

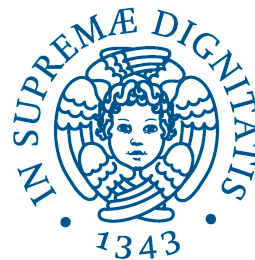


Una breve introduzione alla Fisica della Particelle

John Walsh

INFN Sezione di Pisa

International Masterclass, 2 Marzo 2016



SCUOLA
NORMALE
SUPERIORE



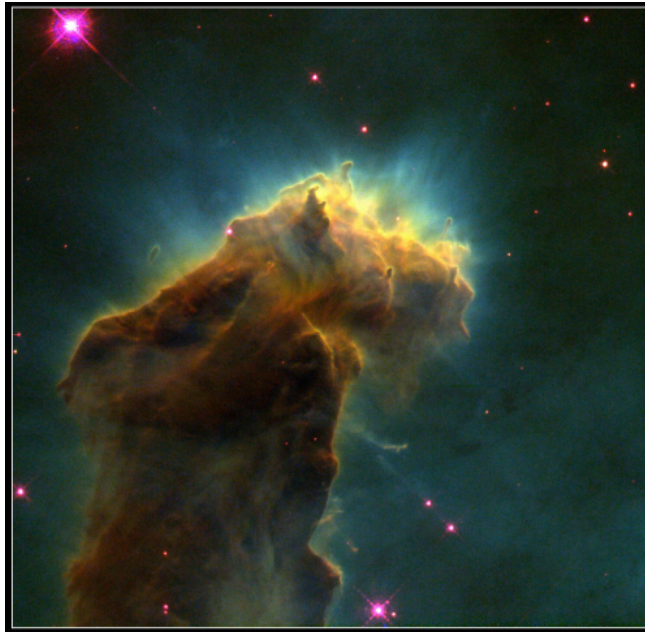
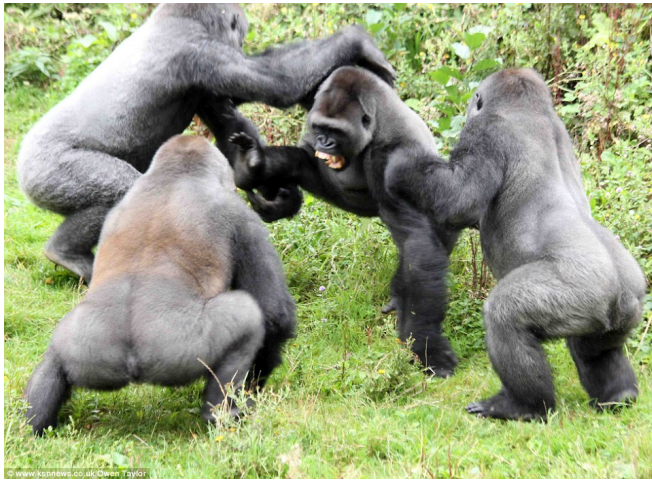
Scopo della fisica delle particelle

- Studiare (e capire!) l'universo al livello più fondamentale, più elementare
- Quali sono i costituenti della materia?
- Come si possono descrivere le interazioni tra questi costituenti?

***PARTICELLE
ELEMENTARI***

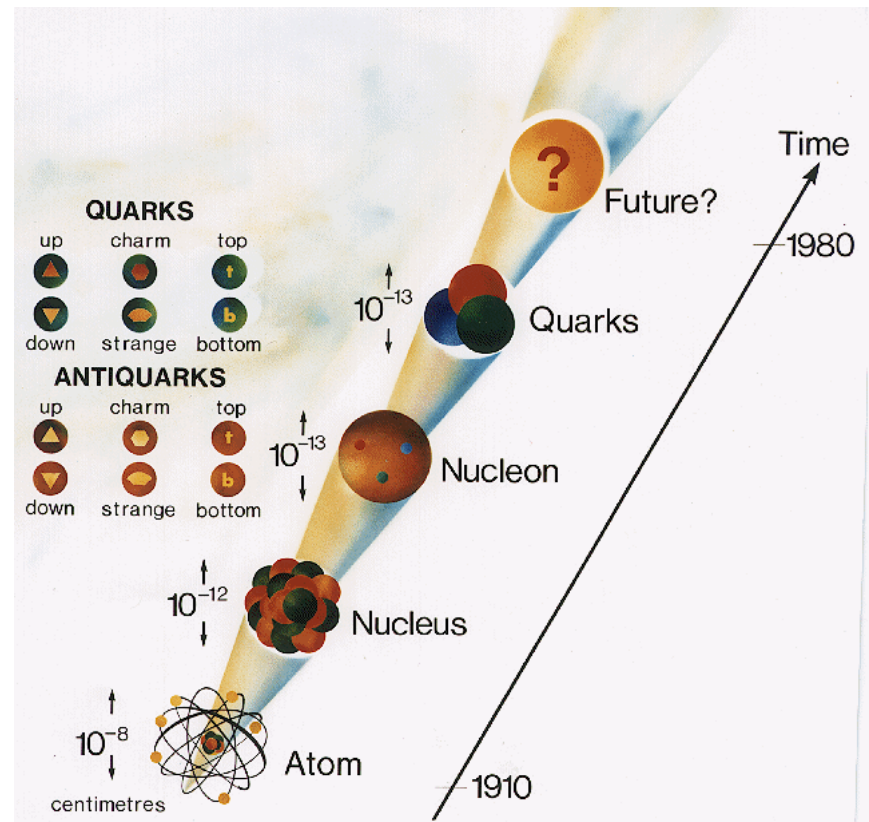
***FORZE
FONDAMENTALI***

Tanti modi per studiare il mondo



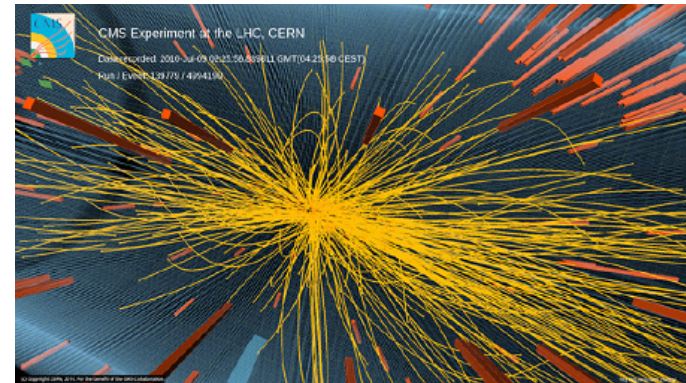
Il mondo del piccolo...

- Storicamente, lo studio del piccolo ha spesso portato grandi progressi nella nostra comprensione dell'universo
- Strumenti → Acceleratori, collider



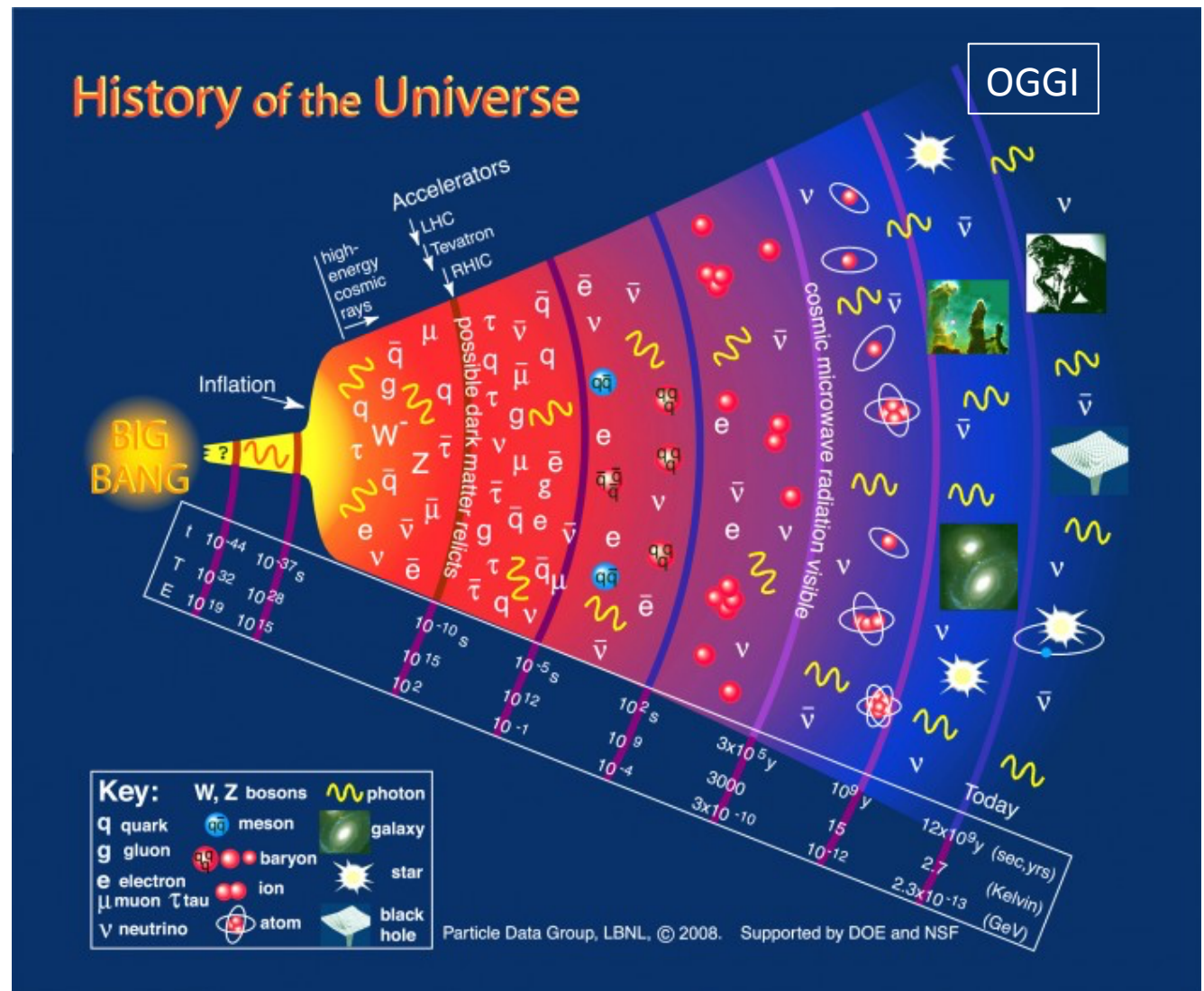
Curioso legame con il cosmo:

- Big Bang Theory:
l'universo che vediamo oggi dipende fortemente dalle particelle create al Big Bang e le interazioni tra loro
- Inoltre, possiamo osservare particelle elementari che ci arrivano dallo spazio (raggi cosmici)



