

Introducción a Física de Partículas y Cosmología

del siglo XX

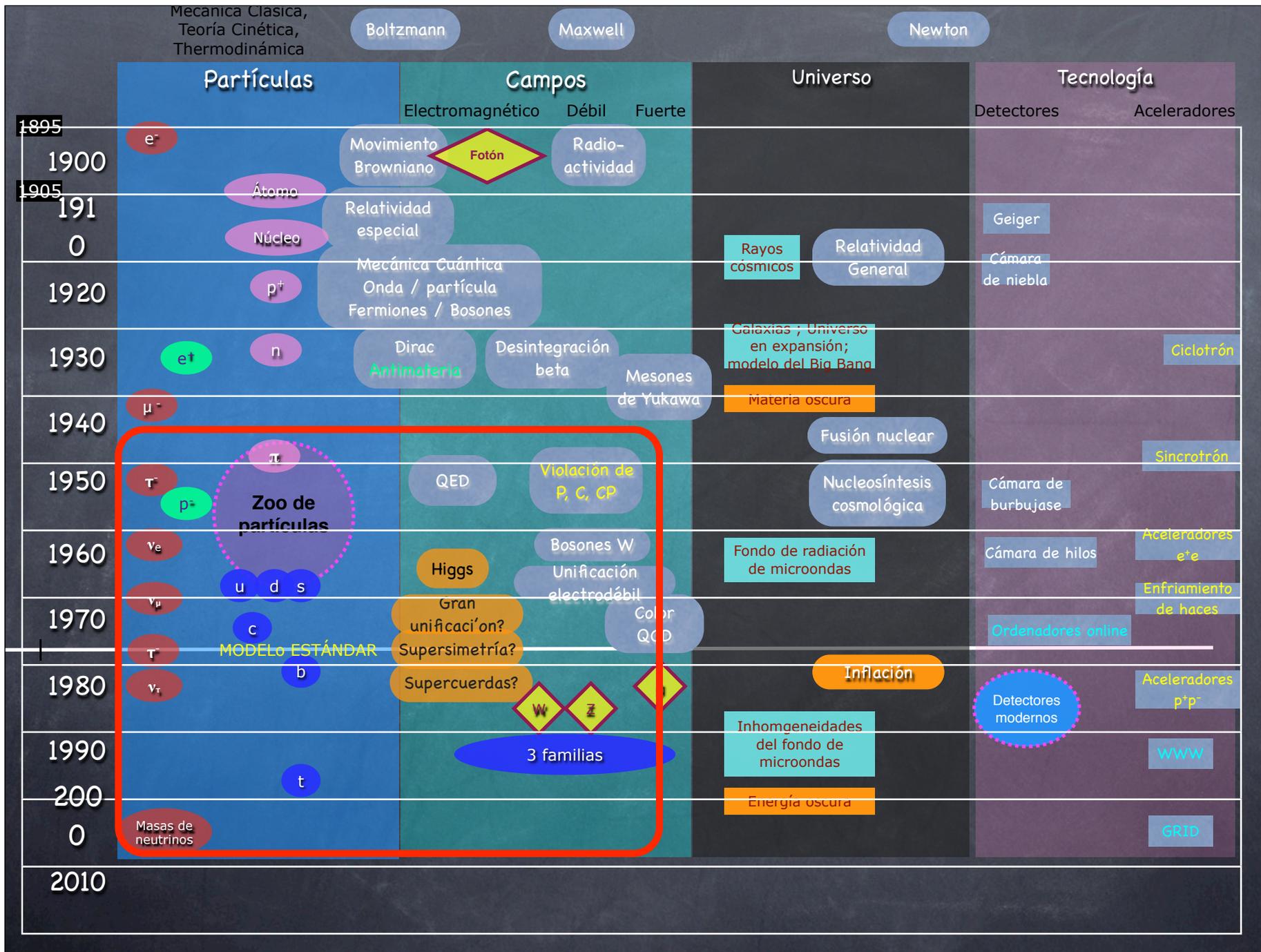
Parte 3/4

Angel M. Uranga

CERN

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid

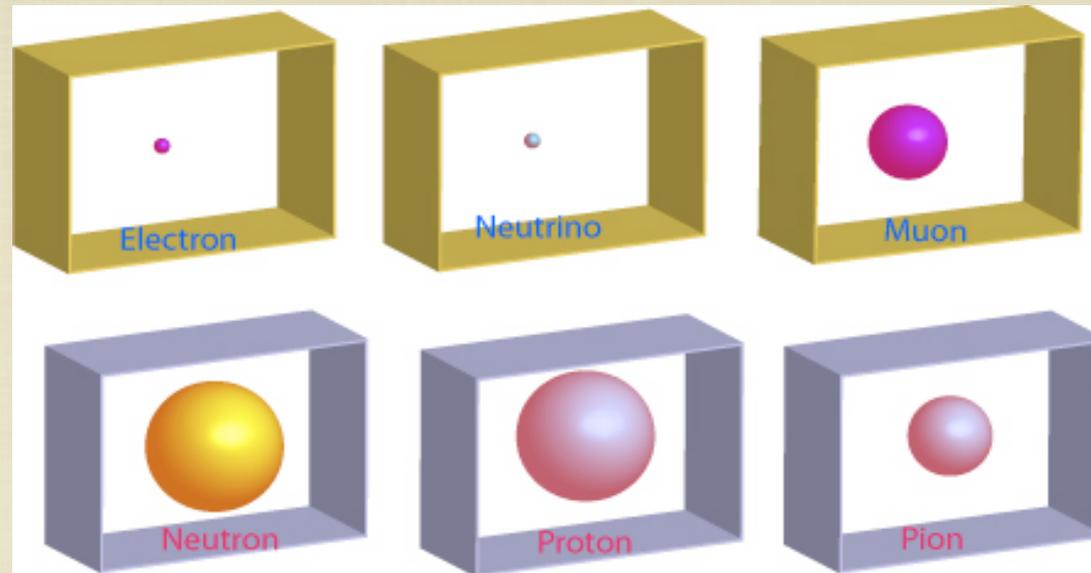
(agradecimiento a Rolf Landua
por material original)



PARTÍCULAS ELEMENTALES

1948

- Lista de partículas elementales (aprox. 1948)



- Interacciones electromagnética (fotón),
débil (teoría de Fermi), y fuerte (pión)

- Descripción cuántica y relativista de partículas e interacciones

Pronto se comprobó que no es una lista completa...

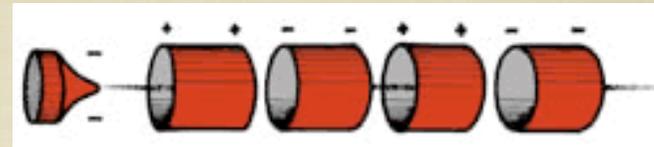
PARTÍCULAS ELEMENTALES

1931-60

Extraordinario desarrollo en las tecnologías de aceleradores...

1928: Acelerador lineal resonante (R. Wideroe)

Aceleración en los intervalos entre electrodos
Radio-frecuencia (RF) ajustada al movimiento



1931: Ciclotrón (E. Lawrence)

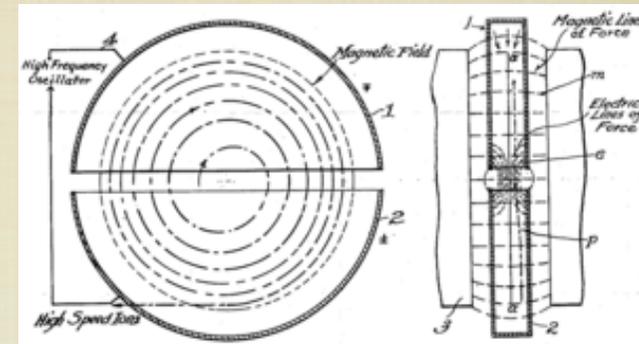
Campo magnético \Rightarrow trayectorias circulares
Múltiples pasos por electrodos \Rightarrow mayores energías

1931: 80 keV

1932: 1000 keV

1939: 19 MeV*

1946: 195 MeV (sincrociclotrón)



1947: Sincrotrón (L.W. Álvarez)

* Limitaciones debidas al aumento relativista de la masa

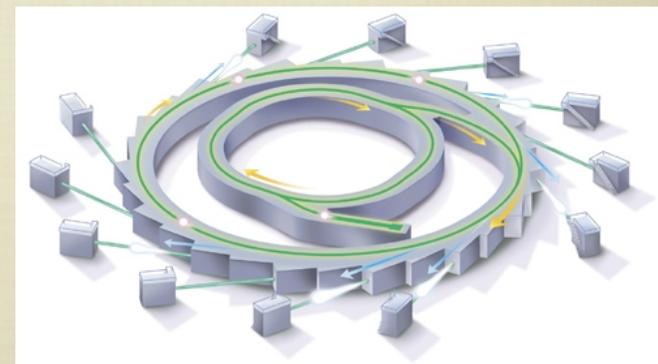
Campo magnético variable para mantener las partículas en órbita fija, compensando el aumento relativista de la masa

1952: Brookhaven, 3 GeV

1954: Berkeley, 6.2 GeV (antiprotón)

1959: CERN, 24 GeV

1960: Brookhaven, 30 GeV



... y detectores: Contadores Geiger, cámaras de niebla, cámaras de burbujas, detectores Cerenkov, fotomultiplicadores, cámaras de chispas, ...

