

Esto es una colección de hechos y figuras sobre el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en la forma de preguntas y respuestas. Las preguntas están agrupadas en secciones, y las respuestas tienen a menudo dos niveles, con más detalles en el segundo nivel. Por favor, note que cuando hablamos sobre colisión de partículas en el acelerador, la palabra “interacción” es sinónimo de “colisión”

Esta guía es actualizada regularmente. Para obtener la última versión visitar:

<http://cdsweb.cern.ch/record/1165534>

*This is a collection of facts and figures about the Large Hadron Collider (LHC) in the form of questions and answers. Questions are grouped into sections, and answers are often two-tier, with more details in the second level. Please note that when speaking about particle collisions in the accelerator, the word 'interaction' is a synonym of 'collision'.*

*This guide is regularly updated. For the latest version, please visit:*

*<http://cdsweb.cern.ch/record/1165534>*

## Contenidos

Preámbulos físicos	1
El LHC en general	15
La máquina	27
Detectores	37
Entorno	47
10 fascinantes hechos sobre el LHC	52
Apéndice 1	53
Apéndice 2	54



## Preámbulos físicos

### Potencias de 10

Las potencias de diez son usadas frecuentemente en física y en la tecnología de la información. Son una notación práctica y reducida para números muy grandes y muy pequeños.

Potencia de 10	Número	Símbolo
$10^{-12}$	0,000000000001	p (pico)
$10^{-9}$	0,000000001	n (nano)
$10^{-6}$	0,000001	$\mu$ (micro)
$10^{-3}$	0,001	m (mili)
$10^{-2}$	0,01	
$10^{-1}$	0,1	
$10^0$	1	
$10^1$	10	
$10^2$	100	
$10^3$	1 000	k (kilo)
$10^6$	1 000 000	M (mega)
$10^9$	1 000 000 000	G (giga)
$10^{12}$	1 000 000 000 000	T (tera)
$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	P (peta)

## Physics preamble

# faq

### Powers of ten

The powers of ten are commonly used in physics and information technology. They are practical shorthand for very large or very small numbers.

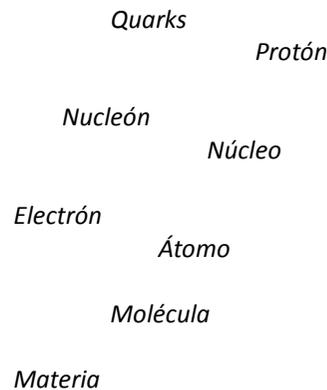
Power of ten	Number	Symbol
$10^{-12}$	0.000000000001	p (pico)
$10^{-9}$	0.000000001	n (nano)
$10^{-6}$	0.000001	$\mu$ (micro)
$10^{-3}$	0.001	m (milli)
$10^{-2}$	0.01	
$10^{-1}$	0.1	
$10^0$	1	
$10^1$	10	
$10^2$	100	
$10^3$	1000	k (kilo)
$10^6$	1 000 000	M (mega)
$10^9$	1 000 000 000	G (giga)
$10^{12}$	1 000 000 000 000	T (tera)
$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	P (peta)

## Dentro del átomo

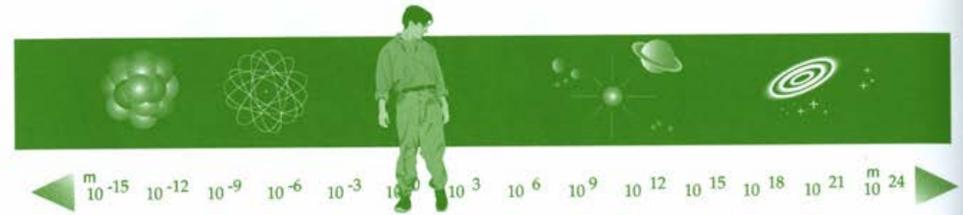
La física de Partículas estudia los objetos más pequeños de la Naturaleza. Al investigar lo más pequeño y fundamental, también mira hacia atrás muy lejos en el tiempo, justo unos instantes después del Big Bang. A continuación se muestra un pequeño ejemplo de las dimensiones con las que los físicos de partículas tratan:

Átomo:  $10^{-10}$  m  
 Núcleo:  $10^{-14}$  m  
 Quarks:  $< 10^{-19}$  m

*Si el protón y el neutrón tuviesen un tamaño de 10 cm, entonces el quark y el electrón tendrían un tamaño de menos de 0,1 mm y el átomo entero tendría un tamaño de 10 km. Más del 99,99% del átomo es un espacio vacío.*



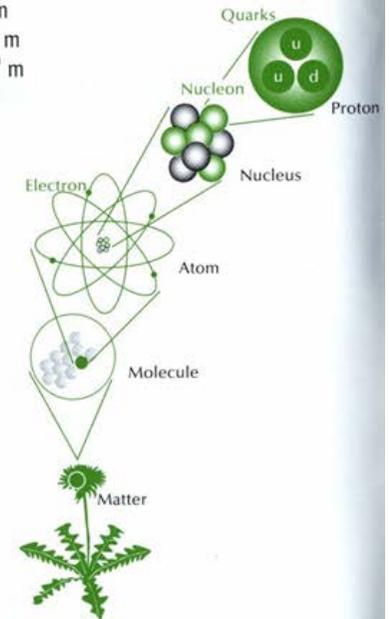
## Inside the atom



Particle physics studies the tiniest objects of Nature. Looking into the very small and fundamental, it also looks very far back into time, just a few moments after the Big Bang. Here are a few examples of dimensions particle physicists deal with:

Atom:  $10^{-10}$  m  
 Nucleus:  $10^{-14}$  m  
 Quarks:  $< 10^{-19}$  m

*If the protons and the neutrons were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across. More than 99.99% of the atom is empty space.*



La energía tiene muchas unidades en física; julios, calorías y kilovatios-hora son las unidades utilizadas en diferentes situaciones. Solo el julio es una unidad del Sistema Internacional (SI) de unidades, pero todas ellas están relacionadas mediante factores de conversión. En la física de partículas, la unidad que más frecuentemente se utiliza es el electrón-voltio (eV) y sus múltiplos keV ( $10^3$  eV), GeV ( $10^9$  eV) y TeV ( $10^{12}$  eV). El electrón-voltio es una unidad conveniente porque, en términos absolutos, la energía con la que tratan los físicos de partículas es muy pequeña. Si tomamos el LHC como ejemplo, el total de la energía de colisión es de 14 TeV, siendo el más poderoso acelerador de partículas del mundo. Así, si se transforma en julios, obtenemos

$$14 \times 10^{12} \times 1,602 \times 10^{-19} = 22,4 \times 10^{-7} \text{ julios}$$

Esta es una cantidad muy pequeña de energía si la comparamos, por ejemplo, con la energía de un objeto de 1 kg de masa que cae desde una altura de 1 m, que es de 9,8 julios =  $6,1 \times 10^{19}$  electrón-voltios.

*La definición de electrón voltio viene del hecho de que un electrón acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio tiene una discreta cantidad de energía,  $E=qV$  julios, donde  $q$  es la carga del electrón en culombios y  $V$  es la diferencia de potencial en voltios. De ahí  $1 \text{ eV} = (1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1 \text{ V}) = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .*

## Energy units in physics

Energy has many units in physics: joules, calories, and kilowatt hours are all units of energy used in different contexts. Only the joule is an International System (SI) unit, but all of them are related by conversion factors. In particle physics, the unit that is most frequently used for energy is the electronvolt (eV) and its derivatives keV ( $10^3$  eV), MeV ( $10^6$  eV), GeV ( $10^9$  eV) and TeV ( $10^{12}$  eV). The electronvolt is a convenient unit because, in absolute terms, the energies that particle physicists deal with are very small. If we take the LHC as an example, the total collision energy is 14 TeV, making it the most powerful particle accelerator in the world. Still, if we convert this into joules, we obtain:

$$14 \times 10^{12} \times 1.602 \times 10^{-19} = 22.4 \times 10^{-7} \text{ joules.}$$

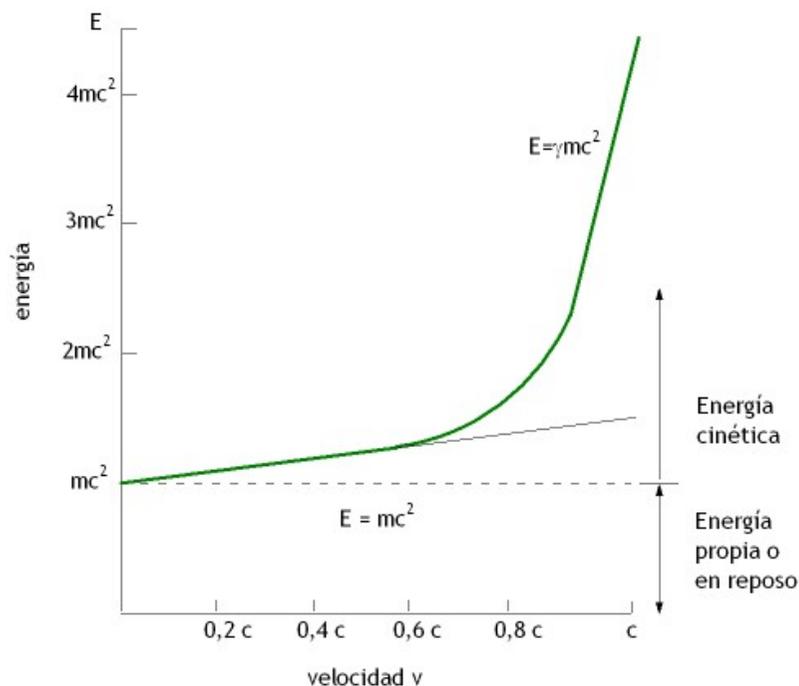
This is a very small amount of energy if compared, for example, to the energy of an object weighing 1 kg and falling from a height of 1 m, that is: 9.8 joules =  $6.1 \times 10^{19}$  electronvolts.

*The definition of the electronvolt comes from the simple insight that a single electron accelerated by a potential difference of 1 volt will have a discrete amount of energy,  $E=qV$  joules, where  $q$  is the charge on the electron in coulombs and  $V$  is the potential difference in volts. Hence  $1 \text{ eV} = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1 \text{ V}) = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .*

## Energía y velocidad de una partícula

Ninguna partícula puede moverse con una velocidad mayor que la velocidad de la luz en el vacío; sin embargo, esto no es un límite para la energía que una partícula puede tener. En los aceleradores de alta energía, las partículas viajan normalmente a velocidades muy próximas a la velocidad de la luz. En estas condiciones, como la energía aumenta, el incremento de velocidad es mínimo. Por ejemplo, las partículas en el LHC se mueven a 0,999997828 veces la velocidad de la luz a la máxima energía (energía = 7000 GeV). Sin embargo, los físicos de partículas piensan realmente poco sobre la velocidad, y sí más en la energía de las partículas.

La relación clásica Newtoniana entre velocidad y energía cinética ( $K = \frac{1}{2} mv^2$ ) sólo se cumple para velocidades mucho menores que la de la luz. Para partículas moviéndose próximas a la velocidad de la luz necesitamos el uso de las Ecuaciones de Einstein de la relatividad especial  $K = (\gamma - 1) mc^2$  donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío (299 792 458 m/s), y  $\gamma$  está relacionada con la velocidad según  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ ;  $\beta = v/c$  y  $m$  es la masa de la partícula en reposo.

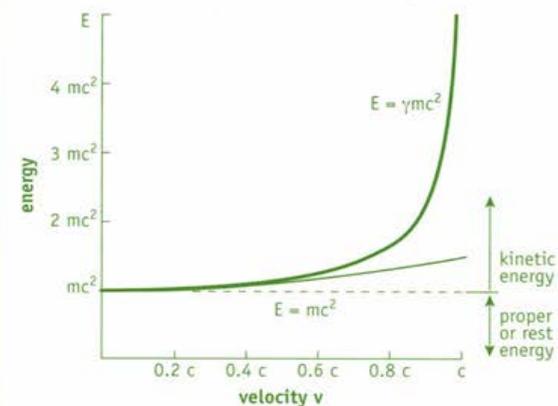


Ref: [http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module\\_equation.htm](http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module_equation.htm)

## Energy and speed of a particle

No particle can move with speeds faster than the speed of light in a vacuum; however, there is no limit to the energy a particle can attain. In high-energy accelerators, particles normally travel very close to the speed of light. In these conditions, as the energy increases, the increase in speed is minimal. As an example, particles in the LHC move at 0.999997828 times the speed of light at injection (energy = 450 GeV) and 0.999999991 times the speed of light at top energy (energy = 7000 GeV). Therefore, particle physicists do not generally think about speed, but rather about a particle's energy.

The classical Newtonian relationship between speed and kinetic energy ( $K = (1/2)mv^2$ ) only holds for speeds much lower than the speed of light. For particles moving close to the speed of light we need to use Einstein's equation from special relativity  $K = (\gamma - 1)mc^2$  where  $c$  is the velocity of light (299 792 458 m/s), and  $\gamma$  is related to speed via  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ;  $\beta = v/c$  and  $m$  = mass of particle at rest.



Ref: [http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module5\\_equations.htm](http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module5_equations.htm)

Energía cinética de un protón (K)	Velocidad (%c)	Acelerador
50 MeV	31,4	Linac 2
1,4 GeV	91,6	PS Booster
25 GeV	99,93	PS
450 GeV	99,9998	SPS
7 TeV	99,9999991	LHC

Relación entre la energía cinética y la velocidad de un protón en las máquinas del CERN. La masa en reposo del protón es  $0,938 \text{ GeV}/c^2$ .

## Energía y Masa

La energía y la masa son las dos caras de la misma moneda. La masa puede transformarse en energía y viceversa según la famosa ecuación de Einstein ( $E=mc^2$ ). En el LHC esta transformación sucede en cada colisión. Así, a causa de esta equivalencia, la masa y la energía pueden ser medidas con las mismas unidades. En la escala de física de partículas ésta es el electrón-voltio y sus múltiplos (ver *Unidades de energía en física*).

Kinetic energy of a proton (K)	Speed (%c)	Accelerator
50 MeV	31.4	Linac 2
1.4 GeV	91.6	PS Booster
25 GeV	99.93	PS
450 GeV	99.9998	SPS
7 TeV	99.9999991	LHC

Relationship between kinetic energy and speed of a proton in the CERN machines. The rest mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2$

## Energy and mass

Energy and mass are two sides of the same coin. Mass can transform into energy and vice versa in accordance with Einstein's famous equation ( $E=mc^2$ ). At the LHC this transformation happens at each collision. Also, because of this equivalence, mass and energy can be measured with the same units. At the scale of particle physics these are the electronvolt and its multiples (see *Energy units in physics*).

El modelo estándar es un conjunto de teorías que plasman todo nuestro conocimiento actual sobre partículas fundamentales y fuerzas. De acuerdo con la teoría, la cual esta soportada por un gran número de evidencias experimentales, los quarks son los bloques constituyentes de la materia, y las fuerzas actúan a través de partículas portadoras intercambiándose entre las partículas de materia. Las fuerzas también difieren en su potencia. Los siguientes dibujos son un resumen de los puntos básicos del Modelo Estándar.

*Aunque el Modelo Estándar es una teoría convincente, algunos de los fenómenos recientemente observados – tal como la materia oscura y la ausencia de antimateria en el Universo – permanecen sin explicar y pueden no ser explicados por el modelo. Leer más sobre esto en la página 22.*

*Representación matemática del Modelo Estándar de física de partículas*

## The Standard Model

The Standard Model is a collection of theories that embodies all of our current understanding of fundamental particles and forces. According to the theory, which is supported by a great deal of experimental evidence, quarks and leptons are the building blocks of matter, and forces act through carrier particles exchanged between the particles of matter. Forces also differ in their strength. The following pictures summarize the Standard Model's basic points.

*Although the Standard Model is a very powerful theory, some of the phenomena recently observed — such as dark matter and the absence of antimatter in the Universe — remain unexplained and can not be accounted for in the model. Read more about this on page 22.*

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

*Mathematical representation of the Standard Model of particle physics.*

## LEPTONES

Constituyen la materia	<b>Electrón</b> Junto con el núcleo forman el átomo	<b>Neutrino electrónico</b> Partícula sin carga eléctrica y masa muy pequeña; Millones atraviesan tu cuerpo cada segundo
	<b>Muón</b> Un pariente más pesado del electrón; su vida es de dos millonésimas de segundo	<b>Neutrino muonico</b> Se crea junto a los muones cuando alguna partícula decae.
	<b>Tau</b> Más pesado; es extremadamente inestable. Descubierta en 1975	<b>Neutrino tauonico</b> Descubierta en 2000

Constituyen la materia	<b>Up</b> Tiene una carga eléctrica de mas dos tercios; los protones contienen dos, los neutrones contienen uno	<b>Down</b> Tiene una carga eléctrica de menos un tercio; los protones contienen uno, los neutrones contienen dos
	<b>Charm</b> Más pesado que el Up fue encontrado en 1974	<b>Stange</b> Más pesado que el Down
	<b>Top</b> Más pesado aún Encontrado en 1995	<b>Bottom</b> Más pesado aún; La medición del quark es un test importante de la teoría electrodébil

## LEPTONS

Make up matter	<b>Electron</b> Together with the nucleus, it makes up the atom		<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and very small mass; billions fly through your body every second	
	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second		<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay	
	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975		<b>Tau neutrino</b> Discovered in 2000	

## QUARKS

Make up matter	<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one		<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two	
	<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974		<b>Strange</b> A heavier relative of the down.	
	<b>Top</b> Heavier still; found in 1995		<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory	

## Fuerza Fuerte

Sentida por: quark

Partícula portadora: gluones

### Fenómenos asociados

La fuerza fuerte une a los quark para formar protones y neutrones (y otras partículas). También une protones y neutrones en el núcleo, donde vence la enorme repulsión eléctrica entre protones

## Fuerza electromagnética

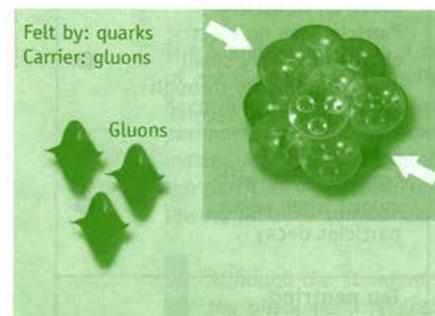
Sentida por: quark y leptones cargados

Partícula portadora: fotones

### Fenómenos asociados

Mantiene unidos los electrones al núcleo en los átomos, une átomos en moléculas, y es responsable de las propiedades de los sólidos, líquidos y gases.

