

# **Seminario de Partículas y Campos**

**Mariel Santangelo**

*Departamento de Física - Universidad Nacional de La Plata*

*Argentina*

**2013**

# Contents

⇒ ●	Introducción . . . . .	2
●	Unidades y órdenes de magnitud . . . . .	3
●	Aceleradores de partículas . . . . .	8
●	Detectores de partículas . . . . .	14
●	La noción de partícula elemental a lo largo del siglo XX . . . . .	19
●	Las teoría de interacciones fundamentales: evolución histórica . . . . .	43

## Bibliografía

- Michael Peskin and Daniel Schroeder; An Introduction to Quantum Field Theory; Perseus Books, Reading, U.S.A. (1995).
- David Griffiths, Introduction to Elementary Particles; John Wiley VCH, Weinheim, Germany (2004).

# Introducción

Dos preguntas de la física subatómica:

- Cuáles son las partículas elementales?
- Cómo interactúan?

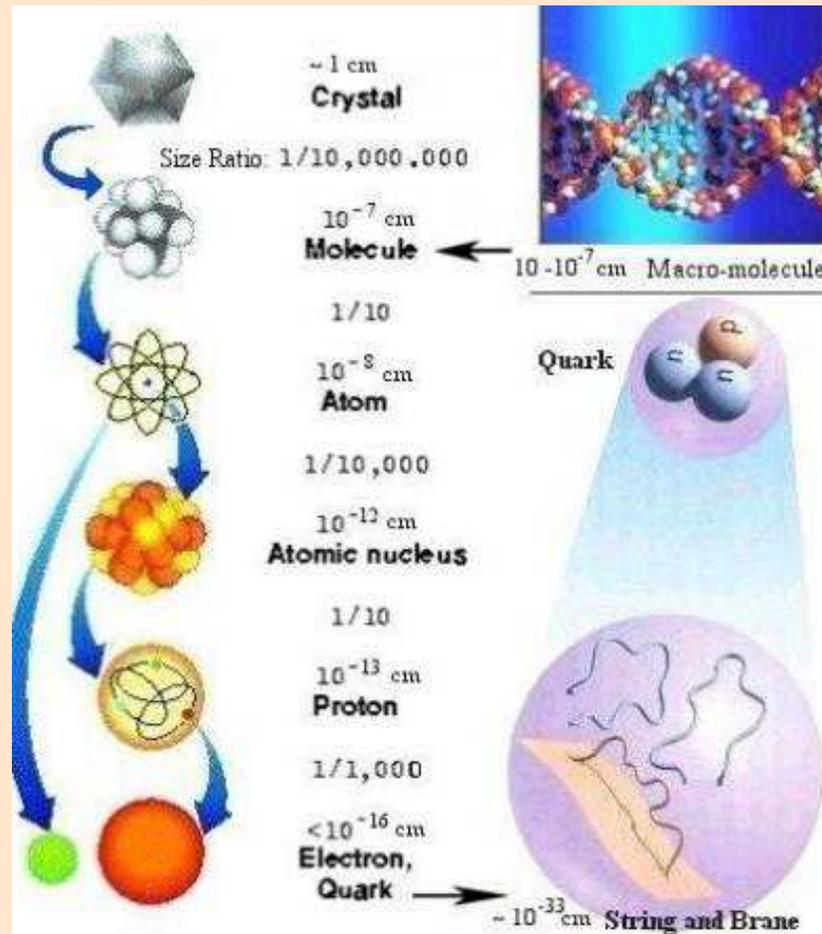
↓ VELOCIDAD CRECIENTE

C NR	NC NR
C R	NC R

TAMAÑO CRECIENTE →

Teorías de partículas elementales: **CR**

## Unidades y órdenes de magnitud



$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} \quad 1 \text{ eV} = 1,62 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

<b>Energía (eV)</b>	<b>Comentarios</b>
$1.2 \times 10^{28}$	Energía de Planck
$\sim 3 \times 10^{25}$	Escala de unificación fuerzas débiles, electromagnéticas y fuertes
	<b>DESIERTO DE ENERGÍAS</b>
$\sim 10^{12}$	Energía máxima accesible al <a href="#">LHC</a>
$\sim 2 \times 10^{11}$	Masa en reposo del quark top
$\sim 9 \times 10^{10}$	Masa en reposo de los bosones intermedarios ( $W^+$ , $W^-$ , $Z^0$ )
$\sim 1 \times 10^9$	Masa en reposo del protón y del neutrón
$\sim 5 \times 10^5$	Masa en reposo del electrón
$\sim 1.4 \times 10^1$	Energía de ligadura del electrón en el átomo de hidrógeno

## Unidades “naturales”

$[L]$ : dimensiones de longitud     $[T]$ : dimensiones de tiempo     $[M]$ : dimensiones de masa

En particular:

$$[c] = \frac{[L]}{[T]} \quad [\hbar] = \frac{[M] [L]^2}{[T]}$$

$$\hbar = c = 1$$

En unidades “naturales”:     $[L] = [T]$      $[M] = [L]^{-1}$      $[E] = [M]$

## Producción de partículas

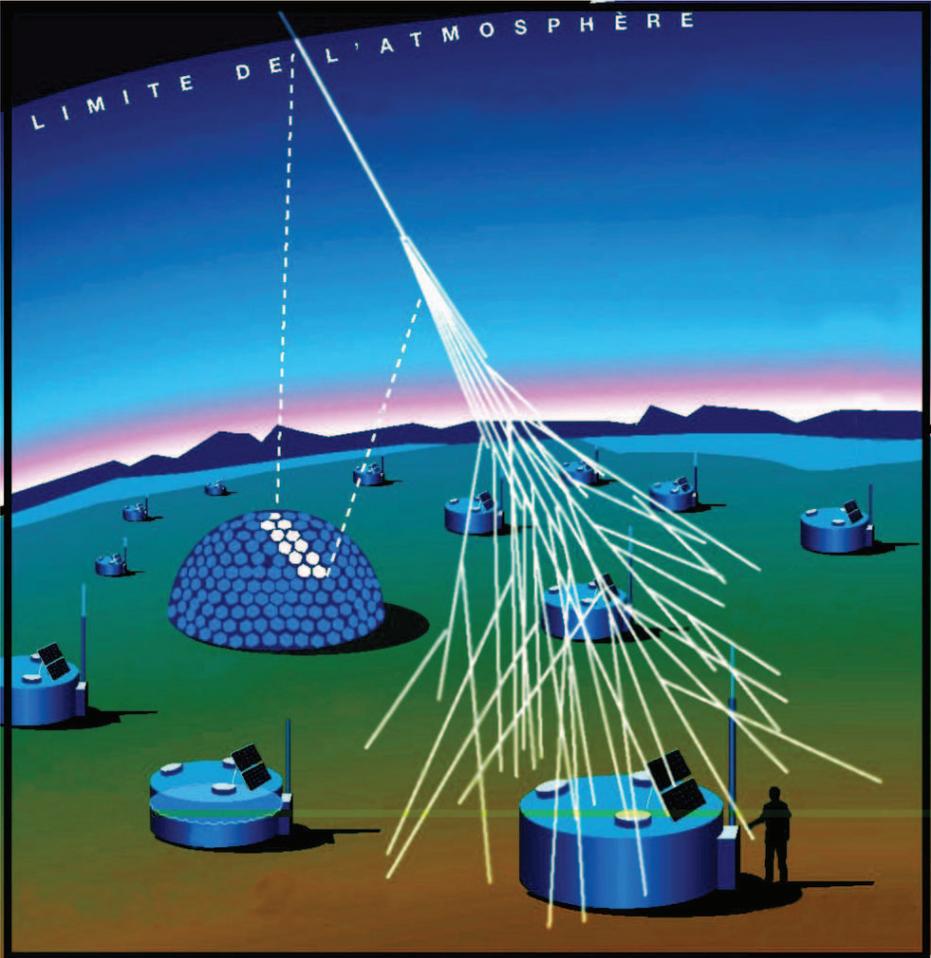
Simple producir electrones y protones:

**Electrones:** calentar metal y colimar

**Protones:** ionizar hidrógeno

Pero otras partículas:

- **Rayos cósmicos** ([www.auger.org](http://www.auger.org); [visitantes.auger.org.ar](http://visitantes.auger.org.ar))
- **Reactores nucleares** (<http://www.cnea.gov.ar/xxi/reactores/RA1.asp>)
- **Aceleradores de partículas**



## Aceleradores de partículas

Dos razones para acelerar:

- Producir partículas más masivas:  $E \geq M c^2$
- Estudiar regiones más pequeñas:  $\lambda = \frac{h}{p}$

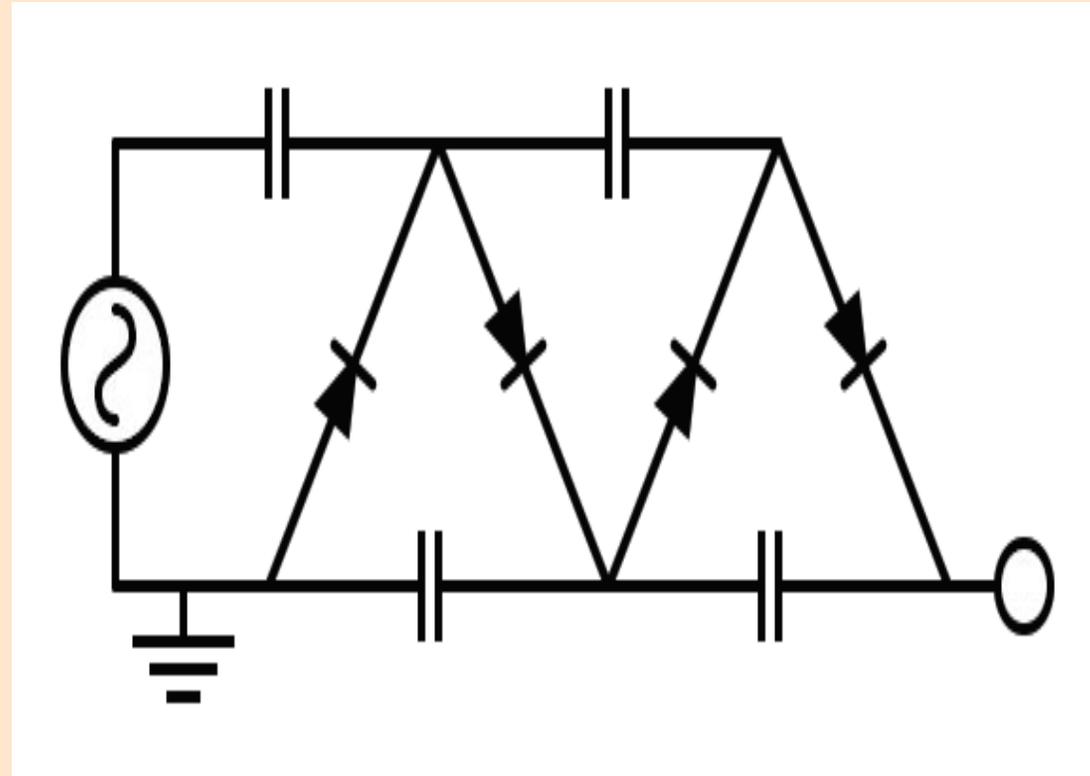
$$\vec{F} = q \vec{\mathcal{E}}$$

Energía electrostática:  $E = F d = q V$

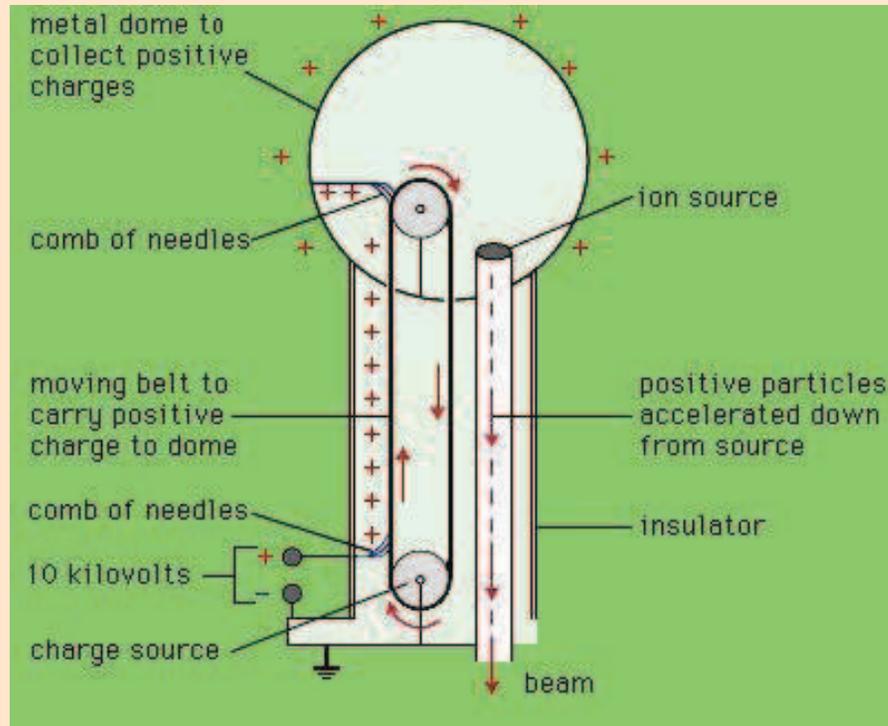
Primeros multiplicadores de voltaje:

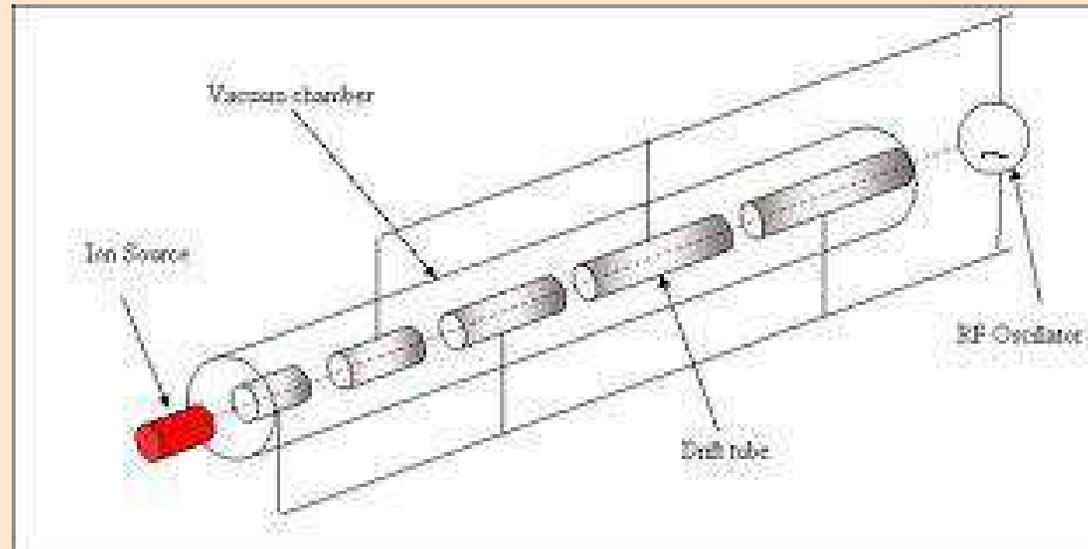
Cockcroft-Walton (1932)- van de Graaff (1933)-Tándem

