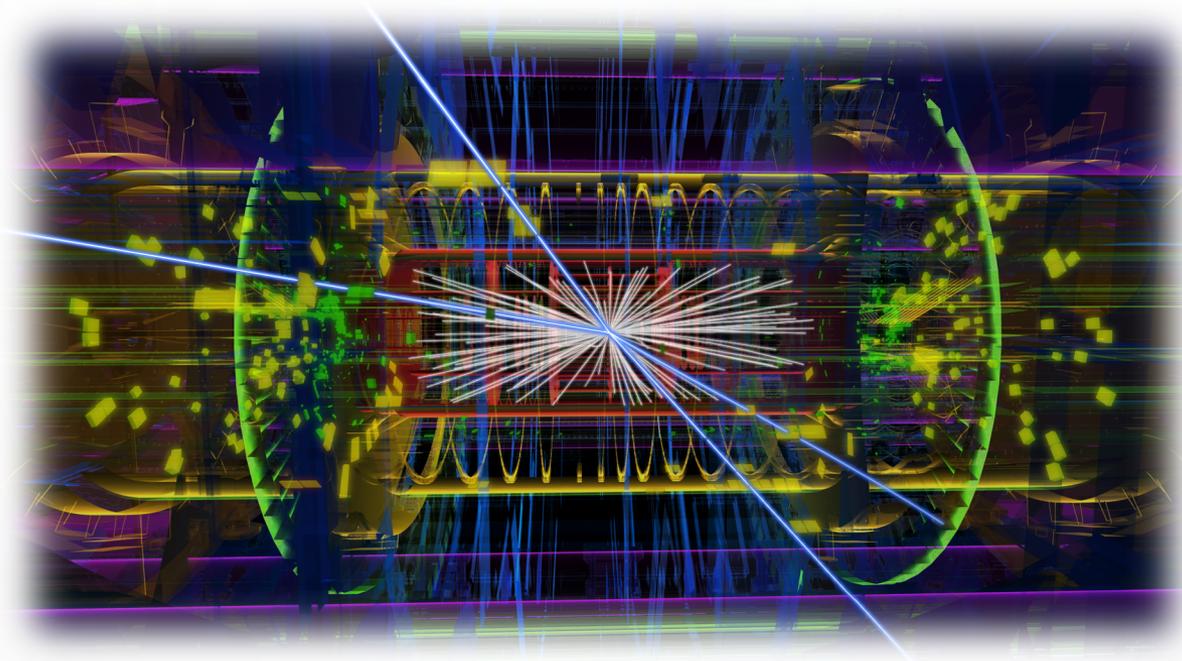


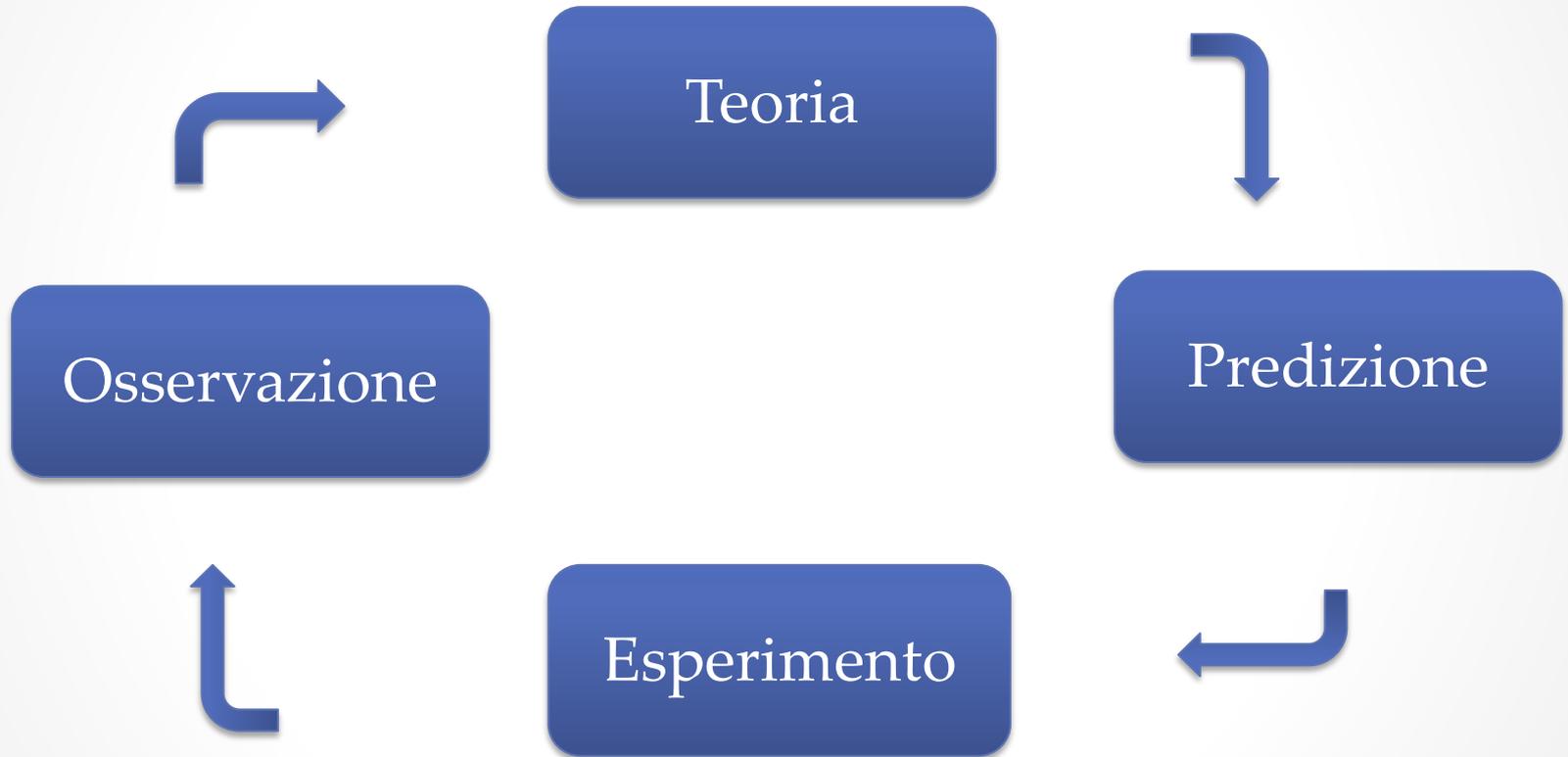
Il mondo delle particelle elementari: dall'elettrone al bosone di Higgs e... oltre.



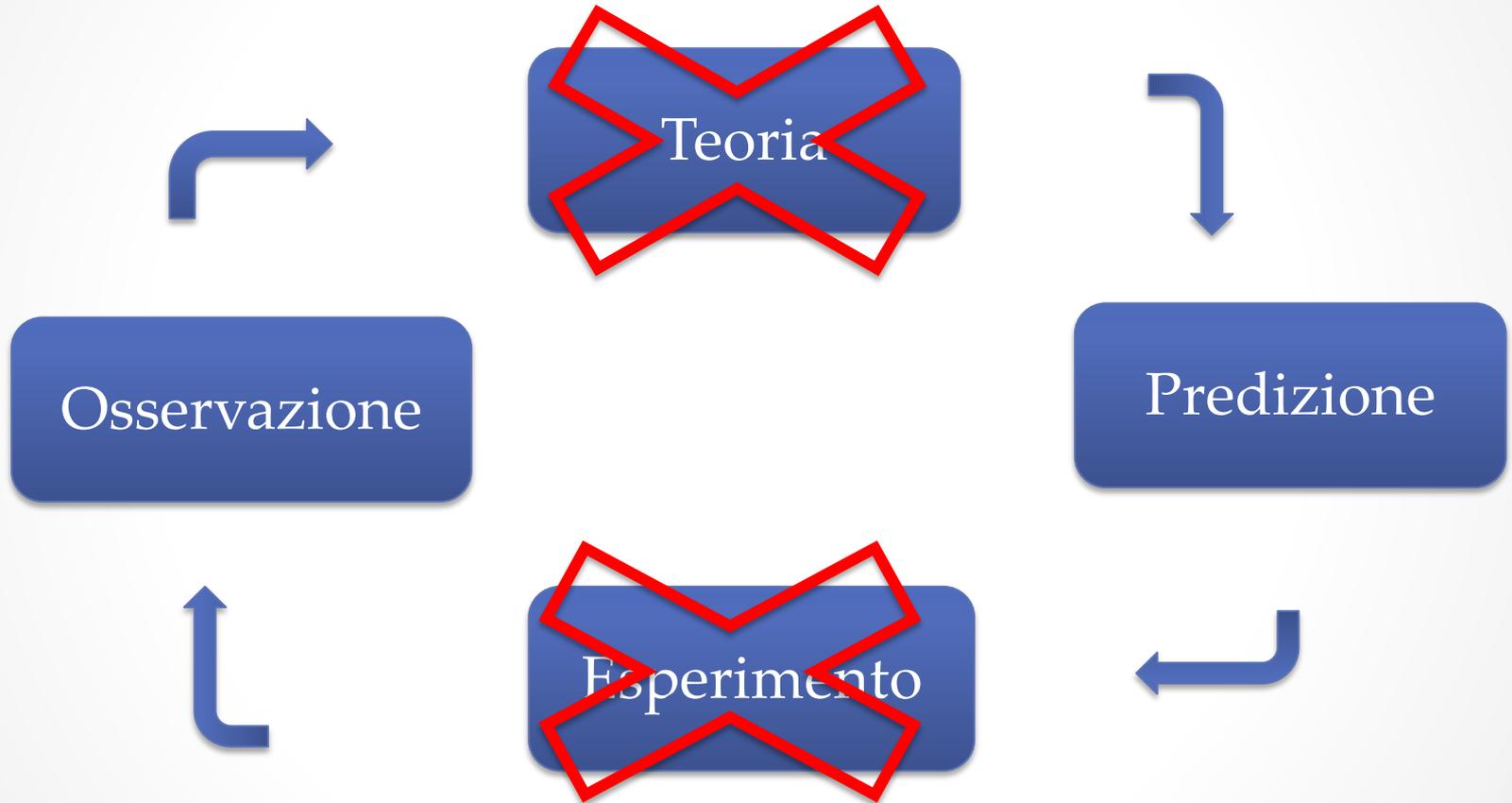
Perché cerchiamo le particelle elementari ?

- In una frase «Reductio ad unum»
- Cerchiamo:
 - i componenti fondamentali della materia (“mattoncini” indivisibili che formano la materia” o se preferite “particelle elementari”)
 - Le forze fondamentali che agiscono tra di loro
- Con le nostre osservazioni costruiamo modelli che mirano a fornire una descrizione completa di tutto quello che ci circonda... fino a spiegare i primissimi istanti dopo il Big Bang !

