

# El Modelo Estándar de la Física de Partículas

Luca Merlo



Cincuenta Aniversario

**UAM** Universidad Autónoma de Madrid



Instituto de Física Teórica  
UAM-CSIC

elusives-invisiblesPlus  
neutrinos, dark matter & dark energy physics



1979



**Sheldon Lee  
Glashow**



**Abdus Salam**



**Steven Weinberg**



1999



**Gerardus 't Hooft**



**Martinus J.G. Veltman**



2004



**David J. Gross**



**H. David Politzer**

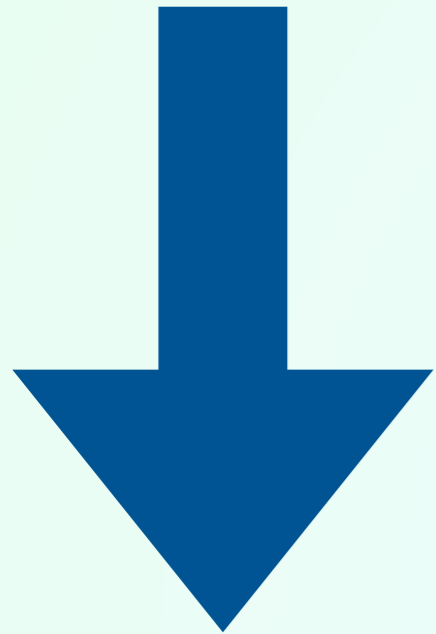


**Frank Wilczek**

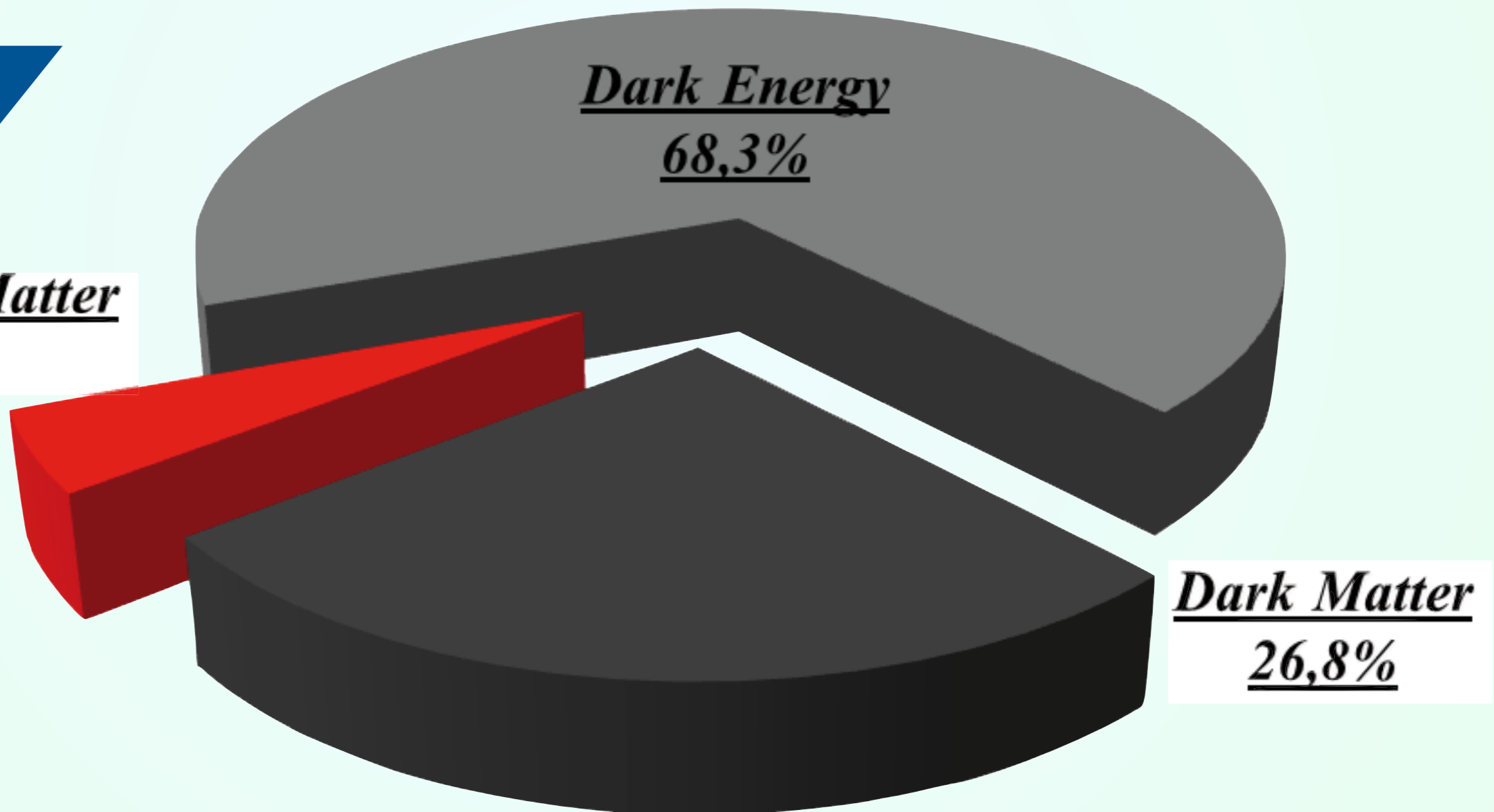
# ¿De qué trata el Modelo Estándar?

Describe las interacciones de las partículas elementales que constituyen la materia ordinaria del universo

# Composición de nuestro universo



Ordinary Matter  
4,9%



# ¿Qué es la materia ordinaria?

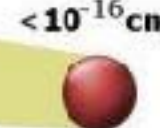
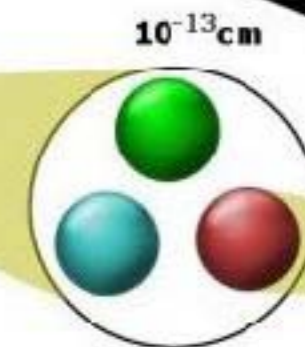
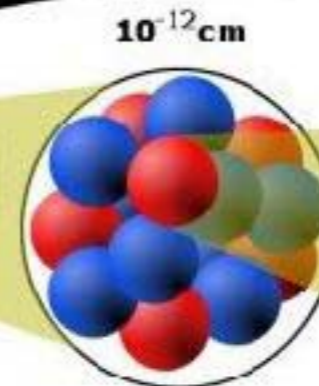
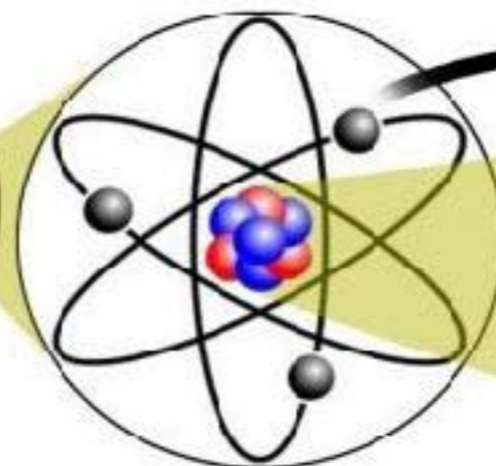
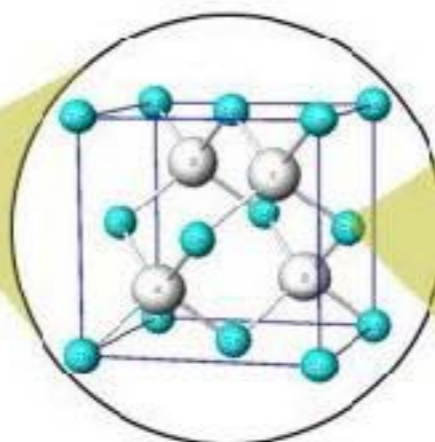
Nuestro Sistema Solar



Vía Láctea

Macroscopic

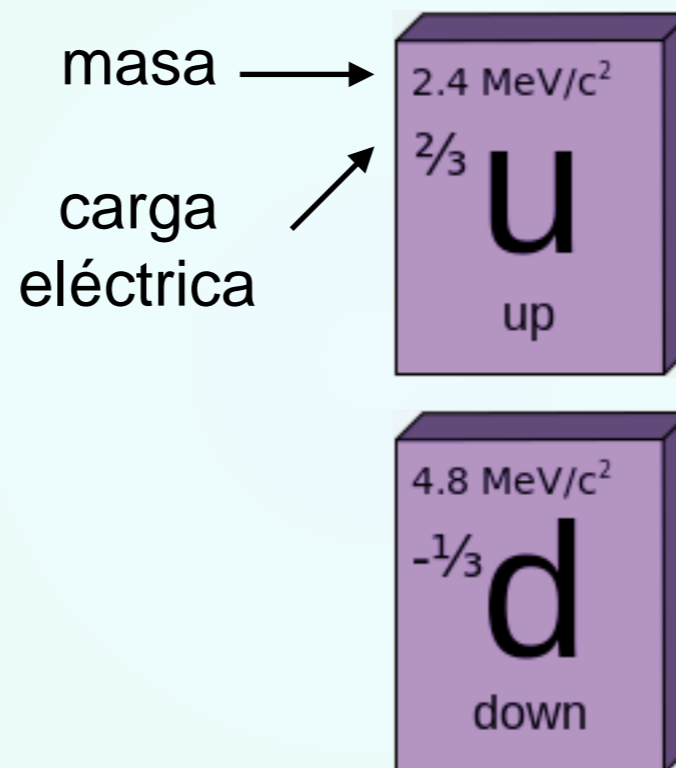
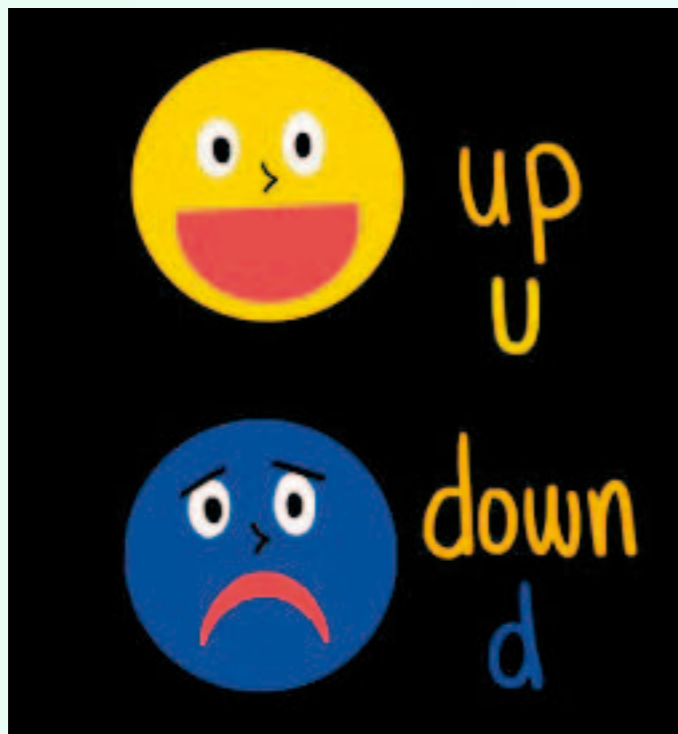
Microscopic



# Las partículas elementales

DEF: Son los constituyentes de la materia que no tienen subestructuras.

## QUARKS

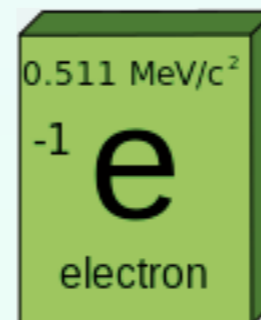
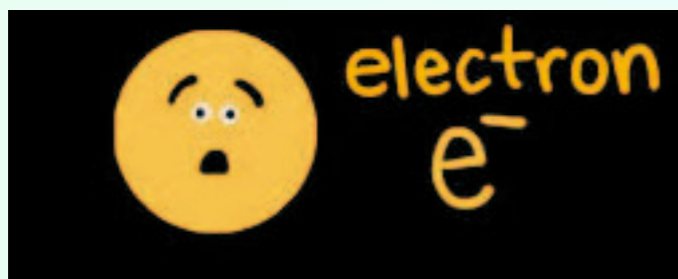


$$E = m c^2$$

$1 \text{ MeV} = 1.78 \times 10^{-27} \text{ g}$

ej.  $M_p = 1000 \text{ MeV}$

## LEPTONES

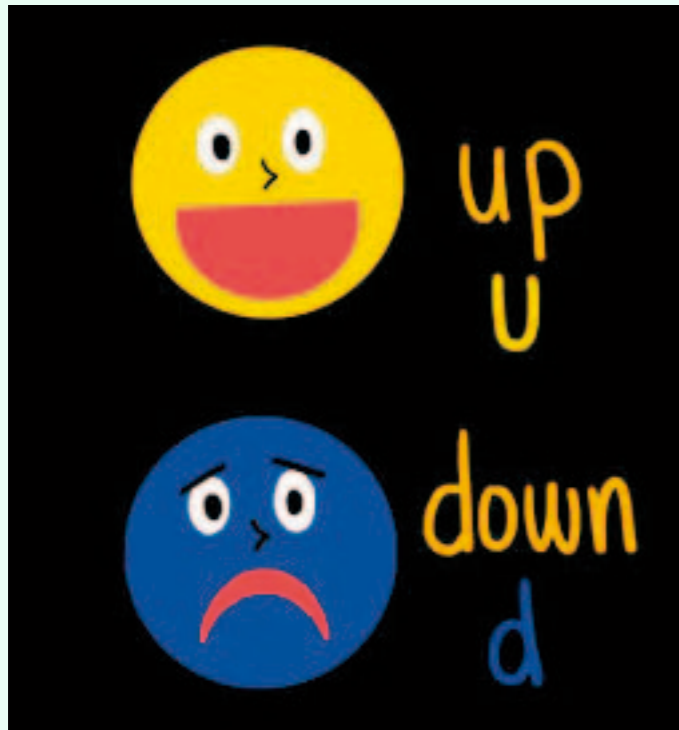


La carga eléctrica es cuantizada

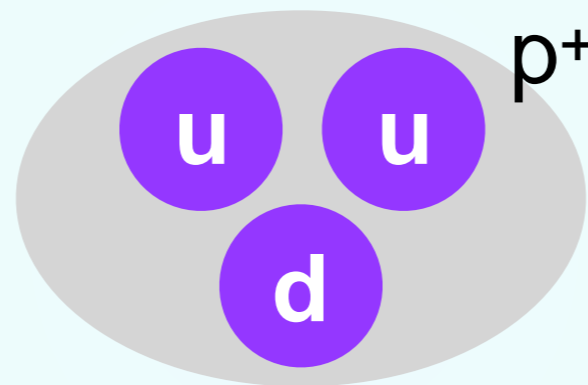
$$Q = n Q_P$$

# Las partículas elementales

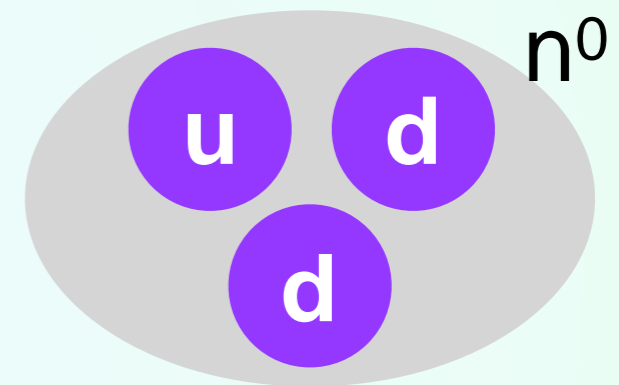
## QUARKS



No son libres pero están confinados en partículas más grandes: un ejemplo los protones y los neutrones



$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$



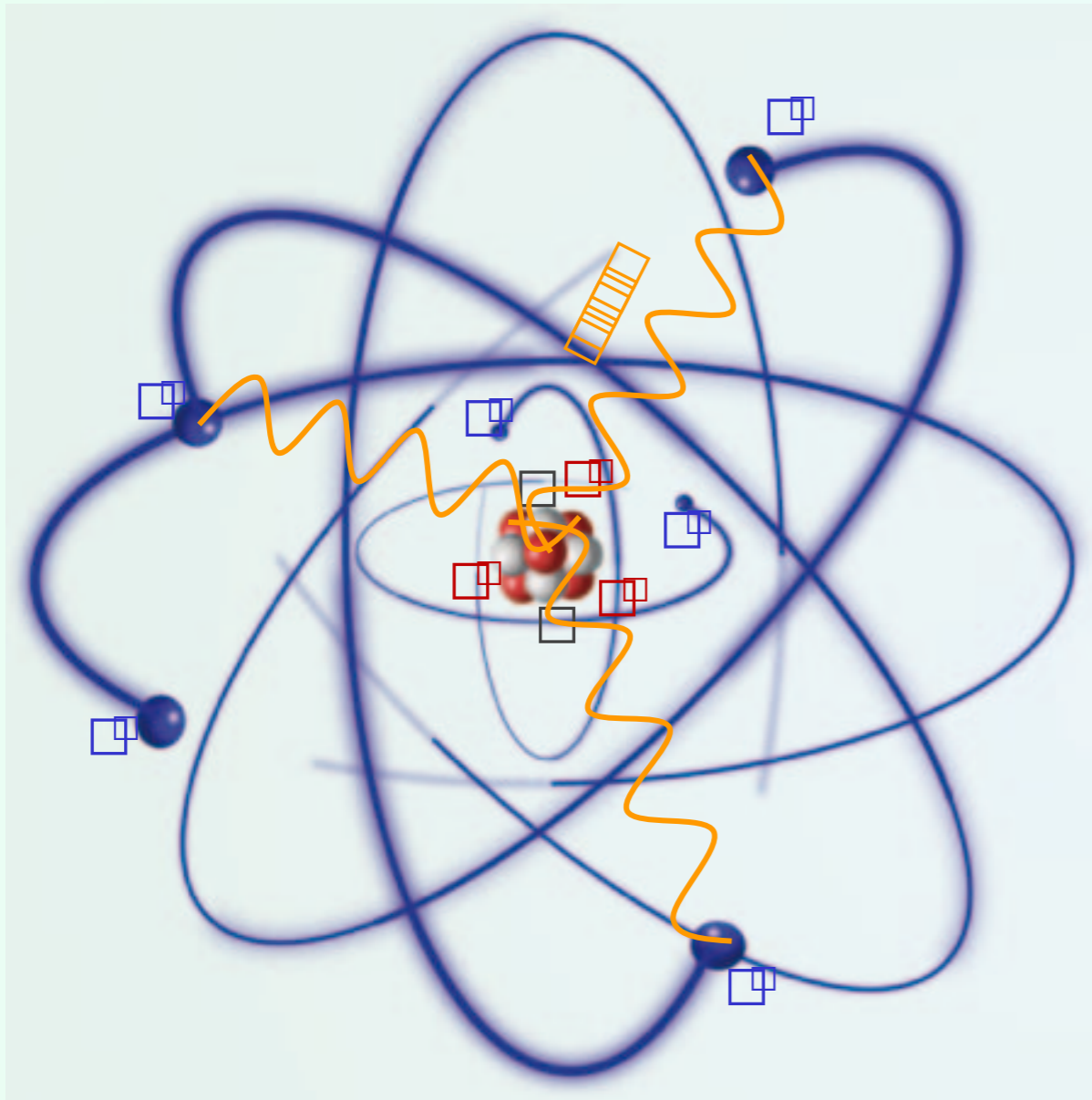
$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

## LEPTONES



Los electrones pueden estar libres, pero normalmente los encontramos en los átomos

# ¿Qué mantiene unido un átomo?



Los electrones  $e^-$  se mantienen orbitando atraídos por los protones  $p^+$

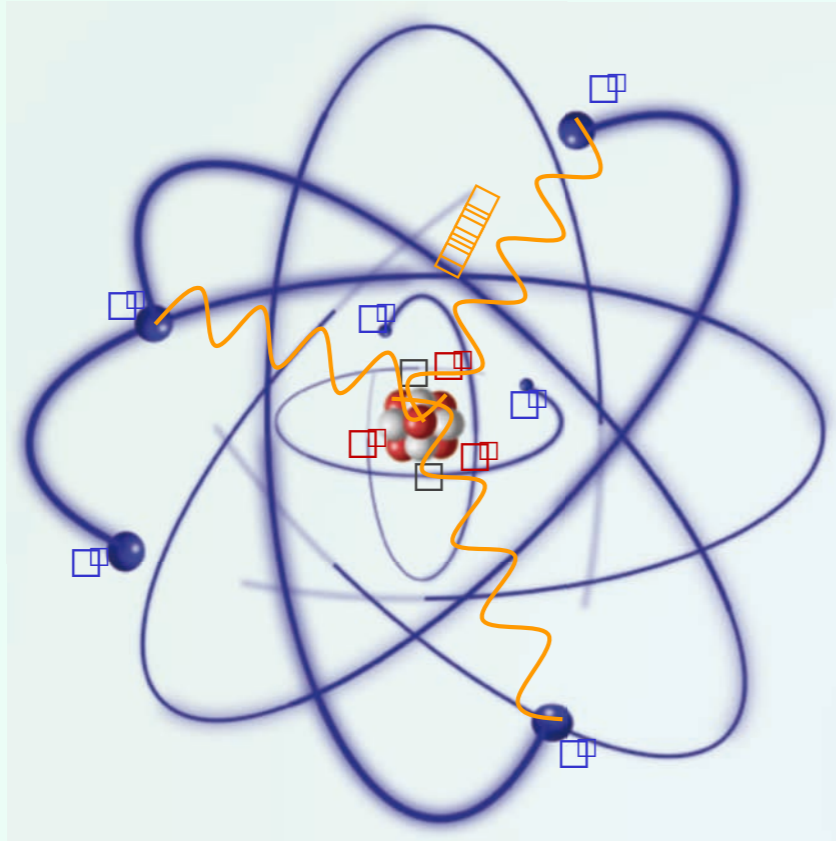
La atracción entre electrones y protones se debe al intercambio de fotones



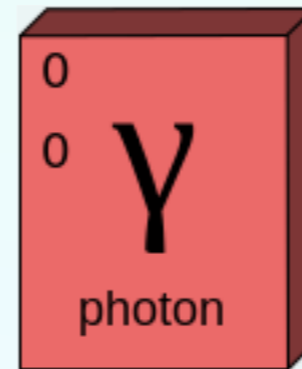
**Una fuerza o interacción se explica con la presencia de un “mediador”**



# Fuerza Electromagnética



## Fotones

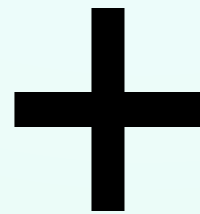
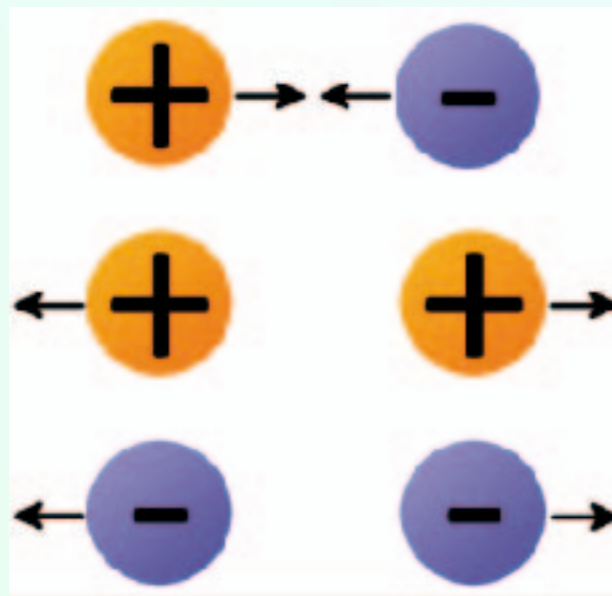


