

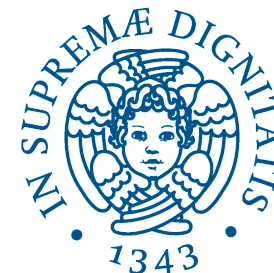


# Una breve introduzione alla Fisica delle Particelle

John Walsh

INFN Sezione di Pisa

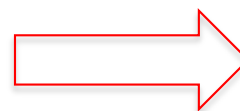
International Masterclass, 12 Marzo 2025



# Scopo della fisica delle particelle

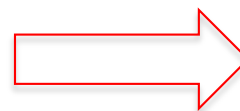
- Studiare l'universo al livello più fondamentale, più elementare

- Quali sono i costituenti della materia?



**PARTICELLE**  
**ELEMENTARI**

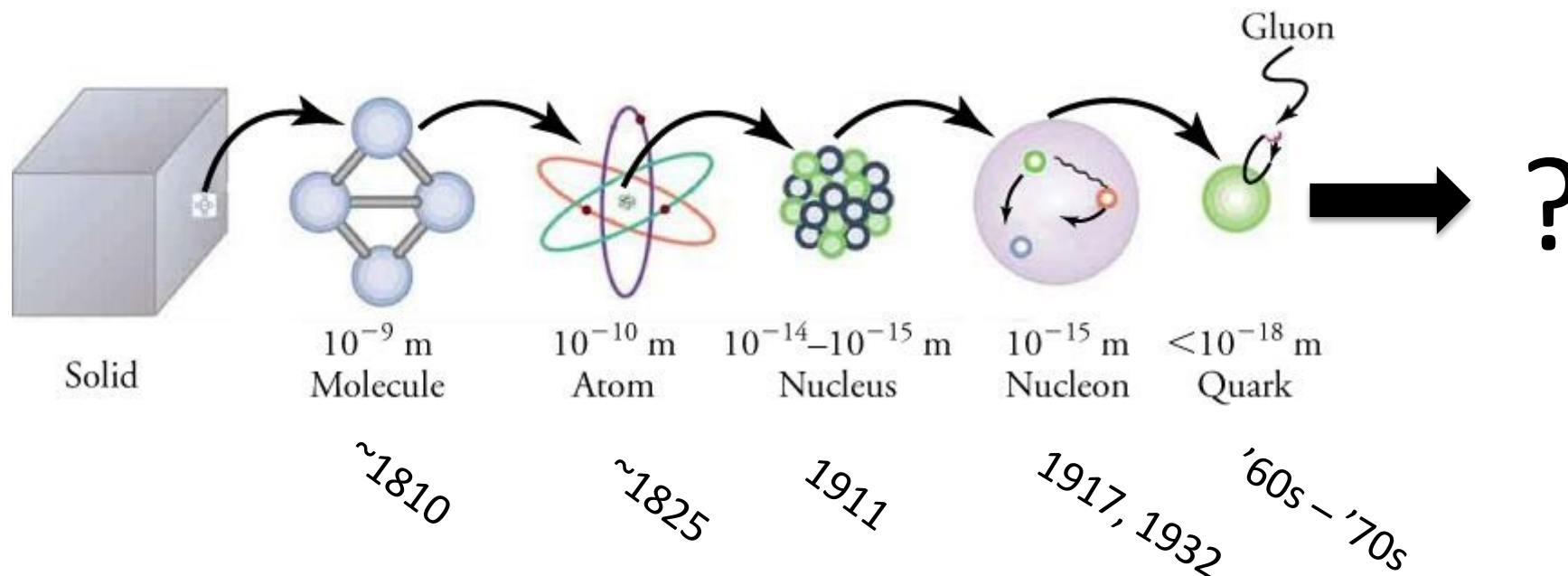
- Come si possono descrivere le interazioni tra questi costituenti?



**FORZE**  
**FONDAMENTALI**

# Cercare gli oggetti più piccoli...

- Storicamente, lo studio del piccolo ha spesso portato grandi progressi nella nostra comprensione dell'universo
- Quest' approccio continua oggi con acceleratori di particelle come l' LHC (Large Hadron Collider)

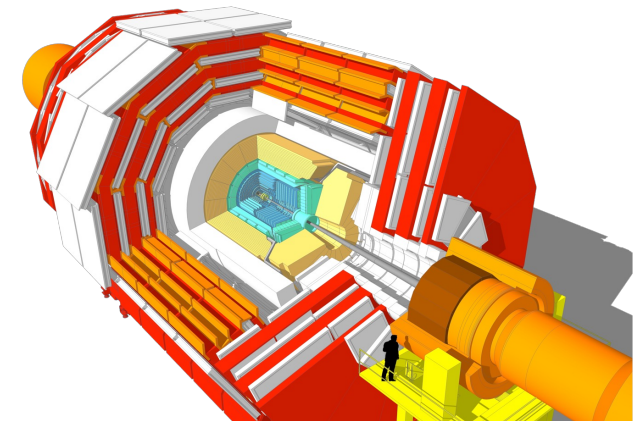


# Oggetti piccoli e grandi:

- **Big Bang Theory:** l'universo che vediamo oggi dipende fortemente dalle particelle create al Big Bang e le interazioni tra loro
- Queste particelle continuano ad arrivare sulla Terra in forma di **raggi cosmici**, dove gli scienziati le possano studiare
- Ma possiamo anche creare le particelle in laboratorio – **Acceleratori di particelle**, per esempio **LHC: Large Hadron Collider**



Rivelatore di particelle

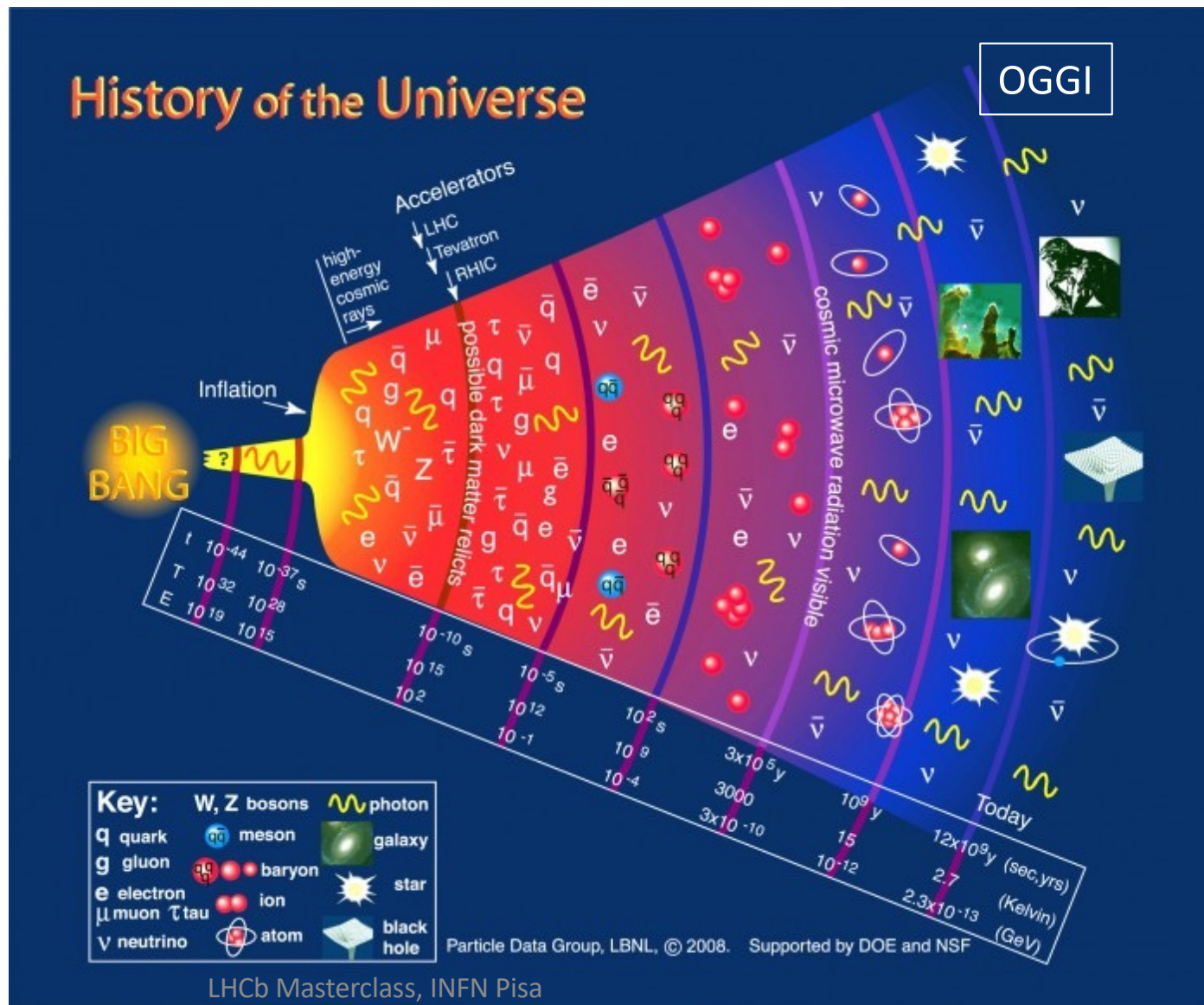


Collisione di 2 protoni



# Creare le condizioni iniziali dell'universo: LHC

- Le collisioni prodotte dal LHC creano le condizioni esistenti  $10^{-10}$  sec dopo il Big Bang



# Teoria v. Esperimenti



**Teorici:** formulare modelli matematici che descrivono le particelle fondamentali e la loro interazioni. Una teoria dovrebbe predire fenomeni che possono essere osservati.

***Oggi siamo fisici sperimentali***

**Sperimentali:** osservare i fenomeni previsti da teoria. Anche meglio: trovare qualcosa che non torna con le teorie esistenti.



# Teoria della fisica delle particelle

- **Modello Standard**

- Descrive tutte le particelle fondamentali
- Descrive come le particelle interagiscono tra di loro tramite le forze fondamentali