Energías mayores: Lineales (Linacs) - Circulares







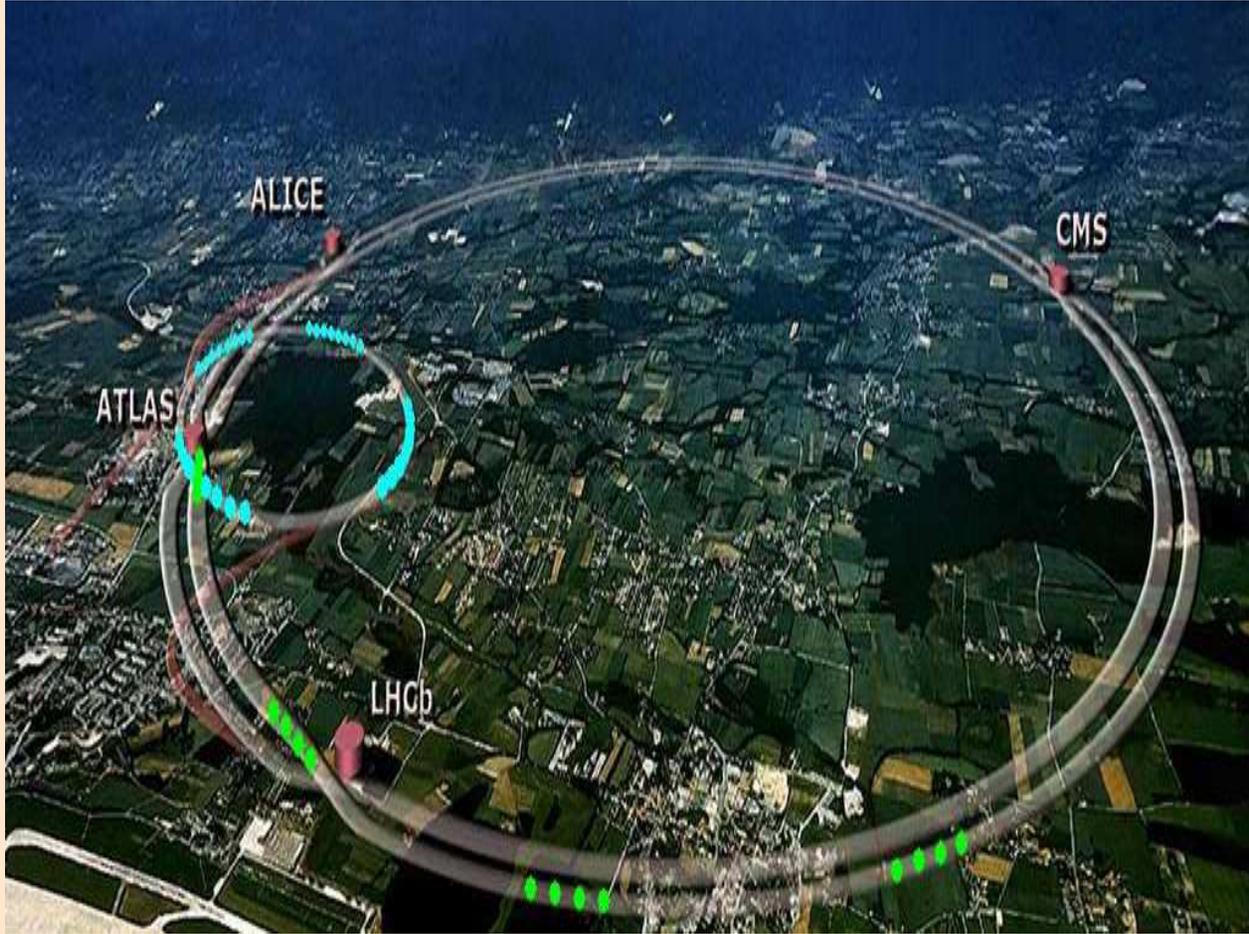


## LINAC

Voltaje alterno y cilindros de campo nulo

$$L = v \tau = \frac{v}{\nu}$$

SLAC: 3km - 50 GeV

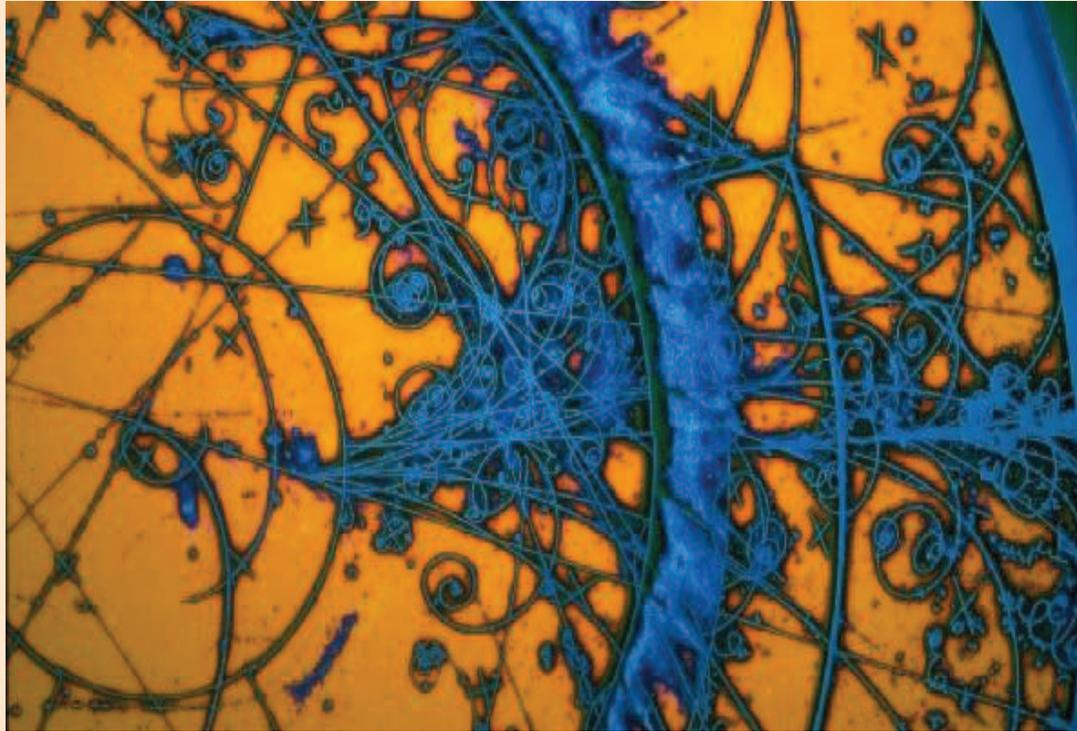


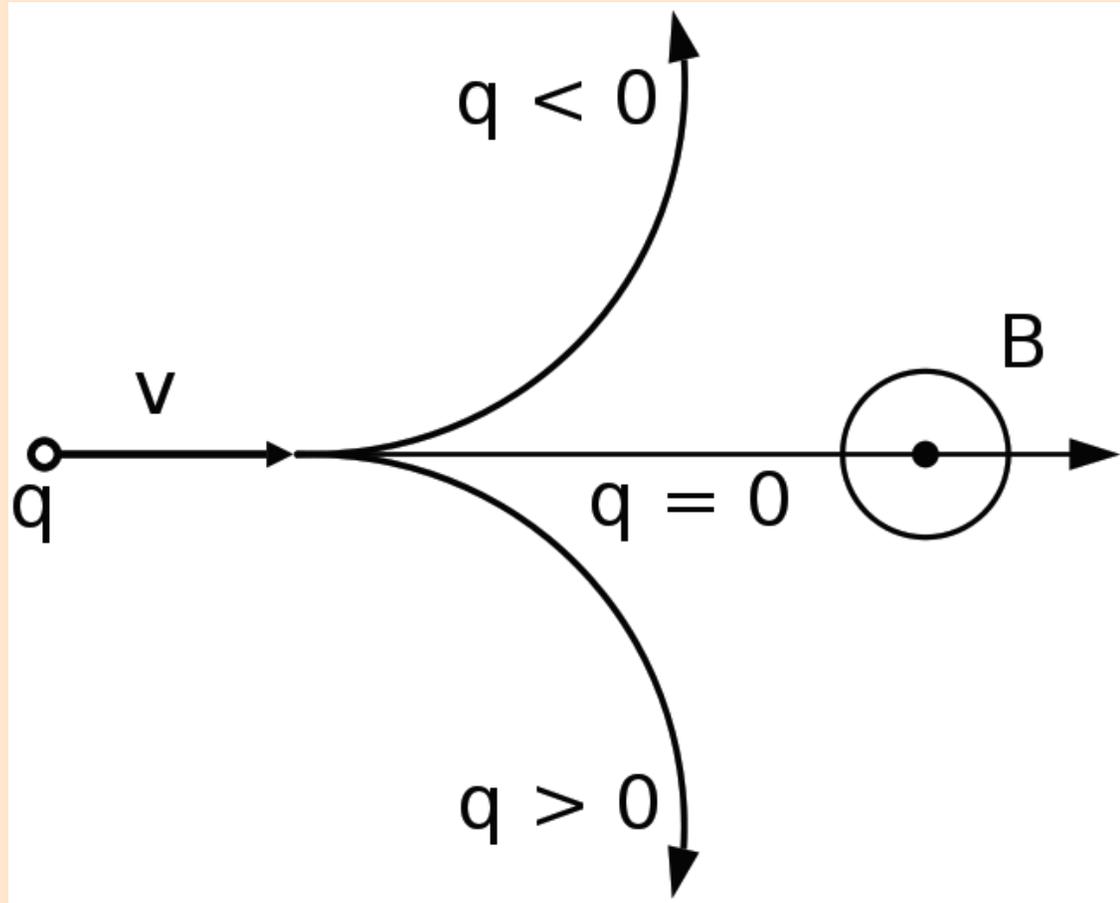
## Detectores de partículas

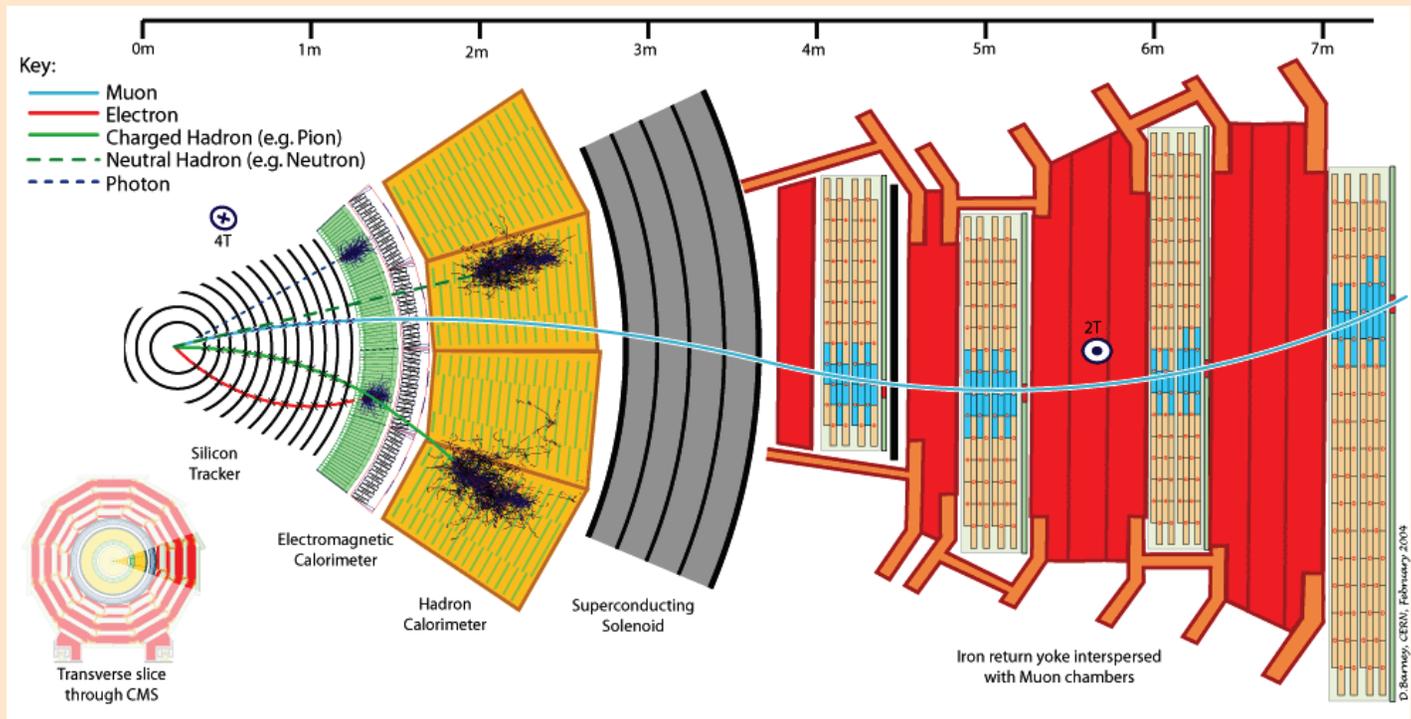
- Contadores Geiger
- Cámaras de burbujas
- Cámaras de niebla
- Cámaras de chispas