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

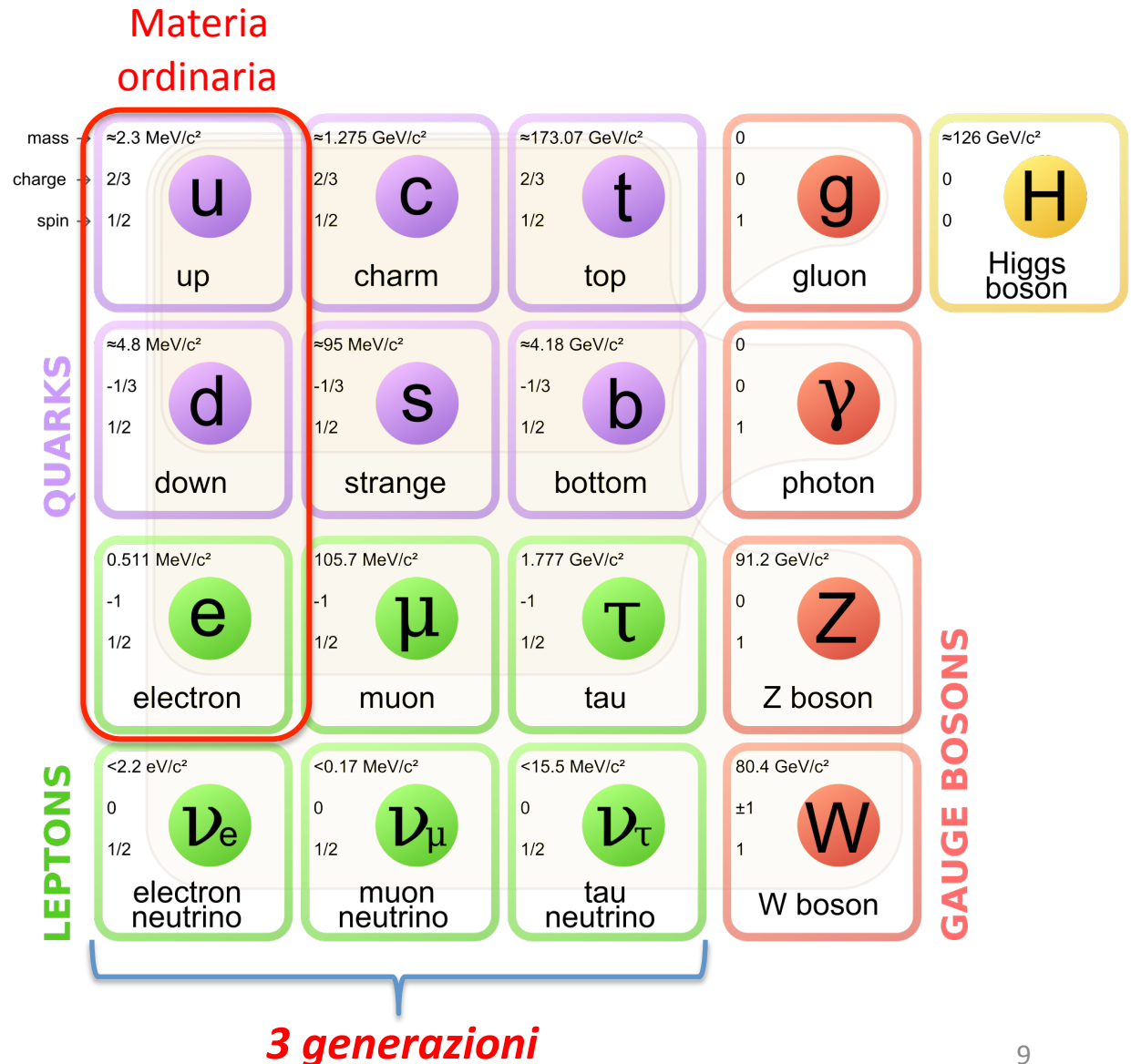


Teoria: Modello Standard

- Teoria che descrive le particelle elementari e 3 delle 4 forze fondamentali.
- Modello matematico basato sulla teoria quantistica dei campi
- Sviluppata nella seconda metà del XX secolo.
- Impressionante successo: nessuno è riuscito a confutarla

Le particelle del Modello Standard

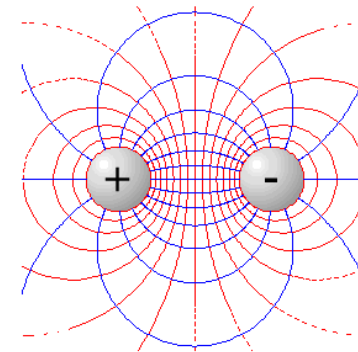
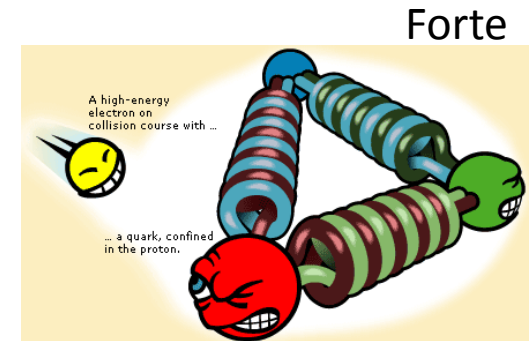
- Quark, leptoni, bosoni
- 3 particelle (u,d,e) costituiscono la materia ordinaria
- Le altre 14 sono esotiche, esistevano al tempo del Big Bang, oggi solo in laboratorio



Le quattro forze

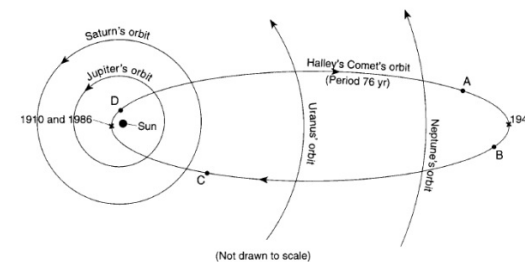
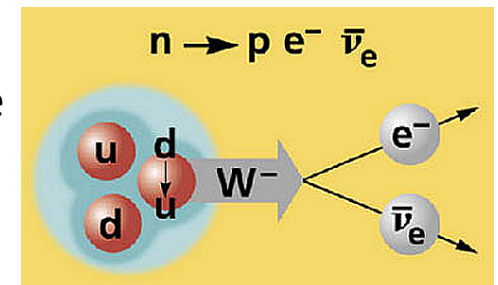
Modello Standard

- **Interazione forte**
 - tra quarks, mediata dal gluone
- **Interazione elettromagnetica**
 - tra particelle cariche, mediata dal fotone.
 - 100 volte più debole della forza forte
- **Interazione debole**
 - tra quark e leptoni, mediata dai bosoni Z,W.
 - 10,000,000 volte più debole della forza forte
- **Interazione gravitazionale**
 - tra particelle con massa, mediata dal gravitone
 - 10^{39} volte più debole della forza forte



Elettromagnetica

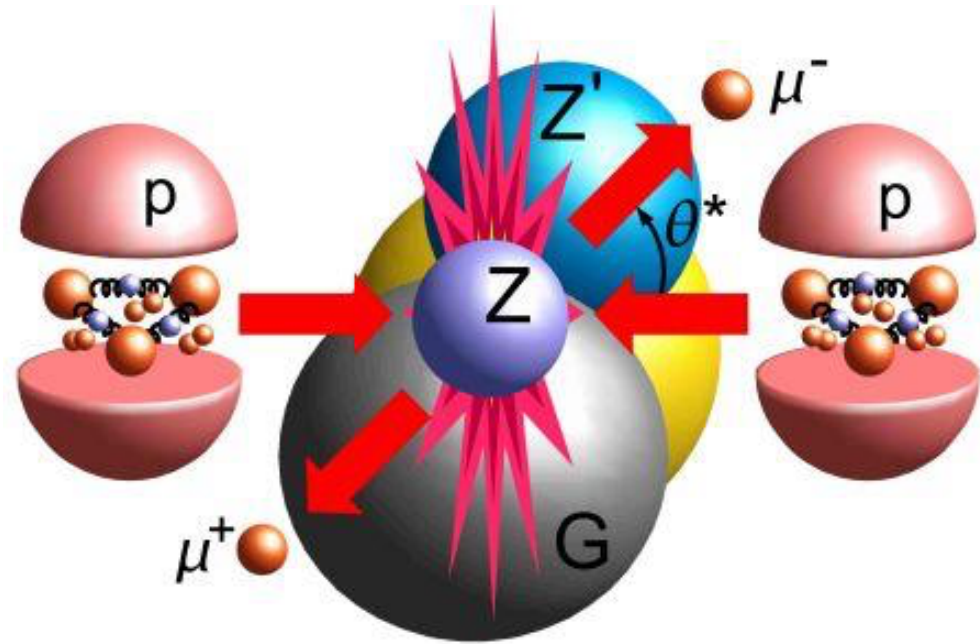
Debole



Gravità

Collisioni ad alta energia

- **Con collisioni violenti**, possiamo riprodurre le condizioni iniziali dell'universo
- Perché "alta energia"? Perché **$E=mc^2$** !
 - l'energia delle particelle che si scontrano (protoni) si trasforma in massa, creando particelle pesanti
- Ciò ci permette di studiare **particelle pesanti**, come i bosoni Z e H
- E cercare **particelle ancora non osservate**



Una nuova era nella scienza fondamentale

Large Hadron Collider (LHC)

La piu' grande impresa scientifica mai realizzata

Una macchina costruita al CERN per fare scoperte nel campo della fisica delle particelle: la Scienza del microcosmo e del macrocosmo

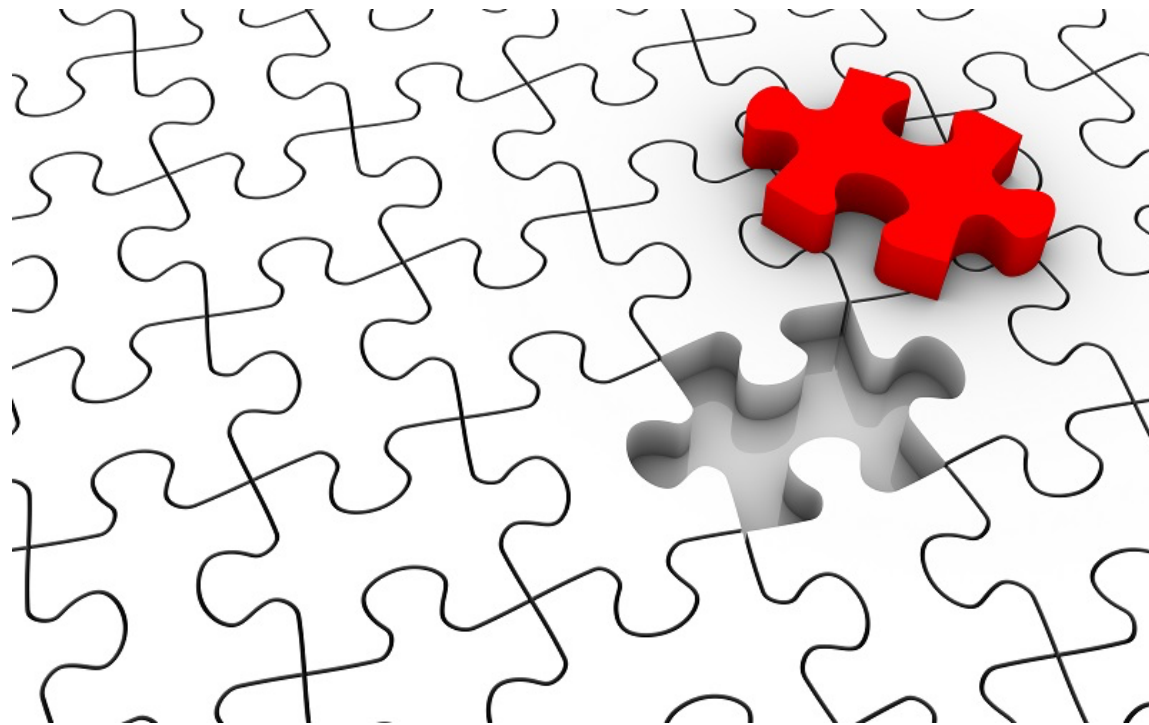


Il perché del LHC

- Trovare l'ultimo pezzo del Modello Standard: il bosone di Higgs
- Capire se il Modello Standard è completo
 - ci sono motivi per credere che non sia una teoria completa
- Se ci sono fenomeni al di là del Modello Standard, cosa sono?
 - nuove particelle
 - nuove interazioni

