

## 2.19. Radiación de Fondo Cósmico: Penzias y Wilson; los primeros minutos y la geometría global.

### 2.19.1. Introducción:

La expansión del Universo descubierta por **Edwin Hubble** en 1929 implica que en el pasado el Universo tuvo una mayor densidad. En 1946 el físico ruso-norteamericano **George Gamow** propuso una teoría que plantea que, en sus etapas iniciales, el Universo tenía una altísima temperatura, lo suficientemente alta para permitir transmutaciones nucleares. La expansión ha ido enfriando al Universo dando origen a toda su historia posterior. Esta teoría conocida, por el sobrenombre que le pusieron los astrofísicos ingleses autores de la teoría rival, de **Big-Bang**, que en la versión de Gamow es Big Bang caliente es la teoría que mejor explica los grandes rasgos del Universo. El paso crucial para el big bang ocurrió en 1964.

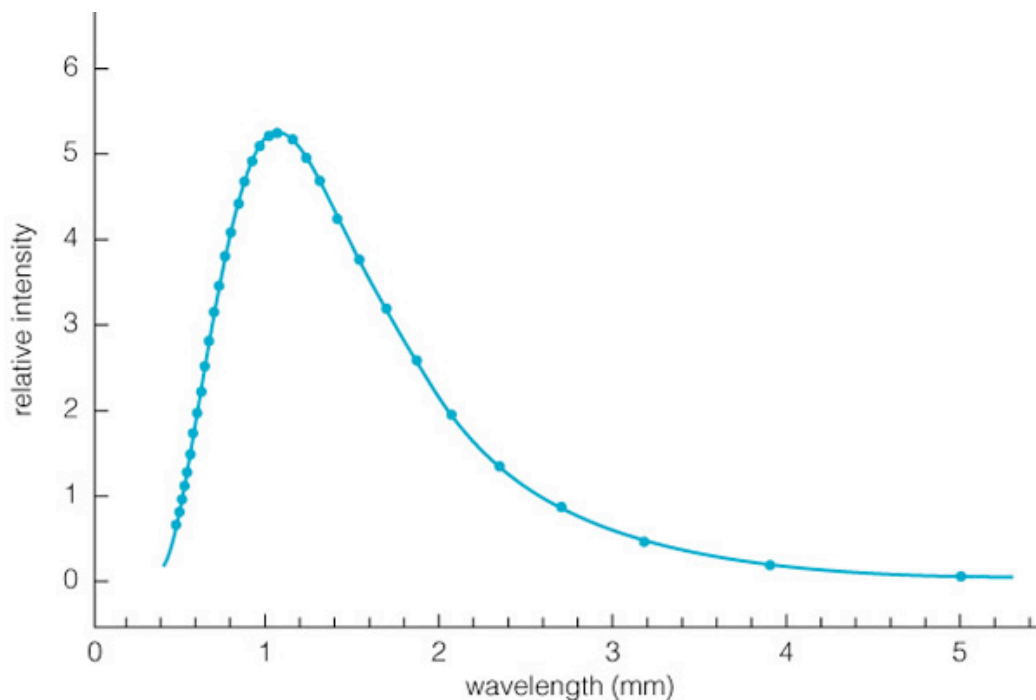
### 2.19.2. La Radiación de Fondo Cósmico: Penzias y Wilson.

El gran giro en la teoría del big-bang vino en 1964 cuando los físicos **Arno Penzias** (1933-) y **Robert Wilson** (1936-), trabajando para la *Bell Telephone* en Crawford Hill, Holmdel, New Jersey, detectaron una radiación en la banda de las microondas que venía de todas partes del cielo. La llamaron *radiación de fondo cósmico*, tiene un espectro plankiano, con una temperatura de 2,7 K. Lo que Penzias y Wilson habían encontrado era la temperatura actual del universo. La teoría alternativa al big-bang llamada la teoría del estado estacionario (steady-state), propuesta a fines de los años cuarenta por los ingleses Bondi, Bonnor, Hoyle y Thomas Gold, planteaba que el universo es homogéneo en el espacio y en el tiempo y por ende el universo no tiene ni comienzo ni fin. La expansión hace que se genere materia, en la cantidad justa para mantener la densidad constante. La nueva materia genera nuevas galaxias, donde nacen nuevas estrellas. El universo sería una mezcla de galaxias viejas y nuevas, con estrellas a punto de agotarse y estrellas recién nacidas.



Arno Penzias (a la izquierda) y Robert Wilson posan frente a su antena.

