

Cacería de quarks



El descubrimiento del quark *top*, la partícula elemental más pesada conocida hasta ahora, culminó una serie de experimentos de la física moderna diseñados para conocer la estructura más íntima de la materia.

Jacobo Konigsberg Levy

*¿Qué es una cosa? La pregunta es muy vieja.
Lo que siempre permanece nuevo es que se tiene
que volver a preguntar constantemente.*

Martin Heidegger, *¿Qué es una cosa?*

INTRODUCCIÓN

A veces no resisto la tentación de sonar un poco misterioso y, cuando alguna gente me pregunta a qué me dedico, contesto: “a cazar quarks”. La verdad es que ha sido un gran privilegio y una fuente de orgullo el haber participado en una de las cacerías más grandes, y de cierto modo más esotéricas, en la ciencia moderna: la caza del quark *top*, la última partícula elemental descubierta en 1995 en el *Fermi National Laboratory* (Fermilab), en las afueras de la ciudad de Chicago. En este ensayo trato de ilustrar la gran aventura en que se

ha embarcado el ser humano en los últimos 100 años, en su afán por investigar la estructura más íntima de la materia. Para ello me enfocaré en el descubrimiento de los quarks, primero describiendo un poco el camino experimental que nos llevó a intuir su existencia, y finalmente a los descubrimientos de estas extraordinarias partículas.

La historia de la búsqueda y descubrimiento de partículas elementales es paralela a la historia del ser humano moderno, a sus cuestionamientos filosóficos y científicos. Empieza con los antiguos griegos hace unos 2 mil 500 años y avanza lentamente hasta principios del siglo XX, en el cual, a pesar de, y en mucha medida ayudado por las grandes guerras mundiales, los avances se han acelerado en una forma espectacular.

Tales de Mileto, Anaxímenes y Heráclito sugirieron que todo estaba formado por un solo “elemento”: agua, aire y fuego, respectivamente. Empédocles propuso un modelo con cuatro elementos, añadiendo la tierra, y planteó que estos elementos podían ser unidos o separados por fuerzas “morales” que interactuaban entre ellos: amor y odio. Finalmente Demócrito introdujo la idea de que todo estaba formado por partículas invi-

sibles e indivisibles: los átomos. Indudablemente, el pensamiento revolucionario de los griegos de esa época ha sido la guía que ha forjado la investigación científica de la estructura de la materia hasta nuestros días. La idea de que existen bloques elementales que interactúan por medio de un intercambio de “energía”, esencialmente no ha cambiado desde entonces. Sin embargo, el lenguaje que describe estas interacciones está formado por las más modernas teorías de la física y de las matemáticas: la teoría de la relatividad, la física cuántica, la teoría de campos, la teoría de grupos, etcétera.

¿Cuántos bloques fundamentales y cuántas fuerzas existen? Éstas son las preguntas que a través del tiempo los científicos han tratado de contestar, con la idea de que la naturaleza es fundamentalmente simple y tanto el número de bloques elementales como el de fuerzas deben ser mínimos. Pero hasta ahora, con cada avance, siempre se han generando también nuevas interrogantes. Me gusta describir al proceso de investigación científica como la sinergia que resulta de la triangulación entre cuestionamientos sobre la naturaleza, el proceso de experimentación que éstos generan, y las teorías que explican la evidencia experimental y que a la vez predicen nuevos fenómenos y generan nuevas preguntas.

En el caso de la física de las partículas, este proceso científico es claramente perceptible. En cada paso el estudio experimental de los “elementos” ha revelado ciertos patrones que a su vez han generado teorías que intentan explicarlos. Como veremos, estas teorías han llevado a predicciones sobre la existencia de niveles de estructura más y más elementales en la naturaleza que, a su vez, los experimentalistas se han dedicado a comprobar o a refutar. Así ha avanzado, paso a paso, esta ciencia, con los físicos teóricos elaborando teorías cada vez más complejas y los experimentalistas haciendo uso de los instrumentos más grandes jamás construidos y de los avances tecnológicos más sofisticados. Todo, quizá paradójicamente, con la meta última de encontrar un modelo que explique de forma simple a la naturaleza.

Hasta donde sabemos, los quarks, conjuntamente con los leptones (el electrón, el neutrino y sus familiares) constituyen los bloques fundamentales con los cuales está construida toda la materia, desde el principio del tiempo. Los quarks más ligeros, el *up* (arriba) y el *down* (abajo), forman las partículas más comunes, como el protón y el neutrón, que a su vez son los constituyentes de los núcleos atómicos. Éstos, combinados con sus correspondientes electrones,

Los quarks más ligeros,
el *up* (arriba) y el *down* (abajo),
forman las partículas
más comunes,
como el protón y el neutrón,
que a su vez son los
constituyentes
de los núcleos atómicos



forman todos los elementos agrupados en la famosa tabla periódica construida originalmente por el químico ruso Dmitri Mendeleev en 1869.

Los quarks más pesados, *charm* (encanto), *strange* (extraño), *top* (cima) y *bottom* (fondo), abundantes en los primeros momentos después del *big bang*, son ahora producidos sólo en aceleradores de partículas (como veremos más adelante). Todas estas partículas elementales han podido ser clasificadas de acuerdo a sus propiedades en una nueva “tabla periódica”. Los leptones y los quarks aparecen en pares, llamados generaciones o familias. Cada una de estas partículas está caracterizada, además de su masa, por varias propiedades llamadas números cuánticos. Éstos incluyen la carga eléctrica

y el espín (o momento angular intrínseco), entre otros. Además, por cada una de estas partículas existe una antipartícula, que tiene la misma masa y espín, pero con carga eléctrica (y todos los otros números cuánticos) opuesta.

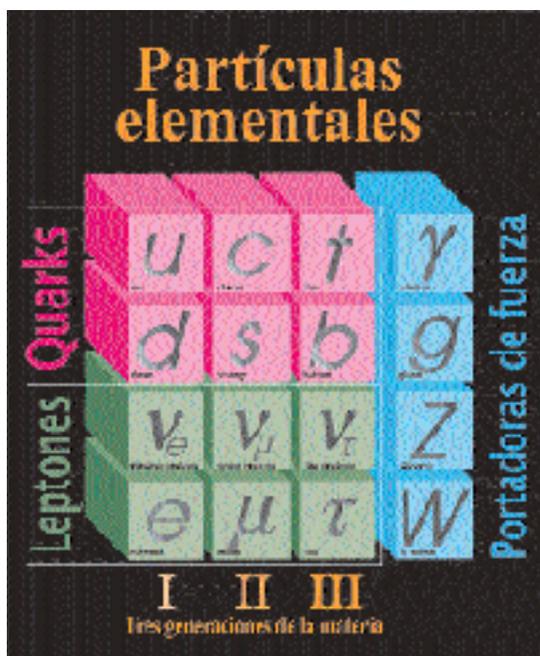
El *modelo estándar* describe las interacciones entre estas partículas elementales que son llevadas a cabo por medio de intercambio de otras partículas mensajeras. Existen cuatro fuerzas básicas que describen todas las interacciones hasta ahora observadas entre las partículas.

