

EL ANILLO LHC DEL CERN

Parte I: La Física de las Partículas



Rafael Iturbe Uriarte
Ingeniero Industrial (ANTEC)
Javier Etxeandía
Ingeniero Técnico Industrial
(ANTEC)
Carmelo Mendivil Arrieta
Ingeniero Industrial

Recibido: 13-06-05
Aceptado: 27-06-05

En el mes de abril de 2007 está prevista la entrada en funcionamiento del LHC (*Large Hadron * Collider*), la más moderna y potente máquina diseñada para profundizar en el conocimiento íntimo de la materia y de las leyes por las que se rige el Universo. La industria europea está construyendo en estos momentos los diversos componentes, para lo que tiene que enfrentarse a desafíos tecnológicos desconocidos hasta la fecha.

Introducción

Hace pocos meses se han celebrado los actos de conmemoración del 50 aniversario de la constitución del CERN: el acto oficial tuvo lugar el 19 de octubre de 2004 en la sede de Meyrin (Ginebra), con la asistencia de jefes de estado como **Jacques Chirac** y **Joseph Deiss**, presidentes de Francia y Suiza, y el rey **Juan Carlos** de España, así como centenares de científicos e ingenieros de muchos países, que elogiaron la labor desarrollada en el avance de la ciencia y en el fomento de la colaboración internacional entre científicos. El tema más común en las conferencias presentadas fue que el CERN debe continuar sirviendo de modelo de rigor científico y cooperación internacional, aumentando el conocimiento de la materia y al mismo tiempo creando tecnologías de utilidad práctica.

Pero siendo el CERN el Organismo de investigación científica más importante del mundo, con miles de científicos e ingenieros desarrollando tecnologías punteras en investigación básica y aplicada, es un ente desconocido, al menos en nuestro país. Como ejemplo, entre los millones de usuarios de Internet en el mundo, ¿cuántos conocen que ha surgido en el CERN?

La mayoría piensa que es un invento norteamericano, de la NASA o el Pentágono: y, sin embargo, fue creado en 1989 por un equipo de personas del CERN liderado por **Tim Berners-Lee**, partiendo de la idea de interconectar los ordenadores de los



Tim Berners-Lee inventó y desarrolló el Word Wide Web como herramienta esencial para los físicos de las partículas. Ideó el sistema para crear el primer servidor de red, buscador multimedia y editor de red

diversos departamentos del Laboratorio para que los científicos de los mismos tuviesen conocimiento inmediato de sus experiencias.

La UNESCO ha establecido este año 2005 como *Año Internacional de*

la Física, en conmemoración del centenario de la publicación en 1905 por **Albert Einstein** de sus conocidos tres escritos que revolucionaron el mundo. Este artículo pretende ser una pequeña contribución a este año conmemorativo.

Un poco de historia II

Al finalizar la Guerra Mundial, Europa había quedado devastada en muchos aspectos, entre ellos el científico, que había tenido un gran desarrollo, y con importantes resultados, en los primeros años del siglo. Un gran número de científicos se había visto forzado al exilio, principalmente a Estados Unidos, y, una vez alcanzada la paz, muchos investigadores jóvenes estaban abocados a cruzar el Atlántico en busca de medios de investigación apropiados que no podían hallar en la arruinada Europa.

En diciembre de 1949, en una Conferencia Cultural Europea en Lausana (Suiza), el eminente físico francés **Louis de Broglie**, el padre de la Mecánica ondulatoria, recogiendo la idea de diversos científicos de buscar la fórmula de obtener los medios para recuperar las actividades científicas anteriores a la guerra, lanzó una



En la Conferencia Cultural Europea de 1949 en Lausana, Louis de Broglie propuso por vez primera la creación de un Laboratorio Europeo de Investigación

* Para mejor conocer los distintos tipos de partículas y sus características, ver al final el Glosario y el cuadro del Modelo Estándar (SM) de las Partículas Fundamentales y sus Interacciones.

petición a los diversos gobiernos europeos para que los primeros contactos que se estaban llevando a cabo tendientes a la unidad en Europa, no fueran sólo en los planos político y económico sino también en el ámbito intelectual y, en particular, en el de las actividades científicas.

La idea fue muy bien acogida, no sólo por razones políticas (en ese año de 1949 había tenido lugar la explosión de la primera bomba atómica soviética), sino también porque las necesidades de la comunidad de físicos en investigación básica, sobrepasaban en aquel momento los recursos nacionales disponibles. Sin embargo, el proyecto no fue fácil de realizar: por un lado, los físicos no estaban todos de acuerdo sobre el camino a seguir, y por otro, entre los políticos no estaba aún muy extendido el espíritu de la unidad europea. Así transcurrieron tres años en los que el proyecto tomó forma y se decidió su ubicación en Meyrin, cerca de Ginebra, en pleno corazón de Europa. En setiembre de 1954 quedó constituido el CERN como Laboratorio Europeo para la Física de las Partículas (las siglas **CERN** provienen del nombre inicialmente adoptado: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*).

La Física de las partículas ha cumplido cien años: el electrón

Es un hecho generalmente reconocido por los científicos que el descubrimiento del electrón en 1897 por el británico **Joseph John Thomson** marca el nacimiento de la Física de las Partículas, también conocida como Física de las Altas Energías: ese descubrimiento daba fin a la idea, manifestada por **Demócrito** en el siglo IV antes de Cristo, y que con diversos avatares había permanecido desde entonces, de que la materia estaba constituida de manera discontinua por partículas invisibles e indivisibles, que Demócrito llamó "*átomos*" (en griego "no divisible").

A lo largo del siglo XIX la electricidad y el magnetismo habían experimentado un enorme desarrollo. Los dos fenómenos eran conocidos desde la antigüedad y la relación entre

ambos con los experimentos de **H. K. Oersted** y **M. Faraday** llevaron a **J. C. Maxwell** a desarrollar una serie de ecuaciones que abarcan todas las leyes que rigen la electricidad y el magnetismo, indicando que ambos constituyen un mismo tipo de energía que se desplaza por el espacio a la velocidad de la luz y que llamó ondas electromagnéticas, sugiriendo que también la luz estaba formada por ese tipo de ondas.

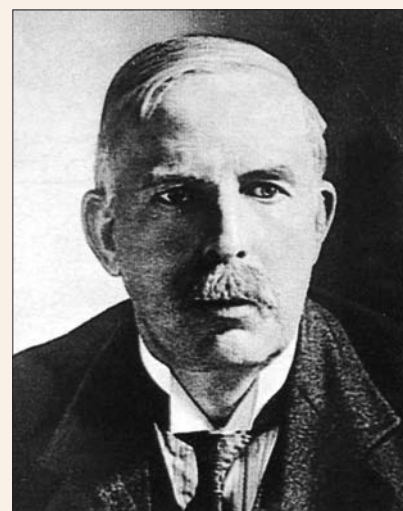
Entre los experimentos llevados a cabo para conocer la conducción de la electricidad por diversos tipos de materiales, unos de los más llamativos fueron los realizados a través del vacío: al conectar una fuente de electricidad a un par de placas colocadas en el interior de un tubo de vidrio en el que se había hecho el vacío, se presentaba un resplandor verdoso en la placa con polaridad negativa, que habían denominado "cátodo", y al fenómeno, "rayos catódicos". La naturaleza de estos rayos dio origen a fuerte controversia, pues mientras unos científicos pensaban que eran ondas electromagnéticas, otros en cambio decían ser partículas.

La relación entre materia y energía, ésta en forma de electricidad, ya había sido estudiada por **Faraday** cuando en 1833 realizó sus experiencias con soluciones salinas, observando que las sales quedaban disociadas en partículas de diferente carga eléctrica, que llamó "iones" (en griego, "marchar"): las de carga positiva eran atraídas por el polo negativo o "cátodo" y llamó "cationes", y las de carga negativa se trasladaban al polo positivo o "ánodo" y llamó "aniones": el más pequeño de estos aniones fue llamado más tarde "electrón", la palabra griega para designar el "ámbar", ya que las propiedades de este material de atraer pequeñas partículas cuando se le frota, fueron las primeras manifestaciones de la electricidad.

Esta idea fue recogida por **H. A. Lorentz** para lanzar la teoría de que la materia está formada por partículas con cargas positivas y negativas, pero fue **Thomson**, en sus experiencias con los rayos catódicos, el que observó que éstos eran desviados tanto

por los campos magnéticos como por los eléctricos, probando que los rayos estaban formados por partículas, los electrones, que eran de carga negativa y que su masa era unas 2000 veces más pequeña que la del átomo más pequeño, el de hidrógeno. El descubrimiento del electrón, la primera partícula subatómica identificada, por la que Thomson recibió el Premio **Nobel** de Física de 1906, marca el nacimiento de la Física de las Partículas. En 1911 el norteamericano **R. Millikan** calculó la carga eléctrica del electrón midiendo la cantidad de carga eléctrica que habían tomado unas placas metálicas sometidas a un campo eléctrico, y en las que había repartido unas pequeñas gotas de aceite: resultó una carga de $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ culombios.

