



# Una breve introduzione alla Fisica della Particelle

John Walsh

INFN Sezione di Pisa

International Masterclass, 16 Febbraio 2023



# Scopo della fisica delle particelle

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

- Quali sono i costituenti della materia?



***PARTICELLE  
ELEMENTARI***

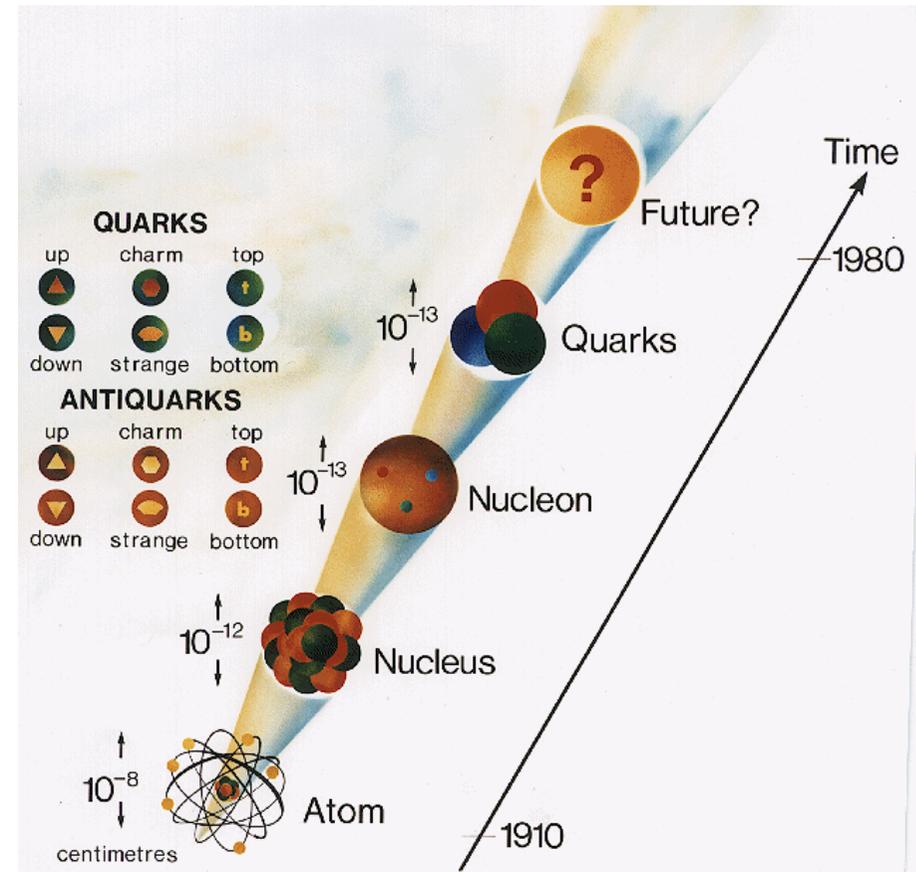
- Come si possono descrivere le interazioni tra questi costituenti?



***FORZE  
FONDAMENTALI***

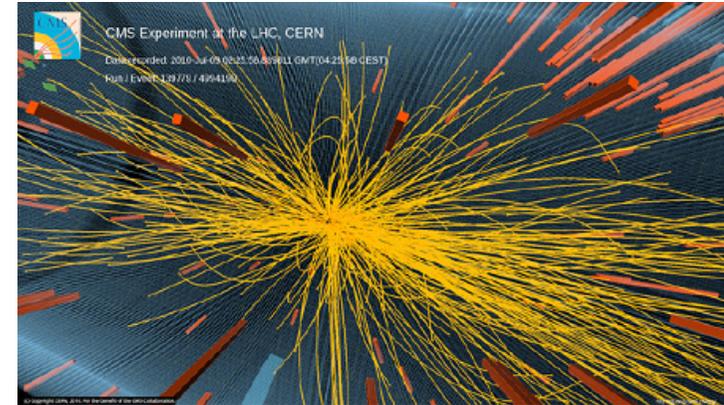
# Cercare gli oggetti più piccoli...

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



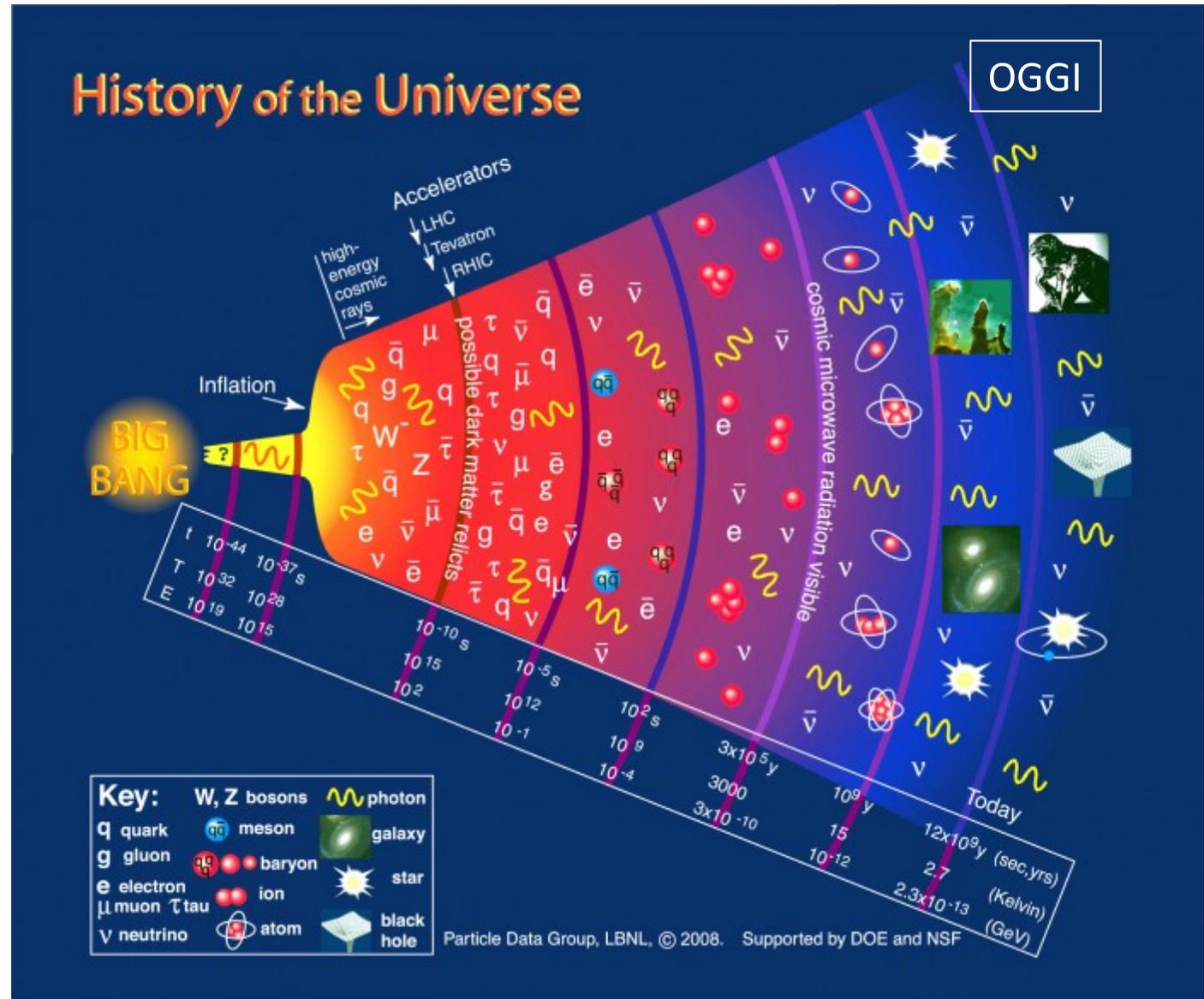
# Oggetti piccoli, oggetti grandi:

- **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.

