




El Gran Colisionador de Hadrones

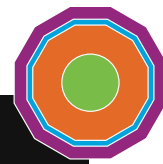
Verónica Guerrero Mothelet

Imagen © CERN

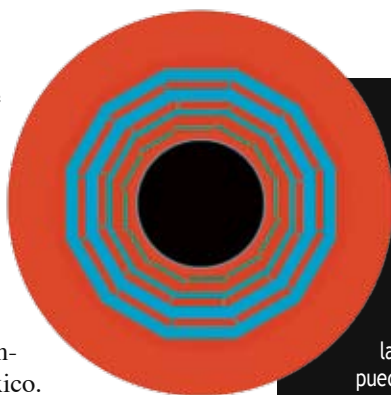
**Un instrumento gigantesco
para desentrañar los
misterios de lo
más pequeño.**



EN JUNIO DE este año, después de muchos retrasos, empezará a funcionar el acelerador de partículas más grande y potente del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (o LHC, del inglés *Large Hadron Collider*), a un costo que podría llegar a los 10000 millones de dólares. Se trata del dispositivo experimental más caro de la historia; con él se espera hallar el camino que debe seguir la física para entender más íntimamente



el Universo. Este proyecto se concibió en los años 70 y fue aprobado en 1994; se trata de una aventura internacional en la que participan varios centros de investigación de México.



Un acelerador, como su nombre indica, acelera partículas cargadas por medio de campos eléctricos y magnéticos. Las partículas luego chocan entre sí y de estas colisiones surgen nuevas partículas.

Grandes esperanzas

El LHC se construye a varias decenas de metros de profundidad, en la frontera entre Francia y Suiza, cerca de Ginebra. Este acelerador de partículas consiste en un túnel circular de 27 kilómetros de circunferencia, con tramos que se encuentran a distintas profundidades (entre 50 y 175 metros). Por el túnel corren dos tubos dentro de los cuales circularán dos haces de partículas en sentidos opuestos. Las partículas, que van aumentando de velocidad con cada vuelta, se mantienen en trayectorias circulares por medio de enormes imanes superconductores. Cuando se alcanza la energía deseada, los haces se desvían y se hacen chocar entre sí en puntos específicos del acelerador, donde se encuentran los detectores. Al chocar con energías altísimas estas partí-

La búsqueda de la unidad

La física busca entender el Universo deduciendo leyes generales, cuanto más generales mejor. Por ejemplo, muchos físicos se dedican a buscar los ingredientes básicos de todo lo que existe. En esa búsqueda se han topado con patrones en el comportamiento de las cosas —fenómenos que se repiten y que pueden servir para describir la naturaleza y hacer predicciones—. Esos patrones son las leyes. Los físicos siempre han buscado reducir al mínimo el conjunto de leyes físicas que necesitan para entender el Universo, en otras palabras, alcanzar una visión unificada de la naturaleza.

Los primeros filósofos de la Grecia clásica ya se preguntaban cuál es la materia primigenia a partir de la cual se puede formar todo lo demás. Tras la aparente diversidad de manifestaciones, pensaban, debía ocultarse una unidad fundamental. Desde entonces, y sobre todo en los últimos cuatro siglos, los físicos han pugnado por esa unidad. Cada nueva síntesis ha ampliado un poco más nuestra comprensión de la constitución y funcionamiento del Universo. Hacia el final del siglo XVII, Isaac Newton propuso que la caída de los objetos en la Tierra, las mareas y las órbitas de los planetas eran distintos aspectos de un solo fenómeno: la fuerza de gravitación universal. Casi 200 años después, James Clerk Maxwell sintetizó en una sola teoría los

fenómenos de la electricidad y el magnetismo. En 1967, los físicos Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam propusieron, cada uno por su cuenta, una teoría precisa que une el electromagnetismo de Maxwell con la llamada *fuerza débil*, un tipo de interacción entre los componentes del núcleo atómico. La obra de Glashow, Weinberg y Salam, conocida como *teoría electrodébil*, impulsó, en la década de 1970, el desarrollo del Modelo Estándar, la teoría más general de la física, que describe las partículas fundamentales de que se compone todo en la naturaleza y tres de las cuatro “fuerzas” por medio de las cuales interactúan esas partículas. En el Modelo Estándar las fuerzas entre objetos operan por intercambio de algún tipo de partículas entre ellos.