## STRONG FORCE

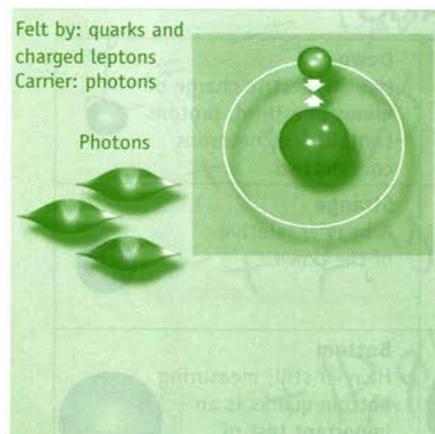


### Associated phenomena

The strong force binds quarks together to make protons and neutrons (and other particles). It also binds protons and neutrons in nuclei, where it overcomes the enormous electrical repulsion between protons.



## ELECTROMAGNETIC FORCE



### Associated phenomena

It holds electrons to nuclei in atoms, binds atoms into molecules, and is responsible for the properties of solids, liquids and gases.



## Fuerza débil

Sentida por: quark y leptones

Partícula portadora: intermediada por bosones  $W^-$   $W^+$   $Z^0$

### Fenómenos asociados

La fuerza débil sirve de base a la radiactividad natural, por ejemplo en la Tierra, bajo nuestros pies. Es esencial también para las reacciones nucleares en el centro de estrellas como el Sol, donde el hidrógeno se convierte en helio

## Gravitación

Sentida por: todas las partículas con masa

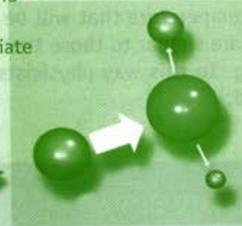
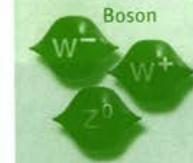
Partícula portadora: Gravitón

### Fenómenos asociados

La gravedad hace que las manzanas caigan al suelo. Es una fuerza de atracción. En una escala astronómica, une la materia en estrellas y planetas y mantiene las estrellas unidas en galaxias

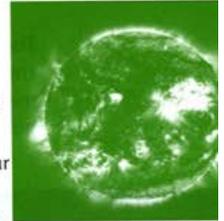
## WEAK FORCE

Felt by: quarks and leptons  
Carrier: intermediate vector bosons



### Associated phenomena

The weak force underlies natural radioactivity, for example in the Earth beneath our feet. It is also essential for the nuclear reactions in the centres of stars like the Sun, where hydrogen is converted into helium.



## GRAVITATION

Felt by: all particles with mass  
Carrier: Graviton  
(Not yet discovered)



### Associated phenomena

Gravity makes apples fall to the ground. It is an attractive force. On an astronomical scale it binds matter in planets and stars, and holds stars together in galaxies.



## Vuelta al Big Bang

La densidad de energía y temperatura disponibles en las colisiones en el LHC es similar a aquellas que existían unos pocos momentos después del Big Bang. De esta forma los físicos esperan descubrir como evolucionó el Universo.

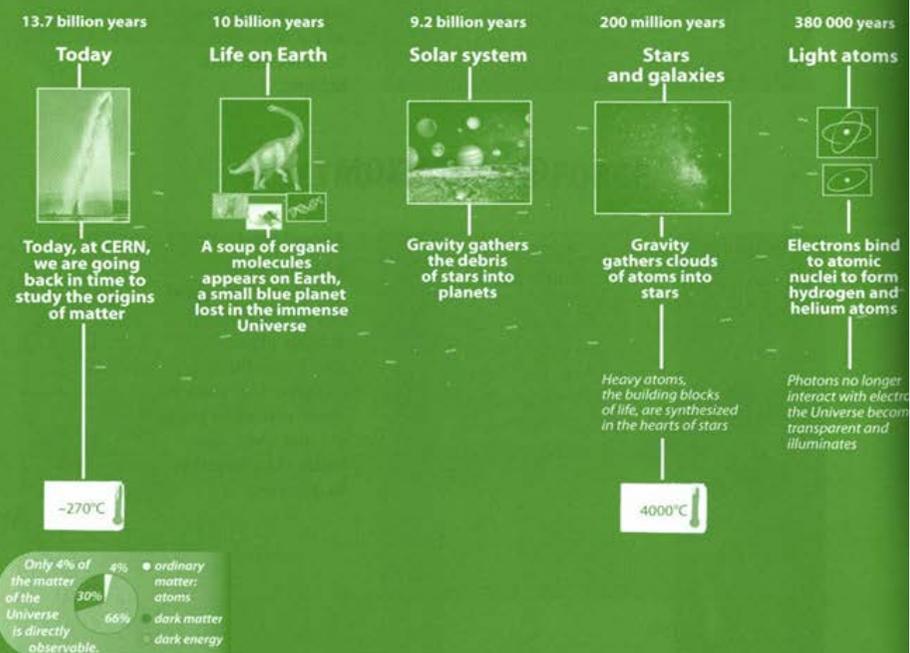
### La evolución del Universo

13,7 mil millones de años	10 mil millones de años	9,2 mil millones de años	200 millones de años	380.000 años
Hoy	Vida en la Tierra	Sistema Solar	Estrellas y galaxias	Luz y átomos
Hoy, en el CERN estamos volviendo hacia atrás en el tiempo para estudiar el origen de la materia	Una sopa de moléculas orgánicas aparecen en la Tierra, un pequeño planeta azul perdido en el inmenso Universo	La gravedad reúne restos de estrella en planetas	La gravedad reúne nubes de átomos en estrellas	Los electrones se unen a núcleos atómicos para formar átomos de hidrógeno y de helio
			En el interior de las estrellas se sintetizan los átomos pesados, los bloques constituyentes de la vida	Los fotones no interaccionan más con los electrones: el Universo se vuelve transparente y luminoso
-270 °C			4000 °C	
Solo el 4% materia de la materia ordinaria: del universo átomos es observable	materia oscura energía oscura			

## Back to the Big Bang

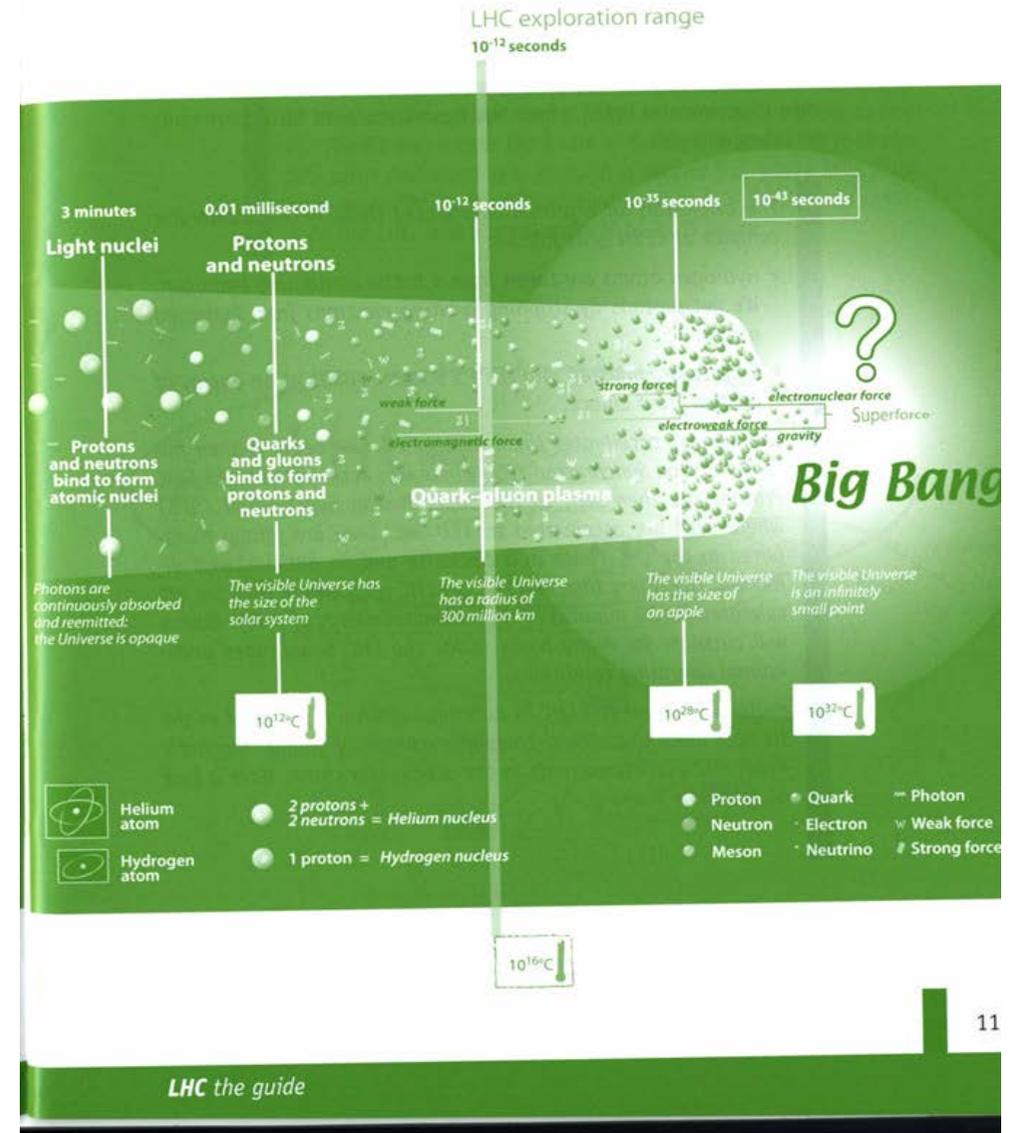
The energy density and temperature that will be made available in the collisions at the LHC are similar to those that existed a few moments after the Big Bang. In this way physicists hope to discover how the Universe evolved.

### The Evolution of the Universe



3 minutos	0.01 milisegundos	$10^{-12}$ segundos	$10^{-20}$ segundos	$10^{-35}$ segundos	$10^{-43}$ segundos
-----------	-------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

Los protones y los neutrones se juntan para formar núcleos atómicos	Los Quarks y los gluones se juntan para formar los protones y los neutrones	plasma de Quark – gluón	fuerza débil fuerza fuerte	fuerza fuerte fuerza electrodébil	fuerza electrodébil gravedad	Superfuerzas fuerza nuclear
Los fotones son absorbidos continuamente y reemitidos: el Universo es opaco	EL Universo tiene el tamaño del sistema solar	El Universo tiene un radio de 300 millones de km		El Universo tiene el tamaño de una manzana	El Universo tiene el tamaño de un pequeño punto infinitesimal	
Átomo	$10^{12}$ °C	$10^{15}$ °C		$10^{27}$ °C	$10^{32}$ °C	
Helio	2 protones + 2 neutrones = núcleo de Helio		Protón Neutrón Mesón	Quark Electrón Neutrino	Fotón Fuerza débil Fuerza Fuerte	
Átomo						
Hidrógeno	1 protón=núcleo de Hidrógeno					



## El complejo de aceleradores del CERN

EL complejo de aceleradores del CERN es un conjunto de máquinas con cada vez más altas energías. Cada máquina inyecta un haz en el siguiente, el cual se encarga de llevar al haz hasta una energía más alta y así sucesivamente. En el LHC – el último elemento de esta cadena – cada haz de partículas es acelerado hasta el récord de energía de 7 TeV. Además, muchos de los otros aceleradores de la cadena tienen sus propios experimentos, donde cada haz es usado para experimentos a bajas energías.

*La breve historia de un protón acelerado a través del complejo de aceleradores del CERN es la siguiente:*

▷ *Átomos de hidrógeno se toman de una botella que contiene hidrógeno. Obtenemos protones eliminando los electrones que orbitan en el átomo de hidrógeno*

▷ *Los protones se inyectan en el PS Booster (PSB) con una energía de 50 MeV desde el linac2*

*El Booster les acelera hasta 1,4 GeV. El haz se introduce en el Protón Sincrotrón (PS) donde se aceleran hasta 25 GeV. Desde ahí los protones son enviados al Súper Protón Sincrotrón (SPS) donde son acelerados hasta 450 GeV. Son transferidos finalmente al LHC (los protones circulan en el LHC en dos direcciones, en dirección de las agujas del reloj y contrario a las agujas del reloj, el tiempo de llenado del anillo LHC es de 4'20") donde son acelerados durante 20 minutos hasta la energía nominal de 7 TeV. Los haces circularán durante muchas horas en el interior del LHC por los tubos del haz bajo condiciones normales de operación.*

*Los protones llegan al haz en paquetes, los cuales se han preparado en pequeñas máquinas. Para un plan completo de llenado, campos magnéticos y corrientes de partículas en el conjunto de aceleradores, ver el Apéndice 1 y 2*

## The CERN accelerator complex

The accelerator complex at CERN is a succession of machines with increasingly higher energies. Each machine injects the beam into the next one, which takes over to bring the beam to an even higher energy, and so on. In the LHC—the last element of this chain—each particle beam is accelerated up to the record energy of 7 TeV. In addition, most of the other accelerators in the chain have their own experimental halls, where the beams are used for experiments at lower energies.

*The brief story of a proton accelerated through the accelerator complex at CERN is as follows:*

- ▶ *Hydrogen atoms are taken from a bottle containing hydrogen. We get protons by stripping orbiting electrons from hydrogen atoms.*
- ▶ *Protons are injected into the PS Booster (PSB) at an energy of 50 MeV from Linac2.*

*The booster accelerates them to 1.4 GeV. The beam is then fed to the Proton Synchrotron (PS) where it is accelerated to 25 GeV. Protons are then sent to the Super Proton Synchrotron (SPS) where they are accelerated to 450 GeV. They are finally transferred to the LHC (both in a clockwise and an anticlockwise direction, the filling time is 4'20" per LHC ring) where they are accelerated for 20 minutes to their nominal energy of 7 TeV. Beams will circulate for many hours inside the LHC beam pipes under normal operating conditions.*

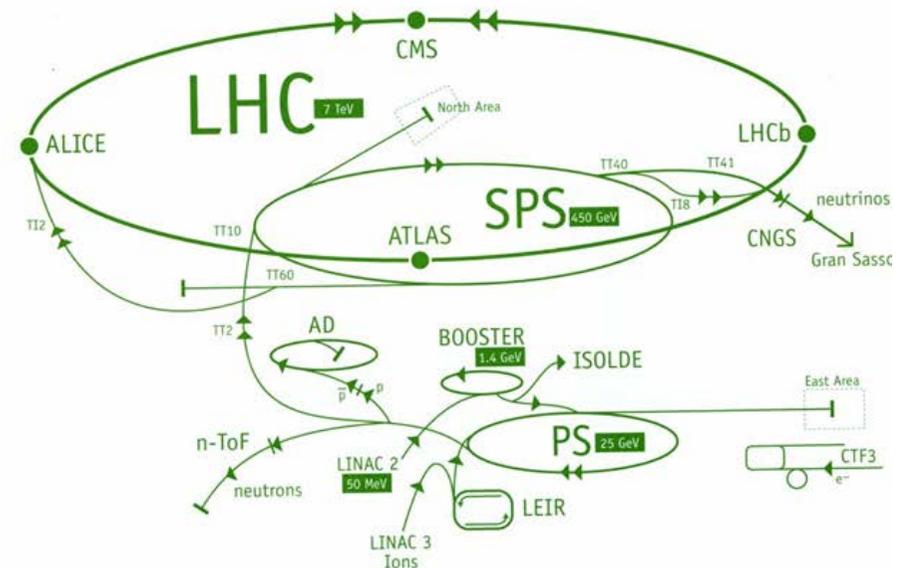
*Protons arrive at the LHC in bunches, which are prepared in the smaller machines. For a complete scheme of filling, magnetic fields and particle currents in the accelerator chain, have a look at Appendix 1 and 2.*

Además del acelerador de protones, el conjunto de aceleradores también aceleran iones de plomo.

Los iones de plomo son producidos a partir de plomo muy purificado calentado a una temperatura de aproximadamente 550°C. Una corriente de electrones ioniza el vapor de plomo. Se producen muchos estados de carga diferente con un máximo alrededor del  $Pb^{29+}$ . Estos iones son seleccionados y acelerados hasta 4,2 MeV/u (energía por nucleón) antes de pasar a través de un filtro de carbón, el donde muchos de ellos pasan a  $Pb^{54+}$ . El haz de  $Pb^{54+}$  se acumula y acelera a 72 MeV/u en el Low Energy Ion Ring (LEIR) –Anillo de iones de baja energía –, desde donde se transfieren al PS. El PS acelera el paquete a 5,9 GeV/u y los envía al SPS después de pasar a través de un segundo filtro donde pasan todos a  $Pb^{82+}$ . El SPS los acelera hasta 117 GeV/u y son enviados al LHC, el cual los acelera hasta 2,76 TeV/u.

In addition to accelerating protons, the accelerator complex also accelerates lead ions.

Lead ions are produced from a highly purified lead sample heated to a temperature of about 500°C. The lead vapour is ionized by an electron current. Many different charge states are produced with a maximum around  $Pb^{29+}$ . These ions are selected and accelerated to 4.2 MeV/u (energy per nucleon) before passing through a carbon foil, which strips most of them to  $Pb^{54+}$ . The  $Pb^{54+}$  beam is accumulated, then accelerated to 72 MeV/u in the Low Energy Ion Ring (LEIR), which transfers them to the PS. The PS accelerates the beam to 5.9 GeV/u and sends it to the SPS after first passing it through a second foil where it is fully stripped to  $Pb^{82+}$ . The SPS accelerates it to 117 GeV/u then sends it to the LHC, which accelerates it to 2.76 TeV/u.



