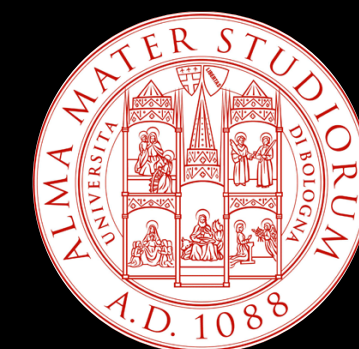


# PARTICELLE FANTASTICHE E DOVE TROVARLE

Giuseppe Carratta



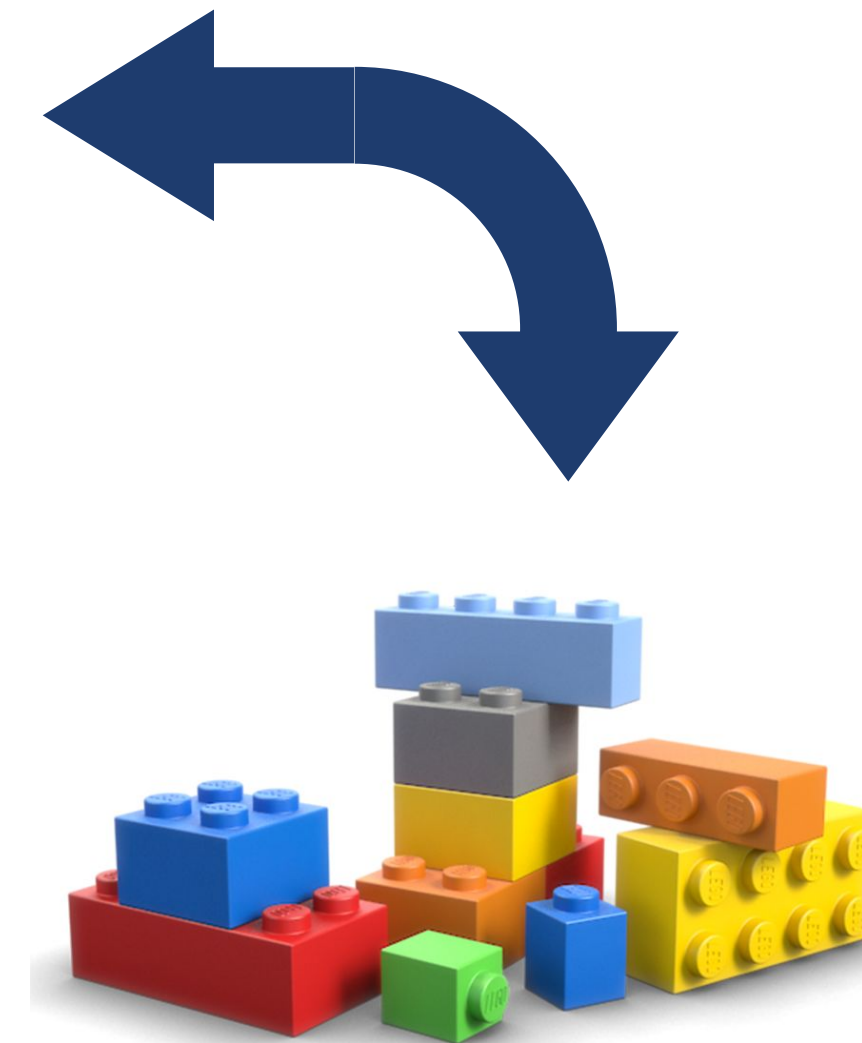
# La fisica delle particelle elementari

---

- **Come è fatta la materia ?**
- **Quanto sono piccoli gli oggetti più piccoli che conosciamo ?**
- **Come è possibile "vedere" oggetti così piccoli e studiarne le proprietà ?**

# Di cosa è fatto il mondo?

---



Se le cose fossero tutte come quest'auto, sarebbe facile rispondere!

