

El origen de la materia

Aún no sabemos por qué la materia dominó a la antimateria en la formación del universo

James M. Cline

¿De dónde proviene la materia? Quizá no deje perplejos a muchos que existamos y nos rodee la materia, que no sea el mundo un mero baño de microondas. Mas, para un cosmólogo, la existencia de materia es desconcertante, un problema que no ha encontrado solución desde que la física teórica hubo de planteárselo hace casi cuarenta años. Las mejores teorías acerca del origen del universo no ofrecen todavía una explicación.

La existencia de materia es un capítulo inacabado de la teoría de la gran explosión del origen del universo, que por lo demás acierta a explicar casi todo lo que observamos. Se cree que la materia y la antimateria se equilibraban exactamente entre sí en los primeros momentos tras la gran explosión. Como la materia y la antimateria no pueden coexistir —se aniquilan la una a la otra—, esta situación, si hubiera continuado, habría dejado un universo muy monótono. ¿Por qué prevaleció la materia y llegó a dominar el universo?

El físico y disidente político ruso Andrei Sajarov se adelantó a su tiempo al proponer ideas relativas a la creación de la materia en 1967. Por entonces, cuando yo estaba aún aprendiendo la tabla de multiplicar, el origen de la materia se daba más o menos por descontado. Sajarov vio la importancia de la cuestión. Considerando que la creación de la materia no podía darse por descontada, enunció las condiciones que una explicación plausible debería satisfacer.

La materia de que estamos hechos consta sobre todo de protones y neutrones, los componentes de los núcleos atómicos. Se llama a estas partículas *bariones*, de la palabra griega *barys*, que quiere

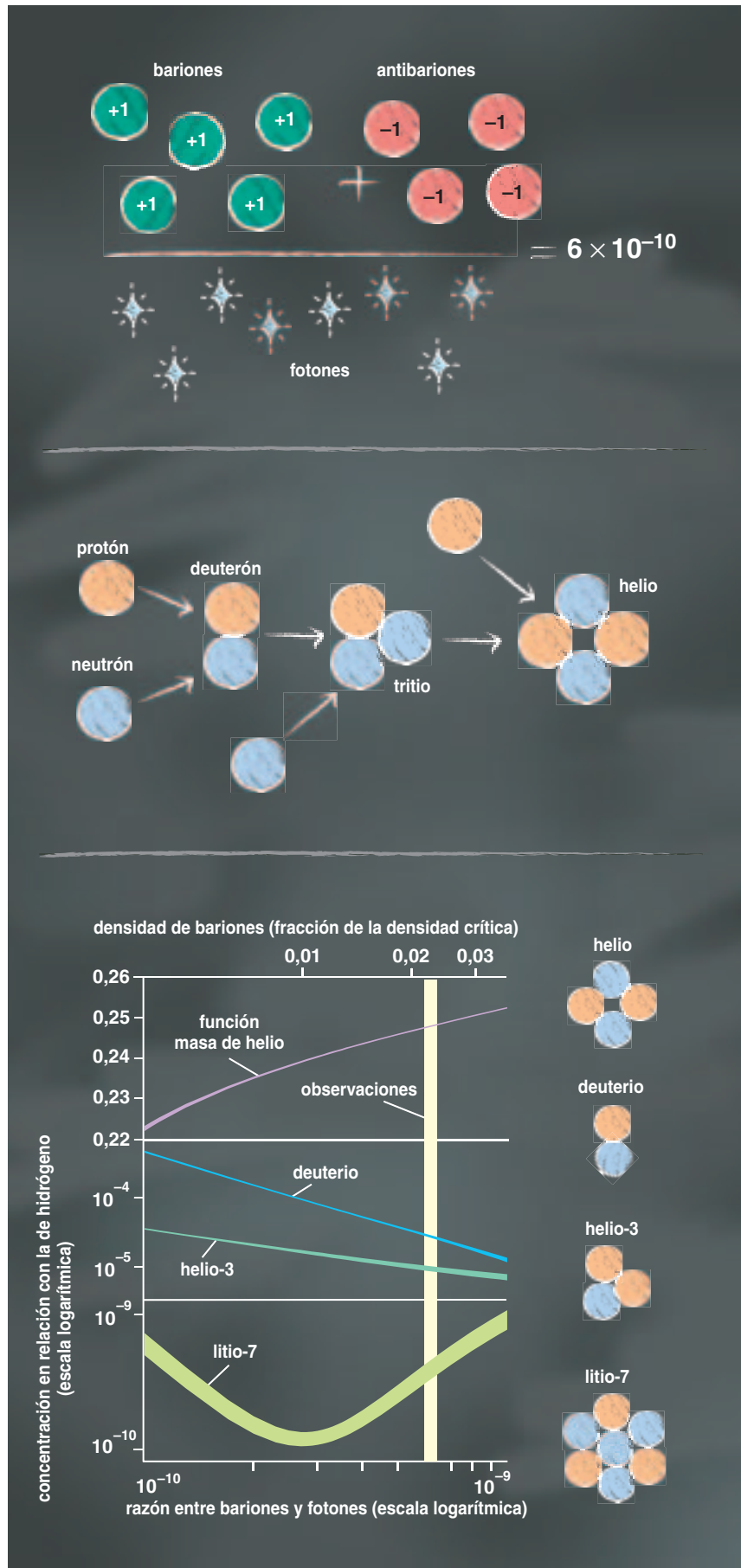
decir pesado: lo son 2000 veces más que los electrones. Los experimentos han demostrado que se componen de partículas menores, los quarks. No faltan bariones en el universo. Su densidad media es de unos 0,2 por metro cúbico. Pero en ese mismo volumen hay *diez mil millones* de fotones, o partículas de luz. Se trata de los fotones del fondo cósmico de microondas, el remanente de la gran explosión.

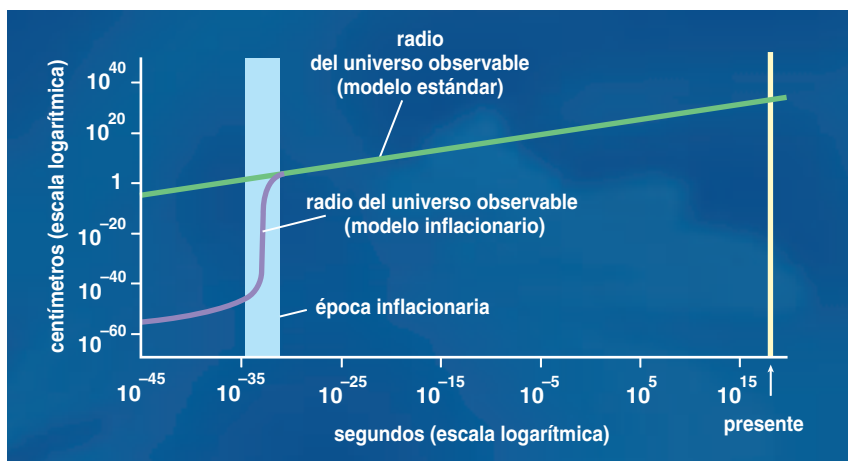
La razón entre la densidad de bariones y la de fotones permanece constante a lo largo del tiempo, pese a que el universo se va expandiendo y diluyendo. La *asimetría bariónica* del universo, el número de bariones dividido por el número de fotones, es 6×10^{-10} . Un número extraño, que nunca ha dejado de preocupar a los físicos teóricos. Si la razón hubiera sido más próxima a 1, hubiéramos podido imaginar que nada muy especial sucedió en el universo primitivo, ya que todas las partículas se comportan más o menos igual a temperaturas elevadísimas; entonces se producen bariones y fotones en números aproximadamente iguales. También hubiera resultado natural que no hubiese habido ni un barión: así habría ocurrido si la materia y la antimateria se hubiesen aniquilado mutuamente. Al calcular la asimetría bariónica, se sustraerían los antibariones y saldría cero.