La *fuerza de gravedad* y la *fuerza electromagnética* son experimentadas comúnmente en la vida diaria, ya que actúan a largas distancias entre partículas con masa y con carga eléctrica, respectivamente. Sus “mensajeros” son los gravitones y fotones, respectivamente. Las fuerzas *débil* y *fuerte* son experimentadas únicamente a distancias subatómicas. La fuerza fuerte está generada por un intercambio de partículas llamadas gluones, actúa entre los quarks y les permite formar otras partículas. La fuerza débil, generada por los bosones *W* y *Z*, actúa entre leptones y entre quarks, y es responsable de la desintegración radioactiva de los núcleos que, por ejemplo, es la causa de que el Sol brille y dé calor.

Como ya mencionamos, una de las preguntas básicas de la física de partículas es si acaso estas fuerzas son fundamentales o si sólo son manifestaciones de alguna fuerza más primordial. Si éste fuera el caso, estas fuerzas podrían ser *unificadas*, es decir, descritas por una teoría más básica que explicaría todo lo que observamos. Éste ha sido el sueño de muchos físicos a través de los años. ¡Y de hecho algunos esfuerzos de unificación ya han sido exitosos!

La fuerza electromagnética representa la unificación de las fuerzas eléctricas y magnéticas. Las ecuaciones del físico escocés James Clerk Maxwell (formuladas en 1864), que son tanto un ejemplo de simplicidad como de elegancia matemática, describen estos dos fenómenos como manifestaciones de una sola teoría. A través de los años sesenta, ya usando la teoría cuántica y la relatividad especial, se pudo desarrollar la teoría electro-débil que logró unificar esta fuerza electromagnética con la fuerza débil. Existen teorías mas nuevas que intentan unificar la fuerza fuerte con la teoría electro-débil. Hasta ahora no han podido ser confirmadas ni negadas experimentalmente. La búsqueda continúa...

Desde mi punto de vista, el modelo estándar es uno de los alcances más espectaculares al que ha llegado el conocimiento humano. Una obra desarrollada a través de muchos años y en la que han sido protagonistas muchos de los científicos más



Las partículas elementales del modelo estándar.

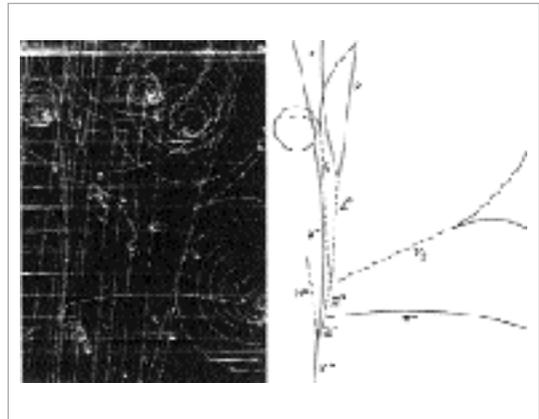
prestigiosos de la historia, originarios de países muy diversos. Y, por cierto, este desarrollo también está representado por una sucesión impresionante de premios Nobel de física. Como toda gran empresa humana, ha sido a la vez una historia de cooperación y de gran competencia, con la participación de laboratorios y universidades de gran reputación en el foro internacional.

RAYOS, RAYOS Y MÁS RAYOS

Experimentos con electricidad viajando dentro de tubos al vacío, empezados aproximadamente en 1850, llevaron al descubrimiento de los rayos catódicos, que formaban un aura misteriosa creada por el paso de la electricidad por el tubo. En 1897, el científico inglés J. J. Thomson resolvió el misterio mostrando que estos rayos podían ser desviados por un campo eléctrico y también por un imán. Además, demostró que estos rayos eran realmente partículas con carga eléctrica negativa, a las que llamó *electrones*. Su conclusión fue que “en los rayos catódicos encontramos materia en un nuevo estado, en el cual la subdivisión de esta materia va mucho más allá que el estado gaseoso ordinario”. Se puede considerar que éste fue el nacimiento de la física de partículas. Thomson recibió el premio Nobel de física en 1906.

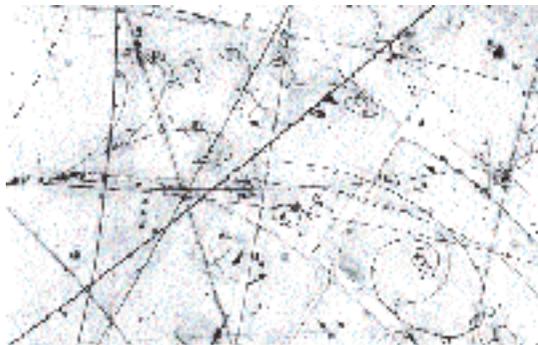
El estudio de los rayos catódicos resultó, en 1896, en el descubrimiento de los rayos X por el físico alemán Wilhem Konrad Röntgen, que recibió en 1901 el primer premio Nobel en física. Estos rayos X eran producidos en el punto luminoso donde los rayos catódicos pegaban en el tubo al vacío. Este descubrimiento inspiró al francés Henri Becquerel a estudiar la naturaleza de estos rayos X, entender cómo eran generados y a descubrir, por accidente, que materiales como el uranio eran también fuente de otra “radiación” misteriosa, a la cual llamó “rayos de uranio”. El descubrimiento de materiales radioactivos resultó en un premio Nobel para Becquerel, el cual compartió con Pierre y Marie Curie en 1903. Otro gran científico inspirado por los rayos X fue Ernest Rutherford, originario de Nueva Zelanda, quien demostró en 1898 que el uranio emitía dos tipos distintos de radiación, a los cuales llamó alfa y beta. La radiación beta fue rápidamente identificada como electrones y la alfa, más tarde, como núcleos de átomos del elemento helio, despojados de sus dos electrones.

En 1911 Rutherford, en un experimento clave en el cual bombardeó láminas muy delgadas de oro con estas partículas alfa, descubrió, casi por casualidad, que más del 99 por ciento de



Descubrimiento de la partícula omega-minus.

la masa del átomo estaba concentrada en un muy pequeño núcleo con carga positiva. La idea era probar si el modelo atómico de Thomson, que describía al átomo como una esfera difusa de materia, tenía validez. Si éste era el caso, las partículas alfa deberían atravesar por la lámina de oro con muy poco cambio en su trayectoria. En efecto, esto ocurría en la gran mayoría de las veces. Su aparato de medición consistía básicamente de una pantalla fosforescente que se iluminaba al ser golpeada por las partículas alfa, y por los propios ojos de los experimentalistas, que tenían que determinar la frecuencia de estos golpes en función del ángulo de incidencia. Para su sorpresa, cuando decidieron examinar si es que había partículas rebotando hacia el mismo lado de la lámina de



Detección de partículas por medio de una cámara de burbujas.