Zoo de partículas

Con los nuevos aceleradores y detectores se encontró un verdadero "zoo de partículas" ~ 200 "partículas elementales"

$\pi^+ \pi^- \pi^0$

Piones

η'
Eta-Prima

η
Eta

$\rho^+ \rho^- \rho^0$

Rho

MESONES

$K^+ K^- K^0$

Kaones

ϕ

Phi

$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$

Delta

$\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$
Sigma
(¡extraño!)

Λ^0

Lambda
(¡extraños!)

Ξ^0, Ξ^-
Sigma (¡muy extraño!)

BARIONES

¿A qué se debe esta estructura?



Esquema de clasificación basado en los 'quarks'



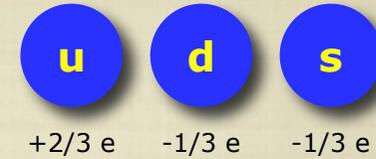
Fig. 6.35 Murray Gell-Mann (b.1929).

M. Gell-Mann



G. Zweig

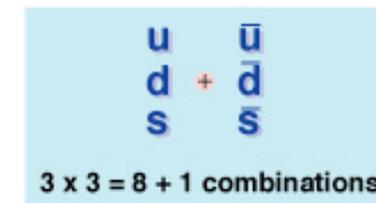
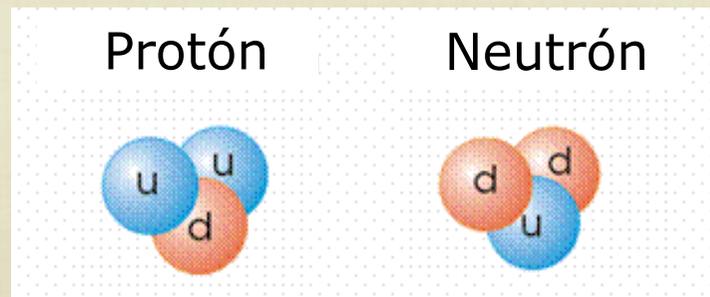
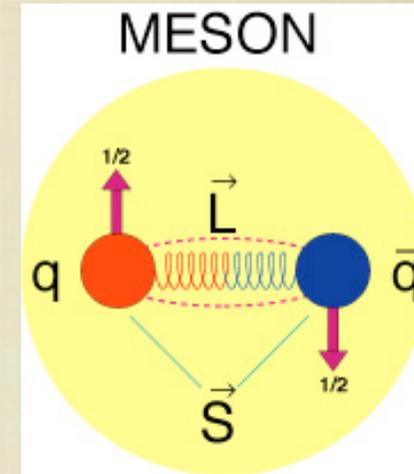
- Tres tipos ("sabores") de "quarks" :
up, down, strange
("arriba", "abajo", "extraño")

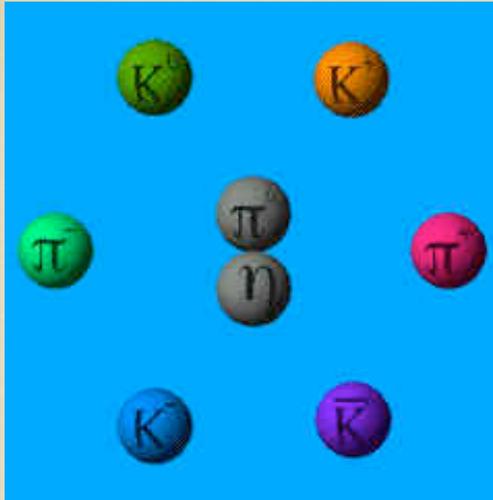
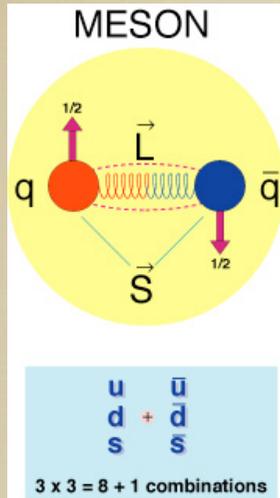


- Con cargas eléctricas +2/3, -1/3, -1/3
- Sólo existen en combinaciones:

Mesón = quark+antiquark

Barión = quark(1) + quark(2) + quark(3)





Kaones

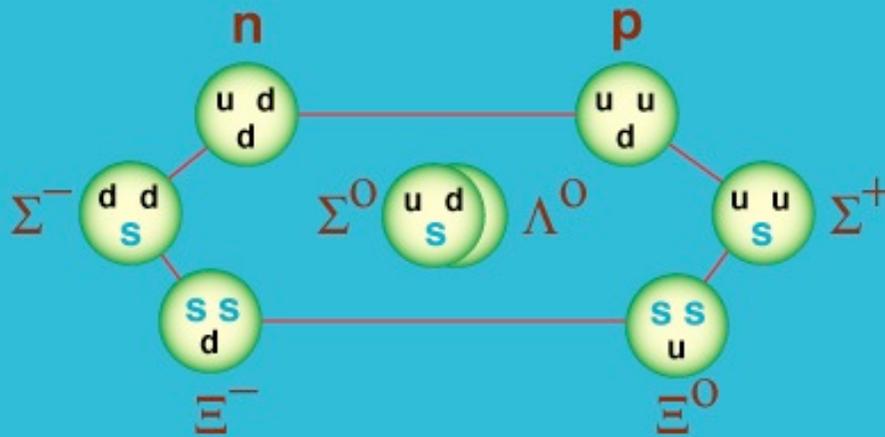


Piones, Etas

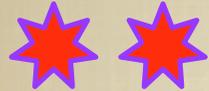


Kaones

OCTETE DE BARIONES DE SPIN 1/2



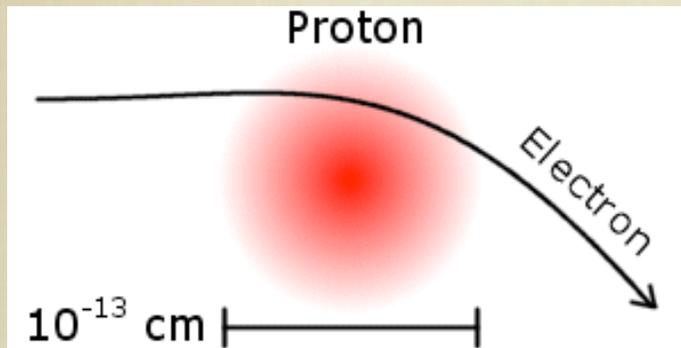
Bariones más ligeros:
Protón, Neutrón;
Lambda, Sigma, Xi



Descubrimiento de los quarks

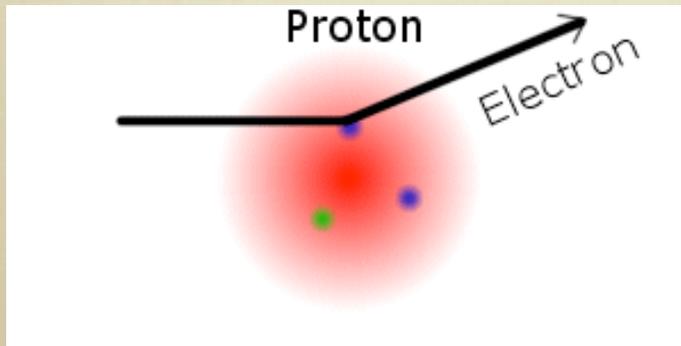
Dispersión electrón-protón (análogo más energético del experimento de Rutherford)

En 1956 Hofstadter midió el tamaño del protón



SLAC, Stanford Linear Accelerator Centre

En 1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC): Los datos demuestran la dispersión violenta ('hard scattering') del electrón por tres partículas puntuales



⇒ **El protón está compuesto de 3 quarks**
¡Los quarks son partículas reales!

