

I rivelatori e la scoperta del bosone di Higgs



Chiara Mariotti INFN-Torino

7-9 ottobre 2024

Programma per gli insegnanti italiani

L'insegnante è la persona alla quale un genitore affida la cosa più preziosa che possiede suo figlio: il cervello. Glielo affida perché lo trasformi in un oggetto pensante. Ma l'insegnante è anche la persona alla quale lo Stato affida la sua cosa più preziosa: la collettività dei cervelli, perché diventino il paese di domani.

Piero Angela

Pagina web con molto materiale:

www.to.infn.it/~mariotti/particelle2.html

Le lezioni del "primo ciclo"

https://www.dropbox.com/s/t8zwjv60hhkrtnz/lezioni_cern_settembre2014_1.pptx?dl=0

https://www.dropbox.com/s/2123cyzs1d63qw4/lezioni_cern_settembre2014_2.pptx?dl=0

https://www.dropbox.com/s/08q8us2ha2mkndo/lezioni_cern_settembre2014_3.pptx?dl=0

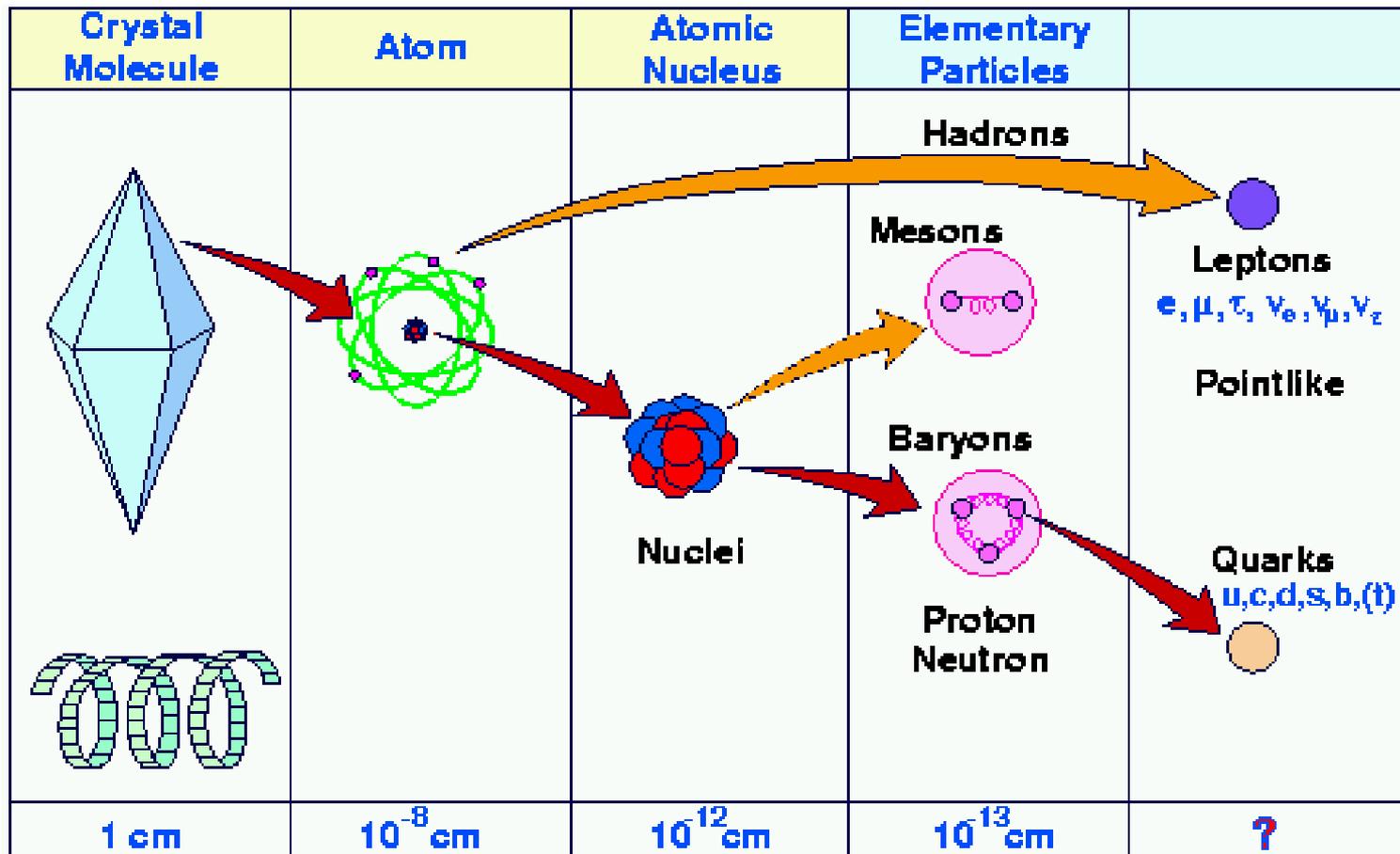
"Secondo ciclo":

https://www.dropbox.com/s/aeac886lkhh18y7/lezioni_2ciclo_cern_settembre2015.pptx?dl=0

Le Particelle Elementari

Negli ultimi 50 anni si è scoperto che l'universo è costituito da particelle elementari (puntiformi).

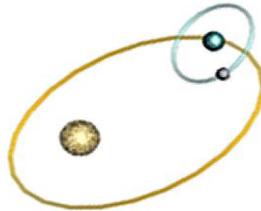
Combinare tra loro formano la materia di cui siamo fatti.



Le Forze

Le particelle elementari interagiscono tra loro tramite **messaggeri**,
che sono altre particelle, dette “**particelle forza**”.
Le forze che conosciamo in natura sono:

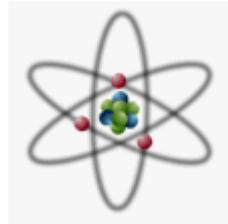
Forza gravitazionale:



Caduta dei corpi, moto stellare...

Il messaggero si pensa sia il **gravitone**

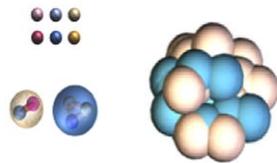
Forza elettromagnetica:



corrente, magneti, atomi, chimica...

Il suo messaggero è il **fotone**

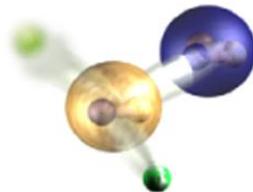
Forza forte:



tiene uniti i protoni e i neutroni nel nucleo
anche se di carica uguale e tiene uniti i quark

Il suo messaggero è il **gluone**

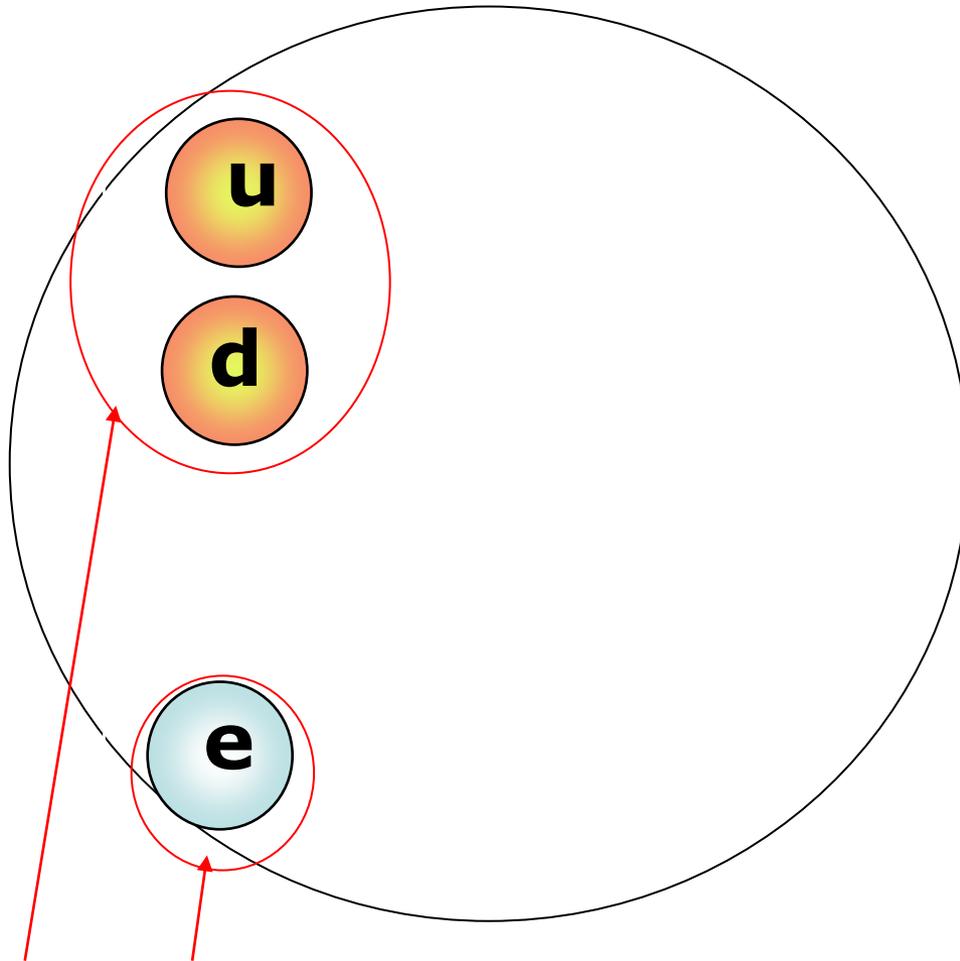
Forza debole



radioattività, attività solare ...

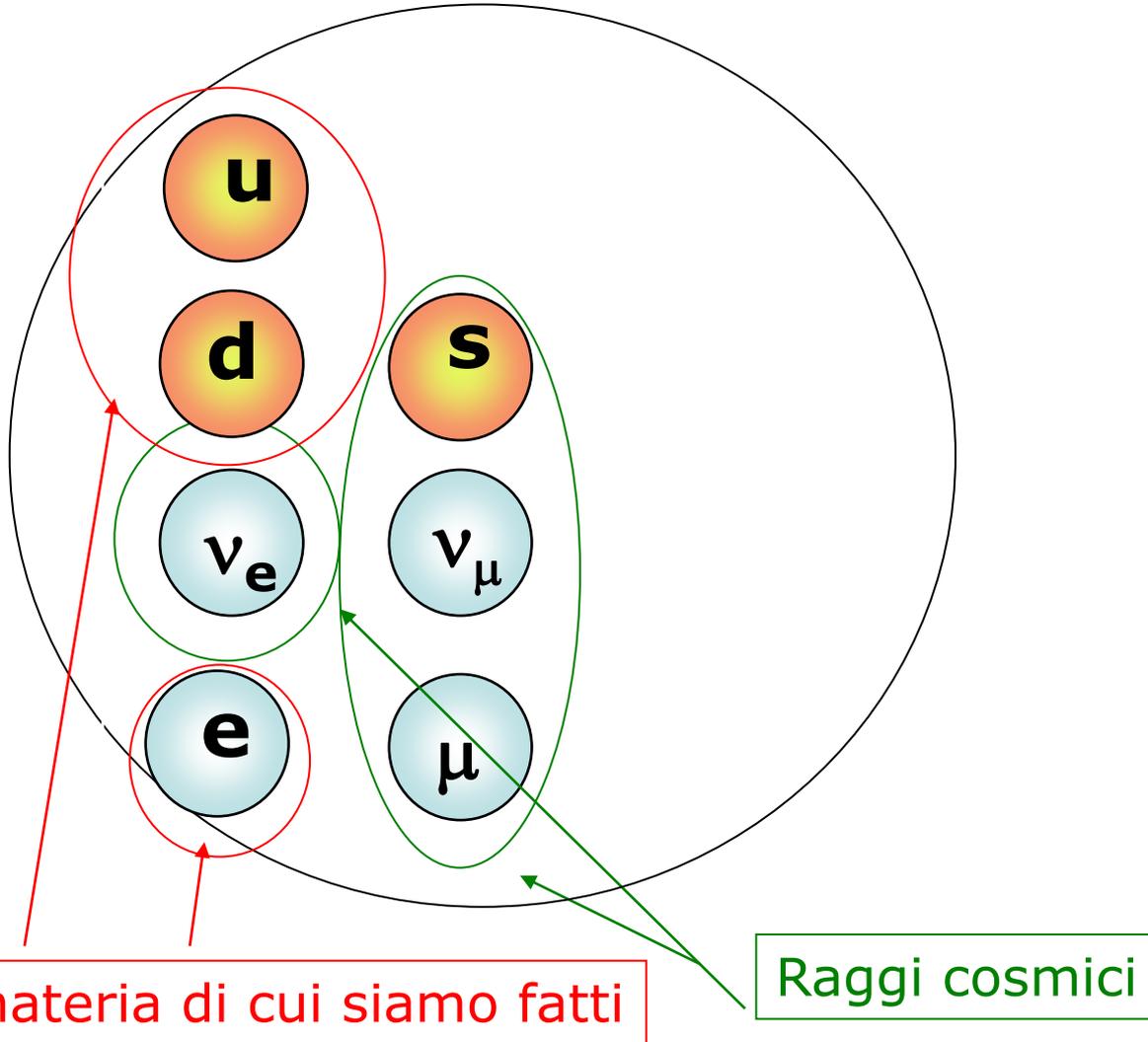
I suoi messaggeri sono i **W^\pm** e la **Z**

