

QUIRALIDAD

MARCOS MOSHINSKY*

Miembro de El Colegio Nacional

El nombre de quiral se asocia a cualquier tipo de objetos que no son idénticos a su imagen especular. Un ejemplo es el de las manos de las personas. Miren sus manos y fíjense que tienen muchas arrugas y, en particular, una línea curva que empieza en la base de la mano y llega a un punto entre el pulgar y el índice.

Con el objeto de ilustrar mejor estas líneas, las marqué en mis manos con una pluma como pueden ustedes ver al mostrarles mis manos. Tengo también un espejo. Si pongo la mano derecha frente al espejo, lo que veo no es ésta sino la mano donde la línea pintada se ve al revés o sea veo lo que parece ser la mano izquierda.

Las manos pueden recibir entonces los nombres de quiral derecha y quiral izquierda y esta apelación después se conserva para muchos otros objetos o partículas para distinguir su propiedad de quiralidad.

Antes de continuar con la discusión quisiera indicar que en la física se usa un concepto similar con el nombre de paridad. Si un objeto o partícula tiene una imagen especular idéntica, se dice que tiene paridad y se le asigna el número $+1$. Si la imagen especular es diferente, no tiene paridad y se le asigna el número -1 . Obviamente quiralidad y paridad son equivalentes aunque se les asigne nombres diferentes: derecha o izquierda o \pm . Los utilizaremos según los encontremos en la literatura.

El objeto de mi plática no es tratar sobre las manos u otros objetos macroscópicos sino de partículas elementales. Para empezar son muy difíciles de ver directamente y no podríamos distinguirlos como hicimos con las manos. Sin embargo, sí es posible tener información sobre el carácter quiral derecho o izquierdo. Para que entiendan cómo lograrlo necesito un voluntario del auditorio que venga a estrechar mi mano.

* Investigador Emérito del Instituto de Física-UNAM. Investigador de Excelencia SNI.
E-mail: moshi@fisica.unam.mx

Primero el voluntario y yo estrechamos la mano derecha con máxima fuerza y luego tratamos de separarlos y vemos que cuesta trabajo. Después el voluntario trata de estrechar su mano izquierda con la derecha mía y aunque cueste trabajo ligarlas, de cualquier forma que se haga es mucho más fácil separarlas después que en el caso de la de las dos manos derechas.

Esta experiencia indica cómo es posible descubrir la quiralidad o paridad en las partículas elementales. Podemos tener por ejemplo dos partículas idénticas en todos sus aspectos: masa, carga, spin, etcétera, pero cómo saber si tienen o no quiralidad. Si tenemos por ejemplo dos electrones derechos, su interacción sería más intensa que si uno fuera derecho y el otro izquierdo y si tenemos identificada la quiralidad de una partícula podemos conocer la de otra (similar a la primera en todos sus aspectos) por la intensidad de su interacción. Pero si las interacciones entre las partículas elementales no dan información sobre quiralidad, lo primero que tenemos que estudiar sería cuáles son estas interacciones.

Todas las interacciones entre partículas elementales que se conocen hasta la fecha son de cuatro tipos. En orden decreciente de su intensidad son las fuertes (que afectan a los nucleones, protón, neutrón, etcétera), las electromagnéticas (fotón, electrón, etcétera); las débiles, que afectan a las partículas provenientes del interior de los núcleos, como la desintegración β de los mismos, y las gravitatorias que afectan a todo, desde el cosmos a las partículas elementales.

La tabla 1 indica en unidades de la interacción fuerte la intensidad y el alcance de estas fuerzas.