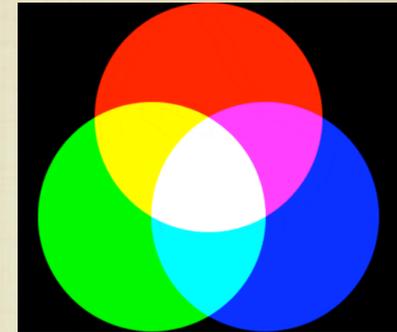
Pero... ¿Qué es lo que mantiene unidos a los quarks en el protón/neutrón?)

Problemas en explicar la composición del barión Δ^{++} . Carga +2 y spin 3/2 sugieren 3 quarks u con spin paralelo en función de onda (orbital) simétrica

Incompatible con el principio de exclusión de Pauli (no más de un fermión en el mismo estado en el mismo "lugar")

Carga de "color" (Bardeen, Fritzsche, Gell-Mann)

- Nuevo número cuántico, con 3 posibles valores: "color"
- Los tres quarks en Δ^{++} difieren en su "color" (compatible con Pauli)
- Sólo combinaciones neutras de color ("blancas")



Mesones = Quark-Antiquark (en una combinación color-anticolor)

Bariones = 3 quarks, cada uno de un color

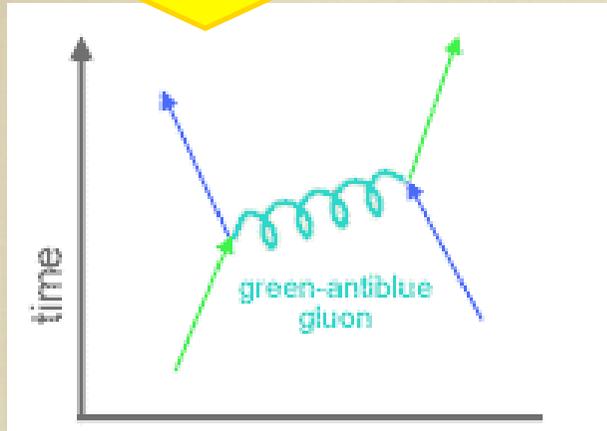


CROMODINÁMICA CUÁNTICA (QCD)

Teoría cuántica de campos análoga a la electrodinámica cuántica

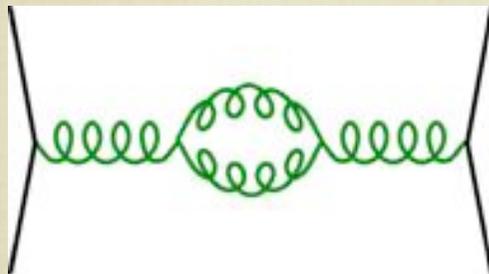
- El color como carga
- La fuerza (interacción fuerte entre quarks) es transmitida por 8 partículas intermediarias (gluones)
- Interacciones fuertes entre bariones/mesones son un residuo de las interacciones gluónicas entre quarks (análogo a van der Waals en moléculas)

gluones



Los **gluones** ("glue=pegamento") son los cuantos del campo que media las interacciones fuertes entre los quarks

Hay **8 gluones diferentes** *
Combinaciones color-anticolor



Diferencia con el electromagnetismo:
Los gluones tienen carga de color
¡AUTOINTERACCIÓN!

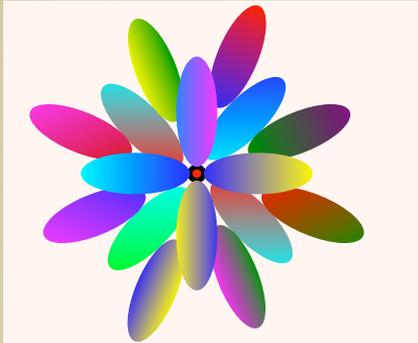
⇒ Confinamiento y libertad asintótica

* ¿Por qué 8?

Forman una matriz

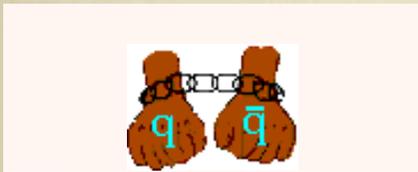
$$\begin{pmatrix} r\bar{r} & r\bar{v} & r\bar{a} \\ v\bar{r} & v\bar{v} & v\bar{a} \\ a\bar{r} & a\bar{v} & a\bar{a} \end{pmatrix}$$

Una de las 9 combinaciones no existe, el gluón "traza de la matriz" $r\bar{r} + v\bar{v} + a\bar{a}$



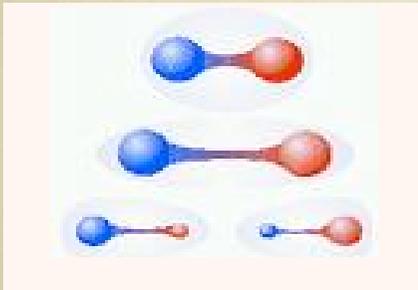
Confinamiento y libertad asintótica

La autointeracción entre entre la nube de gluones virtuales alrededor de cada quark produce antiapantallamiento: la carga de color aumenta con la distancia



Libertad asintótica:

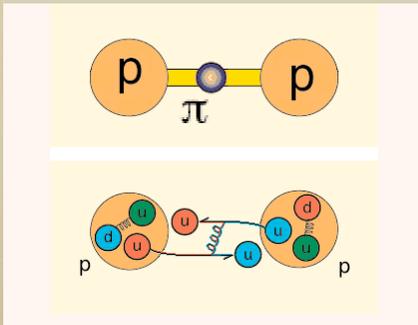
A distancias menores que 10^{-13} cm los quarks y gluones son libres



Confinamiento:

A distancias mayores, la fuerza de color es muy intensa, los objetos coloreados están forzados a formar combinaciones sin color

A pesar de que los mediadores tienen masa cero, la interacción fuerte es de corto alcance



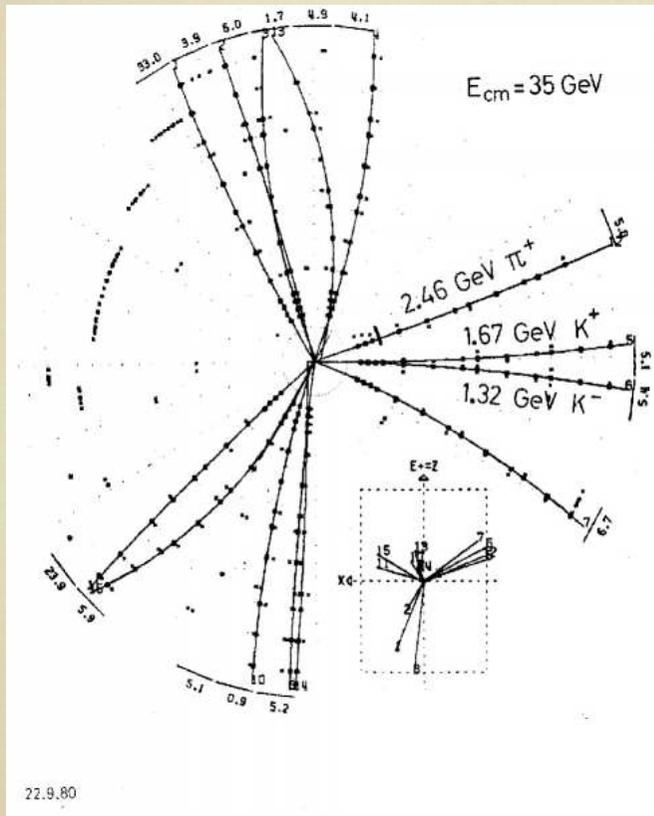
Las interacciones fuertes entre bariones/mesones son un residuo de las interacciones gluónicas entre quarks

