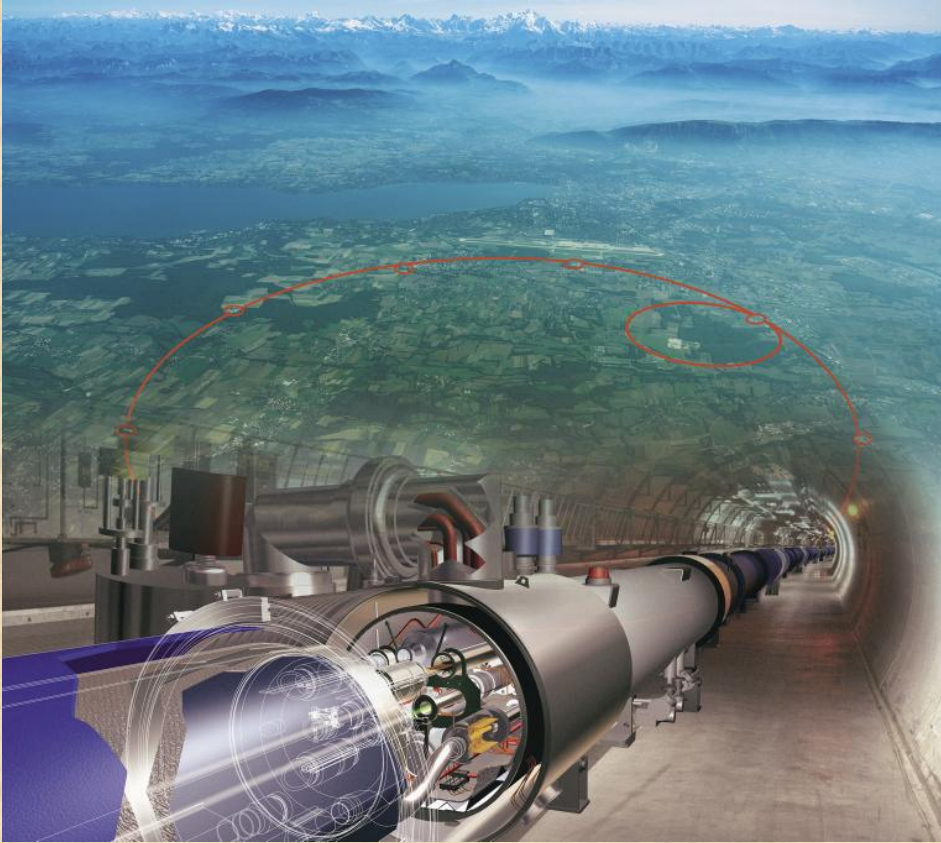


# Introducción a la Física de las Partículas Elementales



Dr. Pedro Labraña,  
Departamento de Física,  
Facultad de Ciencias,  
Universidad del Bío-Bío.

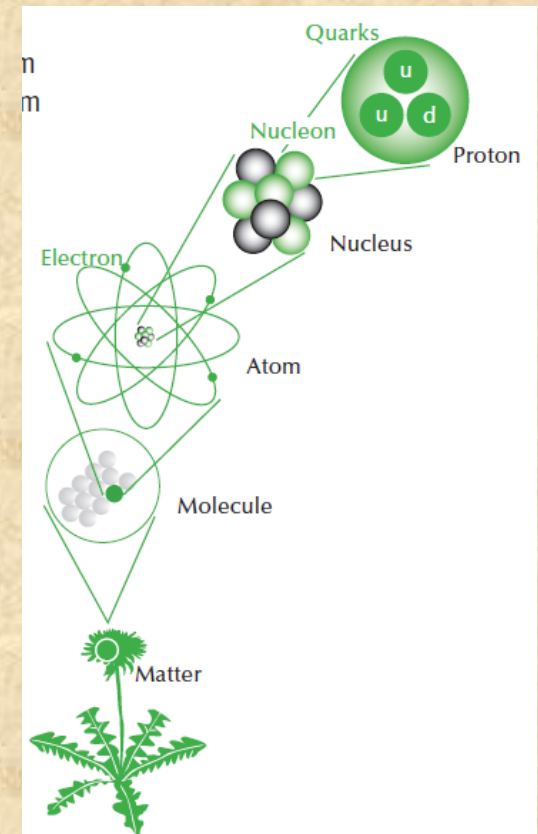
# Introducción al modelo estándar de Física de Partículas

## Escalas y Unidades



En Física de Partículas describe el mundo que nos rodea a escalas muy pequeñas como para utilizar las unidades usuales (gramos, Joule, etc).

Pese que esta área de investigación se denomina Física de Latas Energías.



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

*Desde física atómica utilizamos como unidad de energía el Electrón –volt.  
Definición: Es la energía que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1 Volt*

Para tener una idea de las escalas.

Física atómica: 1KeV

Física de Partículas: 1 MeV, GeV, TeV

Electrón-Volt (eV): es una unidad de energía utilizada con frecuencia por los físicos. En el Sistema Internacional (SI) la energía se mide en Joule (J). Para tener una idea concreta veamos a que corresponde una energía de un TeV.

$$1TeV = 1,6 \times 10^{-7} J$$

**Un ejemplo: El LHC**

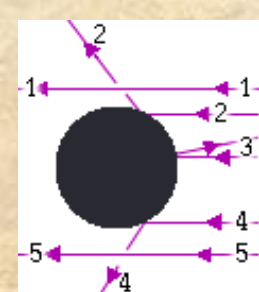
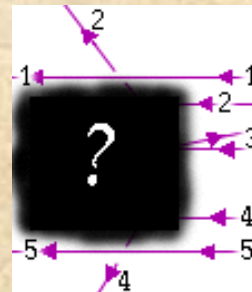
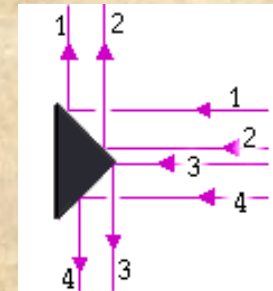
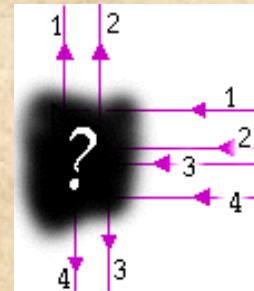


# El Large Hadron Collider (LHC)

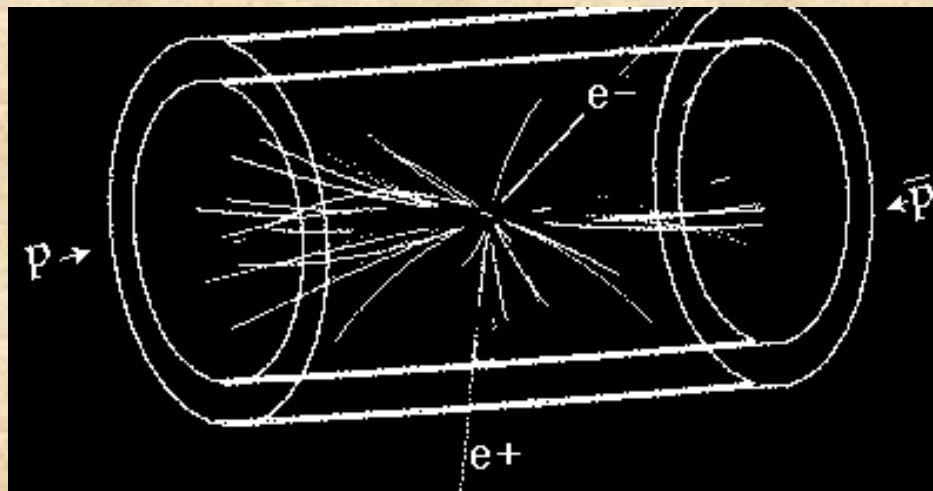
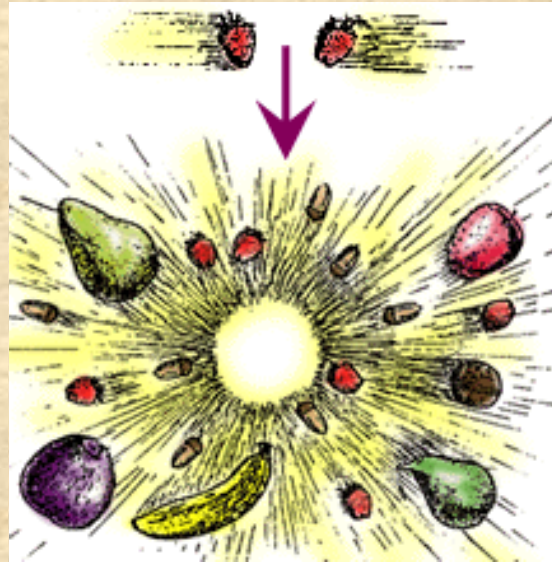
## *El Gran Colisionador de hadrones*

- El LHC es el mayor experimento de física de partículas del mundo.
- El objetivo de este experimento es hacer chocar frente a frente protones que viajan a un 99.999999 % de la velocidad de la luz!! Recreando de esta manera y por un breve momento las condiciones de nuestro universo luego de algunas fracciones de segundo de ocurrido el Big-Bang.

La filosofía detrás de este tipo de experimentos (colisionadores de partículas) es similar al que posee todo niño curioso que desea saber como funciona o de que está hecho un juguete.



En el caso del LHC no es un choque contra un blanco fijo. De esta manera se obtienen colisiones de mayor energía, pero la idea es la misma.