¿Cuál es el significado de LHC?

**LHC** significa **L**arge **H**adron **C**ollider (Gran Colisionador de Hadrones). **Large** se debe al tamaño (aproximadamente 27 km de circunferencia). **Hadrón** porque acelera protones o iones, los cuales son hadrones, y **Collider** porque estas partículas forman dos haces que viajan en direcciones opuestas y colisionan en cuatro puntos donde los dos anillos de la máquina se cruzan.

*Los hadrones (del griego 'adros' que significa voluminoso) son partículas formadas por quarks. El protón y neutrón que constituyen el núcleo atómico pertenecen a esta familia. Por otro lado, los leptones son partículas que no están formadas por quarks. Los electrones y muones son ejemplos de leptones (del griego 'leptos' que significa fino)*

LHC in general

faq

## What does LHC stand for?

LHC stands for Large Hadron Collider. **Large** due to its size (approximately 27 km in circumference), **Hadron** because it accelerates protons or ions, which are hadrons, and **Collider** because these particles form two beams travelling in opposite directions, which collide at four points where the two rings of the machine intersect.

*Hadrons (from the Greek 'adros' meaning 'bulky') are particles composed of quarks. The protons and neutrons that atomic nuclei are made of belong to this family. On the other hand, leptons are particles that are not made of quarks. Electrons and muons are examples of leptons (from the Greek 'leptos' meaning 'thin').*

## ¿Cuándo fue diseñado?

A principios de 1980, cuando el gran colisionador Electrón-Positrón –*Large Electron-Positron* (LEP) – estaba siendo diseñado y construido, grupos del CERN estaban ya ocupados mirando a largo plazo. Después de muchos años de trabajo en aspectos técnicos y requerimientos físicos de la nueva máquina, sus sueños cristalizaron en diciembre de 1994, cuando el equipo de gobierno del CERN, el consejo del CERN, voto aprobar la construcción del LHC. La luz verde para el proyecto fue dada con la condición de que el nuevo acelerador se construyese con un presupuesto constante (fijo) y con el acuerdo de que la contribución de algún Estado no-Miembro pudiera ser utilizada para agilizar y mejorar el proyecto. Inicialmente, las limitaciones presupuestarias implicaban que el LHC debía ser concebido como un proyecto en dos etapas. Sin embargo, a continuación de las contribuciones de Japón, USA, India y otros Estados no-Miembros, el Consejo voto en 1995 permitir que el proyecto se ejecutara en una única fase. Entre 1996 y 1998, cuatro experimentos –ALICE, ATLAS, CMS y LHCb –reciben la aprobación oficial y el trabajo de construcción comienza en los cuatro sitios. Desde entonces, dos pequeños experimentos se ha unido en la búsqueda: TOTEM, instalado cerca de CMS y LHCf, cerca de ATLAS (ver experimentos, página 37).

*Para más información sobre los hitos del LHC, ver:  
<http://www.cern.ch/LHC-Milestones/>*

## When was it designed?

Back in the early 1980s, while the Large Electron-Positron (LEP) collider was being designed and built, groups at CERN were already busy looking at the long-term future. After many years of work on the technical aspects and physics requirements of such a machine, their dreams came to fruition in December 1994 when CERN's governing body, the CERN Council, voted to approve the construction of the LHC. The green light for the project was given under the condition that the new accelerator be built within a constant budget and on the understanding that any non-Member State contributions would be used to speed up and improve the project. Initially, the budgetary constraints implied that the LHC was to be conceived as a 2-stage project. However, following contributions from Japan, the USA, India and other non-Member States, Council voted in 1995 to allow the project to proceed in a single phase. Between 1996 and 1998, four experiments—ALICE, ATLAS, CMS and LHCb—received official approval and construction work commenced on the four sites. Since then, two smaller experiments have joined the quest: TOTEM, installed next to CMS, and LHCf, next to ATLAS (see experiments, page 37).

*For more information about the LHC milestones, see:  
<http://www.cern.ch/LHC-Milestones/>*

## ¿Cuánto ha costado?

El costo de la máquina sola es aproximadamente de 5 mil millones de CHF (aproximadamente 3 mil millones de Euros). El coste total del proyecto se desglosa aproximadamente en la siguiente tabla

Coste de Construcción (MCHF)	Personal	Materiales	Total
Máquina LHC y áreas *)	1224	3756	<b>4980</b>
Aportación del CERN a los detectores	869	493	<b>1362</b>
Ordenadores del LHC (participación del CERN)	85	83	<b>168</b>
<b>Total</b>	<b>2178</b>	<b>4332</b>	<b>6510</b>

\*) Incluye: Máquinas R y D e inyectores, test y pre-operación

Las colaboraciones experimentales son entidades individuales, fundadas independientemente del CERN. El CERN es un miembro de cada experimento, y contribuye al presupuesto del material de CMS y LHCb con el 20%, 16% para ALICE y 14% para ATLAS. TOTEM es un experimento mucho más pequeño, con un costo total de material de aproximadamente 6 millones de CHF, de los cuales el CERN proporciona el 30% del presupuesto.

## How much does it cost?

The cost for the machine alone is about 5 billion CHF (about 3 billion Euro). The total project cost breaks down roughly as follows:

Construction costs (MCHF)	Personnel	Materials	Total
LHC machine and areas <sup>*)</sup>	1224	3756	<b>4980</b>
CERN share to detectors	869	493	<b>1362</b>
LHC computing (CERN share)	85	83	<b>168</b>
<b>Total</b>	<b>2178</b>	<b>4332</b>	<b>6510</b>

<sup>\*)</sup> This includes: Machine R & D and injectors, tests and pre-operation.

The experimental collaborations are individual entities, funded independently from CERN. CERN is a member of each experiment, and contributes to the material budget of CMS and LHCb at the 20% level, 16% for ALICE and 14% for ATLAS. TOTEM is a much smaller experiment, with a total material cost of about 6 million CHF, of which CERN provides 30% of the budget.

NB: 1 billion = 1 thousand million.

## ¿Por qué grande 'large'?

El tamaño de un acelerador está relacionado con la máxima energía que se puede obtener. En el caso de un acelerador o anillo de almacenamiento, esta es una función del radio de la máquina y de la potencia del campo de los dipolos magnéticos que mantiene a las partículas en su órbita. El LHC reutiliza los 27 km de circunferencia del túnel que fue construido para el gran acelerador anterior, LEP. El LHC utiliza algunos de los más potentes dipolos y cavidades de radiofrecuencia que existen. El tamaño del túnel, cavidades magnéticas y otros elementos esenciales de la máquina, representan la principal limitación que determinan el diseño de energía de 7 TeV por haz de protones.

## ¿Por qué Colisionador 'Collider'?

Un colisionador (esto es, una máquina donde haces circulando en direcciones opuestas colisionan) tiene una gran ventaja sobre otra clase de aceleradores donde un haz colisiona con un blanco estacionario. Cuando los dos haces colisionan, la energía de la colisión es la suma de las energías de cada uno de los haces. Un haz de la misma energía que choca con un blanco fijo producirá una colisión de mucha menos energía.

*La energía disponible (por ejemplo, para obtener nuevas partículas) en ambos casos es la energía del centro de masas. En el primer caso es simplemente la suma de las energías de las dos partículas que chocan ( $E = E_{\text{haz1}} + E_{\text{haz2}}$ ), mientras que en el segundo, es proporcional a la raíz cuadrada de la energía de la partícula que golpea al blanco ( $E \propto \sqrt{E_{\text{haz}}}$ ).*

## Why large?

The size of an accelerator is related to the maximum energy obtainable. In the case of a collider or storage ring, this is a function of the radius of the machine and the strength of the dipole magnetic field that keeps particles in their orbits. The LHC re-uses the 27-km circumference tunnel that was built for the previous big accelerator, LEP. The LHC uses some of the most powerful dipoles in existence. The size of the tunnel, magnets, cavities and other essential elements of the machine, represent the main constraints that determine the design energy of 7 TeV per proton beam.

## Why collider?

A collider (that is a machine where counter-circulating beams collide) has a big advantage over other kinds of accelerator where a beam collides with a stationary target. When two beams collide, the energy of the collision is the sum of the energies of the two beams. A beam of the same energy that hits a fixed target would produce a collision of much less energy.

*The energy available (for example, to make new particles) in both cases is the centre-of-mass energy. In the first case it is simply the sum of the energies of the two colliding particles ( $E = E_{\text{beam1}} + E_{\text{beam2}}$ ), whereas in the second, it is proportional to the square root of the energy of the particle hitting the target ( $E \propto \sqrt{E_{\text{beam}}}$ ).*

## Why hadrons?

## ¿Por qué hadrones?

Le LHC acelerará dos haces de partículas del mismo tipo, ambos protones o iones de plomo, los cuales son hadrones. Un acelerador puede acelerar solamente cierto tipo de partículas: en primer lugar necesita que estén cargadas (ya que el haz es manipulado por dispositivos electromagnéticos que solamente tienen influencia en partículas cargadas) y en segundo lugar, excepto en casos especiales, necesita que no se deteriore. Esto limita el número de partículas que en la práctica pueden ser aceleradas a electrones, protones, e iones, más todas sus antipartículas.

En un acelerador circular, como es el LHC, partículas pesadas como los protones (los protones tienen una masa aproximadamente 2000 veces mayor que el electrón) tienen mucha menos pérdida de energía por vuelta debido a la radiación sincrotrón que partículas ligeras como los electrones. Por lo tanto, en aceleradores circulares, para obtener colisiones de muy alta energía es más efectivo acelerar partículas masivas.

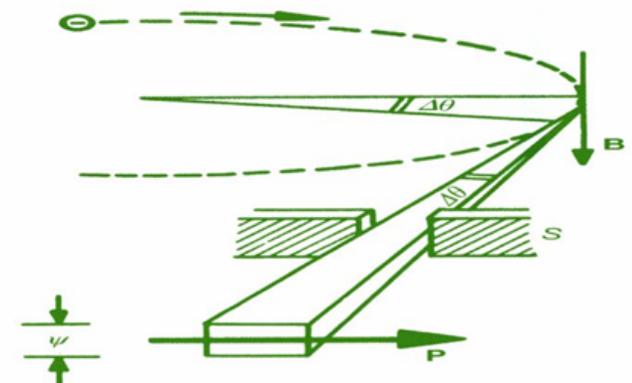
*La radiación sincrotrón es el nombre dado a la radiación que ocurre cuando partículas cargadas son aceleradas en trayectorias curvas o en órbitas. Esta clase de radiación representa una energía perdida por partícula, lo cual significa que debe aportarse más energía al acelerador para mantener un haz de energía constante.*

## Why hadrons?

The LHC will accelerate two beams of particles of the same kind, either protons or lead ions, which are hadrons. An accelerator can only accelerate certain kinds of particle: firstly they need to be charged (as the beams are manipulated by electromagnetic devices that can only influence charged particles), and secondly, except in special cases, they need not to decay. This limits the number of particles that can practically be accelerated to electrons, protons, and ions, plus all their antiparticles.

In a circular accelerator, such as the LHC, heavy particles such as protons (protons are around 2000 times more massive than electrons) have a much lower energy loss per turn through synchrotron radiation than light particles such as electrons. Therefore, in circular accelerators, to obtain the highest-energy collisions it is more effective to accelerate massive particles.

*Synchrotron radiation is the name given to the radiation that occurs when charged particles are accelerated in a curved path or orbit. This kind of radiation represents an energy loss for particles, which in turn means that more energy must be provided by the accelerator to keep the beam energy constant.*



## ¿Por qué se construye el LHC bajo tierra?

El LHC reutiliza el túnel que fue construido para el gran acelerador anterior del CERN, el LEP, desmantelado en el 2000. El túnel subterráneo fue la mejor solución para alojar la máquina de 27 km de circunferencia porque es más barato excavar un túnel, más que adquirir terrenos para construirlo en la superficie y el impacto en el paisaje se reduce al mínimo. Además, la corteza terrestre proporciona una buena protección para la radiación.

El túnel fue construido a una profundidad de 100 m, debido a consideraciones geológicas (de nuevo traducido en costo de construcción) y tiene un ligero gradiente de 1,4%. Así la profundidad varía entre 175 m (bajo el monte Jura) y 50 m (hacia el lago de Ginebra).

*El túnel tiene una cuesta por razones económicas. En el momento que se construía para alojar el LEP, la construcción de pozos verticales era muy costosa. Por lo tanto, la longitud del túnel que está bajo el Jura fue minimizada. Otras limitaciones que afectaron a la posición del túnel fueron:*

- ▷ *era esencial que tuviera una profundidad de al menos 5 m debajo de la parte superior del estrato de la 'molasa' (arenisca de cemento calizo)*
- ▷ *el túnel tenía que pasar por las proximidades del túnel piloto, construido para comprobar las excavaciones técnicas*
- ▷ *tenía que unirse con el SPS. Esto significa que solo había un grado de libertad (inclinación): Este ángulo se obtuvo minimizando la profundidad del pozo.*

## Why is the LHC built underground?

The LHC re-uses the tunnel that was built for CERN's previous big accelerator, LEP, dismantled in 2000. The underground tunnel was the best solution to house a 27-km circumference machine because it is cheaper to excavate a tunnel rather than acquire the land to build at the surface and the impact on the landscape is reduced to a minimum. In addition, the Earth's crust provides good shielding for radiation.

The tunnel was built at a mean depth of 100 m, due to geological considerations (again translating into cost) and at a slight gradient of 1.4%. Its depth varies between 175 m (under the Jura) and 50 m (towards Lake Geneva).

*The tunnel has a slope for reasons of cost. At the time when it was built for hosting LEP, the construction of the vertical shafts was very costly. Therefore, the length of the tunnel that lies under the Jura was minimized. Other constraints involved in the positioning of the tunnel were:*

- ▶ *it was essential to have a depth of at least 5 m below the top of the 'molasse' (green sandstone) stratum*
- ▶ *the tunnel had to pass in the vicinity of the pilot tunnel, constructed to test excavation techniques*
- ▶ *it had to link to the SPS. This meant that there was only one degree of freedom (tilt). The angle was obtained by minimising the depth of the shafts.*

## ¿Qué es la energía de colisión en el LHC y por qué es tan especial?

Cada haz de protones se mueve alrededor del LHC con una energía de 7 TeV, así, cuando dos protones chocan la energía de colisión es de 14 TeV. Los iones de plomo tienen muchos protones, y juntos proporcionan una energía mucho mayor: el haz de iones de plomo tiene una energía de colisión de 1150 TeV. Ambas energías de colisión no han sido nunca conseguidas antes en el laboratorio.

La concentración de energía es lo que hace al colisionador de partículas tan especial. Cuando aplaude con sus manos, probablemente produce una colisión con una energía mayor que los protones en el LHC, ¡pero mucho menos concentrada!. Ahora piense que haría si tuviera que colocar una aguja en una de sus manos. Seguramente ralentizaría sus manos cuando aplaudiese.

*En términos absolutos, estas energías, si las comparamos con las energías que manejamos cada día no son impresionantes. De hecho, 1 TeV es aproximadamente la energía de movimiento de un mosquito volando. Lo que hace que el LHC sea extraordinario es que esta energía está concentrada en un espacio aproximadamente de un millón de millones de veces más pequeño que un mosquito.*

## What is the collision energy at the LHC and what is so special about it?

Each proton beam flying around the LHC will have an energy of 7 TeV, so when two protons collide the collision energy will be 14 TeV. Lead ions have many protons, and together they give an even greater energy: the lead-ion beams will have a collision energy of 1150 TeV. Both collision energies have never been reached before in a lab.

Energy concentration is what makes particle collisions so special. When you clap your hands you probably do a 'collision' at an energy higher than protons at the LHC, but much less concentrated! Now think of what you would do if you were to put a needle in one of your hands. You would certainly slow your hands down as you clapped!

*In absolute terms, these energies, if compared to the energies we deal with everyday, are not impressive. In fact, 1 TeV is about the energy of motion of a flying mosquito. What makes the LHC so extraordinary is that it squeezes energy into a space about a million million times smaller than a mosquito.*

## ¿Cuáles son los principales objetivos del LHC?

Nuestra comprensión actual del Universo es incompleta. El Modelo Estándar de partículas y fuerzas (ver página 6) resume nuestro conocimiento actual de física de partículas. El Modelo Estándar ha sido comprobado mediante varios experimentos y ha sido probado particularmente con éxito al anticipar la existencia de partículas no descubiertas previamente. Sin embargo, deja muchas cuestiones sin resolver, las cuales el LHC ayudará a responder.

- ▷ El Modelo Estándar no explica el origen de la masa, ni por qué algunas partículas son muy pesadas mientras otras carecen de masa. La respuesta puede ser el llamado mecanismo de Higgs. De acuerdo con la teoría del mecanismo de Higgs, la totalidad del espacio está lleno con un 'campo de Higgs', y mediante la interacción con este campo, las partículas adquieren su masa. Las partículas que interactúan intensamente con este campo de Higgs son pesadas, mientras que aquellas que tienen una interacción débil son ligeras. Este campo de Higgs tiene al menos una nueva partícula asociada con él, el bosón de Higgs. Si tal partícula existe, los experimentos en el LHC pueden detectarlo.
- ▷ El Modelo Estándar no ofrece una descripción unificada de todas las fuerzas fundamentales, ya que resulta difícil construir una teoría de gravedad similar a las de las otras fuerzas. La Supersimetría —una teoría que predice la existencia de partículas más masivas que las partículas que conocemos— puede facilitar la unificación de las fuerzas fundamentales. Si la supersimetría es correcta, entonces las partículas supersimétricas más ligeras deben ser encontradas en el LHC.
- ▷ Las observaciones cosmológicas y astrofísicas han mostrado que toda la materia visible explica solamente el 4% del Universo. La búsqueda de partículas o fenómenos responsables para la materia oscura (23%) y energía oscura (73%) ha comenzado. Una idea popular es que la materia oscura este hecha de partículas supersimétricas neutras (aún no descubiertas).