***Oggi siamo fisici sperimentali***

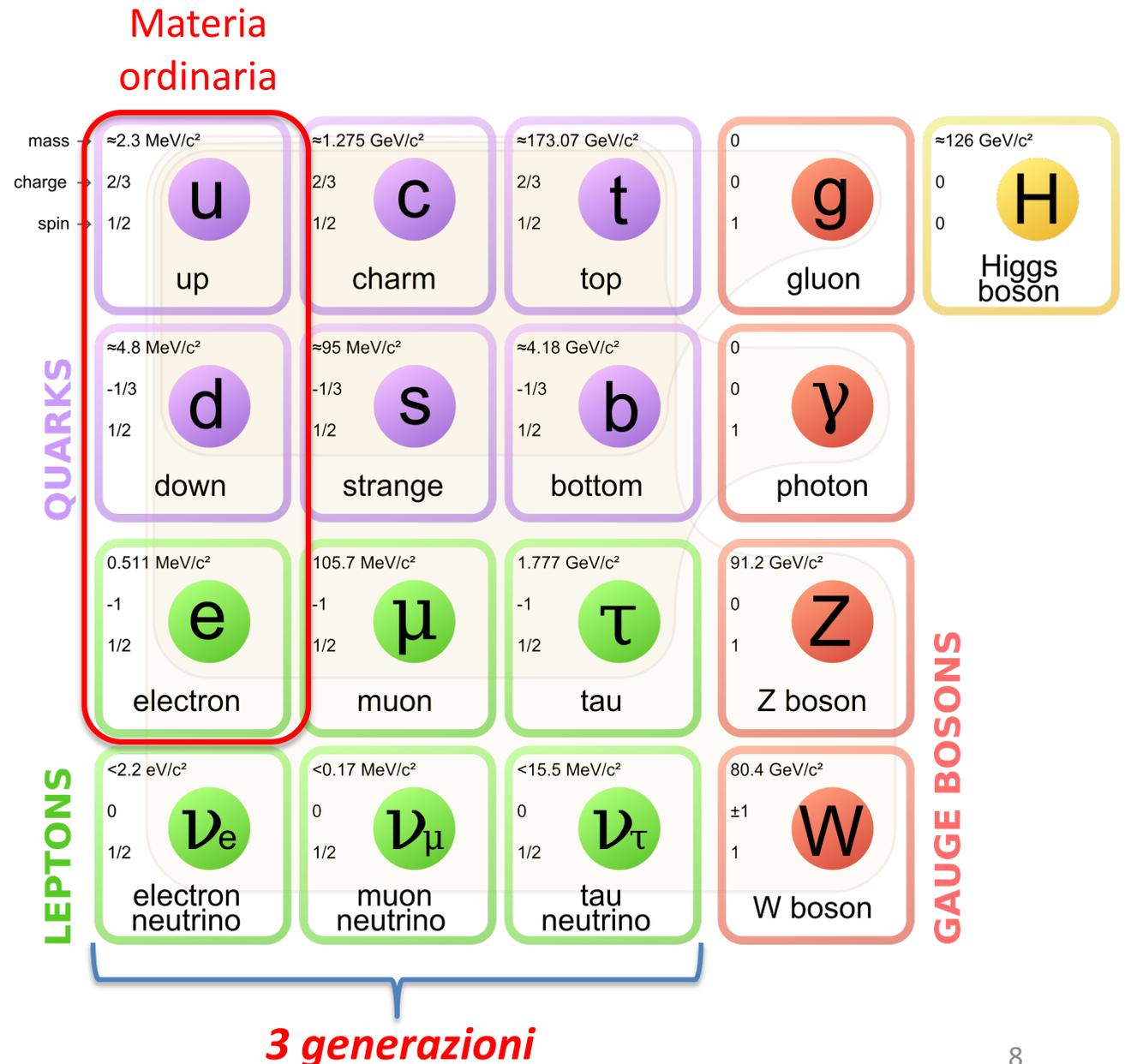


# Teoria della fisica delle particelle

- **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

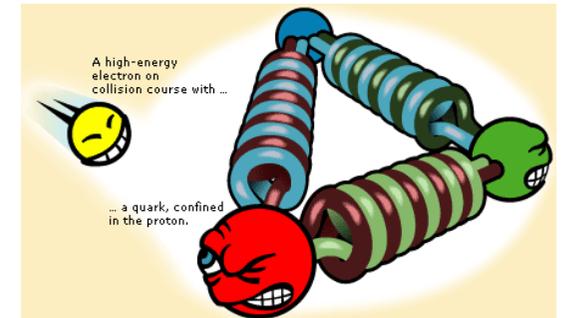
- Divise in **quark**, **leptoni**, **bosoni**
- Solo **3 particelle** (u,d,e) costituiscono **la materia ordinaria**
  - protons: **uud quarks**
  - neutrons: **ddu quarks**
  - **electrons**
- Le altre 14 sono **esotiche**, esistevano al tempo del Big Bang, oggi tipicamente solo in laboratorio
- Eccezioni: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



# Le 4 forze fondamentali

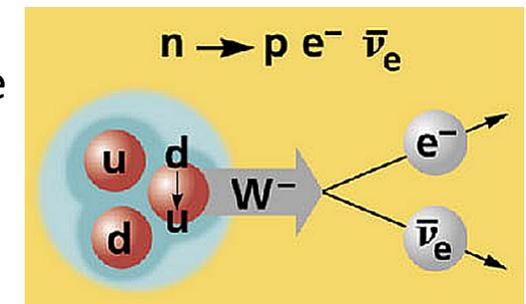
Forza	Intensità relativa	Particelle coinvolte	Particella mediatrice	Esempio
Forte	1	quarks	gluone	forza nucleare
Elettromagnetica	$10^{-2}$	particelle cariche	fotone	forza magnetica
Debole	$10^{-8}$	quarks & leptoni	bosoni W, Z	radioattività
Gravità	$10^{-39}$	particelle massive	gravitone	moto di una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

