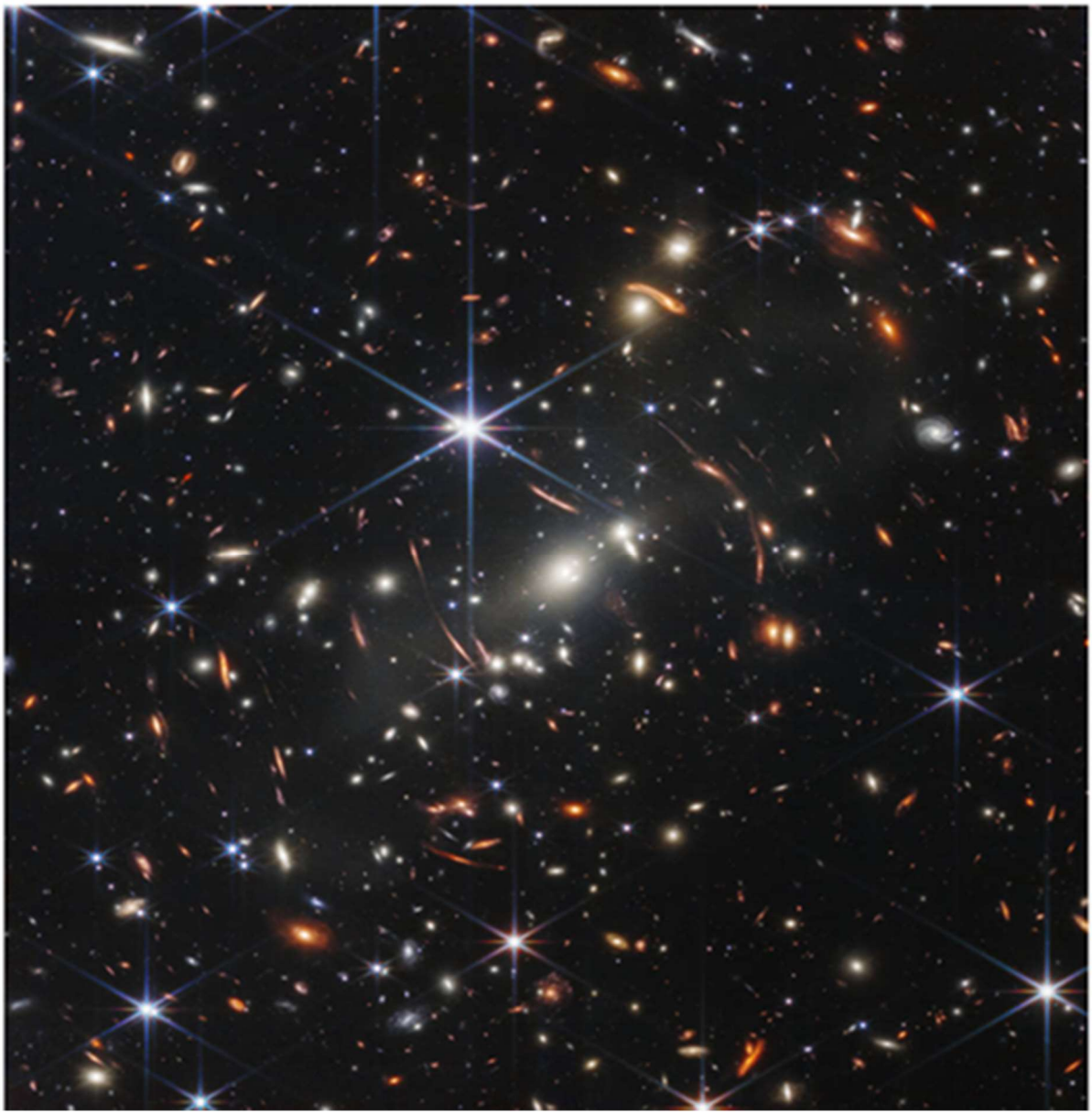
Biografía del Universo



Jaime Reguart Pelegrí
2025

Biografía del Universo

Ampliado a partir de las series "*Biografía del Universo*" y "*El destino del Universo*" editadas en el blog "*El Cedazo*".

(https://eltamiz.com/elcedazo/biografia-del-universo/)

(https://eltamiz.com/elcedazo/series/el-destino-del-universo/)

Imagen de portada: La primera conseguida por el poderoso telescopio James Webb. Se trata de parte del cúmulo de galaxias SMACS 0723 tal y como era hace 4.600 millones de año. (créditos: NASA, ESA, CSA y STScI)

(https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52210366419/in/album-72177720300469752/)

© 2023 Jaime Reguart Pelegrí.

El texto de este libro está publicado bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas 2.5 España. Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra bajo las condiciones siguientes:

• Reconocimiento. Debe incluir esta página completa en la reproducción de la obra, sin alteración alguna.

• No comercial. No puede utilizar esta obra con fines comerciales.

• Sin obras derivadas. No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

• Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claros los términos de licencia de esta obra.

• Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.

• Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.

ÍNDICE

Prólogo 5

00. Encuadre 10
01. Introducción a una historia real 15
02. Momento cero 22
03. Las edades de Planck 36
04. Inflando el Universo I 50
05. Inflando el Universo II 63
06. ¡Qué grande es la inflación! 72
07. De materia y antimateria I 92
08. De materia y antimateria II 100
09. Un puré con mucha radiación 107
10. La liberación de la fuerza débil I 116
11. La liberación de la fuerza débil II 126
12. Los hadrones 133
13. La nucleosíntesis I 144
14. La nucleosíntesis II 151
15. La sinfonía del Universo I 161
16. La sinfonía del Universo II 172
17. El *big flash* 179
18. Lo que nos enseña la radiación de fondo I 191
19. Lo que nos enseña la radiación de fondo II 202
20. La materia entra en faena 211
21. La era de la gran oscuridad 221
22. De la oscuridad a la luz 237
23. Con las gafas de las simulaciones 255
24. Mirando en el campo profundo 271
25. Las distancias en el Universo 286
26. La reionización 295
27. Sobre los frentes de ionización 313
28. La época de los cuásares 319
29. Recordando a la tríada constituyente 332
30. Un Universo de galaxias 338
31. Ondas de densidad en las galaxias espirales 359
32. La fiesta continúa en las estrellas 366
33. De estrellas y agujeros negros 380
34. La senda de las estrellas 399
35. La estructura del Universo 410
36. Y a partir de ahora ¿qué? 424

37. Alternativas de futuro 435
38. En el camino de la muerte térmica 449
39. Inevitable 457
40. Hacia el infinito 464
41. Epílogo 475

ANEXO I: Breve cronología y otros parámetros 482

ANEXO II: Bibliografía 484

Biografía del Universo. Prólogo.

"*Toda la materia, más toda la gravedad en el universo observable, es igual a cero. Por eso el Universo pudo surgir de la nada, porque es, básicamente, nada". **Alan Guth, padre de la expansión inflacionaria.***

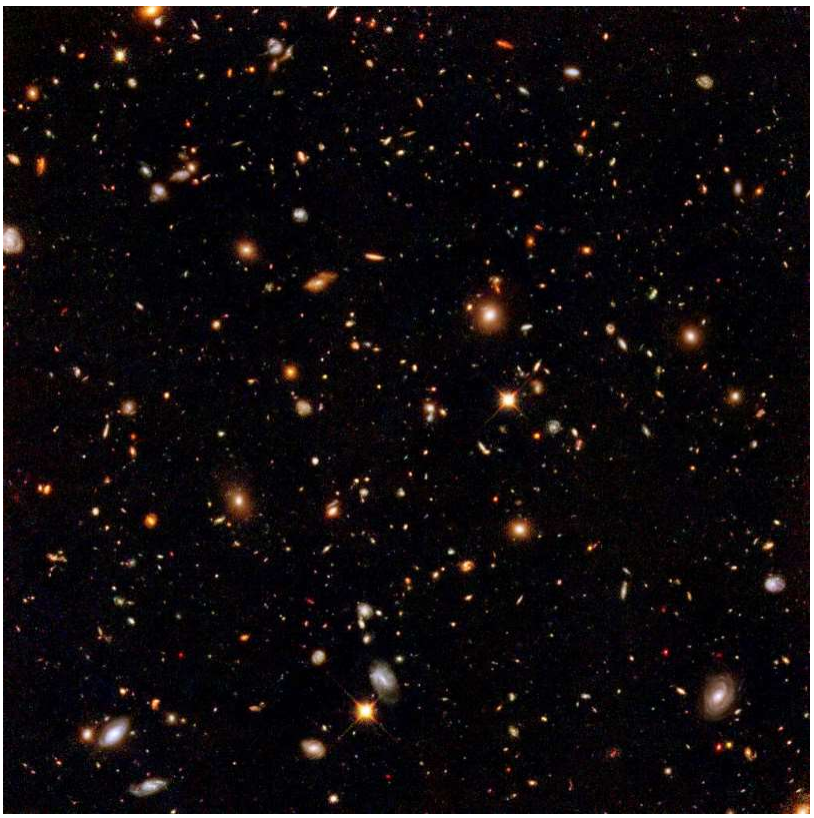


Imagen del campo profundo del Universo tomada por el telescopio Hubble Space en la que se llegan a ver miríadas de galaxias. (Imagen NASA y European Space Agency, dominio público)

El día que esto escribo es primero de enero de 2017. Año Nuevo, vida nueva, se dice por todo el Orbe. Un buen momento para sentarme y compartir una nueva aventura científico-literaria con todo aquel que la quiere seguir. Los que me conocéis ya sabéis mi tendencia hacia las biografías de las cosas que he ido publicando en el blog "*El Cedazo*". La primera acerca de la aventura de la vida terráquea: "*La Biografía de la Vida*". Más tarde otra biografía particular, podríamos decir una rama de la anterior, acerca de la historia que hizo que unos animalillos indefensos se convirtieran en unos feroces competidores en el vértice de la pirámide, gracias a que una serie de carambolas azarosas y coyunturales los colocó allí. Una aventura que la conté bajo el título de "*Biografía de lo Humano*", la última y definitoria palabra exige la mayúscula. Posteriormente cerré el círculo de estudio y conocimiento personal -Universo,

Planeta y Vida, Lo Humano- con dos series más que completaban lo anterior: dos bitácoras de navegación humana "*Los sistemas receptores*" sensoriales y "*El conectoma cerebral*" reflexivo/ejecutivo. En este libro que ahora prorrogo sugiero un nuevo paso, os propongo que nos adentremos en la intrincada selva del escenario en donde se llevó y se lleva a cabo las anteriores obras teatrales que nos han modelado: el Universo, también éste con mayúsculas.

Así que hablemos ya de la "***Biografía del Universo***". Mi nueva propuesta. A la que le he fusionado en el verano postpandémico de 2022 otra serie, también aparecida en *El Cedazo*, continuación lógica de la primera y que he llamado "***El destino del Universo***".

Como en las otras publicaciones citadas, este libro es el resultado de múltiples lecturas dispersas, cazadas a vuelapluma, inicialmente desconexas y con el único propósito de satisfacer mi curiosidad. Y mi conocimiento. Como siempre, mil notas y apuntes que satisfacían también mis aficiones escritoras. Quizás se note en algún momento que el flujo de la historia se recale en un meandro teórico que la complique y grave su seguimiento. O en algún tema marginal que a mí me ha suscitado curiosidad y del que no quiero renunciar. Pido disculpas, pero tiene su explicación. Este libro es un cuaderno de campo en donde ha entrado todo aquello que me parecía ilusionante. Es mi memoria externa. Y eso es un sentimiento muy personal que no deseo traicionar. Muchas veces creo que este libro es la particular acta notarial de mis encuentros con el Universo. Son años de descubrir y decantar. Años de comprobar que era rematadamente cierto lo que leí a mi admirado neurólogo y divulgador Joseph LeDoux: "*La mejor manera de darse cuenta de lo que uno sabe -y de lo que no sabe- acerca de su campo de conocimiento es escribir acerca de él.*" Años en los que la obra la vi crecer sola e independiente, casi como si ella misma quisiera escribirse sin necesidad de mi presencia. Lo que se dice toda una aventura.

Los textos van acompañados de figuras, dibujos e imágenes, aquellas que he creído que iban a facilitar mejor su comprensión. Unas son de confección mía particular, otras las recojo con su licencia de uso y otras cuyo uso cualifico como de "*fair use*", uso justo, y que no deja de ser otra forma de decir a sus propietarios intelectuales cuán útiles las encuentro y que no van a ser utilizadas para propósitos comerciales.

Con la experiencia obtenida al vivir las otras series, el enfoque último lo tenía en la cabeza: [i] aprender de una historia que debía ser hilada y coherente; [ii] divulgarla a través de una plataforma cuyo útil principio fundacional dice así como que "*un buen entendimiento necesita de la ayuda de una buena simplificación*", lo que permitía a mi formación ingenieril ponerse a tiro de la obra que me proponía; y [iii] esperar la lluvia enriquecedora de los comentarios

de los lectores, absolutamente necesarios. Y así surgió otro de mis cuadernos de viaje, que se fue haciendo público a lo largo de la serie homónima del blog "*El Cedazo*".

La idea es muy simple: Partiendo de lo que suponemos es nuestra mejor hipótesis para el inicio del Universo, el Big Bang, llegar a la comprensión de cómo surgieron sus componentes básicos, ampliar el zum hacia las estructuras del Universo que observamos a nuestro alrededor, para acabar la imagen con las previsiones de la evolución hasta el infinito de los tiempos. Éste puede ser un posible sucinto guion:

- El momento cero
- El hipotético escenario del Universo en las edades de Planck, cuando la gran unificación de las fuerzas fundamentales
- El hecho de la inicial inflación exponencial del espacio/tiempo
- Cómo surge la radiación y la materia
- El puré del plasma materia-antimateria de la época electrodébil
- Las partículas elementales en el plasma quark-gluon
- Higgs haciendo de las suyas
- Aparecen los hadrones… entre otros, los protones y los neutrones.
- Los hadrones se constituyen en asambleas, formando algunos núcleos de unos pocos elementos químicos
- La música del Big Bang y su reflejo en la primera foto de familia gracias a la radiación de fondo
- La materia entra en faena una vez que la pegajosa radiación decide liberarse
- Se vuelve a hacer la claridad con la nueva reionización del hidrógeno
- De la oscuridad a la luz gracias a las primeras estrellas y galaxias
- La compactación y ordenamiento de la materia
- La estructura final del Universo
- El futuro hasta el infinito

Bueno… algo más o menos así es mi propósito. Como veis, una historia apasionante que da el necesario soporte a la particular crónica de nuestro Sistema Solar y de la Vida sobre la Tierra que ya conté en una serie del blog "*El Cedazo*", "*La Biografía de la Vida*", y recopilada en un libro del mismo título.

¿Cómo es este libro? Soy consciente de que es un libro a medio camino entre lo divulgativo y lo técnico, que incorpora las cosas que a mí me parecen más interesantes de forma que entre todas dibujen de forma completa nuestra historia. Como cualquier libro técnico. A veces se hará difícil de leer: no es una novela, aunque hablemos de la vida de un personaje, el Universo. Pero hay más de física y cosmología que de aventura. Siendo realmente una aventura. Y como

no es una novela no hay que leerla desde la primera página a la última en un alocado y, seguramente, frustrante maratón. Ya dije que es un cuaderno de campo, de un diseccionador del Cosmos. Mira el índice, selecciona materia y fájate con ella. Repósala. Mañana será otro día. Sé que habrá lectores que se rindan en el empeño. A ellos animo a que se atrevan a leer entre líneas porque el conocimiento de donde vivimos, aunque sea sólo un aroma, lo considero un necesario fundamento en el empeño de saber lo que somos. A los curiosos que por su formación académica o curiosidad personal se desenvuelven medianamente cómodos con los temas técnicos que plantea el libro, deseo haber sido capaz de exponer el conocimiento de forma asequible y veraz. A veces me ha costado entender algunos momentos de la historia, aunque creo haberlos limpiado de la niebla donde los muy taimados se me escondían, por lo que me siento feliz de poder ofreceros el resultado de mi trabajo en esa publicación. Digo feliz porque es la emoción real que experimento en ello y que, por otro lado, se amolda al inevitable ego del creador humano. Lo reconozco.

En el capítulo último podréis leerlo en toda su extensión, aunque aquí sólo traigo las emociones del poeta Walt Whitman (1819-1892) y el colofón de la reflexión que cien años después se hacía Isaac Asimov(1920-1992) que suscribo al completo. El primero escribió *"¿Para qué molestarse en estudiar toda esa basura cuando puedo simplemente salir y contemplar las estrellas?*", pensamiento que Asimov enriquece con plena apertura de mente, "*...el poeta nunca supo cuán limitada e insignificante era la belleza que admiraba cuando él* 'levantaba la vista en perfecto silencio hacia las estrellas'... *Tampoco nosotros podemos conocer o imaginar ahora la belleza ilimitada que se nos revelará en el futuro gracias a la ciencia*."

Espero poder transmitiros esta belleza, este asombro, esta lección de humildad que, por lo menos, a mí me llega al levantar solitario la vista y contemplar el azul del cielo. Somos préstamos del Universo, hijos de la Existencia, y al él inevitablemente rendiremos nuestros seres.

Llega la hora de los agradecimientos. Antes de acabar este breve prefacio, quiero reconocer a los que me han enseñado lo que en este libro expongo, a mis maestros, una vez más a Pedro Gómez-Esteban, *alma mater* del blog "*El Tamiz*", a Enrique F. Borja con su fantástico blog "*Cuentos Cuánticos*", a los grandes del blog "Naukas", a los fenómenos del blog "*NeoFronteras*", a Matt Strassler por su blog "*Of Particular Significance"* y a alguno más que se quedan en el tintero. Y, por supuesto, y sin dudarlo, a tantos divulgadores científicos del mundo anglosajón… ¡qué buenos son, los condenados!, comenzando por el añorado Carl Sagan que sembró la semilla, para seguir por Steven Weinberg, George Gamow, Leon Lederman, Richard Feynman, Stephen Hawking, Brian Green, Michio Kaku, Lawrence Krauss, John Gribbin,

Bill Bryson, Paul Davies… y unos cuantos más. Y no me olvido de los maestros que he leído de los que hago una cumplida relación en el segundo apéndice. De verdad ¡OS DEBO MUCHO! Gracias a todos.

Cumplido con el obligado protocolo… podemos empezar.

Madrid, Santa Ponça (Mallorca), Madrid 2025

00: Encuadre

Soy consciente de que las materias contenidas en los capítulos que siguen pueden resultar difíciles de seguir porque hablan de "cosas" que no pertenecen al mundo lingüístico coloquial. Son campo de la ciencia. Y me gustaría que cualquier persona, con una formación adecuada para deambular por la sociedad, pudiera no tener grandes dificultades. He dicho grandes, porque dificultades las tendrá. Es inevitable. Por eso voy a empezar con una especie de vademécum para no perderse ya desde la primera línea leída o para facilitar el recuerdo, al estilo de las novelas de Agatha Christie cuando pomposamente empieza con el rol de personajes. Aquí también hay una Lady Hamilton o un Mayor Thomas o la doncella Margaret a donde retrotraerse cuando, avanzado el libro, no recuerde uno lo qué es un barión ¡Ya empezamos con la jerga! Qué remedio.

Se trata de hablar de…

1. El ***espacio/tiempo*** como escenario omnipresente donde se realiza la acción. Espacio y tiempo entrelazados permitiendo un mundo de cuatro dimensiones. Tres espaciales y una temporal. Un espacio/tiempo en continua ***expansión***.

2. Las ***teorías cuántica y de la relatividad*** que definen las reglas del juego, la primera en lo pequeño, la segunda en lo grande. La primera nada intuitiva (ya que no es precisa para gestionar nuestra vida, la evolución no la imprimió en nuestros genes), la segunda creo que, al menos, familiar. Y no nos olvidemos de las ***leyes termodinámicas***, podríamos decir más humanas.

Estas últimas, las leyes termodinámicas, hablan de flujos y equilibrios energéticos, de masas y de temperaturas. Por mor de ellas, cualquier sistema aislado tiende a estar en equilibrio termodinámico, situado en un estado donde su energía estará en un mínimo y estable nivel. Si se altera el equilibrio volverá a otro desprendiéndose de lo que tenga que desprenderse para conseguirlo. A esos restos que son no productivos los llamamos ***la entropía***. Como podéis imaginar a medida que van sucediendo esos procesos lo normal es que se vaya acumulando y acumulando esa "basura": la entropía siempre crece fijando con ello en nuestras impresiones el sentido de tiempo ya que el tiempo se mueve en el sentido del incremento de la entropía.

La relatividad nos habla de cómo espacio y tiempo son caras indisolubles de la misma moneda. Nos habla de una velocidad de la luz que fija el máximo de velocidades espaciales para todo. Y nos habla también de cómo el espacio/tiempo es una entidad "flexible" que es moldeada por la materia y que

a su vez condiciona las trayectorias de los cuerpos de esa materia. Incluso le tuerce la mano a la luz. El espacio "tiembla" cuando las masas varían en su interior, lo que produce en su tejido ondas gravitatorias al igual que las ondas de la charca cuando cae una piedra.

La cuántica nos plantea dos realidades completamente ilógicas. Para los humanos, claro. La primera es que ***todo lo imaginable e inimaginable existe a la vez, superpuesto***. Al mismo tiempo estás en tu silla y en Marte. Todo es cuestión de probabilidades, cada opción tiene la suya. Y la de nuestra silla es la que tiene mayor valor y, por tanto, al observar es la que se le concreta en más ocasiones (para nosotros, siempre). La segunda paradoja la conocemos como el ***principio de incertidumbre***. Es sencillo. En el mundo de lo pequeño hay pares de variables cuya existencia está ligada y acotada: espacio y velocidad (cantidad de movimiento), o cantidad de energía y tiempo que disfrutas de ella. Si precisas al milímetro la posición cabe la posibilidad de que en alguno de los casos superpuestos la velocidad sea monstruosa. Podrás rodearte de un montón de energía siempre que disfrutes de ella durante un suspiro.

3. Bajo las dos premisas anteriores, la cuántica nos habla entre otras cosas de ***los campos*** como los "fantasmagóricos" entes básicos que permean todo el espacio/tiempo y que parecen ser la más verdadera manifestación de la realidad. Como una biblioteca en donde los libros no están uno al lado de otro, sino que viven fusionados como un único tomo, el tomo del Universo. Hay muchos y podemos imaginarlos como embalses con un potencial de actuación, los responsables de todo lo que pasa. A veces se "excitan" en algún punto, ya que allí se altera su energía, y generan unos paquetes energéticos que conocemos como partículas. Cada campo tiene su apellido familiar de forma que en cada uno de ellos hay un paquete energético especial que conocemos como ***la partícula*** de ese campo. Por ejemplo, un fotón será el abanderado del campo electromagnético.

4. ***Las partículas*** se comportan de forma muy original ya que a la vez son ondas y a la vez partículas. A la vez. Y eso quiere decir que en cualquier momento pueden presentar cualquiera de las dos caras que coexisten. Realmente son las piezas de nuestro *lego* cósmico. A veces serán los bloques con los que se que construye y otras veces serán el pegamento. A las primeras las llamamos ***fermiones*** y a las segundas ***bosones***. Sí… no queda más remedio de introducir tecnicismos. Unas construyen y las segundas "pegan", que no se nos olvide.

Los bosones son los que hacen que las cosas funcionen. Son los mediadores de las interacciones entre partículas. Hay de varios tipos, pero los vamos a identificar, para simplificar, como los responsables del éxito "laboral" de las ***cuatro fuerzas fundamentales: la gravedad, el electromagnetismo, la nuclear fuerte***, que ata a los componentes del núcleo de los átomos, y ***la nuclear débil***

que se encarga de la magia de transmutar partículas, como lo que pasa en el interior del Sol. A las cuatro añadiré el ***bosón de Higgs*** responsable de generar la cualidad "masa" en las partículas más elementales.

Los fermiones pueden ser de dos tipos y los vemos en el átomo. En el núcleo están los protones y los neutrones, gente de la familia de los ***bariones***, o "gente pesada", y por fuera los electrones, de la conocida familia de los ***leptones*** o "gente ligera". Realmente protones y neutrones son constructos de quarks mientras que el electrón está acompañado por otras partículas de su grupo leptónico como pueden ser los neutrinos. Cada familia tiene sus características que iremos desgranando a medida que avance el libro. Entre ambos forman lo que conocemos como la ***materia bariónica***. Esta materia no es la única que existe ya que la hay de otra clase, detectable solamente por sus efectos gravitatorios, y que la conocemos como ***materia oscura***. Por ahora es suficiente.

5. La masa es fundamental. Ya sabemos desde que nos lo dijo Einstein que es equivalente a la energía, y viceversa, según la conocida ecuación $E=mc^2$. Hay partículas que tiene masa en reposo, por ejemplo los electrones, y otras que no, por ejemplo los fotones. Estas últimas como no tiene freno de inercia se desplazan siempre a la velocidad máxima, la de la luz. A estas partículas tan rápidas las bautizamos como ***radiación***. Prácticamente siempre serán los fotones, aunque los livianos neutrinos, que también van rápidos, a veces los incorporaremos como radiación; e incluso otro tipo de partículas siempre que vayan a velocidades relativistas, velocidades próximas a la de la luz.

6. No solo hay ***materia*** *y* ***radiación***. Hay también un componente que conocemos como ***energía oscura*** que es la responsable de la expansión. ***Son los tres actores***: materia bariónica, un 5% de lo que hay; materia oscura un 25% de lo que hay y energía oscura que supone un 70% del Universo. Más o menos ¡y sólo sabemos algo de la bariónica! Hay un 95% que ni idea.

7. No sabemos ***cómo nació el Universo***. La teoría más aceptada es que lo hizo robando energía del vacío gracias a la incertidumbre cuántica y a la gravedad para, durante un brevísimo suspiro temporal de unos 10^{-32} segundos, culminar una expansión exponencial que duplicó su tamaño unas 100 veces. El ***Big Bang***. Eso de la energía del vacío es un tema cuántico y se explica luego más tarde en el texto. Ahora solo interesa el titular. El frenazo de la descomunal inflación permitió desembolsar energía del espacio/tiempo y transformarla en la materia y radiación que conocemos. Tras esta inflación el Universo cogió una senda de expansión menos acelerada y hasta hoy.

8. Este viaje del Universo siguió un proceso de ***cambios de fase*** en los que se rompían ***simetrías***. No os asuste este planteamiento. Simplemente quiere decir

que partiendo de un estado intrínsecamente homogéneo en cuanto leyes y energía (simetría única hacia donde se observara), el Universo se fue deslizando cronológicamente por algunos precisos escalones energéticos, de forma que en cada uno de los cuales fue cambiando su estructura interna dando lugar a nuevas simetrías más parciales y específicas que comportaban nuevas físicas. Ello provocó la generación de las fuerzas fundamentales y la materialización de las partículas que conocemos.

9. Durante toda la vida de este Universo en expansión han ***coexistido los tres actores***, cada uno influyendo sobre la dinámica expansiva del Universo a su manera como veremos en el texto. En los primeros momentos, unos 55.000 años de vida, la radiación era la reina. No solo es que hubiera para dar y tomar, sino que era súper energética. Poco a poco le fue arrebatando su batuta la materia. Hay que decir que por aquella época la energía oscura era irrelevante. Aunque a los pocos cientos de miles de años más tarde se trastocó el orden, el influjo de la energía oscura comenzó a sobrepasar al efecto de la materia, quedando el papel de la irrelevancia para la radiación. Hoy en día la energía oscura claramente manda y lo hará para siempre.

10. En los primeros 380.000 años, cuando el Universo era relativamente pequeño, todo era un plasma en donde casi todo interactuaba con casi todo y donde la radiación estaba sujeta a la materia. Era un Universo opaco para los fotones. La ***era del plasma***. Con la expansión del Universo las partículas y la radiación se iban separando, ganando potencial gravitatorio al aumentar la distancia entre ellas. Pensad en una piedra que cae sobre vuestra cabeza: es más dañina cuanto más separada de la cabeza comienza su caída. Viene de una posición de mayor potencial que si lo hubiera hecho desde una altura menor. Expansión es igual a separar, igual a incremento del potencial gravitatorio. Pero a cambio de perder energía dinámica, a cambio de perder velocidad que es lo mismo que perder temperatura: la temperatura es un índice de la velocidad media de los componentes elementales de un medio. Por eso, con la expansión, el Universo seguía, y sigue, una ***senda y un ritmo de enfriamiento***. Eso es importante porque cada una de las fuerzas fundamentales, que, se cree, al principio estaban fundidas como una sola y no eran cuatro, necesitan un determinado nivel energético, de temperatura, para hacerse notar como individuales y comenzar a actuar de la forma que conocemos. La expansión del Universo y su ritmo decidió el momento en que cada una apareciera en escena. Lo mismo pasó con las partículas que para "condensarse" a partir de la energía y aparecer, necesitaban que hubiera en promedio la precisa para generar su masa, $E=mc^2$. Pero también en el momento preciso como para que la radiación no tuviera la "fuerza" suficiente como para chocar con ellas y destruirlas nada más nacer. El ritmo de la expansión fue definitorio, no solo para crearlas, sino para separarlas rápidamente de forma que no se aniquilaran unas con otras. Eso último va de materia y antimateria como veremos en el texto.

11. Bajo el anterior postulado ineludible que dirigía a la fábrica de contenidos, pasados los 380.000 años las condiciones de temperatura permitieron aclarar el plasma y parir a los átomos más elementales, permitiendo que la radiación volara independiente. Comenzó con ello ***la era de la luz***. Es cuando empieza la singladura a través de la cual, tras muchos avatares, se han ido formando las estructuras del Universo: las redes cósmicas, los cúmulos, las galaxias, las estrellas y sus sistemas, los agujeros negros… en fin, todo tal como lo vemos hoy ¿Cómo sucedió? Habrá que zambullirse en el texto.

Y ahora sí, ahora comenzamos.

01: Introducción a una historia real

En ciencia eso de "real" es un alarde de fe… y sin embargo la Ciencia está orgullosa de sus continuas dudas. En cada momento asumimos una mejor probabilidad a ciertos eventos observados, medidos y falsados. Es lo que hay. Y puede que mañana no sea así. Llegarán nuevas teorías que nos hagan avanzar en el conocimiento. Por eso nuestra historia es la más probable de acuerdo con el conocimiento que tenemos hoy. Dejadme imaginar…

Tiempo -∞/+0 [1]

Comienza la aventura. Una red de información integrada está tratando de pasar la frontera que le llevará a un nuevo Universo. Uno más. Pero uno muy singular, en donde en algún momento surgirá una inteligencia semejante a la que le emerge de sus redes neuronales. Su consciencia le dice que debe pasar por algo semejante a una singularidad… lo desconocido. Se aproxima al momento infinito-cero de tránsito…

…"***Desde mi posición en*** $[\alpha_{1110}\ \beta_5\ \pi_{47}\ \ldots\ \Omega^t\Lambda^{tx}]$ *soy capaz de percibir el colapso ¿cómo definirme? una inteligencia en el mundo de las cuerdas, dimensión 11. Notario fehaciente de todos los sucesos. Incluso los del pequeño Cosmos de cuatro dimensiones percibibles próximo a nacer. Como tantas otras veces, comienzo a experimentar el ligero desmayo en el que me sumiré durante el paso de la… singularidad. No me preocupa. Soy un experto en este tipo de experiencias, por otro lado, muy normales en los espacios de Kalabi-Yau donde habito. A veces, alguno de estos organismos multidimensionales juega a ser niño y alardea de crear florestas con unos pocos de sus múltiples brazos. Intuyo que es el momento. Como el cloroformo antes de las anestesias, huele a infinito eterno… antes de la tiniebla ¡Nos vemos en el más allá!" …*[2]

******

Un relato imaginario al otro lado de nuestra frontera temporal. Antes del nacimiento de nuestro Universo. Me ha gustado comenzar así la historia que vamos a relatar a lo largo de los capítulos de este libro sobre la Biografía del Universo ¡deseo que nos sintamos como unos viajeros atónitos tras atravesar la Puerta de Istar rumbo a los misterios de Babilonia!

He optado por una fábula, pues ciertamente nadie en este mundo, el de las *x,y,z* y *t* percibibles, sabe de dónde viene nuestro Cosmos ni cómo fue su primer instante. Y si alguien dice que tiene la clave, miente como un bellaco. ¿Nació el entramado del espacio/tiempo que conocemos en aquel incógnito momento?, ¿o fue simplemente una extensión 0/∞ de otro ya existente? O como

en el cuento imaginado, ¿resultó ser un rebote de algo anterior?, ¿o surgió *ex-novo* del vacío? Aunque… ¿qué es el vacío? Podemos imaginar, inventar, conjeturar… pero no sabemos nada de nuestro momento t=0 ¿y si no hubo un tiempo cero? Menos aún que menos sabemos de t<0.

El animal racional que surge como una etapa en la historia que nos trae y que ha sido fijada por las condiciones físicas de nuestro Universo, el hombre, siempre ha sido muy curioso. Ha querido ver con el cuerpo y la razón todo lo que hay más allá de su propio sentimiento como individuo. Con los sentidos llegó hasta donde estos llegaban. Poco para la curiosidad y mucho, lo suficiente, para la supervivencia. Llegado el momento en que fue consciente de ello se le ocurrió idear milagros para lo razonable. Pero la razón es terca y pertinaz. Curiosa y potente. El hombre comenzó a extender los brazos ejecutores de sus antenas sensoriales. A la cabeza de ellos, la vista.

Ideó instrumentos para ver en lo alto. Midió cada vez mejor el tiempo. Supo adentrar su pupila hasta el mundo de lo más pequeño. Y no se rindió ante el reto de llegar más lejos. Donde sus sentidos no abarcaban… idea la gran herramienta que los prolongó casi hasta el infinito: la abstracción matemática y el cálculo con el que jugaba.

Así, una gran fila de visionarios, extensa desde todos los tiempos, pero que iniciamos con Nicolás Copérnico, que fue quien puso al mundo en su lugar. Galileo, Kepler, Newton, Laplace, Darwin, Maxwell, Einstein, Planck, Schrödinger, Heisenberg, Hubble, Feynman, Guth, Hawking… y sé que me dejo un millar de ellos en el tintero. Una saga que participa en la tramoya de nuestra historia. Con sus neuronas curiosas y sus voluntades irreductibles.

En el legado de la humanidad, la teoría y la matemática. Los instrumentos y la experiencia. Las herramientas con las que imaginamos el nacimiento y devenir posterior de nuestro Universo.

Los primeros pasos los vamos a dar ayudados por la teoría del ***Modelo Estándar*** de física de partículas. Un modelo teórico cuyas predicciones se vienen comprobando con exquisita precisión. Conjugando la Teoría Cuántica de Campos, la Relatividad Especial y los datos que proporciona la medida de lo observado, el Modelo Estándar nos va a acompañar durante la explicación, posible o probable, de los inicios del Cosmos. No en toda su extensión temporal hay que avisar, porque, al igual que no conocemos lo anterior al punto de partida, tampoco tenemos certezas, ni herramientas con que comprobar las teorías, acerca de una buena parte de las cosas interesantes y cruciales que sucedieron en los primeros momentos. Corto espacio de tiempo, pero, repito, crucial. A medida que la historia discurre llegaremos a un momento temporal

a partir del cual ya encontramos en nuestros anaqueles teorías e instrumentos que nos permiten conjeturar, e incluso vivir, las incógnitas de la niebla inicial.

Por tanto: el momento anterior al inicial, desconocido; el momento fundacional -∞/+0, obviamente lo mismo… ¿quién puede meter la cabeza en la incongruencia del infinito cero? Quizás algún día. Sigamos.

Cuatro constantes físicas fundamentales de nuestro Universo nos dan pistas para definir el primer escenario que creemos poder imaginar. Imaginar, que no medir. Suponemos que este espacio real en un tiempo ya real tendría unas dimensiones físicas exiguas y unas densidades de energía y temperaturas gigantescamente inimaginables. Las cuatro constantes son *c*, la velocidad de la luz; *G*, la constante gravitatoria universal; *h*, la constante de Planck y k_B la constante de Boltzmann. Con las cuatro, y solamente con ellas cuatro, podemos suponer a este diminuto y súper potente punto/momento inicial.

Posible carné de identidad del espacio/tiempo inicial.

En el momento igual a un "tiempo de Planck" (5,391 x 10^{-44} segundos) tendría un tamaño de una "longitud de Planck" (1,161 x 10^{-35} metros). Almacenaba una energía equivalente a la "masa de Planck" (2,176 × 10^{-8} kilos) a una "temperatura de Planck" de 1,417 × 10^{32} K. Se cree que por debajo de este tamaño el espacio deja de tener sentido. Por debajo de este tiempo no hay tiempo medible. Creemos que ese pudo ser el punto de partida.

Para saber algo de él, un mundo cuántico de energías einsteinianas, tendríamos que saber compaginar teóricamente la mecánica cuántica y la gravedad, cosa muy alejada para nuestros conocimientos actuales. Todo son conjeturas, no hay evidencias de un inicio a partir de una singularidad infinita, un punto adimensional, ni hay evidencias de que surgiera de un espacio/tiempo espumoso como se oye repetidamente, ni siquiera surgió de la imaginaria idea acerca de un "huevo cósmico primigenio" que explotó.

Lo único que sabemos es que el mundo de Planck que hemos descrito como punto inicial encajaría en nuestro conocimiento como posible punto de partida sobre el que pudo construirse un mundo energético -como justifica la teoría cuántica- y en expansión -como justifica la teoría de la relatividad de Einstein- que a la larga devino en lo que observamos hoy en día. La incógnita va a persistir tras salir del mundo de Planck ya que vamos a continuar en las tinieblas del conocimiento aún durante una más que reducida época, que culminó cuando una inflación exponencial del tejido espacio/tiempo, seguida de una creación ingente de materia, terminó.[3] La teoría moderna nos sugiere que antes,

cualquiera que hubiera sido el antes, y también durante la inflación, el Universo estuvo desprovisto de materia y radiación, aunque conteniendo algún tipo de energía, ya fuera inherente al propio espacio o como parte de un campo que no se iba diluyendo a medida que el Universo se expandía.

Aunque la verdad es que no tenemos medios para acceder experimentalmente al Universo de este momento. No podemos inferir nada especial a partir del más profundo y antiguo banco de datos disponible: el espectro de la radiación de fondo de microondas emitida cuando el Universo tenía unos 380.000 años. No sabemos qué campos cuánticos ejercerían realmente un papel en este momento. Suponemos que la física que funcionó en aquella época derivó causalmente en la que conocemos. Quizás fueran unos momentos fríos en los que solo había una energía oscura mientras el Universo esperaba el final de la inflación para que el ambiente se calentara. Pero todo son conjeturas. Suponemos que en algún momento de esta época el espacio/tiempo experimentó un gran tirón que lo expandió factores de amplitud gigantescamente impensables. Sólo lo suponemos, aunque tenemos muchas y serias agarraderas de que así tuvo que suceder y que son consistentes con muchas de las cosas que sí podemos observar hoy en día.

¿Y después de la inflación? Suponemos un mundo caliente y cargado de materia-radiación. Pero tampoco hay forma de poder comprobar si fue así, si las partículas que conjeturamos en este mundo post expansión fueron exactamente las que nacieron de la gran energía liberada tras el frenado de dicha expansión o bien son un producto de nuestros razonamientos teóricos aptos exclusivamente para ser catalogados en nuestros libros. Nosotros encontramos, y realmente "vemos", a nuevas partículas gracias a que podemos generar estados de suficiente alta energía como para poder condensar las masas de estas partículas. Pero nuestra joya que es el LHC (Gran Colisionador de Hadrones) llega tan sólo a un poco más allá de diez TeV, 10^{13} eV[4] Bastón de ciego si pensamos que en el momento fundacional nos encontrábamos en la historia de un mundo energético que se movía en el entorno de 10^{28} eV ¡Quince rangos por encima!

Gracias a dios, se puede deducir ciertamente bastante de esta época a través del estudio de la información implícita en el mapa de la radiación de fondo de microondas en donde quedó impresa la dispersión de las singularidades cuánticas generadas en las épocas primigenias. Incluso podremos saber a partir de las primeras ondas gravitatorias creadas por el gran carajal gravitatorio que se vivió en aquellos momentos. Hablaremos de ellas.

Hay un intervalo temporal mágico y constituyente.

Desde el momento $t=10^{-35}$ segundos tras la singularidad inicial si es que existió como tal: inicio de la fase exponencial expansiva.

Al momento 200 segundos cuando se generan los primeros núcleos atómicos por la unión de neutrones y protones gracias a que el nivel energético cósmico era ya lo suficientemente bajo, 200 KeV, como para dejar expresarse a la fuerza nuclear fuerte.

En el interregno suponemos que en algún momento se fueron independizando las dos fuerzas nucleares y la electromagnética, y que se fueron creando nuevas partículas, algunas de las cuales pertenecen al acervo físico básico: protones, neutrones, electrones, neutrinos y fotones, … incluso la partícula de Higgs. Por suerte ya podemos reproducir en nuestros experimentos las condiciones existentes en el Universo a partir del momento 10^{-14} segundos. Ya hemos hablado del instrumento más potente que nos permite ver lo más profundo alcanzable por nuestra tecnología, el LHC. Nos ha mostrado la existencia real de las partículas, desde el bosón de Higgs, de 125 GeV, hasta los fermiones y bosones constituyentes de la materia más cercana a nuestra esencia humana.

No sólo el LHC, sino que también para estudiar aquella temprana época disponemos de nuestro Modelo Estándar, cuyos resultados teóricos vienen siendo confirmados por los resultados experimentales de nuestros aceleradores de partículas. Ello nos permite pensar que este modelo pueda también ser correcto en niveles de energía mayores y, por tanto, en tiempos más tempranos. Más arriba dijimos que el límite de prospección del LHC está situado en 10^{-14} segundos tras el inicio. Desde ese momento para acá ya nos movemos por una confortable alfombra teórica. Desde este momento podemos tener evidencias de lo que pasó en nuestro joven Universo.

Un *spoiler*. Con nuestras teorías e instrumentos hemos llegado a deducir qué núcleos de elementos químicos y en qué proporción se pudieron producir en tal entorno del momento 200 segundos de edad: 75% hidrógeno (protones) y 25% helio… lo demás es marginal. Asombroso por lo simple y conciso. Y confortable porque la realidad que observamos se ajusta perfectamente a estas previsiones teóricas. Podemos pensar que vamos bien. Pero vayamos más allá.

Año 380.000 tras el Big Bang. Una temperatura de unos 3.000 K, ya lo suficientemente baja como para que la atracción electromagnética entre las cargas negativas de los electrones, hasta entonces libres, pudieran unirse a las cargas positivas de los protones, o de los núcleos de deuterio o helio, generando los primeros átomos en la historia del Universo. El espacio quedaba libre para que corrieran también libremente los fotones, que hasta entonces se habían estado dando codazos en un tú a tú con los electrones. Había llegado para aquellos una transparencia imposible en el opaco plasma anterior. En las zonas de mayor densidad de materia bariónica todo estaba más próximo, todo era más energético de forma que los fotones interactuaban mucho más con los electrones y además de una forma ineludible. En las zonas de menor densidad

los fotones eran menos energéticos. Lo más memorable es que hemos podido hacer una foto de la familia fotónica de aquel momento, un reflejo fiel de la distribución de las masas a lo largo de todo el volumen del pequeño universo de aquellos días. Fotones ancestrales que aún hoy andan por todos los lados a la velocidad de la luz. La radiación de fondo de microondas.

A partir de este momento, cuando el "cielo" se había aclarado y se había vuelto "transparente", ya podemos prácticamente ver lo que hemos imaginado saber. La sofisticada tecnología de telescopios trabajando en un amplio rango de frecuencias y las infinitas posibilidades que nos brinda la tecnología de espectrometría de la luz, nos permiten analizar y deducir información más allá de la banda de frecuencias electromagnéticas visibles. Hemos visto cuásares y galaxias de hace unos 200 millones de años tras el Big Bang. De ahí a hoy en día, 13.800 millones después, [5] se extiende un mundo bastante asequible para la ciencia. Con lagunas, sí, pero por el que avanzamos seguros.

Ese guion que parece deparar un fondo muy complejo realmente no lo es tanto. Como dicen Abraham Loeb y Steven R. Furlanetto en su libro "*Las primeras galaxias en el Universo*", página 23, "…*Las condiciones iniciales del universo se pueden resumir en una simple hoja de papel… es muy pequeño el número de parámetros* [seis] *que nos suministran una precisa descripción de las condiciones iniciales… toda la información asociada con la complejidad posterior estaba encapsulada en esas simples condiciones…* "[6]

Toda esta asombrosa historia es la que me dispongo a contar. Ya sabemos que una parte son suposiciones y que otra son realidades. Iremos a por ello en el siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 01:

1. Eso del -∞/+0 es una licencia literaria, nada matemática, imaginada para concretar un momento inconcretable. Viniendo del menos infinito se inicia en el mundo positivo desde el cero.
2. Todo ese párrafo de ciencia ficción está haciendo guiños a la teoría de cuerdas. Junto con la teoría de la gravedad cuántica de bucles, son las

puntas de flecha en el estudio de qué es todo lo que vemos y experimentamos.

3. Algunas personas se refieren como “el Big Bang” a lo que sucedió al final del proceso de expansión exponencial del Universo. Otros se refieren al Big Bang incluyendo también épocas anteriores. De todo ello se hablará en capítulos posteriores.
4. El Colisionador de hadrones con su última actualización de julio de 2022 alcanza el nivel de energía de 13,6 teraelectrónvoltios -TeV- que es equivalente a 10^{12} electronvoltios. 10 TeV son, por lo tanto, solamente 10^4 GeV.
5. He optado por esta cifra como una de las mejores estimaciones de edad que tenemos ahora mismo del Universo. Realmente es de unos 13,798 +/- 0,037 miles de millones de años según la misión Planck de la European Space Agency, 6 de junio de 2014. “*Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results*”, tabla 10, página 40. [https://arxiv.org/pdf/1303.5062v2.pdf]
6. Los seis parámetros que menciona Loebb son: la densidad de materia bariónica; la densidad de materia oscura fría; la densidad de energía oscura; la amplitud de las fluctuaciones primordiales que dieron origen a las estructuras actuales; el índice espectral de las perturbaciones iniciales (como varían con la escala del universe) y la profundidad óptica a la reionización que mide la cantidad de fotones del CMB que fueron absorbidos y re-emitidos por electrones libres durante la época de reionización. Todo ello se entenderá mejor con el paso de los capítulos.

02: Momento cero

$t = 10^{-43}$ segundos quizás

Tras la introducción hecha en el capítulo anterior en el que intenté explicar el contenido y propósito de este libro titulado "*Biografía del Universo*", viene éste en el que ya vamos a entrar en materia. Para empezar, me voy a tomar la confianza de repetir uno de los primeros párrafos como recordatorio de algo muy real… quizás:

"*… ciertamente nadie en este mundo, el de las x,y,z y t percibibles, sabe de dónde viene nuestro Cosmos ni cómo fue su primer instante. Y si alguien dice que tiene la clave, miente como un bellaco. ¿Nació en aquel incógnito momento el entramado del espacio/tiempo que conocemos?, ¿o fue simplemente una extensión -∞/+0 de otro ya existente? O como en el cuento imaginado, ¿resultó ser un rebote de algo anterior?, ¿o surgió ex-novo del vacío? Aunque… ¿qué es el vacío? Podemos imaginar, inventar, conjeturar… pero no sabemos nada de nuestro momento t=0 ¿y si no hubo un tiempo cero? Menos aún que menos sabemos de t<0.*".

Es una época de niebla en nuestro conocimiento. No tenemos herramientas teóricas para estudiarlo deduciendo certezas. Ni capacidad técnica para comprobar nuestras deducciones, a pesar de que hay una abundante nómina de buenos y serios hombres de ciencia que se fajan a fondo con ello. Y siguen haciéndolo. Quizás en alguno de ellos se manifieste una categoría einsteiniana y nos descubra el antiguo mundo. Hoy por hoy no sabemos nada de él.

Nos estamos apoyando en dos cuerpos de teoría: la relatividad especial de Einstein y la teoría cuántica de campos, popularmente conocidas como el mundo de lo grande y el de lo pequeño.[1] Al conjuntar lo grande, y de energías relativistas, con el mundo de lo pequeño pleno de incertidumbres cuánticas, hemos podido calcular un Universo teórico que se expande lleno de materia y energía. Y funciona muy bien -la realidad observable coincide en gran medida con las previsiones- prediciendo unas hipotéticas condiciones iniciales de gran densidad y temperatura ¿en qué momento? ni idea, pero esa teoría no chirría.

A decir verdad, no sólo funciona teóricamente, sino que también se corresponde bien con lo que se observa. En los años 20 del siglo pasado un gran astrónomo llamado Edwin Hubble se dedicó a estudiar los resultados obtenidos al aplicar técnicas espectroscópicas a la luz que venía de lo que se suponía estrellas de la Vía Láctea. La luz que llegaba de ellas llevaba una impronta, unas bandas características, relacionadas con los niveles energéticos de las

órbitas electrónicas de los átomos que las contienen. Se conoce como el *espectro de emisión*.[2] Estas bandas no dejan de ser más que la huella de unos fotones de una determinada longitud de onda, resultado de la emisión de energía producida al caer un electrón de un orbital superior a otro de inferior energía. La longitud de onda del fotón emitido en ese proceso se ajusta a la diferencia de energías entre ambos orbitales de acuerdo con la conocida correlación propuesta por Max Planck.[3] Y son características, como una foto, de los elementos químicos que se encuentran en la estrella. Si la estrella se aleja de nosotros la longitud de onda del fotón, por el mero hecho de que está cabalgando un espacio en expansión, se "estira" por lo que las bandas características de emisión propias de esta estrella se van a situar sobre el espectro en frecuencias más pequeñas (mayor amplitud de onda) a las que teóricamente le corresponderían, lo que se conoce como "corrimiento al rojo".[4] Pues bien, Hubble determinó con sus estudios que una gran cantidad de aquellas "estrellas" eran otras galaxias y no estrellas de la Vía Láctea, y que además se alejaban de nosotros. Con la circunstancia de que ***cuanto más alejadas estuvieran lo hacían a mayor velocidad***. Lo realmente interesante de aquella observación es que parece que los humanos no vivimos en un lugar privilegiado: todo se aleja de todo.

Eso de que el Universo se expande, que en el fondo es la explicación de que todo se aleje de todo, ya se lo había encontrado Einstein. Alexander Friedmann que había estudiado las ecuaciones de la relatividad simplificándolas para un universo isótropo y homogéneo,[5] llegó a formular la ecuación que sigue (conocida como la primera ecuación de Friedmann). En el mundo de la Cosmología es de gran trascendencia ya que describe la dinámica de la expansión. En ella, el factor H es la constante de Hubble, que da idea de la velocidad de esa expansión.

$$\mathbf{H^2 = (\dot{a}/a)^2 = (8\pi G\rho + \Lambda)/3 - k\,(c^2/a^2)}$$

que podemos verbalizar como:

la velocidad de expansión del universo por unidad de longitud, al cuadrado, es igual a una función que depende de su materia y energía (*y presión interna*), menos otra función que depende de su geometría

Sabido lo anterior era casi lógico el que se llegara a la siguiente idea: "*Entonces, si hay una marcha "adelante" real y las ecuaciones la describen bien siguiendo el sentido de la expansión, teóricamente* -OJO, digo teóricamente- *podemos conjeturar lo que pasó antes del momento inicial de nuestros cálculos* -que no es el momento inicial del Cosmos- *haciendo una regresión de los mismos*". De forma que si hacia delante vamos a un volumen cada vez mayor,

hacia atrás llegaríamos a una dimensión puntual: todo concentrado en la realidad adimensional de un punto singular.

Pero había problemas. No es solamente que este estado puntual incomode por generar un difícilmente manejable infinito matemático, sino también porque a escalas pequeñas -en donde entra la cuántica necesariamente acompañada de la relatividad, dado que los efectos gravitatorios en un mundo de altas energías son inimaginables- vamos a necesitar una teoría gravitatoria cuántica. Y aunque los físicos se han planteado de qué manera se puedan incorporar las ideas de la cuántica a la interacción gravitatoria, o viceversa, aun es el día en que no hay una teoría completa que lo haya conseguido. No tenemos ni idea. Las aproximaciones de las que disponemos no funcionan en todo el rango. Quizás teorías fisicomatemáticas más abstractas, como la de cuerdas o la de bucles, arrojen una luz. Pero hoy por hoy, a fuer de ser sinceros, no sabemos conjeturar con seguridad y consistencia lo que pudo suceder en un punto inicial tan pequeño. Si es que lo hubo, porque, recuerdo, es simplemente una regresión de tipo matemático de las deducciones de la relatividad al forzar el reverso de la película teórica.

Por tanto, ***no hay nada que nos asegure la existencia concreta de una singularidad inicial,*** ningún factor, ni experimental ni matemático. Es una mera especulación muy usada, cuya simplicidad como idea posiblemente ayuda a comprender lo que pudo suceder.

Pero esto no es un freno para los imaginativos teóricos que no se arredran al enfrentarse a la sugerente idea de que en aras de la simetría [*ver ampliación del concepto al final del capítulo*], simplicidad, naturalidad [6] y elegancia[7], en el límite del inicio todo tuvo que ser un igual, y que persiguen la esperanza einsteiniana de que hay una ley física universal que compendia ***todo*** lo que experimentamos. Y cuyas propuestas se recogen en teorías con nombres tan sugerentes como la de la *gran unificación* (GUT), o la de la *supersimetría* (SUSY) o la de cuerdas, que en su aspecto más integrado se la conoce como la *teoría M*. O aún algo más sofisticado como es la *teoría de la gravedad cuántica de bucles*.[8] Estas dos últimas teorías parecen conciliar la coexistencia de la cuántica con la gravedad, que aseguraría la confluencia energética de las cuatro fuerzas fundamentales que conocemos hoy en día, gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil.

Como imaginar es fácil, me permito visualizar -pura figuración- los inicios a partir de esas nieblas, comenzando la historia en un mundo de burbujas cuánticas, en un estado del espacio(tiempo)[9] de consistencia espumosa. Puede que cada una de estas burbujas cuánticas fuera una estación de tránsito cuasi puntual a donde había llegado un universo anterior. No lo sabemos, pero puede ser un aceptable comienzo que no contraviene a nuestras teorías y experiencias.

Admitamos, por tanto, como hipótesis de partida la existencia de un tejido espacio/temporal compuesto por un entramado de elementales cuantos[10] "ordenados" por dimensiones -*cuatro, once, veintiséis…*-, que están vacíos -*los especialistas se refieren al vacío como el estado más estable de mínima energía cuando no hay partículas físicas presentes*- y sometido a las realidades ineludibles de la física cuántica. La cual nos dice que a partir de este vacío es posible que se genere energía de la nada, incluso grandes cantidades, siempre y cuando permanezca durante una fracción de tiempo lo suficientemente corta como para que no se viole el principio de *incertidumbre de Heisenberg*. Técnicamente quiere decir que, si al medir simultáneamente ciertos pares de variables conjugadas necesitamos apurar mucho con la precisión de la medida de una de ellas, irremediablemente veremos que se nos impone el ser muy laxos en la precisión de la medida de la otra, ya que el producto de ambas precisiones debe ser mayor o igual que un valor conocido como la constante de Planck, ħ, cuyo valor es del orden de 10^{-15} electronvoltios por cada segundo. Uno de estos pares conjugados son la posición y el momento lineal (velocidad). Otro par conjugado lo forman la energía y el tiempo, cuya incertidumbre matemáticamente queda reflejada como

$$\mathbf{\Delta E \times \Delta t \geq \hbar}$$

En ese par la incertidumbre nos asegura que tanto la energía como el tiempo durante el que esta energía existe no puedan medirse simultáneamente con una precisión arbitraria. Es decir, que a escala microscópica si precisamos con gran exactitud el valor del tiempo no nos quedará más remedio que admitir una gran campo de desviación en la exactitud de la medida de la energía. Lo que nos deja un buen abanico de posibilidades, con su mayor o menor probabilidad, para que aparezca "mágicamente" de la nada una gran cantidad de energía… que va a durar en la existencia menos que un mini suspiro. Diremos que ***la "energía mágica" que aparece puede concretarse en masa y momento de pares de partículas evanescentes***. Energía potencial más energía cinética. Tras el periodo de tiempo que encaje según la anterior ecuación de Heisenberg con la cantidad de energía nacida, ésta vuelve a ser recogida por el campo emisor que vuelve a su vacío desapareciendo las partículas.[11] Pero ojo… si hay un tercero que retorne "por fuera" la energía prestada del vacío, las partículas virtuales conseguirán concretarse como reales.[12]

Juguemos un poco con los números. En el mundo de Planck, cuyas magnitudes introdujimos someramente en el capítulo anterior, se nos sugiere una energía del orden de los 10^{28} eV. Así que calculemos: la teoría nos insinúa que en un espacio/tiempo vacío de energía, si hay que desarrollar este mundo minúsculo, que se asimila al más primigenio de 10^{28} eV, según el principio de incertidumbre tendríamos de tiempo tan sólo la constante de Planck, 10^{-15} eV por cada segundo, dividida por esa incertidumbre en la energía, del orden de

10^{28} eV. Lo cual nos dice que podríamos obtener esta energía durante un tiempo medido con una incertidumbre de magnitud alrededor de los 10^{-43} segundos -similar al tiempo de Planck- para aprovechar la energía surgida *ex novo*. Si además el mundo está expandiéndose a una velocidad tal que los pares de partículas "virtuales" que materializan esta energía se separan tan rápido que no vuelven a interactuar entre ellas y desaparecer, tendríamos un mundo en marcha.[13] Y una ¿casualidad? más: si ponemos a la luz a correr a su inmutable velocidad en el vacío de 300.000 kilómetros por segundo durante este tiempo de Planck, recorrería una distancia igual a la longitud de Planck ¿Es que la teoría nos está intentando sugerir que el universo está íntimamente constituido por unos parámetros que indican que para el tejido del espacio no haya tamaño más pequeño que la longitud de Planck?

La dimensión del cuanto del espacio se puede calcular teóricamente. Para poderlo medir habría que depositar algo ahí, en el cuanto, una partícula que pueda ser observable. Tiene que haber algo allí que "veamos" y nos permita "ver". Pero como el cuanto se supone muy pequeño, la partícula cuántica estará súper localizada y, por tanto, moviéndose a gran velocidad. De nuevo el principio de incertidumbre. Lo que es igual a que tendrá una altísima energía. Lo que es igual a deformación del espacio/tiempo brutal ¡la partícula desaparecerá en un agujero negro![14] Y si desaparece la partícula ya no tendremos nada con lo que medir el cuanto espacial. En resumen, no podemos medir regiones arbitrariamente pequeñas de espacio porque este desaparece en agujeros negros. Tiene que haber un mínimo "máximo". Lo hay. Bajo esas premisas y tras un cálculo adecuado, se llega a la conclusión de que la dimensión del mínimo cuanto de espacio(tiempo) sobre el que no desaparece la partícula coincide con la distancia de Planck.[15]

¡Un espacio(tiempo) cuantificado! El espacio/tiempo no es liso ni continuo como parece a escalas macroscópicas. Más bien, se comporta de forma caótica, fluctuante y llena de pequeñas burbujas o irregularidades conocidas como "espuma cuánticas". Estas burbujas representan regiones donde el espacio-tiempo mismo se crea y destruye constantemente debido a fluctuaciones cuánticas. O tal como lo afirman los teóricos de la gravedad cuántica: el espacio es genuinamente granular a pequeña escala, cuantos de gravedad unidos en bucles, reverberantes con los otros campos cuánticos, y que no están en el espacio porque ellos son el mismo espacio aparecido en el rumor de sus interrelaciones[16] ¿Uno de esos cuantos como semilla del Big Bang?

La idea de un espacio(tiempo) inicial cuantificado nos permite seguir motivando nuestra imaginación. Uno de los pensamientos que surgen nos lleva a la idea de que si existe un cuanto mínimo de tiempo que es el de Planck de 10^{-43} segundos, realmente ***nunca hubo un tiempo de valor cero para nuestro universo***. Luego… no busquemos qué fue lo que pasó en t=0, lo cual incluso

gusta a muchos teóricos, ya que entonces no habría una singularidad inicial que invalide las ecuaciones de la Relatividad.[17]

Otra idea que se nos ocurre se deriva del hecho de que en cualquiera de los minúsculos cuantos planckianos que podían conformar el espacio(tiempo) inicial se producirían continuamente inestabilidades, durante las que aparecían y desaparecían partículas virtuales. Al ser la zona espacio/temporal donde eso pudiera pasar tan pequeña, la energía de movimiento de dichas partícula sería muy grande: a espacio más confinado, velocidad -energía de movimiento- más elevada. Lo cual no deja de ser un reflejo más del enlace de incertidumbres de la posición y el momento lineal de las partículas. Mucha energía que, si recordamos lo que nos dijo Albert Einstein, mantendría un tejido del espacio/tiempo altamente deformado… lo cual es la base de la interacción gravitatoria. Es decir, ***la gravedad tuvo que existir independiente ya desde el mismo momento inicial***. Sin contravenir a las teorías GUT de unificación de fuerzas.[18][19]

La gravedad es una fuerza atractiva y universal. Para no sentir su efecto teóricamente nos tendríamos que desplazar hasta el infinito, alejados del origen de masas gravitatorias. Si queremos desplazar un objeto con masa -por ejemplo, una piedra- desde cualquier punto también con masa -por ejemplo, la superficie de la Tierra- hasta el infinito, tendremos que aportar energía al sistema para luchar contra el potencial gravitatorio y resistir así su fuerza atractiva. Realmente estamos llevando a la piedra a un punto de mayor potencial del campo gravitatorio. Pero si abandonamos a la piedra, esta iniciará una caída libre hacia la masa de atracción gravitatoria -la Tierra-, acelerándose a medida que transita por el campo gravitatorio desde valores altos de éste hacia valores menores, mientras incrementa progresivamente su energía cinética: la variación en el potencial del campo gravitatorio se ha transformado en energía (cinética) para la piedra. Realmente está sucediendo algo así como que la gravedad está devolviendo a la piedra, en forma de velocidad, la energía que le habíamos cedido al llevarla al infinito. ***Vemos entonces que la normal acción atractiva de la gravedad, gracias a su potencial, hace que ese campo se comporte realmente como una fuente de energía gratuita***.

Conocido lo anterior volvamos al principio de la vida del Universo tras la excursión de inestabilidad cuántica inicial. Ya sabemos que desde los momentos inaugurales la potente gravedad de aquellos momentos interactuaba con la energía -materia- surgida del vacío y que en esos tiempos iniciales el Universo se expandía y, por tanto, todo se separaba. También acabamos de decir que en su normal trabajo la gravedad se comporta como una fuente de energía ¿Y si el incremento de la energía del propio sistema universo fuera debido al trasiego de energía cedida por el campo gravitatorio de forma que se compensaran? ¿qué hubiera pasado si esa disminución de energía en su campo

fuera igual al incremento de la masa equivalente a aquella energía inicial que surgió robada del vacío cuántico? Que esta fugaz energía inicial pudo haberse visto contenida en el tiempo gracias a la acción de la gravedad que indujo. Una por otra… promedio cero.

Lo que nos permite razonablemente poder hacer la siguiente hipótesis: el cuanto constituyente del tejido básico del espacio(tiempo) universal se vio sometido a un "destello" de energía que lo expandió y deformó, ***permitiendo la gravedad asociada el que esa energía permaneciera en el tiempo***. Ese es el "alguien externo", banquero de energía, al que nos habíamos referido unos párrafos antes. Con ello se habría dado luz verde a la creación de nuestro eje de coordenadas temporal.

una posible explicación del inicio de todo

energía cuántica fundacional + (-energía gravitatoria) = cero

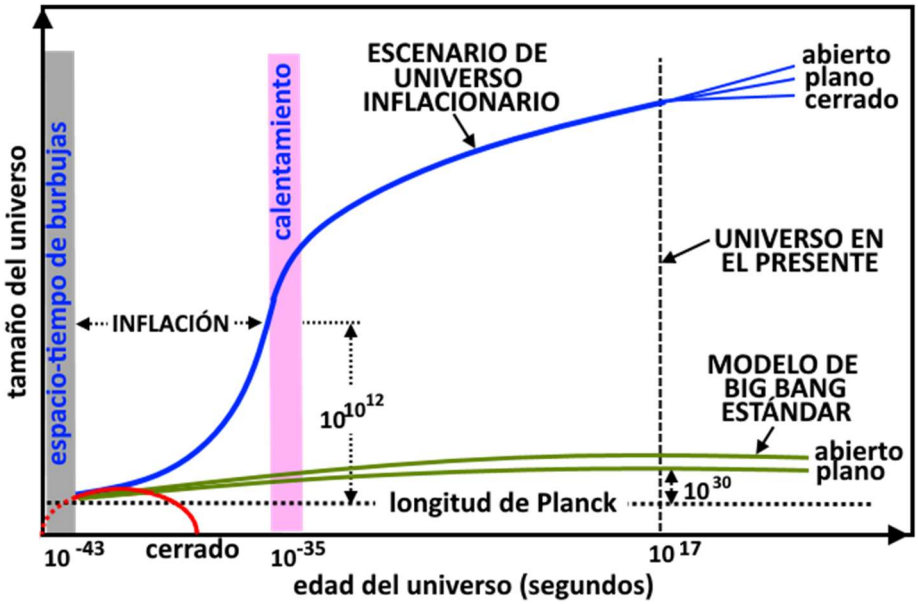
Otra forma de decir lo mismo la he encontrado en las palabras del profesor Leopoldo Infante que dijo: "*... si la densidad de energía en el universo* [durante la expansión] *es justo la necesaria para que éste se expanda a una velocidad constante, entonces la energía asociada a ese movimiento debe ser igual a la energía asociada a las distancias entre las partículas. Dicho de otra forma, la energía cinética es igual a la energía potencial. Ahora bien, como la energía de un sistema material es la suma de estas dos energías, entonces la energía total debe ser exactamente cero. En otras palabras, el universo nace de la nada y no hay que hacer para crear un universo*".[20]

De hecho, se cree que en el punto temporal de un segundo la energía cinética del impulso de expansión y el potencial gravitatorio tuvieron que haber diferido en menos de una parte en 10^{15} para conseguir un universo plano.[21] Explicaremos en otros capítulos que es eso de un universo plano, sin curvatura.

En resumen, todo pudo surgir en un cuanto del espacio, tras una de las infinitas fluctuaciones cuánticas que se deben suceder en este espacio(tiempo): un robo al vacío de un campo desconocido, por el que surge mucha energía en un corto espacio de tiempo. Si el cuanto del espacio(tiempo) escenario del suceso está en un proceso de expansión, es posible que el suceso sea irreversible. Y si hay alguien que está dispuesta a ayudar, como veremos que lo hace la gravedad… miel sobre hojuelas. Con eso no digo que todo lo anterior dibuje exactamente el inicio de la historia, sino que esto es lo que nos sugiere una posible matemática que desarrolla los mundos de la relatividad y la cuántica.

Esta determinada "función de circo" cósmica es el punto de partida en las teorías más sólidas de la evolución del Universo. Lo cual no quiere decir que nos aseguren al 100% su ajuste a la realidad observada, ya que seguirán siendo

conjeturas mientras la realidad de los inicios permanezca escondida en la niebla del desconocimiento humano. Esto puede querer decir que quizás el tiempo, como tal lo imaginamos, no existía en aquellos ¿momentos? O puede querer decir que tal vez la confiable física que manejamos no puede ser aplicada en aquella "esfera" mínima y deformada de espacio/tiempo. Y quién sabe si realmente aquel momento fue súper energético o súper denso. O si fue el inicio o simplemente la continuación de algo. Nos intriga el desconocimiento, pero no nos desazona. Muchas de nuestras conjeturas las hemos podido comprobar como reales en el mundo frío y poco denso, casi vacío, en el que vivimos. Conjeturas y teoría en tiempos t α 10^{-43} segundos. A partir de ahí, el amoldar esta teoría con la realidad parece exigirnos, como veremos en otro capítulo, un episodio de una gran expansión del tejido espacio/tiempo. Más rápida que la velocidad de la luz. Al final de la cual se creó la materia y la radiación.



La imagen anterior[22] nos permite apercibir de un solo vistazo los escenarios que dibuja la teoría que analizaremos con un poco más de detalle en un capítulo posterior. Como vemos todo habría podido surgir a partir de una espuma espacial, espuma de burbujas en las que se habría condensado la estabilidad. De todas formas, la imaginación es adictiva y nos encontramos con teorías que dibujan otros escenarios los cuales se van configurando según sea la cantidad de energía en juego y la curvatura espacial. Escenarios que se mueven desde el que postula que un exceso de gravedad colapsaría relativamente pronto el proceso de creación de un universo, hasta el contrario que dejaría al tejido espacio/tiempo como una tenue niebla vacía y congelada. Lo veremos con más detalle en los últimos capítulos. En el siguiente intentaremos entrar en los laberintos del periodo de inflación que llevó al calentamiento del Universo.

O como asegura el prestigioso físico Michio Kaku especialista de la teoría de campo de cuerdas: "*La teoría de Einstein dice que el universo es una especie de burbuja y que la burbuja se está expandiendo. Esto es la teoría del Big Bang. Pero la teoría de cuerdas dice que nuestra burbuja es solo una burbuja en un baño de burbujas más grande de universos. Cuando una burbuja se divide para crear dos burbujas bebé, o cuando chocan y forman una burbuja más grande, se origina el Big Bang. Entonces, la teoría de cuerdas reemplaza al Big Bang con un baño de burbujas de universos en colisión y división.*"[23]

Así que quedémonos con esa imagen fundacional que nos propone el hecho de que durante un cortísimo espacio temporal inicial una o varias burbujas se fueron uniendo para encontrarse inmersas en un entorno que aún hoy sigue en expansión. Entremedias llegó el momento en el que la inflación empezó a acelerarse siguiendo una excursión exponencial y que finalizó produciendo un Universo caliente y expansivo. Esta expansión, que ya no inflación, continuó después mucho más ralentizada. Y hasta nuestros días.

Elementos del concepto de simetría [22]

Solemos concebir la simetría como algo relacionado con la imagen en un espejo, un reflejo de algún tipo o tal vez una rotación. Un triángulo equilátero es simétrico porque, si lo giramos 120 grados, obtenemos la misma figura. Un cuadrado también es simétrico, pero basta con rotarlo 90 grados para recuperar una configuración idéntica a la de partida. En dos dimensiones la figura más simétrica posible es la circunferencia, ya que permanece inalterada para cualquier ángulo de rotación. Nos hallamos ante una ***simetría continua****.*

Las leyes de la física también pueden ser simétricas*. El paso del tiempo, por ejemplo, no altera las leyes de la naturaleza. Consideremos el caso de dos bolas de billar que chocan en un ángulo determinado y a cierta velocidad. Si se repite el experimento varias veces, en distintos momentos, el resultado es siempre el mismo. Esta cualidad se conoce como* ***simetría temporal****. Las leyes de la naturaleza tampoco dependen del lugar en el que estemos (****simetría espacial****) ni de la dirección en la que miremos (****simetría rotacional****). Por supuesto, el paisaje puede cambiar dependiendo de dónde nos encontremos, en qué momento lo visitemos y hacia dónde estemos mirando. Pero las leyes de la*

física que dictan cómo ha de comportarse ese paisaje son independientes de la posición, la orientación o el momento temporal. Cuando una ley permanece invariante de la manera descrita, se dice que, al igual que el círculo, posee una simetría continua.

La matemática Emmy Noether hace unos cien años demostró que ***las leyes de conservación se hallan relacionadas con las simetrías de la naturaleza****. Cada vez que la naturaleza exhibe una simetría continua, aparece una ley de conservación asociada y viceversa. En concreto, la simetría espacial implica la conservación del momento lineal; la simetría rotacional, la conservación del momento angular; y la simetría temporal, la conservación de la energía.*

Hay también otro tipo de simetrías que tienen sentido en el espacio interno de los campos cuánticos. Hablaremos de ellas en el capítulo 10.

NOTAS DEL CAPITULO 02:

1. Tengo que aclarar aquí un tema. Ya es conocido cómo la relatividad tiene dos cuerpos de teoría: la especial y la general. La especial surgió como resultado del estudio del movimiento de los cuerpos sometidos a las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell. No tenía nada que ver con la gravedad. Cosa de la que hasta el propio Einstein fue consciente, que se puso a reflexionar hasta que encontró su teoría de la relatividad general que sí se trataba de una teoría gravitatoria. La gracia está en que la primera parte podía ser estudiada usando la forma de pensar cuántica de la física, mientras que la segunda, al ser una extensión de la física clásica, no. De ahí la dificultad de incorporar la visión gravitatoria a la visión cuántica que trabaja en un mundo en que la gravedad pudiera ser irrelevante.
2. Para más información sobre espectros de la luz y demás, podéis avanzar hasta el capítulo 24.
3. La longitud de onda es proporcional a la constante de Planck dividida por la energía.
4. Para más información podéis consultar esta entrada de otra serie también publicada en el blog "*El Cedazo*", *"El Universo - La corta historia de la fascinación por algo tan grande"*.

[https://eltamiz.com/elcedazo/2011/04/14/descubriendo-nuestra-galaxia-los-espectros-estelares-y-las-nubes-de-gas/]

5. Un universo es isótropo si desde un punto de observación, mires en la dirección que mires, siempre observas lo mismo; mientras que un universo es homogéneo si a lo largo de una dirección de visión no se observa diferencias apreciables.
6. En física ***la naturalidad*** es la propiedad de que *las relaciones adimensionales* entre parámetros libres o constantes físicas que aparecen en una teoría física *deben tomar valores "de orden 1"* (es decir, valores razonablemente cercanos a 1 en el sistema de unidades adecuado) salvo que exista una razón dinámica o simétrica para justificar valores muy grandes o muy pequeños. Además, los parámetros libres no deben requerir ajustes extremadamente precisos y artificiales para que la teoría sea consistente o para que prediga resultados en acuerdo con las observaciones no están artificialmente ajustados. Por ejemplo, un valor de 2,34 o de 0,98 en una relación adimensional entre parámetros es completamente aceptable y se considera natural porque no hay un ajuste fino o desajuste significativo. Por otro lado, si una teoría da lugar a relaciones como 234,000 o 0,000234, eso podría ser una señal de que la teoría no es completamente natural y podría requerir un ajuste artificial de los parámetros.
7. En el moderno mundo de la física teórica, en donde las ideas calculadas van por delante de las ideas experimentadas, los físicos no disponen de datos suficientes como para basar sus teorías, confiando, en su defecto, a principios "bellos" (es su terminología) como los que he presentado: simetría, simplicidad, naturalidad y elegancia. El olfato profesional nacido de la experiencia acumulada al detectar estas sutilezas se ha manifestado muchas veces como buena bitácora para marcar un rumbo de éxito.
8. La gravedad cuántica de bucles, o *Loop Quantum Gravity*, es una teoría que busca comprender la naturaleza elemental del tejido espacio/tiempo suponiendo que, a escala de Planck, dicho espacio/tiempo no es continuo, sino que consiste en una red de nodos y líneas de unión, bautizada como de espín, en la que se configuran unos bucles que se entrelazan entre ellos formando una malla infinita. La unidad característica del espacio/tiempo serían unos lazos entretejidos formando una especie de espuma cuántica. En esta teoría todas las nociones espaciales van a aparecer como consecuencia del comportamiento de la red de espines.
9. Aviso: en esta entrada donde se introduce el concepto de "cuanto de espacio/tiempo" prefiero anotarlo, cuando hablo en concreto de cuantos, como espacio(tiempo). Lo que quiere manifestar que el cuanto es del espacio de cuyas interacciones en la red de espines surge el tiempo. En

el resto de la serie seguiré usando la notación "einsteiniana" de espacio/tiempo.

10. Un cuanto puede visualizarse como un "paquete" de una cantidad específica de una propiedad. Por ejemplo, en la luz cada fotón es un paquete de energía; o en los electrones confinados en un átomo también los niveles de energía están cuantizados, es decir, solo pueden ocupar ciertos valores discretos. Todo dirigido por el obligado comportamiento cuántico.

11. El proceso espontáneo de creación de una pareja electrón-positrón dura un tiempo increíblemente corto. Podemos calcularlo a partir de la ecuación del principio de incertidumbre. En el caso del electrón su masa es de $9.11 \cdot 10^{-31}$ kg. Por lo tanto

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta m}\frac{\hbar}{c^2} = \frac{1}{2 \times 9.11 \cdot 10^{-31}}\frac{6.625 \cdot 10^{-34}}{4\pi\left(3 \cdot 10^{8}\right)^2} = 3.22 \cdot 10^{-22} s$$

Así pues, una pareja electrón-positrón puede aparecer y desaparecer espontáneamente sin violar ninguna ley física, siempre que su existencia dure menos de 3,22 x 10^{-22} s. En este tiempo habrán recorrido a la velocidad de la luz 10^{-13} metros. Para partículas con mayor masa el tiempo será menor. Por ejemplo, el protón tiene aproximadamente 2.000 veces más masa que el electrón, por lo que las parejas protón-antiprotón pueden aparecer de la nada siempre que desaparezcan en un tiempo 2.000 veces menor que el anterior calculado para la pareja electrón-positrón. [http://abcienciade.wordpress.com/2009/11/30/particulas-virtuales-i/]

12. Aporto aquí las palabras del físico teórico Lawrence M. Krauss extraídas de su libro "*Un Universo de la nada*": "*La conclusión es evidente: la gravedad cuántica no solo parece permitir que se creen universos a partir de nada -en referencia, en este caso, insisto, a la ausencia de espacio y tiempo-, sino que puede requerirlo así. Así, la «Nada» -en este caso, la ausencia de espacio, de tiempo, de todo: la «nada de nada»- es inestable*" y por tanto, digo yo, con posibilidad de generar algo. [Ediciones Pasado y Presente, formato digital Kindle, p. 195].

13. Para asegurar que el universo permanezca homogéneo se requiere que las velocidades iniciales de los fluidos tomen valores muy precisos. Si las velocidades iniciales son ligeramente demasiado pequeñas, el universo vuelve a colapsar en una fracción de segundo. Si son un poco demasiado grandes, el universo se expande demasiado rápido y rápidamente se vuelve casi vacío.

14. Se hablará con mayor extensión de los agujeros negros en el capítulo 31. Los grandes deformadores del espacio-tiempo hacia donde todo cae sin posibilidad de escapatoria. Va a ser una constante a lo largo del libro.

15. "*La realidad no es lo que parece*", páginas 137-138, Carlo Rovelli.

16. "Si *reunimos todo lo que hemos aprendido del mundo físico… vemos una estructura elemental del mundo en la que no existe ni el tiempo ni el espacio, y que consiste en un pulular de fenómenos cuánticos. El espacio, el tiempo, la materia y la luz los crean una serie de campos cuánticos que se intercambian información. La realidad es una red de fenómenos granulares; la dinámica que los une es probabilística.*" Del libro "*La realidad no es lo que parece*", página 10, Carlo Rovelli.

17. "*...los cuantos de gravedad* [cuantos del espacio] *no evolucionan en el tiempo. Es el tiempo el que nace como consecuencia de sus interacciones… El tiempo, como el espacio, surge del campo gravitatorio cuántico.*" Del libro "*La realidad no es lo que parece*", página 159, Carlo Rovelli. Y en la página 164: "*Las cosas cambian solamente unas con respecto a otras. A nivel fundamental, el tiempo no existe. La impresión del tiempo que discurre es sólo una aproximación que únicamente vale a nuestra escala macroscópica, y que se deriva del hecho de que observamos el mundo a grandes rasgos.*"

18. La teoría GUT de la gran unificación (del inglés *Grand Unification Theory*) es una teoría que unificaría tres de las cuatro fuerzas fundamentales en la naturaleza: la fuerza nuclear débil, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electromagnética. La fuerza de gravedad no se considerada en dicha teoría, pero sí en una eventual teoría del todo (*Theory of Everything*, ToE), que identifica a las cuatro interacciones fundamentales. En otro capítulo veremos qué es eso de la GUT.

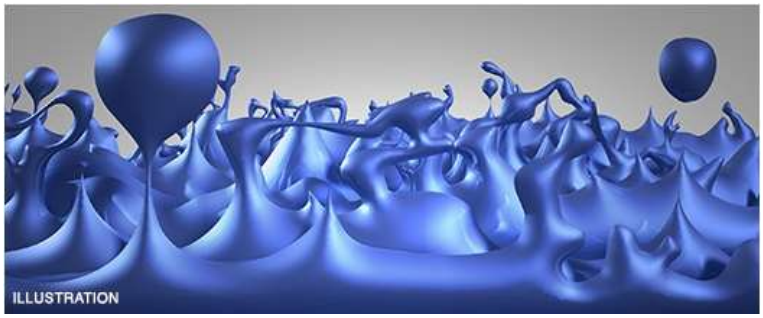
19. No la conocemos, pero se teoriza con la partícula ***gravitón*** como la responsable de las interacciones gravitatorias. En el artículo "*The Challenge of Ruling Out Inflation via the Primordial Graviton Background*" de Sunny Vagnozzi y Abraham Loeb, The Astrophysical Journal Letters noviembre 2022, se propone la hipótesis de que por encima de la escala de Planck, pudieron aparecer cuatro partículas, de las que dos de ellas serían gravitones, cuyas interacciones puntuales mantuvieron en el plasma primordial a esos últimos en equilibrio térmico, es decir, el ritmo de los que iban apareciendo se igualaba con el de los que se iban aniquilando. Esa familia de partículas constituiría un fondo conocido como el ***fondo cósmico de gravitones*** que, si más tarde no se hubieran encontrado con la inflación exponencial, ahora los encontraríamos a temperaturas de unos 0,9 K, pero que, bajo la hipótesis de inflación exponencial, un Big Bang caliente, creemos que su temperatura es inferior a los 50 μK. Si lográramos encontrarlos, cosa que con las tecnologías actuales es harto difícil, se colocarían al lado de otros fondos cósmicos como el de neutrinos o el de fotones, como otro de los grandes transportadores de información primordial. De ellos se hablará más adelante en este libro.

[https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac9b0e]
20. [https://www.emol.com/especiales/2014/tecnologia/columnas-astronomia/6-enero.asp]
21. Martin Rees. "*Nuestro hábitat cósmico*", capítulo 9, Cómo empezaron las cosas".
22. Imagen extraída de la conferencia dada por Andrei Lynde en la Fundación BBVA (27/06/2012) [https://www.youtube.com/watch?v=VK2mKco1wiw&ab_channel=Fundaci%C3%B3nBBVA]
23. Entrevista publicada en el periódico El Mundo, 12 de junio de 2022. [https://www.elmundo.es/papel/historias/2022/07/11/62cc2b62fdddffa7108b45ab.html]
24. Extraído del artículo "*¿Pierde energía el Universo?*", Tamara M. Davis. Investigación y Ciencia, septiembre 2010. [https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3272137]

03: Las edades de Planck

de 10^{-43} segundos a 10^{-35} segundos desde el inicio

En el capítulo anterior hablamos de los comienzos perdidos en la niebla del conocimiento. Y hacía yo mucho hincapié en que no sabemos nada de nada. Nadie sabe lo que pasó en los primeros instantes. Simplemente podemos conjeturar en base a aplicar un "retroceso temporal" a los complejos cálculos que nos sugieren las teorías de la relatividad especial y la cuántica de campos. Insisto que son sólo conjeturas, pero en honor de la verdad las propuestas salidas del cálculo, estas conjeturas, son las que encajan prácticamente como anillo al dedo con el mundo que hoy en día observamos y experimentamos. Afirmados en estos apoyos sigamos intentando clarificar las brumas. A través de ellas parece entreverse una posible historia enraizada en los matices que se apuntaron en el capítulo anterior acerca de un "*universo espuma*" como base ¿eterna? del tejido espacio/tiempo, en donde burbujea la cuántica y nace la gravedad como deformación producida por la energía interna.



Representación artística del Universo en sus escalas más pequeñas propuesta por la NASA (Imagen: NASA/CXC/M.Weiss, fair use)

El escenario: el tejido espacio/temporal vacío, ni energía ni partículas y potencial a nivel mínimo. ¿Cómo de grande? No lo sabemos. De hecho, no sabemos siquiera si éste fue el escenario. Pero vamos a jugar con esta hipótesis. Un tejido que bien pudiera estar cuantificado, cuantos acotados por alcance que impone la longitud o el tiempo de Planck. En estas semillas, el mundo de lo más pequeño, impera la ley de la cuántica. El principio de Heisenberg, del que hablamos en el capítulo anterior, nos dice que en este entorno es posible la aparición de mucha energía durante un corto espacio de tiempo. Esta energía es la manifestación de un campo intrínseco a este cuanto de espacio(tiempo) energizado. En estos tamaños no sabemos cómo funciona la gravedad ya que la teoría de la relatividad desgraciadamente no puede decirnos nada ahí ya que las matemáticas en ese límite puntual se encuentran con infinitos inmanejables. Podemos conjeturar que, al haber aparecido *ex novo* una energía a partir del

vacío, esa energía va a producir gravedad y deformar el tejido espacio/temporal, creando así una burbuja expansiva. Esto podría suceder en todo momento en cualquier punto de todo el escenario completo, por lo que podemos llegar a la conclusión de que el espacio/tiempo, en su ámbito más general y absoluto, podría tener una apariencia espumosa.[1] Lo cual incluso nos permitiría llegar a otro tipo de consideraciones relacionadas con multiversos, que aquí no son nuestro propósito. ***Una de esas burbujas en expansión sería la semilla de nuestro Universo***.

Un pequeño trozo del tejido espacio/tiempo se estaba expandiendo. Había robado energía de algún campo desconocido, incluso quizás del propio espacio/tiempo. Estamos en una situación de un universo que decimos pequeño, con mucha densidad de energía[2] y que se expande. ¿Cómo sabemos que nuestro pequeño espacio se estaba expandiendo si no podemos medirlo? ¿Y por qué se expande?, e incluso ¿qué tenemos que entender cuando hablamos de que el tejido espacio/tiempo se expande?

La primera de las últimas preguntas ya la contestamos en el capítulo anterior. Básicamente es que debemos suponer que se expandía. Además, nos lo sugieren las ecuaciones de la relatividad. Hoy somos capaces de observar que nuestro universo lo está haciendo, e incluso podemos medir a qué velocidad y con qué aceleración lo hace. Si hoy se expande es muy fácil el pensar que si pudiéramos poner esta película marcha atrás observaríamos cómo se va contrayendo de forma cada vez más asintótica hacia el punto inicial. Lo cual nos lleva a la idea teórica de un punto inicial Big Bang.

Volviendo de nuevo el vídeo al *forward* no nos queda más remedio que imaginar que este punto inicial fundacional se expandía. Por otro lado, tenemos una teoría muy consistente, la de la Relatividad, que nos explica matemáticamente cómo lo hace: el Universo tiene que seguir una dinámica espacio/temporal que satisfaga una relación directa entre la geometría/curvatura del universo y la distribución de energías en él. De forma que su variación de escala, en nuestro mundo de curvatura aparentemente nula, ha de seguir la siguiente ecuación que no deja de ser más que la de Friedmann presentada en el capítulo anterior para el caso de una constante cosmológica nula y un universo plano:

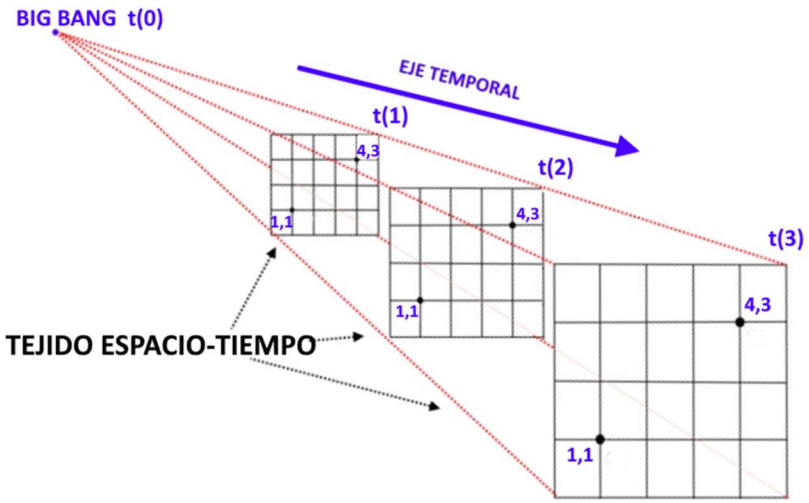
$$\ddot{a}(t) = -K(\rho+3p)\,a(t)$$

en la que la variación de escala ***a(t)*** nos dice en cuánto varían las dimensiones del universo (con dos puntitos es su aceleración), $\boldsymbol{\rho}$ es la densidad de energía de los campos presentes en el universo y $\boldsymbol{p}$ la presión que generan estos campos.[3] Lo cual simplemente quiere decir que

la dinámica en la variación del cambio de escala tiene que ver con la densidad de energía y la presión generada por los campos presentes en el universo.

¿Por qué también se introduce en las ecuaciones de la relatividad la influencia de la presión como elemento gravitatorio adicionalmente a la materia y la energía? Porque la presión tiene una faceta gravitatoria que afecta al espacio interior, actuando sorprendentemente en sentido contrario a lo intuitivo. La presión positiva del sistema Universo genera sobre su tejido una deformación, un efecto gravitatorio de atracción; mientras que la tensión, o presión negativa, genera en sus estructuras una gravedad negativa o de repulsión que puede ser el reflejo de un incremento interno de energía.

Es interesante el observar como si la densidad de materia/energía y la presión son ambas positivas, la expansión se irá ralentizando ya que la aceleración será negativa. Pero si la presión es negativa -guardad esa circunstancia en la memoria- y mayor que 1/3 de la densidad de materia/energía ¡la expansión se acelera! Lo ampliaremos en el capítulo siguiente.



Atención: El eje es temporal y no espacial. No se expande la imagen por efecto de una perspectiva espacial, sino que es más grande a medida que avanza el tiempo.

El Universo, por tanto, se expandía desde sus momentos más primigenios. El fenómeno ***sólo afectaba a su propio tejido espacio/temporal y no a su contenido***, que iba a quedar sometido al efecto de otras fuerzas como la gravedad.[4] Como si estirásemos un mantel de caucho: el propio mantel se agrandaría, pero no las migas de pan que estuvieran sobre él. La pantalla de la película que hoy mide un metro mañana medirá dos. Los objetos en "reposo" sobre ella seguirían manteniendo sus tamaños y formas aunque, eso sí, cada vez más alejadas las unas de las otras como consecuencia de la expansión cósmica. *Estos objetos se denominan comóviles*, se mueven al unísono, tendrían el

mismo sistema de referencia. Aunque también pudiera ser que dentro del contexto expansivo y gracias a otros efectos, como la atracción gravitatoria, se estuvieran aproximando relativamente unos a otros superponiendo ese segundo movimiento peculiar al de la expansión. No, la expansión que "engorda" al Universo no nos engorda a nosotros como podemos colegir de la figura anterior que intenta aclarar la realidad de lo que sucede.[5]

Pero ¿por qué lo hace? ¿Cuál es la causa que hace que se expanda? Es más, lo sigue haciendo justo en este mismo momento en que lo escribo y en el mismo momento que lo lees. También tenemos teorías para explicarlo, aunque la solución la vamos a aclarar con detalle en el siguiente capítulo. No os inquiete la curiosidad. Ahora supuesto que ya hemos entendido qué es esto de que *el universo se expande*, sigamos una vez más con nuestra historia interrumpida.

Según las primeras teorías de un Big Bang caliente a partir de una singularidad puntual, todo habría empezado a los $t=10^{-43}$ segundos, cuando una "excursión" cuántica de energía seguida inmediatamente por la aparición de la gravedad habría generado nuestro pequeño y dinámico escenario. En el momento de partida tenía un nivel de energía de 10^{19} GeV que pronto decayó, gracias al efecto expansivo que enfriaba nuestro universo, hasta unos 10^{15} GeV en el tiempo $t=10^{-35}$ segundos. Y así habría seguido en expansión infinita hasta el final de los siglos. Ese modelo presentaba muchas incógnitas, de las que se hablará en el capítulo 6, planteaba situaciones que no concordaban con la realidad observada. Por lo que con el tiempo se tuvieron que idear la posibilidad de otros escenarios, que también veremos en los próximos capítulos, y que culminan con la hipótesis de que en el desconocido Universo inicial expansivo, en algún momento se produjo una inflación exponencial seguida de un recalentamiento extremo del Universo que dio a luz a toda la materia y energía que observamos hoy.

Sin embargo, y aunque no tenemos ninguna evidencia concluyente como expusimos en el capítulo anterior, no dejaremos de explorar la antigua teoría del Big Bang Caliente y la singularidad inicial. Este enfoque nos permite realizar un valioso ejercicio académico y familiarizar nuestra mente con el fascinante mundo que pudo haber existido en esos instantes primordiales.

Los niveles de energía existentes en aquellos instantes eran suficientes como para que de ella pudieran aparecer pares de partícula-antipartícula cualesquiera que tuvieran una masa, una energía en reposo,[6] inferior a la promedio del Universo. Su tipología la definían los campos existentes en aquel momento y sus interrelaciones. Los componentes de cada par de partículas en aquel universo tan pequeño lógicamente tenían que estar muy próximos, así que tan rápidamente como aparecían… desaparecían, aniquilándose mutuamente y dejando un rastro de energía. Lo que conocemos como un mundo en equilibrio

termodinámico, circunstancia que hemos podido constatar estudiando el momento en que el Universo cumplía la edad de 380.000 años mientras se desgajaba la radiación de la materia. El espectro de esta radiación -la del fondo de microondas- se ajusta perfectamente a la de lo que se conoce como un *cuerpo negro*, objeto que desde hace más de un siglo se sabía que caracterizaba un equilibrio entre la materia y la radiación. Aunque eso lo veremos en los capítulos 18 y 19.

Alcanzar el equilibrio termodinámico supone el haber transitado hasta la máxima entropía para el sistema, la máxima degeneración de la energía. Ya no hay contrastes energéticos como para realizar un mínimo trabajo. De donde surge un gran dilema: si la entropía en aquel momento fundacional era máxima ¿cómo se produce lo que se produce con posterioridad en el Universo? ¿cómo se crean sus estructuras, cómo se genera su dinámica, si no hay posibilidad de salto entrópico? Lo esperable a la vista de todo lo que se construyó después en el Universo era que el punto de partida hubiera sido un lugar de entropía especialmente pequeña. Circunstancia necesaria que no encaja con lo que parece una inicial situación de equilibrio, en donde el plasma se había repartido uniformemente por todo el espacio, cosa que apunta a un estado de máximo entrópico ¿Hay alguna forma de solucionar el dilema? Roger Penrose, premio Nobel de Física 2020, sugiere una posible respuesta. Y está en la gravedad.

La gravedad concentra la materia. A partir de un Universo inicial lleno de un gas difuso se ha construido las maravillosas estructuras cósmicas que hoy observamos. Y se sigue trabajando en ello. Esta contracción que forma las estrellas, y en el límite los agujeros negros, conlleva que las partículas se acerquen cada vez más unas a otras, reagrupándose aquí o allá y moviéndose progresivamente cada vez más rápido. Lo más alejado a un Universo de partida en donde el gas se hallaba distribuido de manera uniforme sin ningún gradiente energético que pudiera monitorizar cualquier evento posterior. Nada nos impide sentirnos libres de imaginar que no haya ningún límite al grado de aglomeración y rapidez de movimiento. Ello haría que los grados de libertad del campo gravitatorio, que estaban prácticamente “inactivados” en un principio, se fueran avivando y multiplicando a lo largo del tiempo sobre la base de un equilibrio termodinámico. Y eso es crecimiento de entropía como explica la nota 7 de este capítulo.[7] El estado que intuimos de equilibrio termodinámico inicial con máxima entropía simplemente era un actor irrelevante frente al inmenso recorrido hacia un top-entrópico escondido en la gravedad en aquellos momentos. Podríamos pensar que la potencialidad de agrupamiento gravitatorio de los gases, al recargar las pilas para el proceso de incremento entrópico, es la que nos ha dado la segunda ley de la termodinámica.

Además de la gravedad, durante todo este periodo actuaba una sola interacción, una fuerza única en la que se identificaban la electromagnética y las nucleares

fuerte y débil que conocemos y están activas en la actualidad. El concepto conocido de masa o de carga -que para cada fuerza en particular son de tipo eléctrica, de color o débil- no tenía sentido. Su campo asociado, conocido como ***Campo Unificado***, mediaba su influencia a través de unos bosones de gran "masa" -energía-, conocidos como X e Y[8] que creemos que son responsables de nuevos fenómenos, como la hipotética desintegración protónica.[9] Y decimos hipotética porque la probabilidad de que se produzca es ínfima, aunque sea teóricamente posible. Debido a la altísima energía promedio del momento los bosones X e Y aún no acoplaban a las partículas más elementales que conocemos -quarks y leptones-.[10]

Al haber una sola fuerza fundamental, además de la gravedad, a este brevísimo periodo, que va desde t^{-43} segundos a t^{-35} segundos a partir del inicio, se le conoce como el de la ***Gran Unificación*** (GUT). Personalmente no me gusta el calificativo de "unificación" porque desde la perspectiva del momento no había ni había habido nada que unificar. Todo era aún uno y homogéneo. Todo estaría unificado porque era tal el nivel promedio de energía que todos los campos estaban necesariamente situados en sus niveles de mayor potencial, en donde su valor era cero en todos los puntos del espacio y desde donde se dominaba una simetría general para todos los campos cuánticos. Como mirar el mundo desde el centro de una esfera. Hay varias teorías acerca de esa simetría primigenia, desde la SU(5) a la SO(10), simetrías que amparan bajo el mismo paraguas a todas las posibles familias e partículas. Hablaremos en otro capítulo acerca de lo que son este tipo de simetrías.

Los bosones X e Y aparecerían de acuerdo con dos procesos físicos.[11] Uno se concretaba como la transformación de las partículas de radiación en pares de materia-antimateria X e Y, que desaparecían muy rápidamente en un estallido de energética radiación al interaccionar dichos pares entre sí.

Materia + antimateria ↔ radiación+ radiación (anti radiación)

El segundo proceso correspondía a la aparición de partículas virtuales en episodios de inestabilidad cuántica, partículas que saltaban instantáneamente dentro y fuera de la existencia cumpliendo los requisitos del principio de incertidumbre. Si lo particularizamos para nuestros bosones X e Y debemos pensar que se desintegrarían espontáneamente tras brevísimos instantes debido a su gran masa de unos 10^{15} GeV,[12][13] creando algo asimilable[14] a quarks y antiquarks además de leptones y antileptones siguiendo algunos de los modos de desintegración siguientes, a los que habría que añadir sus simétricas antibosónicas:

$$\mathbf{X \rightarrow quark_{up} + quark_{up}} \qquad \mathbf{X \rightarrow positrón^{+} + antiquark_{down}}$$

$$\mathbf{Y \rightarrow positrón^{+} + antiquark_{up}} \qquad \mathbf{Y \rightarrow quark_{down} + quark_{up}}$$

Y → antiquark $_{down}$ + antineutrino $_{electrónico}$

Se cree que estos bosones en sus ciclos de nacer-morir no debieron cumplir una de las simetrías de las leyes físicas, en concreto la CP de carga/paridad[15] que es la que fija la igualdad entre la materia y la antimateria en estos procesos. La consecuencia de ello es que con el tiempo se iba a ir generando más partículas elementales de materia que de antimateria. Los modelos que estudian estos fenómenos nos dicen que debido sólo a ello, y ya para todo lo que quedaba de futuro, cuando la materia y la antimateria se habrían definitivamente aniquilado, la primera dominó a la segunda en una proporción de 10^9 a 1.

La teoría -y hay unas cuantas- de la Gran Unificación nos dice que el anterior ajetreo del patio de vecinos debió de ser así hasta que la energía promedio del Universo bajó por la expansión y consiguiente enfriamiento, al nivel de 10^{15} GeV en el tiempo 10^{-36} segundos. En ese momento ***la interacción nuclear fuerte dijo adiós*** a sus otras dos compañeras, la débil y la electromagnética. Estas dos últimas seguirían aún indistinguibles durante un brevísimo tiempo hasta la época en que el Universo se situó a un nivel energético entre 10^3 y 10^2 GeV. Esto sucedería más o menos en el tiempo 10^{-12} segundos desde el teórico inicio, momento en el que separaron sus interacciones.

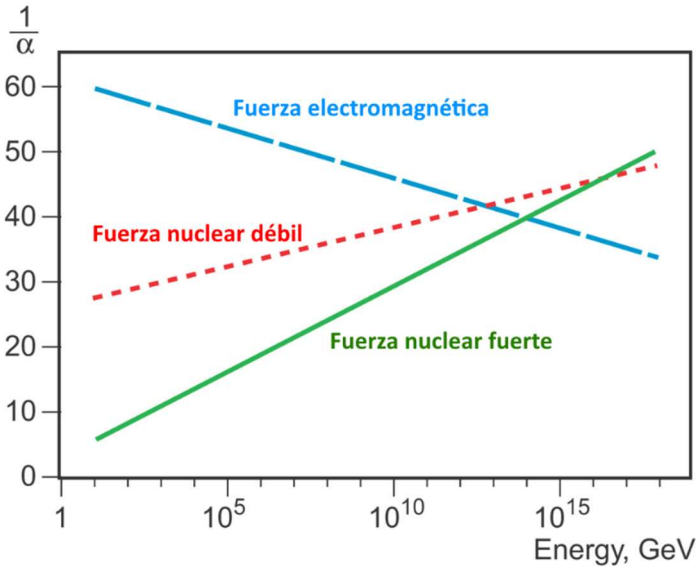


Diagrama que manifiesta la posible confluencia en un entorno energético de 10^{15} GeV de la inversa de las constantes de acoplamiento (α) de las tres interacciones fundamentales de la física (Imagen[16] modificada de "The Nobel Prize", ⓕ fair use)

Y es alentador el comprobar cómo los resultados de nuestros cálculos y experimentos nos orientan hacia la realidad de este hecho, como podemos ver en la figura anterior, con las tres fuerzas en una senda de aproximación a medida que aumenta la energía. Así que quizás la predicción de la GUT sea la

correcta y las tres fuerzas fueran la misma antes de los últimos compases del periodo de inflación exponencial, coincidiendo en un entorno energético de 10^{15} GeV. Hay que decir que esa imagen corresponde a una extrapolación de los datos usando las ecuaciones del modelo estándar de partículas: las constantes de acoplamiento (un número que determina la fuerza de una interacción) de las fuerzas no gravitatorias se vuelven muy similares, *aunque no convergen completamente*. Sin embargo, si extrapolamos utilizando las ecuaciones de la teoría de supersimetría SUSY, las fuerzas *convergen a un nivel de energía fijo* en el entorno de los 10^{16} GeV. Incluso la SUSY predice que la gravedad coincidiría con las tres fuerzas anteriores en el entorno de los 10^{19} GeV.[17]

¿Por qué de tal disgregación de la unidad? La teoría nos propone el modelo de un cambio de fase en el Universo debido a una desviación ("rotura" se le llama) de la simetría de base, aquellas SU(5) o SO(10) de las que hablábamos más arriba. Al bajar por la expansión el nivel medio energético debió suceder que uno de los campos cuánticos existentes tuvo la oportunidad de abandonar el punto de máximo potencial de campo, el lugar privilegiado desde todo se observa simétrico, para caer por propia eficiencia termodinámica a un punto inferior en donde el valor de campo ya no era cero, un punto ya alejado de la simetría inicial. Este campo escalar pudo ser un ***campo de Higgs GUT*** que dio masa a los bosones X e Y, haciéndolos inobservables en energías modernas, y que también por recombinación interna de los "grados de libertad" (sus componentes) del campo GUT alumbró el campo nuclear fuerte y otro distinto conocido como electrodébil. Todo esto sucedía más o menos en el momento $t=10^{-35}$ segundos, con una energía en el entorno de 10^{15} GeV. Ese cambio de fase supuso una reordenación de la estructura de base del Universo que pasó a estar condicionado por una unión de subconjuntos de simetrías, una SU(3) para la nueva fuerza fuerte y una SU(2)×U(1) para la nueva fuerza electrodébil. Hablaremos en el capítulo 10 acerca de la teoría de las simetrías.

La descomposición de la interacción GUT en las dos nuevas, nuclear fuerte y electrodébil, fue algo semejante a un cambio de fase en el Universo. En líneas generales un cambio de fase en un sistema[18] implica la existencia de una cierta cantidad de energía que se utiliza simplemente para producir cambios internos en la estructura de ese sistema. El Universo en su expansión se va enfriando. Pensemos en el agua que al enfriarse hasta su punto de congelación reordena su estructura molecular desde un estado homogéneo líquido a uno condicionado por las estructuras prioritarias de sus cristales de hielo. Para el sistema agua se ha roto la simetría y ha aparecido un nuevo ente con propiedades distintas a la del agua líquida. También el Universo, gracias a la influencia de un campo cuántico que rompe la simetría al caer su valor a un mínimo energético, cambia su estructura y propiedades. Pasó en tiempos GUT y no será el último.

Puede que ese cambio de fase no influyera decisivamente en lo que vino después, o simultáneamente, pero sí es cierto que más o menos a partir de aquel momento creemos que se inició una gran excursión inflacionista en el tejido espacio/tiempo de nuestro Universo. Una expansión que duplicó cien veces su tamaño (lo que equivale a un factor de escala de 10^{30}), de forma que en un infinitesimal lapso de tiempo, en el momento $t=10^{-32}$ segundos desde el inicio de nuestro Cosmos, el Universo pasó de tener un tamaño algo menor que un protón reducido en un factor de 10^{-20}, al de una "esfera" de 10 centímetros. Es lo que se conoce como la ***fase de expansión inflacionaria del Universo***.

Quizás Georges Lemaître y Willem de Sitter fueron los primeros que apostaron por la expansión del Universo que no se enfocó directamente en la idea de un estado inicial caliente. Para ellos la expansión no presentaba en ningún momento un perfil inflacionario. Sitter, con sus desarrollos teóricos en la resolución de las ecuaciones de la relatividad de Einstein, concluyó que podía ser posible la existencia de un universo en el que no hubiera materia pero sí una constante cosmológica positiva,[19] motor natural interno de una expansión exponencial. Una propuesta teórica que planteaba interrogantes de difícil solución.

Alan Guth, físico y cosmólogo estadounidense, propuso una modificación del proceso expansivo con la que lograba explicar algunos de estos interrogantes. Había planteado las bases del concepto conocido como "*Big Bang viejo*" a partir de un Universo caliente y denso en el que se daba un proceso rápido de inflación exponencial. Comentaremos las bases de su teoría en el siguiente capítulo. Pero dejaba otro problema: su inflación no era lo suficientemente "potente" como para generar la cantidad de radiación necesaria pudiendo dejar, además, un universo muy poco homogéneo. En 1982 aparecen nuevas ideas, que ahora ya se conceptúan como de "inflación nueva", que se basaba en un mecanismo basado en una transición de fase de segundo orden, evitando la formación de burbujas, lo que permitió una inflación más suave y homogénea, resolviendo los problemas de la falta de homogeneidad. Posteriormente el físico ruso-americano Andrei Linde aportó una nueva idea, la "inflación caótica", basada también en campos cuánticos, que conseguía ajustar con menos hipótesis de partida y concordar mejor los resultados de "su" expansión a lo que observamos en el universo.

¿Cómo pudo producirse tamaña expansión? ¿Cómo se sostiene? Esto es un dilema que no sólo vive en los inicios ya que acompaña al Universo a lo largo de toda su existencia, un Universo que suponemos, e incluso hoy lo estamos midiendo, siempre ha estado expandiéndose. En el siguiente capítulo vamos a intentar avanzar entre las nieblas apoyándonos en las teorías inflacionarias que nos propusieron tan prestigiosos físicos y que razonablemente nos permiten pensar que disponemos de una explicación coherente. Recordad que aún nos

estaremos moviendo en escalas energéticas muy alejadas de las que manejan nuestros más avanzados instrumentos.

Curvatura del Universo

En este capítulo acaba de aparecer un concepto fundamental, la curvatura del Universo. Tiene que ver con cómo responde geométricamente su tejido en conjunto. Conviene ampliar el tema.

Cuando se considera el Universo a gran escala se le aplica la teoría de la relatividad general, deduciendo que, si el cosmos posee un cierto contenido de materia y energía, entonces su espacio/tiempo tiene que estar curvado. Al hablar de curvatura nos estamos refiriendo al tipo de geometría que se ajusta adecuadamente al espacio/tiempo en su conjunto; de qué manera responde la geometría del espacio/tiempo a escala universal frente a toda la materia/energía contenida. No hay que confundirlo con la deformación local del espacio tiempo producida por la materia/energía según la teoría general de la Relatividad.

Los modelos cosmológicos de más éxito son compatibles con curvaturas espaciales de diversos tipos. La parte espacial del cosmos podría ser «plana», es decir, euclídea o, dicho de otro modo, los tres ángulos de un triángulo de dimensiones colosales sumarían siempre 180 grados. Pero también es posible que el espacio (no el espacio/tiempo) presente una geometría no euclídea bien de curvatura negativa (los tres ángulos de un triángulo sumarían menos de 180 grados) o bien de curvatura positiva (los tres ángulos sumarían más de 180 grados). Los estudios más recientes indican que el espacio, en las mayores escalas, tiene curvatura nula, es decir, posee una geometría euclídea.

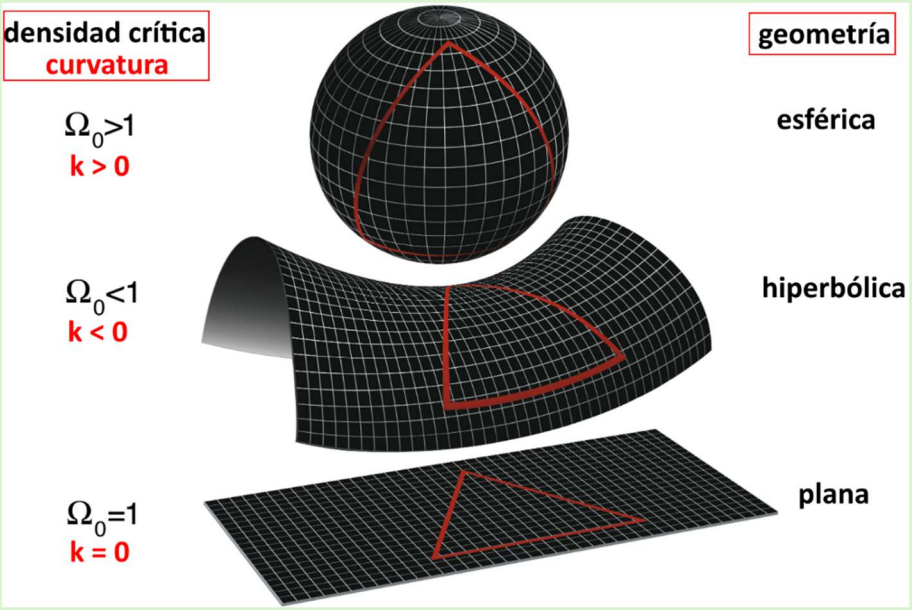
A la curvatura se la conoce como el parámetro k. Ya hemos visto que aparece en la ecuación de Friedmann

Diferentes valores de k implican diferentes geometrías y diferentes universos:

(i) uno cerrado se va a asemejar a una esfera con una curvatura positiva, k>0;

(ii) un universo plano tendrá una curvatura nula, k=0, y seguirá una geometría euclidea; mientras que

(iii) un universo abierto de tipo hiperboloide (silla de montar, Pringle) va a tener una curvatura negativa, k<0.



Figuras que representan las tres posibles geometrías del universo: con curvatura positiva, como la superficie de una esfera, curvatura negativa, y con curvatura cero (Imagen modificada de: NASA/WMAP Science Team, uso no comercial)

NOTAS DEL CAPÍTULO 03:

1. No penséis que esto es una idea peregrina. Un equipo científico, en el que participa la NASA, está hoy en día determinando la grumosidad del Universo a través de las interferencias en la luz que llegan de los cuásares. Más información en este enlace: http://chandra.harvard.edu/press/15_releases/press_052815.html

2. De una manera estimativa podemos dar un orden de magnitud del punto de partida para la densidad de energía. Nuestra referencia sería la del vacío que se estima suponiendo que hay una partícula cuya masa se distribuye en un volumen correspondiente a su longitud de onda. Matemáticamente esta hipótesis se ajusta a:

   $\rho_{vacío} = Masa^4 (c^3/h^3) = 10^{13}$ [Masa / masa del protón]^4 g/cm^3

   Para la partícula más masiva que cabría esperar en aquellos momentos, la masa de Planck de unos 20 microgramos, la densidad de energía inicial sería de unos 10^{91} g/cm^3.
3. Las ecuaciones de Einstein en el caso cosmológico nos dicen que la aceleración de la expansión verifica esta ecuación.
4. La fortaleza de la interacción gravitatoria es órdenes de magnitud superior a la energía de expansión, y por tanto es la que prevalece en los espacios próximos.
5. En la literatura de divulgación hay muchas alegorías que intentan visualizar este fenómeno de la expansión del tejido del Universo. Quizás una de las más afortunadas, al menos me lo parece a mí, es la que usa como ejemplo un pastel de pasas que metes al horno: cuando el pastel "sube" las pasas se separan, aunque ellas mismas no cambian. El pastel es el espacio tiempo y las pasas, la materia/energía local.
6. Según la conocida ecuación de Einstein, $E = mc^2$
7. Hablemos de ***grados de libertad***. Con ese calificativo simplemente estamos estableciendo cuáles son los parámetros micro que determinan el estado de un sistema a su mínimo nivel, el de mayor detalle en lo más pequeño. Al igual que definimos un espacio real de tres coordenadas, (x,y,z), donde podemos situar todas las posibles posiciones de una partícula, podemos construir una entelequia matemático-geométrica al imaginar un espacio de N dimensiones (siendo cada una de ellas uno de los grados de libertad) en donde podremos emplazar cualquier sistema físico de acuerdo con sus particularidades.

   Las coordenadas en ese espacio, los grados de libertad, pueden tener una tipología muy variada y deberá incorporar todo aquello que sea necesario para definir totalmente a cualquier sistema: el número de partículas, las tres posiciones espaciales de cada una de ellas, los tres vectores de movimiento espacial, lo momentos angulares, los estados de vibración internos, la geometría de las partículas, los condicionantes de otros campos… cuantos más grados de libertad más grande podemos imaginar el espacio de posibles de estados (fases) del sistema y mayor su imaginario volumen. Lo que será también representativo del número de posibles estados que puedan representar al sistema global. Y ya sabemos que un mayor número de configuraciones posibles indistinguibles que representan a un sistema abre el camino hacia situaciones de entropía mayores.

Si teóricamente "alejáramos la vista" e hiciéramos un macro zum por encima de un sistema colocado en ese espacio, solamente discerniríamos sus macro características tales como presión, temperatura, color… Esas parcelas tan generales del espacio de estados, volúmenes que engloban a sus particulares configuraciones micro que se nos han difuminado al hacer el macro zum, son lo único que apreciamos los humanos. Lo pequeño se nos ha hecho indistinguible, como si realmente no existiera… aunque realmente esté ahí. Eso significa que el azar y las posibilidades de ausencia de orden campan por el alma soterrada e inapreciable de nuestras grandes escalas. El que esas particulares configuraciones de estados micro sean indistinguibles y cada uno de ellos representativo del sistema macro, nos tiene que hacer pensar que ese volumen macro representativo de lo percibido en nuestro mundo humano tendrá en promedio una entropía proporcional al número de [volúmenes de] estados micro contenidos. De acuerdo con lo que nos dijo Boltzmann acerca de que la entropía de ese macro espacio de N dimensiones es

$$k_b \times \log(\text{número de estados micro})$$

siendo k_b la constante de Boltzmann. O lo que es lo mismo, proporcional al logaritmo del ***volumen del macro espacio*** que, a su vez, es proporcional a sus grados de libertad.

En resumen: a mayor número de grados de libertad mayor es el posible espacio macro, mayor es su volumen y, por tanto, mayor su entropía. Podemos decir que con carácter general la gravedad al concentrar las masas va incrementando los grados de libertad del sistema total… por lo que podemos afirmar que la ***gravedad se manifiesta como generadora de entropía a futuro.***

8. Llamados colectivamente bosones X, que serían unas partículas elementales intermediadores de un tipo de fuerza predicha por la teoría de gran unificación.

9. Nos podemos preguntar cómo es que si los bosones X e Y son los intermediadores durante la época de la gran Unificación, cuando aún no había protones, pudieran mediar en la desintegración de estos últimos. Siendo cierto lo anterior la respuesta es que, tras la ruptura de la simetría GUT que dio masa a los bosones X, aun a día de hoy el Campo Unificado sigue generando efectos virtuales residuales como la desintegración del protón.

10. Ya veremos qué son, aunque para el curioso urgente recomiendo la lectura de la serie del blog "*El Tamiz*", "*Esas maravillosasa partículas*". [https://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]

11. Que por otro lado era lo que le sucedía también al resto de partículas existentes durante la época de la Gran Unificación.

12. Si nos atenemos al tipo de cálculo que se hizo para el electrón en la nota 10 del capítulo 02. Las partículas X e Y surgidas del vacío durarían la nimiedad de unos 10^{-40} segundos.

13. Ya sabemos del capítulo anterior que el principio de incertidumbre de Heisenberg exige emparejar una gran energía con un efímero tiempo.

14. En aquellos momentos es muy arriesgado hablar de masas. Ya sabemos que la teoría nos dice que para que las partículas adquieran la carga de masa se precisa un campo semejante al de Higgs. Pero no tenemos ni idea de si en aquel momento había alguna interacción Higgs. Quizás sí. La que conocemos estaba energéticamente muy alejada, en el hito 125GeV. Por eso en esos momentos hablar de masa supone hablar de energía, pero usaremos la terminología masa por ser más intuitiva.

15. De Wikipedia: "*La simetría CP se basa en la composición de la simetría C y la simetría P. La simetría C o simetría de carga afirma que las leyes de la física serían las mismas si se pudiesen intercambiar las partículas con carga positiva con las de carga negativa. La simetría P o simetría de paridad dice que las leyes de la física permanecerían inalteradas bajo inversiones especulares, es decir, el universo se comportaría igual que su imagen en un espejo. La* ***simetría CP*** *es el producto de ambas.*"

16. [https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2004/popular-information/]

17. Ver "*Unification of Gravity and Quantum Theory*", Adam D. Daniels, 2017. [https://digitalcommons.odu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=engineering_students]

18. El término cambio de fase se usa comúnmente para describir transiciones entre estados sólido, líquido y gaseoso de la materia, así como del plasma en algunos casos raros. Durante una transición de fase de un medio dado, ciertas propiedades del medio cambian, a menudo de manera discontinua, como resultado del cambio de alguna condición externa, como la temperatura, la presión u otras. A modo de ejemplo, un líquido puede convertirse en gas al calentarse hasta el punto de ebullición, lo que resulta en un cambio abrupto en el volumen por el incremento de cantidad de movimiento en sus moléculas, las cuales se desorganizan aun más de lo que estaban en el estado líquido.

19. La constante cosmológica es ni más ni menos que una energía interna.

04: Inflando el Universo I

de 10^{-35} segundos a 10^{-32} segundos desde el inicio

En el capítulo anterior nos movíamos a través de un suspiro temporal menor a 10^{-35} segundos, cuando el Universo era muy joven y también muy pequeño. Se encontraba en la vecindad del mundo de Planck, aunque mayor que él. Las ecuaciones muestran que la pepita solo debía ser de 10^{-26} centímetros.[1] Todo se encontraba comprimido en un mundo de tamaño de un protón reducido a escala de 10^{-13}. La energía del momento era unas 10^{-5} veces la energía de Planck o, lo que es lo mismo, unos 10^{19} veces la energía equivalente de la masa de un protón. En estas pequeñeces deambulamos cruzando los dedos apoyados por la física cuántica de campos, que describe cómo los campos relativistas interactúan y dan lugar a las partículas fundamentales.[2] Cruzamos los dedos pero con cartas marcadas.

Pero ¿qué es un campo relativista? Pues es una entidad física/matemática que permea todo el espacio/tiempo, que cumple los principios de la relatividad especial y que sólo podemos conocer de su existencia por sus interrelaciones y sus excitaciones. Lo que respectivamente podríamos llamar como *interacciones* -fuerzas- *fundamentales* y *ondas-partículas*. Los campos relativistas no son como el resto de los campos que precisan de un medio para ser,[3] sino que son físicamente reales y valiosos en el Universo, en el que gracias a sus ondas se transmite energía e información de un lado a otro, pudiendo suceder que las ondas de uno de esos campo pueda afectar a las de otro, con lo que se cambien procesos que en su ausencia ocurrirían de otra manera. Los hay de muchos y diferentes tipos, al menos en el mundo de las matemáticas y la física más compleja.

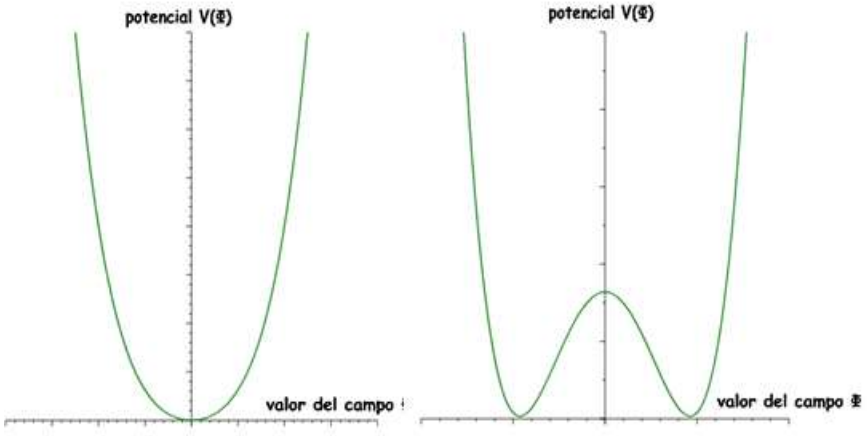
El mero hecho de que el campo exista conlleva que en cualquier punto del espacio/tiempo haya una relación entre su valor y su potencial, es decir, entre su valor y la capacidad que tiene el campo para realizar "algo". Simplemente estamos hablando de cómo el potencial estaría afectando a su función de onda. Pensemos como ejemplo en el campo gravitatorio, tomando arbitrariamente su referencia en la superficie de la Tierra: más arriba hay más potencial, más abajo hay menos potencial. Con este potencial, el campo gravitatorio puede mover una masa. De un punto con mayor potencial a un punto con menor potencial.

La energía potencial de un campo -o simplemente su potencial- viene definido de forma más general por una serie de sumandos en los que interviene diversas potencias del campo. Por diversas causas físico/matemáticas se considera la

siguiente igualdad, en la que Φ es el valor del campo Φ, como una expresión suficientemente exacta a efectos de sacar conclusiones.[4]

potencial V(Φ) = [una constante A x Φ^2] + [otra constante B x Φ^4]

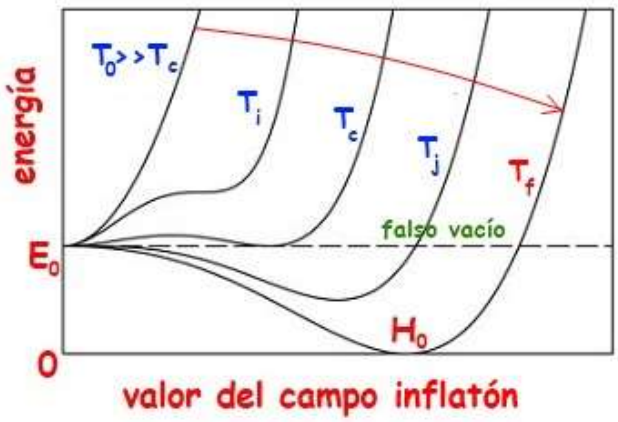
Si representamos la curva del potencial que define la ecuación anterior, f[V(Φ), Φ], tenemos que pensar que su forma dependerá del valor de las constantes A y B. Que en líneas generales será alguna de las imágenes siguientes: la de la izquierda, para valores del coeficiente A mayores que cero, y la de la derecha, para valores de A menores que cero.



Esta curva nos dice cómo la energía potencial V(Φ) del campo puede tomar un valor u otro de acuerdo con el valor que tome el campo. El valor Φ del campo es un indicador del estado del campo en un punto específico y la energía potencial V(Φ) está determinada por ese valor. En un modelo simplificado, como un campo homogéneo, no es necesario conocer la distribución espacial del campo para entender su energía potencial. Sin embargo, en una situación más general con campos no homogéneos, la distribución espacial y temporal de Φ sí es importante. Como cosmológicamente se considera al universo continuamente homogéneo e isótropo, habrá que convenir que la variación temporal del campo habrá de ser la misma en todos sus puntos. Dado la obligatoriedad para los sistemas físicos de posicionarse termodinámicamente en la "arquitectura" de mínima energía,[5] debemos convenir que el punto que defina el estado normal del campo deba ser el que representan los mínimos de las anteriores curvas. Un campo cero en el primer caso, o un campo distinto de cero en el segundo. Ya comenzamos a hablar de ello en el contexto de la ruptura de la simetría GUT. También puede suceder que el campo que siga la curva de la derecha se encuentre de forma transitoria en su máximo de potencial en una situación metaestable. Circunstancia que analizaremos al hablar dentro de nada del campo inflatón o del campo de Higgs en otro capítulo.

La imagen anterior de la derecha es precisamente la foto del carné de identidad del campo que creemos fue el responsable de la expansión primordial de nuestro Universo. Una ecuación de cuarto grado, que representamos de forma más explícita y dinámica en la figura siguiente, y que correlaciona el valor del campo con el valor de su potencial -energía- en distintos momentos relativos al tiempo. Lo que es igual que a distintas decrecientes temperaturas[6]. Vamos a llamar a este campo escalar el ***campo inflatón***. Ya os podéis imaginar el por qué.

Habíamos visto en el capítulo anterior que gracias a Einstein, y muy a pesar de sus iniciales ideas personales,[7] sabemos explicar por qué nuestro Universo se expande y que a lo largo de su historia lo pudo hacer de una u otra manera dependiendo de la distribución de energías, materias y presiones en su estructura espacio/temporal, a lo que habría que añadir la influencia de su curvatura. En los momentos inaugurales del universo el campo inflatón estableció las condiciones iniciales para la expansión cósmica y las fluctuaciones cuánticas que más tarde se convertirían en las estructuras a gran escala del cosmos. Veamos cómo lo hacía.



*Evolución de la curva del potencial de campo inflatón con el tiempo (la flecha roja es la flecha del tiempo) de acuerdo con un perfil cuártico. Las **T** son las temperaturas del Universo en cada momento.*

A medida que el universo se expandía y se iba enfriando, el potencial del campo inflatón evolucionaba con el tiempo de forma que la curva de potencial cambiaba dibujando una especie de progresivo aleteo descendente, tal como hemos tratado de representar en la gráfica anterior. No olvidemos que esta gráfica corresponde a un punto determinado del espacio y que en los demás puntos estaría sucediendo algo por el estilo.

Durante un breve periodo de tiempo, menos incluso que un suspiro cósmico, antes de que el universo alcanzara la temperatura crítica T_c, el campo inflatón permaneció en su posición de mínima energía, E_0. En esta configuración el

valor de E_0 era constante en todos los puntos y en todo momento. El campo inflatón mantenía un nivel prácticamente uniforme de energía en el sistema en expansión del universo, lo que suponía que a pesar de que el volumen del universo fuera aumentando la densidad de energía se mantenía constante puesto que el campo inflatón inyectaba su energía E_0 en cada nuevo "metro cúbico" que se generaba durante la expansión. Lo que implicaba el que la energía total del universo fuera creciendo continuamente debido al aumento de volumen. Es un fenómeno análogo a lo que mencionamos en el capítulo anterior sobre la gravedad como una fuente aparentemente inagotable de energía. En este caso, el campo inflatón actuando como un motor cósmico insuflando energía constantemente mientras permanecía en su posición de mínima energía con el valor del campo (H) igual a cero. Veremos la importancia posterior de este hecho.

Dicha la teoría vamos a intentar cuantificar la magnitud del valor E_0 del campo inflatón en aquellos instantes 10^{-35} segundos tras el inicio. Al comienzo del capítulo dijimos que el nivel energético medio era unas 10^{-5} veces la energía de Planck. Había evolucionado a partir de un mundo de Planck de 10^{-33} centímetros de lado. En estas pequeñeces domina la cuántica que nos dice que energía y longitud (de onda) son inversamente proporcionales. Por lo que el dato de 10^{-5} veces la energía de Planck estaría confinada en un volumen de lado 10^{-28} longitudes de Planck. Como la energía de Planck es del orden de 10^{-5} gramos pasemos a calcular. Un volumen de 10^{-28} longitudes de Planck contienen 10^{-5} veces la masa de Planck, es decir 1 gramo. Con esa densidad en el volumen del momento $t=10^{-35}$ segundos, que como dijimos al principio del capítulo era de 10^{-26} centímetros, fácilmente deducimos que la energía almacenada en el campo inflatón rondaba los 10 gramos. Tras la inflación la inyección proporcionada por este campo hizo que los diez gramos se transformaran en ¡¡10^{55} gramos!!

Veamos cómo juega esto desde un punto de vista termodinámico. El Universo se estaba expandiendo, lo cual, como hemos dicho dos párrafos arriba, conlleva una variación de su energía total gracias al campo inflatón. Al ser por definición un sistema cerrado "rodeado" por la nada, y nada es *nada*, no podía haber ninguna transmisión de energía hacia afuera de él o desde fuera a su interior. A eso se lo conoce termodinámicamente como un proceso de expansión adiabático. Como no recibe calor de ninguna fuente exterior, la energía para la expansión sólo puede salir de su propia energía interna. El proceso, una expansión adiabática, lo fija la siguiente expresión matemática:

Variación de Energía = – Presión por variación de Volumen [1]

Ese es el mismo proceso que experimenta un gas ordinario que se expande empujando un pistón, enfriándose y perdiendo energía térmica. La energía

transferida al pistón proviene de la presión ejercida por las moléculas del gas que en el proceso pierde energía interna. En el caso del Universo en expansión observamos un fenómeno contrario al experimentado por el gas: no solo se expande sino que su energía parece incrementarse. Un símil intuitivo (aunque no del todo preciso) sería imaginar un "pistón" expandiéndose que en vez de recibir energía del sistema, fuera él el que estuviera transfiere energía al gas. Este cambio de perspectiva lógicamente equivale a que el sistema debe estar ejerciendo sobre el pistón una especie de presión negativa que es exactamente lo que postulábamos: el pistón al expandirse ejerce una presión sobre el sistema. En el contexto del Universo, este "pistón" está distribuido en toda su estructura del espacio-tiempo, y la energía proviene del campo inflatón (el "pistón") que introduce energía en el espacio-tiempo mediante esta presión negativa.

Lo anterior nos parece sorprendente porque lo que resulta habitual en nuestra cotidianidad es que al expandirse un sistema aislado, al aumentar su volumen sin que pase nada más, su densidad de energía disminuye. Eso nos sucede porque solemos considerar a la presión en su forma más cotidiana e intuitiva -la que nos afecta en nuestras experiencias- como de tipo positivo, cuando sentimos su *empuje*. Pero también sentimos una *tensión* negativa que atrae. Este último tipo de presión lo experimentamos, por ejemplo, cuando mantenemos a un muelle estirado entre las dos manos, ya que en su estructura material lleva implícita una energía de "aproximación".

Si volvemos a la imagen anterior, la del "aleteo" del campo Inflatón, observamos como con el paso del tiempo y la expansión el potencial cuadrático se va relajando hacia un perfil de cuarto grado, manteniéndose el campo en el punto de mínimo potencia en todo momento. Allí se encuentra oscilando debido a las inestabilidades cuánticas que sufre. Hasta que el Universo no se enfría a una temperatura crítica para el inflatón (en la curva T_c) el campo va a permanecer en el valor E_0 de potencial y, por tanto, con capacidad para incrementar la energía total del sistema. Pasada la temperatura crítica el inflatón se dirige a una posición de un nuevo mínimo que, por conveniencia, es cero porque así hemos decidido situar nuestros ejes de coordenadas. En el fondo el potencial no es que tenga un valor fijo sino que tiene un valor relativo a otro punto que hemos seleccionado aleatoriamente a nuestra conveniencia como base de potenciales.

Si lo anterior es cierto podemos considerar que a lo largo de aquellos momentos iniciales se estaría produciendo un incremento de energía en el universo del siguiente calibre:

La variación de Energía del Universo = La densidad de energía en el campo Inflatón (cte) por la variación de Volumen

Evidentemente esa expresión y la [1] de más arriba tienen que ser la misma cosa. Por lo que si las igualamos concluiremos que

- Presión = Densidad de energía en el campo inflatón (constante) [2]

Como la densidad de energía del campo inflatón situado en el punto de equilibrio es positiva y con valor E_0 , vemos con sorpresa, aunque ya nos lo imaginábamos, que ***en el proceso de expansión aparece una presión negativa***. Recordad cómo en el capítulo anterior habíamos deducido a partir de las ecuaciones de la relatividad que una presión negativa suficientemente grande daría como resultado una expansión acelerada del Universo.

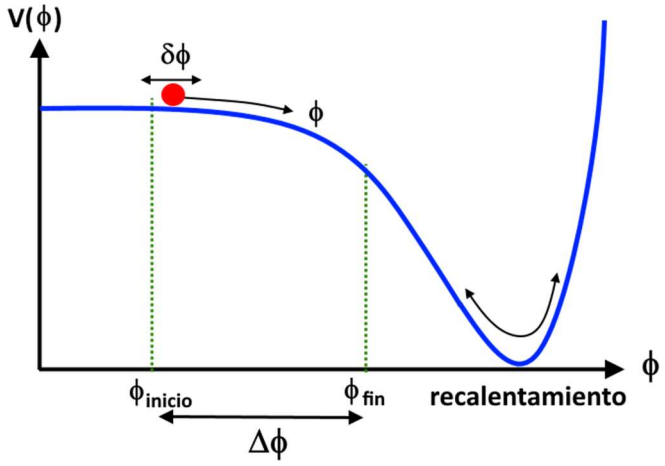
A día de hoy aun no tenemos una idea precisa de lo que pueda causar esa presión negativa aunque la conceptuemos como "energía oscura" o constante cosmológica. Quizás alguna propiedad interna del sistema. Ya lo comentamos en un capítulo anterior al analizar la ecuación de Einstein simplificada que fija la dinámica de la expansión del Universo

$$\ddot{a}(t) = - K (\rho+3p) a(t)$$

Gracias al signo menos inicial vemos como la densidad de materia/energía (ρ) al igual que las presiones internas que sean positivas (p) tienden a ralentizar la expansión del universo. Estas presiones positivas no actúan como una fuerza gravitacional en el sentido tradicional ya que no atraen objetos hacia sí mismas ni modifican directamente el espacio, sino que localmente mueven sustancias dentro del espacio existente. Sin embargo, las presiones negativas lo suficientemente intensas pueden invertir el efecto general de ralentización impulsando la expansión del universo de manera acelerada. Así pues, las presiones positivas se comportan como una fuerza gravitatoria (atractiva), mientras que las presiones negativas actúan como una forma de antigravedad (repulsiva). Ambas caras de una misma moneda, la presión, que también deforma al espacio/tiempo.[8]

Y aunque no tengamos una idea precisa de lo que pueda causar esa presión negativa como se dijo más arriba, SÍ tenemos una teoría para identificar esa causa de la fuerza expansiva del universo, tanto durante la inflación exponencial como en la expansión continua actual del espacio-tiempo: una ***presión negativa antigravitatoria***. Algunos la denominan "*smooth tension*" o "tensión lisa", ya que se trata de una tensión de bajo valor, uniformemente distribuida a lo largo de todo el tejido del universo. Actualmente, esta expansión está dominada por lo que podría considerarse su "*alter ego*", la ***energía oscura***, o quizás más apropiadamente, una ***presión oscura***.[9] Identificada la causa prosigamos la historia.

Mientras el campo inflatón valía cero en su primer mínimo de potencial, no tenía capacidad para generar partículas físicas "estables" -aunque sí un trasiego de las virtuales, que aparecían y desaparecían- por lo que a este estado lo podemos categorizar como un estado denominado de ***falso vacío***.[10] Con el tiempo la expansión, y el consiguiente enfriamiento, estaba proporcionando al campo inflatón la oportunidad de un nuevo vacío de menor potencial a donde necesariamente ir. En el momento en que "cayó" a ese nuevo mínimo en donde el campo **SÍ** tenía un valor, H_0, alcanzó la posibilidad de dar a luz a partículas "estables" extraídas del submundo de las partículas virtuales. Por eso a este nuevo estado se le conoce como ***vacío verdadero***. Podemos imaginar que la tendencia a la caída de un vacío al otro es algo semejante al agua de una presa, que al romperse pasa de una embalsada tranquilidad, la falsa, a otra embalsada tranquilidad de menor energía, la verdadera, cuando alcanza el mar. En el proceso genera energía, lo cual introduce una sutil pista para lo que vendrá en este libro. Ese símil nos ayuda a entender lo que tuvo que pasar durante los primeros momentos del tránsito de un vacío al otro, cuando el valor del campo aún estaba muy próximo a cero, intervalo temporal en el que el campo inflatón estaría favoreciendo el embalsamiento de energía en el Universo en expansión.



Campo inflatón en su camino de "inflar" el Universo [11], ©*fair use.*

La figura anterior, caso particular de la anterior, nos ayudará a remachar el entendimiento del proceso. La aceleración expansiva se inicia en el punto que hemos definido en la curva como Φ_{inicio} momento en el que aún la energía potencial del campo $V(\Phi)$ dominaba a su energía cinética, $\Phi^2/2$. Terminará en el momento Φ_{fin} cuando la energía cinética en su senda de crecimiento alcance un valor comparable a la energía potencial, $\Phi^2/2 \approx V(\Phi)$. ¿Qué estaba pasando al campo inflatón en el proceso anterior hasta llegar al punto Φ_{fin} ? Se encontraba en un estado que se denomina de ***súper enfriamiento*** porque, aunque el universo continuaba expandiéndose y enfriándose rápidamente, el campo inflatón no estaba completando su transición al mismo ritmo,

prácticamente seguía en el alto de su meseta. El súper enfriamiento, conocido también como subfusión, es el estado en el que se puede encontrar a veces el agua en proceso de congelación, que no acaba de solidificarse a pesar de estar a una temperatura muy por debajo de 0ºC. Su estado es líquido, pero altamente inestable, de forma que cualquier alteración, golpe, movimiento o suciedad en su interior le provoca un colapso progresivo hacia el estado natural, sólido, de mínimo de energía para esa temperatura de congelación: de pronto las semillas iniciadoras se congelan, siguiéndolas el resto del agua en fase líquida con el resultado final de liberación de una energía interna, la de cambio de estado. La inicial "alegría energética" de las partículas líquidas en libertad de movimiento, se vio limitada tras la solidificación dejando en el proceso un inevitable remanente energético. Lo mismo le pasó al campo inflatón que se mantenía súper enfriado durante el intervalo temporal entre el principio y el final de la inflación mientras iba "sufriendo" una serie de fluctuaciones cuánticas que fueron las detonantes para su definitiva "caída" al vacío verdadero. Al llegar a este vacío se rompieron las simetrías tal como el agua rompe la suya al estructurarse como hielo. Como decíamos en el capítulo anterior se pasó de la simetría GUT SU(5) a la simetría conjunta SU(3)xSU(2)xU(1).

¿Cómo de rápida fue la inflación, la "caída" hacia el verdadero vacío? Podemos intentar entender la dinámica con la que se expandía el Universo introduciendo nuestro campo en la ecuación de Einstein ajustada a un universo plano como el que vivimos y que ya conocemos de capítulos anteriores:

$$-\ddot{a}(t) = K\,(\rho+3p)\,a(t)$$

Como estamos ante la presencia de un campo escalar en su estado de falso vacío (el campo inflatón no sabe de direcciones) vamos a hacer uso de la deducción [2] hecha unos párrafos más arriba

$$\textbf{presión} = -\ \textbf{densidad energía campo inflatón} = -\ \rho_{\text{falso vacío}}$$

sustituyendo nos queda:

$$\ddot{a}(t) = -K\,(-\,2\,\rho_{\text{falso vacío}})\,a(t) = +\,2K\,.\,\rho_{\text{falso vacío}}\,.\,a(t)$$

A partir de esta igualdad y tras unos sencillos cálculos se obtiene para el factor de escala de la expansión a(t) algo así como una ***relación exponencial*** entre el factor de crecimiento y el tiempo, exponente potenciado por el valor de la densidad de energía del campo inflatón en el falso vacío. Todo ello gracias a que la presión negativa introducida por el inflatón nos ha cambiado radicalmente el alma del proceso al haber transmutado un signo menos por uno más.

La existencia de un campo inflatón de este calibre dio una solución a muchos de los problemas que los cosmólogos no entendían si la expansión del universo hubiera sido menos potente, que era lo que a fin de cuentas decía la teoría primitiva del Big Bang. Entre otras cosas incomprensibles, el porqué de la homogeneidad de la información que observamos en el Universo. Lo que fue la base de la propuesta de la ***teoría inflacionaria*** del físico Alan H. Guth.

****

Ampliemos el detalle termodinámico del proceso de enfriamiento. El agua en su estructura líquida es isotrópica, tiene el mismo aspecto la mires en la dirección que la mires. Por lo que podemos imaginar que tiene más simetría que en su estado sólido en donde la cristalización introduce restricciones geométricas y direcciones singulares. El proceso termodinámico de paso de líquido a sólido, mientras se va quitando energía al agua, sigue la siguiente pauta (ver la imagen siguiente): el agua líquida va perdiendo temperatura hasta que llega al punto de congelación T_c. En este momento si seguimos drenando entalpía esa energía robada no va a dar como resultado una bajada de la temperatura del agua, sino que en un primer momento se usa para reorganizar a las moléculas del líquido que progresivamente va cristalizando, perdiéndose la isotropía de partida. Se trata de la energía de cambio de estado. Una vez se congela completamente sigue el descenso de temperatura.

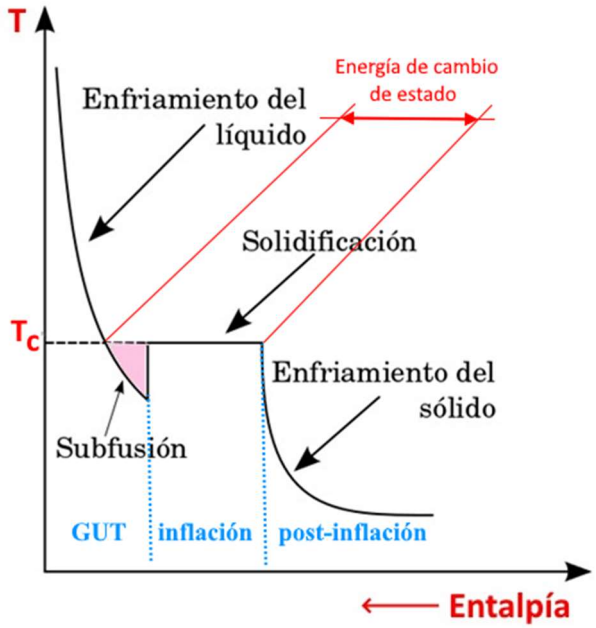


Diagrama de cambio de estado líquido-sólido. El sistema se va enfriando a medida que se le quita energía. El área rosa es la energía embalsada en la subfusión y que eleva su temperatura cuando se produce el cambio de fase a sólido. En azul la analogía inflacionaria. (Imagen modificada de la red, dominio público)

Pero también el camino de enfriamiento del agua puede seguir otros derroteros, el de la subfusión: quitamos energía, baja la temperatura, llega el punto teórico de congelación, aunque ésta no se produce por circunstancias particulares, como puede ser la falta de núcleos iniciadores de la cristalización. La consecuencia es que el agua sigue enfriándose en estado líquido e isotrópico hasta llegar un momento en el que, instantáneamente, el agua se congela a una temperatura superior -la normal de congelación- en comparación con la más baja del estado súper enfriado. ¿De dónde sale la energía necesaria para subir la temperatura? De la propia energía cinética de las moléculas que estaban empecinadas en permanecer líquidas cuando debían haber configurado un sólido. Energía que se utiliza precisamente en "calentar" la nueva estructura en fase hielo.

****

Aunque la analogía del agua puede sernos útil, en el Universo no se produjo un cambio de fase, diríamos, "habitual". Pero sí podemos imaginar que, tras permanecer en un estado metaestable de súper enfriamiento (falso vacío), en algún momento se "derrumbó" rompiendo el juego de simetrías, lo que liberó al propio Universo la energía potencial almacenada durante el proceso. Esta energía elevó la temperatura del Universo devolviéndolo a un estado de alta energía. El "derrumbe" se realizó a través de un proceso de "tunelaje" cuántico tras el que iban apareciendo espontáneamente burbujas de vacío verdadero en el mar de falso vacío del Universo, burbujas que rápidamente se aquietaban cargadas de energía mientras el resto del espacio/tiempo seguía aún trabajando en el proceso explicado. A la larga todo llegó a ser un mundo de burbujas con grandes cantidades de energía, que progresivamente se iban fusionando en un espacio súper expandido. Se suponía que al juntarse las burbujas, en el choque, se debían generar las partículas de radiación y de materia que hoy observamos por transmutación de la energía vertida por el campo.

La idea general de Guth era buena pero dejaba algún "detalle" sin resolver ya que sus cálculos decían que la expansión podía ser tan rápida que quizás nunca llegarían a encontrarse esas burbujas. O tan lenta que no se produciría la necesaria expansión del espacio. De forma que se tuvo que buscar explicaciones distintas para la expansión, nuevas teorías que siguieran estando enmarcadas dentro de la idea general de una expansión exponencial.

Aquí entró la intuición del físico teórico ruso-americano Andréi Linde, que perfeccionó la idea inicial de la inflación propuesta por Guth. Su punto de partida se centró en idear una hipótesis particular para el potencial del campo inflatón. Se trataba de una propuesta que no requería de efectos gravitatorios cuánticos, de transiciones de fase, de un súper enfriamiento o de un súper

calentamiento inicial. No era necesario porque el Universo, con la solución de Linde, se expandía aún a mayor velocidad.

Algunos genios de la cosmología. La "vieja escuela" expansiva (1923) y la "nueva escuela" inflacionaria (2014) (Izquierda, wikimedia, CC BY-SA 3.0 y derecha, Camille M. Carlisle / Sky & Telescope, ⓕ fair use)

NOTAS CAPÍTULO 04:

1. Según afirma Brian Green en su libro "*La realidad oculta*", capítulo 10 *Para crear un universo*.
2. Que son los que intervienen en la mayoría de los fenómenos físicos de esta historia: electromagnético, gravitatorio, electrónico, …
3. Aunque no tenemos que confundir ambas entidades: el campo describe y caracteriza una de las muchas propiedades relevantes del medio.
4. Una mayor información en el siguiente enlace:

   [https://cuentos-cuanticos.com/2014/06/26/el-mecanismo-de-higgs-para-estudiantes-de-bachillerat-i/]

5. De acuerdo con el principio termodinámico de mínima energía. Para saber más podéis consultar este enlace: [https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_energ%C3%ADa_m%C3%ADnima]
6. La temperatura es proporcional al factor de escala del Universo. El factor de escala ***a(t)*** varía con el tiempo según estas sencillas igualdades: en un mundo en que domina la materia, la correlación va a ser $a = Kt^{2/3,}$ y si es la energía quién domina, $a= Kt^{1/2}$. Para más información ver:

[https://cuentoscuanticos.wordpress.com/2011/11/12/en-un-universo-hecho-de-materia/]
[https://cuentoscuanticos.wordpresscom/2011/11/12/en-un-universo-hecho-de-radiacion/]

7. Al ver Einstein que de sus ecuaciones de la relatividad surgía un universo que no era estático, propuso una modificación de éstas que incorporaba una constante cosmológica que anulaba la expansión. Cuando con posterioridad fue evidente que el Universo se expandía, el propio Einstein calificó su decisión como "el peor error de su carrera".

8. La materia no es lo único que genera gravedad. La densidad ρ_G de masa gravitatoria activa en la relatividad general de Einstein es

$$\rho_G = \rho + P_1 + P_2 + P_3 - [\wedge/4\pi G]$$

siendo ρ la densidad gravitatoria de la masa/energía presente; P_1, P_2 y P_3 los valores de la presión de la materia a lo largo de los tres ejes espaciales ortogonales; y $\wedge$ la contante cosmológica que, al contrario, ejerce una influencia anti gravitatoria.

Transcribo aquí un párrafo de Paul Davies en su libro "*Los últimos tres minutos*" (capítulo 3): "*Aunque la presión ejerce una fuerza mecánica hacia el exterior, da origen a un tirón gravitatorio hacia el interior. En el caso de los cuerpos que nos son familiares, el efecto gravitatorio de la presión es despreciable en comparación con el efecto de la masa de esos cuerpos. Por ejemplo, menos de una mil millonésima parte del peso de nuestro cuerpo en la Tierra se debe a la presión interna de la Tierra. Sin embargo, el efecto de la presión es real, y en un sistema en el que la presión llega a valores altísimos, el efecto gravitatorio de la presión puede competir con el de la masa*".

Y como un perfecto complemento de lo anterior transcribo lo que dice un párrafo del libro "*Camino a la realidad…*" de Roger Penrose (capítulo 19): *"…las contribuciones de la presión a la masa gravitatoria activa desempeñan papeles importantes en ciertas condiciones extremas. Cuando una estrella muy masiva se acerca a una situación en la que está en peligro de colapsar bajo su propio tirón gravitacional hacia dentro, encontramos que una presión aumentada en la estrella, que cabría esperar ayudase a mantener la estrella, ¡incrementa en realidad la tendencia a colapsar debido a la masa gravitatoria activa extra que produce!*"

9. Según el cosmólogo Sean Carroll: "*Energía oscura no es, estrictamente hablando, el nombre más descriptivo para esta sustancia; muchas cosas son oscuras y todo tiene energía. La característica que distingue a la energía oscura de la materia ordinaria no es la energía sino la presión, por lo que "presión oscura" sería un mejor término. Sin embargo, no es la existencia de la presión, sino el hecho de que sea negativa (tensión en*

lugar de presión ordinaria) lo que impulsa la aceleración del universo, por lo que "tensión oscura" sería aún mejor. Y lo habríamos detectado hace mucho tiempo si se hubiera acumulado en pozos potenciales en lugar de distribuirse sin problemas, por lo que "tensión suave" [smooth tensión] *sería el mejor término de todos."*

[https://www.god-does-not-play-dice.net/Carroll.html]

10. En cuántica, ***vacío*** es el nombre que se le da al estado de un sistema físico que está en su mínimo de energía.

11. Imagen modificada de "*TASI Lectures on Inflation*", figura 10, Daniel Baumann, 2012. [https://arxiv.org/pdf/0907.5424.pdf]

05: Inflando el Universo II

de 10^{-35} segundos a 10^{-32} segundos desde el inicio

Recuperamos en este nuevo capítulo el hilo del relato interrumpido al final del anterior en el que nos habíamos dedicado a analizar qué es lo que le pasó a nuestro biografiado en el momento más o menos t^{-35} segundos. Y lo que le pasó, o pensamos que le pasó, es que su tejido "corporal" espacio/temporal se vio compelido a un exagerado y rápido "engorde", que conocemos como una inflación exponencial, gracias al capricho del campo inflatón que optó por mudarse de lugar aprovechando el efecto de tunelaje cuántico. Comentamos también cómo dentro del mundillo de la física había mentes brillantes que estaban estudiando la expansión del Universo, aunque sus conclusiones no satisfacían plenamente lo que realmente parecían observar al levantar la vista al cielo. Alan Guth intentó romper el *impasse* con una novedosa idea por la que postulaba un proceso de expansión inflacionaria -de velocidad incluso mayor que la de la luz- para el Universo.

Decíamos también que… "*La idea general de Guth era buena pero… dejaba algún "detalle" sin resolver. De forma que se tuvo que buscar explicaciones distintas para la expansión, nuevas teorías que siguieran estando enmarcadas dentro de la idea general de una expansión exponencial… Aquí entró la intuición del físico teórico ruso-americano Andréi Linde, que perfeccionó la idea inicial de la inflación propuesta por Guth...*"

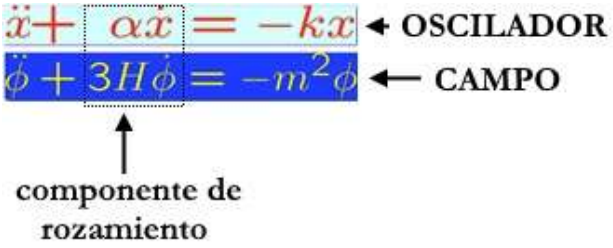
Consideremos el modelo más simple de un campo escalar Φ de masa m y con una densidad de su energía potencial $V(\Phi) = ½\ m^2\ \Phi^2$, una relación cuadrática entre el campo escalar inflatón y su potencial . Dado que esta función tiene un mínimo en $\Phi = 0$ se podría esperar que el campo escalar Φ debería oscilar naturalmente cerca de este mínimo. De hecho esto sería lo que pasaría si el universo no estuviera expandiéndose, en cuyo caso la ecuación de movimiento para el campo escalar sería similar a la ecuación para un oscilador armónico, $\ddot{\Phi} = -m^2\ \Phi$.

Sin embargo, debido a la expansión del universo, en la ecuación del "universo oscilador armónico" debe aparecer un término adicional 3H. A H se le conoce como la constante de Hubble[1] que, como sabemos, tiene que ver con las características de crecimiento dinámico del tejido espacio/tiempo del Universo. Por lo que al tener que tener en cuenta la expansión, la ecuación correcta queda como sigue:

$$\ddot{\Phi} + 3H\,\dot{\Phi} = -m^2\,\Phi$$

Para entender mejor el razonamiento de Linde, vamos a introducir el concepto de rozamiento en el análisis teórico del campo inflatón. En general los campos vibran en forma de múltiples ondas siendo la mínima fundamental la que genera a su partícula característica. Las ecuaciones que rigen esa dinámica son asimilables a las de los osciladores armónicos (un péndulo, un muelle…)[2] de forma que, al igual que les pasa a los osciladores, parece que los campos pueden verse afectados por algo parecido al rozamiento y que va a ralentizar su dinámica.

Si comparamos las ecuaciones que definen ambos sistemas, la del oscilador con rozamiento y la que introdujimos más arriba para el campo de Linde en un espacio/tiempo en expansión, en las dos aparece un sumando adicional que no existe en las ecuaciones para un sistema sin rozamiento, sumando que es proporcional, en el caso del oscilador, a la derivada primera de la elongación, y para el campo cuántico a la derivada primera del valor del campo, lo que permite intuir que hay algo que debe estar afectando a la velocidad de sus cambios.



Si en el esquema anterior nos atenemos a la ecuación para el campo podemos imaginar al parámetro ***H*** como el "factor de rozamiento" del campo al compararlo con el parámetro ***α*** que sí es el factor de rozamiento en el oscilador. Este concepto de "rozamiento" enriqueció la propuesta inflacionaria de Linde, conocida como la "***inflación caótica***". Hasta cierto punto es lógico pensar que la constante de Hubble H pueda asimilarse a un factor de rozamiento ya que es el indicador del "grado" con que varía la velocidad de expansión del Universo.

Fijemos, por tanto, la relación entre campo y potencial de la siguiente manera que geométricamente es una parábola:

$$V(\Phi) = (m^2/2)\,\Phi^2$$

A mayor valor del campo, mayor potencial. Linde aplicó esta configuración del campo a las ecuaciones de la relatividad de Einstein, las cuales le permitieron deducir la siguiente correlación entre la constante de Hubble y el valor del campo:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right) = \frac{m^2}{6}\,\Phi^2$$

Según esta ecuación, cuando el valor Φ del campo es grande, cuando está situado en la parte alta de la parábola del potencial (*ver imagen de más abajo*), también lo será el de H. Por lo que habrá que pensar que en estas posiciones hay mayor "rozamiento", mayor resistencia al cambio del valor del campo Φ. Lo que nos permite pensar, sin demasiado error, que tal "rozamiento" estará haciendo prácticamente constante el valor del campo. Si esto fuera así, la resolución de la primera igualdad de la anterior ecuación es muy sencilla y nos dice que ***el factor de escala "a" es una función exponencial de (H.t)***, es decir,

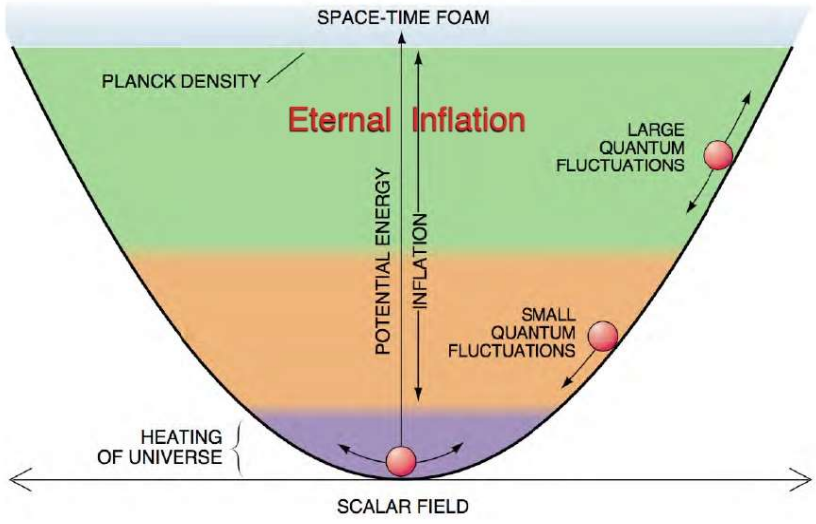
...a mayor valor del campo Φ mayor valor de H y, por tanto, una gran factor de expansión que varía lentamente en el tiempo porque para H's elevadas el mayor "rozamiento" frena la "caída" del campo en su búsqueda termodinámica de mínimos energéticos... [3]

Como veremos después esta fue una circunstancia que más tarde se va a manifestar muy trascendente. Recordemos que el campo inflatón es el que va embalsando energía en el espacio/tiempo: si la excursión a altos valores es lenta y dura mucho…

Ante esta circunstancia física de ralentización en la dinámica de un campo muy grande, Linde se planteó la siguiente posibilidad: ¿Y si eso es lo que realmente pasó en los inicios? Unos inicios que no tenían que ser calientes o energéticos, sino que simplemente existiera un campo potente y lento. Esa solución era más general con un concepto que podría replicarse en campos que tuvieran potenciales suficientemente planos, como los empleados en las anteriores teorías. Y además resultaba mucho más fácil construir una teoría cosmológica consistente sin hacer suposiciones innecesarias sobre el equilibrio térmico; transiciones de fase a altas temperaturas en el universo temprano; situaciones metaestables de campos inflacionarios o efectos túnel como en los modelos de la vieja inflación. Linde había desarrollado un mecanismo inflacionario teórico a partir del cual se deducía una fase de expansión exponencial del universo desde $t=10^{-35}$ segundos, resolviendo así algunas de las limitaciones presentes en el modelo inflacionario de Guth.

A continuación voy a exponer lo que podemos deducir de la imagen siguiente, la función del potencial del campo inflatón, tal como lo propone Linde. La capa más alta del diagrama discurre en un Universo espuma (*space-time foam*) concepto del que ya hemos hablado antes. A partir de ahí, al campo inflatón, representado por una bolita roja, no le queda más remedio que acomodar su valor a la temperatura del momento, progresivamente más fría. Lo cual nos hace imaginar algo así como que la bola "inflatona" "cae" por la pendiente de la parábola. De acuerdo con esta curva y siguiendo el proceso temporal físico a lo largo de esta "caída", la evolución del universo parece llevarse a cabo en

un escenario donde se representan tres episodios separados, aunque secuenciales en el tiempo:



Esquema de las características y comportamiento del campo inflatón según Andréi Linde. El eje vertical corresponde a la energía potencial del campo. El campo emparejado va discurriendo temporalmente desde altos valores de potencial, hasta el valor correspondiente a su estado de mínima energía en el vértice de la parábola[4] (Imagen: Andréi Linde, ⓕ fair use)

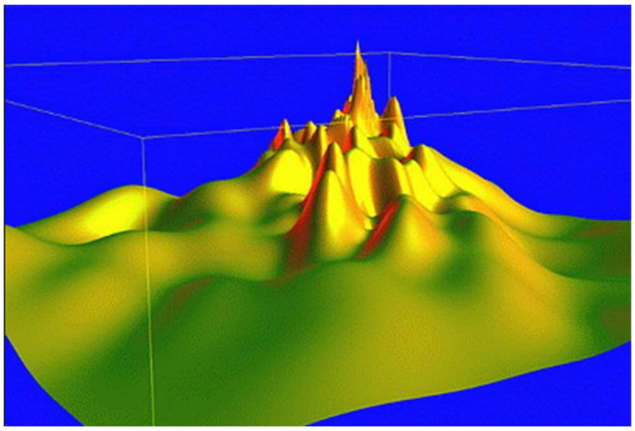
Escenario general. En el capítulo 3 apuntamos la posibilidad de un espacio/tiempo "burbujeante" bajo el imperio de la incertidumbre cuántica. Las fluctuaciones cuánticas del universo primigenio generaban diferencias energéticas entre regiones, dando lugar a niveles de excitación distintos en cada zona. En aquellas con mayor energía se iniciaba una inflación más intensa y estable. Cuanto más alta era la excitación de una región específica del espacio, más rápida y sostenida era la inflación en esa zona. Como resultado de este proceso inflacionario caótico, el universo se fragmentaba en un cúmulo de burbujas inflacionarias o mini-universos: algunas con inflaciones extremadamente rápidas y otras con un crecimiento más lento. Las burbujas con mayor inflación dominaron rápidamente, ocupando la mayor parte del espacio total en un corto periodo de tiempo.

Iniciamos ahora la aventura súper enfriada de nuestro campo inflatón buscando su estable mínimo energético:

(a) Saliendo del estado de universo espuma y metidos en la zona verde. El universo, inicialmente en un estado dominado por fluctuaciones cuánticas, pasó a una fase más estable caracterizada por una inflación lenta. En los tramos más energéticos del potencial del inflatón, en la parte alta de la curva de energía, el campo inflatón, partiendo de valores elevados, disminuía muy lentamente,

como si experimentara una fricción efectiva que ralentizaba su descenso hacia el mínimo del verdadero vacío. Este comportamiento dio lugar a una fase prolongada de inflación lenta, durante la cual el campo inflatón permaneció casi estacionario, con valores de campo y de potencial que no variaban significativamente. Esto resultó en una constante de Hubble elevada, lo que a su vez provocó una expansión exponencial del universo durante este periodo. Matemáticamente, se demuestra que, en paralelo, se generaban fluctuaciones cuánticas a gran escala.[5] Pero esto es harina de otro costal. La realidad que ahora nos interesa es que mientras sucedía este periodo de expansión brutal característico de la inflación, se estaba también produciendo un colosal "embalsamiento" de energía en el tejido del espacio/tiempo debido a que en este momento estaba incrementando su volumen mientras el inflatón prácticamente se mantenía en unos máximos de potencial que lo van a ir permeando.