(la teoría de Yukawa es válida en el régimen nuclear)

gluones

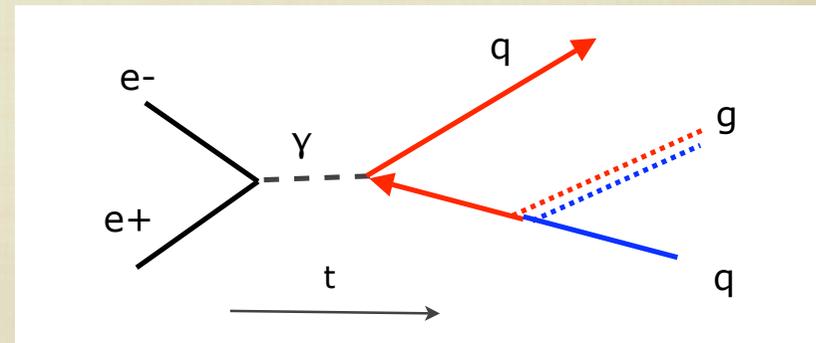


Descubrimiento de los Gluones



Procesos con 3 "jets" (chorros) en colisiones electrón-positrón:

Par quark-antiquark que emite un gluón (los objetos coloreados se combinan con pares virtuales y forman jets de partículas sin color)

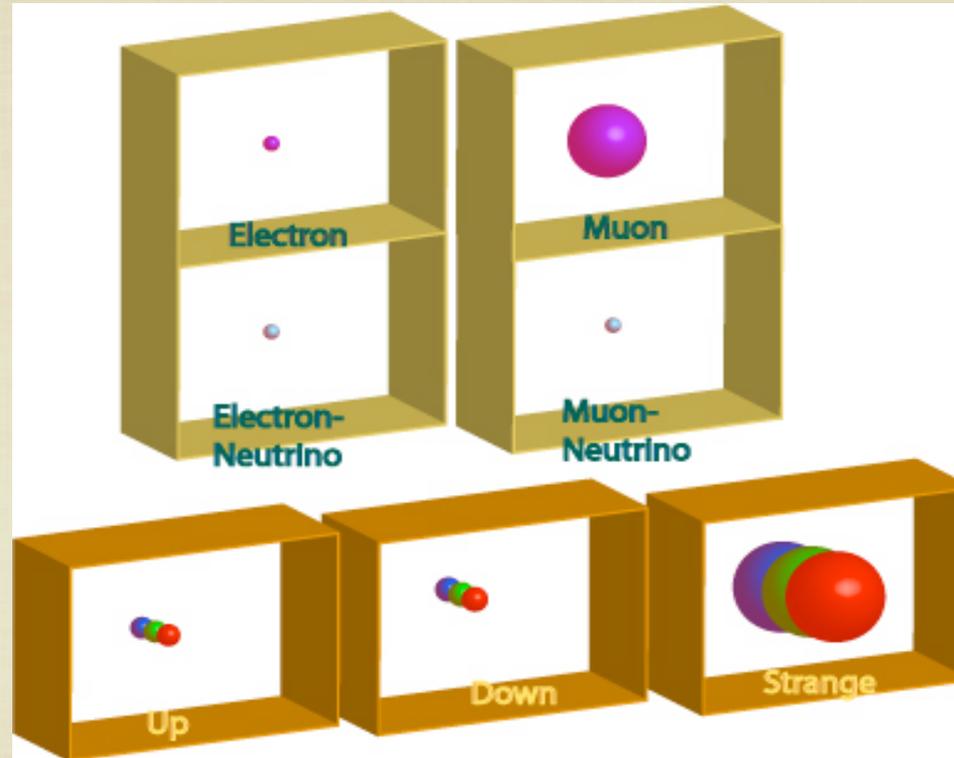


Evento de tres jets en PETRA, DESY (Hamburg)

PARTÍCULAS ELEMENTALES

- Lista de partículas elementales

Leptones



Quarks

- Interacciones electromagnética (fotón), fuerte (gluones) y débil

**La interacción débil relaciona ambos sectores.
¿Cómo funciona en detalle? ¿Existen mediadores para ella?**

El modelo de Fermi de interacciones débiles es patológico a altas energías ~ 100 GeV

La sección eficaz neutrino-protón $\sim (G_F E_\nu)$

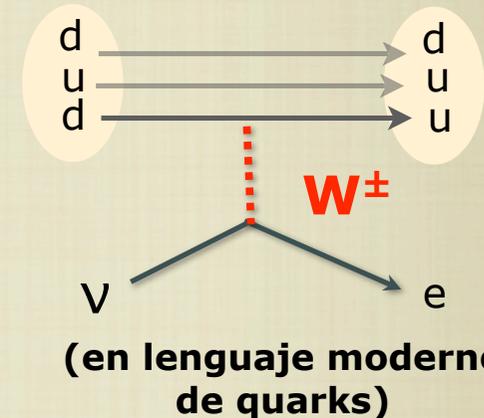
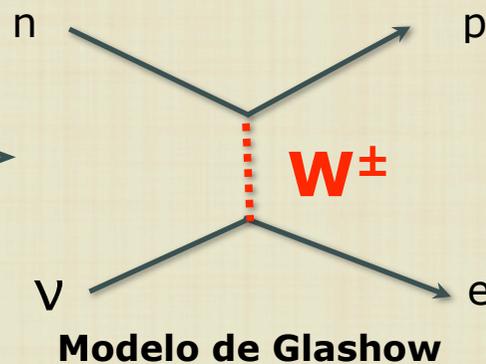
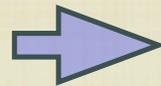
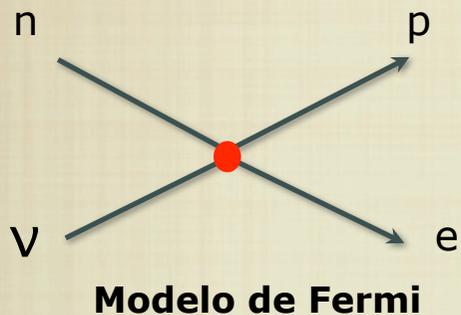
viola conservación de probabilidad para $E > 300$ GeV

(la probabilidad de la interacción es $> 100\%$)



Glashow: partículas intermediarias del campo débil

(análogo al intercambio de fotones en electrodinámica)



Masa muy alta ~ 80 GeV

\Rightarrow **corto alcance**

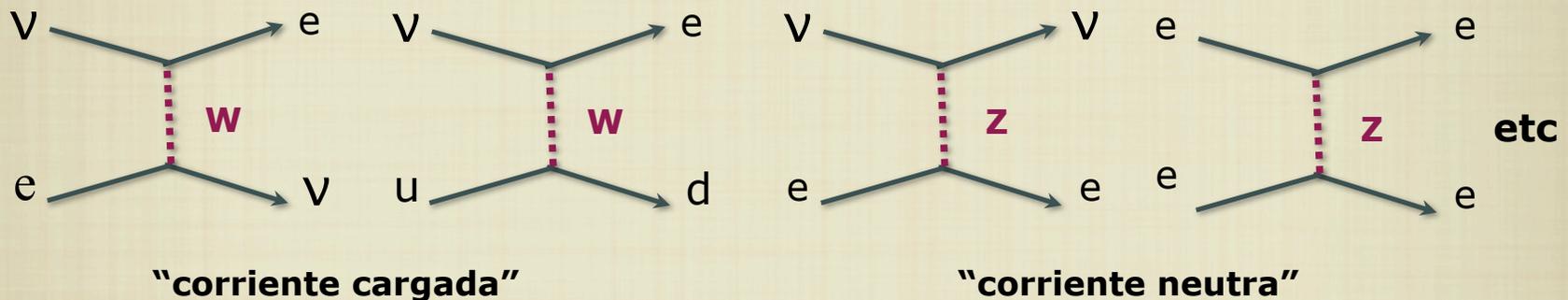
\Rightarrow **acoplamiento pequeño** $G_F = g^2/M_W^2$

