

DEL MUNDO CUÁNTICO AL UNIVERSO EN EXPANSIÓN

Autor: SHAHEN HACYAN



- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- DEDICATORIA
- INTRODUCCION
- I. MATERIA, LUZ Y ANTIMATERIA
- II. LAS FUERZAS DE LA NATURALEZA
- III. EL MODELO ESTÁNDAR
- IV. LAS SIMETRÍAS DEL MUNDO CUÁNTICO
- V. MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR
- VI. EL UNIVERSO
- VII. EL UNIVERSO INFLACIONARIO
- VIII. CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN
- GLOSARIO
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

EDICIONES

Primera edición, 1994

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior de Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1994, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A.
DE C. V.

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN- 968-16-4435-2

Impreso en México

DEDICATORIA

"It ain't necessarily so.
De t'ings dat yo li'ble
To read in de Bible.
It ain't. necessarily so."

Porgy and Bess
Acto II, escena 2

GERSHWIN & HEYWARD

INTRODUCCIÓN

¿Puede la materia dividirse indefinidamente? Demócrito afirmaba, hace más de dos mil años que la materia esta formada de *átomos*, partículas diminutas e indivisibles. El tiempo le dio la razón. A principios del siglo XX quedó plenamente establecido que todos los cuerpos materiales están formados por átomos, cuyo tamaño es del orden de unas cuantas millonésimas de milímetro.

La palabra átomo significa "indivisible" en griego y se utilizó hace menos de un siglo para designar lo que parecía ser el constituyente más pequeño de la materia. Pero pronto se descubrió que lo que se había identificado como un átomo está formado, a su vez, por partículas aún más pequeñas. A éstas se les llamó *partículas elementales* con la esperanza de que fueran efectivamente elementales, es decir, sin más constituyentes.

Pero el Universo no se puede reducir sólo a partículas elementales. El Universo es dinámico; todos los cuerpos interactúan entre sí por medio de fuerzas —de las cuales la gravitacional es la más familiar. Las partículas, junto con sus interacciones, son los elementos fundamentales del Universo.

Para explicar las fuerzas de la naturaleza, los físicos inventaron un nuevo concepto, el *campo*, que resultó ser de enorme utilidad para describir los fenómenos físicos. Partículas y campos resultaron ser dos facetas, inseparables, de una misma realidad. Pero si bien el concepto de partícula es intuitivamente claro, el de campo es un desafío a nuestra capacidad de comprender el mundo. Esta dificultad se hace más manifiesta cuando se des-

cribe el comportamiento de la materia a nivel de los átomos. Ahí rige la *física cuántica* y todas nuestras ideas intuitivas se esfuman; sólo quedan partículas y *campos cuánticos*.

Uno de los objetivos del presente libro es reseñar, para los lectores que no son especialistas en física, los conocimientos actuales acerca de las partículas elementales, de los campos cuánticos y sus comportamientos de acuerdo con la física del mundo atómico. Otro objetivo es mostrar cómo estos conocimientos del mundo cuántico se aplican al estudio de la evolución inicial del Universo. Con base en lo que sabemos del mundo subatómico, pasaremos revista a lo que pudieron ser los primeros instantes del Universo, de acuerdo con la teoría cosmológica más aceptada en la actualidad: la famosa teoría de la *Gran Explosión*.

Con los primeros cuatro capítulos de este libro esperamos proporcionar un panorama general de las teorías modernas respecto al mundo cuántico: de las moléculas a los átomos, de los átomos a las partículas elementales que los componen, así como las fuerzas con las que la materia interacciona consigo misma. La síntesis de la física de partículas elementales y las interacciones entre ellas es el llamado *modelo estándar*, que presentamos en el capítulo III. Más allá del modelo estándar se han elaborado teorías que por ahora son sólo especulativas, pero que tienen profundas implicaciones para la cosmología.

Así, después de un paseo por el mundo microscópico de las partículas elementales, daremos un salto del capítulo VII para pasar al Universo en toda su inmensidad. Antes, en el capítulo VI, reseñamos de modo breve las propiedades más importantes del Universo como la existencia que se conocen en la actualidad.

Quienes ya leyeron *El descubrimiento del Universo*¹  pueden saltarse ese capítulo y pasar directamente al VII, o bien pueden darle una hojeada para recordar algunas de las ideas fundamentales de la Gran Explosión.

Como veremos en los capítulos VII y VIII, la física del micromundo se puede unir con la cosmología para explicar las propiedades más importantes del Universo —como la existencia de las galaxias— a partir de las condiciones físicas en los primeros trillonésimos de trillonésimos de segundo de existencia; el resultado de tal unión es la hipótesis del *Universo inflacionario*. Finalmente, se describirá el panorama cósmico justo después de la inflación y hasta la época en la que al parecer se formaron las primeras galaxias.

I. MATERIA, LUZ Y ANTIMATERIA

PRESENTAREMOS en este y los siguientes capítulos el Universo en la escala microscópica, estudiaremos las partículas más fundamentales de la materia y echaremos un vistazo al mundo cuántico, con sus extrañas leyes, donde los entes fundamentales son partículas y ondas a la vez.

MATERIA

Lo que llamamos átomo en la actualidad no es, estrictamente hablando, el átomo de Demócrito. Ernest Rutherford demostró, en 1911, que el llamado átomo consta de un *núcleo*, alrededor del cual giran pequeñas partículas llamadas *electrones*.

Los electrones son partículas con una carga eléctrica negativa, mientras que el núcleo atómico posee una carga eléctrica positiva. Debido a que cargas eléctricas de signo contrario se atraen, el núcleo ejerce una fuerza de atracción en los electrones que se encuentran a su alrededor.

Para visualizar un átomo, podemos pensar en un sistema solar microscópico en el que el núcleo sería el Sol y los electrones los planetas. La diferencia es que el Sol mantiene unidos a los planetas por la fuerza gravitacional que ejerce sobre ellos, mientras que el núcleo atrae a los electrones por medio de la fuerza eléctrica.

Pero el núcleo atómico no es una partícula, sino que está formado, a su vez, de dos tipos de partículas: los protones y los neutrones (Figura 1). La existencia de los primeros fue estable-

cida por el mismo Rutherford en 1919, mientras que los segundos fueron descubiertos, años más tarde, por J. Chadwick. En resumen, parecía que tres tipos de partículas eran los constituyentes fundamentales de la materia.

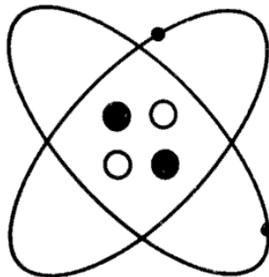


Figura 1. Esquema de un átomo de helio. Dos electrones "giran" alrededor de un núcleo compuesto de dos protones y dos neutrones.

Los protones y los electrones son partículas con cargas eléctricas exactamente de la misma magnitud pero de signos contrarios.

Esta carga fundamental es de 1.602×10^{-19} coulombs. $2\text{p}^3\text{N}$

Los neutrones por otra parte, no poseen carga eléctrica. La carga de un núcleo atómico está determinada de manera exclusiva por el número de protones que lo constituyen y es, por lo tanto de signo positivo. Evidentemente, la carga de un núcleo es un múltiplo entero de la carga de un protón.

Para tener una idea de lo diminutas que son estas partículas, señalemos que la masa de un electrón es de unos 9.109×10^{-28} gramos, mientras que un protón es 1 836 veces más masivo que un electrón —pesa cerca de 1.673×10^{-24} gramos— y el neutrón es ligeramente más pesado que el protón — 1.675×10^{-24} gramos. El cuerpo humano, por ejemplo, está hecho de 20

000 billones de billones (2×10^{28}) de protones, otros tantos electrones y un número un poco mayor de neutrones.

En la naturaleza existen, en estado natural, 92 tipos de elementos químicos. Un elemento químico está determinado enteramente por el número de protones en el átomo que lo constituye. El núcleo del átomo de hidrógeno consta de un único protón, el del helio posee dos protones y dos neutrones, el del litio tres protones y cuatro neutrones,... el carbón seis protones y seis neutrones... el hierro 26 protones y 30 neutrones... y así hasta el uranio, cuyo núcleo está formado por 92 protones y 146 neutrones. Además, los átomos de diversos elementos químicos suelen unirse entre sí para formar moléculas; por ejemplo, la molécula del agua consta de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Los átomos se mantienen unidos en las moléculas gracias a las atracciones eléctricas y magnéticas.

Como veremos con más detalle en el próximo capítulo, los protones y neutrones se encuentran amarrados en el núcleo por las fuerzas nucleares. Para transmutar un elemento químico en otro es necesario cambiar el número de protones en el núcleo, lo cual es posible en principio, pero requiere de una enorme cantidad de energía, muchísimo mayor de la que soñaron los alquimistas. La razón es que las fuerzas nucleares son tan intensas, que no se puede despegar fácilmente un protón del núcleo.

En cambio, las fuerzas eléctricas son menos intensas, por lo que es factible despegar uno o varios electrones de un átomo. En condiciones normales en la Tierra, los átomos constan generalmente de un igual número de electrones que de protones y, por lo tanto, la carga neta de un átomo es cero. Pero puede suceder que algunos electrones se escapen de la atracción del núcleo, dejando así al átomo con una carga positiva neta; en tal

caso se dice que el átomo se ha convertido en un *ion*. En los metales, los átomos se pueden acomodar de tal manera que sus electrones viajan de un átomo a otro; la corriente eléctrica, por ejemplo, se debe al flujo de electrones en un cable metálico.

En resumen, los ladrillos fundamentales con los que está hecha toda la materia que existe a nuestro alrededor son los electrones, los protones y los neutrones. Pero, además de la materia, existe la radiación es decir, la luz...

LUZ

Ya en el siglo XVII, los físicos empezaron a preocuparse por la naturaleza de la luz. Isaac Newton pensaba que la luz estaba hecha de partículas, mientras que otros como Christian Huygens, sostenían que la luz es una onda que, al igual que una ola en el agua o el sonido en el aire, se propaga en algún misterioso medio al que llamaron *éter*.

La naturaleza de la luz quedó aparentemente elucidada a mediados del siglo XIX, cuando James Maxwell encontró las ecuaciones que describen la electricidad y el magnetismo, y demostró, a partir de esas ecuaciones, que la luz es una onda electromagnética. La consecuencia más lógica sería que si la luz es una onda, debería existir el éter para transportarla.

Quizás sería más apropiado decir que la luz presenta características propias de una onda incluso con esta aclaración, la realidad resultó más complicada. El primer problema era el éter mismo, esa extraña sustancia impalpable que sólo se manifiesta como transmisora de la luz. Los intentos por detectarlo, aunque fuese de manera indirecta, resultaron inútiles.⁴ 🌿

Por otra parte, a fines del siglo XIX, ya se habían descubierto algunos fenómenos físicos que sencillamente no se podían ex-

plicar con base en una teoría ondulatoria de la luz. Max Planck demostró que la luz debía consistir de paquetes de energía, o *cuantos* y que la energía E de cada paquete es:

$$E = h\nu$$

donde h es ahora llamada constante de Planck ⁵ y ν es la frecuencia de la luz considerada ⁶. Poco después, en un famoso trabajo publicado en 1905 por Albert Einstein demostró que el efecto fotoeléctrico (el mismo que hoy en día permite construir los detectores que se usan, por ejemplo, para cerrar las puertas de los elevadores) sólo se puede explicar si la luz es una partícula. Tal partícula, el *fotón*, tiene la propiedad de no poseer masa sino energía pura, además de que siempre se mueve a la velocidad de la luz. Esta propiedad sólo puede entenderse en el marco de la teoría de la relatividad de Einstein, a la que volveremos más adelante. Por ahora señalemos que, de acuerdo con esta teoría, ninguna partícula puede moverse más rápidamente que la luz, y sólo puede moverse a esa velocidad si no posee masa, como es el caso de fotón.

Así pues, la luz es una onda y a la vez una partícula. Esta dualidad onda-partícula es una de las características más notorias del mundo cuántico y tendremos oportunidad de volver a ella. Por el momento recordemos que la longitud de una onda de luz —que se define como la distancia entre dos crestas o dos valles (Figura 2) — es inversamente proporcional a la frecuencia y, por lo tanto, a la energía del fotón asociado. A mayor energía del fotón, mayor frecuencia de vibración y menor longitud de la onda.

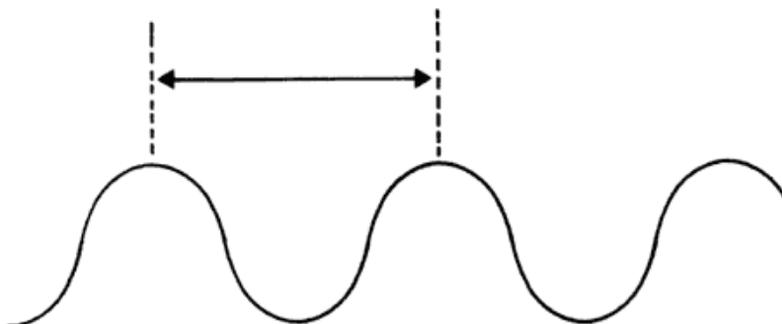


Figura 2. La longitud de onda es la distancia entre dos crestas, y es inversamente proporcional a la frecuencia (número de vibraciones por segundo).

Los fotones con más energía que se conocen son los *fotones gamma*, aquellos que constituyen los llamados *rayos gamma* cuyas longitudes de onda son menores que unos 10^{-8} cm. Les siguen los rayos **X**, cuyas longitudes de onda se encuentran entre los 10^{-8} y los 10^{-6} ; cm; y luego los rayos ultravioleta, entre 10^{-6} y 10^{-5} , cm. Nuestros ojos sólo perciben la luz cuya longitud de onda se encuentra entre las 380 millonésimas de milímetro (luz violeta) y las 760 millonésimas de milímetro (luz roja); entre esas dos longitudes de onda se hallan todos los colores del arco iris; cada color corresponde a una longitud de onda bien definida. Si seguimos aumentando la longitud de onda pasamos a la luz infrarroja, a la que ya no son sensibles nuestros ojos, luego las microondas y finalmente las ondas de radio de uso tan común y cuya longitud de onda se sitúan entre pocos centímetros hasta varios cientos de metros. Entre los rayos gamma y las ondas de radio tenemos un muy amplio espectro de luz, y solo una pequeña zona de ese espectro es directamente perceptible a la visión. Para captar fotones fuera de

nuestro rango de percepción visual necesitamos detectores artificiales.

ANTIMATERIA

Las partículas del mundo atómico se comportan de manera totalmente ajena a nuestra experiencia diaria. Por eso, los físicos tienen que recurrir a las matemáticas para describir adecuadamente la realidad. En 1929 el gran físico inglés P. A. M. Dirac encontró una descripción matemática del electrón que explicaba las características de esa partícula. Sin embargo, su teoría adolecía de ciertas fallas que hubieran desanimado a un físico con menos imaginación, pero que le sirvieron para hacer una atrevida predicción. En efecto, la teoría matemática de Dirac podía ser congruente a condición de redefinir el concepto mismo de vacío. Esto, a su vez, implicaba la existencia de una partícula idéntica al electrón, excepto en la carga eléctrica, que debía ser de signo contrario. Más aún, esa partícula debía tener la propiedad de aniquilarse totalmente con un electrón tan pronto entrara en contacto con él. A esa partícula Dirac la llamó *antielectrón*, o también *positrón*, por tener carga positiva.

Pero dos partículas no pueden esfumarse sin dejar rastro. Cuando un electrón y un positrón se destruyen mutuamente la masa de las dos se transforma totalmente en energía. Este fenómeno es una excelente demostración de la equivalencia entre masa y energía descubierta por Albert Einstein y resumida en la famosa fórmula:

$$E = mc^2,$$

(energía igual a masa por la velocidad de la luz al cuadrado)⁷ . La fórmula de Einstein implica que, en condiciones apropiadas,

das, la materia puede transformarse en energía y viceversa. Así, Dirac predijo que un electrón y un positrón, al entrar en contacto, se aniquilarían transformando toda su masa en fotones de muy alta energía, más precisamente, dos fotones gamma.

El espacio cósmico está lleno de todo tipo de partículas sueltas (fotones, electrones, etc). Las que llegan a la Tierra producen los llamados *rayos cósmicos*. En 1932, Carl Anderson estudiaba estas partículas cuando descubrió una que, según indicaba su movimiento, tenía la misma masa que un electrón, pero carga eléctrica positiva. ¡Se trataba del positrón!

Una vez establecida la existencia del antielectrón, los físicos se percataron de que, de acuerdo con la teoría de Dirac, también deberían existir antiprotones y antineutrones. Y en efecto, éstos fueron descubiertos en los años cincuenta. Más aún, es perfectamente factible que existan antiátomos, formados por un núcleo de antiprotones y antineutrones, alrededor del cual giran positrones. Y con esos antiátomos se pueden formar objetos de antimateria, quizá antiplanetas, antiestrellas y ¡hasta antiseres vivos!

En resumen, a cada tipo de partícula corresponde una antipartícula con la cual se puede aniquilar si hacen contacto. La única excepción es la luz, ya que el fotón es su propia antipartícula. Dicho de otro modo, la luz no distingue entre materia y antimateria. En consecuencia, un objeto de antimateria se ve exactamente como si estuviera hecho de materia ordinaria.

Para dar una idea de las cantidades de energía implicadas, mencionemos que una tonelada de antimateria produce, al aniquilarse con una cantidad igual de materia, tanta energía como la que se consume actualmente en la Tierra durante un año. Desgraciadamente, no poseemos reservas de antimateria ni es factible producirla en grandes cantidades y almacenarla. Para

producir una cierta cantidad de antimateria es necesario invertir la misma cantidad de energía que produciría su aniquilación. Y esa energía, a su vez, habría que sacarla de alguna fuente tradicional —petróleo, uranio, etcétera. (Una ley fundamental de la física es que la energía no se crea ni se destruye, sólo cambia de forma).

¿Qué tanta antimateria hay en el Universo? No se puede dar respuesta definitiva a esta pregunta porque, como la luz no distingue entre materia y antimateria, estas se ven idénticas. En principio, algunas de las estrellas o galaxias que vemos en el firmamento podrían ser de antimateria. Quizá existen antimundos habitados por seres de antimateria. La única manera de comprobarlo es ir a ellos o esperar su visita. Pero si algún ser formado de antimateria llegara a la Tierra, las consecuencias serían catastróficas para todos: al entrar en contacto con nuestra atmósfera explotaría, liberando tanta energía como varias explosiones nucleares juntas.

Para nuestra tranquilidad, es poco probable que abunde la antimateria en las cercanías del Sistema Solar. El encuentro de antimateria con materia produce enormes cantidades de energía en forma de rayos gamma; si hubiera mucha antimateria en nuestra vecindad cósmica, presenciaríamos continuas explosiones de rayos gamma, lo cual no es el caso.⁸ 

Por otra parte, es importante señalar que así como una partícula y una antipartícula pueden convertir sus masas enteramente en energía —energía de los fotones gamma que producen—, el proceso contrario también ocurre en la naturaleza. Dos fotones gamma que choquen entre sí pueden producir una pareja de partícula y antipartícula, transformando así toda su energía en masa. Para que ello ocurra, los fotones deben poseer suficiente energía para generar una partícula y una antipartícula. La masa

de un electrón es de 9×10^{-28} gramos; de acuerdo con la fórmula de Einstein, esta masa equivale a una energía 8×10^{-7} ergs; a su vez, esta energía es la que posee un fotón gamma cuya longitud de onda es de unos 2×10^{-10} cm. Por lo tanto, dos fotones gamma con esa longitud de onda o una menor pueden producir un electrón y un positrón.⁹ Y si la energía de los fotones es unas 1800 veces mayor; entonces tendrán suficiente energía para crear pares de protones y antiprotones. Estos procesos son un excelente ejemplo de la equivalencia entre masa y energía.

Sólo hay una situación en la naturaleza en que materia y antimateria pueden coexistir. Un gas a una temperatura de unos 5 000 000 000 de grados Kelvin¹⁰ o más está compuesto principalmente de electrones, positrones y fotones gamma. Al chocar un electrón y un positrón, se aniquilan produciendo un par de fotones gamma, pero siempre hay otra pareja de fotones gamma que chocan entre sí para producir un par de electrones y positrones, manteniendo así el número total de partícula de cada tipo. De este modo, a tan altas temperaturas la materia y la antimateria coexisten con la intermediación de los fotones, creándose y aniquilándose continuamente las partículas y las antipartículas. Y si la temperatura del gas excede los diez billones de grados Kelvin, los fotones tendrán suficiente energía para generar también pares de protones y antiprotones.

Como veremos más adelante en este libro, los físicos han calculado que, de acuerdo con la teoría de la gran Explosión, había en el principio del Universo *casi* la misma cantidad de materia como de antimateria pero, después de unas fracciones de segundo, todas las antipartículas se aniquilaron con las partículas. Afortunadamente para nosotros, había un ligerísimo excedente de materia que no tuvo contraparte con qué aniquilarse y

dio origen a las estrellas, los planetas y sus habitantes. Así, de acuerdo con la teoría del Origen del Universo más aceptada en la actualidad, la antimateria debe ser muy escasa. Sobreviven, si acaso, algunos raros fragmentos.

ONDA-PARTÍCULA: EL MUNDO CUÁNTICO

Mencionamos anteriormente que la luz, que pareciera ser una onda, se comporta algunas veces como una partícula. Algo enteramente análogo ocurre con las partículas: a nivel cuántico se comportan también como ondas. Louis de Broglie fue el primero en proponer que una partícula cuántica tiene las propiedades de una onda, cuya longitud es:

$$h/mv,$$

donde h es la constante de Planck, m la masa de la partícula y v su velocidad. Todas las partículas del mundo subatómico — electrones, protones, etc.— presentan esta dualidad. Éste es el principio fundamental de la *mecánica cuántica* rama de la física que surgió a principios del siglo XX para explicar los fenómenos del mundo microscópico.

Para ejemplificar una de las peculiaridades del mundo cuántico, quizá la más notoria, imaginemos un experimento que consiste en lanzar electrones hacia una pantalla. La mecánica cuántica predice cuántos electrones llegan a una región determinada de la pantalla, según las condiciones que estas partículas encuentren en su camino.

Supongamos que el experimento se realiza de tal manera que el haz original de electrones pasa por dos rendijas y se divide en dos haces Figura 3(a). Si se tratara estrictamente de partículas, uno esperaría que los electrones se acumulen en la pantalla en dos montones localizados cada uno enfrente de las dos rendijas.

Pero el experimento real revela que esto no es lo que ocurre. Más bien, los electrones se acumulan sobre la pantalla formando franjas, o lo que en el lenguaje de la óptica se llama un patrón de interferencia. Esto es exactamente lo que se esperaría si los electrones fuesen ondas. Piénsense, por ejemplo, en dos olas que se originan en puntos distintos y se cruzan; el resultado, como lo muestra la figura es que las crestas de las olas se suman para hacerse más altas, y los valles se suman para hacerse más profundos.

Por otra parte, si en el experimento de los electrones tapamos una de las rendijas, entonces el resultado es que los electrones se acumulan enfrente de la rendija abierta como si fuesen partículas. De algún modo abandonan su comportamiento de onda (Figura 3b).

