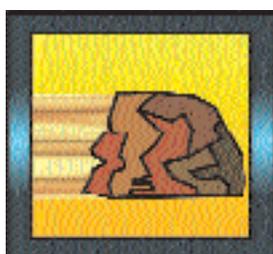


La materia en condiciones extremas: el proyecto ALICE



Físicos mexicanos participan en la construcción del detector de partículas más rápido del mundo: el proyecto ALICE. Con él se podrían recrear fenómenos que nos acerquen más al conocimiento del origen del universo.

Gerardo Herrera Corral

En el principio era la nada. Una nada absoluta que escapa a nuestros sentidos y a todo esfuerzo humano por atraparlo en un pensamiento. Podemos acudir a la imaginación para viajar rápidamente a los espacios siderales, en un intento por hacernos de una idea de la nada. En este intento pensamos en las gigantescas y gélidas regiones intergalácticas del universo, pero en realidad eso no ayuda, pues aún ahí se encuentran átomos dispersos y una pálida luz que todo lo llena. Más aún, esas regiones casi vacías son parte de la estructura invisible del universo que está hecha de espacio y de tiempo. No inmersas en él, sino parte misma de eso que habitamos como lugar y percibimos como tiempo. En la nada que era el principio no había espacio, y el tiempo no transcurría.

En el principio no había nada. No sabemos por qué, pero repentinamente, y desde la na-

da, apareció el universo en que vivimos. Hoy tenemos razones para pensar que el universo fue creado en un gran estallido: el *big bang*.

En esa explosión se creó el espacio y el reloj del universo comenzó a funcionar como el inaudible ir y venir del péndulo. Unos instantes después de que la violenta explosión diera origen al espacio y al tiempo, la densidad y la temperatura de la materia recién creada eran gigantescas. ¿Qué era esa materia tan densa y tan caliente?

Hasta donde sabemos, los quarks y los leptones son las más pequeñas componentes de las que está hecho todo lo que observamos. El modelo estándar de la materia descansa en la idea de que las partículas como protones y neutrones, que encontramos en los átomos, están hechas de quarks, pero nadie ha logrado nunca aislar un quark. Pensamos que los quarks están tan fuertemente ligados dentro de las partículas que forman, que es imposible que se escapen y existan libremente.

No obstante, con la actual descripción de las fuerzas que enlazan a los quarks, se piensa que si pudiésemos lograr una densidad de materia y una temperatura tan grande como la que

existió poco después del gran estallido, las partículas compuestas por estos quarks, como los protones y los neutrones, se fundirían dejando que sus propios quarks, y las partículas que los enlazan, llamados gluones, se liberen. Una vez libres los quarks y gluones formarán un nuevo estado de la materia al que se ha denominado *plasma de quarks y gluones*. En este estado, los quarks se podrían mover libremente a relativamente grandes distancias. Sin embargo, mientras nadie observe quarks libres, esta fascinante historia permanecerá sólo como una teoría que espera ser comprobada.

Unos instantes después de la gran explosión, cuando la temperatura y la concentración de energía era inmensa, los quarks deben haber existido libremente en forma de plasma. En muy poco tiempo los quarks se confinaron en las partículas que hoy conocemos en el universo ya frío, de la misma forma que el vapor se condensa en pequeñas gotas de agua.

Para entender mejor el origen del universo los científicos no usan telescopios, sino aceleradores de partículas. Con ellos es posible recrear las condiciones extremas que regían en el universo temprano. Al hacer chocar iones pesados a muy altas energías se pueden recrear estas condiciones. En el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN), en Ginebra, Suiza, se construye hoy una máquina que por medio de campos electromagnéticos podrá acelerar iones hasta velocidades cercanas a la de la luz.

El acelerador, llamado *Gran colisionador de hadrones* (LHC por sus siglas en inglés, *Large Hadron Collider*) es un anillo con 9 kilómetros de diámetro que se encuentra a 70 metros bajo tierra. En esta máquina se logrará transmitir a los protones y a los iones la energía más alta jamás lograda hasta ahora.

