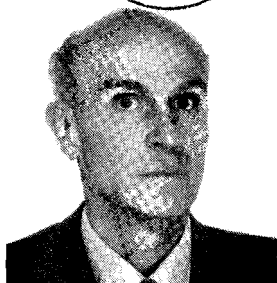


MATERIA Y ENERGIA EN EL UNIVERSO

Por Federico Goded Echeverría



Si queremos saber cuánta existe y cómo está distribuida, debemos necesariamente abordar una cuestión previa. ¿Es finito y cerrado el universo? Si no lo es no podremos saber cuanta materia contiene y sólo podríamos aspirar a conocer su distribución espacio-temporal en la región al alcance de nuestra observación, y bajo qué formas existe actualmente. Por otra parte, tanto las cantidades de materia y radiación como su estado actual dependen de la historia del universo, la cual a su vez plantea otra serie de problemas. ¿Existió un principio? Y si el universo es cíclico, ¿la distribución actual de la materia y la radiación, ¿son las mismas que en ciclos anteriores? Para estas graves cuestiones no hay todavía respuestas definitivas y rotundas, pero sí creemos que merece la pena exponer cómo trata de responder a ellas la física actual, con lo cual además, y como de propina, justificaremos el ambicioso título de estas líneas.



FEDERICO GODED ECHEVERRÍA es Catedrático de Tecnología Nuclear en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid y académico numerario de la Real Academia de Ciencias. Ha publicado trabajos de investigación en revistas especializadas europeas y norteamericanas y media docena de libros científicos.

* BAJO la rúbrica de «Ensayo» el Boletín Informativo de la Fundación Juan March publica cada mes una colaboración original y exclusiva de un especialista sobre un aspecto de un tema general. Anteriormente fueron objeto de estos ensayos temas relativos a la Ciencia, el Lenguaje, el Arte, la Historia, la Prensa, la Biología y la Psicología. En este número se inicia la publicación de una nueva serie de ensayos sobre la Energía.

Para la cuestión del principio del universo la respuesta es clara y definitiva. Hace unos 10^{10} años toda la materia del universo, hoy repartida casi íntegramente en galaxias que se alejan unas de otras en un proceso de continua expansión, estaba concentrada en un volumen finito, y a una enorme temperatura, superior a los 10^{12} °K. La procedencia última de esta materia es obviamente una cuestión que interesa tanto a la física como a la filosofía y a la religión. ¿Procedía esta materia de una implosión, es decir, de un colapso gravitacional que ocurrió al fin de un ciclo anterior, y no existió, por tanto, una creación? Aunque parezca a primera vista que es casi imposible poder dar una respuesta fiable a esta trascendental pregunta, en realidad existen esperanzas fundadas de encontrarla. La razón es simple. Si el universo se contrae y expande cíclicamente, las partículas que no alcancen el equilibrio térmico durante la fase de contracción —tales posiblemente los gravitones y los neutrinos— estarían presentes en mayor proporción en la siguiente fase, lo que en definitiva equivale a decir que es posible que algún día se detecten residuos de un ciclo anterior (1). Pero prescindiendo de la trascendental cuestión de la procedencia —todavía y quizá para siempre desconocida— ha sido posible reconstruir en sus grandes líneas la evolución del universo a partir de ese gas primigenio cuya densidad ha pasado de unos 10^{59} gr./cm³ en el momento en que comenzó su expansión hasta su valor actual comprendido entre 2×10^{-31} gr./cm³ y 2×10^{-29} gr./cm³.