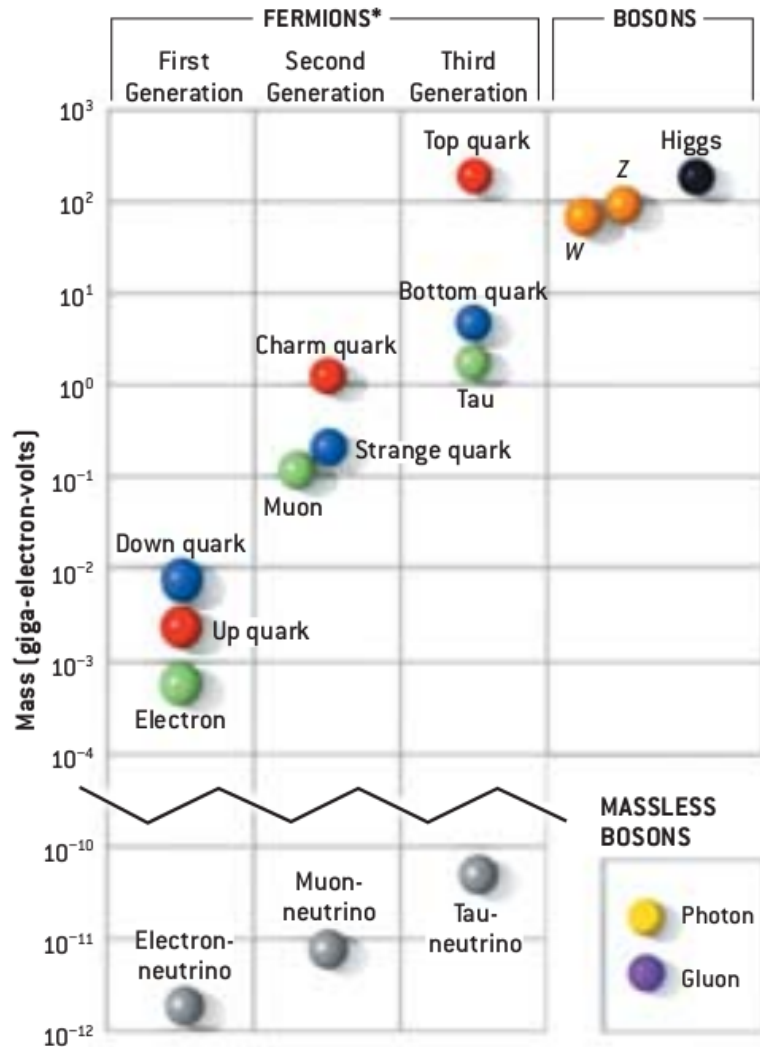


L'ultimo (?) pezzo del puzzle: Bosone di Higgs



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...

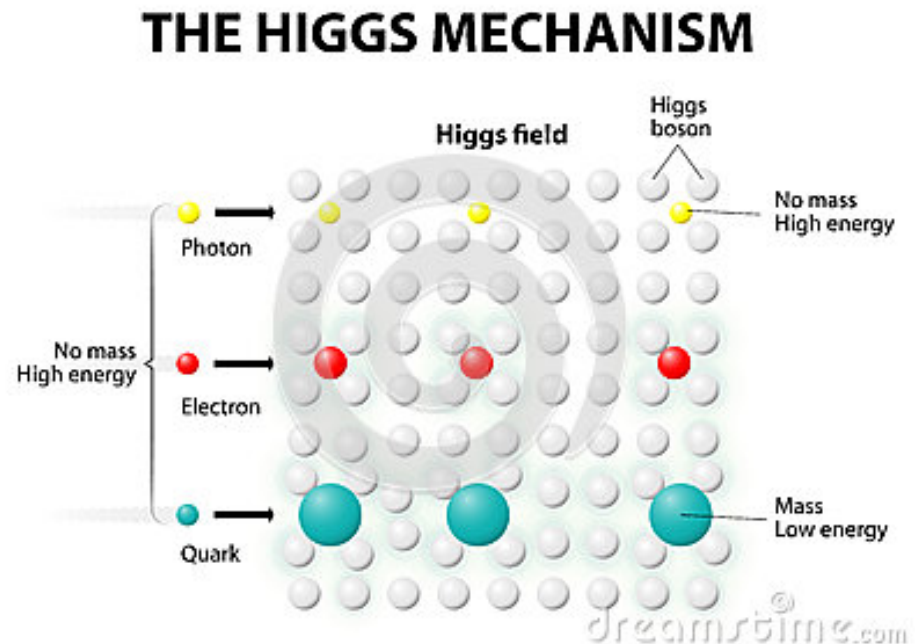
- Nella versione originale del Modello Standard tutte le particelle avevano massa nulla (!)
- Tre fisici teorici hanno proposto un modo per conferire massa alle particelle: Higgs, Englert e Brout

no bueno!



Meccanismo di Higgs

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

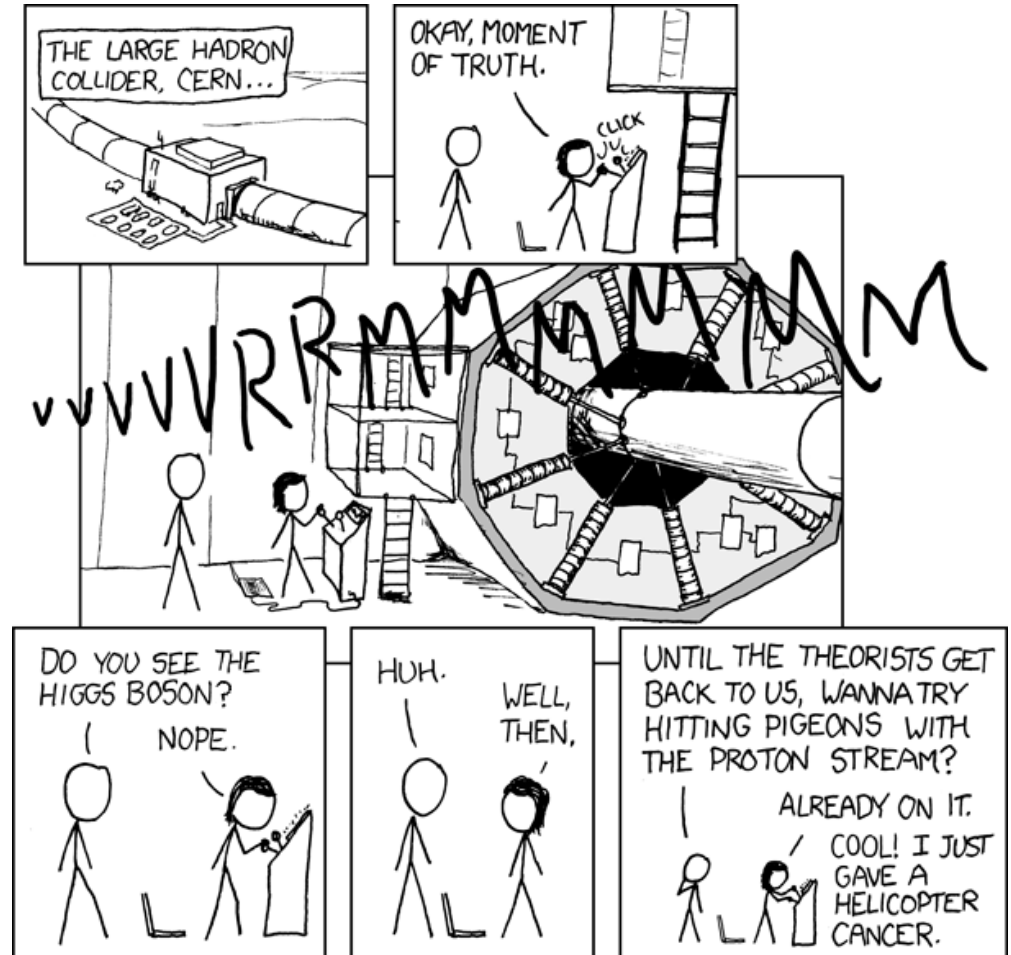


**Conseguenza importante:
prevede l'esistenza di una nuova
particella: **il bosone di Higgs****

Però, nessuna
previsione della massa
della nuova particella.

