

Nucleosíntesis

Uno de los más notables logros de la teoría del Big-Bang es la explicación de la composición química primordial del Universo. Combinada con la teoría de evolución estelar nos proporciona la composición química actual y lo consigue con una precisión sorprendente. Todos los metales (en la acepción astrofísica de la palabra “metal”, es decir, cualquier elemento más pesado que el helio) se han formado en las estrellas, salvo muy pocas excepciones consistentes en elementos minoritarios de ${}^6\text{Li}$ y ${}^7\text{Be}$. Antes de la época de la Nucleosíntesis, en la Era de las Partículas, había como materia bariónica, protones (núcleos de hidrógeno) y neutrones (además de electrones, positrones, fotones neutrinos y partículas de materia oscura no bariónica). En la época de la nucleosíntesis, sólo se formaron núcleos de Helio (${}^4\text{He}$) y cantidades muy pequeñas de núcleos de Deuterio (${}^2\text{H}$), Tritio (${}^3\text{H}$), Helio-3 (${}^3\text{He}$) y los mencionados ${}^6\text{Li}$ y ${}^7\text{Be}$.

Las energías de enlace de los núcleos son del orden de 1 MeV por lo que la época de la Nucleosíntesis ha de ser buscada en el tiempo en el que la temperatura del Universo era de este orden, es decir de aproximadamente 10^{10} K.

Se precisan modelos numéricos que tengan en cuenta las posibles reacciones nucleares, los distintos posibles elementos y sus isótopos, las distintas probabilidades de cada reacción y la energía liberada, además de un modelo de expansión y enfriamiento generales y de los parámetros que lo controlan para determinar las densidades precisas de hidrógeno, helio y de todos los isótopos mencionados. Estos isótopos, aunque se produjeron en cantidades minoritarias, son importantes porque son medibles.

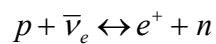
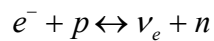
Aceptemos que antes de la Nucleosíntesis sólo tenemos como materia bariónica, protones y neutrones. Estaban en equilibrio termodinámico, por lo que sus densidades relativas, cumplían la distribución de Maxwell-Boltzmann:

$$N \propto m^{3/2} \exp\left(-\frac{mc^2}{kT}\right)$$

por lo que las densidades relativas venían dadas por:

$$\frac{N_n}{N_p} = \left(\frac{m_n}{m_p}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}\right]$$

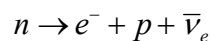
Como las masas del protón y del neutrón son muy parecidas (938.3 MeV y 939.6 MeV respectivamente) cuando la temperatura era muy alta el número de protones y de neutrones era prácticamente el mismo. Tenían un equilibrio termodinámico común, garantizado por las reacciones de conversión protón-neutrón:



Estas reacciones son endotérmicas de izquierda a derecha, necesitando la primera 0.8 MeV y la segunda 1.8 MeV. De derecha a izquierda las reacciones son exotérmicas y se producen espontáneamente, de tal forma que al bajar la temperatura, se producen más reacciones de producción de protones a partir de neutrones.

Vemos esto también en la fórmula de N_n/N_p . Cuando la temperatura va bajando debido a la expansión, la exponencial dejará de dar el valor unidad. La transición ocurrirá más o menos cuando kT sea del orden de la diferencia de masas entre neutrón y protón, es decir, de 1.3 MeV cuando acaece la Nucleosíntesis. La proporción neutrón/protón irá decayendo. La velocidad de reacción va disminuyendo y, sin que especifiquemos la fórmula, se sabe que se hace muy lenta para kT igual a 0.8 MeV, tan lenta que su tiempo característico se hace superior al tiempo de Hubble entonces. Cuando se tiene esta temperatura, podemos calcular que la relación de densidades de neutrones y protones es de 1:5.