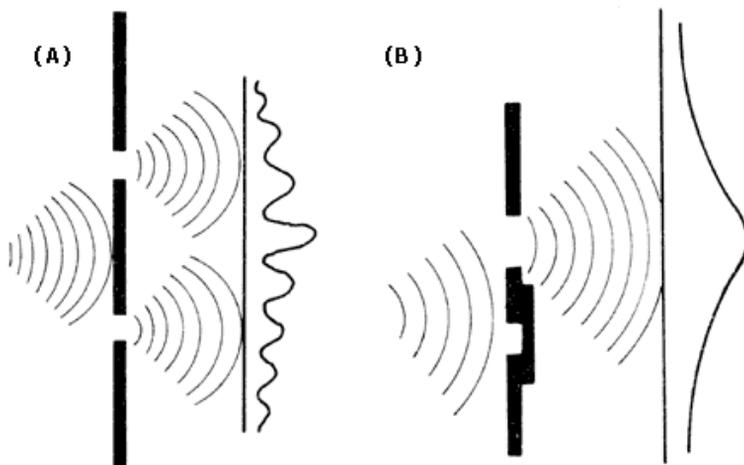


Figura 3. Los electrones se comportan como ondas al pasar por dos rendijas (a), pero como partículas si se tapa una de las rendijas (b).

Pero la situación más sorprendente ocurre si nos empeñamos en determinar por cuál rendija pasa cada electrón individualmente. Uno podría pensar que la mitad de los electrones pasa por una rendija y la otra mitad por la otra. ¿Y qué sucede con un solo electrón? La respuesta parece trivial: pasará por una u otra rendija. Sin embargo, en el mundo cuántico esta condición se ha topado con serias dificultades. En efecto, si uno encuentra la manera de seguir la pista de los electrones para determinar por dónde pasan, *entonces los electrones se comportan como partículas* y desaparece el patrón de interferencia.

La mecánica cuántica tiene dos interpretaciones que son conceptualmente muy distintas. De acuerdo con una primera interpretación, la mecánica cuántica sólo se aplica al estudio estadístico de un número grande de partículas; en el ejemplo anterior se puede predecir lo que harán los electrones en su conjunto, pero nada puede decirse del comportamiento de cada electrón por separado. En este sentido, la mecánica cuántica no sería una teoría completa de la naturaleza. Esta interpretación fue la que defendió Albert Einstein durante toda su vida, en contra de la opinión mayoritaria de los físicos de su época.

De acuerdo con una segunda interpretación la mecánica cuántica sí se aplica a una sola partícula. En el ejemplo del haz de electrones, un electrón pasa simultáneamente por las dos rendijas y las dos posibilidades son de igual modo "reales". El electrón permanece latente en las dos posiciones hasta que lo detectamos, con lo cual lo forzamos a mostrarse en una sola de esas opciones.

Esta segunda interpretación parece absurda, pues nada parecido ocurre en nuestro mundo macroscópico. Si lanzamos una moneda al aire muchas veces, aproximadamente la mitad de las veces caerá águila y la otra mitad sol. ¿Y si no miramos como

cae? ¿Puede afirmarse que una moneda cae simultáneamente águila y sol hasta que la miremos y veamos una de las dos posibilidades? La diferencia fundamental con lo que sucede en el mundo cuántico consiste en que el mirar una moneda no influye en ella, pero detectar la posición de una una partícula como un electrón implica mandarle luz, la que modifica drásticamente su comportamiento. Los fundadores de la mecánica cuántica siempre insistieron en que, a nivel atómico, es imposible abstraerse de la relación entre observador y observado. Toda medición altera la realidad que estudia y esta alteración es fundamental para las partículas elementales. Esta interpretación se debe principalmente al físico danés Niels Bohr —a quien se considera uno de los creadores de la mecánica cuántica— y se conoce como *interpretación de Copenhague*. Einstein y Bohr sostuvieron durante toda su vida una amistosa pero apasionada disputa acerca de la interpretación de la mecánica cuántica, sin llegar jamás a un acuerdo.

El lector podrá pensar que, en la práctica, cualquiera de las dos interpretaciones de la mecánica cuántica debe conducir a los mismos resultados. Pero lo interesante es que, en los recién pasados años, se ha logrado realizar experimentos reales (no sólo imaginarios) aislando y utilizando unas pocas partículas elementales, discriminando así entre una u otra interpretación. Hasta ahora, los resultados experimentales parecen inclinar la balanza hacia la interpretación de Copenhague, en contra de las ideas de Einstein (por lo menos en sus modalidades más sencillas). Pero el debate iniciado por Einstein y Bohr aún está lejos de quedar resuelto.

II. LAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

TODOS los cuerpos materiales interactúan entre sí en el sentido de que unos ejercen fuerzas sobre los otros. La fuerza de interacción más familiar es la gravitación, el hecho de que los cuerpos caigan al suelo es ya parte íntegra de nuestra experiencia común. Pero la gravitación es sólo una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Esas cuatro fuerzas son el tema del presente capítulo.

GRAVITACIÓN

Todo cuerpo masivo atrae gravitacionalmente a otro. La Tierra nos atrae y nosotros atraemos a la Tierra (aunque la fuerza que ejerce nuestro cuerpo es prácticamente imperceptible y, en la práctica, sólo se nota la fuerza de atracción de la Tierra).

En el siglo XVII el gran físico inglés Isaac Newton descubrió que la gravitación es un fenómeno universal. Según una famosa leyenda, Newton estaba un día sentado debajo de un manzano, cavilando con respecto a la fuerza que mantiene unida la Luna a la Tierra, cuando vio caer una manzana. Este suceso le dio la clave para descubrir que la fuerza de gravedad, la misma que hace caer la manzana, es también la que retiene a la Luna en órbita. Descubrió así el principio de la gravitación universal.

Por extraño que nos parezca en la actualidad, hasta antes de Newton se pensaba que la gravitación era un fenómeno exclusivo de la Tierra, como si nuestro planeta fuese un sitio muy especial en el cosmos. Así, el filósofo griego Aristóteles — quien vivió en el siglo IV a.c. y llegó a ser considerado la

máxima autoridad científica en la Edad Media— distinguía claramente entre los fenómenos terrestres y los celestes. Para Aristóteles la gravitación era un fenómeno puramente terrestre, que no podía influir en los cuerpos celestes, pues éstos estaban hechos de una sustancia muy distinta a la materia común que se encuentra en la Tierra. Incluso el mismo Galileo, uno de los fundadores de la ciencia física, estudió detenidamente la caída de los cuerpos pero nunca sospechó que hubiera una relación entre este fenómeno y el movimiento de los planetas.

La gravitación universal, descubierta por Newton, implica que la Tierra no sólo atrae a los objetos que están en su superficie, sino también a la Luna y a cualquier cuerpo en su cercanía. Además, el Sol atrae a la Tierra y a todos los demás planetas, las estrellas se atraen entre sí, las galaxias también, y así toda la materia en el Universo.

Pero además Newton descubrió que la fuerza de gravedad obedece una ley muy sencilla. La fuerza gravitacional entre dos cuerpos es directamente proporcional a las masas de los cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En términos matemáticos, la fórmula para la fuerza se escribe:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

donde F es la fuerza, M_1 y M_2 son las masas de cada uno de los cuerpos, R es la distancia que los separa y G es una constante de proporcionalidad, la llamada constante gravitacional o de Newton, cuyo valor determina la intensidad de la interacción gravitacional. Se ha determinado experimentalmente que G vale $6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}^2$. Esto equivale a decir que dos ma-

sas de un kilogramo cada una colocadas a una distancia de un metro se atraen con una fuerza de 6.672×10^{-11} newtons.¹¹ 

Los planetas se mantienen unidos al Sol en órbitas estables por el equilibrio de dos fuerzas: la atracción gravitacional de ese astro y la fuerza centrífuga debida al movimiento circular. La fuerza centrífuga no se debe a una interacción de la materia, sino a la tendencia que tienen los cuerpos a mantener su movimiento en línea recta (esta fuerza se manifiesta, por ejemplo, en un automóvil cuando toma una curva: los pasajeros sienten una fuerza que los empuja hacia la parte exterior de la curva). El gran éxito de Newton fue encontrar la manera de calcular con extrema precisión la trayectoria de los planetas, o de cualquier cuerpo en general, a partir de ecuaciones matemáticas que describen la fuerza aplicada en ellas.

En resumen, la gravitación es el cemento del Universo. Así como los planetas se mantienen pegados al Sol, las estrellas se atraen entre sí y forman enormes conglomerados que son las galaxias. Las estrellas en una galaxia giran alrededor del centro de ésta y, a la vez, son atraídas gravitacionalmente al centro de la galaxia. De esta manera se mantienen unidas.

Todo se explicaba a la perfección en el esquema teórico desarrollado por Newton. El único pedazo que faltaba en el rompecabezas era la naturaleza de la fuerza de gravitación. En efecto ¿qué es lo que produce realmente la atracción gravitacional? Si jalamos una piedra con una cuerda, la atracción se da por medio de la cuerda; si soplamos para empujar una pluma, la fuerza de interacción se da mediante el aire. Toda transmisión implica un medio: el sonido se transmite por medio del aire, la energía eléctrica por medio de cables, el calor por cuerpos conductores, etc. ¿Qué medio transmite la gravitación?

¿Cómo "sabe" la Luna que la Tierra está ahí y la atrae? ¿Cuál es el origen de esa "acción a distancia"?

Newton nunca estuvo enteramente satisfecho de su obra, pues no tenía una respuesta a las anteriores preguntas. Como una solución provisional propuso que el espacio está totalmente lleno de una sustancia invisible e impalpable, el éter, que permea todos los cuerpos materiales y sirve para transmitir, de algún modo aún desconocido, la atracción gravitacional. La misteriosa "acción a distancia" cuya naturaleza todavía desconocía, se ejercería mediante el éter. Empero, el problema habría de perdurar mucho tiempo en la física.

La física de Newton permaneció incólume durante más de dos siglos. Pero a principios del siglo XX comenzaron a aparecer nuevos aspectos del mundo que ya no correspondían con el modelo clásico. Para dar un nuevo paso y comprender la gravitación se necesitaba una nueva teoría física que relevara la mecánica de Newton en los nuevos dominios del Universo que surgían. Afortunadamente, cerca de 1915 Albert Einstein había elaborado su teoría de la gravitación, también conocida como *teoría de la relatividad general*.¹² 🌿

De acuerdo con Einstein el espacio y el tiempo no son conceptos independientes, sino que están estrechamente vinculados y forman un *espacio-tiempo* de cuatro dimensiones, en el que el tiempo es la cuarta dimensión.

Expliquemos este concepto: nuestro espacio es de tres dimensiones, lo cual quiere decir sencillamente que todos los objetos materiales tienen altura, anchura y profundidad. Éste es un hecho muy evidente, pero no olvidemos que también existen espacios de una o dos dimensiones. La superficie de una hoja de papel, por ejemplo, es un espacio de dos dimensiones; un

dibujo sólo tiene altura y anchura. Del mismo modo, una línea es un espacio de una sola dimensión.

En el siglo pasado, algunos matemáticos como G. F. B. Riemann se dieron cuenta de que es posible concebir espacios de más de tres dimensiones con leyes geométricas perfectamente congruentes. Esto parecía una simple especulación de matemáticos hasta que, a principios de este siglo, surgió la teoría de la relatividad que revolucionó por completo toda nuestra visión del Universo.

Para explicar la gravitación Einstein postuló que la fuerza gravitacional se debe a una *curvatura* del espacio-tiempo. Así como una piedra pesada deforma una lona de tela y cualquier canica que se mueva sobre esa lona sigue una trayectoria curva, el Sol deforma el espacio-tiempo de cuatro dimensiones a su alrededor y los planetas se mueven siguiendo esa curvatura. En particular, una de las consecuencias más interesantes de la teoría de la relatividad es que el tiempo transcurre más lentamente donde la fuerza gravitacional es mayor.

Con la relatividad general, el problema de la acción a distancia fue resuelto a favor de un nuevo concepto: la geometría del espacio-tiempo. La física se redujo a geometría.

ELECTROMAGNETISMO

Otras fuerzas, bastante comunes en nuestra experiencia diaria —aunque no tanto como la gravedad—, son las fuerzas eléctricas y magnéticas. Los griegos se habían dado cuenta que al frotar un pedazo de ámbar (*electros* en griego) con una tela, el ámbar adquiría la propiedad de atraer pequeños pedazos de papel (el experimento se puede repetir con plástico en lugar de ámbar). Varios siglos después Charles-Augustin Coulomb es-

tudio de modo más sistemático el fenómeno de la electricidad y descubrió que dos cargas eléctricas se atraen o se repelen con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, tal como la fuerza gravitacional. Pero, a diferencia de la gravitación que siempre es atractiva, la fuerza eléctrica puede ser tanto repulsiva como atractiva, según si las cargas son del mismo signo o de signo contrario.

También se conocían desde la antigüedad los imanes, pedazos de hierro con la curiosa propiedad de atraer los objetos de hierro, y también de atraerse o repelerse entre sí al igual que las cargas eléctricas. Un imán posee dos polos, norte y sur; pero si se parte un imán por la mitad no se aíslan los polos, sino que se obtienen dos nuevos imanes con un par de polos cada uno: ésta es la diferencia esencial con la fuerza eléctrica, ya que no se puede tener un polo aislado, que equivaldría a una "carga magnética".

La electricidad y el magnetismo empezaron a cobrar importancia en el siglo XIX, cuando Europa vivía en plena revolución industrial gracias a la invención de la máquina de vapor. En las ciencias físicas, Laplace y otros notables científicos habían logrado plasmar la mecánica de Newton en un lenguaje matemático que permitía su aplicación a problemas prácticos. La importancia de las máquinas de vapor, a su vez, propició la creación de una nueva rama de la física, la termodinámica, que estudia el calor y las propiedades térmicas de la materia.

Hasta esa época, electricidad y magnetismo parecían ser dos clases de fenómenos sin relación entre sí. Pero la invención de las pilas eléctricas permitió experimentar con las corrientes eléctricas y los imanes. Fue así como H. C. Oersted descubrió que una corriente eléctrica influye sobre un imán colocado cerca de ella, y A. M. Ampère demostró que ello se debe a que

una corriente produce una fuerza magnética a su alrededor. Finalmente, en 1831 Faraday descubrió que se genera una corriente eléctrica en un alambre conductor cuando éste se mueve junto a un imán. Pero los imanes y las pilas eléctricas servían, cuando mucho, para hacer actos de magia y sólo contados se interesaban en ellos.

Medio siglo después, Tomás Edison tuvo la idea de utilizar el descubrimiento de Faraday para generar corriente eléctrica y distribuirla por medio de cables por la ciudad de Nueva York. La primera planta eléctrica de la historia fue inaugurada en 1881. Consistía en enormes turbinas de vapor que hacían girar grandes bobinas de alambre conductor alrededor de imanes. Debido al efecto Faraday, se generaba una corriente eléctrica que se transmitía por toda la ciudad. La energía térmica se convertía, así, en energía eléctrica. Pocos meses después se inauguró en Wisconsin la primera planta hidroeléctrica, en la que el agua de un río hacía girar las bobinas para producir el mismo efecto.

Toda la electricidad que consumimos hoy en día se genera gracias al efecto Faraday. Lo único que varía es el mecanismo utilizado para hacer girar una bobina alrededor de un imán; este mecanismo puede ser el flujo de agua en una presa, el funcionamiento de un motor de combustión de petróleo, la presión del vapor de agua calentada por el uranio en una planta nuclear, etcétera.

Pero regresemos a Faraday. El problema de la acción a distancia que Newton había planteado por primera vez seguía aún más vigente con el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Para explicar como un imán influye sobre otro, Faraday ideó el concepto de *línea de fuerza*. De acuerdo con esta interpretación, de una carga eléctrica o un imán surgen

líneas de fuerza invisibles pero perfectamente reales, que llenan todo el espacio a su alrededor (Figura 4). Estas líneas guían en cierta manera el movimiento de cargas eléctricas o magnéticas que se encuentran cerca. El concepto es más intuitivo que el de la acción a distancia.

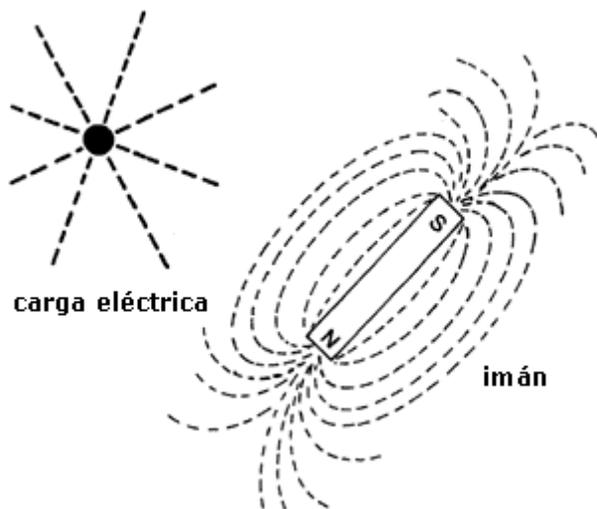


Figura 4. Las líneas de fuerza de Faraday alrededor de una carga eléctrica y de un imán.

El hecho de que las líneas de fuerza de Faraday sean invisibles e impalpables no implica que sean entes imaginarios. La prueba más sencilla de su existencia consiste en colocar astillas de hierro sobre un papel junto a un imán. Si el lector hace este experimento, notará que las astillas se alinean de tal modo que se manifiestan las líneas de fuerza magnética.

Pero faltaba describir con fórmulas matemáticas precisas los descubrimientos de Coulomb, Ampère, Oersted y Faraday. Tal síntesis teórica fue la obra de James Clerk Maxwell, quien plasmó de manera matemática todas las leyes que se conocían

en su época acerca de los fenómenos eléctricos y magnéticos, y demostró que estos son dos manifestaciones de una misma fuerza fundamental de la naturaleza: la fuerza electromagnética. Maxwell logró de este modo la primera unificación en la historia de dos fuerzas interacciones aparentemente distintas. Su teoría matemática del electromagnetismo fue un logro científico, equivalente al de Newton con la gravitación, y sirvió de puente entre la física newtoniana y la física del siglo XX.

Maxwell utilizó la idea de Faraday de las líneas de fuerza para elaborar el concepto de *campo*, que resultó ser enormemente fructífero en la teoría de Maxwell, las cargas eléctricas y los imanes generan a su alrededor un campo de fuerza cuya manifestación son las líneas de fuerza de Faraday. El campo llena todo el espacio y es el que transmite la influencia de una partícula sobre otra.

¿Es el campo algo más que una definición matemática? Lo es sin duda, pues tiene una realidad física que se manifiesta claramente. Es un nuevo concepto del pensamiento humano que no corresponde a nada conocido hasta el siglo XIX. Si acaso, la idea familiar de campo —una extensión indefinida de terreno— remite en la imaginación al concepto físico de "algo" alrededor de una carga. El campo físico, sin embargo, sólo puede describirse con el lenguaje matemático, ya que es imposible reducirlo a conceptos más sencillos o familiares representados por palabras del lenguaje común. Esta situación, de hecho, es una de las características de la física moderna y tiene profundas implicaciones filosóficas pero estas disquisiciones nos alejarían demasiado de los propósitos de este libro.

Como indicamos en el capítulo anterior, las moléculas y los átomos están amarrados entre sí por fuerzas eléctricas y magnéticas. Así como la fuerza de la gravitación es el cemento

del Universo a escala cósmica, la fuerza electromagnética es el cemento de la naturaleza a escala atómica. Las interacciones electromagnéticas son tan intensas que los cuerpos sólidos no pueden interpenetrarse sin romperse.

Estamos acostumbrados al hecho de que la materia puede ser extremadamente dura e impenetrable, como el acero o la roca. Sin embargo, esta dureza parecería increíble si pudiéramos echar un vistazo al mundo microscópico de los átomos, pues veríamos vacío por todas partes, excepto por algunas escasas y diminutas partículas. Recordemos que el tamaño característico de un átomo es de una diez millonésima de milímetro, pero el núcleo es 100 000 veces más pequeño, y aún más diminuto es el electrón. Si un átomo pudiera magnificarse al tamaño de un estadio de fútbol, su núcleo sería, en comparación, del tamaño de una mosca. Pero semejante vacío no es realmente tal porque el espacio está ocupado por fuerzas eléctricas y magnéticas, es decir, por un campo electromagnético. Este campo no es una entelequia; muy por lo contrario, a él debe la materia toda su solidez.

INTERACCIONES FUERTES

Cuando se descubrió que el núcleo de los átomos contiene protones los físicos se preguntaron cómo podían esas partículas, cargadas positivamente permanecer unidas si las cargas eléctricas del mismo signo se repelen. Y lo mismo se podría decir de los neutrones: ¿qué los mantiene unidos si son eléctricamente neutros? Debería existir otro tipo de fuerza en la naturaleza que permitiera tanto a los protones como a los neutrones atraerse entre sí. Esa fuerza de la naturaleza, recién descubierta en el siglo XX, es la *fuerza nuclear*. Es mucho más intensa que la electromagnética y, a la vez, es de muy corto alcance; actúa

únicamente en el núcleo, razón por la cual no forma parte de nuestra experiencia diaria.

La fuerza nuclear sólo se manifiesta en una distancia comparable con el tamaño de un núcleo atómico. Un protón es atraído por las partículas en un núcleo atómico sólo si se encuentra a una distancia de unos diez billonésimos de centímetro; si está un poco más lejos, sólo resentirá la repulsión eléctrica del núcleo. En cambio, un protón en el núcleo es atraído por los otros protones y neutrones por la fuerza nuclear, cuya intensidad es unas 1 000 veces mayor que la fuerza de repulsión electromagnética.

Un hecho de enormes consecuencias es que un núcleo atómico pesa *menos* que todos sus protones y neutrones por separado. Esta diferencia de masa se encuentra en el núcleo transformada en energía de amarre, de acuerdo, una vez más, con la famosa equivalencia de Einstein entre masa y energía. En la figura 5 se muestra la diferencia de masa de los núcleos atómicos comparados con la masa de sus constituyentes por separado. En el extremo izquierdo de la gráfica que la forma se tienen los elementos ligeros; por ejemplo, un núcleo de helio pesa 5×10^{-26} gramos menos que sus dos protones y dos neutrones por separado; si se *fusionan* esas cuatro partículas para formar un núcleo de helio, la masa perdida se libera en forma de energía; este es el principio de la bomba atómica y de los reactores nucleares. En el extremo derecho de la gráfica se tienen los elementos pesados; si se *fusiona* un núcleo de uranio en dos núcleos más ligeros, también se libera energía; este es el principio de la bomba de uranio. Tanto la fusión (para elementos ligeros) como la fisión (para elementos pesados) son dos mecanismos extremadamente eficientes para liberar energía de la materia. Las estrellas brillan porque se producen fusiones nu-

cleares en sus centros. Nótese también en la gráfica 5 que el hierro es el elemento con menor energía: el núcleo del hierro ni se fusiona ni se fisiona, y es por lo tanto el núcleo más estable en la naturaleza.

