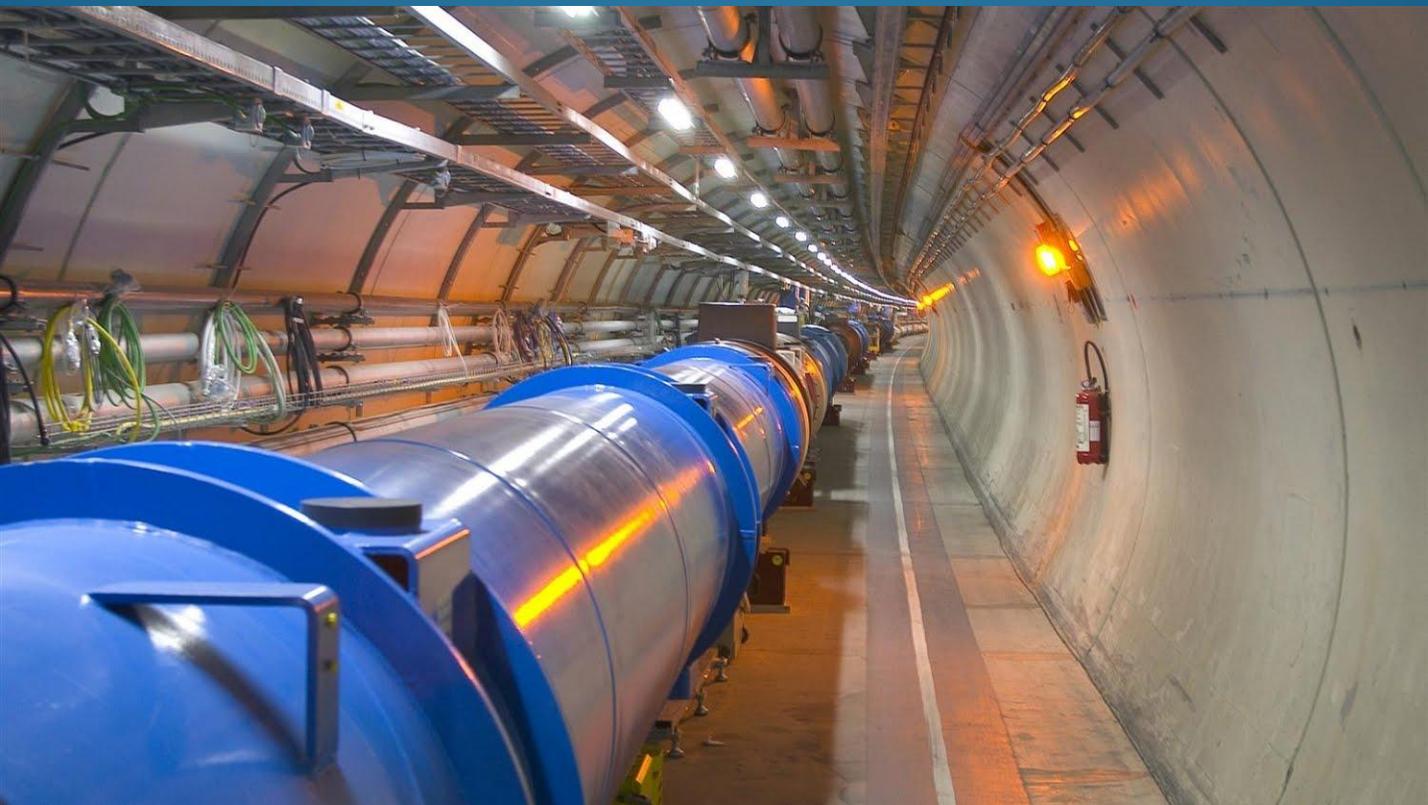


GRAN COLISIONADOR DE HADRONES (LHC)



Celso Martínez Rivero
Ana Ursúa León

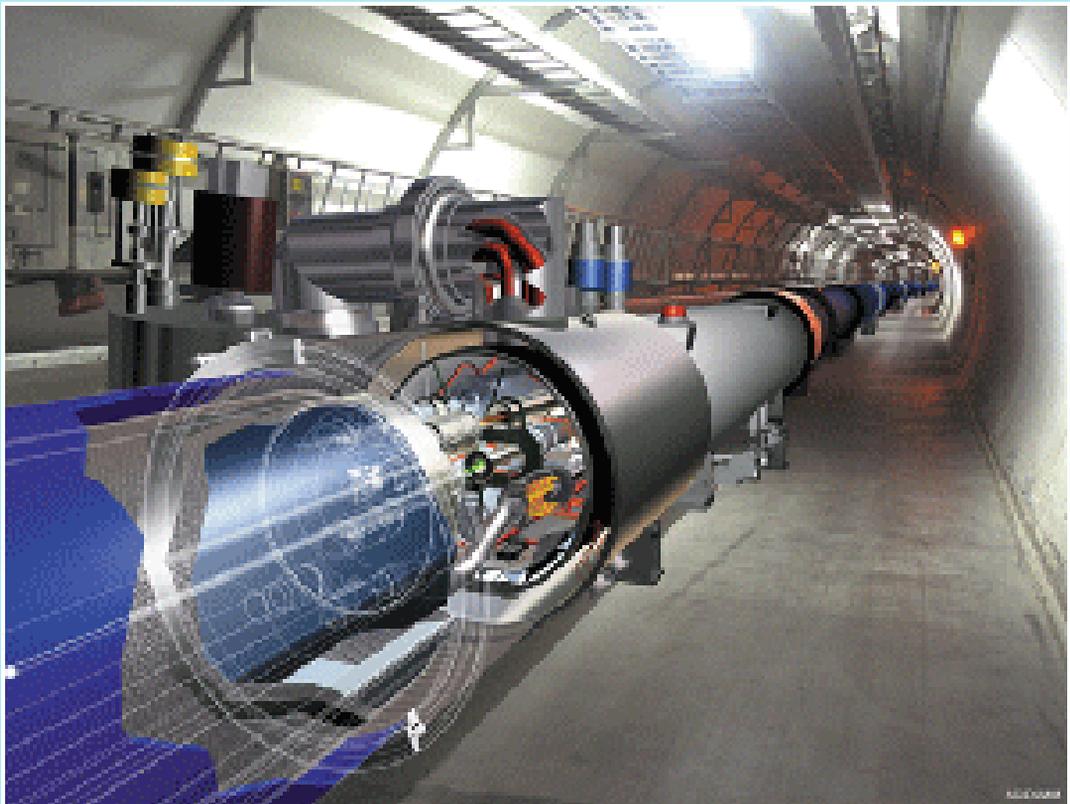


ÍNDICE

- INTRODUCCIÓN
- CERN
 - Breve Historia del CERN
 - Nacimiento de la Web
 - Futuro del CERN
 - España y el CERN
- LHC
 - *Introducción*
 - *Parámetros del LHC*
 - *Aceleradores de Partículas*
 - *Diseño del LHC*
 - *LHC en marcha*
 - *Fuente de protones*
 - *Colisiones*
 - *GRID*
 - *Coste del LHC*
 - *Más allá del LHC*
- FÍSICA EN EL LHC
 - Cinemática
 - Fuerzas
 - Momento Lineal
 - Energía
 - Alto Vacío
 - Bajas Temperaturas
 - Magnetismo
 - Electricidad
 - Superconductividad
 - Luminosidad
 - Sección eficaz
 - Relatividad
 - Radiación sincrotrón
 - Radiación ionizante
 - Agujeros negros
- *DETECTORES*
 - *Introducción*
 - *ATLAS*
 - *CMS*
 - *LHCb*
 - *ALICE*
 - *TOTEM*
 - *LHCf*
 - *MoEDAL*
- *MODELO ESTÁNDAR*
 - *Antimateria*
 - *Interacciones*
 - *Diagramas de Feynman*
 - *Partícula de Higgs*
 - *Violación CP*
 - *Más allá del LHC*
- *GLOSARIO*
- *OTROS*
- *LHC PARAMETROS*
- *DATOS ASOMBROSOS*

INTRODUCCIÓN

- **Large Hadron Collider (Gran Colisionador de Hadrones)** es el **más importante acelerador de partículas del mundo**, acelerando su dos haces de protones a una energía de 3.5 TeV por protón. Esta es la más alta energía alcanzada en un acelerador de partículas, que será mantenida hasta finales de 2011.
- El LHC -situado en las afueras de la ciudad de **Ginebra** sobre la frontera Franco-Suiza- produce la mayor cantidad de información nunca antes generada en otro experimento. Revelará los más fundamentales secretos de la naturaleza.



CERN

- The **European Organization for Nuclear Research** (originalmente: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), comúnmente conocido como CERN, es **el más grande laboratorio de Física de Partículas del mundo**, y está situado en Ginebra en la frontera entre Francia y Suiza.
- El acuerdo que estableció el nacimiento del CERN fue firmado el 29 Septiembre de 1954. De los iniciales 12 firmantes de este acuerdo, el número ha crecido hasta los **actuales 20 estados miembros**.
- Su principal función es **proporcionar su complejo de aceleradores y otras infraestructuras para la investigación en la Física de Altas Energías**. Numerosos experimentos han sido llevados a cabo en el CERN a través de colaboraciones internacionales.
- En el CERN trabajan diariamente unas **2600 personas**. Además, alrededor de unos **8000 científicos y ingenieros (pertenecientes a unas 500 instituciones y 80 nacionalidades)**, trabajan en experimentos operados en el CERN.



Breve historia del CERN

- Los orígenes del CERN se remontan a 1949, cuando el físico francés Louis de Broglie propuso establecer un nuevo laboratorio europeo para detener el éxodo de físicos desde Europa a EEUU. Un año después, en la conferencia de la UNESCO en Florencia, el físico estadounidense Isidor Rabi propondría una resolución que invitase a la UNESCO **"a asistir y a animar hacia la formación y la organización de centros y laboratorios regionales para aumentar y hacer más fructífera la colaboración internacional de científicos"**.
- La resolución fue unánimemente adoptada y, después de otras dos conferencias de la UNESCO, 11 países europeos acordaron la creación de un provisional *Conseil Européene pour la Recherche Nucléaire* (CERN). El nuevo consejo se reunió en Amsterdam y se seleccionó un lugar cerca de Ginebra. Aunque que ya en 1953 comenzaron los experimentos en el primer acelerador construido, no fue formalmente hasta el 29 de septiembre de 1954 que el CERN fue constituido a partir de la ratificación de los primeros 12 estados miembros.
- Esos 12 estados miembros fueron Bélgica, Dinamarca, Francia, Alemania, Grecia, Italia, Holanda, Noruega, Suecia, Suiza, Reino Unido y Yugoslavia. Desde entonces, Yugoslavia desapareció y Austria, España, Portugal, Finlandia, Polonia, Hungría, Eslovaquia, República Checa y Bulgaria entraron en el CERN, elevando el número de países hasta los 20 actuales.
- España abandonó el CERN en 1969 e ingresó de nuevo en 1983.
- India, Israel, Japón, Federación Rusa, Turquía y EEUU tienen el estatus de observador, así como la UE y la UNESCO.
- **Se estima que la mitad de los 13000 físicos de partículas del mundo están involucrados en experimentos del CERN. Alrededor de 4500 son de los 20 estados miembros, y otros proceden de Rusia (744), EEUU (586) y Japón (103).**
- La localización principal está en Meyrin (a 6 km de Ginebra), sobre la frontera franco-suiza, y hay un segundo lugar en Preveessin (Francia).
- **La mayor parte de los 27 km del Large Hadron Collider (LHC) está en Francia: la sala de control está en Preveessin y todos los detectores excepto ATLAS, están bajo suelo francés.**

Nacimiento de la Web

- **EL futuro del CERN es el LHC:**
 - Investigaciones en el campo de la Física: 2010 – 2022.
 - Mejora de la **Luminosidad**.
 - Desarrollo de **nuevos grandes campos magnéticos**.
- **Superconducting Proton Linac (SPL):**
 - Mejora del Complejo de Aceleradores del CERN.
 - Segunda Generación del “**Ion Beam Facility**”
 - La Física de los **Neutrinos**.
- **Otros retos:**
 - LHC Computing Grid (**LCG**)
 - Test de viabilidad del proyecto **CLIC**, para llegar al 2010 con conclusiones definitivas para su posible uso como acelerador lineal electrón-positrón en el orden del TeV.
 - CERN y la **Astrofísica de Partículas**.

Futuro del CERN

- En 1989, **Tim Berners-Lee**, un joven científico que trabajaba en el CERN, creó el **HYPertext** para permitir una mejor comunicación entre los científicos que estaban trabajando en diferentes proyectos.
- Con ayuda de **Robert Caillou** y un pequeño equipo se creó el HTML, http, URLs, el primeiro Servidor, el primer navegador y el primer editor html.
- Cuando el CERN decidió permitir **la libre distribución de la Web** su progreso fue imparable. En un mundo gobernado por los intereses económicos llama la atención la absoluta transparencia con la que trabaja esta institución y su generosa decisión en relación a la **WWW**.
- De aquel único servidor a comienzos de los 90 se ha pasado a los más de 45 millones de hoy en día.
- Ahora, es el momento de una nueva red: **GRID**
- Un encuesta "online" dirigida por “CNN news group” sitúa **the World Wide Web** como la primera de las siete maravillas modernas del mundo.
- La World Wide Web ganó con un 50 % de los votos (3665 votos). **El segundo fue el CERN otra vez**, con el 16 % de los votantes (1130 votos) premiando así al acelerador LHC.

España y CERN



En España hay numerosos centros de investigación que trabajan para el CERN y LHC.

Instituto Galego de Física de Altas Enerxías
IGFAE - SANTIAGO

Depto d'Estructura i Constituents de la Matèria
UB - BARCELONA

Instituto de Física de Cantabria
IFCA - CANTABRIA

Institut de Física d'Altes Energies
UAB - BARCELONA

Instituto de Física Corpuscular
UV - VALENCIA

CIEMAT - Física Experimental de Altas Energías
MADRID

INTRODUCCIÓN LHC

- LHC
- Parámetros del LHC
- Acelerador de partículas
- Unidades
- Diseño del LHC
- LHC en marcha
- Fuente de protones
- LHC Colisiones
- LHC Grid
- LHC Coste
- Más allá del LHC

LHC

- **LHC es el más potente de los aceleradores de partículas del mundo** y está ubicado en el CERN sobre la frontera franco-suiza.
- Utiliza parte de la estructura del ya clausurado acelerador LEP, con una **circunferencia de 27 km** y situado a **100 m bajo tierra**.
- **L A R G E (Gran): El tamaño de un acelerador está relacionado con la máxima energía obtenible.** En el caso de un colisionador circular, esa energía es función del radio de la máquina y de la intensidad del campo magnético dipolar que "dirige" las partículas en sus órbitas. **El LHC utiliza algunos de los más potentes dipolos magnéticos y cavidades de radiofrecuencia que existen.**



Parámetros del LHC

- Partículas: Protones (protón-protón colisión) y iones pesados (Pb 82+)
- Circunferencia: 26659 m.
- Inyector: SPS
- Energía del haz inyectado: 450 GeV (protones)
- Energía Nominal del haz: 7 TeV (protones)
- Campo Magnético a 7 TeV: 8.33 Tesla
- Temperatura de Operación: 1.9 K
- Número de imanes: ~9300
- Número de dipolos principales: 1232
- Número de cuadrupolos: ~858
- Número de imanes correctores: ~6208
- Número de RF cavidades: 8 por haz; intensidad del campo ≈ 5 MV/m
- RF frecuencia: 400 MHz
- Frecuencia de Revolución: 11.2455 kHz.
- Consumo de Energía: ~180 MW
- Gradiente del túnel: 1.4%
- Diferencia entre el punto más alto y el más bajo del túnel: 122 m.

Aceleradores de partículas

Los aceleradores funcionan con partículas cargadas que son aceleradas hasta velocidades próximas a la de la luz. Mediante las colisiones de estas partículas de muy alta energía entre ellas, o contra un blanco fijo, los científicos son capaces de extraer información de los más pequeños componentes de la materia. En esos choques, nuevas partículas son creadas, lo que proporciona valiosos datos para la Física de Partículas.

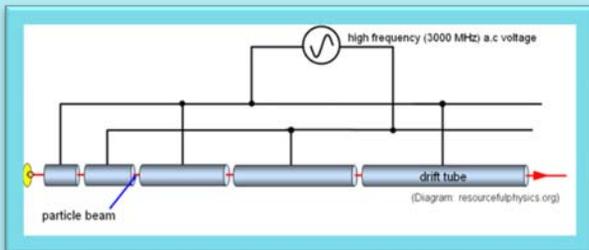
Un tubo de rayos catódicos (TRC) de un televisor tradicional es una forma simple de acelerador. La mayoría del espacio del televisor está ocupado por un tubo de rayos catódicos en el que se sitúa un cañón de electrones que dispara constantemente un haz de electrones contra la pantalla, que está recubierta de fósforo (material que se ilumina al entrar en contacto con los electrones). En los monitores en color, cada punto o píxel de la pantalla está compuesto por tres pequeños puntos de fósforo: rojo (magenta), cian (azul) y verde. Iluminando estos puntos con diferentes intensidades, puede obtenerse cualquier color.



ACELERADORES LINEALES

Un acelerador lineal de partículas (también llamado **linac**) es un dispositivo eléctrico que **mediante un diseño lineal acelera partículas subatómicas**. Las características dependerán del tipo de partículas que van a ser aceleradas: electrones, protones o iones. Los tamaños van desde el tubo de rayos catódicos, a los 3,4 km del *Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)* en California.

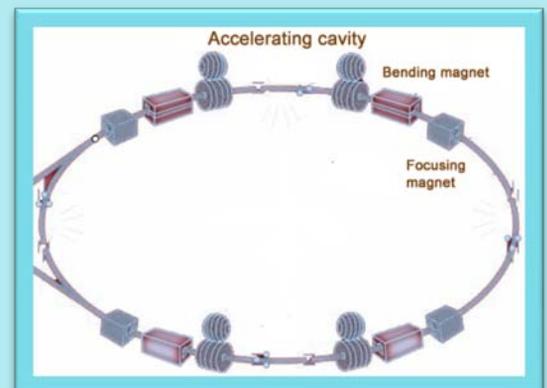
Quizás, el acelerador que tome el relevo al LHC en el futuro sea un acelerador lineal de electrones (ILC).



ACELERADORES CIRCULARES

En un acelerador circular, las partículas se mueven en una trayectoria casi circular hasta alcanzar la energía necesaria. Esa trayectoria se consigue usando potentes campos magnéticos. **La ventaja sobre los lineales es que de esa forma podemos mantener una continua aceleración, dado que las partículas pueden circular todo el tiempo que se necesite.** Otra ventaja es que son relativamente más pequeños que los aceleradores lineales de potencia semejante.

Dependiendo de la energía y del tipo de partículas aceleradas, los aceleradores circulares diseñados para la Física de Partículas tienen la desventaja de emitir **radiación sincrotrón**. Esto provoca una continua pérdida de energía y los problemas asociados a la presencia de este tipo de radiación.



Unidades

El **Electrón-voltio**, unidad de energía con símbolo **eV**, es utilizada para pequeñas energías.

1 electron-Voltio

1 **eV** se define como la cantidad de energía equivalente a la que gana un electrón libre (o un protón) cuando es acelerado mediante una diferencia de potencial de un voltio en el vacío.

Así, una pila de 1,5 V proporcionaría a cada electrón (o protón) una energía de 1,5 eV. O un TRC de un televisor proporciona a los electrones una energía de ~ **20 keV**.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$



Energías en el CERN

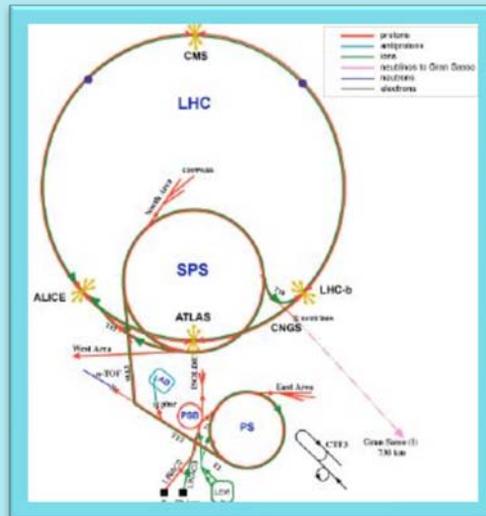
Linac 50 MeV

PSB 1.4 GeV

PS 25 GeV

SPS 450 GeV

LHC 7 TeV



Por tanto, en el LHC cada **protón** alcanza una **energía final máxima** de **7 TeV**.

Harían falta 350 millones de TV "conectados en serie" para conseguir esa energía.

Con un tamaño medio de unos 12 cm en el tramo acelerador de un TRC, tendríamos una longitud de:

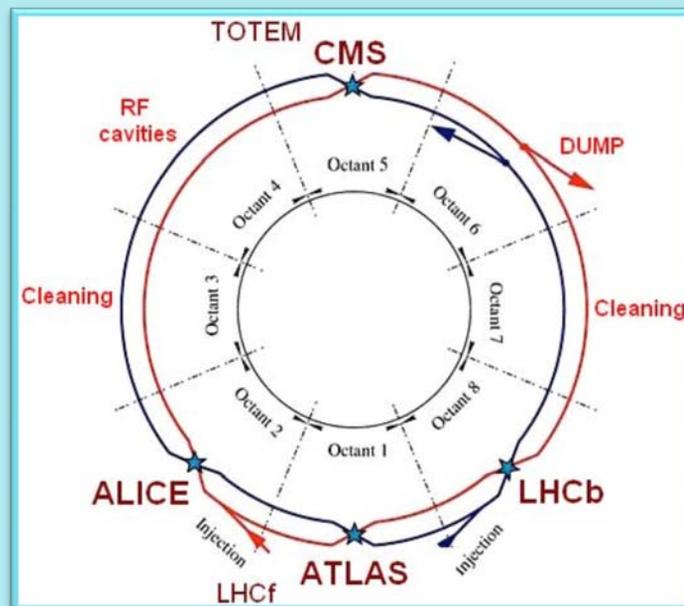
0,12 x 350 · 10⁶ ~ 40 · 10⁶ m (40000 km !).

Por tanto, este "acelerador circular" daría la vuelta a la Tierra sobre la línea del ecuador.

Así que el complejo de aceleradores del CERN finalmente no es tan grande, no?

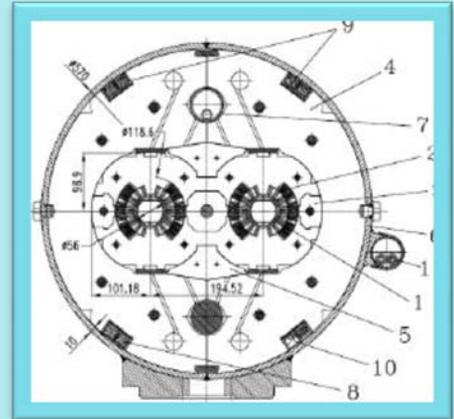
Diseño del LHC

- En el LHC los protones colisionan en choques frontales para alcanzar energías nunca antes obtenidas a esa escala. El colisionador está situado en un túnel de casi 27 km de perímetro circular ($r = 4243 \text{ m}$) y a unos 100 metros bajo tierra.
- El túnel comienza cerca del CERN (Meyrin), continua casi acercándose al macizo del Jura, sigue bajo la campiña francesa, pasa al lado del aeropuerto de Ginebra para volver al CERN (Meyrin).
- El LHC no es un círculo perfecto. Está formado por ocho arcos y ocho 'inserciones'. Consiste en ocho arcos de 2.45 km de longitud, y ocho secciones rectas de 545 m de largo.
- Los arcos contienen los dipolos magnéticos, 154 en cada arco. Una inserción es una sección recta más dos (una en cada lado) regiones de transición — las llamadas 'dispersion suppressors'. El exacto diseño de cada sección recta depende del uso específico de la inserción: Física (colisiones en un experimento), inyección, descarga de los haces o limpieza de los mismos.
- Un sector es definido como la parte de la máquina entre dos puntos de inserción. Los ocho sectores son las unidades de trabajo 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 constituyen el mismo sistema criostático. Cada sector es desde el punto de vista energético independiente.
- Un octante comienza en el medio de un arco y finaliza en el medio del siguiente y "contiene" una inserción total. Por tanto, cada octante define una zona diferente según se está guiando a los haces de partículas hacia su inyección, una colisión, su descarga o su limpieza.
- El LHC proporciona colisiones protón-protón con una energía en el centro de masas de 14 TeV, y un muy alto número de colisiones por segundo y por cm^2 (Luminosidad). Con el fin de obtener estos valores, el colisionador opera con 2808 paquetes de protones (bunches) en cada haz y una alta intensidad (1.15×10^{11} protones por bunch); esto requiere más de 9000 imanes superconductores de diferentes tipos.



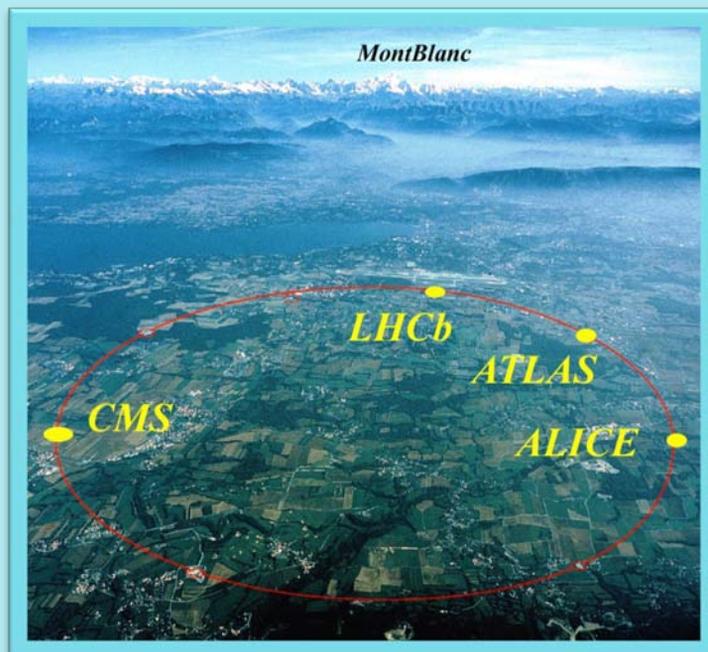
Dipolos superconductores

- El reto más notable en el LHC son los 1232 dipolos superconductores, que operan de forma continua produciendo un campo constante de 8.33 T (100000 veces el campo magnético de la Tierra), con la posibilidad de acadar un valor máximo de 9 T.
- El sistema superconductor opera en helio superfluido a 1.9 K. Haces de núcleos de Pb-208 serán también acelerados, colisionando con una enerxía de 1150 TeV.
- Cada ión de Pb-208 llega a la colisión con $1150/2 = 575$ TeV.
- Por tanto, la energía por nucleón es: $575/208 = 2,76$ TeV
- En las colisiones existirán las condiciones necesarias para que aparezcan nuevas (y quizás inesperadas) partículas elementales.



Detectores

- Cuatro detectores han sido construidos en sendas enormes cavernas. Ellos recogen los datos producidos como resultado de las colisiones. Los detectores (también llamados experimentos) son: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (the Compact Muon Solenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) y LHCb (study of physics in B-meson decays at LHC).
- Además, hay otros dos experimentos: TOTEM (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC) y LHCf (Large Hadron Collider forward).



CLEANING

La alta luminosidad del LHC implica condiciones de almacenamiento, aceleración y haces de partículas nunca antes alcanzadas. La densidad de energía del haz de partículas es 1000 veces más alta que la lograda en cualquier otro colisionador de protones. Una muy pequeña fracción del haz almacenado es suficiente para provocar "quenching" en uno de los dipolos superconductores del LHC, o incluso destruir partes del acelerador. Téngase presente que una fracción de 10^{-5} del haz nominal del LHC puede dañar una superficie de cobre. La energía del haz de protones del LHC es suficiente para fundir casi 1 tonelada de cobre!

Un poderoso **sistema colimador** protege al acelerador contra las inevitables y regulares pérdidas de protones. **Dos secciones rectas, IR₃ e IR₇, están dedicadas al "beam cleaning"**.

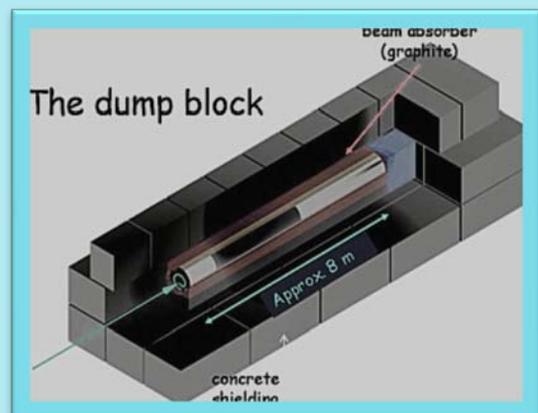
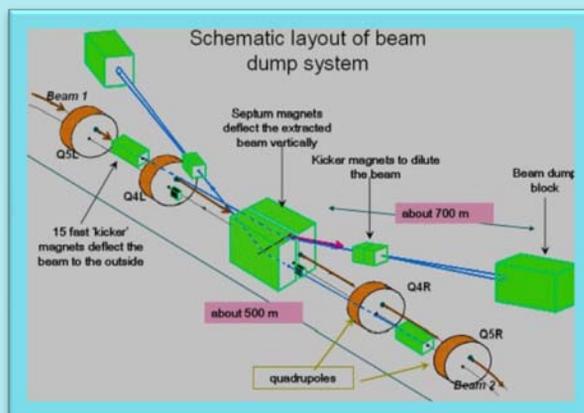
Estas dos secciones son de las más radiactivas áreas del LHC, y están equipadas con unos 50 imanes colimadores funcionando con corriente convencional y operando en un rango de 0.09 T a 1.53 T.

Las trayectorias de los dos haces son separadas horizontalmente de 194 mm a 224 mm en la zona de inserción del sistema colimador.