## What are the main goals of the LHC?

Our current understanding of the Universe is incomplete. The Standard Model of particles and forces (see page 6) summarizes our present knowledge of particle physics. The Standard Model has been tested by various experiments and it has proven particularly successful in anticipating the existence of previously undiscovered particles. However, it leaves many unsolved questions, which the LHC will help to answer.

- ▶ The Standard Model does not explain the origin of mass, nor why some particles are very heavy while others have no mass at all. The answer may be the so-called Higgs mechanism. According to the theory of the Higgs mechanism, the whole of space is filled with a 'Higgs field', and by interacting with this field, particles acquire their masses. Particles that interact intensely with the Higgs field are heavy, while those that have feeble interactions are light. The Higgs field has at least one new particle associated with it, the Higgs boson. If such a particle exists, experiments at the LHC will be able to detect it.
- ▶ The Standard Model does not offer a unified description of all the fundamental forces, as it remains difficult to construct a theory of gravity similar to those for the other forces. Supersymmetry — a theory that hypothesises the existence of more massive partners of the standard particles we know — could facilitate the unification of fundamental forces. If supersymmetry is right, then the lightest supersymmetric particles should be found at the LHC.
- ▶ Cosmological and astrophysical observations have shown that all of the visible matter accounts for only 4% of the Universe. The search is open for particles or phenomena responsible for dark matter (23%) and dark energy (73%). A very popular idea is that dark matter is made of neutral — but still undiscovered — supersymmetric particles.

La primera pista de la existencia de **materia oscura** viene de 1933, cuando observaciones astronómicas y cálculos de efectos gravitatorios revelaron que debe haber más “cosas” presentes en el Universo de las que podemos contar con la vista. Los investigadores creen ahora que los efectos gravitatorios de la materia oscura hacen que las galaxias giren más rápido de lo esperado, y que su campo gravitatorio desvía la luz de los objetos detrás de él. Mediciones de estos efectos muestran la existencia de materia oscura, y pueden usarse para estimar su densidad incluso aunque no puede observarse directamente.

La **Energía Oscura** es una forma de energía que parece estar asociada con el vacío del espacio y constituye aproximadamente el 70% del Universo. La energía oscura está distribuida homogéneamente en todo el Universo y en el tiempo. En otras palabras, sus efectos no se diluyen cuando el Universo se expande. La distribución uniforme significa que la energía oscura no tiene un efecto gravitacional local, pero bastante efecto global en el Universo como un todo. Esto conduce a una fuerza repulsiva, la cual tiende a acelerar la expansión del Universo. EL grado de expansión y aceleración puede medirse mediante experimentos utilizando la ley de Hubble. Estas medidas, junto con otros datos científicos, han confirmado la existencia de la energía oscura y han sido utilizadas para estimar su cantidad.

- ▷ El LHC también nos ayudará a investigar el misterio de la antimateria. La materia y la antimateria deben haber sido producidas en la misma cantidad al principio del Big Bang, pero lo que hemos podido observar hasta el momento, nuestro Universo esta hecho sólo de materia. ¿Por qué? El LHC puede ayudarnos a obtener una respuesta.

Se creía que la antimateria era un 'reflejo' perfecto de la materia –si se reemplaza la materia con antimateria y se mira el resultado en un espejo, no se encontrarían diferencias. Ahora conocemos que la reflexión es imperfecta, y esto ha llevado a un desequilibrio de la materia-antimateria en nuestro universo.

The first hint of the existence of **dark matter** came in 1933, when astronomical observations and calculations of gravitational effects revealed that there must be more 'stuff' present in the Universe than we could account for by sight. Researchers now believe that the gravitational effect of dark matter makes galaxies spin faster than expected, and that its gravitational field deviates the light of objects behind it. Measurements of these effects show the existence of dark matter, and can be used to estimate its density even though we cannot directly observe it.

**Dark energy** is a form of energy that appears to be associated with the vacuum in space, and makes up approximately 70% of the Universe. Dark energy is homogeneously distributed throughout the Universe and in time. In other words, its effect is not diluted as the Universe expands. The even distribution means that dark energy does not have any local gravitational effects, but rather a global effect on the Universe as a whole. This leads to a repulsive force, which tends to accelerate the expansion of the Universe. The rate of expansion and its acceleration can be measured by experiments using the Hubble law. These measurements, together with other scientific data, have confirmed the existence of dark energy and have been used to estimate its quantity.

- ▶ The LHC will also help us to investigate the mystery of antimatter. Matter and antimatter must have been produced in the same amounts at the time of the Big Bang, but from what we have observed so far, our Universe is made only of matter. Why? The LHC could help to provide an answer.

It was once thought that antimatter was a perfect 'reflection' of matter — that if you replaced matter with antimatter and looked at the result as if in a mirror, you would not be able to tell the difference. We now know that the reflection is imperfect, and this could have led to the matter-antimatter imbalance in our Universe.

El límite más sólido de la cantidad de antimateria en el Universo viene del análisis de la “difusión de rayos gamma cósmicos” y de la no homogeneidad del fondo de microondas cósmico (CMB). Asumiendo que después del Big Bang, el Universo se separó de alguna manera en diferentes esferas donde cualquier materia o antimateria era dominante, es evidente que en los límites allí debería haber aniquilaciones, produciendo rayos cósmicos (gamma). Teniendo en cuenta la sección de aniquilación, distancia, y el desplazamiento al rojo cósmico, esto lleva a la predicción de la cantidad de radiación gamma difundida que debe llegar a la Tierra. El parámetro libre en el modelo es el tamaño de las esferas. Comparando con el flujo de rayos gamma observados, lleva a la exclusión de esferas de tamaño por debajo de 3,7 giga años-luz, lo cual no está muy lejos del Universo entero. Otros límites vienen de analizar la no homogeneidad en CMB – esferas de antimateria (de algún tamaño) debe causar calentamiento en los límites de las esferas y aparecer en CMB como fluctuaciones de la densidad. El valor observado de  $\sim 10^{-5}$  establece fuertes límites a la cantidad de antimateria en el Universo temprano.

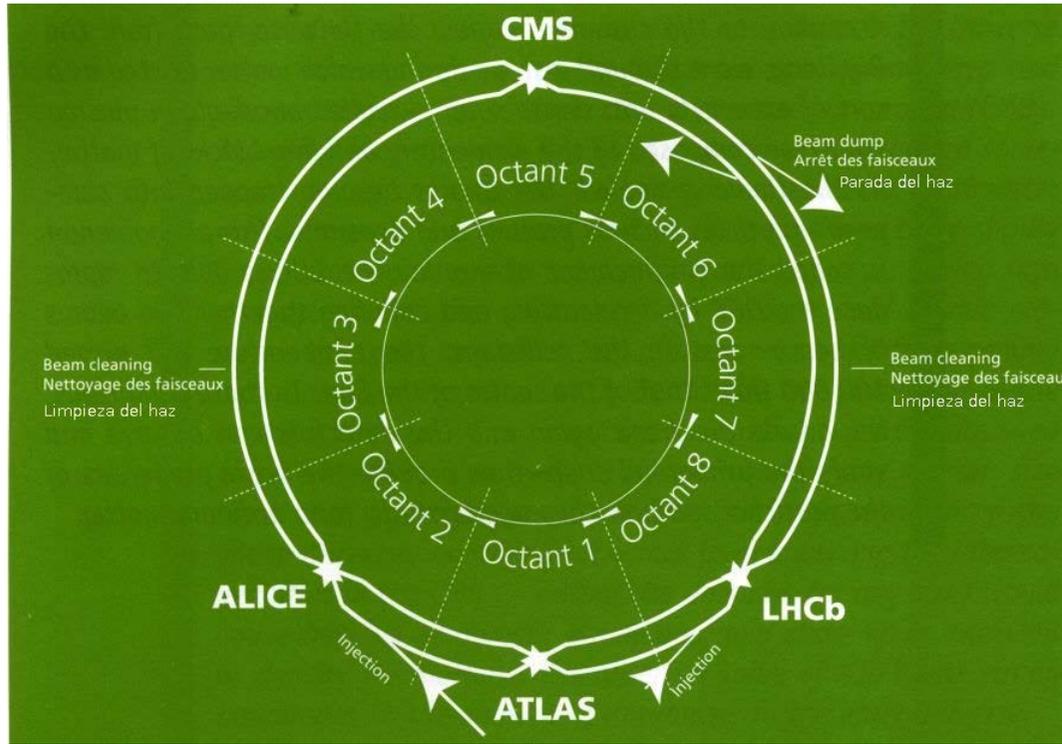
- ▷ Además de los estudios de colisiones protón-protón, las colisiones de iones pesados en el LHC proporcionarán una ventana en el estado de la materia que debía haber existido en el Universo temprano, llamada “plasma de quark-gluón”. Cuando los iones pesados colisionan a altas energías se formará por un instante una “bola de fuego”, materia densa que puede ser estudiada mediante experimentos.

*The strongest limits on the amount of antimatter in the Universe come from the analysis of the ‘diffuse cosmic gamma-rays’ and the inhomogeneities of the cosmic microwave background (CMB). Assuming that after the Big Bang, the Universe separated somehow into different domains where either matter or antimatter was dominant, it is evident that at the boundaries there should be annihilations, producing cosmic (gamma) rays. Taking into account annihilation cross-sections, distance, and cosmic redshifts, this leads to a prediction of the amount of diffuse gamma radiation that should arrive on Earth. The free parameter in the model is the size of the domains. Comparing with the observed gamma-ray flux, this leads to an exclusion of any domain size below 3.7 giga light years, which is not so far away from the entire Universe. Another limit comes from analyzing the inhomogeneities in the CMB — antimatter domains (at any size) would cause heating of domain boundaries and show up in the CMB as density fluctuations. The observed value of  $\sim 10^{-5}$  sets strong boundaries to the amount of antimatter in the early Universe.*

- ▷ In addition to the studies of proton–proton collisions, heavy-ion collisions at the LHC will provide a window onto the state of matter that would have existed in the early Universe, called ‘quark-gluon plasma’. When heavy ions collide at high energies they form for an instant a ‘fireball’ of hot, dense matter that can be studied by the experiments.

*Según las actuales teorías, el Universo, nacido del Big Bang, atravesó un estado durante el cual la materia existió como una densa sopa – llamada plasma de quark-gluón (QGP) – extremadamente caliente, compuesta de elementales bloques de construcción de la materia. Cuando el Universo se enfrió, los quark fueron atrapados en el interior de partículas compuestas como protones y neutrones. Este fenómeno es conocido como confinamiento de los quarks. El LHC es capaz de reproducir el QGP mediante la aceleración y colisión al tiempo de dos haces de iones pesados. En la colisión la temperatura excederá 100 000 veces la que hay en el centro del Sol. En estas condiciones, los quark serán libres de nuevo y los detectores podrán observar y estudiar la sopa primordial, probando de esta manera las propiedades básicas de las partículas y como se agregaron para formar la materia ordinaria.*

*According to the current theories, the Universe, born from the Big Bang, went through a stage during which matter existed as a sort of extremely hot, dense soup — called quark-gluon plasma (QGP) — composed of the elementary building blocks of matter. As the Universe cooled, the quarks became trapped into composite particles such as protons and neutrons. This phenomenon is called the confinement of quarks. The LHC is able to reproduce the QGP by accelerating and colliding together two beams of heavy ions. In the collisions, the temperature will exceed 100 000 times that of the centre of the Sun. In these conditions, the quarks are freed again and the detectors can observe and study the primordial soup, thus probing the basic properties of the particles and how they aggregate to form ordinary matter.*



¿Qué son sectores y octantes en la máquina?

El LHC no es un círculo perfecto, está construido de ocho arcos y ocho intersecciones. Los arcos contienen los dipolos magnéticos 'curvos', con 154 en cada arco. Una intersección consiste en una larga sección recta con dos regiones de transición (una a cada lado) -también llamadas 'supresoras de la dispersión'. La exacta distribución de las secciones rectas depende del uso específico de la inserción: físico (colisión de los haces en un experimento), inyección, parada de haces, limpieza de haces.

Un sector se define como la parte de la máquina entre dos puntos de inserción. Los ocho sectores son las unidades de trabajo del LHC: La instalación magnética tiene lugar sector por sector, el hardware es puesto en servicio sector por sector y todos los dipolos se conectan en serie y están en el mismo criostato continuo. La energía de cada sector es esencialmente independiente.

Un octante comienza en el medio de un arco y finaliza en el medio del siguiente arco y así atraviesa una inserción completa. Sin embargo esta descripción es más práctica cuando miramos el uso de los imanes para guiar los haces en el colisionador o a través de las secciones de inyección, parada o limpieza.

## The machine

# faq

### What are sectors and octants in the machine?

The LHC is not a perfect circle. It is made of eight arcs and eight 'insertions'. The arcs contain the dipole 'bending' magnets, with 154 in each arc. An insertion consists of a long straight section plus two (one at each end) transition regions — the so-called 'dispersion suppressors'. The exact layout of the straight section depends on the specific use of the insertion: physics (beam collisions within an experiment), injection, beam dumping, beam cleaning.

A sector is defined as the part of the machine between two insertion points. The eight sectors are the working units of the LHC: the magnet installation happens sector by sector, the hardware is commissioned sector by sector and all the dipoles of a sector are connected in series and are in the same continuous cryostat. Powering of each sector is essentially independent.

An octant starts from the middle of an arc and ends in the middle of the following arc and thus spans a full insertion. Therefore, this description is more practical when we look at the use of the magnets to guide the beams into collisions or through the injection, dumping, and cleaning sections.

## ¿Cuáles son los parámetros importantes para un acelerador?

Construimos aceleradores para estudiar procesos cuya probabilidad varía con la energía de colisión, y que son a menudo poco frecuentes. Esto significa que para los físicos el parámetro más importante es la energía del haz y el número de colisiones interesantes. Más específicamente, en un colisionador como el LHC la probabilidad para un proceso particular varía con lo que se conoce como luminosidad – una cantidad que depende del número de partículas en cada grupo (ramillete), la frecuencia de giros completos alrededor del anillo, el número de grupos de partículas y la sección del haz. En resumen, necesitamos meter el máximo número de partículas en la mínima cantidad de espacio alrededor de la región de interacción.

## ¿Cuáles son los componentes principales de un acelerador?

En un acelerador, las partículas circulan en un tubo de vacío y son manipuladas utilizando dispositivos electromagnéticos: los dipolos magnéticos mantienen a las partículas en sus órbitas casi circulares, los cuadrupolos magnéticos focalizan el haz y las cavidades resonantes electromagnéticas son los aceleradores que aceleran partículas y entonces las mantienen con una energía constante compensando la energía perdida.

### What are the important parameters for an accelerator?

We build accelerators to study processes whose probability varies with collision energy, and which are often rare. This means that for physicists the most important parameters are the beam energy and the number of interesting collisions. More specifically, in a collider such as the LHC the probability for a particular process varies with what is known as the luminosity — a quantity that depends on the number of particles in each bunch, the frequency of complete turns around the ring, the number of bunches and the beam cross-section. In brief, we need to squeeze the maximum number of particles into the smallest amount of space around the interaction region.

### What are the main ingredients of an accelerator?

In an accelerator, particles circulate in a vacuum tube and are manipulated using electromagnetic devices: dipole magnets keep the particles in their nearly circular orbits, quadrupole magnets focus the beam, and accelerating cavities are electromagnetic resonators that accelerate particles and then keep them at a constant energy by compensating for energy losses.

**El vacío en el LHC:** el LHC tiene la particularidad de no tener uno, sino tres sistemas de vacío.

- vacío aislante para el criomagnetismo
- vacío aislante para la línea de distribución del helio
- vacío para el haz

La presión en el vacío del haz será de  $10^{-13}$  atm (ultravacío) porque buscamos evitar colisiones con las moléculas del gas. El volumen más grande que hay que bombear en el LHC es en el vacío aislante para el criomagnetismo ( $\sim 9000 \text{ m}^3$  – ¡como vaciar la nave central de una catedral!)

**Imanes:** Hay una gran variedad de imanes en el LHC, incluyen dipolos, cuadrupolos, sextupolos, octupolos, decapolos, etc. dando un total de aproximadamente 9600 imanes. Cada tipo de imán contribuye a optimizar la trayectoria de las partículas. La mayoría de los imanes de corrección están incluidos en las masas enfriadas de los principales dipolos y cuadrupolos. Los imanes del LHC tienen o bien una abertura gemela (por ejemplo, los dipolos principales) o abertura única (por ejemplo, algunos de los cuadrupolos de inserción). Los cuadrupolos de inserción son unos imanes especiales utilizados para focalizar el haz hasta el menor tamaño posible en los puntos de colisión, maximizando así la posibilidad de que dos protones choquen de frente uno contra otro. El más grande de los imanes tiene 1232 dipolos.

**Cavidades:** El principal papel de las cavidades del LHC es tener el paquete de 2808 protones bien empaquetados para asegurar una alta luminosidad en los puntos de colisión y de esta manera, maximizar el número de colisiones. También entregan energía de radiofrecuencia (RF) al haz durante la aceleración hasta el máximo de energía. Las cavidades superconductoras con pérdida pequeña de energía y gran energía almacenada es la solución. El LHC usa ocho cavidades por haz, cada una entrega 2 MV (un campo acelerador de 5 MV/m) a 400 MHz. Las cavidades operan a 4,5 K (-168,7 °C) (Los imanes del LHC utilizan helio superfluido a 1,9 K o -271,3 °C). Para el LHC están agrupadas en cuatro criomódulos, con dos criomódulos por haz, e instalados a lo largo de las secciones rectas de la máquina, donde la distancia transversal entre los haces se aumenta desde los 195 mm normales a 420 mm.

**Vacuum in the LHC:** the LHC has the particularity of having not one, but three vacuum systems:

- insulation vacuum for cryomagnets
- insulation vacuum for the helium distribution line
- beam vacuum

The beam vacuum pressure will be  $10^{-13}$  atm (ultrahigh vacuum), because we want to avoid collisions with gas molecules. The largest volume to be pumped in the LHC is the insulation vacuum for the cryomagnets ( $\sim 9000 \text{ m}^3$  — like pumping down the central nave of a cathedral!)