Cuando se hagan chocar dos iones viajando en direcciones contrarias, éstos se convertirán en energía pura, dando origen a una microscópica bola de fuego con las características del universo en su infancia. De manera controlada, el experimento ALICE (por sus siglas en inglés, *A Large Ion Collider Experiment*) permitirá estudiar con detalle los fenómenos que ocurran cuando miles de choques entre iones reproduzcan los momentos de la creación.

Entre más pesado sea un ión, más grande será el volumen en el cual su energía será liberada al momento de la colisión. Entre los iones usados está el plomo, para el cual el número de neutrones y protones es de 208. Al hacerlos chocar, grandes cantidades de energía serán concentradas en una pequeña región del espacio: los quarks podrían entonces formar una burbuja como si se tratara de gas caliente sujeto a una enorme presión.

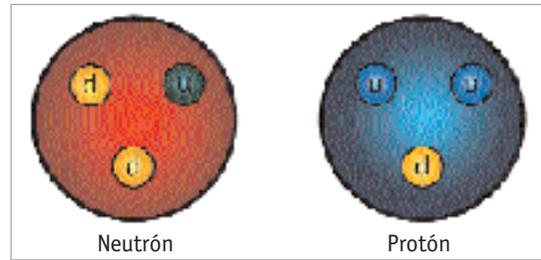


Figura 1. Los protones y neutrones de los que están hechos los átomos están a su vez hechos de quarks. Dentro de los protones y neutrones se encuentran 3 quarks.

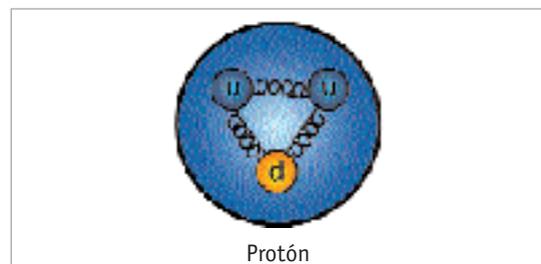


Figura 2. Los quarks dentro del protón interactúan a través del gluón.

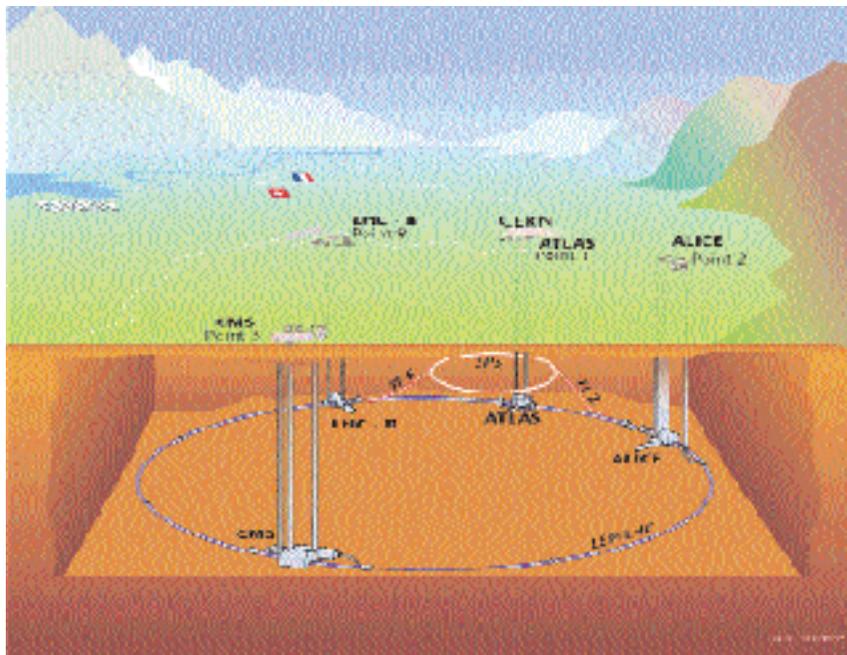


Figura 3. El acelerador LHC generará colisiones de protones para los experimentos CMS, ATLAS, LHCb y ALICE. También hará chocar iones pesados para el experimento ALICE. El anillo se encuentra parte en Francia y parte en Suiza, cerca de Ginebra.