Claro que entonces no habría físicos que perdiesen el sueño por estas cosas: no habría en el universo más que fotones de microondas. Pero un universo sin bariones debe considerarse una posibilidad natural, ya que por todas las partes de la física encontramos principios de simetría. Un tal principio existe para la carga eléctrica: sabemos que en el universo, por cada partícula cargada positivamente, debe haber una negativa.

En contraste, el universo bariónico parece exigir que exista una asimetría. La magnitud de la misma debería seguirse de las ecuaciones de una teoría de la bariogénesis, del origen de la materia. Desgraciadamente, no parece que en lo que nos quede de vida vaya a resultar posible someter a prueba con experimentos la multitud de teorías formuladas al respecto. No podemos esperar que las circunstancias imperantes en los primerísimos momentos del universo, los más calientes, vayan a reproducirse en ningún laboratorio. ¿Es esta área de la teoría un simple juego, en el que podemos construir hábiles hipótesis que sólo juzgaremos por su coherencia y elegancia? Quizá; pero los experimentadores ya han acumulado datos que descartan algunas propuestas, incluida una en la que estuve trabajando cinco años. Como las nuevas teorías siempre nacen para ser sometidas a comprobación, podemos mantener la esperanza de que las ideas que ahora se desarrollan—incluyendo la posibilidad de que la asimetría bariónica surja de una asimetría entre partículas más ligeras, relacionadas con los electrones—den a los experimentadores ideas para otras pruebas. Nuevos hallazgos, o nuevos enfoques, podrían dar nueva

1. LA ASIMETRÍA BARIÓNICA es la razón entre los números de bariones (neutrones y protones) y de fotones (*arriba*). A los bariones de la antimateria se les da un valor negativo en esa relación. Se sabe que la asimetría bariónica del universo es de 6×10^{-10} , un número que no puede explicarse en el marco de las teorías hoy aceptadas pese a que la observación lo ha dejado bien establecido. El número de bariones se determina por la concentración relativa, en el universo, de los elementos ligeros, que se formaron cuando los bariones se unieron y crearon núcleos atómicos. Esta etapa primitiva de la evolución del universo recibe la denominación de nucleosíntesis de la gran explosión (*medio*). La gráfica inferior muestra que las predicciones teóricas sobre las proporciones relativas de los elementos ligeros dependen de la asimetría bariónica. La banda vertical indica el valor de la asimetría en el que las predicciones concuerdan con las observaciones.





2. LA INFLACION ES UNA VARIANTE de la teoría de la gran explosión del universo, corroborada por las últimas mediciones del fondo cósmico de microondas. Consistió en un período de expansión exponencialmente rápida en los primeros momentos del universo; en su transcurso, la densidad de bariones cayó. Para que la asimetría barión-antibarión se hubiese creado antes de la fase final de la inflación, o “recalentamiento”, su valor inicial tendría que haber sido enorme.

vida a ideas ahora relegadas. En cualquier caso, a lo largo de los próximos años las mediciones astronómicas y los experimentos con aceleradores de partículas nos aportarán sin duda una abundancia de datos e ideas acerca del universo primitivo. Cabe esperar que aprenderemos mucho cuando comparemos nuestras teorías con esos resultados.

La génesis de la bariogénesis

Andrei Sajarov se pasó veinte años diseñando armas nucleares para la Unión Soviética. Pero poco a poco se convirtió en uno de los más duros críticos del régimen comunista. En 1980 lo confinaron. Mientras sus opiniones políticas le reportaban titulares de prensa en el extranjero y complicaciones en Moscú, fue abriendo nuevos caminos en cosmología. Entre sus extraordinarios logros se cuenta el inesperado hallazgo de los ingredientes necesarios para la creación de una asimetría bariónica. He dicho “inesperado” porque, en aquel tiempo, nadie más pensaba en tal dirección. Los proponentes de la teoría de la gran explosión suponían que el contenido bariónico del universo era una condición inicial que se debía imponer, un punto de partida y no un hecho que una teoría completa de la evolución cosmológica tuviese que explicar. La mayoría de los colegas de Sajarov en el Instituto Lebedev de Física de Moscú no apreciaron en su

momento la importancia de su descubrimiento. Sin embargo, hoy día los cosmólogos saben que acertó.

Sajarov había estado reflexionando acerca de la violación de CP, una asimetría entre ciertas partículas y sus antipartículas. Esta asimetría, que será importante en lo que sigue, fue uno de los múltiples descubrimientos de física experimental de partículas, por entonces en auge. Se hacían chocar haces de partículas en aceleradores cada vez más grandes y potentes a fin de descubrir nuevos fenómenos que no se habían visto en las moderadas condiciones que prevalecen en la superficie de la Tierra. Los teóricos disponían también de alguna información útil acerca de las propiedades del propio universo.

Las concentraciones relativas de los elementos ligeros en el universo eran uno de esos datos. Los elementos ligeros —el helio, el litio y el deuterio, isótopo del hidrógeno— se formaron a los pocos minutos de la gran explosión, en la etapa que recibe el nombre de “nucleosíntesis de la gran explosión”. A medida que el universo se enfrió tras la gran explosión, los protones y los neutrones se fueron uniendo y formaron los núcleos atómicos. Las colisiones con los fotones de alta energía tendían a romper estos núcleos, pero gradualmente los fotones perdieron energía debida al enfriamiento causado por la expansión del universo. No sorprende de-

masiado que la eficiencia con la que se producían los núcleos dependiese de la razón entre bariones y fotones. Uno de los principales triunfos de la teoría de la gran explosión consiste en que predice correctamente, una vez se ha elegido un valor para la asimetría bariónica del universo, las proporciones de todos los elementos ligeros que se generaron durante la nucleosíntesis de la gran explosión.

En 2003, nuevas mediciones precisas de las pequeñas fluctuaciones de la temperatura de la radiación cósmica de microondas confirmaron el valor conocido de la asimetría bariónica. Estas fluctuaciones revelan finos detalles de las ondas sonoras (o de presión) que existieron en la época en que los electrones se estaban combinando con los núcleos atómicos para formar átomos. Al mismo tiempo, el universo se volvió transparente para los fotones, liberados de la presión del plasma caliente que dominó los primeros 100.000 años después de la nucleosíntesis. Este es otro éxito impresionante de la cosmología de la gran explosión: la asimetría bariónica, confirmada por dos mediciones del todo diferentes.