DUMPING

- **El sistema de descarga de los haces de partículas (beam dumping) del LHC** está designado para realizar una rápida extracción de los haces de partículas desde el acelerador con mínimas pérdidas. Las partículas son entonces llevadas a unos bloques que están ubicados en sendas cavernas al final de una línea de vacío de unos 700 m.
- Cuando es momento de extraer los haces (también en caso de urgencia), éstos son desviados fuera del anillo por un sistema magnético que los envía a los bloques de descarga.
- Un sistema en la línea de vacío de "dispersión energética" horizontal provoca que el haz tome una forma de "e" a la entrada del bloque de descarga para rebajar el impacto energético sobre el bloque. **Este es el único elemento en el LHC que puede resistir el impacto del haz completo.** El bloque está hecho de grafito y tiene forma cilíndrica con 8 m de longitud y 1 m de diámetro, en el que se dispersa la cascada hadrónica generada en su largo volumen.



QUENCHING

“**Quenching**” aparece cuando una parte de un imán pasa de condiciones de superconductividad a un estado resistivo normal.

Los “quenches” se inician con energías de unos pocos mJ cuando la temperatura crítica o la corriente crítica es superada, por movimientos en los superconductores (fricción y disipación de calor), fallos criogénicos, y obviamente por pérdida del haz que impacta contra el sistema criogénico. Entonces, la deposición de energía en el cableado superconductor provoca el fin de las condiciones de superconductividad con un aumento progresivo de la temperatura por efecto Joule.

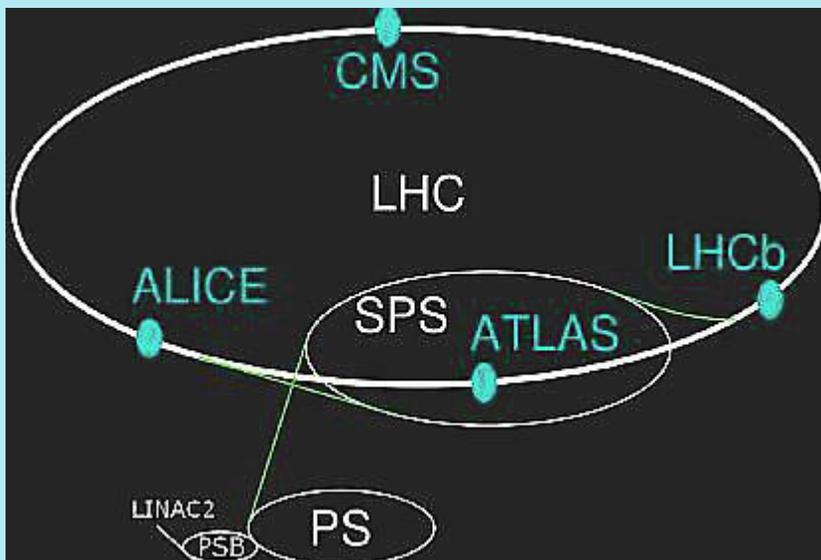
Para proteger los imanes superconductores:

- El “quenching” debe ser detectado: un voltage aparece sobre el bobinado ($R \sim 0$ a $R > 0$).
- La energía liberada es distribuida sobre todo el imán usando los llamados “quench heaters” (de forma que todo el imán entra en quenching).
- La corriente en el imán tiene que ser cortada en $\ll 1$ segundo.

El quenching es un peligro real pues como se ha ya comentado, una muy pequeña fracción del haz (10^{-6}) basta para generarlo.

Un dipolo en “quenching” requiere una descarga de los haces en una sola vuelta, por lo que **los 14 TeV (720 MJ) se disipan en 89 ms!**

Un error en la descarga de los haces expone a los componentes del acelerador a serios riesgos de radiación.



LHC en marcha

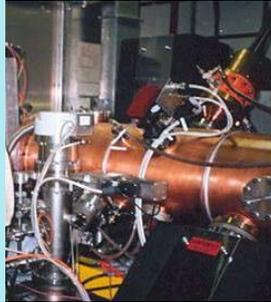
La **fente de protones** (proton source) es donde todo comienza en el CERN.

Para "fabricar" los protones, se inyecta gas hidrógeno dentro de un cilindro de metal, - **Duoplasmatron**- para que un campo eléctrico disocie los átomos en protones y electrones. Este proceso da lugar a un 70 % de protones.

Los protones son acelerados por el cuadrupolo de RF de **90 kV** y son enviados a continuación al acelerador lineal (**LINAC2**) que los acelera hasta los **50 MeV**.



Proton source



RF quadrupole - 90 KeV



LINAC2 - 50 MeV

Cuando salen del Linac2 entran en el primer acelerador circular, **PS Booster**, para salir de él con **1.4 GeV**. El haz entra después en el **Proton Synchrotron (PS)** donde es acelerado hasta los **25 GeV**. Los protones son enviados a continuación al **Super Proton Synchrotron (SPS)** donde se aceleran hasta los **450 GeV**.



PS Booster 1.4 GeV



Proton Synchrotron 25 GeV



Super PS 450 GeV

Finalmente, los protones son transferidos al LHC (**en los dos sentidos**), siendo el tiempo de llenado de 4'20".

Ya en el LHC, los haces de protones serán acelerados durante unos 20 minutos hasta los **7 TeV**.



LHC 7 TeV (proton)

(2,76 TeV/nucleón iones de Pb)

Los dos haces de partículas permanecerán en el colisionador, a máxima energía, entre 10 y 20 horas (con un poco de suerte). En 10 horas, los protones habrán realizado cuatrocientos millones de revoluciones dentro de la máquina.

El llamado "**beam lifetime**" (**tiempo de vida del haz**) del LHC es de **alrededor de 10 h**.

En cada vuelta, un cierto número de protones son perdidos. Esto es debido a la eficacia limitada de los sistemas magnéticos que controlan los haces, interacción con las moléculas del gas residual en los tubos de vacío, interacción coulombiana con los protones que vienen en sentido contrario en las zonas de colisión, son algunas de las razones de estas pérdidas de partículas del haz. Además, se produce la interacción, también coulombiana, entre los protones que forman los paquetes (bunches) que conforman el haz. Como los protones oscilan ligeramente alrededor de su trayectoria circular, pueden entrar en contacto con otros protones del mismo paquete, pudiendo haber modificaciones en sus momentos lineales que provocan su inestabilidad. Los sistemas multipolares magnéticos no podrán corregir esos cambios, generándose la pérdida de esas partículas en el tubo de vacío. Esto es lo que se conoce como **efecto Touschek**, en honor al físico austriaco Bruno Touschek.

Estos movimientos caóticos pueden llegar al extremo de descontrolar el haz, lo que provocaría transferencia de energía sobre el sistema criogénico que implicaría la pérdida de las condiciones de superconductividad (**quenching**), lo que tendría muy negativas consecuencias. Por ello, vaciar los tubos (**dumping**) se hace necesario, para inyectar desde el SPS una nueva colección de paquetes en el LHC.

Fuente de protones

- La **fente de protones** (proton source) es donde todo comienza en el CERN.
- Para **"fabricar" los protones**, se inyecta gas hidrógeno dentro dun cilindro de metal, -Duoplasmatron- para que un campo eléctrico disocie los átomos en protones y electrones.
- Este proceso da lugar a un 70 % de protones.



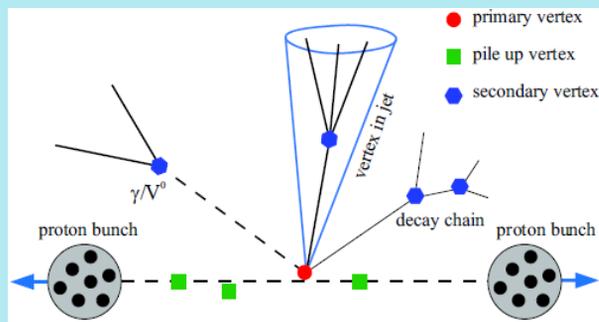
- Para cada haz del LHC, necesitamos:
- **2808 bunches** $\times 1.15 \cdot 10^{11} = 3 \cdot 10^{14}$ **protones por haz o el doble, $6 \cdot 10^{14}$ protones para los dos haces (1)**
- Un solo centímetro cúbico de gas hidrógeno a temperatura ambiente contiene
- con **$P = 10^5 \text{ Pa}$,, $V = 10^{-6} \text{ m}^3$,, $T = 293 \text{ K}$**
- usando **$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$**
- **$n = 4 \cdot 10^{-5}$ moles ,, $N = 4 \cdot 10^{-5} \times 6 \cdot 10^{23} = 2.4 \cdot 10^{19}$ moléculas**
- **Por tanto, $5 \cdot 10^{19}$ átomos of hidrógeno (2)**
- Teniendo en cuenta (1) y (2), el LHC puede ser relleno unas 100000 veces con solo un centímetro cúbico de gas - y solo se rellena dos veces al día!
- Los protones son acelerados por el cuadrupolo de RF de **90 kV** y son enviados a continuación al acelerador lineal (LINAC2) que los acelera hasta los **50 MeV**.
- Una pequeña botella de hidrógeno contiene unos 5 kg de este gas. Entonces la cantidad de moléculas es:
- **$n = 5000/2 = 2500$ moles**
- **$2500 \times 6 \cdot 10^{23} = 1.5 \cdot 10^{27}$ moléculas**
- **$N = 2 \times 1.5 \cdot 10^{27} = 3 \cdot 10^{27}$ átomos**
- Teniendo en cuenta que el proceso de ionización genera un 70% de protones, tenemos:
- **$0,7 \times 3 \cdot 10^{27} = 2.1 \cdot 10^{27}$ átomos**
- Considerando (1), esta botella podrá ser utilizada:
- **$2.1 \cdot 10^{27} / 6 \cdot 10^{14} = 3.5 \cdot 10^{12}$ veces**
- Dado que el LHC es llenado cada diez horas, nuestra botella podrá durar:
- **$10 \times 3.5 \cdot 10^{12} = 3.5 \cdot 10^{13}$ horas**
- **Es decir, unos $4 \cdot 10^9$ años**
- Con toda seguridad el gas hidrógeno escapará de la botella más rápido.

Colisiones

El objetivo fundamental del LHC es proporcionar colisiones a la más alta energía posible. Para eso los protones (o hadrones en general) son aceleradas hasta velocidades próximas a la de la luz. Mediante estas colisiones los científicos son capaces de extraer información de los más pequeños componentes de la materia. En esas colisiones nuevas partículas son creadas, lo que proporciona valiosos datos para la Física de Partículas. En cierto sentido, los aceleradores de partículas son los "super microscopios" de hoy.

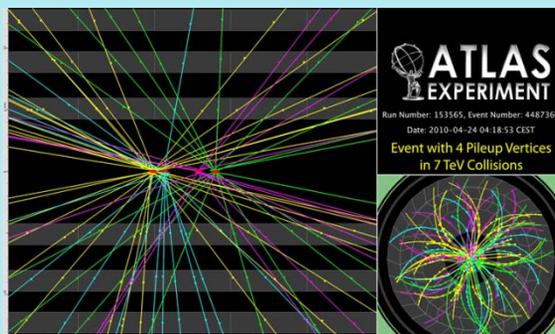
Cada vez que dos paquetes de protones (bunches) se cruzan en el interior de uno de los detectores se producen múltiples colisiones protón-protón simultáneas: **múltiples vértices primarios**.

Cada uno de estos vértices primarios dará lugar a varios **vértices secundarios** y así sucesivamente.



Aquellos **vértices primarios menos energéticos** (generalmente de poco interés) son **desechados** y se atiende únicamente al **vértice primario más energético** (que sueña ser de más interés científico).

El trabajo informático a través de extraordinarios **algoritmos de reconstrucción de trayectorias** es el encargado de esta selección. En condiciones óptimas (máxima **luminosidad**) pueden producirse más de veinte de colisiones simultáneas (gran número de vértices apilados - **pileup vertices**) siendo esto una muestra clara de la enorme dificultad a la que se enfrentan los físicos en el experimento LHC.



Colisión con **cuatro vértices primarios** observada en ATLAS el 24 de abril de 2010.

GRID

- **GRID:** es un servicio para compartir la potencia de computación y la capacidad de almacenamiento a través de Internet. Va mucho más allá de una simple comunicación entre ordenadores, pues **pretende convertir la conexión entre ordenadores en un verdadero recurso computacional único y global.**
- El experimento LHC en pleno rendimiento produce aproximadamente unos **600 millones de colisiones/segundo**, lo que implica en términos de datos **15 Petabytes al año**, a los que accederán miles de científicos de muchas partes del mundo. La misión del **LHC Computing Grid (LCG)** consiste en construir y mantener el almacenamiento de datos y la infraestructura para toda la comunidad de Física de Altas Energías que usa el LHC.
- Los datos de los experimentos del LHC son distribuidos a todas partes del mundo en un modelo de cuatro niveles (**four-tiered model**). Un primer "backup" será almacenado en cinta en el propio CERN: el centro "**Tier-0**" del LCG. Después de un procesamiento inicial, los datos son distribuidos a una serie de centro "**Tier-1**", grandes centros de computación con suficiente capacidad de almacenamiento y con 24 h al día de permanente soporte para la GRID.
- **Los centros "Tier-1" permitirán el acceso a los datos de los centros "Tier-2".** Estos consisten en una o varias **asociaciones de instalaciones informáticas que pueden almacenar suficientes datos y proporcionar adecuada velocidad de procesamiento para las tareas de análisis de datos.** Científicos de forma individual acceden a estas instalaciones a través del nivel último, "**Tier-3**", que consisten, por ejemplo en un cluster local, en un departamento universitario o incluso en PCs individuales.
- **La LHC Computing Grid** conecta ordenadores distribuidos en una muy amplia área geográfica. Mientras que la Web mundial permite el acceso a la información, la Grid permite el acceso a los recursos de los ordenadores conectados. Estos recursos incluyen memoria de datos, energía de proceso, sensores, herramientas de la visualización y mucho más. La Grid puede combinar los recursos de miles de ordenadores para crear un recurso de gran alcance, accesibles desde la comodidad de un ordenador personal y útiles para los múltiples usos en ciencia, negocios y más allá. La Grid se basa en redes de fibra óptica dedicadas a distribuir datos desde el CERN a once centros de computación importantes en Europa, Norteamérica y Asia. De estos, los datos se envían a más de 140 centros en 33 países: Australia, Austria, Bélgica, Canadá, China, la república checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Hungría, Italia, la India, Israel, Japón, república de Corea, los Países Bajos, Noruega, Paquistán, Polonia, Portugal, Rumanía, la federación rusa, Eslovenia, España, Suecia, Suiza, Taipei, Turquía, el Reino Unido, Ucrania, y los Estados Unidos de América.



Coste del LHC

(Tomado *de LHC The Guide 2009*)

El coste para la máquina solamente es de alrededor de 3000 millones de euros.

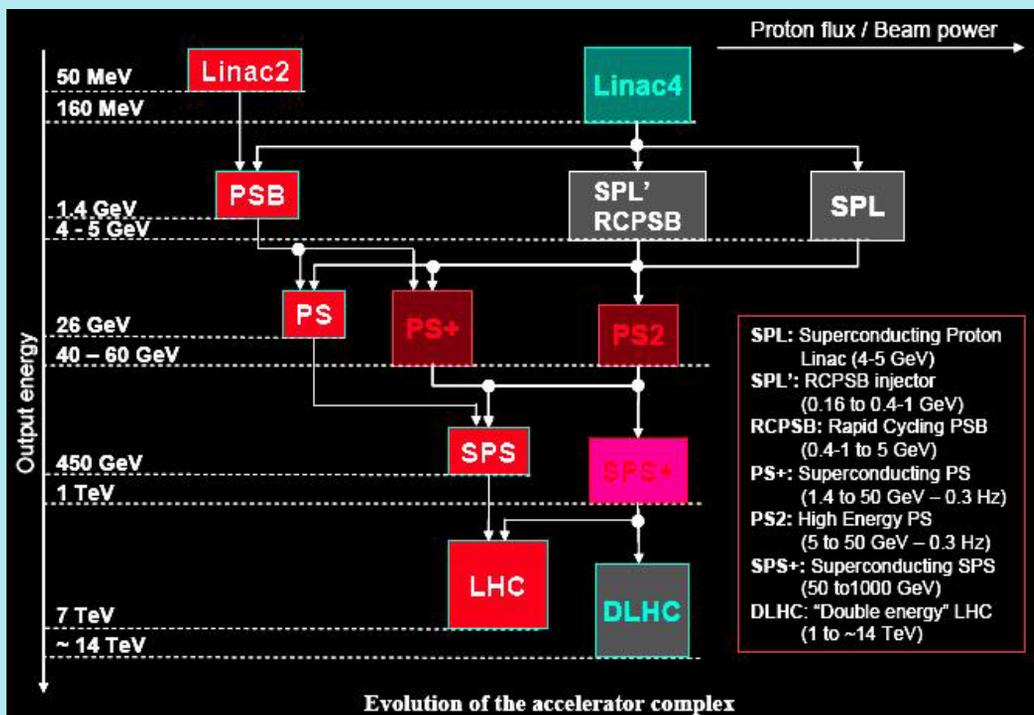
El coste del proyecto total puede desglosarse como sigue:

Costes de construcción	Personal	Materiales	Total
Máquina LHC	1224	3756	4980
Detectores	869	493	1362
Computing	85	83	168
Total	2178	4332	6510

Las colaboraciones experimentales son entes individuales, fundados independientemente del CERN. El CERN es miembro de cada experimento, y contribuye al presupuesto del material de CMS y LHCb en el 20%, 16% para ALICE y 14% para ATLAS. TOTEM es un experimento mucho más pequeño, con un coste en material de unos 4,1 millones de euros, de los cuales el CERN proporciona el 30% del presupuesto.

Más allá del LHC

- Cuando los resultados del LHC comiencen a ser analizados y se llegue al límite de su rendimiento, será preciso poner en marcha planes para mejorar en la cadena de aceleradores que suministran los haces de protones al LHC y el diseño y producción de nuevos imanes superconductores.
 - A continuación, se tienen en cuenta otros aspectos de forma resumida.
 - **El tiempo de arranque del LHC debería ser llevado a cabo en el menor tiempo posible.** El período básico puede ser reducido a partir de **ciclos más cortos en el PSB y PS**. Además, el tiempo de aceleración en el **SPS** puede ser también reducido. Deben ser utilizados todos los medios **para disminuir las pérdidas en el haz de protones. En el SPS, esto incluye el aumento de los picos de potencia en las cavidades RF.** Un posible programa de consolidación de los imanes del SPS podrían proporcionar la mejora de la impedancia y **reducir la generación de nubes de electrones en los haces** por modificación de la cámara de vacío. Los estudios en el SPS ayudarán a confirmar el interés **de un nuevo sincrotrón de ~50 GeV que sustituya al PS.**
- A medio plazo, un nuevo acelerador lineal (**Linac4**) **debería evitar los problemas en la inyección en el PSB.** Esto haría posible la regular aportación de haces en el LHC, reduciendo el tiempo de puesta en marcha y contribuyendo positivamente en la fiabilidad del complejo inyector.
- Podemos esquematizar los cambios necesarios en el siguiente diagrama.



FÍSICA EN EL LHC

- CINEMÁTICA
- FUERZAS
- MOMENTO
- ENERGÍA
- ALTO VACÍO
- BAJAS TEMPERATURAS
- MAGNETISMO
- ELECTRICIDAD
- SUPERCONDUCTIVIDAD
- LUMINOSIDAD
- SECCIÓN EFICAZ
- RELATIVIDAD
- RADIACIÓN SINCROTRON
- RADIACIÓN IONIZANTE
- ¿AGUJEROS NEGROS?

Cinemática

Cada paquete de protones viaja a casi la velocidad de la luz ($v = 0,999999991 \cdot c$) :

$$v = 0,999999991 \times 299792458 \Rightarrow v = 299792455 \text{ m/s}$$

Entonces darán: $299792455 / 26659 = 11245$ vueltas/segundo

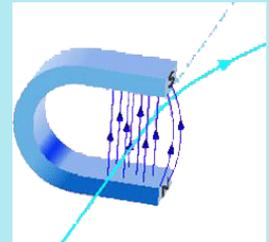
Durante los 20 minutos que los protones precisan para alcanzar la máxima energía la distancia recorrida es mayor de la necesaria para ir y volver al Sol.

$$11245 \times 20 \times 60 \times 27 = 3,64 \cdot 10^8 \text{ km}$$

La **Frecuencia** del movimiento circular es: $f = 11,253 \text{ kHz}$

e el **Periodo** es: $T = 1/f \approx 9 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

Los protones serán acelerados hasta $v \sim c$. Mientras viajan, están bajo la acción de una fuerza centrípeta debida a la **Fuerza de Lorentz**.



Calculemos esa **aceleración centrípeta** :

$$a \approx c^2/r \Rightarrow a_c \approx 2,3 \cdot 10^{13} \text{ m/s}^2 \text{ Es decir, } 2 \cdot 10^{12} \text{ veces a aceleración de la gravedad.}$$

La distancia entre dos paquetes de protones consecutivos es de : $d = 7,48 \text{ m}$

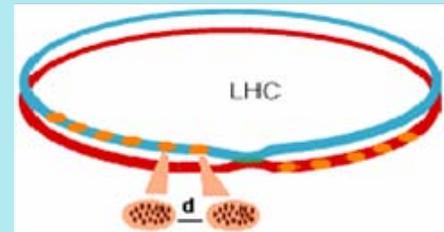
Así que el llamado “**time between bunches**” -**bunch spacing**- será

$$t = \text{distancia} / \text{velocidad}$$

$$t = 7,48 / 3 \cdot 10^8$$

$$t = 24,95 \cdot 10^{-9} \text{ s} \Rightarrow t = 24,95 \text{ ns}$$

que es un muy importante parámetro en un acelerador.



Otro interesante ejercicio es el **cálculo de cuantas vueltas daría un protón antes de "caer" por causa de la gravedad**.

$$h = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \Rightarrow t = (2h/g)^{1/2} \text{ donde } h \text{ es el radio del tubo } (\sim 28 \text{ mm})$$

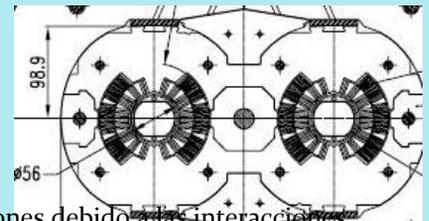
$$\text{entonces: } t = (2 \cdot 0,028 / 9,81)^{1/2}$$

$$t \approx 76 \text{ ms}$$

Dividido entre el periodo: $n^\circ \text{ de vueltas} = 76 \cdot 10^{-3} / 9,9 \cdot 10^{-5}$

$$n = 850 \text{ vueltas}$$

Por tanto, se deben no solamente corregir problemas en los paquetes de protones debido a las interacciones de **naturaleza electromagnética**, si no que debemos corregir otros debidos a la presencia de la gravedad.



Los **multipolos magnéticos** harán este trabajo.

Fuerzas

FUERZA CENTRÍPETA

La fuerza necesaria para mantener a cada protón, viajando casi a la velocidad de la luz, en su órbita en el LHC es:

$$\text{Con } v \sim c: F_c = mc^2/r \Rightarrow F_c = \text{Energía}/r$$

Para generar esa fuerza hay 1232 **dipolos magnéticos** situados en los ocho arcos que conforman la parte curva de LHC. Cada uno tiene una longitud de de 14,3 m, siendo la longitud total implicada:

$$1232 \times 14,3 = 17618 \text{ m}$$

Con este dato podemos calcular el llamado "**bending radius**":

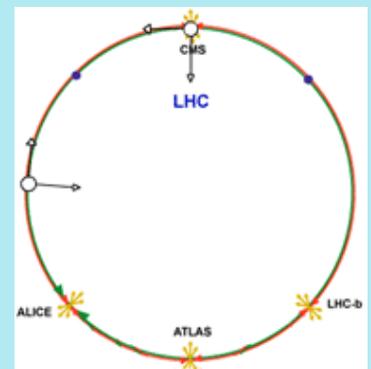
$$r_b = 17618 / (2\pi) \Rightarrow r_b = 2804 \text{ m}$$

Entonces:

$$F_c = 7 \text{ TeV} / 2808 \text{ m} \Rightarrow F_c = 1.12 \cdot 10^{-6} \text{ J} / 2808 \text{ m}$$

$$F_c = 4 \cdot 10^{-10} \text{ N}$$

sobre cada protón.



ACCIÓN Y REACCIÓN

Pero el acelerador sufrirá esa misma fuerza ejercida por cada protón.

Considerando los dos haces con **2808 paquetes (bunch)**, y con un **número de protones** por paquete de **$1,15 \cdot 10^{11}$** , tendremos una fuerza total ejercida sobre el acelerador por los protones:

$$F_T = 2 \cdot 2808 \times 1,15 \cdot 10^{11} \times 4 \cdot 10^{-10}$$

$$F_T \approx 260000 \text{ N} \approx 26 \text{ Tm_Force}$$

Por tanto, la fuerza de reacción sobre la parte curva del acelerador es equivalente a unas 26 Toneladas de fuerza. Se trata de un valor nada despreciable, incluso repartido a lo largo de todo el acelerador, porque este debe estar en operación de forma continua, varias horas al día, durante muchas semanas y quizás meses ininterrumpidamente.

Los diseñadores del LHC hubieron de tener muy presente esa fuerza porque la precisión requerida es muy alta.

Y lo más increíble de todo esto, es que toda esa fuerza es creada por la reacción de $6 \cdot 10^{14}$ protones, con una masa en reposo de solo 1 ng (un nanogramo!).

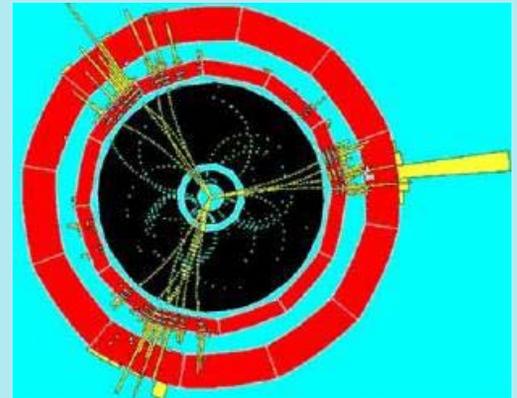
Momento lineal

La conservación del momento lineal debe ser verificada.

Dado que los protones que colisionan frontalmente tiene valores prácticamente iguales en velocidad y dirección, y por tanto igual valor en módulo del momento lineal - 7 TeV/c- (en realidad los dos haces se **cruzan en el punto de interacción formando un ángulo de unos 200 mrad**), el momento total de las partículas creadas después de la colisión debe ser cero.

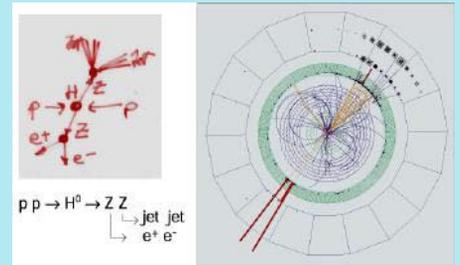
$$\vec{P} \approx 0$$

Esta imagen recrea la **detección de tres chorros de partículas (jets)** generados por la colisión de dos partículas que viajaban en sentidos opuestos y en dirección perpendicular a la imagen. Dado que el momento lineal antes de la colisión es nulo, también debe ser cero después. **La conservación del momento puede ser observada** a simple vista en la recreación mostrada.

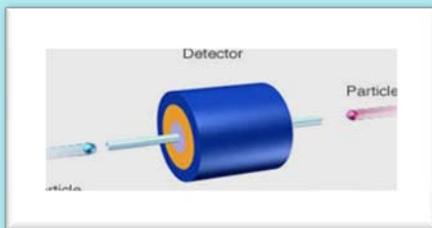


Esta imagen representa la simulación de uno de los eventos más esperados en los detectores del LHC: la aparición de la **partícula de Higgs**. Dos protones viajando en sentidos opuestos y con dirección perpendicular a la imagen mostrada, colisionan produciendo dos **partículas Z** que salen en sentidos opuestos, y que a continuación decaen generando dos chorros (jets) por un lado, y un par electrón-positrón por el otro.

La verificación de la conservación del momento lineal es evidente.

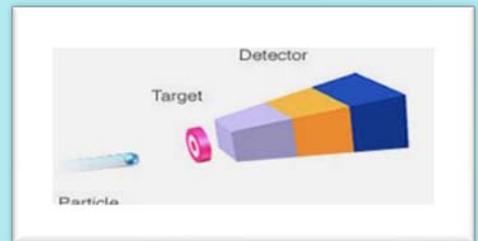


Otro interesante aspecto a considerar es la **diferencia entre una colisión frontal entre dos partículas y una colisión contra un blanco fijo.**



En este caso, $P_T = 0$ por lo que la energía total será "empleada" en la creación de nuevas partículas:

$$E = E_{beam1} + E_{beam2}$$



En este caso, $P_T \neq 0$ y entonces parte de la energía debe ser utilizada en forma de energía cinética de las nuevas partículas creadas:

$$E = \sqrt{E_{beam}}$$

Continuemos con la **diferencia entre los aceleradores con blanco fijo y los colisionadores**.

Tomando en consideración la energía que posee cada partícula - E_p - en el acelerador, tenemos que la energía disponible - E - para la creación de partículas, en el momento de la colisión es:

a) para el caso con **blanco fijo** necesitamos aportar a cada partícula en el acelerador una energía :
siendo m_0 la masa en reposo de la partícula acelerada en unidades de energía ($m_{\text{protón}} \approx 0.001 \text{ TeV}$).

$$E \approx \sqrt{2 \cdot m_0 \cdot E_p} \Rightarrow E_p \approx E^2 / 2 \cdot m_0$$

b) para el caso con **colisión frontal** necesitamos aportar a cada partícula en el acelerador una energía :

$$E_p \approx E / 2$$

Por tanto, para el LHC necesitamos comunicar a cada protón una energía que es la mitad de los 14 TeV precisados:

$$E_p = 7 \text{ TeV}$$

Si consideramos el **choque sobre blanco fijo** necesitaríamos: $E_p \approx 14^2 / (2 \cdot 0,001)$

$$E_p \approx 10^5 \text{ TeV} (\sim 10^{17} \text{ eV})$$

Observando los dos valores para E_p (**7 TeV and 10^5 TeV**) no se precisan de más explicaciones en favor del colisionador en comparación con el acelerador con blanco fijo.