$$M_{\gamma} = 0$$

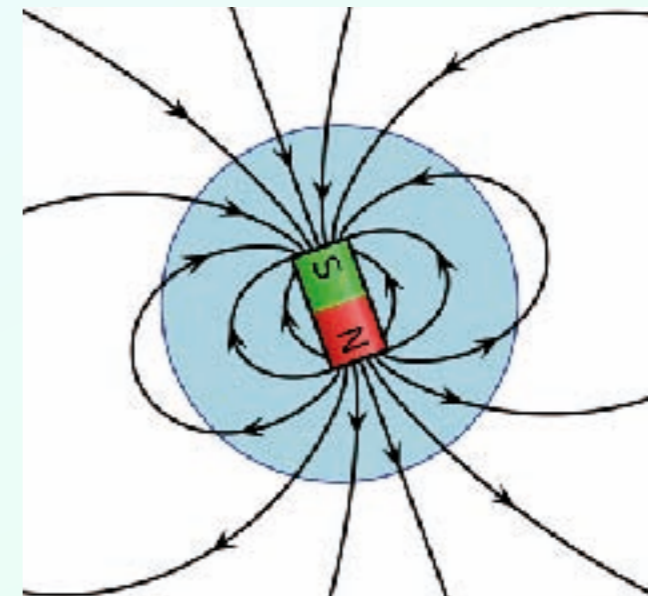
$$Q_{\gamma} = 0$$

Se acoplan sólo a partículas con carga eléctrica

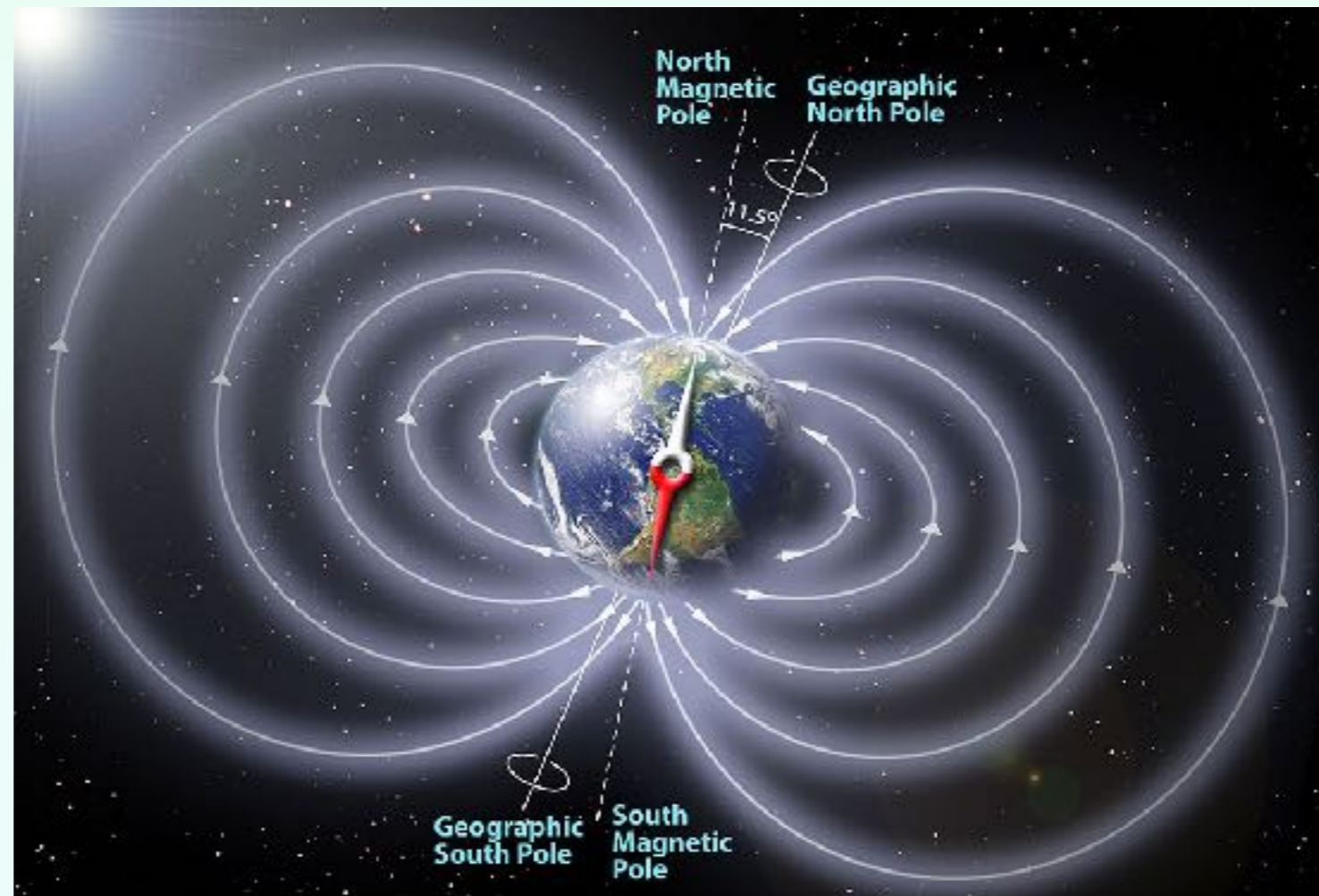
Fuerza Eléctrica



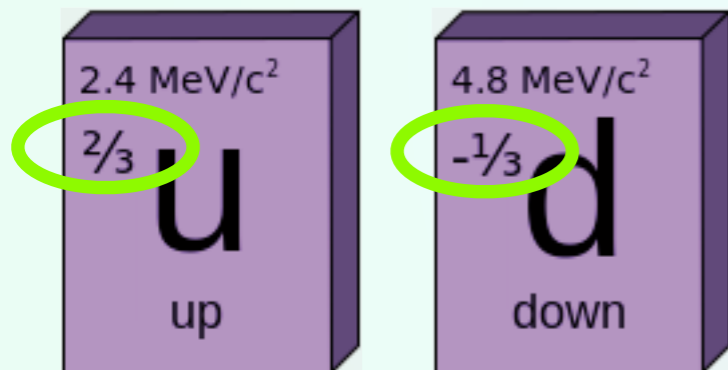
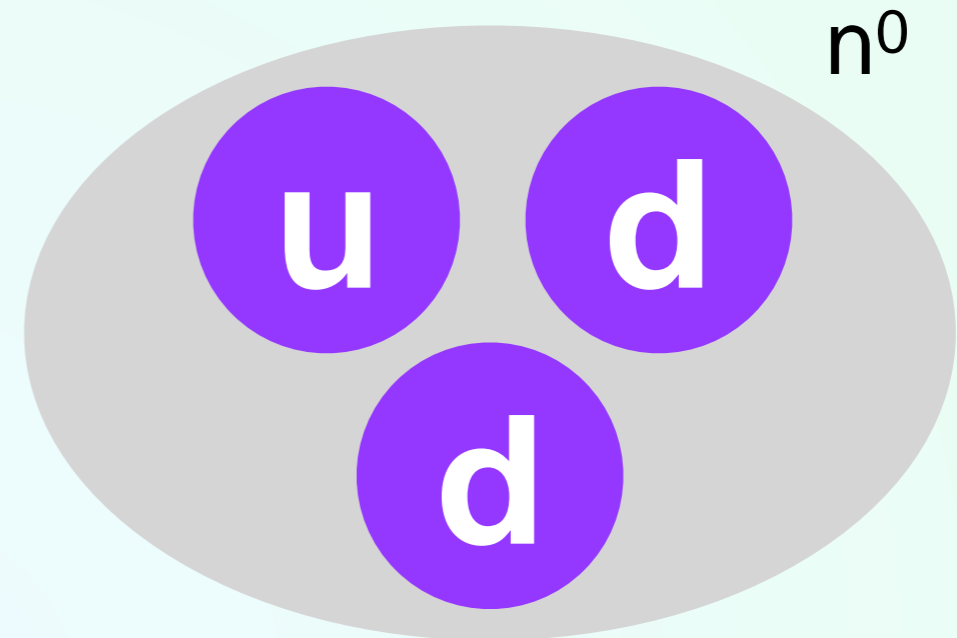
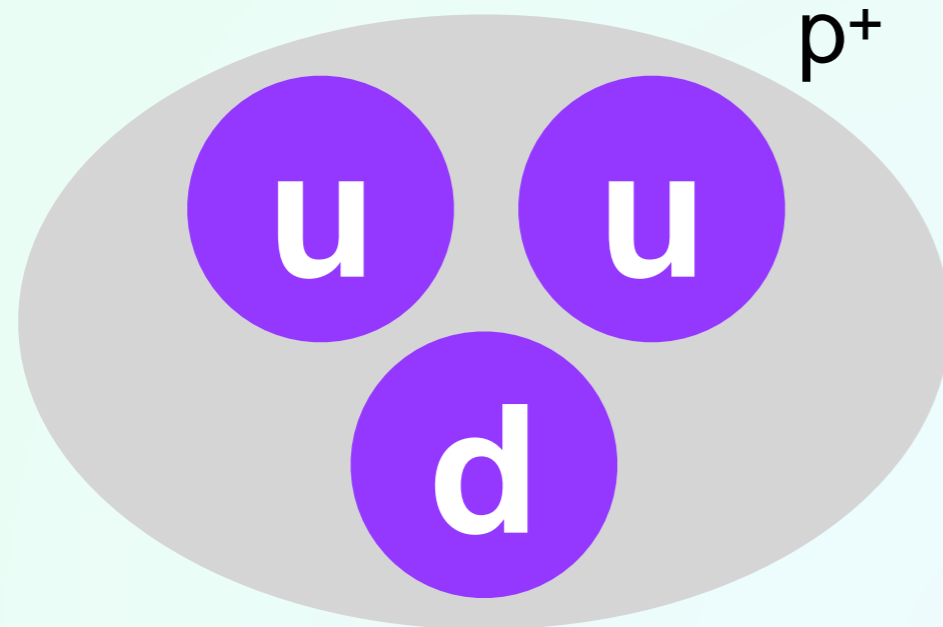
Fuerza Magnética



# Cinturones de Van Allen

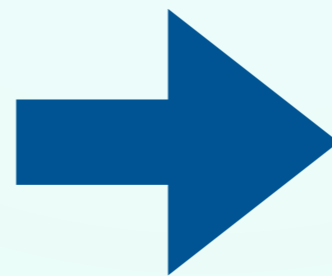


# ¿Y el protón y el neutrón?



Quarks de tipo distinto se atraen

Quarks de mismo tipo se repelen



Como pueden estar juntos

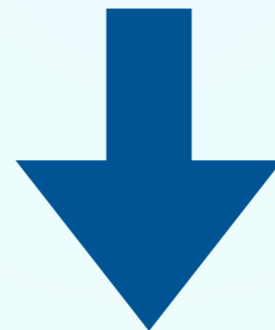
2 u + 1 d?

1 u + 2 d?

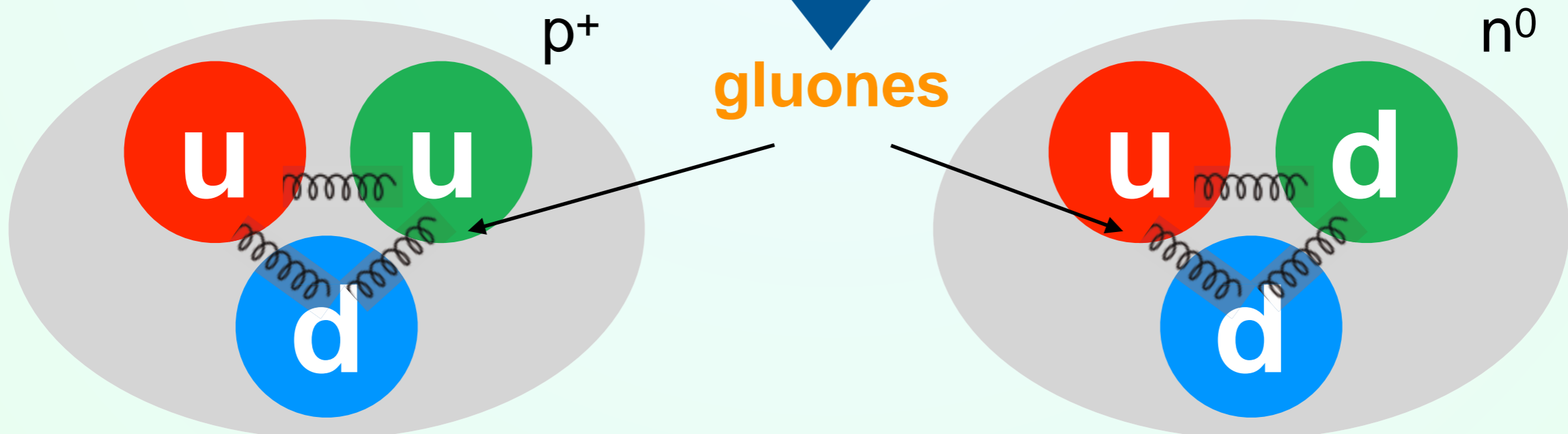
# El “color” de los quarks

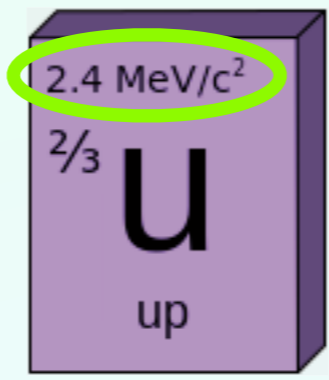
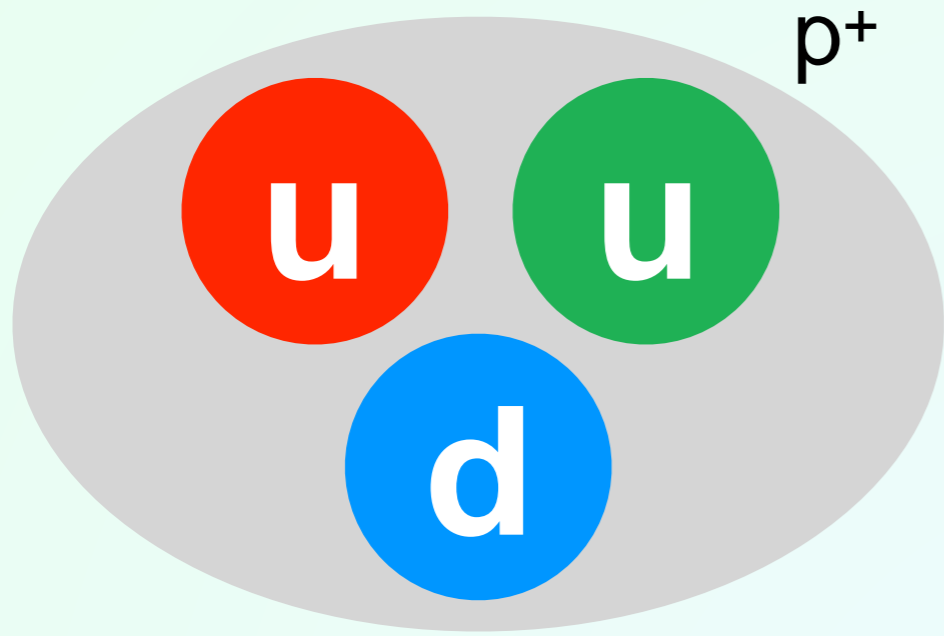
## QUARKS

están presente en tres “colores”

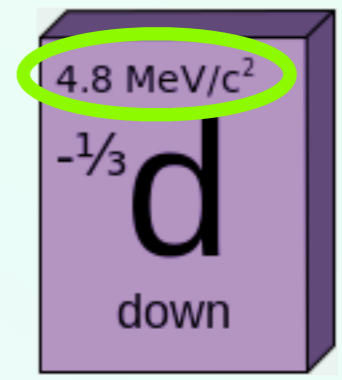


gluones

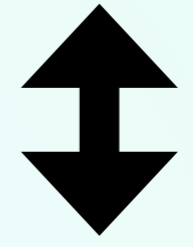




+

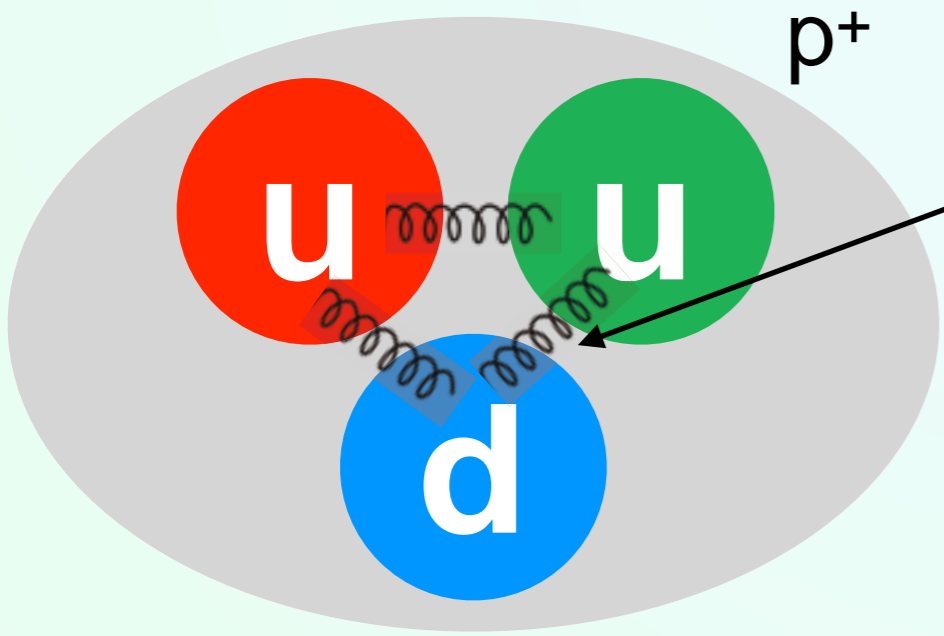


$\simeq 9.6 \text{ MeV}$

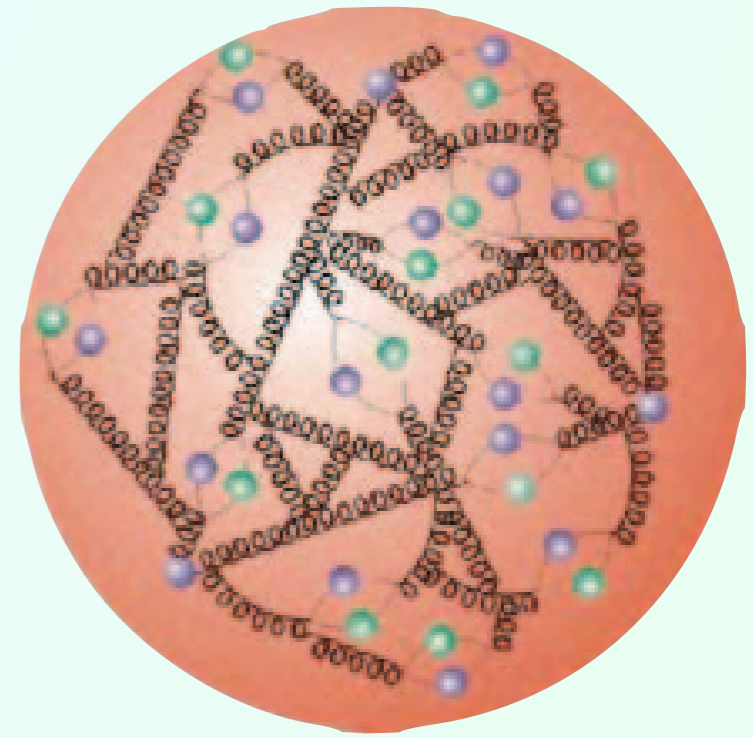
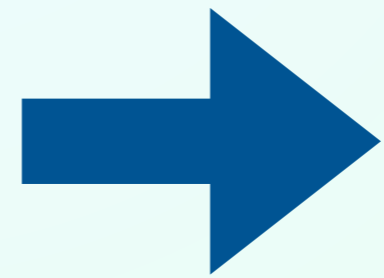


$M_{\text{protón}} \simeq 1000 \text{ MeV}$

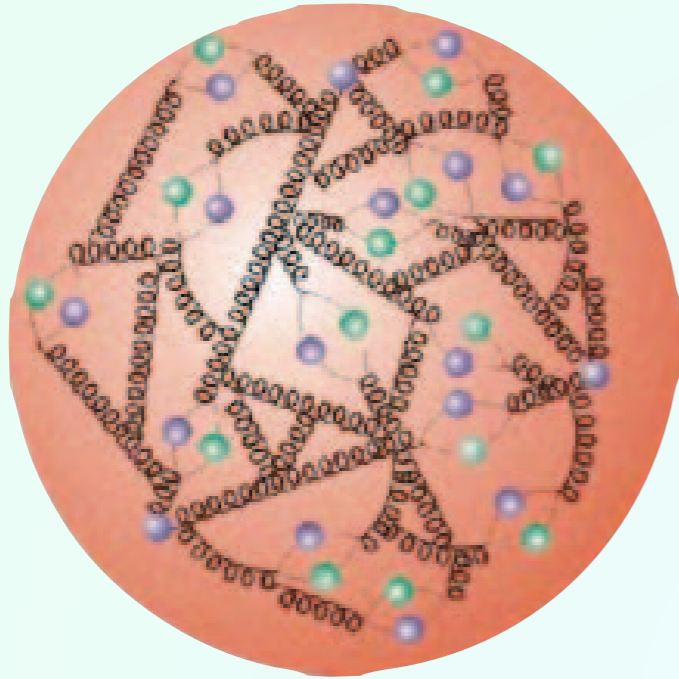
**Como se explica esta diferencia?**



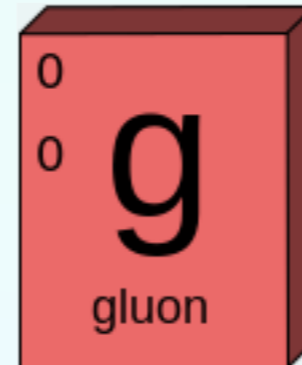
gluones



# Fuerza Fuerte



## Gluones

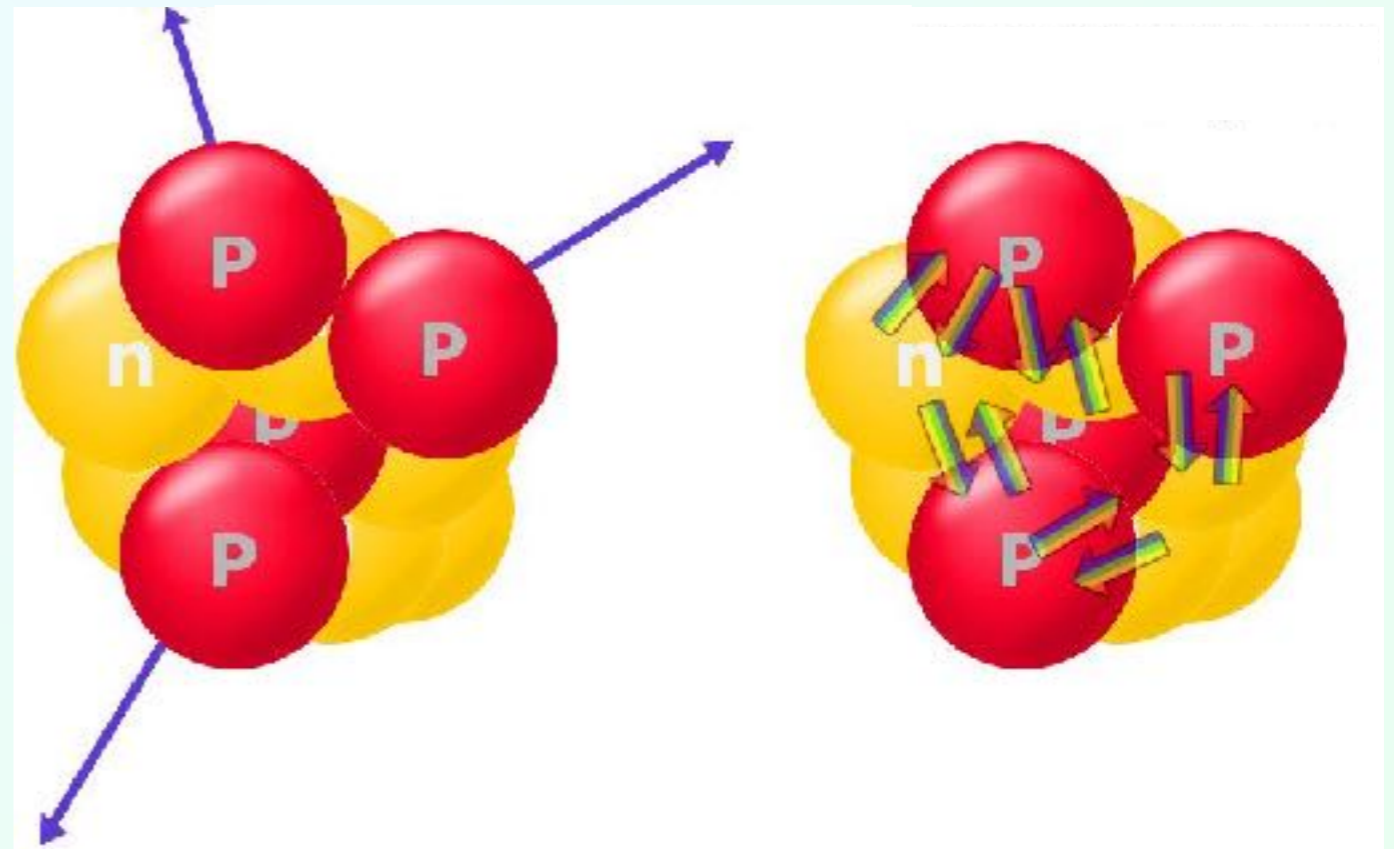


$$M_g = 0$$

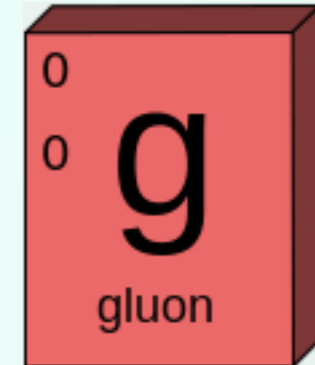
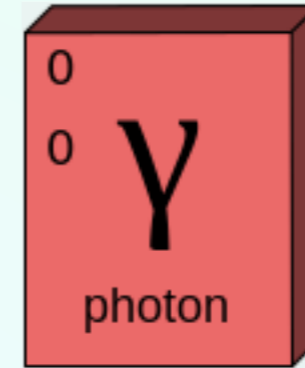
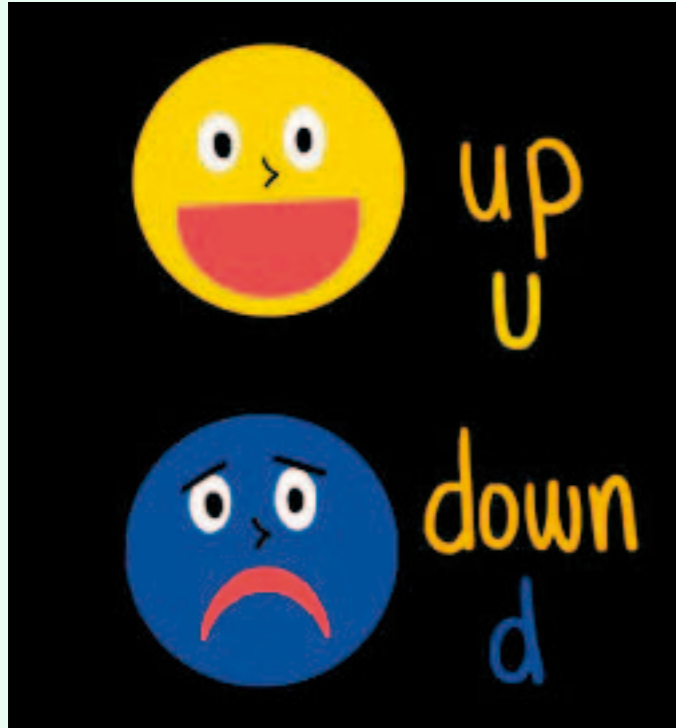
$$Q_g = 0$$

Se acoplan sólo a quark

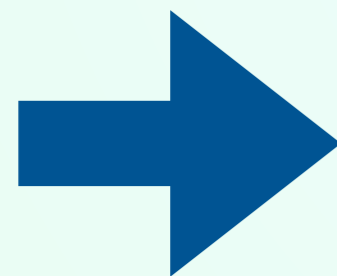
Un efecto de la fuerza fuerte es la **fuerza nuclear**: es lo que mantiene unidos protones y neutrones en los núcleos



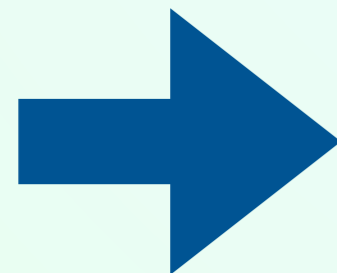
# ¿Ésta es toda la historia?