Pero los físicos encuentran flancos débiles en cualquier argumento con apariencia de solidez. Podemos imaginar, por ejemplo, que hay tantos antibariones como bariones a distancias muy grandes; nosotros viviríamos en una región dominada por bariones. De esta manera, el verdadero número bariónico sería cero. Las regiones de antimateria deberían estar más allá del límite del universo visible; si existieran galaxias de antimateria en la parte del universo que podemos ver, deberíamos detectar regiones fronterizas donde las aniquilaciones entre materia y antimateria produjesen fotones muy energéticos, o sea, rayos gamma. No observamos algo así, pero tampoco se conoce una manera verosímil de segregar en el universo primitivo la materia de la antimateria en zonas muy extensas. Resulta mucho más fácil inventar teorías de bariogénesis que de la segregación de la materia y la antimateria.

¿Hasta qué punto se necesita una explicación de la asimetría bariónica? La cifra 6×10^{-10} es tan buena como cualquier otra. ¿Y si no es más que un valor inicial aleatorio que surgió

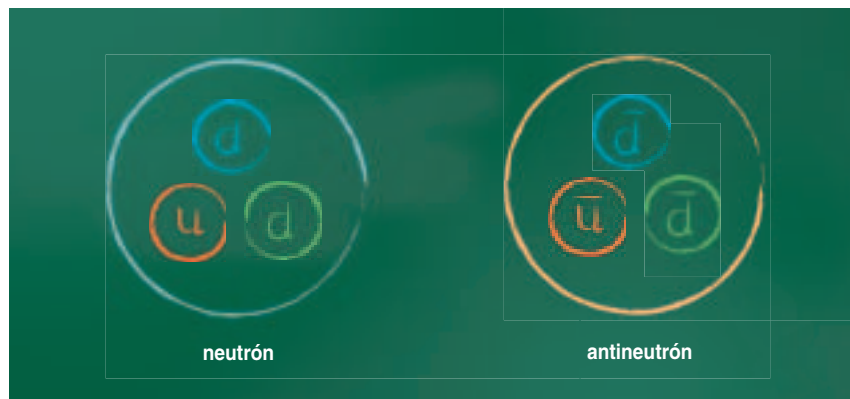
del caos de la gran explosión, tal y como pensaban los primeros teóricos de la gran explosión? Sin embargo, abundan los indicios de que es necesario un mecanismo especial para la bariogénesis.

Así, hay que tener muy en cuenta las poderosas razones que llevan a creer en la existencia de un período de expansión exponencialmente rápida justo tras la gran explosión, o período de “inflación”, durante el cual la temperatura del universo fue a todos los efectos nula. La teoría de la inflación, creada a principios de los años ochenta, por Alan Guth, Andrei Linde, Paul Steinhardt y Andreas Albrecht, es una modificación de la teoría de la gran explosión. La inflación acaba con un “recalentamiento”, proceso en el que la energía potencial almacenada en el vacío se convierte en partículas calientes con una cierta temperatura inicial finita. (En el modelo estándar de la gran explosión, la temperatura crece arbitrariamente a medida que se retrocede hacia el inicio del tiempo.) Las nuevas mediciones del fondo cósmico de microondas aportan un valioso respaldo a esa hipótesis. La inflación explica por qué las fluctuaciones de temperatura del fondo de microondas son pequeñas (del orden del 0,001 por ciento), pero no exactamente cero: fluctuaciones cuánticas de este tamaño se producen de manera natural durante la inflación.

En el curso de la inflación, los bariones se diluyen en el volumen del universo inflado. Si se supone que no se creó una asimetría barión-antibarión durante o después del recalentamiento, se deberá suponer también que el valor inicial de la asimetría bariónica fue enorme; los cálculos arrojan un número, 10^{69} , que por su inmensidad resulta aún menos natural que la pequeña asimetría bariónica actual. Así pues, la inflación hace muy probable que la asimetría bariónica requiera una explicación dinámica.

Las leyes de Sajarov

Mientras Sajarov trabajaba en el problema de la bariogénesis, otro científico ruso, Vadim Kuzmin, identificó las condiciones necesarias. Iba tres años por detrás de Sajarov al proponer una teoría en 1970, pero aún siete por delante del resto del



3. LOS BARIONES son estados ligados de los quarks. Se dice que los quarks tienen “sabores”: arriba y abajo, encantado y extraño, cima y fondo. El neutrón consta de dos quarks abajo y un quark arriba. El antineutrón está formado por los correspondientes antiquarks (su símbolo coincide con el de los quarks respectivos, pero con una barra encima).

mundo; hasta 1977 no empezaron los teóricos a tomarse estas ideas en serio. En sus trabajos, Sajarov y Kuzmin establecieron tres condiciones que debían satisfacerse para que la bariogénesis tuviera lugar.

En primer lugar, el número bariónico no se debía conservar. Es decir, habrá interacciones que cambien el número de bariones del universo.

En segundo, deben violarse dos simetrías que relacionan partículas con antipartículas.

En tercero, debe haber una pérdida de equilibrio termodinámico.

El segundo y el tercer requisito son bastante técnicos. Siempre entiendo mejor los conceptos abstractos cuando se aplican a un ejemplo; expondré, pues, la razón de la necesidad de estas leyes mediante uno de los primeros esquemas de bariogénesis que se formularon, las Teorías de Gran Unificación (o GUT, de “Grand Unified Theories”).

La idea básica en que se funda la bariogénesis en las GUT es bastante simple: unas partículas muy pesadas, los bosones X, dejan al desintegrarse a altas temperaturas más quarks que antiquarks. Por ejemplo, supongamos que la partícula X sigue un cierto proceso de desintegración el 51 % de las veces, mientras que su antipartícula, \bar{X} , sigue el camino de desintegración paralela el 49 % de las veces. Esta asimetría provocaría rápidamente un exceso de bariones.

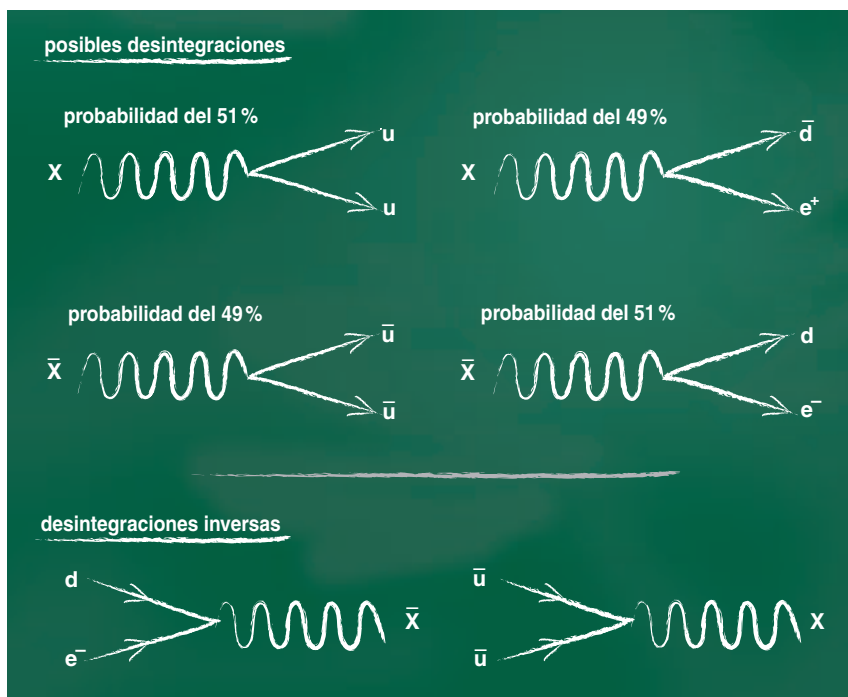
En la figura 4 se muestra una situación verosímil. Los quarks que

constituyen los bariones ordinarios, el protón y el neutrón, aparecen en dos “sabores”: “arriba” y “abajo”; al haber tres en cada barión, el número bariónico de un quark es $1/3$. El positrón es la antipartícula del electrón. Supongamos que el bosón X se desintegra el 51 % de las veces en dos quarks arriba y el 49 % en un antiquark abajo y un positrón. En promedio, cada desintegración de un X producirá $(2/3 \times 0,51) - (1/3 \times 0,49) = 0,177$ bariones (al calcular el número bariónico las antipartículas se restan).