En 1932 el norteamericano Carl Anderson, haciendo uso de la cámara de niebla (una novedosa técnica de detección de partículas) descubrió una partícula que resultó ser idéntica al electrón, excepto que su carga eléctrica era positiva, y la llamó *positrón*. ¡Este fue el primer descubrimiento de antimateria!

oro en el cual estaba la fuente de partículas alfa, ¡encontraron que sí sucedía este fenómeno! Rutherford describió esto como si al disparar una bala de cañón hacia una hoja de papel, esta bala rebotara y le pegara al que disparó. Gracias a mediciones más detalladas concluyeron que el núcleo del átomo no podía ser mayor que 10^{-12} centímetros de diámetro. Hoy en día sabemos que el núcleo tiene aproximadamente 10^{-13} centímetros de diámetro. La continuación de estos experimentos de radiación nuclear en el laboratorio de Rutherford produjo el descubrimiento del *protón* (cuyo nombre quiere decir “la primera partícula”), en 1919, y del *neutrón* en 1932, por James Chadwick (premio Nobel en 1935).

En 1914 Chadwick notó que al parecer los electrones, que eran parte de la radiación beta de los núcleos, violaban las leyes de conservación de energía. Los físicos teóricos postularon la existencia de partículas invisibles, sin carga eléctrica, poca o sin masa, que apenas interactuaban con la materia y que de esta forma permitían que la energía se conservara en estas reacciones. Estos *neutrinos* (bautizados así por el físico italiano Enrico Fermi) se descubrieron en 1954, cuando los físicos norteamericanos Clyde Cowan y Fred Reines montaron experimentos frente a reactores nucleares, que eran supuestamente fuentes intensas de neutrinos. Finalmente, en 1954, su detector, que contenía diez toneladas de una solución de cadmio y contadores electrónicos, los convenció de que habían detectado a los elusivos neutrinos. Recibieron el premio Nobel en 1995.

Otro tipo de rayos, también durante las primeras décadas del siglo XX, ocasionaron el descubrimiento sorpresivo de una serie de partículas. Los físicos, con la iniciativa del austriaco Victor Hess, descubrieron, por medio de aparatos llamados electroscopios, que medían la ionización del aire, instalados en globos que flotaban a gran altura, una nueva fuente de radiación penetrante, a la que bautizaron como “rayos cósmicos”. Los rayos cósmicos son partículas con alta energía, en su mayoría protones, que llegan del espacio a la parte alta de la atmósfera terrestre, donde chocan con sus átomos. Estos choques crean cascadas de distintas partículas secundarias que llegan hasta la superficie de la Tierra. Tienen orígenes diversos en nuestra galaxia, incluyendo al Sol. En 1932 el norteamericano Carl Anderson, haciendo uso de la cámara de niebla (una novedosa técnica de detección de partículas) descubrió una partícula que resultó ser idéntica al electrón, excepto que su carga eléctrica era positiva, y la llamó *positrón*. ¡Este fue el primer descubrimiento de antimateria! En 1936 Hess y Anderson recibieron el premio Nobel por sus descubrimientos.

Unos años antes, el físico inglés Paul Dirac había desarrollado una elegante ecuación que combinaba la física cuántica y la relativista, pero que al aplicarla al electrón también tenía una solución con electrones positivos o “antielectrones”, como él los llamó. Anderson hizo su descubrimiento sin conocer el trabajo de Dirac, y cuando Dirac se enteró del descubrimiento del positrón, se atrevió a predecir que también debería existir un antiprotón, que se descubrió en 1955. Éste me parece un excelente ejemplo de la sinergia que mencioné en la introducción: preguntas, ideas y experimentos avanzando hacia una posible síntesis de conocimiento.

En 1936, Anderson y Neddermeyer descubrieron, también en los rayos cósmicos, una nueva y muy interesante partícula que parecía poder atravesar gruesas capas de plomo: el *muón*. Esta partícula resultó ser pariente del electrón, pero unas 200 veces más pesada. Además, fue totalmente inesperada, pues ninguna de las teorías de la época la predecía. El físico teórico norteamericano Isidor Rabi, cuando se enteró de este descubrimiento, preguntó: “¿quién ordenó esto?”. El misterio de por qué existe más de una generación de partículas elementales sigue, hasta ahora, sin explicación alguna.

Muchas otras partículas muy interesantes también fueron observadas gracias a los rayos cósmicos. Entre 1937 y 1947 se acumuló evidencia que demostró la existencia del *pión* cargado. Entre 1947 y 1950 se descubrió el *kaón*, que inesperadamente tenía un tiempo de vida (el tiempo característico que le lleva a una partícula inestable a desintegrarse) relativamente muy largo. Por esto, a los kaones se les llamó partículas “extrañas”.

Al principio de los cincuenta, los descubrimientos de partículas extrañas por medio de rayos cósmicos fueron confirmados y extendidos mediante experimentos que usaban máquinas de alta energía: los aceleradores de partículas.

ACELERADORES

El choque de una partícula de alta energía con otra en reposo se puede mirar de varias maneras. La famosa ecuación de la física relativista de Einstein, $E=mc^2$, nos indica que para producir, y con suerte descubrir, partículas de alta masa se necesitan aceleradores de alta energía. De acuerdo con las ecuaciones de la cinemática relativista, la energía en el centro de masa de esta colisión es proporcional a la raíz cuadrada de la energía de la partícula acelerada. Ésta es la energía disponible para crear nuevas partículas. Así que, por ejemplo, si cuadruplicamos la energía de un acelerador, solamente duplicamos la masa de las

partículas que podríamos descubrir mediante colisiones de partículas aceleradas.

Otro aspecto muy interesante de estos choques relativistas es que, según la teoría cuántica, las partículas en movimiento se comportan dualmente como partículas y como ondas. Esto fue sugerido por el francés Louis de Broglie en 1923, como un paralelismo con la naturaleza dual de la luz, que también se comporta como ondas y como partículas (los fotones). La longitud de onda λ de estas partículas está dada por la ecuación: $\lambda=h/p$, donde p es el momento de la partícula y h es la constante de la física cuántica de Plank. Entre más energéticas sean las partículas, tienen mayor momento, y por lo tanto una longitud de onda más pequeña. La consecuencia es que estos haces de partículas pueden penetrar la materia y ayudarnos a detectar estructuras de dimensiones muy pequeñas. Es por eso, por ejemplo, que para estudiar con detalle la estructura de virus y bacterias se usan microscopios electrónicos, que

Al principio de los cincuenta,
los descubrimientos
de partículas extrañas
por medio de rayos cósmicos
fueron confirmados
y extendidos mediante
experimentos que usaban
máquinas de alta energía:
los aceleradores
de partículas

usan haces de electrones con longitud de onda comparable o más pequeña que los objetos que se estudian.

