

I - El Modelo Standard. Pilares básicos de la Cosmología.

Javier Zorzano

Departamento de Física Aplicada a la Ingeniería Industrial

U.P.M.

Septiembre 2008

1	Introducción a la Cosmología.....	1
1.1	Física y Cosmología	1
1.2	El estudio de la Cosmología	2
2	Dificultades del universo newtoniano	3
2.1	La paradoja de Olbers y el universo infinito y estático de Newton.....	3
2.1.1	La solución actual de la paradoja	4
2.2	El problema de la inestabilidad	5
3	Bases del Modelo Estándar	5
3.1	Bases Teóricas	5
3.2	Bases Experimentales	7
3.3	Otras características del Modelo Standard	8
3.4	Otros principios en Cosmología	8
4	El Principio Cosmológico. Homogeneidad e Isotropía	9
4.1	Principio Copernicano	9
4.2	Principio Cosmológico	9
4.3	Homogeneidad e Isotropía.....	10
5	Modelos cosmológicos alternativos	10
5.1	El Big Bang y sus evidencias	10
5.2	Otros modelos.....	11
5.3	El modelo del estado estacionario. Steady State	12
6	Las interacciones fundamentales y la producción primordial de elementos	13
7	Breve historia del Universo	14
8	Balance actual de materia y energía	18
9	Resumen del Modelo Cosmológico Standard	19

1 Introducción a la Cosmología

1.1 Física y Cosmología

En los últimos años del siglo XX la Física se ha visto obligada a modificar de forma sensible su visión de la Naturaleza. A los problemas teóricos ya existentes sobre la Interpretación de la Mecánica Cuántica y la Unificación coherente, supersimétrica, de las interacciones electrodébil y fuerte o su posterior unificación con la gravedad (gravedad cuántica, teoría de cuerdas etc.), se han unido nuevos datos experimentales que apuntan a la necesidad de lo que se ha venido en llamar 'Nueva Física'. Se ha evidenciado la existencia de masa de los neutrinos, el momento magnético anómalo del muón es difícil de acoplar en el modelo Standard, el bosón de Higgs del Modelo Standard no ha aparecido en los niveles de energía más sencillos, que ya han sido alcanzados por los aceleradores actuales y no hay indicios válidos de las partículas supersimétricas, que deberían aparecer a energías superiores.

A esta situación de la Física de Partículas Elementales han venido a sumarse dramáticamente los datos experimentales aportados recientemente por la Cosmología. La Cosmología, en los últimos años, ha pasado de ser una materia casi especulativa y teórica a ser una **'Cosmología de precisión'**. Las mediciones del fondo cósmico de microondas (CMB) por experimentos como COBE, BOOMERANG, WMAP, las mediciones del valor actual del parámetro de Hubble por el HST, los valores cada vez más ajustados obtenidos sobre la bariogénesis y la nucleogénesis, el descubrimiento de la aceleración del universo en supernovas SNIa ...han fijado valores a los parámetros y a la composición del Universo. Pero sobre todo han establecido un formidable desafío a la Física: **el 95 % de la composición del Universo es de naturaleza desconocida, materia oscura (DM) o energía oscura (DE), el 5 % restante sería materia bariónica, en buena parte también oscura, solamente el 0.5 % sería materia visible.** A este panorama se deben añadir la confirmación de la Teoría de la Inflación, los indicios y sospechas de que las constantes básicas del universo sean variables en el tiempo, la inquietante evidencia del Principio Antrópico, las múltiples sugerencias de la existencia de muchos universos (Multiverso)...Evidentemente los nuevos datos y teorías que ha aportado recientemente la Cosmología han dado un vuelco a la situación de la Física en los últimos años. A la Cosmología y a su conexión con la Física de Partículas se dedica buena parte del esfuerzo investigador actual en Física fundamental y experimental.

1.2 El estudio de la Cosmología

La cosmología es la ciencia que estudia el universo como un todo. Desde el comienzo de la civilización la humanidad se ha venido preguntando por la composición del universo y las leyes que le gobiernan. Son las viejas cuestiones sobre la edad que tiene el universo, sus dimensiones y su geometría. ¿Cómo comenzó, cómo ha evolucionado y cómo terminará? ¿Cuál es la composición del universo? ¿Cómo se originaron la materia y las estructuras que observamos en él?

La Cosmología científica comienza cuando se hace la suposición de que nosotros no ocupamos ningún sitio especial en el universo, que las leyes físicas que son válidas en la tierra son también válidas en cualquier parte del universo. Algunas de las anteriores cuestiones tienen hoy una respuesta bastante aproximada en el llamado **Modelo Estándar de la Cosmología**

La enseñanza de la Física universitaria en España quizás adolece de falta de información a los alumnos sobre la nueva situación. Sin embargo las noticias de las publicaciones especializadas o no y de los medios de comunicación son cada día más numerosas; y es innegable el interés de profesores y alumnos por estos temas. Un conocimiento básico de Cosmología que pueda enmarcar los distintos experimentos y teorías actuales es accesible con los instrumentos matemáticos y físicos que se poseen tras los cursos de Física básicos. Este es el objetivo de estos temas de introducción a la Cosmología

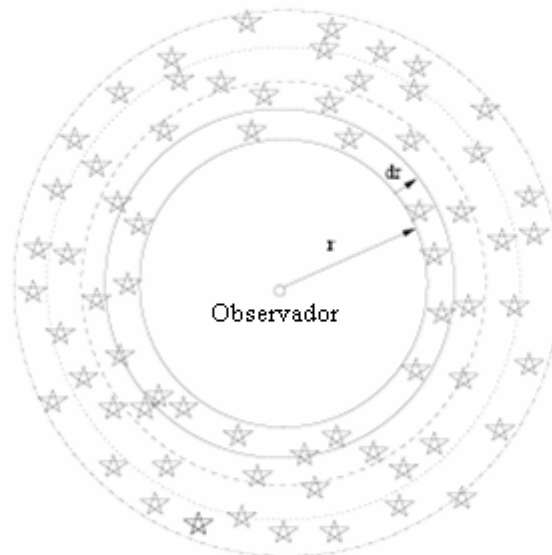
2 Dificultades del universo newtoniano

El universo newtoniano no puede ser finito, porque colapsaría rápidamente hacia su centro de masas. En cambio, **un universo infinito** no tendría centro y eso permitiría que, conforme a las ideas newtonianas, fuera estático. De esa manera, a pequeñas escalas, la gravedad podría hacer que se formaran los pequeños objetos, estrellas, galaxias...que conforman nuestra imagen cotidiana del firmamento.

Sin embargo un universo newtoniano infinito presenta dos problemas: el problema de la paradoja de Olbers y el problema de la inestabilidad.

2.1 La paradoja de Olbers y el universo infinito y estático de Newton

La más simple y más antigua de todas las observaciones astronómicas es la de que el cielo oscurece cuando se oculta el Sol. En el siglo XVII, Johannes Kepler utilizó este hecho como evidencia de que el universo era finito. Pero cuando en el siglo XIX se extendió la idea de que el espacio era infinito, invariable y que, como consecuencia de la revolución copernicana, estaba lleno de estrellas semejantes al Sol, entonces se planteó claramente el problema de por qué la noche es oscura. Un universo infinito, estático y uniformemente lleno de estrellas debería llenar totalmente nuestro campo de visibilidad de tal forma que el cielo nocturno sería tan brillante como nuestro Sol y nosotros mismos nos encontraríamos en medio de un baño de calor, a la temperatura de la superficie del Sol. Sin embargo la noche es oscura, no es brillante y eso significa que el flujo luminoso que recibimos es realmente pequeño. Obviamente, al menos una de las anteriores suposiciones debe ser errónea.