Este valor es el que sirve de base para las diversas magnitudes en la Física de las Partículas: así, la energía se mide en eV (electronvoltio), que es la energía adquirida por un electrón al que se aplica un potencial de un voltio, y en unidades S.I. equivale $eV = 1,6 \cdot 10^{-19}$ julios; dado su pequeño valor, es más frecuente utilizar sus múltiplos, en particular el Giga-electronvoltio: $GeV = 1,60 \cdot 10^{-10}$ julios. También la masa de las partículas se mide en electronvoltios (recordar $E=mc^2$): así la masa del electrón es



*El genio de **Ernest Rutherford** dominó la Física durante el primer tercio del Siglo XX creando el primer modelo del átomo como un sistema planetario*

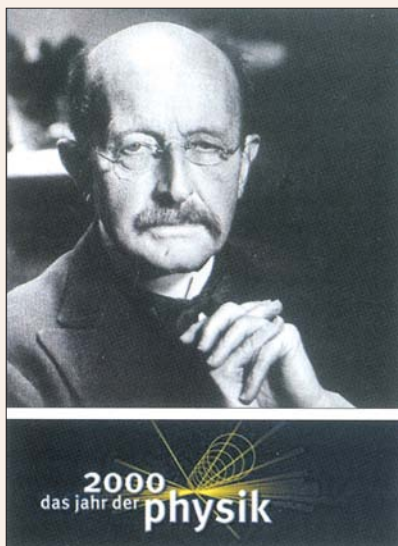
$5,1 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}/c^2$, que en unidades S.I. equivale a $0,907 \cdot 10^{-27}$ gramos.

El núcleo

Los últimos años del siglo XIX habían sido muy fructíferos en descubrimientos en el campo de la Física: en 1895 **W.K. Röntgen** encontró un tipo de radiación con un poder de penetración muy superior a los conocidos rayos catódicos: no sabiendo explicar su origen y propiedades los llamó Rayos X. Poco tiempo después, **H. Becquerel** y los esposos **Curie** investigaron con sustancias que emitían radiación de manera espontánea sin necesidad de ser activadas por la luz u otras energías, sustancias que llamaron "radiactivas". Este nuevo tipo de materiales suscitó el interés de numerosos científicos: uno de ellos fue **E. Rutherford**, que ya había trabajado con las ondas de radio y había construido un detector para las mismas, logrando, antes que **Marconi**, una comunicación a más de dos millas. Investigando en el **Laboratorio Cavendish** de Cambridge, en 1898 observó que estas sustancias radiactivas desprendían dos tipos de radiaciones que eran afectadas por los campos eléctricos y magnéticos, que llamó "rayos alfa" y "rayos beta": en realidad no se trata de radiaciones en el sentido estricto de la palabra, sino más bien de un chorro de partículas eléctricas a gran velocidad: los rayos alfa son núcleos de helio y por tanto poseen carga positiva, y los rayos beta, de mayor poder de penetración, son electrones, de carga negativa. Poco después se descubrieron los "rayos gamma", que Rutherford no había logrado ver porque no poseen carga eléctrica y habían pasado por sus cámaras sin ser detectados: se trata de verdadera radiación, de muy pequeña longitud de onda y por ello, de muy gran poder de penetración.

La investigación con los rayos alfa, que **Rutherford** tardó unos años en identificar como núcleos de helio, le llevó a desarrollar la teoría de la constitución del átomo como un sistema planetario: hizo bombardear una fina lámina de oro con un haz de partículas alfa, registrando su trayectoria sobre una pantalla fluorescente: la

mayor parte pasaban en línea recta, otras sufrían una desviación más o menos fuerte y una mínima parte volían atrás como si chocasen con un muro sólido. Esto le indujo a pensar que el átomo estaba vacío en un 99%, que su masa se concentraba en un diminuto núcleo central con carga eléctrica positiva, dado que las partículas alfa (positivas) habían sido alejadas en su trayectoria, y que el tamaño de todo el átomo era unas 10.000 veces el de ese núcleo. En ese espacio casi vacío se alojaban los electrones con su carga negativa que neutralizaba la positiva del núcleo, electrones que giran en órbitas alrededor del núcleo de la misma forma que los planetas del sistema solar.



*El año 2000 fue "El Año de la Física" en Alemania en conmemoración del descubrimiento de la Teoría del Quantum por **Max Planck** en Berlín*

El modelo del átomo que **Rutherford** ideó en 1911 estaba basado en las leyes clásicas de la física, de modo que la fuerza de atracción del núcleo sobre los electrones, debida a sus cargas eléctricas, estaba compensada por la fuerza centrífuga de los electrones girando en su órbita. Pero algo no encajaba: el electrón, al dar vueltas, desprende radiación de acuerdo con las leyes de **Maxwell** del electromagnetismo, con lo que pierde energía, velocidad, y debería caer, atraído por el núcleo, y ser absorbido

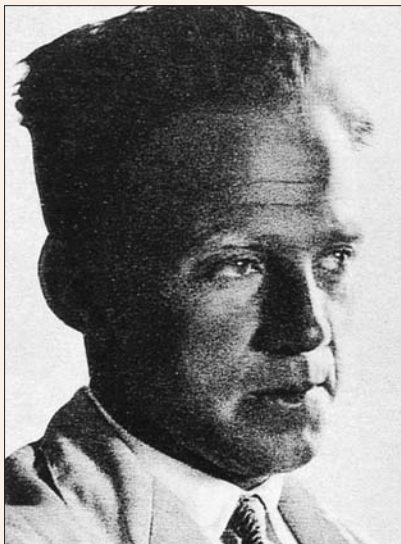
por éste: un planteamiento revolucionario de la Física, el *quantum*, vino a solucionar el problema.

El quantum

No es el objeto de este artículo el tratar de la Mecánica Cuántica, ni mucho menos, un tema tan endiablada-mente complejo que, después de más de cien años de que **Max Planck** acuñara el término *quantum*, sigue siendo controvertido para muchos científicos: quizás la mejor expresión para definir la Mecánica Cuántica es que "*nadie sabe bien lo que es, pero todo el mundo la utiliza*", por sus implicaciones en las modernas tecnologías. Si los autores de este artículo, simples aficionados, lo traemos brevemente aquí, es para mejor explicar algunos aspectos del mundo de las partículas.

Para resolver el absurdo a que se había llegado en los experimentos sobre la radiación de energía térmica de los cuerpos calientes, en 1900 Planck propuso que la energía radiante no se produce de manera continua, sino en forma de pequeños paquetes, que llamó *quanta*. La idea no fue bien acogida, pues rompía con la idea clásica de la energía como un concepto continuo e indivisible, pero le sirvió a **Einstein** para explicar el efecto *fotovoltaico* en 1905: cuando la luz incide sobre ciertos cuerpos, desprende una corriente de electrones: a mayor intensidad luminosa no salen electrones de mayor energía, sino más electrones de igual energía, lo que estaba en contradicción con la teoría ondulatoria de la luz, que predominaba desde un siglo antes: Einstein lo resolvió indicando que la luz se emitía en paquetes de partículas luminosas, en quanta de luz, que llamó *fotones*. La energía de esas partículas depende de la frecuencia de radiación: la relación entre energía y frecuencia es la *constante de Planck*.

Einstein había resuelto un problema pero había creado otro: a fines del siglo XVII **Newton** había definido la luz como un haz de corpúsculos, teoría que estaba en contradicción con la propuesta por **Huygens**, que defendía su naturaleza ondulatoria: durante cierto tiempo se mantuvo la polémica



Werner Heisenberg ideó el "Principio de Incertidumbre" al afirmar que no se puede conocer a la vez la posición y velocidad de un elemento cuántico

ca, pero los experimentos de difracción de **Young** no dejaron duda sobre el carácter ondulatorio de la luz: y **Einstein** no podía olvidar esta evidencia, esta dualidad que le desconcertaba, ese "carácter esquizofrénico" (a comienzos del siglo XX, **Sigmund Freud** y sus ideas sobre el psicoanálisis y la personalidad sentaban cátedra en la sociedad europea). La solución vino por parte del francés **Louis De Broglie**, que sugirió que tanto los fotones como los electrones y demás partículas subatómicas son de carácter ondulatorio, y propuso unos experimentos de interferencias que los confirmaron. Diversos científicos profundizaron en la idea, y uno de ellos, el británico **George P. Thomson** recibió el premio **Nobel** en 1937 por demostrar que el electrón es una onda, cuando su padre **Joseph J. Thomson** lo había recibido en 1906 por encontrar que era una partícula.

En 1913, **Niels Bohr** tuvo la idea de aplicar la teoría del

quantum al modelo del átomo propuesto por **Rutherford** y asignar los electrones que rodean el núcleo a capas con diferentes niveles de energía: dentro de cada capa los electrones se mueven sin pérdida de energía: cuando reciben un impulso suben a una capa más externa, de mayor nivel de energía; al regresar a su estado natural emiten un *quantum* de luz: pero no sabía explicar cómo se produce ese salto de nivel de energía. Diversos científicos propusieron sus ideas:

W. Heisenberg "la *Mecánica matricial*" y el "principio de incertidumbre"; **E. Schrödinger**, apoyado en las teorías de **De Broglie**, "la *Mecánica ondulatoria*"; **Max Born** definía la "onda del electrón" como una "distribución de probabilidades"; **W. Pauli** defendía el "principio de exclusión"... Todo este "cajón de sastre", aparentemente inconexo, constituye hoy la Mecánica cuántica, así que no es sorprendente que tanto **Planck** como **Einstein**, que fueron los primeros en lanzar la teoría del *quantum*, se sintieran incomodados con su evolución. Pero, como hemos dicho anteriormente y remedando a **Galileo**, "eppur si muove".