La burbuja crecerá rápidamente, al mismo tiempo que se enfría, y los quarks se condensarán en paquetes de dos y tres (mesones y bariones), que a su vez se desintegran dando origen a las partículas que forman nuestro entorno.

Las partículas que se producen en el choque volarán en todas direcciones y serán detectadas en alguna componente de los complejos aparatos que los físicos colocarán con ese fin. Con la ayuda de modelos teóricos se predice que la temperatura a la que tal fenómeno tendrá lugar es del orden de 100 mil veces la temperatura que existe en el centro del Sol, es decir, unos dos billones de grados.

Será interesante conocer con precisión el valor exacto de esta temperatura crítica y la densidad de energía necesaria para la formación de este nuevo estado de la materia. Se predice que la densidad de energía crítica es de un giga-electronvolt por femtometro cúbico (un femtometro es 0.000000000001 centímetros), equivalente a siete veces la densidad de energía de materia nuclear ordinaria. Los físicos quieren saber si esto real-

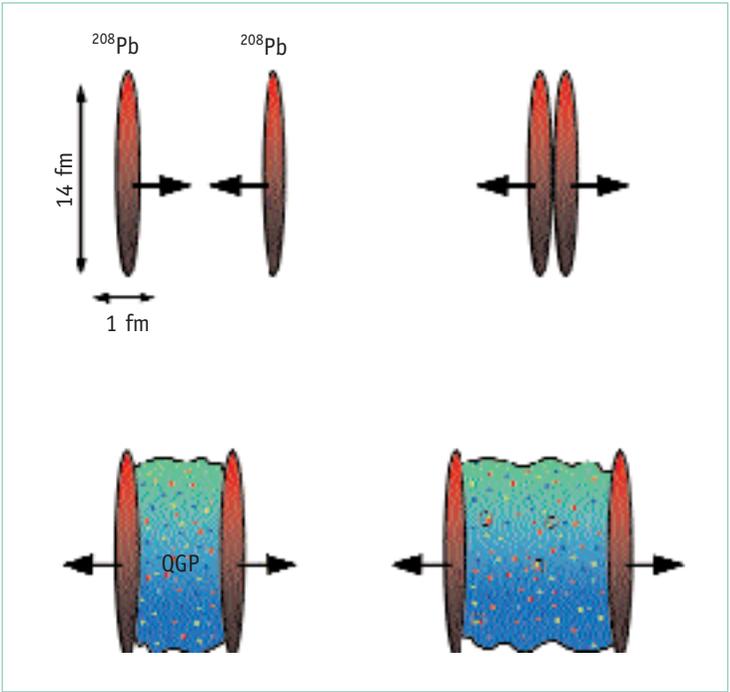


Figura 4. La interacción de dos iones de plomo y la posible formación de un plasma de quarks y gluones, instantes después de la colisión. Un femtometro es 0.000000000001 centímetros.

mente ocurrirá y las condiciones de densidad que se lograrán en el experimento serán 30 veces mayores que ésta.

El problema es que uno sólo puede ver las partículas que escapan de la bola de fuego y llegan hasta los detectores. A partir de estas señales se debe reconstruir lo que pasó previamente, con el fin de saber si los quarks y los gluones fueron producidos en un estado suficientemente denso como para que formara un plasma de quarks y gluones. Los experimentos como ALICE son diseñados para medir señales que pudieran indicar si el plasma se formó y cómo ocurrió esto.

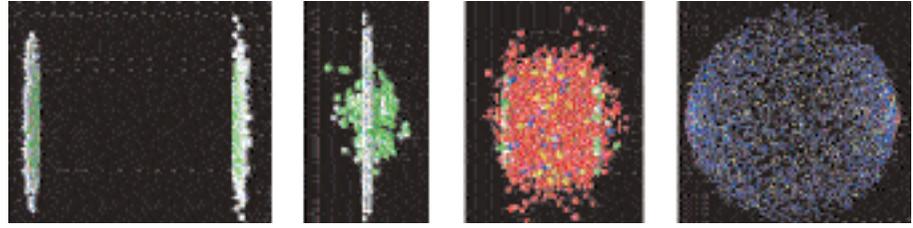


Figura 5. Simulación por computadora de la interacción de dos iones pesados. La secuencia muestra a los iones aproximándose a gran velocidad (de izquierda a derecha), el momento de la colisión y unos instantes después de ella. En el último recuadro se aprecia la expansión de la materia que se formó durante el violento choque.

