

FUERZAS FUNDAMENTALES EN LA NATURALEZA_(rc-132)

J. A. Montiel Tosso. IES Séneca (Córdoba)

En el número 55 de esta revista se ha iniciado una serie de artículos acerca de la constitución del núcleo atómico, comenzando por una revisión de los principales modelos nucleares y por el concepto y el significado de la energía de enlace nuclear ([CONSULTAR “EL NÚCLEO ATÓMICO”](#)). A continuación nos detendremos en la descripción de las fuerzas fundamentales, que son las responsables de mantener unidas a las partículas integrantes de los núcleos atómicos.

Denominamos fuerzas fundamentales a aquellas fuerzas de la naturaleza que no se pueden explicar en función de otras más básicas y que rigen los procesos en el mundo subatómico. Las fuerzas o interacciones fundamentales descubiertas hasta ahora son cuatro: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. Las dos primeras se conocen desde hace mucho tiempo, sin embargo, las nucleares son de reciente descubrimiento, hace apenas un siglo. Puesto que son fuerzas que afectan a las partículas elementales, su estudio necesita de los aceleradores de alta energía, cuyo desarrollo viene marcando los hallazgos experimentales y los avances teóricos subsiguientes.

Seguidamente estudiaremos estos cuatro tipos de interacciones básicas o fuerzas fundamentales de la naturaleza y las teorías que intentan explicar el origen de las mismas.

INTERACCIÓN GRAVITATORIA

Es la fuerza de atracción que una porción de materia ejerce sobre otra, y afecta a todos los cuerpos. Su intensidad es mínima entre las partículas que intervienen en los procesos atómicos, pero es esencial a gran escala porque su alcance es infinito, aunque decrece de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, según la ley de Newton. Su importancia reside en que siempre es atractiva y, por tanto, se acumula, aumentando con el número de partículas en juego. De este modo, la gravitación es la fuerza preponderante a escala macroscópica, a pesar de que se trata de la más débil de todas las interacciones. Es la responsable de la atracción universal entre los cuerpos, de la cohesión de los astros (planetas, estrellas, satélites...) y regula sus movimientos. Podemos afirmar que es la fuerza que mantiene el orden y el equilibrio en el universo y la que provoca, al mismo tiempo, la colisión entre galaxias vecinas y la creación de nuevas estrellas.

En 1915, Einstein, tras desarrollar su teoría especial de la relatividad, sugirió que la gravedad no era una fuerza como las otras, sino una consecuencia de la deformación del espacio-tiempo por la presencia de masa (o energía, que es lo mismo), formulando su teoría general de la relatividad. Entonces, cuerpos como la Tierra no se mueven en órbitas cerradas porque haya una fuerza llamada gravedad, sino que describen trayectorias parecidas a líneas rectas, pero en un espacio-tiempo que se encuentra deformado por la presencia del Sol.

Con todo, Einstein propone una teoría clásica, ya que no introduce los conceptos cuánticos que describen el mundo microscópico. Los intentos realizados por cuantizar la interacción gravitatoria implican la existencia de un bosón mediador de la interacción, el gravitón, de masa nula y número cuántico de espín 2, que no ha podido ser detectado aún. Dicha partícula virtual sería la intercambiada entre las partículas subatómicas (o fermiones) que se ven afectadas por la gravedad en un instante dado.

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La fuerza electromagnética afecta exclusivamente a los cuerpos con carga eléctrica y es la responsable de las transformaciones físicas y químicas de átomos y moléculas, donde une a los electrones y los núcleos. Es mucho más intensa que la fuerza gravitatoria y su alcance es también infinito. Sin embargo, no es acumulativa como la gravitación, pues, según el tipo de cargas presentes, las interacciones electromagnéticas son atractivas o repulsivas, de manera que la neutralidad eléctrica de la materia anula sus efectos a larga distancia.

