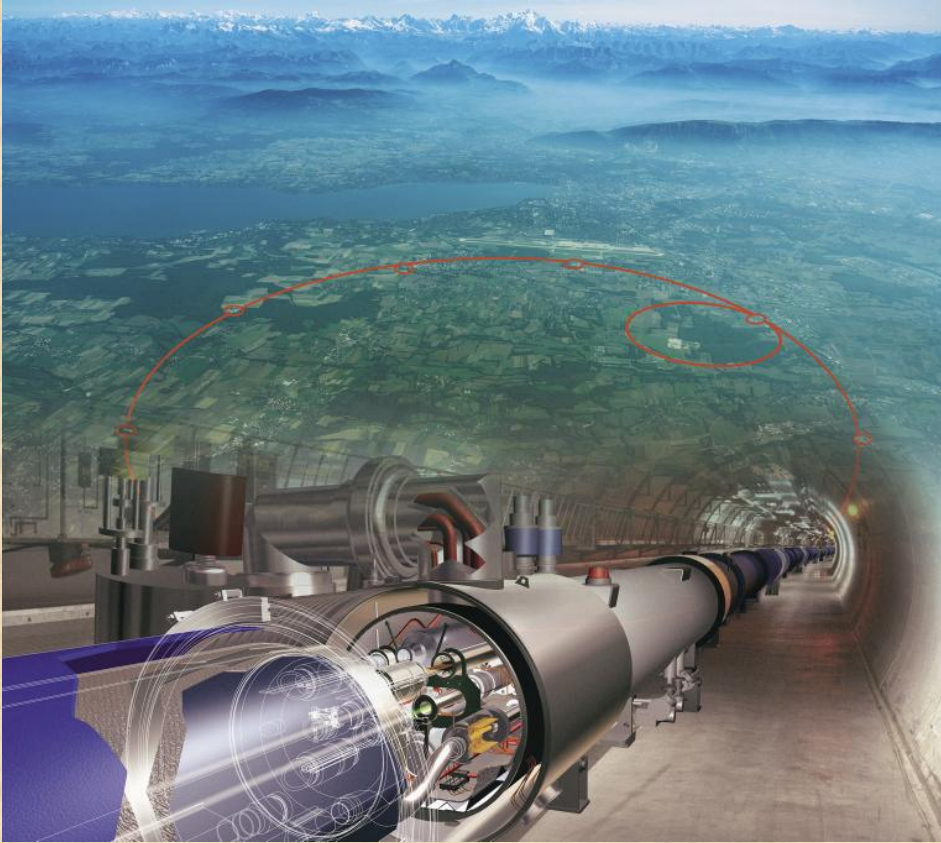


Introducción a la Física de las Partículas Elementales



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

Primer Semestre 2012

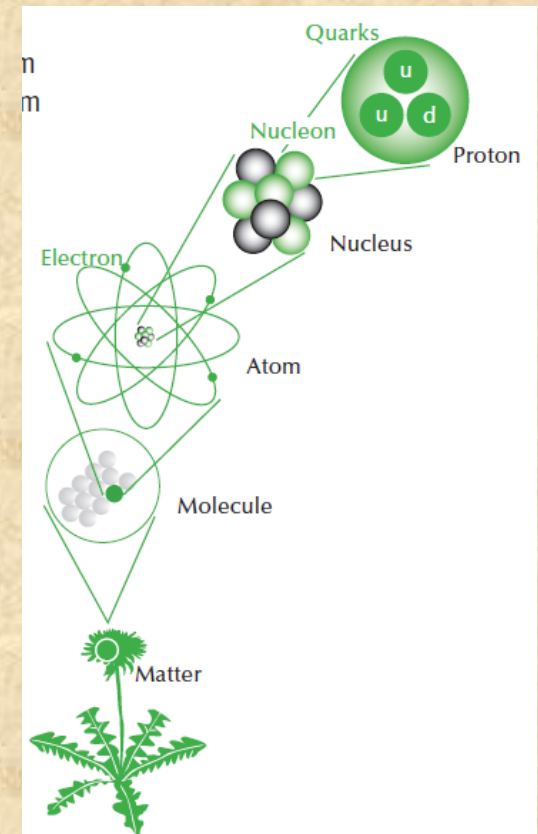
Introducción al modelo estándar de Física de Partículas

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

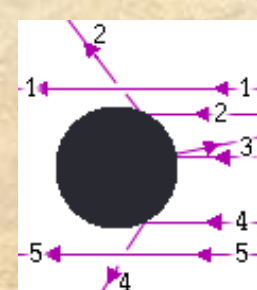
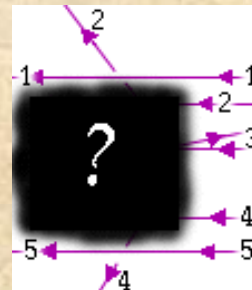
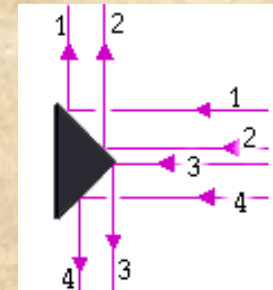
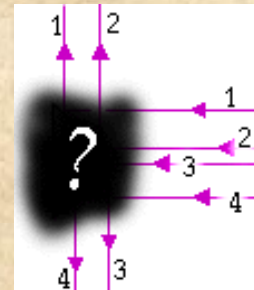


El Large Hadron Collider (LHC)