Energía

¿De cuánta energía estamos hablando?

$$7 \text{ TeV} = 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = \mathbf{1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J}}$$

No parece mucha energía.

Para el experimento **ALICE**, cada ión de Pb-208 alcanza $1150/2 = 575 \text{ TeV}$.

Por tanto, **la energía por nucleón** es: $575/208 = \mathbf{2,76 \text{ TeV}}$

Calculemos la energía cinética de un insecto de unos 60 mg volando a unos 20 cm/s:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \Rightarrow E_k = \frac{1}{2} 6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,2^2 \sim \mathbf{7 \text{ TeV}}$$

Es decir, en el LHC cada protón alcanzará una energía semejante a la de un... **MOSQUITO!**

Pero tengamos presente que ese mosquito tiene alrededor de 36 mil trillonrs de nucleones, mientras que los **7 TeV en LHC están concentrados en un único protón.**

Quizás la comparación no sea aún muy convincente a la hora de valorar el significado energético de 7 TeV. **Veámoslo desde otro punto de vista:**

Calculemos la energía almacenado en uno de los paquetes (bunch) de protones:

$$7 \text{ TeV/protón} \times 1,15 \cdot 10^{11} \text{ protones/bunch} \sim \mathbf{1,3 \cdot 10^5 \text{ J/bunch}}$$

Una poderosa moto GP de 150 kg a 150 km/h tendría una $E_{\text{cinética}}$: $E_c = \frac{1}{2} \cdot 150 \cdot 41,7^2 \sim \mathbf{1,3 \cdot 10^5 \text{ J}}$

Así que si un paquete de protones del LHC colisionase contigo, **el impacto sería semejante** al producido por esa moto viajando a unos 150 km/h.

Si tienes suerte para evitar "**esa moto de 0,2 picogramos**", no te preocupes, hay 2807 que viene detrás. Además, si decides cambiar de carril algo semejante viene en sentido opuesto.

Otro cálculo que muestra la enorme cantidad de energía que se maneja en el LHC es el siguiente: Esto es equivalente a

77,4 kg de TNT

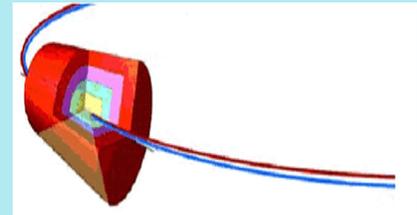
$1,29 \cdot 10^5 \text{ J / bunch} \times 2808 \text{ bunches} \sim \mathbf{360 \text{ MJ}}$
-Energía almacenada en el haz- (Stored beam energy)

La energía generada con TNT es 4.68MJ/kg (Beveridge 1998).

Tomemos la Entalpía de vaporización del Oro: $\Delta H_F = \mathbf{63,71 \text{ kJ/kg}}$

Por tanto, **360 MJ son suficientes para fundir: 5650 kg de Au \Rightarrow 5,65 Toneladas de Au**

Obviamente, **tal cantidad de energía no puede ser proporcionada instantáneamente.** De hecho, el proceso para tener los dos haces de protones a 7 TeV en el LHC dura unos 25 minutos a través de la **cadena de aceleradores** del CERN.



Alto vacío

La existencia del vacío en los aceleradores de partículas tiene su razón de ser en la absoluta necesidad de **limitar las interacciones (elásticas o inelásticas) entre las partículas del haz, y los átomos o moléculas del vacío residual**. Interacciones que provocan una dispersión del haz que es responsable de la limitación del funcionamiento de los aceleradores y del deterioro de su rendimiento.

Vamos a ver **la importancia de conseguir el vacío mas alto posible**.

Para ello consideramos el valor de la presión diseñado para los tubos del haz: $P = 10^{-9}$ Pa.

Estamos hablando de presión unas cien veces menor que en la superficie da Lúa. **Es el lugar más vacío del Sistema Solar.**

Dado que los paquetes de protones tienen una sección de 1 mm^2 (lejos de las zonas de colisión) calculemos el número de moléculas/ mm^3 en el tubo por donde circula el haz.

En el interior del tubo por donde circula el haz de protones la temperatura es 1.9 K (en los ocho arcos donde están situados los dipolos magnéticos). A esa temperatura todos los gases están licuados, pero esto no significa que no haya gases dentro del tubo. Con propósito únicamente didáctico vamos utilizar la siguiente aproximación:

El LHC no es una circunferencia perfecta. Consiste en ocho arcos de 2.45 km donde están los dipolos superconductores ($T = 1.9 \text{ K}$) y ocho secciones rectas de 545 m a temperatura ambiente.

No interior do tubo a 1.9 K todos os gases están licuados. Aún que esto no significa que non haya algunas moléculas de gases dentro del tubo, centraremos nuestro cálculo en las secciones rectas a temperatura ambiente. Solamente con propósito didáctico vamos a utilizar la siguiente aproximación:

$$P = 10^{-9} \text{ Pa} \text{ ,, } V = 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ ,, } T = 293 \text{ K} \text{ ,, } R = 8,21 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

Usando $P\cdot V = n\cdot R\cdot T$ tenemos $n \sim 4\cdot 10^{-22}$ moles

Por tanto, el resultado buscado es: $(4\cdot 10^{-22}) \times (6\cdot 10^{23}) \sim 250$ moléculas/ mm^3 Tomando en cuenta las dimensiones de los paquetes (75 mm largo e 1 mm^2 de sección) y el número de protones en su interior tendremos:

$$(10^{11} \text{ protones}) / (75 \times 1 \text{ mm}^2) \sim 10^9 \text{ protones/mm}^3$$

Podemos ahora comparar las dos cantidades obtenidos y entenderemos cuan importante es conseguir el más alto vacío posible.

El volumen a ser vaciado en uno de los tubos por los que circulan los protones (beam pipes) en el LHC (longitud de 27 km ,, $r \sim 3 \text{ cm}$) es:

$$2 \times (27\cdot 10^3 \times \pi \times 0.03^2) \sim 150 \text{ m}^3$$

Como vaciar totalmente el volumen de una vivienda de 60 m^3 .

Pero **el mayor volumen donde se aplica el vacío** en el LHC es el asilamiento del sistema criomagnético ($\sim 9000 \text{ m}^3$ — como vaciar la nave central de una catedral!)

El vacío del LHC está compuesto por 54 km de vacío ultra bajo, por donde circulan los dos haces y 50 km de vacío de aislamiento alrededor de los imanes criogénicos y en las líneas de transporte del líquido criogénico (helio). Los requisitos para el vacío de estos dos sistemas son radicalmente diferentes.

El vacío para el haz de partículas

Las exigencias del vacío residual del LHC son muy superiores a las de un acelerador lineal, muchas horas de funcionamiento en vez de unos cuantos segundos.

Para garantizar tal duración de vida se hace preciso, como ya hemos indicado, trabajar con presiones inferiores a 10^{-9} Pa (10^{-14} atm) ¡100 billones de veces más baja que la presión atmosférica! limitando, así mismo, el ruido de fondo en los detectores del LHC inducido por la dispersión del haz por colisiones con el gas residual.

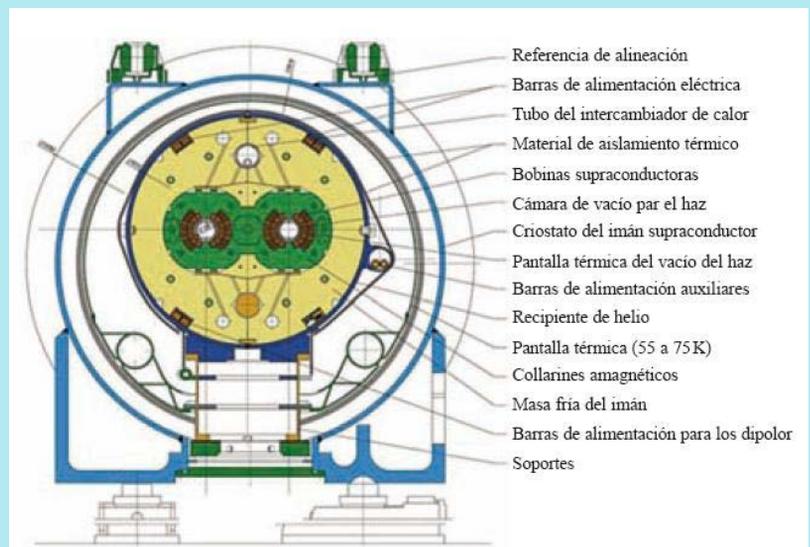
Esta presión es unas diez veces menor que la existente en la Luna.

El cúmulo de exigencias (nivel de presión, efectos dinámicos e ingeniería) para las cámaras de vacío del haz, condujo al diseño de un sistema de vacío totalmente diferente en las secciones de los arcos del LHC a la temperatura criogénica de 1.9 K y las secciones rectas a la temperatura ambiente. De los 54 km de vacío ultra bajo para el haz, 48 km están a una temperatura criogénica ya que las cámaras de vacío son parte integrante de los imanes superconductores. Los restantes 6 km de vacío, están a temperatura ambiente.

Por primera vez en un acelerador operando a una temperatura criogénica, se utilizó una **pantalla térmica** intermedia ("beam screen") en la cámara de vacío para el haz de partículas. Esa pantalla, que opera entre 5 y 20 K, tiene como principal dedicación la intercepción 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.

También debe soportar el alto nivel de radiaciones, evitar fuertes transiciones geométricas que generan ondas de radiofrecuencia estacionarias (> 2 GHz) que perturban el haz y optimizar la duración de vida del haz, es decir, ayudar a mantener ultra bajas presiones.

La pantalla térmica está perforada para permitir el paso del gas liberado por la deserción estimulada (pérdidas del haz, electrones, fotones y iones) a las paredes más frías de los imanes (1.9 K) donde queda atrapado.



El vacío de aislamiento térmico

- El vacío de aislamiento térmico de los imanes y de las líneas de transporte del líquido criogénico (helio) permite reducir las pérdidas térmicas por conducción. Este vacío complementa el uso de 9 millones de metros cuadrados de material de aislamiento multi-capas que limita la radiación térmica, material instalado sobre la superficie exterior de la masa fría del imán superconductor.
- Aunque las exigencias de presión son más bajas (10^{-1} Pa ó 10^{-3} mbar), ese sistema es técnicamente complejo e impresionante:
- 50 km y hasta 1 m de diámetro para un volumen total de 15000 m³. El ensamblaje ha necesitado más de 25000 soldaduras, 90000 hechas directamente en el túnel, que representan una longitud de 100 km y que se añaden a las 18000 juntas de elastómero que representan una longitud total de 22 km. Con tantos ensamblajes, soldaduras y juntas, la estanqueidad del vacío, ha representado un desafío constante, ya que son imprescindibles niveles de estanqueidad inferiores a 10^{-11} Pa·m³ /s.
- Para formarse una idea gráfica del alto grado de estanqueidad alcanzado, un neumático de coche con una fuga de tamaño equivalente, necesitaría más de tres millones de años para desinflarse!



Bajas temperaturas

Los protones son guiados en el anillo del acelerador mediante un poderoso campo magnético proporcionado por corrientes superconductoras. Los cables operan a la **temperatura de 1,9 K** (unos -271°C), **una temperatura más fría que la del espacio exterior.**

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.

Los filamentos superconductores están hechos de Niobio-Titanio. El helio debe fluir constantemente para ser mantenido a esa temperatura, extrayéndose cualquier calor aportado al sistema.

12 millones de litros de nitrógeno líquido se vaporizan durante el enfriamiento inicial de **31000 toneladas de material**, y posteriormente **5000 toneladas de helio** líquido serán necesarios para mantenerlo por debajo de 2K.

Esta cantidad de He supone la producción mundial de este gas en un año.



LHC-Criogenia

El proceso consiste en hacer circular nitrógeno líquido dentro del cuerpo del Dipolo a fin de que la temperatura descienda a 80 K (-193°C). A continuación se añade helio líquido para pasar de los 80 K a 4 K. Finalmente, disminuyendo la presión del helio hasta 15 milibares, se produce la caída hasta los 1,9 K

Con el acelerador dividido en 8 sectores delimitados por sus sistemas de acceso, el mismo número de unidades constituyen el sistema de refrigeración del LHC.

Para el LHC, dos sistemas de refrigeración de 12 kW a 4.5 K, utilizados en el antiguo LEP, fueron mejorados hasta una capacidad de 18 kW, y dos equipamientos no estándar de 18 kW han sido instalados. Gas helio es enfriado hasta 80 K mediante 10000 toneladas de nitrógeno líquido en superficie (el nitrógeno líquido no se inyecta directamente en el LHC para evitar un posible accidente con muertes por asfixia en caso de fuga en el túnel). Pero esta bajada de temperatura constituye la primera fase.

Para garantizar el correcto comportamiento de los componentes del acelerador, el helio debe ser enfriado aún más. Así, el helio a 4,5 K se inyecta en los dipolos (que pasan también a ser llamados "cold masses"), hasta llenarlos por completo. Finaliza así la segunda fase del proceso del enfriamiento.

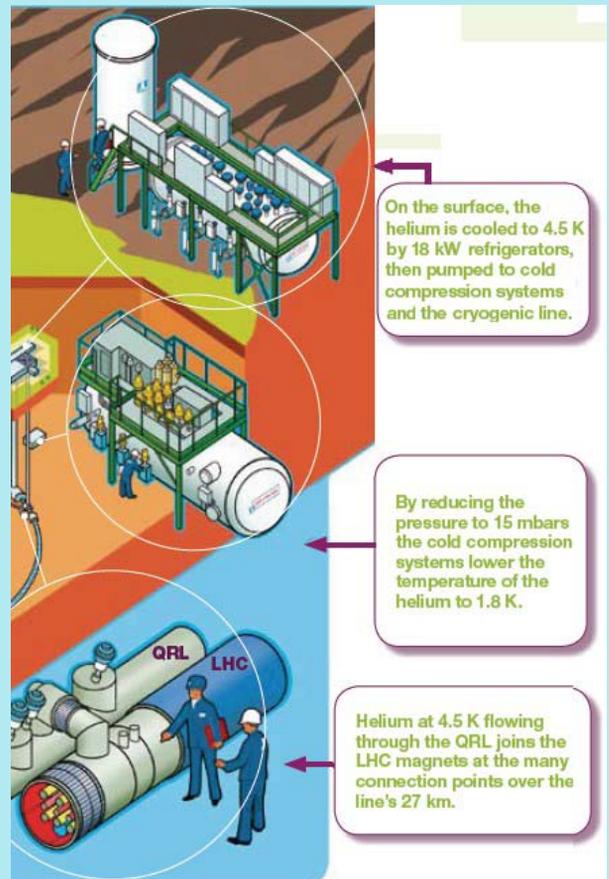
En la tercera y última fase, las unidades de refrigeración llevan al gas noble hasta los 1,9 K (-271,3°C). Para conseguir esto, el vapor de presión sobre el baño de helio tiene que ser reducido.

Para bajar hasta los 15 mbars de presión compresores volumétricos a temperatura ambiente son combinados con compresores centrífugos hidrodinámicos que funcionan a esas bajas temperaturas (Cold Compression System - CSS).

Cuando el helio es enfriado a esa temperatura pasa a partir de 2,17 K (-271,0 °C) a estado "superfluido", que entre otras notables propiedades tiene la de poseer una conductividad térmica alta, lo que lo hace ideal para sistemas de refrigeración muy grandes.

Distribuyendo el frío.

La potencia frigorífica es distribuida mediante una enorme línea criogénica (QRL). Para llevar el helio a esas bajas temperaturas, primero es almacenado en cinco tanques de distribución (QUI), que constituyen cinco "islas criogénicas" instaladas en los accesos del túnel. La línea criogénica tiene el mismo diseño que el colisionador, por lo que en realidad dentro del túnel van en paralelo la instalación de distribución del helio y la del colisionador.



Estamos pues hablando del sistema de refrigeración más grande del mundo, con 27 km de largo.



Supongamos que no fueran utilizados materiales especialmente preparados para estas tan bajas temperaturas. **Podemos calcular los cambios que se producirían en la longitud** del acelerador con ese enfriamiento.

Tomemos de media como coeficiente lineal de dilatación de un metal: $\alpha \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

La longitud del dipolo es 14,343 m at 300 K, por lo que cuando la temperatura baja a 1,9 K tendremos:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta L = 14,343 \cdot 10^{-5} \cdot (1,9 - 300) \Rightarrow \Delta L \approx -0,043 \text{ m}$$

Entonces, **la contracción es de más de 4 cm**, y teniendo en cuenta que hay 1232 dipolos:

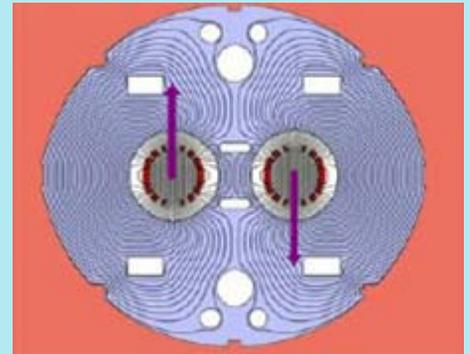
$$\Delta L_T \approx 1232 \cdot (-0,043) \approx -53 \text{ m (!)}$$

Tomando en consideración todos los sistemas multipolares magnéticos y resto de dispositivos sometidos a esas bajas temperaturas, **la contracción total en todo el LHC es cercana a los 80 m !**

Por otra parte , los materiales utilizados en el LHC deben poseer un muy controlado comportamiento a bajas temperaturas para evitar problemas de funcionamiento y errores de calibración. No obstante, no es posible evitar estas contracciones totalmente, por lo que fueron tomadas muy en cuenta por los ingenieros que diseñaron toda la instalación y el ensamblaje de la misma.

Magnetismo

1232 dipolos magnéticos (de 14,3 m de longitud y unas 35 toneladas) colocados a lo largo del túnel proporcionarán a los protones, que viajan por el interior de sendos tubos de vacío, la **fuerza centrípeta** necesaria para mantenerlos en la trayectoria curva del acelerador a su paso por los ocho arcos del LHC.

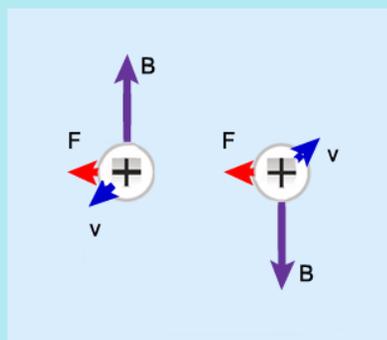


Un muy ingenioso diseño del campo magnético en cada dipolo genera un **campo B** en cada tubo con igual dirección pero sentido contrario al campo B en tubo vecino.

Esta configuración se conoce como: **2 en 1** (figura de la derecha)

Como ya se ha indicado, la misión del campo magnético es curvar la trayectoria de los protones. Esto ocurre gracias a que la fuerza magnética (Fuerza de Lorentz) es siempre perpendicular a la velocidad de los protones.

Ambos vectores B actuando en sentidos contrarios sobre protones que viajan en sentidos contrarios genera una **fuerza con el mismo sentido sobre todos los protones**. Ese sentido está siempre dirigido hacia el centro del acelerador, siendo, como ya se ha dicho, la fuerza centrípeta que mantiene a todos los protones en la trayectoria correcta.



De los cálculos previos para la fuerza centrípeta podemos ahora obtener el valor necesario para B.
Dado que F_c es la Fuerza de Lorentz:

$$F_c = q \times v \times B$$

$$B = F_c / (q \times v)$$

$$F = 4 \cdot 10^{-10} \text{ N}, q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \text{ and } v \sim c$$

$$B \sim 8,33 \text{ T}$$

(100000 veces el campo magnético terrestre)

Si el LHC hubiera llevase dipolos magnéticos tradicionales (no superconductores), serían necesarios **120 km de longitud** para alcanzar la misma energía y el consumo eléctrico sería enorme.

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 (coil inner layer) o exterior (coil outer layer) alrededor de cada tubo.

Además, cada uno de esos hilos de 6 e 7 mm de diámetro (capa interior e exterior sobre el tubo) están hechos de filamentos de Nb-Ti que van introducidos en una matriz de cobre. **Durante la operación, esa zona de cableado está 1.9 K**, para garantizar las condiciones de superconductividad necesaria para que se alcancen los 8,33 T. Los protones circulan en trayectorias planas a lo largo de los 14.3 m activos de cada dipolo.

Las dos trayectorias están separadas en la mayor parte del acelerador LHC por 194 mm, que es la distancia nominal entre los dos tubos en el dipolo. En las **cavidades de radiofrecuencia** la distancia entre tubos es de 420 mm, ye en los detectores ambos haces antagonistas viajan por un único tubo.



El campo magnético dipolar se crea gracias a sendas corrientes superconductoras que circulan sobre cada lado del tubo de vacío por donde viajan los protones.

El cableado está dispuesto en sendas capas dobles alrededor de cada tubo, circulando en sentidos contrarios a cada lado.

Dado que el tubo tiene un diámetro de 56 mm, tomaremos, de acuerdo con las dimensiones que se indican, una distancia media desde el cableado al centro do tubo de 45 mm aproximadamente .

Los campos magnéticos creados por las **corrientes de 11800 Amperios** que circulan por los cables pueden ser calculados a partir da **ley de Biot-Savart**.

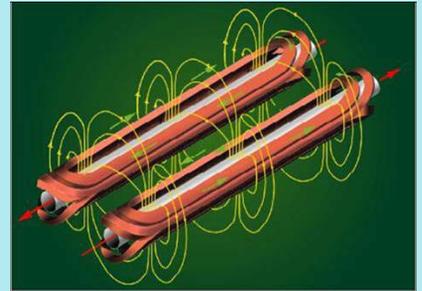
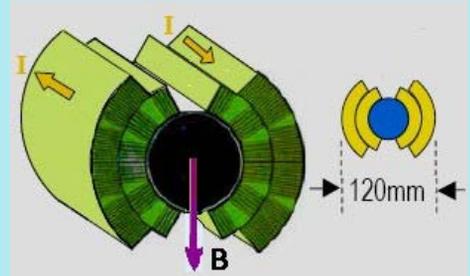
$$B = \mu_0 \cdot I / (2\pi d)$$

$$I \sim 11800 \text{ A y } r \sim 45 \text{ mm,}$$

$$\text{así que en cada cable: } B \sim 0.05 \text{ T}$$

El campo total necesario es de 8.33 T.

$$\text{Necesitamos: } 8.33 / 0.05 \sim 160 \text{ cables}$$



Es decir, para alcanzar los 8.33 T, necesitamos **160 cables superconductores (80 en cada lado)** . Los ochenta cables, como ya se indicó, están situados en sendas capas dobles alrededor de cada tubo, circulando la corriente en ellos en sentidos contrarios a cada lado del tubo.

Los cables están formados por 36 hilos de superconductores, cada un de los cuales tiene exactamente un diámetro de 0.825 mm. A su vez, **cada hilo está formado por 6500 filamentos superconductores de Niobio-Titanio (47% de Ti)**.

Como cada dipolo cubre una distancia de unos 15 m podemos calcular a longitud de total superconductor en los 1232 dipolos (2 tubos por dipolo):

$$L = 2 \times 1232 \times 160 \times 36 \times 6500 \times 15 \Rightarrow L = 1,38 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

Esta cantidad supone más de 9 veces la distancia Sol-Terra ($1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$). Si tenemos en cuenta el resto de cable superconductor para los otros multipolos y para los sistemas magnéticos de los detectores, estaremos hablando de más de 10 veces esa distancia.

Dado que el sentido de la corriente en cada capa de cables es contraria a la de la otra, **los respectivos vectores B creados en el centro del tubo tienen el mismo sentido** (sumándose por tanto).

En el otro tubo los sentidos de las corrientes son los contrarios al que se acaba de describir, y por tanto, el campo total (B_1+B_2) creado en el centro de ese tubo tendrá el sentido contrario al del tubo vecino.

Tenemos así la **configuración 2-in-1**.

Por otra parte, sabemos que **entre conductores paralelos aparecen fuerzas atractivas o repulsivas según sean los sentidos de las corrientes eléctricas que circulan por ellos**. Como en este caso las corrientes sobre cada tubo van en sentido contrario, **aparecerán fuerzas repulsivas entre las dos capas conductoras** que rodean a ese tubo.

Podemos utilizar la siguiente aproximación para calcular esa fuerza repulsiva por unidad de longitud de acuerdo con la fórmula:

$$F/L = \mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 / (2\pi d)$$

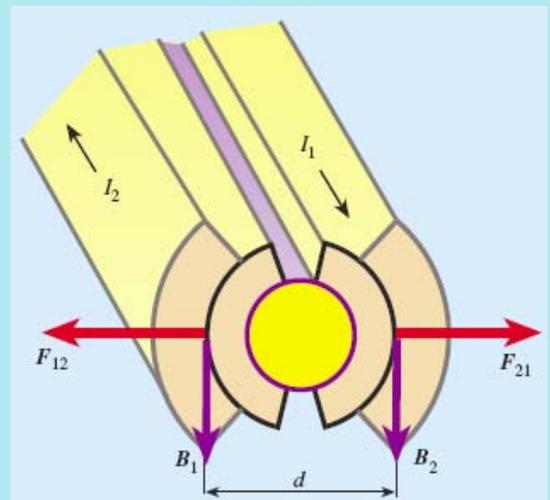
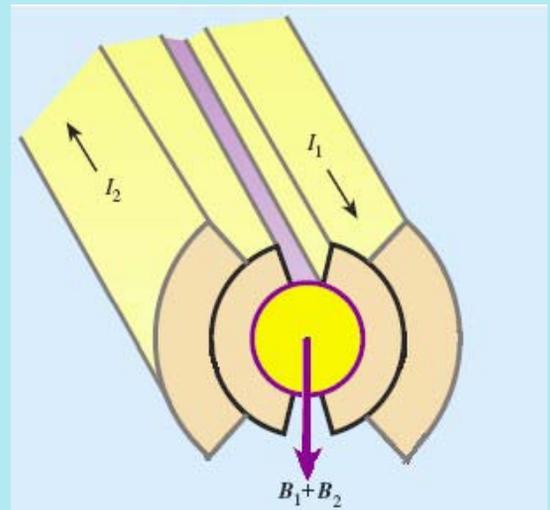
Con $I \sim 11800$ A y $d = 90$ mm,

$$F/L = 310 \text{ N/m}$$

Pero tenemos dos conjuntos de cableados con 80 cables en cada lado. Por tanto la fuerza por metro será:

$$F_T = 80 \cdot 80 \cdot 310 \sim 2 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Debido al diseño de las capas conductoras, esas fuerzas repulsivas actuarán principalmente en la dirección horizontal. Se trata de una intensa fuerza que **tiende a "abrir" el dipolo**. Para contrarrestar esa fuerza, los ingenieros rodean las capas conductoras con unos **collares**, hechos de acero inoxidable no magnético. Un núcleo hecho de hierro rodea los collares.



Vamos a calcular ahora la **Inductancia del Dipolo Magnético**.

Consideraremos una "bobina cilíndrica" (14,3 m de larga y 90 mm de ancha - 2 x 45 mm-), teniendo en cuenta aproximadamente las dimensiones reales) con 80 vueltas y un campo perpendicular de 8,33 T.

El Flujo magnético a través de la superficie que forma el "bobinado" es:

$$\phi = N \cdot B \cdot S \Rightarrow \phi = 80 \cdot 8,33 \cdot (14,3 \cdot 0,09)$$

$$\phi \approx 1000 \text{ Wb}$$

$$\text{Con, } \phi = L \cdot I$$

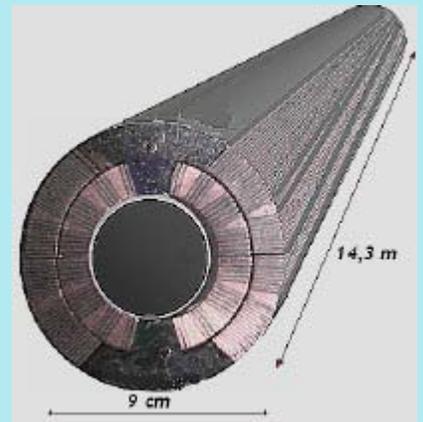
$$L = 1000 / 11800 \Rightarrow L \approx 0,1 \text{ H}$$

Entonces, la energía almacenada en cada dipolo doble es:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \Rightarrow E_d \approx 7 \text{ MJ}$$

Considerando 1232 dipolos: $E_T \approx 9 \text{ GJ}$

Suficiente para llevar a fusión total 45 Tm de Oro, desde 25 °C.



Teniendo en cuenta la longitud del dipolo, la **densidad de energía en cada imán** :

$$7000 / 14,3 \approx 500 \text{ kJ/m}$$

Además de curvar correctamente la trayectoria de los protones, es también preciso focalizarlos. En efecto, dado que los protones se repelen entre ellos, el haz de protones tiende a divergir y por tanto a chocar con las paredes interiores del tubo. La consiguiente deposición de energía podría causar la pérdida de las condiciones de superconductividad en el imán ("quench").

Esta focalización se consigue con **cuadrupolos magnéticos**, los cuales actúan sobre el haz de partículas cargadas (protones en este caso) de la misma forma que las lentes lo hacen sobre la luz (por eso se habla de "**óptica magnética**").

