

JEREMIAH P. OSTRIKER
Y SIMON MITTON

EL CORAZÓN DE LAS TINIEBLAS

Materia y energía oscuras:
los misterios del universo invisible

Traducción castellana de
FRANCESC PEDROSA

PASADO & PRESENTE

PASADO & PRESENTE
BARCELONA

ÍNDICE

<i>Agradecimientos</i>	7
PREFACIO	9
La cosmología se convierte en una ciencia guiada por los datos	9
Esquema del viaje que vamos a emprender	14
PRÓLOGO: DEL MITO A LA REALIDAD	19
Astronomía: la frontera sin límites	19
Mapas y modelos del firmamento	21
Copérnico: «El último de los cosmólogos griegos»	24
Galileo: un nuevo enfoque de la mecánica y la cosmología.	27
El impacto de Copérnico: las leyes de Kepler.	30
Isaac Newton y la gravedad	32
William Herschel descubre el universo	37
La comprensión del universo se convierte en un nuevo tipo de ciencia	41
I. EL KIT DE HERRAMIENTAS DE EINSTEIN: MANUAL DE USO ..	43
Exceso de confianza entre los expertos en los albores del siglo XX	43
Revolución en la física: el inicio de la teoría cuántica y de la relatividad	46
Relatividad especial	49
Relatividad general	52
La relatividad general se somete a examen, lo aprueba y se convierte en la sensación	56
Soluciones cosmológicas a las ecuaciones de Einstein	62

2.	EL REINO DE LAS NEBULOSAS	67
	Los nuevos instrumentos y un mejor ambiente revelan un nuevo mundo	67
	Se confirma un universo de galaxias	78
	Un modelo cosmológico para adaptarse a los nuevos datos: adelante, Georges Lemaître.	80
	Cosmología física y el universo en expansión	84
	El modelo de síntesis de Lemaître predice la contribución de la energía oscura	90
	Los logros de Hubble	93
	Gran Ciencia para atacar el Gran Problema.	95
	El modelo de universo de estado estacionario y el big bang	98
3.	¡VAMOS A HACER COSMOLOGÍA!	103
	El big bang: un punto inicial del que es imposible librarse.	103
	Cosmología observacional, el mayor de los enigmas para resolver con el mayor de los telescopios	107
	Al principio, el Gran Proyecto era demasiado difícil.	111
4.	DESCUBRIR EL BIG BANG	115
	¿Tuvo nuestro universo un nacimiento explosivo?	115
	¿Por qué brillan las estrellas?	117
	La astrofísica nuclear mueve el cosmos	122
	La bola de fuego en la que se gestaron los primeros elementos químicos	127
	Radioobservaciones directas de la bola de fuego del big bang	130
	Comprender el big bang	138
5.	EL ORIGEN DE LA ESTRUCTURA DEL UNIVERSO	143
	«En el principio», o por qué se necesita una explicación.	143
	Estructura en un universo en expansión	148
	La elusiva candela estándar: Beatrice Tinsley cambia las reglas del juego	152
	Fritz Zwicky encuentra y cataloga la estructura cósmica real	158
	Comprender el origen de la estructura se convierte en ciencia seria	162

Inflación cósmica	167
Se descubren las semillas de la estructura cósmica	175
Cerrando el bucle: ¿cómo se convierten las semillas en galaxias?	180
6. MATERIA OSCURA, O EL INVENTO MÁS NOTABLE	
DE FRITZ ZWICKY	187
Cómo se pesó la Tierra	187
Calcular la masa de la galaxia de Andrómeda.	193
Zwicky halla materia oscura en los cúmulos de galaxias en la década de 1930	197
El redescubrimiento de la materia oscura en la década de 1970	200
Las curvas de rotación confirman los argumentos a favor de la materia oscura	205
Más pruebas recientes de la existencia de la materia oscura	209
7. ENERGÍA OSCURA, O LA MAYOR METEDURA DE PATA	
DE EINSTEIN.	215
Una situación curiosa	215
¿Colapsará el sistema solar a causa de la gravedad?	216
Movimientos esperados e inesperados al arrojar una piedra y el universo de Hubble.	218
La invención de la constante cosmológica o energía oscura: 1915	222
El resurgimiento de la energía oscura en la década de 1970	228
Nuevos argumentos y nuevas pruebas: la energía oscura, confirmada en la década de 1990	233
La energía oscura llena el hueco para permitir la existencia del universo plano, «justo».	235
8. EL PARADIGMA MODERNO Y LOS LÍMITES DE NUESTRO CONOCIMIENTO	243
Hemos recorrido un largo camino	243
La materia y la energía contenidas en el universo	245
La solución cosmológica global y el triángulo cósmico	252
Al principio	257
Estructura en el universo	258
El enfoque del superordenador.	261