La caccia allo Higgs

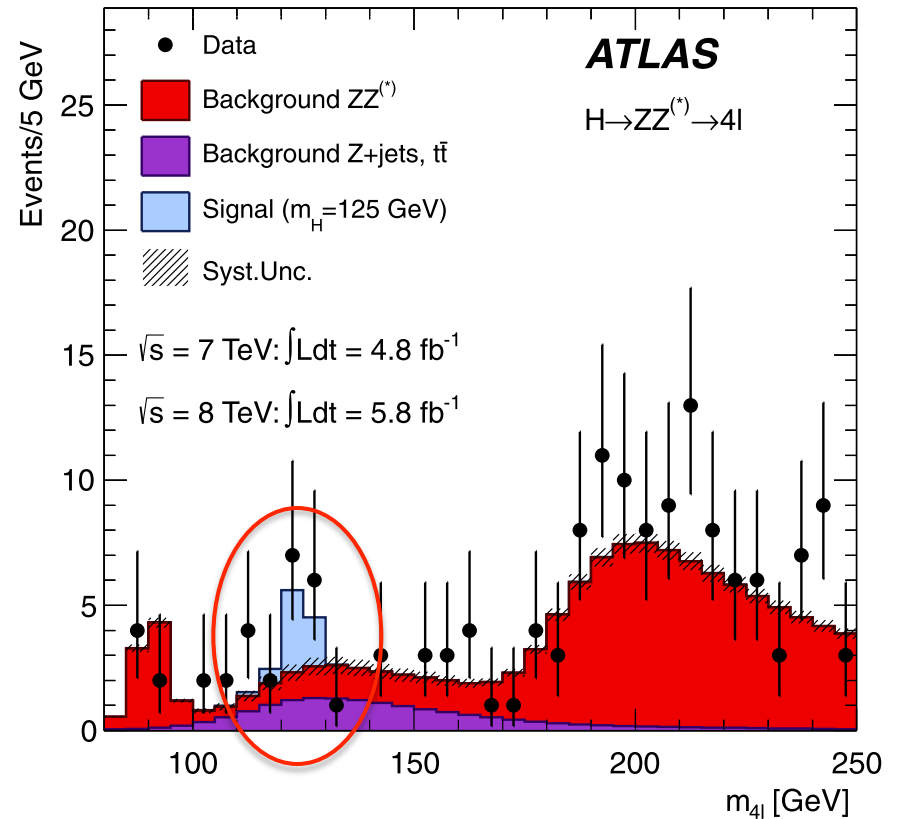
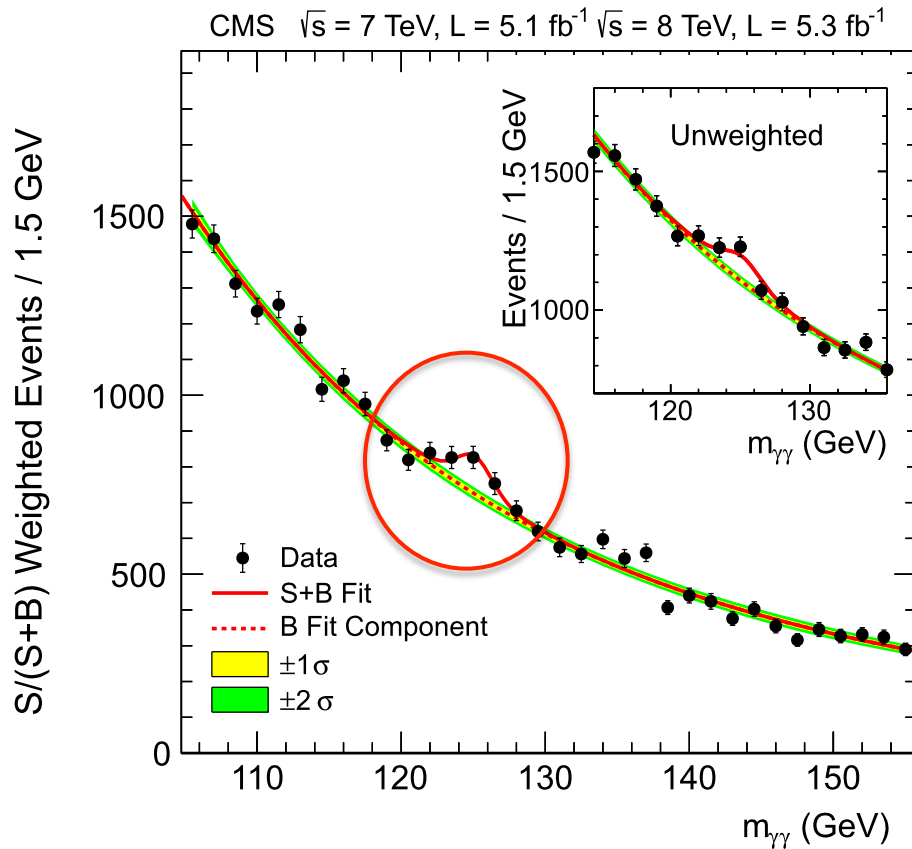
- Lunga ricerca che è durata decenni
- In realtà, solo con LHC abbiamo avuto abbastanza energia di produrre tanti bosoni di Higgs
- Finalmente...



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

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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



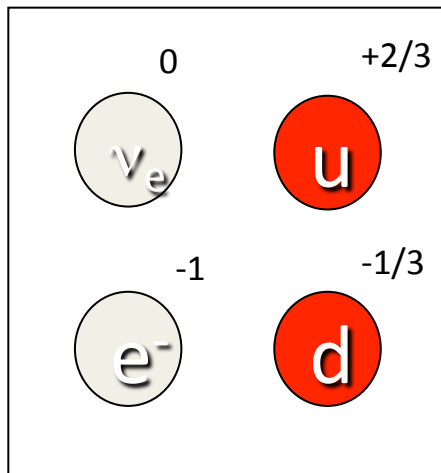
Adesso?

- 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...

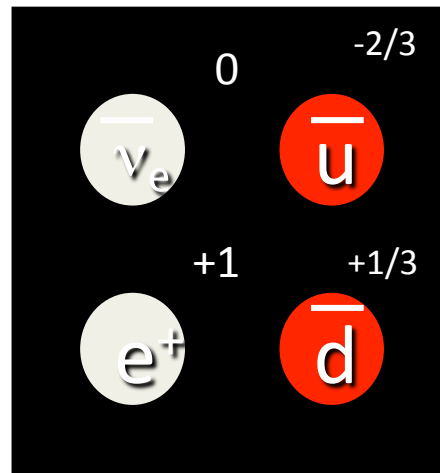
Anti-materia

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.

Matter



Anti-Matter

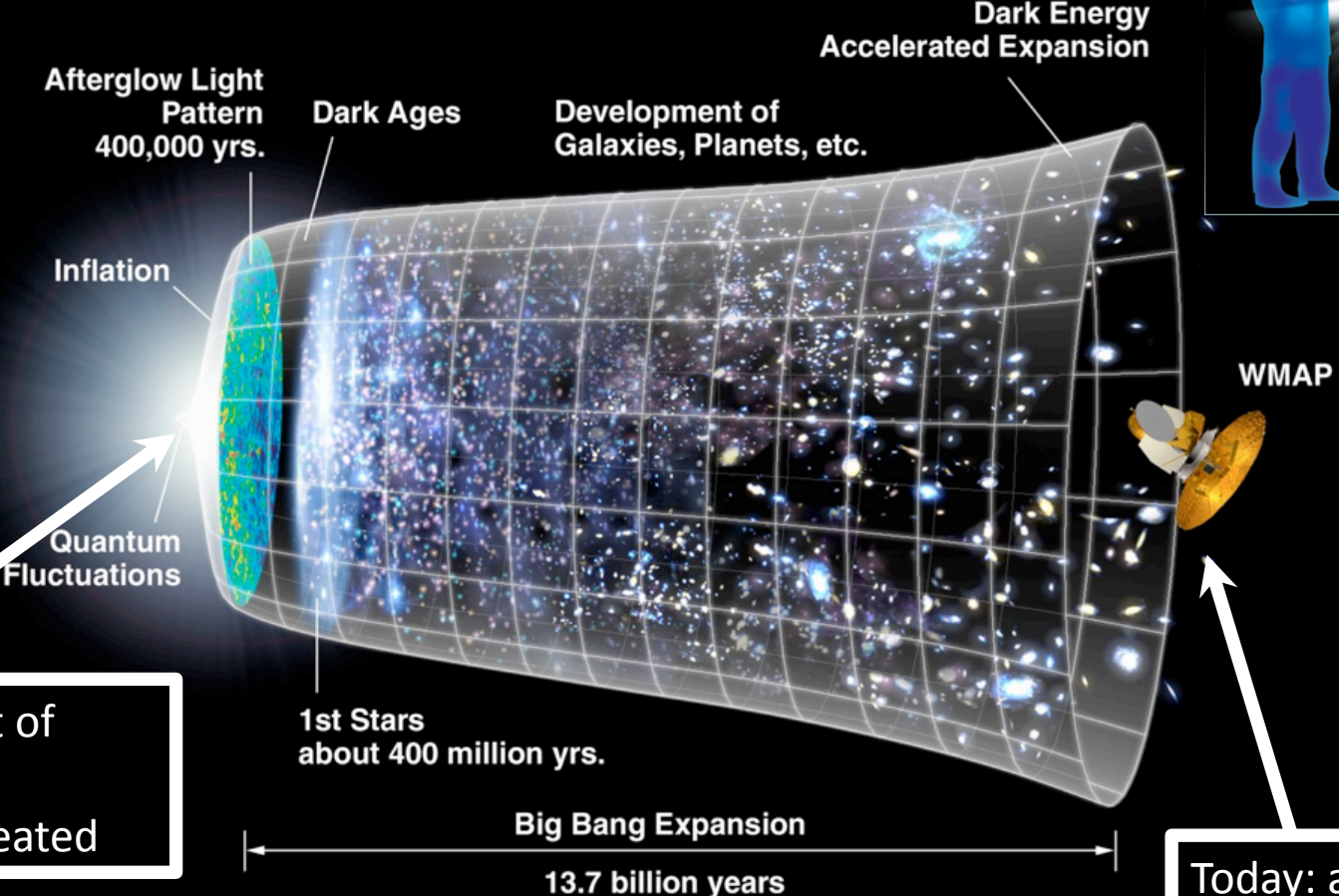


L'antimateria può essere creata in Laboratorio



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

Conosci un' anti-persona?



Equal amount of matter and antimatter created

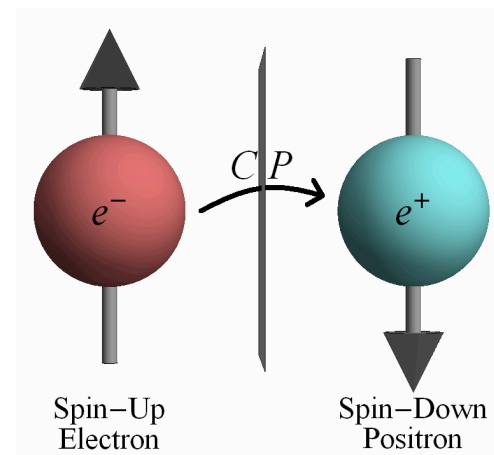
So where did all the antimatter go?

Today: almost no antimatter in the universe

Violazione della Simmetria CP

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.

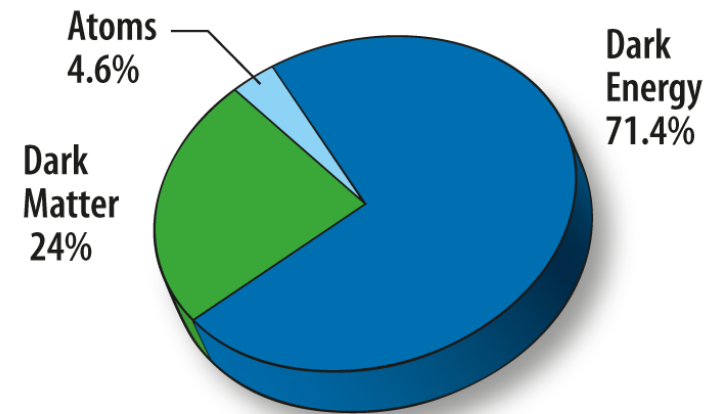
CP = Coniugazione di carica (inverte la carica) x Parità (inverte le coordinate come in uno specchio)



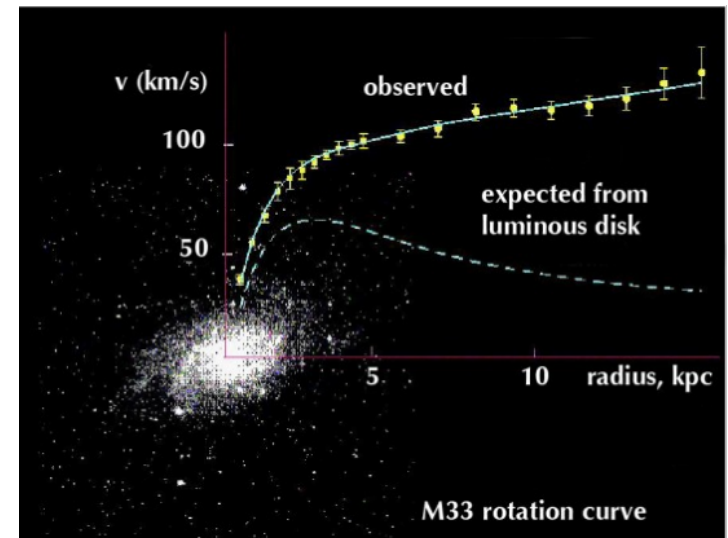
Questo fenomeno non è sufficiente a spiegare il perché l'universo sia fatto di materia e non di anti-materia. Deve esistere qualche nuova interazione che viola CP.