Para determinar claramente este problema se puede hacer un cálculo muy sencillo. Si se desprecia la absorción, la luminosidad aparente de una estrella de luminosidad absoluta L , situada a una distancia r , es:

$$l = \frac{L}{4\pi r^2}$$

Si llamamos n a la densidad numérica de tales estrellas por unidad de volumen, entonces el número de estrellas dN a distancias entre r y $r+dr$ es $dN = n 4\pi r^2 dr$; de

tal forma que la densidad total de energía radiante debida a todas las estrellas es:

$$\rho_l = \int l dN = \int_0^{\infty} \left(\frac{L}{4\pi r^2} \right) 4\pi r^2 dr = Ln \int_0^{\infty} dr$$

La integral claramente diverge y el resultado es una densidad de energía infinita proveniente de la luz de las estrellas.

A fin de evitar esta paradoja **Olbers** postuló la existencia de un medio interestelar opaco que absorbiera la luz de las estrellas muy lejanas, que son las responsables de que diverja la integral anterior. Pero, primero, que puede demostrarse que la cantidad de polvo interestelar necesaria debería ser tan grande que el propio Sol se oscurecería. Además la radiación que reemitiría este polvo caliente, debería verse en el infrarrojo. Y segundo, y más importante, que en un universo eterno la temperatura del medio interestelar habría aumentado hasta que el medio estuviera en equilibrio térmico con la luz estelar, en cuyo caso comenzaría a emitir tanta energía como absorbiera y por tanto no reduciría la densidad media de energía radiante. Pudiera argüirse, visto de otra forma, que las estrellas mismas son opacas y bloquean la luz de las fuentes luminosas suficientemente distantes detrás de ellas. Pero, si esta fuera la solución de la paradoja, entonces cada línea de visión debería terminar sobre la superficie de una estrella y el cielo en su conjunto debería tener la temperatura igual a la de la superficie de una estrella típica.

2.1.1 La solución actual de la paradoja

Se han propuesto un gran número de soluciones para esta paradoja y han sido invocados para su resolución diferentes efectos.

Antes de la Teoría de la Relatividad se pensaba que la gravedad se propagaba a velocidad infinita (Teoría de Acción a Distancia). Las partículas sufrían la interacción gravitatoria inmediatamente. En Relatividad Especial la interacción electromagnética y en Relatividad General la interacción gravitatoria, tienen sin embargo una velocidad de interacción finita (Principio de Finitud de las Interacciones). Como el universo tiene una edad finita, del orden de 10^{10} años, y la gravedad se propaga a la velocidad de la luz, no sentimos la fuerza de la gravedad, **ni nos llega luz alguna desde distancias mayores a esos $\sim 10^{10}$ años-luz**. La paradoja de Olbers se resuelve entonces al aducir que la luz que proviene desde distancias más allá de $\sim 10^{10}$ años-luz no nos ha alcanzado todavía.

Por otra parte, **las estrellas radian solamente durante un tiempo finito**; queman su combustible a tasas bien conocidas. Sea infinita o no la edad del Universo, cada galaxia ha existido solamente durante un tiempo finito y ese es el tiempo en que ha podido radiar hacia nosotros.

Tampoco es infinito el volumen del universo observable; es demasiado pequeño para contener tantas estrellas visibles como necesitaría la paradoja. Es cierto que al ir aumentando la perspectiva temporal iría aumentando el número de estrellas que se hacen visibles, porque su luz ha tardado tiempo en llegar hasta nosotros, pero a su vez, las estrellas habrán ido quemando su combustible y desaparecen.

Hay un argumento adicional que se verá posteriormente. Dado que el universo se expande, las galaxias se separan cada vez más unas de otras, creando un '**redshift**', un

desplazamiento al rojo, sobre la luz que recibimos. Las distancias entre nosotros y el resto de las galaxias aumentan cada vez más. Cada fotón nos llega con menos energía que con la que fue emitido; y a su vez el volumen del universo crece, con lo que la densidad de energía decrece. Precisamente la observación del bajo nivel de radiación proveniente del espacio intergaláctico ha sido aducida como prueba de la expansión del universo.

2.2 El problema de la inestabilidad

El problema de la inestabilidad aparece cuando se aplica a un universo newtoniano infinito el llamado Principio Copernicano por el que se afirma, como veremos después, que nosotros no ocupamos ningún lugar privilegiado dentro del universo. El universo es así homogéneo e isotrópico alrededor de cualquiera de sus puntos (Principio Cosmológico). Bajo la condición de isotropía la fuerza de atracción desde un lado debe ser igual a la fuerza de atracción desde el lado opuesto. Si el número de capas esféricas es infinito, la fuerza desde cada lado se hace cada vez mayor conforme se van agregando capas y la fuerza total resultante sobre cada punto se anula. De esta forma el universo estaría en equilibrio. . . pero con un alto grado de inestabilidad. Se necesita, por tanto, un alto grado de isotropía. Si no la hubiera, las fuerzas no se equilibrarían y eso empujaría la materia hacia un sitio determinado conduciéndola rápidamente al colapso. Bastarían las fuerzas locales que aparecen en el movimiento de los planetas para provocar esta inestabilidad.

Como es bien conocido, en Teoría del Potencial, el problema del universo newtoniano es un problema tipo Dirichlet. Para determinar las fuerzas se necesitan conocer las condiciones de contorno. Si el universo tuviera una distribución de materia uniforme, finita y limitada, dadas las condiciones de contorno, se podría determinar la fuerza gravitatoria en cada punto. Pero en un universo así, newtoniano, infinito, ilimitado y sin centro, el potencial gravitatorio diverge a distancia infinita y el campo gravitatorio depende de las condiciones de contorno en el infinito.