Come lo facciamo: metodo scientifico



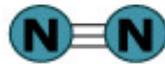
Come lo facciamo: metodo scientifico



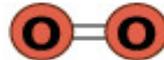
In ogni fase tuttavia ci "aiutiamo" con **parallelismi e strumenti grafici** che permettono di collegare concetti astratti (teoria) a misure reali (esperimento)

Struttura della materia

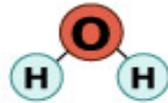
Molecole



Nitrogen, N₂



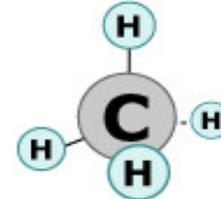
Oxygen, O₂



Water, H₂O

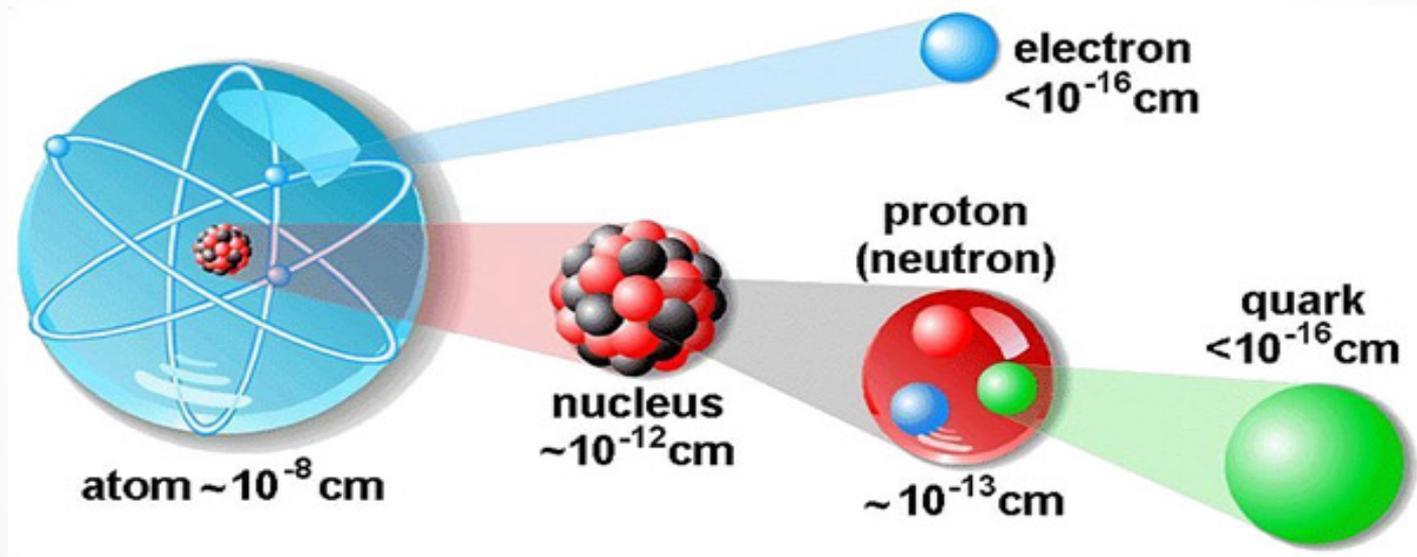


Carbon Dioxide, CO₂



Methane, CH₄

Atomi



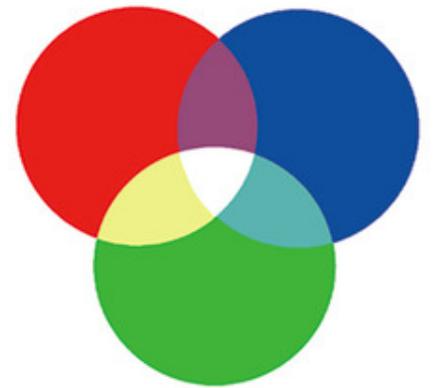
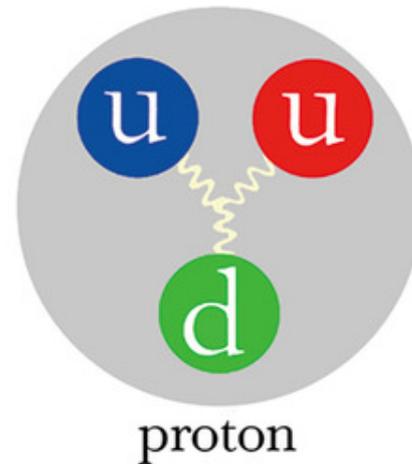
Tutta la materia che ci circonda è composta da elettroni, protoni e neutroni.

Coloriamo i quark

- Protoni e neutroni sono composti da quark
- I quark sono particelle elementari che possiedono una proprietà che può assumere **tre diversi valori** e, tuttavia, non **possono esistere liberi** ma compongono particelle (come protoni e neutroni) che non esibiscono la tale proprietà.
- Che nome dare a questa «proprietà»?

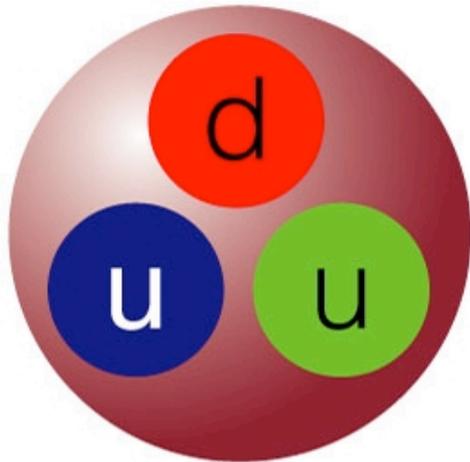
Colore

- Il protone e il neutrone (non colorati) sono quindi composti da tre quark, ciascuno di un «colore» diverso.



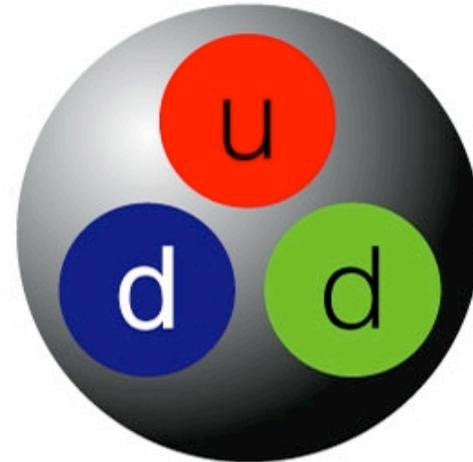
Struttura del protone e del neutrone

A proton is composed of 2 up quarks (u) and 1 down quark (d).



Total charge:
 $+ 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$

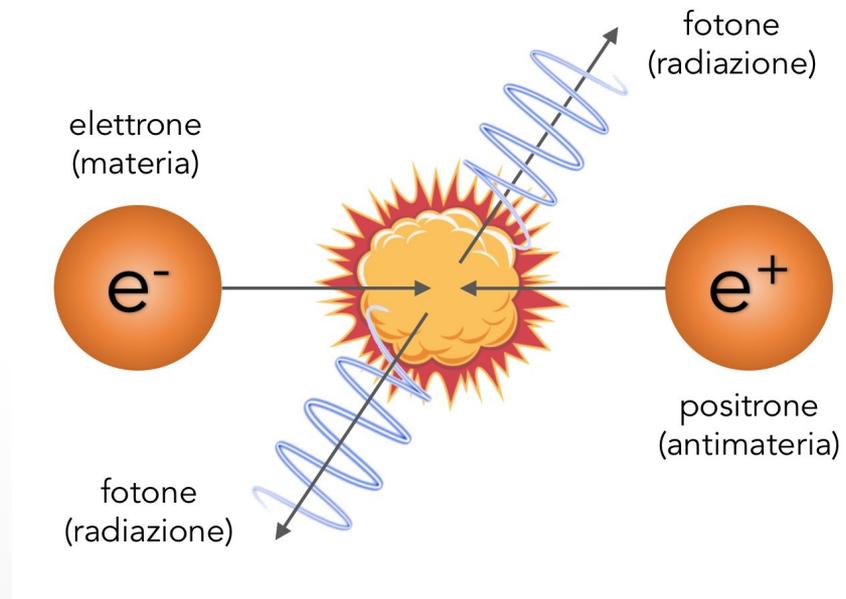
A neutron is composed of 1 up quark (u) and 2 down quarks (d).



Total charge:
 $+ 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

Anti-particelle

- A partire dal 1932 (scoperta del positrone) abbiamo scoperto (prodotto in laboratorio) particelle identiche a quelle che compongono il nostro mondo ma con carica opposta: **le antiparticelle**.
- Materia-antimateria si annichilano producendo energia. Quindi quando anche riusciamo a produrre antiparticelle queste si annichilano con la materia ordinaria in breve tempo.



Materia-Antimateria

Come mai non c'è più antimateria nell'universo ?

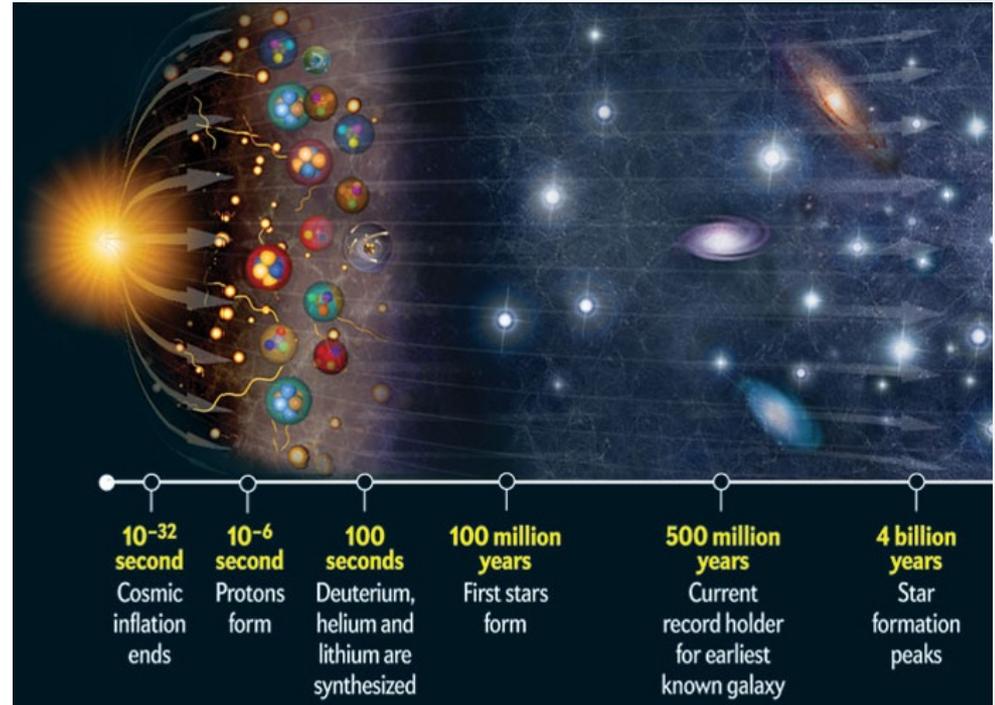
Il **Big Bang** produsse particelle di **materia e di anti-materia** (particelle di stessa massa ma proprietà opposte, come ad esempio la carica elettrica).

Circa 10^{-34} secondi dopo il Big Bang, si creò un **piccolissimo eccesso** di materia sull'antimateria: per ogni

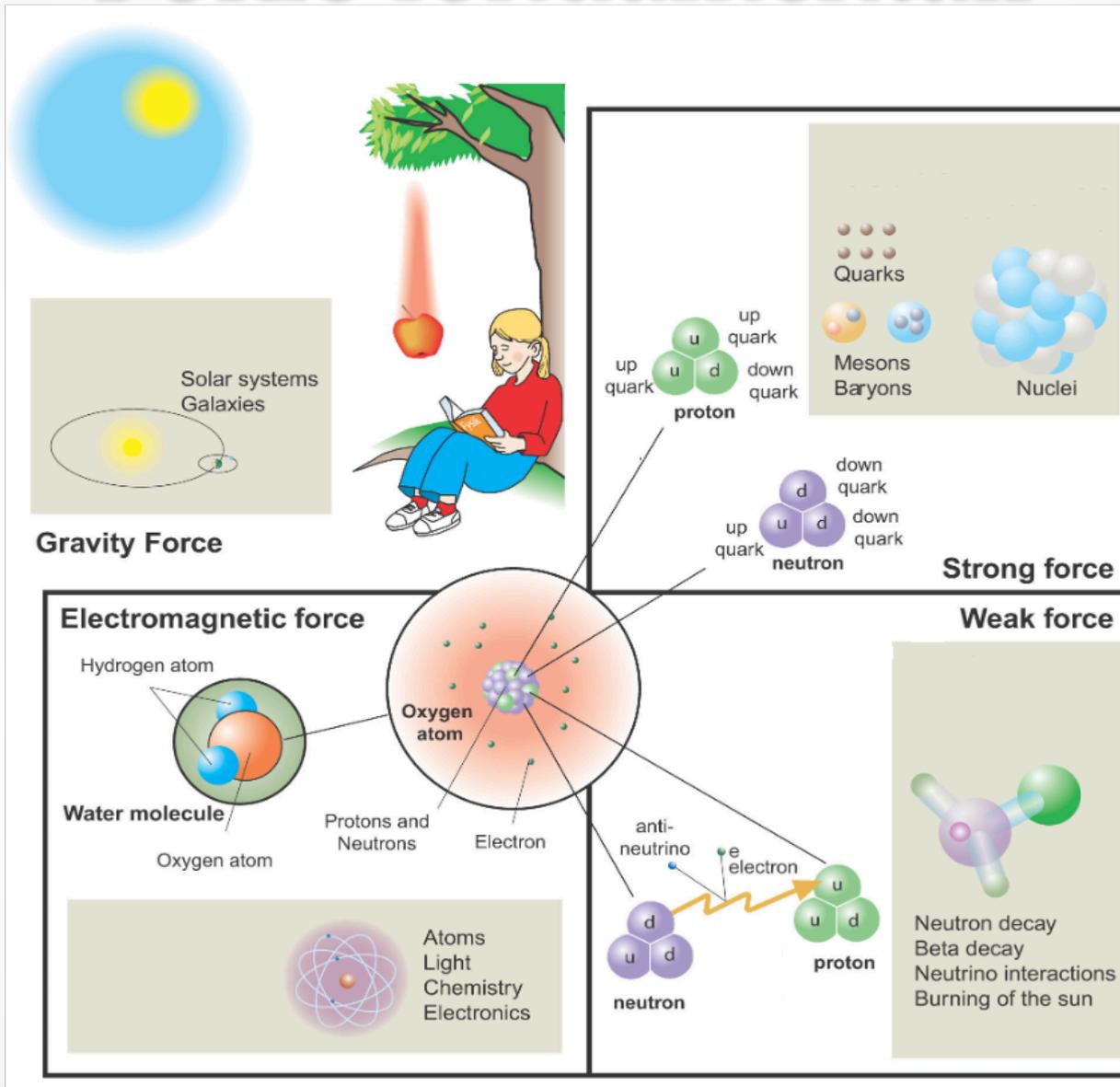
1000000000 antiparticelle si avevano

1000000001 particelle

Dopo 10^{-5} secondi tutte le antiparticelle si annichilarono in collisioni particella-antiparticella; restò solo quel relativamente **piccolo numero di particelle** in eccesso, che rese possibile lo sviluppo **dell'attuale Universo**.