**Magnets:** There is a large variety of magnets in the LHC, including dipoles, quadrupoles, sextupoles, octupoles, decapoles, etc. giving a total of about 9600 magnets. Each type of magnet contributes to optimizing a particle's trajectory. Most of the correction magnets are embedded in the cold mass of the main dipoles and quadrupoles. The LHC magnets have either a twin aperture (for example, the main dipoles), or a single aperture (for example, some of the insertion quadrupoles). Insertion quadrupoles are special magnets used to focus the beam down to the smallest possible size at the collision points, thereby maximizing the chance of two protons smashing head-on into each other. The biggest magnets are the 1232 dipoles.

**Cavities:** The main role of the LHC cavities is to keep the 2808 proton bunches tightly bunched to ensure high luminosity at the collision points and hence, maximize the number of collisions. They also deliver radiofrequency (RF) power to the beam during acceleration to the top energy. Superconducting cavities with small energy losses and large stored energy are the best solution. The LHC will use eight cavities per beam, each delivering 2 MV (an accelerating field of 5 MV/m) at 400 MHz. The cavities will operate at 4.5 K (-268.7°C) (the LHC magnets will use superfluid helium at 1.9 K or -271.3°C). For the LHC they will be grouped in fours in cryomodules, with two cryomodules per beam, and installed in a long straight section of the machine where the transverse interbeam distance will be increased from the normal 195 mm to 420 mm.

La siguiente tabla enumera los parámetros importantes para el LHC

Cantidad	número
Circunferencia	26 659 m
Temperatura de operación de los dipolos	1,9 K (-271,3 °C)
Número de imanes	9593
Número de dipolos principales	1232
Número de cuadrupolos principales	392
Número de cavidades RF	8 por haz
Energía nominal, protones	7 TeV
Energía nominal, iones	2,76 TeV/u (*)
Máximo campo magnético de los dipolos	8,33 T
Mínima distancia entre los paquetes	~7 m
Luminosidad de diseño	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Número de paquetes por haz de protones	2808
Número de protones por paquete (al inicio)	$1,1 \times 10^{11}$
Numero de vueltas por segundo	11 245
Número de colisiones por segundo	600 millones

(\*) Energía por nucleón

¿Por qué la energía del haz en el LHC está influenciada por la Luna como fue el caso para el acelerador LEP?

*En el LHC, la energía del haz estará influenciada por la Luna de forma muy parecida a la del LEP. La energía absoluta de colisión no es una cuestión tan crítica para el LHC como lo era para el LEP, pero las variaciones de las mareas deberán ser tenidas en cuenta cuando los haces se inyecten en el colisionador.*

The following table lists the important parameters for the LHC.

Quantity	number
Circumference	26 659 m
Dipole operating temperature	1.9 K (-271.3°C)
Number of magnets	9593
Number of main dipoles	1232
Number of main quadrupoles	392
Number of RF cavities	8 per beam
Nominal energy, protons	7 TeV
Nominal energy, ions	2.76 TeV/u (*)
Peak magnetic dipole field	8.33 T
Min. distance between bunches	~7 m
Design luminosity	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
No. of bunches per proton beam	2808
No. of protons per bunch (at start)	$1.1 \times 10^{11}$
Number of turns per second	11 245
Number of collisions per second	600 million

(\*) Energy per nucleon

**Will** the LHC beam energy be influenced by the Moon as was the case for the LEP accelerator?

At the LHC, beam energy will be influenced by the Moon in much the same way as at LEP. The absolute collision energy is not as critical an issue for the LHC experiments as it was at LEP, but the tidal variations will have to be taken into account when the beams are injected into the collider.

*El fenómeno de mareas en el océano debido a la influencia de la Luna (y en menor grado al Sol) es bien conocido. Causa que el nivel del agua en el borde del mar suba o baje con un ciclo de unas 12 horas. La tierra está también sujeta al efecto de atracción lunar porque la roca de la que está hecha es elástica. En la Luna nueva y cuando la luna está llena, la corteza de la Tierra se eleva 25 cm en el área de Ginebra bajo los efectos de esta “marea de la tierra”. Este movimiento causa una variación de 1 mm en la circunferencia del LHC (para una circunferencia total de 26,6 km) y esto produce cambios en la energía del haz. Así, los físicos deben tener en cuenta la Luna en sus medidas.*

## ¿Qué hay de especial acerca de los dipolos del LHC?

Los dipolos del LHC representan el desafío tecnológico más importante del diseño del LHC. En un acelerador de protones como el LHC, la energía máxima que puede conseguirse es directamente proporcional a la potencia del campo del dipolo, dando una específica aceleración circular. En el LHC los imanes dipolares son electroimanes superconductores y permiten proporcionar un campo muy alto de 8,3 T sobre su longitud. No se hubiera podido diseñar una solución práctica utilizando imanes “templados” en vez de superconductores.

Los dipolos del LHC utilizan cables de Niobio-titanio (NbTi), los cuales se convierten en superconductores a la temperatura de 10 K (-263,2 °C), esto es, conducen la electricidad sin resistencia. De hecho, el LHC opera a 1,9 K (-271,3 °C), que es incluso inferior a la temperatura del espacio exterior (2,7 K). Una corriente 11.700 A fluye en los dipolos, para crear un campo magnético de 8,3 T requerido para curvar el haz de 7 TeV a lo largo de 27 km del anillo del LHC. Si se hiciese trabajar a los imanes a la temperatura de 4,5 K (-268,7 °C), producirían un campo magnético de solo 6,8 T. En comparación, el promedio de la corriente máxima en una casa familiar es de unos 100A.

*The phenomenon of tides in the ocean due to the influence of the Moon (and to a lesser extent that of the Sun) is well known. They cause the level of water on the edge of the sea to rise and fall with a cycle of some 12 hours. The ground is also subject to the effect of lunar attraction because the rocks that make it up are elastic. At the new Moon and when the Moon is full, the Earth's crust rises by some 25 cm in the Geneva area under the effect of these 'ground tides'. This movement causes a variation of 1 mm in the circumference of the LHC (for a total circumference of 26.6 km) and this produces changes in beam energy. Thus, physicists must take the Moon into account in their measurements.*

## What is so special about the LHC dipoles?

The dipoles of the LHC represented the most important technological challenge for the LHC design. In a proton accelerator like the LHC, the maximum energy that can be achieved is directly proportional to the strength of the dipole field, given a specific acceleration circumference. At the LHC the dipole magnets are superconducting electromagnets and able to provide the very high field of 8.3 T over their length. No practical solution could have been designed using 'warm' magnets instead of superconducting ones.

The LHC dipoles use niobium-titanium (NbTi) cables, which become superconducting below a temperature of 10 K (-263.2°C), that is, they conduct electricity without resistance. In fact, the LHC will operate at 1.9 K (-271.3°C), which is even lower than the temperature of outer space (2.7 K or -270.5°C). A current of 11 850 A flows in the dipoles, to create the high magnetic field of 8.33 T, required to bend the 7 TeV beams around the 27-km ring of the LHC. If the magnets were made to work at a temperature of 4.5 K (-268.7°C), they would produce a magnetic field of only 6.8 T. For comparison, the total maximum current for an average family house is about 100 A.

La temperatura de 1,9 K (-271,3 °C) se alcanza bombeando helio superfluido en el interior del sistema de imanes. Cada dipolo es de 15 m de longitud y pesa alrededor de 35 t.

*Las bobinas magnéticas para el LHC están enrolladas (devanadas) por un cable de 35 pares de hilos de 15 mm, cada hilo esta hecho enrollando 6400 filamentos individuales, cada filamento tiene un diámetro tan pequeño como 7 micrómetros. (En comparación, un cabello humano tiene sobre 50 micrómetros de grueso). Los 27 km de circunferencia del LHC requiere unos 7600 km de cable, correspondiendo aproximadamente a 270 000 km de hilos – suficiente para rodear la Tierra seis veces en el ecuador, Si todos los filamentos fueran desenrollados, llegarían hasta el Sol y 5 veces más quedando suficiente cable como para hacer unos pocos traslados a la luna (ver Dato 2, página 52)*

### ¿Qué tiene de especial el sistema criogénico?

*EL LHC es el mayor sistema criogénico del mundo y uno de los lugares más fríos de la Tierra. Tal es la baja temperatura que se requiere para funcionar los imanes que mantienen los protones en movimiento (ver la pregunta ¿Qué hay de especial sobre los dipolos del LHC?). Para mantener este anillo de 27 km (47 000 toneladas de material en cada uno de los ocho sectores) con helio superfluido (1,9 K, -272,3 °C), el sistema criogénico del LHC debe suministrar una capacidad de refrigeración sin precedentes – unos 150 kW para los refrigeradores a 4,5 K y 20 kW para los de 1,9 K. El diseño para este sistema de enfriamiento está basado en cinco “islas criogénicas”. Cada “isla” debe distribuir el refrigerante y llevar kilovatios de refrigeración a una gran distancia. El proceso completo de enfriamiento lleva unas pocas semanas.*

The temperature of 1.9 K (-271.3°C) is reached by pumping superfluid helium into the magnet systems. Each dipole is 15 m long and weighs around 35 t.

*The magnet coils for the LHC are wound from a cable consisting of up to 36 twisted 15-mm strands, each strand being made up in turn of 6000-9000 individual filaments, each filament having a diameter as small as 7 micrometres (for comparison, a human hair is about 50 micrometres thick). The 27-km circumference of the LHC calls for some 7600 km of cable, corresponding to about 270 000 km of strand — enough to circle the Earth six times at the Equator. If all the component filaments were unravelled, they would stretch to the Sun and back five times with enough left over for a few trips to the Moon (see Fact 2, page 52).*

### What is so special about the cryogenic system?

The LHC is the largest cryogenic system in the world and one of the coldest places on Earth. Such a cold temperature is required to operate the magnets that keep the protons on course (see question: “what is so special about the LHC dipoles?”). To maintain its 27-km ring (4700 tonnes of material in each of the eight sectors) at superfluid helium temperature (1.9 K, -271.3°C), the LHC’s cryogenic system will have to supply an unprecedented total refrigeration capacity — some 150 kW for refrigerators at 4.5 K and 20 kW for those at 1.9 K. The layout for the refrigeration system is based on five ‘cryogenic islands’. Each ‘island’ must distribute the coolant and carry kilowatts of refrigeration over a long distance. The whole cooling process will take a few weeks.

EL proceso de enfriamiento transcurre en tres fases:

- 1) enfriar hasta 4,5 K (-268,7 °C)
- 2) llenar con helio líquido los imanes
- 3) enfriar finalmente a 1,9 K (-271,3 °)

La primera fase tiene lugar en dos etapas: primero el helio es enfriado en los refrigeradores intercambiadores de calor hasta 80 K utilizando aproximadamente 10 000 t de nitrógeno líquido. Entonces las turbinas bajan la temperatura del helio hasta los 4,5 K (-268,7 °C), listo para inyectarlo en los imanes. Una vez que están llenos, las unidades de enfriamiento bajan la temperatura hasta 1,9 K (-271,3 °). En total se necesitan 120 t de helio, de las cuales unas 90 t se utilizan en los imanes y el resto en las tuberías y unidades de enfriamiento.

El nitrógeno líquido nunca se inyecta directamente en el LHC para evitar una posible fuente de asfixia en el túnel subterráneo

## ¿Por qué helio superfluido?

*La elección de la temperatura de funcionamiento para el LHC se hizo tanto con las super propiedades del helio como con las propiedades superconductoras de la aleación de niobio-titanio de los imanes. A presión atmosférica el gas helio se transforma en líquido aproximadamente a 4,2 K (-269,0 °) pero cuando es enfriado aún más en una segunda fase, a 2,17 K (-271,0 °) cambia al estado superfluido. Entre muchas propiedades destacables, el helio superfluido tiene una gran conductividad térmica, lo cual hace que sea elegido como refrigerante para enfriar y estabilizar el sistema de superconductores (ver también la cuestión ¿Que hay en especial en el sistema criogénico?).*

The refrigeration process happens in three phases:

- 1) cool down to 4.5 K (-268.7°C),
- 2) filling with liquid helium of the magnet cold masses
- 3) final cool down to 1.9 K (-271.3°C).

The first phase happens in two steps: first helium is cooled in the refrigerators' heat exchangers to 80 K by using about 10 000 t of liquid nitrogen. Then refrigerator turbines bring the helium temperature down to 4.5 K (-268.7°C), ready for injection into the magnets' cold masses. Once the magnets are filled, the refrigeration units bring the temperature down to 1.9 K (-271.3°C). In total, about 120 t of helium will be needed, of which about 90 t will be used in the magnets and the rest in the pipes and refrigerator units.

Liquid nitrogen is never directly injected into the LHC to avoid any possible source of asphyxiation in the underground tunnel.

## Why superfluid helium?

The choice of the operating temperature for the LHC has as much to do with the 'super' properties of helium as with those of the superconducting niobium-titanium alloy in the magnet coils. At atmospheric pressure helium gas liquefies at around 4.2 K (-269.0 °C), but when it is cooled further it undergoes a second phase change at about 2.17 K (-271.0 °C) to its 'superfluid' state. Among many remarkable properties, superfluid helium has a very high thermal conductivity, which makes it the coolant of choice for the refrigeration and stabilization of large superconducting systems (see also question : "What is so special about the cryogenic system?").

*En resumen la criogenia del LHC necesita unas 40 000 juntas de unión entre las tuberías, y 120 t de helio necesario para que los imanes del LHC puedan funcionar a 1,9 K. El 60% del helio será para enfriar la masa de los imanes mientras que el restante 40% se compartirá entre el sistema de distribución y de refrigeración. Durante una operación normal la mayor parte del helio circulará en circuitos cerrados de refrigeración. Sin embargo, cada año, un cierto porcentaje de las existencias se pierden debido a las paradas en la instalación, fugas a la atmósfera, preparación de las instalaciones y problemas operacionales.*

## ¿Qué podemos decir sobre los paquetes?

Los protones del LHC circulan alrededor del anillo en paquetes bien definidos. La estructura del paquete de un acelerador moderno es consecuencia directa del plan de aceleración de radiofrecuencia (RF). Los protones solo pueden ser acelerados cuando el campo de radiofrecuencia tiene la orientación correcta cuando las partículas pasan a través de la cavidad de aceleración, lo cual sucede en un momento muy concreto durante un ciclo RF.

En el LHC, operando en condiciones normales, cada haz de protones tiene 2808 paquetes y cada paquete contiene sobre  $10^{11}$  protones.

*El tamaño del paquete no es constante alrededor del anillo. Cada paquete, como circula a través del LHC, se comprime o expande -por ejemplo, se comprime lo máximo posible alrededor de los puntos de interacción para incrementar la probabilidad de una colisión. Los paquetes de partículas miden unos pocos centímetros de largo y unos milímetros de ancho cuando están lejos de un punto de colisión. Sin embargo, cuando se aproximan a un punto de colisión, tienen una compresión de aproximadamente de 16  $\mu\text{m}$  (un cabello humano tiene unos 50  $\mu\text{m}$  de ancho) para obtener una gran posibilidad de colisión protón-protón. Incrementar el número de paquetes es una de las formas de aumentar la luminosidad en la máquina. El LHC utiliza un espaciado de paquetes de*

*In all, LHC cryogenics will need some 40 000 leak-tight pipe junctions, and 120 t of helium will be required by the LHC machine to keep the magnets at their operating temperature of 1.9 K. 60% of the helium will be in the magnet cold masses while the remaining 40% will be shared between the distribution system and the refrigerators. During normal operation most of the helium will circulate in closed refrigeration loops. Nevertheless, each year, a certain percentage of the inventory could be lost due to facility stops, leakage to the atmosphere, conditioning of installations and operational problems.*

## Why

### do we talk about bunches?

The protons of the LHC circulate around the ring in well-defined bunches. The bunch structure of a modern accelerator is a direct consequence of the radio frequency (RF) acceleration scheme. Protons can only be accelerated when the RF field has the correct orientation when particles pass through an accelerating cavity, which happens at well specified moments during an RF cycle.

In the LHC, under nominal operating conditions, each proton beam has 2808 bunches, with each bunch containing about  $10^{11}$  protons.

The bunch size is not constant around the ring. Each bunch, as it circulates around the LHC, gets squeezed and expanded—for instance it gets squeezed as much as possible around the interaction points to increase the probability of a collision. Bunches of particles measure a few centimetres long and a millimetre wide when they are far from a collision point. However, as they approach the collision points, they are squeezed to about 16  $\mu\text{m}$  (a human hair is about 50  $\mu\text{m}$  thick) to allow for a greater chance of proton-proton collisions. Increasing the number of bunches is one of the ways to increase luminosity in a machine. At full luminosity the LHC uses

25 ns (o aproximadamente 7 m), que presenta muchos retos técnicos (El predecesor del LHC, el LEP, operaba con solo 4 paquetes).

*El espaciado de los paquetes de 25 ns corresponde a la frecuencia de 40 Mhz, lo cual implica que estos paquetes deben pasar por cada punto de colisión en el LHC 40 millones de veces por segundo. Sin embargo, por razones prácticas, hay varios huecos en el modelo de paquetes, lo que permite mayor tiempo para, por ejemplo, que los imanes deflectores se pongan en marcha para inyectar o rechazar haces. La tasa media de cruce es igual al número total de paquetes multiplicado por el número de vueltas alrededor del LHC por segundo:  $2808 \times 11245 = 31,6$  Mhz*

### ¿Cuántas colisiones por segundo tienen lugar en el LHC?

Cada haz consta de cerca de 3000 paquetes de partículas y cada uno contiene casi 100 billones de partículas. Estas son tan pequeñas que la posibilidad de que dos colisionen es mínima. Cuando los paquetes se cruzan, habrá del orden de 20 colisiones entre 200 billones de partículas. Los paquetes se cruzan alrededor de 30 millones de veces por segundo (ver la pregunta anterior), de manera que el LHC generará hasta 600 millones de colisiones por segundo.