3 Bases del Modelo Estándar

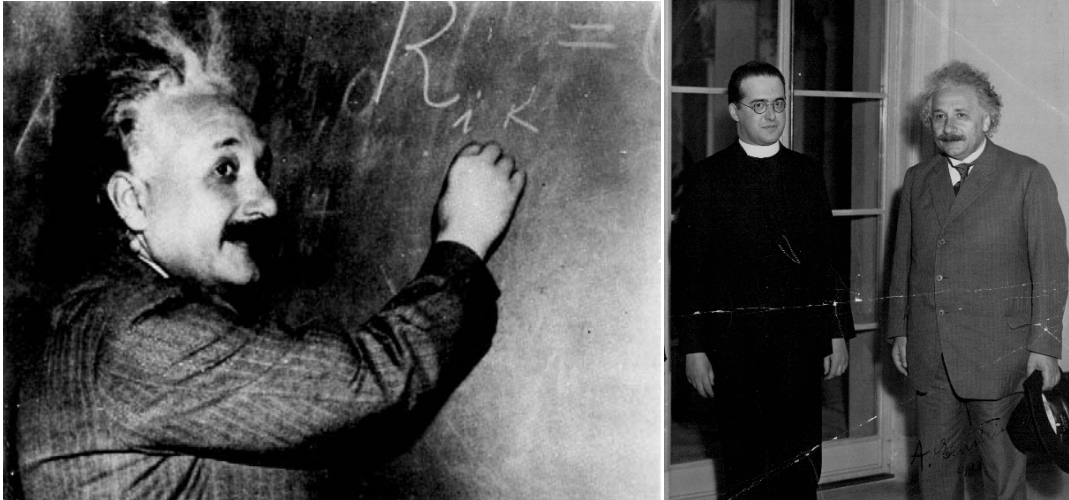
Nuestro conocimiento actual del Universo se fundamenta en el Modelo Standard. **El núcleo del Modelo Standard es la teoría del Big Bang, la ‘gran explosión caliente’**, que ocurrió hace $\sim 13,7 \cdot 10^9$ años. El Modelo Standard explica la evolución del Universo desde la primera fracción de segundo hasta la edad actual de una manera bastante satisfactoria; por eso está hoy casi universalmente aceptado.

El Modelo Standard de la Cosmología (hay también un Modelo Standard de Partículas Elementales) se fundamenta, principalmente, sobre las siguientes bases teóricas y experimentales.

3.1 Bases Teóricas

- Un marco teórico basado en la **Teoría General de la Relatividad de Einstein** (RG), que proporciona la teoría del campo gravitatorio y el marco básico para los distintos modelos cosmológicos, tal como fueron estudiados a principios de los años

20 del pasado siglo por el meteorólogo ruso Alexander Friedmann y el sacerdote belga George Lemaître. Los tres tests clásicos de la Teoría General de la Relatividad que entonces se formularon, el avance del perihelio de Mercurio, la desviación de la luz por el Sol y el desplazamiento al rojo gravitacional, han sido espectacularmente confirmados. Actualmente otros muchos tests avalan la RG de forma espectacular.



- El **Principio Cosmológico**, también introducido por Einstein, que supone la homogeneidad e isotropía del universo.
- El modelo de **fluidos**, que considerando a las **galaxias** como constituyentes básicos del universo las incluye en la teoría mediante una ecuación de fluido. (En la figura aparecen distintos tipos de galaxias).



3.2 Bases Experimentales

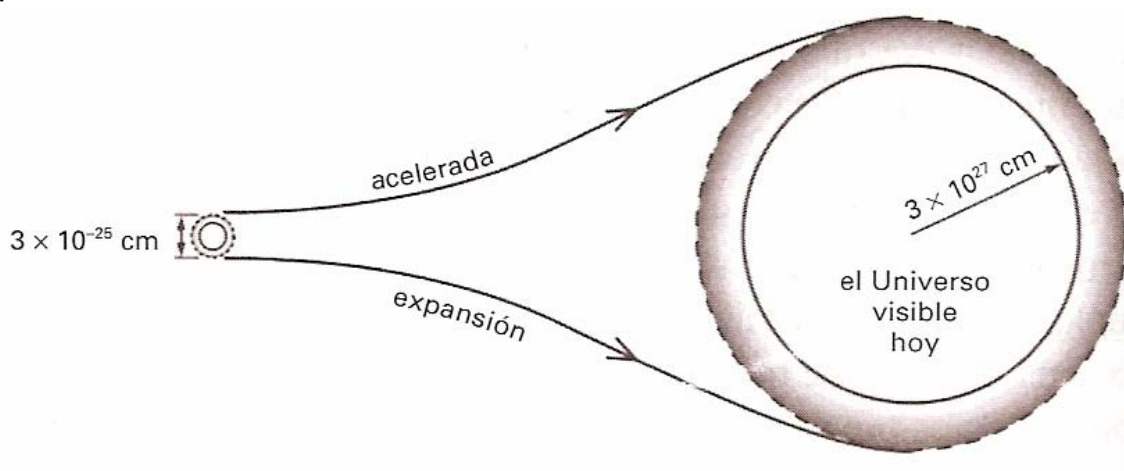
- La **Ley de Hubble**, que establece la expansión del universo con una velocidad de recesión de las galaxias proporcional a su distancia respecto a nosotros. Los diferentes diagramas de medición de esta ley a distintas escalas, mediante observaciones como las del Hubble Space Telescope, pueden determinar asimismo los parámetros de aceleración del universo.
- La **Radiación del fondo cósmico de microondas** (Cosmic Microwave Background, CMB), el ‘último destello del Big Bang’. Fue descubierta en 1965 por Arnold Penzias y Robert Wilson, como una radiación muy isotrópica correspondiente a la radiación de un cuerpo negro a $T^a = 2,725$ °K. Fue emitida cuando el Universo estaba lo suficientemente frío como para formar átomos neutros y que se pudieran desacoplar los fotones de la materia. Esto ocurrió aproximadamente unos 350.000 años después del Big Bang. La CMB contiene información sobre los primeros momentos del universo, da fundamento a la isotropía y permite mediante sus ligerísimas anisotropías de temperatura, 1 parte en 10^5 , la determinación de los distintos parámetros del modelo estándar. Hoy estas observaciones han sido confirmadas con una gran precisión, en experimentos como Cobe, Boomerang, Maxima y actualmente WMAP y están ayudando a establecer el paradigma del Big Bang Inflacionario como modelo preferido de la cosmología.
- La concordancia de los distintos métodos de **estimación de la edad del universo**. Problema no pequeño, porque en distintas épocas surgió el llamado ‘problema de la edad’, por el que alguno de sus constituyentes parecía ser más viejo que el propio Universo.
- La determinación de la abundancia relativa de los elementos primigenios ^1H , ^2D , ^3He , ^4He , y ^7Li formados en las reacciones nucleares en la época de la Nucleogénesis (**Big Bang Nucleogénesis BBN**), cuando el universo tenía 100 s. de edad y era solamente unas pocas veces más caliente que el núcleo de nuestro Sol. Fue establecida inicialmente por George Gamow en los años 40 del siglo pasado.

- El análisis de la **Estructura general del universo** (Large Scale Structure LSS) mediante experimentos como el 2dFGRS o el SDSS, que atestiguan la homogeneidad del universo y ayudan a la determinación de los distintos parámetros del modelo estándar.

3.3 Otras características del Modelo Standard

El Modelo Cosmológico Standard, además de basarse en los anteriores pilares básicos, incorpora algunas características especiales a fin de explicar la evolución y la estructura actual del universo. Se pueden citar las siguientes:

- la **Inflación**, una expansión inicial enormemente acelerada, propuesta originalmente por Alan Guth, y que explica la planitud y la homogeneidad actuales del universo.



- el **Hot Big Bang**, origen extremadamente caliente en el que tiene lugar la BBN.
- la **Constante Cosmológica Λ** , que Einstein introdujo en las ecuaciones de la Relatividad General (RG), originalmente para forzar que el universo fuera estático. Y que hoy explica, ella o una '**energía oscura**' (**DE**), la recientemente descubierta aceleración del universo.
- la '**materia oscura fría**' (**Cold Dark Matter, CDM**). Aproximadamente un 23% del contenido del universo debe estar formado por una materia, que actúa de forma gravitatoria, que es oscura y que no debe moverse a velocidades relativistas (es fría).