Protón y neutrón

Rutherford y sus discípulos continuaron con sus experimentos con las partículas alfa (que Rutherford llamaba "mis amiguetes: en cuanto veo uno lo reconozco"), aunque bajó su intensidad durante la Primera Guerra Mundial. Bombardeando un recipiente lleno de gas nitrógeno con los rayos alfa, observó unos destellos en la pantalla fluorescente del detector, que correspondían a un nuevo tipo de

partículas, más penetrantes que las alfa: en 1919 Rutherford observó que estas partículas eran en realidad núcleos de hidrógeno, y dedujo que los núcleos de nitrógeno habían absorbido las partículas alfa transformándose en núcleos de oxígeno, desprendiendo núcleos de hidrógeno: y que éstos últimos eran la pieza básica en la constitución de los núcleos de los diferentes elementos de la materia, dándoles el nombre de "protón" ("primera partícula"). Se había logrado el viejo sueño de los alquimistas, la transmutación de un elemento en otro.

El protón tiene la misma carga eléctrica que el electrón, pero de signo opuesto, y una masa como 1.838 veces superior: $m = 0,938 \text{ GeV}/c^2$, equivalente en unidades S.I. a $1,67 \cdot 10^{-24}$ gramos.

Tanto el modelo ideado por **Rutherford** como el de **Bohr**, representaban la constitución del átomo mediante un núcleo central, pequeño y masivo, rodeado de un cierto número de electrones, que reflejaba el número atómico del elemento, y que Bohr había ordenado en capas de diferentes niveles de energía. Pero el núcleo era un enigma: estaba formado por protones, en igual cantidad que de electrones para que el átomo resultase eléctricamente neutro, pero su masa, excepto en el caso del hidrógeno, resultaba superior a la correspondiente al número de protones: muchos físicos pensaban que los electrones se encontraban no sólo rodeando el núcleo sino también en su interior, y que éstas eran las partículas beta que aparecían en la radiactividad. Rutherford pensó que en oca-



Wolfgang Pauli formuló el "Principio de Exclusión" en 1924 y predijo la existencia del neutrino en 1930. Una muestra de sus lecciones en Princeton, donde se refugió durante la II Guerra Mundial

siones se unían un electrón y un protón para formar una partícula neutra, que llamó "neutrón", comenzando su búsqueda.

Pero no fue fácil: el neutrón se mostraba muy esquivo y trajo de cabeza a **Rutherford** durante toda la década de los años 20. Finalmente, en 1932, uno de sus ayudantes, **J. Chadwick**, reprodujo un experimento realizado por los esposos **Joliot-Curie** bombardeando una muestra de berilio con partículas alfa, lo que producía una radiación con poder de penetración mayor que los rayos alfa, que ellos pensaron eran rayos gamma. Pero Chadwick llegó a otra conclusión: esos rayos eran partículas con masa similar a la del protón: eran el tan esperado neutrón, y no se trataba de una combinación de protón y electrón como pensaba Rutherford, sino una partícula propia, nueva, que al no tener carga eléctrica no estaba sometida a los campos y fuerzas eléctricas dentro del átomo, por lo que podían atravesar la materia con facilidad.

Los neutrones se mostraron enseguida como una herramienta muy útil en el campo de la Física. En Roma, **E. Fermi** obtuvo neutrones lentos, que eran fácilmente absorbidos por los núcleos, dando lugar a reacciones nucleares artificiales (isótopos) con mayores posibilidades que la radiactividad natural: los isótopos son actualmente de gran importancia en biología e industria.

Asimismo, el núcleo de uranio bombardeado con neutrones lentos resulta inestable y se parte en dos, desprendiendo enorme cantidad de energía y varios neutrones: éstos a su vez rompen nuevos núcleos de uranio y se produce una reacción en cadena. Las consecuencias son de todos conocidas.

Transcurrido el primer tercio del siglo XX, se pensaba que el electrón, el protón y el neutrón eran los tres únicos constituyentes de la materia,



Niels Bohr y Enrico Fermi (con gorro) en la Primera Conferencia Internacional de Física Nuclear en 1931 en Roma. Ambos dieron impulso extraordinario a la Física con sus descubrimientos

torre **Eiffel**, no registrando variaciones apreciables, lo que descartaba la influencia de la radiactividad por materiales de la capa terrestre. Un año después, el austriaco **V. Hess** realizó una serie de ascensiones en globo en altitudes superiores a 5.000 metros, observando que el electroscopio se descargaba a doble velocidad que al nivel del mar: dedujo que la ionización era debida a una radiación desconocida que entraba a la atmósfera desde el espacio: este descubrimiento le valió el Premio **Nobel** de 1936.

Tras la Primera Guerra Mundial, comenzaron de ma-

las partículas elementales: pronto se vio que había que seguir profundizando.

Los rayos cósmicos

El visitante que acude por primera vez al edificio de recepción de la sede del **CERN** en Meyrin, se ve sorprendido por una serie de destellos de colores que surgen del suelo, de un panel con diversas figuras de vidrio dispuestas artísticamente: una placa en la pared próxima explica el fenómeno: se trata de un detector de rayos cósmicos.

Desde hacía mucho tiempo se había observado que el electroscopio, dos finas láminas de oro que se separan al aplicar una carga eléctrica y usado en los primeros tiempos para medir campos eléctricos, perdía la carga lentamente con el tiempo: pensando que era debido a la ionización del aire por sustancias radiactivas procedentes de la corteza terrestre, lo que le convierte en conductor y así descarga el electrómetro. En 1910, **T. Wulf** hizo mediciones en lo alto de la

manera intensiva las investigaciones sobre este nuevo tipo de radiación, que pronto demostró ser una fuente inapreciable de nuevas partículas. Se estudió su procedencia, composición, características, distribución sobre la superficie terrestre y las horas del día, la influencia del campo magnético de la tierra...; parece probable que son los restos de la explosión de estrellas supernovas en nuestra galaxia, pero también de puntos más alejados, aunque su origen real sigue siendo incierto; en cualquier caso se trata siempre de partículas con altísima energía, obtenida al ser aceleradas por los intensos campos electromagnéticos de los espacios interestelares. Se puede decir que hay dos tipos de radiación: una primaria que procede directamente del espacio exterior, y formada principalmente por protones y otros núcleos de átomos, como helio, y otra secundaria originada al chocar partículas primarias con núcleos de las capas altas de la atmósfera, con lo que se rompen, dada la altísima energía con que se des-

plazan, y crean verdaderos aguaceros de nuevas partículas, como mesones y neutrinos, que caen a la tierra penetrando a cientos de metros de profundidad.

El norteamericano **C. Anderson** construyó una cámara de detección especial para la investigación de los rayos cósmicos (una cámara de niebla con un potente campo magnético), y en 1932 encontró las huellas de una partícula extraña: las huellas eran las mismas que las de un electrón pero como si tuviera carga eléctrica positiva: intentó hallar la explicación: no era el protón, pues su masa era mucho menor y buscó otras explicaciones, pero llegó a la conclusión que eran huellas de una nueva partícula, un electrón de carga positiva, y le llamó positrón.

Paul Dirac, en sus ecuaciones matemáticas en 1928 para combinar la Teoría de la Relatividad con la Mecánica del Quantum, había encontrado en varios casos que las ecuaciones tenían más de una solución, cosa frecuente en Matemáticas: en el caso del electrón una solución correspondía al electrón normal pero la otra, a uno con carga positiva (energía negativa). Desarrolló una teoría en la que la energía negativa es real pero indetectable, un mundo que es imagen del real pero como visto en un espejo: había nacido la antimateria. El descubrimiento del positrón por **Anderson** confirmó esta teoría. **Dirac** predijo también el antiprotón, que fue descubierto en 1955. Todas las partículas subatómicas tienen su antipartícula, aunque en algunos casos la partícula y su antipartícula son la misma.

El neutrino

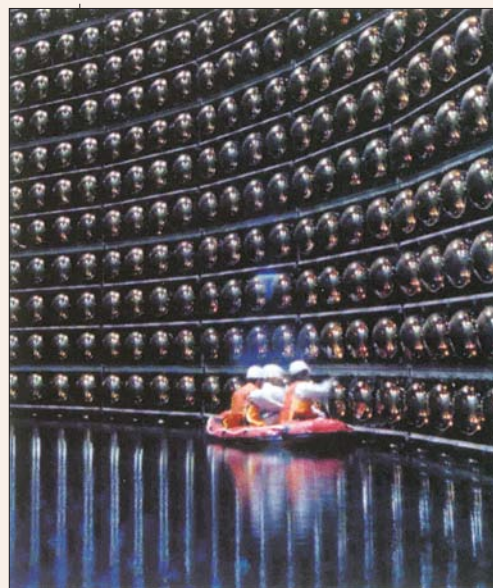
De la misma forma que el positrón, antes de ser descubierto experimentalmente, había sido previsto de manera teórica por **Dirac**, el neutrino fue sugerido por **W. Pauli** para poder explicar cómo se producía la radiación beta. La radiactividad no tenía explicación en la física clásica: es una reacción extraña que convierte a los neutrones en protones, desprendiendo electrones, partículas beta, en un rango continuo de energías. Durante

años, esta desintegración había desconcertado a los físicos ya que no encajaba con la regla de oro de la conservación de la energía y de los momentos: los nuevos productos resultantes de la desintegración, el nuevo núcleo y el electrón, tenían menor energía que el núcleo original, se escapaba algo más. **Pauli** (arquetipo de científico teórico por contraposición al empírico) propuso que el electrón desprendido de la radiación beta lo hacía acompañado de una partícula ínfima que aportaba la energía que faltaba para cuadrar la ecuación, de la misma forma que el fotón acompaña a la radiación electromagnética.

