

SOBRE LA MATERIA BARIÓNICA

Los científicos que en la primera mitad del siglo XX propusieron la Teoría de la Gran Explosión daban como un hecho a priori, como un hecho inicial de partida, el contenido en materia bariónica del Universo. No se consideraba necesario que la existencia de un Universo de materia bariónica fuera algo que necesitara ser explicado teóricamente por la Cosmología. Pero el descubrimiento de la antimateria bariónica hizo que algunos físicos, como Andrei Sajarov, comenzaran a hacerse preguntas.

El concepto de antimateria no había aparecido en la Física hasta los trabajos de Paul Adrian Dirac (1902-1984) en 1928. En una época donde se trataba de desarrollar las ideas de la Mecánica Ondulatoria de Schrödinger-De Broglie, o se trataba de hacer compaginar con los hechos reales el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, apareció en los trabajos de Dirac el concepto de antimateria. Planteó la necesidad de que hubieran partículas que se contrapusieran a los electrones, serían los "antielectrones", que llamó *positrones*, con igual masa que ellos.

Estas ideas de Dirac fueron confirmadas ya en 1932 por los trabajos del equipo de Carl Anderson en el Instituto Tecnológico de California, al detectar en el choque de haces de rayos cósmicos la partícula positrónica. Otro equipo de investigadores, en la Universidad de Berkeley, lograron en 1955 detectar un antiprotón. Formaban parte del equipo investigador entre otros, los físicos Emilio Segre, Owen Chamberlain y Tomas Ypsilantis. Asimismo, ya en 1959, y en el mismo laboratorio, se descubrió también la existencia real del antineutrón (Bruce Cork, William Wenzel y otros).

Se había detectado, pues, en 1959, la existencia de la antimateria bariónica (antiprotones, antineutrones) como algo real, como antipartículas simétricas de protones y neutrones, a la par que el positrón como antipartícula simétrica del electrón.

Aparte de eso, en los años siguientes fueron descubriéndose otras antipartículas de mayor complejidad, como el antideuterio, antihelio, antitritio, etc.

En 1981 se pudo realizar el primer choque controlado entre partículas materiales y sus correspondientes antipartículas obteniéndose en el proceso de aniquilación cantidades enormes de energía (de acuerdo con la expresión $E=mc^2$) como rayos gamma. Comparativamente con la fusión nuclear, se tendría:

- Choque aniquilador de un kg de materia con un kg de antimateria:.. $1,8 \cdot 10^{17}$ Joules
- Fusión nuclear de un kg de isótopos de Hidrógeno:..... $4,2 \cdot 10^{15}$ Joules

Por analogía, si asignamos una antipartícula a cada partícula, también ocurrirá que las partículas más fundamentales, los quarks, tendrán su correspondiente antiquark.

Hoy día sabemos que los fermiones, las partículas que siguen la estadística de Fermi-Dirac, son los bariones y los leptones, y los únicos estables son los bariones. Protones y neutrones, partículas formadas por tres quarks, representan el grueso de la materia bariónica, la materia que conocemos en nuestro acontecer diario, en la vida corriente, en la cotidianidad de los hechos físicos. La antimateria correspondiente serían los antiprotones y antineutrones, formados por tres antiquarks. Protones y neutrones son las partículas "pesadas" que, junto con los electrones, constituyen la materia que vemos y en la que existimos.

Ya en los años sesenta, el científico ruso Andrei Sajarov (1921-1989) se hizo una pregunta clave: ¿porqué la materia bariónica ha predominado sobre la antimateria bariónica, si ambas tendrían que haber aparecido con los mismos niveles desde el momento del Big Bang?.

Desde la Gran Explosión comenzó la formación de materia bariónica, de antimateria bariónica y de radiación (fotones). Nos encontramos con los siguientes aspectos:

- La materia bariónica es mayor que la antimateria bariónica. Puesto que la materia y su antimateria se aniquilan mutuamente, parece obvio que estamos en un Universo en el que predomina la materia bariónica.

- En lo que respecta a la radiación, se ha detectado la densidad de materia bariónica y la densidad de radiación con estos resultados:

Densidad de materia bariónica:

$$d_{mb} = 0,2 \text{ bariones} / m^3$$

Densidad de radiación:

$$d_{fotones} = 333 \cdot 10^6 \text{ fotones} / m^3$$

El cociente de ambas densidades es lo que se denomina *asimetría bariónica*:

$$ab = \frac{d_{mb}}{d_{fotones}} = \frac{2}{333} \cdot 10^{-7} = 6 \cdot 10^{-10}$$

En lo que respecta al primero de estos aspectos, es necesario comprender que la hipótesis de que la materia bariónica pudiera ser del mismo orden que la antimateria bariónica (esto es, que exista una simetría bariónica tendente a cero, $ab \rightarrow 0$) surge de forma natural, puesto que simetrías de este tipo existen en la estructura del Universo (polo norte-polo sur, carga positiva-carga negativa, materia-antimateria, ...). El número que nos da la densidad de bariones se determina en general por la concentración relativa de elementos ligeros (deuterio, helio, litio, ...) que se formaron cuando los bariones se unieron para formar los núcleos atómicos (es la etapa de formación del universo que se conoce como *nucleosíntesis del gran estallido*).

