

El Modelo Estándar y la Física Fundamental

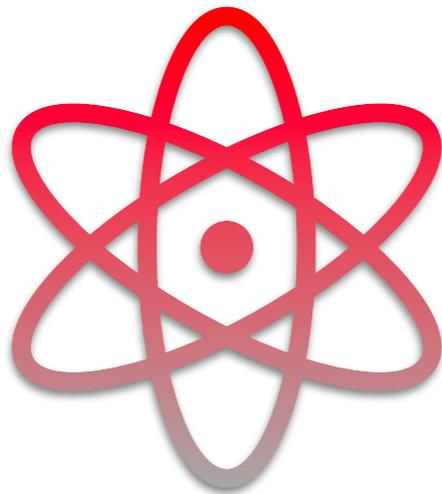


Miguel Escudero Abenza
Theoretical Physics Department, CERN
miguel.escudero@cern.ch

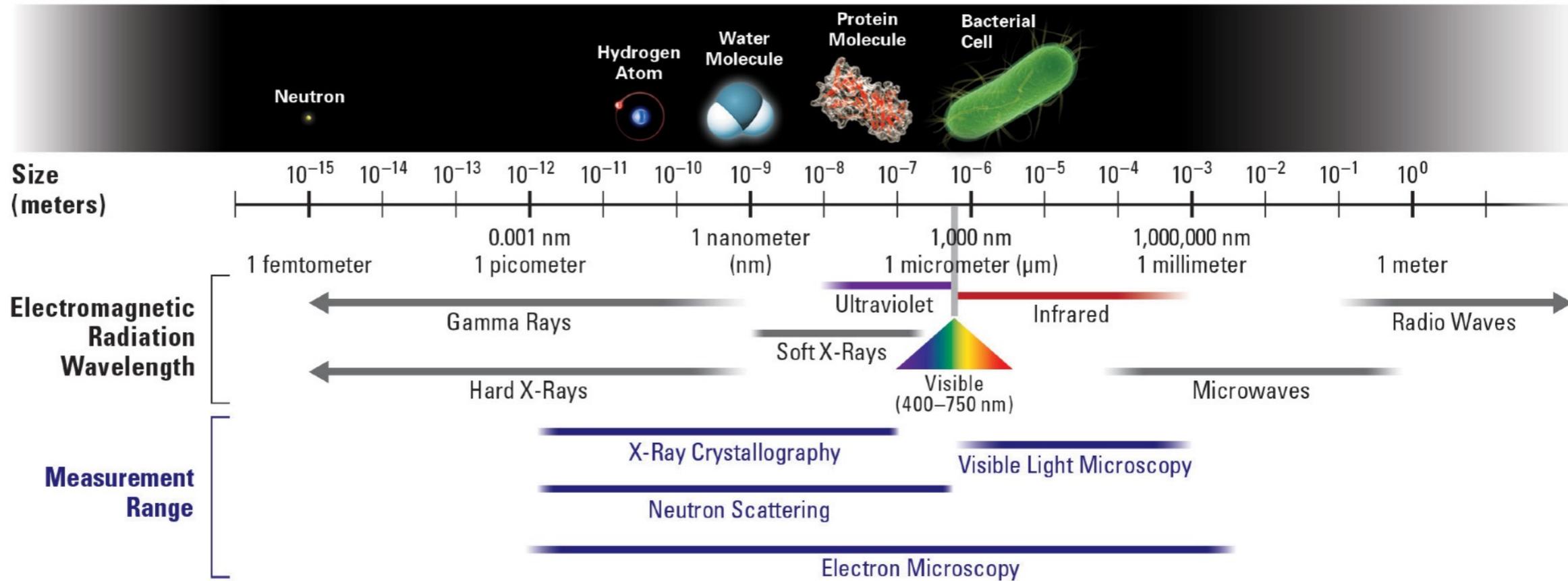
**Programa en lengua española para
profesores, 22 de julio de 2024**

El objetivo de la Física Fundamental

- Entender todos los fenómenos de la naturaleza, a todas las escalas y utilizando el mínimo número de ingredientes
- Esto incluye entender los elementos fundamentales de la materia y sus interacciones



Scale of Subvisible World



De Broglie: $\lambda = h/p$

$p = 7 \text{ TeV} = 7000 \text{ GeV} \simeq 7000 m_p$ $\lambda \simeq 10^{-19} \text{ m}$

**¡El LHC es el microscopio más potente del planeta!
¡Capaz de observar escalas 10000 veces menores que el protón!**

¿Qué es el Modelo Estándar?

- **Es la teoría cuántica de campos que nos permite entender a nivel fundamental toda la materia y sus interacciones**
- **Es la culminación de un esfuerzo colosal tanto experimental como teórico desde hace más de 100 años**
- **El proceso no ha sido lineal y ha requerido del trabajo y de las grandes ideas de miles de científicos de todo el mundo**



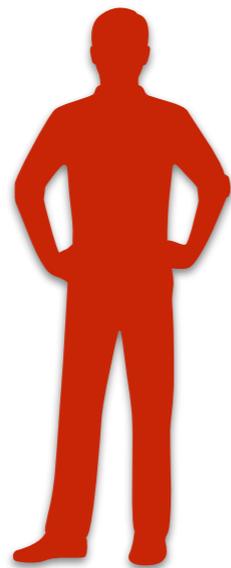
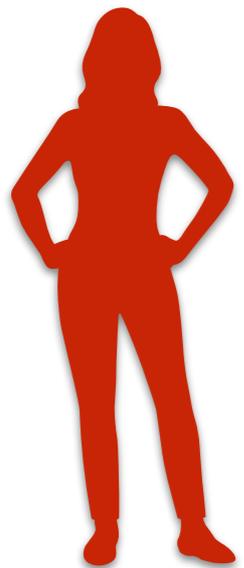
Más de 50 premios Nobel relacionados con la física de partículas

ÍNDICE

- **El Modelo Estándar**
 - **Partículas fundamentales y campos cuánticos**
 - **Interacciones fuertes**
 - **Interacciones electromagnéticas**
 - **Interacciones débiles**
- **Fundamentos del Modelo Estándar**
 - **Simetrías**
 - **El mecanismo de Higgs**
- **Cuestiones abiertas**

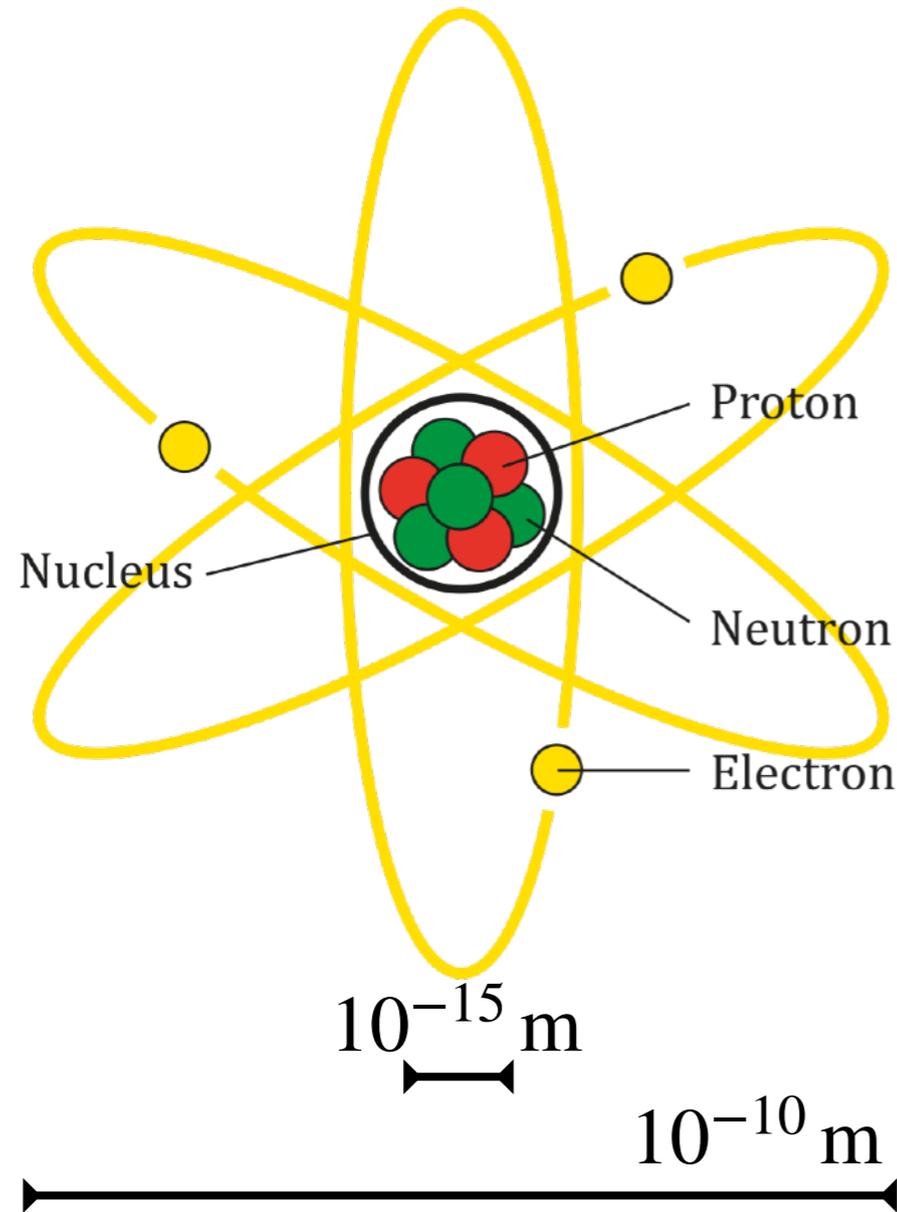
**¡Las preguntas son muy
bienvenidas!**

**Por favor: interrumpidme y
haced preguntas en cualquier
momento de la charla 😊**

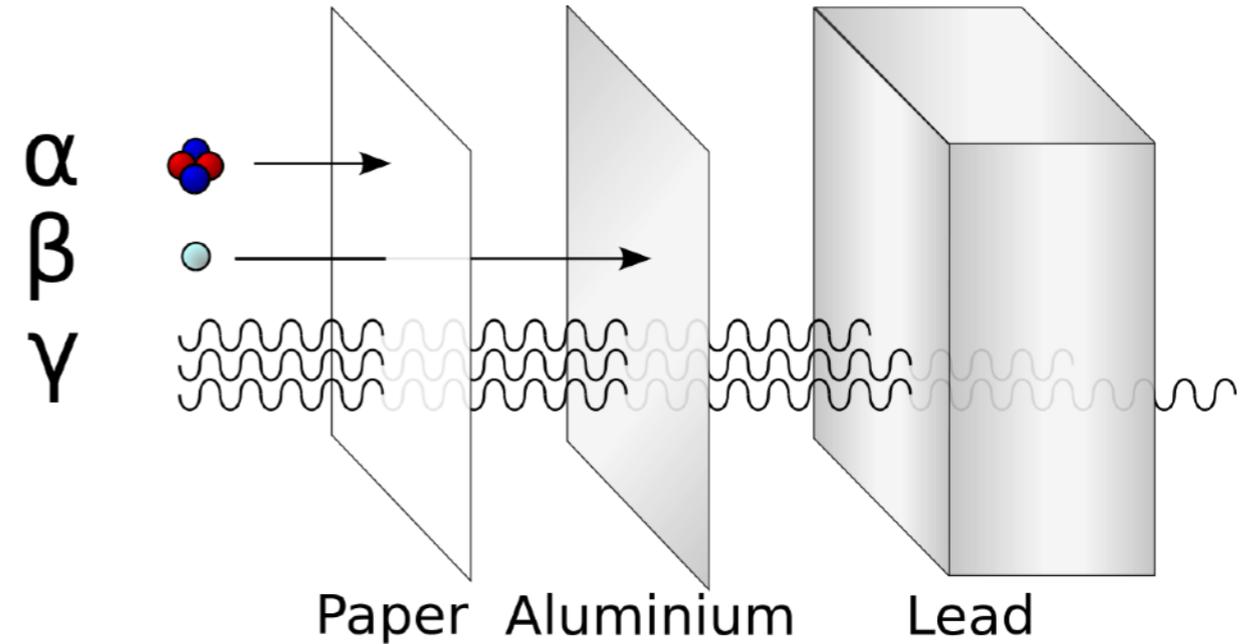


~1930

El átomo:



Radiaciones nucleares:



Los elementos fundamentales son:

 **protones**  **neutrones**  **electrones**

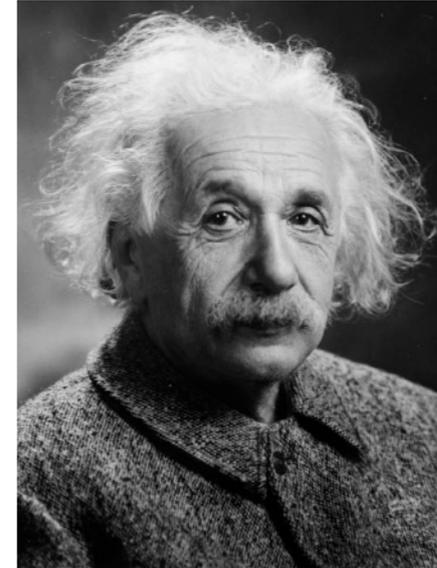
Las leyes que gobiernan su funcionamiento son la mecánica cuántica y el electromagnetismo

El Modelo Estándar nos permite entender el átomo, el núcleo y las radiaciones con total precisión

1) El Modelo Estándar es una teoría cuántica de campos

Mecánica Cuántica

Teoría de la
Relatividad Especial



Una consecuencia fundamental clave:

- **¡La existencia de la antimateria!**

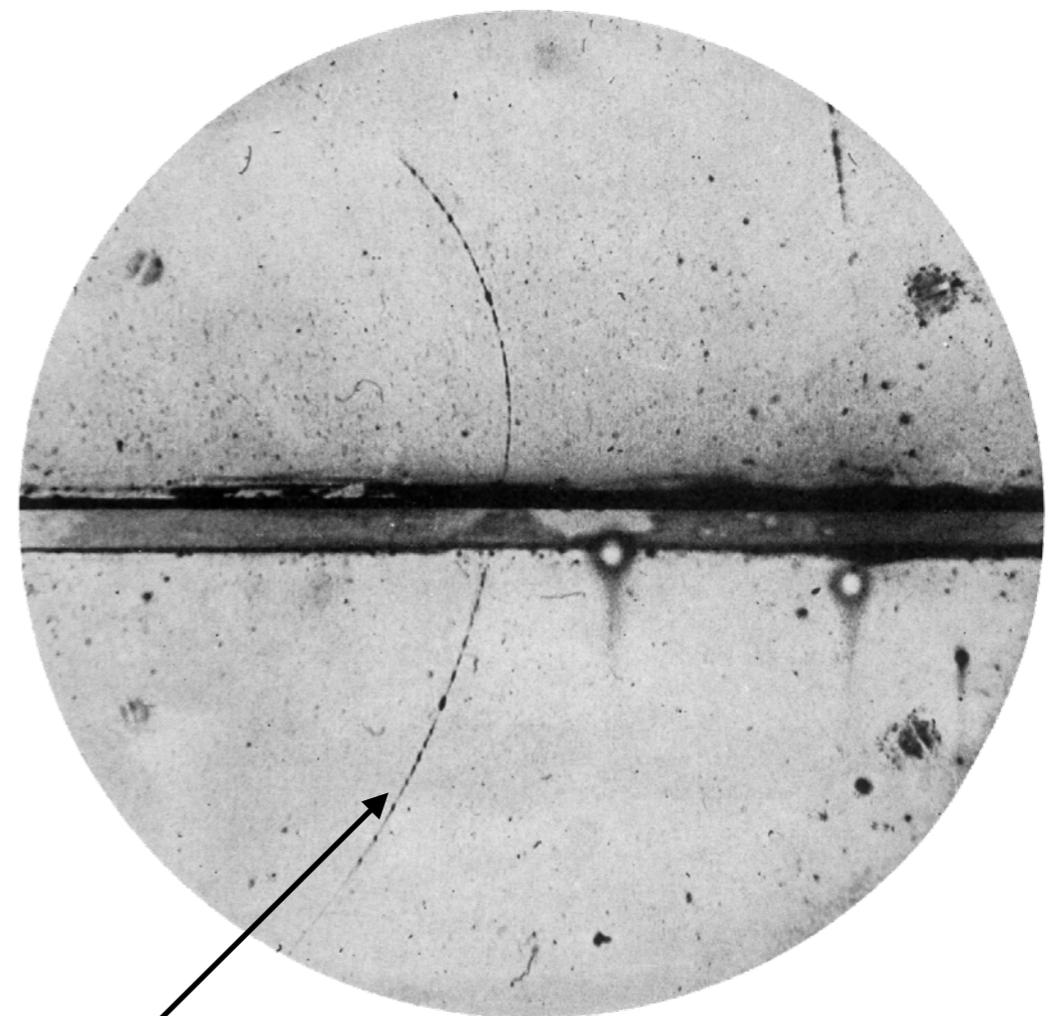


Dirac 1928

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \Psi = m\Psi$$

El entendimiento teórico de las partículas cargadas requiere de la existencia de antimateria. ¡Partículas con números cuánticos opuestos pero con exactamente la misma masa!

En 1932, Anderson descubre el positrón a través de los rayos cósmicos



Electron: 

Positrón: 

Dos tipos de partículas en Mecánica Cuántica:

Bosones:



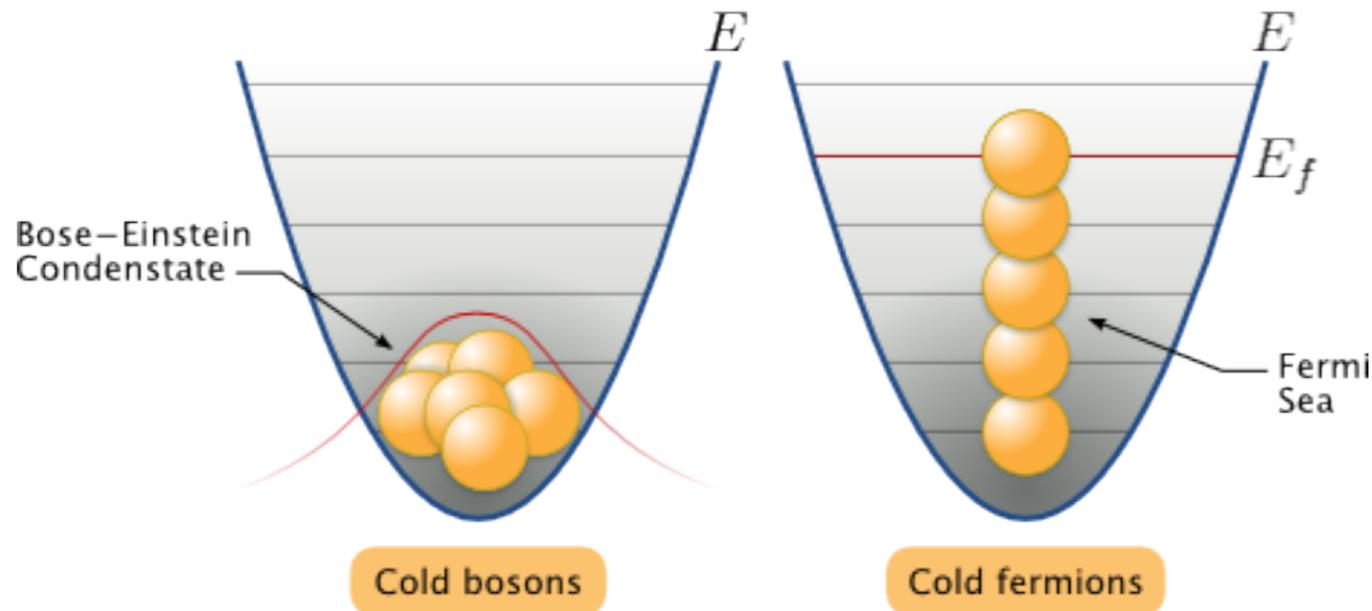
Fermiones:



Caracterizados por un momento angular intrínseco cuantizado:

El espín: S **Bosones:** $\hbar, 2\hbar \dots$
Fermiones: $\hbar/2, 3/2\hbar \dots$

Los bosones pueden ocupar un mismo estado de energía mientras que los fermiones no.

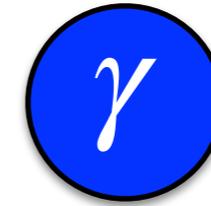


El rol de cada partícula es muy distinto:

Fermiones = Materia

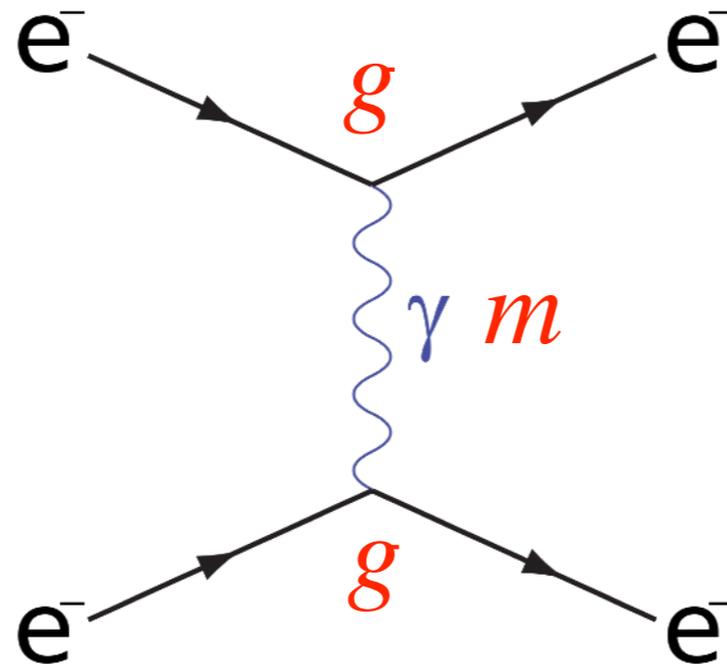


Bosones = Fuerzas



A día de hoy entendemos las interacciones entre partículas como intercambios de otras partículas. En particular, de bosones!