3.4 Otros principios en Cosmología

- **La Universalidad de las leyes físicas**. Esta suposición afirma que las leyes básicas de la física no cambian de un lugar a otro.
- **Principio Cosmológico Perfecto**. Mientras que el Principio Cosmológico pone de manifiesto que el universo es aproximadamente homogéneo e isótropo en el espacio pero no necesariamente en el tiempo, el Principio Cosmológico Perfecto – base del Modelo de Estado Estacionario – asevera que el Universo es homogéneo e isótropo no solamente en el espacio sino también en el tiempo.

- **Principio Antrópico.** Enunciado por Carter, supone una restricción al uso indiscriminado del Principio Copernicano limitando las grandes hipótesis filosóficas sobre la uniformidad del universo. Hay muy distintas versiones, todas ellas sujetas a gran discusión actual.
 - **Principio Antrópico Débil.** ‘Lo que esperamos observar debe estar restringido por la condición necesaria para nuestra presencia como observadores’. Las condiciones necesarias para la existencia de observadores, seleccionan de entre todos los universos posibles, aquellos que permitan, precisamente, que existan observadores.
 - **Principio Antrópico Fuerte.** ‘El Universo, y con él los parámetros fundamentales de los que depende, debe ser tal que admita la creación de observadores dentro de él en alguna etapa’.
 - **Principio Antrópico Participatorio** de Wheeler. La vida pudiera ser esencial, en algún sentido, para la coherencia del Universo.
 - **Principio Antrópico Final** de Barrow y Tipler. Una vez que la vida emerge en el Universo no desaparecerá.

4 El Principio Cosmológico. Homogeneidad e Isotropía.

La cosmología moderna se basa en una importante suposición básica: el Principio Cosmológico, que es una versión más general del Principio Copernicano.

4.1 Principio Copernicano

En 1543 Nicolas Copernicus publicó su tratado “De Revolutionibus Orbium Celestium” en el que se presentaba una visión nueva del mundo: el modelo heliocéntrico. Es difícil subestimar la importancia de este trabajo: desafiaba las antiguas visiones del Universo durante tanto tiempo mantenidas, la preponderancia de la Tierra y por extensión la de los seres humanos. Suponía comprender que nosotros, nuestro planeta y por supuesto el sistema solar, e incluso nuestra Galaxia, eran algo completamente común en los cielos y reproducido por miríadas de sistemas planetarios. Ello proporcionaba una visión del universo sencilla aunque estremecedora. Todas las “seguridades” de la Edad Media desaparecían; la visión del mundo era menos segura y confortable. A pesar de ello y de las críticas, el sistema fue prontamente aceptado; también lo hizo el mismo Galileo.

El Principio Copernicano, pues, dice que la Tierra no es el centro del universo, por tanto que no estamos viviendo en un sitio especial del mismo. Extendido a todo el universo esto significa que debe haber muchísimos soles como el nuestro y que el propio universo debe parecer igual visto desde cualquier punto.

4.2 Principio Cosmológico

Así pues, el cosmos visto desde cualquier punto parece el mismo que si se viera desde otro punto. Semejante a otros principios de simetría más directamente familiares de la

4.3 Homogeneidad e Isotropía

El Principio Cosmológico trae como consecuencia que el universo es homogéneo e isótropo.

La **ecuación de Einstein de la RG** conecta la geometría del espacio-tiempo con el contenido material del Universo. A esta ecuación pueden aplicarse para su resolución algunas ‘simetrías razonables’. Las simetrías más simples de este tipo son la **homogeneidad** y la **isotropía**, precisamente las que aporta este Principio Cosmológico. Por homogeneidad entendemos que el Universo es invariante bajo traslaciones espaciales. Mientras que la isotropía significa invariancia bajo las rotaciones.

El Universo puede ser modelizado como un **fluido perfecto**, cuyo componente básico son las galaxias, con alguna ecuación de estado, que esté dada normalmente como una relación entre la densidad ρ y la presión p del fluido.

La homogeneidad significa entonces que el universo tiene las mismas propiedades en todas las regiones y en cualquier punto del universo. La isotropía del universo significa que el universo parece el mismo cuando se le observa en todas las direcciones. Estas dos propiedades están separadas y necesitamos las dos para completar el Principio Cosmológico.

Realmente esta es una descripción muy pobre de los contenidos del Universo a pequeña escala, como la escala de las personas o los planetas o las estrellas e incluso las galaxias. En efecto, sabemos que a pequeñas escalas el universo ni es homogéneo ni es isótropo, pues si no fuera así, no podrían existir precisamente las distintas estructuras como las de las galaxias, estrellas, planetas y seres humanos. Pero es una excelente aproximación cuando se promedia sobre grandes escalas. Entonces las observaciones, como las de los experimentos que estudian la LSS, muestran en verdad que la materia está distribuida de forma ‘suave’. Midiendo por ejemplo en un Universo euclideo el número de galaxias N como una función de su magnitud luminosa m , se encuentra que $N(<m) \cong 10^{0,6 m}$ y que la distribución subyacente es básicamente homogénea. Notablemente esta relación se mantiene hasta distancias muy significativas; incluso en nuestro actual Universo en expansión.

Por otra parte, como ya se ha dicho, la **radiación cósmica de microondas CMB** es fuertemente isotrópica: hasta una parte en 10^5 , lo que supone una confirmación espectacular de la hipótesis.

5 Modelos cosmológicos alternativos

5.1 El Big Bang y sus evidencias

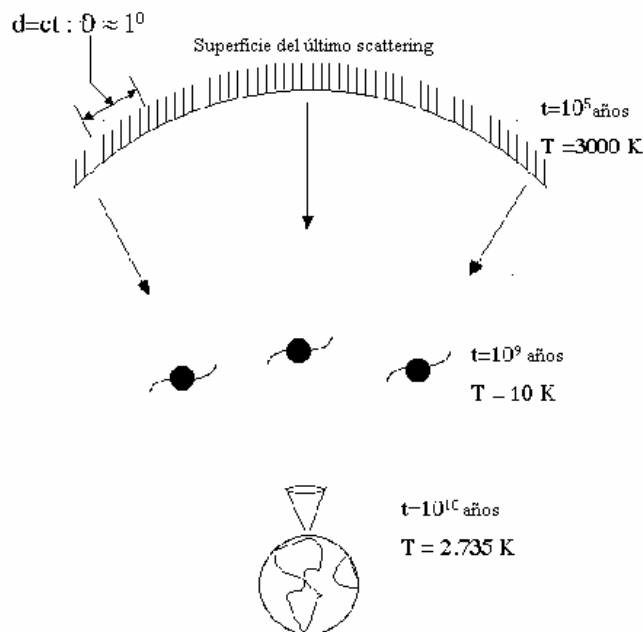
Esta es la interpretación más comúnmente aceptada del origen del Universo. La teoría del Big Bang opera desde una aseveración primaria: que el Universo comenzó casi

como una **singularidad de infinita densidad y temperatura en un momento finito del pasado, hace $13,72 \pm 1,3 \cdot 10^9$ años**. Descansa, como se ha visto, en la suposición de que el Universo cumple el Principio Cosmológico y en la universalidad de las leyes físicas.