Obviamente esta reconstrucción es mejor conocida y más fiable cuanto más cercana al momento actual. La composición y el comportamiento del gas inicial en los primeros 0,0001 segundos de la historia cósmica encuentra graves dificultades de interpretación. Sin embargo, es posible decir que lo que sucedió

en esos 0,0001 segundos primeros dejó huellas indelebiles. Estas huellas permitirán decidir cuál de las dos teorías o modelos propuestos para esta primera fase de la vida del universo es el más acertado. El modelo de las partículas elementales supone que en esos primeros instantes sólo existía un pequeño número de éstas —fotones, leptones, quarks— y sus correspondientes antipartículas. Este modelo supone además que a la temperatura entonces reinante puede prescindirse de las fuerzas que las ligan entre sí, con lo cual el conjunto obedecería a leyes físicas muy simples. El otro modelo, denominado de partículas compuestas, es más complejo y no puede resumirse aquí. La forma de decidir entre ambos modelos consiste simplemente en buscar lo que se ha dado en llamar partículas fósiles, que son aquellas que han eludido o escapado el equilibrio térmico antes de que la temperatura descendiera por debajo de 10^{12}°K y no se fusionaran con los nucleones entonces presentes.

Un posible candidato para estas partículas fósiles podría ser el quark, pero hasta el momento presente ha sido imposible detectar en estado libre esta hipotética partícula.

Ambos modelos suponen que la expansión inicial se realiza en un gas homogéneo y en condiciones isotrópicas. Estas hipótesis que a primera vista parecen las más lógicas, son como enseguida veremos las que producen mayores dificultades para interpretar fases posteriores de la evolución.

Pero cualquiera que fueran las condiciones que prevalecieran en esas cruciales primeras fracciones de segundo, el caso es que en los primeros segundos siguientes la temperatura descendió hasta unos 10^{10}°K y la densidad se redujo a unos 10^5 gr./cm³. En esos momentos todos los pares de nucleones y antinucleo-

nes se recombinaron, y los neutrinos y gravitones se desvincularon de la materia. Desde ese momento ambas clases de partículas —gravitones y neutrinos— se propagan libremente manteniendo el espectro del cuerpo negro. Como desde entonces no han efectuado interacciones con la materia, su detección y observación proporcionarán información experimental acerca de las «condiciones reinantes en el primer segundo de vida del universo» (2).

La formación de los primeros elementos químicos tuvo lugar en el período comprendido entre $t \approx 2$ segundos y $t = 1.000$ segundos, en el cual la temperatura descendió desde 10^{10}°K hasta 10^9°K y la densidad desde 10^5 gr./cm^3 hasta 10^{-1} gr./cm^3 . En este período alrededor del 25 por 100 de todos los bariones del universo se convirtieron en He^4 y el 75 por 100 restante en hidrógeno. Pequeñísimas cantidades de litio, deuterio y He^3 también se crearon, pero no se formaron elementos más pesados. La formación de todos los demás elementos químicos tuvo lugar mucho después en el interior de las estrellas en los procesos que brevemente mencionaremos después.

Después de la formación de los elementos químicos la materia y la radiación continuaron en interacción, manteniéndose ambas a la misma temperatura.

La temperatura y la densidad continuaron descendiendo de una forma continua, y cuando el universo alcanzó una edad de unos 10^5 años, la temperatura había bajado hasta unos pocos miles de grados y la densidad hasta $\approx 10^{-20} \text{ gr./cm}^3$. A partir de este momento la densidad debida a la materia sobrepasa a la densidad debida a la radiación. Otro suceso importante ocurre en ese momento. Este es el denominado «desacoplamiento». Termina en ese momento la interacción entre la materia y la radiación, y los

fotones de esta última se propagan desde entonces libremente en el espacio. Desaparece poco a poco la presión debida a los fotones que hasta entonces impedía que la materia se condensara en estrellas, galaxias y racimos de galaxias, y como consecuencia comienza la condensación. Esta condensación da lugar a la aparición de estrellas y galaxias, cuando el universo tiene una edad comprendida entre 10^8 años y 10^9 años.

El nacimiento de las estrellas tiene lugar por condensación de la materia, condensación que es originada por las fuerzas gravitatorias (3). Ahora bien, para que esta condensación ocurra es preciso que existan inhomogeneidades en la distribución de la materia, las cuales no serían de suficiente entidad como para formar estrellas si la materia estuviera distribuida homogéneamente desde el instante inicial.