Pauli consideró que esta partícula era una variedad de neutrón, aún sabiendo que era de mucha menor masa que los neutrones que forman el núcleo, pero fue **Fermi** en 1932 el que le definió. Preguntado si era el mismo neutrón que acababa de descubrir **Chadwick**, contestó: "*Oh, no: es mucho más pequeño: es un neutrón enano: es un neutrino*". Y la broma de Fermi hizo fortuna.

El neutrino constituye, dentro de las partículas subatómicas, un caso muy especial: no tiene carga eléctrica, no tiene masa (o si la tiene, es tan pequeña que no se puede medir) y no tiene propiedades magnéticas: por todo ello tiene un gran poder de penetración de modo que viaja por el espacio sin desviarse y sin chocar apenas con otras partículas. Los primeros neutrinos fueron observados en los rayos cósmicos, pero posteriormente se han conseguido en los reactores nucleares, de modo que sus descubridores, **Fred Reines** y **Clyde Cowan** en 1956, pudieron confirmar su existencia 25 años después de la idea propuesta por **Pauli**.

El interés de los físicos por los neutrinos se debe a que se producen en lugares de gran actividad nuclear, como es el caso de las estrellas, donde se producen reacciones de fusión: cuatro átomos de hidrógeno se unen para formar un átomo de helio y la pequeña diferencia de masa se libera



La piscina del Super-Kamiokande en Japón, con 50.000 toneladas de agua ligera para detectar los neutrinos de origen solar

como gran cantidad de energía: pero además se liberan dos partículas ínfimas, los neutrinos. Del Sol (el reactor termonuclear que tenemos más cerca) nos llegan miles de millones de neutrinos pero atraviesan la tierra sin apenas impactar con un átomo: la probabilidad es muy pequeña pero con mucha paciencia el norteamericano **Raymond Davis** logró detectarlos con un tanque de 615 toneladas de un compuesto de cloro que se transformaba en argón al recibir los impactos. Este hecho le valió el Premio Nobel de Física de 2002, compartido con el japonés **Masatoshi Koshihara**, que ha obtenido interesantes resultados en el laboratorio **Super-Kamiokande**, con una piscina de 50.000 toneladas de agua ligera, situado en una mina a gran profundidad para que las partículas no deseadas que puedan acompañar a los neutrinos queden retenidas por la pantalla de cientos de metros de roca.

Otros varios proyectos están en servicio, como el situado bajo el Mont Blanc, al que se accede por el túnel entre Francia e Italia, pero destacaremos el Proyecto **Antares**, que empezará a funcionar en 2006, y que consistirá en instalar un telescopio en el fondo del mar Mediterráneo a

2.400 metros de profundidad, frente a la Costa Azul: los detectores estarán orientados tanto hacia la superficie para captar los neutrinos que vienen del espacio, como hacia el fondo del mar, para captar los que han atravesado toda la tierra desde las antípodas, los que provienen del hemisferio sur celeste.

Como veremos más adelante, no hay un solo neutrino, sino varios.

Fuerzas nucleares

Una vez establecidas las leyes de la Mecánica Cuántica, el modelo del átomo con su masa concentrada prácticamente en el núcleo y los electrones a su alrededor siguiendo al “*principio de incertidumbre*” y demás aspectos de la mecánica cuántica, ofrecía una solución satisfactoria, pero en Física, resuelto un problema aparece otro. El núcleo constituido por neutrones y protones, éstos con carga eléctrica positiva y por tanto obedeciendo las leyes del Electromagnetismo, debiera reventar al repelerse mutuamente los protones (los neutrones sin carga no pueden contrarrestar esta repulsión). Y, sin embargo, el núcleo se mantiene sólidamente unido, difícil de romper: tenía que haber una fuerza intensa que mantuviera juntos protones y neutrones, superior a la electromagnética.

Una fuerza conocida hasta la fecha era la gravedad. Conocida, al menos en sus efectos, desde siempre, había sido estudiada por muchos científicos como **Galileo** con sus famosos experimentos en la Torre Inclinada de Pisa pero no fue hasta **Newton** cuando se estableció la *Ley de la Gravitación Universal* y, un siglo más tarde **H. Cavendish** cuando calculó la *Constante de Gravitación*. Se trata de una fuerza de atracción siempre, de poca intensidad (si se notan sus efectos es debido a la enorme masa de los cuerpos que se atraen o de al menos uno de ellos: entre dos cuerpos a escala humana, y mucho más en la Física de las Partículas, con las masas tan pequeñas, sus efectos son inapreciables), y de largo alcance (es la ley que rige la atracción entre los astros a las enormes distancias a que se encuentran). **Einstein**, con su

teoría de la Relatividad General, describe la gravedad como la curvatura del espacio-tiempo.

El Electromagnetismo, unificado por **Maxwell** (como ya se ha visto anteriormente), era otra fuerza conocida: es una fuerza caracterizada por ser de atracción o de repulsión, según el signo de las cargas que estén implicadas; de gran intensidad (no hay más que ver cómo un imán atrae piezas próximas venciendo la acción de la gravedad,) y de pequeño alcance (en cuanto el imán se aleja un poco del cuerpo a atraer, su acción es mínima: solamente con una masa muy grande, como la Tierra, se deja sentir su efecto, y, con todo, el campo magnético terrestre es de pequeño valor).

En el núcleo, los protones confinados en un espacio reducido tienen que sentir la fuerza del electromagnetismo que es intensa en pequeñas distancias: el japonés **H. Yukawa** se basó en la teoría de **Heisenberg** de que el modelo neutrón-protón del núcleo estaban unidos intercambiando un electrón, y sugirió, basado en el *Principio de incertidumbre*, que eran otras partículas las portadoras de fuerza, como el fotón lo es en la fuerza electromagnética, y de la misma forma que en la radiación beta el neutrón decae en protón emitiendo un electrón y un neutrino: pero los cálculos daban que ésta última era una fuerza débil (**Fermi** la denominó “*interacción nuclear débil*”), por lo que pensó que tendría que ser una partícula más pesada que el electrón aunque menos que el protón: la llamó mesón (intermedia). Esta partícula dentro del núcleo actúa entre protones y neutrones que se intercambian mutuamente uniéndolos intensamente, por lo que son las portadoras de la “*interacción nuclear fuerte*”: las dos fuerzas, débil y fuerte, son independientes y cada una tiene su propio campo de acción y sus propias partículas portadoras.

Cuatro años después de que **Anderson** descubriera el positrón, en los rayos cósmicos encontró una partícula de masa similar al mesón pero que no estaba afectado por las fuerzas nucleares, mientras que el sugeri-

do por **Yukawa** actuaba intensamente: pronto se vio que ambos formaban parte de una familia más extensa: el de Yukawa era el mesón-pi o pión y el de Anderson el mesón-mu o muón. A estos se unieron enseguida otras partículas como las tau, kaón, lambda, omega, ksi,etc, un grupo “*extraño*”, unas más ligeras que el protón y con vida anormalmente larga, y otras más pesadas pero de vida muy corta.

De estas partículas, el muón y el tau, junto con el electrón y los respectivos neutrinos, forman una familia de partículas, llamadas “leptones” (en griego, ligero), que no sienten la interacción nuclear fuerte.



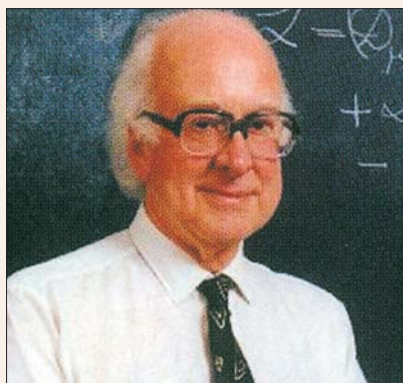
*Las Matemáticas y las leyes de la simetría sirvieron a **Murray Gell-Mann** para formular una especie de tabla periódica con los constituyentes más pequeños de la materia, a los que llamó “quarks”*

Los Quarks

Todo este enjambre de partículas era muy difícil de entender, y los físicos empezaron a aplicar las teorías de los grupos y las leyes de la simetría, y descubrieron que muchas partículas compartían una serie de características que les permitía agruparlas en una especie de tabla periódica, como había ocurrido cien años atrás con los elementos químicos. Y de la misma manera que los elementos químicos están formados por unos pocos constituyentes de toda la materia,

protón, neutrón y electrón, siendo el número y disposición de estos electrones lo que determina las propiedades de los elementos, el norteamericano **M. Gell-Mann** propuso una teoría de que las partículas subatómicas estaban formadas por otros componentes más pequeños, cuyo número y disposición determinaba las propiedades de las mismas: diseñó unas fórmulas matemáticas con tres subpartículas, que llamó "quark", un nombre sin ninguna relación especial con los términos en griego clásico utilizados hasta entonces para denominar las partículas: esos quarks los encuadró en una característica que llamó "sabor" (*flavour*) según su orientación: así surgió el "quark u" (*up*) y el "quark d" (*down*), llamando al tercero "quark s" (*strange*) por ser un elemento vital de las partículas "extrañas": más adelante, el número se amplió a seis, los "quark c" (*charm*), "quark t" (*top*) y "quark b" (*bottom*).

