

## DIÁLOGOS SOBRE FÍSICA CUÁNTICA. IV. LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

**Autor: José Antonio Montiel Tosso**

**Doctor en Ciencias Químicas**

**Profesor de Enseñanza Secundaria**

Alumno: Me han surgido algunas dudas sobre las *partículas elementales*. En primer lugar, ¿hay diferencias cuando hablamos de *partículas fundamentales* o es lo mismo?.

Profesor: Aunque a veces se les ha otorgado ciertos matices, últimamente son términos análogos. Podemos definir las partículas elementales como las que constituyen el componente último de la materia. No obstante, el concepto de partícula elemental ha evolucionado considerablemente a lo largo de los años. Recuerda que en un principio se pensaba que los átomos eran partículas indivisibles, pero pronto cedieron esta característica a sus componentes: electrones, protones y neutrones, que hasta la década de 1930 se creían partículas elementales. 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. Hoy se sabe que muchas de estas partículas son sumamente complejas, pero se las sigue llamando partículas elementales.

Alumno: Por lo que dice, no es un término tan claro.

Profesor: 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. Así, para explorar el interior del núcleo atómico en los modernos aceleradores se lanzan contra ellos electrones de muy alta energía. Los resultados de estas colisiones indican que los nucleones no son partículas elementales, sino compuestos por partículas aún menores, denominadas **quarks**.

Alumno: Eso quiere decir que en este campo de la ciencia es esencial el desarrollo de los medios experimentales, ¿verdad?.

Profesor: Me temo que sí. Pero hay otro hecho curioso que te quiero comentar. Conforme avanza la tecnología y se alcanzan niveles de energía mayores se observan más analogías entre el microcosmos subatómico y el macrocosmos que constituye nuestro universo, de manera que la Cosmología y la Física de partículas no son más que dos ramas de un mismo tronco.

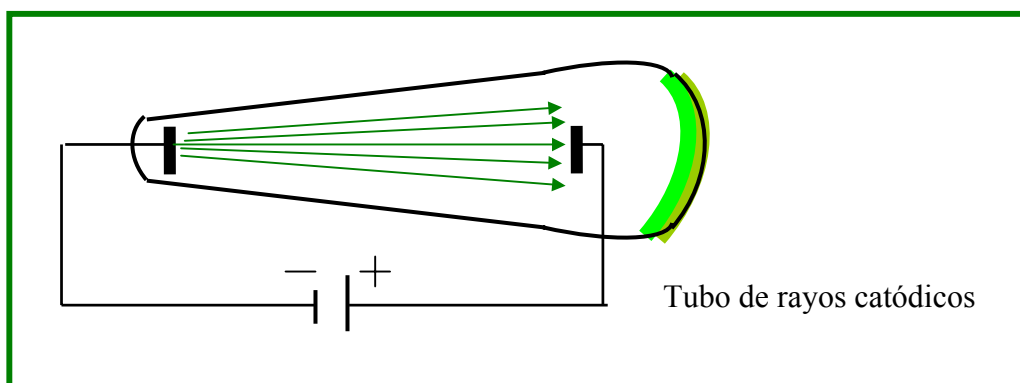
Alumno: De eso también tenemos que hablar pero ahora me interesan mucho más las *partículas subatómicas*. ¿Cuándo podemos decir que comenzó su estudio?.

### DESCUBRIMIENTO DE LAS PRIMERAS PARTÍCULAS SUBATÓMICAS Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Profesor: 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.

Alumno: Empecemos por el electrón. Cuando me explicó la evolución de los modelos atómicos me dijo que fue descubierto por Thomson.

Profesor: Efectivamente. 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 que tenía soldados en su interior dos electrodos 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.



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.

Alumno: ¿Cómo llevó a cabo Thomson el estudio de estos rayos?.

Profesor: Mediante la aplicación de campos eléctricos y magnéticos consiguió desviar los electrones, habida cuenta de que son partículas cargadas. Analizando sus trayectorias se puede deducir la relación carga/masa.

Alumno: Pero...¿verdaderamente los rayos catódicos salen del cátodo?. No entiendo bien su origen.