A raíz del triunfo de la teoría general de la gravitación de Newton, Coulomb la adaptó para explicar las fuerzas de atracción y repulsión experimentadas por los objetos cargados eléctricamente, demostrando que ésta era directamente proporcional al producto de las cargas eléctricas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Mostró también que las cargas de igual signo se atraen y las de distinto signo se repelen, y que los cuerpos imantados también sufrían una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Experimentos posteriores realizados por el danés Oersted, el francés Ampère y el británico Faraday revelaron que los fenómenos eléctricos y magnéticos estaban relacionados. Su estudio fue sistematizado por el físico escocés J. C. Maxwell en su teoría electromagnética, en la que predijo que la transmisión de los campos eléctrico y magnético, perpendiculares entre sí, se realizaba ondulatoriamente a la velocidad de la luz.

En el orden macroscópico, la teoría de Maxwell constituye un modelo de economía al unificar el tratamiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos en sólo cuatro famosas ecuaciones, mientras que en las dimensiones atómicas la teoría del electromagnetismo se denomina electrodinámica cuántica, cuyos fundamentos se deben a Bethe, Tomonaga, Schwinger y Feynman, principalmente, y que realiza una corrección cuántica de las ecuaciones de Maxwell.

INTERACCIONES NUCLEARES

En las emisiones radiactivas de tipo beta, ciertos átomos tienen un exceso de neutrones, algunos de los cuales se desintegran convirtiéndose en un protón, un electrón y un neutrino a través de un proceso regido por la interacción nuclear débil o de Fermi, que sólo se manifiesta a distancias de 10^{-17} ó 10^{-18} m, la fuerza de menor alcance. Recibe este nombre porque su intensidad es muy inferior que en las interacciones fuertes.

La emisión de neutrinos fue propuesta por primera vez en 1929 por Pauli. Postuló que, junto a los tres tipos de radiaciones conocidos, alfa, beta y gamma, debían emitirse otras partículas a las que llamó neutrinos y antineutrinos, sin carga eléctrica y cuya masa era muy pequeña o incluso nula, como en el caso del fotón. En la emisión beta, un neutrón se convierte en un protón, una situación no prevista ni en física clásica ni en física cuántica y que tanto desconcertó a los físicos de partículas, y se crean un electrón y un antineutrino.

Las predicciones de Pauli se confirmaron cuando fueron descubiertos los neutrinos por Reines y Cowan, en Los Álamos, en 1956. El neutrino es el mejor ejemplo de las interacciones débiles. Aunque tiene una sección eficaz extremadamente baja y como consecuencia de ello muy poca interacción con la materia, es muy importante en astrofísica, pues los procesos termonucleares de las estrellas implican una producción masiva de neutrinos. Gracias a esto se han podido estudiar, pues la escasa interacción se ve compensada por el gran número que se genera de ellos.

Para explicar la estabilidad de los núcleos, que contienen protones a una distancia increíblemente pequeña, Rutherford postuló la existencia de la interacción nuclear fuerte, una fuerza atractiva muy intensa para distancias del orden de los diámetros nucleares (10^{-15} m), capaz de vencer la repulsión electrostática entre los protones. Podemos afirmar que la fuerza o interacción nuclear fuerte es la que mantiene unidos los componentes de los núcleos atómicos y actúa indistintamente entre dos nucleones cualesquiera, ya sean protones o neutrones.

Teniendo en cuenta el especial carácter de las fuerzas nucleares al compararlas con las dos interacciones clásicas, su formulación no es similar a las ecuaciones de Newton y de Coulomb. La descripción que actualmente se utiliza de la fuerza débil se realiza de manera unificada con la electromagnética en la denominada interacción electrodébil. Sus autores, Glashow, Salam y Weinberg, recibieron el Premio Nobel de Física en 1979 por su trabajo. La teoría actual de la interacción fuerte, debida principalmente a Yang y Mills, fue completada a mitad de los años 70 y se llama cromodinámica cuántica, desarrollada por analogía con la electrodinámica de Feynman y colaboradores.