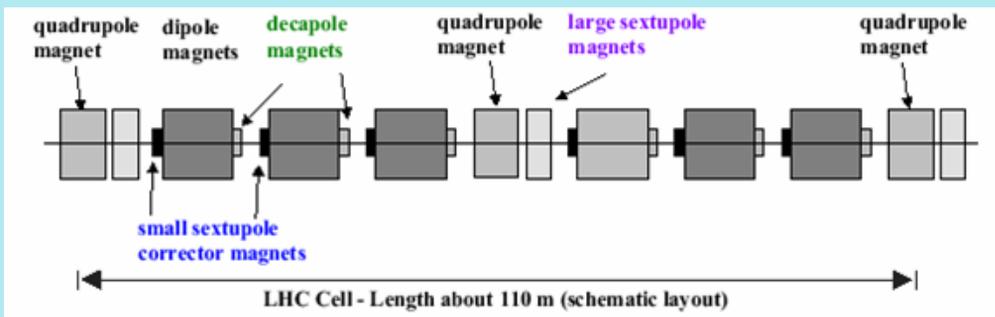
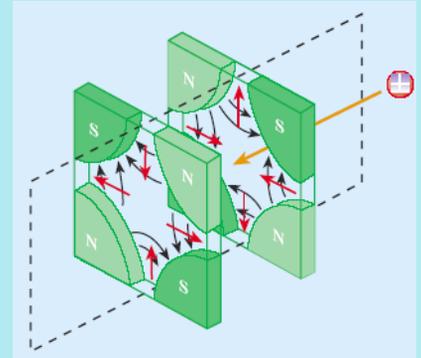


Así, imaginemos que las partículas positivas (protones en el LHC) vienen desde la derecha de la imagen.

El primer cuadrupolo toma el control sobre la dirección horizontal del haz contrayéndolo, mientras que el segundo cuadrupolo hace lo propio con la dirección vertical.

Así, los dos cuadrupolos trabajando conjuntamente mantienen a los protones estrechamente empaquetados para que el mayor número de colisiones pueda ocurrir.

Hay un total de 858 cuadrupolos magnéticos.



Además, otra serie de multipolos ayudan en la focalización y aseguran las correcciones necesarias debidas a otras interacciones como la gravitatoria sobre los protones, la electromagnéticas entre paquetes, las creadas por nubes de electrones que se asocian desde las paredes de los tubos, etc.

La figura siguiente muestra el agrupamiento multipolar magnético básico (FODO-cell), de 110 m, en el LHC.

Los dipolos y cuadrupolos mantienen en órbitas estables a los protones con la energía correcta, mientras que los sextupolos corrigen las trayectorias de los protones que tienen energías ligeramente diferente a la deseada. Los otros multipolos compensan las imperfecciones del campo magnético.

Además de los imanes ya citados hemos de considerar los llamados "Inner triplets" que son los encargados de modificar la trayectoria paralela de los dos haces para que se crucen en el punto de interacción de cada detector. Bajo la acción de este imán, cada "bunch" es compactado para lograr la mayor densidad posible en el punto de colisión. Así, se pasa de una sección de 0,2 mm lejos del detector a 16 micras en el momento del cruce (Interaction Points IP).

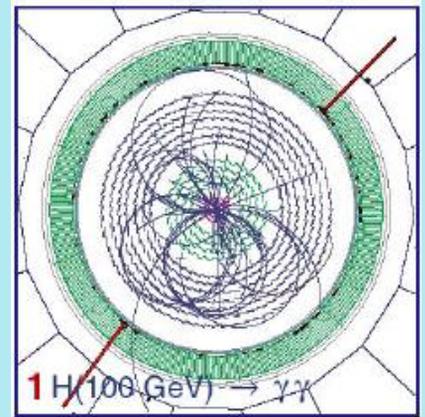
- at IP (ATLAS, CMS) 16 μm
- in the triplets ~1.6 mm
- in the arcs ~0.2 mm



La Fuerza de Lorentz juega otro muy importante papel en el LHC. Es la responsable de **curvar la trayectoria de las nuevas partículas** creadas después de la colisiones de los protones.

Dependiendo de la carga eléctrica, masa y energía, las partículas serán separadas por la fuerza magnética de formas diferentes, pudiendo así ser analizadas separadamente.

En la imagen vemos la simulación de la creación de una *partícula de Higgs* con la aparición final de dos fotones que no son, obviamente, afectados por el campo magnético del detector.



Cada detector tiene su propio diseño para ese campo magnético, y vamos a continuación a echarle una mirada a dos de ellos.

El detector CMS (**Compact Muon Solenoid**) es un instrumento de 12500 toneladas (el núcleo de hierro -en rojo en la imagen- del sistema magnético contiene más hierro que la Torre Eiffel).

El imán está formado por tres partes: **la bobina superconductora, el tanque de vacío y e núcleo de hierro**. La bobina produce el campo axial mientras que el núcleo es el responsable del retorno del flujo magnético en la parte exterior del solenoide. Este retorno del flujo es el que conforma el conjunto de líneas de fuerza que llenan el detector en todo su volumen paralelamente al eje, y que curvarán las trayectorias de las partículas que se produzcan debido a las colisiones en el centro del detector.



El Solenoide consiste en 5 módulos de 2,5 m de largo cada uno.

Cada módulo está formado por un cilindro de aluminio **con cuatro capas internas de embobinado**, de 109 vueltas cada una.

$$\text{Por tanto : } N = 5 \cdot 109 = 2180 \text{ voltas.}$$

$$\text{La longitud total del solenoide es: } L = 5 \cdot 2,5 \text{ m} = 12,5 \text{ m}$$

$$\text{La intensidad de corriente es : } I = 19500 \text{ A.}$$

Por tanto :

$$B = \mu_0 \cdot N \cdot I / L \Rightarrow B \approx 4 \text{ T}$$



Podemos calcular **la Inductancia del Solenoide del detector CMS**.

El solenoide tiene 2180 vueltas, el campo magnético es de 3,8 T y la superficie es: $S = \pi \cdot 3^2 = 28,3 \text{ m}^2$.

Por tanto, el Flujo magnético a través de la superficie es:

$$\phi = N \cdot B \cdot S \Rightarrow \phi = 2180 \cdot 3,7 \cdot 28,3 \Rightarrow \phi \approx 230 \text{ kWb}$$

$$\text{Con, } \phi = L \cdot I \Rightarrow L = 230000 / 19500 \Rightarrow L \approx 12 \text{ H}$$

Estamos hablando de una energía almacenada en el solenoide de:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \Rightarrow E \approx 2,3 \text{ GJ}$$

equivalente a media tonelada de TNT.

El detector ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) ofrece un sistema híbrido de cuatro imanes superconductores: un **solenoide central** rodeado por 2 toroides extremos (End-cap) y un **sistema toroidal** "de barril" (BT). Las dimensiones de este sistema magnético son 20 m de diámetro y 26 m en longitud. Con sus cerca de 2 GJ de energía almacenada, es realmente el imán superconductor más grande del mundo.

El **solenoide central**, de 5,5 toneladas de peso, 2,5 m de diámetro y 5,3 m de largo, proporciona un campo magnético axial de 2 T en el centro del área de tracking de ATLAS.

Dado que este solenoide precede al calorímetro electromagnético de argón-líquido (LAr), su espesor debe ser el mínimo posible para permitir la máxima respuesta del calorímetro.

Contiene 9 km de cables superconductores enfriados por helio líquido y circula por él una corriente eléctrica de 8000 A.

Con 7 km de cables superconductores tenemos

$$\text{Nº de vueltas} = 7000 / (\pi \cdot 2,5) = 1142 \text{ vueltas}$$

$$\text{De } B = \mu_0 \cdot N \cdot I / L \Rightarrow B = (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1142 \cdot 8000) / 5,3$$

$$B \approx 2 \text{ T}$$

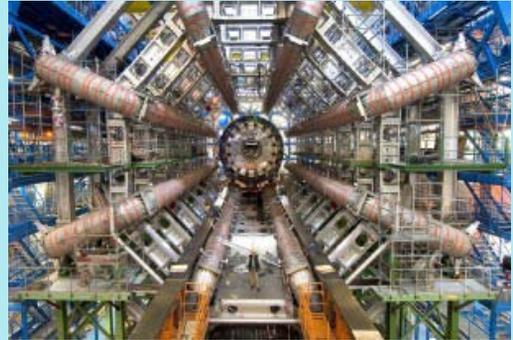
$$\phi = N \cdot B \cdot S \Rightarrow \phi = 1142 \cdot 2 \cdot (\pi \cdot 1,25^2) \Rightarrow \phi \approx 11200 \text{ Wb}$$

$$\text{Con, } \phi = L \cdot I \Rightarrow L = 11200 / 8000 \Rightarrow L \approx 1,4 \text{ H}$$

La energía almacenada por el solenoide es: $E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \Rightarrow E \approx 44,8 \text{ MJ}$



ATLAS posee también un **enorme sistema magnético toroidal superconductor (Barrel Toroid - BT)** con unas dimensiones de 25 m largo y 22 m de diámetro. Este **sistema toroidal** proporciona el campo magnético para las áreas de detección muónica. El toroide está compuesto por 8 estructuras de 25m x 5m por donde circulan . corrientes superconductoras de 20500 A.



Su masa total es de 850 t.

Cada una de esas estructuras tiene una longitud de $(25+25+5+5) \sim 60$ m. Tomando los 100 km de cables superconductores podemos considerar que el número de vueltas equivalentes del toroide es:

$$\text{N}^\circ \text{ equivalente-vueltas} = 100000/60 \Rightarrow \text{N}^\circ \text{ vueltas} \approx 1670$$

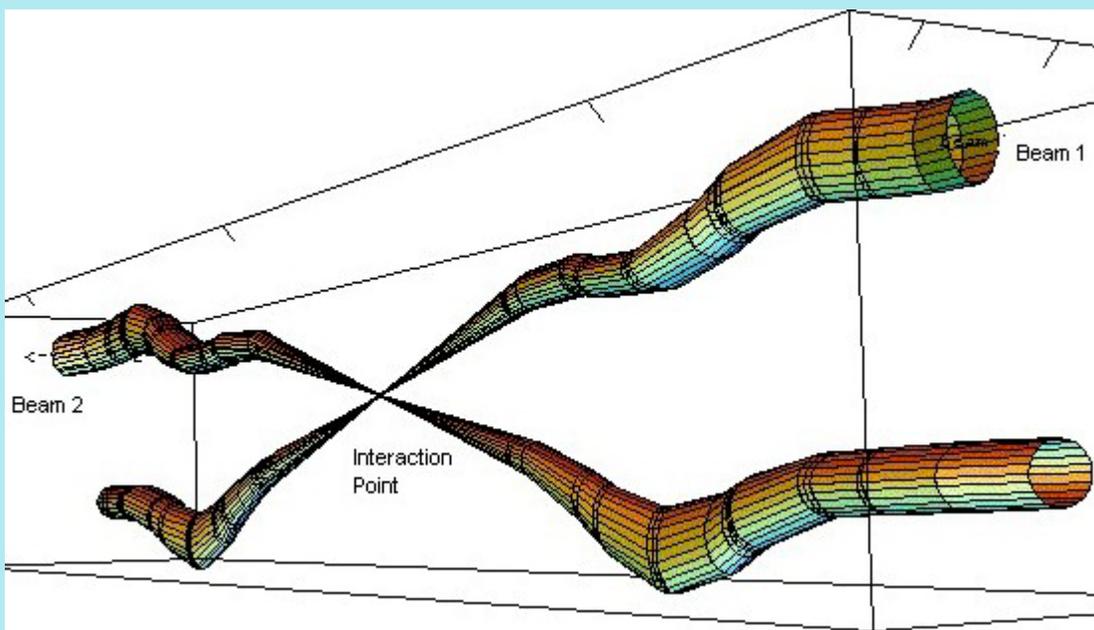
$$\text{De } B = \mu_0 \cdot N \cdot I / L \Rightarrow B = (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1670 \cdot 20500) / (2\pi \cdot 8,5)$$

$$B \approx 1 \text{ T}$$

$$\phi = N \cdot B \cdot S \Rightarrow \phi = 1670 \cdot 1 \cdot (25 \cdot 5) \Rightarrow \phi \approx 208750 \text{ Wb}$$

$$\text{Con, } \phi = L \cdot I \Rightarrow L = 208750 / 20500 \Rightarrow L \approx 10,2 \text{ H}$$

La **energía almacenada** es: $E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \Rightarrow E \approx 2 \text{ GJ}$



Electricidad

El objetivo fundamental del experimento es obtener conclusiones de las colisiones de los protones a la mayor energía posible. Por tanto toda la tecnología del LHC está dirigida en la dirección de conseguir grandes concentraciones de protones en los dos haces contrarios para garantizar un alto número de colisiones. Para esto los protones generados en el duoplasmatrón y después acelerados son agrupados en paquetes (bunches) que cumplan dos condiciones: el mayor número posible y la mayor duración de estabilidad. Recordemos que los protones se repelen por tener la misma carga y esto va inestabilizando el bunch.

La mayor eficacia se consigue con $1.15 \cdot 10^{11}$ protones en cada paquete, siendo la dimensión de cada bunch en el haz de 7,48 cm de longitud y con una sección de 1 mm^2 . Cuando se cruzan en los detectores esos “bunches” son comprimidos hasta una dimensión de 16×16 micras para aumentar las probabilidades de colisión.

Vamos a calcular cual es la distancia media protón-protón.

Cuando van lejos de las zonas de colisión, el “volumen esférico disponible” para cada protón es aproximadamente:

$$\frac{7.48 \times 0.01}{1.15 \cdot 10^{11}} = 6,5 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3 / \text{protón}$$

El radio de cada una de esas esferas es: $r \sim 8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$

y por tanto la distancia media protón-protón es: $d = 2 \cdot r \rightarrow d \sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$.

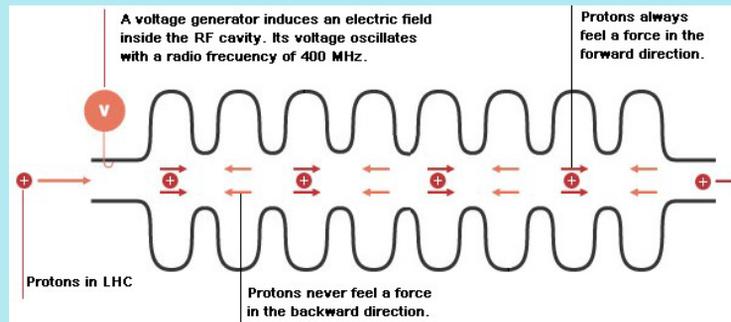
Estamos en condiciones de calcular la fuerza de repulsión protón-protón:

$$F = k \frac{q q'}{d^2} \rightarrow F = 9 \cdot 10^9 \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2}{(2 \cdot 10^{-6})^2} \rightarrow F \sim 6 \cdot 10^{-17} \text{ N}$$

Cavidades RF

La principal función de las cavidades RF del LHC es mantener los 2808 "bunches" de protones estrechamente empaquetados para asegurar una alta *luminosidad* en los puntos de interacción, y por tanto maximizar el número de colisiones. Las cavidades también proporcionan energía de radiofrecuencia (RF) al haz durante la aceleración hacia el máximo de energía, reponiendo, además, la energía perdida por *radiación sincrotrón*.

El LHC usa ocho cavidades por haz, proporcionando cada una 2 MV (un campo acelerador de 5 MV/m) a 400 MHz. Las cavidades operan a 4.5 K (los *dipolos do LHC* usan helio superfluido a 1.8 K).



Para el LHC las cavidades están instaladas en una sección recta del acelerador en la que la distancia entre los haces se incrementa desde la nominal de 195 mm a 420 mm.

Cada protón en su paso por las cavidades RF es afectado por:

$$2 \times 8 \text{ MV} = 16 \text{ MV}$$

Entonces, el protón recibe una energía extra de: 16 MeV

Como cada protón realiza 11245 vueltas por segundo la energía total recibida por segundo es:

$$(16 \text{ MeV/vuelta}) \times (11245 \text{ vuelta/s}) = 1.8 \cdot 10^5 \text{ MeV/s} \text{ o } 0.18 \text{ TeV/s} \quad (1)$$

Desde el SPS cada protón entra en el LHC con 0.45 TeV , por lo que la energía que las cavidades deben proporcionar es:

$$7 - 0.45 = 6.55 \text{ TeV}$$

A partir de (1) podemos calcular es tiempo requerido para alcanzar la máxima energía:

$$6.55 / 0.18 = 36.4 \text{ s}$$

El resultado correcto es de alrededor de 20 minutos. La razón de esta diferencia es debida, en parte, a que los protones no son afectados de forma total por el voltaje en cada paso. Por eso es preciso un mayor tiempo. Además, lo importante no es reducir ese tiempo sino que las cavidades cumplan su otro objetivo, mantener los paquetes de protones lo más compacto posible para conseguir el mayor número de colisiones en los cruces dentro de los detectores.

Se define el **Número Harmónico** como la relación entre el periodo de revolución de la partícula y el periodo de los cambios de voltaje en la cavidad.

$$\text{Número Harmónico} = T_{\text{partícula}}/T_{\text{RF}} \text{ ou } \text{Número Harmónico} = T_{\text{partícula}} \cdot f_{\text{RF}}$$

$$T_{\text{partícula}} = LHC_{\text{longitud}}/c \Rightarrow T_{\text{partícula}} = 26,659/300000 = 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

$$\text{Número Harmónico} = (8,9 \cdot 10^{-5}) \cdot (400 \cdot 10^6)$$

$$\text{Número Harmónico} \approx 35600$$

Potencia

Estando a pleno funcionamiento el LHC, el CERN precisa un aporte de energía de alrededor de 180 MW, de los cuales:

- LHC criogenia 27.5 MW
- LHC experimentos 22 MW

Si incluimos todas las instalaciones que trabajan para el LHC tendremos una contribución total de unos 120 MW.

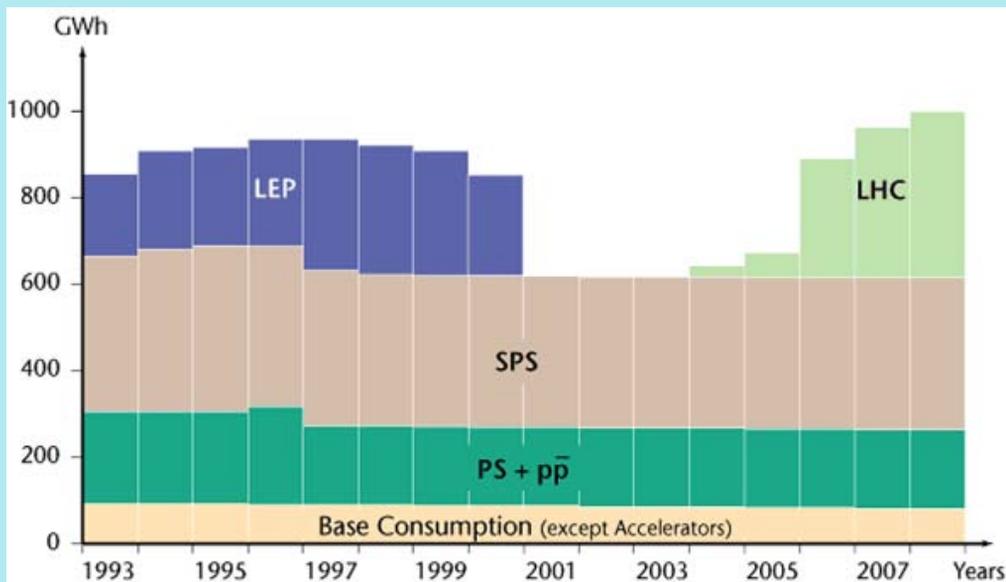
Durante el invierno, con el complejo de aceleradores detenido, el consumo total del CERN cae a unos 35 MW.

Energía

Asumiendo 10 horas diarias de funcionamiento del LHC: $120 \text{ MW} \times 10 \times 365 \Rightarrow 440 \text{ GWh/año}$

Considerando el resto de consumo del CERN tendríamos: $60 \text{ MW} \times 24 \times 365 \Rightarrow 530 \text{ GWh/año}$

En total estamos hablando de unos **1000 GWh (1 TWh)** que es la predicción de CERN para el año **2009**.



El cantón de Ginebra consume *41000 TeraJoules/año* (calor, transporte, electricidad), es decir alrededor de 11.4 TWh, por lo que el CERN supone **menos del 10% del consumo total** do cantón.

El CERN no produce ninguna energía, aunque tiene generadores diesel para suministrar potencia para que funcionen los servicios esenciales, en caso de un corte de corriente.

Superconductividad

En el anterior acelerador **LEP** (Large Electron Positron), el campo magnético dipolar de 0,3 T era generado por un dipolo magnético «tradicional». Cada dipolo precisaba 20 kW por imán. Había 500 imanes en el LEP por lo que se necesitaban 10 MW (cada tren AVE precisa 8 MW de potencia).

La resistencia del cable era $R=0.08 \Omega$ y la intensidad de corriente era $I=500 \text{ A}$.

Por tanto, la energía por efecto Joule disipada por segundo era:

$$P = 500 \cdot R \cdot I^2 = 500 \cdot 0.08 \cdot 500^2 = 10^7 \text{ J/s.}$$
$$P_T = 10^7 \text{ J/s} = 2400 \text{ Kcal/s}$$

Dado que el campo magnético para el **LHC** es 30 veces más alto que para el LEP y la pérdida de energía varía con I^2 , **un calor unas 900 veces mayor debería ser extraído desde el túnel del LHC.**



Imagen de LEP.

Pero otro aún mayor problema aparecería. En la práctica, la saturación magnética del hierro se alcanza para un valor máximo de B igual a 2 T, por lo que este es el límite para este tipo de dipolos.

Para evitar estos problemas, los cables deben ser superconductores.

Helio superfluido mantiene una temperatura de **1,9 K** (la más baja del Universo !!!). El helio debe fluir constantemente y debe ser enfriado permanentemente, extrayéndose todo el calor..

Se precisan **5000 toneladas de helio** en todo el LHC, lo que representa la producción mundial de este gas.



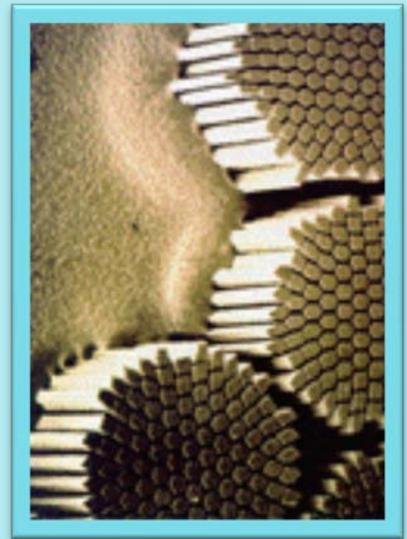
Cables Rutherford



Los cables están formados por 36 hilos de superconductores, cada uno de los cuales tiene exactamente un diámetro de 0.825 mm. A su vez, cada hilo está formado por 6500 filamentos superconductores de Niobio-Titanio (con 47 % de Ti). Cada filamento tiene un espesor de unos 0.006 mm, es decir, 10 veces más delgado que un cabello humano.

Alrededor de cada filamento hay una capa de 0.0005 mm de cobre de alta pureza.

El total de cable superconductor requerido supone **1200 toneladas y 7600 km** de longitud. Si consideramos los hilos y filamentos estaríamos hablando de una longitud de más de 1500 millones de km, lo que llegaría par ir y volver cinco veces al Sol y aún sobraría filamento par unos cuantos viajes a la Luna.



Hay un gran número de diferentes tipos de multipolos magnéticos, por lo que no es fácil calcular la longitud total de cable conductor que estamos indicando. Por eso vamos a considerar solamente la mayor contribución a esta distancia que viene dada por los dipolos principales de la instalación del LHC.

Como ya se ha indicado, cada dipolo (14,3 m) lleva dos tubos "cubiertos" por 160 cables cada uno.

Por tanto,

$$1232 \text{ dipolos} \times (2 \text{ tubos/dipolo}) \times (160 \text{ cables/tubo}) \times 14,3 \text{ m} \sim 5640 \text{ km.}$$

Considerando el resto de multipolos superconductores y los imanes superconductores de los detectores, llegamos a la cifra antes indicada de **7600 km**.

Finalmente,

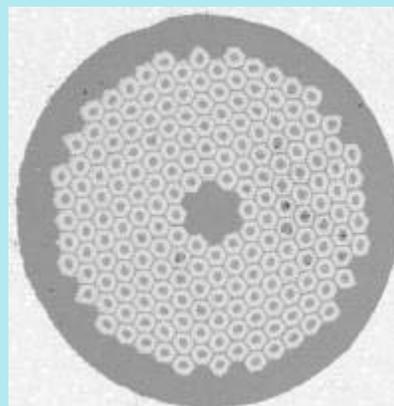
$$(7600 \text{ km/cable}) \times (36 \text{ hilos/cable}) \times (6500 \text{ filamentos/hilo}) \sim 1,8 \cdot 10^9 \text{ km}$$

Más de 10 veces la distancia Tierra-Sol !!!

Mejorando la superconductividad

Los estudios e investigaciones llevadas a cabo en todo el mundo debido a la construcción del LHC han sido fundamentales a la hora de impulsar la tecnología de la superconducción a un muy alto nivel, pero también ha demostrado claramente que **la tecnología basada en la aleación NbTi ha alcanzado su límite de funcionamiento (alredor de 9T)**. Para ir más allá (y cruzar el umbral de los 10 T manteniendo los márgenes operacionales de temperatura), es necesario cambiar de material superconductor.

Nb₃Sn es el único material superconductor que puede ser seriamente considerado en un horizonte de una decena de años, y con la perspectiva de 2015, para reemplazar los imanes en las regiones de interacción. **El Nb₃Sn** tiene el potencial para operar en un rango de 10 a 15 T, pero tiene la desventaja de que una vez formado se vuelve quebradizo y muy sensible a la tensión. En **EEUU**, el Departamento de Energía ha promovido notables esfuerzos en I+D en el campo del Nb₃Sn para los próximos años. Estas actividades están coordinadas por el programa llamado *US-LHC Accelerator Research Program (LARP)*. En paralelo, un consorcio de **7 institutos europeos** (CCLRC/RAL en el Reino Unido, CEA en Francia, CERN, CIEMAT en España, INFN en Italia, Twente University en Holanda y Universidad de Tecnología de Wroclaw en Polonia) están trabajando en el llamado *Next European Dipole (NED)*. Esta actividad común de investigación está incluida en el *Coordinated Accelerator Research Projecte (CARE)* financiado en parte por la Comisión Europea. (



Los objetivos de NED y LARP son totalmente compatibles y complementarios. Más que competir, sus propósitos son sinérgicos, y se apoyan entre sí. Ambos cuentan con todo el apoyo desde el **CERN**.

Luminosidad

La **Luminosidad (L)** es uno de los **más importantes parámetros** de un acelerador.

Es una medida del número de colisiones que pueden producirse en un detector **por cm² y por segundo**.



L puede ser obtenido semicualitativamente de:

- N^2 : número de protones, porque cada partícula en un paquete (bunch) puede colisionar con cualquier otra del paquete que se aproxima en sentido contrario.

- t : tiempo entre bunches.

- S_{ef} : sección de colisión efectiva que depende de la sección del bunch. ("efectiva" porque el perfil del haz no está perfectamente definido); la fórmula para S_{ef} viene dada por: $S_{ef} = 4 \cdot \pi \cdot \sigma^2$ con $\sigma = 16$ micras ou $16 \cdot 10^{-4} \text{cm}$

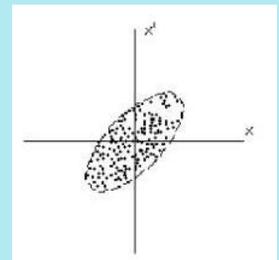
A la derecha vemos o esquema de la sección de un paquete de protones.

Asumimos que es completamente opaco, y por tanto presenta una opacidad 1.

$$L \approx N^2 / (t \cdot S_{ef})$$

$$\text{Con, } N^2 = (1,15 \cdot 10^{11})^2 \\ t = 25 \cdot 10^{-9} \text{ s , } S_{ef} = 4 \cdot \pi (16 \cdot 10^{-4})^2 \text{ cm}^2$$

$$L \approx 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



Este valor nos dice que en los detectores do LHC se podrían producir **10^{34} colisiones por segundo y por cm²**

Dado que en el LHC el valor de L es 100 veces mayor que en el anterior LEP o en el Tevatron (EEUU), el CERN va a ser durante muchos años líder en el campo experimental de la Física de Partículas .

Después de que el LHC haya operado durante algunos años con los parámetros nominales, **será necesario mejorarlos para alcanzar una más alta luminosidad**. La forma más directa de aumentar la luminosidad es **focalizar los haces de protones más estrechamente** en los puntos de colisión (reducir el valor de S_{ef} en la fórmula, o más específicamente reducir el llamado parámetro β^*) lo que implicará un rediseño de la "óptica magnética" en las regiones de interacción (IR).

El tiempo a considerar estará muy relacionado con la vida operativa de los sistemas magnéticos actuales sometidos durante la operación del LHC a muy altas dosis de radiación. Estaríamos hablando de alrededor del año 2015.

Otra reestructuración tiene que ver con la **cadena de inyección de los haces** y que se perfila para el horizonte de 2020.

Otras opciones también consideradas para incrementar la luminosidad del LHC, son el **aumento del número de "bunches"**, o el **aumento del número de protones por "bunch"**. No obstante, hay limitaciones en como esos parámetros pueden ser variados, tales como el límite operativo de bunches y las llamadas interacciones haz-haz de largo rango (que se producen cerca del punto de colisión entre bunches antes del cruce), los efectos debidos a las nubes de electrones procedentes de las paredes de los tubos, implicaciones en la protección de los sistemas de colimación, o un excesivo "apilamiento" de sucesos en el detector.

Sección eficaz

La sección eficaz (Cross Section) - σ - es una medida de la probabilidad de que un suceso (event) ocurra.

Se mide en "barn" - $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

El número de sucesos por segundo (N_{ev}) para un determinado resultado viene dado por:

$$N_{\text{events/sec}} = \text{Luminosidad} \cdot \text{Sección Eficaz}$$

$$N_{\text{events/sec}} = L \cdot \sigma$$

Por tanto, es fácil entender la importancia de la Luminosidad en un acelerador como magnitud de determinante a la hora de considerar que un determinado suceso pueda ser detectado.

Dado que en el LHC el valor de L es 100 veces mayor que en el anterior acelerador (LEP) o en el Tevatron (EEUU), el CERN va a ser durante muchos años líder en el campo experimental de la Física de Partículas.