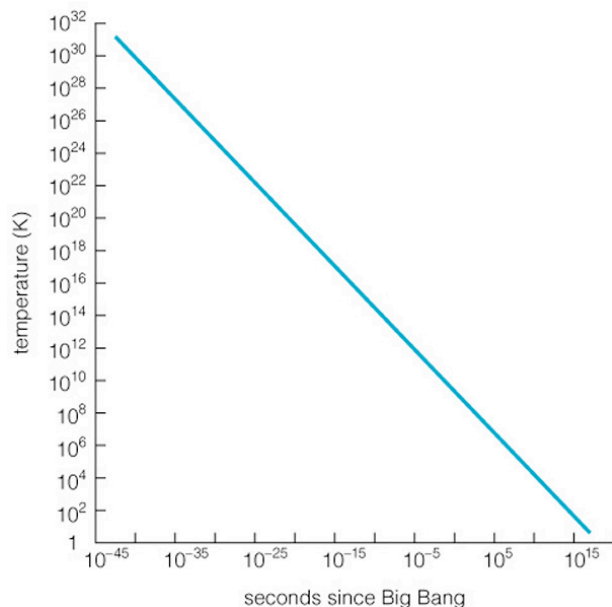
La radiación de fondo cósmico de Penzias y Wilson encaja en forma natural con la teoría del big-bang de Gamow y es muy difícil de explicar para la teoría del universo estacionario. ¿Porqué habría de haber una radiación que todo lo permea en la teoría del estado estacionario? En el Big Bang es muy lógico pues el universo joven, mucho más caliente, estaba constituido por radiación y materia. El universo actual, más frío, también está inmerso en una sopa de radiación a una muy baja temperatura. A partir de 1964 la teoría del big-bang se ha transformado en el paradigma cosmológico de los astrónomos. La inmensa mayoría de los astrónomos la aceptan como la versión globalmente correcta de los eventos ocurridos en nuestro universo. La academia sueca reconoció el trabajo de Penzias y Wilson otorgándoles el premio Nobel de Física, en 1978.



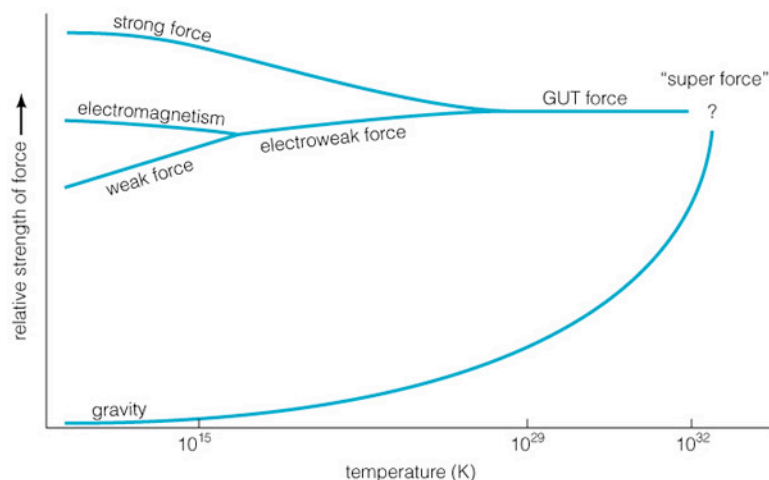
**Emisión característica de un cuerpo negro a 2,7 Kelvin. Los puntos son valores medidos de la radiación de fondo cósmico y la línea es una curva de Planck a 2,7 K. El acuerdo entre las observaciones y la teoría es excelente.**

### 2.19.3. Los Primeros Minutos.

La densidad y temperatura del Universo en el instante inicial eran tan altos que ni las partículas elementales podían existir allí sino una especie de sopa de energía. Al producirse la explosión de ese estado inicial, evidentemente inestable, la densidad del Universo comienza a disminuir y con ello la temperatura. En ese universo primordial las cosas ocurren con rapidez.



En la figura se muestra la marcha de la temperatura con el tiempo. En los primeros instantes, cuando  $T$  era menor que una centésima de segundo la temperatura era altísima, mayor que  $10^{11}$  K.

