

LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES Y EL MODELO ESTÁNDAR (rc-142)

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"](#)) y continuando con el estudio de las fuerzas fundamentales, que son las interacciones responsables de mantener unidas a las partículas integrantes de los núcleos atómicos ([CONSULTAR "LAS FUERZAS FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA"](#)).

En esta tercera parte comenzaremos por el descubrimiento de las primeras partículas subatómicas y sus propiedades y haremos seguidamente una revisión de las instalaciones experimentales necesarias en el desarrollo de la física de altas energías. A partir de sus descubrimientos resumiremos el modelo estándar, que ofrece, hasta el momento, la mejor explicación de la constitución y propiedades del mundo subatómico.

PARTÍCULAS ELEMENTALES

Consideramos partículas elementales a cada una de las múltiples partículas que constituyen el componente último de la materia. No obstante, este concepto ha evolucionado considerablemente a lo largo de los años. Así, en un principio se pensaba que los átomos eran partículas indivisibles, pero pronto cedieron esta característica a sus componentes, electrones, protones y neutrones hasta la década de 1930. Esta hipótesis fue refutada por Dirac de manera teórica y los posteriores descubrimientos pusieron en evidencia que también éstas eran partículas formadas por otras más elementales y que, además, existía un gran número de ellas.

En la actualidad, se emplea también la denominación de partículas subatómicas en general. El área de conocimiento que se ocupa de ellas es la Física de partículas, es decir, el estudio de las partículas elementales y sus interacciones, también llamada Física de altas energías porque la energía necesaria para estudiar distancias extremadamente pequeñas es muy elevada, como consecuencia del principio de incertidumbre.

DESCUBRIMIENTO DE LAS PRIMERAS PARTÍCULAS SUBATÓMICAS Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Hasta 1932 sólo se conocían tres partículas subatómicas, el electrón, el protón y el neutrón, que se consideraban elementales. Algunos años antes, Pauli había pronosticado la existencia del neutrino con el fin de explicar los cambios energéticos en ciertas desintegraciones radiactivas y en determinados procesos nucleares. Sin embargo, aún no se disponía de pruebas reales de su existencia.

A) EL ELECTRÓN

A finales del siglo XIX, Thomson había estado estudiando los rayos catódicos, continuando las investigaciones de Crookes y Goldstein iniciadas dos décadas atrás. Al introducir gases a muy baja presión en un tubo de vidrio y someterlos a potenciales eléctricos de 20.000 a 100.000 voltios se producía la descarga, pero no se observaba luminosidad alguna en el interior del tubo. Sin embargo, en la zona situada frente al cátodo (polo negativo) aparecía una especie de fluorescencia verdosa, atribuida a ciertas radiaciones procedentes del cátodo: los rayos catódicos (figura 1).

Thomson estudió las propiedades y efectos de estos rayos y llegó a la conclusión de que estaban constituidos por partículas, con carga eléctrica negativa, dotadas de gran velocidad, casi dos mil veces más pequeñas que el átomo de hidrógeno. Además, las partículas eran idénticas aunque cambiase el gas del tubo. A propuesta de Stoney les dio el nombre de electrones. Los electrones tienen una masa en reposo de $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg y una carga eléctrica negativa de $1,602 \cdot 10^{-19}$ culombios, que es la unidad básica de electricidad.

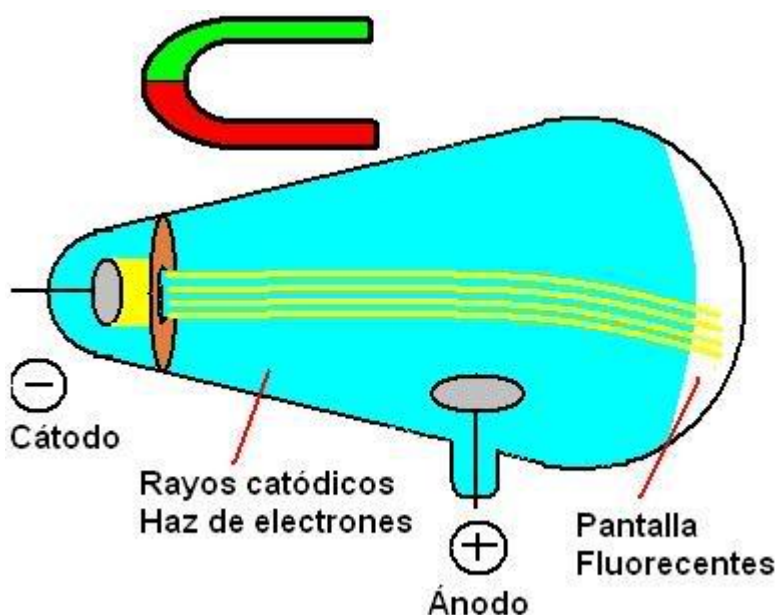


Figura 1. Experimento de Thomson

El espín es la propiedad cuántica de las partículas subatómicas que indica su momento angular intrínseco. Puesto que los electrones tienen espín semientero

($\pm 1/2$), se clasifican en el grupo de los fermiones, como veremos posteriormente. La partícula de antimateria correspondiente al electrón es el positrón.