Ello quiere decir que para explicar satisfactoriamente la formación de las estrellas y las galaxias, es necesario admitir que el universo desde su formación poseía inhomogeneidades de la magnitud suficiente. Sin adentrarnos más en esta cuestión del origen de esas inhomogeneidades, y aceptando que en el período descrito estas inhomogeneidades existían, es fácil ya comprender que las fuerzas gravitatorias hagan que la materia contenida en ciertas regiones fuera primeramente captada, y posteriormente fuera condensándose en un espacio cada vez menor, calentándose progresivamente. De esta forma una cierta cantidad de materia, que en el momento en que fue captada por las fuerzas gravitatorias ocupaba un enorme volumen y estaba a una temperatura reducida, fue reduciendo progresivamente su volumen y aumentando por consiguiente su densidad, y calentándose progresivamente. El tiempo necesario para

que este proceso se desarrollase es pequeño a escala cósmica, ya que sólo asciende a unos 100 millones de años (4).

El nacimiento descrito de una estrella, no tiene repercusión alguna en la formación de elementos químicos hasta que la temperatura en la zona central no llega a los veinte millones de grados, en cuyo momento comienzan a realizarse en cantidad apreciable las primeras reacciones de fusión. Debe notarse que en esos momentos la estrella termina el proceso de contracción y estabiliza su volumen, debido a que las fuerzas gravitacionales son equilibradas por la presión de las radiaciones generadas en la zona central de la estrella. La composición de la materia de la estrella en esos primeros momentos es evidentemente la misma que la que tenía la materia del universo de la cual se formó. Esto quiere decir que la materia de la estrella está formada en esos momentos por un 75 por 100 aproximadamente de hidrógeno y un 25 por 100 de helio.

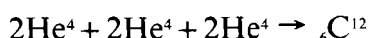
Las primeras reacciones de fusión que ocurren son las del ciclo H-H, también denominado ciclo de C. Chritchfield. La situación de equilibrio se mantiene mientras existen reservas suficientes de combustible para este ciclo, es decir, mientras existe suficiente hidrógeno. En la zona central de la estrella y como consecuencia de las reacciones nucleares del ciclo mencionado, el combustible de hidrógeno se va convirtiendo poco a poco en helio. Sin embargo, la cantidad total de hidrógeno contenido en la zona central se mantiene prácticamente constante debido a que la zona convectiva que la rodea suministra a la primera zona el hidrógeno que ésta consume. Como consecuencia de este proceso es la zona convectiva, y no la central, la que se va empobreciendo progresi-

vamente en hidrógeno y enriqueciendo en helio. Es claro que el proceso descrito, aunque dura muchos millones de años, no puede continuar indefinidamente, pues la zona convectiva llega un momento en que está tan empobrecida en hidrógeno que ya no puede enviar más combustible, es decir, más hidrógeno, a la zona central de la estrella.

Cuando esta aportación de hidrógeno cesa, se acaban también las reacciones termonucleares en la zona central y, como consecuencia, disminuye la presión de la radiación que antes era equilibrada por las fuerzas gravitacionales. Como consecuencia de ello las fuerzas gravitacionales sobrepasan a las debidas a la presión de las radiaciones y la estrella se contrae de una forma apreciable. Al experimentar una notable contracción la temperatura sube de nuevo, tanto en la zona central como en la convectiva que la rodea. El aumento de temperatura es importante y cesa cuando se alcanzan los 20 millones de grados en la zona convectiva, en cuyo momento termina la fase de contracción. Las reacciones nucleares tienen lugar ahora únicamente en la zona convectiva, en la cual la temperatura alcanza los valores necesarios para que tengan lugar el ciclo H-H y el del carbono. En esos momentos la zona central está prácticamente desprovista de hidrógeno y compuesta únicamente de helio. Puede decirse, pues, que la zona donde tiene lugar la transformación de masa en energía se ha desplazado del centro hacia la periferia. Este desplazamiento continúa posteriormente y va acompañado de una traslación paralela de las temperaturas altas hacia el exterior. Como consecuencia de todo ello la presión de la radiación en las zonas periféricas llega finalmente a ser muy superior a la debida a las fuerzas gravitacionales y el resultado final es una gran expan-

sión, un gran aumento de volumen, convirtiéndose la estrella en roja gigante.