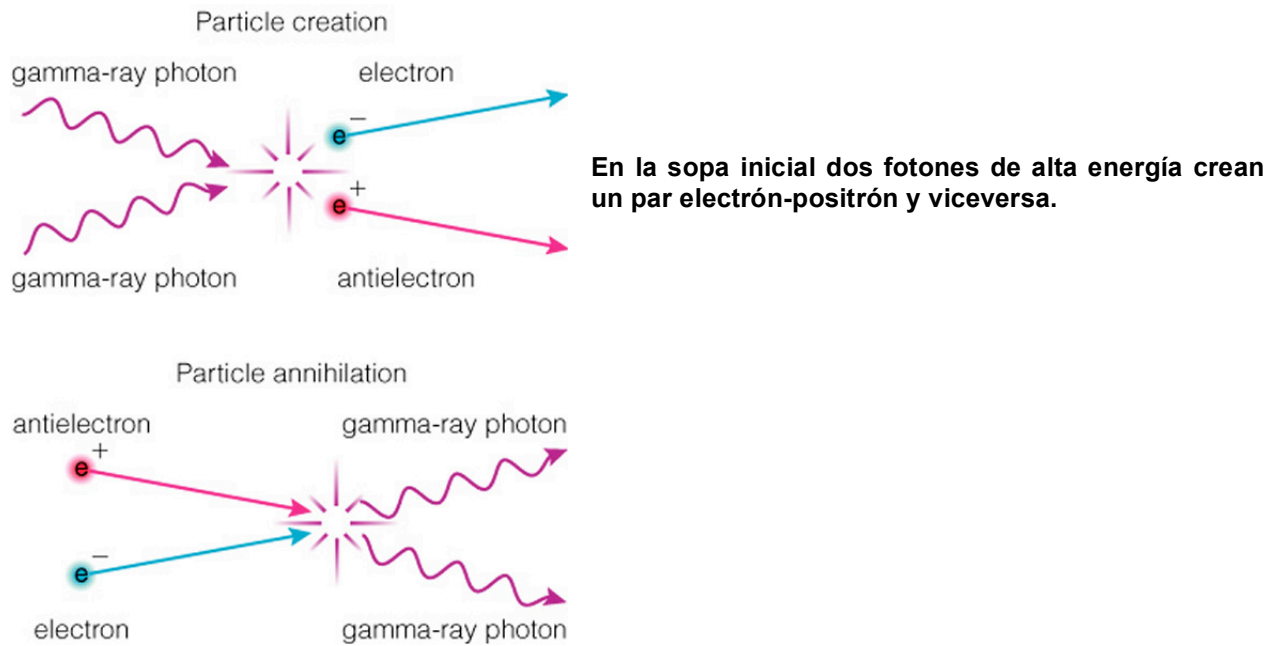


La cuatro fuerzas del Universo, a alta temperatura, se funden posiblemente en una sola. A  $10^{15}$  K las interacciones débiles se unifican con las fuerzas electromagnéticas y a  $10^{27}$  K se funden con las interacciones fuertes (GUT: Gran Unified Theory). Quizás a  $10^{32}$  K todas se fundan en una sola súper fuerza.

Un centésima de segundo después de la explosión la temperatura ha bajado a cien mil millones de grados Kelvin ( $10^{11}$  K). El Universo es una sopa de radiación y materia cuyos componentes principales son: fotones, neutrinos y antineutrinos, electrones y positrones (antielectrones). El Universo está dominado por la radiación y el conjunto se encuentra en perfecto estado de equilibrio termodinámico. La densidad equivalente del contenido de masa-energía es de 3,8 miles de millones de kilogramos por litro ( $3,8 \times 10^9$  gr/cm<sup>3</sup>). Hay un pequeño número de partículas nucleares, alrededor de un protón o neutrón por cada mil millones de fotones o electrones o positrones. A fin de poder predecir abundancias químicas es necesario conocer la proporción entre protones y neutrones.

El neutrón es ligeramente más masivo que el protón siendo la diferencia de masa entre ambos de 1,293 MeV (1 MeV = un millón de electrón-Volts). [Masa del protón:

938,3 MeV; masa del neutrón: 939,6 MeV]. Pero por ser la energía característica de un electrón o un positrón, a una temperatura de  $10^{11}$  K, de 10 MeV, choques de protones y neutrones con los muy numerosos electrones y positrones producirán rápidas transiciones de neutrones a protones y viceversa. Bajo las suposiciones clásicas el número de protones resulta igual al número de neutrones en ese instante del Universo. El decaimiento radioactivo de un neutrón en un protón no ejerce influencia alguna en esta fase pues toma alrededor de 15 minutos en ocurrir, un tiempo muy largo en relación a lo que lleva vivido el Universo.