Forte

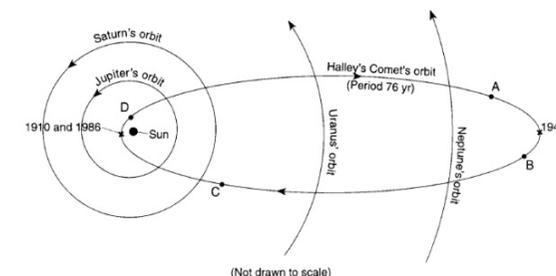


Elettromagnetica

Debole



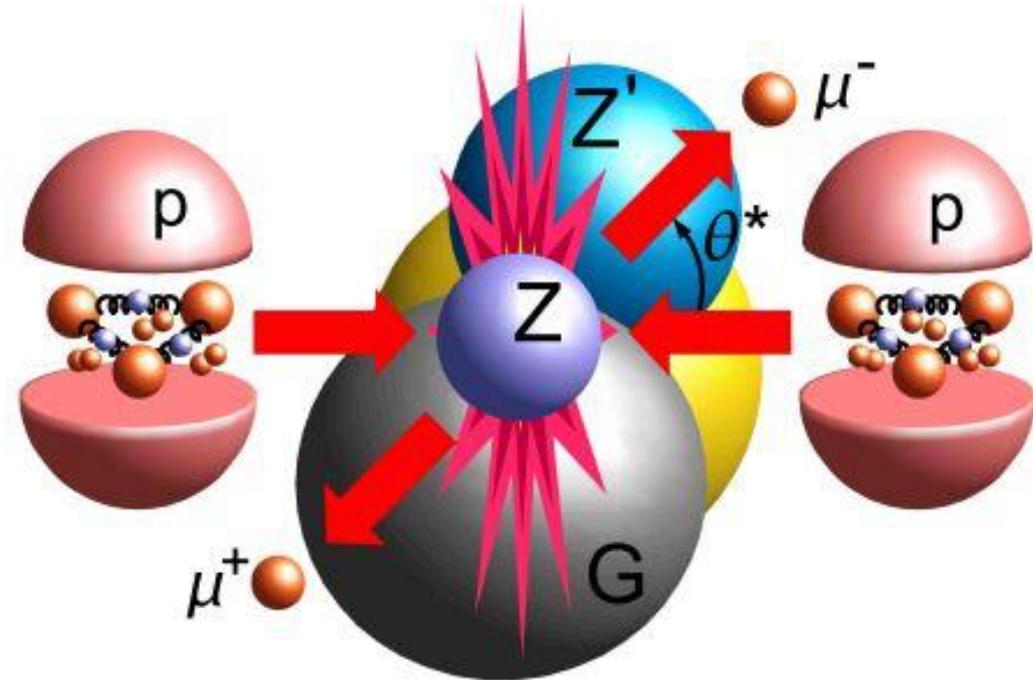
Gravità



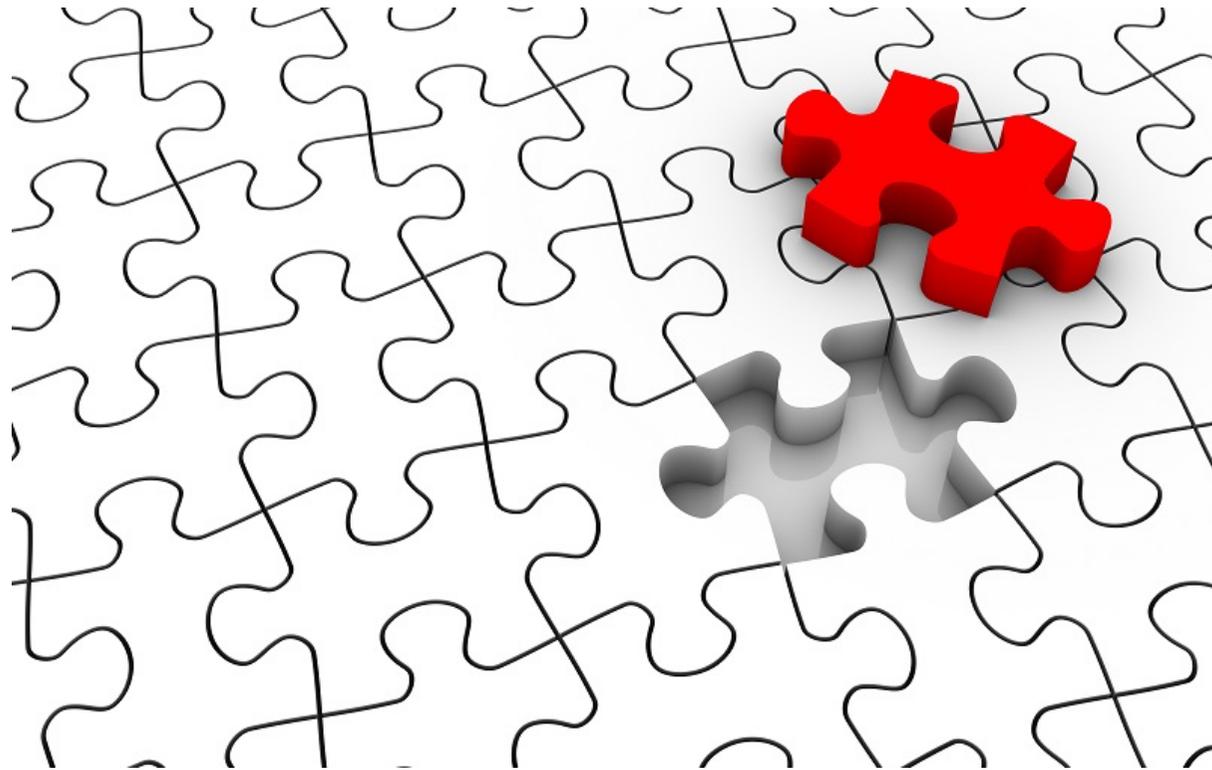
Incluse nel Modello Standard

# 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**

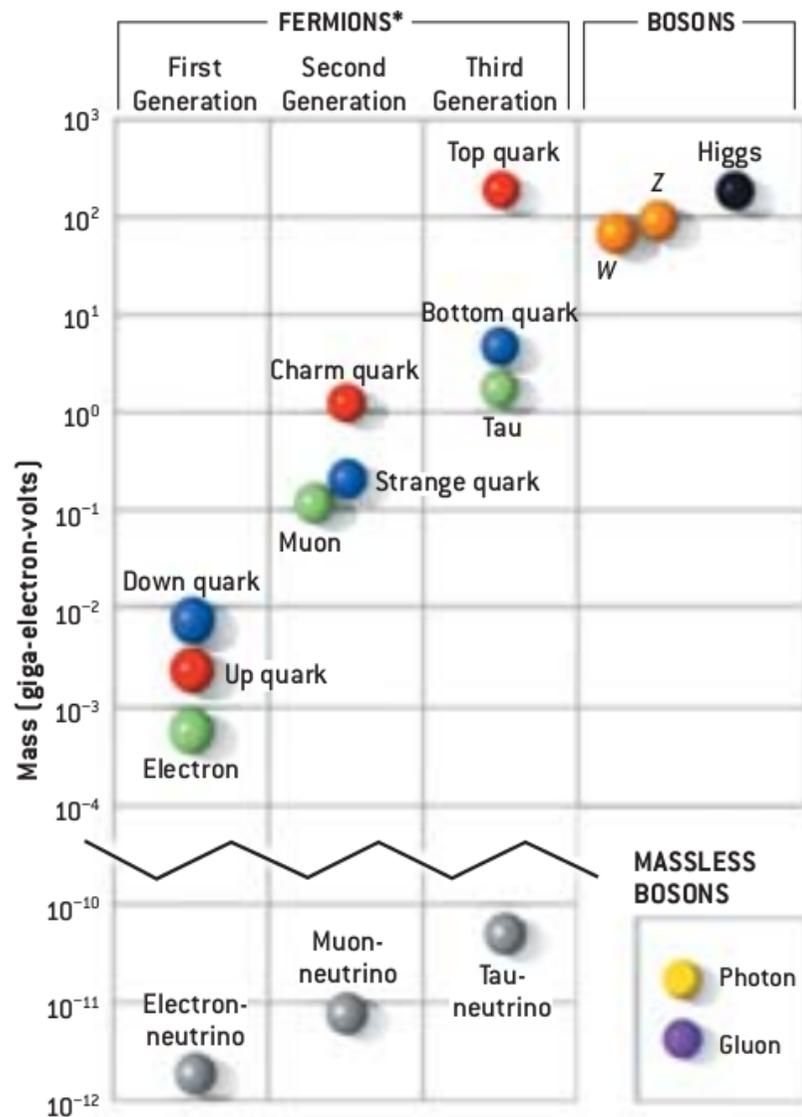


# L'ultimo (?) pezzo del puzzle: Bosone di Higgs



ovvero: il problema di massa

# La massa delle particelle ricopre 11 ordini di grandezza -



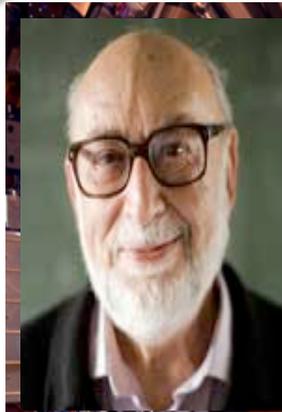
- Non c'è nessuna regolarità nei valori di massa delle particella elementari
- I neutrini sono molto leggeri
- L'elettrone è 350.000 volte più leggero del quark più pesante
- Tra i bosoni, il fotone è privo di massa, ma i bosoni W e Z pesano circa come 80-90 protoni