PARTÍCULAS VIRTUALES

Sabemos que la relación de incertidumbre enunciada por Heisenberg puede extenderse a otras variables conjugadas además de la posición y la cantidad de movimiento. Por ejemplo, el producto de la energía y el tiempo también posee las unidades de h. Si designamos por ΔE la incertidumbre en nuestro conocimiento de

la energía de una partícula y por Δt la incertidumbre respecto al tiempo en el que la energía adquiere un cierto valor, también se cumplirá la relación de incertidumbre:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Para comprender esta relación pensemos en lo que implica el proceso de medición de la energía de una partícula. La observación requerirá algún tipo de sonda que empleará un tiempo en la realización de la medida durante el cual interactúa con la partícula. Podemos definir ese tiempo como la incertidumbre Δt . La incertidumbre ΔE representa nuestra capacidad de obtener información sobre la energía de la partícula en un tiempo inferior a Δt . En este sentido, la relación de incertidumbre tiempo-energía da lugar a un concepto muy interesante de la física actual, el de partícula virtual. Así, si sustituimos en la expresión de Heisenberg el valor de la energía por su equivalencia relativista con la masa ($\Delta E = \Delta m c^2$) y despejamos ésta, obtenemos: $\Delta m \geq \frac{h}{4\pi c^2 \Delta t}$

Vemos que si Δt es lo suficientemente pequeño es posible que la indeterminación de la masa sea lo bastante grande para que durante ese tiempo no podamos conocer si en un punto del espacio hay una partícula de masa m o un conjunto de partículas de masa $m + \Delta m$. Es decir, podríamos tener una sucesión como la mostrada en la figura 1, donde una partícula se convierte por un instante en una pareja de partículas. Decimos que la partícula original "fluctúa" entre dos partículas y llamamos al objeto adicional partícula virtual.

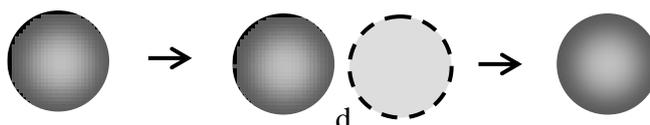


Figura 1. Una partícula (izquierda) fluctúa entre sí misma y una partícula virtual (centro) y otra vez vuelve a convertirse en sí misma.

Yukawa aplicó por primera vez este concepto para explicar la interacción fuerte. Si tenemos dos partículas a una distancia "d" lo suficientemente pequeña como para que pueda ser recorrida por una partícula virtual en el tiempo que dura su "fluctuación", puede acabar siendo absorbida por la segunda partícula antes de desaparecer. Esto se conoce como intercambio de una partícula virtual (figura 2) y de nuevo el principio de incertidumbre nos dice que estos procesos pueden darse sin que seamos capaces de detectar ninguna violación del principio de conservación de la energía.

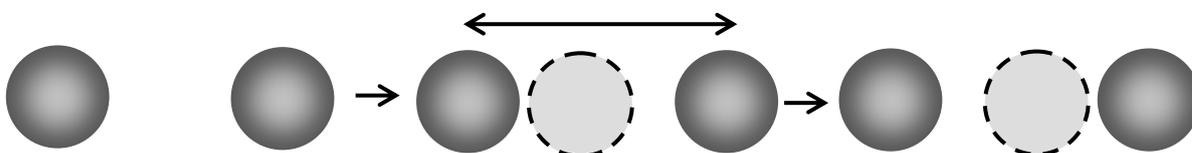


Figura 2. Dos partículas pueden intercambiar una partícula virtual sin violar la conservación de la energía.

Yukawa demostró matemáticamente que si la masa de las partículas virtuales tuvieran aproximadamente $1/9$ de la masa del protón, el resultado neto del intercambio sería una fuerza lo bastante elevada como para superar la repulsión electromagnética entre dos protones y mantenerlos unidos. Es decir, el intercambio de la partícula virtual produciría la enorme fuerza necesaria para mantener la cohesión del núcleo. Posteriormente, los cálculos de Yukawa fueron confirmados por el descubrimiento de los mesones. De este modo, ahora se piensa que todas las interacciones fundamentales son debidas, en última instancia, al intercambio de partículas virtuales.

No todas las partículas virtuales que se han propuesto se han podido observar, pero sí muchas de ellas, como los fotones de la interacción electromagnética, los gluones de la interacción fuerte y las partículas, designadas por W^+ , W^- y Z , mediadoras de las interacciones nucleares débiles.