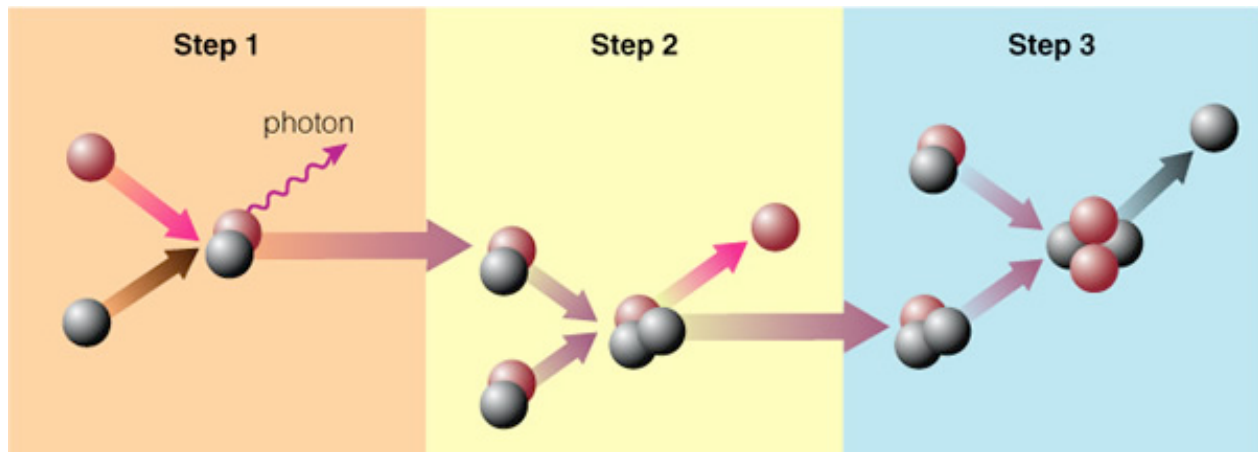


Un décimo de segundo después de la explosión la temperatura es de 30 mil millones de grados ( $3 \times 10^{10}$  K). El equilibrio entre protones y neutrones empieza a ser favorable a los protones que constituyen en esa fase el 62% de los nucleones. A medida que baja la temperatura la reacción que convierte un neutrón en un protón ocurre con más facilidad que la reacción inversa, por lo cual empezamos a encontrar más protones que neutrones. La densidad del Universo, es decir, el contenido de masa y energía por unidad de volumen, equivale a  $30 \times 10^6$  gr/cm<sup>3</sup>.

Cuando han transcurrido 1,1 segundos la temperatura es de  $10^{10}$  K. Los neutrinos dejan de interactuar con la materia por ser ya la densidad muy baja para ellos ( $380.000$  gr/cm<sup>3</sup>). Se dice que en ese instante los neutrinos se desacoplan de la materia y la radiación. El balance entre protones y neutrones sigue cambiando a favor de los protones que conforman ahora el 76% de los nucleones.

A los 13,8 segundos de la explosión la temperatura ha bajado ya a  $3 \times 10^9$  K. Los electrones y los positrones empiezan a desaparecer. La temperatura es lo suficientemente baja como para que puedan existir núcleos de  $^4\text{He}$ . Sin embargo, no se producen núcleos de  $^4\text{He}$  inmediatamente, debido a que para formar un  $^4\text{He}$  se necesita que un protón y un neutrón reaccionen formando un deuterio (hidrógeno pesado). Si