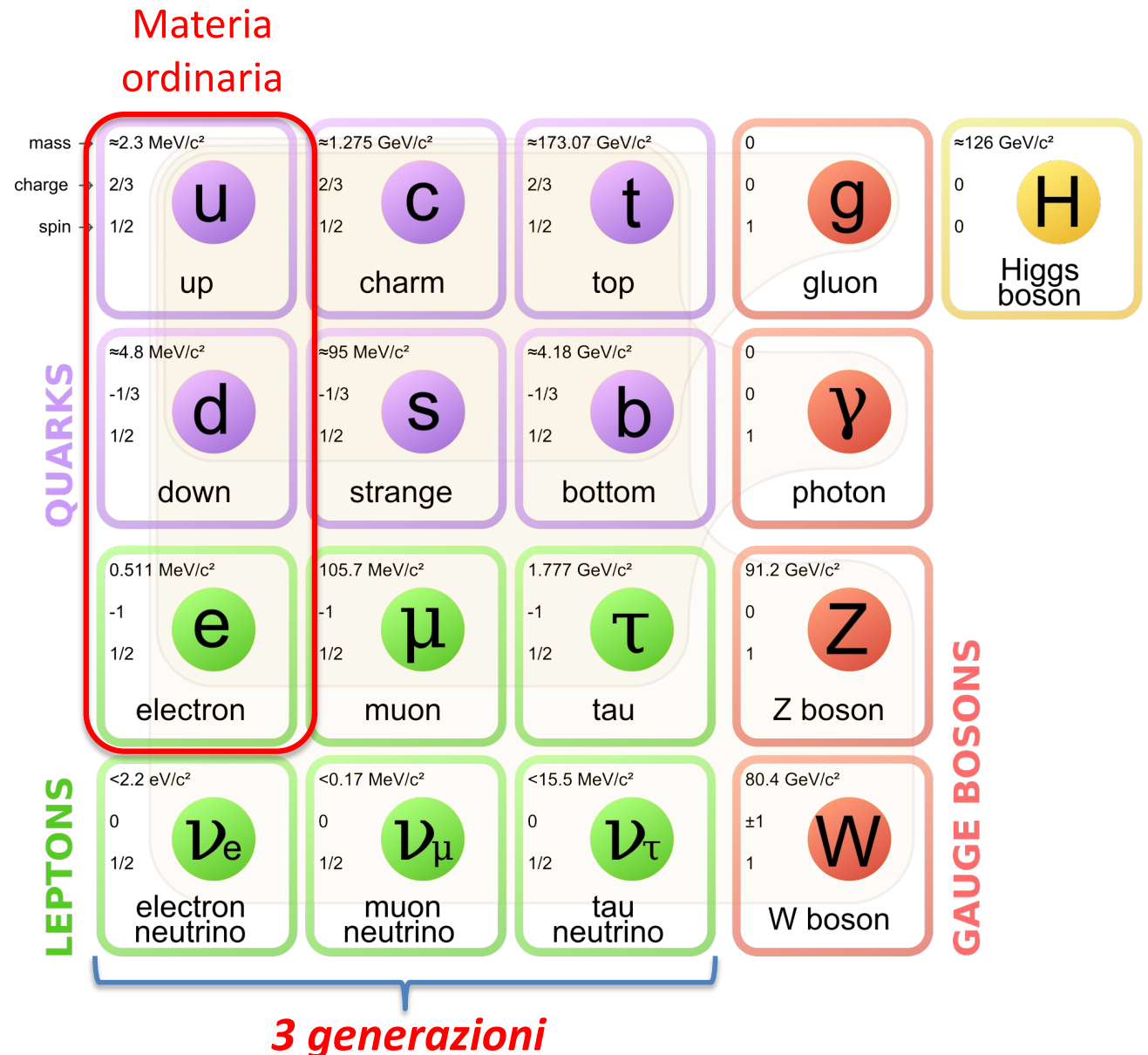
- Sviluppato gradualmente nella seconda metà del secolo scorso

- Successo notevole: *nessun risultato sperimentale fatto finora risulta incompatibile con le previsioni del Modello Standard*

*Migliaia di misure!*

# Le 17 particelle del Modello Standard

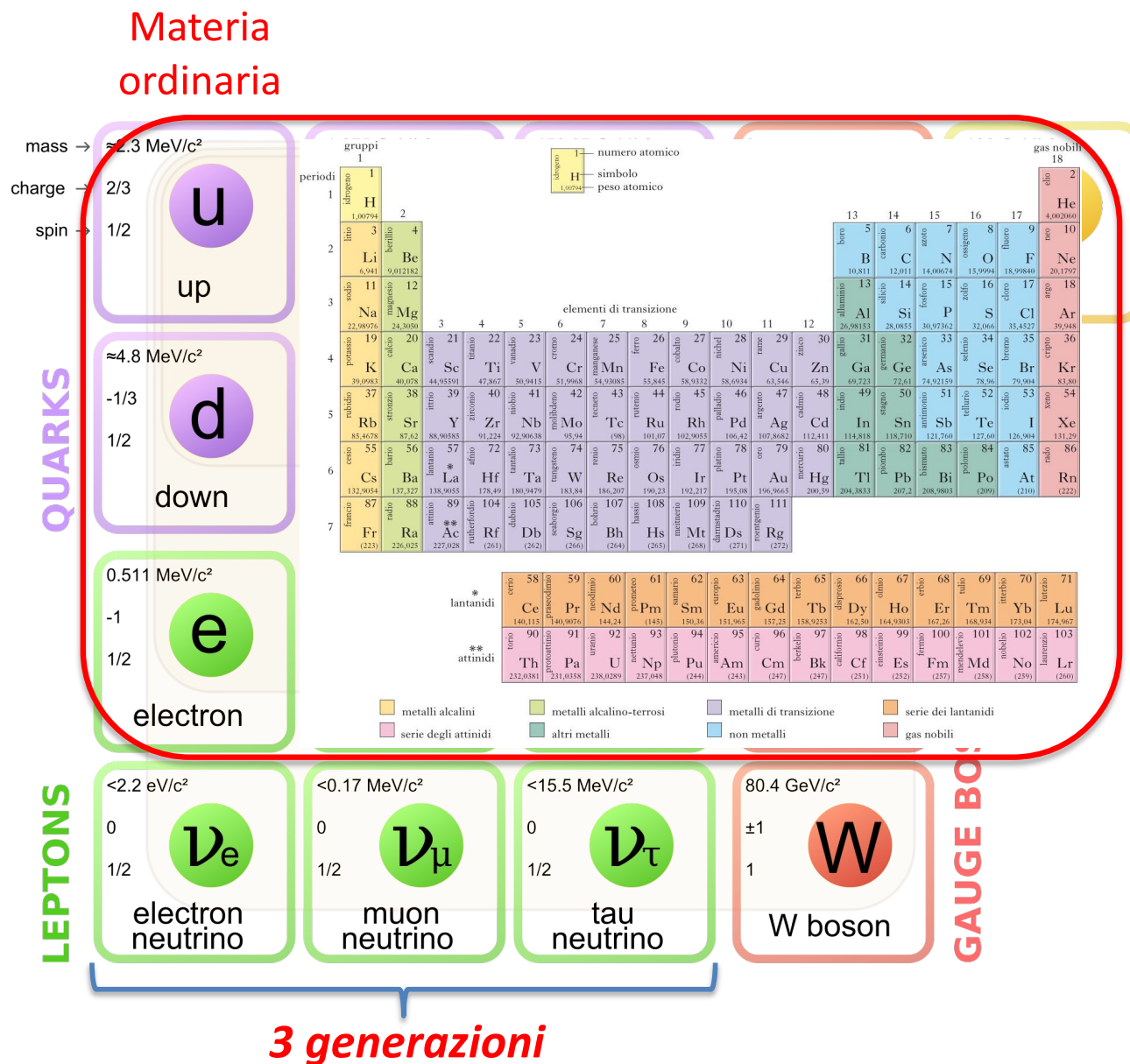
- Divise in **quark**, **leptoni**, **bosoni**
- Solo **3 particelle** (u,d,e) costituiscono la **materia ordinaria**
  - protoni: **uud quarks**
  - neutroni: **ddu quarks**
  - **elettroni**
- Le altre 14 sono **esotiche**, esistevano poco dopo il Big Bang, oggi tipicamente solo in laboratorio
- Eccezioni: **fotoni** (particelle di luce) e **neutrini** (dappertutto, ma invisibili)





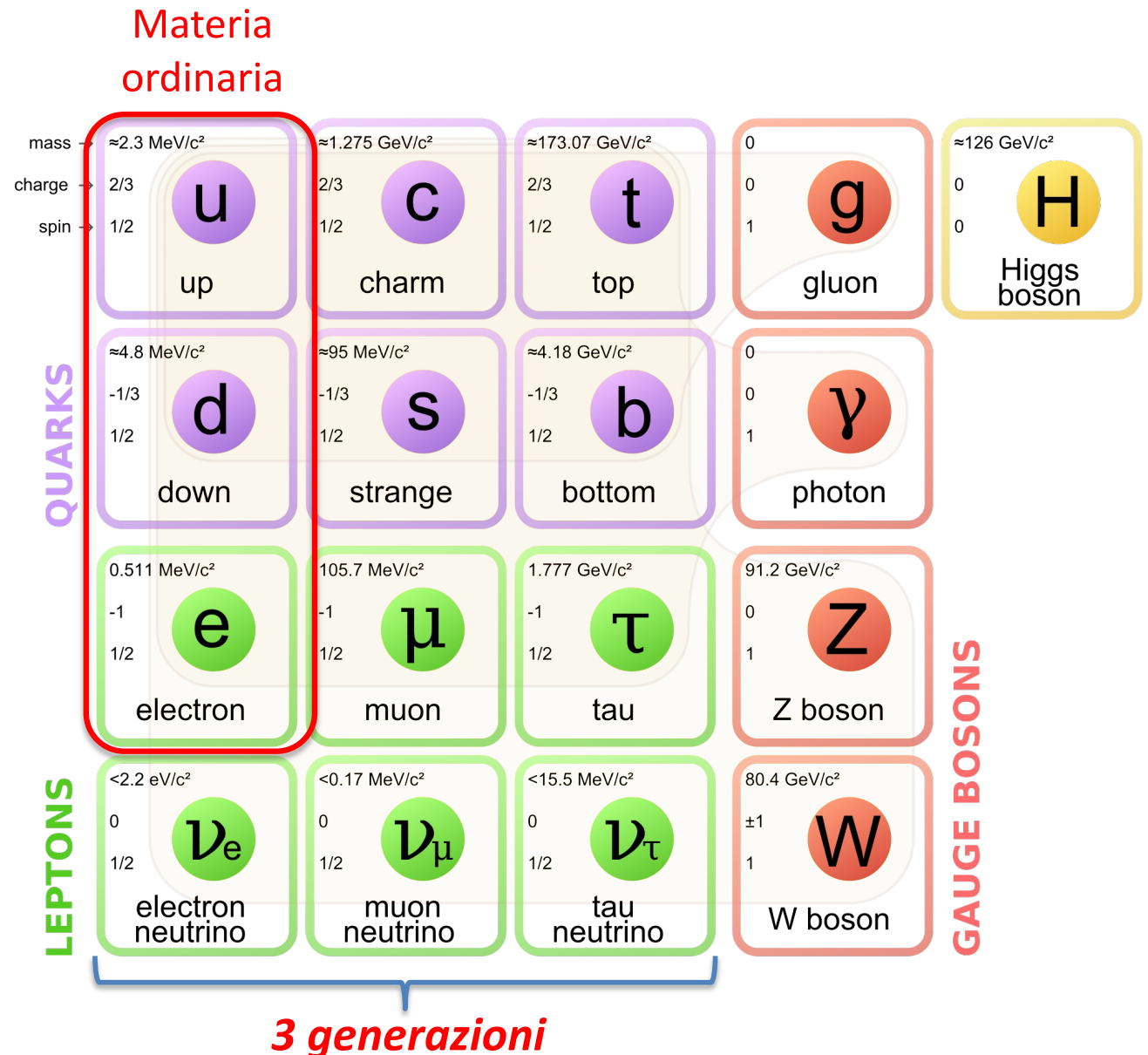
# Le 17 particelle del Modello Standard

- Divise in **quark**, **leptoni**, **bosoni**
- Solo **3 particelle** (u,d,e) costituiscono la **materia ordinaria**
  - protoni: **uud quarks**
  - neutron: **ddu quarks**
  - elettroni**
- Le altre 14 sono **esotiche**, esistevano poco dopo il Big Bang, oggi tipicamente solo in laboratorio
- Eccezioni: **fotoni** (particelle di luce) e **neutrini** (dappertutto, ma invisibili)