Su antipartícula \bar{X} se desintegra el 49 % de las veces en dos antiquarks arriba y el 51 % en un quark abajo y un electrón. Esto da $(-2/3 \times 0,49) + (1/3 \times 0,51) = -0,157$ bariones. Cien desintegraciones de cada partícula aportan una ganancia neta de dos bariones, muy superior a lo que se necesita para generar la pequeña asimetría bariónica que observamos.

¿Por qué se requieren las leyes de Sajarov para que valga este esquema?

Violación del número bariónico. Si X sólo pudiera desintegrarse en dos quarks, diríamos que tiene un número bariónico de $2/3$. Si X sólo pudiera desintegrarse en un único antiquark, le asignaríamos un número de $-1/3$ (ya que los antiquarks tienen números bariónicos negativos). Que ambos canales sean viables significa que no se puede dar un número bariónico inequívoco a la partícula. Sólo sería posible si todas las interaccio-



4. LAS PARTÍCULAS SUBATÓMICAS dejan, al desintegrarse, partículas de materia y energía. Puede surgir una asimetría si la probabilidad de un cierto canal de desintegración es distinta para una partícula y para su antipartícula. Tomemos como ejemplo una partícula hipotética, el bosón X. Supongamos que es un poco más probable que X se desintegre en dos quarks arriba que en un antiquark abajo y un positrón, y que las probabilidades de los caminos de desintegración paralelos de su antipartícula \bar{X} están invertidas: es un poco más probable que \bar{X} se desintegre en un quark abajo y un electrón que no en dos antiquarks arriba. Cien desintegraciones de cada partícula darían una ganancia neta de dos bariones. El panel inferior ilustra las desintegraciones inversas, la fusión de partículas para crear nuevos bosones X. A temperaturas elevadas en el universo primitivo, las desintegraciones inversas serían tan rápidas como las desintegraciones, lo que arruinaría la asimetría.

nes respetaran el número bariónico, tal como sucede en la física usual.

Violación de las simetrías de conjugación de carga. Ya he mencionado antes que ciertas propiedades de las partículas no deben ser perfectamente simétricas; dos de esas propiedades cuasisimétricas se conocen con las letras C y CP. Con C se simboliza la conjugación de carga, la operación que cambia una partícula en una antipartícula; la letra P nos remite a la paridad, la operación que cambia el signo de las coordenadas espaciales de un sistema y crea una imagen especular. Algunas teorías físicas que rigen las propiedades microscópicas permanecen invariables cuando se cambian las partículas por las antipartículas. Pero en el ejemplo anterior he dispuesto una asimetría al dejar que un barión y su antibarión prefirieran distintos modos de desintegrarse.

Pérdida de equilibrio térmico. Un buen ejemplo de equilibrio térmico es el agua hirviendo dentro de una olla a presión cerrada. Las moléculas de agua pasan de la fase líquida a la gaseosa sin cesar. Hay equilibrio porque, una vez se ha alcanzado una temperatura constante, el ritmo a que las moléculas hacen esta transición es exactamente igual al ritmo del proceso inverso, de manera que la cantidad total de líquido y vapor permanece constante. Se rompe este equilibrio térmico si se levanta la tapa. El vapor escapa y el ritmo de transformación de líquido a gas se vuelve mayor que el ritmo inverso. Si se sigue suministrando calor, se evaporará todo el líquido.

Hay una situación en el universo primitivo análoga a levantar la tapa de la olla. En el equilibrio, los bariones se están desintegrando, pero

acontece también el proceso inverso, en el cual los quarks se unen para formar bariones; ambos procesos suceden al mismo ritmo. Las desintegraciones no pueden producir una asimetría bariónica, ya que las desintegraciones inversas la van deshaciendo. Sin embargo, a medida que el universo se expande, la temperatura decrece, como si se destapara la olla a presión. A determinada temperatura un par de quarks ya no tendrá la suficiente energía como para producir una partícula pesada. Se generará así una asimetría bariónica.

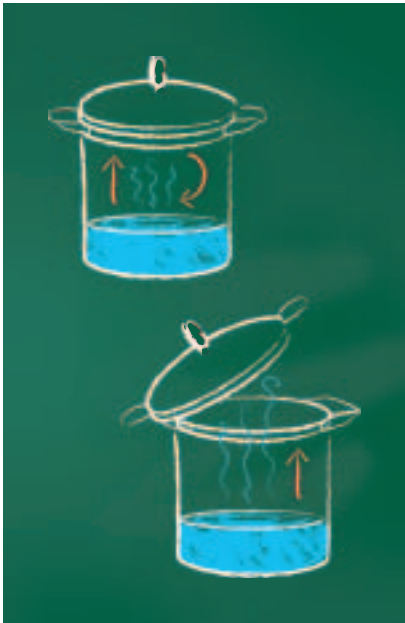
Violación de CP

Sajarov indicó que, para la bariogénesis, no se debía violar un tipo de simetría, sino dos. De ellos uno requiere cierta explicación. La violación de CP combina dos transformaciones. C cambia partículas por antipartículas. Su vinculación con la paridad resulta menos obvia.

Las posiciones de los objetos en el espacio se describen mediante tres ejes, x , y y z . Cuando se mira en un espejo, se ve una transformación de paridad en el eje perpendicular a la superficie del espejo. Si es el eje y y el objeto real está en la posición x, y y z , la posición especular del objeto se encontrará en la posición $x, -y$ y z . Un reflector de esquina, consistente en tres espejos formando un vértice de cubo, muestra la completa transformación de paridad ($-x, -y$ y $-z$) en las tres direcciones.

La paridad es relevante para la bariogénesis debido a que los quarks no sólo tienen sabores; también pueden ser levógiros o dextrógiros. Una manera sencilla de imaginarlo: si los dedos de la mano derecha se curvan en torno a una partícula imaginaria que se mueve en la dirección del dedo pulgar estirado, una partícula dextrógira girará en la dirección en la que apuntan los dedos. Una partícula levógira girará en sentido opuesto.

Si la simetría CP se hubiese satisfecho durante toda la historia del universo, la única asimetría de partículas que crearíamos sería entre quarks levógiros y antiquarks dextrógiros, más una asimetría igual y opuesta entre quarks dextrógiros y antiquarks levógiros. Por desgracia, la asimetría total entre quarks y antiquarks sería aún nula.