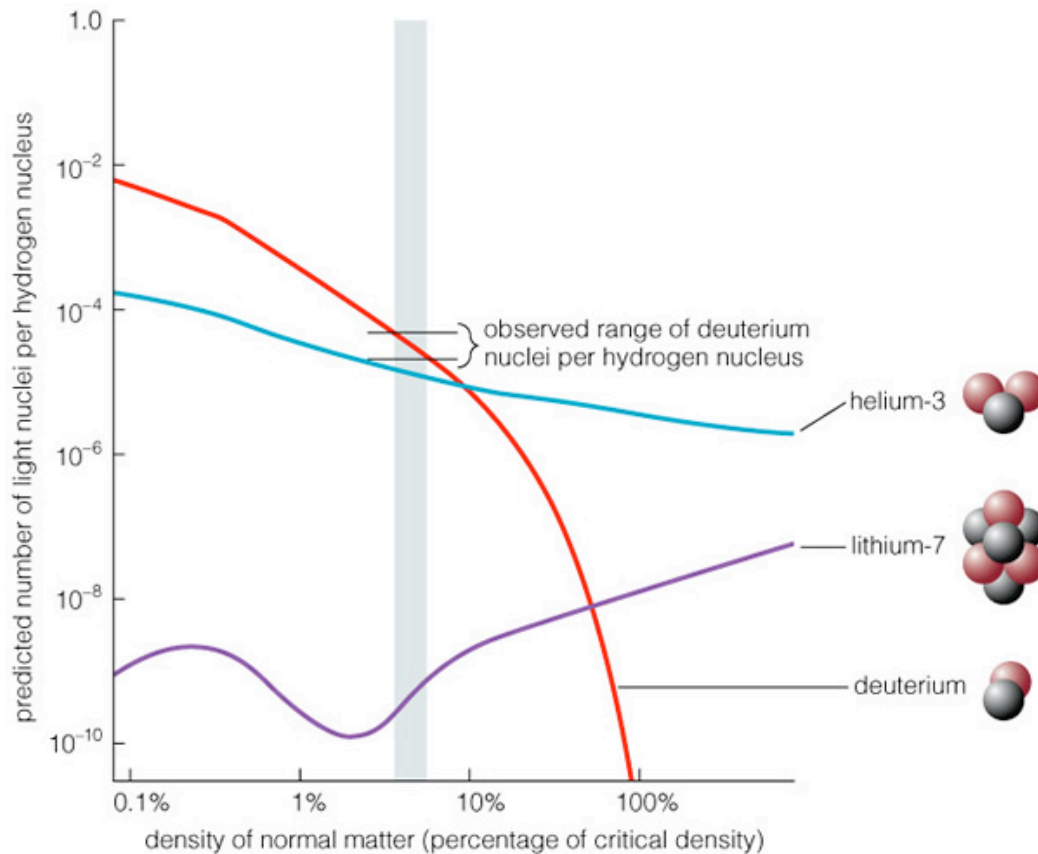
ese deuterio reacciona con un protón formará un  $^3\text{He}$  o si choca con un neutrón formará un tritio ( $^3\text{H}$ ). Finalmente, si el  $^3\text{He}$  reacciona con un neutrón o si el  $^3\text{H}$  lo hace con un protón, obtendremos un núcleo de  $^4\text{He}$ . El núcleo atómico de  $^4\text{He}$  puede sobrevivir a una temperatura de  $3 \times 10^9$  K, pero el deuterio, paso previo indispensable, es mucho más frágil y no resiste esa temperatura por lo cual se destruye tan pronto se forma. Esto constituye el así llamado **“cuello de botella del deuterio”**. Los neutrones se siguen convirtiendo en protones, el balance es ahora de 83% de protones y 17% de neutrones.



La figura ilustra una de las varias reacciones posibles. Primero un protón y un neutrón forman un deuterio. Luego dos deuterios forman un  $^3\text{H}$  y liberan un protón. Por último un tritio y un deuterio forman un  $^4\text{He}$  liberando un neutrón.

Después de transcurridos 3,7 minutos (220 segundos desde el Big Bang) la temperatura ha descendido a un nivel en el cual el deuterio puede sobrevivir ( $0,9 \times 10^9$  K aproximadamente). Tan pronto como se alcanza ese nivel todos los neutrones forman deuterios que a su vez son cocinados en núcleos de  $^4\text{He}$ . El balance entre neutrones y protones era de un 87% para los protones y un 13% para los neutrones. Por lo tanto, si todos los neutrones terminan encerrados en un núcleo de  $^4\text{He}$ , el 26% de la masa de Universo queda en forma de Helio. La especial circunstancia de no existir en la naturaleza un núcleo atómico que sea estable y tenga 5 u 8 partículas en su núcleo hace que sea difícil formar núcleos más pesados que el  $^4\text{He}$  por interacción de partículas en el Big Bang.

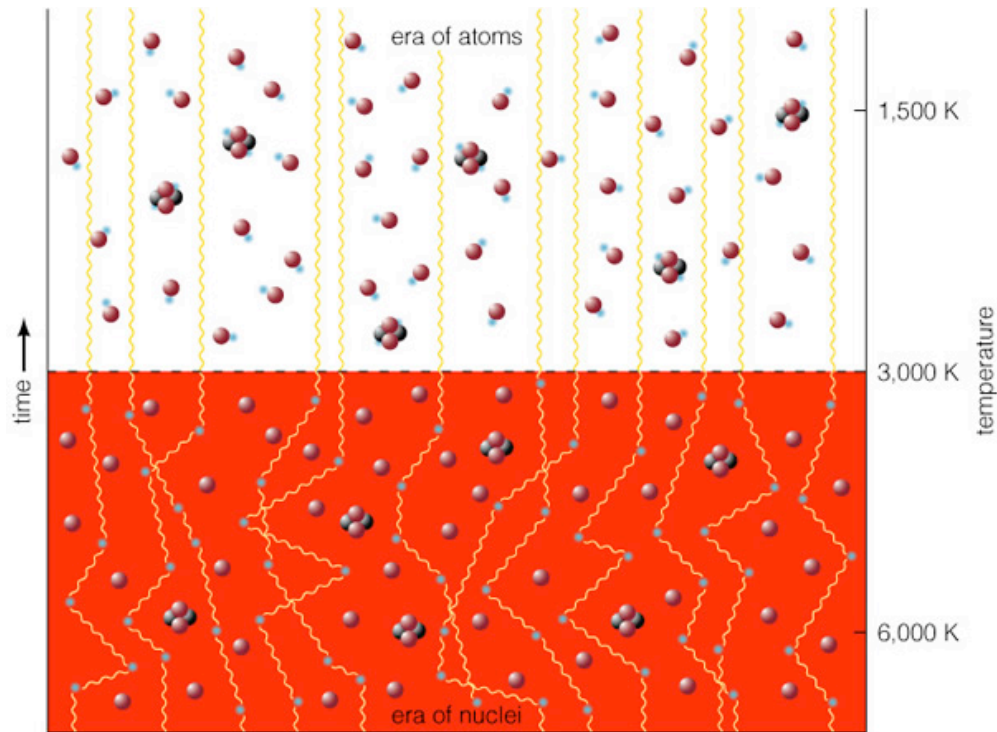
Algo más de media hora después de la explosión inicial la temperatura será de  $3 \times 10^8$  K. La densidad del contenido masa-energía será sólo de un 10% de la densidad del agua. En este momento los procesos nucleares se detienen. El Universo está formado por radiación, protones, núcleos de  $^4\text{He}$ , electrones y neutrinos. La temperatura es muy alta para que puedan existir átomos neutros.