Analizando el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de la luz proveniente de objetos astronómicos distantes y aplicando la **Ley de Hubble**, se hace aparente que el Universo, en sí mismo, se está expandiendo. Esta se considera una de las pruebas de la teoría del Big Bang.

Otra prueba aducida a favor de la teoría es la **Nucleosíntesis**, cuando después de unos pocos minutos de expansión, tras el Big Bang, cuando había una temperatura de alrededor de 10^9 °K se combinaron los protones con los neutrones para formar entre otros los núcleos de deuterio y helio del Universo.

Y una tercera prueba importante es la **CMB**, la radiación de fondo cósmico de microondas. Una radiación muy isotrópica, con el espectro térmico de un cuerpo negro y a una temperatura de 2,725 °K. Se produjo aproximadamente 400.000 años después del Big Bang, cuando los electrones y los primeros núcleos que se formaron se combinaron mutuamente para formar átomos. En ese momento la radiación quedó desacoplada de la materia y continuó viajando ampliamente sin ser impedida a través del espacio.



5.2 Otros modelos

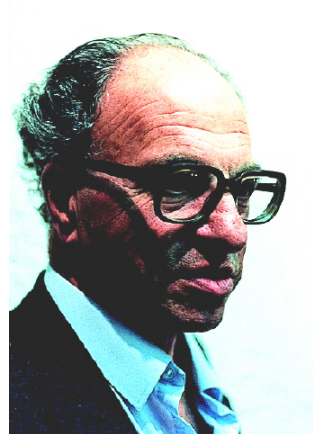
Ahora bien, el modelo del Big Bang ha ido teniendo problemas y se le han ido añadiendo soluciones 'ad hoc' a fin de ir apuntalándolo, como por ejemplo las de la Materia Oscura y la Energía Oscura. La propia idea de la expansión es una suposición 'fuerte' que ha sido criticada.

Por supuesto que han existido y existen otros modelos cosmológicos que actualmente tienen menos aceptación, como por ejemplo:

- modelos con materia oscura caliente (Hot Dark Matter, HDM)
- el modelo de Estado Estacionario (Steady State) (Hoyle, Bondi, Narlikar)
- modelos fractales (Pietronero)
- modelos con constantes fundamentales G , c , α función del tiempo (Dirac, Barrow, Magueijo)
- modelos de 'luz cansada' (Tired Light)

5.3 El modelo del estado estacionario. Steady State

La Teoría del Estado Estacionario es una teoría rival del Big Bang a la hora de explicar los orígenes del Universo. Fue propuesta en 1948 por Fred Hoyle, Thomas Gold y Hermann Bondi. Parte de la suposición de que el Universo cumple el **Principio Cosmológico Perfecto**. Tiene sus similitudes con la teoría del Big Bang en que también predice un universo que se está expandiendo y que acepta por tanto las mismas interpretaciones de la Ley de Hubble. Pero lo que la teoría del Estado Estacionario afirma en cambio, es que, aunque el Universo se expande, su densidad global no cambia. El Universo sería eterno.



Uno de los grandes problemas que plantea esta teoría es cómo se puede mantener la misma densidad en un universo que se expande, puesto que debería disminuir con el tiempo. La teoría supone entonces que hay una **generación constante de materia**, principalmente hidrógeno, que permite que la densidad media se mantenga igual en el tiempo.

La teoría empezó a tener problemas más serios cuando las observaciones empezaron a sustentar la idea de que el universo estaba, en efecto, cambiando: **cuasares** y radio galaxias, que tenían desplazamientos al rojo muy elevados, podían verse a distancias muy grandes, y no en galaxias cercanas. (Por supuesto que esto es bajo la interpretación de que estos desplazamientos al rojo obedecen exclusivamente a la ley de Hubble). La teoría del Estado Estacionario predecía que tales objetos deberían encontrarse por todas

partes en el Universo, no precisamente a grandes distancias como la teoría del Big Bang había predicho correctamente que se observarían.

El descubrimiento de **la radiación de fondo cósmico de microondas (CMB)** fue, como dijo Stephen Hawking, el clavo final sobre el ataúd de la teoría del Estado Estacionario. La explicación que ésta da a la CMB es que es el resultado de que la luz proveniente de estrellas antiguas ha sido dispersada por el polvo galáctico. Sin embargo esta idea no convence a los cosmólogos pues es difícil de explicar cómo brota de fuentes puntuales y además no muestra evidencias de características, tales como la polarización, que están normalmente asociadas con la dispersión. Aún más, el espectro de la CMB es tan cercano al de un cuerpo negro ideal que sería difícil que fuera formado por superposición de las contribuciones de distintos aglomerados de polvo a diferentes temperaturas y con diferentes desplazamientos al rojo.

En 1993 Fred Hoyle, Geoffrey Burbidge y Jayant V. Narlikar propusieron un **Estado Casi-Estacionario (QSS)** diseñado para tener en cuenta los nuevos descubrimientos para lo que el modelo antiguo fallaba en su predicción. Sin embargo han seguido apareciendo fallos y discrepancias con las observaciones, por lo que la mayor parte de los cosmólogos no aceptan tampoco esta teoría.

6 Las interacciones fundamentales y la producción primordial de elementos.

El marco básico del Modelo Estándar es, tras el Big Bang, el de un Universo en expansión enfriándose paulatinamente hasta el momento actual.

Si retrocedemos en el tiempo hasta el comienzo del Universo encontramos por tanto un Universo cada vez más caliente: aumenta la energía disponible para las interacciones de las partículas. De esta forma, irían emergiendo ante nosotros las distintas interacciones fundamentales de la naturaleza. Primero la **gravitación** y la interacción **electromagnética**, que son interacciones de baja energía y largo alcance. Después entraríamos en el dominio de la física atómica y nuclear: la interacción **electrodébil** y la **interacción fuerte**. Y después podríamos pasar al feudo, mucho menos conocido, de las teorías de **gran unificación** y la **gravedad cuántica**.

Nuestro conocimiento de las interacciones fundamentales a altas energías tiene su base en las colisiones en los **aceleradores de partículas**. Ha habido un enorme progreso experimental en la energía disponible en estas colisiones. Pero las condiciones físicas bajo las que se realizan son muy diferentes de las que existían en los primeros momentos del Universo. No solamente no se puede llegar a disponer de las energías iniciales. Es que no se pueden reproducir las condiciones de densidad y presión existentes en aquel plasma primordial, un plasma que además se expandía y se enfriaba rápidamente.

En cosmología interesa conocer con precisión cuáles eran la naturaleza y la tasa de reacción de las interacciones fundamentales locales que se alcanzaban a aquellas altísimas energías. Y además cuáles eran las propiedades estadísticas y térmicas que podría tener aquel plasma. Conociendo esto se puede saber cuándo estas interacciones

no fueron lo suficientemente rápidas en relación al enfriamiento sufrido por la expansión del Universo y tuvieron que abandonar su equilibrio con el plasma. Y en base a ello se pueden hacer ya importantes predicciones: la formación de los **núcleos**, con la producción de elementos primordiales, la posterior formación de **átomos neutros**, más la subsiguiente presencia de **fotones** que llenan el fondo cósmico. En efecto la teoría ha predicho con bastante exactitud sus abundancias y la observación las ha confirmado posteriormente.