Le Particelle Fondamentali: Il MODELLO STANDARD

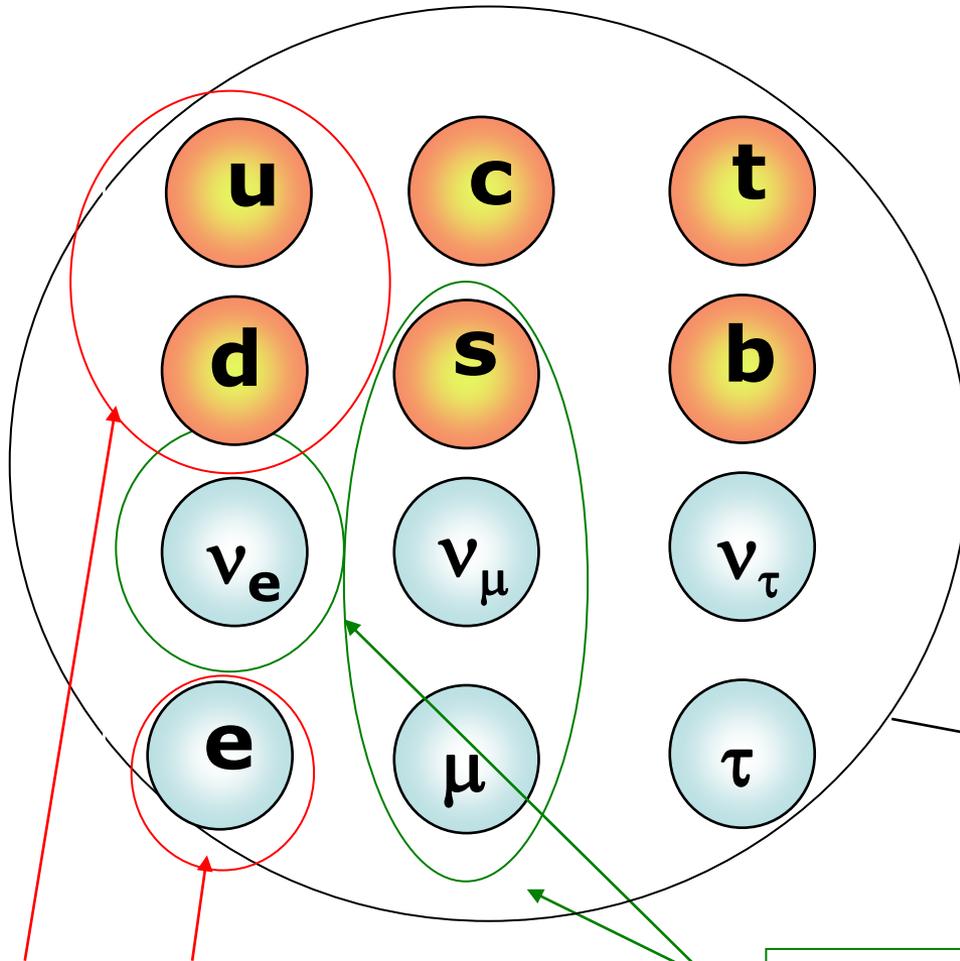


La materia di cui siamo fatti

Le Particelle Fondamentali:II MODELLO STANDARD



Le Particelle Fondamentali: Il MODELLO STANDARD

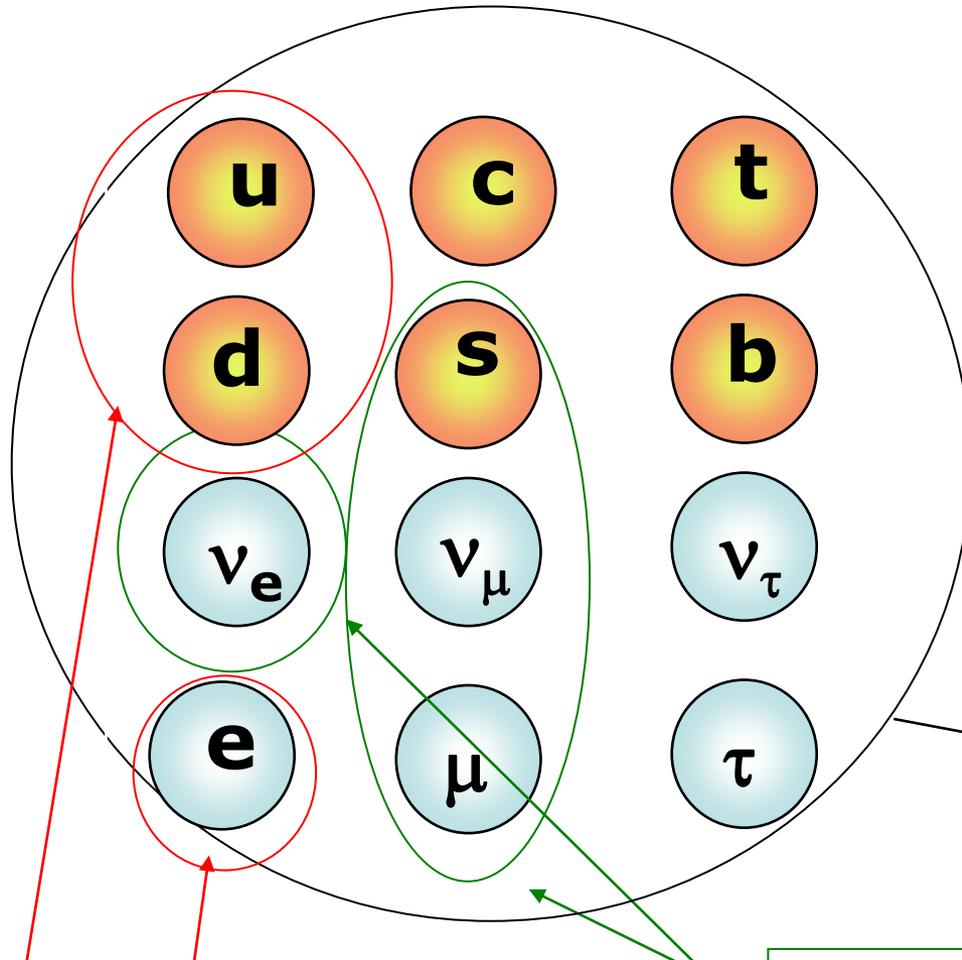


La materia di cui siamo fatti

Raggi cosmici

Si possono produrre in laboratorio

Le Particelle Fondamentali: Il MODELLO STANDARD



Le particelle forza:

i bosoni

g gluoni (8)

γ fotone

W^+, W^-, Z

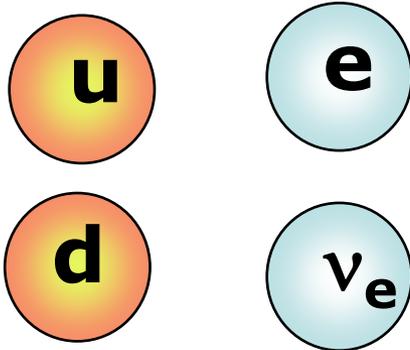
Si possono produrre
in laboratorio

La materia di cui siamo fatti

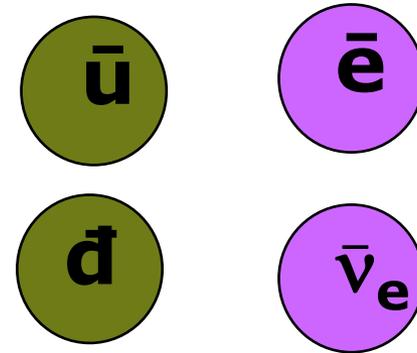
Raggi cosmici

L'antimateria

Per ogni particella



Esiste la sua antiparticella



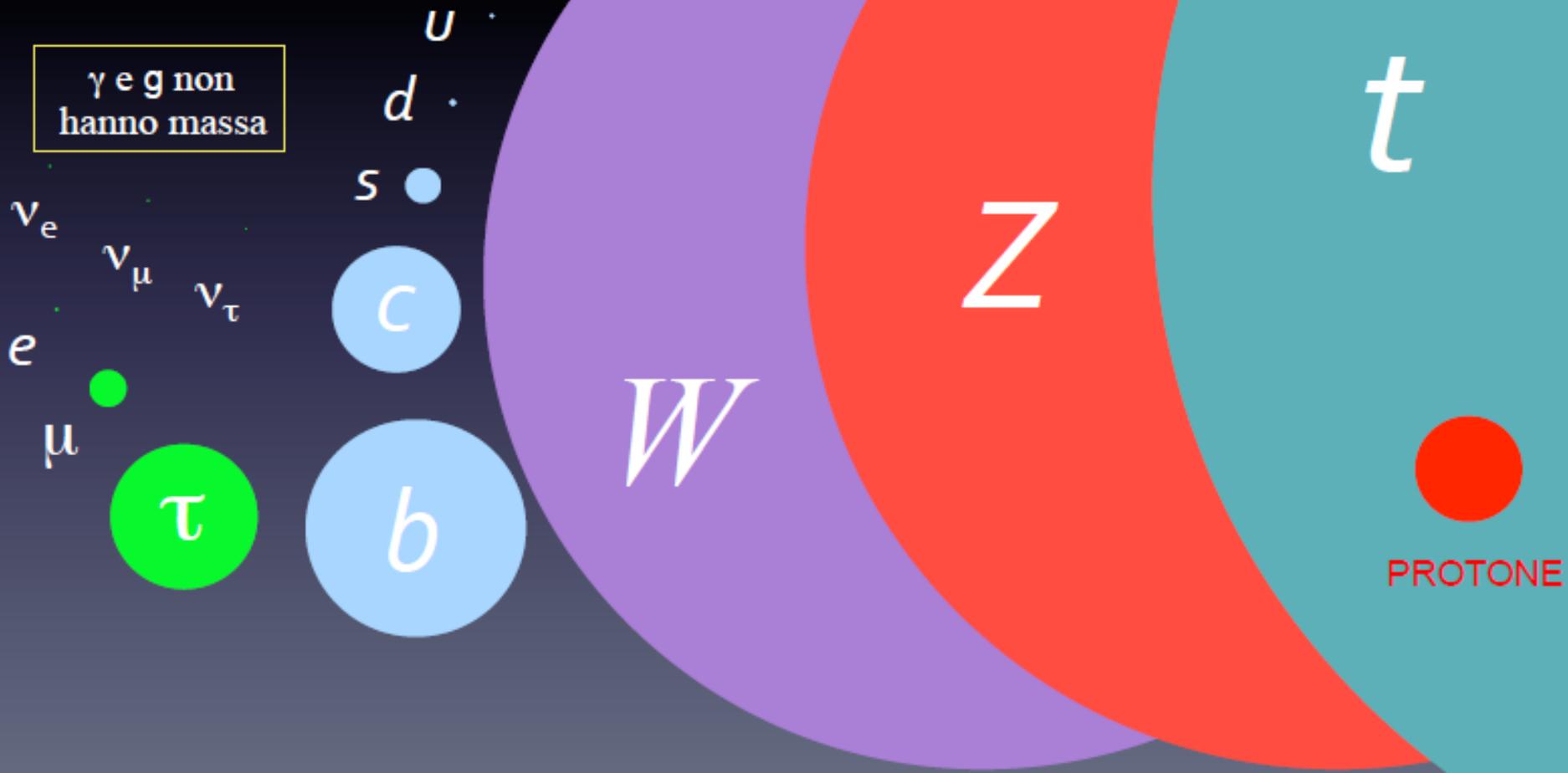
Le particelle e le antiparticelle hanno carica elettrica opposta



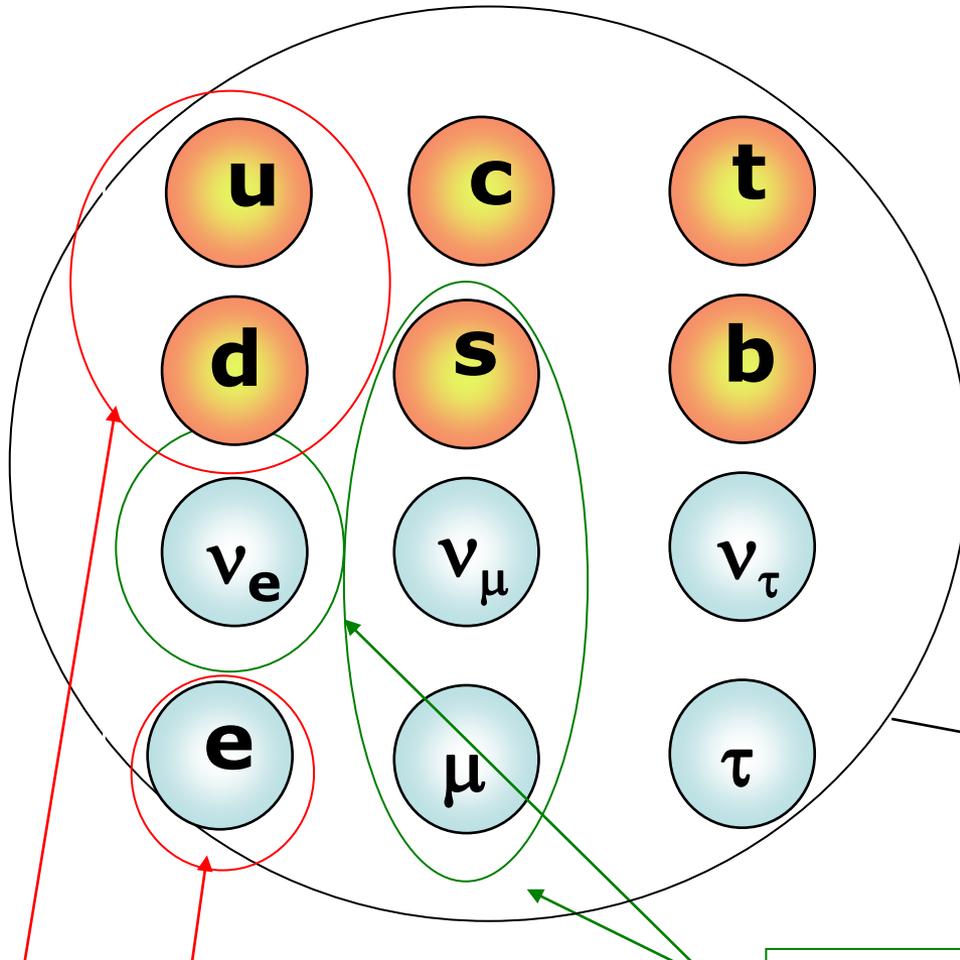
14 miliardi di anni fa, il Big Bang ha creato la materia e l'antimateria in quantità uguali. Noi esistiamo perché non c'è più antimateria. Come è successo questo?

Il problema della massa

Non c'è una spiegazione della massa delle particelle.
Eppure le particelle hanno una massa, che è enormemente diversa fra loro!

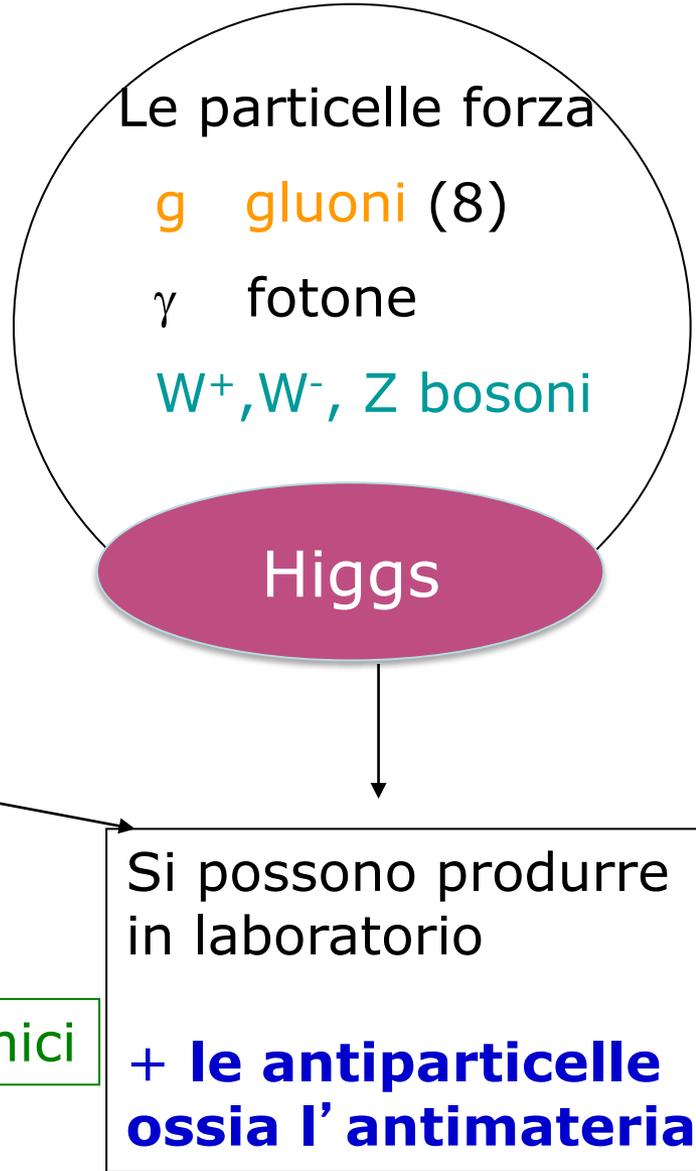


Le Particelle Fondamentali: Il MODELLO STANDARD



La materia di cui siamo fatti

Raggi cosmici



Le particelle forza

g gluoni (8)

γ fotone

W^+, W^-, Z bosoni

Higgs

Si possono produrre in laboratorio

+ **le antiparticelle**
ossia l' antimateria

Cosa e' la massa di una particella

L'impulso \vec{p} e l'energia E di una particella che si muove ad una velocita' vicino a quella della luce sono date da:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad E = mc^2$$

Quando lavoriamo con oggetti relativistici

la massa a cui ci riferiamo e' quella a riposo
i.e. l'energia a $v \rightarrow 0$ divisa per c^2 .

$$E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^2 c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$$

Un punto importante: particelle relativistiche possono avere $m=0$ e allo stesso tempo $E \neq 0$ e $\vec{p} \neq 0$.

Questo e' possibile solo se $v=c$.

La massa delle particelle

Il protone ha massa, e' un oggetto composto (da quark) e la sua massa e' in teoria calcolabile.

Delle particelle elementari (quelle che non hanno struttura interna) non si puo' calcolare la massa, ma la si deve misurare sperimentalmente (ex: elettrone, muone, tau).
La massa e' un numero fondamentale.