Pero g^2 comparable a constante de estructura fina (acoplo electromagnético)

★ ★ Glashow, Salam, Weinberg: Interacción electro-débil

- La interacción electromagnética y la débil son diferentes aspectos de una misma fuerza "electrodébil"
- Los quarks y leptones tienen una "carga débil"
- Los intermediarios de la interacción débil son un "fotón pesado" (Z^0) y dos bosones cargados (W^\pm) con spin 1 y masas $\sim 50-100$ GeV

En lenguaje moderno de quarks y leptones:

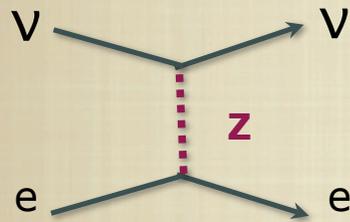


- Los bosones Z/W adquieren su masa por interacción con un campo nuevo (Higgs)
Si no, nueva patología a mayores energías ~ 1000 GeV

- Sólo la polarización levógira siente las interacciones débiles
(violación de paridad, Wu et al 1957)

★ ★ Verificación experimental de la teoría electrodébil

Descubrimiento de las corrientes neutras, CERN (1973)



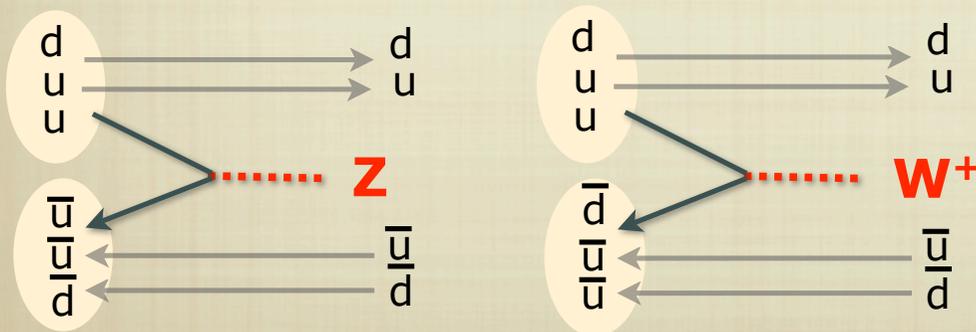
- Haz de neutrinos dirigido a un detector (Gargamelle, frente a Microcosmos)

- Una trayectoria de electrón aparece de la nada (el neutrino ioniza un átomo mediante un Z)



Descubrimiento de los bosones W, Z bosons, CERN (1983)

Colisiones protón-antiprotón en SpS



C. Rubbia, S. van der Meer

★ ★ Las partículas de materia parecer organizarse en familias

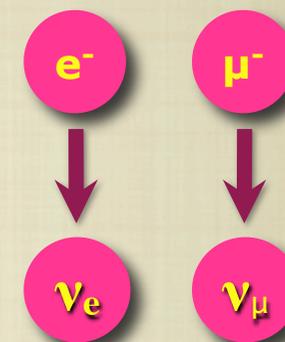
Neutrino " muónico" (Lederman, Schwartz, Steinberger)



Dos tipos de neutrinos: electrónico y muónico

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu + p$$

$$\nu_e + n \rightarrow e + p$$



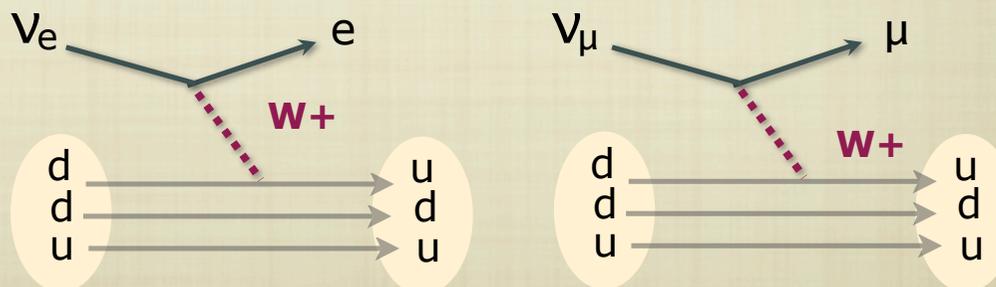
Se distinguen por sus distintas reacciones con neutrones

Jack Steinberger, 1962



Jack Steinberger, HST 2002

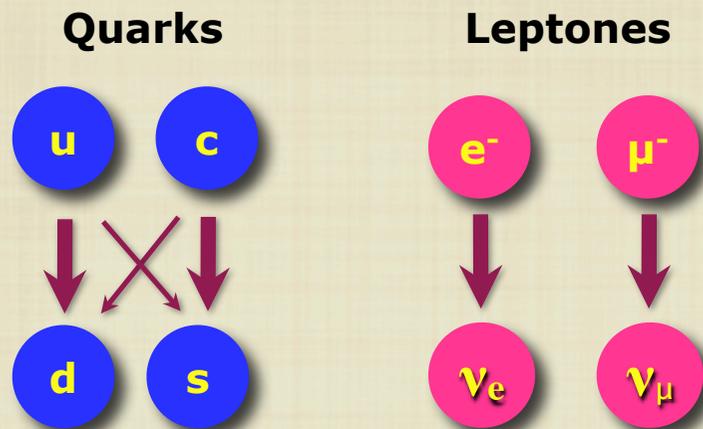
En lenguaje moderno de quarks y leptones



También hay una estructura de familias en el sector de quarks

Predicción de un nuevo quark, el **charm** ("encanto") en 1970

Glashow, Iliopoulos, Maiani

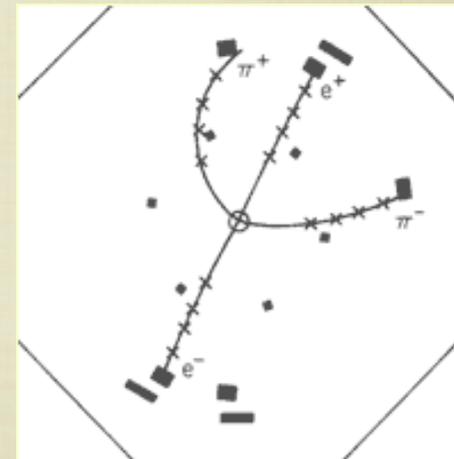


**Modelo Estándar
(con dos familias)**

Confirmada experimentalmente en 1974

Dos grupos descubren simultáneamente una nueva partícula, que en SLAC (Burt Richter) denominaron ' ψ ' y en Brookhaven (Sam Ting) denominaron ' J '

