

Alta luminosidad: mejorando el Gran Colisionador de Hadrones

Lizardo **Valencia Palomo**

El conocimiento actual sobre los constituyentes básicos de la materia se encuentra plasmado en el Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales, pero hay muchas preguntas para las que este modelo no ofrece respuesta. Para poder responder a dichas cuestiones se construyó el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), una maravilla del mundo moderno que cuenta con la más alta tecnología. Sin embargo, más de 15 años después del inicio de sus operaciones el LHC sufrirá una serie de mejoras que lo harán aún más impresionante.

EL MODELO ESTÁNDAR

La física de partículas se encarga del estudio de los bloques fundamentales de la materia. Hoy en día sabemos que todo lo que nos rodea está formado de átomos, los cuales están compuestos de un núcleo orbitado por electrones. El núcleo es un conjunto de protones y neutrones, que a su vez están formados de quarks.

El conocimiento actual de los componentes básicos de la materia se engloba en el Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales. Este marco teórico indica que la naturaleza está formada de dos tipos de partículas: los quarks y los leptones. Todas las partículas compuestas por quarks se hacen llamar hadrones; a este grupo pertenecen los protones, neutrones y otras partículas. Existen

seis tipos de quarks: u, d, s, c, b y t; listados del más ligero al más masivo.

Los electrones que se encuentran en el átomo forman parte del grupo de leptones. Otras dos partículas, el muon y el tau, muy parecidas al electrón, pero con mayor masa, también se cuentan entre los leptones. A cada una de estas tres se le asocia una partícula especial: el neutrino. Es especial porque después de más de 60 años de su descubrimiento, hoy en día no es posible decir cuál de los tres neutrinos es el más ligero y cuál el que tiene mayor masa.

El Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales también indica que las interacciones entre todas las anteriores partículas se llevan al cabo por medio de otras partículas llamadas bosones. Cuatro de estos tienen la particularidad de ser los portadores de las fuerzas fundamentales del universo: la electromagnética, la nuclear débil y la nuclear fuerte.

La fuerza electromagnética es bastante conocida por todos nosotros. Se hace presente en el funcionamiento de las brújulas o cuando frotamos nuestro cabello con un globo. La partícula mediadora de esta fuerza es el fotón y su rango de alcance es infinito.

Las fuerzas nucleares débil y fuerte son posiblemente desconocidas para muchos de nosotros. La primera es la responsable del decaimiento radioactivo de los núcleos, mientras que la segunda mantiene a los quarks unidos dentro de los hadrones. Ambas son imperceptibles en nuestra vida diaria porque su rango de acción es de muy corto alcance: se manifiestan únicamente a escalas subatómicas. El gluón es la partícula portadora de la fuerza fuerte, mientras que la débil tiene dos partículas mediadoras: el Z y la W.

Finalmente se tiene el bosón de Higgs. Su importancia radica en que su existencia es una manifestación del mecanismo que proporciona masa a las partículas. Su descubrimiento en 2012 ha marcado un gran triunfo del Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales.

PREGUNTAS SIN RESPUESTA

Sin embargo, el modelo estándar no puede responder a todas nuestras interrogantes sobre los constituyentes básicos de la materia.

Es muy probable que la primera fuerza fundamental que experimentamos en nuestra vida haya sido la fuerza de gravedad. Pues bien, esta fuerza no está incluida en el Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales, ya que aún no se entiende completamente su funcionamiento en el mundo subatómico.

De acuerdo con nuestros modelos sobre el origen del universo, el *Big Bang* debió haber creado iguales cantidades de materia y antimateria. Sin embargo, el Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales no puede explicar por qué hoy en día existe tan poca antimateria.

El modelo estándar tampoco puede explicar la gran diferencia de masa que existe entre los quarks. Tampoco ofrece respuesta a la aparente imposibilidad de encontrar quarks o gluones como partículas libres, ya que siempre están confinados en hadrones.

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES

Para poder explorar las entrañas de la materia, se utilizan los aceleradores de partículas. Estas máquinas aceleran partículas y las hacen chocar unas con otras. Hoy en día, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés) es el acelerador de partículas más grande y más poderoso que existe en el mundo. Este colisionador mide 27 kilómetros de circunferencia y se localiza a 100 metros bajo tierra, en la frontera entre Suiza y Francia (ver Figura 1). Su planeación, construcción y operación está a cargo de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN).

Parte del sorprendente desempeño del LHC se debe a que detrás de él existe una importante infraestructura de aceleradores. Así pues, los protones a ser colisionados en el LHC primero recorren los 80 m de un acelerador lineal. Luego son inyectados a un primer acelerador circular de 160 m de



Figura 1. El túnel del LHC. Se observa el interior de un dipolo superconductor. Imagen tomada de <https://cds.cern.ch/record/905940>. © CERN.

circunferencia. Aquí las partículas se mantienen girando a través de cuatro anillos hasta que se reúne una importante cantidad de protones. Luego estos son enviados a otro acelerador circular de 630 m de circunferencia, en donde los protones son agrupados en paquetes.