La sección total eficaz de cruce protón-protón a 7 TeV es aproximadamente de 110 mbarns. Esta sección total puede ser distribuida en la siguiente forma:

- colisión inelástica = 60 mbarn
- difracción = 12 mbarn
- colisión elástica = 40 mbarn

Los eventos debidos a fenómenos difractivos o a colisiones elásticas no son "vistos" por los detectores, siendo solo las colisiones inelásticas las que generan partículas a ángulos suficientes respecto al eje del haz.

Número de eventos producidos por colisiones inelásticas:

$$N_{\text{events/sec}} = L \cdot \sigma$$

$$10^{34} \times [(60 \times 10^{-3}) \times 10^{-24}] = 600 \text{ millones/s}$$

Con alrededor de 30 millones de cruces/s:

$$600/30 \Rightarrow 20 \text{ eventos inelásticos por cruce.}$$

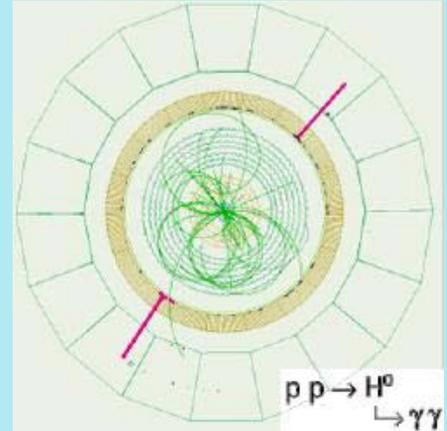
Veamos otro ejemplo:

La sección eficaz para un evento en el que aparecería un Bosón de Higgs, de 100 GeV de masa, es 50 fb (femto-barn).

Así que , $\sigma = (50 \cdot 10^{-15}) \cdot 10^{-24} \text{cm}^2 \Rightarrow \sigma = 5 \cdot 10^{-38} \text{cm}^2$

De $N_{\text{events/sec}} = L \cdot \sigma \Rightarrow N_{\text{events/sec}} = (10^{34}) \cdot (5 \cdot 10^{-38})$

$$N_{\text{events/sec}} = 5 \cdot 10^{-4}$$



Por tanto, **en el LHC hay $5 \cdot 10^{-4}$ eventos por segundo que generarán un Bosón de Higgs con esa masa**, si obviamente existe en la naturaleza.

Para entenderlo mejor, vamos a calcular el inverso de esa cantidad:

$$t = 1/(5 \cdot 10^{-4}) = 2000 \text{ s} \Rightarrow t = 33 \text{ minutos}$$

Entonces, **cada 33 minutos una partícula de Higgs de esa masa debería aparecer en el detector. Por tanto, en 10 horas de un día de funcionamiento, serían 20 bosones de Higgs los que podrían ser detectadas.**

Pero miles de millones de colisiones se producirán en el detector en ese tiempo. Se comprende que el trabajo para distinguir esos 20 eventos en el medio de tantos otros implica un trabajo de computación colosal.

Relatividad

En el LHC cada protón alcanza una energía de 7 TeV.

Veamos el valor que **toma el parámetro relativista γ (gamma)** cuando el protón pose esa energía.

$$E = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2$$

$$7 \cdot 10^{12} \text{eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{J/eV} = \gamma \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{m/s})^2$$

$$\gamma \sim 7460$$

Como es obvio $\gamma \gg 1$, por lo que estamos en el "territorio" de la Relatividad Especial.

Podemos calcular **la velocidad del protón** asociada a esa energía:

$$\gamma = 1/[1 - (v/c)^2]^{1/2}$$

$$\text{con } \gamma = 7460 \Rightarrow v = 0,999999991 \cdot c ; \text{ entonces: } v \sim c$$

El uso de unidades de energía para otras magnitudes es habitual en la Física de Altas Energías.

Así, **la energía en reposo del protón** es:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 \Rightarrow E_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{m/s})^2 \Rightarrow E_0 = 1,503 \cdot 10^{-10} \text{J} \Rightarrow E_0 = 938,3 \text{MeV}$$

Dado que $m_0 = E_0/c^2$, la masa en reposo del protón puede ser expresada como $m_0 = 938,3 \text{MeV}/c^2$

En unidades mas del LHC tenemos: $m_0 = 0,0009383 \text{TeV}/c^2$

Aunque se trata de un concepto objeto de controversia, podemos también hablar de la "**masa relativista**" del protón acelerado hasta la energía de 7 TeV : $m = E/c^2 \Rightarrow m = 7 \text{TeV}/c^2$

Comparemos este valor con el de la masa en reposo: $m_0 = 0,0009383 \text{TeV}/c^2$ para visualizar el incremento experimentado.

También podemos considerar el valor del **momento lineal** do protón en términos relativistas:

$$E^2 = (\mathbf{p} \cdot \mathbf{c})^2 + E_0^2 \Rightarrow \mathbf{p} \cdot \mathbf{c} = (E^2 - E_0^2)^{1/2} \quad \mathbf{p} \cdot \mathbf{c} = (7^2 - 0,0009383^2)^{1/2} \Rightarrow \mathbf{p} \sim 7 \text{TeV}/c$$

Se trata de un importante parámetro del acelerador.

Finalmente, calculamos el campo magnético presente en el acelerador de otra forma a lo hecho en otra sección:

Utilizando el bending radius (r_b): $r_b = 2804 \text{m}$

$$F_{\text{centripeta}} = F_{\text{magnética}} \Rightarrow m \cdot c^2 / r_b = q \cdot c \cdot B \quad \text{Con, } E = m \cdot c^2 \Rightarrow B = E / (c \cdot q \cdot r_b)$$

$$\text{Y como } E = 7 \text{TeV} \Rightarrow E = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{J} \quad B = 1,12 \cdot 10^{-6} / (3 \cdot 10^8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2804) \quad B = 8,33 \text{T}$$



Radiación sincrotrón

La **Radiación Sincrotrón** es, de forma simple, radiación procedente de partículas cargadas que se mueven a velocidades relativistas bajo un campo magnético uniforme. Es el equivalente de la radiación ciclotrón, y toma el nombre de los aceleradores relativistas. Cuando los ciclotrones son suficientemente poderosos para lanzar las partículas a cerca de la velocidad de la luz, la frecuencia orbital de esa partícula cambia. Se precisa sincronizar los parámetros del acelerador para que se adapte a esos cambios. Tenemos entonces un acelerador sincrotrón. Las partículas sometidas a una trayectoria permanentemente curvada emiten radiación: a radiación sincrotrón.



ALBA (España)

Instalaciones que usan la radiación sincrotrón están en funcionamiento en diversos lugares del mundo como fuentes muy valiosas de fotones UV e R-X, para investigación estructural.

ALBA es la instalación española ubicada en Cerdanyola del Vallès, cerca de Barcelona. Está en fase de construcción.

En el universo se crean electrones relativistas que son atrapados en campos magnéticos diversos. **Los objetos cósmicos que emiten radiación sincrotrón en esas condiciones son muy interesantes en el campo de la Astrofísica.**

Sin embargo, **en los aceleradores de partículas circulares, como el LHC, esta radiación supone un serio problema**. Las partículas cargadas viajando en trayectorias curvadas emiten esta radiación, y por tanto pierden energía. Además, esa radiación constituye un problema para todos los sistemas de acelerador (en particular la criogenia) y también desde el punto de vista de la seguridad radiológica. Las cavidades RF deben restituir esa energía radiada por las partículas.

Por revolución, la potencia perdida es:

$$P = \frac{2 \cdot e^2 \cdot c \cdot \gamma^4}{3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \rho^2}$$

(donde ρ es el radio)

Es importante destacar que dado que $\gamma = E/m_0 \cdot c^2$, los electrones pierden energía 10^{13} veces más rápido que los protones. Esta es una de las razones de que en el LHC corran protones, y que el posible acelerador de electrones del futuro (*ILC*) será un acelerador lineal.

Obtengamos ρ en función de otros parámetros del acelerador y sustituyamos su valor en la expresión anterior:

$$\frac{m \cdot v^2}{\rho} = e \cdot v \cdot B_{\perp} \Rightarrow \rho = \frac{m \cdot v}{e \cdot B_{\perp}} \xrightarrow[\text{vs } c]{m = \gamma \cdot m_0} \rho = \frac{\gamma \cdot m_0 \cdot c}{e \cdot B_{\perp}}$$

$$P = \frac{2e^2 c \gamma^4}{3 \cdot 4 \pi \epsilon_0 \rho^2} \longrightarrow P = \left[\frac{e^4}{6 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot m_0^2 \cdot c} \right] \gamma^2 \cdot B_{\perp}^2$$

Para un protón: $P = 4,70 \cdot 10^{-21} \cdot B^2 \cdot \gamma^2$

con $B = 8,33 \text{ T}$ y $\gamma = 7640$ tenemos: $P = 1,90 \cdot 10^{-11} \text{ W}$

Por tanto, para cada haz: $P_{\text{beam}} = 1,90 \cdot 10^{-11} \cdot 2808 \cdot 1,15 \cdot 10^{11} \Rightarrow P_{\text{beam}} \approx 6135 \text{ W}$

Finalmente, la energía perdida por segundo y metro é:

$$P \approx (2 \cdot 6135) / 26659 \Rightarrow P_{\text{beam}} \approx 0,46 \text{ W/m}$$

Para minimizar las pérdidas de energía disminuyendo el número de partículas **debemos tener en cuenta** que la luminosidad varía cuadráticamente con este valor. Entonces, si reducimos el número de partículas para bajar la potencia radiada, la luminosidad decrecerá con mucha mayor rapidez.

La forma de reducir el número total de partículas **sin comprometer la luminosidad** consiste en incrementar el espacio entre bunches -bunch spacing- (utilizar menos bunches) y compensar esta reducción aumentando el número de protones en cada bunch.

Radiaciones ionizantes

La **radiación** en las áreas bajo tierra y en el túnel del LHC **es producida** por la interacción de los protones con el gas residual (beam gas interactions) o con núcleos de los átomos de cualquiera de los materiales que rodean a los haces, tales como los colimadores, cables, criostatos, etc.

Cuando los protones circulan, hay una pequeña pero continua pérdida de protones a lo largo de anillo. Esos protones perdidos interactúan con lo que esté cerca de la trayectoria de los haces, produciéndose una serie de **partículas secundarias** como neutrones, piones, kaones y otros protones.

Algunas de esas partículas secundarias tienen suficiente energía para interactuar con más materia y producir partículas de **tercera generación**, y así sucesivamente. Es lo que se llama **cascada hadrónica**. Los fragmentos nucleares resultados de la cascada hadrónica son radioactivos y decaen en una escala de tiempo que va de unos segundos a varios días. Es decir, **el acelerador continua generando radiactividad aunque no estén circulando partículas por él.**

Por tanto, **todos los materiales** (plásticos, aceites, cemento, aluminio, acero, hierro, cobre, etc) cerca de los tubo por donde circulan los protones **son radiactivos una vez que el LHC entró en funcionamiento.**

Los equipamientos electrónicos en el túnel del acelerador y en las cavernas de los experimentos también resultan activados.

El nivel de esta activación radiactiva depende de varios factores: de la cantidad de radiación recibida, la composición exacta del material, la posición en la máquina y el tiempo pasado desde la irradiación. Por tanto, no es fácil predecir en cada uno de los lugares con exactitud de los niveles de radiación remanente mientras el acelerador está parado.



Unidades Radiológicas

El Gray [Gy]: Expresa la energía depositada por la radiación por kg de materia irradiada: **1 Gray = 1 Joule/kg**. Esta es la unidad utilizada para expresar la cantidad de radiación recibida por el material en el túnel durante la operación del LHC. La tolerancia del material del equipamiento a la radiación puede ser expresada en términos de la cantidad de Grays que el material puede recibir sin entrar en fallo. Este límite se conoce como Dosis de Ionización Total (TID-Total Ionising Dose) del material del equipamiento. En algunos casos, la vieja unidad radiológica **-rad-** es aún utilizada; **100 rad = 1 Gy**.

Como ya se ha indicado, se producen unas ~ 3000 de paquetes dando lugar a multiplicidades de aproximadamente 3000 partículas cada 25 ns. Por tanto, será muy alto el nivel de radiación al que estarán sometidos los detectores.

Tomemos **como ejemplo el Central Barrel de 2000 toneladas del detector CMS**. Cada segundo 600 millones de colisiones de 14 TeV ocurren en el centro de ese enorme cilindro, y vamos a considerar que la mayor parte de la energía de esas colisiones se deposita en esa parte del detector. Entonces, la energía total depositada por año (~ 300 días y 10 h por día) es:

$$(600 \cdot 10^6 \text{ colisiones/seg}) \times (14 \cdot 10^{12} \text{ eV} \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) \times (300 \text{ días} \times 10 \text{ horas/día} \times 3600 \text{ seg/hora}) \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

Por tanto, **la absorción de radiación por kilogramo de material** en el Central Barrel del CMS es en promedio:

$$\text{Dosis de Radiación Absorbida} \approx (1,5 \cdot 10^{10} \text{ J}) / (2000 \cdot 10^3 \text{ kg}) \approx 7500 \text{ Gray/año}$$

En realidad, el valor superará los **10 kGy/año** en las zonas más expuestas.

O Sievert [Sv]: Expresa la **dosis recibida por un ser humano**. La dosis en Sieverts es igual a la dosis absorbida en Grays multiplicada por **un factor de calidad llamado Q**. Este factor **-Q-** **depende** del tipo de radiación y de la energía de la partícula para tener en cuenta los efectos biológicos. Los valores de **Q varían entre 1 y 20** y han sido determinados por la International Commission for Radio Protection (ICRP).

Cuando no hay haces presentes en el LHC, hay solo radiación remanente causada por fotones (R-X y gamma) y electrones (rayos β de baja intensidad). En este caso es correcto tomar **Q = 1, así que 1 Sv = 1 Gy**. En algunos casos, la vieja unidad radiológica **-rem-** es aún utilizada; **100 rem = 1 Sv**.

El Becquerelio [Bq]: Unidad utilizada para definir la actividad de una fuente radioactiva. **1 Bq corresponde a 1 desintegración por segundo**. Material con actividad menor que 2 Bq/gramo es clasificado como no radiactivo. En algunos casos, aún se sigue usando el Curie: **1 Curie = $3 \cdot 10^7$ Bq**. Usualmente, **la actividad en las zonas controladas del CERN** se expresan en términos de velocidad de dosis remanente en **$\mu\text{Sv/hr}$ a 10 cm de distancia del objeto**.

Dosis límite

El ICRP recomienda una dosis límite de **20 mSv/año** para trabajadores en instalaciones nucleares. El CERN tiene establecido una dosis límite de **15 mSv/año para personal específico, 6 mSv/año para otros miembros del staff y 1 mSv/año para el resto de personas.**

Es interesante **comparar** la dosis adicional recibida por el personal del CERN debido a su trabajo, con la dosis recibida por cualquiera persona que viva en el **Pays de Gex** (onde la mayor parte del LHC está ubicado):

Fuente de radiación	Dosis anual
Rayos cósmicos	0.6 mSv
Radiación terrestre (granito, etc...)	0.6 mSv
Radiación interna (potasio)	0.4 mSv
Radón en casas	2.2 mSv
Vuelos intercontinentales	0.1 mSv
Exámenes médicos	1.0 mSv
Total	4.9 mSv

Proporción de dosis límite

Las áreas controladas en el CERN están clasificadas de acuerdo con su proporción de dosis remanente. En la práctica será **difícil obtener autorización para realizar trabajos en las áreas con un intervalo de dosis por encima de 2 mSv/hr**, mientras que en zonas con menos de 1 mSv/h es habitualmente admitido.

Área	Límite de dosis
Área controlada	< 2 mSv/hr
Límite permanencia en área	< 2 mSv/hr
Área altamente radioactiva	> 2 mSv/hr
Área prohibida	> 100 mSv/hr

La proporción de dosis remanente en el **Pays de Gex** es aproximadamente de 0.1 µSv/hora o 100 nano Sieverts/hora.

Agujeros negros

“No hay bases para estar preocupados por las consecuencias que se puedan derivar de la generación en el LHC de nuevas partículas o formas de materia”. Así se manifestaron los cinco físicos que constituyen el LHC Safety Assessment Group.

“Todo lo que el LHC pueda hacer ya lo ha hecho la Naturaleza muchas veces antes”.

Algunos científicos críticos han argumentado, no obstante, que el CERN ha ignorado o menospreciado el riesgo de que el LHC pueda producir un "agujero negro" que acabe con la Tierra, o que se puedan crear otras partículas peligrosas.

El LHC Safety Assessment Group, sin embargo, desde sus estudios precisa que **rayos cósmicos ultra energéticos** producen colisiones equivalentes a las del LHC sobre la Tierra y otros objetos astronómicos de forma continua. *“Esto se traduce en que la Naturaleza ha completado alrededor de 10^{31} programas experimentales LHC desde el comienzo del Universo, y las estrellas y las galaxias están aún ahí”*, argumentan.

Los rayos cósmicos son partículas energéticas originadas en el espacio y que colisionan contra la atmósfera de la Tierra. Casi el 90% de ellos son protones, alrededor del 9% son núcleos de Helio (partículas alfa) y un 1% son electrones

Los rayos cósmicos están **bombardeando la atmósfera terrestre continuamente** y una parte de ellos con **energías mayores que las de los protones en el LHC**. Por tanto, estos rayos pueden producir en el centro de masas energías equivalentes y superiores a las que se va generar en las colisiones del LHC.

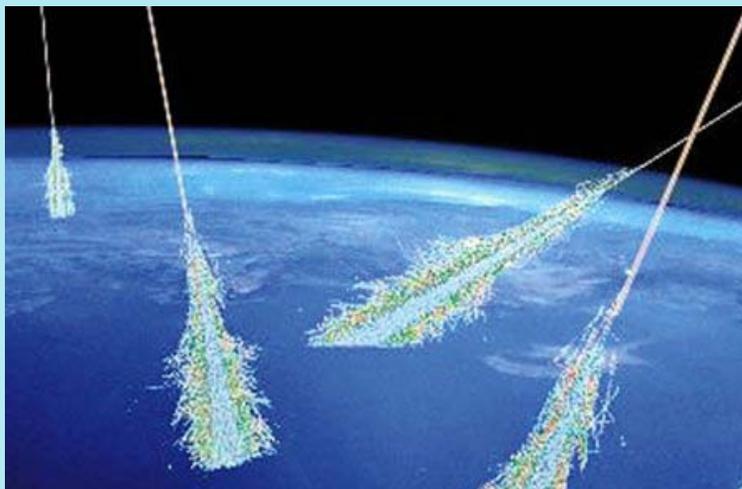


Imagen de la web de NASA

Los siguientes cálculos pretenden de una forma simple explicar el razonamiento del LSAG Report que asegura que no existe riesgo de ningún tipo en el Gran Colisionador de Hadrones. (LHC)

Calculemos la energía necesaria que deben poseer para que chocando con un blanco fijo (partículas en reposo en la atmósfera), impliquen una energía total en la colisión de **14 TeV**.

Debemos utilizar condiciones relativistas. Llamemos **sistema LHC** a aquel en el que dos protones colisionan de frente, y **sistema CR** (Cosmic Ray) a aquel en el que un protón (rayo cósmico) colisiona contra un blanco fijo (protón en reposo en la atmósfera).

Siendo **E** la energía de las dos partículas en el sistema y **P** el momento total, de las relaciones de invarianza de la Teoría Especial de la Relatividad se sigue:

$$\left(P^2 - \frac{E^2}{c^2} \right)_{LHC} = \left(P^2 - \frac{E^2}{c^2} \right)_{CR} \quad (1)$$

But in LHC frame: $P = 0$ and $E = 14 \text{ TeV}$

and in CR frame CR : $P = P_{ray} + 0$ and $E = E_{ray} + m_p \cdot c^2$

being $m_p =$ protón rest mass

Then the equation (1) gives: $-\frac{14^2}{c^2} = P_{ray}^2 - \frac{(E_{ray} + m_p \cdot c^2)^2}{c^2}$

Then, $-\frac{14^2}{c^2} = P_{ray}^2 - \frac{(E_{ray}^2 + m_p^2 \cdot c^4 + 2 \cdot m_p \cdot c^2 E_{ray})}{c^2}$

$-196 = P_{ray}^2 \cdot c^2 - (E_{ray}^2 + m_p^2 \cdot c^4 + 2 \cdot m_p \cdot c^2 E_{ray})$ (2)

Since $E_{ray}^2 \gg m_p^2 \cdot c^4$ e $P_{ray}^2 \cdot c^2 \approx E_{ray}^2$

equation (2) gives: $196 = 2 \cdot m_p \cdot c^2 E_{ray}$ (3)

and for protons $m_p \cdot c^2 \approx 10^{-3} \text{ TeV}$ (3)

So from (3): $E_{Ray} \approx 10^{17} \text{ eV}$

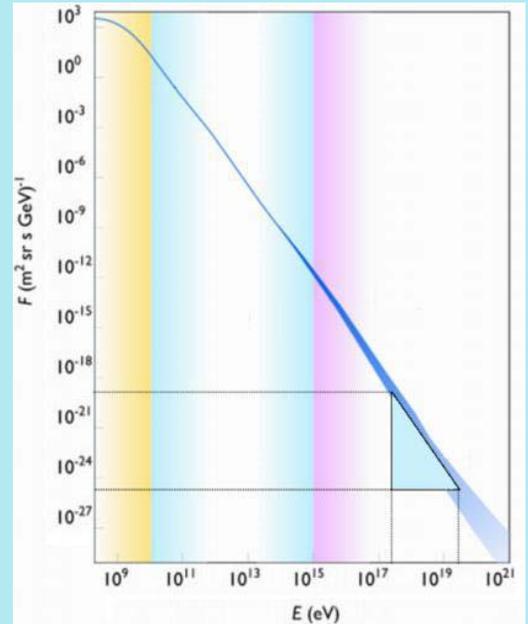
Así, la energía equivalente en el centro de masas, cuando un protón (rayo cósmico) colisiona contra la atmósfera, será como mínimo de 14 TeV si la energía de ese protón es 10^{17} eV o mayor.

La figura siguiente muestra el **espectro energético diferencial para los rayos cósmicos**. Nosotros hemos de considerar el flujo total debido a rayos cósmicos con energía de 10^{17} eV o mayor.

En la gráfica está representado el **Flujo diferencial en función de la energía de los rayos cósmicos**. De forma sencilla es una medida del número de rayos cósmicos que inciden en función de su energía por metro cuadrado y segundo en la atmósfera terrestre.

Para conocer el Flujo total en el rango de energías superior a 10^{17} eV podemos aproximarnos calculando el área del triángulo dibujado.

Su altura es de unas 10^{-20} partículas/(m²·sr·s·GeV)⁻¹ y su base es de alrededor de 10^{20} eV (10^{11} GeV). Por encima de ese valor el flujo de rayos cósmicos es depreciable.



Entonces:
$$\text{Flux} \approx \frac{1}{2}(10^{-20}) \cdot (10^{11}) \Rightarrow \text{Flux} \approx 10^{-10} \text{partículas/s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Supondremos que el Sol recibe la misma cantidad de esa clase de rayos cósmicos ultra energéticos (el campo magnético del Sol es enorme y muy complejo) y que todos los rayos cósmicos son protones. Una aproximación más exacta no afectaría para nada a la conclusión de que el LHC no supone riesgo alguna para la Tierra.

La superficie del Sol es:
$$S = 4\pi \cdot R^2 \Rightarrow S = 4\pi \cdot (7 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow S \approx 6 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

Por tanto , **cada segundo el número de colisiones**, equivalentes en energía a las del LHC, en la superficie del Sol es:

$$(10^{-10})(6 \cdot 10^{18}) \approx 10^9 \text{ collisions/s}$$

El número de colisiones por segundo en ATLAS o CMS a la máxima luminosidad posible es de alrededor de:

$$600 \text{ millones/s} \approx 10^9 \text{ colisiones/segundo.}$$

Por tanto, **el Sol sufre cada segundo el mismo “peligro” que el que existirá debido a las colisiones en el LHC en ese mismo tiempo**. Pero esta situación para el Sol viene ocurriendo desde su creación. **Y el Sol aún existe.**

Si además consideramos los millones de estrellas aún más grandes que nuestro Sol, y por tanto sufriendo más colisiones, es fácil asumir que verdaderamente no hay ninguna razón para el alarmismo.

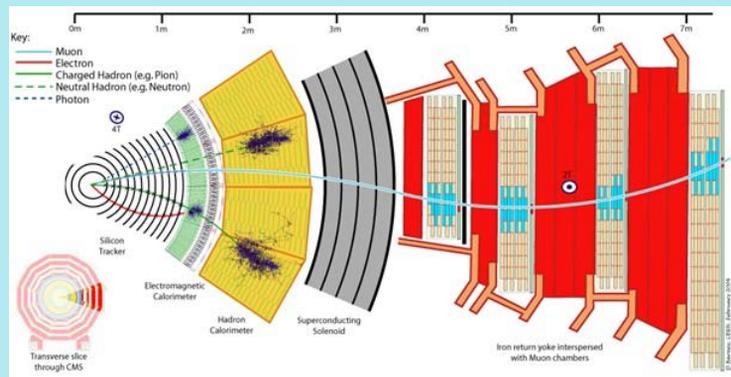
DETECTORES

- INTRODUCCIÓN
- ATLAS
- CMS
- LHCb
- ALICE
- TOTEM
- LHCf
- MoEDAL

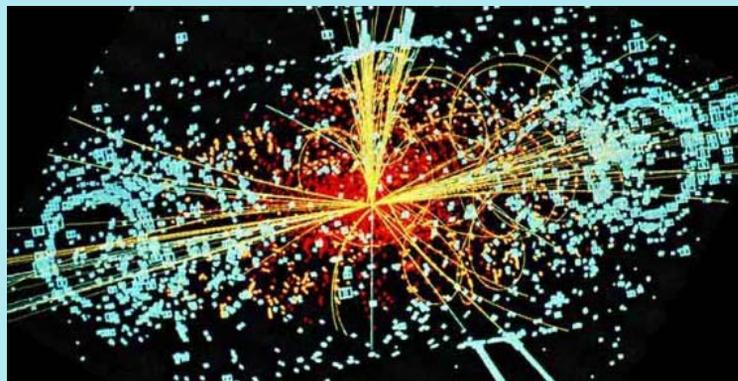
INTRODUCCIÓN

Los **detectores** del LHC fueron designados, construidos y llevados a cabo por colaboraciones internacionales procedentes de todas partes del mundo. Hay cuatro grandes experimentos (**ATLAS**, **CMS**, **LHCb** y **ALICE**) y tres pequeños (**TOTEM**, **LHCf** y **MoeDAL**). Fueron necesarios veinte años para el diseño y construcción de los detectores y la duración de los experimentos será del orden de 15 años.

Los eventos (un evento es una colisión con todas sus partículas resultantes) son estudiadas en detectores gigantes que son capaces de reconstruir lo que ocurrió durante las colisiones, y todo esto en un entorno elevadísimo de tasa de colisiones. Pueden ser comparados con enormes cámaras digitales tridimensionales que pueden tomar 40 millones de "secuencias" (digitalizadas por decenas de millones de sensores) por segundo. Los detectores son construidos en capas, teniendo cada capa una determinada funcionalidad. Las internas son las menos densas, mientras que las exteriores son las más densas y compactas.



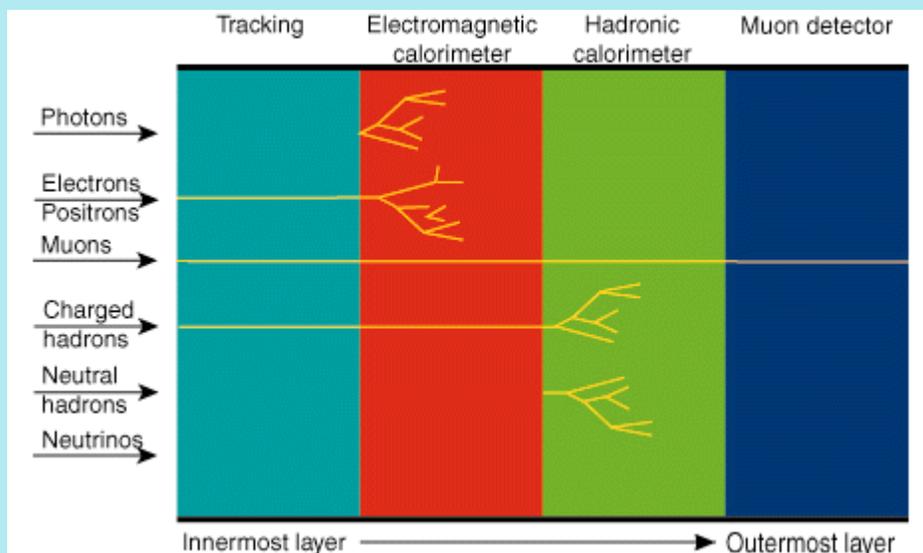
Las partículas muy masivas que los científicos esperan crear tienen una muy corta vida, decayendo en otras más ligeras y ya conocidas. Después de una colisión cientos de esas partículas ligeras como electrones, muones y fotones, protones, neutrones y otras, vuelan a través del detector con velocidades próximas a la de la luz. Los detectores usan esas partículas ligeras para deducir la breve existencia de las nuevas y pesadas producidas.



Las trayectorias de las partículas cargadas son curvadas por campos magnéticos, y los radios de curvatura son utilizados para calcular sus momentos: cuanto más alta es la energía más abierta es la curvatura. Por tanto, partículas con mucha energía cinética presentan una suficiente trayectoria a través del detector para ser medido su radio de curvatura e por tanto su momento.

Otras partes del detector son los **calorímetros** destinados a medir la energía de las partículas (tanto de las cargadas como de las no cargadas). Los calorímetros también deben ser suficientemente grandes para absorber la máxima energía posible. Estas dos son las razones de que los detectores del LHC sean tan grandes. Los detectores rodean el punto de interacción para recoger toda la energía de las partículas y el balance de los momentos de cada evento para reconstruirlo en detalle. Combinando la información desde las diferentes capas es posible determinar el tipo de partícula que dejó su traza en cada capa.