Un'altra questione aperta: la materia oscura

- Solo 5% dell'universo è visibili ai nostri telescopi
- 24% dell'universo è fatto di materia oscura
- Evidenze di materia oscura: **velocità angolare delle galassie**, lente gravitazionale



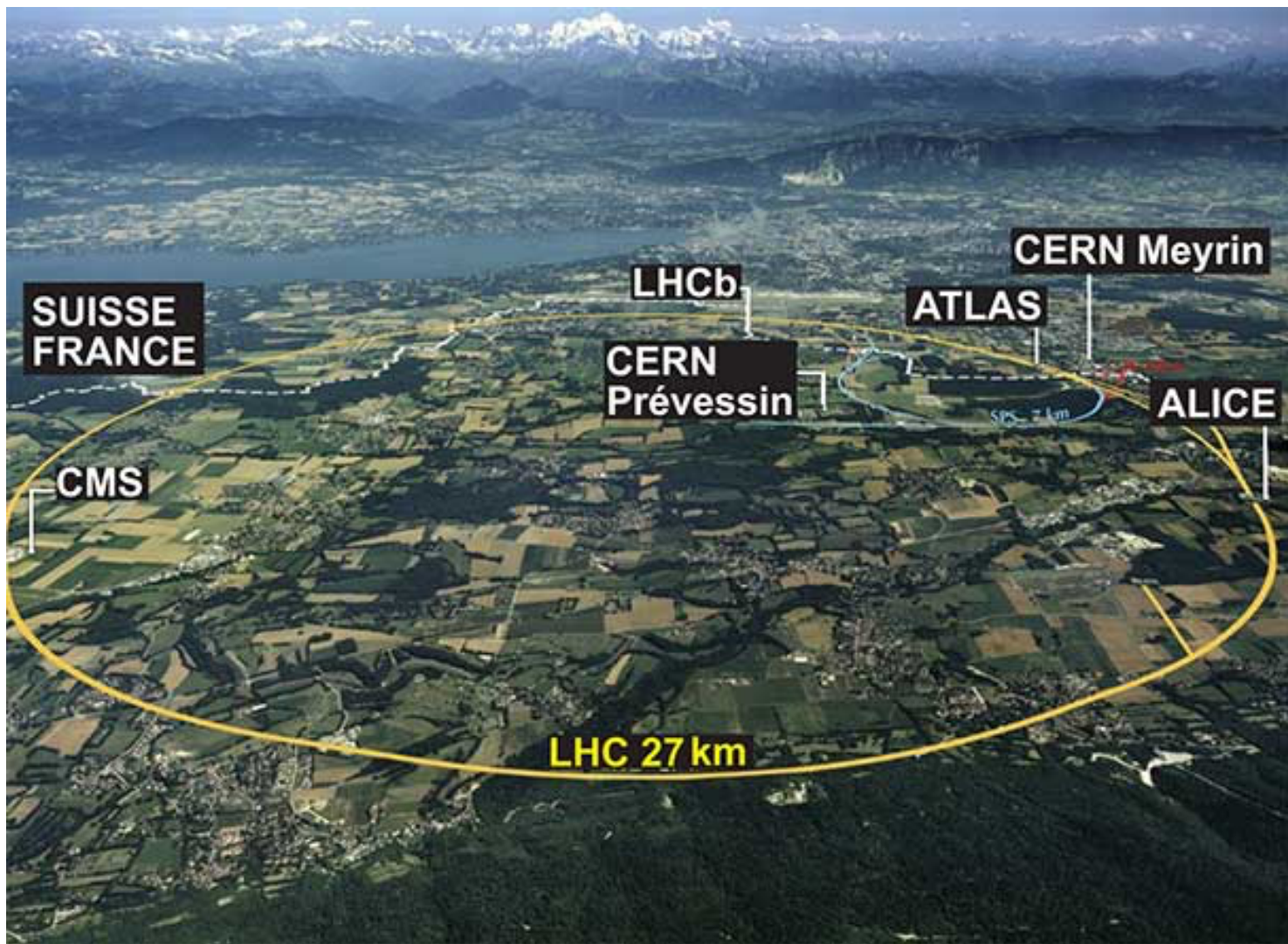
TODAY



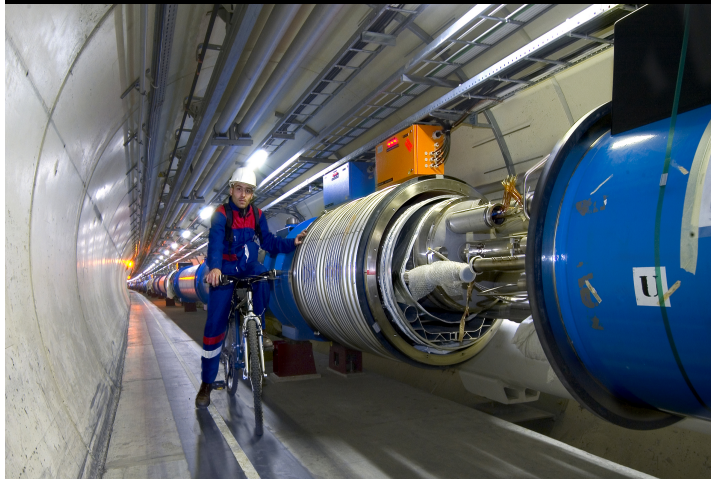
Una questione interessante per la fisica delle particelle

- Perchè questa materia oscura dev'essere fatta da particelle, forse particelle nuove
- Le particelle devono essere elettricamente neutre (altrimenti non sarebbe "oscura")
- Nel Modello Standard i neutrini sono un candidato per la materia oscura, ma ci sono problemi con questa ipotesi
- Teorie oltre il Modello Standard, come **Supersimmetria**, propongono particelle neutre, come **neutralini**, che sono candidati per la materia oscura
- Queste particelle potrebbero essere **prodotte in LHC**: sono energicamente cercate negli esperimenti al CERN (ma non viste finora)

Parliamo di LHC

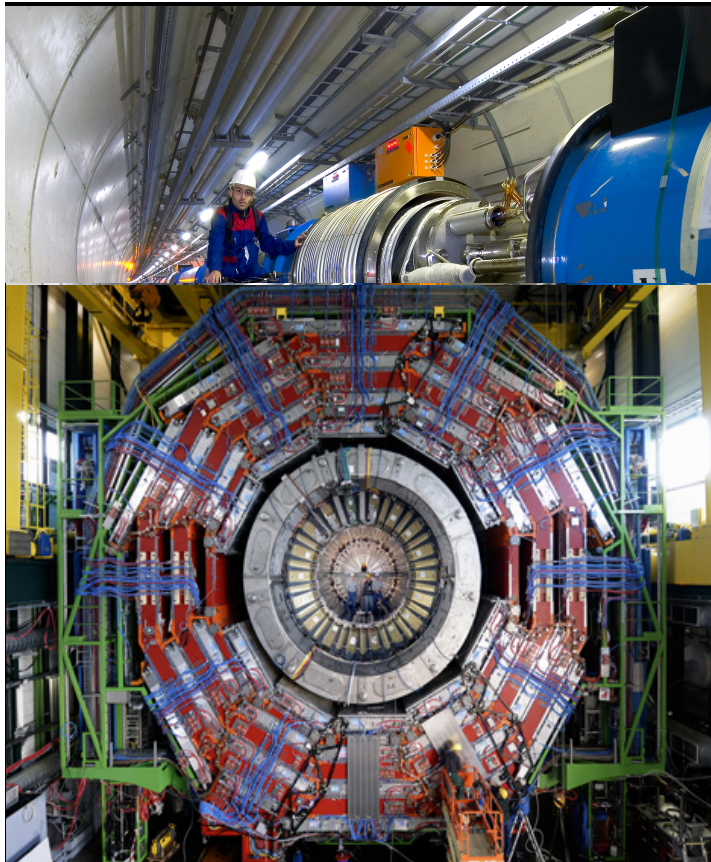


Lo studio delle particelle elementari richiede:



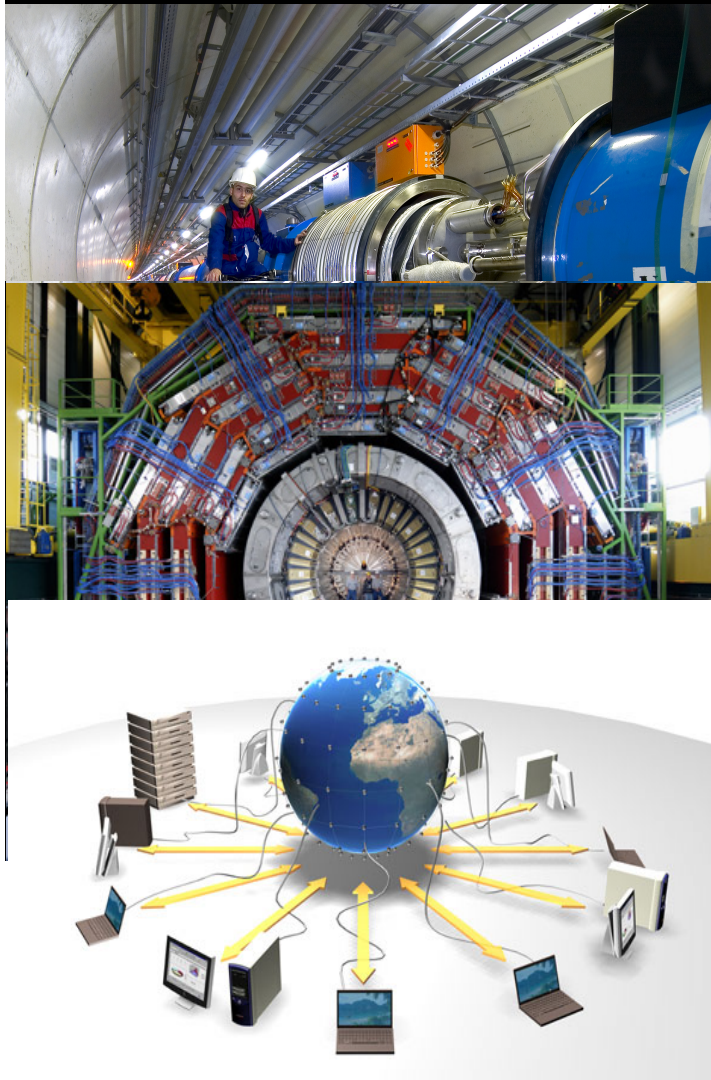
1. **Acceleratore:** una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare

Lo studio delle particelle elementari richiede:



1. **Acceleratore:** una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare
2. **Rivelatori:** strumenti giganteschi che registrano le particelle prodotte quando emergono dal punto della collisione

Lo studio delle particelle elementari richiede:



1. **Acceleratore:** una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare
2. **Rivelatori:** strumenti giganteschi che registrano le particelle prodotte quando emergono dal punto della collisione
3. **Supercomputing:** per raccogliere, conservare, distribuire ed analizzare l'enorme quantità di dati prodotti dai rivelatori.