En cuanto al segundo de los aspectos, sabemos que todas las partículas tienen análogo comportamiento a temperaturas extraordinariamente altas. Salvo que en el primitivo universo hubiera tenido lugar un fenómeno o fase especial, las densidades de materia bariónica y de radiación tendrían que ser del mismo orden. Es decir, la asimetría bariónica, ab , tendrá que aproximarse a la unidad ($ab \rightarrow 1$).

Sin embargo, el valor de $ab = 6 \cdot 10^{-10}$, hoy día generalmente aceptado por todos los especialistas, nos indica que en el contexto del universo existe una acusada asimetría bariónica. La física teórica intenta descubrir el porqué de esta asimetría. Se ha intentado explicar el valor medido de ab de forma concordante con el modelo estándar de la física de partículas. Se ha tenido en cuenta, por ejemplo, la posibilidad de que ab surja de una asimetría más profunda existente en los quarks, componentes básicos de la materia bariónica, de los bariones. En realidad, hace apenas unos años, en 2003, muy precisas medidas en las fluctuaciones de temperatura que presenta la radiación cósmica del fondo de microondas confirmaron claramente el indicado valor de la asimetría bariónica.

Se nos plantea entonces la cuestión de cómo explicar la asimetría bariónica. ¿De donde procede?. ¿Es factible una teoría de la bariogénesis, de la generación de los bariones?. En lo que respecta al hecho de que predomine la materia bariónica sobre la antimateria bariónica, ha sido estudiada la posibilidad de que realmente exista tanta materia como antimateria bariónica, esto es, que el número de bariones y de antibariones sean prácticamente del mismo orden, solo que estarían materia y antimateria separadas por distancias enormes que impiden su mutua aniquilación. Nosotros viviríamos, según esta hipótesis, en una zona del Universo en donde predominan los bariones, encontrándose la antimateria bariónica más allá del universo observable por nosotros.

Si fuera así, si existieran bloques galácticos de antimateria bariónica, nuestras observaciones habrían de detectar regiones fronterizas materia-antimateria, en donde la radiación gamma que se emitiría en los procesos de aniquilación (fotones de alta energía) sería detectable por nosotros. No se observa, obviamente, nada de esto, ni se deduce ningún proceso especial por el que en el primitivo universo habría de separarse la materia de la antimateria.

Nos induce todo esto, por consiguiente, a estudiar la construcción de una teoría que de algún modo explique la asimetría bariónica.

En realidad se han propuesto diversos esquemas para explicar el proceso de bariogénesis dentro de las llamadas Teorías de Gran Unificación (*Grand Unified Theories-GUT*). Uno de los más sencillos esquemas es el que detallamos a continuación.

Una partícula subatómica X del primitivo Universo se desintegra en materia y en antimateria, al igual que su antipartícula X'. La asimetría surge cuando la línea de desintegración es distinta para X y para X'.

Así, por ejemplo, si X se desintegra en dos quarks arriba (up) por una parte, y en un antiquark abajo ($d\bar{u}$) más un positrón (e^+) por otra, con probabilidades distintas, pongamos 51% y 49% respectivamente, se tiene un balance neto de materia bariónica que podemos calcular con facilidad, si tenemos en cuenta que los bariones ordinarios, protones y neutrones, están formados por tres quarks

(es decir, el número bariónico de un quarks es $1/3$, o dicho de otro modo, cada quark es la tercera parte de un barión).

Supongamos, pues, y por poner un ejemplo, que la partícula X se desintegra como materia bariónica (dos quarks arriba) el 51% de las veces y se desintegra como antimateria bariónica (antiquark abajo más positrón) el 49% de las veces, y que, por otra parte, la antipartícula X' se desintegra en materia antibariónica (dos antiquarks arriba) el 49% de las veces y en materia bariónica (un quark abajo más un electrón) el 51% de las veces. En esquema:

- Desintegración de X:

$$X \rightarrow \begin{cases} \text{mat_barionica} & \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_p \rightarrow 0,51 \cdot \frac{1}{3} \\ u_p \rightarrow 0,51 \cdot \frac{1}{3} \end{array} \right\} \rightarrow 0,51 \cdot \frac{2}{3} \\ \text{mat_antibarionica} & \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} d_w' \rightarrow 0,49 \cdot \frac{1}{3} \\ e+ \end{array} \right\} \rightarrow 0,49 \cdot \frac{1}{3} \end{cases}$$

$$\text{Balance de la desintegración: } 0,51 \cdot \frac{2}{3} - 0,49 \cdot \frac{1}{3} = 0,177 \text{ bariones}$$

- Desintegración de X':

$$X' \rightarrow \begin{cases} \text{mat_barionica} & \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} d_w \rightarrow 0,51 \cdot \frac{1}{3} \\ e- \end{array} \right\} \rightarrow 0,51 \cdot \frac{1}{3} \\ \text{mat_antibarionica} & \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_p' \rightarrow 0,49 \cdot \frac{1}{3} \\ u_p' \rightarrow 0,49 \cdot \frac{1}{3} \end{array} \right\} \rightarrow 0,49 \cdot \frac{2}{3} \end{cases}$$

$$\text{Balance de la desintegración: } 0,51 \cdot \frac{1}{3} - 0,49 \cdot \frac{2}{3} = -0,157 \text{ bariones}$$

Balance total de la desintegración de la partícula y su antipartícula: $0,177 - 0,157 = 0,02$ bariones.