# Le 17 particelle del Modello Standard

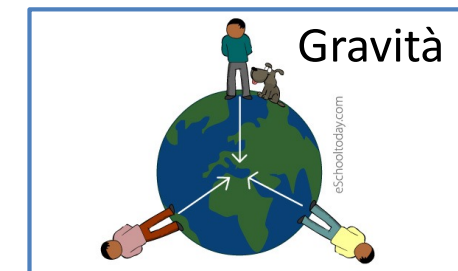
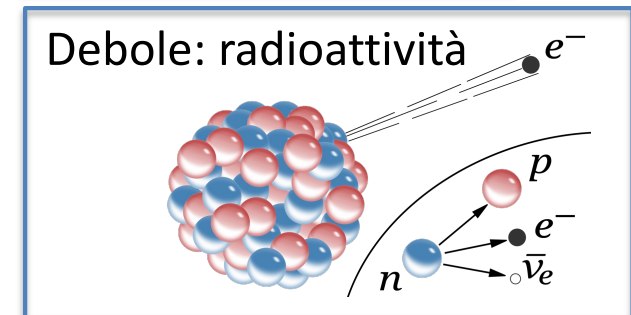
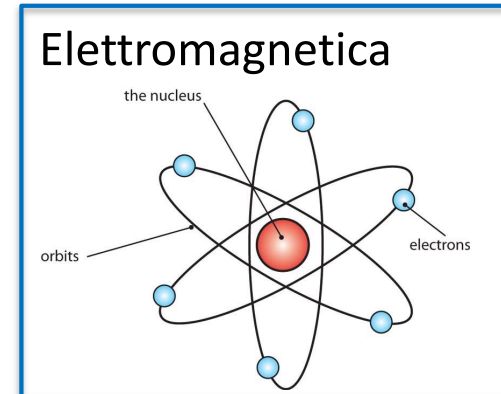
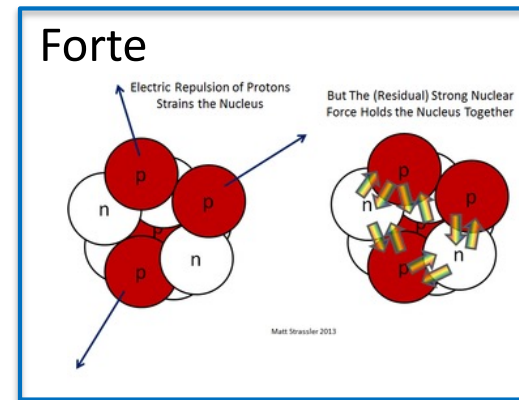
- Divise in **quark**, **leptoni**, **bosoni**
- Solo **3 particelle** (u,d,e) costituiscono la **materia ordinaria**
  - protoni: **uud quarks**
  - neutroni: **ddu quarks**
  - **elettroni**
- Le altre 14 sono **esotiche**, esistevano poco dopo il Big Bang, oggi tipicamente solo in laboratorio
- Eccezioni: **fotoni** (particelle di luce) e **neutrini** (dappertutto, ma invisibili)



# Le 4 forze fondamentali

Forza	Intensità relativa	Particelle coinvolte	Particella mediatrice	Esempio
Forte	1	quarks	gluone	protoni e neutroni nel nucleo
Elettromagnetica	$10^{-2}$	particelle cariche	fotone	elettroni nell'atomo
Debole	$10^{-8}$	quarks & leptoni	bosoni W, Z	radioattività
Gravità	$10^{-39}$	particelle massive	gravitone	peso sulla Terra

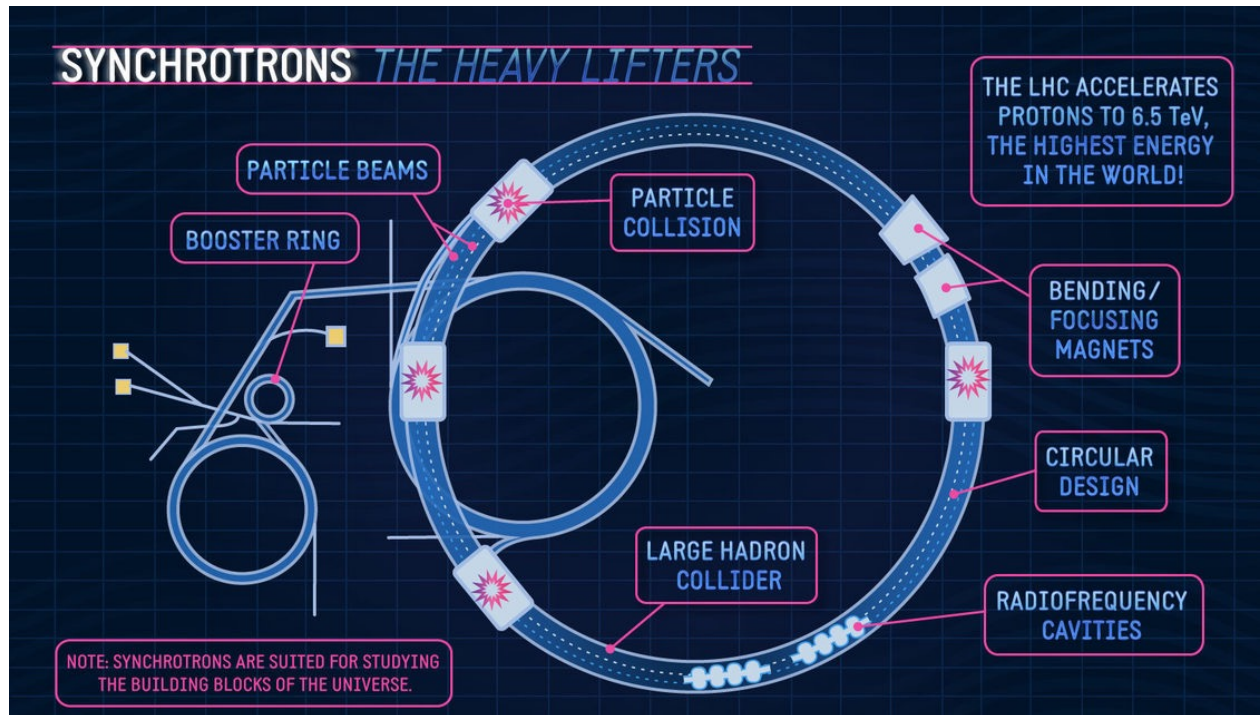
Incluse nel Modello Standard



# Large Hadron Collider (LHC)



# Large Hadron Collider: acceleratore di particelle



- I protoni sono accelerati da potenti campi elettrici. Due fasci di protoni girano in senso opposto in traiettorie circolari.
- Potenti magneti dipoli superconduttori mantengono i protoni nella loro orbita circolare.
- Elevato consumo energetico per produrre i campi elettrici e magnetici: quanto una città come Firenze(!)
- Guidati da magneti, i protoni si scontrano in solo 4 punti diversi intorno all' anello. Qui sono posti i 4 esperimenti.

# THE LARGE HADRON COLLIDER BY THE NUMBERS

**27KM**  
(16 MILES)

IN CIRCUMFERENCE

**1 PETABYTE-**  
**PER-SECOND**

IN RAW DATA GENERATED  
BY LHC EXPERIMENTS

**1 BILLION**  
**COLLISIONS**

OCCUR PER SECOND

**100K**

TIMES HOTTER THAN  
THE SUN'S CORE,

HEAT GENERATED  
BY COLLISIONS

**99.**  
**99999999%**  
SPEED OF LIGHT

ACHIEVED BY PARTICLES

**1.9 KELVIN**  
(-271.3 DEGREES  
CELSIUS)

INTERNAL OPERATING  
TEMPERATURE

**120,000**  
**CORES RUNNING**

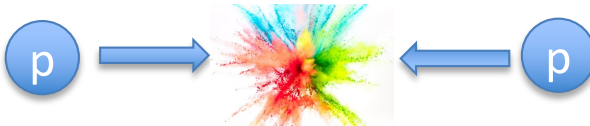
CERN'S OPENSTACK CLOUD  
ACROSS TWO DATA CENTERS

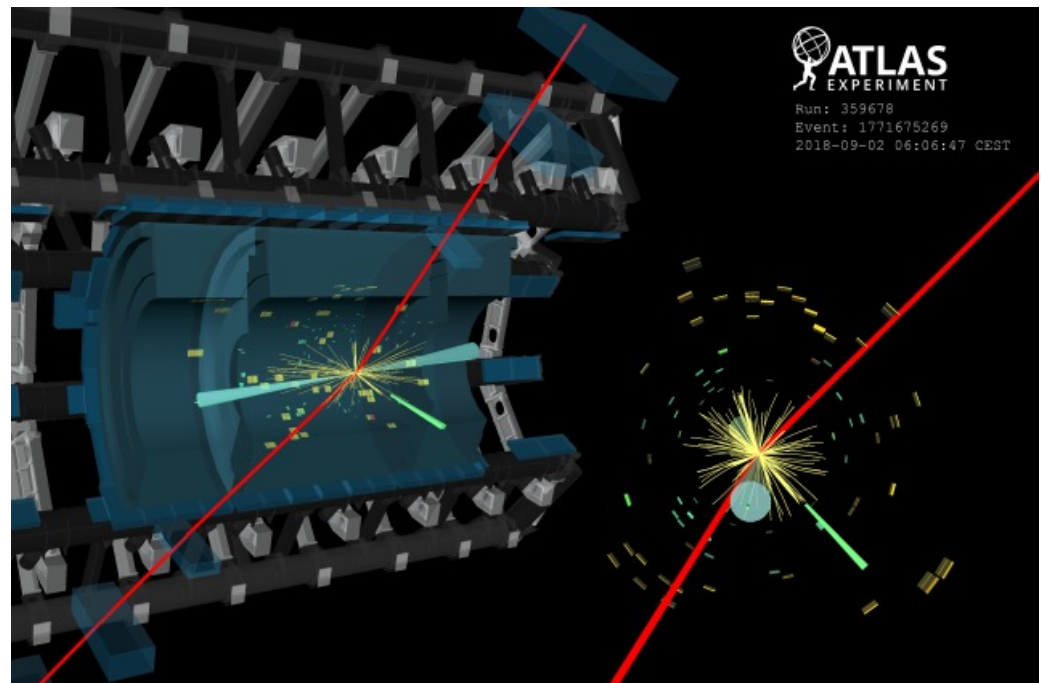
# Collisioni ad alta energia

- **Con collisioni violenti**, possiamo creare e studiare particelle che non si trovano normalmente nella natura
- Più alta l'energia della collisione, maggiore la massa delle particelle che possiamo creare:
  - **Einstein:  $E=mc^2$**  l'energia dello scontro si trasforma in massa
  - Ciò ci permette di studiare **particelle pesanti**, come il bosone di Higgs e il top quark
- E permette la ricerca di **particelle previste da teoria ma ancora non osservate**

