

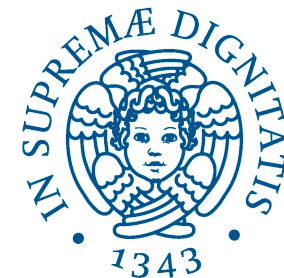


Una breve introduzione alla Fisica della Particelle

John Walsh

INFN Sezione di Pisa

International Masterclass, 18 Marzo 2024



Scopo della fisica delle particelle

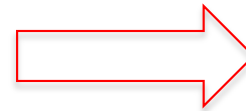
- Studiare (e capire!) l'universo al livello più fondamentale, più elementare

- Quali sono i costituenti della materia?



***PARTICELLE
ELEMENTARI***

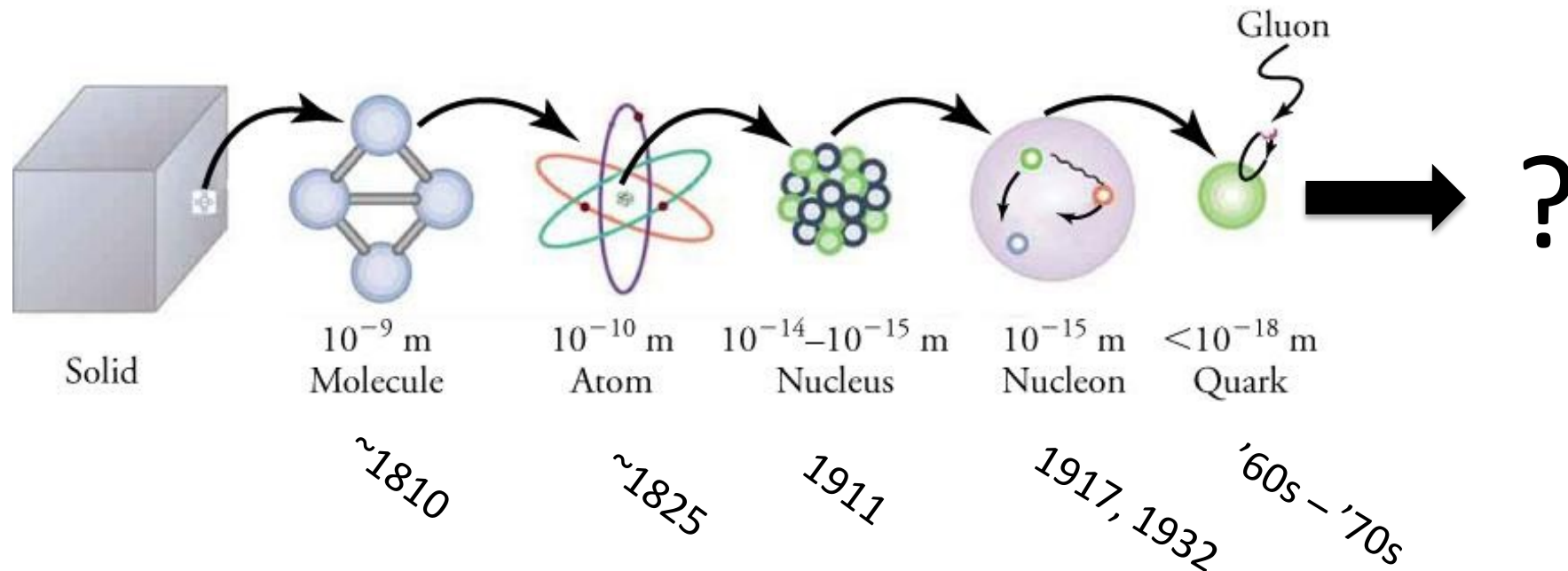
- Come si possono descrivere le interazioni tra questi costituenti?



***FORZE
FONDAMENTALI***

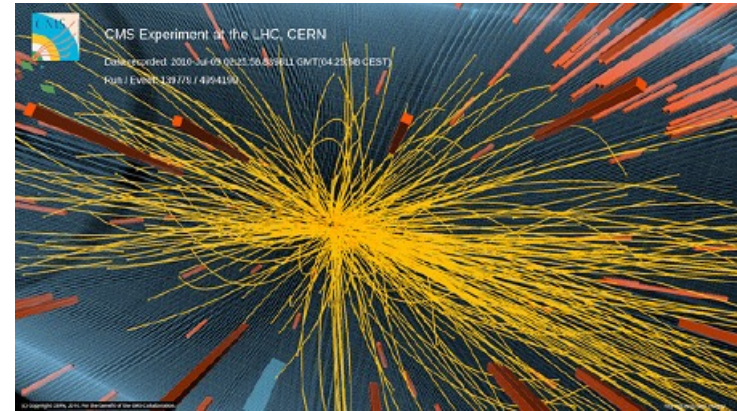
Cercare gli oggetti più piccoli...

- 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)



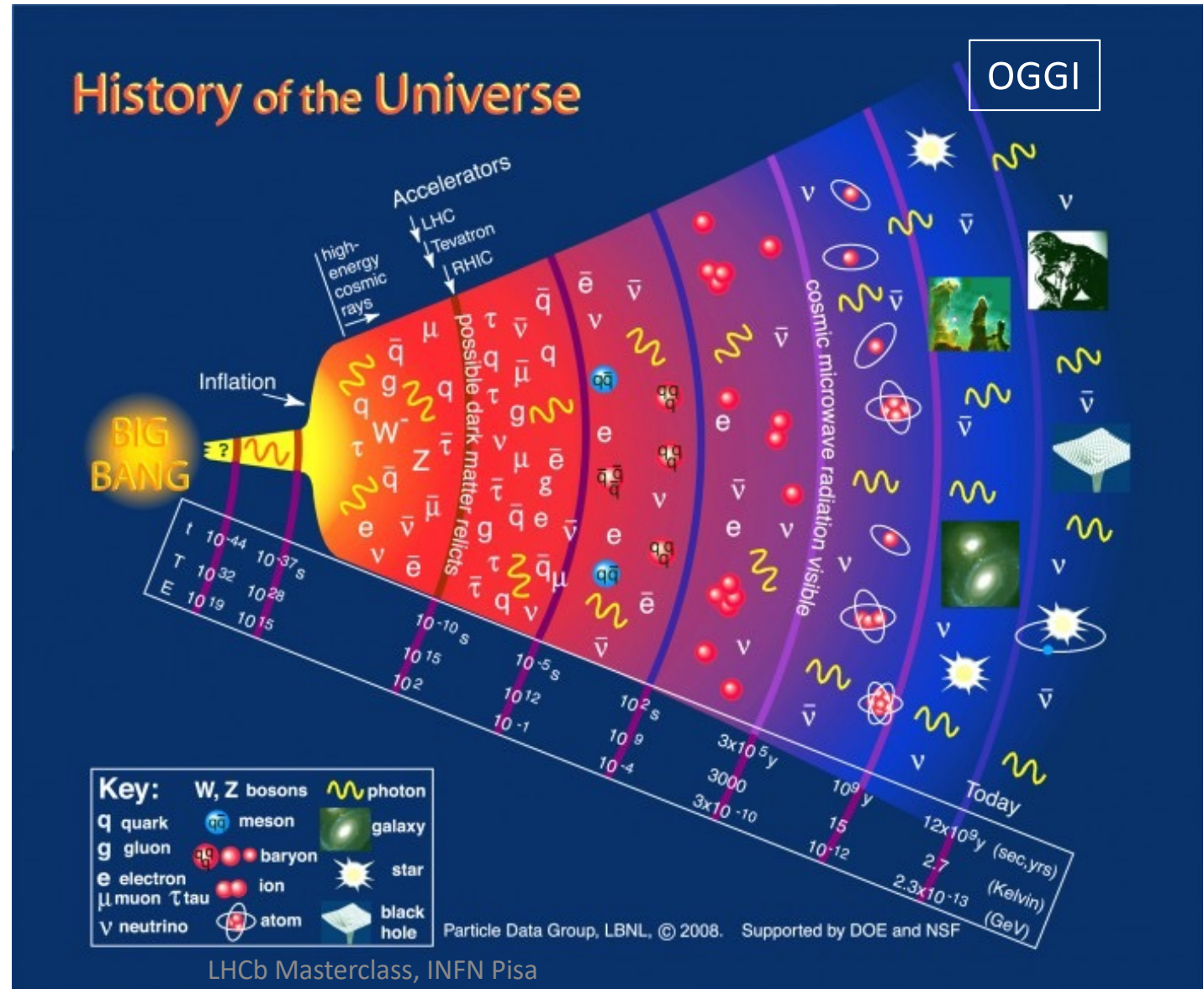
Oggetti piccoli, oggetti grandi:

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



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.