B) EL PROTÓN

En un tubo de vacío, semejante al anterior, pero con el cátodo perforado, Goldstein efectuó la descarga correspondiente y observó otra luminiscencia situada detrás del cátodo. Pensó que eran unas radiaciones susceptibles de atravesar los canales o agujeros del cátodo y que se movían en sentido contrario a los rayos catódicos. Se denominaron rayos canales (figura 2). La carga eléctrica era positiva y su masa dependía del gas empleado, siendo los más pequeños los producidos al utilizar hidrógeno, con una masa mucho mayor que la del electrón, su carga igual y de signo contrario, y a los que se denominó protones. Era evidente que los protones formaban parte del átomo, generados al destruirse por causa de la descarga eléctrica dichos átomos de gas.

La masa de un protón es de $1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg, aproximadamente 1.836 veces la del electrón. Por tanto, la masa de un átomo está concentrada casi exclusivamente en su núcleo. Su carga positiva es igual en magnitud a la carga negativa del electrón y está presente en todos los núcleos atómicos junto al neutrón. Al protón y al neutrón se les denomina también nucleones. El número atómico de un elemento es característico e indica su número de protones.

El protón tiene un momento angular intrínseco, o espín, y, por tanto, un momento magnético. Por otra parte, el protón cumple el principio de exclusión. En Física nuclear, el protón se emplea como proyectil en grandes aceleradores para bombardear núcleos con el fin de producir partículas fundamentales.

Los protones son parte esencial de la materia ordinaria y son estables a lo largo de periodos de miles de millones, incluso billones, de años. No obstante, interesa saber si los protones acaban desintegrándose, en una escala temporal de 10^{31} años o más, ya que las actuales teorías de gran unificación implican que el protón es, en último término, inestable, por lo que los grupos de investigación de numerosos aceleradores de partículas están llevando a cabo experimentos para detectar su desintegración. Cabe decir que, hasta el momento, no se han encontrado pruebas.

El antiprotón, la antipartícula del protón, tiene carga negativa y no forma parte de los núcleos atómicos. Es estable en el vacío y no se desintegra. Sin embargo, cuando un antiprotón colisiona con un protón, ambas partículas se transforman en mesones, de vida media extremadamente breve. Si bien la existencia de esta partícula elemental se postuló por primera vez en la década de 1930, el antiprotón no se identificó hasta 1955, en el Laboratorio de Radiación de la Universidad de California.

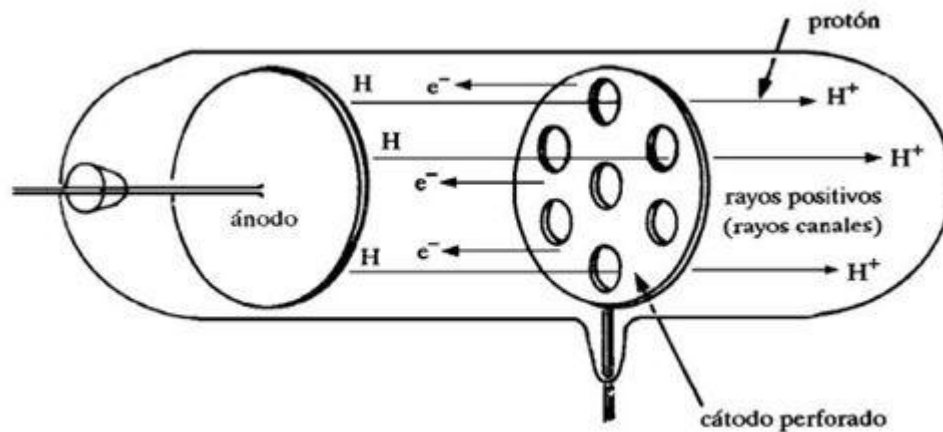


Figura 2. Rayos canales

C) EL NEUTRÓN

La existencia del neutrón fue profetizada en 1920 por el británico Ernest Rutherford y por científicos australianos y estadounidenses, pero la verificación experimental resultó difícil debido a que la carga eléctrica del neutrón es nula y la mayoría de los detectores de partículas sólo registran las partículas cargadas.

El neutrón fue identificado en 1932 por el británico James Chadwick, que interpretó correctamente los resultados de los experimentos realizados en aquella época Irene y Frédéric Joliot-Curie, entre otros. Ellos habían producido un tipo de radiación anteriormente desconocida mediante la interacción de partículas alfa con núcleos de berilio. Cuando se hacía pasar a través de una capa de parafina, las colisiones entre la radiación y los átomos de hidrógeno producían protones. Chadwick se dio cuenta de que la radiación estaba formada por neutrones.

La masa de un neutrón es de $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg, un 0,125 % mayor que la del protón. Está presente en todos los núcleos, salvo el del hidrógeno ordinario. Pueden ser expulsados de los núcleos con diferentes velocidades o energías, y son fácilmente frenados hasta alcanzar una energía muy baja a través de una serie de colisiones con núcleos ligeros como los del hidrógeno, el deuterio o el carbono. Cuando es expulsado del núcleo, el neutrón es inestable, y se desintegra para dar lugar a un protón, un electrón y un antineutrino en apenas unos minutos.