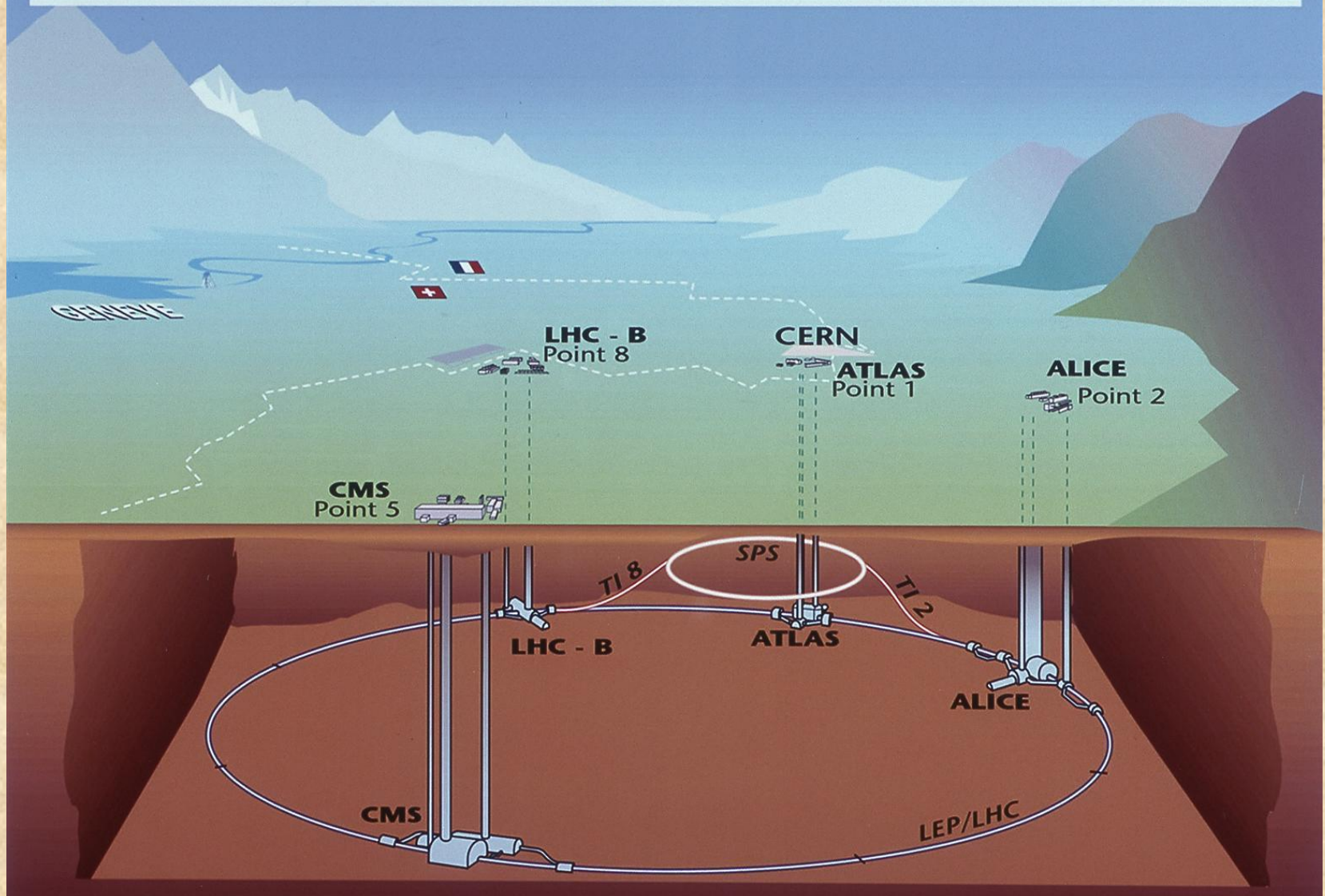
# Características del LHC

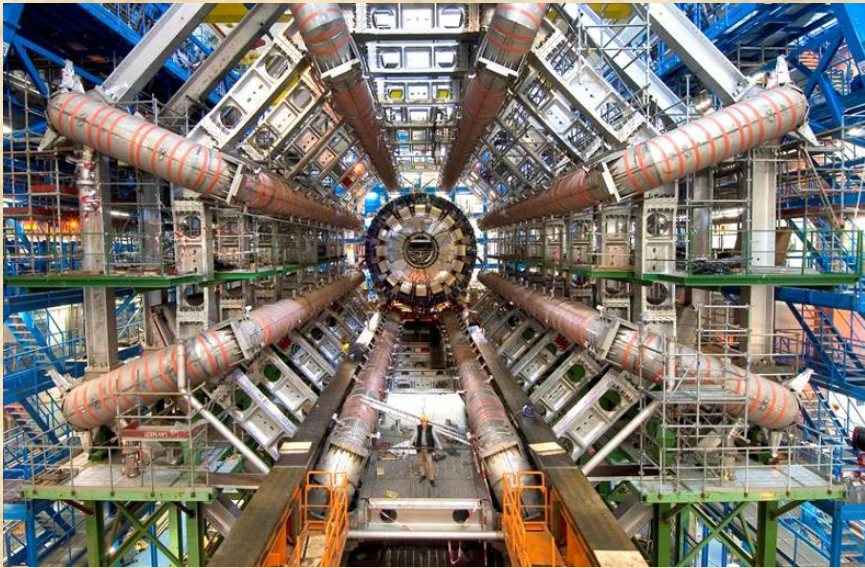
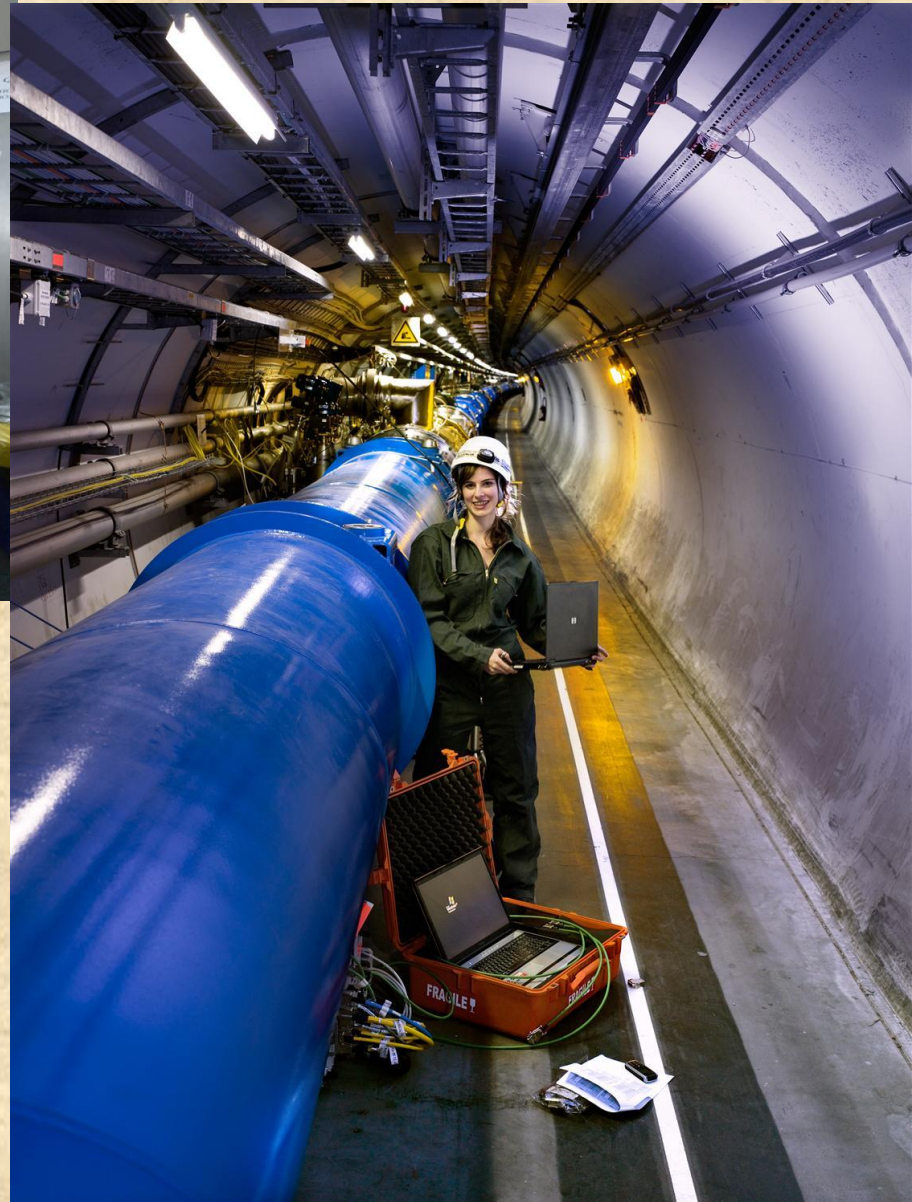


El LHC consiste en un túnel circular de 27 Km de circunferencia. Este túnel está enterrado a una profundidad que va entre 50 a 175 m y se encuentra ubicado cerca de la frontera entre Francia y Suiza.

# Vista panorámica del LHC

Overall view of the LHC experiments.





# El túnel

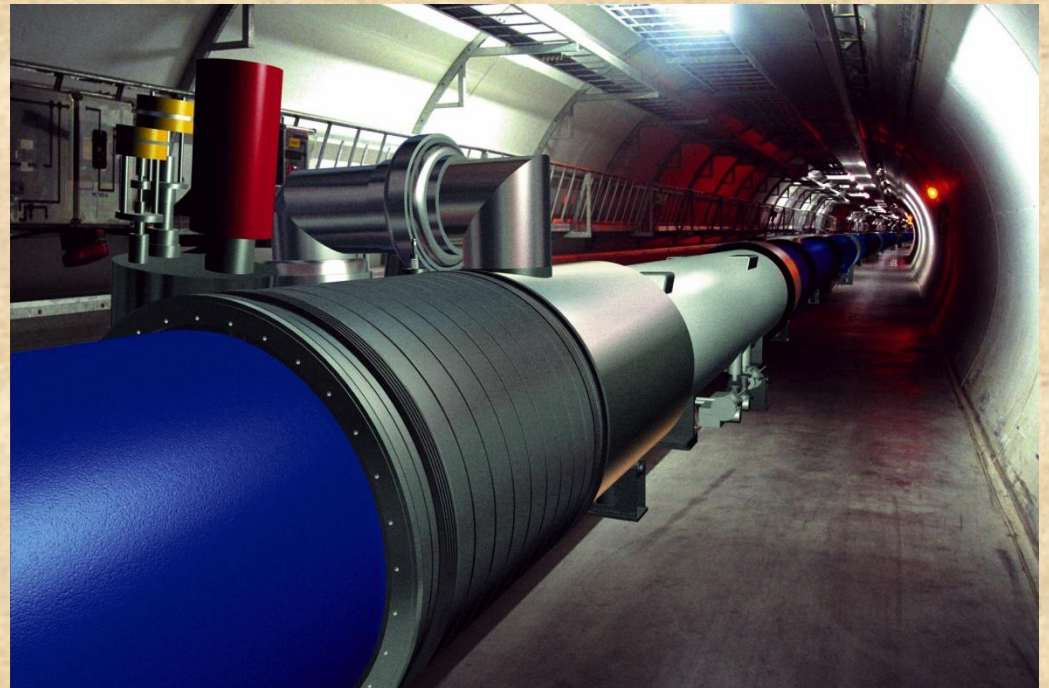


El túnel utilizado en el LHC corresponde a un túnel construido en los años 80 para albergar el experimento LEP (Large electron-positron collider) en funcionamiento entre los años 1989-2000.



Magneto dipolar encargado de mantener a los protones circulando en el anillo. Cada uno de estos magnetos cuesta alrededor de 255 millones de pesos chilenos.

En el LHC hay 1232 de estos magnetos.



# Empujando a un mosquito

El LHC está diseñado para hacer chocar dos haces de protones (o dos haces de iones pesados) que viajan en direcciones opuestas dentro del anillo del LHC. En el caso en que el experimento se realiza con protones la energía por cada haz es de 7 TeV.

## Potencias de 10

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)

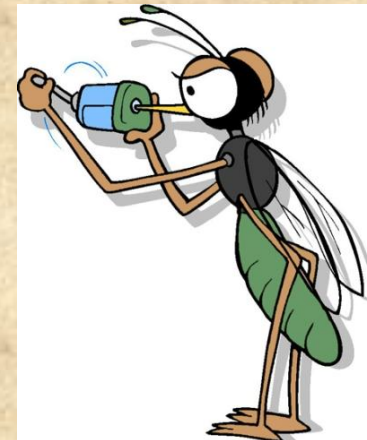
Electrón-Volt (eV): es una unidad de energía utilizada con frecuencia por los físicos. En el Sistema Internacional (SI) la energía se mide en Joule (J). Para tener una idea concreta veamos a que corresponde una energía de un TeV.

$$1TeV = 1,6 \times 10^{-7} J$$

La energía de un TeV corresponde a la energía cinética que posee un mosquito en vuelo

**Es la concentración de esta energía lo que hace que las colisiones en el LHC sean tan especiales!!!**

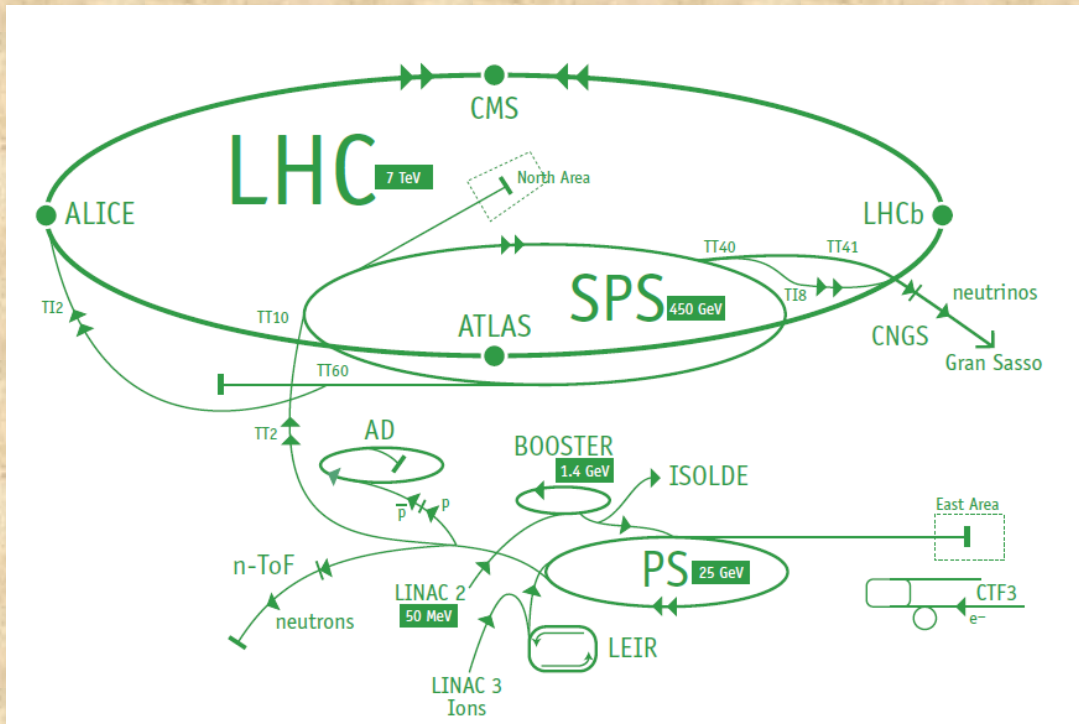
**Nunca antes reproducidas en un laboratorio**



## Velocidad que alcanza un protón según la energía que este tiene

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  $0.938 \text{ GeV}/c^2$



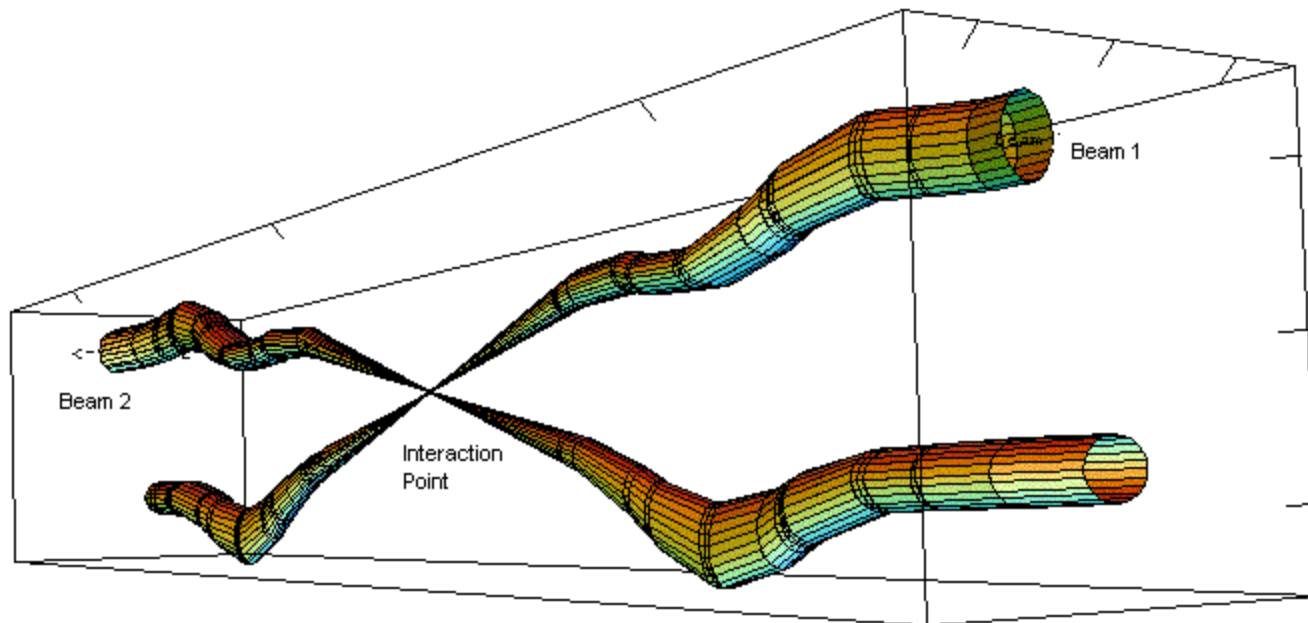
Antes de ser introducidos en el LHC los protones pasan por diferentes tipo de aceleradores. El tiempo que tardan los dos haces de protones en llenar el anillo del LHC es de 4:20 horas.

