

El origen de la materia y la energía en el universo

PEDRO VILARROIG.

Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. C. Ríos Rosas, 21 28003 Madrid.

RESUMEN:

La materia de nuestro universo ofrece un aspecto muy diverso, contrariamente a cómo ésta se presentaba en sus orígenes. En el Big Bang solamente existía una masa de energía en donde todo era indiferenciado y confundido en un volumen casi puntual pero, a medida que la temperatura baja y el universo se expande, aparecen nuevas estructuras que darán lugar a la materia tal como la conocemos hoy en día. Las teorías más modernas apuntan al hecho de que el origen de la materia y la energía es exterior al propio universo.

PALABRAS CLAVE: materia, energía, universo

Es sabido que la teoría más aceptada sobre el origen del universo es el Big Bang o gran explosión. Tomando esta hipótesis, muchos de los fenómenos que hoy en día se observan en el universo, como su expansión, el fondo de microondas, etc., pueden ser correctamente explicados. Según esta teoría, el universo habría nacido a partir de un tamaño infinitesimal y luego habría iniciado una expansión hasta alcanzar el tamaño actual. La pregunta que surge es ¿cómo de pequeño era el universo en su inicio?

No podemos comprimir el universo indefinidamente ya que, en un momento dado, el tamaño alcanzará una escala en donde los fenómenos cuánticos serán apreciables. En ese mismo momento la gravedad será intensa y convivirán dos fenómenos que la física aún no ha sido capaz de unificar. Para estudiar el fenómeno se necesitaría disponer de una teoría cuántica de la gravitación, cosa que aún no está consolidada. Existen unos primeros rudimentos sobre esta teoría y nos dice que, precisamente en esta escala es necesario detenerse.

Existe una distancia mínima, llamada *radio de Planck*, que constituye un cuanto de espacio. Igualmente, la luz tardará un tiempo t_p (tiempo de Planck) que define, igualmente, un cuanto de tiempo. Para deducir estas cantidades, imaginemos un diminuto agujero negro cuyo radio sea lo suficientemente pequeño como para obtener efectos cuánticos. Según la definición de radio de Schwarzschild de un agujero negro, $r_s = 2Gm_p/c^2$, siendo m_p su masa, y a la cual llamaremos *masa de Planck* para el caso que nos ocupa. Su radio será el recién definido *radio de Planck*. Según la relatividad especial, la masa de este agujero negro contiene una energía $E_p = m_p c^2$, y si como hemos supuesto, existen efectos cuánticos, habrá una indeterminación dada por el principio de Heisenberg: $\Delta t \Delta E \geq \hbar$. Combinando todo ello resulta una masa de Planck:

$$[1] \quad m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{2G}} \approx 10^{-8} \text{ Kg}$$

Esta masa es realmente pequeña y no ha podido dar lugar a todo el universo. Surge entonces la pregunta ¿de donde procede el resto de la masa y la energía?

Existen algunos fenómenos que la teoría de la gran explosión no puede explicar o, incluso, predice efectos que contradicen la experiencia. Tales son el problema del horizonte y la planitud. Para justificarlos se introdujo la teoría de la inflación, ilustrada en la figura 1:

En abscisas se sitúa el tiempo y en ordenadas S/S_0 las relaciones entre el radio del universo en cualquier instante (S) y el actual (S_0). Aquí vemos que durante un tiempo espectacularmente corto (10^{-34} segundos) el universo sufrió una expansión (10^{60}) comparable a la que sufriría un objeto desde un tamaño inferior a un protón

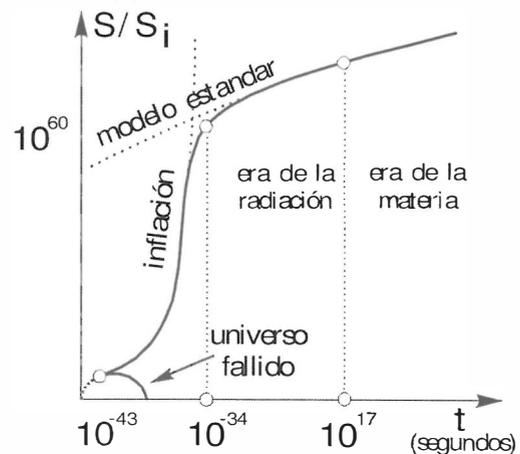


FIGURA 1: Curvas de la evolución del universo

hasta el de una galaxia. Esta expansión se produce a una velocidad enorme que supone millones de veces más rápida que la de la luz c . Aunque esto parece violar la relatividad especial, la teoría general de la relatividad permite expandirse al espacio sin limitación alguna. En estos instantes, la métrica del espacio-tiempo es tal que arrastra a la luz consigo, alcanzando valores muy superiores al actual c .

