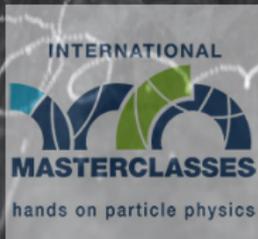
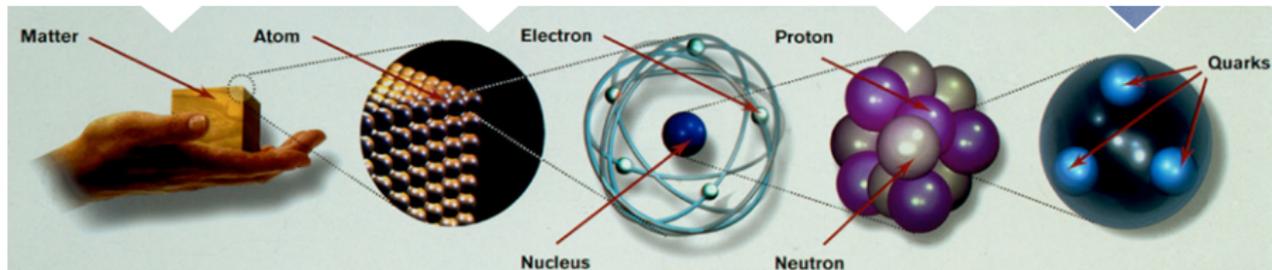


# Física de Partículas y Astropartículas



# Descubriendo lo más pequeño

- ▶ La física de partículas se encarga de estudiar lo más pequeño que conocemos: **las partículas elementales**.



1 cm =  $10^{-2}$  m

$10^{-6}$  cm

$10^{-10}$  m

$10^{-15}$  m

$< 10^{-18}$  m

- ▶ ¡Son escalas con unos 15 órdenes de magnitud menores de las escalas con las que estamos habituados!

# Un paréntesis sobre unidades

- ▶ Los físicos de partículas trabajamos en unas unidades especiales.
- ▶ Medimos energías en electronvoltios, eV, y sus múltiplos, ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) que es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado con una diferencia de potencial de 1 V.  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .
- ▶ Tomamos la velocidad de la luz igual a 1:  $c = 1$ , lo que significa que **masa y energía tienen las mismas unidades**.  $E = mc^2$ .

# Un paréntesis sobre unidades

- ▶ Los físicos de partículas trabajamos en unas unidades especiales.
- ▶ Medimos energías en electronvoltios, eV, y sus múltiplos, ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) que es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado con una diferencia de potencial de 1 V.  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .
- ▶ Tomamos la velocidad de la luz igual a 1:  $c = 1$ , lo que significa que **masa y energía tienen las mismas unidades**.  $E = mc^2$ .

## Ejercicio

Un electrón tiene una masa de  $m_e = 0.511 \text{ MeV}$ . ¿Cómo calculamos la masa en unidades del S.I.?

# Un paréntesis sobre unidades

- ▶ Los físicos de partículas trabajamos en unas unidades especiales.
- ▶ Medimos energías en electronvoltios, eV, y sus múltiplos, ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) que es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado con una diferencia de potencial de 1 V.  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .
- ▶ Tomamos la velocidad de la luz igual a 1:  $c = 1$ , lo que significa que **masa y energía tienen las mismas unidades**.  $E = mc^2$ .

## Ejercicio

Un electrón tiene una masa de  $m_e = 0.511 \text{ MeV}$ . ¿Cómo calculamos la masa en unidades del S.I.?

## Solución

$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ , lo pasamos todo al S.I. y hemos acabado.

# Un paréntesis sobre unidades

- ▶ Los físicos de partículas trabajamos en unas unidades especiales.
- ▶ Medimos energías en electronvoltios, eV, y sus múltiplos, ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) que es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado con una diferencia de potencial de 1 V.  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .
- ▶ Tomamos la velocidad de la luz igual a 1:  $c = 1$ , lo que significa que **masa y energía tienen las mismas unidades**.  $E = mc^2$ .

## Ejercicio

Un electrón tiene una masa de  $m_e = 0.511 \text{ MeV}$ . ¿Cómo calculamos la masa en unidades del S.I.?

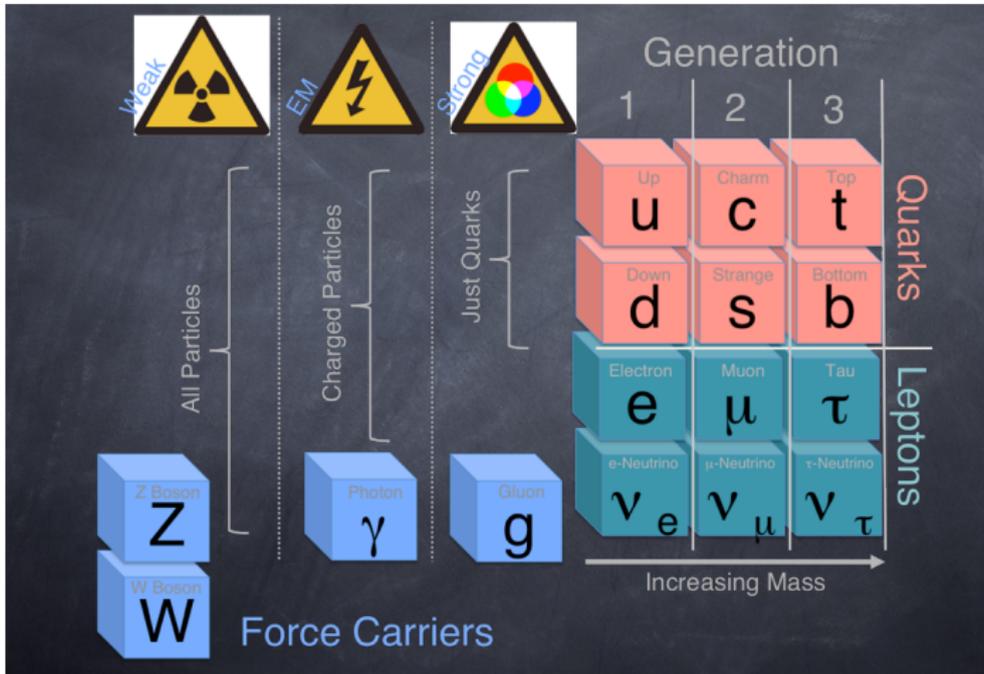
## Solución

$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ , lo pasamos todo al S.I. y hemos acabado.