EL PROYECTO ALICE

En un punto del enorme anillo con 30 kilómetros de perímetro que es el Gran Colisionador de Hadrones, se harán chocar los iones de plomo. En ese punto se colocará un gran detector. Este aparato verá con una precisión sin precedentes lo que ocurre cuando los haces chocan. El detector tendrá 20 metros de altura y estará formado por varios dispositivos construidos con alta tecnología. En el centro de estos detectores también se harán chocar protones con una frecuencia de 800 millones de veces por segundo. Entender qué ocurre en cada una de estas reacciones es el objetivo de ALICE. México es parte de la colaboración internacional que construye el detector. En nuestro país se construyen dos de los dispositivos que formarán parte del detector. Para hacerlo, varias instituciones se han unido formando un grupo que está incidiendo de manera importante en la colaboración ALICE.

La organización interinstitucional que hace posible una participación mexicana fuerte en el proyecto no tiene precedentes en la física de altas energías en México. Nuestro grupo trabaja en el diseño y construcción del detector V0A desde finales del año 2000, y comenzó con el diseño y construcción del detector de rayos cósmicos (ACORDE) un año más tarde.

El financiamiento que estos grupos reciben para llevar a cabo su trabajo de diseño y construcción proviene del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través de un apoyo del Banco Mundial en lo que se conoce como Iniciativa Científica del Milenio. Este apoyo hizo posible que por primera vez en la historia de la física en México un grupo de mexicanos participe en un proyecto de muy alto nivel con la construcción de una parte de este detector.

ALICE tendrá 20 metros de altura y estará formado por varios dispositivos construidos con alta tecnología. México es parte de la colaboración internacional que construye el detector

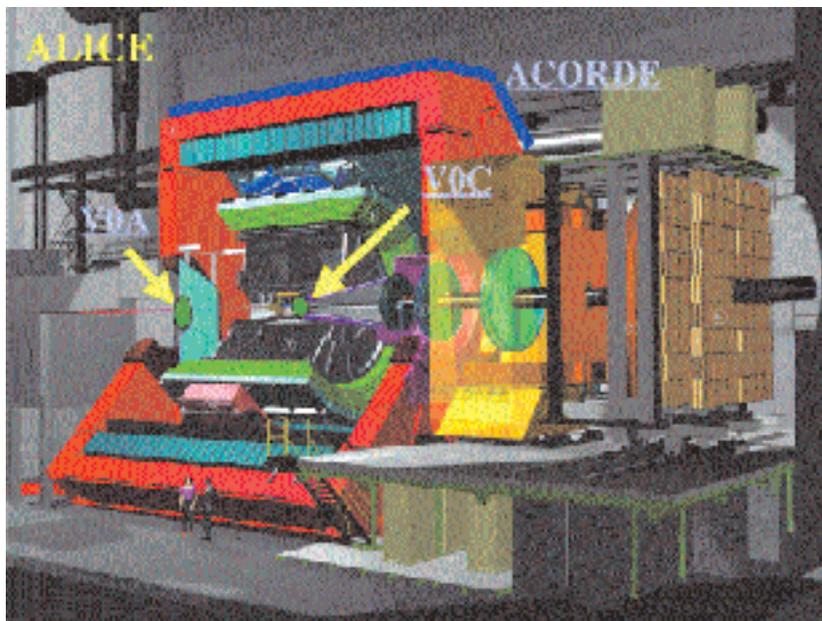


Figura 6. Corte longitudinal del detector ALICE. En el interior del detector se puede apreciar un disco localizado a 3.5 metros del punto de interacción (VOA). Este dispositivo está siendo diseñado y construido en México. En el lado opuesto, a un metro del punto de interacción, se encuentra un disco más pequeño (VOC). El dispositivo VOC está diseñado y construido por un grupo de científicos franceses. Estos dispositivos trabajarán de manera coordinada. En la parte superior se colocarán paneles de detectores que ayudarán a discriminar la radiación cósmica. El dispositivo llamado ACORDE, que además ayudará en la operación de otros detectores de ALICE y que permitirá hacer estudios de rayos cósmicos, también es diseñado y construido en México.