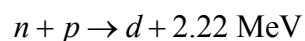
Esta proporción podría disminuir debido al proceso de desintegración-beta del neutrón:



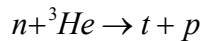
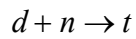
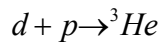
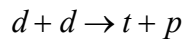
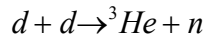
pero el tiempo característico de desintegración es de 887 segundos, que es mucho para la época considerada (del orden del segundo). Por tanto, podemos suponer que el neutrón es bastante estable. Esta desintegración proporciona 0.8 MeV solamente, como puede comprobarse con una tabla de masa de las partículas. A pesar de ello, se puede estimar que la proporción neutrón/protón disminuye hasta 1:7.

Según avanzara el tiempo, esta proporción iría disminuyendo indefinidamente pero, afortunadamente para la vida, los neutrones se “metieron” en núcleos, sobre todo de helio, donde ya esta partícula es completamente estable.

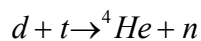
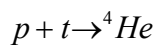
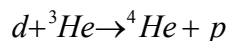
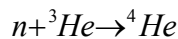
Se pueden producir una serie de reacciones nucleares: Protón y neutrón pueden formar directamente deuterio



La unión de dos núcleos de deuterio podrían dar directamente un núcleo de ${}^4\text{He}$ pero se produce más bien según una serie de reacciones intermedias en las ue se forma tritio y ${}^3\text{He}$:



tras las cuáles ya se puede producir ${}^4\text{He}$:



Parece que, en principio, podría formarse núcleos más pesados por sucesivas agregaciones de p,n, d, etc. pero se produce el llamado cuello de botella de helio. Hay que “romper el helio” pero el helio es muy estable, pues:

$$2m_p + 2m_n - m({}^4\text{He}) = 28.3 \text{ MeV}$$

es decir, tiene una altísima energía de enlace. Además no existen en la naturaleza núcleos estables con número atómico 5 ú 8, por la que la cadena de sucesivas fusiones se interrumpe. Entre el 5 y el 8 tenemos los números atómicos del ${}^6\text{Li}$ y ${}^7\text{Be}$, que sí que se forman aunque en muy pequeñas cantidades.

Si todos los neutrones están en los núcleos de helio (despreciando los elementos minoritarios) habrá entonces un núcleo de helio por cada 12 de hidrógeno, $X_4=1/12$. En masa, los núcleos de helio representan entonces el 25% y el hidrógeno el 75% restante,

$$Y_4 = 0.25.$$

Los modelos detallados permiten encontrarlas abundancias de ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$, D, ${}^7\text{Li}$, etc. en función de los parámetros libres. Inicialmente, uno de estos parámetros libres era el número de familias de neutrinos, ya que este número afecta a la relación temperatura-tiempo en la expansión. Se pudo establecer que había tres familias, como efectivamente se comprobó en el CERN con el experimento LEP, al observarse la desintegración de la partícula Z_0 . Pero es muy interesante recordar que fueron los astrofísicos quienes primero concluyeron que había tres especies de neutrinos.

El otro parámetro libre es la densidad de bariones o, en términos relativos, Ω_B . Es evidente que si el número de bariones cambia, cambiarán las proporciones de todos los compuestos primordiales. Midiendo entonces las densidades reales en el Universo podemos establecer Ω_B , uno de los parámetros clave que definen el Universo real. Así se ha hecho y se ha podido

obtener que este parámetro tiene un valor comprendido entre 0.032 y 0.048, lo que ha sido corroborado con otros métodos independientes, tales como el CMB.

Este buen resultado a favor de la teoría del Big-Bang es muy resaltante, especialmente teniendo en cuenta que las abundancias que se obtienen son:

| | |
|-----------------|---------------------|
| ${}^4\text{He}$ | 0.25 |
| D | 3×10^{-5} |
| ${}^3\text{He}$ | 10^{-5} |
| ${}^7\text{Li}$ | 5×10^{-10} |

y que abarcan unos 10 órdenes de magnitud (i). Bien es cierto que estos productos de la nucleosíntesis primordial no han permanecido inalterados a lo largo de la vida del Universo y, por tanto, no todas las abundancias tienen la misma fiabilidad. En algunos casos, la abundancia primordial ha de obtenerse por extrapolación.