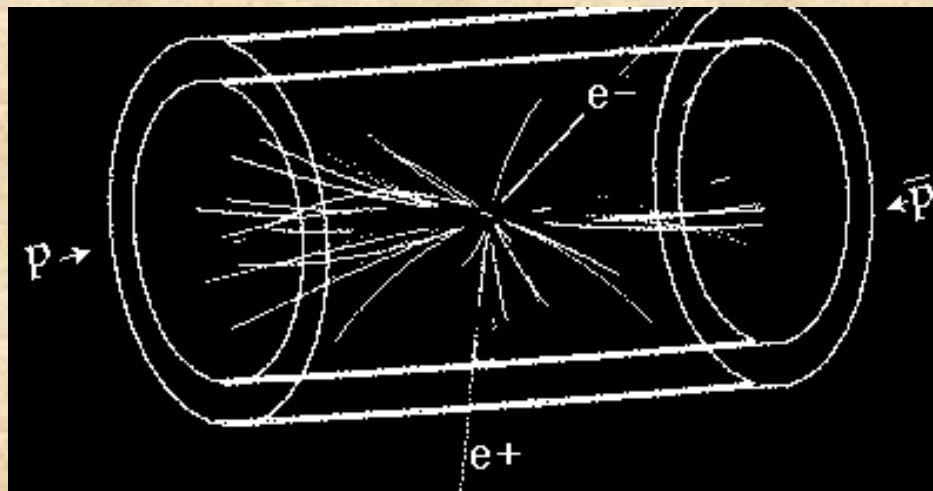
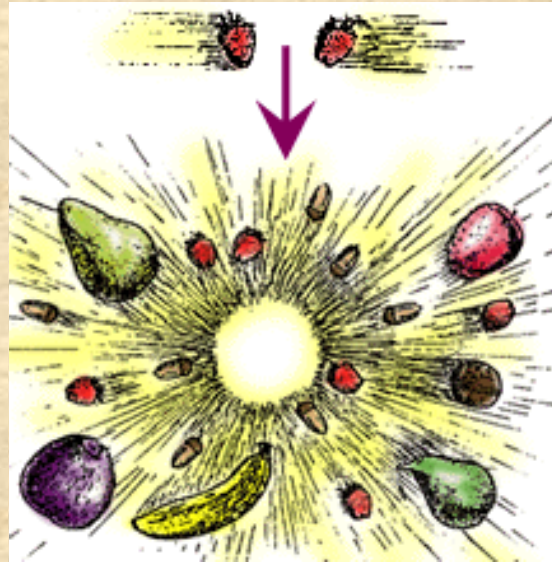
El Gran Colisionador de hadrones

- 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.