Finalmente, los protones recorren un tercer acelerador circular de 7 km de circunferencia y de ahí son transferidos al Gran Colisionador de Hadrones (ver Figura 2).

Como se observa en la Figura 2, el tamaño de los aceleradores va aumentando conforme se avanza en el recorrido. Esto se debe a que la velocidad, y por consiguiente la energía, a la que las partículas son aceleradas también incrementa.

Para manipular la trayectoria de las partículas en los aceleradores se utilizan campos magnéticos generados por imanes. En el LHC hay más de 9,500 imanes y los podemos dividir en dos grupos. Por un lado, están los dipolos que mantienen a las partículas en su órbita circular y por otro lado están aquellos que sirven para compactar el haz de partículas.

En el Gran Colisionador de Hadrones las partículas son aceleradas en ciertas secciones específicas llamadas cavidades de radio-frecuencia. En este colisionador los protones son acelerados hasta llegar prácticamente a la velocidad de la luz. Para controlar su recorrido a energías tan altas es necesario que los imanes generen campos magnéticos muy intensos. Por esta razón se requiere que los

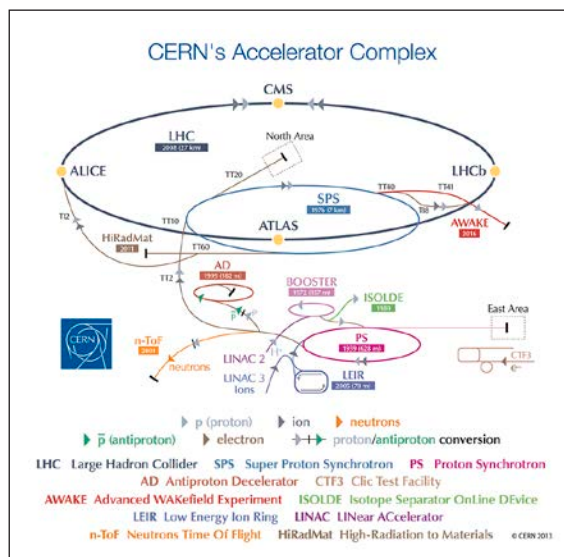


Figura 2. Infraestructura de aceleradores de partículas existentes en el CERN. Imagen adaptada de <https://stfc.ukri.org/research/particle-physics-and-particle-astrophysics/large-hadron-collider/cern-accelerator-complex/>. © CERN.

dipolos estén hechos de cables superconductores, es decir, material que conduce corriente eléctrica sin resistencia. Pero para lograr esto, dichos cables deben funcionar a temperaturas muy bajas, por lo que en el LHC son enfriados a $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aun con todo esto, la probabilidad de que dos protones colisionen es muy baja. Por esta razón cada haz que circula en el colisionador está compuesto de 2,800 paquetes de protones, cada uno a su vez constituido por casi un billón de estas partículas. Pero eso no es todo, justo antes de hacer chocar estos haces, los paquetes son compactados hasta que llegan a tener una anchura menor a la mitad del grosor de un cabello humano. De esta forma se aumenta la probabilidad de que ocurra alguna colisión. En el Gran Colisionador de Hadrones se generan aproximadamente mil millones de colisiones cada segundo.

Cuando dos protones colisionan, la energía de la colisión da lugar a la creación de nuevas partículas que salen disparadas del punto de la colisión. Mientras más energética sea la colisión, se producirán más partículas y con mayor velocidad. Estas partículas son registradas en los diversos aparatos

electrónicos del experimento, lo cual se traduce en datos que los físicos tienen que analizar.

MEJORANDO EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES

La energía de las colisiones no es lo único importante en un acelerador de partículas. Otro parámetro relevante es el número de partículas que colisionan, ya que al incrementar este número aumentan las probabilidades de observar fenómenos nuevos en las colisiones. En la física experimental de partículas a esto se le conoce como luminosidad.

A partir de 2027 y hasta el final de sus días (2037-2040) el LHC se convertirá en el Gran Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad (HL-LHC, por sus siglas en inglés). El objetivo es que el colisionador tenga una luminosidad hasta 6 veces mayor a la que tiene actualmente. Esto permitirá generar una mayor cantidad de colisiones y por consiguiente una mayor cantidad de datos.