El deuterio es el elemento más significativo. Aunque es destruido en las estrellas, podemos observar el deuterio primordial en la nubes de Ly- α , que se suponen formadas por gas pregaláctico, anterior a la compleja química estelar posterior. Por otra parte, la abundancia de deuterio es muy sensible a la densidad bariónica. Si toda la masa fuera bariónica y la densidad del Universo fuera la crítica, tendríamos que su abundancia sería del orden de 10^{-11} , más de 6 órdenes de magnitud inferior a la observada. Esta es una prueba contundente para que el Universo haya de ser cerrado por componentes más exóticas que la materia bariónica.

Una vez puesta de manifiesto la concordancia de las abundancias primordiales con el Universo real no dominado por la materia bariónica, nos surgen preguntas más elementales y de más difícil respuesta. ¿Por qué Ω_B es 0.04 precisamente?, ¿por qué el número de bariones fotón es precisamente 10^9 ?, ¿por qué no hay antibariones?. Son preguntas correspondientes al proceso de **Bariogénesis**. Pero este proceso y la época en que tuvo lugar son mucho más desconocidos que la Nucleogénesis. Sólo hay teorías muy especulativas, por no decir que no se sabe nada.

La asimetría barión-antibarión requiere que se cumplan las llamadas condiciones de Sakharov: 1. Violación de la conservación del número bariónico; 2. Violación de C y CP; 3. Alejamiento del perfecto equilibrio termodinámico.

Si partimos de que inicialmente el número de bariones y antibariones era el mismo, está claro no podemos obtener un número de bariones positivo con ningún proceso. El suponer que el Universo nació con la asimetría ya establecida es filosóficamente difícil de admitir. Así hemos de salirnos del llamado Modelo Estándar.

La violación C se refiere a una simetría según la cuál las interacciones son equivalentes cuando intercambiamos la carga de las partículas. La violación P viola la simetría de las interacciones al cambiar la paridad. En la violación CP intercambiamos carga y paridad. Si no hubiera este tipo de violaciones, cualquier producción de número bariónico mediante algún proceso que no conservara el número bariónico, sería compensado por otro proceso equivalente con la carga y la paridad cambiada.

La separación del equilibrio termodinámico es necesaria porque si hay equilibrio cualquier proceso se da con igual facilidad en un sentido que en su contrario. Si identificamos un proceso que genere número de bariones, se daría también el proceso inverso anulando el efecto.

Normalmente, hay que buscar el origen de la asimetría en una época suficientemente remota como para que $kT \gg m_p c^2$. Tenemos el hipotético proceso:

$$\gamma + \gamma \leftrightarrow p + \bar{p}$$

(decimos hipotético porque debe darse a tan altas temperaturas como para que el protón se descomponga en sus quarks). En equilibrio es de esperar igual número de protones, de antiprotones y de fotones. Supongamos que existe una partícula X muy masiva. Inicialmente, el número de X y su antipartícula sería igual que el de protones y antiprotones. Se desintegra con la reacción similar a la anterior pero, por ser tan masiva, cuando el Universo se enfría ya no se produce la reacción directa. Si se cumplen las condiciones de Sakharov pueden crearse más protones que antiprotones, en una proporción minúscula, precisamente un protón de más cada 10^9 desintegraciones. Se alcanzan así $10^9 + 1$ protones por cada 10^9 antiprotones. Al descender la temperatura suficientemente como para que la reacción anterior sólo se produzca en sentido inverso, es decir, en el sentido de la aniquilación, desaparecerán todos los antiprotones, quedando, más o menos, un protón por cada 10^9 fotones. Aunque la teoría GUT prevé posibles procesos que rompen la simetría del Modelo Estándar, todo permanece aún en estado muy especulativo y vago.

Bibliografía recomendada.

M. Roos. 2003. Introduction to Cosmology. Wiley

A. Liddle. 2003. An Introduction to Modern Cosmology. Wiley