

6

El mundo de las antipartículas

Por Manuel Ramón FERNANDEZ PEREZ (*)

En el año 1930, justo hace medio siglo, los físicos conocían la existencia de sólo tres partículas fundamentales: protón, electrón y fotón, pues, si bien el neutrón ya había sido predicho por W. D. Harkins y E. Rutherford en 1919, su detección experimental no fue llevada a cabo hasta 1932 por el inglés James Chadwick.

En 1925 el matemático alemán Erwin Schrödinger había obtenido su famosa ecuación de ondas para la materia, aplicable a un movimiento no relativista de las partículas.

$$i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta + V \right) \Psi$$

(m_0 , masa en reposo de la partícula; t , tiempo; V , energía potencial; \hbar , constante de acción de Planck), siendo $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ el operador laplaciano,

pero cuando intentó deducir una ecuación de ondas con invariancia relativista se vio acometido por una serie de dificultades que le hicieron desistir de su búsqueda. Sin embargo, dos años más tarde, el inglés Paul Adrien Maurice Dirac logró solucionar el problema, obteniendo una ecuación de ondas relativista que describe la evolución de un electrón o de cualquier otra partícula de spin 1/2 libre o en un campo electromagnético. La ecuación de Dirac es lineal con respecto a las coordenadas y al tiempo, con cuatro componentes, dos de las cuales corresponden a soluciones de energía positiva, con los dos posibles valores de la tercera componente del spin (+ 1/2, ó - 1/2), y las otras dos soluciones de energía negativa con idénticos valores del spin. Para una partícula libre toma la forma:

$$i \frac{c}{\hbar} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t} - \alpha_x \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \alpha_y \frac{\partial \Psi}{\partial y} - \alpha_z \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = \beta m_0 c^2 \Psi$$

(c , velocidad de la luz en el vacío; x, y, z , coordenadas), siendo $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ y β matrices 4×4 .

Del análisis de la ecuación de ondas de Dirac se deducen, entre otras, dos importantísimas conclusiones: en primer lugar, en 1925, el físico suizo-austriaco Wolfgang Pauli y los holandeses George Eugene Uhlenbeck y Samuel Abraham Goudschmidt, con objeto de justificar la estructura fina de las líneas espectrales de algunos elementos, a la vez que explicar el efecto Zeeman anómalo, se vieron obligados a introducir la hipótesis del spin electrónico, el cual daba lugar para el electrón a un momento angular de spin de valor $p_s = \frac{1}{2} \hbar$, y a un momento magnético

$$\mu_s = \frac{e \hbar}{2 m c}$$

. Pues bien, la ecuación de Dirac conduce a valores teóricos en perfecto acuerdo con estos resultados experimentales, por lo que en la actualidad se considera que describe correctamente el movimiento del electrón. Sin embargo, esta ecuación no es aplicable a los nucleones, a pesar de que su momento angular de spin es también $\frac{1}{2} \hbar$,

ya que los momentos magnéticos de estas partículas predichos por la ecuación no se corresponden con los experimentales. Por otra parte, el mesón μ , cuyo momento magnético parece ser predicho correctamente, es presumible que obedezca a la ecuación de Dirac.

En segundo lugar, la teoría de Dirac exige que pueda existir un electrón en estados de energía negativa de una forma exactamente idéntica que en los de energía positiva. En efecto, la expresión relativista de la energía:

$$-p^2 c^2 + E^2 - m_0 c^4 = 0, \\ \text{o, lo que es lo mismo:} \\ \pm E = \sqrt{(pc)^2 - (m_0 c^2)^2}$$

(E, p y m_0 , energía, momento y masa en reposo del electrón, respectivamente; c , velocidad de la luz en el vacío) hace que a un momento p dado le correspondan dos valores de la energía, y, ya que p puede tomar cualquier valor entre cero e infinito, existen evidentemente dos intervalos de energía para el electrón:

$$m_0 c^2 < E < \infty, \quad \text{y} \quad -m_0 c^2 > E > \infty$$

Según la mecánica clásica, la energía varía de un modo continuo, y, de acuerdo con ello, un electrón de energía positiva nunca podrá alcanzar un estado de energía negativa, dado que para ello se verá precisado a dar un salto de energía de $2m_0 c^2$ ($\cong 1,02$ MeV). Sin embargo, este salto es perfectamente factible en el marco de la teoría cuántica, donde las partículas tienden a pasar de un nivel de energía superior a otro inferior, emitiendo la diferencia de energía en forma de radiación electromagnética. Surge entonces aquí la paradoja de por qué los electrones de energía positiva no caen a los estados de energía negativa y, para solucionar el problema, Dirac formuló en 1930 la «teoría de los huecos», postulando que todos los estados posibles de energía negativa están llenos, ocupados por electrones, y son, por consiguiente, inobservables, formando así el vacío como un vasto y compacto mar de partículas, todas con masa inerte negativa (lo cual significa que se mueven en sentido contrario a aquél en que actúa la fuerza), presentándose como un gas de Fermi de densidad infinita que no da lugar a ningún efecto ni gravitatorio ni electromagnético. Por lo tanto, de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, un electrón de energía positiva no puede caer en un estado de energía negativa. Sin embargo, sí puede suceder el proceso inverso, pues una radiación cuyos fotones sean de energía superior a 1,02 MeV es capaz de arrancar un electrón del mar de electrones de energía negativa, haciéndolo pasar a un estado de energía positiva y apareciendo como un electrón ordinario observable (fig. 1). La ausencia del electrón de energía negativa origina un hueco o agujero que puede ser interpretado por un observador, respecto al vacío, como una partícula de energía positiva y de masa idéntica y carga opuesta al electrón, que se denomina en la actualidad positrón, y a la que Dirac designó con el nombre

(*) Catedrático de Física y Química del I. B. «Calderón de la Barca», de Gijón (Oviedo).