ALCANCE E INTENSIDAD DE LAS INTERACCIONES

Cada interacción tiene una intensidad y un alcance concreto que la distingue de las otras, como ya hemos comentado con anterioridad. Por ejemplo, sabemos que las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias tienen un alcance infinito, mientras que las otras dos se reducen al ámbito nuclear. Pues bien, cuando el alcance es infinito los cálculos exigen que la partícula virtual de intercambio, también llamada bosón, tenga masa nula. Esto es lo que le sucede al fotón y al hipotético gravitón. Mientras menor sea el alcance, mayor es la masa requerida para el bosón de la interacción. Por eso, los bosones mayores corresponden a las fuerzas débiles, las de menor alcance.

Un símil nos puede ayudar a entenderlo. Si dos personas se intercambian un objeto grande, como un saco de cemento, han de estar muy cerca. Por el contrario, si el objeto es pequeño, como una canica, se lo podrán pasar una a otra aun cuando estén alejadas. Por consiguiente, y dejando a un lado las particularidades matemáticas que describen las diferencias entre cada tipo de interacción y que justifican una teoría distinta para representar cada una de ellas, es evidente que todas se pueden explicar bajo un marco común, es decir, dos partículas materiales, con mayor o menor estabilidad según el caso, interaccionan mediante el intercambio de una partícula virtual, de existencia efímera. La intensidad de cada tipo de fuerza se explica según la masa de la partícula de intercambio y la constante de acoplamiento.

Richard Feynman ideó un sencillo diagrama para representar la interacción de cualquier tipo entre dos partículas, donde los estados iniciales y finales de ambas se dibujan unidos por la partícula de intercambio.

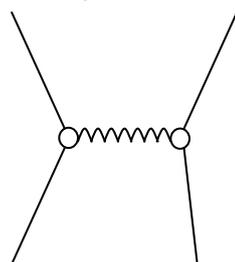


Figura 3. Representación del proceso teórico de las cuatro interacciones.

Si queremos representar los cuatro tipos de fuerzas obtendremos los diagramas de Feynman de la figura 4.

De las relaciones de incertidumbre puede deducirse que la distancia que recorren las partículas virtuales viene dada por la expresión: $d \approx \frac{h}{4\pi m c}$ donde m es la masa de la partícula virtual. En efecto, si sustituimos en la relación $\Delta E \Delta t \leq h/4\pi$ la equivalencia entre la masa y la energía, tendremos: $m c^2 \Delta t \leq h/4\pi$, de donde: $c \Delta t \leq \frac{h}{4\pi m c}$. Y si tomamos como $c \Delta t$ la distancia máxima que pueden recorrer las partículas virtuales, llegaremos a la expresión señalada.

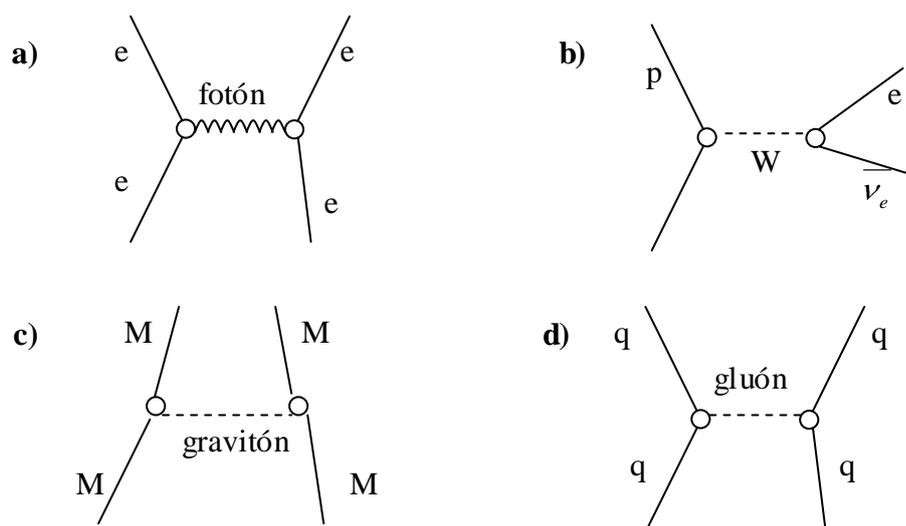


Figura 4. Diagramas de Feynman para las interacciones. a) Electromagnética. b) Débil. c) Gravitatoria. d) Fuerte.