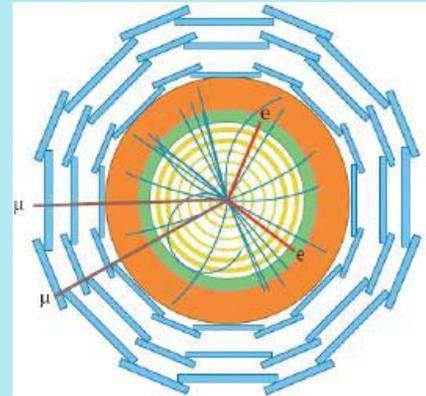
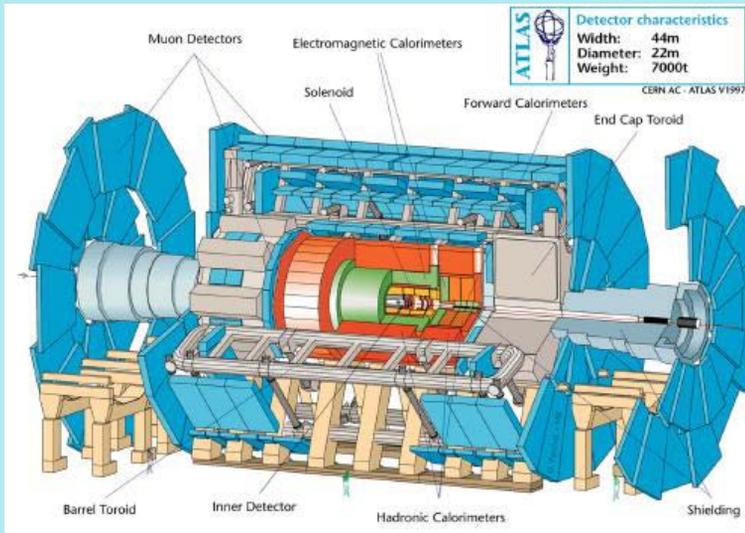
Las partículas – electrones, protones y muones – dejan trazas por ionización. Los electrones son muy ligeros y por tanto pierden su energía muy rápidamente, mientras que los protones penetran más profundamente en el detector. Los fotones no dejan trazas por si mismo pero en el calorímetro se convierten en pares electrón-positrón, cuyas energías pueden ser medidas. La energía de los neutrones puede ser medida indirectamente a partir de la transferencia de la misma que hacen hacia protones. Los muones son las únicas partículas que alcanzan y son detectadas por las capas más externas del detector.



Cada parte del detector está conectado a un sistema de lectura electrónica a través de miles de cables. En el instante en que un impulso es producido el sistema registra el lugar y momento exactos enviando la información a la computación. Centenares de computadores trabajan conjuntamente para combinar esa información. En lo más alto de la jerarquía computacional se decide en una fracción de segundo que evento es interesante y cual no. Hay diversos criterios para seleccionar los eventos potencialmente significativos, reduciéndose así la cantidad de eventos desde los 600 millones producidos a unos centenares que serán investigados en detalles.

ATLAS

El detector ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) es el más grande detector en la Física de Partículas dedicado a propósitos generales (designado para "ver" un amplio rango de partículas y fenómenos producidos en las colisiones en el LHC). **Mide 46 metros de largo, 25 metros de alto y 25 metros de ancho; pesa 7000 toneladas y consiste en 100 millones de sensores** para medir las partículas que emergerán de las colisiones protón-protón en el LHC. La primera pieza de ATLAS fue instalada en 2003 y la última fue bajada en marzo de 2008, completándose así el gigantesco puzzle.



ATLAS podría dar respuesta a la misteriosa "materia e energía oscura", y buscar dimensiones extra en el espacio-tiempo. Está diseñado para ser capaz de descubrir nuevas partículas y nuevos fenómenos esperados como extensiones del Modelo Estándar: *supersimetría* o el *Bosón de Higgs*.

Si el campo de Higgs no es la respuesta buscada para entender la masa de las partículas, se espera que el experimento ATLAS guíe a los físicos en la correcta dirección.

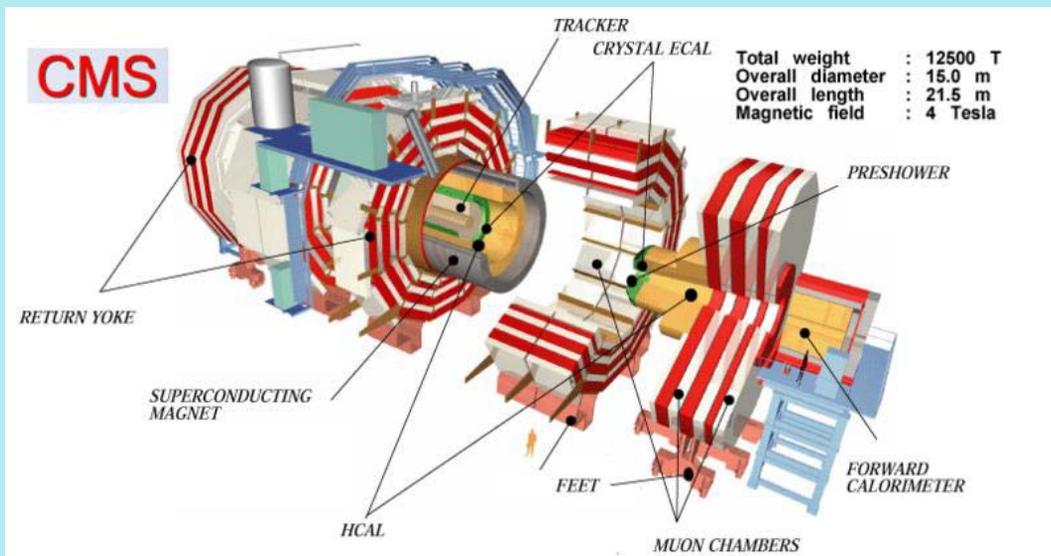
ATLAS es una colaboración mundial que implica a unos 2100 científicos e ingenieros de **167 instituciones de 38 países**. Son: Argentina, Armenia, Australia, Austria, Azerbaiyán, Bielorrusia, Brasil, Canadá, Chile, China, Colombia, República Checa, Dinamarca, Francia, Georgia, Alemania, Grecia, Hungría, Israel, Italia, Japón, Marruecos, Holanda, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, Rusia, Serbia, Eslovaquia, Eslovenia, España, Suecia, Suiza, Taiwán, Turquía, Reino Unido y EEUU.

CMS

CMS (Compact Muon Solenoid) es, junto con ATLAS, un detector de "propósito general" diseñado para explorar la física en la escala del TeV en un amplio rango de partículas y fenómenos producidos en las colisiones en el LHC. En ella se espera encontrar **respuesta a preguntas** como: Hay aún principios fundamentales sin descubrir? Es el **mecanismo Higgs** el responsable de la masa visible del universo? **Cómo podemos resolver el misterio de la energía oscura?** Hay dimensiones extra en el espacio? **Cómo se creó el universo?** Está el **Bosón de Higgs** detrás de la masa de las partículas?



El cuerpo principal del detector CMS es un cilindro multicapa de unos **21 m de largo y 16 m de diámetro, con un peso total de más de 13000 toneladas**. La capa más interior es el silicon-based particle tracker (*detector de trazas hecho de silicio*) rodeado por el scintillating crystal electromagnetic calorimeter (*calorímetro electromagnético de cristal escintilador o de centelleo*), que a su vez está cubierto por el sampling calorimeter for hadrons (*calorímetro de muestra para hadrones*) midiendo la energía de las partículas. Todos estos subdetectores se encuentran dentro del **solenoid central superconductor (3,8 Tesla), de 13 m largo y 6 m de diámetro**, que permitirá medir el momento de las partículas cargadas. En el exterior del solenoide están los large muon detectors (*grandes detectores de muones*), que están insertados en piezas de hierro que constituyen el núcleo de retorno del campo magnético.



La colaboración CMS comprende 2300 científicos de 159 instituciones- entre ellas el Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC)- en 37 países.

LHCb

El detector LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) es un detector de **21 m de largo, 10 m de alto y 13 m de ancho**, estando diseñado para estudiar la "violación CP" y otros raros fenómenos de decaimiento de hadrones formados por quarks pesados, en particular con quarks tipo b (**mesones B**).

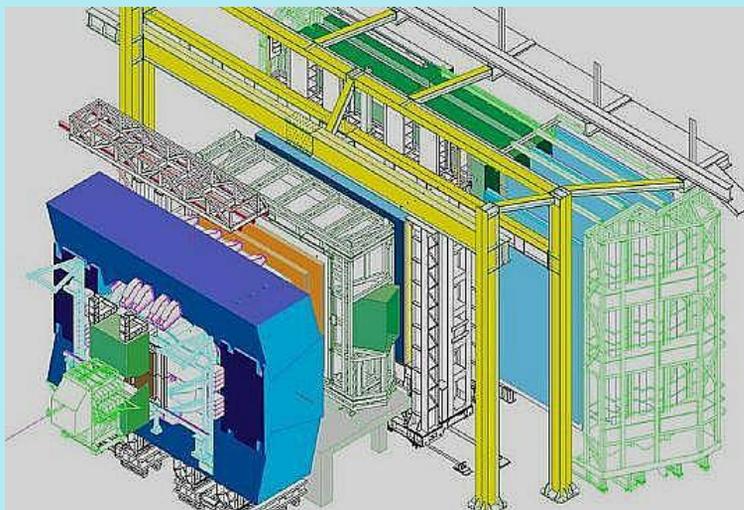


El **incumplimiento de la simetría CP** tuvo como sustento teórico el proporcionado en 1973 por **Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa** (premiados con el **Nobel 2008**, junto a Yoichiro Nambu), que señalaron, además, que esa violación se seguiría automáticamente si había al menos seis tipos -sabores- de quark. Años después, los dos quarks que faltaban - beauty y top - fueron descubiertos.

El interés por la **violación CP** no solamente está dirigido hacia las partículas elementales si no también hacia la cosmología, pues hay que **explicar el dominio de la materia frente la antimateria**, lo que podría estar relacionado con la referida Violación CP. El experimento LHCb mejorará significativamente los resultados obtenidos anteriormente en otros experimentos (Belle y Babar), tanto cualitativa como cuantitativamente, gracias al gran número de diferentes clases de hadrones producidos a partir de las colisiones protón-protón en el LHC.

Los mesones B aparecen con más probabilidad cerca de la dirección de los haces de protones, **por eso el detector LHCb está diseñado de forma que los subdetectores forman un ángulo de menos de 50° con la horizontal**. Además, solamente se ha construido una de las dos partes (desde el punto de colisión hacia uno de los lados), siendo entonces un detector diferente a los otros tres, que se pueden entender como detectores de tipo cilíndrico.

Las partes fundamentales del detector son el **vertex detector**, que mide las trazas de las partículas cargadas, y el Ring-Imaging Cherenkov - **RICH** - que identifica las diferentes clases de partículas producidas.



565 científicos de 47 universidades y laboratorios de 15 países están o han estado relacionados con los trabajos en el LHCb .

ALICE

ALICE (A Large Ion Collider Experiment), estudia las interacciones entre iones relativistas (es decir, iones que alcanzan velocidades próximas a la de la luz). El **objetivo de este experimento es la física de la interacción fuerte a densidades muy alta**, en la que se forma una nueva fase de la materia: **el plasma quark-gluón (QGP)**.

A estas altas densidades y temperaturas podría verificarse **el estado de desconfinamiento (quarks y gluones libres)** y la llamada restauración de la simetría quiral, en la que las masas de todos los quarks son cero.

De alguna forma, se estará reproduciendo como era el universo instantes después del Big Bang.



Los iones de Plomo son producidos por una muestra altamente purificada de plomo calentada a unos 550°C. El vapor de plomo se ioniza mediante una corriente electrónica. Se generan muy diferentes iones cargados con un máximo de alrededor de **Pb²⁷⁺**. Estos iones son seleccionados y acelerados hasta 4.2 MeV/u (energía por nucleón) antes de que pasen a través de una hoja de carbón que convierte a la mayoría de ellos en **Pb⁵⁴⁺**.

EL haz de **Pb⁵⁴⁺** es acumulado, y después acelerado hasta 72 MeV/u en el **Low Energy Ion Ring (LEIR)**, que los transfiere al PS.

El PS acelera el haz hasta 5.9 GeV/u y los envía al SPS después de haber pasado por una segunda hoja de carbono que lleva a los iones a su máxima carga: **Pb⁸²⁺**.

El SPS los acelera hasta 177 GeV/u, para ser finalmente insertados en el LHC, que los acelera a **2.76 TeV/u**.

El detector consiste en dos principales componentes: **la parte central** compuesta de subdetectores dedicados al estudio de señales de hadrones y electrones, y **el espectrómetro de muones** dedicado al estudio del comportamiento de los quarkonios (mesones formados por la pareja de un quark y su antiquark) en la materia de alta densidad. La parte central está encajada en un gran solenoide de campo magnético débil (corriente de 6000 A y campo de 670 miliTesla). La parte más interior del detector es el **tracking system** (sistema de trazas), que consiste en the inner tracking system (ITS) y el outer tracking system (TPC).

El **TPC (Time Projecting Chamber)** es el **principal componente de ALICE** siendo una "cámara de proyección de tiempo". Esta parte es un detector principal de rastreo de partículas en la zona central, el punto de interacción, y con otros subdetectores (ITS, TRD e TOF) proporciona información tanto del momento de partículas cargadas como de la identificación y determinación de los vértices resultantes de las colisiones.

El TPC es un detector principal en muchos experimentos en Física de Altas Energías.



La colaboración Alice comprende: 29 países, 86 institutos, 1000 miembros.

TOTEM

El experimento **TOTEM** (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation) **mide la sección eficaz total p-p y estudia la dispersión elástica y difractiva en el LHC.**



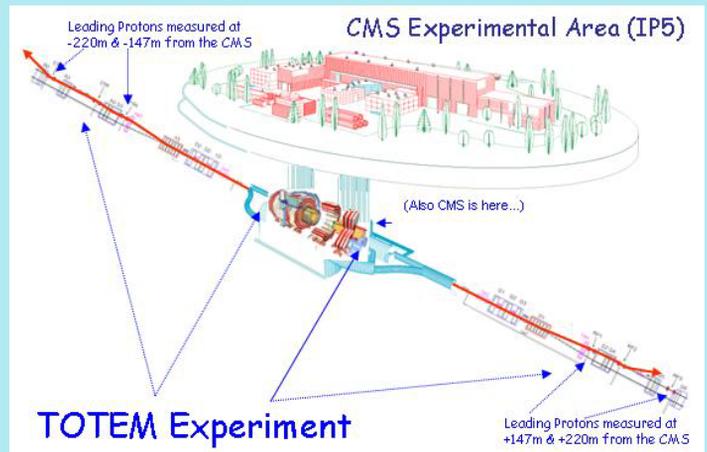
TOTEM está ubicado a unos 200 metros a un lado a otro del punto de colisión del detector CMS (IP5).

Modesto en tamaño, **TOTEM está instalado cerca del punto de colisión en el centro del detector CMS.** Utiliza sensores de silicio en el túnel del LHC a una distancia de unos 200 metros del centro del CMS.

La **medida del "scattering"** (dispersión) de las partículas a muy pequeños ángulos **permitirá el estudio de procesos físicos que no pueden ser estudiados de ninguna otra forma.** Por ejemplo, cómo el tamaño y la forma de los protones varían con la energía.

Se estudian colisiones en las que uno de los protones "sobrevive" y el otro da lugar a nuevas partículas que salen con dirección frontal, y también colisiones en las que los dos "sobreviven" deflectándose ligeramente un al otro.

El experimento **TOTEM** usa **tres tipos de detectores**: uno tipo **Roman Pot**, utilizados para detectar protones; y otros dos **-Cathode Strip Chambers y GEM Detectors-** que miden los chorros de partículas producidas en las colisiones y que salen frontalmente.



La colaboración **TOTEM** comprende unos 80 físicos de 11 universidades y laboratorios en 8 países.

LHCf

El experimento LHCf (LHC forward) está colocado a los dos lados del experimento ATLAS a unos 140 m del punto de interacción (IP₁). Sus dos detectores, hechos de placas de tungsteno y plástico escintilante, pueden medir con gran precisión el número y energía de los piones neutros y otras partículas producidas en las direcciones frontales (forward direction) en las colisiones en ATLAS.



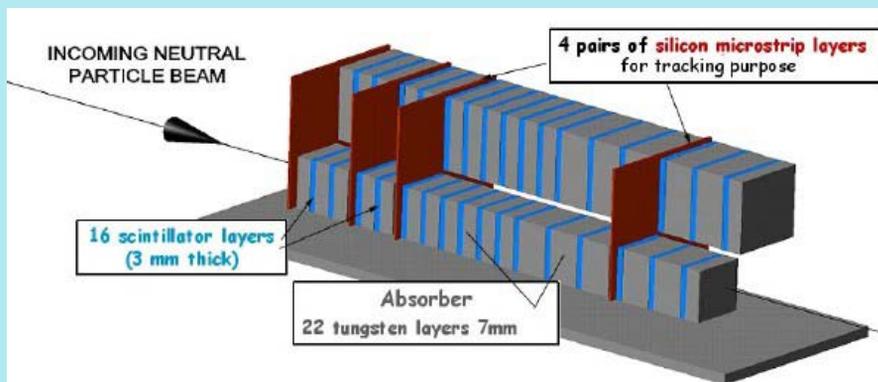
El objetivo de este experimento es el estudio de las secciones eficaces para la producción de partículas neutras generadas en direcciones prácticamente paralelas a la de los haces de protones o núcleos.

La producción de piones neutros, fotones gamma y neutrones será investigada durante la fase inicial del arranque del LHC, a baja luminosidad (inferior a $10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Este estudio es muy importante para la comprensión de las cascadas de partículas producidas en la atmosfera como consecuencia de las colisiones de los Rayos Cósmicos de Ultra Alta energía. Los métodos utilizados para extraer información de la radiación primaria procedente de las colisiones de los rayos cósmicos depende del modelo de interacción supuesto. En el experimento LHCf se puede acumular en unas pocas horas datos suficientes para tener una estadística que permita considerar la validez de esos modelos. También se puede acceder a radiación procedente de las colisiones protón-protón en ángulos ligeramente diferentes a la dirección de colisión mediante el movimiento del detector.

Los dos calorímetros electromagnéticos, situados a 140 metros a ambos lados del IP₁ (ATLAS), consisten en un "sandwich" de material escintilante y tungsteno.

Las dimensiones de cada uno de esos calorímetros es de solo 10cm x 30cm x 90cm.



Las medidas de LHCf, junto con las de sección eficaz inelástica (TOTEM), son de suprema importancia para la comprensión de la evolución de las cascadas de partículas resultado de las colisiones de los Rayos Cósmicos de Ultra Alta energía.

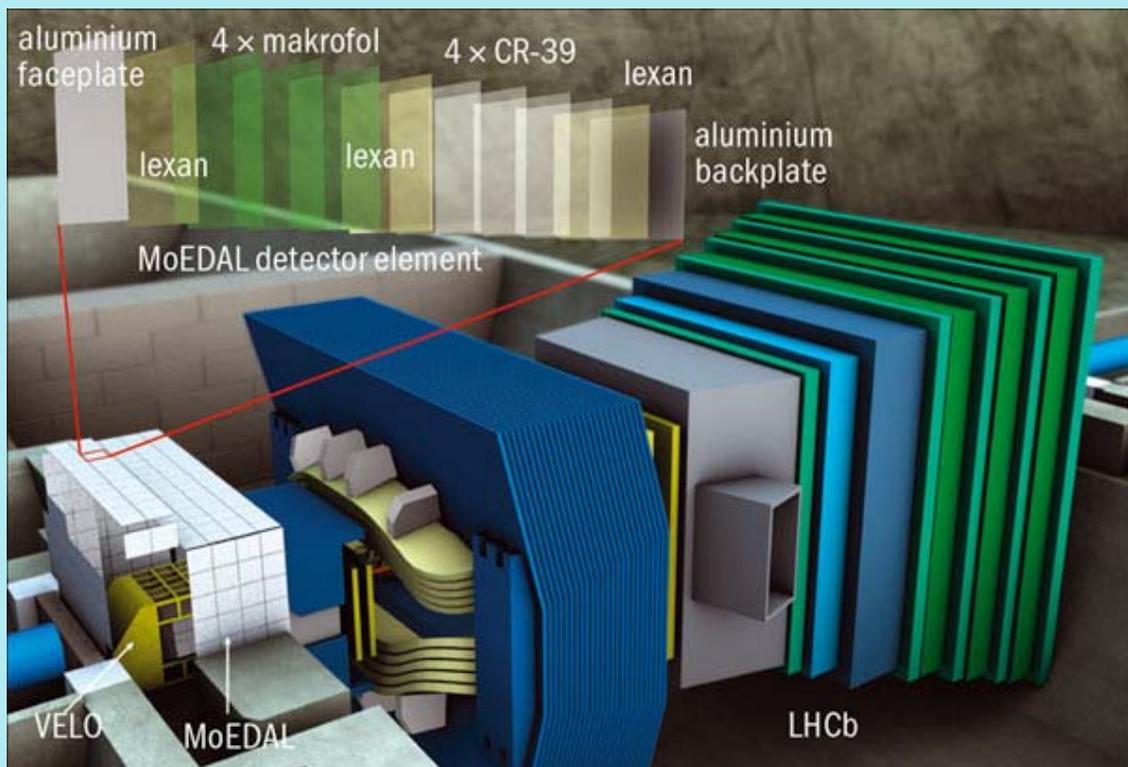
LHCf es el más pequeño de los seis experimentos oficiales del LHC, y comprende una colaboración de 22 científicos de 10 instituciones en 4 países.

MoEDAL

MoEDAL es una colaboración formada por físicos de Canadá, CERN, República Checa, Alemania, Italia, Rumanía y EEUU, y está preparando la instalación del detector durante la larga parada del LHC que **comenzará a finales de 2011**. Se compone de un conjunto de aproximadamente 400 detectores nucleares de trazas (NTDs).



Cada NTD consiste en un apilamiento de 10 capas de plástico lo que da una superficie equivalente de 250 m². **MoEDAL estará desplegado en la región de intersección en el Punto-8 del LHC** donde está el VERteX LOcato (VELO) del detector LHCb.



MoEDAL (the Monopole and Exotics Detector At the LHC) es el más nuevo de los experimentos que Investigará las colisiones en el Large Hadron Collider. Aprobado por el CERN en Diciembre de 2009, el experimento MoEDAL irá a la búsqueda de partículas muy exóticas monopolos magnéticos y partículas masivas (SMPs). Tiene unas dimensiones modestas y estará ubicado en la caverna en la que se encuentra el experimento LHCb, más exactamente añadido al VELO.

MODELO ESTÁNDAR

- ANTIMATERIA
- INTERACCIONES
- DIAGRAMAS DE FEYNMAN
- PARTÍCULA DE HIGGS
- VIOLACIÓN CP
- Y MÁS ALLÁ

MODELO ESTÁNDAR

El **Modelo Estándar de Física de Partículas** es la mejor teoría que los físicos tienen actualmente para describir los bloques fundamentales del edificio del universo. Es uno de los logros más grandes de la ciencia del siglo XX.

El Modelo Estándar describe el universo usando **6 quarks, 6 leptones y algunas partículas “portadoras de la fuerza”**. Hay cuatro fuerzas conocidas (o interacciones), cada una mediada por una partícula fundamental, conocida como partícula intermedia o portadora. Tres de ellas son los **fotones** (interacción electromagnética), **gravitones** (interacción gravitatoria), y los **gluones** (interacción fuerte) que no tienen ninguna masa, mientras que las partículas **W[±]** y **Z⁰**, portadoras de la fuerza débil tienen una masa de 80-90 GeV/c².

La **Gravedad** está incluida solamente en el Modelo Estándar como hipótesis especulativa, pues los gravitones no se han observados directamente aún.

A **energías muy altas y a escalas muy pequeñas las interacciones fuerte, electromagnética y débil llegan a ser casi idénticas, pero la convergencia es imperfecta.**

Las **fuerzas electromagnéticas y gravitacionales** varían con el cuadrado inverso de la distancia y tienen alcance infinito. Sin embargo las fuerzas nucleares fuertes y débiles son de muy corto alcance.

En el caso de la **fuerza débil**, ese corto alcance tiene que ver con la enorme masa de las partículas portadoras de la fuerza. En el caso de la **fuerza fuerte**, la razón de su corto alcance debe a su especial comportamiento que hace que aumente asintóticamente con la distancia. Por tanto, según aumente la distancia están implicadas energías cada vez mayores.

Las partículas que "sienten" la fuerza nuclear fuerte se llaman **hadrones**, mientras que las que no la sienten son los leptones. Los hadrones se forman por unión de partículas más elementales llamadas quarks, mientras que los leptones se consideran como partículas sin estructura y por tanto verdaderamente elementales.

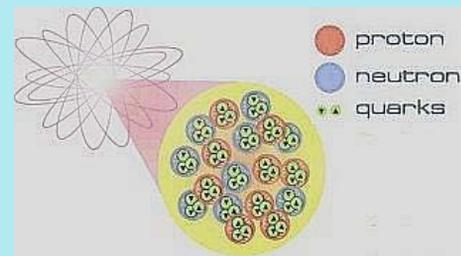
Hay **seis tipos** (también llamados “sabores”) de quarks y de leptones (ver cuadro).

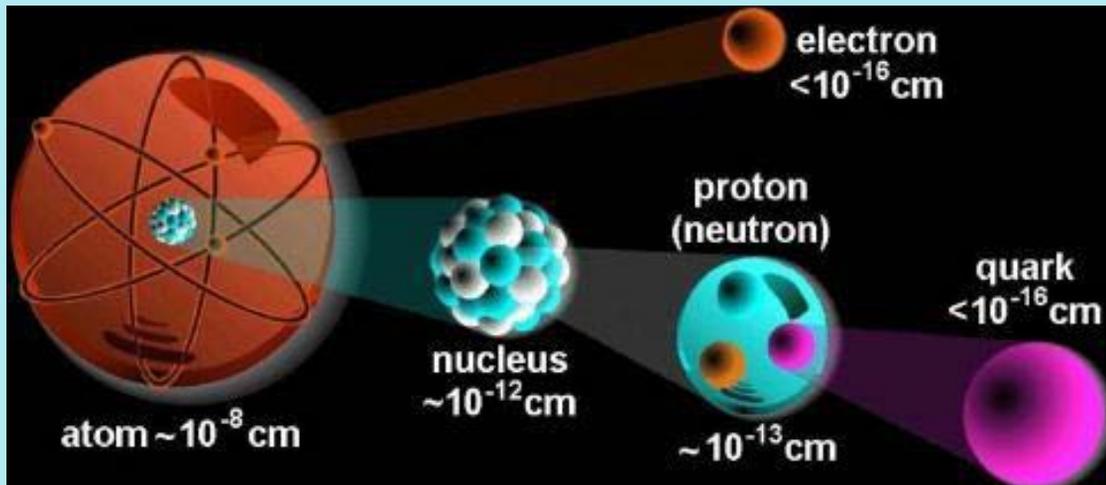
Los **leptones pueden existir aislados pero los quarks se asocian siempre en tríos (bariones) o en parejas quark-antiquark(mesones)**. Los protones y los neutrones son los bariones más conocidos, mientras que piones y kaones son mesones.

Los **quarks existen solamente dentro de los hadrones** donde están confinados por la fuerza fuerte. Por tanto, no podemos medir su masa aislándolos. Esta es una característica nueva y radical de la fuerza fuerte (conocida como **libertad asintótica de los quarks**), cuya explicación les valió el premio Nobel a **Gross, Wilczek y Politzer** en el año 2004.

The Six Leptons		The Six Quarks	
electron	electron neutrino	up	down
muon	muon neutrino	strange	charm
tau	tau neutrino	top	bottom
photon	gluon	W Z	graviton

The Four Force-carrying Particles





Por otra parte, todas las partículas se clasifican como **fermiones** o **bosones**. La diferencia entre ellas es debida al valor de su **spin**.

Fermión: nombre para las partículas caracterizadas por un spin fraccionario del momento angular intrínseco en unidades de $h/2\pi$ ($1/2, 3/2, 5/2\dots$), y que se comportan según la estadística de Fermi-Dirac, es decir **no pueden ocupar el mismo estado cuántico simultáneamente**.

Los quarks, leptones y bariones son todos fermiones.

Dos fermiones "se oponen" a ser situados cerca uno del otro. Por tanto, los fermiones poseen "rigidez" y de ahí se van a derivar todas las propiedades macroscópicas de la materia. Por tanto, se consideran a veces a los fermiones como "**partículas de materia**".

El principio de exclusión de Pauli obedecido por los fermiones es responsable de la estabilidad de los electrones e los átomos (y por tanto de la estabilidad de toda a materia). También es responsable de la complejidad de los átomos (dada la imposibilidad de que todos los electrones atómicos ocupen el mismo nivel de energía), siendo ésta la explicación de la variedad química del universo. Es también responsable de otros efector tan espectaculares como la presión dentro de la materia degenerada que gobierna en gran parte el estado de equilibrio de las enanas blancas y de las estrellas de neutrones.

Bosón: nombre para las partículas con spin entero ($0, 1, 2\dots$) en unidades de $h/2\pi$ de momento angular y que responden a la estadística de Bose-Einstein.

En contraste con los fermiones, **varios bosones pueden ocupar el mismo estado cuántico**. Así, los bosones con misma energía pueden ocupar el mismo lugar en el espacio. Son pues las partículas que conforman los campos de fuerza y por tanto son bosones las partículas portadoras de todas las interacciones. Los mesones son también bosones.

Las características del **LASER** y del **MASER**, el **Helio-4 superfluido** y los llamados **condensados de Bose-Einstein** son debido a las propiedades de los bosones.