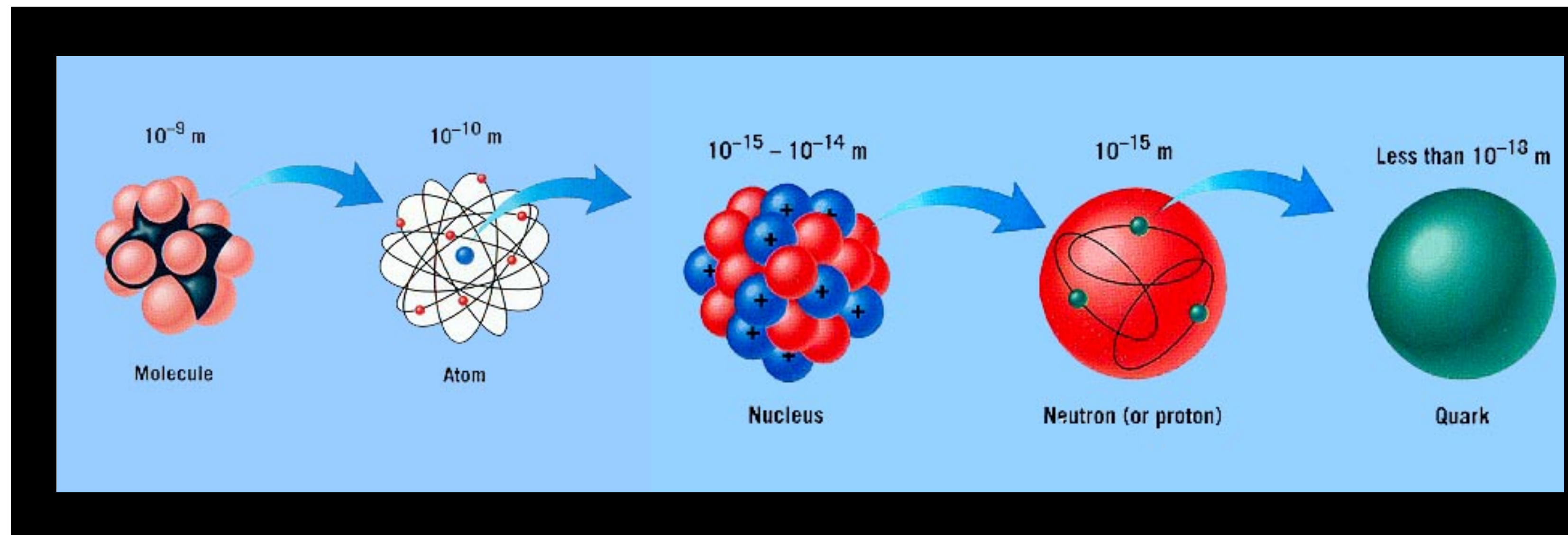
# Realtà e percezione

---



Ma il mondo è più complesso!  
Per fortuna ci sono state grandi menti che hanno affrontato il  
problema...

# Cosa sappiamo dopo 25 secoli?



Il nucleo è piccolissimo rispetto all'atomo,  
e dunque... la materia è praticamente fatta di vuoto!

