

## Colisionando hadrones

**El LHC del CERN es uno de los mayores proyectos científicos del mundo. Acelerar partículas a velocidades muy cercanas a la de la luz con energías que hacen multiplicar varios miles de veces sus masas en reposo y luego hacerlas colisionar con una precisión extraordinaria ha supuesto tener que superar unos retos técnicos sin precedentes.**

Todos conocemos los avances que ha tenido en estos últimos años la cosmología, ampliando los horizontes del universo conocido por el espacio y el tiempo hasta los confines del universo en los momentos iniciales de la creación.

De esta manera se ha focalizado en la física de partículas en condiciones extremas. Así, a lo largo de los años, los aceleradores de partículas, a medida que se han hecho más potentes, han podido escudriñar más en el interior de las partículas y la materia, y han implicado un soberbio reto por sus dimensiones, precisión y complicación.

En este artículo repasaremos el diseño y el funcionamiento del LHC<sup>1</sup> ('Large Hadron Collider') del CERN ('Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire'), su último gran proyecto.

### Las prestaciones

El LHC es un conjunto de túneles circulares subterráneos que atraviesan la frontera entre Suiza y Francia. El mayor de ellos tiene una longitud de 27 km y en él se puede conseguir una energía máxima teórica de 7 TeV<sup>2</sup> por cada uno de los protones que puede acelerar, en dos túneles en sentidos opuestos.

Los protones no viajan solos, sino en paquetes. Cada uno de los túneles puede operar hasta con 2.808 paquetes de protones y con una alta intensidad de  $1,15 \times 10^{11}$  protones en cada uno.

### La aceleración

---

<sup>1</sup> En realidad, el LHC es la última etapa de aceleración (un anillo de unos 27 km.), pero hay otras etapas previas. En este artículo denominaremos a todas como 'LHC'.

<sup>2</sup> 1 TeV =  $10^{12}$  eV, siendo 1 eV la energía necesaria para dar a un electrón una fuerza electromotriz de un voltio. 1 TeV es también igual a  $1,6 \times 10^{-5}$  J, la energía de un mosquito de 20 mg. a la velocidad de 20 cm / s.

Esta energía es equivalente a 70.000 veces su masa en reposo y su velocidad es muy cercana a la de la luz.

Un acelerador de partículas es básicamente una máquina que inyecta partículas subatómicas cargadas, las acelera y las hace colisionar entre sí o contra otras para detectar y analizar los productos de esos choques.

En general, los aceleradores pueden clasificarse en dos grupos:

- Lineales, en los que las partículas recorren un camino recto en su aceleración. Un tubo de rayos catódicos de un televisor es un ejemplo sencillo. Este tipo tiene el inconveniente de que requieren gran longitud para alcanzar energías suficientemente altas, pues las partículas pasan por cada una de sus secciones una sola vez.
- Circulares, en los que las partículas ganan velocidad siguiendo una trayectoria curva. Su ventaja es que se puede mantener una aceleración dando vueltas sucesivas sobre el círculo y, por ello, pueden ser mucho más pequeños que los lineales que generan energías equivalentes. Por el contrario, los movimientos circulares de partículas cargadas eléctricamente generan radiación sincrotrón<sup>3</sup> y, con ella, pérdida de energía.

En el caso del LHC, las partículas aceleradas son protones o núcleos de plomo ( $\text{Pb}_{208}$ ) agrupados en haces, llamados 'paquetes'. Como dentro de ellos las partículas tienden a separarse, son necesarios, además, imanes que los focalicen.

En el caso de aceleradores circulares, son necesarios otros campos electromagnéticos que contrarresten la fuerza centrífuga de esos haces de partículas.

En el caso del LHC, los túneles donde se mueven las partículas están un alto vacío (así se minimizan los rozamientos en el trayecto) y en una temperatura cercada al cero absoluto (para permitir que los imanes puedan operar en condiciones de superconductividad).