➔ NO



Existen otras partículas elementales

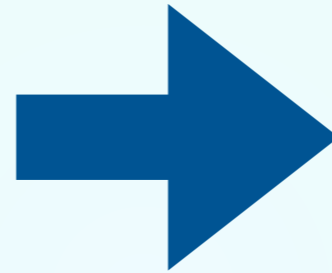
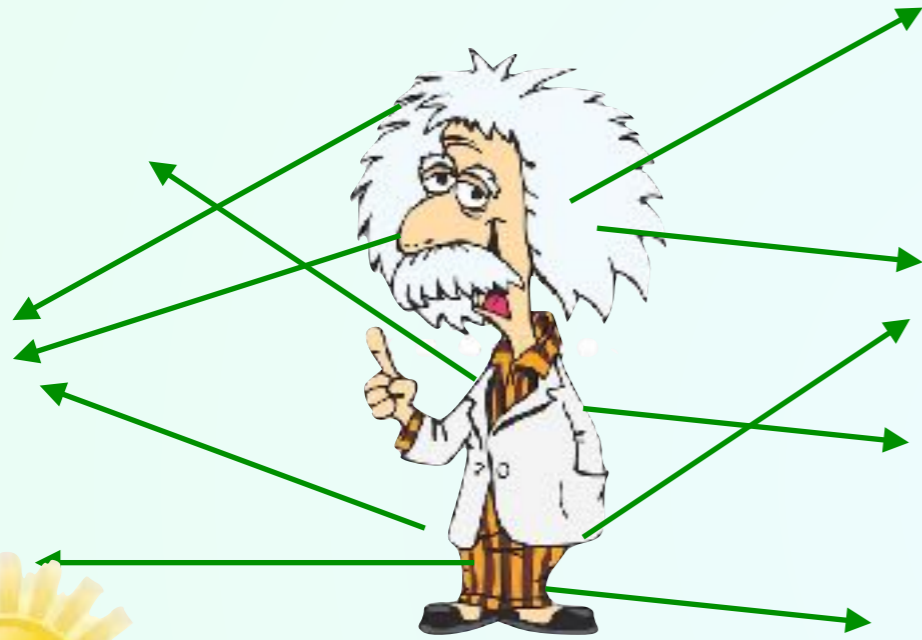


Existe otra fuerza: la Fuerza Débil

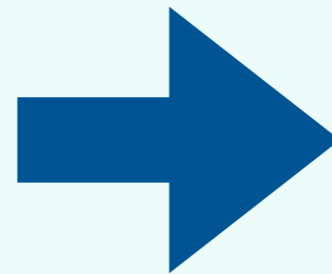
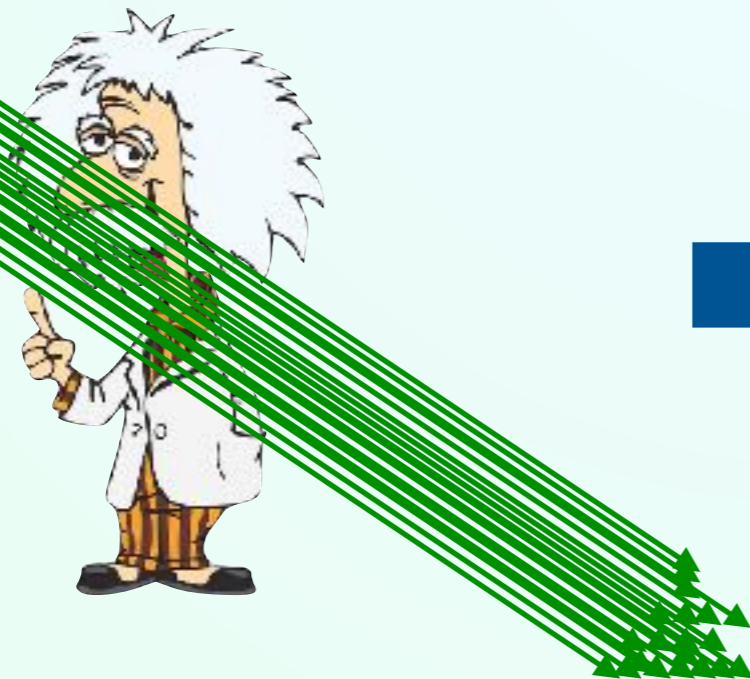


# El neutrino

¡Por cada electrón y quark en el Universo hay  
**10 000 000 000 neutrinos  $\nu$ !**



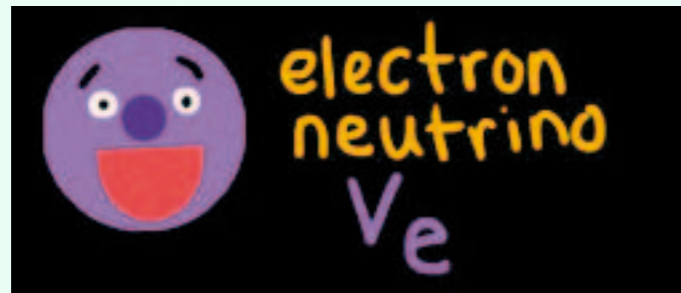
¡Nuestros cuerpos  
producen cientos de  
millones de  $\nu$  al día!



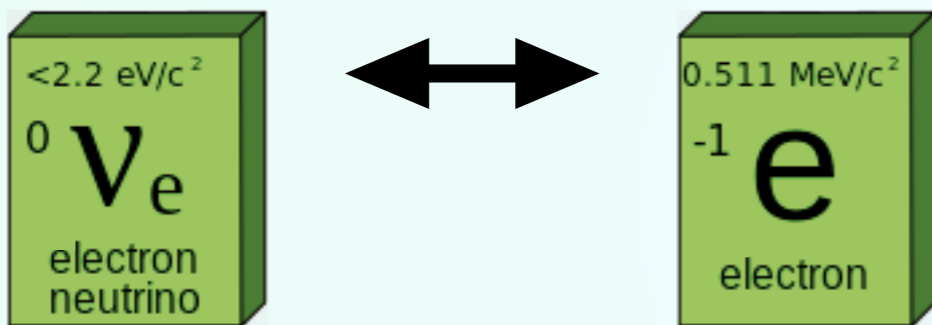
¡El Sol produce tantos  $\nu$   
que cada segundo nos  
atraviesan  
100 000 000 000 000!



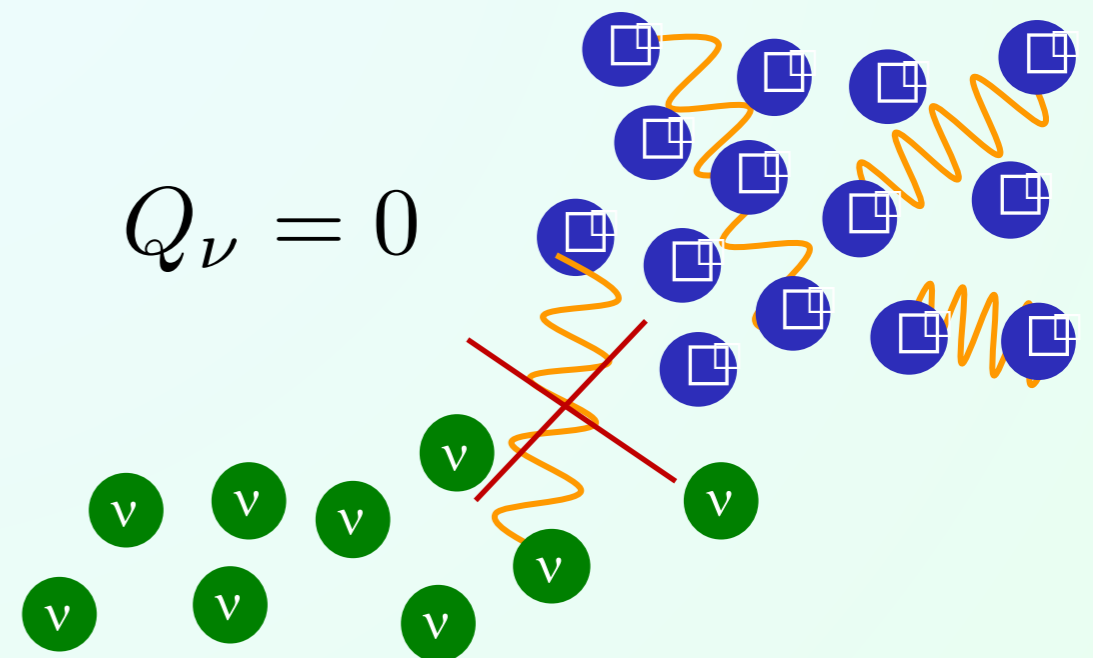
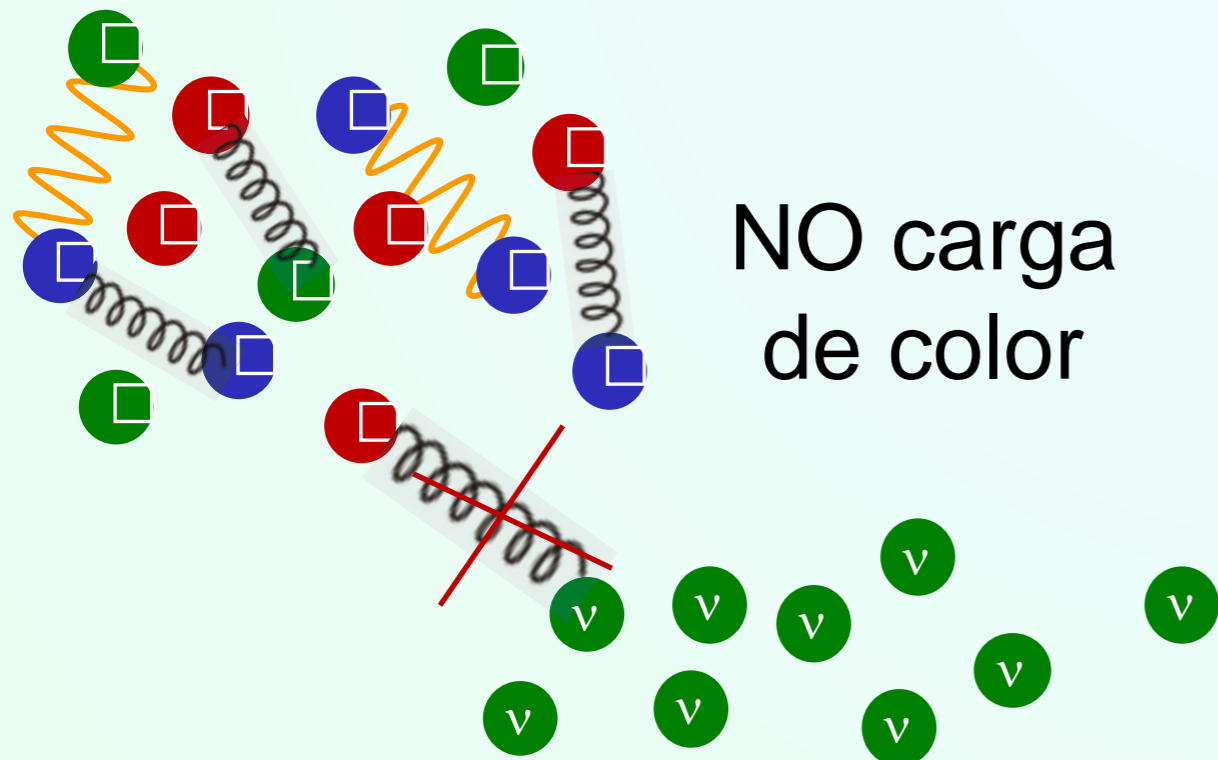
# ¿Cómo interactúan los neutrinos?

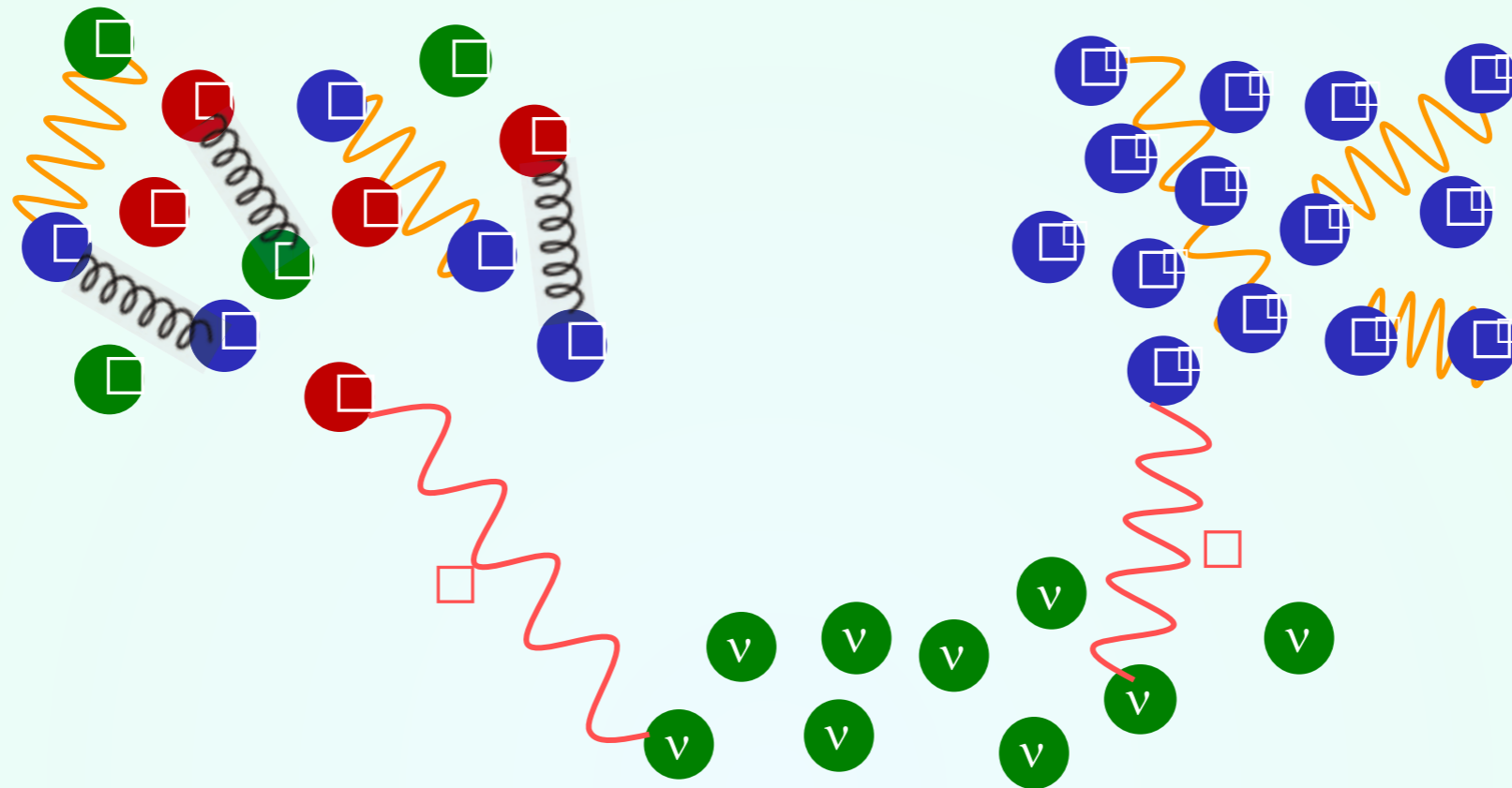


Aunque hay muchísimos **neutrinos**, no los sentimos porque son muy ligeros y porque no tienen ni carga eléctrica ni carga de color!

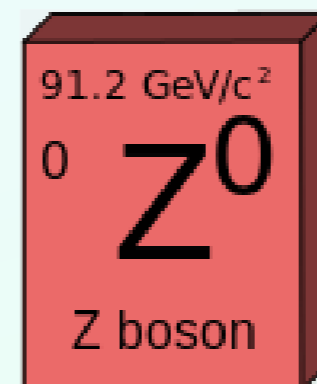
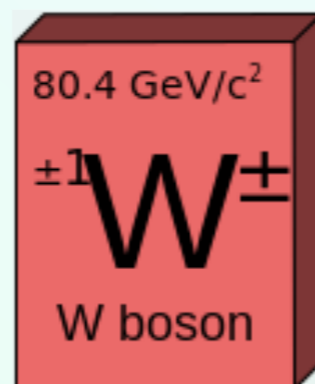


Un millón de veces mas ligeros que los electrones  
 $1 \text{ eV} = 0.000001 \text{ MeV}$





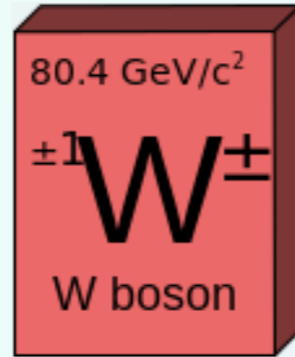
Los **neutrinos** interactúan muy muy **débilmente** mediante partículas llamadas **W** y **Z**



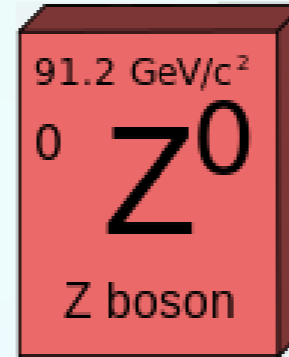
# Fuerza Débil



## W y Z



$$Q_W = \pm 1$$



$$Q_Z = 0$$

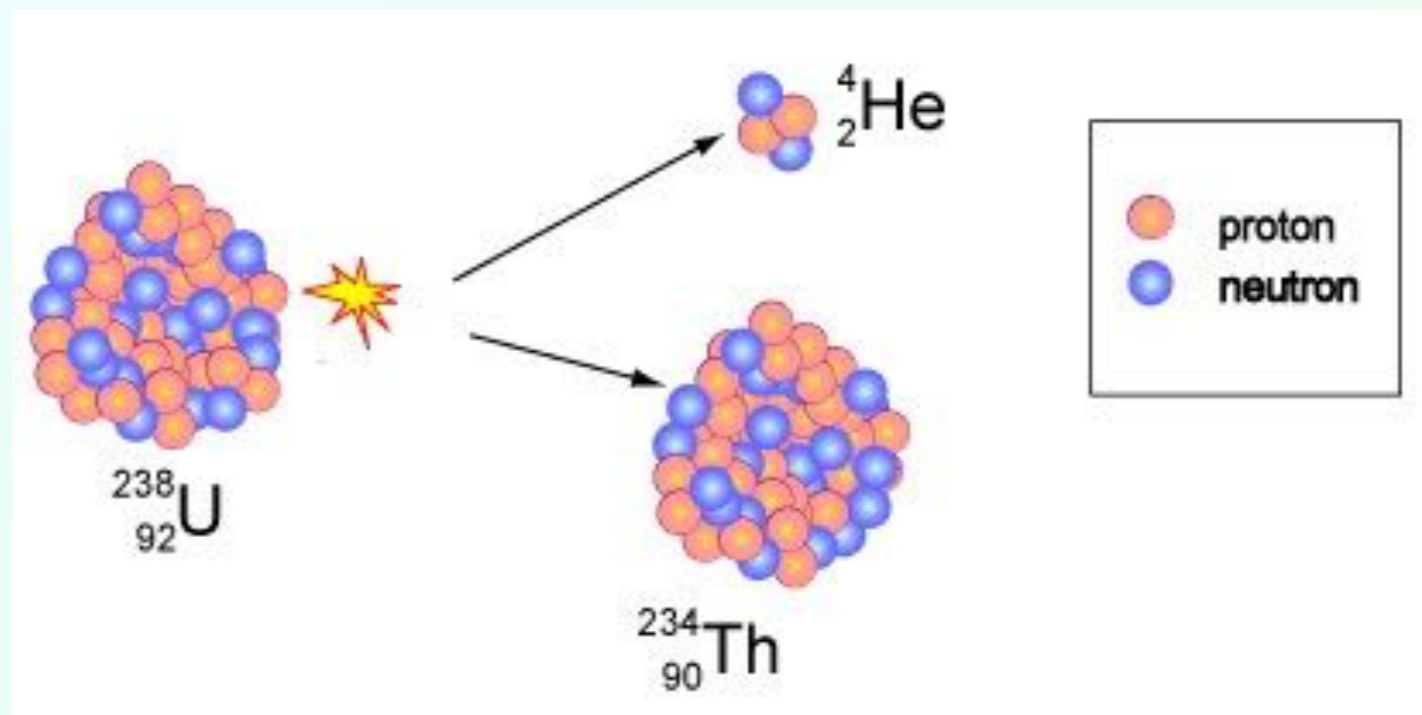
$$M_W = 80.4 \text{ GeV}$$

$$M_Z = 91.2 \text{ GeV}$$

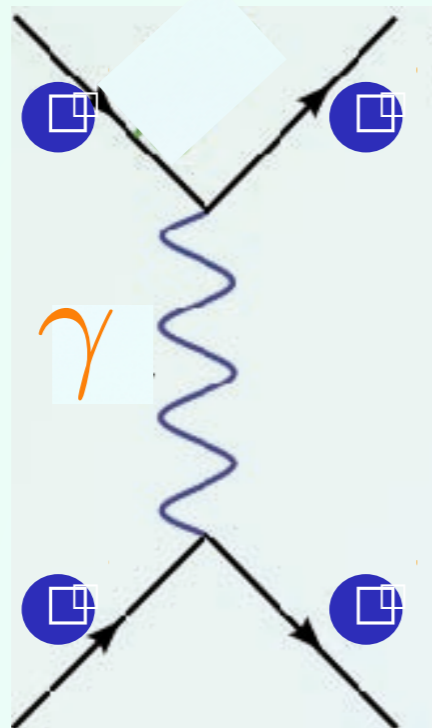
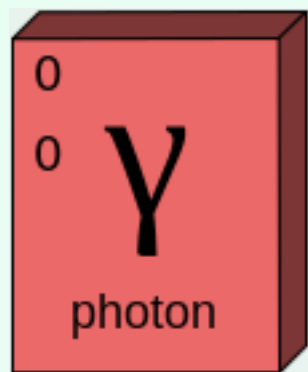
$$1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$$



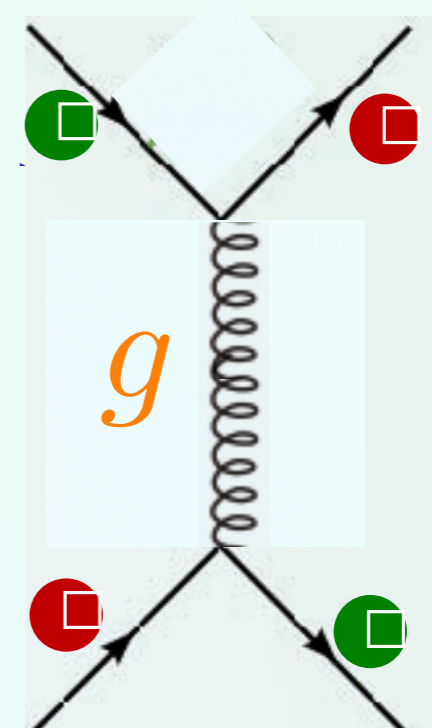
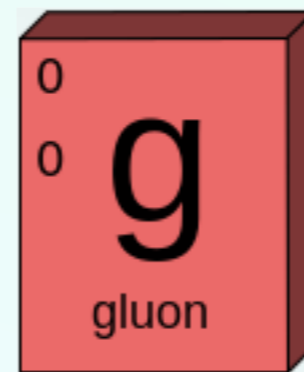
## Fisión nuclear



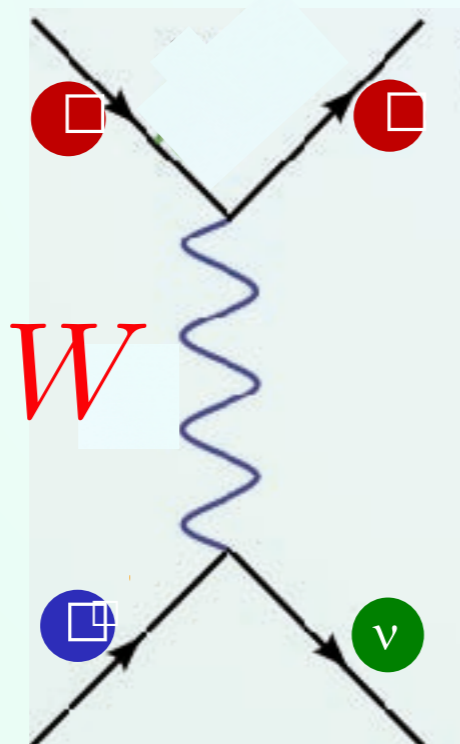
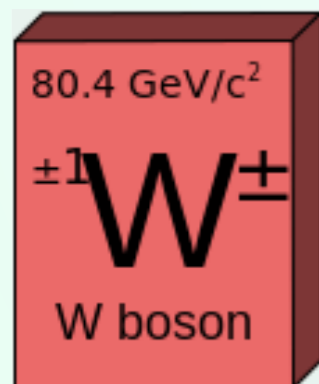
# Acoplos del W



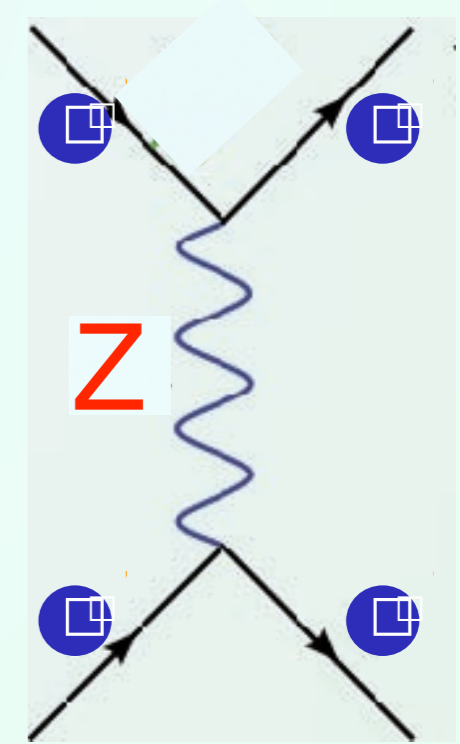
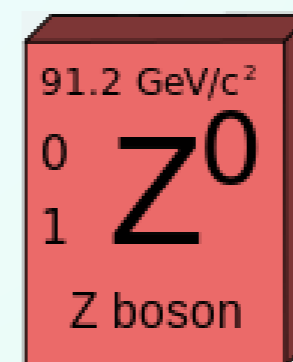
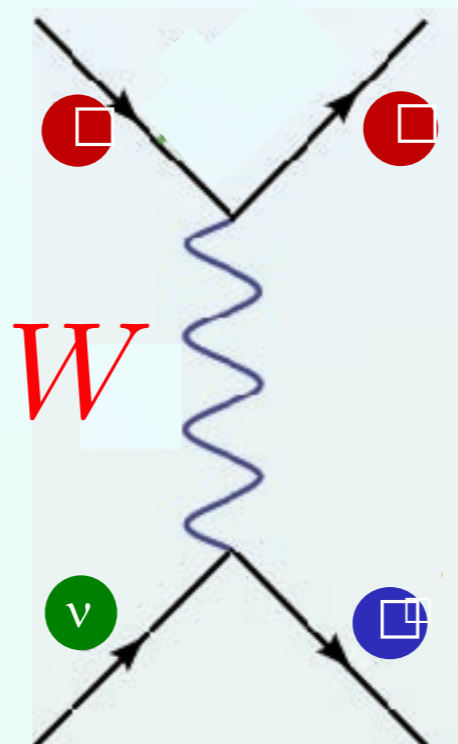
NO cambia nada