Altre particelle:

il neutrino: si e' da poco scoperto che e' massivo;
il fotone ha massa nulla.

i 3 quark che compongono il protone sono responsabili di solo 1% della sua massa. Il resto viene dall'interazione tra i quark e i gluoni



Il fotone

In meccanica quantistica relativistica ogni particella è associata ad un campo e viceversa.

Il fotone è la particella (messaggero o “particella forza”) associata alla radiazione elettromagnetica. **È senza massa per definizione: la radiazione elettromagnetica viaggia nello spazio alla velocità della luce.**

Si capisce bene il perché del valore della sua massa.

Il potenziale elettrostatico ha range infinito: la propagazione delle onde elettromagnetiche è possibile su lunghe distanze.

Interazioni deboli

Le interazioni deboli, per contro, sono a corto range: sebbene abbiano bisogno di “messaggeri” tipo il fotone, chiamati W^\pm e Z , la loro massa e' molto grande, circa 100 volte la massa del protone.

La connessione tra l'interazione elettromagnetica e l'interazione debole e' molto profonda: sono differenti aspetti della stessa interazione fondamentale (la teoria e' unificata → la teoria elettrodebole). Il perche' la massa del fotone e le masse di W e Z sono cosi' diverse e' veramente difficile da capire.

Una soluzione possibile

Torniamo all'elettromagnetismo: Sappiamo che i fotoni possono comportarsi come particelle massive: questo succede quando viaggiano in un mezzo diverso dallo spazio vuoto.

La ragione fisica per questo è che la propagazione del campo elettrico e magnetico (ovvero del fotone) interagisce con il mezzo. L'effetto risultante è il “rallentamento” dell'onda che si propaga che **è l'equivalente di una massa effettiva per il fotone che si propaga.**

Si potrebbe dunque modificare lo spazio vuoto in modo tale che si comporti come un mezzo per le particelle che si propagano?

La rottura spontanea di simmetria

La risposta è ' sì' : possiamo introdurre un campo tale che:

1. non abbia valore nullo quando “non accade nulla”
(ovvero lo stato di minima energia /stato fondamentale non sia nullo)
2. che non violi i principi di base della invarianza relativistica
3. interagisca con tutti gli altri campi “nel modo giusto” (ossia vogliamo che ad esempio il fotone rimanga a massa nulla, mentre W , Z , leptoni e quark acquistino massa). → **Le particelle “muovendosi” nel mezzo dove questo nuovo campo è presente, acquistano una massa effettiva**

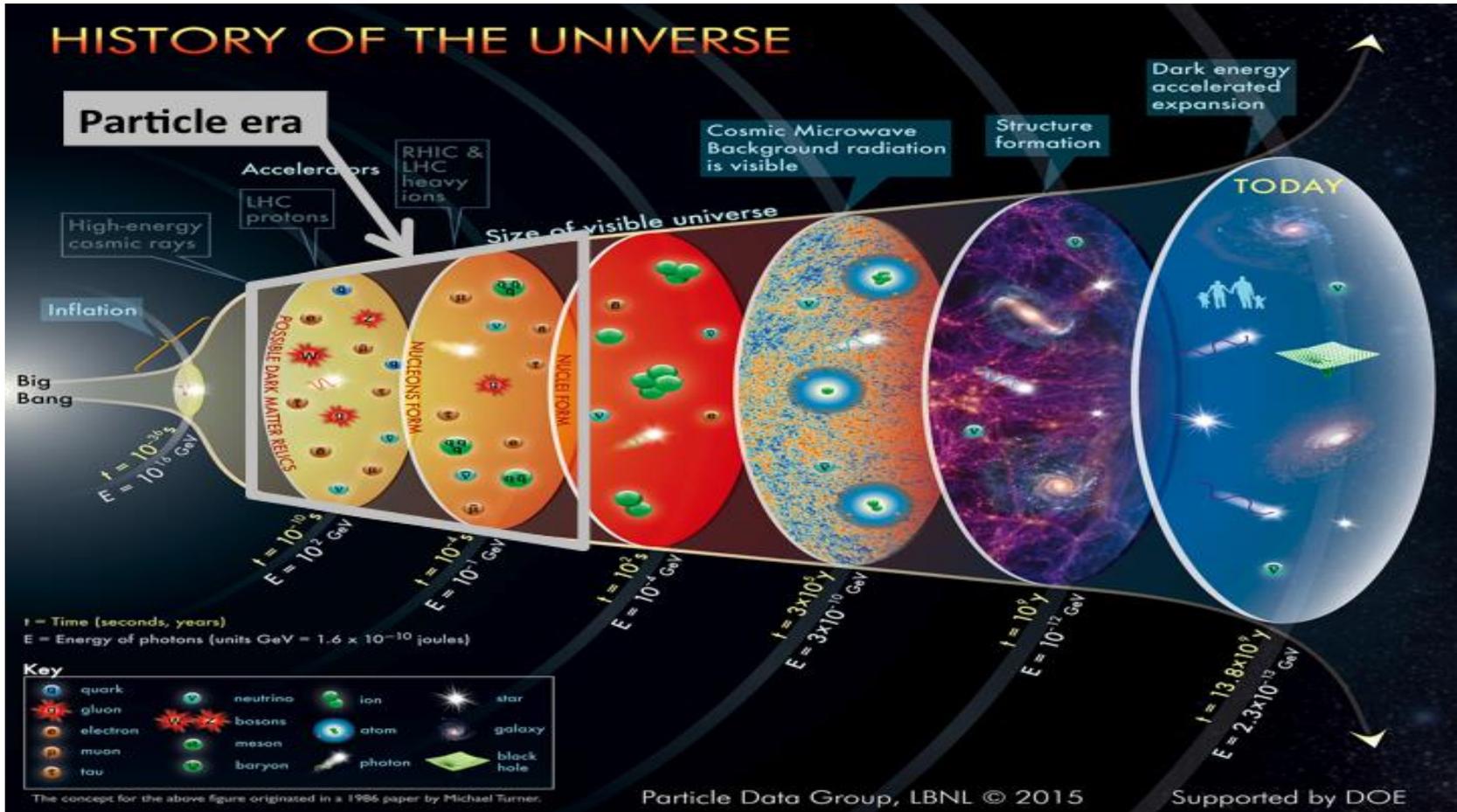
Il punto 1 è quello che chiamiamo “**rottura spontanea di simmetria**”: lo stato fondamentale **non** corrisponde ad una configurazione totalmente simmetrica



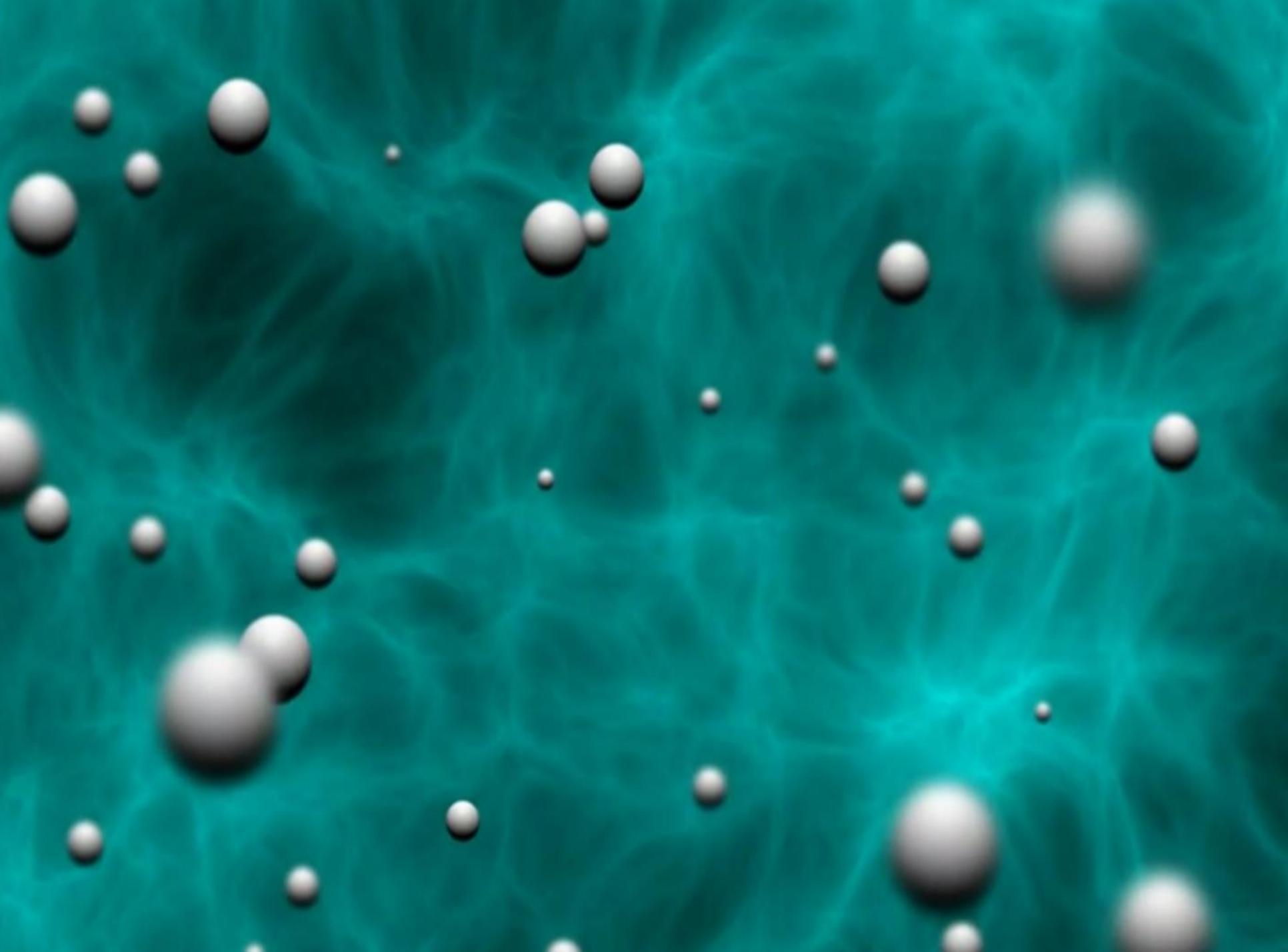
**The Higgs field
and
the Higgs boson**

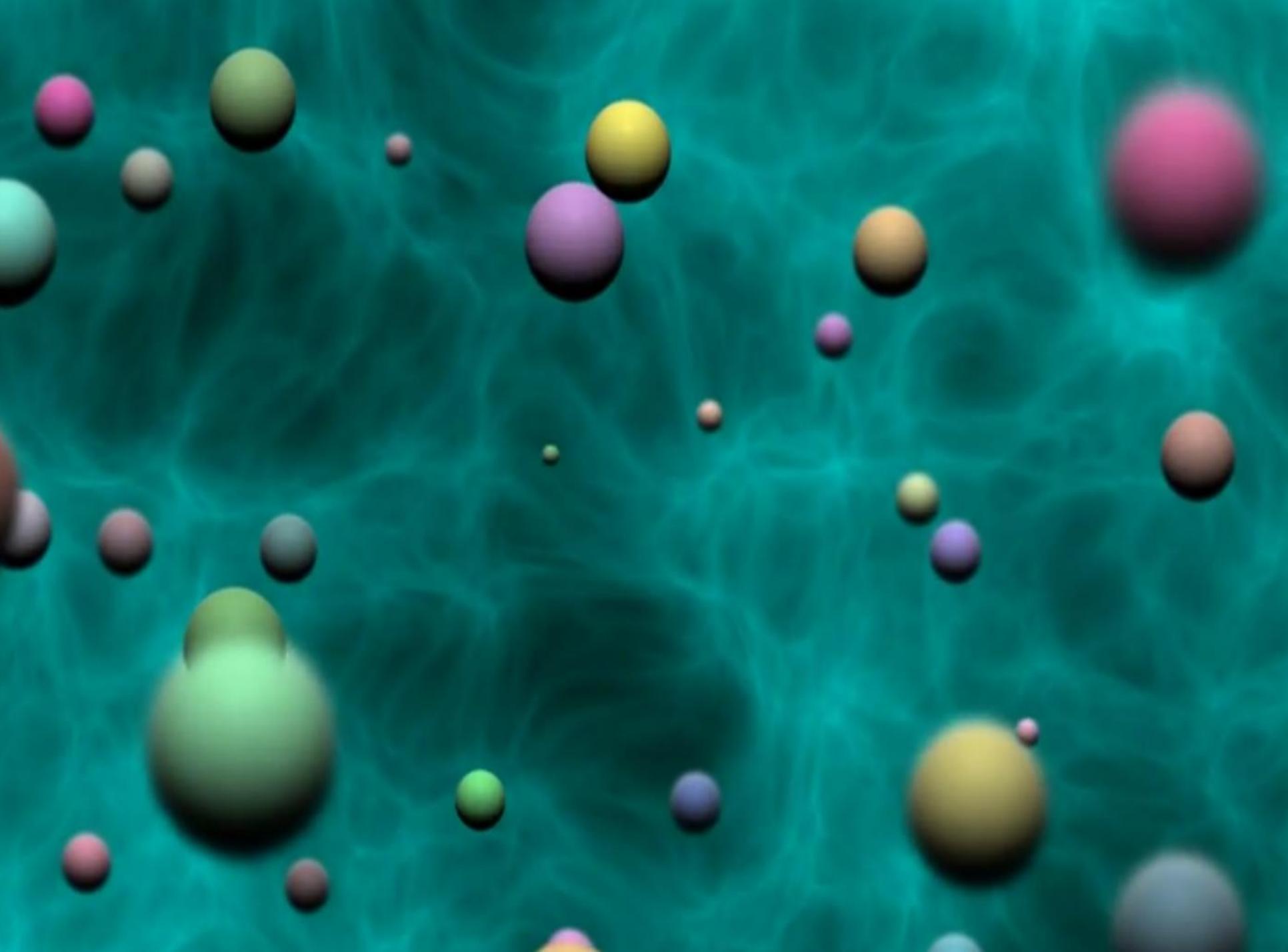
The Higgs boson

The Higgs boson is a prediction of a mechanism that took place in the early Universe, less than a picosecond after the Big Bang



Nature 607,
(2022)



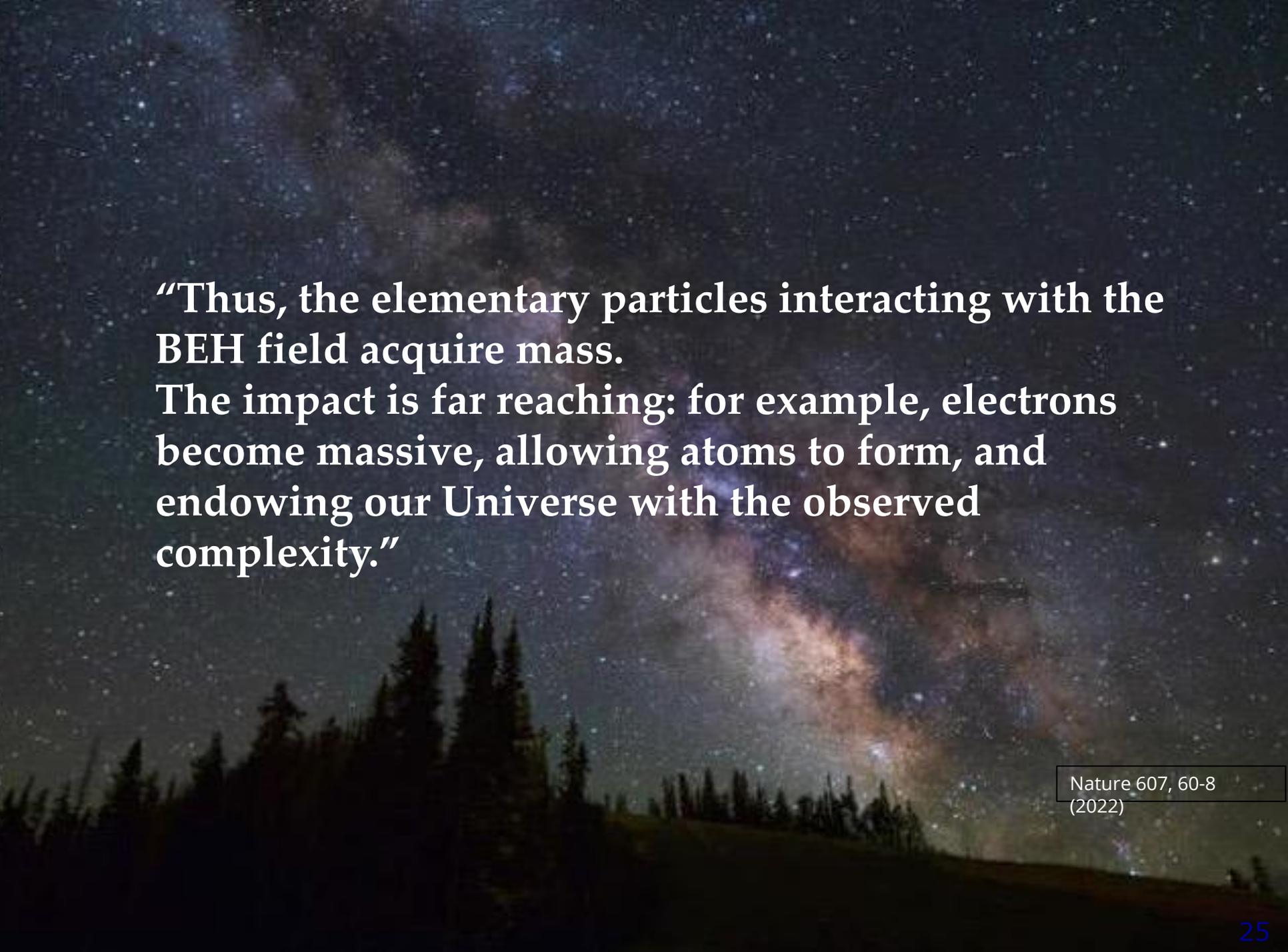


The Higgs boson

The Higgs boson is a prediction of a mechanism that took place in the early Universe, less than a picosecond after the Big Bang

The W and Z boson acquire mass, the photon remains massless

which led to the electromagnetic and the weak interactions becoming distinct in their actions.