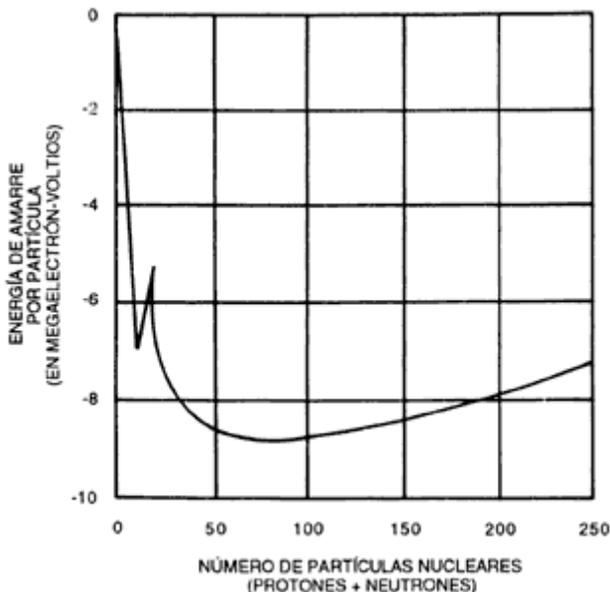


Figura 5. Masa faltante de los núcleos atómicos en función del número atómico (número de protones en el núcleo).

INTERACCIONES DÉBILES

El repertorio de fuerzas de la naturaleza no termina con la gravitación, el electromagnetismo y las fuerzas nucleares. En los años treinta, los físicos que estudiaban las radiaciones emitidas por los átomos se dieron cuenta de que en algunos casos, los núcleos atómicos eliminan electrones; a este proceso lo llama-

ron *radiación beta*. Pronto se descubrió que la *radiación beta* se debe a que un neutrón en el núcleo se transforma en un protón y un electrón, y este último se escapa a gran velocidad del núcleo.

Pero, al medir las propiedades del electrón que se escapaba, los físicos descubrieron que le faltaba algo de energía. Al principio hubo cierta alarma, pues parecía que la energía no se conservaba en contra del principio bien establecido de que la cantidad total de energía y masa implicada en cualquier proceso físico no se crea ni se destruye. Para solucionar este problema propusieron que una nueva clase de partícula se lleva la energía faltante, una partícula sin carga, totalmente invisible e inmune a las fuerzas eléctricas y magnéticas. Enrico Fermi llamó *neutrino* a tal partícula (que en italiano significa "neutronicito") para distinguirlo del neutrón, y ese es el nombre que se le ha quedado.

La interacción del neutrino con la materia no es enteramente nula, pero es millones de veces menos intensa que la de una partícula "normal". Es la cuarta fuerza de la naturaleza y se le llama interacción débil. Su alcance es extremadamente corto, semejante al de las fuerzas nucleares, razón por la que no forma parte de nuestra experiencia cotidiana. En promedio, se necesitarían billones de kilómetros de plomo para absorber un neutrino (en comparación, una lámina delgada de metal detiene cualquier fotón de luz). Si tuviéramos ojos sensible a los neutrinos podríamos "ver" el centro de la Tierra o del Sol... Y es que la luz, siendo un fenómeno electromagnético, interactúa electromagnéticamente con los átomos. Como señalamos antes, la "dureza" de un átomo se debe casi exclusivamente al campo electromagnético que posee. Para el neutrino que es insensible a ese campo, el átomo es un cuerpo casi inexistente.

La existencia de los neutrinos se ha establecido plenamente hoy en día y sus propiedades son bien conocidas. La más interesante es que el neutrino no tiene masa, o, si la tiene, es extremadamente pequeña. Si la masa del neutrino es estrictamente cero, entonces esta partícula, al igual que el fotón, tiene que moverse siempre a la velocidad de la luz. Tal parece que el neutrino comparte esa propiedad con el fotón. Así, un neutrino nunca podría estar en reposo.

A pesar de ser prácticamente imperceptibles, los neutrinos desempeñan un papel muy importante en los fenómenos cósmicos. Por ejemplo, el Sol brilla porque se producen en su centro reacciones nucleares por la fusión del hidrógeno. Esas reacciones generan luz y calor pero también neutrinos. De hecho, una fracción importante de la energía solar es emitida a manera de neutrinos; los que llegan a la Tierra atraviesan nuestro planeta a la velocidad de la luz y siguen su viaje por el espacio. Por nuestro cuerpo cruzan cada segundo alrededor de 100 billones de neutrinos provenientes del Sol sin que nos demos cuenta.

Si pudiéramos detectar los neutrinos solares, "veríamos" el centro mismo de Sol. Pero ¿cómo capturar tan elusivas partículas? La única posibilidad es un detector lo suficientemente grande para garantizar que unos cuantos neutrinos, en un flujo de billones y billones, sean absorbidos y detectados (algo análogo a comprar un gran número de boletos de la lotería para asegurarse de sacar alguna vez un premio mayor).

En 1973 empezó a funcionar el primer detector de neutrinos solares, que consistía en 600 toneladas de cloro sumergidas en una vieja mina de oro en Dakota del Sur. Cuando ocasionalmente un neutrino era absorbido por un átomo de cloro, éste se transformaba en argón radiactivo; midiendo la cantidad de argón producido se determina cuántos neutrinos han sido cap-

turados. Y, efectivamente, se logró detectar del orden de una docena de neutrinos al mes. Por una parte, el experimento fue todo un éxito y sus resultados han sido confirmados posteriormente, pero, por otra parte, planteó nuevos problemas, ya que los cálculos teóricos predecían aproximadamente el triple de neutrinos capturados. Este es un problema que todavía no está resuelto de manera definitiva.

Además de los neutrinos solares, es muy probable que el espacio cósmico esté lleno de neutrinos cuyos orígenes se deben buscar en los primeros instantes del Universo. Los físicos han calculado que, junto con la materia común, una gran cantidad de neutrinos debió crearse pocos instantes después de la Gran Explosión, y que estos todavía llenan el Universo; así, nos movemos en un mar de unos 300 neutrinos de origen cósmico por centímetro cúbico. Desgraciadamente, estos neutrinos son muchísimo más difíciles de detectar que los de origen solar, aunque es posible que en el futuro puedan ser observados, con lo cual podríamos echar un "vistazo" a los primeros segundos de existencia del Universo.

Aunque los neutrinos parecen no poseer masa, esto está aún por confirmarse. En 1981 un grupo de científicos rusos anunció haber medido una pequeñísima masa, equivalente a menos de una diezmilésima parte de la masa del electrón. Esto causó gran revuelo en la comunidad científica porque las implicaciones de un neutrino masivo, son muy importantes para la evolución del Universo. En efecto, habiendo tantos neutrinos, la mayor parte de la masa del Universo correspondería a estas partículas y no a la materia común. A su vez, esa masa sería tan grande que determinaría la evolución del Universo. Volveremos a este tema en el capítulo VII, pero por el momento aclaremos que, como se descubrió posteriormente, el resultado del

grupo ruso resultó ser una falsa alarma. Sin embargo, no está del todo excluido que el neutrino tenga una pequeñísima masa y que ésta sea medida algún día.

Por último, hay que señalar que un neutrino también tiene una antipartícula que es el *antineutrino*. Para ser precisos, un antineutrino es el que se emite en el decaimiento del neutrón. A pesar de que los neutrinos no poseen carga eléctrica, sí es posible distinguir un neutrino de un antineutrino, como veremos en el capítulo IV.

III. EL MODELO ESTÁNDAR

ONDA, PARTÍCULA, CAMPO

VIMOS en el capítulo I que las partículas del mundo cuántico se comportan a veces como ondas, y las ondas a veces como partículas. En realidad los conceptos de onda y partícula, tal como los conocemos en nuestra experiencia diaria, no son muy apropiados para describir las partículas elementales. La situación recuerda la historia de los ciegos que fueron puestos en presencia de un elefante y se les pidió que lo describieran; un ciego palpó, una pierna del elefante y afirmó que el animal se asemeja al tronco de un árbol, otro agarró su cola y lo describió como una serpiente, para un tercero que tocó su panza el paquidermo semejaba una pared, etcétera.

Quizás si tuviéramos un sexto sentido veríamos a las partículas elementales no como ondas o partículas, sino como algo más complejo. Quizás, también, ese sexto sentido lo poseamos realmente como una manera de comprensión que se expresa en el lenguaje de las matemáticas. Pero estas especulaciones filosóficas nos alejan demasiado de los propósitos de este libro por lo que las dejaremos hasta aquí.

Volviendo, pues, a las partículas elementales, el asunto se complica aún más si tomamos en cuenta el concepto de campo, tal como lo introdujimos al abordar el electromagnetismo. ¿Cómo se comporta el campo a nivel cuántico? Pensemos por un momento en el campo como una sustancia que permea el espacio, como sería, por ejemplo, un fluido o un gas; esta sus-

tancia puede vibrar, y las vibraciones son ondas. En el caso del electromagnetismo, la luz es una onda del campo electromagnético, al igual que el sonido es una onda en el aire. Pero recordemos que, en el mundo cuántico, una onda también es una partícula. Por lo tanto, *las vibraciones del campo también son partículas*.

Podemos presentar ahora una imagen coherente del mundo cuántico. El elemento fundamental es el campo. El campo vibra y sus vibraciones, a nivel cuántico, son a la vez ondas y partículas. Las partículas asociadas al campo electromagnético son los fotones, las partículas de la luz. Existen otros tipos de campos y sus vibraciones: otras partículas elementales como los electrones, los protones y muchos otros. Tendremos la oportunidad de conocerlos en las páginas siguientes.

Por ahora señalemos que existen esencialmente dos tipos de partículas en la naturaleza: las partículas asociadas a la materia y las partículas asociadas a las interacciones. Las primeras se llaman *fermiones* y las segundas *bosones*, en honor a Enrico Fermi y Satyendranath Bose respectivamente, físicos que describieron por primera vez las propiedades básicas de estas dos grandes familias del mundo cuántico.

La diferencia básica entre fermiones y bosones tiene que ver con una importante propiedad de las partículas elementales que se llama espín, palabra que proviene del inglés *spin*, girar. Esta propiedad es análoga, en lo cuántico, a la rotación de los cuerpos sólidos sobre sí mismos. Un principio básico de la mecánica newtoniana es que esa rotación perdura indefinidamente mientras no se aplique alguna influencia externa. Sabemos por ejemplo, que la Tierra ha girado sobre sí misma dando una vuelta en un día, prácticamente desde que se formó hace unos 5 000 000 000 de años. En un ámbito más reducido, un trompo

gira por largo rato, y cuando finalmente se detiene es por la fricción de su punta con el suelo. En mecánica la cantidad de rotación se mide con el llamado *momento angular*, que es esencialmente la masa de un cuerpo, multiplicada por su *velocidad de rotación*, y vuelto a multiplicar por su *radio*. Lo curioso es que las partículas elementales también poseen una propiedad equivalente al momento angular, el espín, que es absolutamente invariante. Además, el espín de una partícula elemental está cuantizado en unidades de la constante de Planck h ¹³ dividida por 2π —es común definir \hbar (léase *hache barra*) como $h/2\pi$. Lo anterior quiere decir que hay partículas con espín $0, \hbar, 2\hbar$ etcétera: que son los bosones, partículas asociadas a las interacciones. Por otra parte, también hay partículas con espín $1/2\hbar, 3/2\hbar$, etcétera, como los fermiones, partículas asociadas a la materia. El electrón, el neutrino, el protón y el neutrón tienen espín $\hbar/2$ y es un fermión.

Si bien el espín es el análogo cuántico del momento angular, la analogía no debe tomarse muy literalmente, ya que las partículas elementales no son objetos sólidos que giren. El espín es una propiedad intrínseca muy particular del mundo cuántico que se manifiesta sólo indirectamente. Veremos ahora con más detalle cuáles son los fermiones y los bosones fundamentales.

CUARKS Y LEPTONES

En un principio, parecía que los ladrillos fundamentales de la materia eran los electrones, protones y neutrones, pero las cosas empezaron a complicarse en los años cincuenta cuando se descubrieron partículas "exóticas" que no concordaban con ningún esquema teórico. Cada año se encontraban nuevas partículas supuestamente elementales y su número aumentaba

sin límite. Los físicos las bautizaban generalmente con los nombres de las letras griegas, y así aparecieron las partículas *mu*, *pi*, *omega*, *lambda*, *delta*, *ksi*, *tau*, *eta*, etc. Pero parecía que el alfabeto griego sería insuficiente.¹⁴ 

En los grandes aceleradores de partículas, electrones y protones chocan unos con otros y se transforman en esas partículas exóticas durante sus muy breves vidas, dejan rastros en las cámaras de niebla. Estas cámaras consisten en recipientes llenos de algún gas que se ioniza fácilmente cuando pasa una partícula cargada eléctricamente; cuando eso sucede se observa una trayectoria luminosa (Figura 6). El estudio de esa trayectoria, captada en una placa fotográfica, permite deducir varias propiedades de las partículas, como su velocidad, masa, tiempo de vida, etcétera.



Figura 6. Trayectoria de partículas elementales en una cámara de niebla.

Salvo el electrón y el protón, todas las partículas de la materia son inestables. El neutrón aislado alcanza a vivir, en promedio, unos 15 minutos, al cabo de los cuales se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino (proceso llamado decaimiento beta). Pero las otras partículas tienen vidas medias extremadamente breves, que se miden en millonésimas de segundos.

Con el fin de poner orden en el zoológico de las partículas elementales, Murray, Gell-Mann y George Zweig propusieron en 1965 que todas las partículas que interactúan fuertemente entre sí están formadas, a su vez, de unas partículas aún más fundamentales, que Gell-Mann llamó *cuarks* ¹⁵ , cuyas cargas eléctricas son ¡uno o dos tercios de la carga de un electrón! Una propuesta muy aventurada en su época, pues jamás se había detectado nada parecido a tales partículas.

Una característica común a todas las partículas es que sus cargas eléctricas son siempre múltiplos enteros (positivo o negativo) de una carga elemental: la carga de un electrón o un protón. Ya vimos que esa carga elemental, que vamos a llamar e , equivale a unos 1.602×10^{-19} coulombs. La mayoría de las partículas tienen carga e (positivo), $-e$ (negativo), o no tienen carga, aunque algunas partículas exóticas de muy corta vida poseen cargas de $2e$ o de $-2e$. Pero lo que definitivamente no se había descubierto nunca es una partícula cuya carga fuese una fracción de e como, por ejemplo, un tercio.

El hecho de que los protones y neutrones no sean partículas tan elementales, sino que estén hechos de otras más pequeñas, quedó establecido entre 1967 y 1973 gracias a una serie de experimentos realizados con el acelerador de partículas de tres kilómetros de largo de Stanford, California. El procedimiento consiste en lanzar electrones con energías enormes contra pro-

tones y estudiar el resultado de las colisiones. Esto es semejante a disparar un rifle contra una caja cerrada para determinar qué contiene; si el contenido de la caja es homogéneo y blando las balas siguen su trayectoria con desviaciones mínimas; por lo contrario, si la caja contiene balines de metal, algunas balas rebotarán contra éstos. De esta manera se puede tener una idea aproximada del contenido de la caja. El método parece burdo, pero es el único del que se dispone para estudiar las partículas elementales.

En los experimentos, resultó que la mayoría de los electrones lanzados contra un protón lo atravesaban casi sin desviarse, pero unos cuantos rebotaban en muy distintas direcciones. Esto era la evidencia de que los protones están formados por partículas más pequeñas, que posteriormente se identificaron con los cuarks. Sin embargo, no es posible encontrar un cuark aislado por razones que explicaremos en la siguiente sección.

En la actualidad se piensa que existen seis tipos de cuarks agrupados en tres familias. Como había que bautizarlos de alguna manera, los físicos inventaron los nombres de *up* y *down* para los cuarks de la primera familia, *strange* y *charmed* para los de la segunda, y *top* y *bottom* para los de la tercera. Estos nombres traducidos al español serían: *arriba*, *abajo*, *extraño*, *encantado*, *tope*, *fondo* y corresponden a los distintos tipos de cuarks. Además, a cada tipo se le llamó *sabor*. Por supuesto, tales nombres no deben tomarse literalmente. Para fines más prácticos y conservadores, es suficiente designar los cuarks con las letras *u*, *d*, *s*, *c*, *t*, *b*. Y, por supuesto, cada cuark tiene un *anticuark* asociado, con las mismas propiedades excepto la carga eléctrica que es de signo contrario (por ejemplo, la carga del cuark *d* es de *menos* un tercio la carga del electrón, y la carga del anticuark *d* es de *más* un tercio esa carga).

Hasta la fecha, se han encontrado evidencias experimentales de la existencia de todos esos cuarks, excepto del cuark t . Además, podría haber aún otras familias de cuarks, aunque los experimentos más recientes indican que tres es el número tope de familias escogido por la naturaleza (por alguna razón que hasta ahora desconocemos).

Todas las partículas que son susceptibles de interactuar fuertemente entre sí están hechas de cuarks, y son de dos tipos:

BARIONES: partículas formadas de tres cuarks (protones, neutrones...)

MESONES: partículas formadas de un cuark y un anticuark.

Y, por supuesto, sus correspondientes antipartículas los antibariones; por ejemplo, un antiprotón formado de tres anticuarks.

Todos los mesones son inestables; por ejemplo, los mesones π cargados y K que son los más "longevos", se desintegran en una cienmillonésima de segundo transformándose finalmente en protones y electrones. En cuanto a los bariones exóticos tienen vida(s) del orden de las billonésimas de segundo o menos.

Por otra parte, aquellas partículas que son inmunes a las interacciones fuertes son:

LEPTONES: partículas que no están hechas de cuarks (electrones, neutrinos)...

Estos nombres fueron tomados del griego: *barios* = pesado, *mesos* = intermedio, *leptos* = ligero.

En la Tabla 1 se presenta cada cuark con su carga eléctrica, cuya magnitud es de uno o dos tercios de la carga del electrón. Además de carga, los cuarks poseen un espín de $1/2 \hbar$, por lo que son fermiones.

TABLA 1

CUARKS						
	u	d	c	s	t	b
carga	$2/3 e$	$-1/3 e$	$2/3 e$	$-1/3 e$	$2/3 e$	$-1/3 e$
LEPTONES						
	electrón	neutrino	muon	neutrino	tauón	neutrino
		electrónico		muónico		tauónico
carga	$-e$	o	$-e$	o	$-e$	o

Un protón está formado por dos cuarks u y un cuark d (cuyas cargas sumadas dan $+e$) mientras que un neutrón está hecho de un cuark u y dos cuarks d (carga total cero). Una partícula exótica como el Δ^{++} consta de tres cuarks u y posee una carga de $2e$. Por otra parte, un mesón π^+ consta de un cuark d y un anti-cuark u , etcétera.

Como ya mencionamos, se conocen tres grandes familias de cuarks, y cada familia posee dos cuarks. Por una simetría con la naturaleza que aún no se explica, también existen tres grandes familias de leptones. La primera familia comprende al bien conocido electrón; en la segunda familia tenemos la partícula llamada muon —que se designa con la letra griega μ —, cuya masa es unas 207 veces la del electrón; finalmente tenemos la tercera familia, con una pesadísima partícula llamada tauón —por la letra griega τ —, cuya masa equivale a la de unos 3 500 electrones, ¡más pesada que un protón a pesar de ser un leptón! Un muon tarda en promedio unas dos millonésimas de segundo para transformarse en un electrón, mientras que un tauón tarda 3×10^{-13} segundos para transformarse en un muon.

En cuanto al neutrino, este es el momento de aclarar que, en realidad, existen tres clases de neutrinos, cada uno esta asociado con los electrones, los muones y los tauones respectivamente; el neutrino electrónico sólo interactúa con el electrón, el neutrino muónico con el muon y el neutrino tauónico con el tauón. Cada uno de estos tres neutrinos pertenece a una de las tres familias de leptones.

En la Tabla 1 también presentamos los leptones, para beneficio de aquellos lectores que ya se perdieron en el zoológico de las partículas elementales. Pero, finalmente, seis cuarks, seis leptones y sus antipartículas dan un total de 24 partículas, que no es un número demasiado grande.

El lector atento habrá notado que el mundo tal como lo conocemos podría muy bien existir con sólo la primera familia de cuarks y leptones; después de todo, nuestro mundo, incluyendo nosotros mismos está hecho de electrones, cuarks u y cuarks d . Además, el Sol y las demás estrellas brillan por procesos de fusión nuclear en los que intervienen neutrinos electrónicos.

¿Para qué sirven las otras familias de partículas? ¿Sólo para complicar la vida de los físicos? La existencia de tres familias fundamentales de fermiones aún no se explica satisfactoriamente.

Y, finalmente, cabe la pregunta de si los cuarks están hechos a su vez de partículas más pequeñas. ¿Y éstas de otras aún más pequeñas? ¿Dónde acaba la Sucesión? Afortunadamente ya se tienen evidencias experimentales de que sólo hay tres familias de cuarks y leptones, y, por lo tanto, el número de tipos de cuarks no excede de seis. Gracias a este reducido número, tenemos la esperanza de que los cuarks sean realmente los constituyentes básicos de la materia.

INTERACCIONES DE "COLOR"

Cuando Gell-Mann y Zweig propusieron por primera vez la teoría de los cuarks los físicos experimentales se pusieron a buscar estas partículas con sus aceleradores, pero nunca pudieron encontrar un cuark aislado. Sólo quedaban dos posibilidades: o los cuarks sencillamente no existen o, por alguna razón física, los cuarks no pueden estar aislados. Muchos físicos habrían aceptado la primera opción si no fuera por los experimentos que mostraban que los protones y neutrones sí tienen una estructura más fundamental. Finalmente, a mediados de los años setenta surgió una nueva teoría de las interacciones entre los cuarks, que implicaba que éstas, efectivamente, no pueden existir aisladas.

Para quitar un electrón de un átomo, o un protón de un núcleo, se necesita invertir cierta cantidad de energía. En el caso de los cuarks, éstos se mantienen unidos por medio de una fuerza que, además de ser extremadamente intensa, tienen una peculiari-

dad: aumenta con la distancia. Podemos pensar en esta fuerza entre cuarks como una especie de resorte: mientras más se estira mayor es la fuerza con que jala el resorte. Si dos partículas están unidas por un resorte y se intenta separarlas estirándolo lo más posible, llega un momento en el que se rompe. Algo parecido sucede con los cuarks: el "resorte" que los une se puede estirar hasta "romperse", pero la energía necesaria para ello es tan grande que con esa misma energía, se crean dos nuevos cuarks en las "puntas" rotas del resorte — gracias, una vez más, a la equivalencia entre masa y energía. Esta es, a grandes rasgos, la razón por la que es imposible tener un cuark aislado en la naturaleza.

¿Cuál es la naturaleza de esa poderosísima interacción entre los cuarks? Al igual que otras partículas, los cuarks poseen una carga eléctrica, pero, además, tienen otro tipo de "carga" que aparece en *tres* tipos, cada uno en positivo y negativo. Como había que llamar de algún modo a esa nueva característica, los físicos inventaron el concepto de color para designarla. Sobra decir que esto no tiene nada que ver con propiedades visuales, pero el concepto ha sido muy útil para describir las propiedades de los cuarks y las partículas que forman.

Antes de seguir con los cuarks, hagamos un breve paréntesis para recordar la teoría de los colores (los verdaderos). Los tres colores primarios son el verde, el azul y el rojo. Estos tres colores, al mezclarse en forma de luz, y en la misma proporción, producen el color blanco.¹⁶ Además, a cada uno de los tres colores primarios se asocia un color complementario magenta, amarillo y cian (también llamado índigo o añil). Los tres colores complementarios mezclados producen blanco. Asimismo, un color primario mezclado con su color complementario correspondiente también produce blanco (ver la Figura 7).