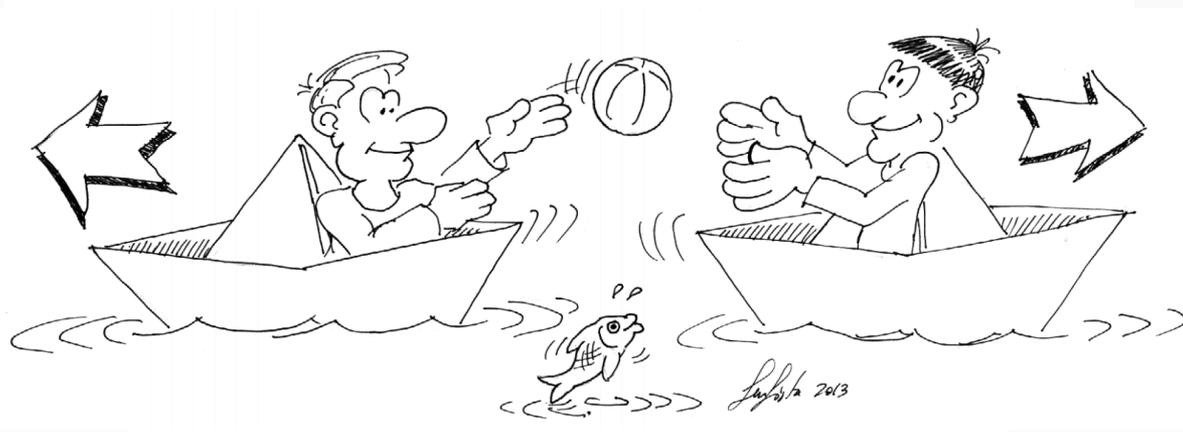


Forze fondamentali



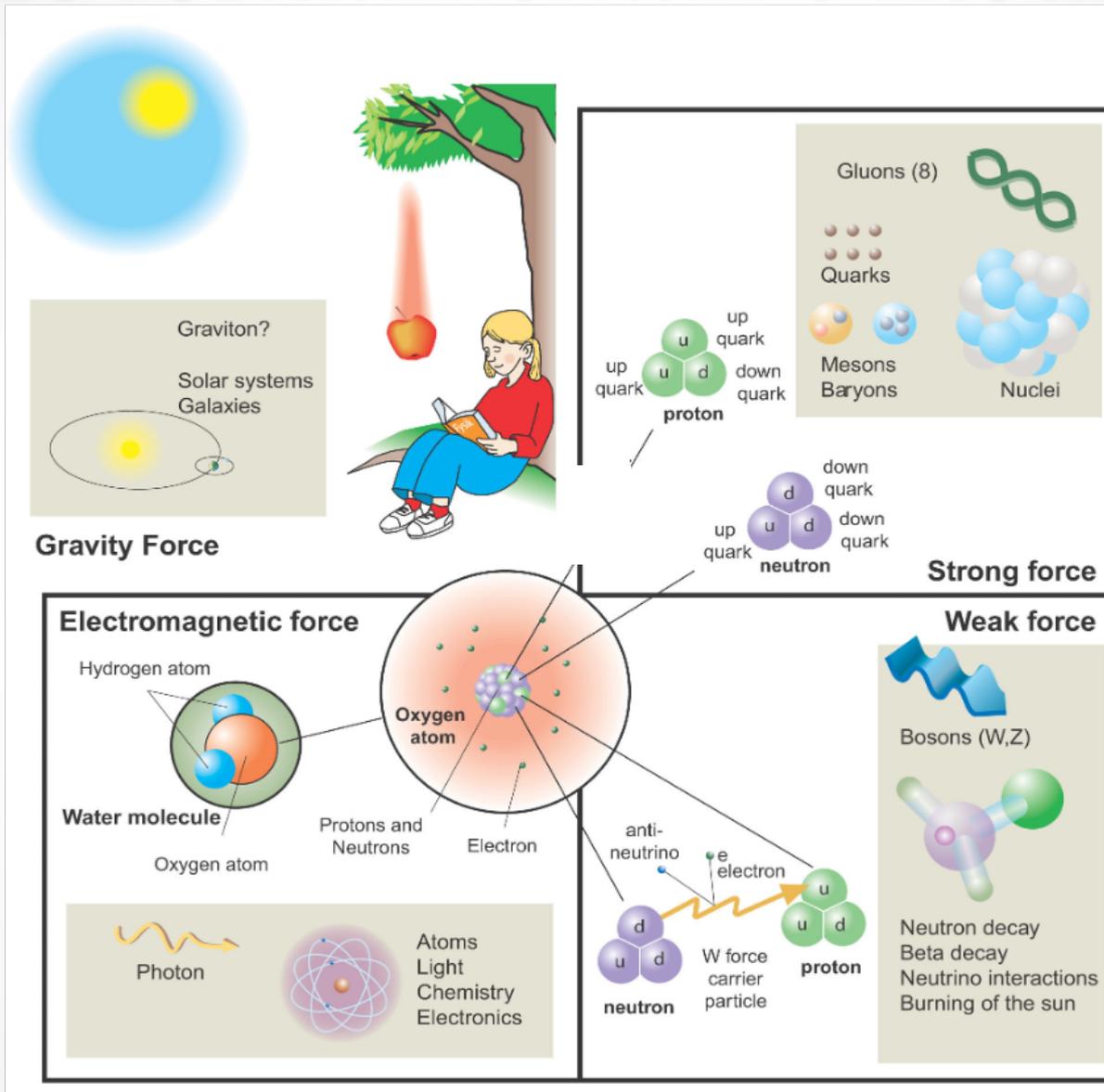
Mediatori delle forze

- Le interazioni possono agire a distanza grazie a campi di forza.
 - Il campo gravitazionale generato dal Sole determina il moto dei pianeti.
 - Il campo elettromagnetico permette comunicazioni a grandi distanze con la trasmissione di onde
- La fisica moderna spiega le interazioni tra due (o più) particelle tramite lo scambio di un'altra particella che fa da mediatore.



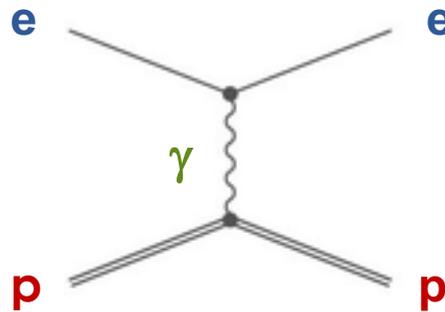
- Il fotone è il mediatore della forza (interazione) elettromagnetica.

Forze fondamentali e mediatori

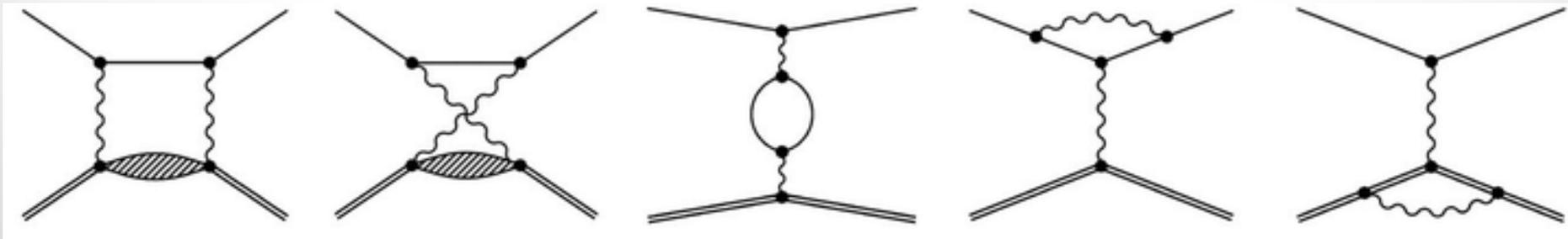


Disegniamo le interazioni

- Per calcolare l'interazione tra particelle si usano grafici (diagrammi di Feynman) che hanno una corrispondenza diretta con la precisione del calcolo.
- Interazione tra elettrone e protone (calcolo "approssimato")

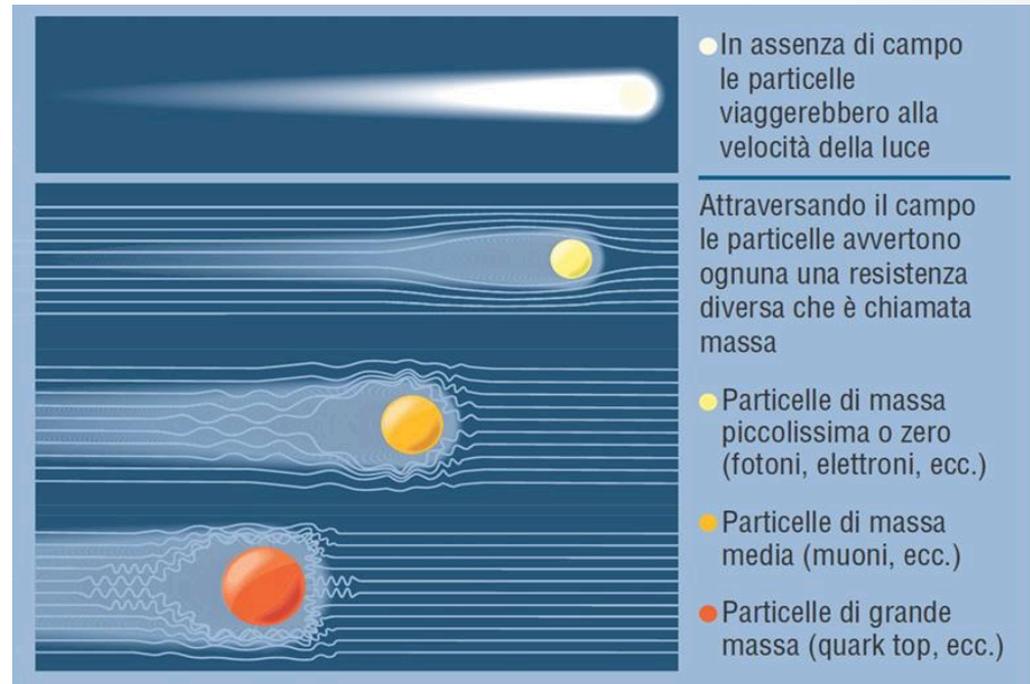


- Calcolo più preciso (tiene conto anche di tutti gli altri modi in cui il processo può avvenire)



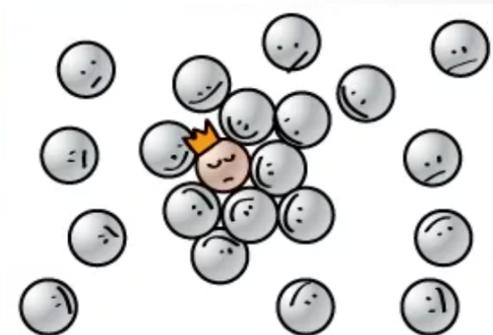
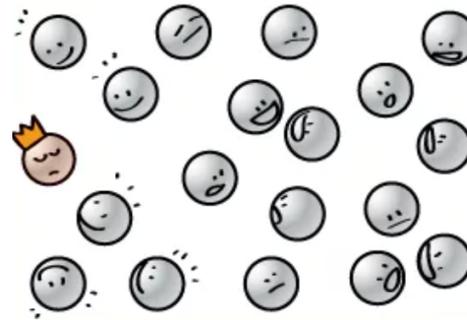
Il bosone di Higgs (e le sue metafore)