Para lograr este aumento de luminosidad se siguen tres métodos complementarios: incrementar el número de protones en cada paquete, compactar aún más los paquetes y hacerlos colisionar de manera más frontal. Esto a su vez requiere de la instalación de nuevos equipos en el LHC:

- **Cadena de pre-inyección más eficiente.** Gran cantidad de protones se pierden en el trayecto para llegar al Gran Colisionador de Hadrones. Para evitar esto es menester realizar mejoras en la cadena de pre-aceleradores: se ha construido un nuevo acelerador lineal y se harán reparaciones en los demás aceleradores circulares.
- **Imanes más poderosos.** Se instalarán imanes superconductores más poderosos para compactar aún más los paquetes de partículas: menos de la mitad del grosor de los paquetes que circulan ahora en el Gran Colisionador de Hadrones. El compuesto superconductor de estos imanes permitirá alcanzar campos magnéticos 50 % más intensos que su predecesor.
- **Mejores cables superconductores.** Hechos de un nuevo material superconductor, funcionarán a

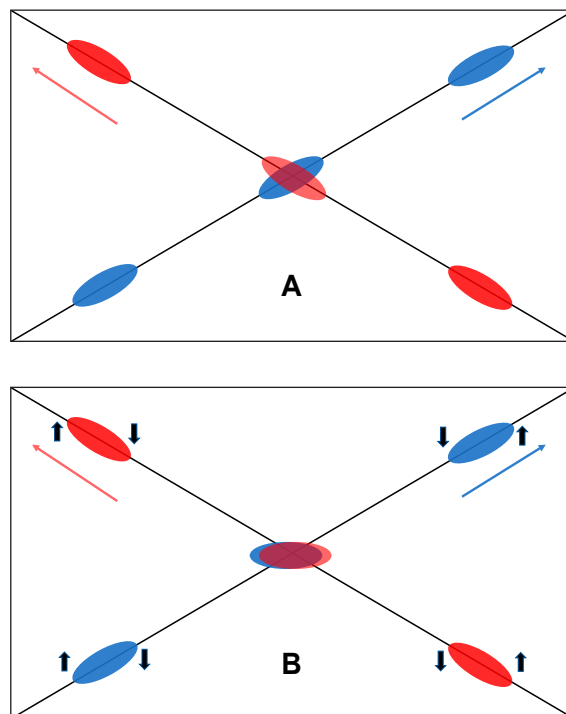


Figura 3. A) Colisión de los paquetes de partículas en el Gran Colisionador de Hadrones. B) Efecto de las nuevas cavidades de radio-frecuencia en la fase de Alta Luminosidad.

una temperatura más alta que los imanes y permitirán que a través de ellos circule una mayor intensidad de corriente eléctrica.

- **Nuevas cavidades de radio-frecuencia.** Contrario a lo que se pueda imaginar, en los aceleradores de partículas los paquetes de estas no colisionan de frente. Existe una cierta inclinación entre ellos, de tal forma que al cruzarse solo una pequeña área de los paquetes colisiona. Estas nuevas cavidades impartirán un pequeño giro a los paquetes justo antes de cruzarse. De esta forma el área de traslape será mayor, lo que se traduce en una mayor cantidad de partículas que colisionan (Figura 3).
- **Más colimadores.** Más protones por paquete implica que el haz tendrá una mayor energía, haciéndolo potencialmente más peligroso en el supuesto caso de un accidente. Por consiguiente, es importante reforzar la protección del Gran Colisionador de Hadrones. Esto se logra con más colimadores, los cuales absorben los protones que se separan de la trayectoria del haz y que pudieran dañar la máquina.



© Ana Vélez.



© Ana Vélez.

El incremento de la luminosidad traerá algunos retos consigo. Para el caso de los experimentos, el número de colisiones cada vez que los paquetes de partículas se crucen, podría llegar hasta 200. Esto implica que los detectores deben mejorar su funcionamiento para separar cada una de estas colisiones, así como hacer el seguimiento de las partículas que se crean. Esto a su vez generará más y más datos que habrá que procesar, almacenar y analizar. Se espera que con el Gran Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad se produzcan hasta 500 millones de gigabytes de datos al año.

UN FUTURO BRILLANTE

En los poco más de 10 años de funcionamiento del Gran Colisionador de Hadrones, se han producido alrededor de 5 % de la totalidad de datos que se espera que produzca durante sus casi 30 años de vida útil. En el siguiente lustro, el Gran Colisionador de Hadrones generará otro 5 % adicional. En el 2027, cuando inicie operaciones el Gran

Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad, y por un período aproximado de 10 años, se producirá el 90 % restante de los datos esperados. Es a partir del 2027 que, en su modalidad de Alta Luminosidad, se convertirá en un monstruo colisionando partículas y generando datos.

Así pues, aún nos encontramos en los albores de esta aventura por alcanzar los confines de la materia, pero sin lugar a dudas el porvenir es alentador. Nos espera un futuro con mucha luz.

B I B L I O G R A F Í A

Evans L (2018). *The Large Hadron Collider: a marvel of technology*. Suiza: EPFL Press.

Brüning O and Rossi L (2015). *The high luminosity Large Hadron Collider: the new machine for illuminating the mysteries of universe*, Singapur: World Scientific Publishing Company.

Lizardo Valencia Palomo
Universidad de Sonora
lizardo.valencia@unison.mx



© Ana Vélez.