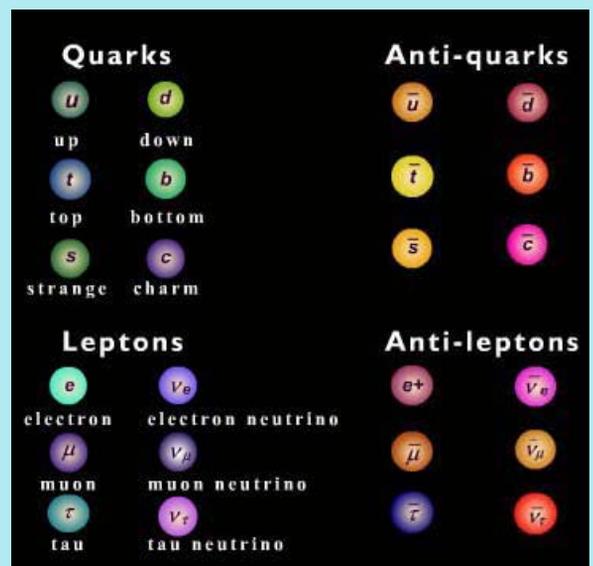
Los únicos dos bosones en el Modelo Estándar que deben aún ser descubiertos experimentalmente son el **bosón de Higgs** y el **gravitón**.

Antimateria

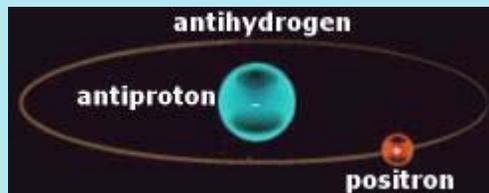
- A finales de la década de 1920, **Paul Dirac** aplicó a la mecánica cuántica la Teoría Especial de la Relatividad de Einstein. Como resultado de esta nueva interpretación se sigue **que debe haber estados de energía negativa**:

$$\pm E = (c^2p^2 + m^2c^4)^{1/2}$$

- Dirac sugirió que la falta de un electrón en uno de esos estados sería equivalente a una partículas de vida corta de carga positiva -un **positrón**- y con la misma masa que el electrón. En la materia ordinaria, un positrón encontraría rápidamente un electrón, desapareciendo ambos (**aniquilación**) y generándose, por ejemplo, un par de fotones.
- Una manera meramente descriptiva de aproximarse** a este proceso es suponer que los electrones que ocupan los estados de energía negativa se encuentran fuera de cualquier interacción que los permita observar, pues su energía es la más baja posible. Sin embargo, un fotón de alta energía (rayo gamma) podría hacer que uno de ellos dejase ese estado haciéndose visible como tal electrón. Pero simultáneamente quedaría "un hueco" en el estado de baja energía que se comportaría como una partícula positiva de igual masa que el electrón. Es decir, un "electrón positivo" (un positrón). **Tenemos entonces la creación de un par electrón-positrón**. De inmediato un electrón en un estado de energía superior "bajaría" a ese estado inferior libre, por lo que dejaríamos de observarlo, y el hueco (positrón) también. **Esto sería la aniquilación**. Por eso, esas partículas que parecen aniquilar a las "normales" de materia **se llaman antimateria**.
- Para cada partícula de materia existe su correspondiente de antimateria**. La partícula de antimateria es idéntica a la correspondiente de materia excepto en alguna clase de carga o característica cuántica, para la que presenta el valor opuesto.
- Como hemos comentado para el par electrón-positrón, cuando una partícula se encuentra con su antipartícula, se aniquilan par dar lugar a bosones como fotones, gluones o Z (partícula neutra intermediaria en la interacción débil). A la inversa, **bosones con suficiente energía pueden dar lugar a la producción de pares partícula-antipartícula**.
- Estos dos tipos de sucesos constituyen la base de los eventos generados en las colisiones en un acelerador de partículas como el LHC.
- Un problema no resuelto en cosmología es saber **por que en el universo domina la materia frente la antimateria**. La respuesta a esta pregunta es uno de los principales objetivos del experimento **LHCb**ver violación CP).



- La creación por primera vez de átomos de **antimateria en el CERN** abrió la puerta a la sistemática exploración del "antiuniverso". La receta para fabricar anti-hidrógeno es muy simple - tómesese un antiprotón y un anti-electrón, ponga este último en órbita alrededor del primero- pero es muy difícil llevarlo adelante porque las antipartículas no existen de forma natural en la Terra. Ellas pueden ser solamente creadas en el laboratorio, y aún así raras veces las condiciones son las precisas para que se puedan juntar para formar el anti-hidrógeno.
- Tres cuartas partes de nuestro universo es hidrógeno. Si el comportamiento del anti-hidrógeno difiere solo en una muy ligera forma del hidrógeno ordinario, los físicos tendrían que rehacer o abandonar muchas de las ideas establecidas sobre la simetría entre materia y antimateria. Se acepta actualmente que la antimateria "funciona" bajo la gravedad de la misma forma que la materia, pero **si en la naturaleza el comportamiento non es simétrico se debe averiguar como y por qué.**



- Se trata entonces de observar si el anti-hidrógeno realmente se comporta tal como lo hace el hidrógeno ordinario. Estas comparaciones pueden ser hechas con una gran exactitud, e incluso la aparición de una muy pequeña asimetría tendría enormes consecuencias para la comprensión de nuestro universo. Para que estas observaciones se puedan llevar a cabo es preciso mantener anti-átomos durante segundos, minutos, días o semanas. **Las técnicas necesarias para almacenar la antimateria se siguen desarrollando en el CERN.**

Interacciones

Las partículas "sienten" una fuerza debido a la presencia de otra partícula que posee **una misma clase de carga**.

Esta carga es una propiedad de las partículas que determina la intensidad y la participación en el proceso de interacción. Una partícula con **carga eléctrica** tiene interacción electromagnética; una con **carga fuerte** (o carga de color) tendrá interacción fuerte, si tiene **carga débil** (isospin o hipercarga) tiene interacción débil, y, finalmente, si tiene **carga inercial** (masa) determina la interacción gravitatoria.

Una consecuencia del **Principio de Incertidumbre de Heisenberg** es que la energía y tiempo están caracterizadas por incertidumbres complementarias. Hay siempre, en cada punto del espacio -también en un perfecto vacío- una cierta indeterminación en los valores de energía y tiempo que no puede ser reducida a cero simultáneamente.

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \Rightarrow \Delta E \sim \hbar / \Delta t \Rightarrow \Delta m \cdot c^2 \sim \hbar / \Delta t$$

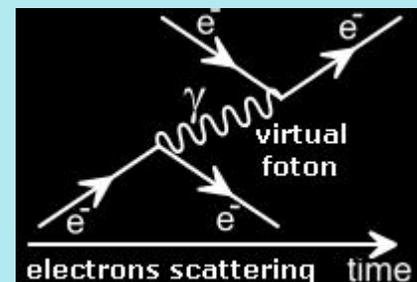
$$\Delta m \sim \hbar / (\Delta t \cdot c^2) \quad (1)$$

Puede existir una partícula con masa Δm mientras su duración no supere Δt .

El **significado del Principio de Heisenberg** a este respecto, se puede expresar diciendo que "algo" puede surgir de la "nada" si ese "algo" vuelve a ser "nada" después de un muy breve lapso de tiempo. Un intervalo demasiado corto para ser observado ese "algo". Estas micro-violaciones de la conservación de la energía no solamente están permitidas sino que **en el vacío continuamente pares partícula-antipartícula aparecen y se aniquilan**.

Aunque esas partículas, llamadas con razón **PARTÍCULAS VIRTUALES**, no pueden ser observadas individualmente, su existencia es indiscutida.

La figura muestra la interacción entre dos electrones "usando" un **fotón virtual** (diagrama de Feynman). v

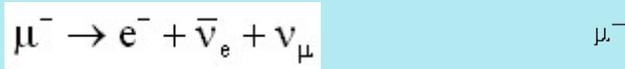


En virtud de relación vista en (1), cuanto menos masa tenga una partícula virtual, más tiempo puede durar y viceversa. Así, un fotón virtual o un gravitón virtual como tienen masa nula pueden durar un intervalo de tiempo infinito, mientras que un protón o un antiprotón virtuales durarán un tiempo muy pequeños.

Para cada interacción hay una partícula "portadora" de la fuerza (un bosón) asociado con las excitaciones del campo de fuerzas correspondiente a esa interacción. Esas partículas portadoras son partículas virtuales que surgen del vacío, como ya ha sido comentado anteriormente, de acuerdo con el Principio de Heisenberg.

Los gluones son las partículas portadoras de la interacción fuerte, los fotones son los portadores de la interacción electromagnética, los bosones W y Z "llevan" la interacción débil, y los gravitones están propuestos como partículas portadoras de la interacción gravitatoria.

Veamos como ejemplo la desintegración de un muón negativo en un electrón, en un antineutrino electrónico y un neutrino muónico, a través de una partícula virtual W :



Como ya se indicó antes, en virtud de (1), las interacciones electromagnética y gravitatoria tienen alcance infinito porque las partículas portadoras de esas interacciones (fotón y gravitón) tienen masa nula y por tanto duración infinita. Por contra, las partículas portadoras de la interacción débil tienen una enorme masa, de ahí que el alcance de esta interacción sea muy corto ($< 10^{-15}m$). El caso de la interacción fuerte es diferente debido a las peculiaridades de la carga de color (libertad asintótica).

	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

Muy importante es **no confundir** la existencia de las partículas reales -por ejemplo, un fotón real emitido por un átomo excitado es perfectamente detectable- con esas mismas partículas, pero virtuales, portadoras de una determinada interacción y de las que solo sabemos su existencia por la presencia de la propia interacción.

Diagramas de Feynman

Cada una de las tres interacciones básicas presentes en el Modelo Estándar puede ser descrita usando el llamado **vértice de Feynman**. Para el físico de Partículas, cada vértice representa un componente para un sofisticado cálculo matemático en la resolución de la interacción que se está estudiando. Pero **nosotros podemos usar estos diagramas de forma cualitativa para ilustrar como quarks y leptones interactúan**. Hay tres vértices básicos, cada uno de ellos asociados a cada una de las interacciones fundamentales. Hay un vértice para la interacción electromagnética, otro para la débil y un tercero para la interacción fuerte.

Estructura básica de un vértice.

En el vértice mostrado, el símbolo de la propagación de la interacción aparece en vertical. Lo habitual es dibujarlo inclinado para sugerir que se está moviendo hacia o desde el punto de interacción.

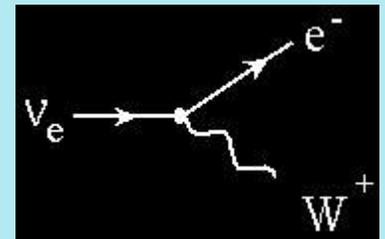
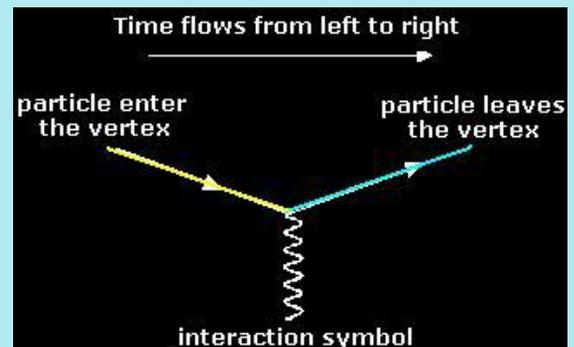
Aspectos importantes a considerar en los vértices de Feynman:

1.- Es importante reconocer que el vértice no es más que un símbolo, y por tanto **no representa una traza real en el proceso, ni describe un diagrama espacio-tiempo**.

2.- **El diagrama se lee de izquierda a derecha**. La parte izquierda muestra la naturaleza de la partícula antes de la interacción y la parte derecha la muestra después de la interacción. (Nota: es también común encontrar diagramas de Feynman que usan la convención de que el tiempo fluye de abajo hacia arriba.).

3.- Se usa una **flecha hacia adelante** para representar una partícula viajando hacia adelante en el tiempo, y una **flecha hacia atrás** para representar una antipartícula también viajando hacia adelante en el tiempo.

El **diagrama de la derecha** representa la interacción de un neutrino electrónico produciendo un electrón y un bosón virtual W^+



Partícula de Higgs

Por qué las partículas tienen masa? Por qué tienen las masas que tienen? Por qué hay tales diferencias de masas entre unas y otras?

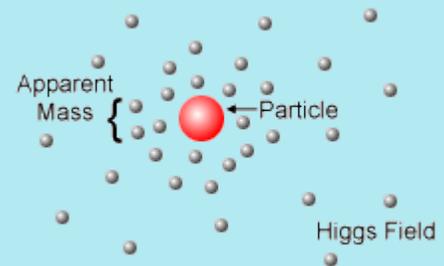
El **Modelo Estándar** describe todo lo que nos sabemos sobre los más pequeños componentes de la materia y es la teoría más exacta desarrollada en cualquier campo de la Física. Sin embargo, **sin la partícula Higgs no tiene sentido**.

En efecto, **el modelo estándar tiene un aspecto no trivial** que es que **ciertos bosones intermediarios** de las interacciones (W^+ , W^- , Z_0) **tienen masa**, y los **otros** (foton y gluones) **no tienen**.

Esto se explica introduciendo, "a mano", un **campo escalar**, cuyo mínimo de energía no corresponde al campo nulo (como ocurre para el resto de los campos). Esto produce una "**ruptura espontánea de la simetría**", que hace que estos bosones y los fermiones, acoplados al campo escalar adquieran masa (al menos a energías bajas). Por los estudios teóricos en este campo, **el físico estadounidense de origen japonés Yoichiro Nambu fue reconocido con el Premio Nobel de Física de 2008** junto a los japoneses Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa.

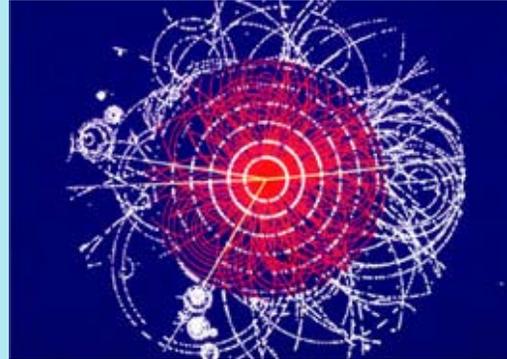
Si esto es cierto, el campo escalar podría efectuar "oscilaciones" en torno al valor mínimo, que se manifestarían como la **partícula denominada Boson de Higgs**.

En los años 60 del S.XX, independientemente, **Peter Higgs, Francois Englert, Robert Brout, Gerald Guralnik, Dick Hagen y Tom Kibble**, propusieron precisamente, que el universo estaba lleno de un campo más tarde llamado **Campo de HIGGS**. Como ya se ha comentado, **las interacciones de las partículas con este campo provoca que adquieran masa**. Podemos pues imaginar el espacio lleno de estas *partículas virtuales* (**bosones de Higgs**) que al interaccionar con las demás partículas provocan en ellas "dificultades" para moverse. Es decir, las partículas adquieren inercia y por tanto masa. **A más interacción con el campo Higgs más masa**. Por ejemplo, los fotones no interaccionan con ese campo mientras que los quarks "top" lo hacen muy intensamente.



ATLAS y CMS son detectores de propósito general designados para "ver" un amplio rango de partículas y fenómenos producidos más colisiones no LHC. Los bosones de Higgs, posiblemente cientos de veces más pesados que el protón, **serán detectados en estos dos detectores, si realmente existen.**

2000 físicos de 35 países estarán utilizando los datos registrados por estos dos complejos detectores **para buscar la partícula de Higgs.**

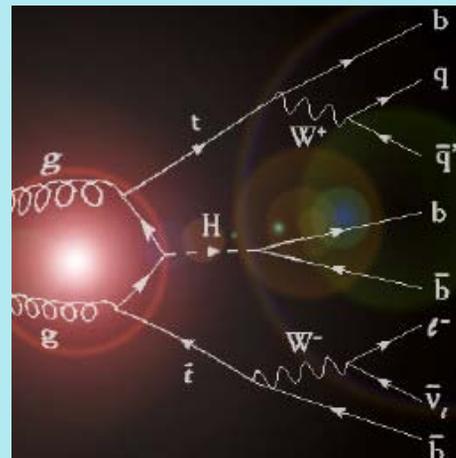


Simulación de partícula Higgs decayendo en cuatro muones.

A la derecha podemos ver una **recreación de la interacción de dos gluones** en el instante de la colisión de dos protones del LHC, **produciéndose un bosón Higgs**, un quark t y un antiquark t.

Estas tres partículas decaen en una combinación de otros quarks y leptones muy particular que es muy difícil que se den desde otros procesos.

Recogiendo suficientes evidencias de señales como ésta podrán las colaboraciones ATLAS y CMS **descubrir el bosón Higgs.**



El bosón Higgs es conocido (debido al Nobel en Física Leon Lederman) **"la partícula divina"** dada su importancia para el Modelo Estándar.

Violación CP

El universo visible está compuesto de partículas -protones, neutrones y electrones- y no por sus antipartículas antagonistas - antiprotones, antineutrones y positrones.

El Big Bang debería haber creado iguales cantidades de materia y antimateria. Entonces por qué hay tanto de unas y tan poco de las otras?

La violación CP (C: conjugación da carga - P: paridad) -un efecto visto solamente en ciertas clases de partículas elementales- podría proporcionar la respuesta.

Andrei Sakharov en 1967 **propuso tres condiciones** que explicarían un universo que habiendo creado la misma cantidad de materia que de antimateria hubiese evolucionado hacia un dominio de la materia como vemos hoy:

- El primer requerimiento era que **el protón sea inestable**.

- El segundo era **la violación C y CP**.

- La tercera condición es que **el universo hubiese sufrido una fase de muy rápida expansión**, por que si no la materia y la antimateria estarían destinadas a una equivalencia de comportamiento.

La simetría CP, que analizaremos mas adelante, **se refiere al hecho de que los fenómenos ocurren de igual forma si las partículas se convierten en las correspondientes antipartículas** usando la transformación CP.

El marco teórico del incumplimiento de esta simetría, la **Violación CP**, fue proporcionado en 1973 por **Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa** (premiados con el **Nobel 2008**, junto a Yoichiro Nambu), que señalaron que **esa violación se seguiría automáticamente si había al menos seis sabores** -tipos- de quark. En los años posteriores los quarks "b" y "t" fueron descubiertos completándose la lista de 6 tipos de quarks.

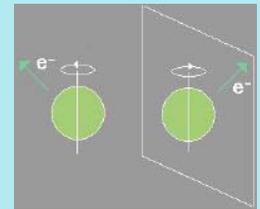
La Paridad es una importante propiedad en la descripción cuántica de un sistema físico. En muchos casos, se refiere a la simetría de la función de onda que representa al sistema. **La transformación de paridad reemplaza al sistema como si fuese un espejo, es decir convirtiendo las coordenadas (x,y,z) por $(-x,-y,-z)$**

En general, si un sistema es idéntico al original después de una transformación de la paridad, se dice que el sistema presenta paridad par; en caso de que el resultado de la transformación de la formulación negativa de la original se dice que el sistema tiene paridad impar.

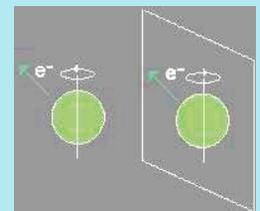
Más concretamente, P invierte la relación entre el momento angular intrínseco (spin) de una partícula y la dirección de su velocidad. Si el spin se alinea con la velocidad se dice que la partícula tiene "helicidad positiva". Si el spin es anti-paralelo a la dirección de la velocidad, a partícula tiene "helicidad negativa". Bajo una transformación P , la dirección de la velocidad se invierte pero la dirección del spin no (el spin es un número cuántico); por tanto, una **helicidad positiva \Rightarrow helicidad negativa** y viceversa.

Hasta 1956 fue aceptado que cuando un sistema aislado de partículas elementales interactuaba, la **paridad total del sistema permanecía constante** (se conservaba).

Intentando comprender ciertos rompecabezas en el decaimiento de los mesones K (se descomponían unas veces en dos mesones π y otras veces en tres mesones π), los físicos estadounidenses de origen chino **Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang propusieron en 1956 que la Paridad no siempre se conservaba**. El año siguiente (1957), la física estadounidense, también de origen chino, **Chien Shiung Wu**, a partir de su famoso experimento, probó de forma concluyente que en la interacción débil la paridad no se conservaba.



Conservación de la Paridad



No conservación de la Paridad

En efecto, Wu orientó con un poderoso campo magnético núcleos del isótopo inestable $Co-60$, y a una temperatura cercana al cero absoluto para evitar desorientaciones. Observó entonces que en el decaimiento beta menos de este isótopo había preferencia por la emisión de electrones desde uno de los polos del núcleo. El fenómeno era asimétrico y por lo tanto la paridad no se conservaba.

La operación C (o conjugación de carga) **invierte los números cuánticos aditivos** como la carga eléctrica, hipercarga, extrañeza, etc.

Así, bajo una transformación CP un protón de helicidad negativa se convierte en un antiprotón de helicidad positiva.

Se predijo -y posteriormente se comprobó experimentalmente en los años 1950- que partículas con helicidad contraria interactúan de forma diferente. Así, un electrón de helicidad negativa interactúa con un núcleo convirtiéndose en un neutrino, pero un electrón con helicidad positiva no lo hace. Sin embargo, un positrón con helicidad positiva sí sufrirá esa interacción con el núcleo dando lugar a un antineutrino. Se trata pues de dos procesos absolutamente simétricos, simetría CP. **Esta simetría CP fue asumida como exacta hasta 1964.**

Los efectos directamente observables para la violación son extremadamente sutiles, y no fueron descubiertos hasta 1999, en experimentos con **mesones K** en el CERN y en el **FermiLab** (EEUU).

En ese año, **James Cronin** y **Val Fitch** del Brookhaven National Laboratory descubrieron una ligera anomalía en el decaimiento del mesón K^0 que ponía de manifiesto que **la simetría CP fallaba**, o en otras palabras se producía la llamada **violación CP**.

Los efectos directamente observables para la violación son extremadamente sutiles, y no fueron descubiertos hasta 1999, en experimentos con **mesones K** en el CERN y en el **FermiLab** (EEUU).

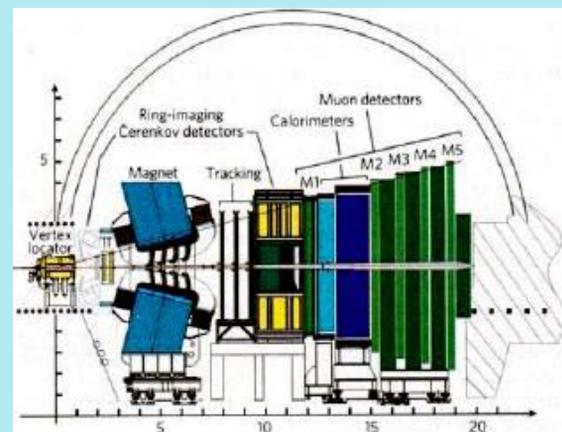
Se han realizado medidas muy precisas para determinar el origen de la violación CP con mesones K, pero dado que estos mesones también interactúan bajo la interacción fuerte es difícil sacar una conclusión definitiva sobre el origen de la violación CP. **Para poder hacer determinaciones más precisas** se comenzó a experimentar con los mesones constituidos por quarks de tipo b (**B-mesones**).

Un mesón B contiene un antiquark b (también llamado en la jerga "b-bar") con **un quark u** o **d**. Su antipartícula, llamada **antimesón B** o mesón "B-bar", está compuesta de un **quark b** y un **antiquark u** o **antiquark d**. Dos experimentos en el mundo han sido llevados a cabo para medir y estudiar la violación CP mediante el decaimiento de mesones B: **BaBar** (PEP-II - Stanford, USA) y **BELLE** (KEK -Tsukuba, Xapón).



El experimento **LHCb** está fundamentalmente dedicado al estudio de la violación CP mediante procesos de decaimiento de mesones B.

El LHC es de largo la "fábrica" más productiva de mesones B, con una variedad de b-hadrones, tales como B_u , B_d , B_s , B_c y b-bariones producidas en muy alta proporción. El detector **LHCb** cuenta con un conjunto de subdetectores que serán capaces de identificar los parámetros importantes de las partículas generadas en esos decaimientos. Esos dispositivos son: RICH, calorímetros electromagnéticos y hadrónicos, y las cámaras de muones.



Más allá del LHC

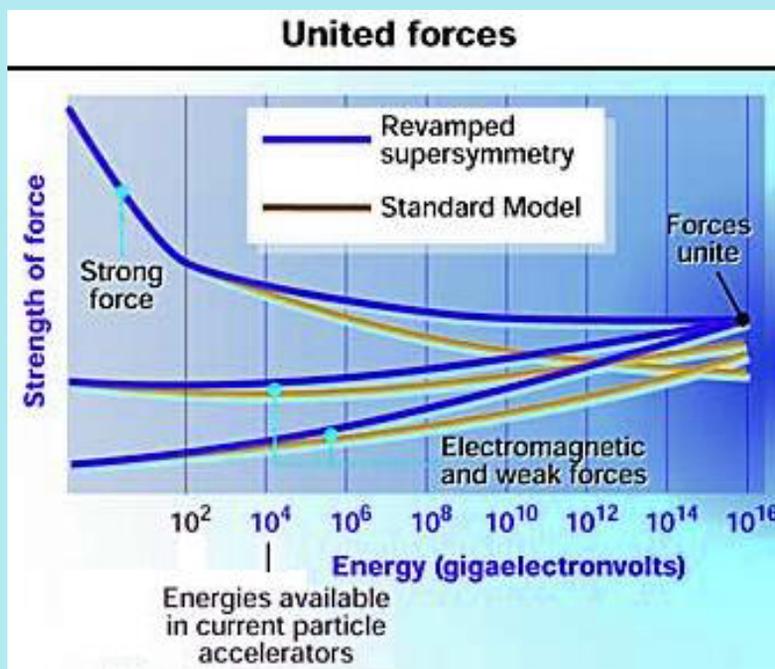
Aunque **el Modelo Estándar** ha tenido mucho éxito en la explicación y predicción de fenómenos experimentales, se sabe que **no puede ser la teoría definitiva de la Física de Partículas** dado que no da respuesta a muchas cuestiones de gran importancia.

Así, **si las fuerzas y partículas hoy propuestas es todo lo que hay**, deberían todas esas partículas viajar a la velocidad de la luz, pero no es eso lo observado. Para "ralentizarlas se necesita el campo de Higgs.

No incluye la fuerza de gravedad y no abarca la Teoría General de la Relatividad.

Además, los físicos saben hoy que el 96 % del **universo no está hecho de la materia que nosotros conocemos**, y esto no encaja en el Modelo Estándar.

Como extender el Modelo Estándar para contemplar estos problemas son cuestiones abiertas que deben comenzar a ser respondidas con los datos de los experimentos en el LHC.



OTROS

- DATOS CURIOSOS
- PARÁMETROS LHC
- Física de partículas en el mundo
- GLOSARIO

Datos curiosos

Dato 1) Cuando el túnel de 27 km fue excavado entre el Lago de Ginebra y el macizo del Jura, los dos finales se encontraron con una precisión de 1 cm.

Dato 2) Cada uno de los 6300 filamentos superconductores de niobio-titanio del cable producido para el LHC tiene unos 0.006 mm de espesor, es decir unas 10 veces más fino que un cabello humano.

Dato 3) Si uniésemos uno detrás de otro todos los filamentos de Nb-Ti, la longitud obtenida sería suficiente para ir al Sol y volver, y sobraría para unos cuantos viajes a la Luna.

Dato 4) La zona central del LHC es la máquina frigorífica mas grande del mundo. A una temperatura más fría que la del profundo espacio exterior, contiene hierro, acero y todos los importantes imanes superconductores.

Dato 5) La presión interior en los tubos por donde circulan los protones es unas diez veces más baja que la de la superficie lunar. Se trata de ultravacío.

Dato 6) Los protones a máxima energía en el LHC viajan a 0.999999991 veces la velocidad de la luz. Cada protón dará en el anillo de 27 km más de 11000 vueltas por segundo.

Dato 7) A energía máxima, cada uno de los haces de protones en el LHC tendrá una energía equivalente a la de un tren de alta velocidad de 400 toneladas circulando a 200 km/h. Esta energía es suficiente para fundir 500 kg de cobre.

Dato 8) El Sol nunca se pone en la colaboración ATLAS. Los científicos que trabajan en este experimento proceden de todos los continentes a excepción de la Antártica.

Dato 9) El sistema magnético del detector CMS contiene unas 10000 toneladas de hierro, lo que representa más cantidad de ese metal que el que hay en la Torre Eiffel.

Dato 10) Los datos registrados por cada experimento en el LHC son suficientes para llenar alrededor de 100000 DVDs cada año.

Parámetros LHC

Se presenta una lista de los principales parámetros del Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

Circunferencia	26659 m
Temperatura de operación del dipolo	1,9 K
Número total de imanes (dipolos, cuadrupolos ... dodecapolos)	9300
Número de dipolos	1232
Número de cuadrupolos	858
Agrupamiento multipolar magnético básico (Lattice type)	FODO 2-in-1
Nº de arcos (2450 m longitud)	8
Nº de agrupamientos FODO por arco	23
Nº de secciones rectas (545 m longitud)	8
Principal sistema de RF	400.8 MHz
Voltaje del Sistema de 400 MHz RF a 7 TeV	16 MV
Número de cavidades RF	8 por haz
Energía nominal, protones	7 TeV
Momento en la colisión	7 TeV/c
Momento en la inyección	450 GeV/c
Energía nominal, iones	2,76 TeV/nucleón
Pico del campo dipolar magnético	8,33 T

Parámetros LHC (II)

Corriente en el dipolo principal	11800 A
Densidad de energía en cada dipolo	500 kJ/m
Longitud del dipolo principal	14,3 m
Diámetro interior en el Dipolo	56 mm
Distancia entre ejes en el dipolo (1,9 K)	194,00 mm
Distancia entre ejes en el dipolo (293 K)	194,52 mm
Fuerza horizontal a 8,33 T (capa interna y externa)	1,7 MN/m
Composición de la aleación superconductora	Nb_Ti (47% Ti)
Máxima corriente sin resistencia (1,9 K e 8,33 T)	17000 A
Máxima corriente sin resistencia (1,9 K e 0 T)	50000 A
Número hilos por cable	36
Número de filamentos de Nb-Ti en cada hilo	6500
Bending radius	2803.95 m
Nº de vueltas por segundo	11245
Energía almacenada en el haz	360 MJ
Energía almacenada en los imanes	11 GJ
Vida media del haz (Beam lifetime)	~ 10 h
Average crossing rate (cruces por segundo)	31,6 MHz
Nº de colisiones por segundo	600 millones

Física de partículas en el mundo

IFCA, CANTABRIA (ESPAÑA)

El Instituto de Física de Cantabria es un consorcio del CSIC y la Universidad de Cantabria (UC). Su objetivo es la investigación “ciencia básica” relacionada con la Astrofísica y la Estructura de la Materia.