La intensidad real de las interacciones se expresa a través de su constante de acoplamiento, que se relaciona con la masa de la partícula de intercambio y el alcance de la interacción. La constante de acoplamiento de la interacción fuerte es del orden de la unidad, de ahí que su intensidad sea muy superior a la de las restantes fuerzas, con un alcance de unos 10^{-15} m, las dimensiones del núcleo atómico. Como el valor de la masa de los bosones W y Z es muy grande, se explica la baja constante de acoplamiento de la interacción débil, en torno a $5 \cdot 10^{-14}$, y un alcance todavía más corto (10^{-18} m). Para la fuerza electromagnética, la constante tiene un valor de $7,3 \cdot 10^{-3}$ y para la interacción gravitatoria, la más débil de todas, de $2 \cdot 10^{-39}$.

TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

El concepto clásico de campo se modifica cuando nos movemos en el mundo subatómico, pues las grandes velocidades de las partículas hacen que estén sujetas a consideraciones relativistas. Por ello, la aplicación de la teoría cuántica a la

teoría de la relatividad especial dio como resultado la teoría relativista del campo cuántico o teoría cuántica de campos, cuyos pioneros fueron Jordan, Heisenberg y Born, a los que pronto se unieron Wigner y Pauli, de manera que hacia 1930 ya se había completado.

En el concepto clásico hay una clara diferenciación entre los campos y las partículas, pues son entidades distintas. En la teoría moderna, las segundas son manifestaciones de los primeros, es decir, las entidades fundamentales son los campos, es decir, los valores que adquieren los campos en determinados puntos. Ahora, en los lugares donde la intensidad del campo es mayor suponemos situadas a las partículas, o, mejor dicho, decimos que es más probable encontrar allí a las partículas. En la teoría cuántica de campos hemos de dejar a un lado la vieja idea de partícula material y continuar con la imagen “abstracta” dual, centro de los conceptos de la nueva mecánica. Por esta razón recurrimos a la descripción matemática de las partículas, o lo que es igual, de los campos cuánticos, que vienen representados por ellas, dotándolas de una serie de propiedades, como carga, masa, espín, color, etc. En un artículo, publicado en 1939 por Eugene Wigner de la Universidad de Princeton, se estableció el modo de calcular la masa en reposo de las partículas y la utilidad de su clasificación basada en su espín.

Los estados de una partícula o campo cuántico se pueden expresar mediante un conjunto de números, los números cuánticos, sujetos a unas reglas muy estrictas y cuyos cambios, que indican las transformaciones en las partículas, sólo se permiten desde el punto de vista teórico si obedecen a las distintas restricciones que les han sido establecidas por las exigencias matemáticas de la teoría. Ahora no necesitamos imaginar a las partículas como entes materiales, con la dificultad que eso entraña, sino como entes matemáticos, con un lenguaje mucho más conciso y concluyente. Sus propiedades traducidas al lenguaje “numérico” son mucho más asequibles para su tratamiento y para la predicción de muchos fenómenos y se pueden analizar comparativamente y estudiar sus variaciones con mucha facilidad. Precisamente a esto se debe el enorme desarrollo de la física de partículas en tan poco tiempo.