# I MATTONI FONDAMENTALI



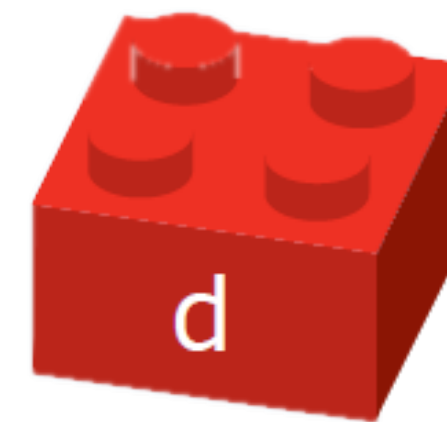
# Le regole del gioco

---

## Materia



Quark UP:  
carica  $+2/3$



Quark DOWN:  
carica  $-1/3$

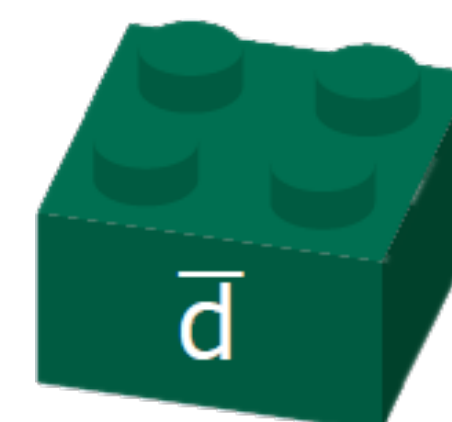


Quark STRANGE: carica  
 $-1/3$

## Antimateria



Anti-Quark UP:  
carica  $-2/3$



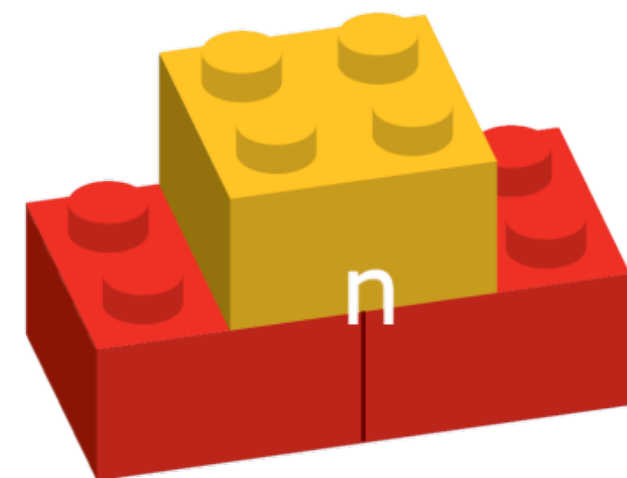
Anti-Quark DOWN:  
carica  $+1/3$



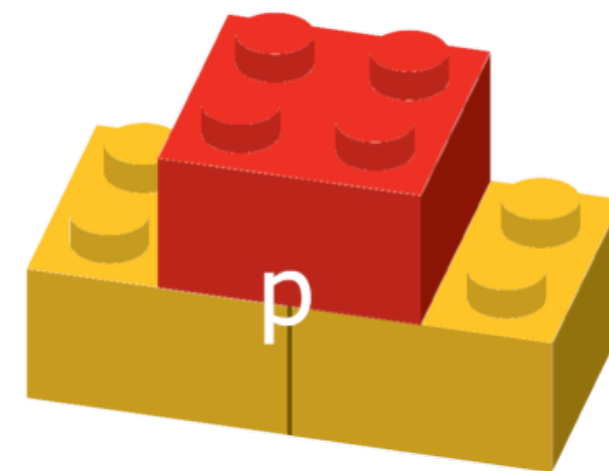
Anti-Quark  
STRANGE:  
carica  $+1/3$

# Le regole del gioco

Barioni (3 quark)