Diagramas de Feynman:



$$V(r) = g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

g = constante de acoplamiento
 m = masa del boson

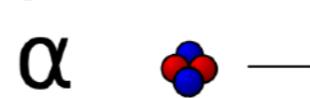
Probabilidad de colisión: $P \propto g^4$

El Modelo Estándar describe a nivel fundamental tres de las cuatro fuerzas de la naturaleza:

Interacciones Electromagnéticas

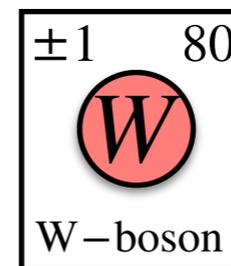
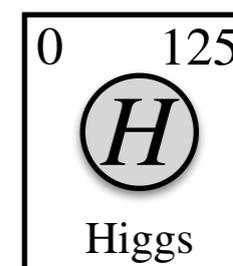
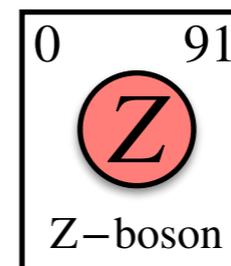
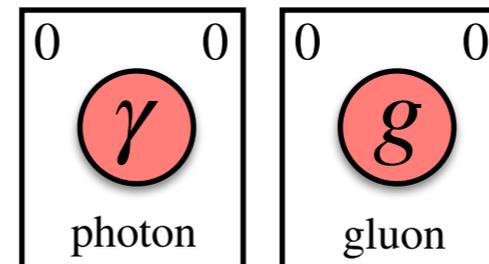
Interacciones Débiles

Interacciones Fuertes



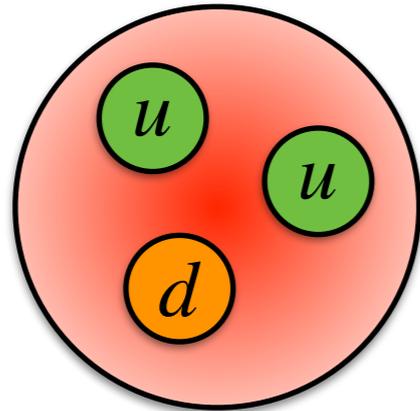
Las partículas fundamentales:

| | | |
|--|--|--|
| $+\frac{2}{3}$ $\frac{1}{500}$ u up | $+\frac{2}{3}$ 1.2 c charm | $+\frac{2}{3}$ 173 t top |
| $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{200}$ d down | $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{10}$ s strange | $-\frac{1}{3}$ 4.7 b bottom |
| -1 $\frac{1}{2000}$ e electron | -1 $\frac{1}{10}$ μ muon | -1 1.7 τ tau |
| 0 $< 10^{-9}$ ν_e neutrino- e | 0 $< 10^{-9}$ ν_μ neutrino- μ | 0 $< 10^{-9}$ ν_τ neutrino- τ |

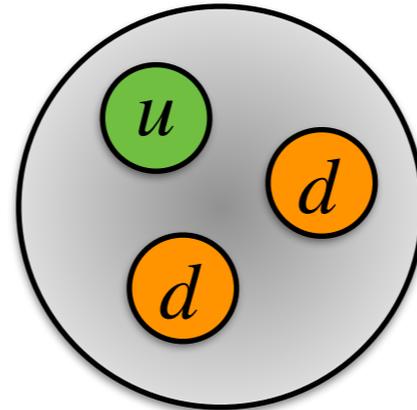


Interacciones Fuertes:

protón



neutrón



quarks:



$$Q = + 2/3$$



$$Q = - 1/3$$

El protón y el neutrón están formados por quarks y estos sí que son partículas fundamentales

¿Qué mantiene a los quarks unidos?

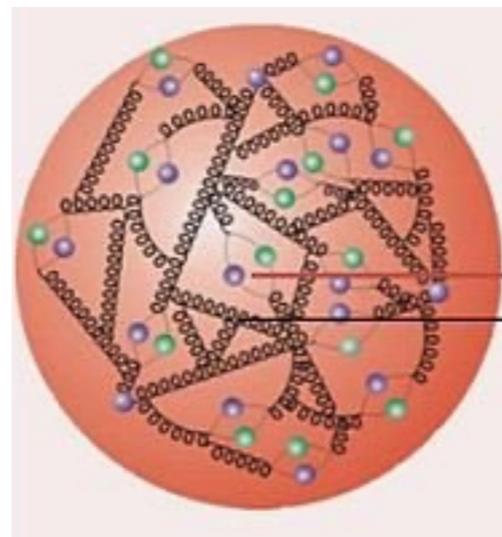
Otras partículas que interactúan fuertemente:

los gluones



$$Q = 0 \quad m = 0$$

Descripción moderna del protón:



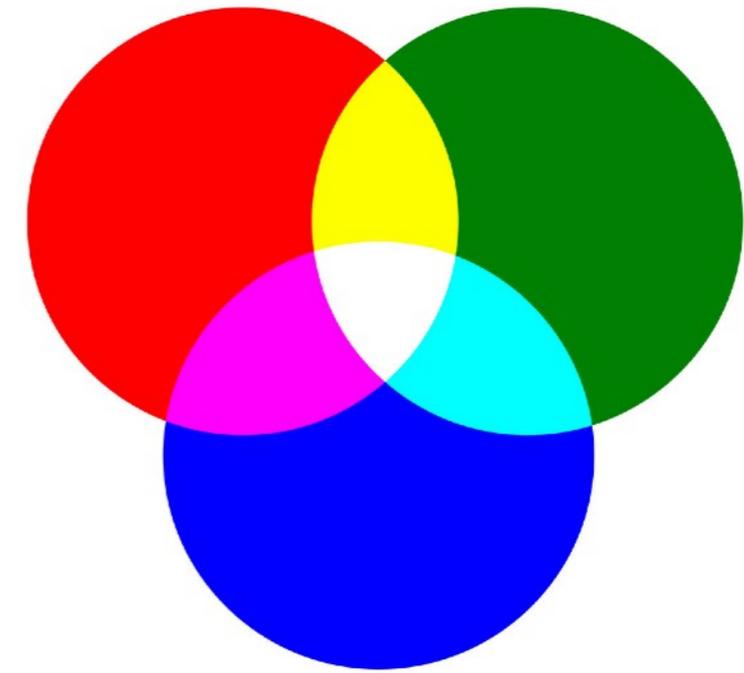
La gran parte de la masa del protón viene por la energía cinética/de interacción de los quarks. No de su masa!

$$m_u = m_p/500$$

$$m_d = m_p/200$$

Interacciones Fuertes: Cromodinámica Cuántica

Los quarks vienen en 3 colores.
¡Los gluones en 8!

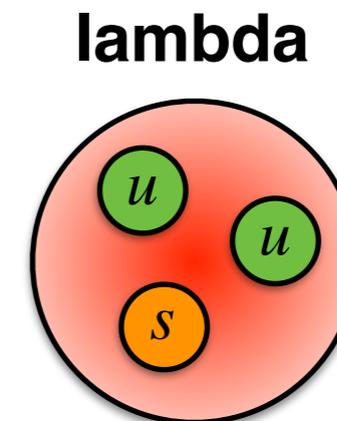
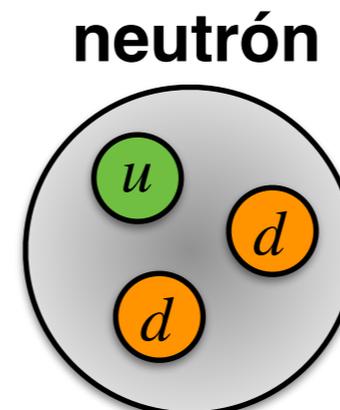
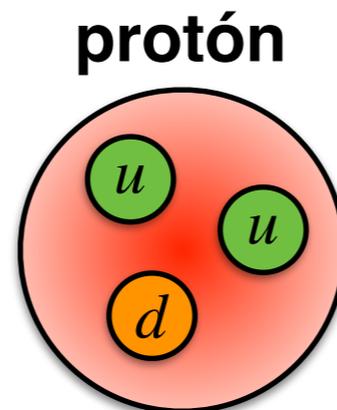


Confinamiento: las partículas observadas no pueden tener color

Hadrones:

Bariones:
(fermiones)

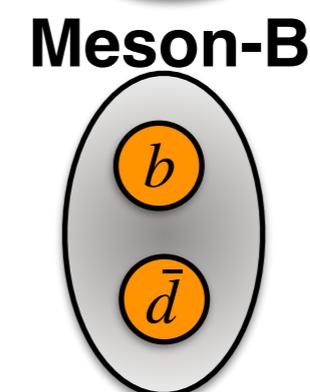
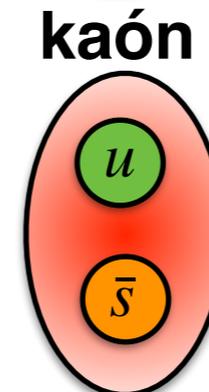
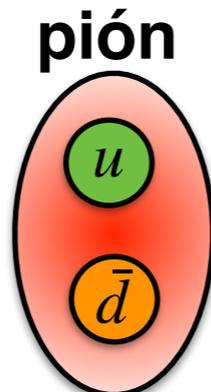
qqq



...