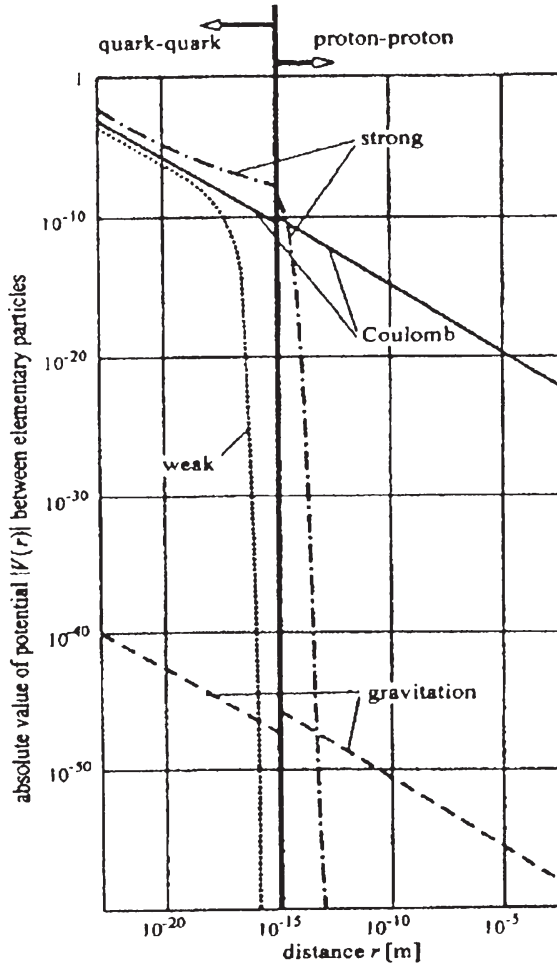
Tabla 1

<i>Interacción</i>	<i>Intensidad relativa</i>	<i>Alcance</i>
Gravitación	10^{-41}	∞
Nuclear débil	10^{-15}	$\ll 1 \text{ fm}$
Electromagnética	10^{-2}	∞
Nuclear fuerte	1	$\ll 1 \text{ fm}$

En la tabla 2 se indican más claramente los alcances, ya que todas estas fuerzas dependen de la separación (en metros) de las partículas afectadas. Originalmente se supuso que todas las interacciones propuestas eran invariantes ante la reflexión en un espejo, por lo tanto en todas ellas la paridad era una simetría y no eran quirales, pero un estudio de Yang y Lee en 1956 mostró que tal era el caso sólo en la interacción débil.

Como la paridad está relacionada con la quiralidad y por ello también aparece sólo en las interacciones débiles, de aquí en adelante nos limitaremos sólo a estas últimas.

Tabla 2



El primer fenómeno que dio lugar eventualmente a proponer la existencia de interacción débil fueron las observaciones independientes realizadas por Kaufman, Becquerel y Rutherford alrededor de 1900 de que el uranio, y después otros materiales, emitían rápidas partículas cargadas

que recibieron el nombre de rayos β , con una velocidad cercana a la de la luz.

Posteriormente se vio que estos rayos eran electrones que provenían del decaimiento de ${}_{91}^{236}\text{Pa}$ al ${}_{92}^{236}\text{U}$.

Se notó además que estos rayos tenían un espectro continuo de energías, lo que automáticamente eliminaba la posibilidad de emitirlos una a una ya que entonces lo harían con una energía fija $(m_n - m_p)c^2$ de la reacción $n \rightarrow p + e$. Para aliviar esta paradoja, Pauli, en 1930, propuso que el electrón viniera acompañado con otra partícula de carga y masa cero, que luego se llamó neutrino, y que el electrón e y el neutrino ν se repartieran esa energía.

Años después se vio que además de la interacción débil que da los rayos β

$$n \rightarrow e + p + \bar{\nu} \quad (1)$$

había muchas otras que involucraban mesones tales como

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \end{aligned} \quad (2)$$

con \pm indicando el signo de la carga, ν al neutrino y $\bar{\nu}$ su antipartícula o antineutrino, que proviene del hecho que toda partícula relativista tiene una antipartícula por el signo \pm que relaciona su energía con su cantidad de movimiento

$$E = \pm(p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2} \quad (3)$$

Los mesones π son los responsables de las interacciones entre los nucleones en los núcleos atómicos y una de sus formas de desintegración es la indicada arriba.