Los quarks tenían carga eléctrica pero fraccionaria y de signo según el tipo: así los quarks u, c y t son de carga positiva y valor 2/3 de la carga del protón; los quarks d, s y b son de carga negativa y valor 1/3. Este concepto de carga fraccionaria, cosa no conocida en ninguna partícula hasta el momento, fue considerado como una idea puramente matemática: además, **Gell-Mann**, de acuerdo con la figura geométrica que ordenaba los quarks por grupos, había previsto la



El campo Higgs y su partícula son los responsables de la rotura espontánea de la simetría de las interacciones electrodébiles: el nombre es debido a su descubridor, el escocés **Peter Higgs**



Carlo Rubbia, Dr. Gral. del CERN inaugurando la Exposición *Microcosmos* en septiembre de 1993

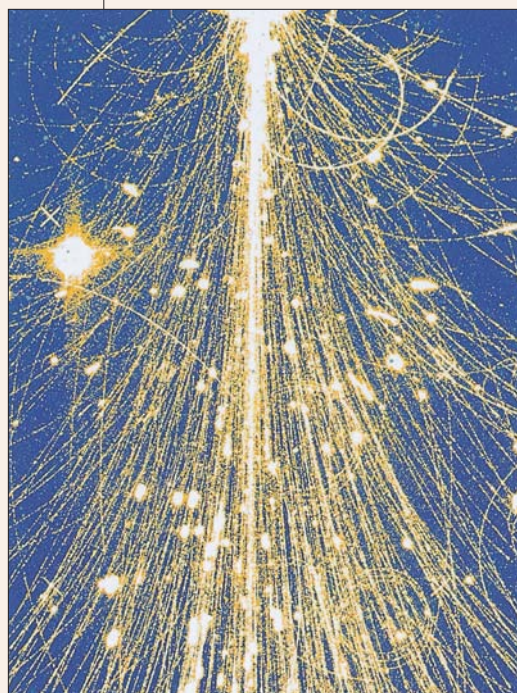
existencia de una partícula desconocida, que llamó omega menos (Ω^-), formada por tres quarks s, que contravenía el principio de exclusión de **Pauli**. Pero esto se resolvió enseguida por la sugerencia de que los quarks, además de su carga eléctrica, tenían otra característica que llamaron "color": así, cada quark tiene tres colores, el rojo, verde y azul, y cada trío de quarks lleva uno de cada color dando como resultado un color "blanco", nulo (lógicamente la idea del color es puramente figurativa, nada tiene que ver con la realidad).

El descubrimiento en 1964 de la partícula omega menos y la "belleza" con la que la teoría de los quarks permitía ordenar todas las partículas, hizo que fuera una idea aceptada unánime-

mente: **Gell-Mann** recibió en 1969 el Premio **Nobel** por su teoría de los quarks, y en 1974 unos experimentos en el **CERN** demostraron que un protón está formado por tres quarks, cada uno con una carga eléctrica fraccionaria.

Las partículas obtenidas con la agrupación de quarks reciben el nombre de "hadrones" (en griego, fuerte), y todas sienten la interacción nuclear fuerte: se subdividen en "mesones" (intermedios), con masa inferior al protón, y "bariones" (pesados), como protón, neutrón y otros de masa aun mayor como la omega menos; los bariones están formados por tríos de quarks, y los mesones por parejas de quark y antiquark.

Con núcleos de átomos pesados la energía liberada en el choque (aquí contra un blanco fijo) está multiplicada por la carga eléctrica (número de protones) y recrear brevemente las condiciones que han podido existir en el momento del Big Bang



Standard FUNDAMENTAL PARTICLES

The "Standard Model" is a term used to describe the quantum theory that includes the weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is the only force that acts on all particles.

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2,...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$< 2 \times 10^{-8}$	0
e^- electron	5.1×10^{-4}	-1
ν_μ muon neutrino	$< 3 \times 10^{-4}$	0
μ^- muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	$< 4 \times 10^{-2}$	0
τ^- tau	1.784	-1

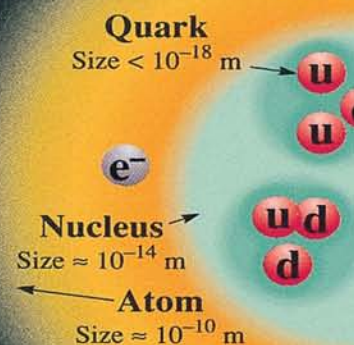
Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	4×10^{-3}	2/3
d down	7×10^{-3}	-1/3
c charm	1.5	2/3
s strange	0.15	-1/3
t top (not yet observed)	> 89	2/3
b bottom	4.7	-1/3

Spin is the *intrinsic* angular momentum of particles. Spin is given in units of $\hbar$, which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electron volt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$ kg.

Structure of the



If this picture were drawn to the same scale as the nucleus, then the quarks would be about 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 cm in size.

Sample Fermionic Hadrons

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol. Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

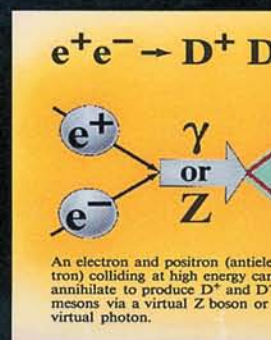
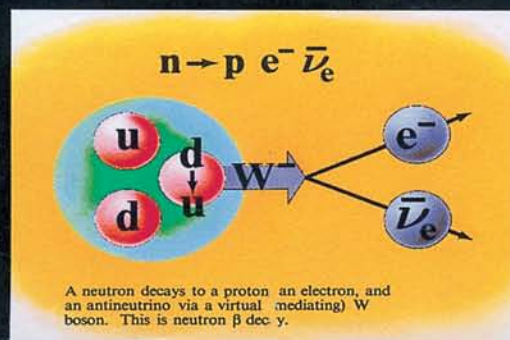
Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are *not* exact and have *no* meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, red lines the quark paths, and black lines the paths of leptons.

Copyright, © 1990 CPEP

PROPERTIES OF THE

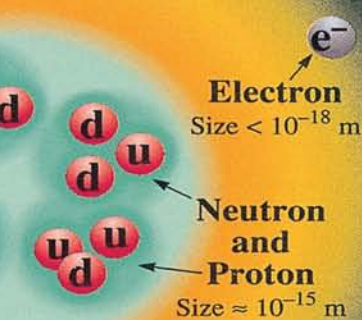
Property \ Interaction	Gravitational	Weak
Acts on:	Mass – Energy	Flavor
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^-
Strength for two u quarks at: (relative to electromagnetic) $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41} 10^{-36}	0.8 10^{-4} 10^{-7}
for two protons in nucleus		



Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of electroweak interactions (electroweak theory) are one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

Structure within Atom



The scale given by the protons and neutrons would be less than that of the electrons. The atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2,...

Unified Electroweak spin = 1	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.6	-1
W^+	80.6	+1
Z^0	91.16	0

Strong or color spin = 1	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge

Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles exchange gluons.

Leptons, photons, and W and Z bosons have no color charge and hence no strong interactions. One cannot isolate quarks and gluons; they are **confined** into color-neutral hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged objects.

Confinement

As color-charged particles (quarks and gluons) are separated, the color force between them approaches a constant value and the energy in the color-force field increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see the figures below). The objects that finally emerge are color-neutral combinations called **hadrons** (mesons and baryons).

Residual Strong Interactions

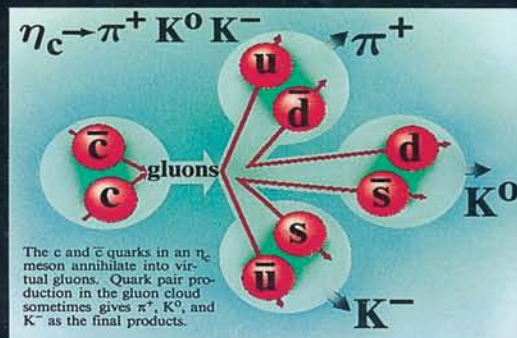
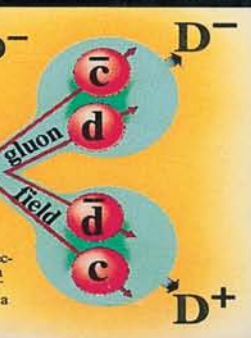
The strong binding of the color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction which binds electrically neutral atoms to form molecules. It can be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

THE INTERACTIONS

Interaction	Electromagnetic (Electroweak)	Strong	
	Electric Charge	Fundamental Color charge	Residual See Residual Strong Interaction Note
Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
W^-	Z^0	γ	Gluons
	1	25	Not applicable to quarks
	1	60	
	1	Not applicable to hadrons	
			20

Sample Bosonic Hadrons

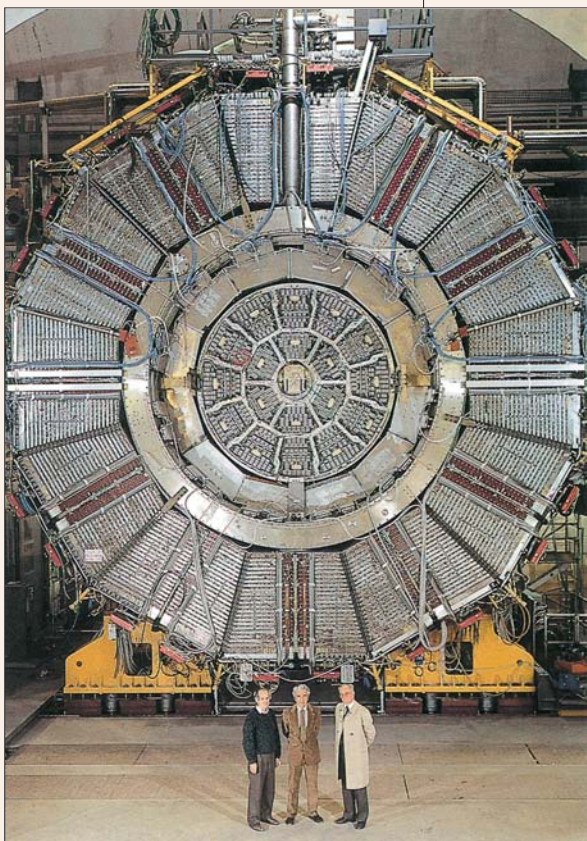
Mesons $q\bar{q}$					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
D^+	D	$c\bar{d}$	+1	1.869	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0