El fenómeno de “observación” tiene tres partes: el objeto, la “luz” con la cual este objeto se ilumina, y el aparato que detecta la luz reflejada por este objeto. Así, los objetos que podemos ver con nuestros ojos son aquellos iluminados con luz con longitudes de onda dentro del espectro visible, que es más que suficiente para detallar casi todo lo que normalmente nos rodea. Cuando los objetos a ser estudiados son partículas subatómicas, los aceleradores proveen la “luz” que las “ilumina” (las partículas aceleradas) y los “detectores” son los aparatos que perciben la luz reflejada (o las nuevas partículas creadas) y que sirven como extensión a nuestros sentidos para ayudarnos a determinar esta estructura subatómica. El último aspecto fascinante de los choques de partículas a alta energía es que, en el punto de colisión, efectivamente se recrean las condiciones de alta temperatura que existían en los primeros momentos del origen del universo; podríamos decir que los aceleradores de partículas son también máquinas del tiempo que nos transportan al pasado...

En 1932 John Cockcroft y Ernest Walton construyeron en el laboratorio de Rutherford, en Cambridge, el primer acelerador de partículas

Fue Rutherford (otra vez) el que percibió la necesidad de tener proyectiles nucleares “artificiales” de energías mucho más altas que las que proveían las fuentes naturales de partículas alfa. En 1932 John Cockcroft y Ernest Walton construyeron en el laboratorio de Rutherford, en Cambridge, el primer acelerador de partículas. Esta máquina aceleró protones por medio de un sistema de alto voltaje y los dirigió a un blanco de litio, el cual por medio de este bombardeo se desintegraba y se convertía en helio. Junto con Rutherford concluyeron que habían “partido” al átomo. Por su trabajo Cockcroft y Walton compartieron el premio Nobel en 1951. La máquina de Cockcroft-Walton y su versión más avanzada, el acelerador de Van de Graaf, aceleran partículas por medio de altos voltajes estáticos. Sin embargo, el alcance de energía de esta técnica es limitado. Esta energía es medida por los físicos en electronvolts. Un electronvolt es la energía que un electrón gana al atravesar la distancia entre dos electrodos con una diferencia de potencial eléctrico de 1 volt. El acelerador de Van de Graaf alcanzaba un millón de electronvolts (un megaelectronvolt).

Normalmente trabajamos en el sistema de unidades en el cual la velocidad de la luz es $c = 1$, y en el que, por tanto, la masa y la energía se pueden expresar en las mismas unidades. La masa del electrón es aproximadamente 0.5 megaelectronvolts, y la masa del protón y del neutrón son, también aproximadamente, 1000 megaelectronvolts o 1 gigaelectronvolt (mil millones de electronvolts). En el cuadro 1 encontramos los valores de masa de los quarks mencionados a lo largo de este artículo. Claramente, a lo largo de los años, hubo que superar a estos primeros aceleradores de partículas. El quark *top*, por ejemplo, tiene una masa de aproximadamente 178 gigaelectronvolts, ¡tan pesado como un átomo de oro! Como veremos adelante, se necesitó un monstruoso acelerador, casi un millón de veces más poderoso que el de Van de Graaf, para descubrir a esta partícula.

Esta carrera por construir aceleradores más y más poderosos ha tenido como competidores a muchos países en varios continentes: Inglaterra, Estados Unidos, Rusia, Alemania, Italia y Japón. Además, se han formado colaboraciones internacionales que han construido y planeado aceleradores impresionantemente poderosos. A continuación resumimos brevemente la trayectoria del desarrollo de estas máquinas hasta el punto en que permitieron el descubrimiento de los primeros quarks.

En 1928, el ingeniero noruego, Rol Widerøe inventó el acelerador lineal. En vez de ser aceleradas solamente una vez, las partículas viajaban por varios electrodos en serie, recibiendo

muchos “empujones”. Pero para llegar a energías realmente altas se necesitaría una máquina larguísima. Ernest Orlando Lawrence, en la Universidad de Berkeley, California, encontró una solución revolucionaria: inventó en 1930 el ciclotrón. En esta máquina las partículas eran mantenidas en órbitas espirales, dentro de una caja circular, por medio de fuertes campos magnéticos, y aceleradas por un oscilador eléctrico de alta frecuencia, sincronizado con el paso de las partículas mientras giraban. El primer ciclotrón parecía un juguete, con 11 centímetros de diámetro, y alcanzaba 80 mil electronvolts (figura 1).

En 1939, Lawrence alcanzó 19 megaelectronvolts con un ciclotrón de 1.5 metros de diámetro, hizo planes para una nueva máquina con la meta de alcanzar 340 megaelectronvolts y además recibió el premio Nobel de física. El alcance de energía de los ciclotrones tenía una limitación técnica, debido a la teoría de la relatividad, cuando la velocidad de las partículas se acercaba a la de la luz.

Después de la guerra, y con gran ayuda financiera gubernamental, vino lo que se conoce como “la invasión de aceleradores”. Una nueva técnica desarrollada por Edwin M. McMillan, colega de Lawrence, permitió acelerar a las partículas a velocidades muy cercanas a la de la luz. En vez de la caja del ciclotrón y las órbitas en espiral, las partículas circulan en un tubo anular, rodeado de imanes, en el cual tanto el campo eléctrico como el magnético están sincronizados con la creciente energía de las partículas, teniendo en cuenta los efectos de la teoría de la relatividad. En 1952, en el primer sincrotrón de protones, en el *Brookhaven National Laboratory*, cerca de Nueva York, se alcanzaron energías de 3 gigaelectronvolts. Éste fue el primer acelerador que produjo energías similares a las de los rayos cósmicos: se le bautizó como Cosmotrón. En 1954, en Berkeley se construyó el Bevatrón, que alcanzó 6 gigaelectronvolts y descubrió al antiprotón (la antipartícula del protón). Y así continuó esta competencia de sincrotrones; los europeos construyeron en el nuevo laboratorio internacional CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), en las afueras de Ginebra, Suiza, una máquina de 28 gigaelectronvolts, energía que fue rápidamente igualada por Brookhaven, que, por haber estado más preparados para acumular e interpretar datos, tomaron ventaja en muchos descubrimientos sobre el CERN. Uno de estos descubrimientos, en 1961, por el cual los norteamericanos Jack Steinberger, Leon Lederman y Melvin Schwartz recibieron el premio Nobel en 1988, fue un nuevo tipo de neutrino asociado con la desintegración de los muones, y por tanto llamado *neutrino del muón*. Después de esperar 27 años por el

CUADRO 1.