Mesones:
(bosones)

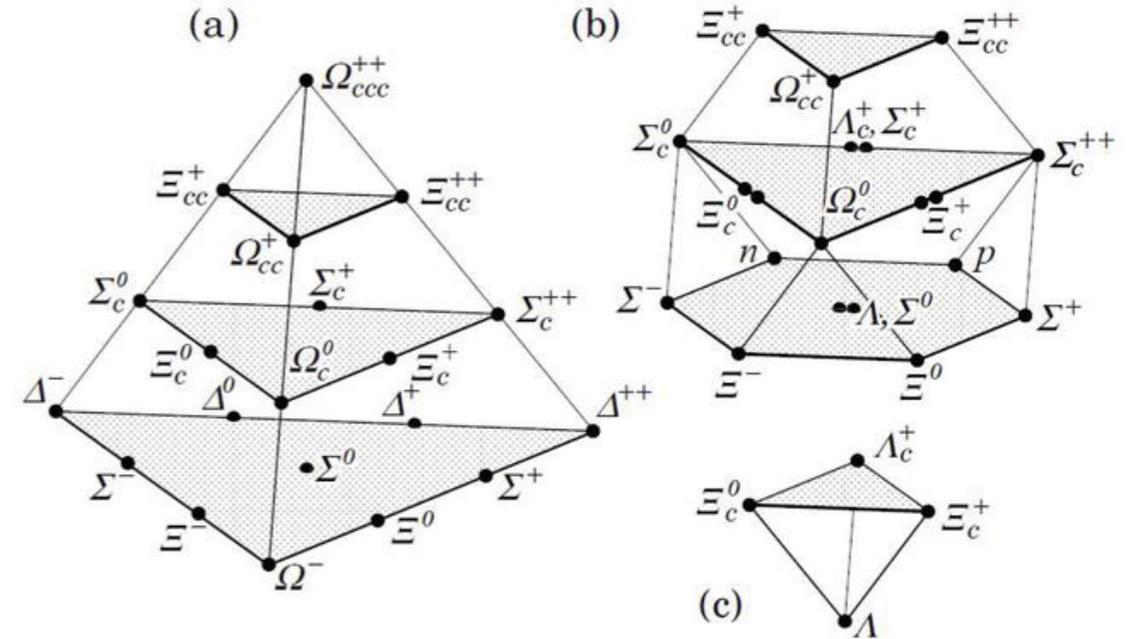
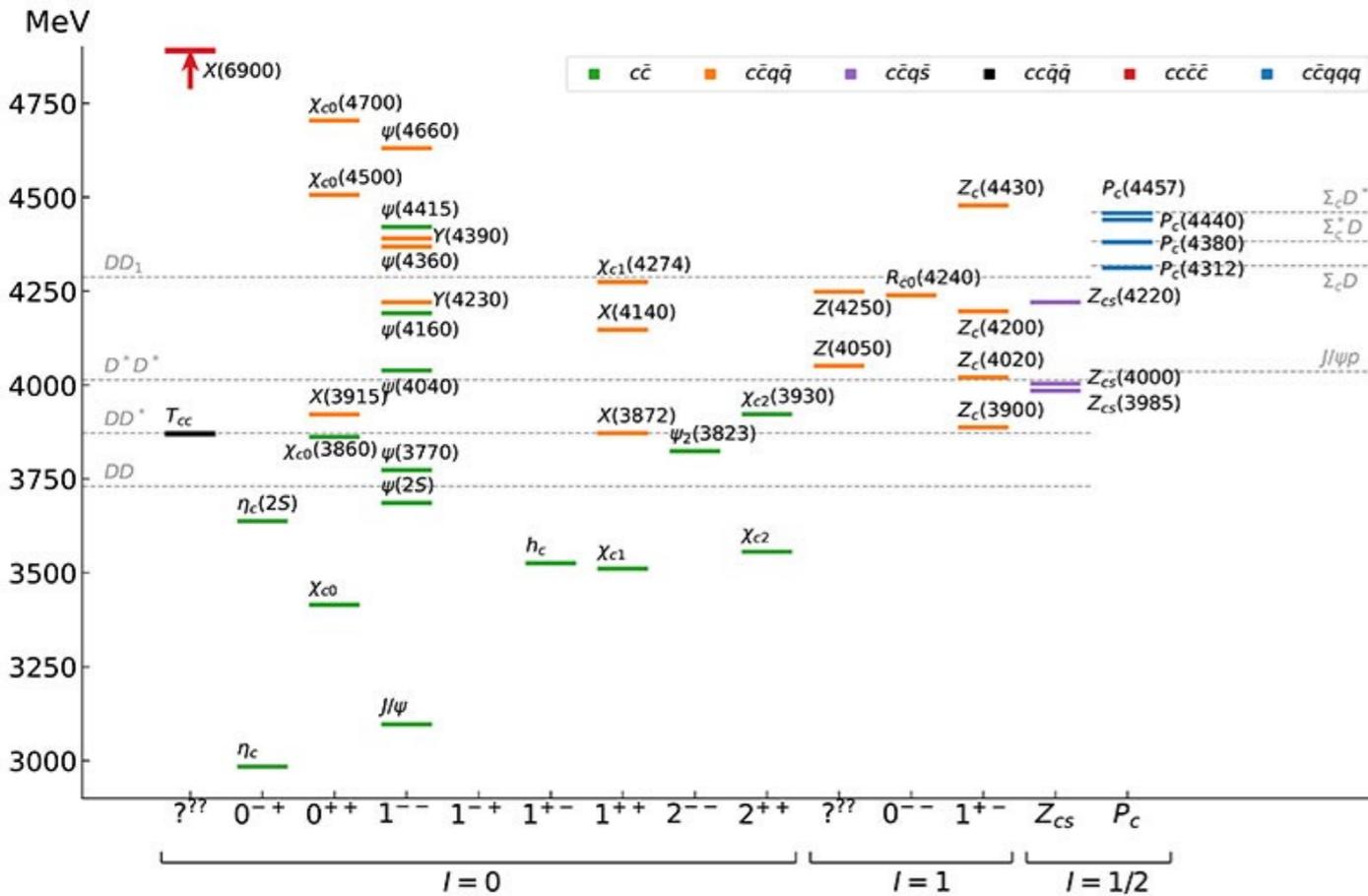
$q\bar{q}$



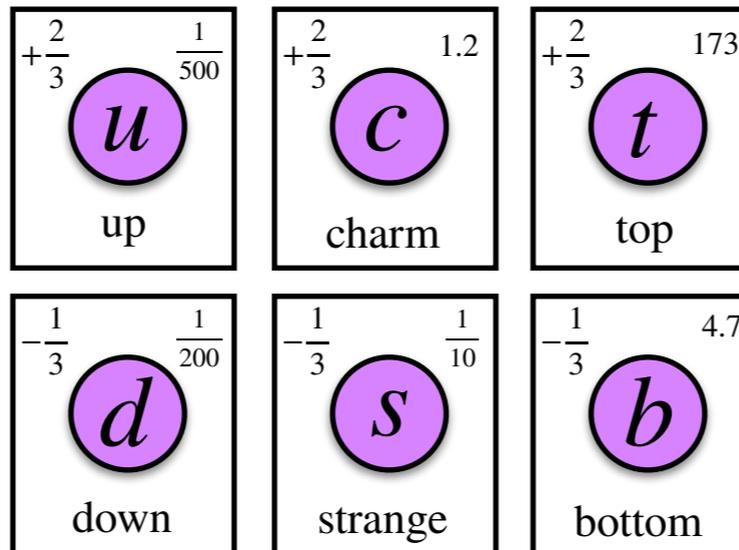
...

Interacciones Fuertes: Cromodinámica Cuántica

¡Cientos de hadrones descubiertos!

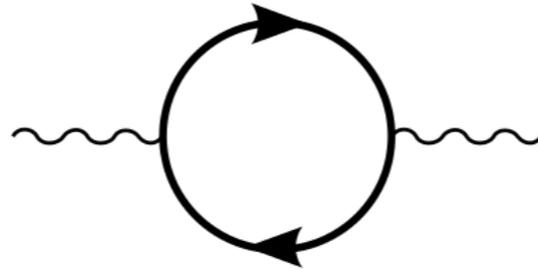


Se pueden explicar con sólo los siguientes ingredientes:



Interacciones Fuertes:

Libertad Asintótica:

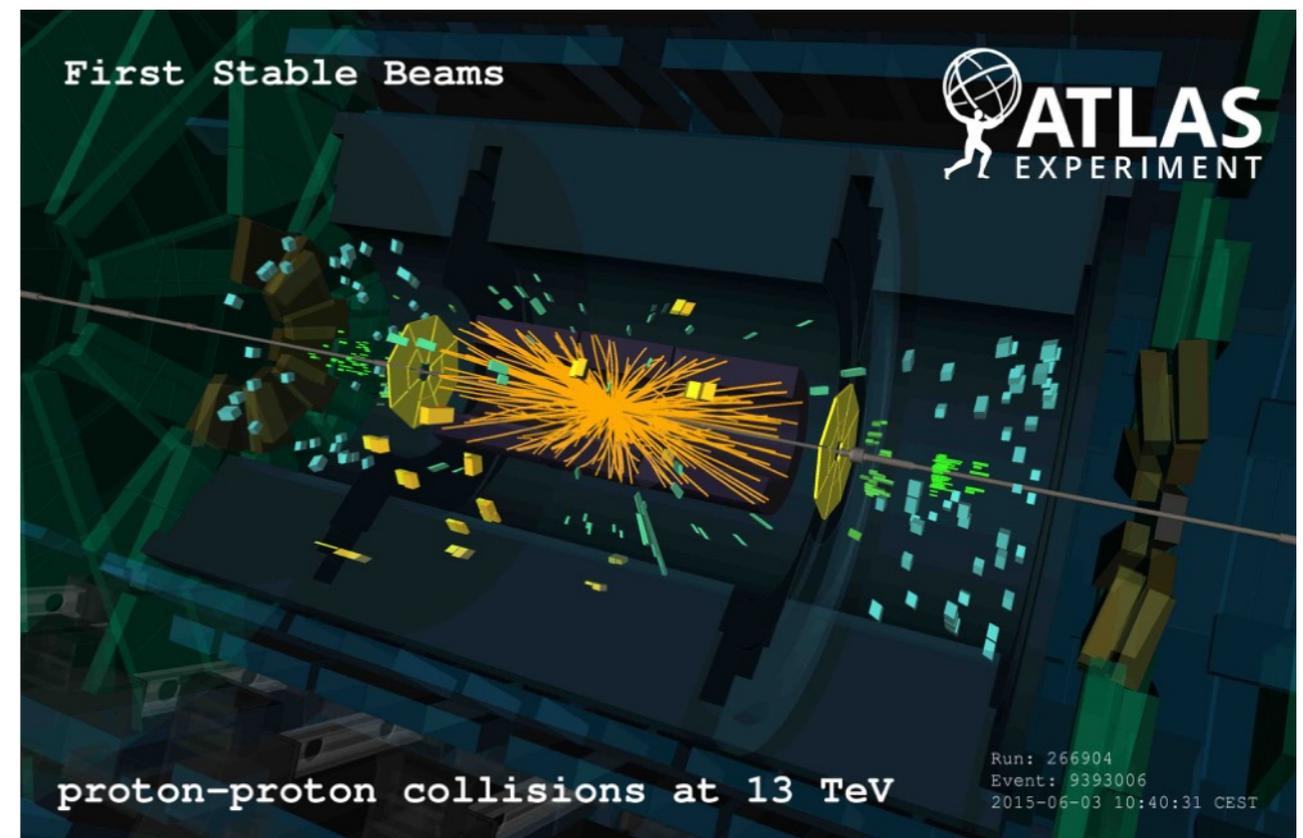


Efecto cuántico por el que la fuerza fuerte es menos intensa a altas energías o a pequeñas escalas.

| | | | |
|--------------------------------|---|--------------|--------------|
| Escala | | 10^{-15} m | 10^{-19} m |
| Energía | | GeV | 10 TeV |
| Fuerza Fuerte |  | 10 | 1 |
| Fuerza Electromagnética |  | 1/137 | 1/128 |

Efecto muy importante para entender las colisiones en el LHC:

¡Y que implica que los quarks dentro de los núcleos se mueven libremente!