Al igual que el protón y el electrón, el neutrón posee momento angular intrínseco o espín. Por eso, los neutrones actúan como pequeños imanes individuales, una propiedad que permite la creación de haces de neutrones polarizados. La antipartícula del neutrón, conocida como antineutrón, tiene su misma masa, espín y tasa de desintegración beta. En ocasiones se produce en la colisión de antiprotones con protones, y posee un momento magnético igual en magnitud y opuesto en signo al del neutrón.

ACELERADORES DE PARTÍCULAS

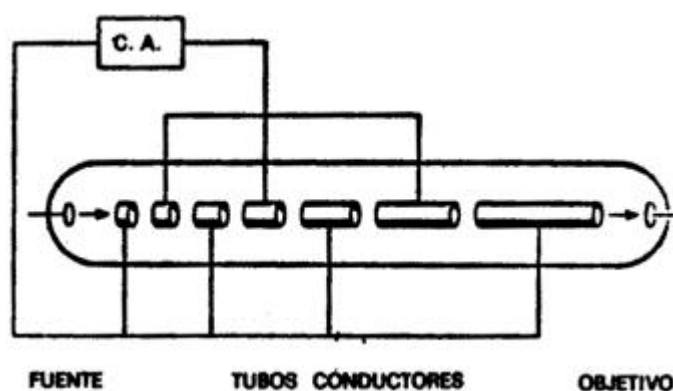
La investigación de la estructura atómica con más detalle no habría sido posible sin el desarrollo tecnológico que permite concentrar las enormes cantidades

de energía requeridas en el estudio del mundo subatómico. El avance teórico viene ligado al perfeccionamiento de los aceleradores y detectores de partículas.

Los aceleradores de partículas son los instrumentos de mayor tamaño y más costosos utilizados en Física. Se componen de una fuente de partículas elementales o iones, un tubo donde existe un vacío parcial en el que las partículas se desplazan y un sistema para aumentar la velocidad de las partículas, con el fin de provocar choques de mucha energía. Hallamos diversos tipos que han ido perfeccionándose progresivamente:

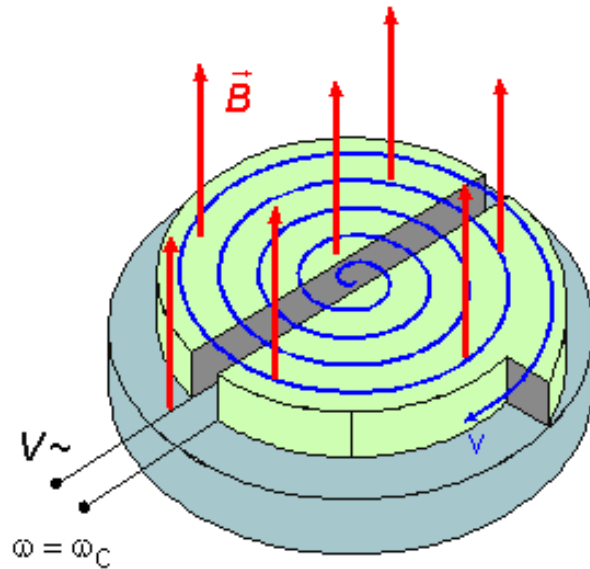
- Acelerador lineal. Utiliza tensiones alternas elevadas para impulsar partículas a lo largo de una línea recta cada vez que pasa por un hueco entre dos tubos metálicos. Dichos tubos se encuentran situados dentro de un cilindro en el que se ha hecho el vacío (figura 3). El más grande del mundo se halla en la Universidad de Stanford (Estados Unidos) y tiene una longitud de 3,2 km. Puede acelerar electrones hasta una energía de 50 GeV.

Figura 3. Esquema del acelerador lineal



- Ciclotrón. Diseñado por Lawrence, fue el primer acelerador circular. Tiene dos cámaras de vacío huecas en forma de *D* mayúsculas opuestas entre sí. Un electroimán mueve las partículas en una trayectoria curva, acelerándose cada vez que atraviesan el hueco entre las *des* (Figura 4). Para solucionar el aumento de masa Veksler y McMillan diseñaron el sincrociclotrón. El oscilador de radiofrecuencias que acelera las partículas se ajusta automáticamente para mantenerse en fase con ellas, disminuyendo la frecuencia de aceleración. El mayor sincrociclotrón tiene 6 metros y se encuentra en Rusia. Es capaz de acelerar los protones hasta más de 700 MeV. El más potente está en Michigan (Estados Unidos) y puede llegar a 8 GeV.

Figura 4. Esquema del Ciclotrón



- **Betatrón.** Cuando se aceleran electrones no es posible adaptar los sincrociclotrones a un aumento de masa tan grande. Por eso se utiliza otro acelerador cíclico, el betatrón, formado por una cámara toroidal donde se ha hecho el vacío, situada entre los polos de un electroimán que mantiene a los electrones en una trayectoria circular. La fuerza electromotriz inducida a lo largo de la órbita circular acelera los electrones.

- **Sincrotrón.** Consta de un tubo en forma de un gran anillo, por cuyo centro se desplazan las partículas en una órbita constante, bajo la acción de imanes (Figura 5). En 1983, el Fermilab de Batavia aumentó su capacidad hasta un límite potencial de 1 TeV al instalar imanes superconductores, lo que lo convirtió en el acelerador más potente del mundo. En 1989 empezó a funcionar en el CERN (Ginebra) el gran colisionador de electrones-positrones (LEP, siglas en inglés), un anillo de 27 km que puede alcanzar una energía de 50 GeV.