- ▶ El momento y la energía también tienen las mismas unidades. La energía de un fotón es  $E = pc$ .
- ▶ También tomamos  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1$ .

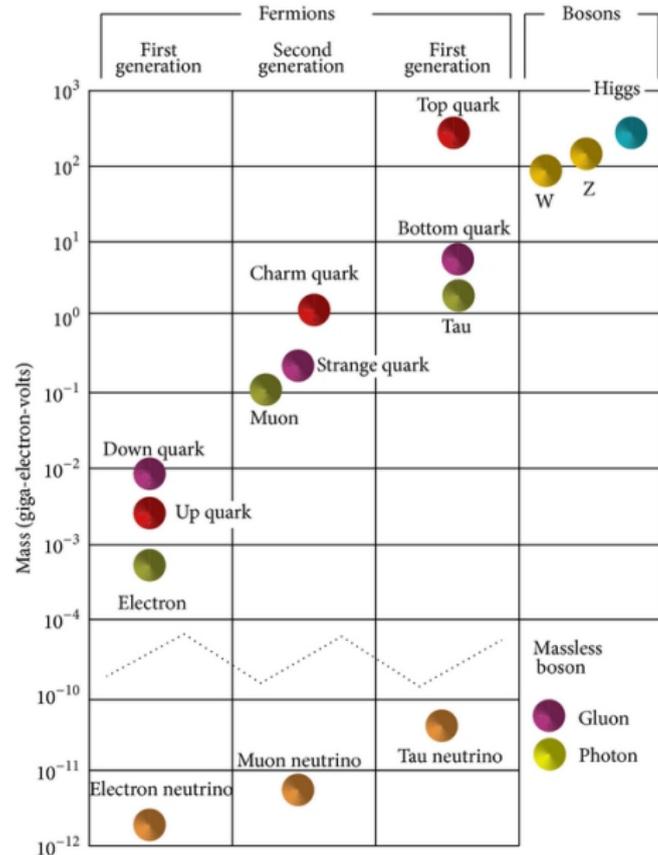
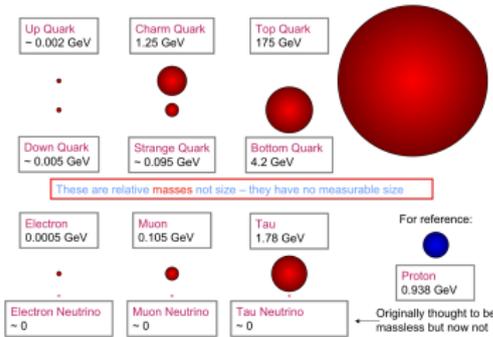
# El Modelo Estándar

- ▶ Es la teoría que explica lo que sabemos sobre las partículas elementales y sus interacciones.



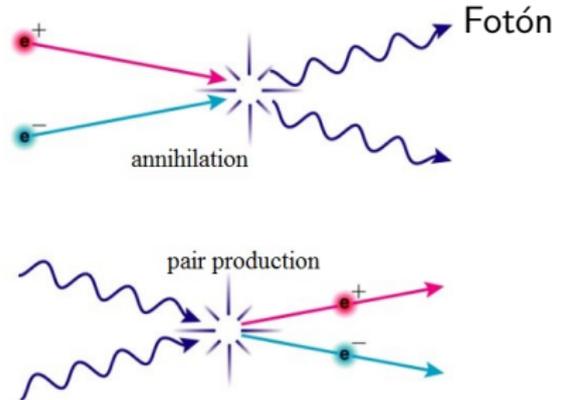
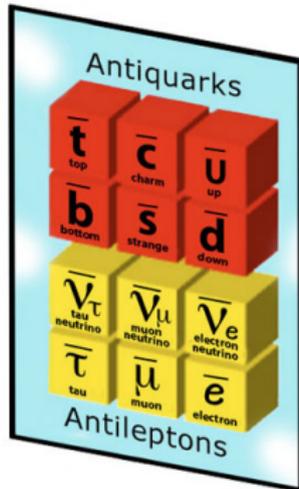
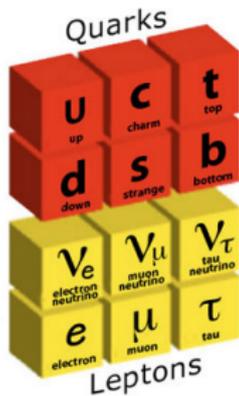
# Masas de las partículas elementales

- ▶ La masa varía desde los neutrinos, con menos de una millonésima de la masa de un electrón hasta la masa del quark top, comparable a la de un átomo de oro.



# El reflejo de las partículas: las antipartículas

- ▶ Para cada partícula existe su *antipartícula*, que tiene las mismas propiedades salvo la carga, que es de signo contrario.
- ▶ Por ejemplo, el electrón  $e^-$  tiene como antipartícula al positrón  $e^+$ .

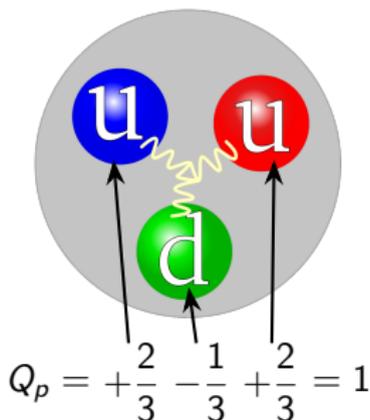


- ▶ Una partícula y su antipartícula pueden aniquilarse y liberar energía en forma de fotones según  $E = mc^2$ .