5. ANDREI SAJAROV MOSTRO QUE UNO DE LOS REQUISITOS para la creación de materia es la pérdida del equilibrio térmico. Si las consideraciones térmicas se añaden a la situación hipotética ilustrada en la figura 4, puede surgir una asimetría bariónica. En equilibrio térmico está el interior de una olla cerrada: el líquido entra y sale de la fase gaseosa a velocidades iguales. La expansión del universo equivale a quitar la tapa de la olla. A medida que el universo se enfría, alcanza una temperatura en la que dos quarks carecen ya de suficiente energía para producir un bosón pesado X.

La búsqueda de violaciones de la simetría CP ha sido una pasión de los físicos de partículas desde los años cincuenta. Antes se creía que CP era una simetría exacta. Se vio lo erróneo de esta creencia cuando los experimentos de 1964 de James Christenson, James Cronin, Val Fitch y Rene Turlay, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, encontraron un proceso que violaba la simetría CP, aunque sólo un poco. Dos partículas supuestamente distintas resultaron ser una misma, el kaón. Se demostró que el kaón neutro se desintegraba en estados con diferentes valores de CP.

Sin embargo, la violación de CP en las desintegraciones de los kaones es tan débil, que ni siquiera puede crear una asimetría bariónica tan pequeña como la que se observa. Se espera que se descubran fuentes mayores de violación de CP. El experimento BaBar, del Centro del Colisionador Lineal de Stanford, y un experimento japonés análogo, Belle, están ahora buscando violaciones de CP en las interacciones de ciertos quarks pesados.

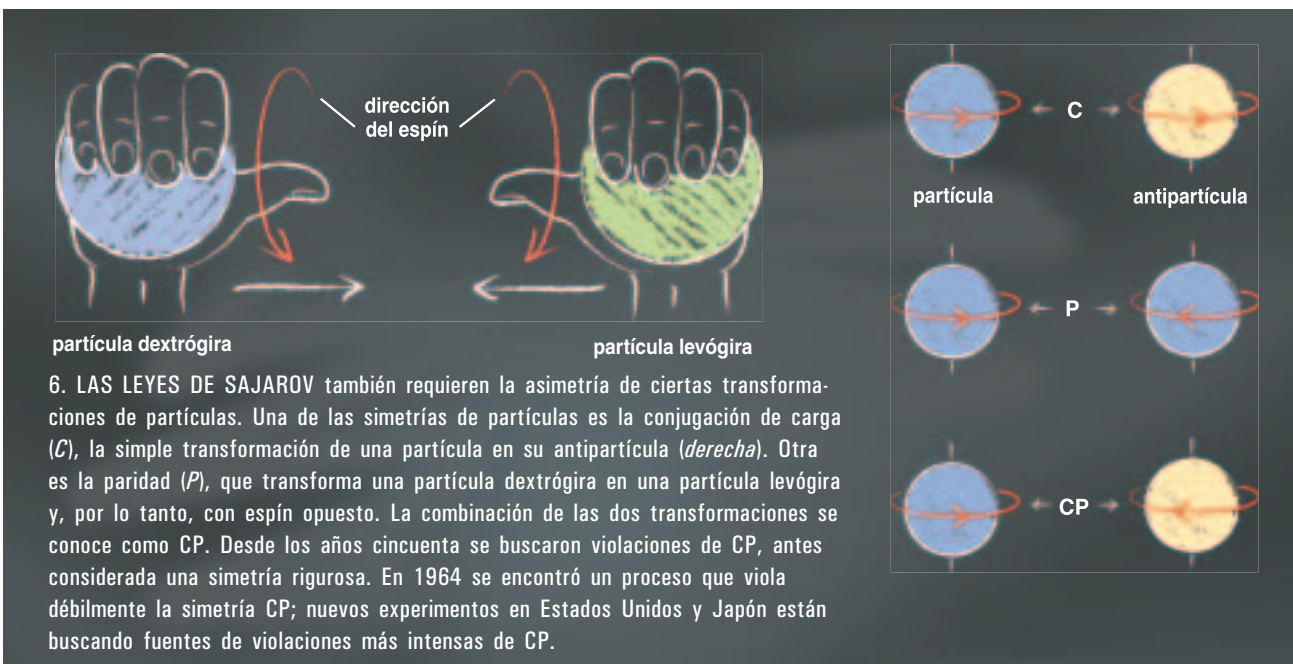
Burbujas y masa

Con el descubrimiento experimental de la violación de CP, Sajarov tuvo una realidad física que le inspirase ideas acerca del origen de la materia. No sabía que otro de sus criterios de violación de simetrías, la necesidad

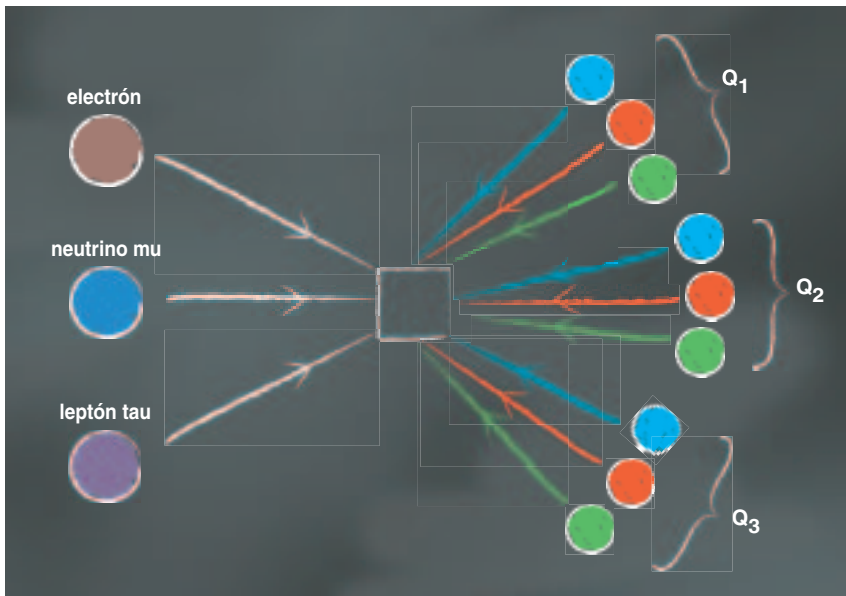
de violación del número bariónico, se cumpliría en el modelo estándar de la física de partículas por medio de cierto proceso, el esfalerón (del griego “caer”).

El modelo estándar unifica el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil en unas interacciones electrodébiles, con las correspondientes partículas. El esfalerón es cierta interacción concreta predicha por el modelo estándar. Involucra nueve quarks y tres partículas ligeras de la clase de los leptones, que se pueden contar de manera parecida a como se cuentan los bariones. Descubierta como resultado matemático en 1984 por Frans Klinkhamer y Nicholas Manton (ahora en las Universidades de Karlsruhe y Cambridge, respectivamente), el esfalerón no se ha confirmado experimentalmente, aunque ningún teórico duda de su validez.

Para que tenga lugar la violación bariónica, se juntan tres quarks de cada una de las “generaciones” del modelo estándar —la de los dos quarks ligeros (*arriba* y *abajo*) y otras dos de quarks más pesados, descubiertos en los experimentos a altas energías de los aceleradores— con un leptón de cada generación de leptones correspondiente. A baja temperatura, este proceso requiere que se produzca un efecto túnel cuántico, una transición del sistema microscópico que normalmente requeriría un aporte de energía.