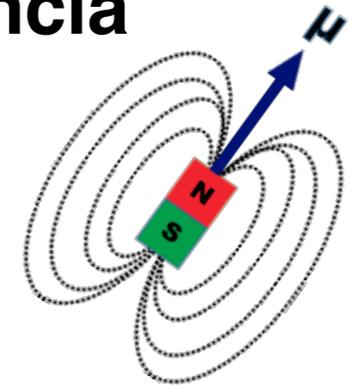
Interacciones Electromagnéticas: Electrodinámica Cuántica

Describe el electromagnetismo clásico

¡El fotón habla con todas las partículas salvo con los neutrinos!

Es la parte del Modelo Estándar que ha producido algunas de las predicciones más espectaculares de la historia de la ciencia

Considerar el momento dipolar magnético del electrón:

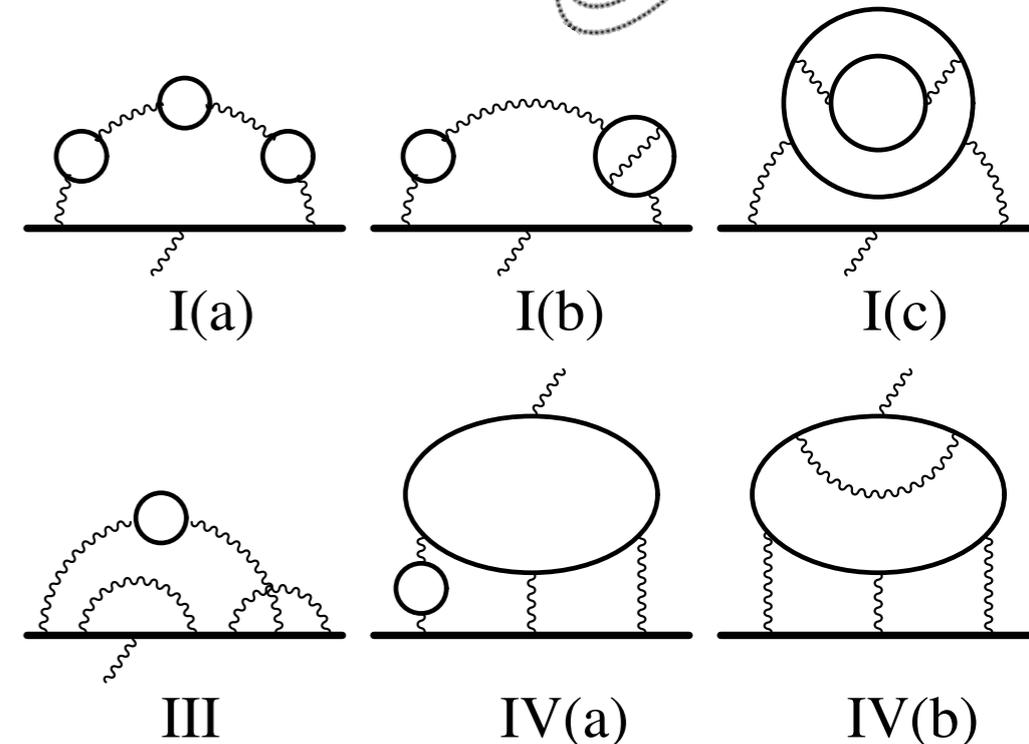


Mecánica clásica: $g_s = 1$ 😞

Dirac: $g_s = 2$

Medida 2023: $g_s = 2.0023193043621(3)$

Teoría 2023: $g_s = 2.0023193043632(3)$



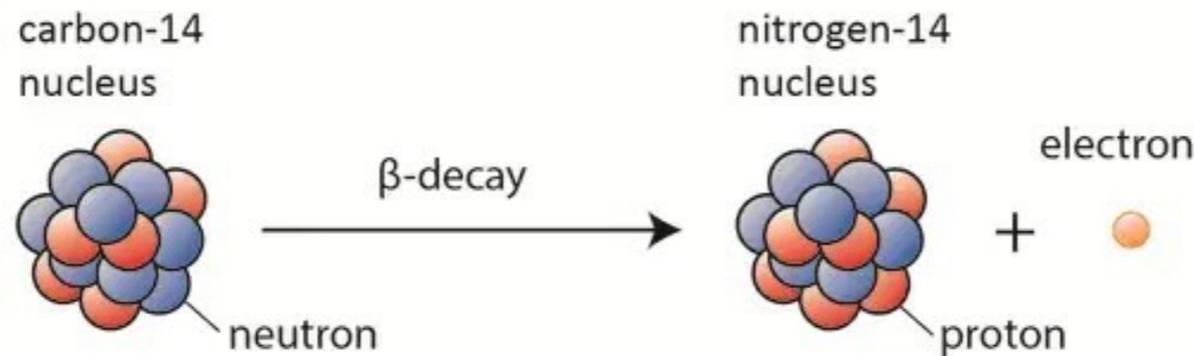
¡Acuerdo entre teoría y experimento en una parte en 1 billón!

~1930 Los elementos fundamentales son:

● protones ● neutrones ● electrones

¿Es esto todo? No!

Se observa que el espectro de energía de la radiación beta es continuo!

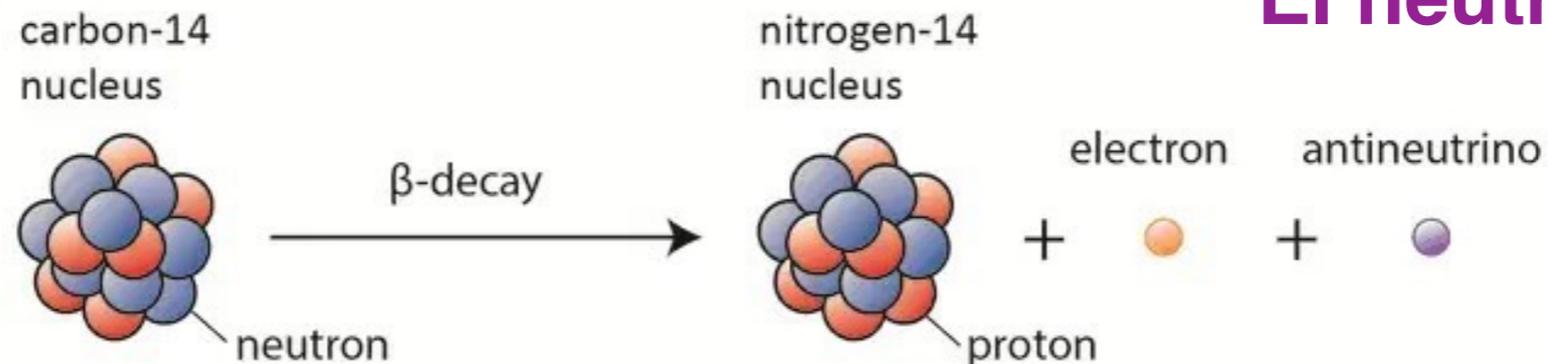


Bohr propone que la teoría falla y que de alguna manera la energía no se conserva en el proceso



Pauli propone que hay otra partícula muy ligera y neutra, que interactúa muy débilmente y que también se produce en la reacción:

El neutrino

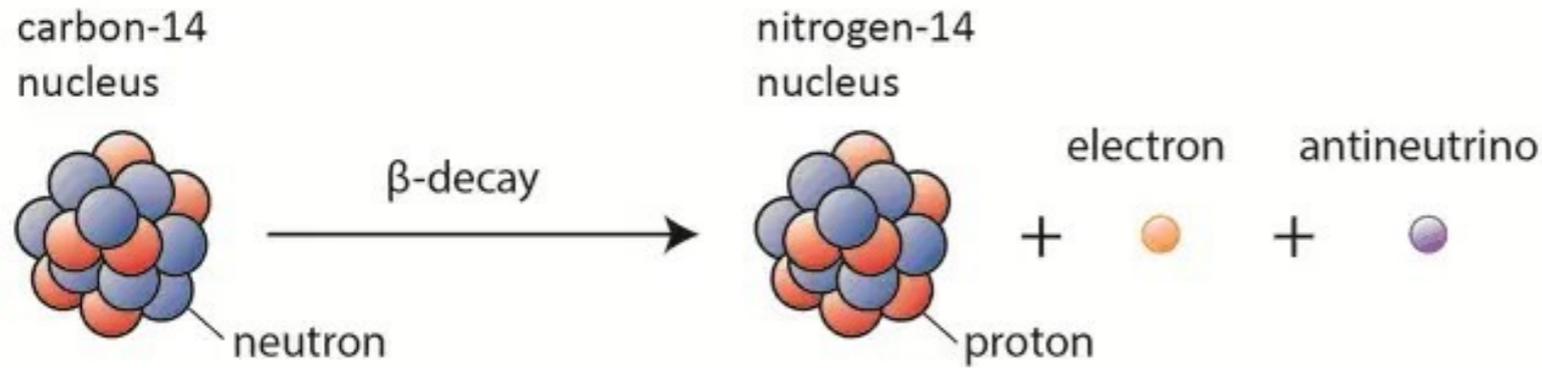


● Por primera vez detectado en 1956 por Cowan y Reines

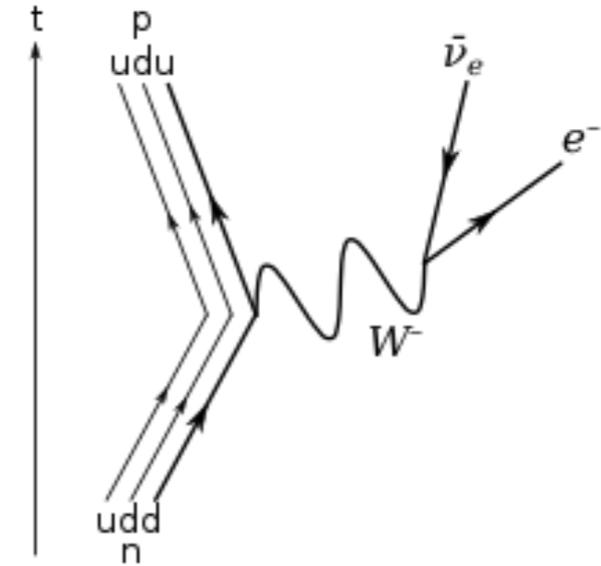
● Nos atraviesan $\sim 10^{12}$ neutrinos por segundo provenientes del sol!

Interacciones Débiles:

A nivel nuclear:



A nivel de partículas:



¿Por qué se llama débil?

Las partículas portadoras son realmente pesadas:

corto alcance:

$$m_{W^\pm} = 80 \text{ GeV}$$

$$R < 10^{-16} \text{ m}$$

¡Descubiertas aquí en el 1982 en el CERN Super Proton Synchrotron!