La partícula J/ψ es un mesón formado por un par $c\bar{c}$



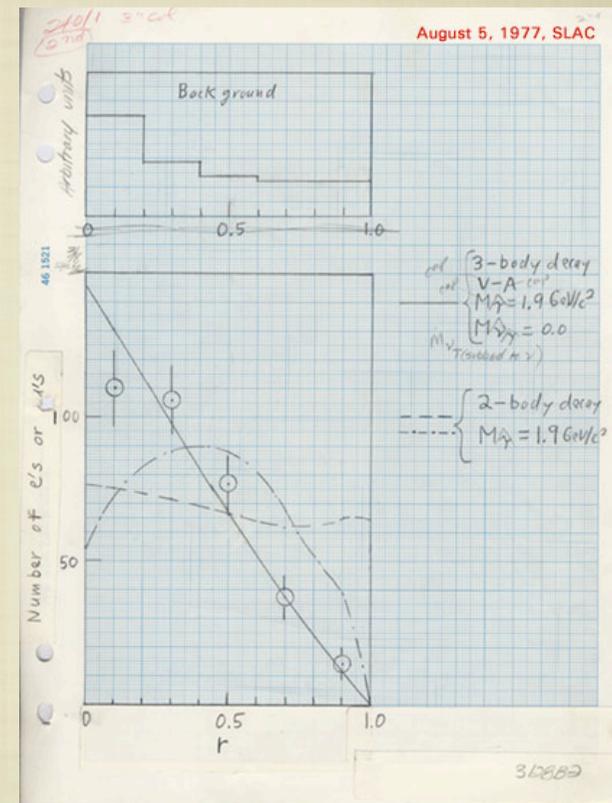
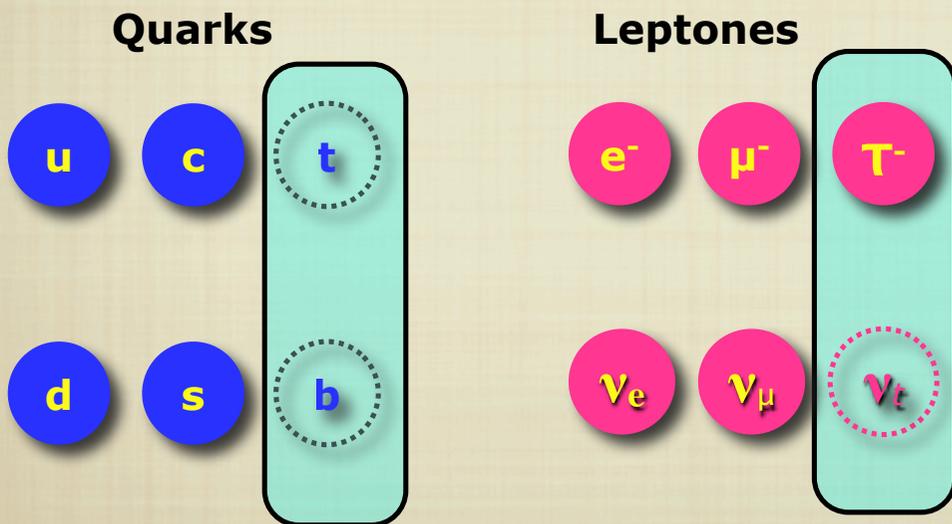
Todos estos hechos proporcionan una firme base experimental y teórica para el Modelo Estándar de interacciones electrodébiles y fuertes

Pronto se descubrió un nuevo leptón SLAC (M. Perl) ... *who ordered that?*

Un nuevo tipo de "electrón pesado" con masa $1,7\text{GeV}=3500 \times m_e$, denominado "tau"

que sugirió la existencia de una tercera familia

Un nuevo tipo de neutrino (el neutrino 'tau'), Y dos nuevos tipos de quarks ('top' y 'bottom')



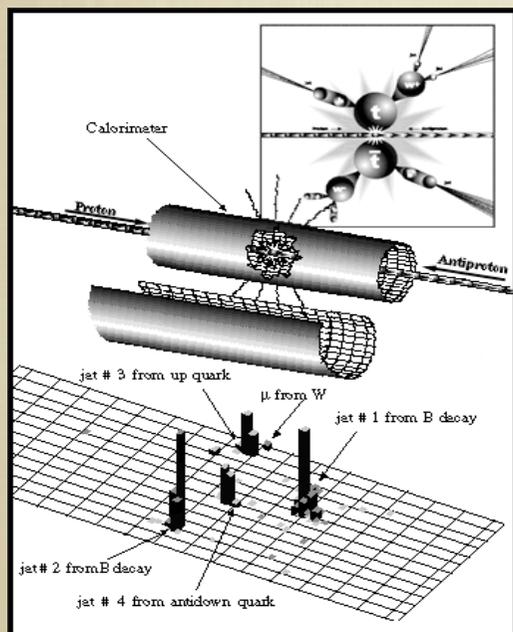
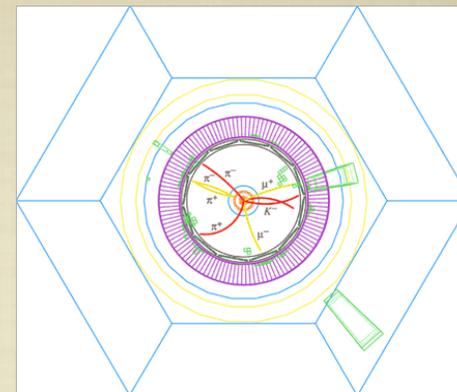
Página del block de notas de Marty Perl

Con el tiempo, se descubrieron experimentalmente los restantes miembros de la **tercera familia**

- **Quark bottom**, descubierto en Fermilab en 1977

Mesón "Upsilon" formado por un par bottom-antibottom

El quark bottom tiene carga $-1/3$ y masa **~ 5 GeV**



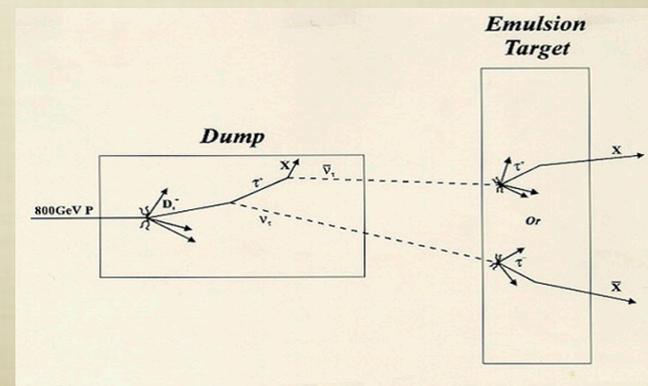
- **Quark top**, descubierto en Fermilab en 1995

El quark top tiene carga $+2/3$ y masa **~ 170 GeV**

Tan pesado e inestable que se desintegra antes de formar estados ligados. No existe un mesón top-antitop. (via interacción débil p.ej. $t \rightarrow b + e^+ + \nu_e$)

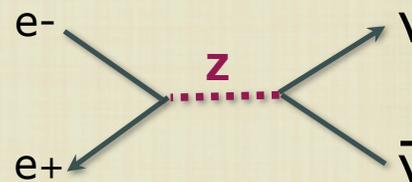
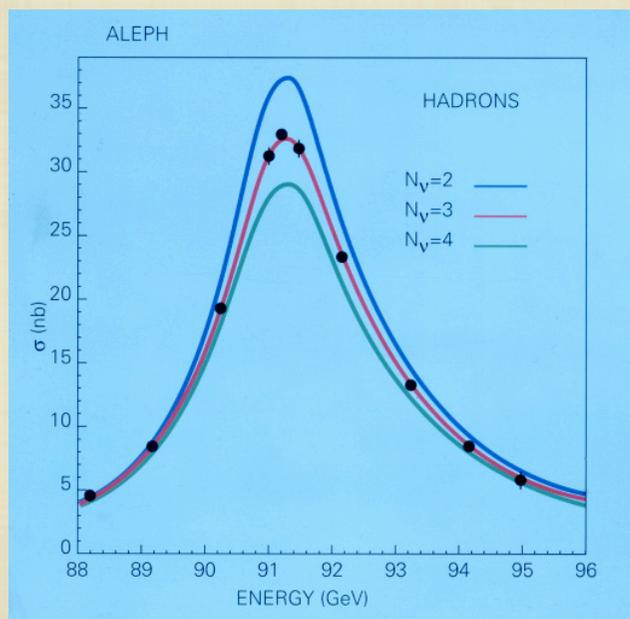
El top se detecta como un jet en el calorímetro.