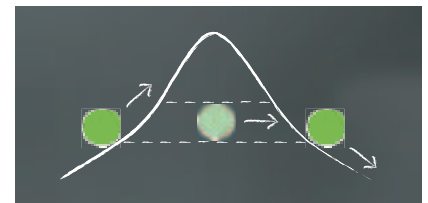
6. LAS LEYES DE SAJAROV también requieren la asimetría de ciertas transformaciones de partículas. Una de las simetrías de partículas es la conjugación de carga (C), la simple transformación de una partícula en su antipartícula (*derecha*). Otra es la paridad (P), que transforma una partícula dextrógira en una partícula levógira y, por lo tanto, con espín opuesto. La combinación de las dos transformaciones se conoce como CP. Desde los años cincuenta se buscaron violaciones de CP, antes considerada una simetría rigurosa. En 1964 se encontró un proceso que viola débilmente la simetría CP; nuevos experimentos en Estados Unidos y Japón están buscando fuentes de violaciones más intensas de CP.



La probabilidad de ese efecto túnel es tan pequeña, que no se esperaría ver que ocurriese en el laboratorio o en el universo observable. ¿De dónde le viene su importancia, pues? Dieron la respuesta Kuzmin, Valery Rubakov y Mikhail Shaposhnikov en 1985: a las altas temperaturas del universo primitivo, la barrera energética que evita la violación bariónica podría superarse con energía térmica. Es decir: a altas temperaturas sí ocurre

la interacción esfalerónica. Aún más importante es la disminución, e incluso anulación, de la barrera energética a temperaturas suficientemente elevadas.

La aceptación general de la validez del esfalerón por parte de los teóricos significa que dos de los tres criterios de Sajarov —la violación de la simetría CP y la violación del número bariónico— se cumplen en la naturaleza. ¿Existe un proceso que

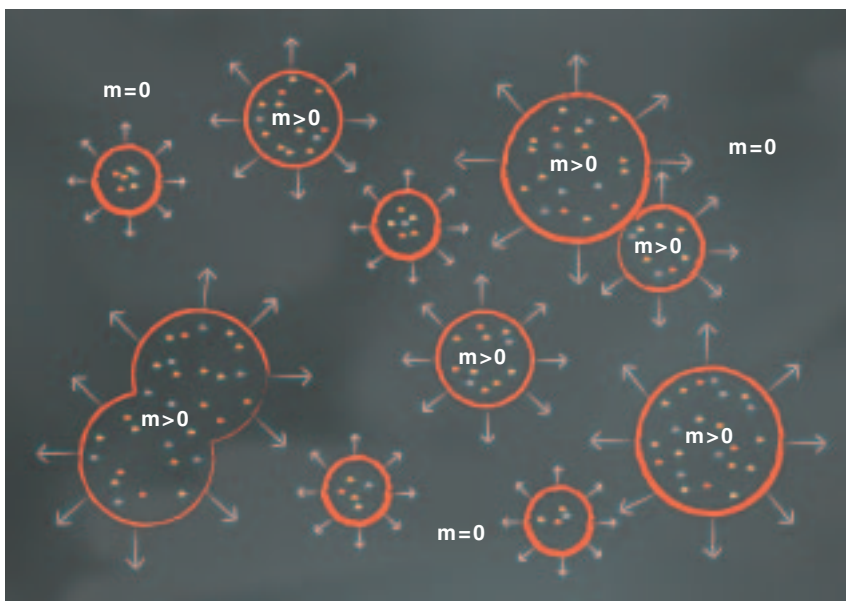


7. LA VIOLACION DEL NUMERO BARIO-NICO quizá se deba a una determinada interacción entre quarks y leptones, dos grandes clases de partículas elementales. En ella intervendrían quarks de las tres generaciones del modelo estándar de las partículas elementales y un leptón de cada una de las correspondientes generaciones de leptones (*izquierda*). A bajas temperaturas, esa interacción requiere un "túnel cuántico", donde el sistema acomete una transición que, en condiciones normales, demandaría una aportación de energía (*arriba*). Figuradamente hablando, el sistema abre un "túnel" a través de una barrera de energía. A temperaturas más altas, la transición puede sobrepasar la barrera: se realiza una interacción de esfalerón.

satisfaga la tercera condición, la pérdida del equilibrio térmico? Si así fuera, comprenderíamos el tamaño de la asimetría bariónica a partir de principios conocidos, sin tener que establecer nuevas hipótesis, y tendríamos de condiciones restrictivas para cualesquiera nuevas ideas físicas que predijesen un valor distinto de la asimetría bariónica.

Antes el agua hirviendo ha servido de ejemplo de pérdida del equilibrio térmico. Hay un proceso con ese mismo efecto en la teoría electrodébil a altas temperaturas, pero opuesto a lo que sucede cuando el agua hierve. En el universo primitivo se formaron burbujas a medida que el universo se enfriaba. La fase existente fuera de las burbujas no era usual; en esa fase las partículas carecían de la masa que tienen de ordinario. Sólo dentro de las burbujas las partículas recuperaban sus masas y generaban la física que conocemos. Las burbujas se expandieron y, finalmente, excluyeron del universo toda la fase exótica sin masa. Un proceso de este tipo constituye una transición de fase de primer orden.

¿Qué relación guarda ello con la bariogénesis? En esta teoría los esfa-



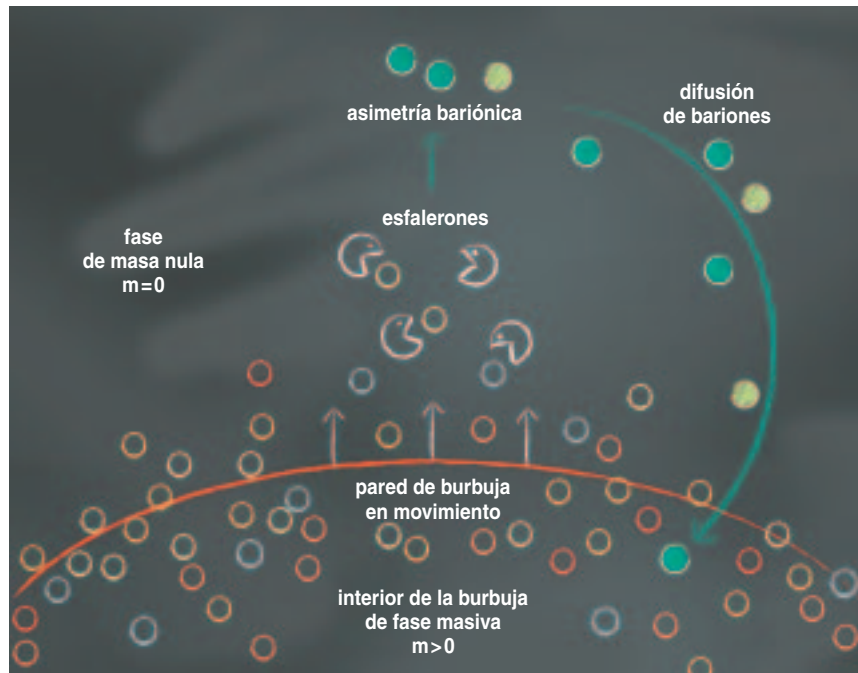
8. SEGUN LA TEORIA ELECTRODEBIL, se formaron burbujas mientras las altas temperaturas del universo primitivo se enfriaban. En su interior, las partículas tenían masa y la física era la ordinaria; la fase de fuera de las burbujas carecía de masa. Las burbujas se expandieron hasta que por fin eliminaron la fase exótica sin masa mediante una "transición de fase de primer orden".

lerones, la fuente de la violación del número bariónico, son mucho más débiles dentro de las burbujas (en el reino de la física ordinaria) que a extramuros de las mismas. Fuera no existe la “barrera” de energía que en condiciones normales los esfalerones han de pasar por efecto túnel; suceden sin ninguna barrera que superar. Por tanto, la violación bariónica es fuerte fuera de las burbujas y mucho más débil dentro. Finalmente, como se recordará, a bajas temperaturas los esfalerones se debilitan tanto, que resultan despreciables.