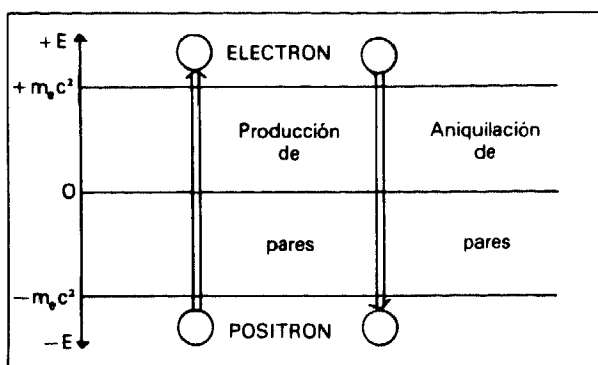


Fig. 1. — Producción y aniquilación de pares, según la teoría de Dirac.

de antielectrón. Por lo tanto, siempre que se forma un positrón, aparece simultáneamente un electrón, ya que precisamente la ausencia de este electrón del mar de energía negativa inobservable es lo que constituye el positrón. En realidad, el proceso de creación del par electrón-positrón puede considerarse como la *materialización de la energía*, ya que justamente la formación de dicho par hace desaparecer una cantidad de energía de $2m_e c^2$, que se transforma en materia.

Tras las predicciones teóricas de Dirac, la detección experimental del positrón fue lograda por vez primera en 1932 por el norteamericano Carl David Anderson, del Instituto de Tecnología de California, al observar fotografías de las trazas de los rayos cósmicos en una cámara de niebla, situada entre las dos piezas polares de un potente electroimán. Fue precisamente Anderson quien dio el nombre de positrones a las partículas detectadas. Los parámetros más importantes que hoy conocemos del positrón vienen resumidos en la tabla de la figura 2, acompañados por los correspondientes al electrón, para que se puedan comparar con facilidad.

Ya se ha dicho anteriormente que la formación de un par electrón-positrón se traduce en la desaparición de una cantidad de energía de $2m_e c^2$. Experimentalmente se puede conseguir la creación de dicho par haciendo pasar un fotón de energía superior a 1,02 MeV cerca de un núcleo o una partícula cargada (Fig. 3), pues la presencia de esta tercera partícula es necesaria para que se cumplan las leyes de conservación de la cantidad de movimiento y de la energía. El exceso de energía del fotón, $h\nu - 2m_e c^2$, aparece como energía cinética de ambas partículas creadas, que se distribuye entre ellas de forma aleatoria, de manera que cualquiera de las dos puede recibir aproximadamente con la misma probabilidad cualquier energía entre cero y $h\nu - 2m_e c^2$, si bien, a causa de la repulsión electrostática del núcleo, el positrón recibe en promedio más energía que el electrón. Por otra parte, el núcleo, debido a su gran masa, sólo recibe una fracción insignificante de la energía. La distribución de energía entre las dos partículas del par no condiciona la dirección de retroceso del núcleo, por lo que las direcciones del electrón y del positrón están distribuidas al azar.

En el estudio de los chaparrones (chorros de partículas electrificadas producidas por los rayos cósmicos) con la cámara de niebla, se observa con bastante frecuencia la salida desde un punto de dos trayectorias igualmente encorvadas en sentidos contrarios correspondientes a un par electrón-positrón. La radiación γ del Th C'' es de una energía $h\nu = 2,62 \text{ MeV} > 1,02 \text{ MeV}$, por lo que puede emplearse para la creación de un par. En efecto, se ha realizado la experiencia de lanzar un haz de dichos rayos y sobre una lámina delgada de plomo, situada en el centro de una cámara de

	Electrón	Positrón
Símbolo.....	e^-	e^+
Carga eléctrica, Q.....	-1	+1
Masa en reposo, MeV.....	0,511	0,511
Spin.....	1/2	1/2
Número leptónico, L.....	+1	-1
Número bariónico, B.....	0	0
Extrañeza, S.....	0	0
Vida media.....	∞	∞

Fig. 2

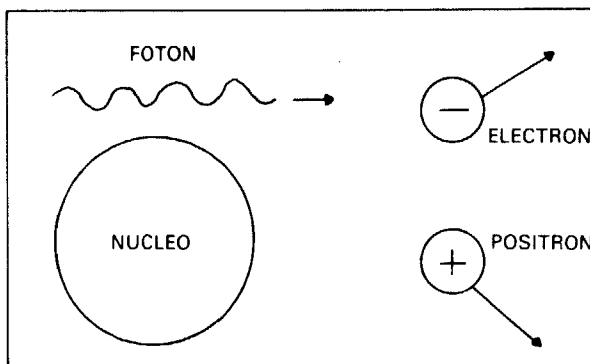


Fig. 3. Producción de pares

niebla, viéndose la aparición de las dos trayectorias de las partículas del par desviadas por la acción del campo magnético.