1984

Rubbia & van der Meer

Interacciones Débiles:

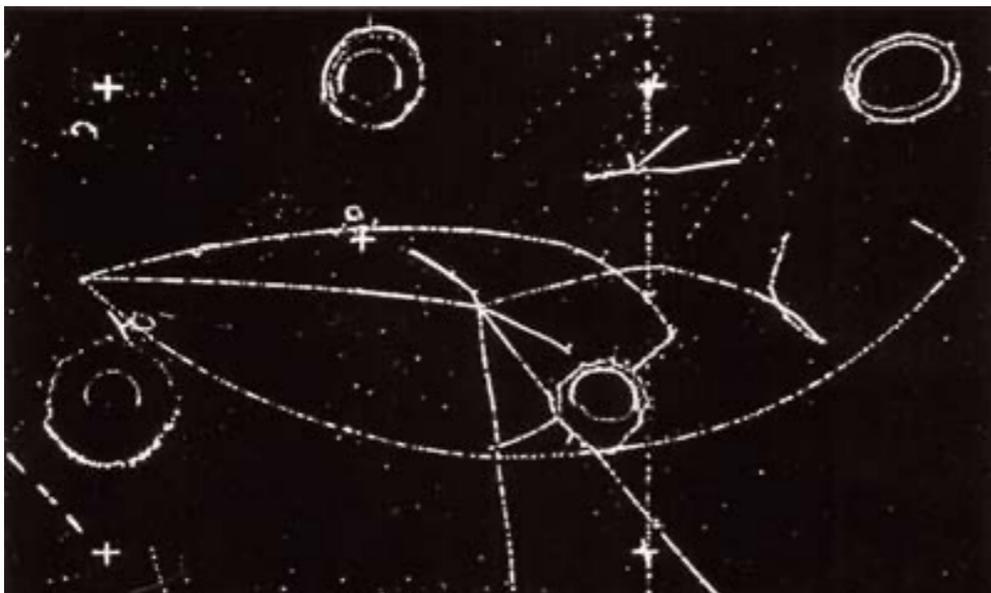
No es posible entender a nivel fundamental los bosones W^{\pm} y el fotón sin otra partícula: el bosón Z^0

Esta partícula no hacía falta para nada, pero se teorizó:

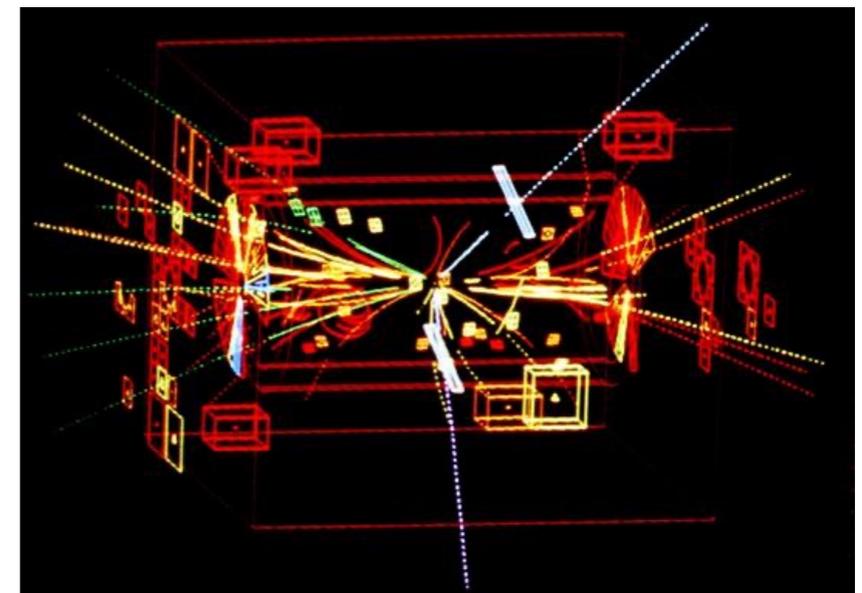
Premio Nobel a Salam,
Weinberg y Glashow
en 1979



¡Primera evidencia de
su existencia en 1973!



¡Descubierta aquí en
el CERN en 1983!



El Mecanismo de Higgs

El modelo sólo con esto no tiene sentido a nivel cuántico

| | | |
|--|--|--|
| $+\frac{2}{3}$ $\frac{1}{500}$ u up | $+\frac{2}{3}$ 1.2 c charm | $+\frac{2}{3}$ 173 t top |
| $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{200}$ d down | $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{10}$ s strange | $-\frac{1}{3}$ 4.7 b bottom |
| -1 $\frac{1}{2000}$ e electron | -1 $\frac{1}{10}$ μ muon | -1 1.7 τ tau |
| 0 $< 10^{-9}$ ν_e neutrino- e | 0 $< 10^{-9}$ ν_μ neutrino- μ | 0 $< 10^{-9}$ ν_τ neutrino- τ |

| | |
|-------------------------|-------------------|
| 0 γ photon | 0 g gluon |
|-------------------------|-------------------|

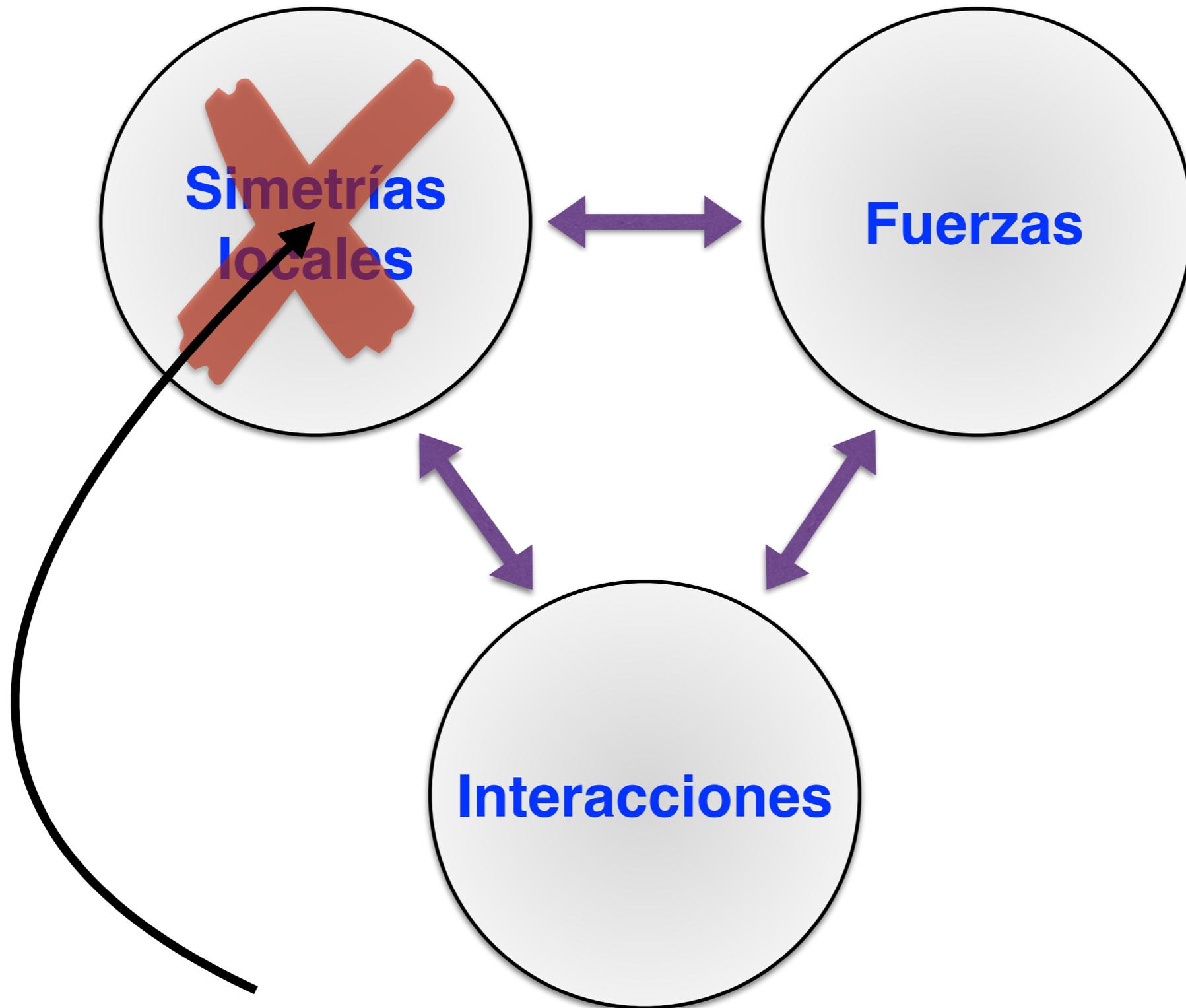
| |
|---------------------------|
| 0 91 Z Z-boson |
|---------------------------|

| |
|---------------------------------|
| ± 1 80 W W-boson |
|---------------------------------|

Sólo funciona si añadimos esto:

| |
|--------------------------|
| 0 125 H Higgs |
|--------------------------|

El Modelo Estándar se basa en poderosas simetrías

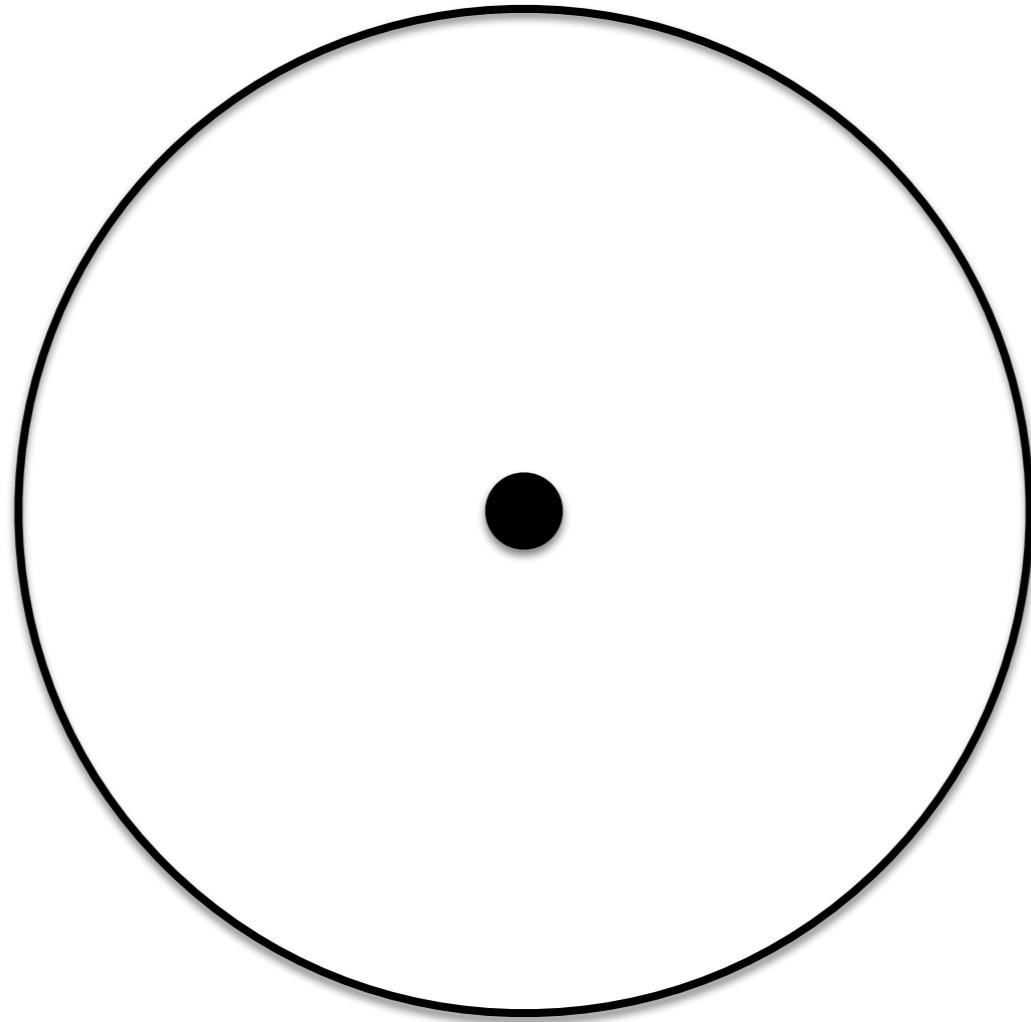


Las masas de las partículas rompen esas simetrías! 🙄

El mecanismo de Higgs: cómo dar masa a las partículas sin romper las simetrías explícitamente