La aceleración de las partículas no se consigue en una sola etapa, sino en cinco, con mayores energías inyectadas cada vez, que se ven en el cuadro adjunto:

---

<sup>3</sup> Cuando una partícula cargada describe círculos genera campos magnéticos.

| Acelerador                      | Energía protones | Longitud | Velocidad protones (c) |
|---------------------------------|------------------|----------|------------------------|
| Linac2                          | 50 MeV           | 18 cm    | 33,9%                  |
| PSB (Protón Síncrotrón Booster) | 1,4 GeV          | 157 m    | 91,6%                  |
| PS (Proton-síncrotron)          | 25 GeV           | 628 m    | 99,9%                  |
| SPS (Super Proton-Síncrotron)   | 450 GeV          | 6,9 km   | 99,99%                 |
| LHC (Large Hadron Collider)     | 7 TeV            | 27 km    | 99,999%                |

*Los aceleradores del CERN.*

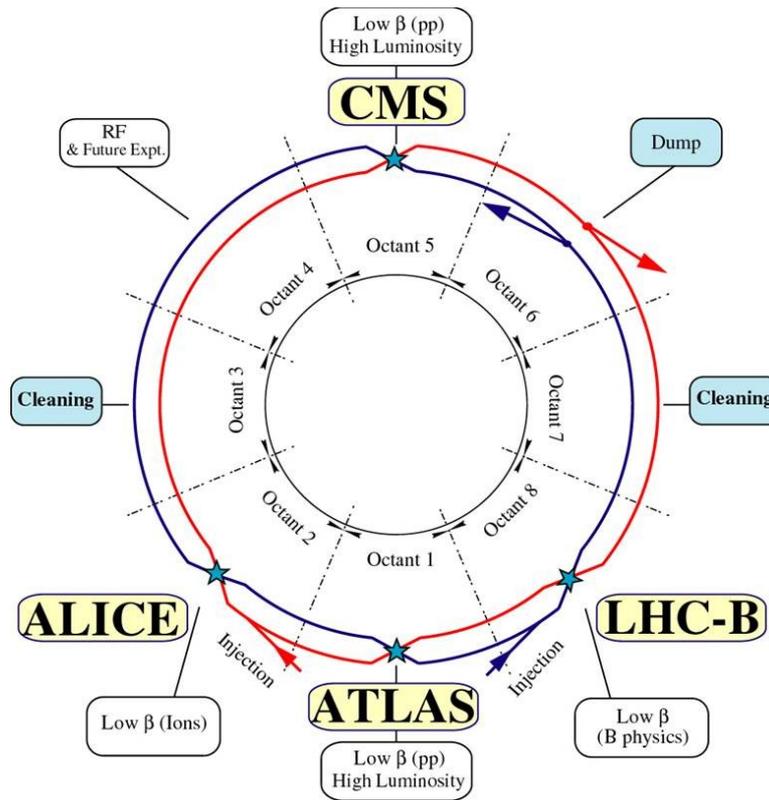
Solo la primera etapa es lineal y el resto son circulares.

### Los sectores del LHC

Por cuestiones de mantenimiento, el LHC no es un círculo perfecto, sino que se compone de ocho arcos (curvos) entre ocho secciones (rectas).

Un sector u octuante es la parte del túnel entre dos puntos de inserción. Los ocho sectores unidades de trabajo independientes del LHC: la instalación de los imanes se realiza sector por sector, todo el trabajo con las diferentes partes también se hace sector por sector y todos los dipolos magnéticos de un sector están conectados en serie y son enfriados por el mismo sistema criostático o refrigerante. Cada sector está formado por:

- Un arco de 2,45 km. que contiene 154 dipolos magnéticos que se encargan de mantener enfocado el haz de protones. Cada arco empieza y termina en una sección y en una región de transición (llamada 'dispersion suppressor').
- Una sección recta, que es una parte recta del túnel, de 545 m., entre dos arcos. El diseño exacto de cada sección recta depende de su uso específico: colisiones en un experimento, inyección de haces ('injection'), focalización ('RF cavities'), descarga ('dumping') o limpieza ('clearing').



Los 8 octantes del LHC. Fuente: [lhc-machine-outreach.web.cern.ch](http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch)

Por otra parte, el LHC tiene dos tubos en los que partículas viajan en sentido contrario. La separación es de 194 mm., excepto en las cavidades de radiofrecuencia donde la distancia es de 420 mm, y en los detectores, donde se juntan.

### Alto vacío para el haz de partículas

El haz trabaja con presiones inferiores a  $10^{-9}$  Pa ( $10^{-14}$  atm)<sup>4</sup>. Esto limita, además, el ruido de fondo en los detectores del LHC inducido por la dispersión del haz por colisiones con el gas residual.

El cúmulo de exigencias (nivel de presión, efectos dinámicos e ingeniería) para las cámaras de vacío del haz condujo a un nuevo diseño de sistema de vacío. Por primera vez se utilizó una pantalla térmica intermediaria ('beamscream') que envuelve la cámara de vacío para del haz de partículas. Esa pantalla, que opera entre 5 y 20 K, tiene como principal objetivo la interceptación de las cargas térmicas inducidas por el haz: luz sincrotrónica, pérdidas de partículas, resistencia eléctrica a la corriente de imagen del haz, efectos dinámicos por electrones e iones.