Contemporary Physics Education Project

This chart was created by the Contemporary Physics Education Project. For information on materials prepared to supplement this chart (book, computer software, film), write: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720. Production of this chart was supported by funding from:

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY
LAWRENCE BERKELEY LABORATORY
STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER
SUPERCONDUCTING SUPER COLLIDER LABORATORY
CERN-MICROCOSM
IBM
ROCKWELL INTERNATIONAL
MARTIN MARIETTA ASTRONAUTICS GROUP
AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS
BURLE Electron Tubes



La experiencia Aleph, utiliza una cámara de proyección tridimensional para las partículas y un calorímetro para medir las energías electromagnéticas

con una teoría llamada “electrodinámica del *quantum*”, en la que, por las leyes de la simetría, se apreciaba la semejanza entre el Electromagnetismo y la interacción débil: un equipo formado por **Sheldon Glashow**, **Abdus Salam** y **Steven Weinberg** creó unas fórmulas matemáticas en las que las partículas portadoras de la fuerza electromag-

nética no tienen carga ni masa (los fotones) mientras que las portadoras de la interacción débil son tres partículas de gran masa: una, de carga positiva, y su antipartícula negativa, y la tercera, neutra, a la que llamaron W^+ , W^- y Z^0 .

Aunque **Glashow** y sus compañeros fueron premiados con el **Nobel** de 1979 por la teoría de *unificación de las fuerzas electromagnética y débil*, la “interacción electrodébil”, la gran masa de las partículas portado-

ras, unas cien veces la masa del protón, necesaria para actuar en la distancia corta de la interacción débil, impidió que pudieran ser encontradas en los experimentos de laboratorio al no haber máquinas con la energía necesaria. En el **CERN**, **Carlo Rubbia** propuso modificar un acelerador de protones que chocaban con un blanco fijo, para convertirlo en colisionador en el que dos haces de partículas, protones y antiprotones, circulando en sentido contrario chocan de frente, aumentando así su energía. Ayudado por el holandés **S. Van der Meer**, que había descubierto un procedimiento de almacenar y controlar antiprotones en cantidades importantes, llamado “enfriamiento estocástico”, lograron encontrar las ansiadas partículas: se había dado el primer paso para la unificación, y ambos recibieron el Premio **Nobel** en 1984 por el descubrimiento de esas partículas.

Sin embargo, la teoría de la *interacción electrodébil* tiene un “punto débil”: el fotón no tiene masa mientras las partículas W^+ , W^- y Z^0 son muy masivas: las leyes de la simetría pueden dar a veces resultados no simétricos. El físico escocés **Peter Higgs** sugirió la existencia de una partícula que rompe la simetría: esa partícula crea un campo de propiedades no lineales para todas las partículas: a lo largo de ese campo los fotones circulan con gran libertad sin necesidad de masa, mientras que las partículas portadoras de la interacción débil tienen que cruzarlo con

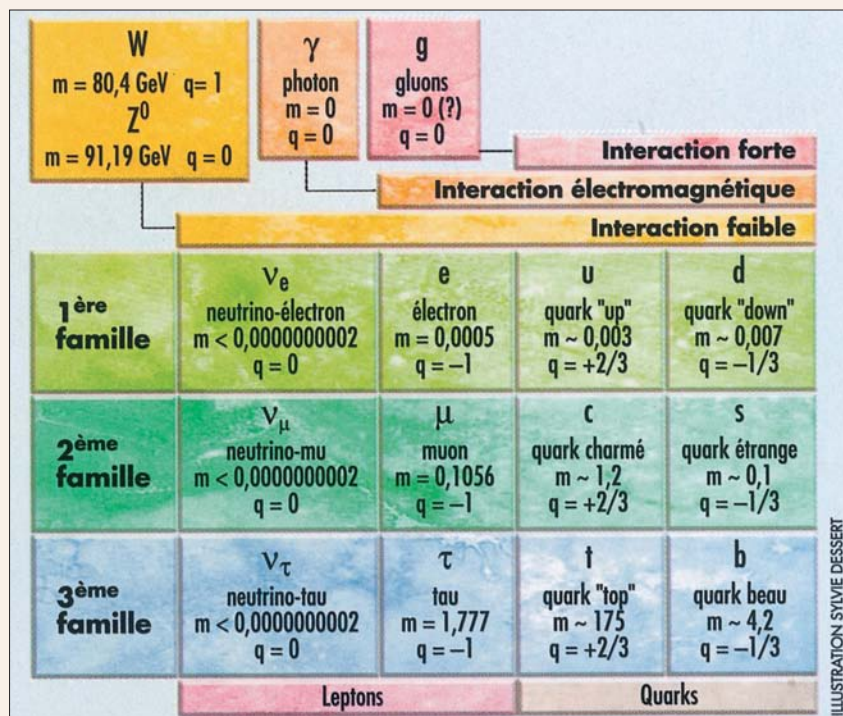
Unificación de fuerzas

Como se ha visto antes, en 1864, **Maxwell**, con sus geniales ecuaciones, logró la primera unificación de dos de las fuerzas existentes en la naturaleza, el magnetismo y la electricidad, quedando reunidas en el electromagnetismo. **Einstein** dio los primeros pasos para unificarlo con su nuevo concepto de la gravedad, desarrollado en su teoría de la relatividad, y dedicó a ello gran parte de sus últimos años, pero sin llegar a una solución ya que no tenía en cuenta las interacciones nucleares por estar basadas en la Mecánica cuántica, que le desagradaba.

La incorporación del Electromagnetismo a la Mecánica cuántica, fue

Recreación por ordenador de una posible partícula Higgs en el detector ALEPH del LEP, con cuatro haces de partículas





Las doce partículas elementales o fermiones del Modelo Estándar, clasificadas en tres familias. Las masas (m) están dadas en GeV y las cargas (q) eléctricas, en unidades de carga del protón

gran esfuerzo absorbiendo energía del campo y adquiriendo masa. Desde entonces, se conoce esta rotura de la simetría como “campo Higgs”, creado por la “partícula Higgs”, y es uno de los misterios aún sin resolver.

El éxito de la teoría de la “electrodinámica cuántica” para relacionar electromagnetismo e interacción débil, llevó a los físicos a idear otra teoría para la interacción fuerte: basándose en la carga de “color” de los quarks, ya citada, la llamaron “cromodinámica del quantum”. Pero esta teoría presenta un mecanismo más complejo: la fuerza del “color” que une los quarks dentro del protón y del neutrón, transmitida por unas partículas llamadas “gluones” (del inglés *glue*: pegamento), que actúan de manera diferente a la gravedad o el electromagnetismo: en éstos la fuerza disminuye con la distancia, pero los gluones, a corta distancia, dejan sueltos los quarks sin fuerza que los una: cuando los quarks se separan, aumenta la fuerza que los une como si estuvieran unidos por una banda elástica que, destensada los deja libres y cuanto más se la estira, con mayor fuerza están atraídos. La fuerza de “color” es una fuerza sólo de

atracción: es la más fuerte en la Naturaleza, más de mil veces la del electromagnetismo que atrae los electrones al núcleo del átomo: de esta forma no ha habido posibilidad de descubrir quarks libres en laboratorio y posiblemente no se les descubrirá nunca, pero sus efectos han sido confirmados repetidamente.

La fuerza de “color” entre quarks es la base de la “interacción nuclear fuerte” entre protones y neutrones dentro del núcleo por intercambio de mesones. El último Premio Nobel de Física, en octubre de 2004, fue concedido a los norteamericanos **David Politzer, Frank Wilczek y David Gross** por esta teoría, destacando que “el trabajo ha acercado a la física un paso más al gran sueño de formular una teoría unificada que incluya también la gravedad, una teoría del todo”.

El Modelo Estándar (SM)

Los físicos han desarrollado un cuadro que resume de manera esquemática todo el contenido de los materiales y de las acciones que constituyen la Física de las Partículas, cuadro que deja aún varios cabos sueltos pero que es universalmente aceptado en el

estado actual del conocimiento: este marco lo han llamado El Modelo Estándar (*Standard Model SM*): ver el Cuadro y el Glosario que aclaran y definen algunos de los términos utilizados.

De acuerdo con este esquema, las partículas fundamentales, las que no pueden dividirse en otras más pequeñas, están contenidas en dos grupos: los “fermiones” (nombre tomado del eminente físico italiano **Enrico Fermi**), que son los componentes de la materia, y los “bosones” (nombre puesto en honor del menos conocido físico indio **Satyendra Nath Bose**, que descubrió que la luz se propaga como fotones), que son las partículas portadoras de las fuerzas.

Los fermiones están formados por doce partículas fundamentales, seis “leptones” y seis “quarks”, que se agrupan en tres familias de cuatro, cada una con dos leptones y dos quarks. La primera familia consta del electrón y su neutrino, y los quarks *up* y *down*: estos dos quarks se agrupan en tríos para hacer los “baryones”, los neutrones y protones que forman los núcleos, que atraen los electrones en órbita para hacer los átomos de los 92 elementos químicos naturales de que está hecho nuestro mundo (más una docena obtenida artificialmente en laboratorio). La segunda familia la forman el muón y su neutrino, y los quarks *strange* y *charm*, mientras la tercera familia está constituida por la partícula tau y su neutrino, y los quark *top* y *bottom*: las partículas de la segunda y tercera familias son inestables y sólo se pueden encontrar en los rayos cósmicos y en experimentos de laboratorio.