Cambia sólo el color



Cambia sólo la carga eléctrica

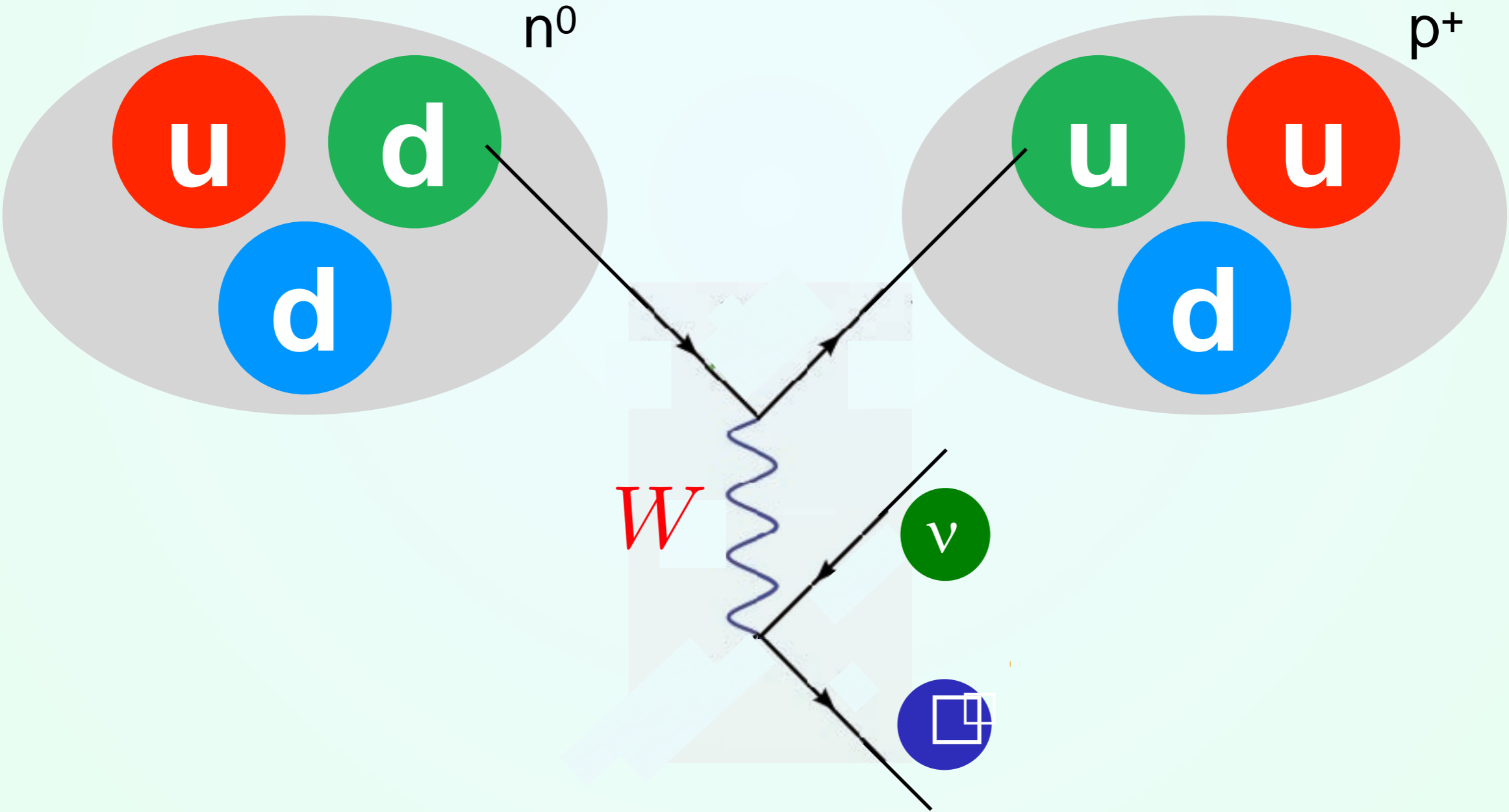


NO cambia nada

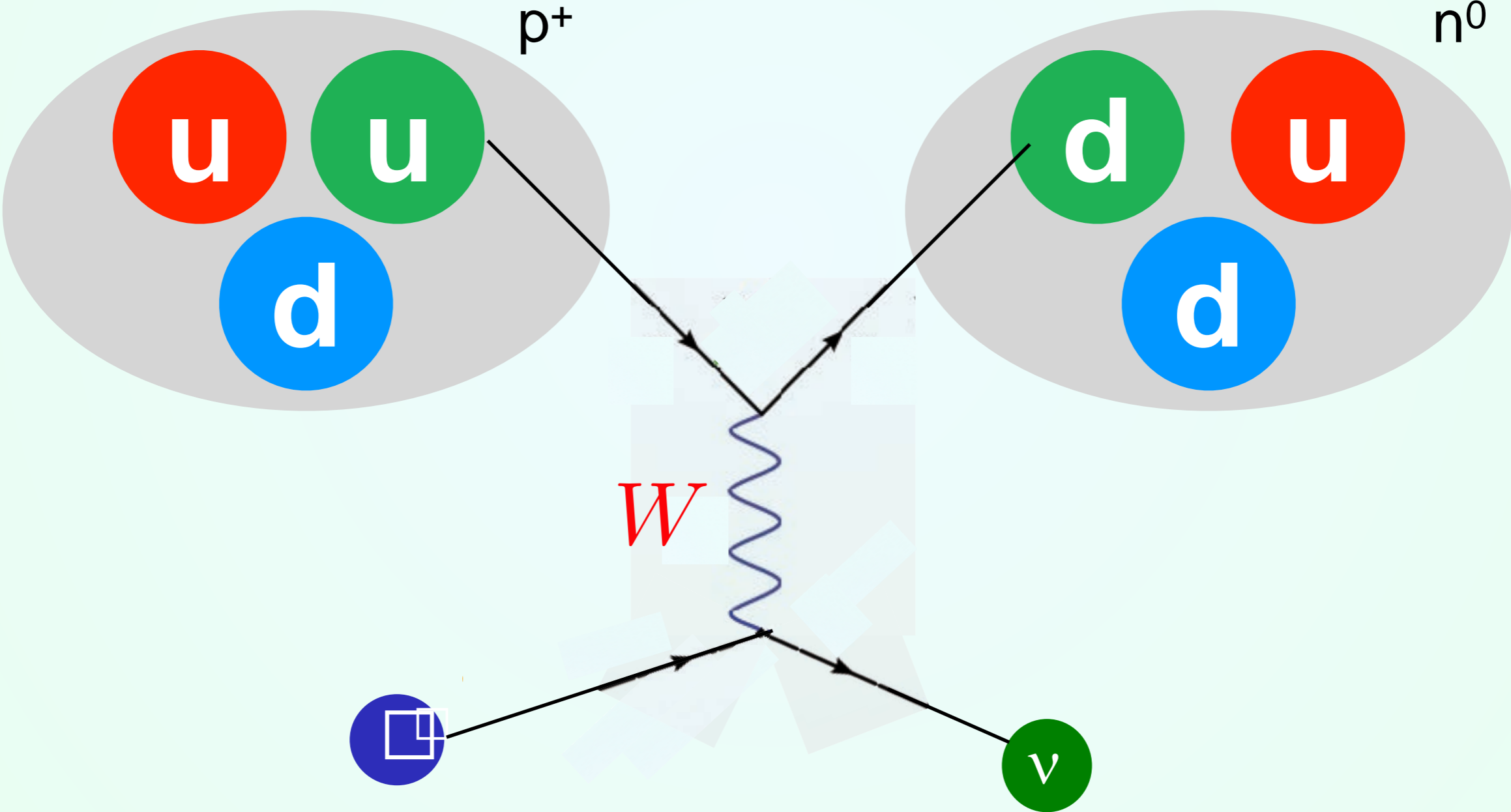
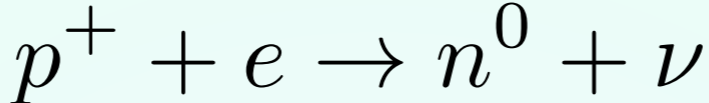
Desintegración Beta: ej.  ${}^1_6\text{C} \rightarrow {}^1_7\text{N} + e + \nu$

1 neutrón se transforma en 1 protón

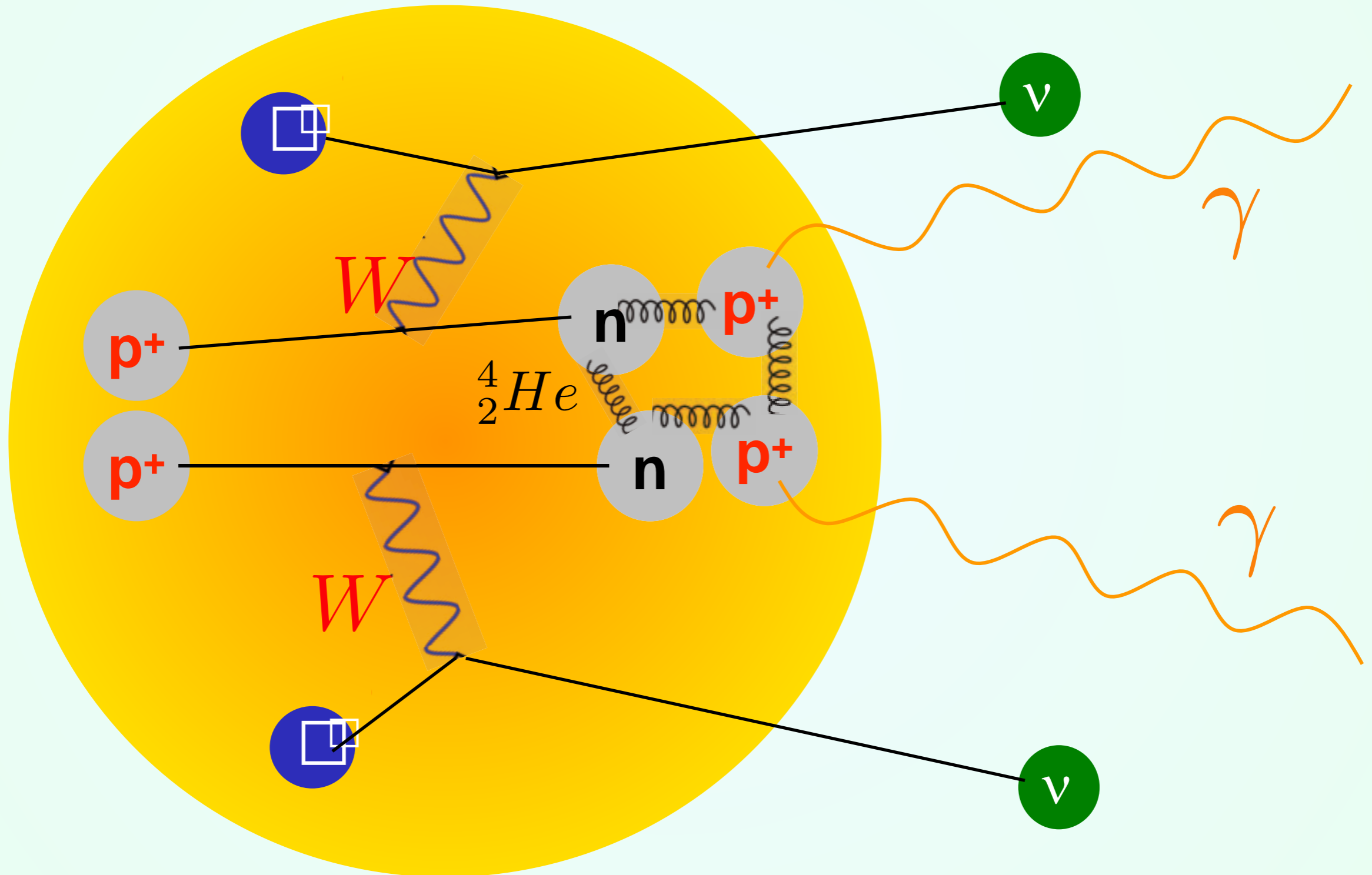
$$n^0 \rightarrow p^+ + e + \nu$$



También puede pasar que un protón se transforma en un neutrón:

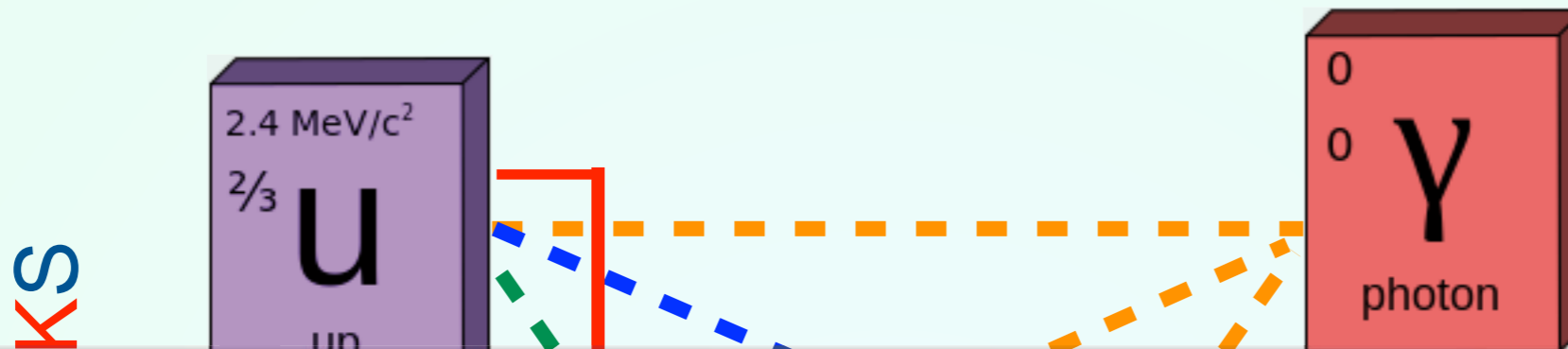


Aunque no parece, la fuerza débil es fundamental para la vida:  
Fusión Nuclear en el Sol

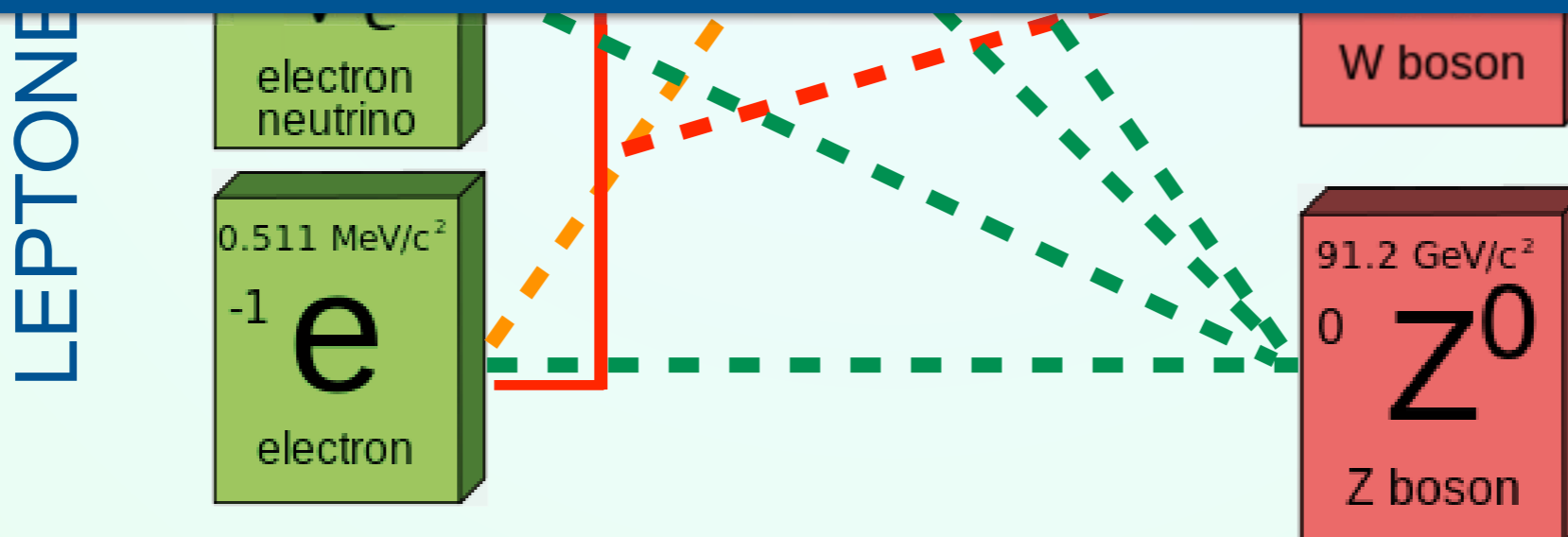


¡Y así tenemos la luz y el calor que necesitamos para vivir!

# Pequeño resumen



¡La Naturaleza es aún más complicada!



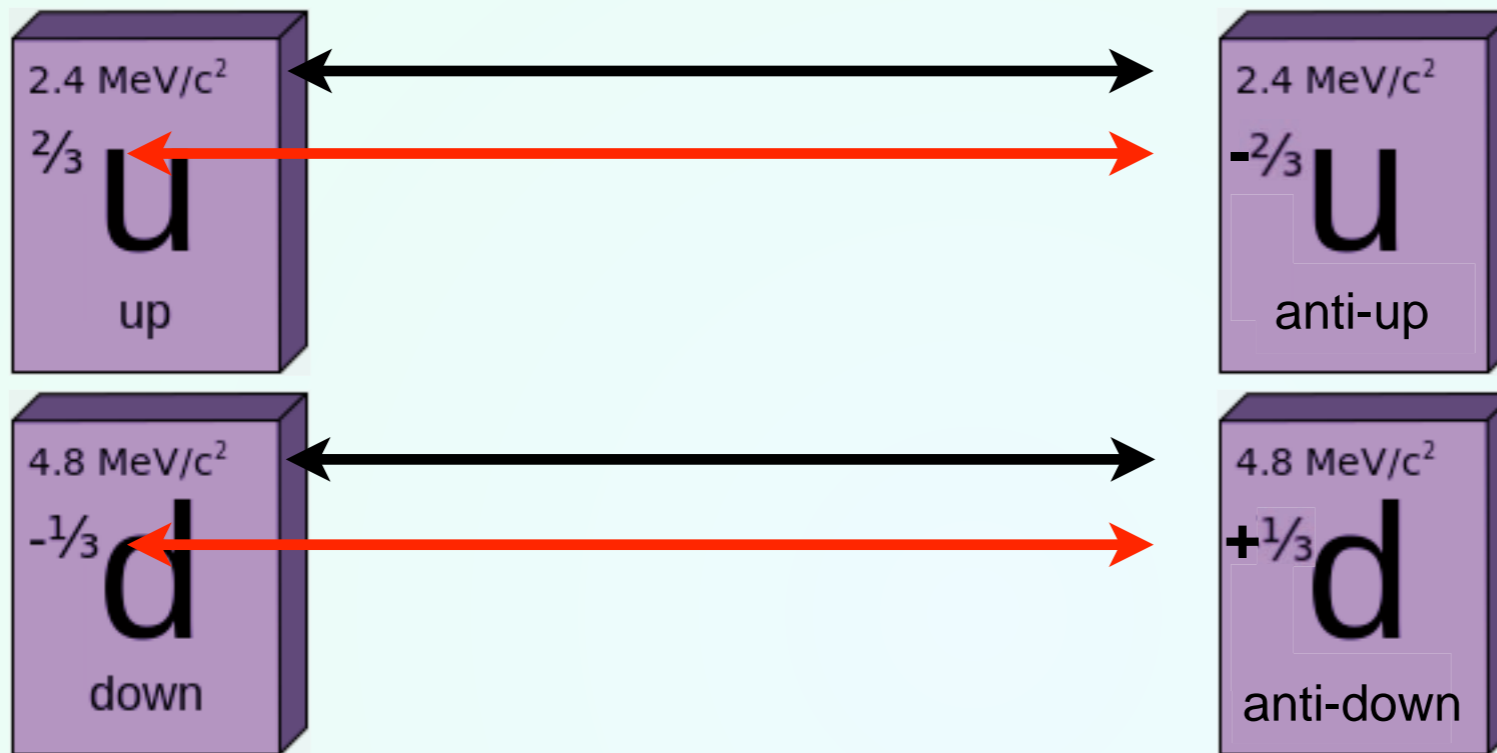


# Antimateria

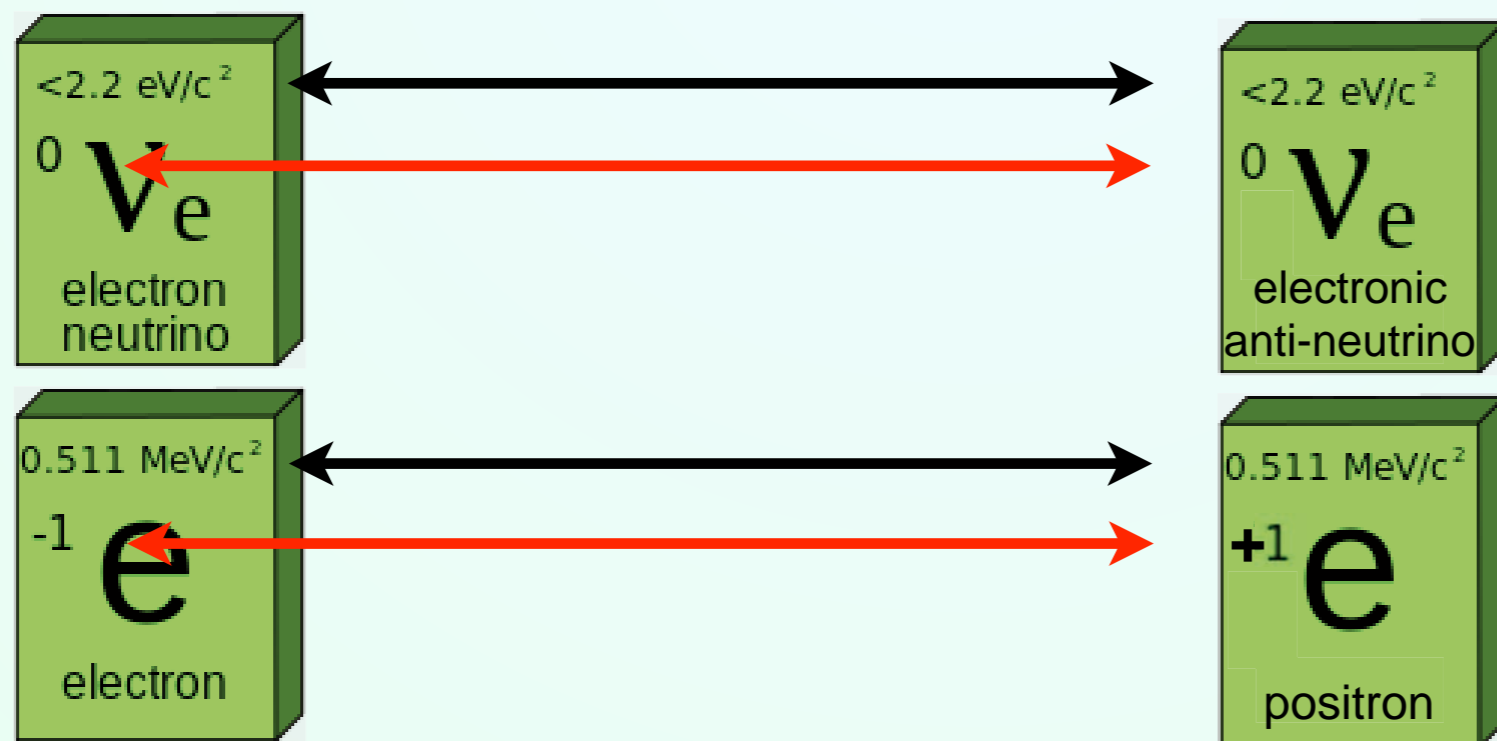
¡Por cada partícula hay un antipartícula!

misma masa  
carga opuesta

QUARKS



LEPTONES

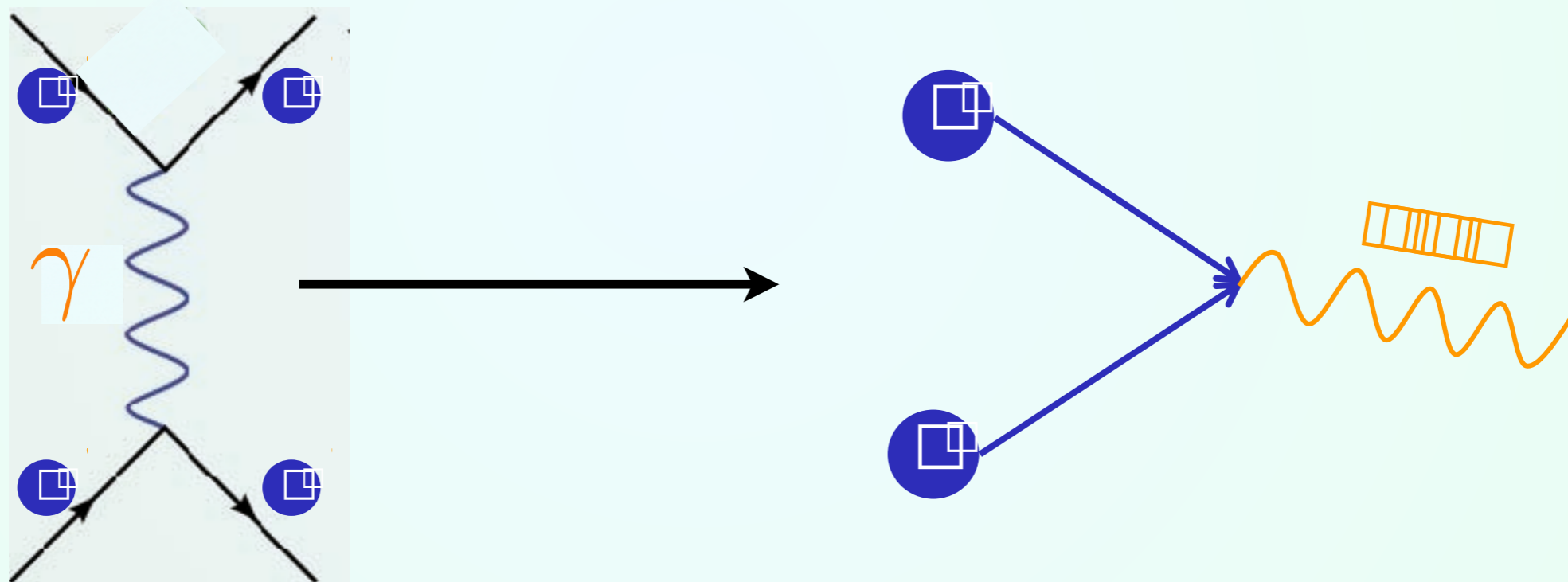
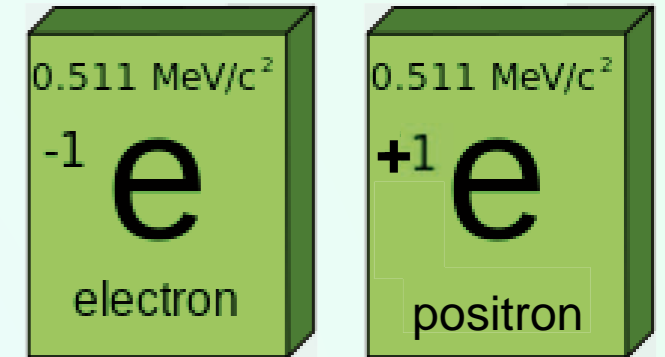