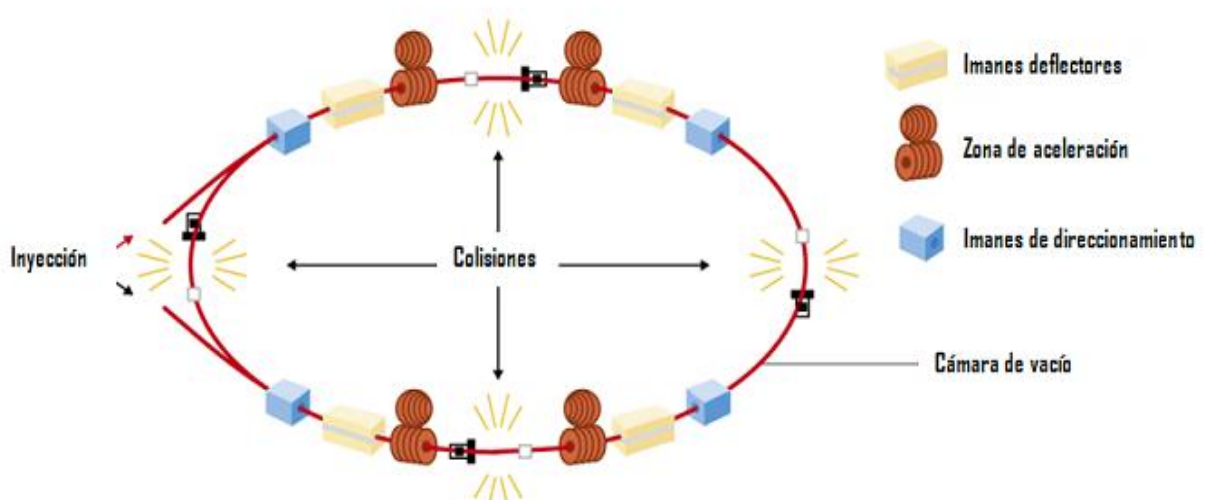


Figura 5. Sincrotrón

- Colisionadores con anillo de almacenamiento. Un colisionador es una combinación de un acelerador y uno o más anillos de almacenamiento, que produce colisiones más energéticas entre partículas que un acelerador convencional. El Fermilab puso en operación el anillo de almacenamiento en 1987 y el LEP del CERN se está continuamente mejorando para contar desde 2006 con un Gran Colisionador de Hadrones (LHC), que permite alcanzar cada vez mayores cantidades de energía (figura 6).

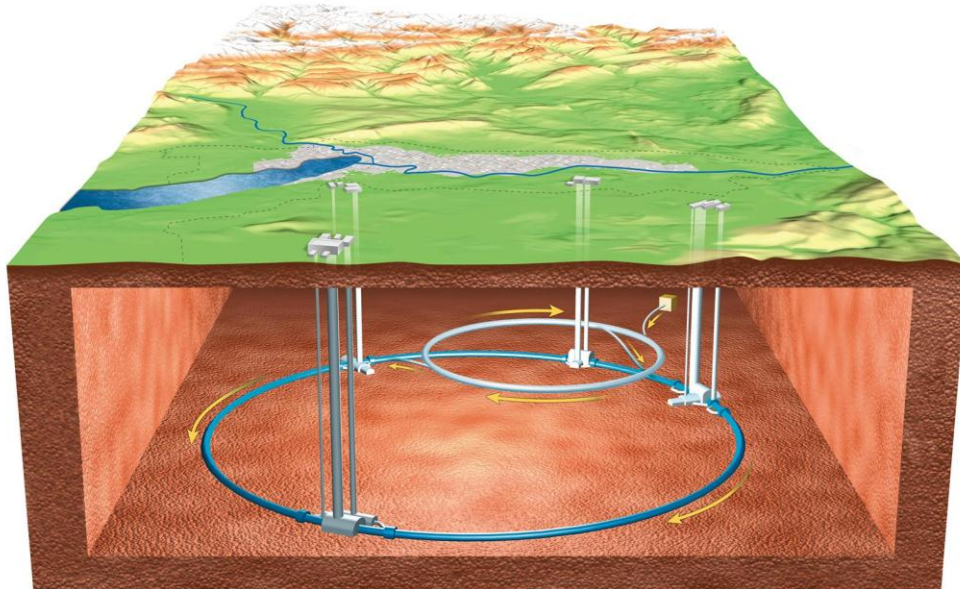


Figura 6. Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

DETECTORES DE PARTÍCULAS

Básicamente, son los instrumentos que ponen de manifiesto, y en muchos casos hacen visibles, las partículas subatómicas. Deben poseer alta resolución espacial y corto tiempo de respuesta, para obtener la masa, carga, energía y trayectoria de las partículas producidas. La gran sofisticación de dichos aparatos se refleja en los premios Nobel concedidos a sus diseñadores, como Wilson y Charpak. Distinguimos varios tipos, dependiendo del procedimiento de detección utilizado.