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

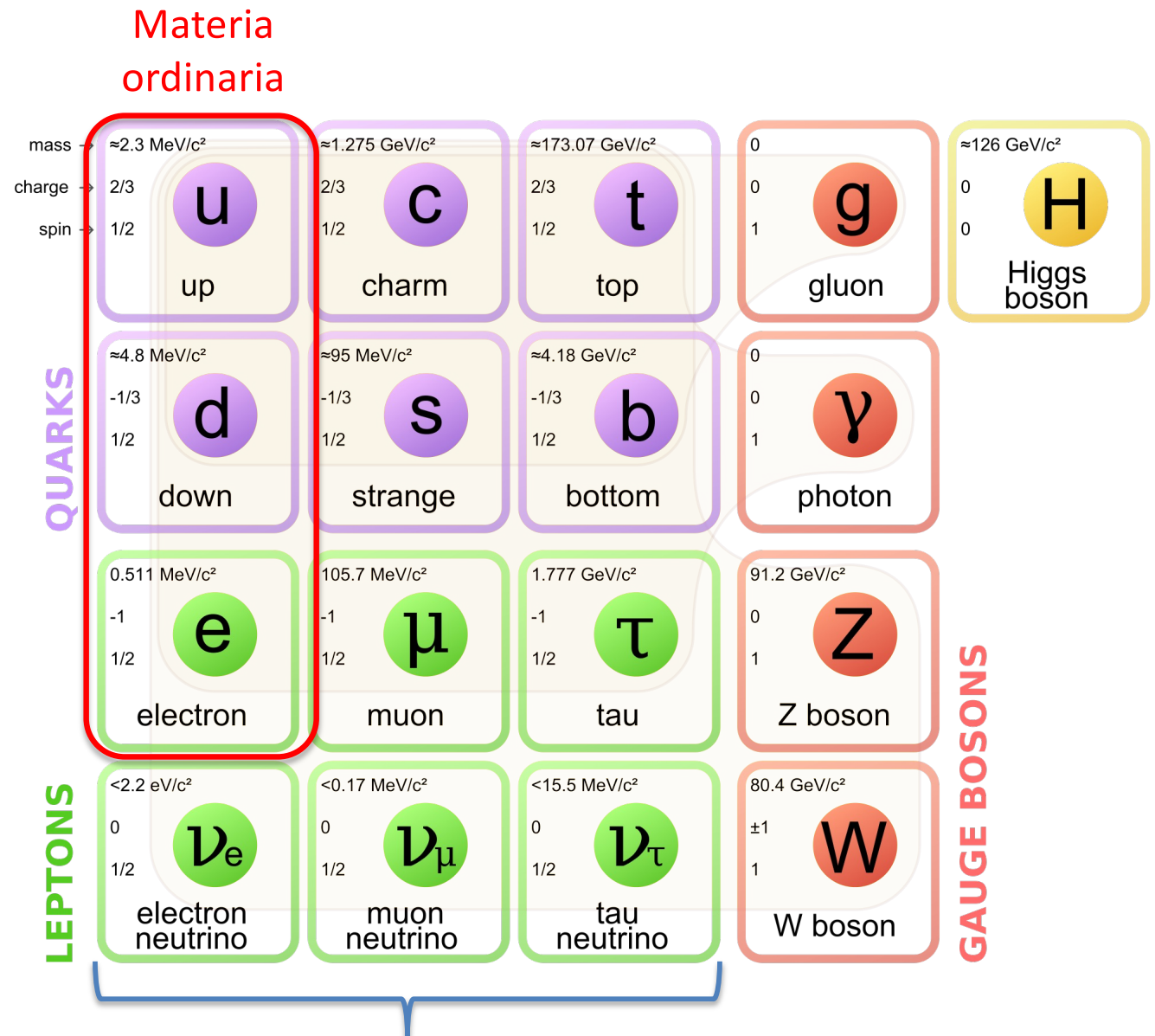


Teoria della fisica delle particelle

- **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

Le 17 particelle del Modello Standard

- Divise in **quark**, **leptoni**, **bosoni**
- Solo **3 particelle** (u,d,e) costituiscono **la materia ordinaria**
 - protons: **uud quarks**
 - neutrons: **ddu quarks**
 - **electrons**
- Le altre 14 sono **esotiche**, esistevano al tempo del Big Bang, oggi tipicamente solo in laboratorio
- Eccezioni: **fotoni** (particelle di luce) e **neutrini** (dappertutto, ma invisibili)



Le 4 forze fondamentali

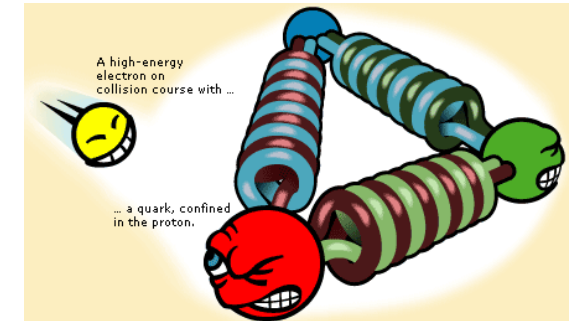
| Forza | Intensità relativa | Particelle coinvolte | Particella mediatrice | Esempio |
|------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| Forte | 1 | quarks | gluone | forza nucleare |
| Elettromagnetica | 10^{-2} | particelle cariche | fotone | forza magnetica |
| Debole | 10^{-8} | quarks & leptoni | bosoni W, Z | radioattività |
| Gravità | 10^{-39} | particelle massive | gravitone | moto di una cometa |

Incluse nel Modello Standard

18 mar 24

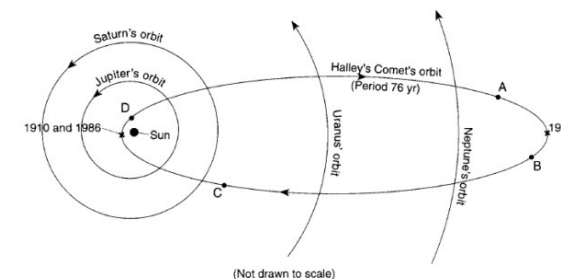
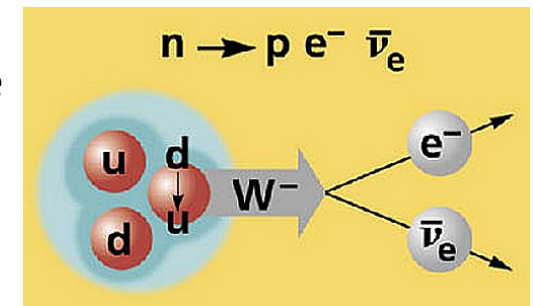
LHCb Masterclass, INFN Pisa