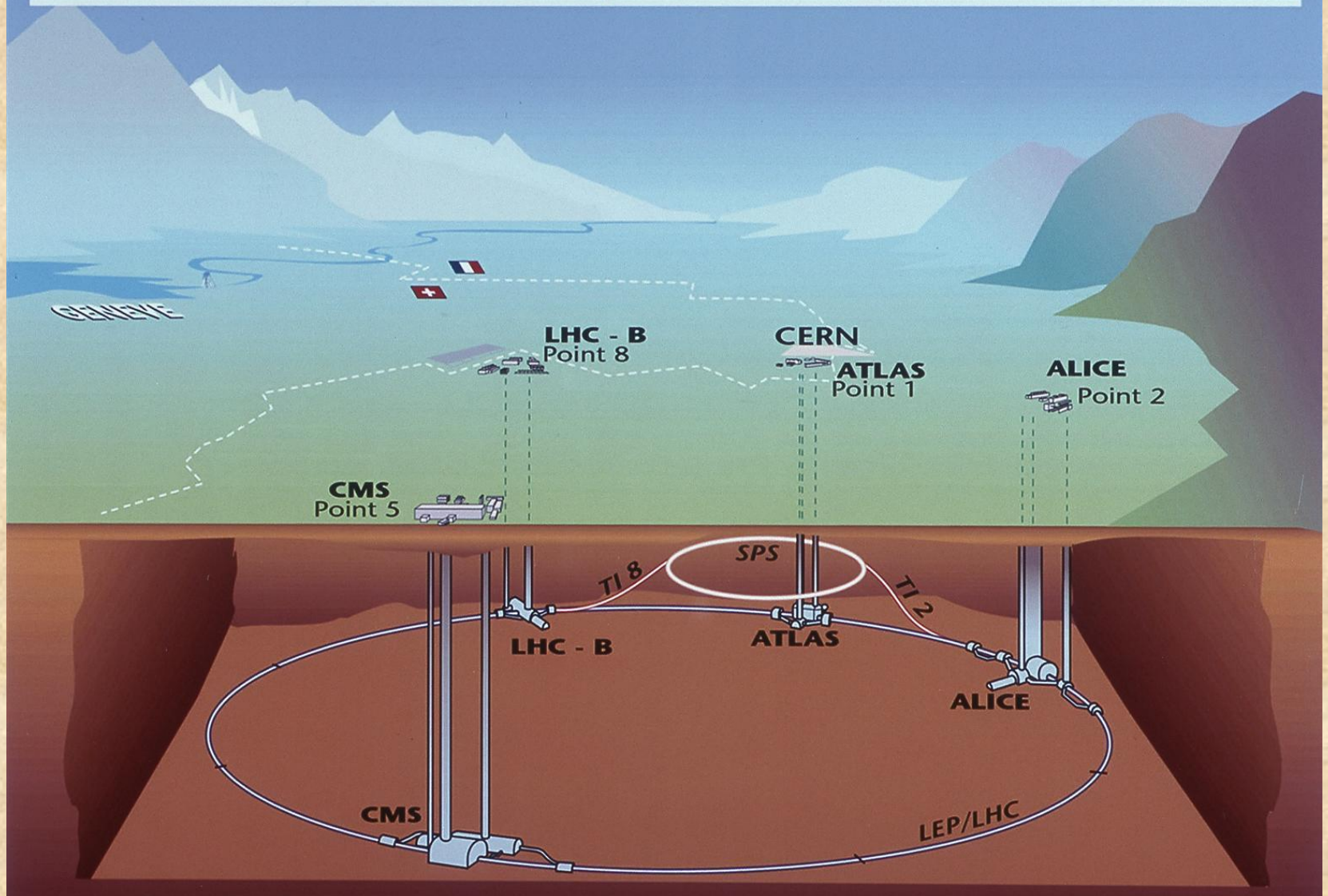
Características del LHC

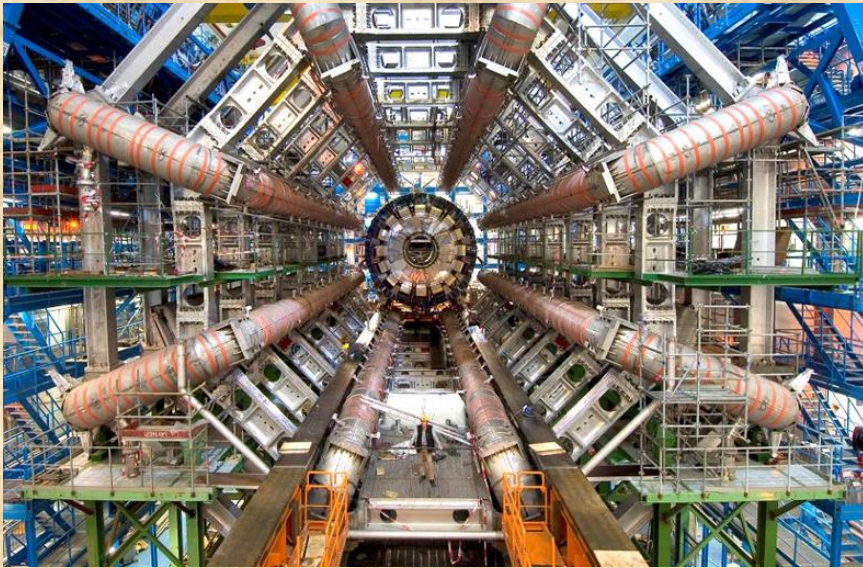
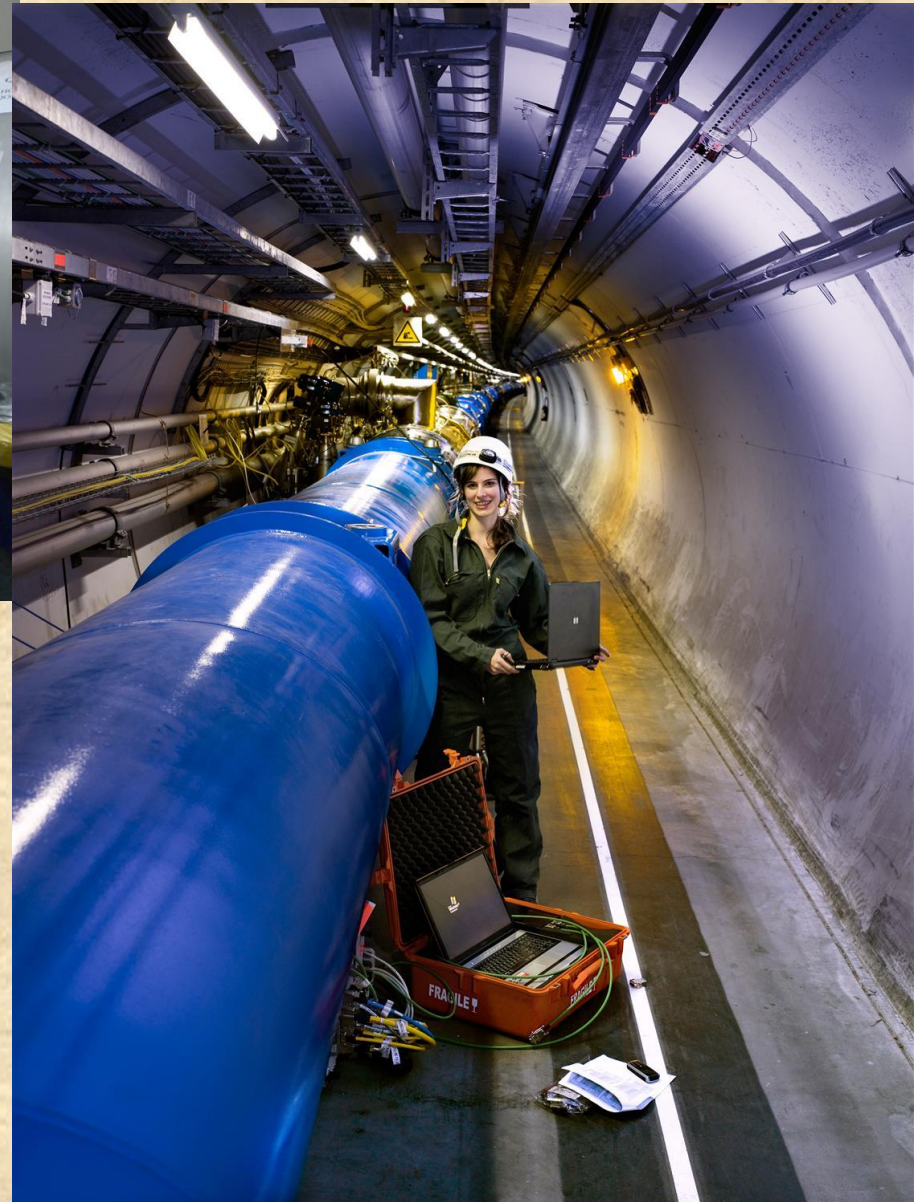


El LHC consiste en un túnel circular de 27 Km de circunferencia. Este túnel está enterrado a una profundidad que va entre 50 a 175 m y se encuentra ubicado cerca de la frontera entre Francia y Suiza.

Vista panorámica del LHC

Overall view of the LHC experiments.