ANTI-QUARKS

ANTI-LEPTONES

# Antimateria

Considerando por ej. electrones y positrones



# Las demás “familias”

Family I

---

Quarks



up  
u



down  
d

---

Leptons



electron  
neutrino  
 $\nu_e$



electron  
 $e^-$

# Las demás “familias”

QUARKS

$2.4 \text{ MeV}/c^2$   
 $\frac{2}{3}$   
**u**  
up

$1.27 \text{ GeV}/c^2$   
 $\frac{2}{3}$   
**c**  
charm

$171.2 \text{ GeV}/c^2$   
 $\frac{2}{3}$   
**t**  
top

$4.8 \text{ MeV}/c^2$   
 $-\frac{1}{3}$   
**d**  
down

$104 \text{ MeV}/c^2$   
 $-\frac{1}{3}$   
**s**  
strange

$4.2 \text{ GeV}/c^2$   
 $-\frac{1}{3}$   
**b**  
bottom

0  
0  
 **$\gamma$**   
photon

0  
0  
**g**  
gluon

LEPTONES

$<2.2 \text{ eV}/c^2$   
0  
 **$\nu_e$**   
electron neutrino

0  
 **$\nu_\mu$**   
muon neutrino

0  
 **$\nu_\tau$**   
tau neutrino

$0.511 \text{ MeV}/c^2$   
-1  
**e**  
electron

$105.7 \text{ MeV}/c^2$   
-1  
 **$\mu$**   
muon

$1.777 \text{ GeV}/c^2$   
-1  
 **$\tau$**   
tau

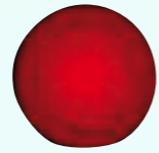
$80.4 \text{ GeV}/c^2$   
 $\pm 1$   
 **$W^\pm$**   
W boson

$91.2 \text{ GeV}/c^2$   
0  
 **$Z^0$**   
Z boson

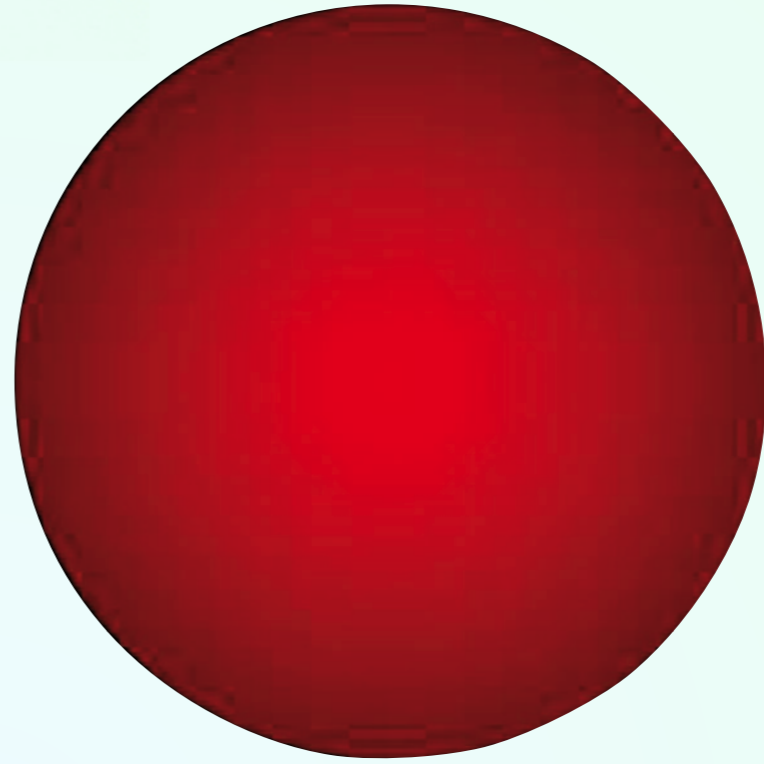
MEDIADORAS

$1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

$\cdot u$



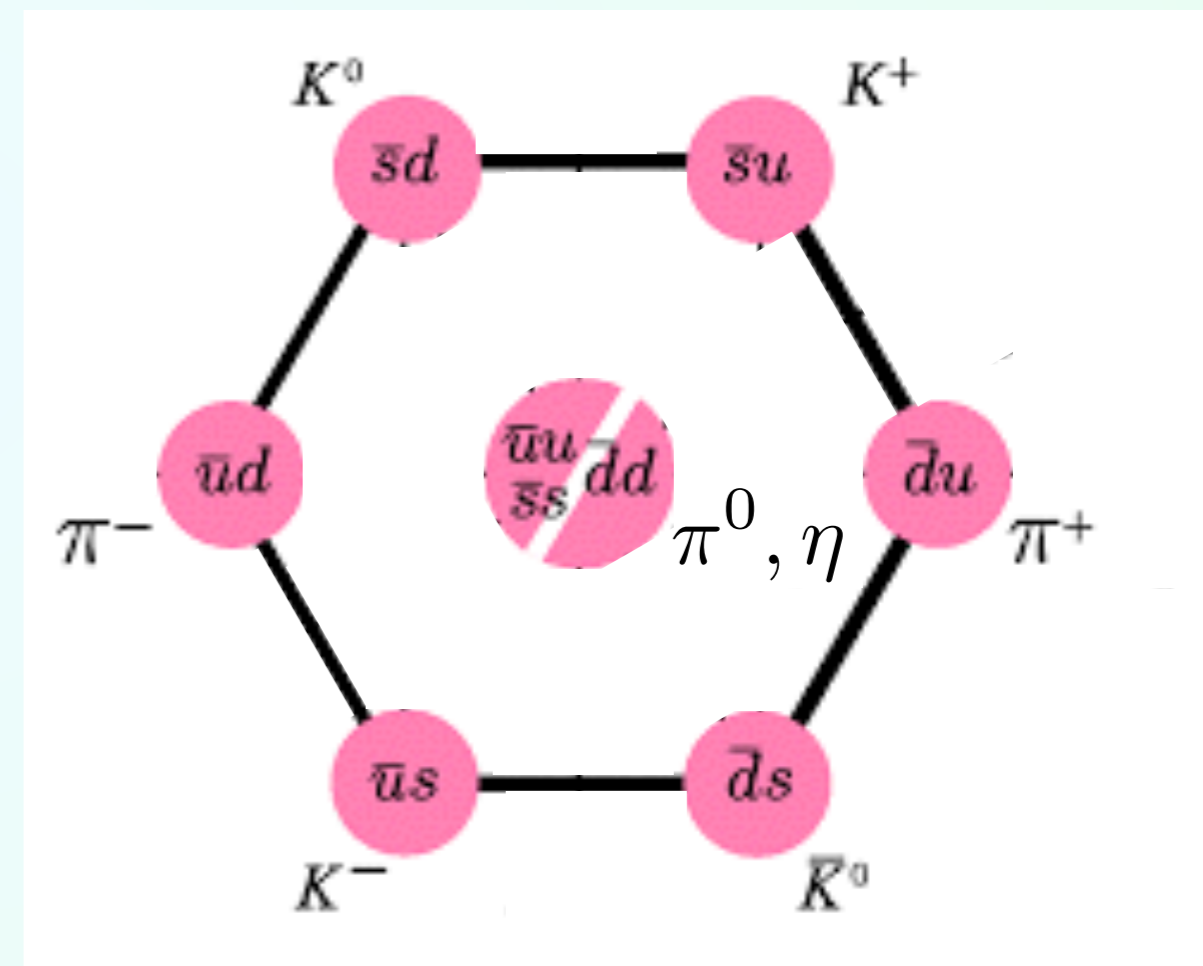
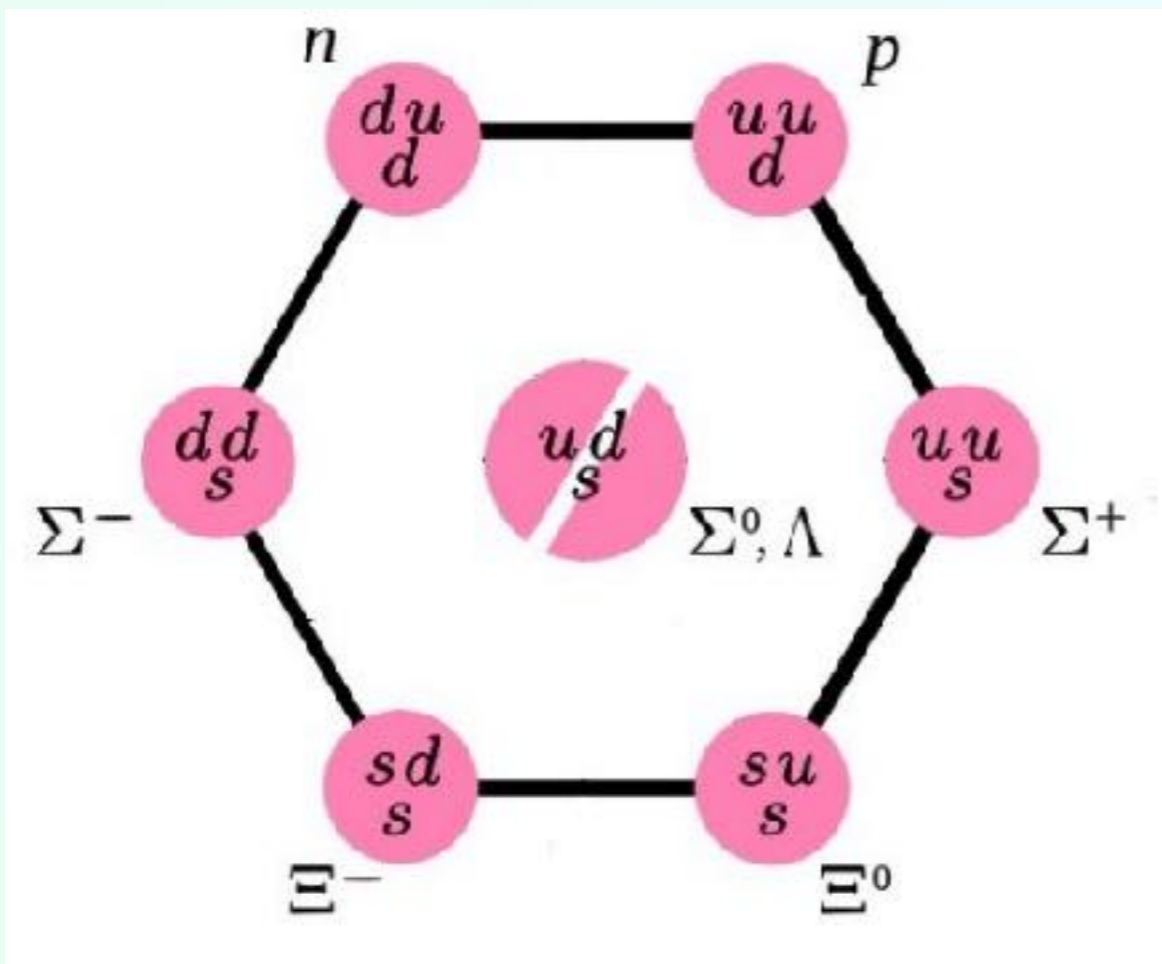
$c$



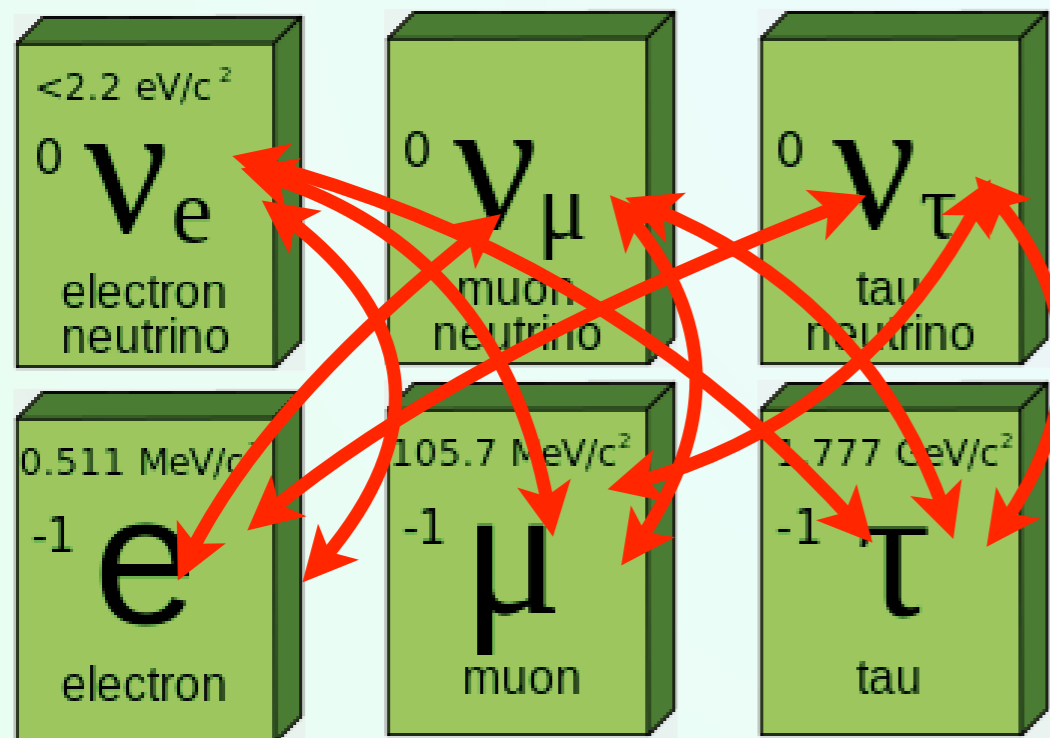
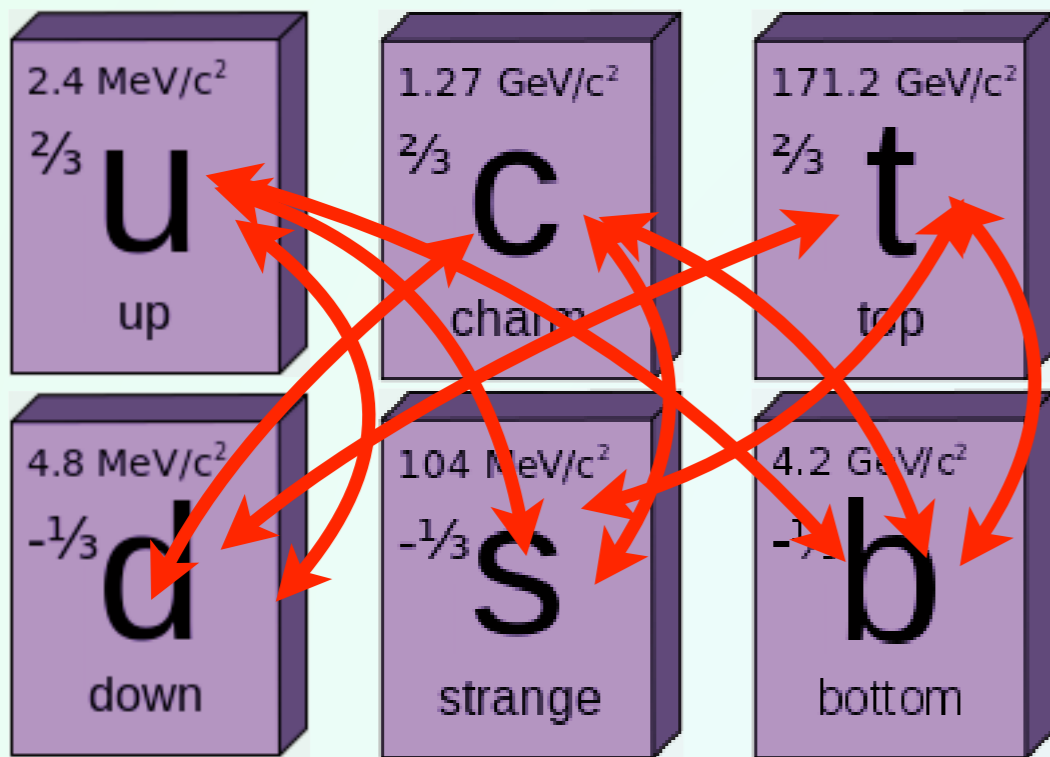
$t$

# Los Hadrones

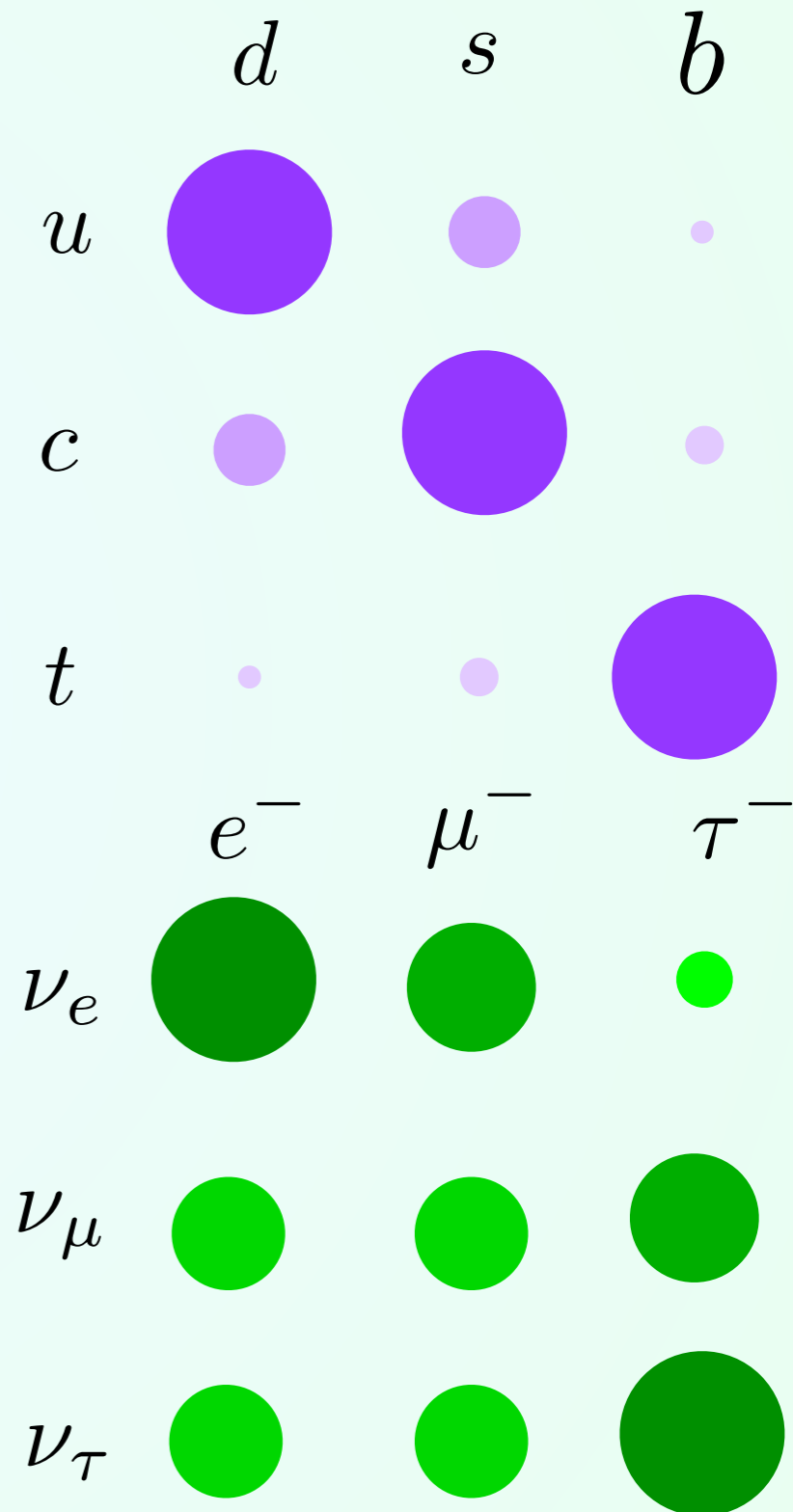
Protones y Neutrones constituyen la materia ordinaria, pero hay otras partículas constituidas desde los quark que no son estables: **los hadrones**



# La mezcla entre las familias

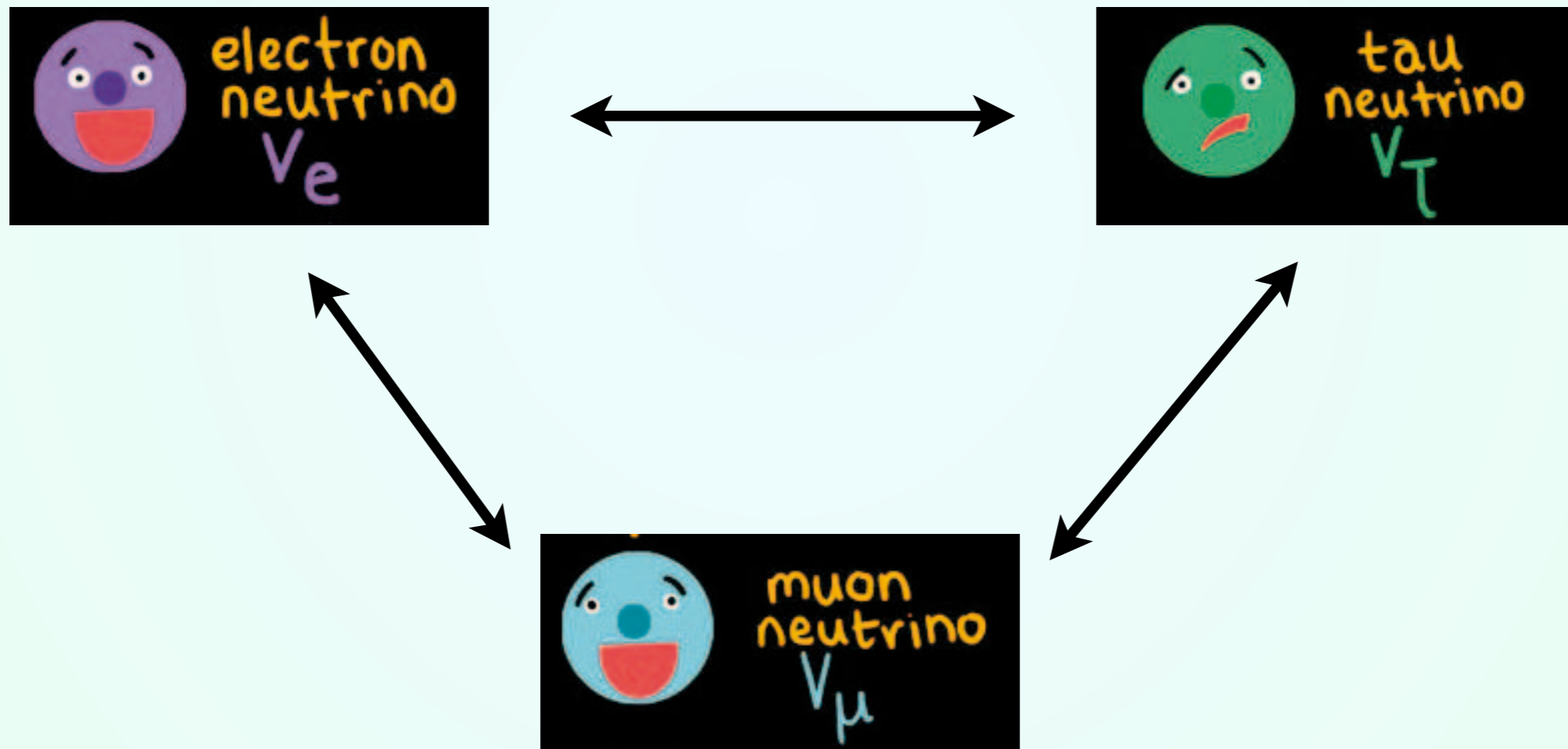


Mezclas con distintas probabilidades



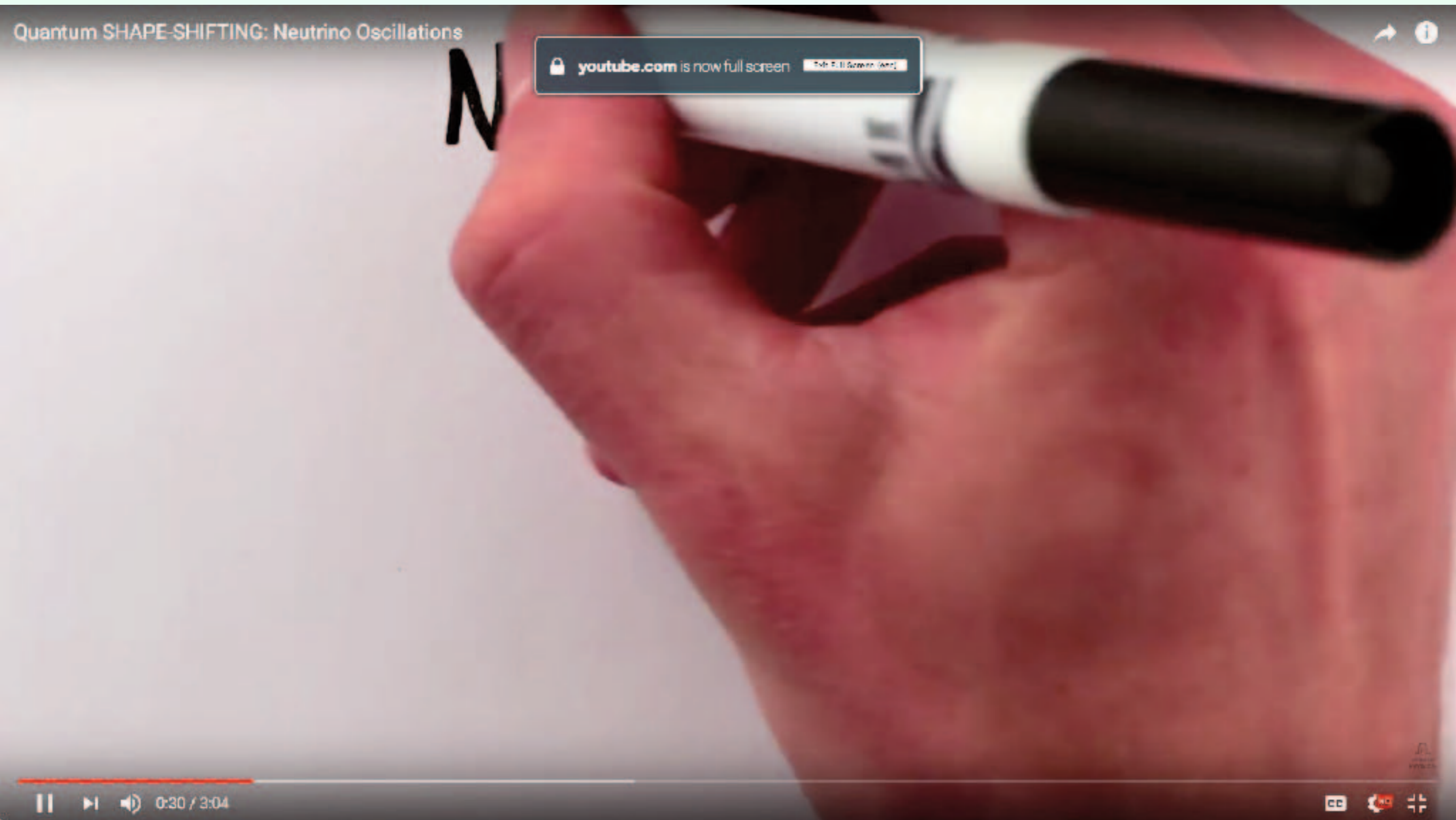
# Oscilaciones de Neutrinos

Los neutrinos son tan ligeros, con mezclas tan grandes, que oscilan entre ellos:





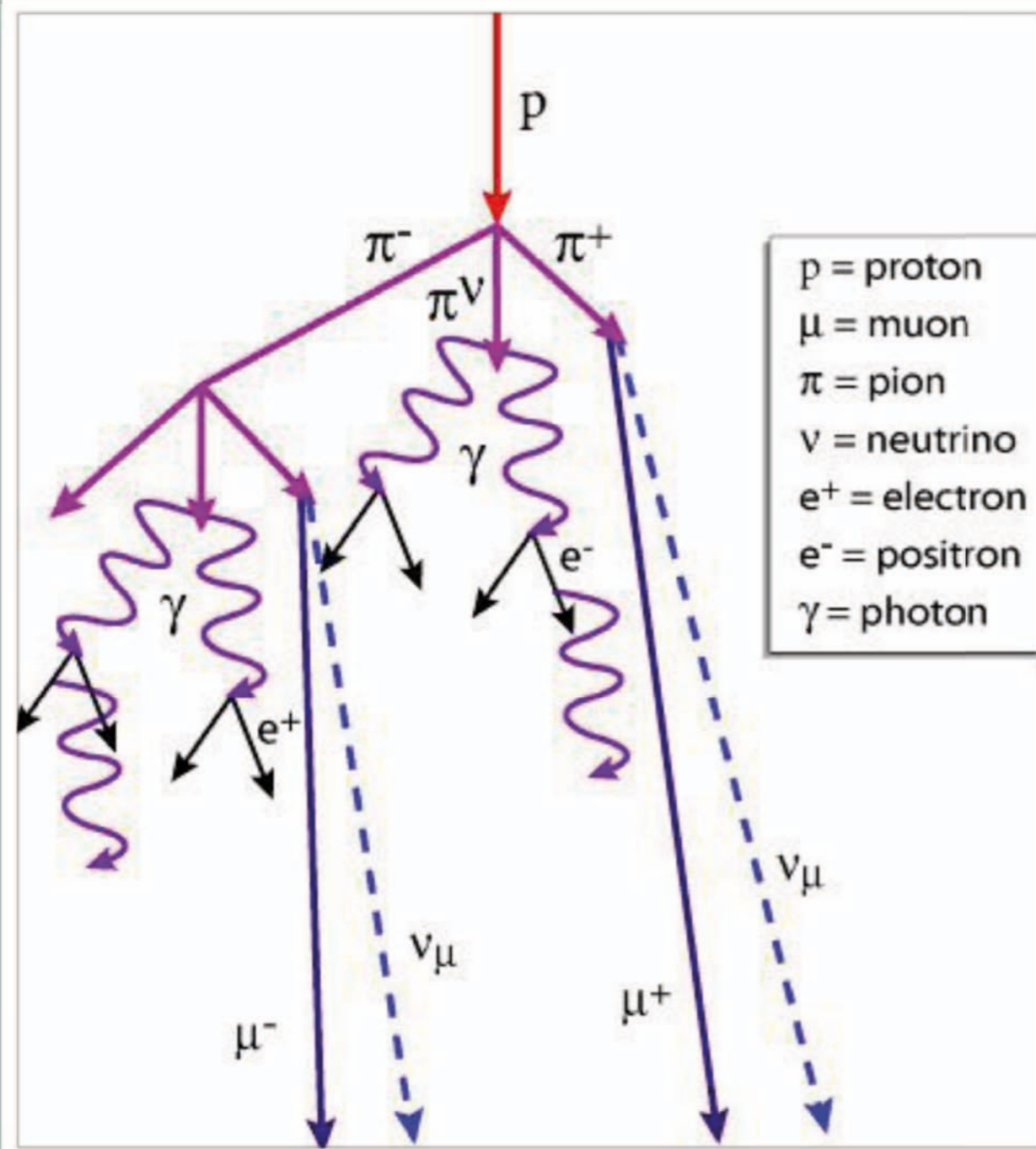
# Oscilaciones de Neutrinos



# Ej. Neutrinos Atmosféricos

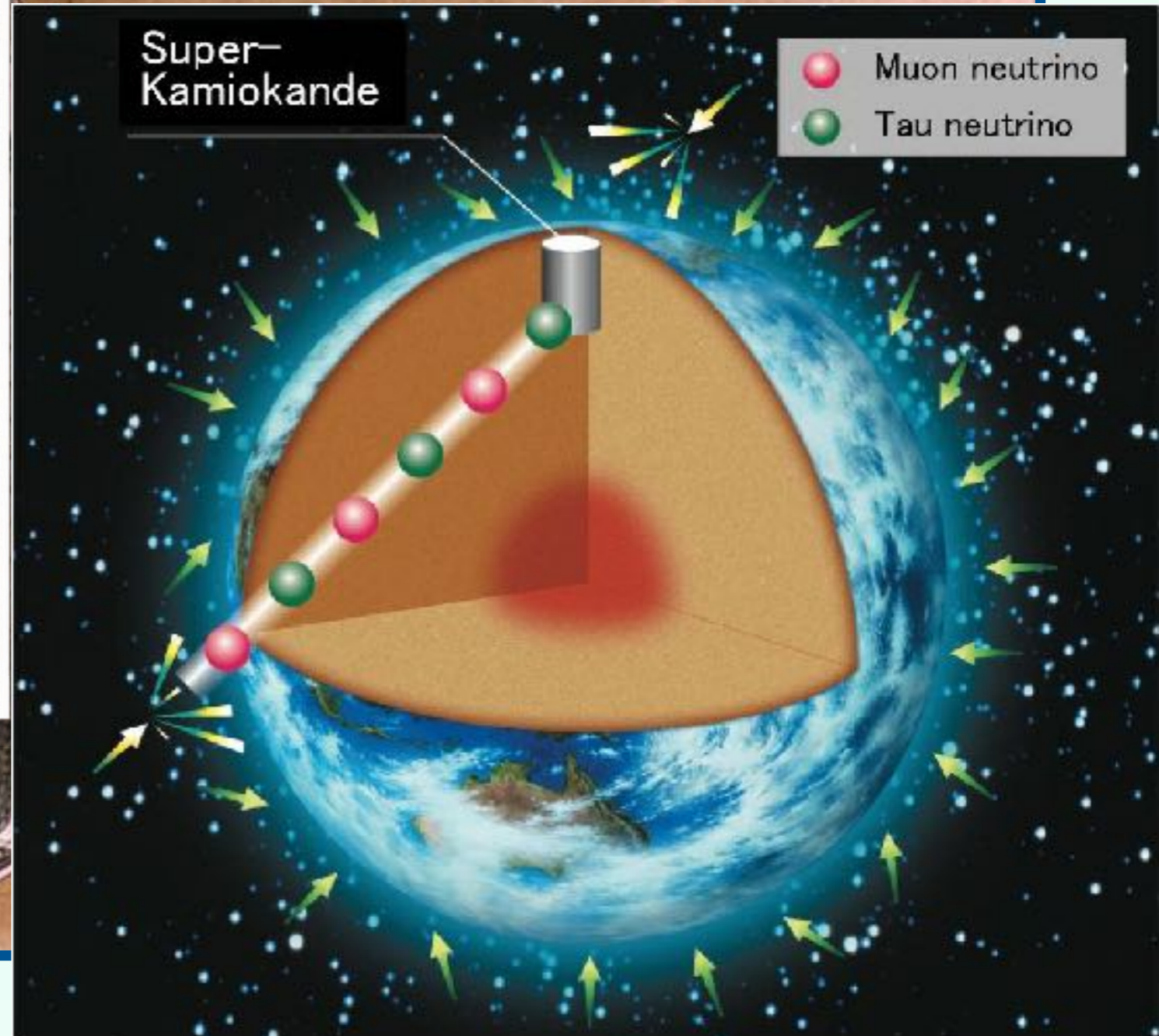
## SUPERKAMIOKANDE

50 000 toneladas de agua ultrapura

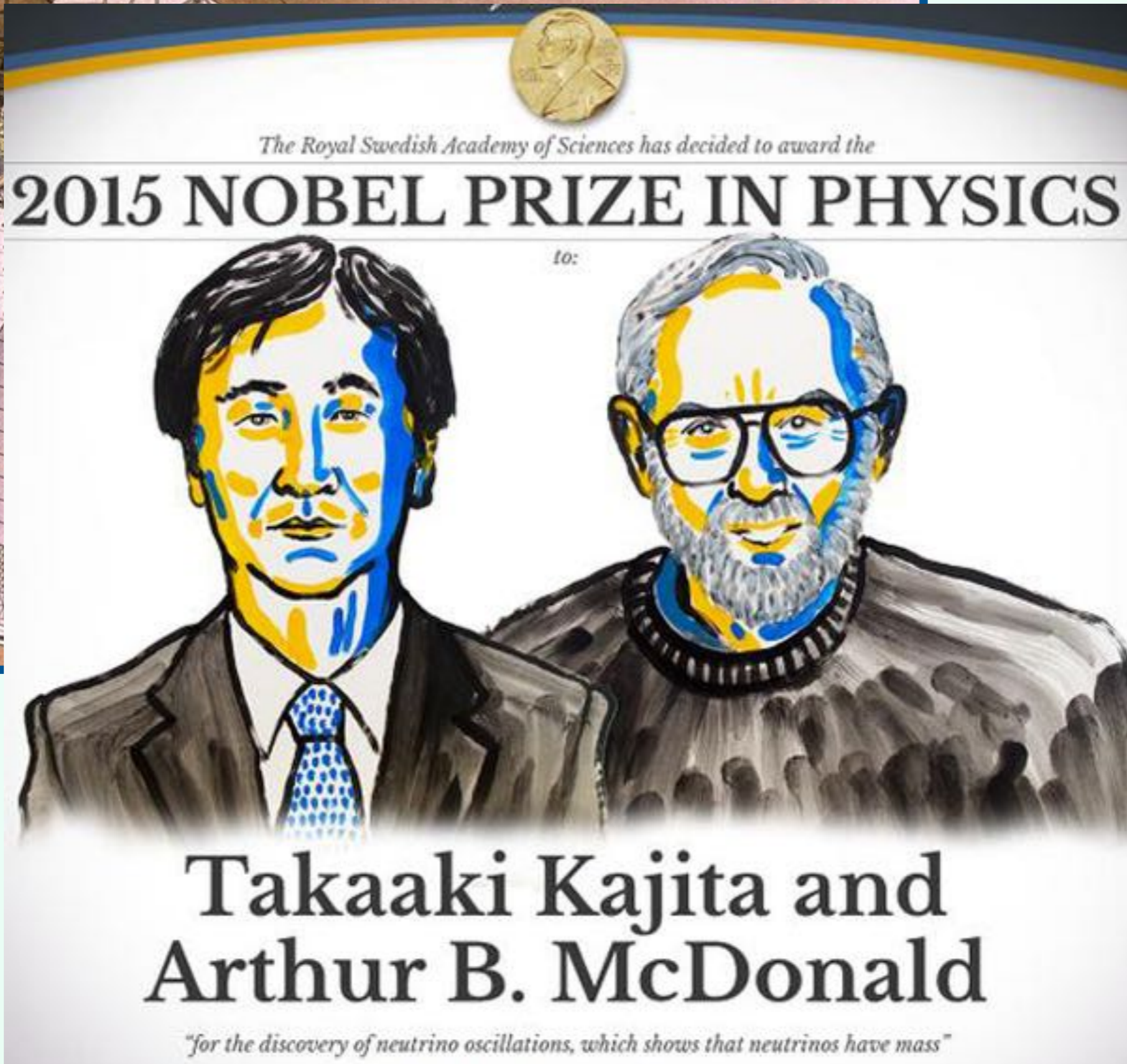


Super-Kamiokande

- Muon neutrino
- Tau neutrino



# SUPERKAMIOKAN

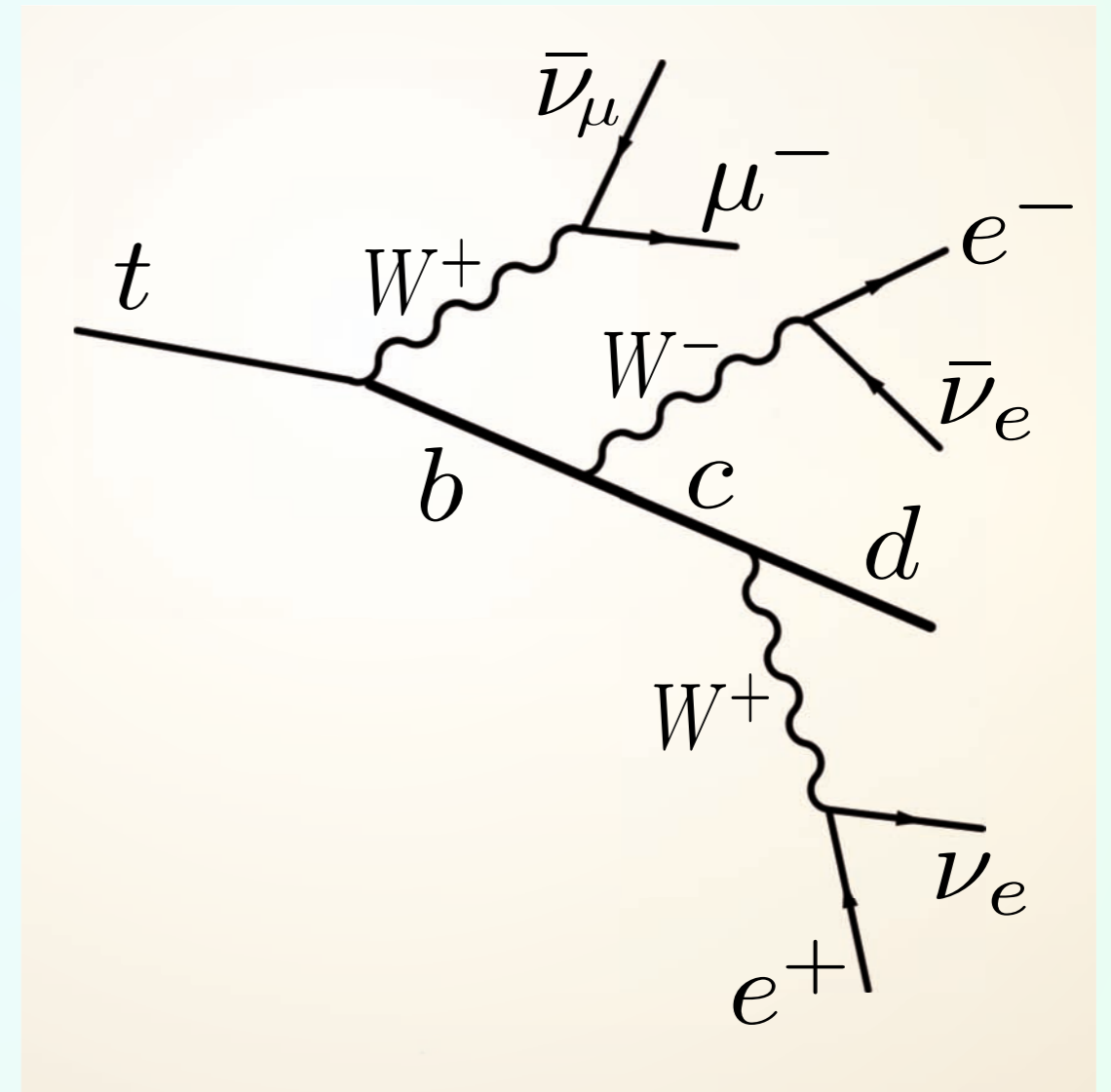
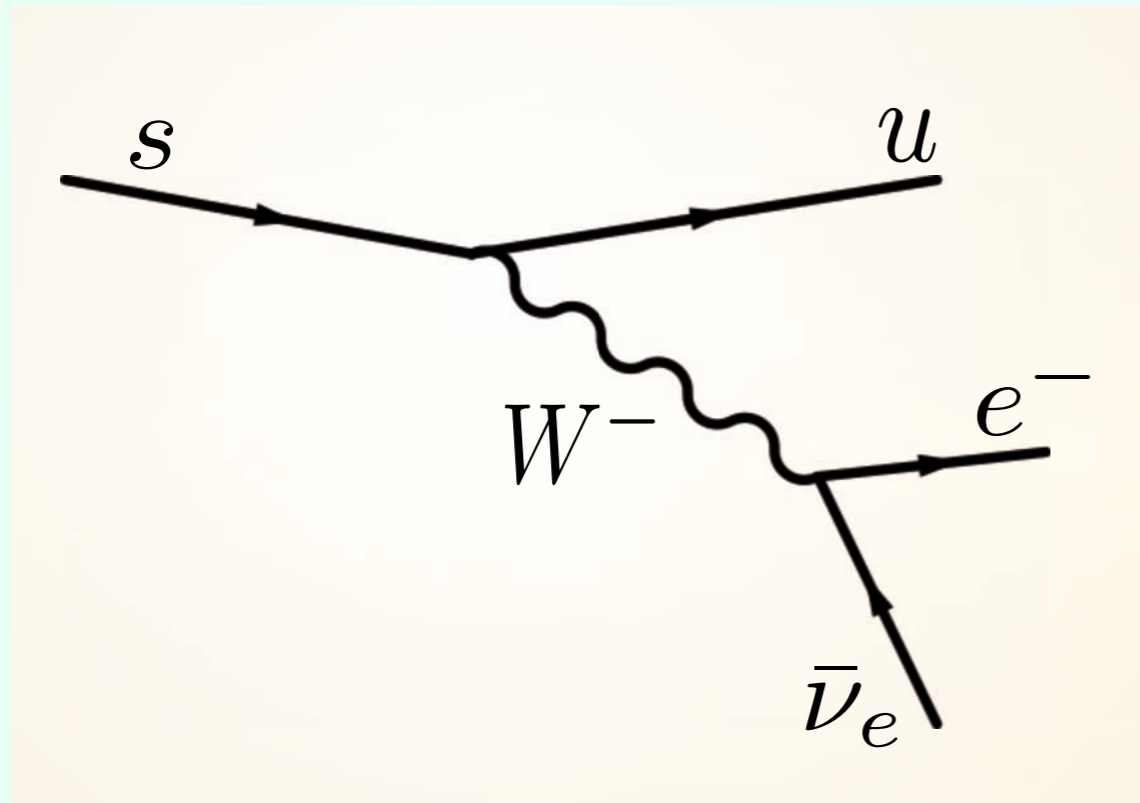


SNO



# Familias inestables

Las partículas de la segunda y tercera familias no constituyen la materia ordinaria porque no son estables



Para poder ver estas partículas necesitamos producirlas con mucha energía



Si la energía es suficientemente alta



Se pueden crear partículas que han existido en el universo primordial, pero que ahora no las encontramos en la materia ordinaria

# The Large Hadron Collider - LHC

Laboratorio CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear)

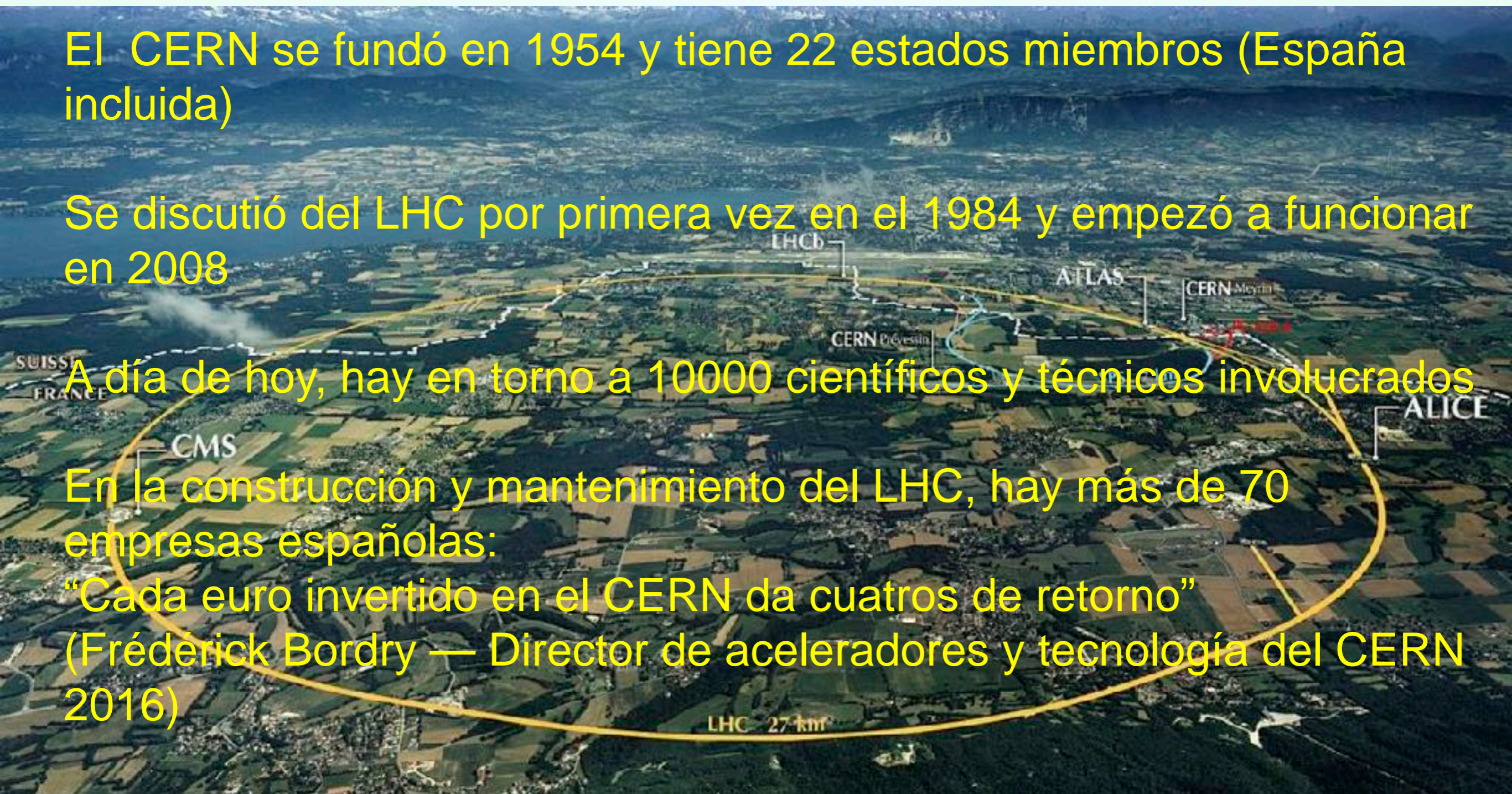
El CERN se fundó en 1954 y tiene 22 estados miembros (España incluida)

Se discutió del LHC por primera vez en el 1984 y empezó a funcionar en 2008

A día de hoy, hay en torno a 10000 científicos y técnicos involucrados

En la construcción y mantenimiento del LHC, hay más de 70 empresas españolas:

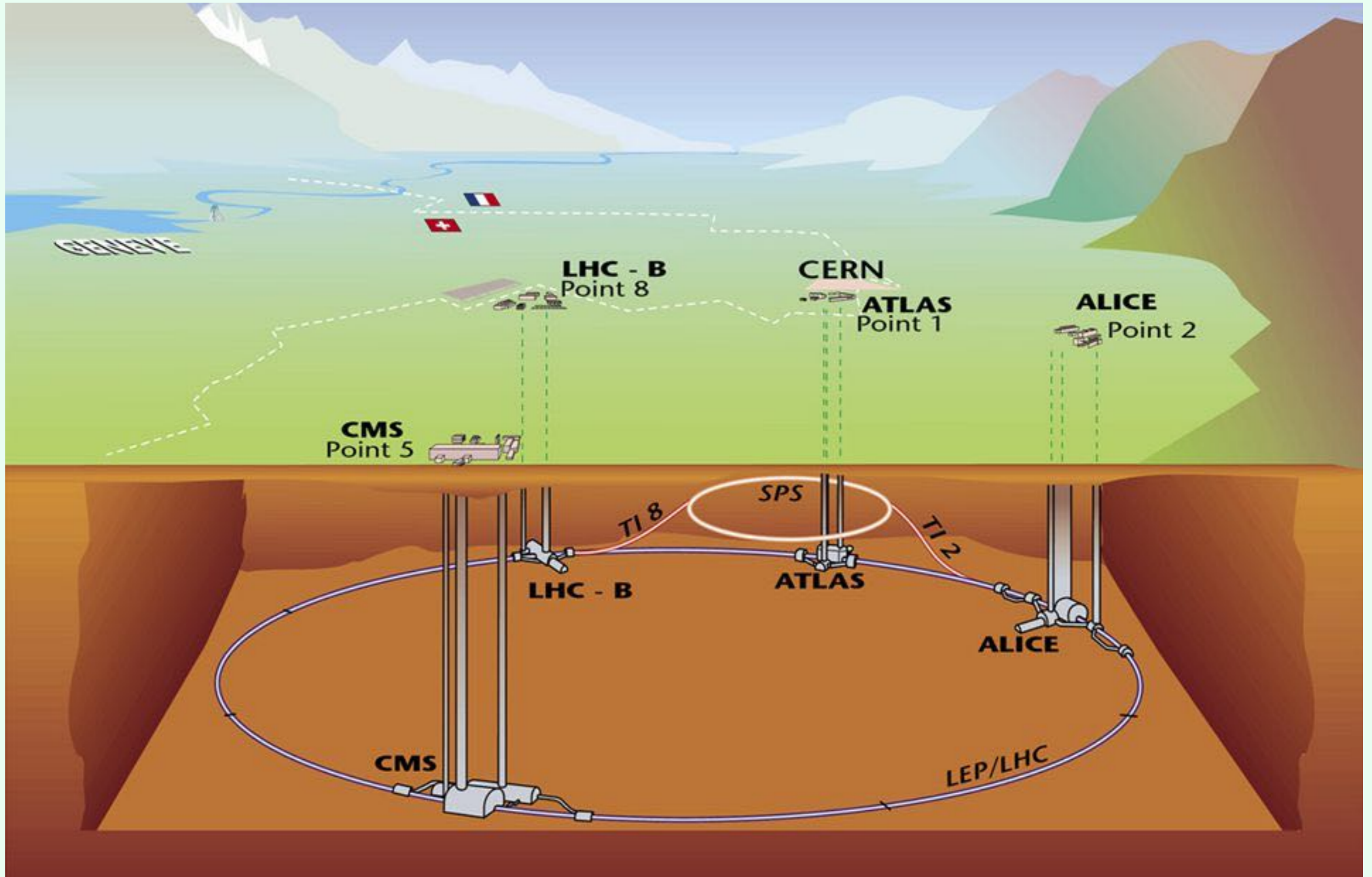
“Cada euro invertido en el CERN da cuatros de retorno”  
(Frédéric Bordry — Director de aceleradores y tecnología del CERN 2016)



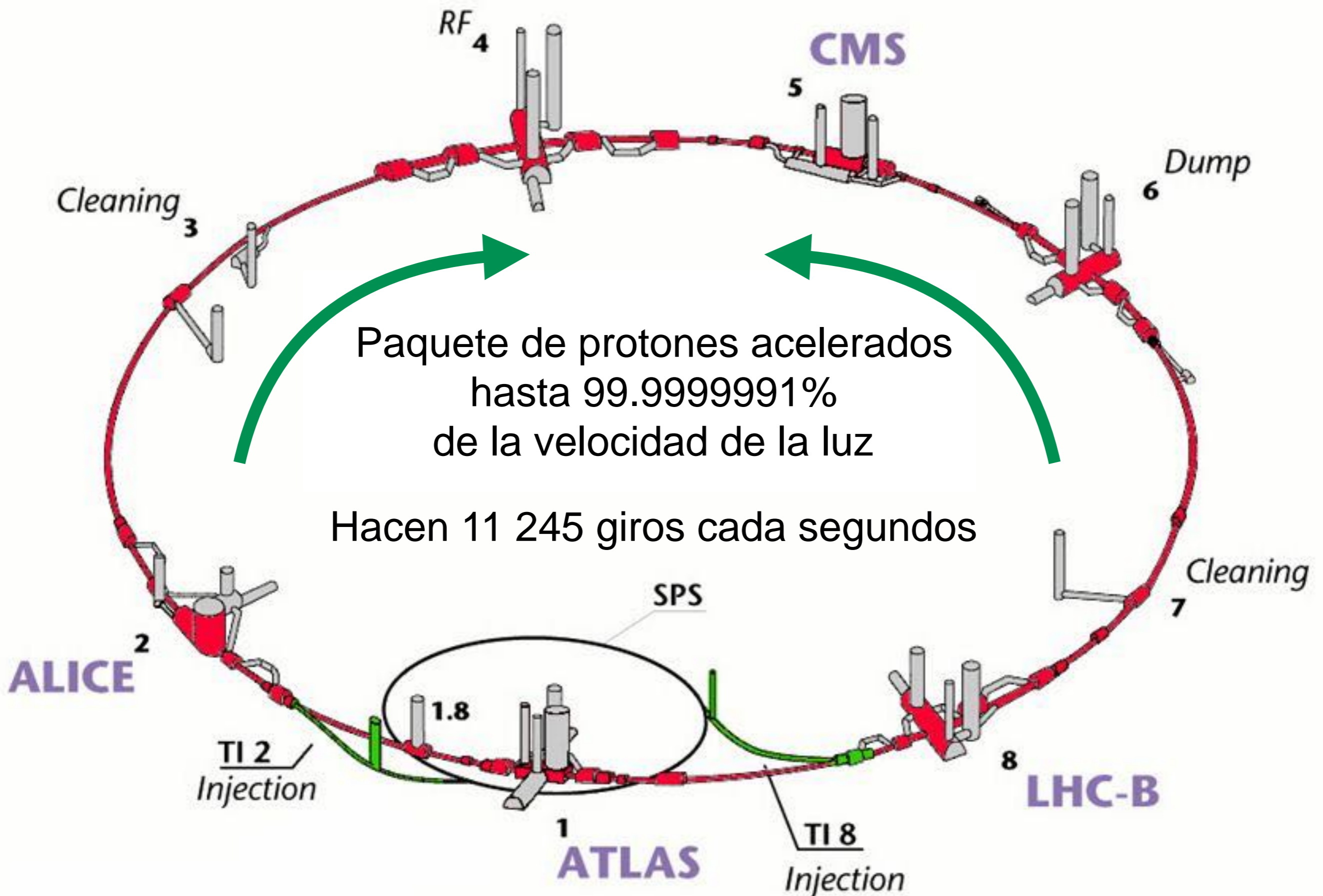
Frontera Franco-Suiza, cerca de Ginebra

# The Large Hadron Collider - LHC

27 Km de longitud de circunferencia a una profundidad de 100 m

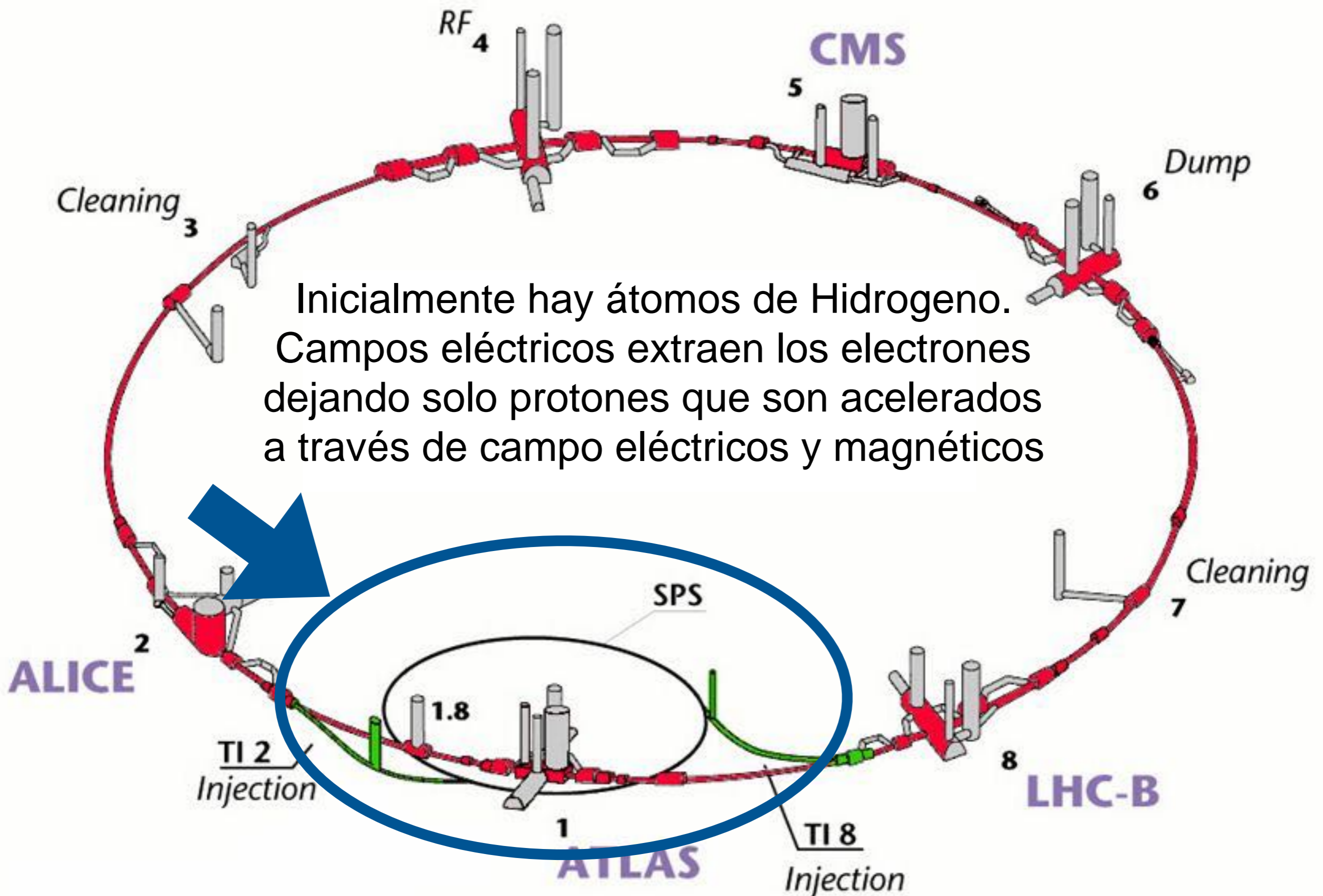


# The Large Hadron Collider - LHC



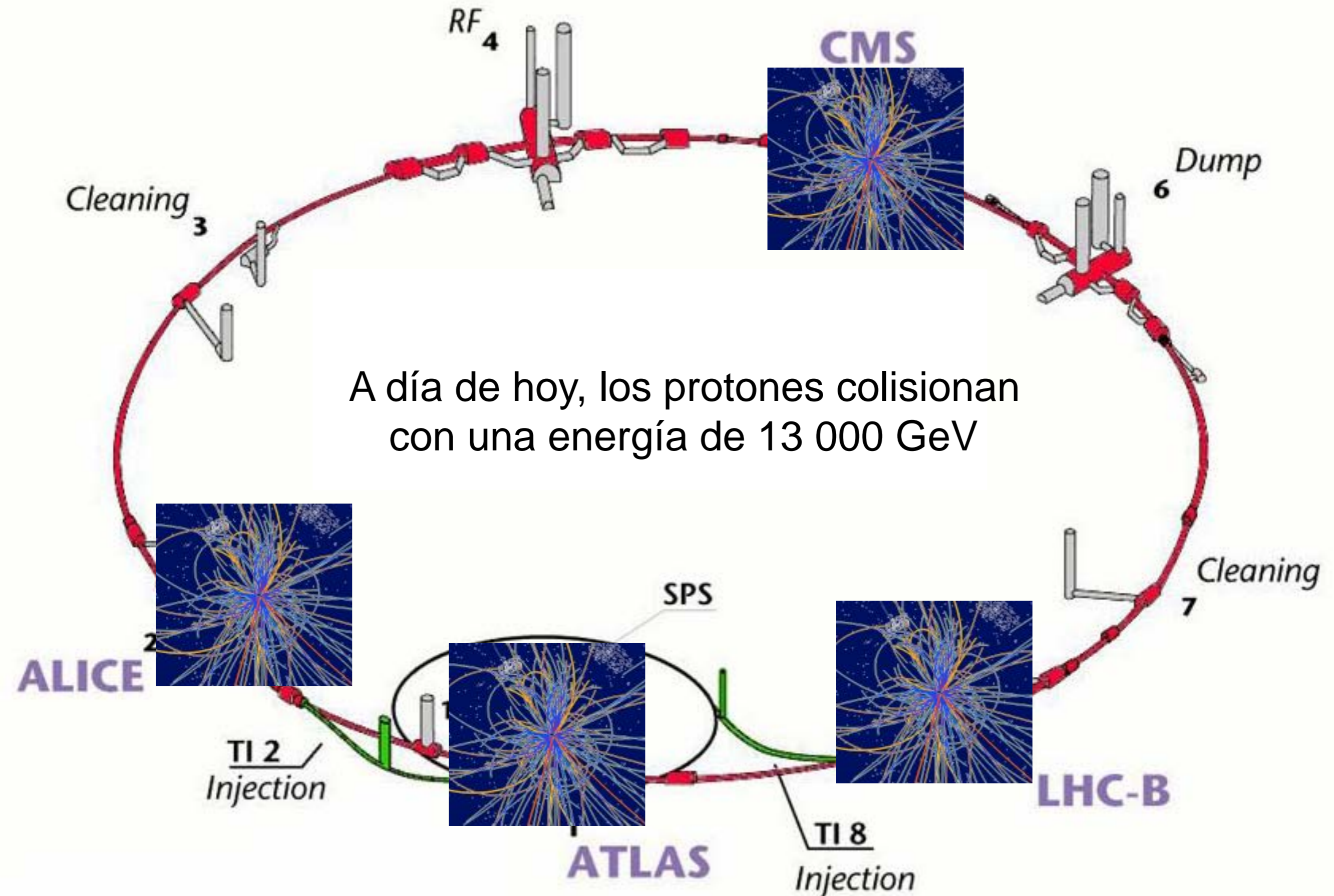


# The Large Hadron Collider - LHC



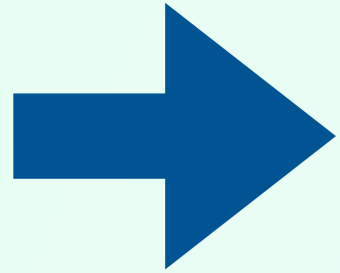
Inicialmente hay átomos de Hidrogeno. Campos eléctricos extraen los electrones dejando solo protones que son acelerados a través de campo eléctricos y magnéticos

# The Large Hadron Collider - LHC

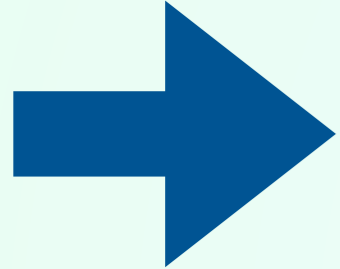


A día de hoy, los protones colisionan con una energía de 13 000 GeV

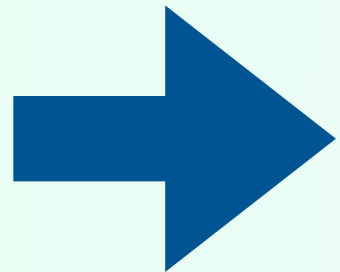
# ¿Cómo se entiende lo que pasa?



Se tienen que estudiar los productos finales  
(solo la materia ordinaria es estable)



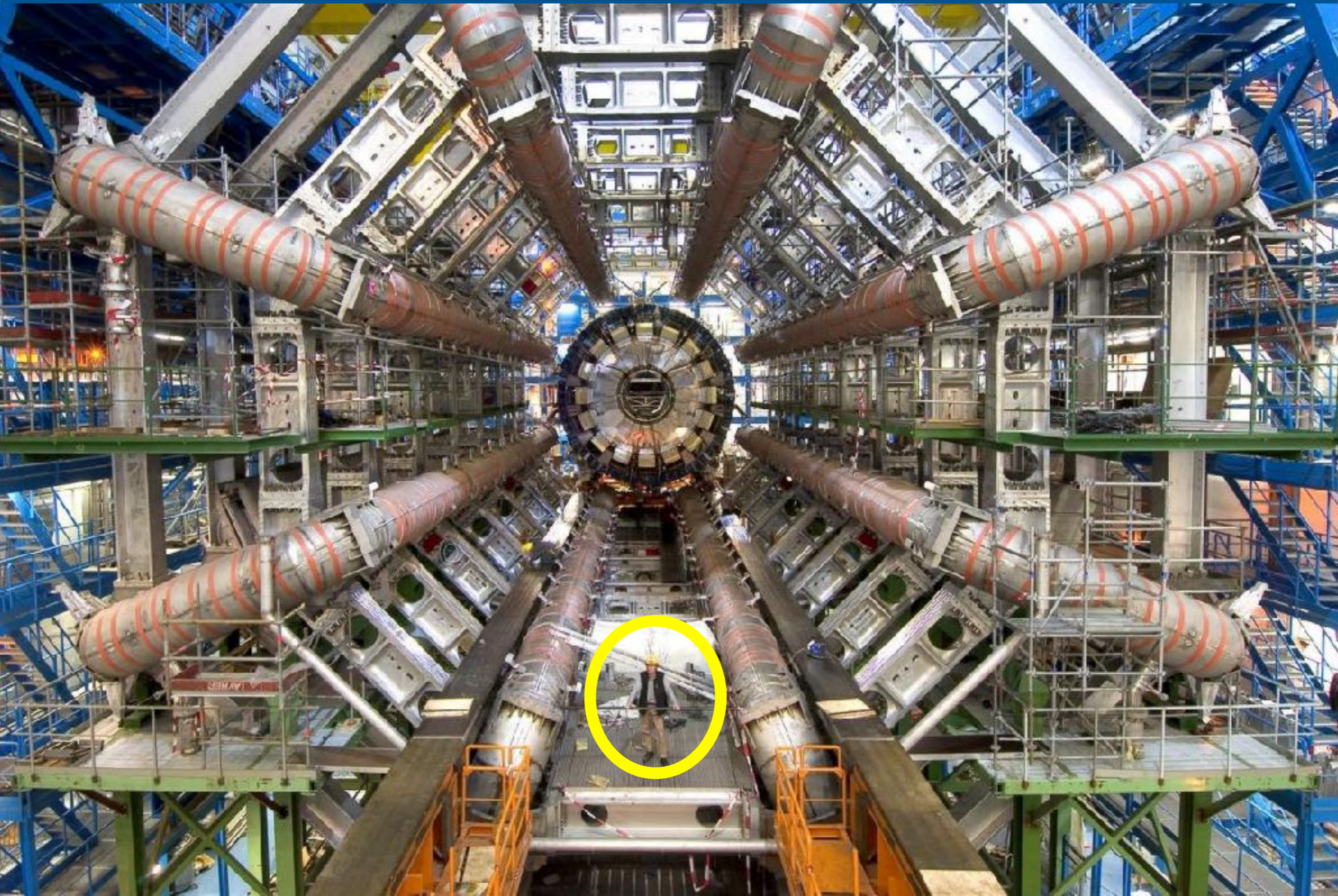
Distintas partículas se revelan con distintas partes de  
los reveladores



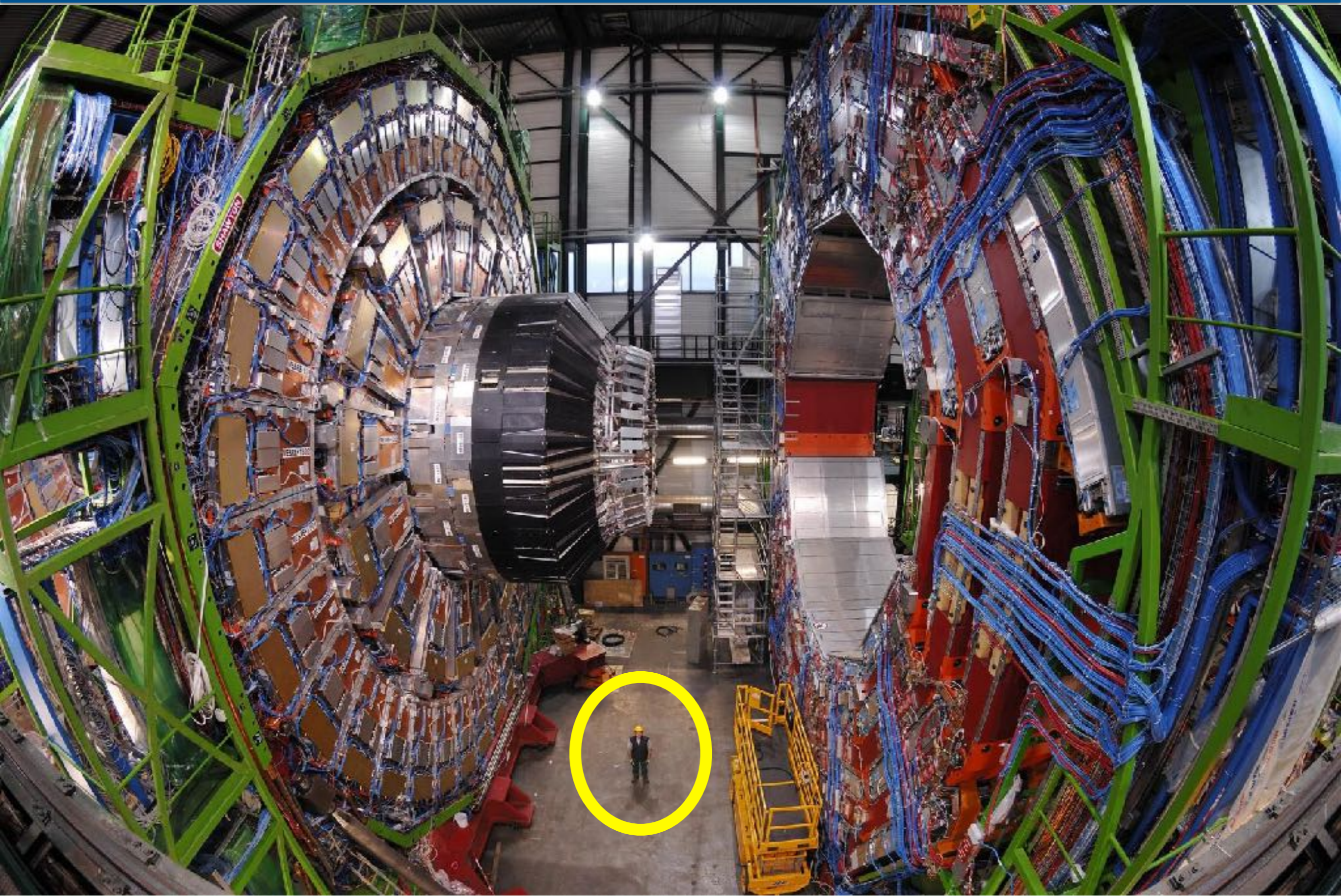
Usar algoritmos que identifican comportamientos  
característicos de las distintas interacciones



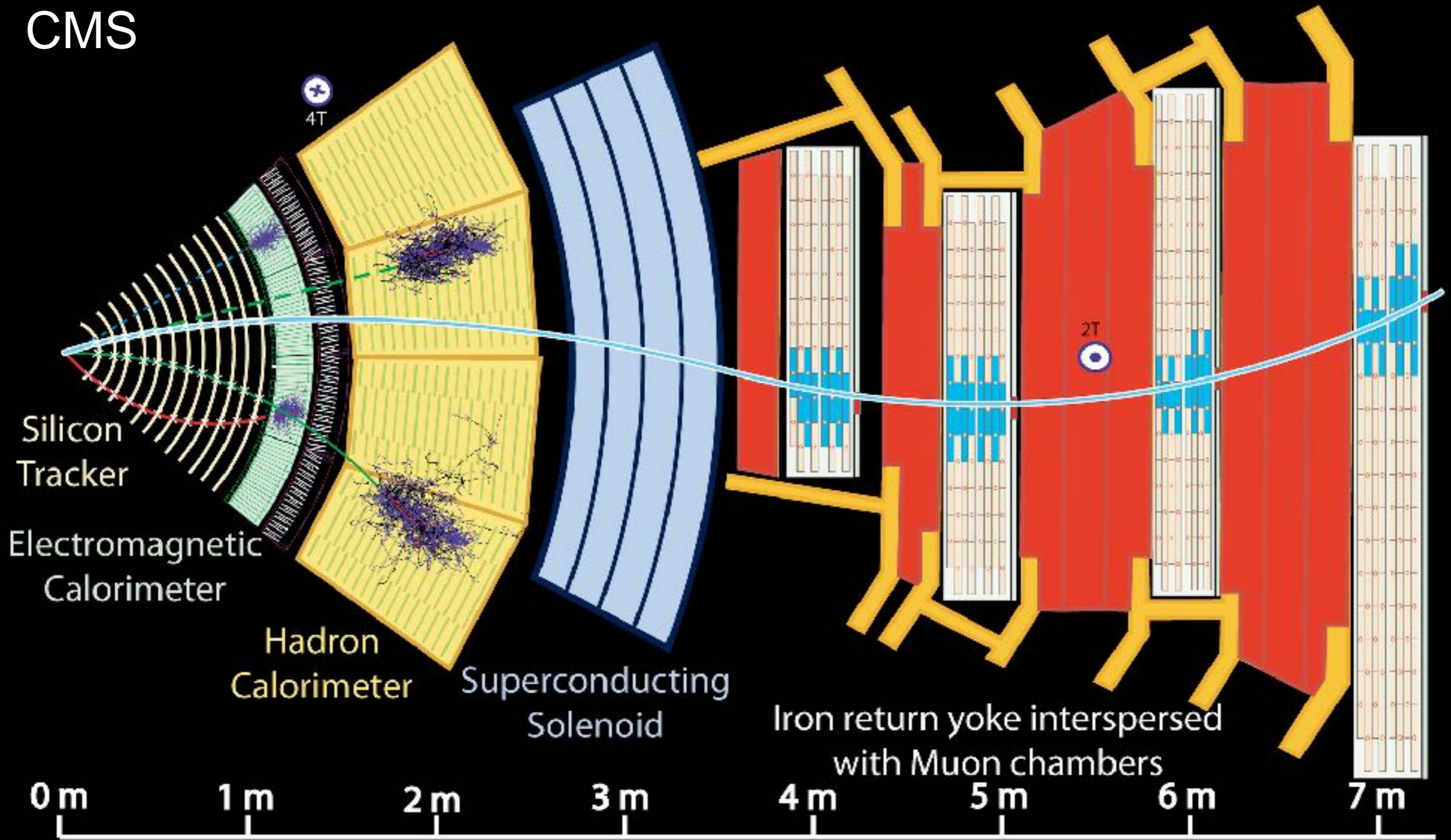
# Detector de ATLAS



# Detector de CMS



# CMS



Key:

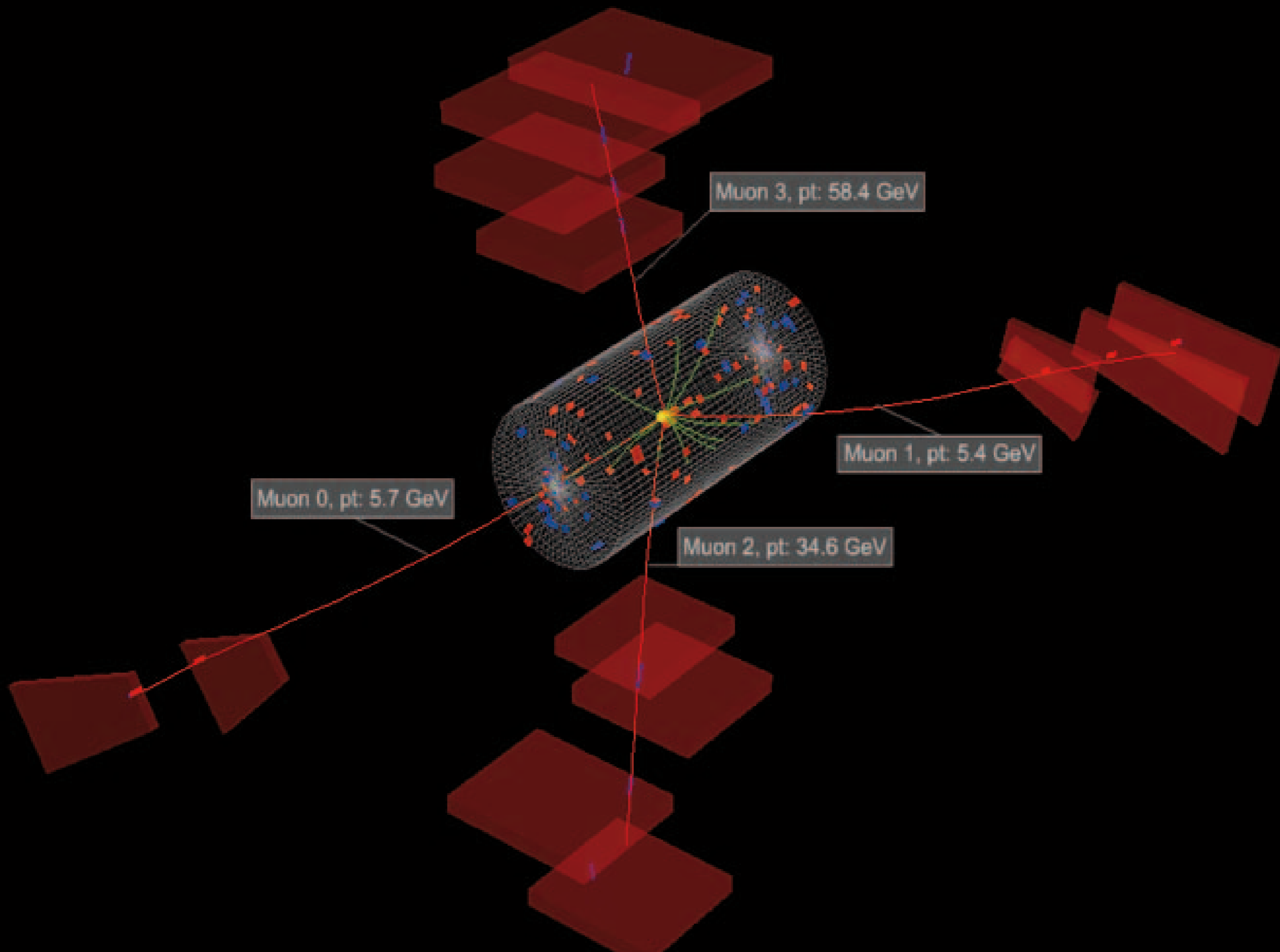
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Hay mil millones de colisiones en un segundo:  
esta información se guarda en ordenadores hasta un  
total de 50 000 000 Gb de datos cada año.