Ya en 1931 Dirac pronosticó la vida efímera del positrón: «El antielectrón no duraría mucho tiempo en el mundo. Si por un instante se moviera (como otras partículas en el mar que se agita alrededor) un electrón caería en el agujero y habría simultáneamente la destrucción de un par. Las dos partículas se aniquilarían una o otra y se sustraerían a nuestra observación». Y en realidad es así: la *aniquilación del electrón y del positrón* es un proceso que tiene lugar verdaderamente y que puede considerarse como el inverso del de formación del par, produciéndose con una liberación de energía de $2m_e c^2$ (fig. 1), sin que sea necesaria la presencia de núcleo o partícula alguna, puesto que esta energía aparece en forma de dos o tres rayos y en direcciones tales que se conserva la energía y la cantidad de movimiento. En 1933 los físicos franceses Jean Thibaud y Frederic Joliot llevaron a cabo este proceso de aniquilación haciendo incidir positrones sobre una lámina de platino y observando la producción de rayos γ de 24 UX de longitud de onda. Cada positrón absorbido origina dos fotones de cantidades de movimiento iguales opuestas y de 0,516 MeV de energía cada uno, valor que es aproximadamente el mismo que el de la energía correspondiente a la masa en reposo del electrón y del positrón, lo cual demuestra que la tendencia a combinarse de los positrones y electrones será mayor cuando sus velocidades sean pequeñas.

En realidad, cuando un positrón lento se detiene al pasar a través de la materia, puede unirse a un electrón, para formar un estado ligado de ambos, llamado *positronio* (nombre que fue sugerido en 1945 por el físico americano Arthur Edward Ruark), que dura un tiempo medible antes de producirse su aniquilación, y que se puede considerar como un átomo análogo al de hidrógeno, pero sin núcleo, moviéndose el electrón y el positrón en una órbita de Bohr alrededor de un centro de gravedad que coincide con el punto medio de la distancia que los separa. El positronio puede describirse asignándole los valores: $Z = 0$, $A = 0$ y $M = 2m_e$.

El estado más bajo del positronio ($n = 1$; $l = 0$) es un estado S, que tiene una estructura fina a causa de los spines

	Partícula	Antipartícula	
Hadrones	Bariones	Protón, p	Antiprotón, \bar{p} (o p^-)
		Neutron, n	Antineutrón, \bar{n}
		Lambda, Λ^0	Anti-Lambda, $\bar{\Lambda}^0$
		Sigma más, Σ^+	Anti-sigma menos, $\bar{\Sigma}^-$
		Sigma cero, Σ^0	Anti-sigma cero, $\bar{\Sigma}^0$
		Sigma menos, Σ^-	Anti-sigma más, $\bar{\Sigma}^+$
		Cascada menos, Ξ^-	Cascada más, $\bar{\Xi}^+$
		Cascada cero, Ξ^0	Anti-cascada cero, $\bar{\Xi}^0$
		Omega menos, Ω^-	Omega más, Ω^+
		Mesones	Kaones
k más, K^+	K menos, K^-		
Piones	pi más, π^+		Pi menos, π^-
	pi cero, π^0		El mismo, π^0
Leptones	Electrón, e^-		Positrón, e^+
	Mesón mu menos, μ^-		Mu más, μ^+
	Mesón tau menos, τ^-	Tau más, τ^+	
	Neutrino electrónico, ν_e	Antineutrino electrónico, $\bar{\nu}_e$	
	Neutrino muónico, ν_μ	Antineutrino muónico, $\bar{\nu}_\mu$	
Clasones	Fotón, γ	El mismo, γ	
	Gravitón,	El mismo.	

Figura 4. - Relación de partículas elementales transformadas una de otra por conjugación de carga.

del electrón y del positrón. Como los momentos angulares de spin de ambas partículas valen $1/2\hbar$, el número cuántico S del momento angular total de spin del positronio puede ser 0, cuando los dos spines están dirigidos en sentidos opuestos (en estado de singlete, parapositronio) ó 1, cuando son paralelos (en estado de triplete, ortopositronio). De los dos niveles del positronio, 1S_0 y 3S_1 , el segundo es el que tiene una mayor energía, siendo metaestable y de vida más larga que el estado simple ($1,5 \cdot 10^{-7}$ s y 10^{-10} s, respectivamente).

Tras los cálculos teóricos de J. Pirenne (1944), J. A. Wheeler (1946), Ore y Cecil Frank Powell (1949), que pusieron de manifiesto que un átomo de positronio en su estado 1S_0 se desintegra en dos rayos γ , cada uno de los cuales posee una energía total de m_0c^2 ($\approx 0,51$ MeV), mientras que, partiendo del estado 3S_1 , su desintegración origina tres rayos y cuyas energías totales son $2m_0c^2$, la existencia real del positronio fue confirmada experimentalmente por vez primera por el físico austriaco-americano Martín Deutsch en 1951.

Recientemente, en mayo de 1963, Dirac sugirió para el positrón una descripción diferente de la de 1930, haciendo asemejarse el electrón y el positrón a los dos extremos de una línea electromagnética de fuerza. De acuerdo con esta moderna imagen de Dirac, la aniquilación de un par sería comparable a juntar el extremo positivo de una línea con el negativo de otra; de este modo, los extremos (electrón y positrón) desaparecen, dejando sólo una línea de fuerza. Por el contrario, si se corta una línea de fuerza se origina la creación de un par de extremos positivo y negativo.

En la actualidad, y ya desde su descubrimiento, se considera el positrón como la antipartícula del electrón. El concepto de antipartícula surge directamente de la teoría de Dirac y resulta de la aplicación a una partícula de la transfor-

mación de simetría llamada *conjugación de carga*, la cual hace variar el signo de sus propiedades intrínsecas, permaneciendo sin alteración sus propiedades mecánicas. Supongamos que $\Psi_0(x)$ es la función de onda que representa la evolución de una partícula de Dirac de masa m y carga eléctrica e en un campo electromagnético. Si designamos la transformación de conjugación de carga por C_c y la aplicamos a $\Psi_0(x)$, se obtiene una nueva función de onda $\Psi'_0(x)$, tal que:

$$\Psi'_0(x) = C_c \Psi_0(x)$$

y que representa la evolución de una nueva partícula de la misma masa m , pero de carga eléctrica opuesta, $-e$.