En la teoría electrodébil, al expandirse las burbujas y llenar todo el espacio, cada partícula del universo acaba por atravesar la pared de una de ellas hacia su interior. Andrew Cohen, de la Universidad de Boston, junto con David B. Kaplan y Ann Nelson, ahora en la de Washington, percibieron en 1990 que así se crea un mecanismo para la bariogénesis. Cuando los quarks encuentran la pared tienen cierta probabilidad de penetrar en el interior de la burbuja o de rebotar hacia el exterior. La violación de CP permite que esta probabilidad difiera para quarks y antiquarks, y para quarks levógiros y dextrógiros. Supongamos que se crea una asimetría de los antiquarks levógiros en la fase sin masa a extramuros de las burbujas. Los esfalerones intentarán borrar esta asimetría; mas, al hacerlo, cambiarán el número bariónico total, generando una asimetría bariónica. Finalmente, esos bariones caerán dentro de las burbujas, que llenarán el universo.

Los esfalerones proceden con lentitud mayor dentro de la burbuja que fuera de ella. Como los ritmos no son iguales, los esfalerones quedan fuera del equilibrio en el interior de la burbuja. Tan decisivo resulta ello, que si no ocurriera así los esfalerones del interior de la burbuja destruirían la asimetría bariónica creada por los que están fuera.

En este repaso crítico he esbozado la trayectoria que seguí con mi colaborador Kimmon Kainulainen, de la Universidad de Jyväskylä, de Finlandia, en nuestra reciente búsqueda fallida de una teoría correcta de la bariogénesis. Llegamos a una manera de comprobar la teoría, a una pregunta cuantitativa: los esfalerones



9. EN LA SITUACION DESCRITA en la figura 8, los procesos esfalerónicos son mucho más débiles dentro de las burbujas que fuera, donde no tienen que atravesar por efecto túnel una barrera de energía. Esa diferencia proporciona un mecanismo para la bariogénesis. Podría establecerse una asimetría de los antiquarks levógiros en la fase sin masa. Los esfalerones intentarían borrar la asimetría, pero así cambiarían el número bariónico total, creando una asimetría bariónica. Los bariones se difundirían dentro de las burbujas que llenan el universo. Por desgracia, en el marco del modelo estándar de la física de partículas las burbujas sólo se forman si ciertas partículas son más bien ligeras: recientes experimentos realizados en aceleradores de partículas han probado que no son tan livianas como se necesitaría.

de dentro de las burbujas de nuestro universo ¿son tan lentos como para producir la asimetría bariónica observada? Ello depende del tamaño de la barrera energética que deban superar; o, en el lenguaje de los físicos, de la intensidad de la transición de fase. Si la transición es demasiado débil, la asimetría bariónica se reduce sobremanera.

Shaposhnikov y otros encontraron que la intensidad de la transición de fase depende, en el modelo estándar, de la ligereza de ciertas partículas: el bosón de Higgs y el quark “cima”. Recientes resultados de experimentos con aceleradores han demostrado que son bastante pesadas; en consecuencia, se debe admitir que la transición de fase resulta demasiado débil para explicar la bariogénesis, a no ser que se añadan nuevos principios físicos hipotéticos. No todas las condiciones de Sajarov pueden satisfacerse dentro del modelo estándar.

Supersimetría

¿Qué nueva física nos ayudaría? Una de las ideas mejor motivadas, la supersimetría, o SUSY, nació en 1970 en el Instituto Lebedev; la trajeron al mundo Yuri Golfand y sus colaboradores. La supersimetría extiende las simetrías que caracterizan las familias de partículas del modelo estándar y establece que, para cada clase conocida de partícula que tenga un cuanto de espín, es el caso de los quarks y los leptones, existe una supercompañera de espín nulo. No se han descubierto aún tales partículas; por tanto, se cree que tienen masas grandes, más allá de nuestra capacidad de detección. Pero SUSY logra explicar —en realidad se inventó para explicarlo— otro de los misteriosos números pequeños del modelo estándar, la masa de la partícula Higgs.

Las nuevas partículas predichas por la supersimetría aumentan la intensidad de la transición de fase



10. LA LEPTOGENESIS, la creación de las partículas ligeras conocidas como leptones, es una de las vías posibles para la creación de la materia. Si hay una asimetría entre ciertos leptones y sus antipartículas, los procesos esfalerónicos pueden convertir la asimetría leptónica en una asimetría bariónica. La interacción esfalerónica vendría a ser como abrir una válvula que igualase la asimetría leptónica y la bariónica. Los estudios relativos a los neutrinos, los leptones más fantasmagóricos, han aportado pruebas de que tienen masa, lo que ha alimentando el interés en la leptogénesis en cuanto clave de la bariogénesis. En tal caso, los objetos de mayor masa del universo se habrían originado gracias a las partículas más etéreas que se conocen.

electrodébil al elevar la barrera del esfalerón y salvar de los estragos de los esfalerones no suprimidos a los bariones que se hallan en las burbujas. SUSY proporciona nuevas fuentes de violación de CP, más intensas que los procesos demasiado débiles del modelo estándar. Pero esta propiedad se ha convertido en el talón de Aquiles del modelo. Los mismos procesos que violan la simetría CP crean momentos dipolares eléctricos de quarks, electrones, neutrones y núcleos atómicos bastante grandes. Esos momentos deben cumplir las restricciones impuestas por los experimentos, que sólo miden sus límites superiores. Por un tiempo, se pudo imaginar que las fuentes supersimétricas de violación de CP se conjugasen de modo que crearan una asimetría bariónica grande y al mismo tiempo diesen momentos dipolares eléctricos pequeños. Con el tiempo, la acumulación de datos experimentales ha ido, sin embargo, quitando verosimilitud a estas expectativas.

La mayoría de los expertos considera hoy que la versión mínima de la bariogénesis electrodébil basada en la supersimetría está muerta o, por lo menos, es muy improbable. Cabría resucitarla complicando el modelo mínimo con partículas e interacciones extra. Quizá se descubran tales

añadidos cuando entre en funcionamiento en 2007 el que será el mayor acelerador de partículas del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones del Laboratorio Europeo de Física de Partículas, el CERN, en Ginebra. Hasta entonces, esas versiones adornadas de la teoría permanecerán en el reino de la especulación.