***Perché?***

# *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



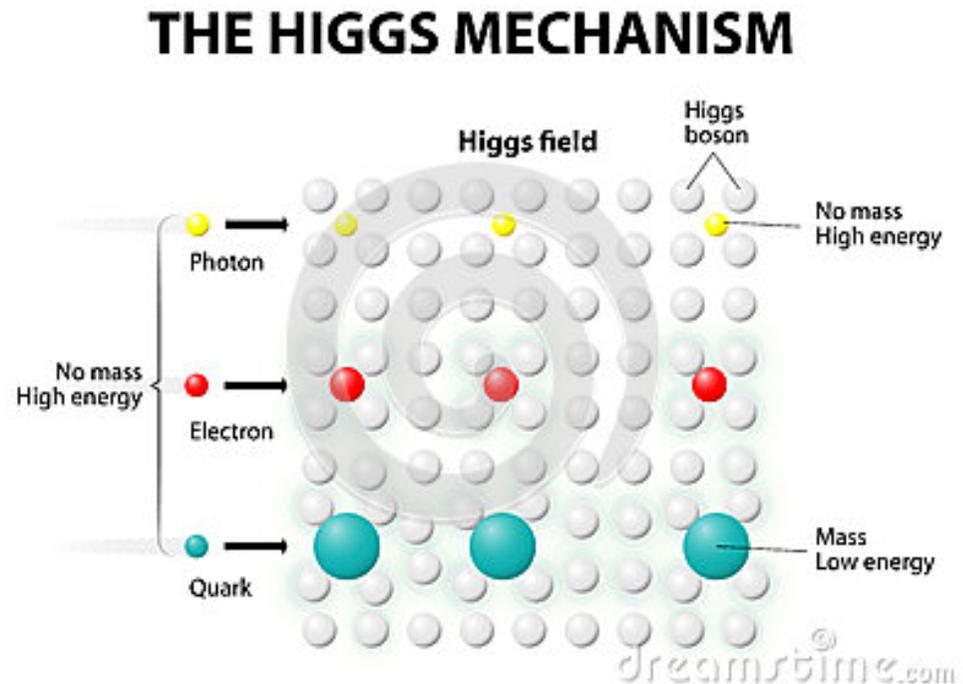
Peter Higgs



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

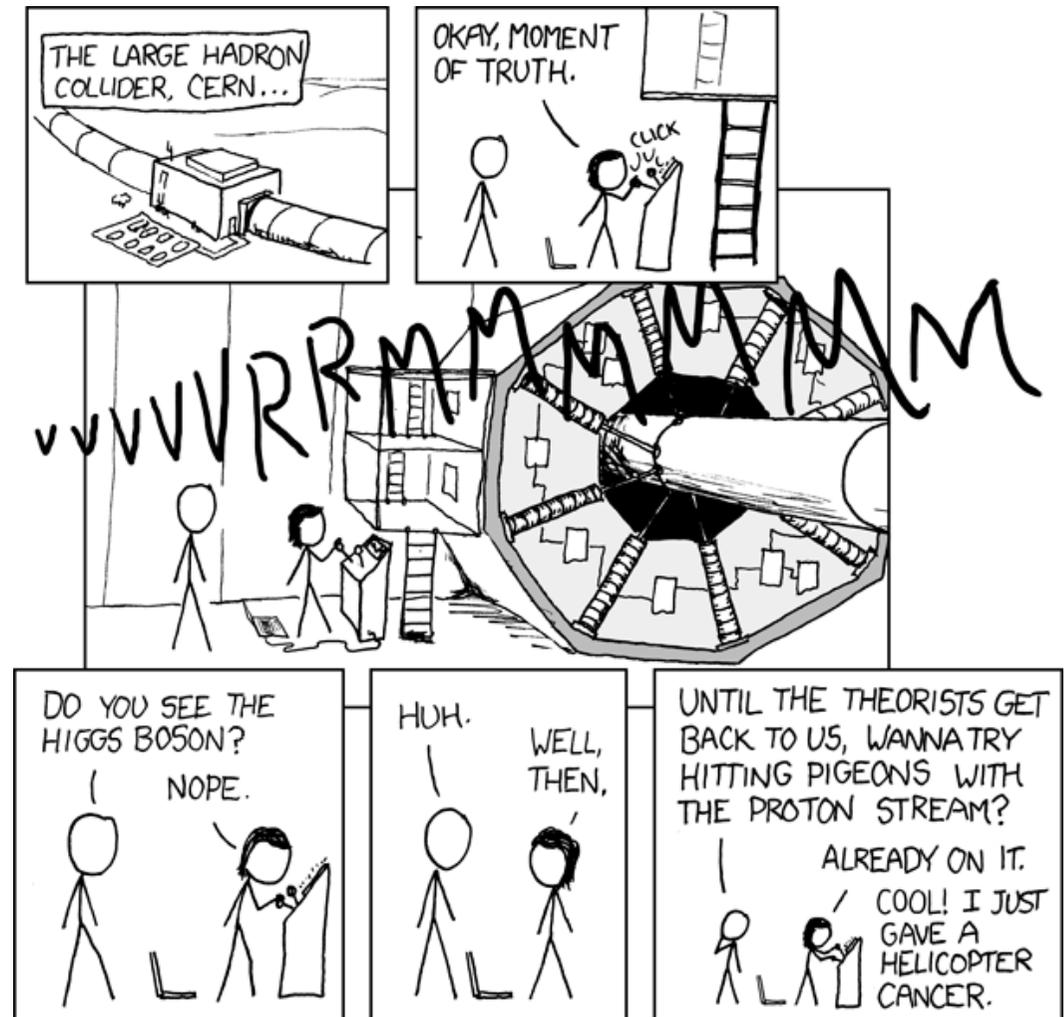


**Conseguenza importante:  
prevede l'esistenza di una nuova  
particella: il bosone di Higgs**

Però, nessuna  
previsione della massa  
della nuova particella.

# La caccia allo Higgs

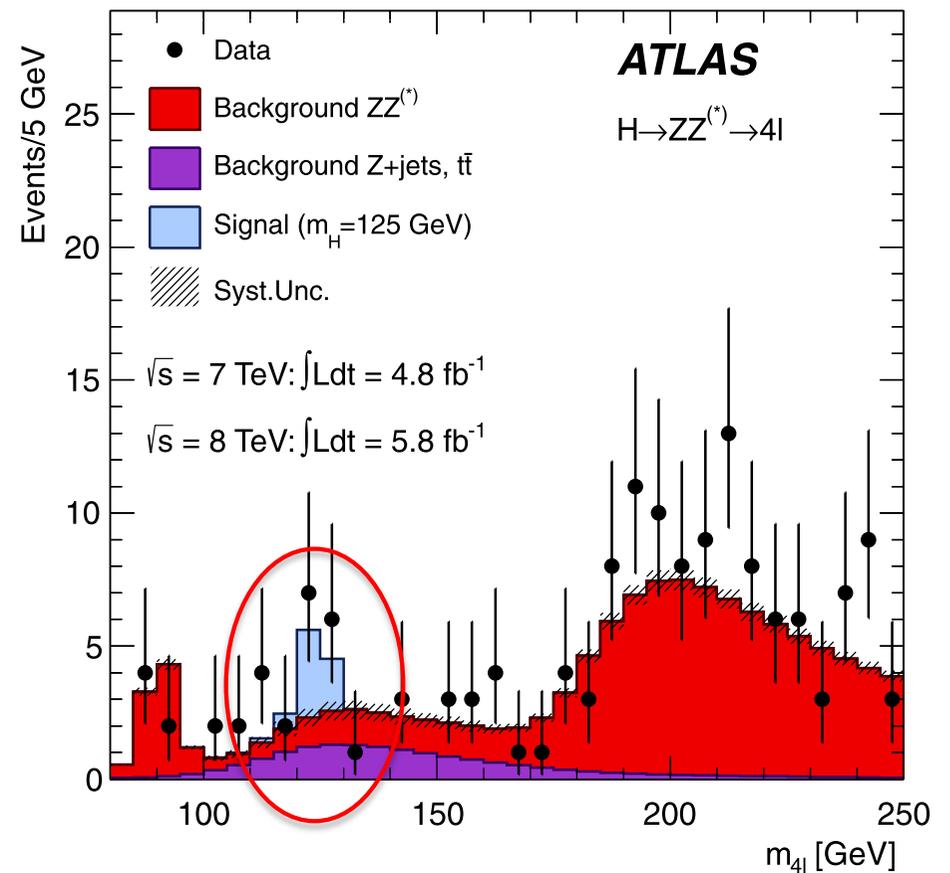
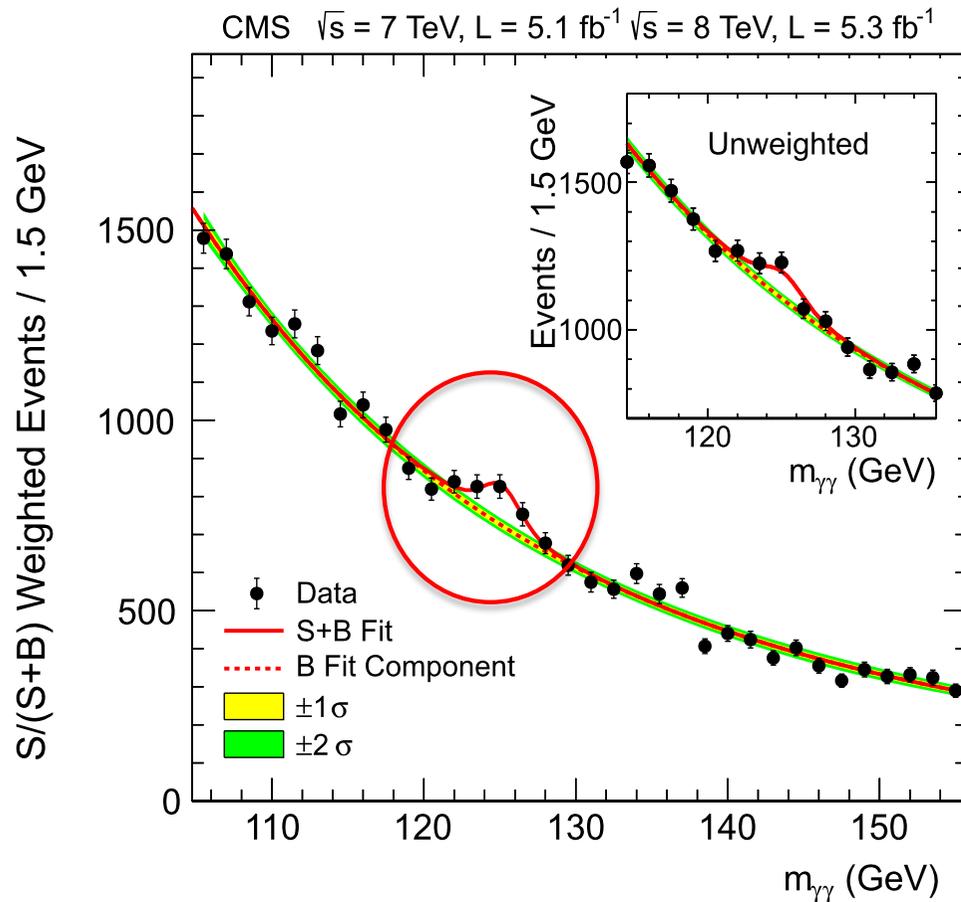
- Lunga ricerca che è durata decenni
- In realtà, solo con LHC abbiamo avuto abbastanza energia per produrre tanti bosoni di Higgs
- Finalmente...