En sentido más general, la conjugación de carga no se aplica sólo a las partículas descritas por la ecuación de Dirac y además no se trata de una simple transformación de simetría con respecto al signo de las cargas eléctricas, sino que también actúa sobre la estructura electromagnética interna de la partícula. En el caso de una partícula neutra cuya evolución venga representada por la función de onda $\Psi_0(x)$, la aplicación de la conjugación de carga puede ocasionar que la partícula quede invariante bajo su acción (son las llamadas partículas autoconjugadas: mesón π neutro, fotón y gravitón), o bien que cambie de naturaleza (como, por ejemplo, el neutrón, los neutrinos o la partícula lambda).

La conjugación de carga es una transformación que cambia la naturaleza de las partículas, pero que deja invariantes sus momentos angulares y sus posiciones. Podemos decir que es una operación de simetría asociada con el intercambio entre una partícula y su antipartícula correspondiente, de modo que las partículas elementales que se transforman unas en otras por conjugación de carga son antipartículas entre sí. El hecho de nombrar a algunas de ellas como partículas y a otras como antipartículas es, al menos en principio, totalmente convencional. En la tabla de la figura 4

podemos ver clasificadas las partículas elementales conocidas y sus correspondientes antipartículas, y en ella se aprecia que la antipartícula del protón recibe el nombre de antiprotón. Dirac ya lo predijo en 1931, al generalizar la teoría cuántica del electrón a los fermiones de spin $1/2$: «de modo parejo, los protones tendrían su propio mar de partículas densamente apretadas. En ciertas condiciones una partícula sería desalojada fuera de su mar, convirtiéndose en un protón ordinario y dejando un agujero de carga negativa que se comportaría como un antiprotón». Evidentemente, el antiprotón será producido a partir de energía, al mismo tiempo que el protón, lo cual determina la energía umbral, 1836 veces mayor que la necesaria para la formación del par electrón-positrón, y solamente asequible cuando el desarrollo de la tecnología hizo posible disponer de aceleradores de partículas lo suficientemente potentes. De esta manera, en octubre de 1955, Owen Chamberlain, Emilio Gino Segré, C. E. Wiegand y T. Ypsilantis, científicos del Laboratorio de Radiación de la Universidad de California, en Berkeley, crearon por vez primera el antiprotón, tras bombardear cobre durante largo tiempo con protones activados en un bevatrón con energía del orden de 56 GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$). El momento magnético del antiprotón es igual y de signo contrario al del protón (fig. 5). Además, los antiprotones sólo pueden crearse en parejas con los protones y se aniquilan con los nucleones, originando principalmente mesones π . La creación y la aniquilación se rigen por el hecho de que debe conservarse la carga eléctrica y el número total de nucleones. Los piones pueden entrar en el recuento y ser creados o aniquilados incluso uno por uno. Durante todo el proceso deben conservarse la energía, el momento y el momento angular.

Un año más tarde, en el otoño de 1956, los científicos de la Universidad de Berkeley, trabajando con el bevatrón, identificaron el antineutrón, partícula que se forma ocasionalmente en las colisiones entre protones y antiprotones. El antineutrón tiene igual masa, spin y constante de desintegración que el neutrón, pero, en cambio, sus momentos magnéticos son iguales y de sentidos contrarios. El por qué una partícula sin carga eléctrica, como el neutrón, puede tener un momento magnético es desconocido, si bien puede explicarse considerando al neutrón como una estructura compleja formada por un núcleo neutro, tal vez constituido por mesones, en opinión del físico americano Robert Hofstadter, a cuyo alrededor giran partículas positivas y negativas en sentidos contrarios.

Desde 1932 se sabe que los átomos están constituidos fun-

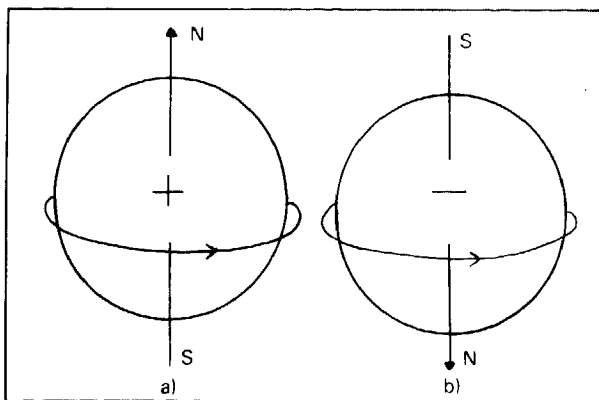


Fig. 5. — Protón y antiprotón.

a) El protón puede considerarse como una esfera giratoria cargada positivamente, con polos magnéticos norte y sur debidos a su momento magnético; b) el antiprotón con la misma masa, tiene una carga y un momento magnético numéricamente iguales, pero de signo contrario a los del protón. Estas representaciones son meramente simbólicas, pues ambas partículas sólo pueden ser descritas correctamente por la mecánica cuántica.