Masa y carga eléctrica de los quarks

Quark	Masa (gigaelectronvolts)	Carga eléctrica
Up (u)	0.004	+2/3
Down (d)	0.008	-1/3
Charm (c)	1.5	+2/3
Strange (s)	0.15	-1/3
Top (t)	178	+2/3
Bottom (b)	4.7	-1/3

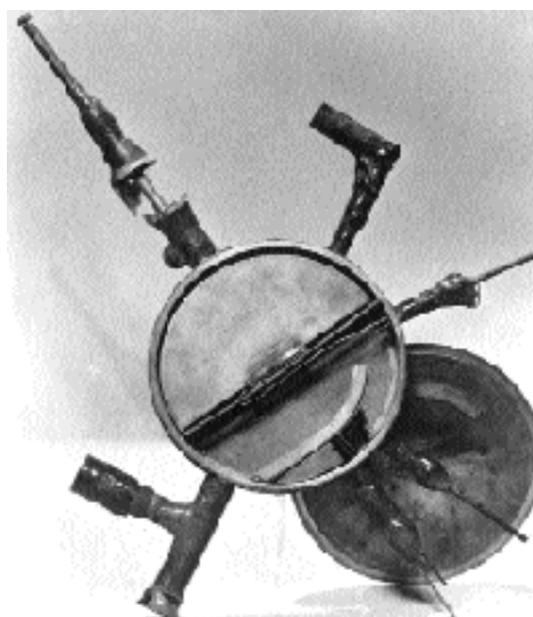


Figura 1. El primer acelerador de tipo ciclotrón, de 11 centímetros de diámetro.

premio, se cuenta que Steinberger comentó que “para obtener el premio Nobel de Física hay que hacer dos cosas: primero, un experimento interesante cuando estás joven y, segundo, mantenerse vivo lo suficiente.”

En los años cincuenta los descubrimientos de partículas extrañas mediante rayos cósmicos fueron confirmados y extendidos por las nuevas generaciones de experimentos en aceleradores. Tres partículas más fueron descubiertas y bautizadas con nombres del alfabeto griego: *lambda*, *sigma* y *ksi*. Los kaones son varias veces más pesados que el pión pero más ligeros que el protón, y como mencionamos anteriormente, tienen un tiempo de vida inexplicablemente

Se cuenta que Steinberger comentó que “para obtener el premio Nobel de Física hay que hacer dos cosas: primero, un experimento interesante cuando estás joven y, segundo, mantenerse vivo lo suficiente.”

largo. Estas nuevas partículas también eran longevas, y por lo tanto también se les consideró “extrañas”, pero eran más pesadas que el protón. A principios de los años sesenta, entre los descubrimientos de nuevas partículas con rayos cósmicos y los que vinieron por medio de aceleradores, la simplicidad del mundo subatómico, formado sólo por el protón, el neutrón y el electrón, había sido reemplazada por lo que ha sido llamado el “zoológico de partículas”. Esta vez los teóricos vinieron al rescate, especulando que casi todas estas nuevas partículas podrían ser descritas como compuestas por solamente tres partículas hipotéticas: los quarks.

QUARK QUARK QUARK

Ya en 1954, el estadounidense Murray Gell-Mann y el japonés Kazuhito Nishijima habían especulado que un modo de explicar el largo tiempo de vida de las partículas extrañas (aunque sólo hablamos de milmillonésimas de segundo) era asumir que éstas llevaban, además de carga eléctrica, otra propiedad fundamental, llamada, por supuesto, “extrañeza”. Aunque suena trivial, la idea era que, de igual modo que la carga eléctrica se conserva, la extrañeza se tiene que conservar bajo las reacciones mediadas por la fuerza fuerte. Por lo tanto, las partículas más ligeras con extrañeza no pueden desintegrarse en otras partículas mediante la fuerza fuerte (lo cual les daría un tiempo de vida relativamente corto) y tienen que desintegrarse por medio de la fuerza débil que les permite sobrevivir por más tiempo. Unos años después, en 1961, el mismo Gell-Mann y el físico israelí Yuval Ne’eman, de manera independiente, usando ideas de simetría matemática, pudieron agrupar a las aproximadamente 30 partículas extrañas que interactuaban por medio de la fuerza fuerte en familias que contenían 8 o 10 miembros. Gell-Mann llamó a esta clasificación *The eightfold way* (el sendero óctuplo), una expresión que viene del budismo. Esta clasificación recuerda, pero a nivel subatómico, la tabla periódica de Mendeleev. Es más, tal como Mendeleev hizo con varios elementos químicos, Gell-Mann se atrevió a predecir no sólo la existencia de una nueva partícula que faltaba para completar uno de estos grupos, sino también sus propiedades. La llamó *omega menos* y debería tener una masa de aproximadamente 1.7 gigaelectronvolts, una unidad de carga eléctrica negativa, y un espín con valor $3/2$. En 1963, un grupo dirigido por Nick Samios, trabajando en el sincrotón de Brookhaven, detectó en su cámara de burbujas, después de revisar más de 50 mil fotografías, una partícula exactamente con estas propiedades. Esto

sugería que era muy posible que la simetría propuesta por Gell-Mann y Ne'eman fuera en realidad lo que gobernaba los patrones observados.

Vemos una vez más cómo los científicos que estudian la estructura básica de la materia se encontraron con nuevos patrones y nuevas interrogantes. La pregunta más importante estaba asociada, como en el caso de los elementos químicos, a la existencia de partículas más fundamentales que causarían esta periodicidad subatómica. Otra vez Gell-Mann, en Caltech, e independientemente su colega ruso George Zweig, demostraron matemáticamente que estos arreglos surgirían naturalmente de tres componentes básicos. Gell-Mann, que primero los llamó “quirks” (como curiosidades, en inglés), terminó bautizándolos como *quarks*. Esta palabra aparece en un párrafo de uno de los libros favoritos de Gell-Mann: *Finnegans wake*, del escritor irlandés James Joyce, cuya primera frase es “*Three quarks for Muster Mark*”.

Gell-Mann los bautizó como *up* (*u*, arriba) y *down* (*d*, abajo) y el tercero *strange* (*s*, extraño), por ser componente esencial de las partículas extrañas. Estos quarks debían tener carga eléctrica fraccionaria, el *up* de $+2/3$ de la carga del electrón, y el *down* y el *strange* de $-1/3$. Esto fue muy difícil de aceptar, pues nunca se habían observado partículas con carga fraccionaria. También, por supuesto, se necesitaban los correspondientes *anti-quarks*. Además, para resolver otro dilema de la física cuántica causado por la partícula omega-menos, que tenía que estar compuesta por tres quarks *strange* idénticos, se necesitó postular que estos quarks tenían que llevar una nueva carga cuántica, llamada *color*. A diferencia de la carga eléctrica, que puede ser positiva o negativa, el color puede tener tres valores (con sus respectivos anti-valores): rojo, azul y verde. Las combinaciones válidas de quarks eran las que formaban partículas de color neutro: las partículas de dos quarks, llamadas *mesones*, con el mismo color y anticolor, o partículas con tres quarks, llamadas *bariones*, cada quark con un color distinto. Recientemente se encontró evidencia experimental de lo que parecen ser partículas con cinco quarks, o *penta-quarks*.