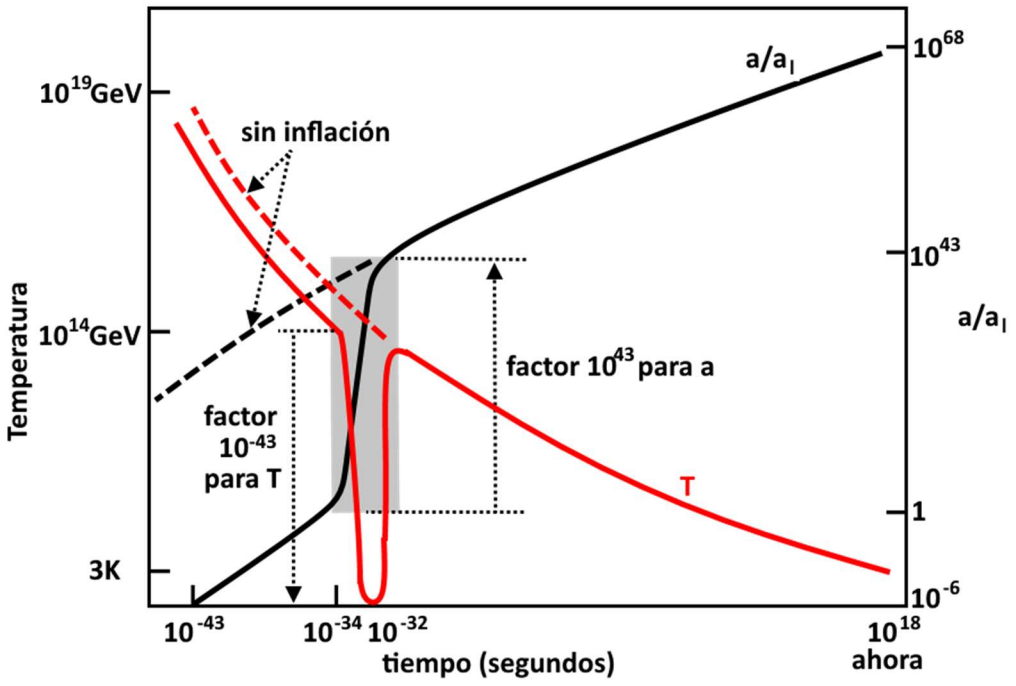
(b) Tras la zona inicial de descenso, en donde el efecto de la presión negativa (*recordadla del capítulo anterior, aunque hablaremos de ello más adelante*) y la expansión exponencial es mayor, ***entramos en la zona naranja*** de la curva del potencial del campo inflatón de Linde. El potencial empieza a disminuir mucho más rápidamente, siendo esta transición hacia la zona morada muy corta, transición a lo largo de la cual se generan en nuestro Universo en expansión fluctuaciones cuánticas más pequeñas. Su distribución espacial va a definir el patrón de distribución de masa en el futuro de ese. Volveremos a hablar de esto en otro capítulo.



Generación de fluctuaciones cuánticas. El borboteo es incesante cambiando continuamente el paisaje de picos (Imagen, ⓕ fair use)

(c) Fase de recalentamiento (zona morada). Por último, al acabarse la inflación exponencial el inflatón se adentra en la zona de reposo, oscilando por excursiones cuánticas alrededor del punto de mínima energía. La enorme distensión producida por la inflación había enfriado al Universo hasta llegar a una temperatura muy próxima al cero absoluto. Pero repentinamente, al final

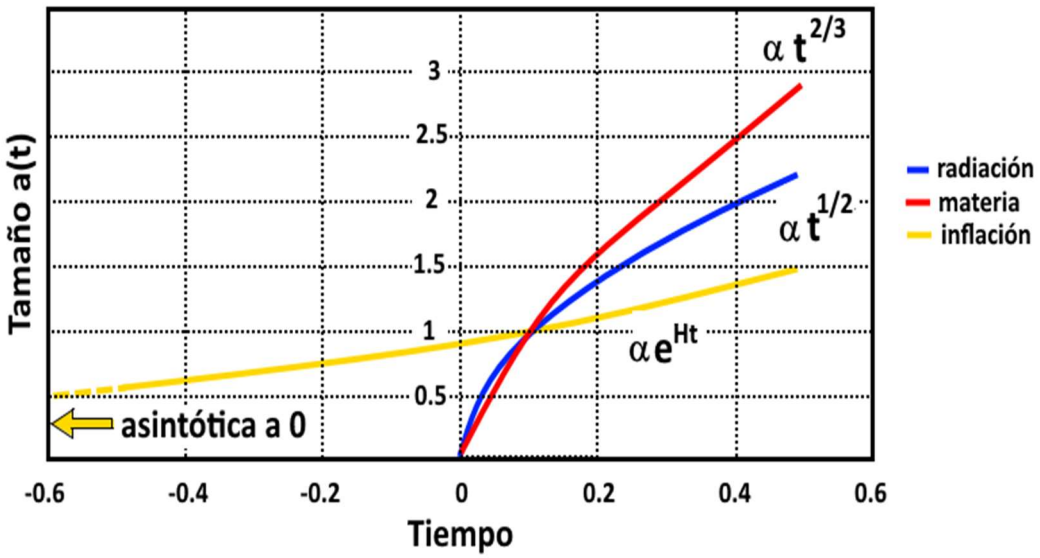
de la inflación se recalienta hasta el prodigio de 10^{28} K. En estos momentos creemos que aparece una nueva generación de campos y el universo pasa de un estado vacío, oscuro y frío[6] a todo lo contrario. En el frenado, como subproducto de la liberación de la energía del vacío, muchas de las partículas virtuales que continuamente iban apareciendo y desvaneciéndose absorbieron parte de esa energía pasando a ser partículas reales. La inmensa energía potencial embalsada durante la expansión gracias al campo inflatón se transforma en eso, en cantidades ingentes de partículas de "masas" (energías) del orden de hasta 10^{14} GeV y de radiación con el mismo nivel energético. Había aparecido como por arte de magia las 10^{50} toneladas de materia/energía que nos componen a nosotros mismos, las galaxias y el resto del Universo observable. Y no sólo eso, a la materia y radiación los acompañó un océano rielante de ondas gravitatorias a las que aún no hemos podido detectar. Era el momento 10^{-32} segundos a partir del inicio. Quedaban sólo las bases físicas del impulso primigenio para seguir con el proceso expansivo, ahora a un ritmo mucho menor, el que dicta las ecuaciones de la relatividad de Einstein. Y así hasta el día de hoy, que sigue en la labor.



*Evolución del factor de escala **a** y de la temperatura **T** en función del tiempo en el modelo inflacionario. La banda gris indica el intervalo de inflación. (Imagen modificada del libro "Gravitation and space time", página 469, edición 3ª, Hans C. Ohanian y Remo Ruffini, fair use)*

Entonces… ***una inflación exponencial seguida de un Big Bang caliente***. Nuestra mejor opción con el nivel de conocimientos actual. Pero ¿qué hubo antes de esta casi instantánea excursión inflacionaria?

Un argumento a favor de la existencia del Big Bang inflacionario, impulsado por una expansión exponencial, es que, a diferencia de la expansión "normal" de Friedmann, evita regresar a una singularidad a(t)=0 en t=0, como sí hubiera pasado si la expansión siguiera una función potencial como en el modelo antiguo. Esto último queda manifiesto en las curva azul o roja del gráfico siguiente las cuales describen respectivamente un universo dominado por radiación o por materia. Sin embargo, la hipótesis inflacionaria, curva amarilla, sugiere que siguiendo hacia atrás la expansión exponencial, incluso al extrapolar hacia tiempos arbitrariamente tempranos (t→ -∞), el universo nunca llega a un punto de singularidad ¿Qué hubo en el -∞? Lo desconocemos.



Como dice el astrofísico y escritor estadounidense Ethan Siegel: "*Hay muchas y buenas razones para creer que el estado inflacionario no fue eterno en el pasado, que pudo haber habido un estado anterior que dio lugar a la inflación, y que, cualquiera que fuera ese estado inicial, tal vez tuvo un comienzo. Pero una cosa parece ser segura: terminó la inflación y*

- *ocurrió el Big Bang caliente,*
- *el Universo se llenó de materia y radiación y más,*
- *y comenzó a expandirse, enfriar y gravitar, para finalmente desembocar en la actualidad.*"[7]

De la materia y radiación generadas inicialmente en la última fase de recalentamiento hablaremos en un capítulo posterior, cuando comentemos lo que se cree que pueda ser la actual distribución cuantitativa de energía en el universo, en sus diversas manifestaciones. Sin embargo adelantamos ahora una aproximada pincelada al respecto: una pequeña parte está en forma de materia potencialmente visible; siete veces más en forma de materia oscura; y el resto,

un 70%, en forma de la energía oscura que es la que hace expandirse al tejido espacio/temporal del Universo.

Sí, esto es lo que se cree que sucedió entre $t=10^{-35}$ segundos desde un hipotético inicio del tiempo fijado en el momento de una ficción matemática que llamamos singularidad inicial, hasta el momento $t=10^{-32}$ segundos. Pero lo más sorprendente fue el ritmo: cada 10^{-34} segundos el Universo doblaba su escala, es decir, aproximadamente desde el momento 10^{-35} al 10^{-32} segundos dobló su tamaño ¡100 veces! ¡Un crecimiento superior a 10^{30} ($\sim 2^{100}$)! ¡Desde 10^{-20} veces el tamaño de un protón hasta el tamaño de una naranja de 10 centímetros! ¡y todo en menos de 10^{-32} segundos![8] La luz tarda 10^{22} veces más en recorrer el tamaño de esta expansión. Y esto no va en contra de que nada puede viajar más deprisa que el límite que impone el valor de la velocidad de la luz en el vacío, 300.000 km/seg. Simplemente lo que sucede es que el tejido espacio/temporal ha dado de sí creciendo a velocidades de vértigo.

Hasta aquí con la teoría de la fase inflacionaria del Universo. En el capítulo siguiente nos adentraremos en algunos aspectos cosmológicos que la inflación nos ha ayudado a entender mejor. O eso creemos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 05:

1. Edwin Hubble descubrió que las galaxias en el Universo se separan unas de otras, a mayor velocidad cuanto más alejadas están entre ellas. Actualmente una galaxia situada a una distancia de 3,26 millones de años luz se aleja de nosotros a una velocidad aproximada a unos 70 km/s. Al factor de proporción entre la velocidad de desplazamiento y la distancia se le conoce como constante de Hubble.
2. Para una mayor comprensión recomiendo seguir la serie "*Fields and Their Particles: With Math*" del blog "Of particular significance".
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/]
3. Ver el siguiente enlace correspondiente a un artículo de Andrei Linde hablando del tema. "*Inflationary Cosmology after Planck 2013*", marzo de 2014.
   [https://arxiv.org/pdf/1402.0526.pdf]
4. OJO, no pensemos esta curva como inmersa en un campo gravitatorio, aquí no cae nada. Simplemente hay que imaginar como si la parte alta

fuera más "pegajosa", realmente la que tiene más rozamiento, por lo que el inflatón va a permanecer deslizando por esa zona un buen tiempo.

5. Para entendernos con lo último, esto se traduce en que en determinadas zonas del tejido espuma espacio/temporal de nuestro universo en expansión quedaría una energía potencial capaz de hacer renacer el proceso, creando a partir de las fluctuaciones cuánticas de alto nivel un nuevo universo. En el primer enlace de la nota 3 encontraréis la presentación resumen de una conferencia de Linde sobre el tema.
6. Con relación a la afirmación de que el universo venía de un estado vacío, oscuro y frío, y no del denso, energético y caliente que postulaban los teóricos de las antiguas teorías inflacionarias, aporto aquí las palabras del físico teórico Matt Strassler escribió en el año 2014: *"¿Qué sabemos sobre lo que sucedió antes de la inflación? ¡suponiendo que haya habido inflación! Nada. Oh, claro, hay muchas especulaciones científicamente fundamentadas sobre lo que sucedió antes. Pero son muchas y se contradicen entre sí; y actualmente no hay ningún tipo de datos que pueda distinguir cuál de estas especulaciones podría ser la correcta. Ni siquiera existe una teoría principal en la que la mayoría de los científicos tienden a pensar que es la más probable. Simplemente no se sabe. Por lo que sabemos, la inflación es un proceso continuo que ocurre en la mayor parte del universo… El universo se calentó después de la inflación. Si también hizo calor en algún período anterior a la inflación es completamente especulativo; no hay evidencia de una forma u otra. Pero durante la inflación,* [debido a la expansión] *la temperatura bajó a una pequeña fracción de grado por encima del cero absoluto.*" Una oda al Big Bang caliente post inflacionario. Párrafo a partir de las siguientes entradas de su blog "*Of Particular Significance*".
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/relativity-space-astronomy-and-cosmology/history-of-the-universe/inflation/]
7. De "*The Big Bang no longer means what it used to*", Ethan Siegel, agosto de 2022.
   [https://bigthink.com/starts-with-a-bang/big-bang-meaning/]
8. La alegoría de la naranja está extraída del libro de John Gribbin "*Biografía del Universo*", edición Drakontos Bolsillo 2011, página 72, aunque allí habla de un pomelo. De la misma publicación sale el dato del factor de inflación de 10^{30} aunque en esto hay muchas opiniones, incluso 10^{50} como proponen Eric Chaisson y Steve McMillan en su libro "*Astronomy today*". O incluso $[10^{10}]^{12}$ como propone Andrey Linde en una de sus conferencias en de la Universidad de Stanford, "*Los secretos de las muchas caras del Universo*". O los 10^{43} propuestos en la figura de Hans C. Ohanian y Remo Ruffini de este mismo capítulo.

06: ¡Qué grande es la inflación!

$t = 10^{-32}$ segundos

Salíamos del capítulo anterior en un momento en que el Universo había sido sometido a un ***estiramiento*** de piel brutal y a un ***recalentamiento*** que lo dejó muy energético Esto último sucedía más o menos a los 10^{-32} segundos desde el origen teórico de nuestro tiempo en el centro del mundo de Planck. Recordemos una frase allí escrita: "*Por último, al acabarse la inflación exponencial el inflatón se adentra en la zona de reposo, oscilando por excursiones cuánticas alrededor del punto de mínima energía. La enorme distensión producida por la inflación había enfriado al Universo hasta llegar a una temperatura muy próxima al cero absoluto. Pero repentinamente, al final de la inflación se recalienta hasta el prodigio de 10^{28} K.*"

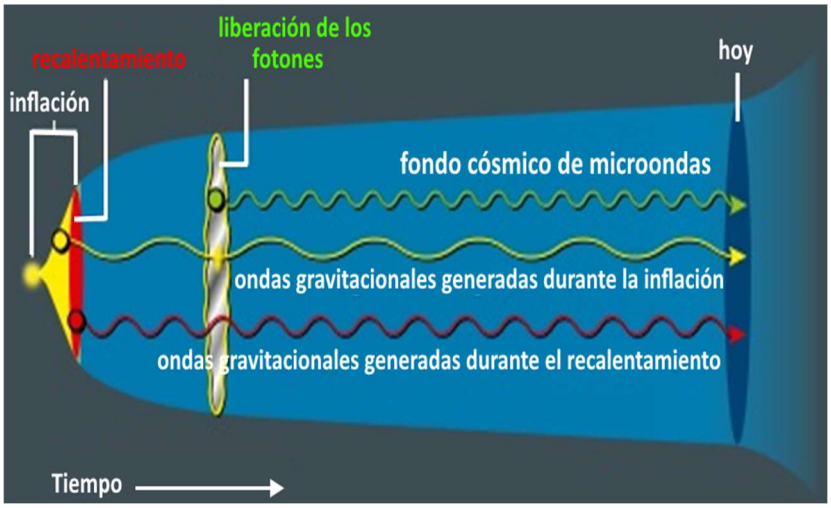
Nota general para cuando se menciona un universo observable:

Como "universo observable" entendemos a una región parcial del Universo total, una esfera con nosotros como observadores en el centro, en la que la luz emitida por los puntos frontera más exteriores ha tenido tiempo de llegar hasta el centro de la esfera. Lo que quiere decir que estos puntos frontera se encuentran a una distancia de nosotros igual a la edad del Universo, 13.800 millones de años-luz. Durante este tiempo la expansión del Universo a "estirado" este radio hasta la impresionante longitud de unos $0{,}5\times10^{24}$ kilómetros, el auténtico radio de la esfera observable. El resto del Universo, que se postula en algunas teorías como finito y cerrado y en otras como infinito -o casi infinito- en el espacio, pero finito en el tiempo, es y será inalcanzable. [1]

El final del recalentamiento marcó el punto donde el universo pasó de un estado dominado por la inflación a un estado rico en partículas y radiación. La energía positiva de toda la materia que se acababa de crear durante la fase de recalentamiento del universo se balanceó con exactitud con la energía negativa de toda la gravedad del universo. Tal como dijo Alan Guth, el cosmólogo que visionó el proceso de expansión inflacionaria, "*Toda la materia más toda la gravedad en el universo observable es igual a cero. Por eso el Universo pudo surgir de la nada, porque es, básicamente, nada*".

En el momento de alcanzar su estado de mínima energía potencial, la del verdadero vacío, el campo inflatón fue capaz de interactuar con los campos

fundamentales que, al ser inherentes del tejido espacio-temporal, ya existían desde el Big Bang pero que no estaban activados antes de este momento de cambio de estado para el Universo. Campos correspondientes a nuevas partículas y fuerzas; algunas serían como las actuales, quarks, leptones, gluones o el bosón de Higgs, y otras extrañas o desconocidas para nosotros.[2] El campo inflatón inducía estados de vibración en esos campos, quizás mediante la intermediación de una partícula que podríamos llamar también inflatón, en un mundo de altísimas energías que rondarían los 10^{24} eV, muy alejadas de las que manejan nuestras actuales capacidades tecnológicas. Esto quiere decir que este momento y estas partículas son aún inobservables para nosotros.



Los dos tipos de ondas gravitatorias que se pudieron generar en los primeros momentos del Universo. Las primeras (en amarillo) como consecuencia de la rápida expansión del espacio/tiempo y las segundas (en azul-rojo) como consecuencia de los fenómenos de recalentamiento apuntadas en el texto (Imagen: Investigación y Ciencia, diciembre 2012, ⓕ fair use)

Diversas resoluciones teóricas del fenómeno del ***recalentamiento*** parecen indicar que el proceso pudo iniciarse a partir de la formación de burbujas de energía en determinadas regiones del espacio, que serían ondas de materia muy localizadas y con una tremenda energía cinética. A velocidad próxima a la de la luz, estas burbujas chocarían fragmentándose en otras más pequeñas y con unas longitudes de onda menores. Con el paso del tiempo, y siguiendo este proceso, las burbujas iniciales se habrían extendido por todo el espacio que se comportaría algo así como un fluido turbulento. Poco a poco se fue atemperando esa turbulencia, alcanzándose un nivel de temperatura prácticamente homogéneo en todos los puntos. Todo ello en una pequeñísima fracción de segundo. Estos procesos habrían generado un espectro de ondas gravitatorias que si llegamos algún día a poder detectar nos darían una alternativa al Gran Colisionador de Hadrones, LHC, o a tecnologías similares que le sigan, para el análisis de lo que sucedió en los momentos iniciales. En

ese universo de tamaño parecido al de una naranja, las partículas y la radiación que convivían en su tejido tenían que moverse a grandes velocidades al estar confinadas en un pequeño espacio. Dada la alta energía de fondo se podría crear un abanico extenso de partículas, desde las de gran masa hasta las más pequeñas. A pesar de que desconocemos las características reales del campo inflatón, incluso si realmente existió, se conjetura que las partículas creadas en el recalentamiento pudieron ser de tipo escalar, algo semejante al bosón de Higgs, a las que se añadirían bosones asociados a campos vectoriales, precursoras de los fotones o los mediadores de la fuerza nuclear débil,[3] más las nuevas partículas mencionadas de materia fermiónica, como los electrones o los quarks. Las velocidades serían tan grandes y la energía de la radiación tan brutal, que continuamente chocarían entre ellas, desapareciendo y creándose de nuevas. [4] Volveremos a este punto en otros capítulos. Antes voy a abrir un paréntesis en el relato y dedicar lo que queda de éste a hacer un sucinto repaso a algunas de las incógnitas que se nos plantean al observar el Universo y que la inflación exponencial nos ha permitido explicar… o no.

Densidad de energía *(… un bonito problema… no resuelto)*

En el capítulo anterior -cosa que como habéis visto remachamos en éste- ya dijimos cómo la inflación fue la responsable de generar toda la materia del Universo actual a partir de la nada del vacío, quizás en un equivalente a la energía del volumen de Planck de unos 10^{-5} gramos,[5] con un mucho de ayuda de la gravedad. El modo tan especial en que se movió el campo inflatón durante la expansión fue embalsando en todos y cada uno de los nuevos dominios del tejido del Universo una energía que llamamos "*smooth tension*" o "energía oscura" o "constante cosmológica". O incluso, como dicen algunos, "presión oscura".

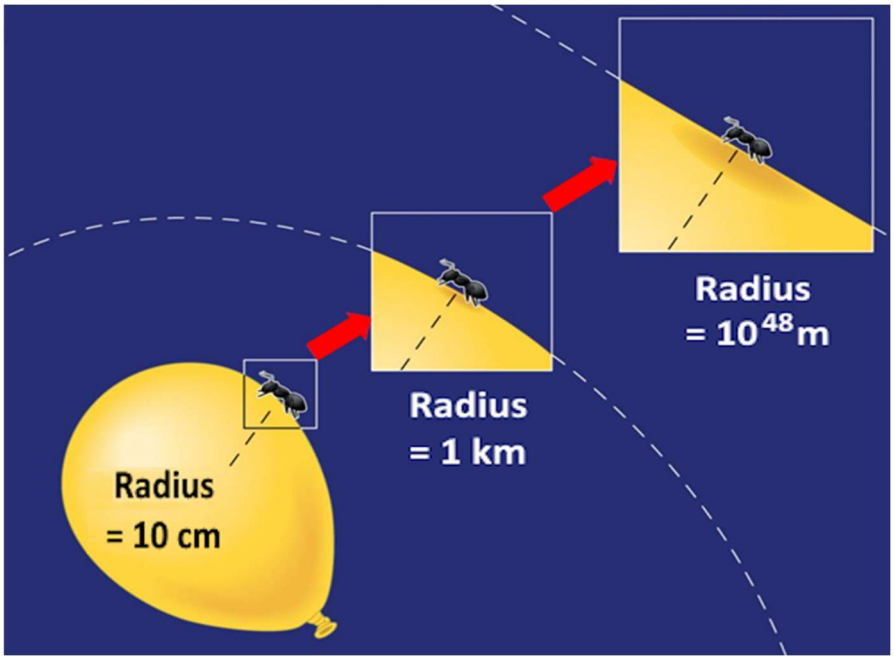
Pero la teoría exige explicaciones concretas. Y la verdad es que la realidad es más cruda. El problema que tenemos es que todas las veces que nos ponemos a hacer un ***cálculo teórico*** cuántico de la ***densidad de la energía del vacío*** llegamos a la cifra de $\boldsymbol{10^{91} gr/cm^3}$, mientras que la que medimos en la ***realidad observable*** es del orden de $\boldsymbol{10^{-29}\ gr/cm^3}$. Un "pequeño" problema a resolver de una magnitud de 10^{120}. En un rapto de optimismo lo podemos ver más atemperado si pensamos en masas, ya que la densidad del vacío es proporcional a la cuarta potencia de una masa, lo que nos lleva a decir que la relación entre la masa calculada y la observada es de 10^{30}. Lo veamos como lo veamos, la incongruencia es muy elevada. Y hoy por hoy no tenemos ni idea del porqué.[6]

Planitud (*… parece que aquí sí tenemos solución*)

No todo son incógnitas. Observamos un Universo actual que se comporta como si su geometría - *la métrica*-,[7] la que utilizamos en los cálculos que nos permite

entenderlo, fuera plana. Es decir, que en el espacio/tiempo observable se cumple el que la suma de los tres ángulos de un triángulo es 180º. Como veremos en un capítulo posterior cuando hablemos de la radiación de fondo de microondas emitida en el momento de la recombinación, 380.000 años tras el nacimiento del Universo, de la propia estructura térmica de estas ondas se deduce una geometría euclidiana, es decir, plana.

Quizás podamos entender mejor lo de la planitud a través de otro razonamiento. Sabemos, gracias a la fantástica intuición de Einstein, que la masa-energía-presión genera una deformación del tejido espacio/temporal. Y creo que de tanto oírlo ya nos imaginamos bastante bien cuando se trata de concentraciones "puntuales" de masa, que al deformar el espacio provocan gravedad y desviaciones en las trayectorias de otros cuerpos próximos con o sin masa. Si proyectamos este razonamiento a nivel global de todo el Cosmos, podemos imaginar cómo toda la energía-masa contenida debe provocar también una curvatura general de todo el Universo como nos aseguran las ecuaciones de la relatividad de Einstein.



Una hormiga experimentando asombrada como su mundo se va haciendo más y más plano a medida que se hincha el globo. Todo es cuestión de perspectiva (Imagen del libro "Astronomy today", pag 704, Eric Chaisson y Steve McMillan, ⓕ fair use)

Si como hemos comentado el Universo pudo partir, y así lo consideramos en nuestras teorías, de una burbuja de la espuma cuántica básica con una curvatura próxima al infinito, es lícito el preguntarse ¿cómo pudo llegar a ser plano? Pues gracias a que la inflación exponencial que sufrió esa burbuja expandió su tejido de tal manera que, en el momento actual, el pedacito de Universo que podemos

observar,[9] aunque sea en esencia curvo, para nosotros es plano. Algo así como ver el mar desde la costa, que nos parece plano, aunque siga la curvatura de la Tierra. Y es que, tal como parece que runrunea la hormiguita de la figura de la página anterior, … todo es cuestión de perspectiva.

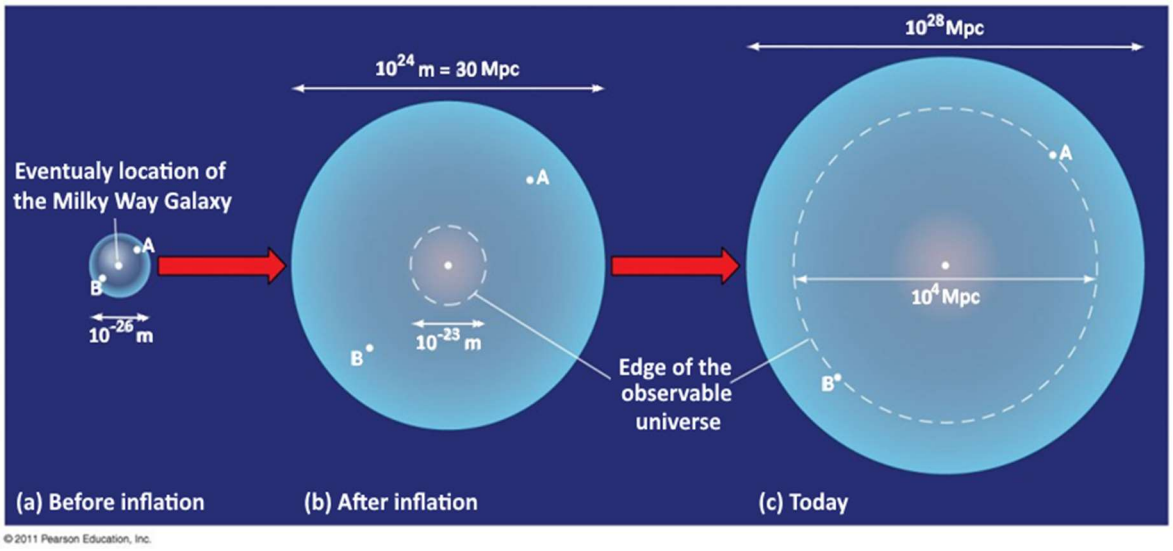
Homogeneidad e isotropía ***(… en este caso no era tan difícil el problema)***

Otra peculiaridad que observamos es que el Universo es homogéneo e isótropo. Eso quiere decir que en lo macro tiene las mismas características en todos sus puntos, por ejemplo su densidad, y que además vemos lo mismo miremos hacia donde miremos desde cualquier punto de observación.[10] Sí, hay estrellas y galaxias, pero perdidas y diluidas en los inmensos vacíos cósmicos, aunque nos parezcan masas dignas de titanes. Si nos fijamos en el conjunto del Universo observamos que la temperatura es prácticamente igual en todos sus puntos: 2,275K. Los fotones de fondo que nos vienen por la derecha provenientes de hace 13.800 millones de años, la edad del Universo, son de la misma longitud de onda -la misma energía, la misma temperatura- que los fotones de hace 13.800 millones de años que nos vienen por la izquierda, o por arriba, o por abajo ¿Por qué la temperatura es prácticamente igual en todos los lados?

Nosotros sabemos que en un volumen cerrado que contiene gas, a la larga todas las moléculas tendrán la misma temperatura pues todas se habrán influido con sus movimientos y choques, unas a otras, hasta que las cantidades de movimiento de todas y cada una de ellas sean en promedio iguales. A esto se le llama *estar en equilibrio termodinámico térmico*. Si en el Universo todos los puntos tienen una temperatura igual es porque han tenido la oportunidad de estar en algún momento juntos intercambiando y equilibrando sus energías. La información que nos trae la luz emitida desde cualquier punto que se encuentre en el borde del Universo salió de él hace unos 13.800 millones de años, justo su edad, que lógicamente es el tiempo que tardó su luz en llegar a nosotros.[11] Pero si miramos a nuestra derecha y luego a nuestra izquierda hacia el fondo profundo del Universo observable, la información que nos llega d cada lado proviene de dos puntos separados el doble de lo que la luz pudo recorrer durante la edad del Universo. La única explicación para que su temperatura sea igual es que la distancia que los separa ahora en algún momento fue mucho menor. Tuvieron que ser colindantes, para con posterioridad separarse a una velocidad superior a la de la luz, la inflación exponencial, y situarse en las posiciones donde hoy los vemos. Sin inflación no se entendería la homogeneidad observada.

La imagen siguiente es muy clarificadora de este tema, conocido también como ***el problema del horizonte***. La imagen recoge tres momentos, (a) justo antes de la inflación, (b) después de la inflación y (c) en el tiempo actual. En todos ellos el punto equivalente al del observador actual se sitúa en el centro del

correspondiente círculo, en realidad una esfera. Antes de la inflación, otros dos puntos A y B estuvieron tan próximos que pudieron llegar al equilibrio térmico.[13] Durante la inflación, A y B se han separado tan rápidamente que después de la expansión exponencial aún seguían en equilibrio térmico. En el momento (b) de la figura, el observador habría perdido de vista ambos puntos ya que a la luz de A o B aún no le habría dado tiempo a recorrer el espacio expandido, quedando fuera del universo observable del momento.[14] Pero en el actual, a la derecha de la imagen, sí que son visibles, y entonces el observador que ve llegar la luz de A y B se puede dar cuenta de que las características térmicas de los dos puntos son las mismas.

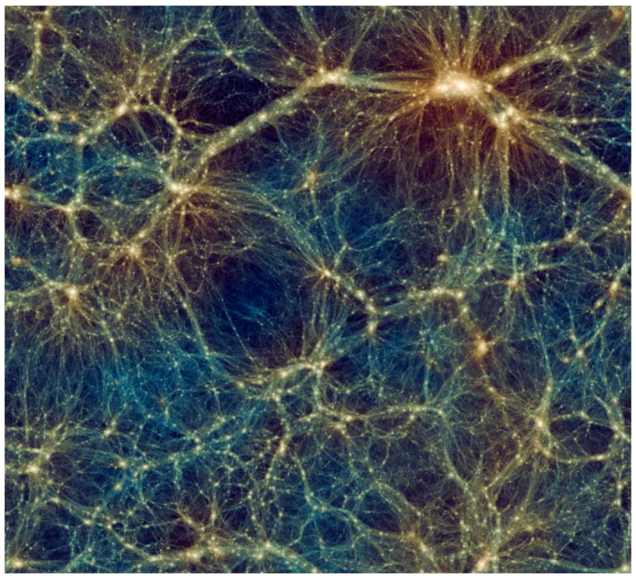


Explicación al problema del horizonte gracias a la inflación. Se ha dibujado esquemáticamente el borde del Universo observable y el del que podemos pensar que sea el total[12] *(Imagen del libro "Astronomy today",pag 703, Eric Chaisson y Steve McMillan, ⓕ fair use)*

La imagen anterior es muy clarificadora de este tema, conocido también como ***el problema del horizonte***. La imagen recoge tres momentos, (a) justo antes de la inflación, (b) después de la inflación y (c) en el tiempo actual. En todos ellos el punto equivalente al del observador actual se sitúa en el centro del correspondiente círculo, en realidad una esfera. Antes de la inflación, otros dos puntos A y B estuvieron tan próximos que pudieron llegar al equilibrio térmico.[13] Durante la inflación, A y B se han separado tan rápidamente que después de la expansión exponencial aún seguían en equilibrio térmico. En el momento (b) de la figura, el observador habría perdido de vista ambos puntos ya que a la luz de A o B aún no le habría dado tiempo a recorrer el espacio expandido, quedando fuera del universo observable del momento.[14] Pero en el actual, a la derecha de la imagen, sí que son visibles, y entonces el observador que ve llegar la luz de A y B se puede dar cuenta de que las características térmicas de los dos puntos son las mismas.

Estructura de la materia observada ***(… ese sí era un problema difícil, al que parece que le hemos cogido el tono)***

Hay otro misterio que también parece que nos puede aclarar el proceso de expansión exponencial del Universo, todo gracias a la mecánica… según nuestra teoría… que siguió el campo inflatón. Hemos comentado en el capítulo anterior cómo a lo largo de su recorrido hacia una situación de mínima energía en el campo inflatón el Universo se iba expandiendo. A la vez, se iban generando en los puntos de su tejido fluctuaciones cuánticas que los dejaban energizados. Al principio estas fluctuaciones eran muy potentes, muy energéticas, y más tarde más atemperadas, lo que pudo configurar en el tejido espacio/temporal un bosque apretado de "púas" energéticas de fluctuación cuántica. El gigantesco estiramiento inflacionario en un factor de 10^{30} supuso necesariamente la separación y atenuamiento de estas "púas" en el mismo factor. Las grandes ondas en un vaso de agua se convirtieron en ligero cabrilleo de un océano.



Simulación de la estructura del Universo, Proyecto UCHUU[15] (imagen, CESIC, ⓒfair use)

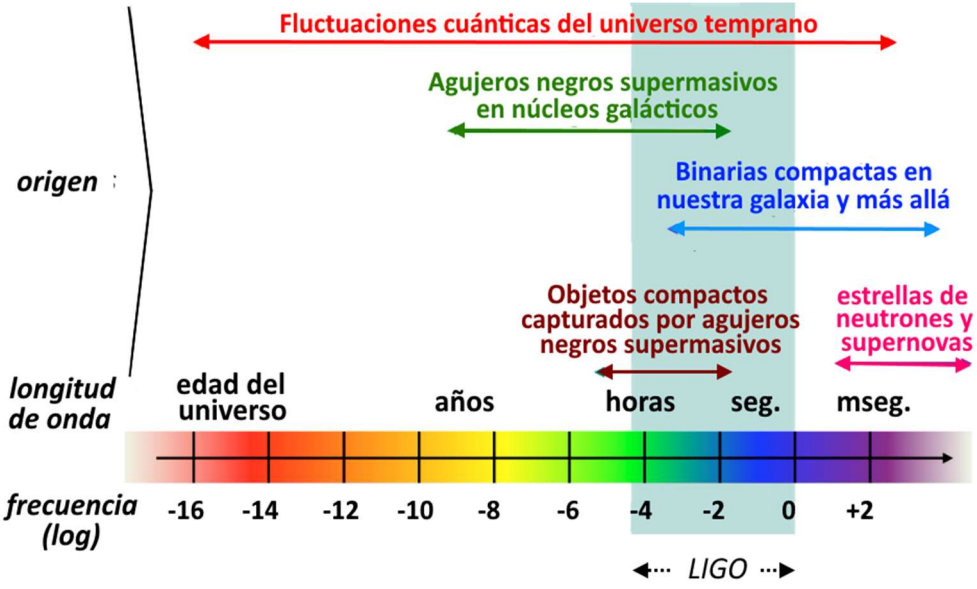
El Universo se volvió muy, muy homogéneo, aunque tenuemente rizado de energía. Imagen sutil pero muy definitiva para lo que pasó en el futuro, porque fue ése el factor que condicionó y modeló la distribución casi homogénea del nuevo mundo de partículas aparecido tras el recalentamiento, de forma que fue el germen por el que se pasó de la homogeneidad perfecta a los racimos de materia que hoy en día observamos mirando al cielo de nuestras noches. Las ligeras anisotropías debidas a las diferentes energías gestadas en las fluctuaciones cuánticas, atemperadas por la inflación, fueron suficientes para crear un potencial gravitatorio que ordenó a la materia con el patrón que

observamos hoy en la estructura de estrellas y galaxias. Cosa que ya analizaremos, por supuesto, en capítulos posteriores.

¡Qué grande es la inflación! Cuántos interrogantes planteados en nuestras observaciones adquieren un sentido bajo su luz. La idea nos funciona, nos cuadra con lo que vemos y medimos. Pero no deja de ser una teoría escondida en la profundidad de una fosa energética del calibre de la de las Marianas[16] que hoy por hoy nos es inalcanzable. Sin embargo no nos rendimos, porque aún nos quedan recursos en el tintero. Una tenue esperanza viene a través de ***las ondas gravitatorias***.

Ondas gravitatorias *(… y llegaron unas posibles súper heroínas)*

¿Qué es eso de *ondas gravitatorias*? Copio de Wikipedia: "*En física, una* ***onda gravitatoria*** *es una ondulación del espacio/tiempo producida por un cuerpo masivo acelerado"* y que viajan a la velocidad de la luz, añadiremos. Por analogía, diríamos que aparecen de igual modo que las ondas electromagnéticas se crean por cargas eléctricas en movimiento. Incluso un objeto como nuestra Tierra envía ondas gravitatorias mientras orbita alrededor del Sol. Pero son tan pequeñas que se vuelven imposible de medir. Solo a modo de comparación: la radiación gravitacional total de la Tierra es de alrededor de 300 W. Esta energía emitida es extremadamente pequeña en comparación con otras formas de radiación o interacción de la Tierra, como la radiación electromagnética (por ejemplo, la luz solar reflejada y radiación térmica) que es del orden de 10^{17} W.



Espectro de las ondas gravitatorias (Imagen modificada de NASA Goddard Space Flight Center, dominio público)

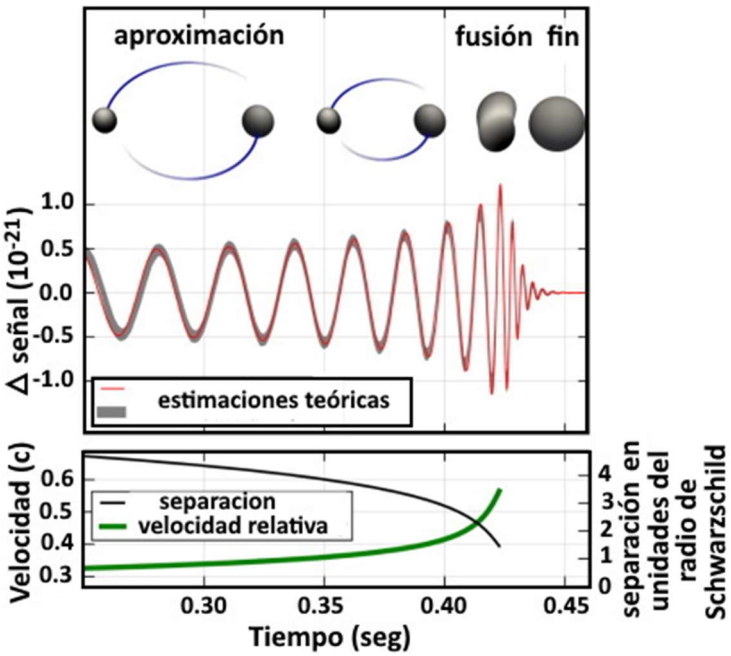
La tipología de las ondas gravitatorias es variada y depende de lo que las cause:

- Ondas gravitatorias continuas, que surgen, por ejemplo, debido a la rotación de estrellas de neutrones. Las ondas tienen entonces una frecuencia y amplitud casi constantes.
- Ondas gravitatorias espirales binarias compactas. Estos se crean durante las colisiones de dos cuerpos extremadamente masivos, por ejemplo, agujeros negros. La duración de estas ondas es del orden de segundos.

- Ondas aleatorias provenientes del espacio desde todas las direcciones. Sus fuentes pueden ser muy diferentes.

- Ondas gravitatorias no convencionales que se diferencian de todas las observadas porque son provocadas por fenómenos cósmicos aún no conocidos.[17]

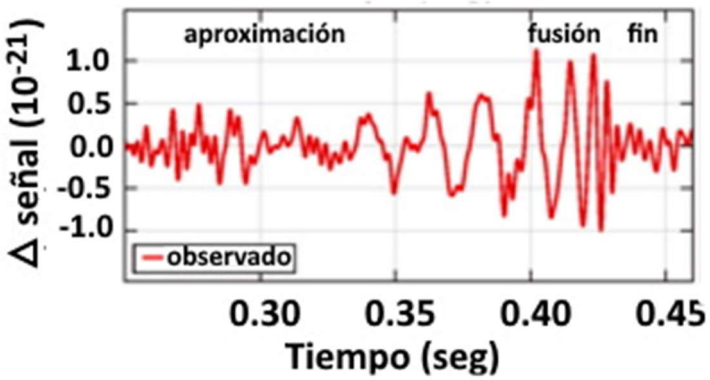
Einstein predijo su existencia a través de sus ecuaciones y hasta hace poco sólo disponíamos de evidencias indirectas de ellas, como el decaimiento del periodo orbital observado en un púlsar binario que no podía ser producido de otra manera que al perder energía por la emisión de ondas gravitatorias. Pero en 2016 el experimento LIGO[18] nos dio una alegría al detectar unas ondas gravitatorias, GW150914, de unos cientos de hercios producidas durante el choque y posterior fusión de dos agujeros negros, hace ahora 1.400 millones de años. La frecuencia de la onda gravitatoria es el doble de la frecuencia orbital de los agujeros.



(Imagen de la onda gravitatoria GW150914, modifica de [19], fair use)

La imagen anterior dibuja alguno de los resultados del análisis teórico de la onda gravitatoria GW150914 resultante de la fusión de dos agujeros negros.

Por Δ señal se indica la diferencia de deformación detectada en ambos brazos del detector LIGO en las tres etapas del evento: aproximación, fusión y fin del anillo. Impresiona la precisión tecnológica de los detectores capaces de "visualizar" diferencias, para frecuencias entre 50 y 1.000 Hz, del orden de 10^{-22} entre las dos mediciones. Eso es más o menos equivalente a medir un cambio en la distancia a la estrella más cercana de una décima parte del ancho de un cabello humano. También se muestran la separación (en radios de Schwarzschild,[20] $2GM/c^2$) y la velocidad (en fracción de la velocidad de la luz) de los agujeros negros, y cómo cambian a medida que se desarrolla el evento de fusión. Y la que sigue es la señal real.



(Imagen: ver nota 22, ⓕ fair use)

En 2017 un nuevo gran paso: la detección de las ondas gravitatorias resultante de la fusión de dos estrellas de neutrones a 130 millones de años luz de la Tierra. En este último caso con una GRAN ventaja añadida… estos cataclismos cósmicos provocan una emisión de rayos gama de alta energía que han podido ser detectados con nuestros telescopios ópticos, lo que va a permitir analizar un evento gracias no solo a su "imagen" fotónica, como hasta ahora, sino también gracias a su "sonido" gravitatorio. Con la gran curiosidad de que las ondas de luz llegaron 1,7 segundos más tarde que las gravitatorias. Después de todo la materia es transparente a las ondas gravitatorias ¡pero interactúa continuamente con la luz! Sea cual sea la respuesta a esta "curiosidad" no se puede negar que un nuevo sentido ha entrado en juego en la Cosmología.

Al inicio del capítulo ya explicamos cómo se pudo desarrollar el cambio de estado que sufrió el Universo, aquel que llamamos *recalentamiento*. El proceso de creación de materia debió ser tan violento, con unas partículas chocando a velocidades relativistas, que provocaría un gigantesco tren de ondas gravitatorias generadas por la energía perdida en esos choques. Se supone que la energía que se desvió hacia la creación de estas ondas pudo llegar a ser del orden de una millonésima de la energía total en juego durante el recalentamiento. Al igual que una piedra alborota la superficie del estanque

esculpiendo un tren de olas, la súbita aparición de tanta materia alborotó el tejido espacio/temporal del Universo. Al ser la gravedad una interacción tan débil -comparada con la fortaleza de las otras tres fuerzas fundamentales conocidas-, las ondas del Big Bang pudieron desacoplarse del plasma de partículas y energía, propagándose por el espacio, literalmente arrugando el tejido espacio/temporal, a velocidades cercanas a la de la luz. De forma que en estos momentos de tranquila lectura aún lo deben estar haciendo, llevando en sus lomos la información de lo que pasó durante el recalentamiento.

Como ocurre en cualquier movimiento ondulatorio, las características de las ondas dependen del sistema físico en donde se crean. Teorizando con las propiedades físicas del Universo en el momento en que se generó el mar de ondas gravitatorias, y a pesar de que desde aquel momento el universo se ha estirado en un factor de 10^{26}, se ha podido llegar a la conclusión de que hoy las podríamos observar con un pico en el espectro de frecuencias entre docenas de kilohercios y el gigahercio[21] dependiendo de la escala de energía a la que ocurrió el proceso de recalentamiento del universo posterior a la inflación. El descubrimiento de dicho fondo abriría una nueva ventana al universo primitivo. Estaríamos viendo cómo era el universo 10^{-32} segundos después de haberse iniciado[22]

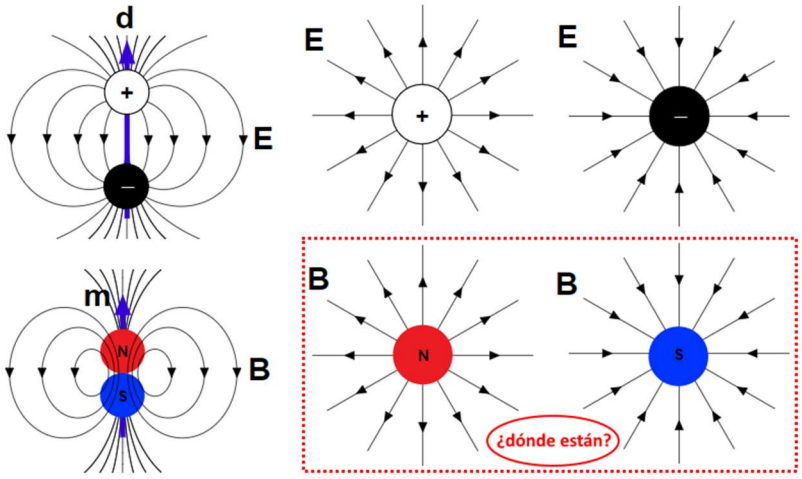
Así que ahí hay que buscarlas, y además esperando ver un espectro de distribución espacial caótico y turbulento, como corresponde a sus orígenes. Algo muy distinto al suave espectro de las ondas de la radiación de fondo de microondas emitidas mucho más tarde, 380.000 años tras el Big Bang. A pesar de la homogeneidad de estas últimas, quizás también podamos encontrar en ellas pistas indirectas de las ondas gravitatorias generadas durante el recalentamiento. Hablaremos de la radiación de fondo de microondas cuando describamos su correspondiente momento cronológico.

Monopolos magnéticos (… ***la gran incógnita o el gran bluf*****)**

¿Por qué hay cargas eléctricas, positivas o negativas, y no hay cargas magnéticas, polos norte o polos sur individuales? ¿por qué las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell dan una perfecta simetría para el campo eléctrico y no para el magnético?[23] ¿por qué se parecen tanto las ecuaciones de Maxwell adaptadas a una simetría que dé monopolos magnéticos?[24] Todas esas preguntas no tienen más valor que el que concede el viejo axioma de los físicos acerca de las ecuaciones bellas.

Lo que es cierto es que si el universo primitivo hubiera sido muy caliente se habría producido una gran cantidad de monopolos magnéticos, una especie de "carga magnética" estable y pesada, propiedad del campo magnético, equivalente a la carga eléctrica propia del campo eléctrico. La teoría de la GUT

predice una serie de partículas pesadas y estables que no se han observado en la naturaleza, tales como el monopolo magnético o las famosas X e Y. Las estimaciones más sencillas muestran que el número de monopolos pronosticados tuvo que ser muy grande, y como eran de gran masa, en reposo por lo menos de 10^{15} GeV, su cuantiosa energía total tuvo que influir en la expansión del Universo haciéndolo tempranamente cerrado, lo que quiere decir que tendría que haber colapsado en un *big crunch* hace muchísimos años.[25] Lo cual es evidente que no ha sido así. Por otro lado, tuvo que haber monopolos en tan gran número y de forma compatible con lo que se observa en el momento actual: sorprendentemente ninguno. Quizás los monopolos se desintegraron con sus correspondientes "anti" en los momentos iniciales de alta energía. Quién sabe. Quizás nuestra física es incompleta y nunca han existido. A todo este galimatías se le conoce como ***el problema del monopolo***.[26]



(derecha) Un par de cargas de cada campo, eléctrico E y magnético B, se dejan ver gracias a sus líneas de campo, pero ¿cuál es la diferencia? Existen cargas eléctricas individuales, + y -, pero no sabemos de monopolos magnéticos independientes N y S. Sólo los conocemos formando una unidad: son nuestros imanes (Imagen modificada de la red, Maschen, dominio público)

Si se hubiera producido un periodo de inflación con anterioridad al momento energético en el que se hubieran podido producir los monopolos magnéticos tendríamos una posible solución a este problema: los monopolos se hubieran separado entre sí a medida que el Universo se iba expandiendo a sus pies, lo que hubiera reducido su densidad en muchos órdenes de magnitud. De nuevo ¡qué grande es la inflación! Incluso en el subconjunto de la hipótesis y la teoría.

Vamos a ir acabando, anunciando el tema del próximo capítulo que dedicaremos a hablar de cosas que, aunque teóricas, nos van a decir mucho acerca de los personajes que habitaban aquellas "oscuras" edades. Vamos a hablar de materia y de antimateria.

Acerca de los monopolos

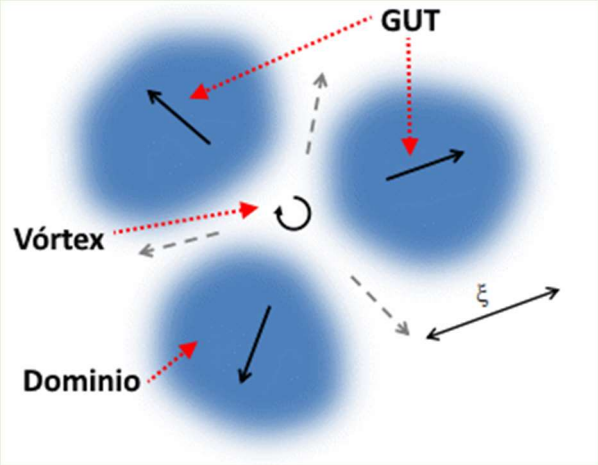
Realmente no se tiene ni idea de cómo pueden nacer los monopolos, cual es el proceso que los gesta. El universo primitivo era muy caliente. Si hubiera sido lo suficientemente caliente quizás la simetría GUT no se habría roto inicialmente por lo que el campo GUT hubiera permanecido en su falso vacío con un valor cero. Pero el Universo se expandía y se enfriaba, y cuando cumplió los 10^{-35} segundos de vida se produjo un cambio de fase, una rotura de simetría. Tras esta transición de fase el campo GUT se volvió distinto de cero y con una dirección determinada aleatoria ya que es un vector. Como estaba obligado a buscar un mínimo de energía, a la larga la dirección del vector tendería a ser la misma en todas partes. Sin embargo la transición duró un tiempo finito, lo que condicionó las cosas.

Recordemos que según nos dice la relatividad la información no puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Si durante la fase de rotura consideramos dos puntos en el espacio A y B que están tan separados que la información de uno no puede llegar al otro antes de que se complete la transición, habrá que suponer que en cada uno de esos dos puntos se habría podido "elegir" la dirección del campo GUT que plazca, independientemente el de uno del del otro. Y como debido a la simetría todas las direcciones eran igualmente probables, tendremos que pensar que al igual que en aquellos dominios donde la luz pudo llevar información la dirección tenía que ser uniforme, también podremos pensar que en los dominio situados en distancias más alejados, donde en conjunto no se había producido el contacto de información, las direcciones del vector del campo serían diferentes, aleatorias y sin correlación. El universo contenía casi un infinito de dominios en cada uno de los cuales la dirección del vector del campo sería distinta.

Sin embargo no acababa todo ahí. El campo GUT tenía que ser continuo, no podía tener discontinuidades en ningún punto, por lo que en aquellas zonas colindantes entre dos dominios contiguos con vectores no paralelos se tendrían que ir interpolando suavemente sus valores y direcciones entre ellos. Aunque no es todo tan sencillo. Imaginemos un punto en donde se tocan más de dos dominios, tres o más. En ese caso, el campo no podría interpolarse continuamente entre los cuatro dominios a no ser que se adoptara una solución especial en el punto medio común. Podría comportarse ahí como un vórtex girando.

Esta es la solución del monopolo de 't Hooft-Polyakov en la que en el vórtex el vector campo tuviera un valor fijo, aunque apuntando en diferentes direcciones, todas opuestas a un origen común. En términos matemáticos, en la zona común el campo depende de la posición y está orientado de manera

radial: siempre opuesto a un origen común. Esto crea un vórtice o estructura espacialmente definida, donde el campo magnético no se desvanece, un grumo de energía localizado en un pequeño volumen cerca del origen (ver la última imagen del capítulo donde se representan las líneas de fuerza del campo magnético). Y como según la teoría de la relatividad la energía es masa, eso significa que en el origen central del vórtex tiene que existir una masa localizada, en otras palabras, una partícula. ***El monopolo****.*



La imagen anterior dibuja un ejemplo bidimensional de lo dicho arriba (mecanismo Kibble). El campo GUT es aleatorio a distancias mayores que la longitud de correlación ξ, aquella en que la luz proporciona causalidad. Por lo tanto, podemos imaginar que el universo consta de dominios de tamaño ξ, cada uno con una dirección de campo Higgs aleatoria pero más o menos uniforme (flechas sólidas). En el centro se produce un vórtex ¿un monopolo? El campo se interpola continuamente entre cualquier par de dos dominios (flechas discontinuas), pero donde se encuentran tres dominios o más, es posible que no pueda hacerlo sin desaparecer en el medio. En ese caso se forma un defecto topológico (un vórtice)[26]

Algunos apuntes sobre la métrica y la geometría cosmológica

La expansión métrica del espacio es una pieza clave de la ciencia actual para comprender el universo, a través del cual el propio espacio/tiempo es descrito por una métrica que cambia con el tiempo, de tal manera que las dimensiones espaciales parecen crecer o acortarse según el universo se hace más joven o viejo. La solución estándar de la cosmología tiene fundamento y emana de su métrica, que condiciona la descripción de la geometría del espacio/tiempo.

La métrica define de qué forma se puede medir una distancia entre dos puntos cercanos en el espacio, en términos de sus coordenadas, por lo que es lo que

nos va a permitir calcular distancias en un espacio y, además, a construir y calcular áreas, volúmenes, ángulos, etc. Es decir, en cierto sentido la métrica es la llave maestra de la geometría de un espacio.

En un espacio Euclidiano de tres dimensiones espaciales la distancia que une dos puntos sigue la ecuación base de la ***métrica euclidiana****:*

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

que es invariante ya que midas esa distancia desde donde la midas siempre tendrá que salir lo mismo. Entre Madrid y Buenos Aires hay exactamente 10.045,08 kilómetros en línea recta, aunque lo midas desde Sebastopol o desde el salón de tu casa. Con esa métrica el tiempo no interviene, va a su aire e independiente. Como le gustaba a Newton.

Pero no es lo mismo en un espacio/tiempo donde se asienta la relatividad especial y en donde dos eventos no están sólo separados por el espacio sino también íntimamente separados por el tiempo. La métrica relativista también es una invariante, la midas desde donde la midas e independiente del momento que la midas, y está expresada de la siguiente forma:

$$ds^2 = (c.dt)^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

lo cual viéndolo con ojos de Pitágoras no deja de ser más que el cuadrado de la "distancia" entre ***dos eventos****, cada uno en su lugar (x,y,z) y su distancia temporal (c.t). Esta métrica es la que se denomina* ***métrica de Minkowski.***

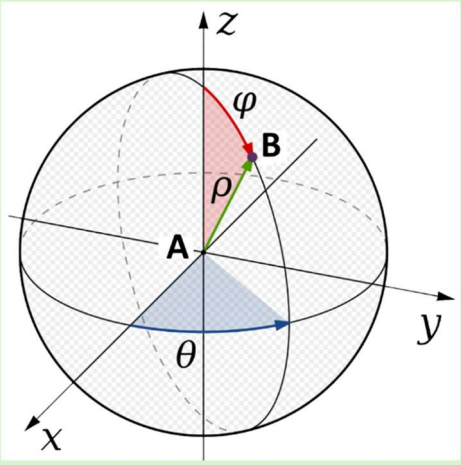
Es curioso, e incluso contraintuitivo, cómo ds^2 puede llegar a ser negativo, circunstancia que se daría cuando el recorrido espacial entre los dos eventos superara al temporal necesario: se trata de trayectorias entre dos eventos espaciales A y B de tal forma alejados en el espacio que incluso la luz no hubiera tenido tiempo para conectarlos. Eso supone que entre ellos no puede existir nunca una relación causal. Por el contrario, si ds^2 es positivo la distancia recorrida por la luz en el intervalo AB es siempre mayor que la distancia espacial entre los eventos que nos interesan, por lo que este caso representa las trayectorias de los cuerpos materiales en el espacio/tiempo «hacia el futuro». En el caso que ds^2 sea cero, las trayectorias (porque puede haber infinitas trayectorias para ir de A a B) sólo se pueden concretar a través de perturbaciones del espacio/tiempo que se muevan a la velocidad de la luz: en el mismo instante que nace el evento A, se desplace espacialmente por donde se desplace, tiene que llegar y coincidir con el naciente evento B.

La relatividad general de Einstein establece que la curvatura local del espacio/tiempo es proporcional a la densidad de masa y energía, lo que exige

una expresión de la geometría más compleja que las expuestas anteriormente ya que debe incorporar el concepto de curvatura.

En el caso de un universo homogéneo e isótropo hay que aplicar una nueva ***métrica****, la de* ***Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker*** *o* ***modelo FLRW****, en donde no sólo aparece la curvatura k sino también el factor de escala de la expansión a(t). En coordenadas esféricas será de tal manera:*

$$ds^2 = (c\,dt)^2 - a^2(t)\,[d\rho^2 / (1-k\,\rho^2) + \rho^2\,(d\theta^2 + \sin^2\theta\,d\phi^2)]$$



La geometría del universo y su contenido están profundamente entrelazados. Resolver este problema significa comprender cómo las leyes físicas que gobiernan las partículas, la energía y la gravedad producen el universo que observamos, con su estructura y evolución dinámica. Este es el núcleo de la cosmología moderna y de nuestra búsqueda por entender el universo en su totalidad.

¿Por qué la velocidad de la luz es una constante?

La luz, más en concreto las ondas electromagnéticas, son excitaciones de los campos electromagnéticos que se mueven acopladas de forma sinusoidal y manteniendo una perpendicularidad entre los dos tipos de excitaciones. No es un capricho, así las definen las ecuaciones de Maxwell. Fue la gran sorpresa del siglo XIX. Dichas ecuaciones nos llevan a la siguiente velocidad de propagación de esas ondas:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{\mu 0 \varepsilon 0}}$$

siendo μ_0 la permeabilidad magnética en el vacío (una constante) y ϵ_0 la permitividad eléctrica en el vacío (otra constante). Si sustituimos los valores de

permeabilidad y permitividad obtendremos que la velocidad de las ondas electromagnéticas, la de la luz, en el vacío es aproximadamente 3×10^8 m/s .

NOTAS DEL CAPÍTULO 06:

1. Con relación a la finitud o no del Universo hay que pensar que toda nuestra experiencia sobre él y los cálculos que más nos aproximan a lo que vemos, están basados en el principio cosmológico de un universo homogéneo -igual en todos sus puntos- e isotrópico -en cualquier dirección que miremos vemos lo mismo-. Si esto es así el Universo no podría tener bordes en donde se perdiera la homogeneidad. Luego si hay que apostar yo lo haría a la baza de finito y cerrado como una esfera.
2. Para saber un poco más acerca de cómo interactúan teóricamente los campos cuánticos y de qué forma a partir de estas interacciones surgen las partículas, recomiendo leerse los magníficos artículos del blog del físico teórico Matt Strassler, "*Of particular significance*", de los que selecciono dos relacionados con lo que hablamos en este momento en nuestra serie:
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/7-particles-are-quanta/]
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/8-how-particles-and-fields-interact/]

3. En el texto aparece la mención a partículas escalares o asociadas a campos vectoriales. Eso tiene estrecha relación con una propiedad interna que surge en el mundo cuántico conocida como espín [*giro en inglés*] que proporciona una medida del momento angular intrínseco de toda partícula. A principios del siglo XX cuando se descubrió el espín, se le llamó así porque la ecuación matemática que describía el comportamiento de esta propiedad de las partículas se parecía a la que describía también un cuerpo rígido clásico que giraba sobre sí mismo. Aunque, en contraste con la mecánica clásica donde el momento angular se asocia a la rotación de un objeto extenso, el espín es un fenómeno exclusivamente cuántico que no se puede relacionar de forma directa con una rotación en el espacio.
   En general siguen esta norma para fermiones y bosones

$$s_{fermión} = (n+1/2)\,\hbar \quad ; \quad s_{bosón} = m\hbar$$

siendo s el número de espín de la partícula y la constante de Planck dividida por 2π. Los bosones tienen espines enteros, mientras que los fermiones lo tienen fraccionario. Un bosón escalar, como el de Higgs, es un bosón cuyo número de espín m es igual a cero. El fotón, un bosón vectorial, tiene un número de espín m igual a una unidad.

4. Para más detalle de todo lo anterior ver este artículo de la revista Investigación y Ciencia:
[http://projects.ift.uam-csic.es/outreach/images/articles/ventana-bellido.pdf]
5. Lo cual no implica una baja densidad de energía: la de Planck es del orden de 10^{94} gr/cm^3.
6. Para más detalles podéis ver este artículo:
[http://www.astronomia.net/cosmologia/lambda.htm]
7. Aquí propongo unos enlaces en donde poder ampliar de forma muy didáctica qué quiere decir esto de la métrica en cosmología. La verdad es que el primer artículo está dedicado al motor de Alcubierre… o cómo moverse por el tiempo sin necesidad de agujeros de gusano o similares.
[https://cuentoscuanticos.wordpress.com/2016/11/23/el-motor-de-curvatura-de-alcubierre-viajes-hiper-rapidos-en-relatividad-general/]
[https://fisicalandia.com/relatividad/minkowski/]
8. Es tan sencillo como despejar de la ecuación de Friedmann

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda}{3} - K\frac{c^2}{a^2}$$

la densidad ρ con la hipótesis de universo plano, k=0, y con constante cosmológica nula, ∧=0. El resultado es

$$\rho_c(t) = 3H^2(t)/8\pi G$$

9. Aquel en donde se encuentran los objetos que vemos… y que vemos porque se encuentran a una distancia tal que la luz que emiten nos puede llegar. Los fotones emitidos por los más lejanos se han movido a 300.000 km/seg a lo largo de los 13.800 millones de años de historia del Universo, incrementados por lo que se ha expandido el tejido del Universo desde entonces. Lo que nos da una esfera cósmica observable de unos 1,37 x 10^{26} metros de radio.
10. El universo, tal como se observa hoy, está lleno de estructuras intrincadas y complejas. Mirando a escalas de longitud del tamaño de un planeta individual (~10^{-10} pc, pársec), del sistema solar (~10^{-3} pc), de la galaxia (~10^{-1} Mpc) o incluso cúmulos de galaxias (~10 Mpc), parece evidente que hay grandes desviaciones del valor promedio de la densidad de energía . Una medida de la desviación de la homogeneidad en cualquier posición viene dada por la cantidad δ, donde

$$\delta \equiv \delta\rho / \bar{\rho} \equiv (\rho - \bar{\rho}) / \bar{\rho}$$

En escalas muy pequeñas (planetarias), los contrastes de densidad pueden ser tan grandes como $\delta \sim 10^{30}$. Sin embargo, a medida que se observa en escalas cada vez más grandes se constata que el contraste de densidad de un punto típico en el espacio es mucho más pequeño. Cuando se examinan escalas de 100 Mpc (3×10^{19} km), o incluso mayores, se encuentra que los contrastes de densidad son casi siempre muy pequeños de forma que se llega a valores $\delta << 1$.

De "*Cosmological perturbations and their effects on the universe: from inflation to acceleration*", Ethan R. Siegel diciembre de 2006.
[https://inspirehep.net/files/ec1c941296f11deee2c03c1f127ed213]

11. De los que están más lejos no sabemos nada: no podemos verlos, pues la luz no ha tenido aún tiempo suficiente como para llegar hasta nosotros. Está todavía de camino. Este límite es precisamente lo que define el límite del Universo observable.

12. En esta imagen se ha supuesto que el factor de crecimiento del Universo durante la expansión fue de 10^{50} en lugar de los 10^{30} que planteamos a lo largo de los capítulos de este libro, que es lo estimado por el conocido astrofísico y divulgador británico John Gribbin en su libro "*Biografía del Universo*".

13. Esto quiere decir que tanto A como B como el punto Observador igualaron las mismas características termodinámicas.

14. Que en el momento (b) era el producto de la velocidad de la luz, 300.000 kilómetros por segundo, por el tiempo, 10^{-32} segundos, es decir los 10^{-23} metros indicados en la figura.

15. [http://skiesanduniverses.org/Simulations/Uchuu/]

La fosa de las Marianas en el fondo del océano Pacífico occidental, es la más profunda fosa oceánica conocida y el lugar más profundo de la corteza terrestre. 10.994 metros de inmersión.

16. "*Částicové Zoo – gravitony a gravitační vlny*" ("*Zoológico de partículas: gravitones y ondas gravitatorias*"), Dana Tenzler, septiembre 2022.
[https://danatenzler.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=524987]

18. ***LIGO*** es un observatorio de detección de ondas gravitatorias. La sigla proviene de *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (*Observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser*).

19. Imagen extraída de la publicación "*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*", figura 2, B. P. Abbott et al., febrero 2016.
[https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102]

20. El radio de Schwarzschild es una distancia crítica asociada a un objeto masivo. Representa el límite a partir del cual, si toda la masa de un objeto

estuviera contenida dentro de una esfera de ese radio, la velocidad de escape sería igual a la velocidad de la luz.

21. Estas frecuencias se sitúan en el ámbito de las microondas y las ondas de radio. En cualquier caso, una frecuencia muy similar a la del sonido. Los científicos han trasladado una frecuencia a la otra para crear sonidos audibles. En el siguiente enlace podréis escuchar el ruido que hacen dos agujeros negros al chocar. Sorprendente ¿no?
[https://www.youtube.com/watch?v=LBWN8MYeSDk]

22. Véase este artículo para más información.
[https://www.investigacionyciencia.es/blogs/astronomia/17/posts/ondas-gravitacionales-provenientes-de-la-gran-explosin-10299]

23. En el blog El Tamiz encontrareis una breve e interesante serie sobre las ecuaciones de Maxwell.
[https://eltamiz.com/las-ecuaciones-de-maxwell/]

24. En este artículo, "*Introducción a la Teoría de los Monopolos Magnéticos*", capítulo 6, Mauricio Vargas Villegas, 2008, podéis apreciar la ligera diferencia en las ecuaciones de Maxwell que da la simetría necesaria para explicar a los monopolos magnéticos. Y bastante más.
[https://arxiv.org/pdf/0812.0386.pdf]

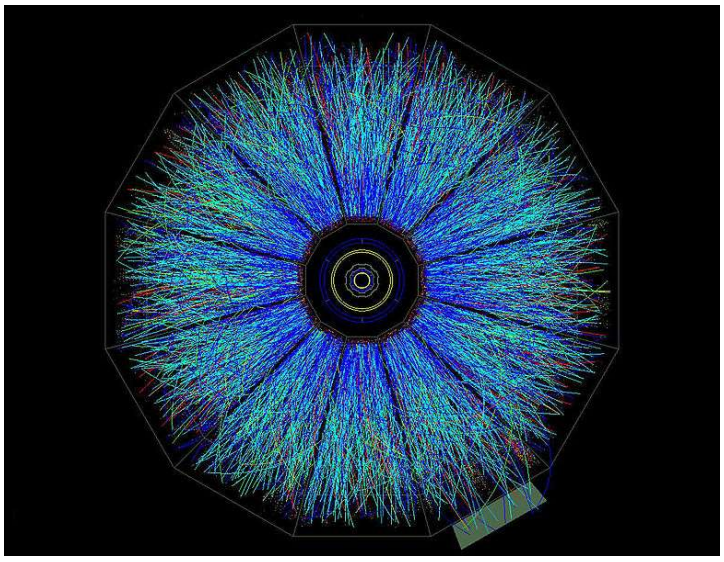
25. Del Gran Colapso o *Big Crunch* hablaremos con más detalle en el capítulo 35.

26. Para una mayor información podéis acudir a "*Introduction to Magnetic Monopoles*", Arttu Rajantie, abril 2012.
[https://arxiv.org/pdf/1204.3077v1.pdf]
A pesar de las dificultades mencionadas parece que sí se han podido observar físicamente monopolos reales, o algo que se comporta como ellos. Lo podéis ver en este artículo: "*Creation of Dirac monopoles in spinor Bose-Einstein condensates*", Ville Pietilä et al., marzo 2009.
[https://arxiv.org/pdf/0903.4732.pdf

07: De materia y antimateria I

En el anterior capítulo salimos de la inflación exponencial con todo un futuro por delante. Llegamos a entender cómo a partir de ella pudo eclosionar un mundo del tamaño de una naranja que existía en sí mismo, acotado por nada. Un mundo en donde violentos vórtices de energía chocaban unos con otros, mientras aparecían y desaparecían los nuevos habitantes del espacio/tiempo, partículas y más partículas desplazándose a velocidades relativistas a lomos de misteriosos campos cuánticos. Tras una brevísima fracción de tiempo la temperatura del Universo había llegado a ser del orden de 10^{26} K, con una energía media que se había situado en la plataforma de 10^{24} eV. Era el tiempo $t = 10^{-32}$ segundos y había todo un universo por delante.

A medida que avancemos por los capítulos de este libro nos vamos a encontrar en nuestro joven Universo con unos personajes que llevan una vida social muy activa y cambiante, ajustándose a las condiciones de temperatura y energía de cada momento. Las leyes que posiblemente actúen en esta física son bastante complejas, aunque creemos entenderlas razonablemente bien. Pensamos que andamos por buen camino ya que lo que vamos deduciendo a partir de ellas se ajusta bastante bien a lo observado.



Fotografía de una colisión entre dos haces de iones de oro que se produjo en el RHIC del Laboratorio Nacional de Brookhaven en USA (2005). Se trata de un plasma de quarks-gluones que pudiéramos asemejar, salvando las distancias energéticas, a lo que había en el Universo cuando tenía una edad de 10^{-12} seg (Brookhaven National Laboratory, CC BY-NC-ND 2.0)

No obstante, mirar directamente a los inicios de este puré de materia y radiación queda aún muy lejos de nuestras posibilidades y quizás exija una nueva física

que englobe la actual del modelo estándar de partículas y que se fusione con la relatividad gravitatoria. La continua expansión que siguió a la inflación iba a llevar al Universo desde un nivel promedio de energía de partida de 10^{24} eV tras el recalentamiento, pasando por 1 eV cuando se formaron los primeros átomos, para continuar hasta el escaso milielectronvoltio de hoy. Nuestro más potente "telescopio regresivo" es el LHC que se zambulle hasta unas profundidades del entorno de los 10^{13} eV, en un mundo 10^{4} veces más pequeño que el protón. Con él podemos reproducir las condiciones del Universo cuando tenía 10^{-12} segundos de vida. Pero no nos podemos remontar más atrás, hasta las condiciones del momento $t=10^{-32}$ segundos cuando el recalentamiento estaba fabricando el paisaje. Y aunque parezca poco, en estos 10^{-12} segundos iniciales invisibles para nosotros, pasaron, o creemos que pasaron, muchas cosas realmente decisivas.

Como ya se ha dicho otras veces, para saber de esta época inicial nos apoyamos en nuestras teorías, en las que confiamos, aunque queden algunos agujeros que aún no sabemos rellenar. Nuestro escudo se llama ***Modelo Estándar de la física de partículas***.[1] El Modelo Estándar es un cuerpo de doctrina física construido a partir de varios participantes: la ***teoría especial de la Relatividad*** y la teoría sobre ***Mecánica Cuántica***.[2] Por desgracia, la gravedad aún no se habla muy bien con esta última y por eso en el edificio no encaja la ***teoría general de la Relatividad***. Es cierto que la posible gravedad cuántica tiene puestas sus esperanzas en un buen número de teorías, o simplemente ideas desarrolladas, como lo son lo que los físicos teóricos llaman supersimetría o la tan mencionada teoría de cuerdas o la de la gravedad cuántica de lazos. Pero ya se verá. Por el momento con el Modelo Estándar tenemos mucho sobre lo que pensar.

Pero este modelo no es completo, hay que darle de comer. No todo es deducción o razonamiento matemático. Hay que alimentarle con datos de entrada tales como las características de las partículas de la naturaleza que se conocen y se han podido medir: sus masas, cargas, espín… En los cálculos también se tienen en cuenta una serie de simetrías que se observan en el Universo y que obligan, en base a ellas, a que ciertos parámetros no varíen -energía, momento, carga…- pase lo que pase.[3] El que los sistemas cuánticos analizados mantengan sus características al verse transformados por alguna de ellas, lleva necesariamente a la existencia de una serie de interacciones entre campos cuánticos que dirigen la forma de relacionarse las partículas entre ellas: la ***fuerza nuclear fuerte*** -desarrollada por la *cromodinámica cuántica*-, el ***electromagnetismo*** y la ***fuerza nuclear débil*** -desarrolladas esas dos últimas en su conjunto por la *teoría electrodébil*-. Observad cómo no entra en el juego la cuarta fuerza de interacción que es la ***gravedad***.

El resultado del Modelo Estándar confirma la existencia de sistemas partícula/onda que conocemos más comúnmente como materia o radiación.

Nos dice también que estos personajes son capaces de interactuar a través de la mensajería realizada por los tres campos cuánticos de fuerzas y del comportamiento que se induce cuando se entrelazan los campos específicos de cada tipo de partícula con los de las fuerzas. Podemos imaginar el proceso al saber cómo aparecen las partículas/ondas. Cualquier excitación energética en un punto de un campo se traduce en una oscilación de este, una onda, que cuando lo hace en su frecuencia fundamental conforma la partícula adherida a este campo. Así, por ejemplo, la excitación del campo electrón engendra un electrón, así como la del campo electromagnético genera un fotón. Y cuando decimos que en una interacción de un electrón se emite un fotón, lo que en realidad sucede es que el campo de electrones interactúa con el campo electromagnético, transfiriéndole energía y cantidad de movimiento, lo que crea una unidad de excitación en el campo electromagnético, su partícula. Las "cosas" que interactúan con un campo pueden interactuar entre sí a través del campo. Por ejemplo, los electrones pueden repelerse intercambiando excitaciones a través del campo electromagnético. De manera similar, las masas se atraen entre sí a través del campo gravitatorio. Todo es consecuencia de que las excitaciones de los distintos campos se han entrelazado en mayor o menor medida de acuerdo con la ***fuerza de acoplamiento*** entre ellos.

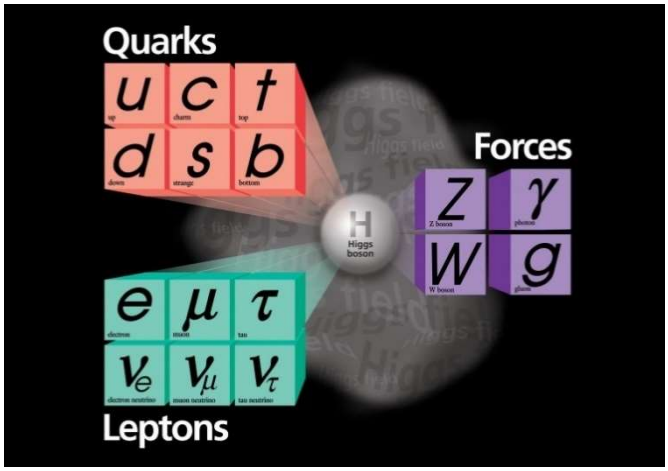
Éste es el proceso general que determina la física -y que se observa aplicada en la química- de nuestro Universo. A partir del mismo momento inicial de nuestra historia. Aunque parece que todas estas explicaciones teóricas nos desvían del camino propuesto, no queda más remedio que hablar de ello para una mejor comprensión de lo que vamos a descubrir. Es su base.

Bajemos a hablar más en concreto acerca de ***las partículas*** haciendo un relato de la nómina de los personajes más elementales que van a estar presentes. Inevitablemente, desde un punto de vista teórico, el número de partículas puede ser infinito, cosa que explico de la mano del premio Nobel de física Roger Penrose.

En su libro "*El camino a la realidad: Una guía completa a las leyes del universo*", hace la siguiente consideración: *"... la partícula y la antipartícula pueden juntarse y aniquilarse mutuamente, convirtiéndose su masa combinada en energía de acuerdo con la expresión $E=mc^2$ de Einstein; recíprocamente,* ***si se introduce energía suficiente*** [y a nivel cuántico según el principio de incertidumbre hay posibilidad de energía a espuertas] *en un sistema localizado en una región apropiadamente pequeña, entonces hay una fuerte posibilidad de que esta energía pudiera servir para crear una partícula junto con su antipartícula. Así pues, con ese potencial para la producción de antipartículas existe siempre la posibilidad de que más partículas entren en la imagen… Por consiguiente, cuando uno trata de llegar a una teoría de partículas relativistas se ve impulsado a ofrecer una teoría en la que* ***existe un potencial para la***

creación de un número ilimitado de partículas." Pero que no cunda el pánico pues, como veréis ahora mismo, nos arreglamos muy bien con unas pocas.

Hasta ahora sólo hemos hablado de un hipotético campo de unificación, el de la interacción GUT[4] con sus bosones X e Y, o de un no menos hipotético campo inflatón y su hipotética partícula el inflatón. Pero como hemos comentado, hay muchos más campos y cada uno de ellos tiene una partícula/onda asociada, su excitación fundamental. Así que hablemos de la panoplia de partículas.[5] El modelo estándar maneja dos tipos: los ***fermiones*** y los ***bosones***. Los primeros son los que van a formar la materia que observamos -los *quarks* y sus subproductos, como el protón o el neutrón, y los *leptones*, como el electrón o los neutrinos-. En cuanto a los segundos, los bosones -el fotón, el gluon…-, diré que son los que van a mediar las interacciones con las fuerzas fundamentales.



Nómina de partículas elementales del Modelo Estándar. Hay que observar cómo el bosón de Higgs, en el centro, no interactúa con los fotones y los gluones, partículas sin masa. Su interacción con los neutrinos no es muy bien conocida. (Imagen: Fermilab, ©fair use)

Es curioso cómo las partículas conocidas de la materia, los fermiones, se agrupan formando familias: tres de quarks y otras tres de leptones, con unas masas situadas a tres niveles progresivos de energía, sin que se descarte el que podamos encontrar más partículas a energías superiores. En cada una de esas familias hay partículas de dos "sabores". Por otro lado están los cuatro tipos de bosones que intermedian en cada una de las fuerzas fundamentales, a los que se les ha unido el higgs, de reciente puesta de largo en sociedad.[6]

Cada partícula tiene su correspondiente antipartícula, su reverso. Pero su reverso solo en aquellas características que puedan tomar valores opuestos, como la carga eléctrica o la dirección de movimiento (sentido de su vector momento lineal), y no en aquello que no acepta varias caras como puede ser la

masa o el espín (momento angular intrínseco). Ello es debido a que, cuando aparezcan a pares partícula/antipartícula a partir de la energía, se supone que se deben conservar ciertos números cuánticos "aditivos", de aquí que se exijan valores opuestos que en el cómputo total puedan anularse. En teoría si a una partícula de materia

a. le cambiamos su carga -***simetría C*** -,

b. le cambiamos sus coordenadas por las opuestas -***simetría P*** -,

c. le hacemos ir en el sentido contrario del tiempo -***simetría T*** -

y después de ello lo que sale es otra partícula que se comporta igual que la partícula primera de materia, habremos conseguido su antipartícula.[7]

Los pares de partículas y antipartículas pueden generarse a través de diversos procesos, siendo posiblemente estos dos que cito a continuación los más frecuentes: pueden *aparecer de forma espontánea a partir del vacío cuántico*; o bien producirse a pares *como resultado del choque de fotones* con una energía conjunta por encima de la equivalente a la masa de las nuevas partículas.[8][9] En ese proceso la energía de los dos fotones se transforma en materia, partícula y antipartícula, según $E = mc^2$. La reacción contraria también es posible y es lo que sucede si tras "nacer" partícula y antipartícula, éstas no se alejan lo suficiente tras su aparición -todo depende de la velocidad de expansión del Universo-: se aniquilarán una a la otra dejando un rastro de radiación.

Fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula

Estas reacciones, como las que se formula arriba, se producen a millones, por lo que parece que estadísticamente se tendrían que producir manteniendo un equilibrio térmico, debiendo contabilizarse las mismas tanto en un sentido como en el opuesto. Si uno de ellos fuera claramente el dominante sólo veríamos partículas que habrían ganado a la radiación, o radiación que habría aniquilado a las partículas. Sin embargo, la energía que observamos en nuestro universo es una mezcla de todo: abundante radiación, que pesa poco en la cesta, bastante menos materia, que pesa mucho, y una pizca infinitesimal de antimateria. Y esto último sí que es raro, ya que o debería haber la misma materia que antimateria, o no debería haber nada ni de una ni de otra. Aunque podríamos postular que esta diferencia viene "de fábrica", es decir, que fuera una característica natural del universo desde su nacimiento.

Lo que observamos hoy en día parece decirnos que hay una partícula de antimateria por cada diez mil millones de partículas de materia, es decir, que su relación de densidades es de 10^{-10}.[10] Dado que cualquier asimetría bariónica primordial habría sido diluida exponencialmente durante la inflación, el dato

observado hoy exige la existencia de una diferencia materia/antimateria durante la época GUT anterior a la inflación del orden de 10^{69}. Este número parece impensable como dato que venga, según lo que hemos denominado, "de fábrica", por lo que se considera más probable que inicialmente la diferencia entre materia y antimateria fuera nula para con posterioridad, y a través de algún proceso físico hoy por hoy desconocido, se generara la asimetría tan grande que se observa ahora. Por eso los físicos se las están ingeniando, sin ningún resultado concreto convincente todavía, aunque de forma esperanzadora, buscando procesos que hubieran podido producir la diferencia materia-antimateria que hoy vivimos.

En el siguiente capítulo continuaremos con el tema de la antimateria hablando del físico ruso Andréi Sájarov, padre de la teoría que resulta ser la biblia para todos los que estudian el misterio poblacional de la materia y la antimateria.

Ideas elementales sobre las teorías de la Relatividad y de la Mecánica Cuántica [2]

1. Teoría de la Relatividad*: Desarrollada en dos cuerpos, el primero conocido como Relatividad Especial y el segundo como Relatividad General.*

La relatividad especial establece la identidad e indisolubilidad del espacio y el tiempo. El hecho de que la velocidad de la luz en el vacío sea constante y que nada pueda moverse a mayor velocidad, según fija el electromagnetismo, lleva en la relatividad especial a conclusiones poco intuitivas, como la de que cuando un objeto se mueva a mayor velocidad con relación a otro que esté inmóvil, al ser observado desde este último el tiempo del móvil transcurre a menor ritmo, se dilata, mientras su longitud en el sentido del movimiento se acorta. Lo cual suscita paradojas como la de los gemelos o que el presente no sea el mismo para todos los observadores o que el tiempo no sea monolítico como lo pensó Newton.

La relatividad general se apoya en el principio de equivalencia que básicamente dice que un campo gravitatorio es exactamente igual que un campo de aceleración, ambos son aspectos distintos de una misma realidad. Las consecuencias asombrosas de aplicar esa idea a que el espacio/tiempo sea uno, llevó a Einstein a afirmar que la materia(energía) deforma el espacio mientras esta deformación influye en el movimiento de la materia.

***2. Mecánica cuántica**: Su nombre proviene del hecho de que la energía no es continua, sino que está cuantificada. Va en pequeños paquetes de valores prefijados. Esa idea llegó a su culmen cuando se llegó a afirmar que en las pequeñas escalas todo se comporta como si fuera un duplo onda/partícula.*

Apoyada en ello la cuántica nos dice que no podemos tener un conocimiento completo y determinado de los objetos, sino sólo de las probabilidades con que las que podemos esperar encontrarlos en cualquiera de los estados en que puedan estar. Estos estados coexisten realmente todos a la vez y sólo conoceremos uno, según su probabilidad de ocurrencia, en cuando intervengamos al objeto. Todo ello dentro de una indeterminación y de una forma aproximada de acuerdo con un criterio que se conoce como principio de incertidumbre de Heisenberg: la exactitud con que podemos determinar una cualidad del objeto esta ligada con la inexactitud de otra cualidad intrínsecamente asociada con la primera, como ocurre con las parejas energía/tiempo o posición/momento lineal (velocidad). Todo ello nos lleva a paradojas como la que encontramos en el hecho real de entrelazamiento cuántico de partículas, lo que implica que, no importa lo alejadas que estén las entrelazadas, cualquier alteración de una afecta instantáneamente a la pareja en lo que parece una violación flagrante de que nada pueda desplazarse a mayor velocidad que la de la luz en el vacío.

En el fondo la cuántica nos dice que el mundo es granulado, aleatorio e interrelacional. De ahí surge todo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 07:

1. Para saber más del modelo estándar sin entrar en demasiadas complicaciones ver la serie "*Cuando un modelo es estándar*" del blog "*Cuentos Cuánticos*".
   [Este es el enlace de la primera entrega de tres: https://cuentoscuanticos.wordpress.com/2011/09/13/cuando-un-modelo-es-estandar-13/]
2. Recomiendo para moverse con una cierta soltura en estos dos campos de la física leer las respectivas series del blog "*El Tamiz*", de Pedro Gómez-Esteban, que tituló como "*Relatividad sin fórmulas*" y "*Cuántica sin fórmulas*".

[https://eltamiz.com/relatividad-sin-formulas/]
[https://eltamiz.com/cuantica-sin-formulas/]

3. Para saber más sobre simetrías acudid a los cuadros específicos de los capítulos 02 y 10.
4. Que debía fijar las interacciones entre partículas en la época de la gran unificación, antes de iniciarse la inflación exponencial preconizada por Alan Guth.
5. Recomiendo de nuevo la serie del blog "*El Tamiz*", "*Esas maravillosas partículas*".
[http://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]
6. El bosón de Higgs, o partícula de Higgs, es una partícula elemental propuesta también en el modelo estándar de física de partículas. Recibe su nombre en honor a Peter Higgs quien, junto con otros, propuso en 1964 el hoy llamado mecanismo de Higgs para explicar el origen de la masa de las partículas elementales. Hablaremos de él en el capítulo 10.
7. O como diría mi admirado Pedro Gómez-Esteban en su blog "*El Tamiz*": "…si coges un antiprotón y lo filmas en una película, le cambias la carga, pones el Universo al revés y luego la película hacia atrás, es indistinguible de un protón".
[https://eltamiz.com/2007/05/26/esas-maravillosas-particulas-el-proton/]
8. He subrayado la palabra pares con toda la intención ya que hay múltiples procesos en el Universo actual o en nuestros laboratorios en los que se generan partículas de antimateria individuales. Un ejemplo clásico lo observamos en la cascada de reacciones que se provoca al penetrar un rayo cósmico en la atmósfera terrestre.
9. Además de los dos procesos mencionados en el texto (fluctuaciones del vacío y colisiones de fotones), existen varios otros mecanismos que pueden generar pares de partículas y antipartículas: producción en campos eléctricos intensos, desintegración o colisión de partículas masivas, interacciones con campos magnéticos extremos… Estos procesos son fundamentales en la física de partículas, la cosmología, y la astrofísica, y ocurren en una amplia variedad de contextos, desde aceleradores de partículas hasta el universo temprano o el entorno extremo de los agujeros negros.
10. Realmente según la publicación referenciada más abajo de Davidson, Nardi y Mir, parece que está en el siguiente rango de $0.16 < \eta \times 10^{10} < 6.2$, siendo η un parámetro que cuantifica la relación de densidades de bariones y antibariones, y que es conocido como el parámetro de asimetría.
[https://arxiv.org/pdf/0802.2962v3.pdf]

08: De materia y antimateria II

Continuamos en ese capítulo la materia iniciada en el anterior, en donde se avanzaba que iba a hablar del científico que planteó las bases técnicas sobre las que se debía apoyar cualquier estudio sobre la antimateria.

Hace más de 40 años, el físico Andréi Sájarov formuló los principios fundamentales que la Física debía cumplir para explicar la asimetría entre partículas y antipartículas. Estos principios, todavía vigentes en la actualidad, proporcionan una base teórica para entender la abrumadora preponderancia de materia sobre antimateria en el universo, con una proporción aproximada de diez mil millones de partículas de materia por cada partícula de antimateria.

En líneas generales dijo que

[1ª] a altas energías se debían dar procesos simétricos de generación de bariones y de antibariones, por los que se crearían el mismo número de unos que de otros, formándose así un universo numéricamente equilibrado respecto a ambos tipos de partículas. Sin embargo**,**

[2ª] entre todas estas interacciones alguna, o algunas, tenían que violar este equilibrio. Aunque esta violación tenía que ser muy ligera, debido al hecho de que las interacciones que violan el número bariónico podrían intervenir en la desintegración del protón. Y sabemos, o creemos saber, que el protón es súper estable.[1] En particular con la segunda condición Sájarov se refería a las reglas de la simetría CP -de carga y de inversión especular espacial-: la C cambia cargas positivas por negativas y viceversa, y la P coordenadas espaciales positivas por negativas, como si se le diera una vuelta de calcetín al Universo.[2]

El cumplimiento de ambas simetrías combinadas implica que, en los procesos de creación o transmutación de partículas, la probabilidad de que ocurra una reacción con una partícula específica es idéntica a la probabilidad de que dicha reacción involucre a su antipartícula. Ambos procesos son posibles y poseen propiedades análogas, así como las mismas probabilidades de ocurrencia. Es fácil de entender entonces que, si se cumplen ambas simetrías combinadas, lo único que harían las interacciones que modifican a los bariones es cambiar elementos de “estantería” -unos bariones por otros, materia por antimateria-, aunque siempre manteniendo el equilibrio entre unos y otros. Pero si esto no se cumple, que es el postulado de Sájarov, podremos pensar que hay procesos más probables que otros, más materia que antimateria. Y eso es la bariogénesis.[3]

Pero Sájarov aún pensó en una tercera condición:

[3ª] la bariogénesis se tuvo que producir en algún momento en que el Universo no estuviera en una situación de equilibrio térmico. En una situación de equilibrio térmico, la creación y aniquilación de pares de partículas y antipartículas ocurre en igual proporción, lo que preserva sus respectivas cantidades y mantiene constante su relación.[4] Para romper esta situación en algún momento se tuvo que abrir una válvula de escape de antimateria en la olla perpetua del equilibrio térmico.

Dicho lo anterior había que ponerse a trabajar y encontrar evidencias teóricas o experimentales que demostraran que estas tres condiciones se dieron en algún momento. Las observaciones nos han asegurado que en el Universo se dan determinadas reacciones de aniquilación en las que se viola la simetría CP, como, por ejemplo, entre unas partículas llamadas kaones[5]. Aunque también se cree que quizás dicho comportamiento de los kaones no acabe de explicar con precisión la bariogénesis ya que se tratan de reacciones muy débiles. Desde la física del Modelo Estándar, o también del modelo de la supersimetría o de las teorías de cuerdas, se apuntan otras posibilidades que aún están muy lejos de ser comprobadas.[6]

Como puede aclarar nuestras ideas sobre el tema, paso a exponer brevemente uno de los casos expuestos por estas físicas-matemáticas basado en la teoría de la gran unificación (GUT), que postula en el inicio de la vida del universo la existencia de bosones muy masivos, los bosones X e Y de los que ya se habló en el capítulo tercero. Estos bosones se desintegran a altas temperaturas en bariones y leptones, según las ecuaciones que siguen,

$$X \rightarrow \text{(51\% de las desintegraciones)}\ \text{quark}_{up} + \text{quark}_{up}$$

$$X \rightarrow \text{(49\%)}\ \text{positrón}^{+} + \text{antiquark}_{down}$$

$$\text{antiX} \rightarrow \text{(49\%)}\ \text{antiquark}_{up} + \text{antiquark}_{up}$$

$$\text{antiX} \rightarrow \text{(51\%)}\ \text{electrón}^{-} + \text{quark}_{down}$$

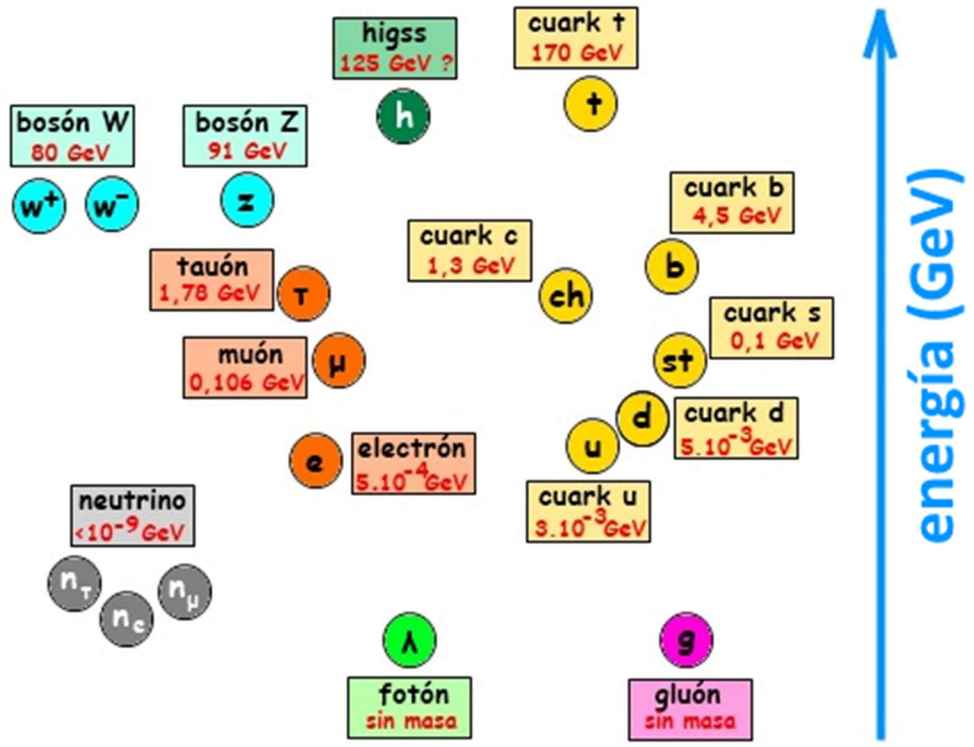
pero al hacerlo así dejan más quarks que antiquarks. En cada una de las parejas de desintegraciones (la primera de materia y la segunda de antimateria) se producen quarks de distintos tipos según el porcentaje indicado. Del análisis de las anteriores parejas de reacciones podemos deducir que, tras cien desintegraciones de ambas, eliminando la materia y la antimateria resultante homóloga, que se aniquilarán mutuamente, nos va a quedar (contando sólo las partículas bariónicas):

$$\mathbf{2\ [quark_{up} + quark_{up}] + 2\ quark_{down}}$$

Como los protones están formados por dos quark $_{up}$ y un quark $_{down}$ a la vista del resultado anterior podemos asegurar que por cada cien interacciones de un tipo más cien interacciones del otro tendremos como resultante a dos protones de materia que no tienen compañeros de antimateria.

En resumen: los bosones X en su desintegración no cumplían al pie de la letra la simetría CP, de forma que generaban un escasísimo porcentaje más de materia que de antimateria. Con el tiempo y a pesar de que la inflación separaba a las parejas materia-antimateria y les restaba energía cinética, siguieron los encuentros de aniquilación, cada vez más escasos, dejando como balance un pequeño poso dominante de partículas de materia, la base de lo que luego será la que hoy percibimos.

A medida que descendía la temperatura del Universo, que es lo mismo que hablar de su energía promedio, se iban consolidando a partir de ella las ***partículas elementales*** que hoy nos rodean, desde las de mayor masa a las de menor. Estamos hablando fundamentalmente de los quarks, los leptones -electrones, muones, tauones y neutrinos- y de los bosones con masa -pión, los tres débiles y el Higgs-. Las podemos visualizar en el esquema de más abajo.



En el esquema anterior quedan representadas las partículas más fundamentales del Modelo Estándar, con sus masas en unidades de la energía equivalente, y ordenadas de abajo a arriba desde la de menor masa a la de mayor. Nos va a servir de referencia en la continuación del relato.

Pero ¿qué pasa con las ***partículas compuestas***? Para que pudieran condensarse los protones y neutrones, que están formados por tres quarks, o incluso gestarse los núcleos atómicos, habrá que esperar a que el nivel de energía baje lo suficiente como para que permita actuar a la fuerza nuclear fuerte que los une gracias a sus gluones y piones (de todo ello se hablará en otros capítulos). Quarks, protones o neutrones deben tener una velocidad muy ajustada entre una alta, que les haría rebotar una partícula con otra, y otra baja que no las aproximaría lo suficiente como para que actuaran los bosones de la interacción nuclear fuerte.

Así que no sólo necesitaba el Universo el nivel energético adecuado para expresar su materia más elemental, sino también para permitir actuar a las fuerzas fundamentales. En una primera instancia para que los correspondientes bosones intermediadores salidos del vacío pudieran materializarse el tiempo suficiente -lo que conocemos como el *tiempo característico de las interacciones*- como para que se produzca la intermediación. Segundo, para que las partículas de materia pudieran aproximarse de forma que se colocaran dentro de la distancia de alcance de la fuerza, lo cual resulta vital para las de muy corto alcance como son las dos nucleares.[7]

Creo que ya estamos preparados con argumentos suficientes como para que, al leer los capítulos que siguen, no nos sorprenda lo que vamos a ir viendo suceder a lo largo de una historia que iremos despiezando mientras seguimos el paso del tiempo. Y lo que sucede es simplemente que al ir cambiando las condiciones ambientales medias del Universo van apareciendo progresivamente nuevos cambios de estado, nuevas posibilidades de equilibrios, tras los que se van a ir consolidando nuevas partículas y posibilitando la acción de las fuerzas que conforman nuestra más próxima realidad. La historia continúa chapoteando en un puré con mucha radiación.

Complementos sobre la aparición de la materia

Antes de acabar esta capítulo voy a plantear un razonamiento intuitivo sobre el comportamiento de partículas y energía habitantes del plasma que constituía el universo de los primeros minutos ¡y años! Nos ayudará a comprender los procesos de condensación de las partículas y entenderemos mejor cómo nacen a partir de la energía de la radiación.

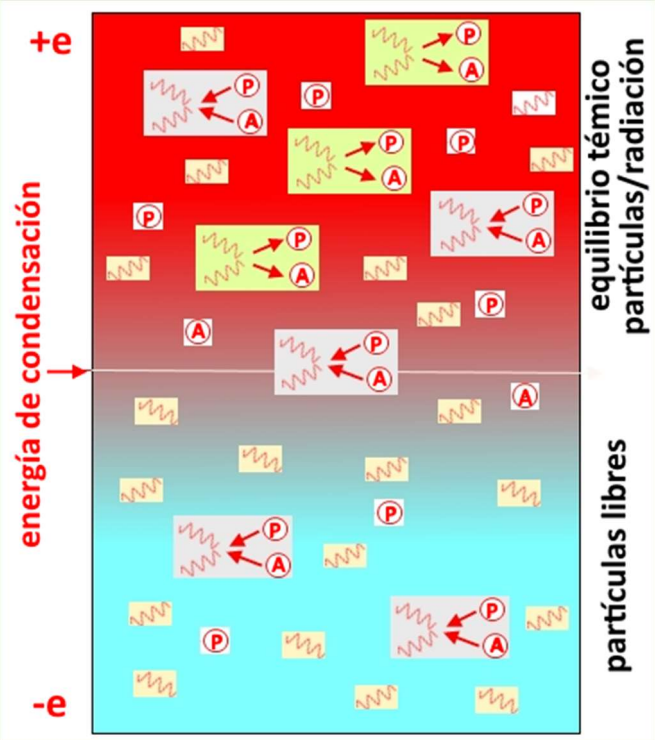
Para crear una determinada cantidad de materia se requiere una determinada cantidad de energía, fijada por la relación $E = mc^2$*. Energía que en parte también puede imprimir un movimiento a la nueva partícula. En teoría, dada una determinada energía media del Universo se pueden crear cualquier tipo de partículas siempre que el equivalente energético de sus masas sea inferior al nivel energético del momento. A muy altas energías, los choques entre partículas podrían dar lugar a la creación de fotones de alta energía y pares de partícula/antipartícula, donde las partículas de gran masa se moverían a velocidades relativamente bajas, mientras que las partículas de pequeña masa se desplazarían a velocidades cercanas a la de la luz. Los fotones, con grandes energías debido a que sus velocidades son las de la luz, son capaces de generar partículas.*

La contrapartida a la creación de pares es su aniquilación, partícula contra antipartícula, devolviendo radiación al Universo. Esto es un proceso continuo que sucede sin tregua. Cuando el progresivo enfriamiento del Universo debido a la expansión le lleva al nivel de temperatura de condensación de cada partícula que cumple la igualdad siguiente, esta aparece y ahí queda.

Temperatura = Energía de condensación/constante de Boltzmann

Por debajo de este punto la energía no tendrá ya suficiente "potencial" como para crearlas y pasará a dominar la dinámica los procesos de aniquilación entre materia y antimateria, lo que provocará una progresiva pérdida en su población. Al final van a quedar relativamente muy pocas en comparación con épocas anteriores. A ellas deberíamos sumarles las que saltan por brevísimos instantes desde el vacío por procesos cuánticos (ver la siguiente figura) y que pueden transmutarse en partículas reales en determinadas circunstancias.

<u>En resumen</u> (ver imagen adjunta) podríamos decir que en el historial de las partículas observamos dos etapas durante el enfriamiento del Universo:



a. *La primera, con la temperatura media del Universo superior a la fijada como de condensación, cuando se encuentra en equilibrio térmico con su antipartícula y con la radiación. En esos momentos la siguiente igualdad transcurre con la misma probabilidad de derecha a izquierda que de izquierda a derecha:*

fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula *[1]*

b. *Y la segunda etapa, en épocas más frías, que comenzaría en la frontera energética fijada por la siguiente igualdad:*

energía de la radiación = masa de la partícula x (velocidad de la luz)^2 = energía de condensación de la partícula

momento en que la ecuación [1] anula su camino de izquierda a derecha, cuando los fotones ya no tienen suficiente energía, quedando en exclusiva el inverso, de derecha a izquierda, proceso que sigue hasta que sólo quede el pequeño número de partículas consecuencia del exceso inicial de materia frente a antimateria.

NOTAS DEL CAPÍTULO 08:

1. Se cree que su vida media es de unas muchos órdenes de magnitud la edad del universo. Para los amantes de las estadísticas, esa vida media tiene un límite inferior de unos 10^{35} años. Hablaremos más de ello en el capítulo 35.
2. Del blog *Ciencia para Llevar*, Beatriz Gato Rivera y Mar Gulis: "*En un sentido amplio, la antimateria puede considerarse como el reverso de la materia o como una imagen especular de la misma respecto a varios 'espejos'... Las partículas de antimateria tienen sus propiedades opuestas respecto a las de las partículas de materia. Esto se refiere solo a aquellas propiedades que admiten valores opuestos, ya que las propiedades que no admiten valores opuestos son idénticas para las partículas y sus antipartículas. Por ejemplo, el electrón y su antipartícula, el positrón, con la misma masa y el mismo espín, tienen valores opuestos de la carga eléctrica, la carga débil y la carga leptónica*".
3. La palabra ***bariogénesis***, al contrario de lo que podrías interpretar (el proceso de génesis de los tipos de bariones), se trata del término genérico utilizado para referirse a los hipotéticos procesos físicos que produjeron una asimetría entre bariones y antibariones durante los primeros instantes de la creación del universo. A ese proceso primigenio algunos le llaman ***la gran aniquilación***. Muy gráfico.
4. Lo especifico como creación/aniquilación por pares ya que se entiende muy bien. Aunque realmente hay otros procesos de creación/aniquilación en los que participan independientemente y son mediados por otras partículas.
5. Para una mayor información podéis leer la entrada especifica que Pedro Gómez-Rey dedica a ello en el blog "*El Tamiz*".
   [http://eltamiz.com/2007/08/26/esas-maravillosas-particulas-el-kaon/]
6. Para los más curiosos propongo este enlace al blog "*Naukas*" que amplía el tema:
   [http://francis.naukas.com/2010/07/04/la-asimetria-entre-materia-y-antimateria/]
7. De nuevo para mentes curiosas. Esta serie de artículos son bastante ilustrativos de lo que pasa en el interior de protones y neutrones.
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/the-structure-of-matter/protons-and-neutrons/]
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/largehadroncolliderfaq/whats-a-proton-anyway/]
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/largehadroncolliderfaq/whats-a-proton-anyway/checking-whats-inside-a-proton/]

09: Un puré con mucha radiación

de 10^{-32} a 10^{-12} segundos desde el inicio

Después de una serie de capítulos con contenidos más teóricos que biográficos, necesarios para comprender mejor lo que vamos a leer, proseguimos en éste con el transcurrir de la historia del Universo, que es nuestro objetivo último. Volvamos al Universo del tamaño de una naranja tras la inflación exponencial, allá por el momento 10^{-32} segundos tras el Big Bang… más o menos. Hay opiniones al respecto del momento concreto del suceso, pero me parece que para nuestra historia del Cosmos podemos asumir la incógnita. Sabemos que fue muy al principio y en un momento que se había roto ya lo que postula la teoría de la Gran Unificación (GUT), al haberse liberado la fuerza nuclear fuerte de sus dos compañeras, la débil y la electromagnética, que siguieron formando un tándem (la fuerza electrodébil). Creemos que gracias al campo inflatón el Universo se había duplicado unas cien veces, tras lo que se había producido un intercambio de cromos: energía interna por materia y radiación, en un entorno de gran densidad y mucha temperatura, 10^{28}K. Tras el recalentamiento habían quedado reliquias de ciertas fluctuaciones cuánticas, las cuales hacían que la distribución energética, o de masas, o de temperatura, que prácticamente es lo mismo, presentara unas tenues irregularidades. Las partículas y la radiación danzante conformaban un plasma oscilante por el que se transmitían ondas de presión semejantes a unas ondas sonoras.

Nuestro Universo era joven y, como parece corresponder a la edad, subversivo y alborotador, pero aún tendremos que esperar mucho tiempo para observar en él un cambio sustancial. Al poco de salir de la inflación este plasma violento había atemperado sus turbulencias, continuando su camino, activo y agitado, pero hacia un estado cada vez más asentado en el equilibrio térmico. La expansión del tejido base seguía su ritmo persistente, aunque ahora mucho más calmado. La propia expansión difuminaba los grumos de densidad de las fluctuaciones cuánticas, rincones de mayor o menor energía, que habían aparecido a lo largo de la excursión del campo inflatón hacia su mínima energía. Por delante le quedaba unos 380.000 años de puré de partículas y radiación. En realidad, más de lo último que de lo primero.

Estamos entrando en una nueva era que conocemos como la ***época electrodébil***,[1] durante la que va culminando el proceso de ***bariogénesis*** por el que la materia se va a decantar definitivamente frente a la antimateria, permitiendo el nacimiento de los quarks que con el tiempo acabarán formando los protones y los neutrones… en fin, la familia de los bariones. Esta época terminará cuando culmine la separación de las interacciones electromagnética

y nuclear débil en el tiempo 10^{-12} segundos. Pero veamos con un poco más de detalle lo que pudo pasar a lo largo de esta fase**.**

¿Cuál es el escenario teórico? El modelo estándar de partículas no es definitivo en el rango de energías en el que nos movemos en esta época. Podemos decir que hay un "océano" neblinoso tremendo entre los niveles energéticos que acotan esta época, entre 10^{15} y 10^{4} GeV. Océano en el que nos vamos a asomar en este capítulo para ver quién chapoteaba por ahí. El nivel inferior de energía, 10^{4} GeV, es la profundidad de campo "visual" que nos proporciona el LHC, en donde hemos encontrado la última partícula postulada por el Modelo Estándar, el bosón de Higgs. Tan es así de neblinoso el intervalo que los físicos teóricos le llaman "gran desierto". Están a la espera de la aparición de una nueva física que enlace el modelo estándar con las exigencias de la unificación GUT. Parece que el LHC ha dado todo lo que podía, aunque siguen las esperanzas puestas en que en su tope alto de energía nos revele algún partícula, alguna interacción, que concuerde y nos lleve de la mano a alguna predicción de teorías, como la de la supersimetría o de muchas otras que están en el limbo de la matemática. Como nos dice el premio Nobel de física Steven Weinberg: "*Teníamos esperanza de que el LHC revelara algo realmente nuevo. No que solamente siguiese confirmando el Modelo Estándar, sino que encontrase signos de materia oscura o supersimetría o algo que nos llevase al siguiente gran paso en la física fundamental*".[2] Esas son las tibias esperanzas. Pero tenemos que avanzar en nuestra biografía y presuponer algo con visos de coherencia con el mundo testado.

¿Qué tipo de partículas podían ser posibles en el escenario de la época electrodébil? La teoría GUT nos sugiere que uno de sus principales legados pudo ser la aparición y consiguiente condensación de un verdadero "zoo" de partículas elementales que interactuaban entre ellas muy débilmente ¿quizás de materia oscura? Algunas de ellas, como los antiguos bosones X e Y del Campo Unificado se habrían descompuesto en algún tipo de quarks, en electrones y positrones, y en algún tipo de neutrinos, que moldearon el proceso de bariogénesis, el dominio de la materia frente a la antimateria, como ya comentamos en el capítulo ocho. Como consecuencia en estos momentos ya tendríamos presentes en el plasma a algunas de las partículas elementales, quarks y leptones. Además de la "infinita" radiación existente comparada con la materia, los fotones, a los que incluso podríamos asimilar en cierto sentido los neutrinos moviéndose a velocidades relativistas. Realmente los fotones como tales aún no existían. Sí que en su lugar podríamos encontrar a una partícula "correcaminos" sin masa intermediadora del campo electrodébil de aquel momento que más tarde, gracias a la interacción con el campo de Higgs, generó a cuatro hijas: tres para el campo débil y nuestro conocido fotón para el electromagnético. Hablaremos de ello en otro capítulo. Y aunque no sea

exactamente cierto para el momento que estamos analizando, al bosón electrodébil le anticiparemos el nombre genérico de fotón.

Hay que pensar que gran parte de la población se estaría produciendo por choque de los fotones de la radiación, generándose cualquier partícula de las familias de quarks y leptones en parejas de materia-antimateria. No durarían mucho, ya que las partículas se aniquilarían rápidamente con sus antipartículas generando de nuevo fotones. En todas ellas, dado el nivel energético medio sobre el que estaba cabalgando el Universo, entre 10^{24} y 10^{12} eV, esto sería lo más común: paso de partículas a radiación y a la vez de radiación a partículas, en las proporciones precisas para que en el plasma hubiera lo que llamamos un equilibrio térmico, es decir, siempre el mismo número de partículas, siempre el mismo número de fotones, y ambas poblaciones iguales.

(radiación) fotón + fotón ↔ partícula + antipartícula **(materia)**

Podemos también preguntarnos si en aquel marasmo de energético plasma pudiera haber otras cosas, como subpartículas de estos quarks elementales. La respuesta es clara… no lo sabemos. Ni siquiera sabemos si existen ¿Y partículas más pesadas? ¿O compuestas por los elementales quarks? Había energía más que suficiente, aunque no tenemos evidencia ninguna de partículas súper pesadas como las que, por ejemplo, se postulan en la teoría de la supersimetría coloquialmente conocida como SUSY[3] que entre otras cosas dice que cada partícula fermión tiene una pareja bosón y que, a su vez, cada bosón tiene una pareja que es un fermión. Parejas que, o bien son ambas de materia, o bien ambas de antimateria. Si en aquel momento estaban participando en el equilibrio térmico, aún no tenemos forma de saberlo. El hecho de que no sepamos casi nada de nada, no quita que nos preguntemos también si quizás en la época electrodébil estuvieron presentes las partículas teóricas que componen la materia oscura, que actualmente forma casi el 30% de nuestro Universo.

La materia oscura es una realidad que podemos percibir por métodos indirectos, aunque no sabemos lo que es, qué la constituye. Algunos físicos a estas partículas "oscuras" las han bautizado con el nombre de ***wimp*** -*weakly interacting massive particles*-, partículas masivas pero que interactúan muy poco, entre las que parece podría colocarse el masivo neutralino, nombre genérico para una familia de súper partículas postuladas por la teoría SUSY que podrían tener una masa del orden de unos doscientos protones -200 GeV-, por lo que quizás las podríamos detectar en el LHC. Para el Universo de nuestros días también son populares entre algunos físicos las partículas agrupadas bajo el nombre *cold dark matter*, ***CDM***. Frías -*cold*- porque sus energías serían bajas ¿quizás los esquivos neutrinos? Sean como sean y lo que

sean esas familias de partículas, lo que es cierto es que en algún sitio del plasma de aquellos instantes tendría que encontrarse la materia oscura o su antecesora.

Pero no hace falta ir solamente por las nebulosas de la ignorancia, porque nos podemos preguntar por partículas que conocemos mejor, como son los bariones -el protón y el neutrón-, ambos con unas masas en reposo en el entorno de 10^9 eV (es decir, 1 GeV). ¿Estarían en aquel plasma? ¿o quizás… incluso podríamos ver núcleos atómicos? En ambos casos sí tenemos una respuesta y es sencilla: es imposible que este tipo de partículas o de conglomerados de partículas estuvieran ya presentes en el plasma ¿Por qué? Porque para que pudieran formarse a partir de las partículas más elementales, los quarks, deberíamos tener a nuestras fuerzas fundamentales no solo operativas sino también con condiciones de entorno "amigables". Y esto aún no era así, como vamos a ver al revisar en qué situación se encontraban los respectivos campos de las fuerzas.

Para empezar por lo fácil, ***[A]*** la *gravedad* siempre ha sido debilísima en comparación a la presión de la energía del momento, pero ahí estaba operativa desde el principio, y aunque no influía directamente en la generación de partículas, sí estaría curvando el tejido espacio/temporal.

[B] La *fuerza nuclear fuerte*, que creemos ya había aparecido como una entidad propia antes de la inflación, se encontraría dedicada a intentar producir interacciones entre las partículas con carga de color[4] quarks, antiquarks y su partícula intermediadora, el gluon. Los quarks aún no habían conseguido masa, faltaba aun un poco para que el campo de Higgs se condensase. Imaginaos las velocidades tan extremas que desarrollarían esas partículas con masa cero en reposo. La interacción fuerte es realmente potente en la cortísima distanciase dentro de un margen muy pequeño de 10^{-15} metros.[5] Más allá se difumina con gran rapidez. Al ser tal la energía cinética de las partículas de color en aquellos instantes, si las hubiera, tenemos que pensar que tendrían grandes dificultades en acercarse lo preciso durante un tiempo suficiente como para unirse y conformar "objetos" de color neutro. Tal vez los gluones generaban ocasionalmente pares quark/antiquark que desaparecían rápidamente formando nuevos gluones. A la postre se construía y deconstruía un borboteante puré de quarks y gluones en un continuo baile conocida como el ***plasma quark-gluon***. Por semejanza al plasma del mundo electromagnético en donde los iones campan a sus anchas sin interaccionar. Hablaremos más de todo ello en el capítulo 12.

Había aun otra fuerza, ***[C]*** la *electrodébil*, de la que ya sabemos que en aquellos niveles energéticos fusionaba a otras dos conocidas por nosotros, como son la *nuclear débil* y el *electromagnetismo*. Seguían siendo indistinguibles y no sabemos muy bien cómo interactuaría su campo electrodébil con la materia.

Hoy se manifiestan a través de la desintegración beta de los quarks y por la atracción-repulsión electromagnética entre cargas eléctricas. Para lo primero se necesitan unos bosones intermediadores W y Z ***con masa***, que por aquel entonces aun no existían como tales ya que aún no había acudido en su ayuda el campo de Higgs -el responsable de las masas de las partículas elementales-, el cual no rompió simetrías hasta que el Universo no llegó a niveles energéticos de alrededor de 10^2 GeV.

Para la segunda interacción, las reacciones entre cargas eléctricas, la dificultad estribaba en que la velocidad de las partículas cargadas no permitía establecer relaciones de proximidad suficientemente duraderas como para que la fuerza electromagnética pudiera desperezarse y actuar. Pensad que la energía del electrón que orbita un protón en el hidrógeno es del orden de los 17 eV y es el resultado de la atracción entre las cargas de ambas partículas. Nada que hacer a lo largo de una época que terminó con una energía del orden de 10^3 GeV. Así que nada de protones o neutrones, y mucho menos núcleos atómicos.

En resumen, más allá de lo que podamos teorizar con partículas exóticas masivas que pudieran aparecer y desaparecer casi al instante a través de episodios de inestabilidad cuántica, tenemos que imaginar más bien un plasma con partículas sin masa, que en aquel momento estaría constituido por los bosones intermediadores de fuerzas, más las partículas elementales bariónicas, como los quarks y los dos leptones, el electrón y el ligerísimo neutrino. Todos ellos serían los personajes del mundo electrodébil, cuyas poblaciones seguían una particular dinámica.

Recordemos cómo el Cosmos estaba en expansión, circunstancia que hacía que la radiación existente se fuera difuminando en un volumen cada vez mayor y además sus partículas -los que hemos llamado fotones-, debido a la propia expansión del tejido soporte iban también "estirando" la longitud de sus ondas. Como consecuencia de ello las partículas de la radiación eran cada vez menos energéticas dentro de un Universo cada vez más frío.[6] A las reacciones de aniquilación materia-antimateria la circunstancia puede que le fuera completamente indiferente y seguirían generando incansables nuevas partículas de radiación. Sin embargo, si miramos en el otro sentido de la reacción, la de la creación de pares materia-antimateria por choque de radiación, tenemos que pensar que se iría ralentizando progresivamente al ser los fotones cada vez menos energéticos y, por tanto, con menos energía para transformarla en materia. Por ello, el equilibrio térmico se iba progresivamente deshaciendo a favor de los fotones. En resumen, se estaba viviendo una progresiva marcha hacia una situación de más fotones y comparativamente menos partículas de materia. Esto es lo que podemos observar hoy en día, de forma que lo que realmente contabilizamos en el Cosmos es que hay mil millones de fotones por

cada protón-neutrón, que además son prácticamente todos de materia salvo alguno de antimateria.

¿Sólo ***alguno***? Ya sabemos por los dos capítulos anteriores, el 7 y el 8, que por alguna falta de simetría en la desintegración de las partículas X e Y, o las que hubiera en la población del momento, cuando el Universo tenía temperaturas muy altas se produjo un desequilibrio entra bariones y antibariones, de forma que por cada 10^9 de esas parejas tuvo que haber UN "barión" que quizás se "escapara" de la debacle gracias a la expansión acelerada. Porque ella hacía que alguna de las parejas materia-antimateria que se iban creando se separaran con tal rapidez que les fuera imposible reencontrarse y contrarrestarse. De hecho hay teorías que conjeturan con la hipótesis de que fuera del universo observable por nosotros podría encontrarse una "burbuja" de antimateria, un universo complementario al nuestro. Hay que comentar también que en nuestra época aún se está produciendo antimateria en diversos procesos físicos como, por ejemplo, en los choques de los rayos cósmicos con nuestra atmósfera terrestre, aunque eso se trataría de antimateria "nueva", nada que ver con la posible primigenia.

Todo lo anterior intenta dibujar el cuadro de una época de tránsito en la que se iba perfilando la creación de los bariones y el próximo acomodo de las fuerzas fundamentales. Con esto cerramos un intenso periodo de la vida de nuestro Universo, que fue extremadamente corto, entre el tiempo 10^{-32} segundos a 10^{-12} segundos desde su inicio. Este final del periodo va a coincidir con el momento en que la fuerza electrodébil rompa su simetría -hablaremos de ello en el siguiente capítulo- comenzando a actuar como fuerzas diferenciadas el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil. Es el momento energético en que condensó el bosón de Higgs, que hoy sabemos que existe gracias a que lo hemos detectado a través de los experimentos en el LHC. Aquella naranja de unos 10 centímetros de diámetro del inicio habrá crecido en un factor de 10^{11}. En su interior, un plasma de fermiones elementales del tipo quark, electrón, neutrino, muon y tauón, así como bosones del tipo gluon o el específico del campo electrodébil ya que en aquellas condiciones el fotón y los bosones W y Z debían ser indistinguibles, los tres sin masa y moviéndose a la velocidad de la luz ¡la radiación del momento! Todas esas partículas con sus correspondientes antipartículas, que iban siendo cada vez más residuales. Y aunque no sabemos nada de ellas, también tenían que estar presentes las partículas que conforman la materia oscura, tales como los teóricos axiones o los también teóricos WIMP's neutralinos.[7]

Vamos a acabar con este capítulo para continuar en el siguiente la historia de un Universo que era un mundo de plasma dominado por una energética y abundante radiación, que no dejaba tranquilos ni a los campos de materia ni a los de fuerzas. Un mundo en continua expansión y enfriamiento, con un

comportamiento físico que podemos asemejar al de un mundo de gas opaco, en donde la "luz" (la radiación) no era libre y en donde las perturbaciones de la materia se comportaban como ***ondas sonoras***. Ondas que aun bautizadas como sonoras tenían frecuencias que ningún hombre, si allí hubiera podido introducir un micrófono, hubiera sido capaz de percibir con su oído y su cerebro. Pero las había… ondas sonoras inherentes a los flujos de compresión-expansión que experimentaba el plasma. Físicamente un fenómeno idéntico al que experimentamos cuando un foco sonoro emisor produce ondas en el medio físico, el gas atmosférico, que se transmiten por él hasta llegar a nuestros oídos receptores. Aunque me estoy adelantando… dejemos esto como un anuncio de un tema que desarrollaremos en otro capítulo, cuando estemos ando a la frontera de los 380.000 años.

Ideas acerca del equilibrio térmico en el Universo temprano

A lo largo de este texto hemos hablado, y vamos a hablar, muchas veces acerca del equilibrio térmico, que consiste en que todos los componentes de un sistema mantienen la misma temperatura, la misma energía cinética. O del equilibrio termodinámico, que es un concepto más amplio ya además de cumplir la condición de equilibrio térmico, guarda también otras condiciones más amplias, como la de equilibrio numérico poblacional, es termodinámico.

Ya sabemos también que el Universo primitivo era un puré plasmático con mucha radiación en el que los diferentes ingredientes se encontraban en equilibrio térmico, interactuando continuamente y compartiendo la misma temperatura. Todas sus partículas tenían en promedio la misma energía cinética y todas estaban involucradas en reacciones en las que un tipo de partícula se convertía en otra, o en varias, manteniendo sus poblaciones. Pero en promedio, tanto el número de partículas de cada especie, así como la energía con la que contribuían al contenido total de energía del universo, se mantuvo igual. Podemos asimilarlo a una niebla en la que si sube la temperatura habrá más vapor que gotas de agua y si baja, lo contrario, aunque siempre habrá la misma cantidad de agua. Todo depende del potencial implicado en el cambio de fase vapor-líquido y de la temperatura del momento.

Sin embargo, hay una complicación. Si las condiciones externas cambian, el sistema deberá establecerse en un nuevo estado de equilibrio y eso tardará un tiempo. Y en aquellos momentos era lo que sucedía: el escenario se expandía. Así que continuamente si su sistema de partículas quería seguir en equilibrio debía ir ajustándose y como es lógico pensar, eso se podría llevar a cabo con mayor o menor rapidez dependiendo de la probabilidad con que pudieran

ponerse en contacto e intercambiar energía. Cuanta más población y más energéticas pudieran ser las partículas, más interactuarían entre ellas y la probabilidad de reaccionar mayor. Y lo contrario.

Así que a medida que las condiciones externas del Universo iban cambiando, las velocidades de reacción entre partículas también cambiaban. De forma que dependiendo de cómo comparaba la velocidad de la expansión con la velocidad con que podían llevarse a cabo las reacciones entre partículas, todo podía transcurrir de forma muy diferente. La mezcla de partículas en todo momento dependía de la competición entre las reacciones que restablecían el equilibrio, que dependían del nivel de temperatura, y el cambio de esta misma temperatura debido a la expansión cósmica. Si la expansión hubiera sido muy rápida las partículas se habrían separado tan deprisa que no hubieran tenido posibilidad de encontrarse, ni tiempo para reaccionar y reequilibrar el conjunto de energías en el Universo al nivel que determinaba la nueva temperatura fijada por la expansión. Si esta hubiera sido muy lenta hubiera habido tiempo para alcanzar algún estado de equilibrio, las reacciones hubieran sido muy distintas y el Universo también. Que realmente, viéndolo desde hoy, es lo que pasó.

*Estas ideas, que en el fondo son otra manera de contar lo que informaba el anexo al capítulo 8 "*Complementos sobre la aparición de la materia*", van a estar latentes a lo largo de todos los capítulos que describen la infancia y juventud del Universo. Conforman una regla básica en su biografía.*

NOTAS DEL CAPÍTULO 09:

1. Recordemos que ya se había roto la simetría GUT, separándose la interacción nuclear fuerte de la interacción electrodébil. De ahí el nombre.
2. Del libro de Sabine Hossenfelder "*Perdidos en las matemáticas*", pag.147, colección Ariel, 2019, editorial Planeta.
3. Si tenéis más curiosidad sobre este tema de la supersimetría podéis leer este artículo del blog "*Cuentos Cuánticos*":
   [https://cuentoscuanticos.wordpress.com/2011/09/01/supercosas/]
   o éste otro más técnico, aunque en un buen porcentaje comprensible para los neófitos, aparecido en el blog "*Naukas*":

[http://francis.naukas.com/2012/12/29/el-modelo-estandar-la-supersimetria-y-la-supergravedad/]

4. Así como en el campo electromagnético existe la cualidad carga eléctrica y en el gravitatorio la cualidad masa, en el campo fuerte se habla de la carga de color, Es de tres tipos, rojo, verde y azul y su regla de combinación exige un resultado de carga de color "neutra".
5. Al ser el gluon partícula con carga de color, también interaccionan entre ellos. Es decir que cuando entre dos quarks se lanzan un gluon, este mismo gluon lanza más gluones, que lanzan más gluones, que lanzan más gluones… y así resulta que la interacción nuclear fuerte es muy intensa dentro de un alcance cortísimo: no puede hacerse sentir en las grandes distancias, ella misma no se deja. Lo veremos en el capítulo 12.
6. La energía implícita en una onda es directamente proporcional a su frecuencia y, en consonancia, inversamente proporcional a su longitud de onda.
7. La existencia de la materia oscura desde los inicios del Universo es algo incuestionable. No sólo porque ahora experimentemos sus efectos gravitatorios en las estrellas y galaxias sino por algo más sutil. Durante toda la época del plasma quark-gluon, e incluso posterior, hasta la recombinación que explicaremos en el capítulo 17, la materia ordinaria estaba fuertemente acoplada con la radiación lo que le confería una densidad muy homogénea y suave. Si no hubiera nada más que eso, esa densidad suave habría pervivido a lo largo de los eones haciendo imposible la generación de concentraciones gravitatorias y, por tanto, cualquiera de las especiales estructuras de materia que hoy observamos en el Universo, cúmulos, galaxias, estrellas… En aquellos momentos fundacionales la materia oscura que no estaba acoplada a la radiación vino a nuestro rescate. Ahí residía y actuaba.

10: La liberación de la fuerza débil I

de 10^{-12} a 10^{-6} segundos desde el inicio

Llegó el momento $t=10^{-12}$ segundos desde el principio. Comienza la ***época electrodébil***. Espero que al final de este capítulo se entienda por qué se llama así. En estos momentos de la historia del Cosmos nuestro personaje había estirado sus estructuras desde la época del recalentamiento en un factor de 10^{10}. Aunque el tamaño total del Universo es un arcano, podemos hacer uso de la imaginación y pensar que la naranja que surgió de la inflación pudo pasar a ser una "esfera" de unos mil millones de kilómetros: el campo de juego en aquellos tiempos era semejante a una esfera de la órbita de Júpiter. En esta inmensidad pongamos ahora una cabeza de alfiler de medio milímetro de diámetro ¿la veis? pues eso que creéis ver es justamente lo que ocupaba nuestro universo observable, habían pasado 10^{-12} segundos y la luz sólo podía haberse desplazado el radio de esta esferilla.[1] Aquella pequeña naranja que había sido en el momento 10^{-32} segundos, ahora había crecido y, aunque menos que entonces, aún seguía siendo un mundo denso, muy denso, 10^{25} veces más denso que el agua de nuestras piscinas.

Habíamos quedado al final del capítulo anterior que los habitantes de tan apretado barrio eran los bosones, tales como los gravitacionales gravitones si realmente existen[2], los gluones intermediarios de la fuerza nuclear fuerte y algo asimilable a los fotones y bosones W y Z de la fuerza electrodébil puesto que, realmente, en esta época eran indistinguibles. Habría que esperar todavía un poco a que el campo de Higgs hiciera sus diabluras y los diferenciara. También revoloteaban por allí los bosones de este último, el Higgs, no sabemos si de cuatro tipos o quizá más: todo depende de la imaginación (y necesidades en sus cálculos) de los físicos matemáticos. También estaban presentes las partículas elementales de la materia, entonces sin masa, los "fermionosos" quarks, electrones, neutrinos y alguno más. Y no me gustaría olvidarme que nuestro mundo es como es gracias a la materia oscura, así que tenemos que añadir al cóctel las posibles partículas asociadas, quizás los axiones o quizás los neutralinos, aunque no tengamos ni idea de lo que son.

Todas esas partículas tenían una característica que los hacía diferentes a como las vemos en nuestros días: ***no tenían masa***. Lo cual quiere decir, como nos ilustró Einstein, que se tenían que desplazar a la velocidad de la luz o muy próxima a ella. Así había sido desde el principio.

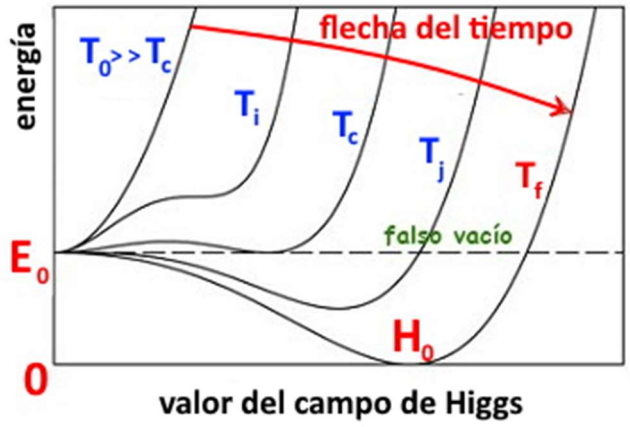
Más o menos en estos momentos cósmicos sucedió algo decisivo para nuestro mundo tal como lo observamos, tal como vemos de qué forma somos realmente

nosotros. Poco después de cruzar el nivel de energías medias por partícula en el entorno de las centenas de GeV, tal como lo predice el Modelo Estándar, y con una temperatura en el Universo de 10^{15} K el campo de Higgs condensó, es decir, alcanzó un estado de energía mínima rompiendo una vez más la simetría, en ese caso la electrodébil de base. El viejo campo electrodébil se separó en dos y dio a luz en el proceso al campo electromagnético y al nuclear débil que hasta entonces se habían manifestado como una misma cosa.

¿Qué quiere decir que se separaron? ¿Qué es lo que pasó? El campo de Higgs que acababa de condensar[3] alcanzó la posibilidad de excitarse en su forma fundamental, lo que era lo mismo que generar un bosón de Higgs en el nivel de 125 GeV, al que ya hemos detectado en el *Large Hadron Collider* (LHC). Tenemos que pensar que al unísono comenzaría a acoplarse con el campo electrodébil, lo que hizo que de los cuatro bosones que "históricamente" se generaban a altas energías en las excitaciones de este último campo, W_1, W_2, W_3 y B, se recombinaran adquiriendo masa tres de ellos, mientras que el cuarto siguió con el mismo carácter de "cero masa" que había tenido hasta entonces. A ese proceso se lo conoce como ***mecanismo de Higgs***, que queda más desarrollado en el cuadro de información adicional del final de este capítulo. Gracias a estos bosones W_i, a los que llamaremos a partir de este momento en que adquirieron su masa, bosones W^+, W^- y Z^0, la fuerza nuclear débil pudo comenzar a interactuar con los campos de partículas elementales: quarks, electrones, etc., mientras que la fuerza electromagnética se quedó para ella con el bosón B, sin masa en reposo, al que realmente a partir de este momento se le puede llamar propiamente fotón.[4]

Veremos en los siguientes capítulos lo trascendental que fue este cambio de rumbo. El bosón gluon intermediador de la fuerza nuclear fuerte podrá unir quarks y así generar partículas tan importantes como el protón o el neutrón. Los bosones W y Z podrán apoyar las transmutaciones de unas partículas en otras, como por ejemplo de protones a neutrones o viceversa, o desintegrar a los neutrones, reacciones que fueron decisivas en el momento en que se fijaba la densidad de distribución de los elementos químicos en el Universo… o en los procesos de fusión nuclear en el interior de las estrellas. Mientras que el fotón podrá intermediar por sí solo entre cargas eléctricas permitiendo la creación de átomos… ¡¡¿Fue importante el momento o no?!!

Una vez presentado el argumento, reflexionemos un poco. Cosas como las mencionadas en el párrafo anterior ya surgían como consecuencia del propio Modelo Estándar pero, como ya hemos comentado, se precisaba de la existencia de un campo muy especial, hermano quizás de nuestro conocido inflatón: el campo de Higgs. ¿Qué le pudo pasar a este último cuando la energía promedio de las partículas del Universo había descendido por debajo de los 10^3 GeV?



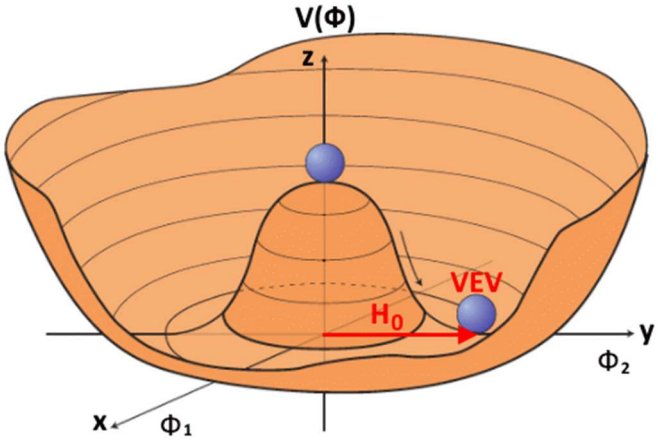
¡Esta figura me suena!, dirás. Y tienes toda la razón. Viste una casi igual en el capítulo cuarto, en el que hablábamos del campo inflatón. La diferencia está en que ahora en vez de leer inflatón estás leyendo Higgs. Si, la base teórica de los dos funciona igual.

El campo de Higgs permeaba desde siempre toda la extensión del espacio/tiempo. A medida que iba descendiendo la temperatura del Cosmos, la curva del campo Higgs, la que dibuja en todos los puntos del espacio la correlación entre el propio valor del campo y el de su energía (potencial), atemperaba su forma dibujando con el transcurrir del tiempo una especie de "aleteo descendente", como hemos intentado dibujar en la superposición de instantáneas fijas que es la figura anterior, en donde la flecha roja es la del tiempo. Y esto era lo mismo en todos y cada uno de los puntos del homogéneo Universo. A altas temperaturas, la curva identitaria del campo se ajustaba bastante bien a una parábola. En estas condiciones el campo de Higgs se habría situado lógicamente en el fondo de mínima energía de esta parábola, en donde se encontraba en una posición relativamente precaria: con el paso del tiempo, estar en este mínimo energético, E_0, no podía ser una situación muy estable estando afectado por innumerables alteraciones cuánticas, ya que este valor no era el que marcaba la referencia de energía cero para el resto del Universo, pues había niveles de energía menores.

Al ir bajando aún más la temperatura, la curva característica se fue modificando hacia otro tipo de curvas de cuarto grado, deslizando su contorno de forma que, a medida que transcurría el tiempo, se posibilitaban nuevos puntos de mínima energía, cada vez menor. Todo ello hacía que mantenerse en el punto E_0 de energía no-cero fuera cada vez más difícil para el campo. En ese punto (0, E_0) el campo de Higgs se encontraba, a medida que transcurría la expansión del Universo, en una situación que progresivamente era más inestable. Paulatinamente iba creciendo el termodinámico "impulso"[5] de colocar al campo en estos nuevos mínimos de energía, fuera del pozo del falso vacío en el que se hallaba instalado desde los inicios. Como le había sucedido al campo inflatón hacía muchos electronvoltios, aunque realmente Como le había

sucedido al campo inflatón hacía muchos electronvoltios, aunque realmente muy, muy poco tiempo, nuestro campo de Higgs inició, de manera uniforme ***en todos los puntos*** de un Universo homogéneo e isotrópico, una excursión hacia el ***verdadero mínimo de energía***. Hasta que llegó al nuevo estado de equilibrio en un vacío real de energía nula[6] con un valor de campo H_0. En todos los puntos del espacio/tiempo dejó de tener un valor promedio cero para establecerse ***en todos los puntos del espacio/tiempo*** un valor H_0. Los físicos interpretan ese proceso como la espoleta de una ***rotura de la ancestral simetría electrodébil*** en todo el universo y como el santo grial de la generación de masa de las partículas elementales.

Podemos considerar al campo Higgs Φ como una confluencia de dos subcampos escalares imaginarios Φ_1 y Φ_2. Es decir, estaría definido por cuatro parámetros, dos reales y dos imaginarios, lo que le confiere cuatro grados de libertad. Consideremos a los dos campos Φ_1 y Φ_2 acoplados y con una distribución campo/potencial, en ambos del tipo cuártico, como el apuntado en una figura de más abajo. Al ser dos campos acoplados vamos a dibujarlos de forma que el plano (x, y) nos de sus valores y dejando la coordenada z para representar al valor del potencial conjunto que se conoce por su forma como un potencial en "sombrero mejicano". Y eso será así para todos los puntos del espacio.



(Figura extraída del articulo Higgs Physics de J.Ellis, [6] ⓐfair use)

En el falso vacío el valor de ambos campos será cero y por tanto su acoplamiento, representado por la bola, se situará en lo alto de la cúspide interna. Desde allí es fácil intuir que la simetría que se observa es total, el campo instalado en el tope ve lo mismo mire hacia donde mire, que corresponde a la simetría global que regía aquel momento, la SU(3)xSU(2)xU(1). En algún momento el campo (la bola morada) emprenderá un camino ineludible de descenso buscando un mínimo de energía, encontrándolo en el canal circular inferior de la superficie potencial, canal de verdadero vacío. Desde allí la

simetría que se observa es parcial (realmente parece circular) aunque la simetría original siga ahí.

La incógnita es ¿en qué punto del círculo habrá caído? La respuesta es fácil ya que cualquier punto es posible puesto que los procesos de tunelaje cuántico son aleatorios. De todas formas cae a un punto que se le conoce como VEV (H_0) o ***valor esperado en el vacío***.

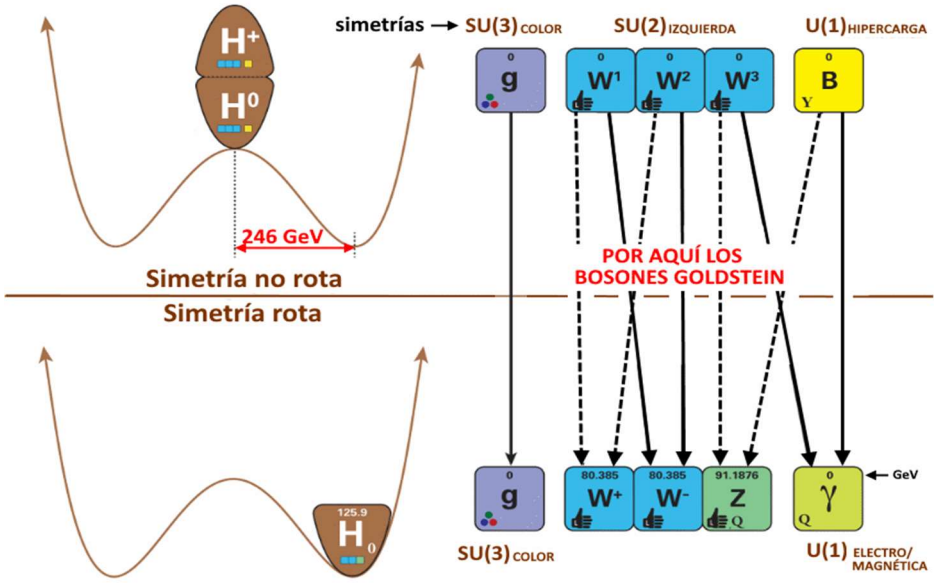


Imagen que describe el papel del bosón de Higgs y la estructura de la ruptura de la simetría electrodébil: en el nuevo valor del vacío de Higgs se rompe la simetría electrodébil (azul+amarilla) haciendo que las propiedades de sus partículas cambian en consecuencia. (Imagen a partir de Latham Boyle y Mardus,[8] CC BY-SA 4.0)

En el proceso, los campos acoplados Φ_1 y Φ_2 pueden experimentar excitaciones (inestabilidades cuánticas) en forma de ondas/partículas como pasa con cualquier campo cuántico. La situación en que se encuentran el campo en su posición VEV dentro del canal inferior permite dos tipos de libertades para estas excitaciones: o siguiendo la simetría circular del fondo, para lo cual no necesita un aporte de energía, o escalando el potencial con un incremento de energía. En el caso de la excitación por el canal, sin posible variación de energía, se generan tres partículas sin masa en reposo (bosones Goldstein) que serán los que curiosamente serán absorbidas por los bosones de la fuerza débil dándoles masa. No así al independizado fotón que no va a interaccionar con las partículas Goldstein del Higgs. El mismo mecanismo dará masa al resto de partículas elementales. Y si la excitación del Higgs se produce escalando aparece una partícula con masa, el "auténtico" Higgs.[7] Lo vemos en la imagen de más arriba en donde toma sentido lo dicho en un párrafo anterior: "*Tenemos que pensar que al unísono* [el campo de Higgs] *comenzaría a acoplarse con el*

campo electrodébil, lo que hizo que los cuatro bosones que "históricamente" se generaban a altas energías en las excitaciones de este último campo, W_1, W_2, W_3 y B se recombinarán adquiriendo masa tres de ellos, mientras el cuarto siguió con el mismo carácter de "cero masa" que había tenido hasta entonces." Los tres bosones de la fuerza débil más el fotón.

A todo ese proceso de rotura universal de simetría, que realmente era la simetría ancestral electrodébil, se lo conoce en general como ***mecanismo de Higgs*** ¿Por qué pasan este tipo de cosas? Voy a intentar explicarlo en el capítulo próximo, otra inmersión teórica referente a lo que se ha dicho que le pasó al campo de Higgs. Una explicación matemática muy simple, espantosamente simple, aunque creo que clara, del por qué creemos que suceda esta dinámica en algún tipo de campo.[9]

Un poco de teoría sobre simetrías

¿Qué es eso de las simetrías y sus roturas? Ya presentamos en otro cuadro aclaratorio al final del capítulo 2 ciertas nociones elementales acerca de ellas. Ahora toca ampliarlas.

Los procesos de la física experimental y la teórica pueden ser descritos mediante las matemáticas, las cuales ofrecen formulaciones más o menos complejas, reflejo y explicación de la dinámica de dichos procesos. Tanto para las ecuaciones de la gravedad newtoniana como para las más intricadas fórmulas de las ecuaciones de onda cuánticas.

Se da el caso que a estas fórmulas se les puede aplicar transformaciones matemáticas que no alterarán sus resultados ni alteraran el sistema transformado. Por ejemplo, cambiar el origen de coordenadas. Si lo hacemos el mundo seguiría siendo descrito de la misma manera. A estas transformaciones particulares se las conoce como ***simetrías****, que podrán ser "externas", las que afectan al mundo "tangible", como traslaciones o giros, o "internas", aquellas que afectan al intrincado mundo intangible de la matemática.*

Como nos dijo la matemática alemana Emmy Noether allá por el año 15 del siglo pasado, si existe una simetría continua (como la que presenta un círculo frente a una rotación continua, proceso durante el que no se produce ni un salto de imagen) existe "algo" que se conserva. Que es lo que sucede con la energía hija de la simetría temporal, o la carga eléctrica hija de lo que llamamos simetría electromagnética. La primera se daría en el mundo real y tangible, la del espacio/tiempo, y la segunda en el mundo interno de la

matemática y los objetos que describe (como los campos cuánticos). De ahí que antes le hayamos llamado simetría interna.

Normalmente alrededor de este último tipo de simetrías oiremos hablar, por ejemplo, de simetrías ortogonales O(n), SO(n), o unitarias U(n) o SU(n), estas últimas que afectan a campos complejos. El parámetro ***n*** *significa el número de dimensiones en las que trabajamos. Todas ellas son grupos de transformaciones bajo las que un sistema mantendrá su simetría. Los elementos que conforman esos grupos son las distintas formas de transformar un sistema manteniendo su simetría. Como un grupo de giros y rotaciones sobre un triángulo alrededor de un origen de coordenadas, tal como se decía en el capítulo 2. Las simetrías "S" son grupos de simetrías exclusivamente de rotación. Como veis, todo ello no deja de ser más que un lenguaje matemático de unas teorías "internas". Entre ellas las* ***simetrías de gauge*** *que son un tipo específico de simetría interna relacionadas con la* ***invarianza*** *bajo transformaciones locales en el espacio de campos, y son fundamentales para describir las interacciones mediadas por bosones de gauge, los de las fuerzas fundamentales. La invarianza significa que las leyes físicas o las ecuaciones que describen un sistema no cambian al verse transformadas.*

Estos grupos de transformaciones de simetría "internas" están definidas por un conjunto de matrices unitarias nominadas como U(n) o SU(n), siendo n el tamaño/dimensión de las matrices. El grupo de simetría interna más simple es el U(1). Geométricamente corresponde a la simetría rotacional de un círculo girando un ángulo. Las simetrías SU(n) también son simetrías exclusivamente rotacionales, pero en un espacio n>2. A bajas energías promedias del Universo, nuestro mundo, la invarianza frente a la simetría SU(2) nos define la interacción débil y la U(1) la interacción electromagnética. Retrocediendo en la historia del Universo hacia estados más energéticos, vemos que ambas en realidad se unifican a energías de alrededor de ~250 GeV, más o menos la energía de cambio de fase para la escala electrodébil. A esas energías superiores el grupo combinado SU(2)×U(1) describe las interacciones electrodébiles en donde estas dos fuerzas son indistinguibles. Aún más atrás en la historia del Universo, en escalas de energía mucho mayores ($>10^{15}$ GeV), se postula que las tres fuerzas fundamentales del Modelo Estándar (interacciones fuerte, débil y electromagnética) se unifican. En este régimen se describen mediante un grupo más amplio de simetrías gauge, como SU(5) o SO(10), que engloban a la SU(3)×SU(2)×U(1).

Las simetrías que se aplican uniformemente en todo el espacio-tiempo se conocen como ***simetrías globales****. Estas transformaciones mantienen inalteradas las leyes físicas siempre que el cambio sea el mismo en todos cada punto del espacio. Sin embargo, existe otro tipo de simetría, una más intrincada y rica, donde las transformaciones pueden variar*

*independientemente en cada rincón del universo. Estas son las **simetrías locales**. En el caso de las simetrías locales, el valor del cambio tras la transformación simétrica no es constante, sino que puede diferir de un punto a otro. Este último enfoque, aunque profundamente elegante y enriquecedor por sus posibilidades de diversidad, trae consigo un desafío: aplicar estas transformaciones de manera inconsistente en cada lugar puede generar diferencias que rompan la coherencia de las ecuaciones que rigen la física. Para resolver este problema, se requiere la aparición de un nuevo protagonista: un campo adicional que compense estas discrepancias y restaure la armonía. Este personaje, que podríamos imaginar como un camarero atento que estabiliza una bandeja de copas mientras camina por una habitación en constante movimiento, es el **campo gauge**. El objetivo general es llevar la bebida a la mesa, pero es fundamental que la bebida llegue sin haber sido derramada.*

Si estudiamos la aplicación de simetrías internas a las ecuaciones de estado de los campos cuánticos vemos, como decimos, que realmente se necesita a este nuevo personaje, que en concreto es un campo cuántico de interacción, como puede ser el electromagnético o el nuclear fuerte. Con ello la partícula esencial de un campo puede interrelacionarse con la partícula mediadora de fuerza de otro campo, con una intensidad que va a depender de la constante de acoplamiento de ambos campos, dándole la posibilidad de realizar "acciones" gracias a que ambas interactuarán.

NOTAS DEL CAPÍTULO 10:

1. Como universo observable entendemos a una región parcial del Universo total, una esfera con nosotros de observadores en el centro en la que la luz emitida por los puntos frontera más exteriores ha tenido tiempo de llegar hasta el centro de la esfera. Lo que quiere decir que estos puntos frontera se encuentran a una distancia tiempo-luz de nosotros igual a la edad del Universo en el momento. Hoy su edad es de 13.800 millones de años-luz, que ampliados por el efecto de la expansión equivalen a unos 5×10^{23} kilómetros de radio de la esfera observable. El resto del Universo es inalcanzable.
2. Los científicos hablan de "fuerza gravitatoria, fuerza electromagnética y fuerzas nucleares fuerte y débiles" en un sentido diferente del sentido newtoniano clásico. En ese contexto la palabra "fuerza" sustituye al término más técnico de "interacción". Lo que buscan los físicos

modernos no es el portador de una fuerza clásica, la gravedad no se describe ya como una fuerza en el sentido de Newton, sino como una especie de alteración del espacio-tiempo tal como postulaba Einstein, que presumiblemente podría ser detectada en forma de perturbaciones aisladas y localizables llamadas gravitones, un tipo de partícula cuántica asociada a la interacción gravitatoria.

3. Lo de *condensar* es otra pequeña alegoría de que la interacción de Higgs comenzaba a ser una realidad. Podemos pensarlo como que había aparecido de forma estable la partícula del campo Higgs.
4. Para una mayor información podéis acudir a esta entrada del blog Naukas.

   [http://francis.naukas.com/2013/09/23/francis-en-trending-ciencia-asuntos-de-familia-del-higgs/]

   O si aún queréis un poco más de profundidad "entendible" os recomiendo estas dos entradas del blog "*Of particular significance*". La primera, general sobre la interactuación entre campos relativistas enlazados y la segunda, que se apoya en la anterior, para explicar matemáticamente cómo Higgs induce masa en las partículas de otros campos que en principio no tenían.

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/8-how-particles-and-fields-interact/]

   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/how-the-higgs-field-works-with-math/1-the-basic-idea/]
5. A este ***impulso*** se le conoce como el "principio de energía mínima", que esencialmente declara que para un sistema cerrado, sin que los parámetros externos -como el volumen- varíen, la energía interna disminuirá y se acercará en el equilibrio a un valor mínimo.
6. Simplemente decimos que la energía es nula por pura conveniencia ya que los potenciales tienen sentido en comparación con su nivel en otros puntos.
7. Técnicamente se los conoce como bosones de Goldstone. Esos bosones podrían "moverse" siguiendo la circunferencia de mínimo potencial definida por el VEV. Pero es zona de potencial constante, lugar donde no se genera masa en las partículas ¿Por qué? De forma intuitiva, porque sabemos que una partícula másica se genera por excitación del campo y el Higgs posicionado en VEV solo puede excitarse en la dirección radial, la de su vector (O,VEV), y no por el fondo del canal circular de potencial constante. La explicación más teórica de esto la encontramos en que un potencial constante no puede generar masa porque no induce ninguna variación en la energía de las partículas, lo cual es necesario para que éstas adquieran masa. Las partículas que interactúan con un campo constante no experimentan ninguna "fuerza" que altere su estado de

energía de forma que adquieran masa. Para generar masa de forma general en un campo, el potencial debe ser variable, es decir, debe cambiar en función de la posición o el tiempo, lo que da lugar a la interacción que da masa a las partículas. Luego los bosones de Goldstone no tienen masa, pero sí que mantienen los grados de libertad correspondientes a la direcciones rotas. La cuarta dirección, la prioritaria, es la que define un cuarto bosón, el bosón de Higgs con masa.

8. [http://cds.cern.ch/record/1638469/files/117-167%20Ellis.pdf?version=2]
9. [https://www.fiquipedia.es/home/recursos/fisica/recursos-modelo-estandar/]

11: La liberación de la fuerza débil II

de 10^{-12} a 10^{-6} segundos desde el inicio

En el capítulo anterior habíamos empezado a hablar acerca de la liberación de la fuerza nuclear débil, en la época que conocemos como electrodébil. La energía del Universo había descendido hasta niveles adecuados para que pudieran suceder dos cosas muy trascendentales para su futuro: la "condensación" de la partícula Higgs y la consiguiente rotura de la simetría que nos trajo el campo electrodébil. Allí habíamos comentado los correspondientes detalles y nos habíamos quedado en una descripción teórica de cómo Higgs pudo engendrar una masa en las partículas elementales. Recuperemos el último párrafo del capítulo 10 que nos enlace con lo que diremos en este.

"*¿Por qué pasan este tipo de cosas? Voy a intentar explicarlo en el capítulo próximo, otra inmersión teórica referente a lo que hemos dicho que pasó con el campo de Higgs. Una explicación matemática muy simple, espantosamente simple, aunque creo que clara, del por qué creemos que sucede esta dinámica en algún tipo de campo.*"

Los campos relativistas transportan energía e información a lomos de sus ondas-partículas de un punto a otro del Universo. Estas ondas pueden afectar a las ondas de otro campo, con la consecuencia de que se puede modificar alguna de sus características físicas, cosa que no hubiera pasado sin el influjo del primero. Según la mecánica cuántica, la ecuación de onda que definen a los campos generalmente adopta la siguiente forma matemática siendo Φ la función de onda del campo:

$$\mathbf{d^2\Phi / dt^2 - c^2\, d^2\Phi / dx^2 = - [K_1\, \Phi + K_2\, f(\Omega,\beta,\theta,\ldots)]}$$

En esta ecuación la genérica expresión $[d^2\Phi/di^2]$ es la variación de la variación del campo Φ[1], la primera con respecto al tiempo (aceleración de la onda) y la segunda con respecto al espacio (curvatura de la onda); **c** es la velocidad de propagación de la luz; K_1, el coeficiente que acompaña al campo en el sumando lineal en Φ y sólo en Φ, es un término de amortiguamiento, una constante que tiene que ver con la masa de la partícula fundamental del campo Φ[2]; y K_2 tiene que ver con la fuerza de acoplamiento entre el campo Φ y los que intervienen en la función última f(Ω,β,θ,…), que, por lo general, puede depender de uno o varios campos -Ω,β,θ,…-, e incluso del propio campo **Φ.**

Dicho lo anterior no nos asustemos… voy a traducir la ecuación a palabras, que creo resultará más comprensible.

La dinámica espacio/temporal de un campo cuántico relativista Φ

es, de alguna manera, función de

los cuantos de energía específicos del campo, es decir, "la masa de sus partículas" y de

"la fuerza de interrelación" con otros campos

Lo cual no parece ser el descubrimiento de la pólvora: la dinámica de cualquier cosa depende de su propia forma de ser y de cómo interactúa con su medio. Incluso los humanos somos así.

Hasta el momento en que se inició el proceso que estamos empezando a estudiar, el correspondiente a un nivel de energía media en el Universo ligeramente por debajo de 10^3 GeV, los campos existentes -los que correspondían a las partículas elementales quarks, electrón, muon, tauon y neutrino- no generaban partículas con masa. Incluso el campo de Higgs. Pero ya sabemos que llegó un instante en que se rompe la simetría y Higgs va a dar masa a las partículas de otros campos e incluso a sí mismo. Vamos a intentar plasmar estas dos "personalidades", sin y con masa, en ese momento de transición, usando la ecuación anterior de los campos que ahora ya entendemos mejor.[3]

Por ejemplo, *ésta sería la que rige la vida de un quark sin masa* →

$$\mathbf{d^2Q / dt^2 - c^2\, d^2Q / dx^2 = - K_2\, QH^2}$$

(no tiene el sumando de K_1)

y ésta es la que rige la vida de Higgs ya con masa →

$$\mathbf{d^2H/ dt^2 - c^2\, d^2H/ dx^2 = - [K'_1\, H + K'_2\, HQ^2]}$$

Dijimos en el capítulo anterior que al final del proceso de rotura de la simetría, cuando el campo llega a la situación de vacío verdadero, Higgs adquirió un valor constante y universal H_0. Eso no quiere decir que Higgs estuviera firmemente anclado en el valor 0 puesto que las inestabilidades cuánticas le mantienen vibrando ***con una cierta amplitud h a caballo de la base H_0***: en el mar estable de H_0 cabrillean las ondas de h de forma que [$H = H_0 \pm h$]. Como la referencia H_0 es constante su ecuación tras la rotura de la simetría seguirá teniendo la misma apariencia, aunque relativa a la parte h de la verdadera amplitud de onda.

Pero ¿qué pasa con la ecuación del campo Q? Pues que *la ecuación anterior correspondiente al quark Q* (que podemos generalizar a la mayoría de las

partículas elementales del modelo estándar), en los puntos donde se produce una interrelación entre el campo de Higgs H en el vacío verdadero y el campo Q, *se va a transformar adoptando esta nueva expresión*:

$$\mathbf{d^2Q/dt^2 - c^2\ d^2Q/dx^2 = -K_2\ Q\ (H_0+h)^2 = -K_2Q\ (H_0^2+2H_0h+h^2)}$$

Normalmente los campos cuánticos se desvían de su valor de equilibrio poquísimo, por lo que podemos decir que el valor de Q que baila sobre un valor cero y el de h tienen que ser muy pequeños. No es el caso de H_0 que es constante con valor apreciable. El producto de dos o más números muy pequeños lo podemos considerar despreciable frente a números significativamente más grandes, por lo que, si aplicamos esa idea a la ecuación anterior fácilmente llegamos a la siguiente.

$$\mathbf{d^2Q\ /\ dt^2 - c^2\ d^2Q\ /\ dx^2 = -\ [K_2\ H_0^2]\ Q = -\ K_1\ Q}$$

Ha aparecido como de la nada un ***nuevo término lineal en Q*** que he resaltado en rojo, un nuevo K_1 que, como hemos dicho más arriba, tiene que ver con la masa de la partícula fundamental del campo Q. No, no es magia: ***La fuerza de acoplamiento K_2 entre los campos Q y H ha generado masa en el campo Q***.

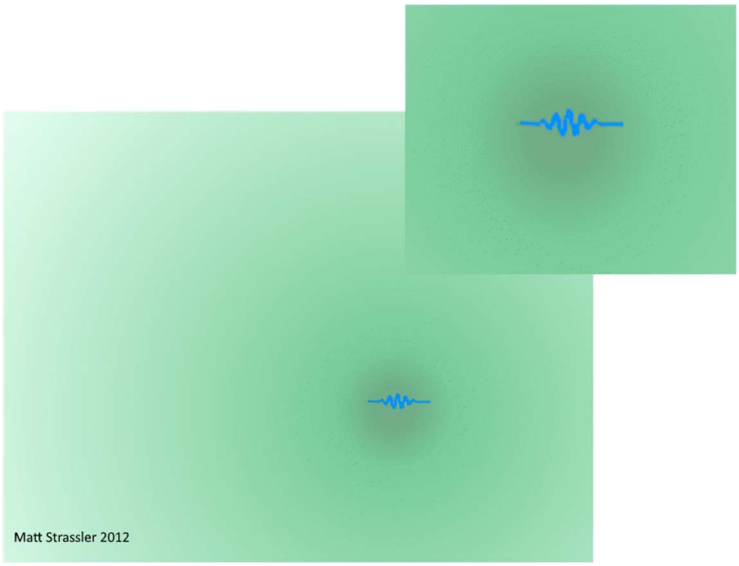
Por curiosidad, diremos que la masa que aparece de "*ex novo*" es la siguiente:

$$\mathbf{m_Q = [h/2\pi c^2]\ (K_2)^{1/2}\ H_0 = y_Q\ H_0}$$

Según la fórmula anterior de la masa de las partículas más elementales, ésa depende de la fortaleza de la interacción del campo específico con el de Higgs, que en la ecuación anterior hemos identificado como la constante de Yukawa y_Q,[4] y del valor promedio constante del campo Higgs en el universo, H_0. De nada más.

Lo que nos dice que ***la masa inducida depende del valor base del campo de Higgs y <u>en absoluto</u> con su partícula***: si el campo de Higgs tuviera un nivel base igual a cero, no induciría ninguna masa en las partículas de los otros campos. Y, sin embargo, el propio campo de Higgs seguiría teniendo su partícula, que no sería más que la excitación vibratoria fundamental, su cuanto de energía, de acuerdo a como se dijo en el capítulo anterior. Aunque el campo de Higgs es el mecanismo reconocido y ampliamente aceptado para generar masa en las partículas elementales dentro del Modelo Estándar, se reconoce que podrían existir otros mecanismos más allá del Modelo Estándar que también contribuyen a la masa de algunas partículas o fenómenos. En particular, investigaciones en teorías más allá del Modelo Estándar, como la supersimetría, la gravedad cuántica o la materia oscura, podrían revelar nuevos aspectos de cómo se genera o distribuye la masa en el universo, lo que aún no se comprende completamente.

En la imagen siguiente se intenta explicar de forma gráfica lo que acabamos de expresar, es decir, cómo se influyen los campos cuánticos entre sí. Uno de ellos, que podemos suponer como el campo quark, está inicialmente en reposo y permea con su color verde pálido uniforme todo el espacio. Un segundo campo que coexiste con el anterior en el mismo espacio, y que podemos suponer el Higgs, sufre una excursión energética en un punto, apareciendo un cuanto, su onda-partícula fundamental (la especie de pequeño muelle azul), una pequeña ola de energía sobre el mar de base del campo verde. Ambos campos pueden interrelacionarse con una determinada fuerza… y de hecho en este croquis se intenta grafiar que así lo hacen. Se puede observar cómo al interactuar los dos, en el campo verde se incrementa la energía (se oscurece el verde) con un gradiente que lo hace más oscuro cuanto más cerca del cuanto del campo azul, y que se va difuminando progresivamente hacia el color pálido inicial en las distancias más alejadas. Puede llegar el caso de que si el campo azul es lo suficiente potente -y ahí podemos pensar en Higgs montado en su H_0- inducirá una mayor excitación en el campo verde, generando en él un cuanto propio de energía, la onda-partícula característica del campo verde. En nuestro ejemplo un quark.