damentalmente por tres clases de partículas: protones y neutrones en el núcleo y electrones en la corteza. Al descubrirse, como acabamos de ver, sus correspondientes antipartículas, se hizo evidente, al menos en principio, la posibilidad de obtener para cada átomo su conjugado de carga. Cada antiátomo sería exactamente igual que un átomo, salvo que estaría formado por antipartículas, en vez de partículas: antiprotones y antineutrones en el núcleo y positrones en la corteza. De hecho, esto no es una mera suposición teórica, pues en 1965, en el Laboratorio de Brookhaven, al bombardear un blanco de berilio con protones de alta energía, se logró combinar antiprotones y antineutrones en la relación 1:1 para formar núcleos de antideuterio. También se ha producido el antihelio-3 y es casi seguro que se podrán obtener otros antinúcleos más complejos. Los antiátomos, al combinarse, darán lugar a la antimateria, cuya existencia es, por el momento, hipotética. Un átomo de antimateria aislado sería estable, pero si entrase en contacto con su correspondiente átomo de materia, inmediatamente ambos se aniquilarían, dando lugar a la formación de mesones π y otras partículas, que, a su vez, se transformarían en pocos microsegundos en rayos y neutrinos, los cuales, por tener una masa en reposo nula, se desplazarían necesariamente con la velocidad de la luz. De ahí que todo intento futuro de sintetizar antimateria en cantidades apreciables tenga que ir acompañado de las inevitables condiciones de aislamiento que imposibiliten su inmediata aniquilación. En principio, no sólo nuestro Sistema Solar, sino también todas las estrellas integrantes de la Vía Láctea están formadas de materia, ya que, en caso contrario, sería posible observar una intensa radiación y procedente de todas las regiones de nuestra galaxia; sin embargo, el hecho de que el satélite artificial Explorer XI haya detectado en 1961 una radiación de fotones y muy energéticos procedente de otras galaxias hace imposible extender la anterior afirmación a todo el universo, que, o bien puede estar todo él constituido de materia ordinaria, o bien la mitad de materia y la otra mitad de antimateria. La discusión de esta posible alternativa parte de un problema que aún está por resolver, y es el de si la masa gravitacional de las antipartículas es positiva o negativa. Aunque pueda repugnar a nuestra experiencia cotidiana, ni la teoría de la gravitación de Newton ni la de Einstein excluyen la existencia de masas negativas. Y, del mismo modo que las antipartículas poseen un campo electromagnético invertido con respecto a las partículas correspondientes, no hay nada que impida una posible inversión de su campo gravitatorio, de modo que, mientras dos partículas o dos antipartículas se atraen gravitatoriamente, una partícula y su correspondiente antipartícula se repelerían, designándose a esta repulsión con el nombre de antigravedad. Para obtener una respuesta directa a esta cuestión podría imaginarse una experiencia consistente, por ejemplo, en hacer pasar un haz de antiprotones a través de un tubo de vacío dispuesto horizontalmente, y observar si, debido a la acción de la gravedad, se dirige hacia abajo o hacia arriba. Esta última posibilidad, si se verificase, pondría de manifiesto la repulsión de las antipartículas por la masa de la Tierra, es decir, se confirmaría la hipótesis de la existencia de dos tipos de masa, de forma análoga a como existen dos tipos de carga eléctrica: positiva y negativa. Sin embargo, la experiencia presenta tales dificultades técnicas que hasta la fecha no ha podido ser realizada, pues, dado que las antipartículas producidas en los modernos aceleradores se mueven a velocidades próximas a la de la luz, su desplazamiento vertical en un tubo de vacío sería completamente inobservable. En efecto, si el tubo tuviese una longitud de 3 kilómetros, el haz de antipartículas lo recorrería en

un tiempo $t = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 10^{-5} \text{ s}$, y su desviación lateral en uno u otro sentido sería $H = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot (10^{-5} \text{ s})^2 \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, distancia del orden del diámetro

atómico. La utilización de moderadores para frenar el haz de antipartículas (y hacer, por consiguiente, mayor su desplazamiento vertical) es imposible, pues las antipartículas se aniquilarían en la primera colisión con los átomos de la materia ordinaria del moderador (grafito o agua pesada). El problema, por tanto, no está todavía resuelto, a pesar de la gran utilidad que reportaría en la explicación de infinidad de cuestiones cosmológicas, pues, si extrapolamos para todo el Universo el principio de conservación de la carga eléctrica que rige en nuestro mundo material, es lógico pensar que las partículas y antipartículas hayan sido creadas, o se estén creando, en igual número y que, en caso de existir antigravedad, la mútua atracción entre partículas de la misma especie y esta hipotética repulsión gravitacional entre partículas de especie opuesta provocaría la separación de ambas clases de materia: habría, así un Universo de materia y un Antiuniverso de antimateria, a los que el físico austriaco-americano Maurice Goldhaber, director del Brookhaven National Laboratory, designa con los nombres de «cosmon» y «anticosmon», respectivamente. Esta concepción cosmológica de un Universo doble, además de estar de perfecto acuerdo con las teorías del «Bing Bang» y del «Estado Constante», resulta sumamente coherente con la actual visión del mundo físico fundada en consideraciones de simetría, pues se establece un equilibrio perfecto en cuanto a materia y antimateria, a pesar de que nuestro propio Universo sea prácticamente pura materia.

Suponiendo que todo esto sea cierto, que en el Universo haya galaxias y antigalaxias, unas y otras no se podrían distinguir a través de la luz emitida, pues en ambos casos estaría constituida por fotones. Tal vez la distinción podría llevarse a cabo a través de los rayos cósmicos emitidos por ellas, pero lo que sí abre una perspectiva esperanzadora cara al futuro es el hecho de que, mientras las galaxias liberan neutrinos, las hipotéticas antigalaxias, si existiesen, emitirían antineutrinos. Hoy día, los neutrinos y antineutrinos son sumamente difíciles de observar, pero, cuando el avance de la tecnología haga más fácil su detección, si se localiza astronómicamente una fuente rica de antineutrinos, no habrá duda de que se tratará de una antigalaxia.