Lo cual nos indica que se producirían 2 bariones por cada cien desintegraciones.

Tal cantidad de materia bariónica es mayor que la necesaria para generar la antisimetría bariónica que se observa, pero hemos de tener en cuenta la desintegración inversa ("integración") por la que los quarks realizan el proceso inverso, proceso que a altísimas temperaturas puede ser tan rápido como la desintegración directa, deshaciendo la indicada antisimetría.

Para que puedan tener lugar procesos como los del esquema anterior deben cumplirse algunas condiciones que violan principios generales y simetrías de carga y de paridad. Estas condiciones o leyes de los procesos de desintegración y generación de bariones fueron enunciadas por primera vez por el físico Andrei Sajarov, en los años sesenta, adelantándose en algunos años al resto de la comunidad científica.

- Primera condición: violación del número bariónico.

Si en un proceso de desintegración de una partícula X se obtienen dos quarks unas veces y un antiquark más un positrón otras veces, esto querría decir que X tiene un número bariónico de $2/3$ unas veces y de $-1/3$ otras. El admitir la posibilidad de ambos canales de desintegración significa, por tanto, admitir que la partícula X no tiene un inequívoco número bariónico.

- Segunda condición: pérdida del equilibrio termodinámico.

En el primitivo universo las partículas subatómicas X, junto con sus correspondientes antipartículas, se desintegran constantemente en quarks y electrones, o en antiquarks y positrones, originando el descrito proceso de antisimetría bariónica, pero también tiene lugar el proceso inverso, por el cual los quarks se juntan para formar los bariones, deshaciendo dicha antisimetría. Para que se mantenga la antisimetría es necesario que se reduzca la desintegración inversa de forma que un par de quarks no adquiera la suficiente energía que le permita formar un barión. Esta situación de desequilibrio ocurriría debido a la

disminución de temperatura originada por la expansión del Universo, al modo que en una olla hirviendo se pierde el equilibrio termodinámico al destapar la olla.

- Tercera condición: violación de las simetrías de carga (C) y de paridad (P).

La simetría C, de carga, indica que en las transformaciones de partículas la conjunción de la carga transforma una partícula en su correspondiente antipartícula.

La simetría P, de paridad, transforma una partícula dextrógira en una partícula levógira, y viceversa. Esto es, tal simetría cambia el spin de las partículas.

La combinación de ambas transformaciones es lo que se conoce como simetría CP.

Las violaciones de las simetrías C y P son investigadas en laboratorio desde los años cincuenta, habiéndose encontrado solamente una débil violación de CP en el año 1964. Actualmente siguen buscándose en laboratorios de EEUU y Japón fuentes de violaciones intensas de CP.

Sajarov indicó que para el desarrollo de la bariogénesis habrían de violarse ambas simetrías, es decir, tanto la simetría de carga como de paridad. Esto habría de ocurrir porque si se hubiera satisfecho CP durante toda la historia del Universo, la única asimetría que se crearía sería obviamente entre quarks levógiros y quarks dextrógiros, simetría igual y opuesta entre quarks dextrógiros y quarks levógiros, permaneciendo intacta la simetría global.

Se creyó desde el primer momento que la simetría CP es exacta, sin embargo en 1964 se realizaron experimentos que comprobaron un proceso que violaba mínimamente dicha simetría (experimento de James Cronin, Val Fitch y René Turlay – Laboratorio Nacional de Brookhaven) al encontrar que aparecían dos partículas en ciertas desintegraciones que eran realmente una sola: el caso del kaón.

Se siguen buscando experimentalmente nuevas violaciones de CP, pues la débil violación que aparece en la desintegración de los kaones no es capaz, por sí sola, de provocar la también débil asimetría bariónica observada.

Documentación complementaria:

Sakharov, A.D.; Violation of CP Invariante, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe. JETP Letters, 1967.

Kuzmin, V. A.; CP-Noninvariance and Baryon Asymmetry of the Universe. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1970.

Kuzmin, V. A. - Shaposhnikov, M.E.; On the Anomalous Electroweak Baryon Number Non-Conservation in the Early Universe. Physics Letters B, 1985.

Cline, J.M. - Joyce, M. - Kainulainen, K.; Supersymmetry Electroweak Baryogenesis in the WKB Approximation. Physics Letters B., 1998.

Dine, M. - Kusenko, A.; Origen of the Matter-Antimatter Asymmetry, Reviews of Modern Physics, 2004.

El presente artículo se basa en el artículo de James M. Cline: "El Origen de la Materia", publicado en la revista Investigación y Ciencia en el número del mes de junio de 2005.

reflexiones@casanchi.com
casanchi.com