Profesor: Cuando efectuamos la descarga eléctrica a tan grandes potenciales se liberan electrones de los átomos metálicos que constituyen el cátodo y al mismo tiempo se **ionizan** las moléculas del gas, que naturalmente eran neutras, y se producen cargas negativas, es decir, electrones, y positivas, los iones del gas. Estos últimos son atraídos por el cátodo (negativo) y al chocar contra él no provocan efectos visibles, pero los electrones libres se mueven hacia el polo opuesto, el **ánodo** (positivo), chocando contra el otro extremo del tubo y produciendo la luminosidad característica ya comentada. Lógicamente, los electrones arrancados al gas por la descarga también se dirigen hacia el ánodo y se mezclan con los rayos catódicos propiamente dichos.

Alumno: Y esto sucedió en 1897. Ya sé que unos años después Millikan determinó con gran exactitud la carga del electrón mediante su experimento de la gota de aceite. ¿Cómo fue?.

Profesor: Básicamente consiste en ionizar pequeñas gotas de aceite, que se hacen caer por el hueco entre dos placas. Se ajusta el potencial entre ellas de modo que la fuerza eléctrica aplicada detenga la caída de las gotas cargadas. Mediante sencillos cálculos, que tienen en cuenta las fuerzas de **rozamiento** (*viscosidad* del aceite), es posible hallar la carga de las gotas. Todas ellas son múltiplos de una unidad fundamental, la carga del electrón,  $e$ , antes mencionada. Y finalmente, conocida la carga y la relación carga/masa de Thomson, es inmediato despejar el valor de la masa del electrón.

Alumno: Yo he estudiado que los componentes del núcleo atómico son los protones y los neutrones. ¿Cómo se descubrieron?.

### EL PROTÓN

Profesor: En un tubo de vacío, muy semejante al de la figura anterior, pero con el cátodo perforado, en 1886, 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** por razones obvias. La carga eléctrica era *positiva* y su masa dependía del gas empleado, siendo los más pequeños los producidos al utilizar hidrógeno. Algunos años después, se comprobó que su masa era mucho mayor que la del electrón, su carga igual y de signo contrario, y se les denominó protones. Era evidente que los protones formaban parte del átomo, generados al destruirse por causa de la descarga eléctrica dichos átomos de gas.

Alumno: O sea, no sucede igual que con los rayos catódicos. La carga y la masa de los rayos canales varían según el gas. Sólo son protones cuando utilizamos hidrógeno ¿no es cierto?.

Profesor: Así es, ya que están constituidos por los iones positivos provenientes de los átomos del gas, cuando la descarga eléctrica les arranca electrones. Puesto que son positivos se dirigen rápidamente hacia el cátodo y la mayoría atraviesa por sus agujeros, yendo a parar contra el extremo del tubo. Cuando el cátodo no está perforado, es imposible observar estos rayos *positivos* y sólo se ven los rayos catódicos.

La masa de un protón es de  $1,6726 \cdot 10^{-27}$  kg, aproximadamente 1.836 veces la del electrón. Su carga positiva es igual en magnitud a la carga negativa del electrón y está presente en todos los núcleos atómicos. El número atómico de un elemento es característico e indica su número de protones, que lógicamente será igual al de electrones.

### EL NEUTRÓN

Alumno: ¿Por qué fue el neutrón la última partícula en descubrirse?.

Profesor: Es la última de las partículas consideradas estables. La existencia del neutrón fue profetizada en 1920 por el físico 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.

Alumno: Puedo imaginarme la "carrera" de los científicos de los años veinte por "cazar" al neutrón.

Profesor: Más o menos fue así. El neutrón fue identificado en 1932 por el británico James Chadwick, que interpretó correctamente los resultados de los experimentos realizados en aquella época por los físicos franceses Irene y Frédéric Joliot-Curie, entre otros. Ellos habían producido un tipo de radiación anteriormente desconocida mediante el bombardeo de *núcleos de berilio* con partículas *alfa*. Cuando esta misteriosa radiación se hacía pasar a través de una capa de parafina, las colisiones entre la radiación y los átomos de hidrógeno de la parafina originaban 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, aproximadamente un 0,125 % mayor que la del protón. Es una partícula constituyente de todos los núcleos, salvo el del hidrógeno ordinario. Ahora sabemos que los neutrones libres, que no forman parte de un núcleo atómico, se producen en reacciones nucleares. Pueden ser expulsados de los núcleos con diferentes velocidades o energías, y son fácilmente frenados mediante choques 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 quince minutos.

## ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Alumno: Esta es la idea de partícula elemental que he tenido hasta ahora, es decir, el núcleo formado por protones y neutrones, que contiene casi toda la masa del átomo en un espacio mínimo y la corteza, donde se mueven los electrones en sus diferentes orbitales. ¿Son éstas todas las partículas elementales?.

Profesor: Ciertamente no. El electrón no parece tener estructura interna y sí la podemos considerar elemental en el sentido que deduzco de tu exposición, no obstante desde los años treinta se han ido detectando numerosas partículas subnucleares.

Alumno: ¿Cómo ha podido ser eso?. ¿Con qué medios experimentales?.

Profesor: En un principio, mediante la observación detallada de la naturaleza, concretamente de los **rayos cósmicos**.

Alumno: Por su nombre, diría que proceden del espacio.

Profesor: En efecto. Los rayos cósmicos son generalmente protones, aunque también contienen núcleos más pesados, emitidos en las reacciones nucleares de las estrellas, incluyendo a nuestro sol, que alcanzan la Tierra muy acelerados. Por término medio, su recorrido en la atmósfera es de unos 800 m hasta chocar contra algún núcleo, originando nuevas partículas, que a su vez pueden volver a chocar, produciendo lo que se conoce como "**cascada**". Estudiando, con detectores adecuados, dichas colisiones, los físicos de la primera mitad del siglo XX obtuvieron mucha información acerca de la estructura del átomo.

Alumno: Supongo que el estudio se completaría luego con la ayuda de los medios más sofisticados.

Profesor: Eso sucedió desde la década de los cincuenta, con el empleo de los **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.

Para estudiar las partículas fundamentales que componen el núcleo se emplean aparatos con energías superiores a un Giga-electrón-voltio (GeV). Los aceleradores son enormes instalaciones de varios kilómetros que permiten generar violentas *colisiones* entre partículas. Son los instrumentos de mayor tamaño y más costosos utilizados en Física. Todos tienen los mismos componentes básicos: una **fuelle** de partículas elementales o iones, un **tubo** donde existe un vacío parcial en el que las partículas pueden desplazarse libremente y un **sistema para aumentar la velocidad** de las partículas.

Alumno: ¿En qué consiste ese sistema?.

Profesor: Ha ido perfeccionándose a lo largo del tiempo. En un principio, las partículas cargadas se aceleraban mediante un campo electrostático. Por ejemplo, situando electrodos con una gran diferencia de potencial en los extremos de un tubo de vacío, los británicos Cockcroft y Walton consiguieron acelerar protones hasta 250.000 eV. A principios de la década de 1930 Van de Graaff diseñó un acelerador estableciendo un potencial entre dos electrodos y transportando cargas mediante una cinta móvil. Este tipo de aceleradores lineales puede alcanzar energías de 15 MeV.

Alumno: ¿Por qué se llama acelerador lineal?.

Profesor: El acelerador lineal, también llamado "linac" al utilizar las primeras letras de su nombre en inglés, fue concebido a finales de la década de 1920. Emplea tensiones alternas elevadas para impulsar partículas a lo largo de una línea recta, sincronizadas de forma que la partícula sea impulsada hacia delante cada vez que pasa por un hueco entre dos tubos metálicos, que se encuentran dentro de un cilindro en el que se ha hecho el vacío.

Alumno: ¿Qué tamaño alcanza?.

Profesor: 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. En teoría, pueden construirse aceleradores lineales de cualquier energía, pero existe un inconveniente. Conforme los experimentos demandan más energía se hace necesario incrementar el recorrido de las partículas aceleradas y eso nos acarrea graves problemas en su construcción.

Alumno: Me imagino que a partir de un cierto tamaño sería imposible aumentar las dimensiones del acelerador. No se me ocurre ninguna solución al problema.

Profesor: Pero la tuvo. El físico estadounidense Ernest Lawrence, de la universidad de Berkeley, recibió el Premio Nobel de Física en 1939 por un avance en el diseño de aceleradores llevado a cabo a principios de la década de 1930. Lawrence desarrolló el **ciclotrón**, el primer *acelerador circular*.

Alumno: Comprendo, se trata de hacer que las partículas den vueltas consiguiendo así un recorrido mucho mayor.