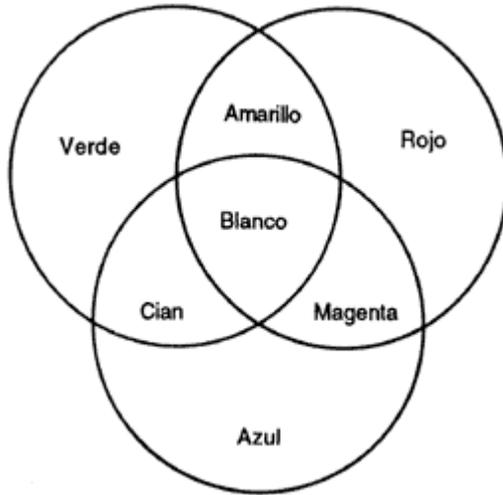


Figura 7. Colores primarios y complementarios.

Después de esta digresión cromática, volvamos a los cuarks. Cada cuark posee una carga de color, que es uno de los tres colores primarios. Una regla básica es que las partículas hechas de cuarks son enteramente blancas, en el sentido de que sus colores se tienen que combinar para producir el color blanco. Por ejemplo, un protón está hecho de dos cuarks u y un cuark d ; uno de estos cuarks tiene que ser azul, otro verde y el tercero rojo; no se puede tener, por ejemplo, dos cuarks azules y un tercero rojo. En la naturaleza sólo existen partículas blancas.

La analogía de la carga de color se puede extender hasta los anticuarks si interpretamos al "anticolor" como el color complementario. Por ejemplo, un mesón puede estar formado por un cuark azul y un anticuark amarillo (que sería "antiazul").

La situación se asemeja a la de los átomos. El núcleo tiene carga, eléctrica positiva, mientras que los electrones poseen carga negativa. En los átomos neutros, como son la mayoría de los

que encontramos en la Tierra, la carga de los electrones compensa exactamente la de los protones. Un átomo neutro sería el equivalente de una partícula "blanca". La diferencia fundamental es que en la naturaleza sí existen átomos no neutros (iones) que tienen menos electrones que protones, pero no se puede "colorear" una partícula porque no se puede despegar un cuark de otro. No existe algo tal como un "ion de colores".

Ahora veamos cómo interactúan los cuarks "coloreados". Sabemos ya que el fotón es la partícula que transmite la fuerza electromagnética entre dos partículas cargadas eléctricamente. En el caso de los cuarks se tienen no una sino *ocho* partículas que transmiten la fuerza entre los cuarks de colores. Como había que ponerles algún nombre a estas partículas, se les bautizó con el nombre de gluones, que proviene de la palabra inglesa *glue* "pegamento". Los *gluones* son las partículas asociadas a los "resortes" que unen a los cuarks entre sí.

Al igual que los fotones, los gluones no poseen masa. Sin embargo, el concepto de masa para un cuark o un gluon no es sencillo, ya que estas partículas no pueden existir aisladas en la naturaleza y la energía de los gluones es inseparable de la masa del cuark. Cuando mucho, se puede interpretar la masa de un cuark como un parámetro en la teoría. Con esta aclaración, podemos situar la masa de un cuark *d* entre una y tres cienmilésimas de la masa del electrón, mientras que el cuark *b* es unas cinco veces más masiva que el protón, y el cuark *t*, que todavía no se ha detectado, debería tener una masa superior cien veces a la del protón.

En resumen, la interacción de color entre cuarks se debe a los gluones, que son los cuantos del campo de color. La llamada interacción nuclear, o interacción fuerte, es una manifestación de lo que en la actualidad se conoce como interacción de color.

La parte de la física que estudia esa interacción se llama *cro-*
modinámica que proviene de la palabra griega *chromos*, "color".

INTERACCIONES ELECTRODÉBILES

¿Por qué existen en la naturaleza sólo cuatro tipos de interacciones entre las partículas y no algún otro número? Después de todo, hasta antes de Faraday y Maxwell se pensaba que las interacciones eléctricas y magnéticas no tienen relación entre sí, pero luego quedó en evidencia que son dos aspectos de un mismo tipo de interacción: la electromagnética. ¿No podría suceder algo parecido con las cuatro interacciones conocidas? El mismo Albert Einstein pensaba que la gravitación y el electromagnetismo podrían unificarse en una sola interacción y dedicó casi la segunda mitad de su vida a buscar una teoría unificada de estas dos fuerzas. Pero su búsqueda fue infructuosa y durante mucho tiempo se perdieron las esperanzas de llegar a unificar las interacciones.

En 1967 apareció un pequeño artículo científico en el que su autor, Steven Weinberg, proponía una teoría unificada de las interacciones electromagnética y... débiles. Esa teoría fue desarrollada posteriormente por Abdus Salam, Gerard't Hooft, Sheldon Glashow, entre otros físicos. La predicción básica, y de la que dependía la validez de la nueva teoría, era la existencia de unas partículas de tipo bosón que median la interacción débil, tal como el fotón media la interacción electromagnética. A diferencia de los fotones, estas partículas deberían ser extremadamente pesadas, casi 100 veces más masivas que un protón.

Y, efectivamente estas partículas predichas por la teoría fueron descubiertas en 1976, lo cual les valió a Weinberg, Salam y

Glashow el Premio Nobel de física en 1979, y en 1984 lo obtuvieron también sus descubridores experimentales Rubia y Van der Meer . Estas partículas se conocen ahora como bosones W y Z. Hay dos tipos de bosones W, uno con carga eléctrica positiva y otro negativa (de la misma magnitud que la carga del electrón), mientras que el bosón Z es neutro. La masa de los dos bosones W es de 87 veces la del protón y la del bosón Z es de 95 veces.

¿Pero cómo pueden partículas tan masivas intervenir en la interacción de partículas muchísimo más ligeras, como los electrones o los neutrinos? ¿Acaso surge masa de la nada ? La respuesta está en *el principio de incertidumbre* de Heisenberg,¹⁷ uno de los conceptos más básicos y peculiares de la mecánica cuántica.

Según el principio de incertidumbre existe un límite natural a la precisión con la que se pueden determinar simultáneamente la velocidad y la posición de una partícula. Esta incertidumbre no se debe a nuestras limitaciones observacionales, sino que es inherente a la naturaleza misma. Si determinamos con mucha precisión la posición de una partícula perderemos precisión en su velocidad, y viceversa.

Otra versión del principio de incertidumbre es la siguiente: la energía de una partícula y el tiempo durante el cual posee tal energía no se pueden determinar simultáneamente con absoluta precisión. En consecuencia, nada impide que se creen y destruyan continuamente partículas del vacío mismo; debido a la equivalencia entre masa y energía ($E = mc^2$) una partícula 100 veces más pesada que un protón puede surgir de la nada y desaparecer en un tiempo menor a 10^{-27} segundos. Este es justo el caso de las interacciones débiles entre partículas: las W y Z se crean y desaparecen tan rápidamente que sus enormes masas

pasan inadvertidas. Además, debido a esa vida tan corta las W y Z sólo pueden viajar una distancia extremadamente corta, razón por la cual las interacciones débiles son de muy corto alcance.

De acuerdo con la teoría de Weinberg y Salam, las interacciones electrodébiles se producen por cuatro tipos de partículas: el fotón, los bosones W positivo y negativo, y el bosón Z. De estas cuatro partículas nuestro viejo conocido, el fotón, no posee masa, mientras que las otras tres son extremadamente masivas. ¿Por qué hay una diferencia tan fundamental? ¿Qué produce la masa de esos bosones tan pesados? Una posible explicación podría estar relacionada con la existencia del llamado *campo de Higgs*, que presentaremos a continuación.

EL CAMPO DE HIGGS

Para explicar la gran masa de los bosones W y Z, Weinberg y Salam tuvieron que recurrir a una vieja idea de Peter W. Higgs para producir la masa de las partículas elementales. Según esta hipótesis, el espacio estaría lleno de un campo —¡uno más!— que interactúa con las partículas y genera sus masas. A estas alturas, el lector ya debe estar acostumbrado a la idea de los campos cuánticos que permean todo el espacio, al estilo del éter de los siglos anteriores, por lo que no debe sorprenderse ante la aparición de un nuevo campo. Sin embargo, este campo tiene una característica nueva que explicaremos a continuación.

Hagamos una analogía con el campo eléctrico. Este campo tiene una *intensidad*, que se puede definir con toda precisión como la fuerza que ejerce sobre una partícula con una carga dada. Donde hay campo hay fuerza sobre partículas y, además, hay energía: la asociada a los fotones del campo eléctrico. In-

tuitivamente, uno esperaría que mientras más intenso fuera el campo mayor sería su energía. Y efectivamente, así sucede; si designamos la intensidad del campo eléctrico en un punto dado con la letra \emptyset , la energía del campo en ese punto resulta proporcional a \emptyset^2 . La figura 8(a) muestra una gráfica que relaciona la energía con la intensidad del campo. Nótese el hecho muy importante de que, si la intensidad del campo es cero, entonces la energía también es cero. Esto parece trivial: si no hay fuerza, tampoco hay energía.

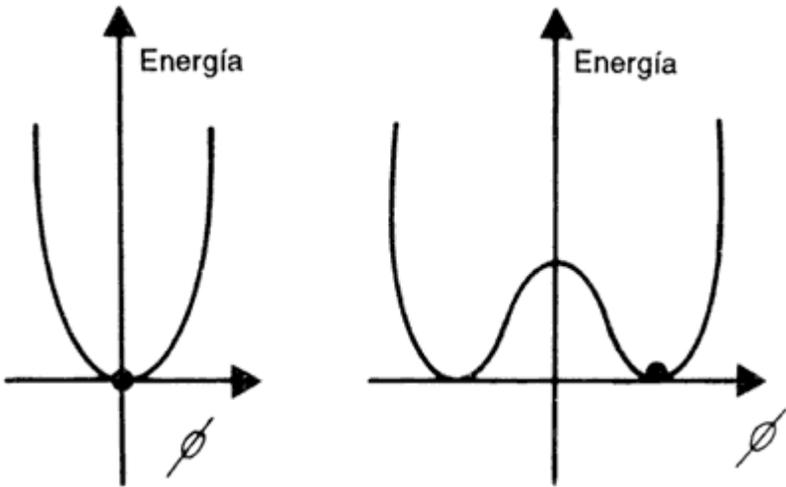


Figura 8. Relación entre energía e intensidad de campo.

Pero la afirmación anterior no es tan trivial como parece. En efecto, podría existir algún campo cuya energía fuera cero pero *no* su intensidad. Ese sería el caso si la relación entre energía e intensidad es un poco más complicada que en el caso del campo eléctrico, en particular como la que se muestra en la figura 8(b). Ese es justamente el caso del campo de Higgs.

Supongamos que estamos en el vacío total. Por definición, la energía del vacío debe ser el mínimo posible: cero. ¿Cuánto vale la intensidad del campo de Higgs en el vacío? De acuerdo con la figura 8(b) la intensidad del campo de Higgs en el vacío no es cero.

Pero ¿qué se entiende exactamente por intensidad del campo de Higgs? Después de todo, esa intensidad es una forma más de energía; pero si el vacío no posee energía, ¿dónde está la energía asociada a la intensidad? La respuesta es que esa intensidad toma forma de masa: ¡es la masa de las partículas W y Z! De hecho, hay tres campos de Higgs, uno para cada partícula —W positivo W negativo y Z— y la masa de estas partículas corresponde a $\sqrt{\hbar/c^2}$ veces la intensidad del campo de Higgs en el vacío.

El modelo de Higgs parece muy rebuscado, pero funciona. En realidad la idea proviene de un modelo que describe la superconductividad eléctrica a muy baja temperatura —un tema de la física en apariencia muy alejado de las partículas elementales— y que demostró ser una interpretación correcta de ese importante fenómeno físico. Un mecanismo como el propuesto por Higgs está relacionado con lo que se conoce como *cambio de fase*, son las transiciones del hielo al agua y del agua al vapor, que ocurren a las temperaturas críticas de 0 y 100 grados centígrados respectivamente.

Precisamente la energía del campo de Higgs depende también de la temperatura de la forma en que se muestra en la figura 9. Arriba de una cierta temperatura crítica la energía de campo de Higgs es la mínima posible cuando la intensidad del campo es cero; si no hay campo no hay energía (o ésta es la mínima posible). Pero a una temperatura menor que la crítica se tiene la

situación descrita un poco más arriba: donde no hay energía sí hay una intensidad de campo.¹⁸ 

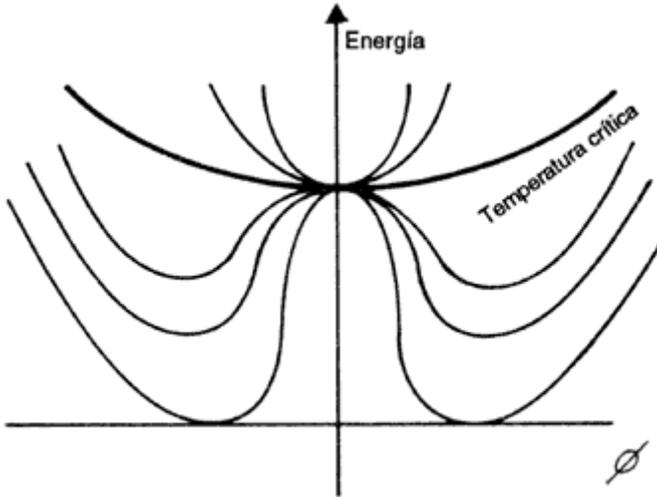


Figura 9. Energía del campo de Higgs a diferentes temperaturas.

En el caso de las interacciones electrodébiles, la temperatura crítica corresponde a unos 10^{15} grados Kelvin, una temperatura que sólo pudo existir en los primeros microsegundos del Universo, como veremos más adelante. Por arriba de esa temperatura crítica el campo de Higgs no actuaba todavía y ninguna de las partículas W y Z poseían masa; nada las distinguía del fotón y las interacciones débiles eran idénticas a las electromagnéticas. Pero a la temperatura crítica se produce un auténtico cambio de fase y, por debajo de esa temperatura, el campo de Higgs genera la masa de las partículas W y Z. Sólo el fotón se queda sin masa. Las W y Z son casi 100 veces más masivas que un protón, lo cual indica que la intensidad del campo de

Higgs es extremadamente alta, en comparación con la de otros campos.

Además, todo campo cuántico por supuesto vibra y sus vibraciones son ondas y partículas a la vez. Las vibraciones del campo de Higgs son partículas: los bosones de Higgs. Infortunadamente, hasta ahora estos bosones no han sido detectados. La razón es que la masa de un bosón de Higgs debe ser muy grande, probablemente algunos cientos de veces la masa de un protón, y los aceleradores actuales de partículas no generan suficiente energía para producir tales partículas.

Los bosones de Higgs, junto con los cuarks *t*, son la única pieza fundamental del rompecabezas que falta para tener un modelo coherente de las partículas elementales. A pesar de ese hueco, la teoría funciona muy bien y se le conoce como el *modelo estándar*. Incluso algunos físicos han especulado que un mecanismo como el de Higgs podría explicar la masa de *todas* las partículas: el espacio estaría lleno de varios campos de Higgs cuyo estado de mínima energía —es decir, el vacío— tendría una intensidad que generara la masa de todas las partículas en el Universo.

Para encontrar en los bosones de Higgs los físicos tienen la esperanza de contar en el futuro con lo que sería el instrumento científico más costoso de la historia: *el super colisionador super conductor* (SCS). Con un costo de 10 000 000 000 de dólares, este aparato gigantesco está programado para entrar en operaciones en el año 2002, sino hay contratiempos,¹⁹ y se está construyendo en un pequeño pueblo texano llamado Waxahachie, cerca de Dallas. El SCS consistirá en un túnel circular de 86 kilómetros de longitud, a lo largo de los cuales unos circuitos superconductores acelerarán protones y antiprotones. Después de dar muchas vueltas, los protones y antipro-

tones alcanzarán velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz y chocarán entre sí, produciendo nuevas partículas de un tipo jamás observado hasta ahora.

Uno de los propósitos del SCS sería encontrar las elusivas partículas de Higgs. Si se descubren confirmarían en forma espectacular la validez del modelo estándar. En caso contrario, la conclusión sería que estas partículas son demasiado masivas para producirse en un colisionador, incluso uno como el SCS o que, sencillamente no existen, en cuyo caso habría que buscar una teoría mejor. De todos modos, una parte de la comunidad científica opina que bien vale la pena construir el SCS para no quedarse con la duda, aunque otra parte lamenta su enorme costo y piensa que podría destinarse a algo mejor.

EL VACÍO CUÁNTICO

¿Qué es el vacío? Ha llegado el momento de replantear esta pregunta. En la física clásica el vacío es sencillamente la ausencia de todo, pero en el mundo cuántico este concepto no es tan trivial. Dada la existencia de los campos y sus vibraciones el vacío cuántico se parece a todo menos a la idea instintiva del vacío.

El espacio está lleno de campos: gravitacionales, electromagnéticos, de colores, de Higgs... Estos campos vibran y tienen fluctuaciones, como las olas en el agua. En la física clásica es perfectamente posible concebir un estanque de agua en reposo absoluto, sin ninguna fluctuación. Pero los campos cuánticos nunca pueden estar en absoluto reposo; siempre están fluctuando por las peculiaridades del mundo cuántico.

El principio de incertidumbre de Heisenberg impone condiciones a la realidad, que son inherentes a la naturaleza misma.

Una de sus consecuencias es el hecho de que una partícula no puede estar en reposo absoluto, ya que eso implicaría que está en todas partes en el Universo. En efecto, si la velocidad de la partícula es cero con absoluta precisión entonces la incertidumbre en su posición es infinita. Y recíprocamente, si su posición está restringida a una cierta región del espacio su velocidad no puede ser absolutamente nula.

El principio de incertidumbre también se aplica a los campos, o más precisamente, a sus fluctuaciones. Un campo cuántico posee necesariamente fluctuaciones cuánticas, y éstas se pueden interpretar como partículas que se crean y se destruyen en un tiempo demasiado corto para ser detectadas. Hay que aclarar, sin embargo, que la carga eléctrica no obedece a ningún principio de incertidumbre. Por lo tanto, como no se puede crear o destruir una carga eléctrica las partículas que se producen por fluctuaciones cuánticas deben ser eléctricamente neutras o aparecer en pares de partícula y antipartícula, de tal modo que la carga total de la fluctuación sea nula. Por ejemplo, una pareja electrón-positrón puede surgir espontáneamente y desaparecer en un tiempo menor a 10^{-22} segundos.

Así, el "vacío" de la mecánica cuántica, está repleto de fluctuaciones de campos y de partículas que aparecen y desaparecen burlándose de la ley de conservación de la masa, encubiertas por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Tales partículas, por principio indetectables, se llaman *partículas virtuales*.

La presencia de fluctuaciones cuánticas en el vacío origina importantes problemas conceptuales. Por lo pronto, el vacío cuántico recuerda más bien al famoso éter del siglo pasado. En realidad, es sólo una cuestión semántica si el éter de los físicos de antaño es el vacío cuántico de ahora. Debemos insistir, en que el vacío cuántico no es un concepto metafísico: aunque las

fluctuaciones cuánticas y las partículas virtuales no puedan observarse de manera directa, producen efectos físicos perfectamente reales y que se han medido de modo experimental. El tema de estos fenómenos cuánticos empero, rebasa los propósitos del presente libro.

IV. LAS SIMETRÍAS DEL MUNDO CUÁNTICO

LAS partículas y los campos del mundo cuántico poseen, además de sus propiedades dinámicas, ciertas simetrías que facilitan la comprensión de lo que sucede en ese nivel de la realidad. Las tres simetrías fundamentales están relacionadas con el espacio, el tiempo y la antimateria. Este es el tema del presente capítulo.

PARIDAD

Si miramos el mundo en un espejo vemos otro mundo en el que los lados derecho e izquierdo están intercambiados, pero donde todo se mueve de acuerdo con las leyes de la física que conocemos. En principio, no hay ningún experimento que nos permita distinguir entre el mundo real y su imagen especular. Si filmamos una película directamente y otra a través de un espejo y las proyectamos, es imposible distinguir cual de las dos corresponde al mundo real (por supuesto que en una de éstas los letreros aparecerán al revés, pero ninguna ley de la naturaleza nos impide escribir al revés para engañar a la audiencia). Esta invariancia de las leyes de la física ante reflexiones se llama *simetría de paridad*, o simetría P.

Hasta los años cincuenta se creía que la simetría de paridad es una de las leyes fundamentales de la física. Pero en 1955 los físicos T. D. Lee y C. N. Yang descubrieron que no es así. Para esa época ya se habían detectado fenómenos curiosos que ocurrían con los neutrinos. Lee y Yang demostraron de manera

concluyente que en el decaimiento beta del neutrón, producido por las interacciones débiles, no se conserva la paridad.

Imaginemos un reloj transparente en el que sólo se ven las manecillas. Viendo en qué sentido se mueven éstas, se puede determinar de qué lado hay que poner la carátula (Figura 10). O sea, la rotación define una dirección particular en el espacio: ésta sería la dirección perpendicular a la carátula. Pero si se ven las mismas manecillas en un espejo sin saberlo se pensará que la carátula se encuentra en el otro lado.

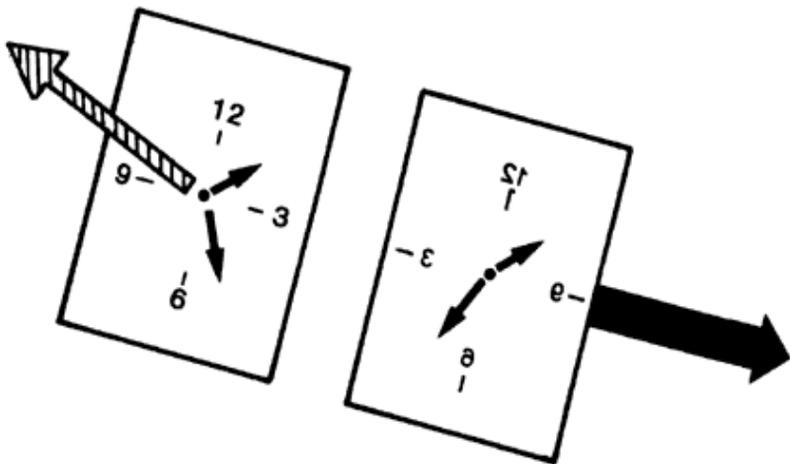


Figura 10. La rotación define una dirección en el espacio.

Volviendo al decaimiento beta, un neutrón (aislado o en un núcleo atómico) se transforma espontáneamente en un protón, un electrón y un antineutrino. Ahora bien, el núcleo gira como un trompo —más precisamente, posee un espín— y ese giro define una dirección particular. Lee y Yang descubrieron experimentalmente que, en promedio, los electrones se emiten más

hacia una dirección (definida por la rotación —o espín— del núcleo) que en otra. Visto en un espejo, el decaimiento beta de un conjunto de núcleos sería igual que en el mundo real.