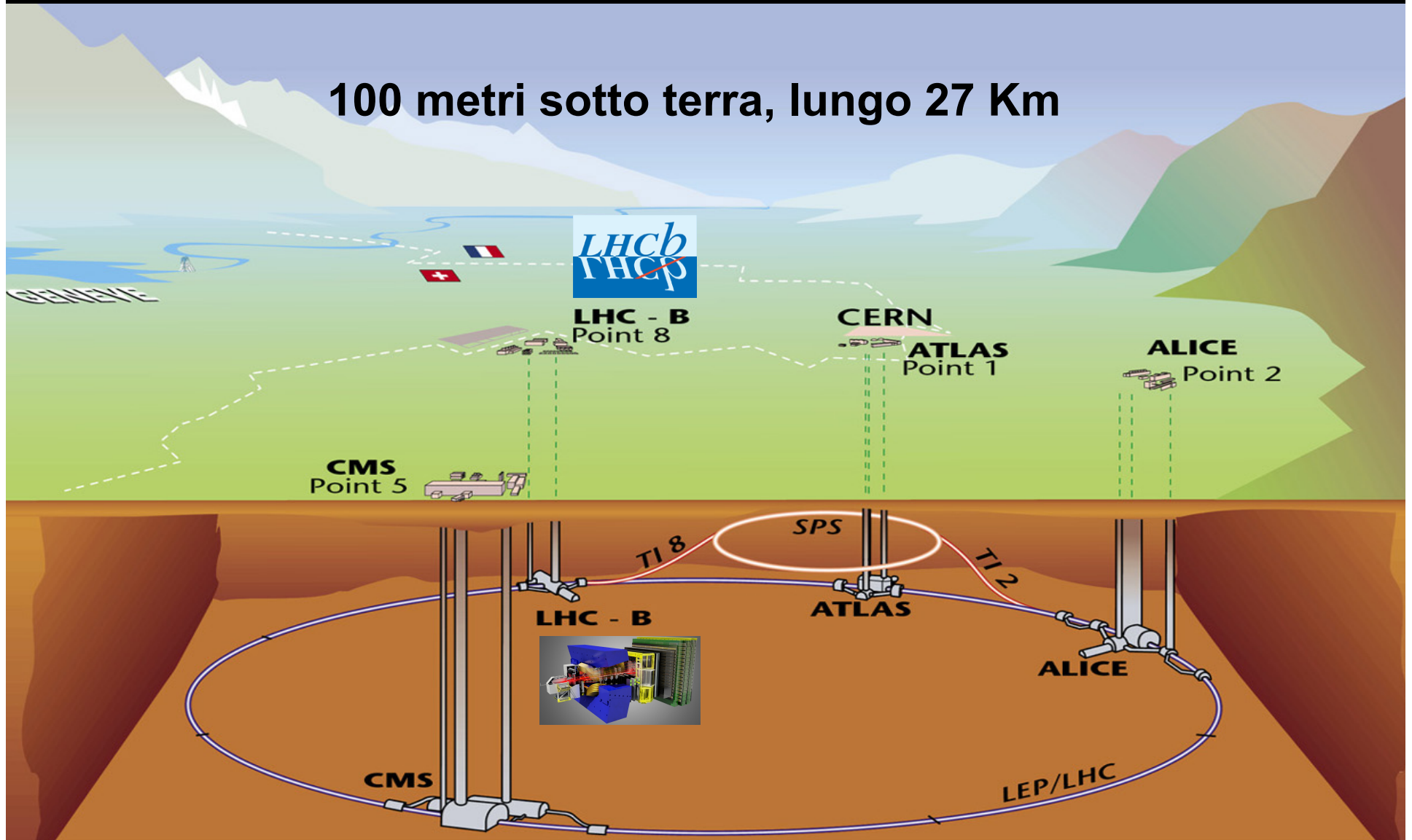
Lo studio delle particelle elementari richiede:



1. **Acceleratore:** una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare
2. **Rivelatori:** strumenti giganteschi che registrano le particelle prodotte quando emergono dal punto della collisione
3. **Supercomputing:** per raccogliere, conservare, distribuire ed analizzare l'enorme quantità di dati prodotti dai rivelatori.
4. **Scienza collaborativa su scala mondiale:** migliaia di scienziati ed ingegneri per disegnare, costruire ed operare queste macchine molto complesse

LHC Tunnel

100 metri sotto terra, lungo 27 Km



Large Hadron Collider



- I protoni sono accelerati da potenti campi elettrici a velocità vicine a quella della luce. Sono guidati lungo le loro traiettorie circolari da potenti magneti dipoli superconduttori.
- I magneti dipoli lavorano a 8.3 Tesla, (200.000 volte il campo magnetico terrestre) & 1.9 K (-271°C) in elio superfluido.
- I protoni viaggiano in un tubo che è a vuoto più spinto ed a temperatura più bassa che lo spazio interplanetario.

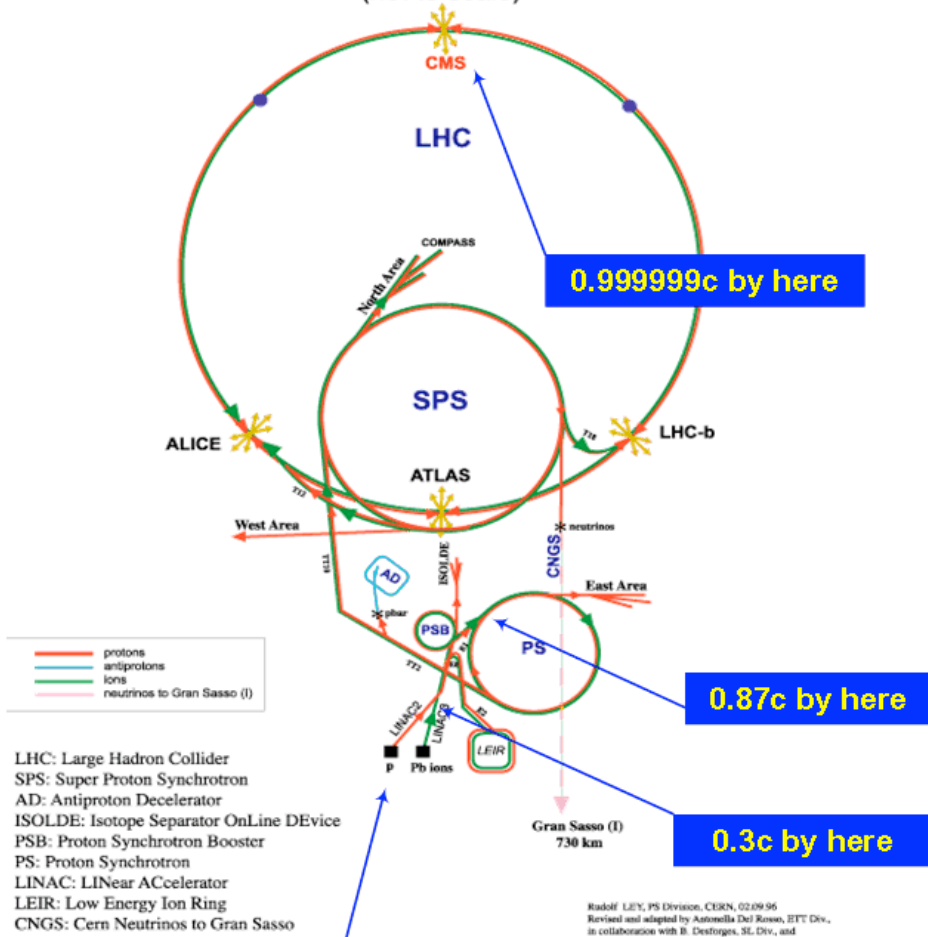
Esperimenti di fisica delle particelle

- Due strade:
 - mirare alle energie più alte: Energy Frontier
 - da 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 (p.e. mesoni B, D)
 - fare misure di alta precisione che sono capaci di testare il Modello Standard molto accuratamente: fisica del flavour
 - **LHCb**

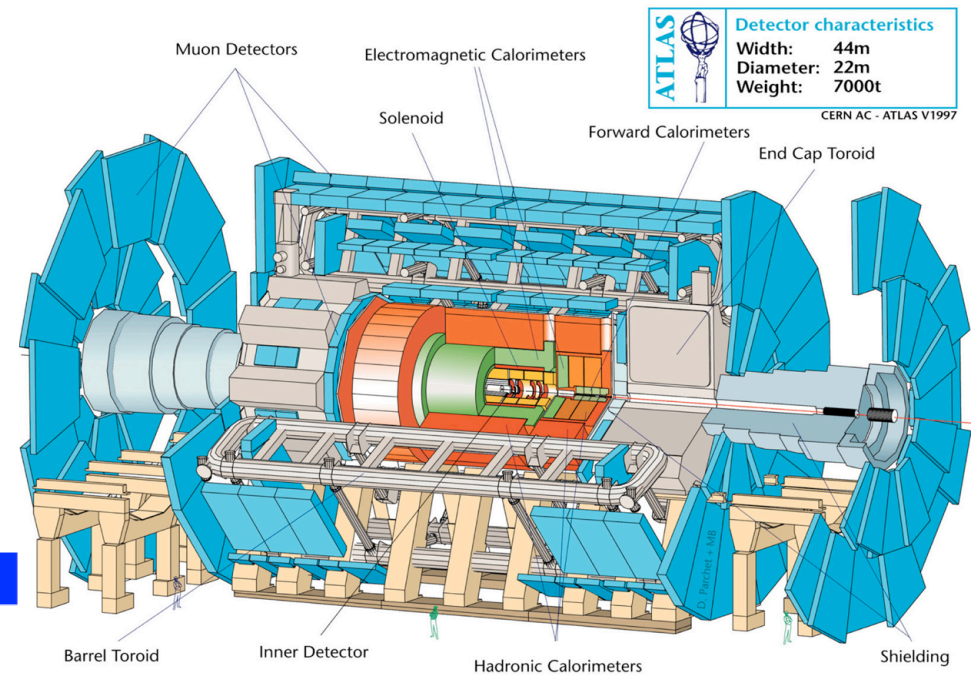


Major experiments

CERN Accelerators
(not to scale)