Los protones son introducidos en el LHC en “bunches” (racimos) de modo que cada haz contiene 2808 de estos racimos.

Estos bunches son de algunos centímetros de largo y el diámetro transversal es del orden de milímetros.

Sin embargo en los posibles puntos de colisión el diámetro transversal es del orden de micrones.

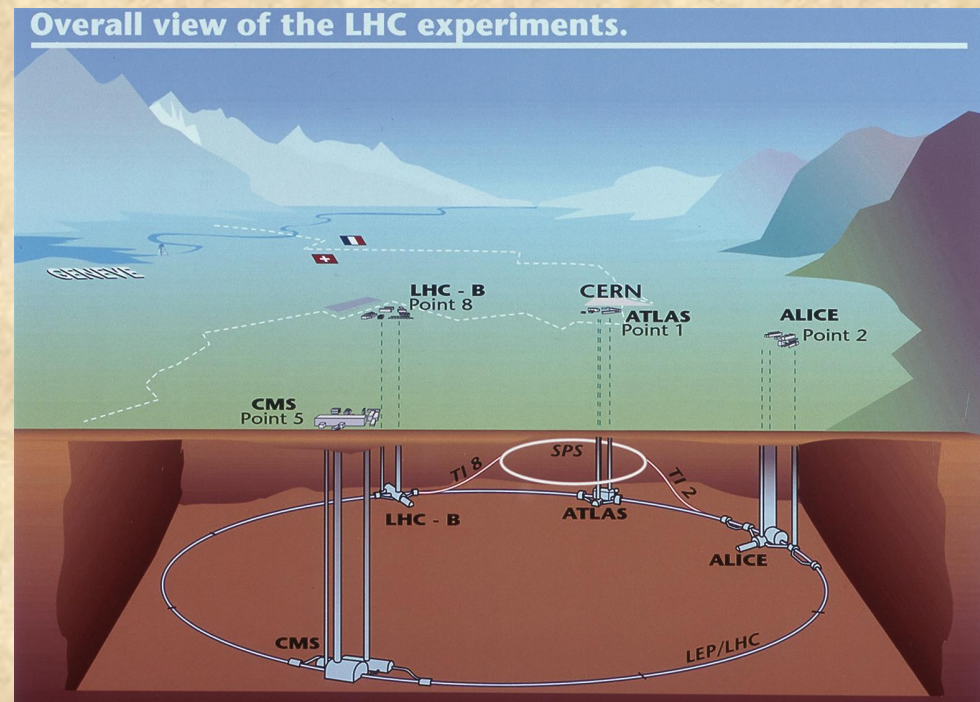
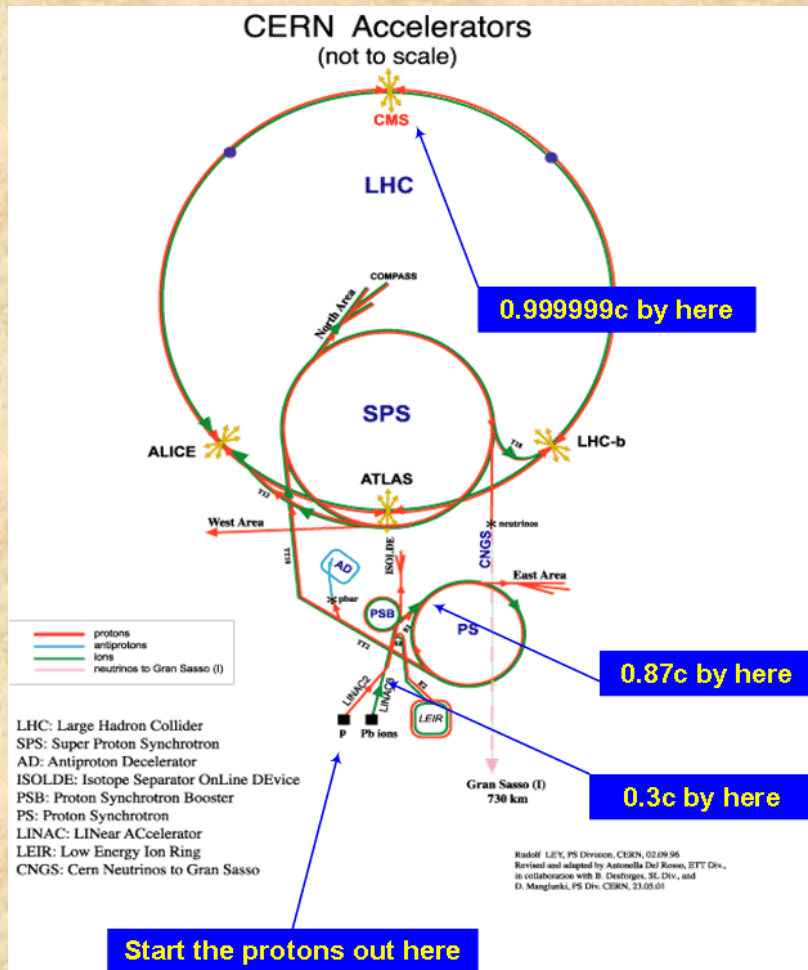
Cada uno de estos racimos contiene  $1.15 \times 10^{11}$  protones.



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Los haces se mantendrán girando en el LHC por 10 horas. Durante este tiempo se los hará colisionar en cuatro puntos, que corresponden a los cuatro experimentos principales del LHC.

**Notemos que durante estas 10 horas cada protón a recorrido una distancia equivalente a viajar desde la Tierra a Neptuno ida y vuelta.**

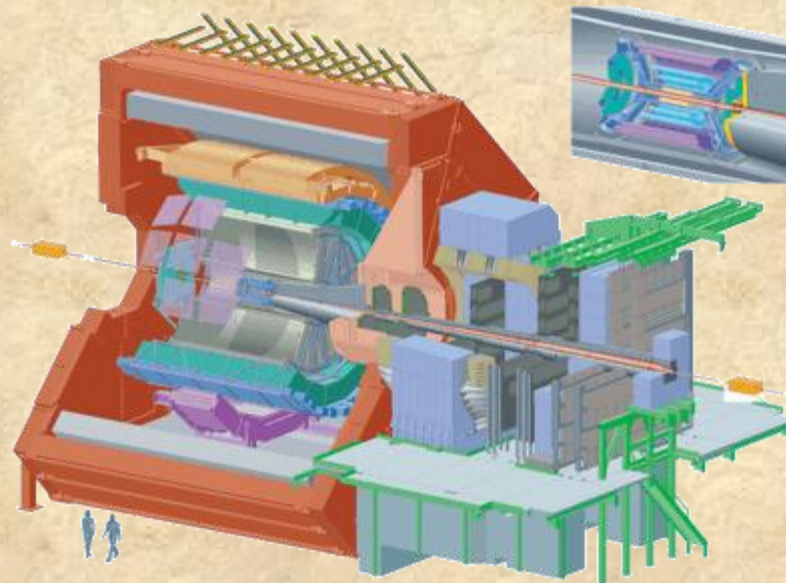


# Los Experimentos Principales del LHC

## ALICE: A Large Ion Collider Experiment at CERN LHC

Especializado en analizar las colisiones de iones pesados.  
Objetivo: Estudiar las propiedades del estado de la materia denominado quark-gluon-plasma. Este estado es el que tenía la materia apenas unos segundos luego del Big-Bang.

En este experimento trabajan 1500 personas de 104 instituciones y 31 países



## ATLAS: A large Toroidal LHC ApparatuS



En tamaño es el detector mas grande y esta diseñado como un detector de múltiples propósitos.

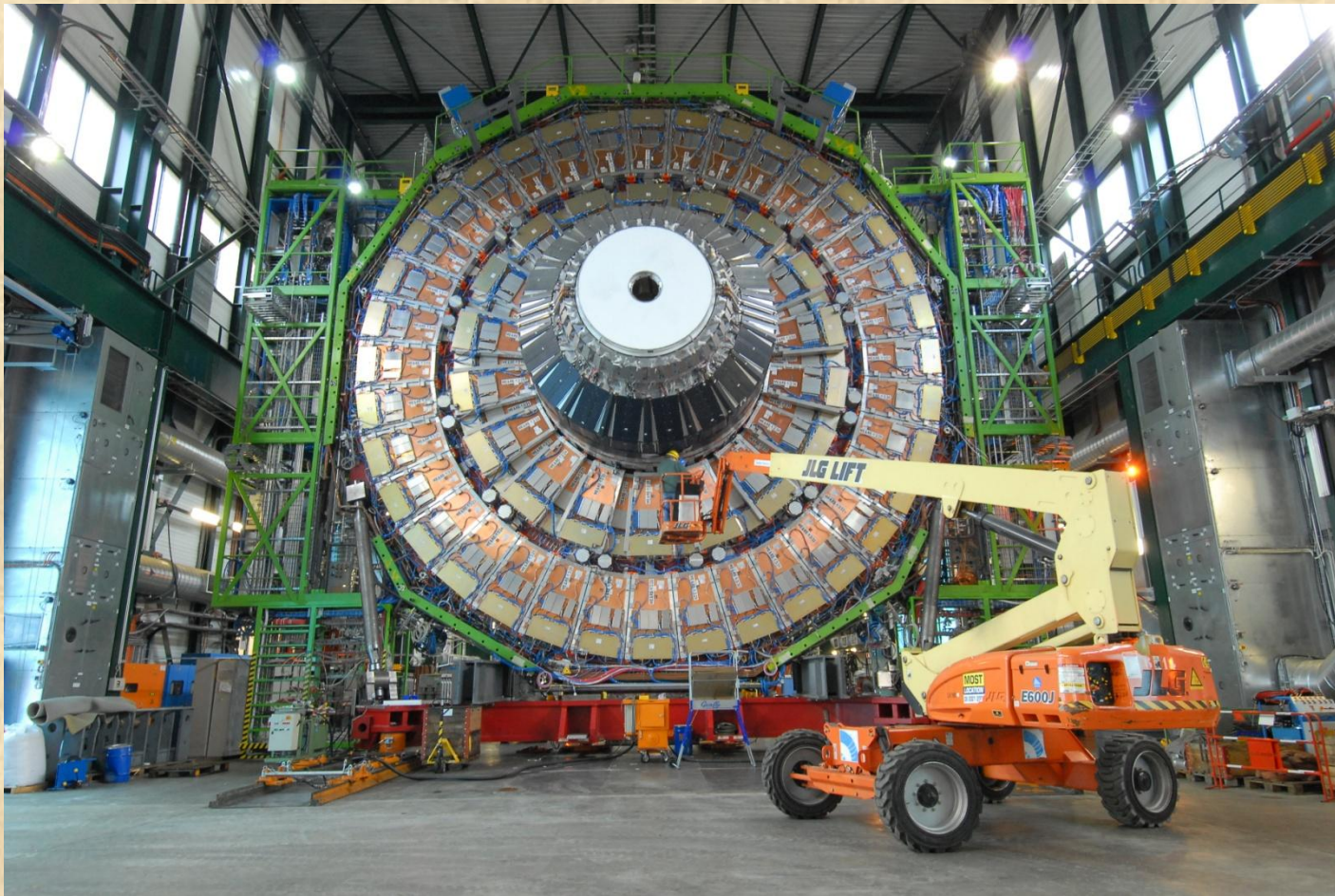
Objetivo: Principalmente esta abocado en la detección del **Bosón de Higgs**. Sin embargo también podría detectar señales que indiquen la existencia de partículas supersimétricas y la existencia de dimensiones extras.

En este experimento trabajan 1900 personas de 164 instituciones en 34 países



## CMS: The Compact Muon Solenoid

Es un detector multipropósito con los mismos objetivos que el ATLAS pero con un diseño y tecnología diferente. En este experimento trabajan 2000 personas de 181 instituciones de 38 países.