Leptogénesis

Tras la agonía de la bariogénesis electrodébil, otra idea ha venido a ocupar su puesto: la bariogénesis vía *leptogénesis*. Aunque la teoría electrodébil no puede satisfacer fácilmente con bariones las tres condiciones de Sajarov, no resulta difícil adaptar el argumento para crear una asimetría de otras clases de partículas, en concreto la de los leptones, que incluye electrones, muones, partículas tau y neutrinos. Se puede establecer una asimetría entre neutrinos y antineutrinos. Pero estamos constituidos por bariones, no por fantasmagóricos neutrinos; ¿de qué le sirve esa asimetría neutrónica a la bariogénesis?

De nuevo el proceso del esfalerón ofrece un instrumento para pensar acerca de la asimetría. Recordemos que en los esfalerones participan tanto leptones como quarks. Por esta razón, es casi imposible crear una asimetría leptónica a altas tempera-

turas sin que se convierta, al menos parcialmente, en una asimetría bariónica. Poner en marcha las interacciones esfalerónicas es abrir una válvula que iguala las asimetrías leptónica y bariónica.

La leptogénesis se apoya en la desintegración de los neutrinos pesados, partículas hipotéticas cuya existencia se requiere para explicar por qué los ligeros neutrinos del modelo estándar apenas tienen masa. La carencia absoluta de carga eléctrica y casi completa de masa de los neutrinos del modelo estándar los vuelve fantasmagóricos. Aunque en el universo abundan casi tanto como los fotones, muy rara vez interactúan con otras partículas. Ha costado estudiar si tienen masa y hasta qué punto es pequeña. Se han usado toda clase de ingeniosas técnicas para observar los neutrinos del Sol, de las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera de la Tierra y de los reactores nucleares. Cada vez hay más pruebas de que los neutrinos tienen masas no nulas. Este hallazgo alimenta el interés en la leptogénesis en cuanto clave de la bariogénesis.

Por desgracia, no está claro que la leptogénesis pueda comprobarse directamente. Que las masas conocidas de los neutrinos cumplan los requisitos de la leptogénesis da esperanzas, pero dista de ser una prueba. Podemos esperar que la futura observación de raras desintegraciones —la del pesado muon, por ejemplo, en un electrón y un fotón— proporcionará más pruebas circunstanciales de la leptogénesis. Quizá sólo podamos esperar signos que apunten hacia la leptogénesis y nunca tengamos una verdadera prueba.

De cuerdas e ideas postergadas

En nuestro empeño por entender la naturaleza del universo, los teóricos a menudo debemos admitir que nos hemos introducido en un callejón quizá sin salida, que hemos dado con una pregunta a la que nunca podremos contestar de manera satisfactoria. La esperanza de muchos cosmólogos de resolver tales cuestiones radica en la búsqueda de una teoría fundamental que haga predicciones universales, de las que se deducirían sin ambigüedades las respuestas de las cuestiones menores.

Los desarrollos recientes en una teoría fundamental, la teoría de cuerdas, nos hace sospechar que nuestras preguntas sobre números pequeños cuenten con una multitud de respuestas, no con una sola, inequívoca, o que haya una plétora de teorías que se apliquen en regiones diferentes del universo, regiones que, a efectos prácticos, se podrían considerar universos separados, ya que no se comunicarían entre sí. No tendríamos manera, *a priori*, de predecir qué fase de la teoría se aplica en la región que nos ha tocado.

Sin embargo, sólo algunas de las fases disponibles en la teoría de cuerdas son compatibles con nuestra existencia, ya que otras predicen universos con condiciones hostiles al desarrollo de vida. Algunos querrían restringir la atención a las fases de la teoría de cuerdas compatibles con nuestra propia existencia. Muchos consideran este "principio antrópico" una renuncia a hacer ciencia de verdad. Su reaparición en la teoría de cuerdas ha polarizado a los físicos teóricos.

La existencia humana restringe muchos de los parámetros de las leyes que gobiernan la física que conocemos. Estas leyes deben definirse de manera que se ajusten a lo que observamos, un universo que contiene vida. La asimetría bariónica, ¿es antrópicamente dependiente? Es decir, ¿qué sacaríamos de buscar sólo va-

lores compatibles con nuestra propia existencia? Se ha argumentado que valores comprendidos entre 10^{-4} y 10^{-11} cumplen esa condición: permitirían que hubiese estrellas y galaxias (lo que no sería posible si escasease demasiado la materia), e impedirían que la producción de helio superara la de hidrógeno (como sucedería si la asimetría fuese demasiado grande), en cuyo caso no habría agua y las estrellas se consumirían antes de que la temperatura del universo llegara a ser la adecuada para la vida. Debido a que estas limitaciones dejan un intervalo bastante grande de posibles valores, los argumentos antrópicos no afectan demasiado a la teoría, así que podemos dejar de lado el debate antrópico y seguir buscando una explicación dinámica y determinista del origen de la materia.

Tendría su gracia que la teoría más en boga hoy, la leptogénesis, fuese cierta. Significaría que los objetos de mayor masa del universo tendrían su origen en las partículas más etéreas que conocemos, los neutrinos. Por mi parte, aún pongo esperanzas en la idea postergada, la bariogénesis electrodébil supersimétrica. Puede que todavía haya atajos que no se hayan visto y maneras de satisfacer las limitaciones experimentales impuestas a la teoría, y quizá se pueda comprobarla con más detalle cuando el Gran Colisionador de Hadrones empiece a funcionar.

El autor

James M. Cline es profesor de física en la Universidad McGill, en Montreal. Ha trabajado en varias áreas de la física de las partículas elementales, incluyendo sus implicaciones para la cosmología primitiva así como la presente expansión acelerada del universo.

©American Scientist Magazine.

Bibliografía complementaria

VIOLATION OF CP INVARIANCE, C ASYMMETRY, AND BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE. A. D. Sakharov en *JETP Letters*, vol. 5, págs. 24-27; 1967.

CP-NONINVARIANCE AND BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE. V. A. Kuzmin en *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 12, págs. 228-230; 1970.

ON THE ANOMALOUS ELECTROWEAK BARYON NUMBER NON-CONSERVATION IN THE EARLY UNIVERSE. V. A. Kuzmin, V. A. Rubakov y M. E. Shaposhnikov en *Physics Letters B*, vol. 155, págs. 36-42; 1985.

SUPERSYMMETRIC ELECTROWEAK BARYOGENESIS IN THE WKB APPROXIMATION. J. M. Cline, M. Joyce y K. Kainulainen en *Physics Letters B*, vol. 417, págs. 79-96; 1998.

ORIGIN OF THE MATTER-ANTIMATTER ASYMMETRY. M. Dine y A. Kusenko en *Reviews of Modern Physics*, vol. 76, págs. 1-30; 2004.



FISICA

INVESTIGACION CIENCIA

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Identidad cuántica,

de Peter Pesic
Septiembre 2003

Agujeros negros en condensados de Bose-Einstein,

de Carlos Barceló y Luis J. Garay
Febrero 2004

Borrado cuántico,

de S. P. Walborn, M. O. Terra, S. Padua y C. H. Monken
Febrero 2004

Átomos del espacio y del tiempo,

de Lee Smolin
Marzo 2004

Gases de Fermi

atrapados ópticamente,
de John E. Thomas y Michael E. Gehm
Marzo 2005

Geometría no conmutativa y espaciotiempo cuántico,

de José L. Fernández Barbón
Marzo 2005

Condensados de Bose-Einstein y microchips,

de Jakob Reichel
Abril 2005



Prensa Científica, S.A.