EL DETECTOR MÁS RÁPIDO

La predicción del tiempo permitió al pueblo egipcio desarrollar una agricultura a la orilla del río más largo de la Tierra, el Nilo, que al norte de lo que hoy es Sudán comienza a crecer en mayo, alcanza su máximo en agosto y decrece después para mantener su bajo nivel de enero a mayo. Este conocimiento hizo posible el nacimiento de una civilización poderosa y convirtió a la región en la más rica del mundo por miles de años. Conocer el tiempo dio origen al imperio más longevo en la historia de la humanidad. En ese entonces, la medición del tiempo era

determinada por la posición del Sol, y no se podía hablar de minutos. La duración de un minuto es tan pequeña que no había necesidad de medirla. La vida transcurría con lentitud. El minutero en los relojes tradicionales apareció en 1670 y no fue sino hasta comienzos del siglo XIX cuando se incorporó el segundero.

Desde los tiempos de esplendor del imperio egipcio hasta nuestros días, la complejidad de las civilizaciones ha crecido a medida que han conseguido un mayor conocimiento sobre la medición del tiempo. Es incluso tentadora la idea de que en mayor o menor grado el desarrollo de las sociedades ha dependido siempre de la precisión con que éstas han llegado a conocer el tiempo. En nuestros días existen en el planeta comunidades que se rigen por la posición del Sol, pero las sociedades dominantes son poseedoras de un conocimiento profundo sobre el tiempo. En la vida moderna las actividades cotidianas están sujetas a una precisión de minutos, pero los anuncios comerciales de la radio y la televisión se manejan en tarifas de segundos. En la mayoría de los deportes los segundos son decisivos y casi siempre hacemos operar el microondas por segundos. Sin embargo, no es el minuto, ni siquiera el segundo, la escala de tiempo que rige nuestra vida diaria. Existe una escala mucho menor de tiempos de la que surge la tecnología que hace posible a la modernidad.

Un grupo de científicos mexicanos del Centro de Investigación y Estudios Avanzados y de los Institutos de Física y de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México construyen lo que será el detector más rápido jamás visto en operación en la física de partículas elementales. Para lograrlo es necesario conocer el tiempo a profundidad.

Para nuestra concepción cotidiana de intervalos de tiempo, una milésima de segundo es equivalente a un instante sin duración temporal. Imaginarse lo que significa 800 millones de colisiones por segundo es imposible para nuestra percepción cotidiana. Intervalos de tiempo tan cortos no empezaron a usarse sino hasta hace relativamente poco tiempo.

¿Que puede ocurrir en una milésima de segundo? En ese tiempo el sonido recorre 33 centímetros, un avión cerca de medio metro, y la Tierra recorre 30 metros en su órbita alrededor del Sol. Para algunos insectos, una milésima de segundo es un tiempo perfectamente apreciable. Un mosquito bate sus alas aproximadamente 50 veces por segundo: en aproximadamente una milésima de segundo sube y baja sus alas. El movimiento más rápido que los seres humanos pueden realizar es un parpadeo: se realiza con tanta rapidez que ni lo podemos percibir al mirar. Sin embargo, medido en milésimas de segundo, este movimiento es tan lento que según los datos aportados por mediciones precisas, un abrir y cerrar de ojos dura aproximadamente $2/5$ de segundo, es decir, 400 milésimas de segundo. El cerrar el ojo en un parpadeo se lleva ya entre 70 y 90 milésimas de segundo. En un parpadeo, el ojo dura cerrado aproximadamente 150 milésimas más, y la elevación del párpado requiere de aproximadamente 170 milésimas de segundo. Como puede apreciarse, “un abrir y cerrar de ojos” es extremadamente lento si consideramos que los ojos electrónicos que se usarán en el experimento de LHC captarán lo que ocurre 800 millones de veces en un segundo.