### ¿Cuánto tiempo duran los haces en el acelerador?

*Un haz puede circular unas 10 horas, viajando más de 10 billones de kilómetros, suficiente para llegar al planeta Neptuno y volver de nuevo. A casi la velocidad de la luz, un protón en el LHC dará 11245 vueltas cada segundo.*

a bunch spacing of 25 ns (or about 7 m), which introduces many technical challenges. (The LHC's predecessor, LEP, operated with as few as 4 bunches).

*The bunch spacing of 25 ns corresponds to a frequency of 40 MHz, which implies that bunches should pass each of the collision points in the LHC 40 million times a second. However, for practical reasons there are several bigger gaps in the pattern of bunches, which allow time for example for the 'kicker' magnets to come on in order to inject or dump beam. The average crossing rate is equal to the total number of bunches multiplied by the number of turns round the LHC per second:  $2808 \times 11245 = 31.6$  MHz.*

### How many collisions per second take place at the LHC?

Each beam will consist of nearly 3000 bunches of particles and each bunch will contain as many as 100 billion particles. The particles are so tiny that the chance of any two colliding is very small. When the bunches cross, there will be a maximum of about 20 collisions between 200 billion particles. Bunches will cross on average about 30 million times per second (see previous question), so the LHC will generate up to 600 million particle collisions per second.

### How long do the beams last in the accelerator?

A beam might circulate for 10 hours, travelling more than 10 billion kilometres, enough to get to the planet Neptune and back again. At near light-speed, a proton in the LHC will make 11 245 circuits every second.

## Detectores

### ¿Cómo podemos ver partículas?

Para cada colisión, la meta de los físicos es contar, trazar y caracterizar todas las diferentes partículas que se producen con el fin de reconstruir el proceso completamente. Precisamente la trayectoria de las partículas de mucha información útil, especialmente si el detector está colocado en el interior de un campo magnético: la carga de las partículas, por ejemplo, serán evidentemente desde partículas cargadas positivamente que se curvaran de una forma y otras con carga eléctrica negativa que se curvaran en sentido contrario. También el momento de las partículas (la "cantidad de movimiento" que es igual al producto de la masa por la velocidad) puede determinarse: muchas partículas con alto momento se mueven casi en líneas recta, partículas con bajo momento describen espirales apretadas.

	Cámara de trazas	Calorímetro electromagnético	Calorímetro de hadrones	Detector de muones
Fotones				
Electrones y positrones				
Muones				
Piones o protones				
Neutrones				

## Detectors

# faq

### How do we see particles?

For each collision, the physicist's goal is to count, track and characterize all the different particles that were produced in order to reconstruct the process in full. Just the track of the particle gives much useful information, especially if the detector is placed inside a magnetic field: the charge of the particle, for instance, will be obvious since particles with positive electric charge will bend one way and those with negative charge will bend the opposite way. Also the momentum of the particle (the 'quantity of motion', which is equal to the product of the mass and the velocity) can be determined: very high momentum particles travel in almost straight lines, low momentum particles make tight spirals.

	Tracking chamber	Electromagnetic calorimeter	Hadron calorimeter	Muon detector
Photons				
Electrons or positrons				
Muons				
Pions or protons				
Neutrons				

## ¿Qué detectores hay en el LHC?

Hay seis experimentos instalados en el LHC: Un “*Large Ion Collider Experiment*” (ALICE), ATLAS, el “*Compact Muon Solenoid*” (CMS), el “*Large Hadron Collider beauty*” (LHCb), el experimento “*Large Hadron Collider forward*” (LHCf) y el experimento “*TOTAL Elastic and diffractive cross section Measurement*” (TOTEM). ALICE, ATLAS, CMS y LHCb están instalados en cuatro enormes cavernas subterráneas construidas alrededor de cuatro puntos de colisión de los haces del LHC. TOTEM está instalado cerca del punto de interacción CMS y LHCf será instalado cerca de ATLAS.

## ¿Qué es ALICE?

ALICE es un detector especializado en analizar las colisiones de iones. Estudiara las propiedades del plasma de quark-gluón, un estado de la materia donde los quarks y los gluones, bajo condiciones de muy alta temperatura y densidad, no están confinados dentro de los hadrones. Así tal estado de materia probablemente existió justo después del Big Bang, antes de que las partículas como los protones y los neutrones se formasen. La colaboración internacional incluye más de 1500 miembros de 104 institutos en 31 países (julio 2007)

Tamaño	26 m de largo, 16 m de alto, 16 m de ancho
Peso	10 000 toneladas
Diseño	Un tubo central con un simple brazo hacia el espectrómetro de muones
Coste del material	115 MCHF
Localización	St Genis-Poilley, Francia

para más información, visite: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/>

## What are the detectors at the LHC?

There are six experiments installed at the LHC: A Large Ion Collider Experiment (ALICE), ATLAS, the Compact Muon Solenoid (CMS), the Large Hadron Collider beauty (LHCb) experiment, the Large Hadron Collider forward (LHCf) experiment and the TOTAl Elastic and diffractive cross section Measurement (TOTEM) experiment. ALICE, ATLAS, CMS and LHCb are installed in four huge underground caverns built around the four collision points of the LHC beams. TOTEM will be installed close to the CMS interaction point and LHCf will be installed near ATLAS.

## What is ALICE?

ALICE is a detector specialized in analysing lead-ion collisions. It will study the properties of quark-gluon plasma, a state of matter where quarks and gluons, under conditions of very high temperatures and densities, are no longer confined inside hadrons. Such a state of matter probably existed just after the Big Bang, before particles such as protons and neutrons were formed. The international collaboration includes more than 1500 members from about 100 institutes in about 30 countries (updated figures are available from <http://graybook.cern.ch>).

Size	26 m long, 16 m high, 16 m wide
Weight	10 000 tonnes
Design	central barrel plus single arm forward muon spectrometer
Material cost	115 MCHF
Location	St Genis-Pouilly, France.

For more information, visit: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/>

## ¿Qué es ATLAS?

ATLAS es un detector de propósito general diseñado para cubrir el espectro más ancho posible de física en el LHC, desde la búsqueda del bosón de Higgs a la supersimetría (SUSY) y extra dimensiones. La mayor característica del detector ATLAS es su enorme sistema de imanes en forma de rosquilla. Este consiste en ocho imanes superconductores anulares de 25 m de largo, organizados desde un cilindro alrededor del conducto del haz que atraviesa el centro del detector. ATLAS es el detector de colisiones de mayor volumen jamás construido. La colaboración consiste en más de 1900 miembros de 164 instituciones en 35 países (Abril 2007).

Tamaño	46 m de largo, 25 m de alto y 25 m de ancho
Peso	7000 toneladas
Diseño	tubo mas las tapas
Coste del material	540 MCHF
Localización	Meyrin, Suiza

Para más información, visitar <http://atlas.ch/>

## What is ATLAS?

ATLAS is a general-purpose detector designed to cover the widest possible range of physics at the LHC, from the search for the Higgs boson to supersymmetry (SUSY) and extra dimensions. The main feature of the ATLAS detector is its enormous doughnut-shaped magnet system. This consists of eight 25-m long superconducting magnet coils, arranged to form a cylinder around the beam pipe through the centre of the detector. ATLAS is the largest-volume collider-detector ever constructed. The collaboration consists of more than 2000 members from about 160 institutes in more than 30 countries (updated figures are available from <http://graybook.cern.ch>).

Size	46 m long, 25 m high and 25 m wide
Weight	7000 tonnes
Design	barrel plus end caps
Material cost	540 MCHF
Location	Meyrin, Switzerland.

For more information, visit: <http://atlas.ch/>

## ¿Qué es CMS?

CMS es un detector de propósito general con el mismo propósito físico que ATLAS, pero diferentes soluciones técnicas y diseño. Está construido alrededor de un enorme solenoide superconductor. Este tiene la forma de un anillo cilíndrico de cable superconductor que genera un campo magnético de 4 T, aproximadamente 100 000 veces mayor que el de la Tierra. Más de 200 personas trabajan para CMS, de 181 instituciones en 38 países (mayo 2007)

Tamaño	21 m de largo, 15 m de alto y 15 m de ancho
Peso	12 500 toneladas
Diseño	Tubo mas las tapas
Coste del material	500 MCHF
Localización	Cessy, Francia

Para más información, visitar <http://cmsinfo.cern.ch/outreach/>

## What is CMS?

CMS is a general-purpose detector with the same physics goals as ATLAS, but different technical solutions and design. It is built around a huge superconducting solenoid. This takes the form of a cylindrical coil of superconducting cable that will generate a magnetic field of 4 T, about 100 000 times that of the Earth. More than 2000 people work for CMS, from about 180 institutes in more than 35 countries (updated figures are available from <http://graybook.cern.ch>).

Size	21 m long, 15 high m and 15 m wide.
Weight	12 500 tonnes
Design	barrel plus end caps
Material cost	500 MCHF
Location	Cessy, France.

For more information, visit: <http://cmsinfo.cern.ch/outreach/>

## ¿Qué es LHCb?

El LHCb se especializa en el estudio de la ligera asimetría entre materia y antimateria presente en interacciones de partículas  $\beta$  (partículas que contienen el quark b). Comprenderlo debe resultar inestimable para responde a la pregunta: “¿Por qué nuestro Universo esta hecho de la materia que observamos?” En vez de rodear el punto de colisión completo con un detector cerrado, el experimento LHCb utiliza una serie de subdetectores para detectar principalmente las partículas adelantadas. El primer subdetector se construye alrededor del punto de colisión, mientras que los siguientes van uno detrás de otro en una longitud de 20 m. La colaboración del LHCb tiene más de 650 miembros de 47 instituciones en 14 países (Mayo 2007)

Tamaño	21 m de largo, 10 m de alto y 13 m de ancho
Peso	5600 toneladas
Diseño	espectrómetro progresivo con detectores planos
Coste del material	75 MCHF
Localización	Ferney-Voltaire, France

Para más información, visitar: <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>

## What is LHCb?

LHCb specializes in the study of the slight asymmetry between matter and antimatter present in interactions of B-particles (particles containing the b quark). Understanding it should prove invaluable in answering the question: “Why is our Universe made of the matter we observe?” Instead of surrounding the entire collision point with an enclosed detector, the LHCb experiment uses a series of sub-detectors to detect mainly forward particles. The first sub-detector is built around the collision point, the next ones stand one behind the other, over a length of 20 m. The LHCb collaboration has more than 650 members from about 45 institutes in about 15 countries (updated figures are available from <http://graybook.cern.ch>).

Size	21m long, 10m high and 13m wide
Weight	5600 tonnes
Design	forward spectrometer with planar detectors
Material cost	75 MCHF
Location	Ferney-Voltaire, France.

For more information, visit: <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>

## ¿Qué es LHCf?

LHCf es un pequeño experimento que medirá las partículas producidas muy cerca de la dirección del haz en las colisiones protón-protón en el LHC. El motivo es comprobar los modelos utilizados para estimar la energía primaria de los rayos cósmicos de ultra energéticos. Tiene detectores a 140 m del punto de colisión de ATLAS. La colaboración tiene 21 miembros de 10 institutos en 6 países (figuras actualizadas se encuentran disponibles en <http://graybook.cern.ch> )

Tamaño	dos detectores, de 30 cm de longitud cada uno, 10 cm de alto, 10 cm de ancho
Peso	40 kg cada uno
Localización	Meyrin, Suiza (cerca de ATLAS)

Para más información, visitar: <http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf/>

## What is LHCf?

LHCf is a small experiment that will measure particles produced very close to the direction of the beams in the proton-proton collisions at the LHC. The motivation is to test models used to estimate the primary energy of the ultra high-energy cosmic rays. It will have detectors 140 m from the ATLAS collision point. The collaboration has about 20 members from about 10 institutes in 6 countries (updated figures are available from <http://graybook.cern.ch>).

Size	two detectors, each measures 30 cm long, 10 cm high, 10 cm wide
Weight	40 kg each
Location	Meyrin, Switzerland (near ATLAS).

For more information visit: <http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf/>



## ¿Qué es TOTEM?

TOTEM medirá el tamaño efectivo o “sección transversal” de los protones en LHC. Para hacer esto TOTEM debe ser capaz de detectar partículas producidas muy próximas al haz de LHC. Incluye detectores alojados en cámaras de vacío especialmente diseñadas llamadas “Ollas romanas”, las cuales están conectadas a la línea del haz del LHC. Ocho Olla Romana se colocarían en pares de cuatro localizaciones cerca del punto de colisión del experimento CMS. TOTEM tiene más de 70 miembros de 10 institutos en 7 países (las figuras actualizadas se encuentran disponibles en <http://graybook.cern.ch> )

Tamaño	440 m de largo, 5 m de alto y 5 m de ancho
Peso	20 toneladas
Diseño	Olla romana y detectores GEM y cámara de bandas catódicas
Coste del material	6,5 MCHF
Localización	Cessy, Francia (cerca CMS)

Para más información visitar: <http://totem.web.cern.ch/Totem/>

## What is TOTEM?

TOTEM will measure the effective size or ‘cross-section’ of the proton at LHC. To do this TOTEM must be able to detect particles produced very close to the LHC beams. It will include detectors housed in specially designed vacuum chambers called ‘Roman pots’, which are connected to the beam pipes in the LHC. Eight Roman pots will be placed in pairs at four locations near the collision point of the CMS experiment. TOTEM has more than 70 members from 10 institutes in 7 countries (updated figures are available from <http://graybook.cern.ch>).

Size	440 m long, 5 m high and 5 m wide
Weight	20 tonnes
Design	roman pot and GEM detectors and cathode strip chambers
Material cost	6.5 MCHF
Location	Cessy, France (near CMS)

For more information visit: <http://totem.web.cern.ch/Totem/>



## ¿Que impone la forma general del detector de partículas LHC?

Un moderno detector de física de altas energías de uso general, tal como el ATLAS o CMS, necesita ser hermético, de modo que hay solo una pequeña probabilidad de que una partícula (detectable) escape sin ser detectada a través de una región que no está instrumentada. Por conveniencias técnicas, los detectores de partículas más modernos como el LHC adoptan el diseño de “barril con tapas” donde un detector cilíndrico cubre la región central y dos tapas planas circulares cubren los ángulos primos al haz (región delantera). ALICE y LHCb tienen formas asimétricas como se centran en áreas más específicas de la física.

## ¿Cuáles son los componentes principales de un detector?

El fin de los grandes detectores instalados en LHC es identificar las partículas secundarias producidas en las colisiones, y medir su posición en el espacio, su carga, velocidad, masa y energía. Para hacer esto, los detectores tienen muchas capas o “sub-detectores” que tienen cada una su papel particular en la reconstrucción de la colisión. Un sistema de imanes completa el diseño. Estas funciones son para separar las diferentes partículas de acuerdo con su carga y permitir la medida de su momento – una cantidad física unida a la masa y velocidad de la partícula.

Hay dos categorías importantes de subdetectores

- ▶ Los **dispositivos de trazas** dejan ver las trazas de las partículas cargadas eléctricamente a través de las huellas de quejan en la materia ionizada. Puede utilizarse un campo magnético para medir la curvatura de las trayectorias de las partículas y por lo tanto el momento de las partículas. Esto puede ayudar a identificar la partícula. Los más modernos dispositivos de trazas no hacen la traza directamente visible. En su lugar, producen señales eléctricas que pueden ser almacenadas en un ordenador. Programas de ordenador reconstruyen los patrones de las trazas almacenadas.

### What dictates the general shape of the LHC particle detectors?

A modern general-purpose high-energy physics detector, such as ATLAS or CMS, needs to be hermetic, so that there is only a small probability of a (detectable) particle escaping undetected through a region that is not instrumented. For engineering convenience, most modern detectors at particle colliders like the LHC adopt the ‘barrel plus endcaps’ design where a cylindrical detector covers the central region and two flat circular ‘endcaps’ cover the angles close to the beam (the forward region). ALICE and LHCb have asymmetric shapes as they focus on more specific areas of physics.

### What are the main components of a detector?

The purpose of the large detectors installed at the LHC is to identify the secondary particles produced in collisions, and to measure their positions in space, their charges, speed, mass and energy. To do this, the detectors have many layers or ‘sub-detectors’ that each have a particular role in the reconstruction of collisions. A magnet system completes the design. Its function is to separate the different particles according to their charge and to allow the measurement of their momentum — a physical quantity linked to the mass and speed of the particle.

There are two important categories of subdetector:

- ▶ **Tracking devices** reveal the tracks of electrically charged particles through the trails they leave by ionizing matter. In a magnetic field they can be used to measure the curvature of a particle’s trajectory and hence the particle’s momentum. This can help in identifying the particle. Most modern tracking devices do not make the tracks directly visible. Instead, they produce electrical signals that can be recorded as computer data. A computer program reconstructs the patterns of tracks recorded.

Dos tipos especiales de dispositivos de trazas son detectores de vértice y cámaras de muones. Los detectores de vértices se colocan cerca del punto de interacción (vértice primario); las cámaras de muones están localizadas en las capas exteriores del conjunto del detector porque los muones son las únicas partículas cargadas capaces de atravesar a través de metros de densa materia.

Hay dos técnicas principales utilizadas para construir el dispositivo de trazas.

- ▷ *Cámaras gaseosas, donde el medio ionizado es un gas y los iones o electrones son recogidas en electrodos normalmente en forma de varillas o almohadillas bajo fuertes campos eléctricos. En las cámaras de deriva, la posición de la traza se encuentra por la medida del tiempo lleva a un electrón alcanzar un ánodo de alambre, medido desde el momento en que la partícula cargada pasa a través de ella. Este resultado tiene una alta resolución espacial para anchas separaciones de los hilos: las celdas de deriva son normalmente de varios centímetros de ancho, dando una resolución espacial de 50-100  $\mu\text{m}$ . En una cámara de proyección el volumen de deriva es mucho más largo, hasta 2 m o más, y el sentido de los hilos está organizado en una superficie final.*
- ▷ *Detectores semiconductores, donde las partículas crean electrones y huecos que pasan a través de la unión del semiconductor, normalmente silicio. Los dispositivos están subdivididos en franjas o píxeles; la resolución normal es 10  $\mu\text{m}$ .*
- ▷ *Los **Calorímetros** son dispositivos que miden la energía de partículas, deteniéndolas y midiendo la cantidad de energía liberada. Hay dos tipos principales de calorímetros: electromagnéticos (ECAL) y hadrónicos (HCAL). Utilizan diferentes materiales dependiendo de qué tipo de partículas tienen que detener. EL ECAL generalmente absorbe totalmente electrones y fotones, los cuales interactúan fácilmente a través de la fuerza electromagnética. La interacción fuerte de partículas (hadrones), tales como protones y piones, pueden empezar a perder energía en el ECAL, pero son detenidos en el HCAL. Muones (y neutrinos) pasaran a través de ambas capas. Los calorímetros proporcionan la principal forma de identificar las partículas neutras como los fotones y neutrones, aunque no sean visibles en los dispositivos de trazas, son descubiertos por la energía que depositan en los calorímetros.*

Two specialized types of tracking devices are vertex detectors and muon chambers. Vertex detectors are located close to the interaction point (primary vertex); muon chambers are located at the outer layers of a detector assembly because muons are the only charged particles able to travel through metres of dense material.