Un bosquejo de cómo interactúan dos campos. En el texto se explica cómo interpretarlo (Imagen: Matt Strassler, ⓕ fair use)

Hecha la anterior digresión teórica, volvamos al escenario. En el Universo todo seguía más o menos según los viejos parámetros. Había energía suficiente para que ahora, ya roto el campo electrodébil, el recién estrenado y libre campo electromagnético siguiera generando perturbaciones en el resto de los campos de partículas: ya sabemos que por choque de fotones lo suficientemente energéticos se van generando nuevas partículas, cuyas masas serán iguales o menores que la suma de energías de los fotones madre.

Hagamos una vez más la foto fija del momento. Cualquiera comprendido entre 10^{-12} y 10^{-6} segundos tras el Big Bang. Entre la rotura electrodébil y la primera generación de hadrones como el protón o el neutrón. La sopa de partículas estaba constituida por las tres familias de los quarks, electrones y neutrinos, los bosones de los cuatro campos de fuerzas más el de Higgs y las partículas hoy por hoy desconocidas que están ya formando alguna especie de materia oscura. La energía de "condensación" de alguna hipotética de estas últimas, que en las teorías de la supersimetría SUSY se las conoce con el nombre genérico de neutralinos, pudiera estar en el entorno de 30 a 5.000 GeV, aunque la apuesta más firme es la de los 200 GeV, justo en el rango del periodo que estamos analizando en este capítulo (de 10^5 a 1 GeV).

Todo ello constituía un plasma denso que se conoce con el nombre del plasma quark-gluon, simplificación del momento y esencia de lo que iba a venir. En este plasma era perceptible una textura de "viruelas", reminiscencia de las atemperadas fluctuaciones cuánticas que se produjeron en los momentos más álgidos de la expansión inflacionaria. Este plasma también estaba manteniendo la dinámica de algo similar a unas ondas sonoras que "arrugaban" su esencia y dibujaba patrones de densidad de materia y energía. Algo parecido a lo que genera un instrumento musical al emitir una nota, que "arruga" la densidad de la mezcla de gases del aire produciendo una onda sonora. Sin olvidarnos de la existencia de las ondas gravitatorias predichas por Einstein,[5] consecuencia de las tremendas variaciones de masa generadas al culminar la inflación, y que también seguían produciendo en el mundo del plasma quark-gluon. un "arrugamiento" del tejido espacio/temporal. Por supuesto que en este escenario también estaban presentes las almas de la función, las fuerzas fundamentales responsables de la dinámica de la materia y la radiación. Todas las partículas existentes quedaban al alcance de cualquier campo de fuerzas existente. Quizás en aquellos momentos el nivel térmico no fuera el más adecuado para ello ya que la Física sólo les permite ser eficaces por debajo de una cierta temperatura. Que es lo mismo que por debajo de una cierta energía cinética de la partícula. Repasemos su nómina.

La *gravedad*, vieja actriz. Su presencia se manifestó desde el verdadero principio del Big Bang. Y aunque en el momento de la rotura de la simetría electrodébil las partículas acababan de dejar de ser casi pura radiación sin masa, no cabe duda de que sus energías asociadas deformarían levemente el tejido espacio/temporal, lo que sin duda también alteraría sus trayectorias.

El *electromagnetismo* asimismo estaba presente. En esta época los fotones comenzaron a tener una identidad libre tal como los conocemos, por lo que ya podían ejercer su mediación entre las cargas eléctricas. Así que ya existía la condición base para que, en el momento en que las partículas cargadas vayan

frenando sus velocidades con la expansión, tuvieran la oportunidad de unirse: allí estaban en la brecha quarks y electrones. Aunque aún tendrán que esperar.

La *fuerza nuclear fuerte* era independiente desde hacía "mucho". Pero ella sabe actuar sobre quarks y gluones. Por fin los primeros se habían "condensado" y con masa, lo que les daba una cierta estabilidad temporal, lo suficientemente prolongada como para posibilitar las interrelaciones. Pero para ver los efectos de la fuerza nuclear fuerte deberemos esperar hasta un nivel de energía del orden del GeV ¡y estamos a 10^3 GeV!

Por último, la *fuerza nuclear débil* que también estaba presente: Los bosones W^+, W^- y Z^0, ya con masa, podían intermediar en las reacciones de desintegración β por la que los quarks pueden cambian su "color". Eso iba a permitir, entre otras cosas, el transmutar protones por neutrones y viceversa. O ser la responsable de la gran aniquilación de una buena porción de los neutrones primigenios. Veréis la importancia de ello dentro de unos capítulos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 11:

1. Para el que piense que la frase parece un poco ininteligible, le animo a aplicarla al siguiente caso cotidiano: la velocidad de un objeto no es más que la variación de la distancia recorrida con el tiempo, y la aceleración es la variación de la velocidad con el tiempo -la variación de una variación-. Vemos que sabemos manejar con soltura el concepto de la *variación de la variación*, lo que se conoce en matemáticas como segunda derivada, que es lo que quiere decir la grafía del texto $d^2…/ d...^2$
2. En realidad proporcional a la masa al cuadrado.
3. Si queréis un poco más de profundidad entendible os recomiendo que leáis estas dos entradas del blog "*Of particular significance*". La primera, general sobre la interacción entre campos relativistas enlazados y la segunda, que se apoya en la anterior, para explicar matemáticamente cómo Higgs induce masa en otros campos que en principio no tenían.
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/fields-and-their-particles-with-math/8-how-particles-and-fields-interact/]
   [https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/how-the-higgs-field-works-with-math/1-the-basic-idea/]

4. La ***constante de Yukawa*** es un parámetro que mide la intensidad de la interacción entre un fermión y el campo de Higgs. Cuanto mayor es esa constante, mayor es la masa de la partícula, ya que la masa se genera a través de esta interacción. Por ejemplo, para el electrón la constante es muy pequeña (aproximadamente 2.08×10^{-6} y para el quark top mucho mayor (aproximadamente 1).
5. Y que ya hemos detectado en otros fenómenos cósmicos, como la fusión de dos agujeros negros en 2015, o la fusión de dos estrellas de neutrones en 2017. Más información sobre las ondas gravitatorias en el capítulo 6.

12: Los hadrones

llegando al segundo desde el inicio

Recordamos del capítulo anterior cómo en el tiempo $t=10^{-6}$ segundos después de su inicio el Universo estaba formado por un medio al que llamamos plasma quark-gluon, aunque realmente había allí más partículas compañeras de viaje. Este plasma comienza a ser familiar para los físicos, puesto que ya ha sido recreado en experimentos realizados en algún acelerador de partículas como el del CERN.[1] Lo curioso del caso es que estos experimentos nos dicen que más que a un gas el plasma quark-gluon se asemeja a un líquido apenas viscoso, a pesar de que la teoría nos dice que la densidad es tremenda puesto que corresponde a 10^{17} veces la del agua. En este momento de la vida del Universo se ha alcanzado un nivel energético que se encuentra en el entorno de 1 GeV, lo que equivale a una temperatura de crucero de 10^{13} K.

Cronómetro 0: tiempo igual a $t=10^{-6}$ segundos. Va a comenzar la ***transición de quarks a hadrones***. La nómina de estos últimos, que son partículas que están formadas por dos o tres quarks, está compuesta por el protón, el neutrón y algún que otro bosón raro, entre los que se encuentra el mesón pión, que tienen su importancia en la fortaleza de los núcleos atómicos. Los quarks son unas partículas elementales que, por lo que sabemos hoy en día, creemos que no están compuestas de otras más pequeñas.[2]

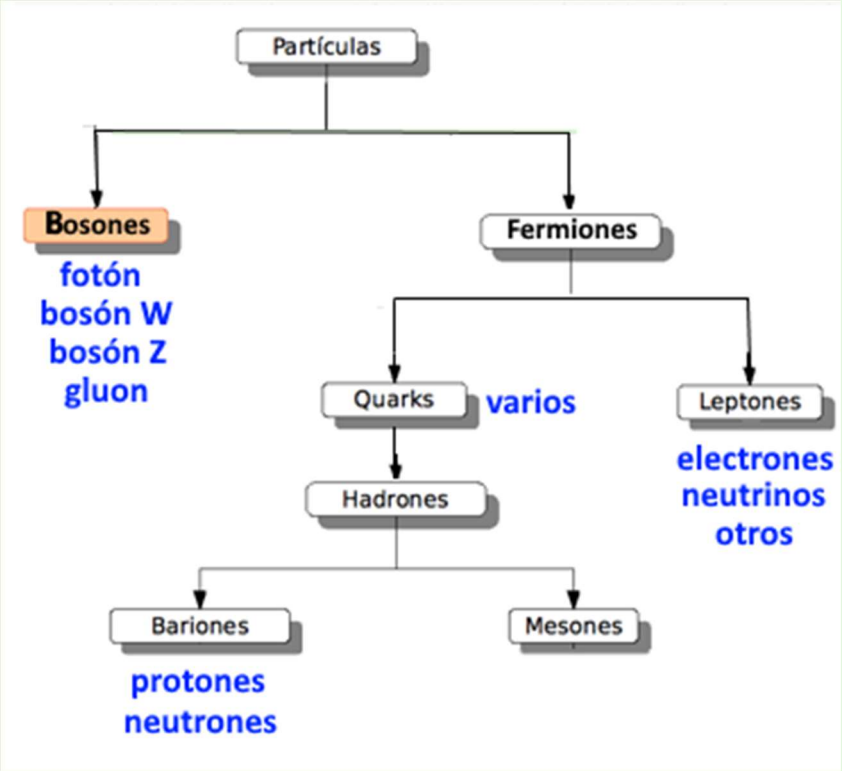
Los conocemos de seis "sabores" -se suele usar esta terminología-, seis quarks distintos emparejados de dos en dos. La masa de tres de ellos supera la energía promedio del momento, lo cual quiere decir que su única oportunidad de aparecer en escena es como producto en alguna reacción "*ad-hoc*" entre partículas o en una fluctuación cuántica de su campo, para luego desaparecer en un plazo brevísimo como corresponde a partículas pesadas. Cosas de la incertidumbre cuántica, ya sabemos. Los otros tres, además de estos caminos para nacer, y al tener una masa inferior a la energía del momento de 1 GeV, aún se generaban en parejas quark-antiquark por el choque de los fotones que en aquella época se movían con ese nivel de energía.

En este periodo la ***fuerza nuclear fuerte*** comenzó a jugar un papel protagonista, uniendo quarks mediante su partícula mediadora, el gluon.[3] Esta fuerza permitió la formación de partículas compuestas llamadas hadrones, como protones y neutrones. Los quarks más ligeros, como los up y down, permanecieron estables en mayor medida, ya que los quarks más pesados (*charm, strange, top, bottom*) tenían una vida extremadamente corta. Debido a su gran masa, estos quarks más masivos se desintegraron rápidamente en

partículas más ligeras antes de que pudieran formar estructuras estables. Este proceso no fue una limitación de la interacción fuerte, sino una consecuencia de las leyes de la física cuántica que rigen la desintegración de partículas inestables. Así, el universo primitivo quedó dominado por los quarks *up* y *down* que formaron la base para los núcleos atómicos que surgirían más adelante.

Nota para encuadrar el embrollo de partículas introducidas en el texto

Existen dos grandes familias de partículas, los ***bosones*** *mediadores de las interacciones -las fuerzas- entre campos y los* ***fermiones****, el resto, que formarán la materia. En los fermiones hay otras dos grandes familias, la de las partículas formadas por quarks -los hadrones- y el resto, los leptones. Los mesones son una cosa rara, ya que, a pesar de que caen en la línea de la materia -bajo los quarks-, realmente actúan como bosones intermediadores. Entre los mesones se encuentra el pión, personaje que sale en nuestro libro.*

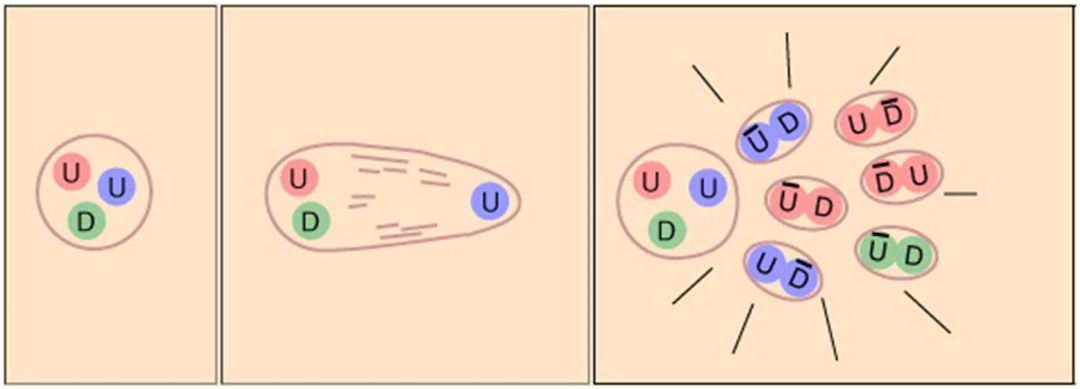


(Imagen: simplificada a partir de la serie "Esas maravillosas partículas", blog El Tamiz, CC BY-NC-ND 2.5 ES)

La fuerza nuclear fuerte presenta unas características realmente curiosas. Porque lo mismo engendra bariones como permite que esos queden agrupados en los núcleos atómicos en contra de lo que parecería imponer la fuerza

electromagnética. A veces se comenta que cuando une quarks habría que llamarla ***fuerza de color*** mientras que cuando trabaja para que no se desbaraten los núcleos separando protones y neutrones, habría que bautizarla como ***fuerza fuerte residual***. Y es realmente fuerte en la corta distancia, en el entorno de los 10^{-15} metros que es más o menos el tamaño de un núcleo atómico, por lo que está perfectamente capacitada para ejercer su función de pegamento dentro de ellos. Por debajo de esta distancia, es decir, dentro de un protón o un neutrón la fuerza de color intermediada por los gluones parece ejercer aún una mayor interacción de modo que los quarks encuentran casi imposible separarse, lo que se conoce como confinamiento de los quarks cosa que explicamos con más detalle a continuación.[4]

Los gluones también poseen carga de color, lo que significa que pueden interactuar entre ellos. Esta propiedad única genera una dinámica compleja: cuando un gluon es intercambiado entre dos quarks, puede emitir o absorber otros gluones, que a su vez generan aún más gluones, creando una intensa red de interacciones. Este campo de gluones que interacciona fuertemente alrededor de un quark no se extiende uniformemente en todas direcciones como el campo eléctrico de una partícula cargada. Más bien queda confinado en un ***tubo de flujo*** que se extiende hasta algún otro cuark. Allí los gluones viajan a la velocidad de la luz pero no viajan muy lejos. Esta característica explica por qué la fuerza nuclear fuerte es extremadamente poderosa a cortas distancias, pero no se manifiesta a escalas mayores, ya que su propia naturaleza la restringe a un alcance muy limitado.

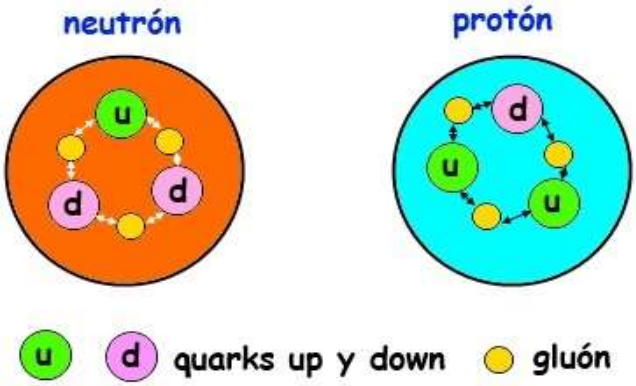


*Esquema de lo que se conoce como **confinamiento de color** por el que los quarks nunca se han observado en solitario (A partir de Hyperphysics [5] fair use)*

Si un quark intenta separarse de los otros dentro de un barión (ya sea por su movimiento interno o mediante un impulso externo), el tubo de flujo generado en el campo de gluones que lo conecta con los demás quarks concentra tanta energía que, antes de romperse, alcanza el umbral necesario para crear un nuevo par quark-antiquark. Este proceso asegura que, en lugar de liberar un quark

aislado, lo único que se produce es una "lluvia" de parejas quark/antiquark adicionales. En esencia, cualquier intento de romper la conexión entre quarks únicamente genera más materia confinada, manteniendo a los quarks y gluones dentro de los hadrones tales como protones o neutrones. Esta propiedad conocida como ***el confinamiento de color,*** refleja la tendencia natural de los quarks y gluones a permanecer enlazados en estructuras compuestas estables.

La figura de más arriba es una explicación visual intuitiva de lo que acabamos de decir. El ejemplo corresponde al caso de un protón, con dos quarks *up* de distinto color y uno *down*, que estarían enlazados por gluones que aquí no están representados aunque los podemos imaginar. Por la causa que sea, un quark *up* intenta separarse de esa agrupación a tres generando un tremendo potencial en el campo fuerte, una energética tensión de cortísima distancia en el tubo de flujo. Y tal como se ha dicho, termodinámicamente resulta más espontáneo utilizar dicha energía en producir pares de quark/antiquark, permaneciendo así el quark *up* en su enlace original como se ve a la derecha del esquema.



Esquema de las "interioridades" del protón y el neutrón, formados aparentemente cada uno por tres quarks.

Y eso es lo que empezó a suceder en aquella época durante la que la actividad de la fuerza nuclear fuerte fue muy intensa, de forma que creemos que a los 10^{-3} segundos casi no quedaban ya quarks libres puesto que estaban confinados principalmente en neutrones y protones. En la figura anterior se puede ver cómo cada uno de ellos está formado por un trío particular de quarks y tres gluones, aunque en la realidad hay una miríada, que les hacen de pegamento. Hay que decir aquí que los protones y neutrones no presentan un aspecto tan plácido como podría deducirse de la figura. Ambos tienen una masa del orden de 1 GeV y como hemos apuntado, a vista de pájaro están formados por tres quarks de 4.10^{-3} GeV cada uno y por tres gluones sin masa. Evidentemente, no cuadran los números para la cantidad de masa en juego. El truco está en que en las pequeñas parcelas del mundo cuántico, los dominios espaciales internos de un protón o de un neutrón, se generan y desaparecen también millones de partículas, un mar de quarks y gluones con velocidades relativistas,

interaccionando entre ellos gracias a la fuerza nuclear fuerte o, incluso, naciendo y muriendo como resultado de sus choques. Todo ello aporta energía, la energía necesaria para cuadrar el balance másico de protones y neutrones hasta el que medimos de 1 GeV.[6]

El nivel energético medio del momento, 1 GeV y temperaturas de 10^{13} K, era similar a la masa en reposo de estas partículas compuestas, por lo que la radiación existente apenas los desestabilizaría al no tener suficiente energía como para "romper" sus estructuras. Eso sí, los quarks y antiquarks existentes habían creado hadrones y antihadrones, los cuales rápidamente degenerarían en reacciones de aniquilación que dejaron multitud de otras partículas elementales.[7] Como podemos imaginar el resultado final fue que la materia de hadrones seguía dominando sobre su antimateria.

Ciertamente debían quedar muy pocos de los quarks libres del plasma inicial -habían casi desaparecido a los 10^{-3} segundos gracias a este proceso de confinamiento en hadrones- pero aún seguían allí una gran multitud de electrones y neutrinos. Podemos contabilizar la población de ambos como uno por cada partícula de radiación. Los electrones, al interactuar con el campo electromagnético convivían con la radiación en equilibrio térmico: al no haberse alcanzado aún su temperatura de condensación -sus masas en reposo son muy pequeñas- hay que pensar que los procesos de creación a partir de la radiación existente y los de destrucción entre sus pares partícula-antipartícula se producirían sin trabas, manteniendo sus poblaciones estables. Por otro lado, los neutrinos, al interactuar solo débilmente, ya comenzaban a desacoplarse de la radiación. Este desacoplamiento los aislaba térmicamente del resto del plasma, marcando una diferencia fundamental con los electrones.

Las reacciones que siguen serían algunas de las que en aquellos momentos describirían las interrelaciones de las tres partículas elementales libres existentes: fotón, neutrino y electrón.

$$\textbf{Fotón(es)} \leftrightarrow \ \mathbf{e^+ + e^-} \ \ \mathbf{[positrón^+ + electrón^-]}$$

En el sentido de izquierda a derecha esta reacción iría decayendo en número a medida que la energía se iba aproximando en su enfriamiento hacia los 0,5 MeV, equivalente energético a las masas de electrón y el positrón, nivel a partir del cual ya fue muy difícil que se crearan este tipo de partículas a partir de la radiación. En el sentido derecha a izquierda duraría hasta que materia y antimateria se hubieran anulado mutuamente.[8] Aunque esto último sucedió más o menos a los 10 segundos de vida del Universo.

En las aniquilaciones de electrones no sólo se creaban nuevos fotones, sino también neutrinos, gracias a la fuerza nuclear débil, según el siguiente equilibrio:

$$e^+ + e^- \leftrightarrow \text{neutrino}_e + \text{antineutrino}_e$$

Esta última reacción, que habría contribuido desde la salida de la inflación exponencial a rellenar el Universo con los esquivos neutrinos, era muy efectiva por encima del MeV… ¡y en esta fase el valor de la energía promedio estaba situada por encima de este límite en un factor de diez a mil veces! A pesar de su importancia en aquellos momentos tenemos que pensar que progresivamente estaría perdiendo mucha eficacia y, de hecho, desaparecerá más o menos en la frontera del segundo -1 MeV- tras el inicio del Universo, momento en que los neutrinos se desacoplaron del plasma.

Todo parecía indicar que se estaba aproximando el momento en que culminara lo que se había ido pergeñando a lo largo de la época de la bariogénesis, con el triunfo final de la materia frente a la antimateria y el nuevo equilibrio de la balanza de partículas, que iba aproximándose al ratio de un barión superviviente por cada 10^9 fotones. Como hemos dicho, los electrones aún seguían en equilibrio térmico con la radiación y habría que esperar un poco más para que estas partículas quedaran sólo en su forma de materia -como contrario a su antimateria-. Cuando llegue ese momento, volveremos a contabilizar un electrón por cada protón por aquello de la neutralidad de carga en el Universo. Es decir, un protón y un electrón por cada 10^9 fotones -y neutrinos-. Pero eso será más tarde.

Ahora ya sabemos que en la fase en que nos encontramos, el plasma quark-gluon inicial se había transformado sustancialmente. Las cuatro fuerzas fundamentales estaban ya presentes de forma independiente, actuando en un plasma en el que aparecían como actores principales los protones y neutrones, los electrones y una intensa radiación de fotones y neutrinos. Una vez más adopto la licencia de llamar a los neutrinos *radiación*, acepción que se aplica normalmente a los fotones. Pero su poca masa, su velocidad relativista de desplazamiento por el Universo y su participación clave en las dispersiones de partículas en las que interviene la fuerza débil me inducen el imaginar un perfil muy semejante, aunque evidentemente no igual. Por completar la nómina de la vecindad no nos podemos olvidar que por algún lado andarían también los neutralinos, o algo así: las fantasmagóricas obreras de la materia oscura.

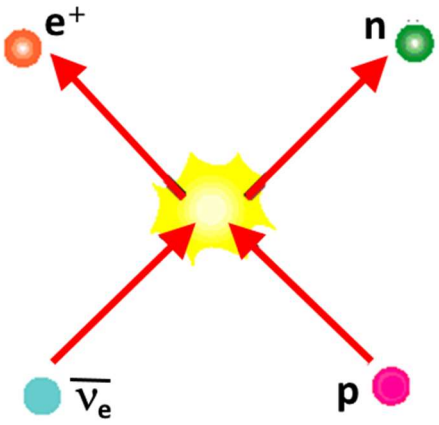
Dediquémosles un poco más de tiempo a los neutrinos, unas partículas muy esquivas. Hasta hace poco se creía que no tenían masa, aunque ahora sabemos que realmente ofrecen a la gravedad una muy ligera interacción, del orden del eV para los neutrinos menos pesados. No tienen carga, por lo que son transparentes para el campo electromagnético. Y también son ignorados por la fuerza nuclear fuerte. Podríamos decir que el campo relativista neutrino sólo está ligado a otros campos de partículas a través del campo de la interacción nuclear débil, con el que participa muy activamente provocando o siendo el

producto de reacciones de aniquilación de otras partículas. Algunas de ellas son las reacciones de desintegración radiactiva, como las que se dan en el núcleo de las estrellas. En particular, ayudados por los bosones W^+, W^- y Z^0 del campo nuclear débil, que no van a dejar tranquilos a nuestros bariones.

Los neutrinos, con muy poca masa en reposo pero que en este momento disponían de una energía elevada, también estaban allí formando una población superabundante. Entre todo este tipo de partículas se producían múltiples interacciones provocándose las conocidas como reacciones β inversa:

neutrón + neutrino$_e$ ↔ protón$^+$ + electrón$^-$

protón$^+$ + antineutrino$_e$ ↔ neutrón + positrón (e^+)



Esquema de la reacción beta inversa. Un antineutrino electrónico y un protón interaccionan decayendo en un positrón y un neutrón (Imagen: Sergio Torres, ⓔ fair use)

Se conocen con el calificativo de reacciones β inversa porque el neutrino es un iniciador, siendo así que en las reacciones β directa, como veremos más abajo, son subproductos. En estas reacciones inversas los protones pasaban a neutrones, los cuales respondían a su vez pasando a protones en un equilibrio numérico casi perfecto. Mientras los neutrinos tuvieran energía suficiente como para participar, su ritmo debía seguir tranquilamente. Pero la vida no es tan tranquila. El sustrato que estaba soportando estos intercambios, el tejido espacio/temporal del Universo, se estaba expandiendo, lo cual afectaba a la longitud de onda de los neutrinos que se veían amplificadas disminuyendo en consecuencia su energía.

En el difuso momento en que se sobrepasaba el umbral de 1 segundo el nivel energético era tan bajo, 1 MeV, que la energía de movimiento de los neutrinos ya no fue suficiente para iniciar las reacciones nucleares débiles con neutrones y protones. Podemos pensar que las ondas de los neutrinos eran tan grandes que

los bariones se escapaban entre sus piernas. Como resultado, estas pequeñas partículas quedaron libres para volar a su aire por todo el espacio/tiempo del Universo, abandonando el equilibrio termodinámico que habían mantenido con las otras partículas. Aquellos neutrinos primitivos aún están por ahí, aunque con una energía muy disminuida debido al enfriamiento general producido al expandirse el Cosmos. Los cálculos nos dicen que deberíamos ver en el frío Universo de hoy unos 112 neutrinos primigenios por centímetro cúbico. Pensamos que en este mar de fondo, lo que conocemos como ***fondo cósmico de neutrinos***, la temperatura ha descendido hasta los 1,95 K.[9]

Por desgracia, con el nivel de tecnología del que disponemos hoy en día no podemos llegar a detectar su pista de la misma manera como lo hemos podido hacer con la pista de los fotones que se liberaron de la materia bariónica bastante más tarde. Si consiguiéramos la foto del fondo de neutrinos tendríamos información directa del Universo a la edad de poco más de ¡un segundo!

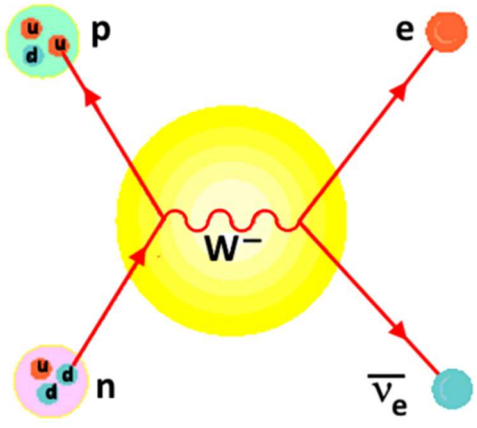
Pero la historia sigue. Los protones y neutrones que quedaron libres de los neutrinos tras su emancipación cósmica, lógicamente seguían estando en manos de la fuerza nuclear débil, aunque ahora siguiendo otro tipo de reacciones de desintegración β directa, conocidas como β^- y β^+.

desintegración β^-

neutrón → protón$^+$ + W$^-$ → protón$^+$ + electrón$^-$ + antineutrino$_e$

desintegración β^+

protón$^+$ → neutrón + W$^+$ → neutrón + positrón (e$^+$) + neutrino$_e$



Esquema de la reacción beta menos, característica de la interacción débil, mediada por uno de sus bosones W$^-$: Un neutrón decae en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico (Imagen: Sergio Torres, fair use)

La primera de las anteriores reacciones β directas hacía del neutrón una partícula inestable con una vida media de unos 15 minutos: es decir, cada 15 minutos una bolsa de neutrones reducía su población a la mitad… ¡a ese paso nos íbamos a quedar sin neutrones! A la par la segunda reacción por la que los protones libres podían pasar a neutrones, se producía cada vez con mayores dificultades por una circunstancia que, a la postre, en aquellos momentos iba a resultar decisiva para el tipo de "personalidad" que iba a adoptar el futuro Universo. El neutrón es ligeramente más pesado que el protón, por lo que en las dos reacciones de desintegración β anteriores era más fácil pasar de neutrón a protón que pasar de protón a neutrón. Lo primero implica ir energéticamente cuesta abajo -de la masa del neutrón a la menor masa del protón- mientras que lo segundo es una cuesta arriba energética.

La consecuencia es que llegado un momento la segunda reacción de desintegración β no ocurría con los protones libres, ya que la suma de las energías de las partículas resultantes sería mayor que la del protón inicial. Y esto violaría el principio de conservación de la energía. Este tipo de reacción β^+ hoy día sólo la observamos en protones ligados, integrados en núcleos atómicos, cosa que en aquel momento aún no existían. Así que poco a poco, mientras bajaba la temperatura, cada vez tenía más fuerza el siguiente **NO**

$$\textbf{protón}^+ \rightarrow \textbf{NO} \rightarrow \textbf{neutrón + positrón } (e^+) \textbf{ + neutrino}_e$$

circunstancia por la que el equilibrio protón-neutrón que hasta entonces se había dado, se iba haciendo cada vez más difícil. El número de neutrones libres iba decreciendo, incrementándose constantemente la relación protón/neutrón. Cuando el cronómetro marcaba 10^{-1} segundos desde el nacimiento del Universo, la relación era de 3 a 2 y en el umbral del segundo, con un 3 a 1, se intuía una futura goleada.

Antes de seguir adelante vamos a recapitular dibujando de nuevo el cuadro general final del intervalo temporal que estamos analizando. A un segundo tras el Big Bang teníamos unos neutrinos que volaban independientes por el tejido del Universo de aquel momento, unos protones en una posición de fortaleza a costa de unos neutrones en decremento. Y también unos electrones y positrones que, mientras no estaban trabajando para la fuerza nuclear débil, seguían con el mismo juego que hasta entonces: o se estaban aniquilando como parejas partícula-antipartícula o los fotones, que en este momento tenían aún suficiente energía, los iban creando al chocar entre pares. Esto último duró hasta que más tarde se alcanzó la energía de "condensación" de electrones y positrones, que es del orden de los 500 KeV. Hasta el segundo 14 tras el Big Bang los fotones mantendrían aún la suficiente energía como para que hubieran podido regenerar la población, momento tras el que ya sólo se producirían reacciones de aniquilación entre electrones y positrones, disminuyendo su concentración en

el plasma. Dado que la carga eléctrica total en el Universo es cero, al final sólo iban a quedar el mismo número de electrones que de protones.

Estamos celebrando el primer "cumplesegundos" del Universo. Una "esfera" repleta de radiación y neutrinos, algunos bariones y electrones, uno por cada mil millones de fotones, y algunas partículas más, inestables o misteriosas, que se distribuían localmente de acuerdo con las primitivas fluctuaciones cuánticas del periodo inflacionario. Toda esta energía-materia apelotonada formando un plasma de densidad 10^5 veces la del agua a lo largo de una fabulosa extensión del orden de los 10^{13} kilómetros de diámetro, en el entorno del año-luz, aunque mucho más pequeña que nuestra galaxia, la Vía Láctea. Y todo con una temperatura de 10^{10} K o, lo que es lo mismo, un MeV de energía promedio para todos sus habitantes. Mientras, las ondas sonoras y gravitacionales rielaban aquel infierno. Quizás algún meticuloso lector me pregunte ¿qué pasa con la cacareada fuerza nuclear fuerte residual? Porque hasta ahora solo ha aparecido la faceta de fuerza de color. No nos pongamos nerviosos. Estamos a las puertas de un suceso trascendental. Uno más, claro. Lo presentaré en el próximo capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 12:

1. En este enlace podéis profundizar en el tema: [http://francis.naukas.com/2013/11/18/francis-en-trendingciencia/#more-28270]
2. Claro que hasta hace unas décadas pensábamos que el protón y el neutrón eran a su vez elementales…
3. Aquí tenéis su historia, en el blog "*El Tamiz*": [http://eltamiz.com/2007/10/18/esas-maravillosas-particulas-el-gluon/]
4. Podéis haceros una idea mejor de la intensidad de interacción de la fuerza de color viendo la curva del potencial de Hideki Yukawa en el capítulo 13 siguiente.
5. [http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Particles/qbag.html#c1]
6. Las contribuciones a la masa-energía del protón o neutrón pueden asimilarse a tres causas:
   - La masa/energía de los quarks y antiquarks contenidos en el mar de partículas del interior de los hadrones. Los gluones aunque no tengan

masa en reposo generan en los tubos de flujo un campo con una gran cantidad de energía.

- La dinámica de las partículas. En primer lugar la energía del movimiento de los tres tipos de partículas. También sucede que los gluones se intercambian constantemente, generando fluctuaciones cuánticas que añaden aún más energía al sistema.
- Las interacciones entre gluones y quarks generan una cantidad significativa de energía adicional potencial o de enlace almacenada en las fuerzas nucleares fuerte que mantienen unido al hadrón, lo que también se traduce en masa.

7. En estos dos enlaces podéis ver algún ejemplo gráfico del tema:
[http://particleadventure.org/spanish/top_pros.html]
[http://particleadventure.org/spanish/k2s.html]

8. Dejando electrones y una cantidad marginal de positrones. Esta partícula, que fue predicha en la teoría por Paul Dirac, fue encontrada al fotografiar las huellas de los rayos cósmicos en una cámara de niebla. En la actualidad los positrones, a pesar de ser antimateria, nos son muy familiares y los producimos con facilidad, por ejemplo, cuando hacemos una tomografía por emisión de positrones.

9. Aunque si se tienen en cuenta sus pequeñas masas los cálculos nos dicen que estarán mucho más fríos, a $1{,}6\times10^{-4}$ K.

13: La nucleosíntesis I

desde 1 segundo a 380.000 años desde el inicio

Pero… ¿cómo es esto? Desde 1 segundo a 380.000 años… ¡PERO ESTO ES UNA BARBARIDAD! Hasta ahora hablábamos de fracciones temporales casi infinitesimales. ¿Qué pasó para alargarse tanto el calendario de eventos? Pues pasó que el mundo cambió entre los 30 y los 240 segundos. Un auténtico "*hat trick*" de la magia física que más tarde desvelaremos. Antes de los cien segundos lo que sucedía era continuación de lo mismo que había estado pasando al final del capítulo anterior, consecuencia de la aparición de los protones y neutrones libres. Después de los 240 segundos de vida, lo único digno de mención es que el Universo siguió expandiéndose y enfriando. Y así hasta que 380.000 años más tarde alcanzó una temperatura de unos 3.000 K, del orden de la que hay en la superficie del Sol. ***En unos escasos 200 segundos el Universo inventó la novedad del núcleo atómico*** más allá del humilde protón núcleo del hidrógeno.

Pero vayamos por pasos. Recordemos cómo en el capítulo anterior nuestro plasma estaba formado básicamente por radiación de fotones y neutrinos, electrones y positrones peleando y aniquilándose entre ellos, unos protones en proporción no demasiado abundantes comparados con la radiación y unos neutrones cada vez menos numerosos. Y entre ellos, comandando sus vidas, las cuatro fuerzas fundamentales generando sus particulares bosones intermediadores. No, no nos olvidamos de la materia oscura.

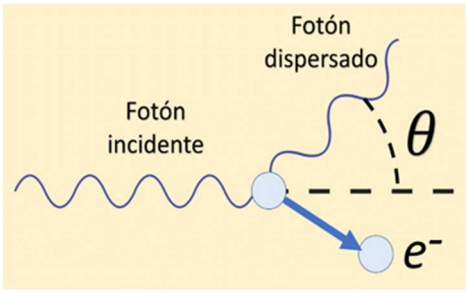
Hasta el segundo 14 siguió la batalla perdida del neutrón por sobrevivir. Más o menos en este tiempo la energía media del universo bajó hasta un nivel de 0,5 MeV, con la que los electrones no podían ya transformar protones en neutrones en interacciones β inversa,[1] mientras que su inestabilidad natural, la del neutrón, había hecho que se redujera su población universal a la mitad cada 15 minutos.[2] Por el contrario, los protones conseguían mantener su población, e incluso incrementarla, gracias al decaimiento de los neutrones. De forma que en este momento en particular la menguante relación protón/neutrón ya era de 5/1. Protones y neutrones que se trataban casi de tú a tú, con unas cinéticas propias y con los fotones que alteraban sus trayectorias y aproximaciones, dificultando cualquier tipo de nuevas relaciones entre ellos. Mientras, los electrones seguían apurando los últimos coletazos en sus relaciones de muerte y nacimiento con los positrones y la radiación.

Durante esta época temprana del Universo, debido a las condiciones de alta temperatura y densidad donde las grandes poblaciones de electrones y fotones

estaban en equilibrio térmico o casi en equilibrio térmico, las interacciones Compton entre esos dos tipos de partículas ocurrían de manera significativa. La dispersión Compton es el proceso en el cual un fotón interactúa de forma inelástica con un electrón libre o débilmente ligado, transfiriendo parte de su energía y momento.

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma' + e^-$$

el fotón incidente (γ) pierde energía al transferirla al electrón (e^-) lo que resulta en una disminución de la energía (o aumento de la longitud de onda) del fotón dispersado (γ′).



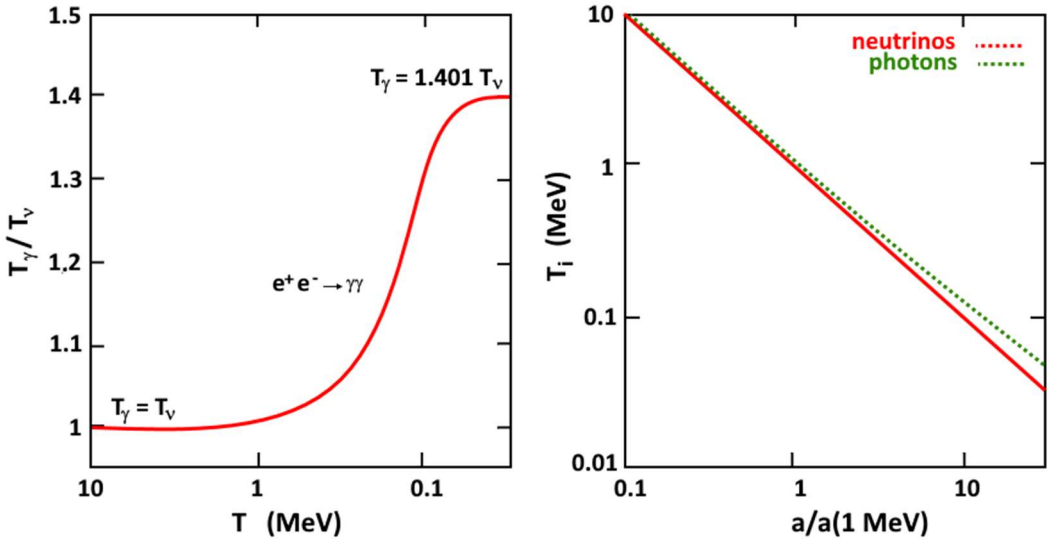
A partir de un difuso segundo 14, con un Universo a 6×10^9 K, el ritmo de aniquilación entre los electrones y los positrones empezó a ser superior al de regeneración producido a partir de los fotones y de los neutrinos. No en vano la energía media había caído por debajo del MeV, equivalente a la masa del electrón y el positrón.

$$e^+ + e^- \rightarrow \text{fotón} + \text{fotón} > \text{fotón(es)} \rightarrow e^+ + e^-$$

Este hecho hacía que la población de la radiación se incrementara con nuevos fotones producto de las reacciones de aniquilación, sin que se consumieran en las reacciones contrarias, lo que supuso una inyección de energía en esa radiación[3] lo que provocó una ligera ralentización en la situación de caída libre de la velocidad de su enfriamiento. Sin embargo, los neutrinos que se habían desacoplado del plasma hacia poco, como vimos en el capítulo anterior, no sufrieron este recalentamiento ya que sus densidades en el Universo habían sido fijadas desde el momento de su emancipación de la materia. La consecuencia es que, a pesar de haberlo hecho antes, si llegáramos a observar hoy aquellos neutrinos de fondo, cosa que aún no hemos conseguido, casi con seguridad los encontraríamos más fríos que la recalentada radiación de fondo de fotones. ¿Cuánto? Lo que nos diga esta relación que sigue, en la que ν se refiere a los neutrinos y γ a los fotones de la radiación

$$\frac{T\nu}{T\gamma} = \left(\frac{4}{11}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Como hoy la temperatura de la radiación cósmica de fondo de fotones es de 2.7 K, la del fondo de neutrinos tendrá que ser de 1.95 K. A la vista de este "frío" tan próximo al cero absoluto y lo esquivos que son los neutrinos, quizás su detección se escape a nuestras posibilidades. Desde luego, hoy por hoy constituye una ardua tarea.



Evolución del hueco de temperaturas entre los neutrinos de fondo y los fotones (Imagen[4], ⓕfair use)

Las curvas anteriores dibujan perfectamente esa situación de no emparejamiento de neutrinos y fotones primigenios. A la izquierda se indica cómo va variando la relación de sus temperaturas a lo largo de la fase en que seguía el proceso de aniquilación de electrones y positrones cuando los neutrinos ya se habían liberado. A la derecha se ve cómo las temperaturas de neutrinos y fotones se van separando con la expansión del Universo[5] a favor de un recalentamiento de los segundos.

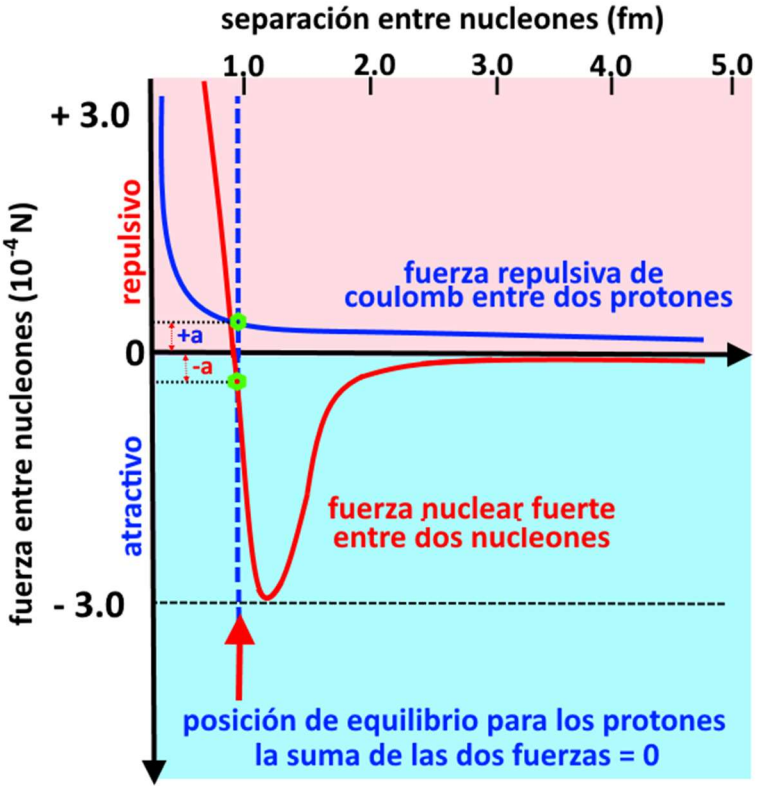
Pero esta situación no duró mucho, ya que a pesar del ligero frenado del proceso de enfriamiento introducido por la expansión del Universo, se llegó a lo inevitable. Al poco de la fuga neutrínica se llegó a un nivel energético promedio por partícula tal que protones y neutrones, a pesar de las interferencias y choques con los fotones, pudieron por fin aproximarse lo suficiente entre ellos como para que la fuerza nuclear fuerte pudiera intervenir. A pesar de que tal fuerza llevaba un tiempo echando toda la carne en el asador para contener a los quarks juntos dentro de protones y neutrones gracias a la colaboración del campo gluónico, le sobraba energía para seguir con sus diabluras, ahora apoyada por el campo piónico. La ***fuerza nuclear fuerte residual***, con la ayuda del bosón de masa cero pión, aglutinó a protones y neutrones formando núcleos atómicos.

Dicho lo dicho, nos podemos preguntar por qué sucede esto si las cargas positivas de los protones deberían repelerse y romper el núcleo, o bien el porqué de que unas partículas neutras como los neutrones tengan esta afinidad a los protones, con los que forman estructuras tan estables. La respuesta la encontramos en el diferente patrón de fortaleza que tienen las fuerzas electromagnética y nuclear fuerte con relación a la dinámica de unión-separación entre dos partículas en juego.

Según nos había propuesto ya en 1930 el físico Hudeki Yukawa, premio Nobel de Física en 1949, el potencial de la interacción fuerte sigue el siguiente patrón

$$U_{nf} = K\,[e^{-mr} / r]$$

siendo K una constante, m la masa del pión -la partícula intermediadora- y r la distancia entre las dos partículas que interaccionan en el campo nuclear fuerte. Este potencial dibuja una curva en la que aparece un pozo, como lo podemos ver en la imagen siguiente, en donde la hemos comparado con la hipérbola decreciente de la interacción electromagnética.



Potencial de Hudeki Yukawa.

El hecho físico en la aproximación de dos protones sería el siguiente: La fuerza electromagnética se hace mayor en las cortas distancias, así que la repulsión entre dos protones se hace más acusada a medida que se acercan el uno al otro. Sin embargo, la fuerza nuclear fuerte presenta otro patrón. Para distancias más

grandes de 10^{-15} metros (1 fermi), el tamaño aproximadamente del radio de un protón, genera un pozo de potencial atractivo, lugar ideal para que los nucleones reposen en un mínimo unidos por una tremenda fuerza atractiva producida por la intermediación de bosones pión entre protones y neutrones, de acuerdo con las reacciones que se indican un poco más abajo. En estas distancias se manifiesta como una fuerza atractiva mucho más potente que la electromagnética repulsiva. Más allá de los 10^{-15} metros su fuerza decae exponencialmente, haciéndose despreciable frente a la fuerza electromagnética.[6]

Y esto es lo que sucede en el núcleo de cualquier átomo mayor que el del hidrógeno,

$$\mathbf{p^+_a + n^0_a \rightarrow (n^0_b + \pi^+) + n^0_a \rightarrow n^0_b + (\pi^+ + n^0_a) \rightarrow n^0_b + p^+_b}$$

$$\mathbf{n^0_a + p^+_a \rightarrow (p^+_b + \pi^-) + p^+_a \rightarrow p^+_b + (\pi^- + p^+_a) \rightarrow p^+_b + n^0_b}$$

Como se ve, dentro del núcleo hay un continuo baile de protones (p^+) y neutrones (n^0) de primera generación (subíndice a) que pasan, apoyados por los piones (π), a neutrones y protones de segunda generación (subíndice b). Así que el pión es el que proporciona el pegamento de cohesión, quedando manifiestamente claro que para conseguir núcleos los protones precisan de la presencia de neutrones. Cuanto más parecido sea el número de unos y otros, los núcleos serán más estables. Si dominasen los protones, la repulsión electromagnética rompería al núcleo; si dominasen los neutrones, algunos quedarían fuera del alcance de la fuerza nuclear fuerte que les une a los protones, por lo que se desintegrarían al estar libres.[7]

La ***nucleosíntesis***, o consolidación de los primeros núcleos atómicos, se inició mucho antes de que pudieran haber pasado los primeros 15 minutos, duración de la vida media de un neutrón (exactamente 885,7 ± 0,8 segundos). A los 100 segundos aún podíamos encontrar neutrones libres -los que se estaban escapando de la quema- dispuestos a enlazar sus vidas con los protones, por lo que más o menos en este momento comenzaron a aparecer los primeros núcleos atómicos de una forma más o menos estable, los del deuterio.[8] Para un protón le resultaba más fácil -más probable dado el nivel de energía- echar mano de la fuerza nuclear fuerte que del electromagnetismo. Por eso dejó pasar su primera oportunidad de formar un átomo de hidrógeno enlazando un electrón y se fue con un neutrón a formar un núcleo de deuterio. Y esto fue lo que salvó a los neutrones de la aniquilación total: el quedar protegidos dentro de un núcleo atómico.

Recordemos cuál era la amenaza para los neutrones libres:

$$\text{neutrón} \rightarrow \text{protón}^+ + \text{electrón}^- + \text{antineutrino}_e$$

Con el neutrón dentro de un núcleo, y allí asociado con los protones, si se hubiera dado esta reacción de desintegración, el electrón no hubiera podido escaparse del núcleo ya que no nace con la energía suficiente como para vencer la atracción de la carga positiva de los protones. Por lo que entonces se hubiera producido el colapso entre un protón y el electrón, revirtiendo la desintegración y estabilizando el núcleo, lo que hace imposible cualquier desintegración β en neutrones nucleares no libres.

Recapitulemos. La historia de la aparición de los núcleos atómicos nos dice que el más simple ya lo teníamos allá por el segundo $t=10^{-6}$ segundos, tan pronto como aparecieron los hadrones a partir de los quarks: el núcleo del hidrógeno, es decir, un solitario protón. Pero para salvar a los neutrones nos interesa que aparezca algo más sofisticado como el núcleo del deuterio: un protón y un neutrón unidos gracias a la intermediación de los piones. Desde nuestro sillón de lectura sabemos ya que el resultado de tal cuestión fue trascendental. Hoy en día vemos cómo nuestro mundo está conformado por el juego físico entre elementos químicos. Se nos antoja, pues, que al nacimiento del núcleo del deuterio le debemos prestar una atención especial. Y eso es lo que haremos en el siguiente capítulo, donde no sólo hará acto de presencia el deuterio, sino que también aparecerán unos pocos colegas más.

NOTAS DEL CAPÍTULO 13:

1. Era una de las fuentes más importantes para la repoblación de neutrones. Recuerdo la ecuación que gobernaba esta transacción, que ya fue comentada en el capítulo 12

   $$\text{protón}^+ + \text{electrón}^- \leftrightarrow \text{neutrón} + \text{neutrino}_e$$

2. Mientras el neutrón no está confinado en un núcleo atómico, en donde queda ligado a los protones por la fuerza nuclear fuerte intermediada por su bosón (pión), está sometido a un proceso natural de desintegración β^-

   $$\text{neutrón} \rightarrow \text{protón}^+ + (\text{electrón}^- + \text{antineutrino}_e)$$

   que le condena a un tiempo medio de vida de 885,7 ± 0,8 s.
3. Al haber más fotones en el mismo volumen su velocidad aumentaba y por tanto también lo hacía su temperatura que seguía -con un exponente a la cuarta- a la densidad de la radiación.
4. "*Neutrino mass from Cosmology*", figura 1, Julien Lesgourgues y Sergio Pastor, diciembre 2012.
   [https://arxiv.org/pdf/1212.6154v1.pdf]

5. Esta expansión está indicada en la curva en unidades del factor de expansión del Universo “a” normalizado al valor de “a” en el momento de la emancipación de los neutrinos, 1 MeV.
6. Y como se puede ver en la curva de Yukawa prácticamente la interacción mediada por el pión desaparece para distancias de 3 x 10^{-15} metros, orden de magnitud del tamaño de un núcleo medio. Eso sucede así ya que al ser el pión másico, unos 140 MeV, se desintegra con mucha rapidez, en el entorno de los 10^{-8} segundos, por lo que tras aparecer para la mediación no tiene mucho tiempo para alejarse manteniendo la interacción fuerte.
7. En realidad, eso es lo que se observa en la naturaleza, en donde los átomos, y sus isótopos, si los ordenamos en unos ejes que representan el número de neutrones y el número de protones, toman la forma de una nube alargada más o menos según la diagonal de los ejes. Realmente, a altos números atómicos -lo que es igual a muchos protones- el núcleo proporcionalmente necesita un extra de neutrones para compensar la gran fuerza de repulsión electromagnética que se acumula con tantos protones. En líneas generales, los átomos que se ajustan al “eje” central del ordenamiento son estables. Los situados por encima o por debajo tienen exceso de protones o de neutrones, y por tanto tienden a ser inestables, cosa que solucionan con algún tipo de decaimiento β por el que un neutrón pasa a protón o bien un protón pasa a neutrón. Si se ve la estabilidad del núcleo muy “apurada” puede emitir directamente un protón o un neutrón sin más líos. Y si los núcleos son muy muy grandes tienden directamente a desprenderse de una parte -el mínimo es una partícula α, que están formadas por dos neutrones y dos protones- o bien se fisionan espontáneamente.
   [https://es.wikipedia.org/wiki/Is%C3%B3topo_estable#/media/Archivo:Table_isotopes_es.svg]
8. Ya habían aparecido núcleos de deuterio, un protón más un neutrón, desde los 30 segundos, pero eran inestables.

14: La nucleosíntesis II

desde 1 segundo a 380.000 años desde el inicio

En el transcurrir de esta historia sobre nuestro Universo habíamos llegado en el capítulo anterior a abrir la ventana por donde se entreveían los núcleos de unos futuros actores imprescindibles en la representación, como son los elementos químicos. Para enlazar con lo que allí dijimos, transcribo uno de sus últimos párrafos:

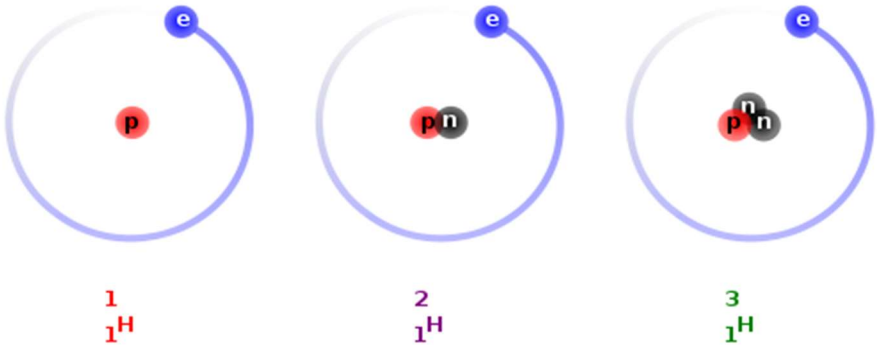
"La historia de la aparición de los núcleos atómicos nos dice que el más simple ya lo teníamos allá por el segundo $t=10^{-6}$ segundos, tan pronto como aparecieron los hadrones a partir de los quarks: el núcleo del hidrógeno, es decir, un solitario protón. Pero para salvar a los neutrones nos interesa que aparezca algo más sofisticado como el núcleo del deuterio: un protón y un neutrón unidos gracias a la intermediación de los piones."

Todo pasó en un corto momento dentro de una larga era: desde el segundo 30 al segundo 240, dentro de lo que se nos imagina un inmerso periodo que decidimos acotar entre un segundo y 380.000 años desde el inicio del Big Bang. Después de los 240 segundos parece que el Universo, acabado de tomar el postre de la nucleosíntesis, se sentó a digerir todo lo que le había pasado mientras seguía expandiendo su dilatado estómago. Pero sigamos la historia.

Si analizamos la energía de enlace de los primeros elementos de la tabla periódica de Mendeléyev o sus isótopos, teóricamente podríamos esperar que cada uno de ellos aparecería, o se haría definitivamente estable, cuando el nivel energético promedio del Universo cayera por debajo de la energía con que se enlazan sus nucleones. La radiación de base ya no hubiera sido suficientemente potente como para desbaratar a los "recién nacidos". Así que para hacernos una idea de por dónde nos movemos, vamos a ver qué características tiene el posible "material" implicado, recordando que en el tiempo un segundo después del Big Bang la energía promedio era de 1 MeV y a los 200 segundos de 0,1 MeV. Estas son las energías de enlace por nucleón en los primeros elementos más ligeros:[1]

- Deuterio (1p + 1n) 1,11 MeV
- Hidrógeno 3 (1p + 2n) 2,83 MeV
- Helio 3 (2p + 1n) 2,57 MeV
- Helio 4 (2p + 2n) 7,07 MeV
- Litio 6 (3p +3n) 5,33 MeV
- Berilio 8 (4p + 4n) 7,06 MeV

Como vemos, en el tiempo un segundo la energía del universo había ya caído por debajo de las energías de enlace de todos ellos. Por lo que en esos instantes, si los nucleones fueran capaces de acercarse lo suficiente, iban a tener medianamente fácil el quedar amarrados por la fuerza nuclear fuerte de forma que fuera posible generar núcleos atómicos. Pero eso no es tan sencillo ya que las reacciones imprescindibles no solo dependen del nivel de energía, sino también de la probabilidad de concurrencia de los protones y neutrones precisos para formar núcleos. Lo cual depende no sólo de sus densidades y energía cinética, sino también de la velocidad de expansión del universo que las atempera, haciendo que las partículas estén cada vez más separadas y vayan más lentas. Si lo hace demasiado deprisa, éstas no estarán presentes en el número adecuado y no tendrán energía cinética suficiente como para aproximarse la distancia adecuada entre ellas para generar una ligadura. Por el contrario, si lo hace demasiado despacio la energía cinética de los nucleones será muy alta, produciéndose el choque y subsiguiente rebote antes de ser atados. De hecho, fue la expansión la que frenó la creación de núcleos en la linde marcada por el litio.



Esquema de los tres isótopos naturales del hidrógeno, de izquierda a derecha: protio, deuterio y tritio (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Podemos pensar que al ser la energía de enlace de los nucleones del helio 4 muy alta, este elemento es el que antes habría pasado la frontera del equilibrio térmico hacia un estado libre y estable, por lo que las primeras reacciones de nucleosíntesis hubieran sido quizás las suyas, inatacables por la radiación del momento. Sin embargo, a tan altas energías los dos protones y dos neutrones que se tenían que unir se desplazaban aún a velocidades demasiado elevadas como para que la fuerza nuclear fuerte los atara a los cuatro a la vez: la probabilidad de obtener un núcleo de helio 4 era baja. Esta circunstancia obligaba a que este núcleo tuviera que construirse por aproximaciones sucesivas a partir de una primera unión de dos nucleones… para seguir con la adición paulatina de los otros. Y lo mismo le estaba pasando al hidrógeno 3 o al helio 3. Lo cual nos lleva a la conclusión de que realmente las primeras reacciones de nucleosíntesis tuvieron necesariamente que ser las que

produjeran núcleos de deuterio y todas las demás debieron pasar obligatoriamente por ese cuello de botella.

Para conseguir un núcleo de deuterio, un protón y un neutrón, una posibilidad hubiera sido el que se juntaran dos protones, o dos neutrones, y se hubiera convocado a la fuerza nuclear débil. De forma que produjera un cambio de "sabores" en uno de los miembros de la pareja -un protón a neutrón o un neutrón a protón-, siguiendo cualquiera de las dos reacciones siguientes:

$$\text{protón} + \text{protón} \rightarrow \text{protón} + [\text{neutrón} + \text{positrón} + \text{neutrino}] \rightarrow \text{deuterio} + \text{positrón} + \text{neutrino}$$

$$\text{neutrón} + \text{neutrón} \rightarrow \text{neutrón} + [\text{protón} + \text{electrón} + \text{antineutrino}] \rightarrow \text{deuterio} + \text{electrón} + \text{antineutrino}$$

Sin embargo, en aquel momento la fuerza nuclear fuerte era más potente que la débil en un factor de varios órdenes de magnitud, por lo que era más fácil, más probable, el que se diera la reacción directa entre protones y neutrones, sin intermediación de neutrinos:

$$\text{neutrón} + \text{protón} \rightarrow \text{deuterio} + 2{,}22\ \text{MeV}$$

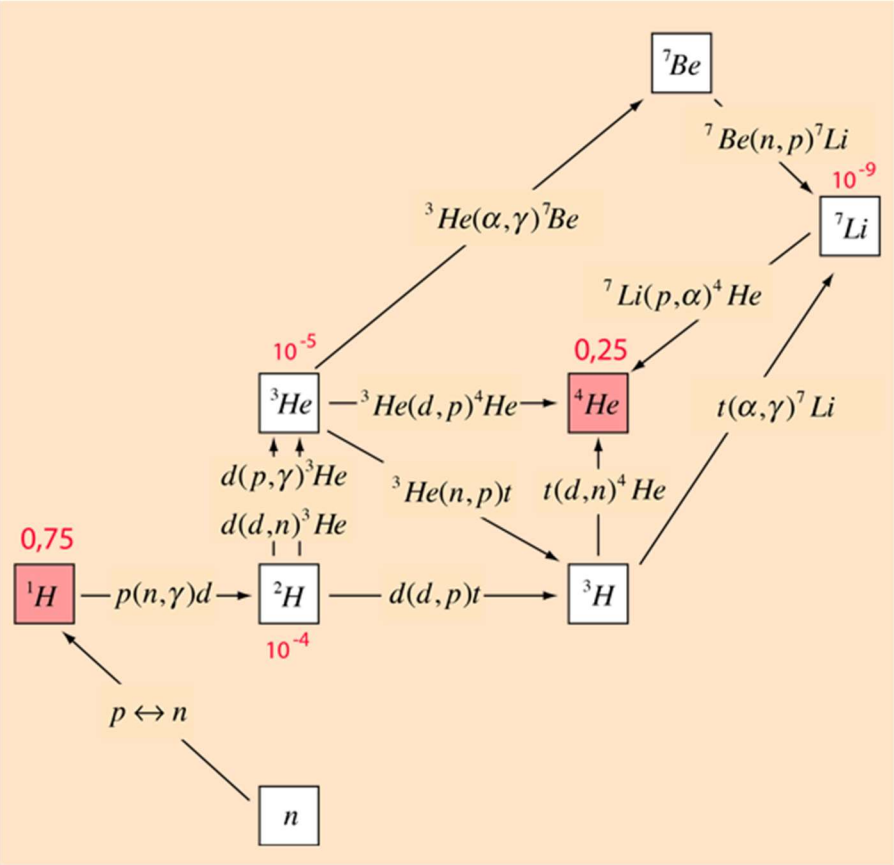
Podemos imaginar que cualquier partícula que portase una energía superior a estos 2,22 MeV rompería el frágil núcleo del deuterio, lo cual suponía una seria barrera en el camino hacia núcleos más pesados. Y efectivamente era así. Aunque la reacción de creación del deuterio debió ser bastante frecuente tras el nacimiento de los bariones, la energía de aquella época era todavía tan alta que los nuevos núcleos de deuterio eran destruidos por la abundantísima radiación existente tan pronto como se iban formando. El cuello de botella del deuterio se prolongó en el tiempo hasta que la temperatura se situó por debajo de los $9x10^8$ K (0,1 MeV), aproximadamente en el minuto dos tras el Big Bang, tras lo que el deuterio finalmente pudo concretarse y perdurar.

A los 100 segundos tras el Big Bang la energía estaba ya por debajo de los 100 KeV y seguramente muchos núcleos de deuterio eran ya estables. En aquel momento la mitad de los neutrones existentes vivían enlazados en ellos. Todo dibujaba un escenario propicio para que los núcleos de deuterio existentes pudieran reunirse de forma estable y en cantidades significativas, reaccionar entre ellos aumentando el tamaño y gestar así los núcleos de los siguientes elementos más pesados. Como podemos ver en el diagrama siguiente, los más sencillos surgirían por la unión de un deuterio con otro protón o con el propio deuterio, generándose núcleos de helio 3 o de tritio, siguiendo las pautas de las siguientes reacciones:

$$\text{deuterio}(^2\text{H}) + \text{protón} \rightarrow {}^3\text{Helio} + \text{fotón}$$

deuterio + deuterio → ^{3}Helio + neutrón

deuterio + deuterio → tritio (^{3}H) + protón



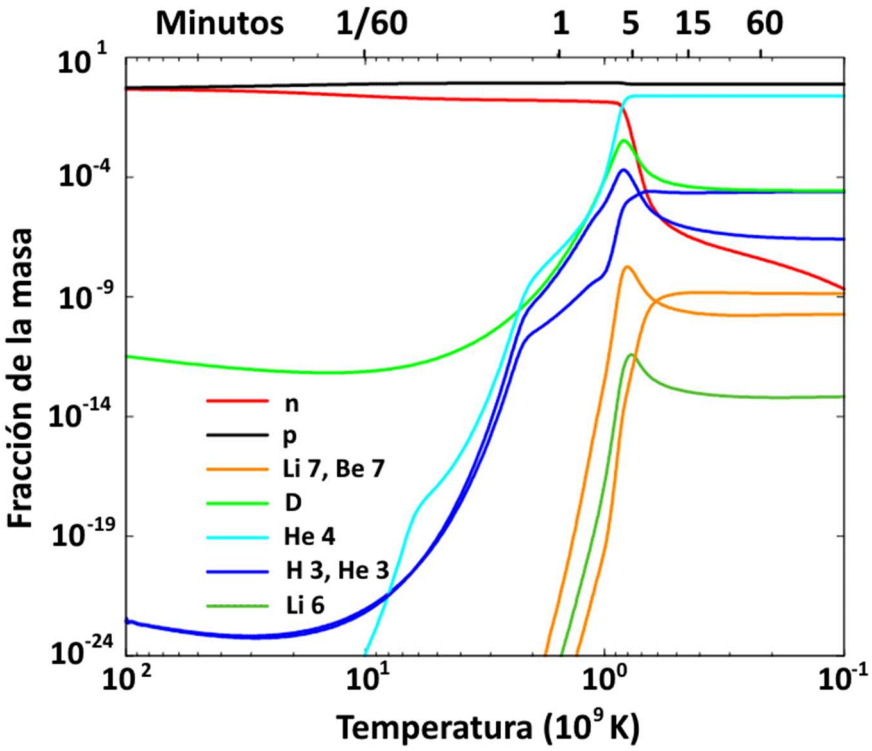
Cadena de reacciones durante la nucleosíntesis primigenia (Imagen extraída de Hyperphysics.[2] Los números en rojo indican el tanto por uno aproximado del elemento en el conjunto de núcleos salidos de la nucleosíntesis, ⓕfair use)

Para conseguir un núcleo de helio 4, que tiene dos protones (p) y dos neutrones (n), se hacía preciso pasar por los dos isótopos anteriores, tritio (t) o helio 3, según podemos ver en el esquema anterior. Cuando los niveles de energía permitieron que el deuterio (d) estuviera consolidado, el helio 4 ya era muy estable como podemos deducir de la relación resumen que fija su nacimiento

protón + protón + neutrón + neutrón → helio 4 + 28 MeV

En el fondo la energía liberada corresponde a cuatro veces la energía de enlace por nucleón. Para volver a romper el helio 4 arrancándole tan sólo uno de sus nucleones se necesitaban fotones de 7,07 MeV, cosa que en aquel momento en que la energía rondaba las escasas décimas de MeV era un imposible. El helio era por tanto muy estable y parecía que se había abierto un camino por el que se pudiera seguir hacia la construcción de núcleos mayores. Pero ahí apareció

un nuevo cuello de botella ya que el siguiente núcleo, el boro 5, era muy inestable, circunstancia que hizo que el helio 4 prácticamente fuera acaparando a todos los neutrones disponibles en la nucleosíntesis. La consecuencia inmediata fue el que los siguientes, el litio 6 y el berilio 7, apareciesen en una menor proporción, casi testimonial. Además, con el tiempo, el berilio 7 desapareció ya que decayó a litio 7.[3] El núcleo de ocho nucleones, como podía haber sido el del berilio 8, era también inestable… otro cuello de botella que ya no se pudo salvar. La expansión había diluido las posibilidades. Y se acabó. Hasta ahí dio la energía primigenia para crear nuevos actores, los existentes ya no tenían la suficiente como para aproximar lo suficiente dos núcleos con cargas positivas de forma que los piones de la fuerza nuclear fuerte pudieran actuar. ***Habían pasado 3 minutos desde el inicio***. Se había culminado prácticamente el proceso de la nucleosíntesis con un resultado final -transitorio-[4] en donde había numerosísimos protones, bastante helio y ligeras trazas de otros núcleos más pesados. A los 13 minutos, definitivamente, todo había pasado.



Este gráfico muestra con una escala logarítmica la evolución temporal de la abundancia de los elementos ligeros (Imagen modificada de:[5] Burles, Nollett & Turner (1999), ⓤfair use)

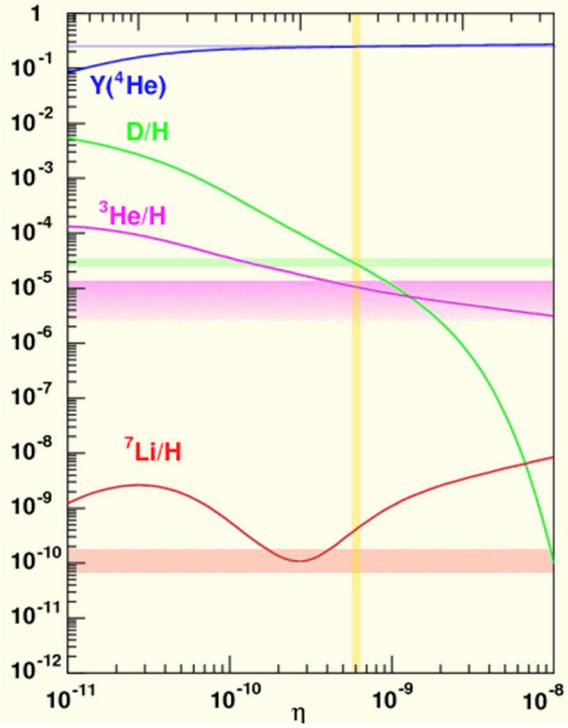
A los 200 segundos podemos considerar que todos los neutrones supervivientes se habían blindado dentro de los núcleos,[6] cuando la menguante relación con los protones rondaba un valor próximo a 1/7, es decir 7 protones por cada neutrón. Eso ¿qué significaba? Si la mayor parte de los núcleos existentes eran

los de hidrógeno, un único protón, y los de helio -dos protones y dos neutrones- y la relación protón/neutrón era 1/7, podemos hacer la siguiente estimación:

Núcleo de helio = 2 neutrones + 2 protones

1 neutrón = 7 protones

luego la existencia de 1 núcleo de helio requería la existencia de 14 protones, 7 por cada uno de sus 2 neutrones. Pero como en el núcleo de helio hay dos protones, habría que restarlos de los 14 que dijimos, hasta unos 12 protones -doce núcleos de hidrógeno-. Lo cual quiere decir que los bariones, y por tanto sus masas, se habían repartido un 25% en el helio y un 75% en el hidrógeno. Es decir, la proporción entre ambos elementos quedó en 1 núcleo de helio por cada 12 hidrógenos. Sorprendentemente, o quizás no tanto, éstas son las proporciones que observamos hoy en día en el Universo.[7]



(Adaptada de E. Vangioni, Institut d'Astrophysique de Paris, fair use)

Los astrónomos son capaces de calcular de forma bastante exacta las cantidades de esos elementos primordiales que existen actualmente en el Universo. Para ello observan la luz de objetos cósmicos lejanos en el tiempo, tales como cuásares o galaxias enanas, representantes próximos a la época de la nucleosíntesis. Por otro lado, teóricamente se puede asegurar que la cantidad de elementos supervivientes de la nucleosíntesis debe estar correlacionada con la densidad de la materia bariónica en el Universo en el momento en que empezó el proceso. Es decir, podemos hacer unas estimaciones de como pudieran variar las cantidades de los elementos según hubiera sido esta

densidad. En los estudios de este tema los físicos utilizan un parámetro denominado "eta", η, que relaciona el número de protones y neutrones dividido por el número de fotones, relación que es casi constante a lo largo del tiempo.

Eso nos da unos resultados teóricos que se pueden ver en la imagen anterior. En el eje horizontal tenemos el parámetro η. La escala es logarítmica en la que, por ejemplo, el valor 10^{-9} corresponde a un protón o neutrón por cada mil millones de fotones. El eje vertical indica las diferentes abundancias. Para el helio-4 se muestra la relación de masa Y, es decir, la masa de los núcleos de helio-4 dividida por la masa total de todos los protones y neutrones del universo. Para los demás núcleos se muestra el número de tales núcleos, dividido por el número de núcleos de hidrógeno, el elemento más abundante. Vemos también una franja vertical amarilla que corresponde a un valor de η de $5x10^{-9}$ que se ha obtenido gracias al análisis de la radiación de fondo de microondas, cosa que explicaremos lo que es con más detalle en los capítulos 18 y 19, valor que corresponde a la realidad física actual. Los resultados observacionales corresponden a las franjas horizontales y vemos que coinciden espectacularmente con lo que dice la teoría ¡Bingo!.[8]

Como curiosidad diremos que cuando cesaron las reacciones nucleares primordiales que hemos explicado un poco más arriba, aún quedó una pequeña cantidad de deuterio. Con ese elemento sucede que, a diferencia del helio, apenas se produce en los hornos estelares, en donde más bien se destruye pasando a tritio. Por lo que cualquier deuterio que vemos hoy debe ser primordial, resultado del remanente que aún no se ha fusionado.

Elemento[9]	**nº partículas nucleares**	**% abundancia en masa**
Hidrógeno	1	90
Helio	4	9
Litio e isótopos	de 7 a 11	0,000001
Carbono e isótopos	de 12 a 20	0,2
Sílice e isótopos	de 23 a 48	0,01
Hierro e isótopos	de 50 a 62	0,01
Grupo de masa intermedia	de 63 a 100	0,00000001
Grupo de masa pesada	más de 100	0,000000001

Y así comenzó la materia que nos es habitual. Más tarde, con la irrupción de la energética dinámica de las supernovas y los vientos estelares y galácticos, tal como comentaremos en un próximo capítulo, se fueron creando el resto de los elementos de nuestra tabla periódica, hasta el uranio. El resultado final actual es el que dice la tabla anterior: Eso no es todo ya que algo se nos queda fuera de la foto del momento. Con tanto pensar teóricamente en modo "núcleo

atómico" nos hemos olvidado de que existía también otra realidad, la de los electrones y positrones, que con energías de "condensación" de 0,5 MeV hacía tiempo que habían dejado el equilibrio térmico y estarían dando los últimos coletazos de aniquilación partícula/antipartícula, soltando fotones ya no muy energéticos, pero en suficiente número como para recalentar la radiación del Universo y aumentar ligeramente su ritmo de expansión. Al final quedarían tantos electrones como protones,[10] uno por cada 10^9 fotones, y muchos neutrinos.

De tal forma que hoy en día contabilizamos por metro cúbico
4,11 x 10^8 fotones + 0,22 protón/electrón/neutrones + 1,12 x 10^8 neutrinos

Teóricamente también podemos hacer un cálculo para los masivos (y misteriosos) neutralinos, con masa del orden de los 200 GeV, una de las partículas candidatas de la materia oscura. Ya que su relación másica con la masa bariónica parece ser que es más o menos de 5 a 1, cosa que veremos en otro capítulo, el número de ***neutralinos*** en el universo sería de ***1 por cada 40 protones***, es decir, más o menos 0,0055 por cada metro cúbico.

Tras toda la interesante historia de la nucleosíntesis el Universo entra ahora en un largo periodo de relativa estabilidad, a lo largo del cual el plasma se expandirá hasta tener unas densidades inferiores a la del agua, dejando a sus partículas muy dispersas unas con relación a otras. Ondas "sonoras" y gravitatorias llevaban su información de un lado para otro. En este mundo, los protones arrastraban en sus cercanías a los electrones gracias a una especie de cortejo de cargas eléctricas. Mientras que todos los fotones, muy numerosos, andarían atareados chocando con los electrones en procesos que se conocen como *dispersiones Thomson*.[11] Por esa causa los fotones no podían volar en libertad, lo que hacía de aquel plasma una especie de opaca niebla bajo la potente e invisible mano, como telón de fondo, de la esquiva materia oscura.

El siguiente cambio fundamental será la formación de átomos mediante la unión de los núcleos y los electrones existentes. Pero aún se tuvo que esperar mucho, hasta que la temperatura del Universo fuera lo suficientemente baja, unos 3.000K -del orden a la de la superficie de nuestro Sol- como para que el campo de la fuerza electromagnética pudiera por fin intervenir en un mundo repleto de partículas y núcleos con carga eléctrica.

Esto sucedió a lo largo de una franja temporal, aunque la convención es fijar el hecho en el entorno de cuando se cumplía el año 380.000 tras el nacimiento del Universo. En aquellos momentos era unas 1.100 veces más pequeño que el que conocemos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 14:

1. En el siguiente enlace tenéis los datos de todos los elementos e isótopos. Podréis jugar viendo como varían sus características al movernos en vertical -mismo número de neutrones- u horizontal -mismo número de protones-.
   [https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html]
2. [http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Astro/bbnuc.html]
3. El berilio 7 (4 protones y 3 neutrones) decae a litio 7 (3 protones y 4 neutrones) por absorción de un electrón que hace mutar un protón a un neutrón.
4. Lo de *transitorio* lo digo porque es evidente que en el Cosmos hay muchos más tipos de elementos con sus núcleos. Pero para que siguiera la cadena con los siguientes habrá que esperar algunos cientos de millones de años. Ya lo veremos en los capítulos donde se explicará el inicio de las estrellas y los vericuetos que siguen a lo largo de sus vidas.
5. "*Big-Bang Nucleosynthesis: Linking Inner Space and outer Space*", S. Burles, K. M. Nollett, and M. S. Turner, marzo 1999.

   [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9903300v1.pdf]
6. Dada la estabilidad del núcleo del helio 4, prácticamente casi todos los neutrones estaban confinados en este tipo de núcleos.
7. Por cada doce núcleos de hidrógeno, se debió crear uno de helio; por cada 10^5 de hidrógeno aparecieron tres núcleos de deuterio y uno de helio-3; por cada 10^{10} de hidrógeno, cinco de litio.
8. Para más información ver estas dos entradas del blog "*Einstein online*":
   [https://www.einstein-online.info/en/spotlight/BBN/]
   [https://www.einstein-online.info/en/spotlight/bbn_obs/]
9. Tabla extraída de "*Astronomy Today*", table 21.1, Eric Chaisson y Steve McMillan.
10. La carga eléctrica total del Universo debe ser cero. Imaginad lo que pasaría si no fuera así: la fuerza electromagnética es muchos órdenes de magnitud superior a la de la gravedad, pues la relación de intensidades entre ambas fuerzas para dos protones en el núcleo es del orden de 10^{-36}. Si hubiera un balance de carga positivo, la gravedad no sería capaz de contrarrestar la fuerza de repulsión de cualquier pequeña carga residual que quedase en el Universo.
11. La dispersión de Thomson es la dispersión elástica que sufre la radiación electromagnética en el choque con una partícula cargada libre en situaciones de baja energía. La energía cinética de las partículas y la frecuencia de los fotones no cambian como resultado de la dispersión, lo

cual sucede siempre y cuando la energía del fotón sea mucho menor que la energía de la masa de la partícula, o equivalentemente. En el Universo primitivo en este tipo de interacciones podían intervenir tanto las cargas positivas, protones, como las negativas, electrones. Pero como la relación de masas entre ambos es de 2.000, prácticamente el total de las interacciones Thomson las llevaban a cabo los ligeros electrones.

Recordemos que en el capítulo 13 anterior hablamos de dispersiones Compton para los mismos personajes. En el fondo es el mismo fenómeno pero lo que sucede es que a altas energías el fotón dispersado pierde en el choque parte de su energía, lo que implica que su frecuencia disminuya.

15: La sinfonía del Universo I

a lo largo de los primeros 380.000 años

A estas alturas de nuestra biografía, y ya lo veníamos advirtiendo en capítulos anteriores, sabemos que el Universo había emprendido un largo camino de monotonía que iba a durar casi cuatrocientos mil años. Como dijimos en el capítulo 3, tras la inflación el universo pasó de tener un tamaño algo menor que un protón reducido en un factor de 10^{-20}, al de una "esfera" de 10 centímetros. Muchas veces se habla del tamaño de una naranja, pero ahora prefiero la metáfora de una granada, repleta de multitud de infinitesimales granos jugosos, cada uno dominio de una inestabilidad cuántica surgida durante la inflación exponencial. Ya veremos el porqué de la comparación.

Primero la radiación y luego la materia fueron los que iban manipulando su dinámica al fijar la tasa de expansión, por la que progresivamente disminuía la densidad del plasma que rellenaba el Universo. Pasó por un momento en que tuvo la del agua, luego atravesó el nivel de la del aire y no paró, pues se encaminaba hacia un estado en el que cada centímetro cúbico iba a tener tan sólo unos 10^3 átomos.[1]

Durante la inflación las pequeñas fluctuaciones cuánticas iniciales comenzaron a hacerse relevantes de forma que, al terminar, se convirtieron en las bases de las estructuras de materia. Se había generado un plasma de núcleos ligeros, electrones, fotones, neutrinos y algunas partículas de otros sabores que, menos los "libres" neutrinos, se encontraban en equilibrio térmico completamente ligados como si se tratara de un gas, inmersos en "océanos" de una materia oscura indiferente a la influencia electromagnética. Las cargas de protones y electrones se cortejaban mientras los fotones de la radiación permanecían atrapados en constantes interacciones Thomson con los electrones, manteniéndose acoplados al plasma hasta el momento que dejarían de estarlo mucho tiempo después. Podemos hacernos una imagen 2D terriblemente simple e intuitiva del espacio post inflación, viéndolo como una lámina elástica que se iba estirando mientras las zonas donde la materia estaba más concentrada lo deforman dejando aquí y allá, a lo largo de 380.000 años de expansión, diversos "cuencos" gravitatorios.

En ese mundo de granulado gravitatorio la materia bariónica no solo interactuaba con la radiación, sino que también se veía influida por la gravedad dominada en gran medida por la materia oscura. Esta última situada mayoritariamente en aquellos "cuencos" gravitatorios que habíamos mencionado, favorecía el que la materia bariónica se fuera acumulando en

ellos. La progresiva densificación en esas zonas hacía que su temperatura aumentase hasta un momento en que la presión de la radiación, cada vez más intensa con la compactación de la materia, fuera frenando la caída de materia densidad, incluso induciendo un rebote. Como consecuencia la materia volvía a expandirse, disminuía su densidad decayendo también la presión del plasma, hasta que la materia oscura volvía a recuperar la capacidad de contraer de nuevo el plasma de la región, aumentando así la densidad… con lo que el ciclo comenzaba de nuevo. Cada una de esas zonas hijas de la inestabilidad cuántica conforman lo que hemos acordado llamar un grano de nuestra imaginaria granada cósmica.

Podemos imaginarlo como si alguien en el centro de una palangana, un recipiente circular con agua, hubiera dado una palmada, un ¡plash! seco, que indujera una dinámica oscilante y caótica que rápidamente muta a un perfil de ondas concéntricas que se trasladan hacia los bordes mientras localmente se apelmazan, y suben, y se relajan, y bajan. Un movimiento que se comporta como la suma de unas ondas estacionarias resultado de la competencia entre la presión de la palmada y la gravedad.

Esquema de una onda estacionaria (en negro) resultado de la superposición resonante de las ondas roja y azul que se desplazan a la misma velocidad, aunque en sentidos contrarios.

La dinámica de las ondas estacionarias es interesante. Para comprenderlo mejor, pensad en la cuerda de una guitarra constreñida entre sus dos extremos. Cuando la pulsamos, se genera una onda que rebota en los extremos y crea un patrón de cumbres y valles, típico de una onda estacionaria. En el plasma primordial sucedía algo similar, aunque en un medio tridimensional: las ondas estacionarias respondían a fluctuaciones periódicas de densidad y presión, vibrando arriba y abajo y trasladando el efecto de estas pulsaciones longitudinalmente a lo largo del espacio. Estas oscilaciones dejaron una huella imborrable en el universo, visible aún hoy en el fondo cósmico de microondas.

En cada punto del plasma alterado por las fluctuaciones cuánticas iniciales, los "granos" de la granada experimentaban una presión que oscilaba en tres dimensiones, desde el centro hacia el exterior. La compresión y rarefacción se

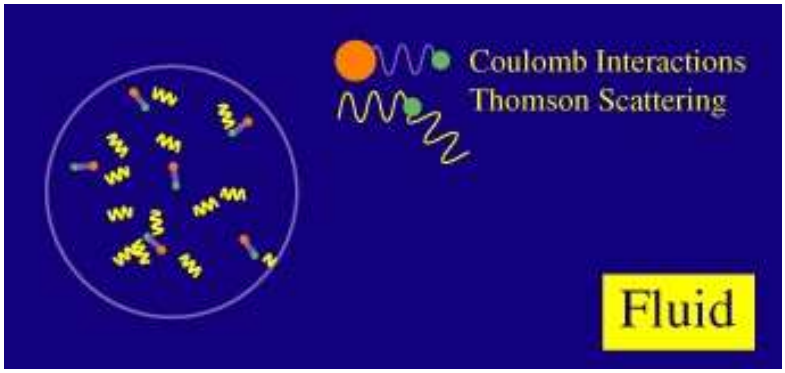
propagaban hacia afuera desde las sobredensidades primigenias, transportando las oscilaciones de densidad y presión hacia nuevas regiones dentro de los límites espaciales de cada "grano", que a su vez se expandían conforme el universo crecía. Esto implicaba que las partículas del plasma, tanto bariones como fotones, se desplazaran físicamente hacia afuera desde el centro de las sobredensidades iniciales, formando una "cáscara" en expansión. Así que, de manera similar a cómo el sonido se propaga en el aire o las olas en el mar, el plasma primordial del universo se llenaba de resonancias sonoras. Era como si el universo temprano estuviera compuesto por una red de vóxeles "esféricos" en cuyo interior la presión latiera como un corazón configurando una onda estacionaria cargada de armónicos desplazándose hacia sus fronteras.[2] Este movimiento quedaba superpuesto al de expansión cósmica pero no pensemos aun en él.

¿Cómo se define la dimensión de los granos? Está claro que por definición los podemos considerar como ***espacios gravitatorios autónomos e independientes***. Su dinámica la define la propia materia y radiación internas. ¿Hasta dónde llegará la influencia gravitatoria del ¡plash! inicial que define su frontera? Si pensamos que las perturbaciones gravitatorias se propagan a la velocidad de la luz podemos calcular la distancia al borde en cada instante. Lo que pasa es que el plasma de base no es el vacío donde la luz se desplaza a la velocidad conocida de 300.000 km/seg, sino que se ve ralentizada con un factor de atenuación proporcional que a la postre tiene que ver con la relación radiación/bariones de cada momento. Cuanta mayor radiación mayor empuje, cuantos más bariones mayor resistencia. En los primeros instantes, debido a la gran incidencia de la presión de la radiación, la velocidad era de 0,577 c y al final del periodo de aproximadamente la mitad de la velocidad de la luz. Con esos datos y sabiendo que la recombinación se produjo en el entorno del año 380.000, se llega a la conclusión de que el radio máximo al que pudo llegar cada grano de granada, lo que conocemos como ***horizonte acústico***, en la recombinación fue de unos 150 mil años luz o aproximadamente 480 millones de años luz en el universo actual al considerar la expansión posterior. En el capítulo 17 veremos que es eso de la recombinación. Al comportarse los granos como una unidad gravitatoria, se van a conformar como el ladrillo básico para la formación de la estructura a gran escala del universo. Como veremos también más tarde.

Todas las ondas acústicas en los granos cósmicos, junto con sus armónicos, comenzaron simultáneamente tras el recalentamiento posterior al Big Bang, sincronizadas por el origen común de las fluctuaciones iniciales. Aunque las características individuales de cada grano, como la profundidad de sus pozos gravitatorios, podían alterar la intensidad de sus oscilaciones, todas compartían este inicio al unísono. Algunas ondas mostraban una superposición parcial,

pero la mayoría permaneció confinada dentro de sus respectivos granos sin tiempo para interactuar entre si antes de la recombinación. En el fondo cada grano de granada sería como una sala de conciertos, quizás escuchando la Octava de Beethoven, la Pequeña Sinfonía, en un auditorio cuyo entorno está repleto de sones, muchos de ellos ondas en el rango de frecuencias audibles para el hombre. Unas provendrán de los violines o las trompetas, y serán más agudas, mientras que otras las habrán emitido los contrabajos o los trombones y serán más graves. Montados en las ondas fundamentales de cada instrumento se encuentran además cientos de armónicos, que dan colorido y cuerpo a la música de la sinfonía. De la misma manera los armónicos de las ondas de presión en el plasma del Universo apuntalaban los matices del futuro dibujo de la materia. La gran diferencia con el símil musical es que las ondas del plasma primordial tenían amplitudes de ¡cientos de miles de años luz!

Si hacemos zum sobre una cualquiera de las zonas del mosaico que era el Cosmos en aquellos momentos, *un grano de la granada*, veremos dos tipos de materia: la bariónica, formada básicamente por protones, neutrones, electrones y neutrinos, y la materia oscura, que no sabemos realmente lo que es pero que abulta como cinco veces la bariónica. Realmente hay mucha materia oscura.[3] Gracias a la incesante expansión, las partículas con dinámicas entrelazadas en el gas de materia bariónica, así como las de la oscura, iban diluyéndose cada vez más en la menguante densidad del plasma. Por ello cada vez les costaba más encontrarse e interactuar entre ellas, aunque, CIERTAMENTE, eso no quiere decir que no lo hicieran.



Esquema de lo que sucedería en el plasma primigenio mientras el Universo se expandía. Protones y electrones unidos por la fuerza de Coulomb mientras la radiación interfería a través de dispersiones de tipo Thomson[4]
(Imagen: Wayne Hu, Universidad de Chicago, ⓕ fair use)

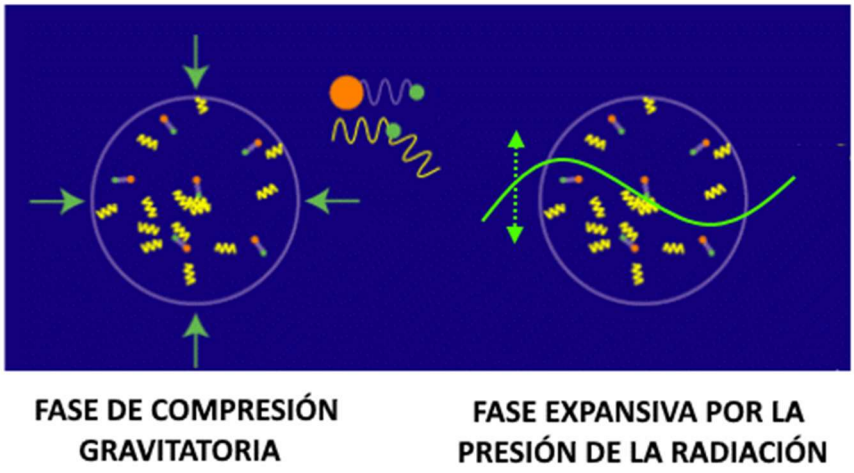
Veamos lo que le sucedía a la bariónica. Sus principales actores, los protones y electrones, junto con los fotones de la ubicua radiación, seguían yendo forzosamente de la mano ya que no podían ir muy lejos unos de otros. Los protones de carga eléctrica positiva y los electrones negativos, aunque

cercanos, se movían separados intercambiando cómplices aproximaciones gracias a sus cargas opuestas. Los fotones que constituían la radiación del plasma aún tenían energía suficiente como para, al chocar con ellos, impedir la unión definitiva de cargas opuestas. Con la energía que tenían les sobraba como para interactuar con los electrones, menos masivos que los protones, a través de choques elásticos dispersivos del tipo Thomson (ver imagen anterior), tras los que el fotón salía en una dirección distinta a la que traía antes de la colisión, con la misma frecuencia y sin haber perdido energía. Así, la radiación y la materia bariónica, unidas por el pegamento de los electrones, vivían un escenario de continuos choques y dispersiones, de forma que la primera -la radiación- era incapaz de volar libre e independiente.

Con la materia oscura la vida era más tranquila ya que no interactúa con el campo electromagnético: los fotones son incapaces de "verla". De forma que en aquellos momentos este tipo de materia era transparente para la componente de radiación del plasma.

Dentro de ese plasma de protones, electrones y fotones pasaban además otras cosas curiosas que pudieron condicionar la evolución del Universo y sus estructuras. Protones y electrones son "fantasmas" eléctricos, cargas positivas y negativas, que como acabamos de comentar se movían independientemente. Las cargas eléctricas en movimiento inducen campos magnéticos. Y aunque las separaciones entre cargas y las corrientes creadas por la transferencia de cantidad de movimiento en las interacciones con los fotones eran muy pequeñas, fueron de gran importancia para la generación de campos magnéticos en los primeros tiempos. Una vez que surge un campo magnético es como una "semilla" que puede volverse más grande y fuerte al alinear con él a otros campos más débiles. En palabras del astrofísico teórico del Instituto Max Planck de Astrofísica en Garching, Torsten Enßlin: "*El magnetismo es un poco como un organismo vivo, porque los campos magnéticos aprovechan cada fuente de energía libre que pueden retener y crecer. Pueden propagarse y afectar con su presencia a otras áreas, donde también crecen*."[5] Los campos magnéticos primordiales que estaban presentes en el plasma en aquellos momentos y que, como hemos insinuado, eran las semillas iniciales de los potentes campos magnéticos cósmicos que vemos hoy en día,[6] estarían induciendo también fluctuaciones a pequeña escala en la densidad bariónica del plasma primordial. Estas faltas de homogeneidad van a tener su importancia más tarde durante la fase que conocemos como recombinación, cuando el Universo cumplía los 380.000 años y los electrones comenzaron a unirse a los núcleos atómicos. Esos campos magnéticos primordiales hacían que la recombinación no fuera perfectamente homogénea, lo que alteró los picos y las alturas de las anisotropías a gran escala en la radiación del fondo cósmico de microondas. Pero quizás nos hemos adelantado. Prosigamos con nuestro hilo argumental.

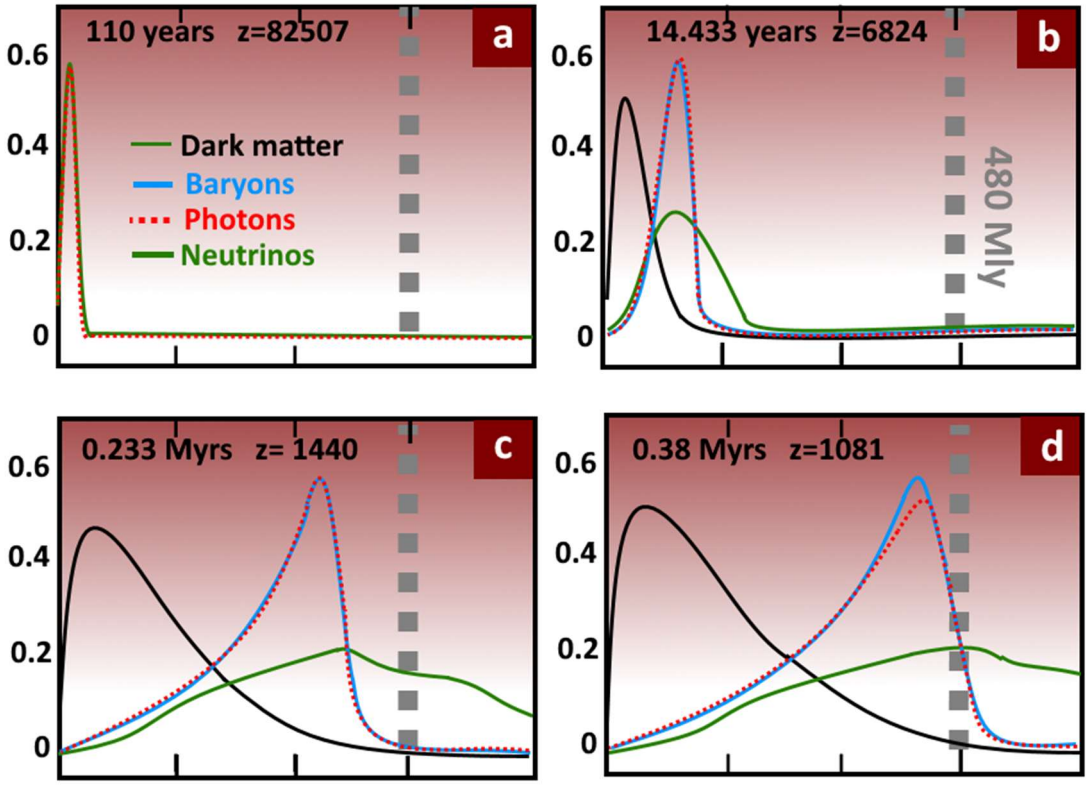
Sobre el fondo de materia oscura, la bariónica se comportaba como una niebla espesa y opaca a la luz, con unos fotones cambiando continuamente de dirección choque tras choque. Algo muy parecido a lo que les pasa a los fotones generados en el interior del Sol, que tardan entre diez mil y ciento setenta mil años en poder acercarse a la superficie de la estrella y escapar definitivamente de la materia.[7] Si hubiera habido forma de ver a aquel plasma desde fuera, cosa imposible pues fuera del Universo se postula que no hay nada, no hubiéramos sido capaz de penetrar sus brumas y saber cómo era en su interior.



La burbuja de materia y radiación es comprimida por la gravedad para pasar luego a ser expandida por la presión de la radiación interior, producida en el proceso de compactación. Ello era lo que generaba la dinámica oscilatoria que se comenta en el texto. A la par la burbuja se expandía con el Universo. (Imagen: Wayne Hu, Universidad de Chicago, fair use)

Y aunque la materia oscura no se viera afectada por el electromagnetismo, la gravedad estaba presente y ejercía su acción compactando las partículas de materia incluidas las de la materia oscura. En los puntos de la niebla de nuestro plasma-gas, que como resultado de las fluctuaciones cuánticas iniciales habían quedado más densos en materia, la gravedad actuaba ***aglomerándola*** aún más, incluso absorbiendo el plasma-gas de sus alrededores. Lo cual hacía que en estas zonas especiales la densidad aumentara, las partículas se aceleraran y la temperatura se incrementara. Como consecuencia, la presión interna de la radiación allí presente se iba haciendo mayor al irse recalentando por la creciente compresión gravitatoria, hasta que llegaba a ser tan intensa que podía dominar y contrarrestar a la gravedad, iniciándose una onda de presión ***¡nuestra onda sonora!*** que arrastraba a la materia y la radiación acumulada y que hacía que la zona se descomprimiese relajando su densidad de materia. Hasta un momento en el que la gravedad volvía a dominar… ciclos de compresión-expansión, algo parecido a lo que decíamos al principio del capítulo acerca de

pulsar una cuerda de guitarra que vibra sinusoidalmente a lo largo de su longitud. A pesar de que el proceso lo inicia la atracción gravitatoria de la materia oscura, el "pulsado" definitivo de la cuerda lo produce la radiación, por lo que el proceso siguiente de expansión ***sólo afectaría a la materia bariónica*** ya que, como se ha dicho, la oscura era transparente a los fotones.

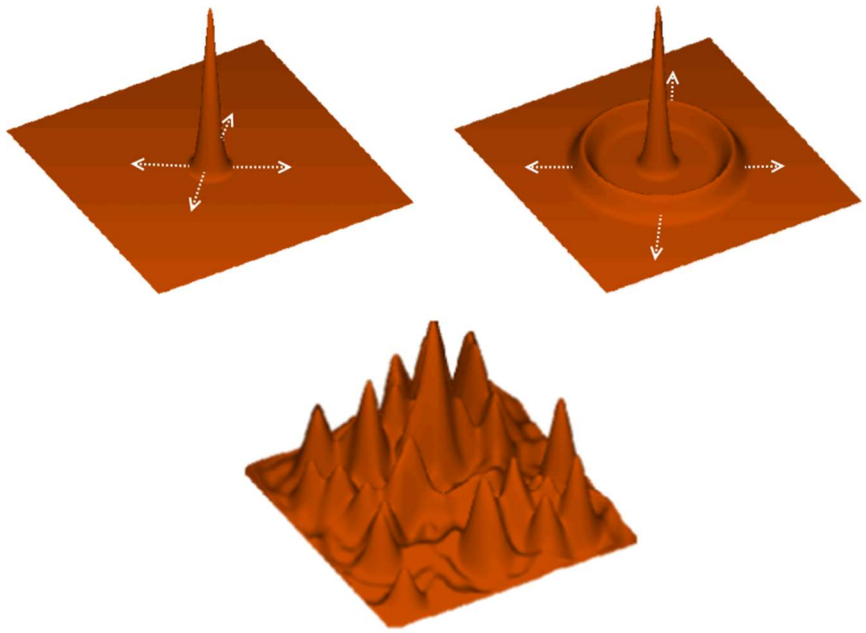


Evolución de la onda sonora del plasma a través del tiempo. Z es el corrimiento al rojo y 480 Mly (millones de años luz) la distancia máxima actual reflejo de la que quedó "congelada" tras la recombinación, distancia conocida como horizonte acústico (de todo ello hablaremos con más detalle en otro capítulo). El eje horizontal indica el radio de la burbuja en cada momento, normalizado en cada cuadro de acuerdo con la idea de escala comóvil.[8] En el eje vertical se indica el exceso de densidad de la perturbación sobre la media del plasma (Imagen: Daniel Eisenstein, [9] fair use)

Como consecuencia de esa dinámica en el centro más o menos relajado de esas unidades gravitatorias quedaba una materia oscura que seguía comprimiéndose gracias a su propia gravedad y una radiación menos energética, más fría. El proceso general queda reflejado en la secuencia de imágenes anterior en la que cada cuadro representa la situación de la burbuja en un momento determinado de la vida del Universo, con la distribución de materia y energía que habría en su interior. Acaba en el año 380.000 que es cuando la radiación se evade finalmente de la materia, proceso y fotograma que explicaremos con detalle en

otro capítulo. En el cuadro b. vemos cómo a los 14.433 años ya se habían desacoplado ambos tipos de materia, iniciando la bariónica la cresta de la onda esférica. Con el tiempo se va estabilizando hacia su máximo alcance -*horizonte acústico*-, indicado con la barra vertical de trazos grises. El efecto gravitatorio de la materia bariónica afecta a la materia oscura que había quedado en el centro de la perturbación inicial arrastrándola en cierta medida hacia fuera. Mientras, se ve cómo los fotones van acompañando al frente de onda bariónico y sólo empiezan a desacoplarse cuando llega la edad de 380.000 años.

Como hemos dicho repetidamente, esto sucedía en mayor o menor grado, dependiendo de sus densidades particulares, en todos los puntos del plasma que habían experimentado una fluctuación cuántica durante la inflación. Como no todas las fluctuaciones fueron iguales, aunque muy muy similares, cada una de las ondas generadas de partículas bariónicas y de radiación asociada presentaban su propio patrón. Muchas de ellas tendrían que coincidir sobre el tejido del espacio/tiempo, por lo que al interferir espacialmente unas con otras hacían del plasma un mar embravecido cruzado por un patrón de ondas heterogéneo. Crestas elevadas de materia oscura y otras menores de materia bariónica. No en vano la primera era en masa unas cinco o seis veces la segunda. Y todo esto incansablemente a lo largo de 380.000 años, momento del que entenderemos su singularidad en el siguiente capítulo.



La imagen artística anterior[10] nos permite imaginar bastante bien el proceso descrito como "…*un mar embravecido cruzado por un patrón de ondas heterogéneo*". Las dos de arriba hay que verlas de forma correlativa como un inicio del pico de la onda de arrastre de materia que con el tiempo se va extendiendo hacia afuera desde el centro donde se originó, lo que corresponde a la de una sola burbuja generada en un particular grano de la granada. En el

fondo, esos picos intentan modelar tridimensionalmente las curvas 2-D de evolución del plasma presentadas más arriba. Aunque realmente hay infinitud de burbujas pisándose parcialmente unas a otras, con el resultado para la evolución del Universo que intenta representar la imagen inferior.

Supongo que ahora ya podemos entender bien lo de la analogía que hacía con una obra musical. En ella cada instrumento, con su timbre y color característico, genera su patrón de ondas y frecuencias, y entre todas creando con su dinámica conjunta una fantástica armonía. El Cosmos también tiene sus instrumentos en la diversidad local de la densidad de su plasma: cada uno de los puntos que habían emitido su particular onda de materia bariónica era uno de ellos, que al sonar acoplados generaron un vaivén musical,[11] quizás cacofónico para nuestros gustos, pero que no deja de ser su melodía.

En este punto, cuando nos acabamos de encontrar con el susurrar de la música primordial del Universo primitivo, vamos a hacer un intermedio. El reposo nos ayudará a asimilar el concepto antes de avanzar en su teoría a lo largo del siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 15:

1. Eso sería al final de esos 380.000 años. Añado aquí un sencillo cálculo para que nos hagamos idea: Sabemos que la composición de átomos en aquel momento era básicamente de 75% de hidrógeno y 25% de helio 4, por lo que un átomo medio pesaría [0,75 x 1 + 0,25 x 4]= 1,75 unidades de masa atómica (*uma*) y cada *uma* equivale a 1,7 x 10^{-27} kilogramos. Luego la densidad sería 10^3 átomos/ cm^3 x 1,75 uma/átomo medio x 1,7 x 10^{-27} kg/uma x 10^3 gr/kg ≈ 3 x 10^{-21} gramos/ cm^3.
   Para hacernos una idea de por donde se sitúa esta cifra diré que en condiciones normales la densidad del agua es de 1 gramo/cm^3 y la del aire 1,4 x 10^{-3} gramos/cm^3. Llevada la anterior cifra estimada de la densidad del Universo hoy en día, tras una dilatación espacial de 1.100 veces que hizo que el cm^3 inicial se convirtiera a más o menos 10^{10} cm^3, la densidad bariónica ha pasado a ser más o menos 10^{-31} gramos/ cm^3, del orden del 1 % de la masa crítica total del universo que es del orden de magnitud 10^{-29} gramos/cm^3. Hemos podido comprobar que la densidad bariónica es un 5% de la total, por lo que ambas cifras encajan bastante bien.
2. La onda estacionaria no es tan sencilla como la del ejemplo empleado en el texto que hemos dibujado como una sinusoide perfecta de modo 2, dos longitudes de onda. Nuestra onda estacionaria cósmica es la suma de

infinitos armónicos, sus modos, desde el fundamental de una sola longitud de onda, modo 1, hasta los que os queráis imaginar.

3. Como veremos en un futuro capítulo, esa realidad no es una entelequia, y aunque no interactúa con el campo electromagnético, y por tanto no la podemos ver, sí que la hemos sabido medir por métodos indirectos.
4. Esta imagen y las siguientes se han extraído de [https://background.uchicago.edu/~whu/]
5. [https://dailygalaxy.com/2020/09/the-invisible-universe-a-primordial-magnetic-soul-pervades-the-cosmos/]
6. El espacio interestelar está lleno de partículas/polvo cargados que tienen sus propios campos magnéticos debidos a sus propios momentos dipolares o inducidos por el movimiento de las cargas. Cuando un campo magnético más grande y global influye sobre estas pequeñas cargas, muy a menudo ocurre una alineación (por ejemplo, el dipolo de las partículas se alineará con el campo más grande, o el movimiento cambiará repentinamente para moverse a lo largo de la línea de campo). Esto hace que estos campos más pequeños se sumen al campo más grande, haciéndolo aún más grande.
7. Podéis leer al respecto el siguiente artículo de la NASA: [https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php]
8. Voy a intentar explicar qué es eso de la escala comóvil. El término ya da una pista: "comóvil" implica que los objetos se mueven conjuntamente. Debido a la expansión del espacio-tiempo en el universo, dos objetos que permanecen en la misma posición relativa, es decir, inmóviles entre sí, parecerían alejarse uno del otro, ya que el espacio que los separa se expande con el tiempo. En otras palabras, la distancia entre los dos objetos "quietos entre sí" aumentará a medida que el universo se expanda, y esta expansión es proporcional al tiempo. Esta propiedad permite que, al utilizar un sistema de coordenadas comóviles, podamos estudiar el comportamiento de los objetos sin tener que considerar la expansión del universo en ese momento. En un sistema comóvil, los objetos se mueven junto con la expansión del espacio, de modo que sus posiciones relativas permanecen constantes. En la imagen 480 Mly es el tamaño real de la onda acústica tal como la apreciamos hoy en día, valor que se ha escogido en el estudio como escala fija de comparación.
9. *"Cosmic sound Waves rule",* Daniel J. Eisenstein y Charles L. Bennett, Physics Today abril 2008.
   [https://web.archive.org/web/20170812231716/http://aether.lbl.gov/bccp/PDFs/BAO.pdf]
10. Extraídas de este artículo de Scienceblogs:
    [http://scienceblogs.com/startswithabang/2008/04/25/cosmic-sound-waves-rule/]

11. Podéis oír esta cacofonía en la recreación del eco de la sinfonía del Universo tras la emancipación de los fotones a los 380.000 años de vida. En el enlace de más abajo John G, Cramer, profesor de la Universidad de Washington, explica qué hizo para obtenerlo y por qué lo hizo.

[http://faculty.washington.edu/jcramer/BBSound_2013.html]

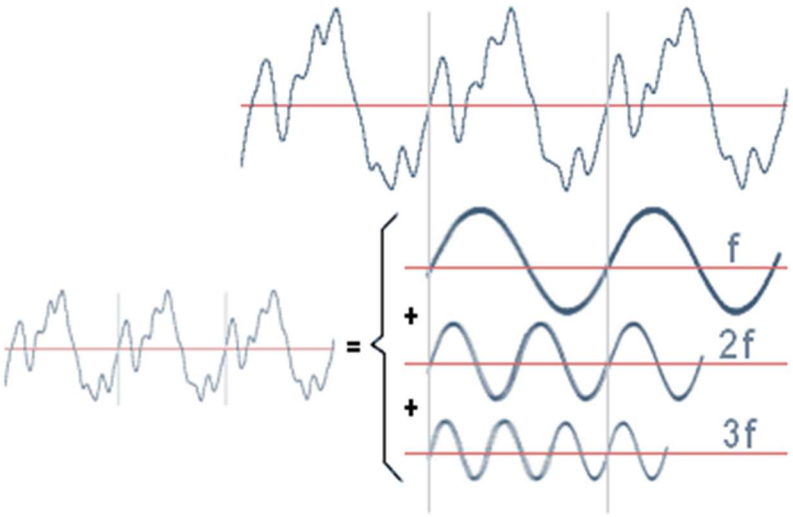
De todas formas repito lo ya dicho en el texto: la longitud de onda de esos "ruidos" podía ser de hasta un millón de años luz. Como podéis comprender nuestro oído no está diseñado para recoger tamañas amplitudes. Para una temperatura de aire de 20ºC donde la velocidad del sonido es 344 m/s, las ondas de sonido audible, tienen longitudes de onda desde 0,0172 a 17,2 metros.

16: La sinfonía del Universo II

a lo largo de los primeros 380.000 años

En el capítulo anterior descubrimos cómo el Universo, a lo largo de sus primeros 380.000 años, estaba compuesto por un plasma que progresivamente disminuía su densidad por causa de la continua expansión que experimentaba el tejido espacio/temporal de base. Decíamos también que este plasma estaba rielado por una serie de ondas sonoras consecuencia de las ondas de presión impulsadas en los colapsos gravitatorios iniciales. Una concordancia cósmica como resultado del baile de las fluctuaciones cuánticas primigenias locales que se fueron superponiendo y acoplando para crear esta particular sinfonía global.

Entremos en materia e intentemos entender su armonía. Porque si conseguimos distinguir en los acordes de esta melodía las flautas traveseras de los pícolos, los diferentes colores de los instrumentos de su plantilla, quizás comprendamos mejor su ser. Para ello necesitamos introducir ciertos conceptos elementales de la física de los sonidos y de las matemáticas que la soportan. Que no cunda el pánico, no habrá misterios.

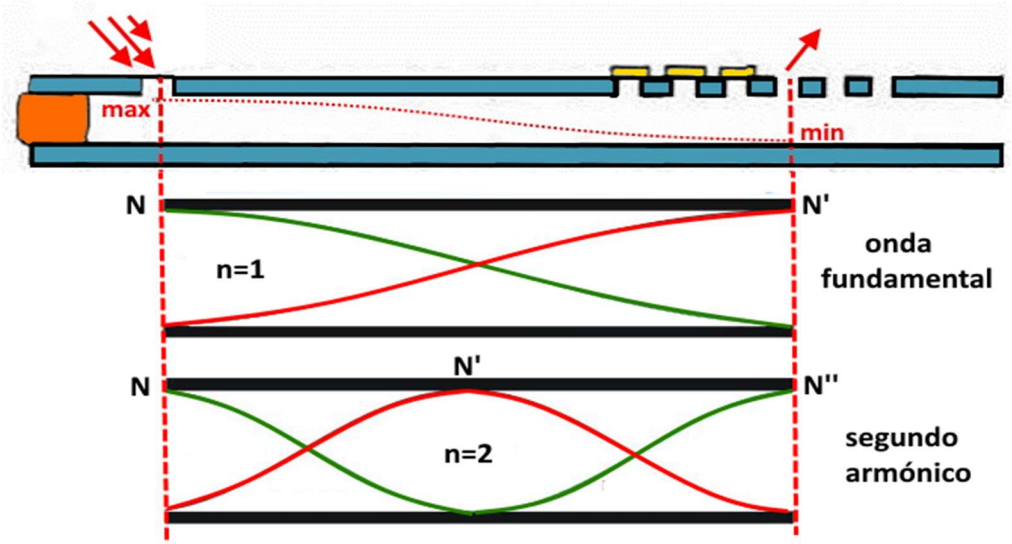


(Imagen obtenida de la red, ⓔfair use)

En la parte superior de la figura anterior se representa una curva cíclica, no muy alejada de lo que puede ser la onda sonora de un instrumento musical generada al tocar una determinada nota, y que viene condicionada por el tamaño de la caja de resonancia del instrumento. Tiene un perfil periódico, pero presenta una variación muy aleatoria a lo largo de este periodo. En principio puede parecer un galimatías caótico, aunque gracias a las matemáticas podemos hacer con ella una abstracción y descomponerla en un sumatorio de ondas perfectamente

sinusoidales, cada una de ellas con una frecuencia el doble de la anterior, siendo la primera, la de mayor longitud de onda (f en la imagen), lo que se suele conocer como la ***frecuencia fundamental***.

Este artificio matemático, conocido como la descomposición en series de Fourier,[1] se puede aplicar a cualquier tipo de sonido, movimiento ondulatorio o variación periódica y repetitiva. Por lo que también nos va a servir para analizar las ondas sonoras del plasma del Universo inicial y así sumergirnos en la información que llevan sus patrones. Pero ¿de dónde sacamos un patrón de ondas del Universo que nos sirva de base para el estudio? Un poco de paciencia… es algo que veremos en los siguientes capítulos.[2] En éste seguiremos un poco más con la teoría intentando caracterizar cómo son las ondas de la música del Cosmos.

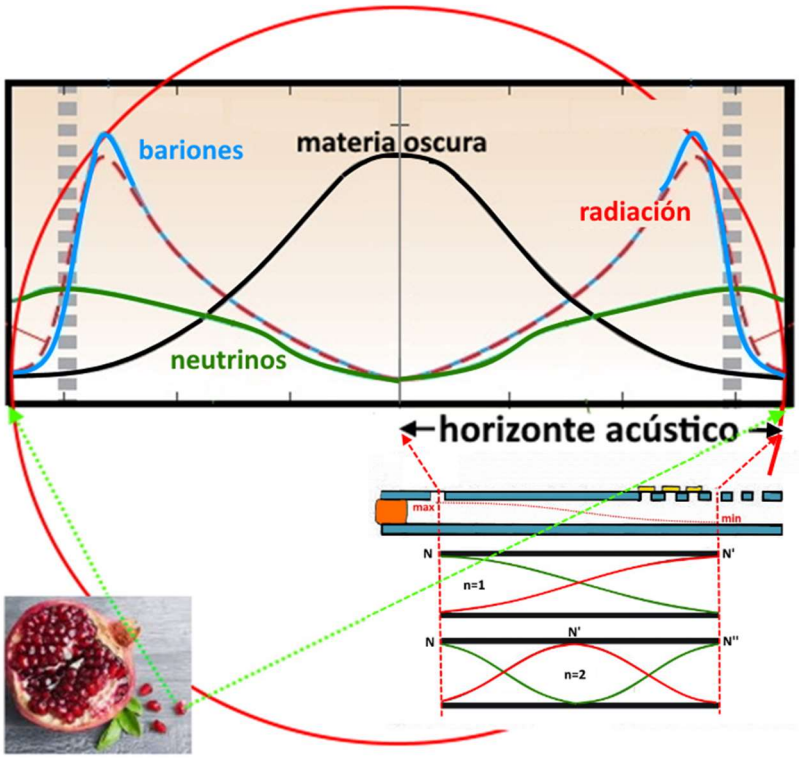


Esquema de una flauta en la que se ha abierto el cuarto orificio obteniéndose una serie de armónicos sonoros de los que se han dibujado los dos primeros. En todo extremo abierto de un tubo sonoro se produce un vientre. Por eso suena.

La Acústica Musical define como *tubo abierto* aquel que tiene dos o más orificios. Hay muchos instrumentos que cumplen el modelo. Fijémonos, por ejemplo, en una flauta: se sopla por un orificio y sale el aire cargado de información sonora por otro. Realmente sale el aire con un patrón de compresión, ya que el sonido, la sensación, se produce más tarde tras un fenómeno mecánico y neuronal en nuestras cabezas. La teoría dice que en la flauta se produce una *onda de presión* que fija sus cimas o vientres en los extremos del tubo. La onda con una longitud doble a la longitud de la flauta se trata del armónico fundamental, n=1, que comentábamos más arriba. Que se ve acompañado de infinitos armónicos, cada uno de longitud de onda $1/N_i$ veces la de la fundamental.[3] O lo que es lo mismo, *el segundo* n=2, con una

frecuencia *doble* de la fundamental; *el tercero*, *triple* de la fundamental, y así en los sucesivos. Gracias a la figura anterior que intenta dibujar el corte de una flauta, podemos hacernos una mejor idea.

Este patrón físico lo podemos extrapolar al Universo, que se comportó en su periodo *sinfónico* como un conjunto de flautas. Con una diferencia, la longitud de la flauta es fija mientras que el "horizonte acústico" en un grano de la granada cósmica se expande con el Universo. En todo momento el diámetro de esas burbujas gravitatorias definiría la longitud de onda del armónico fundamental n=1, el doble de la distancia N-N' en la imagen anterior. Ya sabemos que esas ondas y sus armónicos se desplazan entre los dos extremos de sus respectivas cajas acústicas a la velocidad del sonido en el medio que se trate, produciendo una resonancia que da como resultado una onda estacionaria.[4] El bandear de esta onda comprime y relaja la densidad del aire en la flauta, fenómeno que podemos oír; mientras que en el caso del Universo se comprime y relaja la materia del interior de cada una de las burbujas gravitatorias, lo que altera la distribución espacial de esa materia cosa que podemos apreciar muchos millones de años después al mirar las estructuras del Cosmos.



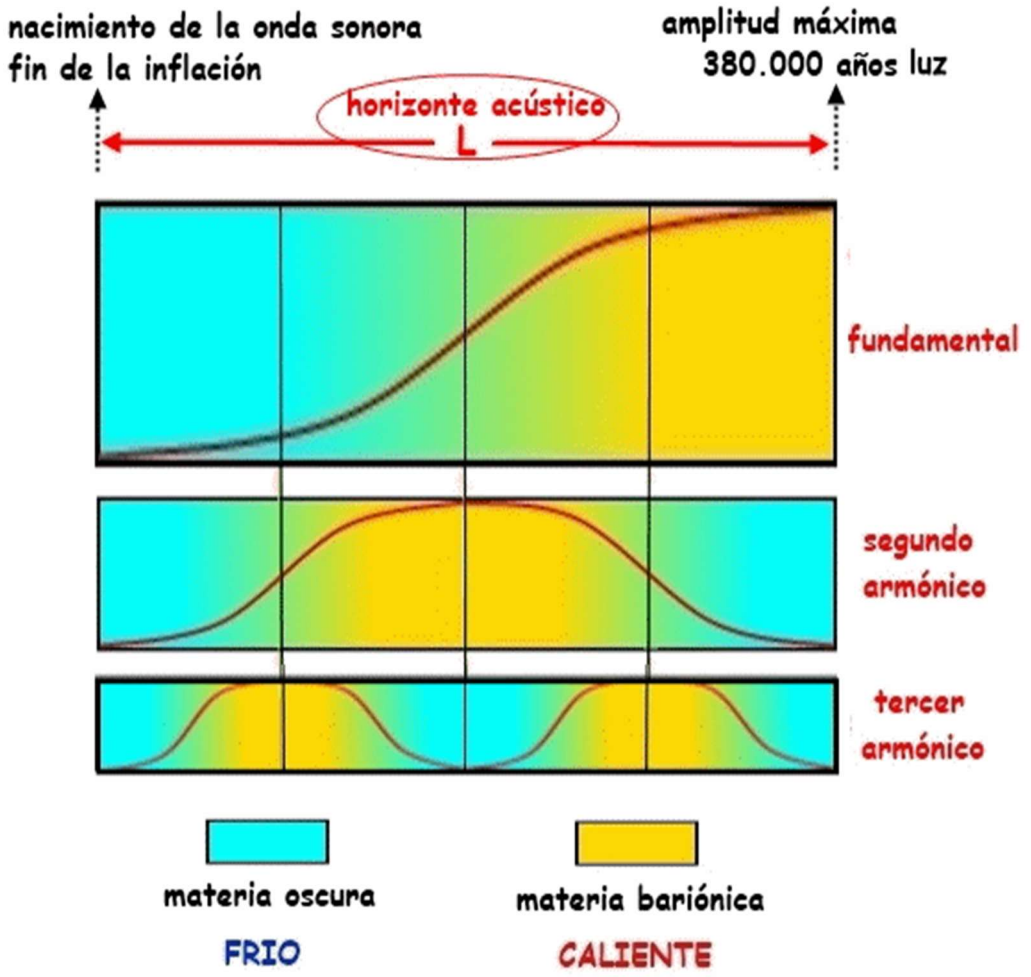
La orquesta cósmica está compuesta por millones de estas flautas. Millones de granos de granada. Los armónicos de las ondas de sonido rielaban por todo el espacio dentro del horizonte acústico. En el capítulo 18 se explicará el especial perfil de la distribución de materia y radiación que hemos usado en esta imagen.

Así que tenemos ya a los "instrumentos musicales" del Universo, unos "granos" que se comportaban como puntos que se expandían conformando una especie de burbuja esférica en cuyo interior se estaba dibujando una onda estacionaria gravitatoria de presión-relajación. La conjunción del "sonido" de esa miríada de instrumentos creo la gran sinfonía. Y eso fue así tan pronto como el primer momento tras la inflación, cuando nacieron las ondas esféricas de materia bariónica y radiación en cada punto del plasma del Cosmos donde se había producido una fluctuación cuántica.

Recordamos también que, al iniciarse en el mismo momento temporal en todos los lugares, todas las ondas de todos los puntos del plasma estaban acopladas. Cabalgando sobre la dinámica expansiva del tejido espacio/temporal y sobre su propia dinámica centrífuga que movía la materia bariónica por su interior, cada una de ellas iba dilatando su longitud con el tiempo, lo que era lo mismo que decir que su "tubo" acústico, su horizonte, se iba haciendo progresivamente más largo. A los 380.000 años, y debido al fenómeno que describiremos en el siguiente capítulo[5], el "tubo" llegó a su máxima longitud, exactamente la longitud que el "sonido" había podido recorrer en esos años y en ese medio.[6] En una palabra: nuestra gran flauta cósmica. Miles y miles de ellas superpuestas al unísono.

Podemos imaginar a cada onda sonora del plasma como compuesta por su combinación de armónicos. Y podemos pensar cada uno de ellos con vida independiente. En todos ellos las crestas correspondían a pozos gravitatorios de materia oscura en donde habían "caído" con preferencia el gas bariónico y los fotones asociados. Si había fotones, radiación, había también presión que compensaría el colapso gravitatorio. Lo que quiere decir que las crestas serían los puntos calientes del Universo. Mientras que los valles, zonas con menos materia oscura y por consiguiente escasos bariones y radiación anexa, serían los puntos fríos del Universo.

Con este patrón de ondas y el consiguiente de distribución de materia, podemos imaginar algo así como que el Cosmos era un mosaico romano, un mosaico dibujado por la materia bariónica acompañada de la radiación, sobre un sustrato director de materia oscura. En una segunda derivada lo podemos entender como un mosaico térmico, lo cual nos facilita mucho el estudio de la radiación de fondo de microondas. En el cuadro general de cada mosaico el patrón de dibujo que generaba cada frecuencia era modificado por la siguiente de menor amplitud que la anterior al contraponerse los máximos y mínimos de sus ondas. Donde una cargaba materia, la siguiente la descargaba. Así una tras otra. La figura siguiente intenta aclarar estos patrones de alternancia entre armónicos pares e impares y su efecto en el reforzamiento o dilución de la materia y la temperatura.



Tras el ¡plash! inicial la onda avanzaba dentro de su burbuja gravitatoria creciendo su influencia hasta una longitud L. Y ¡OJO! porque la leyenda superior puede inducir a pensar que el ancho está en unidades de tiempo cuando está en unidades de espacio, el que se ha propagado a lo largo de los 380.000 años antes de la recombinación.

Como intenta expresar la figura de arriba, cada uno de los armónicos de la onda sonora tenía una longitud de onda menor que el anterior. Así que, en algunas zonas, la concentración de materia bariónica que había acumulado el armónico fundamental se veía matizada por la relajación que había sido creada en las oscilaciones de los armónicos pares o por el reforzamiento que introducían las de los impares. A mayor densidad bariónica, mayor tenía que ser la densidad de radiación y, por tanto, mayor la temperatura. La anterior figura nos permite hacernos una idea visual de cómo el armónico fundamental fue el que generó la mayor diferencia posible de temperaturas entre dos puntos cualquiera del mapa del Cosmos. Estos puntos estaban separados por una distancia L, que era el radio de nuestra onda-esfera de sonido, el espacio que había corrido el frente de materia a lo largo de 380.000 años a la velocidad del sonido.[7]

Una conjunción de armónicos en una onda, una conjunción de ondas en el espacio… un Universo grumoso de materia con unos patrones de temperaturas acordes con ello. Un plasma convulso con cada vez menos energía promedio, en donde se estaban gestando las semillas de la futura estructura a gran escala del Cosmos. Y llegó la fecha talismán, 380.000 años de edad, cuando esa energía promedio por partícula rondaba los 0,25 eV y la temperatura era del orden a la de la superficie de nuestro Sol. La sinfonía llegó a su acorde final. Entonces… ¡¡¡*FLASH*!!!

El momento es mágico… lo dejo en el aire y aquí dejo este capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 16:

1. Las series de Fourier se obtienen aplicando la Transformada de Fourier a la curva periódica que queremos analizar. Mediante esta función vamos a descomponer la señal en funciones sinusoidales de duración infinita y amplitud constante. Esta descomposición nos va a permitir encontrar las posibles señales estables que configuran nuestra señal original de una forma rápida y sencilla.
2. Adelanto aquí que este patrón se obtiene del estudio del mapa de radiación de fondo de microondas. Este último está formado por los fotones que escaparon de la materia allá por el año 380.000 de la vida del Universo. Lo veremos con detalle en los capítulos 17 y 18.
3. N_i es un número entero que va desde un valor 2 hasta, en teoría, infinito, aunque mucho antes los armónicos se amortiguan de tal forma que se hacen inaudibles.
4. De nuevo me parece que resulta ilustrativo el recordar el ejemplo de la cuerda de una guitarra sujeta en sus dos extremos. Si la pulsamos se genera en ella una onda que se propaga hacia sus extremos fijos. Allí rebota y vuelve hacia el centro interfiriendo en su camino con la onda primera. La consecuencia de ese proceso es que la cuerda parece ondear atada a sus puntos fijos, dibujando un patrón característico de cumbres y valles que es lo que constituye la onda estacionaria.
   [https://es.wikipedia.org/wiki/Onda_estacionaria#/media/Archivo:Standing_wave_2.gif]
5. Ya adelanto en esta nota que se trata del momento conocido como de la ***recombinación***, cuando los electrones se acoplaron a los núcleos dejando a los fotones en libertad. Estos últimos son precisamente los que conforman lo que llamamos ***radiación de fondo de microondas***.

6. En el momento de la recombinación el universo era unas 1.100 veces más pequeño que ahora, por lo que la longitud del horizonte acústico si entonces era del orden de los pocos cientos de miles de años luz, en el momento actual se encuentra en el entorno de 480 millones de años luz. Recordamos como una imagen del capítulo anterior la dibujaba precisamente en el entorno de los 480 millones de años luz.
7. Advierto que aquí la velocidad del sonido no es de 340 m/seg, que es aquella con la que se propaga por el aire. En cada momento sería diferente y dependiendo de la densidad. El plasma del Universo primitivo varió desde densidades de materia superiores a las del aire, a serlo menos, así que podemos imaginar que la velocidad de las ondas sonoras variaba con el tiempo. Aunque con valores de fracciones significativas de la velocidad de la luz.

17: El *big flash*

a los 380.000 años desde el inicio

Nos disponemos a abrir una nueva página crucial para el conocimiento de nuestro Universo. En el capítulo anterior lo habíamos descrito con un ¡*FLASH*!… pero ahora voy a ser un poco más exagerado, porque me atrevo a ponerle la etiqueta de ¡*BIG FLASH*! Como allí dijimos, el Universo estaba completando una larga sinfonía iniciada en su momento t^{-35} segundos de vida. Llegaron los últimos compases que conformaron la coda final del primer movimiento en la Sinfonía del Universo. Está a punto de iniciarse el último tema musical… 380.000 años después se va a completar la obra con la aparición liberadora de los átomos mientras suena una fanfarria de metales. Después sólo quedaría la reverberación de su eco. Aunque… ¡menuda reverberación!

CODA

La energía promedio de las partículas del Universo estaba alcanzando las decenas de eV. Era ya lo suficientemente baja como para que el campo de la fuerza electromagnética, con sus fotones, pudiera intervenir en un mundo de partículas y elementos, algunos de ellos con cargas eléctricas. Hasta entonces las velocidades de los actores -núcleos, protones, electrones y, sobre todo, la de los fotones- habían sido tan altas que en los múltiples choques entre ellos no habían tenido tiempo para que los que tenían cargas opuestas se unieran. La energía de unión entre un protón positivo y un electrón negativo, un átomo de hidrógeno, es del orden de 13,6 eV. Así que, cuando los fotones, siguiendo el camino de enfriamiento general, "estiraron" su longitud de onda por debajo de estos niveles energéticos,[1] ya no tuvieron fuelle suficiente y dejaron de hacer lo que habían hecho hasta entonces: "molestar" a los electrones a través de las pertinaces dispersiones de tipo Thomson. A pesar de la baja densidad seguramente los electrones se debían desplazar muy cerca de los protones debido a la atracción electromagnética que había entre ambos tipos de partículas. Por lo que una vez vencida la rémora que suponían los fotones, los electrones cayeron en brazos de los núcleos que mostraban el atractivo de la carga positiva de sus protones. Esto sucedió más o menos hace unos 380.000 años tras el Big Bang, cuando la temperatura del Universo llegó a ser del orden de los pocos miles de Kelvin, tres o cuatro mil, parecida a la de la superficie de nuestro Sol. Había llegado la época conocida como de la "***recombinación***", cuando se formaron los ***primeros átomos estables*** -de hidrógeno, deuterio, helio, litio y poco más- dejando como resultado a un remanente de abundantísimos fotones de 0,25 eV, que pudieron "volar" libres por primera vez sin encontrar apenas ningún impedimento. El cielo se había vuelto

transparente y lleno de luz del rango infrarrojo, cercano al visible para el hombre… si es que hubiera habido alguno por ahí.

¡¡¡*FLASH*!!!

O quizás no tanto

Después de esto, el Universo quedó de tal forma transformado que nunca más volvió a ser el mismo. ***La densidad de energía de la radiación se escondió en un sutil fondo cediendo definitivamente la batuta a la densidad de energía de la materia***. No es que en el Universo a partir de la recombinación la materia cogiera el testigo que le pasaba la radiación, no. Ya se había iniciado la labor hacía 330.000 años, a los cincuenta mil desde el Big Bang. En este temprano momento la dinámica expansiva del Universo, lleno de radiación y materia, comenzó a sentir la progresiva influencia de esta última, más potente que la que le dinamizaba el periodo anterior de un mundo de dominante radiación. Por fin se iba a consolidar un ritmo de crecimiento $t^{2/3}$ frente al anterior $t^{1/2}$. Y ya va a ser así hasta muchos millones de años después. Las ondas sonoras que movían al plasma de forma grumosa antes del *flash* se congelaron, dejando el particular patrón de materia bariónica y de materia oscura que ya conocimos del capítulo anterior. Y que será lo que con el tiempo irá definiendo la arquitectura y las estructuras del Universo de hoy.

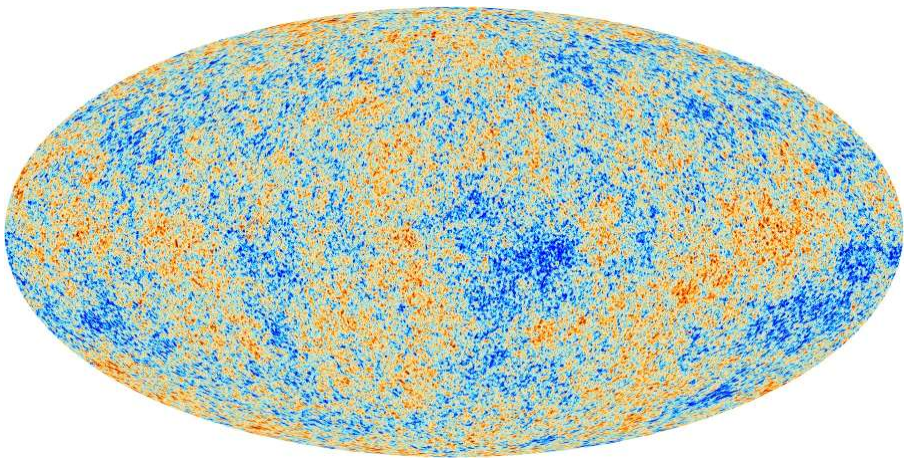
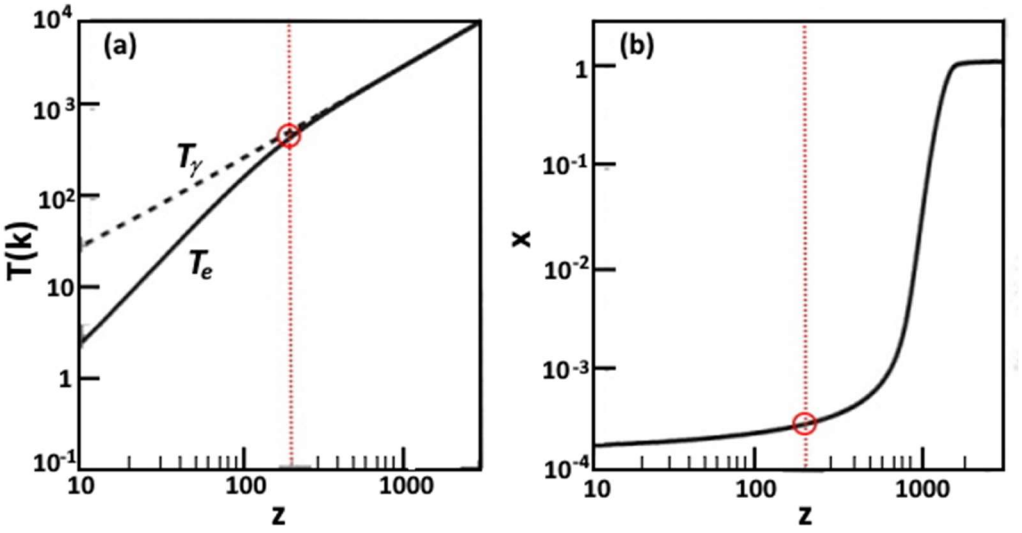


Imagen de la radiación de fondo de microondas obtenida por el satélite Planck: los fotones que se liberaron cuando la época de la recombinación (Imagen: European Space Agency, ESA, non-commercial use)

Aquello no fue como un fogonazo de transparencia, aunque realmente nos guste imaginarlo así. Duró su tiempo.[2] Pero ese *flash* lo hemos podido fijar con nuestros magníficos instrumentos COBE, WMAP y Planck,[3] y así disfrutar de la primera fotografía de infancia de nuestro Cosmos: la que captura a aquellos fotones de la época en que huyeron de la materia a 3.000K, hace más de 13.400 millones de años, y que ahora llegan a nuestras cámaras. Llenan el Universo

entero y vienen de todos los lados. Arriba está la foto. La de aquella granada cósmica imaginaria de la que hablábamos en un capítulo anterior. Cada uno de sus granos una unidad de información gravitacional. En la foto, cada color es una clave de la temperatura de su estructura. Pero vayamos por partes y contemos toda su historia.

Ciertamente no fue un *flash* digno de Star Trek. Tomó su tiempo. La huida de los fotones había dejado a los bariones y a la materia oscura campar relativamente a sus anchas. Curiosamente ambas poblaciones no se movían al unísono sino que entre ambas se daba un movimiento relativo, los bariones, en promedio, iban por un lado y la materia oscura hacia otro, a una velocidad media que se puede cuantificar en unos 30 kilómetros por segundo.[4]



A la izquierda evolución de la temperatura de la radiación y de los bariones en cada momento z. A la derecha porción de los electrones que no se han recombinado (Imagen de "The first Galaxies in the Universe", Abraham Loeb y Steven R. Furlanetto, figura 2.5, ⓑfair use)

Más aún, en el gas de bariones no todo eran átomos de hidrógeno o de helio ya que las condiciones del medio hacían que el acoplamiento protón/electrón necesitara tomar su tiempo ya que los fotones del fondo aun seguían ejerciendo su influencia durante los primeros momentos tras la recombinación y lo siguieron haciendo prácticamente hasta unas épocas de corrimiento al rojo z=200 cuando ya el enfriamiento de la expansión los dejó sin gasolina. Esa dilación en la conclusión de la formación de átomos neutros fue motivada por algo que ya venía sucediendo de lejos: en aquellos momentos la proporción entre bariones y fotones era muy baja, del orden de 10^{-9}. Os podéis imaginar el pim pam pum del momento, sobre todo para los pequeños electrones dos mil veces menos masivos que un protón. Y aunque el impulso medio de los fotones fuera significativamente menor que la energía de ionización de un átomo neutro

(13,6 eV para el hidrógeno), las energías de su población seguían una distribución de Poisson por lo que, cosas de la estadística, en su conjunto todavía quedaban bastantes fotones con suficiente energía como para mantener al universo fuera de una total recombinación durante un largo periodo.

A lo largo de este dilatado proceso la temperatura de los electrones que aún no se habían recombinado iba variando de forma aleatoria debido precisamente a dos efectos contrarios: por un lado, aun perduraban los choques de dispersión con los fotones, cosa que los podía acelerar, mientras que por otro lado se verían frenados por el "rozamiento" que producía el momento intrínseco de los fotones sobre el movimiento de los electrones. Este último efecto se producía porque al interactuar los fotones con los electrones, estos pueden redistribuir su energía y momento en direcciones menos eficaces para el movimiento neto del electrón, generando un efecto de frenado que tiende a reducir su energía cinética. Debido a las interacciones de los electrones con los fotones a través de dispersión Thomson, el sistema de electrones y bariones también permanecía estrechamente vinculado a la radiación cósmica de fondo, por lo que podemos imaginar que en su conjunto se mantuviera un equilibrio térmico entre bariones y radiación, equilibrio que definía la temperatura del gas cósmico en cada momento. Lo vemos en la curva izquierda de la figura anterior.

Pero eso fue cambiando ya que a medida que pasaba el tiempo y la expansión crecía, los electrones se veían progresivamente más incentivados a recombinarse con los núcleos ligeros del momento. La situación parece que se estabilizó definitivamente en una época situada más o menos en un corrimiento al rojo z=200, año 5,75 millones desde el Big Bang (*ver imagen anterior*), cuando el efecto de las dispersiones Thomson resultó ineficiente. En ese momento, dado el pequeño porcentaje de electrones no recombinados, tres por cada 10 mil de la población total, se perdió el equilibrio térmico entre materia bariónica y radiación. El gas se encontró con que debía seguir una expansión adiabática, por lo que los electrones fueron perdiendo su temperatura a un ritmo superior a la de los fotones como se observa en la curva anterior de la izquierda.[5] En ese momento sí que podemos decir que el gas bariónico y la radiación de fondo volaban libres mientras se echaba definitivamente el telón al *FLASH*.

Los fotones definitivamente pudieron moverse con libertad por el Universo portando una energía por debajo del electrón voltio, en las frecuencias infrarrojas. Así que no se "vio" ningún destello luminoso. Algunos chocaban con los recién estrenados átomos de hidrógeno, aunque sin posibilidad de ionizarlos ya que para ello, hacer saltar al electrón, se necesitaba una energía igual a la de unión protón-electrón en el hidrógeno, 13,6 eV. Mucho más tarde volveremos a ver este proceso cuando gracias a las fusiones nucleares en el interior de las primeras estrellas se generaron fotones con la energía

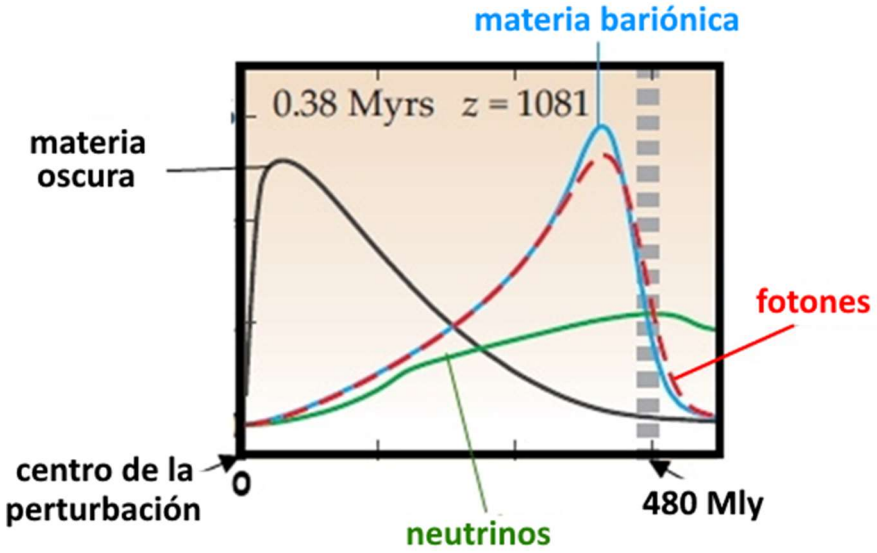
necesaria.[6] Comenzaba la época conocida como de la ***gran oscuridad*** que iba a durar hasta que se encendieran esas primeras estrellas unos pocos cientos de millones de años después.

El momento de la recombinación fue el de la segunda "manumisión" masiva. La primera la habían protagonizado los neutrinos cuando casi había pasado un segundo en la vida del Universo.[7] Tras aquel viejo momento la aniquilación mutua de los electrones y los positrones seguía en marcha transformando su materia-antimateria en energéticos fotones, lo que suponía un aporte de energía al conjunto de la radiación del plasma. Eso es lo que explica que la segunda "manumisión", la de los fotones, fuera un tanto más energética que la primera protagonizada por los neutrinos. Con la tecnología de hoy en día hemos podido detectar este ubicuo mar de fotones, cosa que no tenemos ni idea de cómo hacerlo con los neutrinos que son mucho más esquivos. Los fotones de la recombinación están ahora por todas partes, mucho más "fríos" que entonces al haberse suavizado su longitud de onda a la par de lo que se iba expandiendo el Universo. Unas 1.100 veces desde entonces. De forma que hoy son los constituyentes de una radiación de fondo en la frecuencia de microondas, con una energía equivalente a los 2,725 K.

La impactante imagen de tres páginas más arriba corresponde a estos fotones perdidos. Salieron hace 13.700 millones de años, el tiempo pasado desde la recombinación hasta hoy, desde una cáscara esférica de Universo en cuyo centro nos hallamos, que está en el límite de lo observable por nosotros a 46.500 millones de años luz.[8] Hay que decir que no hay contradicción entre las dos cifras, 13.700 y 46.500 millones de años luz, ya que la mayor incorpora no sólo el tiempo de viaje sino también el efecto de la expansión del Universo. La imagen que hemos presentado obtenida por la sonda Planck es una fotografía de hoy, pero que no deja de ser un modelo a escala de la fotografía más antigua que se puede hacer al Universo. A nuestro Universo observable. ¡Una foto venida del año 380.000 de la vida del Universo! Ya hemos dicho que en ella cada color corresponde a fotones de una determinada longitud de onda, que es equivalente a hablar de energía-temperatura. Donde había una mayor densidad de materia bariónica los fotones liberados tenían una mayor energía ya que allí se producían más interacciones, la presión de la radiación era mayor. Donde la densidad bariónica era menor, los fotones liberados eran de menor energía. Lo vemos en una imagen rescatada de hace dos capítulos.

Como podemos ver en la figura que sigue, que dibuja la posible distribución de materia en el momento de la recombinación, la densidad de la radiación -los fotones- no se concentraba en donde había una gran densidad de materia oscura, ya que no interacciona con ellos, sino en el frente de ola de materia bariónica. Por esta razón los fotones más calientes se encontrarán en estas últimas zonas, las de mayor potencial gravitatorio, y los más fríos en las zonas de materia

oscura. Por eso la foto de la radiación de fondo de microondas ***es sencillamente la foto de la distribución de la materia en el Universo*** cuando tenía casi cuatrocientos mil años. Un matiz sorprendente que quizás se nos había escapado.



Distribución de la materia y la energía de una fluctuación cuántica primordial en el momento de la recombinación (Imagen: a partir de Daniel J. Eisenstein, Physics today, abril 2008, ⓕ fair use)

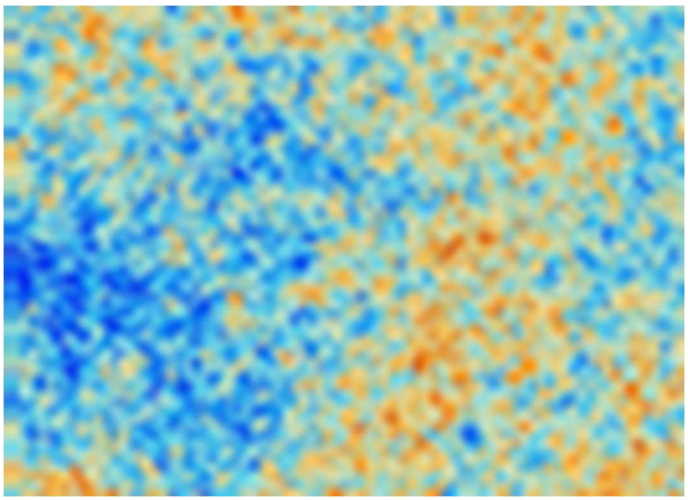
A la vista de las irregularidades que se aprecian en la imagen de la radiación de fondo de microondas puede parecer que el proceso no fue muy homogéneo, pero realmente entre unos puntos y otros hay diferencias máximas de tan sólo una parte en 100.000. Es como si la superficie de una piscina olímpica de 50 metros se estuviera moviendo con olas de medio milímetro. Inapreciable.[9]

Vamos a dedicarle un poco de tiempo a lo que nos dice esta primera imagen del contenido del Universo. Realmente corresponde a una proyección cartográfica plana del tipo Mollweide de la esfera celeste en cuyo centro nos encontraríamos observando.[10] En esta especie de elipse está representada la totalidad del firmamento visible, lo que un día cualquiera nosotros podemos ver si miramos al profundo cielo en todas las direcciones de donde nos viene luz. Pero habiéndole manipulado un poco. Eliminemos la luz solar que oculta a los pequeños focos que nos interesan. Eliminemos también la de las estrellas y galaxias, sobre todo la de la Vía Láctea. La luz remanente que nos queda tras esta acción de borrado son los fotones de la radiación de fondo.

Con nuestro ojo, que no olvidemos que es un aparato biológico para detectar fotones, no los captamos ya que la frecuencia de esta ancestral luz está en el rango de las microondas por lo que queda muy alejada del espectro visible.[11] Pero el hombre, como animal insaciablemente curioso e razonador, ha ido

ideando métodos para detectar a estos fotones mejorando sus aparatos de percepción de la luz, desde la rudimentaria antena con la que Penzias y Wilson en 1965 descubrieron de una forma muy rocambolesca[12] los fotones del fondo de microondas, hasta los modernos satélites como el COBE, el WMAP o el Planck que transportan unos telescopios con resoluciones fantásticas. La foto que obtuvieron nuestros dos pioneros descubridores era monocromática… para ellos y la sensibilidad de su tecnología todos los fotones del fondo eran de la misma energía. La resolución fue progresivamente mejorando con las tres sondas mencionadas.

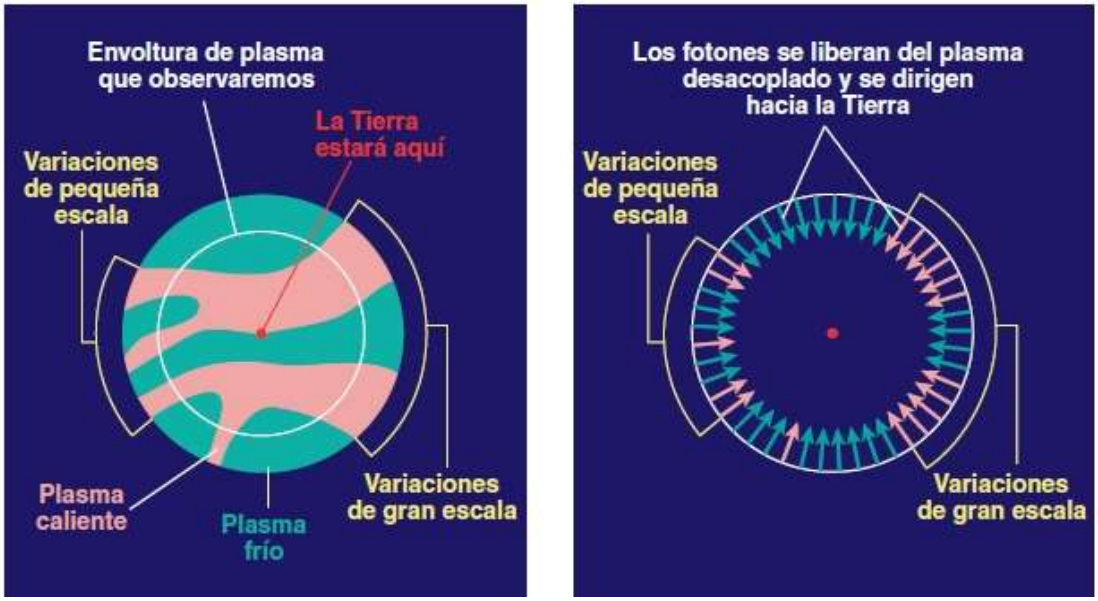
Y al igual que la foto de nuestros tatarabuelos nos permite saber cómo eran ellos, aunque ya no estén con nosotros, las tomadas por COBE, WMAP y Planck nos permiten saber cómo era el Universo de 380.000 años. La imagen siguiente nos está hablando de ello ya que es un detalle de las anisotropías del fondo de microondas tal como lo que nos han dicho nuestros satélites y que ahora vamos a intentar entender un poco más.



Remarcamos una vez más que los colores son simplemente una referencia cromática artificial de las “temperaturas-densidades de masa”. Parece como que realmente vemos el reflejo de las ondas sonoras esféricas que se transmitieron por el antiguo plasma a velocidades del sonido y que quedaron congeladas en el momento de la recombinación. Son perfectamente imaginables los grumos dibujados por los armónicos fundamentales y sus interferencias que marcaban la identidad y diferencia entre las zonas de mayor densidad y las de menor densidad. La foto real de nuestro Universo accesible.

La imagen esquemática que sigue nos permite hacer una mejor idea de el porqué de estas distribuciones. A su izquierda un corte de la “esfera” del universo, en cuyo centro nos encontramos nosotros hoy como observadores. La circunferencia blanca inmersa en un universo mayor es nuestro horizonte de visión del fondo de microondas: de allí salieron hace 13.400 millones de años los fotones que llegan ahora a nosotros. Unos proceden de las zonas rojas de un

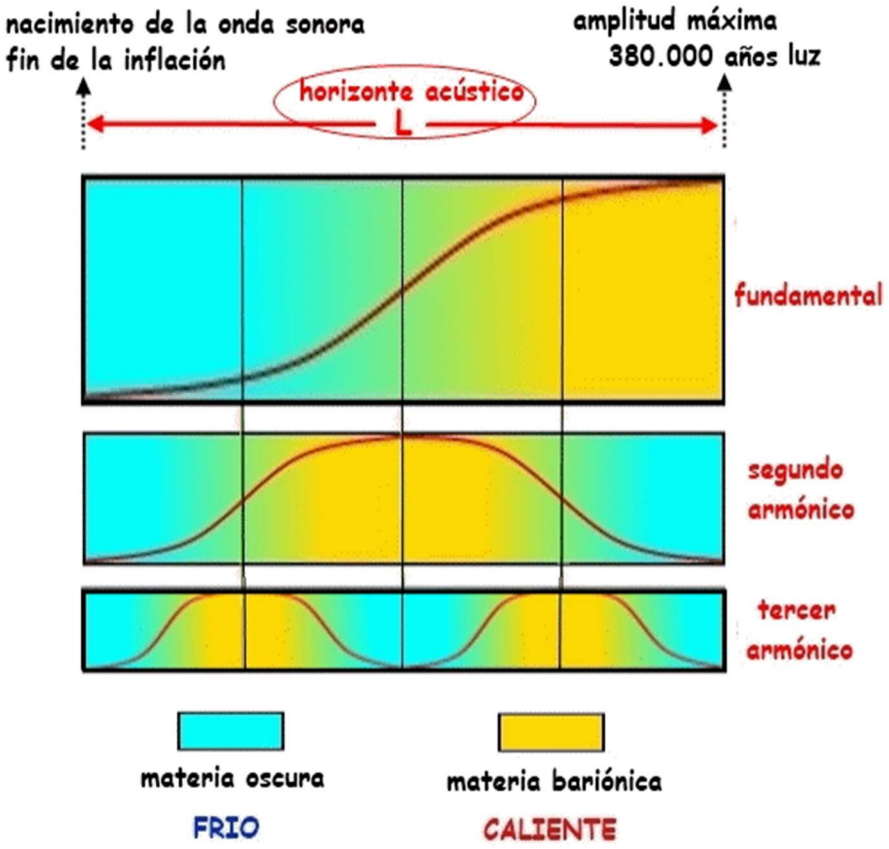
plasma primordial más caliente y otros, de un plasma más frío. Todo ello dibuja un patrón de anisotropías que podemos ver enfocando nuestro zum a diferentes escalas, con el resultado que vemos a la derecha. Éste es el origen del patrón de colores de la foto de la radiación de fondo.



Esquema teórico de la realidad física que hemos podido captar como la foto de la radiación de fondo de microondas. Se explica en el texto (Imagen: "Polarización del fondo cósmico de microondas", Matthew Hedman, IyC diciembre 2005, ⓕ fair use)

A la vista de esta maravilla, vamos a ver de qué forma podemos extraer la información que lleva en su mosaico. Recordemos lo que dijimos en el capítulo anterior acerca de los armónicos de la onda sonora. El armónico fundamental marcaba la máxima amplitud posible en el perfil de la onda sonora. Que es lo mismo que la mayor diferencia de temperaturas entre zonas del Universo. El segundo armónico presentaba una nula diferencia de temperatura entre sus extremos, aunque realmente sí inducía un pozo de materia bariónica en la zona intermedia. Al acoplarse ambos armónicos en la frontera de la burbuja de sonido, la alta masa bariónica -temperatura- que allí fija el primero fue modulada a la baja por el segundo. Pero el tercer armónico reforzaría la temperatura en la frontera de la burbuja ya que fomenta allí la concentración de masas. Y así con los demás matizándose unos a otros.

En el momento de la recombinación cuando se "congelaron" las ondas de sonido, el armónico fundamental se había extendido una distancia igual a la que recorrió la onda de presión durante los 380.000 años de existencia de esa onda. Esta distancia es conocida como horizonte acústico. Hoy en día, cuando el Cosmos se ha "estirado" desde entonces en un factor de 1.100, este horizonte acústico ha crecido hasta un valor próximo a los 480 millones años-luz.



El tamaño del horizonte acústico tiene que depender del potencial del pozo gravitatorio inicial, de la energía de la radiación que impulsa el rebote de la onda de sonido y de la velocidad con la que se desplaza por el medio. Las tres cosas dependen de la composición de la materia, bariónica y oscura, y su relación con la densidad de la radiación. El tamaño del horizonte acústico tal como lo observamos hoy en día depende también del ritmo de expansión del Universo -constante de Hubble- y de su curvatura. Ambos dependen también de la cantidad de materia y energía total existente. Todo este cúmulo de diferentes circunstancias son las que están escondidas en la apariencia grumosa de la foto del fondo de microondas. Es la información que lleva encriptada y ***que podemos intentar descifrar***.

Con estas ideas, pasemos al análisis del fondo cósmico de microondas. Vamos a estudiar su espectro de ondas acústicas, es decir, la distribución de las fluctuaciones de densidad y temperatura que quedaron impresas en la radiación poco después del Big Bang. Este análisis es similar al estudio de un sistema cerrado descompuesto por frecuencias, como cuando se traza el espectro de radiación de un cuerpo negro o el espectro de luz del Sol. En nuestro caso realizaremos este análisis a partir de la imagen de la esfera celeste conocida como la foto primordial del universo. Lo que nos permitirá trazar un perfil detallado de las oscilaciones acústicas bariónicas y desentrañar información clave sobre los parámetros cosmológicos, como la densidad de materia, la curvatura del universo y la proporción de energía oscura.

Como podéis imaginar el tema da mucho de sí, lo que aconseja desarrollarlo en un siguiente capítulo. Lo haré de forma somera, aunque espero que suficiente para ser entendido.

NOTAS DEL CAPÍTULO 17:

1. Según el viejo Planck eso iba de que la energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, según su conocida ecuación $E=h\lambda$
2. El proceso de recombinación no sucedió en una fecha exacta, no fue breve en el tiempo sino que se dio a lo largo de un periodo cuyo inicio se situó cerca del momento con corrimiento al rojo z=3.233 cuando la materia empezaba a doblarle el pulso a la radiación, y duró unos 118.000 años hasta el corrimiento al rojo z= 195.
   [http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March03/Lineweaver/Lineweaver7_8.html#Table%201]
3. Se tratan de tres sondas espaciales portadoras de telescopios. COBE, 1989, fue el primer satélite construido especialmente para estudios de cosmología y estuvo especialmente dedicado al explorar el fondo cósmico. WMAP, 2001, tuvo como misión el estudiar el cielo y medir las diferencias de temperatura que se observan en la radiación de fondo de microondas. Por último, Planck, lanzado en 2009, está diseñado para detectar las anisotropías en el fondo cósmico de microondas.
4. Las diferencias de velocidad entre la materia oscura y la bariónica tras la recombinación se deben a la interacción gravitatoria exclusiva de la materia oscura y a las oscilaciones acústicas de los bariones desacoplados del fondo de radiación.

   Eso va a tener suma importancia ya que cuando más tardara la materia oscura en iniciar las primeras concentraciones de materia bariónica en su potencial gravitatorio, más difícil iba a ser el hacerlo. Además será más fácil que caigan los bariones que pasen cerca del centro de gravedad de la materia oscura. Incluso pudo afectar a la propia acreción de la materia oscura al ser menor la masa del halo que se estuviera compactando.
   Ver "*Supersonic Relative Velocity between Dark Matter and Baryons: A Review*" de Anastasia Fialkov y Christopher Hirata, 2014
   [https://arxiv.org/pdf/1005.2416]
5. Mientras los fotones se veían afectados exclusivamente por la expansión de Hubble que los enfriaba proporcionalmente al valor de z de cada

momento, la expansión adiabática del gas enfriaba a los electrones proporcionalmente al valor de $(1+z)^2$.

6. Ya veremos en un capítulo posterior, el 24, que eso se produjo en un momento conocido como la ***reionización***.
7. Como la liberación de los neutrinos fue casi unos 380.000 años anterior a la de los fotones, la esfera de su liberación LSS (*Last Scattering Surface*) tendría que estar más alejada de nosotros que la de los fotones de fondo CMB (*Cosmic Microwave Background*). Hablamos de esferas ya que conceptualmente nos estamos refiriendo a fotones o neutrinos que llegan a nosotros situados en su centro y en nuestro momento temporal, partículas que vienen desde estas hipotéticas esferas viajando hacia nosotros desde que se independizaron. Esas dos superficies deberían estar separadas unos 285 millones de megapársecs, casi 1.000 millones de años luz. Es decir, cuando nos llega un fotón del fondo CMB salido de un determinado punto, a los neutrinos LSS que partieron del mismo lugar les debería faltar 1.000 millones de años luz para llegar. Sin embargo cuando midamos la realidad hay que tener en cuenta el hecho de que los neutrinos tienen una pequeñísima masa que implica la disminución de su velocidad con relación a la de la luz de los fotones. Así que los neutrinos vienen más despacio. Por ejemplo, los neutrinos del fondo LSS de tipo electrónico con masa 10^{-4} eV que nos están llegando ahora mismo, proceden de un punto más cercano que los correspondientes fotones CMB que se desplazan a la velocidad de la luz. Los neutrinos electrónicos de mayor masa, 1 eV, se mueven a una velocidad de 0,59 c, por lo que parecen provenir desde una distancia de 461 millones de años luz. Compárese con los caminos de 46.000 años luz de los correspondientes fotones CMB (*ver el siguiente enlace, figura 1*).
   [https://arxiv.org/pdf/0907.2887v1.pdf]
8. Estos fotones son los elementos del Cosmos que podemos observar más alejados en el tiempo, son realmente el telón de fondo del Universo observable por nosotros.
9. Al comienzo del Big Bang caliente, tras el periodo de inflación exponencial, el Universo era casi perfectamente uniforme. Si dibujáramos una esfera alrededor de cualquier región de aquel espacio, descubriríamos que en su interior habría encerrada una cierta cantidad de masa que se puede traducir como una cierta densidad. Si dibujamos mil esferas del mismo tamaño en 1.000 regiones diferentes de aquel Universo, encontraríamos que sus densidades siguen una distribución gaussiana con una desviación estándar ridícula:
   - alrededor de 683 regiones tendrían una densidad entre el 99.997% y el 100.003% de la densidad promedio,

- alrededor de 954 regiones, entre el 99.994% y el 100.006% de la densidad promedio,
- alrededor de 997 regiones, entre el 99.991% y el 100.009% de la densidad promedio,
- y todas las 1.000 regiones, entre el 99.988% y el 100.012% de la densidad promedio.