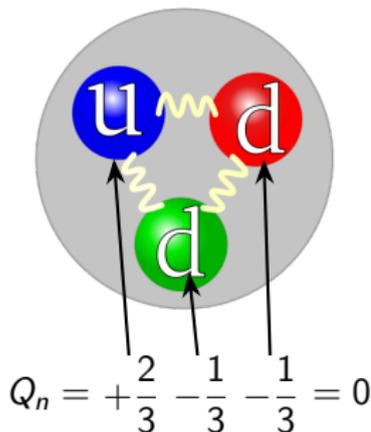
# Los dos hadrones más famosos

- ▶ Algunas partículas elementales pueden encontrarse formando parte de otras partículas.
- ▶ Un ejemplo de esto son los hadrones, que están formados por quarks o antiquarks.
- ▶ A su vez los hadrones se dividen en bariones (3 quarks o 3 antiquarks) y mesones (un quark y un antiquark)

**Protón**

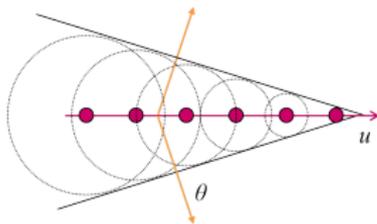
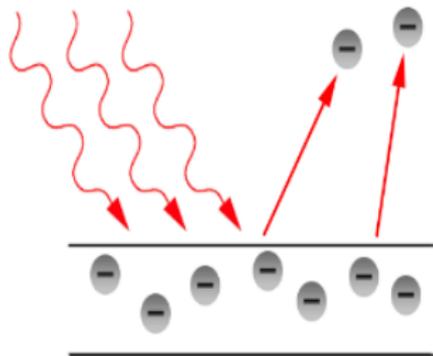


**Neutrón**

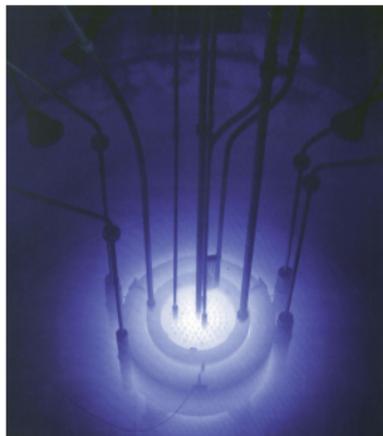


# ¿Cómo estudiamos las partículas?

- ▶ Siempre con métodos indirectos, midiendo las consecuencias de la interacción de las partículas con la materia.

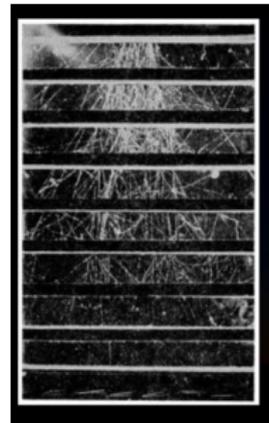
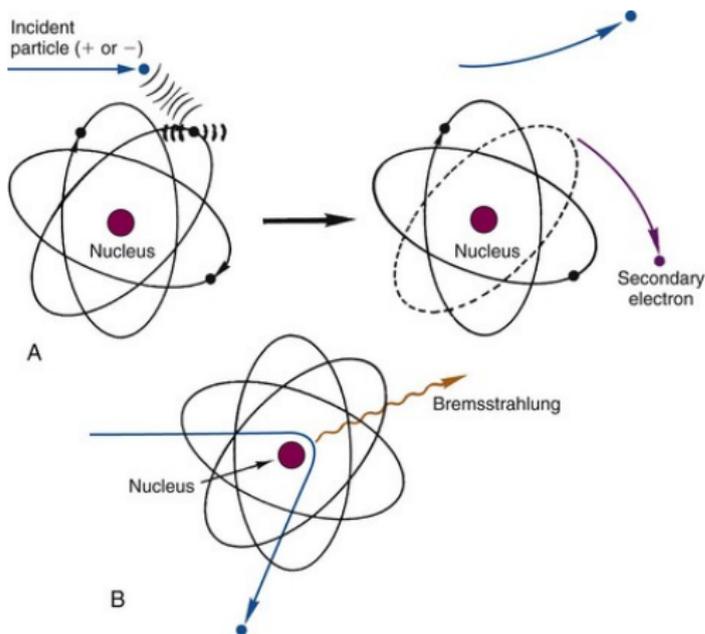


- ▶ Los fotones pueden detectarse por el efecto fotoeléctrico.
- ▶ Una partícula que viaja a una velocidad mayor que la de la luz **en un medio** emite radiación Cherenkov.



# ¿Cómo estudiamos las partículas?

- ▶ Las partículas cargadas ionizan el medio por el que pasan.
- ▶ Este fenómeno se puede aprovechar de distintas formas, como recogiendo la carga negativa (cámara de hilos) o aprovechando que un gas se puede condensar cerca de los iones (cámara de niebla).



- ▶ Una partícula acelerada pierde energía que emite en forma de radiación (fotones).

# Aceleradores de partículas

- ▶ Con ayuda de campos eléctricos y magnéticos, las partículas **cargadas** son aceleradas.