La teoría electrodébil está muy bien fundamentada. En 1983 se detectaron las partículas mediadoras de la fuerza débil, llamadas bosones W y Z, predichas por la teoría. Sin embargo, los valores de sus masas —y la existencia misma de la masa en general— siguen siendo un enigma. ¿Por qué tienen esos valores precisos las masas de las partículas fundamentales? Y más allá de eso: ¿de dónde sale la masa? En el Modelo Estándar se plantea la existencia de una partícula especial que, al interactuar con las otras, las dotaría de masa. Esa partícula se conoce como *bosón de Higgs* y jamás ha sido observada.

culas se destruyen y producen partículas secundarias. Los físicos recogen los datos de la colisión por medio de distintos detectores especiales, y los comparan con las predicciones de las hipótesis o teorías que desean evaluar.

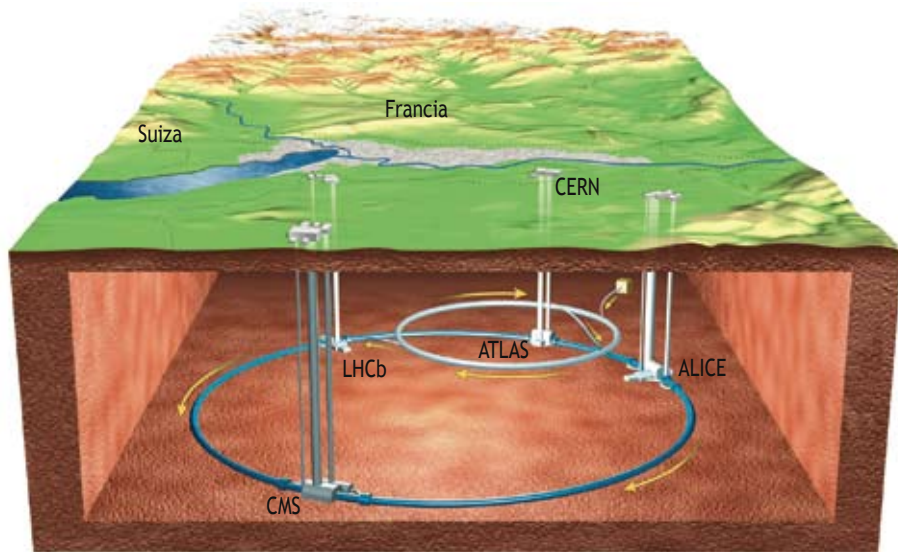
Los imanes superconductores que mantienen a las partículas en su curso operan a

una temperatura de cuatro kelvin, es decir, cerca de 270 °C bajo cero. A esa temperatura sus componentes pueden conducir electricidad sin perder energía en forma de calor (sin resistencia). Empero, al chocar los haces de partículas se producirán temperaturas de miles de millones de grados, como las que debieron existir en las primeras fracciones de segundo después del origen del Universo, hace unos 13 700 millones de años, cuando la materia posiblemente existía en una especie de sopa de partículas elementales en libertad.

El LHC es el proyecto más ambicioso realizado hasta ahora por el CERN, siglas en francés de la Organización Europea de la Investigación Nuclear, antes Consejo Europeo para la Investigación Nuclear. El CERN se fundó en 1952 y se ha convertido en el centro mundial de la física de partículas. Allí trabajan científicos de los 20 estados miembros de la organización, así como de muchos otros países invitados.

El Modelo Estándar, obra en construcción

Se espera que con los experimentos que se realizarán en el LHC puedan solucionarse varios problemas del llamado Modelo Es-



El túnel circular de 27 km del LHC (azul) se ubica en la frontera entre Suiza y Francia; los detectores principales se localizan en cavernas subterráneas conectadas a la superficie.