De aquí el calificativo de "inapreciable" usado en el texto para las variaciones de densidad local.
[https://bigthink.com/starts-with-a-bang/first-supermassive-black-holes/]

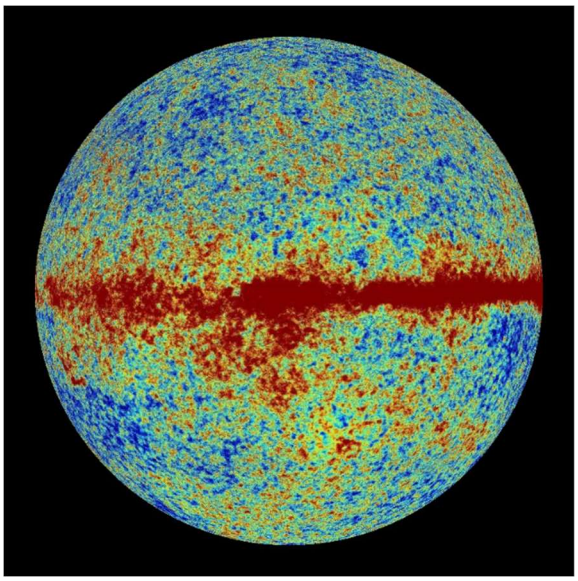
10. Como dice Wikipedia, la proyección de Mollweide es una proyección cartográfica equitativa y pseudocilíndrica, usada generalmente para mapas de la Tierra. El ecuador tiene el doble de longitud que el eje corto. El meridiano central es recto mientras que los meridianos a 90° son arcos circulares. Los paralelos son rectos pero desigualmente espaciados. La escala es casi verdadera sólo a lo largo de los paralelos estándar de 40:44N y 40:44S, por lo que tiene una mayor representación por la zona ecuatorial.

11. Las microondas tienen una longitud de onda en el rango aproximado de un metro a un milímetro, mientras que el visible se mueve en un entorno de los 10^{-7} metros.

12. En el enlace propuesto a Wikipedia os podéis hacer una buena idea de la aventura por la que se llevaron el premio Nobel de física de 1978, aunque para mí en cierta medida fue injusto ya que les habían allanado el camino los investigadores de la Universidad de Princenton, los cuales, tras hacer la mayor parte del trabajo, se quedaron compuestos y sin novia.
[https://es.wikipedia.org/wiki/Descubrimiento_de_la_radiaci%C3%B3n_de_fondo_de_microondas]

18: Lo que nos enseña la radiación de fondo I

En el capítulo anterior asistimos a un gran momento del Universo: ***la recombinación***. El Universo parió a los primeros átomos y la radiación quedó libre de la materia, o viceversa, lo que permitió el inicio de los procesos de la definitiva compactación gravitatoria que ha dibujado las estructuras actuales del Cosmos. En este capítulo continuamos con un objetivo: vamos a intentar destripar los misterios velados en la foto de la radiación de fondo de microondas. Lo que era ya quedó dicho en el último capítulo. Para nuestro nuevo propósito contamos con el análisis de su espectro de anisotropías -su ligerísima falta de homogeneidad espacial-, que iremos deshojando al igual que podemos hacerlo con el de frecuencias de las emisiones de un cuerpo negro.



Esta imagen del fondo de microondas es una esfera convexa, como una luna, aunque la realidad nos dice que se trata de una bóveda celeste cóncava, como un planetario, desde la que nos llega tan lejana radiación. La franja horizontal roja es luz emitida por nuestra mucho más cercana galaxia. (Imagen: WMAP-NASA, dominio público)

Antes de seguir ya veis que me ha interesado introducir una modificación de la imagen que apareció en el capítulo anterior del fondo de microondas. Creo que es bueno pasar unas páginas atrás para mantener en la mente la original, aunque ahora la presento en su forma más auténtica, esférica y no plana. Representa la superficie esférica más lejana desde donde nos viene la radiación de fondo de microondas. Imaginémonos a nosotros como observadores situados en el centro de esa esfera desde donde contemplamos su grumosidad. Es como si se tratara del espectáculo de un planetario en el que vemos el aspecto del cielo con estrellas y planetas, pero en ese caso admirando la más vieja cara del Cosmos.

Sabemos que en lo que vemos, a pesar de las inhomogeneidades aparentes, hay unas simetrías decisivas troqueladas por las anisotropías del Big Bang, las cuales llevan encriptada mucha información:

- la información de quiénes las hicieron como son, es decir, la composición de la materia -bariónica y oscura- y su relación con la radiación; y
- la información de lo que hicieron, el ritmo de expansión del Universo -constante de Hubble- y de su curvatura, que dependen de la cantidad de materia y energía total existente.

Sin duda imaginamos que la realidad de su estudio debe ser harto compleja, pero los cosmólogos lo han conseguido. Todo pasa por obtener la información, ordenarla, descomponerla en funciones simples para su estudio e integrar lo que nos dicen esas funciones.

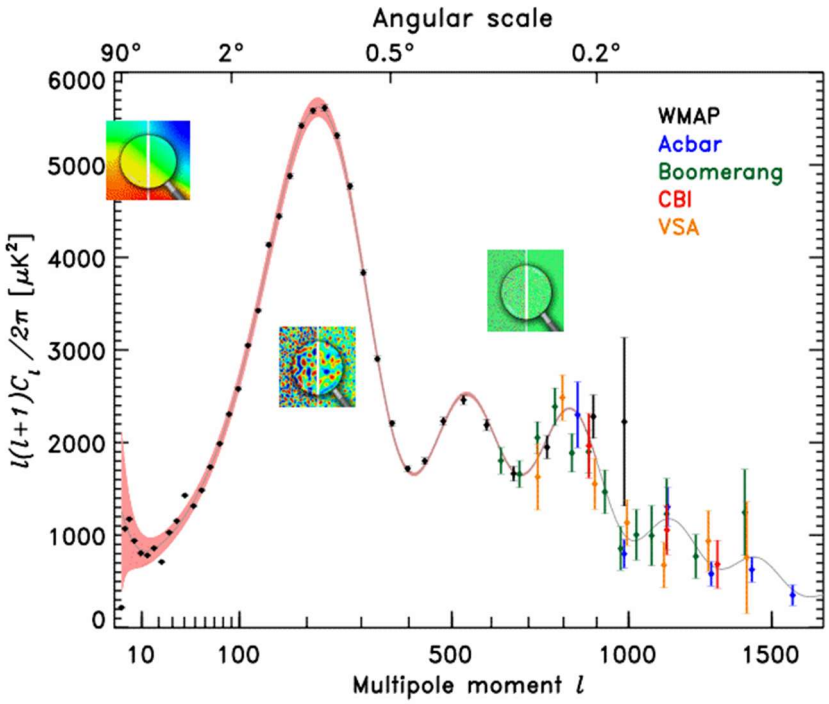
La información nos le ha dado instrumentos tales como los del satélite COBE o el telescopio Planck situado a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra. Hay que decir que si nos moviéramos hasta otro punto distante y lanzáramos allí un Planck, y limpiáramos las alteraciones ajenas a las frecuencias del fondo, obtendríamos una imagen prácticamente igual a la que conocemos. Así es de uniforme en todo el Universo.

Pero aun así nos parece muy dispersa y grumosa, por lo que la vamos a ordenar. Para ello nos asentamos en el sillón giratorio de nuestra casa y lanzamos hacia todas las direcciones unos conos visuales que abarquen pequeños círculo del lejano escenario. Círculos de distintos diámetros que nos permitan enfocar los "granos de granada" con sus horizontes acústicos, que es lo que realmente queremos detectar.

¿Cómo determinamos los armónicos en el fondo de microondas? Buscando su espectro de potencias. Lo vamos a hacer parcelando su imagen en áreas que nosotros los observadores vemos cubiertas por un ángulo θ, y que podemos imaginar como pequeños círculos. Los conos visuales de los que hablaba más arriba. Medimos en cada una de estas áreas la ΔT, la mayor diferencia de temperaturas entre los puntos de su interior. A continuación, determinamos para cada θ un valor promedio de ΔT, por ejemplo, para zonas de un ángulo de 1º la ΔT promedio es de 0,0075K, con lo que obtendremos una serie $[\Delta T,\theta]$ que luego se transcribe a una curva. Realmente no se usa θ sino otro parámetro equivalente: ***el momento multipolar l***, que aproximadamente se correlaciona con el ángulo según $\theta \sim 180º/l$, más o menos la de veces que un semicírculo contiene el ángulo θ. Por ejemplo, si el momento multipolar es 1000 es que en toda la esfera del cosmos estás observando la circunferencia máxima con un zum de 2000 píxeles.

Lo que realmente hemos hecho con esta discriminación angular es algo así como si al ir disminuyendo el ángulo de observación hubiéramos ido añadiendo filtros más finos que resalten las anisotropías ocultas para los filtros anteriores de mayor ángulo, menos finos. En el universo temprano, los procesos que generaron las anisotropías a diferentes escalas angular también ocurrieron en momentos ligeramente diferentes. Las fluctuaciones grandes (escalas angulares grandes) son vestigios de las condiciones iniciales del universo. Las fluctuaciones pequeñas (escalas angulares pequeñas) fueron moldeadas por procesos más recientes en términos cosmológicos. Por eso el hacer zum es como realizar un viaje desde las zonas más profundas y borrosas en la edad del Universo hacia las más actuales.

El resultado de este trabajo es la curiosa curva que sigue.



Los puntos negros dibujan el espectro de potencia de las anisotropías de la temperatura del fondo de radiación de microondas en función de la escala angular, según datos aportados por diversos experimentos. La franja-línea de color rosa corresponde a la curva teórica calculada (Modificado de Wikipedia, dominio público)

Una curva que correlaciona la potencia del zum con la amplitud promedio de las fluctuaciones de temperatura que se observan con ese zum (*se han incorporado unas iconos representativos del zum de tres zonas*). Presenta una serie de máximos que aunque parezca sorprendente, nos va a dar una información fundamental del Universo, y que corrobora los conocimientos que ya teníamos a partir de otras experiencias y observaciones. Hay que recalcar

que la curva de puntos, que corresponde a datos experimentales, se ajusta perfectamente a la curva teórica, franja rosa, que se obtiene por "simple" cálculo aplicando los criterios del Modelo Estándar y el concepto ya explicado en otros capítulos de las ondas sonoras del plasma. Asombra ¿no?

En las escalas de longitud más grandes, a la izquierda, se observa una gran indeterminación. Esto se debe principalmente a que los datos disponibles son menos precisos en estas escalas y en donde, además, el universo contiene menos "regiones independientes", lo que estadísticamente aumenta la varianza de las mediciones. También durante la última dispersión se debieron producir variaciones en la fuerza de la gravedad, causadas por diferencias de densidad en el universo primitivo, variaciones que afectarían a la energía de los fotones. Además los fotones que salían de un pozo de potencial gravitatorio perdían algo de energía y, como resultado, la radiación que nos llega desde esa dirección parecerá ligeramente más tenue o más fría que el promedio y viceversa.

Vayamos ahora hacia la derecha, en donde se empiezan a apreciar los detalles, los patrones que dejaron las ondas de sonido. El primer máximo es un pico que por su magnitud lógicamente debe estar relacionado con las zonas de máxima compresión de la materia bariónica, puesto que es igual a decir "de temperatura máxima". El segundo, de menor altura y en un momento multipolar mayor, indica que al mirar con otro zum más fino, la información que obtenemos nos permite intuir que se ha añadido un efecto de rarefacción que atempera la temperatura. El tercero atempera la tendencia al enfriamiento, lo que indica que a escalas aún menores se ha añadido al segundo pico un nuevo impulso de compresión, por lo que indica un nuevo refuerzo a la temperatura. Suena tremendamente a lo que decíamos en los capítulos anteriores acerca de los tres armónicos primeros de la onda de sonido. Y realmente es que estamos hablando de lo mismo.

Lo cual nos permite intuir que la curva de anisotropías lleva en sus patrones cierta información del horizonte acústico y su desarrollo, información sobre el tipo de materia y radiación existente en el Universo, sus densidades y curvatura. Todo un regalo. Pero pasemos a analizarlo con un poco más de detalle.

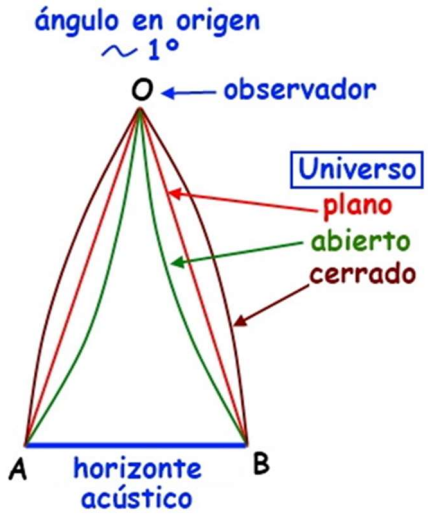
Fijémonos en el primer pico. Es el máximo de la curva y se da en el entorno del momento multipolar ***l=200***, cuatrocientos píxeles por circunferencia equivalente a zonas abarcadas por una amplitud angular de aproximadamente 1º. El doble de lo que se nos aparenta la Luna. Y como vimos en el capítulo anterior, al ser este pico el mayor de los máximos podemos pensar que debe tener alguna relación con aquellas zonas en donde se dieron las diferencias de temperatura más extremas, a donde la onda acústica había empujado a la materia bariónica y radiación hasta el otro extremo del horizonte acústico con

relación a la materia oscura. Quizás este pico tenga algo que decirnos acerca de la cantidad de esas materias en el conjunto del Universo.

Sabemos por la teoría que hemos explicado en el capítulo 16 que este intervalo particular fue la consecuencia de la "congelación" del armónico fundamental de la onda acústica en el ámbito de nuestro ya famoso "grano de granada", cuando el Universo tenía 380.000 años. El ángulo de 1º abarca el radio de este grano gravitacional, la longitud del horizonte acústico en el momento de la recombinación. Los cálculos más precisos disponibles nos dicen que hoy en día mide unos 480 millones de años luz después de que el Universo hubiera crecido 1.100 veces tras la recombinación.

El que sea 1º tiene mucha miga ¿por qué? porque entre otras muchas cosas, nos va a servir de vara de medida para investigar sobre la curvatura del Universo que a su vez depende de la materia/energía que contiene. En la figura siguiente intentamos visualizar lo que sucede según el tipo de curvatura del Universo. Este parámetro es crucial para su dinámica ya que no solo determina su geometría global, sino que afecta a la trayectoria de los objetos y a la evolución futura de su expansión.

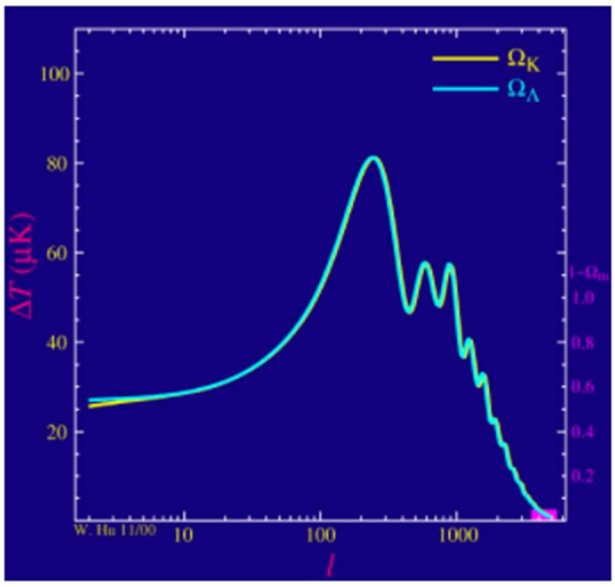
Recordemos como en el capítulo 3 se hablaba acerca de que el Universo puede tener tres posibles curvaturas espaciales, cada una con una geometría característica: la euclidiana -universo plano-, la positiva -universo cerrado- y la negativa -universo abierto-. Todo depende de la cantidad de materia y energía que se encuentre en el Universo. Teóricamente se ha definido una densidad de materia/energía que llamamos "crítica", que corresponde a la que hace que las ecuaciones sigan una geometría euclídea. En un universo plano, euclídeo, los fotones que hubieran salido de los extremos del horizonte acústico describirían una trayectoria lineal hasta llegar a nosotros los observadores, trayectorias que formarían un ángulo que vamos a llamar α. Si el universo fuera abierto, el ángulo de arribada sería menor que α y si fuera cerrado sería mayor.[1]

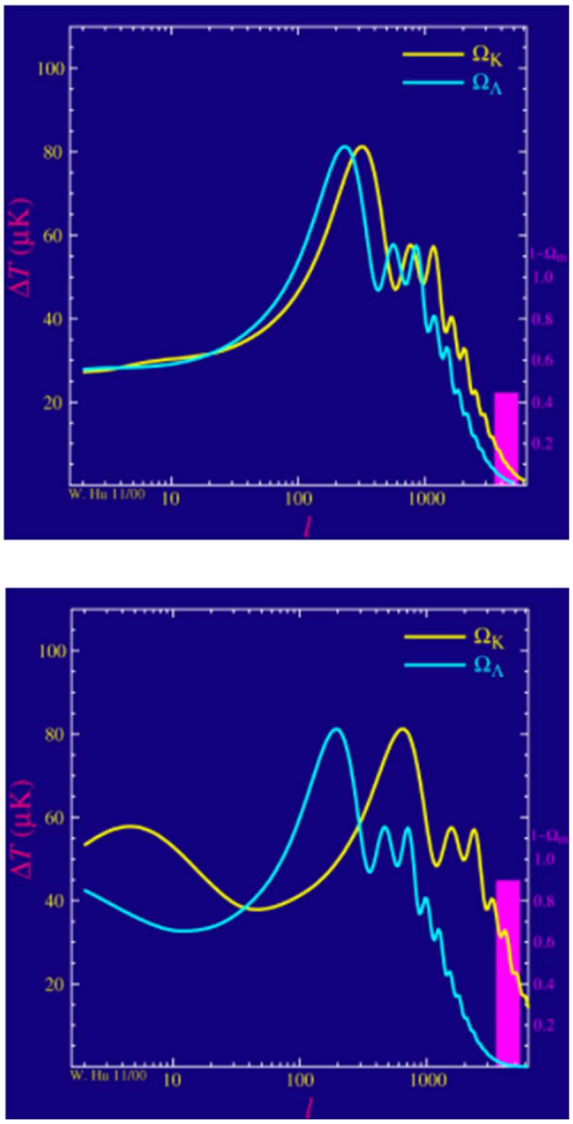


Pues bien: veamos qué es lo que observamos. Tenemos tres lados de un triángulo conocidos y medidos: la base es el radio de nuestro grano de granada, el horizonte acústico, y los otros dos lados la distancia al borde del Universo observable. También hemos medido el ángulo α y es igual a 1º. A partir de esos datos, los cosmólogos han podido medir con gran precisión la suma de los tres ángulos, y es justamente 180º. Curioso, ¿verdad?[2]

Se trata, por tanto, de una geometría puramente euclidiana, lo que nos dice claramente que nos encontramos con un Universo que la cumple, luego geométricamente se comporta como si fuera plano. Al menos desde nuestro entorno cercano. Tanta maravilla esconde un pequeño "pero" que no invalida la conclusión, porque la verdad es que no conocemos con precisión absoluta los parámetros que conforman este triángulo. Con ello me estoy refiriendo a *la velocidad del sonido* en el plasma inicial -que condiciona la longitud del horizonte acústico- y la *constante de expansión* del universo -que condiciona los otros dos lados del triángulo-. De todas formas, los expertos nos aseguran que la confianza con que lo decimos es del 95%. Yo apostaría mi sombrero en favor del Universo plano.

Con lo dicho no nos sorprende lo que nos dicen los estudios teóricos que han calculado el espectro de frecuencias de la radiación de fondo de microondas. Esos estudios determinan que para el caso de una distribución de materia/energía propia de un universo plano, se produce un pico en campos angulares de aproximadamente 1º, es decir, con un momento multipolar de 200. Si disminuye la densidad de materia/energía el universo se tiene que abrir, hacerse hiperbólico. Y si aumenta el universo se tiene que cerrar haciéndose esférico. Así se observa en los mencionados análisis teóricos realizados a partir de nuestros modelos cosmológicos, cuyos resultados podemos seguir en la serie de imágenes que siguen.[3]





Evolución del primer pico dependiendo de la cantidad de materia que se considere en el Universo, lo que define su geometría (ver explicación en el texto). (Imagen:[3] Wayne Hu, Universidad de Chicago, ⓕ fair use)

Ante todo definamos la densidad critica del universo, importantísima a la hora de definir su curvatura, y que es el resultado de unos cuantos participantes que se suelen referenciar normalizados a la unidad

$$\Omega_{total} = \Omega_b + \Omega_{mo} + \Omega_\Lambda + \Omega_r \rightarrow \Omega_{total} = \Omega_{materia} + \Omega_\Lambda + \Omega_r$$

$$\Omega_{total} = 1 - \Omega_k$$

es decir, densidad de los bariones, densidad de la materia oscura, densidad de la energía oscura y densidad de la radiación. Las dos primeras las vamos a integrar en una que llamaremos densidad de la materia.[4]

Por último, Ω_k es la densidad asociada a la curvatura del universo que si es cero nos dice que el universo es plano (*ver recuadro fuera del texto a final del*

capítulo) si es positiva implica que Ω_{total} es menor que 1 (universo abierto), y si es negativa, el mismo razonamiento nos lleva a un universo cerrado. Todas estas variables son las que nos encontramos en las figuras anteriores.

También vemos dos tipos de curva, azul y amarilla. La azul considera Ω_k igual a cero, es decir un universo plano, para resaltar la influencia de la energía oscura; mientras que la amarilla fija o ignora Ω_Λ para centrarse en los efectos de la curvatura. A la derecha de las imágenes anteriores hay una escala en rosa que mide inversamente la cantidad de materia, más abajo, nada arriba.

Ahora podemos analizar las curvas variando la participación de la materia según la escala rosa de la derecha. A medida que aumenta los máximos de la curva azul prácticamente no varían de posición. Lo cual nos indica que debe haber mucha cantidad de esta energía intrínseca ya que su influencia anula prácticamente cualquier variación de la materia.

Pero los picos de la curva amarilla al disminuir la participación de la materia en el universo sí se desplazan significativamente hacia monopolos mayores (zum más agudo), es decir, hacia horizontes acústicos menores. Y es lo que debe ser. Recordemos que esa curva fija la energía oscura, o sea que su dinámica se verá afectada exclusivamente por la materia y el efecto de la curvatura. Si disminuye $\Omega_{materia}$ disminuye Ω_{total} y, por tanto, se aumente la aportación de la curvatura ($k<0$), por lo que el universo se vuelve más abierto.[5] Lo cual es lo lógico porque en este caso los fotones, como habíamos comentado en el párrafo anterior, cierran los ángulos de sus trayectorias, lo que supone unos horizontes acústicos menores y, por tanto, observables como multipolos mayores.

Pues bien: justo todo eso que nos ha dicho el análisis teórico es lo que hemos visto luego en la realidad al estudiar los datos obtenidos por nuestros instrumentos.

Llegados aquí, con las neuronas calientes de tanta materia y radiación, nos va a convenir mirar solamente a los posos que se hayan podido decantar, si es que hay alguno. Voy a intentar resumir de todo el alegato anterior lo que básicamente ***nos dice el primer pico*** del espectro de potencia de las anisotropías de la temperatura del fondo de microondas:

[1] Nuestro universo es plano o casi plano,

[2] La densidad total del universo debe ser igual a la crítica e incluye materia bariónica y oscura, y energía oscura.

[3] La posición y altura del primer pico son consistentes con las predicciones de los modelos de inflación cósmica.

[4] La altura relativa del primer pico refleja la densidad de materia bariónica en el universo temprano. Comparando las observaciones con los modelos teóricos, se determina que $\Omega_b \approx 0.05$, es decir, que aproximadamente el 5% de la densidad total del universo está en forma de materia bariónica.

[5] El contenido total de materia (Ω_m) afecta la posición del primer pico y la amplitud de los picos secundarios. Eso nos informa de que la mayor parte de la materia en el universo no es bariónica.

[6] El primer pico define la escala física del horizonte acústico, la distancia máxima que el sonido pudo viajar en el plasma antes de la recombinación, que hoy en día es de 480 millones de años luz.

Dicho esto, en el capítulo siguiente continuaremos con el análisis de los armónicos encontrados en las anisotropías.

Sobre la métrica plana y la densidad crítica

Evidentemente, un universo plano no tiene sólo dos dimensiones espaciales. Al menos nuestra experiencia nos dice que podemos apuntarle tres direcciones ortogonales: arriba-abajo, derecha-izquierda y delante-detrás, lo que no nos impide imaginar desde dentro la idea abstracta de "planitud". Lo mismo que un ser que nos contemplara desde un mundo externo de dimensión 4, sería capaz de explicarnos con soltura la evidencia para él de la "esferitud" de nuestro Universo. Pero ¿por qué es tan importante que sea plano?

Tiene que ver con la cantidad de materia-energía que contiene. Si hubiera mucha habría también mucha gravedad y el universo colapsaría en forma de una esfera cerrada cada vez más curvada y pequeña. Si hubiera poca, la expansión seguiría acelerada hasta "rasgar" su tejido, cada vez más abierto y con más curvatura negativa. Cualquier desviación inicial positiva o negativa, aun mínima, con respecto a un punto de equilibrio, con la expansión del

universo se hubiera realimentado exponencialmente para caer en el mundo "colapsado" o en el mundo "rasgado".

Pero vemos que el universo no parece comportarse ni de una ni de otra manera, lo que quiere decir que debe tener una densidad adecuada para que suceda lo que observamos, densidad que no habrá variado mucho desde el inicio. Ello implica que su densidad de materia y energía, al ser plano, deba coincidir con la crítica de $0{,}9\times10^{-29}$ gr/cm^3, un valor calculado basado en el modelo estándar de cosmología y en las mediciones del parámetro de Hubble. Las observaciones actuales son consistentes con este cálculo.[4]

NOTAS DEL CAPÍTULO 18:

1. Es intuitivo. Si queremos coger algo que se encuentra en la cúspide de una esfera junto a nuestro cuerpo -geometría cerrada- debemos abrazarla abriendo los brazos -abertura de ángulo-. Si estamos junto a un caballo y su silla de montar -geometría abierta-, y queremos alcanzar algo en la parte más alta de la silla, al acoplarnos a ella notaremos que los brazos se nos desvían hacia el interior de la curvatura de la silla de montar -*cierre del ángulo*-. Alcanzar algo situado sobre una mesa -geometría plana- solo nos exige el estirar los brazos con normalidad -*ángulo normal*-.
2. Podemos realizar un cálculo aproximado para ilustrar la situación. Estamos observando una pequeña región en el cielo, un "píxel" de 1º de ángulo, que se encuentra a unos 46.500 millones de años luz de distancia, que es el borde del universo observable. Este valor incluye los 13.800 millones de años luz correspondientes a la distancia recorrida hasta el presente, más la expansión del universo durante ese tiempo. Esto da un arco de unos 810 millones de años luz que debería corresponder al horizonte acústico del universo primordial. Realmente el horizonte acústico actual tiene una medida de unos 480 millones de años luz. Aunque este dato es inferior al valor de 810 millones de años luz, las cifras están en el mismo orden de magnitud. Como dije al principio: un cálculo aproximado en el que no hemos tenido en cuenta algunas auténticas incertidumbres como las mencionadas en el texto ¿y si la velocidad del sonido en el plasma no fuera de una valoración tan evidente? ¿y si la constante de Hubble hubiera variado en los 13.800 años

de vida del Universo? A pesar de todo no parece arriesgado el suponer que las anisotropías a 1º deben tener algo que ver con los volúmenes donde se daban las mayores diferencias de temperatura en la recombinación. Realmente son la misma cosa según los entendidos.

3. En este enlace podéis ver de una forma más intuitiva el mensaje de las figuras del texto, ya que las veréis en acción.
http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/clcurvature.html

4. A partir de los datos obtenidos por la sonda WMAP dedicada a la observación de las anisotropías en el fondo de microondas, así como de los del telescopio espacial Planck, conocemos las densidades para los tres constituyentes de toda la materia-energía en el universo: materia (bariónica y oscura); radiación relativistas (fotones y neutrinos) y energía oscura o constante cosmológica Λ. Y sus valores, relativos a la densidad crítica

$$\Omega_{total} = \Omega_{materia} + \Omega_{relativista} + \Omega_{\Lambda} = 1.00 \pm 0.02$$

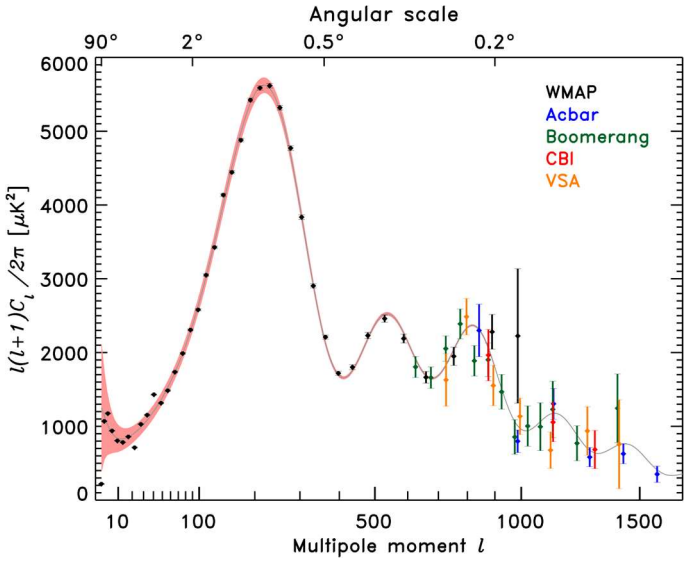
$$\Omega_{materia} \approx 0.315 \pm 0.018;\ \Omega_{relativista} \approx 9.24 \times 10^{-5};\ \Omega_{\Lambda} \approx 0.682 \pm 0.002$$

siendo el valor absoluto de la densidad crítica 9.47×10^{-27} kg/m^{-3}.

5. La aparente contradicción de que una disminución de la curvatura del universo signifique el aumento de la participación de la densidad de la curvatura en la densidad crítica nos la justifica la ecuación de Friedmann que nos dice que Ω_k es igual a MENOS kc^2 / a^2H^2.

19: Lo que nos enseña la radiación de fondo II

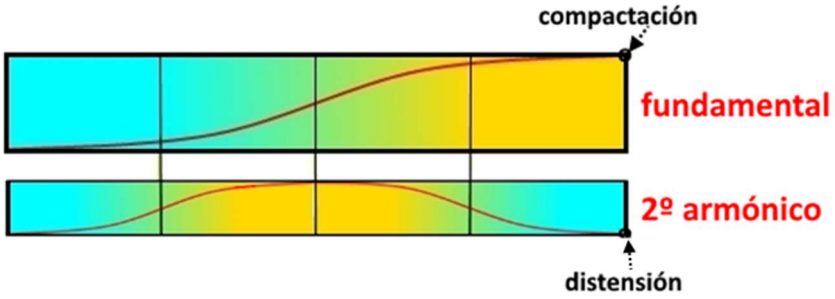
En el anterior capítulo habíamos comenzado a analizar el espectro de anisotropías de la radiación de fondo de microondas. Este cúmulo de palabras encadenadas no quiere decir más que estamos hablando de la foto de los primeros fotones que se emanciparon de la materia en los momentos iniciales, cuando nuestro personaje estaba cumpliendo más o menos su 380.000 cumpleaños. Nos habíamos extendido al hablar del primer pico de dicho espectro, que nos había dicho mucho sobre la curvatura del Universo y de la cantidad de materia que contiene. También nos había puesto sobre la pista de algo misterioso que llamábamos *energía intrínseca* al tejido espacio/temporal, cosa que conocemos más comúnmente como *energía oscura*. Y deducíamos que debía de haber mucha. Para que no se nos olvide repetimos aquí abajo la imagen del carné de identidad del Universo en el momento de la recombinación, en donde somos capaces de ver muchos rasgos de su personalidad.



Espectro de potencia de las anisotropías en la radiación de fondo de microondas (Wikimedia, dominio público)

Tras haber analizado el primer pico, ahora vamos a continuar la investigación atendiendo al ***segundo pico*** que aparece en la fotografía de la recombinación cuando *bajamos a resoluciones más finas,* lo que quiere decir menor ángulo θ o momento multipolar l mayor. Es como si en el campo circular de 1º en donde veíamos al primer pico empezáramos a ser más puntillosos y lo compartimentáramos en círculos de menos radio. Al aplicar la lupa en estos terrenos podemos detectar más pormenores, de forma que si elegimos un radio de medio grado comenzaremos a apreciar los detalles producidos por la influencia del segundo armónico de la onda de sonido que, recordemos, tenía

una longitud de onda la mitad que la del armónico fundamental. El resultado de este rastreo más minucioso nos hace ver que próximo a l=500, lo que equivale a una región que abarca un ángulo aproximado de 0,4º, encontramos otro máximo en la curva del espectro. En el capítulo anterior ya dijimos cómo se construye la curva de forma que ahora ya sabemos que dentro del campo fijado por este ángulo de observación sobre el fondo del Universo vamos a encontrar un intervalo de temperaturas característico, menor al que detectamos en zonas abarcadas por ángulos mayores y que es consecuencia de la superposición de influencias de los armónicos tal como podemos intuir al ver el extremo derecho de la figura de más abajo. No nos debe sorprender, por tanto, que el segundo pico en las anisotropías aparezca donde aparece y que tenga una menor altura que el primero.



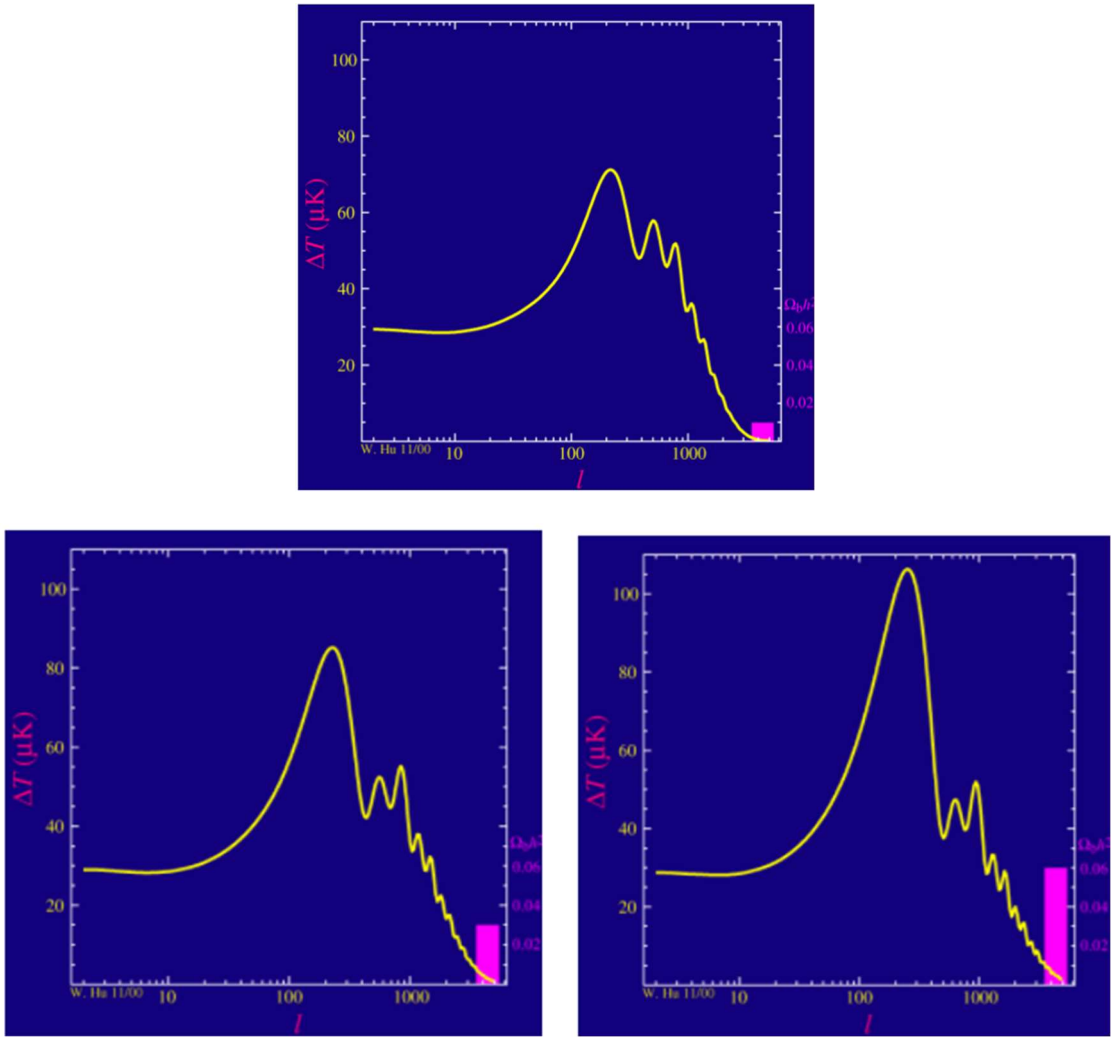
Las zonas en azul son las que acumulan menos materia bariónica/radiación y en consecuencia son más frías; mientras que las amarillas son las de más materia bariónica/radiación y en consecuencia las más calientes.

Ahora vamos a intentar entender ***el mensaje oculto en este segundo pico***. De la imagen anterior podemos extraer una idea aproximada: en el intervalo mientras el armónico fundamental acumulaba materia -en el extremo de una semilongitud de onda-, el segundo armónico la había distendido. Recordemos que esas oscilaciones eran motivadas por la radiación y que afectaban solamente a la materia bariónica. Eso nos lleva a pensar que esta segunda onda puede llevar información independiente que comparada con la de la primera onda, la fundamental, nos de datos de la relación entre la materia oscura y la bariónica así como de su interacción con la radiación en el universo temprano. Veamos.

Imaginemos que en el Universo, por arte de magia, se incrementara la densidad de la materia bariónica. Tenemos que pensar que si eso sucediera el pozo gravitatorio inductor de la onda sonora sería mucho mayor, lo que haría que la compresión inicial fuera más potente antes de que la presión de la radiación comenzara a actuar distendiendo a la materia. Deberemos pensar también que al ser el plasma más denso, lo que induce una especie de rozamiento por la inercia bariónica, la velocidad de esa distensión sería más pequeña. Lo cual implica que la distensión iba a ser menor, lo que afectaría a los armónicos pares

en la curva de anisotropías y, por tanto, a la altura de los picos pares. Y por el contrario, la compresión sería mayor, lo que magnificaría el primer pico. En general, los armónicos pares serían penalizados en su amplitud con relación a la de los armónicos impares. Y así lo muestran los resultados de las simulaciones teóricas, como lo podemos ver en las tres imágenes que siguen.

Al contrario de en las imágenes anteriores, aquí la barra rosa de la izquierda indica la densidad de materia bariónica Ω_b. Vemos cómo al aumentar la participación de la densidad de la materia bariónica la diferencia de alturas entre el primero y segundo pico se incrementa. Y como la distensión es causada por la radiación atada a la materia bariónica, que no a la oscura, si analizamos la diferencia de altura entre picos pares e impares de la curva observacional que encabeza este capítulo,



Evolución de los picos al variar la materia bariónica (Imagen: [1] Wayne Hu, Universidad de Chicago, ⓤfair use)

Vemos como las alturas de los picos primero y segundo, al menos, están directamente relacionadas con la materia bariónica y la radiación. Así que, la

comparación de sus amplitudes nos va a dar pistas de cómo la materia bariónica responde a la interacción entre la gravedad compactadora y la presión de radiación impulsora de la distensión, de forma que al final seremos capaces de deducir la cantidad y composición de materia en el Universo. A partir de esos análisis los cosmólogos han deducido que la materia bariónica y los fotones debían tener más o menos la misma densidad de energía, lo que les ha conducido a asegurar que la densidad bariónica explica hasta un 4-5% de la densidad crítica del Universo. Esto se ha deducido combinando la información del espectro de picos del CMB y las mediciones independientes de parámetros cosmológicos, como la constante de Hubble y la nucleosíntesis primordial. Este porcentaje puede parecer sorprendente puesto que a partir de la observación directa sólo somos capaces de contabilizar bariones que aportan un 2% a la densidad total. Lo cual quiere decir que hay un 50% perdidos en el Universo. Realmente no están *perdidos*, están ahí, pero no sabemos dónde.[2]

Pero también el análisis de la altura de los picos nos permite saber algo acerca de la materia oscura. Esa materia es la gran responsable de la compactación además de los bariones. Por eso sus proporciones influyen decisivamente en el tamaño de dichos picos de forma que al comparar sus amplitudes y combinar esta información con modelos cosmológicos, se puede determinar que la materia oscura constituye aproximadamente el 25-27% de la densidad crítica del universo, mientras que la materia bariónica contribuye con el 4-5% tal como se dijo.

Pasamos ahora a ampliar el análisis con los datos que proporciona los ***siguientes picos***, los cuales ya incorporan la incidencia de los siguientes armónicos de la onda sonora. Lo primero a explicar es el porqué de sus menores alturas y su progresivo debilitamiento. A medida que las oscilaciones acústicas progresan, los fotones tienden a moverse difundiéndose a través del plasma hacia regiones menos densas llevando consigo energía y suavizando las fluctuaciones de densidad en las escalas más pequeñas.[3] Aquí concurren dos fenómenos. Por un lado, cuando hubiera altos niveles de radiación se magnificaría el anterior efecto difuminatorio de las oscilaciones, cosa que era la realidad en el Universo más primitivo. Por otro lado, al tener los armónicos de mayor orden frecuencias mayores y por tanto longitudes de onda más cortas, completan sus ciclos más rápidamente que los armónicos de longitudes de onda mayores, como el fundamental o el segundo armónico. Eso significa que los picos de mayor orden ya habrían alcanzado sus máximos o mínimos en un momento en que los armónicos más largos aún estaban en fases intermedias de sus oscilaciones. Y como se ha dicho, en aquellos momentos la radiación era muy alta, equivalente a una difuminación de la distensión muy significativa, lo que afectó decisivamente a la "potencia" (disminuyéndola) de esos armónicos cortos. También hay que añadir el hecho de que las longitudes de onda de los

armónicos de mayor frecuencia se van haciendo más pequeñas que las distancias medias entre los bariones del plasma, lo que impide que esos armónicos influyan en las oscilaciones de la materia y la radiación. [4] Este cambio de paradigma se refleja ya en el tercer pico.

El segundo pico nos había proporcionado información cualitativa acerca de la materia oscura, había mucha con respecto a la bariónica. Pero el tercer pico del CMB proporciona información cuantitativa lo que nos ha ayudado a determinar la cantidad de materia oscura en el universo, que se estima en aproximadamente 26% de la densidad crítica del universo, de acuerdo con los datos más recientes.

Aún con todo nos quedaría en el aire la energía oscura, con un peso porcentual en la densidad crítica de

$$\Omega_{\Lambda(\text{energía oscura})} = 1 - \Omega_{\text{materia oscura}} - \Omega_{\text{materia bariónica}} =$$

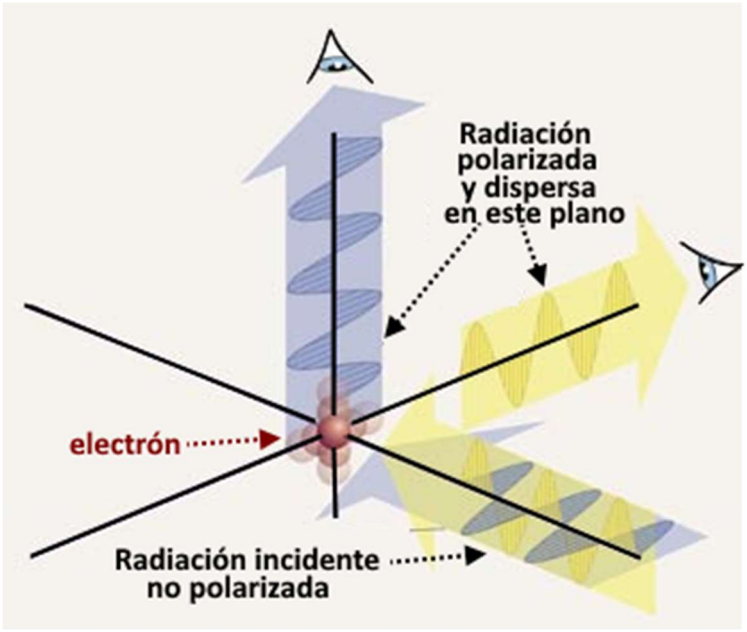
$$= 1 - 0{,}26 - 0{,}04 = 70\% \text{ [5]}$$

Como veis, todo un alarde de la física y la cosmología. La posición y forma de los picos nos dan una información valiosa pero además es que afirman la consistencia de los modelos de la física del plasma en el universo temprano y nos confirman que el modelo estándar cosmológico (ΛCDM) describe correctamente la estructura y composición del universo.

¡Pero no acaba aquí todo!, porque aún hay más lecciones que aprender de la foto inaugural. Estos fotones que nos llegan tras haber viajado casi 13.800 millones de años luz no sólo nos dicen los patrones de materia escritos en su distribución de energías, sino que nos aportan una información adicional escondida en sus ***patrones de polarización***… ¡Pero bueno! ¿Será posible que los fotones del fondo de microondas están polarizados? Pues sí. Y vamos a ver por qué.

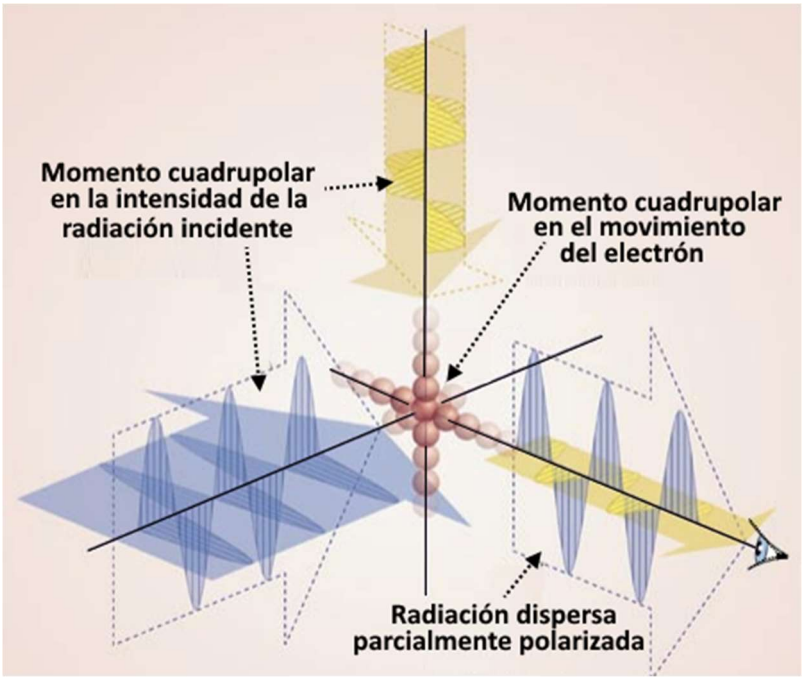
Así como el mapa de la radiación de fondo presenta una serie de anisotropías de brillo -temperatura-, también lo hace mostrando un patrón de polarización. Anisotropías de brillo y de polarización que fueron debidas a fenómenos diferentes. Ya sabemos el porqué de las primeras, por lo que nos quedaría por analizar las segundas, que también quedaron "congeladas" en el momento de la recombinación y que nos van a dar indicación de la velocidad del movimiento del plasma o de las ondas gravitatorias primordiales surgidas tras los últimos instantes de la inflación exponencial del Universo.

La polarización de la radiación en el plasma inicial fue debida a las interacciones con los electrones libres, dando lugar a dispersiones del tipo Thomson a bajas energías. La siguiente imagen nos intenta decir que sucede en esas interacciones.



Esquema general de las interacciones Thomson (Barbara Aulicino, I y C, diciembre 2005, ⓕfair use)

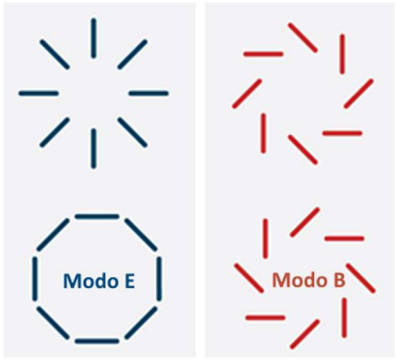
La onda electromagnética de cualquier fotón llevaba asociado un campo eléctrico sinusoidal, el cual hacía que un electrón próximo cargado negativamente oscilara en el plano perpendicular a ese campo. Esta oscilación hacía que el electrón emitiera energía en forma de otro fotón, el cual va a oscilar en un plano perpendicular al de como oscila el electrón: el fotón emitido estará siempre polarizado en el plano del campo eléctrico del fotón inicial. Todo ello es traspasable a lo que sucedía en el plasma primordial.



Esquema particular de las interacciones Thomson en el plasma primordial (Barbara Aulicino, Investigación y Ciencia, diciembre 2005, ⓕfair use)

En aquel plasma los electrones se veían bombardeados por fotones que les venían por cualquier lado. Si todos esos fotones hubieran sido de la misma energía, en las dispersiones Thomson el electrón se hubiera visto "empujado" de igual forma en todas las direcciones y, como consecuencia de ello, los fotones dispersos tras la interacción Thomson no iban a estar polarizados: sus ondas iban a tener componentes en todas las direcciones. Pero lo anterior no podía suceder si el electrón se encontrara en una zona del plasma primordial en donde unos fotones fueran más fríos que otros: entonces el electrón *vibraría preferentemente* en el sentido fijado por los fotones calientes de mayor energía. Por consiguiente, en esas regiones del plasma los fotones dispersos quedaron parcialmente polarizados. Lo vemos en la anterior figura.

Existen dos mecanismos que pueden producir esto último en zonas con energías heterogéneas en su interior: los flujos de plasma o las ondas gravitatorias. En los *flujos de plasma* a velocidades relativistas, el electrón en su movimiento "ve" que le vienen más rápidos los fotones que se le acercan en el eje "delante-detrás" en la dirección de su movimiento, que los que le vienen por los lados. A mayor velocidad de los fotones, mayor es su energía y la temperatura. Luego estaríamos en el caso de que el electrón *ve una dirección principal* en las interacciones con la radiación, por lo que los fotones dispersos tendrán una componente polarizada.



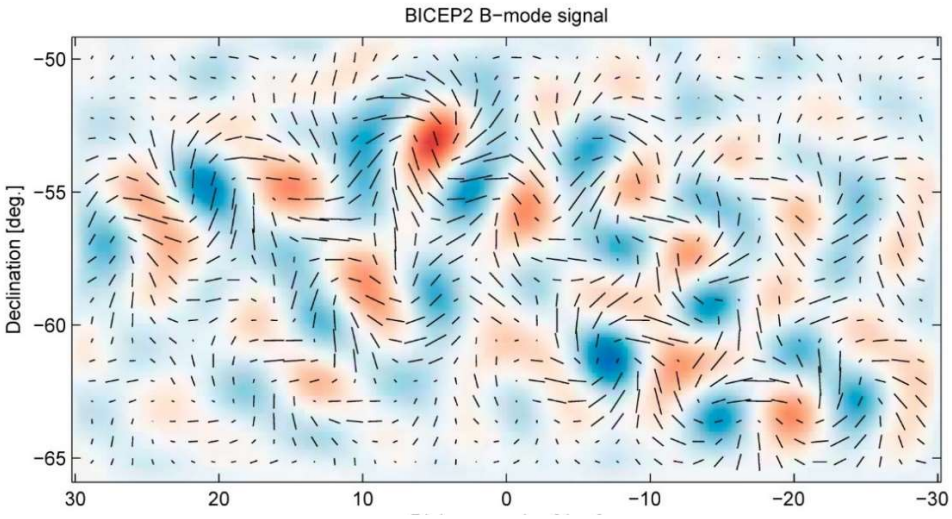
Patrones de polarización de los modos E y B. Cada línea es la dirección de la polarización (Imagen de la red, ⓕ fair use)

En el caso de las *ondas gravitatorias* lo que sucede es que cuando pasa una de ellas el espacio se estira y encoge, achatándose alternativamente a lo largo de dos ejes ortogonales. Como consecuencia, los fotones que se desplazan en estas dos direcciones ortogonales tendrán distinta velocidad y el electrón que interactúe con ellos, por las mismas razones antes expuestas, entra en el proceso de emisión de un fotón con una componente polarizada preferentemente en un plano.

De hecho se producen dos tipos de polarizaciones, la E y la B, con patrones muy distintos cuando las observamos, como se intenta mostrar en la figura

anterior. Se da la circunstancia de que los flujos masivos de plasma, que generan polarizaciones del tipo E, no pueden generar polarizaciones del tipo B, que requiere complejos flujos circulares que no se dan en el movimiento del plasma pero sí en las ondas gravitatorias. Por consiguiente, el patrón de modo E que podamos extraer de la imagen primera de la radiación de fondo nos va a dar información del flujo y reflujo del plasma original, mientras que el patrón de modo B nos dará información sobre el estiramiento y achatamiento del espacio/tiempo, las ondas gravitatorias. Los modos E son del orden diez veces más débiles que las anisotropías de temperatura (recordemos que estas últimas son del orden de 1 en 100.000), pero son más intensos que los modos B.

La imagen siguiente es la constatación de lo que decimos. Corresponde a información real del proyecto BICEP-2 proporcionada en 2014 en donde se observan patrones del modo E y alguno que pudiera ser del modo B. [6]



(Imagen: Proyecto BICEP 2, fair use)

Mucha información posible, sí… pero de difícil detección. Sabemos de los modos E desde el año 2002, pero en el año 2022 aún andábamos en la pelea de exprimir los modos B desde el fondo de microondas. Por el experimento LIGO[7] sabemos que las ondas gravitatorias realmente existen, las hemos medido, pero el patrón de polarización B nos daría una información fantástica de lo que pasó justo tras la expansión inicial, momento $t=10^{-32}$ segundos ¡casi nada!

Toca ya concluir la exposición que hemos hecho de algunas de las enseñanzas, las más importantes, que podemos extraer de la antigua foto de familia del universo. La historia debe continuar. Después de que la materia y la radiación se desacoplaran y la onda de sonido se congelara, cuando el Universo tenía tan "sólo" 380.000 años de edad, la gravedad siguió ejerciendo su labor. La materia oscura y la bariónica siguieron concentrándose en aquellos puntos donde el proceso de la onda acústica las había colocado en un potente pozo gravitatorio.

Con el tiempo, estas perturbaciones gravitatorias formaron las estructuras cósmicas de forma que la separación fijada por el horizonte acústico es la base del patrón de la distribución de las galaxias tal como lo vemos hoy. Lo iremos analizando en capítulos posteriores.

Con eso liquidamos una época en la que en buena medida dominaba la radiación y en la que se formaron las bases del Universo que observamos hoy en día. A partir de los siguientes capítulos intentaremos ver cómo fue evolucionando el mundo de la materia.

NOTAS DEL CAPÍTULO 19:

1. [http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/baryons3.html]
2. Estudios posteriores han identificado parte de estos bariones en el medio intergaláctico caliente, regiones de gas tenuemente ionizado y caliente dispersas en el espacio intergaláctico.
3. Ese tipo de difusión de fotones se conoce como "difusión de Silk".
4. En el plasma primordial, justo en los momentos antes de la recombinación, una partícula debía recorrer hasta 10.000 años luz antes de encontrarse y chocar con otra.
5. Podéis preguntaros por qué en todo este reparto de la densidad crítica no hemos tenido en cuenta el efecto de la radiación. ¿Y todos los tibios fotones de la radiación de fondo? ¿Y todos los energéticos fotones que se han generado en las estrellas tras la recombinación? ¿Es que todos estos no aportan energía? Curiosamente tenemos que decir que siendo así, su aporte energético es despreciable frente al de la materia en sus dos vertientes y al de la energía oscura. La aportación de los fotones de fondo es del orden de 10^4 veces menor y la de los fotones de las estrellas incluso aún diez veces menos: a pesar de su alta energía hay muy pocas estrellas por unidad de volumen en el Universo.
6. "*BICEP2 I: Detection Of B-mode Polarization at Degree Angular Scales*", P.A.R. Ade et al., marzo 2014. [https://arxiv.org/abs/1403.3985]
7. LIGO es un observatorio de detección de ondas gravitatorias. La sigla proviene de *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* -observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser-. La primera observación directa de una onda gravitatoria se produjo el 14 de septiembre de 2015.

20: La materia entra en faena

poco después de t=380.000 años desde el inicio

El Cosmos se había aproximado a una juvenil edad de 380.000 años. Sus habitantes eran partículas variadas, unas bastante conocidas como los protones, electrones, núcleos de helio y deuterio, y neutrinos. Otras aún son una incógnita para nosotros como las que deben formar a la materia oscura. La radiación representada por los fotones daba sus últimos bandazos en este mundo de plasma. En su conjunto todas ellas iban ajustando sus energías y sus amplitudes de ondas a las teóricas que fija el espectro de radiación típico de un cuerpo negro a 3.000K, que es lo que era el Universo en aquel entonces. Continuemos su camino.

Gracias a la expansión, las interacciones de fotones con electrones se fueran relajando progresivamente lo que facilitaba la acción de la fuerza electromagnética entre cargas opuestas. Hacia el nivel de energía de 13,6 eV pudo iniciarse la unión entre electrones y protones. Como consecuencia en aquel plasma se iban condensando átomos de hidrógeno neutro. Fue el momento, más bien un largo momento, de ***la recombinación***. Y digo largo momento porque, tal como se dice en el capítulo 17, duró hasta el año 5,75 millones tas el Big Bang.

Como los hidrógenos emergían de un plasma relativamente homogéneo, en el nuevo mundo también irán ocupando todo el volumen posible de forma casi homogénea. Mientras los fotones, con una baja energía promedio del orden de las unidades de electrón voltio, pudieron volar por el cosmos de forma libre interactuando cada vez menos con los electrones y su cohorte de protones. En aquellos instantes comenzaban a formar parte del espectro infrarrojo. Si hubiera existido un hombre por aquellos pagos quizás hubiera percibido un ligero resplandor producido por la pequeña fracción de fotones que en su enfriamiento aún iban saliendo de las últimas energías/frecuencias visibles en el rojo hacia su destino final de microondas.

El Universo se había transformado en un “vacío” oscuro.[1] Aquellos fotones primigenios, unos 1.000 millones por cada protón existente, aún corren por ahí y llenan nuestro espacio. Los que nos rodean en este preciso momento vienen de una zona situada a 13.400 millones de años luz de nuestro punto de observación. Nos están llegando ahora mucho menos energéticos que cuando iniciaron su viaje, más fríos que entonces porque desde entonces la expansión del tejido espacio/tiempo ha ensanchado sus longitudes de onda unas 1.100 veces. Los hemos visto en la foto de la radiación de fondo de microondas

situados ahora en un invierno de 2,725 K, con una longitud de onda de casi dos milímetros, mucho más allá de la escasa micra que fija en nuestros cerebros el color rojo.

Pero volvamos a aquellos turbios momentos, con nuestro diluido puré en el que mayoritariamente los protones iban pasando a hidrógeno atómico neutro y la radiación infrarroja corría por doquier. En ese puré pasaban otras cosas porque además de encontrar átomos de hidrógeno también se veían moléculas del mismo elemento. Dos átomos unidos. Aparecían como resultado de un proceso catalizado por los abundantes electrones libres a través de la generación del ion hidruro H^-, un átomo de hidrógeno al que se le ha pegado un electrón adicional.

$$H + e^- = H^- + \text{fotón (energía)} \quad \rightarrow \quad H^- + H = H_2 + e^-$$

Esta reacción química fue muy eficiente mientras hubo una fracción significativa de electrones libres, por lo que progresivamente fue perdiendo eficacia tras la recombinación. En esos momentos se abrieron otros caminos menos rápidos hacia la formación de moléculas de hidrógeno, a través de dos átomos de hidrógeno que se vieran excitados por algún fotón.

$$H + H + \text{fotón (energía)} = H_2 + \text{fotón}$$

La existencia de moléculas de hidrógeno en fechas tan tempranas fue fundamental para la generación de las primeras estrellas como explicaremos en el capítulo 22.

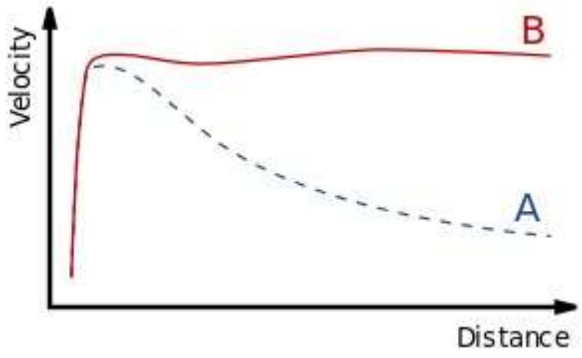
Podemos imaginar que todo hubiera acabado con la recombinación, ya que la energía cinética de los fotones ni de lejos era suficiente como para arrancar al electrón orbital del hidrógeno, ni tampoco a los del helio. Parece que ya nada más podía pasar. Los astrónomos, haciendo uso de un estilo melodramático, han bautizado a esta época posterior a la recombinación como la ***era oscura***. Pero en esta oscuridad la gravedad, con el permiso de la energía oscura, seguía tejiendo sus hilos... Newton a los mandos.

En un mundo material de hidrógenos y helios, la misteriosa materia oscura seguía trabajando de forma sigilosa y persistente. Sabemos que ya estaba ahí desde antes del momento de la recombinación. También sabemos de la existencia de su masa gracias a los tirones gravitatorios que ejercen sobre la materia bariónica, la que nosotros conocemos, vemos y medimos. Aunque no tenemos una idea clara de lo que pueda ser la tal materia. Hay que pensar que debe estar formada por partículas con masa no excesivamente grande pues tienen que ser muy estables: están haciendo su labor desde el inicio de los años. Además, tenemos que suponer también que no deben moverse a grandes

velocidades si resulta que es la encargada de la compactación gravitatoria de la materia… para ello se necesita un mundo relativamente "sosegado".[2]

¿Y a qué viene ahora hablar de la materia oscura? Pues a que en su historia inmersa en el plasma anterior a la recombinación aparece registrada una labor crucial. Por un lado, magnificando a lo largo de los primeros 380.000 años de expansión del Universo los grumos de energía-materia producto de las inestabilidades cuánticas anteriores a la inflación. Por otro lado, a que tras la recombinación estamos casi seguros de que fue la gran responsable gravitatoria que inició el colapso del hidrógeno y helio atómicos nacidos entonces. Estos elementos primigenios presentaban ya de por sí ligeras variaciones en la distribución local de su densidad poblacional. Pero quizás este potencial no hubiera sido suficiente, o el proceso hubiera sido extremadamente largo como para cebar la espoleta que inició la gran concentración gravitatoria. Y esto lo generó la materia oscura, que logró cuajar las ligeras diferencias iniciales locales de masa bariónica, dando lugar a la arquitectura cósmica que contemplamos hoy en día, espuma, filamentos, cúmulos y paredes de gases, polvo y galaxias.

Posiblemente la materia oscura permea una gran parte del universo y aunque no sabemos de qué está compuesta, tenemos evidencias indirectas de ella. Es lo que explicaría las incoherencias en las velocidades de ciertas agrupaciones celestes. Una de ellas son los cúmulos de galaxias -nuestra Vía Láctea orbita en uno de ellos que llamamos Grupo Local- en donde las más exteriores giran a velocidades superiores a lo que les tocaría si allí sólo hubiera masa bariónica. Otra pista la sacamos al observar las velocidades de giro de las estrellas dentro de las propias galaxias, en donde las más externas lo hacen de forma no coherente con la cantidad de materia ordinaria visible (ver figura siguiente).



Curva de rotación de una galaxia espiral típica: predicho (A) y observado (B). La materia oscura explicaría la apariencia plana de la curva de rotación para radios (distance) grandes (Wikimedia, Phil Hibbs, CC BY-SA 3.0)

Otro fenómeno que nos permite detectarla es el efecto de lente gravitatoria que ejerce "algo" desconocido en el Cosmos, que debemos suponer es la materia

oscura, sobre la luz emitida por focos que se encuentran detrás de ese "algo". Así se ha podido estimar que la vía Láctea tiene diez veces más materia oscura que materia bariónica, o bien que incluso hay galaxias compuestas prácticamente en su totalidad por materia oscura.

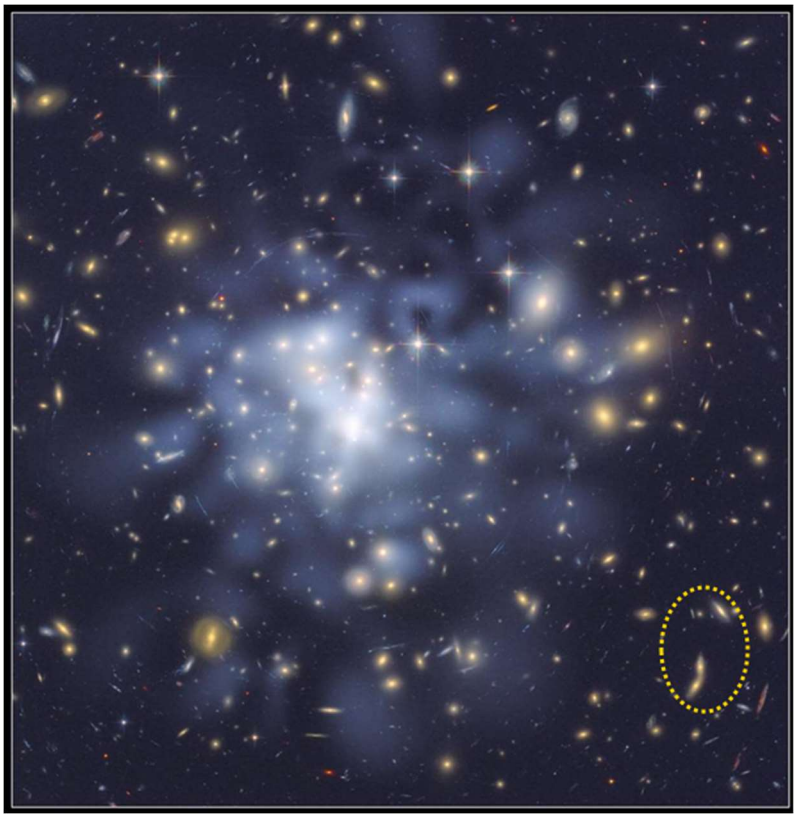


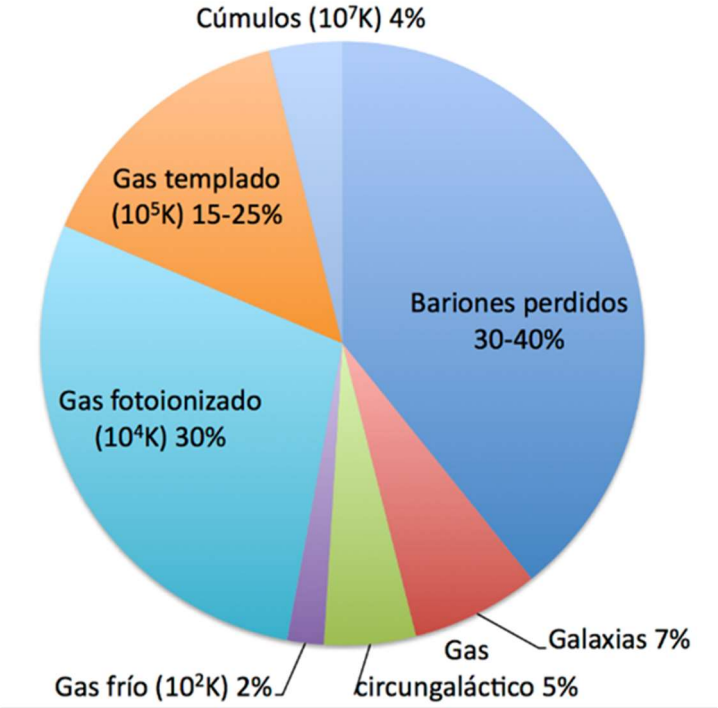
Imagen de la materia oscura en el cúmulo de galaxias Abell 1689. Los científicos de la NASA han sobreimpuesto encima del fondo de galaxias una mancha en azul -la materia oscura- que es reflejo de los resultados de los cálculos hechos a partir de la observación de 135 imágenes de galaxias deformadas por lentes gravitatorias. Alguna de ellas se ven claramente en la esquina inferior derecha (NASA, dominio público)

El no saber que pueda ser la materia oscura deja volar nuestra imaginación como para hacer mil argumentaciones acerca de sus posibilidades. La casuística que idea nuestras mentes y nuestras teorías abarca a

- *materia bariónica "caliente"*, partículas que se mueven próxima a la velocidad de la luz, como pudieran ser los neutrinos escapados del plasma al segundo de iniciarse el Big Bang, o la

- *materia bariónica "fría",* agujeros negros, estrellas enanas marrones y cosas así que no podemos detectar[3], o incluso la

- *materia NO bariónica* también de los dos tipos "fría" y "caliente", que pudieran ser partículas ligeras del tipo de los nunca vistos axiones, los tampoco detectados fotinos -la contraparte bariónica del fotón en la supersimetría SUSY-, los neutrinos estériles[4] u otro tipo de partículas masivas de interacción débil (WIMP's), que incluyen a los neutralinos.[5]



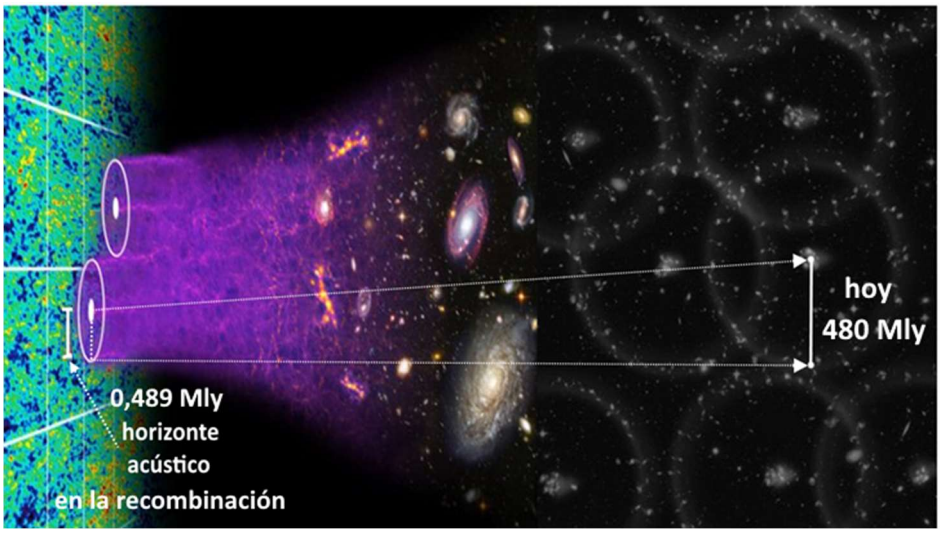
Distribución de materia ordinaria bariónica conocida en el universo (Imagen: Xavier Barcons, IyC 2015, ⓤfair use)

Al margen de las grandes incógnitas sobre la materia oscura, bastante tenemos con averiguar dónde podemos encontrar a nuestra familiar materia bariónica del Modelo Estándar, la que sabemos que explica un escaso 5% de lo que hay en el universo. Con el estado de la tecnología actual a lo más que hemos llegado es a decir que del total de la materia bariónica un 7 % está recluida en las *galaxias* en forma de estrellas, planetas, medio interestelar… Más o menos un 5 % adicional están formando *gases arrojados por vientos y flujos de las galaxias*, pero atrapados en sus alrededores por la gravedad de la propia galaxia. En aquellas zonas donde la materia oscura se ha concentrado más y se han acumulado galaxias hasta formar un *cúmulo,* hay también atrapado un 4 % de materia ordinaria a temperatura de decenas de millones de grados y que podemos ver con nuestros telescopios de rayos X.

El resto de la materia bariónica detectada es tan tenue que no brilla lo suficiente como para que la podamos ver directamente. Sin embargo, observando fuentes muy brillantes y lejanas, como puedan ser los cuásares, también podemos deducir que un 30% de esa tenue materia ordinaria se encuentra en *bolsas de*

hidrógeno fotoionizado (protones, núcleos de hidrógeno sin su electrón) por los propios cuásares o galaxias, que tienen una temperatura de unos diez mil grados. Aún más sutilmente creemos detectar trazas de otro 15-25 % que se encuentran formando *nubes de gas a una temperatura de unos cien mil grados*. El restante 30-40% que no detectamos creemos que aún siguen atrapados en las acumulaciones de materia oscura, a temperaturas de millones de grados, siguiendo sus estructuras filamentosas, sin haber llegado a cuajar en galaxias. Los *bariones perdidos*.

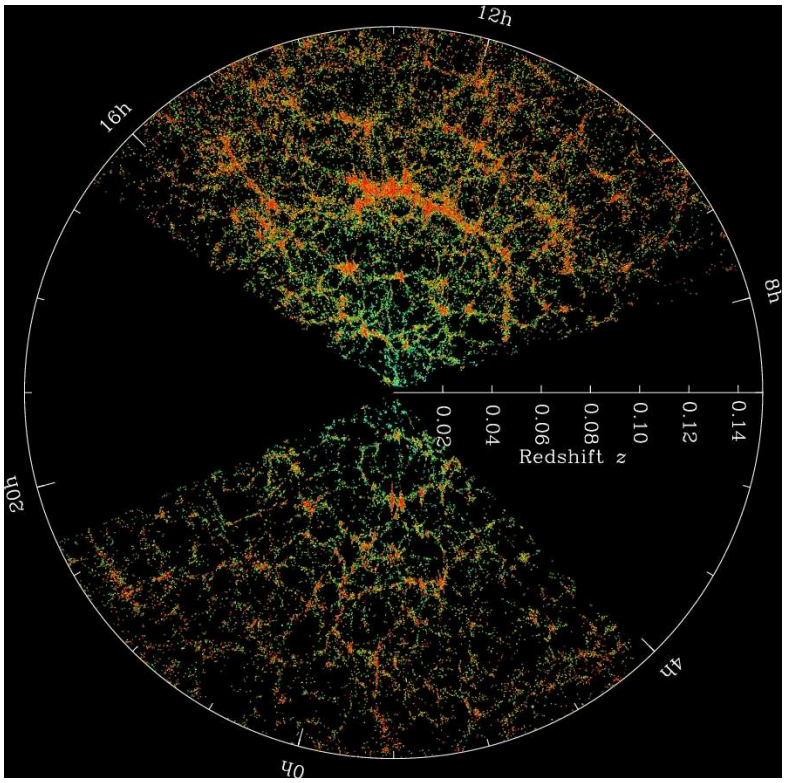
Con posterioridad al año 380.000 tras el Big Bang, tanto la materia ordinaria como la oscura proyectaron sus patrones de distribución espacial hacia el futuro gracias a la expansión continuada del universo. La fuerza de gravedad inducida por esas materias fue el motor para la temprana concentración de masas en el universo. Podemos pensar que todo tipo de estructuras evolucionaron de forma homogénea y homotética, aunque en realidad las galaxias colapsaron a mayor velocidad de la que se llevó a cabo la formación de los cúmulos y supercúmulos en donde al final se albergaron.[6] Gracias a la conjunción de expansión y gravedad se había pasado desde un mundo con variaciones medias de la densidad de la materia de 10^{-5}, que es lo que vemos en el telón de fondo de la radiación de microondas, a unas variaciones con respecto a la densidad media del universo de 10^{2} para las grandes estructuras -los cúmulos- y a unas variaciones de 10^{6} para las pequeñas estructuras como las galaxias.



(Imagen compuesta a partir de: Chris Blake y Sam Moorfield + Zosia Rostomian, Lawrence Berkeley National Laboratory, ⓕfair use)

La figura anterior, una representación artística, intenta hacer visual la idea de cómo el horizonte acústico de la recombinación se proyecta hasta el momento actual para dibujar el patrón de galaxias y cúmulos que observamos hoy en día. Las oscilaciones acústicas generadas por el movimiento de los bariones que quedaron congeladas en el momento de la recombinación, a la izquierda,

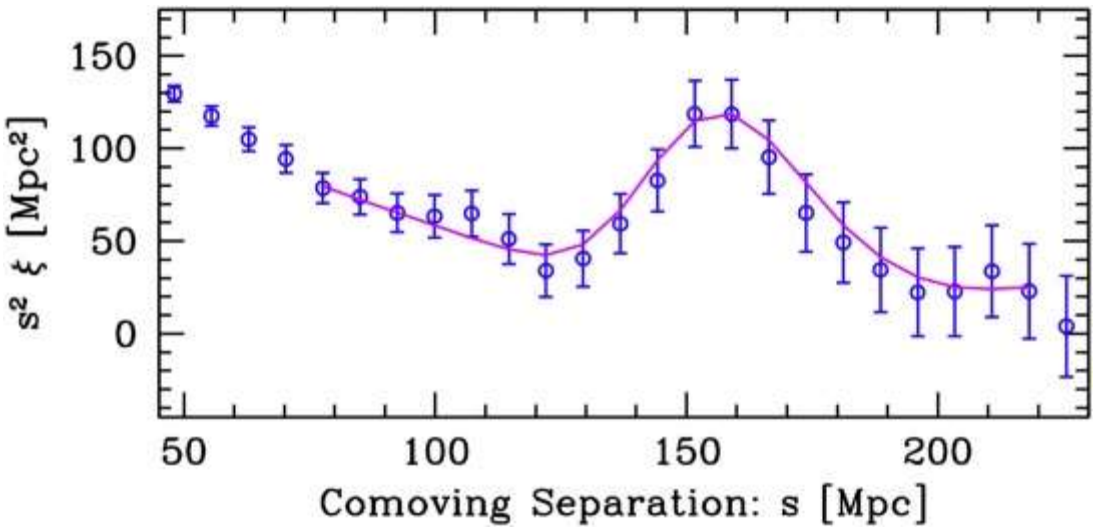
pueden seguir siendo observadas hoy en día en las imágenes reales de las estructuras del Universo. La barrita blanca de la derecha representa el horizonte acústico actual recrecido con la expansión, 1.100 veces mayor.[7] La imagen no es una entelequia: la hemos podido constatar con una gran precisión gracias al mapeado tridimensional del universo que las tecnologías modernas nos han permitido confeccionar.



Distribución de las galaxias cercanas realizadas por el programa SDSS - Sloan Digital Sky Survey- que está realizando un masivo estudio espectrométrico del Universo (Imagen: Programa SDSS, ©fair use)

El proyecto *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS)[8] lleva desde el año 2000 cartografiando en 3-D el cielo visible, habiendo conseguido medir con precisión la historia de expansión del Universo a lo largo del ochenta por ciento de la historia cósmica cuando el Universo tenía menos de tres mil millones de años. Lo que ha permitido obtener el modelo real de la distribución de objetos -hasta cuatro millones de galaxias y cuásares- de esta parte del universo (ver imagen parcial de arriba). A partir de esta foto real se han hecho variedad de estudios.

En uno de ellos se han medido las distancias entre todos los pares de galaxias en una población de 1,2 millones de ellas y se ha hallado la distribución según distancias, lo que ha permitido hallar una correlación entre el número de pares de galaxias distantes entre sí un valor X, con la distancia X que las separa. El resultado se muestra en la curva de siguiente.[9]



(Imagen: Ashley Ross et al, a partir de libro "The Dark Univers", pag. 18, Catherine Heymans, 2017, ⓤfair use)

Deberíamos esperar que, para distancias pequeñas, al estar las galaxias metidas en el mismo halo de materia oscura, la población de pares fuera mayor, mientras que a medida que vamos ampliando la separación la población se fuera ajustando al valor de como si estuvieran distribuidas en el espacio de forma aleatoria. Realmente eso es lo que se puede apreciar en la curva anterior: es más normal que las galaxias estén próximas entre sí en el entorno de las pequeñas distancias. Pero vemos también una anomalía en la separación de 150-160 megapársecs, es decir, vemos un máximo fuera de la tendencia situado en valores de la distancia entre galaxias de 480-520 millones de años luz: las galaxias tienden a formar cúmulos de estos tamaños. Lo cual es muy consistente con el tamaño del horizonte acústico postulado como consecuencia del que se había generado en la recombinación y que se puede estudiar a partir de la imagen de la radiación de fondo de microondas. Unos 480 millones de años luz como ya venimos comentando desde el capítulo 15.

A partir del tamaño de los cúmulos los científicos han determinado, con una precisión del 4%, la relación entre el tamaño del universo ahora y el tamaño del universo justo después del Big Bang. Lo que les ha permitido no sólo afianzar la idea que teníamos de que la expansión del Universo se acelera por la presencia de la energía oscura, sino que también les ha permitido asegurar aún un poco más el hecho de que la acumulación regular de galaxias deriva directamente de las ondas de presión y del tamaño de esas ondulaciones que había en el plasma caliente primitivo. Si nuestros ojos fueran instrumentos adecuados lo podríamos percibir en el cielo, veríamos grandes discos que ocupan el doble del tamaño de la Luna. En algún capítulo posterior hablaremos de estas estructuras.

Ahí tenemos las bases de la configuración arquitectónica de nuestro Universo. En el trabajo de la materia. Al poco de la recombinación lucían las primeras galaxias con su colección de estrellas de la población III. Ya veremos qué es de ellas.[10] Galaxias como JADES-GS-z14-0, con un corrimiento al rojo de z∼14.32, [11] que se formó apenas 280 millones de años después del Big Bang o la galaxia GL-z13, que por encontrarse en un corrimiento al rojo de z=13 sabemos que corresponde a una época 330 millones de años tras el Big Bang. O el cuásar QSO J0313-1806, con un corrimiento al rojo de z=7,672, a menos de 650 millones de años tras el Big Bang.

La radiación ultravioleta que se generaba en los hornos nucleares de estas primeras estrellas recalentaría las nubes gaseosas de sus alrededores, provocando de nuevo una rotura de los átomos de hidrógeno que, en su mayoría, quedaron nuevamente ionizados como antes de la recombinación. Eso se produjo en la edad de la reionización que será nuestro objeto de estudio dentro de dos capítulos ya que en el siguiente aún nos queda desmenuzar lo que acabamos de apuntar: ¿qué es lo que pasó entre los 380.000 años y la época de la reionización?

NOTAS DEL CAPÍTULO 20:

1. Para el ojo humano, claro. Y "vacío" entrecomillado porque realmente había mucha materia y radiación.
2. Para explicar la materia oscura hay bastantes teorías. Incluso que sea un campo más, como el de la gravedad, que interactúe con la materia. En este artículo del blog "*Neofronteras*" titulado "*Actualidad sobre materia oscura*" (enero 2017) podéis ver un repaso general de la situación del tema. [http://neofronteras.com/?p=5261]

3. Ese tipo de "objetos" se les conoce como MACHO's (de su acrónimo en inglés: *Massive Astrophysical Compact Halo Object*) u objeto astrofísico masivo de halo compacto. Un MACHO es un objeto pequeño de materia bariónica que se mueve por el espacio interestelar de manera aislada (no se encuentra asociado a ningún sistema solar) y que emite muy poca o ninguna radiación.
4. En este enlace a Wikipedia podéis ver en qué consiste tal esterilidad de los neutrinos:
   [http://neofronteras.com/?p=5261]

5. Redirijo vuestra atención hacia la serie del blog "*El Tamiz*" titulada "*Esas maravillosas partículas*", en especial las cuatro últimas dedicadas a la materia oscura y sus posibles "responsables".
[https://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]
6. Eso es debido a que el tiempo de colapso de una cierta materia contenida en una burbuja de gas -supongamos una esfera- y por tanto con una densidad ρ, sigue la siguiente ley: $t = \sqrt{2/G\rho}$. Por tanto las bolsas de gas más densas, que darían nacimiento a las galaxias, colapsaban más rápidamente, del orden de cientos de millones de años, que las bolsas de gas menos densas en su entorno, las que darían a luz a los cúmulos, que seguirían un proceso más lento, del orden de los diez mil millones de años. Hay que decir también que en las concentraciones más densas de materia, como eran las que devinieron en galaxias, se daban a la vez otros procesos a niveles moleculares por los que se disipaba energía, lo que iba a favor de la compactación gravitatoria. Por todo ello los cosmólogos afirman de forma coloquial que las galaxias son formaciones moribundas mientras que los cúmulos aún están con plena vitalidad.
7. La relación entre el horizonte acústico en la recombinación, 489 mly, con el tamaño actual de 480 Mly tiene en cuenta no solo la expansión proporcional al factor (1+z), sino también la dinámica específica del modelo ΛCDM que considera cómo cambia la expansión a través del tiempo cósmico debido al cambio de su contenido (radiación, materia y Λ).
8. En este enlace podéis encontrar la página oficial de dicho proyecto: [http://www.sdss.org/]
9. El eje de ordenadas se ha multiplicado por un factor s^2 para magnificar la visualización. Un Mpc (megapársec) equivale a 3,26 millones de años luz. Realmente tenemos que decir que el parámetro **$\xi(Mpc^2)$** indica el número relativo de pares de galaxias separadas por una distancia **s** en Mpc -megapársec- con relación al número de pares que saldrían bajo la suposición de que toda esta población estuviera distribuida en el espacio de forma aleatoria. Da una idea de sobredensidad.
10. Las estrellas están agrupadas en tres tipos de familias. Las más jóvenes son las de Población I y las más viejas de Población III. Se diferencian no sólo en su edad, sino también por los elementos químicos que las componen.
11. Ya veremos también qué es esto del "corrimiento al rojo" con más detalle en un capítulo posterior, pero tiene relación con la edad de la luz que recorre el Universo. A más edad, más corrimiento al rojo. Hoy z=1. En la recombinación z=1.100.

21: La era de la gran oscuridad

de 380 mil a unos 200 millones de años desde el inicio

Hace unos capítulos nos habíamos quedado en el momento del paso a un Universo dominado claramente por la materia, cuando se liberaron los fotones. La foto de aquel momento de la radiación de fondo nos dio pie a hablar de su estructura y de cómo hay más cosas que la materia visible y los neutrinos y fotones primigenios. Evidentemente, estas "más cosas" tuvieron que ejercer un papel muy importante en el proceso. En especial la materia oscura con su más que significativo efecto gravitatorio, ya que era cinco o seis veces más abundante que la materia bariónica, la "normal". Seguimos aún en el mundo "oscuro" tras la recombinación, sin galaxias ni estrellas. Aunque todo está a punto de cambiar. La teoría es lo que vas a leer en este capítulo y el siguiente. Y es que de aquella época no sabemos nada de forma directa.

Tenue imagen de la galaxia JADES-GS-z14-0 proporcionada por el telescopio James Webb (imagen de wikimedia, dominio público)

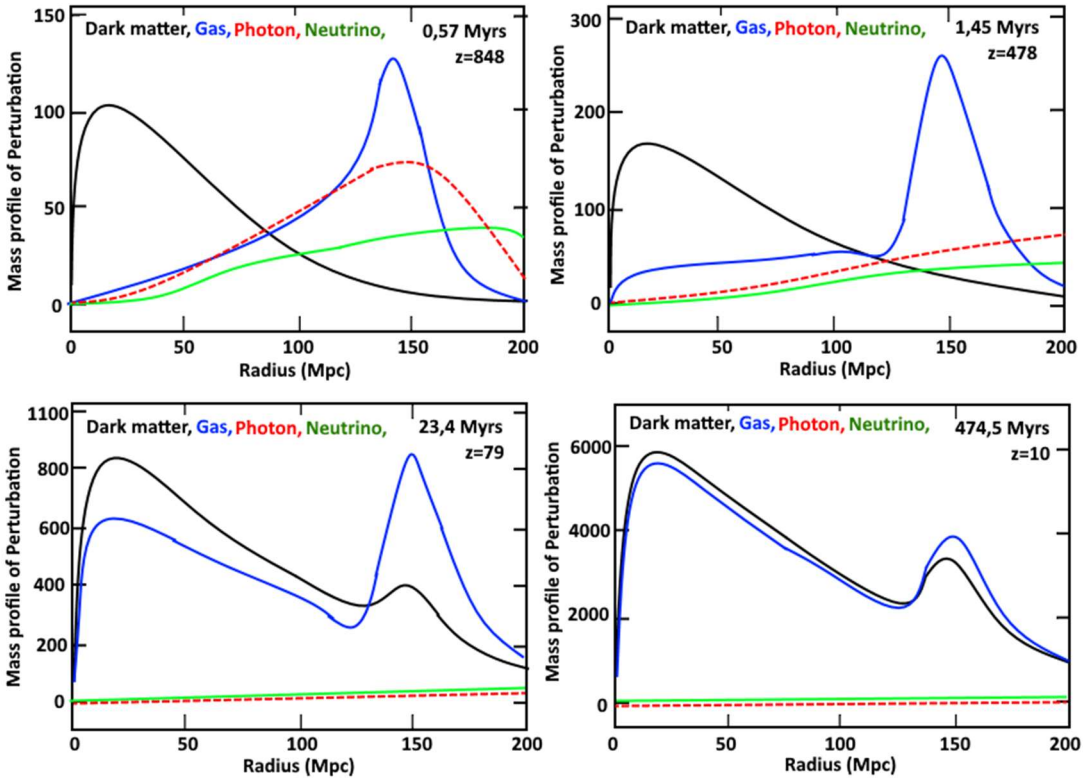
Gracias a telescopios como Hubble, y desde 2022 con el James Webb, se ha podido observar en lo más profundo del Universo lo que parecen ser pequeñas galaxias, las más claras a una distancia temporal equivalente a unos 300

millones de años tras el Big Bang como ya se dijo al final del capítulo anterior, pero de luminosidad más débil y en menor cantidad.[1] Sus formas no son las "convencionales" y están muy lejos de las de las galaxias espiral o elípticas que vemos hoy en día. Estas extrañas galaxias son la crónica de un período cuando el universo era más errático y fundacional. Son fotos realmente muy antiguas, lo que nos permite asegurar que la estructura del Universo se inició muy pronto. Y si de esas estructuras la materia oscura fue el alma fundamental y la materia bariónica su cuerpo visible, tendremos que convenir que ambos actores ya tuvieron que haber comenzado su trabajo en un momento muy temprano. Lo podemos disfrutar contemplando la imagen anterior que amplía sobre el campo profundo la imagen de la galaxia ***JADES-GS-z14-0***, con un corrimiento al rojo de z∼14,32 que se formó apenas 280 millones de años después del Big Bang.

Se cree que ya desde antes de la recombinación, cuando todavía no se habían juntado los electrones y los protones formando los primeros núcleos atómicos, se estaba gestando la semilla de lo que luego ha sido la estructura fantasmagórica de la materia oscura. Por su gran abundancia tuvo que ser la primera a la que la gravedad obligó a formar agrupaciones arrastrando a su lado a la materia bariónica. Además, como no le afectaba la radiación pudo compactarse sin ser empujada por las ondas de presión que generaban los fotones, aunque no lo tuvo del todo fácil ya que la aleatoriedad de su propia dinámica interna sí tenía que ejercer una cierta traba frente a una posible compactación *ad infinitum*. Eran momentos plasmáticos en los que materia oscura y materia luminosa -la bariónica- debían estar entrelazadas por la gravedad, y así se mantuvieron tras la recombinación. Ya sabemos que esta íntima unión entre ambas materias tuvo su reflejo en la foto inaugural de los fotones que constituyen la radiación de fondo de microondas. A partir de aquellos momentos y en base al esquema que dejaron las ondas sonoras del plasma, la materia oscura empezó a trabajar modelando lo que iba a ser la arquitectura futura del Universo, hasta la actual. Lo comentábamos al final del capítulo anterior.

En la serie de gráficos de abajo podemos apreciar con más detalle este despliegue inicial tras la recombinación. Cada una de las curvas dibuja la evolución de materia y radiación correspondiente a una burbuja de inestabilidad cuántica primigenia en un momento determinado -en millones de años, Myrs- para un corrimiento al rojo determinado -z-. Las unidades del radio, o avance de onda, son comóviles, es decir, no incorporan la dilatación producida por la expansión. Para pasar a las de la época correspondiente bastará dividirlas por la z del momento. El extremo último del horizonte acústico está situado más o menos sobre el radio 150 Mpc, los 480 Mly de horizonte acústico que ya sabemos.[2] Vemos cómo la materia oscura se quedó prácticamente anclada en su pozo gravitatorio próximo al del punto de partida, desde donde había

empujado a los bariones a los confines del horizonte acústico. También podemos observar cómo el gas bariónico deja de estar acoplado con la radiación de fotones cayendo de nuevo, con el tiempo, en brazos de la materia oscura. Próxima la edad a los 500 millones de años ambas materias estarían prácticamente ensambladas, mientras que la presencia de fotones y neutrinos se fue disolviendo, con el tiempo, siguiendo la expansión del Universo. Es el resultado de la dinámica de lo que más tarde en este escrito llamaremos halos. A pesar de ser el resultado de una simulación, así creemos que comenzó el espectáculo de lo que vemos en nuestro cielo nocturno.



Evolución radial teórica, tras la recombinación, de los perfiles de materia y radiación proyección de una burbuja de inestabilidad cuántica en donde se generó un horizonte acústico. Son la continuación cronológica de los perfiles que vimos en el capítulo 15 (Imagen a partir de D. J. Eisenstein et al. [3] *fair use)*

Pero no adelantemos los acontecimientos.

Nos movemos en los tiempos que hemos llamado de la "gran oscuridad" porque los fotones salidos de la recombinación tenían unas frecuencias alejadas de las que hoy conceptuamos como visibles o luminosas, las que "cazan" nuestros cerebros. Entre los componentes que formaban la materia bariónica poco a poco iba ganando presencia el hidrógeno neutro, un protón con un electrón "en órbita". Aunque, como ya hemos comentado en el capítulo 17, en la población también había núcleos de hidrógeno y electrones libres aún no recombinados.

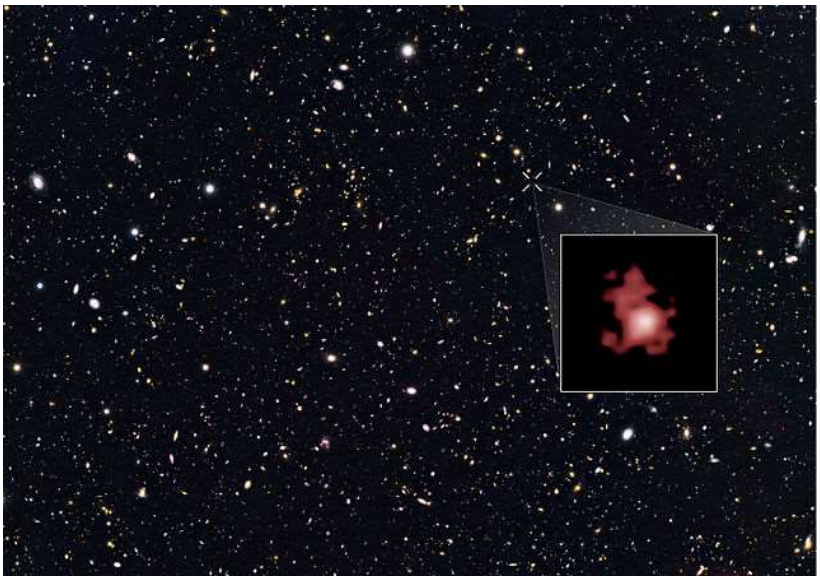
Realmente esas últimas partículas "libres" representaban una proporción muy baja dentro de cada una de sus poblaciones particulares, del orden de 10^{-4} a 10^{-6}, pero totalmente decisivas como veremos más tarde.

El tejido espacio/temporal de fondo se estaba agrandando por efecto del empujón de la energía oscura. Y esto era lo más alejado a lo que pudiera ser una ayuda para la condensación gravitatoria de las grandes masas de materia como las que observamos hoy en día. De todas formas, en donde había acumulaciones de materia, tanto visible como oscura, los efectos de la expansión quedaban parcialmente sujetos gracias al efecto gravitatorio atractivo que provocaba sus masas que deformaban fuertemente el tejido del Universo. Inicialmente conseguían muy poco ya que el factor de expansión era muy superior al de contracción.

El análisis que sigue es una simplificación intuitiva de lo que estaría sucediendo, aunque los valores y fórmulas que planteo no reflejan directamente los modelos cosmológicos. El tejido espacio/temporal soporte se expandía en un factor ***k*** mientras que la gravedad en aquellos lugares donde había materia le debía recortar a esta ***k*** una pequeña porción ***xk***. Para decirlo de forma intuitiva el espacio se expandía por cada unidad de tiempo ***k*** veces, mientras en las zonas gravitatorias, en promedio de la zona, lo hacía como ***k(1-x)***. El tiempo marcado por el reloj de Hubble fue superado por el de Newton de forma que, lentamente, unos lugares iban diferenciando su densidad de materia con respecto a otros, se iban expandiendo menos que el tejido espacio/temporal que las rodeaba. Al cabo de ***una*** unidad de tiempo, el volumen del Cosmos se incrementó en k^3, mientras que en una de sus zonas con materia lo haría en $k^3(1-x)^3$, es decir, que su densidad de masa gravitando habría pasado a ser un $1/(1-x)^3$ mayor que la de la mayoría de su entorno en el Universo ¿Eso es mucho o es poco? Imaginemos una **x** de 0,001. En este caso y haciendo unos sencillos cálculos, en una unidad de tiempo la zona con materia será un tres por mil más densa que la mayoría del espacio circundante. La magnitud del proceso depende del parámetro x que acompaña a la materia y de la unidad de tiempo definida. Y los tiempos del Universo son inconmensurables para nuestra humana vara de medir.

El efecto realmente importante es que en estas zonas especiales la materia iba paulatinamente aumentando su densidad. Podemos imaginar que al cabo de mucho tiempo, cientos de miles de años, la densidad de la materia se habría hecho inmensa en determinadas zonas comparada con la "densidad" de la expansión. En el Universo iba surgiendo un fantasmal escenario de grumos de materia, principalmente oscura, unos más grandes que otros, unos más densos que otros, lo que podríamos llamar semilla de proto cúmulos de materia, en donde la gravedad podía hacer valer su poder y que, a la larga, iban a ser las piezas fundamentales de las estructuras del Universo.

Por fin los tirones gravitatorios conjuntos fueron de tal calibre de forma que ***se iban formando regiones de materia con libertad como para seguir la senda de una compactación gravitatoria definitiva***. En ellas ya se podía empezar a apreciar la formación de la estructura del Universo, y creemos que eso se produjo tan pronto como a corrimientos al rojo de z = 30~15, es decir entre 100 y 270 millones de años tras el Big Bang.



¿Quieres ver algo realmente joven-joven, de hace mucho mucho tiempo? Aquí tienes a la galaxia GN-z11, que en esta imagen era prácticamente contemporánea de los fotones de la radiación de fondo (Wikimedia, NASA Hubble site, dominio público)

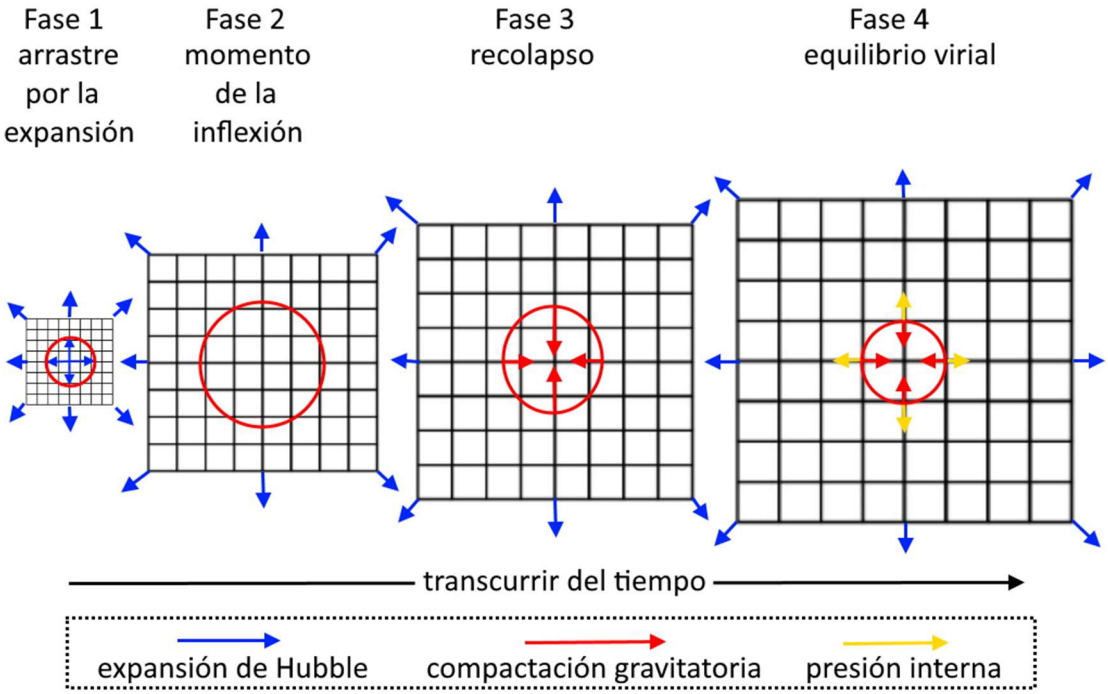
Como decimos, a los 100 millones de años ya se podían encontrar nubes de materia oscura comprimida, aun no muy grandes en dimensión puesto que serían como el sistema solar, con la mayor parte de su materia en el centro. Poco a poco, en un proceso que se conceptúa como jerarquizado, se fueron agrupando más y más de esas nubes para formar halos en los que también la mayoría de la materia estaría en su centro. Podemos imaginar cómo la intensidad del potencial gravitatorio que se generaba debía ser cada vez más potente a medida que más y más materia caía en el pozo. Se cree que ese potencial podía estar reforzada por agujeros negros producidos por esa misma materia oscura, cuyas semillas se habrían gestado en la época de la nucleosíntesis y que ahora se encontraban en el centro de los cúmulos.[4] Quizás algunos de ellos fueron los que forzaron la creación de los cuásares, una especie de ávidas galaxias que ya estaban activas en los primeros millones de años tras el Big Bang. Hasta ahora entre los más alejados de nosotros en espacio y tiempo que hemos podido detectar tenemos al cuásar J0313-1806, detectado a unos 13.030 millones de años luz de la Tierra que ya existía cuando el universo tenía solo 670 millones de años, aproximadamente un 5% de su edad actual. O

también ULAS J1120+0641, que se encuentra a 13.040 millones de años luz, y cuyas ondas de radio lanzadas a los 750 millones de años del Big Bang nos están llegando ahora… ¡prácticamente se emitieron tras la recombinación!

El hecho de que existieran aquellas primigenias zonas de compactación, en las que la importancia de la expansión del tejido espacio/temporal parecía haber quedado en un segundo plano, nos puede hacer pensar en un cosmos convulso y apocalíptico. Algo así como cuando vemos avecinarse una tormenta una tarde veraniega en las grandes montañas. Pero aunque la actividad era ciertamente intensa en determinadas zonas, en promedio el teatro cósmico de aquella época oscura debió ser tranquilo como corresponde a un mundo de gas con una densidad de un protón por centímetro cúbico[5], protón que en una gran mayoría formaban el núcleo de un átomo de hidrógeno con un radio del orden de los 10^{-8} centímetros. Algo así como cerezas separadas por 1.000 kilómetros de vacío. La física en aquellos momentos debía ser bastante simple comparada con la posterior. Prácticamente aún no se habían generado elementos más pesados que el hidrógeno y el helio, por lo que no había polvo cósmico que complicara la existencia de los procesos. Los campos magnéticos tan condicionantes de la dinámica de las poblaciones solo estarán presentes tras la irrupción de las primeras estrellas. Y por la misma razón no habría radiación ultravioleta tan trascendental para la química y la dinámica de calentamiento y evaporación del gas primordial. En palabras del astrónomo Volker Bromm, *"…la física en la formación de las primeras estrellas estaba gobernada principalmente* [y solamente] *por la gravedad, la presión de la temperatura y los momentos angulares de las partículas."*[6] Así que realmente el gas intergaláctico debía ocupar un lugar muy plácido al no tener fuentes de turbulencias a su alrededor. Aunque en ese estable mundo la materia oscura no lo tendría del todo fácil. Podríamos imaginar que los procesos de compresión iban ocurriendo de forma homogénea en todos sus puntos, aunque en realidad creemos que todo fue bastante diferente, no obstante no seamos capaces de observarlo.

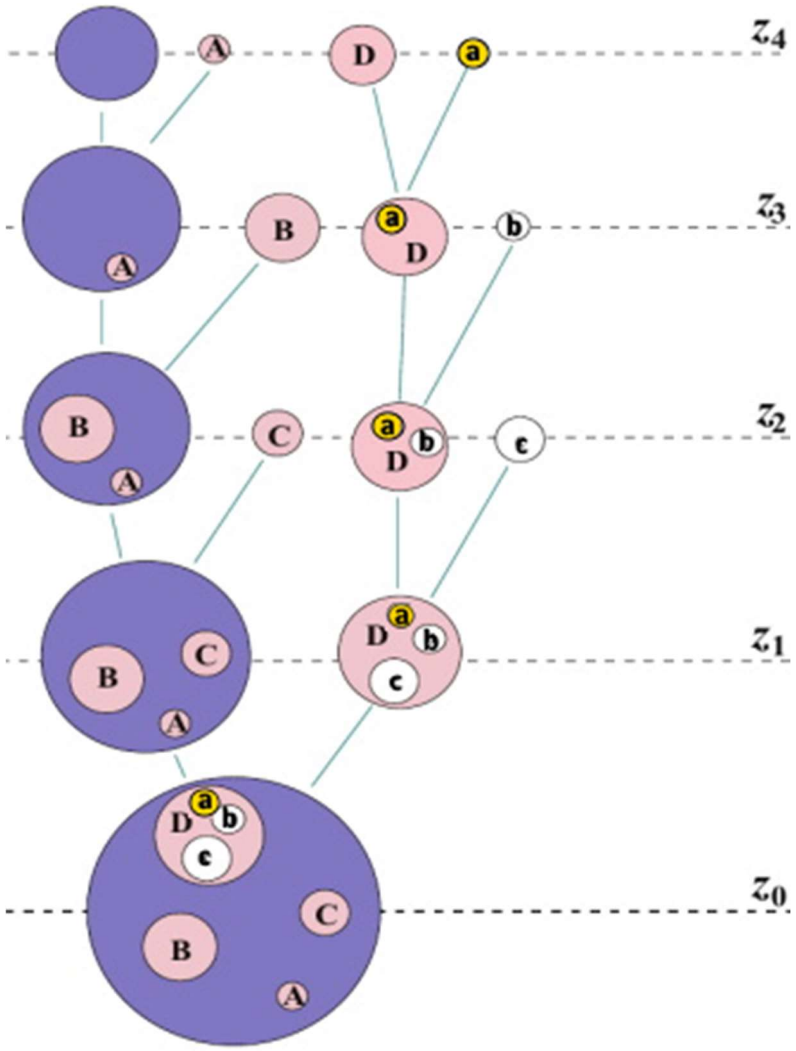
Como decimos, todo comenzaría por la concentración de halos de materia oscura, aquí y allá según la distribución e intensidad de las inestabilidades cuánticas primigenias, hacia donde se veía arrastrada la materia bariónica de los alrededores (*ver la imagen que sigue*). Si había suficiente materia oscura disponible los halos irían creciendo y compactándose, superpuestos aun al ritmo expansivo base de Hubble (fase1), posiblemente y con ciertos matices[7] adoptando forma de esferas. Incluso a lo largo de este proceso la materia oscura de los alrededores menos densos llegaría a participar cayendo sin pauta en el pozo gravitatorio del halo que seguía incrementando su volumen hacia su fase 2. Llegó un momento en que la velocidad de acreción se hizo superior a la velocidad de Hubble, lo que hizo que la gravedad comenzara a dominar a la

expansión, permitiendo que la esfera de materia oscura "rebotara" iniciando la senda de un auténtico colapso (fase 3).



A pesar de que se considere a la materia oscura como "fría" y por tanto sujeta a débiles influencias de la presión de la radiación, lo que permitiría un colapso continuo hasta tamaños incluso nulos, las anisotropías iniciales y los momentos angulares de sus partículas lo van a impedir. Las simulaciones nos dicen que cuando en esa última compactación la sobredensidad alcanza un valor del orden de las decenas de la que provocó el rebote, el halo llega a un equilibrio sin contraerse ni expandirse. La dinámica interna lo conserva -presión vs gravedad- alcanzando una temperatura promedio característica, justo cuando la energía potencial del halo se hace el doble de su energía cinética. En ese momento la velocidad centrípeta de compactación queda igualada por la velocidad centrífuga de la onda de presión. Decimos que ***el halo se ha virializado*** (fase 4).[8]

¿Con cuánta masa gravitatoria se inicia el colapso del halo? Según veremos en el capítulo siguiente para que la compactación sea potente hace falta congregar una masa mínima que conocemos como ***masa de Jeans***. Si sólo hubiera materia oscura, que ya sabemos tiene poca inclinación a interactuar incluso consigo misma, la masa de Jeans sería despreciable ya que con cualquier cantidad ya se compactaría. Aunque no totalmente nula puesto que, como ya hemos comentado, las anisotropías y momentos angulares propios supondrían un freno a una compactación sin límites. Se cree que en aquella edad los halos con masas entre la de Júpiter y la de 10^5 soles, prácticamente eran de materia oscura con muy pocos bariones.



Representación esquemática del árbol de fusiones de un halo de materia oscura a lo largo de pasos de tiempo discretos. (Imagen [9] a partir de "The Substructure Hierarchy in Dark Matter Haloes", figura 1, Carlo Giocoli et al., 2010, ⓕfair use)

Los halos de materia oscura no estaban solos y por tanto estaban sujetos a la posibilidad de fusionarse dos o más de ellos, cosa que va a ser importante en el camino futuro hacia la formación de galaxias. Las fusiones daban como resultado a otro nuevo y mayor halo con propiedades quizás muy diferentes a la de los progenitores. La dinámica de cascadas de fusiones se conoce como de "crecimiento jerárquico" en el sentido de que los halos grandes provienen de la fusión de múltiples halos más pequeños como está esquematizado en el croquis anterior que es la representación esquemática de un árbol de fusión jerárquica de halos de materia oscura en progresivos desplazamientos al rojo. Los halos crecen por acumulación de halos vecinos más pequeños (A, B, C, D), que se convierten en subhalos en el momento en que cruzan por primera vez el radio virial del halo anfitrión. La rama principal del árbol representa la evolución del progenitor principal (mostrado en azul). Dado que este proceso ocurre en toda

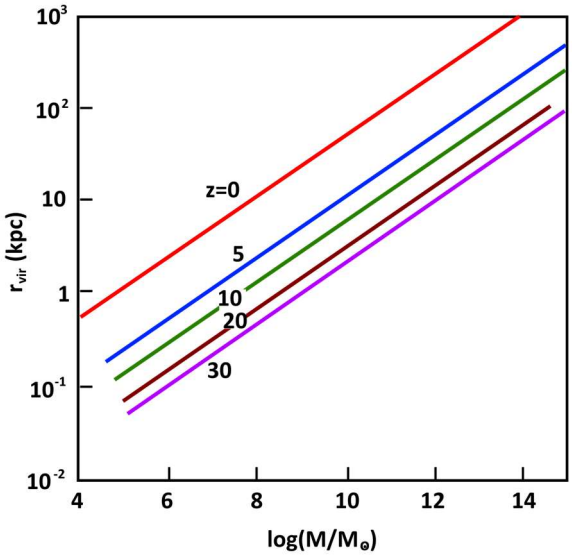
la jerarquía de estructuras, hay subhalos dentro de los subhalos (como a, b, c en el sistema D) y así sucesivamente.

La fusión de dos halos de masas parecidas es muy violenta lo que hace que rápidamente la energía orbital de los progenitores se transforme en energía de unión interna del halo resultante, que así puede alcanzar rápidamente un estado próximo a la estabilidad y equilibrio. Si los dos halos que se fusionan tienen muy diferente masa los procesos dinámicos son menos violentos. El sistema más pequeño, el satélite, orbita dentro del halo principal durante un período prolongado a lo largo del cual compiten dos circunstancias que determinan su destino final. Su tamaño y la fricción dinámica con el halo principal. Esta última hace que el halo más pequeño gire en espiral hacia adentro, mientras va eliminando masa de sus regiones exteriores por efecto de las mareas gravitacionales, con lo que, eventualmente, pueden llegar a deshacerse por completo. Lógicamente esa fricción dinámica es más efectiva cuando los satélites son más masivos. Pero si la proporción de masa de los halos iniciales es lo suficientemente grande, el objeto más pequeño, un subhalo, puede mantener su identidad durante mucho tiempo orbitando dentro del pozo de potencial de su anfitrión.

Y si tras ese relato sentís como os ronda por la cabeza el crecimiento vertical y turbulento de una especie de nube de tormenta veraniega, imagen próxima al escenario de fusiones y cúmulos de halos de materia oscura, podéis seguir con ella ahora contemplado con vuestros propios ojos en la imagen anterior los espectaculares resultados de una simulación,[10] que corresponde a un campo de materia oscura, en donde resalta lo que claramente podemos conceptuar como un particular “Grupo Local”. Se distinguen un par de sistemas de halos de materia oscura separados un megapársec, en cuyo interior destacan grandes halos con unas masas viriales de aproximadamente 10^{12} masas solares, rodeados por un conjunto de subhalos de 10^{6} masas solares. La escala de grises

representa la densidad local de la materia con una resolución que nos permite visualizar hasta más de 2.000 halos satélites de materia oscura.

Los primeros halos de materia oscura constituyen la unidad fundamental en la formación de los objetos astronómicos. En los tiempos iniciales la mayor parte de la materia oscura lógicamente se encontraba en halos de baja masa, los cuales continuaron acumulando materia y fusionándose a lo largo del tiempo, dando lugar a halos de mayor masa. Los halos más pequeños y abundantes los podríamos encontrar en regiones más aisladas y de baja densidad, ya que de no ser así habrían sido "deglutidos" por los halos mayores. En contraste, los halos grandes y masivos se iban desarrollando en vecindarios con altas densidades de materia, donde es raro encontrar halos pequeños independientes ya que estos hubieran sido integrados como subhalos dentro de los más grandes.

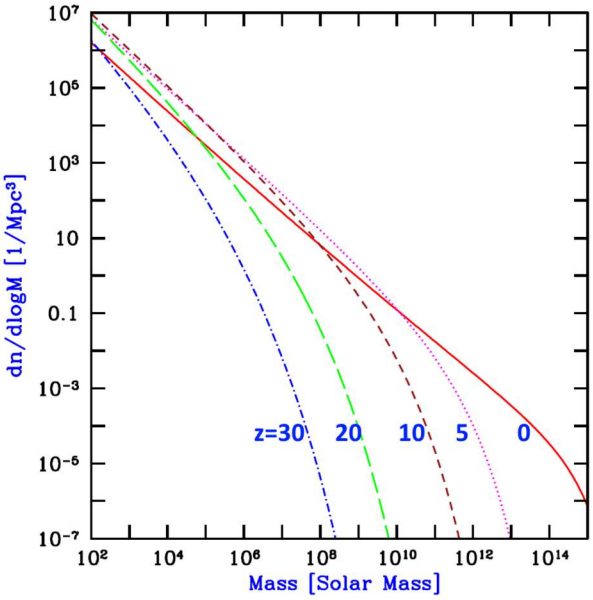


Radio virial de los halos, según masas, en función del momento cosmológico z (Imagen de "The first Galaxies in the Universe", Loeb y Furlanetto, figura 3.5, ⓒfair use)

Sin contradecir lo anterior, la dinámica presentaba un sesgo hacia la generación de ***halos mayores con el paso del tiempo*** tal como lo podemos ver en la figura anterior resultado de una simulación, en la que se explicita el tamaño del radio del halo en su momento virial en diversos corrimientos al rojo y para diversas masas. Es lógico que esa sea la tendencia porque para una misma masa M el radio virial r_{vir} será mayor si la densidad media de materia en el momento del colapso es menor, y viceversa. Y la realidad era que la densidad disminuía a medida que el universo se expandía a medida que pasaba el tiempo, medido por corrimientos al rojo z menores.

Ahora que tenemos una idea de cuan grandes y densos podían ser los halos que colapsaban nos podemos preguntar cuántos existieron a través del tiempo y con que sesgo con respecto a sus masas. Esta predicción es un paso importante para

inferir la abundancia de galaxias y de cúmulos de galaxias. Para ello los cosmólogos proponen modelos analíticos, que no por ser teóricos se puedan ajustar menos a la realidad, pero sí les permiten reflexionar acerca de los fundamentos de lo que estaba pasando.

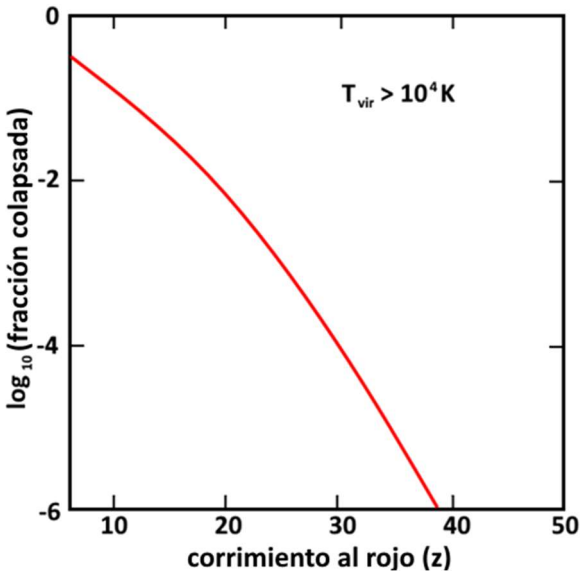


La figura anterior, resultado de uno de esos cálculos analíticos, aporta un nuevo matiz al respecto. Tiene que ver con la representación de lo que se conoce como la función de distribución de masas ξ(M) que conceptualmente se refiere a cuántos objetos existen por unidad de volumen que tengan masas con un valor dentro de un intervalo dado alrededor de un valor M_i. Que es más o menos lo que nos mide el eje vertical. El eje horizontal representa la masa M_i de los halos de materia oscura en unidades solares. Y las curvas representan para varios desplazamientos al rojo el espectro definido.[11] [12]

En general se observa que, ***para todos los tiempos, la distribución del número de halos masivos en la población menguaba rápidamente con la masa***. Había un número mayor de halos pequeños que de alta masa. La curva también nos corrobora lo que ya sabíamos de la anterior, es decir, que para una masa de halo determinada M_i el número de halos en el intervalo fue creciendo con el paso del tiempo (disminución del corrimiento al rojo). Con una excepción para las masas más pequeñas, ya que parece como que el número de halos pequeños han disminuido en nuestra época cósmica de forma que incluso es igual que cuando dominaban en z's más altas.

En el fondo me parece que solo hemos corroborado lo esperable. Los halos se iban haciendo mayores con el paso del tiempo, por acreción y por incremento de la masa de Jeans, y a medida que iban creciendo en la población había menos de los grandes en proporción al de pequeños, cuyo número también iba menguando, quizás posiblemente porque ya iba quedando poco material de construcción.

Pero ahí no solamente había materia oscura, sino que también se manejaba la materia bariónica, la cual seguía a la oscura bajo la batuta del pozo gravitatorio de esta última. En la curva siguiente vemos en qué proporción participaba la población bariónica[13] con relación a la materia oscura y cómo en cada momento cosmológico z esa participación evolucionaba con el paso del tiempo. Todo ello para el caso de halos con temperaturas viriales mayores a 10^4 K.[14] Esta temperatura corresponde a una situación de enfriamiento del halo muy particular que facilita la compactación, como veremos en el próximo capítulo.

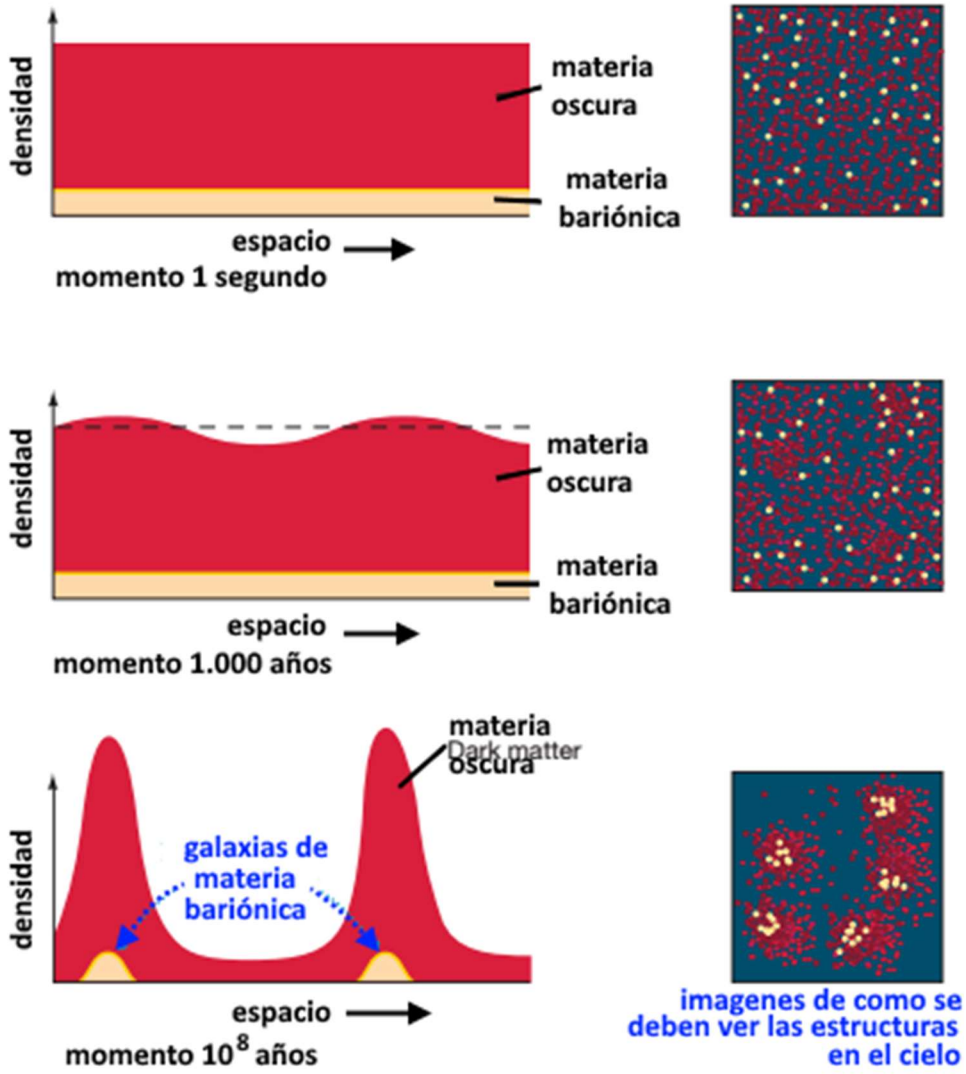


Como apreciamos en la curva, en los momentos más iniciales la presencia de materia bariónica era escasa dentro de los halos, ya que tan sólo un 10^{-6} de la población estaba en el juego en z=40 a los 65 millones de años. Pero vemos que se van haciendo más participativos al movernos hacia corrimientos al rojo más actuales siendo del 1% en z=20 a los 180 millones de años. De todas formas, lo que más puede sorprender es saber que a lo largo de la vida del Universo una gran mayoría de la población bariónica seguía libre como parte del gas intergaláctico.

Sabemos ya que los bariones sí interactuaban con la radiación, al contrario de la materia oscura, por lo que la onda de presión que mantenía virializado al halo se vería muy reforzada al incrementar su abundancia en el halo. Gracias a ello se podía acrear mucha más materia bariónica, más gas, que progresivamente y gracias a su momento angular iba adoptando la forma de un disco que giraba alrededor del centro durante mucho tiempo y que, eventualmente, tendía a romperse en un conjunto de nubes densas que a su vez se fragmentarían más tarde en cúmulos de gases que si sobrepasaban sus particulares masas de Jeans, acabarían gestando cada uno una estrella.

¿Por qué puede romperse el disco de gas? Muy sencillo. Porque puede enfriarse, circunstancia que induce una disminución de la intensidad de sus ondas locales de presión. Enfriarse supone la pérdida de radiación lo que hace

que puedan compactarse más. El efecto "radiador" se consigue principalmente a través de varios caminos que explicaremos también en el siguiente capítulo. Aquí adelanto algunos, quizás los principales: desexcitación de los electrones del átomo de hidrógeno y desexcitación de los momentos vibracionales y angulares de las moléculas existentes. En cada subhalo se hará a su manera y así gracias al progresivo incremento de la presión gravitatoria se llegará a la temperatura de ignición de las estrellas.



(Imagen a partir de "Astronomy today", pag 706, Eric Chaisson y Steve McMillan, ⓕ fair use)

La imagen anterior es una intuitiva representación gráfica del proceso de la inicial compactación gravitatoria de la materia dirigida por la oscura. Nos transmite la idea de la interrelación entre materia bariónica y oscura y cómo el pozo gravitatorio de la última iba dirigiendo el proceso. Representan tres momentos en la historia del Universo. ***El primero***, muy metido en el puré del

plasma inicial, cuando la fuerza nuclear débil entró en combate dejando a los neutrinos que camparan a sus anchas. Era cuando rayaba el primer segundo de vida del Universo. ***La segunda imagen*** corresponde al plasma en estado "transitorio", podíamos decir. Era la época del equilibrio termodinámico y de las ondas de sonido rielando el plasma primordial. Mil años tras el inicio y conformándose el patrón del horizonte sonoro. ***En la tercera***, el Universo a los cien millones de años, en la plenitud de la época que estamos tratando en este capítulo, cuando la materia oscura estaba construyendo grandes estructuras al generar zonas de alta densidad dentro de los que la materia bariónica caía para formar las galaxias que vemos hoy en día. A la derecha una imagen espacial de cómo andarían de revueltos materia oscura y bariones. Los primeros consiguen formar los halos y en su interior los bariones encendiéndose como luminosas estrellas.

En el próximo capítulo veremos cómo se encendieron las primeras luces.

NOTAS DEL CAPÍTULO 21:

1. Distancia en años luz y edad es equivalente. La edad la determinamos a partir de la del Universo hoy en día -unos 13.800 millones de años luz- y del corrimiento al rojo que tiene la luz de esta galaxia que detectamos. Como veremos en otro capítulo, el corrimiento al rojo, conocido como el parámetro *z*, nos indica cuán lejos de nosotros está el foco emisor de la luz. Por simple resta con la edad total del Universo sabemos cuál es la edad de la galaxia. ***Edad = 13.800 – Función[z]***. En el momento de la recombinación *z* era igual a 1.100. Aquí dejo el enlace a una calculadora cosmológica para jugar con los valores de z y de las edades.
   [https://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html]

2. Un megapársec, Mpc, es igual a 3,26 millones de años luz. Por lo que el horizonte acústico de hoy en día mide unos 480 millones de años luz y, como sabemos, es el patrón estándar de la dispersión de las galaxias.
3. "*Cosmic sound Waves rule*", Daniel J. Eisenstein y Charles L. Bennett, Physics Today abril 2008.
   [https://sites.astro.caltech.edu/~george/ay21/readings/Cosmic_Sound.pdf]
4. La existencia de agujeros negros primordiales es muy controvertida y, posiblemente, exige una nueva física desconocida por nosotros. Si existen o existieron, quizás se pudieron producir durante algún cambio de estado

del Universo: al final de la inflación, en la ruptura de simetría electrodébil, durante la formación de los nucleones o en cualquiera otra transición de fase.

No obstante, si quieres formar un agujero negro primordial, no puedes hacerlo recreciendo una pequeña semilla. Es preciso comenzar con una semilla enorme: algo que tenga aproximadamente un 68% más de densidad que la promedio del Universo. Cuando comparas lo que vemos con variaciones a gran escala de aproximadamente el 0,003%, y que, además, disminuye lentamente a medida que avanzamos a escalas más pequeñas, simplemente parece imposible admitir la creación de agujeros negros primordiales.

[https://bigthink.com/starts-with-a-bang/primordial-black-holes/]

5. Esta sería la presencia media de la materia en la época de la formación de las primeras galaxias, particularizada para un corrimiento al rojo de z=100. En ese momento el valor de la densidad media era inferior a la densidad de la atmósfera terrestre a nivel de mar en un factor de 10^8.
6. "*The formation of the first stars. 1. The primordial star forming cloud*", apartado I., Volker Bromm et al., 1999.
   [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0102503.pdf]
7. Si bien describimos en el texto la forma de los halos como esférica hay simulaciones de formación de estructuras que han demostrado que los halos son en realidad estructuras triaxiales donde las superficies de isodensidad pueden ser descriptas por elipsoides, cada uno caracterizado por la longitud de sus semiejes. Algunos autores encuentran una correlación inversa entre la masa y la esfericidad de los halos, en el sentido de que los halos menos masivos son más esféricos como consecuencia de que los más masivos son en general los que han sufrido fusiones más recientes y no han tenido tiempo suficiente aun para alcanzar nuevamente el estado de equilibrio final. Además, se observa una fuerte tendencia a que los ejes menores se dispongan perpendiculares a los más cercanos filamentos de la distribución de la materia en las grandes escalas, y con los ejes mayores y medios más o menos paralelos al filamento. Este tipo de alineación es más clara cuanto más masivos sean los halos, mostrando que la forma de los halos de materia oscura a nivel de la gran escala, están condicionados por el campo de mareas gravitatorias donde están inmersos.
8. En mecánica clásica, el ***teorema del virial*** es una ecuación general que relaciona la energía cinética total promedio de un sistema con su energía potencial promedio. En el caso de que la fuerza de interacción entre dos partículas cualesquiera del sistema es debida a un potencial del tipo $V(r)=\alpha r^n$, es decir, se hace proporcional a alguna potencia n de la distancia r entre las partículas, la ecuación del teorema del virial adopta la siguiente forma

$$2[E_{cinética}] = n\ [E_{potencial}]$$

La palabra "virial" tiene su origen en *vis*, la palabra en latín para "fuerza" o "energía".

9. "*The Substructure Hierarchy in Dark Matter Haloes*", figura 1, Carlo Giocoli et al., 2010.
[https://arxiv.org/pdf/0911.0436.pdf]

10. "*The dark matter crisis*", figura 1, Ben Moore, 2001, fair use.
[https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0103100.pdf]

11. "*First light*", figura 19, Abraham Loeb, 2006, fair use.
[https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0603360.pdf]

12. En astronomía la ***función de masa*** es una función analítica o empírica que describe la distribución de masas para una población de objetos astronómicos. Normalmente se acepta que la función de distribución de masas $\xi(M)$ es una función exponencial de la forma $\xi(M) \propto M^{-\alpha}$ siendo M la masa. Entenderemos su sentido si la presentamos de otra manera, en donde n es el número de halos,

$$dn = \xi(M).dM$$

es decir, es el nexo entre el número poblacional y la masa. Estamos ahora en condiciones de analizar la curva anterior. La variable del eje vertical, dn/dlogM, indica el número de halos que se encuentran en un intervalo de masa comprendido entre M_i y M_i+dM. Cantidad que está correlacionada con la masa M_i en el eje horizontal (que realmente está referenciada al correspondiente exponente de 10).

13. Misma fuente que en la nota 11, pero ahora la figura 13, fair use.

14. La temperatura virial de un halo es un indicador de su energía interna, y la condición de que $T_{vir} > 10^4$ K significa que los bariones en estos halos están en un nivel de energía tal que les permite enfriarse y pasar de un estado de gas caliente a uno más denso, lo que va a facilitar la formación de estructuras más complejas, como fragmentarse para formar estrellas. Se explica con mayor detalle en el capítulo 22.

22: De la oscuridad a la luz

200 millones de años desde el inicio

En el capítulo anterior habíamos dejado a la materia oscura haciendo su trabajo de panadero amasador de la materia. Se estaba iniciando el nacimiento de las primeras estructuras cósmicas. Habíamos asegurado que la realidad fue bastante diferente a un proceso sencillo de ir agrupando progresivamente materia, lo mismo que el polvo se apelmaza dentro de la bolsa del aspirador casero gracias al potencial de succión generado por su motor/ventilador. En el presente capítulo entramos a desentrañar alguna de las particularidades de este proceso.

En los albores de la compactación las partículas bariónicas -átomos de hidrógeno y helio básicamente-, al ser poco masivas se moverían comparativamente a altas velocidades. El Cosmos en aquellos momentos se encontraba bastante frío con relación a lo que había sido, unos cientos de grados Kelvin como correspondía a la energía promedio de la radiación del orden de las décimas del electronvoltio. Con la expansión, poco a poco la velocidad con la que se movían los átomos de hidrógeno se iría también ralentizando hasta llegar a una temperatura tal que, con la ayuda catalizadora de los electrones libres, se hacía posible la rápida ***aparición de abundantes moléculas de ese elemento*** por unión covalente de dos átomos.[1] Estos átomos y moléculas continuaron enfriándose y ralentizando. Hasta que, como sabemos, llegó el momento de la irreversible acción de la atracción gravitatoria de la materia oscura que, juntamente con otro tipo de interacciones -como pudiera ser el empuje que se produciría en los choques entre partículas, modulados por sus momentos angulares-, haría que los bariones de la materia luminosa poco a poco fueran "cayendo" de forma azarosa hacia los centros supermasivos de los cúmulos de materia oscura, iniciando así los primeros esbozos de la estructura del Universo que vemos.

El proceso que hemos explicado a grandes rasgos no debió ser tan elemental. No todo fue frenarse y caer en el pozo gravitatorio, porque todo tiene un límite. Al irse comprimiendo los grandes volúmenes de gases, los átomos y moléculas de la materia bariónica se iban acelerando al encontrase en un espacio cada vez más pequeño. El mayor número de colisiones consiguientes, y con una mayor energía en el choque, traía como consecuencia el que en estas zonas la temperatura aumentase. Y ya sabemos que cuanto mayor fuera la temperatura de la radiación presente, mayor debía ser la presión expansiva dentro del gas. Es decir, la concentración gravitatoria estaba generando una onda de presión que, partiendo desde el centro, se transmitía en sentido centrífugo por toda la

nube que se estaba compactando. Esa onda se movía a la velocidad del sonido en el medio. De forma similar a lo que vimos en el interior del plasma anterior al momento de la recombinación. Mientras esa velocidad fuera mayor que la de la caída de bariones al pozo gravitatorio, la presión era capaz de contener el colapso al alcanzarse un equilibrio entre ambas fuerzas: gravedad vs. presión.

La llegada a este equilibrio se iba realizando poco a poco. Durante un tiempo y a medida que se iba acarreando cada vez una mayor masa desde los alrededores, el halo se iría manteniendo en un estado transitorio dinámicamente semejante al inicial sin cambios fundamentales. Hasta que se llega a acumular una determinada cantidad crítica, momento tras el que el halo cada vez más denso se inestabiliza, de forma que la gravedad llegará a vencer a las fuerzas de presión de la nube de gases que por fin colapsarán en todo su volumen. Momento de rotura de la virialidad. Ello será así cuando la energía gravitatoria de la nube de gases supere el doble de su energía térmica.[2]

En aquel amasijo de materia y radiación se daban unas circunstancias que retardaban y otras que aceleraban la compactación de la materia. Eso fue realmente importante, ya que todo ese juego de pros y contras configuraron un determinado y concreto patrón de densidades que, de no haberse alcanzado, no se hubiera generado este Universo tan espléndido como lo vemos ahora, con sus estructuras filamentosas y radiantes, llenas de galaxias y estrellas, cuásares y agujeros negros.

En todas las edades astronómicas existieron "*fuerzas del mal"* que se oponían a la densificación. En cada momento unas eran más poderosas que otras, pero ahí estaban. Entre ellas se encontraban los ***campos magnéticos cósmicos*****.** Este gran imán del Universo no sabemos muy bien por qué está ahí. Quizás apareció en los inicios del Big Bang como uno más de sus campos. En principio sería un magnetismo débil presente en todas partes que luego sembró semillas de campos más intensos en galaxias y cúmulos a lo largo y ancho del Cosmos.[3] Siempre han estado actuando, aunque… ¿cómo? *Forzando las trayectorias del movimiento de las partículas ionizadas* que estaban intentando congregarse formando un cuerpo masivo. Y esas trayectorias, que se ajustaban a las líneas de dichos campos magnéticos, no tenían por qué coincidir con las de la "caída" gravitacional, directamente hacia el centro de masas. Debido tan sólo a eso la compactación podía ralentizarse. Pero es que además, al ser aceleradas por los campos magnéticos de fondo, las partículas cargadas en su movimiento chocaban con las partículas no cargadas dificultando en una segunda derivada la compactación.

Otro "opositor" a la compactación era ***la radiación Lyman-α*** de la que hablaremos con extensión en el capítulo 26. Se trata simplemente de los fotones emitidos al decaer un electrón excitado en el átomo de hidrógeno desde el nivel

dos al fundamental que arrastran una energía de 10,2 eV. Esos fotones suministran una *presión centrífuga* muy importante, porque normalmente quedan atrapados dentro de la nube del gas chocando con sus bariones. Los choques se traducen en un incremento de la energía de los fotones por lo que la presión que generan se ve magnificada y, por consiguiente, generando una ralentización de la velocidad de caída del gas. En halos pequeños su influencia puede ser tan grande que incluso pueden parar del todo el proceso de compactación.

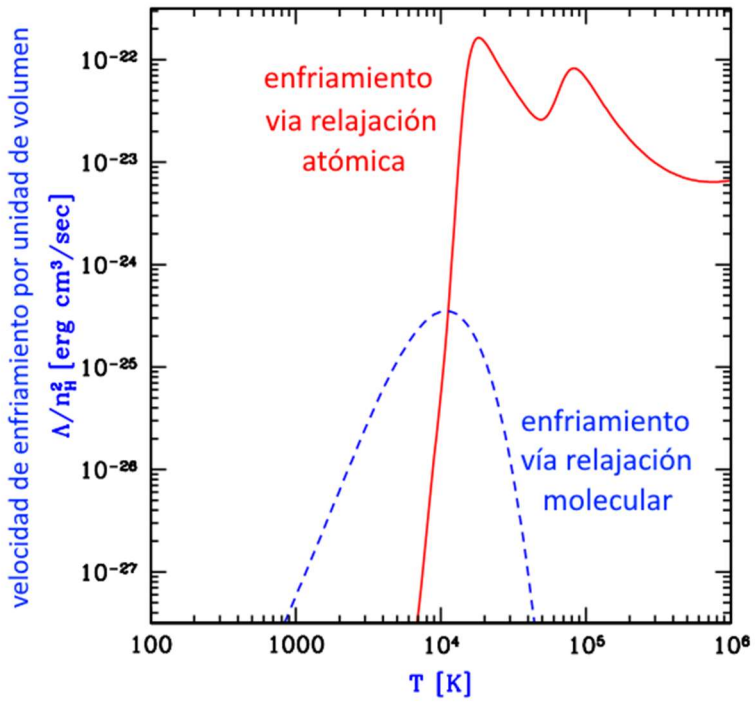
Y seguimos con las fuerzas del mal. Dado que dentro de las masas del gas que se iba conglomerando la presión era cada vez mayor, la energía de los fotones que se oponían al derrumbe iba cada vez incrementándose. Incluso en algún momento, cuando se iniciaban los primeros balbuceos de las estrellas, estarían presentes ***los rayos ultravioleta*** con energías de decenas de electronvoltios. Esos fotones, como el resto de los de su especie, no sólo hacían valer la "presión" en su cruzada anti-compactación, sino que también aprovechaban su energía para otros menesteres. Algunos de ellos sobrepasarían la fuerza de enlace del átomo de hidrógeno, con energía de 13,6 eV, por lo que tendrían la suficiente como para *ionizar a esos átomos en la zona central del halo* que en el proceso emitirían fotones. Por consiguiente, en esas zonas de hidrógeno ionizado la temperatura tendría que ser mucho mayor que la de las zonas del entorno. Al calentarse debían incrementar el volumen que crecería hacia el exterior con una gran aceleración, provocando un ***frente de gas ionizado hacia afuera*** y que dificultaba la compactación hacia el núcleo. Este frente inicialmente era supersónico, aunque se iría frenando a medida que se fuera expandiendo e interaccionara con lo que iba encontrando en su camino, llegando a alcanzar velocidades próximas a la del sonido. En ese momento *el frente de onda sónico quedaba atrapado ya que al chocar con el gas neutro exterior podía ya acoplarse con él*.

En la zona de acople podemos imaginar que se inducía en el gas neutro y molecular exterior como una especie de concha, dentro de la cual queda el frente de gas ionizado, mientras el conjunto sigue avanzando a la velocidad del sonido. Mientras la presión en el borde de la concha fuera mayor que el potencial gravitatorio el frenado de la compactación del halo seguiría siendo efectivo. A medida que la onda se propagaba hacia el exterior la densidad del hidrógeno neutro con el que se encontraba iría lógicamente disminuyendo, por lo que *en algún momento el frente de material ionizado se volvió a desacoplar* recuperando velocidad y perdiéndose en el infinito. Es lo que se conoce como la ***evaporación del halo***.

PERO… otros fenómenos físicos trabajaban en sentido contrario. Básicamente, lo que hacían era relajar la creciente temperatura que se producía al incrementarse la compactación. Si la masa comprimida por la atracción

gravitatoria no se calentara tan rápido, podría alcanzar densidades mayores antes de que la presión generada por la radiación comenzara a oponerse al colapso.

Ciertamente había, y aún está operativo, un "***ventilador cósmico fotónico***" que trabajaba en este sentido. Básicamente lo que hacía en las zonas de progresiva acumulación era "ventilar" energía en forma de fotones que podían abandonar el grumo de materia, con lo que así ésta seguía un camino de calentamiento más suave. ¿De dónde provenían estos fotones? En toda esta sopa, a pesar de que eran tremendos espacios vacíos, los átomos chocarían unos con otros o con la radiación, con el resultado de que alguno de sus electrones orbitales ascendía a una capa de mayor energía. Casi inmediatamente volvían a su querencia de menor energía: saltaban a su órbita inferior emitiendo fotones portadores de energía, *de nuevo los Lyman-α, alguno de los cuales lograban escapar refrigerando la zona* al perderse en el espacio lejos de la conglomeración de materia. Este ventilador fue altamente eficiente a partir de que el halo alcanzara una temperatura virial mayor a 10^4 K como vemos en la figura siguiente.



Tasas de enfriamiento en función de la temperatura para un gas primordial compuesto de hidrógeno y helio atómicos, así como la tasa del hidrógeno molecular.[4] *(Rennan Barkana, mayo 2001, ⓕfair use)*

Además, se daba otro proceso aún más eficiente al que teóricamente en física se le conoce como ***excitación de un gas perturbado***. Tenía relación con las moléculas de la sopa gravitatoria bariónica, que en aquel momento en su mayoría era de hidrógeno. ¿Cómo aparecen moléculas de H_2 en un mundo de

átomos e iones? Sabemos ya del capítulo 17 que tras el momento de la recombinación la aparición de átomos de hidrógeno (H) no se hizo de forma inmediata, sino que tomó su tiempo. Los electrones libres eran abundantes al principio, decayendo poco a poco hasta ser una fracción 10^{-4} de la población total inicial cuando el inicio de la recombinación. Los electrones libres catalizaban la molécula de H_2 en un proceso que pasaba por la formación del ión hidruro H^-, un protón con dos electrones, a través de las reacciones siguientes

$$H + e^- \rightarrow H^- + \text{energía} \qquad H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$$

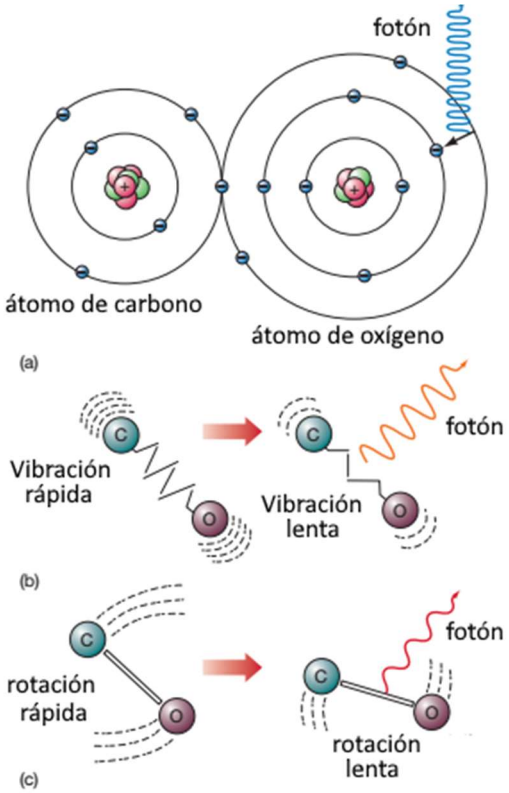
Las moléculas de hidrógeno estaban sometidas a estrés de movimiento en un medio compacto en donde se estaba incrementando la temperatura y en donde chocaban unas con otras transmitiéndose energía y alterando continuamente sus estados.

Algunas de esas moléculas se salían de la disciplina que Boltzman definió para un cuerpo negro, que es lo que era el cúmulo de gas. Pero obligatoriamente tenían que volver a ella, y *lo hacían emitiendo fotones que aliviaban la tensión cinética de sus estados vibratorio y de rotación molecular, fotones que a la larga salían del halo arrastrando consigo parte de su energía*. Eso era precisamente lo que pasaba a nuestras moléculas de hidrógeno, que así se travistieron de potentes refrigeradores de los proto cúmulos con la eficacia que dibuja la línea a trazos de la curva anterior.

Además, en los halos donde coexistían moléculas e iones de hidrógeno, se daban las circunstancias precisas como para que apareciera otro tipo de moléculas ventilador: la HD formada por un hidrógeno y un deuterio. Su acción fue importante cuando el nacimiento de las últimas estrellas de la primera generación.

$$H_2 + D^+ \rightarrow HD + H^+$$

Mucho más tarde aparecieron otros actores que reforzaron las refrigeraciones de las masas de gases colapsantes. Me refiero a ***los "metales" estelares*** (elementos más allá del hidrógeno o el helio) que se crearon gracias a los hornos de las primeras estrellas de Población III y que se podían encontrar en forma de granos de polvo o diluidos en el gas interestelar. *Los granos de polvo absorben de forma muy eficiente a los fotones ultravioleta para después refrigerarse gracias a la emisión en infrarrojo*, fotones que fácilmente puede abandonar la nube de gas gracias a su amplia longitud de onda. Además, añadían una segunda derivada de enfriamiento, no solamente porque podían irradiar su calor, sino también porque sobre su superficie se catalizaba con gran facilidad el "refrigerador" H_2.

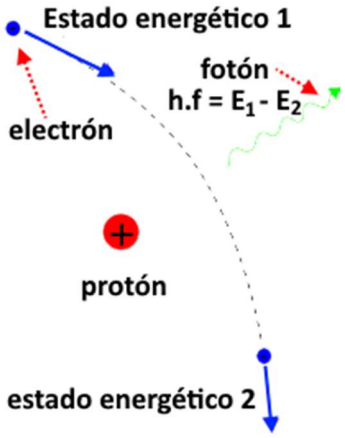


Esquema de relajación energética en las moléculas. (a) Por emisión de un fotón al desexcitarse un electrón por descenso de nivel; (b) por ralentización del estado vibratorio molecular y (c) por frenado de su rotación (Imagen del libro "Astronomy today", pag 91, Eric Chaisson y Steve McMillan, ⓕfair use)

Este proceso es crucial para las estrellas de segunda generación, que tienen concentraciones de metales más bajas que las del Sol. En estas estrellas, la principal forma de enfriamiento no proviene del hidrógeno o el helio molecular, sino de pequeñas fracciones de elementos pesados, como carbono y oxígeno, presentes en el gas. Estos átomos y moléculas enfrían de manera eficiente el gas bariónico que da origen a las estrellas de las segundas y terceras generaciones.[5] Este extra de refrigeración fue fundamental para la formación de galaxias ya que permitió y facilitó una mayor fragmentación del disco central de acreción.

El que actúe un modelo de enfriamiento u otro depende de las circunstancias locales y temporales. Normalmente, y a excepción de la dispersión Compton inversa de la que hablaremos luego, todos los mecanismos de enfriamiento que hemos comentado involucran al menos dos partículas. Lo que significa que el enfriamiento es generalmente más efectivo en las regiones de mayor densidad. En halos masivos, donde la temperatura virial es muy alta, $T_{vir}>10^7$ K, el gas se ioniza completamente por colisión y se enfría principalmente a través de la ***radiación de frenado Bremsstrahlung*** que se produce cuando los electrones

libres “tuercen” su trayectoria por la atracción electromagnética de los núcleos próximos. Y ya sabemos que una carga eléctrica puntual acelerada emite energía e impulso en forma de radiación.[6]



Esquema de la radiación de frenado Bremsstrahlung (Imagen Wikipedio, dominio público)

En el rango de temperaturas 10^4 K<T_{vir}<10^6 K, son varios los mecanismos de excitación y desexcitación que pueden desempeñar un papel. Los electrones pueden recombinarse con iones emitiendo un fotón; o los átomos neutros o parcialmente ionizados pueden ser excitados por una colisión con otra partícula, para decaer radiactivamente de nuevo al estado fundamental. Básicamente lo que habíamos conceptuado como el camino de relajación atómica. Dado que cada especie atómica tiene su propia energía de excitación, las velocidades de enfriamiento dependerán en gran medida de la composición química del gas.

En los halos con T_{vir}<10^4 K, lo que supone una energía relativamente baja, se cree que el gas prácticamente no esté ionizado siendo casi completamente neutro, lo que dificulta en gran manera que se lleven a cabo los procesos de enfriamiento mencionados anteriormente. Sin embargo, todo depende de la cantidad de elementos y moléculas que se hallen presentes ya que aún pueden darse procesos de enfriamiento gracias a la relajación molecular. Estos últimos párrafos son un reflejo de lo que nos dice la curva de un poco más arriba acerca de la eficacia de los mecanismos de refrigeración atómicos y moleculares.

Finalmente, en momentos muy primordiales con altos corrimientos al rojo (z>6) pudo ser muy eficaz la ***dispersión Compton inversa del fondo cósmico de microondas***. ***Ese tipo de dispersión*** se da con fotones de baja energía que se encuentran en ambientes de altas energías y esta producida por electrones relativistas. Los electrones relativistas pueden aumentar la energía de los fotones de baja energía en una cantidad potencialmente enorme e incluso

pueden transformarlos en rayos gamma. Al huir del halo se llevarán consigo un buen plus de refrigeración.

Resumen de las interacciones atómicas y moleculares que aparecen en el texto y que involucran a fotones, moléculas, átomos, iones y electrones.

• *Procesos doblemente enlazados: Estos son los procesos por los cuales un electrón hace una* ***transición de un nivel energético*** *(enlazado)* ***a otro nivel energético*** *(enlazado) en un átomo (o ion). Tales transiciones se pueden llevar a cabo ya sea por colisiones con electrones (excitación/desexcitación por colisión) o por interacciones con fotones (excitación o decaimiento espontáneo/forzado).*

• *Procesos de transición de un electrón entre un nivel enlazado y un estado libre: estos procesos implican la eliminación de un electrón de una órbita energética (enlazada), lo que puede suceder cuando un átomo (o ion) choca con un electrón enlazado (****ionización por colisión****) o cuando absorbe un fotón (****fotoionización****). El proceso inverso es la* ***recombinación****, por el cual un electrón libre se recombina con un ion.*

$$\textit{Colisión ionización/excitación} \quad H^0 + e^- \rightarrow p^+ + e^- + e^-$$

$$\textit{Fotoionización/foto excitación} \quad H^0 + \gamma \rightarrow p^+ + e^-$$

$$\textit{Recombinación} \quad p^+ + e^- \rightarrow H^0 + \gamma$$

• *Procesos libre-libre: estos procesos involucran solamente electrones libres. Cuando un electrón libre es acelerado o desacelerado, emite fotones a través de la* ***radiación Bremsstrahlung****. El electrón también puede absorber un fotón a través de una absorción libre-libre.*

$$p^+_a + e^-_a \rightarrow p^+_b + e^-_b + \gamma$$

• *Dispersión Compton: Este es el proceso en el cual los fotones son dispersados por electrones libres (o iones). Si la energía del fotón es alta, los electrones ganan energía (el* ***proceso Compton****). Si la energía cinética del electrón es mucho mayor que la energía del fotón, la energía es transferido del electrón al fotón (****inverso de Compton****).*

$$e^-_a + \gamma_a \rightarrow e^-_b + \gamma_b$$

Gracias a todos estos efectos la acción gravitatoria pudo seguir consolidándose hasta estados impensables. En el fondo las casuísticas que hemos explicado

llevan impresas el concepto de la masa de Jeans: la temperatura y la densidad importan. Lo explicamos.

Teóricamente el pulso entre gravedad y presión lo describe la siguiente relación que define la masa mínima ("***crítica***") que se precisa para iniciar un proceso de compresión exitoso. La calculó a principios del siglo pasado el astrónomo James H. Jeans y se conoce como la ***masa de Jeans***:

La Masa crítica de la nube mantiene una proporcionalidad directa con la Temperatura e inversa con la Densidad

Lo cual es lógico, ya que cuanto mayor sea la temperatura → mayor será la velocidad de las partículas → mayor será la presión interna; y cuanto menor sea la densidad → menor será la energía gravitatoria. En el primer caso se requerirá una mayor masa para vencer la mayor presión, y en el segundo se requerirá también una mayor masa que refuerce el efecto gravitatorio. Es decir, a cualquier nube de gas sólo le hace falta ser lo suficientemente masiva y fría para que comience su colapso gravitatorio.

Además, un incremento de volumen va a ir a favor de la gravedad ya que la energía gravitatoria absoluta de la nube crece con la potencia quinta del radio (r^5), mientras que la de la presión que se contrapone solamente crece con la potencia tercera del radio (r^3).[7] Al aumentar el tamaño de la nube llegará un momento en que la gravedad será la que domine. Es curioso, porque parece contraintuitivo, que cualquier cantidad de masa pequeña también es capaz de colapsar venciendo a la presión, ya que también es decisivo cuánto de grande sea el espacio en donde se encuentra repartida. Si a una gran temperatura le confrontamos el escudo de una materia con pequeña densidad, pero repartida en un gran volumen, teóricamente con esa masa difusa podríamos a la larga compactar gravitatoriamente una zona del espacio sin que la presión del movimiento de las partículas del gas nos moleste. Ello nos dice que ***la casuística para el derrumbe gravitatorio puede ser teóricamente muy variada***. Es lo que nos dice la realidad. Si miramos las masas de gases que observamos a nuestro alrededor, veremos que dominan las nubes moleculares a 10 K con densidades de cincuenta protones por cada centímetro cúbico, que teóricamente pueden tardar en colapsar hasta cien mil años tras conseguir congregar una masa doscientas veces la de nuestro sol. Realmente pequeñas.

Así que los primeros efectos de compresión se debieron notar en los halos con una importante sobredensidad, por encima de la media, o en las grandes nubes de materia repartida en grandes volúmenes, aunque inicialmente tuvieran pequeñas densidades. Los átomos, moléculas y todo tipo de partículas seguirían unos movimientos aleatorios, no "caerían" verticalmente hacia el centro de atracción gravitatoria como cae una piedra en la Tierra. Durante estas erráticas

caídas chocarían unos con otros, se verían obstaculizados por las partículas cargadas que se movían de acuerdo con las líneas de campo del magnetismo de fondo del Universo e, incluso, las fuerzas gravitatorias tirarían de ellos de formas muy poco homogéneas… todo lo cual induciría unas trayectorias en zigzag y rotatorias, con densificaciones locales aleatorias que hacían imposible el que las fuerzas de la compresión fueran iguales en todos los puntos. Tampoco en todos los puntos el ventilador de fotones o las evaporaciones del halo actuarían con la misma intensidad, de tal manera que no todas las masas de moléculas o átomos, en sus caminos de aglomeración, ejercerían parecidas resistencias a la presión y la temperatura.

Dentro de las grandes masas las inestabilidades gravitacionales iban produciendo diversos núcleos compitiendo en la acreción de gases. Allí los momentos angulares de la materia iban conformando un especie de disco plano que giraba (*ver cuadro anexo al final del capítulo*). Entre estos núcleos algunos de menor tamaño, distribuidos aleatoriamente en el espacio, alcanzarían antes la masa de Jeans, por lo que, aquí y allá, comenzarían a verse subgrupos colapsando a su aire dentro de un núcleo gigantesco que lo hacía a su ritmo desde hacía mucho. Las interacciones de estos núcleos de segundo orden podían seguir la física de sistemas de tres cuerpos, lo que hacía que los núcleos más pequeños se fueran a la periferia del disco plano de acreción, con menos material, mientras los núcleos grandes se iban al centro en donde ganaban masa a gran velocidad. Nos parece ya ver cómo se iba dibujando un estado inicial en donde será fácil que se produjera las semillas en un rango extenso de masas estelares.

Una vez encendidas esas primeras estrellas apareció en el escenario lo que podía ser un contratiempo para el proceso. Los rayos ultravioleta exteriores rompían las moléculas refrigeradoras de H_2 o incluso ionizaban átomos en el interior de los mini halos crecientes. Y eso era peligroso para el proceso de gestación de una nueva estrella puesto que sabemos que podría provocar frentes de choque con posterior evaporación. A ello podríamos añadir además el que los campos magnéticos de fondo imprimirían movimientos azarosos en las recién nacidas partículas ionizadas, lo que sin duda también dificultaría la compactación gravitatoria. Sin embargo esos efectos eran menores dentro de los halos compactados que en sus alrededores, ya que la propia mayor densidad en el interior de aquellos serviría de blindaje frente a la cada vez más abundante radiación ultravioleta, que tendría dificultades para atravesar esas densidades.

Las grandes masas además jugaban con otro as: una masa más compactada supone una mayor temperatura interna… y recordemos lo dicho un poco más arriba que cuando la temperatura sobrepasa los 10^4 K, el ventilador atómico se hace realmente importante. Realmente su senda de crecimiento era potente. Mientras que los halos más pequeños que no llegaran a ese dintel de

temperatura, al perder su H_2 por la acción de la radiación UV y sin la posibilidad de que los átomos resultantes pudieran refrigerar, tendrían verdaderas dificultades para alumbra una estrella.

Estas primeras estrellas de Población III eran masivas, de vida corta y extremadamente brillantes. Las explosiones de supernovas de las más masivas, o la formación de agujeros negros, o la emisión de fotones UV, tendrían un impacto significativo en el entorno, alterando la densidad del gas y desencadenando o impidiendo la formación de nuevas estrellas. Por ello, es razonable pensar que una cierta sincronización en la formación de dichas estrellas dentro de un halo oscuro primigenio fue importante. Si la formación estelar hubiera sido demasiado dispersa en el tiempo, las primeras supernovas podrían haber dispersado el gas restante del halo antes de que otras regiones densas del gas tuvieran la oportunidad de colapsar gravitacionalmente y formar estrellas. Esto habría limitado la formación de cúmulos o incluso de las primeras galaxias, produciéndose un conjunto final más pobre que el que conocemos.

Todos los párrafos anteriores explican un proceso muy teórico, espero que ahora más claro, pero merecedor de poder verse mediante la contemplación de su belleza cósmica reflejada en la imagen anterior de la nebulosa Rosetta tal como la vemos ahora.[8]

Imagen actual de la nebulosa Rosetta, a 5.200 años luz de la Tierra, cuna de unas pocas estrellas que canibalizan la materia disponible para un mayor número de ellas (Imagen: NASA, dominio público)

Recapitulando. Inicialmente las zonas de grandes masas de materia oscura y gases bariónicos fueron las que antes corrieron hacia posiciones de compresión. Como consecuencia, se fueron formando cúmulos en los inicios de la historia universal. Cúmulos grumosos que podían estar construyendo en su interior

múltiples compactaciones locales apoyadas en la compresión global de su entorno. Cuando la densidad central de esos grumos locales llegaba a ser suficientemente alta, del orden de 2.000 átomos por cm^3, cada uno de ellos se auto blindaba, quedando indemnes a la acción de las fuentes ionizantes exteriores y pudiendo devenir en estrellas. Esto explicaría el por qué un gran cúmulo de gases no se transforma solamente en una gran estrella, sino que puede formar una familia de ellas que se comportan como un conjunto. Un proceso que se autorregula en sí mismo a través de circunstancias del entorno: la acción de los rayos ultravioleta propios o que venían de estrellas del exterior; o el influjo de las realimentaciones dinámicas que se producían en los gases intergalácticos, o en los propios cúmulos de las protoestrellas, tras las explosiones supernova al final de la vida de los primerísimos miembros de la Población III.

Y como una imagen vale más que mil palabras, adjunto ahora un esquema clarificador y autoexplicativo de lo que creemos que pasaba dentro de los halos de materia bariónica.