Para que el fenómeno tenga éxito es necesario que hacia 10^{-43} segundos se inyecte en el universo suficiente energía como para producir su expansión, ya que, en caso contrario colapsaría sobre sí mismo según la pequeña curva cicloide indicada en la figura y el universo sería fallido.

La incógnita del origen de la energía restante sigue, no obstante, en pie. La teoría más aceptada que existe sobre este origen se denomina *el bosón de Higgs*. En ella se postula que existe una partícula (el bosón de Higgs) que verifica una relación matemática determinada que liga el valor de la energía potencial V que adquiere el bosón en un determinado campo escalar f . Dicha relación depende de la temperatura T según:

$$[2] \quad V_2(f, T) = -\frac{1}{2} m^2 f^2 + \frac{k}{4} f^4 + \frac{k}{8} f^2 T^2 + \dots$$

Podemos representar esta función en la gráfica de la figura 2.

Cuando la temperatura es muy elevada (T_1), se tiene

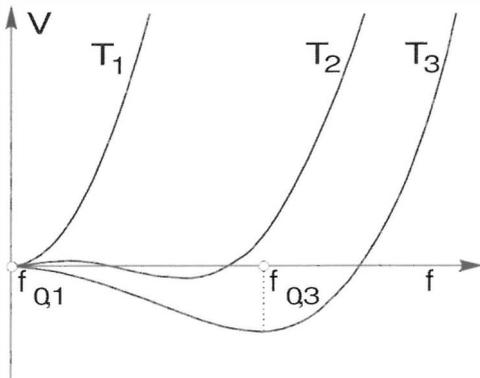


FIGURA 2: Distribución del potencial en función de la temperatura

una curva de tipo parabólico con un mínimo de energía potencial en el origen $f_{0,1}$. Sabemos, por física elemental, que toda partícula sometida a un campo se sitúa en el mínimo de energía potencial, de forma que en el caso presente los bosones se situarán en el origen. A medida que la temperatura desciende hacia T_2 y T_3 , la curva se deforma creando otros mínimos de potencial V , tal como $f_{0,2}$ y $f_{0,3}$. Este fenómeno se conoce en física como *rotura de la simetría*, y consiste en que una partícula que posee un agente sensible a un determinado campo, repentinamente se pone en movimiento debido a la aparición de una fuerza típica de ese campo. Por citar algún ejemplo, diremos que un electrón inmerso en un campo eléctrico uniforme jamás experimentará alteración alguna mientras que no se produzca una irregularidad en el campo, es decir, una diferencia de potencial. Es análogo al caso de tener una bola de plomo sobre una tabla horizontal; la bola no se moverá hasta que la tabla no se incline. Es en el instante en que se delata que la partícula posee alguna propiedad sensible al campo. En la fig. 2 existen estas diferencias de poten-

cial para distintos valores del campo f , poniendo de manifiesto una fuerza que no existía en el caso T_1 . A la temperatura T_2 algunas de las partículas que estaban en $f_{0,1}$ fluyen hacia el siguiente mínimo penetrando hacia el mismo por efecto túnel (en la figura vemos que existe una pequeña barrera de potencial). Esto se interpreta en nuestro espacio ordinario como una escisión de partículas. De pronto algunas de ellas sufren la acción de una fuerza que hasta ahora no existía mientras que otras permanecen en $f_{0,1}$. Aparentemente, el bosón de Higgs ha generado dos tipos de partículas diferentes. Digamos que ahora hay partículas con masa y sin ella, generando lo que llamamos gravedad y otra fuerza, llamémosla x . A medida que la temperatura desciende, la fuerza x se divide nuevamente y aparecen las interacciones fuerte y electrodébil, escindiéndose ésta última finalmente en débil y electromagnética. Si se realiza la operación inversa, es decir, se eleva la temperatura, las interacciones se unifican al llegar a T_1 en donde solamente existe una interacción, por lo que se denomina *la Gran Unificación*. Estas escisiones han generado lo que se denomina *materia de espejo* (*mirror matter*), que comparte con nosotros la gravedad (primera escisión) pero no otras interacciones como la electromagnética, por ejemplo, con lo cual, ni la podemos ver, ni interactúa con nuestros electrones pudiendo interpenetrarse con la materia ordinaria. Hoy en día se postula que la materia oscura del universo podría estar formada en gran parte por este tipo de materia.