7 Breve historia del Universo.

Veamos cuál es, según el Modelo Standard, la evolución del Universo desde sus orígenes hasta hoy.

De acuerdo al punto de vista más aceptado, el Universo pudo haberse originado por **una fluctuación cuántico-gravitatoria en la llamada ‘era de Planck’** (10^{19} GeV, 10^{-43} s). Una teoría sobre la **gravedad cuántica** no está hoy por hoy bien establecida; no se ha conseguido la reconciliación de la relatividad general con una teoría cuántica de campos, aunque existen diversos intentos para lograrlo (gravedad cuántica de lazos, teorías de cuerdas y de membranas...). Los fenómenos de la gravedad cuántica corresponden a esta escala, la llamada escala de Planck ($l_{\text{planck}} = 10^{-33}$ cm; $m_{\text{planck}} = 10^{19}$ GeV; $G = m_{\text{planck}}^{-2}$). Las últimas investigaciones astrofísicas pueden ya notar fenómenos al nivel de las energías de las **Teorías de Gran Unificación (GUT)**, alrededor de los 10^{16} GeV, correspondientes a 10^{-35} s.

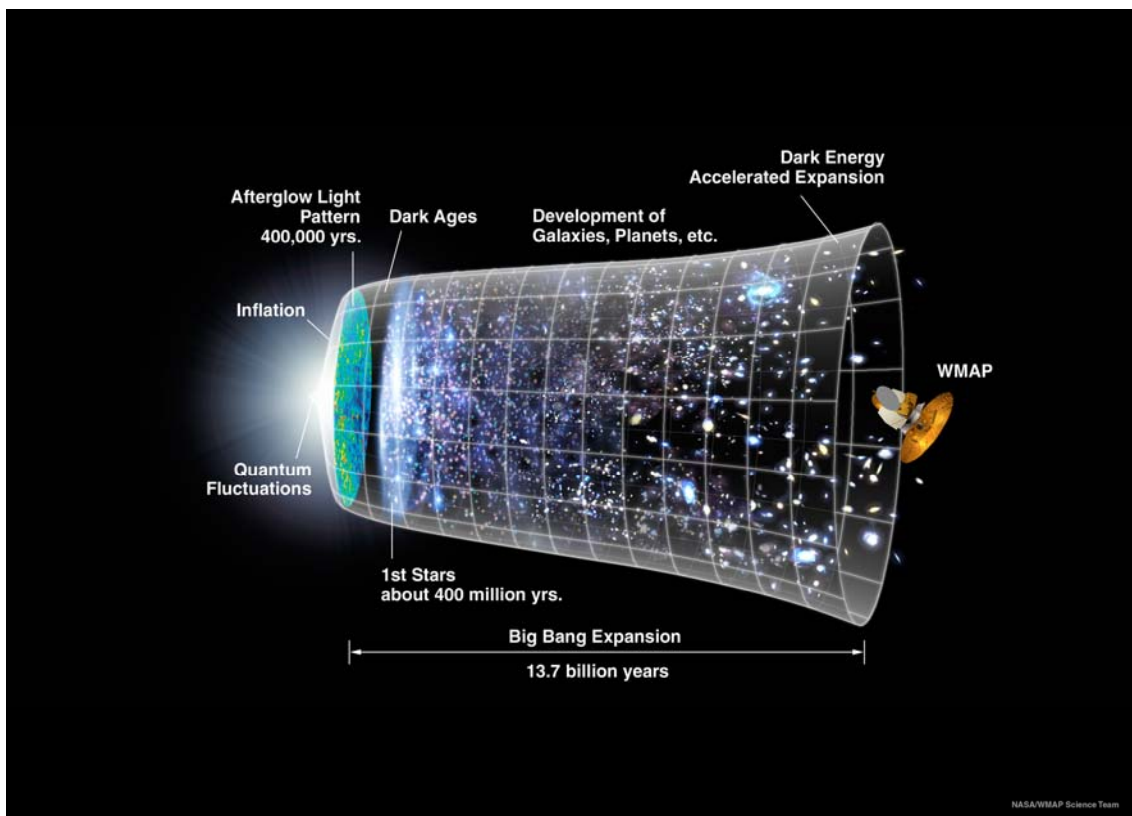
Poco después, y en una era previa al Big Bang apareció un período de expansión acelerada, anterior a la actual expansión: es la llamada **‘inflación cosmológica’**. La inflación, propuesta originalmente por Guth en 1981 y de la que existen muchos modelos, proporciona una solución elegante para imponer al Big Bang el conjunto de condiciones iniciales que son necesarias en la cosmología estándar. El universo, tal como lo describe el Modelo Estándar presenta dos graves problemas: el de la planitud y el de la homogeneidad entre regiones que estaban causalmente desconectadas. Los modelos de inflación los solucionan, aunque la Inflación no forma parte realmente del Modelo Estándar. En algún momento, al comienzo, justo antes de que el Universo hubiera alcanzado la era de la Gran Unificación (10^{16} GeV, 10^{-35} s), cuando todavía no estaba termalizado, la densidad de energía del Universo fue dominada por un tipo de campo, el campo ‘inflatón’, dotado de una presión negativa que aceleró rapidísima y exponencialmente la expansión del Universo, del orden de 10^{50} veces. De esta forma, las condiciones físicas que tenían lugar en una pequeña región causalmente conectada, se esparcieron casi de inmediato a distancias gigantescas; distancias que son las que hoy observamos en el Universo. Esto es lo que explicaría cómo pudo hacerse el universo tan grande, tan uniforme y tan plano, como hoy lo conocemos. Posteriormente el universo fue dominado por la expansión FRW, la descrita por el modelo de Friedmann-Robertson-Walker sobre las ecuaciones de la Relatividad General, que es la que hoy observamos.

Las **fluctuaciones cuánticas** del campo inflatón dejaron su sello en pequeñísimas perturbaciones en la pequeña parcela, por otra parte muy homogénea, del Universo primitivo. Al ser aumentadas durante la inflación por la expansión exponencial, generaron **perturbaciones a gran escala** en la geometría espacio temporal del Universo. Cuando la materia cayó en los pozos gravitacionales de estas perturbaciones

geométricas, creó a su vez perturbaciones de densidad. Posteriormente éstas colapsaron gravitacionalmente para formar las galaxias, grupos de galaxias y super-agrupaciones de galaxias. La estructura a gran escala fue así ‘sembrada’ por perturbaciones geométricas en una época extremadamente temprana en la evolución del Universo. Este hecho ha sido ya comprobado por observaciones de un alto nivel de precisión, por combinación de los recientes resultados del satélite WMAP sobre el CMB y por prospecciones de galaxias 2dF sobre la LSS.

Cuando se detuvo la inflación, la enorme densidad de energía del campo inflatón se convirtió en partículas que pronto fueron termalizadas. Este fue el origen del ‘**Big Bang caliente**’. Este proceso se llama de ‘**Recalentamiento**’ del Universo. A partir de entonces, el Universo quedó dominado por la radiación: es la ‘**Era de la Radiación**’.