Pero todas las desintegraciones que hemos indicado son por interacciones débiles y por lo tanto se pueden describir en forma similar a la teoría iniciada por Pauli para la desintegración beta, en la que inicialmente todas las partículas eran aquirales o equivalentemente de paridad 1.

Todo parecía pues marchar bien hasta la década de los años 50 sobre las teorías de las interacciones débiles, hasta que una serie de paradojas empezó a poner en duda que fueran invariantes a la reflexión especular, es decir que fueran aquirales o, equivalentemente, de paridad +1.

Discutiré estas paradojas desde dos ángulos. Por un lado daré por conocido cuál es la quiralidad o paridad de las partículas elementales recordándoles el proceso de interacción que indicamos inicialmente en nuestro experimento con las manos. Sobre la base de ese conocimiento discutiremos las paradojas que se presentan en la desintegración de algunos de los mesones del tipo K y mostraremos que algunas desintegraciones indican que la partícula inicial da lugar a partículas finales que en ocasiones pueden tener paridad $+1$ o -1 , lo que significa que la partícula inicial puede presentar una quiralidad.

El otro ángulo consistirá en una presentación más rigurosa de la teoría de la desintegración beta y de cómo esta teoría indica la posibilidad de violación de paridad y de allí de la presencia de quiralidad.

Empezaré pues con la discusión del primer ángulo indicando primero cómo se puede determinar la paridad de las partículas elementales, así como el carácter absoluto o relativo de la quiralidad.

Para partículas que se desplazan con una cantidad de movimiento $m\vec{v}$ y tienen spin (momento angular intrínseco como por ejemplo el de la tierra) se puede afirmar que su quiralidad es derecha si la dirección del spin es la misma que la de su cantidad de movimiento e izquierda si es opuesta.

Con esta propiedad y el razonamiento anterior basado en las interacciones podemos obtener la paridad de las partículas elementales y daremos este dato como conocido en nuestra discusión futura.

Por cierto que la quiralidad puede ser absoluta o relativa. El primer caso ocurre con todas las partículas, fotón, gluón o gravitón de masa cero y cuya velocidad es la de la luz, que no puede excederse.

Para partículas con masa diferente de 0, cuya velocidad es inferior a la de la luz su quiralidad es relativa, ya que el observador puede estar en un sistema de referencia cuya velocidad es mayor que la de la partícula y puede ver a esta última moviéndose en dirección opuesta a la que la vería si el observador estuviera en reposo.

Después de estas observaciones vamos a analizar un ejemplo en que la paridad de la partícula puede tener más de un valor y por ello también la quiralidad, lo que recibe el nombre de violación de la paridad y que se presenta en algunas interacciones débiles.

Entre los diferentes mesones que se designan con la letra K y cuya interacción es fuerte con los nucleones pero débil con los otros mesones como los π , hay dos que se designan con las letras K_L^0 y K_S^0 , donde su carga ya es 0 y las índices L (long) y S (short) tienen que ver con sus diferentes vidas medias que designaremos por τ .

$$\tau_S = 9 \times 10^{-11} \text{s}, \tau_L = 5.2 \times 10^{-8} \text{s}. \quad (4)$$

Las K_L^0 y K_S^0 se desintegran predominantemente en los estados finales siguientes

$$K_L^0 \rightarrow \begin{cases} \pi^0 + \pi^0 + \pi^0 & 21\% \\ \pi^+ + \pi^- + \pi^0 & 12\% \\ \pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \pi^- + \mu^+ + \nu_\mu & \text{en conjunto } 27\% \\ \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e, \pi^- + e^+ + \nu_e & \text{en conjunto } 39\% \end{cases}$$

$$K_S^0 \rightarrow \begin{cases} \pi^+ + \pi^- & \\ \pi^0 + \pi^0 & \end{cases} \quad \text{casi } 100\% \quad (5)$$

Los piones tiene paridad y por los procedimientos indicados anteriormente se determinó como -1 y son emitidos con un momento angular 0 de manera que no contribuya a su paridad. De allí que la paridad del K_L que es producto de las paridades de sus partículas π de desintegración sea

$$\text{Paridad} \quad K_L = (-1)^3 = -1$$

mientras que la de K_S es paridad

$$\text{Paridad} \quad K_S = (-1)^2 = 1$$

Se tiene pues que K_L y K_S son de paridades definidas y opuestas.