Imagen © CERN



Foto © CERN

Vista aérea del área que ocupa el LHC; se aprecia Ginebra, el Lago Lemán y, al fondo, los Alpes franceses y el Mont Blanc.

tándar: la teoría más general de la física, que describe toda la materia y fuerzas del Universo (excepto la fuerza de gravedad), y explica muchas de nuestras preguntas sobre su estructura e interrelación. Según esta teoría, que se gestó durante los años 70 y 80, la materia prima de todo cuanto existe está hecha de seis tipos de unas partículas llamadas quarks y seis de otras conocidas como leptones (el electrón es la más conocida de éstas)... ¿o tal vez no? Mejor vayamos por partes. Una manera sencilla de acercarse a la descripción del Modelo Estándar es dividiéndolo en tres secciones: partículas de materia, partículas mediadoras de fuerzas y el famoso bosón de Higgs, que lleva ese nombre porque fue previsto en 1964 por el físico británico Peter Higgs.

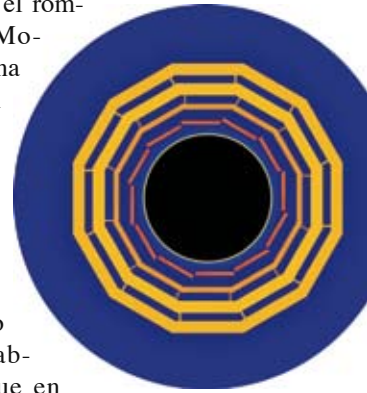
Los átomos están formados por protones, neutrones y electrones. Los protones y neutrones, a su vez, están compuestos de partículas más elementales, los quarks. Los quarks y los leptones son partículas “puntuales”, o sea, sin dimensiones, como los puntos. A diferencia de los leptones, que pueden existir de forma individual, los quarks sólo se encuentran formando par-

tículas compuestas, que se conocen como *hadrones* (los protones y los neutrones son dos tipos de hadrones).

Las partículas tienen cuatro formas básicas de interactuar (de afectarse unas a otras), llamadas interacciones o *fuerzas fundamentales*: la gravedad y la fuerza electromagnética, que operan a larga distancia y que percibimos en el mundo macroscópico en el que vivimos; y dos fuerzas que sólo actúan en la escala del núcleo atómico: la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte. El Modelo Estándar describe sólo las tres últimas; la gravedad no se ha podido incorporar a la descripción unificada de partículas e interacciones. Las fuerzas en el Modelo Estándar se comunican por medio de partículas portadoras, como si las partículas en interacción se lanzaran bolas de billar entre ellas para desviarse. Las partículas portadoras son el fotón para el electromagnetismo, los bosones *W* y *Z* para la interacción débil y los gluones para la fuerte. Si la gravedad se incorpora al modelo, estaría mediada por partículas llamadas gravitones, que aún no se han detectado en la naturaleza.

Pero quedan aún muchas piezas sueltas en el rompecabezas del Modelo Estándar. Una de ellas, central para profundizar en nuestro conocimiento de la naturaleza de las cosas, es el misterio de la masa. Llamarle misterio puede parecer absurdo, puesto que en la vida diaria todo tiene masa. El origen del problema es que, de acuerdo con el Modelo Estándar, todas las partículas verdaderamente fundamentales deberían carecer de masa. Sin embargo, salvo excepciones como el fotón, todas las partículas la tienen, hecho que la teoría debería poder explicar.

Hoy en día, la hipótesis más favorecida para explicarlo se conoce como *mecanismo de Higgs*. Éste tiene que ver con lo que los científicos llaman el *campo de Higgs*, un campo (como el campo gravitacional, digamos) que está presente en todo el espacio. Al interactuar con el campo de Higgs, las



Nueva red de cómputo

Para poder manejar y examinar los millones de datos que producirá el Gran Colisionador de Hadrones se creó la “Grid”, una red de cómputo distribuida por el mundo, cuya capacidad permite enviar datos y analizarlos con mucha mayor eficiencia.