El universo consistía entonces de un **plasma de quarks-gluones**. Esta es una fase que estudia la cromodinámica cuántica, QCD y que existe a temperaturas y densidades extremadamente altas. El contenido de este plasma son los constituyentes básicos de la materia: quarks y gluones, casi libres, y otras partículas elementales como leptones y bosones gauge. Las temperaturas eran tan altas que los movimientos al azar de las partículas eran a velocidades relativistas, cercanas a la velocidad de la luz. En las colisiones se creaban y se destruían continuamente pares de toda clase de partículas y antipartículas.



Habían transcurrido 10^{-11} segundos, pero el Universo continuaba expandiéndose y su temperatura disminuía. Con ello la energía típica de las partículas iba también decreciendo. Conforme disminuía la energía, fueron apareciendo las **transiciones de fase**; rompiendo simetrías en las interacciones fundamentales dejaban ya **las fuerzas fundamentales de la física y los parámetros de las partículas elementales** en su

forma actual. Los experimentos actuales de física de partículas a altas energías, en aceleradores y rayos cósmicos, aspiran hoy a alcanzar esos rangos de energía.

Se llama **Bariogénesis** al proceso de formación de los bariones. De los resultados independientes de la Nucleogénesis y de la CMB se desprende que la densidad de bariones en el universo es de unos pocos %. Numéricamente corresponde a una relación barión/fotón de $n_b/n_\gamma \approx 10^{-9} - 10^{-10}$. ¿Por qué hay tan poca materia bariónica? ¿Y por qué aparentemente no hay antimateria? Apenas hay antiprotones en los rayos cósmicos, ni se han visto antinúcleos, ni se detecta radiación procedente de aniquilaciones materia-antimateria procedente del grupo local de galaxias, ni el CMB aparece distorsionado por ninguna frontera entre materia-antimateria dentro del universo observable... Realmente parece que existe una **asimetría cosmológica entre materia y antimateria**

Podría explicarse si cuando el universo tenía menos de 10^{-6} s hubiera habido un quark extra por cada 10^9 pares quark-antiquark. ¿Qué originó esta pequeña asimetría? En 1967 **Sakharov** estableció las condiciones. Existe efectivamente una diferencia entre las interacciones de la materia y la antimateria en la violación de la conjugación de carga (C), que fue descubierta en las interacciones débiles en 1957 y otra en la violación de la paridad-conjugación de carga (CP) que fue descubierta en 1964 en la desintegración de los kaones. Debe haber también una desviación del equilibrio térmico que pudo ocurrir durante una transición de fase, quizás en la transición de fase electrodébil a los $t \sim 10^{-10}$ s o en la transición de fase GUT cuando $t \sim 10^{-36}$, o bien al final de la inflación. Finalmente debió haber una violación del número bariónico, que pudo haber ocurrido a través de interacciones débiles a altas temperaturas, característica típica de las GUT. En cualquier caso, este mecanismo produjo un ligero exceso de quarks y leptones sobre anti-quarks y anti-leptones.

Conforme se enfriaba el Universo, pudo atravesar la fase de transición quark-gluón (10^2 MeV, 10^{-5} s), en la que ya **se formaron los bariones**, principalmente protones y neutrones, a partir de sus constituyentes los quarks. El pequeño exceso de quarks sobre antiquarks produjo consiguientemente un pequeño exceso de bariones sobre antibariones. La temperatura no era ya lo suficientemente grande como para que se siguieran creando nuevos pares protón-antiprotón o neutrón-antineutrón. Inmediatamente siguió una **aniquilación en masa, que dejaba solamente uno por cada 10^{10} protones y neutrones originales, y ninguna de sus antipartículas**. El resultado fue la preponderancia de la materia sobre la antimateria en el universo actual.

A una energía de ~ 1 MeV se produjo el **desacoplamiento de los neutrinos** del resto de la materia. Poco después, cuando el universo tenía entre 1s y 3min, a energías entre 1 y 0,1 MeV, se produjo la **Nucleosíntesis** primordial. Los protones y los neutrones se habían enfriado ya lo suficiente como para que pudieran formarse sistemas ligados en base a ellos, dando lugar a la aparición de **los elementos más ligeros de la tabla periódica**: ^1H , ^2D , ^3He , ^4He , ^7Li . Las abundancias relativas de elementos ligeros predichas por la teoría se han confirmado brillantemente por la observación. Esto constituye uno de los más firmes apoyos del Modelo Estándar de Cosmología a la vez que demuestra su interconexión y perfecta concordancia con el Modelo Estándar de Física de Partículas Elementales

Poco después, cuando el universo tenía 1 minuto y la energía era de ~ 0.5 MeV, tuvo lugar, por un proceso similar al descrito con bariones y antibariones, la **aniquilación**

electrón-positrón. El exceso de leptones sobre antileptones se tradujo en un exceso de electrones. Toda la energía de la aniquilación se convirtió en **fotones**. Protones, neutrones y electrones residuales ya no se movían a velocidades relativistas; la densidad de energía del Universo quedó fundamentalmente dominada por los fotones: fue la **‘Era de la Radiación’**.

El universo siguió expandiéndose y perdiendo temperatura. Cuando habían transcurrido unos 10^5 años (~ 55.000) y ya las energías eran de 1eV , a una temperatura de $T \approx 10^4 \text{°K}$, la **radiación y la materia igualaron sus densidades de energía**. Corresponde a un redshift de $z \approx 3.300$

Hacia aproximadamente los $3 \cdot 10^5$ años, y a energías de $0,3 \text{ eV}$, los electrones se unieron a los núcleos para formar átomos. A este proceso se le llama **‘Recombinación’**. Éste es el dominio de la física atómica. Inmediatamente después, **los fotones se desacoplaron del plasma**, atravesando de ahí en adelante libremente el espacio. Aquellos fotones son los que hoy observamos como la **‘Radiación del Fondo Cósmico de Microondas’ (CMB)**. Comenzaba la **‘Era de la Materia’**. La temperatura era $T \approx 3.300 \text{°K}$ y el redshift $z \approx 1100$.

La radiación de fondo cósmico de microondas CMB, descontada la corrección del movimiento propio del sistema solar y nuestra galaxia es una radiación de cuerpo negro altamente isotrópica, ‘excesivamente isotrópica’ pues deberían haber inhomogeneidades que justificaran la ‘siembra’ del proceso de formación de las galaxias. El satélite COBE fue el primero en observar en 1990 unas minúsculas **anisotropías en la distribución angular de la temperatura de la CMB**. Se cree que estas anisotropías representan fluctuaciones intrínsecas de la propia CMB debidas a la presencia de diminutas **fluctuaciones de densidad en la materia** presente en el cosmos en el tiempo de la Recombinación. Estas fluctuaciones de densidad son las que más tarde colapsaron para formar todas las estructuras del Universo. La distribución angular de la CMB tiene muchísima más información física pues depende, por ejemplo, de la densidad bariónica ρ_b , la constante de Hubble H_0 y las densidades de materia oscura ρ_{DM} y de energía oscura ρ_{DE} . Como puede comprobarse en los resultados de WMAP de 2008 la CMB es un test muy sensible para los distintos modelos cosmológicos.

Cuando habían transcurrido 10^8 años, a un redshift de $z \approx 20$, se produjo la **Reionización**, el proceso de formación de las primeras estrellas.