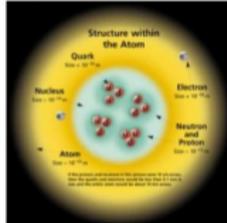
Visible light



X-ray

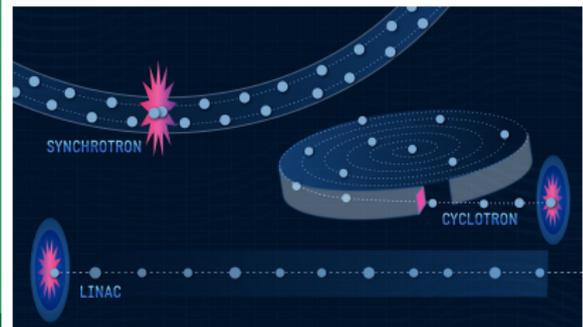


Particle accelerators



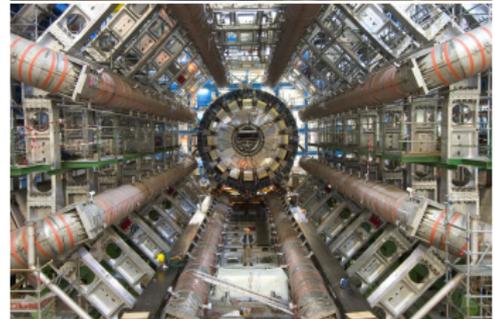
Principio físico:

$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$



# Aceleradores de partículas

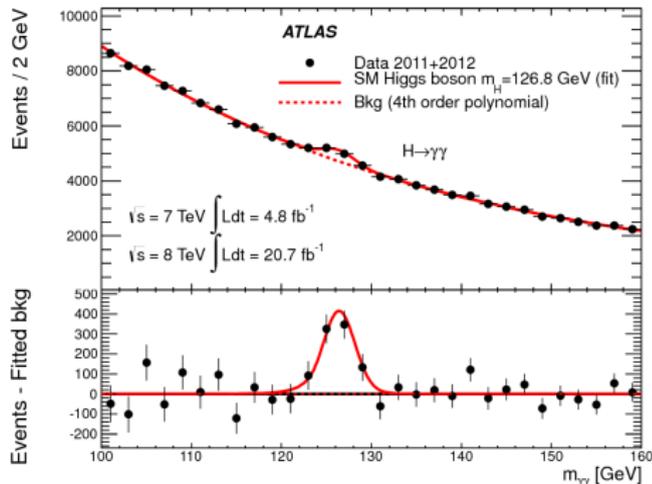
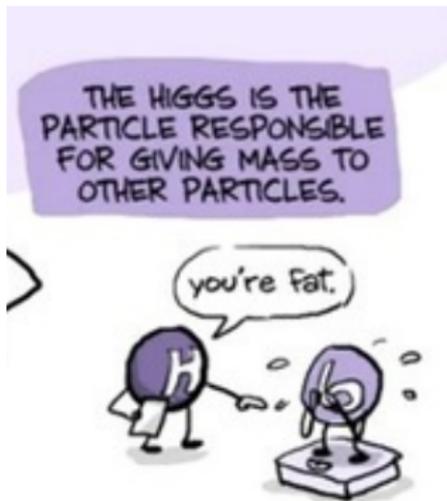
- ▶ El más grande y potente es el LHC (Large Hadron Collider).



- ▶ 7 TeV de energía por haz ( $7 \cdot 10^{12}$  eV)
- ▶  $10^{11}$  protones por paquete ( $\sim 10000$  vueltas por segundo)
- ▶ Una colisión cada 25 ns. Temperatura: 1.9 K. Consumo:  $\sim 1000$  GWh, como el consumo doméstico de unas 500000 casas.
- ▶ En unas 10 horas los protones podrían ir y volver a Neptuno.

# ¡Una nueva partícula!

- ▶ En el LHC se ha descubierto el **bosón de Higgs** 
- ▶ Su existencia se predice en el año 1964.
- ▶ Esta partícula es responsable de que las demás partículas tengan masa.