Referente al tema que nos atañe, el modelo del universo inflacionario se une al postulado de la *constante cosmológica*. Dicho postulado consiste en añadir un término a las ecuaciones tensoriales de Einstein para justificar que el universo se halla acelerando su expansión en la actualidad¹. De la fusión de ambas teorías se desprende que la constante cosmológica proviene de un campo escalar que se halla fuera del universo o, mejor dicho, que nuestro universo se encuentra sumergido en un campo escalar de energía. Al producirse una diferencia de potencial de ese campo escalar cosmológico (al que se denomina *inflátón*), se genera una burbuja de universo hacia la cual irrumpe durante el proceso de inflación una enorme cantidad de energía. Hay que señalar que, según nos indica la relatividad general, la burbuja posee una pared externa en donde el tiempo ha sufrido una dilatación infinita, llegando éste a detenerse. Existe un agujero negro de forma anular que rodea la burbuja, impidiendo que entre energía alguna a través de la pared. La transferencia de ener-

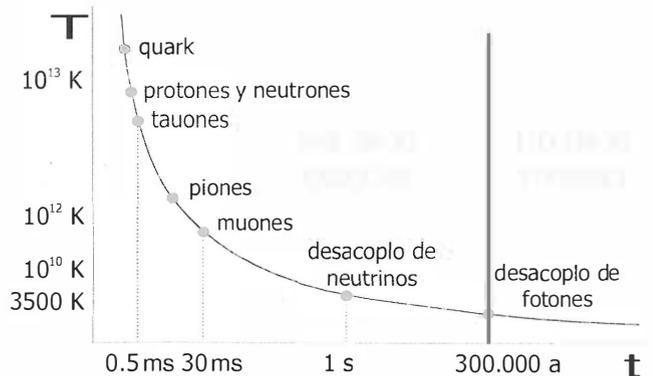


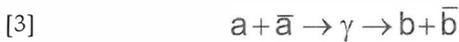
FIGURA 3 Diferentes especies de partículas a medida que el universo se expande

¹ El propio Einstein ya lo había hecho tiempo atrás pero con el único motivo de evitar que sus ecuaciones predijesen la expansión del universo. Esa idea, carecía de base científica y simplemente se debía a un factor psicológico de Einstein que, por motivos desconocidos, repudiaba la idea de un universo dinámico.

gía desde el campo inflatón se realiza a través de los puntos interiores de la burbuja por una dimensión que no podemos apreciar. Recordemos que la teoría de supercuerdas admite que el universo puede llegar a tener hasta 16 dimensiones, y más, cuando nos movemos a escalas muy pequeñas.

Esta irrupción de energía se produce en unas dimensiones de burbuja cercanas al radio de Planck y lo hace en forma de partículas ultrarrelativistas de altísima energía. A partir de este momento se inicia la historia térmica del universo. Esta historia se puede resumir en el gráfico de la figura 3.

En los primeros instantes solamente existen quarks, ya que la temperatura es tan alta que cualquier otra partícula que quisiera formarse a partir de ellos es inmediatamente disociada. Instantes más tarde, a medida que la temperatura desciende, se generan las primeras partículas actuales, es decir, protones, neutrones, electrones, piones, tauones, muones, neutrinos y fotones. Todos ellos conviven dinámicamente con sus respectivas antipartículas mediante la reacción siguiente:



Aquí se indica con *a*, una especie de partícula cualquiera y *a*⁻ su antipartícula. Ambas se unen para generar un fotón *g* quien, a su vez se descompone en un nuevo par partícula-antipartícula representado por *b*, que puede volver a ser la misma de antes o cualquier otra.