En un principio la densidad de **energía oscura** en el universo, que posiblemente corresponda a la energía del propio vacío, era mucho menor que la densidad de energía de la materia. Pero con la expansión, la densidad de ésta iba disminuyendo hasta que a un redshift $z \approx 0,46$ las dos densidades se igualaron. En adelante la evolución del universo está dominada por la energía oscura.

Entre los 10^9 y los 10^{10} años, las pequeñas inhomogeneidades generadas durante la inflación habían crecido ya, vía colapso gravitacional, para convertirse en galaxias y agrupaciones de galaxias. Es la época de la **formación de estructuras**. Pertenece al dominio de la física gravitatoria de largo alcance

Finalmente, como herederos de generaciones previas de estrellas se originaron el **Sol y la Tierra**. Y hoy, a 3°K y $13,7 \cdot 10^9$ años después, contempla todo **la vida biológica ...**

8 Balance actual de materia y energía

La composición del Universo se expresa normalmente en base a los parámetros de densidad Ω_i . Representan qué valor tiene la densidad ρ_i de un determinado componente i en el Universo, recuérdese que se considera homogéneo, en relación a la densidad crítica ρ_c , densidad necesaria para hacer que la geometría del Universo sea plana.

Los más recientes resultados, como por ejemplo los del ‘WMAP-5 year’ combinados con los de otros experimentos, apuntan a que el universo posee efectivamente una geometría plana y densidad crítica. Los valores de los parámetros Ω_i corresponden por tanto a la composición porcentual estimada del universo.

Para calcular la densidad de la materia se han utilizado gran variedad de métodos: curvas de rotación de las galaxias, velocidades de rotación de las galaxias en sus grupos, mediciones de rayos X en las agrupaciones de galaxias, velocidades y distribución espacial de las galaxias en grandes escalas, lentes gravitatorias etc... Estas medidas han proporcionado una composición aproximada de un 30% de materia. Sin embargo solamente $\sim 4,5\%$ es **materia bariónica**. Y buena parte de ella es no visible, oscura; la parte visible del universo corresponde solo a $\sim 0,5\%$. El resto de materia es ‘**materia oscura no bariónica**’ (**DM**), dotada de interacción gravitatoria, pero diferente de los constituyentes bariónicos de las estrellas y planetas. Su naturaleza es hasta el momento totalmente desconocida. Se piensa que no se mueve a velocidades relativistas por lo que se le llama ‘fría’: Cold Dark Matter (CDM)

Por otra parte, desde 1998 diferentes grupos experimentales, trabajando de forma separada, principalmente el Supernova Cosmology Project y el High-z Supernova Search Team, han estudiado la velocidad y la luminosidad de supernovas lejanas del tipo SNIa, llegando a la conclusión de que **la actual tasa de expansión del Universo se acelera ligeramente**. Eso supone que el 70% restante del universo debe estar hecho de algo, que se parece mucho a un fluido con presión negativa, que podría ser identificado con la **constante cosmológica Λ** que introdujo Einstein en sus ecuaciones de la relatividad general y que podría corresponder a la **energía del vacío** predicha por las teorías cuánticas de campo. Pero lamentablemente su magnitud es del orden de 10^{-120} que la que podría esperarse de éstas, por lo que hoy por hoy representa un misterio aún mayor que el de la ‘materia oscura’.

Curiosamente es más fácil hacer el balance de densidad de la energía del Universo hecho sobre la ‘fotografía’ de algo que sucedió cuando tenía solamente 400.000 años, la radiación cósmica de fondo CMB, unido a los resultados de la nucleogénesis, que sobre la situación actual. Según los últimos resultados de 2008 del satélite WMAP, la composición sería la siguiente: **4,5 % de materia bariónica 23 de materia oscura y 72,5 % de energía oscura.**

Se puede concluir que, en la actualidad, **la naturaleza del 95% del universo es absolutamente desconocida.**

9 Resumen del Modelo Cosmológico Standard.

La nueva cosmología es una extensión construida sobre el modelo del Big Bang caliente. El modelo exitoso apareció en los años 70 del siglo pasado y describe la evolución del Universo desde el comienzo de la Nucleosíntesis en el Big Bang (BBN) hasta el momento actual ($t \approx 13,7 \cdot 10^9$ años).

A grandes escalas (> 100 Mpc) actualmente, y a pequeñas escalas en los primeros tiempos ($t < 10^6$ años), nuestro Universo se describe correctamente por los modelos isotrópicos y homogéneos de Friedmann-Robertson-Walker (FRW) en base a la Relatividad General. Las características que mejor describen nuestro Universo dentro del Modelo Standard se pueden resumir como sigue:

- Espacialmente plano, con densidad crítica ($\Omega_0 = 1,005 \pm 0,006$), expandiéndose con una tasa actual de $H_0 = 70,5 \pm 1,3$ km/s/Mpc, y acelerándose con un parámetro de deceleración de $q_0 \equiv \frac{\ddot{R}}{R H_0^2} = 0,67 \pm 0,25$.
(1 Mpc (megaparsec) = 10^6 pc (parsec) = $3,26 \cdot 10^6$ años luz.)
- Edad de $13,72 \pm 0,13 \cdot 10^9$ años
- Composición
 - Bariones $\Omega_b = 0,0456 \pm 0,0015$
 - con una contribución estelar de: $\Omega_* \approx 0,005$
 - Materia oscura no bariónica : $\Omega_{DM} = 0,228 \pm 0,013$
 - con una contribución de neutrinos masivos de: $\Omega_\nu = 0,001$
 - Energía oscura (algo con una presión negativa ($\omega \equiv p/\rho \approx -1$): $\Omega_{DE} = 0,726 \pm 0,015$.
 - Fotones de la radiación de fondo cósmica de microondas (CMB): $\Omega_\gamma \approx 0,004$ con una temperatura de $T_0 = 2,725 \pm 0,001$ °K
- Fase primordial, extremadamente caliente y densa. Big Bang.
- Estructura a gran escala construida mediante la atracción gravitacional de la CDM, materia oscura fría.
- Evidencia de una fase temprana de expansión acelerada (inflación) que produjo las semillas de las perturbaciones de la densidad a partir de las fluctuaciones cuánticas anteriores.

Un éxito de esta cosmología es que, hoy en día, existen un conjunto de parámetros cosmológicos con unos márgenes de error seguros, que se soportan y se conectan entre sí mediante una red de medidas independientes. Es, en frase de Turner, la “cosmología de precisión”. Véanse en la tabla.

Descripción	Parámetro	Valor
Diez Parámetros Globales		
Tasa de expansión actual	h	$0,705 \pm 0,013$

Parámetro de deceleración	q_0	$-0,67 \pm 0,25$
Edad del Universo	t_0	$13,72 \pm 0,12 \cdot 10^9$ años
Temperatura de la CMB	T_0	$2,725 \pm 0,001$ °K
Parámetro de densidad	Ω_0	$1,005 \pm 0,006$
Densidad bariónica	Ω_b	$0,0456 \pm 0,0015$
Densidad de la materia oscura fría	Ω_{DM}	$0,228 \pm 0,013$
Densidad de la energía oscura	Ω_{DE}	$0,726 \pm 0,015$
Parámetro de la ecuación de estado de la energía oscura	ω	$-0,992 \pm 0,06$