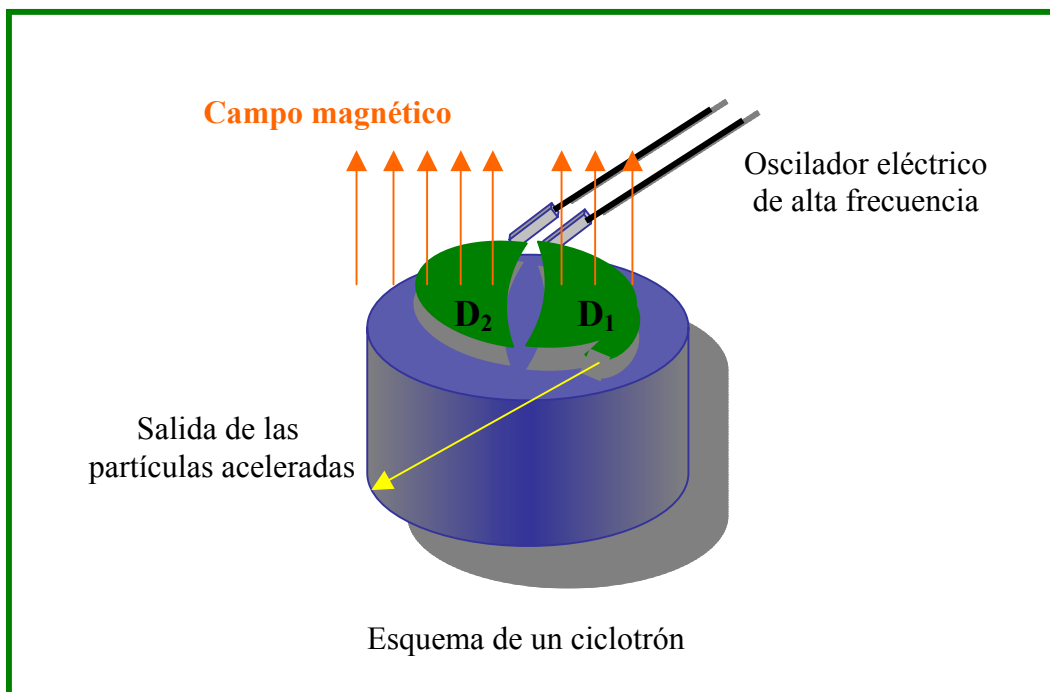
Profesor: El ciclotrón diseñado por Lawrence era una especie de acelerador lineal arrollado en una espiral. En vez de tener muchos tubos, la máquina sólo tiene dos cámaras de vacío huecas, que actúan como electrodos, llamadas **des**, cuya forma es la de dos letras **D** mayúsculas opuestas entre sí. Un campo magnético producido por un potente electroimán hace que las partículas cargadas se muevan en una trayectoria curva, de forma que se aceleran cada vez que atraviesan el hueco entre las **des**. A medida que las partículas acumulan energía, el radio de sus trayectorias se incrementa y se acercan al borde externo del acelerador, por donde acaban saliendo.

Alumno: Parece que Lawrence halló la solución definitiva al principal problema de estas "máquinas", pues ahora no estamos limitados por el espacio que necesitan sus largos recorridos.

Profesor: Sin embargo, surgió otra dificultad. Cuando las partículas aceleradas en el ciclotrón alcanzan una velocidad próxima a la de la luz, su masa aumenta de modo apreciable, tal como predice la *teoría de la relatividad*. Esto hace que sea más difícil acelerarlas, y lleva a que los pulsos de aceleración en los huecos entre las **des** queden desfasados.

Alumno: Tengo la impresión de que hemos cambiado un problema por otro.

Profesor: No exactamente. El hecho de incrementarse la masa a medida que aumenta a esos niveles relativistas la velocidad de las partículas es independiente del tipo de trayectoria. Si se hubieran construido aceleradores lineales con la longitud suficiente para que los protones o los electrones alcanzasen energías del orden de los 500 GeV, por ejemplo, también existiría esta grave dificultad. Ahora bien, en 1945, el físico soviético Veksler y el estadounidense McMillan sugirieron una solución a este problema diseñando el **sincrociclotrón**, denominado a veces **ciclotrón de frecuencia modulada**.