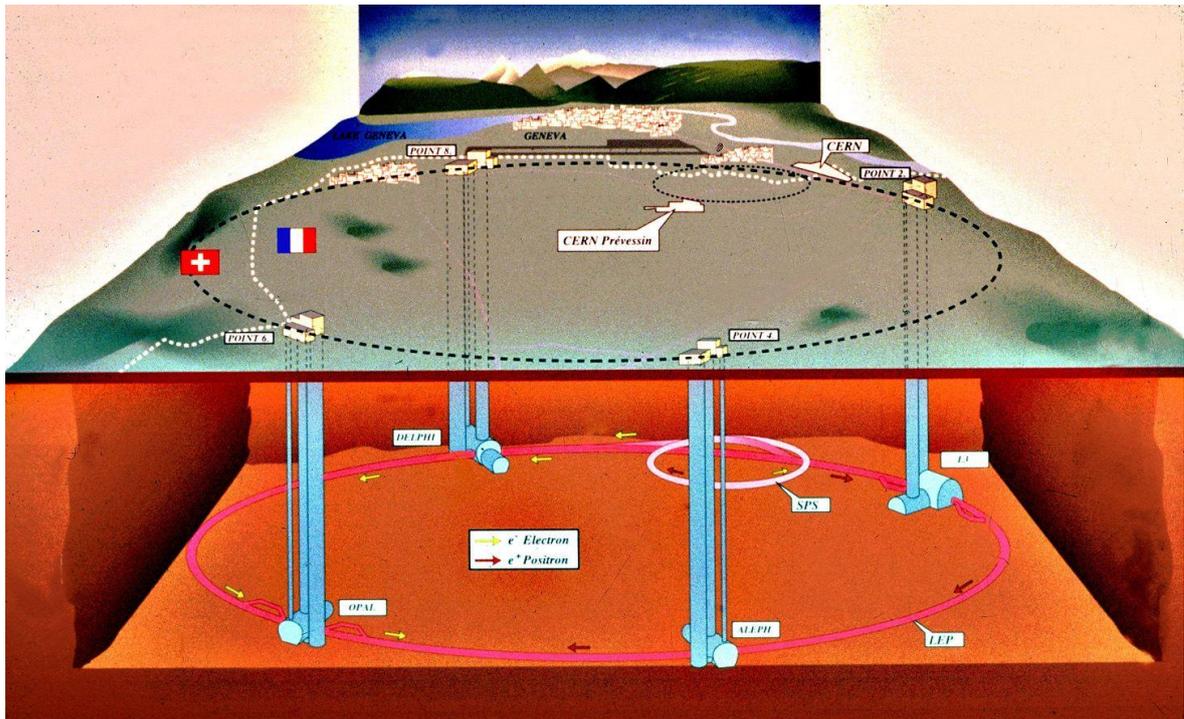
Para explicar la existencia de los campos nucleares se ha recurrido al concepto ya comentado de intercambio de una partícula virtual. Fermi y Yukawa describieron las fuerzas nucleares débiles mediante el intercambio de fotones y de mesones, respectivamente. Hacia 1937, el sueco Oskar Klein predijo la existencia de los bosones cargados W^+ y W^- , y John Ward, en 1958, tuvo el honor de cerrar el tratamiento del campo nuclear débil con la propuesta del bosón Z como el mediador sin carga eléctrica, que fue finalmente detectado en el acelerador LEP del CERN en noviembre de 1989.

Corresponde al físico japonés Hideki Yukawa, en 1935, el primer tratamiento matemático de la interacción nuclear fuerte, suponiendo un bosón con un 10 % a un 16 % de la masa de un nucleón. Cuando en 1945 se detectaron los mesones pi, uno con carga positiva, otro negativa y un tercero neutro, todos con una masa aproximada de 140 MeV se creyó que eran efectivamente las partículas de intercambio propuestas por Yukawa. Sin embargo, hubo una grave dificultad en el caso del campo nuclear fuerte. Dada su mayor constante de acoplamiento necesita

más términos a la hora de calcular las intensidades porque no sólo hay que pensar en la posibilidad de intercambio de una partícula, sino en dos o más. En las teorías cuánticas de campos, estos cálculos se conocen como “teoría de perturbaciones” o “serie perturbativa” y se hacen técnicamente inabordable y poco exactos. Esta situación se prolongó hasta mediados los sesenta, momento en que surgió el concepto de carga de color, o simplemente color, como la propiedad característica de las interacciones nucleares fuertes y con el desarrollo de la cromodinámica cuántica.