Los neutrinos violan completamente la simetría de la paridad. Esto a su vez, permite distinguir un neutrino de un antineutrino, a pesar de que estas partículas no poseen carga eléctrica. Como ya mencionamos el neutrino posee un espín, es decir como si estuviera girando sobre sí mismo. Lo que sí distingue un neutrino de un antineutrino es el sentido en el que gira. Esto se ilustra en la figura 10: vistos desde atrás con respecto a la dirección de un movimiento, un neutrino gira en sentido contrario al de las manecillas de un reloj y un antineutrino en el otro sentido.²⁰ Sin embargo, podríamos pensar que si nos movemos más rápido que un neutrino, y lo rebasamos, lo veríamos girar en el otro sentido, como si fuera un antineutrino... ¡Pero hay que recordar que los neutrinos se mueven a la velocidad de la luz, por lo que es imposible rebasarlos! Debido al límite natural que tiene, impuesto por la velocidad de la luz, la distinción entre neutrino y antineutrino tiene pleno sentido físico. Del mismo modo, un neutrino se vería en un espejo girando en sentido contrario (un reloj parece caminar al revés cuando se mira en un espejo), ¡así que su imagen especular sería un antineutrino!

CARGA

Lo que acabamos de mencionar con respecto al neutrino está relacionado, más generalmente, con el hecho de que existe otra simetría en la naturaleza relacionada con el intercambio de carga eléctrica. La fuerza eléctrica entre dos cargas positivas es exactamente la misma que entre dos cargas negativas. En general, a esta invariancia se le llama *conjugación de carga*, o si-

metría C, e implica que las fuerzas de la naturaleza no se alteran si se intercambian partículas y antipartículas. Si por algún milagro todas las cargas positivas en el Universo se transformaran en negativas y éstas en positivas, el comportamiento del Universo no cambiaría en nada. De la misma manera, si una galaxia lejana está compuesta de antimateria no se distinguiría de una de materia porque la interacción de la luz con la materia y con la antimateria es idéntica.

La simetría C parecía ser otra de las propiedades fundamentales de la naturaleza hasta que la violación de la paridad puso a los físicos a dudar al respecto. Y, en efecto, resulta que también la simetría C es violada en las interacciones débiles.

Sin embargo, lo que sí parece que se conserva es una combinación de simetrías C y P. Esto quiere decir que si vemos el mundo en el espejo y, al mismo tiempo, intercambiamos partículas por antipartículas el resultado es un mundo en el que se cumplen las mismas leyes de la naturaleza. En el ejemplo de los neutrinos un neutrino reflejado en un espejo tiene exactamente el mismo comportamiento que un antineutrino.

TIEMPO

Otra simetría que ocurre en la naturaleza tiene que ver con el tiempo. Las leyes de la física son las mismas si el tiempo transcurre del pasado o al revés. ¡Pero esto no es lo que se observa comúnmente! Para comprender de qué se trata esta simetría temporal veamos primero en qué consiste la dirección del tiempo.

El tiempo fluye del pasado al futuro y nosotros somos viajeros en el tiempo. Pero nuestro viaje es en una sola dirección. A diferencia del espacio común, en el que podemos movernos en

cualquier sentido, es imposible remontar la corriente del tiempo y regresar al pasado.

Todo lo anterior parece obvio y de sentido común. Pero la pregunta ¿por qué el tiempo corre en una sola dirección? no resulta tan trivial si se examina más de cerca. En efecto, las leyes de la naturaleza que los físicos ahora (con una pequeña excepción que veremos más adelante) no implican de ningún modo que el tiempo tenga que fluir en un sentido o en otro. Esas mismas leyes describen a la perfección el comportamiento de la materia, pero la dirección del tiempo está escondida en alguna región aún mal comprendida por la ciencia moderna.

Supongamos que filmamos el movimiento de los planetas alrededor del Sol y proyectamos una película al revés. Veríamos una película de un proceso físico en el que se ha invertido el sentido del tiempo. Pero este proceso también es perfectamente posible: los planetas se verían girando en sentido contrario sin que se viole ninguna ley conocida de la física. Un hipotético astrónomo de otra galaxia que vea esa película no podría determinar, por mucho que la estudie, si está proyectada en el sentido correcto o no.

Podemos repetir el experimento filmando lo que sucede normalmente en nuestro alrededor. En una película de la vida cotidiana proyectada al revés se ve, por ejemplo, a la gente caminando hacia atrás pero esto no contradice ninguna ley física. En efecto, cualquiera puede caminar al revés, así que ¿cómo saber que los personajes de la película no lo hicieron a propósito para engañar al público?

Sin embargo, existen procesos que no dan lugar a dudas. Por ejemplo, un vaso que derrama su contenido por el suelo, filmado y proyectado al revés se ve de la siguiente manera: el charco en el suelo súbitamente se junta, forma una bola de líquido y

ésta brinca al interior del vaso. Evidentemente, cualquiera que vea tal fenómeno en la pantalla adivinará que la película está invertida.

Pero aquí surge un problema muy importante. El agua en el vaso consta de millones de moléculas unidas entre sí por fuerzas electromagnéticas que se mueven y vibran en todos los sentidos. Visto a través de un microscopio muy potente ese movimiento azaroso de las moléculas tiene el mismo aspecto del vaso que cuando el charco se junta para brincar al interior del mismo. En el mundo microscópico no existe distinción entre pasado y futuro, porque la leyes de la física no dependen del sentido en que corre el tiempo. Es imposible determinar si la filmación de unas moléculas en movimiento e interactuando entre sí se está proyectando en el sentido correcto o no.

La conclusión de lo anterior es que la dirección del tiempo sería una propiedad *exclusivamente* estadística. Explicaremos a continuación el sentido de esta afirmación.

Para investigar las propiedades de un conjunto muy grande de objetos o individuos se recurre a la estadística. Por ejemplo, para estudiar la población de un país se utilizan datos como número de habitantes, porcentaje de la población dedicada a tal o cual actividad, edad promedio, distribución de ingresos etc. Tal información es mucho más útil que un registro detallado de cada individuo. Lo mismo ocurre en la física: los objetos que vemos y utilizamos diariamente están constituidos de billones y trillones de moléculas y átomos, cuyo registro individual es imposible. Tiene más sentido estudiar las propiedades globales de la naturaleza.

Es evidente que la historia de un país evoluciona de modo tal que el pasado antecede al futuro, pero sería absurdo afirmar que los individuos que componen una nación no distinguen

entre pasado y futuro. Y, sin embargo, tal situación aparentemente absurda es propia del mundo físico: los cuerpos macroscópicos evolucionan en una dirección en el tiempo, pero ¡las moléculas y los átomos no distinguen entre pasado y futuro!.

Tal parece entonces que la dirección del tiempo es un concepto puramente estadístico. En el siglo pasado los físicos empezaron a aplicar conceptos de estadística al estudio de la materia. Descubrieron, por ejemplo, que la temperatura de un cuerpo está relacionada con la energía promedio de las moléculas que lo componen. También descubrieron otras propiedades estadísticas de la naturaleza, la más interesante de las cuales es la *entropía*, que está directamente relacionada con la dirección del tiempo.

La entropía es en cierto sentido, una medida del desorden de un sistema. Supongamos, por ejemplo, que recortamos una por una las letras de esta página y las revolvemos; el resultado será muy probablemente un revoltijo de letras sin sentido. Pero es muy poco probable que ocurra lo contrario: si revolvemos al azar un conjunto de letras sería un milagro que apareciera un texto coherente. En el lenguaje de la física el texto con sentido tiene poca entropía, mientras que el revoltijo de letras tiene una entropía alta (la entropía se interpreta también como una medida inversa de la cantidad de información que posee un sistema). Ahora bien, parece ser una ley fundamental de la naturaleza que la entropía total de un sistema *siempre aumenta con el tiempo*; esto se conoce como la *segunda ley de la termodinámica*. Sin embargo, ésta es una ley estadística que sólo tiene sentido aplicada a conjuntos muy grandes de moléculas, aisladas del resto del Universo.

La segunda ley de la termodinámica define una dirección del tiempo y es, de hecho, la única ley conocida de la naturaleza en la que aparece una distribución entre pasado y futuro. Pero la entropía es un concepto puramente estadístico y no se puede aplicar a una molécula sola. El problema de la dirección del tiempo sigue sin ser resuelto en el nivel microscópico.

Regresemos al ejemplo del vaso que derrama su contenido. El agua en el vaso tiene una entropía relativamente baja y el charco una alta. Pero, en principio, se podría dar el caso en que los billones de moléculas que componen el charco adquieran tal movimiento que todas se junten y brinquen al interior del vaso. De acuerdo con las leyes de la física esto sí puede suceder. Si nunca se ha presenciado algo así es porque la probabilidad de que tal coordinación del movimiento molecular ocurra es extremadamente baja.

La probabilidad se puede medir con precisión. En un volado la probabilidad de ganar es de uno en dos, porque se escoge un resultado de dos posibles (águila o sol). Si se compra un boleto de la lotería y la rifa consta de 50 000 boletos la probabilidad de ganar el premio principal es de uno en 50 000. ¿Cuál es la probabilidad de que no se cumpla la segunda ley de la termodinámica? Se puede calcular, por ejemplo, que la probabilidad de que el agua de un charco se junte y salte súbitamente es de uno en... un número tan grande que se necesitarían ¡billones de billones de cifras para escribirlo!²¹  Es decir que los milagros también ocurren en la física, pero son muchísimo menos probables que ganar la lotería.

En sentido estricto, la segunda ley estipula que es abrumadoramente más probable que la entropía aumente, pero no excluye la posibilidad de milagros. Si la única forma de definir la dirección del equipo es por medio de la segunda ley, entonces

la conclusión es que la distinción entre pasado y futuro se aplica sólo a conjuntos muy grandes de partículas y es una cuestión de suerte, aunque la suerte esté muy inclinada hacia un lado. En resumen, la simetría entre pasado y futuro no ocurre en el nivel cuántico. Los fenómenos cuánticos satisfacen la llamada simetría T.

CPT

Y así tenemos tres simetrías fundamentales: C, P y T. A partir de los años cincuenta, sabemos que C y P no son simetrías válidas, pero una combinación de ellas sí lo es. Pero, además, con base en consideraciones extremadamente generales se puede demostrar matemáticamente que cualquier fenómeno físico, independiente de la clase de interacción, debe satisfacer una combinación de simetrías C, P y T. Éste es el importante *teorema CPT*.

Si en nuestro universo intercambiamos partículas, invertimos la dirección del tiempo y miramos el resultado en un espejo, lo que veríamos es un universo que se comporta exactamente como el nuestro. Esto, por supuesto a nivel cuántico, donde no existe una dirección del tiempo privilegiada.

Las interacciones débiles violan las simetrías C y P por separado, pero no las dos combinadas. En un decaimiento beta, por ejemplo, el proceso de transformación de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino, visto en un espejo, tiene exactamente el mismo comportamiento que el decaimiento de un antineutrón en un antiprotón, un positrón y un neutrino.

El hecho de que se conserve la combinación de simetrías C y P implica, por el teorema CPT, que se conserva la simetría T por separado. Para que haya una distinción entre pasado y futuro se

debe encontrar algún fenómeno en el que se viole la simetría CP lo cual no parecía ocurrir hasta hace algunos años.

En 1964 un grupo de físicos de la Universidad de Princeton descubrió el primer fenómeno microscópico en el que existe una dirección privilegiada del tiempo. El llamado *mesón K*, una partícula elemental cuya vida promedio es de apenas una cienmillonésima de segundo, decae en tres partículas más ligeras, pero el proceso inverso en el tiempo no ocurre. Dicho más precisamente el antimesón K visto en un espejo no decae como el mesón K cuando se viola la simetría CP.

Hasta la fecha no se ha encontrado ningún otro proceso microscópico en el que aparezca una dirección del tiempo. Sin embargo, los físicos esperan que el fenómeno del mesón K, por muy insignificante que parezca, pueda dar la clave para comprender la dirección del tiempo.

La simetría T ha dado lugar a varios malentendidos. En efecto, debido a la simetría CP las antipartículas se comportan como si fueran partículas que se mueven hacia atrás en el tiempo. Esto ha hecho creer a cierta gente que la antimateria tiene la dirección del tiempo invertida; por ejemplo, en una hipotética galaxia de antimateria ¡el tiempo transcurriría al revés con respecto a nosotros! Sin embargo, como ya señalamos, la dirección del tiempo no tiene importancia para las partículas elementales y sólo se manifiesta en sistemas compuestos. La ley del aumento de la entropía no distingue entre materia y antimateria.

El mundo microscópico de las moléculas y átomos está regido por las leyes de la física *cuántica*. Pero el nivel intermedio, que se encuentra situado entre el mundo cuántico y el mundo microscópico de nuestra experiencia diaria es todavía un terreno poco conocido. Es posible que sea en ese ámbito de transición,

entre lo grande y lo extremadamente pequeño, donde cobre sentido la dirección del tiempo. Sea como fuere el problema del sentido del tiempo tiene implicaciones muy profundas y aun está lejos de haber sido resuelto satisfactoriamente.

Por otra parte, la asimetría entre pasado y futuro, que está relacionada con una asimetría en el comportamiento de la materia y de la antimateria, podría influir drásticamente en la creación de la materia. Volveremos a este problema en el capítulo dedicado a la creación del Universo.

V. MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

LA GRAN UNIFICACIÓN

EL ÉXITO de Weimberg y Salam para unificar las interacciones eléctricas y débiles hizo renacer el viejo sueño de llegar a una teoría que unifique todas las interacciones. El hecho de que Einstein haya fracasado en su intento por unificar la gravitación con el electromagnetismo parecía indicar que la interacción gravitacional es la más difícil de tratar, así que ¿por qué no intentar primero unificar las interacciones fuertes con las electrodébiles y dejar la gravedad para una mejor ocasión? El ideal se conoce como *Teoría de la Gran Unificación* (TGU).

Recapitulemos lo que debería unificar tal teoría: las interacciones de color entre cuarks, mediadas por gluones, y las interacciones electrodébiles entre leptones y cuarks, mediadas por fotones y partículas W y Z.

En los años setenta surgieron varias propuestas acerca de la TGU. Su elemento común es la hipótesis de que existen partículas extremadamente masivas, a las que se llamó *partículas X*; que son responsables de mediar entre los leptones, los cuarks y los gluones. Estas partículas X serían partículas W y Z que, recordemos, adquieren sus masas de un campo de Higgs.

Para que la teoría funcione tales partículas X hipotéticas deberían obtener su masa a partir de... ¡otros campos de Higgs! Tendrían una masa de unos 10^{-10} gramos, lo cual equivale a la

masa de ¡trillones de protones! Y la vida media de tales partículas sería de apenas unas 10^{-38} segundos.

El campo de Higgs para estas partículas dejaría de actuar a una temperatura de unos 10^{27} grados Kelvin. Por arriba de esa temperatura las interacciones fuertes no serían distinguibles de las electromagnéticas y débiles. Al igual que en la teoría de Weinberg-Salam se produciría un cambio de fase a la temperatura mencionada y, por abajo de ella, las interacciones fuertes se separarían de las electrodébiles.

Tales temperaturas sólo pudieron existir en los primeros instantes después de la Gran Explosión, como veremos en el capítulo VII. Crear partículas X en la Tierra está completamente fuera de toda posibilidad práctica. Los grandes aceleradores construidos en la actualidad apenas pueden generar partículas W y Z, que son "sólo" 100 veces más masivas que un protón. Entonces, ¿las teorías de la Gran Unificación están condenadas al ámbito únicamente de la cosmología? Afortunadamente se conoce al menos una dirección que no está totalmente fuera de la tecnología actual.

DECAIMIENTO DEL PROTÓN

Una de las predicciones más importantes de la TGU es que el protón no es eterno; su vida promedio debería ser de unos 10^{31} años. De acuerdo con la teoría mencionada un protón puede decaer espontáneamente en un positrón y un pion.

Hasta donde se sabe el protón es una partícula estable ya que aislado, no se transforma en ninguna otra partícula. También un electrón es absolutamente estable y, aislado, nunca decae. Por ello la materia es indestructible.

Si el protón no es una partícula eterna, ¿cuánto vive en promedio? Hace algunos años los físicos decidieron comprobar con experimentos si esta partícula es eterna. El motivo no era sólo curiosidad sino confirmar la Teoría de la Gran Unificación mencionada en la sección anterior.

Evidentemente no podemos esperar un billón de trillones de años para comprobar si los protones se transforman en positrones. Sin embargo, ésta es una edad promedio. La vida de un ser humano, por ejemplo, es de unos 70 u 80 años en promedio, pero esto no implica que todos mueran a esa edad; unos viven más y otros menos; incluso puede darse el caso de muertes prematuras. Lo mismo sucede con los protones: en un conjunto de un billón de trillones de estas partículas, uno al año desaparecerá en promedio por muerte muy prematura.

En los años ochenta se empezó a practicar una serie de experimentos destinados a descubrir el decaimiento de un protón. La idea básica era colocar detectores de positrones en una gran cantidad de agua y esperar la aparición de una de estas partículas. En la práctica se necesitan varios miles de toneladas de agua para detectar unos cuantos decaimientos al año de protones en positrones y piones. Además, el agua debe colocarse a gran profundidad debajo de la tierra para evitar toda contaminación por los rayos cósmicos provenientes del espacio, entre los cuales también se encuentran positrones. Así, para detectar la muerte de los protones se utilizaron minas abandonadas: una en Ohio y otra en Dakota del Sur, en los EUA, otra mina en Japón, una más en un túnel debajo de los Alpes, etcétera.

La búsqueda fue larga y difícil, pero todos los experimentos convergen, hasta ahora, en una conclusión unánime: no se ha detectado ningún decaimiento de protón. Con base en los expe-

rimentos más recientes, su vida media debe exceder 3×10^{32} años.

Este límite inferior para la vida promedio del protón descarta la versión original y más sencilla de la TGU. Sin embargo, una forma modificada de la teoría todavía podría ser compatible con el resultado de los experimentos. Por ahora, la TGU es una hipótesis, aunque sus implicaciones para la cosmología son sumamente interesantes.

Para todo fin práctico podemos afirmar que el protón es estable y, por lo tanto, la materia es eterna. Pero ¿qué pasaría si el protón no fuera estrictamente eterno? Su vida media podría ser, por ejemplo, 10^{34} años, lo cual todavía no está descartado por los resultados experimentales. En tal caso, podemos especular que, dentro de 10^{34} años la materia en el Universo empezará a degradarse. Los protones se transformarán en positrones. Estas partículas, a su vez, al entrar en contacto con los electrones se aniquilarán totalmente transformándose en luz. Finalmente el Universo ya no contendrá materia sino sólo luz ¡Imposible imaginar un Universo más aburrido! Queda la posibilidad de que, antes de que suceda esto, el Universo se colapse sobre sí mismo para renacer con nueva y fresca materia, lo cual podría ser factible según la cosmología moderna. Pero para nuestra experiencia mundana podemos estar seguros de que la materia es, prácticamente, eterna.

¿GRAVEDAD CUÁNTICA?

Aún no sabemos si tiene sentido una Gran Unificación como la mencionada antes, pero mientras se aclara esta duda podemos preguntarnos si la gravedad podría entrar en algún esquema de unificación. ¿Quizás exista una temperatura de la cual las cua-

tro interacciones fundamentales de la naturaleza se encuentran unificadas? Esto, hasta ahora, es una especulación. El principal escollo es que no tenemos ninguna idea clara de cómo se comporta la gravedad a nivel cuántico.

Para ubicar el problema veamos cuáles son los límites de la relatividad general. Para ello, recordemos que las dos constantes que entran en esta teoría son G ; la constante de Newton, y c , la velocidad de la luz. En una teoría cuántica de la gravitación, sea cual fuere su forma, tendría que aparecer también otra constante fundamental para incluir los efectos cuánticos: ésta sería h , la constante de Planck.

G , c , y h son las tres constantes fundamentales de la naturaleza y sus valores se han determinado experimentalmente. El mismo Planck se dio cuenta de que es posible combinarlas entre sí para obtener unidades de longitud, tiempo y masa. En efecto, la combinación:

$$\sqrt{G/hc^3}$$

tiene unidades de longitud y vale unos 10^{-33} centímetros; del mismo modo, la combinación:

$$\sqrt{G/hc^5}$$

tiene unidades de tiempo y equivale a unos 5×10^{-44} segundos; por último, la combinación:

$$\sqrt{hc/G}$$

tiene unidades de masa y equivale a unos 5×10^{-5} gramos. La longitud y el tiempo de Planck son las unidades naturales de un nivel de la realidad aún desconocido, muchísimo más pequeño que el mundo cuántico. Para tener una idea sencilla: el tamaño

más común de un átomo es de unas 10^{25} longitudes de Planck. En el mundo de Planck, la fuerza gravitacional vuelve a ser de fundamental importancia: los fenómenos cuánticos y gravitacionales se relacionan íntimamente entre sí, y ni la mecánica cuántica ni la relatividad general son válidas por sí solas.

La creencia más difundida es que la relatividad general se aplica en distancias e intervalos de tiempo mucho mayores que la longitud y el tiempo de Planck, del mismo modo que la mecánica de Newton es válida para objetos mucho más grandes que un átomo. Por otra parte, la masa de Planck es muchísimo mayor que la masa de cualquier partícula elemental; se piensa que esta masa esta relacionada con la energía necesaria para "romper" una partícula elemental, energía que queda completamente fuera de todas nuestras posibilidades tecnológicas.

Si el campo gravitacional es, en realidad, una curvatura del espacio-tiempo debemos suponer que en el mundo de Planck, donde dominan los efectos cuánticos y gravitacionales, el espacio-tiempo posee fluctuaciones cuánticas como cualquier campo. Así como los océanos presentan aspecto llano y tranquilo desde el espacio exterior pero poseen olas, turbulencias y tormentas a escala humana, el espacio-tiempo parece liso a gran escala pero es extremadamente turbulento en el nivel de Planck.

Las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo debieron manifestarse en toda su plenitud durante los primeros instantes del Universo. Según una hipótesis muy popular en la actualidad, las mismas galaxias tuvieron su origen en esas fluctuaciones cuánticas, cuando la edad del Universo era comparable al tiempo de Plank. Volveremos a este tema en el capítulo VIII.

Prácticamente desde que la mecánica cuántica tomó la forma con que se la conoce actualmente muchos físicos intentaron

crear una teoría cuántica de la gravitación. A pesar de varios intentos interesantes todavía no se tiene una respuesta convincente. La gravitación cuántica es el gran hueco en la física de las interacciones fundamentales. Incluso algunos se han preguntado si tiene sentido hablar de la gravitación a nivel cuántico: ¿quizás esta fuerza fundamental es incompatible con la mecánica cuántica?, ¿quizás la gravedad es una manifestación de otro fenómeno insospechado...? Todas éstas son dudas aún sin resolver. Mientras, es justo señalar que ha habido varios intentos por cuantizar la gravedad. El más reciente tiene que ver con lo que se conoce como *teoría de las supercuerdas*, la cual reseñaremos brevemente a continuación.

LAS SUPERCUERDAS

A principio de los años setenta algunos físicos tuvieron la idea de concebir cada partícula elemental como un cierto estado de una cuerda de tamaño subatómico. Esto sería el equivalente a una cuerda de guitarra que según la frecuencia de su vibración emite una nota y, cambia al variar la frecuencia. Siguiendo esta analogía las partículas elementales serían las distintas notas de cuerdas microscópicas.

Esta teoría era, más que nada, un modelo matemático que permitía resolver algunos problemas de cálculo a los que se enfrentaban los físicos teóricos. En realidad, pocos la tomaron en serio como una teoría fundamental de la naturaleza. Pero algunos años más tarde surgió una versión mucho más refinada de la teoría de las cuerdas que causó muchas expectativas entre la comunidad de físicos, pues sus proponentes prometían nada menos que explicar *toda* la física. Nos referimos a la teoría de las supercuerdas.