Después del Big Bang una pequeña fracción de la masa del Universo está en la forma de Deuterio,  $^3\text{He}$  y  $^7\text{Li}$ . La figura señala que para una densidad de un 6-7% de la densidad crítica la cantidad de Deuterio y  $^3\text{He}$  es  $\sim 10^{-4}$  y la de Litio es  $\sim 10^{-9}$ . El Deuterio es el elemento que más sensibilidad tiene a la densidad del universo, por lo cual su determinación es muy importante, pero muy difícil.

Transcurridos 380.000 años la temperatura alcanza el punto donde los electrones se pueden combinar con los núcleos para formar átomos neutros (de Hidrógeno y Helio). Al desaparecer los electrones libre el Universo se hace transparente a la radiación. Se dice que en este momento la materia se **recombina** y que la materia y la radiación se desacoplan. En verdad la materia del universo se combina por vez primera pero el fenómeno, genéricamente se lo llama recombinación. La materia y la radiación permanecían acopladas por la absorción de los fotones que hacían los electrones libre. Ahí ambos intercambiaban energía y los electrones interactuaban con los protones. Al desaparecer los electrones libres los fotones pueden viajar sin que nada se lo impida y por ende se desacoplan de la materia.





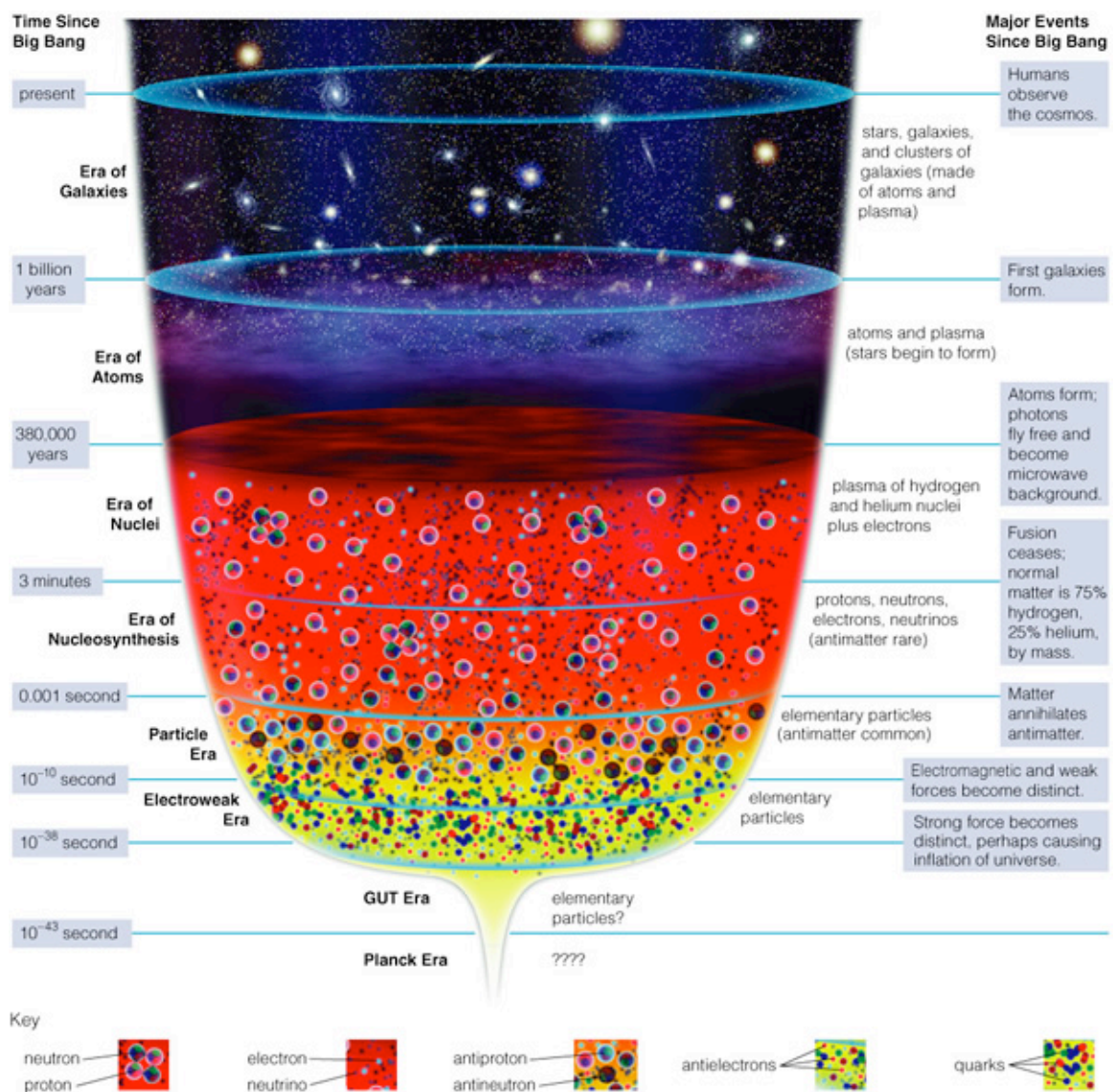
**Cuando la temperatura llega a los 3.000K el Universo “encierra” los electrones libres en el interior de átomos de Hidrógeno y Helio, haciéndolo transparente. Desde ese instante, ocurrido 380.000 años después del Big Bang, la radiación viaja libremente por el Universo. De esa superficie recibimos hoy la radiación de fondo cósmico.**

A partir de ese instante fluctuaciones de densidad pueden ir generando las estructuras que darán origen a las primeras estrellas y las primeras galaxias. La materia prima para las estrellas de primera generación, en cada galaxias, será de un 74% de Hidrógeno y un 26% de Helio.