A diferencia de los experimentos de la generación anterior, cuyos datos debían guardarse y transportarse en cintas para luego analizarlos, se han desarrollado nodos de cómputo a lo largo del planeta y un *software* que hace compatible la comunicación. En contraste con la Web, también desarrollada en el CERN, que contiene una gran cantidad de información, la Grid representa más bien una enorme capacidad de cómputo, ya que empleará los recursos de miles de computadoras en muchos países, cuyos datos estarán a disposición de todos los investigadores.

De hecho, en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM ya funciona el primer nodo latinoamericano de la Grid, de nombre *Tochtli* (conejo, en náhuatl). Formado por un cúmulo de computadoras personales, se enlaza a la red UNAM, de donde se integra al mundo por Internet 2.

El concepto tiene consecuencias importantes en otros campos. En Europa, la Grid fue la inspiración de la red Mamogrid, que maneja una enorme cantidad de datos y digitaliza información sobre mamografías y cáncer de mama en ese continente.

partículas fundamentales adquieren masa. Podemos imaginarlo como un inmenso platón de crema en el que se baña una fruta. La fruta sería la partícula y la crema sería la masa que adquiere al interactuar con el campo de Higgs. O bien como una celebridad tratando de trasladarse entre una multitud de admiradores; en ese caso, los *fans* son como el campo de Higgs y el artista como la partícula, que batalla para desplazarse mientras sus admiradores le piden autógrafos. Como todo campo, el de Higgs debe tener una partícula mediadora: el bosón de Higgs. Encontrarlo sería esencial para descubrir si realmente existe tal campo y así aclarar el enigma de la masa. Para conseguirlo, los físicos han puesto su confianza en el Gran Colisionador de Hadrones.

Mexicanos en el CERN

Actualmente, está casi concluida la construcción de cinco detectores del LHC, llamados ALICE, ATLAS, CMS, LHCb y TOTEM, que tomarán datos de distintas clases de experimentos con partículas en colisión. El experimento ALICE, cuyo objetivo es estudiar los fenómenos que se producirán cuando miles de choques de partículas reproduzcan las condiciones de los primeros momentos del Universo, es también el proyecto que concentra la ma-



Foto © CERN

Vista del túnel.

yor parte del esfuerzo mexicano. No es la primera vez que participan investigadores mexicanos en proyectos del CERN, pero las características del LHC hacen de ésta la colaboración más amplia e importante para la ciencia de nuestro país.

Gerardo Herrera Corral es jefe del Departamento de Física del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Na-

cional. Herrera Corral cuenta que en México se diseñaron y construyeron dos de los 16 dispositivos que forman el experimento ALICE: el detector VO y el detector de rayos cósmicos, llamado ACORDE (por *ALICE Cosmic Ray Detector*). Herrera Corral añade que “varias instituciones de diferentes partes del mundo trabajan para desarrollar alguno de los 16 sistemas del ALICE. Al final, todos llegamos con nuestras piezas y las ensamblamos para que funcionen en conjunto”.

En ALICE participaron los institutos de Ciencias Nucleares (ICN) y de Física (IF) de la UNAM, y las unidades de Mérida y de Zacatenco del CINVESTAV, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), y la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS).

El detector VO, un disco de plástico de aproximadamente un metro de diámetro y formado por pequeñas celdas y fibras ópticas, se construyó en los talleres del Instituto de Física de la UNAM. Este detector, señala, Herrera Corral, es muy importante para todo el ALICE, “porque constituye parte de lo que llamamos el ‘sistema de disparo’”. Esto significa que es el dispositivo más veloz del experimento. Cuando una partícula atraviesa el plástico, se produce luz que es recolectada por las fibras y llevada hasta un tubo fotomultiplicador que la convierte en una señal electrónica que contiene información importante acerca de la partícula y la colisión en la que se produjo.