- Fino a poco tempo fa mancava la particella (ipotizzata 50 anni fa) che “fornisce” la massa a tutte le altre: il **bosone di Higgs**. Scoperto all' LHC del CERN nel 2012.
- Il bosone di Higgs è nato da una transizione di fase (un po' come l'acqua che diventa ghiaccio) avvenuta nei primissimi istanti dell'universo. Da quel momento tutte le particelle (prima di massa nulla) hanno acquistato massa in maniera proporzionale alla loro interazione con il campo di Higgs.
- Un po' come un corpo che si muove nella melassa: più la melassa oppone resistenza al corpo (interazione) più questo si muove lentamente (massa)
- Altri parallelismi spesso usati sono:
 - persone sulla neve (sci, racchette, stivali)
 - persone famose in mezzo alla folla



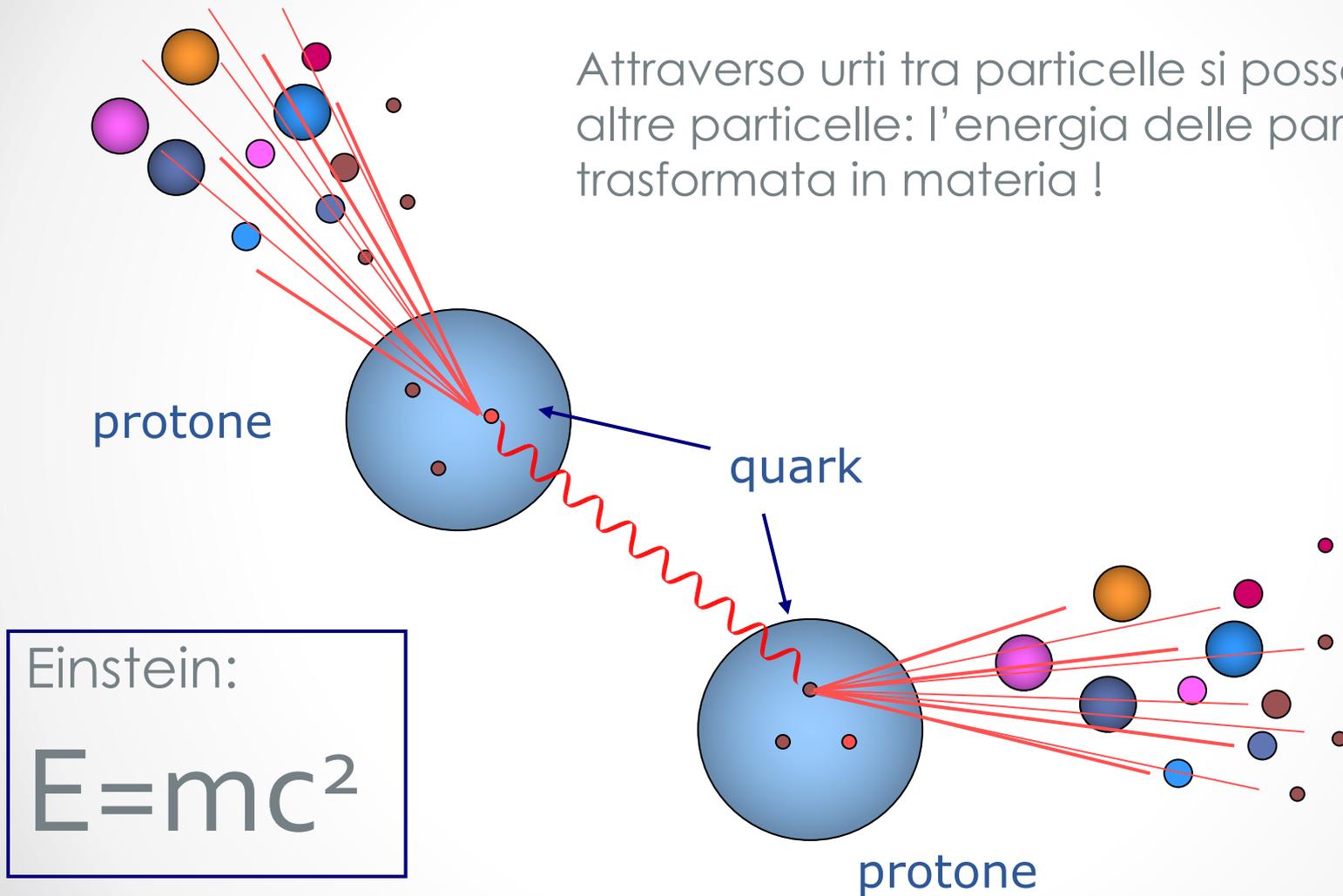
Il bosone di Higgs (e le sue metafore)

- Fino a poco tempo fa mancava la particella (ipotizzata 50 anni fa) che “fornisce” la massa a tutte le altre: il **bosone di Higgs**. Scoperto all' LHC del CERN nel 2012.
- Il bosone di Higgs è nato da una transizione di fase (un po' come l'acqua che diventa ghiaccio) avvenuta nei primissimi istanti dell'universo. Da quel momento tutte le particelle (prima di massa nulla) hanno acquistato massa in maniera proporzionale alla loro interazione con il campo di Higgs.
- Un po' come un corpo che si muove nella melassa: più la melassa oppone resistenza al corpo (interazione) più questo si muove lentamente (massa)
- Altri parallelismi spesso usati sono:
 - persone sulla neve (sci, racchette, stivali)
 - persone famose in mezzo alla folla



Come produciamo le particelle?

Attraverso urti tra particelle si possono creare altre particelle: l'energia delle particelle viene trasformata in materia !

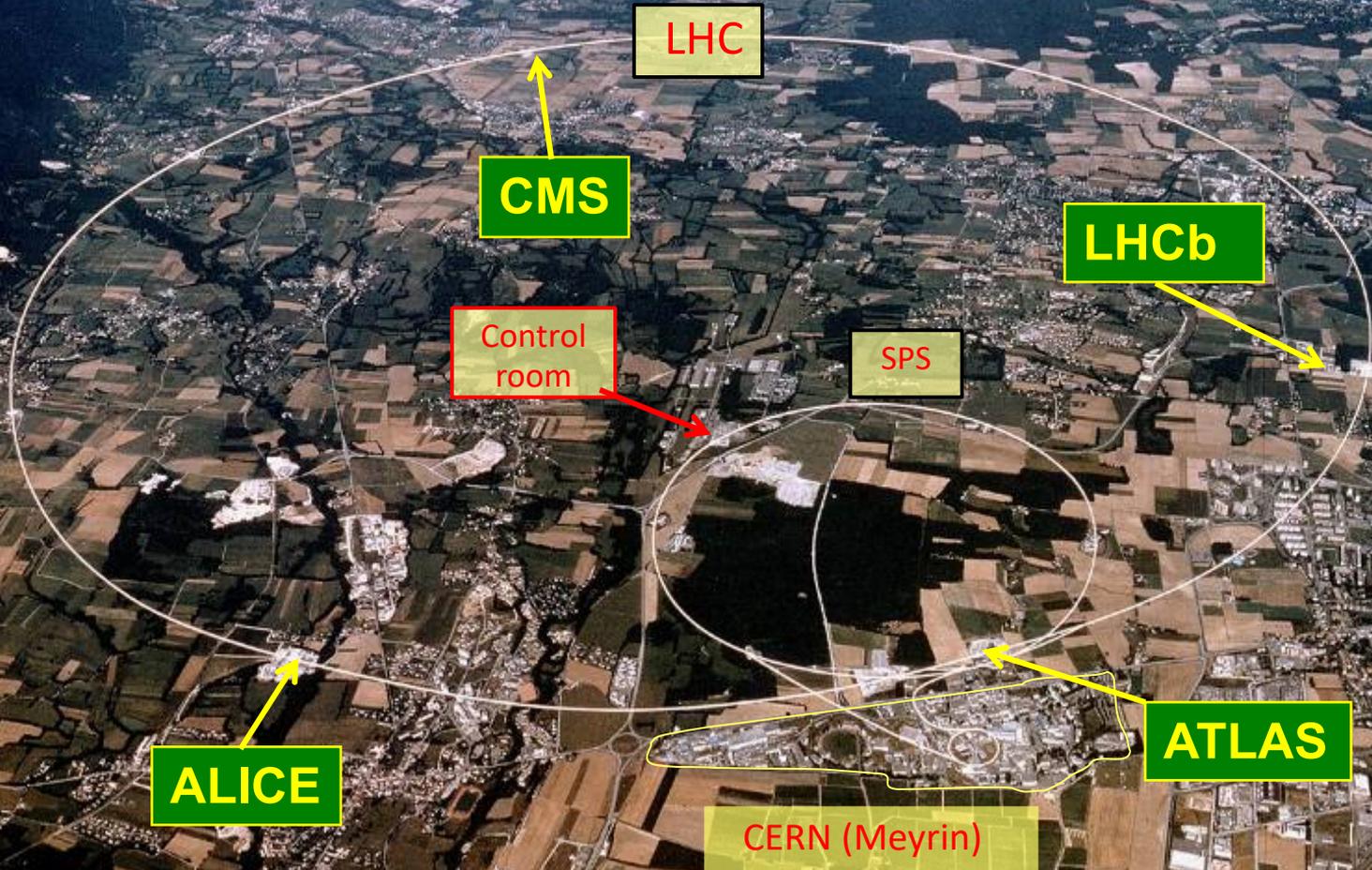


Einstein:

$$E=mc^2$$

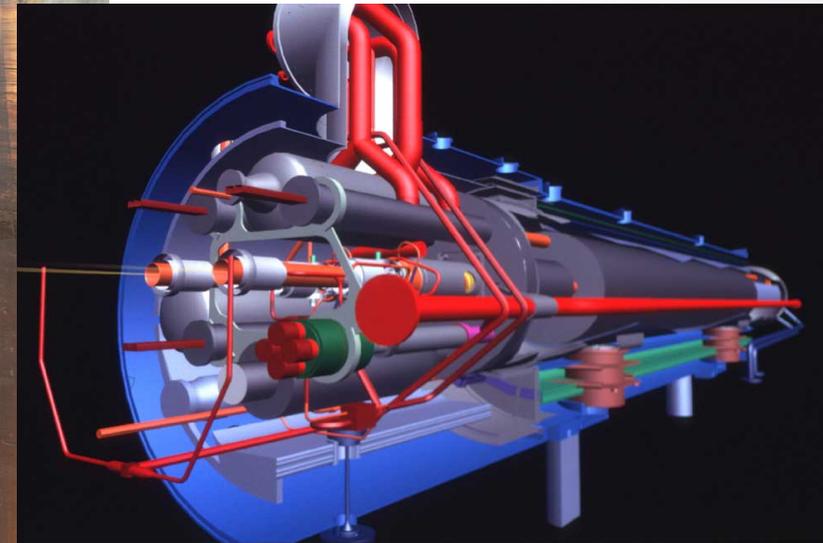
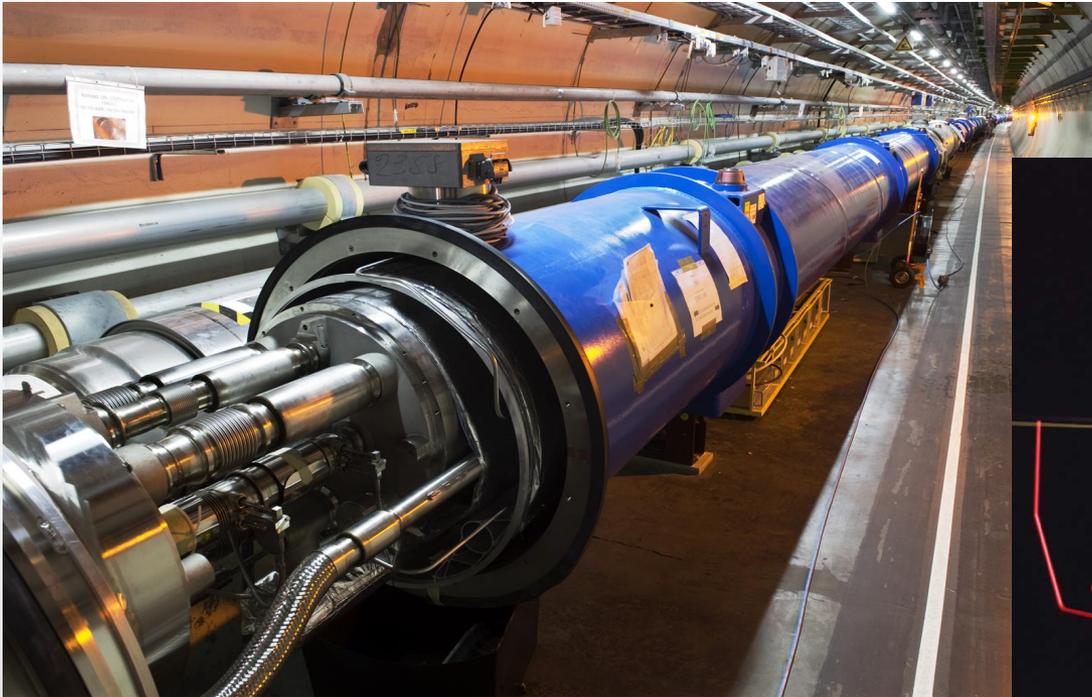
L'acceleratore LHC al CERN di Ginevra

27 km di circonferenza. A piedi ci mettereste 5/6 ore a fare il giro completo ! Le particelle che girano in un secondo fanno 10 mila giri!!! (in un secondo fanno 10 volte il giro della Terra!)