El túnel

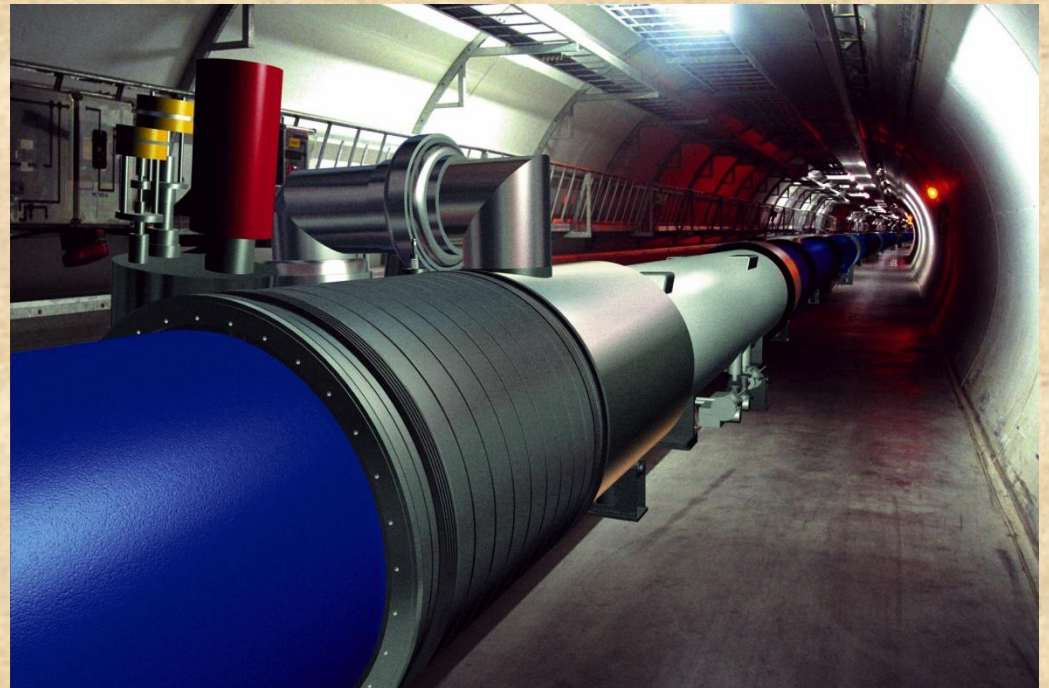


El túnel utilizado en el LHC corresponde a un túnel construido en los años 80 para albergar el experimento LEP (Large electron-positron collider) en funcionamiento entre los años 1989-2000.



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	μ (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)

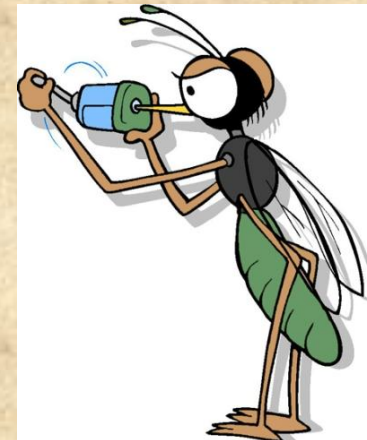
Electrón-Volt (eV): es una unidad de energía utilizada con frecuencia por los físicos. En el Sistema Internacional (SI) la energía se mide en Joule (J). Para tener una idea concreta veamos a que corresponde una energía de un TeV.

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

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!!!

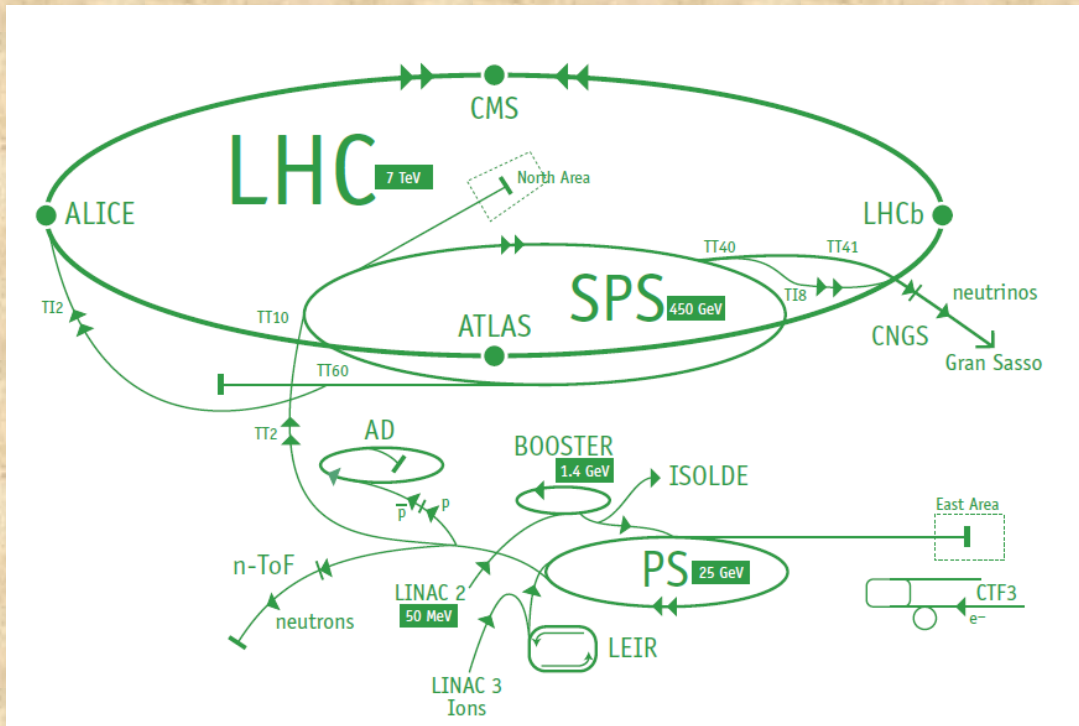
Nunca antes reproducidas en un laboratorio



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.

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

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

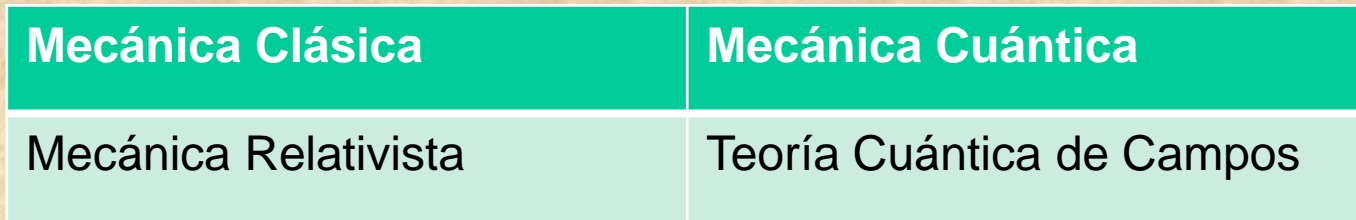
Unit	Metric value	Derivation
1 eV ⁻¹ of length	1.97×10 ⁻⁷ m	= (1eV ⁻¹) $\hbar c$
1 eV of mass	1.78×10 ⁻³⁶ kg	= (1eV) / c ²
1 eV ⁻¹ of time	6.58×10 ⁻¹⁶ s	= (1eV ⁻¹) \hbar
1 unit of electric charge (for rationalized)	5.29×10 ⁻¹⁹ C	= $\sqrt{\hbar c \epsilon_0}$
1 eV of temperature	1.16×10 ⁴ K	= 1eV / k _B

La Filosofía que soporta el esquema del curso

Teoría Cuántica de Campos

Pequeñas escalas 

Rápido



Mecánica Clásica	Mecánica Cuántica
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).