## LHC-b: Large Hadron Collider beauty experiment

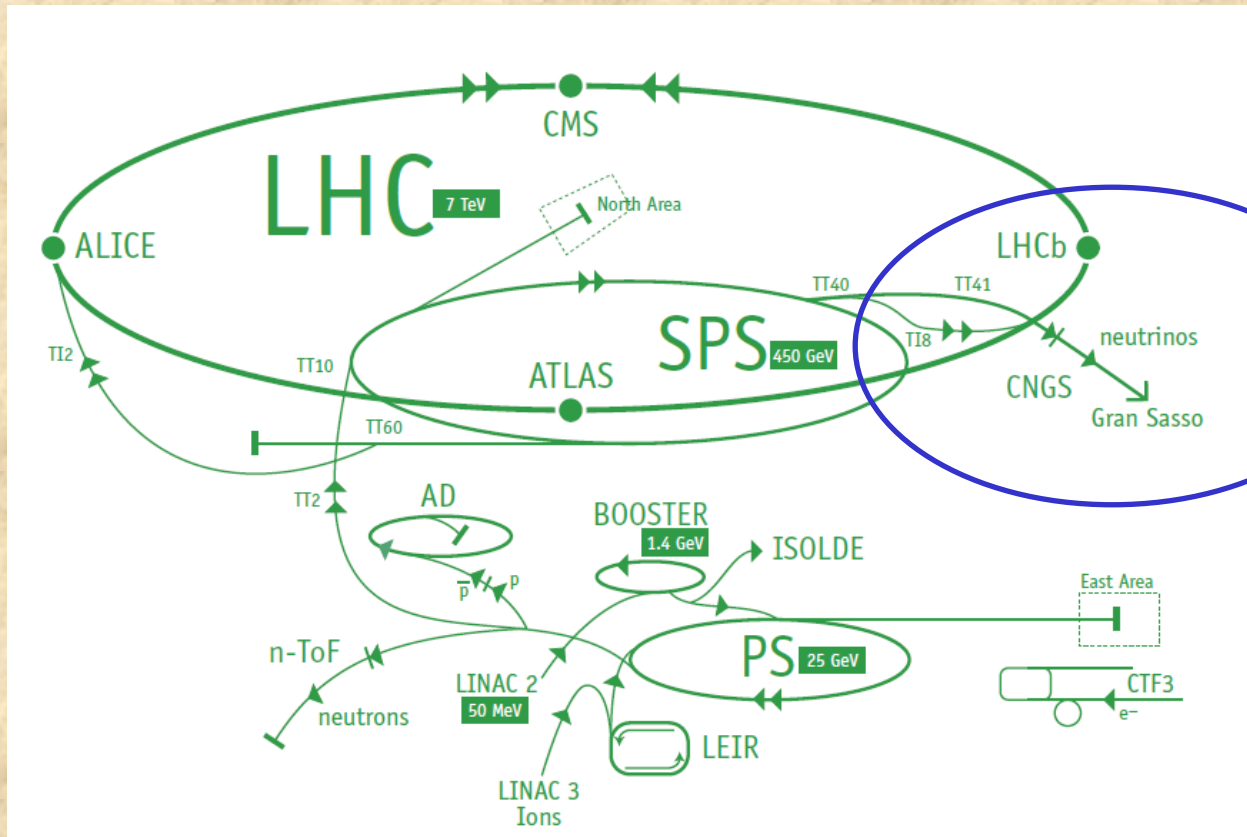
Es un detector diseñado para estudiar la pequeña asimetría entre materia y antimateria presente en las interacciones donde participan partículas B (partículas que contienen al quark bottom)

Objetivo: responder a la pregunta: ¿Por qué nuestro universo está hecho de materia y no de antimateria?

En este experimento trabajan 650 personas de 47 instituciones de 14 países.



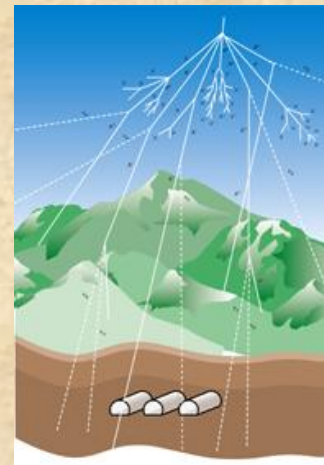
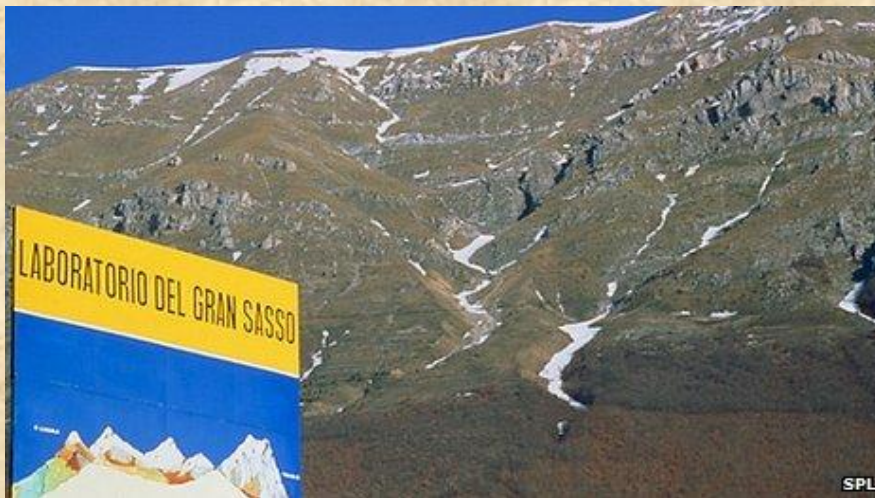
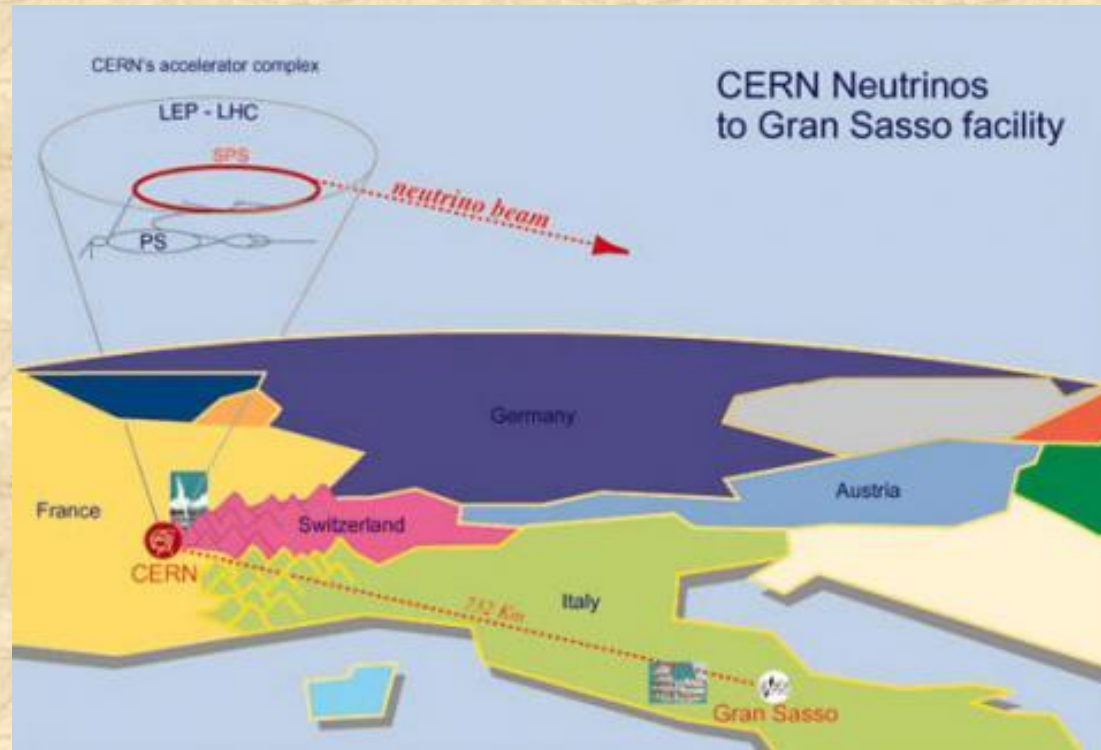
# Algunas novedades



**Cuarto neutrino tau observado en el experimento OPERA (25 de marzo 2014)**

**El experimento OPERA en Gran Sasso observa en directo la transformación de un neutrino muónico generado en el CERN en un neutrino tauónico**

# From Geneva to Gran Sasso in 2.5 milliseconds!



**Un neutrino muónico producido en el colisionador SPS del CERN, tras atravesar 732 km. por el interior de la corteza terrestre, se ha transformado en un neutrino tauónico. Esta es una señal inequívoca y por primera vez una observación directa de que los neutrinos oscilan (cambian de identidad). El primer neutrino tau fue observado en OPERA el 2010, el segundo y el tercero 2012 y 2013. El cuarto neutrino tau ha sido reportado esta semana.**

**SPS: The Super Proton Synchrotron is the second-largest machine in CERN's accelerator complex. Measuring nearly 7 kilometres in circumference.**

# El descubrimiento del Bosón de Higgs

Anuncio oficial: 4 de julio del 2012



Desde el CERN y en conexión con la conferencia en altas energías ICHEP 2012 en Melbourne Australia, la conferencia comenzó con las palabras de Rolf Heuer, Director del CERN, para luego dar paso a la exposición de Joseph Incandela, vocero de CMS y de la vocera de ATLAS Fabiola Gianotti

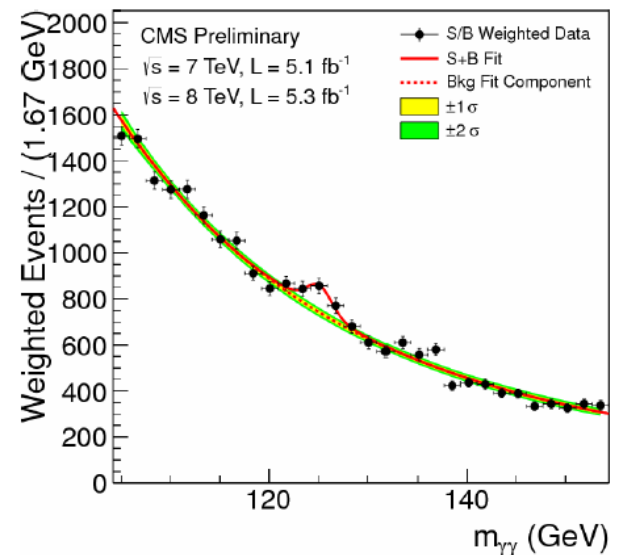
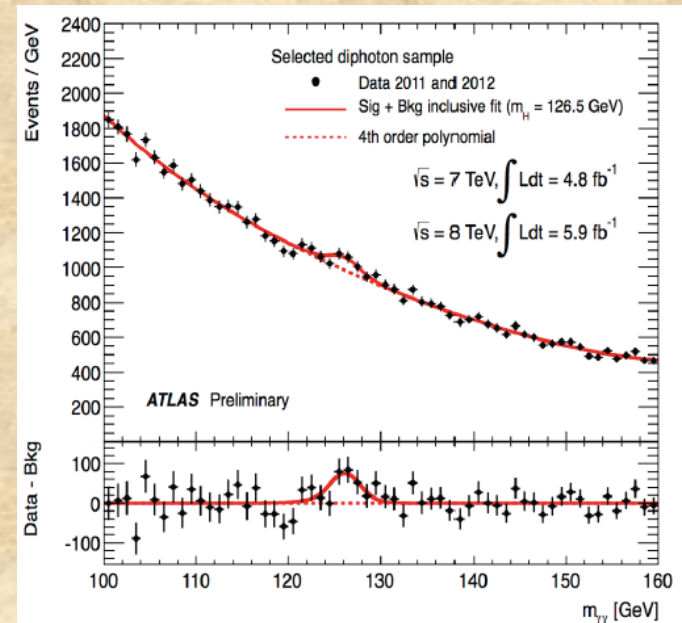
**Masa = 125 GeV**

**Espín entero: 0, 1 (bosón)**

**Compatible con el añorado Bosón de Higgs**

# Nacido el 4 de Julio

El 4 de julio dos de los detectores más grandes del LHC, ATLAS y CMS proclaman haber encontrado una señal que es compatible con el Bosón de Higgs.



# Los papers



CERN-PH-EP-2012-218  
Submitted to: Physics Letters B

## Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC

The ATLAS Collaboration

### Abstract

A search for the Standard Model Higgs boson in proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately  $4.8 \text{ fb}^{-1}$  collected at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  in 2011 and  $5.8 \text{ fb}^{-1}$  at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  in 2012. Individual searches in the channels  $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$  in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for  $H \rightarrow ZZ^{(*)}$ ,  $WW^{(*)}$ ,  $b\bar{b}$  and  $\tau^+\tau^-$  in the 7 TeV data and results from improved analyses of the  $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$  channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of  $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys)} \text{ GeV}$  is presented. This observation, which has a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of  $1.7 \times 10^{-9}$ , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

arXiv:1207.7214v1 [hep-ex] 31 Jul 2012

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN)



CERN-PH-EP/2012-220  
2012/08/01

CMS-HIG-12-028

## Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC

The CMS Collaboration\*

### Abstract

Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV in the CMS experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to  $5.1 \text{ fb}^{-1}$  at 7 TeV and  $5.3 \text{ fb}^{-1}$  at 8 TeV. The search is performed in five decay modes:  $\gamma\gamma$ ,  $ZZ$ ,  $WW$ ,  $\tau^+\tau^-$ , and  $b\bar{b}$ . An excess of events is observed above the expected background, a local significance of 5.0 standard deviations, at a mass near 125 GeV, signalling the production of a new particle. The expected significance for a standard model Higgs boson of that mass is 5.8 standard deviations. The excess is most significant in the two decay modes with the best mass resolution,  $\gamma\gamma$  and  $ZZ$ ; a fit to these signals gives a mass of  $125.3 \pm 0.4 \text{ (stat.)} \pm 0.5 \text{ (syst.) GeV}$ . The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

*This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away.*

*In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.*

Submitted to Physics Letters B

arXiv:1207.7235v1 [hep-ex] 31 Jul 2012

# Nomenclatura

Es usual expresar otras cantidades físicas en eV.