There are two main techniques used to build tracking devices:

- ▶ *Gaseous chambers, where the medium ionized is a gas and the ions or electrons are collected on electrodes usually in the form of wires or pads under strong electric fields. In drift chambers, the position of the track is found by timing how long the electrons take to reach an anode wire, measured from the moment that the charged particle passed through. This results in higher spatial resolution for wider wire separation: drift cells are typically several centimetres across, giving a spatial resolution of 50-100  $\mu\text{m}$ . In a time projection chamber the drift volume is much larger, up to 2 m or more, and the sense wires are arranged on one end face.*
  - ▶ *Semiconductor detectors, where the particle creates electrons and holes as it passes through a reverse-biased semiconductor, usually silicon. The devices are subdivided into strips or pixels; typical resolution is 10  $\mu\text{m}$ .*
- ▶ **Calorimeters** are devices that measure the energy of particles by stopping them and measuring the amount of energy released. There are two main types of calorimeter: electromagnetic (ECAL) and hadronic (HCAL). They use different materials depending on which type of particle they are stopping. The ECAL generally fully absorbs electrons and photons, which interact readily through the electromagnetic force. Strongly interacting particles (hadrons), such as protons and pions, may begin to lose energy in the ECAL but will be stopped in the HCAL. Muons (and neutrinos) will pass through both layers. Calorimeters provide the main way to identify neutral particles such as photons and neutrons; although they are not visible in tracking devices, they are revealed by the energy they deposit in the calorimeters.

Los calorímetros consisten normalmente de capas de material de alta densidad “pasiva” o “absorbente” (plomo por ejemplo) intercaladas en capas de un medio “activo” tal como vidrio de plomo sólido o argón líquido.

Los detectores a menudo también tienen subdetectores para medir la velocidad de las partículas cargadas, un factor esencial para la identificación de partículas.

Hay dos métodos importantes para medir la velocidad de las partículas:

- ▷ *Radiación Cherenkov: cuando partículas cargadas atraviesan un medio por encima de cierta velocidad, emiten fotones con un ángulo específico que depende de la velocidad. Cuando se combina con la medida del momento de la partícula la velocidad puede ser utilizada para determinar la masa y de ahí identificar la partícula. Para que la emisión de Cherenkov ocurra la partícula debe viajar a una velocidad mayor que la de la luz en el medio.*
- ▷ *Radiación de transición: cuando una partícula relativista con carga atraviesa un medio no homogéneo, en particular el límite entre materiales con propiedades eléctricas diferentes, emite más o menos radiación en proporción a su energía. Esto permite distinguir unas partículas de otras.*

## ¿Cuál será la tasa de producción del bosón de Higgs en el LHC?

*Aunque el número de colisiones de partículas en el LHC será muy alto, la tasa de producción del Higgs será tan pequeña que los físicos esperan tener suficientes estadísticas solo después de aproximadamente 2 o 3 años de obtención de datos. La tasa de producción del bosón de Higgs depende totalmente del modelo teórico y los cálculos utilizados para evaluarle. Bajo buenas condiciones, hay expectativas de tener uno cada pocas horas de experimentos. Lo mismo se aplica a las partículas supersimétricas. Los físicos esperan tener los primeros resultados positivos en aproximadamente un año de toma de datos a luminosidad completa.*

*Calorimeters typically consist of layers of ‘passive’ or ‘absorbing’ high density material (lead for instance) interleaved with layers of ‘active’ medium such as plastic scintillators or liquid argon.*

Detectors also often have sub-detectors measuring the speed of charged particles, an essential factor for particle identification.

*There are two important methods for measuring the velocity of particles:*

- ▶ *Cherenkov radiation: when a charged particle traverses a medium above a certain velocity, it emits photons at a specific angle that depends on the velocity. When combined with a measurement of the momentum of the particle the velocity can be used to determine the mass and hence to identify the particle. For Cherenkov emission to occur the particle must be travelling faster than the speed of light in the medium.*
- ▶ *Transition radiation: when a relativistic charged particle traverses an inhomogeneous medium, in particular the boundary between materials with different electrical properties, it emits radiation more or less in proportion to its energy. This allows particle types to be distinguished from each other.*

## What will be the Higgs boson production rate at the LHC?

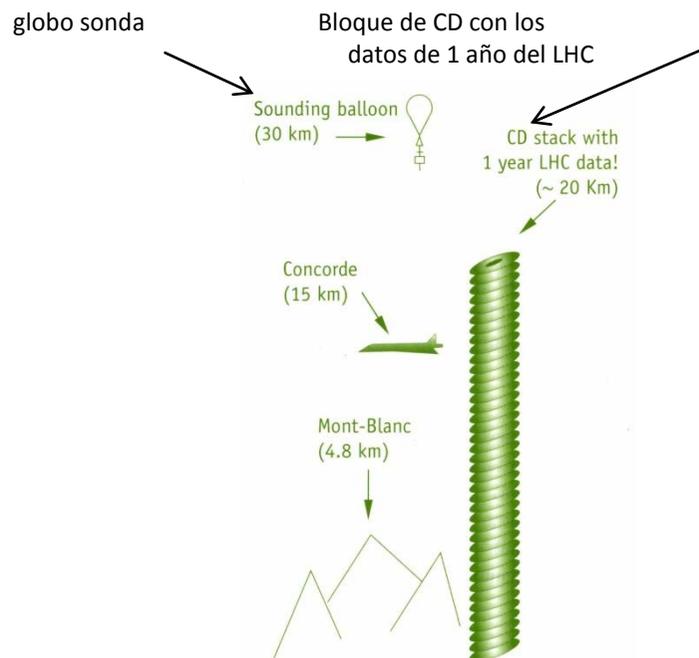
Although the particle collision rate at the LHC will be very high, the production rate of the Higgs will be so small that physicists expect to have enough statistics only after about 2-3 years of data-taking. The Higgs boson production rate strongly depends on the theoretical model and calculations used to evaluate it. Under good conditions, there is expected to be about one every few hours per experiment. The same applies to supersymmetric particles. Physicists expect to have the first meaningful results in about one year of data-taking at full luminosity.

## ¿Cuál es el flujo de datos esperado de los experimentos del LHC?

Los experimentos del LHC representan aproximadamente 150 millones de sensores entregando datos 40 millones de veces por segundo. Después de filtrarlos sólo serán interesantes unas 100 colisiones por segundo.

El flujo de datos desde los cuatro experimentos será aproximadamente de 700 MB/s que es aproximadamente 15 000 000 GB (=15 PB) por año, correspondiente a una pila de CDs de casi 25 km de alto cada año. Esta enorme cantidad de datos será analizada y estudiada por miles de científicos en todo el mundo. La misión de la Red de Computación de LHC es construir y mantener un almacén de datos y una infraestructura de análisis para toda la comunidad de físicos de alta energía que utilicen el LHC

- ▷ *ATLAS producirá 320 MB/s*
- ▷ *CMS producirá 220 MB/s*
- ▷ *LHC producirá 50 MB/s*
- ▷ *ALICE producirá 100 MB/s con colisiones protón-protón y 1,25 GB/s con colisiones de iones pesados*

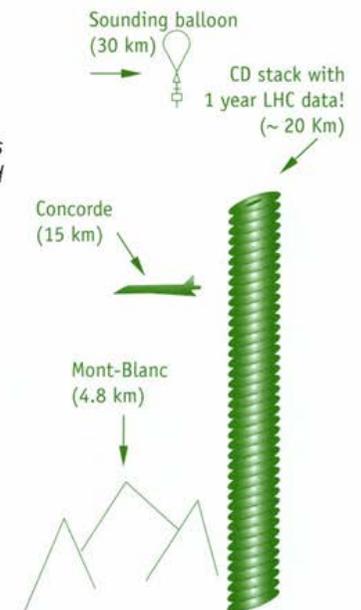


## What is the expected data flow from the LHC experiments?

The LHC experiments represent about 150 million sensors delivering data 40 million times per second. After filtering there will be about 100 collisions of interest per second.

The data flow from all four experiments will be about 700 MB/s, that is around 15 000 000 GB (=15 PB) per year, corresponding to a stack of CDs about 20 km tall each year. This enormous amount of data will be accessed and analysed by thousands of scientists around the world. The mission of the LHC Computing Grid is to build and maintain a data storage and analysis infrastructure for the entire high-energy physics community that will use the LHC.

- ▶ *ATLAS will produce about 320 MB/s*
- ▶ *CMS will produce about 300 MB/s*
- ▶ *LHCb will produce about 50 MB/s*
- ▶ *ALICE will produce about 100 MB/s during proton-proton running and 1.25 GB/s during heavy-ion running*



## Medio Ambiente

### ¿Cuál es el consumo de energía del LHC?

Es aproximadamente de 120 MW (230 MW para todo el CERN), que corresponde más o menos al consumo de los hogares del Cantón de Ginebra. Suponiendo una media de 270 días de trabajo del acelerador (la máquina no trabaja en el periodo invernal), el consumo de energía anual estimado para el LHC en 2009 es de aproximadamente 800.000 MWh. Esto incluye el emplazamiento de carga y los experimentos. El costo anual para el funcionamiento del LHC es por lo tanto de aproximadamente 19 millones de Euros. El suministro del CERN lo realiza la compañía francesa EDF (Las compañías Suiza EOS y SIG son utilizadas solamente en caso de escasez de Francia).

*Una gran parte del consumo eléctrico del LHC se va en mantener el sistema de imanes superconductores a temperaturas (1,8 y 4,2 K) dependiendo de los imanes. Gracias a la tecnología empleada para estos imanes superconductores, el consumo nominal del LHC no es mucho más alto que el del Super Proton Synchrotron (SPS), incluso aunque el LHC es mucho más grande y superior en energía.*



The graphic features a green curved banner at the top with the word "Environment" in white. To its right, the letters "faq" are written in a large, light green, lowercase, sans-serif font.

### What is the LHC power consumption?

It is around 120 MW (230 MW for all CERN), which corresponds more or less to the power consumption for households in the Canton (State) of Geneva. Assuming an average of 270 working days for the accelerator (the machine will not work in the winter period), the estimated yearly energy consumption of the LHC is about 800 000 MWh. This includes site base load and the experiments. The total yearly cost for running the LHC is therefore, about 19 million Euros. CERN is supplied mainly by the French company EDF (Swiss companies EOS and SIG are used only in case of shortage from France).

*A large fraction of the LHC electrical consumption will be to keep the superconducting magnet system at the operating temperatures (1.8 and 4.2 K) depending on the magnets. Thanks to the superconducting technology employed for its magnets, the nominal consumption of the LHC is not much higher than that of the Super Proton Synchrotron (SPS), even though the LHC is much larger and higher in energy.*

LHC the guide

53

## ¿Son las colisiones del LHC peligrosas?

El LHC puede conseguir energías que ningún otro acelerador de partículas ha alcanzado antes. La energía de estas colisiones de partículas solo se ha encontrado antes en la Naturaleza. Y es solo por la utilización de tan poderosa máquina que los físicos pueden profundizar en la investigación de la explicación de los misterios del universo. Algunos han expresado inquietudes sobre la seguridad de todo lo que puede ser creado en la colisión de partículas de alta energía. Sin embargo no hay razones para preocuparse.

- ▷ *¿Colisiones de energías sin precedentes?* ¡En la Tierra solo! Los aceleradores solamente recrean los fenómenos naturales de los rayos cósmicos bajo condiciones controladas en los laboratorios. Los rayos cósmicos son partículas producidas en el espacio sideral en fenómenos tales como supernovas o formación de agujeros negros, durante los cuales pueden ser acelerados a energías que exceden las del LHC. Los rayos cósmicos viajan por todo el Universo y han bombardeado la atmósfera de la Tierra continuamente desde su formación hace 4.500 millones de años. A pesar de la imponente potencia del LHC en comparación con otros aceleradores, las energías producidas en sus colisiones son superadas enormemente por aquellas encontradas en los rayos cósmicos. Ya que las colisiones de muy alta energía proporcionadas por la naturaleza durante miles de millones de años no han dañado la Tierra, no hay razón para pensar que un fenómeno producido por el LHC lo haga. Los rayos cósmicos también chocan con la Luna, Júpiter, el Sol y otros cuerpos astronómicos. El número total de estas colisiones es enorme comparado con las esperadas en el LHC. De hecho los planetas y las estrellas permanecen intactas reforzando nuestra confianza que las colisiones del LHC son seguras. La energía del LHC, aunque poderosa para un acelerador, es modesta para los niveles de la naturaleza.
- ▷ *¿Mini big bangs?* Aunque la concentración de energía (o densidad) en las colisiones de partículas del LHC es muy alta, en términos absolutos la energía involucrada es muy baja comparada con la energía que tratamos cada día o con las energías involucradas en las colisiones de los rayos cósmicos. Sin embargo, a la escala tan pequeña del haz de protones, la concentración de energía reproduce la densidad de energía que existía justo unos pocos momentos después del Big Bang – Es por esto por lo que las colisiones del LHC son a veces citadas como minis big bangs.

## Are the LHC collisions dangerous?

The LHC can achieve energies that no other particle accelerators have reached before. The energy of its particle collisions has previously only been found in Nature. And it is only by using such a powerful machine that physicists can probe deeper into the key mysteries of the Universe. Some people have expressed concerns about the safety of whatever may be created in high-energy particle collisions. However there are no reasons for concern.

- ▶ *Unprecedented energy collisions?* On Earth only! Accelerators only recreate the natural phenomena of cosmic rays under controlled laboratory conditions. Cosmic rays are particles produced in outer space in events such as supernovae or the formation of black holes, during which they can be accelerated to energies far exceeding those of the LHC. Cosmic rays travel throughout the Universe, and have been bombarding the Earth's atmosphere continually since its formation 4.5 billion years ago. Despite the impressive power of the LHC in comparison with other accelerators, the energies produced in its collisions are greatly exceeded by those found in some cosmic rays. Since the much higher-energy collisions provided by nature for billions of years have not harmed the Earth, there is no reason to think that any phenomenon produced by the LHC will do so. Cosmic rays also collide with the Moon, Jupiter, the Sun and other astronomical bodies. The total number of these collisions is huge compared to what is expected at the LHC. The fact that planets and stars remain intact strengthens our confidence that LHC collisions are safe. The LHC's energy, although powerful for an accelerator, is modest by nature's standards.
- ▶ *Mini big bangs?* Although the energy concentration (or density) in the particle collisions at the LHC is very high, in absolute terms the energy involved is very low compared to the energies we deal with every day or with the energies involved in the collisions of cosmic rays. However, at the very small scales of the proton beam, this energy concentration reproduces the energy density that existed just a few moments after the Big Bang—that is why collisions at the LHC are sometimes referred to as mini big bangs.

*¿Agujeros negros?* Agujeros negros masivos se crean en el Universo por el colapso de estrellas masivas, los cuales contienen una enorme cantidad de energía gravitatoria que atrae a la energía de los alrededores. La atracción gravitatoria de los agujeros negros está relacionada con la cantidad de materia o de energía que contienen – cuanto menos hay, más débil es la atracción. Algunos físicos sugieren que pueden producirse microscópicos agujeros negros en las colisiones del LHC. Sin embargo, estos solo pueden ser creados con la energía de las partículas que colisionan (equivalentes a la energía de los mosquitos), de manera que ningún agujero negro producido en el interior del LHC podría producir una fuerza gravitatoria lo suficientemente fuerte para atraer la materia que lo rodea. Si el LHC puede producir agujeros negros microscópicos, los rayos cósmicos de mucha más energía deberían haber creado ya más de uno. Como la Tierra está aún aquí, no hay razones para creer que las colisiones dentro del LHC son perjudiciales.

*Los agujeros negros pierden materia por la emisión de energía a través de un proceso descubierto por Stephen Hawking. Algunos agujeros negros que no atraigan materia, como los que se puedan producir en el LHC, se contraerán, evaporarán y desaparecerán. Cuanto más pequeños son los agujeros negros, más rápidamente desaparecen. Si un agujero negro microscópico pudiera ser encontrado en el LHC, existiría solo fugazmente. Tendría una vida tan corta que la única forma de ser detectado sería detectando los productos de su descomposición*

- ▷ *¿Materia extraña?* La materia extraña son hipotéticos pequeños pedazos de materia cuya existencia nunca ha sido probada. Están hechos de “quarks extraños” -pesados e inestables en comparación con los quarks que constituyen la materia estable. Incluso si la materia extraña existe, debe ser inestable. Además, su carga electromagnética debe repeler a la materia normal, y en lugar de combinarse con sustancias estables, debe sencillamente decaer. Si la materia extraña se produjese en el LHC, no causarían estragos. Si existe deben haber sido creada ya por los rayos cósmicos de muy alta energía, sin consecuencias perjudiciales.

- ▶ *Black holes?* Massive black holes are created in the Universe by the collapse of massive stars, which contain enormous amounts of gravitational energy that pulls in surrounding matter. The gravitational pull of a black hole is related to the amount of matter or energy it contains — the less there is, the weaker the pull. Some physicists suggest that microscopic black holes could be produced in the collisions at the LHC. However, these would only be created with the energies of the colliding particles (equivalent to the energies of mosquitoes), so no microscopic black holes produced inside the LHC could generate a strong enough gravitational force to pull in surrounding matter. If the LHC can produce microscopic black holes, cosmic rays of much higher energies would already have produced many more. Since the Earth is still here, there is no reason to believe that collisions inside the LHC are harmful.