En este último estado la temperatura en la zona central alcanza los 100 millones de grados, en la cual el helio se convierte también en combustible y comienza a verificarse la reacción de fusión



Con esta reacción comienza la formación de elementos pesados. Dado que la fusión sólo es rentable, energéticamente hablando, hasta la zona del hierro en la escala de Mendeleiev al final de la vida de la estrella, toda la zona central está formada casi exclusivamente de hierro, cromo y níquel.

El final de la vida de una estrella del tipo como la descrita, termina con una explosión violenta en la cual gran parte de su materia es arrojada al espacio, a grandes velocidades, del orden de miles de kilómetros por segundo. Después de esta explosión la materia no expelida se contrae debido a las fuerzas gravitacionales, y puede convertirse en un agujero negro, cuya detección sólo será posible merced a fenómenos cuánticos.

Como resultado de los procesos descritos las abundancias relativas de los diversos elementos químicos en nuestra galaxia son en el momento actual las siguientes (5): el 92 por 100 de los átomos son de hidrógeno, el 8 por 100 de helio, y uno de cada mil son de elementos más pesados. Por consiguiente, la tierra, la cual ha perdido la mayor parte de su hidrógeno, no es sino una mota de polvo extraña, una verdadera rareza en lo que se refiere a su composición.

Dada la homogeneidad del universo las restantes galaxias han de poseer la misma composición. Debe

señalarse además que la composición actual del universo no es fija, y ha de seguir variando con el tiempo conforme vayan desarrollándose los procesos evolutivos ya descritos, y otros no mencionados aquí, que, sin embargo, tienen menor trascendencia en lo que respecta a este aspecto.

En la presente somera descripción del posible origen y posterior evolución del universo no debe faltar una mención al problema de la masa que falta. La teoría de la relatividad general, complementada con la observación experimental, predice (6) que la densidad media del universo en su estado actual debe ser del orden de 2×10^{-29} g./cm.³. Sin embargo, la densidad media actual, como indicamos anteriormente, es menor. Si se da crédito a las predicciones de la relatividad general, en vista de los rotundos éxitos que esta teoría ha cosechado hasta el presente, entonces sería necesario admitir que existe en el universo una masa que falta, es decir, que todavía no se ha encontrado. ¿Dónde está esa masa que falta? El primer sitio donde se ha buscado esta masa ha sido el espacio intergaláctico y en el interior de los racimos de galaxias, pero debe notarse que esta búsqueda se ha saldado con un fracaso hasta el presente momento.

En vista del resultado de esta búsqueda, hasta el presente negativo, se continuó la exploración tratando de encontrar esta masa en el espacio intergaláctico y fuera de los racimos de galaxias, donde razones teórico-empíricas permiten ser optimistas sobre los resultados de esta investigación, en curso en el momento actual.

Otros lugares posibles donde eventualmente podría encontrarse esta masa que falta son las ga-

laxias enanas, cuyo tamaño es tan reducido que ha impedido hasta el momento su detección, y en las estrellas negras, es decir, en las estrellas que han experimentado la última fase del colapso gravitacional. Otra posibilidad, apuntada recientemente, es la de que la masa que falta está contenida en galaxias completas que hayan experimentado colapso gravitacional. Obviamente esta posibilidad será muy difícil de verificar experimentalmente, si el colapso se ha completado enteramente, en cuyo caso sólo podría detectarse esta masa por la desviación que produciría sobre los rayos luminosos que pasaran cerca de ella, circunstancia esta última que si es difícil de comprobar cuando se conoce y se puede ver la masa que produce la flexión de los rayos de luz, lo es mucho más cuando se ignora la presencia y la magnitud de esta masa.