9. LA FRONTERA: GRANDES MISTERIOS AÚN NO RESUELTOS . . .	267
Materia oscura	267
Energía oscura	269
Inflación	271
Agujeros negros gigantes	273
Ajuste fino	274
En resumen	275
<i>Apéndices</i>	277
<i>Glosario</i>	293
<i>Bibliografía</i>	305
<i>Índice alfabético</i>	309

PASADO & PRESENTE

DESCUBRIR EL BIG BANG

¿TUVO NUESTRO UNIVERSO UN NACIMIENTO EXPLOSIVO?

En astrofísica, las conexiones entre lo muy pequeño y lo muy grande son estrechas. Los átomos son muy pequeños, y se componen de una bola nuclear mucho más pequeña y extremadamente densa, hecha de neutrones y protones, rodeada de una nube de electrones. En este capítulo hablamos de cómo los conocimientos obtenidos por los físicos acerca del funcionamiento de los núcleos atómicos transformaron nuestra forma de entender tanto las estrellas como el cosmos. En todas las familiares reacciones químicas de los laboratorios de la Tierra, los núcleos atómicos permanecen intactos, y los átomos interactúan y se combinan compartiendo electrones en las nubes que rodean el núcleo. Los núcleos y, por tanto, los elementos químicos en sí, no cambian durante una interacción química. Sin embargo, en circunstancias extremas, cuando los núcleos colisionan con mucha fuerza, estas bolas de partículas generalmente estables pueden combinarse o fragmentarse, liberando enormes cantidades de energía. Esto puede suceder en la Tierra a pequeña escala, en aceleradores diseñados *ad hoc*, a gran escala en el centro de las estrellas y, como veremos, a escala cósmica en el universo joven. Esta rama de la física, impulsada por trabajos relacionados con la Segunda Guerra Mundial, efectuó avances colosales en la década de 1940. Las consecuencias de ese trabajo para la astrofísica sirvieron para explicar, no solo cómo y por qué brillan las estrellas, sino cómo debió de iniciarse el propio universo en una inmensa explosión cósmica.

Cuando Hubble descubrió que el universo de galaxias estaba actualmente en estado de expansión, esto suscitó de inmediato la pregunta que abordamos en el capítulo anterior: si las cosas se están alejando

ahora, ¿no debió de haber un momento, bastante reciente en unidades cósmicas, en que todo estaba realmente compactado? Como expusimos en ese capítulo, la simple extrapolación hacia atrás en el tiempo indica que tiene que haber habido un evento singular unos 10 o 20.000 años atrás. No es un período de tiempo inmenso, comparado con la edad de la Tierra, 3.700 millones de años. Así, la pregunta surgía por sí sola: ¿cómo empezó el universo? Es como si estuviésemos mirando los restos, alejándose volando, de una explosión gigantesca en el pasado, un «universo de fuegos artificiales», como decía Lemaître, o un «big bang», como lo denominó Fred Hoyle en 1949. ¿Podía ser correcta una explicación tan simplona? Y si era así, ¿cómo era el universo en sus primeros tiempos? ¿Caliente o frío? ¿Homogéneo o desigual?

Las preguntas surgen una tras otra, sin fin, y podríamos pensar en cualquier escenario fascinante y divertido para la evolución pasada del universo, algo que han hecho prácticamente todas las culturas, pero ¿cómo podríamos saber si una imagen en concreto es científicamente correcta? ¿Podría la cosmología, esa actividad de creación de mitos cómoda y especulativa en la que llevamos siglos embarcados, convertirse en una verdadera ciencia? Como hemos indicado en el prefacio, para que sea una verdadera ciencia es necesario que los escenarios cosmológicos que se nos han ocurrido sean lo bastante definidos, claros y matemáticamente precisos para poder ponerlos a prueba empíricamente. Las pruebas deben ser lo bastante precisas y limpias para que se pueda demostrar si una determinada imagen teórica es incorrecta. La teoría debe ser «falsable», esto es, refutable; tiene que ser posible demostrar, ya sea mediante observación o mediante experimentación, que es errónea.