- Contadores Cerenkov
- Fotomultiplicadores

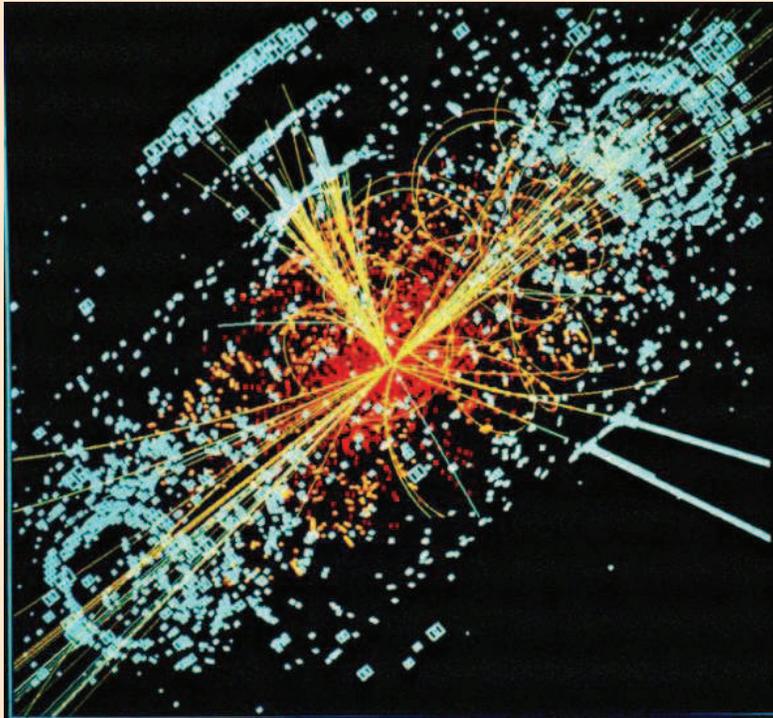
En general, basados en ionización de un medio en estado metaestable y campo magnético que curva la trayectoria.

$$R_C = \frac{m \gamma v}{q B} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$









## **La noción de partícula elemental a lo largo del siglo XX**

-Sheldon L. Glashow, El encanto de la física; Tusquets Editores (2000).