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

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

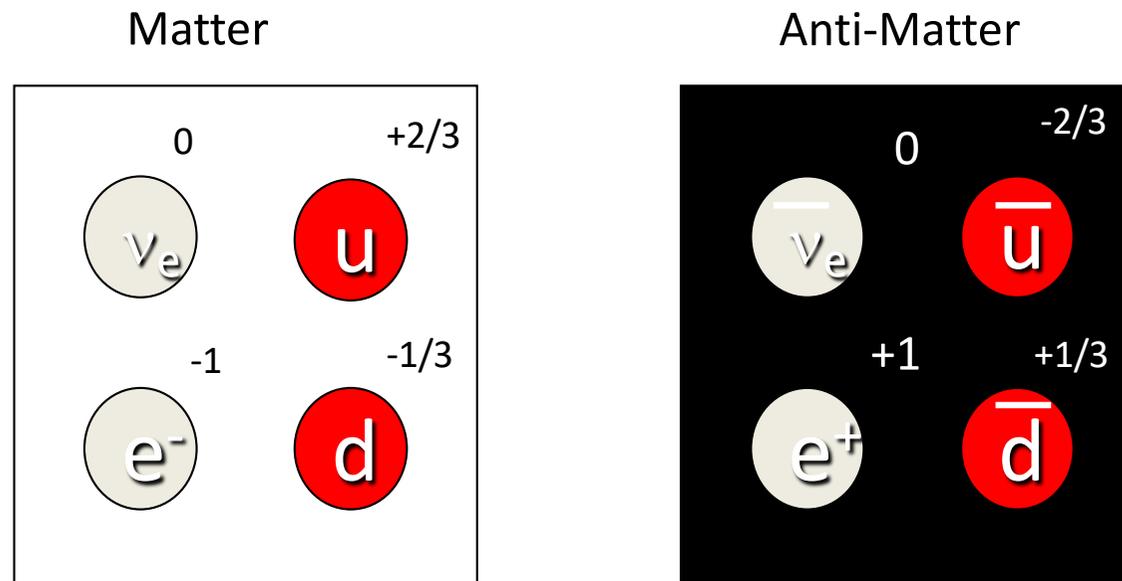


# Dopo il bosone Higgs?

- L'ultima particella del Modello Standard trovata
- Ma rimangono tante domande:
  - quella delle masse diverse
  - 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.



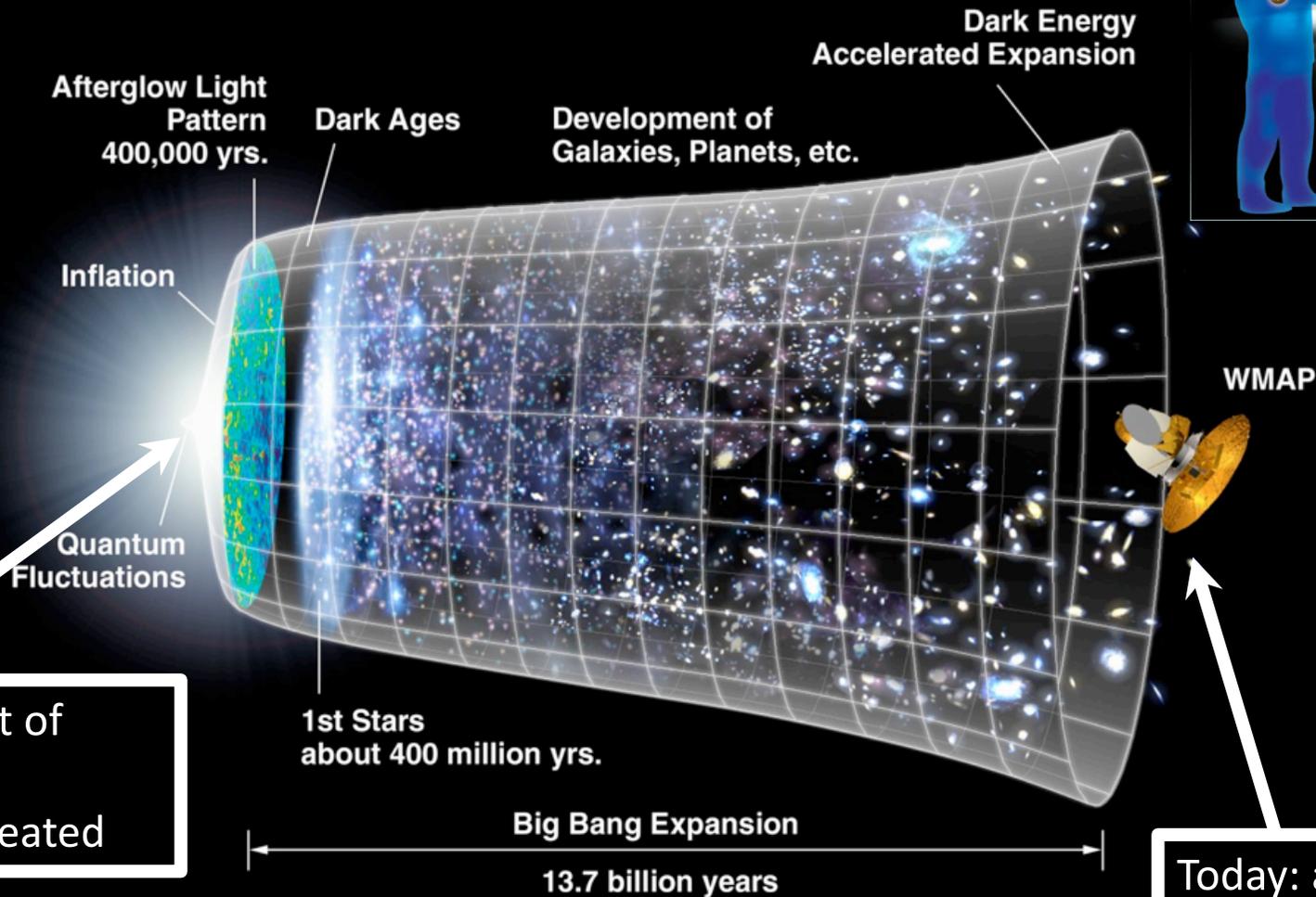
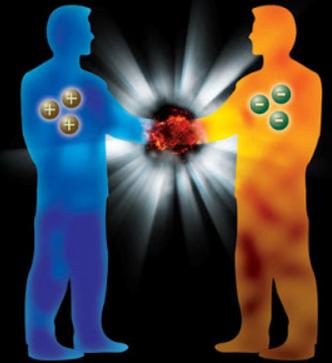
Si può creare in laboratorio:

[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?