Resultó que la clave se hallaba en dos tecnologías —la física nuclear y el radar—, desarrolladas durante la Segunda Guerra Mundial para fines muy distintos. La comprensión de la física nuclear nos dio los métodos para estimar la producción de elementos químicos que habría ocurrido como consecuencia de la explosión gigante que se dio en llamar «big bang caliente». La radioastronomía nos dio las herramientas para detectar y medir la radiación que quedó después de aquella explosión, primero desde la superficie del planeta y luego desde el espacio.

La famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$ contiene la clave para entender el origen del combustible que generaba la enorme producción de energía del Sol, y sugiere claramente que procesos nucleares pareci-

dos debieron de tener lugar cuando la temperatura del universo era tan caliente (o más), en el pasado distante, como lo es en nuestros días en el interior del Sol. Esto ofrecía una explicación para el origen de los elementos químicos ligeros, los más comunes, abundantes en estrellas y en el medio interestelar. La *cocina cósmica* (o la transformación de los elementos químicos) ocurrió en un campo de radiación increíblemente denso y caliente que no podía haberse disipado del todo. El argumento era que las enormes cantidades de radiación calorífica habrían quedado diluidas por la expansión cósmica, pero debían seguir siendo visibles si se buscaba con atención.

Aunque se iniciaron investigaciones en busca del «campo de radiación cósmica de fondo» residual, este campo se descubrió de forma completamente accidental; y entonces es cuando todas las piezas encajaron. Hubble había escrito lo que ahora consideramos el segundo acto de nuestra pieza teatral cósmica. El dramático primer acto se percibía ahora en todo su ardiente esplendor. Se habían descubierto la explosión global primordial, la formación de los elementos químicos y la preparación del escenario para el posterior mundo de galaxias.

Históricamente, el origen de muchos de los elementos químicos en la explosión del big bang no era el primero de los problemas de la astrofísica enfocado desde la nueva física nuclear. Había una pregunta más urgente, que había estado preocupando a los científicos desde que Lord Kelvin la formulase, a finales del siglo XIX.

¿POR QUÉ BRILLAN LAS ESTRELLAS?

La génesis moderna de la astrofísica nuclear tuvo lugar en la década de 1930, de la mano del físico nuclear George Gamow, el extravagante inmigrante de la Unión Soviética, que se convirtió en su principal figura. Había nacido en 1904 en Odessa, que en aquel momento formaba parte del imperio ruso. Asistió a la universidad en Odessa y Petrogrado (rebautizada como Leningrado en 1924 hasta recuperar su antiguo nombre de San Petersburgo en 1991), donde fue alumno de Alexander Friedman, el brillante matemático que había descubierto y clasificado las soluciones cosmológicas a las ecuaciones de Einstein. Entre 1928 y 1931, Gamow trabajó en física nuclear y física estelar en Copenhague y Cambridge antes de regresar a la Unión Soviética. La vida allí le pa-



FIGURA 4.1. Instituto Niels Bohr, Copenhague, 1930. En la fila de delante (de izquierda a derecha): O. Klein, N. Bohr, W. Heisenberg, W. Pauli, G. Gamow, L. Landau, H. Kramers; algunos de los fundadores de la mecánica cuántica y la nucleosíntesis. (Archivo Niels Bohr, cortesía de Archivos visuales de AIP Emilio Segre, Colección Margrethe Bohr).

reció desagradable, de modo que, cuando viajó con su mujer a Bruselas en 1933, con ocasión de la Sexta Conferencia Solvay, dedicada a la física nuclear, ambos desertaron. En 1934 fue nombrado profesor en la Universidad George Washington, donde trabajó con Edward Teller, que posteriormente se haría célebre en la prensa como padre de la bomba de hidrógeno.

Gamow y Teller organizaron diversas reuniones en Washington, DC, a finales de la década de 1930, dedicadas a la investigación sobre el combustible de las estrellas. Los requisitos energéticos eran tan inmensos que sabían que iba a implicar la transformación de elementos a través de procesos nucleares y que utilizaría la relación clásica entre masa y energía de Einstein. Los primeros intentos de aplicar la física nuclear a la astrofísica se llevaron a cabo en una reunión a finales de la década de 1930, cuyo tema central era las reacciones nucleares en el interior de las estrellas, que por aquel entonces era el principal interés de Gamow.