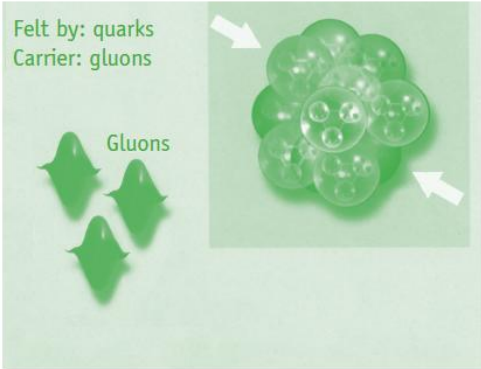
Fuerzas Fundamentales

Fuerza Nuclear Fuerte

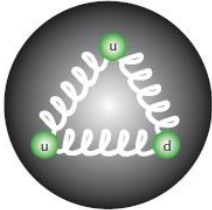
STRONG FORCE

Felt by: quarks
Carrier: gluons

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.

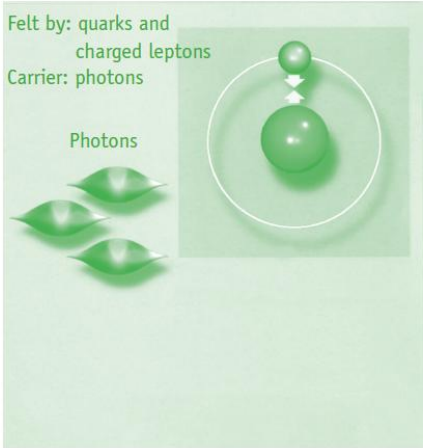


Fuerza Electromagnética



ELECTROMAGNETIC FORCE

Felt by: quarks and charged leptons
Carrier: photons

Photons



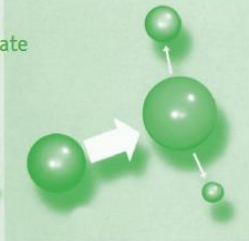
Associated phenomena
It holds electrons to nuclei in atoms, binds atoms into molecules, and is responsible for the properties of solids, liquids and gases.



Fuerza Nuclear Débil

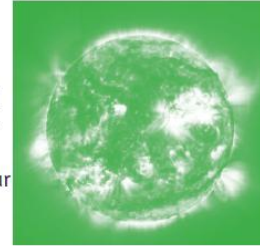
WEAK FORCE

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

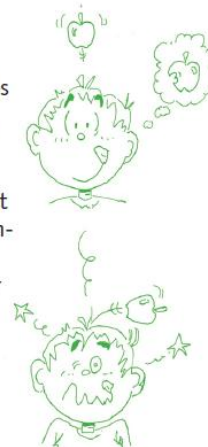
GRAVITATION

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	Graviton	Infinito

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 descubierta 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.

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)

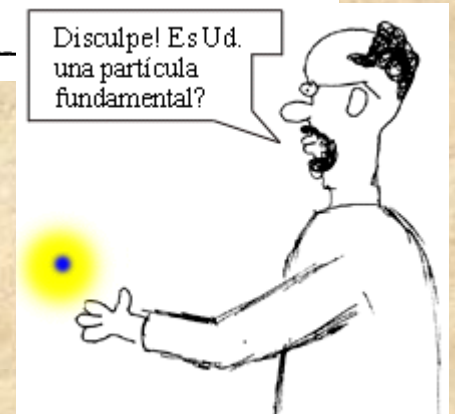
Table 7. Some properties of the known baryons belonging to the 20_m of SU(4). Experimental values adapted from Trippe *et al* (1976, 1977).