En el corazón del detector ALICE se colocará un anillo de plásticos centelladores que actuará como un ojo capaz de discernir en 25 nanosegundos (milmillonésimas de segundo), si lo que ocurrió durante el choque de las partículas subatómicas es suficientemente interesante. A una velocidad extraordinaria, un millón de veces menor a un milésimo de segundo, deberá comunicar a todas las demás componentes del detector si pueden proceder a registrar tal interacción. Este dispositivo lo construyen científicos mexicanos en sus laboratorios, al mismo tiempo que desarrollan la infraestructura material y humana necesaria para realizar proyectos de muy alto nivel en nuestro país. Cuando esté listo, será llevado a CERN para formar parte del arreglo de detectores que seguramente nos ayudará a entender mejor el origen del universo.

El detector V0A es considerado un dispositivo básico en el experimento. Esto significa que el subsistema es parte imprescindible de ALICE. Tiene varias funciones al trabajar en coordinación con el V0C, que se encuentra en el lado opuesto.

En el corazón del detector ALICE se colocará un anillo de plásticos centelladores que actuará como un ojo capaz de discernir en 25 nanosegundos (milmillonésimas de segundo), si lo que ocurrió durante el choque de las partículas subatómicas es suficientemente interesante

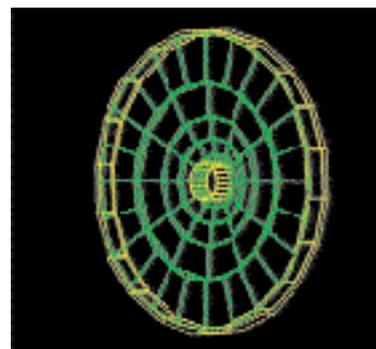


Figura 7. El detector V0A es un disco de plástico centellador con aproximadamente un metro de diámetro. El disco está formado por celdas más pequeñas que serán leídas de manera independiente con fibras ópticas. Cuando una partícula atraviesa el plástico se produce luz que es recolectada por las fibras y llevada hasta un tubo fotomultiplicador que convertirá la luz en una señal electrónica.



Figura 8. Prototipo de una sección del detector V0A. En este diseño las celdas son grabadas en una sola pieza de plástico que mantiene su rigidez mecánica. Las celdas se aíslan con resina después de hacer canales por ambos lados del plástico. Las fibras ópticas están embebidas en el plástico para lograr una mejor recolección de luz.

El detector ALICE
estará expuesto a
los rayos que desde los
confines del universo llegan
a nuestro planeta y que se
conocen desde principios
del siglo xx como
radiación cósmica

Determinará muy rápidamente si las interacciones que ocurren cada 25 nanosegundos acontecen en el lugar adecuado. En algunas ocasiones las partículas del haz chocarán con algún átomo que sin ser deseado se encuentre por ahí. Muy probablemente estas interacciones ocurrirán fuera de la región esperada. Medir el vértice de la interacción será una excelente forma de deshacerse de muchos eventos no deseados que se conocen como ruido. Otra de las funciones del detector será determinar si el choque de los iones fue un choque central o si los iones pasaron ligeramente de lado, dando origen a un choque periférico. Para determinar esto, V0A deberá medir rápidamente cuántas partículas se producen en cada uno de los choques. La luminosidad es una de las cantidades cruciales en la medición de parámetros físicos que se realizará en los experimentos con aceleradores. En el experimento ALICE, la medición de la luminosidad estará a cargo de los detectores V0A y V0C. La luminosidad es la cantidad que relaciona la frecuencia con que ocurre un proceso determinado con la probabilidad de que este proceso ocurra. Siendo V0A un detector muy veloz, y con una eficiencia grande, resulta natural que sea el dispositivo indicado para medir la luminosidad.

Después de tres pruebas con haces de partículas que el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) nos ha proporcionado, el grupo mexicano se dispone a realizar la última prueba del detector V0A a finales de 2004. En las pruebas anteriores se han medido parámetros importantes y arreglos diferentes. El diseño ha cambiado desde la primera prueba realizada en el verano de 2001 hasta lograr excelentes resultados en la prueba de agosto de 2003. Para el verano de 2004 se habrá fijado el diseño para iniciar su construcción a finales de este mismo año. La instalación del detector se llevará a cabo a finales de 2006, pues el experimento deberá estar completo y en funcionamiento en abril de 2007.