Teller lo llamó en cierta ocasión «el juego de Gamow», aunque fue el científico nuclear Hans Bethe quien se convirtió en el jugador número uno, y el que recibió el premio Nobel en 1967 como resultado de su trabajo. Bethe resolvió el problema central de cómo las estrellas, incluido nuestro propio Sol, pueden seguir brillando durante miles de millones de años, emitiendo abundante energía luminosa de forma continua, cuando todas las fuentes conocidas de energía química, como los combustibles fósiles, se habrían agotado en una minúscula fracción de la vida de una estrella. Se sabía que el helio normal contenía cuatro partículas en el núcleo, dos protones y dos neutrones, de modo que, en principio, podía formarse a partir de colisiones entre los cuatro protones de cuatro átomos corrientes de hidrógeno. En aquel tiempo ya se sabía que los dos principales componentes del Sol eran hidrógeno y helio, así que parecía posible que las reacciones nucleares requeridas estuviesen ocurriendo en el Sol. Además, un átomo de helio pesa menos que cuatro átomos de hidrógeno, de modo que combinar estos últimos para formar el primero liberaría una tremenda cantidad de energía. En la figura 4.2 se muestra un esquema de la «cadena protón-protón» descubierta por Bethe, que convierte hidrógeno en helio. Actualmente se están investigando en muchos laboratorios del mundo variantes de este proceso para utilizar la energía de fusión termonuclear como fuente para producir energía eléctrica.

No se trataba de una idea totalmente novedosa. Casi dos siglos antes, un químico inglés, William Prout, se convirtió en el primer científico moderno en abordarla. En 1816 propuso que todos los elementos se habían formado a partir de hidrógeno por un proceso de coagulación. Un siglo más tarde, Eddington, intrigado por la hipótesis, sugirió en su libro divulgativo *Stars and Atoms* que los núcleos de helio se formaban combinando cuatro núcleos de hidrógeno en un proceso que conllevaba una pérdida de masa. Pero ¿cómo sucedía esto? Lo que se necesitaba era una trayectoria detallada de reacciones nucleares que pudiesen darse en las condiciones del interior de una estrella. Nadie había hallado el camino.

Hans Bethe había huido de Alemania en 1933. Tras pasar un período en la Universidad de Bristol, en Reino Unido, se estableció en el rústico y aislado campus de la Universidad de Cornell, donde pronto se erigió en primera autoridad mundial en teoría nuclear. Cuando asistió a la reunión de Washington en 1938 organizada por