“Thus, the elementary particles interacting with the BEH field acquire mass. The impact is far reaching: for example, electrons become massive, allowing atoms to form, and endowing our Universe with the observed complexity.”

Nature 607, 60-8
(2022)

Special quantum numbers

In the SM, this mechanism, labelled as the Brout–Englert–Higgs (BEH) mechanism, introduces a complex scalar (spin-0) field that permeates the entire Universe. *Its quantum manifestation is known as the SM Higgs boson.*

$$J^{PC} = 0^{++}$$

It is the only elementary particle that does not spin
It has zero electric charge
It is even under parity and charge conjugation

Il meccanismo di Higgs

Il meccanismo descritto puo' essere implementato in modo consistente: **il meccanismo di Higgs**

Nella versione piu' semplice richiede l'introduzione di un solo campo scalare (SPIN = 0, con una sola componente - mentre il fotone ha 3 componenti): **il campo di Higgs.**

In meccanica quantistica relativistica ci aspettiamo che al campo di Higgs sia associata una particella.

La prova di consistenza interna delle teorie di campo con il meccanismo di rottura spontanea della simmetria di gauge e' stato molto laborioso ed e' uno dei risultati di piu' alto livello della fisica teorica.

La massa del bosone di Higgs

Questo nuovo campo di Higgs responsabile della massa di tutte le particelle corrisponde ad una particella fisica:

il bosone di Higgs.

Osservazione diretta di questa particella e' necessaria per una conferma che tale meccanismo sia corretto.

Era l' unico pezzo mancante della teoria che oggi abbiamo delle interazioni fondamentali (il Modello Standard).

Nel Modello Standard il bosone di Higgs deve esistere con una massa al di sotto di **1 TeV**, altrimenti la teoria non e' piu' valida.

Il bosone di Higgs

Se cammini e improvvisamente entri in una piscina, rallenti.

Se non vedessi l'acqua, penseresti di essere improvvisamente diventato pesante.

Acquisti "massa" perché interagisci con un mezzo che è tutto attorno a te.

Il campo di Higgs è l'equivalente dell'acqua che ti sta attorno.

Il bosone di Higgs

Possiamo pensare alla particella di Higgs come il messaggero del campo di Higgs, come un fiocco di neve.



Possiamo pensare al “vuoto” come un mezzo denso che offre una “resistenza” ad una forza e quindi é equivalente ad una massa:



quark top



elettrone

Il campo di Higgs

“Immaginate questa stanza, togliete tutti gli oggetti, svuotatela.
Quello che rimane e' il campo gravitazionale.

Immaginate ancora di poterla spostare nello spazio
in un luogo dove non ci sia il campo gravitazionale.
Quello che resta e' il campo di Higgs.”

Alvaro de Rujula
ai poeti di POP-Science

La ricerca di nuove particelle

Vogliamo dunque:

- scoprire se esiste il bosone di Higgs
- Cercare il meccanismo responsabile dell'origine delle masse
- cercare nuova fisica / nuove particelle
- verificare altre e nuove teorie

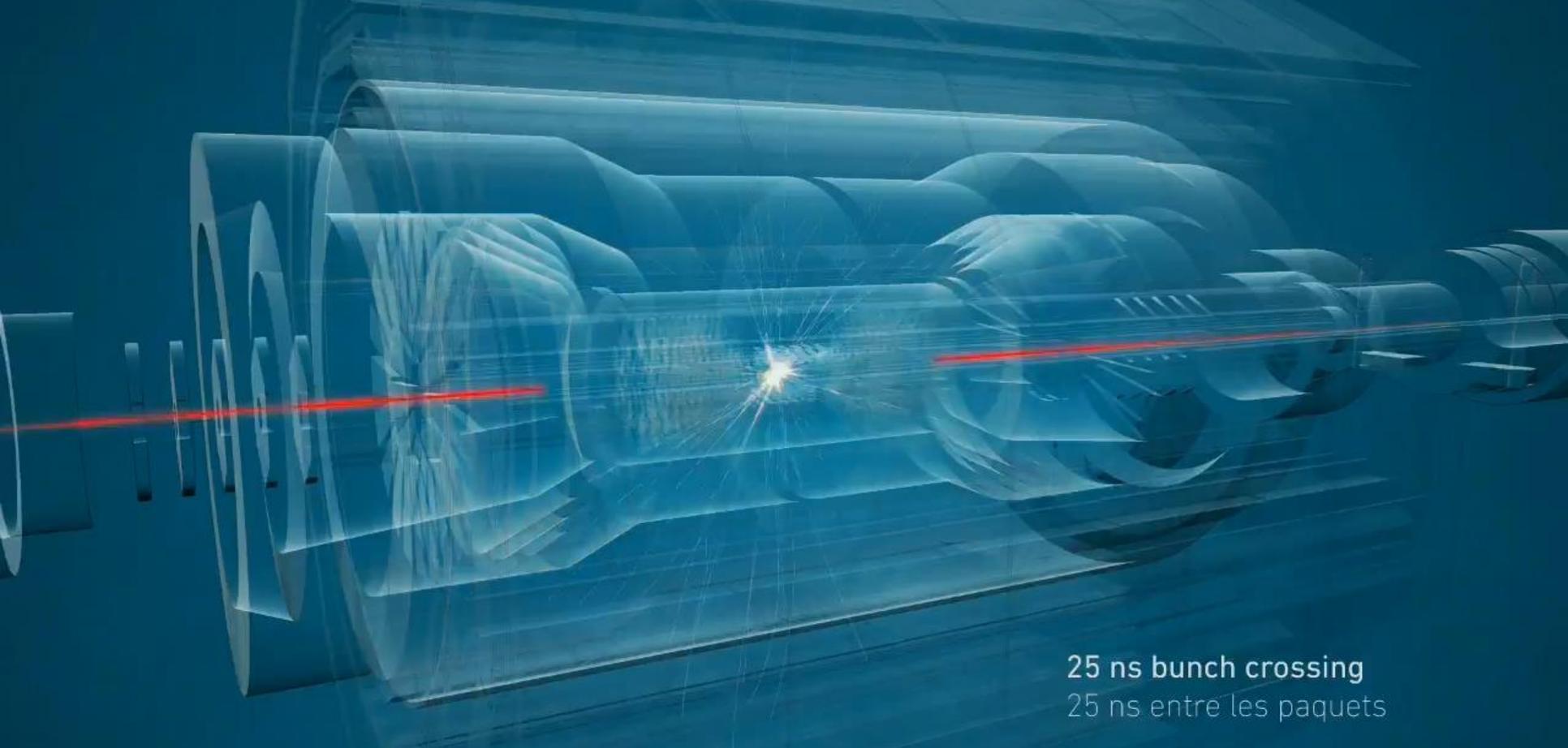
Al **CERN** e' stato costruito l'acceleratore chiamato **LHC (Large Hadron Collider)** che e' stato e sara' in grado di dare una risposta a queste domande.
E' entrato in funzione alla fine del 2009.

Gli acceleratori

$$E=mc^2$$

Acceleriamo particelle portandole ad altissime energie per poi farle scontrare:

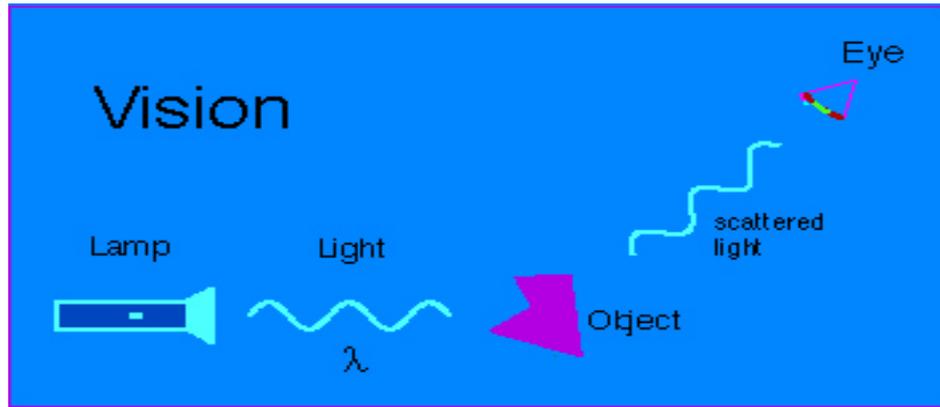
- per studiare cosa succede durante l'interazione a $< 10^{-13}$ cm
- per produrre nuove particelle grazie a $E=mc^2$



25 ns bunch crossing
25 ns entre les paquets

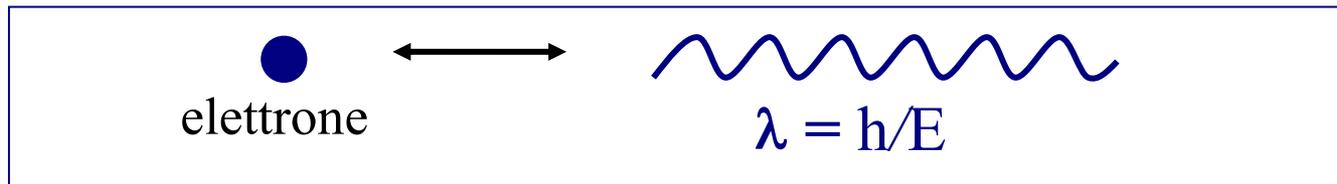
Studiando le particelle prodotte (quante sono, quali sono, le loro caratteristiche etc.) possiamo capire cosa è successo al momento dell'urto e risalire ai processi fondamentali che regolano la natura

Perché accelerare?



Possiamo vedere fino a dimensioni di $\sim 10^{-2}$ cm

La meccanica quantistica ci dice che le particelle si comportano come un' onda e viceversa.



Tanto più la lunghezza d' onda è piccola / ovvero tanto più l' energia è grande tanto più piccole sono le dimensioni che possiamo esplorare/vedere

I microscopi elettronici possono esplorare regioni di $\sim 10^{-6}$ cm – cellule / DNA

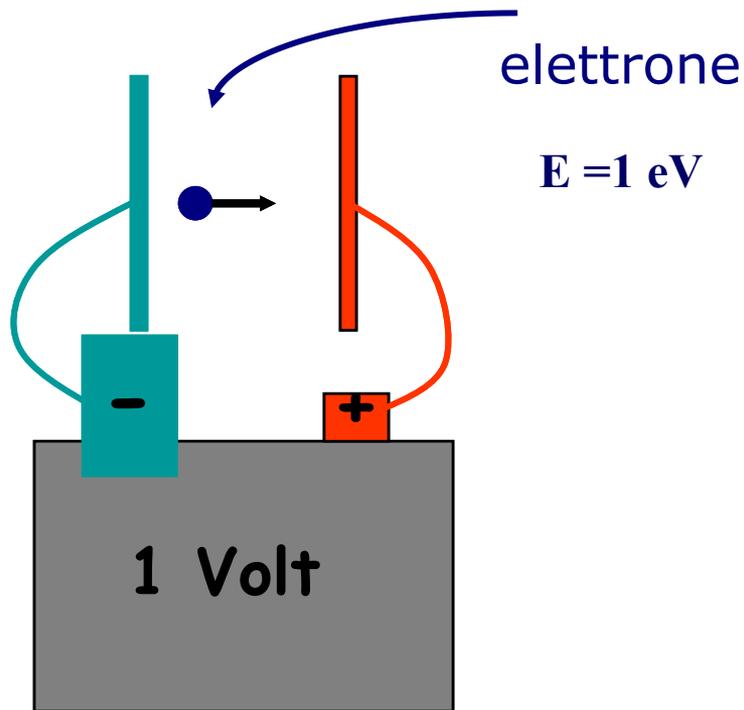
Per andare oltre (10^{-13} - 10^{-15} cm) dobbiamo accelerare oltre le particelle.

Unita' di misura di energia

I fisici usano il **GeV** - Giga ElectronVolt = 10^9 eV

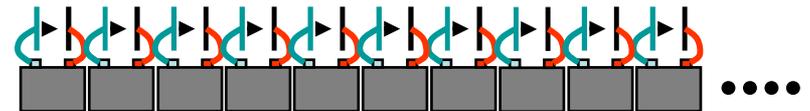
$m(\text{protone}) = 0.938 \text{ GeV} \rightarrow 1.67262158(31) \times 10^{-27} \text{ Kg}$

$m(\text{elettrone}) = 0.0005 \text{ GeV} \rightarrow 9.109 \times 10^{-31} \text{ Kg} = (1/2000 m(p))$



$E = 1 \text{ eV}$

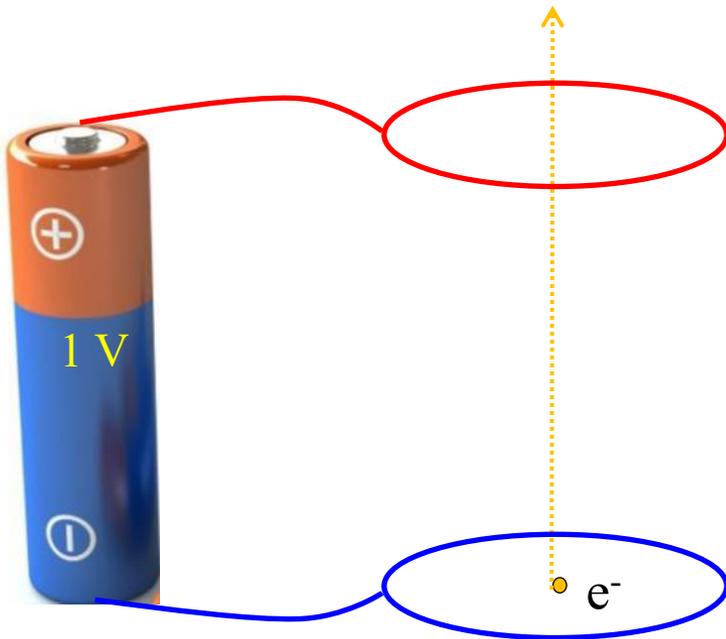
Per dare ad un elettrone l'energia di **1GeV**, dovremmo mettere di seguito **666,666,666** pile da 1.5 Volt !!