La posible existencia de antimateria en otras partes del Universo ha dado origen a múltiples especulaciones frontizas con la ciencia-ficción. Se ha hablado de que los asteroides de nuestro Sistema Solar tal vez fuesen restos de un antiguo planeta estallado en fragmentos a causa de la energía liberada en la colisión de materia y antimateria. También se ha sugerido que la gigantesca explosión que tuvo lugar en Siberia el 30 de junio de 1908 pudo tener su origen en el choque contra la Tierra de un meteoro de antimateria. Surgen, por otra parte, muchos interrogantes aún no resueltos: ¿De dónde proviene la enorme energía que se desprende en las explosiones galácticas, como, por ejemplo, la de Cygnus A? ¿Cuál es el origen del chorro luminoso observado en Messier 87? ¿Qué son, en realidad, los quasars?...

Pero, dejando aparte lo que pueda haber de cierto en todas estas especulaciones, de lo que no cabe duda es del gran interés que presenta la posibilidad de crear antimateria para su uso como combustible en los viajes espaciales. En efecto, mientras que en la fusión nuclear sólo se logra la transformación en energía de un 1 por 100 de la masa total, la aniquilación mútua de materia y antimateria supone su conversión total en energía. Hasta ahora no se ha logrado la creación de antimateria, pero tal vez, como dice Martín Gardner, fuese posible imantar antihierro y mediante campos magnéticos mantenerlo suspendido en el vacío y luego hacerlo combinarse lentamente con el hierro ordinario. De esta forma se podría aprovechar la energía de aniquilación.

Ya antes he mencionado que las propiedades de las antipartículas se obtienen a partir de las de la partícula corres-

pondiente mediante la operación de simetría llamada conjugación de carga. En la física de las partículas elementales se ha establecido el principio de invariancia de la naturaleza por efecto de la conjugación de carga: las leyes de la naturaleza no cambiarían si todas las partículas existentes fuesen sustituidas por sus correspondientes antipartículas; el Universo continuaría evolucionando de la misma forma, o, con otras palabras, particularizando, las mismas leyes que gobiernan a los átomos deben gobernar la vida de los antiátomos. En la actualidad se considera que, en general, un principio de simetría (o, lo que es equivalente, un principio de invariancia) da origen a una ley de conservación. Así, la invariancia de las leyes físicas ante una traslación espacial trae como consecuencia la conservación de la cantidad de movimiento, mientras que la invariancia ante una rotación espacial trae aparejada la conservación del momento angular. La invariancia que antes hemos considerado ante la conjugación de carga se traduce en la conservación de la paridad de carga, C. La simetría entre la izquierda y la derecha (o, lo que es lo mismo, la invariancia para la reflexión del espacio) se conoce ya desde muy antiguo, pero no fue hasta 1927 en que el físico húngaro-norteamericano Eugene Paul Wigner demostró que esta simetría derecha-izquierda es equivalente a la conservación de la paridad, P. Y, del mismo modo, la invariancia para la inversión del tiempo (las leyes físicas permanecen invariantes tanto si el tiempo discurre hacia adelante como hacia atrás) se traduce en la conservación de la paridad de tiempo, T.

Hasta 1956 se suponía que todas estas leyes de conservación se cumplían en todas las interacciones entre las partículas subatómicas. Pero, en el verano de ese año, los físicos chino-norteamericanos Chen Ning Yang y Tsung Dao Lee sugirieron y unos meses más tarde Chien Shiung Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes y R. P. Hudson llevaron a cabo una serie de experiencias que reflejaban la no equivalencia de los resultados obtenidos en una desintegración β del cobalto-60 al girar 180° el dispositivo experimental y que pusieron de manifiesto que tanto la paridad como la paridad de carga no se conserva en las interacciones débiles, lo cual significa que en este tipo de interacciones es posible distinguir entre derecha e izquierda y entre una partícula y su antipartícula correspondiente. Experimentalmente se ha comprobado que en todo proceso en que no se conserve la paridad tampoco se conserva la paridad de carga, pero por aquellas fechas lo que sí se creía que se conservaba en todas las interacciones era el producto CP: «las leyes físicas se mantienen invariantes si se efectúa una reflexión especular y, al mismo tiempo, se transforma toda la materia en antimateria» (C. N. Yang). Más tarde se encontró que las tres simetrías de reflexión (reflexión de carga, reflexión de espacio y reversión de tiempo) están relacionadas por un importante teorema, llamado teorema CPT de G. Lüders: «el producto CPT de las paridades de carga, espacio y tiempo de un sistema se conserva siempre invariante». El descubrimiento en 1964, por parte de los norteamericanos James Watson Cronin y Val Logsdon Fitch, de que el mesón K^0 puede desintegrarse en un mesón π^+ y en otro π^- , lo cual viola la conservación de CP, significó una profunda revolución en el campo de la Física de partículas y les valió a ambos investigadores el Premio Nobel de Física de 1980. Diez años más tarde se demostró que la violación de CP trae aparejada la de T, de forma que el teorema CPT se cumple siempre rigurosamente, como se ha comprobado, tanto teórica como experimentalmente.

Conviene, al llegar a este punto, considerar con cierto detalle el caso del neutrino. Es ésta una partícula neutra con masa en reposo nula y spin igual a $1/2$, que se emite en la desintegración β y otras desintegraciones débiles. La existencia del neutrino fue postulada inicialmente por Wolfgang Pauli en 1931 con el objeto de justificar el déficit de energía, cantidad de movimiento y momento angular que se observa

en las partículas resultantes de una desintegración β (el núcleo residual y el electrón). El neutrino es un leptón que obedece a la estadística de Fermi-Dirac y cuya única interacción conocida es la interacción β , la cual es tan débil que la observación directa, tanto del neutrino como de su correspondiente antipartícula, el antineutrino, resulta sumamente difícil. El neutrino se emite en las desintegraciones anti- β , acompañando a un positrón (por ejemplo: $^{37}\text{Ar} \rightarrow ^{37}\text{Cl} + e^+ + \nu$), mientras que los antineutrinos acompañan a los electrones en las desintegraciones β ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$). A pesar de la pequeñez de la sección transversal de interacción del neutrino, que es $\approx 10^{-44} \text{ cm}^2$, el antineutrino fue observado por vez primera por Frederick Reines y Clyde L. Cowan, Jr., del «Los Alamos Scientific Laboratory», los cuales utilizaron para sus experiencias los antineutrinos producidos por el reactor de fisión de la «Atomic Energy Commission», a orillas del río Savannah, en Georgia, y les hicieron bombardear a los protones del agua, de acuerdo con la reacción: $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ (desintegración β inversa), logrando detectar un rayo γ y procedente de la aniquilación del positrón, seguido de otro rayo γ originado en la captura del neutrón.