Caratteristiche di LHC

LHC è stato progettato per produrre eventi molto rari ad energie elevate. Accelera protoni fino a 6.5 TeV per fascio (energia mai raggiunta prima, corrispondente ad una velocità pari al 99.99991% della velocità della luce), e produce fino a 800 milioni di collisioni al secondo.



Dove tutto ha inizio...

- Da dove escono le particelle che vengono accelerate in LHC ?
- Da una bombola di idrogeno !
- L'atomo di idrogeno è formato da un protone ed elettrone, tramite forze elettriche si strappa l'elettrone ottenendo un insieme di protoni.

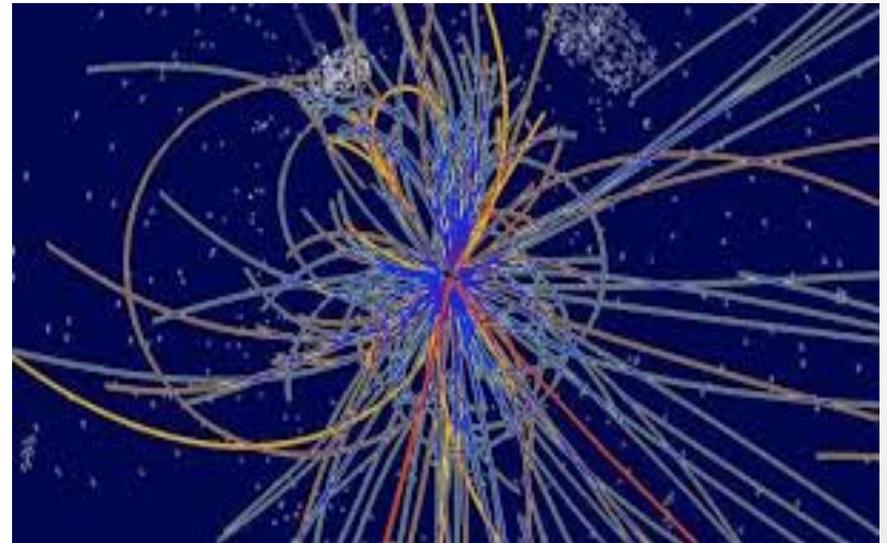


Funzionamento di LHC



Dove vanno le particelle prodotte ?

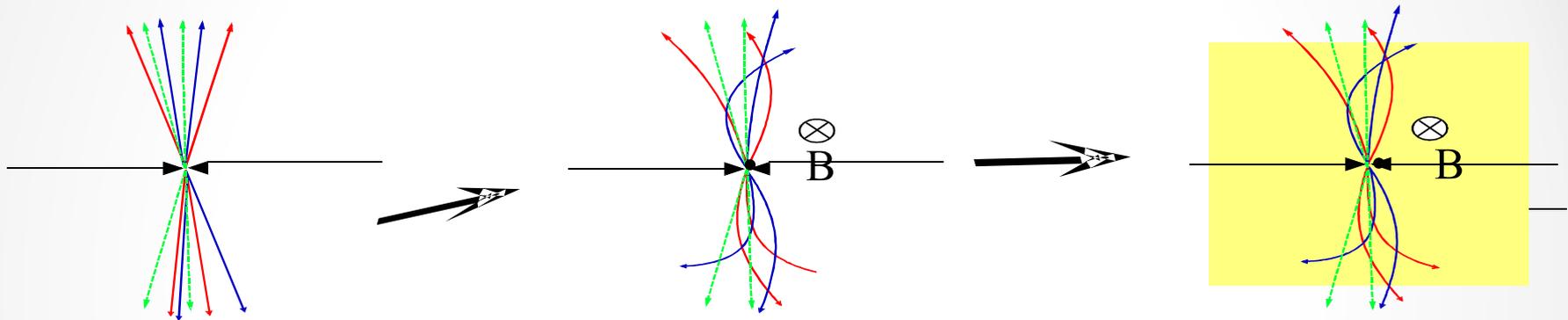
- Le particelle prodotte dalla collisione protone-protone hanno un'esistenza brevissima (da 10^{-22} a 10^{-12} sec) e poi decadono (si trasformano) in particelle "figlie" stabili.
- Le particelle "figlie" lasciano "orme" nel rivelatore.



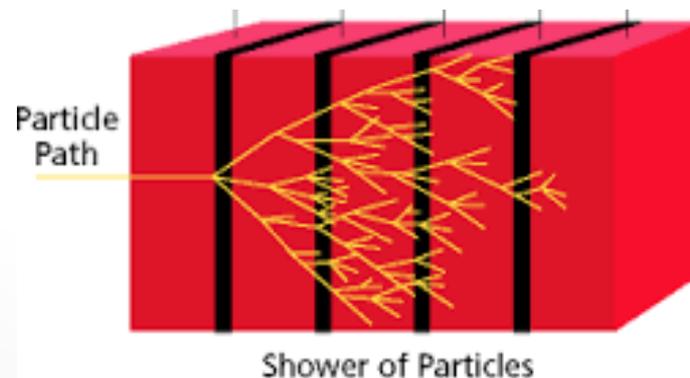
- Il primo passo consiste quindi nel capire in quali particelle "figlie" si possono trasformare le particelle che vogliamo cercare.

Come rivelare le particelle prodotte ?

- Impulso particelle cariche tramite curvatura della traiettoria in campo magnetico (Forza di Lorentz: $F = qv \times B$)



- Energia: ``fermando'' la particella in un materiale denso e misurando l'energia depositata. Per leptoni carichi la perdita di energia è proporzionale a $1/m^2$.



Più grande l'energia più grande il rivelatore

(microscopio)