En primer lugar aclaremos que el prefijo *súper* se refiere a que la nueva teoría trata en un mismo nivel a los fermiones y a los bosones, los dos tipos fundamentales de partículas elementales. Fermiones y bosones tienen propiedades distintas y la clase de matemáticas necesaria para describir a uno u otro tipo de partículas es distinta. Cualquier teoría física que unifique las dos clases de partículas merece, para los físicos, el calificativo de *súper*.

Pero lo más peculiar de la teoría de las supermoléculas es que estos objetos existen en un espacio de muchas dimensiones. El número de dimensiones necesarias era nada menos que ¡24! en las primeras versiones de la teoría (posteriormente bajó a 10). Esto hubiera desanimado a cualquier físico, pero los autores de la teoría propusieron que nuestro mundo posee realmente más de cuatro dimensiones, de las cuales nosotros sólo vemos cuatro, por razones que explicaremos a continuación.

Como ya mencionamos en relación con la teoría de la relatividad, nuestro espacio posee tres dimensiones y, junto con el tiempo, forma el espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Es difícil concebir un espacio de más de tres dimensiones pero, por lo contrario, es muy sencillo visualizar espacios de menor dimensión. La superficie de la Tierra, por ejemplo, es un espacio de dos dimensiones; con los números, la longitud y la latitud, podemos especificar plenamente cualquier punto de ese espacio. Del mismo modo, una curva (piénsese por ejemplo en un hilo) es un espacio de una sola dimensión; cualquier punto sobre una curva se puede determinar con un único número, que puede ser la distancia desde un punto fijo. Y, finalmente, un punto es un espacio de cero dimensiones.

Imaginemos un hilo delgado que, como ya sabemos, es un espacio de una sola dimensión. Pero esto es relativo ya que, para

una pulga, un hilo tiene una superficie y esa superficie es un espacio de dos dimensiones. La pulga puede pasearse a lo largo del hilo y también puede darle la vuelta para regresar al mismo punto. En cambio el único movimiento que ve un humano es a lo largo del hilo. Otro ejemplo: la Tierra es un cuerpo de gran tamaño para nosotros pero, a escala del Universo, es apenas un punto, un espacio de cero dimensiones.

Estos ejemplos ilustran el hecho de que el número de dimensiones depende de la escala considerada, siempre que sea posible "dar la vuelta" al espacio moviéndose en una o más direcciones. En ese caso, el número total de sus dimensiones no se manifiesta más que a escalas suficientemente pequeñas, escalas comparables con el radio del espacio.

Ahora bien, de acuerdo con la teoría de las supercuerdas nuestro espacio tiene muchas dimensiones, pero de éstas, sólo cuatro se manifiestan en nuestra experiencia diaria. Para percibir las otras dimensiones sería necesario "ver" distancias extremadamente pequeñas: ¡del tamaño de la longitud de Planck! Y ese es también el tamaño aproximado de una supercuerda.

Las supercuerdas causaron mucho revuelo a mediados de los años ochenta. Algunos físicos muy optimistas anunciaban ya la solución final a todos los problemas de la física teórica. La teoría pretendía describir todas las fuerzas de la naturaleza, desde la fuerza gravitacional que gobierna el movimiento de las estrellas y los planetas hasta las fuerzas nucleares que se manifiestan sólo en los núcleos atómicos, pasando por las fuerzas eléctricas y magnéticas.

Desafortunadamente, a pesar de un inicio muy prometedor la teoría se ha topado con serias dificultades debidas al enorme aparato matemático que necesita, cuya complejidad no permite tener una imagen intuitiva de lo que realmente está pasando. La

principal dificultad es que las primeras *notas* de las supercuerdas corresponden a partículas cuya masa es comparable a la masa de Planck, y quedan, por lo tanto, fuera de toda posibilidad de ser detectadas. En cuanto a la masa de las partículas comunes se tiene que recurrir a un mecanismo del tipo de un campo de Higgs para explicar por qué hay partículas masivas como un electrón o un cuark, así que, en ese aspecto, la teoría de las supercuerdas no ha aportado nada todavía. Pero algo quedará; por lo menos una nueva visión del mundo subatómico.

VI. EL UNIVERSO

EL OBJETIVO de este capítulo es presentar algunos conceptos básicos de la tecnología moderna,²² con los cuales estaremos listos para abordar, en el siguiente capítulo, la historia del Universo en sus primeros instantes, y su origen a partir de los campos cuánticos.

ESTRELLAS, GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

Antes de iniciar nuestro rápido viaje mental por el Universo definamos una unidad de medida. Para medir las distancias cósmicas utilizaremos el año luz. Esta es la distancia que recorre la luz en un año. Siendo la velocidad de la luz 300 000 kilómetros por segundo, un año luz equivale a unos 9 460 000 000 000 kilómetros.

A la velocidad de la luz es posible dar siete vueltas y media a la Tierra en solo un segundo, y llegar a la Luna en un segundo y fracción. Un rayo de luz emitido por el Sol tarda unos ocho minutos en llegar a la Tierra y aproximadamente una hora en llegar a Plutón, el planeta más distante en el Sistema Solar. Pero para las distancias características del Universo, la luz es bastante lenta; la estrella Alfa *Centauri* una de las más cercanas a nosotros, se encuentra a la distancia de cuatro años luz, lo cual quiere decir que la luz emitida por esa estrella tarda cuatro años en llegar hasta nosotros (actualmente la estamos viendo como era hace cuatro años). Pero Alfa *Centauri* es nuestra vecina cercana...

Las estrellas se agrupan en galaxias, que son conjuntos de miles de millones de estrellas. Nuestro Sol es una estrella entre

tantas otras y forma parte de una galaxia a la que llamamos Vía Láctea. La distancia del Sol al centro de nuestra galaxia es de unos 30 000 años luz, y un rayo de luz tardaría 100 000 años en recorrer la Vía Láctea de un extremo al otro. Pero aún estas son distancias mínimas comparadas con la vastedad del Universo.

La galaxia de Andrómeda es la vecina de la Vía Láctea y se encuentra a una distancia de 2 000 000 años luz. Nosotros la vemos hoy tal como era hace 2 000 000 años, cuando todavía no había hombres sobre la Tierra.

También las galaxias tienden a formar grupos que los astrónomos llaman cúmulos de galaxias: la Vía Láctea, Andrómeda y algunas otras galaxias más están agrupadas en el llamado Grupo Local. El cúmulo de Virgo por ejemplo, se encuentra a 30 000 000 años luz.

Hasta hace algunos años los astrónomos creían que los cúmulos de galaxias están distribuidos más o menos uniformemente por todo el Universo. Sin embargo, nuestra imagen del Universo ha cambiado progresivamente. Ahora sabemos que los cúmulos de galaxias tienden a agruparse en supercúmulos que llegan a medir unos 100 000 000 años luz. Pero lo más sorprendente es que, entre un supercúmulo y otro, existen enormes huecos de más de 200 000 000 años luz sin una sola galaxia visible. Muy recientemente se ha descubierto que la estructura del Universo a gran escala recuerda una esponja o una espuma jabonosa.

EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

Los datos anteriores respecto, a las dimensiones del Universo eran totalmente desconocidos hasta principios del siglo XX. Si bien a partir del siglo XVII, los astrónomos habían encontrado

diversos métodos para medir la distancia a las estrellas más cercanas, no tenían ninguna idea de la extensión real del Universo. Lo que ahora identificamos como galaxias se ven, a través de un telescopio sencillo, como pequeñas manchas luminosas. A estas manchas los astrónomos las llamaron nebulosas. Ya a fines del siglo XVIII el gran filósofo Immanuel Kant había propuesto que algunas de esas nebulosas son conglomerados de millones de estrellas, semejantes a nuestra Vía Láctea, y que si se ven extremadamente pequeñas es debido a las enormes distancias a que se encuentran. Pero en la época de Kant esto no pasaba de ser una especulación.

En 1908 se inauguró el observatorio astronómico del Monte Wilson, en California, que contaba con el telescopio más grande del mundo en esa época. Uno de los primeros astrónomos en utilizarlo fue Edwin Hubble, quien encontró una manera confiable para medir la distancia a la nebulosa de Andrómeda. Existen ciertas estrellas, llamadas *cefeidas*, que varían su brillo con un periodo muy regular que suele ser de unos cuantos días. Lo interesante es que existe una relación directa entre el periodo de una cefeida y su brillo intrínseco. Este hecho es muy importante porque si se conoce el brillo intrínseco de una estrella (o de cualquier cuerpo luminoso) y se compara con su brillo aparente se puede determinar su distancia. La razón es que el brillo disminuye inversamente al cuadrado de la distancia: si un foco se coloca a una cierta distancia y otro, de la misma potencia, a una distancia doble, este segundo se verá cuatro veces menos brillante; y si está tres veces más lejos, se verá nueve veces menos brillante, y así sucesivamente.

Hubble logró detectar estrellas cefeidas en la nebulosa de Andrómeda y de ahí dedujo sus distancias comparando el brillo aparente con el observado. Resultó que esta galaxia se encuen-

tra a 2 000 000 años luz, y que su verdadero tamaño es comparable a nuestra propia Vía Láctea. La hipótesis de Kant se había confirmado plenamente.

Hubble también pudo medir, con diversas técnicas, la distancia a otras muchas galaxias, cada vez más lejanas. Pero, además, estudió la luz emitida por éstas y se encontró con un hecho sorprendente. No sólo se revelaba un Universo muchísimo más vasto de lo que se había sospechado hasta ahora mismo, además, un Universo en plena expansión.

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

La luz del Sol está constituida por una mezcla de todos los colores. Cuando un rayo solar pasa por un prisma se descompone en los colores del arco iris debido a que el cristal desvía la trayectoria de los rayos luminosos, pero la desviación es generalmente distinta para cada longitud de onda. Un examen más detallado revela que, superpuestas sobre los colores del arco iris, se encuentran una serie de rayas brillantes u oscuras a las que se les denomina *líneas espectrales*. Estas líneas se deben a que los átomos a través de los cuales pasó la luz absorben o emiten luz con una longitud de onda muy bien definida; a su vez, esta longitud de onda corresponde a una posición muy precisa en el arco iris.

Cada elemento químico está caracterizado por su *espectro*, que es el conjunto de líneas espectrales que lo caracterizan y permiten determinar la composición del material que emitió la luz. El descubrimiento de las líneas espectrales en el siglo XIX fue crucial, pues el estudio de la luz emitida por cualquier objeto, terrestre o celeste, permitió determinar de qué elementos químicos está constituido.

La longitud de onda de una línea espectral cambia si la fuente emisora de la luz está en movimiento. Este fenómeno, conocido como *efecto Doppler*; ocurre tanto para una onda sonora como para una onda luminosa. En el caso del sonido se manifiesta, por ejemplo, con el sonido de la sirena de una ambulancia: cuando ésta se acerca, la sirena se oye más aguda y cuando se aleja el mismo sonido se escucha grave. Lo que sucede es que la longitud de una onda, tanto sonora como una luminosa, se acorta o se alarga según si su emisor se acerca o se aleja (Figura 11).

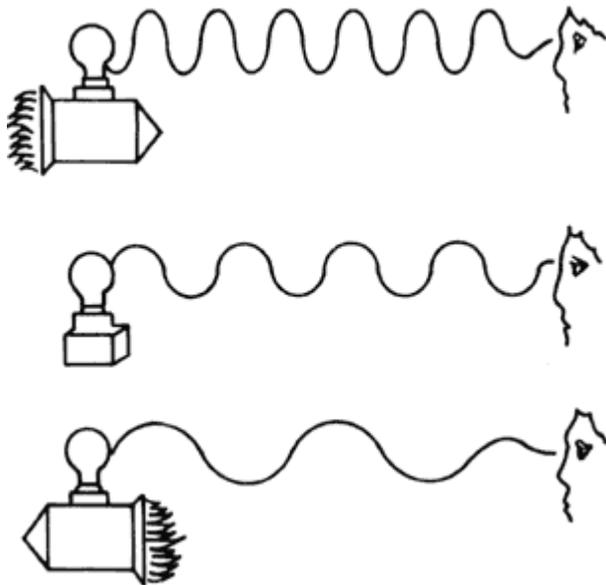


Figura 11. El efecto Doppler.

Volviendo a las galaxias Hubble estudió la luz que emiten las estrellas en las galaxia lejanas y descubrió que las líneas espec-

trales están sistemáticamente corridas hacia el lado rojo del espectro. De acuerdo con el efecto Doppler esto implica que todas las galaxias, se alejan de nosotros. Pero el descubrimiento más sorprendente fue que esa velocidad de recesión es directamente proporcional a la distancia de la galaxia. La implicación de este fenómeno es que el *Universo está en expansión*.

El hecho de que el Universo esté en expansión implica que, desde cualquier galaxia, se ve a las otras alejándose. Algunas veces se hace la analogía con la superficie de un globo que se está inflando. Si se pintan puntos sobre el globo la distancia entre cada punto aumenta, y la velocidad de separación entre dos puntos es mayor cuanto mayor es la distancia entre ellos.

En el caso de las galaxias la velocidad de separación aumenta en proporción en la distancia, lo cual se puede expresar con la sencilla fórmula:

$$V=H \times R$$

donde V es la velocidad de una galaxia, R su distancia y H la constante de Hubble.

La constante de Hubble es de fundamental importancia en cosmología, aunque es muy difícil de medir con precisión y sólo se conoce su valor aproximado. Se ha estimado que es de unos 30 kilómetros por segundo por cada 1 000 000 de años luz de distancia, aunque algunos astrónomos piensan que el valor correcto podría ser la mitad del mencionado.

La consecuencia más importante de que el Universo esté en expansión es que, alguna vez en el pasado, todo el espacio estaba concentrado prácticamente a una densidad infinita y todo el Universo era... ¡un punto! A partir de la velocidad de expansión medida es fácil determinar que tal situación ocurrió hace unos 15 o 20 000 000 000 de años aproximadamente. Si tal es

el caso entonces el Universo tuvo un principio y "nació" con una densidad de energía y una temperatura prácticamente infinitas. Esta es la teoría de la Gran Explosión. El comportamiento del Universo de acuerdo con la teoría de la Gran Explosión, el concepto de concentración infinita en un punto, y lo que puede ser antes de ese instante crucial son los temas que veremos en el resto de este libro.

LA CURVATURA DEL ESPACIO

La relatividad general, que tuvimos oportunidad de conocer en el capítulo I, llegó justo a tiempo para convertirse en el soporte teórico de la cosmología. Inicialmente, el mismo Einstein propuso un modelo cosmológico para resolver el viejo problema de si el Universo es finito o infinito. Einstein postuló que el espacio es, a gran escala, curvo como la superficie de una esfera. En ese sentido, nuestro Universo es finito pero sin fronteras, y es posible, en principio, dar la vuelta al Universo viajando siempre en línea recta.

De acuerdo con el modelo cosmológico original de Einstein el Universo era estático, es decir, sin movimiento. Sin embargo todas las estrellas y galaxias se atraen entre sí gravitacionalmente por lo que no es posible mantener inmóvil toda la materia en el universo. Para resolver este problema Einstein postuló que existe una especie de repulsión gravitacional a escala cósmica que mantiene en equilibrio al Universo; desde el punto de vista matemático tal repulsión sería la consecuencia de incluir un término adicional, la *constante cosmológica*, en las ecuaciones de la relatividad general. Empero, esto parecía más un truco matemático que una propiedad física real, y el mismo Einstein estaba insatisfecho de la modificación introducida en su teoría.

Pocos años después el físico ruso Alexander A. Fridman estudió las ecuaciones de la relatividad general, con y sin el término de la *constante cosmológica*, y encontró soluciones que describen un Universo en expansión: la distancia entre dos galaxias aumenta con el tiempo y la velocidad de separación es proporcional a la distancia entre las galaxias.

Al principio Einstein y sus colaboradores no le dieron importancia al trabajo de Fridman. Pero cuando Hubble anunció en 1929 su descubrimiento de que el Universo está en expansión, quedó manifiesto que los modelos de Fridman son los que describen adecuadamente el comportamiento a gran escala del Universo. El estudio de estos modelos fue retomado posteriormente por varios cosmólogos, entre los cuales destaca George Lemaître, quien fue uno de los fundadores de la teoría de la Gran Explosión.

LA RADIACIÓN DE FONDO Y EL FUEGO PRIMORDIAL

Así, si el Universo está en expansión su densidad de materia debió ser muchísimo mayor en el pasado. En los años cuarenta Georges Gamow propuso que, además de denso, el Universo también estaba extremadamente caliente en un principio. Esto permitiría que se formaran los núcleos atómicos de los elementos químicos por reacciones nucleares tal como sucede en una explosión nuclear, en la que el hidrógeno se transforma en helio. La hipótesis de Gamow ofrecía una explicación del origen de los elementos químicos que existen en el Universo. Aunque tuvo que ser modificada posteriormente, la idea básica de que la temperatura primordial del Universo era altísima es ampliamente aceptada en la actualidad por los partidarios de la Gran Explosión. Por lo pronto señalemos, para dar una idea de

magnitudes implicadas, que la temperatura cósmica debió ser de unos 1 000 000 000 de grados apenas un segundo después de la Gran Explosión.

De acuerdo con la teoría de la Gran Explosión la temperatura cósmica bajó a cerca de 5 000° K cuando la edad del Universo era de unos 500 000 años. Esta temperatura es crítica porque el hidrógeno, que es el elemento químico principal en el Universo, forma átomos sólo por debajo de tal temperatura. Por arriba de los 5 000° K los átomos chocan entre sí tan violentamente que los electrones se desprenden de los núcleos atómicos y, como resultado de este proceso, el gas queda formado por núcleos y electrones *libres*; en esa situación se tiene lo que se llama un *gas ionizado*. El hecho fundamental es que la luz interactúa levemente con los átomos, pero muy intensamente con los electrones libres. En consecuencia, una nube de hidrógeno no ionizado es tan transparente a la luz como el aire pero, por lo contrario, si está ionizado presenta el mismo aspecto que el fuego: brillante pero no transparente.

En resumen, en el principio era el *fuego primordial*. Ese fuego se apagó cuando la temperatura del Universo bajó a unos 5 000° K, y a partir de ese momento el espacio cósmico se volvió transparente. En el momento en que el hidrógeno dejó de estar ionizado la luz se volvió libre por primera vez y empezó a recorrer todo el Universo prácticamente sin obstáculos. Esa luz emitida por el fuego primordial y liberada 500 000 años después de la Gran Explosión es la que vemos actualmente como la radiación de fondo, proveniente de todas las regiones del firmamento.

El mismo Gamow calculó que la temperatura actual del Universo sería de unos cuantos grados sobre el cero absoluto, lo cual debería de observarse en la actualidad en forma de una

radiación de microondas proveniente homogéneamente de todas las regiones del Universo.

En 1965 los radioastrónomos A. A. Penzias y R. W. Wilson descubrieron una débil señal de radio ²³,  en una longitud de onda correspondiente a las microondas, que tenía todas las características predichas por Gamow. A partir de sus observaciones, Penzias y Wilson dedujeron que la temperatura actual del Universo es de unos 3° K.

La existencia de la radiación de fondo fue reconfirmada de manera espectacular en 1992 por medio de un satélite artificial llamado COBE; (*Cosmic Background Explorer*). El satélite permitió medir con enorme precisión la forma del espectro de la radiación —que es esencialmente una medida del número de fotones con cada longitud de onda— y el resultado concuerda plenamente con lo que se esperaba de ser correcta la teoría de la Gran Explosión. Más aún se ha podido fijar la temperatura del Universo en 2.73 grados Kelvin. Lo más sorprendente de esta radiación es su extrema homogeneidad en todas las direcciones en el cielo. En el próximo capítulo veremos con más detalle cómo se originó esta radiación así como sus importantes implicaciones.

El Universo presenta, a gran escala, un aspecto homogéneo que no depende de la posición o la dirección en que se mira. Esta propiedad es aún más manifiesta para la radiación de fondo. Los estudios más recientes de hechos con satélites artificiales revelan que esta radiación es absolutamente homogénea en todas las direcciones observadas con una precisión de hasta una parte en 10 000. Por debajo de ese nivel de homogeneidad se han detectado pequeñas variaciones que podrían corresponder a galaxias en proceso de formación durante la época del fuego

primordial (hablaremos más de este tema en los siguientes capítulos).

LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

Si el Universo está en expansión es natural presentarse: ¿se expandirá para siempre o se detendrá en algún momento? Esto depende esencialmente de la densidad de materia en el Universo. Todos los cuerpos se atraen entre sí por medio de la fuerza de gravedad; a gran escala esto implica que la expansión del Universo se enfrena poco a poco debido a que las galaxias se atraen entre sí. ¿Es esa atracción suficiente para frenar totalmente el Universo? De acuerdo con los cálculos basados en la teoría de la relatividad el Universo detendrá por completo su expansión y empezará a colapsarse sobre sí mismo si la densidad actual de materia excede de un cierto valor crítico; en caso contrario la velocidad de expansión irá disminuyendo gradualmente con el tiempo, pero sin llegar jamás a anularse.

De acuerdo con los cálculos basados en la teoría de Einstein el valor preciso de esta densidad crítica, correspondiente a la actualidad, está dada por la cantidad $3H^2/8\pi G$, donde H es la constante de Hubble y G la constante de la gravitación de Newton, y equivale a unos 10^{-29} gramos por centímetro cúbico — algo así como 10 átomos de hidrógeno por metro cúbico.

La densidad crítica que hemos mencionado parece extremadamente baja (muchísimo menos de la que se obtiene en la mejor cámara de vacío en Tierra), pero no hay que olvidar que estamos hablando de una densidad promedio y que el vacío casi absoluto domina el Universo, siendo las concentraciones de materia como las estrellas y los planetas puntos prácticamente insignificantes. Los astrónomos han calculado que la materia

visible en el Universo, es decir, aquella que se encuentra en las estrellas y las nubes de gas brillante —la única que se puede observar directamente— contribuye con menos de la centésima parte de la densidad crítica. Esto implica que si la mayor parte de la materia del Universo es la visible entonces la expansión cósmica proseguirá eternamente. Pero bien podría ser que el Universo esté lleno de alguna materia opaca que sencillamente no sea visible. De hecho, se tienen evidencias indirectas de que la masa de las galaxias es mucho mayor que lo inferido únicamente en las estrellas brillantes que las componen.

La naturaleza de esa masa invisible, si realmente existe, es uno de los problemas más importantes de la cosmología moderna.

LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

El elemento químico más abundante en el Universo es el hidrógeno, que constituye la mayor parte de la materia, seguido por el helio. Esta afirmación parece sorprendente a primera vista porque en la Tierra existe una gran variedad de elementos químicos. Pero nuestro planeta es muy poco representativo de lo que se encuentra en el Universo.

En la Tierra se encuentran muchísimos otros elementos químicos, aparte del hidrógeno y helio (el primero se halla mezclado con oxígeno en las moléculas de agua, mientras que el segundo es, un gas muy escaso). Los demás elementos químicos terrestres, como el carbono, el hierro, el oxígeno, etc. deben tener un origen posterior al nacimiento de las primeras estrellas.

En la antigüedad los alquimistas trataban de cambiar un elemento en otro en sus hornos y alambiques. Soñaban con fabricar oro a partir del plomo y otros metales más comunes. Ahora sabemos que éste sueño alquimista es realizable en principio

pero no en un modesto laboratorio terrestre. Para transmutar un elemento químico en otro se necesitan temperaturas de miles de millones de grados.