Reacciones termonucleares en el interior de las estrellas irán transmutando Hidrógeno en Helio, posteriormente Helio en Carbono y Oxígeno, y luego se formará  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ , etc. hasta el  $^{56}\text{Fe}$  en el centro de las estrellas masivas. Todos estos elementos químicos serán arrojados de vuelta al medio interestelar en el momento final de la evolución de las estrellas masivas (las supernovas de tipo II). Estos restos gaseosos contaminarán las nubes de gas primigenio. Las nuevas generaciones de estrellas formadas a partir de las nubes contaminadas contarán desde el inicio de algunos elementos químicos distintos del Hidrógeno y el Helio. En nuestra galaxia, después de unos 12 o 13 mil millones de años de existencia, la composición química del gas interestelar es de 73% de Hidrógeno, 25% de Helio y 2% de elementos químicos más pesados que el Helio, entre los cuales destacan el C, N, O, Ne y S.

#### 2.19.4. Los Primeros Instantes del Universo.

La mecánica cuántica define un límite al intervalo de tiempo menor que puede ser medido y al espacio que puede ser medidos ellos se llaman tiempo e intervalo de Planck. El **tiempo de Planck es  $10^{-43}$  segundos**. Por ello el intervalo de tiempo entre el comienzo del Big Bang y  $10^{-43}$  segundos se llama la **era de Planck**, dentro de la cual la granularidad cuántica del espacio-tiempo se hace muy importante y por ende se necesitaría una teoría unificada entre la gravitación y la mecánica cuántica, que aún no se tiene. Por ende la era de Planck es la zona en la cual estamos limitados ahora por la ignorancia en las herramientas teóricas para abordar el problema.



En el Universo se pueden distinguir algunos instantes claves:



Para  $t = 10^{-43}$  segundos (tiempo de Planck) el universo actual está confinado a un tamaño menor que el de una partícula atómica y por ende la Relatividad General y la Mecánica cuántica deberían fundirse en una sola teoría, que en este momento se desconoce. Por lo tanto, entre  $t=0$  y el tiempo de Planck, llamada era de Planck, la descripción física de Universo está más allá de las posibilidades de la física actual.