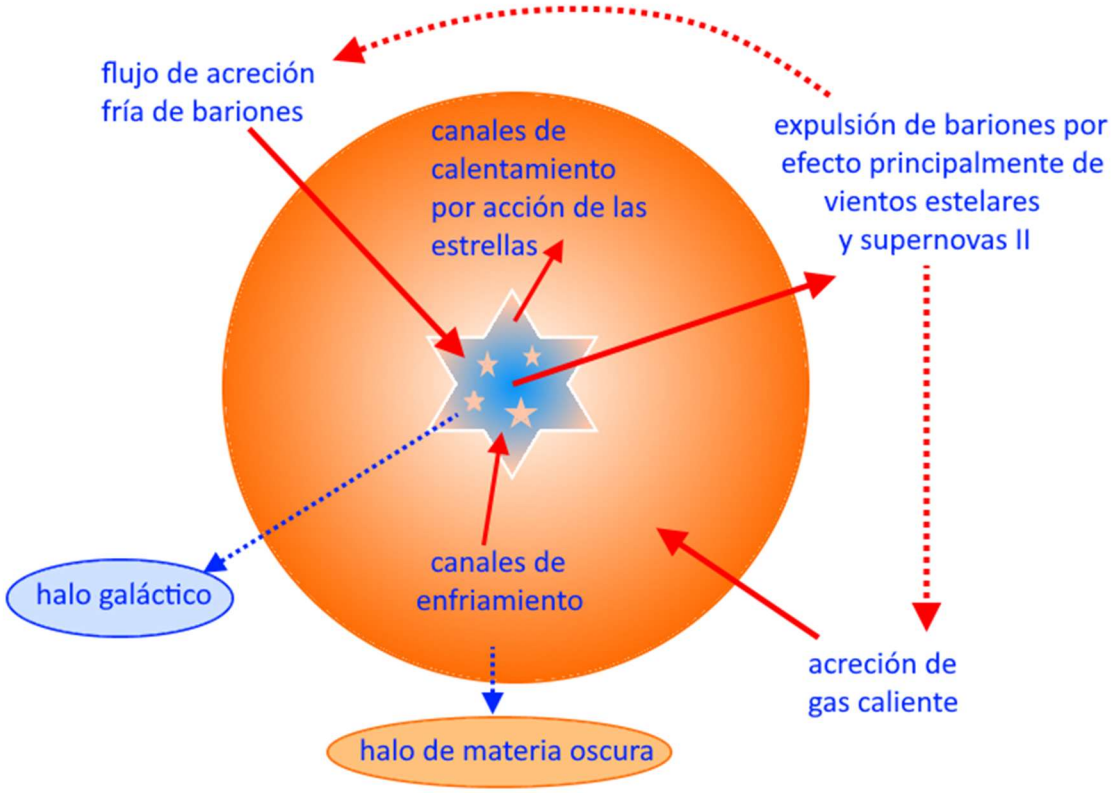
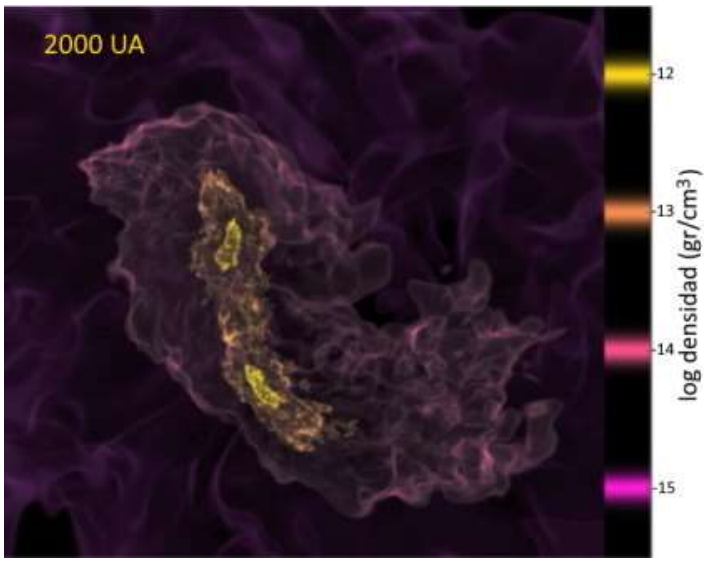


Diagrama del ciclo del flujo de bariones hacia el interior/exterior del medio interestela. [9]

Pero la vida continuaba y más tarde, dentro de cada uno de los puntos calientes del rosario de conglomeraciones que se produjo en el Cosmos, la gran presión y temperatura -que llegó a 104 K- forzaron la ruptura de las moléculas de

hidrógeno y helio. Tan pronto como la temperatura alcanzó valores como para permitirlo, estos átomos se ionizaron. En esos grumos todo volvió a ser algo que olía al plasma original; la radiación en cierta medida ya no volaba tan libremente y sus interacciones con la materia volvían a ser decisivas. Estos fueron unos momentos críticos para nosotros, ya que estas circunstancias iniciaron, en lo que iban a ser las primeras estrellas, los procesos de fusión a partir de las moléculas de hidrógeno disgregadas. El Universo se abrió a la posibilidad de enriquecer su nómina de elementos químicos… ¡qué seríamos nosotros sin el calcio o el magnesio, el carbono y el oxígeno.[10] Se estaban formando las primeras galaxias, esas que creemos haber visto con el telescopio Hubble en los primeros cientos de millones de años tras el Big Bang. Dentro de ellas tenían que habitar unas estrellas, aún no vistas, que se las conoce como de Población III, mucho más masivas que nuestro Sol, súper calientes y que debieron tener una vida fugaz, quizás unos 4 o 5 millones de años.



Resultado de una simulación de una región de formación estelar, libre de metales. Se observa que el halo de gas se ha fragmentado en dos núcleos, cada uno de los cuales probablemente albergará una estrella de Población III (Imagen de[11] Matthew J. Turk et al. Fair use.)

Lo "breve" de su existencia se explica ya que en aquel momento prácticamente todo era hidrógeno y helio. Y sucede que a partir de gases muy ligeros, lo que suponía densidades bajas, la compactación sólo se consiguió, según nos dice el ya mencionado equilibrio de Jeans, cuando acabó por reunirse la masa requerida como para que por su cuantía se hubiera alcanzado el necesario poder gravitacional. Y en las estrellas, incluidas las actuales, sucede que a mayor masa comprimiendo se necesita una mayor presión para contenerla, y eso solo puede ser consecuencia de una mayor viveza en las reacciones de fusión en su interior. Y eso implica una quema de combustible muy rápida y, por tanto, vidas muy cortas.

Todos estos procesos sucedían por primera vez cuando estábamos llegando al año 150 millones desde el momento inicial del Big Bang. Creemos que fue así porque aún no tenemos la capacidad técnica como para observarlos directamente. Quizás el telescopio James Webb, recién lanzado a su órbita en diciembre de 2021, pueda hablarnos de las primeras luces. Mientras, sólo haremos conjeturas en base a nuestros conocimientos, teorías y capacidades de cálculo. Hay muchos y detallados estudios que intentan dibujar el camino del pasado, desde la reionización hasta las protoestrellas. Creo pues que puede ser útil el introducir una visión teórica, puramente matemática, del proceso de conglomeración de materia hasta encenderse una estrella.

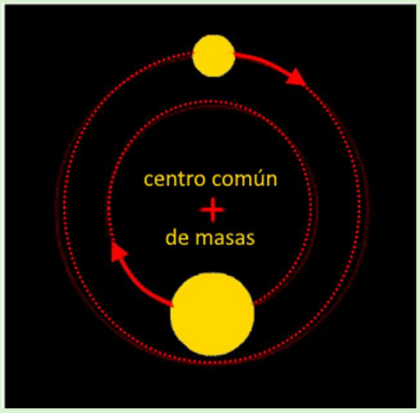
Pero eso merece un nuevo capítulo.

Acerca del momento angular y las sociedades de estrellas

En sus aleatorias trayectorias durante la compactación hacia el alumbrado de estrellas, las partículas que se movían y giraban, obligadas por el principio de conservación del momento angular, tenían que mantener ese momento.[12] Una vez que en un cúmulo se alcanza una densidad crítica, el colapso gravitacional comienza a dominar, el sistema experimenta una contracción significativa y la compactación toma el control a la acreción de materia. Este proceso implica una rápida disminución del radio que va a inducir un incremento de la velocidad de giro. Por lo que cada vez giraban más y más rápido, como peonzas dentro de los cúmulos de materia oscura que las portaban. La rotación acelerada producía un viento centrífugo de partículas que chocaban con las vecinas del exterior, ejerciendo sobre ellas un influjo de ralentización en su velocidad de caída gravitacional. Era como si se fuera generando un huevo aislado en cuyo interior la presión iba en aumento mientras que en su exterior todo quedaba más relajado.

De todas formas, un giro muy intenso podía provocar el que los movimientos fueran tan violentos que no se consiguiera la formación de estructuras. Para ello se necesitaba que concurriera algún otro fenómeno que disminuyera la tensión de giro. Uno de los procesos que con toda seguridad relajó el momento angular del conjunto fue la expulsión de grandes masas -arrastrando parte de la energía de giro- fuera del sistema. Pero fue más común, quizás por ser energéticamente más equilibrado, el mantener gran parte del momento angular dentro del sistema, siguiendo el procedimiento de que un pequeño grupo de concentraciones de masa se agrupase solidariamente -la unión hace la fuerza- contra el “enemigo”, manteniendo una equilibrada y auto mantenida dinámica

conjunta: estaríamos hablando por primera vez de lo que serían las semillas de estrellas que no irían apareciendo solitarias dentro de la nube de gas, sino en conjuntos de dos o más, lo cual aportaba un punto más de redistribución del momento angular al permitir un "escape" de la rotación hacia un baile conjunto de ellas alrededor de su centro de masas. Los modelos de cálculo nos dicen que, con el tiempo, tras violentos cambios gravitatorios, se debieron ir consolidando sistemas estelares en una proporción de 25 conjuntos triples por cada 65 dobles, dejando un resto de 35 estrellas solitarias como lo es nuestro Sol. Tal como lo vemos hoy en nuestros cielos.



Simulación del baile de dos estrellas de un sistema binario alrededor de su centro de masas marcado como una cruz roja (Wikimedia, dominio público)

NOTAS DEL CAPÍTULO 22:

1. Ya hablamos de la función catalizadora de los electrones en la reacción de formación de moléculas de hidrógeno en el capítulo 20. Las uniones químicas covalentes no son más que el resultado de que los átomos de los elementos se encuentran más cómodos en configuraciones semejantes a la del gas noble más próximo, por lo que tienden a tener la capa de electrones más externa absolutamente rellena. Así al hidrógeno le apetece parecerse en sus electrones a lo que tiene el helio, es decir, dos. Y para eso lo que hace es buscarse un partenaire con el que compartir para rellenar el primer nivel. Dos hidrógenos lo harán con un oxígeno y saldrá una molécula de agua, H-O-H. Dos hidrógenos se entenderán y formarán su molécula de H-H con una energía de enlace de 4,52 eV. Imaginad su fortaleza cuando en aquellos momentos la energía promedio del Universo rondaría las centésimas de un electronvoltio.

2. La energía térmica es proporcional a la velocidad media de los átomos y moléculas dentro del sistema de gases. Cuanto mayor será la violencia entre los choques que se produzcan mayor será su temperatura, y también mayor la presión interna generada. El límite para el equilibrio antes de que se pueda iniciar el colapso gravitacional es que la energía potencial sea el doble de la cinética. Ya se comentó en el capítulo 21 cuando hablamos de la virialización del halo.
3. En el capítulo 15 ya habíamos hablado un poco de la naturaleza de esos campos magnéticos y de su influencia en la configuración de las semillas de las estructuras del Universo.
   Se han encontrado campos magnéticos en muchos tipos diferentes de galaxias y cúmulos. Las galaxias espirales, incluida la nuestra, parecen tener campos magnéticos relativamente grandes en el entorno de los 10 μGauss y algunas (como la galaxia M82) contienen campos anómalamente intensos de hasta 50 μG. Las galaxias elípticas e irregulares también poseen fuerte evidencia de campos magnéticos, aunque son mucho más difíciles de observar debido a la escasez de electrones libres en estas clases de objetos. Los campos magnéticos también se observan en estructuras más grandes que las galaxias individuales, como en sus cúmulos, del orden de las unidades de μG. E incluso existe evidencia de campos magnéticos en escalas aún mayores: a lo largo del filamento entre el cúmulo Coma y el cúmulo Abell 1367 pudiera haber un campo magnético de 0,2 a 0,6 μG. Y en escalas cosmológicas más grandes solo sabemos de límites superiores para los campos magnéticos. Estos límites surgen de las observaciones del fondo cósmico de microondas y de la nucleosíntesis, que establecen que para escalas ≥10 Mpc las intensidades de campo son $\leq 10^{-8}$ Gauss.
   (A partir de "*Cosmological perturbations and their effects on the universe: from inflation to acceleration*", punto 3.2, Ethan R. Siegel, 2006.)
   [https://inspirehep.net/files/ec1c941296f11deee2c03c1f127ed213]
   Para una mayor información acerca de los campos magnéticos del Universo, también podéis leer los siguientes artículos: "*The Hidden Magnetic Universe Begins to come Into View*", Natalie Wolchover, Quanta Magazine, julio 2020 y "*El universo tendría un alma magnética invisible*", Eduardo Martínez de la Fe, Tendencias 21, 2021, en los siguientes enlaces:
   [https://www.quantamagazine.org/the-hidden-magnetic-universe-begins-to-come-into-view-20200702/]
   [https://tendencias21.levante-emv.com/el-universo-tendria-un-alma-magnetica-invisible.html]
4. Esas curvas dibujan las tasas de enfriamiento en función de la temperatura para un gas primordial compuesto de hidrógeno y helio atómicos, así como de hidrógeno molecular en ausencia de radiación externa. Se ha supuesto que la densidad numérica de hidrógeno es de 0,045 cm^{-3}, que correspondería a la densidad media de los halos virializados en z=10. El eje de ordenadas

está en unidades Λ/n^2_H donde Λ es la velocidad de enfriamiento del volumen (en erg cm3/seg). La línea sólida muestra la curva de enfriamiento para un gas atómico, el "ventilador cósmico fotónico", con los picos característicos debido a la excitación por colisión del H I (H) y de los iones He II (He^{++}). La línea punteada muestra la contribución adicional del enfriamiento molecular, la "excitación de un gas perturbado", asumiendo una abundancia molecular igual a 0,1% de n_H.
"*In the Beginning: The First Sources of Light and the Reionization of the Universe*", figura 12, Rennan Barkana, mayo 2001.
[https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0010468.pdf]

5. Algunos de los principales procesos refrigeradores tienen que ver con la relajación a nivel de las estructuras finas del oxígeno y del carbono, que emiten fotones de 63 y 158 μ respectivamente. La línea del C^+ puede acumular hasta el 1% de la emisión energética de una galaxia.
"*The Road to Galaxy Formation*", capítulo 10.3, William C. Keel, Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2007
6. La ***radiación de frenado*** o ***Bremsstrahlung*** es una radiación electromagnética producida por la desaceleración de una partícula cargada de baja masa (por ejemplo, un electrón) debido al campo eléctrico producida por otra partícula con carga (por ejemplo, un núcleo atómico). Este tipo de radiación fue descubierto por Nikola Tesla cuando hacía experimentos con altas frecuencias entre 1888 y 1897.
7. Lo podemos ver al analizar la relación que fija la condición con la que nos estamos manejando, es decir, que la energía gravitacional sea mayor que la energía térmica. Es la siguiente:

$$3/5\ [GM^2/R] > 3/2\ [M/\mu m_H]\ kT$$

en donde M, R y T son respectivamente la masa, que es proporcional a R^3, el radio y la temperatura de la nube.
8. Realmente la imagen que captamos de Rosseta ahora en la Tierra salió del lugar donde se situaba la nebulosa hace 5.200 años. La radiación de las estrellas jóvenes excita los átomos de la nebulosa haciendo que como reflejo emitan también radiación, dándole esta sensación de brillo.
9. Modificado de "*The first Galaxies in the Universe*", Abraham Loebe y Steven R. Furlanetto, figura 8.2, uso no commercial.
10. Si queréis saber de este misterio os recomiendo leer la entrada, de la que dejo más abajo el enlace, del blog "El Tamiz" que habla de ello en el contexto de las supernovas de tipo II.
[https://eltamiz.com/2007/12/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-supernovas-de-tipo-ii/]
11. Ver la publicación "A multi-code analysis toolkit for astrophysical simulation data", figura 4, Matthew J. Turk et al., The Astrophysical Journal, diciembre 2010.

[https://arxiv.org/pdf/1011.3514]

12. El ***principio de conservación del momento angular*** dice que si el momento de las fuerzas exteriores es cero -lo que no implica que estas fuerzas sean cero-, el momento angular total se conserva, es decir, permanece constante.

23: Con las gafas de las simulaciones

En los capítulos anteriores se hizo un relato de lo que pudo haber pasado desde el "momento" de la recombinación hasta el nacimiento de las primeras protoestrellas. Creemos que lo explicado tiene una alta probabilidad de que sea cierto, aunque aún no tenemos la capacidad técnica como para observar todos aquellos procesos de formación cósmica. Mientras, sólo haremos conjeturas en base a nuestros conocimientos, teorías y capacidades de cálculo.

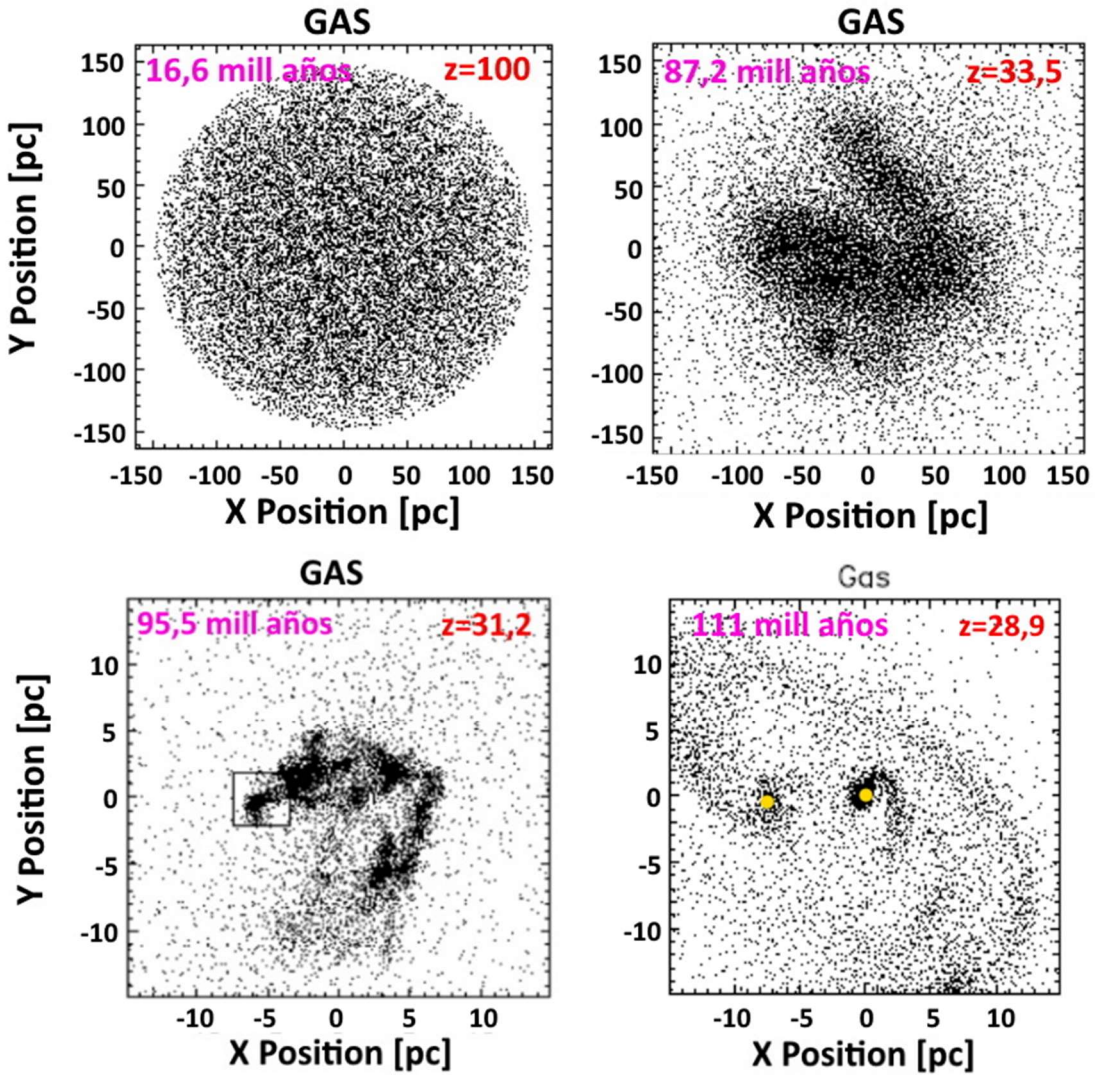
Los primeros núcleos fueron una consecuencia directa de la aparición de unas fluctuaciones lineales de densidad en el plasma primordial tras el Big Bang. Lo que nos hace pensar que las condiciones físicas iniciales de donde proceden están bien definidas y se conocen bien, y que la física de su formación se puede seguir con bastante precisión mediante simulaciones por ordenador. Por suerte esas condiciones iniciales fueron mucho más simples que las que participan en la formación de las estrellas en la actualidad, quedando totalmente especificadas por (i) la distribución de la densidad de las fluctuaciones cuánticas primigenias, por (ii) la densidad media de la materia oscura, por (iii) la temperatura y densidades del gas cósmico iniciales y por (iv) la composición primordial según nos dice la nucleosíntesis tras el Big-Bang. Por otro lado, la química primitiva era mucho menos sofisticada que la actual por la ausencia de metales, mientras que la dinámica de los gases era también mucho más simple ya que no había campos magnéticos dinámicamente significativos ni retroalimentaciones ejercidas por la radiación de los objetos luminosos, que aún no existían.

La simplicidad del conjunto de condiciones iniciales permite que la evolución de la cantidad y variabilidad de los núcleos semilla puedan ser completamente descritos mediante métodos analíticos, por simple cálculo a través de conocidas fórmulas; mientras que lo que sucede más tarde, el colapso y la fragmentación de las estructuras no lineales, podemos atacarlo mediante simulaciones numéricas. [1]

Los estudios de los primeros objetos bariónicos ofrecen la clave para avanzar en nuestro conocimiento sobre la física de la formación de las estrellas y de los agujeros negros masivos. Por suerte disponemos de muchos y detallados análisis que intentan dibujar el camino del pasado, desde la reionización hasta las protoestrellas. Creo pues que pueda ser útil el introducir una visión teórica, puramente matemática y proyectiva, del proceso de conglomeración de materia hasta encenderse una estrella.

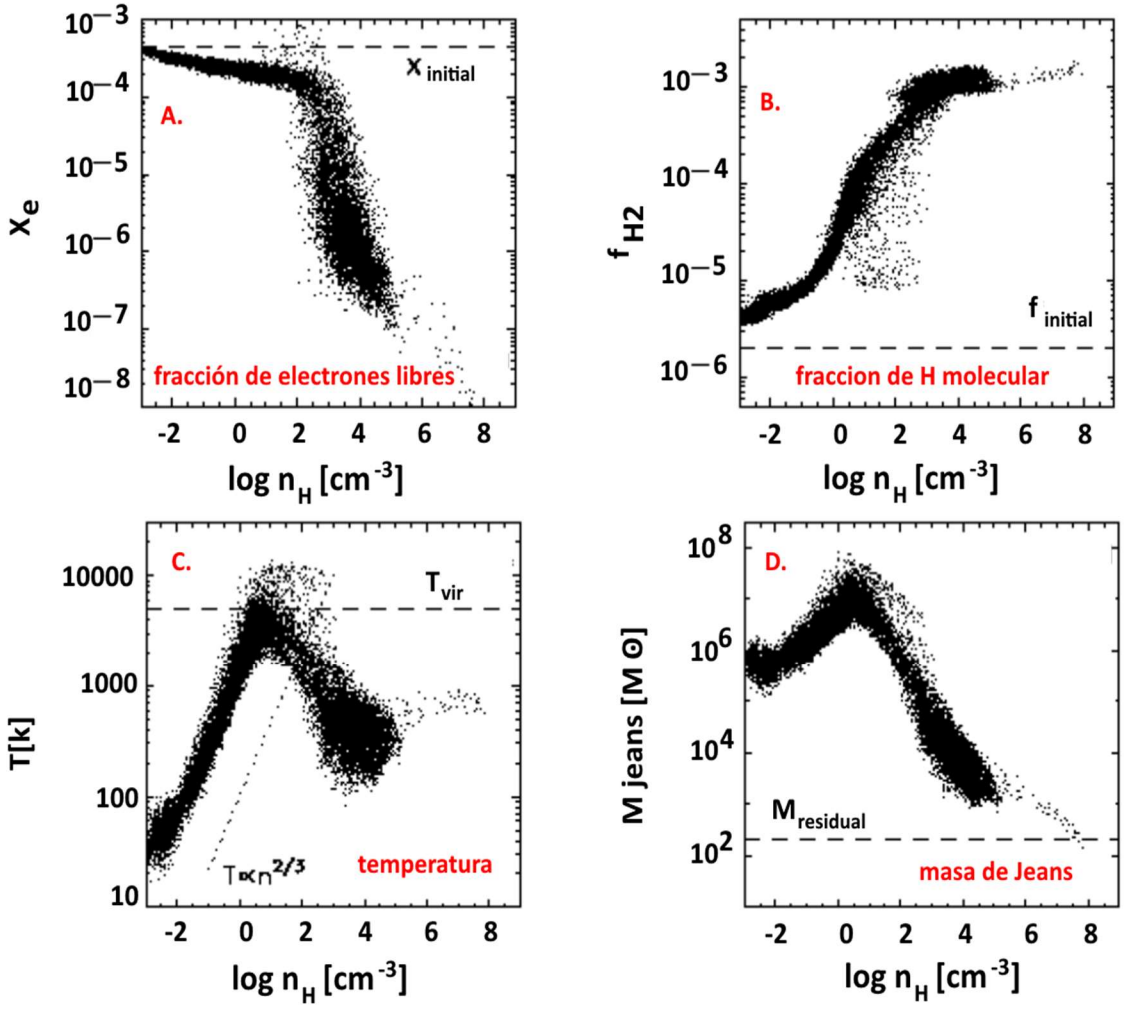
De la reionización al halo virializado

Vamos a empezar por el estudio hecho en 1999 por Volker Bromm y colegas, cuyas conclusiones nos van a servir de genial visualizador de lo que pasaba durante el colapso inicial de un halo de materia oscura previo al surgimiento de una proto estrella de Población III, las primeras en el Universo. [2] Se trata de una simulación acerca de cómo se comporta una cantidad total de materia de aproximadamente un millón de masas solares, en la que tan sólo un 5% son bariones. La simulación tiene en cuenta las dinámicas de ficticias partículas elementales de ambos tipos de materia, bariónica y oscura, en momentos cósmicos muy tempranos, en el entorno de los 100 millones de años tras el Big Bang.



Arriba se puede observar el resultado de la simulación que dibuja la secuencia de evolución de la materia bariónica dentro de un halo de materia oscura en tres momentos temporales consecutivos. Se observa cómo, a partir de una distribución uniforme inicial, los bariones van formando estructuras significativas a medida que van cayendo en los pozos de la materia oscura.

Estamos viendo solamente su distribución en un plano X-Y lo que perfectamente nos permite hacernos una idea de cómo el disco central de materia se va rompiendo en grumos de menor tamaño. Eso sucede tan pronto como a los 87,2 millones de años desde el Big Bang. La concentración preferente en el centro del halo se observa ya unos ocho millones de años después. Se observa también en el último cuadro la aparición de dos proto cúmulos -puntos amarillos-, de cerca de 20.000 veces la masa solar, a los 111 millones de años y que sobrevivirán sin fundirse entre ellos. Y aunque no se enseña en la secuencia la situación a los 100 millones de años, la simulación nos dice que en z=30 se va a producir la virialización del halo.



La imagen anterior muestra cómo van evolucionando los parámetros fundamentales que participan en la dinámica del gas bariónico de acuerdo con el logaritmo de la densidad del número de hidrógenos (por ejemplo, para el valor 4 el número de hidrógenos -protones- por cm^3 sería de 10^4). Como lo que estamos observando es la simulación del proceso de progresiva compactación de la materia en un halo, el eje de abscisas nos da también una aproximación bastante buena del transcurso del tiempo. Las cuatro nubes de puntos dibujan la situación concreta de una familia de partículas del gas bariónico. En las dos

de arriba quedan referenciados los dos tipos de población más importantes de la materia bariónica: a la derecha la fracción de electrones libres que aún no se han recombinado y a la derecha la fracción de hidrógeno que está en forma molecular. Abajo se informa acerca de la temperatura del halo en grados kelvin y de la teórica masa de Jeans en masas solares. Pasemos a su explicación.

En el cuadro A. vemos la población de electrones libres que aún no se han recombinado, población que progresivamente va a ir disminuyendo en el tiempo gracias a ese proceso. Es un poco la continuación de otra figura conceptualmente igual del capítulo 17. De aquel capítulo sabemos ya que la fase de recombinación duró unos cuantos millones de años, posiblemente hasta un corrimiento al rojo de unos pocos centenares, durante los que los electrones libres iban realizando una importante labor al catalizar una abundante población de moléculas refrigeradoras de hidrógeno. Al principio el enfriamiento se veía superado por el calentamiento de la compresión, pero a partir aproximadamente del momento de la virialización, que coincide con la de los últimos vahídos de la recombinación, con densidades del hidrógeno de 10^2 protones por cm^{-3}, ya pudo actuar con todo esplendor de forma muy eficiente el ventilador molecular de hidrógeno como podemos ver en el cuadro C.

El cuadro B. dibuja perfectamente esa población de hidrógeno molecular en franco crecimiento hasta que la recombinación capturó a la mayoría de los electrones libres que catalizaban su formación, tras lo cual la generación de sus moléculas prácticamente finalizó.

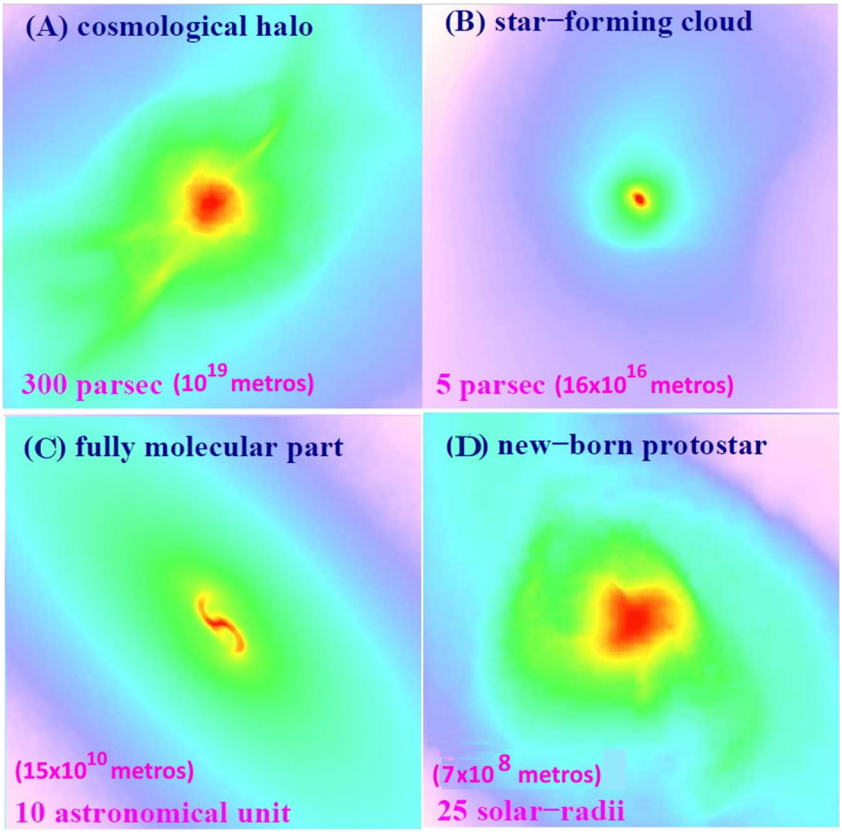
En el cuadro C. vemos como la temperatura del gas va creciendo casi linealmente debido a la compresión hasta que alcanza la de virialización de T~ 5.000 K. A medida que se va incrementando la densidad el enfriamiento proporcionado por las moléculas de H_2 se va haciendo cada vez más eficiente de forma que fue bajando la temperatura hasta el nivel permitido por las energías de vibración moleculares próximas en promedio a 512 K, [3] cuando la densidad estaba en el entorno de los 10^4 protones por cm^{-3} (densidad crítica de partículas).

Como ya sabemos de un capítulo anterior la masa de Jeans (MJ) es proporcional a la temperatura. Y eso es lo que se aprecia ***en el cuadro D***. en donde podemos ver como la MJ va creciendo con la caída de bariones en el pozo hasta alcanza un valor aproximado de 10^3 veces la del Sol coincidiendo con el momento en que el halo se ha virializado. A partir de ese punto la MJ disminuye puesto que la temperatura disminuye mientras la densidad sigue aumentando (ya sabemos que la MJ es inversamente proporcional a la densidad). Con la masa bariónica incorporada en el centro del pozo de la materia oscura la MJ se estabiliza en el valor de 200 masas solares.

Del halo virializado a la proto estrella

Tenemos por tanto un halo virializado con un centro en donde pudiera concentrase el material bariónico con una densidad de 10^4 hidrógenos por cm^3. Sentimos la curiosidad de saber cómo continúa su vida.

Tenemos ayuda. Vamos a acudir a un nuevo estudio, una nueva simulación, que nos va a llevar de la mano hasta una proto estrella. De las primeras primerísimas. Se trata del realizado en 2008 por Naoki Yoshida y colegas, "*Protostar Formation in the Early Universe*". [4]



Parten de una población de materia oscura y bariónica en un volumen cúbico de 200 kilopársecs de lado, en un Universo de 300 millones de años cuando z=14. El gas dentro de ese halo estaba a 1.000 K y su densidad era de 10^{-4} moléculas de hidrógenos por cm^3 (***cuadro (A) de la secuencia anterior***). Momento en que, según las curvas del estudio anterior de Volker Bromm, el "ventilador" de moléculas de hidrógeno ya empezaba a resultar efectivo. Debido a ello ya sabemos que se había facilitado la compactación de un núcleo de gas dentro del halo de materia oscura hasta un punto en que desaparece el hidrógeno molecular. A partir de aquí continúa la historia porque nuestro halo sin sus ventiladores comienza a aumentar su temperatura interna hasta que la presión térmica para la acreción de la parte central de la nube de gas permite iniciar el proceso de creación de una proto estrella. A partir de allí se cree que la evolución pasa a ser bastante compleja. **(*cuadro B*)**

Inicialmente se había formado una nube con materia aproximada a una masa solar y una densidad de 10^8 hidrógenos por cm^3 (momento que parece la continuación temporal del estudio de Bromm). En ese momento la densidad es suficientemente grande como para que se active una nueva química que hace renacer la "ventilación". Reaparecen las moléculas de hidrógeno a través de ese tipo de reacciones químicas:

$$H + H + H \rightarrow H_2 + H \qquad H + H + H_2 \rightarrow H_2 + H_2$$

por las que prácticamente todo el hidrógeno vuelve a pasar a su forma molecular.

El enfriamiento se reanuda y la compactación se intensifica hasta un punto en que la densidad es tal que ya no pueden escapar los fotones refrigerantes. Se llega a densidades mayores a 10^{14} hidrógenos por cm^3 momento en que los choques son tan frecuentes que la energía disipada en ellos se constituye en otra forma de ventilación. Esas emisiones tienen una dirección preferente que corresponde a aquella en que la compactación se estaba haciendo más rápidamente, a mayor velocidad. Como consecuencia de ello una pequeña parte del centro bariónico, del orden de 0,1 masas solares, se enfría formando una estructura semejante a un disco plano con un radio de unos 10^8 kilómetros. Como la parte exterior del disco seguía un proceso de compactación más lento, se generan unas ondas espirales de materia que acaban adosando dos brazos al núcleo central que consiguen una estabilidad gracias a su giro.

(*cuadro C*) Cuando en el centro la densidad alcanza un valor tan grande como 10^{18} hidrógenos por cm^3, la materia bariónica es tan densa que se hace opaca para la radiación, terminando definitivamente la vida de nuestros ventiladores fotónicos. Con una segunda derivada anti refrigerante y es que en esa loca dinámica los choques acaban disociando a las moléculas de hidrógeno.

En esos momentos el gas se compacta adiabáticamente sin más interferencias, lo que hace crecer a la temperatura del núcleo central hasta varios miles de kelvin mientras la densidad escala hasta 10^{20}. El término adiabático hace referencia a la imposibilidad de transferencia de calor con el entorno. Al final del proceso se habrá generado una protoestrella con una masa un 1% de la solar. En su interior la densidad habrá llegado a los 10^{21} hidrógenos por cm^3 y la temperatura superior a 10^4 K. **(*cuadro D*)**

Fragmentación en el disco protoestelar

Ya tenemos un disco en el que parece que va asomando la nariz una incipiente primera estrella. No va a tener una evolución fácil ya que hay motivos para pensar que el disco donde se va gestando puede romperse y fragmentarse, de forma que va a poder ser la incubadora de más de una estrella. Para entender el

proceso vamos a seguir los resultados de una nueva simulación realizada en 2011 por Paul C. Clark y colegas, "*The Formation and Fragmentation of Disks around Primordial Protostars*". [5]

La fragmentación puede verse iniciada a través del influjo de varios posibles mecanismos impulsores que implican inestabilidades en las masas de gas tales como inestabilidades gravitatorias, turbulencias o desequilibrios termodinámicos. Esas inestabilidades pueden ser contenidas en un sistema estático por la presión que se opone a la compactación gravitatoria y en uno dinámico además por la fuerza centrífuga generada por el movimiento de giro que proporciona una elemento estabilizador adicional. Entonces, para iniciarse una inestabilidad que lleve al colapso, la gravedad no sólo tendría que superar la presión interna del gas, sino que también va a necesitar solventar el problema que supone la distinta fuerza centrífuga a que se ven sometidas dos regiones que giren a distintas distancias del centro y que por definición tienen que colapsar juntas. [6]

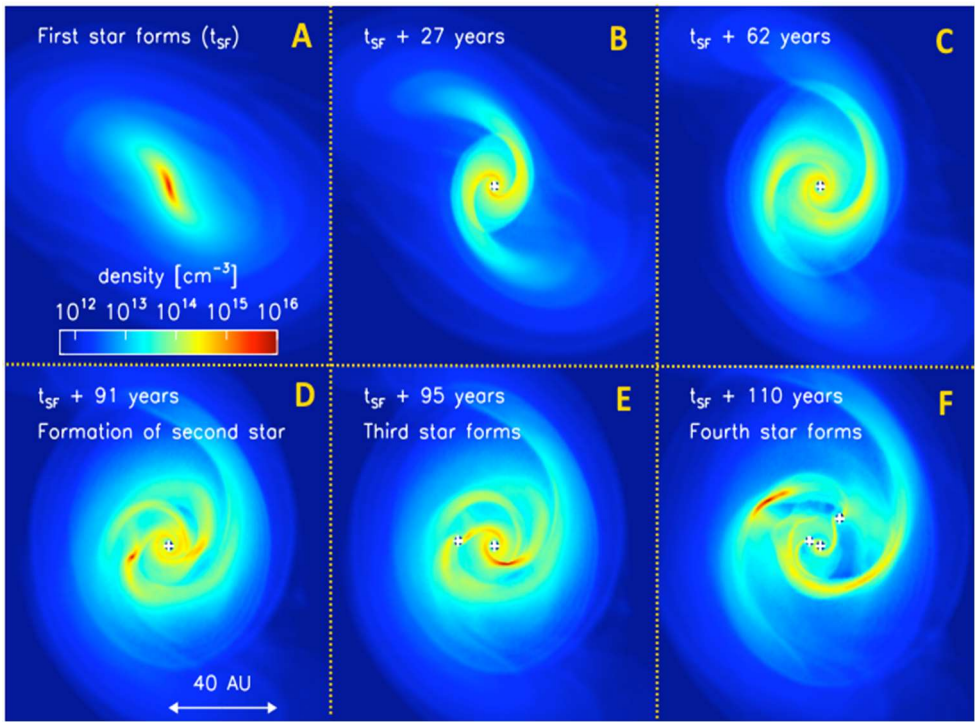
A pesar de los mecanismos de contención, a veces se producen asimetrías no axiales que disturban la estabilidad del disco, movimientos que "molestan" el colapso, que incluso puede verse compensado o, en último término, deshacer el halo. Todo ello se va a traducir en perturbaciones que no pueden ser controladas ni por la gravedad ni por las fuerzas rotacionales, lo que va a llevar al disco a su fragmentación.

Según las simulaciones que comentamos, inicialmente se producen una serie de circunstancias que van a favorecer la aparición de estas inestabilidades, aunque poco a poco la realidad es que la densidad y la temperatura del disco tiende a permanecer constantes en su mayor parte, por lo que se pierde la capacidad de acrear más masa hacia su centro. Para continuar la compactación en un régimen propicio a las desequilibrios que nos lleven a la generación de múltiples protoestrellas se debe reactivar algún tipo de "ventilador cósmico", que como veremos serán causa para inducir nuevas inestabilidades y fragmentaciones.

En esos momentos de aparente pausa en el disco aparece el fenómeno conocido como "*emisión inducida por colisión*" y que es causado por los choques de las moléculas de H_2 con las de otras poblaciones como el H, el He o el mismo H_2. En esas interacciones se forman super moléculas que se comportan como un dipolo eléctrico que lo mismo actúa como emisor de fotones como de sumidero. Este método de refrigeración permite que el gas se enfríe durante los primeros momentos de la fragmentación y va actuando hasta que la densidad del gas es mayor a 10^{16} hidrógenos por cm^3, momento en el que el ventilador se para y la temperatura vuelve a crecer. Pero de nuevo hay un cambio de tendencia ya que a $T>10^3$ K *el H_2 se disocia* dejando en cada disociación 4,48 eV libres que

abandonan a lomos de fotones la masa del gas. Hay que decir que todas esas excursiones de temperatura provocan también inestabilidades y fragmentaciones del disco.

Aún hay una tercera causa que favorecerá la inestabilidad y que se debe a ciertas turbulencias inducidas por una *forma muy curiosa de acrear gas que se califica como "fría"*. Las masas así acreadas forman mini halos desde donde se transportan en forma de filamentos de materia que no interaccionan con el halo hospedador hasta que llegan a chocar supersónicamente con el centro de este provocando nuevas fragmentaciones. Hasta aquí el contexto general.



La imagen anterior es una representación visual de los resultados de la simulación de Paul C. Clark que incorpora la tipología de perturbaciones explicada. El sujeto del crimen es un disco donde se está gestando una estrella de Población III y el cálculo matemático nos indica que, en un primer momento, hacia el año 100 tras la formación del primer núcleo protoestelar, el disco adopta una configuración en espiral desarrollando estructuras que son asimétricas con respecto a su eje y que a la postre van a dibujar inestabilidades locales (***Cuadro A***). Durante los primeros 60 años la estructura del disco se ve fuertemente dominada por una disposición en forma de espiral con dos brazos (***B y C***) mientras poco a poco se va separando un segundo núcleo protoestelar a unas 20 Unidades Astronómicas del primero.

A los 90 años el disco ha duplicado su tamaño (***D***) y aunque la forma de la espiral comienza dibujando una perfecta simetría, rápidamente vemos que desarrolla estructuras que no son simétricas con el eje. En las imágenes ***D***, ***E*** y

F se divisan unas incipientes zonas coloreadas de rojo. La semilla de futuras estrellas.

Ya sabemos que para que una región del disco forme una nueva estrella, debe ser capaz de liberarse del calor generado a medida que colapsa y, además, debe hacerlo antes de que los movimientos del disco lo fragmenten. En el caso de un disco protoestelar primordial, con densidades alrededor de 10^{12} a 10^{14} hidrógenos por cm^3, este enfriamiento lo proporciona el hidrógeno molecular. En los centros de los brazos espirales, o en zonas con densidades numéricas de alrededor de 10^{14}, el enfriamiento por emisión inducida por colisión del H_2 comienza a dominar permitiendo que la fragmentación gravitacional inicial tuviera lugar en los brazos espirales. A densidades superiores, 10^{16}, el gas se vuelve ópticamente opaco para los fotones inducidos por los choques por lo que el disco vuelve a calentarse de nuevo a medida que se comprime.

Así que el gas de uno de los brazos de la espiral se vuelve inestable, empieza a colapsar, y forma una segunda protoestrella a una distancia de 20 UA de la primera. La masa de la primera es de tan solo la mitad de la del Sol (**D**). La fragmentación no se detiene con la formación de una segunda protoestrella. Solo cuatro años después de la fragmentación inicial del disco, una franja densa de un brazo espiral vecino también se fragmenta, formando una tercera protoestrella (**E**). Quince años después el disco se fragmenta de nuevo una vez más de forma que las protoestrellas evolucionan hasta convertirse en un caótico sistema múltiple (**F**). A lo largo de las etapas de la evolución que se muestra en la secuencia anterior de imágenes, poco menos de una masa solar de gas se va a convertir en protoestrellas y, por lo tanto, podemos asegurar que el sistema aún se encuentra en plena infancia. Poco a poco el disco pierde la capacidad de fragmentarse una vez que el calentamiento de las protoestrellas sea lo suficientemente fuerte como para disociar todo el H_2, eliminando así el método de refrigeración principal. Aun así el sistema continuará acumulando gas que sigue cayendo desde la envoltura exterior, hasta que una de las protoestrellas hermanas se caliente lo suficiente como para ionizar el gas y evaporarlo, lo que finalmente va a ser el definitivo fin de la acreción.

Hoy en día observamos como las turbulencias comentadas son un factor muy importante en los procesos “normales” de formación de estrellas que viven en momentos próximos al nuestro. Sabemos, sin ninguna duda, que son las responsables de producir la fragmentación de grandes nubes moleculares que se dividen en una panoplia de núcleos protoestelares dentro un rango de masas muy grande. Por lo que no es de sorprender el hecho de que las simulaciones para z’s mayores nos propongan algún proceso similar como causa de la rotura de los halos bariónicos durante la época de las antiguas estrellas de Población III.

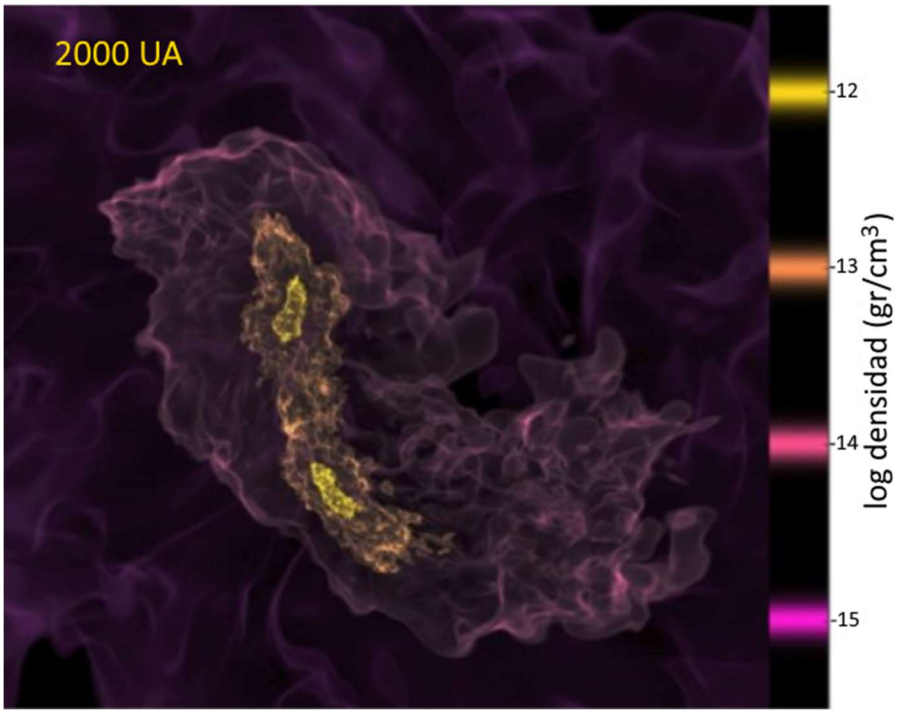
En el camino hacia las proto galaxias

Una vez que hemos completado este teórico recorrido por los primeros escenarios tras la recombinación, retomamos el escenario donde encaja la teoría para asomarnos a los primeros alumbramientos de estrellas. Dentro de cada uno de los puntos calientes del rosario de conglomeraciones que se produjo en el Cosmos, la gran presión y temperatura -que llegó a 10^4 K- forzaron la ruptura de las moléculas de hidrógeno y helio. Más tarde, tan pronto como la temperatura alcanzó valores como para permitirlo, estos átomos se ionizaron. En esos grumos todo volvió a ser algo que olía al plasma original; la radiación en cierta medida ya no volaba tan libremente y sus interacciones con la materia volvían a ser decisivas. Estos fueron unos momentos críticos para nosotros, ya que estas circunstancias iniciaron, en lo que iban a ser las primeras estrellas, los procesos de fusión a partir de las moléculas de hidrógeno disgregadas. El Universo se abrió a la posibilidad de enriquecer su nómina de elementos químicos… ¡qué seríamos nosotros sin el calcio o el magnesio, el carbono y el oxígeno. [7] Se estaban formando las **primeras galaxias**, esas que creemos haber visto, con los telescopios Hubble y James Web, situadas en los primeros cientos de millones de años tras el Big Bang. Entre ellas la que conocimos en el capítulo 21, GN-z11. Dentro de ellas tenían que habitar unas estrellas, aún no observadas, que se las conoce como de Población III, en su mayoría mucho más masivas que nuestro Sol, súper calientes y que debieron tener una vida fugaz, quizás de unos 4 o 5 millones de años.

Lo "breve" de su existencia se explica ya que en aquel momento prácticamente todo era hidrógeno y helio. Y sucede que, a partir de gases muy ligeros, lo que supone densidades bajas, la compactación sólo se consigue acumulando una gran masa, según nos dice el ya mencionado *equilibrio de Jeans*. Y en las estrellas, incluidas las actuales, sucede que a mayor masa comprimiendo se necesita una mayor presión para contenerla, y eso solo puede ser consecuencia de una mayor viveza en las reacciones de fusión en su interior. Lo que implica una quema de combustible muy rápida y, por tanto, vidas muy cortas.

El proceso en su conjunto debió ser espectacular. A medida que se iba compactando la nube de gas el ventilador de fotones iba haciendo su papel, cada vez con mayor intensidad al irse incrementando la temperatura de la nube que se apelmazaba. A lo largo de la larga "caída gravitatoria" se cree que la mitad de la masa se transformó en energía calorífica que iba siendo irradiada al exterior gracias a sus mecanismos de enfriamiento, radiación que tenía que ser más intensa a medida que la masa compactada alcanzaba más y más temperatura. Durante un brevísimo instante de tiempo nuestro *proyecto de estrella* brilló con una luminosidad infrarroja superior a la de 10.000 soles. Luego llegó el momento en que comenzó la fusión nuclear, de forma que este cuerpo de gas irradió nuevos fotones mucho más energéticos. El conjunto debió

de ser como un prolongado *flash* de luz que pasó del no visible infrarrojo a un continuo espectro luminoso… y más.



Resultado de una simulación de una región de formación estelar, libre de metales. Se observa que el halo de gas se ha fragmentado en dos núcleos, cada uno de los cuales probablemente albergará una estrella de Población III (Imagen de [8] Turk et al., 2009, ⓕ fair use)

Se había encendido la luz de las estrellas y el Universo, que hasta entonces había sido oscuro, comenzó a ser un espectáculo luminoso, parte de la cual se encontraba dentro de la escala de frecuencias detectables por un ojo biológico. Sí, efectivamente, entonces no había ojos, lo cual no quita ningún ápice al esplendor del momento.

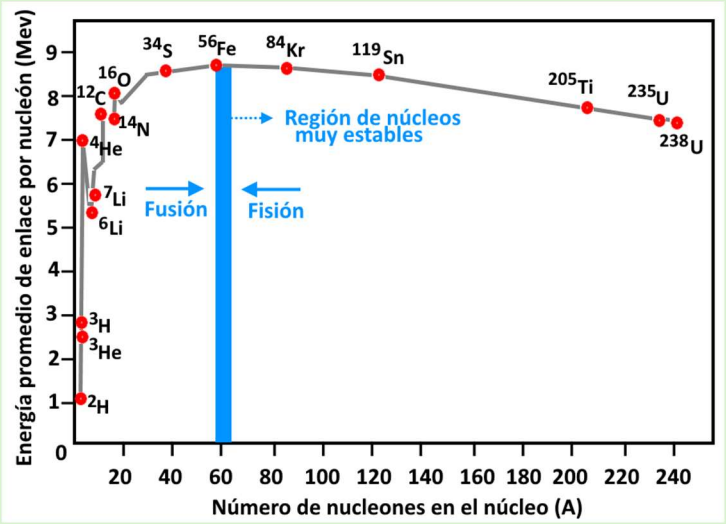
Aunque a la par algo iba sucediendo. Cosa que veremos en el siguiente capítulo

Sobre la fusión nuclear (en las estrellas)

La fusión es el proceso por el que varios núcleos atómicos se unen y forman un núcleo más pesado. Para ello tienen que contrarrestar el rechazo electrostático que generan las cargas positivas de los dos núcleos para que pueda intervenir la fuerza nuclear fuerte y fusionarlos. Eso se puede conseguir en entornos con

grandes presiones que generan altas temperaturas, las cuales son capaces de "empujar" a ambos núcleos hasta posiciones muy próximas que permitan el proceso.

La curva siguiente muestra cómo varía la energía de enlace por nucleón en función de los diferentes elementos químicos. Cuando un núcleo se forma, lo hace porque representa una configuración más estable que los nucleones separados, ya que la interacción nuclear fuerte los une, situándolos en un estado de menor energía. Cuanto mayor sea la energía de enlace que mantiene unidos a los nucleones, más estable será el núcleo. Según la equivalencia entre masa y, esta estabilidad implica que la masa del núcleo formado es menor que la suma de las masas de los nucleones individuales. La diferencia de masa, conocida como defecto de masa, corresponde a la energía de enlace repartida entre los nucleones.



En la gráfica anterior, se observa que los <u>núcleos a la izquierda del hierro</u> tienden a fusionarse porque el núcleo resultante tiene una mayor energía de enlace por nucleón, lo que se traduce en una mayor estabilidad. Durante la fusión, es necesario superar la repulsión electrostática entre los núcleos iniciales, lo que requiere un aporte inicial de energía. Sin embargo, al unirse los núcleos y formar un núcleo más estable, se libera una cantidad de energía mayor que la utilizada para iniciar el proceso. Este intercambio de masa y energía, descrito por la relación $E=mc^2$, es más eficiente cuanto más cercano esté el producto final al hierro, que posee la mayor energía de enlace por nucleón de todos los elementos de la tabla periódica.

Por el contrario, en los elementos más pesados que el hierro, la situación se invierte: para fusionarlos sería necesario aportar más energía de la que se liberaría, lo que hace que estos elementos no tiendan a la fusión. Su estabilidad, en cambio, los orienta hacia procesos de fisión, donde se dividen en núcleos más pequeños y estables, liberando energía en el proceso.

Hay varias formas por las que en el interior de las estrellas *se produce la actividad de fusión en sus hornos nucleares. Como sabemos, las nubes que se condensaron hasta generar una estrella prácticamente eran de hidrógeno. Hablar del encendido nuclear es, por tanto, hablar de las reacciones del hidrógeno. Como resumen general diremos que en el proceso se quema H+ (desaparece $^{1}H^{+}$), aparece $^{4}He^{2+}$ y sale cantidades ingentes de energía transportada por fotones y neutrinos.*

Para ello hay varias maneras. Cuál vaya a ser el elegido dependerá de la masa de la estrella. Si el equilibrio radiación/gravedad permitido por la masa hace que en el núcleo persistan temperaturas de hasta unos $25x10^{6}$ K, lo que significa estrellas medianas, va a estar presenta la ***cadena protón-protón****. Si las masas son mayores, se generarán temperaturas aun superiores a la mencionada y entonces entrará en funcionamiento el* ***ciclo CNO*** *(carbono-nitrógeno-oxígeno). A continuación se plantea de forma muy somera las reacciones correspondientes a ambos procesos.*

1. <u>Cadena protón-protón</u>

$$protón^{+} + protón^{+} \rightarrow deuterio^{+} + positrón^{+} + neutrino_{electrónico}$$

De los dos núcleos iniciales de H, cada uno de los protones, uno se ha transmutado en un neutrón del deuterio gracias a la participación de la energía nuclear débil. Hay muchísimos electrones libres en el plasma estelar dispuestos a aniquilarse con sus antipartículas los positrones, dando un par de fotones: $electrón^{-} + positrón^{+} \rightarrow 2\ fotón$

Los neutrinos huirán a toda velocidad fuera de la estrella y hasta el infinito llevando energía en sus ondas. Los fotones tras una serie temporalmente larguísima de choques consiguen salir de la estrella y perderse en el espacio llevando también energía en sus ondas.

Seguimos con el devenir de las reacciones de fusión:

$$deuterio^{+} + protón^{+} \rightarrow {}^{3}He_{2}{}^{++} + fotón$$

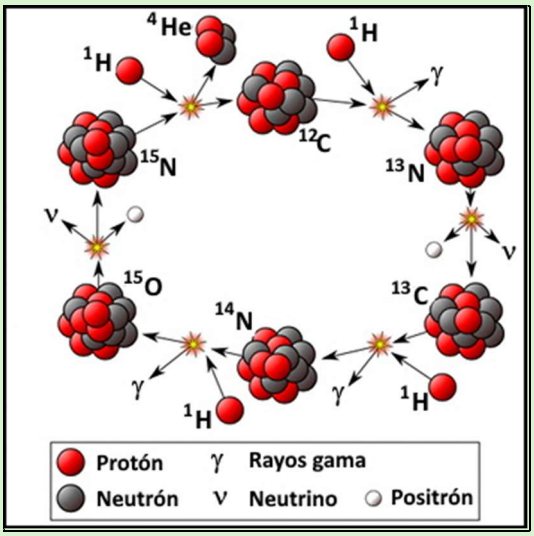
$${}^{3}He_{2}{}^{++} + {}^{3}He_{2}{}^{++} \rightarrow {}^{4}He_{2}{}^{++} + protón^{+} + protón^{+}$$

Los nuevos protones se incorporan al juego de las fusiones mientras queda el helio como producto de ellas. La energía se fue con neutrinos y fotones.

Esas son las reacciones más normales en las estrellas. Aunque además hay otras alternativas para el tercer paso en donde intervienen el litio o el berilio, pero siempre con el mismo resultado: desaparecen protones, aparece ^{4}helio y mucha energía a cuestas de fotones y neutrinos.

*2. **Ciclo CNO***

Como es un poco farragoso para explicarlo con palabras y una imagen vale más que mil palabras, aquí va el ciclo CNO.



Ciclo CNO de fusión del hidrógeno en los hornos estelares (Imagen modificada de wikipedia, Borb, dominio público)

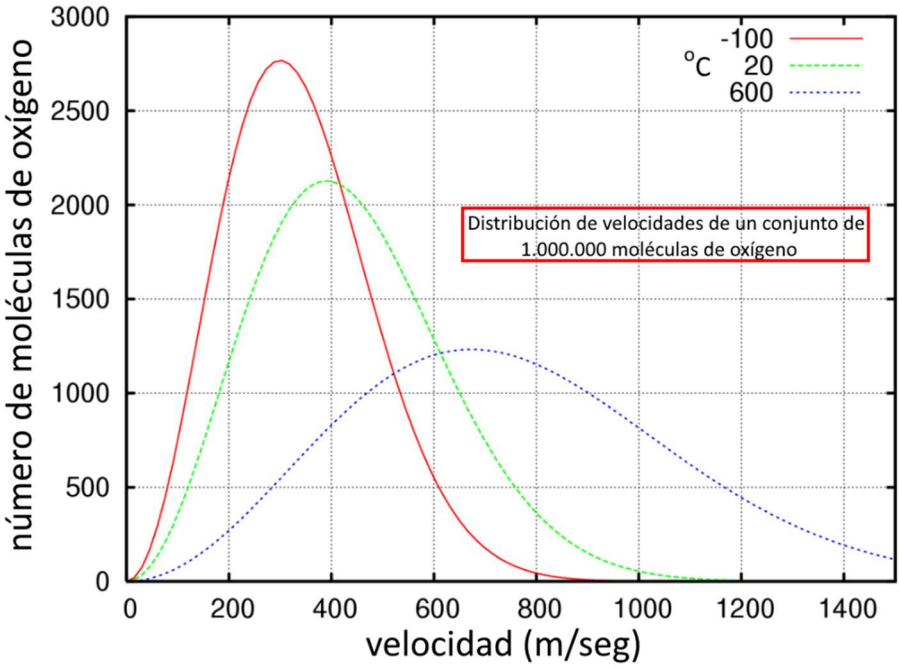
$$4\ protón^{+} \rightarrow {}^{4}He^{++} + 2\ positrón^{+} + 2\ neutrino$$

El resultado neto del ciclo es la fusión de cuatro protones en una partícula alfa, ${}^{4}He^{++}$, y la liberación de dos positrones, que con su electrón darán fotones(energía), dos neutrinos (energía) y más fotones (energía) en el rango de los rayos gamma. Los núcleos usados de carbono, oxígeno y nitrógeno sirven como catalizadores y se regeneran en el proceso.

NOTAS DEL CAPÍTULO 23:

1. "*In the Beginning: The First Sources of Lightband the Reionization of the Universe*", Prefacio, Abraham Loeb y Rennan Barkana, mayo 2001. [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0010468.pdf]
2. "*The formation of the first stars. 1. The primordial star forming cloud*", Volker Bromm et al., 1999. [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0102503.pdf]

3. Realmente la temperatura mínima a la que eso comienza a suceder es de alrededor de 200 K, menor que los 512 K indicados en el texto, ya que la distribución estadística de las velocidades de las partículas así lo permite. Esta distribución teórica, conocida como de Maxwell-Boltzmann se prolonga con una cola en el campo de las altas energías como vemos en el caso de la curva siguiente para el oxígeno.



Es en esa cola donde la temperatura del gas que se comprime en un halo presenta una desviación estadística hasta los 200 K frente a la más probable de 512 K.

4. "*Protostar Formation in the Early Universe*", Naoki Yoshida et al., Science, agosto 2008.
[https://arxiv.org/pdf/0807.4928.pdf]

5. "*The Formation and Fragmentation of Disks around Primordial Protostars*", Paul C. Clark et al., Science, febrero de 2011.
[https://arxiv.org/pdf/1101.5284.pdf]

6. En un disco de gas que gira conceptualmente podemos imaginar dos regiones circulares muy definidas por las dos condiciones de equilibrio frente a la compresión gravitatoria. Una que corresponde a donde la presión interna se encarga del trabajo y otra donde, además, los giros diferenciales se encargarán de generar fuerzas centrífugas que se oponen a la compactación. La primera la define el radio de Jeans L_J (concepto parejo al de masa de Jeans) lo que nos permite imaginar que si el halo es mayor que ese radio ganará la gravedad. La otra zona está definida por el radio de rotación L_r que si es superado por el tamaño del halo las fuerzas centrífugas acumuladas en este van a poder con la gravedad. Luego la gravedad solo podrá compactar si el radio del halo está entre estas dos distancias, L_J y L_r. Y solo sucederá si L_r es mayor que L_J. Si son iguales el halo permanecerá

en equilibrio: no se producirán inestabilidades en un disco de acreción que gire diferencialmente siempre que se cumpla el *criterio de Toomre* definido por la siguiente desigualdad

$$c_s k/\pi G\Sigma > 1$$

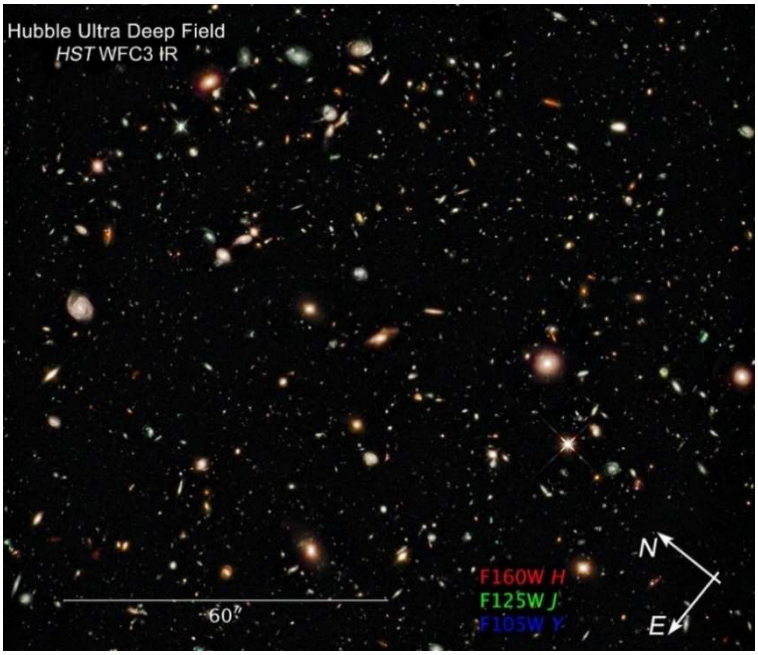
siendo c_s la velocidad del sonido, k la frecuencia con que oscilará una parte del gas del disco si se desplaza radialmente, G la constante gravitatoria y Σ la densidad superficial del disco.
[https://docplayer.es/65696471-Inestabilidades-la-longitud-de-jeans-y-el-criterio-de-toomre.html]

7. Si queréis saber de este misterio os recomiendo leer la entrada, de la que dejo más abajo el enlace, del blog "*El Tamiz*" que habla de ello en el contexto de las supernovas de tipo II. [http://eltamiz.com/2007/12/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-supernovas-de-tipo-ii/]

8. *A multi-code analysis toolkit for astrophysical simulation data*", figura 4, Matthew J. Turk et al., The Astrophysical Journal, diciembre 2010.
[https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0067-0049/192/1/9/meta]

24: Mirando en el campo profundo

En el capítulo anterior estuvimos hablado de cómo la materia se iba ordenando en el mundo sombrío que dejó la recombinación. Casi toda la bariónica consistía principalmente en un gas de átomos neutros de hidrógeno y helio, doce del primero por cada uno del otro. Podemos afirmar que en los primeros momentos de aquella época, antes de encenderse las estrellas, el universo debía ser como un mundo de ciegos.

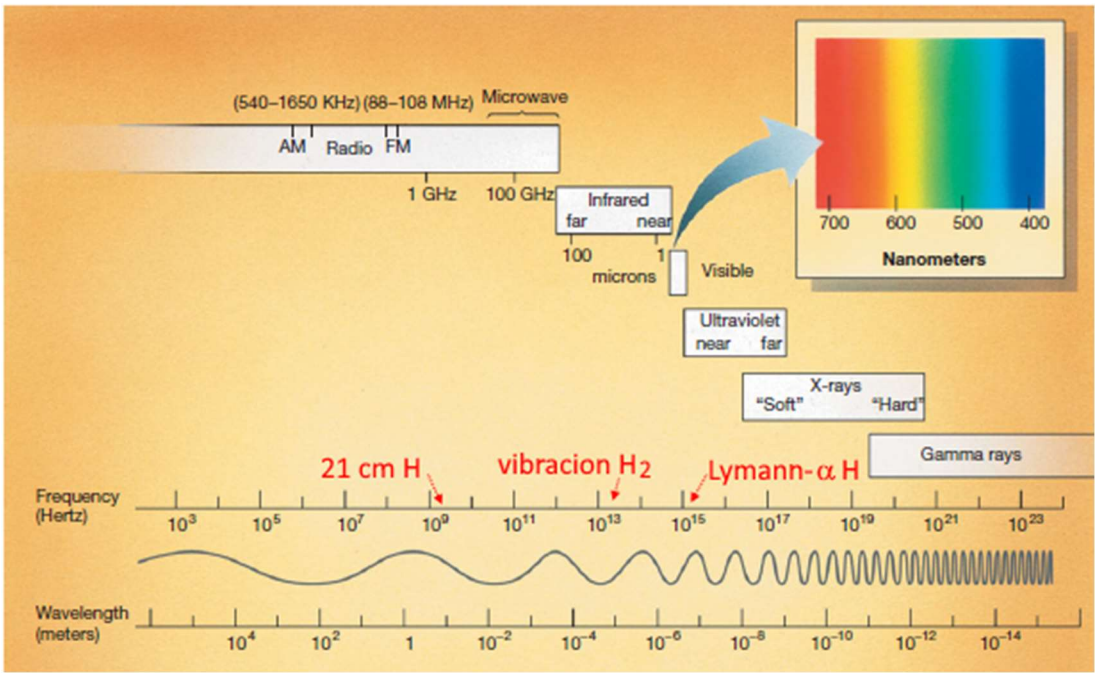


Datos infrarrojos del campo profundo de Hubble tomados con la Wide Field Camera 3 (WFC3). Los colores se han asignado de forma artificial siguiendo un patrón de longitudes de onda infrarroja (Wikimedia, NASA, dominio público).

Fue en esta tenebrosa oscuridad visual carente de referencias donde la materia oscura iba imponiendo su poder gravitatorio sobre la bariónica, proceso por el que esa última se iba concentrando selectivamente, dando lugar a las primeras galaxias incubadoras de las primeras estrellas. Una de las más antiguas conocidas es GN-z11 que se encuentra en la constelación de la Osa Mayor y que ya lucía a unos 13.400 millones de años luz de nosotros, es decir, 400 tras el Big Bang. Y aún más antigua lo que parece ser una débil galaxia descubierta en 2022 por el telescopio James Web, la GL-z13, que ya lucía a los 250 millones de años tras el Big Bang.

Los puntos más densos habían comenzado a contener el colapso del pozo gravitatorio en el que se habían transformado. La gran temperatura que se iba alcanzando hacía que las nubes de gases, en su enfriamiento, radiaran fotones

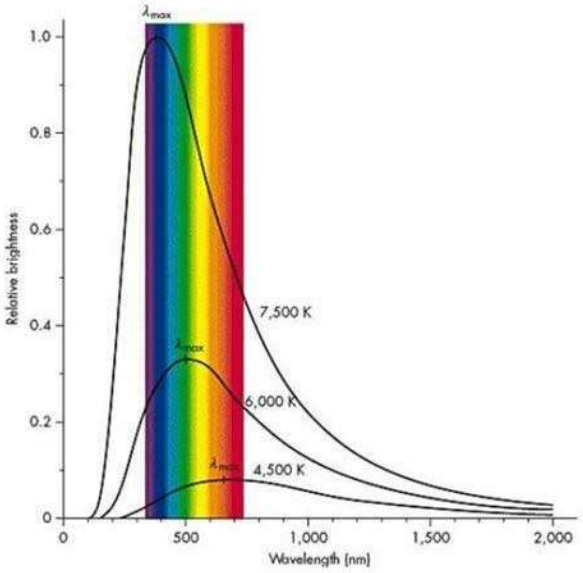
en el campo infrarrojo. Poco a poco la compactación se fue desacelerando contenida por la creciente presión, hasta que se llegó a un extremo en que los mismos procesos de presión y apelmazamiento cebaron la fusión del abundante y casi único elemento de entonces, el hidrógeno neutro, iniciando la vida de lo que serían las primeras estrellas.[1] Cada dos núcleos de hidrógeno se transformaban tras un complejo proceso, tal como lo explicamos en el capítulo anterior, en un átomo de helio liberando una cantidad ingente de masa en forma de unas partículas súper energéticas -entre otras, los fotones de radiación gamma- consecuencia de las reacciones de fusión. Así, con el fuego nuclear de estas incipientes estrellas se fue recuperando la vieja energía que nos había regalado el campo inflatón, aquella que con el paso de los años se había ido transmutando en partículas y fuerzas. Exactamente el mismo proceso que lo que pasa hoy en día en el interior de nuestro Sol en donde la temperatura alcanza cotas de casi 15×10^6 K. La familia de los fotones, por aquellos momentos dominada por la aburrida radiación electromagnética de fondo de menos de 1 eV, se animó con nuevos vecinos, los fotones ultravioletas estelares, casi rayos X, que podían arrastrar energías de más de 100 eV.



Espectro electromagnético en el que se han resaltado las frecuencias de nuestros principales ventiladores cósmicos (Imagen modificada de "Astronomy Today", figura 3.8, Eric Chaisson y Steve Mc Millan, ⓤ fair use)

Llegado el momento del teórico encendido de las primeras estrellas, el momento de la primera luz en el Universo, voy a proponer un alto en la descripción del devenir de nuestra historia e introducir un capítulo más teórico para intentar explicar cómo nos asomamos al riquísimo océano de información que lleva incorporada esa luz. Los modelos computacionales son una de

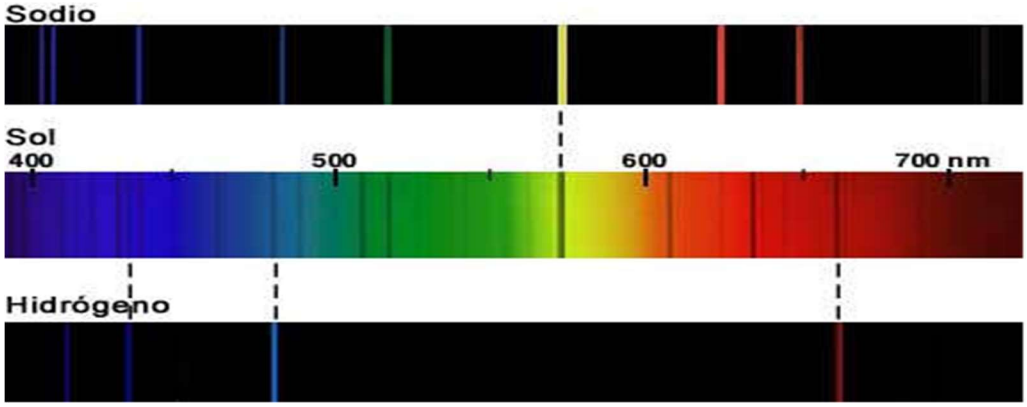
nuestras más grandes y esclarecedoras herramientas, sobre todo tras el desarrollo tecnológico que nos ha brindado capacidades de procesamiento inimaginables con los que nos acercamos a manejar la voluminosa información que encierran los procesos cósmicos. Con ellos recreamos con gran detalle lo que pudo ser; gracias a ellos casi podemos ver en nuestras pantallas y listados al Universo real; y sin lugar a duda nos tranquilizan si lo que modelan los programas se ajusta a lo que observamos. Y observamos con la gran herramienta "histórica" de análisis de los astros del cielo, la ***espectroscopia de la luz***,[2] muy potenciada por la tecnología actual que nos permite llegar a analizar frecuencias más allá de las del campo visible. Veamos en qué consiste.



Gráfica que muestra el espectro de cuerpo negro emitido por tres cuerpos a distinta temperatura (4.500 K, 6.000 K y 7.500 K). El pico de la emisión, λ_{max}, ocurre a distintas longitudes de onda en función de la temperatura (Imagen de la red, ⓔfair use)

Cualquier emisor de luz -fotones- no lo hace solamente en una frecuencia, sino de acuerdo con una distribución de ellas que se ajusta a un determinado patrón. Por ejemplo, lo que llamamos *radiación de un cuerpo negro* sigue un patrón de frecuencias a la que llamamos *emisión en continuo*, que dibuja una frecuencia preferida -un máximo- que depende de la temperatura del emisor. La curva anterior refleja precisamente este fenómeno: si fuera el caso de que representara las emisiones de una estrella que tiene una gran temperatura superficial, ésta se orienta más hacia las frecuencias más próximas al azul que si es más fría, con preferencia a las frecuencias del rojo. El espectro de nuestro amarillo Sol, 5.748 K, se queda ligeramente por debajo del de la curva de 6.000 K. De todas formas, así es la luz que emiten las estrellas o el resto de los cuerpos cósmicos, ya sean cuásares, galaxias o nubes de gas, que a través de sus espectros nos proponen una gran cantidad de información.

Aunque hayamos dicho que al espectro luminoso se le conoce como emisión en continuo, este proceso no es exactamente así de "continuo" en la naturaleza. La materia de cada cuerpo emisor de luz tiene una determinada composición mezcla particular de los diversos átomos que la componen. Cada uno de ellos tiene su particular distribución de orbitales electrónicos, cada uno con una determinada energía y no otra, puesto que así lo condiciona las reglas de la cuántica. Sus electrones pueden ser excitados al interaccionar con fotones, de forma que pueden absorber parte o toda su energía permitiéndoles dar el salto cuántico desde su nivel orbital a otro de mayor energía. Con el tiempo esos electrones excitados vuelven a sus órbitas iniciales emitiendo un fotón con energía (frecuencia) igual a la diferencial de ambas órbitas. De forma que si medimos la luz que emite un determinado elemento químico veremos que se concentra en esas frecuencias tan específicas del elemento. Como lo podemos ver en la imagen siguiente en donde se muestra los ***espectros de emisión*** del sodio y del hidrógeno.

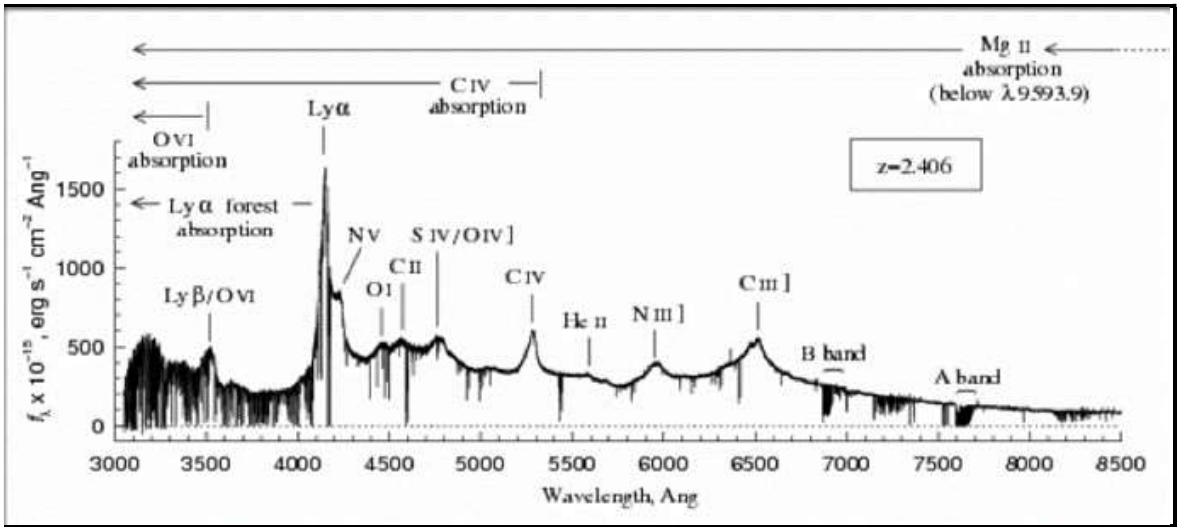


En esta imagen se puede ver el espectro de absorción del Sol comparado con los espectros de emisión del sodio y el hidrógeno, elementos que están en el propio Sol (Imagen de la red, ⓕ fair use)

Esa "selección" de frecuencias también se encuentra en los espectros de las estrellas, y en muchas de ellas está influenciada por la presencia del hidrógeno que es el elemento más abundante en sus atmósferas. Sin embargo, la prominencia de las líneas de hidrógeno puede variar dependiendo de la temperatura y las condiciones de excitación en la estrella. Como hemos comentado un poco más arriba el espectro de su luz es continuo, el de un cuerpo negro, pero curiosamente en el de los astros podemos encontrar una serie de bandas negras que corresponde al fenómeno inverso del de la emisión. Los electrones de los propios átomos de la estrella absorben la luz del continuo en aquellas frecuencias que coinciden con la de los niveles energéticos de esos átomos. El espectro de la luz de la estrella presenta entonces unas franjas negras, precisamente en esas frecuencias características. Un ejemplo queda reflejado en la imagen anterior que corresponde al Sol. Con ello podemos saber

la composición del plasma estelar. Ese patrón, conocido como ***espectro de absorción***, es casi el carné de identidad de cada estrella.

También se produce un patrón de absorciones cuando la luz de la estrella, en su camino hacia el observador, se cruza con una nube de gas y polvo. En ese caso los elementos dentro de la nube se encargan de absorber frecuencias de la luz de la estrella según los niveles energéticos de los átomos del gas, lo que nos permitirá saber cuál es la composición química de la nube.



Espectro de un cuásar que se encuentra en un corrimiento al rojo de z= 2,406 (Imagen: "The Quasar Absorption Line Group" de la New Mexico State University, ⓕ fair use)

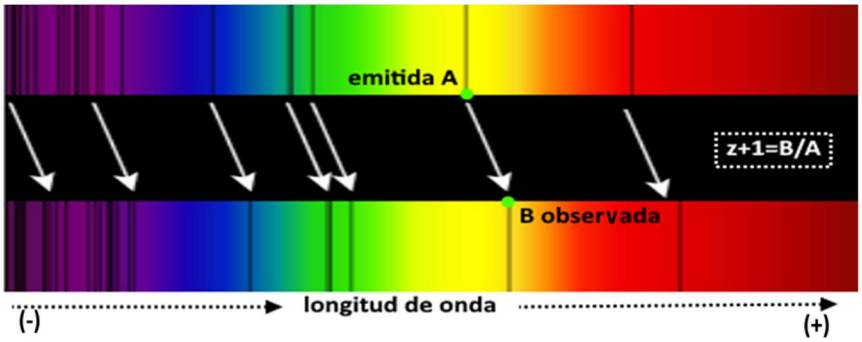
Las líneas de absorción de los espectros las podemos ver en los diagramas de colores que hemos presentado más arriba, o bien dibujando en vertical la intensidad de las líneas sobre un eje que representa el espectro continuo de longitudes de onda, lo que nos da otra representación como podemos ver en el diagrama anterior. Los picos serían las franjas luminosas de emisión y los pozos las negras de absorción. Aporta además una visión más clara de las vicisitudes sufridas por la luz emitida en la lejanía del tiempo y espacio y que llega ahora a nuestros espectrómetros. Veremos el alcance de ello a lo largo de todo este libro.

Después de lo expuesto en los párrafos anteriores creo que ya empezamos a sospechar acerca de la potencia de la espectroscopia para determinar la composición de los objetos del Universo. Y como decía un poco antes, aunque me repita un poco, quiero enfatizar también que esta técnica, además, permite conocer la temperatura de los objetos cósmicos, lo que se consigue analizando la curva de emisión de su espectro como lo hicimos con la del Sol. Como hemos podido ver en la figura que representa el espectro de cuerpo negro para tres

emisores distintos, la forma de estas curvas depende de la temperatura del emisor: a mayor temperatura, mayor energía y, por tanto, una frecuencia moda[3] virada hacia las frecuencia menores, hacia el azul. Igualmente podemos determinar que para temperaturas bajas la frecuencia dominante se situará en los intervalos sesgados al rojo. Con los datos del espectro podemos dibujar la curva de emisiones, lo que nos va a permitir calcular la temperatura de una lejana estrella o una nube de gas o el disco de caída de materia en un agujero negro.

No se acaban aquí las bondades que los astrónomos encuentran en la espectroscopia. Lo vamos a ver al dar un paso más en la teoría, un paso que nos va a llevar de la mano hasta otro de sus fantásticos subproductos. A partir de este momento en nuestro relato saldrá profusamente un concepto que se conoce como el "***corrimiento al rojo***". No es algo misterioso o con tintes gore, o que manifieste unas determinadas preferencias ideológicas. Simplemente hace referencia a que la radiación *emitida desde más lejos* -tiempo y distancia es lo mismo- hasta llegar a nosotros los observadores habrá tenido que recorrer *durante más tiempo* a la velocidad de la luz el tejido de un universo que se va expandiendo. Debido a esta expansión del tejido espacio/temporal que soporte la onda de los fotones, su longitud también se habrá estirado, de forma que cuanto más alejado esté el punto emisor, más amplia se habrá hecho la onda. Esto tiene su consecuencia visible cuando analizamos los espectros de frecuencia de la luz que nos viene desde un determinado punto.

Si el cuerpo está junto a nosotros el espectro coincidirá con el teórico. Por ejemplo, la longitud de onda de sus fotones azules que observamos en el espectro medido estará en el entorno de los 470 nanómetros, que es la que corresponde a este tipo de color. Si este mismo objeto luminoso que emite en esta frecuencia azul está más lejos, cuando nos lleguen sus fotones tendrán una longitud de onda mayor, su onda se habrá estirado. Particularizando para el caso de que si desde que se emitió el fotón hasta que nos llegó, el Universo se ha expandido en un factor de 10, este fotón de salida azul lo veríamos como un infrarrojo.[4] Esto les pasará indistintamente a las líneas oscuras de los espectros de absorción o a las brillantes de los espectros de emisión. Y en general, a medida que el cuerpo emisor -o absorbedor- se aleja, las ondas se alargan y, por tanto, todo el espectro parece como corrido hacia el espacio de las frecuencias del rojo, con longitudes de onda más largas. Cuanto más lejos está el emisor de la luz mayor será este desplazamiento hacia la frecuencia de los rojos, circunstancia que se cuantifica mediante un parámetro denominado precisamente ***corrimiento al rojo*** y se designa con la letra *z*, que es ni más ni menos que el cociente entre la cantidad de corrimiento de la frecuencia particular y la longitud de onda "limpia". Lo entenderemos mejor ayudados por la imagen de abajo.



Las flechas indican el corrimiento al rojo experimentado por la luz del foco de emisión (Imagen de Wikimedia: CC BY-SA 3.0)

En ella se ven dos espectros de absorción. El de arriba corresponde al que medimos del Sol y abajo al que medimos de una lejana galaxia en donde reconocemos líneas de absorción parejas a las de nuestro astro. No es de extrañar ya que la química de las estrellas es muy parecida en todas partes. Resalta claramente que las líneas de la lejana galaxia nos llegan con las longitudes de onda corridas hacia el color rojo -la base está en el cercano Sol- resultado de la larga cabalgada sobre el tejido en expansión del Universo desde que salió la luz. En la imagen se ha representado una fórmula que es ni más ni menos lo que dijimos en el párrafo anterior: z es igual al tanto por uno en que ha crecido la longitud de onda desde que se emitió, o lo que es lo mismo, el cociente entre la cantidad de corrimiento y la longitud de onda "limpia"

$$z = (\lambda_B - \lambda_A) / \lambda_A \qquad \text{o bien} \qquad \lambda_B / \lambda_A = z+1$$

siendo λ la longitud de onda del fotón y A y B los momentos de emisión y de observación respectivamente.

El corrimiento al rojo y su parámetro z *se utiliza para medir distancias* en nuestro universo. Una mayor z indica un mayor alejamiento mientras que a menor z el objeto analizado se encontrará más próximo. Para z's menores que 1, es decir, para objetos alejados de nosotros menos de unos 6.000 millones de años luz, se sigue la siguiente relación aproximada:

$$D = c \cdot z / H$$

siendo D la distancia, c la velocidad de la luz y H la constante de Hubble.[5] Con el espectro determinamos z y una vez conocida z determinamos la distancia D. La z de nuestra era es 0 como corresponde a la definición de "cociente entre la cantidad de corrimiento y la longitud de onda limpia".

También *podemos determinar la velocidad* con que se aleja de nosotros un foco de luz. La relación entre la frecuencia observada y la emitida tiene que ver con

la relación entre la velocidad de separación entre fuente y observador, ***v***, y la velocidad de la luz ***c***, según la siguiente ecuación:

$$f_B = f_A \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}$$

Conocida la relación z y sabiendo que la relación inversa entre la frecuencia emitida y la observada es z+1, podemos conocer la velocidad con que se aleja o acerca a nosotros la fuente emisora de luz. Relación que nos la da la ecuación siguiente:

$$(f_A/f_B)^2 = (\lambda_B / \lambda_A)^2 = (z+1)^2 = (1 + v/c) / (1 - v/c)$$

Esta misma circunstancia de corrimientos de frecuencias se produce en cualquier tipo de movimiento de masas emisoras de luz, aunque es debida básicamente a otro tipo de fenómeno físico conocido como efecto Doppler,[6] y que detectaremos con nuestros espectroscopios. Y todo ello *nos va a permitir saber direcciones y velocidades de estos movimientos*. Así, por ejemplo, podremos detectar cómo gira una galaxia espiral, ya que la luz de un extremo, supongamos que es la que emite el brazo de la galaxia que se aproxima a nosotros, estará corrida al azul, mientras que la del otro extremo de la galaxia, que se aleja, estará corrido al rojo. Y esto es aplicable de una forma general al movimiento de estrellas, galaxias, cúmulos… y otros objetos cósmicos emisores de luz.

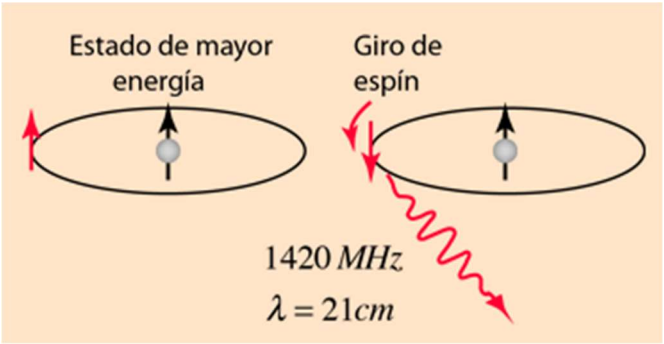
Composiciones, temperaturas, distancias, velocidades… todo un cuerpo de conocimiento que nos ha desvelado la mayor parte de lo que sabemos de nuestro Cosmos.

El potencial de la tecnología actual nos permite "ver" las estructuras del Cosmos con ojos que no son los habituales, nuestros ojos biológicos que sólo interpretan las frecuencias visuales, entre 700 y 400 nanómetros como vimos en una figura al inicio de este capítulo. Y no solo eso. Como veremos en el 28 las galaxias, además de albergar a las estrellas, están permeadas por el medio interestelar, MIE compuesto por gas (iones, átomos y moléculas, principalmente de hidrógeno) y polvo. El polvo interestelar se encuentra formando grumos de átomos y moléculas, incluso minerales refractarios más grandes, que se condensaron cuando la materia abandonó el cuerpo de las estrellas empujada por sus vientos o por las ondas de presión tras la explosión de una supernova. El tamaño de esos componentes es muy decisivo ya que pueden llegar a bloquearnos el paso de la luz que viene de un foco posterior. Átomos y moléculas tienen un tamaño del orden de los $10^{-9}/10^{-10}$ metros mientras que las partículas más pequeñas de polvo son de unos 10^{-7} metros. El

polvo interestelar, al estar formado por grupos de átomos y moléculas, es más complejo que un remolino de partículas simples en un gas. Como una regla aproximada podemos recordar que cualquier fotón con una longitud de onda inferior al "cuerpo" que se le oponga quedará oscurecida. Y, al contrario, si la longitud de onda del fotón es mayor que el obstáculo, el fotón pasará.

El gas apenas pone dificultades a los fotones: la longitud de onda en el espectro visible ronda los 10^{-6} metros por lo que nuestra regla del palmo nos dice "paso libre". Cosa que evidente no sucede con el polvo que presenta al fotón una superficie mayor. Pero hay métodos para salvar el escollo: deberemos buscar observar fotones que tengan una longitud de onda mayor que el tamaño del polvo. Nuestro gráfico de inicio de capítulo nos dice que "mirando" con instrumental que detecte rayos infrarrojos, microondas u ondas de radio tendremos el problema resuelto.[7]

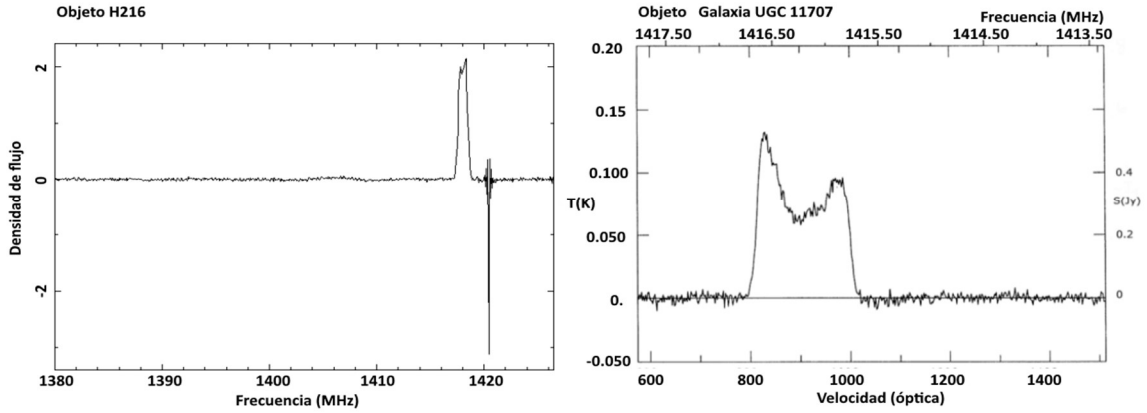
Fijémonos en las frecuencias de radio cuyas longitudes de onda son del orden de los centímetros de amplitud. Estamos hablando por tanto de fotones de baja energía. En el hidrógeno neutro los espines de su protón y del electrón situado en la capa s1, la más próxima al protón del núcleo,[8] pueden estar orientados en la misma dirección o contrapuestos. La primera configuración es más energética siendo el escalón de energía entre ambas de $5{,}9 \times 10^{-6}$ eV: el electrón que decae desde esta configuración a la menos energética va a emitir un fotón con una longitud de onda de 21 centímetros.



Esquema de un átomo de hidrógeno que explica lo dicho en el texto acerca de las emisiones en 21 centímetros (Imagen extraída del blog Hyperphysics, fair use)

La importancia de estos fotones es que son resultado del decaimiento del hidrógeno. Y el hidrógeno supone el 75% de la materia bariónica del Universo. Bien es cierto que la disposición excitada de espines paralelos es súper estable ya que su vida media es de unos 10 millones de años. Pero es que hay mucho hidrógeno y, por tanto, la señal a 21 cm es abundante. Lo que obtenemos con los radiotelescopios es el espectro de absorción/emisión de esa línea de frecuencia en cada uno de los puntos del objeto que estamos observando y que luego podremos "visualizar" adaptando coloración a sus variaciones.

Mediante las observación de esos fotones, gracias a la ventaja que supone el ser transparentes a las nubes de polvo, podemos "ver" el gas difuso y frío del Cosmos que los emite lo que, no tan sólo han revolucionado los conocimientos de nuestra galaxia, sino que ha cambiado de forma radical nuestro conocimiento de las galaxias y su entorno en general. Realmente los 21 cm nos permiten ver la realidad tal como es… pero con ojos de alienígena.[9]



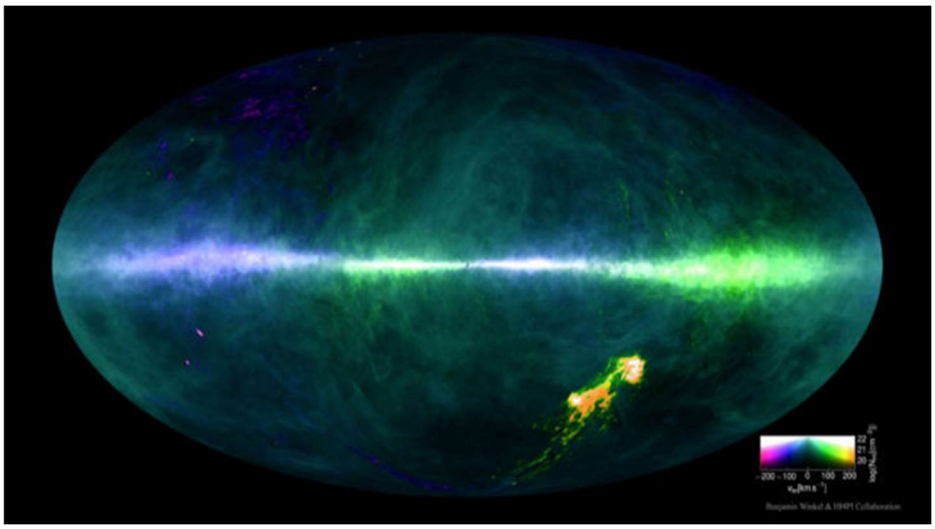
Ejemplos reales de la línea espectral 21 cm, a la izquierda, y como no es solo una línea, sino que contiene mucho detalle (Imágenes de Cartografiado HIPASS / CSIRO / ATNF.NRAO, y Haynes et al. (1998), AJ, 115, 62, fair use)

Como se ve en el espectro de arriba a la derecha, la línea espectral 21 cm, 1420 MHz, se distribuye en una banda más o menos ancha alrededor de la frecuencia principal. No sólo el desplazamiento al rojo (en este caso al azul) nos dice la velocidad con que se aleja o acerca a nosotros, sino que también por integración de todo el flujo en el ancho de la línea podemos conocer la cantidad de hidrógeno en el gas de la galaxia. Otra curiosidad: los dos "cuernos" a derecha e izquierda de la línea en el espectro derecho indica que la galaxia está en rotación, siendo el ancho de la línea el doble de la velocidad de rotación. Sólo es una muestra.[10]

En ese punto encaja una imagen espectacular que corresponde a la Vía Láctea observando en los 21 centímetros del hidrógeno atómico traducido a una paleta de colores. Los colores azules indican gas que se acerca al observador, mientras que los colores verdosos corresponden a gas que se aleja.

En el ecuador vemos la Vía Láctea, mientras que el centro de nuestra Galaxia corresponde al amasijo de gas brillante verdosos hacia la derecha. No sólo se puede apreciar la misma rotación de la Vía Láctea por comparación de sus zonas azules o verdes, sino que también se pueden ver estructuras más complicadas: filamentos, burbujas, grumos, huecos, capas de gas, que narran la dinámica evolución de nuestra galaxia. Aparecen nubes de gas difusas en colores violetas y amarillos indicadores de altas velocidades. Estas "nubes de

alta velocidad" corresponden a corrientes de gas que está cayendo o saliendo expulsado de la Vía Láctea (como, por ejemplo, las galaxias enanas satélite de la Vía Láctea, las Nubes de Magallanes, abajo a la derecha, en colores naranjas). [11]



Mapa del cielo observando en la línea de 21 cm del hidrógeno atómico (Crédito [11]: Benjamin Winkel & the HI4PI Collaboration, ⓕ fair use)

Evidentemente no se acaba con acaban aquí las bondades de los fotones 21 cm, el potencial es mucho mayor. Pensemos que están íntimamente relacionados con el hidrógeno neutro y que apenas el Universo es opaco a ellos. El hidrógeno más primitivo es el de la recombinación y sus fotones 21 cm nos están llegando con una longitud de onda superior a los dos metros. Y SÍ, ese tipo de fotones nos ayudan a ver a su población y a todo lo que le pasó en su largo camino hacia nosotros desde entonces, desvelando los "cuándos" de las distintas fases de la biografía del Universo. No voy a entrar en detalles en este momento ya que desarrollaré el tema en el 26 cuando realmente profundice en el proceso de la reionización.

Pero va siendo hora de acabar. He encabezado este capítulo con el título de "*Mirando en el campo profundo*". Aunque después de haber escrito lo que he escrito pienso que quizás realmente debería haberlo llamado "*El cebado de las estrellas nos lleva de la mano a hablar de la espectrometría*". Me diréis… de acuerdo, sí, realmente esto de los espectros de la luz es algo muy curioso y valioso, nos has convencido, pero… venga, deja de dar la brasa y vamos ya a la historia del Universo. Tenéis razón, pero… y yo también aporto un pero… es que sin la espectrometría de la luz ahora mismo estaríamos en los tiempos de Newton, viendo cómo orbitan los cuerpos celestes en un cosmos que no llega más allá de la Vía Láctea. La espectrometría ha sido nuestro brazo derecho, el izquierdo y si me apuráis, también una pierna. Así que repetid conmigo ¡Viva la espectrometría y el que la inventó! ¿Newton, con su famoso prisma?

El siguiente capítulo va a ser complemento de este: lo vamos a dedicar a completar la información de cómo escrutamos las distancias en el Universo. Y sí, usaremos la información que transporta la luz.

El "corrimiento al rojo" energético de la ¡materia! [12]

Normalmente se habla del fenómeno de corrimiento hacia las frecuencias rojas sólo para los fotones. Aunque ¡oh sorpresa! el fenómeno asociado de disminución de frecuencia -de disminución de energía- también afecta a la materia. Con la expansión también pierde energía. O eso parece.

Supongamos que estamos viajando por el Universo y que tomamos como nuestro nivel de referencia a una galaxia que acabamos de dejar a nuestro lado. Seguimos adelante en busca de otra galaxia que se está alejando de nuestra referencia exclusivamente debido a la expansión. Las distancias se van haciendo más grandes, cada vez parece que nos cuesta más avanzar, cada vez vamos más y más despacio. En otras palabras, nuestra velocidad realmente ha disminuido con respecto a nuestro sistema de referencia.

Y aquí viene lo curioso. Del mismo modo que la luz pierde energía al incrementar su longitud de onda, la materia también pierde energía al reducirse su velocidad. Ambos comportamientos quizá parezcan diferentes, sin embargo, resultan análogos desde un punto de vista cuántico. Según la descripción cuántica de la materia, las partículas también poseen propiedades ondulatorias. El físico Louis Víctor de Broglie descubrió que cuanto menor es el momento de una partícula, el producto de su masa por su velocidad, mayor es su longitud de onda.

Si calculamos la pérdida de velocidad relativa que experimenta una partícula con masa al ir dejando atrás a sus vecinos comóviles, obtenemos que la longitud de onda de de Broglie aumenta exactamente en la misma proporción que la longitud de onda de los fotones. Así la luz y la materia se comportan de igual manera en lo que se refiere a las pérdidas de energía asociadas a la expansión del universo.

Esto refleja una característica inherente de un universo dinámico y en expansión, no una violación de las leyes físicas. Desde la perspectiva de la relatividad general, la conservación de la energía no es un principio global aplicable al universo en expansión, dado que el concepto de energía total carece de una definición precisa en cosmología. Esto se debe a que un universo

en expansión no presenta una simetría temporal global, lo que rompe el vínculo entre la conservación de la energía y el teorema de Noether, que requiere una simetría en el tiempo.

La aparente pérdida de energía observada en el marco cosmológico no es absoluta; más bien, es una consecuencia de cómo medimos la energía en un marco comóvil que se dilata junto con el espacio-tiempo. A escalas locales, las leyes de la física se mantienen inalteradas y la energía de las partículas se conserva según las reglas tradicionales. Sin embargo, a escalas cosmológicas, la aparente pérdida de energía refleja los efectos de una geometría cambiante del espacio-tiempo, evidenciando la naturaleza dinámica del universo.

Si realizamos los cálculos de manera cuidadosa, teniendo en cuenta lo mencionado previamente y siguiendo algunas prescripciones propuestas por expertos, podemos comprobar que la magnitud del desplazamiento hacia el rojo de las galaxias es idéntica al desplazamiento Doppler que experimentaría un observador al ver un coche alejándose a la misma velocidad que la galaxia.

NOTAS DEL CAPÍTULO 24:

1. Podéis consultarlo en el enlace de más abajo que corresponde a una entrada del blog "*El Tamiz*", una de las de la serie "*La vida privada de las estrellas*".
   [http://eltamiz.com/2007/09/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-las-entranas-de-una-estrella/]
2. Etimológicamente espectroscopia significa "observación del espectro". No deja de ser más que las técnicas de medida y el estudio de la luz en todo el alcance de sus posibles frecuencias.
3. En estadística la ***moda*** es el valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.
4. De acuerdo con la fórmula que relaciona longitud de onda y corrimiento al rojo,

   $$\mathbf{z = [\lambda_{observada} - \lambda_{emitida}] / \lambda_{emitida}]}$$

   podremos calcular la observada, que será:

   $$\mathbf{(1+z)\ \lambda_{emitida}} = 11 \text{ x } 470 = 5.170 \text{ nm.}$$

5. Realmente la relación más exacta la define la siguiente ecuación, en la que se introduce un factor **q** relacionado con la aceleración de la expansión del Universo:

$$\boldsymbol{D} \approx \mathbf{c}\,\frac{\mathbf{2}\boldsymbol{z} - \boldsymbol{z}^{\mathbf{2}}(\mathbf{1}+\boldsymbol{q})}{\mathbf{2}\boldsymbol{H}\,(\mathbf{1}+\boldsymbol{z})}$$

6. Hay algunos cosmólogos y astrónomos que equiparan ambos fenómenos. Mi opinión es que, aunque por la expansión del Universo pudiera parecer que los cuerpos se separan, por lo que se produciría una extensión de las longitudes de onda en esta separación, realmente esto no sucedería si no hubiera expansión del tejido soporte, con lo que no habría corrimiento al rojo. Realmente si hacemos el análisis considerando que emisor y observador son comóviles no deberíamos tener en cuenta el corrimiento al rojo y sí el efecto Doppler que es otra cosa: es el cambio de frecuencia aparente de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Aunque considero que es de sobras conocido y lo habremos oído mil veces, la frecuencia de una onda sonora aumenta o disminuye si el foco emisor se acerca -con el acercamiento se va comiendo parte de la longitud de onda- o se aleja -con el alejamiento nos vamos quedando atrás con respecto al emisor por lo que la longitud de onda aparentemente se agranda-. Exactamente tal y cómo cambia el sonido del coche de carreras que viene y nos sobrepasa pasando de los agudos a los graves. Con la luz pasa lo mismo.
7. En el capítulo 25 vamos a comentar la importancia de dos tipos particulares de radiación a la hora de explorar el Universo en todas sus dimensiones, temporal o espacial. Se tratan de las emisiones Lyman-α del hidrógeno a $1{,}21 \times 10^{-7}$ metros, radiación ultravioleta, y las de relajación de la estructura fina, también del hidrógeno neutro, a 21 cm, ondas de radio.
8. En este enlace obtendréis información de la estructura atómica. [https://eltamiz.com/elcedazo/2012/10/28/la-tabla-periodica-iii-estructura-elecronica-del-atomo/]
9. El espectro visible es la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible: el ojo humano típico responderá a longitudes de onda de 380 a 750 nm, aunque en casos excepcionales algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 310 hasta 1.050 nm.
10. En este enlace podéis tener una fantástica información acerca de la radioastronomía usando las emisiones del hidrógeno neutro de 21 cm de longitud de onda. "*La emisión del hidrógeno neutro a 21 cm.*" **Ángel López-Sánchez, 2017.** Y cuatro publicaciones más encadenadas a ésta que es la primera.

[https://culturacientifica.com/2017/01/20/HIDROGENO-UNIVERSO-I-LA-EMISION-DEL-HIDROGENO-NEUTRO-21-CM/]

11. "*HI4PI: A full-sky H i survey based on EBHIS and GASS*", figura 3, N. Ben Bekhti1 et al., Astronomy & Astrophysics, octubre 2016. [https://arxiv.org/pdf/1610.06175.pdf]

12. Extraído del artículo "*¿Pierde energía el Universo?*", Tamara M. Davis. Scientific American, julio 2010. [https://kaiserscience.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/08/is-the-universe-leaking-energy-law-conservation.pdf] [https://archive.org/details/investigacion-y-ciencia-408-septiembre-2010/page/16/mode/2up]

25: Las distancias en el Universo [1]

En el capítulo anterior vimos como con la espectrometría de la luz que nos viene del Universo obtenemos una gran cantidad de información. De hecho, muchos de los grandes descubrimientos o el esclarecimiento de grandes incógnitas, los hemos podido realizar gracias a nuestras habilidades con el análisis de la luz. Entre otras cosas nos permite saber la distancia a la que se encuentra un objeto, si se aproxima o se aleja de nosotros y a qué velocidad. Hemos hablado de cómo los trabajos de Hubble nos permiten saber acerca de todo ello. Pero ¿hay más métodos para saber distancias? ¿con Hubble podemos ver desde lo más próximo a lo más lejano? La respuesta es sí a la primera pregunta y para la segunda depende, sabemos que Hubble es bueno para largas distancias, pero hay otros métodos más sencillos, más fiables, más adecuados en las cortas.[2]

Unidades de distancias más usadas en astronomía

*Una **unidad astronómica**, UA, es la distancia media entre el Sol y la Tierra que por definición mide 149.597.870.700 metros.*

*Un **año luz** es la distancia que recorre la luz en un año. Como su velocidad en el vacío es de 300.000 kilómetros por segundo, un año luz es aproximadamente $9{,}46 \times 10^{12}$ kilómetros.*

*Otra unidad que se maneja mucho y que ha aparecido abundantemente en este libro, y lo seguirá haciendo, es el **pársec**, pc, que es la distancia a la que nos tenemos que alejar para ver a la pareja Sol/Tierra bajo un ángulo de 1 segundo de arco. Mide la friolera de 206.265 UA; o 3,2616 años luz, o $3{,}0857 \times 10^{13}$ kilómetros.*

Vayamos pues de lo más próximo a lo más alejado.

(i) Hasta ***una Unidad Astronómica***, la distancia entre la Tierra y el Sol. Estamos hablando de ver desde el Sol hasta un poco más allá de Marte. En este volumen tan "corto" nos es muy útil ***el radar***. Con él medimos el tiempo entre la emisión de una señal y la recepción del eco de la misma. Como la señal se mueve a la velocidad de la luz es fácil obtener la distancia entre el radar y el objeto medido.

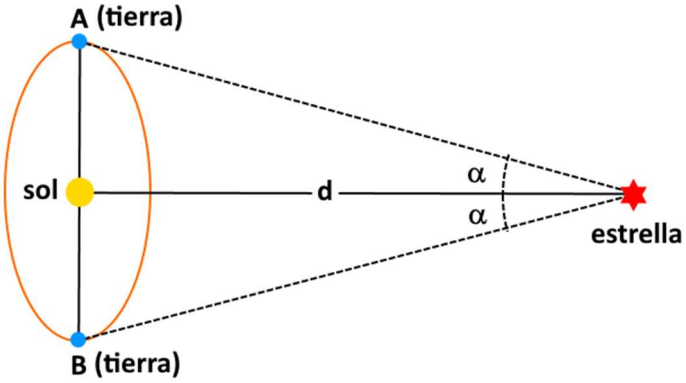
(ii) Si queremos saltar afuera del sistema solar y visitar las estrellas más cercanas podemos utilizar el ***método del paralaje***. Se observa la estrella desde

dos posiciones distanciadas $\overline{AB}$ que pueden ser las correspondientes a un lado y otro de la órbita terrestre alrededor del Sol.

Los ejes de visión de ambas observaciones formarán un ángulo. Por lo que podemos definir un triángulo rectángulo con base igual a la mitad de la distancia entre los dos puntos de observación y ángulo la mitad del ángulo formado por los dos ejes de visión. Con esos sencillos datos la trigonometría nos dice que (*ver figura*)

$$\text{tg } \alpha = (AB/2) / d$$

de donde podemos deducir la distancia ***d*** a la estrella. Este método es útil para objetos que se encuentren ***hasta unos 200 párstecs***. Un párstec es la friolera de 3×10^{13} kilómetros. La estrella Beltegeuse en la constelación de Orión se encuentra más o menos a esta distancia.



Trigonometría del método del paralaje

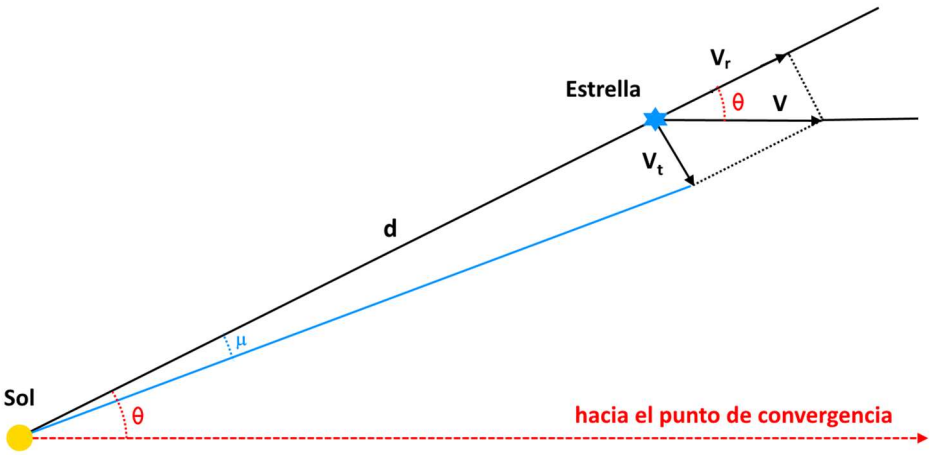
Más o menos dentro del margen de distancias que estamos considerando se utiliza otro método conocido como el de ***los cúmulos en movimiento***. Se basa en la suposición razonable de que todas las estrellas de un cúmulo abierto[3] se mueven a la par en el espacio, con el mismo vector velocidad y que, por ello, debido a la perspectiva, desde la Tierra parecen converger hacia un punto definido de la esfera celeste y divergir de otro.

La trigonometría que debemos usar es muy sencilla si vemos la figura siguiente. V es la velocidad real del movimiento de la estrella, que se puede descomponer en la radial V_r y la tangencial V_t que va a ser la aparente para nosotros. La velocidad radial se calcula de acuerdo con el corrimiento al rojo de la luz de la estrella. Los ángulos μ y θ se determinan mediante la observación. Entonces, como

$$\text{tag } \theta = V_t / V_r \quad \text{y} \quad \text{tag } \mu = V_t / d$$

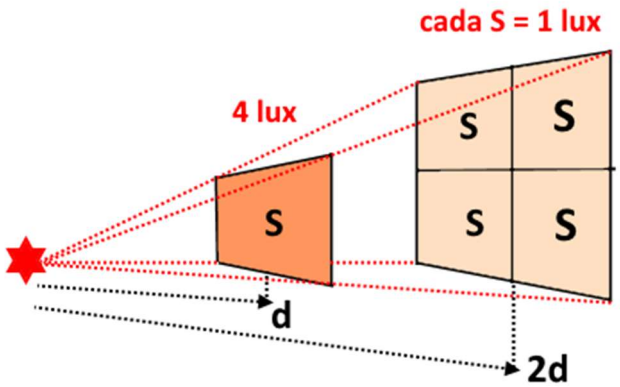
combinando ambas igualdades, y sabiendo que el ángulo μ es muy pequeño y por tanto igual a su tangente, llegamos a establecer que la distancia es

$$d = (V_r \text{ tag } \theta) / \mu$$



Trigonometría del método del cúmulo móvil

(iii) Si damos un salto ***hasta 10^4 pársecs*** podemos utilizar el método del ***paralaje espectroscópico*** ¿cómo se hace eso? Se mide la luminosidad aparente de la estrella que es la que apreciamos desde la Tierra. Se mide su temperatura a través de análisis espectroscópico. Ya hemos dicho cómo en el capítulo 24. Luego la situamos sobre la secuencia principal de la estrella que veremos lo que es en el capítulo 33. Básicamente responde al hecho de que la mayoría de las estrellas cuando empiezan a quemar su hidrógeno, y a lo largo de prácticamente toda su vida, podemos situarlas en un punto de una franja fija, la secuencia principal, que correlaciona de una manera bastante precisa su temperatura y luminosidad. Por lo que una vez situada la estrella allí, y gracias a que conocemos su temperatura, podremos conocer aproximadamente su brillo real.



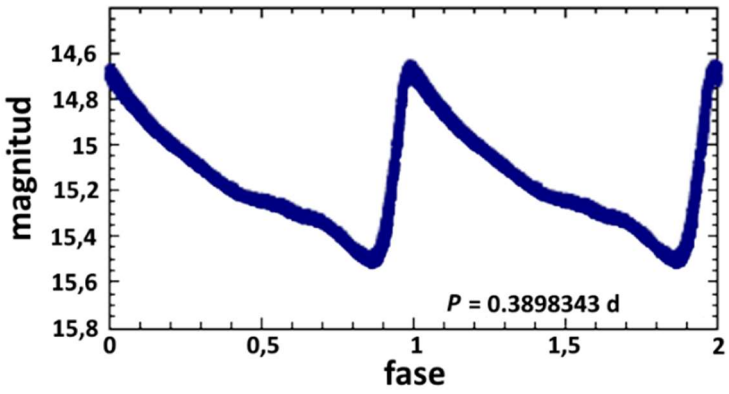
Geometría del método de la inversa del cuadrado de la distancia

Los flujos luminosos se dispersan por el espacio desde el punto de emisión, difuminándose proporcionalmente al cuadrado de la distancia recorrida (*ver imagen de abajo*). Sabiendo eso y su brillo aparente deduciremos la distancia de acuerdo con

d^2 = brillo real (a partir de la secuencia principal) / brillo aparente (medido en la Tierra)

Con ese método podremos visitar a nuestra Vía Láctea y llegar incluso a alguna de las galaxias más próximas dentro de nuestro grupo local, como la enana de Can Mayor o la enana de Sagitario. Aunque no alcanzaremos a nuestra hermana, la galaxia Andrómeda, que se encuentra a unos 10^6 párseccs de nosotros.

(iv) Vayamos aún más lejos, más o menos ***hasta los confines de los 25 millones de párseccs***. Nos vamos a apoyar en una curiosa característica del comportamiento de ciertas estrellas en las que la intensidad de su brillo es cíclica haciéndolo de una forma muy característica y con un alto grado de precisión: mantienen un mismo periodo de un ciclo al siguiente. Estamos hablando de las que se conocen como ***estrellas variables pulsantes*** como las RR Lyrae y las cefeidas. Todas las estrellas RR Lyrae pulsan de manera similar con solo pequeñas diferencias en el período entre ellas. Los períodos observados oscilan entre aproximadamente 0,5 y 1 día. En las cefeidas, aun pulsando de forma cíclica, estrellas diferentes pueden tener períodos de pulsación bastante diferentes, que pueden ir desde alrededor de uno a cien días.



Relación periodo/luminosidad en una estrellas Lyrae con un periodo de casi 0,39 días (Imagen de OGLE Atlas of Variable Star Light Curve[4], ⓤfair use)

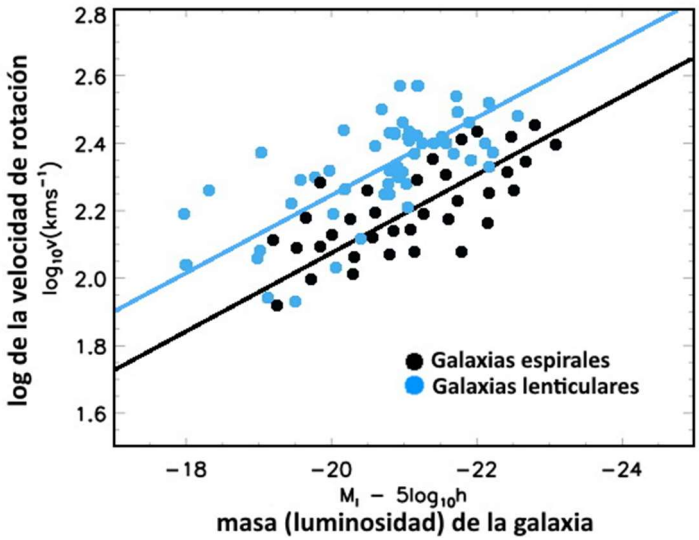
¿Por qué pulsan las variables cefeidas y RR Lyrae? La estructura de cualquier estrella está determinada en gran parte por la facilidad con la que la radiación puede viajar desde el núcleo a la fotosfera, es decir, por la opacidad del interior, el grado en que el gas dificulta el paso de la luz a través de él. Si la opacidad aumenta la radiación queda atrapada, la temperatura y la presión interna aumentan y la estrella se "hincha". Ahora bien, el incrementar su volumen hace que se enfríe, con la consecuencia de que su opacidad disminuye, favoreciendo de nuevo el paso de la radiación que puede escapar más fácilmente. Al enfriarse la estrella se comprime y encoge, creándose una situación hacia un nuevo recalentamiento que relanzaría al ciclo. En determinadas circunstancias una estrella puede desequilibrarse y entrar en un estado semejante al explicado, lo que va a dar lugar a las pulsaciones que observamos en las cefeidas.

El tipo de pulsación nos da la pista de si se tratan de un tipo o del otro. Si son lyrae prácticamente todas tiene un brillo real unas cien veces la solar. Mientras que en las cefeidas es un poco más complejo, pero aun así relativamente sencillo, ya que ese tipo de estrellas presentan una estrecha correlación entre la luminosidad promedio y el período de pulsación. Sabido el periodo sabremos su brillo. Las cefeidas que varían lentamente, es decir, que tienen períodos largos, tienen grandes luminosidades; por el contrario, las cefeidas de período corto tienen luminosidades bajas.

Ahora ya podemos volver a aplicar el mismo criterio que para el escalón anterior de distancias, la ley del cuadrado:

d^2 = brillo real (a partir de la secuencia principal) / brillo aparente (medido en la Tierra)

(v) Ahora un poco más lejos. Vamos a intentar mirar a unos ***200 millones de pársecs***. En esas distancias, en galaxias muy distantes, no podemos recurrir a las variables cefeidas simplemente porque no se pueden observar lo suficientemente bien. Así que deberemos acudir a otra metodología, la ***relación Tully-Fischer*** que se basa en la estrecha correlación entre las velocidades de rotación y las luminosidades de las galaxias espirales (*ver imagen de abajo*).



Relación Tully-Fischer. La luminosidad de la galaxia es proporcional a su masa bariónica (Imagen de wikipedia, dominio público)

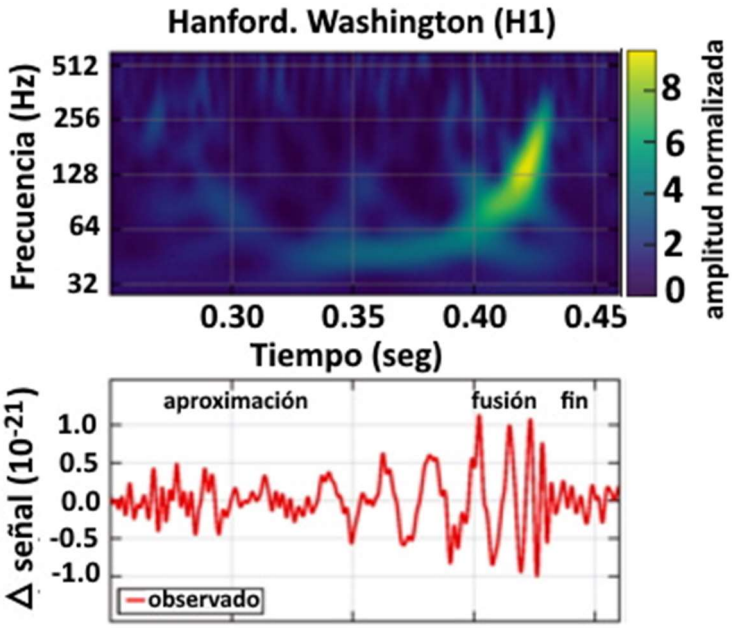
La relación, derivada de forma empírica y que tiene la expresión matemática que sigue, establece que la luminosidad de una galaxia espiral L es proporcional a la cuarta potencia de su velocidad máxima de rotación que, a su vez, se determina a partir de los corrimientos al rojo o al azul de las líneas en el espectro de la galaxia, en particular de la línea a 21 cm emitida por el hidrógeno neutro de la galaxia.

$(V_{max})^{\beta} \alpha$ L (distancia, brillo aparente) siendo $\beta \sim 3{,}8$

Por lo que una vez conocida la velocidad V y medido desde la Tierra el brillo aparente m, se puede deducir la distancia d a la galaxia.

(vi) En el margen anterior de distancias también se usa otra metodología cuya eficacia puede extenderse hasta ***1.000 millones de pársecs***. Se basa en la observación de otro tipo de candelas estándar, diferentes a las estrellas cíclicas, y que también son objetos astronómicos cuyas luminosidades se conocen bastante bien. Estamos hablando de observar a las nebulosas planetarias, a las supergigantes rojas o azules y a las supernovas de Tipo I que han demostrado ser especialmente fiables como candelas estándar. En el capítulo 31 hablaremos de ellas y podremos entender el porqué de la pequeña dispersión de los valores de las luminosidades de las supernovas de Tipo I y que es una consecuencia directa de las circunstancias que concurren en estos violentos eventos. De nuevo, conocida la luminosidad real y la aparente medida en la Tierra, podremos calcular la distancia a la que se encuentra la supernova.

(vii) ¿Y más allá? Nos queda la eficacia probada de la ***ley de Hubble***, explicada en el capítulo 24, que nos permite mirar con una aceptable seguridad ***a partir de unos 100 millones de pársecs y más allá***.

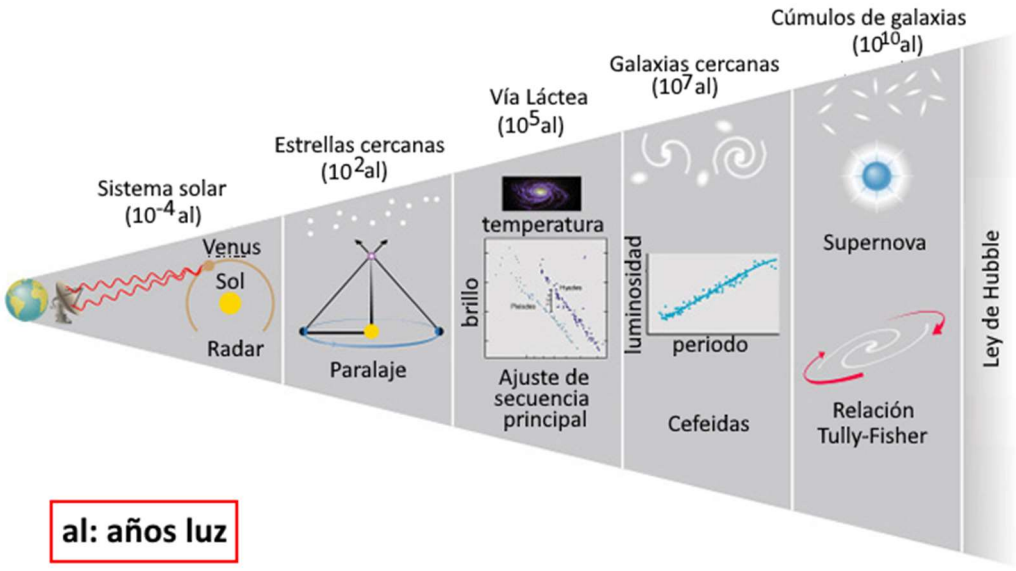


Onda gravitatoria GW150914 resultado de la fusión de dos agujeros negros detectada en la instalación de LIGO en Hanford, estado de Washington. En la parte de arriba una representación tiempo-frecuencia con un código de colores que nos permite ver como la frecuencia incrementa con el tiempo. Abajo la diferencia de señal medida entre ambos brazos del detector indicador de la forma de la onda gravitatoria (Imagen [5], ⓕ fair use)

También para ese "más allá" nos va a ser útil una técnica que se está estudiando reciente y que se conoce como ***sirena estándar***. Sirena en su acepción lingüística como instrumento acústico ululante. Esta especie de candela

estándar está basada en la existencia de ondas gravitatorias de las que tenemos constancia de su existencia, aunque con una estadística aún muy pobre. Ya sabemos que una onda gravitatoria es una perturbación del espacio/tiempo producida por un cuerpo masivo acelerado, aunque, realmente, la radiación gravitatoria que se conoce como su "luminosidad" se genera cuando dichas ondas son emitidas por ciertos objetos o por sistemas de objetos que gravitan entre sí.[6]

Las ondas gravitatorias que nos interesan son las que se originan en la fase de colapso de los sistemas binarios compactos, como las estrellas de neutrones o los agujeros negros, que tienen la propiedad de que tanto la amplitud como la forma de la onda gravitatoria emitida en momentos próximos a la fusión, lo que se conoce como el "chirrido", llevan "impresa" una cantidad ingente de información que, a la postre, permite calcular la distancia al punto donde se generaron. Esa "iluminación" hija de un baile binario actúa así como el análogo de una candela estándar, con la ventaja de que no requiere posteriores ajustes y comprobaciones con otros métodos definidos por la escalera de distancias cósmicas (ver figura de abajo).[7] La única suposición fundamental es que la relatividad general es válida. Debido a que la detección de ondas gravitacionales se parece más a escuchar una señal que a ver una imagen, su capacidad para determinar distancias les ha hecho valedoras del nombre de sirenas estándar.[8]



Escalera simplificada de distancias cósmicas, resumen de lo expuesto en este capítulo (Imagen modificada de David Darling,[9] fair use)

No creáis que los métodos explicados son todo lo que hay. La imaginación de los astrofísicos es extensa y quien quiera profundizar hay sitios donde consultar. Para iniciaros en ello os recomiendo la página correspondiente de la Wikipedia, versión inglesa, "*Cosmic distance Ladder*".

Acabamos aquí un par de capítulos que son más teóricos que biográficos. Estoy seguro de que nos han ayudado a entender mejor, o al menos nos ha aportado nuevos enfoques acerca de nuestra particular biografía que vamos a retomar en el siguiente capítulo, en el que hablaremos de un nuevo proceso cósmico que conocemos como ***la reionización***, y de cómo se pueden utilizar las técnicas explicadas en estos últimos capítulos para buscar sus límites temporales, así como para determinar la geometría y distribución de las grandes estructuras de nebulosas, gases y polvo repartidas por el vacío del Universo.

NOTAS DEL CAPITULO 25:

1. Este capítulo no tiene su parejo en el blog "*La Biografía del Universo"*. Sin embargo, creo que es una materia que puede enriquecer nuestro entendimiento sobre el Cosmos. Por eso aparece aquí un capítulo relacionado con las distancias y su medida.
2. En este capítulo solo describo los métodos más conocidos. Para una mayor información hacerca de un abanico mayor de posibilidades recomiendo la lectura del siguiente enlace [http://pages.astronomy.ua.edu/keel/galaxies/distance.html]
3. Los cúmulos estelares abiertos son grupos de estrellas formados a partir de una misma nube molecular, sin estructura y en general asimétricos. También se denominan cúmulos galácticos, ya que se pueden encontrar por todo el plano galáctico. Las estrellas de los cúmulos abiertos se encuentran ligadas entre sí gravitacionalmente. Las estrellas que albergan suelen ser jóvenes, masivas y muy calientes, y su número puede oscilar desde una decena hasta varios miles. Se encuentran repartidos en espacios del orden de la treintena de años luz y que, debido a las fuerzas de marea producidas por el centro de la galaxia, se van disgregando lentamente.
4. [http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR_Lyr.html]
5. Imagen extraída de la publicación "*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*", figura 1, B. P. Abbott et al., febrero 2016. [https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102]
6. Para más información ver el artículo "*Gravitational astrophysics*", Martin Hendry y Graham Woan, febrero 2007. [https://academic.oup.com/astrogeo/article/48/1/1.10/220585?login=false#2472425]
7. Se denomina ***escalera de distancias cósmicas*** a la sucesión de distintos métodos para realizar medidas de la distancia a objetos cada vez más lejanos

y que se han explicado en el texto. Cada uno de los métodos se basa en uno o más métodos de medida para distancias menores, lo que puede verse como los distintos pasos o peldaños de una escalera. Para avanzar un peldaño en la escalera es necesario haberse apoyado antes en el peldaño anterior.

8. "*Measuring cosmic distances with standard sirens*", Daniel E. Holz et al., Physics Today, 2018. [https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/117836/1/pt.3.4090.pdf]
9. [https://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/cosmic_distance_ladder.html]

26: La reionización

de 300 a 900 millones de años desde el inicio

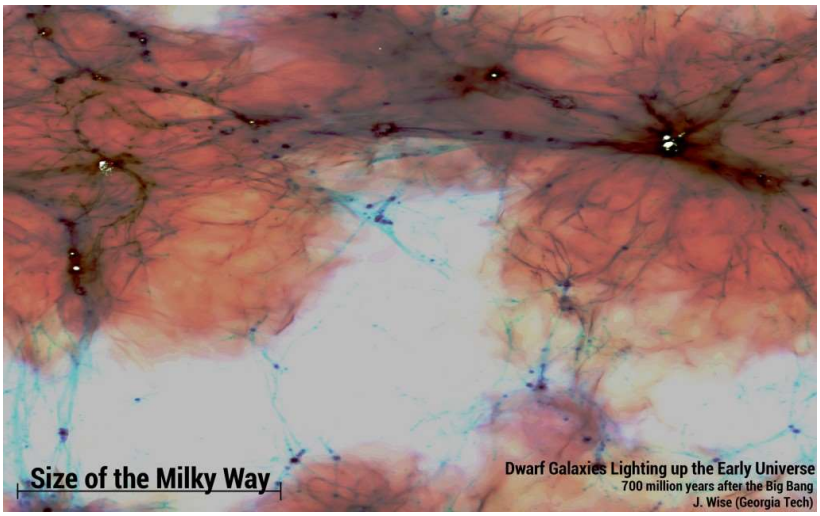
Los capítulos 22 y 23 nos hablaron del momento del inicio de los procesos de fusión en las primeras protoestrellas gracias a los que apareció la luz portadora de información. Gracias a ella, analizada por procedimientos espectrométricos, podemos saber mucho de esas épocas como se dijo en el capítulo 24. Su importancia nos obligó a pensar un poco en modo “teórico” para explicar qué era eso de los espectros luminosos. Y siguiendo con las bases de información, el capítulo siguiente lo aprovechamos para dar unas pinceladas acerca del cómo medir distancias en el Universo.

Parece que definitivamente había finalizado la edad oscura, aunque la alegría se iba haciendo esperar. Los fotones ultravioleta recién nacidos en las nuevas estrellas, se encontraban inicialmente con el hidrógeno neutro y molecular que llenaban el espacio. En general el átomo de hidrógeno neutro tiene la habilidad de absorber la luz de todas las longitudes de onda, pero como el nivel orbital fundamental está situado a 13,6 eV de energía, en el rango de los fotones UV, la luz ultravioleta es absorbida por completo quedando el hidrógeno ionizado.

Este escenario describe precisamente el comportamiento de los jóvenes fotones estelares de aquella época, que poseían suficiente energía para desestabilizar los electrones de los átomos de hidrógeno neutro en las nubes de gas. No solo conseguían que los electrones aumentaran su nivel energético en la estructura atómica, sino que, en algunos casos, el choque era tan violento que el electrón era expulsado del átomo, dejando al hidrógeno ionizado. No obstante, estos eran tiempos de incertidumbre y experimentación: los ecos de la recombinación todavía se sentían, lo que permitía que en ciertas regiones los protones liberados pudieran emparejarse nuevamente con los electrones.

Lo singular de este momento radicó en que, a medida que los gases estelares se comprimían y encendían, es decir, cuando los procesos de fusión nuclear comenzaban a consolidarse, se formaban regiones "esféricas" crecientes, burbujas en las que el hidrógeno neutro desaparecía, dejando en su lugar iones de hidrógeno y electrones libres. Estos electrones, a su vez, heredaban la energía de los fotones que habían ionizado los átomos de hidrógeno, lo que provocaba un aumento significativo de la temperatura bariónica de estas regiones, alcanzando valores cercanos a los 10^4 K. Esta mayor temperatura llevó a la expansión de la materia, lo que a su vez hizo que las burbujas de gas ionizado se ampliaran, se encontraran y se fusionaran, hasta que, con el tiempo, lograron llenar casi todo el espacio. Los fotones ultravioleta, así como aquellos

del rango visible, se desplazaban sin restricciones a través de este medio ahora ionizado. Quizás este haya sido el verdadero momento de "¡que se hizo la luz!" El Universo, y todos sus habitantes, entraban así en la era de la reionización.



Resultado de la simulación mencionada en el párrafo siguiente del texto. Muestra la estructura a gran escala del gas, que se distribuye en filamentos y grumos. Las regiones rojas son calentadas por la luz ultravioleta de las galaxias (resaltadas en blanco) (Imagen: John Wise, Royal Astronomical Society, ⓕ fair use)

Parece que las galaxias menores tuvieron una gran importancia. Un estudio teórico[1] apunta la posibilidad de que, a pesar de la densidad de rayos ultravioleta producidos en las galaxias mayores, las muy numerosas galaxias pequeñas fueron las principales responsables del proceso de reionización. En una de las simulaciones se ha podido observar cómo las más pequeñas y débiles, que contenían 1.000 veces menos estrellas y masa que la Vía Láctea y eran 30 veces más pequeñas, contribuyeron con un 30% de la radiación ultravioleta durante la reionización. La explicación a esta aparente contradicción está precisamente en su tamaño, que permitía a los fotones escapar con mayor facilidad al espacio intergaláctico.

Los fotones ionizantes que escapaban de las estrellas y de las galaxias se abrían camino a través de las regiones circundantes de alta densidad en donde los procesos de recombinación aún se estaban produciendo a un alto ritmo, formando una frontera de ionización que inducía cambios y ajustes en la materia bariónica así que pasaba la ola, conocida como *onda de choque*. Detrás quedaba el hidrógeno ionizado rodeando a los núcleos de las protoestrellas como si fuera una "bola de niebla". A medida que avanzaba la onda, la densidad del gas con el que se encontraba era cada vez menor, lo que disminuía la probabilidad de ionización, hasta llegar a su práctica desaparición. Por fuera de ella la recombinación seguía su proceso conocido. Durante este período vemos como en el medio intergaláctico se estaban diferenciando dos tipos de zonas

caracterizadas unas como regiones altamente ionizadas separadas de otras, las regiones neutras, por los frentes atrapados de fotones UV. Se estaba viviendo el inicio de un nuevo Universo.

A esa fase inicial le siguió otra conocida como de *"superposición"* durante la que las crecientes regiones ionizadas, definidas por los frentes de ionización alrededor de las estrellas o galaxias, comenzaron a superponerse, fundirse y crecer de volumen, expandiéndose sobre las regiones exteriores de gas neutro. En ellas el gas intergaláctico quedaba expuesto a los fotones ionizantes de ambas fuentes lo que hizo que la intensidad ionizante en su interior aumentara rápidamente.

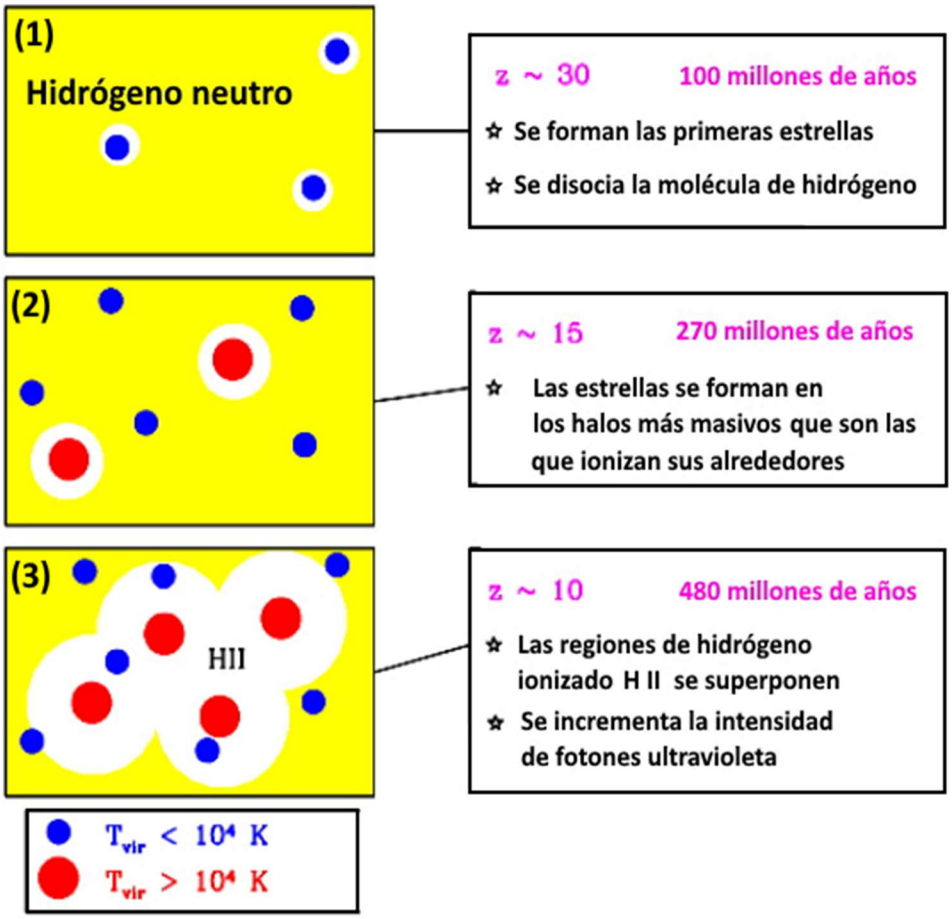
Al final de esa etapa de superposición la mayoría de las regiones del gas intergaláctico habían quedado sometidas al influjo de las múltiples fuentes luminosas, tal como comentamos, lo que hizo que se calentaran hasta temperaturas superiores a 10^4 K. Ya sabemos que esta circunstancia incrementaba el límite de las masas de Jeans necesarias para los futuros colapsos ¿y eso qué quiere decir? Como es evidente que los colapsos se produjeron, lo que simplemente quiere decir es que las galaxias de segunda generación fueron capaces de acrear más material bariónico y conseguir así alcanzar un tamaño mayor que el de las primeras. En consonancia con esa mayor depredación de materia impuesta por las grandes, las galaxias más tenues no tuvieron demasiado futuro ya que, al haber menos material para acrear, lógicamente disminuyó en ellas la capacidad de generar nuevas estrellas. Ese escenario marcaría el final de la fase de "superposición" fijando el hito que se conoce como el "***momento de la reionización***". Momento en que todo este proceso había culminado.

Y como una imagen vale más que cien palabras en el croquis siguiente intento resumir lo que se estaba viviendo en aquellas épocas.[2]

Cuadro (1). Las primeras grandes nubes gaseosas aparecidas en regiones de alta densidad colapsaron en épocas que se correspondían con corrimientos al rojo entre 20 y 30, alrededor de hace unos 13.700 millones de años. Poco a poco se fueron fragmentando en galaxias aisladas y nuevas estrellas gracias al enfriamiento producido por el ventilador del hidrógeno molecular. Pronto este se iba a ir agotando por acción de la recién aparecida radiación UV.

Cuadro (2). Para seguir con la compactación y la fragmentación del halo necesaria para la generación de nuevas estrellas, una vez perdido el ventilador molecular se necesitó el atómico. En el capítulo 22 ya resaltamos la gran importancia de la temperatura de virialización de 10^4 K porque a partir de ella es cuando este último fenómeno refrigerador se hace muy eficaz. Eso quiere decir que era más probable el que las nuevas estrellas se formaran en los halos más masivos, aquellos que pudieran contener galaxias con temperaturas superiores a los 10^4 K. La mayor parte de la radiación que ionizó el universo

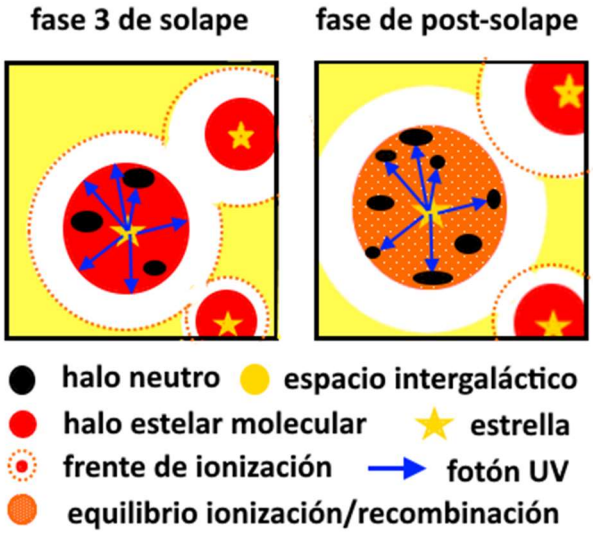
tuvo que ser emitida desde esas galaxias.[3] Fue durante esta fase en la que en el medio intergaláctico tomaron cuerpo las dos fases claramente diferenciadas: unas regiones altamente ionizadas separadas por frentes de ionización de las regiones con hidrógeno neutro.



Cuadro (3). Durante la larga fase final los halos ionizados se fueron superponiendo hasta llegar a una situación que de forma muy intuitiva la han descrito, usando un símil lácteo, los físicos teóricos Abraham Loeb y Steven R. Furlanetto: "*Durante la época en que el Universo tenía unos pocos cientos de millones de años, la distribución de hidrógeno se vio perforada con agujeros y parecía un queso suizo. Los agujeros fueron creados por la radiación ultravioleta de las primeras galaxias y agujeros negros que ionizaban el hidrógeno cósmico que se encontraba en su vecindario*."[4]

De hecho, aún quedaba una última fase **(4)** que se conoce como de "*post-solape*". Recoge los momentos durante los cuales, y gracias a la falta de homogeneidad inicial de la densidad en el gas intergaláctico, incluso dentro de las burbujas ionizadas quedaban zonas de gas neutro que se resistían a ser ionizadas. Mientras las burbujas de gas ionizado fueran pequeñas, la radiación UV podía alcanzar fácilmente las fronteras de las burbujas y continuar propagándose sin encontrar zonas de gas neutro donde la radiación fuera

absorbida. Esto significaba que la ionización avanzaba de forma eficiente. Pero la situación cambió.

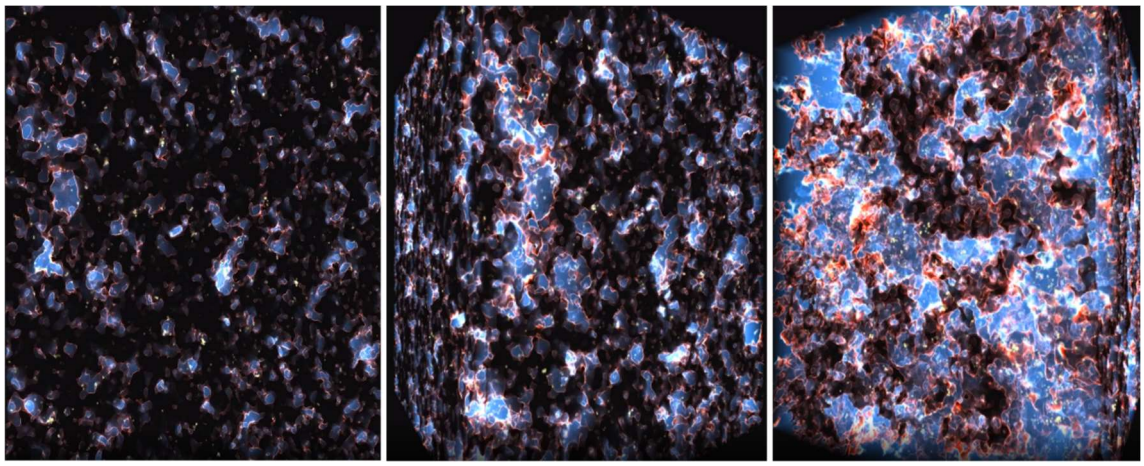


A medida que las burbujas de gas ionizado se expandían, empezaron a solaparse con otras burbujas ionizadas, lo que significaba que las zonas de gas neutro dentro de las burbujas también aumentaban. Esto creaba una mayor "superficie de colisión" para los fotones UV. Es decir, que más zonas de gas neutro dentro de estas burbujas estaban expuestas a la radiación UV, lo que reducía la cantidad de fotones que seguían avanzando hacia el gas neutro que aún quedaba por ionizar. La disminución de fotones UV llevó a un aumento en las recombinaciones (cuando los electrones se recombinan con los protones para formar hidrógeno neutro). En estas regiones donde la ionización era más difícil, las recombinaciones ocurrieron a un ritmo más alto, lo que afectó al equilibrio entre ionización y recombinación: cuando las recombinaciones aumentan, el sistema se acerca a un equilibrio en el que el número de ionizaciones (fotones UV que ionizan el hidrógeno) es igual al número de recombinaciones (formación de hidrógeno neutro de nuevo). Esto significó que, aunque aún hubiera fotones UV, las recombinaciones equilibraron el proceso y la reionización del hidrógeno se fue ralentizando hasta que se alcanzó un punto de equilibrio. De todo ello hablaremos con más detalle en el capítulo siguiente

Se piensa que el proceso de reionización comenzó a tomar forma en el entorno de los trescientos millones de años después del Big Bang y podemos decir que fue bastante rápido a escala temporal cosmológica. Duró más o menos unos seiscientos millones de años más, años de continua expansión, tras los que el proceso de ionización se ralentizó lo suficiente debido a que las partículas se habían alejado mucho unas de otras. Se supone que a los 300 millones de años tras el Big Bang el universo estaba reionizado en un 20%; doscientos cincuenta millones de años después pasó a estarlo en un 50 % y en prácticamente su totalidad, porque aún quedan bolsas de hidrógeno neutro, a los 860 millones de años del Big Bang. Y así sigue hasta el día de hoy. Por supuesto que al helio le

pasó igual, también se ionizó, pero en un momento diferente de nuestra historia, más tarde, lo más probable hace entre once y diez mil millones de años.

Es muy difícil estudiar directamente esta antigua época con los telescopios actuales. Las galaxias se resisten, escondidas en la niebla de la profundidad temporal del cosmos.[5] Pero podemos recurrir a modelos computacionales que intenten reproducir lo que pasaba. Uno de esos estudios es el realizado por Marcelo A. Álvarez et al. publicado en 2009.[6] Su objetivo era correlacionar el universo que observamos actualmente con el de la época de la reionización, ya que el Universo de hoy en día debe conservar aun las marcas de aquellos momentos. Desarrollaron un modelo que les permitió analizar y visualizar lo que pudo haber pasado y que queda reflejado en forma muy parcial en la serie de imágenes siguiente que corresponden, de izquierda a derecha, a épocas con desplazamientos al rojo cada vez menores, cubriendo un lapso temporal que va desde unos 300 millones de años tras el Big Bang hasta 650 millones de años, ya finalizando la reionización. Las regiones ionizadas son las azules y translúcidas los frentes de ionización son rojos y blancos; y las regiones neutras son las oscuras y opacas. La reionización todavía es bastante heterogénea en estas grandes escalas, con inmensas regiones ionizándose mucho antes que otras.

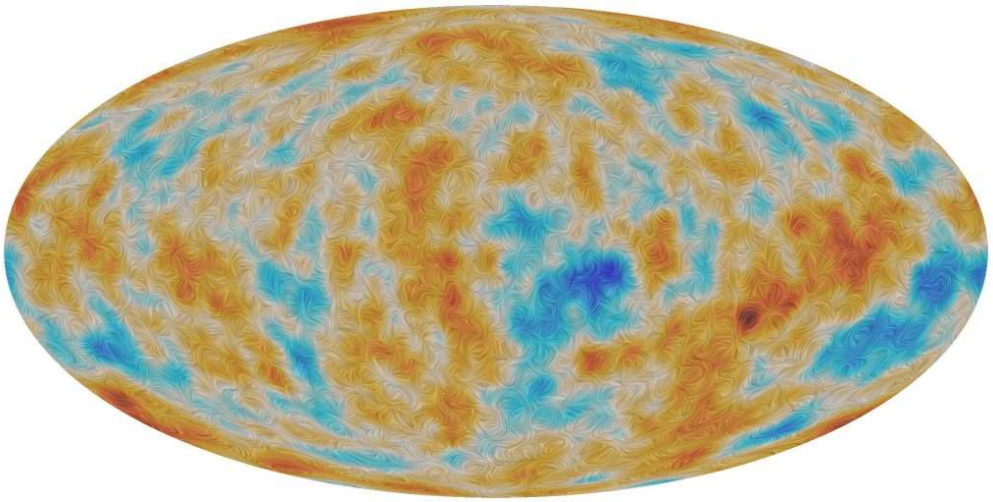


Visualización del progreso de la reionización resultante del cálculo de Marcelo A. Álvarez et al. mencionado en el texto. El campo analizado corresponde a un cubo con dimensión comóvil de aproximadamente 4,5 años luz. (Imagen[6], ⓕ fair use)

Una forma de determinar con más exactitud la época de la reionización es estudiando la polarización de los fotones de la radiación de fondo de microondas. Sabemos que en el plasma inicial radiación y electrones se dispersaban mutuamente. Una de las consecuencias fue la polarización de estos fotones reminiscentes de la recombinación, que podemos observar en la imagen de más abajo, tal como ya lo explicamos en el capítulo 19 dedicado a la radiación de fondo.

Os invito a imaginar. Desde nuestro puesto de lectura proyectemos nuestra mirada virtual hacia el infinito del Cosmos. Desde el fondo de nuestro canal de visión nos llegan los fotones polarizados de la radiación de fondo: llevan 13.400 millones de años de viaje. Desde nuestra posición de observadores nos sorprende el ver unas polarizaciones diferentes a las esperadas… aunque la sorpresa nos dura sólo unos instantes ¡sabemos que tienen que estar producidas por los choques con los electrones liberados durante la reionización que aún andan navegando por el vacío, en su largo camino hacia nosotros!

Comparando el patrón de polarizaciones que observamos hoy en día con el que debió ser el inicial tras la recombinación hace 380.000 años, obtendremos información de lo que sucedió entremedias, información que tuvo que ver con la población de electrones de la reionización. A partir de ello podemos determinar el número de electrones que están en la columna de gas ionizado a la que estamos mirando, "carretera" de los fotones que nos vienen desde aquel momento inicial. Como conocemos la densidad de electrones en el universo, podemos deducir la longitud de esta columna y, por tanto, el momento de la reionización. Lo que permite conjeturar que el universo comenzó a reionizarse aproximadamente en z=11 y acabó en z=7. Es decir, el proceso se extendió entre los años 420 y 770 millones tras el Big Bang.

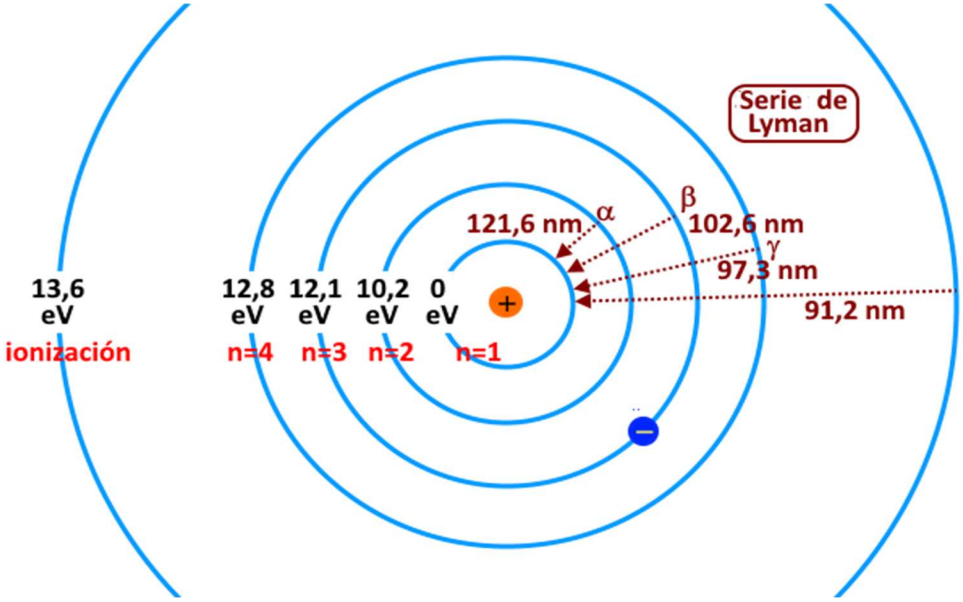


Visualización de la polarización de la radiación de fondo de microondas detectada por la misión Planck. El color representa la temperatura mientras que la textura tiene que ver con la dirección de la luz polarizada (Imagen: ESA/Planck Collaboration, uso libre no comercial)

Otra forma de estudiar el mismo fenómeno pasa por analizar los espectros de los primeros cuásares contemporáneos de la reionización.[7] Sus espectros suelen ser bastante uniformes, así que cualquier alteración que observemos desde nuestra posición tiene que ser debida a algo que hay interpuesto, átomos que interactúan con sus emisiones luminosas dejando su huella en los espectros que recibimos en forma de un determinado patrón de líneas de absorción. Una

de las alteraciones que resultan más útiles para los cosmólogos es lo que se conoce como líneas de emisión Lyman-α. Vamos a intentar explicarlo.[8]

Para ello, recapitulemos un poco situándonos en los momentos iniciales tras la recombinación, cuando aún no había llegado la reionización. El espacio estaba lleno de mucho hidrógeno, un 93%, y hasta el 100 era casi todo helio. En este mundo hidrogeniano las nuevas estrellas comenzaron a emitir fotones en un variado espectro de frecuencias. Entre ellos los de 121,567 nanómetros de longitud de onda veían el mundo como un imposible, ya que pronto caían en las garras de los hidrógenos neutros. Y eso ¿por qué?

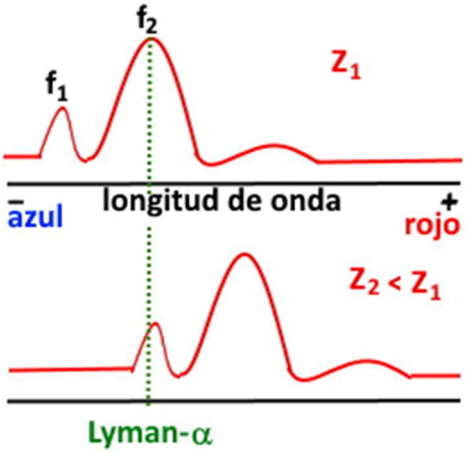


Esquema del átomo de hidrógeno con los posibles niveles donde puede situarse su electrón. Se indica también la serie de decaimientos de Lyman. Hacemos mención especial a la emisión Lyman-α que se produce al caer a n=1 un electrón que había pasado previamente a n=2 al ser excitado por un fotón.

Baste saber que en el mundo cuántico del átomo de hidrógeno la diferencia de energía permitida entre el orbital electrónico más bajo y el siguiente es exactamente la que corresponde a una onda de esta amplitud: 121,567 nanómetros.[9] Radiación ultravioleta. Dentro del espectro del hidrógeno se le conoce como la línea Lyman-α. Cuando los fotones de esta frecuencia salían de los procesos de fusión nuclear en las nuevas estrellas, se encontraban con los átomos de hidrógeno neutro que podían absorberlos, quedando anulados para el resto del universo. Mientras aún había hidrógeno neutro, el espectro de la luz de los cuásares allí presentes, vistos hoy en día, presentan una melladura negra, precisamente en la frecuencia de la línea Lyman-α, tanto más invisible cuanto más hidrógeno se interpusiera en su camino.

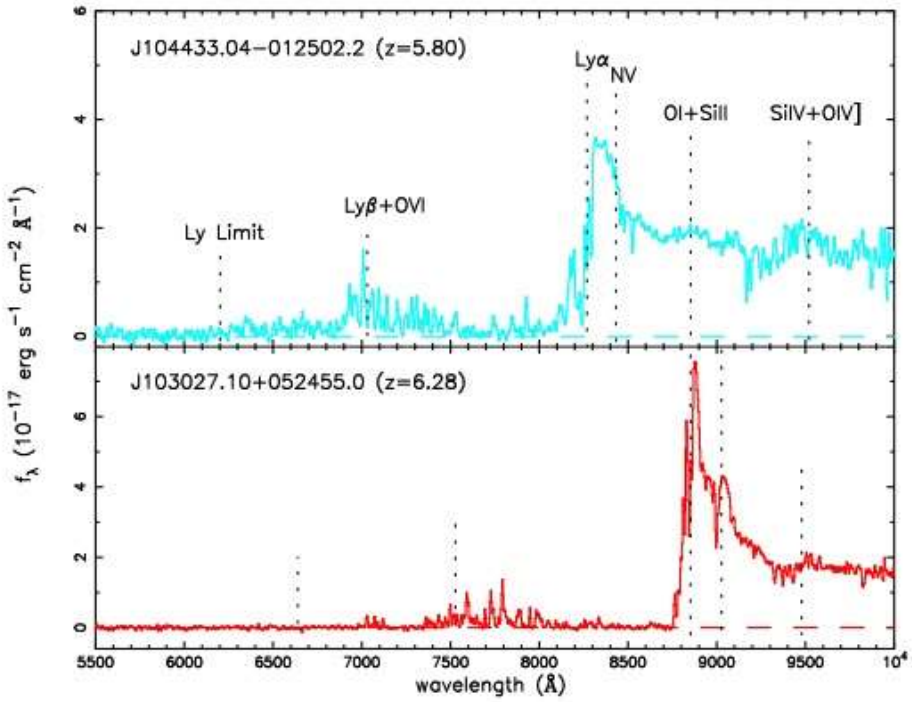
Llegó la reionización y desapareció el hidrógeno neutro ¿todo? Ya sabemos que no. En el Cosmos aún encontramos grandes nubes de gases en donde se ha refugiado siendo así que el hidrógeno neutro es un componente abundante en las galaxias. Y eso tiene su influencia, ya que con una pequeña cantidad de átomos de hidrógeno neutro en la población de partículas en el gas intergaláctico -incluso uno por cada 10^5 ionizados- ya se nota su efecto de absorción en el espectro de las estructuras luminosas distantes. Como la de los cuásares.

Las curvas que siguen son un esquema teórico del espectro de emisión de un hipotético cuásar en dos momentos cósmicos correlativos z_1 y z_2, en donde destaca una frecuencia, la f_2, que fijamos como la Lyman-α. Debido a la expansión del Universo que alarga las longitudes de onda de los fotones mientras se acercan a nosotros los actuales observadores, todas las líneas de emisión del espectro a z_1 se han desplazado hacia frecuencias "más rojas". Y si particularizamos esos corrimiento en las longitudes de onda más cortas que la Lyman-α (por ejemplo, el pico f_1), tenemos que pensar que en algún momento y en algún lugar z_2, al "enrojecerse" alcanzarían el valor de la frecuencia Lyman-α (f_2). Si esto último sucedía en unas regiones en las que hubiera hidrógeno neutro, con su tremenda capacidad de interactuar con este tipo de fotones, todas estas frecuencias del tipo f_1 quedarían fuertemente absorbidas, o incluso anuladas.



De forma que en el tramo ultravioleta del espectro de la luz de los objetos que estemos analizando -por ejemplo, cuásares lejanos- se va a detectar hoy una atenuación de la luz sobre la teóricamente esperada debido a las absorciones intermedias causadas por el hidrógeno neutro en el medio intergaláctico. A este "desierto" de luz se le conoce como la *depresión de Gunn-Peterson*. En los espectros de objetos luminosos lejanos que emitieron su luz antes del final de la reionización, este efecto es mucho más pronunciado que en los espectros de objetos más cercanos (es decir, de épocas posteriores a la reionización). De hecho, la presencia de este "desierto" en un espectro se toma como un criterio para determinar el límite de la reionización.

Las curvas siguientes corresponden al espectro real de dos cuásares. Uno de ellos -arriba- se encuentra en un corrimiento al rojo z= 5.80, mientras que el otro -abajo- está más lejos, a z=6.28. En cada uno de los dos el pico mayor corresponde a la frecuencia Lyman-α inicialmente 1216 Å, y podemos observar que están muy corridos al rojo, con longitudes de onda ocho o nueve veces mayores.[10] Si nos fijamos en ambos espectros en la altura de los picos que quedan a su izquierda, podemos comprobar que en el cuásar lejano prácticamente han desaparecido comparados con los del cercano. Es el efecto Gunn-Peterson que nos está diciendo: "*por aquí anda la frontera del final de la reionización, en z=6, cuando el universo tenía más o menos 950 millones de años de antigüedad*". Si ahí acabó el proceso, los cosmólogos se atreven a postular que bien pudo comenzar en el momento z=10, cuando tenía 480 millones de años luz. Muy parecido a lo que nos dijo el estudio de las polarizaciones.

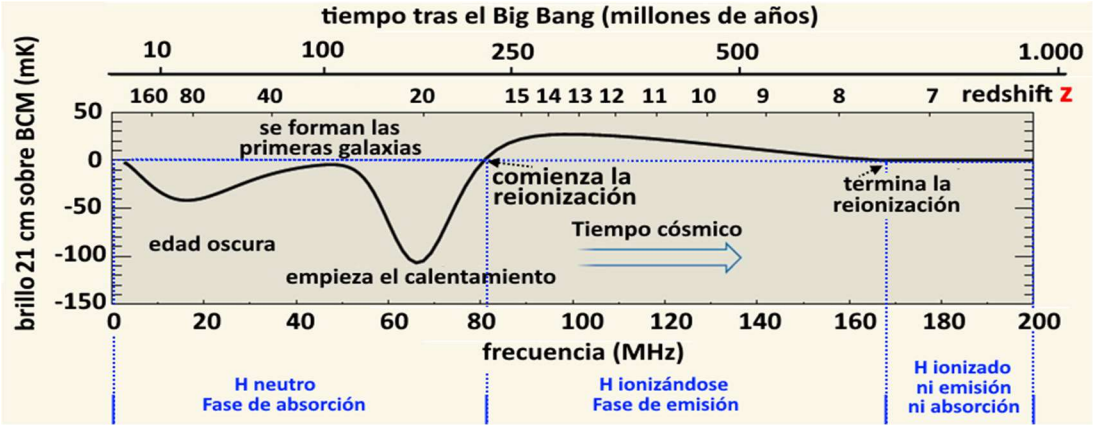


Comparación de los espectros de dos cuásares, cada uno a cada lado de la frontera del fin de la reionización (Imagen: Robert H. Becker, ⓕ fair use)

Un último método para estudiar el periodo temporal cubierto por la reionización. Ya lo anunciamos en el capítulo 24 al hablar de la espectroscopia de los fotones de longitud de onda 21 centímetros. Para la toma de información se necesitan antenas de radio ya que esta longitud de onda cae en ese entorno de frecuencias. Pensad que esos fotones nos llegan ahora estirados hasta una longitud de onda superior a los dos metros. Y claro está, desde cualquier punto del espacio que contenga hidrógeno neutro susceptible de ese tipo de desexcitaciones, nos llegaran líneas de absorción o emisión con su correspondiente corrimiento al rojo.