Sin embargo en 1964 J. H. Christenson y J. W. Cronin, V. L. Fitch y R. Turkey descubrieron experimentalmente el proceso

$$K_L^0 \rightarrow \text{dos piones} \quad (6)$$

La probabilidad de este proceso es pequeña, 10^{-3} de la posibilidad total, pero está firmemente comprobada.

Se tiene pues una violación, aunque pequeña, de la paridad y de allí de la quiralidad.

El análisis más completo de la violación de la paridad está en el caso de la desintegración beta donde además una discusión matemática completa existe, pero requiere conocimientos como el hamiltoniano del pro-

blema, la ecuación de Dirac, sus aproximaciones no relativistas, etcétera, que pudieran estar más allá de los conocimientos de los participantes y por ello no se incluyen.

La conclusión de esta plática es que la quiralidad se observa en las partículas elementales sólo cuando su interacción es débil y, como novedad relativamente reciente, algunas partículas pueden tener una mezcla de los dos tipos de paridad o quiralidad.

1. QUIRALIDAD Y DESINTEGRACIÓN BETA

Ya hemos indicado en la primera parte de esta exposición de que la desintegración beta tiene que ver con el proceso

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (7)$$

donde n es el neutrón, p el protón, e el electrón y $\bar{\nu}$ el antineutrino, porque el proceso implica la presencia de una antipartícula en lugar de partícula, como se indicó brevemente en la discusión anterior al hablar de partículas relativistas.

En 1934 Fermi extendió la sugestión de Pauli de la producción del neutrino con el electrón a una teoría cualitativa de la desintegración β basada en un hamiltoniano que además de las partes asociadas con cada una de las partículas tuviera un término de interacción entre las mismas basado en las funciones de onda de las 4 partículas $n, p, e^-, \bar{\nu}$ de la forma

$$H = H_n^0 + H_p^0 + H_e^0 + H_{\bar{\nu}}^0 + \sum_i C_i \int d^3x (\bar{u}_p \hat{O}_i u_n) (\bar{u}_e \hat{O}_i u_{\bar{\nu}}) \quad (8)$$

donde $u_p, u_n, u_e, u_{\bar{\nu}}$ denotan las funciones de onda de las 4 partículas y las barras \bar{u}_p, \bar{u}_e indican las adjuntas (en el estilo de Dirac relacionadas con las recíprocas de esas funciones de onda) y \hat{O}_i son operadores apropiados que caracterizan el decaimiento y cuyas magnitudes se caracterizan por las constantes C_i .

Como los neutrinos se suponían entonces de masa 0 (hoy se suponen sólo de masas pequeñas) y la masa del electrón es pequeña comparada con las energías cinéticas [en unidades de masa $m = (E/c^2)$] la teoría debe de formularse en forma relativista utilizando la ecuación de partícula libre de Dirac

$$\left(i\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} - m_k \right) u_k(x) = 0, \quad k = n, p, e, \nu \quad (9)$$

$\mu = 0, 1, 2, 3$, e índices repetidos sumados, para cada una de las 4 partículas.

Las interacciones (2) están basadas en los acoplamientos corriente-corriente de la electrodinámica aunque tienen algunos aspectos más generales porque podrían ser corrientes vectoriales como en la electrodinámica si $\hat{O}_i = \gamma^\mu$ pero también escalares si $\hat{O}_i = 1$.

Las \hat{O}_i son funciones de las γ^μ y de sus productos y los posibles se dan en la tabla 3.