Para  $t=10^{-33}$  segundos ocurre un proceso conocido como inflación en el cual el universo crece en 60 órdenes de magnitud. El universo tiene un tamaño característico de  $10^{-25}$  metros antes de la inflación y uno de  $10^{35}$  después de ella. La inflación opera a densidad constante. En  $t=0$  se crea el espacio y el tiempo; en  $t \sim 10^{-33}$  segundos se crea toda la energía del Universo, a partir del vacío.

A los tres minutos se produce la nucleosíntesis.

A los 380.000 años el universo se recombina, se hace transparente. Desde allá nos llega la radiación de fondo cósmico, que la vemos con un corrimiento al rojo  $z \sim 1.100$ .

Uno de los fenómenos más espectaculares del Big Bang es la Inflación. Por años los astrónomos se sintieron perturbados por el hecho que el Universo parecía casi plano cuando se calculaba su densidad y se la comparaba con la densidad crítica. Cifras de un 10% a 20% se derivaban y ello parecía demasiado cercana a la densidad crítica. Si el universo hubiese tenido una densidad menor que la crítica desde el inicio su valor actual debería ser muy pequeño pues los modelos muestran que  $\Omega$ , la razón entre la densidad y la densidad crítica, se aleja de uno cuando pasa el tiempo. Si ahora, casi 14 mil millones de años después del Big Bang  $\Omega$  fuese 0,3 1 segundo después del Big Bang  $\Omega$  diferiría de la unidad en una parte en  $10^{15}$  y en el tiempo de Planck diferiría de la unidad en una parte en  $10^{60}$ . Esta extraordinaria sintonía del universo con un universo plano llevó a muchos astrónomos a creer que debía haber alguna razón para que el Universo fuese plano.

En 1981 el astrofísico norteamericano **Alan H. Guth** (1947-) y el ruso **Andrei Linde** (1948-) propusieron, independientemente, la teoría de la inflación. El Universo nace con un vacío en un estado excitado y cuando han transcurrido  $\sim 10^{-33}$  segundos el vacío cambia de fase, cambia de un falso vacío al verdadero vacío, de menor energía, e inyecta energía al universo y éste se infla sesenta órdenes de magnitud en un breve intervalo pasando de un tamaño característico de  $10^{-25}$  metros a  $10^{35}$  metros al final de la inflación. La inflación ocurre a densidad constante por lo que se crea toda la materia en la inflación. El Big Bang crea el espacio y el tiempo; la inflación crea la energía que posteriormente va a originar la materia. Cuando ha transcurrido  $10^{-33}$  segundos la luz ha viajado una distancia de  $3 \times 10^8$  metros/segundos  $\times 10^{-33}$  segundos =  $3 \times 10^{-25}$  metros. Por ende una zona del universo de un tamaño de  $10^{-25}$  metros puede haber intercambiado información y haberse hecho homogénea. Esa pequeña zona, millones de veces más pequeña que una partícula atómica, después de la inflación tiene un tamaño superior al que tiene el universo observable hoy. Esto explica porqué el universo que hoy observamos es tan homogéneo: en su génesis el universo estuvo todo en contacto causal.

Un último problema en la génesis es porqué existe materia en el universo. A partir de la energía se generan pares de partículas y antipartículas en igual número que se crean y se aniquilan. Por razones que no se conocen bien se produjo una ligera asimetría que creó más partículas que antipartículas. Esa asimetría es muy pequeña de modo que por cada mil millones de anti-partículas se crean mil millones más una partícula. Las partículas superan a las antipartículas en una por cada  $10^9$  antipartículas. Eso define la razón del número de bariones a fotones en el universo que están en esa proporción: hay un barión por cada  $10^9$  fotones. Después que el universo se hace transparente el número de bariones y de fotones se conserva. Dado que en los instantes iniciales el universo debe haber estado en un estado de equilibrio entre las reacciones que a partir de dos fotones de alta energía formaban pares partícula-antipartícula y aquellas que las destruían, en una ligera proporción resultaba más fácil destruir la antipartícula con lo cual queda finalmente este exceso de partículas. Si así no fuese no existiría el mundo alrededor de nosotros ni tampoco existiríamos nosotros. La razón física de porqué se produjo esa asimetría partícula-antipartícula no se conoce cabalmente.

## Referencias:

Peter Coles 2001 "*Cosmology*", Oxford University Press, Oxford.  
Donald Goldsmith 2000 "*The Runaway Universe*", Perseus, Cambridge, Massachusetts.  
Craig J. Hogan 1998 "*The Little Book of the Big Bang*", Copernicus,  
Springer-Verlag, N.York.  
Steven Weinberg 1977 "*The First Three Minutes*" Basic Book, N. York.