Imaginemos una serie de "fotogramas" de su momento y los ordenamos desde el de la recombinación hasta el de hoy (*ver figura de abajo*). Cada fotograma está marcado con el valor de la diferencia entre la temperatura de la población de fotones 21 cm y la de los fotones del fondo cósmico de microondas. A este parámetros le llamamos el brillo diferencial y lo referenciamos como una temperatura que indica la cantidad diferencial de energía que recibimos en cada momento de los dos tipos de fotones. [11] Si esta diferencia es positiva, significa que el gas está más caliente que el fondo, lo que indica que puede haber procesos de calentamiento o ionización en curso, aunque la señal de 21 cm proviene exclusivamente del hidrógeno neutro restante. Si la diferencia es negativa, el gas está más frío que el fondo, y observaremos una señal de absorción, lo que sugiere que la mayor parte del gas aún está en estado neutro.

Con esa información podemos montarnos una especie de espectro continuo ordenado en el tiempo ¿cómo lo ordenamos en el tiempo? Viendo el corrimiento al rojo de los fotones 21 cm propios de cada momento. En la figura están expresados como z's o propiamente como la variación al rojo con que nos llega la frecuencia 1420 MHz de los fotones 21 cm propia de cada uno de los "fotogramas".



Historia del Universo temprano según lo que nos dice los fotones 21 cm. BCM: radiación de fondo de microondas (Imagen [12], ⓕ fair use)

Ahora bien, la forma específica de este espectro no es aleatoria ya que depende de múltiples factores que influyen en la intensidad de las emisiones y absorciones en cada etapa cósmica. Por ejemplo, las condiciones "estáticas" de la población bariónica, como puede ser su densidad (y dentro de ella el peso porcentual del hidrógeno neutro y la relación de las poblaciones "espines paralelos/opuestos" de ese último). O también, la temperatura del fondo de microondas referencia obligada para las emisiones/absorciones. Incluso depende de las condiciones "dinámicas" externas, aquellas que van a provocar en el paisaje anterior las excitaciones/desexcitaciones del hidrógeno neutro: la velocidad con que los bariones van a chocar, la energía de los fotones del fondo con los que puede interactuar y, una vez que se hubieron encendido las estrellas,

y por los mismos motivos, la radiación UV (Lyman-α). Todo ello explica la forma de la curva "espectro continuo" de más arriba.

Durante los primerísimos compases tras la recombinación aún se produciría el acople, vía interacciones Compton, entre la materia bariónica y el fondo de microondas. Las temperaturas de ambas eran iguales y por tanto no había potencial de excitación en los niveles hiperfinos del hidrógeno. Nuestro espectro se sitúa en el nivel 0, no hay señal diferencial. Pero con la expansión adiabática la temperatura bariónica disminuyó a un ritmo $(1+z)^2$ mientras que la del fondo lo hacía a un ritmo $(1+z)$, por lo que pronto se eliminó tal acople Compton quedando la excitación de los bariones en manos de los choques entre partículas que fijaban su temperatura promedio. Se estaba generando un potencial excitatorio en el sentido de la temperatura mayor, la del fondo, a la menor, la de los bariones: eso se tradujo en un periodo de absorción en la que la curva de brillo diferencial cae por debajo de cero. Con la continua expansión los bariones se van separando, los choques entre ellos van disminuyendo, pudiéndose acoplar su temperatura, de nuevo, a la que imponía la del fondo. Volvemos al nivel cero.

Hasta que se encienden las primeras estrellas que comienzan a emitir fotones UV (Lyman-α) con suficiente energía como para calentar y acelerar a los bariones y volver a acoplar el potencial excitatorio de la estructura hiperfina a los choques entre ellos. Con ello se indujo una nueva fase de absorciones más potente que la anterior. A medida que las primeras estrellas van muriendo, alguna deja tras de sí a un agujero negro emisor de potentes rayos X. Esos SI son capaces de calentar a los bariones a temperaturas muy superiores a la del fondo, provocando entonces el inicio de una senda de emisiones 21 cm. Ese recorrido se puede observar en nuestro particular "espectro" como un perfil de disminución de intensidad en las líneas de absorción, que llegarán a anularse, para transformarse en positivas cuando la temperatura bariónica supera a la del fondo: en esa recién estrenada fase de emisiones comienza el periodo de reionización del hidrógeno neutro. Situación que se prolonga en un continuo desangrado, hasta que todos esos átomos se ionicen y ya no haya posibilidad de más emisiones: fin del periodo de la reionización.[12]

Eso nos lo dice la teoría y las simulaciones. En la vida real aún no hemos llegado tan lejos. Aunque hay varios proyectos en marcha con resultados prácticos, como el MWA (*Murchison Widefield Array*) que es el que hoy por tiene la mayor ventana de observación: entre 80 y 300 MHz, que corresponden a z's entre 5 y 20. Muy lejos aún de la época de reionización. En la actualidad se está desarrollando el proyecto SKA (*Square Kilometer Array*) que promete: "*Una vez que esté en funcionamiento, el telescopio SKA-Low podrá tomar las mejores medidas posibles de las primeras fuentes de luz del Universo. También*

va a poder tomar instantáneas de las emisiones de hidrógeno antes, durante y después de la reionización.".[13]

Con eso damos por suficiente desarrollada la presentación acerca de la reionización acontecida durante los años iniciales de dominio de la materia en el Universo. En el siguiente capítulo vamos a iniciar los primeros compases de definición de sus estructuras, todo un mundo en evolución que seguiremos analizando paso a paso en profundidad.

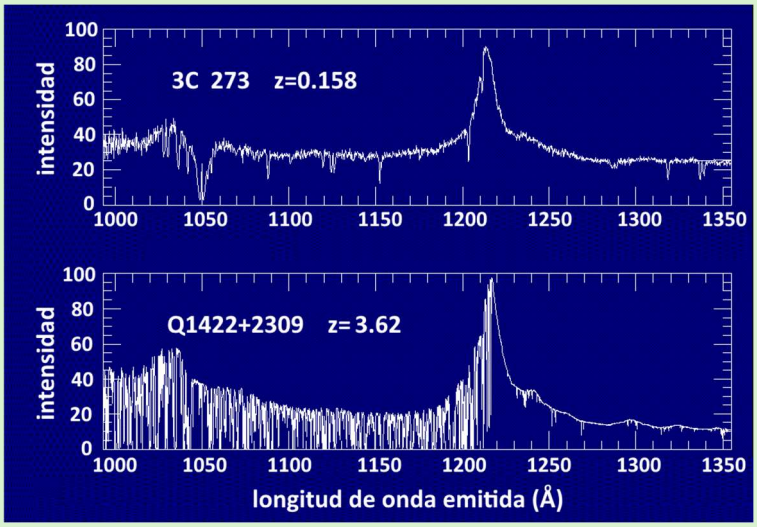
Usando la espectrometría (capítulo 24) para mirar a la reionización (capítulo 26) y obtener distancias a los objetos cósmicos (capítulo 25)

Ya sabemos que los cuásares son objetos con una tremenda intensidad de emisión de luz y que, además, al estar muy alejados, esa luz barre grandes distancias en el espacio/tiempo gravando en sus ondas información de gran parte del Universo observable.

(Imagen modificada de S. G. Djorgovski et al., Caltech. Produced with the help of the Caltech Digital Media Center, CC BY-SA 4.0)

Más allá de la idea de la "depresión de Gunn-Peterson", un continuo desierto en el espectro que dibuja la era de la reionización, podemos sacar partido de las absorciones Lyman-α en el espectro de los cuásares producidas al atravesar su luz las grandes nubes de gases de abundante hidrógeno neutro que quedaron tras la reionización. No es teoría… lo podemos detectar en las

correspondientes gráficas espectroscópicas en donde vamos a encontrar unas características franjas de absorción.

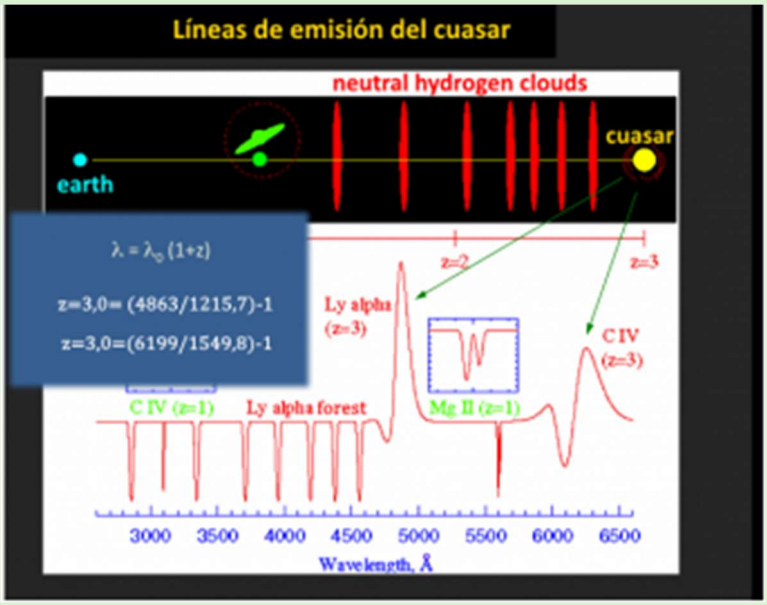


Comparación de los bosques Lyman-α en el espectro de la luz de dos cuásares, uno más próximo que el otro (Imagen: [14] a partir de Bill Keel, fair use)

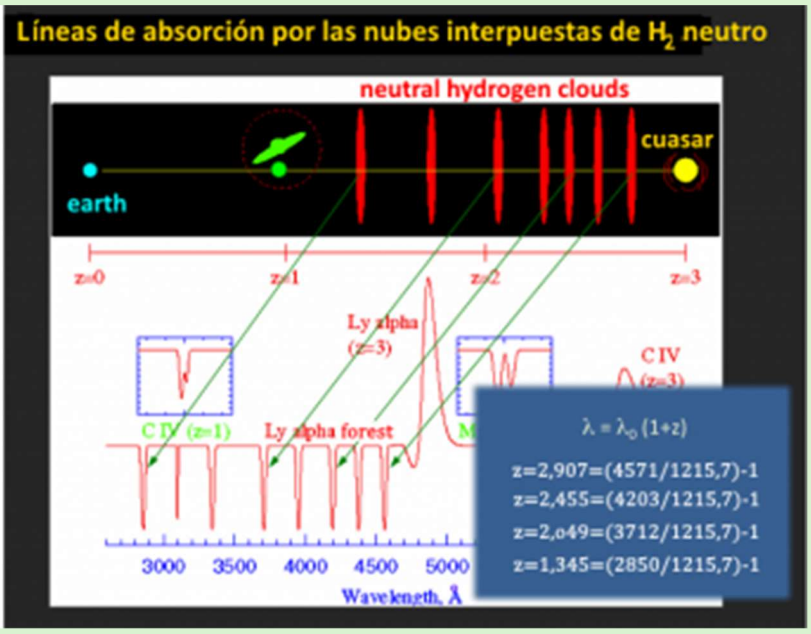
Cada una de ellas corresponde a una distancia en la que algún pico de la emisión original del cuásar se ha alargado hasta la longitud de onda Lyman-α, cayendo en el pozo del hidrógeno neutro que allí se encontraba tal como podemos apreciar en la figura anterior. En ella claramente podemos ver los picos de sierra negativos de la izquierda correspondientes a las absorciones Lyman-α de la luz de los cuásares en las nubes de gas interpuestas. Generalmente, cuanto más alejado esté el cuásar, más nubes de hidrógeno neutro ha tenido que atravesar su luz antes de llegar a nuestro ojo y, por tanto, más picos negativos se ven cómo podemos apreciar en los espectros de la luz emitida en z=0,158 y la más lejana en z=3,62. Al conjunto se le conoce como el "bosque Lyman-α". Los árboles que ocultan la luz. Pero… si cada "muesca" en la curva corresponde a la absorción Lyman-α causada por una nube de gas neutro en el espacio y, además, vemos el corrimiento al rojo con la que lo percibimos… tenemos una riquísima información como para hacer un mapa espacial de estas masas de gas. Y de algún cuerpo astronómico adicional que se interponga en el camino. Y así es, como vamos a explicarlo mediante la secuencia de imágenes que sigue.

Las tres imágenes siguientes corresponden al mismo espectro de la luz que proviene de un cuásar del fondo del universo (en amarillo a la derecha), aunque en cada una hemos particularizado un aspecto relativo a la densidad de masas de gas interpuestas o al efecto de otros cuerpos cósmicos.[15] Aunque es la incógnita, en nuestro ejemplo se ha optado por dibujar el cuásar en z=3 y su luz llega hasta el observador actual (en azul a la izquierda, earth)

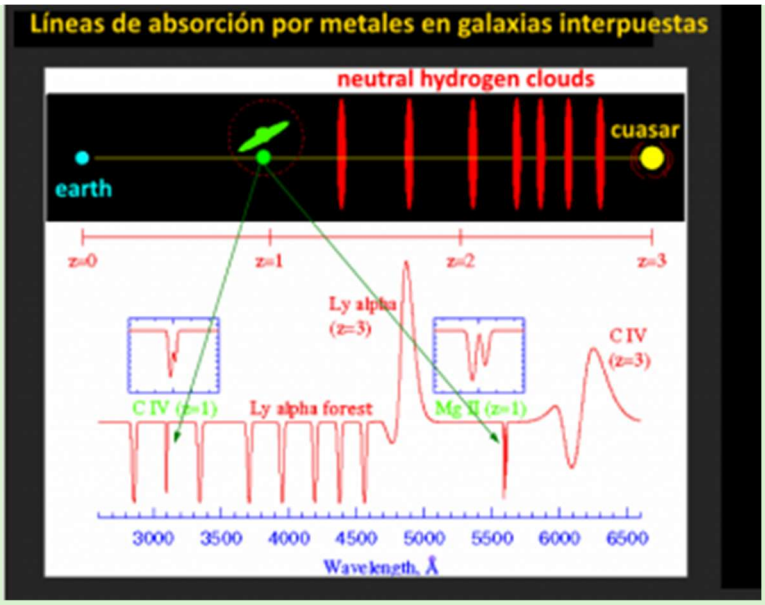
atravesando varias nubes de hidrógeno neutro (en rojo) a varias distintas z y una galaxia (en verde). El espectro que medimos es el que dibuja la curva roja.



En los cuadros numéricos sobre fondo azul podemos ver el cálculo que nos dice cuánto se ha corrido al rojo la línea Lyman-α de la luz del cuásar. Así, en el cuadro de arriba medimos 4.863 Å como la longitud de onda que corresponde a la Lyman-α del cuásar -es el gran pico que se ve-, corrimiento al rojo que nos permite calcular que se encuentra en z=3.



A medida que la luz del cuásar va atravesando las nubes de gas de hidrógeno neutro (cuadro de arriba), éste absorbe los fotones que con la expansión se han ido corriendo al rojo hasta la frecuencia Lyman-α para las distintas distancias z de cada nube. Es el bosque de depresiones de la parte izquierda de la curva.



Más allá hay una galaxia más joven en cuya composición hay elementos pesados que absorben también frecuencias de luz del cuásar (cuadro de abajo). Son los pozos marcados como C IV (z=1) y Mg II (z=1) [en verde].

En resumen, la posición de picos y pozos nos están indicando el corrimiento al rojo y, en consecuencia, el lugar de las masas interpuestas y de la emisora de luz.

NOTAS DEL CAPÍTULO 26:

1. "*The birth of a galaxy – III. Propelling reionization with the faintest galaxies*" de John H. Wise et al., publicado en la revista Monthly Notices de la Royal Astronomical Society, 26-junio-2014. [https://arxiv.org/pdf/1403.6123.pdf]
2. "*In the Beginning: The First Sources of Light and the Reionization of the Universe*", figura 4, Rennan Barkana, mayo 2011. [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0010468.pdf]
3. Tenían más que capacidad para ello. Podemos intentar hacer un cálculo estimado de la potencia de las fusiones en la reionización de aquellos momentos cuando se estaban encendiendo las primeras estrellas debido a la fusión de los átomos de hidrógeno. Pensemos que cada átomo de

hidrógeno fusionado libera $7x10^6$ eV de energía. Cada átomo de hidrógeno necesita 13,6 eV para ionizarse. Luego en las estrellas cada átomo de hidrógeno fusionado -en realidad se necesitan para ello dos- era capaz de ionizar hasta $5x10^5$ hidrógenos. La masa del Sol es 10^{58} veces la del protón, luego una estrella de sus características podría haber ionizar ella sola hasta 10^{63} átomos de hidrógeno. En el Universo hay aproximadamente uno 10^{80} protones, luego con las fusiones de 10^{17} estrellas se ionizaría al Universo al completo ¡y pensamos que hay 10^{22}!

4. "*The first Galaxies in the Universe*", página 5, Abraham Loeb y Steven R. Furlanetto, Princeton University Press, 2013.
5. Aunque los científicos siguen en la tarea. Gracias a los datos conjuntos del telescopio Hubble y del Gran Telescopio de Canarias, utilizando técnicas de lentes gravitatorias, se ha podido descubrir y estudiar una primigenia galaxia de 1.200 millones de años de antigüedad -A370-L57- con un núcleo de jóvenes estrellas en formación de unos 10 millones de años, cuyos descubridores aseguran "*... sus propiedades hacen de ella una buena representante de la población de galaxias responsables de la reionización cósmica*." Lo podéis leer en el artículo "*SHARDS Frontier Fields: Physical properties of a low mass Lyman-alpha emitter at z=5.75*" de Antonio Hernán-Caballero et al. (octubre 2017).
   [https://arxiv.org/abs/1710.00826]
   Y aún anterior, a 600 millones de años tras el Big Bang: la galaxia UDFy-38135539 descubierta mediante el Very Large Telescope de ESO en el norte de Chile. Este es el enlace a la página de ESO que lo anunciaba:
   [https://www.eso.org/public/spain/news/eso1041/]
6. "*Connecting Reionization to the Local Universe*", Marcelo A. Álvarez et al., 2009.
   [iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/703/2/L167/pdf]
   El siguiente enlace corresponde a un precioso vídeo con la secuencia temporal de la simulación de Álvarez. Es de donde he extraído las imágenes del texto.
   [https://cdn.eso.org/videos/hd_and_apple/eso1041d.m4v]
7. Los cuásares son objetos lejanos que emiten grandes cantidades de energía. Se suponen que son agujeros negros que capturan estrellas o gas interestelar formando una especie de galaxia, proceso en el que se emite su intensa radiación. La palabra cuásar es un acrónimo de "*quasi stellar radio source*" -fuentes de radio casi estelares-.
8. Para una mayor información de las líneas espectrales y saber a qué proceso físico corresponde eso de las emisiones Lyman-α, no os perdáis la entrada "*Qué es la estructura hiperfina*" del blog hermano "*El Tamiz*":
   [http://eltamiz.com/2014/10/20/que-es-estructura-hiperfina/]

9. Recordemos que ambos valores, energía y longitud de onda (frecuencia), se correlacionan según Planck de acuerdo con la siguiente ecuación: $E = h.f = h/\lambda$.

10. Å es igual a 10^{-10} metros. La longitud de onda visible roja está sobre los 7.000 Å.

11. La intensidad recibida de una onda de una determinada frecuencia no deja de ser más que una indicación de su energía integrada. Pero sabemos que la energía de una onda es igual a h.f o si consideramos que es parte de un todo "cuerpo negro" también tiene que ver con lo que nos dijo Boltzman, K_B. T. Lo que nos permite asimilar una intensidad de una onda como una temperatura.

12. "*21-cm Cosmology in the 21st Century*", Jonathan R. Pritchard y Abraham Loeb, Reports on Progress in Physics, julio 2012. [https://arxiv.org/pdf/1109.6012.pdf]

13. Página oficial del proyecto SKA (Square Kilometer Array) [https://www.skao.int/]

14. [http://pages.astronomy.ua.edu/keel/agn/forest.html]

15. Las imágenes se han obtenido a partir de *"The Quasar Absorption Line Group"* de la New Mexico State University, ⓕfair use. [http://astronomy.nmsu.edu/cwc/Group/QALsims/]

27. Sobre los frentes de ionización

En este capítulo vamos a ampliar lo mencionado en el anterior acerca del frente de choque de la ionización.

La radiación ultravioleta generada por los incipientes procesos de fusión nuclear en las protoestrellas interactuaba con una masa de materia bariónica que continuaba colapsando hacia el centro "cayendo" a velocidades supersónicas a través de un entorno extremadamente denso. En este medio, los fotones UV colisionaban con los átomos de hidrógeno neutro, provocando su ionización y generando un protón y un electrón libres:

$$\text{Hidrógeno neutro} + \text{fotón}_{UV} \rightarrow \text{protón} + \text{electrón}$$

Estos electrones y protones libres heredaban la energía de los fotones UV, una energía que determinaba la temperatura de los gases circundantes. Al calentarse, estos gases respondían expandiéndose y alterando el entorno inmediato de la protoestrella. Este proceso creaba una frontera difusa y exterior, generalmente esférica, que avanzaba a través del medio interestelar. Esta frontera, que conocemos del texto, es el ***frente de ionización***.

Dentro del espacio limitado por este frente predominaban los iones de hidrógeno que coexistían con una pequeña población de átomos neutros relictos de la recombinación. La proporción de estos últimos había disminuido drásticamente de forma que las simulaciones realizadas por los físicos indican que la relación era aproximadamente de un átomo neutro por cada 10^5 ionizados.

A pesar de su escasez relativa, los átomos neutros dentro de la burbuja ionizada desempeñaron un papel crucial puesto que las recombinaciones seguían siendo extremadamente importantes en este entorno. Estas recombinaciones descritas por la reacción:

$$\text{protón} + \text{electrón} \rightarrow \text{hidrógeno neutro} + \text{fotón}$$

eran también una fuente significativa de fotones que podían arrastrar un amplio abanico de energías, dependiendo del nivel orbital al que cayera el electrón libre al recombinarse con el protón.

A medida que avanzaba hacia el entorno exterior el frente de ionización alteraba drásticamente la continuidad del gas de hidrógeno neutro. Era comparable a un tsunami o una onda de choque. En el lado ionizado predominaban una alta temperatura, velocidad y presión; mientras que al otro lado el entorno era mucho más relajado, con temperaturas cien veces menores y presiones 200 veces inferiores.

Podría pensarse que este “pistón” ionizado afectaría inevitablemente la termodinámica de la región menos densa, pero no siempre era así. Todo dependía de la velocidad a la que se propagaba el “ariete” del frente de ionización. Si avanzaba a velocidades supersónicas en comparación con la velocidad del sonido en el gas exterior, los bariones neutros apenas podían reaccionar ¡Y en aquellos momentos estas velocidades rondaban los miles de kilómetros por segundo! Así que el gas neutro ambiental, "sorprendido" por el empuje del flujo ionizado, no tenía tiempo para reorganizarse y adaptarse suavemente a las nuevas condiciones. En lugar de eso, se acumulaba justo frente al avance del frente, empujado y comprimido por la presión de la onda de choque que seguía avanzando inexorablemente.

Solo en casos aislados, algún barión neutro permeaba el frente “bajo la ola”, pero solo si era ionizado previamente por los fotones UV al otro lado de la frontera. En gran medida esta capacidad para absorber e ionizar los bariones del entorno dependía de la velocidad del frente de ionización. Lo que a su vez estaba directamente relacionado con el número de fotones ionizantes disponibles en el interior del frente y los que llegaban hasta él. Cabe recordar que las poblaciones de fotones UV no solo incluían los producidos por las fusiones estelares, sino también los generados por las recombinaciones.

Estos fotones provenientes de las recombinaciones tenían un impacto significativo en la velocidad del frente. Cada recombinación añadía un nuevo fotón ionizante al sistema, aumentando el número total de fotones que podían alcanzar el frente. Sin embargo, detrás de cada recombinación quedaba un átomo de hidrógeno neutro, que muy probablemente volvería a ser ionizado al absorber otro fotón UV, casi siempre de origen estelar. Por lo tanto, en términos netos, los fotones provenientes de recombinaciones no añadían un impacto real sobre el avance del frente.

La situación se complicaba más debido a las características energéticas de los fotones generados en las recombinaciones. Existen procesos, como las recombinaciones tipo B, en los que los electrones caen a niveles orbitales superiores al nivel base del hidrógeno. Estos procesos emiten fotones de menor energía, incapaces de causar nuevas ionizaciones y prácticamente invisibles al medio. Estos fotones escapaban fácilmente hacia el exterior, disminuyendo la población efectiva de fotones ionizantes y ralentizando el avance del frente de ionización.

Además, la densidad de los fotones UV estelares en el frente de ionización disminuía naturalmente en proporción al cuadrado del radio a medida que avanzaba. Esta dispersión añadía otro factor que contribuía a ralentizar el frente de ionización.

Con el tiempo la velocidad del frente se equilibraba alcanzándose una situación estacionaria. Este punto teórico de ruptura se producía cuando el número de

ionizaciones igualara al de recombinaciones, lo que detendría la expansión del frente.

La velocidad del frente de ionización estaba definida por el frente según la siguiente relación hasta cierto punto lógica:

$$V_f \alpha \dot{N}_\gamma / n_H$$

siendo $\dot{N}_\gamma$ la tasa de fotones ionizantes y n_H la densidad de hidrógeno neutro.

Por tanto, la velocidad va a depender de varios factores:

1. Disponibilidad de fotones ionizantes

La velocidad del frente de ionización depende principalmente de la tasa de llegada de fotones UV capaces de ionizar átomos de hidrógeno neutro. Si dentro del frente hay más hidrógeno que necesita ionizarse, se va a requerir dentro de la bolsa de gases una mayor cantidad de fotones para mantener la ionización (por dispersión o absorción), lo que va a disminuir la tasa de fotones disponibles en el frente: la velocidad del frente se reduce.

2. Densidad del hidrógeno neutro

Un frente de ionización que avanza hacia regiones con mayor densidad de hidrógeno neutro necesita consumir más fotones para mantener su progreso. Esto ralentiza la expansión del frente ya que cada fotón ionizante consumido deja menos disponibles para cubrir nuevas áreas del medio neutro. Por el contrario, en zonas de menor densidad de hidrógeno neutro el frente puede avanzar más rápidamente.

3. Recombinaciones dentro del frente

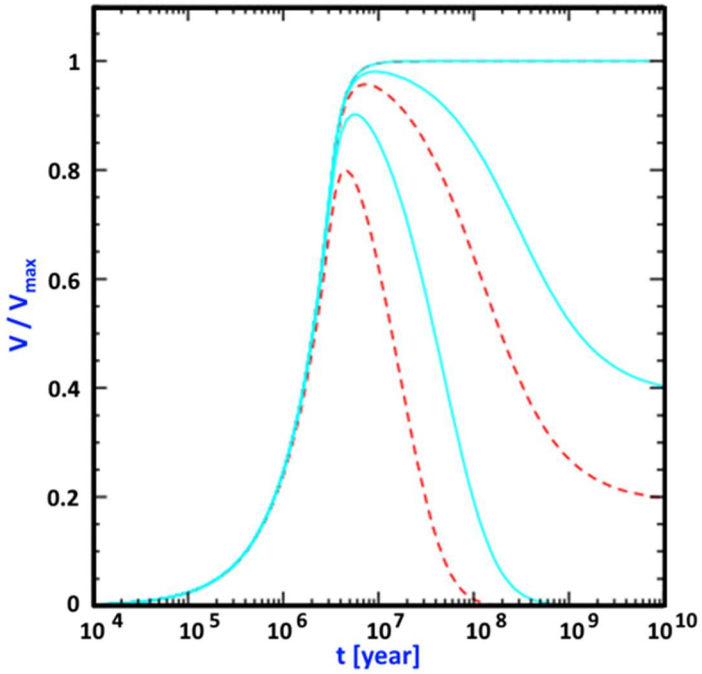
Las recombinaciones que se produzcan dentro de la bolsa de gas delimitada por el frente influyen en su dinámica porque cada recombinación requiere un fotón adicional para mantener la ionización del átomo que se ha recombinado. Esto significa que un mayor nivel de recombinaciones reduce la cantidad efectiva de fotones disponibles para ionizar hidrógeno neutro adicional, lo que ralentiza la velocidad del frente. Pero…

4. Energía de los fotones disponibles

Lo cual es lógico. Aunque en particular diremos que los fotones emitidos en algún tipo de recombinaciones, en las que el electrón no se posiciona en el primer nivel fundamental, suelen tener energías más bajas, lo que los hace incapaces de ionizar nuevos átomos de hidrógeno. En estos casos, aunque haya fotones en el sistema no contribuyen directamente al avance del frente. Y no solo eso. En la práctica la expansión del frente provocaba una disminución gradual en la densidad de recombinaciones dentro de la región ionizada, por lo

que, proporcionalmente, el número de fotones UV de recombinación también disminuía.

Antes de llegar a un frenado total, el frente experimentaría una **desaceleración progresiva**. Este cambio en la dinámica tiene una consecuencia crucial y es que al ralentizarse el frente deja de ser supersónico como en sus etapas iniciales. Llegando el momento en que su velocidad se iguala a la del sonido en el medio exterior hacia el cual se expande.



Expansión de la región de hidrógeno ionizado alrededor de una fuente ionizante aislada. V significa aquí el volumen. (Imagen[1], figura 21-, ⓕfair use)

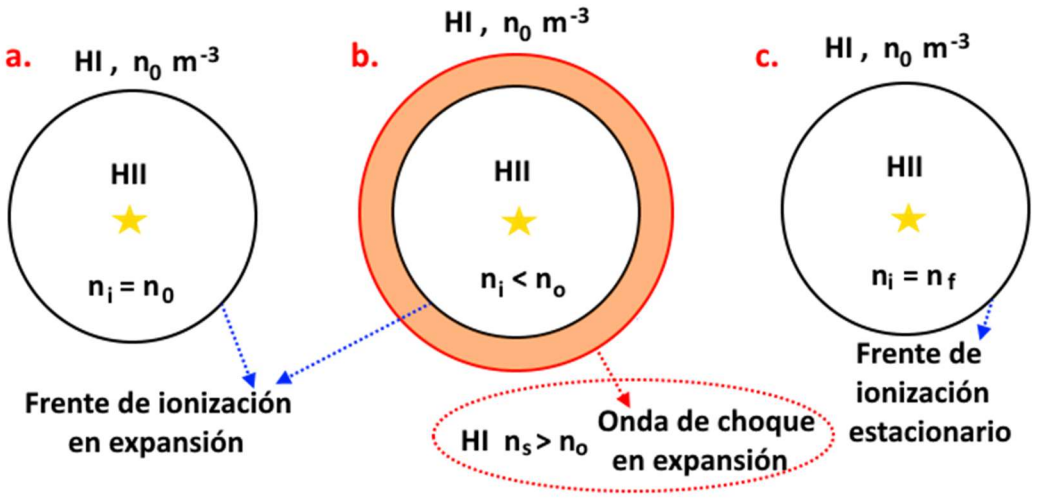
¿Qué ocurre en esta nueva situación? Cuando el frente avanza a velocidades subsónicas el gas neutro del exterior tiene tiempo para reaccionar ante el empuje. Ya no se acumula pasivamente como antes, incapaz de adaptarse. En su lugar, la onda de choque generada por el frente logra acoplarse a los bariones del gas neutro, aumentando su densidad. Esta mayor densidad del medio exterior ralentiza aún más el avance del frente, que eventualmente queda "atrapado". A partir de ese momento la velocidad de expansión del frente se ajusta a las condiciones termodinámicas del medio circundante. En este estado el frente forma una especie de fino caparazón por lo que la onda de choque deja de ser tan extrema. Finalmente, el proceso alcanza un punto en el que la densidad del gas ionizado disminuye lo suficiente como para que la presión en la frontera se equilibre con la del gas neutro del otro lado. En ese instante la expansión de la burbuja se detiene.

Un estudio, cuyas conclusiones vemos en la figura anterior, analiza cómo las burbujas de hidrógeno ionizado pudieron expandirse en dos épocas cósmicas

diferentes, para z = 10 (curva azul) y para z = 15 (curva roja). El análisis contempla tres hipótesis que se diferencian en la tasa de recombinaciones del hidrógeno ionizado. La hipótesis superior asume ausencia de recombinaciones, mientras que en las otras dos, en sentido descendente, se incrementa progresivamente la frecuencia de recombinaciones. Es significativo observar cómo en todos los casos el máximo volumen posible del halo ionizado se alcanzaría aproximadamente 10^7 años después del "encendido" inicial de la fuente emisora de rayos ultravioleta.

Vemos que a partir del momento de máximo el tamaño se mantiene en el tiempo si no hay nuevas recombinaciones del hidrógeno ionizado. Sin embargo, se observa un lógico decremento del volumen del halo en los caso con recombinaciones, tanto mayor cuanto mayor es el número de esas. No nos sorprende ya que eso es precisamente lo que hemos explicado en el texto.

****



Esquema evolutivo de una región HII (hidrógeno ionizado) en expansión (Imagen modificada de "Physics of the Interstellar Medium", [2] *J.E. Dyson y D.A. Williams, Manchester University Press, 1980, ⓕ fair use)*

La imagen anterior nos está dando una explicación visual somera de lo apuntado hasta ahora. La "foto" (a) corresponde a la etapa inicial de la expansión del frente de ionización. Esta etapa avanza rápidamente, por lo que la densidad del gas ionizado interior n_i disminuye, acercándose a valores de la densidad del medio circundante, n_o. En el momento (b) la frontera de la ionización continúa expandiéndose por lo que el gas ionizado caliente crea una onda de choque que también se mueve invadiendo el medio exterior de hidrógeno neutro HI, creando así un particular caparazón en cuyo interior crece la densidad, de forma que $n_s > n_o$. En la etapa final (c) se ha llegado a un equilibrio de presión entre la región ionizada y el medio ambiente.

NOTAS DEL CAPÍTULO 27:

1. "*In the Beginning: The First Sources of Light and the Reionization of the Universe*", figura 21, Rennan Barkana, mayo 2011. [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0010468.pdf]

2. "*Physics of the Interstellar Medium*", figura 7.2, J.E. Dyson y D.A. Williams, Manchester University Press, 1980. [https://dokumen.pub/the-physics-of-the-interstellar-medium-3nbsped-0367457326-9780367457327.html]

28: La época de los cuásares

de 300 a 3.000 millones de años desde el inicio

Los dos últimos capítulos los dedicamos al proceso de la reionización del Universo. Prefiero llamarle *proceso* más que *época*, ya que realmente fue un prolongado cambio físico "atómico" que condicionó al mundo físico "vivencial" del Cosmos. Y eso sí es parte de una biografía. De todas formas, estáis en vuestro derecho de discrepar conmigo. En el presente capítulo intentaré describir lo que pasaba al margen de lo que implicó la reionización, cosas y personajes que se prolongan más allá de los tiempos ionizantes.

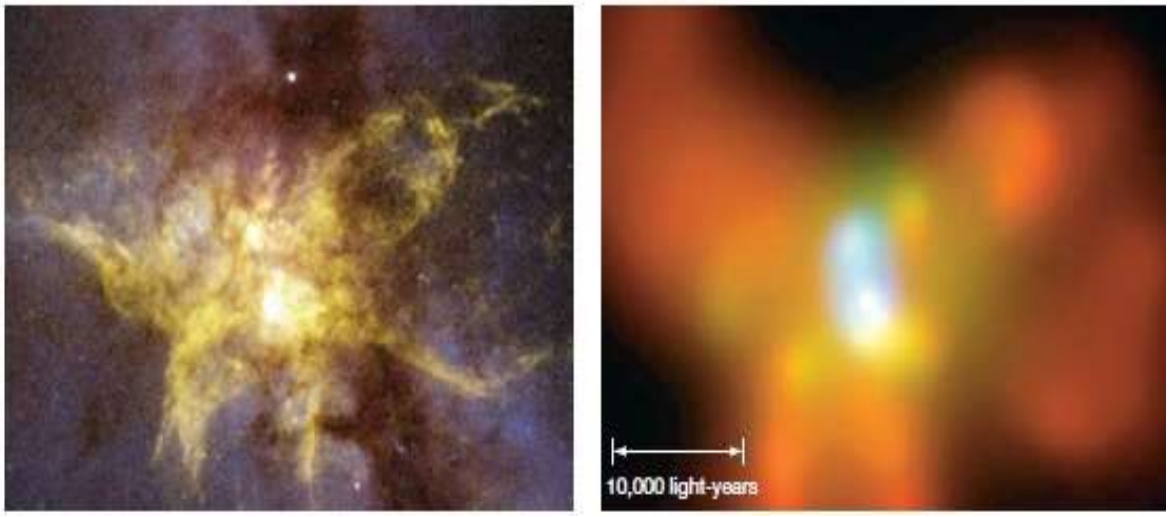
Inicio con un resumen que contextualice lo que había ahí y entonces. Las masas de gas arrastradas por la materia oscura estaban colapsando y habían conseguido generar densas zonas de materia. Se empezaban a ver galaxias, muchas, tenues, pequeñas y de diversas formas resultado de los procesos azarosos que estaban ocurriendo. También estaban presentes los agujeros negros, que quizás ya venían desde la recombinación; agujeros negros que quizás fueron los motores de las jóvenes galaxias enanas que, a la par de encender sus estrellas, pasaban por sus etapas juveniles, algunas como cuásares, para con posterioridad irse uniendo y modificando sus estructuras hacia formas elípticas o espirales. Toda la dinámica dependía de las masas en juego y de los choques y fusiones que se iban produciendo, choques que en aquellos momentos de gran densidad galáctica, el Universo era aún pequeño, ocurrían con bastante frecuencia. Entre los dos y tres mil millones de años tras el inicio se llegó al punto álgido. Más allá, una vez reagrupada la materia y ensanchado el Universo, se entró en una fase más estable, lo cual no quiere decir que todo se hubiera acabado. Evidente siguieron sucediendo cosas y las estamos observando.

Sabemos que los agujeros negros tuvieron su papel en los colapsos gravitatorios iniciales con los que se iniciaron las estructuras del Universo. Y que estaban ahí antes de que se cumplieran los primeros 500 millones de años. Teóricamente creemos que para que apareciera uno tuvo que pasar tan sólo unos 100 millones de años tras el Big Bang. Pero el problema es que la tasa de crecimiento de los que vemos supera cualquier límite teórico.

Hemos encontrado cuásares con agujeros negros supermasivos en su interior, de entre 500 millones de masas solares a poco más de mil millones, y que se remontan a una época en la que el Universo tenía alrededor de 700 millones de años. También, gracias a satélites como el Hubble que investiga el campo profundo del Universo en los rangos de la luz visible y ultravioleta, y el satélite Chandra, que hace sus prospecciones en la frecuencia de los rayos X, podemos

estudiar los agujeros negros que se estaban formando en el momento de nuestro análisis. Comparando las imágenes de ambos telescopios se concluye que la mayoría de las fuentes de rayos X detectadas corresponden a agujeros negros súper masivos. No sabemos mucho cómo se formaron, porque los que observamos están a mil millones de años tras el Big Bang y son de masas hasta cien mil veces la del Sol, por lo que sería difícil de explicarlos como colapso de alguna estrella masiva.

Los cosmólogos están trabajando en resolver el problema tamaño/edad y hay ideas que podrían explicar el dilema. Una de ellas se apoya en que en los inicios las corrientes de gas ultra masivas y frías colisionaron en los puntos de confluencia de materia en la red cósmica que entonces estaba emergiendo -proto galaxias o cúmulos de estrellas fusionándose- lo que haría que en pequeños volúmenes de gas, en un lugar determinado, se elevase la densidad hasta unos 100.000 masas solares. Por cierto, lo de la red cósmica es una realidad que va a ir saliendo a lo largo del contexto de este libro y consiste en que la materia del Universo se fue organizando como una tela de araña o, mejor, como la masa de espuma en la superficie de nuestra bañera. Diversas hipótesis nos dicen que se generaron directamente a partir de una reacción de acreción en cadena en grandes nubes de gas; otras que por colapso de estrellas muy masivas de cerca de 10^6 masas solares en el interior de alguna primitiva galaxia enana; mientras que otras afirman que los agujeros negros se generaron pasando por otros agujeros negros intermedios que, por fusión, dieron lugar a los que vemos con Hubble y Chandra.



Pistas de un agujero negro binario en la galaxia NGC 6240. A la izquierda, lo detectado por el Hubble en el rango de las frecuencias visibles y, a la derecha, lo detectado por Chandra en el rango de los rayos X (Imagen: "NASA/CXC/SAO", uso libre no comercial)

Un estudio de la NASA de 2016 parece decantarse hacia la hipótesis de colapso, sugiriendo que según las observaciones obtenidas de los observatorios

mencionados -Chandra X-ray, Hubble Space Telescope o Spitzer Space Telescope- se tienen evidencias de que al menos algunos de los primeros agujeros negros se formaron directamente a partir del colapso de una nube de gas, sin pasar por estadios intermedios.[1] Pero en otro estudio del 2002 hecho por el Observatorio Chandra X-ray se comenta que tras haberse descubierto a NGC 6240, se vio que era una galaxia con un agujero negro binario en proceso de fusión. Aunque es una galaxia muy cercana, los astrónomos piensan que el proceso fue similar a lo que pudo suceder en los primeros momentos.[2] Fuera como fuere, los fenómenos que los formaron estaban ahí desde el principio jugando un papel fundamental en lo que estaba sucediendo.

Normalmente estos agujeros negros se encontraban en el centro de galaxias o de cuásares, absorbiendo la materia que se ponía a su alcance y siendo el motor del giro de estas grandes estructuras cósmicas. De forma que casi está establecida la regla de que cada galaxia brillante, ya sea de las activas o no,[3] contienen un agujero negro central supermasivo. Los cuásares son objetos normalmente muy lejanos que emiten energía en frecuencia de radio[4] y que hasta hace poco no se sabía que están asociados con una galaxia, por lo que se cree que deben ser algo así como una fase de juventud en la generación de esas estructuras. Esa circunstancia hace que su estudio nos pueda dar muchas pistas sobre la formación de las galaxias. La dificultad de ver la galaxia asociada al cuásar está en que son objetos muy lejanos y que, por tanto, la sutileza de la luz de la galaxia hace que quede velada por la más intensa emisión del cuásar. Sin embargo, la tecnología de los telescopios modernos nos permite discernir la luz en una variada escala de frecuencias que además podemos filtrar con los modernos equipos de forma que al eliminar la luz de los cuásares aparece la lejana galaxia.

De hecho, gracias a estas tecnologías se están observando más cuásares a grandes distancias -sobre todo entre mil y tres mil millones de años tras el Big Bang- lo que demuestra que eran mucho más numerosos en los inicios que hoy, cuando las primeras galaxias se estaban formando en grandes cantidades. Esa circunstancia ha hecho que algunos hayan designado a esta fase como la ***época de los cuásares***.

Es posible que la breve duración de la época cuásar se deba a que, para que se activen, se necesita la combinación de un agujero negro inicial y una abundante cantidad de materia circundante que alimente su actividad. Esta materia, al caer hacia el agujero negro, genera el disco de acreción cuya radiación caracteriza a los cuásares. Sin embargo, la cantidad de materia requerida para mantener un cuásar activo es tan grande que su "combustible" se agota en un periodo relativamente corto, de apenas unos pocos millones de años. Para que un cuásar pudiera brillar durante más tiempo, sería necesario un "motor" más potente, quizás generado por la fusión de varios agujeros negros más pequeños. Este

proceso podría ocurrir en el núcleo de una galaxia joven, donde las colisiones galácticas y las altas densidades de gas favorecen la formación de un agujero negro supermasivo lo suficientemente grande como para acumular grandes cantidades de materia y mantener la actividad del cuásar por más tiempo. Además, estas fusiones podrían redistribuir gas y polvo hacia el núcleo galáctico, proporcionando más materia para el disco de acreción y prolongando la vida del cuásar. Sin embargo, a medida que las galaxias evolucionan, el gas disponible disminuye y las interacciones gravitacionales se reducen, limitando la capacidad del cuásar para mantenerse activo.

La época de los cuásares comenzó más o menos en un corrimiento al rojo de z=6/7, es decir, a los 800 millones de años tras el Big Bang, aunque tuvo su momento álgido dos mil millones de años más tarde debido a la mayor complejidad de algunos de los procesos de fusión de varios agujeros negros.

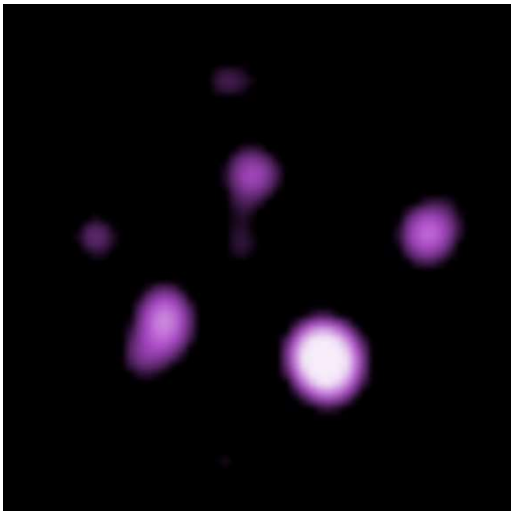


Imagen del cuásar H 1413 + 117 obtenida por el telescopio en rayos X Chandra. Aparece cuatro imágenes por efecto de lente gravitatoria producida por alguna masa interpuesta entre el cuásar y nosotros. Se encuentra más o menos a unos 2.700 millones de años tras el Big Bang (Imagen: NASA/CXC/Penn State/G.Chartas et al, uso libre no comercial)

Hasta ahora venimos haciendo un largo camino en nuestro relato. De las masas de gases a los agujeros negros, y de ellos a los cuásares para llegar ahora a las galaxias. Aunque antes de seguir con la descripción detallada de estas últimas debemos introducir una teoría que explica los procesos asociados a sus nacimientos. Se necesita la concurrencia de unas determinadas circunstancias físicas cuyos fundamentos teóricos quedaron explicados en el capítulo 22. Las recordamos:

i. un halo de materia oscura virializado.
ii. un eficiente ventilador de bariones.
iii. suficiente masa como para permanecer estable frente a las realimentaciones dinámicas provocadas por sus propias estrellas.

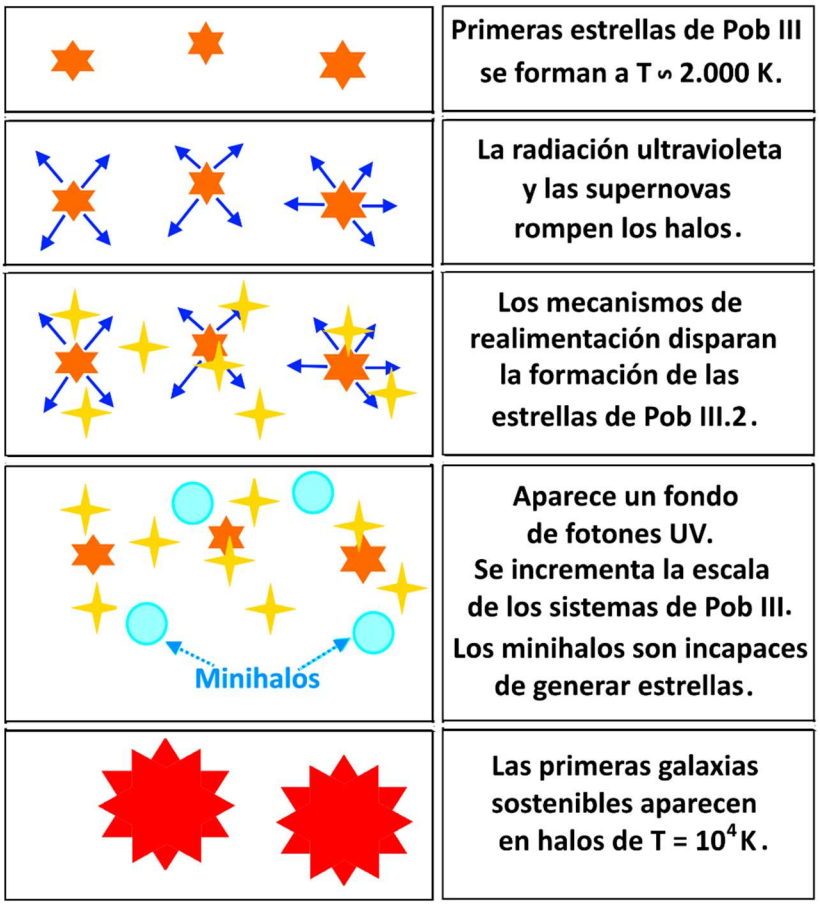
iv. suficiente masa como para permanecer estable frente a las realimentaciones dinámicas provocadas por los halos vecinos.

En su conjunto el camino de generación de galaxias dibuja un proceso muy definido en sus diversas fases temporales. Y lo que sigue pretende ser la posible historia de esos racimos de luces. Historia de estrellas.[5] En el texto he puesto en cursiva aquellos párrafos que me parecen mejor definen cada paso del proceso, y cuyo mensaje refuerzo con la figura de más abajo.

Las primeras estrellas de la Población III se formaron en el interior de halos galácticos, gracias al enfriamiento de la materia bariónica facilitado por los "ventiladores" de gas molecular H_2 y otros procesos, que redujeron la temperatura del gas a unos pocos miles de grados. La materia bariónica tendía a acumularse en el centro del halo, lo que favoreció el inicio de la formación estelar en esa región. Es posible que antes de este proceso, el halo se fragmentara, adquiriendo una estructura grumosa, o que esta fragmentación ocurriera directamente en su disco central. Sabemos que los grumos más pequeños tienden a situarse en la periferia de sistemas en rotación y, al encontrarse en las regiones externas del halo, disponían de menos material para acrecer. *Esto probablemente limitó la formación de estrellas pequeñas, dejando el protagonismo a unas pocas estrellas de gran masa*, posiblemente superiores a las 100 masas solares, formadas preferentemente en el núcleo de los halos. En este escenario, las primeras estrellas de la Población III debieron ser extremadamente solitarias. *Dado su tamaño excepcional y su vida relativamente breve en términos cósmicos*,[6] estas estrellas fueron como destellos fugaces de energía, desempeñando un papel crucial en los primeros momentos de la evolución del universo.

Esas primeras estrellas, posiblemente aún dispersas en cúmulos poco cohesionados, ejercían una gran influencia sobre el halo de gas que las contenía. Durante su vida, modificaban continuamente su entorno mediante procesos de realimentación dinámica, como la emisión de radiación ultravioleta, que provocaba fotoevaporación, y la radiación Lyman-α, eficiente en la disociación de moléculas de H_2. Estos mecanismos favorecían la evaporación del gas difuso en el centro del halo, dificultando su acumulación. Al morir como supernovas, estas estrellas liberaban enormes cantidades de materia y energía, *generando ondas de choque que barrían los restos de gas residual en el halo*. Los vientos de las supernovas enriquecían el medio interestelar con elementos más pesados que el hidrógeno y el helio, contribuyendo al aumento de la metalicidad del universo temprano. En algunos casos, *estos procesos de realimentación eran tan violentos que podían disipar por completo las protogalaxias, devolviendo su contenido al gas intergaláctico*. Con el tiempo, este material reciclado, enriquecido con elementos de "segunda mano", se acumulaba en suficiente cantidad para dar lugar a nuevas generaciones de estrellas y galaxias.

De este modo, el ciclo cósmico de formación y destrucción permitía la aparición de galaxias más evolucionadas en etapas posteriores.



Los fenómenos de difusión asociados a las primeras estrellas y galaxias podían extenderse a lo largo de miles de pársecs, alcanzando regiones interestelares lejanas e incluso afectando halos vecinos. Esta influencia generaba un impacto significativo, estableciendo un panorama general de dilución de gas en el universo temprano. *Los núcleos más pequeños se vieron particularmente afectados por esta dispersión, mientras que los halos más grandes lograron preservar mejor su gas. En estos últimos, la formación estelar se convirtió en un proceso más exitoso*, gracias a la protección que ofrecía su mayor densidad, actuando como un "escudo" frente a los mecanismos de retroalimentación. Además, como en esos grandes sistemas había mucho hidrógeno ionizado, el proceso de enfriamiento se vio reforzado por la vía del deuterio de hidrógeno (HD, *ver capítulo 22*). *Lo que permitió que en fases posteriores en esos halos fueran apareciendo otras estrellas de menor masa*, una segunda generación de Población III más pequeñas. Se las conoce como las III.2.

En medio de esta intensa actividad, *los grupos de estrellas vecinas, cada uno alojado dentro de su propio mini halo, tendían a mantenerse parcialmente en fase y con desarrollos relativamente acoplados a lo largo de sus vidas*. Esta sincronización era casi inevitable, ya que, de no ser así, muchos de estos grupos

habrían terminado evaporándose, en gran parte debido a las influencias cruzadas entre ellos. Las estrellas más tempranas, a través de sus procesos de retroalimentación, habrían afectado de manera depredadora a las formaciones estelares más tardías eliminándolas antes de que pudieran desarrollarse por completo. Este proceso de interacción y ajuste gradual dio lugar a estructuras que hoy identificamos como galaxias, o en algunos casos, como cúmulos estelares interiores.

A partir de lo que pudo ser el esbozo de las primeras galaxias, y gracias a la dispersión inicial de gases enriquecidos con metales y los procesos de retroalimentación asociados a las ionizaciones provocadas por la radiación ultravioleta, que calentaron los gases hasta aproximadamente 10^4 K, se formaron las condiciones necesarias para que *surgieran las segundas galaxias y las estrellas de Población II en halos más tranquilos*. En estos nuevos entornos, la presencia de "metales" -elementos más pesados que el helio, sintetizados en las estrellas de Población III- permitió una refrigeración más eficiente, facilitando la acreción de materia de forma más suave y constante. Esto favoreció la formación de estrellas de manera pausada dentro de estas galaxias de segunda generación, que eran más masivas que sus predecesoras. Por este motivo, se cree que *esta segunda generación de halos formadores de estrellas dio lugar a las primeras galaxias sostenibles, más grandes, ricas en estrellas y dominadas por poblaciones de Población II*.

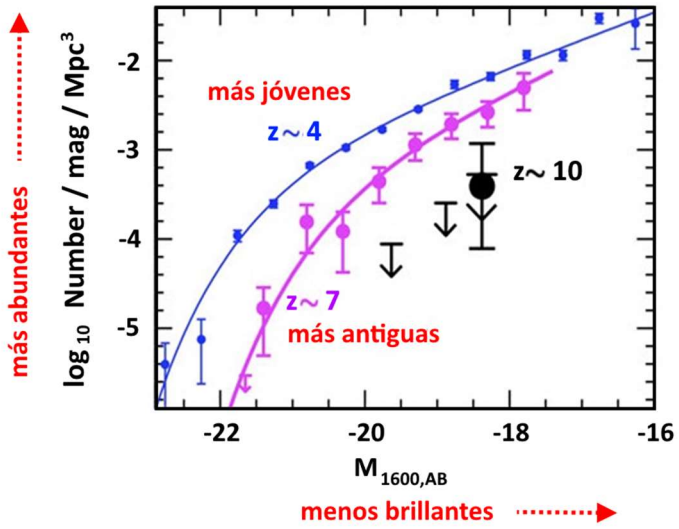
Con toda probabilidad la transición desde los momentos de generación de las estrellas hasta su consolidación en galaxias con futuro comenzó a suceder antes de que el Universo se reionizara. Toda una historia de éxito para nuestro protagonista.

Pero la vida continúa y nos tenemos que meter en "minucias" tan atractivas como preguntarse cómo serían las poblaciones de las recién llegadas galaxias.

Se cree que hubo *diez veces más galaxias por unidad de volumen al inicio que las observadas ahora*.[7] Además de abundantes, estudiando la nómina de galaxias conocidas de una edad próxima a los mil millones de años vemos que en promedio eran *mucho más pequeñas y de mayor luminosidad por unidad de masa que las galaxias actuales*. Una luminosidad en la frecuencia de los azules como corresponde a sus jóvenes estrellas emitiendo fotones muy energéticos. También sabemos que durante los dos mil primeros millones de años, las que se fueron formando contaban con *un número muy pequeño de estrellas*.

Primeras galaxias
- más pequeñas
- más abundantes por unidad de volumen
- más energéticas por unidad de volumen
- con pocas estrellas

A partir de estas primeras estructuras, y como si ya se hubiera acabado la materia prima a depredar, por fusión entre ellas se llegó más tarde a las grandes galaxias que vemos hoy. A pesar de ello algunas de pequeño tamaño se escaparon de estos procesos de fusión y canibalismo y aún podemos observarlas hoy en día ¡y creemos que debe haber muchas! Es el caso de la tenue galaxia enana llamada Pegasus V que se encuentra a unos 3 millones de años luz. Una satélite de Andrómeda con muy pocas estrellas brillantes que tienen que ser muy viejas dado que parecen ser extremadamente deficientes en elementos más pesados que el hidrógeno o el helio en comparación con galaxias enanas similares. Lo que significa que es muy antigua y probablemente sea un fósil de las primeras galaxias del Universo.[8]



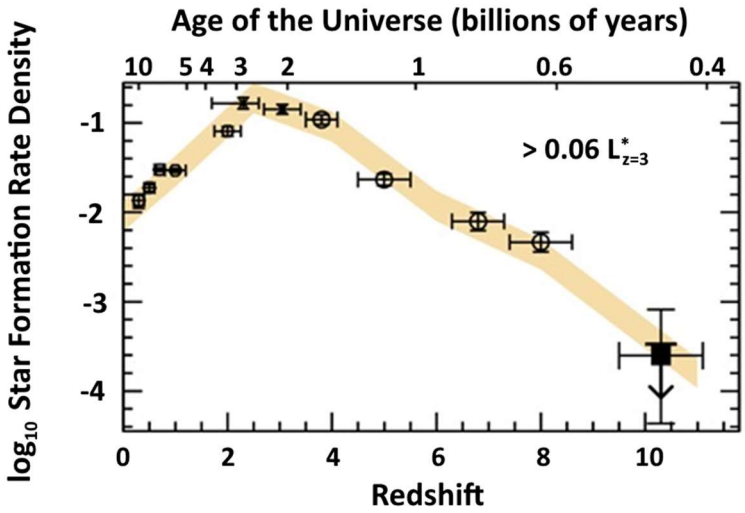
Curvas que correlacionan en el eje vertical la densidad volumétrica de las galaxias, con su luminosidad en el eje horizontal para dos momentos cósmicos (Imagen[9]: CC BY 3.0 US)

Si estudiamos la función de luminosidad, es decir, la densidad de las fuentes luminosas -las estrellas- en función de esta luminosidad, se pueden obtener datos precisos de cómo cambió la población de las galaxias a lo largo del tiempo. Los astrónomos han hecho este análisis en el intervalo $4<z<10$, de 1.500 a 500 millones de años tras el Big Bang. Los resultados se recogen en la figura anterior. En ella el eje vertical indica la densidad de la población, mientras que en el horizontal se trazan las luminosidades. Cuanto más negativo sea más brillante es la galaxia. Y como el eje vertical está representado en unidades logarítmicas, cuanto más negativo sea el número, menor es su abundancia.

Dicho esto, la conclusión es que para cualquier época las menos luminosas eran más abundantes que las más luminosas y que a altas z -las más antiguas- las galaxias eran menos luminosas que las que existieron más tarde. Lo cual no nos sorprende, ya que era de esperar que las galaxias más brillantes fueran la

consecuencia de la fusión de galaxias menos brillantes y más pequeñas. Esto es coherente con lo que piensan los astrónomos, que establecen la existencia de una *jerarquía de fusiones de galaxias* en el proceso de su desarrollo, tema que desarrollaremos en el capítulo 30. Al igual que como lo vemos hoy en día, tendrían que encontrarse en su mayoría dentro de cúmulos de galaxias, por lo que en aquellos momentos era bastante probable todo tipo de interferencias y colisiones. Esto no sólo afecta a sus formas, sino también al proceso de generación interno de estrellas y de emisiones desde el núcleo central. Los estudios de estas características indican que las interacciones entre galaxias y la generación de estrellas se dio con más intensidad hace mucho, la mayoría en la proximidad de hace unos diez mil millones de años -3.800 millones tras el inicio-.[9] En estos instantes del Universo temprano las galaxias estaban viviendo el fenómeno más intenso de formación estelar conocido, el denominado estallido de formación estelar o *starburst*.

Pero esas galaxias que estaban floreciendo con dramáticos estallidos estelares en el Universo temprano, fueron testigos de una abrupta interrupción del nacimiento de estrellas, dejándolas con el aspecto actual: galaxias masivas pero pasivas y con estrellas viejas. Los astrónomos tienen un posible culpable para el repentino final de los estallidos de formación estelar: el nacimiento de agujeros negros supermasivos. En ese estadio de la historia del cosmos los *starburst* se agruparían de manera similar a los cuásares, lo que indica que se encontraban en los mismos halos de materia oscura en los que sabemos existe un agujero negro. El intenso estallido de formación estelar alimentaría al cuásar proporcionando grandes cantidades de material a su agujero negro. Además, el cuásar emitía poderosos estallidos de energía que expulsaba los restos de gas de la galaxia -la materia prima para la formación de nuevas estrellas- lo que efectivamente puso fin a la fase de formación estelar.[10]



Densidad de la tasa de formación de estrellas en función de la edad del Universo (Imagen[9]: CC BY 3.0 US)

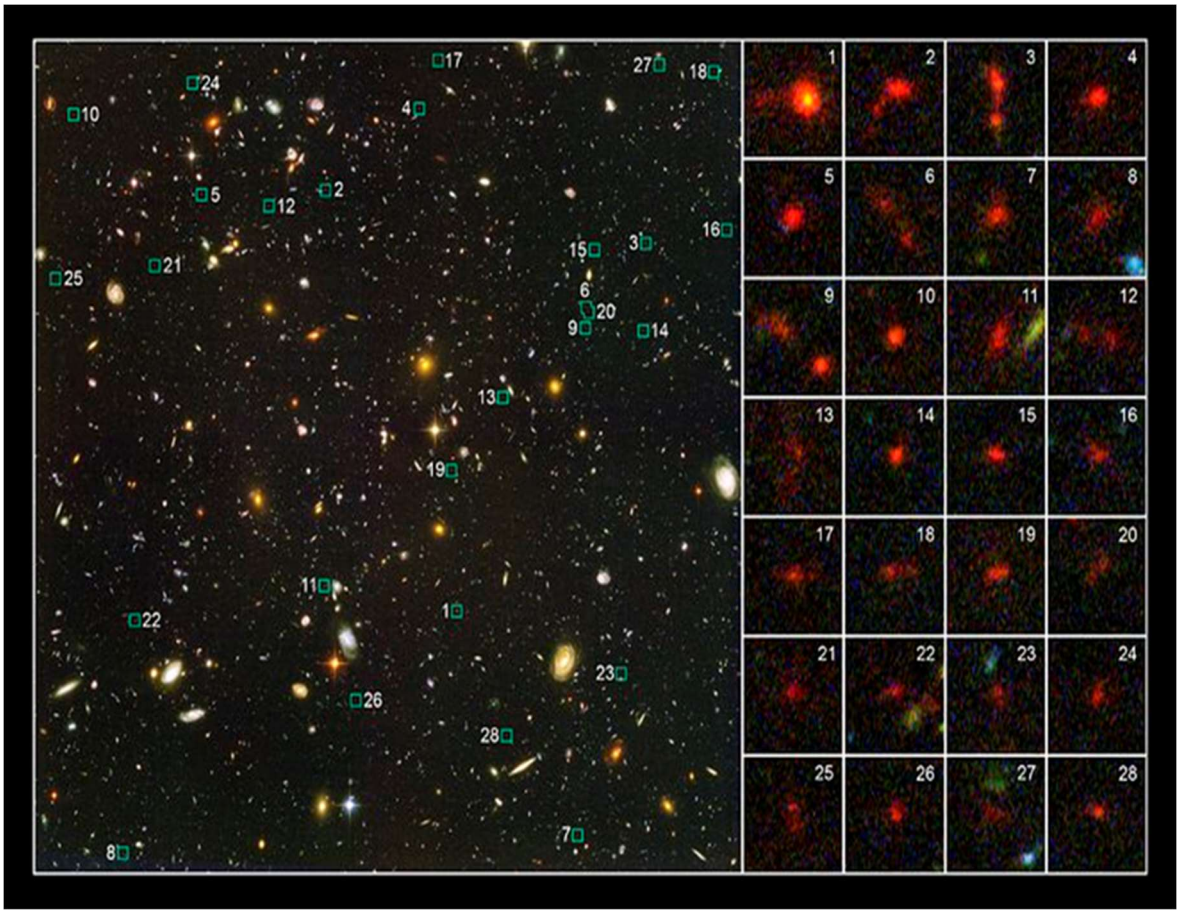
En resumen, lo que sucedió lo podemos ver en la curva siguiente en la que se ha dibujado la intensidad de formación de estrellas en función de la edad del Universo. Vemos cómo la curva se incrementa rápidamente desde z's altas (*Redshift* en la imagen), gran antigüedad, hasta alcanzar el pico *Starburst* cuando el universo tenía entre dos y tres mil millones de años, para luego irse ralentizando el ritmo de generación estelar.

Las imágenes ópticas (izquierda) revelan nubes de gas y polvo en la nebulosa de Orión. La imagen de infrarrojos (derecha) muestra las estrellas de formación reciente brillando en la nebulosa. (Imagen, C. R. O'Dell, NASA/ ESA, dominio público)

Hoy en día aún podemos ver (*imágenes de arriba*) cómo sucede el proceso de encendido nuclear de estrellas en lugares como la "incubadora" de la nebulosa de Orión, en donde unas familias de estrellas brillantes cohabitan con su materia prima de gases todavía muy próxima a ellas. Es una evidencia clara del ciclo galáctico del que ya hemos hablado: una nube de gases se fusiona, aparecen estrellas jóvenes, su radiación muy energética dispersa a la nube asociada en unos diez millones de años. Estos vientos estelares, juntamente con ondas de choque generadas en la explosión de supernovas, comprimen una nueva nube de gases… y vuelta a empezar.

También podemos hacernos una idea de lo que estamos hablando acerca de las galaxias y su formación con otra imagen real. La que sigue a ese párrafo corresponde a parte del campo profundo del universo fotografiado por el satélite Hubble, en donde a la izquierda observamos evidencias "fósiles" de cientos de galaxias a menos de mil millones de años tras el Big Bang (z=7). A la derecha hay una ampliación de alguna de ellas, más bien cúmulos de miles de millones de estrellas muy próximas, auténticas proto galaxias dispuestas a entrar en procesos de fusión entre ellas. Aparecen de color rojo dada su lejanía y consiguiente corrimiento al rojo de su luz. El tamaño y la apariencia de estas galaxias distantes en comparación con las que están en primer plano respaldan

firmemente la idea básica de que las galaxias eran más pequeñas y menos regulares en el pasado.



(Imágen: NASA, CC BY 4.0)

Con esto damos por acabada la información de los primeros años de dominio de la materia en el Universo. La materia oscura, que se había posicionado ya desde antes de la recombinación, rápidamente había tomado el mando. Su tirón gravitatorio se tuvo que sentir desde los primeros instantes, ya que observamos cómo aparecen muy pronto las primeras galaxias con sus jóvenes estrellas de población III emitiendo, como era propio de su juventud, energéticos rayos ultravioleta. Se cree que las semillas de este veloz proceso debieron ser los agujeros negros generados por el colapso gravitatorio de las masas de materia oscura, agujeros negros que generaron a los antiguos cuásares cuando la materia bariónica ordinaria, cada vez más fría, se frenó lo suficiente como para iniciar su "caída" hacia esos boquetes del universo. Los cuásares se iban alimentando de los bariones más próximos, permitiendo al resto de su población seguir con sus procesos particulares de compactación que ya explicamos en capítulos anteriores. Se fueron generaron cúmulos pequeños y galaxias de tamaño de los pocos miles de años luz, en los que las gigantescas estrellas tuvieron su ventaja, estructuras que se iban sumando, generando a su vez otras mayores y más rutilantes. En el entorno de los dos o tres mil millones

de años desde el Big Bang la familia empezó a estabilizarse, entrando en el régimen "normal" de nuestros días.

Hemos llegado a un momento de la biografía en que ya se han introducido las estructuras base del Universo, hemos hablado ya de estrellas, galaxias y cúmulos. Agujeros negros y cuásares.[11] No obstante la aparente "estabilidad" alcanzada seguimos teniendo un mundo en evolución que seguiremos analizando en los próximos capítulos. Pero antes hagamos también un alto nosotros para recordar a vista de pájaro la personalidad de nuestro personaje.

NOTAS DEL CAPÍTULO 28:

1. Podéis verlo en la reseña publicada por la NASA o con más detalle, en el segundo enlace, el informe del equipo investigador.
   [https://www.nasa.gov/press-release/nasa-telescopes-find-clues-for-how-giant-black-holes-formed-so-quickly]
   [https://arxiv.org/pdf/1603.08522.pdf]
2. "*Discovery of a binary AGN in the ultraluminous infrared galaxy NGC 6240 using Chandra*", St. Komossa et al., 2002.
   [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0212099.pdf]
3. ***Galaxia activa*** (extraído de la web de la Sociedad española de Astronomía): "*Galaxia de luminosidad excepcionalmente alta y variable que muestra signos de la existencia de procesos muy energéticos relacionados con su zona central o núcleo. El brillo de este pequeño núcleo, que se manifiesta en todas las frecuencias desde ondas de radio a rayos gamma, sobrepasando el del resto de la galaxia, implica la existencia tanto de un enorme calentamiento térmico (temperaturas de millones de grados) como de un potentísimo acelerador de partículas. El origen de estos procesos es la caída de materia hacia un agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia. Galaxias Seyfert, cuásares, radiogalaxias o blázares son distintos tipos de galaxias activas.*"
4. La palabra cuásar es un acrónimo de "*quasi stellar radio source*" -fuentes de radio casi estelares-.
   Los **cuásares** son objetos lejanos que emiten grandes cantidades de energía. Se supone que son agujeros negros que capturan estrellas o gas interestelar, formando una especie de galaxia, proceso en el que se emite su intensa radiación. Esa radiación es debida a que en la caída espiral del gas se disipa parte de su energía rotacional por fenómenos de viscosidad. La energía que se expulsa gracias a esa radiación puede suponer entre el 5,7 y el 42,3% de

la masa del gas. Comparado con el 0,7% de eficiencia en los procesos de fusión nuclear en las estrellas… realmente lo del cuásar es una brutalidad.

5. Las ideas de lo que sigue están extraídas del libro de Abraham Loeb y Steven R. Furlanetto "*The first Galaxies in the Universe*", capítulo 6, páginas 212 y siguientes.
6. Una estrella con mucha masa genera una presión interna colosal que debe ser compensada por una presión centrífuga también colosal. Eso solo lo conseguirá si las reacciones nucleares en su interior son muy activas, lo que implica necesariamente una alta velocidad en la fusión nuclear de su hidrógeno, un consumo brutalmente rápido de su combustible. O lo que es lo mismo… una vida corta.
7. En el artículo "*The evolution of galaxy number density at z < 8 and its implications*", publicado en la revista *The Astrophysical Journa*l en octubre de 2016 se estima que para una edad correspondiente a un corrimiento al rojo de z=8, 700 años tras el Big Bang, el número total de galaxias sería de dos billones - 2×10^{12} -, una población mayor en un factor de 10 comparada con la población de 10^{11} de ahora. El menor número lo podemos atribuir a que se ha vivido un continuo proceso de fusión de galaxias. Pero impresiona la disminución en la densidad ya que para z=8 el universo era ocho veces menor que ahora, por lo que desde entonces el volumen se ha incrementado más de 500 veces (8^3=512) y, en consecuencia, la densidad en número de galaxias, teniendo en cuenta el factor de 10 de menos abundancia en la población actual, ha disminuido en más de 5.000.
8. "*Pegasus V - a newly discovered ultra-faint dwarf galaxy on the outskirts of Andromeda*", Michelle L. M. Collins et al., abril 2022. [https://arxiv.org/pdf/2204.09068.pdf]
9. UCO/Lick Observatory, University of California Santa Cruz. (The results) [http://firstgalaxies.org/explore.html]
10. "*The LABOCA survey of the Extended Chandra Deep Field-South: clustering of submillimetre galaxies*", Ryan C. Hickox et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012. [https://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1206/eso1206.pdf]
11. En este enlace podéis encontrar un listado de los objetos astronómicos más lejanos: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_the_most_distant_astronomical_objects]

29: Recordando a la terna constituyente

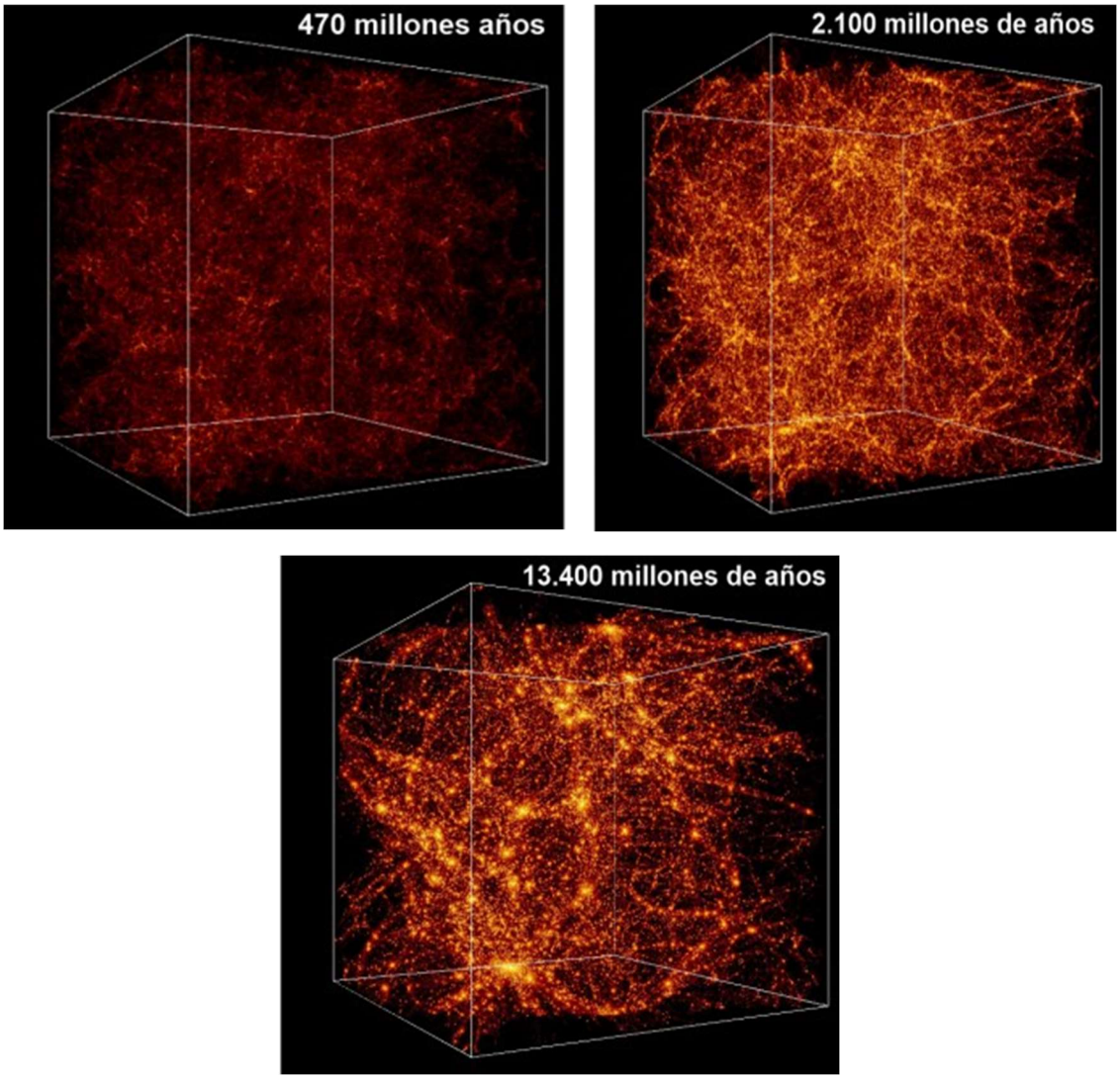
El capítulo anterior había cerrado con un universo lleno de agujeros negros, cúmulos, cuásares, galaxias y estrellas. La máquina estaba ya en régimen de crucero, sólo tenía que seguir rodando. Quizás éste sea un buen momento para hacer un alto en el camino, ajustar el zum con el pensamiento recordando desde la distancia al "alma" del Universo cuando cumplía los primerísimos milenios de millones de años en su vida. Un homenaje a la tríada constituyente responsables del misterio que estamos tratando de desvelar: radiación, materia y energía oscura.

Desde el inicio, el Universo había seguido ampliando su tejido espacio/temporal. El campo inflatón había dado un impulso tremendo, exponencial, al crecimiento de aquella pequeña burbuja "planckiana" inicial. Inflatón se frenó cuando su energía ganada del vacío se hubo convertido en materia y radiación, pero el universo siguió su impertérrito ritmo. Seguramente lo estaba consiguiendo gracias al influjo de otro campo, semejante al inflatón o al Higgs, que insuflaba presión negativa interna al tejido del espacio/tiempo, mientras buscaba su verdadero vacío para él, y alcanzar así el obligado nivel de mínima energía. Einstein, en una primera aproximación, había pensado que el Universo debía refrenar la expansión que predecían las ecuaciones de la relatividad, ya que para don Alberto aquel tenía que ser estable y eterno. Para ello ideó un factor energético que modificaba la geometría del cosmos al controlar la tendencia a la compactación de la gravedad. Le llamó la ***constante cosmológica***, y la nominó con la letra griega lambda, $\boldsymbol{\Lambda}$.

Pero la idea no se ajustaba completamente a la realidad. Unas decenas de años más tarde se descubrió -lo hizo el astrónomo Edwin Hubble- que las galaxias se separaban unas de otras y, sin lugar a duda, a mayor velocidad cuanto más alejadas estuvieran unas de otras. Esto indicaba que la separación de los cuerpos celestes no se debía a la dinámica gravitatoria del conjunto universo, sino que era el propio sustrato el que iba ampliando las distancias. Un campo Λ estaba estirando al espacio/tiempo, y para ello contaba con un valor constante de energía en todos los puntos del universo de 10^{-12} eV. Y ojo… en este caso constante quiere decir *constante*: a medida que va creciendo sigue añadiendo 10^{-12} eV en los nuevos espacio/tiempos recrecidos. Así parece ser lo que observamos en nuestro universo accesible.

El problema es que, según nuestros cálculos teóricos de lo que creemos la realidad, un campo cuántico de este calibre no debería tener tan poca energía; la teoría exige un incongruente salto hacia una mayor energía, exige un factor multiplicador que pudiera ser de hasta 10^{120} entre lo real y lo cuántico. Lo

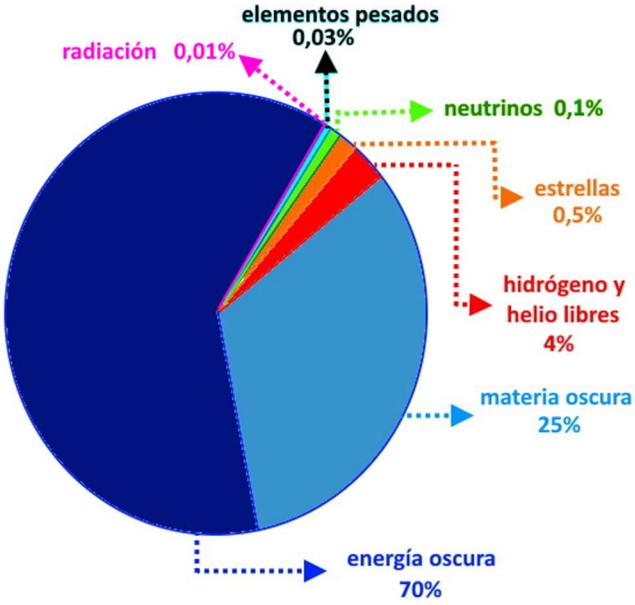
comentamos ya en el capítulo 6. Aunque muy bien pudiera ser que en lo real no seamos aún capaces de ver todo lo que hay.



Las imágenes anteriores representan tres "fotogramas" que ilustran cómo suponemos que ha evolucionado la estructura del Universo. En realidad, se trata de tres capturas de una simulación que muestra la distribución de la materia oscura, presentadas en orden cronológico. En estas simulaciones, se ha omitido la distorsión uniforme causada por la expansión del Universo (es decir, el volumen de muestra permanece constante). Aunque en las imágenes "observamos" materia oscura, su distribución puede asimilarse con bastante precisión a la de las galaxias, ya que la gravedad de la materia oscura desempeñó un papel fundamental en la formación y condensación de las estructuras visibles.[1]

Ya dijimos en el capítulo 19 al hablar de la radiación de fondo de microondas, que para explicar la planitud de nuestro Universo necesitamos una densidad de energía determinada y precisa. Ni muy grande, lo que hubiera colapsado ya el

universo hace tiempo, ni muy pequeña, tanto como que hubiera permitido su difuminado hace mucho también. Se requieren exactamente 9,47 x 10^{-27} kg/m^3, pero la materia bariónica más la oscura solo nos explican hasta algo así como un 30% de este valor. Ahí entraría en nuestra ayuda un nuevo e incierto personaje: la energía oscura generadora de la constante cosmológica Λ, y que sería la responsable de llegar al 100% de las necesidades teóricas y observadas.



Reparto observado de la energía/materia en el Universo. Impacta la nimiedad de la radiación[2] (Wikipedia, dominio público)

La energía oscura se presentaba como un elemento muy débil al principio de la historia del Universo, tan débil que la propia débil gravedad podía con ella haciendo que el ritmo de expansión se fuera ralentizando. Pero más vale la constancia que la fuerza, y la energía era esto: constante. Constante en el sentido de que a medida que iba creciendo el universo con un factor de escala $\boldsymbol{a}$, la constante energía oscura iba embalsándola a base de ir acumulando su pequeño valor a un ritmo $\boldsymbol{a^3}$. Y sucedió algo así como lo que cuenta la famosa leyenda del ajedrez, en la que se iban duplicando los granos de trigo depositados sobre cada cuadrícula, empezando por uno en la primera…[3] Con el tiempo, la cuantía absoluta almacenada de energía oscura se hizo descomunal, tanto que logró romperle el pulso a la gravedad. De forma que hace unos 9.000 millones de años, lo que era una expansión decelerada pasó a ser acelerada, y cada vez a mayor ritmo. Y así hasta lo que vemos hoy en día… ¿hasta cuándo? ¿Será tan abundante que inducirá una tensión tal que romperá finalmente el tejido espacio/temporal? No tengamos miedo, no sabemos exactamente lo que pueda pasar, ni ningún hombre lo comprobará personalmente. Aunque lo intentamos como se explicará en los últimos capítulos.

Hoy en día vivimos un momento bastante calmado, bien cierto que con una velocidad de expansión -la constante de Hubble- de 71.9+2.4/−3.0 (km/s)/Mpc, siendo un megapársec una distancia igual a 3,26 millones de años luz como ya sabemos.[4] Parece mucho, pero… la estructura del Universo aún no sufre por ello. En las distancias cortas donde se manejan las concentraciones de masa, todavía es mayor la avidez de la gravedad que el desleír de la energía oscura. Así lo demuestran estas estructuras, empezando por la Vía Láctea que está al alcance de nuestra vista en cualquier noche despejada. Ahí están, perdidas en la infinitud después de seguir el patrón de las anisotropías de materia y energía liberadas en el año 380.000 tras el Big Bang, cuando se produjo la recombinación de núcleos y electrones.

Veamos ahora cuál es el cuadro marco de la dinámica del Universo que acabamos de esbozar.

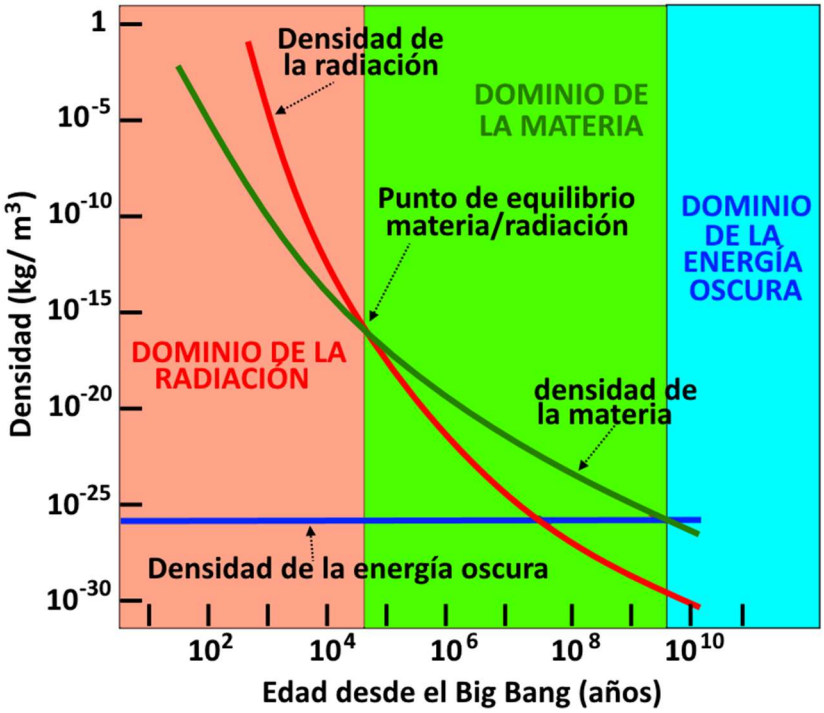


Gráfico que explica las distintas épocas del Universo y la variación del influjo de sus tres personajes dominando su dinámica (Imagen adaptada de: "Astronomy today" Fig 27.1, ⓕair use)

Cuando inicialmente surge el Universo, estando aún en la fase del plasma quark-gluon, vivió un largo periodo durante el que dominaba la radiación sobre la materia: las altas energías fijaban la dinámica del tejido espacio/temporal y de todo lo que ahí pasaba. Con el paso del tiempo y la progresiva expansión, la temperatura disminuyó y la radiación amplió su longitud de onda: se había hecho menos energética. La progresiva caída de su energía era proporcional al exponente cuarto del factor de expansión,[5] mientras que la materia simplemente disminuía su densidad en un factor al cubo.[6] La consecuencia es

que llegó un momento en la carrera en el que la materia empezó a aportar más densidad de energía que la radiación. Junto a ellas dos estaba también la energía oscura que al ser "pequeña" en aquellos momentos frente a lo que sería después, apenas tenía incidencia sobre lo que decidían la materia o la radiación.

El momento en el que el influjo de la materia sobrepasó al de la radiación fue bastante temprano a efectos cósmicos, tanto como unos 330.000 años antes de la recombinación.[7] A partir de entonces fue la materia la que dirimió lo que le pasaba al Universo ¿Para siempre? Pues no, ya que ahí seguía la persistente y modesta energía oscura insuflando hálito al creciente volumen del universo, mientras la materia -y no digamos la radiación- diluía su poder en la expansión. Y llegó lo esperado, el momento en que la energía oscura ganó finalmente la batalla a la materia: eso pasó hace unos 6.200 millones de años.[8] Tras este momento todo lo que viene después quedó absolutamente condicionado por dicha energía.

Ése es el Universo dinámico del que estamos contando su vida. Al final del capítulo anterior habíamos llegado más o menos al año 3.000 millones tras el Big Bang. Es decir, en la figura anterior casi en el borde de la zona verde, dispuestos a dar el salto a la zona azul. El Universo había sobrepasado la efervescente etapa de la adolescencia dirigiéndose hacia una estable y creativa madurez. Creo que puede ser un buen momento para ampliar lo que veníamos diciendo en el capítulo anterior cuando explicábamos cómo era el Universo y cómo evolucionaban sus estructuras primeras: en particular, en el siguiente hablaremos más de las galaxias.

NOTAS DEL CAPÍTULO 29:

1. Computación realizada en 2006 en la Universidad de Chicago por Andrey Kravtsov. Corresponde a un cubo en el espacio de unos 280 millones de años luz en el que no se ha tenido en cuenta la expansión hubeliana de fondo. Aunque corresponde a la materia oscura, podemos asemejarla a la distribución de galaxias ya que la gravedad de la materia oscura es la que ayudó a la condensación de las estructuras visibles (Imagen: uso no comercial)
   [http://cosmicweb.uchicago.edu/sims.html]
2. En el Universo encontramos a los fotones de la radiación de fondo tan "fríos" -a 2,725K- que aportan una energía de un orden de magnitud cuatro veces inferior a la de la materia y de la energía oscura, a pesar de que desde

la recombinación también encontramos a los fotones resultado de los procesos de fusión en las estrellas. Al ser el vacío del Universo tan enorme, estos últimos fotones aún pesan menos que los anteriores. En concreto, una décima parte de la radiación de fondo. En total se cree que suman un 0,01% del total de la densidad crítica.

3. En el enlace de abajo se explica de una forma amena la mencionada leyenda y las consecuencias a que se llegó:
   [http://matematicascercanas.com/2014/03/10/la-leyenda-del-tablero-de-ajedrez-y-los-granos-de-trigo/]
4. El valor de la constante de Hubble se va afinando continuamente con el tiempo como podemos ver en el enlace de más abajo. El problema es que la velocidad de los objetos cósmicos la podemos calcular bastante bien gracias al análisis de los corrimientos al rojo, pero la apreciación de las distancias no es tan exacta ya que depende del método elegido. De aquí surge lo que se conoce como la tensión de Hubble y las diferentes estimaciones de la constante.
   [https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble%27s_law]
5. Un factor al cubo lo introducía la propia expansión, que diluía volumétricamente la población de la radiación, mientras que la expansión de la longitud de onda era lo que lo subía al exponente cuarto.
6. El que fija el propio aumento del volumen del espacio/tiempo debido a su expansión.
7. Coloquialmente se suele decir que el momento en que la materia dominó a la radiación fue en la recombinación, cuando protones y electrones dejaron de ser "importunados" por los fotones. De manera evidente eso no fue exactamente así ya que el proceso se iba produciendo desde antes a lo largo de una larga época que comenzó en el momento en que se igualan la relación de densidad de materia y radiación, es decir cuando ambos estaban aportando un 0.5 a la densidad crítica unitaria (el ratio de densidad de la energía oscura entonces era despreciable). Ese momento se caracteriza por un desplazamiento al rojo al que se le suele llamar z-equivalente. La mejor medida de z-equivalente la proporciona la síntesis de medidas cosmológicas publicadas por la Colaboración Planck en 2015, y ésta es de z-eq = 3371 +/- 23. A ese desplazamiento al rojo le corresponde un tiempo cosmológico de vida del Universo de 52 mil años, cuando el Universo era unas 3.500 veces más pequeño que ahora y su temperatura de 16.000 K.
8. Tenéis un cálculo de la fecha del cambio a una expansión acelerada en la siguiente entrada de la web "*La web de Física*":
   [http://forum.lawebdefisica.com/entries/623-El-inicio-de-la-expansi%C3%B3n-acelerada-del-Universo]

30: Un Universo de galaxias

después de los primeros 3.000 millones de años

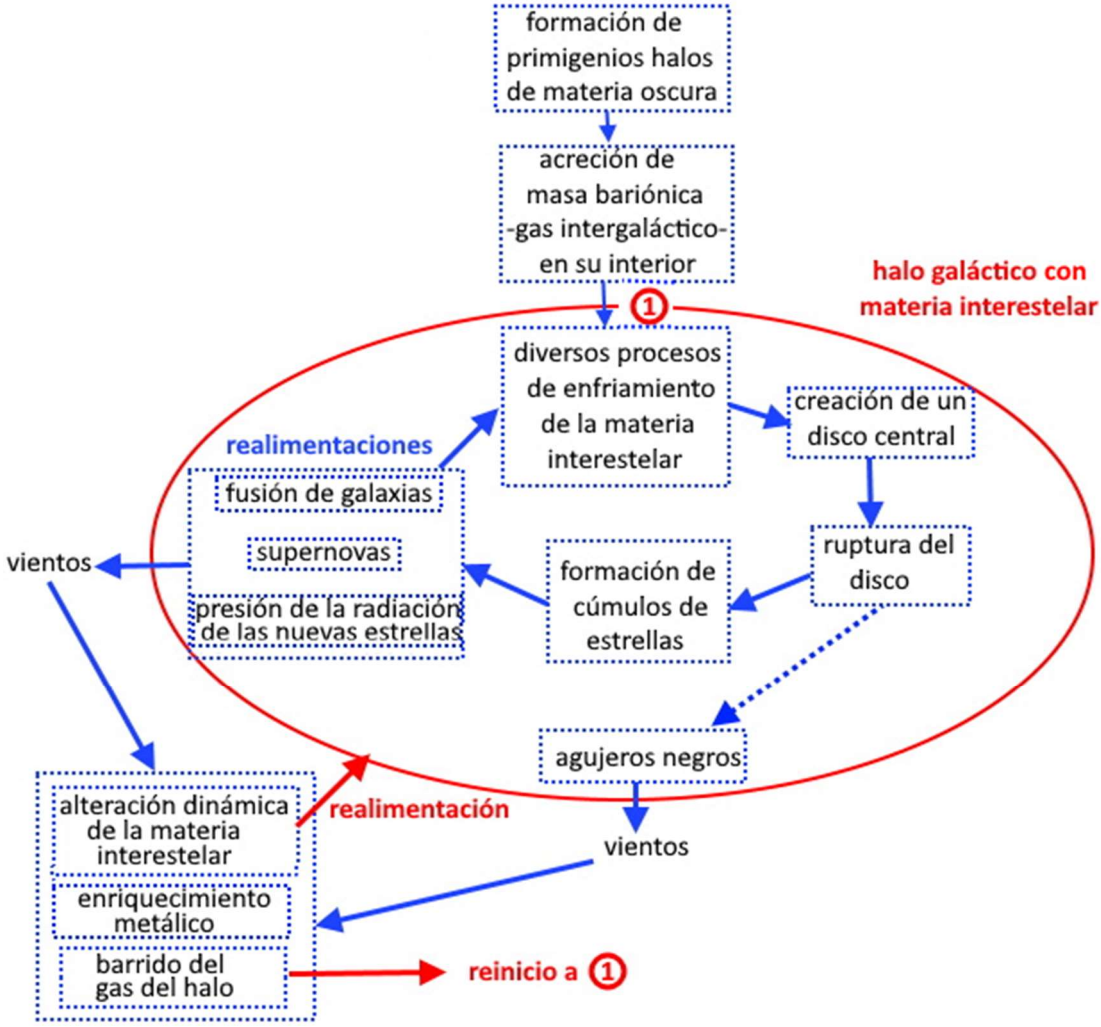
En el anterior capítulo nos habíamos tomado un respiro para ver un poco lo que llamaba "el alma" del Universo desde una hipotética vista de pájaro. La película cronológica había quedado congelada dos capítulos antes, el 27, en un universo lleno de agujeros negros, cúmulos, cuásares, galaxias y estrellas. Tras el fin de la reionización, y quizás a partir del final del tercer mil millón de años, el universo veía cómo su vida empezaba a hacerse más tranquila. Se habían ido colapsando las primeras estructuras, unas sobre otras, hasta alcanzar un régimen que podríamos llamar "normal". Normal según lo que estamos viviendo en nuestros momentos del Cosmos. Ahí estaban las galaxias como piedras angulares de las estructuras del Cosmos, recogiendo el fruto de los colapsos gravitatorios en los halos de materia oscura y ofreciendo sus productos en formas de estrellas que revitalizarían el ambiente.

Una galaxia es simplemente un sistema de estrellas y gas aislado en el espacio, inmerso en un halo de materia oscura, y que está trabado por su propia gravedad. Es un escenario cambiante, ya que la generación y muerte de esas estrellas -y agujeros negros- se lleva a cabo de forma sostenida a lo largo de periodos cosmológicos de tiempo, cosa que sucedió tanto en el pasado como vemos que pasa en nuestros días. En el fondo la galaxia es una máquina recicladora de material bariónico con un gran producto añadido: los fotones de todo tipo de energías. Se hallan inmersas en un medio muy difuso conocido como intergaláctico, MIG, posiblemente compuesto en su mayoría de protones y electrones libres, lo que conocemos como hidrogeno ionizado y que es el principal proveedor de materia de los halos galácticos.

El siguiente esquema autoexplicativo nos ayudará a refrescar nuestro conocimiento de los caminos por dónde deambulan las galaxias y los factores que intervienen en su dinámica.

Como ya se comentó más arriba, el aspecto más importante de la "ecología galáctica" es probablemente el ciclo recirculador de la materia desde el MIE hasta las estrellas y de vuelta al MIE. En el primer paso de este ciclo, se forman nuevas estrellas a partir del depósito de material interestelar. Este material, lejos de estar repartido uniformemente por el espacio interestelar, muestra tremendos contrastes de densidad y temperatura, de modo que sólo las regiones moleculares más densas y frías ofrecen un entorno favorable para la formación estelar. Una fracción de esta materia finalmente regresa al MIE, ya sea de manera continua a través de poderosos vientos estelares o de manera instantánea tras las explosiones de supernovas. En ambos casos, la inyección

de masa estelar en el MIE va acompañada de una fuerte liberación de energía que, además de generar movimientos turbulentos en el medio, contribuye a mantener su estructura altamente heterogénea y puede, en determinadas circunstancias, dar lugar a nuevas regiones moleculares propensas a la formación de estrellas.



Composición de las galaxias

Todo lo apuntado, sin duda, son aspectos generales de las galaxias que más o menos ya conocíamos de anteriores capítulos: qué son, cómo son y cuál es su dinámica. Ahora toca hacer un simple repaso de sus ingredientes fundamentales, los quiénes, los colores que participan en el cuadro que pretendemos pintar: la materia oscura y la materia bariónica. Básicamente las galaxias están formadas por

i. un gigantesco *halo de materia oscura* que las motorizó, y que constituye de largo la mayor parte de su masa, en cuyo interior se encuentra

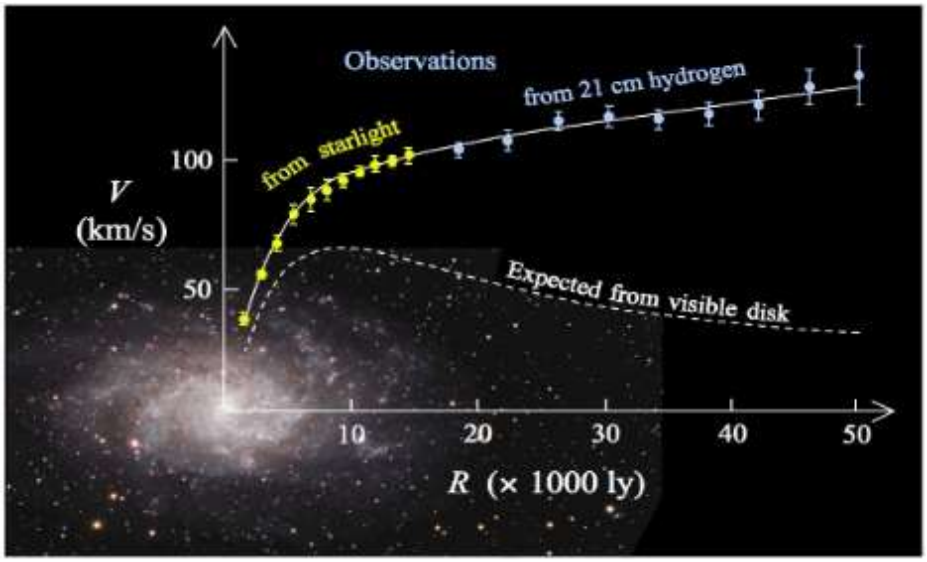
ii. el *halo galáctico* con viejas estrellas y poco gas y, si la galaxia es joven, en su centro se encuentra situado

iii. el *disco* en donde podemos encontrar las estrellas más jóvenes y la mayor parte de lo que se conoce como el *medio interestelar*, MIE, que es un plasma de gases y polvo muy tenue.[1]

En la Vía Láctea este MIE constituye entre el 10 y el 15% de la masa del disco galáctico. Abriendo el detalle, diremos que el MIE está formado por materia bariónica, libre o en forma de polvo, por partículas cargadas conocidas como rayos cósmicos y por campos magnéticos generados por las partículas cargadas de todo tipo.

Así es el "cuerpo" de las galaxias. Y así son sus componentes.

Comenzando por el primero, ***la materia oscura***, la gran matriarca que nunca vemos pero que sin duda ejerce un continuo pastoreo. Hasta ahora, en todo el libro hemos afirmado que la materia oscura es la cocinera básica de todo el guiso cósmico que observamos. Es cierto, y debía de estar ahí con su influjo desde antes de la era de la recombinación, cuando el Universo era aún un plasma caliente.



Estudio de la curva de rotación de la galaxia M33. (Wikimedia, dominio público)

En el capítulo 20, que titulamos "*La materia entra en faena*", comentamos que una de las pistas que nos dice que sí, que efectivamente hay algo ahí que es la materia oscura, la encontramos en el análisis de la velocidad de las estrellas rotando alrededor del eje de su galaxia.

Diremos primero que según las leyes gravitacionales de Newton la velocidad de un objeto "orbitando" una masa M la define la ecuación $v^2 = G.M/r$, siendo r la distancia entre los centros de gravedad de ambas masas. Para una misma distancia del objeto al centro de masas, si la M total es mayor su velocidad también deberá ser mayor. Y viceversa. Si su velocidad real es muy grande, por

encima de la velocidad teórica que determinaría su r particular de acuerdo con la anterior fórmula, la única explicación es que hay que añadir más masa a M.

La figura anterior da el resultado de un estudio hecho para la galaxia M33. La curva definida por los puntos en amarillo y azul es la observada a partir de diversas metodologías. La curva de trazos blancos es la teórica de acuerdo con la distribución de la materia visible de la galaxia. ¿Por qué en la realidad van más deprisa? Porque en la realidad debe haber más masa: la discrepancia entre ambas se puede corregir añadiendo la masa de un halo de materia oscura que rodee a la galaxia. Como también lo permite pensar el análisis del movimiento de galaxias inmersas en un mismo cúmulo particular ya que se desplazan a velocidades superiores a las que teóricamente les tocaría y todo ello gracias a la influencia de la materia oscura. Una similar conclusión se desprende de los estudios acerca del alcance del efecto de lente gravitatoria generado por galaxias lejanas, superior a lo esperado teóricamente, y que sólo es explicable por un extra de materia oscura.

Ahora bien, el perfil de la influencia de la materia oscura sobre la bariónica ha ido cambiando con el tiempo. En las galaxias con un gran corrimiento al rojo, por tanto de épocas muy antiguas, se puede observar que la velocidad de rotación de sus estrellas más alejadas del centro es menor que lo que sucede en las galaxias temporalmente más próximas, en las que estrellas parejas rotan más deprisa. Lo cual indica que en aquellos momentos tempranos la influencia de la materia oscura no debía ser tan fuerte como lo es hoy en día.[2] Y eso ¿qué nos dice? Pues que la materia oscura, a pesar de ser actor y director crucial en las compactaciones gravitatorias que dan forma a las estructuras del Universo, sufrió en su propio proceso una dinámica mucho más atemperada que la observada en la materia "normal". En una palabra, a la materia oscura le costó compactarse. O mejor, su proceso de compactación, aún siendo muy potente, sufre una especie de amortiguamiento, una plasticidad mayor, lo que hizo que se prolongase durante muchos millones de años más en comparación con el proceso gravitatorio equivalente de la materia bariónica.[3]

Vayamos ahora a por el segundo componente material de las galaxias. No toda la ***materia bariónica*** se manifiesta como un exagerado lujo de *estrellas* habitando su galaxia (de ellas hablaremos en un próximo capítulo). La mayor parte de esa materia no está en los espectaculares hornos nucleares si no en las más humildes zonas de "minería", lo que hemos llamado *materia interestelar* -MIE-. Humilde por decir algo, humilde porque nuestros ojos en una fría noche de invierno no la aprecian, humilde por su consistencia tenue, humilde por ser sólo materia prima, humilde… con el permiso de la materia oscura, en la MIE empieza todo. Dada su gran trascendencia no podemos pasar por alto a nuestro "fantasmal" personaje sin hablar un poco más acerca de él.

La MIE, situada principalmente en el disco galáctico, no es homogénea y presenta un aspecto hasta cierto punto grumoso. Eso se descubrió a partir de las observaciones de la Vía Láctea puesto que, históricamente, se habían apreciado ciertos "vacíos" oscuros que realmente no eran tales, sino nubes de MIE distribuidas aleatoriamente y que absorbían la luz de la galaxia emitida por las estrellas de detrás. No podíamos verla con las viejas tecnologías. Pero a medida que ésta avanzaba se ha analizado hasta el infinito el tipo de "tamizado" de fotones que se producía en cada uno de esos grumos opacos de la galaxia para determinar qué es lo que había en ellos. Ese es un resumen de las conclusiones.

Aproximadamente

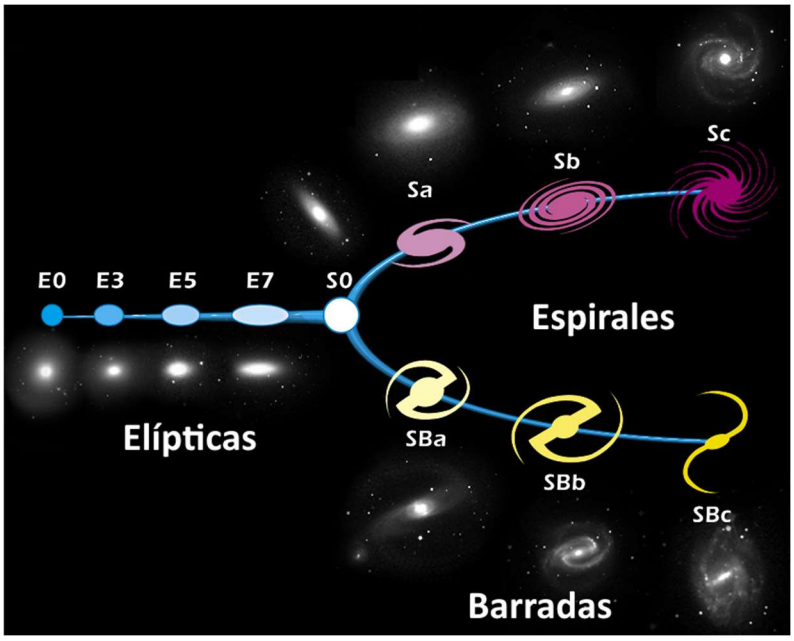
(i) la mitad de la masa interestelar del disco está confinada en nubes muy dispersas ya que llenan tan solo entre el 1 y el 2 % del volumen interestelar. El contenido de estas nubes es muy variado y definen su grado de opacidad. Las hay de *gas molecular* muy frío (T∼10−20 K), las llamadas ***nubes oscuras*** que bloquean la luz visible de las estrellas de fondo, y las hay de *gas atómico* también frío, aunque menos (T∼100 K), que son casi transparentes excepto en un número de longitudes de onda específicas en las que dan lugar a líneas de absorción y que se conocen como ***nubes difusas***. Entre estos dos tipos hay un abanico de ***nubes translúcidas*** compuestas por una *mezcla de partículas atómicas y moleculares*.

(ii) El resto de la materia interestelar está esparcido también de forma difusa entre las nubes anteriores y a mayor temperatura (en el entorno de $10^4<T<10^6$ K) formada por *átomos neutros* templados e *iones* calientes.[4][5]

En los párrafos anteriores cuando estamos hablando de moléculas en el MIE nos estamos refiriendo principalmente al H_2 y al CO. Cuando ambas se relajan emiten fotones en la frecuencia UV. El CO además tiene una transición rotacional de su molécula que le hace emitir fotones en el espectro de ondas de radio con longitud de 2,6 milímetros. Cuando hablamos de gas atómico neutro nos estamos refiriendo principalmente al hidrógeno atómico neutro, generalmente indicado como HI. No se puede observar directamente en longitudes de onda ópticas, aunque sí sabemos que emite fotones UV Lyman-α con longitud de onda de 1,216 10^{-7} metros. Cuando se menciona al gas ionizado nos referimos básicamente al ion hidrógeno, HII, o al helio ionizado que pierden su estado neutro gracias también a la radiación UV de las grandes estrellas. En las recombinaciones de esos iones se emiten fotones en la frecuencia de los rayos X por el efecto *bremsstrahlung*, así como en las longitudes de onda ópticas, infrarrojas y de radio. Esta última terna se produce principalmente en la recombinación de los iones de hidrógeno y helio con los electrones libres y en la relajación energética de los metales de los granos de polvo, excitados en los procesos de choque entre ellos.

Y estos son los “quiénes” que constituyen los barrios de las estrellas y de las galaxias. Ahora estamos ya en condiciones de pasar a hablar de estas últimas, dejando para los siguientes capítulos al mundo de las estrellas.

A falta de poder testar en directo lo que le sucede al Universo por razones casi obvias, tenemos varias teorías acerca de cómo se generaron las galaxias. La más aceptada actualmente es que han ido evolucionando a partir de la fusión de concentraciones de pequeñas masa, pequeñas concentraciones de gases del tamaño de los cúmulos estelares -los que observamos actualmente se mueven en un rango del orden de centenares a millones de estrellas- que luego, por fusión, pasaron a constituir una galaxia. Ya sabemos, por las imágenes reales de la figura que cerraba el capítulo 28, que las primeras debieron ser muy irregulares y no sabemos muy bien cómo pudieron pasar a ser de la tipología más “ordenable” que observamos hoy en día.



Tipos de galaxias de acuerdo con el esquema de clasificación de Hubble [6]
(imagen modificada de Wikimedia, dominio público)

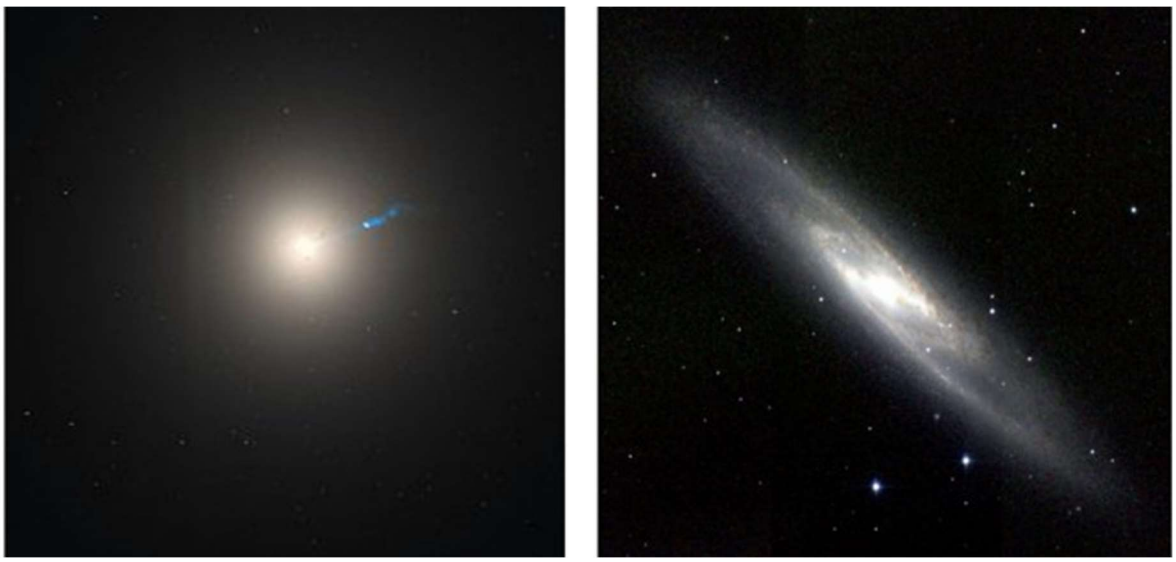
Clasificación de las galaxias

El astrónomo Edwin Hubble clasificó a las galaxias en dos grupos, las *elípticas* y las *espirales*, por razones obvias de su geometría, como podemos ver en la imagen anterior. Entre las espirales distinguió una subclase, las *barradas* Sb, que son espirales con dos brazos muy definidos y un bulbo alargado interior que los une. Son muy abundantes tanto en el pasado como en el presente, estimándose que hasta unas tres cuartas partes de las galaxias espirales presentaron o van a presentar en algún momento de su existencia una estructura de barra. Lo que va a depender de factores diversos tales como fusiones

galácticas, inestabilidades dinámicas y redistribución de momento angular, procesos que ocurren en escalas de tiempo muy largas.

A todas ellas hay que añadir un par de poblaciones más: las *irregulares* -una especie de elípticas-, y las *lenticulares S0*, entre las elípticas y las espirales. Esta clasificación plasmada en el esquema de la imagen anterior, conocido como el diapasón de Hubble, no tiene en realidad nada que ver con la secuencia temporal de formación de las galaxias. Más bien pudiera ser que la sucesión real dibujara una imagen especular del tenedor de Hubble, es decir, que por fusión de galaxias espirales se pasaría a elípticas. Además, hoy en día se considera que hay mejores argumentos que la "forma" para clasificar a las galaxias. A fin de cuentas, Hubble las clasificó viéndolas sólo en las frecuencias de luz visibles. Posiblemente su clasificación hubiera sido distinta si hubiera podido verlas también en otras frecuencias.[7]

Pero ¿cómo son esas galaxias tan dispares?



A la izquierda, un ejemplo de galaxia elíptica, Virgo A M87 con la emisión de un chorro de materia, y a la derecha una galaxia espiral barrada NGC 253 (imágenes de Wikimedia, dominio público)

Las del primer tipo -las elípticas- disponen de una gran cantidad de gases calientes, a tan altas temperaturas que es muy difícil el que en ellas nazcan actualmente estrellas debido a las altas velocidades del material que se necesita compactar para ello. De hecho, se cree que en ese tipo no han nacido estrellas en los últimos 10 mil millones de años y que la mayoría lo hizo durante los primeros años de vida de sus galaxias. Esas viejas estrellas parecen haber conseguido la independencia que se le asume a la madurez, ya que las vemos siguiendo unos movimientos azarosos en cualquier dirección sin que haya ninguna preferida. La existencia en ellas de elementos "pesados" -más allá del helio- corrobora nuestra idea acerca de que son galaxias muy viejas.

En cambio, y tal como explicamos a continuación, las galaxias espirales tienen discos ricos en gases no demasiado calientes, por lo que siguen generando estrellas aunque a un ritmo mucho más lento que el que tenían las galaxias elípticas en sus inicios. Se observa también una tercera "forma de vida" estelar en las galaxias irregulares, las cuales presentan a menudo una apariencia "explosiva" porque en ellas se lleva a cabo vigorosos procesos de creación estelar. En consonancia con esa anarquía sus abundantes masas de gases y estrellas, jóvenes y viejas, se desplazan por la estructura de la galaxia siguiendo orbitas muy anómalas.

Imagen de la galaxia irregular NGC 1569 (Wikipedia, dominio público)

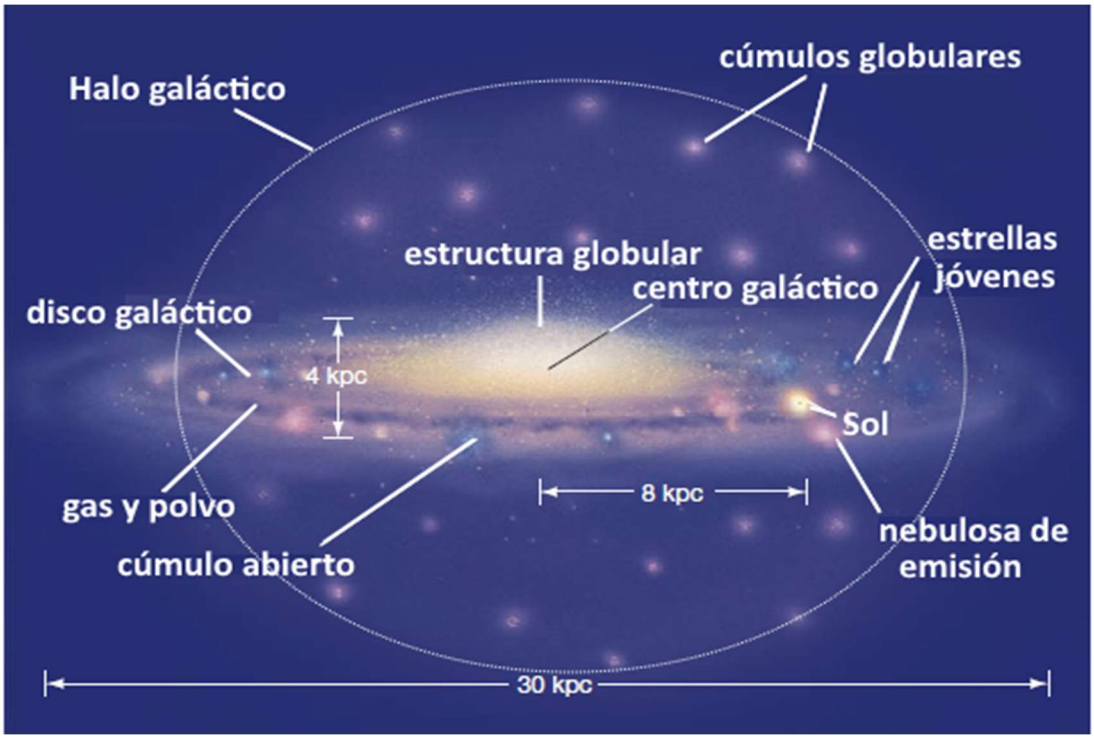
Arquitectura galáctica

Por su proximidad emotiva para nosotros y, realmente, porque la Vía Láctea es nuestra galaxia de la que nos es fácil aprender cosas, basándome en ella voy a desarrollar lo dicho acerca de las características de las galaxias espirales.

Presentan un núcleo central globular, rodeado por un disco orientado más o menos en un plano. Todo ello rodeado con mucho por un halo de materia normal, que en gran medida son gases calientes[8] restos de los productos iniciales del Big Bang, hidrógeno y helio en su mayoría, que pueden llegar a representar hasta el 15% de la masa total de la galaxia. De ello un 95% está en las estrellas y un 5% es gas interestelar. Y todo ello envuelto por un inmenso halo de materia oscura que realmente constituye el mayor porcentaje de su masa total, hasta un 85% del total.

Además, tienen un agujero negro supermasivo en su centro, circunstancia que no es exclusiva de las elípticas ya que la mayoría de las galaxias gigantes, de

los dos tipos, los tienen. Posiblemente ese agujero negro fue la semilla galáctica inicial sobre la que pudo construirse.



Arriba podemos ver una representación artística que dibuja lo dicho y que se ajusta a las características de nuestra galaxia espiral Vía Láctea. No se ha dibujado el halo de materia oscura que, realmente, se saldría del mapa.[9] En la imagen se ven claramente las tres subestructuras bariónicas de una galaxia espiral: ***el disco*** plano, la estructura globular del ***bulbo central*** y el envolvente ***halo galáctico*** exterior. Ese halo es una región esférica que envuelve al disco y al bulbo, compuesta principalmente por cúmulos globulares y estrellas antiguas. El halo también alberga una cantidad significativa de materia oscura, que influye en la dinámica galáctica.

Las estrellas más jóvenes se concentran en el disco en donde coexisten con otras más viejas, edades que van creciendo a medida que nos vamos alejando del centro, tanto por la estructura globular como por el halo en donde encontramos a las más añosas. Eso concuerda con las observaciones de que las incubadoras de estrellas se concentran en el disco. Vemos también que el halo es casi traslucido ya que no contiene prácticamente gas ni polvo. Y lo que es muy curiosos, en el disco las estrellas rotan alrededor del centro de su plano, mientras que las del halo lo hacen de forma azarosa siguiendo órbitas centradas y orientadas en cualquiera de las direcciones. Eso es debido a que las estrellas del halo, más viejas, proviene de la primigenia formación de la galaxia por fusión de nubes de gases con unas dinámicas de rotación muy débiles. Cosa que cambió sustancialmente cuando colapsó el disco con un sentido de giro ya muy definido que es el que siguen las jóvenes estrellas que se encuentran en él.

Dinámica del material en las galaxias

Quizás pudiéramos pensar que los brazos de las galaxias espirales son como "torrentes" de materia transportada de un lugar a otro que va dando vueltas alrededor del agujero negro central. No es así. Sabemos que los objetos de las galaxias rotan alrededor de su eje, ***con velocidad lineal constante prácticamente en todo el radio***, lo cual implica que las más interiores lo hagan a una velocidad angular mayor que las del exterior puesto que la relación entre velocidad angular (ω) y velocidad lineal (v) está dada por la fórmula: $v=\omega \cdot r$.[10] Si el brazo fuera un cuerpo perfectamente trabado esta diferencia de velocidades angulares haría que en unos 10^8 años se enrollara como una madeja, lo cual no es lo que observamos. Hay que buscar otro mecanismo.

Una de las principales explicaciones para la existencia de los brazos espirales es que son el resultado de ondas espirales de densidad, que son la verdadera causa de su formación. Estas ondas no son ondas de materia, sino perturbaciones de compresión en el gas y las estrellas, similares a una onda sonora. Se propagan a través del disco galáctico en la misma dirección que la rotación general del disco, comprimiendo y expandiendo los objetos galácticos a medida que avanzan. En las zonas de compresión, donde la onda provoca inestabilidad, se desencadena la formación de nuevas estrellas. Esto ocurre debido a que la alteración del patrón de velocidades genera más colisiones y fricciones, lo que calienta el medio y favorece la formación estelar.

Imagen que representa las ondas espirales de densidad en una galaxia vista desde arriba. Esas ondas siguen el sentido de rotación de la galaxia, destacando cómo en las regiones de alta densidad se dibujan los brazos espirales marcados con flechas.

La velocidad de rotación del material en el disco galáctico, ya sean estrellas o gas, es diferente de la velocidad de rotación de la onda de presión. Las estrellas

ubicadas en las regiones interiores de la galaxia se mueven más rápido que la onda, la alcanzan por detrás, se unen a ella durante un tiempo determinado y finalmente la superan. Por otro lado, las estrellas de las regiones externas de la galaxia se mueven más lentamente que la onda, por lo que la onda las alcanza por detrás y termina por adelantarse. En ambos casos, el resultado es que el material galáctico, mientras se encuentra atrapado y transita temporalmente por la onda, se ralentiza y se comprime, para luego retomar su movimiento normal. Este fenómeno es similar al efecto acordeón que experimentamos en los atascos de tráfico: cuando llegamos a una zona de parón, nos vemos atrapados muy cerca de otros vehículos, hasta que la resistencia al flujo de tráfico disminuye y volvemos al ritmo normal. Durante este parón, nuestra paciencia suele verse afectada, y no es raro que, al igual que las estrellas en la onda, se produzcan exabruptos, a veces de proporciones casi "estelares". En el siguiente capítulo podéis leer una explicación más detallada de ese fenómeno.

Como consecuencia se producen las barras y los brazos espirales que serían las "crestas" de la materia galáctica producidas por el empuje dinámico que ejercen sobre ella las ondas de presión. Y a medida que los "canales" de materia alcanzan (o son alcanzados) y entran en la onda de presión, el gas se comprime y forma estrellas.

Las más importantes son las brillantes gigantes azules que viven sólo por un corto periodo de tiempo ya que pronto van a estallar como supernovas. Por lo que esas jóvenes estrellas, que se concentran en cúmulos abiertos o en nebulosas de emisión, las podemos encontrar solamente en los brazos de los canales de polvo que están "surfeado" las ondas de presión y muy cerca de sus lugares de nacimiento. Es el brillo de estos sistemas jóvenes lo que resalta la estructura en espiral. Aguas abajo del paso de la materia por "encima" de la ola de presión vemos principalmente estrellas y cúmulos estelares más antiguos ya que han tenido suficiente tiempo desde su formación para alejarse de la ola. Aunque algunas de ellas ya estaban presentes antes de la onda de presión y simplemente orbitaban el centro galáctico con velocidades diferentes.

Sin embargo, estas estructuras no son permanentes, ya que la interacción de las estrellas, el gas y las ondas de densidad es un fenómeno dinámico que cambia con el tiempo. A lo largo de millones de años, sus movimientos individuales aleatorios, superpuestos a su rotación general alrededor del centro galáctico, distorsionan y finalmente destruyen su configuración espiral original, convirtiéndose de nuevo en parte de la materia general del disco. Las ondas de presión continúan moviéndose por el disco, pero el material galáctico (gas y estrellas) no va a permanecer permanentemente ligado a los brazos.

Hasta ahora hemos estado hablando de galaxias que quizás habríamos conceptuado como normales. Pero no nos podemos obviar una propiedad característica de algunas de ellas, las conocidas como ***galaxias activas***, que son

casi un 40% del total. Las galaxias activas son especialmente brillantes: las elípticas más grandes brillan unas 10^{12} veces más que el Sol. Pensad que la Vía Láctea brilla con la equivalencia de 10^9 soles. La mayoría de las galaxias activas emiten cantidades sustanciales de radiación visible, pero aun mucha más en longitudes de onda "invisibles". Las galaxias activas, en longitudes de onda ópticas, se ven a menudo como galaxias normales con sus componentes familiares tales como discos, bulbos, estrellas o bandas de polvo oscuro. Sin embargo, en otras longitudes de onda se hace más evidente que tienen propiedades inusuales. A veces, simplemente estamos asomándonos a una época temporal de intensa generación de nuevas estrellas. Pero muchas veces la actividad anormal está relacionada con eventos violentos que ocurren en o cerca del núcleo galáctico. A esos núcleos se les conoce como ***núcleos galácticos activos*** que caracterizan variadas estructuras galácticas, algunas ya conocidas por nosotros, como los cuásares, o los blázares y pulsares de los que hablaremos en el capítulo 33.

Evolución de las galaxias. Fusiones

Vamos a entrar ahora en el estudio de la evolución de las galaxias una vez que ya son estructuras consolidadas, cosa que está muy condicionada por los "choques" entre ellas y los consiguientes fenómenos inducidos de generación estelar y modificación en la distribución de gases. Siempre se ha pensado que de las más globulares elípticas se habría pasado a las espirales de acuerdo con una inevitable dinámica de movimiento de giro de sus masas. Pero el hecho de que la galaxia más grande que conocemos sea una elíptica, la IC 1101, con un tamaño de unos 400 mil años luz, introduce unas ciertas dudas que nos llevan a pensar que quizás el proceso pudo ser el contrario. Sea como fuere, lo que es cierto es que los astrónomos tienen serias evidencias observacionales de que las colisiones e interacciones entre galaxias son muy comunes y que estos encuentros son los principales procesos físicos que condicionan su evolución.

En el universo encontramos muchos cuerpos unidos por interacciones gravitatorias, entre ellos las galaxias, con una dinámica que es imposible de ser evitada. Con el tiempo, estas galaxias atadas por la gravedad formando cúmulos acabarán entrando en senda de colisión. Realmente en la "pecera cumular" donde deambulan no tienen mucho espacio para moverse sin chocar entre sí: la distancia entre galaxias adyacentes en un cúmulo tiene un promedio de unos cientos de miles de párseces, que es menos de cinco veces el tamaño de una galaxia típica incluido su halo de materia oscura,[11] por lo que los encuentros son la norma más que la excepción.[12]

No obstante, no pensemos que este proceso de fusión sea como un choque de trenes: no chocan estrellas contra estrellas ya que éstas están tremendamente separadas unas de otras en comparación a su tamaño, sino que más bien se produce una mezcla progresiva de los componentes de las galaxias. En los

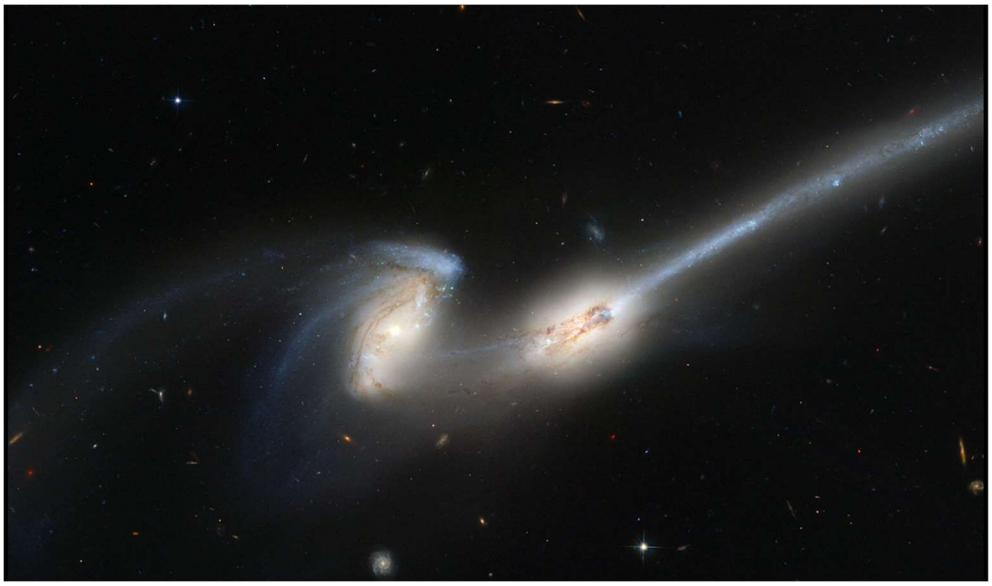
grupos más pequeños, las velocidades de las galaxias son lo suficientemente bajas como para que las que interactúan tiendan a "pegarse", siendo la "fusión" el resultado más común. En grupos más grandes las galaxias se mueven más rápido y tienden a atravesarse sin pegarse. De todas formas, tampoco es un proceso tan suave, ya que la fricción de los gases entre las dos galaxias origina normalmente ondas de choque que generan nuevas estrellas, mientras que otras ya existentes serán lanzados al espacio exterior. Lo más común es que a la larga se llegue a formar un cuerpo único -una nueva galaxia- en un estado estable.

La mayoría de los encuentros galácticos se produjeron para z's mayores de 1, antes de cumplirse los 3.000 millones de años tras el Big Bang, cuando las galaxias se encontraban más compactas, lo cual es bastante lógico. Pero debemos pensar que a medida que el tiempo y la expansión disminuye la densidad de las galaxias, el número de aproximaciones, encuentros y colisiones tuvo que ser menor.

Los astrónomos trabajan principalmente con tres tipos de interacciones galácticas, clasificación que surge fruto de contrastar el resultado de simulaciones en computadores con las observaciones.

Una primera sería el caso de la aproximación de dos galaxias en donde *una tiene una masa mucho más pequeña que la otra*. La mayor canibaliza a la pequeña en un proceso en el que el halo de la mayor interactúa con la menor, haciendo que esta última inicie un baile en espiral sobre la grande emitiendo hacia el exterior, en la dirección contraria a la de aproximación, parte de sus estrellas. Lo que se conoce como la cola de marea, una región delgada y alargada de estrellas y gas interestelar que se extiende al espacio desde una galaxia. Un segundo tipo de interacción galáctica se produce cuando *una de ellas tiene ligeramente menos masa que la otra.* En este caso la menor puede inferir en la mayor la generación de nuevos brazos espiral y la creación de nuevas estrellas. El tercer tipo corresponde a la situación de encuentro entre *dos galaxias comparables en masa y tamaño*. El choque, y las supernovas generadas en el subsiguiente episodio de intensa creación de nuevas estrellas, hace que los discos se rompan y que el gas de las galaxias sea expulsado al espacio intergaláctico. Cuando todo se calma aparece una galaxia elíptica con un halo visible en la frecuencia de rayos X.

A esa triple tipología de fusiones debemos añadir el caso de que las galaxias que se fusionan sean de un *tamaño similar pero pequeño*. Entonces lo más probable es que aparezca una galaxia elíptica. Eso es debido a que cuando interactúan gravitacionalmente galaxias enanas, al ser la masa final también pequeña no habrá suficiente potencial gravitatorio como para "disciplinar" tras la fusión los movimientos iniciales de las galaxias, con direcciones de encuentro al azar. Como sabemos, eso es lo que caracteriza a las elípticas, diferenciándolas de las disciplinadas espirales.



(Imagen, NASA, H. Ford (JHU), G. Illingworth (UCSC/LO), M.Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), the ACS Science Team y ESA, dominio público)

La imagen anterior corresponde a ese caso de fusión galáctica, la de dos pequeñas de tamaño similar, las "galaxias ratón" NGC 4676A/B, que llevan unos 160 millones de años bailando en pareja. Sus núcleos aún siguen atrapados por sus propios pozos gravitacionales mientras que los brazos del disco están siendo distorsionados y enviados como largos flujos de gases y jóvenes estrellas más allá del influjo de los cuerpos nucleares. Lo que poco antes hemos calificado como cola de marea. Entre ambas galaxias se ha creado un flujo de intercambio de materia que indica que posiblemente acaben fusionándose en una única galaxia elíptica.[13]

(Imágen: NASA/ESA y The Hubble Heritage Team (STScI), dominio público)

La imagen anterior corresponde a otro caso de fusión, la de las galaxias espirales NGC 2207 y la ligeramente más pequeña IC 2163 que aparentemente se cruzan con sutil elegancia. El análisis de esta imagen sugiere que la pequeña está pasando ahora junto a NGC 2207 en sentido contrario a las agujas del reloj, después de haber iniciado un acercamiento hace unos 40 millones de años, situación que va a continuar ya que IC 2163 aparentemente no tiene suficiente energía para escapar de la atracción gravitacional de la galaxia mayor. Se ve claramente cómo al ser empujadas y sacudidas sus nubes interestelares de gas y polvo, ambas galaxias experimentan estallidos de ráfagas de formación de estrellas. En aproximadamente mil millones de años estas dos galaxias probablemente se fusionarán en una sola galaxia masiva.

(Imagen ESA/Hubble, CC BY 4.0)

Por último, una tercera imagen, la anterior, que corresponde a la fusión de las "galaxias antena" NGC 4038/4039 que comenzaron a interactuar hace unos doscientos o trescientos millones de años. Toman su nombre de unos largos "brazos" en forma de antena que se extienden lejos de los núcleos de las dos galaxias y que esta vista parcial no recoge. La hemos ampliado al inicio del próximo capítulo, donde podréis apreciar claramente las "antenas" que les dan nombre. Casi la mitad de los objetos débiles en la imagen son cúmulos jóvenes que contienen decenas de miles de estrellas. Las dos manchas más claras arriba y abajo del centro de la imagen son los dos núcleos de las galaxias originales y consisten principalmente en viejas estrellas atravesadas por filamentos de polvo, que en la imagen aparecen de color marrón. Las dos galaxias están salpicadas de regiones de formación de estrellas de color azul brillante rodeadas de gas de hidrógeno resplandeciente, que aparece en la imagen en rosa. La gran mayoría de los cúmulos de súper estrellas formados durante esta interacción se

dispersarán y las estrellas individuales se convertirán en parte del fondo uniforme de la galaxia. Sin embargo, se cree que alrededor de un centenar de los cúmulos más masivos sobrevivirán para formar cúmulos globulares regulares similares a los cúmulos globulares que se encuentran en nuestra propia galaxia la Vía Láctea.[14]

Agrupaciones de galaxias

A la par de estas danzas entre pares, las galaxias se iban organizando. En la frontera entre el primer y el segundo millar de millones de años las galaxias comenzaban a unirse formando "proto cúmulos", siguiendo un proceso que ya hemos explicado más arriba. A partir del tercer milenio de millones de años se formaron ya los verdaderos cúmulos de galaxias[15] Y en el quinto milenio de millones la gravedad había conseguido formar supercúmulos. No os imaginéis a los cúmulos de galaxias como unos racimos cósmicos más o menos densos en donde las galaxias serían los granos y el resto vacío o ligeramente ocupado por gases, aunque realmente así nos lo parece cuando los vemos en una imagen en la frecuencia de lo óptico. Es algo mucho más complejo. Para empezar, hay el doble más de gases que de materia bariónica luminosa concentrada en las galaxias, gases que provienen de distintos orígenes, desde el primigenio del Universo -hidrógeno y helio primordiales- hasta el que es producto del proceso que siguen la supernovas, y tan calientes[16] que pueden ser apreciados en el espectro de los rayos X. Pero eso es aún una nimiedad al lado de la materia oscura que los conforma, ya que ésta representa entre el 80 y el 85% de la masa total del cúmulo.[17] Realmente podemos pensarlos como "ameboides", con su propia vida y una larga evolución gravitatoria hacia el equilibrio dinámico en sus organismos,[18] lo que les lleva normalmente por una senda de progresiva estabilidad: los cúmulos que observamos de forma irregular aún no han llegado a ese equilibrio, estando aún en proceso de formación y siendo dominados por las galaxias espirales, mientras que los cúmulos de forma más regular son más estables, más relajados, quizás porque son más viejos y han tenido tiempo para llegar al equilibrio, siendo dominados por galaxias elípticas.

En la imagen que sigue podemos contemplar casi en vivo y en directo a los componentes de base de uno de esos cúmulos. Se trata de la representación del Cúmulo Bala (1E 0657-56) situado en z=0.3, temporalmente muy próximo a nosotros, en donde se han superpuesto las imágenes de frecuencias ópticas y las de rayos X. Es la estampa real de lo que se cree el resultado del "choque" -cruce- de dos cúmulos galácticos, separándose después de que el pequeño, que se mueve hacia la derecha, haya atravesado al mayor que se desplaza hacia la izquierda. Realmente la "bala" -el menor- se corresponde con el cono rosáceo de la derecha. Esos rosas corresponden a los gases hipercalientes de los cúmulos y a parte de la materia bariónica que también está a muy alta temperatura como consecuencia del choque. La gran mayoría de la materia

bariónica de las galaxias sigue fría y es precisamente la que se observa a la par del halo azul en forma de cientos de galaxias. Estas zonas azules se corresponden con la materia oscura acompañante calculada a partir de técnicas que usan a las lentes gravitatorias.

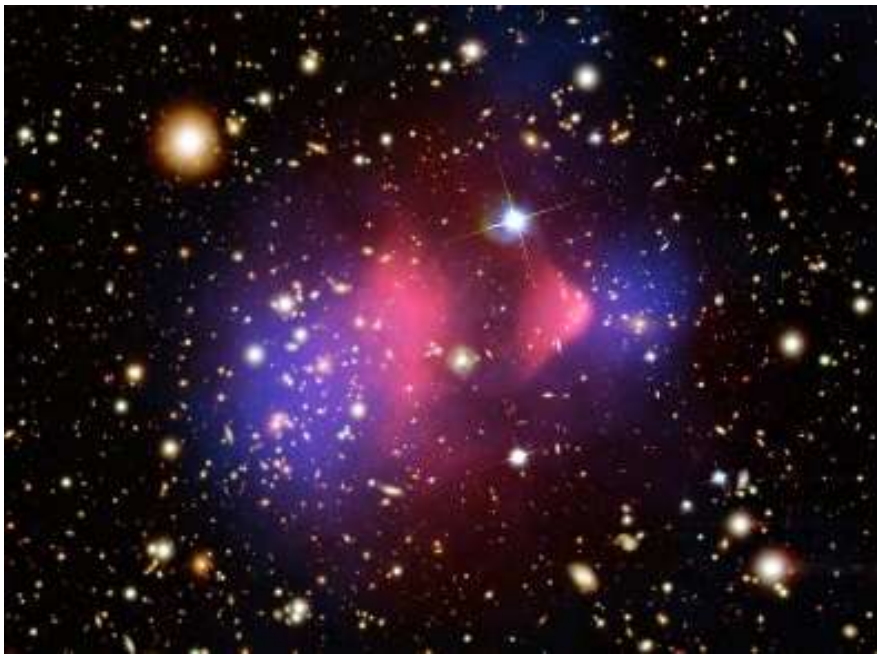


Imagen del cúmulo Bala (1E 0657-56) (Imagen: X-ray: NASA/CXC/CfA/ M.Markevitch et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/ D.Clowe et al. Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al., uso no comercial)

La distribución comentada permite pensar que el gran "choque" se dio principalmente entre los gases, por rozamiento, que quedaron rezagados en sus caminos de separación con respecto a sus respectivas familias galácticas. El resto de materia, tanto las galaxias como la oscura, da la impresión de que se cruzaron apenas sin interactuar. Lo que da una pista acerca de la esencia de la materia oscura: no solo interactúa levemente con la materia ordinaria sino también con ella misma. No se comporta como un gas intergaláctico.

Esos gigantes en la escala de estructuras del Universo, los ***cúmulos de galaxias***, son muchas órdenes de magnitud mayores que los cúmulos de estrellas ya que se tratan de superestructuras cósmicas formadas por miles de galaxias unidas por la acción de su gravedad y de la materia oscura que las acompaña. El más masivo conocido se trata de SPT-CLJ2106-5844 que tiene una masa del orden de $1{,}27\times10^{15}$ masas solares. A unos cuantos pasos más allá se encuentran los ***supercúmulos***, que son estructuras más complejas formadas por centenares o miles de cúmulos galácticos interaccionando gravitatoriamente entre sí. Nuestra Vía Láctea, una galaxia antigua con 13.210 millones de años, se encuentra con otras 53 en un cúmulo de galaxias llamado el Grupo Local, que

a su vez pertenece al supercúmulo Laniakea, con unos 300 a 500 cúmulos de galaxias y cuyo tamaño es de 500 millones de años luz.

Las galaxias son estructuras constitucionales clave, bisagra entre lo grande y lo pequeño en un Cosmos repleto de materia y energía. Galaxias repletas de estrellas de primera generación, las de Población III. Hasta ahora sólo hemos visto que el Universo, durante la nucleosíntesis, había dado a luz a mucho hidrógeno, menos helio y unas pizcas de litio. Pero es evidente que a nuestro alrededor hay algo más, vemos cosas de lo más diversas, desde conchas de moluscos hechas de calcio, a centrales eléctricas consumidoras de uranio, o clavos de ferroníquel. ¿De dónde ha salido esta variedad, todos los elementos químicos que vemos hoy en día? Este misterio es lo que intentaremos analizar en los próximos capítulos. *Spoiler*: las estrellas.

NOTAS DEL CAPÍTULO 30:

1. El gas y el polvo se encuentran por todas partes en el espacio interestelar, ninguna parte de nuestra Galaxia está verdaderamente desprovista de materia. Sin embargo, la densidad del medio interestelar es extremadamente baja. En general, hay aproximadamente un promedio de 10^6 átomos de gas por metro cúbico -solo 1 átomo por centímetro cúbico- aunque hay grandes variaciones de lugar a lugar.
   El polvo interestelar se encuentra formando grumos de átomos y moléculas, incluso minerales refractarios más grandes, que se condensaron cuando la materia abandonó el cuerpo de las estrellas empujada por sus vientos o por las ondas de presión tras la explosión de una supernova. El polvo es aún más raro en el espacio interestelar que los átomos de gas. En promedio sólo hay una partícula de polvo por cada 10^9 átomos, lo que supone solo 10^{-6} partículas de polvo por metro cúbico.
   (Del libro "*Astronomy Today*", pagina 452, Eric Chaisson y Steve McMillan, 2014).
2. Tenéis los datos en un artículo publicado en la revista Nature de marzo de 2017, "*Strongly baryon dominated disk galaxies at the peak of galaxy formation ten billion years ago*" de R. Genzel et al.
   [https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1703/1703.04310.pdf]
3. La afirmación de que la materia oscura tiene un proceso de compactación más lento y prolongado en comparación con la materia bariónica es consistente con la naturaleza no colisional de la materia oscura. Este comportamiento está relacionado con su interacción gravitatoria pura, en contraste con la materia bariónica, que además interactúa

electromagnéticamente, facilitando la disipación de energía y el colapso en estructuras más compactas.

4. En esta tabla se pueden ver algunas características físicas de una galaxia como la nuestra. T(K) es la temperatura en kelvin, n(cm^{-3}) la cantidad -número- de población del componente por cm^3 y M(10^9 $M_\odot$) la masa total en miles de millones de masas solares.

Componente	**T (K)**	**n (cm^{-3})**	**M(10^9 $M_\odot$)**
Molecular	10 − 20	$10^2 - 10^6$	~ 1.3−2.5
Atómico frío	50 − 100	20 − 50	>~ 6.0
Atómico templado	$6.10^3 - 10^4$	0.2 − 0.5	>~ 6.0
Ionizado templado	~ 8.10^3	0.2 − 0.5	>~ 1.6
Ionizado caliente	~ 10^6	~ 0.0065	

"*The Interstellar Environment of our Galaxy*", Tabla 1, Katia M. Ferrière, 20 junio 2001.
[https://arxiv.org/pdf/astro- ph/0106359.pdf]

5. Animo a recordar la espectacular imagen con que se cerraba el capítulo 24 y a releer su explicación en el texto. Se trata del mapa de todo el cielo observando en la línea de 21 cm del hidrógeno atómico, ondas de radio, en donde uno se hace idea de los cúmulos descritos en el texto de este capítulo.

6. La imagen que sigue no hace honor a una clasificación según el color real, ya que el azul correspondería a galaxias con mayoría de estrellas jóvenes y el rojo correspondería a galaxias con estrellas más viejas. Quizás el hecho de que las galaxias elípticas hayan sido más rápidas en la generación de sus estrellas, que por tanto son más viejas y con tendencia de su luz a las frecuencias rojas, mientras que las espirales sigan aun generando muchas estrellas, jóvenes y azules, sea lo que ha provocado la selección de color en la imagen que acompaña el texto. Quizás interese obtener una ampliación sobre el porqué de una clasificación de color, lo que tenemos en los dos enlaces siguiente (el segundo en español):

   [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Galaxy_color%E2%80%93magnitude_diagram]

   [http://angelrls.blogalia.com/historias/75290]

7. Para una comprensión más detallada de la clasificación morfológica actual de las galaxias, se puede consultar el documento titulado "*Tipos de galaxias y otros objetos estelares*", capítulo 1.2 "*Clasificación morfológica de las galaxias*", de Alianza B@UNAM, CCH y& ENP. Este documento ofrece

una visión detallada de los diferentes tipos de galaxias y sus características distintivas.

8. Están muy calientes porque al moverse a muchísima velocidad por las fuerzas gravitatorias, se calientan por rozamiento. Realmente lo que está caliente son los componentes del gas, pero como están muy diluidos el espacio intermedio que los contienen está a una temperatura bajísima, cercana a los 3 K.

9. Imagen modificada de la figura 23.10 del libro "*Astronomy Today*", Eric Chaisson y Steve McMillan, 2014, ©*fair use*.

10. "*Ondas de densidad y evolución de galaxias*", páginas 3-6, Santiago García Burillo, Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid, 2003.

[http://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/ondasdedensidadyevolucion.pdf]

11. Recordemos que la materia oscura puede representar hasta el 85% del total de su masa y, por tanto, su influjo en la dinámica de aproximaciones es vital. A medida que orbitan las galaxias interactúan sus halos oscuros, lo que ralentiza el movimiento de las galaxias y elimina el material del halo por las fuerzas de las mareas. La materia del halo se redistribuye entre las galaxias o se pierde por completo fuera del sistema. En cualquier caso, el resultado es una interacción mucho más fuerte que puede cambiar mucho las órbitas de ambas galaxias.

12. Podemos hacer un cálculo con números gruesos. Según la información que da Wikipedia para los cúmulos de galaxias, los mayores tienen diámetros de 10 Mpc y contienen hasta 1.000 galaxias. El volumen será de 10^3 Mpc^3 lo que da 1 Mpc^3 por galaxia. Entonces sería una razonable aproximación si decimos que los centros de dos galaxias estarán separados por 1 Mpc. Ahora comparad: el diámetro de la Vía Láctea es más o menos de medio Mpc. Realmente las galaxias dentro de sus cúmulos están ciertamente próximas.

13. Para una más detallada explicación os sugiero acudir a la entrada "*Imágenes astronómicas - Los Ratones*" del blog "*El Tamiz*".

[https://eltamiz.com/2007/09/29/imagenes-astronomicas-los-ratones/]

14. Para más información ver la siguiente página de la ESO:

[https://hubblesite.org/contents/media/images/2006/46/1995-Image.html]

15. Ojo, no nos despistemos: remarco que ahora estamos tratando de agrupaciones de galaxias, y no de cúmulos estelares, que se encuentran dentro de una galaxia.

16. A temperaturas típicas del orden de 10^7 a 10^8 K.

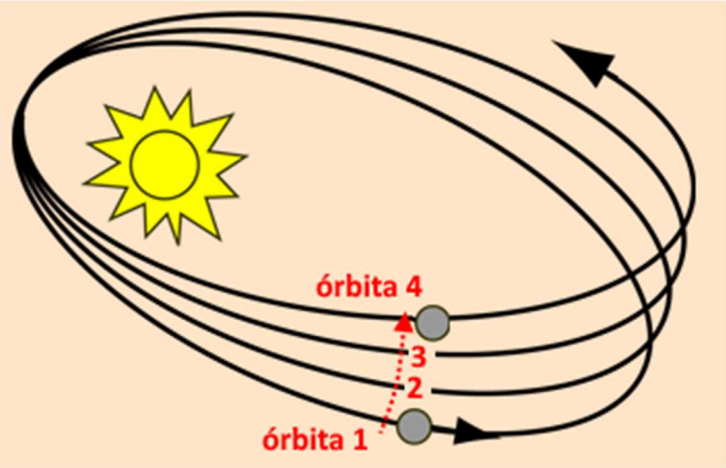
17. La masa típica de un cúmulo de galaxias es de 10^{14} a 10^{15} masas solares, pero su luminosidad es de solo 10^{12} veces la luminosidad solar. Esos números nos dicen que atendiendo sólo al espectro óptico se nos puede escapar grandes cantidades de masa. La masa de la materia oscura.

18. Técnicamente, este equilibrio se consigue cuando entre los elementos de un sistema se corresponde la energía potencial promedio de los mismos con su energía cinética promedio, en una relación de dos a favor de la energía cinética. En la teoría se le conoce como el *teorema del virial*, y cuando un sistema llega al equilibrio dinámico representado por este teorema se dice que está "virializado". Este teorema se usa en variadas disciplinas -en particular la Cosmología- para calcular la energía cinética total promedio de sistemas muy complejos en los que es muy difícil obtener una solución exacta. Se habló de ello en el capítulo 21.

31. Ondas de densidad en las galaxias espirales

En el capítulo anterior se ha hablado de las ondas de densidad que recorren el disco de las galaxias espirales. Y de como estas ondas condicionan la estructura de los brazos y el nacimiento de estrellas en ellos. En este capítulo vamos a analizar con más detalle lo que sean esas ondas.[1]

Las estrellas dentro del disco galáctico siguen por lo general unas curiosas trayectorias elípticas las cuales también giran alrededor del centro y, además, presentando un movimiento de precesión. Es decir, que cuando una estrella ha completado una órbita, generalmente no vuelve a su punto de partida, sino que este punto de partida se habrá desplazado por el giro propio de la órbita.



Esquema de la precesión sobre el rosetón dibujado por la órbita de Mercurio (Imagen modificada de Hyperphysics, ©fair use)

Podemos imaginar que cada órbita de estrella irá a su aire, pero si sus movimientos desordenados son suficientemente pequeños, lo que quiere decir que las velocidades relativas entre ellas no son muy grandes, la influencia gravitatoria de unas con otras podrá poner a sus órbitas en resonancia dibujando un *ballet* bastante coordinado que se manifiesta como una onda.

La imagen siguiente nos propone algunos esquemas de distintas ordenaciones de las órbitas elípticas estelares en una galaxia:

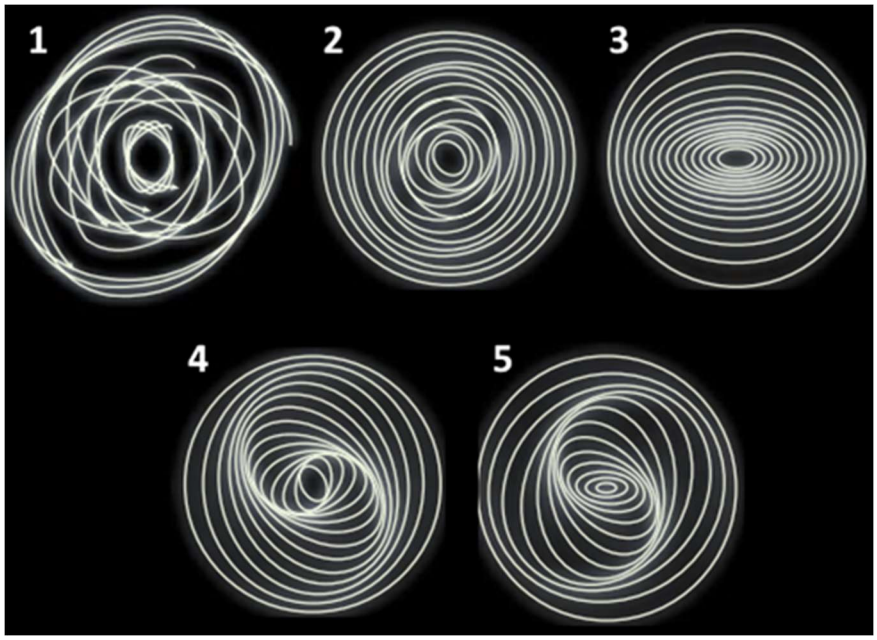
1. Ejemplo general de tres rosetones de órbitas estelares con sus precesiones. En las cuatro siguientes, en aras a la claridad, hemos eliminado el oscilar de las precesiones.

2. Varias órbitas aleatorias no coordinadas. No se produce una onda como claramente sí sucede en los tres siguientes casos.

3. Órbitas alineadas que formarán una onda barrada.

4. Órbitas que se mueven al unísono, pero no están perfectamente coordinadas. Se genera una onda espiral.

5. Como el caso anterior pero cerca del núcleo las órbitas están alineadas. Se genera una onda espiral barrada.



Ejemplos de ordenación de las órbitas elípticas de las estrellas en una galaxia (Imagen modificada de "Ondas en el océano galáctico", Françoise Combes, IyC diciembre 2005, fair use)

La coordinación de las órbitas estelares dentro de una galaxia desempeña un papel crucial en la formación de estructuras características, como los brazos espirales y las barras estelares. Esta sincronización orbital da lugar a regiones del disco donde aumenta la probabilidad de aglomeración de estrellas y gas, creando patrones dinámicos en constante evolución. Estas acumulaciones siguen un movimiento coordinado, formando ondas de densidad que pueden observarse como estructuras espirales o barradas en las imágenes galácticas. La formación de estas ondas de densidad está estrechamente relacionada con la alineación específica de las órbitas estelares (como los casos 4 y 5 previamente mencionados). Dependiendo del tipo de coordinación orbital, la forma de la onda resultante varía, generando las características figuras que observamos en las galaxias espirales.

Los brazos espirales son manifestaciones temporales de estas ondas de densidad, actuando como "crestas" donde el gas y las estrellas se acumulan de forma transitoria, análogas a atascos en una autopista cósmica. Estas crestas no solo representan áreas de mayor densidad, sino que también generan condiciones ideales para la formación estelar. En estas regiones congestionadas, las dinámicas se intensifican, comprimiendo el gas y desencadenando la formación de viveros estelares que iluminan y destacan la

estructura espiral. Así, los brazos espirales son tanto un resultado como un motor de la evolución galáctica.

Sin embargo, las ondas de densidad no son permanentes. Al interactuar con el medio interestelar, generan ondas de choque que disipan gradualmente su energía, lo que provoca que los brazos espirales se diluyan con el tiempo. Este proceso de amortiguamiento, aunque conduce a la desaparición de las ondas espirales, no deja un disco amorfo y desorganizado. En cambio, abre paso a la formación de estructuras más estables, como las barras estelares.

Las barras galácticas, al igual que los brazos espirales, son también ondas de densidad, pero con una estabilidad significativamente mayor. Una vez formadas, las barras actúan como inmensos agitadores, transfiriendo momento angular y energía a través del disco. Este movimiento continuo induce la formación de nuevas estructuras espirales en el gas circundante. Estas espirales, a su vez, alimentan la formación de estrellas, regenerando parcialmente la inestabilidad espiral en la galaxia. Por ello, las barras no solo son elementos estructurales clave, sino también catalizadores de la evolución dinámica de las galaxias.

La dinámica de creación y dilución de estructuras galácticas está íntimamente ligada a la temperatura del disco galáctico. En un disco suficientemente frío la dispersión de velocidades de las estrellas es muy pequeña, lo que permite que la gravedad actúe de manera efectiva para generar una estructura espiral. Esta estructura inicial puede, con el tiempo, evolucionar hacia la formación de una barra estelar. Sin embargo, como hemos mencionado, las ondas o inestabilidades, incluidas las espirales y las barras, sufren un proceso de amortiguamiento a medida que pierden energía. Esta energía se transfiere a las estrellas en forma de movimientos desordenados, lo que resulta en el calentamiento del disco. Cuando el disco alcanza temperaturas demasiado altas, la dispersión de velocidades aumenta considerablemente, dificultando la acción gravitacional y llevando a la desaparición de las inestabilidades espirales.

En casos extremos, incluso las barras, que son estructuras mucho más estables que los brazos espirales, pueden desaparecer si el disco se calienta lo suficiente y no contiene gas. Un disco compuesto exclusivamente por estrellas carecería de un medio eficiente para disipar energía, lo que dificultaría la regeneración de inestabilidades gravitacionales.

No obstante, este escenario es poco común ya que la mayoría de las galaxias contienen una cantidad significativa de gas. El gas desempeña un papel esencial en la regeneración de estructuras galácticas, actuando como un medio disipador que permite enfriar el sistema de manera eficaz. Este enfriamiento facilita la formación de nuevas ondas de densidad, restableciendo la estructura espiral incluso en discos que han experimentado un calentamiento considerable. Así,

el gas no solo modula la temperatura del disco, sino que también asegura la continuidad del *ballet* dinámico de las galaxias.

Las estrellas y el gas interestelar responden de manera muy diferente a las ondas de densidad debido a sus propiedades físicas y dinámicas. Mientras que las estrellas no pueden ceder fácilmente el exceso de energía que les transfieren las ondas, el gas interestelar sí lo hace de forma mucho más eficiente. Esto se debe a la naturaleza de las nubes de gas interestelar, que son grandes y altamente propensas a "colisionar" con frecuencia. Esas colisiones de gas no son como colisiones elásticas simples, sino interacciones hidrodinámicas en las que la energía se transforma en calor, turbulencia y radiación. Durante estas colisiones, la energía cinética de las nubes se convierte en ondas de choque y, posteriormente, en radiación refrigerante que disipa el exceso de energía del sistema. Esa radiación se concentra principalmente en emisiones en líneas espectrales específicas (como las del carbono ionizado o el oxígeno) en el rango infrarrojo. El mecanismo de enfriamiento permite que las nubes de gas reduzcan sus velocidades y, como resultado, se vuelvan más susceptibles a la formación de inestabilidades ondulatorias.

Por otro lado, las estrellas, debido a sus pequeñas secciones transversales y las vastas distancias entre ellas, prácticamente no colisionan. Esto las mantiene en un amplio rango de velocidades relativas, dificultando su respuesta colectiva a las ondas de densidad y ofreciendo una mayor resistencia a su paso. En términos energéticos las estrellas tienden a conservar el calor generado por las ondas, mientras que el gas lo disipa activamente.

Como resultado, aunque las ondas de densidad calientan tanto el disco estelar como el gas, sólo el gas tiene la capacidad de disipar esta energía en forma de radiación. Este proceso de enfriamiento tiene implicaciones significativas: al disipar energía el gas reduce las velocidades medias del sistema y, al estar dinámicamente acoplado a las estrellas, este enfriamiento acaba extendiéndose al disco completo. De esta forma se facilita la reaparición de inestabilidades espirales, iniciando un nuevo ciclo de formación de estructuras.

En este sentido, el disco de gas y estrellas actúa como un sistema autorregulado. La capacidad del gas para disipar energía y, eventualmente, enfriar el conjunto, sugiere que las ondas de densidad podrían ser cuasi permanentes, manteniéndose activas durante largos períodos de tiempo a lo largo de la vida de la galaxia. Este proceso cíclico de calentamiento, enfriamiento y regeneración refuerza la idea de que las ondas no son eventos pasajeros, sino dinámicas persistentes que moldean y reconfiguran continuamente la estructura galáctica.

El intercambio de momento angular entre las ondas de densidad y la materia en el disco galáctico es un proceso esencial para entender la evolución dinámica de las galaxias. Como se ha señalado, el gas, debido a su naturaleza disipativa,

responde más fácilmente a estos intercambios, facilitando su interacción con estructuras como las barras y las espirales. Cuando el gas pierde momento angular, se ve atraído hacia las regiones centrales de la galaxia, donde forma densas concentraciones.

Este flujo masivo de gas hacia el núcleo galáctico tiene múltiples consecuencias importantes. En primer lugar, la acumulación de gas en el centro desencadena episodios de formación estelar extremadamente intensos, conocidos como brotes estelares. Estas zonas de formación estelar pueden alcanzar tasas entre 10 y 100 veces mayores que las de las regiones más externas de la galaxia, creando cúmulos de estrellas jóvenes y masivas que iluminan el núcleo. Estos brotes son, además, transitorios, ya que el gas disponible para alimentar la formación estelar se agota relativamente rápido, en escalas de tiempo de decenas de millones de años.

En segundo lugar, el gas que cae hacia el centro no solo alimenta la formación estelar, sino que también interactúa con el agujero negro supermasivo que reside en el núcleo de la mayoría de las galaxias. A medida que el gas pierde momento angular y se adentra en las regiones más internas, forma un disco de acreción alrededor del agujero negro. Este disco puede liberar enormes cantidades de energía en forma de radiación, viento estelar y chorros relativistas, transformando temporalmente la galaxia en un núcleo activo (AGN, por sus siglas en inglés). Estos episodios de actividad pueden alcanzar luminosidades que rivalizan o incluso superan a las de toda la galaxia combinada.