Forte



Elettromagnetica

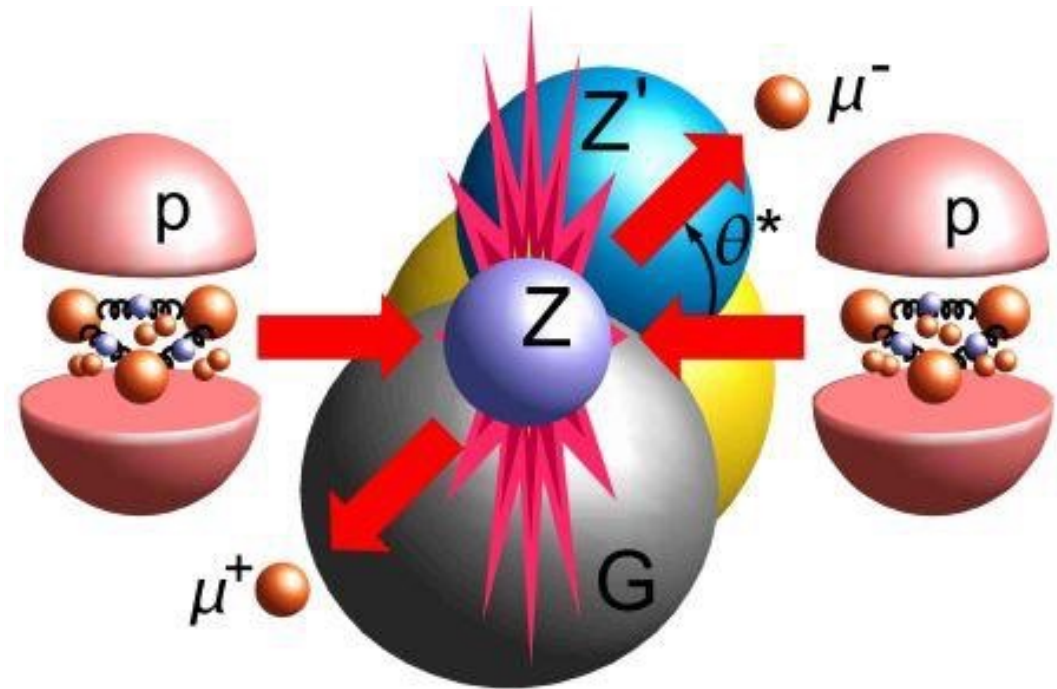
Debole



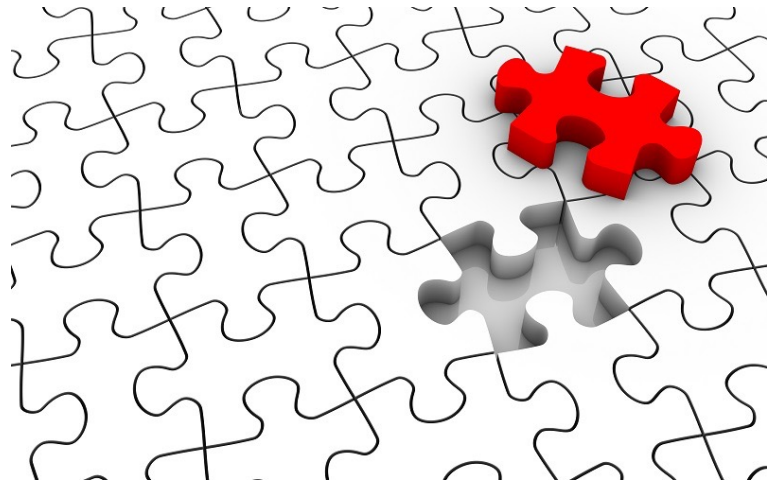
Gravità

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 i bosoni Z e H
- E cercare **particelle ancora non osservate**



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

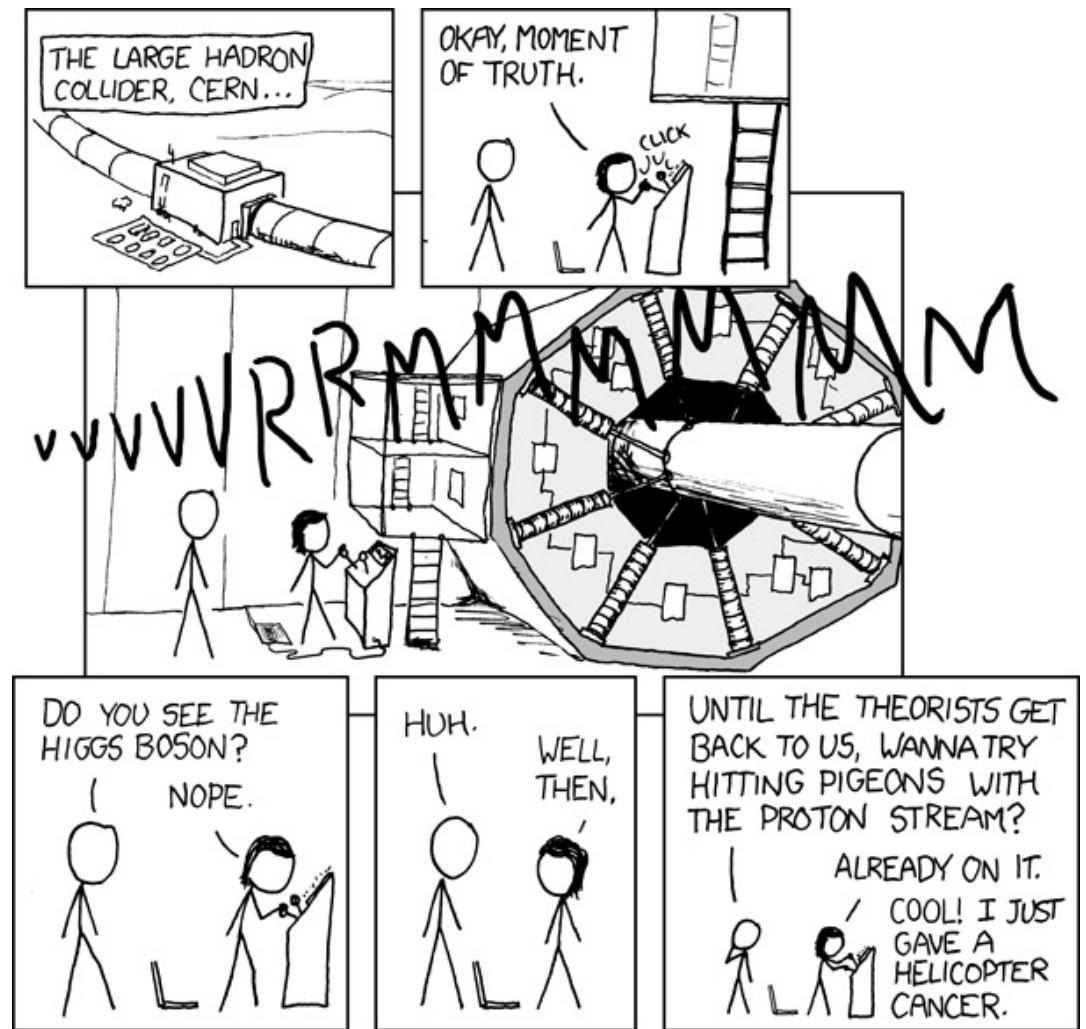


- La teoria del Modello Standard **prevede una nuova particella, il bosone di Higgs**
- Nel modello, **lo Higgs è necessario** per spiegare alcuni concetti riguardanti le masse delle particelle