Momentum:

$$[Momentum] = \frac{MeV}{C}, \frac{GeV}{C}$$

Masas:

$$[Masa] = \frac{MeV}{C^2}, \frac{GeV}{C^2}$$

Ejemplo

$$m_P = 938 \frac{MeV}{C^2} = 1.67 \times 10^{-27} Kg$$

$$m_e = 0.51 \frac{MeV}{C^2} = 9.10 \times 10^{-31} Kg$$


# Unidades Naturales

$$C = 1 = \hbar = K_B$$

Unit	Metric value	Derivation
1 eV <sup>-1</sup> of length	1.97×10 <sup>-7</sup> m	= (1eV <sup>-1</sup> )ħc
1 eV of mass	1.78×10 <sup>-36</sup> kg	= (1eV) / c <sup>2</sup>
1 eV <sup>-1</sup> of time	6.58×10 <sup>-16</sup> s	= (1eV <sup>-1</sup> )ħ
1 unit of electric charge (for rationalized)	5.29×10 <sup>-19</sup> C	= √ħcε <sub>0</sub>
1 eV of temperature	1.16×10 <sup>4</sup> K	= 1eV / k <sub>B</sub>

# La Filosofía que soporta el esquema del curso

## Teoría Cuántica de Campos

Pequeñas escalas 

Rápido



<b>Mecánica Clásica</b>	<b>Mecánica Cuántica</b>
Mecánica Relativista	Teoría Cuántica de Campos

# ¿Qué es elemental?

Premisa de querer entender el todo entendiendo como funcionan sus componentes. Hipótesis reduccionista llevada al extremo deviene en el punto de vista de los atomistas (Demócrito) que finalmente es la misma visión de la naturaleza que adopta el Físico de Partículas.

Esto es:

*Suponemos que en la naturaleza existen algunos ladrillos fundamentales (básicos), que aunque siendo pocos al combinarlos en diferentes cantidades y de diferentes maneras generan la totalidad de objetos y fenómenos que vemos en la naturaleza.*

*Notar que aunque útil, la hipótesis reduccionista podría no ser válida.*

¿Qué es un ladrillo fundamental?

*Es algo que no posee estructura interna, lo cual es señal de que no está “hecho” de otras cosas.*

*Ej. El Protón no es uno de estos ladrillos fundamentales. Posee estructura interna. Por ejemplo su carga eléctrica no está distribuida de manera uniforme en el (ver pizarra).*

*El Electrón: Sí sería un ladrillo fundamental*

*Notar: Dependiendo de la escala de energía los elementos revelan su estructura interna. Por ejemplo antes de 1960 se pensaba que el Protón era una de estas partículas fundamentales (ladrillos básicos). Los experimentos no revelaban que el Protón tuviese estructura interna. Esto cambió al aumentar la energía de los experimentos (Ej. Deep inelastic scattering).*

# Fuerzas Fundamentales

## Fuerza Nuclear Fuerte



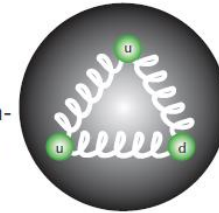
## STRONG FORCE

Felt by: quarks  
Carrier: gluons



### 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.



## Fuerza Electromagnética



## ELECTROMAGNETIC FORCE

Felt by: quarks and  
charged leptons  
Carrier: photons

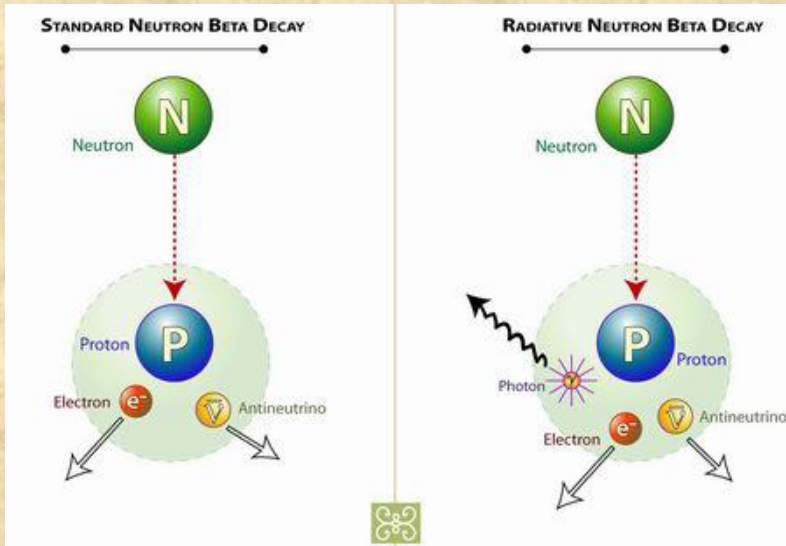


### Associated phenomena

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

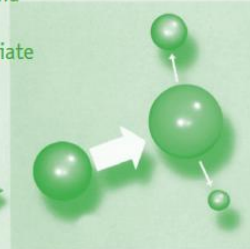


# Fuerza Nuclear Débil



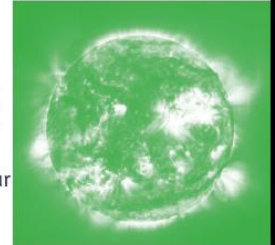
## WEAK FORCE

Felt by: quarks and leptons  
Carrier: intermediate vector bosons

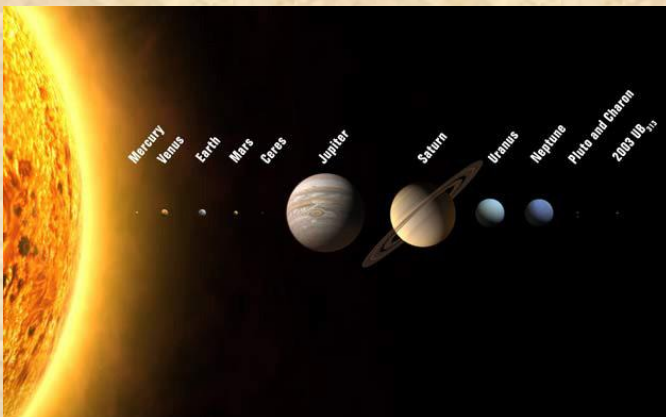


### Associated phenomena

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.



# Gravedad



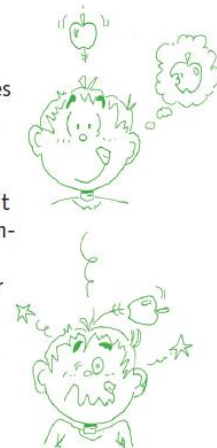
## GRAVITATION

Felt by: all particles with mass  
Carrier: Graviton



### 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.



Fuerza	Magnitud	Teoría	Mediador	Rango
Fuerte	10	QCD	Gluones	$10^{-15}$ m
Electromagnética	$10^{-2}$	QED	Fotón	Infinito
Débil	$10^{-13}$	Modelo de Weimber-Salam	W+,W-, Z0	$10^{-17}$ m
Gravedad	$10^{-42}$	Relatividad General	Gravitón	Infinito

**Notar: Si la fuerza es de rango finito, entonces la partícula mediadora posee masa**

# Partículas en el Modelo Estándar

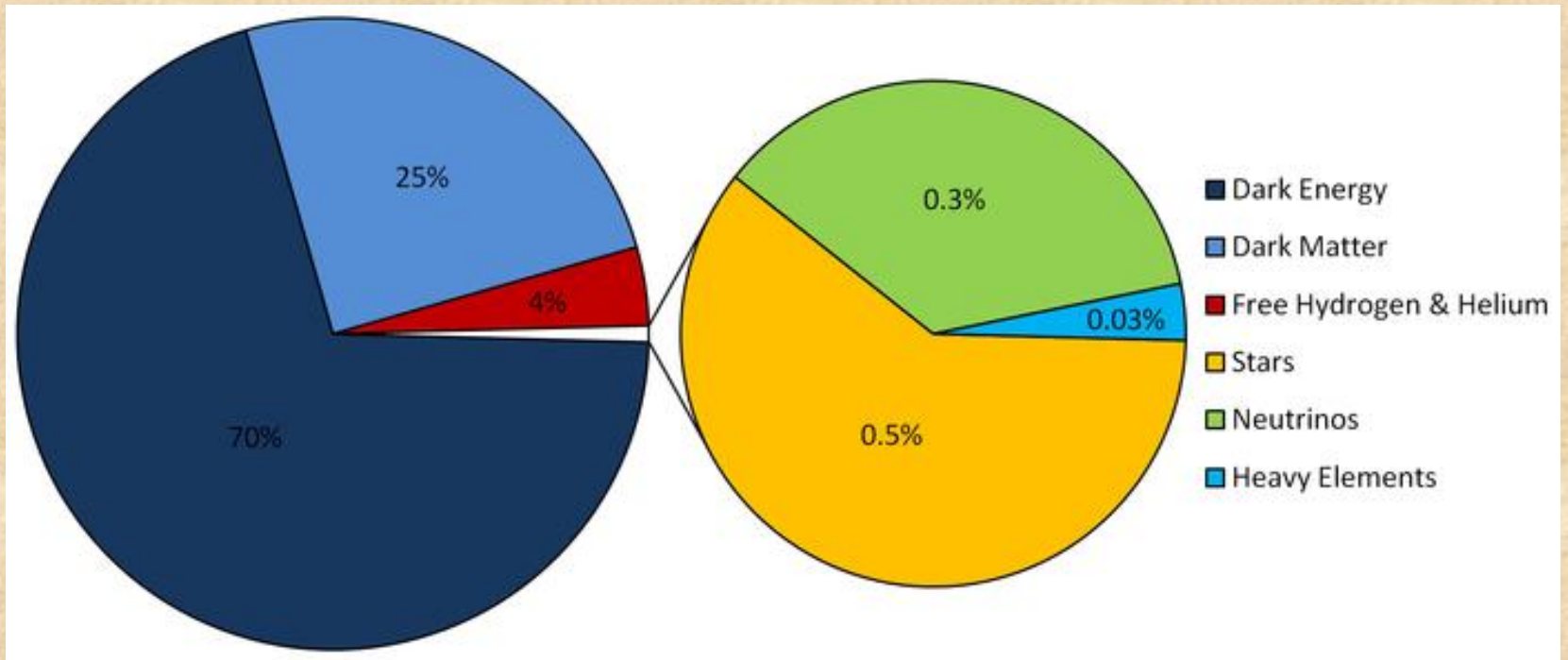
Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptones	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> fuerza débil
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> fuerza débil

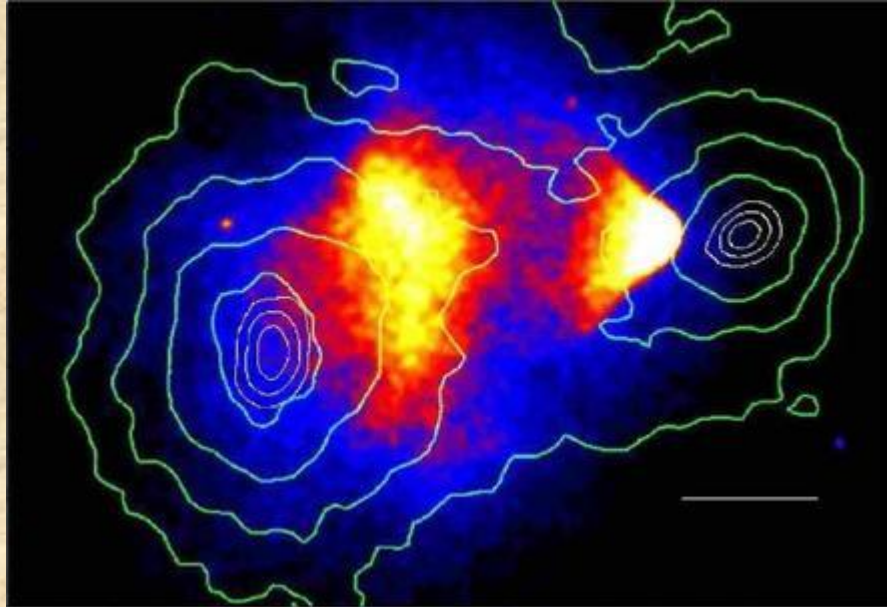
Bosons (Fuerzas)

+ Boson de Higgs

# Contenido de materia en el universo



# Materia Oscura



**Deep Chandra image of the Bullet cluster**

# La zoología del Modelo Estándar

Un poco de historia:

El electrón fue el primero de estos ladrillos fundamentales en ser descubierto en 1887 por J.J. Thomson.

Las siguientes partículas subatómicas en ser descubiertas son:

Protón (1919) y Neutrón (1932).

En 1931 es descubierto la primera antipartícula, el positrón. Partícula predicha por Dirac en 1927.

## Antipartículas

Todas las partículas poseen un compañero antipartícula, el cual posee la misma masa pero todos los otros números cuánticos están invertidos. Ejemplo la carga eléctrica, número leptónico, número bariónico, etc.

Ejemplos: Electrón ----- Positrón  
Protón ----- Antiprotón  
Neutrón ----- Antineutrón

Notar: Existen partículas que son su propia antipartícula. Ej. El Fotón.

# Antimateria: En 1931 es descubierto la primera antipartícula, el positrón (Antipartícula del electrón. Partícula predicha por Dirac en 1928-1931.

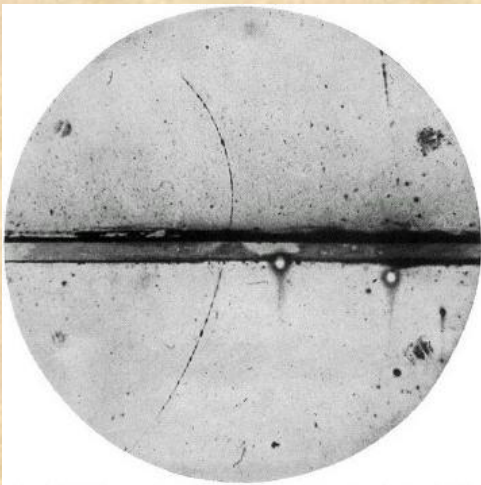
610

## *The Quantum Theory of the Electron.*

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.