- Cámara de ionización. Un recipiente con gas y dos electrodos con potenciales eléctricos diferentes. Las partículas ionizan el gas y estos iones se desplazan hacia el electrodo de signo contrario, creándose una corriente que puede amplificarse y medirse. Las cámaras adaptadas para detectar las partículas individuales de radiación se denominan contadores, como el de Geiger, desarrollado en 1928.

- Contador de centelleo. Las partículas cargadas que se mueven a gran velocidad en determinados sólidos y líquidos (materiales centelleantes, como sulfuro de cinc, yoduro de sodio o antraceno) producen destellos visibles a causa de la ionización, y pueden registrarse.

- Detectores de trazas. Permiten observar las trazas que deja a su paso una partícula. Son de este grupo las emulsiones nucleares, la cámara de burbujas y la cámara de niebla.

Otros tipos de detectores emplean muchas otras interacciones entre la materia y las partículas elementales. Por ejemplo los de semiconductores, el detector de Cherenkov, el detector de percloroetileno (C_2Cl_4) para neutrinos, etc.

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Puede decirse que el modelo “sencillo” del átomo que consideraba al electrón, protón y neutrón como sus partículas elementales, tuvo validez en el primer tercio del siglo XX. En el segundo tercio, la profusión de nuevas partículas que se incorporaban a las ya conocidas resultó casi alarmante. El físico finlandés Roos confeccionó el primer catálogo de partículas en 1963 con cerca de cuarenta identificadas, y en los años setenta y ochenta se catalogaron varios cientos de ellas, clasificándolas bajo distintos criterios. No obstante, los principales responden al tipo de interacción que les afecta y al valor de su espín.

De este modo, llamamos leptones a las partículas que no se ven afectadas por las interacciones nucleares fuertes, como el electrón o el muón, mientras que los hadrones son las partículas sensibles tanto a las interacciones nucleares fuertes como a las débiles. Dentro de los hadrones están el protón y el neutrón, pero también un elevado número de partículas muy inestables, que se desintegran rápidamente. Si tienen masas mayores y en sus productos de desintegración se encuentran protones, las encuadramos en el grupo de bariones. Cuando son de masa inferior y sus productos de desintegración sólo muestran fotones y leptones, las clasificamos como mesones. Este es el caso del mesón pi, la partícula K o el mesón rho.

En este punto se nos plantea la interrogante acerca de cuáles son las partículas elementales. Si nos atenemos a las que existen en los átomos ordinarios serían las ya conocidas de antiguo, esto es, el protón, el neutrón y el electrón, pero si tenemos en cuenta aquéllas que se producen en los aceleradores de alta energía, el número se puede incrementar porque hay algunas, como los mesones, de masa intermedia entre el protón y el electrón. Es evidente que el concepto de elementalidad debe ampliarse o modificarse respecto a las ideas clásicas. La física de altas energías ha proporcionado un gran número de datos experimentales, muchos sucesos que afectan a colisiones y desintegraciones de partículas que han conducido al descubrimiento de una subestructura en la mayoría de estas partículas subatómicas. El estudio de las interacciones entre ellas y los fenómenos de desintegración ha permitido elaborar un nuevo modelo, el llamado “modelo estándar”, que reduce mucho el número de partículas elementales, limitándolas exclusivamente a aquéllas que no ofrecen una estructura inferior, volviendo al concepto antiguo de la elementalidad.

MODELO ESTÁNDAR

Es la teoría física que resume los conocimientos actuales sobre las partículas elementales y las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Utiliza los supuestos de la mecánica cuántica relativista, y considera que la materia está formada por partículas denominadas fermiones, mientras que las fuerzas

corresponden al intercambio de otras partículas llamadas bosones. Los fermiones elementales se agrupan en tres familias, cada una de ellas compuesta por determinados quarks y leptones.

A) QUARKS

Los nucleones no son realmente partículas elementales, sino que se hallan a su vez constituidos por algunas de las seis partículas verdaderamente elementales, denominadas quarks, de carga eléctrica fraccionaria. El concepto de quark fue propuesto independientemente en 1964 por los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig, primero como mera construcción matemática para presentar las propiedades de los hadrones, o partículas sometidas a las interacciones fuertes, de una forma más sencilla, pasando luego a postularse su posible existencia física.

El nombre de quark le fue sugerido a Gell-Mann por un pasaje bastante oscuro del libro de James Joyce "Finnegans Wake" donde puede leerse: "...Three quarks for muster Mark...", un juego de palabras. Supuso una ruptura con la tradición de bautizar nuevas partículas y fenómenos con palabras derivadas de raíces griegas. El término que había elegido Zweig, y que luego no fue utilizado, era el de "aces". Es muy posible que ellos pretendieran quitarle ese halo de misterio que tradicionalmente ha rodeado al mundo invisible de lo atómico. No sólo con la palabra quark, sino con muchos términos que hoy día son de uso común entre expertos y que facilitan, en cierta manera, su comprensión.