- **Neutrino tau**, descubierto en SLAC en 2000



La existencia de sólo 3 familias se ha comprobado experimentalmente de forma indirecta

Medición en LEP, CERN, de la "anchura del Z" (probabilidad de desintegración). Esta cantidad depende del número de canales de desintegración posibles, y por tanto del número de tipos de neutrinos



Número de tipos de neutrino = número de familias
 Los neutrinos parecen ser los miembros más ligeros de cada familia

Por cierto... **¿Son los neutrinos partículas masivas? ¿Cuál es su masa?**



Masas de neutrinos y oscilaciones de neutrinos



B. Pontecorvo

Conversión entre tipos de neutrinos

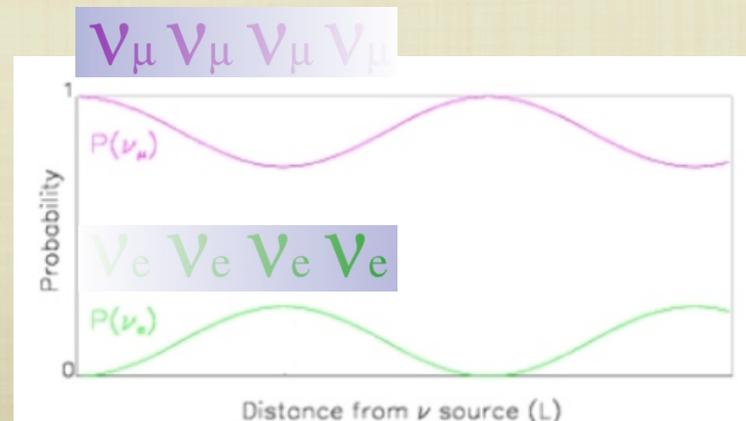
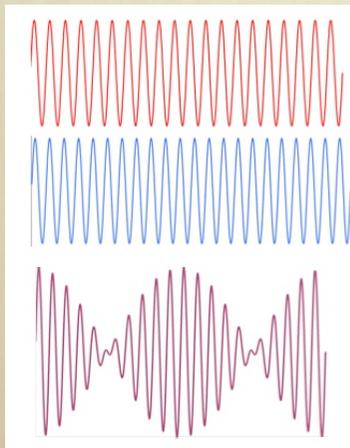


Masas de neutrinos: Intuitivamente, la conversión "frena" la propagación \Rightarrow inercia, masa



Oscilaciones de neutrinos:

Masas \Rightarrow longitudes de onda de Broglie
Patrón de interferencias en la propagación





Descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos

- Neutrinos "solares"

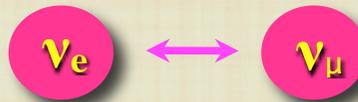
Producidos en las reacciones de fusión en el Sol



Detectables en detectores subterráneos

¡Se detectan menos ν_e de los esperados!

Conversión en el trayecto Sol-Tierra

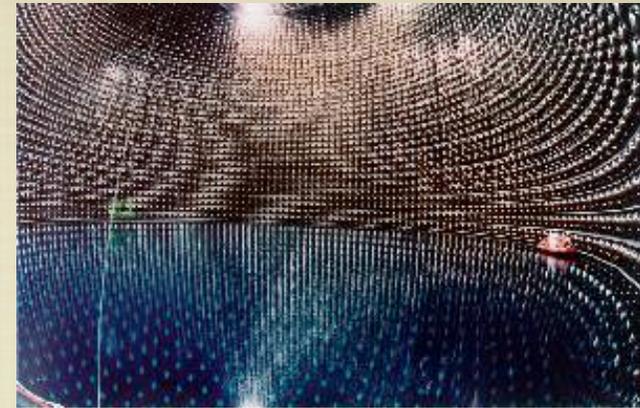


- Neutrinos "atmosféricos"

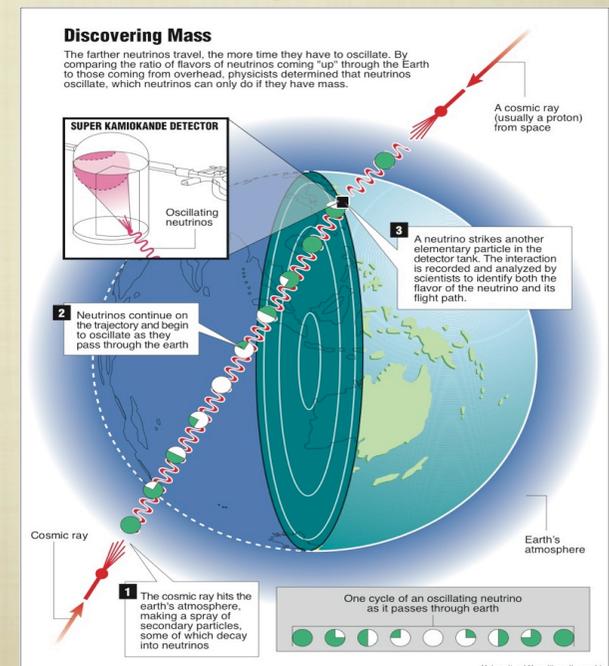
Los rayos cósmicos producen neutrinos muónicos en la atmósfera superior

Se detectan menos ν_μ de abajo que de arriba

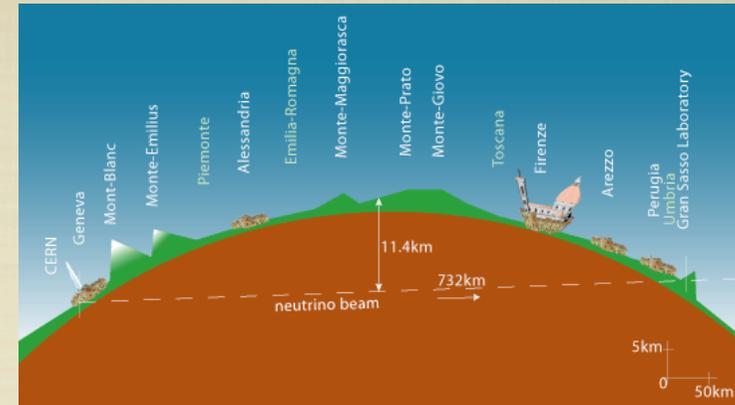
Conversión al atravesar la Tierra



Detector SuperKamiokande



+ Muchos otros experimentos con neutrinos provenientes de **reactores**

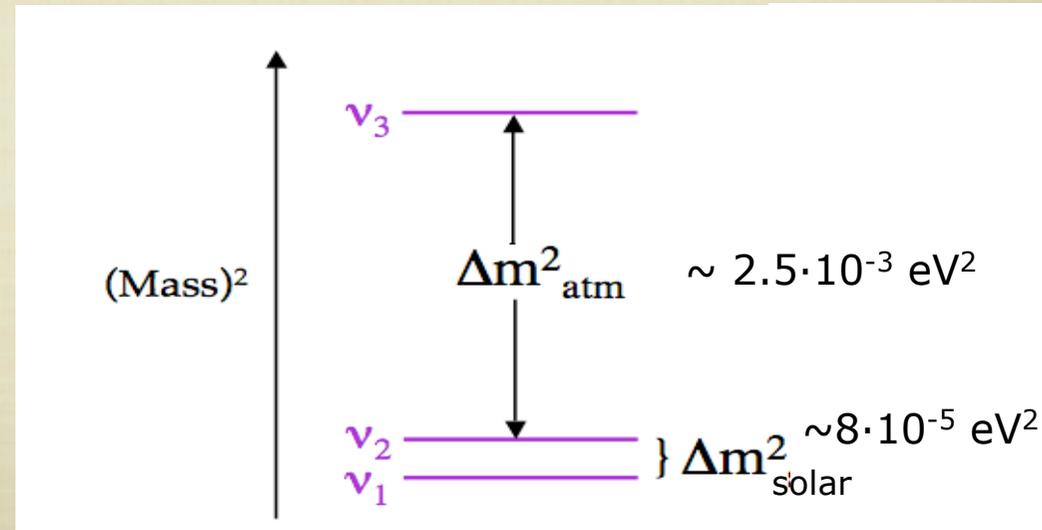


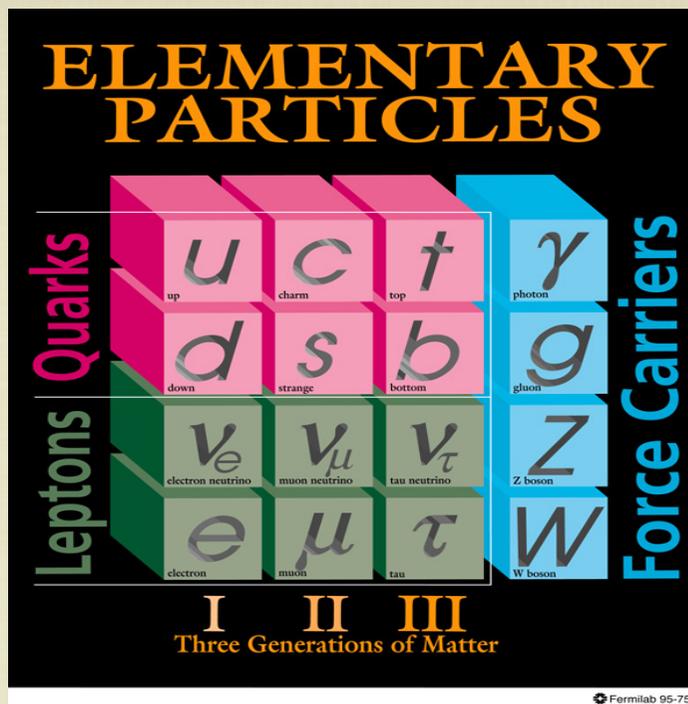
Neutrinos de CERN a GranSasso

¡Todos los datos confirman que los neutrinos tienen masa!