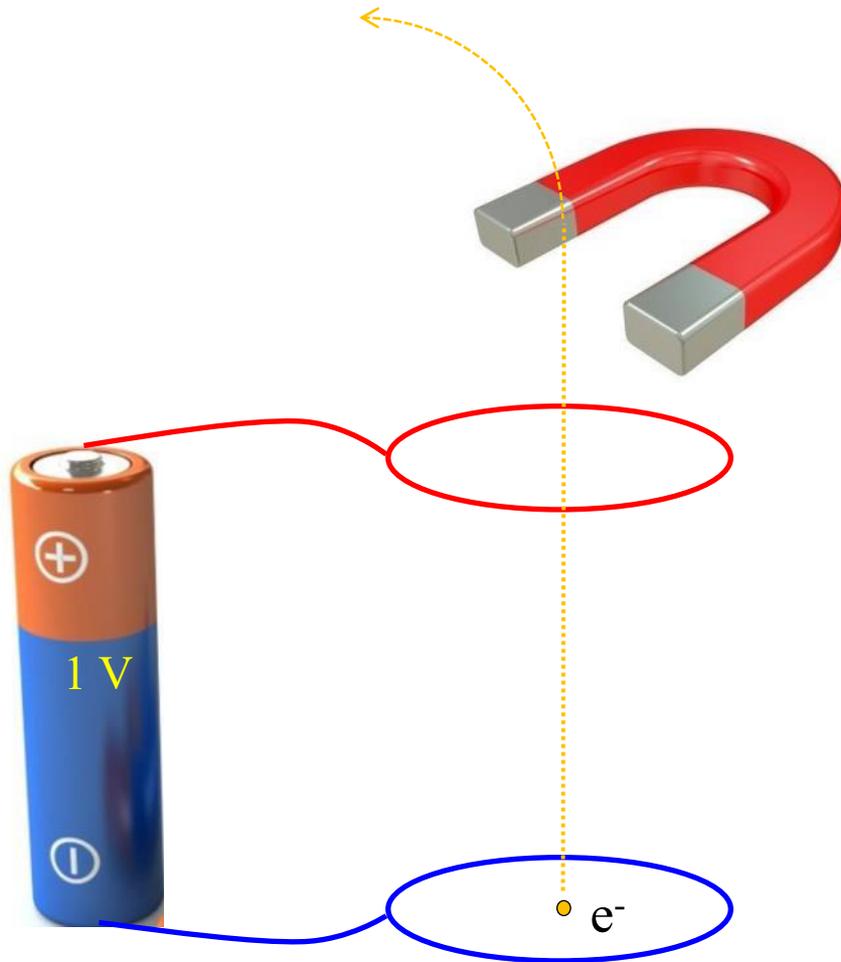
Acceleratori di particelle

Una particella carica si muove a causa dell'effetto del campo elettrico

Aumentando il voltaggio della pila, la velocità della particella aumenta conseguentemente. La particella è accelerata



Acceleratori di particelle



Una particella carica si muove a causa dell'effetto del campo elettrico

Aumentando il voltaggio della pila, la velocità della particella aumenta conseguentemente. La particella è accelerata

Se aggiungiamo un campo magnetico prodotto da un magnete la traiettoria viene curvata.

LHC l'acceleratore piu' potente mai costruito

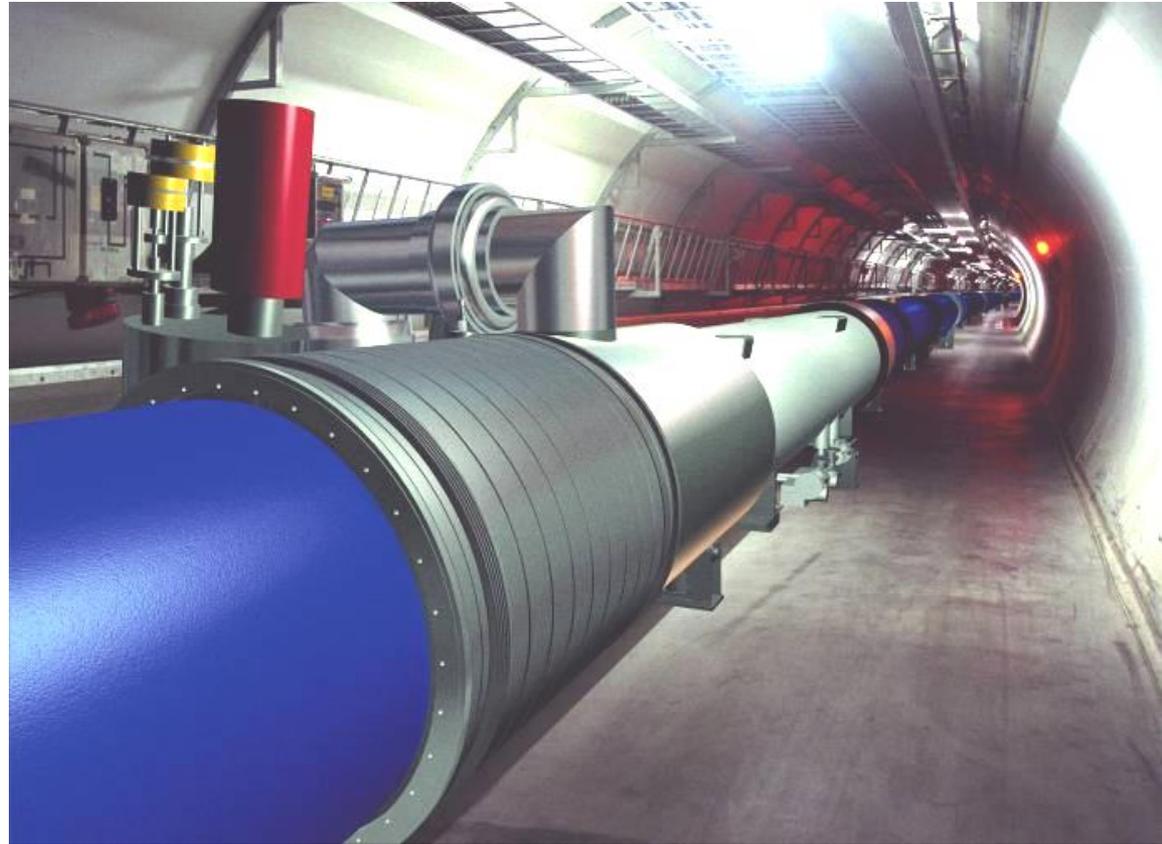
L'energia viene misurata in Elettronvolts -eV- (energia cinetica acquisita da un elettrone che viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt)

L' LHC accelera fasci di protoni ad energie di 7 Tera-eV
(7.000.000.000.000 eV)

CERN LHC :
E = 7 TeV **c-10 Km/h**

velocita' luce
c= 299792 Km/s
=1' 080' 000' 000 Km/h

7×10^3 GeV Energia dei protoni
 10^{11} protoni per "pacchetto"
2832 pacchetti
40.000.000 interazioni al secondo



HL-LHC Design Parameters

Parameter	Nominal LHC (design report)	HL-LHC 25ns (standard)
Beam energy in collision [TeV]	7	7
N_b	1,15E+11	2,2E+11
n_b^{12}	2808	2760
N_{tot}	3,2E+14	6,1E+14
Beam current [A]	0,58	1,1
Half Crossing angle [μ rad]	142,5	250
Minimum β^* [m]	0,55	0,15
ϵ_n [μ m]	3,75	2,50
ϵ_L [eVs]	2,5	3,03
Piwinski parameter	0,65	2,66
Peak Luminosity without crab-cavity [$cm^{-2} s^{-1}$]	1,00E+34	8,1E+34
Virtual Luminosity with crab-cavity: $L_{peak} * R1/R0$ [$cm^{-2} s^{-1}$]	-	1,70E+35
Events / crossing without levelling and without crab-cavity	27	212
Levelled Luminosity [$cm^{-2} s^{-1}$]	-	5,0E+34 ⁴
Events / crossing (with leveling and crab-cavities for HL-LHC) ⁷	27	131
Leveling time [h] (assuming no emittance growth) ⁷	-	7,2
n_b / injection	288	288
ϵ_n at SPS extraction [μ m] ³	3,5	2,1

LHC Magnet system
LHC injector complex

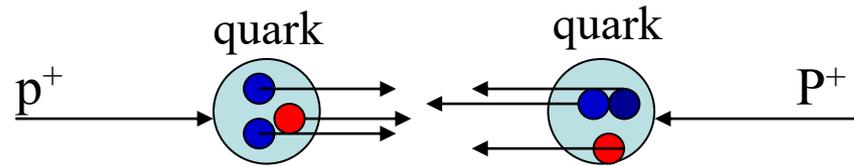
HL-LHC triplet magnets

HL-LHC crab cavities

Machine operation &
availability

LHC injector complex

Quanta energia ?



Collisione di protoni: interazione fra partoni (q, g)

- I partoni che interagiscono portano solo una frazione x dell'energia totale del protone:
- Approssimativamente abbiamo bisogno di collisioni di protoni a **$E_{cm} \sim 6 \text{ TeV}$** per raggiungere $\sim 2 \text{ TeV}$
- Vantaggio: scan di un ampissimo range di energia $0 \rightarrow (E(p) + E(p))$

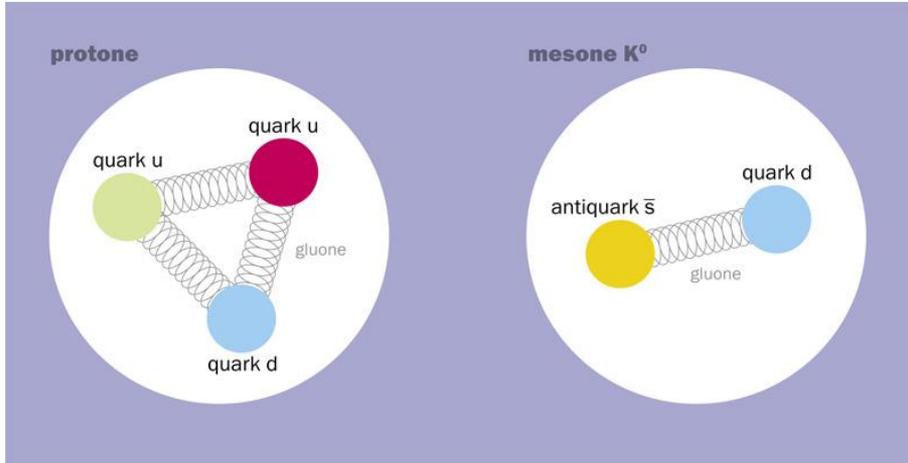
LHC: Collisore di protoni da 14 TeV (7 TeV per fascio)

- $p = 0.3 \cdot B \cdot R \Rightarrow$

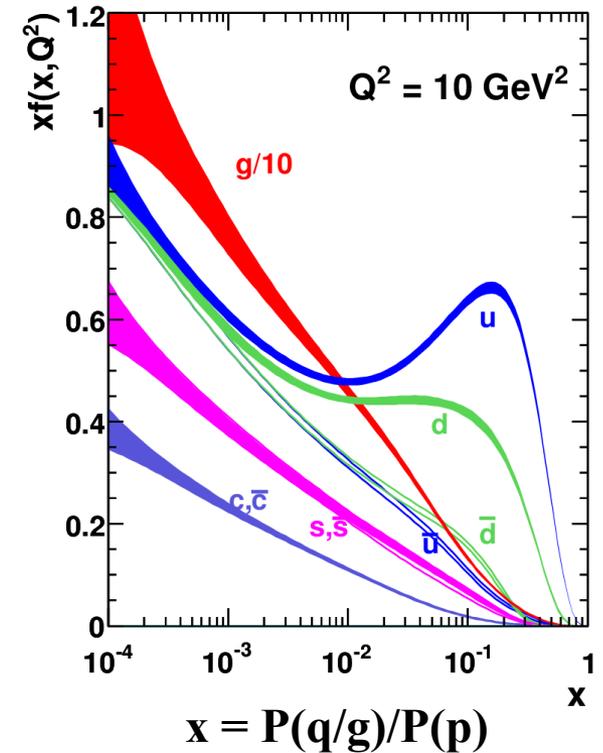
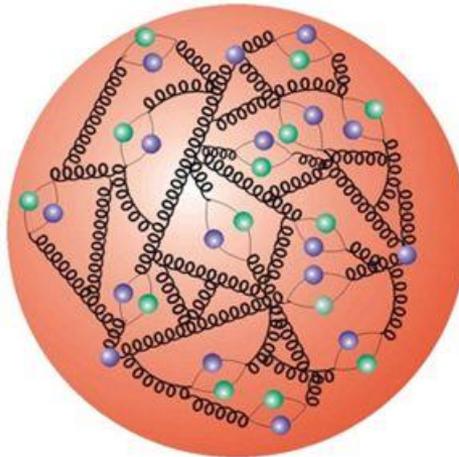
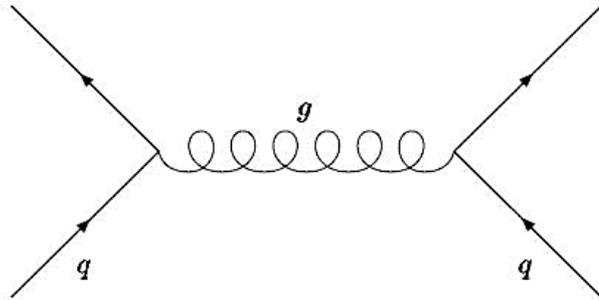
il limite è il **campo magnetico necessario** per curvare p^+ su traiettoria circolare di 27 km

- 1232 dipoli superconduttori (-271°), **8.3 T**
- ~ 9300 magneti in tutto
- Energia immagazzinata: **$\sim 10 \text{ GJ}$**