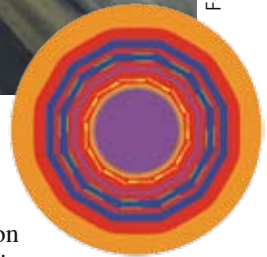


Foto © CERN

Prototipo del detector VO, diseñado y construido por un equipo de científicos mexicanos.

El ALICE deberá detectar y analizar unos 800 millones de colisiones por segundo, y no sería extraño que muchas de ellas se produzcan fuera de la región esperada o tengan algún otro defecto desde el punto de vista del experimento. El VO permitirá aceptar o rechazar un evento o colisión en cuestión de millonésimas de segundo. “En ese caso, enviará una señal, con la que los demás dispositivos del ALICE procederán a efectuar sus propias mediciones de la interacción”, dice Herrera Corral.

“El detector ACORDE fue construido en el taller del Departamento de Física del CINVESTAV”, dice el investigador, “pero parte de los paneles y de su sistema electrónico se fabricaron

en el ICN-UNAM, y los estudios de simulación se realizaron en la BUAP. En la instalación colaboraron las universidades de Sinaloa y de Puebla”.

Arturo Menchaca Rocha, investigador del Instituto de Física de la UNAM, precisa que ambos detectores —el ACORDE y el VO— ya se encuentran en el CERN. Explica que el proyecto ALICE partió de un detector ya existente. “El ACORDE utiliza partes de otro detector que ya estaba allí, el L-3: un imán que pertenecía al acelerador que es el antecesor del LHC, conocido como LEP (*Large Electron-Positron Collider*), un colisionador de positrones y electrones”. El túnel donde se aloja el LHC fue construido originalmente para el LEP, el cual dejó de funcionar en 2000. Ese instrumento estaba forrado de detectores que eliminaban la influencia de los rayos cósmicos, que traspasan todo y pueden contaminar los experimentos aunque éstos se realicen a más de 80 metros bajo tierra. “Para el ALICE se recuperó y montó ese detector”, señala



El imán L-3 del proyecto ALICE.

Foto © CERN

Menchaca. El ACORDE es para evitar que los rayos cósmicos interfieran con los experimentos del ALICE, lo que consigue detectándolos y eliminándolos de los datos de la colisión. Menchaca señala que el detector podría usarse para estudiar los rayos cósmicos mientras no se esté utilizando para la colisión de partículas.

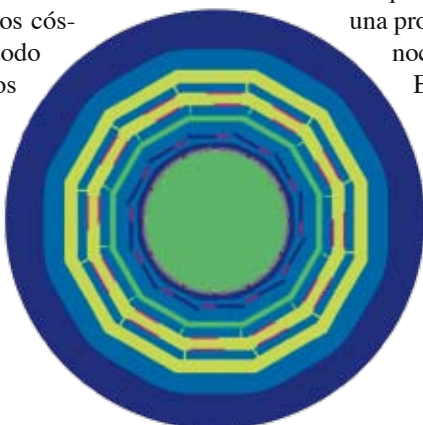
El quark, la partícula muégano

El proyecto ALICE buscará un nuevo estado de la materia conocido como *plasma de quarks y gluones*. Menchaca dice: “El modelo de los quarks (que forma parte del Modelo Estándar) ha sido muy útil para describir la estructura de las partículas más pequeñas. Pero, aunque funciona muy bien, tiene el problema de que nadie ha visto un quark solo”. Esto se debe a una propiedad de los quarks conocida como *confinamiento*.

El confinamiento funciona así: hay partículas hechas de dos quarks, llamadas *mesones*, y otras de tres quarks, conocidas como *bariones*. Los mesones

y los bariones forman la categoría de las partículas llamadas en conjunto *hadrones*. Los quarks no pueden salir del hadrón que forman. Están confinados porque la fuerza que los une (la fuerza nuclear fuerte) funciona al revés de los otros campos conocidos: en lugar de reducirse la fuerza con la distancia, aumenta. Así, cuando uno intenta separar los quarks, crece la fuerza que los une, pero ésta se reduce cuando se les obliga a acercarse entre sí. Los físicos usan una analogía para explicarnos esta extraña propiedad: imagínense que los tres quarks de un protón, por ejemplo, están unidos con ligas elásticas. Cuando los quarks están muy juntos es como si las ligas estuvieran flojas; pero cuando los quarks se separan, los elásticos se tensan y les impiden llegar muy lejos.