Equal amount of matter and antimatter created

So where did all the antimatter go?

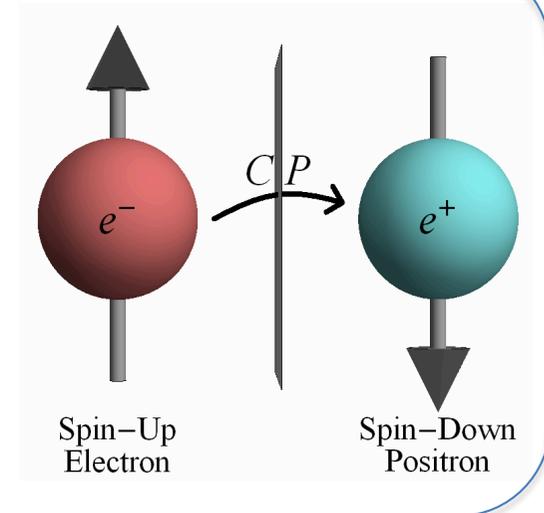
Today: almost no antimatter in the universe

# 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)*

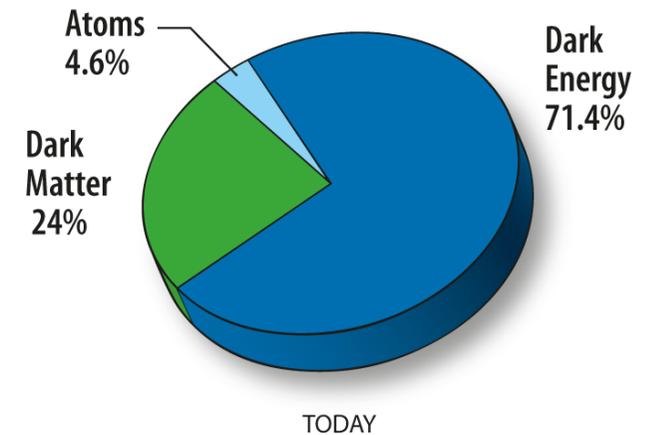


Però, **questo fenomeno non è sufficiente a spiegare il perché l'universo sia fatto di materia e non di anti-materia**. Deve esistere qualche nuova interazione che viola CP.