(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

The new quantum mechanics, when applied to the problem of the structure of the atom with point-charge electrons, does not give results in agreement with experiment. The discrepancies consist of "duplexity" phenomena, the observed number of stationary states for an electron in an atom being twice the number given by the theory. To meet the difficulty, Goudsmit and Uhlenbeck have introduced the idea of an electron with a spin angular momentum of half a quantum and a magnetic moment of one Bohr magneton. This model for the electron has been fitted into the new mechanics by Pauli,\* and Darwin,† working with an equivalent theory, has shown that it gives results in agreement with experiment for hydrogen-like spectra to the first order of accuracy.



## SPECIAL ARTICLES

### THE APPARENT EXISTENCE OF EASILY DEFLECTABLE POSITIVES

Up to the present a positive electron has always been found with an associated mass 1,850 times that associated with the negative electron. In measuring the energies of charged particles produced by cosmic rays some tracks have recently been found which seem to be produced by positive particles, but if so the masses of these particles must be small compared to the mass of the proton. The evidence for this statement is found in several photographs, three of which are discussed below.

In one instance, in which a lead plate of 6 mm thickness was inserted in the cloud-chamber, tracks of a particle were observed above and below the lead. The curvature due to the magnetic field was measurable both above and below the lead. There are the following alternative interpretations:

- (1) a positive particle of small mass penetrates the lead plate and loses about two thirds of its energy; or
- (2) two particles are simultaneously ejected from

the lead, in one direction a positive particle of small mass, in the opposite direction an electron; or

(3) an electron of about 20,000,000 volts energy penetrates the lead plate and emerges with an energy of 60,000,000 volts, having gained 40,000,000 volts energy in traversing the lead; or

(4) the chance occurrence of two independent electron tracks in the chamber, so placed as to give the appearance of one particle traversing the lead plate.

In another instance two tracks of opposite curvature appear below the lead. The alternative interpretations are:

- (1) a positive particle of small mass and an electron emerging from the same point in the lead; or
- (2) a positive particle of small mass strikes the lead and rebounds with a loss in energy; or
- (3) an electron of about 20,000,000 volts energy strikes the lead and rebounds with 30,000,000 volts energy; or
- (4) the chance occurrence of two independent electron tracks.

SEPTEMBER 9, 1932

SCIENCE

239

In the third instance two tracks appear below the lead plate. The alternative interpretations are:

- (1) a positive particle of small mass and another positive particle emerge from the same point in the lead; or
- (2) a 4,000,000 volt electron rebounds from the lead producing the second track; but here a difficulty is met with, since a change in the sign of the charge would have to be assumed to take place in the rebound of the electron; or
- (3) the chance occurrence of two independent tracks.

For the interpretation of these effects it seems necessary to call upon a positively charged particle having a mass comparable with that of an electron, or else admit the chance occurrence of independent tracks on the same photograph so placed as to indicate a common point of origin of two particles. The latter possibility on a probability basis is exceedingly unlikely.

The interpretation of these tracks as due to protons, or other heavier nuclei, is ruled out on the basis of range and curvature. Protons or heavier nuclei of the observed curvatures could not have ranges as great as those observed. The specific-ionization is close to that for an electron of the same curvature, hence indicating a positively-charged particle comparable in mass and magnitude of charge with an electron.

CARL D. ANDERSON

CALIFORNIA INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY,  
SEPTEMBER 1, 1932

per cent., .04 per cent. and .087 per cent. of the grain ration as fluorine fed as a mineral supplement in the form of raw rock phosphate. The rations were balanced as to protein. They contained ample energy and were in all respects adequate dairy rations.

The plasma phosphatase was determined by the method of Kay<sup>3</sup> except that pH values were determined by means of the quinhydrone electrode rather than by the colorimetric method. In all cases the animals receiving fluorine showed a distinct rise in the plasma phosphatase values over that of the control cows. In nearly all cases the values for our control animals were within the normal range of .1000 to .2000 units per cc for mature animals. Twenty-eight determinations made upon control cows gave a range of from .1168 units to .2440 units per cc with a mean value of .1763 units. The low fluorine lot gave an average phosphatase value of .2366 units per cc. The intermediate group showed a further rise in phosphatase with an average of .2751 units per cc, while the high fluorine lot varied from .2240 units to .5312 units per cc. The mean value for this lot (12 analyses) was .3366 units per cc or practically double that of the control animals. It would seem, therefore, that in cattle suffering from fluorosis the plasma phosphatase rises in proportion to the level of fluorine intake, or nearly so. Other blood constituents, such as serum calcium, inorganic phosphorus, total phosphorus, lecithin phosphorus and chlorine, remained within the normal range. There seemed to be a tendency for the serum calcium of the blood to decrease with a correspondingly slight increase in inorganic

*Quantised Singularities in the Electromagnetic Field.*

By P. A. M. DIRAC, F.R.S., St. John's College, Cambridge.

(Received May 29, 1931.)

§ 1. *Introduction.*

The steady progress of physics requires for its theoretical formulation a mathematics that gets continually more advanced. This is only natural and to be expected. What, however, was not expected by the scientific workers of the last century was the particular form that the line of advancement of the mathematics would take, namely, it was expected that the mathematics would get more and more complicated, but would rest on a permanent basis

## Antipartículas

Todas las partículas poseen un compañero antipartícula, el cual posee la misma masa pero todos los otros números cuánticos están invertidos. Ejemplo la carga eléctrica, número leptónico, número bariónico, etc.

Ejemplos: Electrón ----- Positrón  
 Protón ----- Antiprotón  
 Neutrón ----- Antineutrón

Notar: Existen partículas que son su propia antipartícula. Ej. El Fotón.

El neutrino es predicho por Pauli en 1930 para solucionar el problema de la energía perdida en los decaimientos Beta (ver pizarra).

Fermi toma seriamente la teoría de Pauli y logra reproducir los resultados de los experimento si el neutrino (pequeño neutrón) posee carga eléctrica cero y una masa muy pequeña (cero), ver pizarra.

**Figure 1.4** One of Powell's earliest pictures showing the track of a pion in a photographic emulsion exposed to cosmic rays at high altitude. The pion (entering from the left) decays into a muon and a neutrino (the latter is electrically neutral, and leaves no track). Reprinted by permission from C. F. Powell, P. H. Fowler, and D. H. Perkins, *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method* (New York: Pergamon, 1959). First published in *Nature* **159**, 694 (1947).



En 1949 la existencia del neutrino es confirmada

En 1930 la comunidad científica buscaba a las partículas mediadoras de la interacción fuerte predichas por H. Yukawa (Próxima clase). Estas partículas se denominan Piones y son tres de masas cercanas a los 100 MeV, ver pizarra. Sin embargo otra partícula de masa similar fue encontrada. Una partícula que no experimenta la Fuerza Nuclear Fuerte y que por lo tanto no podía ser alguno de los Piones.

A esta partícula que nadie esperaba se le denominó Muon y hay dos tipos de esta partícula (partícula y su antipartícula). Esta partícula se puede considerar como un electrón de mayor masa.

En 1946 los Piones fueron finalmente descubiertos.

Con la aparición de los primeros aceleradores de partículas comienzan a aparecer más y más partículas de modo que el esquema original de que estos objetos subatómicos eran bloques fundamentales parece disiparse.

Ver esquema en la pizarra de la zoología (y nomenclatura) de partículas en los años 1960.

# El Mundo Hadrónico

## Bariones (espín semi-entero)

**Table 7.** Some properties of the known baryons belonging to the  $20_m$  of SU(4). Experimental values adapted from Trippe *et al* (1976, 1977).

Symbol	Mass (MeV)	Mean lifetime (s) or width	Principal decay modes
p	$938.280 \pm 0.003$	Stable	
n	$939.573 \pm 0.003$	$918 \pm 14$	$p e^{-} \nu$ 100%
$\Lambda$	$1115.60 \pm 0.05$	$(2.58 \pm 0.02) \times 10^{-10}$	$p \pi^{-}$ ( $64.2 \pm 0.5$ )% $n \pi^0$ ( $35.8 \pm 0.5$ )%
$\Sigma^{+}$	$1189.37 \pm 0.06$	$(0.800 \pm 0.006) \times 10^{-10}$	$p \pi^0$ ( $51.6 \pm 0.7$ )% $n \pi^{+}$ ( $48.4 \pm 0.7$ )%
$\Sigma^0$	$1192.47 \pm 0.08$	$< 10^{-14}$	$\Lambda \gamma$ 100%
$\Sigma^{-}$	$1197.35 \pm 0.06$	$(1.48 \pm 0.02) \times 10^{-10}$	$n \pi^{-}$ 100%
$\Xi^0$	$1314.9 \pm 0.6$	$(2.96 \pm 0.12) \times 10^{-10}$	$\Lambda \pi^0$ 100%
$\Xi^{-}$	$1321.3 \pm 0.2$	$(1.65 \pm 0.02) \times 10^{-10}$	$\Lambda \pi^{-}$ 100%
$\Lambda_c^{+}$	$2260 \pm 10$	$< 75$ MeV	$\Lambda \pi^{+} \pi^{+} \pi^{-}$ (only mode seen so far)
$\Sigma_c^{++}$	$2426 \pm 12$	?	$\Lambda_c^{+} \pi^{+}$ (only mode seen so far)
$\Sigma_c^0$	$2426 \pm 12$	?	$\Lambda_c^{+} \pi^{-}$ (only mode seen so far)

**Table 8.** Some properties of the known baryons belonging to the  $20_s$  of SU(4). Experimental values adapted from Trippe *et al* (1976, 1977).

Symbol	Mass (MeV)	Width (MeV) or mean lifetime	Principal decay modes
$\Delta^{++}$	$1232 \pm 2$	$115 \pm 5$	$p\pi^+ \sim 100\%$
$\Delta^+$	?	?	$p\pi^0, n\pi^+ \sim 99.4\%$
$\Delta^0$	$1232 \pm 2$	$120 \pm 5$	$p\pi^-, n\pi^0 \sim 99.4\%$
$\Delta^-$	$1237 \pm 5$		$n\pi^- \sim 100\%$
$\Sigma^{*+}$	$1382.5 \pm 0.5$	$35 \pm 2$	$\Lambda\pi^+ (88 \pm 2)\%$ $\Sigma^+\pi^0, \Sigma^0\pi^+ (12 \pm 2)\%$
$\Sigma^{*0}$	$\sim 1385$	$\sim 40$	$\Lambda\pi^0 \sim 88\%$ $\Sigma^+\pi^-, \Sigma^-\pi^+ \sim 12\%$
$\Sigma^{*-}$	$1386.6 \pm 1.2$	$42 \pm 4$	$\Lambda\pi^- \sim 88\%$ $\Sigma^0\pi^-, \Sigma^-\pi^0 \sim 12\%$
$\Xi^{*0}$	$1531.8 \pm 0.3$	$9.1 \pm 0.5$	$\Xi^0\pi^0, \Xi^-\pi^+ \sim 100\%$
$\Xi^{*-}$	$1535.1 \pm 0.6$	$10 \pm 2$	$\Xi^-\pi^0, \Xi^0\pi^- \sim 100\%$
$\Omega^-$	$1672.2 \pm 0.4$	$(1.3 \pm 0.3) \times 10^{-10} \text{ s}$	$\Xi^0\pi^-, \Xi^-\pi^0, \Delta K^-$
$\Sigma_c^{*++?}$	2500	?	$\Lambda_c^+\pi^+$
$\Sigma_c^{*0?}$	2500	?	$\Lambda_c^+\pi^-$

Disculpe! Es Ud. una partícula fundamental?



## Mesones (espín entero)

**Table 5.** Quark content and quantum numbers of pseudoscalar mesons in a five-quark model. We have assumed that the  $b$  quark has  $I=0$  and  $Q = -\frac{1}{3}$ , although there is as yet no definite convincing evidence for these assignments.

Symbol	Quark content	$I$	$I_z$	$S$	$C$	$b$
$\pi^+$	$u\bar{d}$	1	1	0	0	0
$\pi^0$	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	1	0	0	0	0
$\pi^-$	$d\bar{u}$	1	-1	0	0	0
$K^+$	$u\bar{s}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0	0
$K^0$	$d\bar{s}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	0	0
$\bar{K}^0$	$s\bar{d}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	0	0
$K^-$	$s\bar{u}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	0	0
$\eta$	$(u\bar{u} + d\bar{d})\sqrt{2}, s\bar{s}$	0	0	0	0	0
$\eta'$	$(u\bar{u} + d\bar{d})\sqrt{2}, s\bar{s}$	0	0	0	0	0
$\chi$	$c\bar{c}$	0	0	0	0	0
$D^+$	$c\bar{d}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	1	0
$D^0$	$c\bar{u}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	1	0
$\bar{D}^0$	$u\bar{c}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	-1	0
$D^-$	$d\bar{c}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	-1	0
$F^+$	$c\bar{s}$	0	0	1	1	0
$F^-$	$s\bar{c}$	0	0	-1	-1	0
$\chi_b$	$b\bar{b}$	0	0	0	0	0
$D_b^+$	$u\bar{b}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	1
$D_b^0$	$d\bar{b}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	1
$\bar{D}_b^0$	$b\bar{d}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	-1
$D_b^-$	$b\bar{u}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	-1
$F_b^0$	$s\bar{b}$	0	0	-1	0	1
$\bar{F}_b^0$	$b\bar{s}$	0	0	1	0	-1
$E^+$	$c\bar{b}$	0	0	0	1	1
$E^-$	$b\bar{c}$	0	0	0	-1	-1

Disculpe! Es Ud. una partícula fundamental?