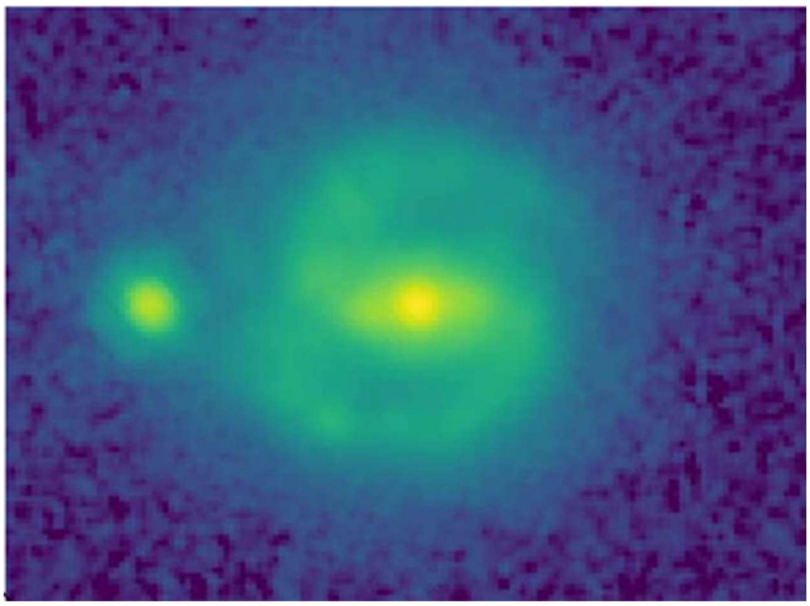
Sin embargo, esta redistribución masiva de materia no es inocua para la evolución de las ondas de densidad. La acumulación de masa en el núcleo altera significativamente el potencial gravitacional de la galaxia, dificultando el movimiento regular de las estrellas que sustentan estructuras como las barras. Las estrellas, al perder su órbita regular, dispersan su energía cinética y reducen la capacidad de la barra para mantener su coherencia estructural. Como resultado, las barras pueden debilitarse o incluso destruirse. Además, el aumento de la densidad central genera un entorno gravitacional más complejo que puede inhibir el desarrollo de nuevas ondas espirales. Esto significa que, a largo plazo, la galaxia podría evolucionar hacia un estado más amorfo o dominado por estructuras lenticulares, especialmente si el gas disponible para regenerar las ondas espirales se agota.

Sabiendo que se dan esas circunstancias la pregunta es ¿por qué se observan tantas galaxias barradas? En las imágenes ópticas, alrededor de dos terceras partes de las galaxias presentan barras, y si las observamos en las frecuencias del infrarrojo la cuenta sube hasta las tres cuartas partes. La abundancia de galaxias barradas, incluso frente a los procesos que tienden a destruirlas, refuerza la idea de que las barras son estructuras dinámicas, cíclicas y

resilientes. El proceso de destrucción y regeneración de las barras no solo depende de las dinámicas internas del disco galáctico, sino también de las interacciones externas con el medio intergaláctico, que aportan nueva materia y reconfiguran el sistema galáctico en su conjunto.

Cuando grandes cantidades de ***gas intergaláctico*** son capturadas por una galaxia, se produce una serie de eventos que pueden facilitar la reconstrucción de una barra. Este gas, inicialmente con trayectorias caóticas y energías elevadas, colisiona consigo mismo y con el gas preexistente en la galaxia, disipando su energía cinética a través de ondas de choque y radiación. Este enfriamiento permite que el gas se redistribuya en el disco galáctico, reduciendo la dispersión de velocidades de las estrellas y favoreciendo la aparición de órbitas más regulares. El gas intergaláctico, al caer hacia la galaxia, también aporta un alto momento angular. Este momento angular adicional actúa como un freno para el colapso rápido del gas hacia el núcleo, permitiendo que el material se distribuya a lo largo del disco y genere inestabilidades gravitacionales que favorecen la formación de una nueva barra. Este proceso es particularmente efectivo en galaxias con discos aún ricos en gas, donde las interacciones entre el gas nuevo y el ya existente pueden desencadenar una reorganización de las órbitas estelares y gaseosas.

Otro mecanismo que puede contribuir a la regeneración de barras son las ***interacciones gravitacionales con galaxias vecinas***. Las fuerzas de marea inducidas por encuentros cercanos pueden perturbar las órbitas estelares y gaseosas, creando condiciones propicias para la formación de nuevas barras. Estas interacciones, aunque disruptivas en un inicio, pueden actuar como catalizadores para la reorganización estructural de la galaxia.



La galaxia EGS-23205 captada con el telescopio espacial Webb. (Imagen: NASA / CEERS / University of Texas at Austin fair use)

El predominio de las barras como estructuras dinámicas y relativamente estables explica de manera satisfactoria por qué una mayoría significativa de las galaxias espirales son además barradas. Si cerca del 75% de las galaxias espirales presentan barras, es razonable suponer que una galaxia típica pasa una proporción considerable de su vida con una barra, incluso desde etapas tempranas de su evolución. Las observaciones recientes realizadas con el telescopio espacial James Webb (*ver imagen anterior*) han proporcionado evidencia directa que respalda esta idea. Galaxias similares a la Vía Láctea, como la EGS-23205, muestran barras prominentes en sus núcleos hace aproximadamente 11.000 millones de años, cuando el universo tenía menos del 20% de su edad actual. Estas barras en el universo primitivo sugieren que este tipo de estructuras no son solo características de galaxias maduras, sino que desempeñan un papel clave en las primeras etapas de la evolución galáctica.

Podemos terminar, y como resumen, diciendo que las barras son mucho más que simples estructuras estáticas en las galaxias, son testigos y agentes de su evolución dinámica. La captura de gas intergaláctico, las interacciones gravitacionales externas y los procesos internos de regulación aseguran que las barras puedan regenerarse incluso después de ser destruidas, haciendo de ellas una característica recurrente en el *ballet* cósmico de las galaxias. Tenemos que tener claro el hecho de que las galaxias no nacen con una forma determinada, barradas o sin barras, sino que se metamorfosean.

NOTAS DEL CAPITULO 31:

1. Las ideas expuestas provienen de "*Ondas en el océano galáctico*", Françoise Combes, IyC diciembre 2005 y de "*Ondas de densidad y evolución de galaxias*", Santiago García Burillo, Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid, 2003.
   [https://kupdf.net/download/investigacion-y-ciencia-351-diciembre-2005-mutaciones-pioneras_5d90172fe2b6f5060df9cd41_pdf]
   [http://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/ondasdedensidadyevolucion.pdf]

32: La fiesta continúa en las estrellas

El penúltimo capítulo antes del actual lo dedicamos a conocer mejor a las galaxias que no dejaban que ser más que un gran barrio de estrellas. Estrellas como personajes individuales. En este vamos a intentar desarrollar su biografía y seguiremos la pista de tal como fue evolucionando su presencia en el Universo a lo largo de los eones de la vida del Cosmos. Algo se apuntó ya en el capítulo 28.

En un punto decíamos: "*...es evidente que a nuestro alrededor hay algo más, vemos cosas de lo más diversas, desde conchas de moluscos hechas de calcio a centrales eléctricas consumidoras de uranio, o clavos de ferroníquel. ¿De dónde ha salido esta variedad, todos los elementos químicos que vemos hoy en día?*" Ya que, hasta ahora hemos visto que durante la nucleosíntesis sólo se había dado a luz a mucho hidrógeno, menos helio y pizcas de litio… ¿cómo entraron en escena el resto de los elementos, calcio, uranio, hierro o níquel? Unos niveles altos y precisos de energía habían favorecido la aparición de los primeros núcleos ligeros. Pero al expandirse llegó un momento en que se enfrió tanto que perdió la capacidad de formar núcleos más pesados. Parece como que la energía deba ser la explicación de todo… grandes cantidades de energía para poder ligar hasta, por ejemplo, 244 protones y neutrones, que es lo que tiene el núcleo del plutonio-244, el último elemento natural de la tabla periódica de Mendeléyev.

En el Cosmos tenemos dos fábricas de energía que cumplen estos requisitos. La primera la encontramos en las estrellas durante su ciclo de vida ordinaria, en cuyos hornos nucleares se pueden sintetizar nuevos elementos, hasta el 56, el hierro. Más allá de este tenemos que acudir a la segunda fábrica disponible, como son las supernovas, en cuyas explosiones destructivas se disipa una energía equivalente a la de cientos de miles de estrellas como nuestro Sol.[1]

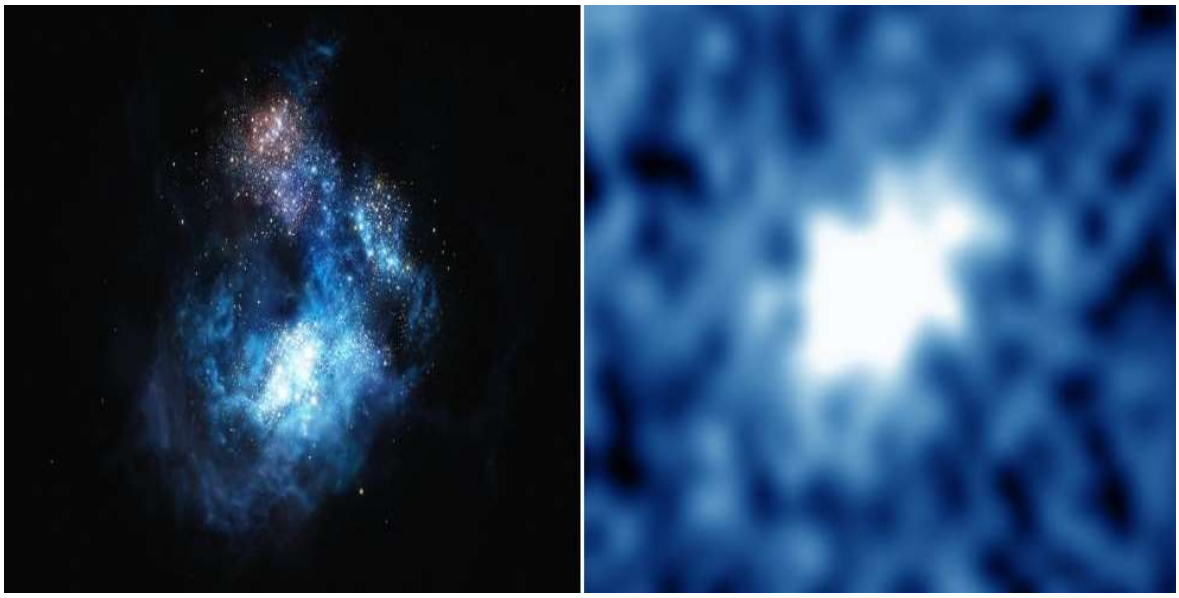
Hoy estamos rodeados por todos los elementos químicos naturales, pero durante la época de la reionización solo existían unos pocos, y eran recién formados. Las responsables de esta diversidad química fueron las primeras estrellas, que mediante sus procesos de fusión comenzaron a crear elementos más pesados que el litio. Al morir, las estrellas más grandes y masivas explotaron como supernovas, liberando al espacio sus gases compuestos por los elementos primigenios —hidrógeno, helio y litio— junto con los nuevos elementos sintetizados en su interior a lo largo de sus vidas. Estas primeras estrellas se conocen como de población III. En contraste, las estrellas de nuestra época -aunque aquí el término "época" abarque una gran parte de la vida del

universo- pertenecen a la población I. Entre ambas generaciones se encuentran, naturalmente, las estrellas de población II.

El ballet cósmico de las galaxias NGC 4038 y 4039, más conocidas como Galaxias Antena. A la izquierda en frecuencias ópticas y a la derecha combinando las imágenes ópticas con los datos de la emisión a 21 cm del hidrógeno atómico, que deja al descubierto en azul las largas líneas de estrellas, gas y polvo, resultado del proceso de fusión de ambas galaxias, que recuerdan a las antenas de un insecto (Imagen: imagen óptica: Robert Gendler; imagen radio: John Hibbard, NRAO/AUI/NSF; combinación multi-frecuencia: Ángel R. López-Sánchez (AAO/MQU); ⓕ fair use)

Las ***estrellas de Población III*** debieron ser estrellas muy, muy masivas (varios cientos de veces más masivas que el Sol), y calientes, sin metales. A efectos astronómicos, todos los elementos que van detrás del hidrógeno, helio y litio se les llama "*metales*", aunque químicamente muchos no lo sean. Pero a todos se les conceptúa como metales, de forma que, según veamos en una estrella una mayor o menor cantidad de ellos, diremos que tiene más o menos ***metalicidad***.[2] Como ejemplo diré que nuestra estrella, el Sol, está catalogada como de una metalicidad alta, aunque sus cantidades absolutas de "metales" sean muy pequeñas comparadas con la cantidad total de hidrógeno y helio: un 1,34 %.

Pues bien, la existencia de las estrellas de población III nos va a dar solución a la necesidad teórica de una fábrica de elementos más pesados que el litio. Son una necesidad para nuestra comprensión del universo, pero… no hemos detectado ni una. Lo cual hasta cierto punto resulta lógico, pues ya sabemos que fueron muy efímeras por lo que deben estar escondidas en corrimientos al rojo muy grandes. Y las que puedan quedar de ellas tras millones de años de vida del Universo tuvieron que ser siempre muy pequeñas y estarán escondidas en galaxias o cuásares.



La galaxia Cosmos Redshift 7, conocida como CR7. A la izquierda una interpretación artística (Imagen: ESO/M. Kornmesser, CC BY 4.0) mientras que a la derecha la imagen real, tomada por el telescopio Very Large Telescope de la ESO (Imagen: David Sobral et al., ⓔfair use)

Según la teoría, deberían encontrarse en cúmulos de entre uno y cien párstecs [un párstec mide $3{,}0857 \times 10^{16}$ metros] de diámetro, mientras que las nebulosas de gas ionizado por estos cúmulos podrían llegar a tener un tamaño de aproximadamente mil párstecs. Realmente ¿qué es lo que vemos? Algunos ejemplos. El objeto astronómico más lejano conocido es la galaxia GL-z13 cuyas estrellas lucían ya a los 250 millones de años del Big Bang. El cuásar más antiguo detectado se trata de ULAS J1120+0641, situado en un corrimiento al rojo de 7, lo que quiere decir que por lo menos ya enviaba su radiación a los 800 millones de años tras el Big Bang. Estos dos cuerpos cósmicos seguramente eran, o fueron, portadores de estrellas de población III. La estrella más lejana que conocemos, Eärendel, en el campo de la constelación de la Ballena, a 900 millones de años tras el Big Bang**,** es ya de población II, puesto que en ella se observa cierta metalicidad. El estudio de la galaxia más luminosa conocida, CR7, situada en el campo de la constelación de la Osa Mayor, a 700 millones de años tras el Big Bang, parece que pudiera ser una combinación de estrellas de población III y de otras estrellas "normales". Las primeras determinaron la emisión de rayos ultravioleta de la galaxia -buenas candidatas para cebar la reionización- y empujaron a los gases hacia su periferia formando a su alrededor masas nebulares interestelares; mientras que las segundas serían las que aportarían la mayoría de la masa de la galaxia tal como la observamos hoy.[3]

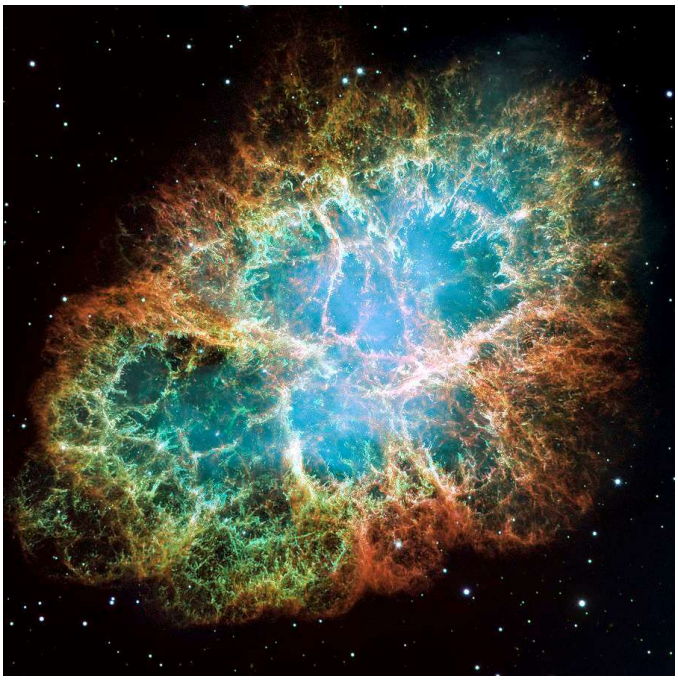
Como ya se ha comentado, las estrellas primigenias de población III tenían una vida "nuclear" muy rápida… lo que exige estrellas de gran volumen, con unas masas de decenas o centenas de la del Sol. Las estrellas muy masivas sufren un

colapso gravitatorio mucho mayor que el de las estrellas más pequeñas. Por eso, para contener su tremenda gravedad, requieren que sus reacciones internas de fusión sean muy potentes -muy energéticas-, lo que hace que se consuman muy rápidamente. Los cien o doscientos primeros millones de años tras la recombinación debieron estar dominados por este tipo de estrellas, quizás con vidas menores a un millón de años. Lo que encaja muy bien con lo que se observa, porque muy pronto tras la recombinación ya había estrellas con una cierta metalicidad, las ***estrellas de Población II***. Antes de que aparecieran estas últimas en el escenario tuvieron que existir estrellas de población III que generaran en su interior, o a través de sus muertes como supernovas, esta metalicidad que luego recibieron las de la población siguiente.

Posiblemente en las primeras estrellas de Población III se llegaron a sintetizar átomos de carbono y de oxígeno. Y esto es significativo a la hora de entender qué es lo que pasó después de su desintegración como estrellas. En las nubes de gases cósmicos el oxígeno tiende a reaccionar con el carbono, dando CO_2, y con el hidrógeno dando como resultado agua. Tanto el CO_2 como el H_2O son moléculas que al calentarse y relajarse durante los procesos de compactación para formar nuevas estrellas, irradian fotones en la frecuencia del infrarrojo, enfriando la nebulosa de gases. Ya sabemos que esos procesos refrigeradores disminuyen la presión de radiación interna y en consecuencia favorecen la intensidad de la acción gravitatoria sobre las masas que se compactan. Por lo que las estrellas con oxígeno y carbono podían conseguir encender sus fuegos con una menor masa, un menor volumen. Como resultado, las estrellas que contenían oxígeno y carbono podían encender sus procesos de fusión con una menor masa y volumen. Esto condujo a la formación de las estrellas de Población II, que, al ser más pequeñas, experimentaron procesos de fusión mucho más lentos. Por esta razón, muchas de estas estrellas aún son visibles en la actualidad, incluso en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea.

En esta segunda generación estelar también se formaron estrellas masivas, con masas de entre ocho y diez veces la del Sol, que tuvieron vidas relativamente cortas, de apenas decenas de millones de años. Estas estrellas poseían la masa suficiente para generar, mediante procesos de fusión, elementos nuevos en su interior, hasta llegar al hierro-56. Durante mucho tiempo se pensó que todas las estrellas de Población II debían ser de baja metalicidad. Sin embargo, ahora sabemos que esto no es del todo cierto. Las estrellas de Población II situadas en el halo estelar galáctico son, efectivamente, de baja metalicidad, pero las del bulbo galáctico presentan metalicidades relativamente altas, comparables a las de algunas estrellas de Población I, como nuestro Sol. De hecho, estas estrellas de Población II fueron fundamentales en la evolución química del universo, ya que enriquecieron el medio interestelar con una mayor metalicidad, alimentando así a la siguiente generación de estrellas.

Algunas de estas estrellas pudieron alcanzar el tamaño necesario para culminar su vida como gigantes rojas, diseminando sus gases en el proceso, o morir de manera más violenta como supernovas. En la actualidad, estos procesos explosivos son comunes en estrellas con masas varias veces mayores que la del Sol: las supernovas de tipo II. Hablaremos más de ellos en el próximo capítulo.



Nebulosa del Cangrejo, residuos de la explosión de una supernova. En su centro quedaron los restos compactos -una estrella de neutrones- en forma de un púlsar. Mientras que en los lejanos alrededores se evidencia lo que pasó con los gases que eran el cuerpo de la estrella primera
(Wikimedia: NASA, ESA, J. Hester y A. Loll (Arizona State University), dominio público)

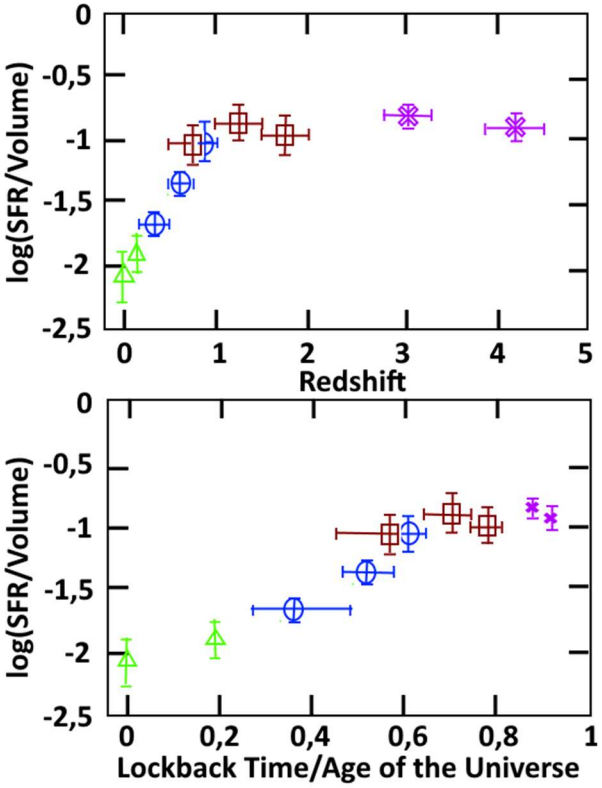
Estas muertes espectaculares, comparables a la explosión de una gigantesca bomba, generaron ondas de temperatura y energía que se propagaron a vastas distancias desde un pequeño cuerpo residual. La energía liberada fue de tal magnitud que provocó, tanto en los gases expulsados como en la materia intergaláctica que encontraba a su paso, una nueva cadena de fusiones atómicas. Estas reacciones nucleares partieron de los elementos pesados sintetizados durante millones de años en los núcleos estelares. El resultado de estas transformaciones catastróficas fue la formación de los elementos restantes que conocemos. Este proceso refuerza la importancia de las estrellas de Población II en la evolución cósmica, ya que su legado químico fue esencial para la formación de ***los sistemas planetarios*** de generaciones posteriores. En particular, muchos planetas interiores, como los de tipo rocoso, están compuestos en gran medida por elementos pesados como hierro, calcio, silicio, carbono, oxígeno, aluminio y otros.

En febrero de 2014 se notificó el descubrimiento de lo que pueda ser una de las más antiguas estrellas observada de este tipo de Población, la II. Se trata de SM0313, una estrella de la Vía Láctea a una distancia de 6.000 años luz del sistema solar y con una antigüedad que algunos aventuran en 13.600 millones de años (¡!). Está muy claro que posee metalicidad de bajo rango que a todas luces queda patente al estudiar su espectro: contiene trazas de carbono, magnesio y calcio. E incluso hierro que, aunque en cantidades mínimas -siete ordenes de magnitud menos que en el Sol-, ha permitido situarla en el tiempo como una estrella de Población II.[4] Más espectacular es el reporte de la estrella de "Matusalén" realizado en 2013[5] nombre popular con la que se conoce a HD 140283. Las estimaciones de su edad la sitúan en aproximadamente 14.500 millones de años, con un margen de error de ±800 millones de años. Esta cifra es notable, ya que es comparable a la edad estimada del universo, que es de alrededor de 13.800 millones de años. Esta aparente discrepancia ha generado debates en la comunidad científica, pero se considera que HD 140283 es una de las estrellas más antiguas jamás observadas. Aunque se ubica cerca del límite con la constelación de Ofiuco, su posición oficial la sitúa dentro de Libra. Es una estrella visible con telescopios pequeños debido a su relativa cercanía de aproximadamente 190 años luz de la Tierra.

La siguiente generación de ***estrellas*** fueron las de ***Población I***. Normalmente son estrellas jóvenes, que se encuentran habitualmente en las galaxias espirales y, según sea su edad, se sitúan en ellas en distintas zonas: las más jóvenes cerca del bulbo de la galaxia y las de mayor edad alejadas de este centro. Ya hemos comentado que tienen una alta metalicidad, la mayor entre la de las tres poblaciones de estrellas.[6] Apoyados en esta característica, hasta hace poco se pensaba que la alta metalicidad les hacía las mejores candidatas para tener sistemas planetarios, en especial los de tipo rocoso que precisan de carbono, hierro, níquel o silicio, entre otros. Sin embargo, gracias a la misión Kepler, se han encontrado este tipo de planetas alrededor de estrellas con un amplio rango de metalicidades, e incluso se han hallado planetas gigantes gaseosos que sorprendentemente se encuentran agrupados alrededor de estrellas de alta metalicidad. Aún hay mucho que aprender.

Una vez presentadas las tres poblaciones estelares, y antes de pasar a desarrollar un poco más el tema de los sistemas planetarios, conviene dar un último apunte sobre la biografía de las estrellas. En capítulos anteriores habíamos comentado como las primeras galaxias fueron muy abundantes y con estrellas jóvenes irradiando en la frecuencia ultravioleta. Con el tiempo el número de galaxias ha descendido, y se estima que hasta hoy lo ha podido hacer en un factor de 20. Podemos extender la misma curiosidad a las estrellas: ¿hay más ahora que antes? ¿al revés? ¿cuál pudo ser la dinámica en su formación?

Los astrónomos hacen sus cálculos a partir de la luminosidad de las galaxias, lo que les permite hacer una razonable extrapolación de la cantidad de estrellas que las "habitan" (*ver las curvas que anteceden*). A partir de las lógicamente escasas primeras estrellas formadas, se debió dar una escalada en su población hasta alcanzar para corrimientos al rojo del orden de 6 o 5, cuando la edad del Universo era de unos 1.000 a 1.200 millones de años, una meseta que más o menos se mantuvo hasta un z=1 a la edad de 6.000 millones de años. A partir de entonces se observa un progresivo declinar en el número de las estrellas. Habrá que pensar que el Universo andaba más revuelto en el pasado que en nuestros días.



Evolución estelar a lo largo de la vida del Universo. Arriba según la fracción de edad del Universo desde hoy. Abajo referenciado la edad retrospectiva del Universo desde hoy (corrimiento al rojo SFR = Star Formation Ratio) (Imagen a extraída del curso on-line "El Universo en formación", por el profesor S. George Djorgovski, CALTECH, ⓤfair use)

En los próximos capítulos veremos cómo son las estrellas, qué aspectos adoptan según sean sus condiciones de partida, y cómo evolucionan hasta su muerte, quizás explosiva, quizás "eterna". En algún momento de su camino de compactación, la conservación del momento angular hará que se achaten en su parte más externa generando un disco que más tarde formará un sistema planetario. Hablemos un poco de ello.

Una galaxia espiral que nos es muy familiar es aquella en la que vivimos: nuestra galaxia, la Vía Láctea. Se formó hace 13.210 millones de años a partir

de un colapso gravitatorio. En ella nació nuestro sistema solar hace unos 4.6 mil millones de años, a partir del colapso gravitacional de una nube molecular fría y densa, compuesta mayoritariamente por moléculas de hidrógeno, aunque enriquecida con elementos más pesados generados por generaciones anteriores de estrellas. En el centro de nuestro sistema solar se encuentra el Sol, que surgió como resultado de este proceso de formación estelar. Es una estrella de población I estable, a la que aún le quedan por delante otros 5 mil millones de años de vida. Tiene su sistema planetario, y estamos seguros de que no es de los más viejos puesto que sabemos que en el universo se habían formado planetas desde una época muy temprana.

La misión Kepler nos ha permitido encontrar al sistema planetario más antiguo conocido por ahora. Tiene 11.200 millones de años, a 2.600 millones de la expansión del Big Bang. Se trata del sistema planetario de la estrella Kepler-444, que se encuentra en nuestra galaxia a solamente 117 años luz de distancia de nosotros. Lo que sabemos por ahora nos habla de cinco planetas rocosos más pequeños que la Tierra.

Gracias a los nuevos telescopios, como el Hubble, se empieza a entender cómo se originan estos cuerpos secundarios. Este telescopio ha estudiado la Gran Nebulosa de Orión y ha obtenido unas excelentes imágenes en las que se aprecian con toda claridad multitud de proto discos planetarios con claroscuros, resultante de la luz de su joven estrella y la opacidad del polvo que los forma. Evidentemente son el resultado de un colapso gravitatorio. Una vez más, grandes masas de gases y polvo, principalmente partículas de silicatos, carbonatos o hielo formaron una burbuja de materia.

Sistemas planetarios que actualmente se encuentran en formación en la Gran Nebulosa de Orión (Imagen a partir de: NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA), HST Orion Treasury Project Team y L. Ricci (ESO) CC BY 4.0)

Bajo la influencia de la gravedad, la burbuja de gas y polvo comenzó a colapsar sobre sí misma y a girar, conservando el momento angular de sus partículas. Este proceso dio lugar a la formación de un disco protoplanetario, en cuyo centro se encendió una estrella. En las regiones periféricas, cada vez más frías a medida que se alejaban de la estrella central, comenzaron a formarse los planetas. Se cree que estos discos iniciales presentan una estructura extremadamente delgada, con un espesor vertical mucho menor que su radio, y una masa comparativamente pequeña en relación con el núcleo central, que puede concentrar hasta el 98 o 99% de la masa total. El material del disco está compuesto mayoritariamente por gases que encapsulan granos de polvo, fundamentales para los procesos de formación planetaria. Además, se estima que las regiones internas del disco poseen una dinámica relativamente estable y tranquila, mientras que las zonas exteriores están dominadas por un plasma altamente turbulento.

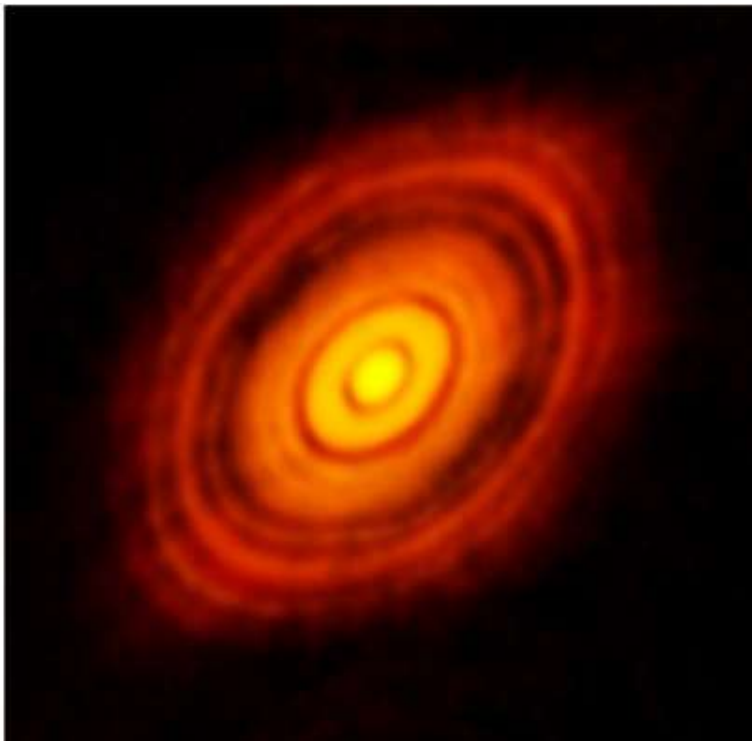
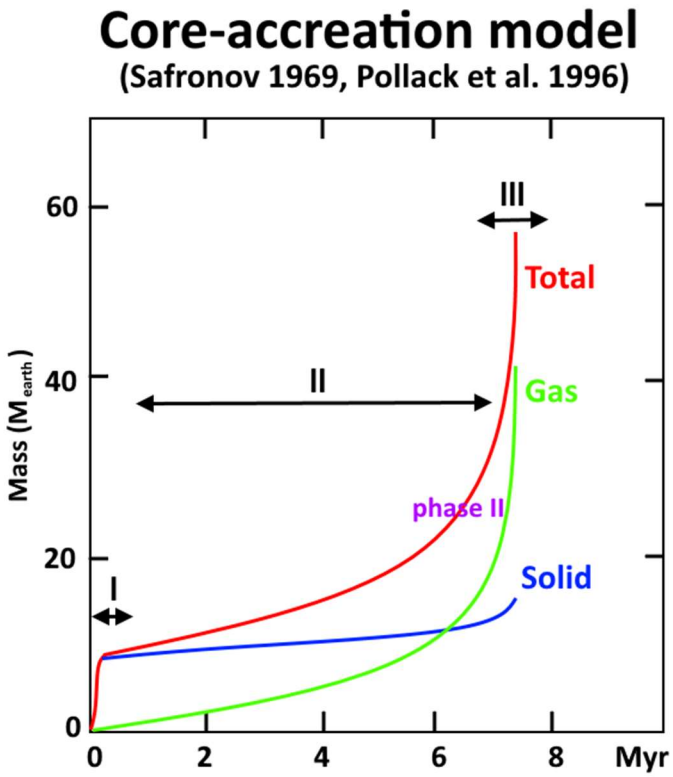


Imagen del telescopio ALMA en Atacama, que corresponde al sistema proto planetario HL Tauri (Wikipedia: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), CC BY 4.0)

No se sabe muy bien cuál pudo ser el mecanismo originador de los planetas en el halo estelar. Quizás no haya uno sólo. Hoy por hoy se cree que los planetas pudieron aparecer o bien por acreción del polvo en el disco, o bien por inestabilidades gravitatorias, llamémosles remolinos secundarios, dentro del disco giratorio. Estas podrían ser producidas por el paso de ondas de presión resultado de la explosión de supernovas cercanas. Los modelos estudiados indican que el primer proceso es muy lento y el segundo mucho más rápido. Y la velocidad importa, ya que lo que realmente se ve al observar el espacio es

que las nuevas estrellas pierden su disco original en un periodo de 10 millones de años en promedio. Cualquier planeta que no se haya formado en este tiempo posiblemente habrá perdido el tren.

La acreción planetaria presenta tres fases (*ver imagen de abajo*). En la primera, con las primeras concentraciones locales de polvo y partículas que van barriendo el disco a una determinada distancia radial del bulbo central, se va generando un anillo específico cada vez más limpio donde luego acabará apareciendo un solitario planeta. Esta fase puede durar hasta medio millón de años, durante los que se habrá ido formando en el anillo una masa sólida superior a la de la Luna, cuando el planeta haya "depredado" casi todo el material en su zona de influencia. En la segunda fase, más estable, esta masa de tamaño lunar, además de seguir barriendo polvo y partículas, atrae gas sobre su superficie, creando lo que podemos asimilar a una proto atmósfera. Esta fase será la que condicione el tiempo de formación del planeta.



Modelo de acreción de planetas gaseosos (Gráfico: James B Pollack, Icarus 124, 1996, ⓤfair use)

Cuando la masa gaseosa es igual a la sólida, y eso sucede más o menos cuando el planeta tiene de 5 a 20 veces la masa de la Tierra, comienza un incremento exponencial en la fijación de gas atmosférico acompañado por los últimos coletazos de captación de sólidos, iniciándose una carrera hacia la formación de planetas gigantes gaseosos del tipo jupiteriano. Esta última fase es muy rápida y tiene que acabar antes de que desaparezca el disco planetario, que

como dijimos finalizará su vida en un periodo máximo del entorno de los 10 millones de años.

Cuando la protoestrella comienza a fusionar hidrógeno en su núcleo, se produce un intenso viento estelar compuesto por partículas que se dispersan hacia el exterior.[7] Este viento arrastra las moléculas más ligeras del disco protoplanetario, como el agua, el amoníaco, el metano y el dióxido de carbono, dejando en las regiones cercanas a la estrella únicamente las moléculas más pesadas, como los silicatos y los metales. En estos sistemas aparece una región conocida como la línea de hielo, que marca la frontera dentro del disco protoplanetario donde la radiación de la estrella ya no es suficiente para evitar la condensación de las moléculas más volátiles. Más allá de esta línea, las bajas temperaturas permiten que dichas moléculas se congelen y queden atrapadas en forma de capas heladas sobre las partículas de polvo presentes en el disco. Los experimentos en laboratorio han revelado que este proceso de congelación no genera hielo sólido como tal, sino una especie de nieve porosa. Este tipo de estructura porosa favorece aún más la adhesión de partículas de polvo, iniciando la formación de conglomerados más grandes. Sin esta adherencia, las partículas tenderían a colisionar de manera elástica y a dispersarse. Como resultado, la acreción gravitatoria dentro del disco conduce a la formación de planetas rocosos en las regiones internas del sistema, mientras que en las regiones externas, más allá de la línea de hielo, se desarrollan planetas gigantes gaseosos.

Imagen de la protoestrella L1527 (modificada de NASA, ESA, CSA, and STScI, J. DePasquale (STScI), uso no comercial)

Antes de acabar este capítulo aporto una de las maravillosas imágenes (*arriba*) conseguidas con el telescopio James Webb que nos permite ***ver en directo*** todo lo dicho con antelación. Realmente es una ventana a cómo se veía nuestro sol y nuestro sistema solar en su infancia, quizás cuando sólo tenía unos cien mil años.

Se trata de una imagen real en infrarrojo de la protoestrella L1527 cuando aún no había encendido su horno de hidrógeno y que nos brinda una inédita información sobre los comienzos más remotos de una nueva estrella. La protoestrella en sí está oculta a la vista dentro del vértice central, al que se ve atravesado por una línea oscura: su disco protoplanetario visto de canto que tiene, aproximadamente, el tamaño de nuestro sistema solar. La luz de la protoestrella se filtra por encima y por debajo de él iluminando al gas y el polvo circundantes. El proyecto de estrella aún no tiene mucha forma, aún es una pequeña masa de gas caliente e hinchada por algún u otro lugar, con una masa entre el 20 y el 40% de la de nuestro sol, aunque sigue en crecimiento.

Las nubes azules y naranjas dibujan las cavidades creadas por el material que salió disparado de la protoestrella y chocó con la materia circundante. Los colores en sí se deben a las capas de polvo entre el telescopio y las nubes. El polvo cósmico es menso transparente para los fotones de longitud de onda pequeña -azul- que para los de onda larga -roja-, por lo que en la imagen las zonas azules coinciden con los sitios donde el polvo es más fino. Mientras que las zonas donde la capa de polvo es más gruesa, donde la luz azul escapa con dificultad, se crearon las bolsas de color naranja.[8]

También pueden verse los filamentos de hidrógeno molecular con los que ha chocado el material expulsado de la protoestrella. Esos choques y las turbulencias dificultan la formación de nuevas estrellas, con la consecuencia de que la protoestrella domina el espacio y se queda con gran parte del material disponible. No obstante la espectacular estructura, a L1527 le queda aún un largo camino por recorrer antes de convertirse en estrella de pleno derecho.

En el siguiente capítulo vamos a desentrañar cómo las estrellas están realmente condicionadas por sus circunstancias iniciales que las van a llevar por caminos muy diferentes. Algunos realmente apasionantes.

NOTAS DEL CAPÍTULO 32:

1. Para saber más sobre estas fantásticas fábricas de los elementos químicos recomiendo la amena lectura de la serie "*La vida privada de las estrellas*", publicada en el blog "*El Tamiz*". Que luego ha cuajado en un excelente libro homónimo.
   [https://eltamiz.com/la-vida-privada-de-las-estrellas/]
   [https://eltamiz.com/libros/]
2. La metalicidad de una estrella se mide comparando la abundancia de elementos más pesados que el helio (llamados "metales" en astronomía) con la del Sol. El parámetro más comúnmente utilizado es [Fe/H], que evalúa la proporción de hierro (Fe) respecto al hidrógeno (H) en una escala logarítmica.
3. El estudio completo sobre la galaxia CR7 fue publicado en The Astrophyscal Journal de 4 de junio de 2015, con el título de "*Evidence for popiii-like stellar populations in the most luminous lyman-α emitters at the epoch of re-ionisation: spectroscopic confirmation*", David Sobral et al.
   [https://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1524/eso1524a.pdf]
4. "*A single low-energy, iron-poor supernova as the source of metals in the star SMSS J031300.36−670839.3*", S. C. Keller et al., Nature, febrero de 2014.
   [https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1402/1402.1517.pdf]
5. "*HD 140283: A Star in the Solar Neighborhood that Formed Shortly After the Big Bang*", Howard E.Bond et al., Astrophysics, 13 febrero 2013.
   [https://arxiv.org/abs/1302.3180]
6. La metalicidad de las estrellas (es decir, la proporción de elementos más pesados que el helio, representada por [Fe/H]) varía significativamente entre las estrellas de Población I y Población II, reflejando su formación en diferentes épocas de la evolución del universo.

Tipo de estrella	***Metalicidad [Fe/H]***
Población I (disco galáctico)	0 a +0.3 (similar o superior al Sol)
Población II (halo galáctico)	-1 a -4 (muy baja metalicidad)
Extremadamente pobre en metales	< -4 (estrellas antiguas raras)

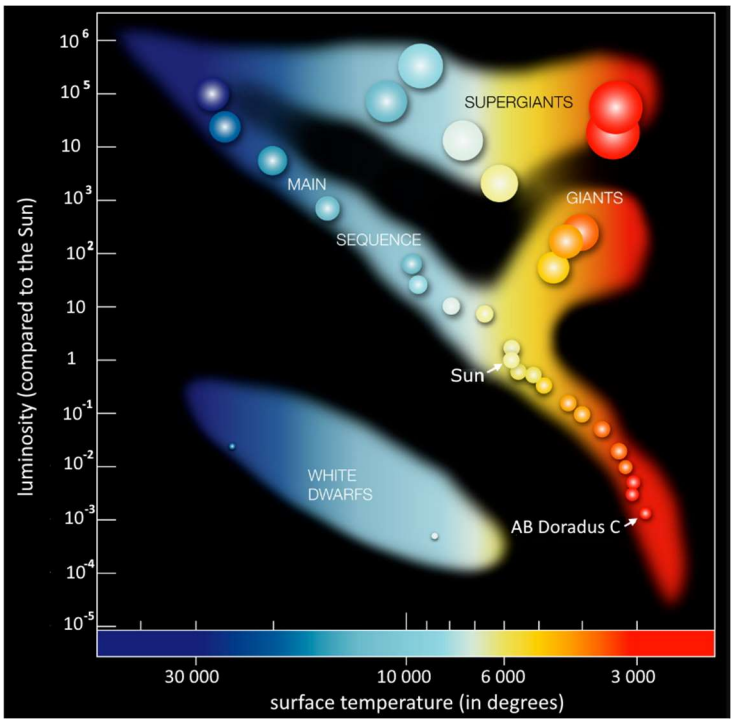
7. Recordad que la masa de las estrellas es un plasma de átomos ionizados, en su gran mayoría núcleos de hidrógeno -protones- e iones de helio en un perfecto chapuzón con los electrones que perdieron en su ionización. La temperatura es altísima -en el Sol, de unos 6.000K- lo que quiere decir que las partículas más ligeras de este plasma, protones y electrones pueden saltar al exterior e independizarse, iniciando un largo viaje a velocidades próximas a la de la luz. En nuestro sistema constituyen lo que llamamos viento solar.

8. A este fenómeno físico se le conoce en cosmología como reddening, "enrojecimiento". En astronomía el enrojecimiento interestelar es un fenómeno por el que el espectro de radiación electromagnética emitido por una fuente de radiación cambia sus características. Se produce debido a la dispersión de la luz por el polvo y otras materias en el medio interestelar. El enrojecimiento elimina preferentemente los fotones de longitudes de onda más cortas extinguiéndolos, mientras que no actúa, o lo hace con menos intensidad, sobre los fotones de longitud de onda más larga, dejando sin embargo a las líneas espectroscópicas sin cambios. Es un fenómeno diferente al del corrimiento al rojo producido por el alargamiento que experimenta, por efecto de la expansión del Universo, la longitud de onda de una luz emitida.

33: De estrellas y agujeros negros [1]

En los capítulos anteriores hemos estado analizando cómo habían nacido las primeras estructuras observables del Universo: agujeros negros, cúmulos de gases, galaxias y estrellas de lo más variopintas. Entre todas ellas escogimos a las galaxias como elemento bisagra entre lo grande y lo pequeño, vimos cómo eran y además sabemos que las primeras estaban formadas solamente por escasamente un par de tipo de átomos en cuyo interior se iban encendiendo las primeras estrellas. Las observaciones nos permiten distinguir dos modos de formación estelar: la relajada en discos de gas soportados rotacionalmente y los estallidos estelares, que como podéis imaginar son mucho más dinámicos. Estos últimos se caracterizan por grandes tasas de formación de estrellas, estando normalmente confinadas en regiones relativamente pequeñas en donde se acumula grandes cantidades de gas y que, a menudo, están situadas en el centro de las galaxias.

La familia estelar también tiene su propia biografía, un devenir de abuelas, madres y nietas, parte importante de la que estamos desarrollando acerca del Universo. Corresponde por tanto el hablar de ello comenzado por su árbol genealógico. Helo aquí.



(Imagen: ESO, CC BY 4.0)

Se trata del ***diagrama de Hertzsprung-Russell***[2] que clasifica a las estrellas según su temperatura superficial (*frecuencia espectral = color*) y su magnitud absoluta (*intensidad real de su brillo).* La mayoría se comportan de forma

estable dentro de lo que se conoce como ***la secuencia principal***, la diagonal del diagrama, en donde pasan la mayor parte de sus vidas ancladas en ella y solo saldrán de ella para morir. En la imagen anterior nuestro Sol se encuentra en un punto casi central. AB Doradus C es la estrella más pequeña que conocemos, 93 veces la masa de Júpiter.

A la derecha del diagrama, arriba, tenemos a las supergigantes rojas con una superficie relativamente fría (por eso son rojas… emiten en frecuencias muy bajas). Al ser tan grandes su luminosidad se tremenda. Por el contrario, al otro lado izquierda-arriba las estrellas son más pequeñas y sin embargo con parecidas luminosidades debido a que emiten en azul (alta frecuencia… alta temperatura). Abajo a la derecha tenemos a las enanas más frías, por lo que su luminosidad es muy baja. Sin embargo, en las de la izquierda, a pesar de las altas temperaturas en su superficie, la luminosidad es también baja, lo que sucede por ser tan pequeñas.

Ya sabemos que las estrellas son resultado de la compactación de gases de hidrógeno y helio, átomos que se generaron tras la Recombinación, en el año 380.000 tras el Big Bang. Lo conocemos de otros capítulos. Sabemos también que la materia oscura había llevado a cabo un buen trabajo ocasionando la compactación gravitatoria que confinó a la materia bariónica, confinamiento que aceleró el movimiento de los elementos compactados, o lo que es lo mismo, incrementó su temperatura. Lo que en aquellos lugares donde las circunstancias fueran favorables podía conducir al encendido de hornos en donde se fusionaría el hidrógeno dando helio. He dicho "podía conducir" ya que no en todos los casos se cebaba una estrella: todo dependía de la masa que se estaba compactando. Lo vemos.

Si la cantidad de gases no era suficiente para la ignición, menos de unas trece veces la masa de Júpiter, 0.1% de la masa del Sol, la ***bola cuasi estelar*** se reducía a una buena cantidad de material muy caliente, oprimida por la gravedad y contenida por las fuerzas electrostáticas y los condicionamientos cuánticos de sus componentes: protones, neutrones y electrones. Y así, con una superficie exterior a 1.000 K, ir deambulando por el cosmos radiando energía infrarroja, cada vez más frías e irreconocibles.

Si la masa de los gases que se estaban compactando era mayor, entre 13 y 80 veces la de Júpiter, la temperatura que se alcanzaba en el núcleo era capaz de disparar la ***fusión del deuterio***, aunque no la del hidrógeno. El deuterio inicia su fusión a temperaturas de un millón de grados kelvin, mientras que la del hidrógeno precisa una temperatura de tres a cuatro millones de grados kelvin. En el rango de masas considerado nunca se puede llegar a tamaña temperatura. A pesar de ello ahora si va a nacer una estrella, una ***enana marrón***, aunque con poca fuerza: su superficie alcanzará quizás los 2.000 K, con un color rojo profundo mientras quema todo su deuterio. Una vez consumido este

combustible y como no hay condiciones para la ignición del hidrógeno, se irá apagando, irradiando irremisiblemente su energía a través de la emisión de fotones infrarrojos.

Si la masa de gases es superior a la de 80 veces la de Júpiter (aproximadamente 0,08 masas solares, $M_{\odot}$) la cosa se pone más interesante ya que ahora sí se consigue iniciar en el núcleo la ***fusión del hidrógeno***, abriéndose una panoplia de posibles caminos futuros diferentes que lógicamente estarán condicionados por la masa inicial de materia que se comprime. Y así podremos ver enanas rojas, gigantes rojas, enanas blancas, estrellas de neutrones e incluso agujeros negros.

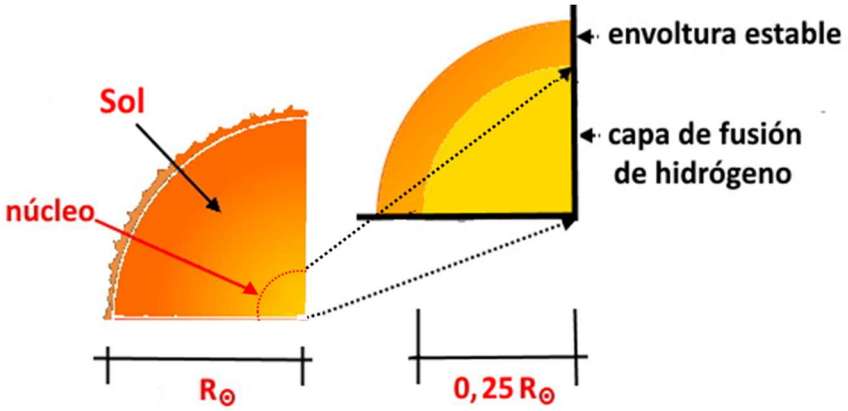
Si una estrella tiene poca masa, entre 80 y 500 masas de Júpiter, 0,08 y 0,5 $M_{\odot}$, el consumo de hidrógeno será extremadamente lento -no hay mucha presión gravitatoria y por tanto se necesita poca presión de radiación- lo que hará que la estrella tenga una vida útil que podría superar la actual edad del universo de las que aún podemos observar individuos de la época post recombinación. Se trata de las ***enanas rojas***. Este lento consumo se debe en gran medida a que son completamente convectivas: en lugar de tener un núcleo activo rodeado por una envoltura inactiva, su estructura permite que el hidrógeno se mezcle continuamente por toda el volumen de la estrella. Esto asegura que todo su combustible esté en algún momento disponible para la fusión.

¿Por qué de esa dinámica convectiva? A bajas temperaturas, los átomos y partículas en la estrella no están completamente ionizados. Esto incrementa la opacidad del plasma porque las partículas ionizadas y los electrones libres absorben y dispersan más radiación, la cual no puede escapar eficientemente, lo que hace que el transporte de energía por radiación sea ineficaz. Debido a la ineficiencia de la radiación, la energía generada por la fusión en el núcleo debe transportarse principalmente mediante movimientos convectivos: el plasma caliente asciende desde el núcleo hacia la superficie, donde se enfría, mientras que el plasma frío, más denso, desciende nuevamente al núcleo, creando un ciclo continuo. Es diferente a lo que les sucede a las estrellas mayores, como el Sol, en las que la transmisión de energía la hacen en gran medida en su interior por radiación y en su parte más externa por convección. Las enanas rojas son un tipo de estrellas muy comunes de forma que, de acuerdo con algunas estimaciones, representan las tres cuartas partes de las estrellas de la Vía Láctea. De ellas Próxima Centauri, 0,12 $M_{\odot}$, es la que está más cercana de nosotros a 4,22 años luz.

Vamos a avanzar ahora un poco más en la escala de masas estelares hasta las que tienen de 8 a 10 masas solares. Porque, aunque las enanas rojas son esencialmente convectivas, sucede que aquellas que tienen masas superiores a las 0,35 solares pueden comenzar a formar una corteza externa radiactiva. Y

así les pasa a las aún mayores a las que les puede suceder cosas más extraordinarias.

No creáis que todo el volumen de la estrella se comporta como un horno nuclear, normalmente solo lo hará la parte central más compacta, lo que conocemos como su núcleo. El resto de la esfera estelar más externo está compuesta básicamente por el gas de hidrógeno y helio primordial, recalentado por la radiación que proviene del centro. Por ese plasma deambulan choque tras choque los fotones producidos en las fusiones, mientras los neutrinos salen disparados hasta el último confín del Universo.



Croquis con propósito exclusivamente informativo/visual acerca del tamaño del núcleo solar comparado con el de la estrella.

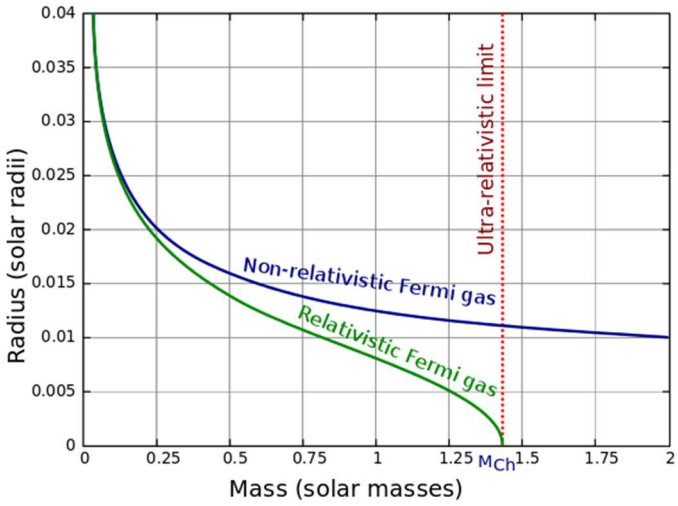
Si las enanas rojas son más masivas, la presión gravitatoria se va a incrementar y la fusión del hidrógeno en el núcleo de la estrella también incrementará su intensidad. El helio que se va a ir generando, al ser más denso "cae" al centro del núcleo desplazando la fusión del hidrógeno hacia zonas más externas. Poco a poco se va a ir consumiendo el combustible y finaliza la fusión. Cuando la fusión se ha terminado ya no hay presión de radiación que contenga la caída gravitatoria. El perfil asintótico de esa compactación final lo dibujaría la curva azul de la figura siguiente: a mayor masa inicial, una compactación más poderosa y un volumen final menor. Pero la realidad no es esa.

Dentro de un rango determinado de masa lo que queda de la estrella se compacta de tal manera que las repulsiones electromagnéticas de las cargas del plasma ya no son capaces de contenerla, interviniendo entonces un nuevo condicionante. Sólo se va a frenar el proceso cuando los electrones se encuentren tan próximos que, por razones cuánticas, se haga imposible una mayor compactación. Es lo que conocemos como ***electrones degenerados*** resultado obligado por lo que se conoce como ***principio de exclusión de Pauli***. Se basa en la exigencia cuántica de que dos partículas fermiónicas[3] no pueden ocupar el mismo "espacio cuántico". A medida que la estrella se contrae, los átomos de su plasma van llenando con electrones los niveles de energías inferiores que normalmente estarían desocupados. Si se colocan en posiciones

más próximas al núcleo, el átomo recorta su volumen. Lo que crea una nueva situación de presión efectiva que previene un colapso gravitacional adicional. A mayor masa mayor presión gravitatoria, por lo que la reacción de los electrones deberá ser mayor.

Ha nacido una ***enana blanca***, una pequeña bola de materia súper densa, inicialmente con una superficie muy caliente. Su temperatura es consecuencia de la energía remanente de su historia de fusiones y de la energía inherente a la presión gravitatoria final.[4] Con el tiempo la temperatura de la enana blanca ira disminuyendo al emitir radiación, cada vez menos energética, hasta convertirse en una ***enana negra***, algo así como un fantasma invisible, sosías de una enana marrón. No creáis que esta naturaleza de enana blanca es un estado marginal dentro del conjunto estelar: si nos olvidamos de las enanas rojas y de las estrellas supermasivas, el 97% de las estrellas que conocemos, incluido el Sol, acabarán generando una enana blanca. Las enanas blancas son, junto a las enanas rojas, las estrellas más abundantes del universo. Como mucho pueden tener una masa de 1,44 masas solares. Fuera cual fuera la de partida y fuera cual fuera el camino hacia la enana blanca de las estrellas originales masivas de hasta 8 o 10 masas solares, les puede pasar muchas cosas dependiendo, evidentemente, de su mayor o menor masa.

Pero antes expliquemos el porqué del límite de 1,44 masas solares que tiene que ver con que la capacidad de contención de los electrones degenerados es precisamente esta masa. La física que dirige la crisis de esos fermiones parece que nos explica el porque a mayores masa de las enanas blancas corresponden volúmenes menores, tal como dibuja la curva azul de abajo.



Relación radio-masa en una enana blanca. La curva azul muestra un modelo no relativista, donde no habría límite de masa tras la compactación final de la estrella. La curva verde, sigue un modelo relativista. ("Ultra relativistic limit" es ni más ni menos que el límite de Chandrasekhar) (Imagen de Wikipedia, dominio público)

Pero lo tenemos que ver de otra forma. Los electrones están tan confinados que atendiendo al principio de incertidumbre de Heisenberg sus velocidades pueden ser próximas a las de la luz, lo que permite generar unos choques tan energéticos como para ayudar a mantener las condiciones que impidan el colapso. Es decir, en la compactación se podrá acumular más materia que la que dice la teoría. Y es que, en estas circunstancias de altas velocidades, para estudiar la dinámica de la estrella que se compacta hay que tener en cuenta que los electrones se encuentran en un estado relativista y que se van a comportar de distinta manera que si sus velocidades fueran menores. En los cálculos habrá que tener en cuenta esos efectos relativistas. Ciertamente cuando la fusión finaliza y sigue apretando terriblemente la gravedad, parece como si la altísima velocidad de los electrones de una oportunidad adicional al colapso. Pero sólo hasta un límite donde surgirá un nuevo paradigma que veremos más adelante. Lo podemos ver en la curva verde de la imagen anterior donde claramente se nos plantean un límite teórico -volumen cero- marcando el final de la curva. Se trata del ***límite de Chandrasekhar***.[5] Pero volvamos a la azarosa historia de las enanas blancas.

A algunas de esas estrellas remanentes les ha podido pasar cosas curiosas en su vida anterior de estrellas exuberantes. Para saber de sus entretelas volvamos al estado en que se ha consumido el hidrógeno del núcleo que ahora estará ocupado por el helio resultante. Allí la presión se está generando básicamente por la pérdida de energía gravitatoria a medida que el helio se acumula más y más en el centro. Energía de presión (temperatura) que es tan grande como para que la ignición nuclear se traslade al plasma de hidrógeno que rodea a ese núcleo de helio. El calor producido por la fusión en esta corona interna se transmite a las capas más exteriores haciendo que la parte externa de la estrella se expanda y crezca de tamaño. Como resultado de esta expansión se enfrían las capas más externas de forma que parece que la estrella tenga una superficie fría: una gran bola de sutil plasma con una superficie a una relativamente baja temperatura que la hace irradiar en la frecuencia de los rojos. Se ha llegado a "fabricar" una ***gigante roja***. La estrella acaba de abandonar la senda de la secuencia principal como analizaremos con más detalle en el capítulo siguiente. Es el futuro de nuestro Sol.

Pero en su interior aún sigue viva la fusión del hidrógeno que rodea al núcleo. Más y más helio "cae" hacia ese núcleo incrementando su densidad. Incluso se cree que, para masas relativamente pequeñas, entre 0,5 y 2,5 masas de la del sol, en el núcleo se llega al límite de los electrones degenerados. Lo normal es que en algún momento la presión encienda el horno nuclear de helio. Tras ello la presión y la temperatura en el centro aumenta, aunque al seguir degenerado no crece de tamaño a pesar de la continua "caída" de nuevo helio. Los electrones contienen el volumen del núcleo. Podéis imaginar que la situación se va haciendo altamente inestable. Hasta un límite en el que podemos decir

que el núcleo no puede más y estalla, lo que se conoce como un *flash* de helio. Esta explosión llevaría a la completa destrucción de la estrella si la tremenda cantidad de energía no fuera absorbida y mitigada por la envoltura fría de la estrella que, como consecuencia, se calienta y expande.

¿Qué está pasando realmente en el núcleo? La fusión del helio está siguiendo un camino que se conoce como el de triple alfa. Una partícula alfa es un núcleo de helio, dos protones y dos neutrones. En el núcleo estelar se unen dos alfas, dos helios, para dar un núcleo de berilio 8 que es muy inestable. Aunque si la fusión del helio es muy rápida el berilio 8 consigue unirse a otra alfa, otro helio -el tercero-, dando carbono 12, que tiene una dinámica de fusión muy eficaz con una elevada liberación de energía. De forma similar el carbono 12 puede unirse a otra alfa para dar oxígeno 16 y más fotones.

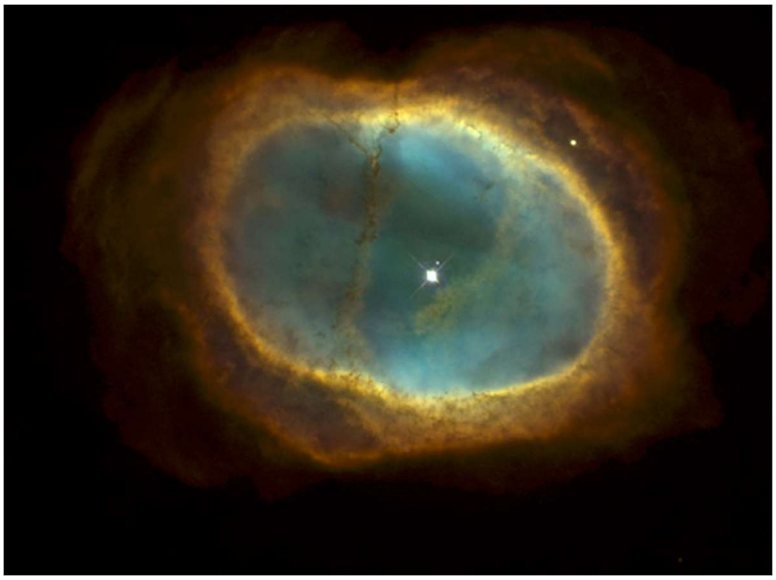
$$^{4}He + {}^{4}He \leftrightarrow {}^{8}Be$$

$$^{8}Be + {}^{4}He \leftrightarrow {}^{12}C + 2\gamma \quad (7{,}367\ MeV)$$

Esos procesos de fusión son muy inestables y sensibles a las variaciones de la temperatura, en un factor exponencial de 30. Lo cual quiere decir que en cualquier momento cualquier pequeña variación de temperatura puede acelerar de forma descomunal la fusión del helio y, por tanto, incrementar sobremanera la temperatura del núcleo estelar. Un *flash* casi instantáneo de energía y materia que atraviesa empujando la "tenue" y poco comprometida gravitatoriamente envoltura exterior de la estrella, haciendo que esa vaya perdiendo material y se expanda cada vez más lejos de su centro.

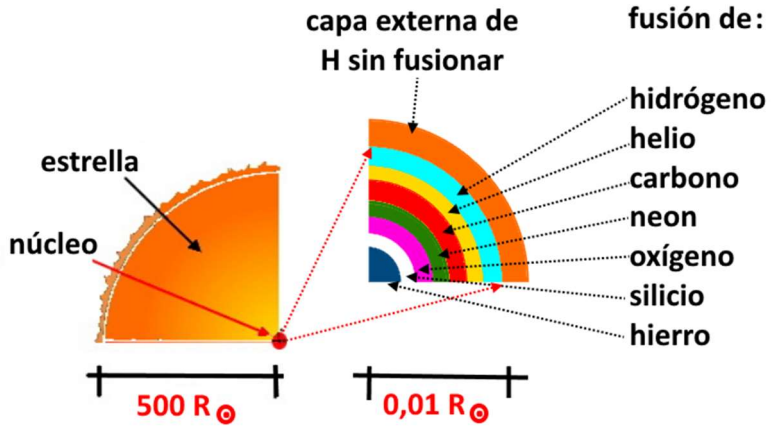
El *flash* ha hecho que la estrella se "calme" reiniciando la quema del helio a través del proceso tres alfa, pero ahora en un núcleo no degenerado. El carbono generado progresivamente ocupa el centro desplazando de nuevo la fusión, del helio e hidrógeno, a capas externas. Estas se calientan, se expanden, por lo que se enfrían y vuelven a caer hacia el núcleo. Fenómeno que va sucediendo en una serie de pulsos, cada uno de los cuales aleja más y más la masa de gases exteriores de la estrella. Al final casi todo el material de la vieja señora se ha ido perdiendo por el espacio dibujando un bello halo mientras en el centro va quedando un pequeño núcleo de helio, hidrogeno, carbono y oxígeno.

Ese halo es conocido como ***nebulosa planetaria***, aunque no tenga nada que ver con una nebulosa. Hasta ahora se pensaba que, durante el proceso de transformación hacia una nebulosa planetaria la estrella debía de perder parte de su materia de una manera paulatina y constante en el tiempo. Pero ahora sabemos que no siempre es así pudiendo darse el caso de que la materia no fluye de la estrella de una manera continua, sino que lo hace de manera episódica.[6] A medida que el combustible se va acabando el núcleo entra en un proceso de compactación que lo va a llevar, ahora definitivamente sí, a formar una enana blanca sujeta por electrones degenerados.



Nebulosa planetaria NGC 3132; en el centro puede observarse una enana blanca (Imagen: NASA, ESA y el equipo del patrimonio del Hubble (STScI / AURA), dominio público)

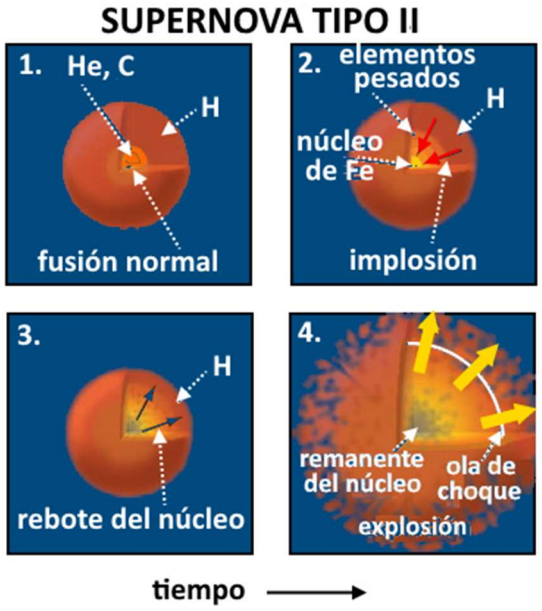
Si la masa de la estrella es grande el proceso de caída de elementos al núcleo estelar se hace escalonada y recurrente. Primero fue el helio el que rellena el centro estelar. Con su fusión comienza a "caer" hacia su centro el carbono que se va generando. El hidrógeno ha quedado en una capa exterior, el helio ha quedado en una capa un poco más interior… ahora la masa sigue compactando el núcleo de carbono que empieza su fusión dando como subproducto al neón, que cae al centro generando otra capa externa ahora de carbono… la masa presiona, se enciende el neón, genera oxígeno… el oxígeno genera silicio… el silicio hierro… y… fin. Ya que termodinámicamente es imposible ir más allá del hierro puesto que su fusión no aporta energía sino que la exige. Un salto cuesta arriba tal como se explicó en el capítulo 23.



Como podéis imaginar, hasta qué elemento se llega en cada estrella particular depende mucho de la cantidad de materia inicial. Treinta masas solares llegarán a formar una estrella con un amplio núcleo de hierro. Y también podéis

imaginar cómo en esos procesos de expansión y compactación, que en cada escalón se hacen más violentos ya que las fusiones se van haciendo más rápidas y energéticas, la estrella va engordando por su más próximo exterior en forma de capas de cebolla -ver figura de arriba-, gases preñados de elementos nuevos que no habían aparecido durante las fases posteriores al Big Bang, mientras en su centro el combustible se va agotando. Llega el momento en que se acaban los procesos de fusión justo en el escalón que fija la masa de partida. Se produce la última crisis gravitatoria, última realimentación de la nebulosa planetaria que va a alcanzar, tras un proceso cósmico en el que se ha ido haciendo más y más grande, su máxima extensión. Si la masa acompaña y respeta el límite de Chandrasekhar, en el centro del escenario restará una enana blanca soportada por la presión de la degeneración de los electrones que durará cientos de miles de millones de años antes de transformarse en una enana negra.

Pero también pudo ser que, tras la debacle final, el núcleo interno de hierro tuviera una masa superior a 1,44 masas solares ¿qué pasará? Sí… eso que pensáis… que los electrones degenerados no soportarán su estructura… ahora la masa es tan grande que no hay forma de frenar la caída gravitatoria: el núcleo de hierro residual colapsa de tal manera y a tal velocidad que en su interior se generan violentos procesos súper energéticos que se traducen en una emisión gigantesca de neutrinos, tantos y tan energéticos, que las capas de cebolla de la estrella explotan, se ionizan y se expanden como una nube cósmica por los alrededores del núcleo.



Evolución de una supernova del tipo II (Imagen a partir de "Astronomy Today", figura 29.1, Eric Chaisson y Steve McMillan, 2014, ⓕ fair use)

De nuevo tenemos una situación en la que la luminosidad de esa estrella que ha explotado eclipsa durante un largo periodo de meses la luminosidad total de la galaxia que la contuvo. Estamos ante una ***supernova de tipo II***. Sus latigazos

de energía son tan intensos que provocan la fusión atómica en los gases de sus nebulosas y de más allá, de forma que en el proceso pueden nacer el resto de los elementos de la tabla periódica allende del hierro, hasta el uranio.

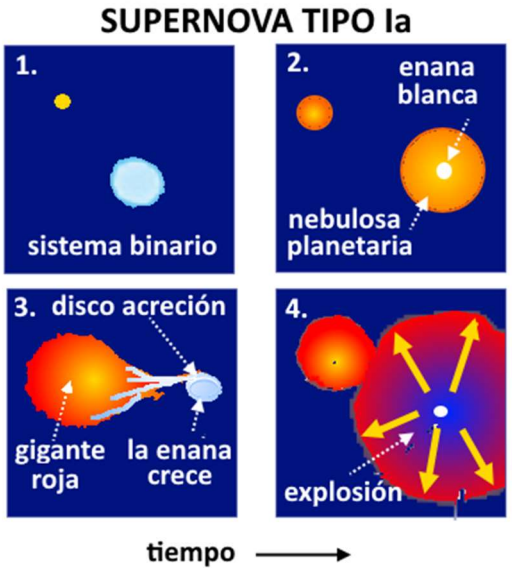
Pero ¿qué pasa con el núcleo residual? Porque aún queda un núcleo residual que sobrepasó el límite de los electrones degenerados y se siguió compactando de manera que ahora ya es un plasma de neutrones, protones y electrones… que se sigue compactando sin freno hasta que protones y electrones ayudados por la fuerza nuclear débil se vuelven a unir formando neutrones mientras un neutrino sale disparado en cada fusión. Esos son los neutrinos súper energéticos de los que hablamos antes. Todo ha pasado a ser una gran bola súper densa, en su mayoría de neutrones contenidos por los mismos principios físicos que contenían los electrones en una enana blanca, el principio de exclusión de Pauli. Una bola que es conocida como ***estrella de neutrones***, aunque realmente no sea una estrella fusionando material.

Lo anterior es una historia que va más allá de la pervivencia de una enana blanca. Aunque a las enanas blancas pueden pasarles también cosas insólitas. Las estrellas en muchas ocasiones viven en parejas o en grupos de tres. De forma que una enana blanca puede tener una pareja con la que gira al paso de dos. Al ser tan compacta -del orden de las pocas toneladas por centímetro cúbico- la atracción gravitatoria que provoca sobre su hermana es muy grande, de forma que la enana repleta de carbono y oxígeno puede llegar a sorber masa de su pareja, creciendo de tamaño y, en consecuencia, su presión gravitatoria interna.

El material no cae directamente sobre la enana ni la alcanza, sino que gira detrás de ella y entra en órbita a su alrededor formando un disco de materia aplanado y arremolinado llamado disco de acreción. Debido a la fricción dentro del gas la materia que orbita en el disco cae gradualmente hacia adentro mientras su temperatura aumenta constantemente a medida que desciende en espiral sobre la superficie de la enana blanca. Si las masas no son muy grandes lo que simplemente pasa es que la materia no cae definitivamente al cuerpo de la estrella blanca permaneciendo en el disco de acreción donde, al incrementarse la temperatura por rozamientos, se va a iniciar la fusión del hidrógeno de forma rápida y violenta, lo que expulsa parte del material del disco al espacio. A este objeto se lo conoce como una ***nova*** (simple nova). Tras el "exudado" la actividad de la pareja continúa repitiéndose la misma jugada un buen número de veces.

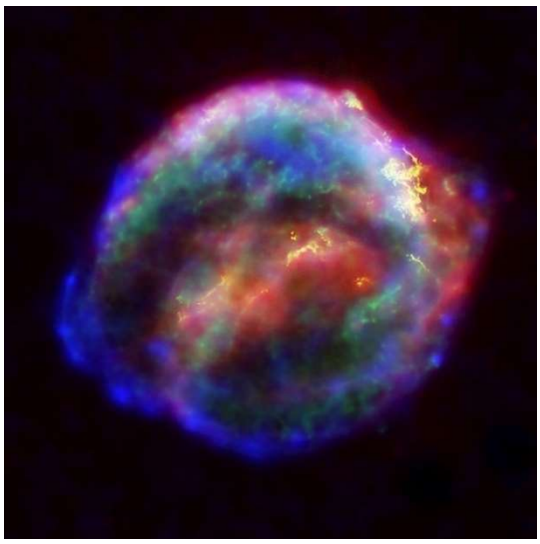
Pero si en el proceso de acreción la materia cae realmente dentro del cuerpo de la enana blanca, en algún momento esta puede llegar a alcanzar una masa en el límite de Chandrasekhar y sobrepasarlo, más allá del cual ya sabemos que la presión de los electrones degenerados no es suficiente para mantener la estructura estelar que irremediablemente va a colapsar en un brevísimo periodo

de tiempo. Entonces el carbono y el oxígeno que se encuentran en su núcleo, con el choque, entran en ignición casi espontánea y completa, explotando la estrella en instantes. El proceso es tan violento que tenemos a un objeto cósmico anulando con su pulsión de radiación la luz de toda su galaxia. Se trata de una ***supernova del tipo Ia.***



Evolución de una supernova del tipo Ia (Imagen a partir de "Astronomy Today", figura 29.1, Eric Chaisson y Steve McMillan, 2014, ⓕfair use)

Normalmente no quedan rastros de la estrella que originó el cataclismo, sino solo restos de gas y polvo sobrecalentados en rápida expansión como podemos ver en la imagen de más abajo. La modificación del campo gravitatorio de la enana blanca produce un cambio en la trayectoria de la estrella vecina ¡si esta pudo sobrevivir a la detonación! que saldrá disparada en la dirección que seguía en el momento del estallido como si éste se tratara de una "onda".



Remanente de la supernova del tipo Ia Kepler, SN 1604 (Imagen: NASA/ESA/JHU/R.Sankrit & W.Blair*, dominio público)*

En estos momentos del relato estelar vivimos ya junto a las estrellas de neutrones, a las que también les sucede procesos curiosos.

Imaginad una estrella del tamaño de dos o tres soles que se ha comprimido hasta unas pocas decenas de kilómetros. La conservación de la cantidad de movimiento angular las lleva a girar hasta velocidades en su superficie que pueden ser del orden de los 100.000 km/s. En su mayoría estas estrellas estarán formadas casi con toda seguridad por neutrones, pero no en todo su volumen. En zonas de menor densidad, como su superficie, aún pueden subsistir protones y electrones libres.

Estas partículas con carga eléctrica que giran a toda velocidad crean un intensísimo campo magnético que, unido al influjo del también intenso campo gravitatorio, atrae a las partículas de gas o polvo de sus alrededores subsumiéndolas hacia los polos de la estrella. En su caída vertiginosa se calientan e ionizan de forma que emiten todo tipo de radiación desde la frecuencia de las ondas de radio hasta la de los rayos gamma, un potentísimo cañón de radiación electromagnética muy intensa orientada en la dirección del eje magnético de la estrella (*ver imagen siguiente*). El eje magnético de ese imán estelar no coincide con el eje de giro, pendulea como una peonza, por lo que normalmente se puede observar como un *flash* periódico cuando la línea de radiación se enfrenta a nosotros los observadores terrestres.

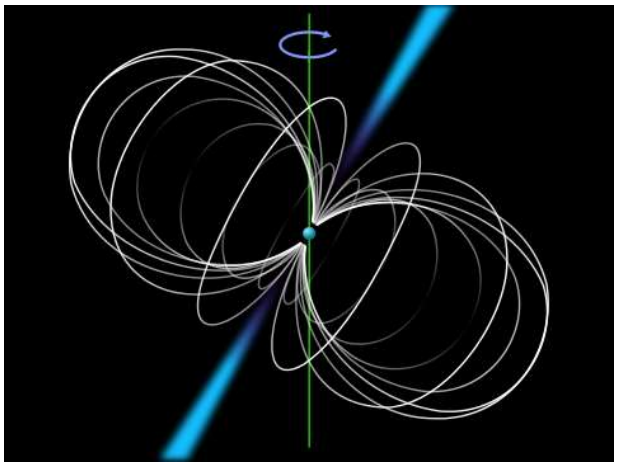


*Diagrama esquemático de un **púlsa**r ilustra las líneas de campo magnético en blanco, el eje de rotación en verde y los dos chorros polares de radiación en azul. (Imagen de Wikipedia, Roy Smith, CC BY-SA 3.0)*

Es lo que conocemos como un ***púlsar***,[7] una "estrella" que a nosotros nos parece que emite radiación muy intensa a intervalos cortos y regulares, aunque realmente dicha emisión es un continuo. Hay algunos de ellos que poseen un campo magnético muy muy potente y que rotan a velocidades "inferiores", entre uno y diez segundos en dar una rotación completa, emitiendo en frecuencias muy altas de rayos X o gamma. A esa subespecie de estrella de neutrones se la conoce como ***magnetar***. De todas formas, esas emisiones de

fotones van menguando poco a poco su energía (masa), de forma que, si no encuentra alguna fuente externa de nueva materia en un plazo largo de tiempo, pero finito, nuestra "estrella" se enfriará y frenará.

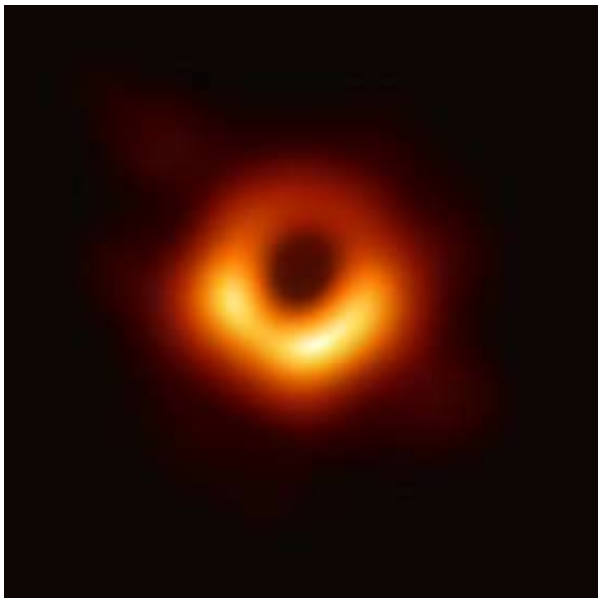
Con las estrellas de neutrones pasa también algo semejante a lo que sucede en los sistemas binarios con una enana blanca. También hay sistemas binarios con una estrella de neutrones participando y depredando material de su compañera. Ese material, en donde hay hidrógeno, conforma un disco sobre la superficie de la estrella de neutrones. Debido al giro y gravedad de esta última, el material del disco se calienta de tal manera que llega un momento en que se alcanza la temperatura de fusión del hidrógeno, que sucede de forma casi instantánea produciéndose una rápida e intensa emisión de energía en forma de rayos X. Es lo que en astronomía se conoce como un ***estallido de rayos X***.

También se ha observado otro tipo de ***estallidos***, estos ***de rayos gamma***, por tanto aún más energéticos que los de rayos X, y con procedencia muy alejada de nosotros, a miles de millones de años luz. Lo curioso es que estas emisiones nunca se repiten desde una misma posición ni están correlacionadas con ninguna superestructura del universo, ya sea lejana o cercana. No sabemos muy bien cual pueda ser la causa, aunque hay teorías que se centran en la creación de una "bola de fuego" relativista que emite chorros de radiación. El origen estaría en una explosión de una supernova o en la colisión y fusión de dos estrellas de neutrones que formaran un sistema binario.

También se han detectado emisiones misteriosas por el otro lado de la banda de frecuencias, lo que conocemos como ***ráfagas rápidas de radio*** (FRB, por sus siglas en inglés). ¿Qué las provoca? ¿de dónde provienen? Se trata de unos fenómenos astrofísicos muy abundantes, de gran energía, de origen desconocido que se manifiesta como un pulso de radio fugaz que dura en promedio unos pocos milisegundos. Vienen de muy lejos de nuestra galaxia, quizás a miles de millones de años luz de distancia. Se ha pensado que podrían ser el resultado de algunos eventos únicos y particulares como la colisión de dos estrellas de neutrones o de una estrella de neutrones y un agujero negro. O los estertores de muerte de pequeños agujeros negros que se formaron poco después del Big Bang. Pero la repetición de las ráfagas desde un mismo sitio y la posibilidad de que todas las ráfagas se repitan de manera similar si se observan durante el tiempo suficiente, parecen argumentar en contra de los procesos únicos. Así que el "culpable" favorito es un magnetar. Otra posibilidad son las nebulosas de viento púlsar, que se formarían justo después de que una estrella gigante explota como supernova dejando un púlsar.[8]

Demos ahora un paso más en la escala ascendente de masa inicial de la estrella. Por encima de la que nos ha llevado a una "estrella" de neutrones. Hasta un nivel en que la presión gravitatoria incluso vence la presión de los neutrones que contenían la geometría de la estrella de neutrones. Entonces no hay un más

allá “normal”, no es que se rompan los neutrones generando por ejemplo una estrella de “quarks” degenerados. Creemos.



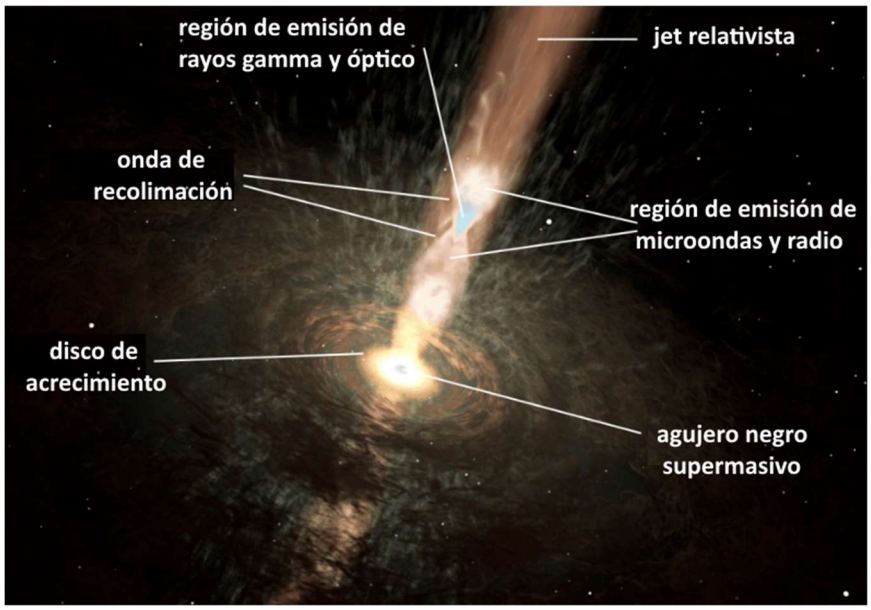
Histórica primera imagen obtenida de un agujero negro supermasivo ubicado en el centro de la galaxia M87. Realmente lo que se aprecia es el remolino de gases súper calientes e ionizados en su caída hacia el agujero negro, el negro vacío central (Event Horizon Telescope Collaboratión[9], ⓤfair use)

La deformación del espacio/tiempo ante tal concentración de masa es tan extrema que se genera un pozo gravitatorio, un ***agujero negro*** hacia donde cae todo lo de su alrededor, sin posibilidad de escape. Ni la luz. El gas que se encuentra en las proximidades se arremolina y calienta por roces viscosos a temperaturas de hasta 12 millones de grados, lo que hace que en su caída las partículas súper aceleradas antes de llegar a lo que podemos titular como horizonte de sucesos, límite de libertad,[10] emitan una radiación muy energética que casi es lo único que delata al agujero negro además de su influjo gravitatorio. Realmente la energía perdida a través de la emisión de radiación es debida a la pérdida de energía gravitatoria mientras la materia cae hacia mínimos en su camino con destino al pozo de potencial del agujero negro. Esta energía disipada puede suponer más de un 10% de la masa.

Los agujeros negros pueden ser de varios tipos, desde los supermasivos en el centro de las galaxias -sabemos ya de capítulos anteriores acerca de su existencia como motores de los cuásares-, hasta los micro -quizás muchos sean recuerdo del Big Bang- pasando por los estelares de los que ya hemos comentado el proceso de su formación.

Por efectos cuánticos, en su “superficie” se generan pares de partículas/antipartículas virtuales, una de las cuales cae en el agujero aumentando su masa mientras la otra se escapa, todo ello gracias a la energía robada a la gravedad del agujero.[11] Es lo que se conoce como radiación de

Hawking. Cosas de que la energía se conserva. Como decía el propio Stefen Hawking en su libro "*El universo en una cáscara de nuez*": "*Los agujeros negros emiten radiación como si fueran cuerpos calientes con una temperatura T que solo depende de su masa*". Gracias a esa emisión de radiación, con el paso de los eones creemos que los agujeros negros se difuminarán en un invierno cósmico.[12]



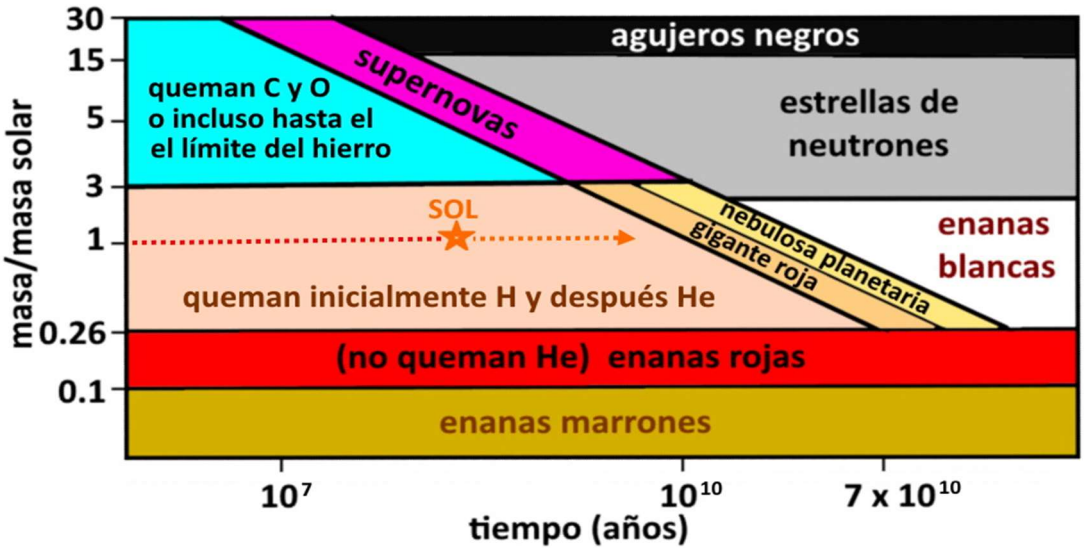
***Blázar** de un agujero negro. Representación artística del fenómeno responsable de los estallidos en rayos gamma (en azul celeste) y en el resto del espectro electromagnético. (Imagen: W. Steffen, IA-UNAM & Cosmovisión, ⓤ fair use)*

Mientras eso suceda hay agujeros negros que, al igual que las estrellas de neutrones, emiten chorros de partículas en dos direcciones definidas por su eje de giro. Un giro que hasta cierto punto viene fijado por la cantidad de movimiento angular de las partículas que caen hacia la singularidad, dando vueltas alrededor del agujero negro y generando un disco de acreción. La gravedad es tal que los gases, partículas y cuerpos que caen, adquieren velocidades próximas a la de la luz, generando un entorno de choques y rozamientos altamente energéticos que ionizan la materia generando unos campos magnéticos muy particulares, perpendiculares al plano de la acreción. Esos campos magnéticos son los directores de dos chorros creados por iones y partículas sobreexcitados que escapan de la caída.

El conjunto es conocido como un ***blázar***. Aunque no sólo están relacionados con los agujeros negros. En general, como podemos leer en la Wikipedia, "*los blázares son un tipo particular de **núcleo activo galáctico** caracterizado por emitir un jet o chorro relativista. Actualmente se acepta que un blázar es un cuásar* -ya hablamos de ellos en un capítulo anterior- *con la salvedad de que su chorro se encuentra apuntando en dirección a la Tierra. El hecho de que*

observemos el jet orientado directamente a nosotros explica tanto la intensidad como la rápida variabilidad y rasgos de los distintos tipos de blázares".[13]

Con todo lo hasta ahora dicho en este capítulo espero que conozcamos un poco mejor a nuestras amigas las estrellas. Algunas siguen siendo hornos nucleares, mientras otras vagan como rescoldos remanentes de esos hornos. Esenciales para nosotros ya que, por lo que sabemos, son motor de la Vida… al menos lo es el Sol para nuestra Tierra.



Esquema de posibles biografías estelares (Modificado del libro "Introducción a la Astrofísica", página 68, de Eduardo Battane, ⓕ fair use)

El esquema teórico de arriba nos da una idea visual aproximada de cuáles son las alternativas en la evolución de las estrellas a lo largo de su vida. No deja de ser más que un resumen de lo dicho en este capítulo. El gráfico posiciona en el tiempo, según la masa de partida de la estrella, lo que va a ser el deambular del astro. No hay que confundir el significado del eje de masas: es simplemente el banderín de salida, la masa inicial. Ya sabemos que con el tiempo evolucionan, normalmente perdiendo masa en sus hornos de fusión o a través de eventos cósmicos. Se ha resaltado el caso del Sol que, por definición del dibujo, parte de una masa 1. Va a quemar hidrógeno y helio para, en algún momento próximo a los 10 mil millones de años transformarse en una gigante roja, generar su nebulosa planetaria en cuyo interior reposarán los restos en forma de una brasa a alta temperatura, una enana blanca. Con el tiempo se va a enfriar hasta convertirse en algo semejante a una enana negra.

Llegados a este punto del relato, cuando ya han aparecido todos los actores principales, no nos queda más que explicar cómo son sus vidas, cual es el *ballet* cósmico que representan, de qué manera evolucionan a través del espacio/tiempo. Así que el siguiente capítulo lo vamos a dedicar a observar a

las magníficas estructuras luminosas -¡y oscuras!- que atraviesan el vacío cósmico de nuestro Universo.

Propiedades del astro resultante tras los procesos de "muerte" estelar[14]

Cuerpo resultante	Masas Solares resultante	Radio (km)	Densidad (Kg/m^3)	El cuerpo está soportado por	Contexto
enana marrón	< 0,08	70.000	10^5	electrones degenerados	Nunca ha habido fusión de H_2
enana blanca	< 1,4	10.000	10^9	electrones degenerados	núcleo estelar de C/O cuando ya no hay fusiones
enana negra	< 1,4	10.000	10^9	electrones degenerados	enana blanca enfriada
estrella de neutrones	De 1,4 a 3,0	10	10^{18}	neutrones degenerados	núcleo resultante de una supernova
agujero negro estelar	> 3	10	infinita en el centro	nada	resultado de una supernova con un progenitor masivo

NOTAS DEL CAPÍTULO 33:

1. Este capítulo no tiene su entrada en el blog "*El Cedazo*", pero me parece indispensable el incorporar el tema a este libro. Realmente en el blog no cabía tal decisión ya que redundaba lo escrito por el *alma mater* del mismo, Pedro Gómez Esteban, el cual había dedicado unas cuantas entradas geniales en su blog "*El Tamiz*" a tan interesante tema que queda en las redes como "*La vida privada de las estrellas*". Incluso lo recoge un libro homónimo.
   [https://eltamiz.com/la-vida-privada-de-las-estrellas/]
   [https://eltamiz.com/libros/]
2. Si se correlaciona la temperatura superficial de la estrella, su color, con la intensidad de la luz que emite, dibujamos el conocido d*iagrama de Hertzsprung-Russell*. Podemos observar que una gran mayoría de ellas dibuja una curva muy característica conocida como la secuencia principal. Su color no deja de ser más que la frecuencia más intensa con que irradia

sus fotones, su temperatura. La intensidad de la luz que emite, su brillo real, es la cantidad de fotones que emite. Aunque la intensidad es función mezcla de su temperatura y su volumen, debemos hacer esta advertencia: un pequeño volumen a gran temperatura puede ser más luminoso que una gigante fría.
[https://es.wikipedia.org/wiki/Secuencia_principal]

3. Como ya sabemos desde los primeros capítulos un fermión es uno de los dos tipos básicos de partículas elementales que existen en la naturaleza (el otro tipo es el bosón). En el modelo estándar de física de partículas existen dos tipos de fermiones fundamentales, los quarks y los leptones (estos últimos lo constituyen la familia de electrones, muones y tauones, y los neutrinos). Los fermiones se caracterizan por tener espín semientero (1/2, 3/2, ...) cualidad que hace imposible que varios ocupen un mismo lugar.
4. Las estrellas de masa baja, menor que 0,5 masas solares, conforman enanas blancas de helio. Entre 0,5 y 8 masas solares, enanas blancas de oxígeno y carbono. Entre 8 y 10, enanas de oxígeno y neón. El 99% de las enanas blancas está constituido básicamente por carbono y oxígeno.
5. ***Límite de Chandrasekhar***, que es la máxima masa posible de una estrella de tipo enana blanca calculada teniendo en cuenta las velocidades relativistas de los electrones degenerados con aseguran la estructura estelar. Si se supera este límite la estrella colapsará para convertirse en un agujero negro o en una estrella de neutrones.
6. V Hya es una estrella variable, rica en carbono, ubicada a 1.300 años luz de distancia en la constelación de la Hidra. En esa gigante roja la materia no fluye de la estrella de una manera continua, sino que lo hace de manera episódica, con explosiones que se producen de manera periódica, dando lugar a una serie de anillos en expansión que van agregando masa y alimentando el crecimiento de una estructura más exterior, con forma de disco, que ha ido formándose, rodeando a la estrella. Su dinámica particular en la fase de gigante roja ha sido relatada en el siguiente articulo "*The rapidly evolving AGB star, V Hya: ALMA finds a multi-ring circus with high velocity outflow*" de Raghvendra Sahai et al., The Astrophysical Journal, 2022.
[https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac568a/meta]
7. La palabra púlsar proviene del acrónimo en inglés "*pulsating star*", estrella pulsante.
8. Para más información ver "*Core Concept: Unraveling the enigma of fast radio bursts*", Adam Mann, PNAS marzo 2017.
[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5380068/]
9. "*First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*", The Event Horizon Telescope Collaboration, Kazunori Akiyama et al., The Astrophysical Journal Letters, abril 2019.
[https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7]

10. Realmente se le conoce como radio de Schwarzschild, $2GM/c^2$, siendo G la constante gravitatoria, M la masa del agujero negro y c la velocidad de la luz. Podemos imaginar que define una especial superficie en donde la velocidad de escape sea la de la luz. Similar a la velocidad de escape que hay que proporcionar a un cohete que "huya" de la Tierra, 11,19 km/s, para no caer jamás (a no ser que con algún sistema de propulsión le hagamos dar la vuelta). He usado la palabra superficie por fijar un límite físico, aunque un agujero negro no tiene superficie. Simplemente es una frontera de información: no somos capaces de que nos llegue lo que hay dentro de ella.

11. Según el principio de incertidumbre de Heisenberg a partir del vacío cuántico se pueden generar partículas. La condición es que la energía aparecida de la nada y transformada en masa/energía de esas partículas tiene que ser devuelta al vacío en un tiempo mínimo. Tanto más mínimo cuanta sea la cantidad de energía/masa prestada. Ver nota 10 del capítulo 02. Si un par de esas partículas virtuales se generan en las proximidades del horizonte de sucesos de un agujero negro y disponen de una vida media lo suficientemente "larga" como par que una de ellas caiga en el interior del horizonte, mientras que la pareja queda libre fuera, puede darse el caso que la energía prestada por el vacío no sea devuelta directamente del par de partículas virtuales sino del campo gravitatorio en donde han caído y donde se han hecho ya reales e independientes.

12. La temperatura de un agujero negro en su horizonte de sucesos viene determinada por la siguiente fórmula

$$T = \frac{h\,c^3}{8\,\pi\,k\,G\,M}$$

En la que h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz, k la constante de Boltzmann, G la constante gravitacional y M la masa del agujero negro. Como vemos cuanto menor sea el agujero mayor es la temperatura y por tanto su radiación: los agujeros negros pequeños se diluyen rápidamente luchando contra el salto térmico que fija la "temperatura ambiente" del Cosmos, que hoy en día es de 2,7 K. Se sabe que según la formula anterior la temperatura de un agujero negro con unas pocas masas solares es del orden de 10^{-6} K y si la masa es mayor, aún más frío. Un gran problema que se va a solucionar con el tiempo gracias a la continua expansión del Universo que lo va a enfriar hasta temperaturas incluso inferiores.

13. Como puedan ser los cuásares o los fenómenos que caracterizan a las galaxias activas de las que hablábamos en el capítulo 28.

14. "Astronomy Today", tabla 22.1. Eric Chaisson y Steve McMillan, ⓕfair use.

34. La senda de las estrellas [1]

Una vez que hemos visto en el capítulo 32 cómo el universo ha ido evolucionando hasta dar a luz a las estrellas y habernos asomado en el capítulo 33 a la variedad de personajes estelares y cuáles podían ser sus finales de acuerdo con sus masas de partida, vamos a intentar aclarar el caso particular de una gran familia de ellas, las que se mantienen quemando hidrógeno en la secuencia principal. Veremos cómo no va a ser todo el resultado de circunstancias azarosas, que también, sino que hasta cierto punto tiene una explicación lógica causal que podemos seguir. Nos vamos a apoyar en el conocido diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R) que correlaciona la temperatura de la superficie estelar con su luminosidad y que dibuja lo que conocemos como la secuencia principal. Lo podemos recordar en el capítulo anterior.

El Universo está repleto de hidrógeno, precisamente el combustible primario de las estrellas. Estos personajes provienen de una asombrosa compactación de gases interestelares que llevan a sus centros hasta temperaturas por encima de 10^7 K, las necesarias condiciones físicas para encender un horno nuclear. Una vez que se ceba la fusión de hidrógeno y hasta que se acaba este combustible, prácticamente todas las estrellas van a mantener sus pares temperatura/ luminosidad en una posición casi fija del diagrama H-R. Cuando van a morir, curiosamente se apartan de la senda principal. Es como si la física estelar constriñera sus "últimos" momentos a un deambular bastante definido. Como veremos, eso que parece sorprendente no lo es tanto. La física manda. En grandes rasgos esas serían las reglas y condicionantes desde el momento cero,

primero, una acreción de masa suficiente como para acumular una cantidad susceptible de generar una estrella;

segundo, unos "ventiladores" atómicos y moleculares que permitan el que la temperatura en la masa acumulada vaya dispersándose mientras se consigue un nivel que equilibre la presión de la compactación gravitatoria de tal masa;

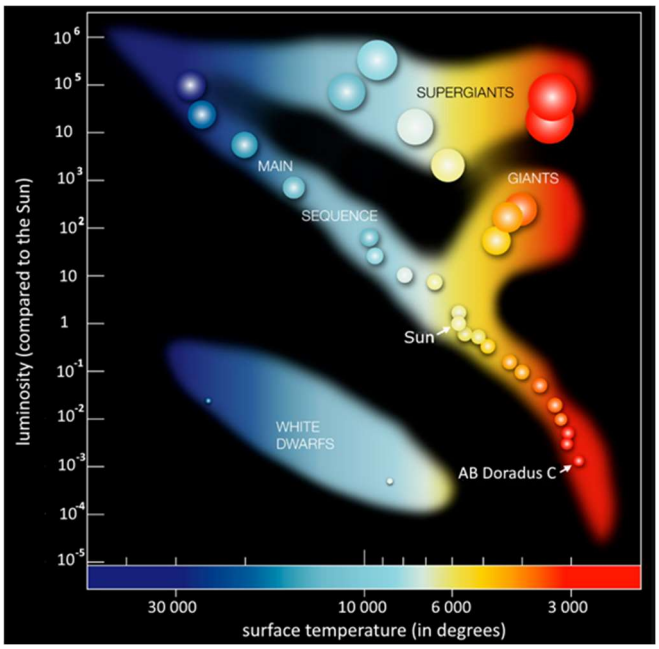
tercero, que en el equilibrio se alcance en el centro del grumo estelar la temperatura precisa para doblegar por velocidad la repulsión electromagnética de los protones, concentrados en un volumen muy comprimido, y así encender el horno nuclear;

cuarto, la fusión puede llevarse a cabo en el centro o en zonas exteriores, con mayor o menor intensidad en uno u otro lugar. La estrella es un cuerpo plasmático que no tiene la misma densidad en todos los lados. Hay un núcleo y una parte externa. La dinámica de la fusión dependerá de lo que haya en cada lugar y en cada momento;

quinto, la integridad estelar no depende sólo de que la compactación sea balanceada por la radiación generada en la fusión. Dependiendo de la cantidad de masa va a haber situaciones en las que no va a ser la energía de la fusión la que soporte al "cuerpo" sino que lo va a hacer la presión de sus componentes "degenerados", inicialmente los electrones libres y más al límite de masas los neutrones;

sexto, para preservar la integridad, la energía de la fusión tiene que ser necesariamente exportada fuera de la masa estelar. Todo dependerá de la "transparencia" del medio interno de la estrella. Puede ser que la radiación (energía) tras muchos choques llegue a salir, o puede ser que las masas calientes se muevan por el interior gracias a la convención llevando la energía a la superficie.

Según sean los posibles caminos que fijen las condiciones anteriores, la superficie de la estrella (i) tendrá más o menos temperatura y su "cuerpo" estará más o menos caliente por lo que (ii) se habrá expandido más o menos (más o menos volumen). Todo ello será decisivo para que la estrella brille más o menos: mucha temperatura superficial… más brillo; para una misma temperatura superficial si el volumen (superficie exterior) es mayor… el brillo será mayor. Y lo contrario. Teóricamente una estrella puede ser grande y brillar poco porque su superficie está muy fría, o puede ser pequeña y brillar mucho por estar muy caliente. Cualquier situación puede ser válida para una estrella y no solo durante la fase estable de su existencia. Lo podemos observar en el diagrama H-R.



Las estrellas van variando sus condiciones físicas a medida que van consumiendo el combustible; o a medida que van cambiando sus condiciones de presión y temperatura; o tal vez por iniciar la quema de un combustible

secundario distinto al hidrógeno. Ya lo vimos en el capítulo anterior. Es importante darse cuenta de que la secuencia principal en sí misma no es una pista evolutiva: las estrellas no evolucionan a lo largo de ella. Más bien es sólo una "estación de paso" en el diagrama H-R donde las estrellas se detienen y pasan la mayor parte de sus vidas. A pesar de la tendencia a permanecer siempre en un mismo punto dentro de la secuencia principal no sucede lo mismo en los primeros balbuceos o en los últimos estertores. Por muy largos que sean esos últimos. La vida las va a llevar a deambular por otros parajes del diagrama H-R. Y es esta "aleatoriedad" la que vamos a intentar desentrañar en este capítulo.

Nos vamos a centrarnos en una estrella de Población I como nuestro Sol. Y vamos a analizar cómo fue su gestación desde que una nube de gas interestelar y elementos pesados comenzaba a concentrarse. El destino va a ser el encaje largamente transitorio de la estrella en la senda de la secuencia principal.

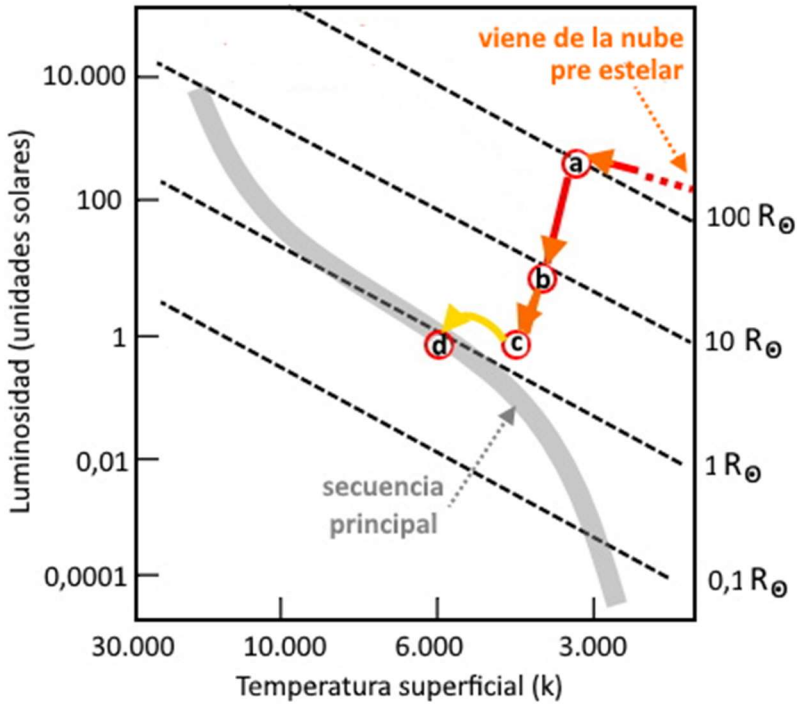
El proceso se inicia al generarse una densa nube interestelar, quizás una nube de polvo o una nube molecular, que poco a poco se vuelve inestable y comienza a colapsar y a romperse en pedazos más pequeños. Cada uno de los cuales imita el comportamiento de compactación de la nube principal, contrayéndose cada vez de forma más rápida. Son las semillas de futuras estrellas.

¿Qué pasa dentro de uno de esos fragmentos que colapsan? Nos vamos a fijar en alguno que tenga de una a dos masas solares. Al principio, a pesar de que colapsa más rápidamente que la nube de gas madre, no logra calentarse sustancialmente ya que la creciente radiación que se opone al colapso con su presión atraviesa fácilmente la masa y se pierde llevando parte de la energía. Poco a poco eso va cambiando, empezando lógicamente en su centro que es donde se densifica antes. Cuando el tamaño del fragmento que se está consolidando en la nube aún es como el del sistema solar, en su centro puede llegar a alcanzarse la temperatura de 10^4 K, aunque su parte más externa siga relativamente fría, puesto que al ser menos densa es más transparente para la radiación que así puede irradiar fácilmente su energía al exterior. Por primera vez nuestro fragmento comienza a parecerse a una estrella: la región densa y opaca del centro se denomina protoestrella que está rodeada de una más tenue fotosfera. En esos momentos ya se ha empezado a gestar y aplanar un disco exterior como consecuencia de que la nube de gas comienza a girar más rápidamente al contraerse. Ese disco aplanado será la masa madre donde nazca su sistema planetario.

A medida que la protoestrella evoluciona siguiendo el anterior camino de acreción y disminución de volumen, su densidad crece y la temperatura va aumentando tanto en el núcleo como en la fotosfera. Lo que hace que tímidamente comience a brillar con más intensidad. Estamos en la ***fase a*** de la imagen de más abajo. Al cabo de unos 100.000 años, y a pesar de que la temperatura en el centro es de unos 10^6 K, aún no se puede encender el horno

nuclear, aunque le quede poco. Recordemos que hay que llegar a unos diez millones de grados kelvin. Su superficie, sin embargo, tiene una temperatura unas 200 veces menor, en el rango de 3,000 a 5,000 K. Sin embargo, al ser su volumen aún gigantesco, comparable al de la órbita de Mercurio, la protoestrella tiene una luminosidad tremenda, muy superior a la del Sol.

Con esas características ya puede ir asomando la nariz en el diagrama H-R, aunque aún le queda para llegar a un estable equilibrio termodinámico. El calor interno de la protoestrella se difunde gradualmente desde el centro caliente hacia la superficie más fría, donde se irradia hacia el espacio. Como resultado, la contracción general se hace más lenta, pero no se detiene por completo: la protoestrella, del tamaño aproximado de la órbita de Mercurio, comienza a disminuir de volumen mientras en su centro la temperatura sigue aumentando. Esto provoca que rápidamente descienda en el diagrama H-R mientras se mueve hacia la izquierda, hacia mayores temperaturas, aunque este movimiento se ralentiza conforme se acerca a la secuencia principal. ***Fase b***.



Evolución de una estrella desde los momentos iniciales en su configuración hasta emplazarse definitivamente en la secuencia principal.

En estos momentos está siguiendo un camino mucho más pausado que en sus inicios, manteniendo una pauta hacia mayor temperatura y menor volumen y luminosidad. La contracción se rige en gran medida por la velocidad a la que la energía interna de la protoestrella se puede irradiar hacia el espacio. Cuanto mayor sea esta radiación de energía interna, es decir, cuanto más rápido se mueva la energía a través de la estrella para escapar de su superficie, más rápido se producirá la contracción.

Al cabo de diez millones de años desde la formación de la protoestrella, esta deviene definitivamente una estrella. ***Fase c***. ¿Qué ha pasado? Sencillo. La temperatura en su centro ha alcanzado el valor de 10^7 K, necesario como para que los protones tengan la suficiente energía térmica que les permita superar su mutua repulsión electromagnética: se inicia la fusión nuclear del hidrógeno. La temperatura de la superficie de la estrella en este punto es de unos 4.500 K, todavía un poco más fría que la del Sol. Y aunque la estrella recién formada tiene un radio ligeramente más grande que nuestro Sol, su temperatura más baja hace que su luminosidad sea algo menor que la del valor solar.

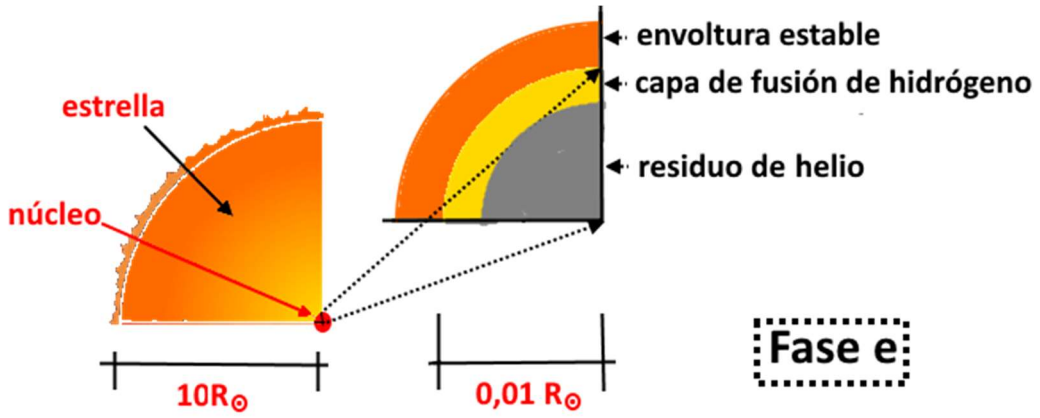
Ya solo le queda contraerse un poco más para anclarse definitivamente en la senda de la secuencia principal, cuando justo ha conseguido el equilibrio entre la velocidad a la que se genera la energía nuclear en el núcleo y la velocidad a la que se irradia la energía desde la superficie. Ha comenzado la combustión del hidrógeno en su núcleo. Y ahí quedará durante unos diez mil millones de años más, aproximadamente. ***Fase d***.

Nos podemos preguntar qué es lo que les pasa a las estrellas que no son de masas semejantes a la del Sol. En principio les va a pasar lo mismo, acabarán en algún momento en la secuencia principal… aunque a distintas velocidades y con distintas trayectorias. De los fragmentos más masivos dentro de las nubes interestelares van a surgir las protoestrellas más masivas y, posiblemente, las estrellas más masivas. De manera similar, los fragmentos de baja masa dan lugar a estrellas de baja masa. La masa condiciona en gran medida el tiempo necesario para que una nube interestelar se convierta en una estrella de la secuencia principal. Los fragmentos de nubes más masivos se calientan hasta los 10 millones K requeridos y se convierten en estrellas en apenas un millón de años, aproximadamente 1/50 veces el tiempo que tarda el Sol. Lo contrario sucede con los objetos pre estelares que tienen masas menores que la de nuestro Sol. Una estrella típica requiere casi mil millones de años para formarse.

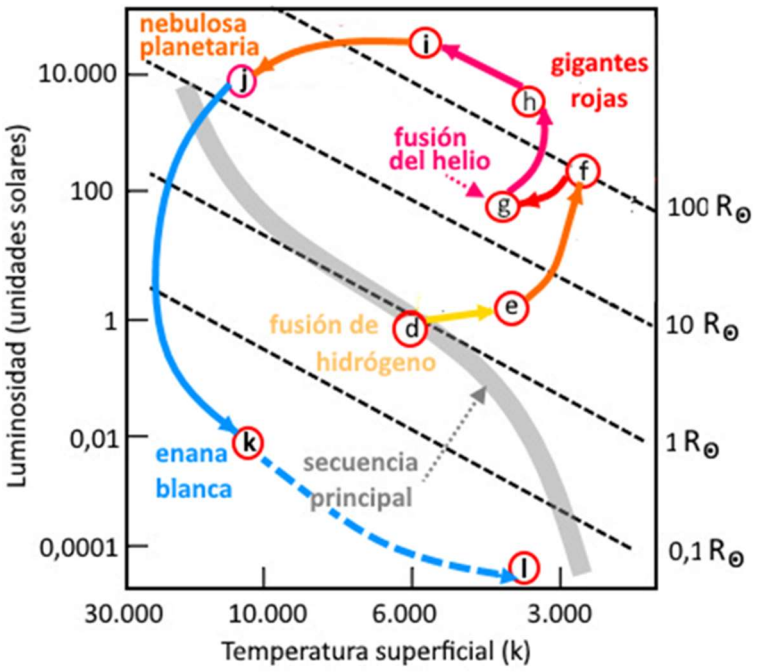
Todas esas etapas parecen muy muy largas, pero el tiempo pasa inexorablemente de forma que, como ya hemos anunciado, a las estrellas les va a llegar el momento de abandonar su cómoda posición en la secuencia principal. Cuando empieza a fallar el combustible hidrógeno el motor “ratea” y empieza una deriva.

A medida que se va quemando el hidrógeno del núcleo se transforma en helio. Como este elemento es más denso “cae” al centro de la estrella desplazando al hidrógeno hacia una capa más exterior mientras el núcleo se va comprimiendo cada vez más. Después de unos diez mil millones de años prácticamente todo el centro es helio con lo que el proceso anterior se acelera. Como todavía no se alcanza la temperatura suficiente para la ignición del helio no hay presión que se oponga a la compactación. Al tener los núcleos de helio dos protones la repulsión entre ellos es mayor que la que sufrían los protones del hidrógeno,

por eso se precisa una mayor temperatura, aproximadamente diez veces más: 10^8 K. Sin embargo, el hecho de que esté subiendo la temperatura hace que el hidrógeno que ha sido empujado hacia una capa más exterior acelere en esa zona su fusión que se hace más rápida que cuando lo hacía en el núcleo. La consecuencia es que la estrella aumenta de volumen en las capas exteriores por lo que cae su temperatura, pero su luminosidad crece ligeramente al tener una mayor superficie exterior.



La estrella en su ***fase de subgigante*** se ha apartado de la secuencia principal de lo que podemos inferir que de nuevo no se encuentra en equilibrio termodinámico. El núcleo de helio está desequilibrado y se está reduciendo. El resto del núcleo también está desequilibrado, fusionando hidrógeno en helio a un ritmo cada vez mayor. La presión del gas producida por esta combustión mejorada de hidrógeno hace que las capas externas de la estrella que no se queman aumenten en radio. Ni siquiera la gravedad puede detener este cambio inexorable. Mientras que el núcleo se encoge y se calienta, las capas superiores se expanden y se enfrían. ***Fase e***.



La superficie se está volviendo tan fría que casi no podría irradiar por lo que el plasma interno parece como si se hubiera vuelto opaco a la radiación de adentro. Entonces comienza un nuevo proceso de transporte de energía en la estrella: la convección transporta la enorme producción de energía del núcleo a la superficie que recibe un nuevo estímulo para seguir y seguir creciendo. La estrella se hace tan grande, cien veces el sol, que a pesar de la moderada temperatura brilla casi mil veces más que cuando salió de la secuencia principal. Los fuertes vientos estelares expulsan grandes cantidades de materia de la superficie de una estrella que pueden perder hasta un 30% de su masa. La estrella se ha convertido en una ***gigante roja***. ***Fase f***.

En esos momentos si la estrella no es demasiado masiva, cosa que haría que los desequilibrios internos la destruyeran, se comienza a cambiar la dinámica: el núcleo va a dejar de contraerse y la parte exterior a él dejará de expandirse ¿por qué? En el momento en que la densidad central ha aumentado a alrededor de 10^8 kg/m^3 (Fase f), la temperatura ha alcanzado los 10^8 K necesarios para que el helio se fusione en carbono y el horno central se vuelva a encender. La reacción que transforma el helio en carbono se produce en los siguientes dos pasos conocidos como la reacción triple alfa (a un núcleo de He -dos protones más dos neutrones- se le conoce como partícula alfa):

$$^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} + \text{energía}$$

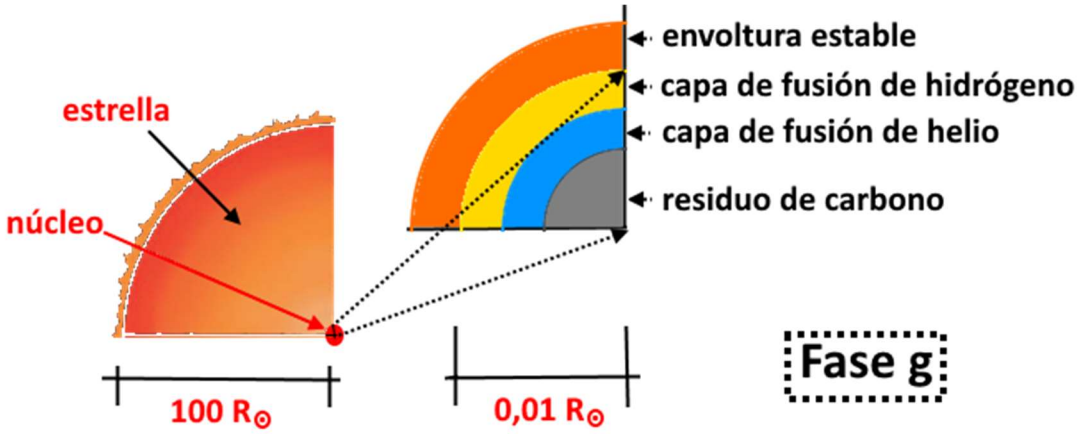
$$^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{energía}$$

Para estrellas comparables en masa a la del Sol, surge una complicación cuando la situación pudiera derivar hacia la fusión del helio. Complicación que viene de la existencia de los infinitos electrones libres en el plasma cuyo número, evidentemente, tendrán una relación directa con la masa de la estrella. Son los que inicialmente fueron pareja de los protones en los núcleos de hidrógeno y helio. Su velocidad es tan grande en el cada vez más pequeño núcleo comprimido que comienzan a verse dirigidos por la física cuántica. Llegará un momento en que dos electrones no podrán aproximarse más entrando en escena el principio de exclusión de Pauli que dice que dos partículas elementales no pueden ocupar el mismo espacio físico. Los electrones están degenerados. Eso implica que la presión asociada al contacto de las partículas es capaz de contener la compactación del núcleo que se comporta como un bloque en el que la presión es independiente a su temperatura. Si en esas circunstancias se inicia la fusión del helio podéis imaginar las consecuencias: la presión contenida por los electrones degenerados apenas varía, aunque el horno está a pleno rendimiento, lo que hará que la temperatura aumente de forma brutal y descontrolada. Se va a producir lo que se conoce como un *flash* de helio. Todo esto lo vimos en el capítulo anterior.

Durante unas horas el helio arde ferozmente. Llega un momento en que la avalancha de energía liberada por este período de fusión descontrolada calienta

el núcleo de tal manera que la presión térmica normal vuelve a dominar a la presión de degeneración. El núcleo es capaz de reaccionar a la energía vertida en él por la quema de helio: expandiéndose, suavizando la temperatura, disminuyendo su densidad y restableciendo el equilibrio gravedad/empuje centrífugo. El núcleo, ahora estable y "tranquilo", vuelve a fusionar helio para dar carbono a temperaturas muy por encima de los 10^8 K. La fusión de helio a carbono es energéticamente mucho más eficiente lo que hará que la temperatura en su superficie aumente y, paradójicamente, la luminosidad descienda. Solo paradójicamente porque la comparación se hace con respecto al momento fragoroso del *flash* de helio. ***Fase g***.

En esta fase nuestra estrella está quemando helio en su núcleo de manera estable y fusionando hidrógeno en una capa que lo rodea. La estrella reside en una región bien definida del diagrama H-R donde las estrellas que queman helio en el núcleo permanecen durante un tiempo antes de reanudar su viaje alrededor del diagrama H-R.



A medida que se va consumiendo el helio en el núcleo queda el carbono generado durante su fusión. La situación es semejante a la vivida anteriormente cuando el hidrógeno fue desalojado del núcleo por el helio. Ahora es el helio el que forma una nueva capa exterior sobre el carbono. Y por encima la del hidrógeno. La consecuencia es que de nuevo hay un aliciente para calentar y expandir a las capas exteriores de la estrella que vuelven a iniciar una senda hacia una nueva giganta roja. Aunque esa vez las fusiones que provocan esa ascensión son mucho más eficientes en términos de energía por lo que el volumen que va a alcanzar las capas externas va a ser mayor como así la temperatura superficial. Todo ello hará que la ***supergigante*** tenga una luminosidad aun mayor que en su primera etapa gigante. ***Fase h***.

A medida que la estrella ha deambulado desde la ***fase g*** a la ***fase h*** su envoltura se ha hinchado mientras que su núcleo interno de carbono, demasiado frío para una combustión nuclear, continúa contrayéndose. Si la estrella es de una gran masa la temperatura en el centro puede llegar a ser lo suficientemente alta como para que se produzca la fusión del carbono. El núcleo volvería a una situación

de equilibrio mientras se van sintetizando elementos más pesados que el carbono que, a su vez, van decantándose en el núcleo. Y vuelta a empezar.

Aunque eso es muy poco habitual dadas las masas de las estrellas. Lo normal es que eso no ocurra y que simplemente se alcancen condiciones como para que en la interfase entre el núcleo de carbono y la capa de helio se genere algo de oxígeno siguiendo la siguiente ecuación

$$^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + \text{energía}$$

Pero ahora vamos a centrarnos en seguir la historia más habitual que es la de que el núcleo interior sea sólo de carbono. En él ya no se genera energía mientras que las capas superiores continúan quemando hidrógeno y helio. Como durante ese tránsito el núcleo se va comprimiendo, va perdiendo energía gravitatoria que se transmite a los hornos nucleares exteriores, lo que hace que la combustión nuclear aumenta en intensidad. Debido a ello la envoltura continúa expandiéndose y enfriándose, cada vez a mayor velocidad, alcanzando un radio máximo de unas 300 veces el del Sol, lo suficientemente grande como para engullir al planeta Marte. La estrella se ha posicionado en el punto ***Fase i*** en nuestro diagrama H-R.

Pero para nada vive una situación estable. El caparazón que quema helio está sujeto a una serie de destellos explosivos causados por la enorme presión generada por la quema del helio y la extrema sensibilidad de la velocidad de la conocida combustión triple alfa a los pequeños cambios de temperatura. Todo ello produce grandes fluctuaciones en la intensidad de la radiación que llega a las capas más externas de la estrella, lo que hace que esas capas latan violentamente: un ciclo creciente de pulsos en el que la envoltura se calienta… se expande… se enfría y luego se contrae… repetidamente. Las inestabilidades tanto del núcleo como en las capas exteriores hacen que prácticamente toda la envoltura de la estrella sea expulsada al espacio en menos de unos pocos millones de años.

El núcleo se va contrayendo mientras las capas expulsadas se van calentando por la intensa radiación ultravioleta lo que permite observar un soberbio espectáculo ya que los gases expulsados forman lo que ya conocemos como una nebulosa planetaria. Planetaria porque rodea a lo que queda de una estrella, restos de la debacle. Hemos llegado a la ***Fase j***.

Hemos visto como durante las etapas finales de la vida de la gigante roja, las reacciones nucleares llegan a generar oxígeno y, en algunos casos, elementos incluso más pesados, como el neón y el magnesio. Algunas de estas reacciones también liberan neutrones que pueden interactuar con los núcleos existentes para formar elementos aún más pesados. Todos esos elementos diferentes al hidrógeno son "dragados" por convección desde las profundidades del núcleo hacia la envoltura para saltar afuera de la estrella hacia la envoltura gigante.

Poco a poco la estrella central se desvanece y finalmente se enfría, y la nube de gas en expansión se vuelve cada vez más difusa tendiendo a dispersarse en el espacio interestelar con todo los materiales que acarrea. Después de unas pocas decenas de miles de años, la nebulosa planetaria brillante desaparece de la vista.

V838 Monocerotis es una estrella variable que exhibió una explosión muy importante a comienzos de 2002. Un "eco de luz" puso de manifiesto las cáscaras de polvo que rodeaban a una vieja estrella. Inicialmente se creyó que era la típica creación de una nova, sin embargo luego se supo que se trataba de algo completamente distinto. El motivo del estallido aún es incierto, pero se han elaborado varias teorías al respecto incluida una erupción relacionada con los procesos de muerte estelar. (NASA, ESA and H.E. Bond (STScI), dominio público)

¿Qué es lo que queda de aquella estrella "solar" que quemaba hace miles de millones de años hidrógeno situada en la secuencia principal? Un pequeño núcleo básicamente de carbono y oxígeno, con un tamaño semejante al de la Tierra. No hay reacciones nucleares por lo que su brillo exclusivamente proviene de que está caliente. Se la conoce como una ***enana blanca***. ***Fase k***. Con el tiempo y el continuo enfriamiento pasará por las fases cada vez menos calientes, amarilla y roja, para desembocar, si hay tiempo suficiente, en una especie de enana negra, una brasa quemada que surca el espacio. ***Fase l***.

Y esa es la historia de una estrella muy habitual, semejante al Sol. Sabemos del capítulo anterior que hay otros finales. Algunos explosivos como el de las

supergigantes rojas con sus nebulosas planetarias, otros tan “dulces” como el de la enana blanca. Dejamos aparte el misterio gravitatorio del agujero negro. En esta biografía ha llegado el momento de enfrentarse a las estructuras del Universo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 34:

1. La exposición de este capítulo debe mucho al libro “*Astronomy Today*”, capítulos 19 y 20. Eric Chaisson y Steve McMillan, 2014. Pearson Education, Inc., 1301 Sansome St., San Francisco, CA 94111.

35: La estructura del Universo

hoy

Con lo dicho hasta el capítulo anterior parece que ya podríamos echar el cierre a la biografía del Universo. Habían pasado más o menos 13.800 millones de años desde aquello que creemos fue una excursión cuántica desde el vacío, una inestabilidad de energía que logró escapar del principio de incertidumbre con la ayuda de la gravedad. Poco más tarde pasó por un episodio tremendamente expansivo en el que su tejido creció a velocidades mayores que la de la luz, durante el que se recargó de energía. Esta energía se convirtió en materia y radiación y aún le quedó impulso que dura incluso hoy en día. En el camino se formaron átomos y cúmulos de materia que devinieron en galaxias y estrellas. Perfectamente ordenadas, según los patrones que fijó la inflación. La historia de nuestra Universo está acabada, pero procede explicar cuál es el grupo escultórico que podemos contemplar hoy, poso del paso dinámico de lo sucedido. Vamos a ver cuál es la estructura que el Universo presenta a nuestros ojos.

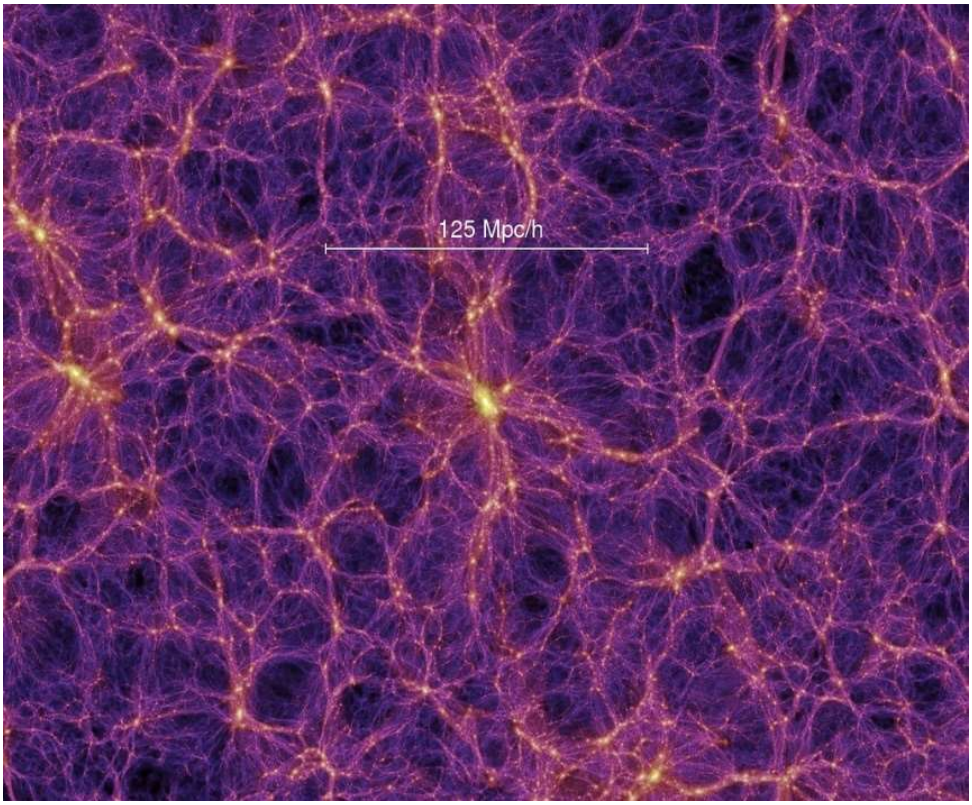
Aquí está nuestro personaje: ***EL UNIVERSO***. Tamaño observable: 93.000 millones de años luz en diámetro. Temperatura media: 2,725 K. Volumen observable: 1,09 x 10^{79} m^3. Densidad de energía: 0,846 x 10^{-29} gr/cm^3. Masa: 9,27 x 10^{52} kg. Y aquí su retrato…

Panorámica nocturna de la Vía Láctea vista desde la plataforma de Paranal, Chile, hogar del telescopio gigante del ESO (Wikimedia, CC BY 4.0)

Podríamos pensar que el Cosmos de hoy tendría que estar lleno de materia distribuida de forma muy homogénea. Y sin embargo, como así lo sugiere la bella fotografía anterior, somos capaces de observar que hay una estrella por aquí, un cúmulo por allá o un agujero negro por el otro lado… ¿dónde está la homogeneidad?

¡La hay!… se trata de una homogeneidad en un inmenso vacío. A pesar de que veamos mucha materia estelar en los cielos nocturnos, no deja de ser una percepción de nuestras más próximas cercanías: la Vía Láctea. Más allá de ella hay más vacío que materia, concentrada en un promedio de ¡medio protón por cada metro cúbico de un espacio mareante!

Allí, en el frío de la "nada", la materia se estructura de forma muy ramificada, dando la impresión de seguir un esquema jerarquizado: un conjunto de vacíos gigantescos, similares a una espuma de pompas de jabón, separados por láminas de mayor o menor espesor y filamentos, rosarios de cúmulos de galaxias en los que, de vez en cuando, aparece un supercúmulo, un nodo relativamente denso. Grandes Murallas, Grandes Vacíos y Grandes Atractores, una panoplia variada de realidades cósmicas.



Modelo de la estructura del Universo. Así debe de ser en la realidad. La escala 125 Mpc/h son aproximadamente 583 millones de años luz.[1]
(Imagen: Springel et al. (2005), The Virgo Consortium for Cosmological Supercomputer Simulations, ⓤfair use)

A escalas suficientemente grandes -del orden de más de 300 millones de años luz-, el universo es homogéneo e isótropo: las irregularidades locales desaparecen al promediar estas distancias. Mires hacia donde mires y desde cualquier punto que mires, la estructura general se mantiene: un fondo rielado por filamentos etéreos y nodos luminosos.

En distancias más cortas, se observan patrones de agrupación definidos por una escala característica de unos 480 millones de años luz. Esta escala refleja el horizonte acústico del universo temprano, grabado en el plasma primordial y visible hoy en la distribución de galaxias y cúmulos. Es la huella de las oscilaciones que moldearon la materia desde sus primeras etapas.

Ahora que hemos explorado las escalas más vastas, hagamos un recorrido por esas estructuras, desde lo más "pequeño" hasta lo más monumental.

Y lo más pequeño son las ***estrellas***, muchas de ellas con sistemas planetarios. Están situadas normalmente dentro de configuraciones que conocemos como galaxias. Pero en ellas suelen presentar unas subagrupaciones que conocemos como ***cúmulos estelares***, que pueden ser globulares o abiertos. Los primeros son agrupaciones densas de centenares de miles o millones de estrellas de más de mil millones de años, mientras que los cúmulos abiertos son más inestables y contienen generalmente centenares o millares de estrellas más jóvenes. Eso sí, como toda clasificación, tiene sus excepciones. Los cúmulos estelares ayudan a comprender la evolución estelar, ya que no dejan de ser agrupaciones de estrellas formadas en la misma época a partir del material de una misma nube molecular.

Tras las agrupaciones estelares debemos seguir por las ***galaxias***, refugio de cientos de miles de millones de astros y de sistemas planetarios. Tienen formas geométricas muy variadas, pudiendo adoptar una geometría espiral -entre ellas también las hay anulares-, elíptica -o globular- e incluso irregular. Tienen un tamaño variable, entre unos cientos y algunos millones de años-luz de diámetro. Entre las más pequeña que conocemos están Segue 2 con unos 110 años luz de diámetro y Willman 1 con 25 años luz, ambas satélites de la Vía Láctea. La más grande conocida es IC 1101 de Virgo, con 5,5 millones de años luz de diámetro.

Las galaxias están ligadas gravitatoriamente entre sí, formando estructuras de orden superior a las que conocemos como ***agrupaciones galácticas***. Las hemos clasificado en tres tipos, dependiendo de su tamaño y el número de galaxias que contienen. Así tenemos

(i) los pequeños *grupos*, con unas decenas de galaxias y tamaños de unos 6 millones de años luz. Les siguen por tamaño

(ii) los *cúmulos,* que pueden agrupar desde 50 a 1.000 galaxias, dentro de un gas caliente emisor de rayos X y con gran cantidad de materia oscura que condiciona decisivamente su dinámica. Su tamaño estándar es de unos 24 millones de años luz. Más grandes aún son

(iii) los *supercúmulos*, en cuyos tamaños de hasta 10^8 años luz se diluye el de las galaxias, siendo sus unidades más elementales los grupos y los cúmulos galácticos.

***Un inciso antes de seguir**. Puede sorprender el que en varias imágenes de este capítulo las distancias se establezcan en kilómetros por segundo. Realmente se está refiriendo a las velocidades de regresión de las galaxias,*

$$velocidad = H_0 . distancia,$$

por lo que habrá que dividir por la constante de Hubble para saber su distancia en millones de parsecs.

Enfoquemos ahora la mirada en nuestro caleidoscopio sobre unos ejemplos que nos ampliarán el conocimiento de estas estructuras.

Por la evidente curiosidad que produce en nosotros, los habitantes de la Tierra, qué mejor que hablar de nuestro universo más próximo. Nosotros vivimos en un lugar irrelevante dentro de todas estas estructuras. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, deambula por el ***Grupo Local***, 3 millones de años luz de diámetro, que está dominado por tres matriarcas, tres galaxias espirales gigantes: Andrómeda, la propia Vía Láctea y la Galaxia del Triángulo. El resto, unas 30, son más pequeñas, siendo muchas de ellas galaxias que giran alrededor de una de las mayores. El conjunto orbita alrededor de un punto situado entre Andrómeda y nuestra galaxia.

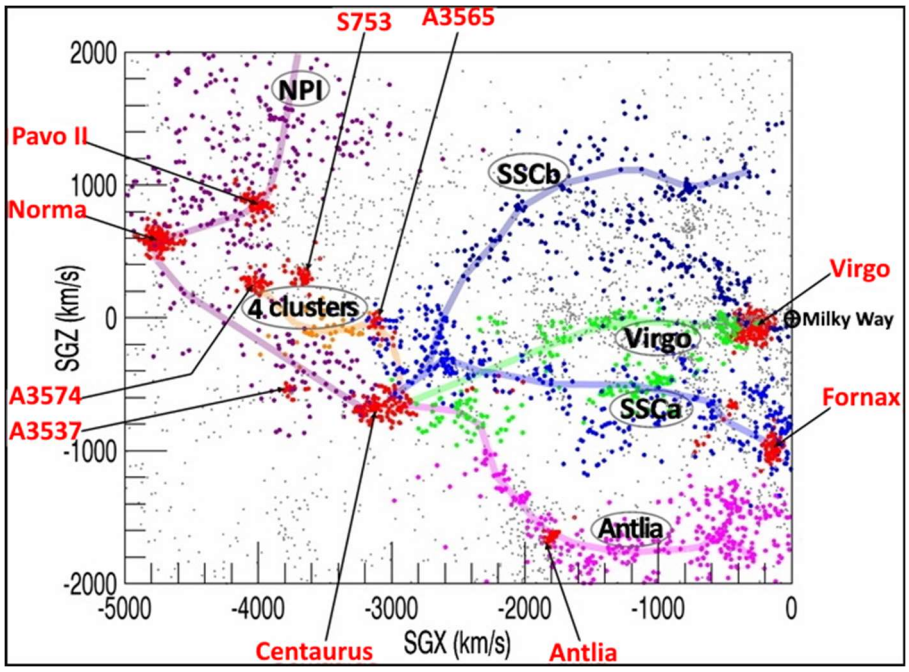
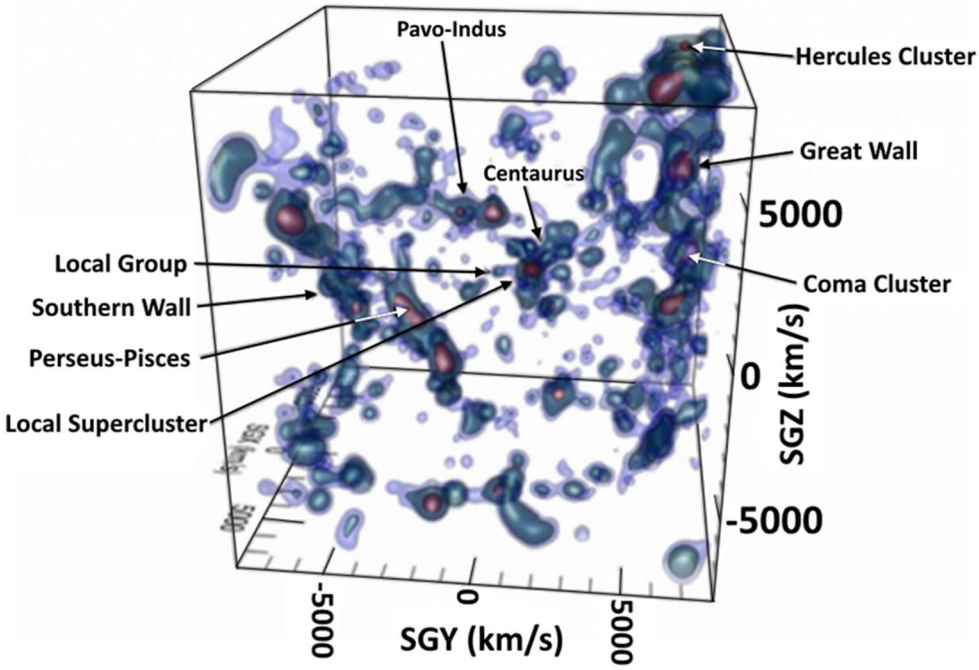


Imagen en donde se aprecian los "filamentos" en que están preferentemente orientadas las galaxias de Laniakea. La anchura del "pantallazo" es de unos 275 millones de años luz. (Imagen [2] Hélène M. Courtois et al., Ⓔfair use)

El Grupo Local deambula perdido dentro del ***Cúmulo de Virgo***, 10 millones de años luz de diámetro, en el que hay una mezcla heterogénea de galaxias espirales y elípticas que posiblemente suman hasta un número de 2.000. Se cree que dentro del cúmulo la distribución de las de tipo espiral adquiere la forma

de un filamento que es aproximadamente cuatro veces más largo que ancho; mientras que las galaxias elípticas se encuentran más concentradas en el centro del cúmulo. Su estructura interna es muy variopinta, ya que agrega varios subgrupos diferentes, algunos de ellos en proceso de fusión. Además, también tiene muchas galaxias satélite situadas relativamente cerca, que seguramente en el futuro acabarán por ser definitivamente atraídas por la gravedad del Cúmulo de Virgo. El medio intergaláctico está formado por un plasma a muy elevadas temperaturas en donde se encuentra, además de un número relativamente elevado de estrellas -incluso formando cúmulos globulares-, nebulosas planetarias formadas por plasma y gas ionizado, expulsados en los últimos momentos de la vida de estrellas gigantes rojas.



Modelizado de las galaxias del Universo cercano. Las burbujas de colores agrupan a la mayoría de las galaxias mientras que el resto es mayoritariamente vacío. La anchura del cubo es de casi 740 millones de años luz. Nosotros estamos en el mínimo "Local Group" central (Imagen: [1] Hélène M. Courtois et al., ⓕ fair use)

Demos un paso más en la escala de tamaños en nuestro universo local. Galaxia Vía Láctea, Grupo Local, Cúmulo de Virgo y… ¡cómo no! el ***Supercúmulo de Virgo*** o Supercúmulo Local (*Local supercluster*), 1.000 millones de años luz de diámetro, que contiene a todas las anteriores y mucho más: hasta 100 grupos y cúmulos de galaxias. Como podemos apreciar en las dos imágenes anteriores nuestro Grupo Local está localizado en las afueras de este supercúmulo, en un pequeño filamento que se extiende desde el Cúmulo de Fornax al Cúmulo de Virgo, y posiblemente dentro de otro supercúmulo, el de Laniakea, que se encuentra junto al de Virgo.

Laniakea parece ser una realidad cada vez más evidente. La base de esta mayor certeza la encontramos en las cada vez más sofisticadas técnicas de análisis que nos ofrece la tecnología. Hoy en día comienza a ser habitual analizar la dinámica del movimiento de galaxias y cúmulos en simulacros 3D. La idea es muy sencilla: Cada día los astrónomos disponen de catálogos de galaxias más completos y hasta distancias más lejanas. Los catálogos recopilan todo tipo de información, entre otra, el lugar de la galaxia con respecto a nosotros y la velocidad de alejamiento con respecto a nosotros. Procesando estos dos datos se puede obtener la densidad local de galaxias en el Universo y la velocidad real de movimiento de cada una de ellas sobre el campo de referencia que suponen los fotones de fondo en microondas. Todo ello permite a los astrónomos determinar la forma geométrica de los campos de potencial gravitatorio y de velocidades, así como las líneas de flujo de movimiento de las galaxias por el Universo.

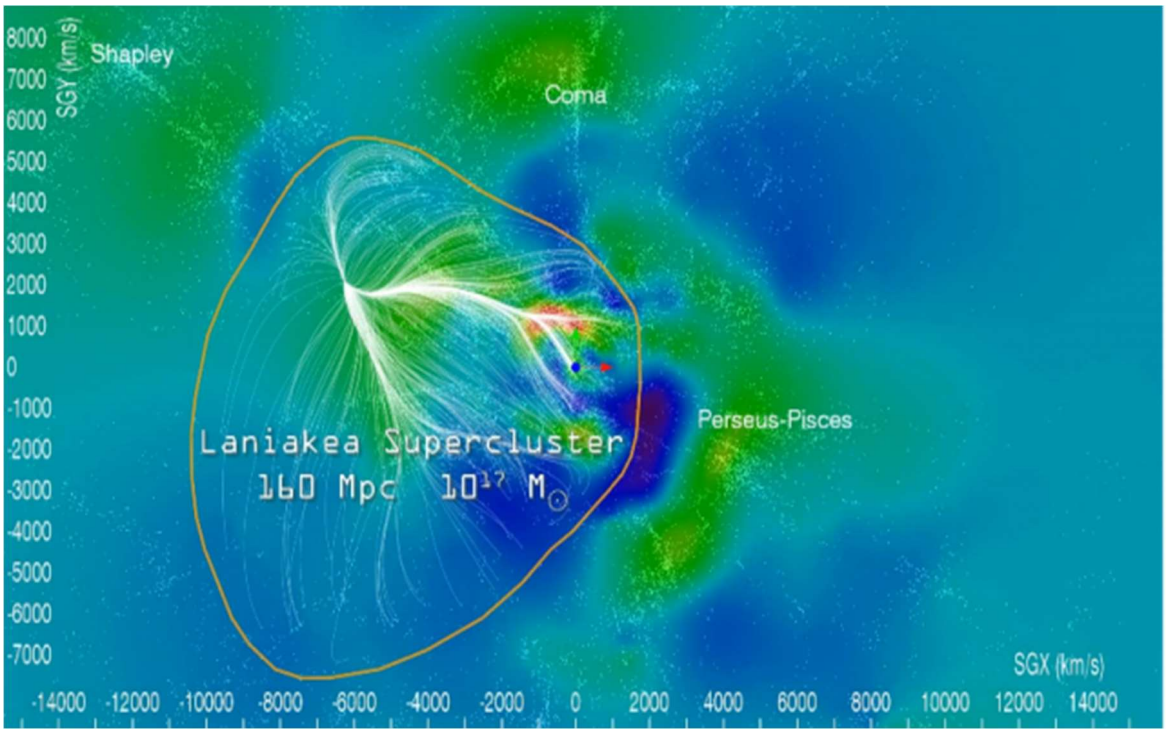
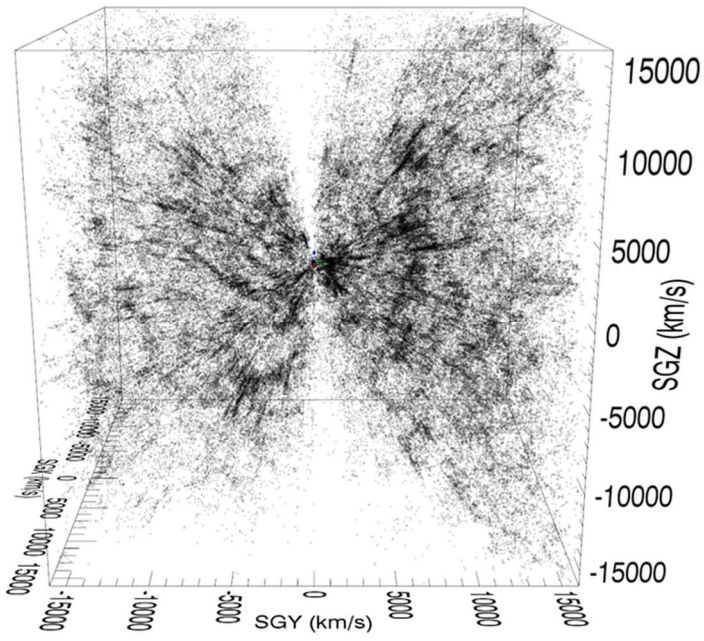


Imagen de la simulación explicada en el texto que permite definir las fronteras de un grupo local de influjo gravitatorio independiente, Laniakea. Su tamaño viene a ser de unos 11.000 km/seg, lo que equivale a unos 520 millones de años luz. La Vía Láctea se encuentra en el punto azul central. (Imagen [2] R. Brent Trully et al., ⓕ fair use)

La imagen anterior es uno de los resultados espectaculares de este tipo de estudios (recomiendo visualizar el vídeo al que dirige la leyenda de la figura). Con estas técnicas se ha logrado detectar un patrón de densidad y flujos de movimiento local que permiten definir un entorno con su particular interrelación gravitatoria, que corresponde a lo que hemos nominado como Laniakea.[3][4]

En la anterior "foto" de Laniakea vemos a sus compañeros cósmicos, los supercúmulos de Shapley, el de Perseo-Piscis y el de Coma. La línea naranja es la frontera de Laniakea, que encierra zonas verdes con densidad de galaxias y zonas vacías en azul. La Vía Láctea, nuestra galaxia, se encuentra en el punto azul central. Las líneas blancas son las líneas de flujo en los movimientos de las galaxias, que van dirigidas en el sentido del atractor de la parte superior del supercúmulo y que coincide con el cúmulo Centauro. Merece la pena resaltar que hay una serie de "filamentos" en donde se concentran preferentemente las líneas de flujo. Realmente equivalen a zonas longitudinales en donde se densifican las galaxias. En particular, hay cinco de estas autopistas: la nuestra corresponde a la de Virgo.

Este supercúmulo de Laniakea es uno entre millones de supercúmulos en la extensión del Universo observable. Se cree que, así como los cúmulos se agrupan en supercúmulos, en las escalas más grandes del universo visible los supercúmulos se agrupan asimismo en ***filamentos*** galácticos, también llamados ***hipercúmulos*** -complejos de supercúmulos- o en ***grandes murallas*** -más delgadas y planas que los filamentos-, que están rodeados de vacíos a modo de enormes burbujas huecas, conocidas como ***gotas Lyman-α***. Se trata de enormes nubes de gas hidrógeno, del tamaño de varias galaxias, que emiten fuertemente en la línea de emisión Lyman-α del hidrógeno. Pueden formar agrupaciones con un tamaño de hasta 200 millones de años luz.



Representación 3D de las estructuras de nuestro Universo. Cada punto es una galaxia. La zona blanca corresponde a la "sombra" de información producida por nuestra Vía Láctea. El campo de representación es un cubo de 1.300 millones de años luz. La información proviene de la base de datos 2 Micron All Sky Survey [6] (Imagen [5]: R. Brent Trully et al., ⓕ fair use)

En el conjunto de toda esta inmensa red cósmica de hilos, paredes y vacíos cartografiados en la imagen anterior, los supercúmulos hacen de nodos de la tela de araña, aunque quizá sea mejor asimilar este entramado a unas esponjas de más de mil millones de años luz. En esta esponja nuestro supercúmulo Local, junto con el supercúmulo Hidra-Centauro, forma una de las cinco partes que integran el Complejo de supercúmulos Piscis-Cetus. A este último se le estima un tamaño de alrededor de 1.000 millones de años luz de largo y 150 millones de años luz de ancho, siendo una de las mayores estructuras identificadas hasta ahora en el universo. El complejo está compuesto por cerca de 60 supercúmulos y se estima que tiene una masa total de 10^{18} masas solares.

Tamaño monstruo es superado por los más de 1.370 millones de años luz de la Gran Muralla Sloan, que está situada a una distancia de mil millones de años luz de la Tierra. Pero no os asustéis, que hay más: U1.11 es un grupo de cuásares -hasta 38- con un tamaño aparente de 2.550 millones de años luz. Quizás penséis que U1.11 os va a hacer caer de espaldas al suelo y que ya no hay más… ¡Pues no! La ***Gran Muralla*** de Hércules-Corona Boreal, a la que también se le conoce por Complejo de supercúmulos de Hércules-Corona Boreal, es una inmensa superestructura de galaxias ¡no hay adjetivos! Su estructura es un filamento galáctico formado por un gigantesco grupo de galaxias asociadas por la gravedad. Tiene cerca de 10.000 millones de años luz en su mayor dimensión -que representa aproximadamente un noveno del diámetro del universo observable- por 7.200 millones de años luz en la otra. Lo que constituye la estructura más grande y masiva conocida en el universo observable.

Pero, si a pesar de todas estas estructuras masivas seguimos diciendo que el universo es homogéneo a grandes escalas, es porque hay más vacío que materia. En nuestras esponjas cósmicas hay más huecos que paredes que representan alrededor del 50 % del volumen total del universo cercano, aunque solo contienen del 5 al 10 % de su masa. Se los conoce como ***Vacíos***, en donde encontramos muy pocas galaxias. O quizás ninguna. Los vacíos más grandes, los súper vacíos, están situados en los espacios de baja densidad del Universo y pueden ser de unos tamaños del entorno unos pocos centenares de millones de años luz. Se cree que los vacíos se formaron en los procesos de las ondas acústicas generadas tras el Big Bang. Recordad del capítulo 15 cómo la masa bariónica en el plasma primordial era desalojada de los pozos gravitatorios de la materia oscura por la gran presión de la radiación, y vueltos a recuperar en parte por la misma materia oscura. En los movimientos de impulsión y colapso de estas masas de materia bariónica se produjeron las semillas de los vacíos. Lo que observamos ahora es el exterior de aquellos huecos primordiales rodeados de materia, que quedaron congelados en el momento del reagrupamiento de núcleos y electrones y que la expansión continua del universo nos ha traído hasta hoy en forma de superestructuras.

Justo en las cercanías de nuestro Grupo Local tenemos al ***Vacío… Local***, ¡cómo no! Es de tamaño medio, a pesar de que tenga unas dimensiones, según en la dirección donde se mida, de unos 230 a 150 millones de años luz ¡Y sus paredes se abren a una velocidad de 260 kilómetros cada segundo! Muy parecido en tamaño tenemos al ***Vacío de Boötes*** o ***Gran Vacío***, que es una gigantesca región esférica del espacio de 250 millones de años luz de diámetro, que contiene muy pocas galaxias. Para hacernos idea de lo vacío que está diremos que cada megapársec cúbico del universo observable contiene 12 galaxias.[7] El vacío de Boötes tiene un volumen de unos 236.000 megapársecs cúbicos. Por lo que en el vacío de Boötes tendríamos que encontrar unos 2.832.000 galaxias… y sólo hay 60.

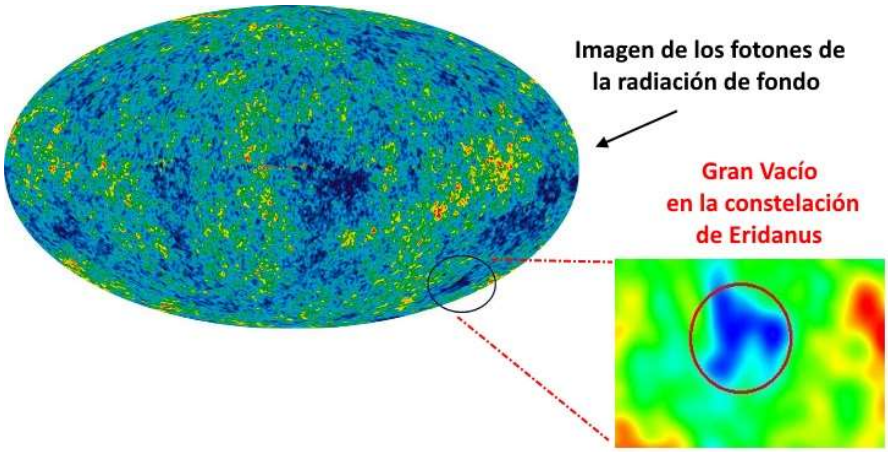
Como estaréis pensando, esos vacíos son un derroche de "nada" … aunque no del todo. Porque ambos no le llegan a la altura del zapato del ***Vacío Gigante***, ubicado en la constelación de los Lebreles, una burbuja de 1.000 o 1.300 millones de años luz de diámetro, dentro de la cual hay una región esférica de unos 160 millones de años luz de diámetro en donde andan "flotando" hasta 17 cúmulos de galaxias que, dada la baja densidad del "agujero", no interactúan gravitatoriamente entre ellas. Por eso lo de "flotando". No se acaba aquí las megalomanías del Cosmos. En 2013 se publicó la existencia de algo aún más grande, una gran esfera de baja densidad de unos 2.000 millones de años luz de diámetro, a la que, en honor a sus descubridores, se le llama ***Vacío KBC***.[8] Nos cabe el honor de que vivimos en ese vacío.

¿Será KBC el fin de la lista? No creo… la película puede continuar porque el Universo no dejará nunca de sorprender a los humanos.

Vamos a acabar esta descripción del museo de las cosas terroríficas… *sí, ya sé que no son terroríficas, pero sus magnitudes me sobrecogen*… con dos últimas curiosidades que nos regala la observación de nuestro Cosmos. Son aspectos muy particulares pero que nos permiten ver la riqueza de formas que nos lega la dinámica del Universo. Y quién sabe si estas formas particulares no sean tan *particulares* y se repitan a lo largo y ancho del espacio.

La primera se trata del ***Supervacío de Eridanus***, o Punto Frío del WMAP o del CMB, que tiene unos 1.000 millones de años luz de diámetro. Con estos nombres podríais imaginar que es "algo" puesto en el escaparate del mapa de la radiación de fondo de microondas -y así aparece en su fotografía-. Se trata de una región del Universo que, tras su análisis, resultó ser extraordinariamente grande y fría en relación con las propiedades esperadas de la radiación de fondo de microondas (CMB). Primer misterio: la temperatura actual promedio del fondo de microondas es de 2,7 K, mientras que la temperatura de dicho supervacío es de 70 µK, mucho más frío que dicha media. Segundo misterio: el supervacío abarca unos 5º en el cielo, siendo así que generalmente la mayor

de las fluctuaciones primordiales de temperatura del CMB se produce con escalas angulares de alrededor de 1°. El Vacío de Eridanus no encaja bien en nuestros modelos teóricos. Hay dudas y se especula que bien pudiera ser causado por algo más cercano, algo que se interpone en el camino de los fotones de fondo en su viaje hacia la Tierra.



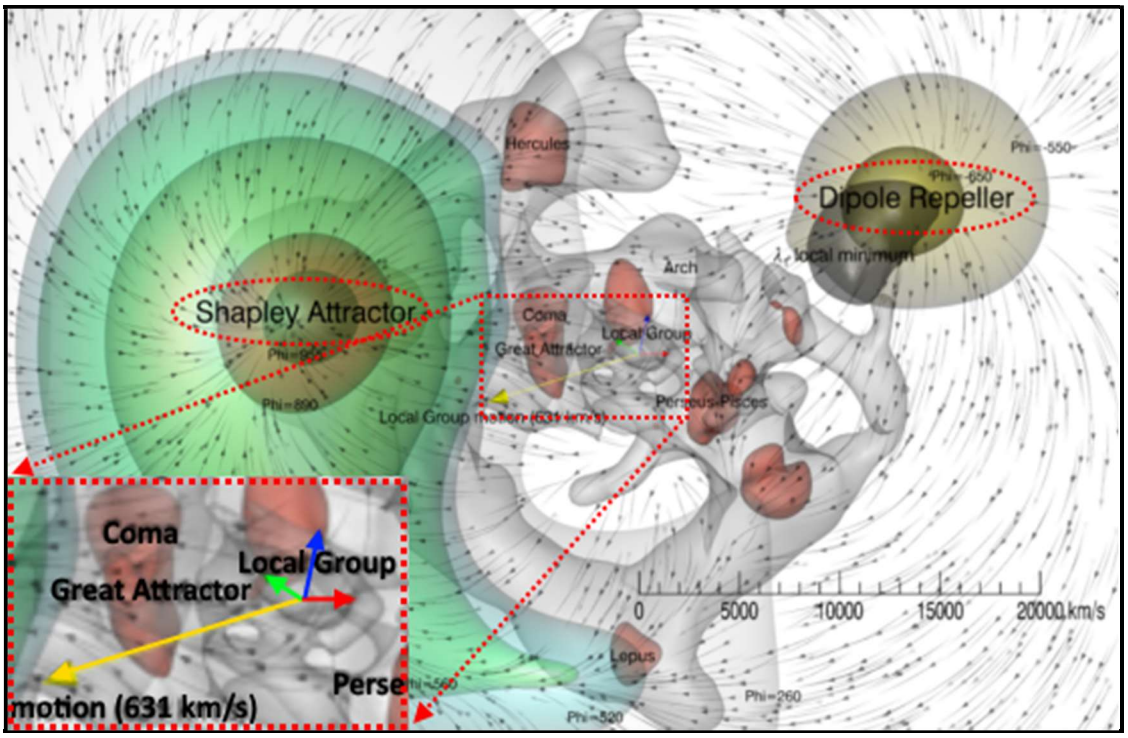
El Gran Vacío localizado sobre la imagen de los fotones de la radiación de fondo de microondas (Imágenes: izquierda WMAP Science Team, NASA, CC BY 4.0, derecha Wikimedia, dominio público)

Por último, vamos a hablar de algo realmente inquietante. Tras el gran Supervacío de Eridanus creíamos que en el Universo no podía haber nada más absoluto y misterioso… pero nos equivocamos. Los sudores fríos de vértigo se apoderan de nuevo de nosotros ante estas dos palabras: ***Gran Atractor***. Pero que no cunda el pánico. No es tan misterioso como parece ya que creemos que no deja de ser más que el mero resultado de la atracción gravitatoria producido por "algo" de masa equivalente a una concentración de decenas de miles de galaxias.

Nuestro Grupo Local de galaxias se mueve con respeto al fondo cósmico de microondas a una velocidad de 631 ± 20 km /seg. Desde hacía tiempo se sabía que algo había en el centro del Supercúmulo de Virgo que arrastraba a las galaxias inmersas en una región de millones de años luz. Observábamos que se alejaban de nosotros, lo que podía ser debido al conocido desplazamiento implícito en la expansión del espacio/tiempo. Pero se llegó a pensar que también podía ser debido a la atracción gravitatoria de una desconocida gran masa de materia, ya que más allá, como si se tratara de una región diametralmente opuesta, hay galaxias cuya luz presenta un corrimiento al azul, lo cual quiere decir que se están acercando a nosotros. La cosa no estaba muy clara, dado que el posible centro atractivo se escondía detrás del halo de nuestra galaxia, oculto por su denso disco de polvo, gases y estrellas.

Pero la tecnología llegó en nuestra ayuda. Fuimos capaces de mirar más allá de lo que se podía hacer con las frecuencias del espectro de lo visible para nuestros

ojos y aprendimos a mirar con visión de rayos X. La luz visible no pueda atravesar las nubes de gas y polvo que rellenan las galaxias, pero sí que pueden hacerlo los energéticos rayos X. Así que nos pusimos a mirar en esta frecuencia hacia la zona donde se sabía debía estar el misterioso centro de atracción. El análisis reveló que en la región donde debería estar el Gran Atractor, entre 150 y 250 millones de años luz lejos de nosotros, hay una estructura dominante, un cúmulo de galaxias unas mil veces más masivo que la Vía Láctea, que conocemos como Cúmulo de Norma y que justifica un 10% de la teórica masa del Gran Atractor.