Alumno: Podemos decir que constituye un modelo avanzado del original, o en términos actuales, un ciclotrón de segunda generación.

Profesor: En dicho instrumento, el oscilador o generador de radiofrecuencias que crea el campo magnético que acelera las partículas alrededor de las **des** se ajusta automáticamente para mantenerse en fase con las partículas aceleradas. Mientras la masa de las partículas aumenta, la frecuencia de aceleración disminuye para seguir su ritmo.

Alumno: Eso quiere decir que el radio de la trayectoria se logra mantener constante, a pesar del aumento de masa porque es compensado con una menor aceleración.

Profesor: Exacto. Por otro lado, a medida que crece la energía máxima de un sincrociclotrón, se incrementa su tamaño, porque las partículas exigen unas trayectorias de mayor radio. El sincrociclotrón más grande tiene 6 metros de diámetro y se encuentra en el Instituto de Dubna, en Rusia. Es capaz de acelerar los protones hasta más de 700 MeV y sus imanes pesan unas 7.000 toneladas. El ciclotrón más potente del mundo, el K1200, empezó a funcionar en 1988 en Michigan (Estados Unidos) y puede acelerar núcleos hasta una energía cercana a los 8 GeV.

Además, para los electrones el aumento de masa por efectos relativistas es mucho mayor que en el caso de los protones y no es válido el método del sincrociclotrón, ya que no es posible adaptarlo a un aumento de masa tan grande. Por ejemplo, un electrón con energía de 1 MeV tiene una masa tres veces mayor que su masa en reposo. Para estos casos se utiliza otro tipo de acelerador cíclico, el **betatrón**, diseñados de modo que permiten modificar no sólo la *frecuencia* de la corriente alterna que alimenta el electroimán sino el *campo magnético* existente en la cámara del acelerador.

Alumno: De todos modos, creo que las energías requeridas actualmente en los experimentos de colisiones entre partículas han de ser mayores. ¿Verdad?

Profesor: En la carrera tecnológica siempre se busca mejorar las prestaciones de los medios experimentales. El siguiente avance fue el **sincrotrón**, el miembro más reciente y con mayor potencia de la familia de aceleradores. Consta de un tubo, en forma de un gran anillo, por el que se desplazan las partículas, rodeado de imanes que hacen que éstas se muevan por su centro. Las partículas entran en el tubo después de haber sido aceleradas a varios millones de electronvoltios y ya en el interior del anillo son nuevamente aceleradas en uno o más puntos cada vez que describen un círculo completo alrededor del acelerador. Para mantener las partículas en una órbita constante, las intensidades de los imanes del anillo se aumentan a medida que las partículas ganan energía.

El primer acelerador que superó la barrera de los Giga-electrón-voltios fue el sincrotrón de protones del **Brookhaven National Laboratory** (Long Island, Nueva York), que alcanzó valores de 3 GeV. En los años sesenta entró en escena otro sincrotrón situado cerca de Ginebra (Suiza), controlado por el **CERN**, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, que ya en 1965 logró energías de 40 GeV.

A principios de los años 1980 se llegó a los niveles de 500 GeV y entró en escena el Fermilab, nombre con el que se conoce al **Fermi National Accelerator Laboratory**, situado en Batavia, a unos 80 km de Chicago. La capacidad de este último aumentó hasta un límite potencial de un TeV (Tera-electrón-voltio), es decir, un billón de voltios, en 1983 al instalar imanes superconductores, lo que le convirtió en el acelerador más potente del mundo.

Alumno: ¿No se ha producido ningún avance en las instalaciones de estos gigantescos complejos experimentales desde los años ochenta?

Profesor: En los últimos quince años se ha registrado el avance que, hoy por hoy, se puede calificar como la vanguardia de las altas energías. Me refiero al **colisionador con anillo de almacenamiento**.

Alumno: Parece una combinación de métodos ya conocidos.