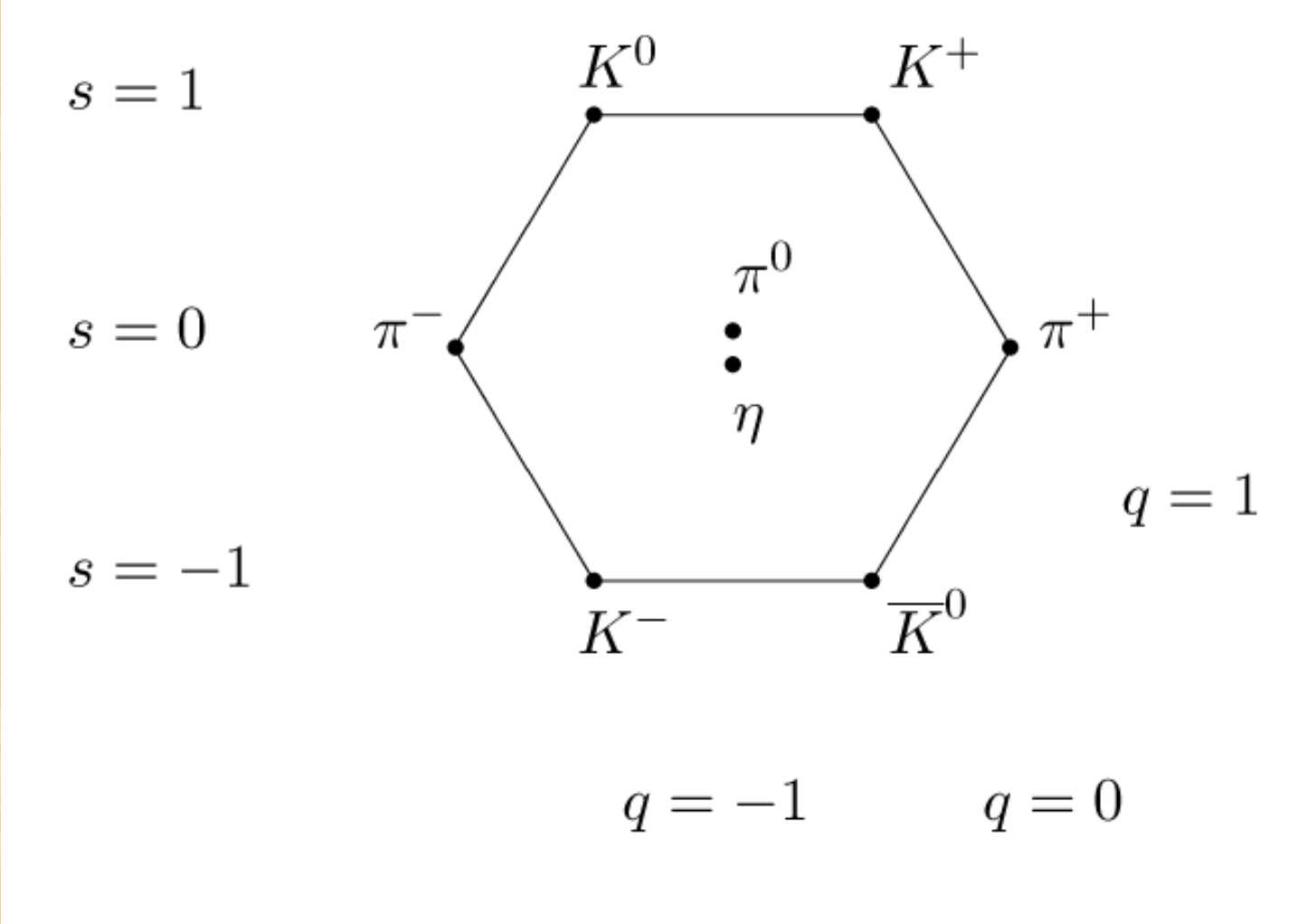


Para resolver este problema primero había que clasificar a los hadrones de una manera astuta. Murray Gell-Mann y el físico Israelí Yuval Ne'eman a comienzos de los años sesenta se convirtieron en los Dimitri Mendeleev de la era moderna al encontrar lo que sería el análogo de la tabla periódica de los elementos químicos, pero para la física de partículas, en particular para la física hadrónica, en lo que será llamado el modelo del camino óctuple (nombre dado por M. Gell-Mann al modelo inspirándose en el Budismo).

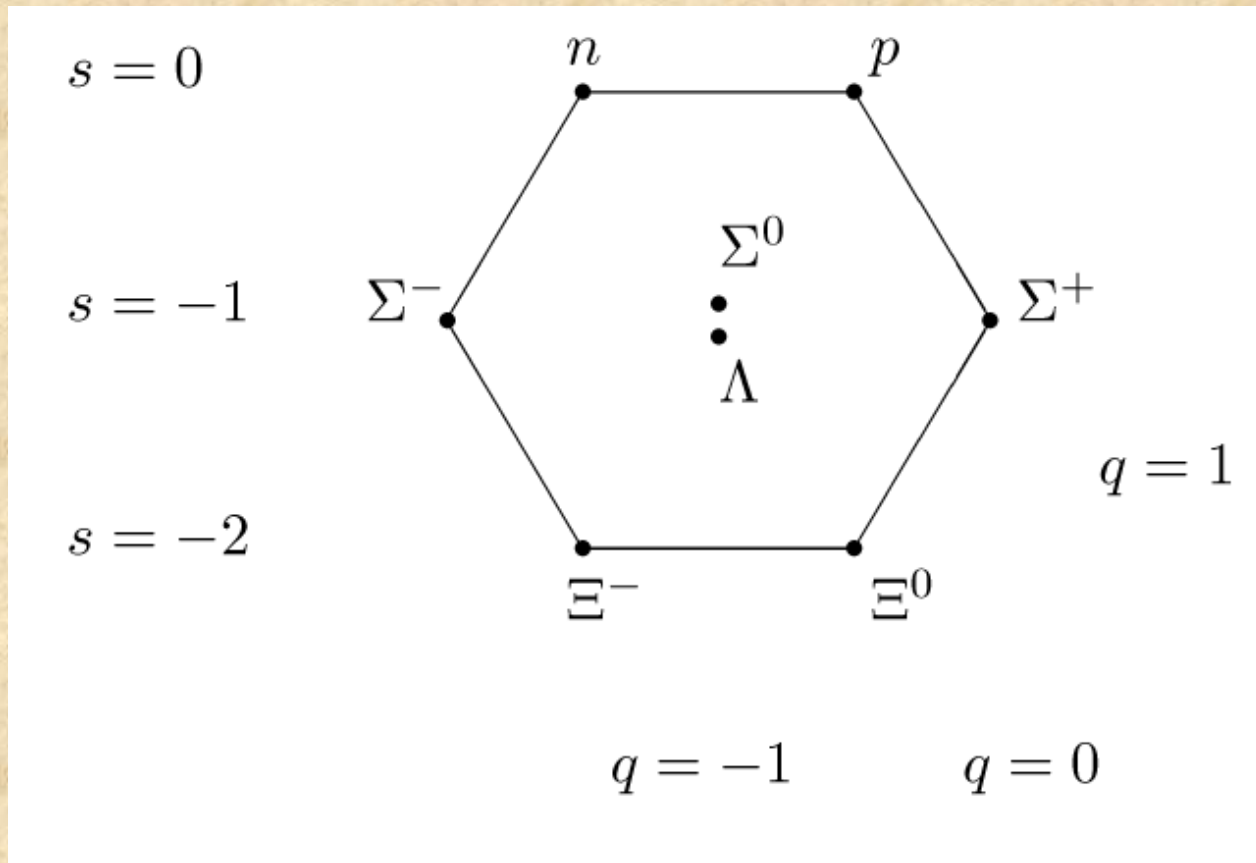
## El Camino Óctuple

Si se agrupan los bariones y los mesones en grupos de igual espín (J) e igual paridad (P), esto se ordenan en grupos de ocho (octetos), diez (decupletos), o están solos (singletes). Esto es curioso. Pero más interesante es como se ordenan cada uno de estos grupos al realizar un grafico Extrañeza (S) v/s Tercera componente del isoespín ( $I_3$ ). Veamos los siguientes casos:

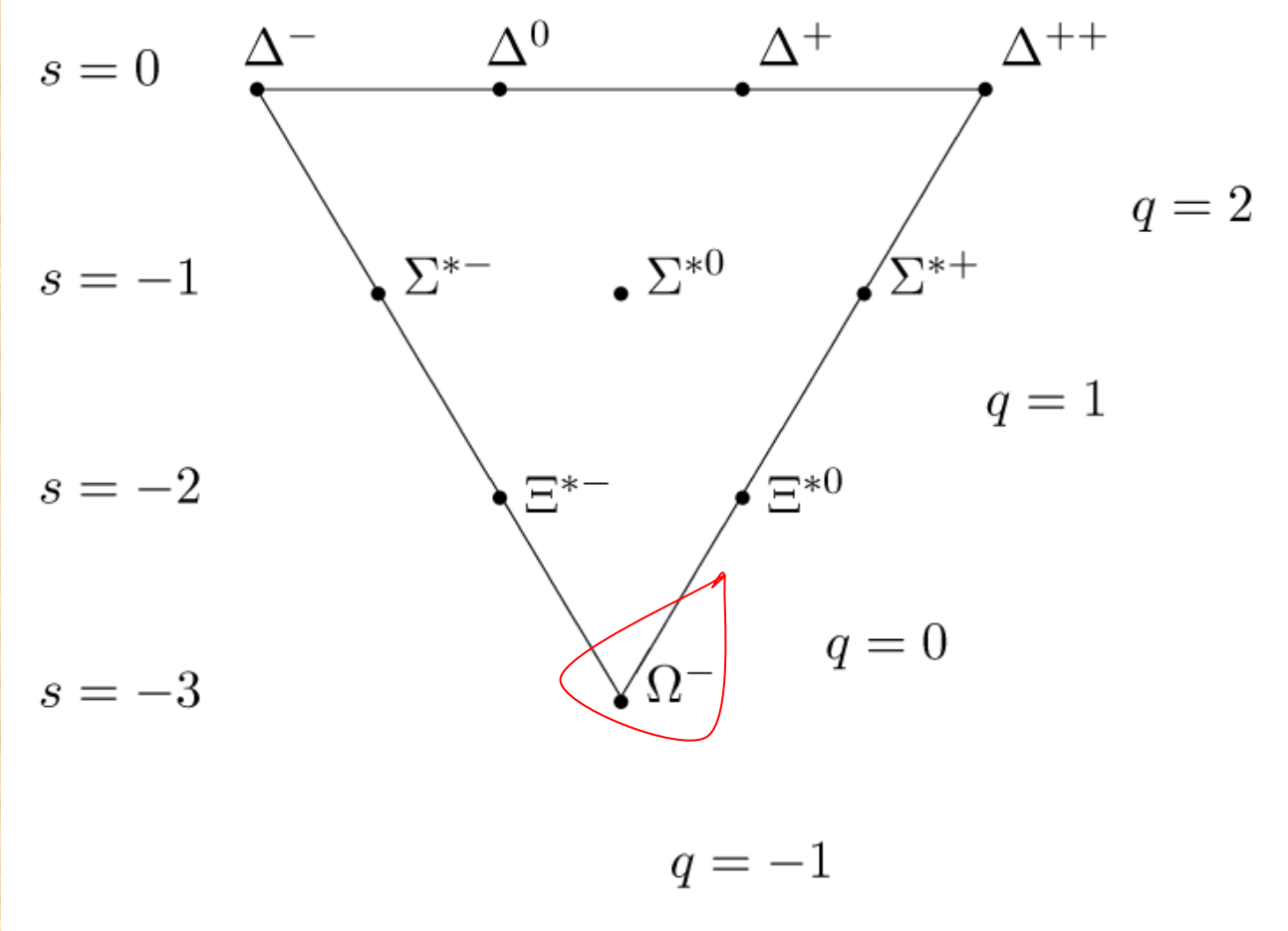
Octeto Mesónico:  $J=0, P=-$



Octeto Bariónico:  $J = 1/2, P = +$



Decapleteo Bariónico:  $J = 3/2, P = +$



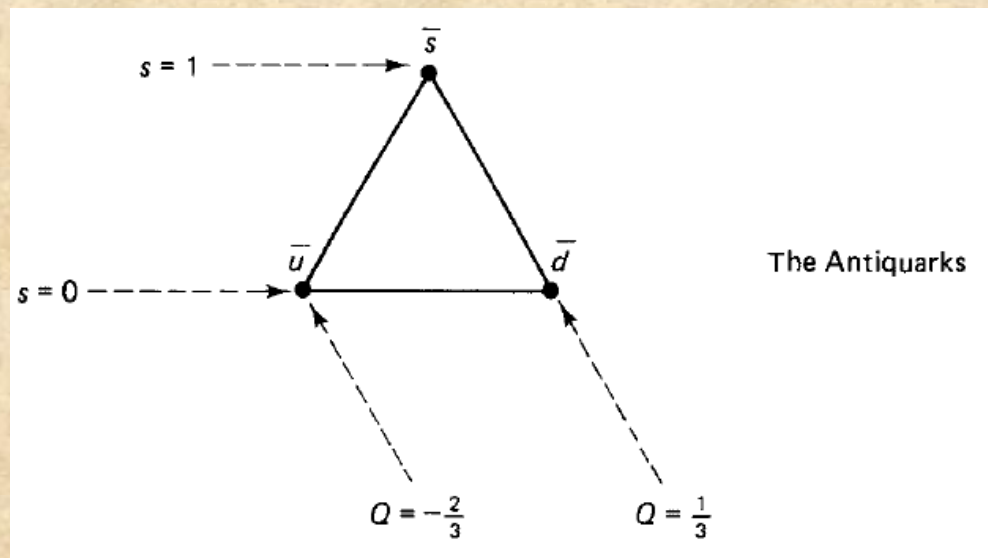
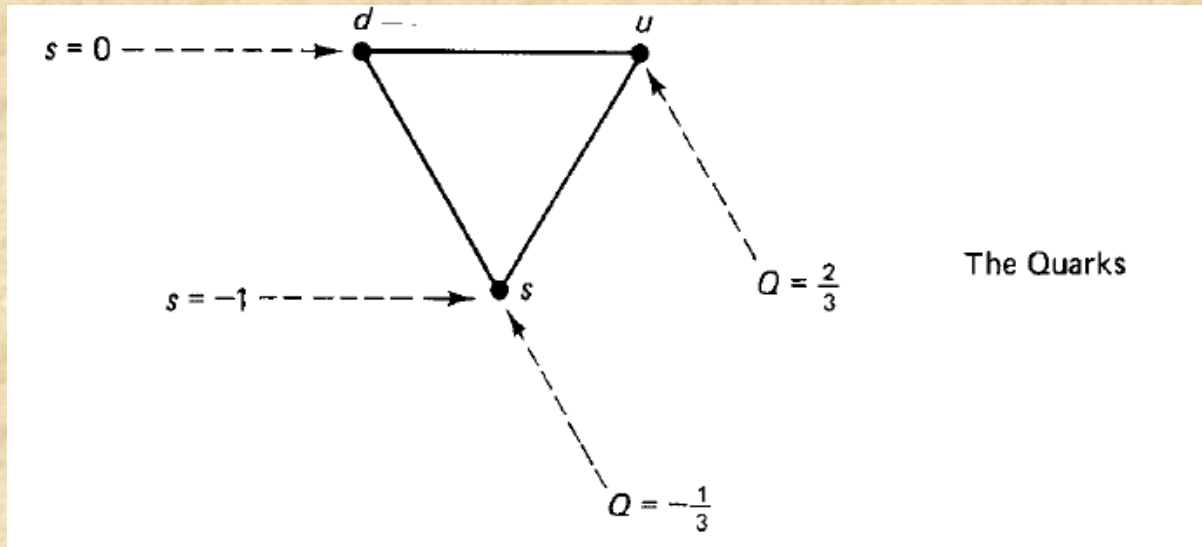
M. Gell-Mann e Y. Ne'eman sabían que estos diagramas son muy similares a los diagramas de Dinkin de las representaciones irreducibles del grupo SU(3). Aunque curiosamente no aparecen todos los diagramas que corresponden a este grupo. Por ejemplo, no está el diagrama que corresponde a la representación natural del grupo (de dimensión  $d = 3$ ).

Sin embargo notó que si se descomponen las siguientes representaciones reducibles del grupo SU(3) en representaciones irreducibles se obtienen las siguientes representaciones irreducibles:

$$(3) \times (3)' = (1) + (8)$$
$$(3) \times (3) \times (3) = (1) + 2(8) + (10)$$

En la formulación final del camino óctuple, dada por el mismo M. Gell-Mann e independientemente por G. Zweig en 1964, se postula que los hadrones no son partículas elementales, en cambio son partículas compuestas, estados ligados de otras partículas más pequeñas que en principio sí serían elementales y que M. Gell-Mann denominó quarks, nombre sacado de la enigmática frase "¡Tres quarks para Muster Mark!" del libro de James Joyce *Finnegans Wake*. Esto porque en el modelo original habían tres variedades (sabores) de quarks; el quark up, el down y el strange.

Los quark “viven” en la representación fundamental del grupo SU(3) y sus anti-partículas en la representación dual



## En este esquema se asume que los bariones están compuestos de combinaciones de tres quark y los mesones de combinaciones quark-antiquark

Con el formalismos del camino óctuple se logra explicar por qué los mesones y bariones se agrupan y ordenan de esta manera tan peculiar, además se da un orden al zoo de partículas hadrónicas, unido al hecho de que ya no se tienen más de cien partículas elementales, ya que los hadrones no son elementales ahora son los quarks que son muchos menos (seis en el modelo estándar) y además están de algún modo relacionados entre ellos formando familias.

Un hecho importante que ayudó a la consolidación del modelo de quarks fue el descubrimiento del barión  $\Omega^-$ . En el tiempo en que M. Gell-Mann postuló la existencia de los quarks y ordenó los mesones y bariones en multipletes sólo se conocían nueve bariones, la décima

partícula (en la parte más baja del decuplete) de carga  $-1$  y extrañeza  $-3$  no se conocía. M. Gellman predijo la existencia de este décimo barión y determinó su masa, también reconoció que la vida media de esta partícula debía ser mayor respecto de sus compañeros del decuplete esto porque  $\Omega^-$  se desintegra debido a interacciones débiles. De este modo Gell-Mann les dijo a los físicos experimentales que existía un nuevo barión y les mostró donde debían buscarlo. Naturalmente el  $\Omega^-$  fue encontrado en 1964 [4] con exactamente las propiedades que Gell-Mann había predicho.

## Preguntas abiertas de este modelo

Sin embargo faltaba explicar algunas cosas, en particular cual es la dinámica de estos quarks, es decir faltaba una teoría que diera una explicación a como interactúan los quarks entre si para formar los hadrones. Además existía el problema de que los quarks como partículas independientes no aparecían en los experimentos. La solución a estos problemas vino de promover a la invariancia global de color de la teoría de quarks a una invariancia local de gauge. Los primeros en poner de manifiesto que las teorías de Yang-Mills eran ideales para describir las interacciones entre los quarks fueron M. Gell-Mann, H. Fritzsche y Y. Nambu. Por su parte la comunidad científica fue aceptando en forma gradual que ésta era la solución para el problema de las interacciones fuertes hasta que finalmente esta idea fue completamente aceptada con el advenimiento de la libertad asintótica y el descubrimiento de la partícula  $J/\Psi$  en 1974.

## El Nacimiento de QCD (Cromodinámica Cuántica)

La invarianza global de color fue originalmente implementada por O. Greenberg en 1964 [6] para solucionar un problema del modelo de quarks que consistía en que a pesar de que los quarks tiene espín  $1/2$  no parecían comportarse como fermiones. En un decuplete, por ejemplo, el  $\Omega^-$  contiene tres quarks idénticos con espín rotando en la misma dirección. Esto debía estar prohibido por el principio de exclusión de Pauli. Sin embargo en la nueva teoría, cada uno de los quarks en el interior de una partícula tal como el  $\Omega^-$  tienen un color diferente y, por lo tanto, uno puede demostrar matemáticamente que ellos tienen que formar decupletes y octetos exactamente igual que los bariones.

De este modo nace la Cromodinámica Cuántica (*QCD*) por sus siglas en inglés al introducir el color como una invariancia local a la teoría de los quarks. Como los colores son tres entonces la teoría es invariante local  $SU(3)$  donde los campos de materia son los quarks y los campos de gauge mediadores de las interacciones entre los quarks son ocho campos vectoriales sin masa denominados gluones.

## El color está confinado

En este modelo se impone que todos los hadrones no tienen color. Luego como el número de colores es tres, entonces las únicas combinaciones permitidas de quarks son:

Quark-antiquark = Mesón

Quark-quark-quark = Barión

Al promover la invariancia global de color a una invariancia local (i.e. una teoría tipo Yang-Mills) se introduce en forma natural una interacción entre los quarks, la cual está mediada por 8 campos de gauge (sin masa) denominados gluones.

Es posible demostrar (David Gross, Frank Wilczek, y David Politzer en 1973) que una teoría de gauge no-abeliana posee libertad asintótica (Nobel de física para estos caballeros en el 2004).

Falta por demostrar confinamiento y estudiar en detalle (a partir de los grados de libertad de QCD) las propiedades de los hadrones. Esto no es fácil debido a que corresponde a cálculos no-perturbativos.

# Fuerza nuclear débil

La simetría que está detrás de la Fuerza Nuclear débil es  $SU(3)_L$   
Los campos de gauge físicos que median esta fuerza son tres  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $J_0$ .  
Y son superposición de los tres generadores del grupo  $SU(3)$ .

Debido al rompimiento espontáneo de la simetría  $U(1) \times SU(2)_L$  estos bosones de gauge poseen masa

- $W^+$  has a mass of  $80 \text{ GeV}/c^2$  and carries +1 electric charge.
- $W^-$  has a mass of  $80 \text{ GeV}/c^2$  and carries -1 electric charge.
- $Z$  has a mass of  $91 \text{ GeV}/c^2$  and is electrically neutral.

The massive gauge bosons of the weak interaction are spin-1 and can have three polarization states.

# Partículas en el Modelo Estándar

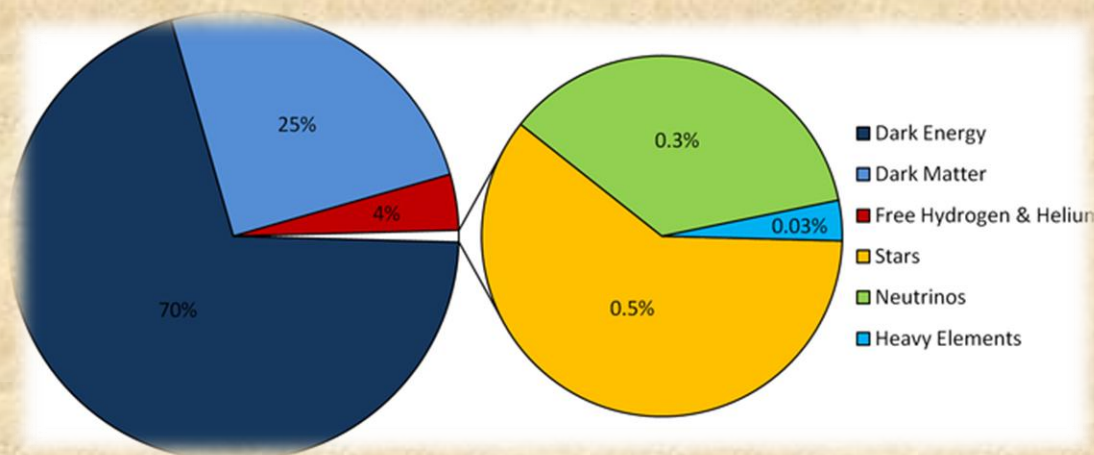
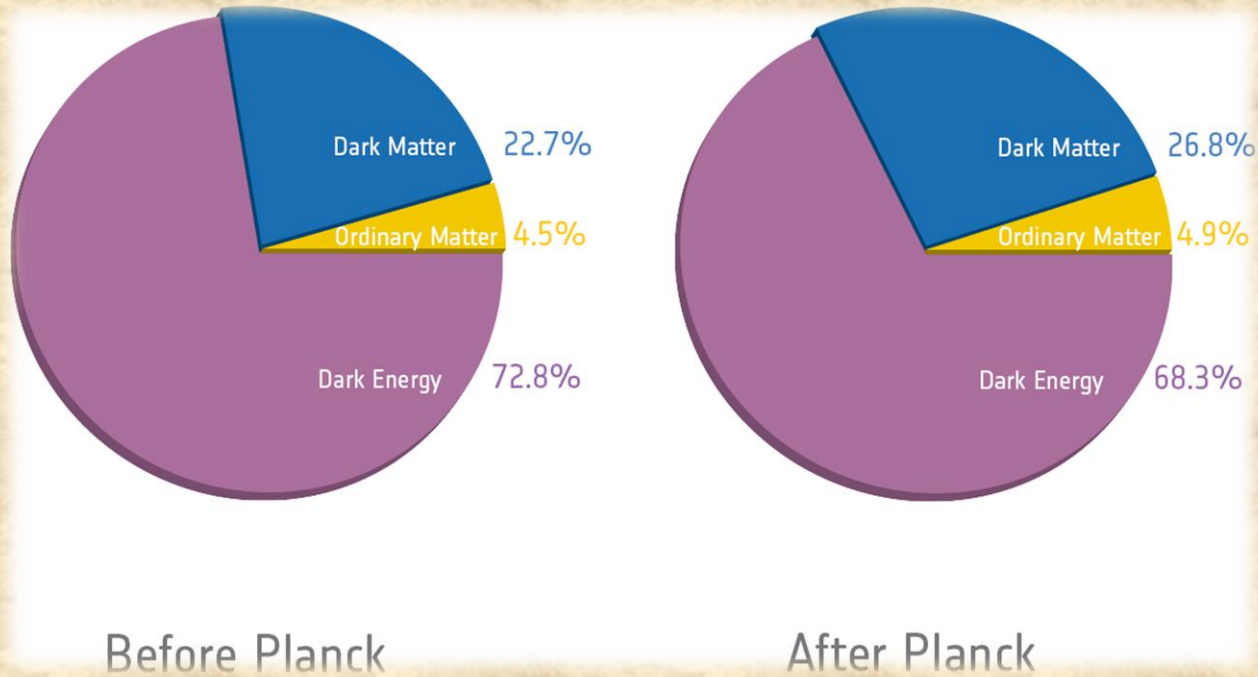
Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptones	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> fuerza débil
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> fuerza débil

Bosons (Fuerzas)

+ Boson de Higgs

# Contenido de materia en el universo



# Algunas consideraciones

**No existen neutrinos derechos:** Ver en la pizarra definición de helicidad y de quiralidad

## **Simetrías del Modelo Estándar:**

- Simetrías de gauge:  $SU(3)_c$ ,  $U(1) \times SU(3)_L$
- Notar que  $SU(3)$  no está rota pero su carga está confinada
- La simetría  $U(1) \times SU(3)_L$  está espontáneamente rota debido al campo de Higgs.
  
- Conservación del número leptónico.
- Conservación del número leptónico por familia ?
- Conservación del número bariónico. (anomalía?)
- Conservación de  $B - L$ .

Fin