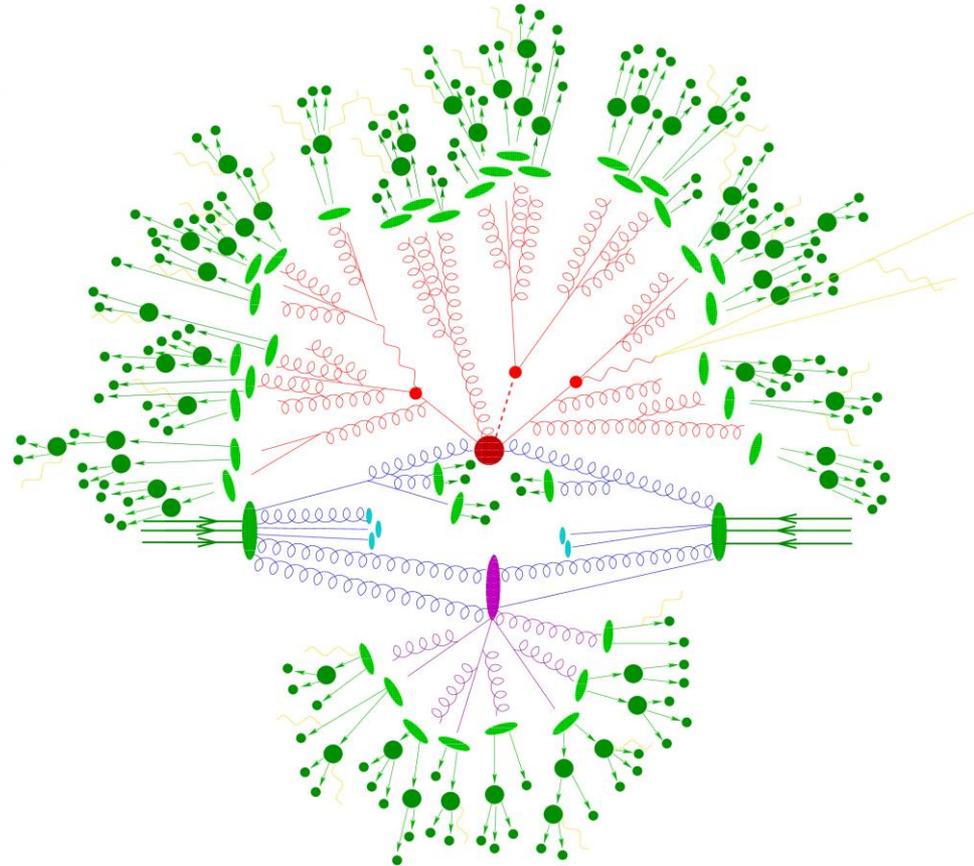
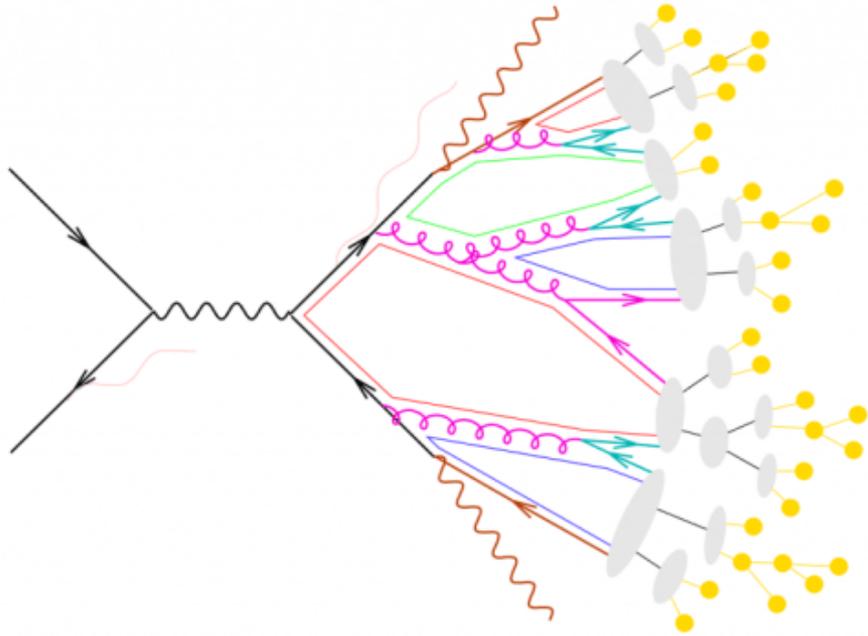
Proton



- 3 quark di « valenza » che danno i numeri quantici del protone
- un mare di quark e anti-quark
- un mare di gluoni

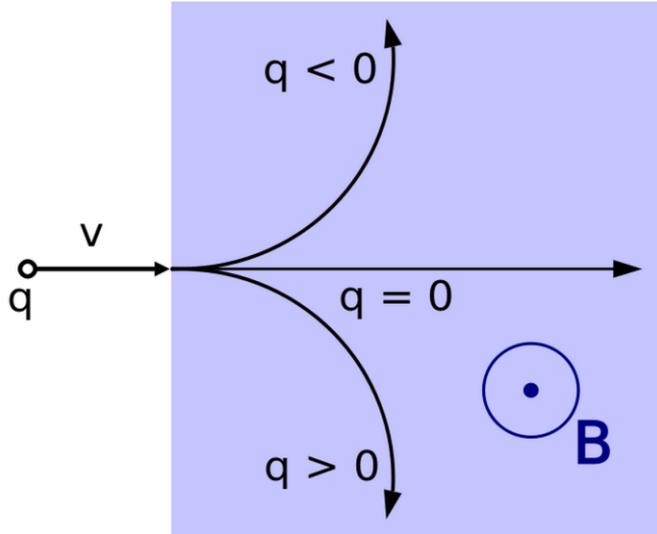


Adronizzazione



Il campo magnetico

Il campo magnetico curva le **particelle cariche**:



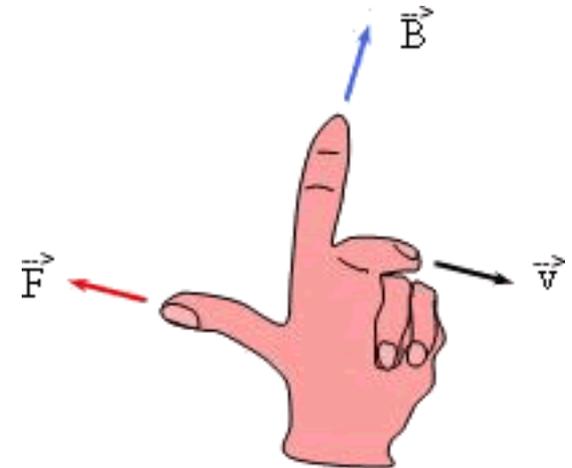
La forza di Lorentz

$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$

Un campo magnetico permette di:

- determinare la carica di una particella,
- dato R il raggio di curvatura ed m, determini p (l'impulso)
- o noto l'impulso determini la massa

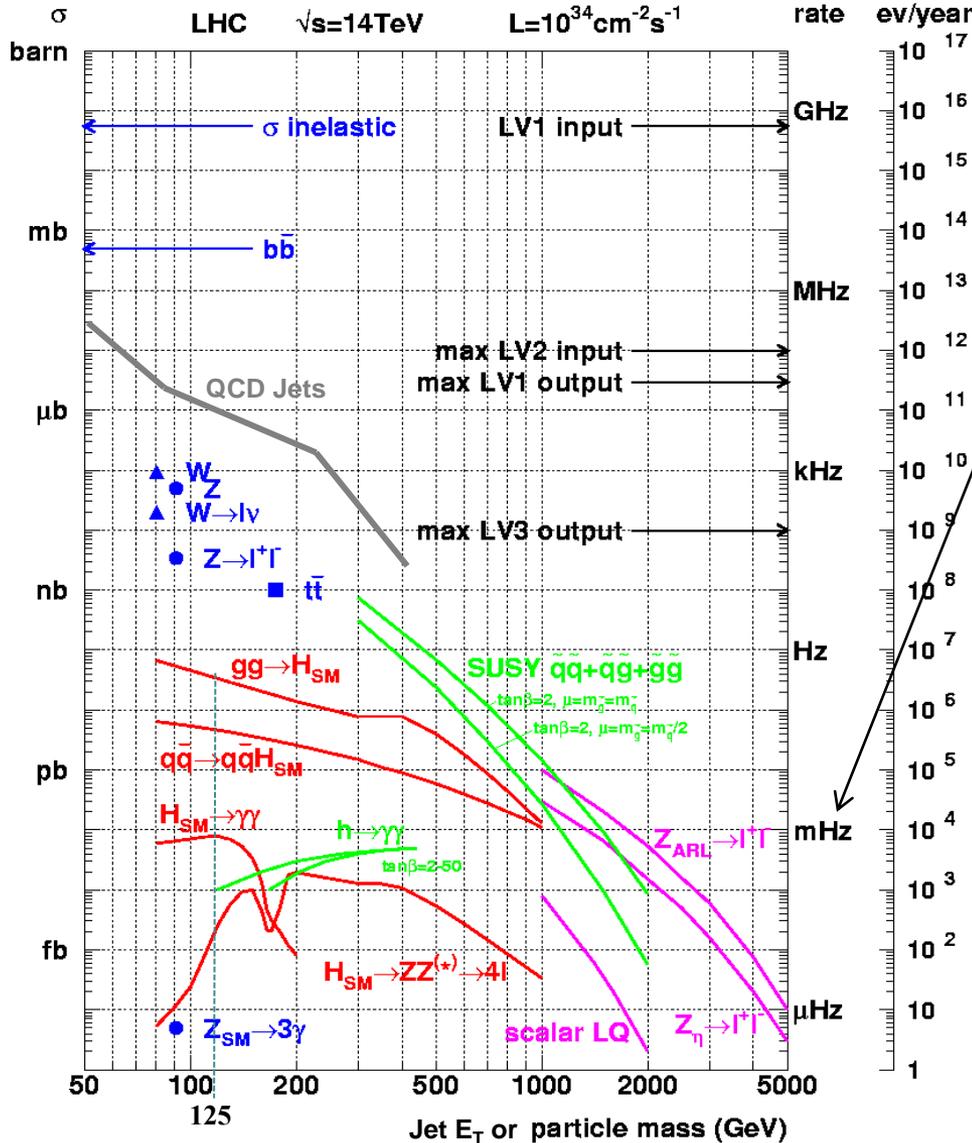


Quante interazioni facciamo?

Sezioni d'urto σ (a 14 TeV):

La sezione d'urto e' la probabilita' che avvenga un certo evento, date le condizioni iniziali

12 ordini di grandezza



Processi molto rari
R=rate

$$R = \mathcal{L} \sigma$$

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{A}$$

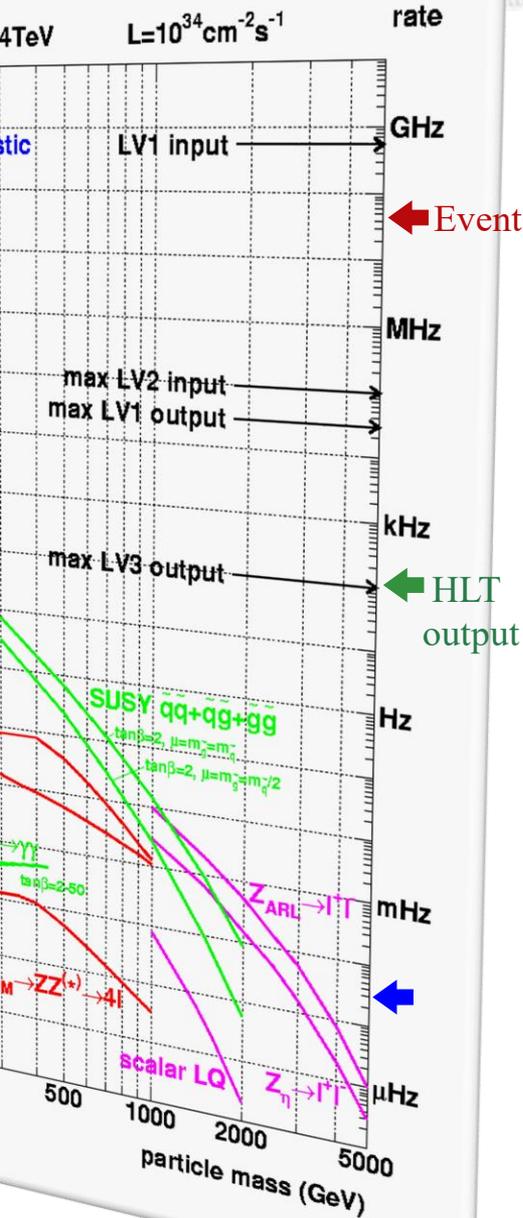
Numero di p nei fasci

Frequenza di collisione

Superficie in cui collidono

⇒ Si cerca la massima luminosità (\mathcal{L}) possibile

Event rate



Rate di collisioni: **40 MHz**

ovvero ogni 25 ns

Dimensione eventi **~ 1 Mbyte**

- Impossibile salvarli tutti!
- Band width limit ~ 100 Gbyte/s

TRIGGER: Selezione in tempo reale

- Per ridurre rate a ~ 100 Hz per scrittura
- A tutti gli effetti un'analisi di fisica degli eventi

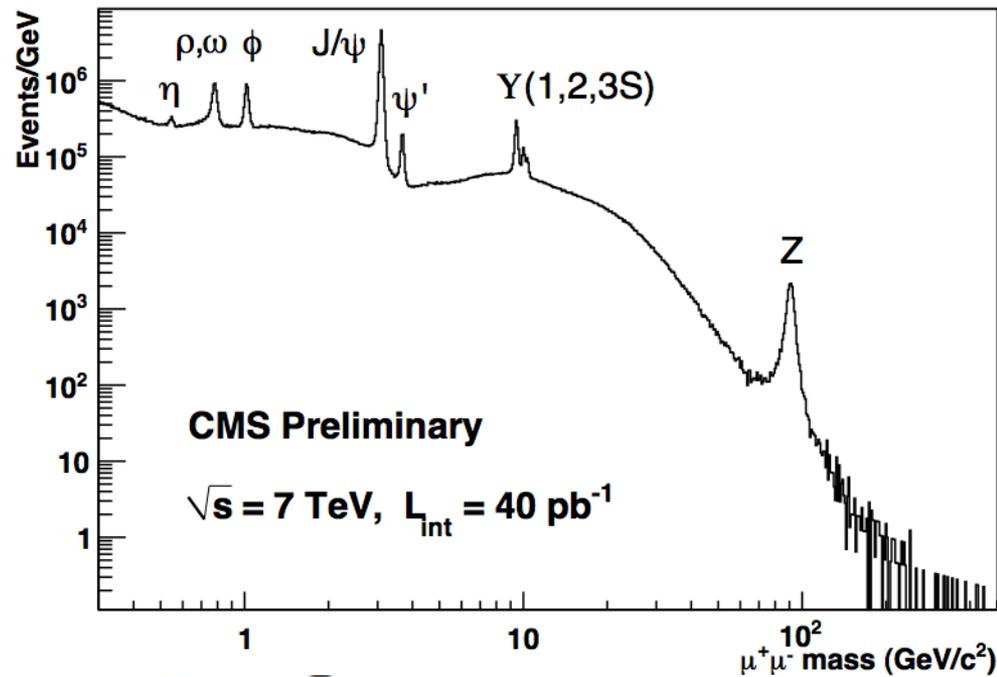
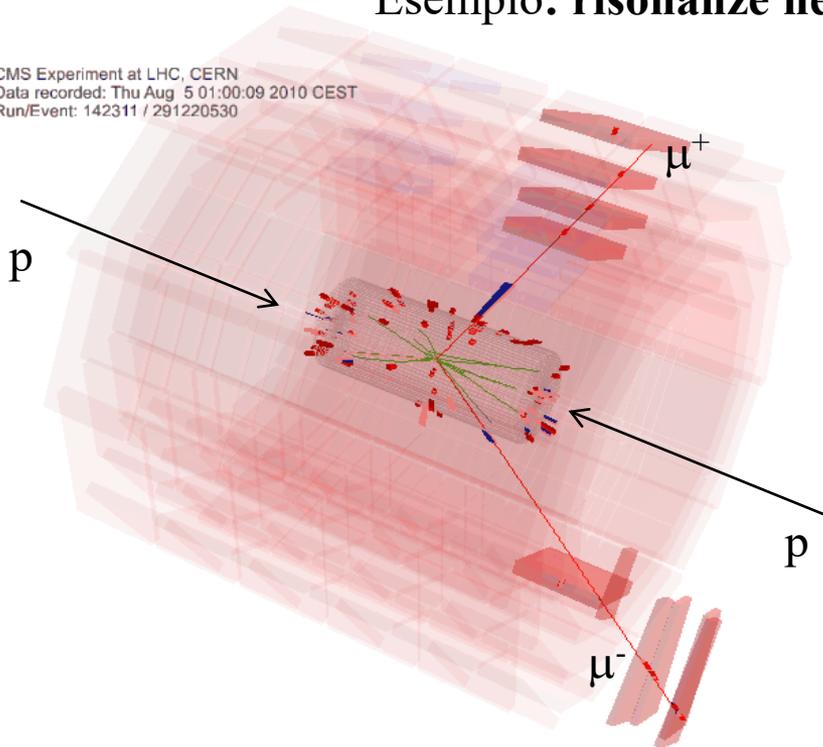
Analisi off-line: ulteriore selezione di 1 evento interessante ogni $\sim 10^6$

Le particelle "interessanti" decadono rapidamente

- Dobbiamo cercare i loro prodotti di decadimento
- Spesso in un fondo ("background") di eventi simili prodotti per es. da processi già noti

Esempio: risonanze nello spettro $\mu^+\mu^-$ in collisioni pp

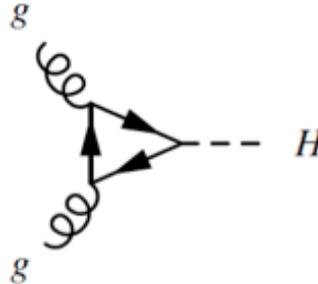
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Thu Aug 5 01:00:09 2010 CEST
Run/Event: 142311 / 291220530