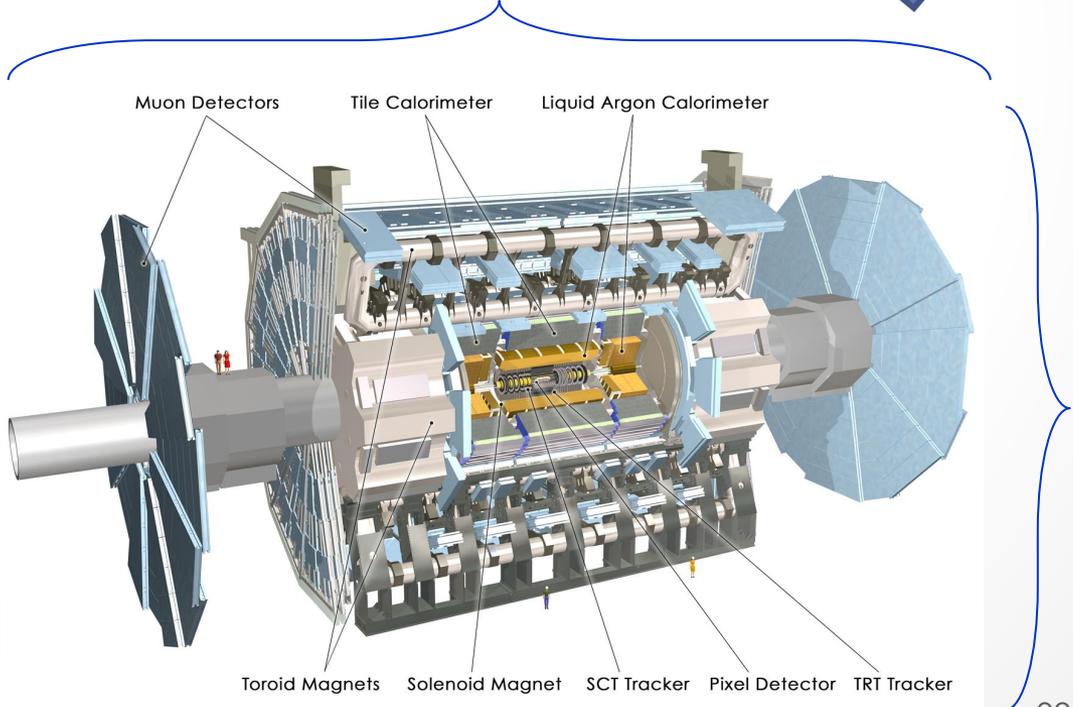


ATLAS vicino ad un edificio di 5 piani: 15 anni per progettarlo e costruirlo



45 m

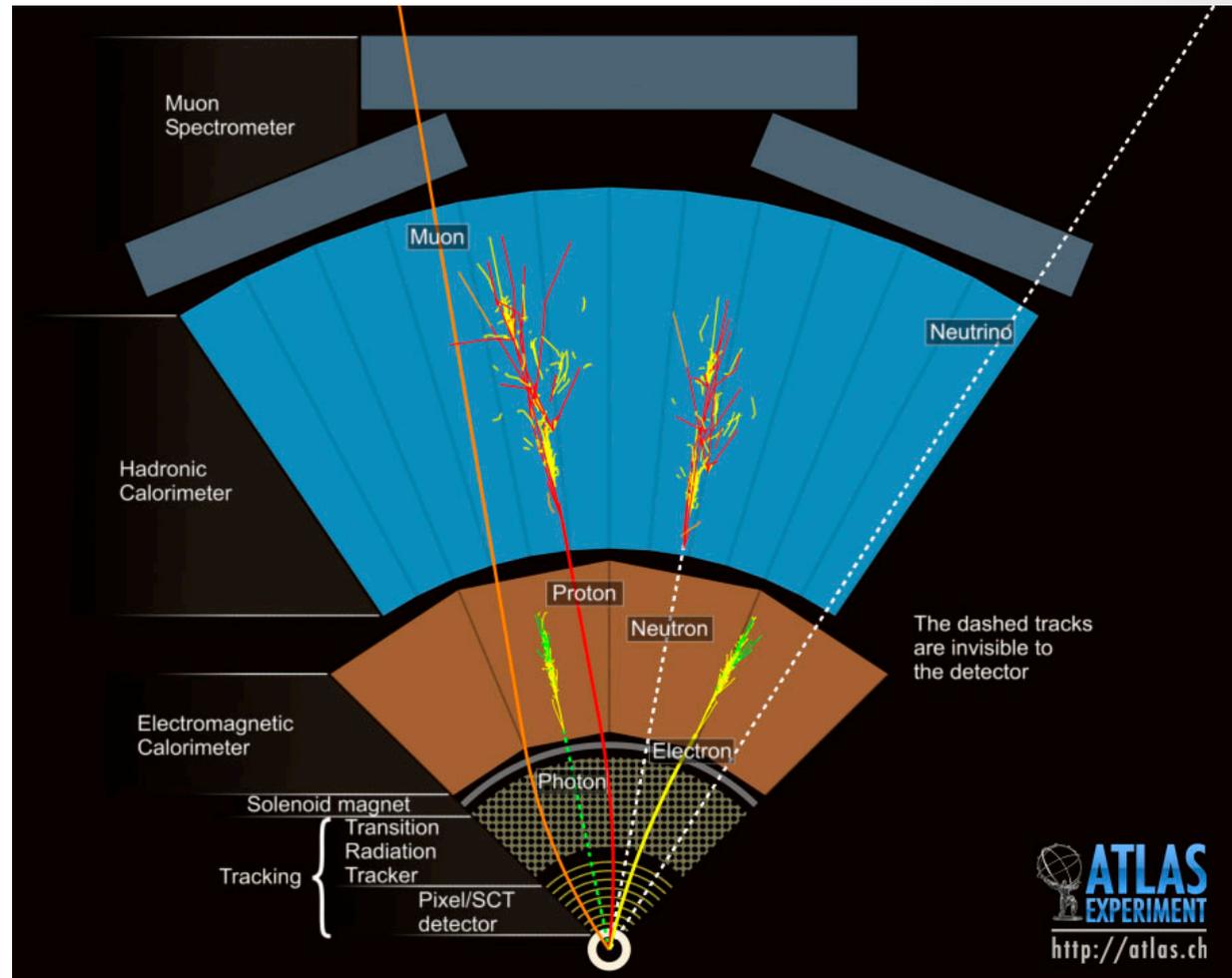
7000 Tonnellate



24 m

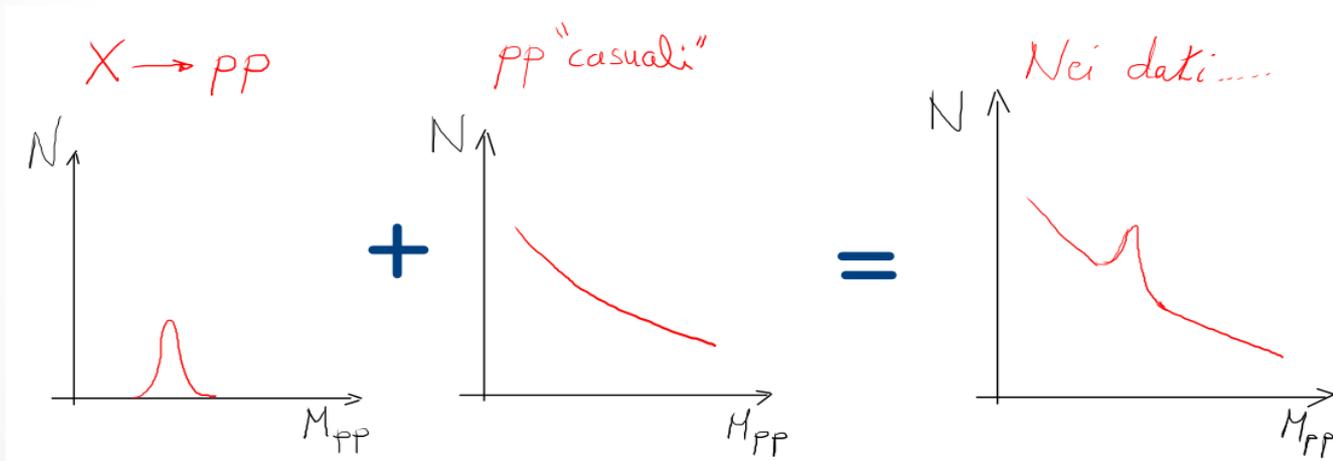
Le orme delle particelle

- Le particelle che effettivamente vengono ricostruite dai rivelatori sono
 - **Elettroni**
 - **Muoni** (cugini pesanti degli elettroni)
 - **Fotoni**
 - Fiotti di particelle (**Jet**) prodotti da quark.
- Ognuna di esse lascia un segnale distintivo



Come facciamo «vedere» le particelle a vita media breve ?

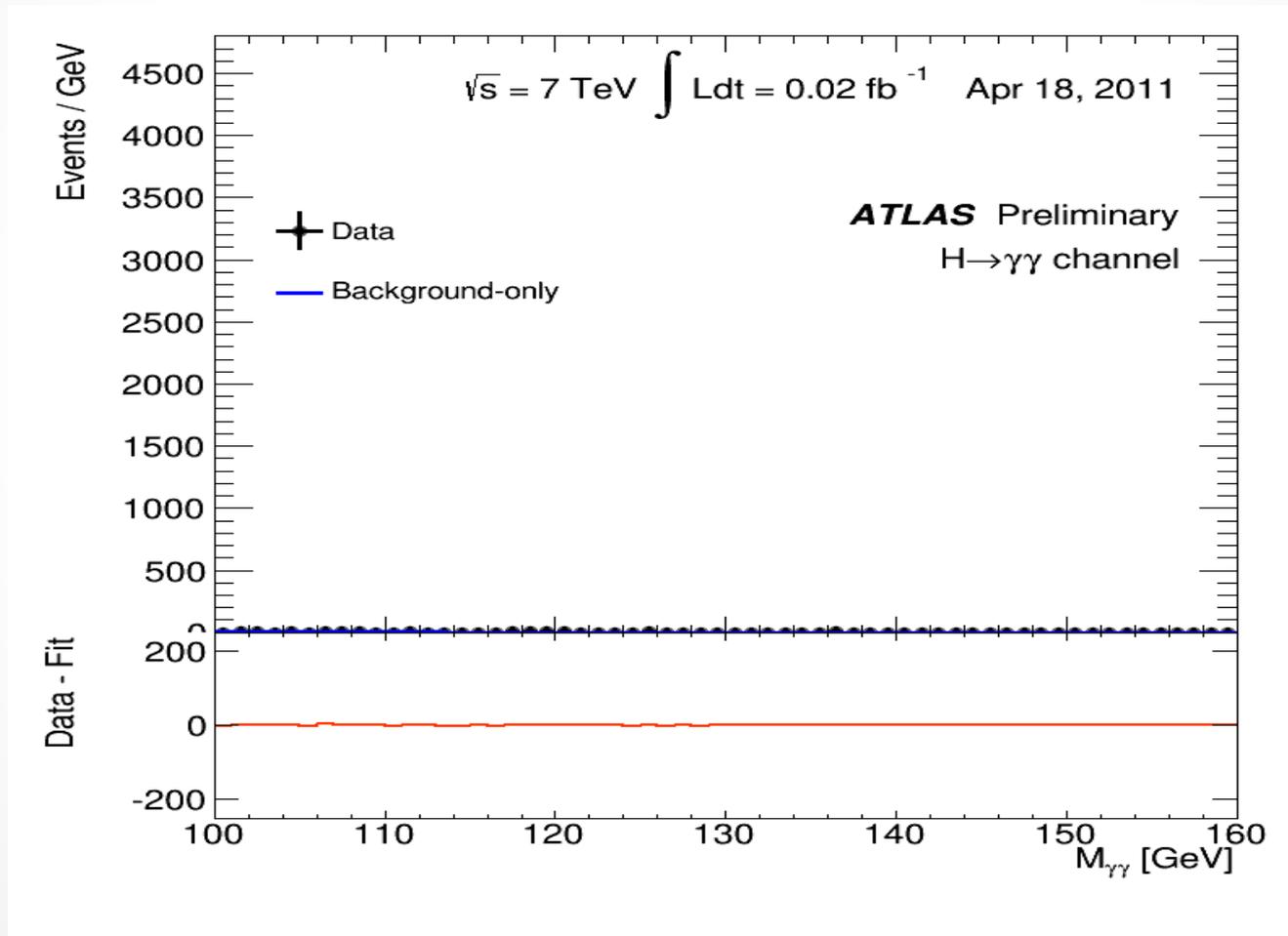
- Come facciamo a collegare la poche particelle che ricostruiamo alle particelle che le hanno generate ?
- Se due (o più) particelle vengono dalla stessa particella madre attraverso di esse è possibile ricostruire la massa di tale particella (che è un valore ben determinato)
- Se invece le particelle hanno origine diversa («combinazione casuale») la massa così calcolata è distribuita in un ampio intervallo



- Identificazione di tipo probabilistico: posso dire quanti eventi ho visto ma non posso dire nulla sul singolo evento (candidato del segnale che sto cercando).

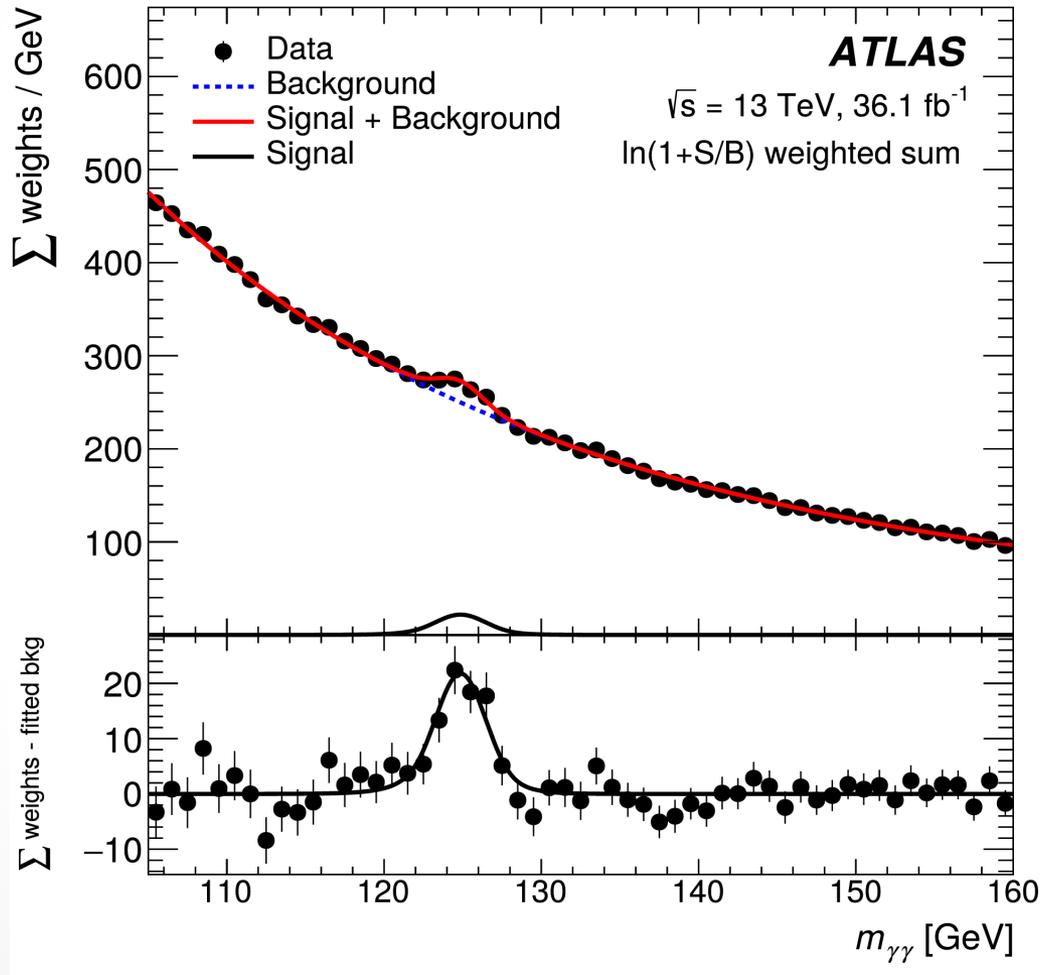
Higgs in coppie di fotoni (ATLAS)