# El descubrimiento del Higgs

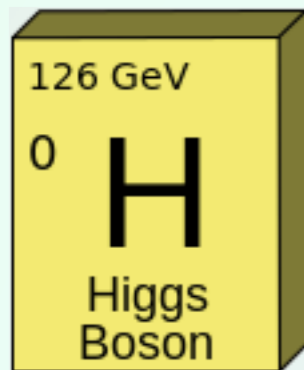
## Nobel Prizes in Physics 2013



*Francois Englert and Peter W. Higgs  
2013 Nobel Prize winners*

Robert Brout (fallecido en 2011) también participó en la formulación del mecanismo que describe cómo el Higgs da masa a las demás partículas.

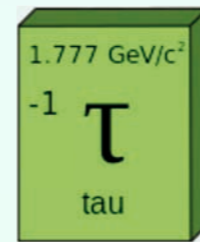
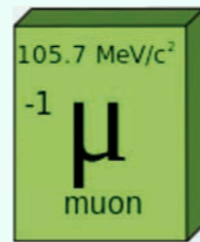
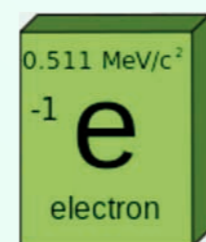
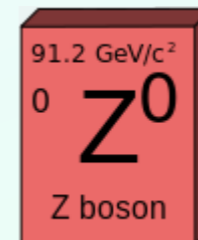
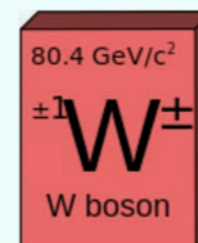
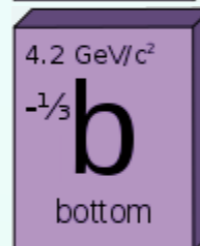
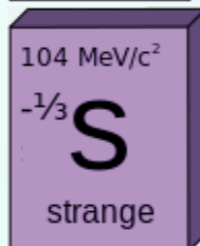
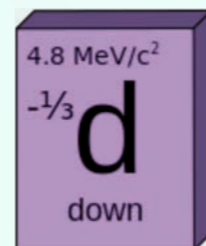
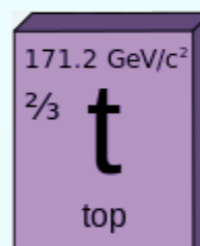
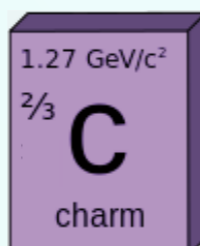
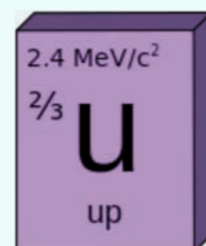
# ¿Qué es el Higgs?



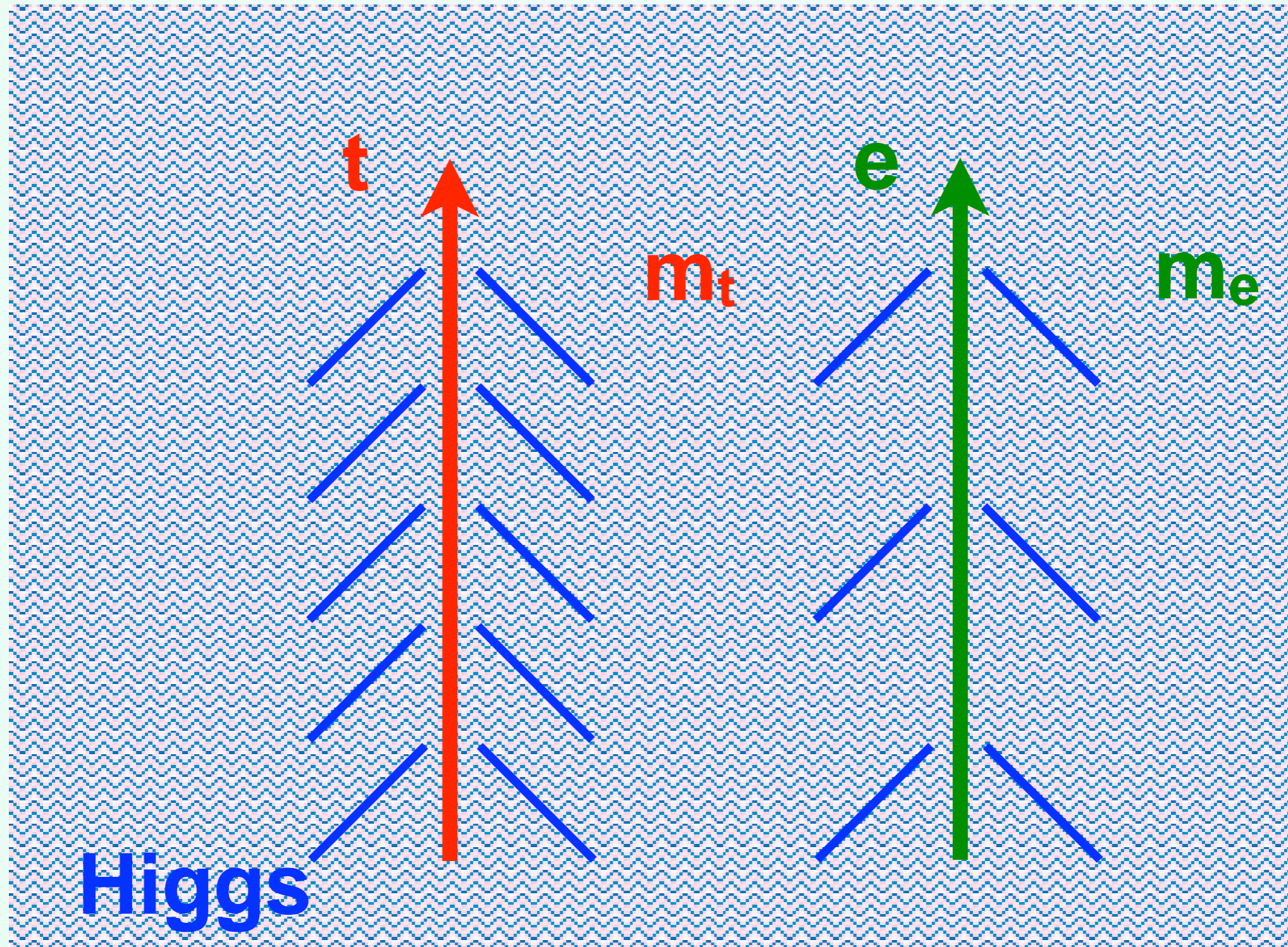
$$M_H = 126 \text{ GeV}$$

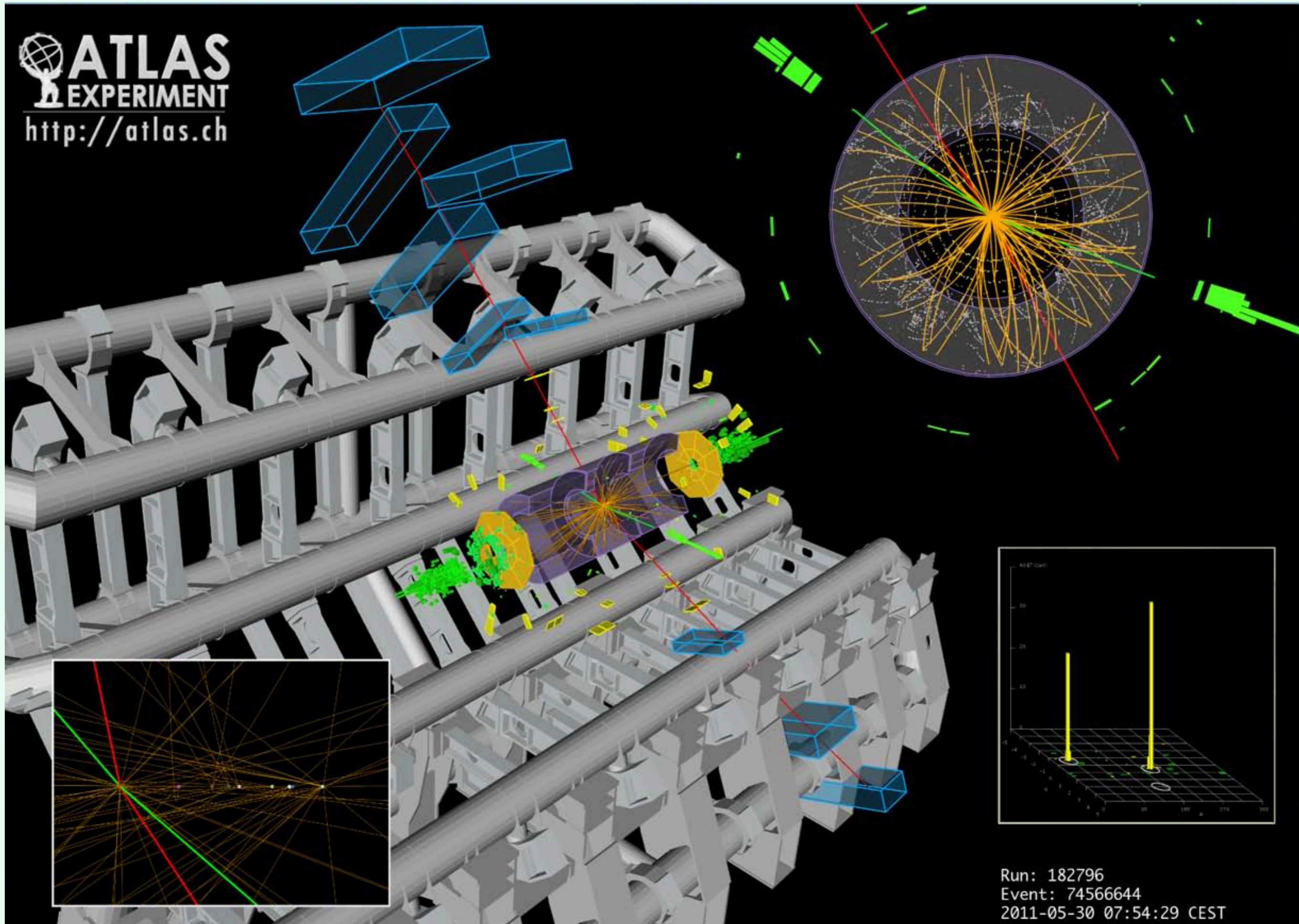
$$Q_H = 0$$

¡¡Es responsable de dar masas a todas las partículas con las que interactúa!!



La masa es como fricción  
con un líquido viscoso





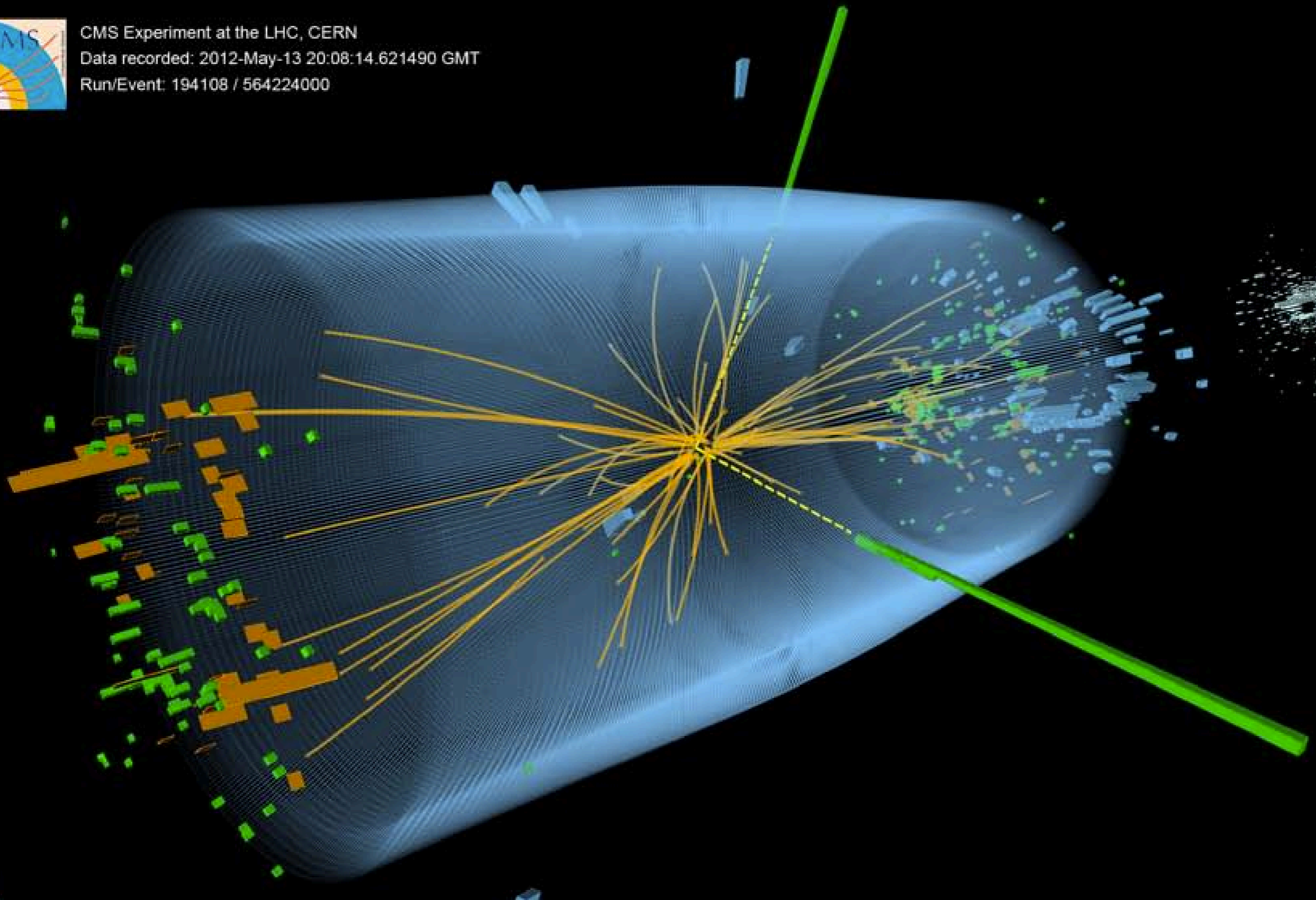
Run: 182796  
Event: 74566644  
2011-05-30 07:54:29 CEST



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

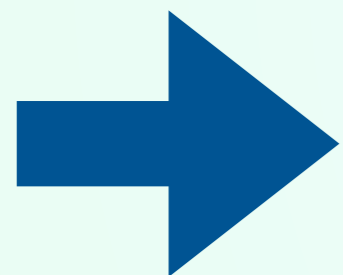
Run/Event: 194108 / 564224000



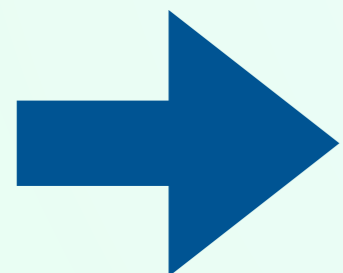
¡El descubrimiento del Higgs representa el haber encontrado la última pieza del Modelo Estándar!



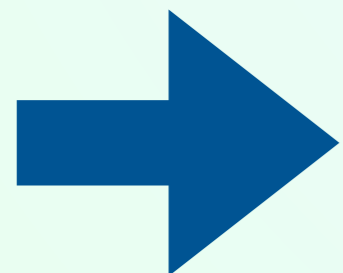
Pero no cierra la investigación en Física de Partículas:



¿El Higgs es elemental o compuesto? ¿Hay solo 1 o más?



¿Hay más partículas elementales con masas más grandes de lo que hemos visto hasta ahora?  
(ej. Supersimetría)

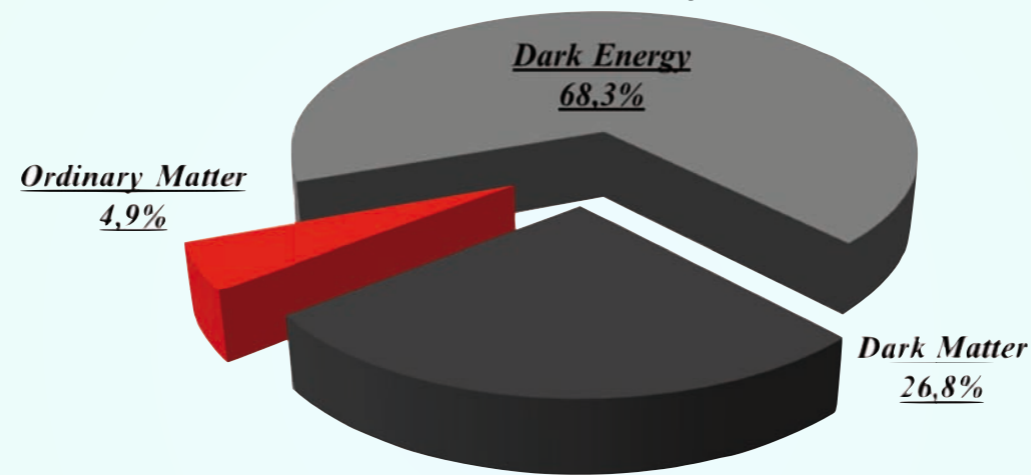


¿Hay una nueva subestructura?  
(ej. Dimensiones extras)

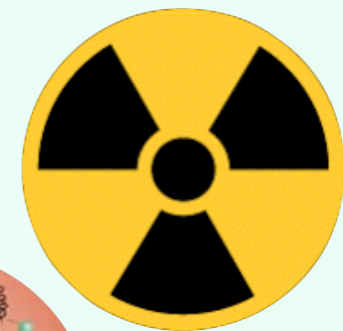
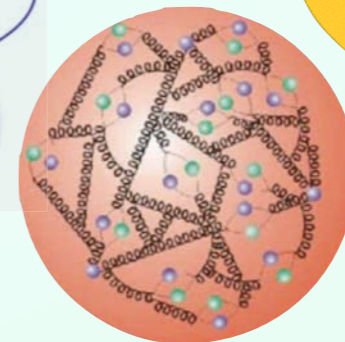
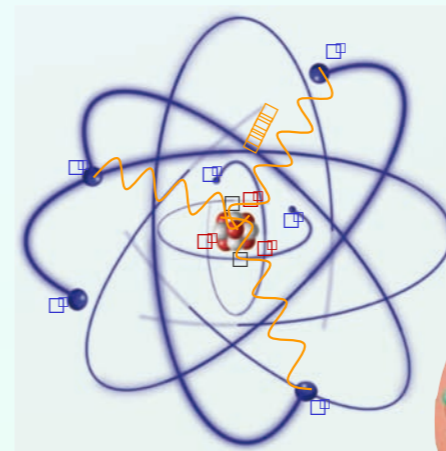
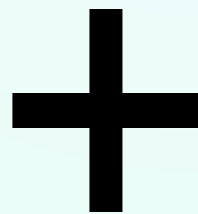
¿Por qué el Higgs se acopla de forma distinta a cada partícula elemental?

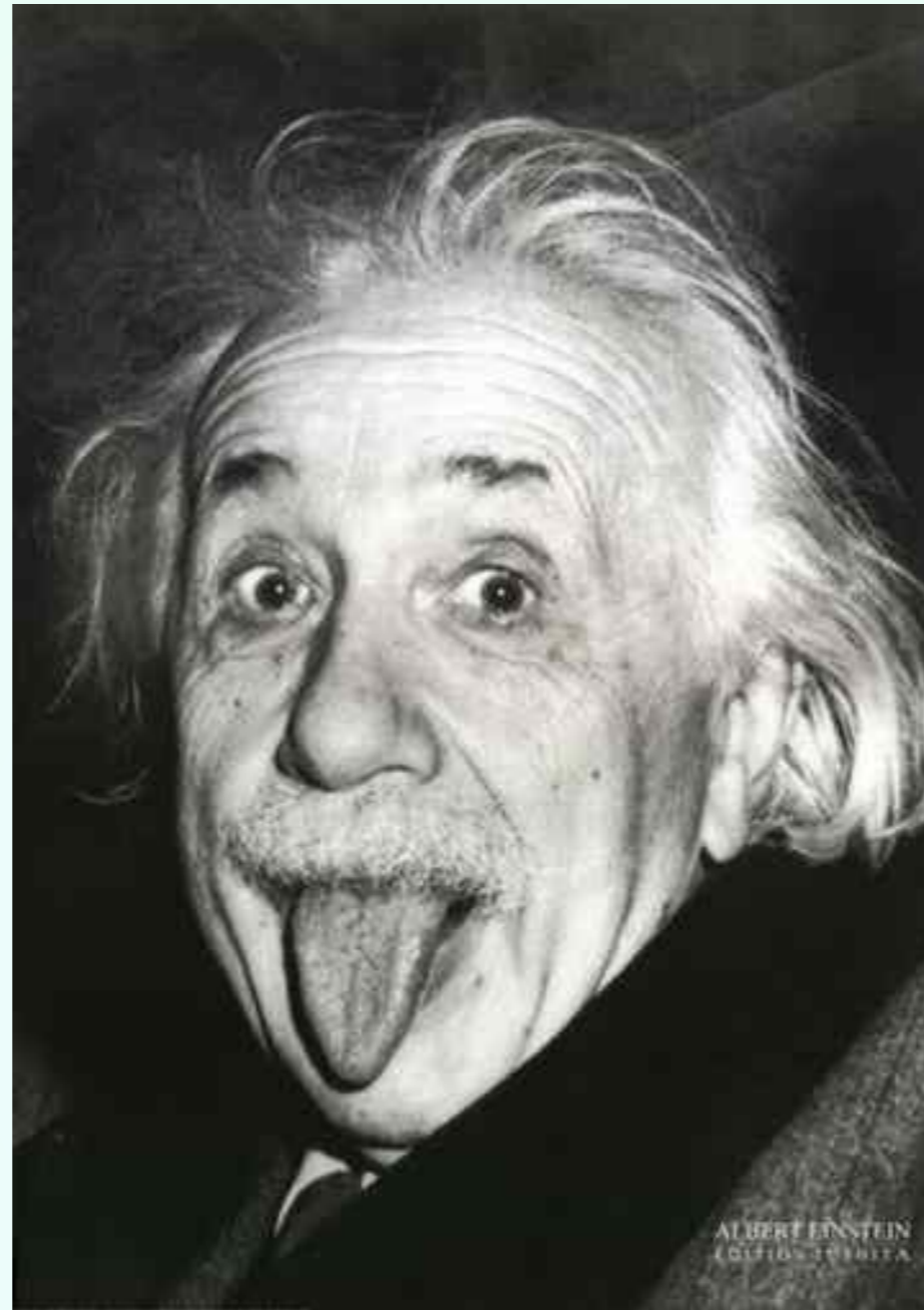
¿Por qué hay (sólo) tres generaciones?

Algunas de estas nuevas partículas pueden explicar qué es la Materia Oscura y/o la Energía Oscura?



¿Cómo podemos introducir la gravedad en la descripción del Modelo Estándar?  
(¿Teoría de cuerdas?)





**“Soy simplemente un  
hombre curioso”**



**¡Muchas gracias!**



# Higgs in dos fotones