$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\bar{E}_1 E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \theta :$$

Produzione e decadimenti del bosone di Higgs

Il bosone di Higgs puo' essere prodotto nella fusione di 2 dei gluoni che sono all'interno del protone:



Il bosone di Higgs non e' una particella stabile

Decade in particelle elementari piu' leggere

Gli "stati finali" sono molteplici; i piu' importanti sono:

- $H \rightarrow$ due fotoni ($H \rightarrow \gamma\gamma$)
- $H \rightarrow$ quattro leptoni, per esempio quattro elettroni o quattro muoni ($H \rightarrow 4l$)



Produzione e decadimenti del bosone di Higgs

La produzione e gli “stati finali” sono previsti con accuratezza dalla teoria

La teoria non fornisce previsione sulla massa del bosone di Higgs

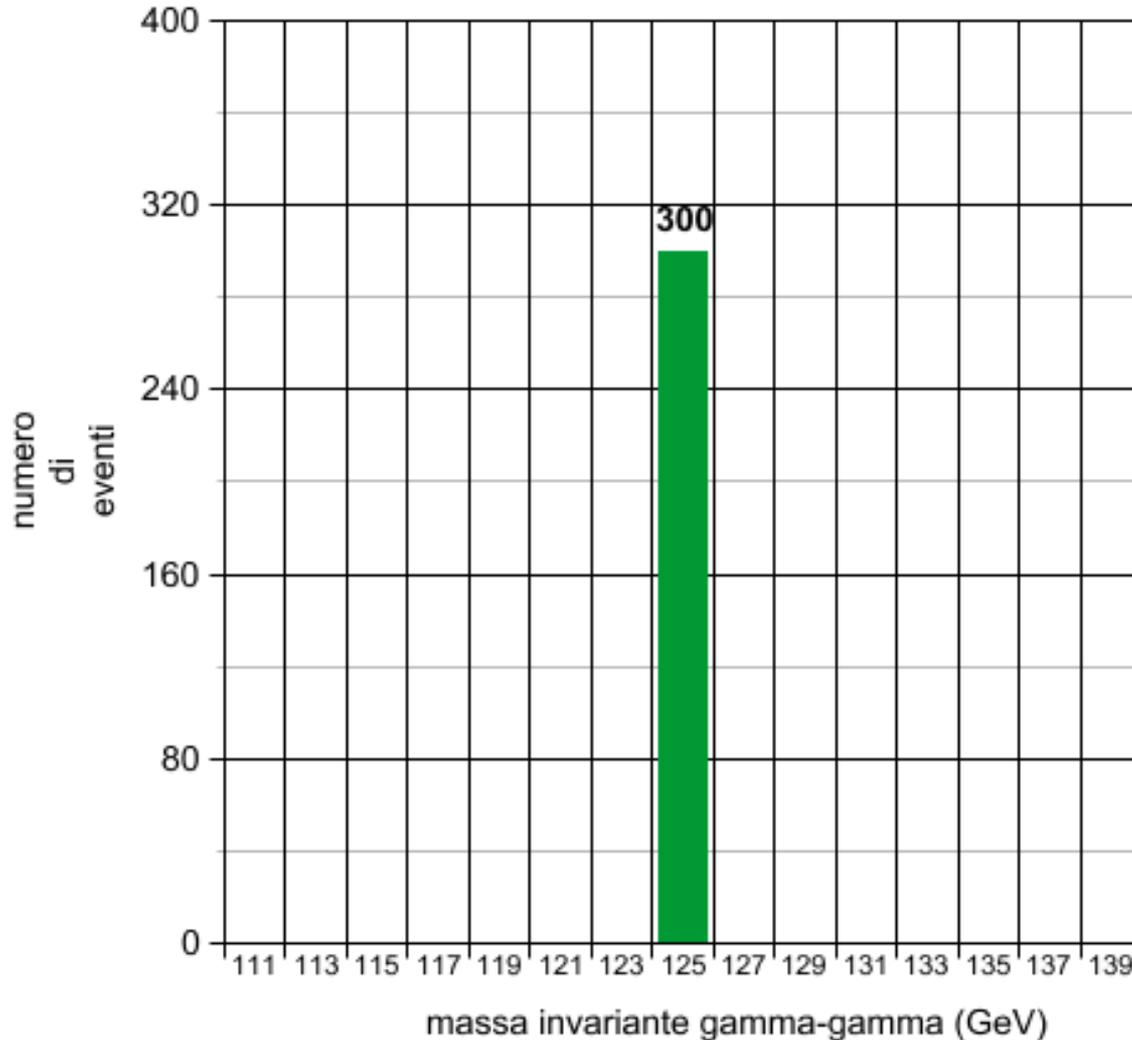
Il bosone di Higgs, come tutte le particelle instabili, viene “ricostruito” partendo dai prodotti che ci aspettiamo dal suo decadimento

Nei rivelatori dobbiamo dunque poter ricostruire i prodotti di decadimento

e con una **precisione** tale (sul momento) da poterli distinguere dagli altri eventi non interessanti, e dominanti.

Decadimento di una particella di massa 125 GeV

istogramma di massa



Questa e' una simulazione

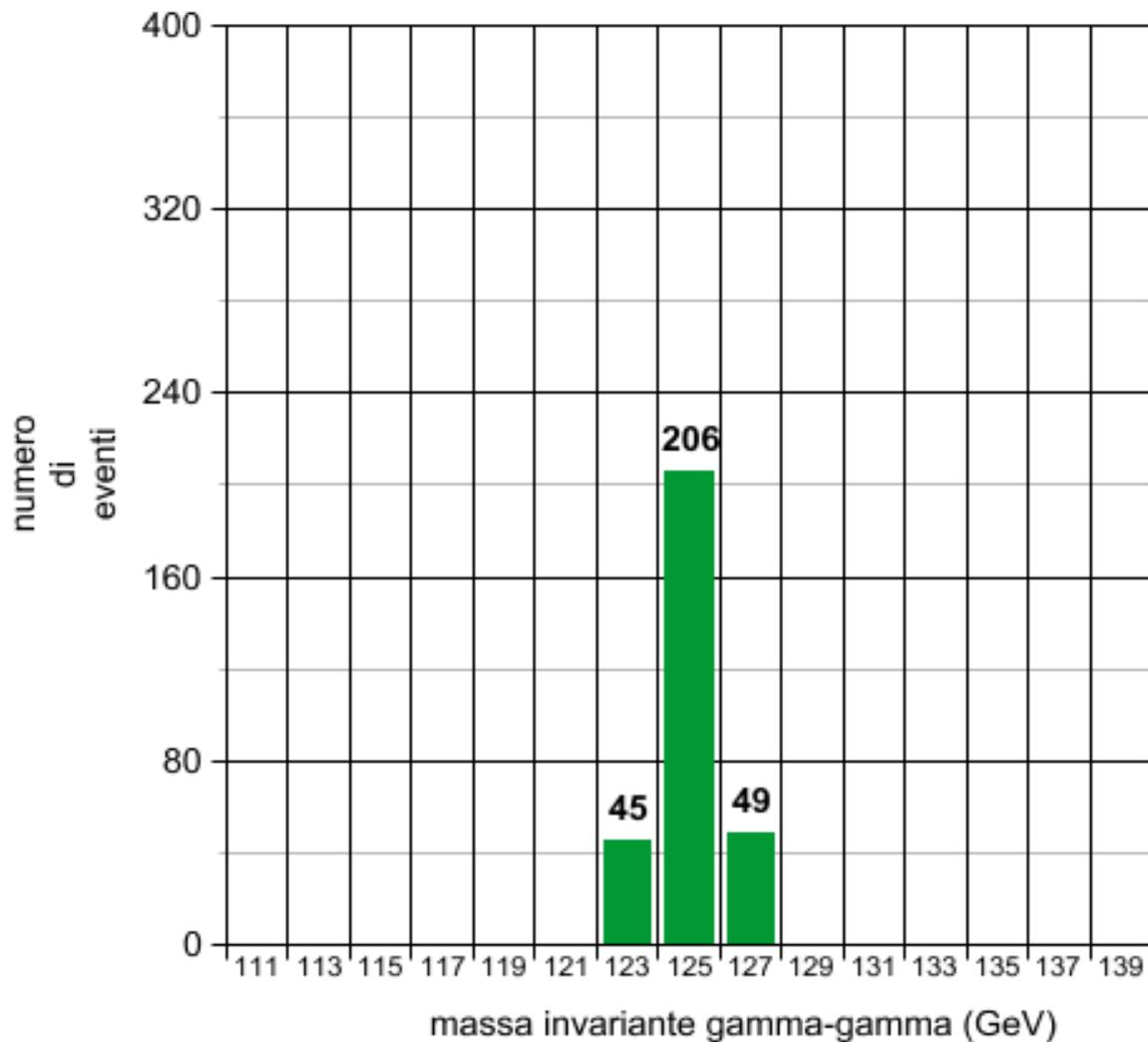
$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta :$$

Decadimento di una particella di massa 125 GeV

istogramma di massa



Questa e' una simulazione

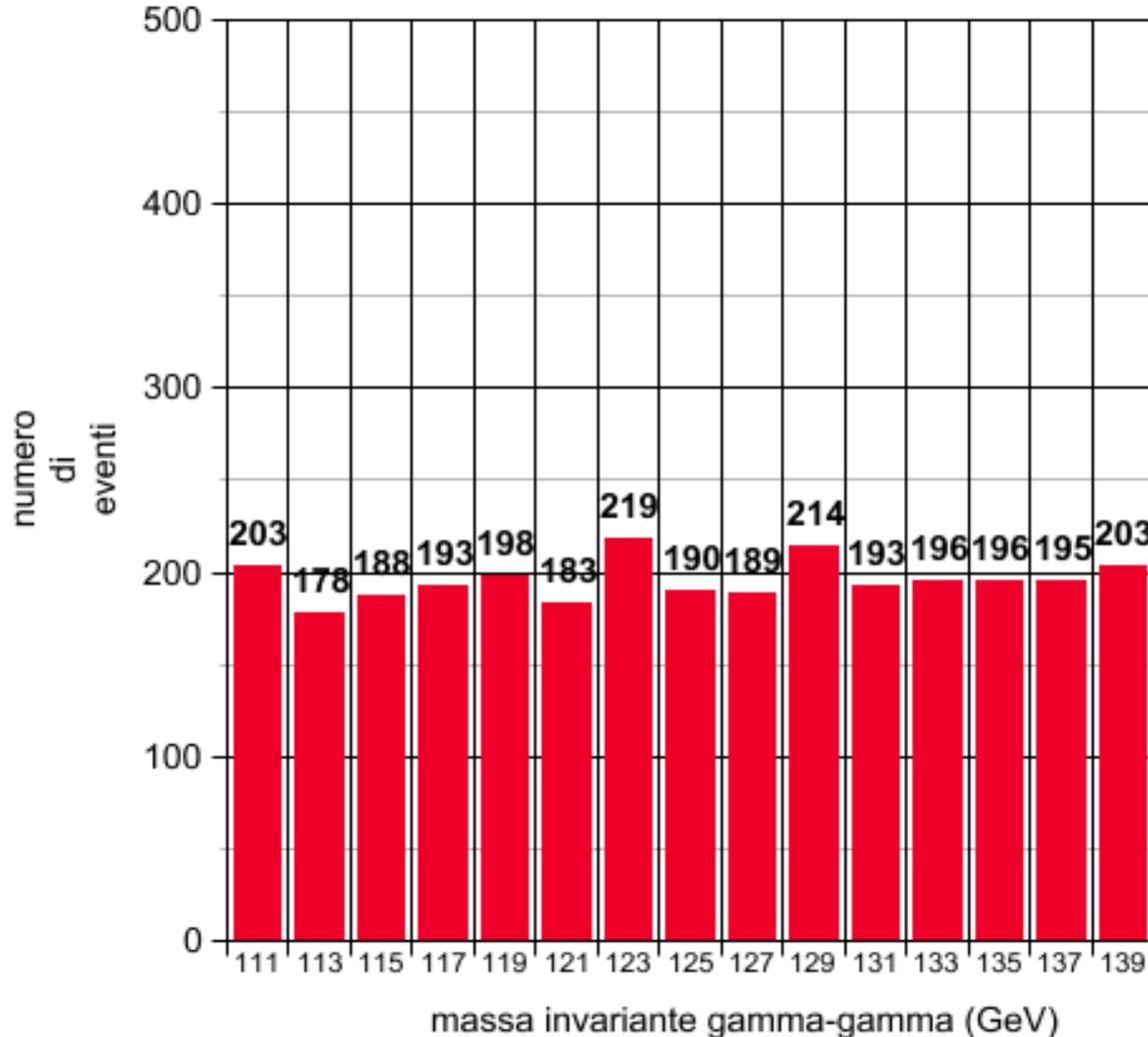
$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Il fondo