Es importante notar que tal como Joyce llevó la literatura a los límites del idioma inglés, Gell-Mann trascendió los límites



Vista aérea del laboratorio Fermilab, en las afueras de Chicago, USA.

Es importante notar
que tal como Joyce llevó
la literatura a los límites
del idioma inglés, Gell-Mann
trascendió los límites
de la realidad física



Vista interior del diseño del futuro acelerador LHC en el laboratorio CERN en Europa.

En 1967, un nuevo acelerador lineal de electrones, de tres kilómetros de largo y con energía de 18 gigaelectronvolts, fue inaugurado en el SLAC

de la realidad física. La publicación de este modelo de quarks ocurrió al mismo tiempo que se descubrió la partícula omega-menos. Se cuenta que a partir de esto, los seminarios de física de esa época empezaron a sonar como las caricaturas del pato Donald.

¿Eran estos quarks una realidad física o simplemente un artificio matemático para describir las observaciones experimentales? La mesa estaba puesta para tratar de contestar esta pregunta. La posibilidad de encontrar estos quarks era decididamente atractiva y muchos grupos experimentales, trabajando con aceleradores, con rayos cósmicos o con lo que fuera, trataron de buscarlos y ver

si en las colisiones resultantes salía disparado algún quark.

Por varios años la cacería fue en vano. La sorpresa vino desde Stanford, en California, donde los especialistas en aceleradores se habían concentrado en crear haces muy energéticos de electrones y, de forma análoga a los microscopios electrónicos, se dedicaron a “iluminar” a los protones. En 1967, un nuevo acelerador lineal de electrones, de tres kilómetros de largo y con energía de 18 gigaelectronvolts, fue inaugurado en el SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*). Uno de los primeros experimentos, en 1968, fue dirigido por los físicos norteamericanos Jerome Friedman, Henry Kendall y el canadiense Richard Taylor. Inicialmente trataron de ver si estos electrones producían alguna partícula nueva. Pero un teórico, James Bjorken, los convenció de que movieran sus detectores y miraran qué pasaba a grandes ángulos con respecto a la línea de trayectoria de los electrones. El resultado fue sorprendente: ¡el número de electrones que emergía a estos ángulos fue diez veces mayor que el esperado! Fue algo muy similar al experimento de Rutherford con partículas alfa.

Richard Feynman explicó que esto podía pasar si el protón tenía subestructura formada de pequeños granos duros a los que llamó *partones*. Por mucho tiempo nadie se atrevió a relacionarlos con los quarks. No fue sino hasta 1974, con una nueva generación de experimentos usando haces de neutrinos y una cámara de burbujas de mil toneladas, en el CERN, que se entendió finalmente que estos partones tenían cargas fraccionarias y que había tres dentro de cada protón. Los quarks imaginarios de Gell-Mann se volvieron una realidad. Al explorar escalas de di-

mención más y más pequeñas, la naturaleza nos parece mostrar continuamente una gran riqueza de subestructuras. Kendall, Friedman y Taylor recibieron el premio Nobel en 1990 por el descubrimiento de los quarks, más de 20 años después de haber realizado el experimento.

ENCANTO, BELLEZA: $3 + 2 = 6 - 1$

Con el descubrimiento de que los protones están compuestos por entidades equivalentes a los quarks que propusieron Gell-Mann y Zweig, con el hecho de que los mesones y bariones descubiertos se clasifican en perfecto acuerdo con la simetría matemática de Gell-Mann y Ne'eman, y con el descubrimiento de la partícula omega-menos en Brookhaven, quedó claro que se podía explicar toda la materia conocida hasta 1974 por medio de cuatro leptones: el electrón, el muón, sus neutrinos correspondientes y tres quarks: *up*, *down* y *strange*. Pero la naturaleza continuó presentando sorpresas. Los físicos teóricos, ya desde 1964, “necesitaban” la posible existencia de un cuarto quark. Además de que estéticamente era preferible tener el mismo número de quarks que de leptones, las teorías de unificación de la fuerza electromagnética y la débil funcionaban bien con quarks, pero sólo si había cuatro. Sheldon Glashow lo llamó *charm* (como amuleto, pero conocido mejor como “encanto”, tanto en inglés como en español). Experimentalmente no existía la necesidad de otro quark para explicar las partículas conocidas; además, nadie sabía dónde buscarlo. Pero no sólo los teóricos se mantenían ocupados: los experimentalistas seguían inventando nuevas máquinas para lograr más altas energías y haces más y más intensos.

Estos dos parámetros son clave en los descubrimientos de nuevas partículas. Al tener más energía, simplemente tenemos, como ya lo dijimos, acceso a partículas más pesadas. Expandir la frontera de la energía nos puede revelar mundos a los que no teníamos acceso anteriormente. Pero hay otra forma de también hacer descubrimientos a partir de una energía fija. Muchas veces, los procesos en los que podríamos estar interesados ocurren con una frecuencia demasiado pequeña en relación con procesos menos interesantes. En estos casos, es muy difícil discernir si algo nuevo o interesante sucedió. Para poder dar una respuesta más definitiva se necesita acumular muchísimos datos. Es por esto que también es importante lograr haces de partículas más y más intensos. Para un acelerador existente que sólo alcanza una cierta energía, éste es un modo muy loable de mantenerlo competitivo en posibles descubrimientos.

Los físicos teóricos,
ya desde 1964,
“necesitaban” la posible
existencia de un cuarto quark

Una forma de alcanzar mayores energías es construyendo aceleradores en los cuales, en vez de que los haces de partículas choquen con un blanco fijo, choquen el uno con el otro. En este caso, la energía disponible para crear nuevas partículas es directamente proporcional a la energía de los haces. Está claro que se puede llegar a energías mayores de esta forma, pero el problema es que tecnológicamente es mucho más difícil hacer chocar dos haces de partículas del grosor de un cabello humano que viajan a la velocidad de la luz, que simplemente dirigir un haz hacia un trozo de metal. Sin embargo, los “colisionadores” de partículas son

ahora muy comunes, y los hay de todos tipos: electrones contra positrones, protones contra antiprotones, protones contra protones y hasta electrones contra protones.