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



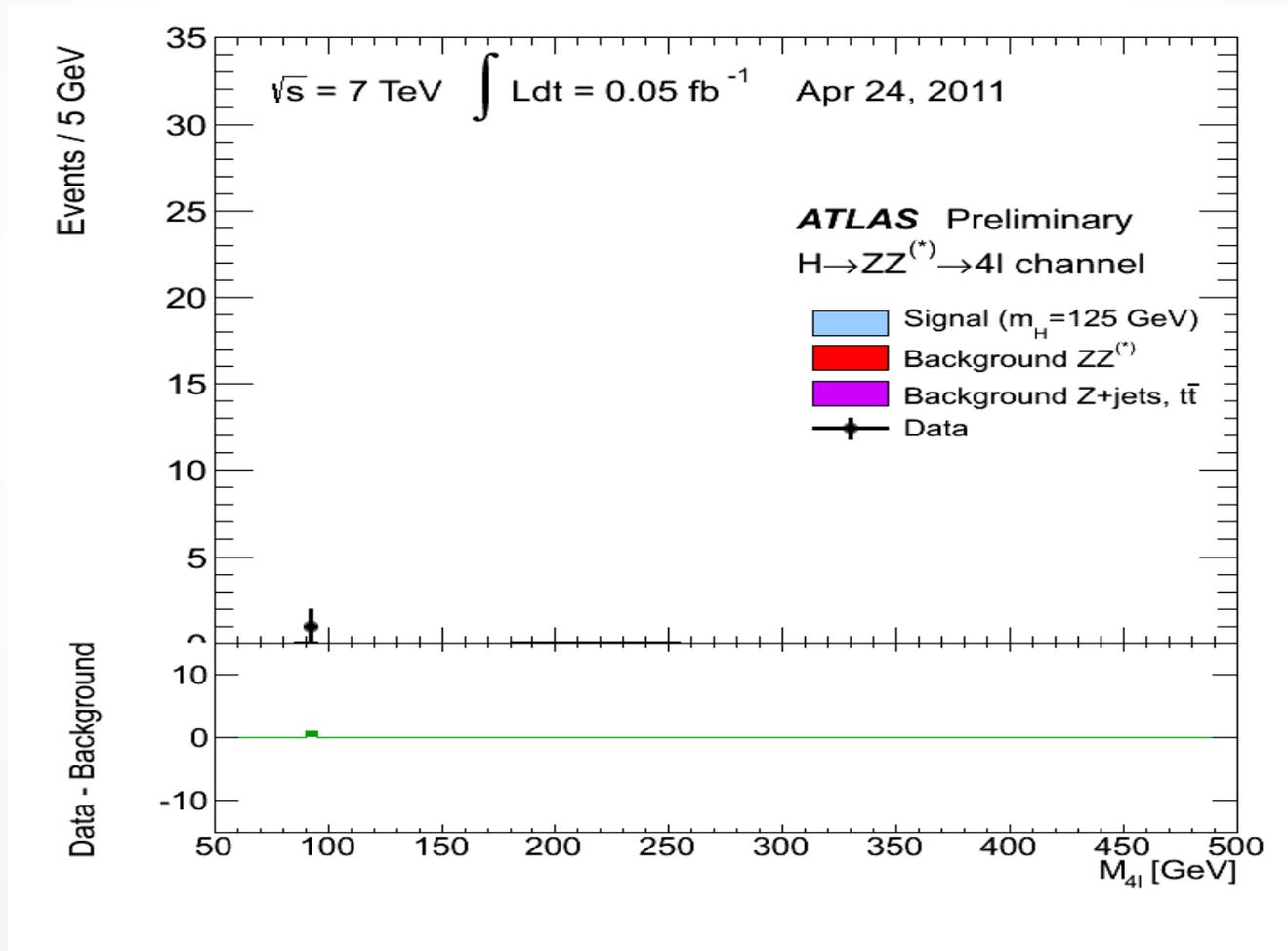
Higgs in coppie di fotoni (ATLAS)

$H \rightarrow \gamma\gamma$ (aggiornato con i dati più recenti)



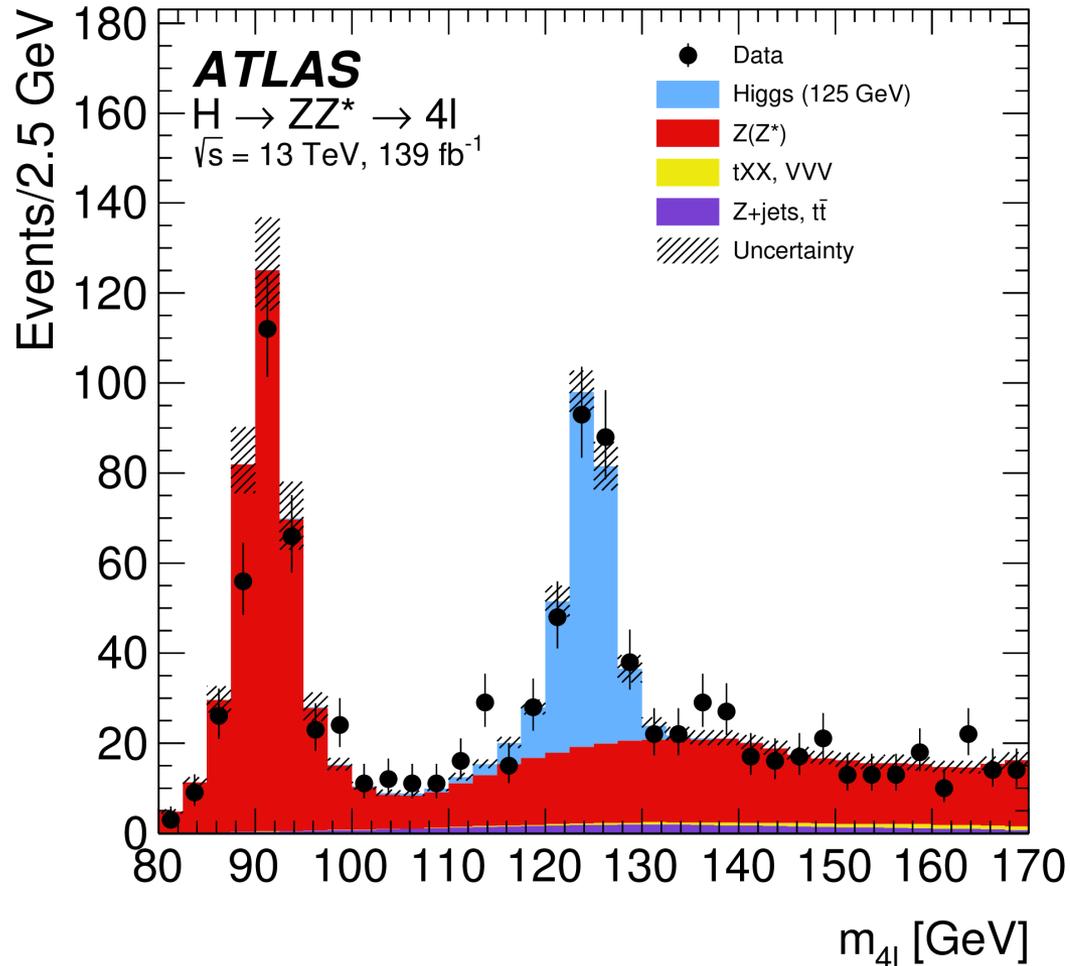
Higgs in coppie di Z (ATLAS)

$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu/ee\mu\mu/eeee$

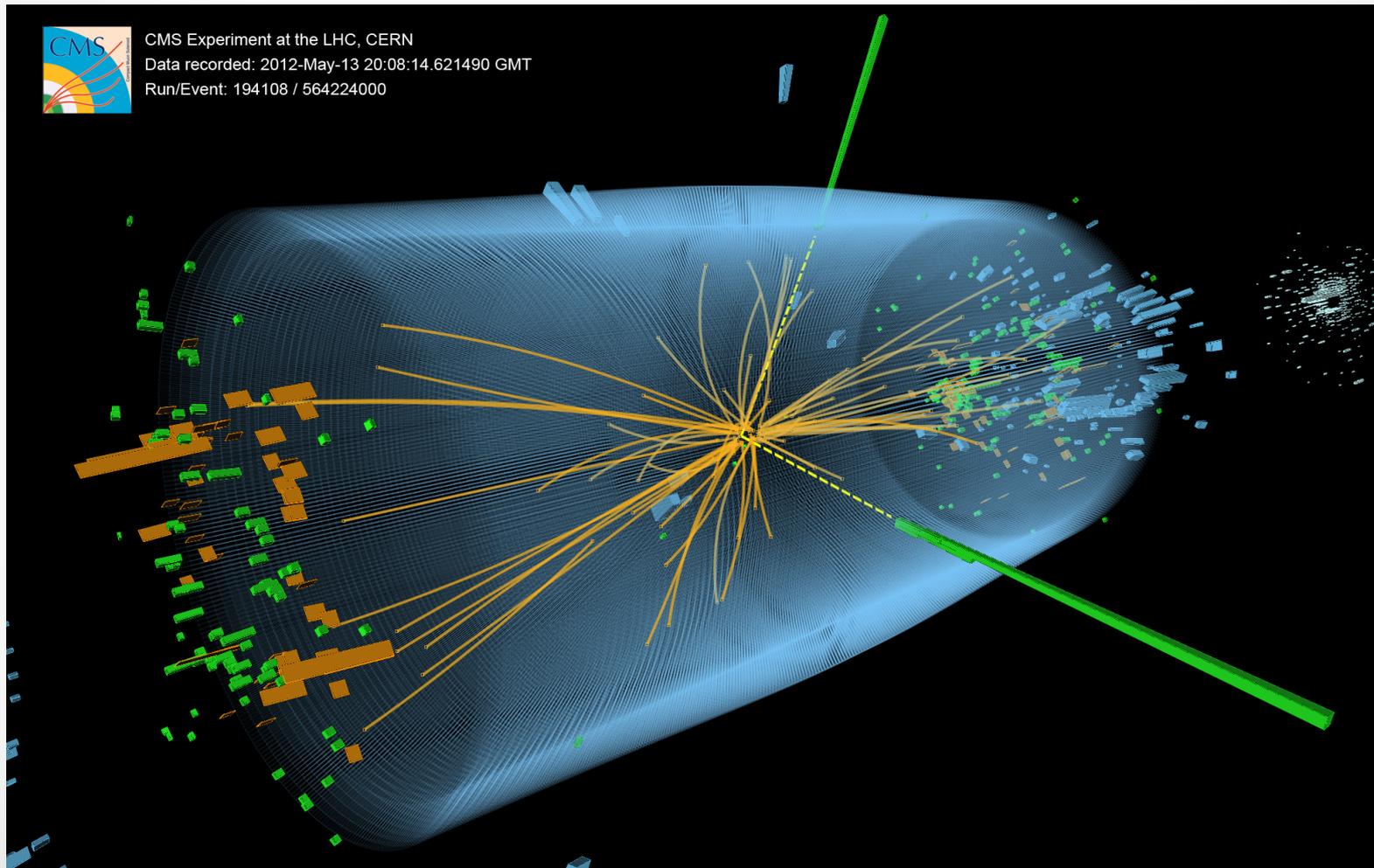


Higgs in coppie di Z (ATLAS)

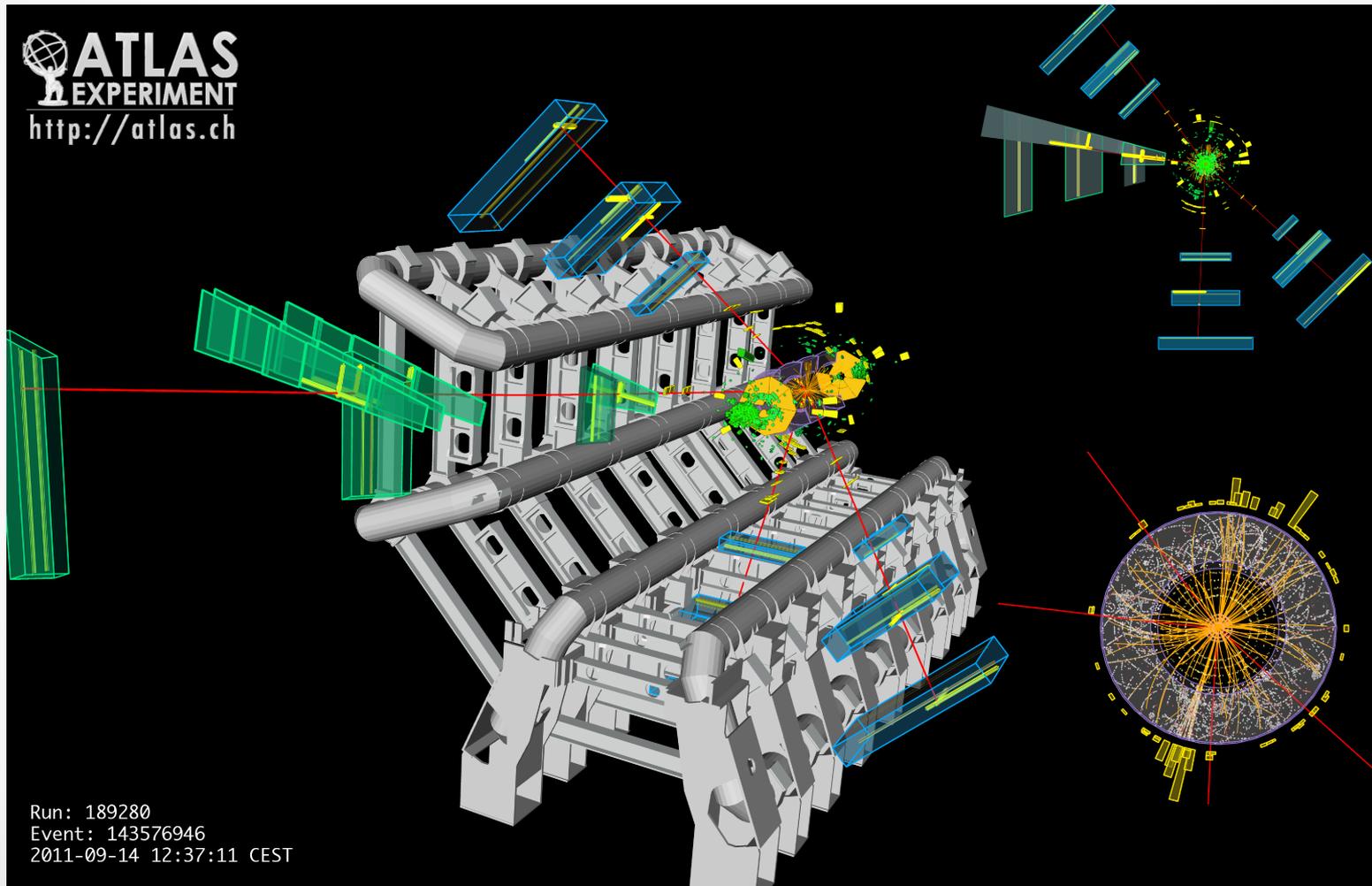
H \rightarrow **ZZ** \rightarrow **$\mu\mu\mu\mu$ / $ee\mu\mu$ / $eeee$** (aggiornato con i dati piÙ recenti)