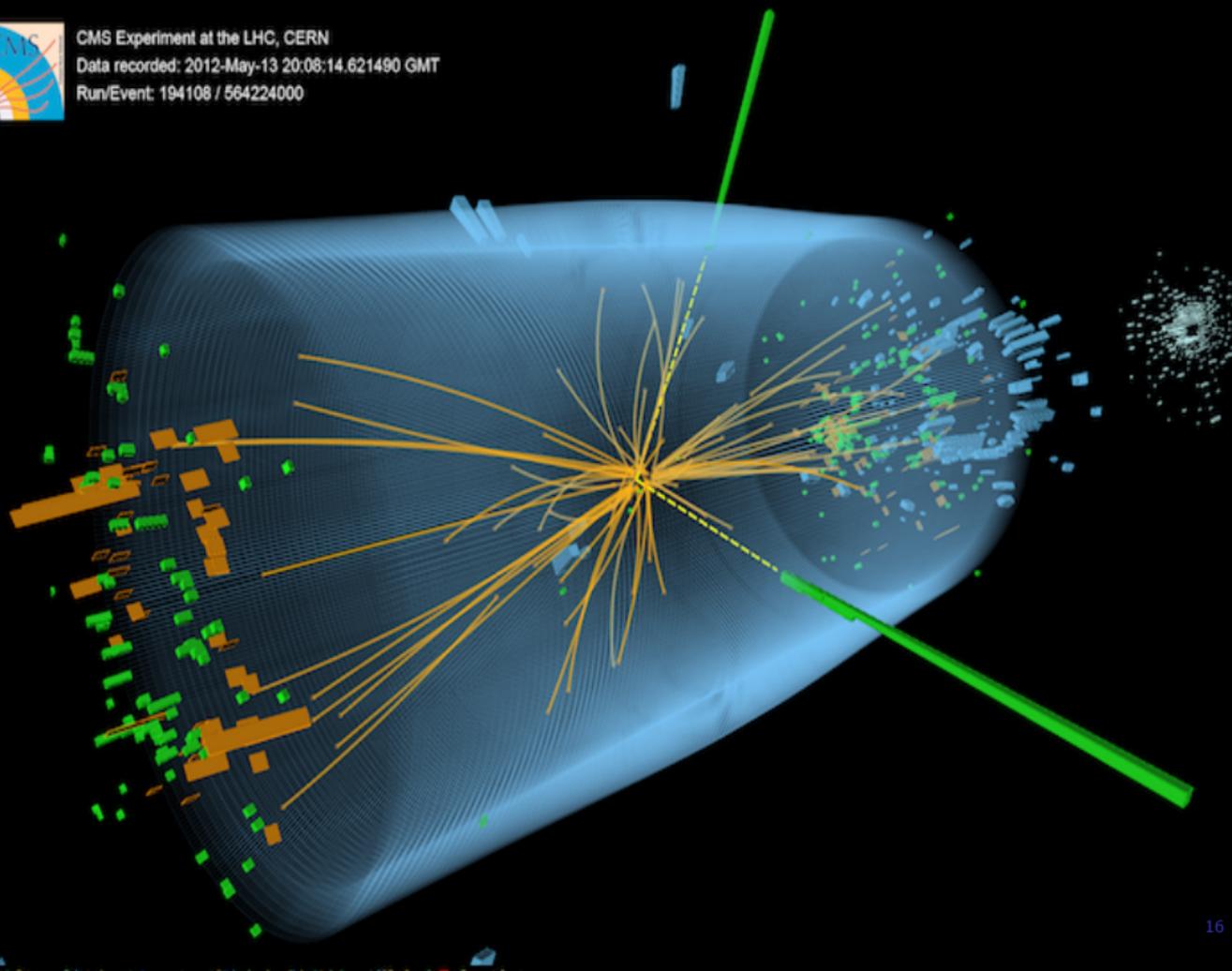




CMS Experiment at the LHC, CERN

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

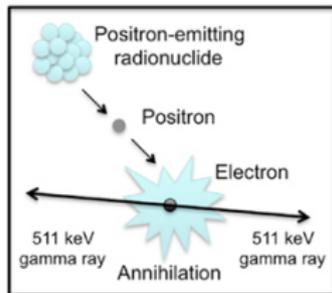
Run/Event: 194108 / 564224000



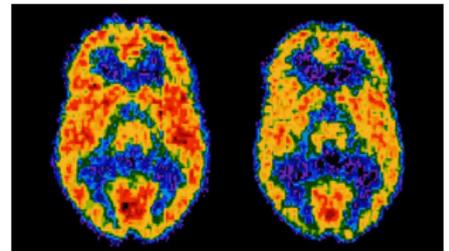
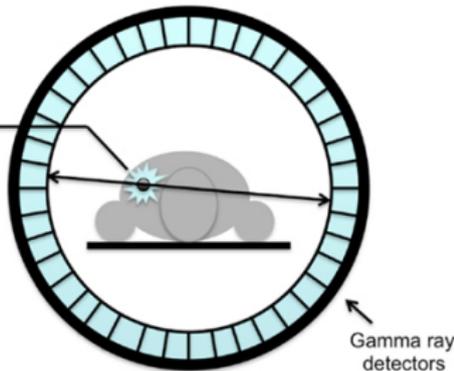
# Otros descubrimientos

- ▶ El bosón de Higgs no es lo único que se ha descubierto en el CERN.
- ▶ La web o World Wide Web (WWW) se inventó en el CERN por la necesidad que los científicos tenían de intercambiar información.
- ▶ En 1976 ya se usaban las primeras pantallas táctiles en el CERN.
- ▶ Un gran avance de la física de partículas y la medicina es la Tomografía por Emisión de Positrones (PET).

Positron emission and positron-electron annihilation

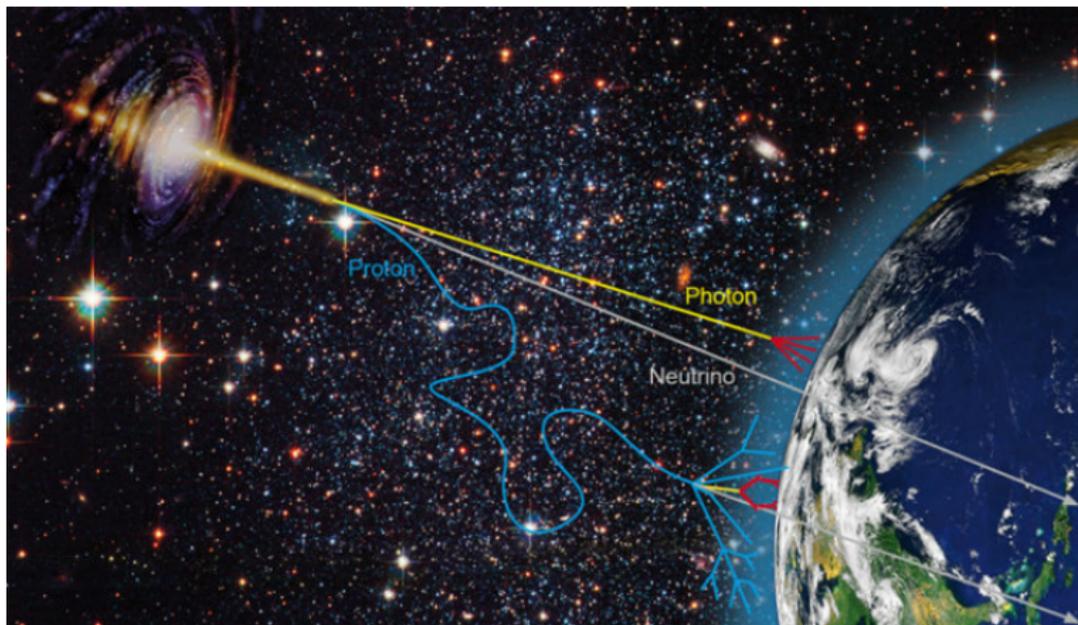


PET scanner



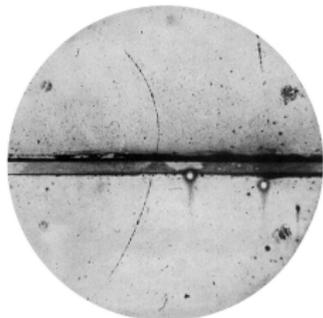
# Nuevos mensajeros del cosmos

- ▶ Hasta hace poco, la mayoría de información que tenemos del universo se ha obtenido en detectores que recogen luz.
- ▶ Podemos obtener información mediante muchos mensajeros, protones, neutrinos, fotones, ondas gravitacionales...