Los primeros colisionadores fueron de electrones contra positrones. Una versión avanzada de este tipo de aceleradores precipitó lo que se llamó la “revolucion de noviembre”: en 1974 un grupo en Stanford, dirigido por Burt Richter, estaba haciendo experimentos con el nuevo colisionador llamado SPEAR (*Standard Positron-Electron Asymmetric Rings*). El experimento consistía en variar la energía del acelerador y medir la frecuencia con la que sus

Richter y Ting recibieron
el premio Nobel
por el descubrimiento
del cuarto quark
tan sólo dos años después,
en 1976

detectores registraban estos choques. Al estudiar la región de 3.1 gigaelectronvolts, el detector empezó a “volverse loco”. Era la señal de que estaban produciendo algo nuevo en forma copiosa; debido a la producción de una nueva partícula (una “resonancia”), la llamaron *psi* (ψ). El 11 de noviembre, ya con una primera versión del artículo que anunciaba este descubrimiento, Richter se enteró de que el equipo dirigido por Sam Ting (que trabajaba en Brookhaven estudiando la frecuencia de producción de pares de electrones y positrones en colisiones de protones en berilio) también había descubierto una resonancia con la misma masa 3.1 gigaelectronvolts, y también tenía una primera versión de una publicación. Sam Ting le llamó *J* a su partícula. Una vez descubierta esta partícula, que ahora se conoce como J/ψ se pudieron hacer muchísimos estudios de su tiempo de vida, sus formas de desintegración, números cuánticos, estados excitados, etcétera. La conclusión inevitable fue que esta partícula estaba formada por el nuevo quark *charm* y por su antipartícula *anticharm*. Fue tan contundente la evidencia, que Richter y Ting recibieron el premio Nobel por el descubrimiento del cuarto quark tan sólo dos años después, en 1976.

En 1975, el mismo experimento en SLAC, durante la investigación de los estados excitados de la partícula ψ permitió otro descubrimiento casi igual de dramático: encontró un tercer leptón, bautizado como *tau* (τ). No obstante, Martin Perl sí tuvo que esperar un poco más, 20 años, para recibir el premio Nobel por el tau en 1995. El descubrimiento del tau demostró que existía una tercera generación de leptones. Para restaurar el equilibrio, una vez más, se necesitaba también una nueva generación de quarks, y su búsqueda se inició de inmediato, extendiéndose las técnicas usadas para descubrir al quark *charm*. Inicialmente se les llamo *truth* (verdad) y *beauty* (belleza), y más tarde simplemente como *top* (cima) y *bottom* (fondo).

Leon Lederman y sus colaboradores, ahora trabajando en el laboratorio de Fermilab, cerca de Chicago, donde se había construido un aparato capaz de acelerar protones a 400 gigaelectronvolts (convirtiéndolo en el acelerador más potente del mundo) siguieron haciendo experimentos estudiando pares de muones que resultaban de los choques de estos protones con blancos fijos de metal. A mediados de 1977 empezaron a ver con claridad un pico en el espectro de masa invariante en la región de 9.5 gigaelectronvolts. Un análisis más detallado mostró que en realidad había dos picos, o resonancias; las llamaron *upsilon* y *upsilon-prima*. Pronto fue evidente que la historia de J/ψ se repetía. Otros laboratorios pudieron confirmar esta observación y, una vez más, se hicieron estudios de los números cuánticos,

desintegraciones, tiempo de vida, etcétera. Se pudo concluir que esta partícula estaba formada por un nuevo quark, con su correspondiente antiquark, y que éstos tenían carga eléctrica de $-1/3$. A este quark se le denominó *b* (por *bottom*). Eventualmente se fueron descubriendo muchos mesones formados por este nuevo quark, que tenía una masa de casi 5 gigaelectronvolts.

¡Por supuesto, a partir de entonces comenzó una nueva carrera para encontrar a la pareja del quark *bottom*: el quark *top*!

EL DESCUBRIMIENTO DEL QUARK TOP

Desde 1978 y hasta 1988, en todos los aceleradores de alta energía del mundo se trató en vano de encontrar a este nuevo quark. Dado que este sexto quark sería parte del modelo estándar, era posible predecir, dependiendo de su masa, la frecuencia con la cual se tendría que producir en las distintas colisiones de partículas en cada acelerador. Cuanto más masiva sea, la partícula se produce con menor frecuencia. Además, como explicamos anteriormente, si los aceleradores no contaban con suficiente energía, el quark *top* simplemente no sería producido. Como resultado, lo único que se pudo hacer en cada experimento fue concluir que la masa del quark *top* tendría que ser mayor que un valor dado. Este valor mínimo fue creciendo año con año, hasta llegar, en 1988, a ser 41 gigaelectronvolts. ¡Esta partícula sí que era excepcionalmente pesada!

En este mismo año, el nuevo colisionador de protones y anti-protones de Fermilab, el Tevatrón, con seis kilómetros de circunferencia, comenzó a funcionar en pleno. ¡La energía de estas colisiones alcanzó primero 630 y después 1800 gigaelectronvolts! Alrededor del punto de colisión se había construido un gigantesco detector de partículas de tamaño equivalente a un edificio de tres pisos. Este detector fue construido por una

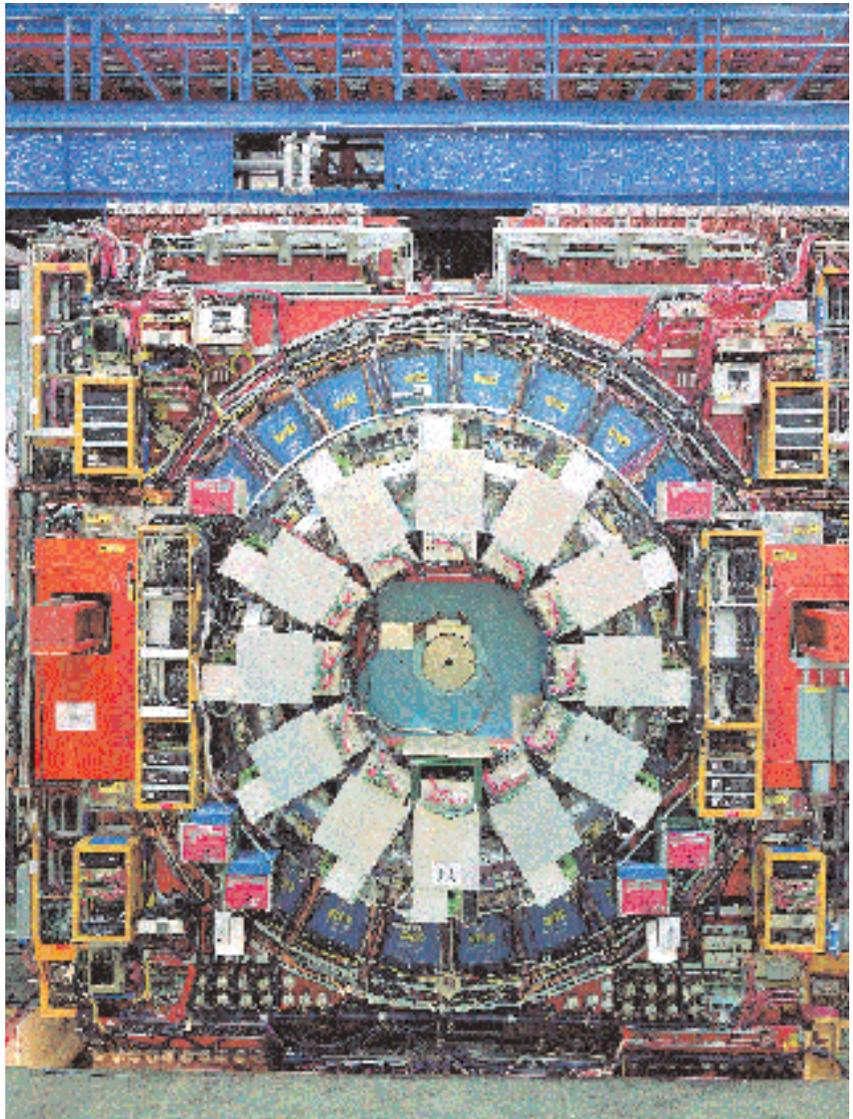


Figura 2. El detector CDF en Fermilab. La primera evidencia de la existencia del quark top se originó en este experimento.