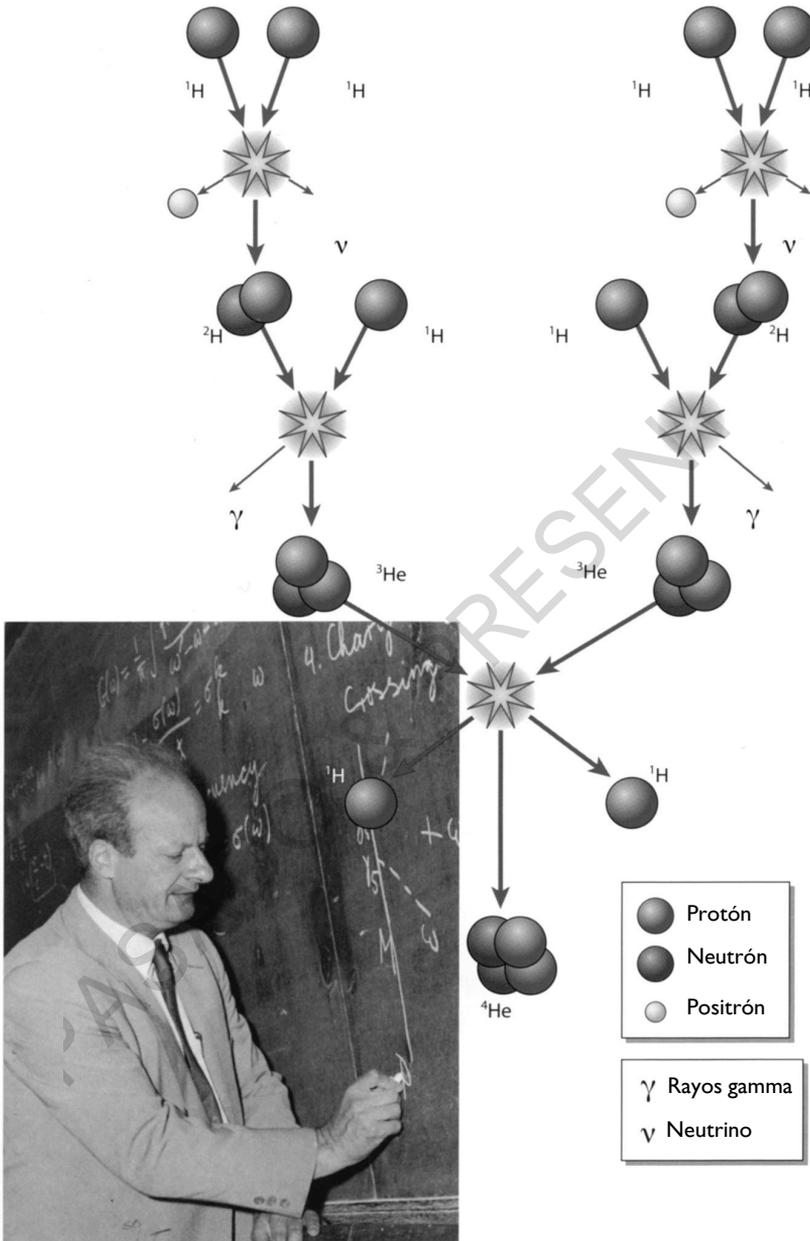


FIGURA 4.2. Hans Bethe en la pizarra. El diagrama muestra cómo 4 protones (núcleos de átomos de hidrógeno) se combinan para formar un núcleo de helio. (Edith Michaelis, cortesía de AIP Emilio Serge Visual Archives).

Gamow y Teller no sabía nada sobre el interior de las estrellas, pero en seguida se interesó por la generación de energía en el Sol, un problema que enfocó desde el punto de vista de la física nuclear. Bethe, junto con Charles Critchfield, antiguo alumno de Gamow, y Teller, propusieron en 1938 el esquema de energía estelar actualmente denominado cadena protón-protón, por el cual los átomos de hidrógeno, el principal constituyente del Sol, podían combinarse secuencialmente para formar helio a través de un proceso de varias etapas, potencialmente liberando energía a un ritmo lo bastante alto como para justificar la enorme luminosidad solar. En el viaje en tren de vuelta a Cornell, Bethe resolvió los aspectos básicos de este ciclo, que seguían exactamente las intuiciones de Eddington: la fusión de cuatro átomos de hidrógeno para formar un núcleo de helio. Seis meses más tarde, y ya con unos conocimientos profundos de astrofísica, Bethe concibió el ciclo CNO, un proceso catalítico más complejo por el que se llegaba al mismo fin. En ambos ciclos, el producto neto tras varias etapas es de un núcleo de helio-4 y dos neutrinos. La energía liberada mediante estos procesos de fusión es tan fabulosa que da a las estrellas como el Sol una vida de 10 a 15.000 millones de años, de los que ya ha consumido 4.000. Bethe había dado respuesta a las dos preguntas infantiles: «¿Qué hace que el Sol brille?» y «¿Se apagará algún día?».

Bethe fue así el fundador de una nueva rama de la astrofísica, en la que el origen de la energía estelar se convirtió en ciencia de laboratorio, una práctica que, tras la Segunda Guerra Mundial, se amplió también a la cosmología, que aún tardaría casi medio siglo más en convertirse en una ciencia de precisión. Bethe fue un pionero en la unión entre la física de partículas y la cosmología, y los físicos nucleares norteamericanos dominaron el terreno de la cosmología durante cierto tiempo. Durante los años de la guerra fue jefe de la división teórica del Laboratorio de Los Álamos, e hizo aportaciones fundamentales al desarrollo de la bomba A y de la bomba H; más adelante se involucró en campañas contra las pruebas de bombas en la atmósfera y a favor de tratados de control de la carrera armamentística nuclear. Freeman Dyson llamó a Bethe «el supremo solucionador de problemas del siglo XX». En aquellos momentos, la emoción de la astrofísica atraía a las mejores mentes científicas del mundo.