ovvero: il problema di massa

La caccia allo Higgs

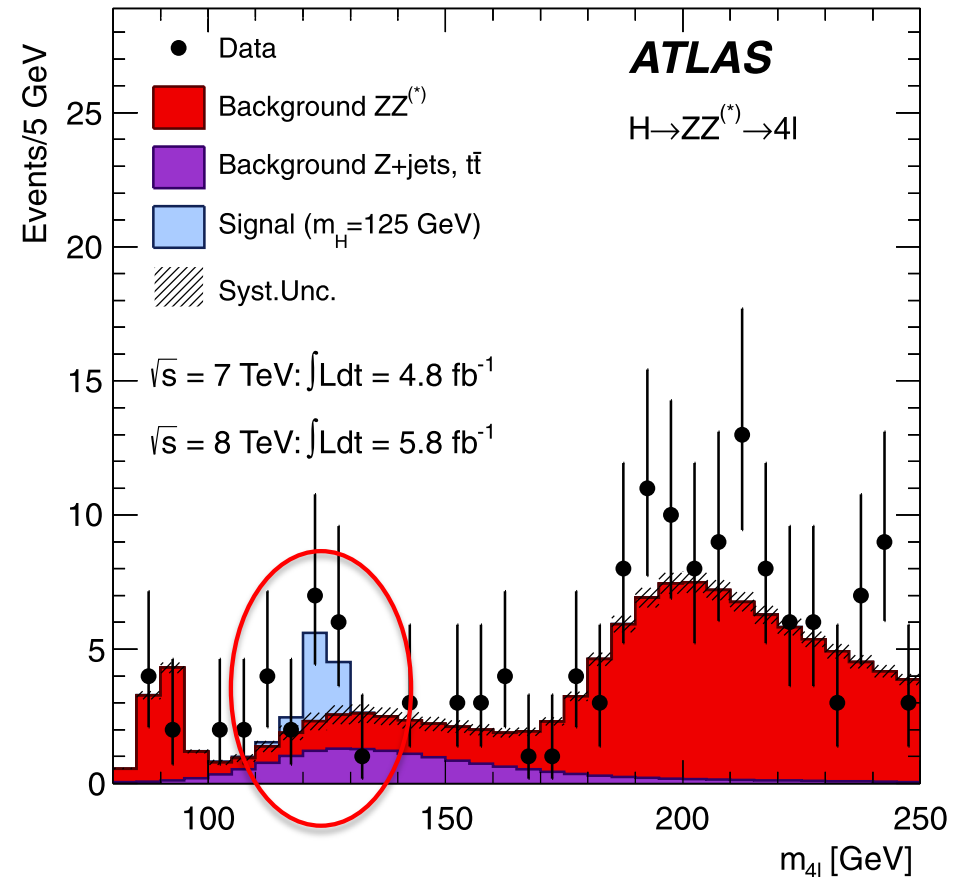
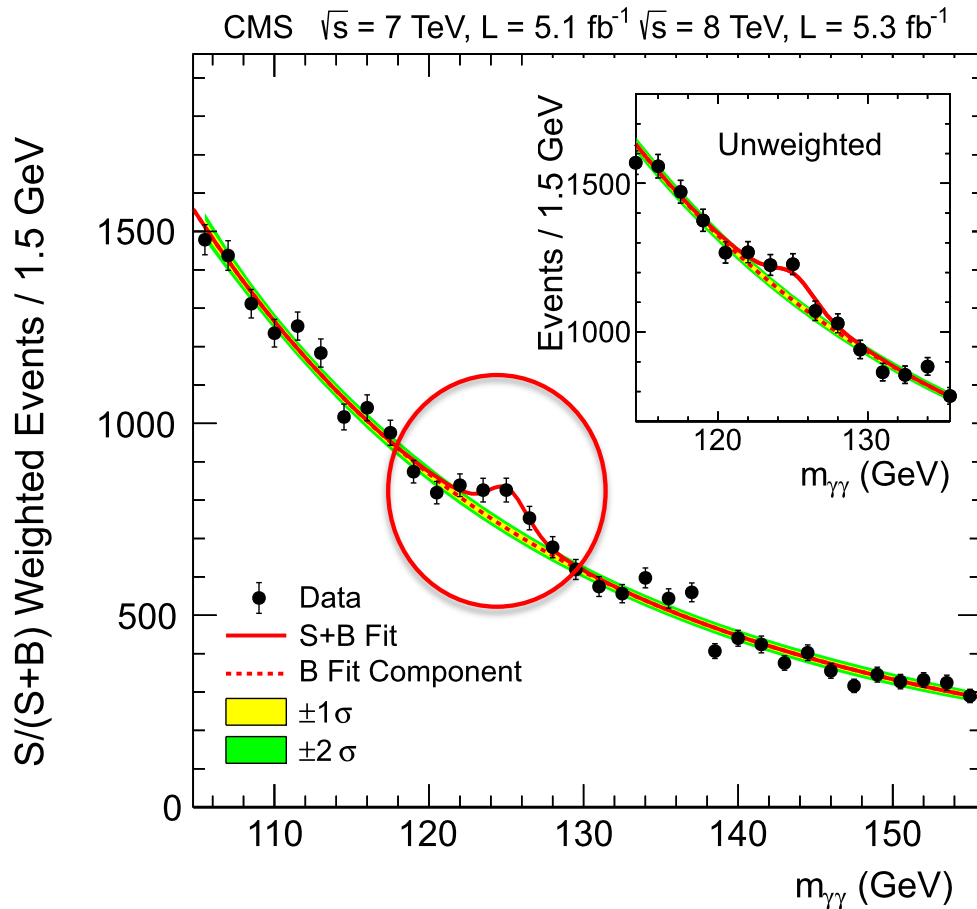
- Lunga ricerca che è durata decenni
- In realtà, solo con l'LHC abbiamo avuto abbastanza energia per produrre tanti bosoni di Higgs
- Finalmente...



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

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

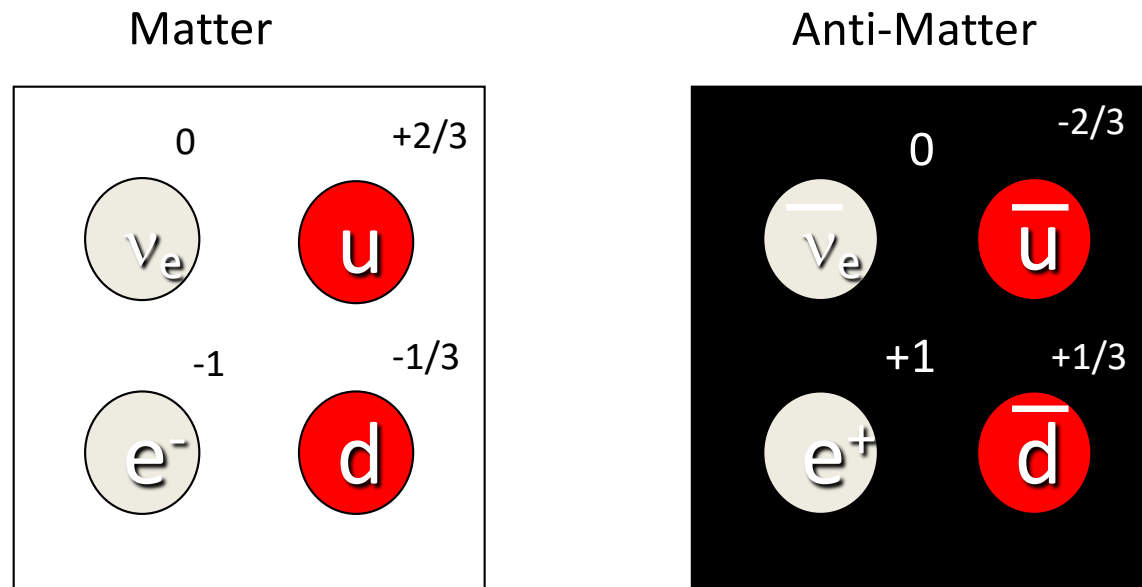


Dopo il bosone Higgs?

- 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...

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.



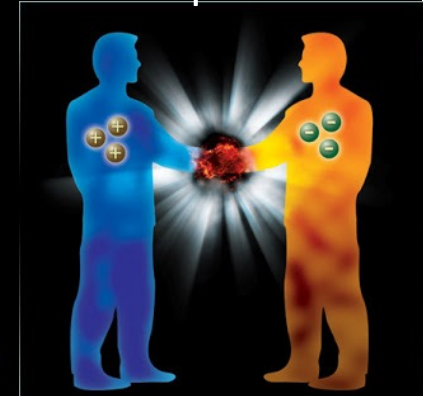
Si può creare in laboratorio:

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

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

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

Conosci un' anti-persona?



Afterglow Light Pattern
400,000 yrs.

Dark Ages

Development of
Galaxies, Planets, etc.