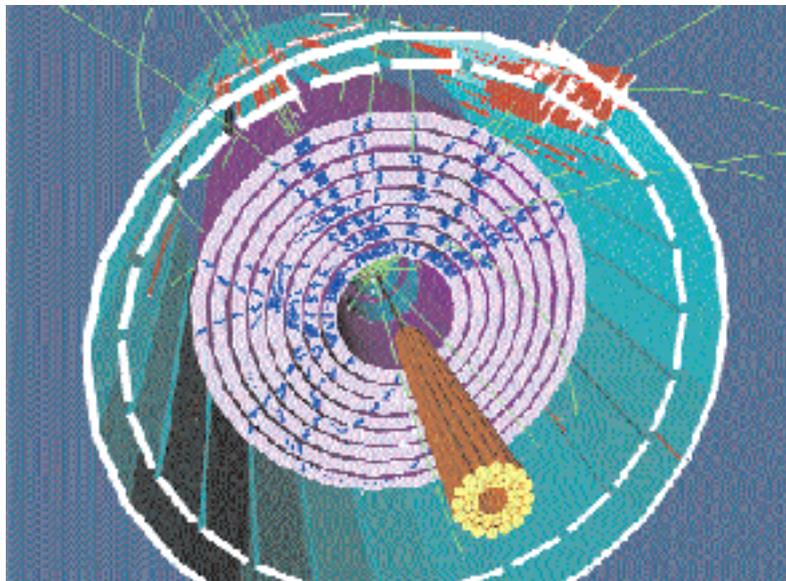


Figura 3. Reconstrucción, por medio de computadora, de una colisión entre un protón y un anti-protón en el detector CDF.

Ningún acelerador en el mundo podía competir con el Tevatrón (el máximo límite de masa al que llegó CERN fue de 60 gigaelectronvolts)

colaboración internacional de universidades y laboratorios llamada CDF (*Collider Detector at Fermilab*). Es imposible describir aquí al detector en detalle, pero basta con decir que es capaz de medir con gran precisión las trayectorias de las centenas de partículas que se originan en las colisiones, medir su energía y revelar su identidad (figura 2). Para esto se necesitan millones de segmentos de detección. Dado que aproximadamente hay cerca de un millón de choques por segundo, es necesario filtrar, registrar y analizar datos a velocidades increíbles, lo cual requiere de los avances más nuevos en las ciencias de la electrónica y la compu-

tación. La figura 3 muestra cómo se reconstruye por medio de computadoras una de estas colisiones (llamadas “eventos”). Después de tomar datos por dos años, un sólo evento, entre decenas de millones estudiados, parecía ser causado por la creación de un quark *top* y su correspondiente anti-quark. ¡Pero lo único que se pudo concluir definitivamente en 1990 fue que la masa del quark *top* tenía que ser mayor que 91 gigaelectronvolts!

Ya en este entonces, ningún acelerador en el mundo podía competir con el Tevatrón (el máximo límite de masa al que llegó CERN fue de 60 gigaelectronvolts). La competencia era ahora entre el experimento de CDF y un nuevo experimento en otro punto de colisión en el acelerador, llamado D0. Yo me uní al experimento CDF en 1990 y me tocó participar de un modo muy intenso en esta competencia. Por dos años nos dedicamos a perfeccionar nuestros detectores y después a tomar datos. Al final de los primeros dos años, los datos de CDF parecían incluir finalmente evidencia de que se habían producido quarks *top* en las colisiones de protones y anti-protones. Esta evidencia nos permitió hacer la primera medición de la masa de este quark: ¡174 gigaelectronvolts!

Dado que había muy pocos eventos que se podían atribuir al quark *top* (sólo doce) y dado que este quark, por ser tan pesado, se producía sólo en una de cada 10 mil millones de colisiones, era muy difícil concluir estadísticamente, y sin lugar a duda, que habíamos definitivamente descubierto al quark *top*. La probabilidad de que otro tipo de procesos falseara nuestra evidencia era de uno en 400, una apuesta más que razonable en cualquier otro ámbito, pero no en esta ciencia tan fundamental. Así que, des-

pués de grandes discusiones entre los experimentalistas, decidimos poner en el título de nuestra publicación la palabra “evidencia” en vez de “descubrimiento”. Este artículo, publicado en abril de 1994, resultó ser de 152 páginas. Ahí describimos con detalle toda la metodología usada para analizar nuestros datos.

El experimento D0, que era más joven y tenía un detector con algunas deficiencias, no observó ninguna señal clara del quark *top* y concluyó que su masa era mayor que 131 gigaelectronvolts. No fue sino hasta marzo de 1995, cuando tanto el CDF como el D0 reunieron suficientes datos para concluir definitivamente que habíamos descubierto al quark *top*.

Yo tuve la suerte de haber dirigido a uno de los grupos de CDF trabajando en esta increíble aventura. A partir de ese momento se nos abría una área de investigación científica completamente nueva. ¿Qué misterios nos esperan? La figura 4 resume, sin palabras, lo que pasamos en esa época.

Bibliografía

- Cahn, G. y M. Goldhaber (1989), *The experimental foundations of particle physics*, Cambridge University Press.
- Fraser, Gordon (1997), *The quark machines: how europe fought the particle physics war*, Institute of Physics Publishing Inc.
- Fraser, Gordon Egil Lillestol e Inge Sellevag (1995), *The search for infinity: solving the mysteries of the universe*, Facts of Life, Inc.



Figura 4. La noticia del descubrimiento del quark *top* en Fermilab, tal y como apareció en muchos de los periódicos alrededor del mundo.

Jacobo Konigsberg Levy es profesor de investigación en el Departamento de Física de la Universidad de Florida y participa desde 1990 en la Colaboración Internacional (CDF) que descubrió en 1995 el quark *top*. Obtuvo su doctorado en la Universidad de California en Los Ángeles y actualmente es líder del grupo que estudia la física del quark *top* en la colaboración CDF en Fermilab.
konigsberg@phys.ufl.edu