<sup>4</sup> Unas 100 veces menor que en la superficie de la Luna.

Aunque las exigencias de presión son bajas (0,1 Pa), ese sistema requiere un túnel de 50 km. de largo y hasta 1 m. de diámetro, resultando un volumen total de 15.000 m<sup>3</sup>. Su ensamblaje ha necesitado más de 250.000 soldaduras, que representan una longitud de 100 km. Con tantos ensamblajes, soldaduras y juntas, la estanqueidad del vacío ha representado un desafío constante, ya que son imprescindibles niveles de estanqueidad inferiores<sup>5</sup> a 10<sup>-11</sup> Pa m<sup>3</sup>/s.

### **Dipolos magnéticos superconductores**

Los haces de partículas tienden a dispersarse de manera natural, pues las partículas tienen la misma carga y se repelen entre sí, así que deben ser constantemente focalizados en su trayectoria, además se deben contrarrestar la enorme fuerza centrífuga de partículas que giran a unas 11.000 revoluciones por segundo a una velocidad muy próxima a la de la luz.

Esto se consigue con 1.232 dipolos magnéticos, que operan en condiciones de superconductividad<sup>6</sup> focalizando y produciendo un campo magnético constante, de 8,33 T<sup>7</sup>.

El campo magnético dipolar se consigue gracias a un cableado superconductor que proporciona la intensidad de corriente necesaria. Cada cable está hecho del trenzado de 28 y 36 hilos, según sea una capa interior o exterior alrededor de cada tubo.

### **Generación de frío**

Para trabajar en condiciones de superconductividad, los cables de los dipolos superconductores deben trabajar a sólo 1,9 K

Por esta razón, el acelerador está conectado a un sistema de distribución de helio líquido, que enfría los dispositivos magnéticos así como otros servicios de apoyo.

Durante el enfriamiento inicial del LHC (de unas 31.000 toneladas de material) se vaporizan 12 millones de litros de nitrógeno. Posteriormente se necesitan otras 5.000 toneladas de helio líquido<sup>8</sup> para mantenerlo por debajo de 2 K.

---

5 Esta estanqueidad es tan alta que un neumático de coche con una fuga de tamaño equivalente, necesitaría más de tres millones de años para desinflarse.

6 Si el LHC hubiera incluido dipolos magnéticos no superconductores, no hubiera podido contrarrestar la fuerza centrífuga y sería necesario un círculo de 120 km de longitud para alcanzar la misma energía, con un consumo eléctrico enorme.

7 Más de 100.000 veces el campo magnético de la Tierra. Este valor tan alto es necesario para contrarrestar la fuerza centrífuga de las partículas que giran a unas 11.000 revoluciones por minuto a una velocidad muy próxima a la de la luz.

8 La producción mundial de He fue en el año 2009 de 38.000 toneladas.

### **'Quenching', 'clearing' y 'dumping'**

Dentro de un mismo paquete, los protones del haz que oscilan ligeramente alrededor de su trayectoria, pueden hacerse inestables al entrar en contacto entre ellos. A veces, los imanes no son capaces de corregir esos desvíos, generándose una pérdida de esas partículas en el túnel<sup>9</sup>.

Un sistema colimador reagrupa los haces en dos secciones muy radiactivas y protege al acelerador contra esas pérdidas. Cada una tiene 50 imanes que funcionan con corriente convencional y operan entre 0,09 y 1,53 T.

En el caso de que estas pérdidas llegasen al sistema criogénico, implicaría un aumento de temperatura y la pérdida de las condiciones de superconductividad. Esto es conocido como 'quenching'. Como consecuencia, los imanes perderían su fuerza magnética y el haz se precipitaría contra las paredes exteriores del túnel, provocando daños muy importantes por colisión y calentamiento<sup>10</sup>.

El 'quenching' es detectado porque aparece un voltaje sobre las bobinas de los superconductores<sup>11</sup>, y se combate mediante dos medidas:

- Liberar calor en el imán usando disipadores (llamados 'quench heaters').
- Sacar los haces de protones del acelerador en una sola vuelta (en sólo 89 milisegundos).

Esta última tarea es conocida como 'dumping'. En caso de urgencia, las partículas son desviadas por un sistema magnético a dos bloques de grafito de unos 8 m. de largo ubicados en cavernas al final de un túnel de unos 700 m. Estas son las únicas zonas del LHC que son capaces de resistir el impacto directo de los haces de partículas.