Temperaturas de esa magnitud se dan en los centros de las estrellas. El Sol, por ejemplo brilla porque se producen enormes cantidades de energía en su centro al transformarse el hidrógeno en helio tal como lo hace una bomba de hidrógeno. De hecho, todas las estrellas son gigantescas bombas atómicas que funcionan continuamente durante millones o miles de millones de años (como dato tranquilizador, nuestro Sol tiene combustible para brillar unos 5 000 000 000 de años más). Cuando se agota el hidrógeno en el centro de una estrella ésta empieza a consumir otros elementos químicos: el helio se transforma en carbono, éste en oxígeno, etcétera.

Las estrellas masivas, que no son raras, son las que evolucionan más rápido y, finalmente, acaban en una gigantesca explosión: una *supernova*. Cuando esto sucede la explosión desparrama la materia de la estrella por todo el espacio interestelar formando gigantescas nubes que contienen prácticamente todos los elementos químicos. De esas nubes se forman, posteriormente, las estrellas con sus planetas, y quizás con sus seres vivos que los habitan. Prácticamente todos los elementos químicos, con la excepción del hidrógeno y del helio, se originaron en las estrellas. Los átomos de nuestros cuerpos provienen de los restos de estrellas que brillaron hace miles de millones de años.

Los astrónomos han calculado que la composición química original del Universo era de aproximadamente 75% de hidrógeno, 25% de helio y apenas una traza de otros elementos químicos. Justamente la teoría de la Gran Explosión predice que el helio primordial se formó en esa proporción a los tres minutos

de existencia del Universo —a una temperatura de 1 000 000 de grados Kelvin. Esta predicción teórica, que concuerda con los datos astronómicos es, junto con la radiación de fondo, uno de los soportes más fuertes de la teoría de la Gran Explosión.

VII. EL UNIVERSO INFLACIONARIO

DESPUÉS del paseo por el Universo presentado en el capítulo anterior estamos listos para reconstruir lo que pudo haber sido el principio del Universo. Antes de aventurarnos en teorías especulativas recordemos que la física actual reconoce explícitamente su ignorancia cuando se implican tiempos comparables al tiempo de Planck, que es de unos 10^{-44} segundos. No podemos, por lo tanto, pretender describir el Universo antes de ese tiempo. Sin embargo, esa limitación conceptual y teórica es extremadamente generosa, a tal punto que muchos físicos han resistido la tentación de construir teorías del Universo muy poco después del tiempo de Planck.

LOS PRIMEROS 10^{-34} SEGUNDOS DEL UNIVERSO

Comencemos, pues, no al tiempo cero, que no tiene sentido en una descripción cuántica, sino al tiempo de Planck, cuando la temperatura del Universo era la temperatura de Planck. Esta equivale a unos 10^{32} grados Kelvin y es la única temperatura que se puede construir combinando las tres constantes fundamentales de la naturaleza, G , c y h . En efecto, la energía de Planck es:

$$E = mpc^2$$

donde mp es la masa de Planck. A esta energía le corresponde una temperatura dada por

$$T = E/k$$

que es la temperatura de Planck. En esa última fórmula k es la constante de Boltzman que relaciona la temperatura de un gas con la energía promedio de las partículas que lo constituyen.

Pero, ¿temperatura de qué? ¿Acaso ya había partículas en el tiempo de Planck? ¡No había partículas todavía! *En el principio era el campo*. El campo vibraba y tenía energía, y esa energía era temperatura, y esa era la temperatura de Planck (no podía ser otra cosa). Más precisamente, había muchos tipos de campos, y sus vibraciones correspondían a partículas.

La creación del Universo, el tiempo cero, si es que hubo tal, esta escondida en el mundo aun inescrutable de Planck, cuando las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza estaban unificadas en una sola. Pero dejemos transcurrir un poco el tiempo para situarnos en un terreno ligeramente menos especulativo. Por debajo de la temperatura de Planck la gravitación se separó de las otras tres interacciones. De los 10^{-44} segundos hasta los 10^{-34} segundos el Universo se expandió y su temperatura bajó a unos 10^{27} grados Kelvin. Durante ese brevísimo periodo; si uno cree en la teoría de la Gran Unificación las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles no se habían separado aún. El campo de Higgs todavía no había actuado, por lo que las partículas X, las W y las Z eran partículas sin masa, al igual que los fotones.

Pero algo muy espectacular ocurrió a los 10^{-34} segundos. Al haberse expandido el Universo, su temperatura bajó a unos 10^{26} grados Kelvin, lo cual propició un cambio de fase, tal como lo explicamos en el capítulo VI. A esa temperatura el campo de Higgs asociado a las interacciones fuertes empezó a transmitir su energía a las partículas X y éstas adquirieron masa.

Lo crucial de este cambio de fase es que produjo una verdadera explosión que liberó enormes cantidades de energía a partir del

campo existente. A su vez, esta violenta explosión aceleró la expansión del Universo, de tal manera que el tamaño real entre dos puntos aumentó por un factor de 10^{80} o más en sólo 10^{-36} segundos; este es el periodo que se designa con el nombre de *inflación*. Se debe esencialmente a la existencia de un campo cuántico que produce un cambio de fase y separa las interacciones fuertes de las electrodébiles.

El Universo inflacionario es una consecuencia natural de la teoría de la Gran Unificación combinada con la cosmología relativista. En su versión más conocida, fue propuesta por Alan Guth en un artículo de 1980. El éxito de este modelo consiste en que resuelve de modo natural varios problemas de la cosmología moderna, dos de los cuales son el problema del horizonte y el de la densidad del Universo, como veremos a continuación.

Por lo pronto mencionemos que uno de los aspectos más interesantes del Universo inflacionario es la posibilidad de explicar por qué hay materia y no antimateria en el Universo contemporáneo. La idea es que las partículas X se tornaron más masivas durante el periodo de inflación y, después de breves 10^{-36} segundos, decayeron en partículas más estables: leptones y, cuarks. En un principio había exactamente el mismo número de partículas X y antipartículas X , pues la materia no gozaba de ningún privilegio con respecto a la antimateria. Sin embargo, debido a la pequeña asimetría entre materia y antimateria en las interacciones fundamentales (la no invariancia de CP que mencionamos en el capítulo IV), las partículas y antipartículas X no decayeron exactamente de la misma manera.

La teoría de la Gran Unificación predice que los protones se pueden destruir (véase capítulo V), pero también predice un proceso contrario por el que se pudieron formar ligeramente

más partículas que antipartículas. Éste es un hecho crucial, pues en algún momento posterior la materia y la antimateria en el Universo se aniquilarán y sólo quedará un pequeño excedente de materia. De hecho, si algún día se llegara a tener una teoría completa y confiable de la Gran Unificación se podría predecir teóricamente nada menos que la cantidad de materia creada en el Universo.

EL HORIZONTE DEL UNIVERSO

Uno de los principios fundamentales de la naturaleza es que ningún cuerpo o señal puede moverse a mayor velocidad que la luz. La energía para alcanzar tal velocidad es infinita, y sólo una partícula sin masa —como el fotón y posiblemente el neutrino— puede viajar a la velocidad de la luz.

Debido a esta limitación el Universo posee para nosotros un *horizonte* más allá del cual no podemos ver ni recibir influencia. En efecto, si el Universo se originó hace 15 000 000 000 de años luz, hoy en día veríamos la Gran Explosión a una distancia de 15 000 000 000 de años luz, distribuida homogéneamente en el cielo —aunque en realidad, la Gran Explosión estaría escondida detrás del fuego primordial (Figura 12). *Nuestro Universo visible* es una esfera centrada en nosotros y con un radio de 15 000 000 000 de años luz. Los límites de esta esfera marcan nuestro horizonte, más allá del cual ninguna región del Universo nos es accesible porque la luz que emitió todavía no nos llega. Además, cada posición en el Universo tiene su propio horizonte, que engloba desde allí a la observación.

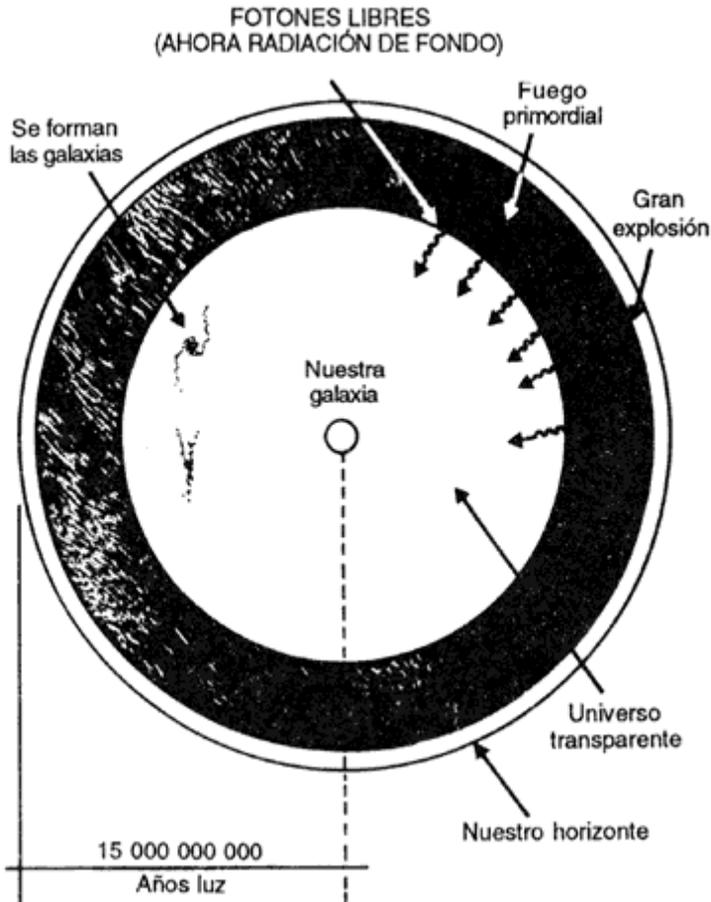


Figura 12. La gran explosión y el fuego primordial con respecto a nuestra posición en el Universo.

Si nos esperamos un tiempo suficiente podemos ver regiones cada vez más lejanas del Universo. Dentro de 10 000 000 000 de años nuestro horizonte será unos 10 000 000 000 de años luz más grande y se nos revelarán regiones del Universo de las que, por ahora, todavía no recibimos su luz.

Del mismo modo, el horizonte del Universo era más estrecho en el pasado remoto. Por ejemplo, mil años después de la Gran Explosión, el tamaño del horizonte era de unos 1 000 años luz. Y un segundo después el horizonte medía apenas unos 300 000 kilómetros; esto implica que en esa época una partícula no podía influir en otra que estuviera a más de 300 000 kilómetros de distancia, ya que nada puede viajar más rápido que la luz.

La existencia de un horizonte plantea un problema muy serio. Señalamos anteriormente que el Universo es extremadamente homogéneo a gran escala, ya que dos regiones muy alejadas del Universo presentan aspectos muy parecidos: la misma densidad de materia, la misma distribución de galaxias etc. Esta homogeneidad se aplica a todas las regiones dentro de nuestro Universo sumamente alejadas y en dos direcciones diametralmente opuestas, la separación actual entre ellas es de unos 30 000 000 000 de años luz. Esto implica que esas dos regiones nunca tuvieron tiempo de interactuar entre sí. Pero entonces ¿cómo pudieron "ponerse de acuerdo" para presentar la misma distribución de materia? Es cierto que en el pasado esas regiones estaban más cercas entre sí, pero también el horizonte era más estrecho y, de todos modos, no tuvieron tiempo de interactuar.

Para describir el problema de manera más precisa veamos qué predice la teoría de la relatividad general para la expansión del Universo y su horizonte. De acuerdo con las ecuaciones de esta teoría la distancia entre dos puntos en el Universo (pensemos, por ejemplo, en dos galaxias muy alejadas) aumenta con el tiempo en proporción a la edad del Universo elevado a la potencia $2/3$. Más precisamente, si la distancia actual de entre dos galaxias vale L_0 y la edad actual del Universo es t_0 , entonces la separación L entre esas mismas galaxias cuando la edad del Universo era t está dada por la fórmula:

$$L = L_0 (t/t_0)^{2/3}$$

Esta última fórmula es válida para épocas posteriores al fuego primordial. La expansión del Universo era un poco más lenta en el pasado, cuando ardía el fuego primordial. En aquel entonces la distancia aumentaba más bien en proporción a la raíz cuadrada de la edad del Universo, es decir,

$$L = L_0 (t/t_0)^{1/2}$$

Por lo que respecta al horizonte, se puede demostrar que el radio del horizonte R_H aumenta en proporción directa al tiempo transcurrido t . Más precisamente,

$$R_h = 3 ct$$

en la actualidad mientras que en la época del fuego primordial la relación era:

$$R_h = 2 ct$$

Los factores 3 y 2 en estas fórmulas se deben a que la curvatura y expansión del Universo alteran las distancias reales; el radio del horizonte resulta ser mayor que ct (que sería la distancia recorrida por la luz en un tiempo t en un universo sin expansión).

Lo importante de todo el asunto es que la distancia real entre dos galaxias aumenta como $t^{2/3}$ (o $t^{1/2}$ durante la época del fuego primordial), mientras que el radio del horizonte aumenta en proporción directa a t . Es decir, el horizonte aumenta más rápidamente que la distancia entre galaxias. Esto, a su vez, implica que el horizonte era más pequeño en el pasado, en comparación con la distancia real (véase la Figura 13).

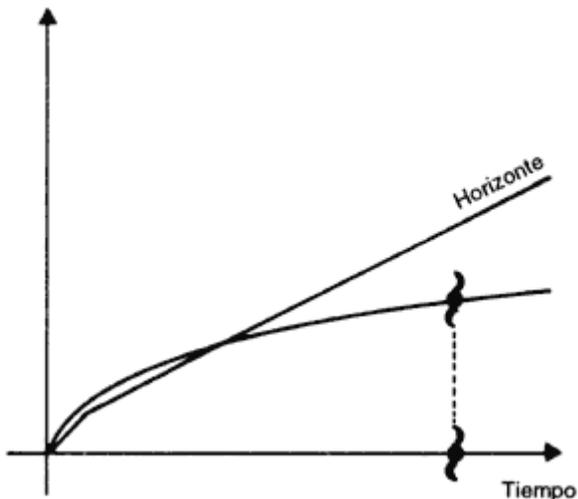


Figura 13. La evolución del horizonte y la distancia a una galaxia lejana según los modelos cosmológicos tradicionales.

Para dar un ejemplo, supongamos que una galaxia se encuentra en la actualidad a una distancia de 2 000 000 000 de años luz de nuestra galaxia. En el pasado, esa misma galaxia se encontraba a una distancia de 3.9 millones de años luz, cuando la edad del Universo era de 1.3 millones de años. Antes de esa misma época nuestro horizonte medía menos de 3.9 millones de años luz y, por lo tanto la galaxia estaba fuera del horizonte de la nuestra. Podemos decir que la galaxia en consideración *entró al horizonte* de nuestra galaxia al tiempo $t = 1.3$ millones de años. Antes, esa galaxia y la nuestra se encontraban en regiones del Universo que no pudieron influir una sobre la otra.

Ahora debe quedar claro por qué es tan extraño que el Universo sea homogéneo a gran escala. El modelo del Universo inflacionario proporciona una solución directa a este problema. La clave es que durante el periodo de inflación la distancia real entre dos puntos del Universo no aumentó como $t^{1/2}$ o $t^{2/3}$, co-

mo en el modelo clásico, sino *exponencialmente* como e^{HT} donde H es la constante de Hubble *durante el periodo de inflación*.²⁴ Esa "constante" mide la velocidad de expansión del Universo y debió ser enorme durante la inflación: la teoría predice que valía algo así como $M_x c^2/h$, donde M_x es la masa de una partícula X . Como consecuencia, todas las distancias aumentaron por un factor de 10^{80} en sólo 10^{-36} segundos. Además durante el mismo periodo de inflación el horizonte del Universo se mantuvo *constante*.

De acuerdo con el modelo del Universo inflacionario la evolución de la distancia y del radio del horizonte no es como la vimos anteriormente en la figura 13, sino que tiene la forma mostrada en la figura 14. Un vistazo a esta última muestra cómo el problema del horizonte queda resuelto. Todo lo que vemos dentro de nuestro horizonte en la actualidad estaba perfectamente contenido dentro del horizonte correspondiente a la época anterior a la inflación.

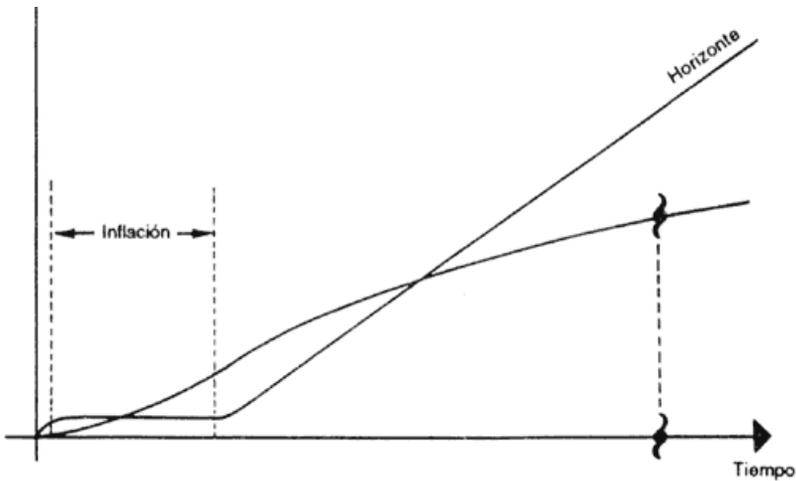


Figura 14. Evolución del horizonte y de la distancia a una galaxia lejana según el modelo del Universo inflacionario.

De hecho todo nuestro Universo actualmente visible estaba contenido originalmente en una región de sólo 10 centímetros justo antes de la inflación. Las regiones del Universo que se encuentran dentro de nuestro horizonte actual tuvieron tiempo de sobra para interactuar entre sí *antes* de la inflación. Es durante la inflación y un cierto tiempo posterior que ya no pudieron interactuar.

El modelo del Universo inflacionario implica que la estructura actual del Universo tuvo sus orígenes en las épocas anteriores a la inflación, muy cerca del tiempo de Planck. Este hecho tiene importantes consecuencias para la formación de galaxias, como veremos en el siguiente capítulo.

LA DENSIDAD DEL UNIVERSO

Otro de los problemas a los que se enfrenta la teoría de la Gran Explosión en su versión tradicional es el de la densidad del Universo. Al expandirse el Universo su densidad disminuye. En el capítulo anterior mencionamos que, dependiendo si esa densidad es menor o mayor que una densidad crítica, el Universo seguirá expandiéndose indefinidamente o no, y que la densidad medida por los astrónomos parece ser de un décimo o un centésimo de la densidad crítica correspondiente a la época actual (es importante notar que el valor de la densidad crítica disminuye con el tiempo, por lo que era mayor en el pasado).

En principio, la densidad del Universo en sus primeros segundos de existencia pudo tener cualquier valor. Los cálculos predicen que si la densidad en esas épocas remotas hubiera sido un poco mayor que la crítica correspondiente a esa época, el Uni-

verso se habría expandido durante algunos segundos para luego volverse a colapsar.

Del mismo modo, si la densidad inicial hubiera sido ligeramente menor que la crítica, la expansión del Universo habría seguido eternamente, pero en la época actual la materia en el Universo estaría diluida a una densidad billones o trillones de veces más baja que la que observamos en la actualidad.

En otras palabras para que la densidad actual del Universo sea de un décimo o un centésimo de la densidad crítica actual se necesita que la densidad algunos segundos después de la Gran Explosión haya sido la crítica de aquella época con una exactitud increíble; cuando mucho un error de una parte en 10^{40} . Cualquier desviación mayor que esa con respecto al valor crítico habría originado un Universo radicalmente distinto al que observamos.

Lo anterior se debe a que el Universo que tenga precisamente la densidad crítica es un Universo inestable. Un ejemplo muy sencillo de un sistema mecánico estable es una canica que rueda sobre una cuerda. Para mantener la canica un buen trecho sobre la cuerda se debe ajustar su posición y velocidad iniciales con una precisión extrema. Cualquier ligera desviación inicial repercute en que la canica se caiga de la cuerda. El Universo es semejante a la canica: cualquier pequeña diferencia inicial de su densidad con respecto a la crítica hubiera cambiado drásticamente su evolución posterior.

El problema consiste, entonces, en explicar por qué el Universo poseía la densidad crítica en el pasado con una precisión de una parte en 10^{40} . Hasta antes de que apareciera el modelo del Universo inflacionario sencillamente no se tenía una explicación. La inflación, sin embargo, resuelve este problema de manera natural. Resulta que como consecuencia de la expansión tan

violenta producida por la inflación, el Universo adquiere una densidad que es prácticamente la crítica correspondiente a esa época, independientemente de cualquier densidad que haya tenido antes de la inflación.

Así, si realmente ocurrió la inflación, la densidad actual del Universo debería ser justamente la crítica. Pero ya señalamos antes que la materia luminosa observada implica apenas una centésima de la cantidad de materia que debería de haber en un universo con densidad crítica. Por otra parte, mencionamos en el capítulo anterior que hay evidencias de que existe más masa que la visible. Si la hipótesis de la inflación es correcta debemos deducir que vemos apenas una centésima parte de la masa que existe en el Universo. ¿De qué está hecha la masa invisible? Este es uno de los grandes problemas de la cosmología actual; hasta ahora se conocen dos posibles respuestas.

La primera posibilidad es que la masa invisible se deba a materia común, hecha de protones y neutrones —es decir, materia bariónica. El Universo podría estar hecho de meteoritos, asteroides, pequeños planetas, estrellas aplanadas (incluyendo hoyos negros), todos ellos objetos que no emiten ninguna luz y que, por lo tanto, son imposibles de descubrir desde nuestro planeta. Hasta ahora no se tiene ninguna idea de qué tan abundantes podrían ser esos cuerpos en el espacio cósmico.

La segunda posibilidad que es más atrevida, es que la masa faltante se deba a partículas *fantasmas* que no interactúan normalmente con la materia común. Ya tuvimos ocasión de conocer una partícula así: el neutrino, que, por no interactuar electromagnéticamente, es invisible y prácticamente intangible. En principio podrían existir partículas masivas que sólo interactuarán con la materia mediante la fuerza gravitacional. Tales partículas serían absolutamente imposibles de detectar en un

laboratorio terrestre, pero se manifestarían a escala cósmica por su influencia gravitacional. La masa faltante podría encontrarse en grandes concentraciones de estas partículas fantasmas, unidas gravitacionalmente a las galaxias.

De hecho, uno de los primeros candidatos para la materia invisible fue el neutrino si bien se cree que la masa de los neutrinos es cero, los experimentos sólo imponen un límite superior a esa posible masa. Ese límite es del orden de unos 10^{-33} gramos, que es apenas una cienmilésima parte de la masa de un electrón. Por otra parte, el Universo se encuentra repleto de neutrinos al igual que de fotones provenientes del fuego primordial. Si estos neutrinos tuvieran masa, podrían explicar una fracción de la materia invisible, pero no toda.

Si bien parece una posición muy especulativa, la existencia de partículas fantasmas masivas ha sido considerada seriamente por los cosmólogos. Tales partículas podrían desempeñar un papel fundamental en la formación de las galaxias, como veremos en el siguiente capítulo.