$v_p = 0.9999999988c$

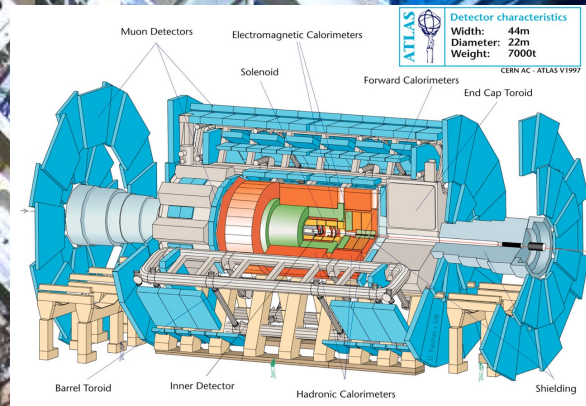
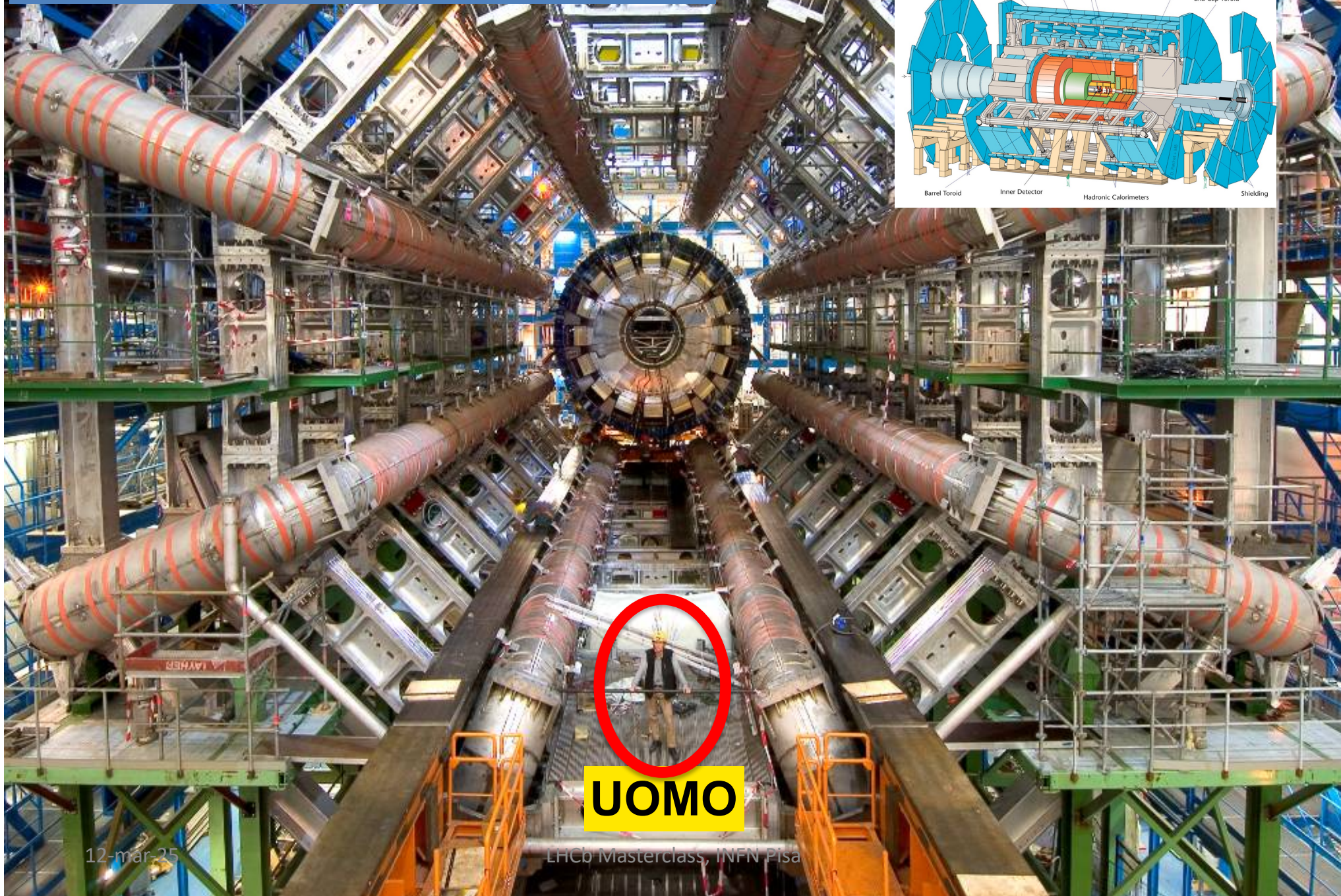
*velocità della luce*





In questo caso, la collisione tra 2 protoni ha creato un bosone di Higgs, con massa circa 125 volte la massa del protone.

# Rivelatore di particelle



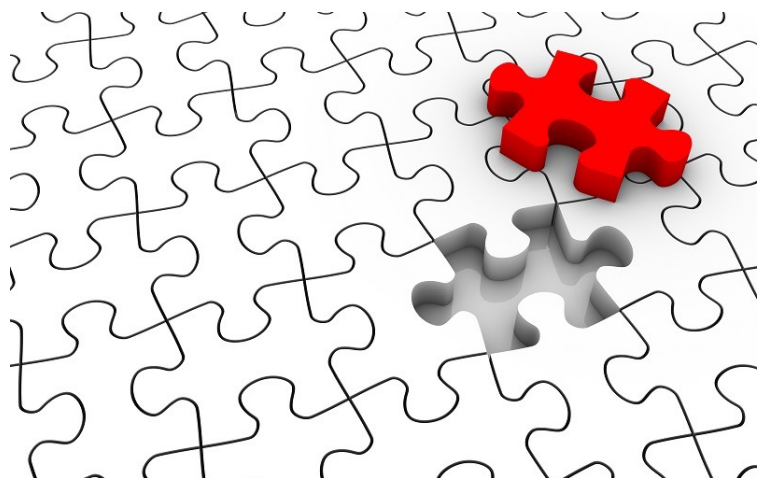
**UOMO**



# Effetti collaterali felici: Spin-offs

- Gli esperimenti al CERN richiedono un altissimo livello di tecnologia → **Spin-offs**
  - progressi tecnologici che sono utili al di fuori della ricerca. Alcuni esempi:
    - *World Wide Web*
    - *Touchscreens*
    - *Tecnologie di imaging medico*
    - *Pannelli solari efficienti*
    - ...

# L'ultimo (?) pezzo del puzzle: Bosone di Higgs

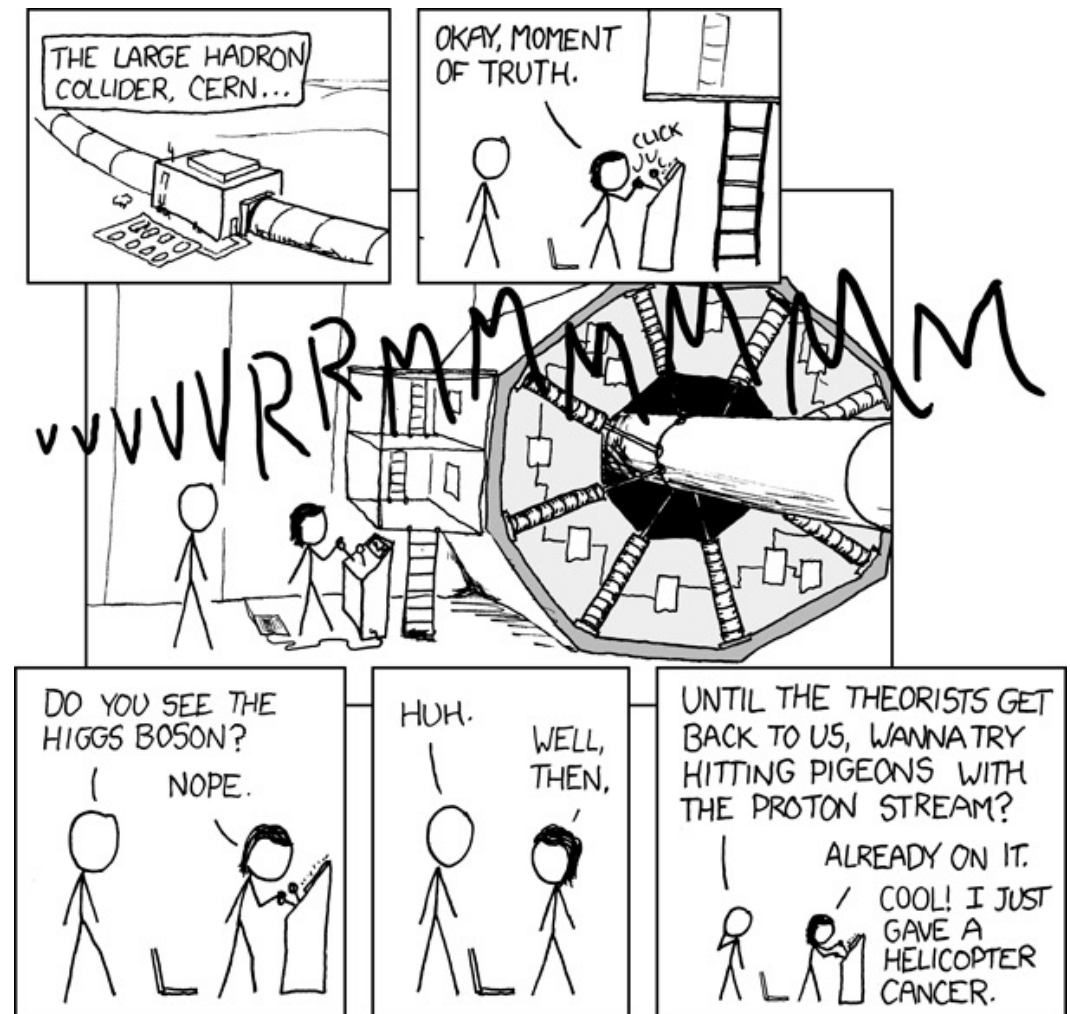


- La teoria del Modello Standard **prevede una nuova particella, il bosone di Higgs**
- Nel modello, **lo Higgs è necessario** per spiegare alcuni concetti riguardanti le masse delle particelle

**ovvero: il problema di massa**

# La caccia allo Higgs

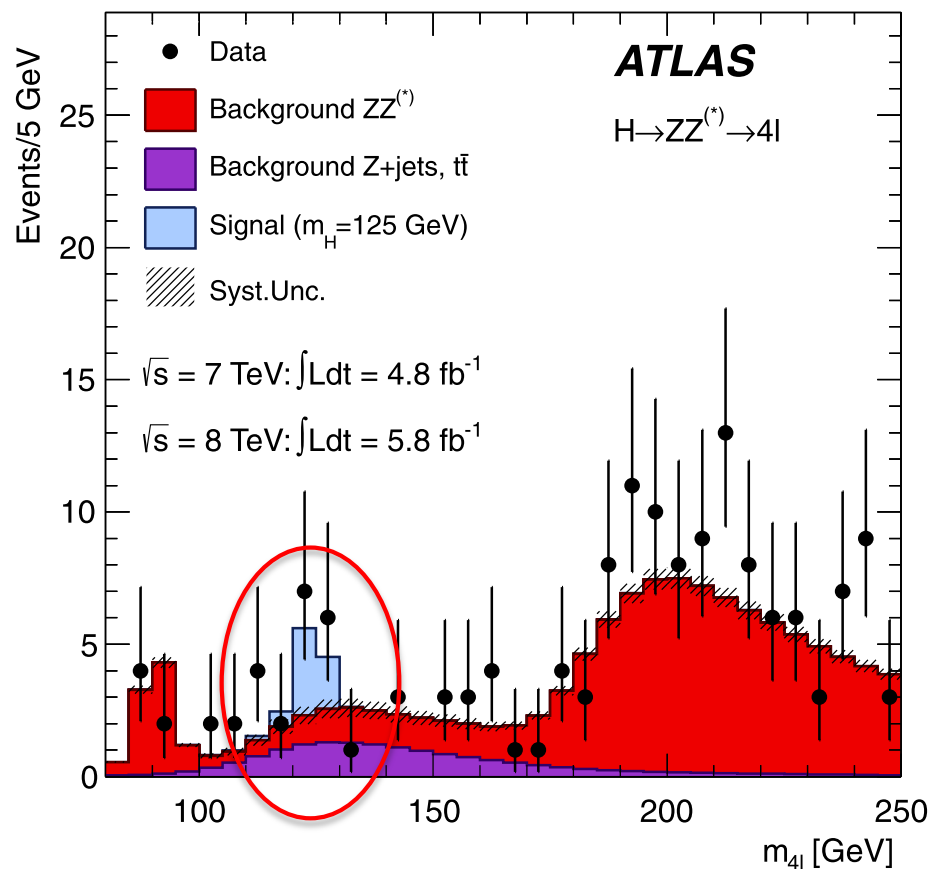
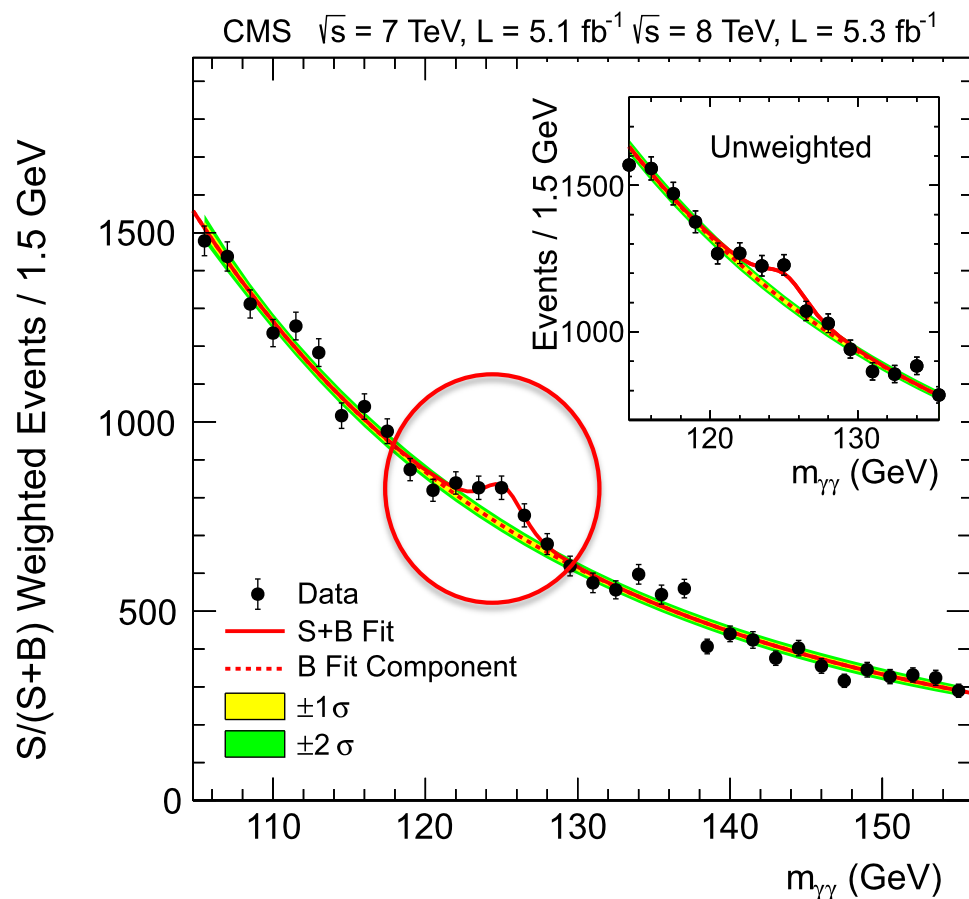
- Lunga ricerca che è durata decenni
- In realtà, solo con l'LHC abbiamo avuto abbastanza energia per produrre tanti bosoni di Higgs
- Finalmente...