Symbol	Mass (MeV)	Mean lifetime (s) or width	Principal decay modes
p	938.280 ± 0.003	Stable	
n	939.573 ± 0.003	918 ± 14	$p e^{-} \nu$ 100%
Λ	1115.60 ± 0.05	$(2.58 \pm 0.02) \times 10^{-10}$	$p \pi^{-}$ (64.2 ± 0.5)% $n \pi^0$ (35.8 ± 0.5)%
Σ^{+}	1189.37 ± 0.06	$(0.800 \pm 0.006) \times 10^{-10}$	$p \pi^0$ (51.6 ± 0.7)% $n \pi^{+}$ (48.4 ± 0.7)%
Σ^0	1192.47 ± 0.08	$< 10^{-14}$	$\Lambda \gamma$ 100%
Σ^{-}	1197.35 ± 0.06	$(1.48 \pm 0.02) \times 10^{-10}$	$n \pi^{-}$ 100%
Ξ^0	1314.9 ± 0.6	$(2.96 \pm 0.12) \times 10^{-10}$	$\Lambda \pi^0$ 100%
Ξ^{-}	1321.3 ± 0.2	$(1.65 \pm 0.02) \times 10^{-10}$	$\Lambda \pi^{-}$ 100%
Λ_c^{+}	2260 ± 10	< 75 MeV	$\Lambda \pi^{+} \pi^{+} \pi^{-}$ (only mode seen so far)
Σ_c^{++}	2426 ± 12	?	$\Lambda_c^{+} \pi^{+}$ (only mode seen so far)
Σ_c^0	2426 ± 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
Δ^{++}	1232 ± 2	115 ± 5	$p\pi^+ \sim 100\%$
Δ^+	?	?	$p\pi^0, n\pi^+ \sim 99.4\%$
Δ^0	1232 ± 2	120 ± 5	$p\pi^-, n\pi^0 \sim 99.4\%$
Δ^-	1237 ± 5		$n\pi^- \sim 100\%$
Σ^{*+}	1382.5 ± 0.5	35 ± 2	$\Lambda\pi^+ (88 \pm 2)\%$ $\Sigma^+\pi^0, \Sigma^0\pi^+ (12 \pm 2)\%$
Σ^{*0}	~ 1385	~ 40	$\Lambda\pi^0 \sim 88\%$ $\Sigma^+\pi^-, \Sigma^-\pi^+ \sim 12\%$
Σ^{*-}	1386.6 ± 1.2	42 ± 4	$\Lambda\pi^- \sim 88\%$ $\Sigma^0\pi^-, \Sigma^-\pi^0 \sim 12\%$
Ξ^{*0}	1531.8 ± 0.3	9.1 ± 0.5	$\Xi^0\pi^0, \Xi^-\pi^+ \sim 100\%$
Ξ^{*-}	1535.1 ± 0.6	10 ± 2	$\Xi^-\pi^0, \Xi^0\pi^- \sim 100\%$
Ω^-	1672.2 ± 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
π^+	$u\bar{d}$	1	1	0	0	0
π^0	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	1	0	0	0	0
π^-	$d\bar{u}$	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
η	$(u\bar{u} + d\bar{d})\sqrt{2}, s\bar{s}$	0	0	0	0	0
η'	$(u\bar{u} + d\bar{d})\sqrt{2}, s\bar{s}$	0	0	0	0	0
χ	$c\bar{c}$	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
χ_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?

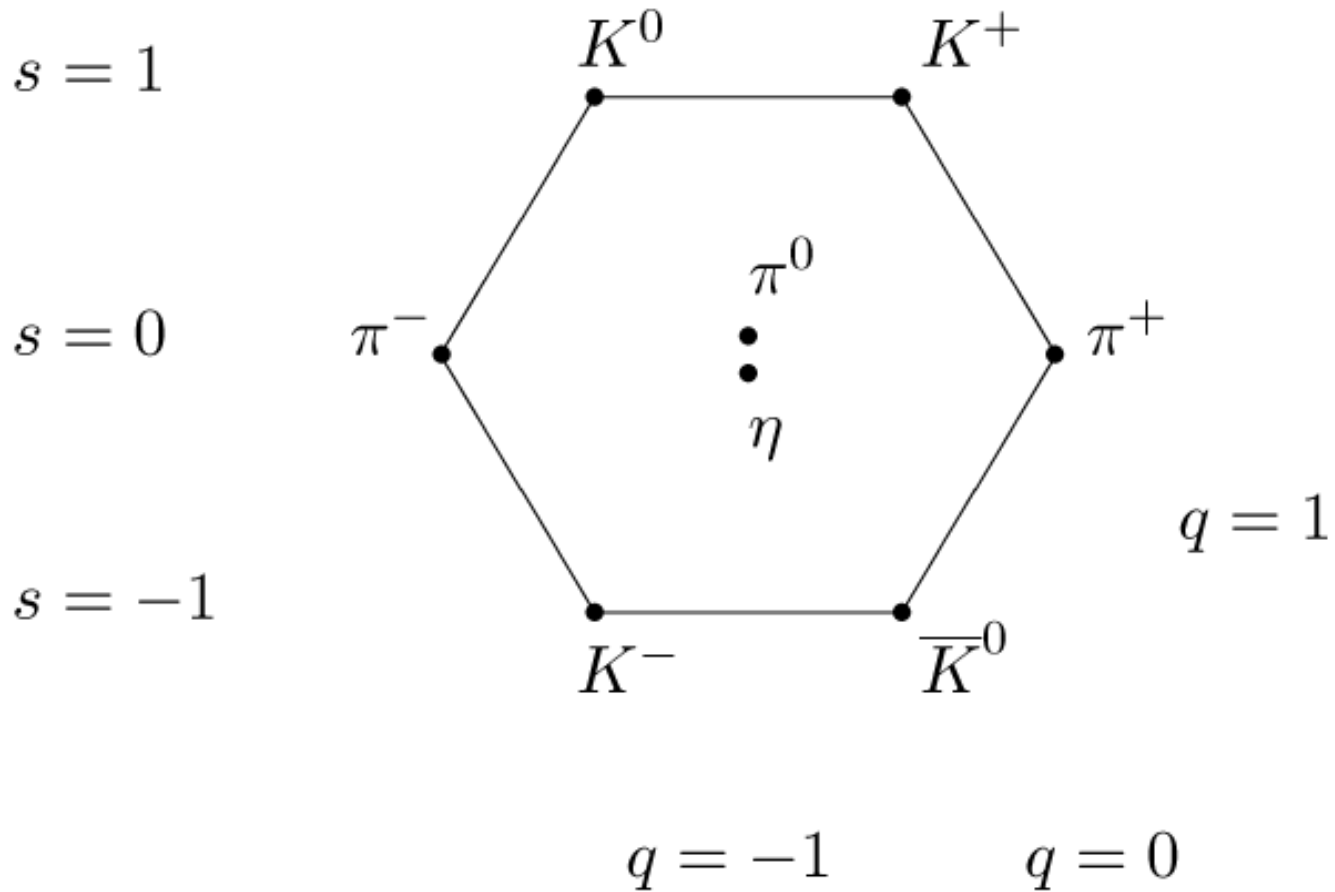


Para resolver este problema primero había que clasificar a los hadrones de una manera astuta. Murray Gell-Mann y el físico Israelí Yuval Ne'eman a comienzos de los años sesenta se convirtieron en los Dimitri Mendeleev de la era moderna al encontrar lo que sería el análogo de la tabla periódica de los 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).