*Modelado de las estructuras del Universo -en donde se encuentra el **dipolo atractor-repeledor** de Shapley- dentro de un rango de 2.300 millones de años luz. Las flechas indican el campo de velocidades de desplazamiento de las galaxias. En rojo y gris los nudos y filamentos de la red de estructuras, respectivamente. En verde y amarillo las superficies de isopotencial gravitatorio, que incorporan en amarillo al repeledor del dipolo y en verde al atractor de Shapley. En el centro la posición de la Vía Láctea (Imagen:[9] Yehuda Hoffman et al., Nature (enero 2017), ⓔfair use)*

Pero aún hubo más sorpresas. A pesar de la superlativa masa del Cúmulo de Norma y del Gran Atractor, ellos solos no podían explicar el movimiento de las galaxias hacia el centro de atracción, cualquiera cosa que fuera este centro. Incluso cuando se miraba "más lejos", a mayores escalas dentro del espacio, se veía que incluso el Gran Atractor se movía en dirección a algo que tenía que ser incluso más masivo. Algo pasaba que nos era desconocido. Y la causa de la sorpresa se desveló. El mismo estudio en las frecuencias de rayos X nos dijo que en esa misma dirección, a 650 millones de años luz, existe otro gigantesco

cúmulo de galaxias que tiene una masa equivalente a unas 10^{16} masas solares. A este grupo de galaxias se le bautizó como el Supercúmulo de Shapley.

Y aunque ya sabemos que el Complejo de supercúmulos Piscis-Cetus tiene una masa cien veces mayor que Shapley, hay que reconocer que este último no está del todo mal. Se trata de la más grande concentración de galaxias en el universo cercano que forman todas ellas una familia de interacción gravitacional, lo cual implica que las galaxias se atraen entre sí en lugar de expandirse con el universo. El análisis de los datos obtenidos sugiere que sólo el 44% de la aceleración que sufre nuestra galaxia en esta dirección es el resultado del tirón gravitatorio de las galaxias que se encuentran en los dominios de Gran Atractor, y que lo que realmente está tirando de todo nuestro vecindario cósmico es el Supercúmulo de Shapley, que está a su vez ayudado por la acción misteriosa de repulsión de una zona de baja densidad, el Dipolo Repeledor, que se encuentra más o menos en sentido contrario y a una distancia parecida.[10] De forma que la atracción de uno es semejante a la repulsión que ejerce el otro.

La atracción egocéntrica de Shapley parece insinuarnos una fuerza singular, en donde todo se va a sublimar en un punto que concentre el recuerdo de lo que pasó. No hay más, y es la excusa adecuada y perfecta para plantear el hito final de nuestra historia "real" (queda el futuro imaginado para los últimos capítulos). Desde un planeta como la Tierra a una gran muralla; desde la distancia de Planck a la inmensidad de un incompleto Universo observable; desde hace 13.800 millones de años a hoy en día; desde el vacío cuántico hasta 10^{-29} gr/cm^3 de densidad de energía, … la maravillosa historia del Cosmos que, gracias a la sorprendente curiosidad de unos hombres, cuyo cerebro de kilo y medio sonríe ante la visión de los estratosféricos 9,27 x 10^{52} kilos de materia del Universo, se nos ha permitido conocer.

Hemos llegado al último día de nuestra biografía, por ahora, hoy. El fin de una historia de hechos físicos -a veces la ignorancia nos dice que también puedan ser matemáticos- pero que tiene más poesía que la que surge espontáneamente al contemplar el mar de luces cósmicas en la noche. Cuando volvamos a elevar la mirada a la profundo bóveda celeste ya no nos vamos a conformar con ver simplemente lo que nuestros ojos aprecian. Pensaremos que todo un piélago de materia desconocida para nosotros, la materia oscura, nos contempla. Cerraremos unos instantes nuestros párpados e imaginaremos la gran nube negra que rodea a cada lejano punto luminoso, sin la que éste no existiría. Un mar aún mayor de energía oscura que tira y tira dilatando las carnes del soporte de nuestras existencias. Unos océanos de fuegos y gases respondiendo a unas sencillas leyes que dibujan belleza en la oscuridad. Un misterio de la duda ante lo inabarcable. Ante esa contemplación espero, estoy seguro, que viviréis un momento mágico lleno de emociones y cargado de belleza.

Mientras… imaginemos el futuro.

NOTAS DEL CAPÍTULO 35:

1. h: Es un factor de escala que está relacionado con la constante de Hubble, H_0, la cual describe la tasa de expansión del universo. "h" es una forma adimensional de expresar H_0 y se define como: h= H_0/100 km/s/Mpc, Donde H_0 típicamente está en el rango de 67-73 km/s/Mpc dependiendo del modelo cosmológico o las observaciones utilizadas.
   La presencia de h en las unidades ajusta las distancias de acuerdo con el valor específico de H_0. Esto es útil porque diferentes estudios usan distintos valores de H_0 , y expresar distancias en términos de Mpc/h permite que los resultados sean escalables para cualquier valor de H_0.
2. "*COSMOGRAPHY OF THE LOCAL UNIVERSE*", Hélène M. Courtois et al., The Astronomical Journal, agosto 2013.
   [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/146/3/69/meta;jsessionid=703B578A836051FDFCF4EED9C03ED8B5.c1.iopscience.cld.iop.org]
3. El estudio mencionado se trata de "*The Laniakea supercluster of galaxies*", R. Brent Tully et al., Nature, septiembre 2014.
   [https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1409/1409.0880.pdf]
4. Este supercúmulo de galaxias, Laniakea, ha sido definido en septiembre de 2014 por un equipo de astrónomos de la Universidad de Hawái liderados por Brent Tully. De ahí que no nos sorprenda su nombre, que significa en hawaiano "*Cielos inconmensurables*" y que fue propuesto por David Nawa'a Napoleón, profesor de lengua hawaiana en la Universidad de Hawái, en honor de los navegantes polinesios y su conexión con el firmamento.
5. Imágenes obtenidas de este interesante vídeo que recoge las conclusiones del estudio mencionado en la nota 3.
   [https://www.youtube.com/watch?v=No0omeHIxwo]
6. Para saber un poco más sobre esta catalogación de objetos astronómicos podéis acudir al enlace que os propongo, que os lleva a una página de la Universidad Caltech específica del proyecto 2MASS.
   [http://www.ipac.caltech.edu/2mass/]
7. Según este artículo, "*The number of galaxies per unit volumen*", página 123, A. Fletcher, Journal: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, enero 1946.
   [https://articles.adsabs.harvard.edu//full/1946MNRAS.106..121F/0000121.000.html]
8. Las iniciales de los tres astrofísicos, R. C. Keenan, A. J. Barger y L. L. Cowie, que publicaron su descubrimiento en la revista "*The Astrophisical Journal*" de septiembre de 2013.

9. "*The Dipole Repeller*", Yehuda Hoffman et al., Nature Astronomy, enero 2017.
   [https://arxiv.org/pdf/1702.02483.pdf]
10. Realmente se encuentran a 16.000 ± 4.500 km/s uno del otro Como ya hemos comentado en el texto, puede sorprender unidades de velocidad para fijar una distancia. Se usan en astronomía pensando en que son unidades equivalentes a la velocidad de Hubber. Para pasar de unidades "velocidad" a unidades "distancia" hay que multiplicar por la inversa de la constante de Hubber (seg^{-1}). En esas unidades 100 km/seg son aproximadamente 4,66 años luz. De forma que el Gran Atractor y el Dipolo Repeledor están tan "cerca" como 746 ± 210 años luz.

36. Y a partir de ahora ¿qué?

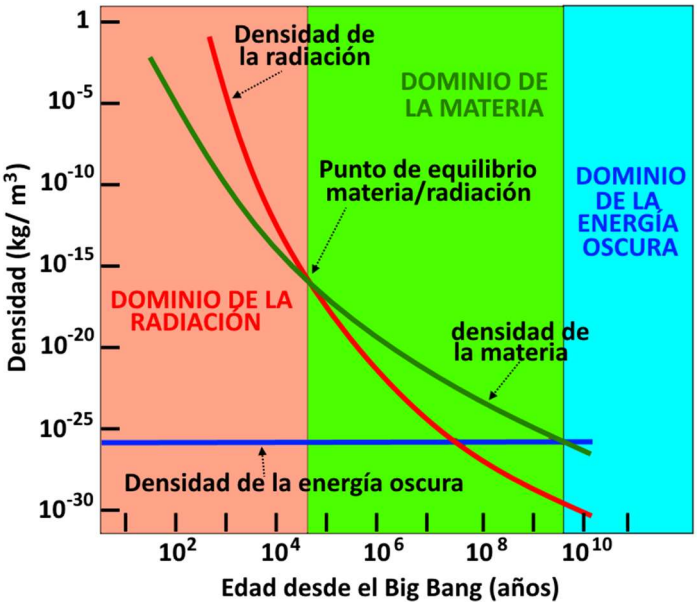
Imaginemos el futuro: a partir de ahora ¿qué? ¿Hacia dónde se dirige nuestro Universo? No sé si merece la pena hacerse esta pregunta… "casi" con toda seguridad ningún humano llegará a poder experimentar su fin. Siempre hay que dejar un casi. Investigar este tema es una obligación para este libro que habla de la biografía del Universo. Hasta su muerte. O lo que sea que quiera decir eso.

Realmente no tenemos experiencia en universos completos, no podemos echar mano del vademécum sobre universos para tener certezas, el futuro es un campo lleno de niebla, una *terra incógnita* llena de ¿monstruos? tal como se dibujaba en los mapas medievales ante un territorio desconocido. Así que sólo podemos llegar a imaginar, a predecir gracias a nuestras teorías físicas, a aproximar la probabilidad de los posibles finales. Y seguramente los habrá inimaginables.

Como nuestra curiosidad es insaciable nos hemos planteado el conocer una fantástica historia, la del futuro del Universo, la de cómo va a evolucionar nuestro particular globo de materia y energía en los abundantes eones que pensamos le quedan de vida. Nuestra inquietud nos va a exigir mucha teoría, mezclar su ecuación de estado con la de evolución de densidad de energía y encajarla en las ecuaciones de la relatividad que nos explican su dinámica de crecimiento. Somos afortunados por vivir en un momento en que se acumula el conocimiento producto del estudio y la mente lógica de mucha gente de ciencia que nos antecedió, grandes inquietos de la Vida que nos han hecho el trabajo, cuyas conclusiones intentaremos resumir en este y los próximos capítulos con la mayor sencillez posible.

Hay que mirar al Universo con amplitud, aunque como buenos *homo*'s tendemos a quedarnos en el detalle de nuestros barrios en donde vemos cosas fantásticas a las que incluso les ponemos nombres humanos. Sí… así funcionamos los hombres, aunque realmente al largo declinar del Universo le importe un comino lo que le pueda pasar a la Vida. Pero no nos despistemos… hay que mirar al Universo con amplitud, decíamos. Que es lo mismo que decir que hay que mirarle como un UNO, único y aislado puesto que no hay nada fuera de él. Y a pesar de lo que los cúmulos de galaxias parecen sugerir, grumos en el espacio, resulta que es extremadamente uniforme e igual, miremos en la dirección que miremos. Realmente nuestro Universo es homogéneo e isotrópico… un "globo" prácticamente lleno de un difuso gas de hidrógeno y helio. Y una más difusa radiación. Como tal habrá que tratarle. Además, podemos observar que ese globo está expandiéndose constantemente por lo que no sólo deberemos atender a su contenido sino también a los motivos que dinamizan la expansión. La constante lucha entre la gravedad y la constante

cosmológica. Si hemos sido capaces de llegar a esta página de nuestro libro, sabemos ya de todo ello, de su historia, lo que fue y es. Sabemos de las poblaciones contenidas y de su historial de expansión.



Las distintas épocas del Universo y los distintos personajes dominando la dinámica del Universo. (Imagen: "Astronomy today", Fig 27.1, Eric Chaisson y Steve McMillan, ⓕfair use)

En el capítulo 29 ya propuse la imagen anterior que resume en un simple gráfico las tres etapas existenciales en la vida del Universo. Una inicial, que duró unos diez mil años tras la inflación exponencial, en la que dominó la radiación. Progresivamente se comenzó a pasar el testigo a la materia. Hasta que hace unos cinco mil millones de años la energía oscura le doblegó la mano a esta última y así parece que será para siempre jamás. Con el tiempo llegará el día en que la materia será tan irrelevante como lo es ahora la radiación. Sabiendo que ese ha sido, es y será el contexto, nos va a ser útil el imaginar al Universo como un entorno en donde, en cada momento, se encuentran superpuestas dos familias, materia y radiación, cada una con sus condicionantes propios y de relación, viviendo en un patio de vecinos conformado por algo tan misterioso pero definitorio como es la energía oscura.

Pero ojo porque el patio de vecinos es de arenas movedizas para la materia y la radiación. Circunstancia a la que no habrá que perder de vista en el análisis de nuestra historia. Tras una expansión inicial siguió un corta y tremenda inflación para inmediatamente volver a ralentizar su crecimiento. Una vez estabilizada la "dinámica Big Bang" la expansión tomó una senda de progresiva deceleración gracias a la dominante influencia gravitatoria de la materia/energía. Hasta que en un cierto "momento" la energía oscura anti gravitatoria se hizo tan abundante que se inició un cambio de tendencia, tras el

cual se recuperó otra vez una senda expansiva de aceleración positiva. Eso es lo que creemos saber.

Así que parece que el análisis del Universo debe ir de participantes, condiciones ambientales y dinámica del escenario. O lo que es lo mismo, va de materia/radiación, variables de estado y condiciones de expansión.

Lógicamente el punto de partida debe ser conocer la ***ecuación de estado del Universo***, su carné de identidad, como prácticamente lo haríamos con cualquier otra entidad física ¿Qué es una ecuación de estado? Es un constructo matemático que correlaciona las características que definen a un ente físico, sus funciones de estado, que nos permite estudiar cómo evolucionan estas funciones unas con respecto a otras en cada momento y como, a su vez, condicionan la dinámica del conjunto ¿Cuáles pueden ser esas funciones de estado a las que nos estamos refiriendo? Entre otras... la energía interna, el volumen, la presión, la temperatura, la entropía… Si lo concretamos para nuestro Universo cerrado, aislado y lleno de una tenue población de gases, el equivalente a unos cinco núcleos de hidrógeno por metro cúbico resulta razonable utilizar la ecuación de los gases perfectos

$$PV = nRT$$

como la ***ecuación de estado del Universo***,[1] que se puede expresar también de la siguiente manera

Presión / densidad de energía = w [2] **[α]**

siendo w un parámetro cuyo valor depende del tipo de contenido material/energético considerado. Recordemos cuáles son las poblaciones contenidas porque, evidentemente, en nuestra observación de la dinámica temporal del Universo no podemos olvidar esta circunstancia.

(i) En un mundo de *radiación*, partículas relativistas, podemos pensar dominado por fotones, aunque también encajarían los ligeros y elusivos neutrinos, el estudio teórico acerca de la presión que ejercen las partículas electromagnéticas nos va a llevar a que el parámetro w de la ecuación de estado para este tipo de mundo valga 1/3.

(ii) Si la componente del Universo es *materia no relativista*, es decir materia bariónica que deambula a poca velocidad con relación a la de la luz, entonces $w = 0$ y por tanto $P = 0$ como se podría esperar de partículas que con sus velocidades lentas (no relativistas) deben “empujar” poco.

(iii) Cuando pasamos a examinar un universo en el que domina la energía oscura en forma de *constante cosmológica*, lo que será la realidad dentro de unos pocos miles de millones de años, entonces w adquiere el valor negativo

de -1. Eso último ya se comentó en el capítulo 4 en donde decíamos que la energía oscura era equivalente a una presión negativa.

Haya otros casos teóricos en los que parece que el factor w puede ser incluso un poquito inferior a -1, lo cual nos lleva a algo que se llama *energía fantasma* que implica energías negativas y otras cosas raras. Ya hablaremos más adelante acerca de lo que supondría para el Universo el que la energía oscura fuera energía fantasma.

Componente	**W**	**ρ**
Radiación	1/3	$\alpha\ a^{-4}$
Materia no relativista	0	$\alpha\ a^{-3}$
Constante cosmológica	-1	constante
Energía fantasma	< -1	incierta

En resumen, la ecuación de estado del Universo sería algo así como la herramienta que va a dibujar el entorno "ambiental", la que nos orienta en el cómo juega en cada momento la presión interna y la densidad de energía, o con qué coyuntura se van a encontrar las poblaciones del Universo y su expansión.

Una expansión que se produce en unas circunstancias muy particulares: el Universo se expande sin intercambiar energía ni trabajo con su exterior por la simple razón de que fuera de él no hay nada. Se trata de una expansión adiabática donde el trabajo realizado por los flujos energéticos internos durante la expansión necesariamente debe surgir de la propia energía interna estructural del Universo ya que no hay más a donde acudir.

Según el primer principio de la termodinámica en un sistema que no intercambia calor con el exterior se tiene que cumplir la siguiente relación energética:

Energía interna – Trabajo realizado = Calor transferido = 0 *[cero porque, recordemos, nuestro sistema está aislado]*

Tras unos sencillos cálculos, o quizás no tanto, podemos llegar al conocimiento de cómo es su ***densidad de energía***[3] siendo ese el resultado

$$\boldsymbol{\rho \propto a^{-3\,(1+w)}} \qquad \textbf{[β]}$$

En esta proporcionalidad aparece un nuevo parámetro adimensional ***a***, conocido como factor de escala, que varía con el tiempo. Conceptualmente quiere decir cuánto ha crecido entre dos momentos t_i una distancia genérica -pensemos que entre A y B- debido a la expansión del Universo. Podemos visualizarlo así

$$a(t_x).\overline{AB(t=0)} = \overline{AB(t=t_x)}$$

Establecidas las dos ecuaciones fundamentales anteriores [α] y [β], las herramientas ambientales "ecuación de estado" y "dinámica evolutiva de la densidad", vamos a introducir en ellas a los participantes y tener en cuenta el hecho de que la densidad del Universo esté alimentada básicamente por tres, con un *mix* distinto en cada eón: la radiación, la materia y la energía del vacío o energía oscura. Entre todos deben sumar una cantidad determinada, la densidad crítica -hoy más o menos 10^{-29} grs/cm^3-, para que la evolución del Universo vaya por el camino "pausado" y de geometría plana que observamos. Si no se cumpliera esta condición el Universo seguramente se desviará -quizás se hubiera desviado ya- hacia otros puertos.

Por último nos queda la faceta expansiva, analizar realmente como van a evolucionar los posibles caminos del Universo en su futuro. La teoría, ciertamente compleja, está contenida en las ecuaciones de la relatividad de Einstein y, como podéis suponer, sumamente rica tras cien años de física. Nosotros no necesitamos mucho detalle y si "sensaciones" por lo que nos vamos a apoyar en las soluciones que propuso el matemático ruso Alexander Friedmann en sendos artículos de 1922 y 1924, que en su conjunto son utilizadas en cosmología física y que describen la expansión del Universo bajo la hipótesis de que es homogéneo e isótropo. En particular analizaremos la primera de sus ecuaciones

$$\boldsymbol{H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{a^2}}$$

en donde ρ es la densidad de materia/energía en el Universo -incluye también el efecto de la presión interna del sistema-, Λ la constante cosmológica[4] y k la curvatura del tejido espacio/tiempo. Vamos a razonar un poco con lo que a simple vista nos dice la ecuación y veamos hasta donde nos lleva.

Hagamos primero un sencillo ejercicio de imaginación con el término intermedio donde aparece el factor de escala ***a***. Vamos a multiplicar imaginariamente numerador y denominador por X, siendo X una distancia entre dos puntos cualquiera del Universo. Con eso en mente nos podemos dar cuenta que ese término imaginado es el cuadrado de la velocidad con que varía el segmento cósmico X, dividido por el propio segmento X; es decir, la velocidad con que se separan los extremos de X dividido por la distancia entre esos dos puntos. Efectivamente, tal como anuncia el primer término de la ecuación, se trata del cuadrado de la constante de Hubble. Vemos pues un primer fruto indispensable para nuestro propósito: usando las ecuaciones de Friedmann podremos calcular cómo se expande el universo en función del tiempo.

Miremos ahora a la derecha de la igualdad. El primer término representa la lucha entre la materia/energía y la constante cosmológica, la energía oscura. La dinámica de la expansión del Universo depende del valor de la densidad $\boldsymbol{\rho}$ de su materia/energía y del valor de la constante cosmológica $\boldsymbol{\Lambda}$. Con sus efectos gravitatorios opuestos, la primera favorece la compactación mientras que la segunda ayuda a lo contrario ¿quién ganará? En el momento actual parece que el pulso se lo está llevando la energía oscura Λ aunque no fue así con anterioridad.[5]

Pero asimismo podemos ver en la ecuación de Friedmann que esa batalla también se ve modificada por el efecto de la curvatura k del Universo. Para un mismo inventario energético no sería lo mismo ver como crece/decrece un mundo cerrado en sí mismo siguiendo una geometría esférica, o un mundo de geometría plana o uno abierto en forma de Pringles o de silla de montar. Parece que la geometría de nuestro particular Universo es de tipo plana, con una k=0, en el que la suma de las densidades de los tres elementos que lo integran, radiación, materia y energía oscura, es igual a la crítica. Lo hemos podido comprobar gracias a distintas verificaciones basadas en la observación del Cosmos, entre otras, lo que nos dice la radiación de fondo de microondas como ya lo estudiamos en el capítulo 18.

Echemos ahora una ojeada a los dos bloques que se restan en la ecuación de Friedmann:

$$\frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$$

Para el caso de materia no relativista (la materia "normal" para entendernos, aunque el razonamiento sirva también para un Universo de radiación) el primer bloque, el de la densidad ρ, tiene que variar en el tiempo en consonancia a como varíe el volumen, es decir, de acuerdo con a^{-3}[6] mientras que el segundo, el de la curvatura, vemos que lo hace según a^{-2}. Densidad de energía vs. curvatura. Como con el tiempo la expansión va incrementando el factor de escala a(t), podemos inferir que van disminuyendo los valores de ambos sumandos. Aunque el ritmo de disminución provocado por el factor a^{-3} lógicamente va a ser mayor que el provocado por el factor a^{-2}. Lo que quiere decir que, en el caso de un universo cerrado con k positivo, el sumando de densidad va a ir perdiendo posición frente al de curvatura. En algún instante la constante de Hubble, inicialmente positiva, se hará cero momento en el que la expansión va a pararse pasando la gravedad a dominar la dinámica del universo. Podemos pensar que, consolidada esa coyuntura, aun habiendo mucha energía anti gravitatoria que "empuje" hacia un universo abierto, ha llegado de nuevo el momento de la materia cuando la velocidad de crecimiento de a(t) comienza a hacerse negativa y el factor de escala se va haciendo cada vez más pequeño: la curvatura le habrá

torcido el brazo a la energía oscura y acabaremos con un universo contrayéndose sobre sí mismo, lo que conocemos como un universo cerrado.

Podemos hacer un razonamiento parecido, aunque opuesto, pensando en una curvatura k negativa: en ese caso el crecimiento del factor de escala a(t) conduce siempre a una constante de Hubble positiva. Nos encontramos en el caso de un universo en continua expansión, un universo abierto. Finalmente, si la curvatura es cero, el crecimiento de la constante de Hubble, aunque siga siempre aumentando, se irá ralentizando con el tiempo al estar afectado de un factor a^{-3}. Recordad que estamos analizando el caso de universo con solo materia no relativista sin constante cosmológica. En la siguiente tabla se recoge los diversos parámetros mencionados en la entrada para un universo plano:[7]

Población	**w**	**ρ**	**a(t)**	**H**
Radiación	1/3	$\alpha\ a^{-4}$	$\alpha\ t^{1/2}$	$\alpha\ 1/(2t)$
Materia	0	$\alpha\ a^{-3}$	$\alpha\ t^{2/3}$	$\alpha\ 2/(3t)$
Energía oscura	-1	Vacío verdadero campo energ. oscura	$\alpha\ e^{Ht}$	Cte.

En términos generales, el parámetro de Hubble, teniendo en cuenta la participación de todos los personajes, curvatura, materia, radiación y energía oscura, sigue la siguiente ecuación:

$$H(a) = H_0 \sqrt{\Omega_k a^{-2} + \Omega_{mat} a^{-3} + \Omega_{rad} a^{-4} + \Omega_{ener\ osc} a^{-3(1+w)}}$$

siendo los parámetros Ω las participaciones de cada elemento en la densidad total de energía del Universo.[8] Si analizamos la ecuación podemos constatar de nuevo lo dicho un par de párrafos más arriba: a medida que el factor de escala aumenta la incidencia de los sumandos va decayendo a excepción del de la energía oscura que puede hacerse constante cuando w tome el valor -1 -caso típico para la energía oscura- y se hará cada vez más relevante cuando w sea más negativo que -1 -caso de la energía fantasma-.

Todo lo anterior son sólo datos para el análisis que no apartan de la búsqueda de panoramas más intuitivos y atractivos. Más allá de tantas k's abstractas, tantas "planitudes" o "esfericidades", y tantas arideces teóricas… siempre debe quedar revoloteando en nuestras mentes la imagen vivencial y diría que "épica" de nuestro Cosmos, el cómo la curvatura, la forma, está condicionando la acción de la materia/energía que contiene el universo; y la tensa relación entre la materia gravitatoria y la energía oscura, la una comprimiendo el espacio mientras la otra trabaja para expandirlo. La guerra de Troya.

Esas son las reglas del juego. En este capítulo hemos esquematizado a nuestro Universo como una gran bola aislada llena de gases y radiación, en constante

expansión acelerada. También hemos repasado las tres ecuaciones fundamentales que van a explicar su "fisiología" y dinámica: la ecuación de estado, la evolución de la densidad y la dinámica relativista de su expansión. En el próximo capítulo veremos a donde nos lleva todo ello.

NOTAS DEL CAPITULO 36:

1. Ecuación de los gases ideales PV = nRT, siendo ***P*** la presión absoluta, ***V*** el volumen, ***n*** el número de moles de gas, ***R*** la constante universal de los gases ideales y ***T*** la temperatura absoluta.
2. La ecuación de los gases perfectos se puede transformar de la siguiente manera:
   $PV=n_{mol}RT \rightarrow PV=[masa_{total}/masa_{mol}]RT \rightarrow P=[M/V][RT/m_{mol}] \rightarrow$
   $\rightarrow P = \rho_{materia} \text{ x } K \rightarrow P = [\rho_{materia}\, c^2]\,[K/c^2] \rightarrow P = \rho_{materia}\, c^2\, w$
   que si la reducimos a unidades c^2 queda como
   Presión / densidad de energía = w
3. Esta es la línea general del cálculo teniendo en mente que se realiza en el volumen de una esfera de radio variable con un determinado factor de escala a(t) en cada momento:
   - Energía interna (U) – Trabajo realizado (W) = 0
   - diferenciando la ecuación obtenemos dU = dW.
   - La típica definición del trabajo diferencial dW=Fdx surge de la mecánica clásica. Pero también en un sistema termodinámico donde las interacciones suelen involucrar variables como presión y volumen, podemos interpretar la presión P como una fuerza generalizada y el cambio de volumen dV como un desplazamiento generalizado. Esto lleva naturalmente a la expresión dW=PdV.
   - Utilizando ahora la conocida ecuación de Einstein $U=E=mc^2$ en el término de la izquierda y teniendo en cuenta para el término de la derecha que en una expansión adiabática dW=PdV pasamos a $d(mc^2)=PdV$,
   - y como masa = densidad x volumen, llegamos a $d(\rho V)c^2=PdV$.
   - Al ser el volumen de una esfera $V \alpha (4/3)\, \pi\, a^3$, operando se llega a la siguiente ecuación de variación de la densidad

$$\dot{\rho} + 3\,\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{P}{c^2}\right) = 0$$

   Las variables con un punto encima representan su primera derivada con relación al tiempo.

[https://cuentoscuanticos.wordpress.com/2011/11/03/el-universo-y-su-densidad/]
Si ahora resolvemos esta ecuación usando la ecuación general de estado del Universo $P = \rho.w.c^2$ (*nota 2*), obtendremos la siguiente correlación general de la densidad

$$\boldsymbol{\rho \propto a^{-3(1+w)}}$$

4. El cosmos parece estar dominado por un agente de carácter desconocido cuyo efecto es equivalente al de una anti-gravedad y que existe a las mayores escalas. Este agente podría explicarse en términos de la constante cosmológica introducida por Einstein, aunque también podría admitir descripciones físicas de otro tipo como energía oscura, quintaesencia, u otras.
5. Eso que parece tan intuitivo, el que la materia/energía de cualquier tipo condicione la expansión, tiene su explicación. Imaginemos un cohete que debe abandonar la Tierra sin volver a caer. Para lograrlo, su energía cinética debe superar a la energía potencial gravitatoria. Si trasladamos esta idea a una esfera teórica e inmensa en el universo, llena de masa distribuida uniformemente, surge una pregunta similar: ¿puede la esfera escapar de su atracción gravitatoria interior y continuar expandiéndose?
   Es importante recordar que la influencia gravitatoria de la masa exterior a una región esférica se compensa debido a la simetría, según el teorema de Gauss en gravitación. Por lo tanto, el comportamiento de la esfera queda determinado únicamente por la masa contenida en su interior.
   En este escenario, la dinámica de la expansión está controlada por el balance entre la energía cinética (asociada a la expansión de la materia) y la energía potencial gravitatoria (que tiende a colapsarla).
   Nuestro universo observable es análogo a esta esfera en expansión, y su destino depende del balance de energía en su interior. Según la Relatividad General, la curvatura del espacio-tiempo está vinculada a la densidad de energía total:
   Si la densidad del universo es mayor que la densidad crítica el universo es cerrado, tiene curvatura positiva y eventualmente colapsará. Si la densidad es igual a la densidad el universo es plano, tiene curvatura nula y se expandirá indefinidamente a un ritmo que tiende a cero. Si la densidad es menor que la densidad crítica el universo es abierto, tiene curvatura negativa y se expandirá indefinidamente a un ritmo creciente.
   En un universo con energía total cero, el equilibrio entre expansión y gravedad crea un cosmos plano y estable, donde la dinámica de la expansión es suave y predecible. Sin embargo, en el universo real, la energía oscura introduce un componente adicional que acelera la expansión, alterando este balance clásico.

Matemáticamente. La masa m contenida en una esfera de radio r, siendo ρ la densidad de materia/energía, será $m = \rho (4\pi r^3/3)$. La energía E *por unidad de masa* es la suma de su energía cinética ½ v^2 debida a la velocidad de expansión, en donde v=H/r siendo H la constante de Hubble, y de su energía potencial gravitatoria G.m/r siendo G la constante gravitatoria de Newton.

Es decir, $E = v^2/2 - G.m/r$. Si sustituimos aquí m y v podemos encontramos la siguiente relación

$$E = (1/2)\, v^2\, (1-\Omega)$$

siendo $\Omega = \rho/\rho_c$, y ρ_c la densidad critica del Universo de la que hemos hablado ya muchas veces. Si Ω es mayor que uno la energía E es menor que cero y el universo colapsa. Por el contrario, si es menor que uno el universo se expande y si es igual a 1 permanece invariable en una perfecta planitud.

6. Es lógico ya que la densidad de la *materia* confinada en un volumen es inversamente proporcional al valor de ese volumen. Si se duplica el radio de una esfera, su volumen se multiplica por ocho. Ya que el volumen depende del factor de escala según $V_o(a_o^3) \rightarrow V_t(a_t^3)$, la densidad de la materia variará inversamente al cubo del factor de escala a(t).

En un mundo dominado por la *radiación*, como al expandirse el Universo se alarga la longitud de onda de esa radiación según a(t), al efecto exponencial 3 por la variación volumétrica se le añade un factor a(t) a la variación de la densidad de la radiación, que seguirá por tanto una relación inversa con la potencia cuarta de a(t).

Y si nos atenemos a la *energía oscura*, su densidad es constante con el tiempo al ser el resultado del potencial de un campo de tipo inflacionista de valor constante y continuo en el tiempo y espacio. En la ecuación de Friedmann Λ tiene unidades de una inversa de longitud al cuadrado, lo que indica que podría evolucionar con el tiempo según $a(t)^{-2}$ al igual que la influencia para la evolución del término de la curvatura en la ecuación de Friedmann. Aunque realmente varía según $a(t)^{-3(1+w)}$, como podemos ver en la fórmula presentada al final de este capítulo para H, siendo w la constante que define la función de estado del Universo.

7. Si nos centramos en el universo plano, k=0, la ecuación de Friedmann se simplifica como

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\,\rho$$

y usando ahora las correlaciones "densidad/factor de escala" ya mencionadas en el texto

$$\rho \propto a^{-3\,(1+w)}$$

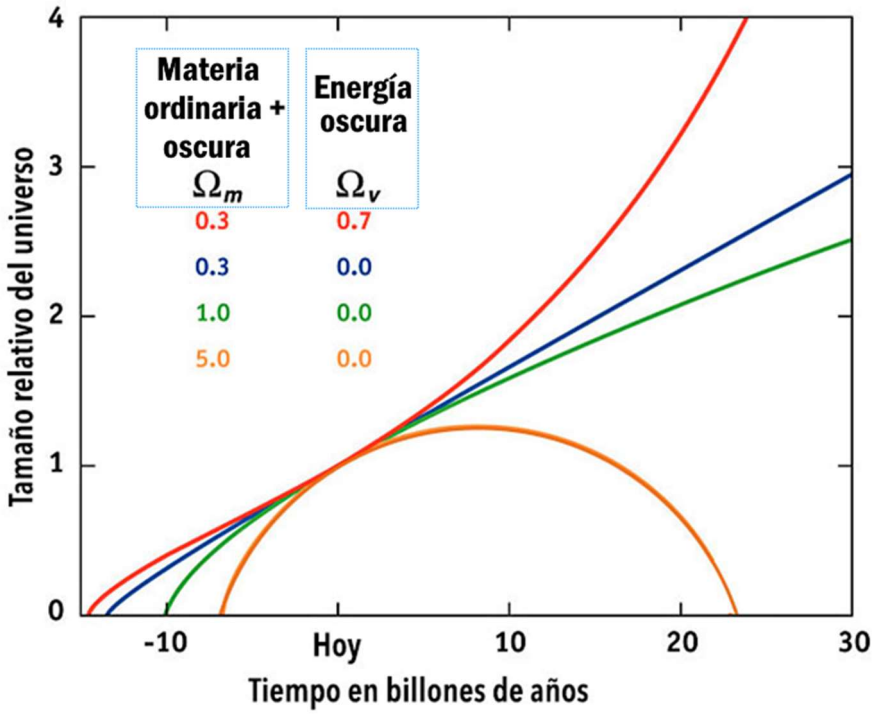
llegamos a las soluciones para la evolución del factor de escala a=a(t):

***1. Radiación (relativista) (w=1/3)**:* con la densidad evolucionando como $\rho \propto a^{-4}$ resulta $\boldsymbol{a(t) \propto t^{1/2}}$, siendo la constante de Hubble H = 1/(2t). Así se comportó el Universo desde el final de la inflación hasta que tuvo unos 10^4 años. En ese mundo de radiación la temperatura evoluciona inversamente proporcional al factor de escala, $\boldsymbol{T \propto t^{-1/2}}$.
(ver el libro "*Introducción a la Astrofísica*", página 139, de Eduardo Battaner).
[https://archive.org/details/introduccion-a-la-astrofisica/mode/2up]
2. Materia no relativista (podemos asemejarlo al polvo) **(*w=0*)**: con la densidad evolucionando como $\rho \propto a^{-3}$ resulta $\boldsymbol{a(t) \propto t^{2/3}}$.
En un universo dominado por radiación relativista (w=1/3), el factor de escala evoluciona como $a(t) \propto t^{1/2}$, mientras que en un universo dominado por materia no relativista (w=0), evoluciona como $a(t) \propto t^{2/3}$. Aunque 2/3>1/2, el universo bajo radiación crece más rápidamente porque la radiación tiene una mayor densidad inicial y ejerce presión ($p=\rho/3$), lo que acelera la expansión en tiempos tempranos. Por otro lado, la materia no relativista (p=0) no genera esa presión adicional, resultando en una expansión más pausada. Así, la clave está en que, aunque el crecimiento del factor de escala es más lento en términos relativos para radiación, el ritmo inicial de expansión inducido por la presión es mucho mayor, lo que explica por qué el universo crece más rápidamente en este caso. acelerando la expansión. La constante de Hubble sigue la evolución temporal H = 2/(3t). Así ha sido el Universo casi toda su existencia. En el mundo de la materia la temperatura evoluciona con el tiempo según $\boldsymbol{T \propto t^{-4/3}}$ (*idem*. página 138).
3. Energía oscura (w=-1): con la densidad permaneciendo constante el resultado es un crecimiento exponencial $\boldsymbol{a(t) \propto e^{Ht}}$, siendo en ese caso H, la constante de Hubble, efectivamente constante.
De hecho, el Universo entrará en una fase de expansión acelerada siempre que $0>3P+\rho$, $\boldsymbol{-1/3>w}$, donde ρ y P corresponden a la densidad de energía total y a la presión del contenido respectivamente.
[https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/JIMENEZ%20MADRID.pdf]

8. En la historia reciente del Universo el valor medido del parámetro w que correlaciona presión y densidad de energía se mueve en el intervalo $-1{,}2 < w < -0{,}9$ a 3σ de grado de confianza.
[https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/JIMENEZ%20MADRID.pdf]

37. Alternativas de futuro

Las bases teóricas explicadas en el capítulo anterior, aplicadas a la evaluación de la evolución del Universo, dibujan varios escenarios posibles tal como propone la figura siguiente. Escenarios que no tienen por qué ajustarse a lo que pase o pueda pasar ya que el Universo no sólo puede dar muchas sorpresas, oportunidades para nuestros conocimientos, sino que estoy absolutamente convencido de que las dará ¿por qué? Ese ha sido el sino histórico en la relación hombre/ciencia y aún queda mucho por desvelar ¡pero si creemos que lo que conocemos es tan sólo algo así como el 5% del Universo!



Casos teóricos de evolución del Universo. Los valores de Ω son las hipótesis que fijan el hoy. La densidad de la radiación se considera despreciable ya que la contribución de los fotones es muy pequeña: $\Omega_\gamma = (4.9 \pm 0.5) \times 10^{-5}$ (Imagen: NASA, WMAP, ⓕfair use)

Vemos en esa figura que todas las casuísticas propuestas coinciden en la abscisa temporal denominada como "Hoy". Es nuestra referencia ya que, suceda lo que suceda, hoy observamos el Universo tal como lo observamos. Anclados desde ese punto temporal fijo analizamos de qué manera pudo transcurrir su infancia o cómo va a discurrir su vejez. En el caso de materia muy abundante, Ω_m=5, densidad muy alejada de la crítica, y sin energía oscura, el pasado dibuja una fuerte ralentización de la expansión dado que los procesos suceden con mucha rapidez. Eso hace que el punto de partida de la curva naranja, el inicio del

Universo, esté situado cronológicamente más cerca de nosotros que en las otras alternativas: la edad actual del Universo sería menor que la que pensamos que tendría en un caso de geometría plana-euclidiana (curvas verde o roja). Cargados de exageración literaria podríamos decir que con cinco veces la masa necesaria aún se percibe el olor de la pólvora del Big Bang.

El primer escenario que podemos analizar se corresponde con un Universo en donde la materia domina por goleada. Ya podemos intuir que nos vamos a encontrar con una tremenda acción gravitatoria que curvará el tejido del Universo hacia un mundo cerrado. Tras el impulso inicial de la inflación, la expansión del Universo sigue su curso, aunque cada vez más ralentizada por el influjo gravitatorio negativo que producía su materia. Como ya dijimos en el capítulo anterior, en ese tipo de mundo el parámetro de Hubble se ralentiza hasta llegar a valer cero, momento tras el cual la expansión seguirá un claro sendero de deceleración hasta que el Universo vuelva a ser un punto compacto, hasta cierto punto parejo a como fue el de su nacimiento. La curva naranja de la figura anterior, en la que se establece la condición de que la densidad de la materia sea cinco veces la crítica, dibuja la historiografía de lo que estamos comentando.

Sigamos jugando con la cantidad de materia en el Universo y sigamos argumentando de forma teórica que no hay energía oscura. Vemos que las curvas verde y azul, Ω_m 1.0 y 0.3 respectivamente, ahora no se frenan y parecen buscar un crecimiento moderado hacia el infinito. En el caso de la curva verde la densidad de la materia es exactamente igual que la densidad crítica (Ω_m = 1.0) por lo que nos encontramos en el caso de un universo plano, aunque ya sabemos que no es nuestro mundo en donde la energía oscura aporta más del doble de densidad que la materia. La curva azul correspondería a un mundo abierto, geometría hiperbólica, en el que la masa es tan poca que no puede vencer con su potencial gravitatorio el empuje expansivo inicial, prolongándose hacia el futuro un crecimiento progresivamente ralentizado del Universo. En la nota 7 del capítulo anterior comentamos que en el caso de un Universo con sólo materia no relativista, la constante de Hubble crece en el tiempo según 2/(3t). Es decir, el ritmo de expansión se va frenando. La expansión se hace cada vez más "lenta", siguiendo una asíntota hiperbólicamente lenta. En este caso, mirando hacia atrás, el comienzo del Universo fue más o menos anterior en consonancia a si hay menos o más materia.

Vayamos ahora a lo que parece ser el mundo que observamos nosotros, en donde hay energía oscura en proporción de 7 a 3 con la materia, tal como configura la curva roja. Entre ambos suman la densidad crítica, por lo que estamos otra vez en un caso de Universo plano. Pero muy distinto al de la curva verde… la energía oscura, con su densidad mantenida constante y continuamente embalsada a lo largo de los eones, llega a ser infinitamente

mayor que la energía de la materia. Tras ese momento la energía oscura, que a efectos prácticos llegará a estar casi solitaria, produce una seria alteración en la dinámica con el resultado de un crecimiento exponencial $a(t) \alpha e^{Ht}$ (*ver nota 7 del capítulo anterior*), siendo en ese caso H, la constante de Hubble, efectivamente constante.[1]

Hasta aquí hemos contemplado distintas posibilidades de evolución del Universo apoyándonos en los conceptos cosmológicos más básicos. Ahora continuaremos con ese tema particularizando en algunas de las teorías más conocidas y curiosas. Comenzando por lo más sencillo, el caso de la curva naranja de la figura anterior, donde veíamos como con el tiempo el Universo colapsa sobre sí mismo volviendo progresivamente a concentrar la materia/energía hasta un punto de máxima densidad y temperatura.

Se trata de lo que se conoce como el **Gran Colapso**, el *Big Crunch*. Podríamos imaginar que el punto de llegada va a ser semejante al de partida, el de la "explosión" del Big Bang, tras haber realizado un rebobinado de la película del Universo. Aunque exactamente no sería una vuelta especular del viaje de ida, entre otras cosas porque en el punto final se va a concentrar no sólo la radiación inicial, la del fondo de microondas, sino también toda la radiación residual generada a lo largo de la vida de nuestro personaje. Una radiación que surgió durante la "ida" a partir de materia que se transmutó, de lo que hablaremos más adelante en este libro. Por lo que, al ser la acción gravitatoria de la radiación mayor que la que ejerce la materia, la recesión del Universo va a ser más rápida que la contrapartida durante su expansión. Además, dependiendo del momento en que se inicie la contracción en el universo nos vamos a encontrar con más o menos estrellas, o ninguna, al margen de que el número de agujeros negros siempre va a ir en aumento, incluso durante en el proceso contractivo. Dos mundos sometidos a las mismas reglas pero con evoluciones muy distintas. Dos mundos, uno de ida y otro de vuelta, que pueden extenderse a lo largo de muchos muchos eones, tantos como 10^{11} años.[2] Llevamos ya 10^{10} años de Universo por lo que no nos debería preocupar demasiado el rebote. Aunque hay gente que opina que el cambio de sentido de la expansión, de acelerada a decelerada, puede estar muy próximo y ser muy rápido, ya que se producirá dentro de tan solo 100 millones de años para pasar después a una fase de contracción más lenta que puede durar hasta 10^9 millones de años. [3]

Pero supongamos que en el momento de la inflexión aún hubiera estrellas. Al iniciarse la marcha atrás contractiva hacia el futuro colapso definitivo, las estructuras del Universo no se van a enterar de nada, las estrellas seguirán naciendo y luciendo, mientras las galaxias seguirán sus bailes y fusiones mutuas. Incluso el Universo observable será el mismo, al menos durante el tiempo que tarde la luz que venga desde el momento de la inflexión. Pero el camino se habrá torcido ya sin remedio. A partir de un determinado momento

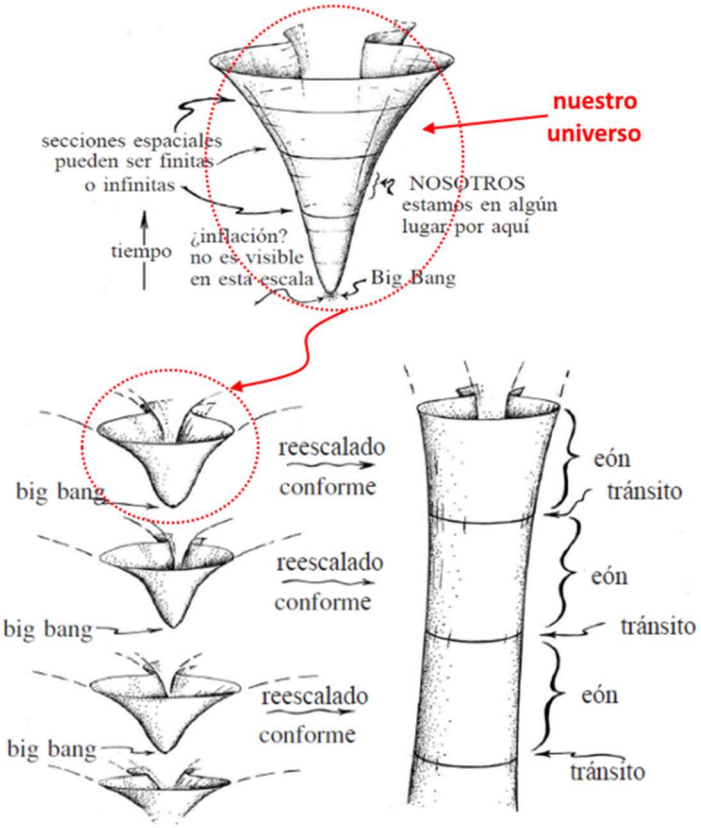
la marcha atrás solo será reconocible porque ya no habrá un corrimiento al rojo en la radiación observada: a partir de un largo periodo de cambio todo convergerá hacia el azul. La temperatura de fondo irá aumentando mientras todo se aproxima. En la actualidad las galaxias ocupan más o menos el 1% del volumen del Universo, pero cuando en el colapso el volumen total llegue a ser una quinta parte del actual, todo será un único y omnipresente supercúmulo de galaxias, aunque éstas seguirán distantes de forma que mantendrán aun su dinámica independencia gravitacional. Irremisiblemente la contracción continuará, mientras la temperatura se irá haciendo más y más infernal, una ardiente radiación térmica que impregnará el universo amenazando la existencia de los cúmulos, las galaxias, las estrellas, los planetas e incluso las moléculas y los átomos, que se irán destruyendo a medida que avance la contracción. Y volverá el mundo de los bariones, el del plasma quark-gluon, el de la unión de las fuerzas fundamentales, gravedad incluida, cuando solamente quede de vida un tiempo de Planck. **CRUNCH**.[4]

Hay otras teorías que se apoyan en la idea de un universo de ida y vuelta, pero en ese caso a través de repeticiones cíclicas de *crunchs*: a la muerte de un universo le sucedería el nacimiento del siguiente. Se trataría del caso del **Gran Rebote**, *Big Bounce*, basado en la teoría cuántica. Según ésta el espacio no es suave y continuo, sino que consta de cuantos indivisibles de 10^{-35} metros de diámetro, la longitud de Planck, que constituirían una especie de "átomos" del tejido del Universo. Estos "átomos" del espacio/tiempo forman una malla densa en continuo cambio -principio de incertidumbre- y que en condiciones normales nunca vamos a poder apreciar. Lo que el físico Carlo Rovelli en su libro "*El orden del tiempo*" describe como el incesante ondular del campo gravitatorio.[5] Pero un espacio cuántico tiene una capacidad finita de almacenar energía, al igual que una galleta tiene una capacidad finita de absorber leche, por lo que a medida que aumenta y aumenta la densidad en la fase final de la contracción, el comportamiento de la física dentro de la espuma espacio/temporal cuántica cambia modificando la naturaleza de la gravedad, que adquiere un modo repulsivo que expande de nuevo el espacio a ritmo acelerado. En esta teoría el fenómeno descrito es el equivalente al del Big Bang de la teoría clásica. Todo sucedería en el brevísimo punto de inflexión, tan breve como lo es el tiempo de Planck de 10^{-43} segundos, cuando el universo temprano tuviera una densidad finita equivalente a un billón de soles concentrados en el tamaño de un protón. A medida que la densidad de nuevo se fuera relajando con la expansión, la gravedad pasaría progresivamente a ser la fuerza de atracción habitual para nosotros.

Y aunque sea una teoría antigua, del año 1934, no me resisto a comentar lo que puede resultar un matiz aún más curioso de los rebotes "eternos".[6] Un poco más arriba dijimos que durante la fase de recesión la población de la radiación tuvo que ser más abundante, y la de la materia menor, que en el equivalente

"momento simétrico" del viaje de ida. Y que eso hacía que la caída hacia el Crunch, por simples motivos gravitatorios, fuera más rápida que el despegue desde el Bang. Si se diera el rebote habría que pensar que el universo que nace del nuevo Bang se expandiría a una mayor velocidad, por el mero hecho de tener una mayor energía fundacional que el Bang anterior. La consecuencia es que el universo se expandiría hasta un tamaño mayor en cada ciclo. Si eso fuera así llegará un momento en el que el correspondiente último eslabón de la cadena de universos tendría una vida tan larga que su evolución no se diferenciará mucho de la que se puede describir durante la muerte térmica (de la que hablaremos con mucho detalle en capítulos posteriores).

Apoyado en la idea de renacimiento cósmico, el cosmólogo Roger Penrose, ganador del Nobel de Física de 2020, ideó un nuevo escenario que consistía en la concatenación, diríamos que eterna, de una serie de ese tipo de renacimientos, un rosario de bigbangs siguiendo un ciclo de episodios que no tienen por qué ser iguales. Todo ello conforma el modelo de ***Cosmología Cíclica Conforme*** por el que el universo se repite a través de iteraciones infinitas, en las cuales el profundo final térmico de cada una de ellas se identifica con la singularidad del bigbang de la siguiente. Así, nuestro Big Bang habría sido el fruto del desvanecimiento por muerte térmica de un universo anterior.



Cadena de Universos según el modelo de Cosmología Cíclica Conforme (Imagen [9], ⓔfair use)

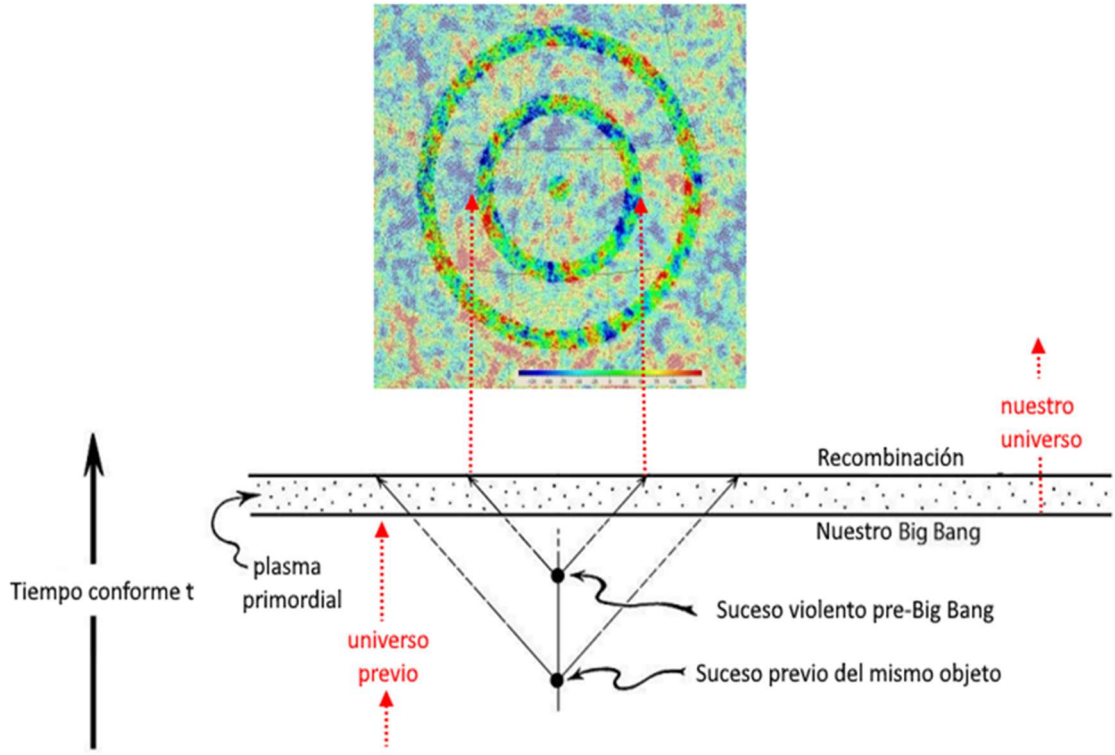
Penrose observó que, en la muerte térmica de un universo, prácticamente las únicas partículas restantes serían fotones y gravitones. Estas partículas no tienen masa en reposo y se mueven a la velocidad de la luz, lo que implica que no experimentan tiempo ni espacio en el sentido habitual, lo que elimina la relevancia de la escala. En este estado, el tamaño absoluto del universo (grande o pequeño) no importa porque los conceptos habituales de espacio y tiempo dejan de ser relevantes. Y en el inicio del siguiente universo, durante el Big Bang, va a ocurrir algo similar: las partículas presentes viajarán a velocidades relativistas extremas, haciendo también irrelevante el tamaño absoluto. Por tanto, el modelo sugiere que las leyes físicas que gobiernan estos extremos deben ser independientes del tamaño del universo, es decir, invariantes bajo transformaciones conformes. En física, decir que una ley es "invariante bajo transformaciones conformes" significa que sigue siendo válida sin importar el tamaño absoluto del sistema.[7]

Gracias a la invariancia conforme, Penrose plantea que el estado "inmenso y expandido" de un universo puede conectarse sin discontinuidad con el estado "puntual y compacto" del siguiente. El tamaño del universo deja de ser un obstáculo porque, en esos momentos extremos, las leyes físicas no dependen del tamaño absoluto.

La geometría conforme emerge como la estructura espaciotemporal clave en los momentos de transición entre eones cósmicos. Su invariancia permite que el estado final de un universo, cuando se disipa en una muerte térmica, se enlace de manera suave con el estado inicial del siguiente. Al final de un eón, una transformación de "aplastamiento conforme" ajusta las escalas infinitas de temperatura y densidad, llevando sus valores nulos (propios de la extinción térmica) a valores finitos.[8] De forma análoga, al inicio de un nuevo eón, un "estiramiento conforme" suaviza las condiciones iniciales, enfriando la temperatura extrema del nacimiento y haciendo finita la densidad. Durante este salto conforme, el universo no tiene masa efectiva: las nociones habituales de tiempo y espacio pierden sentido, ya que el proceso es una simple reescalada conforme. Sin embargo, la actividad física subyacente se conserva inalterada. Así, el remoto futuro de un eón se conecta de forma continua y natural con el remoto pasado del siguiente, asegurando una continuidad cíclica gracias a la invariancia conforme.

Roger Penrose remata: "*...el universo muy primitivo y el futuro muy remoto parecen ser incómodamente similares uno a otro. Por supuesto, no son realmente similares en el sentido de ser casi idénticos, pero son "alarmantemente" similares de acuerdo con el uso que se hace normalmente de esa palabra en geometría euclidiana, a saber, que la diferencia entre los dos parece ser básicamente tan sólo un enorme cambio de escala."* [9]

Y a pesar de los interrogantes que presenta el modelo para muchos teóricos[11], el caso es que Roger Penrose y el físico matemático Vahe Gurzadyan creen tener argumentos que soportan el modelo cíclico conforme. Parten de la idea de que, en el ciclo anterior al nuestro, los eventos de choques y fusiones de agujeros negros pudieron producir enormes liberaciones de energía en forma de ráfagas de radiación gravitacional. Estas ondas esféricas atravesarían el punto de rebote entre universos no como ondas gravitatorias sino como ráfagas esféricas de energía, en su mayoría isotrópicas, que afectarían al plasma inicial en nuestro Universo recién estrenado, por donde se irían transmitiendo hasta el momento de la recombinación, 380.000 años tras el Big Bang.

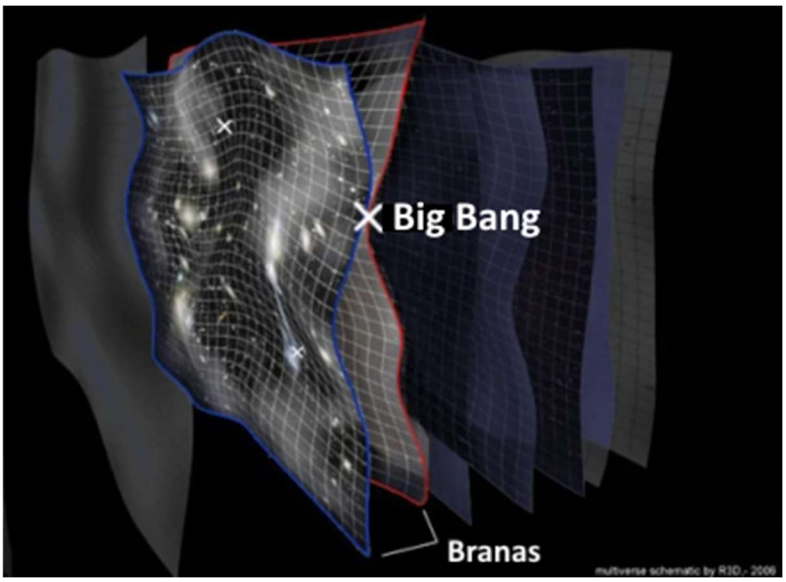


Abajo: según el modelo cíclico conforme, diagrama del efecto de un proceso pre-Big Bang, fuente de eventos violentos (pudiera ser un supermasivo encuentro de agujeros negros). Arriba: Una región del mapa del fondo de microondas obtenida en el proyecto WMAP en donde se ha resaltado la ubicación de círculos que pudieran ser el reflejo de dichos eventos. (Imagen [10], ⓕ fair use)

Por lógica, esos impulsos quedarían reflejados en la distribución de temperaturas del fondo de microondas como unos anillos concéntricos de temperatura ligeramente diferente al promedio. Y efectivamente, el estudio de los datos del WMAP parecen indicar la existencia de esos círculos con una temperatura al menos 15μK inferior al promedio.[12]

Así, quizás como sugiere Penrose ¿estaremos cabalgando a lomos de un toro mecánico cósmico?

Pero pasemos a otras teorías. Dentro de este entorno de ideas con aroma a universos reiterativos nos encontramos también con los ***modelos ecpiróticos***[13] de Neil Turok y Paul Steinhardt, aunque en este caso el inicio del ciclo está motivado por el choque de dos branas que se encuentran en un proceso reiterativo de aproximaciones y alejamientos cósmicos. Para entender eso de una brana podemos imaginar una entidad física de varias dimensiones inmerso en algo más vasto con más dimensiones.



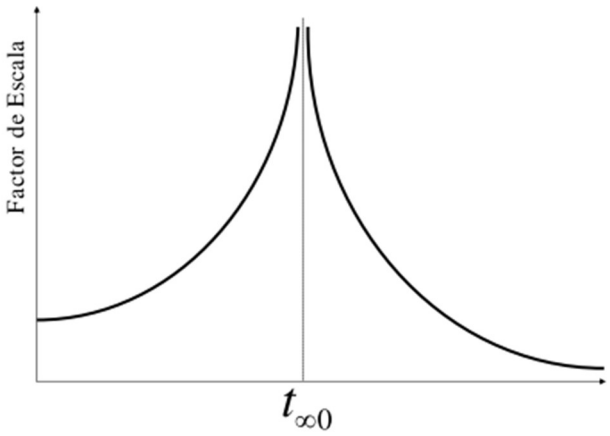
El modelo ekpirótico del universo, que sugiere que nuestro propio universo es el resultado de la colisión de branas entre sí. (Imagen de la red, ⓕ fair use)

Nuestro universo, por ejemplo, sería una brana de cuatro dimensiones inmersa en un sustrato con una o más dimensiones adicionales, quizás infinitamente pequeñas, que desde nuestro mundo nunca vamos a ser capaces de apreciar (un sujeto *planario* nunca imaginará una tercera dimensión que nosotros sujetos 3D sabemos que existe) y en donde conviven otras branas de cuatro dimensiones (o quizás cinco, o más) con las que eventualmente puede chocar una y otra vez nuestro mundo. En el choque se genera la energía que hará florecer un nuevo universo post bigbang coherente con el reconocido modelo estándar Lambda-CDM[14] que explica el nuestro, para continuar a través de una senda expansiva que le llevará tras muchos eones hasta una extensión plana y casi sin rasgos distintivos. Un larguísimo periodo que se truncará al producirse un nuevo choque entre branas.

Volvamos ahora un paso teórico atrás y retomemos las curvas de la primera figura del capítulo, aquellas que auguran un mundo plano o infinitamente abierto. O lo que es lo mismo: expansión eterna, dilución de materia y energía, descomposición de estructuras y átomos, oscuridad, evaporación de los agujeros negros, radiación cada vez más "alargada", mucho más frío que los 2,725 K actuales, entropía al máximo… lo que conocemos como ***muerte térmica***. Tardará más o menos pero en este caso el Universo acabará siendo un

mundo lleno de radiación extremadamente fría. Como dice la astrofísica Katie Mack en su libro "*El fin de todo*", página 104, "*Si la entropía no puede aumentar* [a niveles infinitesimales de temperatura su variación resultará inapreciable], *entonces la energía no puede fluir de un lugar a otro sin hacerlo de inmediato en el sentido inverso, borrando al instante cualquier cosa que, por azar, haya ocurrido… El calor es inútil, el calor es muerte… en un sentido muy real la flecha del tiempo se desvanece*". Hablaremos con más detalle de la muerte térmica más adelante pues aún nos quedan grandes horrores por narrar.

Porque si la muerte térmica tiene un final triste no digamos el del Gran Desgarro. En ese caso la constante ***w*** que fija el tipo de ecuación de estado del Universo, la correlación entre su presión y la densidad de energía es menor que el valor -1 propio de la energía oscura como constante cosmológica. Evidentemente es una idea teórica pero que debemos tener en cuenta dadas las incertidumbres de nuestro conocimiento. Las mediciones que se han hecho sobre el valor de ***w*** en el universo actual no fijan un valor concreto sino un margen muy amplio, más o menos entre -1,2 y -0,9, en el que todo puede pasar. Para valores entre -0.9 y -1,0 se puede producir una continua expansión exponencial que se va a ir relajando en el tiempo hasta lo que hemos llamado muerte térmica. Aunque para valores menores que -1 pueden pasar cosas raras.



Evolución del tamaño del Universo a lo largo del proceso del Gran Desgarro. El punto $t_{\infty 0}$ señala el momento en el que ocurre el Gran Desgarro. (Imagen[15], ⓤfair use)

En ese caso el destino final del Universo bien pudiera ser el acabar en una singularidad futura denominada ***Gran Desgarro*** (*Big Rip*), cuando el factor de escala en un momento finito del tiempo diverge a infinito como dibuja la imagen anterior: el Universo crece desde un tamaño inicial a un tamaño infinito en un tiempo cósmico finito. Y eso sucede tanto más rápido cuanto más se aleje ***w*** del valor -1. La excursión durante la que el factor de escala a(t) se va a hacer infinito va acompañada de serias implicaciones para el Universo y sus

estructuras y componentes. La gigantesca expansión lo va separando todo, inicialmente haciendo cada vez más insignificantes los efectos gravitatorios, para después ridiculizar el esfuerzo de las otras fuerzas fundamentales. Hasta destrozar al propio espacio/tiempo.

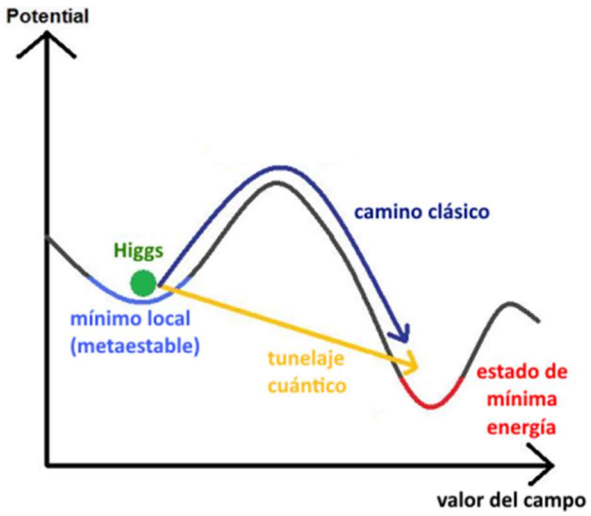
Si pudiera haber un observador que se encontrara mirando al Universo a vista de pájaro, vería cómo se irían "desgarrando" progresivamente las galaxias, estrellas, los sistemas solares y finalmente los átomos y núcleos atómicos. Cualquier objeto del Universo sería llevado fuera del horizonte de sucesos de cualquier otro componente. Pero la evolución del Universo no es solo sorprendente en el mismo Gran Desgarro, sino que incluso es más sorprendente temporalmente más allá de la singularidad del Gran Desgarro… en el caso de que por algún mecanismo exótico el espacio tiempo lograra recuperarse: entonces el Universo se contraería desde un tamaño infinito en la singularidad hasta desaparecer en un tiempo infinito.[15]

Y como una narración nos ayuda a entender mejor lo que propone una fría teoría, esta sería una aproximación cronológica teórica de los sucesos (caso de w -3/2):[16] los cúmulos de galaxias habían empezado a difuminarse aproximadamente desde el año 10^9 antes del final de los tiempos mientras que un "poco" más tarde, aproximadamente 60 millones de años antes del Gran Desgarro, la Vía Láctea se verá destruida. Unos meses antes de la singularidad final la Tierra será "arrancada" del Sol y aproximadamente 30 minutos antes del final se desintegrará el planeta. Llegará el momento en que las otras tres fuerzas fundamentales también serán ridiculizadas por la energía fantasma, de forma que las moléculas y átomos se verán destruidas aproximadamente en el tiempo 10^{-19} segundos antes del final. Los núcleos y los nucleones se disociarán en el intervalo restante. Aun quedará tiempo para que después de esta secuencia de eventos anteriores a la singularidad, con toda probabilidad se pueda activar algún tipo de física nueva.[17] El tiempo cero del desgarro llegará a los $35x10^9$ años a partir de hoy. Aunque, como todo depende del valor considerado de la constante w en la ecuación de estado ¡quizás tengamos suerte y suceda más tarde!

Esto es una amenaza posible, aunque para los humanos de hoy ciertamente no deja de ser más que una curiosidad. Y aún hay más curiosidades teóricas con cierta probabilidad de realidad. Hablamos de la destrucción total, instantánea e indolora. Hablamos de un ***cambio de vacío de Higgs*** (*Big Slurp*, el Gran Sorbo). Recordemos de los primeros capítulos cómo el campo inflatón había descendido desde su posición metaestable en la cumbre de un falso vacío, "rodando" hasta un vacío de menor energía que conceptuamos como verdadero. También recordaremos cómo el campo de Higgs había hecho lo mismo en busca de un mínimo energético cuando el Universo era un infante de 10^{-12} segundos de vida. Pues bien, la mala noticia es que nadie puede asegurar que

el verdadero vacío al que llegó el campo de Higgs sea realmente eso, un verdadero vacío absoluto ¿por qué no puede haber un vacío MÁS verdadero a un nivel energético menor en el que caer? La buena noticia es que los mejores cálculos nos dicen que si lo hubiera, lo más probable es que eso puede pasar dentro de 10^{100} años. Pero en estadística se trabaja con estados medios, con lo cual ¿por qué no puede pasar eso dentro de diez segundos?

Me diréis ¿y qué importancia tiene eso? Recordad como el campo de Higgs cuando rodó a su posición de mínima energía en el verdadero vacío generó la masa de todas las partículas elementales, incluida la de algún bosón. Nuestro mundo es como es porque, entre otras cosas, la masa del electrón es de unos 0,5 MeV y la del protón y neutrón del orden de un GeV. El mundo que conocemos, con nosotros vivos dentro de él, se ha construido apuntalado en esas masas. Si fueran otras el mundo sería muy distinto, incluso sería inimaginable o diametralmente opuesto al que conocemos. Ahí reside el problema de si cabe la posibilidad de un nuevo deslizamiento hacia una posición de menor energía, hacia un verdadero vacío más *ligth*. En ese caso… *kaput* para todos nosotros y todo lo conocido.



(Imagen: modificado de Wikipedia, dominio público)

¿Cómo puede suceder eso? Veamos la imagen anterior. Higgs acunado en el vacío intermedio y sopesando el paso a un verdadero mínimo vacío. Debería saltar por encima de la colina que separa ambos vacíos para lo cual se necesitaría el generar un empujón energético muy elevado, más energético que las explosiones más desbastadoras que vemos en el Cosmos. Lo cual hace a esa vía muy improbable. Pero bien podría aprovechar la oportunidad de atravesarlo a través de un túnel cuántico.[18] Real posibilidad, aunque suficientemente baja como para que no nos preocupemos demasiado. La desintegración del vacío es muy improbable al menos durante muchos muchos billones de años. Pero, repito, ***puede suceder***.

Que no cunda el pánico. Hay una escapatoria. Solo una parte del universo sería destruida en el cambio de vacío de Higgs, mientras que la mayor parte del universo no se vería afectada porque las galaxias ubicadas a más de 4.200 megapársecs -13,7x10^9 años luz- de distancia entre sí se están alejando unas de otras a más velocidad que la de la luz, mientras que el *Big Slurp* no puede expandirse más rápido que esa velocidad.

Pero ¿y si no disponemos de esos escudos protectores? Ya dijimos que la estadística es caprichosa y la suerte de una cara exige la suerte de una cruz. Baste con que ocurra en un punto del Universo, que además puede estar cosmológicamente cerca, para que el fuego se extienda a la velocidad de la luz. Y esto puede estar pasando ahora mismo… el frente de destrucción está llegando al sol y dentro de ocho minutos dejaremos de existir.

Todo comenzaría con una burbuja en un punto del Universo. Allí donde se inicie el evento se va a producir una burbuja de vacío verdadero que va a contener un tipo de espacio completamente distinto con unas leyes también distintas. Al principio es una nimia burbuja rodeada por una pared de altísima energía. Entonces empieza a expandirse ya que su situación de mínima energía es la preferida por el resto del Universo. Todo lo altera a su alrededor provocando una avalancha que hace que cada vez sea mayor el espacio que sucumbe al estado de mínima energía. Allí a donde alcance todo va a cambiar, su energética frontera irá barriendo a la velocidad de la luz y en donde llegue se experimentará un proceso que solo puede calificarse de total y completa disociación, momento en el que dejan de funcionar las fuerzas que antes mantenían unidas las partículas en los átomos y los núcleos.[19] Se cree que la energía y la presión del auténtico vacío crearía un campo gravitatorio tan intenso que la región abarcada por la burbuja se podría contraer, incluso conforme se expandiera la burbuja, en un tiempo menor al microsegundo: una brusca aniquilación de todo según implosiona la burbuja interior en su singularidad espacio/temporal. [20] **FIN**: Un nuevo Universo aparece mientras el nuestro se esfuma en la nada. Gracias a los cielos, y al contrario de lo que suceda en un Gran Colapso o en un Gran Desgarro o durante la "simple" muerte térmica, no lo vamos a notar ni nos va a doler.

NOTAS DEL CAPÍTULO 37:

1. En este interesante artículo se da el resultado del estudio de las posibles historias de expansión del Universo a la luz de los datos que acompañan a las supernovas de tipo Ia. En su figura 4 podemos ver unas curvas de las posibles historias que son más ajustadas que lo dibujado por la figura que abre este capítulo.
   [https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.1580050]
2. "*Time without end. Physics and Biology in an open Universe*", páginas 3 y 12, 1979, Freeman J. Dyson.
3. "*Rapidly descending dark energy and the end of cosmic expansion*", Cosmin Andrei et al., PNAS abril 2022.
   [https://arxiv.org/pdf/2201.07704.pdf]
4. Este párrafo es un brevísimo resumen de las ideas expuestas en el libro "*The five ages of the Universe*", de Fred Adams y Greg Laughlin, paginas 190-195.
5. "*El espacio/tiempo es el campo gravitatorio (y viceversa). Es algo que existe por sí mismo, como intuía Newton, incluso sin materia; pero no es una identidad distinta del resto de las cosas del mundo -como creía aquel-, sino un campo* [cuántico] *como los demás… Y, como los demás, no es ni absoluto, ni uniforme, ni fijo, sino que se dobla, se estira, se expande y se contrae como los demás… puede ondular… puede concentrase y enrarecerse.*" Carlo Rovelli en su libro "*El orden del tiempo*".
6. "*Relativity, thermodynamics, and cosmology*", página 442, Richard C. Tolman, 1934.
   [https://archive.org/details/dli.ernet.288495/page/441/mode/2up]
   "*Los últimos tres minutos*", capítulo 11, Paul Davies.
   [http://www.librosmaravillosos.com/los_ultimos_tres_minutos/pdf/Los_ultimos_tres_minutos-Paul_Davies.pdf]
7. En matemática, la geometría conforme aplica transformaciones que son cambios matemáticos que alteran la escala de un sistema (es decir, lo "agrandan" o lo "encogen") sin modificar sus ángulos ni la forma relativa de los objetos, aunque no necesariamente las distancias. Por lo que, al ser insensible a los cambios de escala locales, es la que precisamente aplica en esas circunstancias.
8. Hablaremos de la finitud de temperatura y densidad en el capítulo 36.
9. *"Ciclos del tiempo: Una extraordinaria nueva visión del universo",* página 178 (la imagen incluida en el texto, figura 3), Roger Penrose, editorial Debolsillo. 2011.
10. Imagen a partir de "*Concentric circles in WMAP data may provide evidence of violent pre-Big-Bang activity*", figuras 1 y 3, V. G. Gurzadyan y R. Penrose, 2010 (ver nota 12).

11. Podéis leer el siguiente artículo que argumenta tales dudas: "*La cosmología cíclica conforme de Penrose y los puntos de Hawking en el fondo cósmico de microondas*", Francisco R. Villatoro, 2018. [https://francis.naukas.com/2018/08/29/la-cosmologia-ciclica-conforme-de-penrose-y-los-puntos-de-hawking-en-el-fondo-cosmico-de-microondas/]

12. Hay que decir que en la actualidad hay una cierta discusión acerca de la significación estadística de las observaciones aludidas del fondo de microondas. Para más información: "*Concentric circles in WMAP data may provide evidence of violent pre-Big-Bang activity*", V. G. Gurzadyan y R. Penrose, 2010. [https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1011/1011.3706.pdf]

13. De la Wikipedia: "El nombre proviene del término estoico *ekpyrosis* (en griego antiguo: *ἐκπύρωσις*) que significa conflagración o, en el uso estoico, "conversión en fuego" con el significado de "disolución del universo en el fuego". En la filosofía estoica, la *ekpyrosis*, el fuego cósmico que todo lo envuelve representa la fase contractiva de un ciclo eterno de destrucción y resurgimiento.

14. En cosmología, el modelo Lambda-CDM es el modelo conocido más simple que está de acuerdo con todas las observaciones. de nuestro universo. Basado en la existencia de una constante cosmológica, Lambda, y de una materia oscura fría, CDM (*cold dark mater*).

15. "*El Problema de la Energía Oscura en la Nueva Cosmología Estándar*", José Antonio Jiménez. (2006). La imagen presentada en el texto es la figura 2.1 de la publicación. [https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/JIMENEZ%20MADRID.pdf]

16. "*Phantom Energy and Cosmic Doomsday*", Robert R. Caldwell, Marc Kamionkowski y Nevin N. Weinberg, 2003. [https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0302506.pdf]

17. Por ejemplo, la producción espontánea de partículas o los efectos extra dimensionales inherentes a la teoría de cuerdas o a la de la gravedad cuántica.

18. La cuántica nos dice que a la vez hay una cierta probabilidad, quizás mínima, de que el campo se encuentre en el vacío verdadero y otra probabilidad de que se encuentre en el falso. Por lo que el "salto" de la barrera sería posible.

19. Del libro "*El fin de todo*", Katie Mack, página 150, (2021), colección Crítica, editorial Planeta.

20. Ver la publicación "*Gravitational effects on and of vacuum decay*", 1980 Sidney Co1eman y Frank De Luccia. [https://static.ias.edu/pitp/archive/2011files/PhysRevD.21.3305.pdf]

38. En el camino hacia la muerte térmica

El capítulo anterior lo acabé conceptuando a la muerte térmica como "simple" porque no se va a producir ninguna extraña singularidad en el proceso. Va a ser un alargado languidecimiento apto para todas las edades, sobre todo si son tan escuetas como la humana. Casi no da miedo el aventurarse por un futuro en donde, al final, se va a ir perdiendo todo, hasta el sentido físico de la flecha del tiempo.

Comencemos por hoy. Si el Universo no nos hace una jugarreta y su física a largo plazo va por derroteros distintos a los que prevemos con nuestro actual nivel de conocimiento, que todo es posible, vivimos en un Universo que responde a una geometría plana, con una cantidad de materia y de energía oscura que se reparten la densidad crítica de energía en una relación 30/70 %. Parece ser que también, por lo que sabemos hoy, lo más probable es que la energía oscura sea una constante cosmológica. Eso nos lleva a un Universo en constante expansión exponencial hacia un mundo que, ya avanzamos, va a ser frío y vacío.

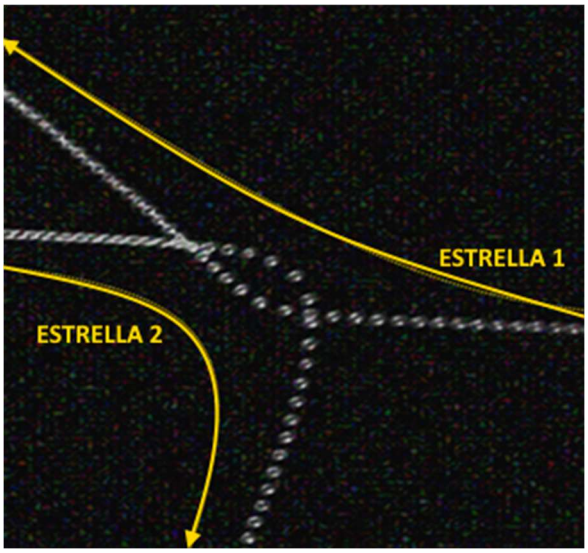
Acto I. Los cúmulos se fusionan, las estrellas se alejan, los sistemas planetarios se descomponen. Comienza la evaporación en las grandes escalas.

Al principio aún habrá zonas en las que la gravedad seguirá dominando a la expansión y el mundo no será muy distinto. Las galaxias seguirán rotando, y eventualmente “colisionando”, en cúmulos cada vez más tenues; las estrellas seguirán en sus galaxias quemando su combustible o siguiendo una senda de enfriamiento cuando hayan llegado a su fin; los planetas girarán atados a la gravedad de sus estrellas con una dinámica fijada por sus masas; los agujeros negros seguirán absorbiendo material próximo y evaporándose a través de la radiación de Hawkings. Pero el Universo seguirá expandiéndose, diluyendo sus estructuras y componentes, que cada vez van a estar más aislados y con mayores dificultades para interactuar. Lo cual no quiere decir que no quede por delante aun una larga historia muy interesante.

La biografía particular de nuestro planeta le llevará a ver como el Sol pasa a ser una gigante roja que posiblemente arrase a Mercurio y Venus para luego irse reduciendo hasta devenir una enana blanca. A la par que eso sucede -dentro de unos cinco mil millones de años-, la Vía Láctea estará en fase de “colisión” y fusión con la galaxia Andrómeda. En el proceso, quizás por mareas gravitacionales, el Sol o la Tierra pueden ser lanzados al medio intergaláctico en un último viaje, ahora como solitarios ermitaños. De todas formas, la tozuda

expansión aún no habrá vencido a la potencia de la gravedad en las "cortas" distancias. Le quedan muchos años, tantos que habrá tiempo para que el Grupo Local, en donde se encuentran la Vía Láctea y Andrómeda, también se fusione cosa que sucederá en el año 10^{12} tras el Big Bang. Desde un poco antes, año 10^{11}, el resto del Cosmos se ha ido difuminando fuera de nuestro campo de visión, nuestra familia estará sola en un Universo gélido donde la radiación de fondo habrá estirado su longitud de onda hasta 10^{12} veces la profundidad de ese horizonte.

Pero el Cosmos sigue y sigue su senda expansiva exponencial. Y al igual que el Grupo Local se fusionará, lo mismo va a pasar en conjuntos de masa mayores como otros cúmulos y supercúmulos, que acabarán siendo unas oscuras galaxias globulosas y esferoidales en donde seguirá pasando cosas. En los procesos de fusión galáctica es muy raro que se produzcan choques entre estrellas y aún más raro que estas pierdan sus planetas: las galaxias son cuerpos muy tenues con grandes separaciones entre sus componentes. La estrella vecina más próxima al Sol es Alfa Centauri A que se encuentra a 4,22 años luz. Si el Sol fuera una esfera de un milímetro de diámetro, Alfa Centauri A estaría alejada de nosotros unos 30 metros.



Interacción gravitatoria entre estrellas durante el cruce de sus galaxias (Imagen modificada de "The five ages of the Universe", página 86, Fred Adams y Greg Lauhglin, publicado por Simon & Schuster, ⓕ fair use)

A pesar de todo, en esa profundidad del futuro, seguirá existiendo un potencial gravitatorio entre los remanentes de las galaxias -estrellas muertas, gases y polvo-. Mientras se cruzan dos de ellas puede haber pares de estrellas que interaccionen mutuamente en sus trayectorias, como en un baile donde los danzantes se cogen por los brazos (*ver imagen anterior*). Las estrellas más

pequeñas suelen acelerarse en esos "contactos" mientras las más grandes se frenan.[1] El incremento de velocidad de la pequeña puede ser tan grande que sea suficiente como para escapar de la galaxia a velocidades próximas a los 300 km/seg. A través de ese proceso conocido como de *relajación dinámica*, las galaxias se van "evaporando" quedándose poco a poco solamente con las estrellas menos dinámicas, empequeñeciendo de tamaño mientras su agujero negro central va aniquilando lo que queda de ella.[2]

Otro mecanismo de disgregación es el conocido como "*honda gravitatoria*" por el que se van a expulsar estrellas de los cúmulos estelares o incluso de la propia galaxia. El mecanismo se basa en la inestabilidad dinámica de un conjunto de tres cuerpos ligados gravitatoriamente. Cosa que puede suceder cuando una estrella o un planeta errante se encuentra por ejemplo con algún sistema binario estelar. Antes del encuentro sus movimientos eran regulares y periódicos, pero después del encuentro van a dejar de serlo. La pauta de interacción mutua va a cambiar continuamente de manera muy complicada. El resultado es que la energía del sistema no la van a compartir por igual todos los participantes, incluso siendo cuerpos idénticos, generándose una dinámica aleatoria y caótica. Puede llegar el caso que con el tiempo dos de los tres cuerpos transmitan tanta energía al tercero que este salga expulsado del sistema.[3]

Mientras eso sucede, a menor escala también se van descomponiendo los sistemas planetarios de las estrellas que se han fugado, comenzando con los planetas más alejados de la estrella y acabando con los interiores. Los que no escapen caerán irremisiblemente sobre sus estrellas así como vayan perdiendo energía gravitacional en sus postreras rotaciones. Las estrellas habrán perdido sus planetas mucho antes de que las galaxias desaparezcan totalmente.

En este mundo en fuga y dispersión cada vez habrá menos densidad de material, gas y polvo, y menos potencial gravitatorio para formar nuevas estrellas. En aproximadamente 10^{14} años tras el Big Bang todos los procesos normales de formación estelar habrán cesado. Mientras, las estrellas que aún existan irán progresivamente agotando el hidrógeno y helio de sus calderas nucleares, incluso en las longevas enanas rojas. Estas últimas, a medida que van quemando su combustible, verán como su núcleo se va compactando ya que el helio es más denso que el hidrógeno. Para contener la presión la fusión se incrementa, la temperatura se incrementa, el brillo exterior se incrementa. Llegará el día en que lo que reste de las galaxias se verá iluminado solo por las abundantes enanas rojas moribundas. Eventualmente alguna estrella grande habrá colapsado sobre sí misma en un fuego de artificio de supernova, aportando nueva materia, casi inútil, al sutil medio interestelar. Las enanas blancas que queden tras las explosiones se enfriarán hasta convertirse en enanas

marrones, con una temperatura máxima de 5K, en unos 10^{17} años tras el Big Bang. Llegará el momento en que solo quedará el calor residual de los cadáveres, en su gran mayoría enanas marrones y enanas blancas (negras), y en mucha menor cuantía residual estrellas de neutrones y agujeros negros.

Distribución estelar en el momento en que cese la formación corriente de estrellas (según la senda actual)

% [4]	*Enanas marrones*	*Enanas blancas*	*Estrellas de neutrones*
Número	0,45	0,55	0,0026
Masa	0,097	0,88	0,024

En lo que quede de las galaxias, que según el físico teórico Freeman J. Dyson oscilará entre el 10% y el 1% de la masa inicial,[5] ya no habrá apenas material ni energía para crear estrellas y todas las viejas han muerto o huido. Mientras, su particular agujero negro central va dando cuenta de los despojos. El resultado es que las galaxias se habrán evaporado en el año 10^{19}. La mayoría de los planetas ya habrán salido de sus órbitas para entonces, pero cualquiera que todavía esté orbitando estrellas caerá hacia ellas en espiral gracias a la radiación gravitacional en unos 10^{20} años. Un mundo oscuro.

Acto II. Reactivación postrera de las estrellas.

Hemos comentado que la probabilidad de colisión entre estrellas era muy baja en los cuerpos evanescentes de las galaxias. Aunque todo es cuestión de probabilidades y esas se hacen mayores a medida que hay mucho más tiempo en juego. Como es el caso del momento que empezamos a analizar: 10^{20} años es la referencia, 10^{10} veces la vida actual del Universo. Y pueden pasar muchas cosas curiosas tras esos choques. Quizás se puedan encontrar dos enanas marrones,[6] con su reserva de hidrógeno sin quemar, de forma que en su fusión se llegue a generar una nueva enana roja que permitirá suavizar la agonía estelar. Incluso si el choque es más o menos tangencial, puede emerger un disco de materia que acabe generando un sistema planetario, incluso con condiciones propicias y tiempo suficiente como para el renacimiento y desarrollo de la Vida. Quizás semejante a la de la Tierra. Eso podría suceder a partir del año 10^{22} tras el Big Bang.

Tal vez se acerquen dos enanas blancas (negras) extintas, aun con su remanente de carbono y oxígeno recuerdo de sus mejores épocas, de forma que una de ellas comience a deglutir masa de la otra y supere el límite de Chandrasekhar,

tras lo que se va a cebar una supernova de tipo Ia. También las enanas blancas pueden entrar en otro tipo de juego. Recordemos cómo algunas de pequeño tamaño pueden mantener sus reservas de helio que nunca pudieron llegar a quemar. Si chocan y se fusionan entre ellas, podría alcanzarse una densidad tal en el núcleo resultante como para que se inicie la ignición del helio. Quizás generen también sus propios sistemas planetarios, aunque, así como en las enanas rojas nacidas de dos marrones cabía la posibilidad de vida en alguno de sus planetas, en las estrellas de helio es imposible dada la rapidez con que se va a quemar este elemento en la estrella resultante.

Todo ello va a crear la oportunidad de un nuevo ciclo de "esplendor" luminoso para las moribundas galaxias, unas leves guirnaldas encendidas aquí y allá, nada parecido a lo que podemos ver ahora mirando el cielo nocturno. Evaporadas las galaxias, cosa que más o menos va a suceder en el periodo que va del año 10^{19} al año 10^{20} desde el Big Bang, aun deambularán por el cosmos las nuevas enanas rojas náufragas durante quizás billones de años más.

Acto III. Degeneración de la materia oscura.

En este momento, desde la placidez del sillón de lectura, nos queda la sospecha de que quizás hayamos corrido mucho en esta historia que alcanza el año 10^{20} tras el Big Bang ya que realmente, aunque hayamos asegurado que las galaxias se han evaporado, no lo han hecho aun totalmente: no nos podemos olvidar de su materia oscura que en las actuales quizás conforme hasta el 85% de toda la masa. Ahí estará y ahí seguirá jugando un papel en el destino del Universo. No sabemos qué es lo que compone la materia oscura, ni idea. Especulamos con que puedan ser partículas con masas del orden de los cientos de GeV[7] que interaccionan poco hasta consigo mismas. Recordemos lo que dijimos de la materia oscura en el capítulo 30 al hablar del Cúmulo Bala.

Lo que si es cierto es que esas partículas, o lo que sean, son insensibles a los campos electromagnéticos y nuclear fuerte. No emiten ni absorben luz ni se encuentran en los núcleos atómicos. Solamente pueden ser detectados por sus efectos gravitatorios y en eventuales aniquilaciones, guiadas por la fuerza nuclear débil, al interactuar con materia bariónica ordinaria. Esas interacciones se dan con una probabilidad muy baja, pero una vez más… nos movemos en intervalos temporales cosmológicos lo suficientemente gigantescos como para que casi todo pueda suceder alguna vez. Incluso hay opiniones de que se hayan podido detectar reflejos de alguna de esas desintegraciones.[8]

En los halos galácticos se encuentran grandes cantidades de partículas de materia oscura y restos de antiguas descomposiciones estelares, gases y polvo.

Un lugar muy apropiado para la desintegración de la materia oscura a través de auto interacciones que van a aportar al Cosmos energía en forma de radiación. Otra posibilidad es que estos "choques" se den *en el interior de restos estelares como las enanas blancas* dando como resultado a pequeñas partículas (fotones, neutrinos, electrones, positrones, protones o antiprotones) con velocidades relativistas que por ello consiguen abandonar los halos galácticos venciendo la atracción gravitatoria. También hay otra vía de transformación de los halos galácticos, quizás aún más interesante.

Como ya hemos comentado la materia oscura no interactúa electromagnéticamente ni a través de la fuerza nuclear fuerte, por lo que sus partículas tienen gran capacidad de penetración en las masas de materia. Cada segundo, ahora mismo, atraviesan nuestro cuerpo unas 10^{11} partículas de materia oscura. Eso mismo sucede continuamente hoy en día en los objetos estelares, pero sin gran repercusión ya que en ellos se dan otros procesos energéticamente mucho más potentes.

Pero en la época que estamos analizando la de la desintegración de los halos galácticos, en el año 10^{20} tras el Big Bang, la aniquilación de partículas de materia oscura en el interior de las masas residuales de materia bariónica toma un gran protagonismo. Las partículas de materia oscura son capturadas en el interior de las estrellas muertas al chocar con alguna de sus partículas bariónicas. El resultado es que, tras perder energía (velocidad) en el encuentro, quedarán allí atadas gravitatoriamente de forma que con el tiempo van a sufrir su aniquilación. Llega un momento en que el flujo de entrada de materia oscura va a ser igual al de aniquilación quedando las enanas blancas como una máquina de destrucción del halo galáctico. Con un sorprendente resultado adicional: la energía total generada a lo largo de los tiempos por la captura y aniquilación de las partículas de materia oscura en una de esas estrellas va a ser del orden de 10^{15} watios, que aunque muy pequeña, 10^{11} veces inferior a la radiada por el Sol, es capaz de dar nueva vida -calentar- a la enana blanca que de nuevo irá radiando fotones desde su superficie, fotones con una longitud de onda relativamente corta, en el infrarrojo, de unos 0,05 milímetros, débiles e invisibles.

Escenario hacia el año 10^{25} tras el Big Bang.

Así que el panorama de nuestro Universo en esos lejanos años por venir, llenos de degeneraciones, será ya muy distinto al actual. La energía oscura dominará claramente en las grandes distancias. La radiación de fondo de microondas se habrá enfriado con la expansión situándose en el entorno de los 10^{-13} K. En los cúmulos galácticos, dominios menguantes de la gravedad, sus galaxias van

completando las fusiones y evaporaciones. En estos proceso las estrellas moribundas se estarán escapando de sus galaxias y los planetas se verán arrancados de cuajo de sus sistemas. En ese conglomerado, cada vez menos ordenado de materia y energía, nacen nuevas estrellas enanas que poco a poco se van a ir viendo dominadas por la tremenda gravedad generada por los errantes agujeros negros centrales de las galaxias.[9] La materia oscura se transmuta paulatinamente en energía. Durante una época las decadentes galaxias estarán tenuemente iluminadas solamente por miles de millones de enanas blancas reactivadas por la materia oscura y, por encima de ese poso luminoso, guirnaldas de miles de millones de radiantes enanas rojas producto de la reactivación de la fusión de hidrógeno tras los choques entre enanas marrones. Todo dibuja un escenario poco denso, cada vez más desordenado, mientras el resto del Universo se escapa más allá del horizonte permitido por la expansión. Creciente soledad, aislamiento y vuelta a las esencias más elementales. Eso será el paisaje mientras avanzamos hacia el año 10^{25} momento en que la materia oscura de los halos galácticos ya es solo dominio de enanas blancas y se va oyendo el progresivo rugido de los agujeros negros. Nos abocamos a momentos de una total e inevitable descomposición.

NOTAS DEL CAPÍTULO 38:

1. El fenómeno es semejante a lo que en astronáutica se denomina *asistencia gravitatoria* que es la maniobra destinada a utilizar la energía del campo gravitatorio de un planeta o satélite para obtener una aceleración o frenado de una sonda cambiando su trayectoria.
2. La ***evaporación de las galaxias*** es un proceso que recuerda a lo que pasa en un líquido en cuya superficie el choque de dos moléculas eventualmente provoca el escape de alguna de ellas hacia un espacio exterior más tenue. Va a ser un proceso muy lento, pero las simulaciones por computadora muestran que alrededor del 90% de la masa de las galaxias eventualmente se "evaporará" de esta manera, mientras que el resto se va a convertir en un gran agujero negro.
3. Del libro "*Los tres últimos minutos*", páginas 109-110, Paul Davies. [http://www.librosmaravillosos.com/los_ultimos_tres_minutos/pdf/Los_ultimos_tres_minutos-Paul_Davies.pdf]
4. Datos extraídos de "*A DYING UNIVERSE: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects*", Fred C. Adams and Gregory Laughlin.

[https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9701131.pdf]

5. "*Time without end. Physics and Biology in an open Universe*", página 7, 1979, Freeman J. Dyson.
6. La radiación gravitatoria hace que las órbitas de las estrellas binarias pierdan energía y se deterioren, fenómeno que se manifiesta de particular importancia en la descomposición de las enanas marrones binarias.
7. Hay varios candidatos para la materia oscura. Unos de ellos serían los ***MACHO***'s, "*Masive Astrophysical Compact Halo Objects*" -objetos astrofísicos masivos y compactos de los halos-, que simplemente serían algún tipo de objeto estelar de difícil observación, simples personajes astronómicos de materia fermiónica, oscuros o difícilmente detectables. También se habla de los ***WIMP***'s, "*weakly interacting massive particles"*, cuya traducción nos dice que serían partículas masivas que interactúan de forma débil. Algo así como neutrinos de gran masa y por tanto muy lentos. El candidato teórico más aceptado es el ***neutralino***, una partícula de masa entre 100 GeV y 1 TeV. O los aún más teóricos ***axiones***, con masas inferiores a 10^{-7} eV.
   Si queréis saber más sobre el tema, y sobre las partículas en general, podéis acudir a la serie "*Esas maravillosas partículas*", del blog de Pedro Gómez-Esteban "*El Tamiz*".
   [https://eltamiz.com/esas-maravillosas-particulas/]
8. En 2014 el telescopio espacial Fermi observó en una gran región de 10°×10° un exceso de rayos gamma con una energía 1∼3 GeV en dirección al centro galáctico. No se conoce su origen, pero se especula con la posibilidad de que podría ser la aniquilación de partículas WIMP de materia oscura.
   "*The Characterization of the Gamma-Ray Signal from the Central Milky Way: A Compelling Case for Annihilating Dark Matter*", Tansu Daylan et al.
   [https://arxiv.org/abs/1402.6703]
9. Un agujero negro del tamaño del que habita el centro de la Vía Láctea, de un millón de masas solares, tiene la capacidad de "comérsela" en un tiempo de 10^{30} años. Si la masa del agujero es mil veces mayor, el tiempo de deglución se acortaría hasta los 10^{24} años.

39. ¿Inevitable?

El capítulo anterior acaba con una frase lapidaria: "*Nos abocamos a momentos de una total e* ***inevitable*** *descomposición*." Quizás la inevitabilidad sea una mera conclusión extraída de un conocimiento parcial e incompleto del mundo, quizás el mundo sea de otra manera distinta a como lo percibimos. Quizás solo percibamos lo que realmente haya sido preciso para una evolución biológica exitosa que, cual engañosa caverna de Platón, nos sugiere que el tiempo tiene una dirección preferente fijada por el desorden. Esa parece ser la irrefutablemente ***útil*** realidad. Aunque me gustaría matizarla. Este capítulo va de reflexiones.

Desde que nos lo propuso Boltzmann sabemos que la entropía es un juego de probabilidades al que juega el poco intuitivo, para nosotros los humanos, mundo microscópico. En este mundo no hay un principio que premie el orden o el desorden; simplemente constatamos que en su "rumor" de interrelaciones va a ser más probable que se den configuraciones desordenadas que ordenadas. Pero ¿quién define el criterio de lo qué es ordenado o no, el fundamento de la flecha del tiempo? Sin lugar a duda una biología consciente como la del hombre. Un criterio que en algún momento aparecería *ex novo* instalado en un nivel perceptivo más global, menos detallado, seguramente más ordenado porque su escala difumina el desorden, pero con un nivel de contraste suficiente como para asegurar el éxito de las necesidades evolutivas biológicas. Un nivel de detalle que, por esa posible razón, se nos hacen el único intuitivo. No necesitamos más. Quizás la evolución haya marcado el orden de las cartas.

Si eso fuera así ¿no podría ser posible que la vida nos haya condicionado psicológicamente la definición del sentido de la flecha del tiempo? como obligándonos a decir que es bueno e ineludible que vaya de pasado a futuro. A fin de cuentas los hombres vivimos de la memoria, del presente y del imaginado futuro. La flecha del tiempo como esencia de nuestro Yo. Quizás sólo un sentimiento que como tal es de exclusividad biológica… porque en el micro mundo eso no existe, allí no hay ni orden ni desorden, allí solo hay una impersonal dinámica de interrelaciones que generan las efímeras, múltiples y cambiantes realidades, inalterables en la dimensión tiempo.[1] El mundo que enfoca sobre los píxeles más minúsculos es así. Y posiblemente esta sea la realidad íntima de nuestro Universo, al cual vemos y juzgamos desde la perspectiva del macro mundo nuestro, la del píxel grueso, con un necesario y biológicamente útil desenfoque vital. El concepto tiempo como emergencia de la consciencia humana. Si fuera así el último suspiro del Universo va a ser distinto del que describo en esta miniserie apoyado sobre un continuo incremento entrópico. Distinto de lo que vemos desde nuestra cueva de Platón.

No somos capaces de ver ni imaginar la auténtica realidad, la del micro mundo.[2] [3]

Pero vivimos como vivimos y percibimos lo que se nos da como posible. Así que con esa perspectiva retorno a nuestro Universo cósmico. Voy a ampliar el plano con mi imaginación y situarme en ese espacio pluridimensional, del que argumentamos hace dos capítulos, en el que "flota" mi brana-universo espacio/temporal. Lo observo como si fuera un gran saco de forma misteriosa que va creciendo con el paso del tiempo. Veo ese saco que me parece transparente y con una frontera espacial muy definida y estanca. Es transparente porque dentro prácticamente no hay nada, el equivalente a cinco núcleos de hidrógeno además de una cantidad de radiación, fotones y neutrinos, comparativamente despreciable, del orden de cien mil veces menor. Quizás también los desconocidos gravitones sin masa. Desde donde observo no deja de ser más que un globo lleno de una sutilísima niebla de gases. Veo que su interior es poco denso y frío, a la temperatura media de los fotones de fondo, y que tiene una frontera impermeable en ambos sentidos. Creemos pero no aseguramos.[4] Tengo que reconocer que mi Universo es bastante normal y que no deja de ser más que un objeto físico, al igual que una piedra o una flor, que obligatoriamente como conjunto sigue las leyes físicas más generales. Hasta ahora en su interior se ha ido construyendo, enlazando, mezclando, horneando… aunque sin variar mucho en su fondo más elemental, simplemente iba cambiando el perfil de sus estructuras. Pero ya hemos llegado al año 10^{25} por lo que hace ya mucho tiempo que se había dejado atrás la época de las florituras y *hat tricks* propios de los primeros miles de millones de años. Vamos a empezar a ver como en el interior de ese globo empiezan a producirse cosas destructivas.

Dentro del menú de obligadas normas de conducta termodinámica, la fundamental es buscar el posible equilibrio interno en un estado de mínima energía estructural. Por eso nuestro Universo ha estado y estará deslizándose, en su promedio, por una descendente rampa energética (mejor sería decir ascendente rampa entrópica), siguiendo caminos que en conjunto van a ser irreversibles. El incesante goteo energético que se fuga a lo largo de ese continuo e inacabable proceso realmente no se pierde, sino que se transforma -*primer principio de la termodinámica*- en otro tipo de energía más desordenada y difícilmente utilizable para hacer un trabajo. Lo que es otra forma de afirmar que su entropía estará continuamente aumentado -*segundo principio de la termodinámica*-. Como todo en la vida, nuestro saco de gases se va a ir volviendo senil. Y vamos a empezar a ver cosas propias de la senilidad, no precisamente orientadas hacia mantener la interesante existencia constructiva disfrutada hasta el momento. Como nos pasa a los humanos, con el tiempo el Universo se diluye mientras su metabolismo se ralentiza provocando el frío

orgánico. ***Densidad*** y ***temperatura*** son las funciones de estado que mano a mano lo han ido conformando. Y sin duda lo seguirán haciendo.

Muy bien… entonces densidad y temperatura… y los principios termodinámicos que nos dicen que ambas funciones están correlacionan de forma biunívoca: durante una expansión adiabática, como la que diluye los contenidos de nuestro Universo, se produce una pérdida de energía interna que se refleja como una disminución de la temperatura. Una dinámica que va a estar presente a lo largo de toda su vida y que va a afectar a los dos mundos paralelos que conviven en él, el de la materia y el de la radiación. Dos mundos con características distintas cuya interacción será crucial para entender cómo la entropía y la energía moldean el destino final de nuestro cosmos.

La materia está compuesta principalmente por restos de la debacle, estrellas apagadas, planetas errantes, por aquí y por allá, con sus masas apreciables y cada vez más aislados unos de otros, enfriándose desde posiciones de relativas altas temperaturas, así como van irradiando fotones desde sus superficies. Y además gases difusos intentando ocupar el total, muchos de ellos a altas temperaturas. Materia que se mueve a velocidades no relativistas, de forma cada vez más lenta ya que los potenciales gravitatorios que podrían acelerarlos se van haciendo progresivamente más livianos mientras aumentan las distancias. Con un final que va a ser su total descomposición como veremos en los siguientes capítulos. Y completando el escenario ***la radiación***, compuesta básicamente por fotones cuyas masas en reposo son nulas, desplazándose a la velocidad de la luz, y probablemente acompañados por neutrinos que les siguen el ritmo.

Dos mundos paralelos, materia y radiación, conviven en el universo, cada uno regido por relaciones específicas entre la densidad y la temperatura. La teoría clásica proporciona un marco para entender cómo se vinculan estas variables en cada momento. En Astrofísica, el mundo de la materia destaca como un caso paradigmático de estudio. Este universo particular se modela frecuentemente como un gas ideal monoatómico, un enfoque que simplifica el análisis y permite describir su comportamiento con una relación sencilla entre la densidad y la temperatura.

$$T_{mat} \propto \rho_{mat}^{2/3}$$

Esta relación no solo facilita la comprensión de procesos fundamentales, sino que también ofrece un punto de partida para explorar fenómenos más complejos en el cosmos. La relación temperatura/densidad se completa con una más intuitiva para el universo de radiación

$$T_{rad} \propto \rho_{rad}^{1/4}$$

La temperatura de la materia es un reflejo de su energía cinética, su velocidad, que a su vez depende de la densidad. Cuanto mayor sea la densidad de las partículas de materia mayor será el número y la intensidad de sus choques, y por tanto su temperatura. En cuanto a la radiación ya sabemos que su energía, su temperatura, es función de su longitud de onda.[5]

En los primeros años de nuestro Universo, la densidad y la temperatura eran significativamente más altas en comparación con el presente. Desde nuestra perspectiva actual, al observarlo de manera global e impersonal, podemos ver cómo, con el tiempo, la expansión del cosmos ha provocado una disminución progresiva de ambas variables. Durante las etapas de "alta" densidad, las condiciones favorecieron la formación de estructuras estables —átomos, estrellas, galaxias— que alcanzaron estados de equilibrio energético mínimo tras seguir caminos en los que la entropía global del sistema aumentó continuamente, como dicta la termodinámica. Sin embargo, las "altas" temperaturas iniciales también impulsaban la desintegración de estas mismas estructuras ordenadas, generando una dinámica constante entre creación y destrucción.

Si miramos hacia un futuro extremadamente lejano, la expansión exponencial del universo hará que la densidad de la materia tienda a cero. En el límite, podemos afirmar que será prácticamente nula. Para el año 10^{100} tras el Big Bang el Universo se habrá expandido hasta 10^{60} veces su tamaño actual. En ese escenario, los pocos protones que hoy existen, apenas unas unidades por metro cúbico, se habrán transformado en partículas aún más ligeras, como positrones, con masas 2.000 veces menores que la de los protones. Datos que nos permiten deducir que, en ese lejano futuro para nosotros, la densidad de la materia será 10^{60}x10^{60}x10^{60}x10^{3} veces menor que la de ahora ¡10^{183}! Y eso no es nada ya que más allá de esa fecha la expansión aún va a continuar impertérrita ¡qué no será entonces en el año $10^{10.000}$! Y más allá aún. La evaporación de la materia a la que también se le unirá la de la temperatura.[6]

Con la expansión del universo, la temperatura tenderá asintóticamente al cero absoluto, aunque nunca lo alcanzará, de acuerdo con el tercer principio de la termodinámica. Este establece que la temperatura de un sistema no puede ser exactamente -273.15ºC. Algunos cálculos teóricos predicen límites infinitesimales para la temperatura en el futuro lejano. En el cero absoluto, la energía interna del sistema sería la más baja posible, lo que, según la mecánica clásica, implica que las moléculas estarían completamente inmóviles. Sin embargo, la mecánica cuántica introduce el principio de indeterminación de Heisenberg, que establece que no es posible conocer simultáneamente la posición y el momento de una partícula con precisión infinita. Por lo tanto,

incluso en el cero absoluto debe existir una energía residual llamada energía de punto cero. Determinar su valor exacto sigue siendo un desafío teórico y experimental. La relatividad general aporta otra perspectiva: cada solución de las ecuaciones de Einstein para un universo homogéneo, isótropo y con constante cosmológica puede asociarse a una temperatura específica. Este análisis introduce el concepto de horizonte causal, que no se limita a los horizontes de eventos de los agujeros negros, sino que incluye el horizonte de sucesos del universo observable. Este horizonte representa una superficie límite del espacio-tiempo, más allá de la cual los eventos no pueden influir en un observador. Se puede imaginar como el borde de un cuerpo caliente que irradia energía hacia ambos lados, reflejando el intercambio de radiación dentro del cosmos.

Es bien conocido que, en este tipo de universos, los observadores inerciales (aquellos que no experimentan fuerzas) se perciben inmersos en un baño de partículas térmicas a una temperatura característica denominada temperatura de Gibbons-Hawking. Imaginemos a uno de estos observadores contemplando su horizonte causal. Este horizonte, desde su perspectiva, emite una radiación térmica que lo "baña" con una temperatura específica. Dicha temperatura es proporcional a la constante de Hubble, la cual, a su vez, está vinculada al valor de la constante cosmológica Λ. Con el conocimiento actual, es posible realizar una estimación razonable del valor de la constante cosmológica. Esto nos permite calcular la temperatura asociada a nuestro horizonte cosmológico, obteniendo un resultado del orden de 10^{-30} K, una magnitud increíblemente baja que refleja el estado extremadamente frío y diluido del universo en estas escalas.[7][8]

Aferrándonos a la teoría que sustenta nuestra existencia, la “flecha entrópica”, podemos proyectar un escenario en el que, en un tiempo teóricamente infinito, la capacidad integradora de la densidad desaparecerá casi por completo. En este estado extremo, solo quedará un potencial remanente mínimo asociado a gradientes térmicos ínfimos, un vestigio de energía capaz de generar un infinitesimal potencial constructivo. De este modo, el destino del universo parece inevitable: una transición gradual hacia la "casi nada". En ese futuro, tanto las grandes estructuras como las partículas más pequeñas se habrán descompuesto. Átomos, electrones y protones se desintegrarán progresivamente siguiendo el camino hacia el máximo desorden permitido por las leyes de la termodinámica.

Hasta ahora el potencial constructor había sido el que ha mandado y sigue mandando. Pero llegará el momento del desmontaje. Y esto es precisamente lo que ya estará sucediendo en los eones a los que habíamos llegado en nuestra

historia al final del capítulo anterior. Volvamos a enfilar los caminos hacia el destino fatal del Universo, volvamos al año 10^{25} tras el Big Bang, era en la que parece que el mundo da un giro definitorio, de la construcción en las galaxias y estrellas al inicio de la degeneración de la materia oscura, a la que se va a unir la de los protones (si es que esos se desintegran, que está por ver). En adelante… es lo que queda. Evaporación hacia la entropía. De ahí nuestra interrogación ¿Irremediable? INEVITABLE.

NOTAS DEL CAPÍTULO 39:

1. Podemos leer a Penrose en su enciclopédico libro "*El camino a la realidad: una guía completa de las Leyes del Universo*": "*Puesto que, según la mecánica cuántica, el entrelazamiento es un fenómeno tan ubicuo ¿por qué es algo que apenas advertimos en nuestra experiencia directa del mundo?... Un enigma al que hay que hacer frente es el hecho de que los entrelazamientos tienden a difundirse. Parecería que finalmente todas las partículas en el universo deben entrelazarse entre sí ¿O ya están todas entrelazadas entre sí? ¿por qué no experimentamos precisamente un revoltijo entrelazado...?*"
2. De nuevo Penrose: "*La definición [de Boltzmann] parece depender de la cercanía con la que decidamos examinar un sistema. Dos estados que son "macroscópicamente indistinguibles" para un experimentador podrían ser distinguibles para otro... Mi propia posición respecto al estatus físico de la entropía es que no la veo como una noción "absoluta" en la teoría física actual, aunque resulta muy útil*."
3. Volvemos una vez más a nuestros principios antrópicos. Tan particulares, tan antrópicos. Recomiendo para un mayor conocimiento de sus implicaciones filosóficas le lectura de las entradas publicadas en el blog "El Tamiz" que se inician con la siguiente: *"¿No es mucha casualidad que haya vida en el Universo?*".
   [https://eltamiz.com/2007/04/20/%C2%BFno-es-mucha-casualidad-que-haya-vida-en-el-universo/]
   Con respecto a los aspectos más generales sobre la entropía y su enlace con el tiempo podéis acudir a la siguiente entrada del blog "El Cedazo": "*Eso que llamamos "Tiempo" – La flecha del tiempo*".

[https://eltamiz.com/elcedazo/2009/03/05/eso-que-llamamos-tiempo-la-flecha-del-tiempo/]
La relación de la memoria y el correr del tiempo autobiográfico en la emergencia del Yo en el hombre se explica a través de varias entradas de la serie de El Cedazo "*Biografía de lo Humano*", comenzando por esta.
[https://eltamiz.com/elcedazo/2016/02/20/biografia-de-lo-humano-07-teoria-sobre-la-evolucion-de-la-consciencia/]
Y no os perdáis la lectura del libro de Carlo Rovelli, "*El orden del tiempo*", para profundizar más el tema del "desenfoque" con que los humanos miramos la baraja de la entropía.

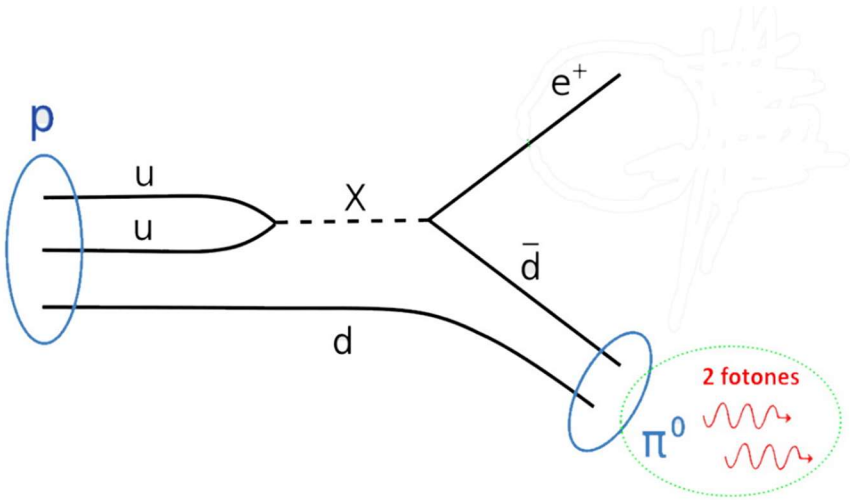
4. Universos vecinos podrían interactuar con el nuestro mediante efectos gravitacionales, intercambio de información, colisiones, fluctuaciones cuánticas o dimensiones extras, dejando rastros detectables en fenómenos físicos.
5. Podemos ver la demostración matemática de estas relaciones en el libro "*Introducción a la Astrofísica*", páginas 139 y 186, de Eduardo Battaner.
[http://astro.df.uba.ar/astro/guias/Battaner_Introduccion.pdf]
6. Según podemos leer en el libro "*The five ages of the Universe*", página 159, de Fred Adams y Greg Laughlin.
7. "*The Cosmic Thermal History Probed by Sunyaev-Zeldovich Effect Tomography*", Yi-Kuan Chiang et al., septiembre de 2020, The Astrophysical Journal.
[https://arxiv.org/pdf/2006.14650.pdf]
8. "*Black Holes Must Die*", Neal Dalal y Kim Griest, Physics Letters B, septiembre 2000.
[https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0008260.pdf]

40. Hacia el infinito

El capítulo anterior de reflexión filosófica acerca de la inevitable evanescencia del contenido del Universo, lo acabamos con la siguiente frase: " *Volvamos a enfilar los caminos hacia el destino fatal del Universo, volvamos al año 10^{25} tras el Big Bang, era en la que parece que el mundo da un giro definitorio, de la construcción en las galaxias y estrellas al inicio de la degeneración de la materia oscura, a la que se va a unir la de los protones (si es que esos se desintegran, que está por ver). En adelante… es lo que queda. Evaporación hacia la entropía.* ". La función continúa.

Acto IV. La destrucción vence en el juego

Empecemos por los protones. Una de las consecuencias de esa teoría de evaporación de la materia pudiera ser que el mundo se desintegrara en radiación a través del decaimiento de los protones en su obligado camino hacia un mínimo de energía como sistema físico. Aunque hoy en día no se tiene ninguna constancia de ese fenómeno. Quizás sea porque no ha habido tiempo suficiente para experimentarlo: hay cálculos que plantean un amplio margen para ello, desde los 10^{30} a los 10^{37} años tras el inicio del Universo. Estamos hablando de la vida media de tan longevas partículas. Hoy estamos algo así como en el cumpleaños 10^{10} de nuestro Universo.



Posible vía de desintegración del protón hacia un positrón y radiación.

Se teoriza con diversos fenómenos que expliquen el decaimiento del protón. Quizás el más típico ejemplo es el que el protón se transforma en un positrón de menor masa -en el fondo se parece a un protón pequeño (de menor energía) aunque realmente es la antipartícula del electrón- más un par de energéticos fotones. Ello incumpliría el mantenimiento del número bariónico, advertencia que ya salió en el capítulo 8 al hablar sobre la antimateria.

Hay también otras posibles formas exóticas por las que se pueda producir la desintegración del protón. Como se dijo en el capítulo 12 el protón está constituido por tres quarks. Bueno… por un baño de vibrantes quarks en donde parece sobresalir una unión de tres mediante gluones. La loca dinámica de su interior permite el que en algún momento se acerquen tanto los tres cuarks como para que se genere un mini agujero negro que por emisión de radiación de Hawking desaparecería instantáneamente. El protón se habrá transmutado en energía. De todas formas, esta vía de desintegración es tan improbable que se estima que le pase eso en unos tiempos medios entre 10^{45} y 10^{169} años. Otro camino de desintegración se derivaría de la posibilidad de que el Universo cayera a un vacío de menor nivel energético que el actual, aunque los tiempos requeridos todavía serían mayores, entre 10^{140} y 10^{150} años. Hemos hablado de esta posibilidad en un capítulo anterior cuando el campo de Higgs tunelaba hacia un nuevo mínimo provocando el *Big Slurp*.

En el escenario propuesto, para el año 10^{25}, siguiendo la hipótesis de una vida media del protón de 10^{37} años, se habrían desintegrado teóricamente la mitad de los protones, lo cual no invalida el que unos lo hayan hecho antes y otros lo vayan a hacer después. Por tanto, en el año 10^{25} estaríamos en tiempos de un posible decaimiento de los protones.[1] Están por todos los lados, en las enanas rojas, en las enanas blancas, en los restos de las galaxias que se difuminan por el Universo o caen en las garras de los agujeros negros. Están en los planetas que se evaporaron de sus sistemas y deambulan solitarios por las oscuridades de la inmensidad. Hay muchos protones, escondidos en los átomos de helio, oxigeno, carbono… e incluso de hierro, hasta el uranio. Y hay neutrones. Y electrones, neutrinos y radiación.

Cuando un protón se desintegra dentro de una estrella se va a producir un pión π^0 y un positrón como lo ilustra el esquema anterior. Posteriormente el positrón se desintegra cuando encuentra un electrón dando como resultado partículas de radiación. Como así también lo hace de forma espontánea el pión. Al final el protón se ha deshecho como radiación, lo que supone una aportación energética para la estrella que así incrementa su temperatura y su luminosidad. Aunque realmente va a ser una luminosidad espectral: si eso sucediera en todas las estrellas dentro de nuestro horizonte observable actual la energía producida sería cien veces menor que la del Sol.

La desintegración de los protones durante la época de degeneración universal que estamos analizando provoca además cosas muy curiosas en las estrellas. Entre otras, la forma en que se altera la química de las enanas blancas. La desintegración de protones y neutrones en los núcleos de los elementos presentes en la estrella hace que la población se deslice hacia núcleos de números atómicos cada vez más bajos. Puede que en esa desescalada los nuevos núcleos interactúen entre sí permitiendo el nacimiento de elementos más

pesados, aunque a la larga predomine la cascada hacia números atómicos más bajos. Algunos de los nuevos productos nucleares serán radiactivos que posteriormente se desintegrarán por lo que, a la larga, solo permanecerán los elementos estables. Con el tiempo, cuando la masa total de la estrella haya disminuido en aproximadamente un factor de diez, casi todos los núcleos que queden en la estrella serán de hidrogeno. Protones que se descomponen.

A lo que vaya quedando de la enana blanca le sucederán más cosas. Recordemos cómo la estructura de esas estrellas estaba sujeta por sus electrones degenerados. A medida que se van evaporando los protones podíamos pensar que la presión interna disminuye, aunque realmente puede aumentar debida a la nueva radiación producto de su desintegración. Eso hace que la estrella crezca de volumen y pierda densidad, de forma que llega el momento en que los electrones dejan de estar degenerados volviendo la estrella a ser una bola de hidrógeno, ahora congelado por las bajas temperaturas. El decaimiento de los protones continua en esta situación hasta que llega a un estado de plasma en donde la radiación producida puede abandonar la influencia de los electrones huyendo por el espacio infinito del Cosmos. Algo semejante a lo que pasó a nivel global en el momento de la Recombinación, 380.000 años tras el Big Bang. En esos momentos la enana blanca, muy pequeña,[2] está muriendo definitivamente mientras su masa se ha convertido en radiación que calienta el Universo.

Algo similar les sucede a las estrellas de neutrones. Mientras sus protones se van desintegrando la estrella va perdiendo densidad hasta un momento en que no precisa la contención de sus neutrones degenerados. En esos momentos comienza a actuar sobre ellos la fuerza nuclear débil que los transforma en protones, electrones y antineutrinos. Una especie de enana blanca. Y ya sabemos cuál es su destino.

Lógicamente algo semejante les está pasando a los planetas errantes. Al final toda la materia se transforma en radiación o… está cayendo en un agujero negro. En el año 10^{40} tras el Big Bang prácticamente todas las estrellas y planetas se habrán evaporado siguiendo la vía de desintegración de los protones,[3] prácticamente todos los electrones y positrones se habrán aniquilado entre ellos manteniendo la carga eléctrica del universo igual a cero. Tras toda esa masacre quedará una “niebla” vacía en donde dominarán los fotones y los neutrinos. Quizás gravitones y voraces agujeros negros haciendo el barrido definitivo.

Ya sabemos que los agujeros negros son objetos muy especiales. A pesar de que de ellos no se escapa ni la luz, cabe la posibilidad de que exuden su masa/energía a través de lo que conocemos como radiación de Hawking. Básicamente consiste en la posibilidad real de que, en la proximidad de su horizonte, se generen pares de partículas virtuales de acuerdo con el principio

de incertidumbre de Heisenberg. Una de las cuales cae dentro del agujero mientras la otra se escapa al espacio exterior con una masa/energía real extraída de la energía gravitacional del agujero. El perfil de emisiones de este tipo asemeja a las de un cuerpo negro con una determinada temperatura, que es inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Con la emisión de radiación el "monstruo" estaría progresivamente perdiendo masa/energía, aunque siempre que la temperatura exterior, la de fondo del Universo, sea menor que la de su horizonte de sucesos. Pero no lo dudemos, le llegará su momento porque, recordemos, cuanto más pequeño es el agujero negro mayor es la temperatura de su horizonte.

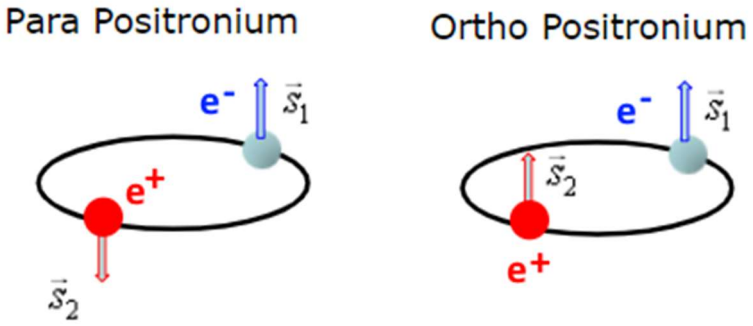
Para cuantificar el problema diremos que un agujero negro con una masa tres millones la del Sol se comporta como si su temperatura fuera 10^{-13} K. La temperatura de base del Universo hoy en día, la del fondo de microondas, es de unos 2,725 K. Por lo que a primera vista parece difícil que los agujeros negros de hoy en día emitan radiación de Hawking.[4] Se encuentran en pleno proceso de comer y comer. Pero en el futuro lo van a tener más fácil, puesto que con la expansión del Universo se irá alargando la longitud de onda de los fotones de fondo, lo que supondrá una disminución de su energía/temperatura. En el año 10^{21} después del Big Bang la temperatura será la adecuada para que empiecen a radiar eficientemente los agujeros pequeños como los que tengan el tamaño del Sol. Y en el año 10^{35} iniciarán su radiación los más grandes, como los de 10^{9} masas solares ¿Hasta cuándo durarán radiando? Depende de sus masas, aunque estamos absolutamente seguros de que hasta el más gigantesco habrá "quemado" totalmente su masa en el año 10^{100} tras el Big Bang, dejando como recuerdo un poso de radiación. En aquellos momentos la temperatura de fondo rondará los 10^{-20} K.[5]

Acto V. Evanescencia

Los últimos instantes de los agujeros negros no van a ser el final suave de una lenta evaporación, sino que una vez más en el Universo se observará un castillo de fuegos artificiales. A medida que van emitiendo la radiación de Hawkins los agujeros negros van perdiendo masa y aumentando su temperatura. Un proceso que se autoalimenta ya que a mayor temperatura mayor radiación. El proceso es inestable en sí mismo y termina por desbocarse como un caballo desatado en un galope cada vez más rápido. Los segundos finales son de un inusitado brillo seguido de una explosión de calor: se cree que hasta un millón de kilos de masa se evanescen como energía en un último segundo. En la explosión se genera mucha radiación y partículas con masa, electrones y protones con sus correspondientes antipartículas, que durarán poco tiempo transformados también en radiación.

En esta era más allá del año 10^{100}, con solo una materia restante muy difusa, con niveles de energía muy bajos y escalas de tiempo muy grandes, la actividad

del Universo se habrá reducido drásticamente en comparación con lo que sucedía en tiempos anteriores. Los fotones y neutrinos seguirán ensanchando sus ondas hacia un mundo cada vez más gélido. Mientras tanto, en un espacio tan poco poblado los electrones y los positrones[6] difícilmente se van a encontrar, aunque ocasionalmente lo harán formando átomos de positronio en los que las dos partículas se verán ligadas en órbitas enormes.[7] Quizás haya que esperar hasta el año 10^{71} tras el Big Bang. Sin embargo, estas estructuras son inestables de forma que, con el tiempo, se aniquilarán mutuamente generando nueva radiación ¿cuándo? En el laboratorio duran poco, pero en el espacio exterior de un Universo difuso, con pocas perturbaciones, se formarán positronios con órbitas de muchos millones de años luz de diámetro, por donde circularán muy muy lentamente un electrón y un positrón. El juego de aniquilación durará hasta el año 10^{116} quedando aquí o allá algún electrón o algún positrón libre. El sino de la materia… pero ¿cuál será el de la radiación?

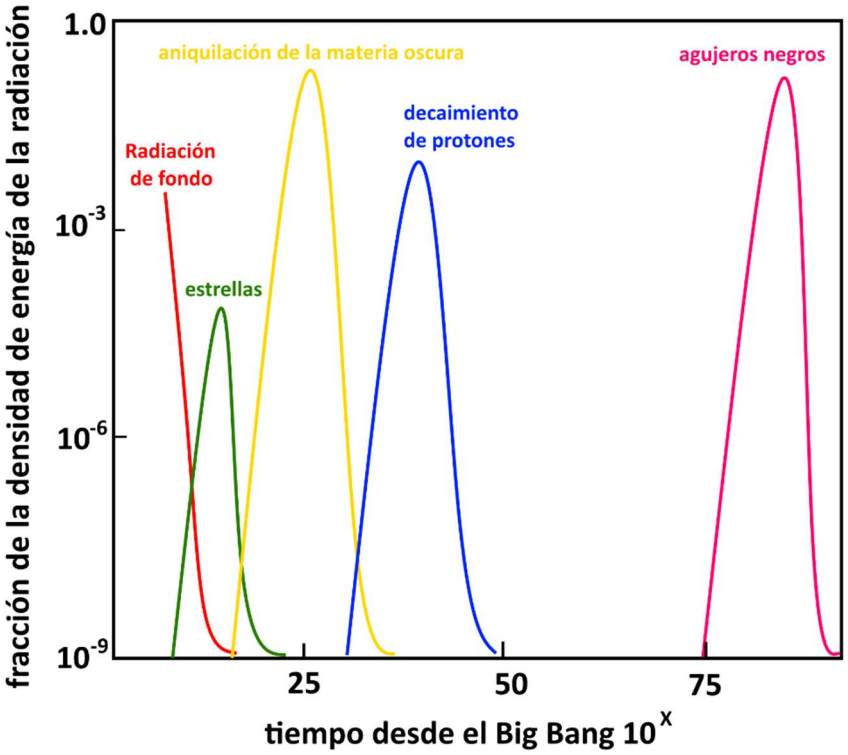


Positronio en sus dos estados posibles: con espines antiparalelos -singlete- o paralelos -triplete- (Imagen de la red, ⓕ fair use)

En el Universo habrá "muchísima" radiación comparada con la materia que haya escapado de la evanescencia. Aunque despreciable frente a la energía oscura. Desde sus inicios se ha ido generando abundantemente, principalmente a través de varios procesos que ya conocemos. Comenzando por los fotones del fondo de microondas, tan importantes hoy en día, casi tanto como los que se están generando en los procesos de fusión estelares. Después de los fotones de las estrellas, dentro de escalas temporales cosmológicas, vendrán a dominar su población los producidos en la aniquilación de la materia oscura dentro de las enanas blancas. Más tarde van a seguir los fotones nacidos de la desintegración de los protones y mucho más tarde los nacidos en los procesos de evaporación y extinción de los agujeros negros (*ver figura que sigue*). Cada una de esas familias va a tener su momento de esplendor… mortal.

A medida que el universo se va expandiendo la longitud de ondas de esa radiación también se va alargando, restándole energía momento a momento. Según nuestros cálculos, en la época de muerte definitiva de los agujeros negros, 10^{100} años tras el Big Bang, el universo habrá crecido con relación a su tamaño actual en un factor de 10^{60} lo que hará que la longitud de onda del fondo

de microondas se alargue hasta dimensiones cósmicas ¡10^{41} años luz! Lo mismo pasará con las otras familias de radiación, incluso con los tardíos y fríos fotones de los agujeros negros, con longitudes de onda semejantes al tamaño de esas estructuras que los irradian.



Familias de radiación a lo largo de la vida del Universo (Imagen modificada de "The five ages of the Universe", pagina 162, Fred Adams y Greg Laughlin, A Touchstone Book, 1999, ⓕ fair use)

Mientras la materia decae y la radiación se diluye, nada comparable le sucede a la energía oscura que continúa embalsándose en el tejido del espacio. Dijimos más arriba que desde el momento actual hasta $t=10^{100}$ el Universo va a crecer en un factor de escala de 10^{60}. Si la densidad de la energía oscura, una constante cosmológica, es constante, la cantidad de energía oscura habrá crecido en un factor de ¡un uno seguido de 180 ceros!

¿Qué va a pasar en adelante? Parece que todo está definitivamente muerto y el potencial térmico prácticamente agotado. A pesar de que nos cuesta pensar que se llegue a perder una infinitesimal posibilidad teórica de extraer trabajo e incrementar la entropía, el conjunto llegará a estar tan distanciado y frío que todo apunta a que se pueda llegar a un definitivo equilibrio termodinámico. Quizás se vaya a llegar a un punto en el que la entropía, por haberse alcanzado el máximo teórico permitido para el sistema, se mantenga constante por lo que no tendría por qué estar violándose el principio termodinámico que augura la maximización de la entropía. Siempre se estará en ese podio. Este estado de equilibrio no implica violar las leyes de la termodinámica, sino simplemente

que el sistema ha llegado a su límite evolutivo termodinámico.[8] Pero también podía manifestarse una nueva física, por ejemplo, fluctuaciones cuánticas extremas, nucleación de nuevos universos, o procesos aún desconocidos que podrían reintroducir gradientes de energía y romper el aparente equilibrio. Aunque nos estamos metiendo en terrenos altamente especulativos.

Aunque bien pudiera suceder, en una última pirueta, todo lo contrario, como afirma Penrose en su modelo de cosmología cíclica conforme: al infinito de la muerte térmica se habrá llegado pasando por un universo "deglutido" prácticamente en su totalidad por los últimos y definitivos agujeros negros que, a su vez y a lo largo de los eones, se habrán ido evaporando hasta desaparecer en lo que él dice un "pop" energético. Este desvanecimiento supondría la pérdida *[...o no]*[9] de toda la información del universo que había caído en el pozo gravitatorio del agujero negro. Es decir, supondría la desaparición de los múltiples grados de libertad existentes en los últimos eones que permitieron el desorden de un mundo de alta entropía.[10] Gracias a ello se recuperaría el orden, una disminución brutal de la entropía. Depósito lleno para volver al trabajo.

¿Qué sucederá en el futuro infinito? ¿Nueva física, cosas inimaginables, nuevos universos? Quién sabe. Cabría pensar que la hipótesis que hemos contemplado de desintegración de los protones bien no pudiera ser cierta. Entonces todo iría más lentamente y por otros derroteros. Bajo esa circunstancia, la de que sobrevivan los protones, se nos amplía de tal forma el campo temporal a lo largo de interminables eones, que se hace posible la existencia de una probabilidad de que ocurran sucesos extraños gracias a efectos de tunelación cuántica. El tema es que, gracias al principio de incertidumbre, y aunque la probabilidad sea muy pequeña, si bien no nula, a cualquier elemento de un átomo le va a llegar la posibilidad de estar en cualquier sitio. De forma que se nos abre una ventana que nos va a permitir visualizar el comportamiento de la materia a lo largo de muchísimo tiempo. Y lo que ahora vemos aparentemente sólido, en algún momento se podrá comportar como un líquido muy viscoso que puede fluir debido a los efectos mecánico-cuánticos. Como dice Freeman J. Dyson animándonos a hacer el ejercicio mental de imaginarnos un trozo de roca, o un planeta, enfriado hasta la temperatura mínima de 0 K: "*Incluso los materiales más rígidos no van a poder mantener sus formas o sus estructuras químicas más allá del tiempo* 10^{65} *... cada trozo de roca se comportará como un líquido, fluyendo hacia una forma esférica impulsado por la gravedad. Sus átomos y moléculas estarán incesantemente difundiéndose de un lado a otro de la misma forma que lo hacen las moléculas de agua en una gota*."[11]

Si lo anterior fuera cierto, implicaría que, en cualquier momento y dentro de los parámetros temporales que estamos considerando, va a haber una pequeña posibilidad de que cualquier "objeto" atómico salte espontáneamente de su sitio en la estructura y aparezca en otra parte. Este concepto ampara la idea de que,

al verse favorecida la probabilidad de aproximación de átomos y partículas, se pueda sortear las constricciones electromagnéticas. En cuerpos con una cantidad de masa estelar se podrían dar fusiones de los elementos más ligeros que las constituyen ¿Cuál sería el producto final? Lógicamente el hierro 56 cuyo núcleo, ya sabemos, es el poseedor de la máxima energía de enlace por nucleón. El resultado sería el de estrellas de hierro muy muy frías. Se piensa que esta tunelación al hierro puede llevar a algunas enanas marrones a explotar como supernovas, dado que en el proceso se puede disminuir el límite de Chandrasekhar. Esto sucedería entre los años 10^{1100} y 10^{1500} tras el Big Bang. Y aún hay más. Esperando aún más tiempo se puede dar tunelaciones cuánticas al hierro desde elementos más pesados por emisión de partículas alfa ¡en el año 10^{32000}!

Los túneles cuánticos también deberían permitir el convertir objetos grandes en agujeros negros, que a estas escalas temporales podemos decir que se evaporarán rápidamente en partículas subatómicas. Esto podría suceder entre los años $10^{10^{26}}$ y $10^{10^{76}}$ tras el Big Bang. También en el dominio de este último inimaginable eón, las estrellas de hierro podrán colapsar en estrellas de neutrones "usando" los túneles cuánticos.

¿Es ese el futuro? Nadie lo puede asegurar. La historia que hemos relatado es lo que nos dice nuestra mejor teoría. Pero nuestra mejor teoría quizás no sea válida en un futuro próximo o lejano. Quizás haya un cambio de fase, o varios, que alteren la forma de proceder del Universo que conocemos. El proceso descrito está fundamentado en los principios termodinámicos ¿y si la entropía no es la magnitud física directora del Universo?[12] También está fundamentado en la teoría de la relatividad y en el modelo estándar de partículas ¿serán válidos tal como los conocemos a lo largo de toda la vida del Universo o descubriremos una física más fundamental? Está fundamentado en un universo plano, homogéneo e isotrópico ¿y si más allá de nuestro horizonte cosmológico hubiera un Universo inobservable completamente distinto? Está fundamentado en una expansión cuantificada por una constante de Hubble que no sabemos cuánto vale con exactitud y dudamos de si es realmente constante. No sabemos qué es la materia oscura. No sabemos qué es la energía oscura. Entre ambas acumulan el 96% de la energía del Cosmos. Tampoco sabemos, aunque la razón teórica no lo puede descartar, si pude haber más mínimos energéticos, más vacíos verdaderos hacia donde se pueda tunelar nuestra existencia.

Entonces ¿cuál es nuestra certeza? Personalmente creo que ninguna. Quizás seamos unos sabios pre-copernicanos a la espera de que alguien nos centre… o mejor, nos descentre de nuestro actual nivel de conocimiento ¿Sucederá alguna vez? ¿Tendrá tiempo la humanidad para desvelar la verdad? ¿Desaparecerá la especie antes de ello? ¿Somos verdad o una ilusión sentida?

Me quedo con la frase con la que Fred C. Adams y Gregory Laughlin concluyen su estudio "*A DYING UNIVERSE: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects*": "*Como cierre de este artículo, presentamos el punto de vista de que el universo debería obedecer a una especie de principio copernicano que se aplicaría a lo que podamos pensar sobre el futuro. Este principio sostiene que la actual época cosmológica (10^{10})* […la del humano supremo…] *no tiene un lugar especial en el tiempo. Por lo que, en otras palabras, en el Universo del futuro puede seguir sucediendo cosas realmente interesantes que ocurrirán en los cada vez más bajos niveles de energía y entropía disponibles*."[13]

Y hasta aquí llego. Espero que esta aventurera biografía al menos os haya entretenido. O quizás enriquecido como personas. El sino del Universo es una de nuestras trascendencias básicas. Tan sólo nos queda cerrar en el próximo capítulo con el epílogo.

NOTAS DEL CAPITULO 40:

1. Hay varios experimentos en marcha para detectar el decaimiento del protón. Quizás el más conocido es el del Super-Kamiokande situado en Japón en la ciudad de Hida. Consiste en un tanque de 50.000 toneladas de agua pura rodeadas por cerca de 11.000 tubos fotomultiplicadores que son detectores ópticos muy sensibles que registran la emisión secundaria de electrones cuando inciden sobre ellos fotones, como los surgidos en la descomposición del protón.
2. En ese momento de difusión de su radiación la ex enana blanca tiene una masa de 10^{24} gramos, seis mil veces menos que la masa de la Tierra.
3. En el texto hemos considerado como vida media del protón 10^{37} años. En el texto estamos ahora en el año 10^{40} tras el Big Bang, es decir, mil veces la vida media del protón. Eso quiere decir que los protones actuales habrán decaído en esos momentos en un fator de $(½)^{1000}$, aproximadamente 10^{-301}. Se estima que en el Universo de hoy hay unos 10^{80} protones. De nuevo… el vacío de materia en aquellos momentos de la vida del Universo será absoluto.
4. Realmente en cierta medida sí lo hacen debido a que sus frecuencias no se centran en un valor fijo máximo sino que siguen una curva teórica, conocida como de Maxwell-Boltzmann.
5. Podéis jugar con esos datos usando la calculadora de radiación de Hawking y de otros parámetros de un agujero negro preparada por el

desarrollador informático Viktor T. Toht. En esta página encontraréis todas las ecuaciones que los definen y que fijan sus dinámicas.
[https://www.vttoth.com/CMS/physics-notes/311-hawking-radiation-calculator]

6. Quizás pueda resultar sorprendente que aún queden positrones y electrones por el universo. Vimos como en la desintegración de los protones aparecía un positrón y debemos suponer que por aquello de la conservación de la carga eléctrica existirán tantos electrones como positrones. Si la desintegración es de protones dentro de una estrella o de un remanente, el recién nacido positrón no escapa, queda atrapado dentro de la masa de la estrella y se aniquila con un cercano electrón. Pero no todo el hidrógeno se va a encontrar en las estrellas. Una pequeña parte no se acreó y rondó desde siempre por los espacios interestelares. Al decaer estos protones, los correspondientes nuevos positrones tendrán la oportunidad de ser independientes.
7. El positronio es un sistema cuasi estable formado por un electrón y su antipartícula, el positrón, orbitando alrededor de su centro de masas común formando así un átomo exótico. La órbita de ambas partículas y los niveles energéticos son similares a los del átomo de hidrógeno (formado por un protón y un electrón). Pero debido a la diferente masa del sistema, las frecuencias asociadas a las líneas espectrales son menos de la mitad que en el hidrógeno.
8. Ver el artículo "*Entropy evolution of universes with initial and final de Sitter eras*", José Pedro Mimoso y Diego Pavón, febrero 2013. [https://arxiv.org/pdf/1302.1972]
9. Eso de la pérdida de la información del Universo es una cosa que produce alergia en los físicos porque viola la ley comúnmente asumida de que, en principio, la información completa acerca de un sistema físico en un punto y en un tiempo debe determinar su estado en cualquier otro tiempo. Es decir, debe prevalecer el principio de reversibilidad que permite que numerosos estados físicos puedan volver al mismo estado inicial. Y eso no se conseguiría si se pierde información. Según esto los agujeros negros deberían guardar una memoria de las estrellas y materia que los originaron, información que debería volver al Universo a través de algo desconocido que bien pudiera ser equivalente a la radiación de Hawking.
10. La idea es sencilla, según los físicos cuantos más grados de libertad dispone un sistema... más configuraciones distintas podrán adoptar sus estructuras. Lo cual es índice de alta entropía. Algo así como cuando en un trozo de hielo la temperatura acelera la movilidad de las moléculas de agua, lo que favorece su liberación del influjo de las fuerzas electromagnéticas. En el proceso el agua va ganando grados de libertad mientras se va licuando, lo que supone una estructura menos ordenada y de mayor entropía.

11. "*Time without end. Physics and Biology in an open Universe*", página 9, 1979, Freeman J. Dyson.

12. A ese respecto aconsejo la lectura del libro "*El orden del tiempo*", del físico experto en gravedad cuántica Carlo Rovelli. Para él la entropía y el tiempo son conceptos emergentes de nuestra conciencia, que se manifestaron muy útiles en nuestro desarrollo evolutivo.

13. "*A DYING UNIVERSE: The Long-Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects*", Fred C. Adams and Gregory Laughlin. [arxiv.org/pdf/astro-ph/9701131.pdf]

41. Epílogo

Queridos amigos, llegó el momento de despedirnos de nuestro Universo, al menos de su biografía. No se me ocurre mejor final que traer a escena a un hombre que ha sido para muchos el impulsor de nuestra afición por tan asombroso escenario.

La fotografía anterior[1] se conoce como *"Pale Blue Dot"*, el punto azul pálido. Y aunque cueste creerlo, el "gran" personaje de esta escena, el pequeñísimo casi imperceptible punto blanco apuntado por la flecha, casualmente en el centro de uno de los rayos de luz dispersos como resultado de tomar la imagen tan cerca del Sol,

¡ES LA TIERRA!

Fue tomada por la nave espacial Voyager 1 el 6 de julio de 1990 cuando se encontraba a una distancia de más de 4 mil millones de millas de nosotros.

En ese pequeño punto ha pasado todo lo que le ha sucedido a la humanidad, desde lo más pequeño a lo más grande… un insignificante lugar en un inabarcable océano… como nos dijo el gran Carl Sagan… [2]

... "Desde este lejano punto de vista, la Tierra puede no parecer muy interesante. Pero para nosotros es diferente. Considera de nuevo ese punto. Eso es aquí. Eso es nuestra casa. Eso somos nosotros. Todas las personas que has amado, conocido, de las que alguna vez oíste hablar, todos los seres humanos que han existido han vivido en él. La suma de todas nuestras alegrías y sufrimientos, miles de ideologías, doctrinas económicas y religiones seguras de sí mismas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de civilizaciones, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, cada niño esperanzado, cada inventor y explorador, cada profesor de moral, cada político corrupto, cada "superstar", cada "líder supremo", cada santo y pecador en la historia de nuestra especie ha vivido ahí... en una mota de polvo suspendida en un rayo de sol."

Carl Sagan

A pesar de su nimiedad, de sus insignificancia azul, en ella han vivido grandes hombres que nos han ayudado a abrir los ojos. No nos queda más que decirles ¡GRACIAS! Cumplido este obligado, para mí, homenaje, recopilemos nuestro relato.

El Universo, nuestra realidad más auténtica, en donde cohabitan y se interrelacionan en el infinito las ciudades cósmicas, nuestros barrios y casas galácticos. Con qué familiaridad hablamos de la Vía Láctea, del Sistema Solar y de la querida Tierra. Espero que después de este largo viaje revelador hayamos sido capaces de desvelar, asimilar y hacer nuestros los misterios de la vida del Cosmos, desde el hipotético Big Bang, cuna cuántica del recién nacido, hasta el escenario de hoy en día cuya contemplación nos deja embelesados. Viajamos por una expansión más rápida que la luz, buceamos en un plasma primordial viendo cómo iban emergiendo fuerzas y partículas físicas, escuchando como sonaba la música ambiental de las ondas sonoras en el revuelto ruedo. Vimos lo que poéticamente conceptuamos como un *flash*, el proceso que liberó a los fotones primordiales que aún vuelan disciplinados a nuestro alrededor, cada vez con menor energía. No tan misteriosamente la materia que nos conforma se iba congregando gracias al poder gravitatorio de fuerzas medianamente oscuras, a la par que el tejido que sustenta la obra de teatro iba creciendo y embalsando cantidades ingentes de energía. Hasta llegar al año 13.800 millones… que con otro origen de coordenadas temporales nosotros conocemos como inmerso en el siglo XXI de nuestra era. Las estructuras que observamos a simple vista, y gracias a la cada vez más favorable tecnología, parecen estáticas, aunque realmente siguen bailando ininterrumpidamente bajo la batuta de las leyes físicas. El Universo de hoy es un universo joven y nosotros estamos en él en un momento muy favorable para poder observarlo. No todo va a seguir igual. No hace tanto que cambió el signo

de la expansión al dominar la energía oscura a la gravedad. Todo aún parece muy cerca como para poder estudiarlo… cercanía que se va a ir desvaneciendo con los millones de años venideros, cuando la materia se irá desgranando, separándose, reconvirtiéndose hacia sus esencias más básicas, para morir en un mar de energía muy fría. O eso creemos.

No me interesa mucho el futuro, pues a mis propósitos e interés me parece irrelevante lo que pueda pasar ya que, como digo, hay muchos boletos para que este futuro sea largo y gélido, el *Big Freeze*. Aunque también se contemplan otras caídas del telón mucho menos probables, sin duda intelectualmente tan estimulantes como el *Big Freeze*. Desde un colapso rápido a una rotura de magnitud cósmica, nunca mejor dicho, del tejido del Universo. En cualquier caso, estamos hablando de un futuro distante de nosotros en una cantidad de años igual a una potencia de 10 elevado a un 1 seguido de… no me atrevo ni a poner el número de ceros, pero ya vimos que una barbaridad inimaginable para el menguadito hombre que soy.

Nuestro Universo que me merece la pena es el de aquí y ahora, el mío, el que puedo disfrutar e investigar. Éste que hizo levantar los ojos al primer *homo* con suficiente consciencia como para sentirse agradecido por el retornar diario del Sol, que le produjo un temor reverencial tal como para ver en él a sus dioses; el que propició la necesidad de inventar cosmologías a todos los pueblos antiguos; el que motivó a los sumerios y egipcios a su estudio; el que hizo vibrar en el alma de Pitágoras la idea de la armonía de las esferas… en definitiva, el que causó asombro a tantos y tantos estudiosos, Copérnico, Galileo, Newton, Einstein, Hubble, Guth… y muchos más que me dejo en el tintero. Una infinita lista, hombres que admiramos porque nos regalaron su asombro hasta extremos que sin ellos nunca hubiéramos alcanzado. Termino.

****

Aunque antes no me resisto a dejar de proponeros la lectura del emotivo pensamiento de Isaac Asimov[4] encontrando poesía más allá de donde el poeta no supo verla. Me declaro su discípulo.

"Uno de los poemas más conocidos de Walt Whitman[4] *es este:*

'Cuando escuché al letrado astrónomo,

cuando las pruebas, las figuras, oscilaban en columnas ante mí,

cuando me mostraron los gráficos y diagramas para sumarlos, dividirlos, medirlos,

cuando sentado escuché al astrónomo con muchos aplausos en la sala de conferencias…

cuán pronto inexplicablemente me sentí cansado y hastiado, hasta que me escabullí de mi asiento y me fui a deambular solo, en el húmedo y místico aire nocturno, y de tanto en tanto, levantaba la vista en perfecto silencio hacia las estrellas.

Imagino que muchas personas al leer estas líneas se dirán a sí mismos exultantes: ¡Cuánta verdad! ¡La ciencia absorbe belleza de todo lo que nos rodea, reduciéndolo a números, tablas y medidores!

¿Para qué molestarse en estudiar toda esa basura cuando puedo simplemente salir y contemplar las estrellas?'

[palabras que provocan la siguiente reflexión de Asimov]

Este es un punto de vista muy práctico ya que hace no solo innecesario, sino francamente mal visto, intentar entender todas esas cosas difíciles de la ciencia. En su lugar lo mejor es echar una ojeada al cielo nocturno, recibir una dosis rápida de belleza y salir hacia una discoteca.

El problema es que Whitman hablaba sobre cosas que no conocía, pero el pobre no conocía nada mejor. No niego que el cielo nocturno sea precioso. Yo también he pasado tiempo tumbado en la ladera de una colina durante horas contemplando a las estrellas y siendo cautivado por su belleza, y recibiendo picaduras de insectos cuyas marcas tardaban semanas en desaparecer. Pero lo que veo -esos silenciosos y titilantes puntos de luz- ***no es toda la belleza que hay****. ¿Debería quedarme admirando cariñosamente una hoja solitaria e ignorar voluntariamente la presencia del bosque? ¿Debería satisfacerme mirando el sol brillando en un solo grano de arena y desdeñar cualquier conocimiento de la playa? Esos puntos brillantes en el cielo que llamamos planetas son mundos.*

Allí hay mundos con una espesa atmósfera compuesta por dióxido de carbono y ácido sulfúrico, mundos de líquido incandescente con volcanes que podrían engullir la Tierra entera; mundos inertes con silenciosas marcas de cráteres; mundos con volcanes soplando penachos de polvo hacia el cielo sin aire;

mundos con desiertos rosáceos y desolados; cada uno con una belleza extraña y ultra terrenal que se reduce a una simple mota de luz si solo observamos el cielo nocturno.

Los otros puntos brillantes que llamamos estrellas en vez de planetas son en realidad soles. Algunos son de una grandiosidad incomparable, cada uno brillando con la luz de mil soles como el nuestro, algunos de ellos no son más que brasas que liberan su energía mezquinamente. Algunos de ellos son cuerpos compactos tan masivos como nuestro Sol, pero con toda esa masa comprimida en una bola más pequeña que la Tierra. Algunos son más compactos todavía, con la masa del sol comprimida hasta el volumen de un pequeño asteroide. Y algunos son aún más compactos con su masa reducida hasta el volumen de cero, cuyo emplazamiento se caracteriza por un fuerte campo de gravedad que lo engulle todo y no devuelve nada; con materia cayendo en espiral por un pozo sin fondo y lanzando un salvaje grito de agonía de rayos X.

Existen estrellas que palpitan sin fin en una inmensa respiración cósmica y otras que, después de haber consumido su combustible, se expanden y enrojecen hasta engullir a sus propios planetas, si es que tiene alguno. Algún día, dentro de millones de años, nuestro Sol se expandirá y la Tierra se quemará y marchitará y se vaporizará convirtiéndose en un gas de hierro y roca sin dejar restos de la vida que una vez dio. Algunas estrellas explotan en un vasto cataclismo cuyo estallido feroz de rayos cósmicos, desplazándose apresuradamente casi a la velocidad de la luz, llega a través de miles de años a tocar la Tierra y suministrar parte de la fuerza motriz de la evolución a través de mutaciones.

A esta ínfima cantidad de estrellas que vemos al alzar la vista en absoluto silencio -unas 2.500, no más, incluso en las noches más oscuras y despejadas- se les suma una vasta horda que no vemos, que asciende a la enorme cantidad de trescientos mil millones, para formar un remolino enorme en el espacio. Este remolino, la Vía Láctea, se estira tan extensamente que le toma a la luz, moviéndose a 300.000 kilómetros por segundo, cien mil años para cruzar de un extremo al otro; y rota alrededor de su centro en un giro amplio y majestuoso que demora doscientos millones de años en completarse. El Sol, la Tierra y nosotros mismos, todos damos ese giro.

Más allá de la Vía Láctea existen otras galaxias, más o menos una veintena de ellas ligadas a la nuestra en un cúmulo de galaxias, la mayoría de ellas pequeñas, con no más de unos pocos miles de millones de estrellas en cada una; pero con una al menos, la galaxia Andrómeda, el doble de grande que la nuestra. Más allá de nuestro propio cúmulo, otras galaxias y otros cúmulos existen; algunos cúmulos formados por miles de galaxias. Se extienden hacia

afuera y hacia el exterior tan lejos como nuestros mejores telescopios pueden ver, sin signos visibles de un final, tal vez cien mil millones de ellos en total.

Cada vez, en más y más de esas galaxias, estamos encontrando una intensa violencia en el centro; grandes explosiones y emanaciones de radiación señalando la muerte de quizás millones de estrellas. Incluso en el centro de nuestra galaxia existe una increíble violencia oculta en nuestro propio sistema solar y su periferia por enormes nubes de polvo y gas que yacen entre nosotros y el centro agitado. Algunos centros galácticos son tan brillantes que pueden ser divisados a distancias de miles de millones de años luz, distancias desde las cuales las galaxias mismas no pueden ser vistas, y solo los centros brillantes y voraces de energía se dejan ver, como cuásares. Algunos de ellos han sido detectados desde más de diez millones de años luz de distancia.

Todas esas galaxias se alejan las unas de las otras en una inmensa expansión universal que comenzó hace quince mil millones de años, cuando toda la materia del Universo se encontraba en una pequeña esfera que explotó en la más vasta forma concebible para formar galaxias. El Universo podría expandirse eternamente o puede llegar el día en que la expansión disminuya y se invierta en una contracción para volver a formar la pequeña esfera y comenzar el juego de nuevo de manera que todo el Universo estaría exhalando e inhalando alientos que quizás tarden billones de años en completarse.

Todo ese panorama que se encuentra más allá del alcance de la imaginación humana fue posible gracias al trabajo de centenares de ***"letrados" astrónomos****.*

*Todo eso, absolutamente todo fue descubierto después de la muerte de Whitman en 1892, y la mayoría en los últimos veinticinco años, de modo que el pobre poeta nunca supo cuán limitada e insignificante era la belleza que admiraba cuando él "****levantaba la vista en perfecto silencio hacia las estrellas****".*

Tampoco nosotros podemos conocer o imaginar ahora la belleza ilimitada que se nos revelará en el futuro gracias a la ciencia."

Hasta aquí los pensamientos poéticos de Isaac Asimov. Entenderéis que tras lo anterior no puedo añadir más.

NOTAS DEL CAPÍTULO 41:

1. Imagen: (NASA, dominio público)
2. Las anteriores palabras se han extraído del libro de Carl Sagan, "*Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio*". Carl Sagan es de sobra conocido para todo el que ama su Universo. Pero por si no es ese el caso… Fue un astrónomo, astrofísico, cosmólogo, escritor y divulgador científico estadounidense (1934-96). Defensor del pensamiento escéptico científico y del método científico, pionero de la exobiología y promotor de la búsqueda de inteligencia extraterrestre entre otras cosas. Ganó gran popularidad gracias a la galardonada serie documental de TV "*Cosmos: Un viaje personal*", producida en 1980, de la que fue narrador y coautor.
3. Isaac Asimov fue un escritor y profesor de bioquímica en la facultad de medicina de la Universidad de Boston, de origen ruso nacionalizado estadounidense, y conocido por ser un prolífico autor de obras de ciencia ficción, historia y divulgación científica.
4. Walt Whitman fue un poeta, enfermero voluntario, ensayista, periodista y humanista estadounidense. Su trabajo se inscribe en la transición entre el trascendentalismo y el realismo filosófico, incorporando ambos movimientos a su obra. Whitman está entre los más influyentes escritores del canon estadounidense y ha sido llamado el padre del verso libre. Dada la fecha de su muerte, 1.892, convendremos en su descargo que quizás en su verso no podía decir otra cosa distinta de la que dijo.

APÉNDICE I. Breve cronología y otros parámetros

Momento	Tiempo	Energía	Temperatura (K)	Tamaño observable (metros)
Edad de Planck	$5{,}391\text{x}10^{-44}$ seg	10*28 eV	$1{,}417\times10^{32}$	$1{,}161\text{x}10^{-35}$
Momento cero	10^{-43} seg	10^{19} GeV	$1{,}417\times10^{32}$	$1{,}161\text{x}10^{-35}$
Aparece la gravedad	10^{-43} seg			
Bosones X e Y				
Época de la Gran Unificación				
Inicio de la inflación	10^{-35} seg	10^{15} GeV		
Separación interacción fuerte	10^{-32} seg			
Fin de la inflación	10^{-32} seg			10^{-1}
[Universo=Límite del LHC]	10-^{14} seg	10^{4} GeV		
Separación débil/ electromagnetimo	10^{-12} seg	10^{3} GeV	10^{16}	$3\text{x}10^{-4}$
Plasma quark-gluon	10^{-12} /10^{-6} seg			
Transicion a hadrones	10^{-6} seg	1 GeV	10^{13}	
	10^{-4} seg	100MeV	10^{12}	$3\text{x}10^{4}$
Liberación de los neutrinos primordiales	1 seg	1 MeV	10^{10}	10^{16}
Relación protón/neutrón=3/1	1 seg			
Fin del equilibrio termodinámico e^-/e^+	14 seg	500 KeV	$3\text{x}10^{9}$	

Momento	Tiempo	Energía	Temperatura (K)	Tamaño observable (metros)
Relación protón/neutrón=5/1	14 seg			
Inicia la Nucleosíntesis	100 seg			
	200 seg	100 KeV	10^9	$3x10^{10}$
Fin de la Nucleosíntesis	240 seg			
La materia domina a la radiación	380.000 años			
Época de la Recombinación	380.000 años	0,25 eV	$3x10^3$	$3x10^{21}$
Primeras estrellas (Población III)	150?? millones años			
La vía Láctea empieza a formarse	200 millones años			
Galaxia más antigua (GL-z13)	250 millones años			
Época de la reionización (inicio-fin)	400-900 millones años			10^{23}
Cuásar más antiguo (ULAS J1120+0641)	770 millones años			$5x10^{23}$
Primeros proto cúmulos de galaxias	1.000 millones años	10^{-3} eV	20	10^{25}
Primeros cúmulos de galaxias	3.000 millones años			
Primeros supercúmulos de galaxias	5.000 millones años			
La energía oscura domina a la gravedad	6.200 millones años			
Hoy	13.800 millones años	$2,3^{10-4}$	2,7	10^{26}

APÉNDICE II. Bibliografía

Antes de proponer el listado de los principales libros de los que me he alimentado tengo que agradecer directamente a gente que tengo más próxima, sabios de la divulgación en la red, comenzando con Pedro Gómez- Esteban, alma mater del blog "*El Tamiz*" (y padre de nuestro blog "*El Cedazo*") en donde encontraréis series tan interesantes como "*El Sistema Solar*", "*Esas maravillosas partículas*", "*La vida privada de las estrellas*", "*Las cuatro fuerzas*", "*Relatividad sin fórmulas*" o "*Cuántica sin fórmulas*". También de "*El Cedazo*" agradezco a Antares por todo lo que he aprendido y disfrutado de su serie "*El Universo – La corta historia de la fascinación por algo tan grande*". Continúo con el blog "*Cuentos cuánticos*" de Enrique Fernández Borja; el blog "*Neofronteras*" del enigmático doctor en física J.J.; o dentro de la comunidad de blogeros "*Naukas*" a Daniel Marín, Francisco R. Villatoros, César Tomé López y algún otro que me dejo en el tintero; a la desaparecida -o en *standby*- "*Pizarra de Yuri*" de Antonio Cantó; al blog "*Of Particular Significance*" de Matt Strassler y… alguno más que no incluyo en la relación, pero que quedan en mi agradecimiento. Y como en las bodas de Caná, el vino bueno llega al final: ¡gracias a mis editores! por su ayuda en la redacción y por sus estimulantes sugerencias: me estoy refiriendo a Pedro Gómez-Esteban, Javier J Sedano y, en grado especial, a Macluskey ¡qué hubiera sido de mi sin Mac! Y gracias a vosotros lectores por la paciencia demostrada en la lectura de este libro ¡habéis sido fieles hasta el final!

Y ahora sí, la bibliografía. Son libros que he leído y me han enseñado mucho:

1. Fred C. Adams and Gregory Laughlin: A DYING UNIVERSE: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects.[1]
2. Fred C. Adams and Gregory Laughlin: The five ages of the Universe.
3. Eduardo Battaner: Introducción a la Astrofísica.
4. Bill Bryson: Una breve historia de casi todo.
5. Sean Carrol: El gran cuadro.
6. Sean Carrol: Las ideas fundamentales del Universo I: Espacio, tiempo y movimiento.
7. Sean Carrol: Las ideas fundamentales del Universo II: Física cuántica, cuantos y campos.
8. Alberto Casas: El LHC y la frontera de la física.
9. Alberto Casas: El lado oscuro del universo.

10. Alberto Casas y Teresa Rodrigo: El bosón de Higss.

11. Eric Chaisson y Steve McMillan: Astronomy today.

12. Freeman J. Dyson: Time without end: physics and biology in an open universe.[2]

13. Paul Davies: Los últimos tres minutos.

14. Cristophe Galfard: El Universo en tu mano.

15. George Gamow: La creación del Universo.

16. Beatriz Gato Rivera: Antimateria.

17. Pedro Gómez-Esteban: La vida privada de las estrellas.

18. Brian Green: El tejido del Cosmos.

19. Brian Green: El Universo elegante.

20. Brian Green: La realidad oculta,

21. John Gribbin: Biografía del Universo.

22. Shahen Hacyan: Los agujeros negros y la curvatura del espacio/tiempo.

23. Stephen Hawking: Brevísima historia del tiempo.

24. Stephen Hawking: El Universo en una cáscara de nuez.

25. Catherine Heymans: The dark Universe.

26. Jim Holt: ¿Por qué existe el mundo?

27. Sabine Hossenfelder: Perdidos en las matemáticas.

28. Michio Kaku: Universos paralelos.

29. Lawrence Krauss: A Universe from nothing.

30. Lawrence Krauss: Historia de un átomo.

31. Abraham Loeb y Steven R. Furlanetto: Las primeras galaxias en el Universo.

32. Katie Mack: El fin de todo.

33. Houjun Mo, Frank van den Bosch y Simon White: Galaxy Formation and Evolution.

34. Roger Penrose: Ciclos del tiempo: Una extraordinaria nueva visión del universo.

35. Roger Penrose: El camino de la realidad.

36. Carlo Rovelli: Agujeros blancos.

37. Carlo Rovelli: El orden del tiempo.

38. Carlo Rovelli: Siete breves lecciones de física.

39. Pilar Ruiz: La aceleración del Universo

40. Carl Sagan: Cosmos.

41. George Smoot y Keay Davidson: Arrugas en el tiempo.

42. Moles Villamate: Claroscuro del Universo.

43. Steven Weinberg: Los tres primeros minutos del Universo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 41 Y APÉNDICES:

1. [arxiv.org/pdf/astro-ph/9701131.pdf]
2. [http://scilib-physics.narod.ru/Dyson/dyson.pdf]