Dark Energy
Accelerated Expansion

Inflation

Quantum
Fluctuations

WMAP

1st Stars
about 400 million yrs.

Big Bang Expansion

13.7 billion years

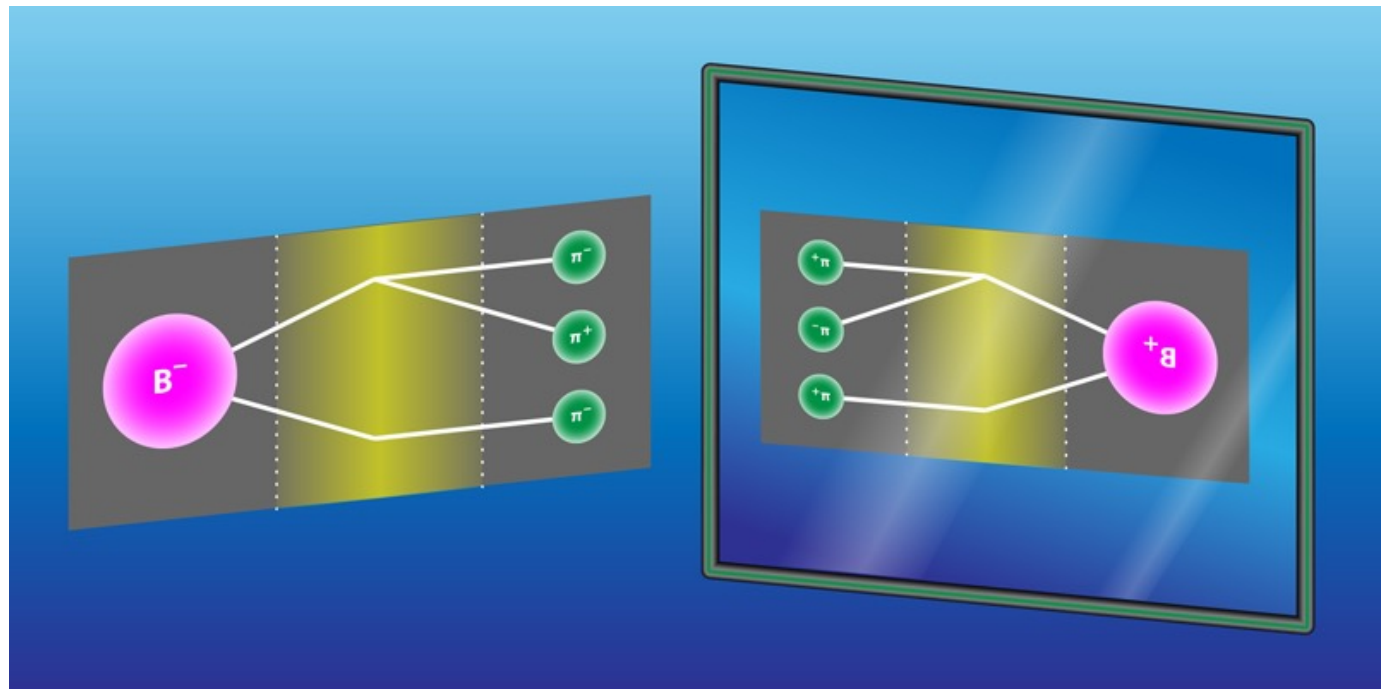
Equal amount of
matter and
antimatter created

So where did all the antimatter go?

Today: almost
no antimatter
in the universe

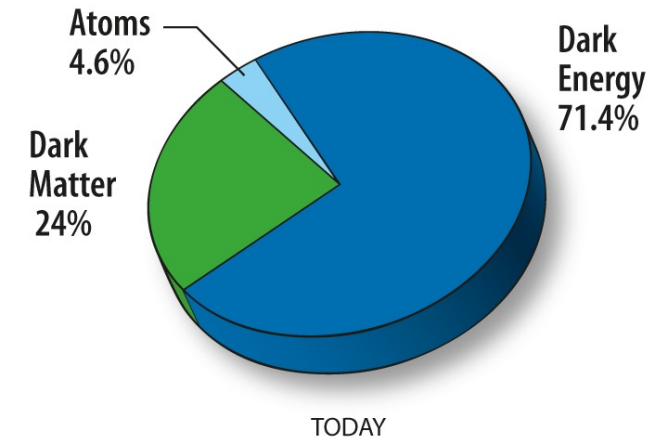
Simmetria CP e CP violation

- **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 (!)**

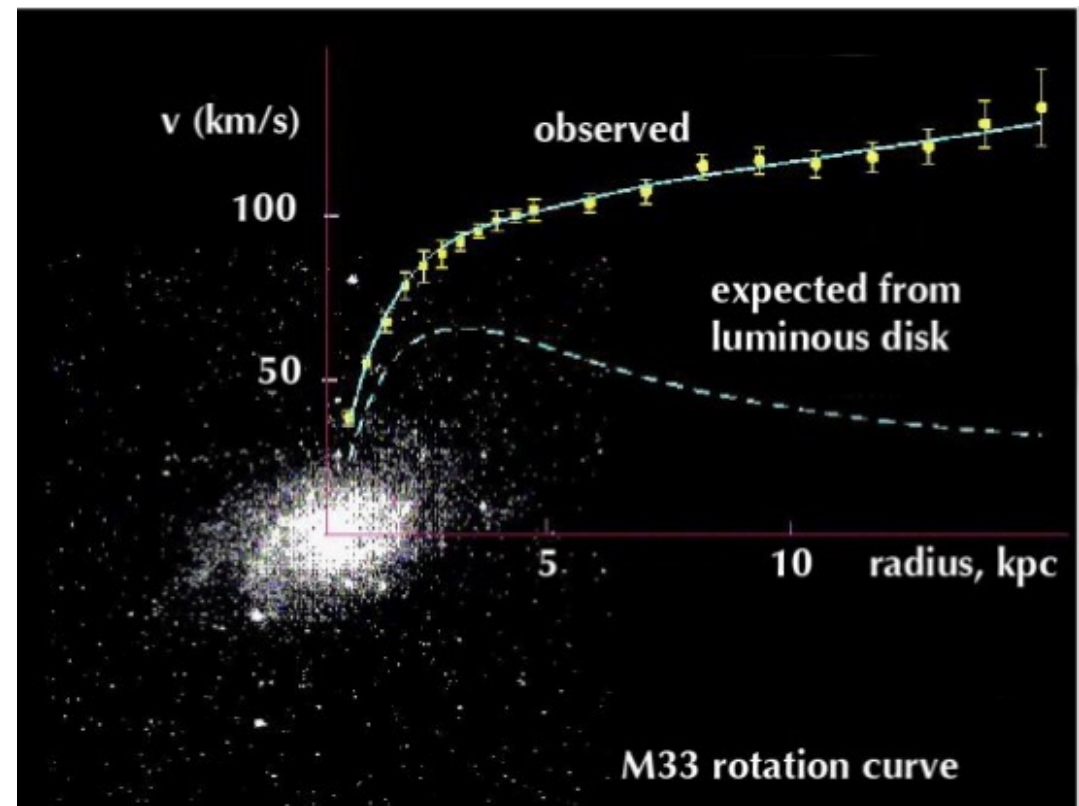


- Sappiamo che la simmetria CP non è sempre rispettata, ovvero abbiamo la “violazione di CP”.
- La violazione di CP potrebbe essere importante per capire la mancanza di anti-materia nell’universo.