I- Hasta 1932

- Grecia Antigua: toda la materia está integrada por cuatro “elementos”

Según Robert Boyle (1627-1691):

“los elementos son ciertos cuerpos primitivos y simples que no están formados por otros cuerpos, ni unos de otros, y que son los ingredientes de que se componen inmediatamente y en que se resuelven en último término todos los cuerpos perfectamente mixtos”

- Fin del siglo XIX: Unos 50 elementos (átomos)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
R <sub>2</sub> O	RO	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RH <sub>4</sub> RO <sub>3</sub>	RH <sub>3</sub> R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	RH <sub>2</sub> RO <sub>3</sub>	RH R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	RO <sub>4</sub>
H							
Li	Be	B	C	N	O	F	
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	
K	Ca		Ti	V	Cr	Mn	Fe Co Ni
Cu	Zn			As	Se	Br	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo		Ru Rh Pd
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W		Os Ir
Au	Hg	Tl	Pb	Bi			Pt

Dmitri Mendeleev (1834-1907) detectó regularidades al ordenar los átomos en su tabla periódica

DEDUJO LA EXISTENCIA DE ESTRUCTURA INTERNA

PREDIJO NÚCLEOS AÚN NO DETECTADOS

Verdadero inicio de la búsqueda de partículas elementales:

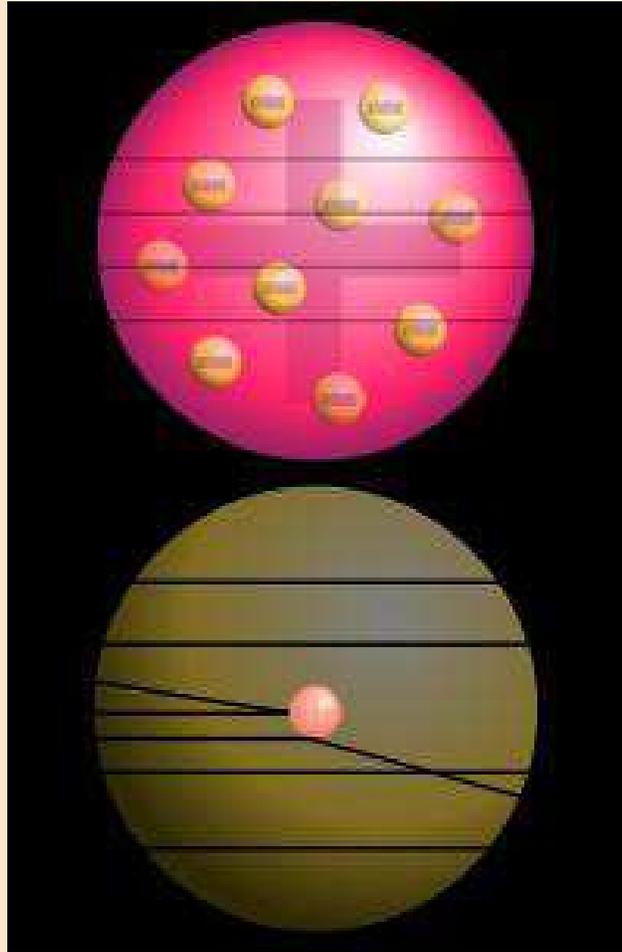
J.J. Thomson (1856-1940): cociente  $\frac{e}{m}$  del electrón en 1897

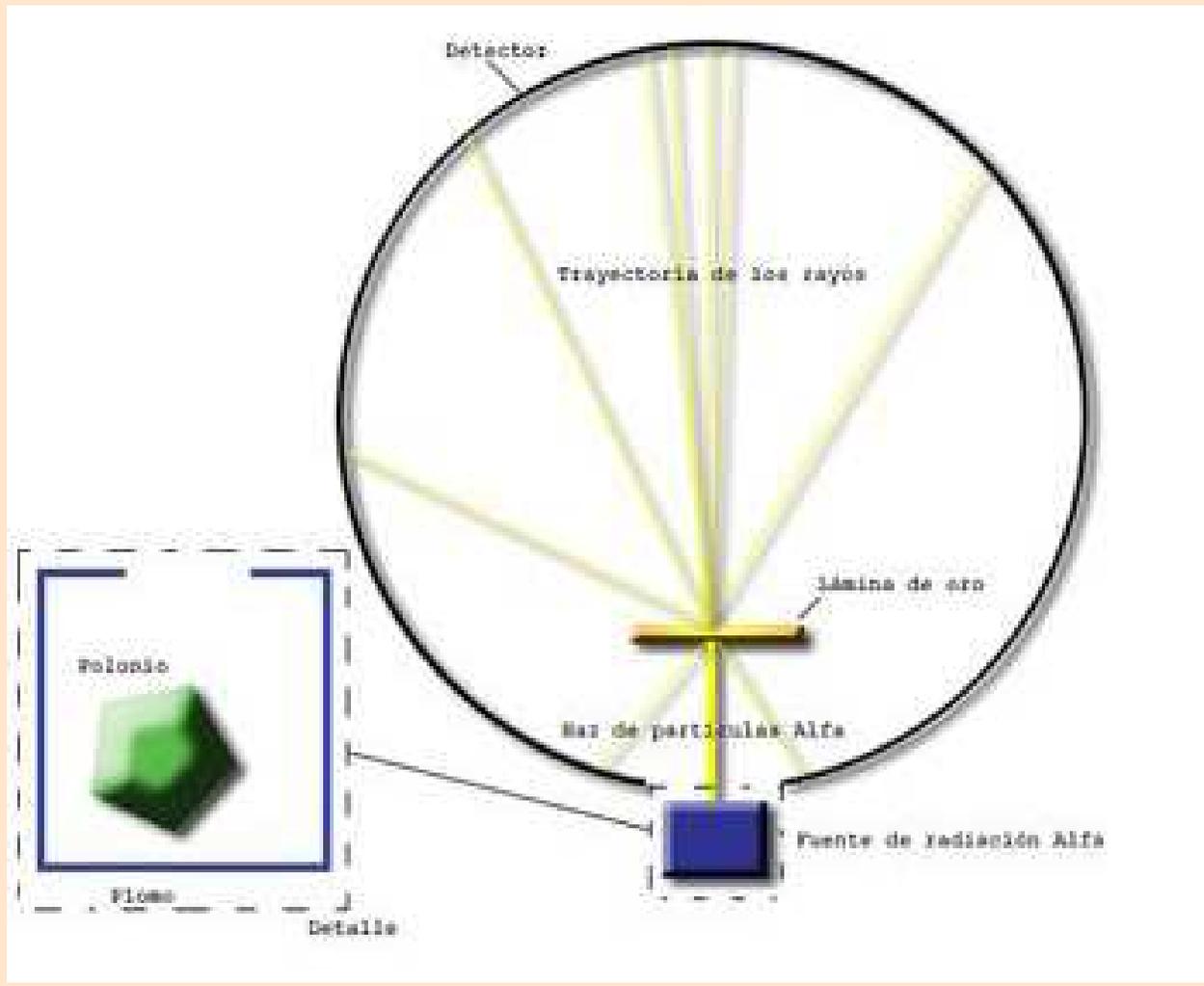
$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \sim 0,5 \text{ Mev} \quad q = -e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Thomson comprendió que los electrones formaban parte del átomo

Pero los átomos son neutros!!!! Dónde está la carga que compensa?