Al principio se pensó que existían tres tipos de quark: up (u), down (d) y strange (s), arriba, abajo y extraño. El protón está formado por dos quarks u y un quark d y el neutrón por un quark u y dos del tipo d, los cuales se mantienen unidos por otro tipo de partículas elementales, sin masa, llamadas gluones, responsables de la interacción fuerte. Esto es posible al considerar que la carga eléctrica de los quarks es fraccionaria, $+2/3$ para u y $-1/3$ para d. Su existencia fue puesta de manifiesto a fines de los años 60 en el acelerador lineal SLAC (California) por medidas de dispersión electrón-nucleón, donde electrones acelerados a 20 GeV se hacían chocar contra protones y neutrones. Se vio que los nucleones estaban formados por tres partículas puntuales, que fueron identificadas como quarks.

En 1970, Glashow, Iliopoulos y Maiani postularon la existencia de un cuarto quark, denominado charm (c), o encanto, para explicar que un kaón neutro no se desintegra en una pareja de muones, sino en piones cargados. Este quark c había sido ya demandado por Glashow aduciendo motivos de simetría, pues se conocían dos parejas de leptones, el electrón y el muón con sus correspondientes neutrinos, y parecía lógico pensar en dos parejas de quarks. La prueba experimental llegó en 1974 de la mano de dos equipos distintos, el de Ting en el laboratorio Brookhaven de Nueva York y el de Richter en el SLAC de California. En dichos experimentos se observó la existencia de una partícula, llamada J/psi, que era el estado de mínima energía correspondiente al menor valor de un nuevo número cuántico llamado C o encanto, de un par quark-antiquark nuevo, el $c - \bar{c}$. Por dicho descubrimiento Ting y Richter fueron galardonados con el premio Nobel de 1976.

Posteriormente se planteó la hipótesis de un quinto y un sexto quarks, llamados respectivamente bottom o beauty (b) y top o truth (t), fondo y cima o

belleza y verdad, por razones teóricas de simetría. En 1977, en los experimentos en el Fermilab, a cargo del equipo de investigadores dirigido por Lederman, se detectó una nueva partícula, de masa 9.640 MeV, que ofrecía grandes posibilidades para estar constituida por un nuevo tipo de quark más masivo que los conocidos hasta esa fecha. La evidencia definitiva la proporcionó el acelerador DESY de Hamburgo (Alemania) en 1978. Sus experimentos de aniquilación electrón-positrón demostraron la existencia del quark bottom. De este modo, la partícula úpsilon, nombre con el que fue designada por Lederman, era interpretada como un estado ligado $b - \bar{b}$. Como es lógico, se estableció un nuevo número cuántico del mismo nombre.

No obstante, el quark top no fue hallado por los investigadores hasta 1995, en el Fermilab de Batavia. Para crearlo hubo que concentrar inmensas cantidades de energía en una región ínfima de espacio. Se esperaba que entre unos cuantos billones de colisiones de protones algunas creasen un quark cima a partir de la energía del impacto, aunque se desconocía la energía necesaria. El modelo estándar predecía muchas propiedades del quark cima, como la carga, el espín o momento angular intrínseco, pero no determinaba la masa. Finalmente, los experimentos efectuados en el Fermilab, coordinados por Liss y Tipton, arrojaron para dicha masa el valor aproximado de unos 175 GeV, tanta como un átomo de oro y mucho más que lo previsto por la mayoría de los teóricos. La del protón, que consta de dos quarks arriba y uno abajo, como ya hemos dicho, es ligeramente inferior a 1 GeV.

Por consiguiente, ha quedado establecido que el número total de quarks es de seis, pues cada familia está integrada por dos de ellos, y de tal modo que cada una tiene una masa muy superior que la de la familia precedente. Se dice que los quarks se presentan en seis sabores distintos, continuando con esta nomenclatura tan especial, pues el término sabor se emplea en física de partículas para referirse a los tipos que hay de cada una de ellas.

La primera familia está formada por el quark u y el quark d; el primero tiene una masa aproximada doscientas cincuenta veces menor que la masa del protón y el otro unas cien veces menor. La segunda familia está formada por el quark s y el quark c. La tercera está compuesta por el quark b y el quark t, de los cuales el segundo tiene una masa mucho mayor. En cualquier caso es muy difícil determinar el valor de la masa de un quark, ya que los quarks no se pueden tener aislados. Por otro lado, la carga eléctrica de los quarks es fraccionaria de la unidad fundamental de carga. Así, por ejemplo, el quark u tiene una carga igual a $2/3$ de la unidad elemental, aunque no se pueden observar tampoco cargas fraccionadas aisladas, ya que los quarks siempre están combinados. Es decir, los quarks forman partículas compuestas llamadas hadrones, palabra derivada de la griega hadrys (fuerte), de modo que la suma de las cargas eléctricas de los quarks que constituyen un hadrón es siempre un número entero.

Los diversos quarks se pueden combinar entre sí para dar lugar a todas las partículas conocidas, salvo los leptones y los bosones, y con este modelo se puede llegar a una buena aproximación en el conocimiento de las partículas elementales. Sin embargo, esta concepción, basada principalmente en la carga eléctrica, deja sin explicar numerosas cuestiones; por ejemplo, que no existan partículas formadas sólo por dos quarks ni tampoco quarks aislados. Para abordar éstas y otras cuestiones

relativas a la estructura más íntima de la materia fue necesaria la introducción de un nuevo número cuántico, el color, cuyos tres valores caracterizan las partículas con mayor precisión.