Un'altra questione aperta: la Materia Oscura

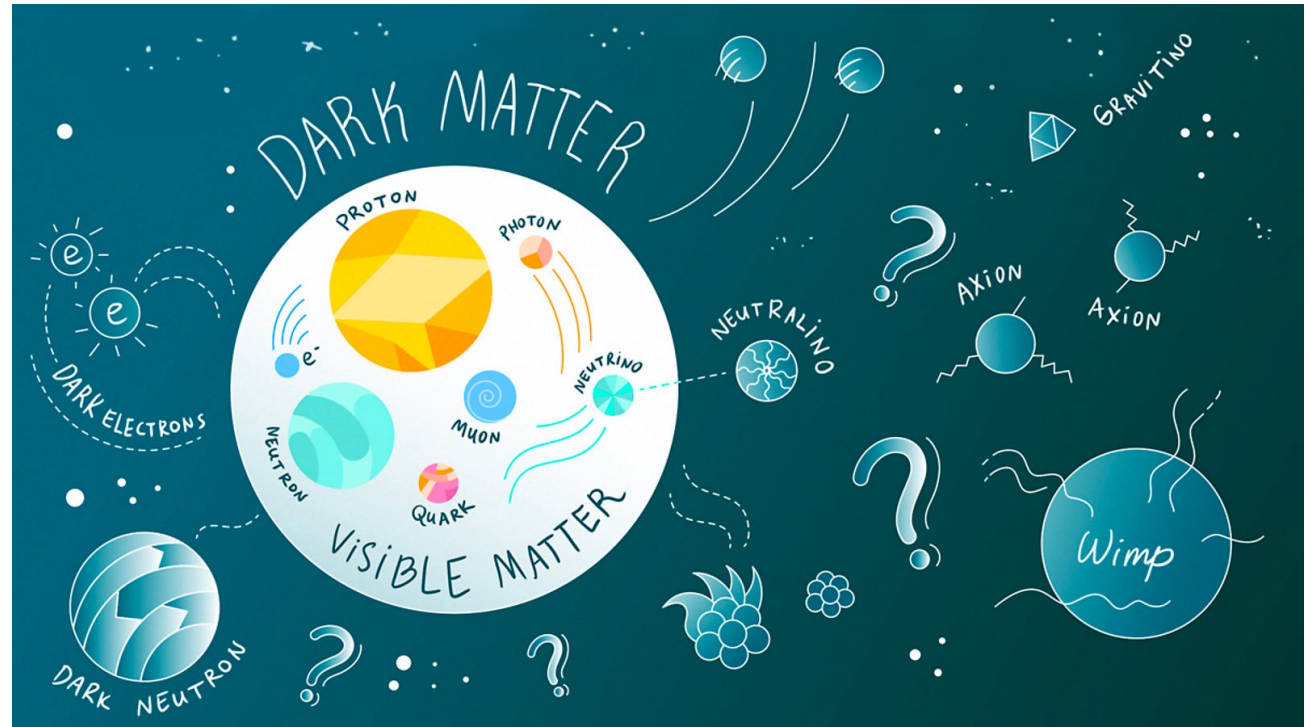


- Solo ~5% dell'universo è visibili ai nostri telescopi e quindi ben compreso
- 24% dell'universo è fatto di materia oscura
- Evidenze di materia oscura: **velocità angolare delle galassie**, lente gravitazionale
- Ancora più misteriosa: energia scura – 71% dell'universo



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



Large Hadron Collider (LHC)



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

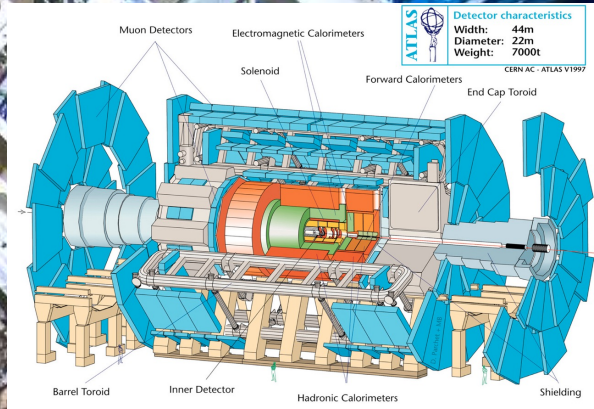
120,000
CORES RUNNING

CERN'S OPENSTACK CLOUD
ACROSS TWO DATA CENTERS

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.



UOMO

Effetti collaterali felici: Spin-offs

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



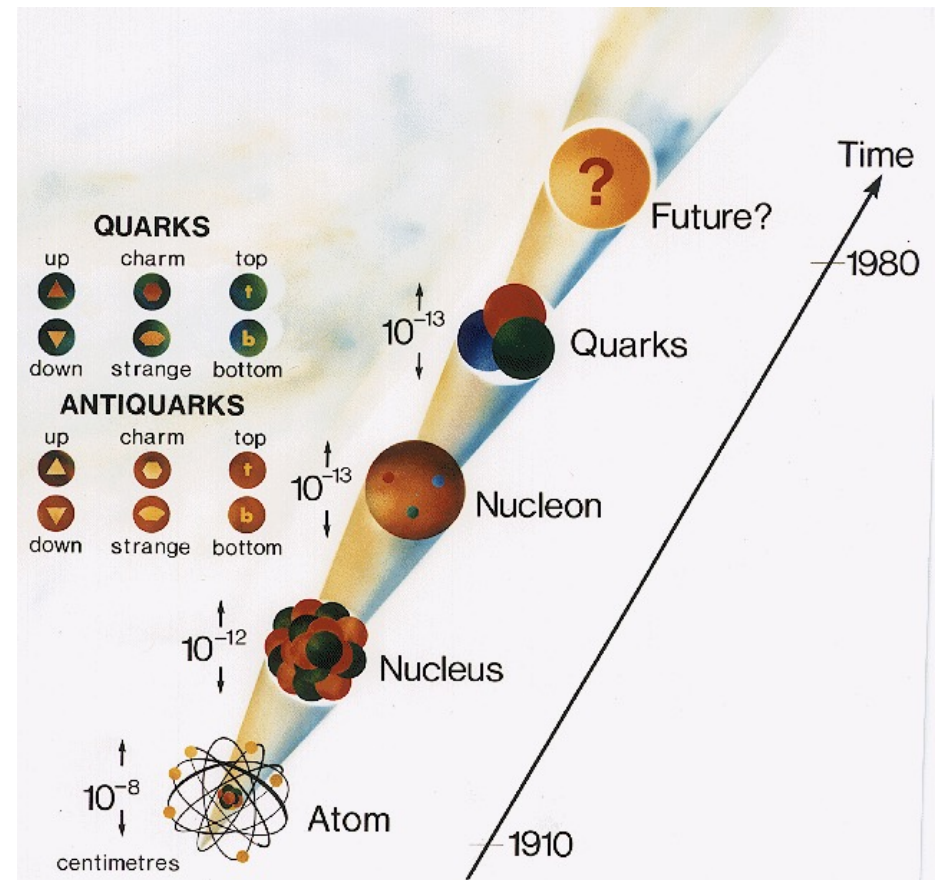
Per concludere...

- 
- 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 fondamentale 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.

backup slides...