Rutherford (con Geiger y Marsden): existencia del núcleo atómico en 1911





Todo claro para el hidrógeno - Átomo de Bohr (1914)

Y EL DEUTERIO? CÓMO SE EXPLICA SU MASA?

James Chadwick (1891-1974): **neutrón descubierto en 1932**

$$Q = +Ze \quad A = N + Z$$

Para núcleos livianos  $Z \sim N$ . Pero, en general,

**ISÓTOPOS:** Igual  $Z$ , distinto  $A$

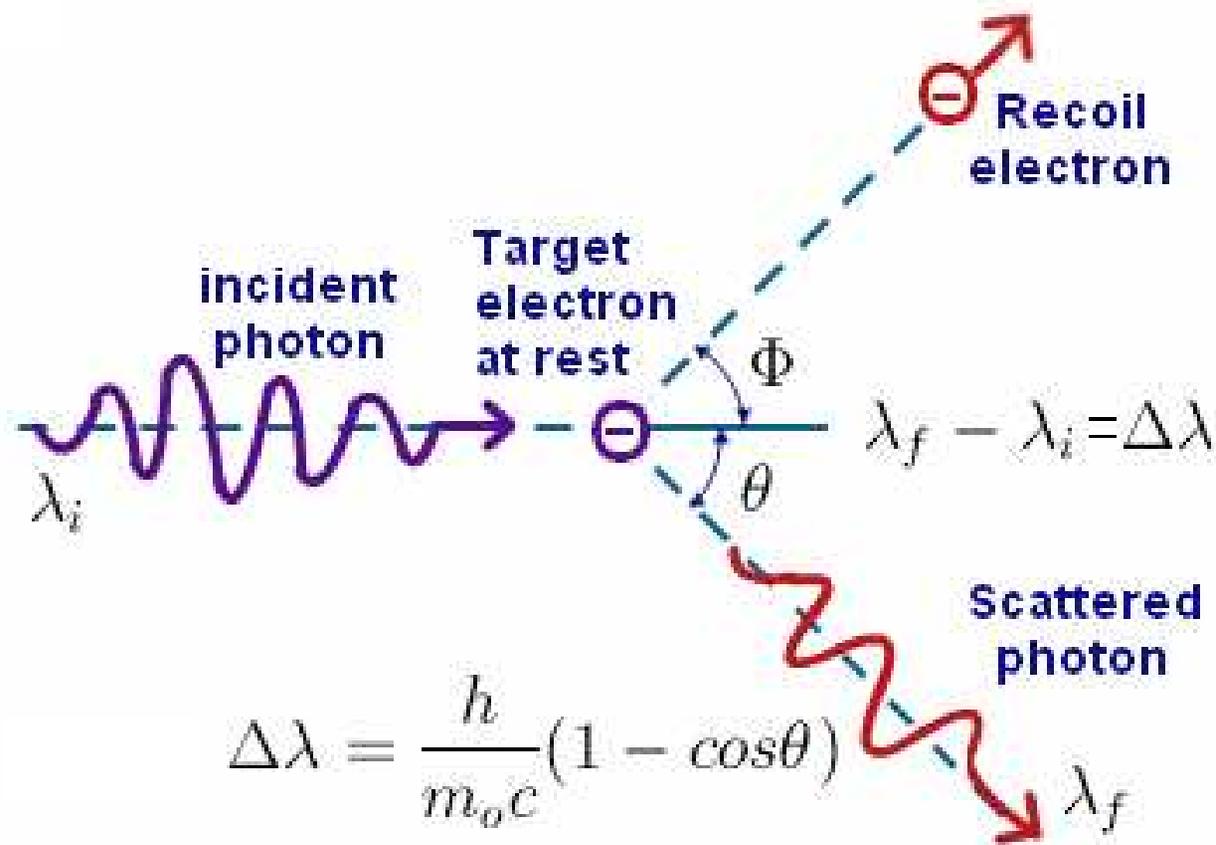
Fotón: mediador de la interacción electromagnética

Max Planck (1858-1947)+ Albert Einstein (1879-1955):  
radiación del cuerpo negro

$$E = h \nu$$

Arthur Compton (1892-1962)

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c(1 - \cos \theta)$$



## Modelo Estándar en 1932

		Materia	Interacción	Mediador
Á T O M O	N Ú C L E O	protón (p) m=1 GeV Q= +e s=1/2	electromagnética	fotón ( $\gamma$ ) m=0 GeV Q= 0 s=1
		neutrón (n) m=1 GeV Q= 0 s=1/2	-----	
		electrón (e) m=.5 MeV Q= -e s=1/2	electromagnética	fotón ( $\gamma$ ) m=0 GeV Q= 0 s=1

II- 1932 a 1960

Piones

Por qué no explota el núcleo?

Hideki Yukawa (1907-1981): mesón  $\pi$  o pión

Nuevo tipo de fuerza: nuclear, mediada por el pión

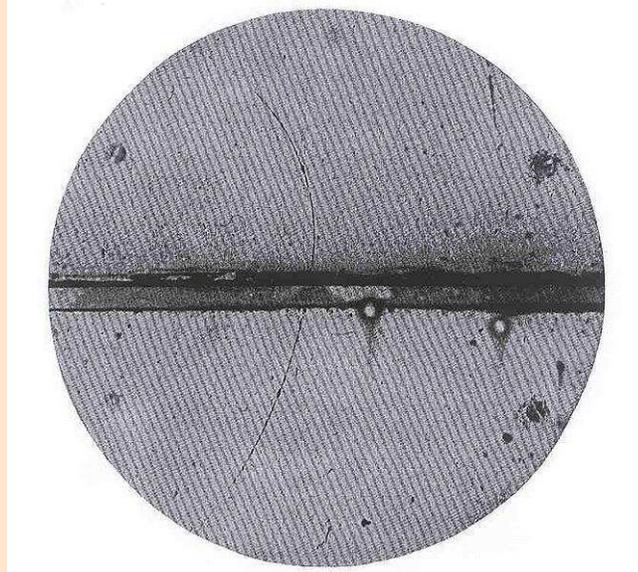
**MASIVO** (fuerza de corto alcance)

1939: dos candidatos con masa  $\sim 300m_e$

1947: uno de ellos es leptón (no interactúa fuertemente):

muón  $\mu$       $m_\mu \sim 200m_e$

Tres piones:  $\pi^0, \pi^+, \pi^-$



## Antipartículas

$$E^2 = c^2 \vec{p}^2 + m^2 c^4$$

Carl Anderson (1905-1981) midió el positrón en 1932

## Neutrinos

En la desintegración  $\beta$  de núcleos radiactivos



**PARECEN VIOLARSE LAS LEYES DE CONSERVACIÓN!!!**

Siempre  $B$  tiene un protón más que  $A$  (como requiere la conservación de carga eléctrica)