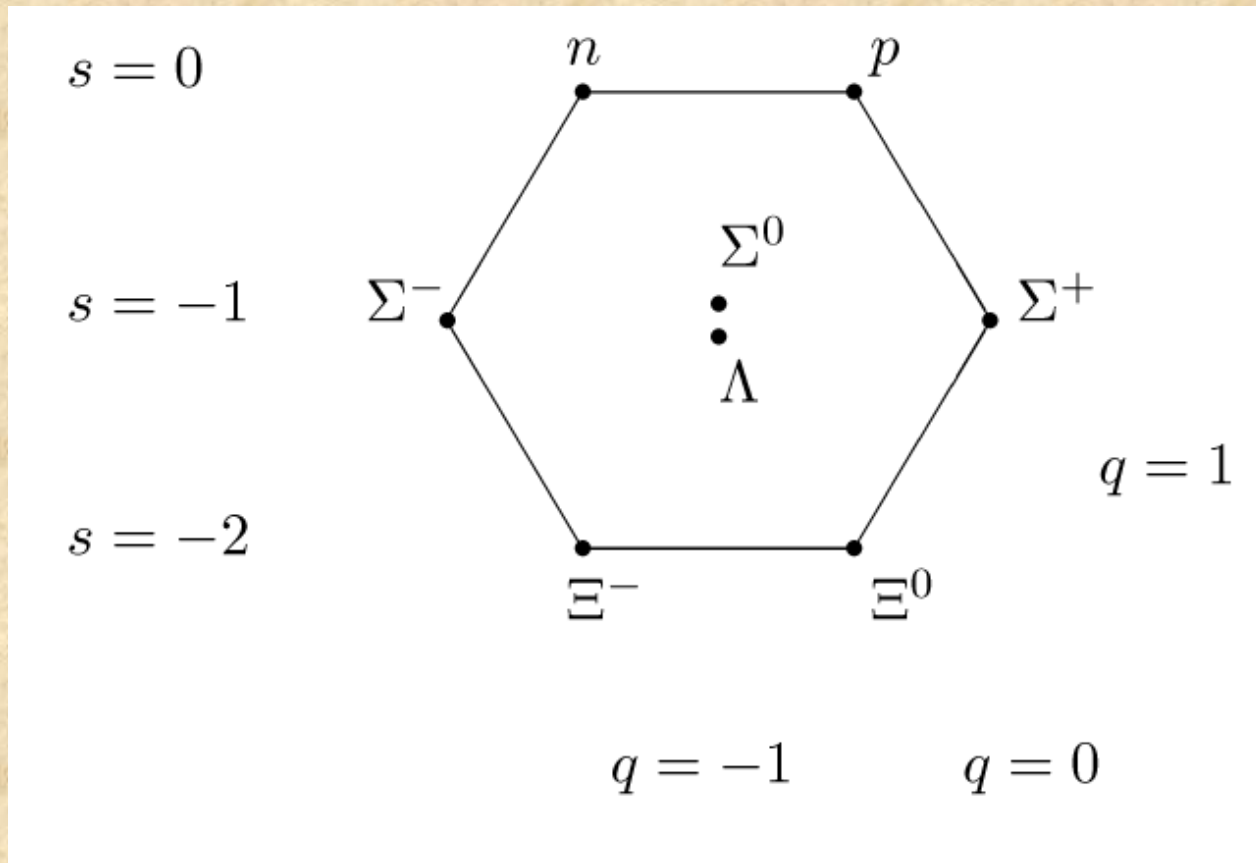
El Camino Óctuple

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 (decapletos), 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:

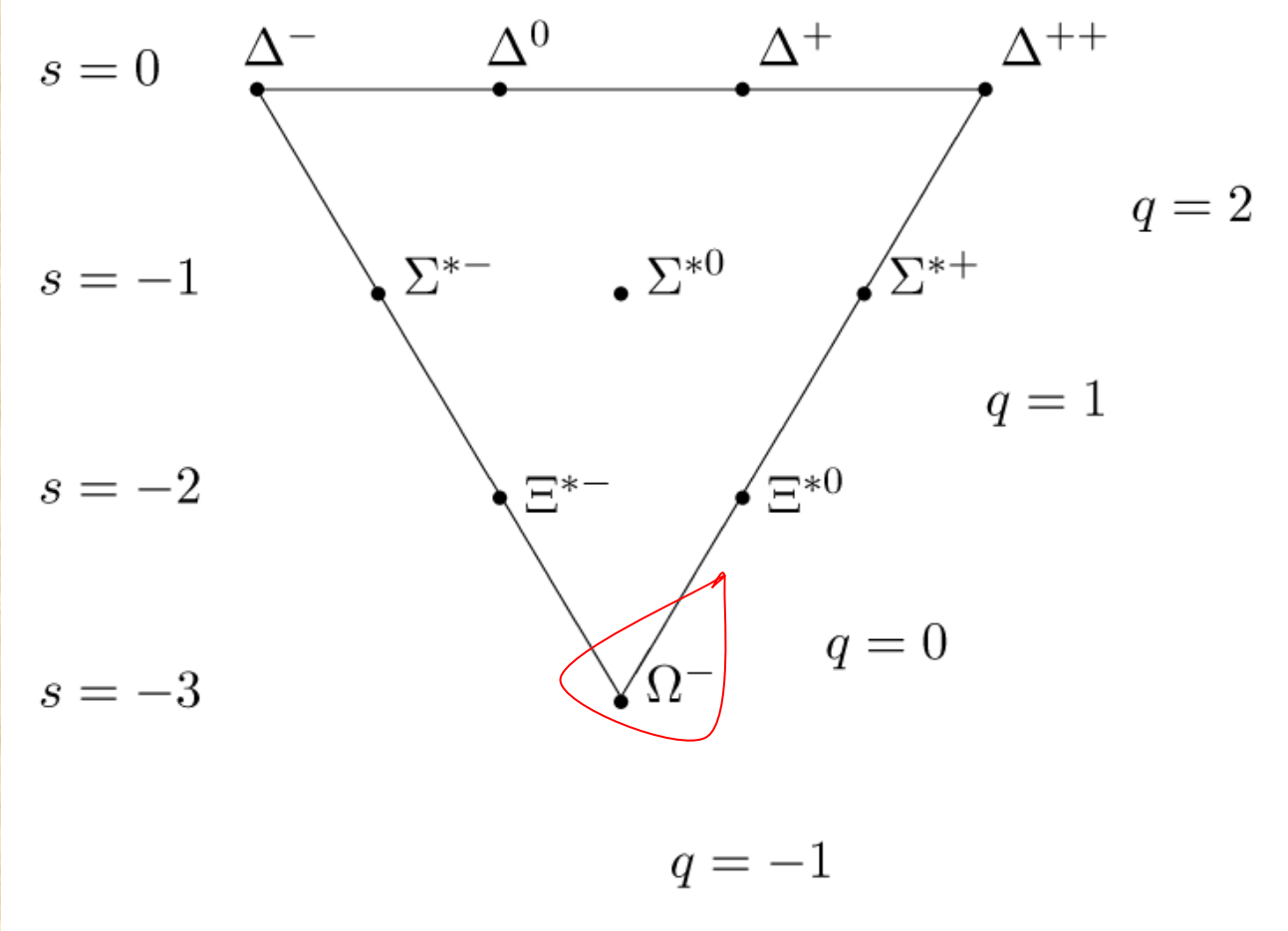
Octeto Mesónico: $J=0, P=-$



Octeto Bariónico: $J = 1/2, P = +$



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



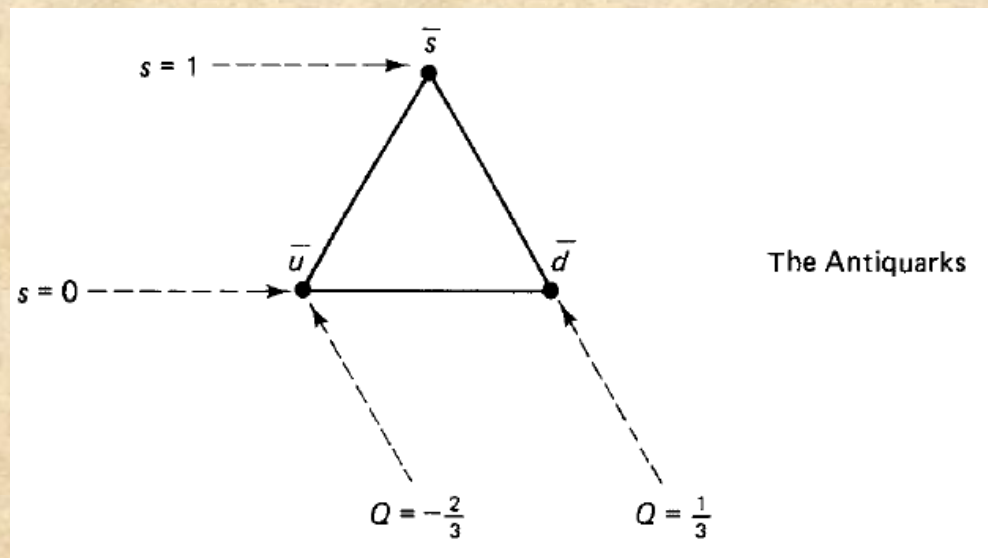
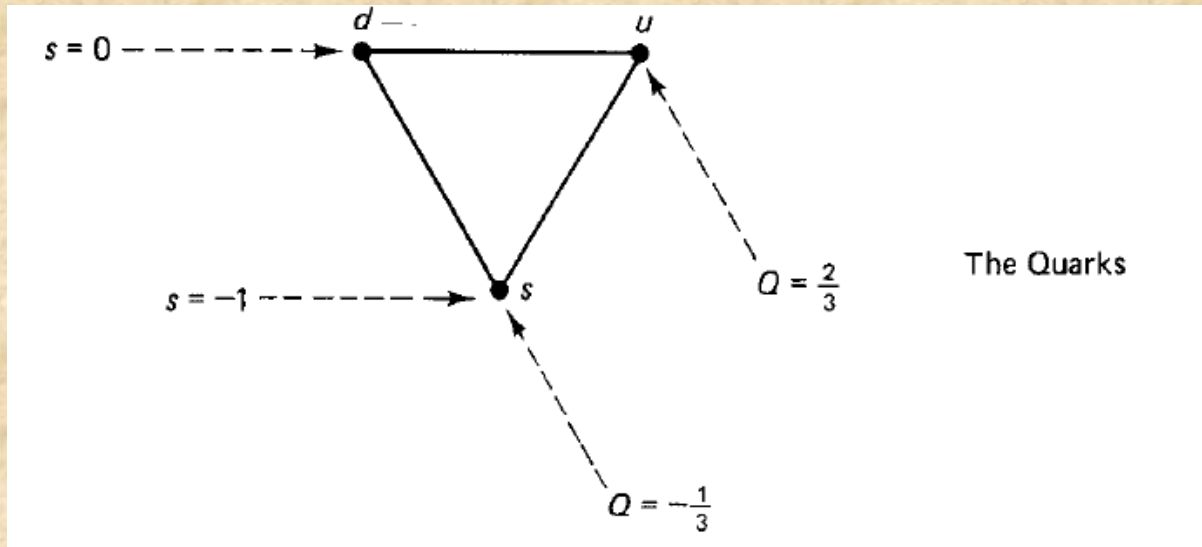
M. Gell-Mann e Y. Ne'eman sabían que estos diagramas son muy similares a los diagramas de Dinkin de las representaciones irreducibles del grupo SU(3). Aunque curiosamente no aparecen todos los diagramas que corresponden a este grupo. Por ejemplo, no está el diagrama que corresponde a la representación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

$$\begin{aligned}(3) \times (3)' &= (1) + (8) \\ (3) \times (3) \times (3) &= (1) + 2(8) + (10)\end{aligned}$$

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 Ω^- . 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 Ω^- 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 Ω^- 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. Fritzsch 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/Ψ 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 Ω^- 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 Ω^- 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 →	u up	c charm	t top	γ 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
	d down	s strange	b bottom	g 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
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ 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
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] fuerza débil

Bosons (Fuerzas)

+ Boson de Higgs

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