VIII. CONSECUENCIAS DE LA INFLACIÓN

LA SOPA DE CUARKS

DESPUÉS de la inflación ya no había partículas X en libertad, pues éstas se habían transformado en leptones y cuarks. El Universo era una sopa homogénea de cuarks, gluones, leptones, partículas W y Z , y fotones, todos chocando entre sí a enormes velocidades transformándose continuamente unas en otras. En esas épocas remotas, cuando la temperatura todavía estaba por arriba de unos 10^{16} grados Kelvin, las interacciones electro-magnéticas y débiles aún no se separaban. Pero a 10^{15} grados Kelvin el campo de Higgs asociado a las partículas W y Z transmitió su energía y estas partículas adquirieron masa. En ese momento, las interacciones electro-magnéticas se separaron para siempre de las débiles. Eso ocurrió a los 10^{-12} segundos y correspondió también a un cambio de fase tal como en la inflación. Pero la liberación de energía fue muchísimo menos espectacular y no tuvo una influencia tan drástica en la evolución del Universo.

Después de unos 10^{-8} segundos la temperatura del Universo había bajado a 10^{13} grados y los cuarks se unieron entre sí para formar los primeros bariones y antibariones, que eran principalmente protones, neutrones y sus antipartículas. En esa época el Universo era una sopa de partículas elementales, principalmente fotones, así como protones, electrones muones, tauones, neutrinos y sus respectivas antipartículas.

A medida que descendía la temperatura la antimateria iba desapareciendo. Al formarse los protones y neutrones la temperatura había bajado lo suficiente para que estas partículas se aniquilaran con sus correspondientes antipartículas (como vimos en el capítulo I, los protones y los antiprotones pueden coexistir a temperaturas superiores a los 10^{13} grados Kelvin, creándose y aniquilándose continuamente con los fotones). Así, en algún momento que podemos situar en unas 100 millonésimas de segundo después de la Gran Explosión, todos los antiprotones se aniquilaron con los protones que encontraron, produciendo una enorme cantidad de luz —o fotones. Afortunadamente había un ligerísimo exceso de protones sobre antiprotones, como consecuencia probable de la asimetría CP que propició la creación de más cuarks que anticuarks. También se aniquilaron los tauones con sus antitauones, y poco después les tocó su turno a los muones y antimuones. Un décimo de segundo después de la Gran Explosión quedaron como constituyentes principales del Universo: protones, neutrones, electrones y positrones, neutrinos y antineutrinos (de las tres especies), y fotones.

Un segundo después de la Gran Explosión, la temperatura había bajado a unos 5 000 000 000 de grados Kelvin. Por debajo de esa temperatura tampoco es posible que coexistan positrones con electrones. Así, cuando la edad del Universo era de un segundo, todos los positrones se aniquilaron con los electrones produciendo más luz. Después ya no hubo antimateria. Pero si quedó un pequeño excedente de materia, gracias a la ligera asimetría entre materia y antimateria, que mencionamos más arriba. Todo lo que vemos en el Universo en la actualidad incluyendo nosotros mismos, está hecho de ese excedente. Se calcula que por cada partícula de materia que sobrevivió hasta

ahora se tuvieron que aniquilar unos 100 000 000 de partículas y antipartículas. Eso sucedió antes de un segundo de existencia. Después, los constituyentes principales del Universo fueron: protones, neutrones, electrones, neutrinos, antineutrinos y fotones.

FORMACIÓN DEL HELIO PRIMORDIAL

Los protones pueden transformarse en neutrones con la intermediación de los neutrinos (la reacción más común es protón + antineutrino \rightarrow neutrón + positrón). Gracias a la abundancia de neutrinos y antineutrinos en esas épocas remotas del Universo los protones se transformaban en neutrones, los cuales se volvían a transformar en protones después de cierto tiempo.

Por otra parte, los protones y neutrones chocaban entre sí y, ocasionalmente podían quedar "pegadas", para así formar un núcleo de *deuterio*, también conocido como hidrógeno pesado. El núcleo de deuterio que consta de un protón y un neutrón puede a su vez, chocar con otros protones y neutrones y formar después de varias reacciones nucleares, núcleos de helio. Lo crucial de este proceso es que ocurre a una temperatura de unos 100 000 000 grados Kelvin. Por arriba de esa temperatura los protones y neutrones tienen demasiada energía y destruyen, al chocar, los núcleos de deuterio y helio que hayan podido formarse. A temperaturas menores los núcleos de deuterio, que tienen carga eléctrica positiva, no poseen suficiente energía para vencer su repulsión eléctrica por lo que le es imposible unirse y formar núcleos más pesados.

Y a los tres minutos de existencia del Universo, la temperatura era justamente de 100 000 000 grados Kelvin.

Los núcleos atómicos que lograron formarse a los tres minutos de existencia del Universo no volvieron a destruirse y fijaron, por lo tanto, la composición química posterior del Universo quedó compuesta de aproximadamente de 75 % de hidrógeno, 25 % de helio y apenas una traza de otros elementos. Esa era la composición química del Universo en aquellas épocas remotas, muchísimo antes de que nacieran las primeras estrellas. Los otros elementos químicos fueron fabricados en el interior de las estrellas y diseminados posteriormente por el espacio cósmico.

La abundancia del helio primordial se ha calculado a partir de observaciones astronómicas y el resultado concuerda muy bien con las predicciones teóricas: ésta es una de las pruebas más sólidas a favor de la Teoría de la Gran Explosión.

FORMACIÓN DE ÁTOMOS Y LA RADIACIÓN DE FONDO

Tres minutos después la Gran Explosión del Universo contenía principalmente núcleos de hidrógeno (sencillos protones), núcleos de helio, electrones, neutrinos, antineutrinos y fotones. Los neutrinos y antineutrinos dejaron por esas épocas de interactuar con las demás partículas, pues ya no poseían suficiente energía. Las otras partículas formaban lo que se llama gas ionizado (véase el capítulo 1), un gas en el que los electrones andan sueltos y no están amarrados a los núcleos atómicos. Como ya explicamos anteriormente esa época del Universo corresponde al fuego primordial.

Esa era la condición física del Universo tres minutos después de la Gran Explosión, y así siguió durante varios cientos de miles de años más sin que volviera a suceder algo excepcional,

salvo que la temperatura bajaba progresivamente a medida que el Universo proseguía con su expansión.

Unos 500 000 años después de la Gran Explosión algo decisivo volvió a ocurrir. La temperatura había bajado a unos 5 000 grados Kelvin y fue entonces cuando los electrones, que andaban libres, pudieron combinarse por primera vez con los núcleos atómicos y formar los primeros átomos en la historia del Universo. La materia dejó de ser un gas ionizado, y como no quedaban electrones libres, los fotones dejaron de interactuar con la materia. A partir de ese momento el fuego primordial se apagó y el Universo se volvió transparente. La luz se desacopló de la materia y siguió su evolución por separado.

Ahora, unos 15 000 000 000 de años después de la Gran Explosión los fotones que quedaron libres luego de la formación de los primeros átomos deben estar presentes todavía, llenando todo el espacio cósmico. Esos fotones fueron emitidos por la materia a una temperatura de 5 000° K. Un gas a esa temperatura irradia principalmente luz visible e infrarroja. Pero, como el Universo está en expansión, esa luz sufrió un corrimiento Doppler y ha perdido una buena parte de su energía antes de llegar a nosotros. Esa luz se observa hoy en día ya no como luz visible sino como ondas de radio: es la radiación de fondo.

FORMACIÓN DE GALAXIAS

A pesar de los descubrimientos tan importantes de los últimos años y los avances teóricos en cosmología y astrofísica uno de los problemas más fundamentales que no se ha resuelto es el de la formación de las galaxias.

La teoría más aceptada en la actualidad es que, las galaxias se formaron por la contracción gravitacional de regiones del Uni-

verso que estaban más densas que el promedio. Para entender esta idea imaginemos al Universo en algún momento temprano de su historia. La materia estaba distribuida de manera homogénea, aunque algunas regiones pudieron estar ligeramente más densas que el promedio, y otras ligeramente menos densas. Las regiones más densas serían como grumos en el Universo primordial estos grumos por tener más masa, se contraen debido a su propia fuerza gravitacional. Una vez que esta contracción empieza no hay modo de que se detenga, y se formará, finalmente, una gran condensación de materia ¡es decir una galaxia! Esta es, a grandes rasgos, la hipótesis más aceptada de la formación de galaxia sin embargo hay dos problemas fundamentales: ¿cuándo empezaron a formarse estos grumos?, y ¿qué tan rápido se contrae la materia por su fuerza gravitacional?

El proceso de la formación de galaxias tiene similitudes con la formación de estrellas. Se piensa que las estrellas se forman a partir de gigantescas nubes de gas que se encuentran en las galaxias. El gas se encuentra relativamente caliente y ejerce, por lo tanto, una presión que tiende a dilatarlo; por otra parte, la propia atracción gravitacional del gas tiende a contraerlo. Si la distribución del gas fuera perfectamente homogénea, la presión y la gravedad mantendrían el equilibrio por tiempo indefinido. Pero, una parte de la nube puede ser ligeramente más densa que otra y romper, así, el delicado equilibrio entre presión y gravedad. Esto sucede si la masa de un pedazo de nube se excede de cierto valor crítico, de tal modo que la fuerza gravitacional domina definitivamente y el pedazo empieza a contraerse. Y no importa que tan pequeña haya sido la perturbación inicial de la densidad pues la contracción procederá inevitablemente.

En principio, un proceso similar pudo coincidir a la formación de una galaxia. La mayoría de los astrofísicos piensan que las galaxias se formaron porque la materia cósmica, en los primeros instantes del Universo, no era perfectamente homogénea sino que había grumos de materia. Estos grumos empezaron a contraerse por su propia gravedad y dieron lugar a condensaciones gaseosas, a partir de las cuales se formaron posteriormente las estrellas.

Sin embargo, la expansión del Universo retarda seriamente la contracción gravitacional. Los cálculos indican que si una inhomogeneidad se formó un segundo después de la Gran Explosión, en la actualidad no se habría transformado todavía en algo parecido a una galaxia. Si uno quiere explicar la formación de las galaxias con el mecanismo descrito tiene que fijar el inicio de la contracción a épocas mucho más remotas.

Aquí es donde surge una vez más el problema del horizonte. Imaginemos una cierta región del espacio que, al contraerse, dio origen a nuestra galaxia. Esa región en la actualidad podría ser, digamos, 100 veces más grande que nuestra galaxia. Ahora vayamos hacia atrás en el tiempo: en algún momento en el pasado, de acuerdo con la figura 13, la región que se colapsó era tan grande como el horizonte de esa época. Y si uno se va aún más atrás en el tiempo resulta que la materia que posteriormente formó nuestra galaxia estaba distribuida en una región muchísimo más grande que el horizonte. Por lo tanto, no pudo haber interacción entre sus partes para iniciar la contracción gravitacional.

Este era un problema básico de la cosmología hasta que apareció la idea de la inflación. Si analizamos la figura 14 vemos que el problema desaparece, ya que tenemos la situación descrita más detalladamente en la figura 15. Podemos tener un

grumo inicial en el Universo antes de la inflación, quizás justo en el tiempo de Planck. Ese grumo está contenido dentro de su horizonte en esa época. Después sobreviene la inflación. El horizonte permanece constante. El grumo deja de contraerse y se expande de manera violenta con todo el resto de la materia en el Universo; a partir de algún momento es más grande que el horizonte. Cuando termina la inflación el grumo sigue expandiéndose con el Universo, pero ahora también el horizonte crece y lo alcanza. A partir de ese momento el grumo está de nuevo dentro del horizonte y reanuda su contracción por su propia fuerza gravitacional para transformarse finalmente en algo parecido a una galaxia.

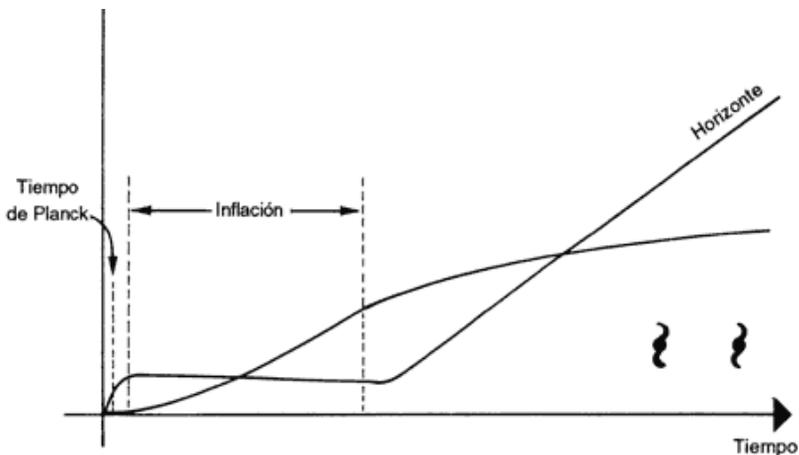


Figura 15. Esquema de la formación de una galaxia a partir de una fluctuación cuántica.

En principio es perfectamente posible que las galaxias, o más bien las pequeñas fluctuaciones de densidad que después dieron origen a ellas, aparecieran durante el tiempo de Planck. En

esa época tan remota el mismo espacio-tiempo estaba en plena turbulencia y, tal como un gas turbulento en el que algunas regiones son más densas que otras, había fluctuaciones cuánticas del vacío que pudieron ser la semilla de las galaxias. ¡Una fluctuación cuántica que origina algo tan grande como una galaxia!

Este es, a grandes rasgos, el escenario para la formación de galaxias de acuerdo con el modelo de la inflación. Lo interesante es que lleva a predicciones teóricas muy concretas. En el escenario de la inflación los cálculos predicen correctamente las propiedades estadísticas de las fluctuaciones tal como debieron ser para reproducir las condiciones actuales (por estadística nos estamos refiriendo a cuántos grumos se formaron con un tamaño dado). En lo que falla el modelo es en el tamaño de las fluctuaciones propuestas. Todos los cálculos indican que las fluctuaciones habrían sido tan intensas que, en lugar de formar galaxias, formarían condensaciones muchísimo más densas, como hoyos negros. La única manera de evitar tal catástrofe sería ajustar de manera extremadamente fina y *ad hoc* los parámetros del campo que debió existir antes de la inflación. Ésta es probablemente la principal falla del modelo inflacionario; los partidarios de este modelo piensan que con el tiempo se podrá corregir este defecto con un modelo más apropiado, lo cual todavía está por verse...

Otra posibilidad, aún sin explorar; es que efectivamente se hayan formado hoyos negros en un principio y que luego estos hayan propiciado la formación de galaxias a su alrededor debido a la fuerza gravitacional que ejercían sobre la materia en sus entornos. Después de todo, hay evidencias de que hoyos negros gigantescos se encuentran en los núcleos de muchas galaxias.²⁵ 

Independientemente de todo lo anterior la hipótesis de que las galaxias se hayan formado por la contracción gravitacional de la materia cósmica se enfrenta a un problema muy serio. La radiación de fondo, que fue emitida cuando se apagó el fuego primordial, es extremadamente homogénea y sólo muestra irregularidades espaciales del orden de una parte en 10 000. Si tales irregularidades corresponden a los grumos que dieron origen a las galaxias, los cálculos indican que definitivamente no tuvieron tiempo suficiente para contraerse. La única salida consiste en proponer que existe masa invisible en forma de partículas fantasmas, tal como explicamos en el capítulo anterior. Las galaxias, entonces, empezarían a formarse por la contracción gravitacional de grumos de materia fantasma, que sólo interactúa gravitacionalmente. Estos grumos podrían estar bastante condensados cuando se liberó la radiación de fondo, pero no tuvieron absolutamente ninguna influencia en ella porque no interactúan con la luz. Posteriormente esas grandes condensaciones invisibles e impalpables atraerían la materia común con la que se formarían las galaxias con sus estrellas.

Este es, de modo general, un posible mecanismo para la formación de galaxias. Los cálculos de los cosmólogos muestran que el proceso funciona razonablemente bien si las partículas fantasmas tienen masas del orden de la masa del protón.

A pesar de algunas fallas serias y de que no explica todo lo que uno quisiera que se explicara, el modelo del Universo inflacionario es lo suficientemente interesante y complejo para confiar en que con algún ingrediente desconocido hasta ahora, se llegue a un escenario más plausible para la Gran Explosión, la creación de la materia y la estructura del Universo tal como las observamos en la actualidad. ■

GLOSARIO

antimateria. Materia hecha de antipartículas: positrones, anti-protones, antineutrones, etcétera.

antipartícula. A todas las partículas elementales que son fermiones corresponde una antipartícula con la misma masa, pero con carga eléctrica y otras propiedades invertidas.

átomo. Constituyente de la materia formado de un núcleo atómico rodeado de electrones.

barión. Partícula elemental formada por tres cuarks. Los bariones más comunes son el protón y el neutrón.

Big Bang. Véase Gran Explosión.

bosón. Nombre genérico de las partículas elementales de espín 0, h, 2h, etcétera. Se asocian a las interacciones.

campo. Concepto fundamental de la física moderna para describir la fuerza ejercida a distancia por una partícula.

campo de Higgs. Campo cuántico que genera la masa de otras partículas.

color. Propiedad de los cuarks, semejante a la carga eléctrica.

cuark. Partícula constitutiva de los bariones y mesones.

electromagnetismo. Una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. Es de largo alcance, por lo que se manifiesta tanto a nivel cuántico como en el macromundo.

electrón. Partícula elemental estable con carga eléctrica negativa.

espacio-tiempo. Espacio de cuatro dimensiones que resulta de considerar el tiempo como una cuarta dimensión, en adición al espacio común de tres dimensiones.

espín. Propiedad intrínseca de las partículas elementales, análogo cuántico del momento angular, que toma sólo valores múltiplos enteros o semienteros de h .

estrella. Cuerpo celeste que emite luz debido a la generación de energía por fusión nuclear en su centro.

fermión. Nombre genérico de las partículas elementales con espín $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, etcétera. Se asocian a la materia.

fotón. Partícula elemental de la luz.

galaxia. Conglomerado de cientos de miles de estrellas unidas por su mutua atracción gravitacional.

gluon. Partícula elemental que produce las interacciones de color entre los cuarks.

Gran Explosión. Estado inicial del Universo que corresponde a una densidad teóricamente infinita de materia.

Gran Unificación. Teoría, por ahora especulativa, que considera las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles como tres aspectos de una misma interacción.

gravitación. Una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. Es la más débil en intensidad pero domina a escala cósmica.

helio. Elemento químico. Su núcleo atómico consta de dos protones y dos neutrones.

hidrógeno. Elemento químico, el más abundante en el Universo. Su núcleo atómico consta de un único protón.

hoyo negro. Concentración de masa con un campo gravitacional tan intenso que nada, ni siquiera la luz puede salir de él. Se cree que estrellas más masivas se vuelven hoyos negros después de terminar sus reacciones nucleares. También hay evidencias de la existencia de hoyos negros gigantescos en los núcleos de ciertas galaxias.

inflación. Teoría cosmológica según la cual el Universo sufrió una expansión violenta, unos 10^{-36} segundos después de la Gran Explosión. El Universo actualmente visible habría tenido un tamaño de solo 10 centímetros antes de la inflación.

interacción débil. Una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. Es de muy corto alcance y sólo se manifiesta en el nivel cuántico.

interacción fuerte. Una de las cuatro interacciones fundamentales, responsable de la cohesión de los protones y neutrones en los núcleos.

leptón. Partícula elemental que no interactúa fuertemente. Los electrones y neutrinos son leptones.

ley de Hubble. Ley observacional según la cual la distancia entre dos galaxias aumenta con una velocidad directamente proporcional a esa distancia. La implicación directa es que el Universo está en expansión.

mesón. Partícula elemental inestable, formada por un cuark y un anticuark, que interactúa fuertemente con otras partículas.

neutrino. Partícula sin masa (hasta donde se sabe) y sin carga eléctrica, que sólo interactúa débil o gravitacionalmente con la materia.

neutrón. Partícula del núcleo atómico ligeramente más masiva que el protón y sin carga eléctrica.

núcleo atómico. Parte central de un átomo formado de protones y neutrones amarrados entre sí por interacciones fuertes.

positrón. Antipartícula del electrón, idéntica a éste excepto por la carga eléctrica (positiva).

protón. Partícula del núcleo atómico, con carga eléctrica (positiva).

radiación de fondo. Radiación luminosa generada cuando la temperatura del Universo bajó a unos 5 000 grados Kelvin y la materia cósmica se tornó transparente. Se observa en la actualidad como una radiación de microondas proveniente, en forma totalmente homogénea, de todas las regiones del Universo.

relatividad especial. Teoría elaborada por Albert Einstein, según la cual no existe un sistema absoluto de referencia pues todos los fenómenos físicos tienen la misma forma en cualquier sistema. Implica, entre otras cosas, que la velocidad de la luz en el vacío tiene siempre el valor c y que el tiempo transcurre de manera distinta según quien lo mida.

relatividad general. Extensión de la relatividad especial, también debida a Albert Einstein, que interpreta la gravitación como una curvatura del espacio-tiempo.

supercuerda. Según una teoría reciente, objeto fundamental de la que están hechas todas las partículas elementales y que se manifiestan en un espacio de muchas dimensiones, de las cuales sólo percibimos cuatro.



CONTRAPORTADA

El filósofo griego Demócrito afirmaba que la materia está constituida de partículas indivisibles: los átomos. Hoy sabemos que tuvo razón en lo esencial, aunque los que llamó átomos resultaron ser divisibles. Los ingredientes fundamentales del Universo no son los átomos sino las partículas elementales que los forman y las fuerzas de interacción entre esas partículas. Empero, las partículas elementales se comportan de acuerdo con las extrañas leyes del mundo cuántico, donde el mismo concepto de partícula pierde su sentido.

Las ideas que se tenían sobre la materia y la energía, la fuerza, el tiempo y el espacio, cambiaron radicalmente en el siglo XX con la aparición de las dos teorías que son los pilares de la física moderna: la mecánica cuántica y la relatividad. Otro cambio radical se produjo con el descubrimiento de la expansión del Universo, que llevó a los físicos y astrónomos a elaborar la teoría de la Gran Explosión, según la cual el Universo habría surgido hace unos 15 mil millones de años en circunstancias que sólo se pueden describir por medio de la física cuántica.

Los extremos se tocan: la evolución del Universo está determinada por el comportamiento de la materia en el nivel microscópico; a su vez la cosmología moderna permite estudiar las propiedades más fundamentales de la materia en lo que constituye el mayor laboratorio concebible: el Universo mismo *Del mundo cuántico al Universo en expansión*, reseña esta relación entre lo cósmico y lo atómico en lenguaje accesible al público en general.

Shahen Hacyan obtuvo la licenciatura en física en la UNAM y el doctorado en física teórica en la Universidad de Sussex, Inglaterra. Es investigador del Instituto de Física y profesor de la Facultad de Ciencias, instituciones de la UNAM. Ha publicado otros tres libros en la colección La Ciencia para Todos: *El descubrimiento del Universo*, *Los hoyos negros* y *Relatividad para principiantes*. Además, ha escrito numerosos artículos de divulgación científica, así como una novela *Regreso a Laputa* y *Balnibarbi*, UNAM. 1993.

Diseño original: Calos Haces / Diseño de portada: Teresa Candela