Vistos los fermiones, los constituyentes de la materia, veremos cómo les afectan los bosones, los portadores de las fuerzas: los seis leptones están afectados únicamente por la interacción electrodébil unificada, es decir por los fotones portadores de las acciones electromagnéticas, y por los bosones W^+ , W^- y Z^0 portadores de la interacción débil: si tienen carga eléctrica, como el electrón, muón y tau, están afectados por la interacción débil y por la electromagnética; en cambio, los neutrinos, partículas

sin carga, sólo sienten la débil. La interacción fuerte actúa sobre los seis quarks por medio de los gluones, que son los responsables de la unión de los quarks dentro de protones y neutrones, y de éstos dentro del núcleo: además los quarks son también sensibles a las otras dos fuerzas.

El cuadro completo que se ha adjuntado del Modelo Estándar refleja muchos otros datos de las partículas, como el espín, cómo interaccionan unas partículas con otras decayendo en nuevas partículas, etc: pero no es objeto de este artículo extenderse más. Sí conviene hacer una precisión: en la cuadrícula donde se reflejan los quarks, una nota dice que el *quark top* no ha sido todavía descubierto: sin embargo, con posterioridad a la edición del cuadro, ha sido encontrado en el **Laboratorio Fermilab** de Chicago, con lo que el Modelo Estándar queda completo.

Teoría de Gran Unificación (TGU)

A pesar de su espectacular éxito experimental para definir el mundo de las partículas, el Modelo Estándar falla en algunos puntos: por qué hay tres pares de leptones y tres de quarks; por qué hay tres fuerzas nucleares de tan distinto alcance e intensidad, y cómo incluir la gravedad. El descubrimiento del bosón Higgs permitiría confirmar la primera fase de unificación de fuerzas, la electrodébil, además de unificarla con la interacción fuerte: quedaría así establecida la “Teoría de Gran Unificación” (TGU), que aunaría las tres fuerzas nucleares, quedando pendiente la cuarta fuerza, la gravedad, aunque para ésta ya le han dado nombre a la partícula portadora, el “gravitón”; pero esa búsqueda ha resultado infructuosa con el

acelerador LEP del **CERN**, aunque ha sido “*exprimido*” al máximo en su energía y duración antes de ser desmantelado para colocar el LHC en su lugar.

La teoría de la *SuperSimetría* (SUSY) es un nuevo marco para tratar de superar las limitaciones del Modelo Estándar: en éste las partículas fundamentales se presentan en dos grupos: fermiones (partículas de materia), tales como electrones, quarks, etc. y bosones (portadores de fuerza), como fotones, gluones, etc. Una característica de la *SuperSimetría* es que cada partícula de materia tiene una contrapartida de bosón, que se denomina anteponiendo el prefijo “s”: así resultan el squark, el selectrón, etc; y cada portador de fuerza tiene como contrapartida un fermión, que se denomina añadiéndole el sufijo “ino”; así resultan el fotino, el gluino, etc.

Esta duplicidad de partículas es debida a que la *SuperSimetría* es un reforzamiento en la mecánica del quantum de las propiedades y simetrías del espacio-tiempo: introduce una nueva forma de dimensión, una que sólo es definida por la mecánica cuántica; así puede resolver algunos de las carencias del Modelo Estándar, por ejemplo, por qué las diferentes fuerzas parecen operar en escalas tan diferentes y aparentemente arbitrarias. Además, las partículas “extra” parecen ser candidatas naturales a aspectos tan sutiles como la “la *energía oscura*”, un componente del Universo que representa alrededor del 70% de su masa total (otro 25% es

otro misterioso componente, “la *materia oscura*”, mientras sólo un 5% consiste en la materia ordinaria, la “bariónica”). Los físicos aseguran un futuro excitante a la *SuperSimetría*, pero por el momento es sólo una teoría.

La violación CP

Las ecuaciones de la *Gran Teoría de Unificación* proponen un equilibrio entre materia y antimateria en el Universo: pero, ¿dónde está la antimateria?

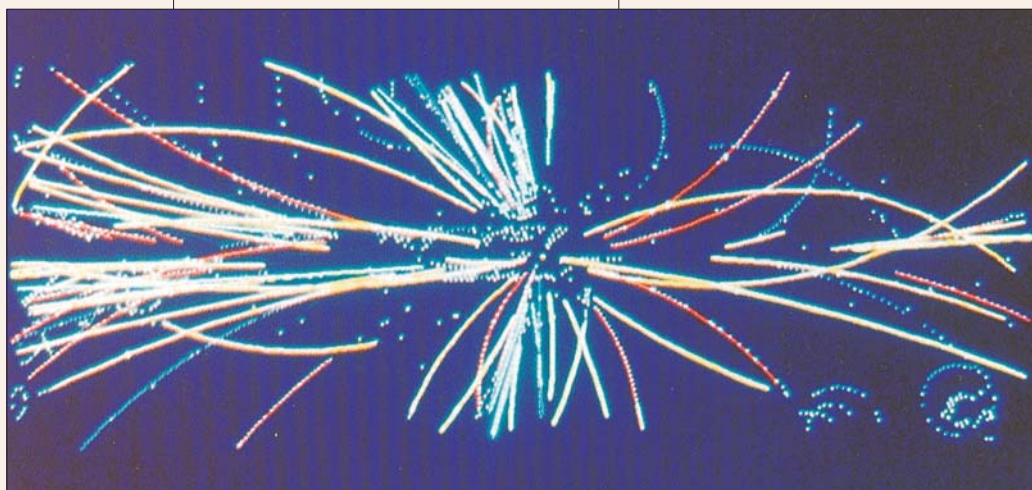
Como se ha visto, las simetrías son un factor fundamental en el planteamiento de las teorías de la Física de las Partículas: hay tres que presentan una importancia especial:

- La paridad P: se refiere a simetría en el espacio alrededor de un centro aleatorio. Con esta simetría, en las partículas no hay diferencia entre arriba y abajo, derecha e izquierda, delante y detrás.

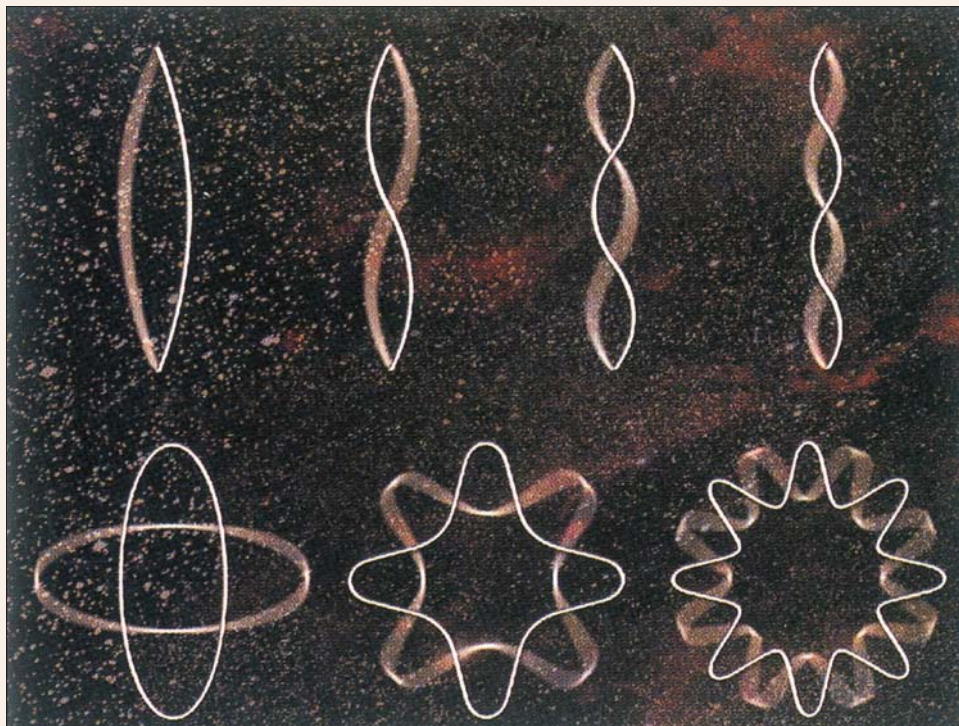
- La conjugación de cargas C: con esta simetría se cambia toda cantidad cuántica en su opuesta, por ejemplo, la carga eléctrica: así, el electrón se convierte en positrón.

- La inversión del tiempo T: esta simetría permite invertir el sentido del tiempo.

En el Modelo Estándar la “invariancia CPT” es un principio básico para todos sus componentes, tanto partículas constituyentes de la materia como de las interacciones: consecuencia de esto es que partículas y antipartículas tienen la misma masa, misma duración de vida, pero cantidades cuánticas opuestas.