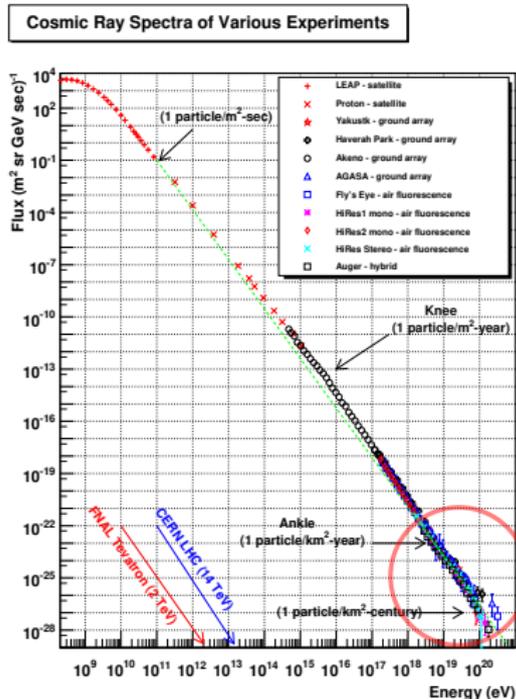
# Rayos cósmicos

- ▶ Son partículas que llegan a la Tierra desde el espacio.
- ▶ Se descubren en 1912 y muchas de las partículas elementales que conocemos hoy se han descubierto en experimentos de rayos cósmicos.
- ▶ La imagen de la derecha es el primer positrón (o antielectrón), descubierto en una **cámara de niebla**.
- ▶ Dentro de la cámara hay un campo magnético, que curva la trayectoria de la partícula cargada.



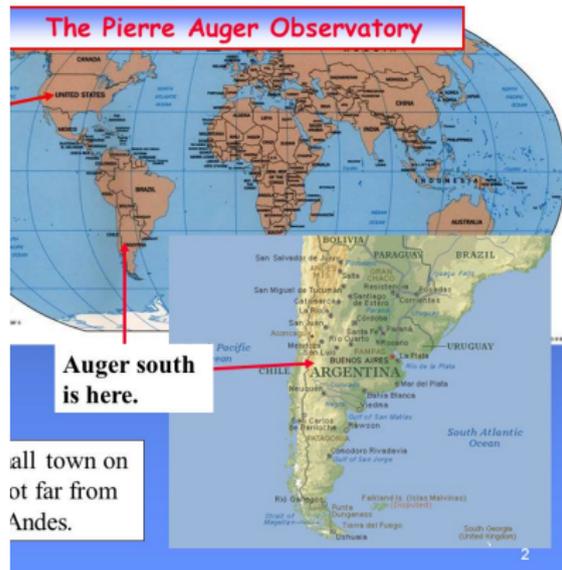
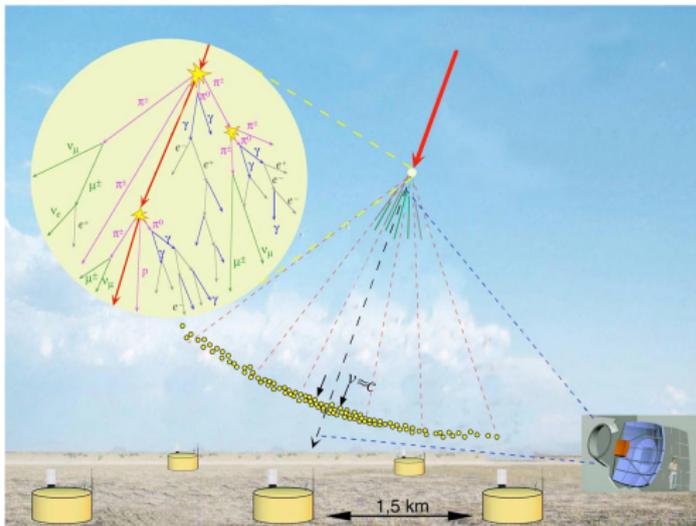
# Un gran problema

- ▶ Cuanto mayor es la energía menor es el flujo.
- ▶ ¡Los rayos cósmicos más energéticos llegan con un flujo de una partícula por  $\text{km}^2$  y por siglo!
- ▶ La solución es construir detectores que ocupen una gran superficie.
- ▶ Hay algunos experimentos en satélites, pero estos no miden los de mayor energía.