Profesor: Se podría decir eso mismo. 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. Este último lanza partículas aceleradas contra un blanco estacionario, mientras que un colisionador acelera dos conjuntos de partículas que se inyectan en el *mismo anillo*, como los electrones y los positrones que tienen cargas eléctricas opuestas y circulan en sentido contrario, o en *anillos distintos* de almacenamiento, cuando hay que hacer colisionar partículas con la misma carga, y después se hacen chocar de frente. El colisionador **LEP** del CERN, que empezó a funcionar en 1989 es de este tipo. El LEP, siglas en inglés de gran colisionador de electrones-positrones, abarca una zona extensa de terreno entre la frontera de Suiza y Francia con un enorme anillo de 27 km de diámetro construido a una profundidad de 100 m. Por su parte, en 1987, el Fermilab convirtió su sincrociclotrón en un colisionador con anillo de almacenamiento e instaló un detector de tres pisos de altura para observar y medir los productos de los choques frontales entre partículas.

Aunque los colisionadores que se utilizan en la actualidad son extremadamente potentes, aún se necesitan superiores energías para comprobar las teorías actuales. Si bien, por desgracia, el montaje de anillos mayores es muy cara. Ya se ha iniciado la construcción del **gran colisionador de hadrones (LHC, siglas en inglés de Large Hadron Collider)** del CERN que compartirá el túnel que alberga el LEP y se espera inaugurar para el año 2006 con unas prestaciones de 14000 MeV (14 TeV) para los choques entre protones con velocidades cercanas a la de la luz. En 1988, Estados Unidos empezó a planificar la construcción de un supercolisionador de 87 km en el estado de Texas, pero el Congreso de dicho país decidió cancelar el proyecto por razones económicas, cuando ya se había construido aproximadamente una quinta parte.

Alumno: Hemos hablado sobre el modo en que los físicos nucleares obtienen las altas energías para los choques que provocan entre las partículas. Pero... ¿cómo saben qué ha ocurrido tras esas colisiones tan violentas?

Profesor: En ese punto entran en acción los **detectores de partículas**. Básicamente, son los instrumentos que ponen de manifiesto, y en muchos casos hacen visibles, las partículas subatómicas. Es necesario que reúnan las características de 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. Distinguímos varios tipos, dependiendo del procedimiento de detección utilizado.

Alumno: ¿Cuáles son las diferentes clases de detectores más utilizadas y que características las diferencian entre sí?

Profesor: En primer lugar, tenemos la **cámara de ionización**. Se trata de un recipiente lleno de gas y provisto de dos electrodos con potenciales 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 de ionización adaptadas para detectar las partículas individuales y de radiación se denominan *contadores*, como el de Geiger, desarrollado en 1928.

Alumno: Conozco el "clic" tan familiar que emite ese contador cada vez que registra la presencia de una partícula radiactiva.

Profesor: Es muy conocido, en parte debido a su aparición en algunas películas. Otro tipo es el contador de *centelleo*. Allí, las partículas cargadas, que se mueven a gran velocidad en los materiales centelleantes, producen destellos visibles a causa de la ionización, y pueden registrarse. Dichos materiales son determinados sólidos y líquidos como sulfuro de cinc, yoduro de sodio o antraceno.

Los **detectores de trazas** permiten observar las señales (o trazas) que deja a su paso una partícula en la sustancia que contiene el detector. Son de este grupo las *emulsiones nucleares*, semejantes a las fotográficas, la *cámara de niebla* y la *cámara de burbujas*.

Alumno: ¿Es cierto que la cámara de niebla fue el primer tipo de detector utilizado para el estudio de los rayos cósmicos?.

Profesor: Así fue. El principio fundamental de la cámara de niebla fue descubierto por Wilson en 1896, aunque el instrumento no llegó a construirse hasta 1911. Contiene aire, saturado con vapor de alcohol, que inmediatamente se condensa sobre los iones que producen las partículas nucleares o atómicas cargadas a su paso por la cámara, lo que hacen visibles sus trayectorias.

La cámara de burbujas, inventada en 1952 por Glaser, tiene un funcionamiento similar a la cámara de niebla. Su diferencia más acusada reside en utilizar un líquido bajo presión a una temperatura algo inferior a su punto de ebullición, en lugar de aire saturado de alcohol. A lo largo de las trayectorias de las partículas que atraviesan el líquido se produce la ionización de sus átomos, y en torno a dichos iones se forman minúsculas burbujas que permiten visualizarlas. Estos métodos ópticos de detección han sido paulatinamente sustituidos por métodos electrónicos de recogida de datos desde que Charpak, en 1968, inventó el contador proporcional multicable, que permiten el registro de un número mayor de sucesos.