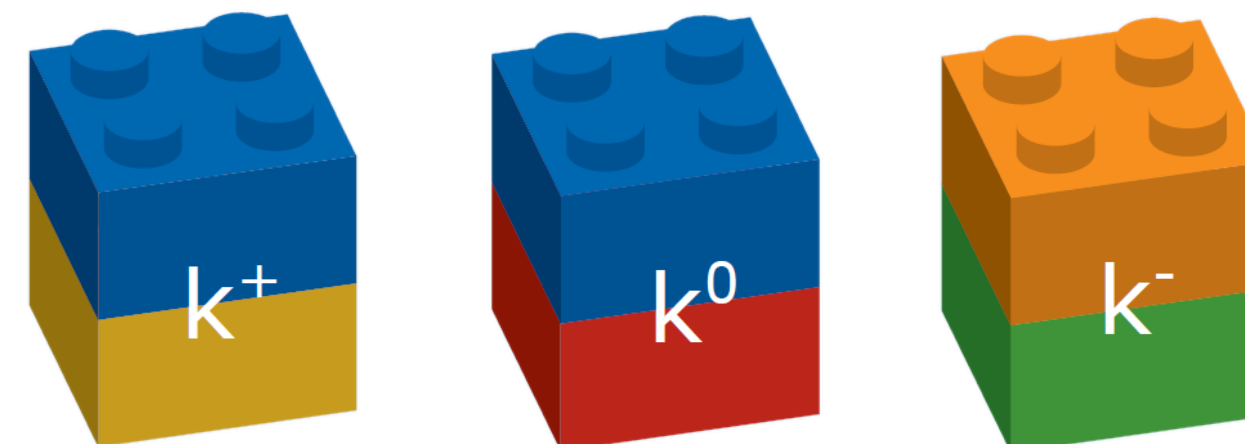


Neutroni

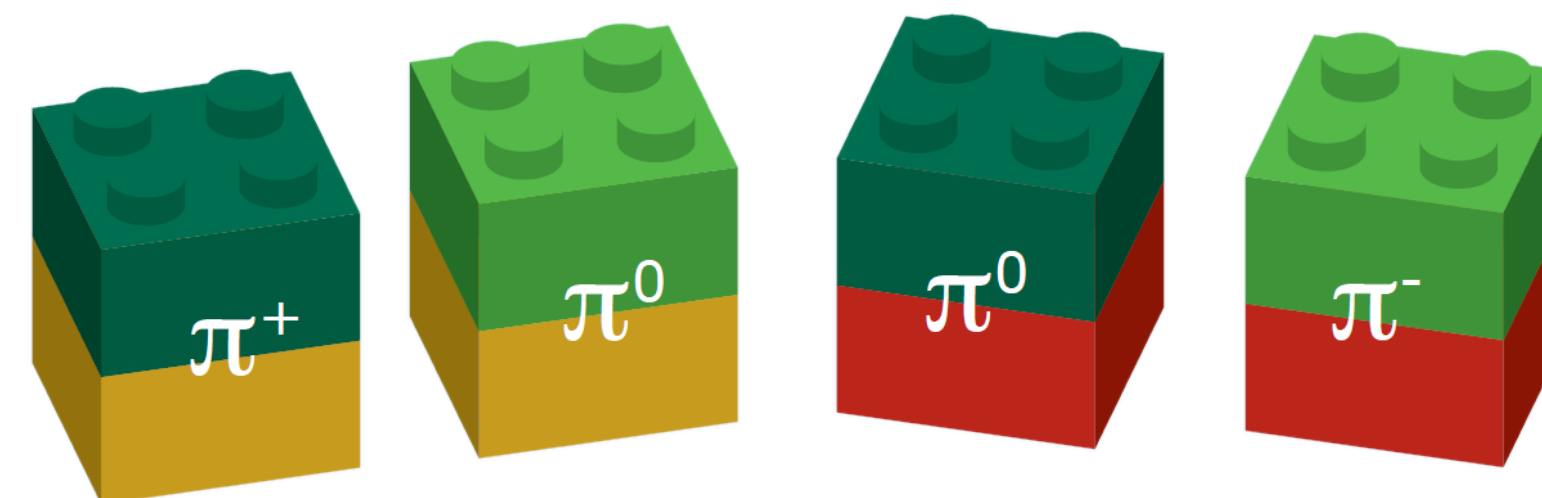


Protoni

Mesoni (1 quark + 1 anti quark)