Una colisión típica
protón-antiprotón
como la que
condujo en 1983 al
descubrimiento de
las partículas W y Z



En la Teoría de las cuerdas, el constituyente elemental de la materia es una cuerda minúscula de espesor evanescente pero de tamaño finito. Puede ser abierta (fila superior) o cerrada (fila inferior). Sus modos de vibrar, como los mostrados aquí, corresponden a las diversas partículas elementales.

particular de las cuerdas. Lógicamente no hay confirmación experimental, el principal argumento a su favor es teórico, pero en la actualidad es el que proporciona el cuadro más coherente para la unificación de las interacciones. (Figura)

Durante años se pensó que las simetrías C, P y T se conservaban de manera independiente, pero, a fines de los años 50, se observaron roturas de la simetría tanto en la C como en la P. Sin embargo, consideradas ambas en conjunto, la asimetría se compensaba, de modo que el “producto CP” constituía una simetría perfecta: esto es lo que hace que la materia se convierta en antimateria. Pero en la realidad el “producto CP” es una simetría “casi perfecta”, lo que hace que nuestro Universo esté constituido sólo de materia: si, en el momento del origen del Universo, en el *Bing-Bang*, se hubieran creado cantidades iguales de materia y antimateria, el mundo no existiría, ya que al encontrarse una partícula y su antipartícula se aniquilan mutuamente.

El físico **Andrei Sakharov**, el padre de la bomba de hidrógeno soviética, demostró que para que la materia se sobreponga a la antimateria en los primeros instantes del Universo tenían que darse tres condiciones, entre ellas la violación de la simetría CP, con la cual las antipartículas eran más inestables que las partículas y éstas ganaron la partida. Mediciones actualizadas señalan que una diferencia ínfima de simetría de una milmillonésima fue suficiente para el origen de nuestro mundo: pero la razón del

dominio de la materia sobre la antimateria sigue siendo desconocida.

Las Supercuerdas

Algunos físicos piensan que el fracaso del Modelo Estándar para poder conciliar la gravedad con las otras tres fuerzas nucleares, lo que equivaldría a conciliar la Teoría de la *Relatividad General* de **Einstein** con la *Mecánica Cuántica*, lo que llaman “Teoría del Todo” – (*Theory of Everything*) – (TOE), es considerar las partículas como puntos y proponen que sean tratadas como pequeños filamentos.

La idea de las cuerdas se sugirió hace 50 años para interpretar la gran fuerza con que los quarks están unidos entre sí, la *interacción fuerte*, pero se abandonó porque la cromodinámica del quantum ofrecía una solución coherente: pero se ha recuperado recientemente con la “Teoría de las Supercuerdas”. En ella, las ecuaciones predicen la existencia de 10 dimensiones espaciales, seis más de las cuatro conocidas del espacio-tiempo. La teoría de las cuerdas sustituye todas las partículas elementales puntuales que forman la materia y median en las interacciones, por unas cuerdas minúsculas: así cada partícula, como electrón, fotón, neutrino, etc. corresponde a una vibración par-

Durante mucho tiempo los físicos pensaron que su grosor sería el menor posible en la física, del orden de la *longitud de Planck* de 10^{-35} metros, pero recientemente se ha descubierto que puede ser mucho más grande, por lo que pueden entrar dentro de los experimentos en los aceleradores de alta energía como el LHC en el **CERN**.

Hay varios ensayos propuestos para estas ideas en los aceleradores de partículas de alta energía, donde se pueda explorar, entre otros, la violación de la Ley de Newton debido a la presencia de dimensiones extra: en efecto, la ley del cuadrado inverso de la atracción gravitacional, $1/r^2$ entre dos masas situadas a distancia “r” se convierte en $1/r^{2+n}$ si hay “n” dimensiones extra. Con el LHC alcanzando energía por encima de la escala de las cuerdas, el acelerador se convierte en el mejor medio para estudiar la gravedad del quantum en el laboratorio. Estas teorías existen sólo en nuestra imaginación, pero el LHC está diseñado para ensayar la idea de SuperSimetría buscando la producción de superpartículas, y hay grandes esperanzas de descubrir nuevos espectaculares y exóticos fenómenos (**Ignatios Antoniadis, CERN**).

En la II Parte se tratará del acelerador LHC.

GLOSARIO

Acelerador de blanco fijo. Acelerador en el que un haz de partículas choca sobre un blanco estacionario.

Antipartícula. Una antipartícula es casi idéntica a su correspondiente partícula excepto que ciertas propiedades, en particular su carga eléctrica, son exactamente opuestas.

Antiprotón. Antipartícula del protón

Bosón. Todas las partículas son o un bosón o un fermión. Las partículas que intervienen en las fuerzas fundamentales son todos bosones, y los quarks y leptones son todos fermiones.

Bosón Higgs. Partícula hipotética que está presente en las teorías unificadas de las interacciones electrodébiles.

Bosones W^+ , W^- , y Z^0 . Los tres bosones con masa, descubiertos en el CERN en 1983, portadores de la fuerza débil.

Colisionador. Acelerador en el que dos haces opuestos de partículas chocan de frente.

Detector. Cualquier dispositivo que pueda señalar la presencia de una partícula o fragmento nuclear.

Electrón. Un leptón ligero con carga negativa, constituyente de todos los átomos. Tiene sólo 1/1836 de la masa del protón.

Electrón-voltio. Es la energía ganada por un electrón acelerado por un potencial eléctrico de un voltio. Dada la equivalencia de masa y energía, la masa de las partículas se mide también en electrón-voltios.

Física de altas energías. El estudio de las propiedades e interacciones de las partículas energéticas

Fotón. Un bosón sin masa, el portador de las interacciones electromagnéticas.

GeV. Gigaelectrón-voltio. Mil millones (10^9) de electrón-voltios.

Gluón. Cualquiera de los ocho bosones sin masa que intervienen en la interacción fuerte.

Gran Teoría Unificada. Una teoría que combina las interacciones electrodébil y fuerte en un solo esquema unificado.

Gravitación. Una fuerza sólo de atracción y de gran alcance. Es tan débil que sus efectos se ven sólo en las interacciones entre objetos macroscópicos

Gravitón. El hipotético bosón sin masa portador de la fuerza gravitacional.

Hadrón. La partícula que siente la interacción fuerte. Protones y neutrones son hadrones.

Interacción débil. Una fuerza de alcance corto y débil que afecta a todas las partículas, tanto quarks como leptones. Es responsable del decaimiento de muchas partículas.

Interacción electrodébil. Una fuerza fundamental. Las interacciones débil y electromagnéticas unificadas.

Interacción electromagnética. La fuerza de alcance amplio que actúa entre cargas y corrientes eléctricas y magnéticas, y transmitida por los fotones

Interacción fuerte. Una fuerza de corto alcance, la más fuerte de las interacciones. Los quarks y todas las partículas compuestas formadas por quarks notan su influencia, pero no los leptones.

ISR. *Intersecting Storage Ring*, el primer colisionador de protones en el mundo.

LEP. *Large Electron Positron Collider*. El colisionador más grande en el mundo, con 27 km de circunferencia. Ahora desmantelado para montar el LHC en su lugar.

Leptón. Cualquiera de las seis partículas elementales que sienten la fuerza débil, pero no la fuerte. El electrón, el muón y el leptón tau, junto con sus neutrinos asociados son leptones.

LHC. *Large Hadron Collider*. El colisionador protón-protón de 16 TeV, (en construcción) que se está instalando en el túnel del LEP en el CERN y estará en servicio en 2007

Luminosidad. Un término utilizado para especificar la intensidad de un colisionador. A más luminosidad, mayor número de colisiones.

Mesón. Un grupo de leptones, similares a los electrones, pero con masa unas 200 veces superior.

Neutrino. Cualquiera de las tres partículas sin carga, y aparentemente sin masa, asociadas con el electrón, el muón y el leptón tau. Los neutrinos sienten sólo la fuerza débil.

Neutrón. Una partícula sin carga, de masa similar al protón. Está compuesto de tres quarks y se encuentra en todos los núcleos atómicos excepto en el de hidrógeno.

Partículas elementales. Una partícula que no puede ser partida en otras partículas. De acuerdo a los conocimientos actuales, leptones, quarks y los bosones portadores de fuerza, son elementales

Positrón. La antipartícula, de carga positiva, del electrón.

Protón. Partícula de carga positiva, hecha de tres quarks, que se encuentra en todos los núcleos atómicos.

PS. Proton-Synchrotron. El primer gran acelerador del CERN, con energía de 26 GeV.

Quarks. Los seis diferentes quarks y sus antiquarks son partículas elementales con cantidades fraccionales de carga eléctrica. Están reunidos juntos por la fuerza fuerte en grupos de dos o tres para formar protones, neutrones, kaones, piones y muchas otras partículas compuestas.

Radiación sincrotrón. La radiación electromagnética emitida por cualquier partícula con carga cuando es forzada a circular por una trayectoria no rectilínea, como en un acelerador circular.

Sincrotrón. Un acelerador en el que la energía de las partículas con carga es incrementada a medida que circulan a través de una órbita circular de radio fijo

SM. *Standard Model*. El Modelo Estándar es la combinación de las teorías de las fuerzas débiles, electromagnéticas y fuertes, incorporando todos los quarks, leptones y bosones portadores de fuerza. El Modelo Standard abarca todo lo que se conoce acerca de la Física Nuclear y de las Partículas.

SPS. Super Proton Synchrotron. La tercera gran máquina del CERN, con energía de 450 GeV.

Superconductividad. La capacidad de algunos materiales de transportar la corriente eléctrica sin pérdida de energía debido a la total ausencia de resistencia eléctrica.

Tc. Temperatura crítica. La temperatura por encima de la cual los materiales superconductores pierden todas sus propiedades

TeV. Teraelectrón-voltio. Un billón (10^{12}) de electrón-voltios. ■

NOTA: Toda la información contenida en el artículo está tomada de documentación del CERN, en especial el Boletín CERN Courier, que ofrece las noticias más completas y actualizadas sobre la Física de las Altas Energías.