EL DETECTOR DE RAYOS CÓSMICOS, ACORDE

Como todos nosotros, el detector ALICE estará expuesto a los rayos que desde los confines del universo llegan a nuestro planeta y que se conocen desde principios del siglo xx como radiación cósmica. El detector se encontrará 50 metros por debajo del suelo. La capa de tierra y piedra que cubrirá al detector sirve como filtro para las partículas de energías más bajas que se producen en la atmósfera cuando un rayo cósmico llega a la Tierra. Esto significa que sólo las partículas producidas por rayos cósmicos con energías muy altas lograrán llegar hasta el detector. El

detector ACORDE (por sus siglas en inglés, *A Cosmic Ray Detector*), como parte de ALICE, proporcionará una señal de disparo que permita discriminar los eventos del acelerador de aquellos que provienen del espacio. Sin embargo, en combinación con otros dispositivos de ALICE estudiará también la radiación generada por rayos cósmicos con energías de 10^{15} a 10^{17} electronvolts. El detector ACORDE fue diseñado por un grupo de investigadores del Centro de Investigación y Estudios Avanzados, la Universidad de Michoacán y la Universidad de Puebla, y ahora está en proceso de construcción en nuestro país.

Es muy importante conocer la cantidad de rayos cósmicos que llegan desde el espacio a la superficie de la Tierra y su energía. También es muy importante saber qué son estos rayos cósmicos, cómo y dónde son acelerados hasta adquirir la energía que traen consigo. Durante los experimentos realizados en el CERN en los años 90 se recolectaron datos sobre rayos cósmicos: se encontraron eventos con muy alta multiplicidad, es decir, con un número de partículas muy alto. De estos eventos, cinco contienen “manojos” de muones con muy alta densidad. En estos eventos aparecen aproximadamente 150 muones en un área de ocho metros cuadrados. Estos eventos son un misterio que sólo podrá ser entendido cuando se tengan mejores medidas y una estadística mayor. Con la Cámara de Proyección Temporal (TPC por sus siglas en inglés, *Time Projection Chamber*), trabajando en conjunto con el detector ACORDE, será posible medir con precisión las trayectorias presentes en los eventos de rayos cósmicos con características especiales, como estos misteriosos eventos. La Cámara de Proyección Temporal tendrá una excelente resolución angular; esto le permitirá funcionar como telescopio cuando ocurran eventos con muchos muones paralelos, al ser capaz de discernir la localización de la fuente en nuestra galaxia o posiblemente mas allá de ésta.

Bibliografía

La página web del experimento ALICE está en la dirección electrónica:
<http://alice.web.cern.ch/Alice/AliceNew>
ALICE Physics Performance Report, Volume I, CERN/LHCC 2003-049
ALICE PPR, Volume I, 7 November 2003.

Gerardo Herrera Corral es investigador titular y jefe del Departamento de Física del Cinvestav. Obtuvo su doctorado en Ciencias en la Universidad de Dortmund, Alemania. Su especialidad es la física experimental de altas energías y encabeza el grupo mexicano que participa en la construcción del detector ALICE en el CERN. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.
 gherrera@fis.cinvestav.mx



Figura 9. En la parte superior del magneto de ALICE se colocarán 120 paneles como el que se muestra aquí. Estos módulos están siendo fabricados y probados en México y serán trasladados al CERN a finales de 2004. Cada uno de estos contadores tiene 20 centímetros de ancho y una longitud sensible de 1.9 metros. El diseño es resultado de estudios de simulación hechos por el grupo mexicano y ha sido aprobado por la colaboración para entrar en la fase de producción.



Figura 10. Este módulo ha sido utilizado para la calibración de uno de los detectores de ALICE llamado “identificador de partículas con alto momento” (HMPID, por sus siglas en inglés: *High Momentum Particle Identification Detector*). El módulo fue fabricado por el grupo mexicano y será colocado junto con otros similares en la parte superior del magneto. Estos paneles serán usados en la calibración y alineamiento de otros dispositivos de ALICE como la Cámara de Proyección Temporal.