Simetrías

Ejemplo:



Ejemplo 2

dimensiones:

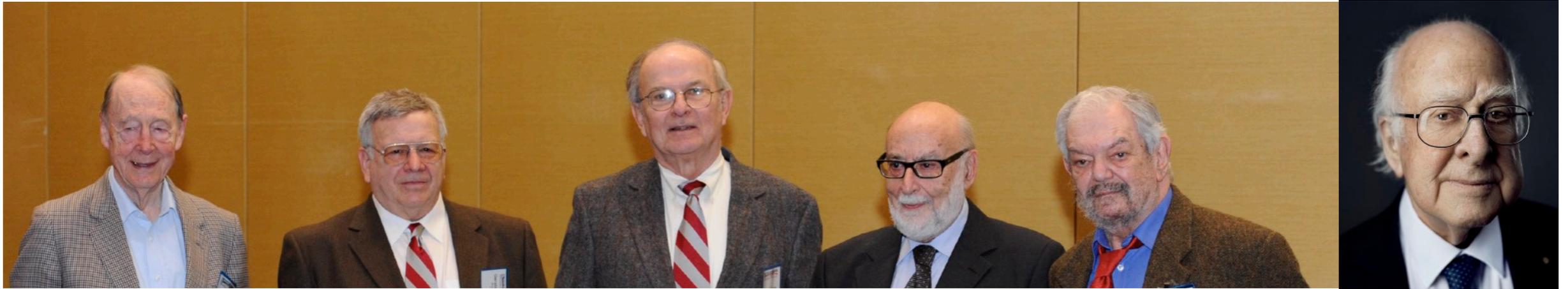


Ejemplo 2

dimensiones:

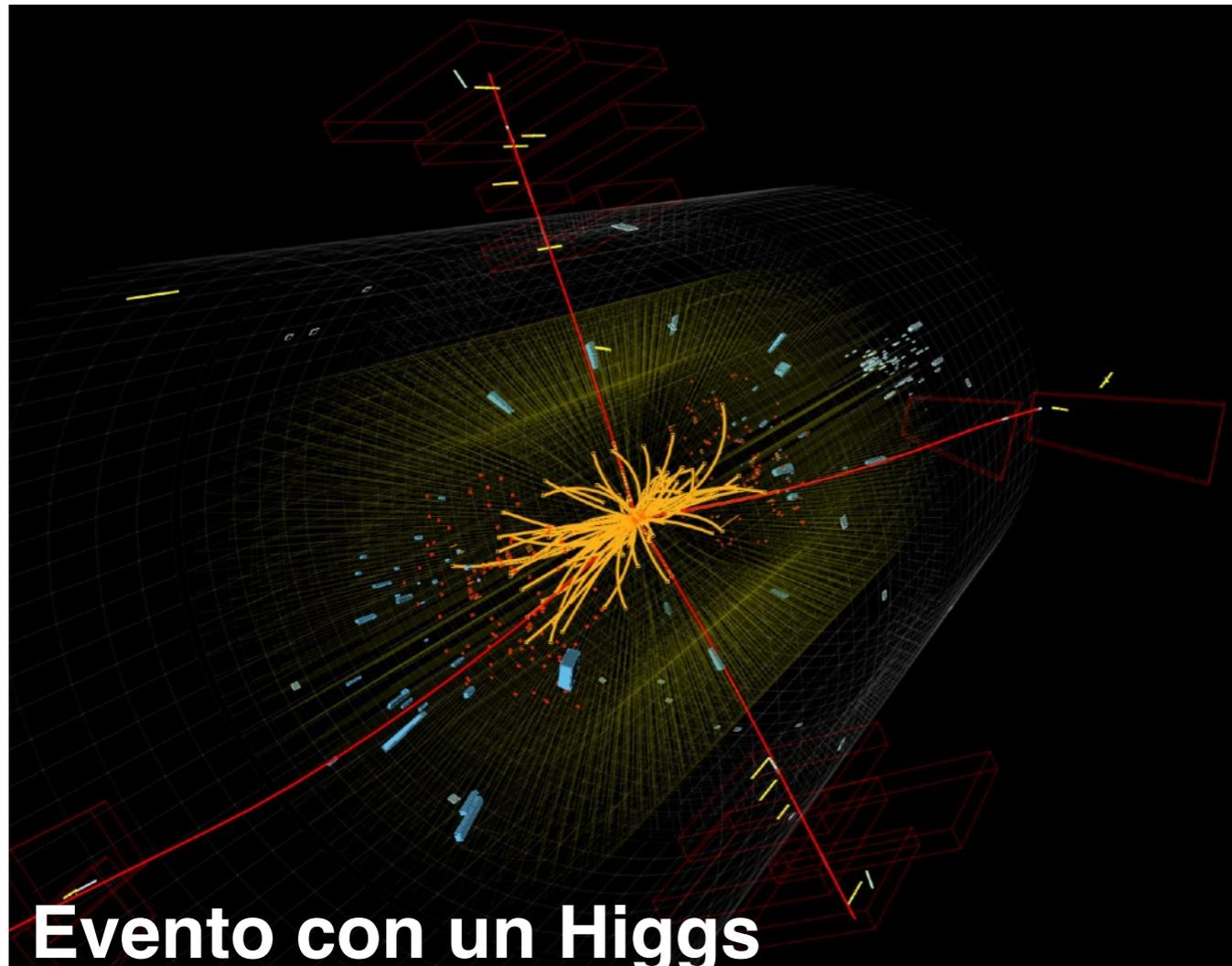


Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble 1964



¡El bosón de Higgs como producto del mecanismo!

Encontrado en el CERN por ATLAS y CMS en 2012



Evento con un Higgs

10:35 AM

El descubrimiento del bosón de Higgs

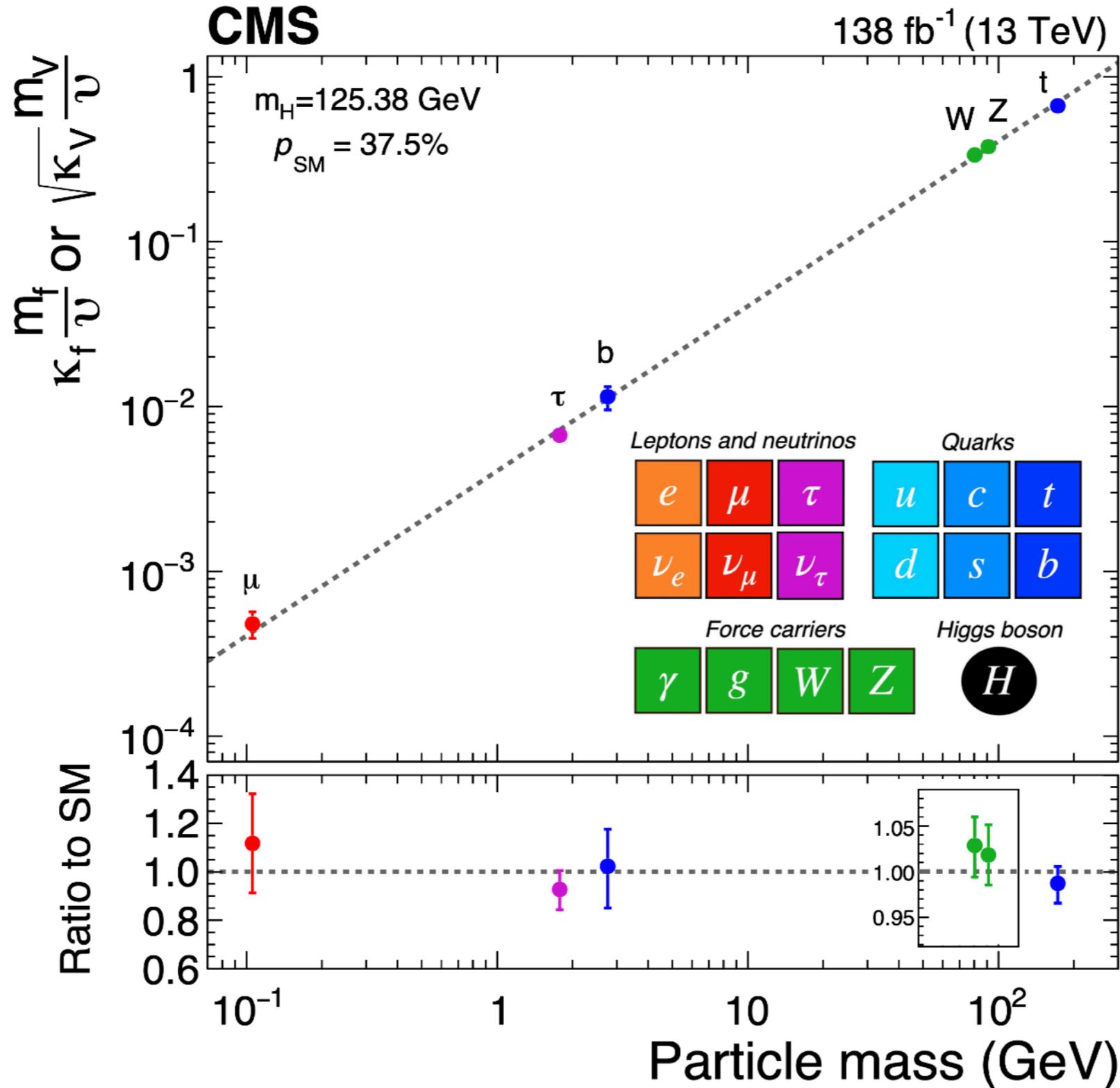
Speaker: Luis Roberto Flores Castillo (The Chinese University of Hong Kong (HK))



2013 para Higgs y Englert!