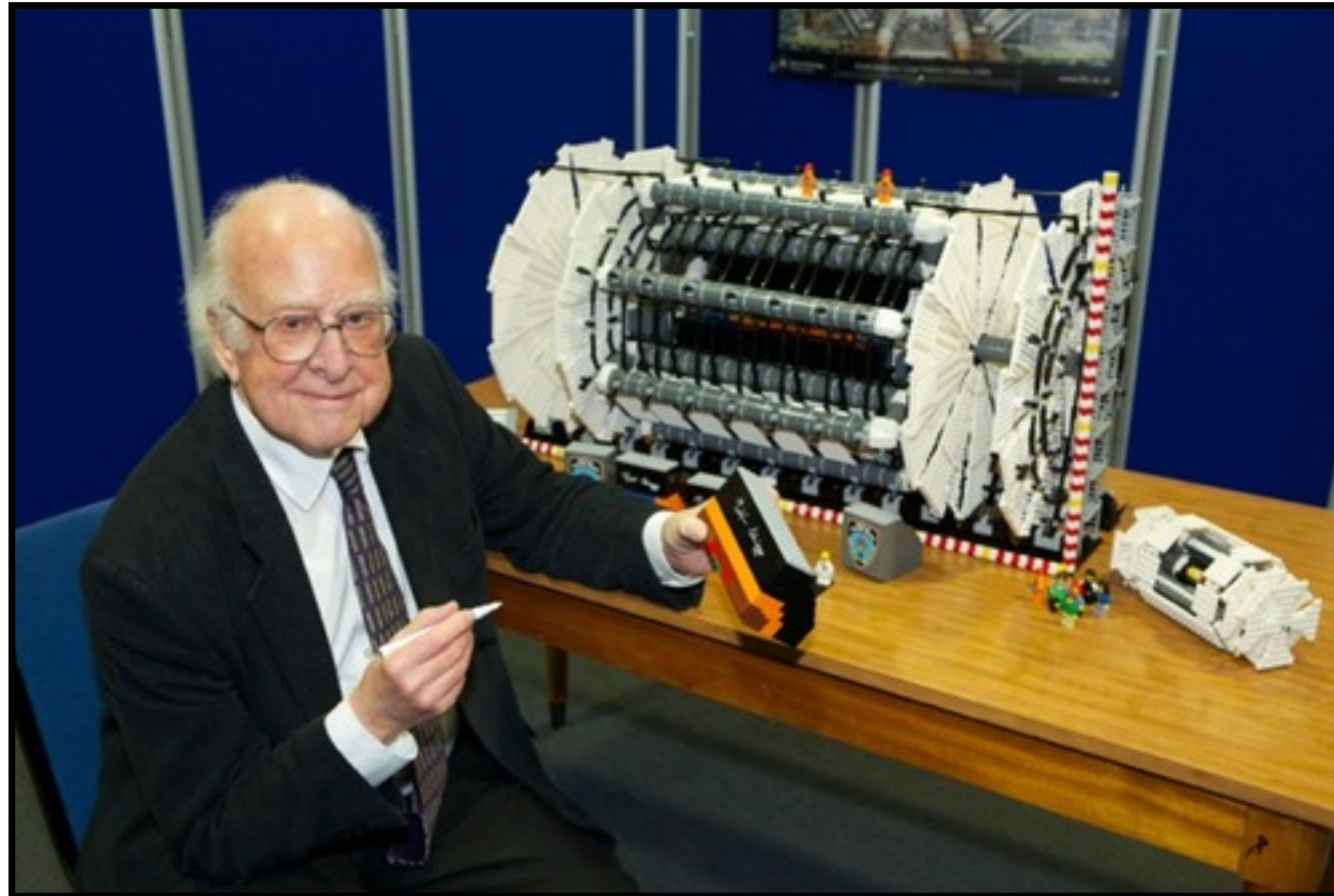
Kaoni



Pioni



# Non dimentichiamo il Bosone di Higgs!



Chi l'ha previsto (nel 1964) e chi l'ha trovato (nel 2012)

# Il Bosone di Higgs

Il campo **permea tutto l'universo**.  
Le particelle che lo attraversano  
avvertono ognuna  
una resistenza diversa.  
Questa **resistenza** è quella  
che chiamiamo **massa**



Per spiegare come mai  
la materia abbia massa,  
il fisico Peter Higgs  
nel 1960 ha ipotizzato  
l'esistenza del bosone  
di Higgs.

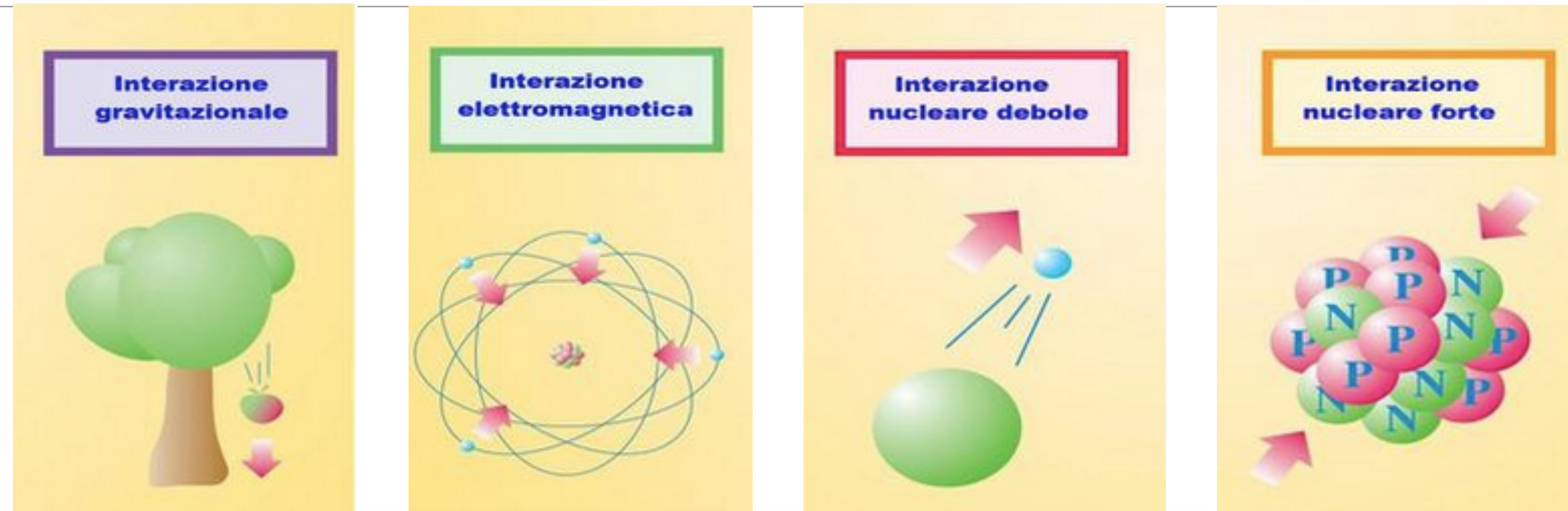
Il bosone di Higgs  
è la particella che dà  
la massa a tutte le altre.  
Ciò avviene quando queste  
interagiscono col campo  
prodotto dall'Higgs.