Además, cada tipo de quark tiene su antipartícula correspondiente, distinguiéndose tres clases o colores diferentes dentro de cada quark o antiquark. Los quarks pueden ser rojos, azules o verdes, mientras que los antiquarks pueden ser antirrojos, antiazules o antiverdes. Estos colores representan una propiedad cuántica. Su significado es análogo al de la carga en la interacción electromagnética, pues dos quarks con distinto color se atraen.

Las interacciones fuertes entre quarks están mediadas por gluones, quienes carecen de masa y de carga eléctrica aunque tienen color, es decir, transportan pares color/anticolor. Si bien hay nueve combinaciones posibles, debido a consideraciones teóricas hay que eliminar una de ellas, quedando pues establecido en ocho el número total de gluones diferentes.

El modelo exige que las combinaciones de quarks y antiquarks para formar hadrones sólo pueden existir si el resultado final es un estado "singlete blanco", o dicho de otro modo, color neutro. Antes del desarrollo de la cromodinámica cuántica, los físicos no podían explicar porqué los quarks sólo se combinan en bariones, partículas de tres quarks, y en mesones, partículas quark-antiquark, pero no, por ejemplo, en grupos de cuatro quarks. Ahora entendemos que sólo estas combinaciones pueden dar color neutro.

Igual que sucede con la carga eléctrica, también se conserva el color. De hecho, existen tantas analogías que ya se habla de "carga de color" y no simplemente de color. Cuando un quark absorbe o emite un gluón en su interacción con otro, su color debe cambiar de modo que el resultado final de la interacción mantenga el mismo color inicial. Por ejemplo, si un quark rojo emite un gluón rojo/antiazul, ha de transformarse en un quark azul para que el resultado global siga teniendo color rojo.

El hecho de que los gluones transporten carga de color hace que se sientan atraídos por las cargas de color de los otros quarks y otros gluones, de forma que la fuerza entre quarks es constante e independiente de la distancia. Esto significa que para separar dos quarks a una distancia mayor se requiere cada vez más energía, de modo que si pretendemos separarlos una distancia infinita, es decir, ver un quark aislado, es necesario ejercer una fuerza infinita. Esto explica el hecho denominado esclavitud infrarroja: no se pueden observar quarks libres, pues quedan confinados por la interacción fuerte. Las grandes distancias se designan como distancias infrarrojas, por eso esclavitud infrarroja es un término apropiado para describir el aumento de las interacciones entre quarks conforme se hace grande la distancia. En las pequeñas distancias, unos 10^{-18} m, la dependencia de los quarks de su propia carga de color desaparece, quedando prácticamente libres. Este fenómeno se llama libertad asintótica.

B) LEPTONES

Se encuadran bajo la denominación de leptones, del griego leptos (ligero), al conjunto de partículas elementales que no interaccionan a través de la fuerza nuclear fuerte. Los leptones son eléctricamente neutros o tienen carga unidad, y, por

supuesto, son fermiones. Además, no parecen tener ninguna estructura interna. Es un grupo integrado por el electrón, el muón, el mesón tau y las tres clases de neutrinos asociadas a ellos. Además, igual que los quarks, cada una de estas partículas tiene su antipartícula correspondiente.

Aunque todos los leptones son relativamente ligeros, de espín igual a $\frac{1}{2}$ y masa inferior a la de los mesones, sus propiedades son muy diferentes. El electrón tiene carga negativa, una masa de 0,511 MeV y es estable. Sin embargo, el muón, también de carga negativa, posee una masa alrededor de 200 veces superior a la del electrón, pero es inestable y se desintegra después de una vida media de $2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos, en un electrón, un neutrino y un antineutrino. Este proceso, igual que la desintegración beta, ocurre por interacción débil, lo que indica que la fuerza nuclear débil actúa igualmente sobre leptones y sobre quarks. Finalmente, encontramos el leptón tau, con una masa mucho mayor que el protón. Es muy inestable y poco conocido: se desintegra tras una vida media de $3 \cdot 10^{-13}$ segundos, produciendo diversos tipos de leptones o hadrones y un neutrino tauónico.

Los neutrinos poseen una propiedad característica que los asocia específicamente con algún tipo de leptón cargado. Se ha encontrado experimentalmente que cuando un neutrino electrónico interacciona con la materia siempre se producen electrones y nunca muones u otro tipo de leptones. Lo mismo ocurre con el resto de las clases de neutrinos. Cuando un leptón pesado decae, es decir, se desintegra, una de las partículas resultantes es siempre el neutrino asociado. Las otras pueden ser cualquier leptón más su correspondiente antineutrino, o cualquier quark con su antiquark.

Los neutrinos son los leptones más ligeros. Las medidas experimentales indican que la masa del neutrino electrónico, si la tiene, es menor que 10 eV. Además, carece de carga, por lo que sólo experimenta las dos fuerzas más débiles de la naturaleza, es decir, la fuerza gravitatoria y la fuerza nuclear débil. Por esta razón, los neutrinos reaccionan con la materia de forma extremadamente leve. Así, los neutrinos producidos por el Sol pueden atravesar la Tierra sin ser absorbidos. Esto hace difícil su detección y el estudio experimental de sus propiedades físicas.