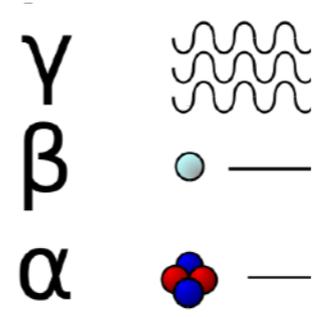
Predicción clave:

¡El acoplamiento del bosón de Higgs es proporcional a la masa de las partículas!

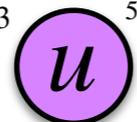
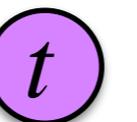
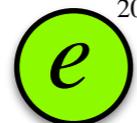


Resumen:

Interacciones Electromagnéticas
Interacciones Débiles
Interacciones Fuertes



Las partículas fundamentales:

| | | | | | | |
|--|---|---|---|--|---|--|
| $+\frac{2}{3}$  up $\frac{1}{500}$ | $+\frac{2}{3}$  charm 1.2 | $+\frac{2}{3}$  top 173 | 0  photon 0 | 0  gluon 0 | 0  Z-boson 91 | 0  Higgs 125 |
| $-\frac{1}{3}$  down $\frac{1}{200}$ | $-\frac{1}{3}$  strange $\frac{1}{10}$ | $-\frac{1}{3}$  bottom 4.7 | | | | |
| -1  electron $\frac{1}{2000}$ | -1  muon $\frac{1}{10}$ | -1  tau 1.7 | | | | |
| 0  neutrino-e $< 10^{-9}$ | 0  neutrino- μ $< 10^{-9}$ | 0  neutrino- τ $< 10^{-9}$ | | | | |
| | | | ± 1  W-boson 80 | | | |

¿Más allá del Modelo Estándar?

Problemas estéticos

¿Por qué 3 familias?

Masas y acoplamientos son parámetros libres

Problemas fundamentales

La gravitación no está integrada en el modelo

¿Problemas observaciones?

Ver:

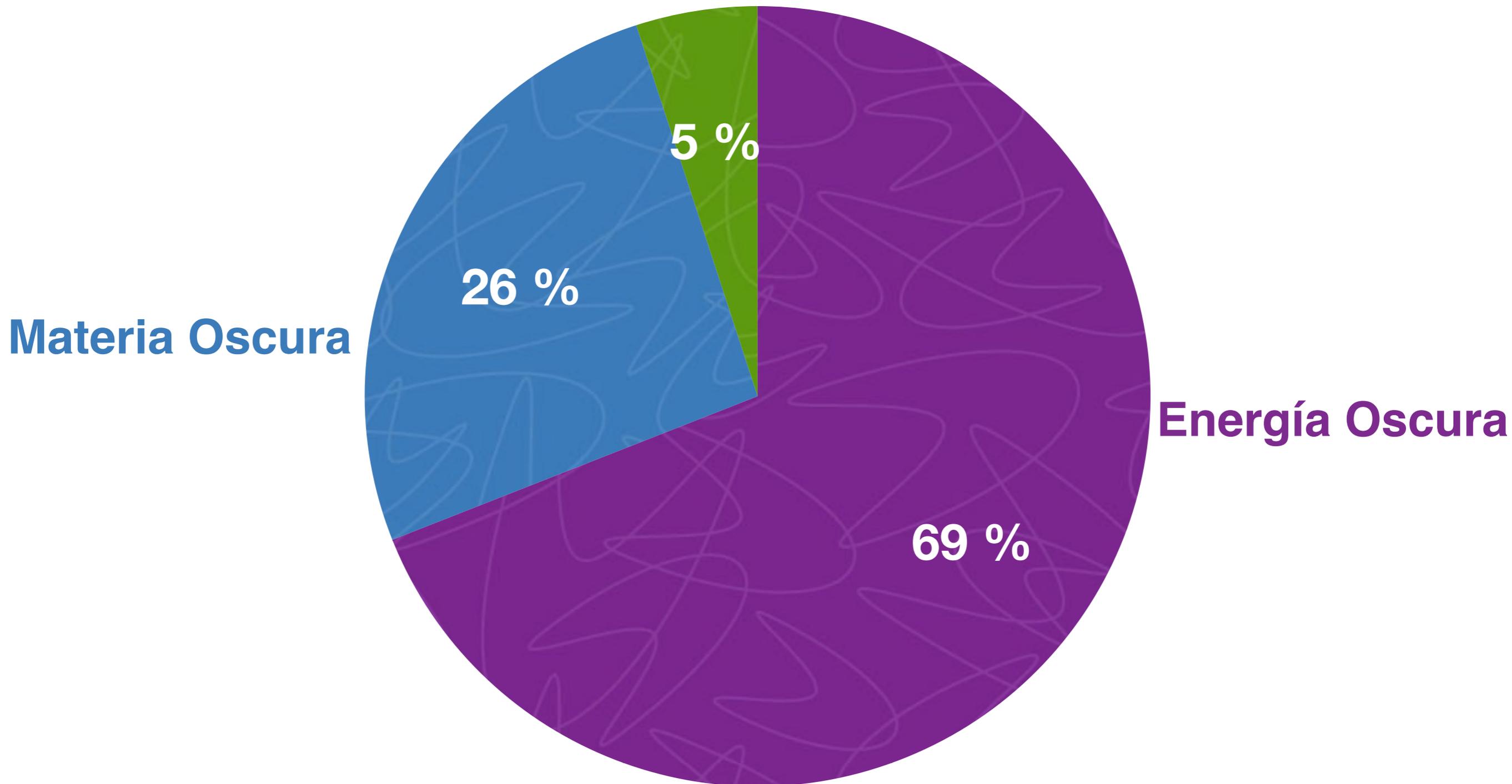
9:00 AM

Física más allá del modelo estándar

Speaker: Clara Murgui Galvez (University of Barcelona (ES))

La composición del universo

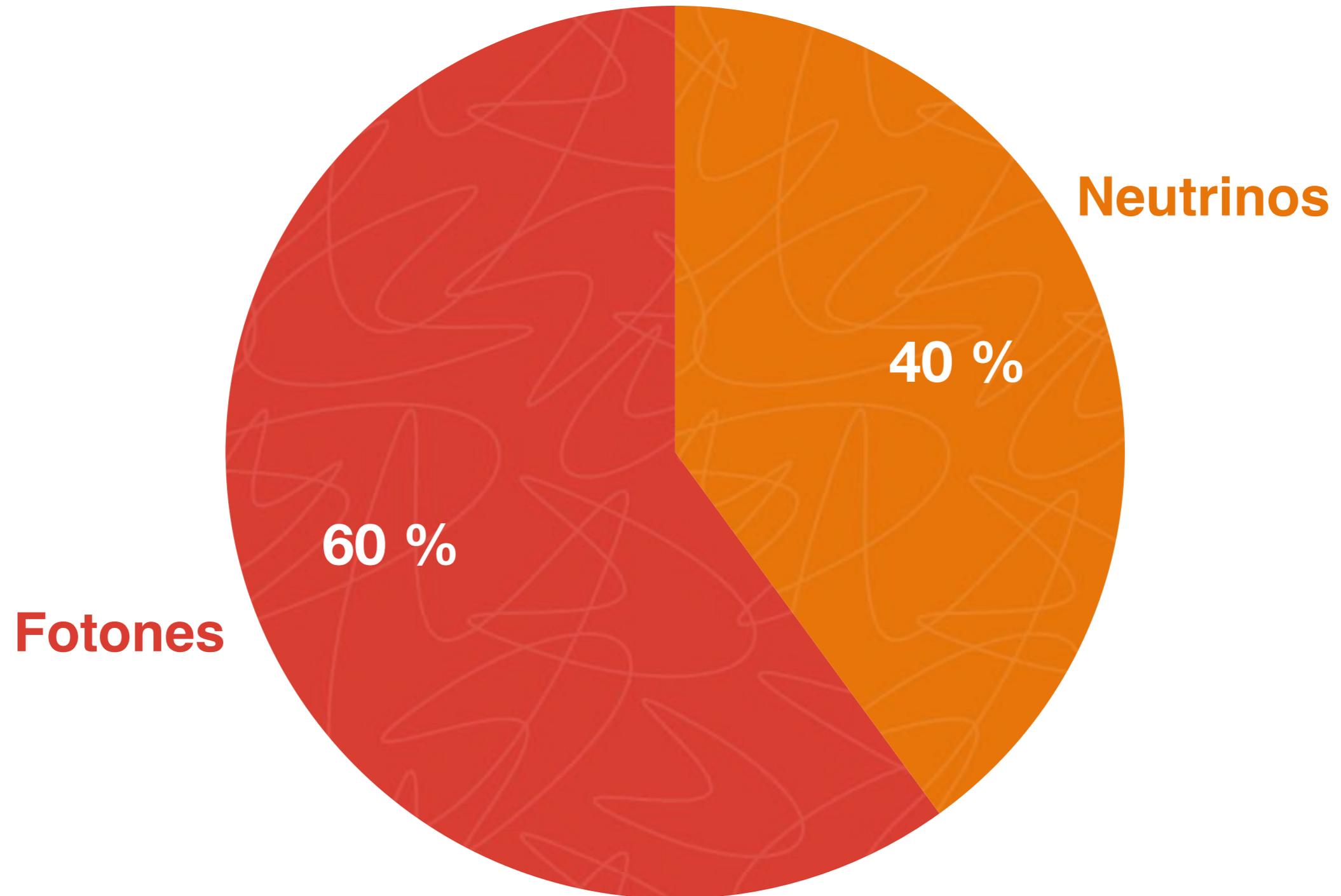
protones, neutrones y electrones



¿Qué fracción de la densidad del Universo viene por física más allá del Modelo Estándar?

¡99.85%!

El universo según el Modelo Estándar



¿Más allá del Modelo Estándar?

Universo hecho sólo de materia

**El universo en que vivimos está hecho solamente de materia
Pero la materia y la antimateria se comportan casi de la
misma manera**

¿Por qué el universo de hoy sólo tiene materia?

Materia Oscura

Domina la dinámica de todas las galaxias del universo

No sabemos lo que es

**Es plausible que sea una partícula fundamental más allá del
Modelo Estándar que quizás el LHC pudiera encontrar**

Energía Oscura

Es la responsable de la expansión acelerada del universo

Podría ser un campo como el de Higgs

Su naturaleza es realmente misteriosa

Ver:

10:30 AM

Cosmología

Speaker: Daniel G. Figueroa (Univ. of Valencia and CSIC (ES))

11:30 AM

Escuchando el universo con ondas gravitacionales

Speaker: Pablo Garcia Abia (CIEMAT)

Conclusiones

El Modelo Estándar es la teoría científica más exitosa de la historia

Descripción fundamental de las partículas hasta escalas 10.000 menores que el radio del protón

Sin embargo, deja muchas cuestiones abiertas

Esperamos que una combinación de investigación en física teórica y experimental nos permitan eventualmente dar respuesta a estas cuestiones



¡Muchas gracias por la atención!



miguel.escudero@cern.ch