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

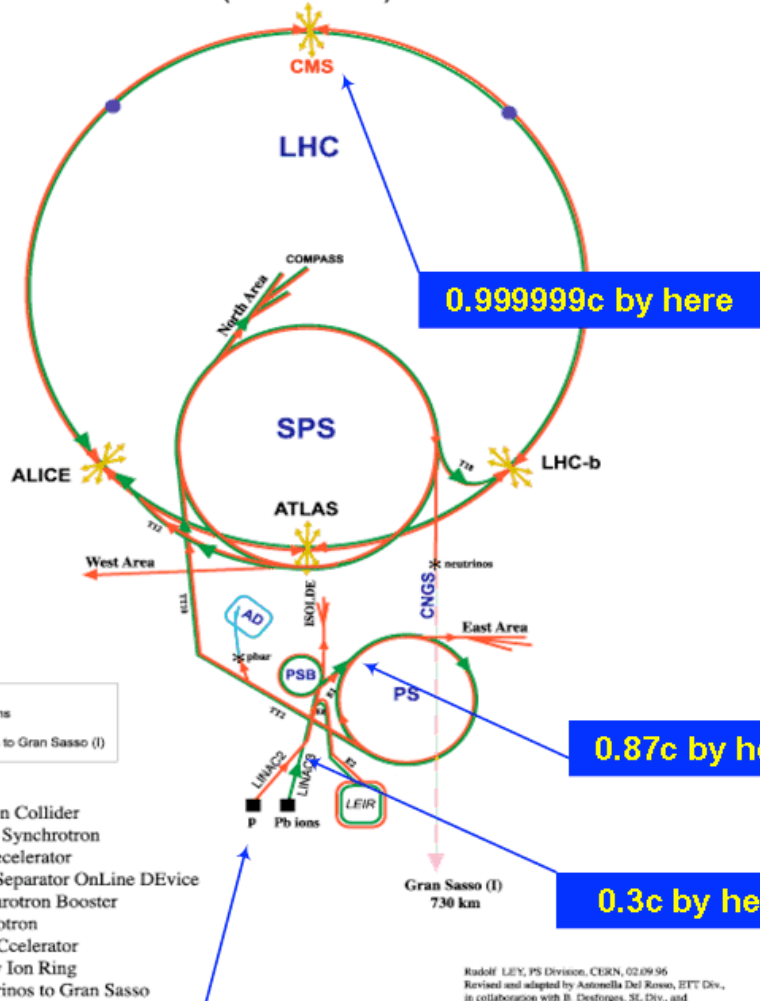


Tanti modi per studiare il mondo

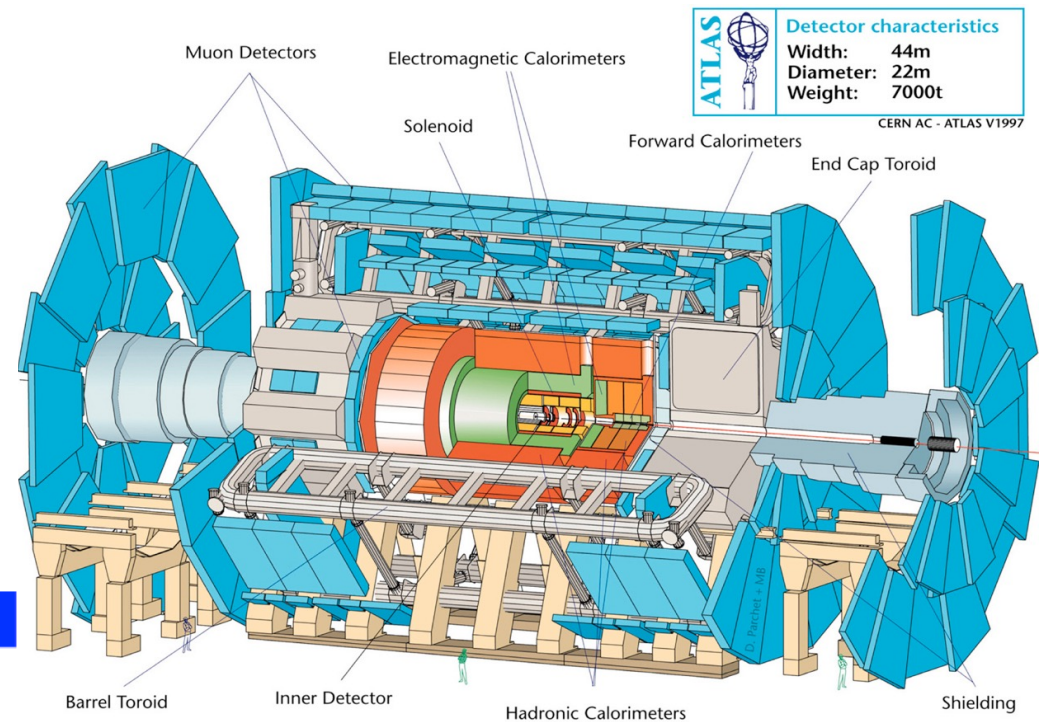


Major experiments

CERN Accelerators
(not to scale)