Los datos de oscilaciones fijan las diferencias de masas entre las 3 familias de neutrinos

Las masas absolutas se estiman en el rango $\sim 0.01 - 0.1 \text{ eV}$





MODELO ESTÁNDAR DE PARTÍCULAS ELEMENTALES

Una proeza del intelecto humano
Describe la materia y fuerzas conocidas,
con un rango de validez de 20 órdenes de magnitud
y con una precisión asombrosa

¿El “final de la Física”?

¿O nuevos comienzos?
 (“nubes en el horizonte”)

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

¿Cómo adquieren masa las partículas? El campo de Higgs

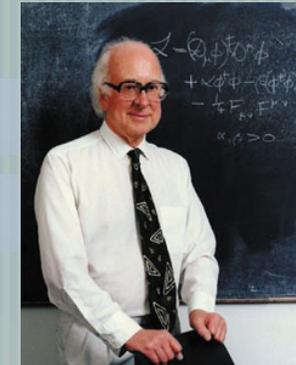
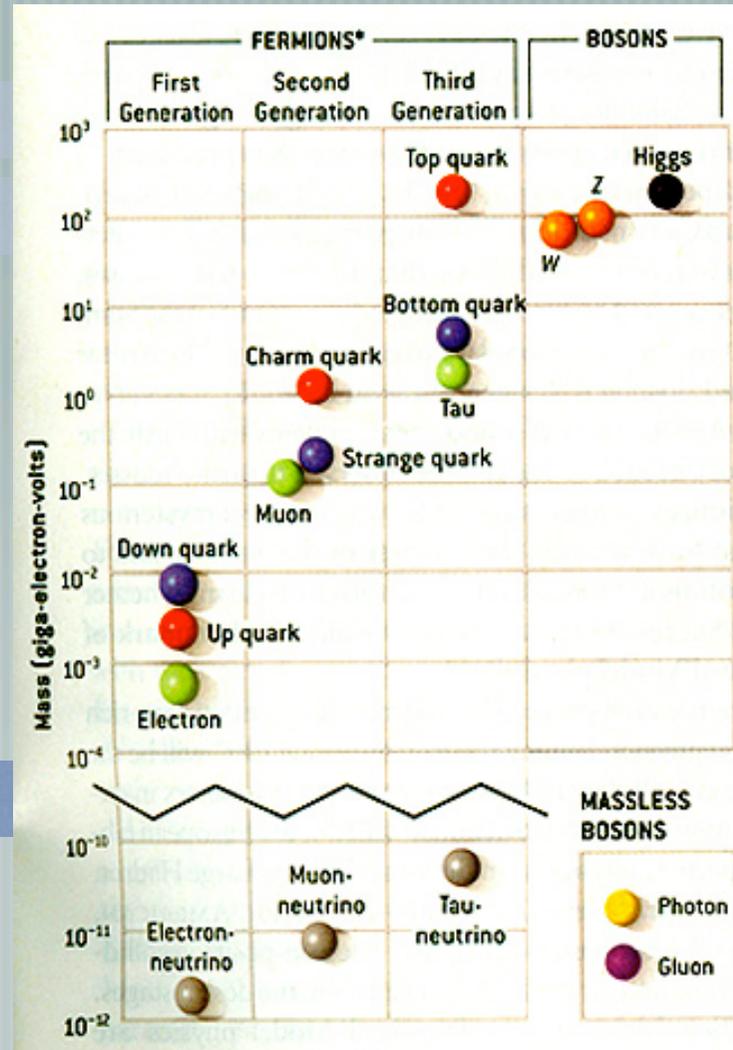
1 TeV →

100 GeV →

1 GeV →

1 MeV →

0.01 eV →



Peter Higgs

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

El campo de Higgs es un campo escalar que permea el vacío

El vacío rompe la simetría electrodébil, da masa a los W/Z, quarks, leptones

Masa (inercia) de las partículas: "fricción en el vacío"

Masa de una partícula, proporcional a su acoplamiento con el campo de Higgs



La partícula de Higgs es el cuanto asociado al campo de Higgs Es una fluctuación del campo de Higgs



El modelo de Higgs predice las propiedades de la partícula de Higgs
Si existe, se descubrirá en el LHC en CERN

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

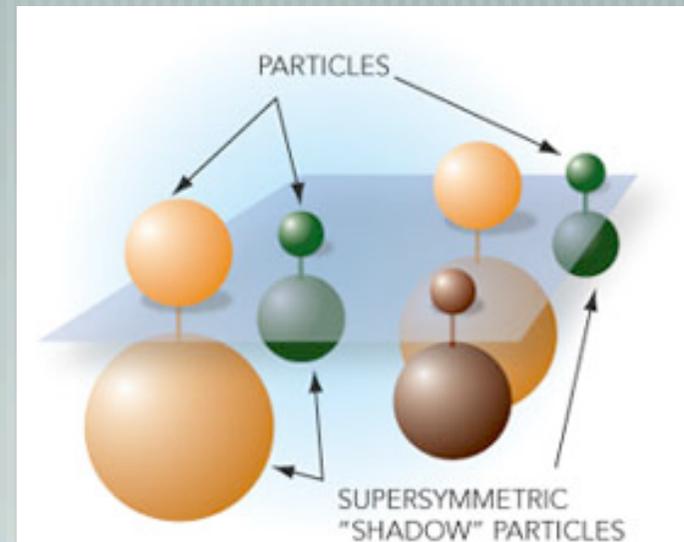
¿Hay más simetrías en la Naturaleza? ¿Supersimetría?

La simetría juega un papel fundamental en la física de las partículas elementales (p.ej. QCD -> simetría de color, teoría electrodébil -> simetría electrón/neutrino)

Supersimetría es una simetría que relaciona fermiones (spin 1/2) y bosones (spin 0, 1)

En supersimetría:
Cada partícula del modelo estándar tiene una partícula supersimétrica asociada, con spin diferente (super-compañero)

Spin 1/2	Spin 0,1
leptón	sleptón
quark	squark
Wino	W/Z
fotino	fotón
gluino	gluón



**Si estas partículas existen, serán muy pesadas (> 200 GeV)
Pero muy posiblemente estén al alcance del LHC**

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

¿Unificación de las interacciones? ¿Gravedad y Mecánica Cuántica? ¿...?

- Teoría de cuerdas

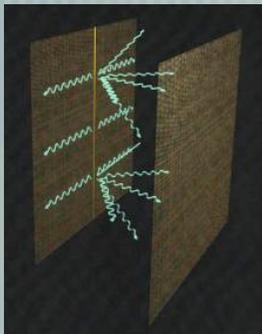


La teoría de (super)cuerdas describe la gravedad a nivel cuántico (gravitón)

Todas las partículas (incluido el gravitón) son diferentes estados de vibración de un único tipo de cuerda -> Unificación

Idea muy atractiva, pero todavía sin evidencia experimental de momento

- Dimensiones extra



Ciertas teorías (p.ej. teoría de cuerdas) predicen la existencia de dimensiones adicionales, de tamaño microscópico

Si son suficientemente grandes, podrían explicar la debilidad de la interacción gravitacional: La gravedad tiene un acoplamiento similar a las otras interacciones, pero los gravitones escapan en las dimensiones extra

En estos modelos, el LHC podría producir procesos donde la interacción gravitatoria es relevante, p.ej. ¡Producción de mini agujeros negros!

- Agujeros negros y Mecánica Cuántica

Radiación de Hawking, el problema de la información, el principio holográfico, ..

Multitud de ideas nuevas:

¿qué nos espera en el próximo nivel de conocimiento de la Naturaleza?

PREGUNTAS PARA EL s.XXI

COMIENZO DEL FUNCIONAMIENTO DEL LHC



¡Nuevas respuestas!