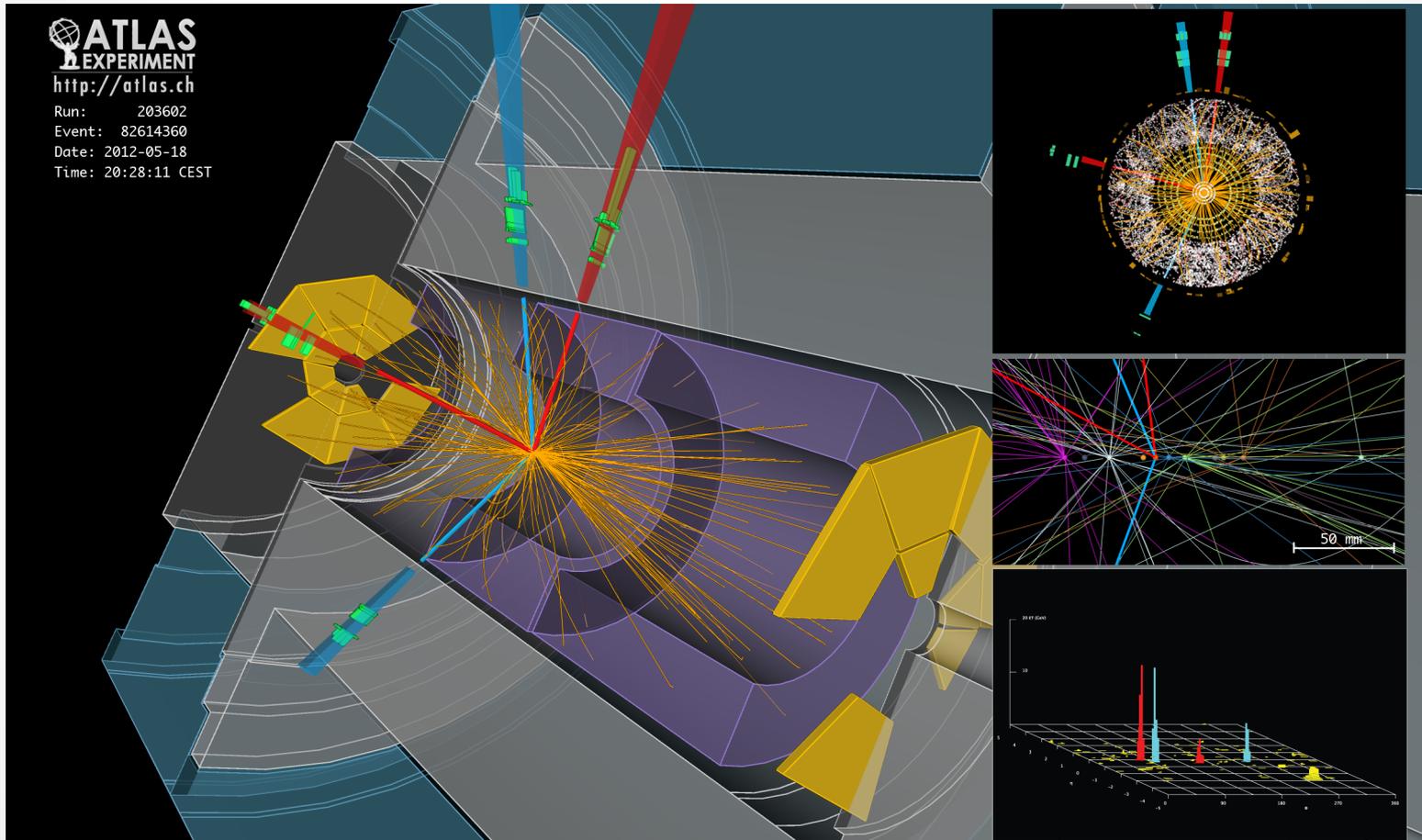
Visualizzazione grafica: coppia di fotoni (CMS)



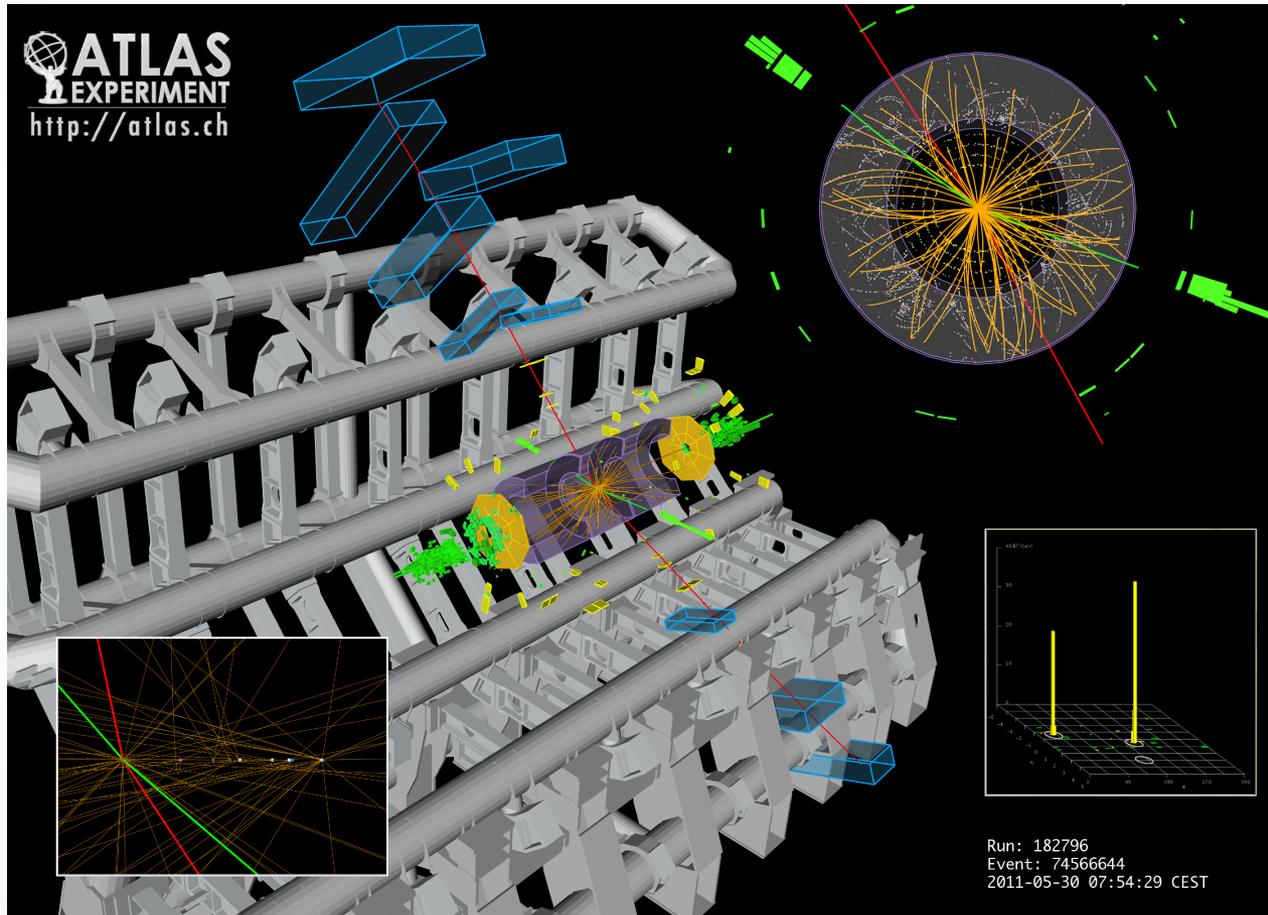
Visualizzazione grafica: coppia di Z che, a catena, decadono in 4 muoni (ATLAS)



Visualizzazione grafica: coppia di Z che, a catena, decadono in 4 elettroni (ATLAS)

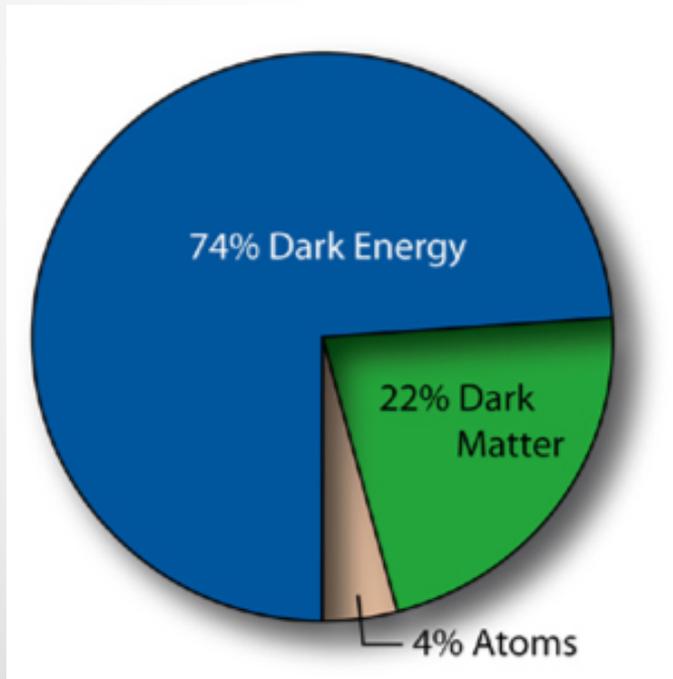


Visualizzazione grafica: coppia di Z che, a catena, decadono in 2 elettroni e 2 muoni



E dopo il bosone di Higgs ?

Nonostante il suo successo del modello costruito nel descrivere la natura molte cose sono ancora da spiegare...



- Come includere la **gravità** nel Modello Standard ?
- Perché le particelle hanno **una determinata massa** ?
- Perché le particelle sono così **tante** (24) ?
- Di cosa è fatta **l'energia del nostro universo** ?
 - la materia nota ne rappresenta solo il 4% .. cos'è il restante **96%?**

E adesso...?

- La scoperta dell'Higgs è stata una pietra miliare nella fisica delle particelle ma ci sono molte cose ancora da capire
- Il Run II (2015-2018) è stato un periodo di presa dati fantastico. Abbiamo accumulato molti più dati rispetto alle previsioni.
- La prossima presa dati partirà nel 2022 (Run III) e sarà seguita nel 2026 da una lunga (e ultima) presa dati ad altissima statistica.
- Stiamo esplorando energie mai raggiunte prima ! Speriamo di trovare indizi che diano risposte alle domande finora emerse, raggiungendo una più profonda conoscenza della struttura della materia e dell'interazione:
 - Misurando meglio particelle le proprietà delle particelle (Higgs in particolare)
 - Cercando nuova particelle (attese o inattese)
- *... continuando a combinare intuizione e fantasia per visualizzare il mondo delle particelle elementari ed estendere i limiti della conoscenza umana sulla struttura più profonda del nostro universo.*