Otros tipos de detectores emplean muchas otras interacciones entre la materia y las partículas elementales distintas a las eléctricas. Por ejemplo, el detector de Cherenkov se basa en una radiación especial emitida por las partículas cargadas al atravesar medios no conductores a una velocidad superior a la de la luz en dichos medios.

Alumno: Algo parecido a lo que sucede cuando un avión supersónico atraviesa la barrera del sonido. ¿No es cierto?.

Profesor: Salvo que ahora se ven destellos luminosos en lugar de un sonido.

Alumno: En todos los casos anteriores se trata de procesos donde intervienen cargas eléctricas. ¿Y cuando queremos detectar neutrones?.

Profesor: Las partículas **neutras** como neutrones o neutrinos no pueden detectarse directamente, pero sí de forma indirecta a partir de las reacciones nucleares que tienen lugar cuando colisionan con ciertos núcleos de las sustancias empleadas en el detector. Así, los neutrones lentos producen **partículas alfa**, detectables con facilidad, al colisionar con los núcleos de boro del trifluoruro de boro. Los neutrinos, que apenas interaccionan con la materia, se detectan en depósitos enormes de percloroetileno ( $C_2Cl_4$ ), gracias a los núcleos radiactivos de argón que producen cuando chocan con núcleos de cloro. Este tipo de detector de neutrinos, situado a gran profundidad bajo tierra para evitar la radiación cósmica, se utiliza actualmente para medir el flujo de neutrinos procedente del Sol.

Alumno: ¿Cuáles son los detectores más empleados en los últimos años?.

Profesor: Los detectores de última generación son un tipo de cámara de burbujas conocida como **cámara de proyección temporal**. Pueden medir las trazas que dejan los haces incidentes en las tres dimensiones, y cuentan con detectores complementarios para registrar otras partículas producidas en las colisiones de alta energía. En el CERN, por ejemplo, existen detectores de varios pisos de altura, formados a su vez por distintos tipos de *detectores concéntricos*. Examinando las trazas puede deducirse la historia de las partículas desde su formación hasta la desintegración.

## LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

Alumno: Con todos estos medios para llegar a tan elevadas energías y estos detectores tan desarrollados el dibujo, relativamente sencillo, de la constitución del átomo supongo que se habrá modificado.



Profesor: Puede decirse que ese modelo del átomo 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.

Alumno: Me imagino que sería urgente buscar una clasificación útil de todas ellas. Tuvo que ser algo parecido a la época en que Mendelejeff y Meyer propusieron la tabla periódica de los elementos.

Profesor: Se han clasificado 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. Cuando estas partículas tienen masas mayores que la de los conocidos nucleones, en sus productos de desintegración se encuentran protones, y las encuadramos en el grupo de **bariones**. Si, por el contrario, son de masa inferior y sus productos de desintegración sólo muestran fotones y leptones, las clasificamos como **mesones**. Este último es el caso del mesón pi, la partícula K o el mesón rho.

Alumno: Entonces, ¿cuáles son ahora las partículas elementales?.

Profesor: 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 elevar 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, es decir, muchos *sucesos* que afectan a colisiones y desintegraciones de partículas, los cuales han conducido al descubrimiento de una subestructura en la mayoría de estas partículas subatómicas.

Alumno: Por decirlo de alguna manera, es como si hubiéramos reducido el tamaño de las "unidades básicas", de los *ladrillos* que componen los átomos.

Profesor: Más o menos es eso. 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 un poco de nuevo al concepto antiguo de la elementalidad. Pero antes de revisar el modelo estándar es necesario concretar qué son las fuerzas fundamentales, sus características más relevantes y el modo en que se transmite la interacción.

<b>Grupo de partículas</b>	<b>Nombre</b>	<b>Masa (MeV)</b>	<b>espín</b>
<b>Leptones</b>	Electrón	0,511	1/2
	Muón	106	1/2
	Tauón	1784	1/2
	Neutrinos	<0,03	1/2
<b>Mesones</b>	Pi	140	0
	Kaón	498	0
	Rho	470	1
<b>Bariones</b>	Protón	938	1/2
	Neutrón	940	1/2
	Lambda	1116	1/2
	Delta	1232	3/2

	Omega	1672	3/2
	Sigma	2455	1/2

Algunos datos de las principales partículas subatómicas