IFAE, BARCELONA (ESPAÑA)

IFAE es un consorcio de la Generalitat de Catalunya y la Universidad de Autònoma.de Barcelona Dirige investigaciones en el campo experimental y teórico en las fronteras de la Física fundamental, especialmente en Física de Partículas, Astrofísica y Cosmología.

IFIC, VALENCIA (ESPAÑA)

El Instituto de Física Corpuscular es un consorcio del CSIC y la Universidad de de Valencia dedicado a la investigación teórica y experimental en los campos de la física de partículas, física nuclear, cosmología, astropartículas y física médica.

IGFAE, SANTIAGO (ESPAÑA)

El Instituto Gallego de Física de Altas Energías (IGFAE) es un centro de investigación perteneciente a la Universidad de Santiago de Compostela (USC) y al Gobierno Autónomo de Galicia (Xunta de Galicia). Abarca tanto el campo experimental como teórico, dirigido a la comprensión de la estructura de la materia y el universo, y sus aplicaciones. Incluye instrumentación científica avanzada, tecnologías GRID, microelectrónica, energía solar, etc. El *Grupo Experimental de Altas Energías* es una parte del IGFAE.

CSIC (ESPAÑA)

El Consejo Superior de Investigaciones Científicas es la más grande organización pública de investigación en España. Depende del Ministerio de Ciencia e Investigación y lleva a cabo investigación en muchos campos de diversas ciencias a lo largo de más de 100 centros en toda España.

CIEMAT, MADRID (ESPAÑA)

El CIEMAT, adscrito al Ministerio de Ciencia e Innovación, es un Organismo Público de Investigación de excelencia en materias de energía y de medio ambiente, así como en múltiples tecnologías de vanguardia y en diversas áreas de investigación básica.

BINP, Rusia

El Instituto Budker de Física Nuclear es el principal centro para la investigación en física nuclear en Rusia. En él está ubicado el Centro de Radiación Sincrotrón Siberiano.

BNL, EEUU

El Laboratorio Nacional Brookhaven (BNL) es un gran y multidisciplinar centro de investigación. En el se encuentra el RHIC (Relativistic Heavy-Ion Collider).

CCLRC, GB

El Council for the Central Laboratory for the Research Councils (CCLRC) alberga los laboratorios Rutherford Appleton y Daresbury, que son la referencia británica en física de partículas, ciencia de aceleradores y fuentes de luz.

CERN

La Organización Europea para Investigación Nuclear (CERN) es el mayor centro mundial de investigación nuclear. Las partículas W e Z fueron descubiertas en el CERN, y en él nació la World Wide Web. Desde 2008, su más grande acelerador, LHC, es el mayor colisionador de partículas del mundo.

CORNELL, EEUU

La Universidad de Cornell alberga el CESR, colisionador electrón-positrón, siendo un importante centro de I+D para aceleradores de partículas.

DAPNIA, Francia

El laboratorio DAPNIA está dedicado a la investigación de las leyes fundamentales del universo. Incluye investigación en astrofísica, física de partículas y física nuclear.

DESY, Alemania

El Síncrotrón de Electrones Alemán (DESY) es uno de los líderes mundiales en aceleradores de partículas. Es un centro de investigación nacional ubicado en Hamburgo y Zeuthen, cerca de Berlín. Alberga el colisionador HERA, y es un importante centro para investigación de fuentes de luz.

FNAL EEUU

El Laboratorio Nacional Fermi (FNAL) es la sede del Tevatrón, el segundo más poderoso acelerador de partículas del mundo. Ha sido escenario de importantes descubrimientos, incluyendo el del quark top .

IHEP, China

El Instituto de Física de Altas Energías (IHEP) es el más grande centro de investigación fundamental en China. Su campo más importante de investigación es la física de partículas, los aceleradores de partículas y sus tecnologías y aplicaciones asociadas.

IHEP, Rusia

El Instituto de Física de Altas Energías de la Federación Rusa, situado en Moscú, es uno de los centros más importantes de Rusia para la física de partículas.

JINR, Rusia

Situado en Dubna, cerca de Moscú, el Joint Institute for Nuclear Research (JINR) es una organización intergubernamental fundada en 1956, que comprende actualmente 18 estados miembros. Su misión es el estudio de las propiedades fundamentales de la materia.

KEK, Japón

Es el principal acelerador de partículas de Japón, y alberga el experimento BELLE, siendo además un importante centro de I+D en el campo de los aceleradores.

LAL, Francia

El Laboratorio Acelerador Linear (LAL) cerca de Paris lleva 50 años como referencia. Su principal área de investigación es la física de partículas, complementada con una también importante relación con la cosmología y la astrofísica.

LNF, Italia

El Laboratorio Frascati (LNF) próximo a Roma es la sede de DAFNE, un colisionador electrón-positrón de alta intensidad donde se llevan a cabo estudios de alta precisión.

LNGS, Italia

El Laboratorio Gran Sasso (LNGS) es el más grande laboratorio subterráneo del mundo para la física de partículas y la astrofísica.

PSI, Suiza

El Instituto Paul Scherrer es la sede de la Fuente de Luz Suiza, trabajando también en el campo de la física de partículas.

RAL, GB

O Laboratorio Rutherford Appleton, está dirigido para a física de partículas y alberga a Fuente de Luz Diamante.

SLAC, USA

El Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) alberga el experimento BaBar, y es un importante centro de investigación científica en fuentes de luz.

TRIUMF, Canadá

El Laboratorio TRIUMF en Vancouver es el laboratorio nacional de Canadá para la física nuclear y de partículas.

Glosario

Acelerador: máquina usada para acelerar partículas hasta altas velocidades (y por lo tanto a alta energía comparada con su energía en reposo).

Agujeros Negros (microscópicos): De acuerdo con algunos modelos teóricos, "agujeros negros microscópicos" podrían producirse en las colisiones en el LHC. En tal caso, el suceso sería fascinante pero en absoluto peligroso. Cuanto más pequeño es un Agujero Negro - Microscópico más rápidamente decae ("se evapora"). Rayos cósmicos con partículas mucho más energéticas que las aceleradas en el LHC colisionan continuamente en la atmósfera o contra la superficie de la Luna desde hace 4500 millones de años y puede que se estén produciendo esos micro-agujeros negros: No obstante, es obvio que no son ninguna amenaza para nosotros.

Aniquilación: proceso por el cual una partícula se encuentra con su antipartícula, desapareciendo ambas. La energía correspondiente puede aparecer como otra pareja partícula-antipartícula, como varios mesones o quizá como bosones neutros (como fotones). Las partículas producidas pueden ser cualquiera combinación permitida por la conservación de la energía el momento y de los diferentes tipos de carga.

Antimateria: Material hecho de antifermiones. Definimos los fermiones que forman nuestro universo como materia y sus antipartículas como antimateria. En la Teoría de Partículas no hay distinción a priori entre materia y antimateria. La asimetría del universo entre estas dos clases de partículas es un problema para el que no hay aún una explicación definitiva .

Antipartícula: Para cada tipo de fermión hay otro tipo de fermión que tiene exactamente la misma masa pero el valor opuesto de todas las otras cargas (los números cuánticos correspondientes). Por ejemplo, la antipartícula del electrón es una partícula de carga eléctrica positiva llamada positrón. Los bosones también tienen antipartículas a excepción de los que tengan valor cero para todas las cargas. Por ejemplo, un fotón o un bosón compuesto de un quark y el su antiquark correspondiente. En este caso no hay distinción entre la partícula y la antipartícula, son el mismo objeto.

Antiquark: la antipartícula de un quark.

Astrofísica: Física de los objetos astronómicos tales como estrellas y galaxias.

Barión: Una partícula que "siente" la interacción fuerte (hadron) formada por tres quarks. El protón (uud) y el neutrón (udd) son ambos dos bariones. Pueden también contener pares adicionales de quark-antiquark.

Beam (haz): corriente de partículas producidas por un acelerador agrupadas generalmente en paquetes.

B-fábrica: Un acelerador diseñado para maximizar la producción de los mesones B. Este tipo de mesones están formados por un quarks tipo b o un antiquark b.

Big Bang (Teoría de la Gran Explosión): teoría de un universo que se expande y que comienza como un medio infinitamente denso y caliente.

Blanco Fijo (Fixed-Target): experimento en el que un haz de partículas en un acelerador impacta contra un blanco inmóvil (o casi inmóvil). El blanco puede ser un sólido o un recipiente con un líquido o un gas.

Bosón: partícula que tiene un momento angular intrínseco (spin) entero medido en unidades de $h/2\pi$ (spin = 0, 1, 2...). Todas las partículas son o fermiones o bosones. Las partículas asociadas a todas las interacciones fundamentales (fuerzas) son bosones. Las partículas compuestas con números pares de fermiones (quarks) son también bosones.

Bottom-beauty (b): El quinto tipo (sabor) de quark (en orden de masa creciente), con carga eléctrica de $-1/3$.

Bunch: paquete de partículas iguales que circulan por el acelerador formando el haz de partículas.

Burbujas de vacío: Existen especulaciones sobre que el universo no se encuentra en su configuración más estable, y que las perturbaciones causadas por el LHC podrían llevarlo a un estado más estable, llamado burbuja de vacío, en el que no podríamos existir. Si el LHC pudiera hacer esto, también podrían hacerlo las colisiones de rayos cósmicos. Puesto que las burbujas de vacío no se han producido nunca en el universo visible, no se podrán producir en el LHC.

C-simetría: simetría de las leyes físicas bajo transformación de la carga. El electromagnetismo, la gravedad y la interacción fuerte obedecen la C-simetría, pero las interacciones débiles violan la C-simetría.

Calorímetro: parte de un detector que mide la energía de las partículas creadas en una colisión. La mayoría de las partículas que entran en el calorímetro crean una cascada de nuevas partículas que ceden su energía al calorímetro donde es medida.

Cámara de ionización: recipiente lleno de gas y provisto de dos electrodos con potenciales diferentes. Las partículas ionizan el gas y estos iones se desplazan hacia el electrodo de signo contrario, creándose una corriente que puede amplificarse y medirse.

Cámara de muones: capas externas de un detector de partículas para seguir el paso de muones. A excepción de los neutrinos, solamente los muones alcanzan estas capas desde el punto de colisión.

Cámara de proyección temporal: pueden medir las trazas que dejan los haces incidentes en las tres dimensiones, y cuentan con detectores complementarios para registrar otras partículas producidas en las colisiones de alta energía.

Carga de color: número cuántico de una partícula que determina su participación en las interacciones fuertes. Quarks y gluones llevan cargas de color distintas de cero.

Carga eléctrica: número cuántico que determina la participación en interacciones electromagnéticas.

Carga: número cuántico de una partícula. Determina si la partícula puede participar en un proceso de interacción. Una partícula con carga eléctrica tiene interacciones eléctrica; una con dos tipos de cargas sentirá dos tipos de interacción, etc.

Charme (c): cuarto tipo (sabor) de quark (en orden de masa creciente), con carga eléctrica $+2/3$.

CLIC (The Compact Linear Collider): colisionador de electrón-positrón que está en estudio para la era post-LHC, para la física de colisión de multi-TeV.

Color: tipo de carga que tienen los quarks, por la cual interaccionan entre ellos a través de la fuerza fuerte.

Collider (colisionador): acelerador en el que dos haces de partículas viajan en direcciones opuestas para proporcionar colisiones de gran energía.

Combinación Carga-Paridad: durante un tiempo se creyó que una violación de la C-simetría podía compensarse con una inversión de la paridad (inversión de las coordenadas espaciales), de forma que se conservase una nueva simetría llamada CP. No obstante, está demostrado que en la interacción débil se produce violación de la simetría CP (particularmente en mesones K y B).

Confinamiento: propiedad de la interacción fuerte por la cual quarks y gluones no pueden ser encontrados separados sino sólo como parte de objetos con carga de color neutra.

Conservación: cuando una cantidad (carga eléctrica, energía, momento, etc) es conservada, es decir el valor de esa cantidad es el mismo después de un evento que la antes.

Conservación de la Carga: la carga eléctrica está conservada en cualquier proceso de transformación de un grupo de partículas en otro.

Conservación de la Paridad: una transformación, por ejemplo, una colisión entre dos partículas A y B que produce las nuevas partículas C y D, posee simetría de paridad o muestra conservación de la paridad (P) cuando, al cambiar de signo las coordenadas espaciales de todas ellas, la probabilidad con la que tiene lugar el proceso no varía.

Contador de centelleo: en el las partículas cargadas, que se mueven a gran velocidad en los materiales centelleantes, producen destellos visibles a causa de la ionización, y pueden registrarse.

Contador proporcional multicable: inventado por Charpak permite la recogida de datos por métodos electrónicos, que permiten el registro de un número mayor de sucesos.

CP violación: no cumplimiento de la postulada simetría CP. Juega un importante papel en las teorías que tratan de explicar el dominio de la materia sobre la antimateria.

CPT simetría: simetría fundamental de las leyes físicas bajo un transformación que implica simultáneamente la inversión de carga, paridad y tiempo. La simetría CPT implica que la imagen especular del nuestro universo – con todos los objetos teniendo sus momentos y posiciones reflejados en un imaginario plano (correspondiente a inversión de la paridad), con toda la materia reemplazada por antimateria (correspondiente al inverso de carga)– evolucionaría exactamente como nuestro universo. La simetría CPT es reconocida como una propiedad fundamental de las leyes físicas.

Creación de materia: es el contrario del proceso de aniquilación. Es la conversión de partículas sin masa en otras partículas con masa.

Cuanto: la cantidad discreta más pequeña de cualquier cantidad.

Decaimiento: proceso en el que una partícula desaparece y en su lugar aparecen otras partículas. La suma de las masas de las partículas producidas es siempre menor que la masa de la partícula original.

Detector de Cherenkov: se basa en una radiación especial emitida por las partículas cargadas al atravesar medios no conductores a una velocidad superior a la de la luz en dichos medios

Detectores de trazas: permiten observar las señales (o trazas) que deja a su paso una partícula en la sustancia que contiene el detector. Son de este grupo las emulsiones nucleares, semejantes a las fotográficas, la cámara de niebla y la cámara de burbujas (en desuso hace mucho tiempo).

Down Quark (d): según tipo (sabor) de quark (en orden de masa creciente), con carga eléctrica $-1/3$.

Electrodinámica cuántica (QED): teoría cuántica de la interacción electromagnética.

Fermión: cualquier partícula que tenga momento angular intrínseco (spin) impar ($1/2, 3/2, \dots$), medido en unidades de $\hbar/2\pi$. Como consecuencia de este momento angular peculiar, los fermións obedecen una regla llamada el principio de exclusión de Pauli, que implica que ninguno de los fermións pueden existir en el mismo estado al mismo tiempo. Muchas de las características de la materia ordinaria se presentan debido a esta regla. Los electrones, protones, y neutrones son todos fermiones, al igual que todas las partículas fundamentales de la materia, los quarks y los leptóns.

Feynman (Diagramas): cada una de las tres interacciones básicas se puede describir usando un símbolo llamado un vértice de Feynman. Para los físicos de partículas, cada vértice de Feynman representa una visualización para ser tratada matemáticamente. Pero podemos utilizar los vértices de una manera no matemática para ilustrar cómo los quarks y los leptones interaccionan.

Feynman (Diagramas): cada una de las tres interacciones básicas se puede describir usando un símbolo llamado un vértice de Feynman. Para los físicos de partículas, cada vértice de Feynman representa una visualización para ser tratada matemáticamente. Pero podemos utilizar los vértices de una manera no matemática para ilustrar cómo los quarks y los leptones interactúan.

Fotón: partícula portadora de las interacciones electromagnéticas.

Generación: sistema formado por quarks y leptones, agrupados según la masa. La primera generación contiene los quarks up y down, el electrón y el neutrino electrónico; la segunda, quarks strange y charm, y los leptones muón y neutrino muónico; y la tercera formada por los quarks bottom y top, y los leptones tau y neutrino tauónico.

Gluón (g): partícula portadora de la interacción fuerte.

Gravitón: partícula portadora de la interacción gravitatoria; no han sido observada aún directamente.

GRID (Reja o parrilla): servicio para compartir memoria, datos y computación al través de Internet. Va más allá de la comunicación simple entre ordenadores, intentando en última instancia ser una red global de computación.

Hadrón: partícula que "siente" la interacción fuerte, estando compuesta de quarks. Incluye a los mesones y a los bariones. Estas últimas partículas participan en interacciones fuertes residuales, como las que mantienen a los protones y neutrones unidos formando los núcleos de los átomos.

Higgs (bosón): cuanto elemental del campo de Higgs. Partícula elemental escalar (spin=0) predicha por el Modelo Estándar, necesaria para comprender la masa del resto de las partículas.

Higgs (campo): campo presente en todo el universo. Cuando las partículas atraviesan este campo interactúan con él más o menos, dificultándose en mayor o menor medida su movimiento. Por tanto, esa interacción confiere inercia a las partículas, es decir masa.

ILC (International Linear Collider): es un colisionador electrón-positrón en estudio que complementará al LHC. Mientras que el LHC señalará el camino, el ILC -una máquina de enorme precisión- proporcionará las piezas que faltan en los resultados del LHC.

Interacción Electrodébil: en el Modelo Estándar, las interacciones electromagnética y débil están relacionadas (unificadas); los físicos utilizan el término electrodébil para abarcar las dos.

Interacción electromagnética: interacción debida a la carga eléctrica; incluyendo las interacciones magnéticas.

Interacción débil: la interacción responsable de todos los procesos en los cuales el sabor cambia. Por tanto es responsable de la inestabilidad de quarks y leptones pesados, y de las partículas que los contienen. Interacciones débiles que no cambian sabor (o carga) también han sido observadas.

Interacción fuerte: interacción responsable de unir quarks, antiquarks y gluones para componer los hadrones. Las interacciones fuertes residuales proporcionan la fuerza nuclear.

Interacción Fundamental: en el Modelo Estándar, las interacciones fundamentales son las interacciones electromagnéticas, débiles, fuertes y gravitacionales. Hay por lo menos otra interacción fundamental que es responsable de las masas de las partículas (el campo de Higgs). Cinco tipos de interacción es todo lo que se precisa para explicar todos los fenómenos físicos observados.

Interacción gravitacional: interacción responsable de la atracción gravitatoria. El gravitón sería la partícula portadora de la interacción pero no ha sido aún observado directamente.

Está implicada en todos los procesos débiles en los que la carga eléctrica cambia.

Interacción Residual: interacción entre objetos que no llevan carga sino que contienen los componentes que sí tienen esa carga. La interacción eléctrica residual entre moléculas es la llamada Fuerza de Van der Waals. La interacción fuerte residual entre los protones y los neutrones, debido a las cargas de color de sus quarks, es la responsable de la cohesión nuclear.

Interacción: proceso por el cual una partícula decae o responde a una fuerza debido a la presencia de otra partícula (como en una colisión).

Jet (chorro): cono estrecho de hadrones y de otras partículas producida a partir de un quark o de un gluón.

Kaón (K): mesón que cuenta con un quark strange y un quark anti-up (o anti-down), o un quark anti-strange y un quark up o down.

LCG: infraestructura de computación, de almacenamiento y de análisis de datos para la comunidad de Física de Altas Energías que utilizan el LHC.

Leptón: fermión que no participa en interacciones fuertes. Los leptones con carga eléctrica son el electrón, el muón, el tau, y sus antipartículas. Los leptones sin carga eléctrica son los neutrinos.

Libertad asintótica: cuando dos quarks están próximos entre sí, intercambien gluones y crear un muy intenso campo de fuerza color que une a la quarks uno a otro. El campo de fuerza es mayor a medida que los quarks se apartan, creciendo de forma asintótica. Por el contrario, cuando se van acercando disminuye la interacción llegando a "ser" a distancias mínimas.

Linacs: abreviatura para acelerador lineal.

Masa propia (Rest Mass): masa definida por el cociente de la energía de la partícula aislada (libre) en reposo, dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz. Cuando los físicos hablan de "masa" siempre se refieren a su "masa propia" (o en reposo).

Materia oscura: materia no visible para nosotros porque no emite radiación que podamos observar. El movimiento de las estrellas alrededor del centro de sus galaxias implica que un 90% de la materia en una galaxia típica es oscura. Los físicos especulan que también hay materia oscura entre las galaxias.

Mecánica Cuántica: leyes de la física que se aplican a escalas muy pequeñas. La característica esencial es que la carga eléctrica, momento lineal, momento angular, y las otras cargas, aparecen en cantidades discretas llamadas cuantos.

Mesón: hadrón compuesto de un número par de quarks. La estructura básica de la mayoría de los mesones es la unión de un quark y un anti-quark.

Modelo Estándar: Teoría de las partículas fundamentales y sus interacciones.

Monopolos magnéticos: Los monopolos magnéticos son partículas hipotéticas con una única carga magnética, bien un polo norte o un polo sur. Algunas teorías especulativas sugieren que, si existen, los monopolos magnéticos podrían producir la desintegración del protón. Estas teorías también predicen que dichos monopolos serían demasiados pesados como para que se pudieran producir en el LHC. Por otra parte, si los monopolos magnéticos fueran lo suficientemente ligeros como para producirse en el LHC, los rayos cósmicos que golpean la atmósfera de la Tierra los hubieran producido ya, y la Tierra los habría parado y atrapado. El hecho de que la Tierra y otros cuerpos celestes sigan existiendo elimina la posibilidad de que los peligrosos monopolos magnéticos que se comerían a los protones fueran lo suficientemente ligeros como para producirlos en el LHC.

Muón: segundo tipo (sabor) de lepton cargado (en orden de masa creciente), con carga eléctrica -1.

Neutrino: leptón sin carga eléctrica. Los neutrinos participan solamente en interacciones débiles y gravitacionales, y son portatno muy difíciles de detectar. Hay tres tipos de neutrinos (asociados sendos a un tipo de leptón) y con una masa muy pequeña.

Neutrón (n): barión con carga eléctrica cero; es un fermión con una estructura básica de dos quarks down y otro up (ligados por gluóns).

Partícula Fundamental: partícula sin subestructura interna. En el Modelo Estándar los quarks, leptóns, fotón, gluóns, bosón W y Z son fundamentales. El resto de los objetos estan hechos de estos.

Partícula Subatómica: partícula que es pequeña comparada con el tamaño del átomo.

Partícula Virtual: una partícula que existe solamente en un instante extremadamente breve en un proceso intermediario. El principio de incertidumbre de Heisenberg permite esta violación evidente de la conservación de la energía. Sin embargo, la medida de la energía antes y después de un suceso está conservada.

Pión: el mesón de menor masa y que puede tener carga eléctrica +1, -1, o 0.

Plasma de quark-gluón (QGP): Una "mezcla" de las partículas más básicas de la naturaleza, libre de su estado confinado como ocurre dentro de los hadrones. Se cree que pudo haber existido algunas milionésimas de según después del Big Bang, antes de que la materia enfriase y comenzase a organizarse en hadrones y átomos.

Positrón (e+): la antipartícula del electrón.

Principio de Exclusión de Pauli: los fermións obedecen este principio, que implica que no pueden existir dos fermións en el mismo estado al mismo tiempo.

Principio de Incertidumbre: principio cuántico, formulado por Heisenberg, que indica que no es posible conocer exacta y simultáneamente los valores de parejas de variables complementarias como el momento y la posición, o la energía y el tiempo.

Protón (p): el hadrón más común, un barión con carga eléctrica +1 igual y contrario a la del electrón. Los protones tienen una estructura básica de dos quarks up y un quark down (ligados por gluones).

PSB (Proton Synchrotron Booster): Acelerador Síncrotrón de Protones perteneciente al complejo acelerador del CERN del que salen los protones con una energía de 1.4 GeV. Tanto las características transversales como longitudinales de los paquetes de partículas quedan establecidas en el PS Booster.

Quantum Chromodynamics (QCD): teoría cuántica de la interacción fuerte.

Quark (q): Un fermión fundamental que "siente" la interacción fuerte. Los quarks tienen carga eléctrica de +2/3 (up, charme y top) o -1/3 (down, estrange, bottom) en unidades donde 1 es la carga del protón.

Quench: es una transición resistiva, por ejemplo cuando un imán pasa del estado de superconductividad al del resistividad. Ocurre cuando la temperatura, o la corriente o el campo críticos, se separan más de lo tolerado de sus valores nominales. También puede ocurrir en caso de pérdidas en el haz de partículas.

Relativista: describe cualquier objeto que viaje a casi la velocidad de la luz, obedeciendo las leyes especiales de la Relatividad de Einstein.

Sabor (flavour): nombre usado para los diversos tipos de quarks (up, down, strange, charme, bottom, top) y para los diversos tipos de leptones (electrón, muón, tau). Para cada sabor de leptón hay un sabor correspondiente de neutrino. Es decir el sabor es el número cuántico que distingue los diversos tipos de quark/leptón. Cada sabor de quark y de leptón tiene una masa diferente. Para los neutrinos aún no si sabe que masa tienen.

Síncrotrón: tipo de acelerador circular en las que las partículas viajan en paquetes sincronizadamente en un perímetro de radio fijo.

Spin: momento angular intrínseco de una partícula subatómica.

Strange quark (s): El tercer sabor de quark (en orden de masa creciente), con carga eléctrica $-1/3$.

Strangelets: Strangelet es el término con el que se denomina a un hipotético trozo microscópico de "materia extraña" que contiene el mismo número de partículas, quarks, de tipo up, down y strange.

Suceso (evento): acontecimiento que ocurre cuando chocan dos partículas o una sola partícula decaen. Las teorías de partículas predicen las probabilidades de los varios acontecimientos posibles que pueden ocurrir cuando muchas colisiones similares o decaimientos son estudiados. No pueden predecir el resultado para un sólo acontecimiento.

Supersimetría (SUSY): es una propiedad postulada para el universo. Es una de las mejor motivadas extensiones del Modelo Estándar de partículas. La Supersimetría requiere que cada tipo de partícula tenga una partícula supersimétrica asociada de mucha mayor masa.

Tau: el tercer tipo (sabor) de los leptóns cargados (en orden de masa creciente), con carga eléctrica -1 .

TeV: 1 trillón de electron-voltios (10^{12} eV), equivalente a $1.6 \cdot 10^{-7}$ J.

Teorema Noether: debida á matemática Emmy Noether (1918) que afirma que si una transformación guarda un tipo determinado de simetría lleva asociado el cumplimiento de una determinada ley de conservación.

Teoría de cuerdas: acercamiento matemático incompleto de la física teórica que entiende las partículas como objetos dimensionales llamados cuerdas, más que como objetos cero-dimensionales (puntuales) como se entienden en el Modelo Estándar de partículas.

Teoría Inflacionaria: propone que después de la Gran Explosión inicial tuvieron lugar unos procesos en los que una sola fuerza unificada de la naturaleza se dividió en las cuatro fuerzas fundamentales que existen hoy.

Top quark (t): el sexto tipo (sabor) de quark (en orden de masa creciente, con carga eléctrica $+2/3$. Su masa es mucho mayor que cualquiera otro quark o leptón.

Track: registro de la trayectoria de una partícula que atraviesa un detector.

Tracking: reconstrucción de la trayectoria dejada por el paso de una partícula a través de él detector.

Tranformación de paridad (también llamada inversión de la paridad): es el cambio simultáneo de las coordenadas espaciales.

Trigger system: lleva a cabo el proceso de selección en varias etapas. En los detectores del LHC, a decisión de mantener los datos de un evento se toma en menos de 2 microsegundos después de que el suceso haya ocurrido. De los 40 millones de cruces de "bunches" por segundo, menos de 100000 pasan el primer nivel de decisión.

T-simetría: es la simetría de las leyes físicas bajo la inversión del tiempo. Aunque en contextos reducidos puede encontrarse esta simetría, el universo en sí mismo no la verifica. Esto es debido al principio de incertidumbre (en las escalas cuánticas) y la entropía termodinámica (a escalas más grandes).

Up Quark (u): el sabor de quark con menos masa, y con carga eléctrica $+2/3$.

Vertex Detector: un detector situado muy cerca del punto de colisión. Permite que las trayectorias de las partículas procedentes del decaimiento de una partícula de vida muy corta producida en esa colisión pueda ser reconstruida con mucha precisión. Por tanto, el 'vertex' point es diferente del punto de colisión.

W (bosón): partícula portadora de la interacciones débil. Está implicada en todos los procesos débiles en los que la carga eléctrica cambia.

Z (bosón): partícula portadora de las interacciones débiles. Está implicada en todos los procesos débiles que no cambien el sabor.



El **Instituto de Física de Cantabria** es un centro de investigación creado en 1995, cuya titularidad comparten el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (**CSIC**) y la Universidad de Cantabria (**UC**). Ambos organismos aportan personal y recursos.

La finalidad del Instituto es realizar investigación en “ciencia básica” de los distintos aspectos de la Física, estudiando desde lo más grande (el Universo) hasta lo más pequeño (las partículas elementales).

Cerca de 100 investigadores y técnicos desarrollan proyectos punteros de investigación tanto a nivel nacional como internacional en varios campos de la Ciencia:

Astrofísica

Física de Partículas

Física de Sistemas no Lineales

Meteorología

Computación y e-Ciencia