Todas las partículas de esta sopa primitiva siguen las leyes de la mecánica estadística, que se pueden englobar en la distribución de Maxwell-Boltzmann:

$$[4] \quad N = \int_0^{\infty} g(p) \cdot e^{-E/kT} dp$$

N representa el número de partículas, *g*(*p*) el número de estados cuánticos que existen para una determinada cantidad de movimiento *p*, *E* la energía de la partícula, *k* la constante de Boltzmann y *T* la temperatura. Centrándonos en el término exponencial, vemos que éste disminuye rápidamente si la temperatura desciende. Para calcular la energía total de la partícula tendremos que tener en cuenta la cantidad relativista $E=mc^2$, de donde se deduce que a bajas temperaturas el cociente *E/kT* se mantiene si *E* es también pequeño, es decir, con poca masa. Si la masa es grande, mc^2/kT es grande y la exponencial tiende a 0, con lo que la partícula desaparece. Esto se entiende muy bien desde el punto de vista físico, ya que según la reacción [3], un cierto par (*b*, *b*⁻) se podrá formar siempre que la energía del fotón sea suficiente como para poder generar la masa de esa partícula. Si la temperatura desciende, los fotones ya no tienen suficiente energía para crear la partícula *b*.

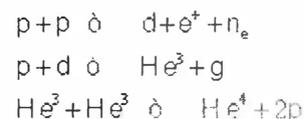
En la figura 3 se ha representado una secuencia en donde se ve que la temperatura baja a medida que el tiempo transcurre. Las primeras partículas, como se ha dicho, fueron quarks, seguidas por protones y neutrones. Desaparecidos éstos (bien entendido que «desaparecer» supone que ya no hay pares protón-anti-

protón y neutrón-antineutrón y solamente quedan unas pocas partículas de materia). Inmediatamente se desintegran los tauones, pues éstos tienen vidas de picosegundos. A medida que la temperatura baja dejan de ser estables los piones y muones, que desaparecen. Hacia los 10¹⁰ kelvin, aparece un fenómeno que se conoce como *desacoplamiento*. Éste consiste en que el universo se expande tan rápidamente que algunas partículas no pueden seguir interaccionando entre sí. Ese es el caso de los neutrinos, que, a modo de partículas fantasma, continúan presentes pero sin actuar sobre el resto, situación que perduró hasta nuestros días. Más adelante, entre 150.000 años y 300.000 se desacoplan los fotones por motivos algo diferentes. En este caso, los electrones que quedan son capturados por protones, generando un átomo de hidrógeno neutro. Estas nuevas partículas, al no poseer carga eléctrica dejan de interactuar con los fotones, los cuales quedan liberados e inician un viaje por el cosmos con entera libertad. Esto se conoce como *última superficie de dispersión* y actualmente aún perduran en lo que se conoce como *fondo de microondas*. También es interesante este momento ya que coincide con bastante precisión con dos periodos que se denominan *era de la radiación* y *era de la materia*. Ambas se caracterizan con el papel que tiene, bien sea la radiación, bien sea la materia, en relación a la presión total en el universo. Como su nombre indica, en la era de la radiación es ésta quien contribuye mayoritariamente a la presión, mientras que en la de la materia es la última quien predomina.

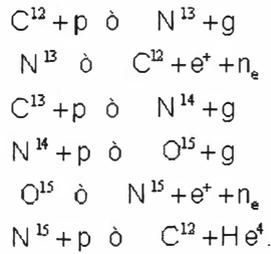
Terminados estos procesos, y por aplicación directa de la estadística de Maxwell-Boltzmann, se deduce que los protones residuales quedan en una proporción de 1 a 7 en relación a los neutrones. Eso supone la formación de átomos de hidrógeno y helio en relaciones del 75% (H) y 25% (He). La observación actual ha verificado que estas proporciones son correctas y constituyen la primera materia del universo.

Estos gases formaron grandes masas gaseosas que, por gravedad, fueron colapsando hasta formar núcleos en los cuales se inició una reacción termonuclear de fusión. La temperatura necesaria para esto se obtiene como resultado del proceso de compresión de la nube de gas, haciendo que la energía gravitatoria se transforme en energía interna del gas. Existe una masa mínima, denominada *masa de Jeans*, y que es crítica para la formación estelar. Por debajo de esta masa, la temperatura que se obtiene no es suficiente para iniciar la reacción de fusión, debido a que llega un momento en el cual el gas se transforma en materia degenerada y el principio de exclusión de Pauli impide continuar la compresión. La masa gaseosa se estabiliza y se aborta la formación de la estrella; este es el caso del planeta Júpiter.