Tabla 3
OPERADORES ELEMENTALES DE TRANSICIÓN FERMIÓNICA

\hat{O}_i	Propiedades de Transformación	Números de matrices
1	Escalares (S)	1
γ^μ	Vectoriales (V)	4
$\sigma^{\mu\nu} = \frac{1}{2} [\gamma^\mu, \gamma^\nu]$	Tensoriales (T)	6
$\gamma^\mu \gamma^5$	Vectores Axiales (A)	4
$\gamma^5 = -i\gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$		
$= i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$	Pseudoescalares (P)	1

Transformación de Lorentz

Las matrices γ^μ , $\mu = 0, 1, 2, 3$ se dan abajo

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix}, \quad \gamma^i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ -\sigma_i & 0 \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, 3.$$

El resto de las matrices se determinan por productos.

Como el hamiltoniano total es la componente temporal del cuadrimento, hay la integral $\int d^3x$ sobre las coordenadas espaciales x_1, x_2, x_3 . De allí que los operadores

$$(\bar{u}_p \hat{O}_i u_n) (\bar{u}_e \hat{O}_i u_n) \quad (10)$$

deben ser escalares de Lorentz y esto limita \hat{O}_i a los valores 1, γ^μ , $\gamma^{\mu\nu}$, γ^μ , γ^5 .

Las transformaciones de Lorentz tienen el siguiente efecto en las funciones de onda de Dirac

$$\psi'(x) = S(a)\psi(x) \quad (11)$$

donde $S(a)$ está dado por

$$S(a) = \exp\left[-\frac{1}{4}\sigma_{\mu\nu}(a^{\mu\nu} - g^{\mu\nu})\right] \quad (12)$$

y de allí podemos ver las relaciones entre

$$\bar{\psi}'(x) O_i \psi'(x') \quad \text{y} \quad \bar{\psi}(x) O_i \psi(x) \quad (13)$$

y ante transformaciones de Lorentz por ejemplo

$$\bar{\psi}'(x') \gamma^\mu \psi(x') = a^\mu_\nu \bar{\psi}(x) \gamma^\nu \psi(x) \quad (14)$$

o sea que se transforman como vector. En cambio se transforma como pseudoescalar

$$\bar{\psi}'(x') \gamma^5 \psi'(x') = \det a \bar{\psi}(x) \gamma^5 \psi(x) \quad (15)$$

donde $\det a$ es el determinante de $||a^\mu_\nu||$.

En las transformaciones propias de Lorentz $\det a = 1$ mientras que en las inversiones es -1 , de manera que γ^5 es una pseudoescalar en el sentido de paridad, mientras que 1 obviamente no lo es. De allí también que γ^μ es un cuadvivector como mostramos en (8) pero $\gamma^\mu \gamma^5$ es un cuadvivector axial de paridad -1 o bien con quiralidad.

Teniendo pues un hamiltoniano, la cosa es determinar si las magnitudes C_i se ajusten a dar una evaluación correcta de las mediciones experimentales de las energías observadas de las diferentes interacciones.

El análisis experimental de los resultados de la desintegración beta muestra que es fundamentalmente debido a la interacción vectorial y pseudo vectorial y de hecho de la interacción entre ellos que marcaremos como C_v , y C_A y está dada por

$$C_A/C_v = -1,255 \pm 0,006 \quad (16)$$

La parte del hamiltoniano de interacción puede entonces escribirse como

$$H_{int} = \frac{G_\beta}{\sqrt{2}} \int d^3x [\bar{u}_p \gamma^\mu (1 - \gamma^5) u_n] [\bar{u}_e \gamma_\mu (1 - \gamma^5) u_\nu] \quad (17)$$

con G_β siendo la constante que depende de la intensidad original del campo de radiación β y recibe el nombre de constante de Fermi o decaimiento nuclear β .

La expresión (17) nos indica no sólo una manera teórica de analizar la desintegración beta, sino también el hecho de que la contribución axial es del mismo orden que la vectorial, lo que indica la importancia del proceso de quiralidad en la desintegración β .

La presente sesión del trabajo requiere información sobre la forma matemática de la teoría y por ello se puso en una sección separada. Pero se incluye para aquellos que tengan los conocimientos necesarios para seguirla.

Está por analizar cómo relacionar entre sí el concepto de quiralidad con las diferentes ramas de la ciencia.