*Black holes lose matter through the emission of energy via a process discovered by Stephen Hawking. Any black hole that cannot attract matter, such as those that might be produced at the LHC, will shrink, evaporate and disappear. The smaller the black hole, the faster it vanishes. If microscopic black holes were to be found at the LHC, they would exist only for a fleeting moment. They would be so short-lived that the only way they could be detected would be by detecting the products of their decay.*

- ▶ *Strangelets?* Strangelets are hypothetical small pieces of matter whose existence has never been proven. They would be made of ‘strange quarks’ — heavier and unstable relatives of the basic quarks that make up stable matter. Even if strangelets do exist, they would be unstable. Furthermore, their electromagnetic charge would repel normal matter, and instead of combining with stable substances they would simply decay. If strangelets were produced at the LHC, they would not wreak havoc. If they exist, they would already have been created by high-energy cosmic rays, with no harmful consequences.

▷ *¿Radiación?* La radiación es inevitable en los aceleradores de partículas como el LHC. Las colisiones de las partículas que nos permiten el estudio del origen de la materia también generan radiación. El CERN utiliza medios de protección activos y pasivos, monitores de radiación y varios procedimientos para asegurar que la exposición a la radiación del personal y de la población colindante es la más baja posible y también por debajo de los límites de regulación internacional. Por comparación, observar que la radiactividad natural – debida a los rayos cósmicos y radiactividad del medio ambiente – es aproximadamente 2400  $\mu\text{Sv/año}$  en Suiza. Un viaje en avión de ida y vuelta Europa-Los Ángeles es de aproximadamente 100  $\mu\text{Sv}$ . El túnel del LHC está alojado 100 m bajo el suelo, a tanta profundidad que aleja la radiación generada durante el funcionamiento así como la radiactividad residual que no será detectada en la superficie. El aire es bombeado fuera del túnel y filtrado. Estudios han demostrado que la radiactividad liberada en el aire contribuirá a las dosis de los miembros del público no más que 10  $\mu\text{Sv/año}$ .

*En el CERN las pautas para la protección del medioambiente y del personal cumplen con las legislaciones nacionales de Suiza y Francia y con la Directiva del Consejo Europeo 96/29/EURATOM. En las dos legislaciones de Suiza y Francia bajo ningún concepto las actividades profesionales pueden llevar a una dosis de más de 20 mSv por año para personal profesionalmente expuesto y más de 1 mSv por año para personal no profesionalmente expuesto y público en general.*

## ¿Qué normas regulan el acceso al LHC?

Cuando no funciona el haz, la mayor parte del túnel del LHC tendrá solo radiactividad débil, la mayor parte de la dosis residual está concentrada en partes específicas de la máquina, tal como las cavernas de las bombas – donde el haz es absorbido al final de cada periodo físico- y en las regiones donde el haz ha colisionado.

Solo una selección de personal técnico autorizado podrá tener acceso al túnel del LHC. Técnicos especializados en protección de radiación acceden en primer lugar y miden el grado de dosis en los lugares solicitados para trabajar, cuando acceden y por cuánto tiempo puede tener lugar la intervención.

▶ *Radiation?* Radiation is unavoidable at particle accelerators like the LHC. The particle collisions that allow us to study the origin of matter also generate radiation. CERN uses active and passive protection means, radiation monitors and various procedures to ensure that radiation exposure to the staff and the surrounding population is as low as possible and well below the international regulatory limits. For comparison, note that natural radioactivity — due to cosmic rays and natural environmental radioactivity — is about 2400  $\mu\text{Sv/year}$  in Switzerland. A round trip Europe–Los Angeles flight accounts for about 100  $\mu\text{Sv}$ . The LHC tunnel is housed 100 m underground, so deep that both stray radiation generated during operation and residual radioactivity will not be detected at the surface. Air will be pumped out of the tunnel and filtered. Studies have shown that radioactivity released in the air will contribute to a dose to members of the public of no more than 10  $\mu\text{Sv/year}$ .

*CERN's guidelines for the protection of the environment and personnel comply with the Swiss and French National Legislations and with the European Council Directive 96/29/EURATOM. In both the Swiss and French legislations under no circumstances can professional activities lead to an effective dose of more than 20 mSv per year for occupationally exposed persons and more than 1 mSv per year for persons not occupationally exposed and for members of the public.*

## What are the rules regarding access to the LHC?

Outside beam operation, the larger part of the LHC tunnel will be only weakly radioactive, the majority of the residual dose rates being concentrated in specific parts of the machine, such as the dump caverns — where the full beam is absorbed at the end of each physics period — and the regions where beams are collimated.

Only a selection of authorized technical people will be able to access the LHC tunnel. A specialized radiation protection technician will access it first and measure the dose rate at the requested intervention place, to assess when, and for how long, the intervention can take place.

## ¿Cuánto helio se consume en el LHC?

La cantidad exacta de helio perdido durante el funcionamiento del LHC no se conoce aún. EL valor actual depende de muchos factores, tales como cuantas veces se apagan los imanes, cortes de electricidad y otros problemas. Sí que es bien conocido la cantidad de helio necesaria para enfriar el LHC y llenarlo para su primer funcionamiento. Esta cantidad es de aproximadamente 120 t.

## ¿Qué sucede si el haz se vuelve inestable?

La energía almacenada en el haz del LHC no tiene precedentes, pudiendo estropear el equipamiento del acelerador en el caso de pérdida incontrolada de un haz, así se debe asegurar que esto no suceda nunca. EL funcionamiento seguro del LHC requiere el funcionamiento correcto de varios sistemas: Colimadores y absorción del haz, sistema de limpieza del haz, control del haz, cruce del haz y sistema de protección de paquetes. Si el haz se vuelve inestable los sensores de pérdida del haz lo detectaran y en tres vueltas (< 0,3 ms) un conjunto de imanes extraerá el haz del LHC. El haz se mueve entonces a través de un túnel especial al bloque de frenado del haz, el cual es el único punto en el LHC que puede resistir el impacto del haz completo. El núcleo del bloque de parada es una pila de varias placas de grafito con diferentes densidades.

*La energía total de cada haz al máximo de energía es aproximadamente 350 MJ, la cual es aproximadamente la energía de un tren de 400 t, como el TGV francés, viajando a 150 km/h. Esta es suficiente energía para fundir aproximadamente 500 kg de cobre. La energía total almacenada en los imanes del LHC es como 30 veces superior (11 GJ).*

## What is the helium consumption at the LHC?

The exact amount of helium loss during operation of the LHC is not yet known. The actual value will depend on many factors, such as how often there are magnet quenches, power cuts and other problems. What is well known is the amount of helium that will be needed to cool down the LHC and fill it for first operation. This amount is around 120 t.

## What happens if the beam becomes unstable?

The energy stored in the LHC beams is unprecedented, threatening to damage accelerator equipment in case of uncontrolled beam loss, so everything is done to ensure that this never happens. Safe operation of the LHC requires correct operation of several systems: collimators and beam absorbers, a beam dumping system, beam monitoring, beam interlocks, and quench protection systems. If the beam becomes unstable the beam loss sensors will detect it and within three revolutions (< 0.3 ms) a set of magnets will extract the beam from the LHC. The beam will then travel through a special tunnel to the beam stop block, which is the only item in the LHC that can withstand the impact of the full beam. The core of the stop block is made of a stack of various graphite plates with different densities.

*The total energy in each beam at maximum energy is about 350 MJ, which is about as energetic as a 400 t train, like the French TGV, travelling at 150 km/h. This is enough energy to melt around 500 kg of copper. The total energy stored in the LHC magnets is some 30 times higher (11 GJ).*

## 9 datos fascinantes sobre el LHC

**Dato 1)** Cuando el túnel circular de 27 km fue excavado, entre el Lago de Ginebra y los montes Jura, Los dos extremos se reencontraron con una diferencia de 1 cm.

**Dato 2)** Cada uno de los 6000-9000 filamentos superconductores de niobio-titanio en el cable producido para el LHC tiene unos 0,007 mm de grueso, sobre 10 veces más fino que el cabello normal de una persona. Si sumamos todos los filamentos juntos, llegarían hasta el Sol ida y vuelta seis veces, sobrando lo suficiente para 150 viajes a la Luna.

**Dato 3)** Todos los protones acelerados en el CERN se obtiene del hidrógeno estándar. Aunque el haz de protones en el LHC es muy intenso, solo 2 nanogramos de hidrógeno\*) son acelerados cada día. Por lo tanto, acelerar un gramo de hidrógeno al LHC le llevaría un millón de años.

**Dato 4)** La parte central del LHC será el frigorífico más grande del mundo. Una temperatura más fría que el espacio exterior, contiene hierro, acero y todas las importantes bobinas superconductoras.

**Dato 5)** La presión en las conducciones del haz del LHC es sobre 10 veces menor que la de la Luna. Esto es un ultra vacío.

**Dato 6)** A plena energía los protones en el LHC viaja a 0,999999991 veces la velocidad de la luz. Cada protón da más de 11.000 vueltas por segundo al anillo de 27 km.

**Dato 7)** A plena energía, cada uno de los haces de protones en el LHC tiene una energía equivalente a un tren de 400 t (como el TGV francés) viajando a 150 km/h. Esta energía es suficiente para fundir 500 kg de cobre.

**Dato 8)** El Sol nunca se pone en la colaboración de ATLAS. Los científicos que trabajan en el experimento vienen de cada continente del mundo, excepto la Antártida.

**Dato 9)** El sistema de imanes de CMS contiene sobre 10 000 t de hierro, lo cual es más hierro que el de la torre Eiffel.

\*) La masa de los protones se calcula en reposo.

## 9 Fascinating Facts about the LHC

**Fact 1)** When the 27-km long circular tunnel was excavated, between Lake Geneva and the Jura mountain range, the two ends met up to within 1 cm.

**Fact 2)** Each of the 6000-9000 superconducting filaments of niobium-titanium in the cable produced for the LHC is about 0.007 mm thick, about 10 times thinner than a normal human hair. If you added all the filaments together they would stretch to the Sun and back six times with enough left over for about 150 trips to the Moon.

**Fact 3)** All protons accelerated at CERN are obtained from standard hydrogen. Although proton beams at the LHC are very intense, only 2 nanograms of hydrogen<sup>\*)</sup> are accelerated each day. Therefore, it would take the LHC about 1 million years to accelerate 1 gram of hydrogen.

**Fact 4)** The central part of the LHC will be the world's largest fridge. At a temperature colder than deep outer space, it will contain iron, steel and the all important superconducting coils.

**Fact 5)** The pressure in the beam pipes of the LHC will be about ten times lower than on the Moon. This is an ultrahigh vacuum.

**Fact 6)** Protons at full energy in the LHC will be travelling at 0.999999991 times the speed of light. Each proton will go round the 27 km ring more than 11 000 times a second.

**Fact 7)** At full energy, each of the two proton beams in the LHC will have a total energy equivalent to a 400 t train (like the French TGV) travelling at 150 km/h. This is enough energy to melt 500 kg of copper.

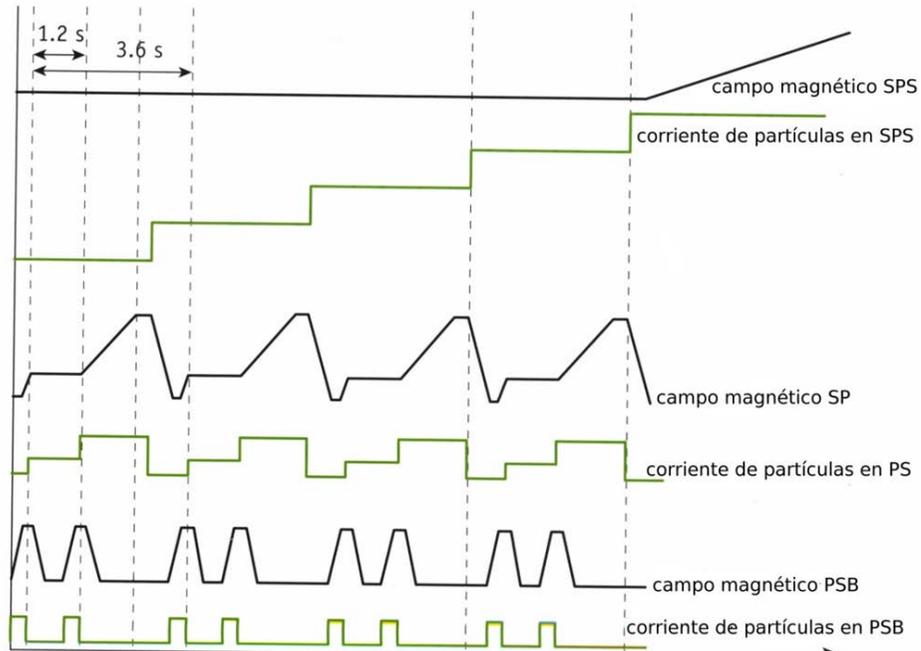
**Fact 8)** The Sun never sets on the ATLAS collaboration. Scientists working on the experiment come from every continent in the world, except Antarctica.

**Fact 9)** The CMS magnet system contains about 10 000 t of iron, which is more iron than in the Eiffel Tower.

\*) the total mass of protons is calculated at rest.

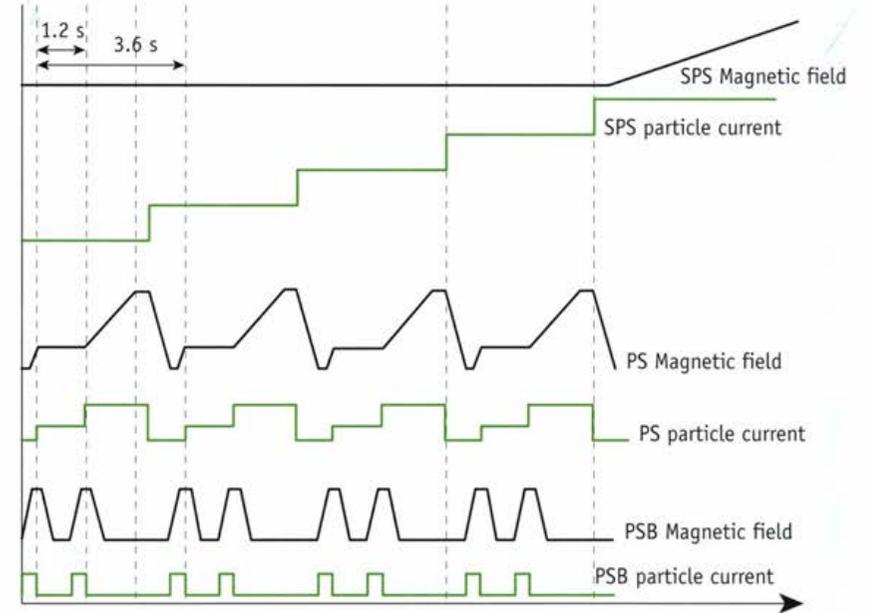
## Apéndice 1

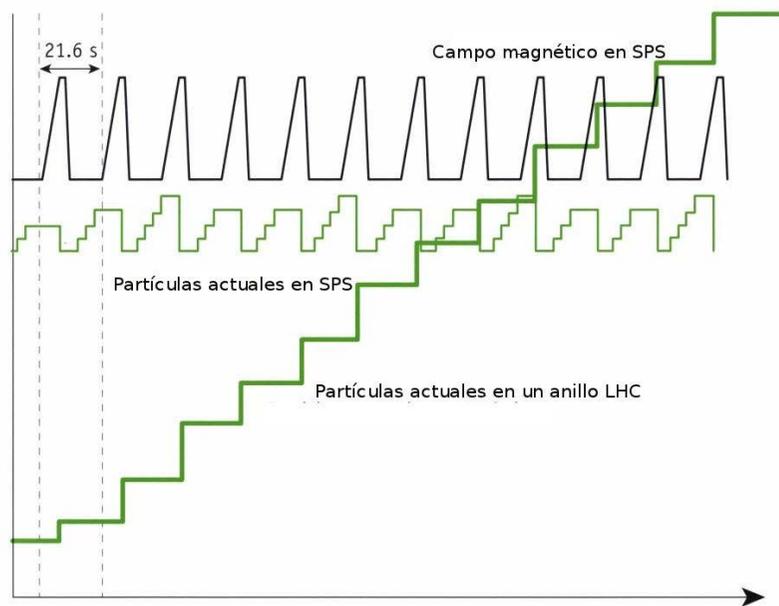
Proyecto vigente de llenado, campos magnéticos y partículas en PSB, PS y SPS



## Appendix 1

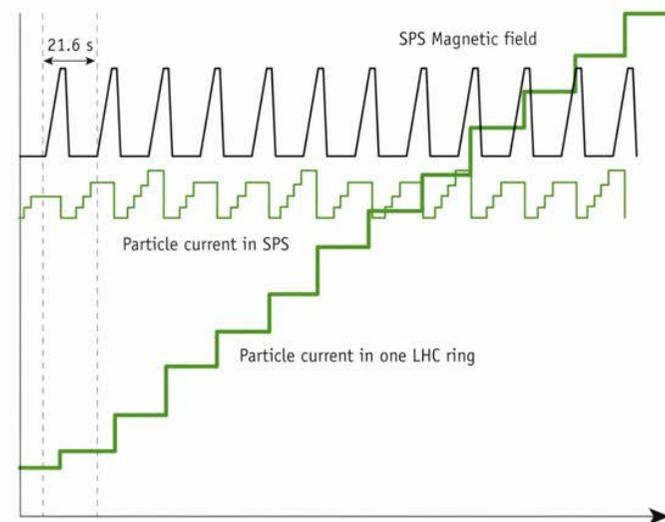
Scheme of filling, magnetic field and particle current in PSB, PS and SPS





## Appendix 2

Scheme of filling, magnetic field and particle current in SPS and LHC



## Apéndice 2

Proyecto vigente de llenado, campos magnéticos y partículas en SPS y LHC