# 4 Luglio 2012: Scoperta dello Higgs a 2 esperimenti del LHC

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

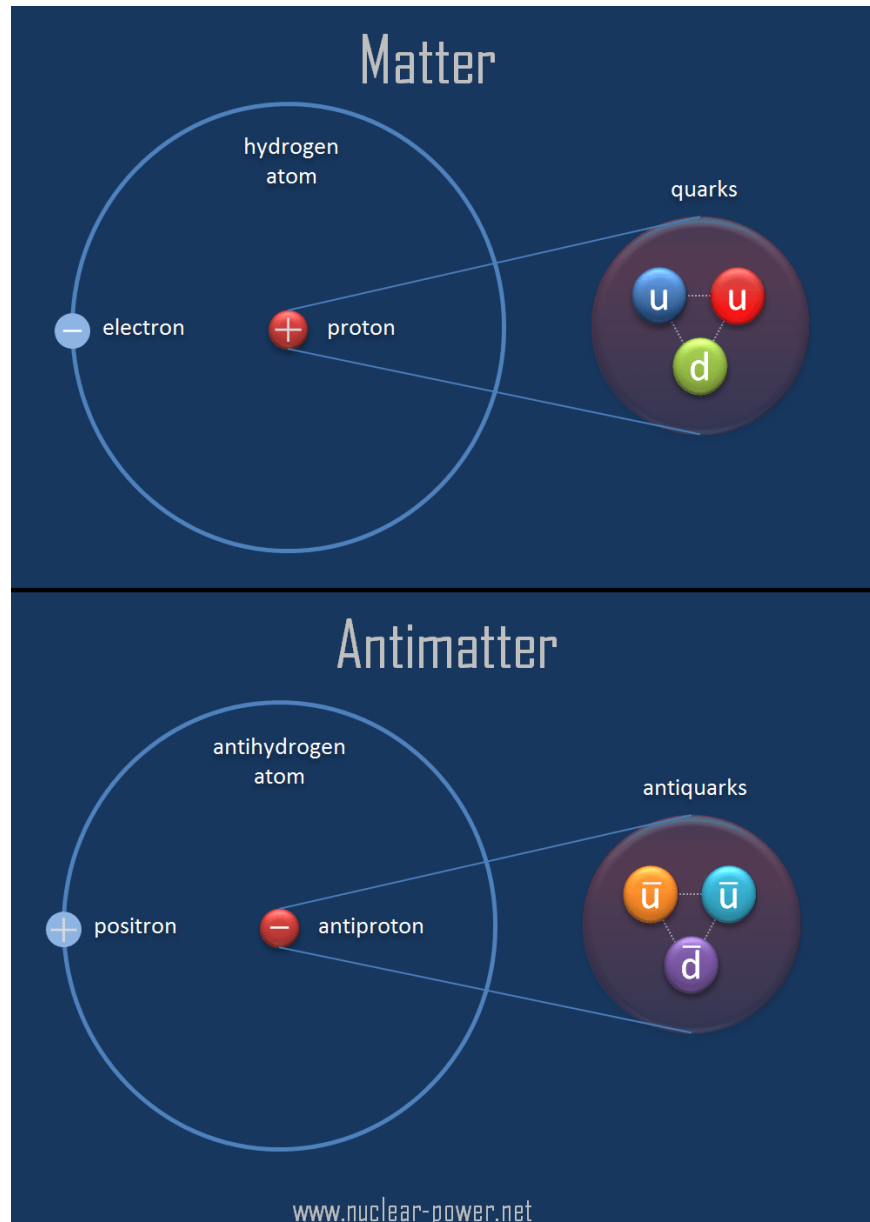
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$$



# Dopo il bosone Higgs?

- L'ultima particella del Modello Standard trovata
- Ma rimangono tante domande:
  - i quark e leptoni sono elementari o sono composti da particelle più piccole?
  - perché 3 generazioni di quark e leptoni? Ci sono altre generazioni non ancora scoperte?
  - dove è andata l'antimateria?
  - di cos'è fatta la materia oscura?
  - e tante altre...

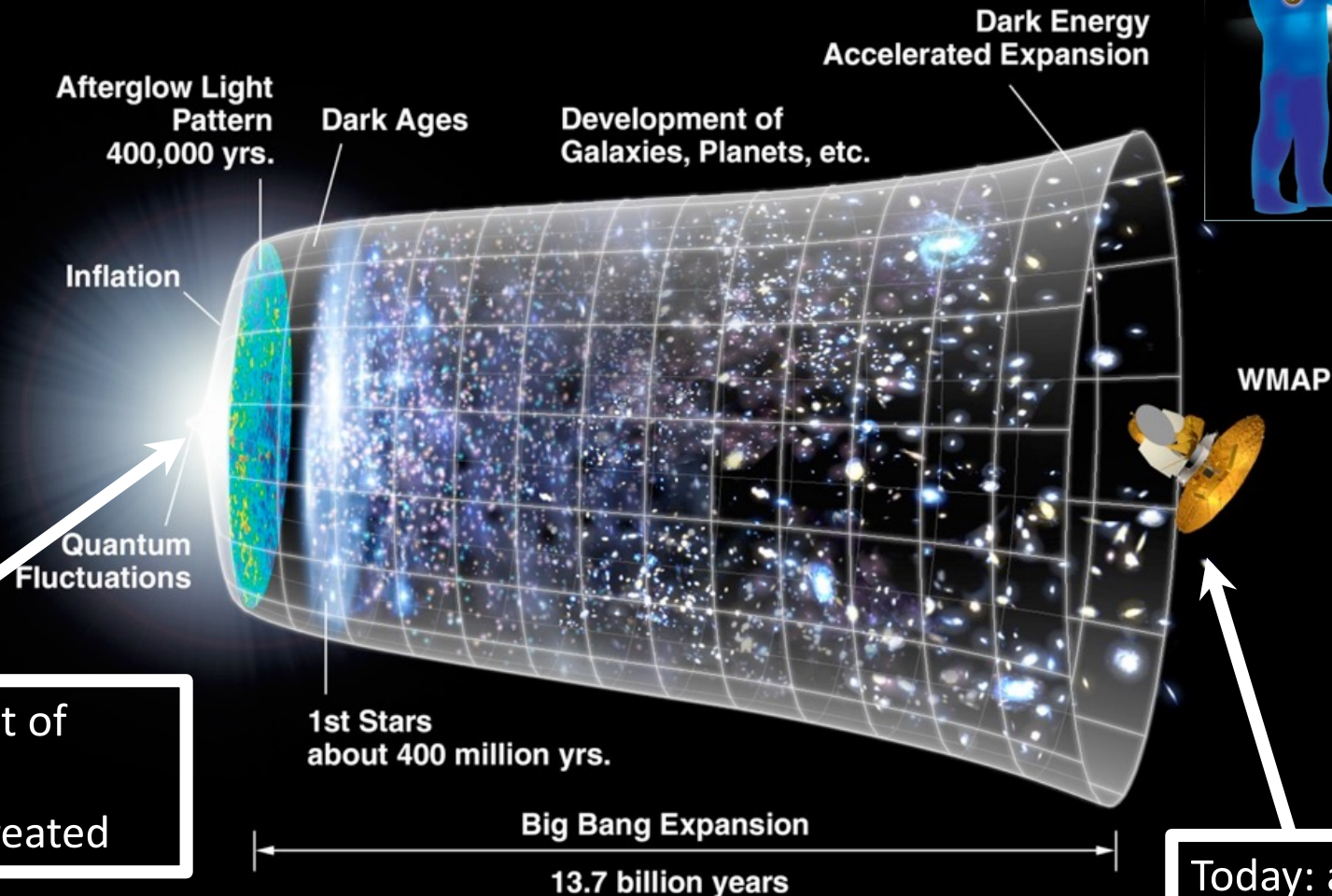
# Materia e antimateria



- Per ogni particella fondamentale esiste una corrispondente anti-particella, fatta quindi da antimateria, con la stessa massa e le stesse proprietà, ma con carica elettrica opposta.
- Tipicamente (nel laboratorio e nell'universo) **particelle sono prodotte in copie di particella/anti-particella**

# Big Bang: quantità uguali di materia e anti-materia create

Conosci un' anti-persona?



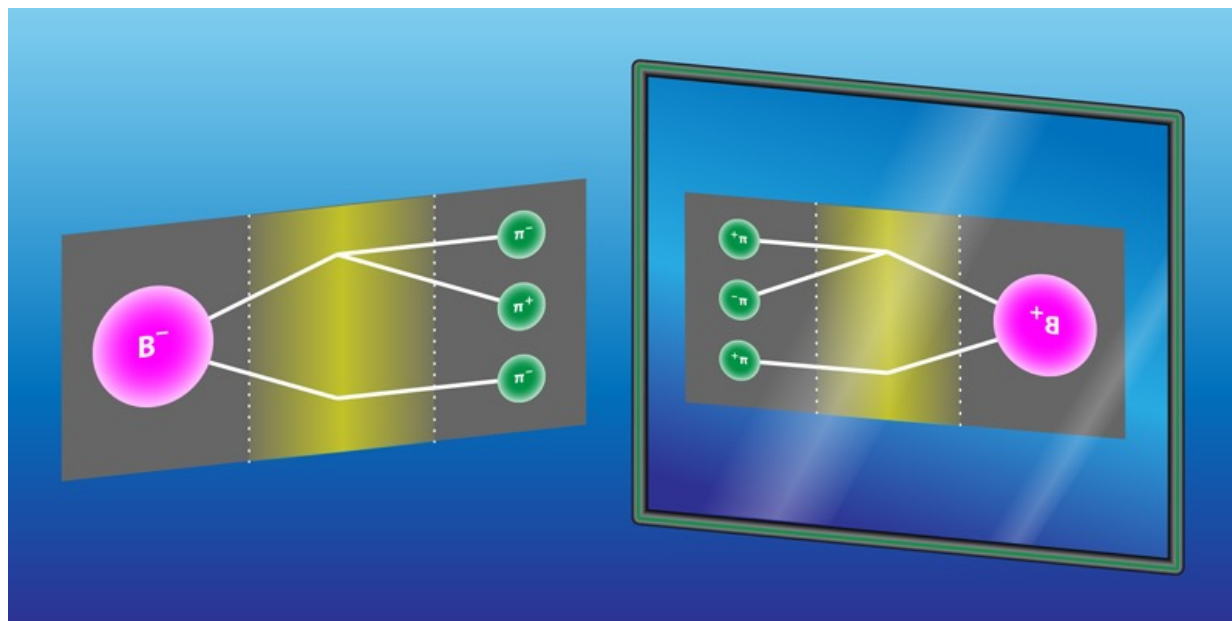
Equal amount of matter and antimatter created

So where did all the antimatter go?