Cuando la masa gaseosa cumple las condiciones de Jeans se crea una estrella. Generalmente la masa de gas forma diferentes centros de compresión, dando como resultado un cúmulo globular, o agrupación de varias estrellas. Dentro de éstas va a tener lugar la síntesis de nuevos átomos. En principio, el combustible del que se dispone es hidrógeno, que da helio merced a un mecanismo de reacción algo complicado y que se denomina *cadena protón-protón*:



Esta reacción tiene lugar en estrellas de tamaño pequeño como el sol. En estrellas más masivas, el ciclo es más complicado, y se denomina *ciclo CNO*:



Aquí se puede ver que en el interior de la estrella tienen lugar los procesos fundamentales que producirán casi todos los elementos químicos conocidos y que compondrán el polvo cósmico, meteoritos, asteroides y los planetas. Cuando una estrella consume todo su hidrógeno, pierde estabilidad, se hincha y se expande pasando por la fase llamada de *gigante roja*. En este estado dejará parte del material que ha sintetizado en el espacio circundante para poder ser aprovechado, bien para producir estrellas de la siguiente generación, bien para otros cuerpos. El helio es ahora un nuevo combustible que acabará produciendo carbono al final de la cadena de reacciones nucleares.

No obstante, las estrellas más masivas son más calientes y pueden continuar aún más adelante en la fusión. Como se sabe, existe una relación entre la energía nuclear de enlace y el número atómico de un elemento. El gráfico se ilustra en la figura 4, indicando que se obtiene un máximo en el hierro. Esto quiere decir que cualquier elemento más ligero que el hierro es capaz de ceder energía si se

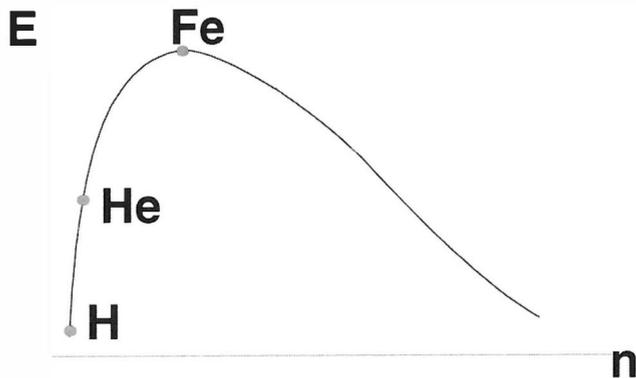


FIGURA: 4 Energía de enlace en función del número atómico del elemento.

fusiona con otro como él pero que, por encima del hierro sucede todo lo contrario, es decir, que se necesita aportar energía para la fusión y que ésta no devuelve nada. Muy al contrario, un átomo de número atómico superior al hierro, lo que hará será ceder energía al romperse (fisión).

Se concluye, así, que una estrella masiva terminará generando un núcleo de hierro, produciendo todo el resto de elementos intermedios. Cuando una estrella de este calibre se encuentra en tales circunstancias, se inicia un proceso denominado *fotodesintegración* del núcleo. Los fotones bombardean el hierro y lo transforman en helio que, a su vez, es desintegrado en protones y neutrones libres. Los protones captan electrones del gas, convirtiéndose a su vez en neutrones. Esta reacción acaba por producir un colapso violento del núcleo estelar, que se desploma en caída libre hasta formar una masa de neutrones de una densidad de unos doscientos millones de toneladas por centímetro cúbico. En ese instante los neutrones forman un gas degenerado que resiste la compresión por el principio de exclusión de Pauli generando, en su detención brusca, una onda de choque sobre los gases de la atmósfera estelar que colapsaban junto con él. El resultado es una explosión de dimensiones catastróficas conocida como *supernova del tipo II*.

En esta explosión se genera una formidable cantidad de energía (unos 10^{44} julios) y una erupción cien veces mayor que se libera en forma invisible como neutrinos. La energía aprovechable actúa sobre los gases residuales, provocando reacciones de fusión que permitirán disponer de los elementos químicos que faltaban desde el hierro hasta los radiactivos.

Así, las estrellas acaban de lanzar al espacio todo el material que necesitarán otros cuerpos para su formación. Si no hubieran existido gigantes rojas ni catastróficas explosiones de supernovas, ni los planetas ni la vida habrían sido posibles en nuestro universo. De alguna manera podemos autodenominarnos hijos de las estrellas.

REFERENCIAS:

Roos, M. (1997): Introduction to cosmology, *John Wiley & sons*.
 Weinberg, S. (1972): Gravitation and cosmology. Principles and Applications of the General Theory of Relativity. *John Wiley & sons*.
 Peacock, J.A. (1999): Cosmological physics, *Cambridge University press*.
 Vilarroig, P. (2000): Principios de astrofísica y cosmología. Las aplicaciones de la teoría general de la relatividad, *Fundación Gómez Pardo*.