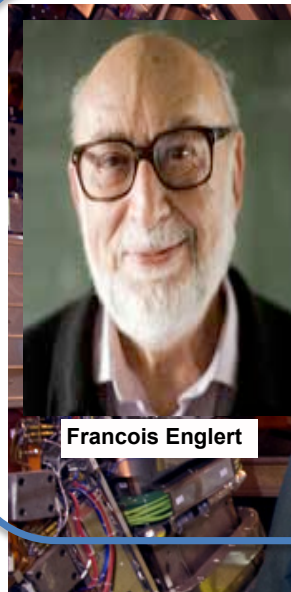
ATLAS



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

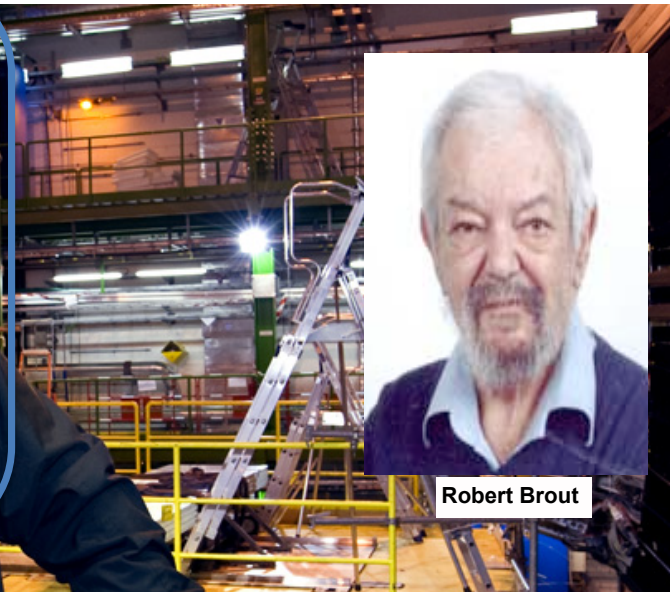
Premio Nobel
2013



Francois Englert



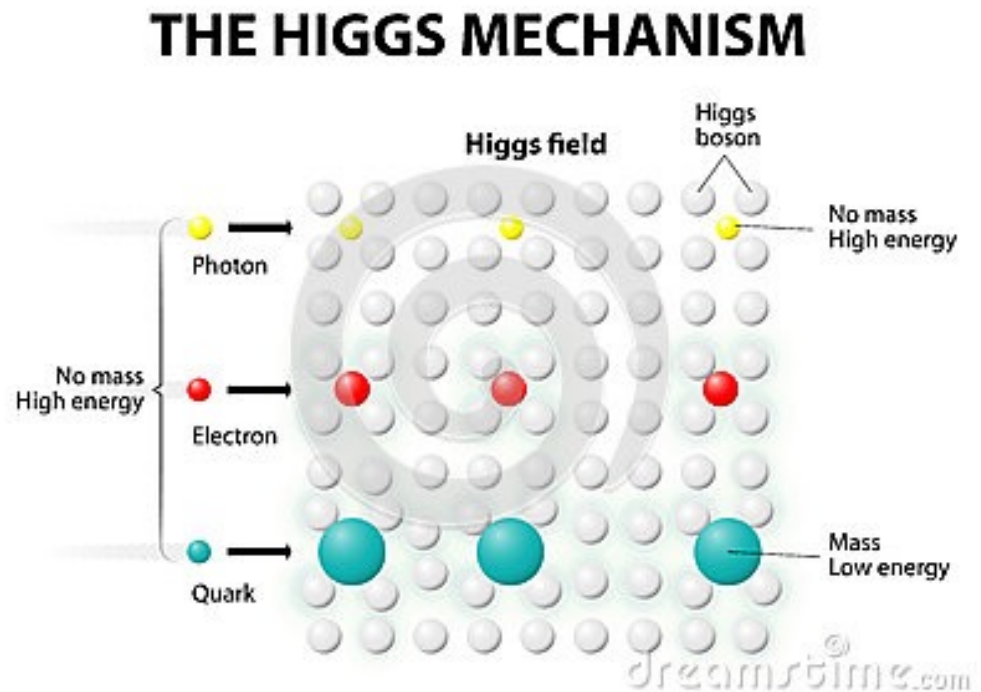
Peter Higgs



Robert Brout

Meccanismo di Higgs

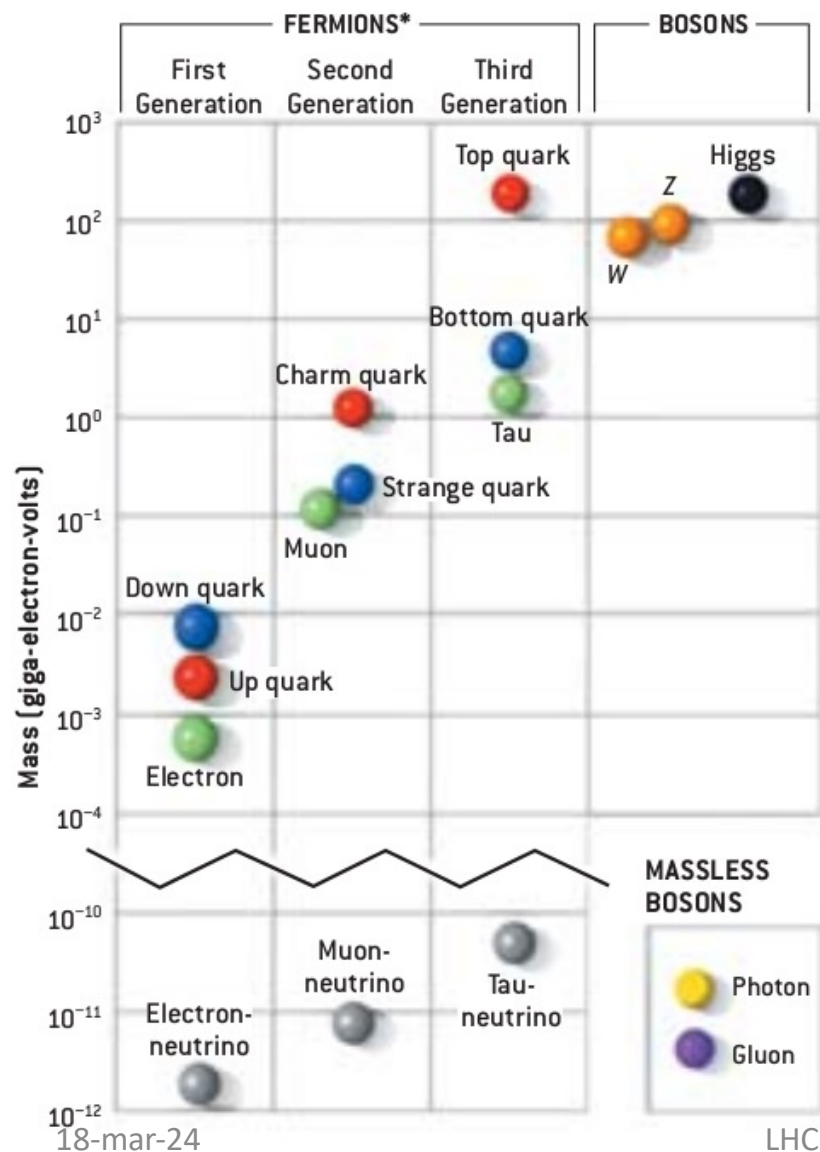
- Introduce un nuovo campo che permette le particelle di acquisire massa
- Più forte una particella interagisce con il campo maggiore è la sua massa



**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

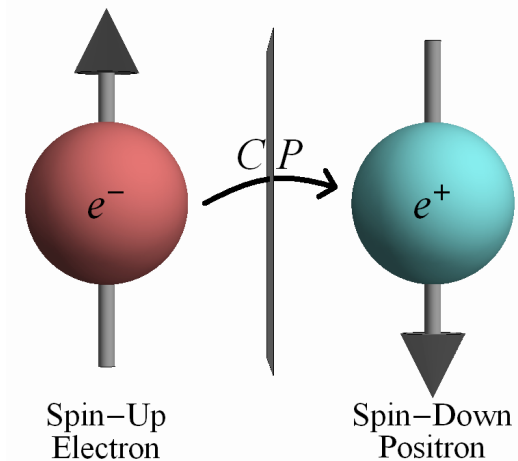
Perché?

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.

33

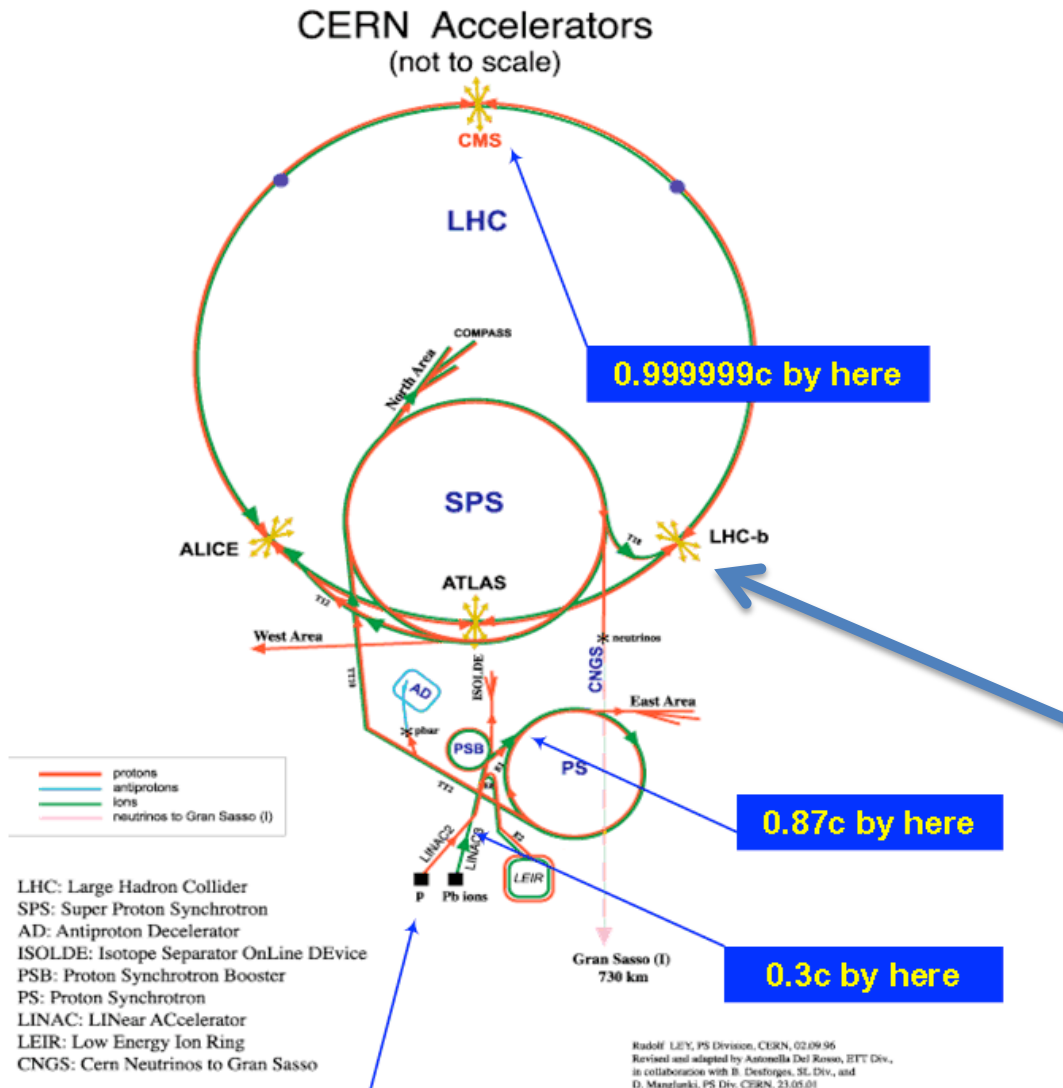
21 Marzo 2019: LHCb annuncia la scoperta di violazione di CP nella particella D^0 – non si sa ancora se compatibile con il MS

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