## **Detectores**

Además de los aceleradores, otros sistemas del LHC se dedican a identificar y estudiar las partículas que resultan de los choques de los protones o iones de plomo. Éstos son los 'detectores', también llamados 'experimentos' o 'colaboraciones'<sup>12</sup>. Los más importantes<sup>13</sup> son:

---

9 Esto es conocido como efecto Touschek.

10 La energía de un solo haz de protones del LHC es suficiente para fundir casi 1 tonelada de cobre

11 La intensidad de corriente es de varios miles de amperios. En el momento en que se presente una resistencia en el imán, por mínima que sea, será perceptible.

12 El término proviene del hecho de que tanto su construcción como mantenimiento y operación son fruto de colaboraciones de equipos de varios países.

13 Además hay otros dos:

- CMS ('Compact Muon Solenoid'). De propósito general.
- ATLAS ('A Toroidal LHC ApparatuS'). De propósito general.
- ALICE ('A Large Ion Collider Experiment'). Para la generación de plasma quark-gluón.
- LCHb ('[Large Hadron Collider beauty](#)'). Para la detección del quark 'bottom'.

### CMS y ATLAS

La finalidad es la detección de todos los tipos posibles de partículas subatómicas que se generan en los choques, distinguiendo características como su masa o su carga eléctrica.

En términos generales, el CMS y el ATLAS son el mismo tipo de experimento, pero difieren en su diseño (principalmente el de los imanes). La detección de las partículas que resultan de la colisión de dos haces en sentido contrario colisiones de haces en sentido contrario se hace en capas concéntricas a partir del punto de colisión y en dirección perpendicular bajo un campo magnético de alrededor de 3 T.

De dentro a afuera se montan las siguientes capas:

1. Detectores internos de trazas, que rastrean las partículas con carga eléctrica. Para ello miden la ionización que esas partículas generan en el material del dispositivo a medida que lo atraviesan. Se emplean láminas finas de silicio divididas en píxeles.
2. Calorímetros electromagnéticos, cuya función es absorber y detectar fotones, electrones y positrones.
3. Calorímetros hadrónicos, que detectan partículas formadas por quarks (hadrones), como los protones o neutrones.
4. Cámara de muones, que están por fuera de los imanes. Son de grandes dimensiones pues los muones interactúan débilmente con la materia.

Los neutrinos se escapan de todos estos detectores sin dejar ningún rastro.

Dos factores complican la detección de partículas.

- En la colisión de dos paquetes de protones, se producen a la vez miles de colisiones, y las trazas de todas sus partículas generadas se mezclan en el detector.

- 
- TOTEM (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC).
  - LHCf (Large Hadron Collider forward).

- Una sola colisión puede generar muchas partículas con mucha energía acumulada, por lo que algunas se desintegran a su vez en otras secundarias y así sucesivamente hasta llegar a partículas estables.

La diferencia entre el CMS y el ATLAS reside en el diseño de sus imanes y sus detectores. Mientras que el CMS usa un solenoide central, el ATLAS genera un campo magnético toroidal a través de ocho bobinas superconductoras.

Los detectores tienen un tamaño enorme (equivalente a edificios de varias plantas) debido a que las partículas generadas tienen grandes energías y recorren largos caminos hasta desintegrarse en otras.

El CMS y el ATLAS son operados y mantenidos por equipos de ingenieros y científicos que trabajan de forma aislada entre ellos<sup>14</sup> para preservar la mayor objetividad posible en sus experimentos y resultados científicos.

### **ALICE**

Este experimento está especializado en la detección de iones de plomo acelerados contra otros en reposo. La energía máxima por protón es en este caso de 2,76 TeV.

La temperatura<sup>15</sup> y la presión que genera en estas colisiones son suficientes para generar una fase de materia llamada 'plasma quark-gluón'<sup>16</sup>, como el que predicen las teorías actualmente aceptadas en el universo varios microsegundos después del big bang.

El detector, como los anteriores, tiene el tamaño de un edificio y pesa varios miles de toneladas. En él trabajan unos 1.000 científicos de unas 100 instituciones.

### **LHCb**

El detector LHCb está especializado en detección de las partículas generadas por el decaimiento del quark 'bottom', y servirá, entre otros objetivos, para confirmar y depurar los parámetros de la detección de la violación de la simetría CP, una de las responsables de la asimetría entre materia y antimateria.

---

14 En el CMS trabajan 4.300 físicos e ingenieros de 179 instituciones de 41 países y en el ATLAS 3.000 científicos e ingenieros de 175 instituciones de 38 países.