Wolfgang Pauli (1900-1959)

**NEUTRINO: neutro, casi sin masa, no sufre interacción electromagnética ni nuclear**

Fuerza débil

En términos de nucleones:

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$$

Otros procesos débiles:

$$n + \nu \rightarrow p + e; \quad \pi^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}; \quad \pi^+ \rightarrow \nu + \bar{\mu}$$

$$\nu \neq \bar{\nu}$$

Distintas quiralidades

$$n + \bar{\nu} \rightarrow p + e \text{ no ocurre.}$$

$$e, \mu, \nu_e, \nu_\mu \text{ tienen } L = 1$$

$$\bar{e}, \bar{\mu}, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu \text{ tienen } L = -1$$

**EL NÚMERO LEPTÓNICO SE CONSERVA EN PROCESOS DÉBILES**

Además,

$$\nu_e \neq \nu_\mu$$

$$\mu \rightarrow e + \gamma$$

no existe

Otros dos números conservados:  $L_e$  y  $L_\mu$

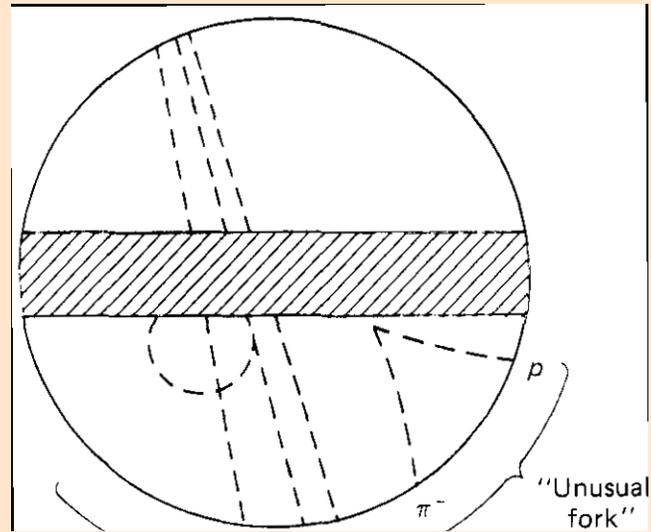
$$L_e + L_\mu = L$$

Notar diferencia entre estos números conservados y la carga eléctrica!!!!

Clasificación de partículas de materia:

**LEPTONES:** INTERACTÚAN ELECTROMAGNÉTICA Y DÉBILMENTE

**HADRONES:** SUFREN LAS TRES INTERACCIONES



### Partículas "extrañas"

Después de 1947: caótica proliferación de hadrones

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+$$

Ambas son mesones (espín entero), como el pión (otros:  $\eta$ ,  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\rho$ ), pero también

$$\lambda^0 \rightarrow \pi^+ + p$$

$\lambda^0$  es barión (espín semientero), igual que  $p$  y  $n$ .

Otros:  $\Sigma$ ,  $\Xi$  ...

Extrañas: Aparecen vía interacción nuclear (muchas) pero se desintegran débilmente (larga vida media)

**S: extrañeza** Conservado en interacciones fuertes, pero no en débiles, de modo que  $\lambda^0 \rightarrow \pi^+ + p$  puede ocurrir.

“Cuando se entregó por primera vez el Premio Nobel, los físicos sólo conocían dos objetos que podían llamarse “partículas elementales: el protón y el electrón. A partir de 1930, apareció una infinidad de nuevas partículas. He escuchado decir: antes, quien descubría una nueva partícula solía ser premiado con un Premio Nobel. Ahora, debería pagar una multa de U\$S 10.000.”, Willis Lamb (1905-20089)

### Desintegración del protón

$$p \rightarrow \bar{e} + \gamma$$

$$\tau_p \geq 6,6 \times 10^{33} \text{ años}$$

CONSERVACIÓN DEL NÚMERO BARIÓNICO B

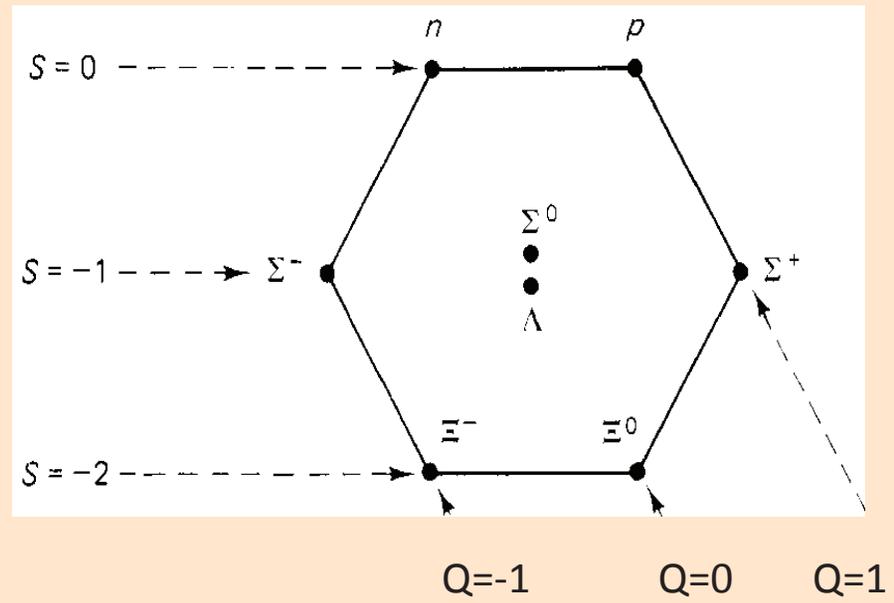
## La óctuple senda y el modelo de quarks

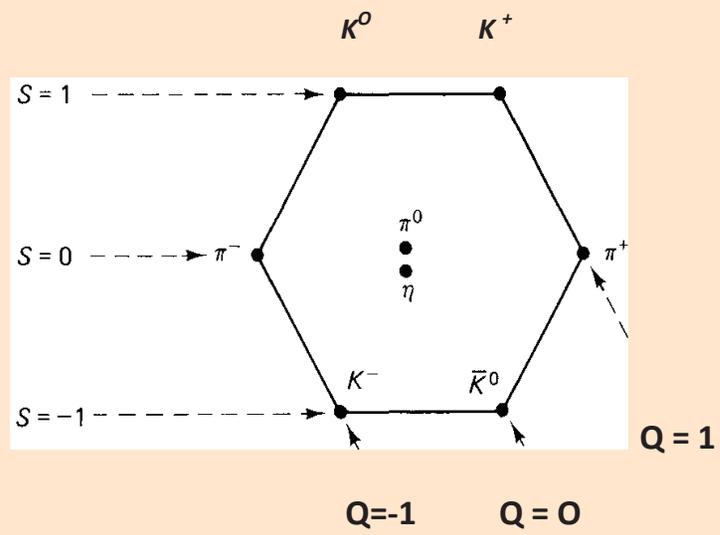
Murray Gell-Mann (1929-) y Yuval Ne'eman (1925-2006)