Today: almost no antimatter in the universe

# Simmetria CP e CP violation

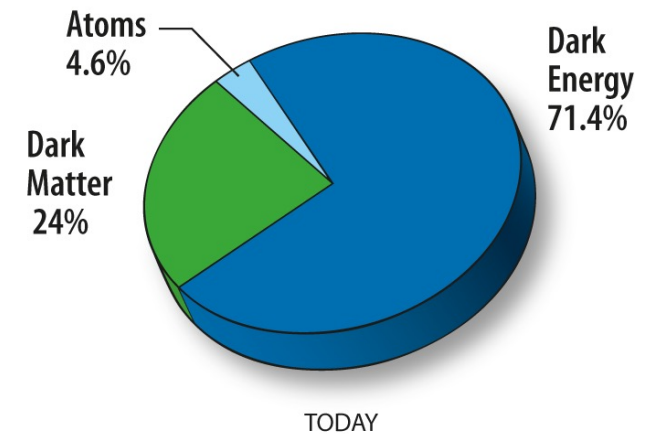
- **Simmetria CP** (charge-parity): una legge di fisica che dice che una particella e la sua anti-particella dovrebbe comportarsi nella stessa maniera
- In realtà, **la anti-particella dovrebbe comportarsi come una particella vista in uno specchio (!)**



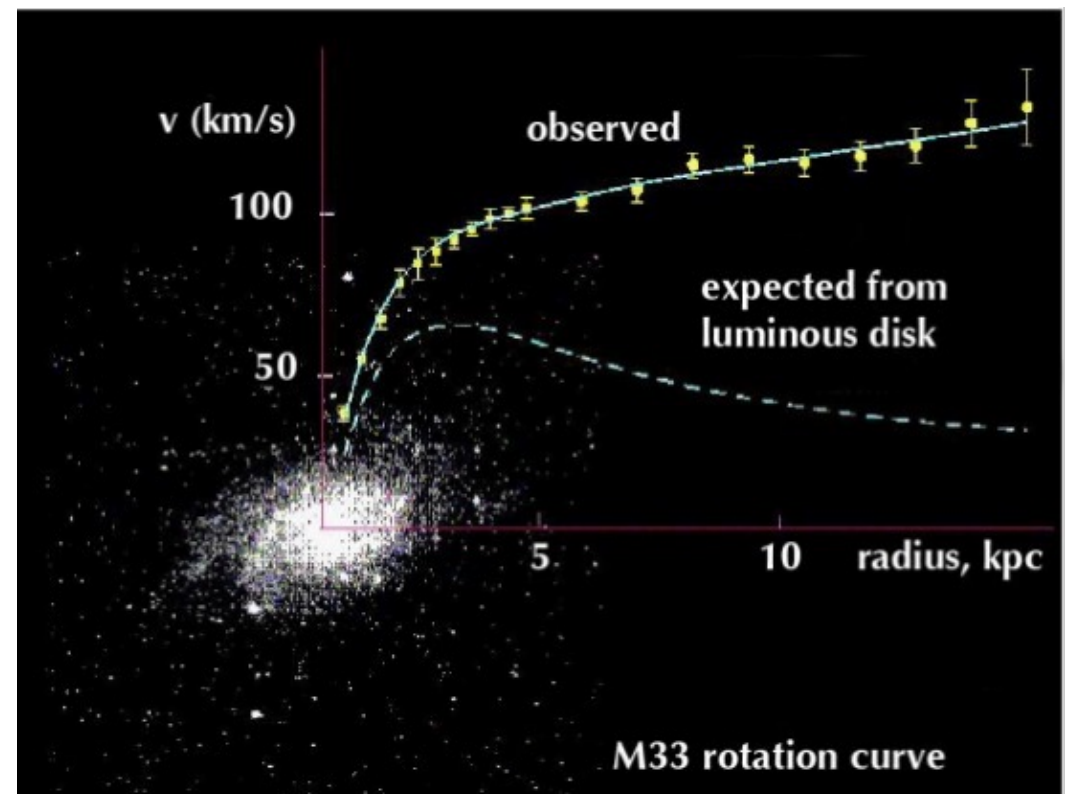
- Sappiamo che la simmetria CP non è sempre rispettata, ovvero abbiamo la “violazione di CP”.
- La violazione di CP potrebbe essere importante per capire la mancanza di anti-materia nell’universo.
- Esperimenti come LHCb possono studiare con precisione il comportamento di particelle e anti-particelle.



# Un'altra questione aperta: la Materia Oscura

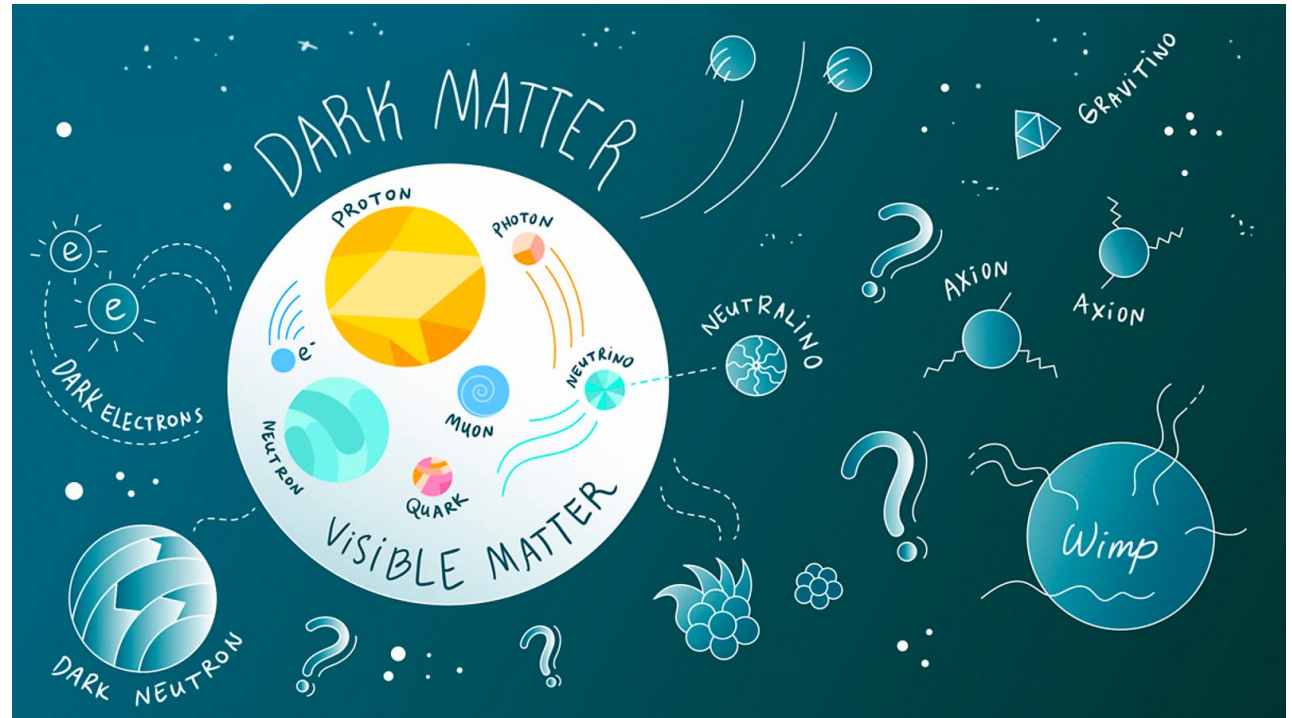


- Solo ~5% dell'universo è visibili ai nostri telescopi e quindi ben compreso
- 24% dell'universo è fatto di materia oscura
- Evidenze di materia oscura: **velocità angolare delle galassie**, lente gravitazionale
- Ancora più misteriosa: energia scura – 71% dell'universo



# Materia oscura: cosa potrebbe essere?

- Fatta di particelle neutre
- **Non** del Modello Standard
- **Supersimmetria**: estensione del Modello Standard: **neutralini**
  - cercati, ma **non rivelati a LHC**
- Tante altre proposte teoriche
- Questione ancora aperta





# Per concludere...

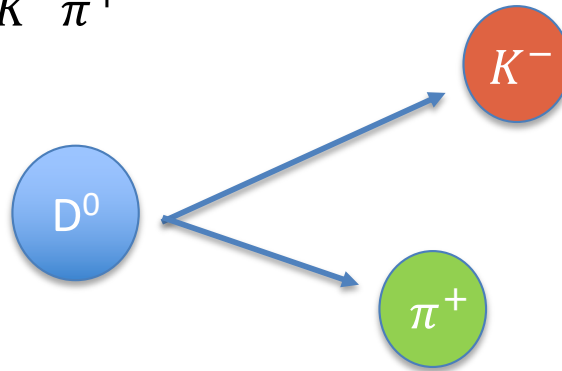
- Studiamo la fisica delle particelle per capire l'universo al livello più fondamentale
- Nonostante il grande successo del Modello Standard nel corso degli ultimi 50 anni, ci sono ancora problemi fondamentali da risolvere. Due esempi:
  - mancanza di anti-materia nell'universo
  - la composizione della materia oscura
- Gli esperimenti al LHC del CERN, tra cui anche LHCb, sono cruciali per questa ricerca.

2:51:53

backup slides...

# Particelle instabili

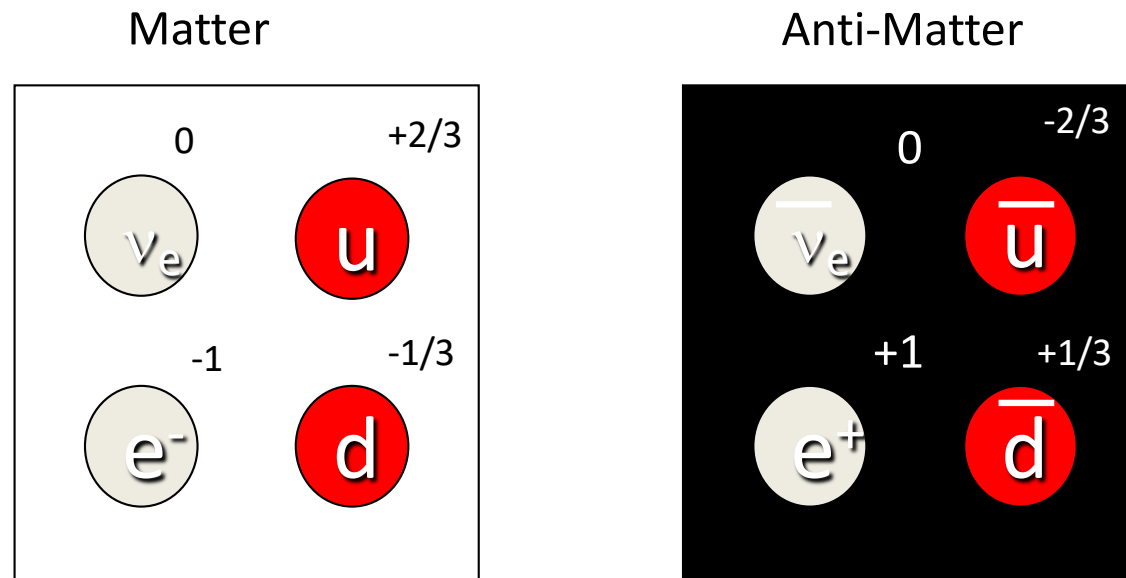
- La maggior parte delle particelle sono instabili:
  - si trasformano o “**decadono**” in altre 2 o più particelle più leggeri
  - per esempio:  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$



- Ogni particella ha un tempo di vita caratteristico, detto **vita media**.
  - in

# Anti-materia

Per ogni particella fondamentale esiste una corrispondente anti-particella, fatta quindi da anti-materia, con la stessa massa e le stesse proprietà, ma con carica elettrica opposta.