Menchaca añade que “lo más frustrante es que los quarks tienen una propiedad que a los físicos les interesa mucho estudiar, que se conoce como ‘color’”. Al igual que otra característica de los quarks, llamada “sabor”, este color no tiene nada que ver con nuestros sentidos; es sólo un modo de nombrar entidades muy abstractas. El investigador explica que se llama así porque



¿Un acelerador en tu casa?

Por extraño que parezca, no sólo en los grandes centros como el CERN existen aceleradores de partículas. También podemos encontrar estos aparatos muy cerca de nosotros, aunque se trata de aceleradores de bajas energías, principalmente de electrones. Son, por ejemplo, los televisores, o los monitores tradicionales de la computadora, ambos con tubos de rayos catódicos; o bien, los equipos de rayos X.

sigue reglas que se parecen a las reglas de los colores. Los bariones (tríos de quarks) deben contener un quark de cada color para quedar “incoloros”, como sucede con los colores primarios, que al combinarse dan el color blanco. “Pero ahí termina el parecido”, advierte Menchaca Rocha. Asimismo, cuando un quark hace pareja con un anti-quark para formar mesones, la unión entre el color de una y el “anti-color” de la otra da también una combinación “blanca”.

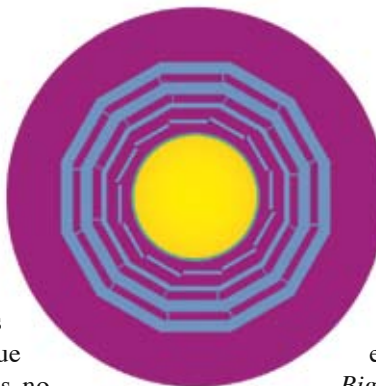
El color de los quarks combinados no puede apreciarse, por lo que es preciso encontrar la forma de separarlos para conocer sus características. Como esto no ha sido posible, ahora se ha propuesto hacer lo contrario: presionarlos hasta que se produzca una densidad tal, que los quarks comiencen a moverse libremente. De este modo, si consiguiera formarse una masa muy compacta de hadrones, se crearía un plasma de quarks y gluones (las partícu-

las que funcionan como el pegamento de los quarks). Arturo Menchaca señala que no es la primera vez que se ha intentado. “En Estados Unidos se construyó un acelerador más o menos con ese fin, pero resultó que la energía de las colisiones no era suficiente”. Eso es lo que se quiere remediar con el LHC.

Otros misterios

Así pues, los físicos esperan con impaciencia que el LHC empiece a operar. Además del bosón de Higgs y de las propiedades de los quarks emancipados, hay otros enigmas, nada pequeños, que esperan también su solución.

Las partículas elementales se pueden clasificar de muchas maneras, según distintas propiedades (por ejemplo, las que componen la materia ordinaria se pueden dividir en quarks y leptones, como ya vimos). Pero una dicotomía especialmente importante es la que existe entre las partículas llamadas *fermiones* y las partículas conocidas como *bosones*. La diferencia entre estas dos clases de partículas tiene que ver con una característica llamada *spin* (palabra que se suele castellanizar como *espín*). Esta característica determina cómo se comportan las partículas colectivamente. Dicho de una



manera muy simple, los bosones pueden aglomerarse pero los fermiones tienden a evitarse. En su afán unificador, los físicos se han imaginado que en las condiciones del

Big Bang no había diferencia entre bosones y fermiones;

eran, en cierta forma, lo mismo. Esta idea se conoce como *supersimetría*, e implica la existencia de toda una familia de partículas que se podrían producir en las colisiones que ocurrirán en el LHC. Se llaman *partículas supersimétricas*, y la idea les gusta a muchos físicos porque, si fuera verdad, haría la física muy estética. Pero, a pesar de la predicciones, hasta ahora nadie las ha visto. El experimento ATLAS del LHC buscará las partículas supersimétricas.