Vista aérea del acelerador LEP (Large Electrón-Positron collider)



Esquema del interior de las instalaciones del CERN donde se halla el LEP

SIMETRÍAS Y LEYES DE CONSERVACIÓN EN LAS INTERACCIONES

La utilidad más importante que se deriva de la concepción matemática de los campos o las partículas es la opción de asignarle unas ciertas simetrías, o lo que es igual, de representar sus propiedades mediante su tipo de simetría empleando la teoría matemática de grupos, similar a la clasificación de los cristales en geología. Sabemos que las propiedades de un cristal, vienen marcadas por la estructura interna de sus partículas, que se hayan dispuestas en una red espacial tridimensional generada por la repetición en el espacio de una estructura básica o celda unidad. Este ladrillo fundamental puede ser un cubo, un prisma hexagonal, rómbico, etc, y presentará ejes, planos y centros de simetrías en los que la figura no se modificará después de su aplicación, o centros de inversión, por ejemplo, donde la posición final de la misma se invierte respecto a la situación inicial. Estos elementos de simetría se asignan a cada grupo de simetría, de forma que si una figura, en este caso, una celda unidad, pertenece al mismo poseerá todos los elementos de simetría del grupo determinado.

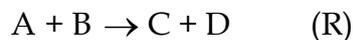
Así pues, las partículas, a pesar de ser elementales, poseen ciertas simetrías igual que los cristales. Sus transformaciones, que vienen como resultados de sus interacciones, también presentan estas simetrías, que se clasifican en la categoría correspondiente según la teoría de grupos, y han de cumplir las leyes que se derivan de las simetrías, denominadas leyes de conservación. Hay un famoso teorema, que se debe a Emmy Noether, enunciado en 1918, que afirma que si una transformación guarda un tipo determinado de simetría lleva asociado el cumplimiento de una determinada ley de conservación. Es una forma de expresar matemáticamente que ciertas propiedades físicas de las partículas sufren

determinadas alteraciones cuando actúan las interacciones fundamentales. Básicamente, los datos se refieren a cambios energéticos, es decir, a la descripción de los estados de energía anteriores y posteriores a la interacción.

Lógicamente, la dinámica de las partículas elementales obedece a las leyes de Newton con las correcciones relativistas pertinentes, de modo que siguen vigentes estas leyes de conservación generalizadas. No obstante se han ido descubriendo otras "simetrías" adicionales de suma importancia, que añaden nuevas leyes de conservación.

La simetría de paridad, conocida también por simetría de reflexión espacial, es la más sencilla. Una transformación, por ejemplo, una colisión entre dos partículas A y B que produce las nuevas partículas C y D, posee simetría de paridad o muestra conservación de la paridad (P) cuando, al cambiar de signo las coordenadas espaciales de todas ellas, la probabilidad con la que tiene lugar el proceso no varía. Esto es lo mismo que decir que si al cambiar de signo las cantidades de movimiento de todas las partículas implicadas en la transformación, la probabilidad de ésta no se ve modificada.

En efecto. Supongamos que la colisión o interacción entre las dos partículas A y B, cuyas cantidades de movimiento designaremos por p_A y p_B , tiene una determinada probabilidad de producir otras dos partículas C y D con cantidades de movimiento p_C y p_D , respectivamente. Llamemos R a esta reacción:



Si ahora las mismas partículas A y B con cantidades de movimiento $-p_A$ y $-p_B$ producen las partículas C y D con cantidades de movimiento $-p_C$ y $-p_D$ con la misma probabilidad que R, significa que el proceso es invariante bajo paridad (P), o bien diremos que presenta simetría P.

Otro principio de simetría es la conjugación de carga. Una transformación es invariante bajo la conjugación de carga cuando tiene la misma probabilidad de producirse siempre que hayamos sustituido cada partícula por su propia antipartícula, es decir, hayamos realizado la transformación conjugada con la misma probabilidad que la original. Continuando con el ejemplo anterior de la transformación R, si se sustituyen las partículas A, B, C y D por sus respectivas antipartículas, R se convierte en su reacción conjugada, que denotaremos por C(R):



donde \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} y \bar{D} son las correspondientes antipartículas. Si C(R) tiene lugar y se produce además con la misma probabilidad que R, decimos que el proceso es invariante bajo conjugación de carga (C), o lo que es igual, presenta simetría C.