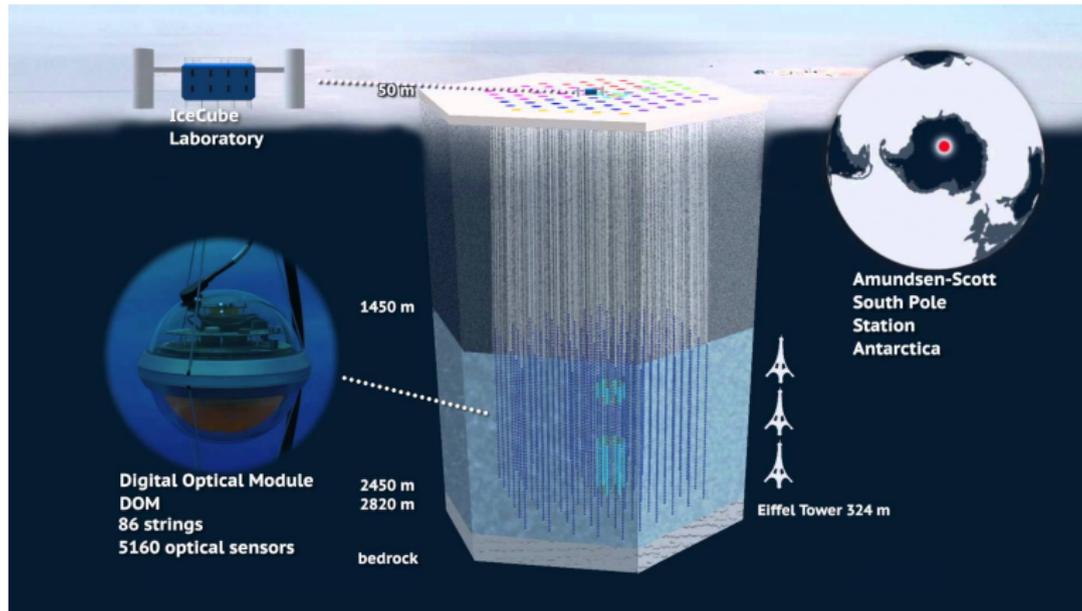
# El Observatorio Pierre Auger

- ▶ Es el experimento de rayos cósmicos más grande del mundo.
- ▶ Con sus 1600 detectores de superficie, ocupa 3000 km<sup>2</sup>. (isla de Mallorca → 3600 km<sup>2</sup>)
- ▶ Es un detector híbrido.



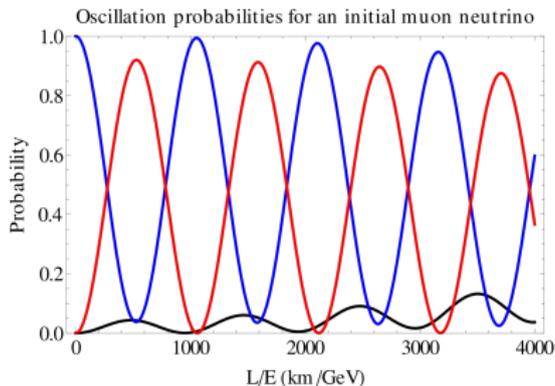
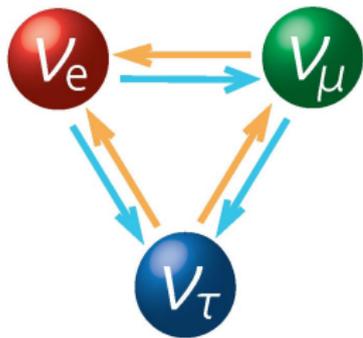
# Los neutrinos

- ▶ Son unas partículas muy especiales: sólo interaccionan débilmente.
- ▶ Por cada  $\text{cm}^2$  nos atraviesan cientos de millones de neutrinos.
- ▶ Ellos no se enteran, ¡y (por suerte) nosotros tampoco!



# Oscilaciones de neutrinos

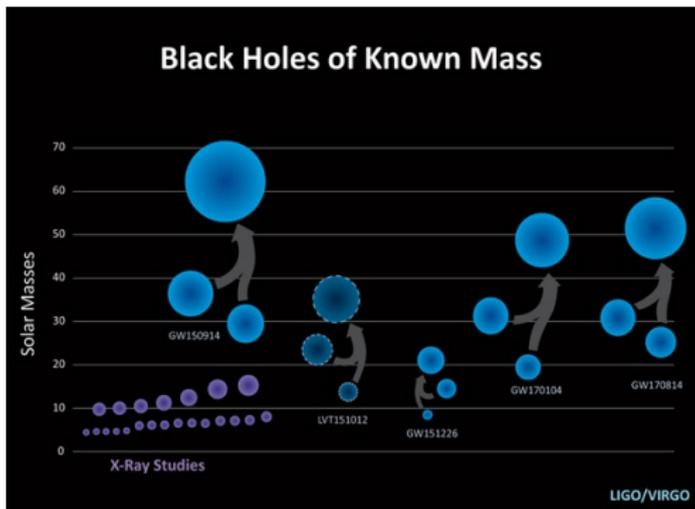
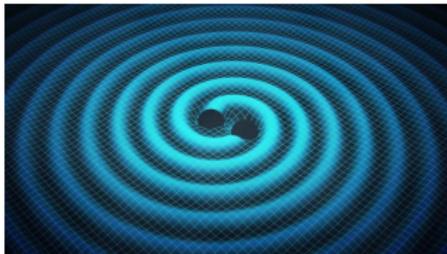
- ▶ Se ha descubierto que los neutrinos pueden **oscilar** de un tipo a otro.
- ▶ Esto significa que la probabilidad de que un neutrino sea del mismo tipo cambia con el tiempo.



- ▶ Este descubrimiento fue galardonado con el Nobel en 2015. 
- ▶ Las oscilaciones implican que los neutrinos tienen masa, en contra de lo que se pensaba hasta entonces.

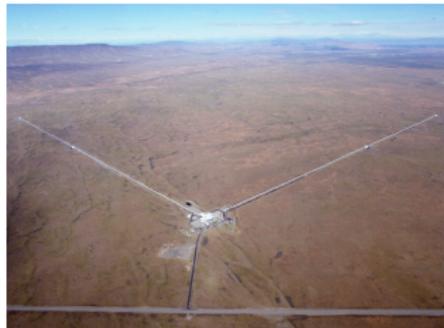
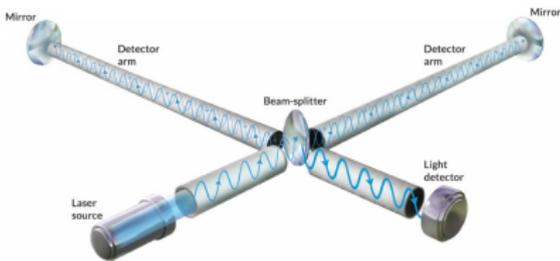
# Ondas gravitacionales

- ▶ La teoría de la relatividad general de Einstein predice **ondas gravitacionales**.
- ▶ Estas ondas son perturbaciones en el espacio-tiempo causadas por fenómenos muy energéticos en el universo, como una colisión de agujeros negros.
- ▶ Las ondas se propagan a la velocidad de la luz y pueden darnos información sobre su procedencia.