Asimismo, muchos físicos tienen la esperanza de realizar el sueño de Einstein: elaborar una descripción física completa que sí incluya a la gravedad, descripción a la que a veces llaman Teoría de Todo. Ya hay candidatos. Las teorías más viables implican que, en la escala más pequeña, el Universo no tiene sólo tres dimensiones espaciales y una temporal, sino muchas dimensiones espaciales que no percibimos por diversas causas (véase “La física pende de una cuerda”, *¿Cómo ves?*, No. 108). El LHC podría revelar también si existen o no esas dimensiones extra.

Ya sea que los físicos de partículas (o de altas energías) encuentren o no el bosón de Higgs, con seguridad los experimentos que se lleven a cabo en el acelerador más grande del mundo dirán mucho sobre el camino que debe seguir la física en adelante. Hasta hoy, el Modelo Estándar es su orgullo; pero, como toda teoría de la física, un día será insuficiente (de hecho, ya lo es, porque en su descripción de las fuerzas no incluye la gravedad). En tal caso, los científicos no se darán por vencidos. Regresarán a sus escritorios, pizarrones y computadoras, y volverán a plantearse cuál puede ser la relación entre lo más pequeño y el mundo macroscópico. ●

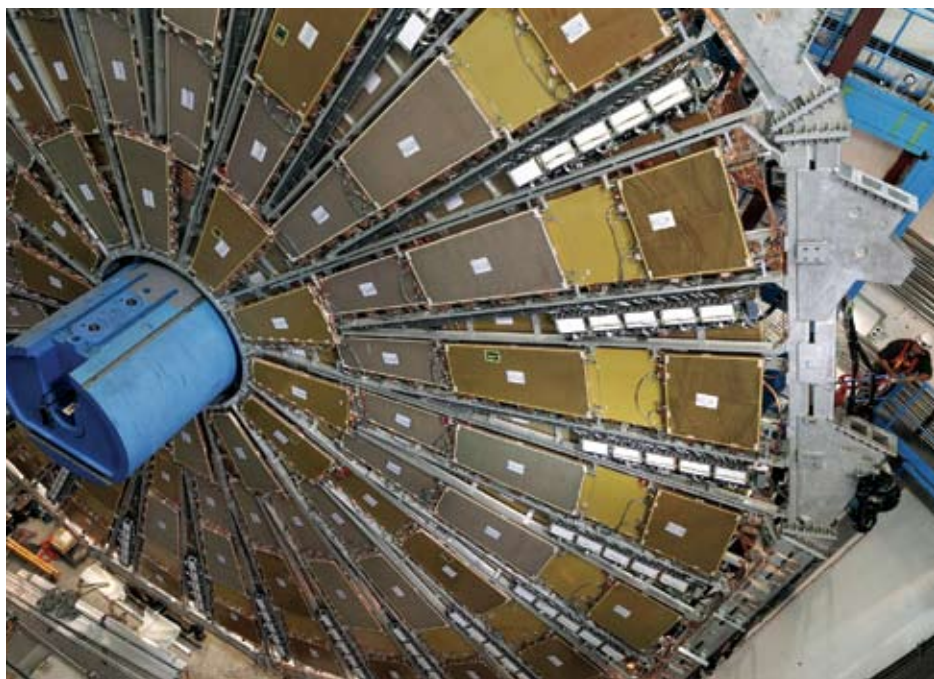


Foto © CERN

El disco TGC-1-C, parte del proyecto ATLAS, contiene múltiples cámaras, que se emplearán para medir la trayectoria y energía de partículas elementales.

Verónica Guerrero es periodista, divulgadora y traductora, publica artículos e imparte talleres sobre los nuevos paradigmas de la ciencia.