Si può creare in laboratorio:

[Antimatter: Most Expensive Substance on Earth](#)

Prezzo: \$62,500,000,000,000/gram

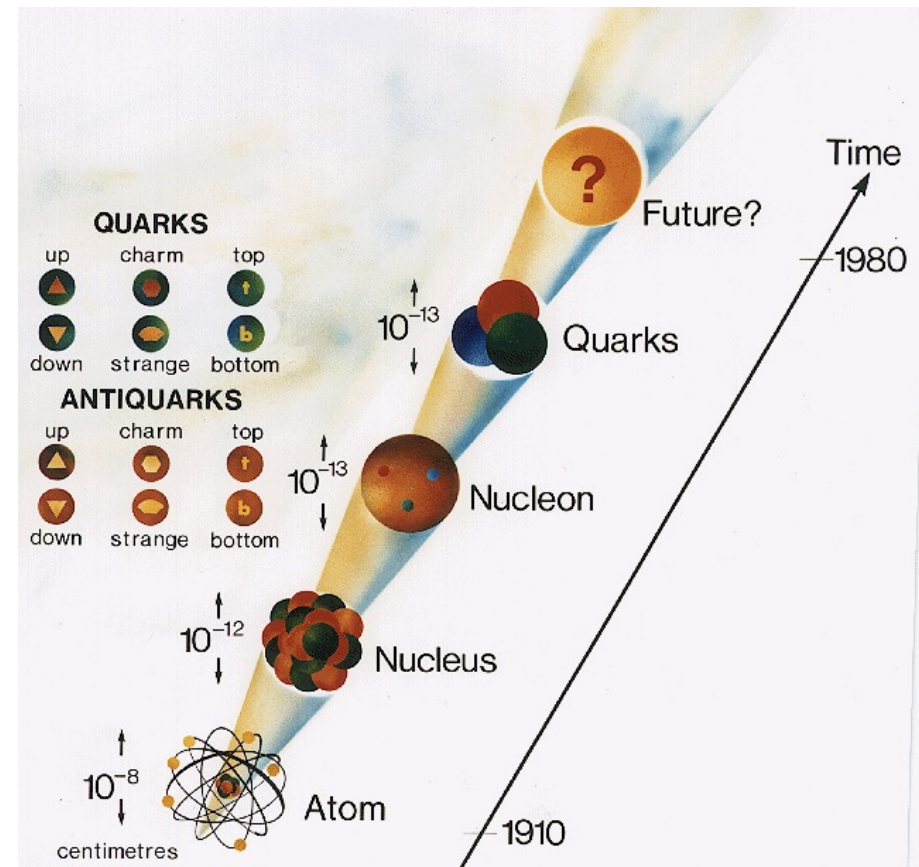
# Large Hadron Collider



- I protoni sono accelerati da potenti campi elettrici quasi alla velocità della luce. Sono guidati lungo le loro traiettorie circolari da **potenti magneti dipoli superconduttori**.
- I magneti producono un campo di 8.3 Tesla, (200.000 volte il campo magnetico terrestre) & sono tenuti a 1.9 K (-271°C) in **elio superfluido**.
- Consumo energetico di LHC: quanto una città come Firenze(!)
- I protoni viaggiano in un tubo che è a **vuoto più spinto** ed a temperatura più bassa che lo spazio interplanetario.

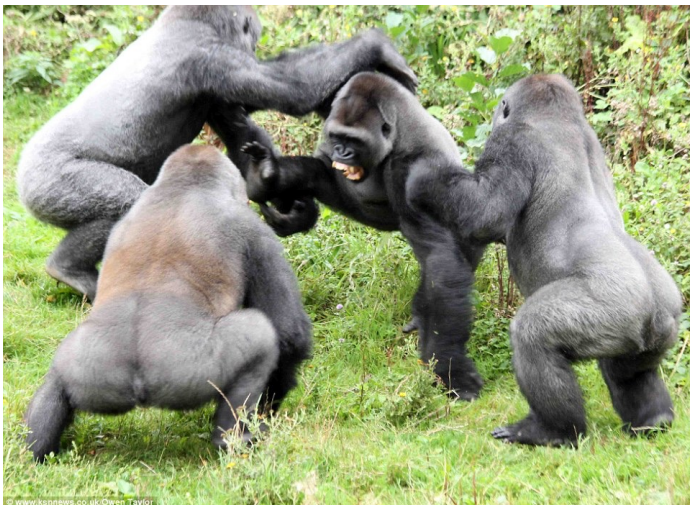
# Cercare gli oggetti più piccoli...

- Storicamente, lo studio del piccolo ha spesso portato grandi progressi nella nostra comprensione dell'universo
- Acceleratori di particelle – creare collisioni violente tra particelle per vedere che succede



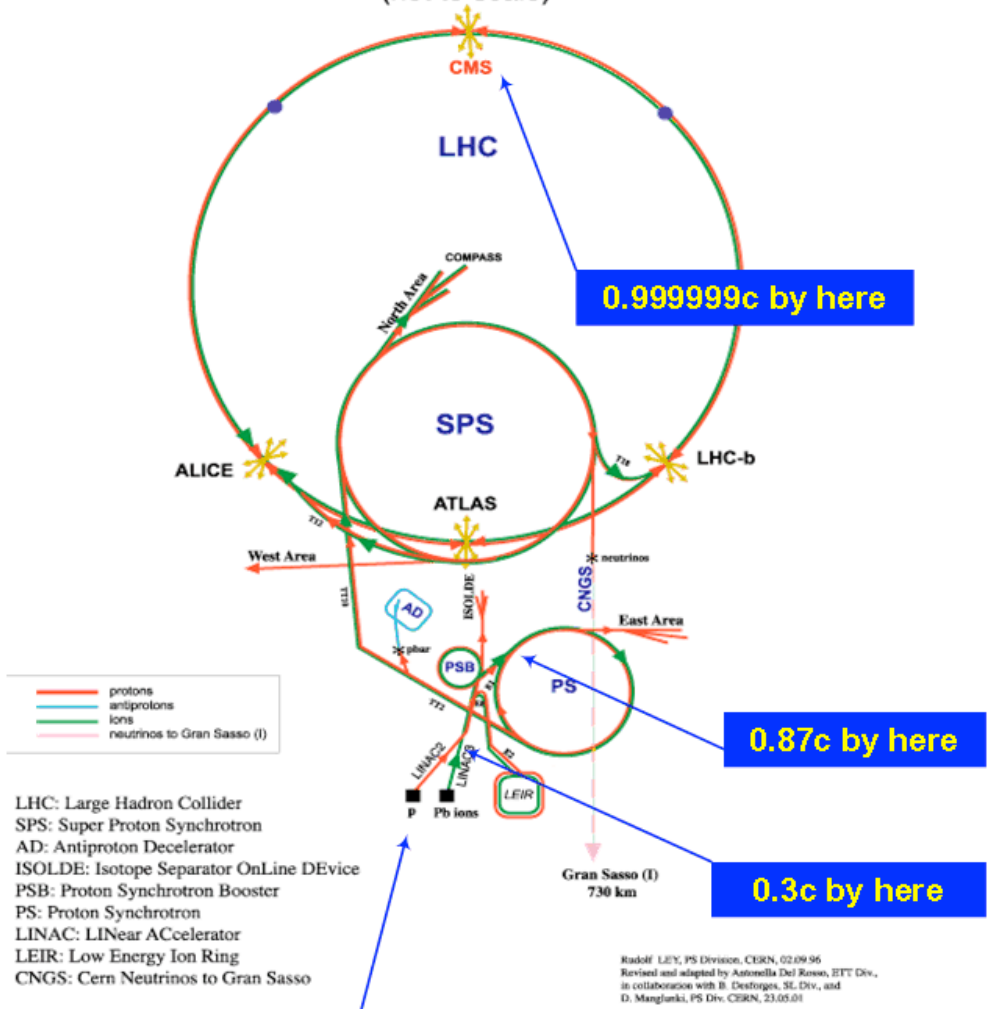


# Tanti modi per studiare il mondo

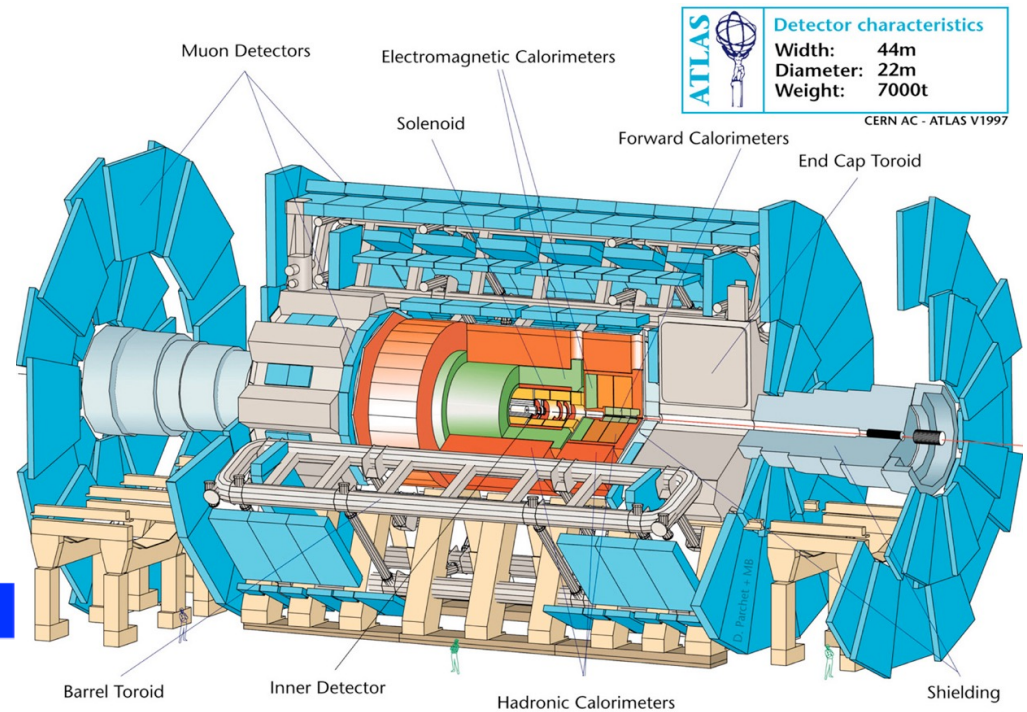


# Major experiments

CERN Accelerators  
(not to scale)



# ATLAS



# *Ancora più grave...*

- Nella versione originale del Modello Standard tutte le particelle avevano massa nulla (!)
- Tre fisici teorici hanno proposto un modo per conferire massa alle particelle: Higgs, Englert e Brout