Finalmente y en lo que respecta a la posible localización de la masa que falta, hay que mencionar que ésta puede también encontrarse bajo la forma de partículas relativistas como los fotones, los neutrinos y los gravitones. Son conocidas las dificultades de detección de estas dos últimas partículas, y además debe señalarse que consideraciones teóricas inclinan a pensar que la mayor parte de esta masa que falta, si en realidad existe, es lo más probable que se encuentre bajo la forma de gas de hidrógeno sumamente rarificado, y uniformemente repartido en todo el espacio.

En los años últimos la radioastronomía ha puesto en evidencia que existen en el universo radio-galaxias, y QSO (quasi stellar objects) de enorme interés. Nadie habría podido sospechar antes del descubrimiento de las radio-galaxias que de la masa de una galaxia típica de alrededor de 10^{44} gramos, una fracción sustancial

podría verse envuelta en una violenta explosión, liberando la energía correspondiente a la masa en reposo de unos 10^{39} gramos, que se convertiría en partículas relativistas y campos magnéticos dando así lugar a una fuente de radio de tamaño e intensidad desconocidos hasta el presente. ¿Por qué mecanismos esta enorme cantidad de masa se convierte en energía? Este tema está todavía muy lejos de estar resuelto y muchos autores estiman (7) que es el principal problema planteado hoy día por la astrofísica.

Para darnos una idea más clara de este fenómeno basta considerar que, cuando ocurre, al menos una milésima parte de la masa de la galaxia —la cual puede ascender a 10^8 masas solares— puede participar en la explosión, y que el fenómeno puede repetirse en la misma galaxia, unos 10^7 años después.

Algunos mecanismos de los propuestos para explicar esta gigantesca transformación de masa en energía son verdaderamente fascinantes. El que atribuye esta transformación a reacciones de aniquilación materia-antimateria es particularmente interesante porque, si esto fuera en realidad la causante de la explosión, podría suceder que una fracción importante de la masa de la galaxia se convirtiera en energía.

Los demás mecanismos propuestos, como, por ejemplo, el del colapso gravitacional seguido de expansión, no permiten la conversión en energía más que de una fracción mucho menor de la masa total.

Hasta aquí sólo hemos hablado muy brevemente del origen y evolución del universo, y para terminar sería conveniente dirigir una mirada al futuro. ¿Cuál es el destino final del mismo? ¿Continuará indefinidamente la expansión? ¿Las galaxias seguirán separándose eternamente unas de otras? O por el contra-

rio ¿las fuerzas gravitacionales frenarán, poco a poco, esta expansión hasta conseguir primero detenerla, y después convertirla en una contracción que acabe en un gigantesco colapso gravitacional? La respuesta a esta trascendental cuestión todavía no se conoce (8), pero existen fundadas esperanzas de que en un futuro no lejano la física experimental consiga desvelar esta incógnita, tan vinculada, por otra parte, a las eternas interrogantes que el hombre se ha planteado desde que existe sobre la tierra y mira a los cielos.

NOTAS BIBLIOGRAFICAS

1. «Gravitation and Cosmology. Principles and application of the general theory of relativity», por S. Weinberg. P. 597, editado por J. Wiley and Sons. 1972.
2. «Gravitation», por C. H. Misner, K. Thorne and J. A. Wheeler. P. 765, ed. Freeman and Co. San Francisco, 1972.
3. Ref. 1. P. 562.
4. «Introducción a la Historia de la Física en el siglo XX», por F. Goded. P. 100-104, ed. U.N.E.D., 1978.
5. «Modern Cosmology», por D. W. Sciama. P. 149, ed. Cambridge University Press, 1973.
6. Ref. 1. P. 476-8.
7. Ref. 4. P. 61.
8. «Modelos cosmológicos relativistas y algunas de sus implicaciones filosóficas», por F. Goded —tomo del centenario de A. Einstein—, ed. por la Real Academia de Ciencias, 1979.