Finalmente, encontramos el principio de simetría de inversión temporal, o reversibilidad del tiempo. El principio afirma que si un proceso R, como el ya descrito en nuestro ejemplo, es invariante bajo T, la probabilidad de la reacción inversa, que denotaremos por T(R): $C + D \rightarrow A + B$ T (R) es igual a la probabilidad de R.

Lógicamente, las cuatro interacciones fundamentales responderán a distintos tipos de simetría puesto que se deben a propiedades diferentes. Hasta 1956

se creía que la simetría de reflexión espacial (o conservación de la paridad) se daba en todas las interacciones. Sin embargo, en dicho año, los físicos estadounidenses de origen chino Yang y Lee indicaron que en realidad no se había comprobado la conservación de la paridad en la interacción débil, y sugirieron varios experimentos para hacerlo. Uno de ellos fue realizado al año siguiente por la profesora Wu, también de origen chino, y sus colaboradores en la Universidad de Columbia.

A pesar de las dificultades técnicas, la idea básica del experimento era relativamente sencilla. Una muestra de material radiactivo, el isótopo cobalto-60, se enfría hasta unas décimas por encima del cero absoluto y se somete a la acción de un intenso campo magnético con el fin de alinear los espines de todos los núcleos en la misma dirección. El isótopo estudiado sufre la desintegración beta y se pudo comprobar que los electrones emitidos salían preferentemente con su espín contrario al del núcleo emisor, en lugar de mostrar una probabilidad del 50 % para ambas situaciones como exigiría la conservación de la paridad.

Posteriormente, los físicos norteamericanos Cronin y Fitch descubrieron en 1964 que la interacción débil no presenta simetría T.

El estudio comparativo de las simetrías en los cuatro tipos de interacciones ha puesto de manifiesto un hecho importante: parecen estar dispuestas jerárquicamente, es decir, cuanto mayor es la fuerza, más propiedades se conservan. Por ejemplo, la interacción fuerte no depende de la carga eléctrica de las partículas que intervienen y presenta simetría CPT. Pero si descendemos en un peldaño hasta la fuerza electromagnética, esa afirmación ya no es totalmente cierta, puesto que el protón se ve afectado por la fuerza electromagnética. Del mismo modo, tanto la fuerza electromagnética como la nuclear fuerte conservan la paridad, mientras que la débil no lo hace.

Estas consideraciones nos llevan a la idea de la existencia de alguna estructura común cuyo descubrimiento nos permita comprender mejor las fuerzas fundamentales. Actualmente es una de las tareas prioritarias de la física: buscar evidencias experimentales que nos sean de utilidad en la tarea de confeccionar una teoría unificada de las cuatro fuerzas fundamentales imperantes en el núcleo atómico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COHEN-TANNOUJJI, G y SPIRO, M. *La materia-espacio-tiempo*. Espasa Universidad. Madrid. 1988.

ENCICLOPEDIA MICROSOFT ENCARTA 2002.

FRITZSCH, H. *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*. Alianza Universidad. Madrid. 1988.

GALINDO, A. y PASCUAL, P. *Mecánica cuántica*. Editorial Alhambra. Madrid.

GRIBBIN, J. *“En busca del gato de Schrödinger”*. Biblioteca Científica Salvat. Barcelona. 1986.

KLEIN, E. *Las partículas elementales*. Editorial Debate. Madrid. 1994.

SÁNCHEZ RON, J. M. *La cuantización de la Física*. Revista Española de Física **14** (1), 6-9. (2000).

TREFIL, J. S. *De los átomos a los quarks*. Biblioteca Científica Salvat. Barcelona. 1985.

YNDURAIN, F. J. *Mecánica cuántica*. Editorial Alianza universidad. Madrid.

DIRECCIONES Y LIBROS DIGITALES CONSULTADOS EN INTERNET

- AMPUDIA, J.: *El momento de la creación*. 2002.
- DÍAZ PAZOS, P. T.: *A horcadas en el tiempo*. 1ª edición. 2002.
- GÓMEZ CAMACHO, J. *Partículas elementales*. 2001.
- <http://es.wikipedia.org/>
- <http://www.particleadventure.org/>