Premio Nobel  
2013



Francois Englert



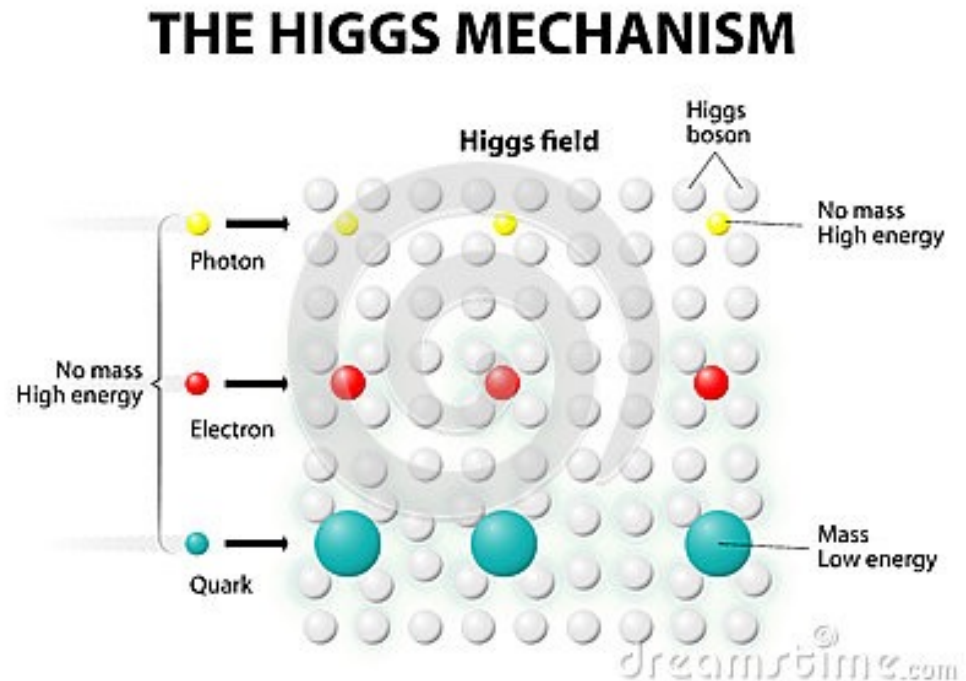
Peter Higgs



Robert Brout

# Meccanismo di Higgs

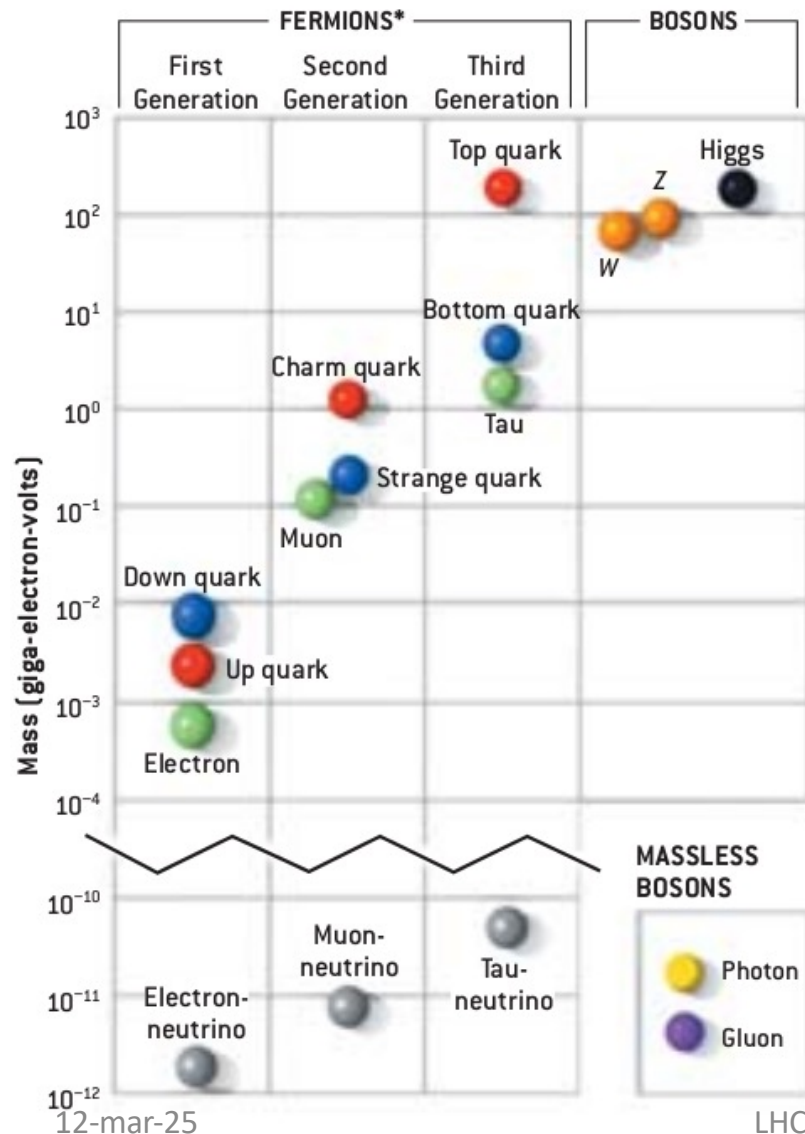
- Introduce un nuovo campo che permette le particelle di acquisire massa
- Più forte una particella interagisce con il campo maggiore è la sua massa



**Conseguenza importante:  
prevede l'esistenza di una nuova  
particella: il bosone di Higgs**

Però, nessuna  
previsione della massa  
della nuova particella.

# La massa delle particelle ricopre 11 ordini di grandezza -



- Non c'è nessuna regolarità nei valori di massa delle particella elementari
- I neutrini sono molto leggeri
- L'elettrone è 350.000 volte più leggero del quark più pesante
- Tra i bosoni, il fotone è privo di massa, ma i bosoni W e Z pesano circa come 80-90 protoni

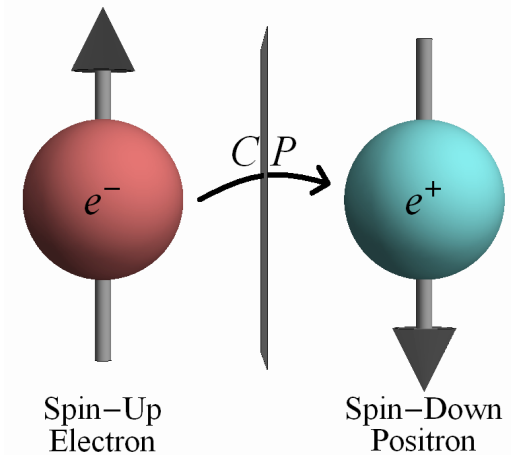
**Perché?**

# Simmetria Charge-Parity

In realtà, un piccolo squilibrio tra materia e anti-materia è previsto dal Modello Standard. Questo è dovuto alla **violazione della Simmetria CP** nella forza debole.

Un positrone (anti-elettrone) dovrebbe comportarsi esattamente come un elettrone ... se lo guardi in uno specchio (!).

*CP = Coniugazione di carica (inverte la carica) x Parità (inverte le coordinate come in uno specchio)*



Però, **questo fenomeno non è sufficiente a spiegare il perché l'universo sia fatto di materia e non di anti-materia**. Deve esistere qualche nuova interazione che viola CP.

38

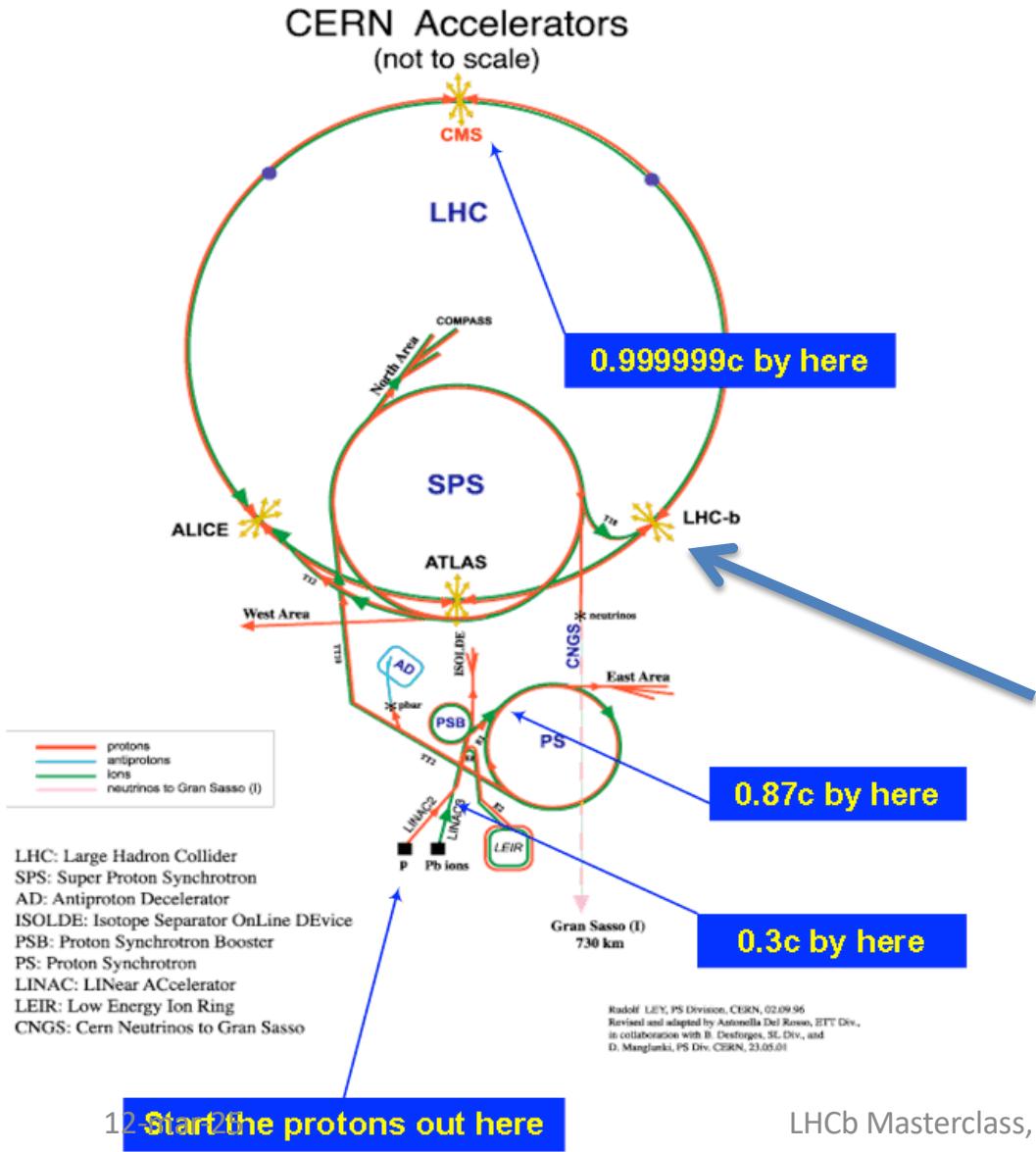
**21 Marzo 2019: LHCb annuncia la scoperta di violazione di CP nella particella  $D^0$  – non si sa ancora se compatibile con il MS**

# Esperimenti di fisica delle particelle

- Due strade:
  - mirare alle energie più alte: Energy Frontier
    - dà la possibilità di creare nuove particelle molto pesanti, come quark top, Higgs, nuove particelle di Supersimmetrie, ecc.
    - ATLAS, CMS, ALICE
  - mirare ad alta intensità: Intensity Frontier
    - studiare particelle di massa più bassa (per esempio, mesoni B, D)
    - fare misure di alta precisione che sono capaci di testare il Modello Standard molto accuratamente: fisica del flavour
      - **LHCb**



# Major experiments



## LHCb