Una reacción conveniente mediante la cual pueden observarse los neutrinos es: $\nu + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$. No obstante, cuando se utiliza un reactor como fuente de neutrinos (de hecho, antineutrinos), esta reacción no se observa, siendo suficiente la reacción para demostrar que el antineutrino es diferente del neutrino. Pero si se utilizan los neutrinos emitidos por el Sol según el proceso: $4 p \rightarrow ^4\text{He} + 2 e^+ + 2 \nu$, si se ha logrado verificar la reacción. Así se detectaron en 1968 los neutrinos solares.

El neutrino no tiene masa, lo mismo que el fotón, y se desplaza a la velocidad de la luz. Al carecer de masa, su spin puede estar dirigido únicamente en el sentido del movimiento o en el sentido contrario. En el primer caso, se dice que el neutrino tiene una polarización hacia la derecha o simplemente que es a derechas, mientras que en el segundo se trata de un neutrino polarizado a izquierdas. A causa de su carencia de masa, el sentido de polarización de un neutrino es una propiedad intrínseca, como su carga o su masa en reposo. En cambio, la polarización aparente de una partícula con masa depende del movimiento del observador: si éste se mueve más rápidamente que la partícula, verá el momento y, por consiguiente, la polarización, invertido.

En la actualidad se ha comprobado mediante observaciones experimentales que sólo existen neutrinos a izquierdas y que los antineutrinos son todos a derechas (fig. 6). En consecuencia, el campo del neutrino tiene sólo dos posibles cuantos (a izquierdas, ν , y a derechas, $\bar{\nu}$), en lugar de los cuatro que ordinariamente son posibles para una partícula de spin 1/2 (partícula y antipartícula a derechas y a izquierdas). Por tanto, el campo de neutrino sólo requiere dos componentes, en lugar de las cuatro especificadas por la ecuación de Dirac. Esta posibilidad para un fermión sin masa, advertida por Wolfgang Pauli en 1933, fue ya anticipada en 1929 por el matemático alemán Hermann Weyl, el cual, basándose en fundamentos matemáticos de gran belleza y simplicidad, sugirió la posibilidad de que una partícula dotada de spin sea estable en cualquiera de las dos formas helicoidales, una de ellas imagen especular de la otra. Ni que decir tiene que, en sus comienzos, estas suposiciones de Weyl y Pauli fueron unánime e inmediatamente rechazadas, porque violaban el principio de conservación de la paridad.

Sin embargo, como el neutrino sólo participa en las interacciones débiles, el derrumbamiento de la simetría entre la izquierda y la derecha en dichas interacciones hizo resurgir de nuevo la idea de Weyl, que fue formulada en 1957 con el nombre de «teoría de las dos componentes» del neutrino por los físicos teóricos Lee y Yang, ya citados, Abdus Salam, de Pakistán, y Lev Davidovich Landau, de la URSS. En

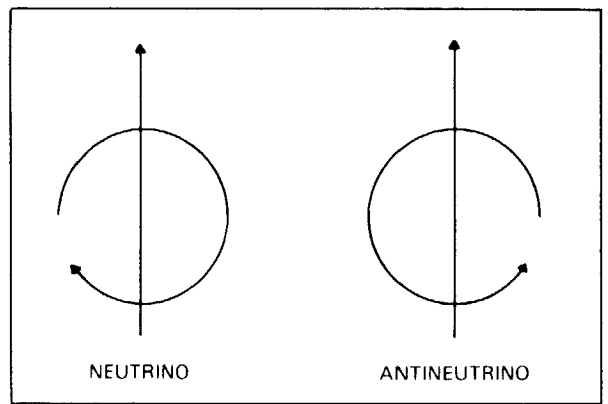


Fig. 6. Diagramas del neutrino y del antineutrino.

efecto, existen neutrinos y antineutrinos, diferentes, discernibles y simétricos. En la figura 6 vemos representados simbólicamente el neutrino y antineutrino y se puede comprobar cómo ambos diagramas se refieren a dos formas estables y simétricas entre sí, de acuerdo con las suposiciones primitivas de Weyl.

En resumen: el neutrino y el antineutrino son imágenes especulares el uno del otro, análogos a los isómeros dextro y levo de los compuestos ópticamente activos, y de igual modo que estos compuestos deben su actividad óptica a una asimetría molecular, también el neutrino y el antineutrino poseen una verdadera asimetría espacial, consistentes en una unión del spin y del sentido del movimiento. Y acaso esta asimetría del neutrino sea quien, en último término, origine las violaciones del principio de conservación de la paridad que se han observado hasta la fecha. En cuanto a las demás antipartículas, también se pueden considerar imágenes especulares de sus partículas correspondientes, sin más que cambiar la definición de la reflexión especular y considerarla como una transformación combinada de una inversión derecha-izquierda más una inversión de carga, que deja invariantes las leyes físicas. Se puede ver esto claramente en la figura 5, que representa los diagramas simbólicos para el protón y el antiprotón: nótese como cada partícula se puede transformar en su conjugada aplicándole la inversión combinada CP. Si se llegase a demostrar que la diferencia entre cargas positivas y negativas, hoy desconocida, no fuese sino una diferencia entre derecha e izquierda, la nueva definición de reflexión especular quedaría reducida a la tradicional. Las posibles repercusiones que acarrea la violación de CP descubierta en 1964 se escapa de los límites de este trabajo, pues hasta la fecha no se ha observado más que en las desintegraciones de los kaones neutros.