C) FAMILIAS DE FERMIONES

La única familia de fermiones que tiene existencia en la materia ordinaria está formada por quarks y leptones de poca masa, y concretamente se compone de los quarks u y d, el electrón y su neutrino, además de sus antipartículas correspondientes, es decir, los dos antiquarks (anti-u y anti-d), el positrón y el antineutrino electrónico.

Los quarks se unen en tríos para constituir los neutrones y los protones, los cuales, a su vez se agrupan en los núcleos, que interaccionan con los electrones dando lugar a los átomos. Los neutrinos de los electrones participan en la desintegración beta radiactiva, en la que un neutrón se convierte en protón, emitiendo un electrón y un antineutrino.

Las partículas que componen las otras dos familias de fermiones no están presentes en la materia ordinaria, pero pueden crearse en aceleradores de partículas potentes. Así, la segunda familia está formada por los quarks c y s, el muón y el

neutrino muónico, y sus antipartículas correspondientes. La tercera familia incluye los quarks t y b y la partícula tau y su neutrino, con sendas antipartículas para todos ellos. Esas partículas son tan inestables que no tiene sentido plantearse su existencia fuera de los experimentos. Eso sí, en ciertos procesos naturales, como los ocasionados por rayos cósmicos o por la radiactividad natural, es posible detectar la rápida formación y desintegración de algunas de dichas partículas.

Hoy sabemos que las interacciones débiles son las responsables de que todos los quarks y leptones más pesados decaigan, produciendo quarks y leptones más ligeros de la familia I, por eso la materia estable que nos rodea contiene sólo electrones y los dos quarks más livianos, u y d . Cuando un quark o un leptón cambian de tipo, por ejemplo, un muón cambiando a un electrón, se dice que cambia de sabor. Por lo tanto, todos los cambios de sabor son producidos por la interacción débil. Otra prueba adicional de la validez de este modelo es la interpretación de la estructura de los mesones. Recordemos que son partículas inestables de masa generalmente comprendida entre la de los electrones y la de los neutrones y sometidas a interacciones fuertes, de espín nulo o entero. Fueron identificados por Powell en 1947 en los rayos cósmicos, aunque su existencia había sido postulada por Yukawa en 1935. El modelo estándar explica perfectamente sus propiedades suponiéndoles constituidos únicamente por dos quarks, en concreto un quark y un antiquark, que den como resultado un color neto blanco (o neutro).

D) BOSONES

El modelo estándar propone que cada tipo de interacción entre las partículas materiales o fermiones tiene lugar mediante el intercambio de ciertas partículas: los bosones. Sus características, masa, carga, isospín, color, etc., vienen determinadas por el alcance e intensidad del tipo de interacción. Los bosones mediadores son doce, agrupados como siguen:

- Ocho gluones, portadores de la interacción fuerte, sin masa ni carga eléctrica.
- Tres bosones vectoriales (spin 1) intermediarios de la interacción débil: W^+ , W^- y Z^0 .
- El fotón, mediador de la interacción electromagnética.

Habría que añadir el bosón de Higgs, que sería una partícula colocada expresamente en la teoría para poder unificar todas las interacciones, en un tratamiento matemático que permita ampliar lo que ya se ha hecho con las fuerzas electromagnética y débil. La teoría debe permitir unificar las partículas con masa cero, como el fotón, con los bosones vectoriales, cuya masa es bastante apreciable, alrededor de 80 GeV. Los bosones de Higgs no se han detectado aún, siendo uno de los retos más atractivos de la física de altas energías. No obstante, unos experimentos, aún sin confirmar, llevados a cabo por C. Tully en el LEP del CERN en el año 2000, parecen sugerir su aparición con una masa de unos 115 GeV. Actualmente, la búsqueda del bosón de Higgs constituye el objetivo prioritario del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) que se está poniendo a punto en el CERN de Ginebra.

Las tres generaciones de la materia				
	I	II	III	Fuerzas
Masa	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
Carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Nombre	u arriba	c encanto	t cima	γ fotón <small>(electromagnetismo)</small>
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d abajo	s extraño	b fondo	g gluón (8) <small>(cromática)</small>
Leptones	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electrón neutrino	ν_μ muón neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 bosón Z <small>(fuerza débil)</small>
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electrón	μ muón	τ tau	W^\pm bosón W <small>(fuerza débil)</small>
				Bosones

Figura 7. Componentes elementales de la materia y la energía

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ALCARAZ, J y JOSA, M. I. *Búsqueda experimental del bosón de Higgs*. Revista Española de Física **14** (2), 27-30. (2000).
- COHEN-TANNOUDJI, G y SPIRO, M. *La materia-espacio-tiempo*. Espasa Universidad. Madrid. 1988.
- EISBERG, R. y RESNICK, R. *Física cuántica*. Editorial Limusa. México.
- FRITZSCH, H. *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*. Alianza Universidad. Madrid. 1988.
- GALINDO, A. y PASCUAL, P. *Mecánica cuántica*. Editorial Alhambra. Madrid.
- 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.

YNDURÁIN, F. J. *Mecánica cuántica y física de partículas elementales*. Revista Española de Física **14** (1), 54-64. (2000).

YNDURÁIN, F. J. *The Theory of Quark and Gluon Interactions*. Springer. 1999.

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

Direcciones y libros digitales consultados en Internet:

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