15 El experimento ALICE consiguió el récord de temperatura generada en un experimento: 5,5 billones de grados kelvin.

16 En ese estado, los quarks no estaban confinados por la fuerza fuerte y vagaban libres por el espacio.

## Tratamiento informático

La cantidad de información sobre colisiones que genera en el LHC es inmensa. Produce, en momentos de actividad, unos 600 millones de colisiones por segundo, lo que implica unos 27 terabytes al día. Toda esa información debe ser filtrada y tratada y no es viable económicamente mantener esa capacidad de cálculo en el CERN. Así que, a partir de él, se ha diseñado una red de computación de ámbito mundial, llamada 'LHC Grid Computing'.

En concreto, estos datos son enviados fuera del CERN a once instituciones académicas de Europa, Asia y Norteamérica, que constituyen el 'nivel 1' de procesamiento. Otras 150 instituciones constituyen el 'nivel 2'.

En un tercer nivel están colaboradores científicos que permiten el uso de sus CPUs en el tratamiento atomizado de los datos.

Para todo esto se utiliza una distribución científica del sistema operativo Linux, llamada Scientific Linux, para recibir y distribuir los datos a unas 100.000 CPU en todo el mundo.

## El triunfo de la colaboración

El presupuesto del LHC es 'astronómico'. El coste de la construcción fue de unos 6.500 millones de euros y su mantenimiento en de unos 800 millones de euros anuales.

Hubiera sido muy difícil que un país por sí solo hubiera invertido tales esfuerzos en este proyecto. Siguiendo una idea de Louis de Broglie, en 1949 se creó el CERN con vocación europea, pero que hace años se ha visto sobrepasada con la inclusión de otros países en la organización, como Estados Unidos, Japón, o Australia.

Por otra parte, los resultados en el mundo de la física han sido indudables. En julio de 2012 se descubrió el bosón de Higgs y es posible que dentro de unos años nos sorprendamos con otros hallazgos importantes.

Pero los beneficios son también técnicos. El manejo de partículas subatómicas con las energías y la precisión necesarias serán de ayuda para otros experimentos, como el ITER<sup>17</sup>, que también necesita el control de partículas a muy altas energías para el provocar fusión nuclear en condiciones económicamente rentables.

---

<sup>17</sup> Acrónimo de 'International Thermonuclear Experimental Reactor'.

Pienso que nuestra civilización no tiene más remedio que abordar ciertas estrategias de forma conjunta si quiere sobrevivir a largo plazo (como el control de la natalidad o la salida al espacio exterior), y entre ellas se incluye el control de la fusión nuclear para la generación de energía y, en eso, la experiencia del LHC será sin duda útil.

Hace tiempo que pasó la época de los descubrimientos individuales o de equipos reducidos de trabajo, como la radiactividad de Marie Curie o la estructura del átomo de Ernest Rutherford). Ahora el bosón de Higgs ha sido anunciado a la prensa por medio de dos equipos independientes donde trabajan miles de científicos, ingenieros, constructores e informáticos de muchas partes del mundo.

¿Qué nos deparará el futuro del LHC? No lo sabemos pero, aunque no hubiera más descubrimientos científicos, ya hemos conseguido una victoria: la colaboración internacional. Sin duda ha valido la pena.

## Referencias

Siendo el LHC y el CERN un proyecto tan importante, hay muchas referencias en internet, pero suelen ser bastante técnicas o centradas en algunos temas muy concretos.

Lo mejor para empezar es la página '[www.lhc-closer.es](http://www.lhc-closer.es)', de los profesores Xabier Cid Vidal y Ramón Cid Manzano.

Hay Información general en:

- '[es.wikipedia.org/wiki/Gran\\_colisionador\\_de\\_hadrones](http://es.wikipedia.org/wiki/Gran_colisionador_de_hadrones)'
- '[lhc.web.cern.ch/lhc/](http://lhc.web.cern.ch/lhc/)'

Informes de diseño del LHC en:

- '[lhc.web.cern.ch/lhc/LHC-DesignReport.htm](http://lhc.web.cern.ch/lhc/LHC-DesignReport.htm)'
- '[project-integration-accelerateurs.web.cern.ch/project-Integration-Accelerateurs/frame\\_integration.htm](http://project-integration-accelerateurs.web.cern.ch/project-Integration-Accelerateurs/frame_integration.htm)'

Y un artículo que describe los sistemas de detección en '*La búsqueda del bosón de Higgs*' de las españolas Martine Bosmann (proyecto ATLAS) y Teresa Rodrigo (proyecto CMS), en Investigación y Ciencia, Septiembre de 2012.