En 1962, en Brookhaven Long Island, se encontró que los neutrinos producidos en la desintegración del mesón π no eran capaces de invertir la desintegración β , lo cual ponía de manifiesto que los neutrinos y antineutrinos que acompañaban a los electrones y positrones eran diferentes, en algún aspecto desconocido, a los neutrinos y antineutrinos acompañantes de los muones positivos y negativos. En vista de ello, a los primeros se les dio el nombre de neutrinos y antineutrinos electrónicos y a los segundos muónicos. Más tarde, en 1975, al descubrirse el mesón τ , se postuló la existencia de una tercera clase o aroma de neutrinos, el neutrino tauónico, lo cual equivale a aceptar también su correspondiente antineutrino.

Hasta ahora se consideraba a los neutrinos desprovistos de masa e intransformables entre sí. Sin embargo, en 1980, el estudio de unas hipotéticas oscilaciones del neutrino, propuestas por vez primera en 1963 por los físicos japone-

ses M. Nakagawa, H. Okongi, S. Sakata y A. Toyoda y en 1968 por el italo-ruso Bruno Pontecorvo, ha abierto la posibilidad de un continuo cambio de identidad del neutrino al avanzar a lo largo de su trayectoria. Estas oscilaciones implican la necesidad de que al menos un tipo de neutrinos tenga masa no nula. Los resultados de los experimentos llevados a cabo en este sentido por Frederick Reines, Henry W. Sobel y Elaine Pasierb, de la Universidad de California, en Irvine, parecen conducir a una diferencia de masa entre el neutrino electrónico y el muónico de alrededor de un electronvolt. Por su parte, E. Tretyakov y col., del Instituto de Física Teórica y Experimental de Moscú, han encontrado para el neutrino electrónico una masa del orden de 10 eV. Sin embargo, desde 1979, grupos de investigadores del Instituto de Tecnología de California, del Instituto Laue-Langevin, de Grenoble y de la Universidad Técnica de Múnich no han detectado en sus experiencias prueba alguna de las oscilaciones del neutrino. Por consiguiente, hasta la fecha los resultados no se pueden considerar definitivos. Se esperan las conclusiones derivadas de los experimentos de Lawrence R. Sulak y sus colaboradores de la Universidad de Harvard y del Brookhaven National Laboratory, que parecen ser diez veces más sensibles que los anteriores, y que quizá zanjen definitivamente esta cuestión.

BIBLIOGRAFIA

- ASIMOV, I.: «Cien preguntas básicas sobre la Ciencia». *Alianza Editorial*, 1978.
- ASIMOV, I.: «El electrón es zurdo y otros ensayos científicos». *Alianza Editorial*, 1979.
- ASIMOV, I.: «El universo». *Alianza Editorial*, 1979.
- ASIMOV, I.: «Introducción a la ciencia». *Plaza-Janés*, 1979.
- AVERY, J.: «Teoría Cuántica de átomos, moléculas y fotones». *Alhambra*, 1975.
- BEISER, A.: «Conceptos de Física Moderna». *Ediciones del Castillo, S. A.* 1973.
- CABRERA, J.: «Introducción a la Física Teórica». *Editorial Librería General*, 1967.
- FUCHS, F.: «Crisis de identidad». *Revista Investigación y Ciencia*. Mes de agosto de 1980, págs. 43-45.
- GAMOW, G.: «Biografía de la física». *Alianza Editorial*, 1980.
- GARDNER, M.: «Izquierda y derecha en el cosmos». *Salvat Editores*, 1972.
- SEMAT, H.: «Física atómica y nuclear». *Editorial Aguilar*, 1962.
- WIGNER, E. P.: «Acontecimientos, leyes de la naturaleza y principios de invariancia». *Editorial Grijalbo*, 1969.
- YANG, C. N.: «La ley de conservación de la paridad y otras leyes de simetría». *Editorial Grijalbo*, 1969.
- YANG, C. N.: «Las partículas elementales». *Editorial Grijalbo*, 1969.



Libros de bolsillo con comentario de textos

- Jean Heffer:
LA GRAN DEPRESION. 465 ptas.
- René Dumont:
¿CUBA SOCIALISTA? 395 ptas.
- Antonio Domínguez Rey:
ANTOLOGIA DE LA POESIA MEDIEVAL ESPAÑOLA
T. I: Desde los orígenes hasta el siglo XV. **580 ptas.**
T. II: Siglo XV. **580 ptas.**
- Rosa Aparicio:
CULTURA Y SOCIOLOGIA. 350 ptas.
- Antonio Buero Vallejo:
CASI UN CUENTO DE HADAS
Comentado por C. González Martín. **325 ptas.**
- Sergio Rábade Romeo:
METODO Y PENSAMIENTO EN LA MODERNIDAD. 350 ptas.
- Tirso de Molina:
POESIA LIRICA. DELEITAR APROVECHANDO
Comentado por Lois Vázquez. **455 ptas.**
- Manuel Machado:
LA GUERRA LITERARIA
Comentado por F. Blasco Pascual. **385 ptas.**
- Mercedes Torrebejano:
RAZON Y METAFISICA EN KANT. 325 ptas.



NARCEA, S. A. DE EDICIONES
Dr. Federico Rubio, 89 - Teléf. 254 61 02
Madrid-20