Massa di 2 fotoni non associati al decadimento di una particella

istogramma di massa

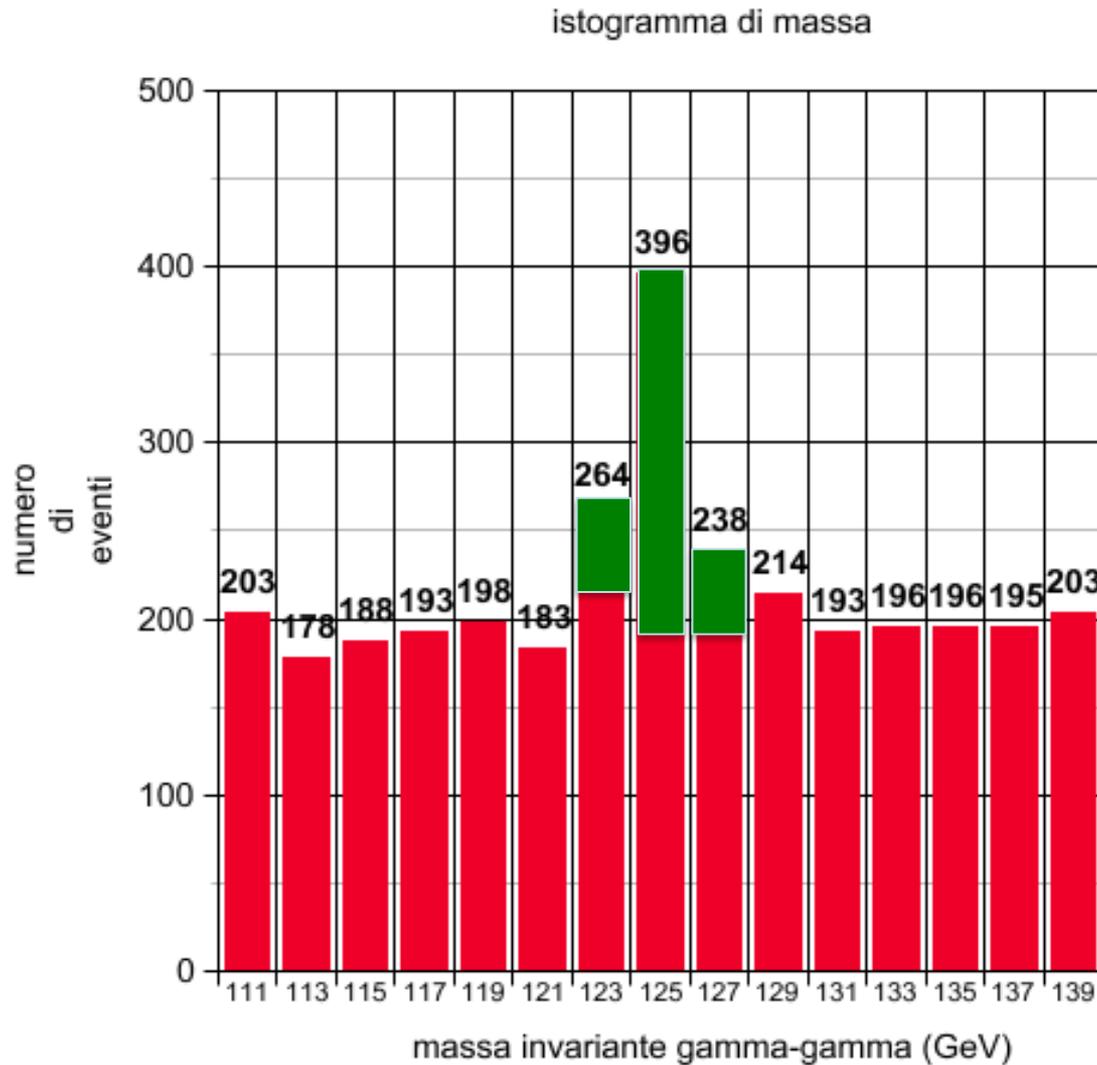


Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Fondo e Segnale

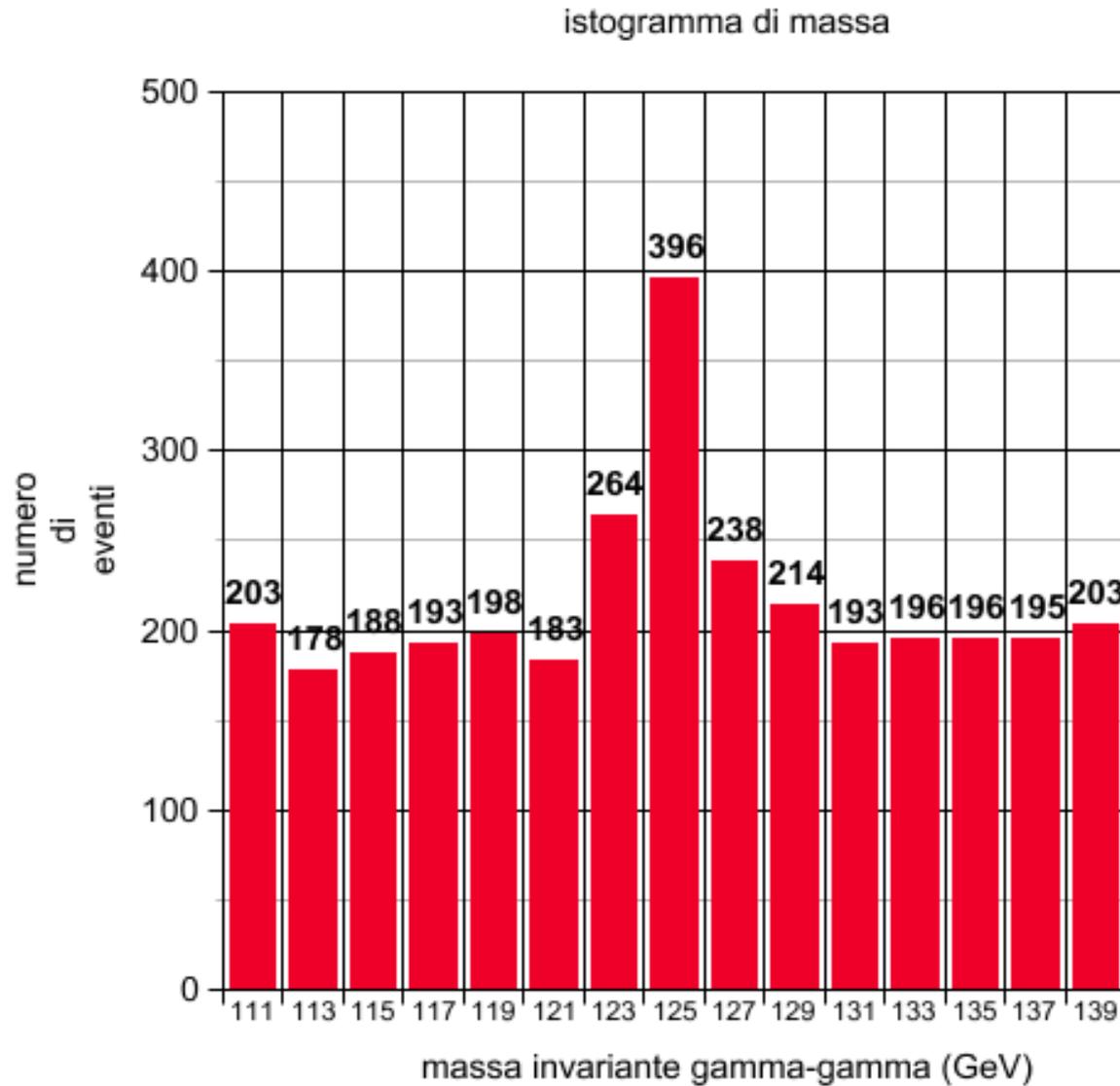


Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Fondo e Segnale



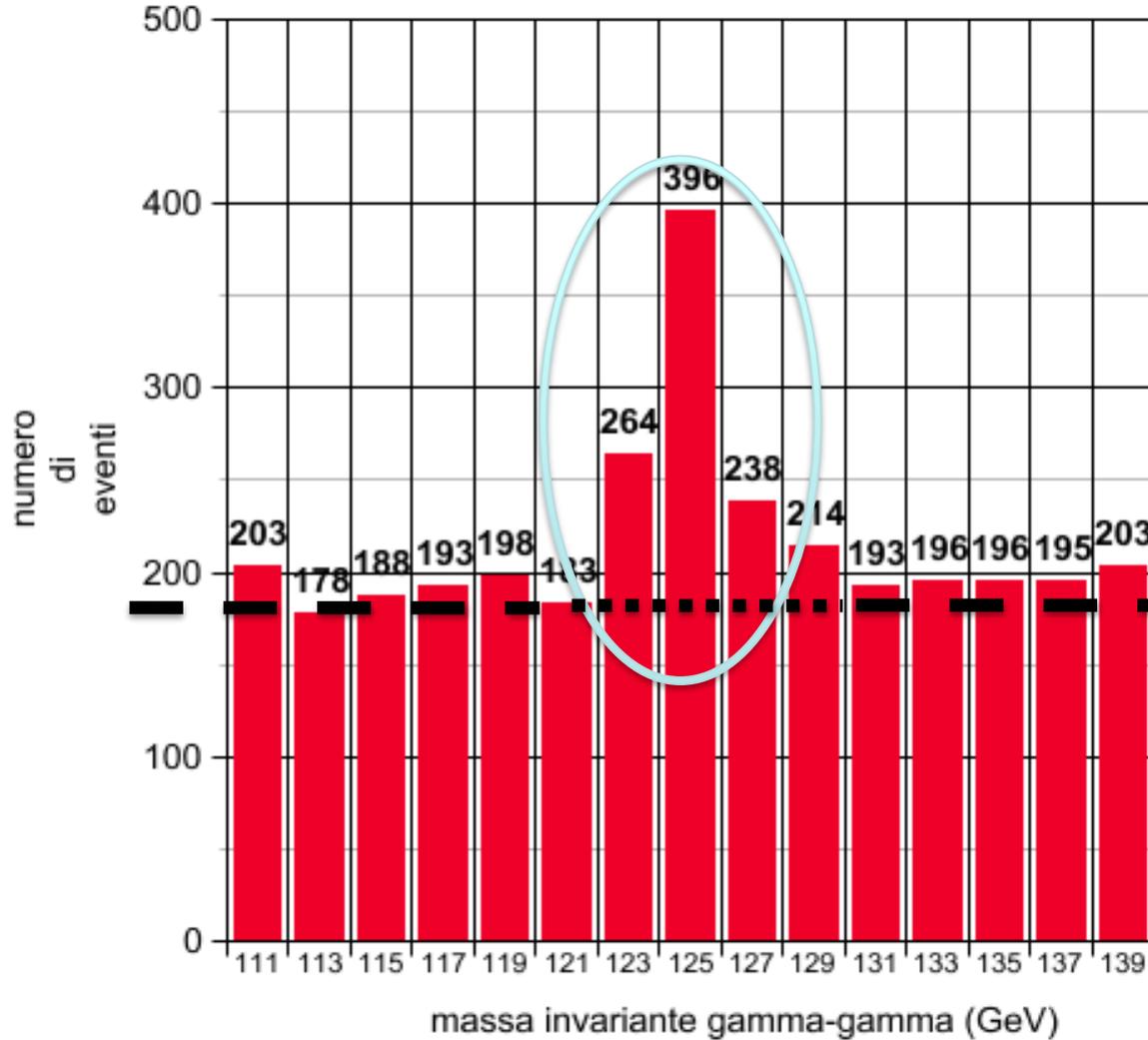
Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Fondo e Segnale

istogramma di massa



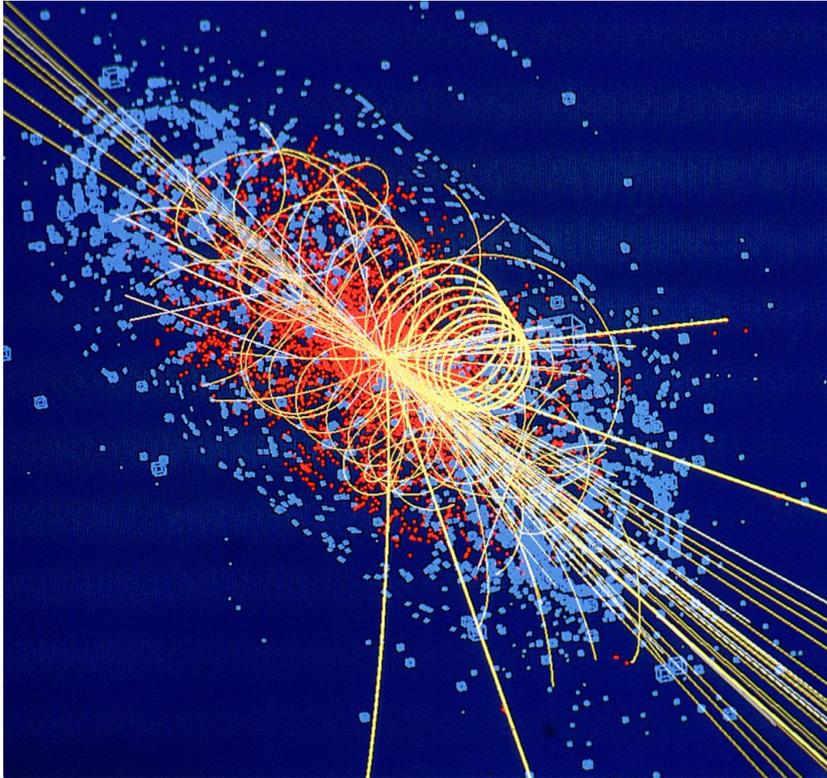
Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

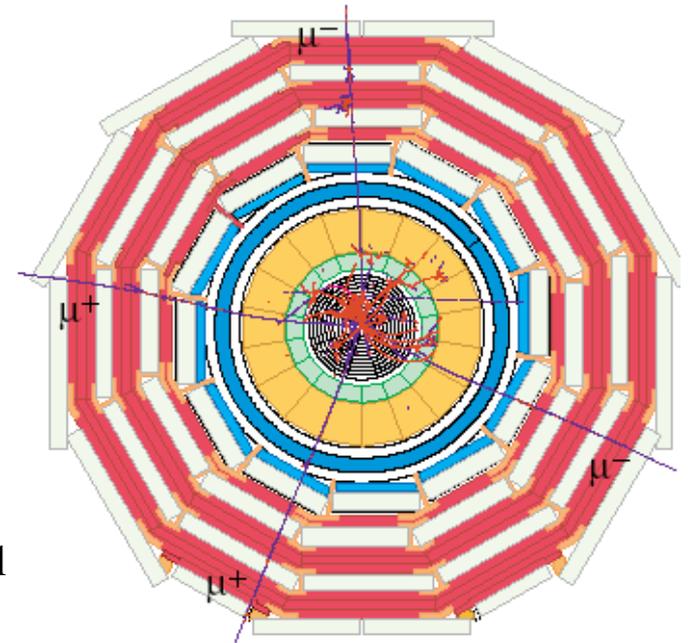
Higgs in 4 leptoni

Evento simulato di produzione di Higgs



L'evento è complesso perché lo stato iniziale è complesso: il protone è una particella composta da particelle elementari che interagiscono tra loro. Nello stato finale avremo centinaia di particelle prodotte + (forse!) quella di interesse.

Il protone è formato da quark e gluoni:
2 gluoni interagiscono e producono Higgs
gli altri quark e gluoni interagiscono producendo molte particelle:



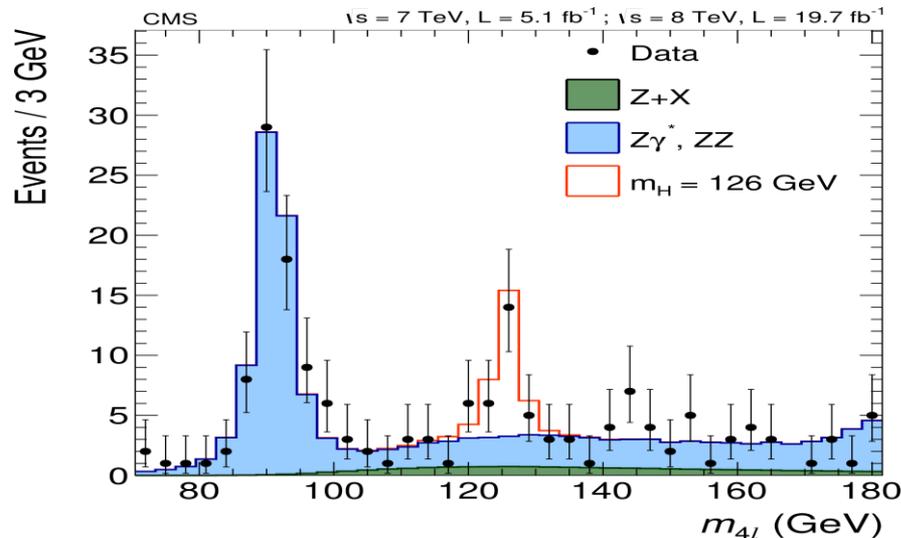
Higgs in 4 leptoni

Uno dei possibili modi in cui l' Higgs puo' decadere e' in due bosoni Z che poi a loro volta decadono in 4 muoni.

Selezionando gli eventi che hanno almeno 4 muoni di **alto momento** si ricostruisce la massa della particella eventuale che e' decaduta nei 4 muoni:

$$M_H^2 = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)^2$$

Dove p sono i "quadri-momenti" dei 4 muoni selezionati.



$M(H)$ alta, i momenti delle particelle sono alti

→ Le tracce sono diritte

$$p = 0.3 \cdot B \cdot R$$

Avremo - se esiste - il picco del segnale e altri eventi di "fisica nota / Modello Standard" che si distribuiscono a vari valori di $M(4\text{-muoni})$

Alto momento trasverso

Particelle di alto momento trasverso provengono da particelle di alta massa:

Una relazione importante e' quella che c'e' tra M_X e p_T . Ad esempio per $X \rightarrow 1,2$ si ha:
$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2p_1p_2 \cos \theta$$

se si approssima $m=0$ in quanto $m \ll M_W$

$$= 2p_1p_2(1 - \cos \theta)$$

Se si suppone che la componente parallela lungo l'asse del fascio sia nulla, $p_{//}=0$, si ha:

$$M_X^2 = 2p_{T1}p_{T2}(1 - \cos \phi_{12})$$

Se X viene prodotto a riposo e dunque l'angolo ϕ tra la particella 1 e 2 e' 180, si ha:

$$M_X^2 = 4p_{T1}^2 \quad \Rightarrow \quad p_T = \frac{M_X}{2}$$

Un oggetto pesante che decade produrra' delle particelle con un p_T dell'ordine di $M/2$

$$M(Z) = 90 \text{ GeV}, M(W) = 80 \text{ GeV}, M(H) = 125 \text{ GeV}$$

Esercizio

18 collisioni pp
sovrapposte a

$H \rightarrow 4$ muoni

Trova 4 tracce
dritte