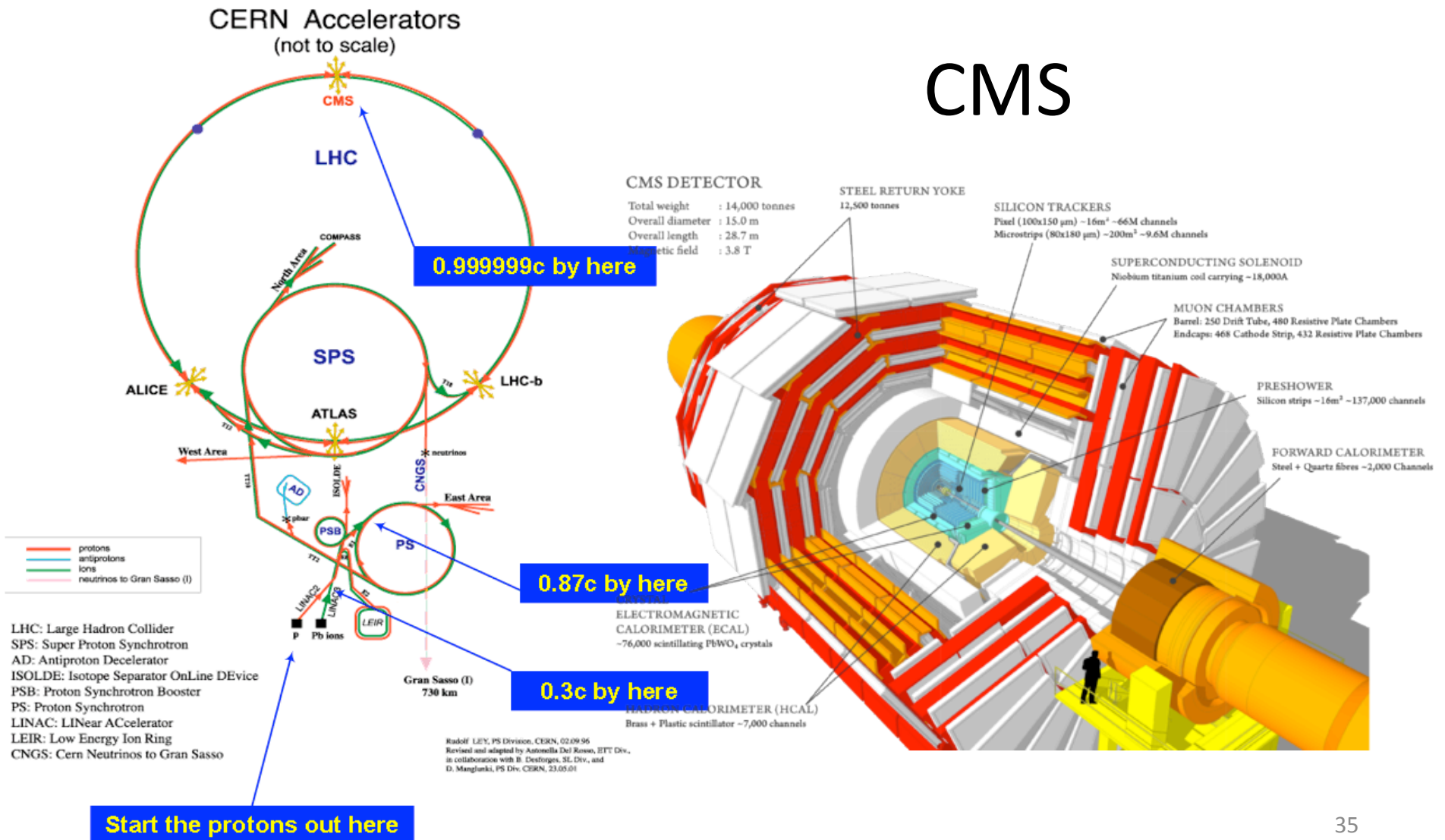


ATLAS

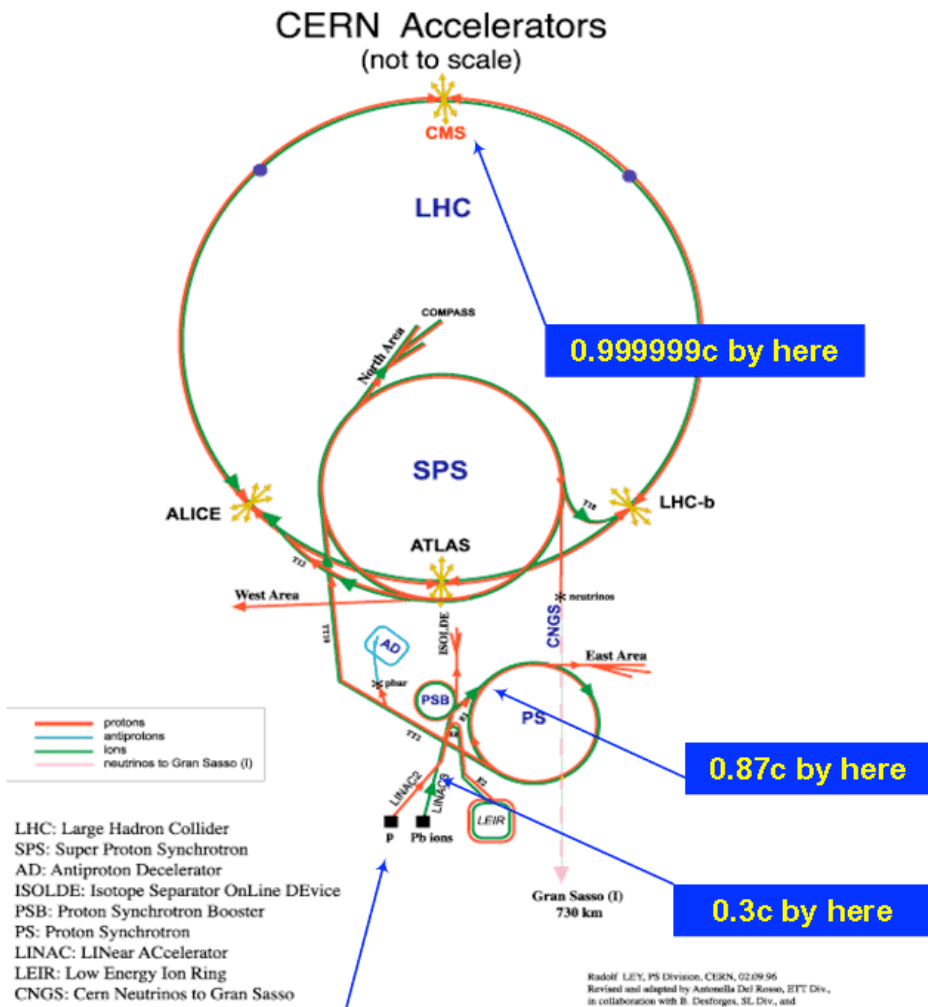


Major experiments

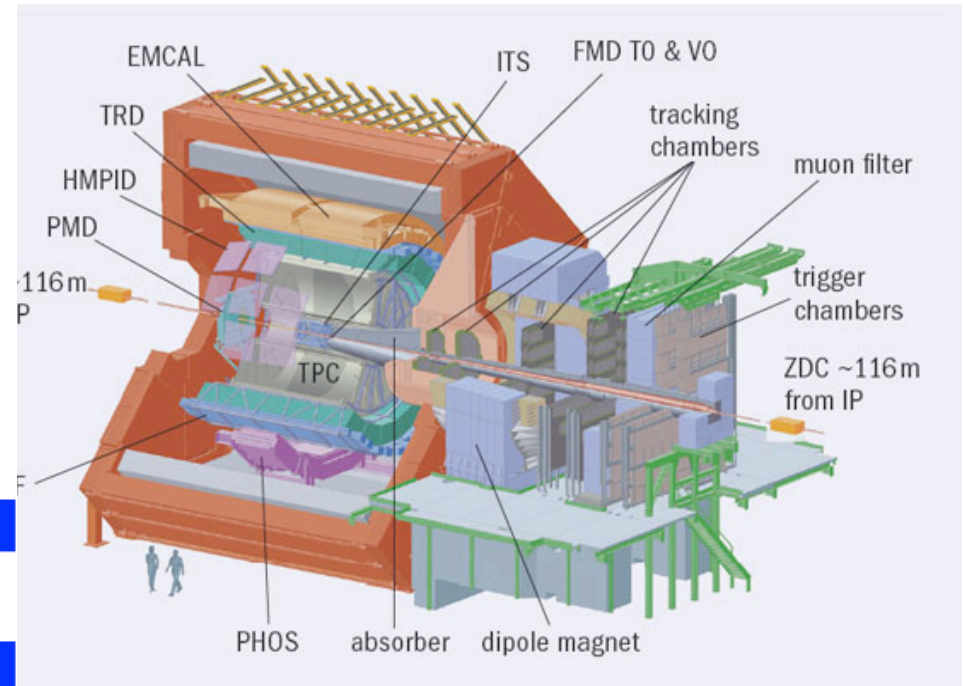
CMS



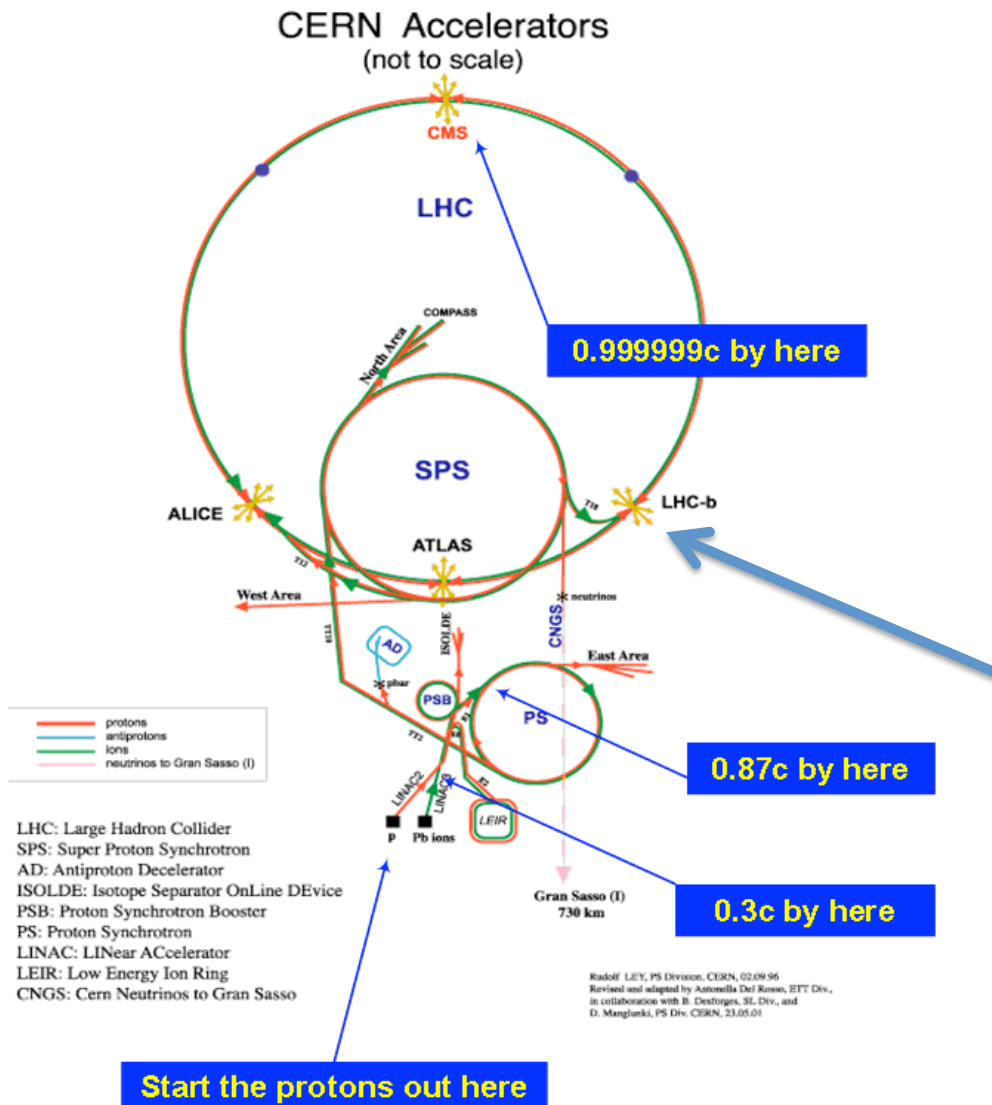
Major experiments



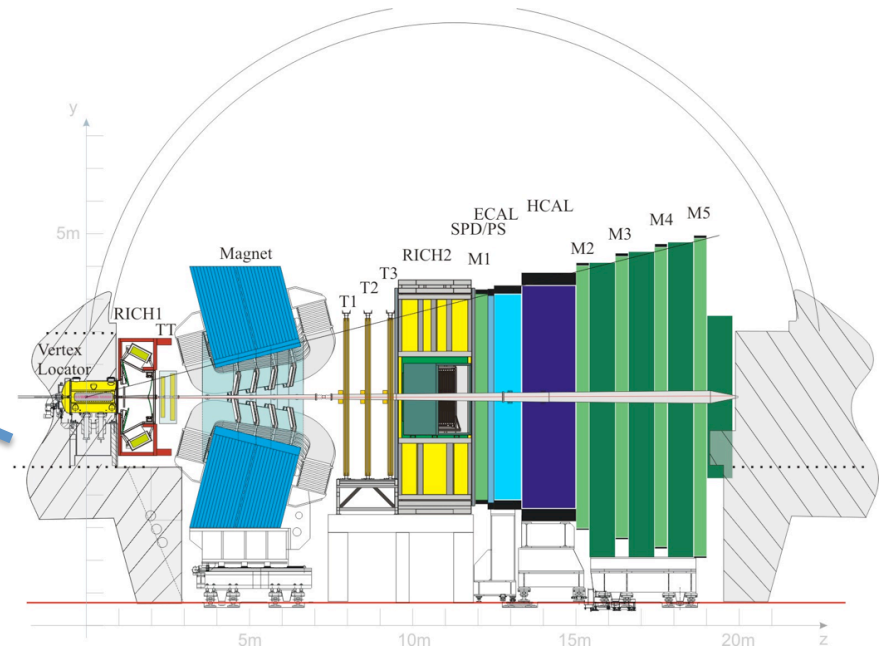
ALICE

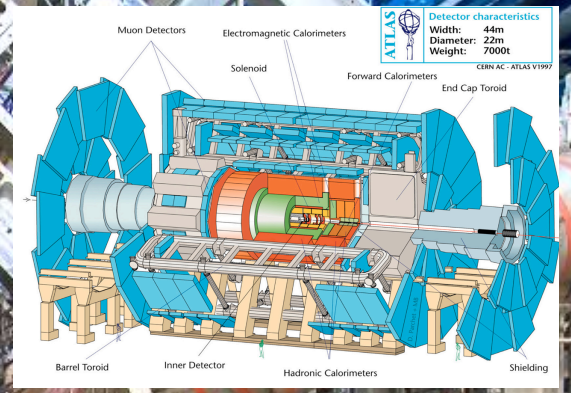


Major experiments



LHCb

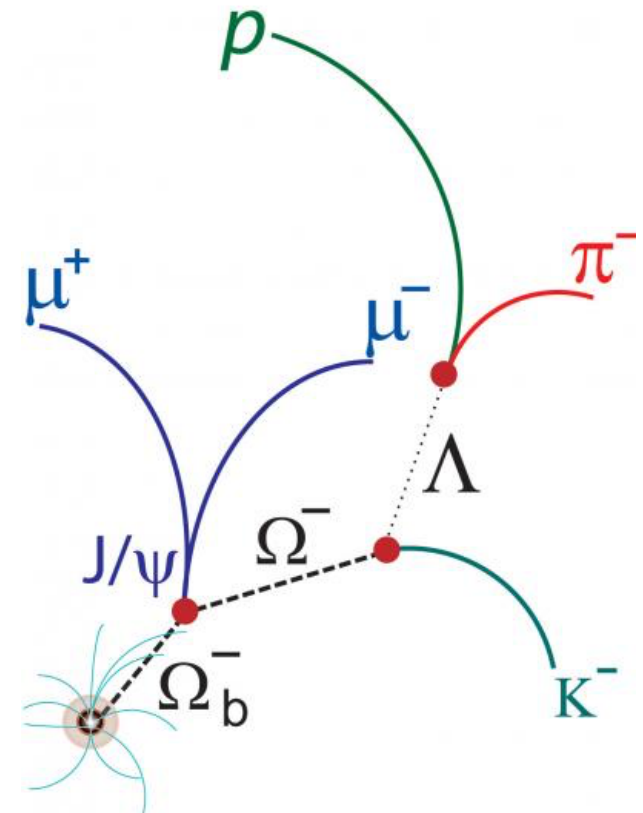




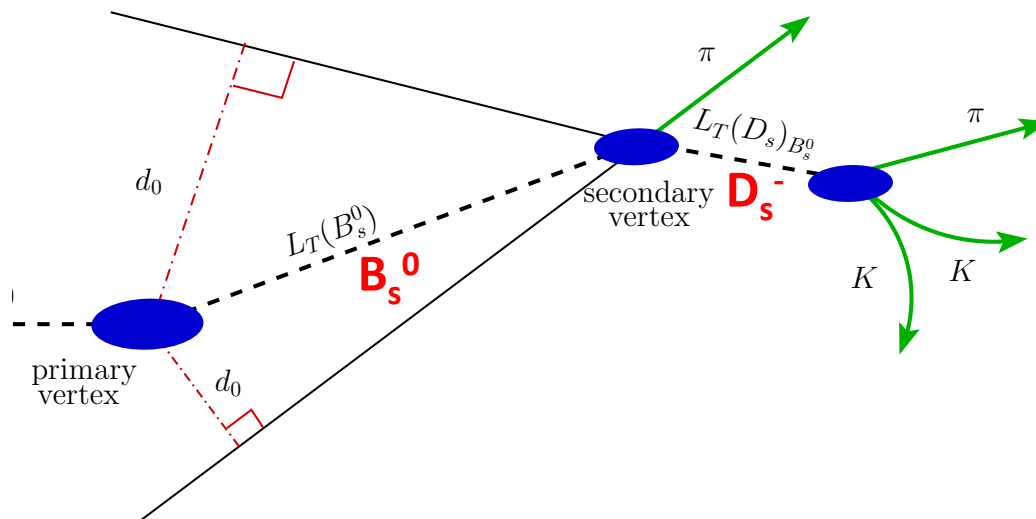
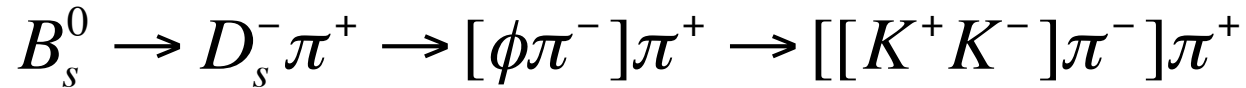
UOMO

Come si identificano le particelle instabili

- Le particelle più interessanti sono quelle instabili (di solito)
 - dopo pochissimo tempo decadono (si trasformano) in altre particelle più leggere
 - queste poi decadono al loro turno, e il processo continua fino a quando rimangono solo particelle stabili che si “vedono” nel nostro rivelatore



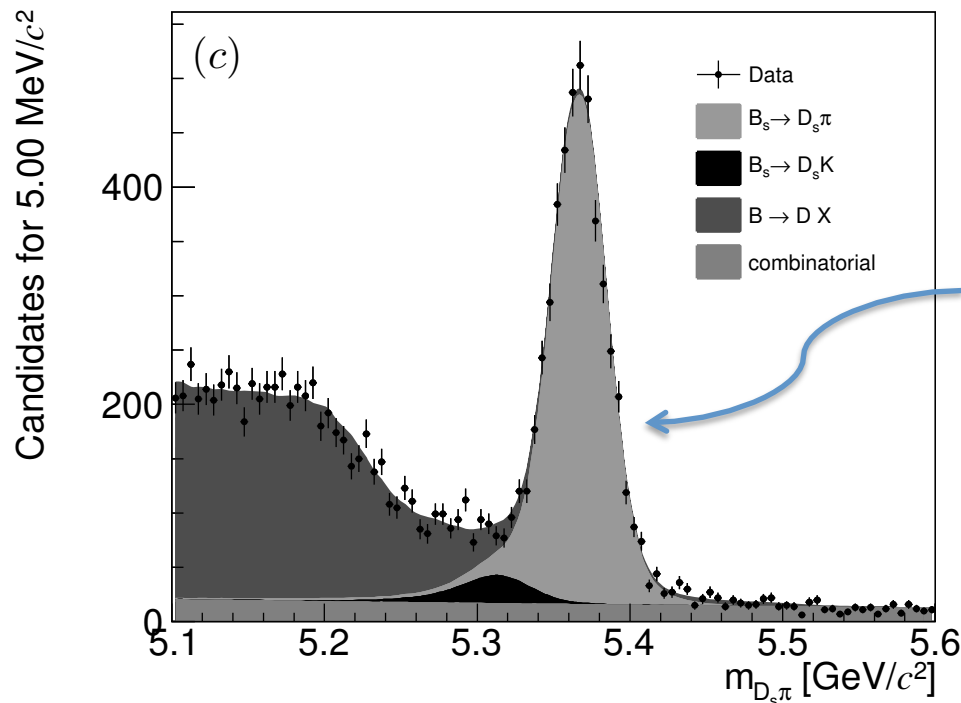
Misurare impulso e energia delle figlie



Conservazione dell'energia : $E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$
 Conservazione dell'impulso : $P = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$ } Necessaria la misura delle
 traiettorie, e identificazione
 del tipo di particella.

Massa invariante della particella: $E^2 - p^2 = m^2$.

Calcola massa invariante



Possiamo selezionare questi candidati e studiare le loro proprietà, per esempio, la vita media.

Se le 4 tracce che abbiamo selezionato provengono veramente da un mesone B_s⁰, allora la massa invariante calcolata sarà vicina alla massa del B_s⁰ (5366 MeV). A volte, però, sbagliamo e prendiamo 4 tracce casuali (fondo combinatorio). In questo caso la massa invariante non mostra un picco alla massa del B_s⁰.

Per concludere...

- Lo studio della fisica delle particelle ci permette di capire l'universo al livello più fondamentale
- Nonostante il grande successo del Modello Standard nel corso degli ultimi 50 anni, ci sono ancora dei problemi fondamentali da risolvere
 - mancanza di anti-materia nell'universo
 - la composizione della materia oscura
- LHC al CERN di Ginevra è un laboratorio eccezionale per lo studio di queste e altre questioni della fisica delle particelle