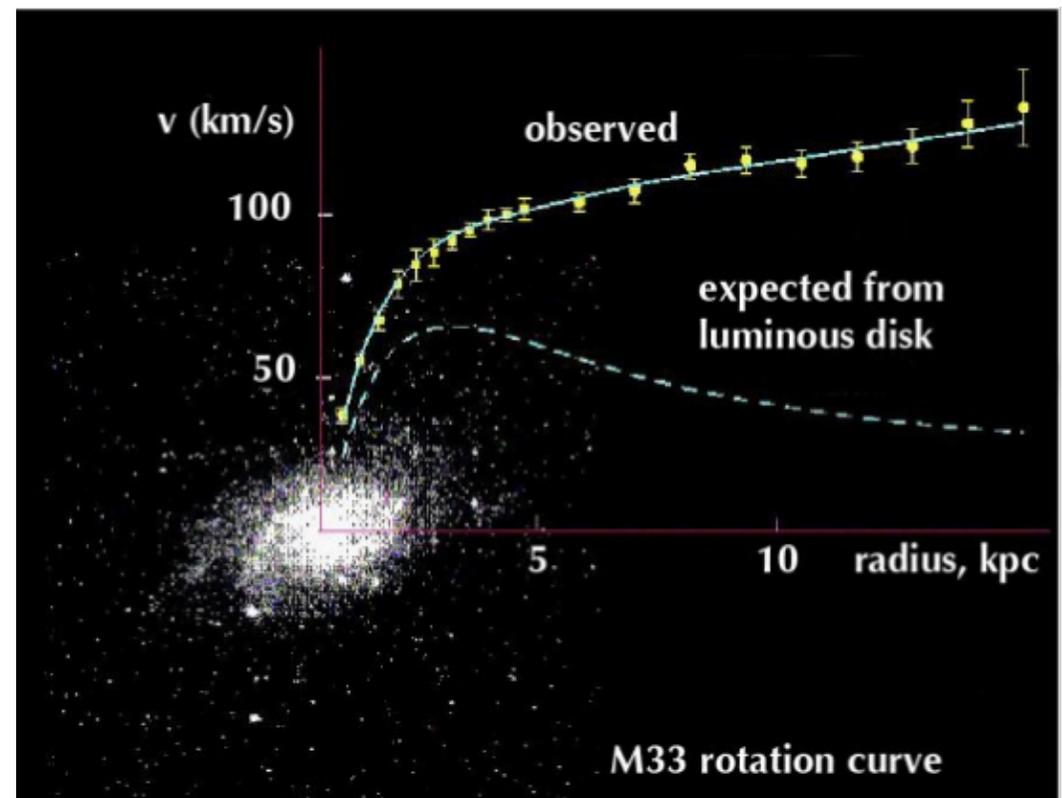
20

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

# 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)



# 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.

# 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

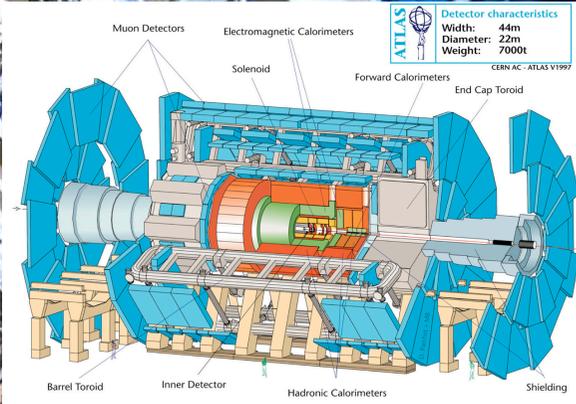
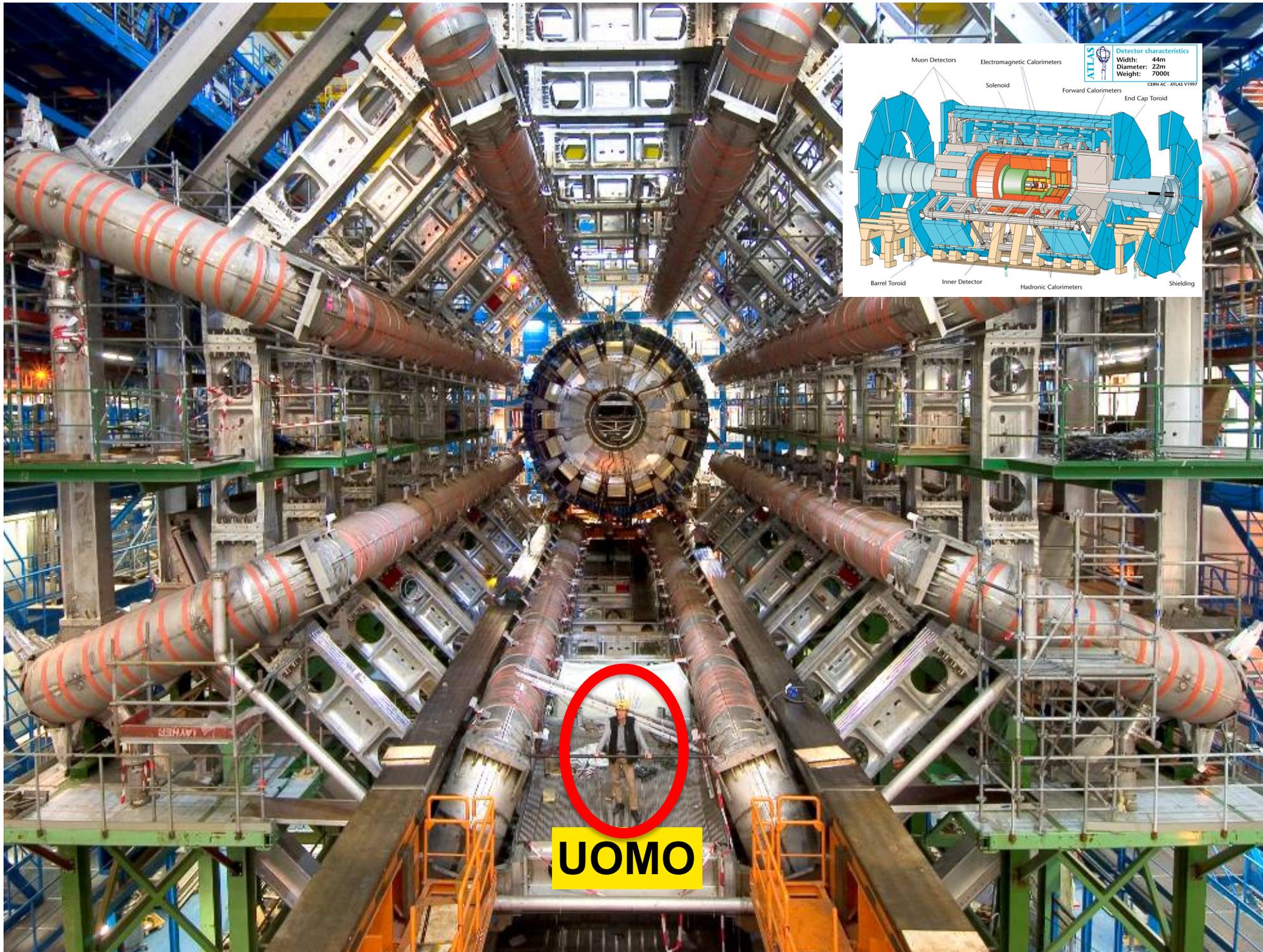
# Effetti collaterali felici: Spin-offs

- 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*
    - ...

# 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**

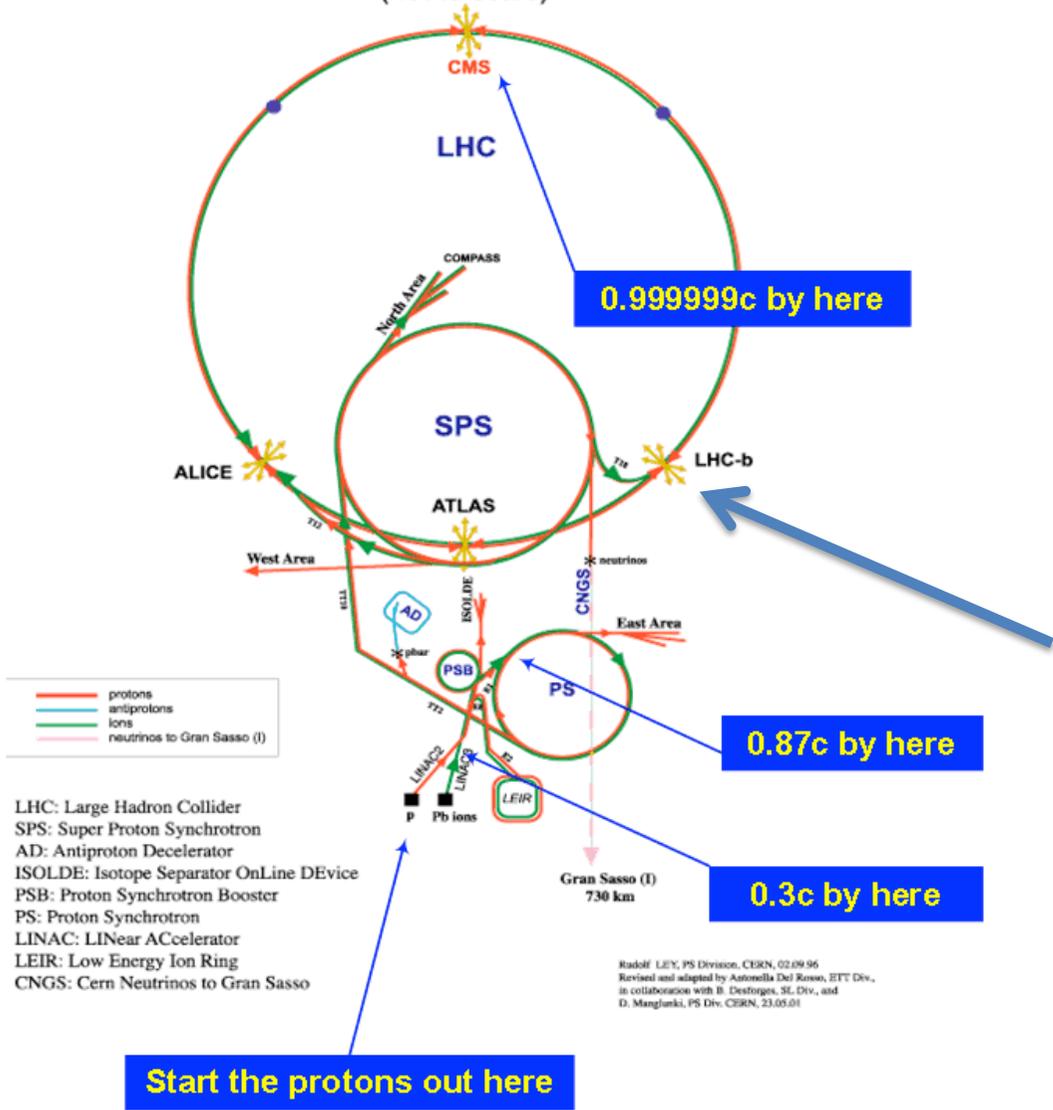




**UOMO**

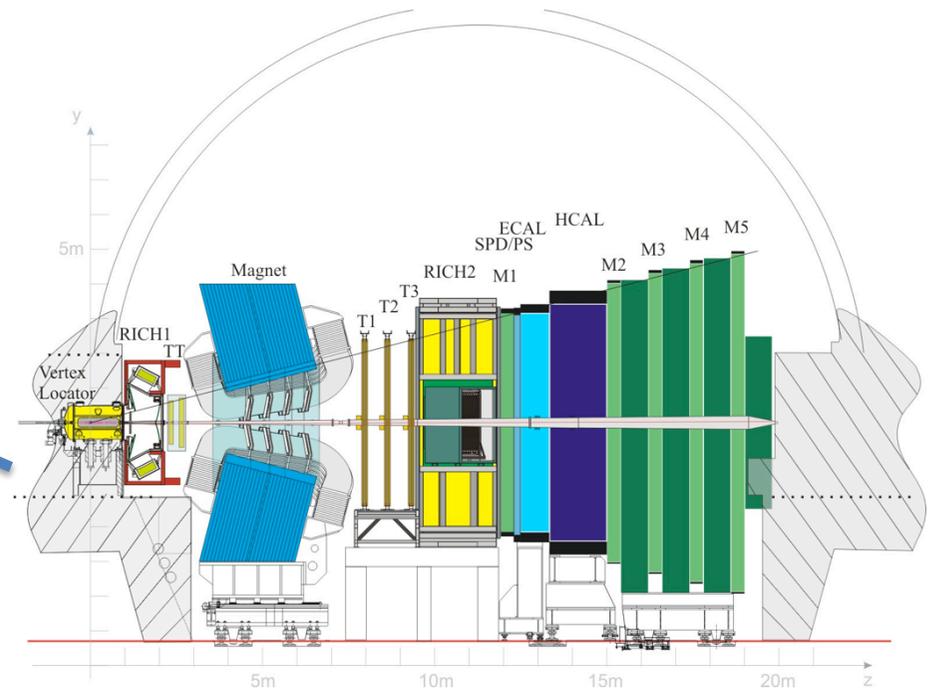
# Major experiments

CERN Accelerators  
(not to scale)



Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96  
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, EFT Div.,  
 in collaboration with B. Desforges, SL Div., and  
 D. Manglinski, PS Div. CERN, 23.05.01

## LHCb





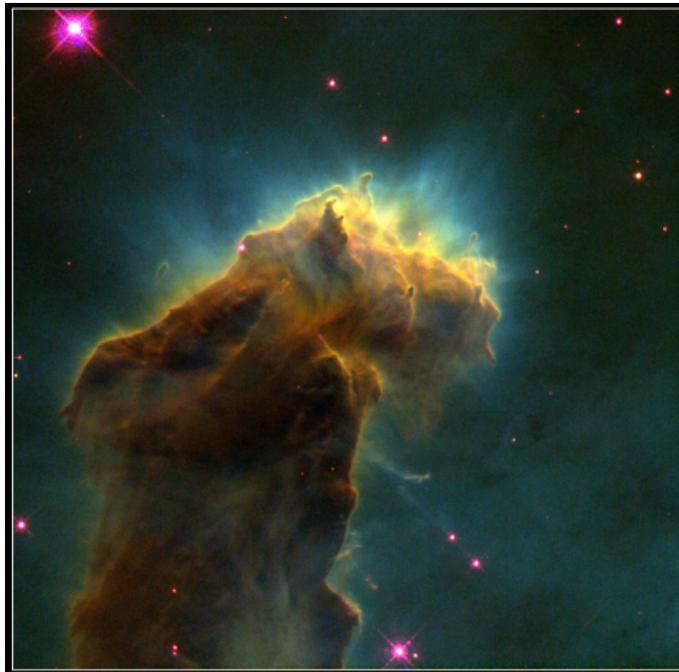
# Per concludere...

- 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.

2:51:53

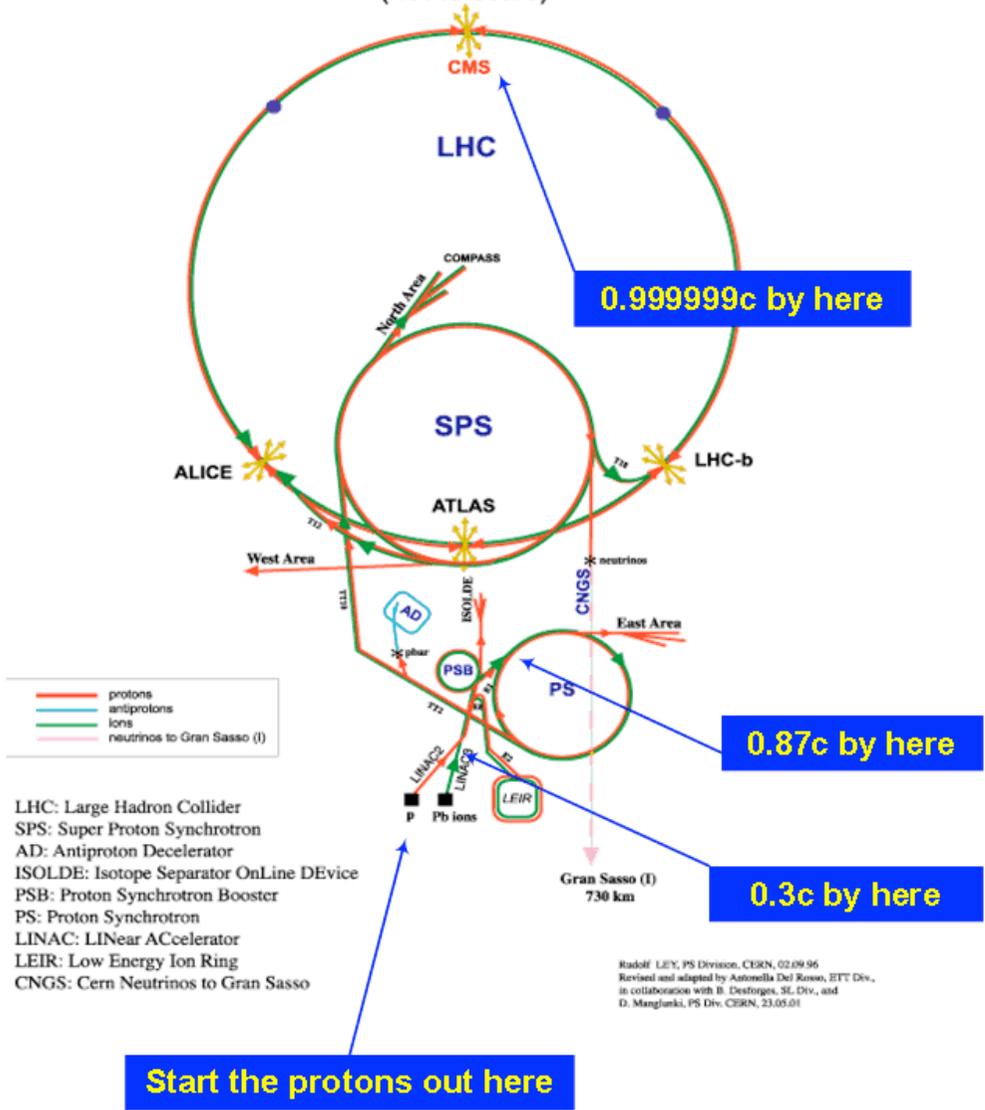
backup slides...

# Tanti modi per studiare il mondo



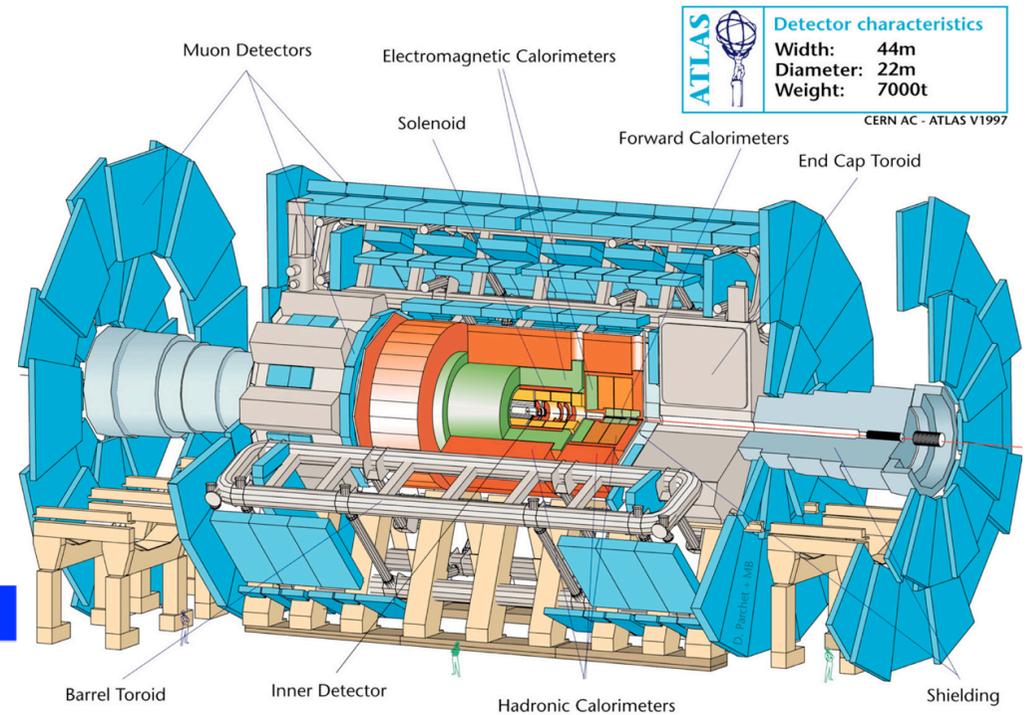
# Major experiments

CERN Accelerators  
(not to scale)



Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96  
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, EFT Div.,  
 in collaboration with B. Desroges, SL Div., and  
 D. Manglinski, PS Div. CERN, 23.05.01

# ATLAS



Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997