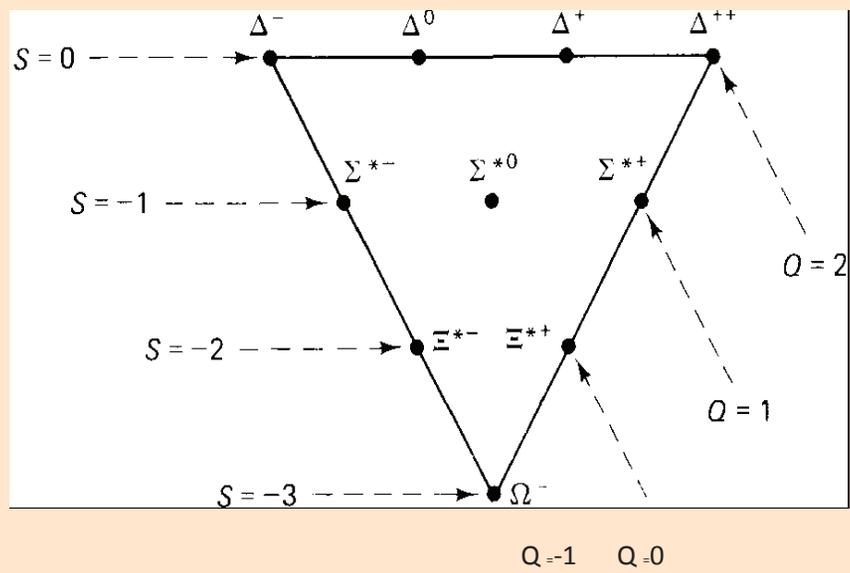
M. Gell-Mann, El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo, Ed. Tusquets, España (2007).

y. Ne'eman and Y. Kirsh, The particle hunters, University Press, Cambridge, UK (1996).

Octupletes de bariones y mesones







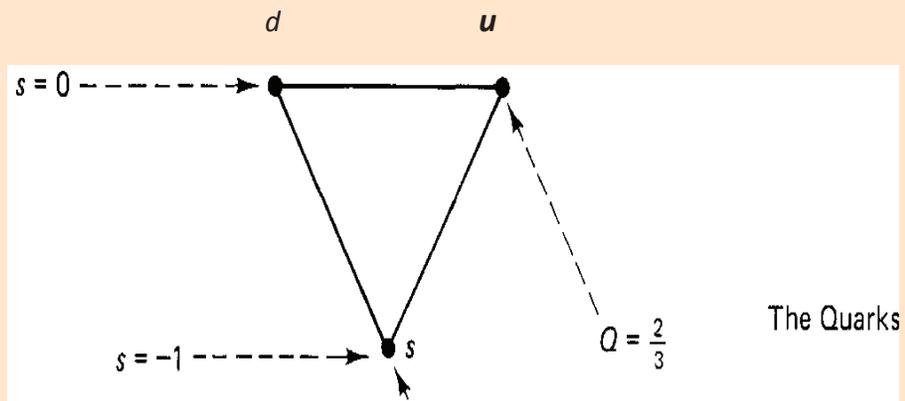
## Modelo de quarks (1964)

Gell-Mann y Zweig (1931-1983)

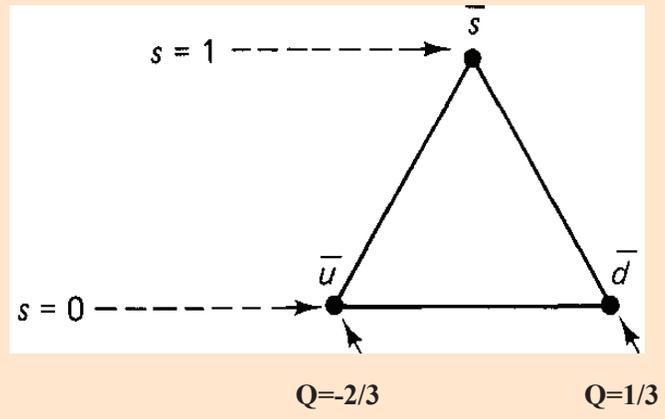
- Cada barión está compuesto por tres quarks (cada antibarión está compuesto de tres antiquarks).
- Cada mesón está compuesto por un quark y un antiquark.

## CONFINAMIENTO

Principio de exclusión: COLOR QCD



$Q = -\frac{1}{3}$



## Las teoría de interacciones fundamentales: evolución histórica

- Principio del siglo XX :Electrodinámica de Maxwell y Gravitación-  
Ambas relativistas pero no cuánticas
- Por analogía: teorías de interacciones nucleares y débiles clásicas (no cuánticas)
- Década de 1950: Schwinger, Dyson, Feynman y otros: **QED**
- Década de 1960: **QCD** para las interacciones fuertes y  
**Glashow-Salam-Weinberg** para interacciones electrodébiles

Teorías cuánticas de campos relativistas (Yang y Mills)

UNIFICACIÓN? Cuantización de la Gravitación?? Cuerdas???

# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

## FERMIONS

**matter constituents**  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	<1×10 <sup>-8</sup>	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
$\mu$ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
$\tau$ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

**Spin** is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum, where  $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$  GeV s =  $1.05 \times 10^{-34}$  J s.

**Electric charges** are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$ ), where  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$  joule. The mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$  kg.

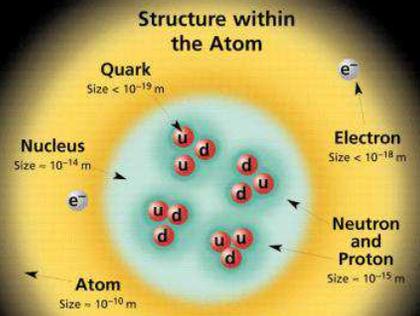
## BOSONS

**force carriers**  
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	g gluon	0	0
W <sup>-</sup>	80.4	-1	<b>Color Charge</b>		
W <sup>+</sup>	80.4	+1	Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.		
Z <sup>0</sup>	91.187	0	<b>Quarks Confined in Mesons and Baryons</b>		

**Quarks Confined in Mesons and Baryons**  
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons**  $q\bar{q}$  and **baryons**  $qqq$ .

**Residual Strong Interaction**  
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture 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.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qq <sub>i</sub> q <sub>j</sub> and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	uds	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	sss	-1	1.672	3/2

Property	Interaction	Strong			
		Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Residual
Acts on:		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup> Z <sup>0</sup>	$\gamma$	Gluons
Strength relative to electromag for two u quarks at:		10 <sup>-41</sup>	0.8	1	25
	10 <sup>-18</sup> m	10 <sup>-41</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	60
	3 × 10 <sup>-17</sup> m	10 <sup>-36</sup>	10 <sup>-7</sup>	1	Not applicable to hadrons
					20

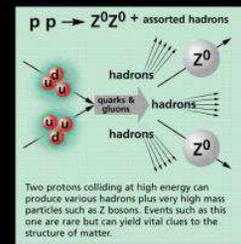
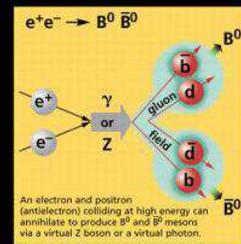
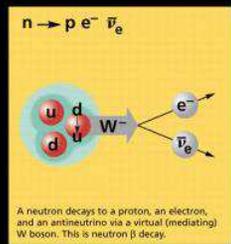
Mesons q $\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	u $\bar{d}$	+1	0.140	0
K <sup>-</sup>	kaon	s $\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	u $\bar{d}$	+1	0.770	1
B <sup>0</sup>	B-zero	d $\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	c $\bar{c}$	0	2.980	0

### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z<sup>0</sup>,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$ , but not K<sup>0</sup> = d $\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

### Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



**The Particle Adventure**  
Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:  
U.S. Department of Energy  
U.S. National Science Foundation  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Stanford Linear Accelerator Center  
American Physical Society, Division of Particles and Fields  
**BURLE INDUSTRIES, INC.**

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 56-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>