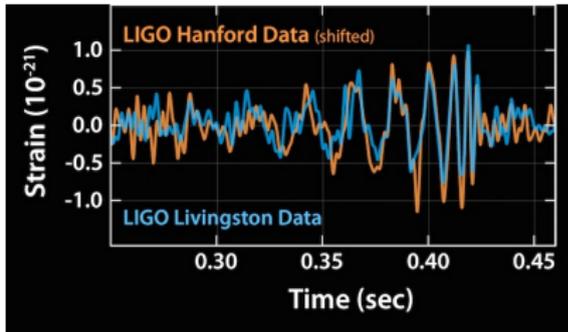
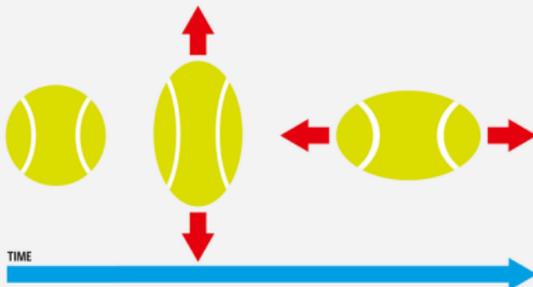


# Ondas gravitacionales: LIGO

- ▶ LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) ha confirmado la existencia de las ondas gravitacionales. 
- ▶ Es capaz de detectar cambios de longitud  $\sim 10^{-19}$  m.



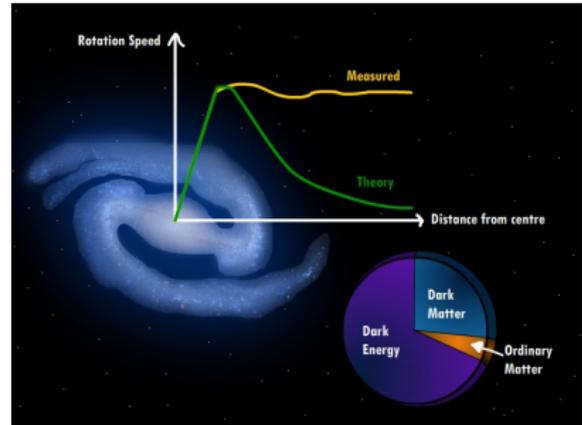
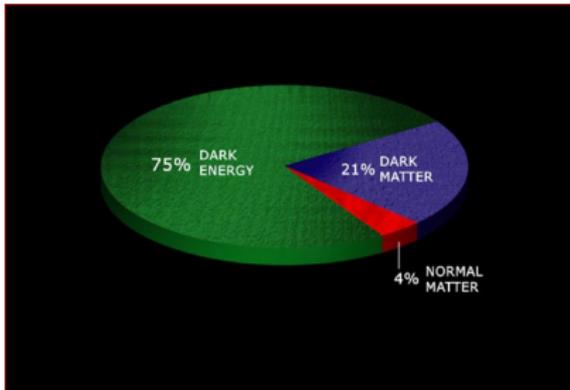
RIDING A GRAVITATIONAL WAVE



**Entonces, ¿queda algo por descubrir?**

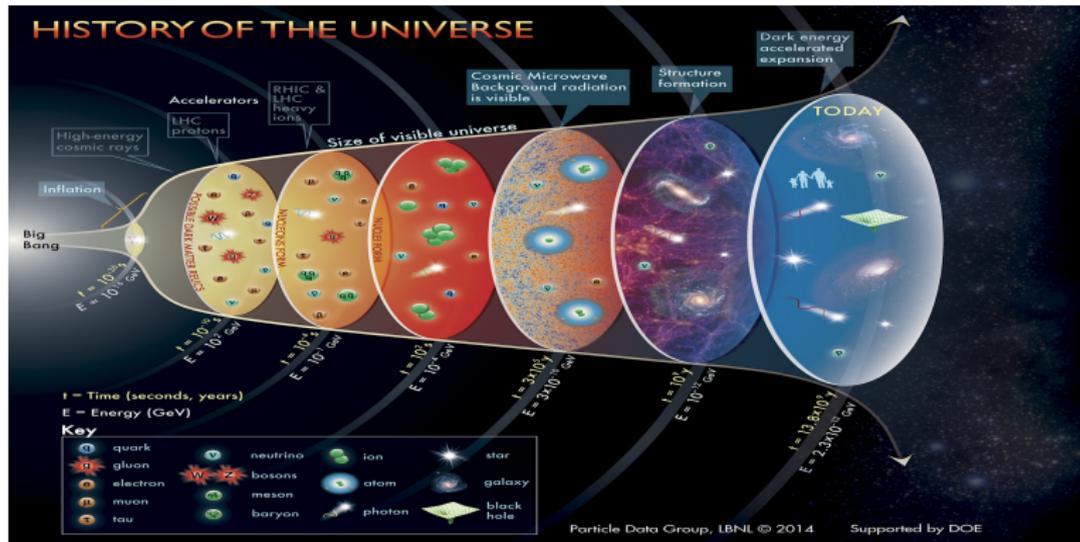
# ¿Qué es la Materia Oscura?

- ▶ Sólo un 4% de la materia y energía del universo es como la que conocemos.
- ▶ Las medidas de materia no cuadran con la teoría.
- ▶ Tiene que haber materia que no vemos, “materia oscura”.



# Y más preguntas: Física más allá del Modelo Estándar

- ▶ ¿Cuál es la siguiente teoría?
- ▶ ¿Qué masa tienen los neutrinos? ¿Son los neutrinos su propia antipartícula?
- ▶ ¿Por qué todo el universo que vemos está hecho de materia y no de antimateria?



Family I

Family II

Family III

# Quarks



up  
u



charm  
c



top  
t



down  
d



strange  
s



bottom  
b

# Leptons



electron  
neutrino  
 $\nu_e$



muon  
neutrino  
 $\nu_\mu$



tau  
neutrino  
 $\nu_\tau$



electron  
 $e^-$



muon  
 $\mu$



tau  
 $\tau$