# Come funziona il mondo

---

- Ora che abbiamo capito quali sono i mattoni fondamentali, cerchiamo di capire come si accorgono l'uno della presenza dell'altro, ovvero come **interagiscono**.
- Le interazioni avvengono mediante le forze: in Natura esistono 4 tipi di forze fondamentali (tutte le altre sono una loro manifestazione).
- Conosciamo le **leggi** di queste interazioni fondamentali?

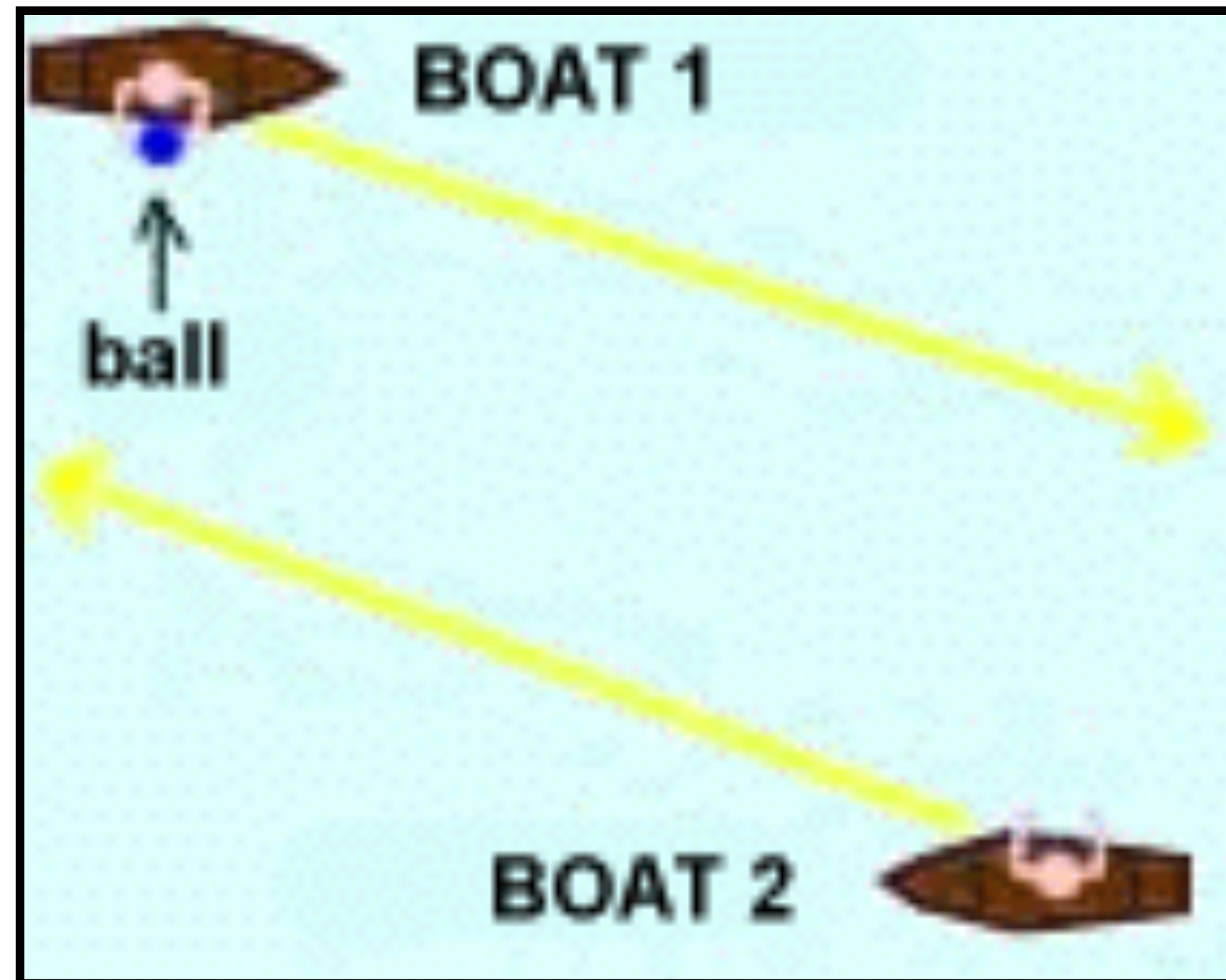
# Le 4 forze della Natura



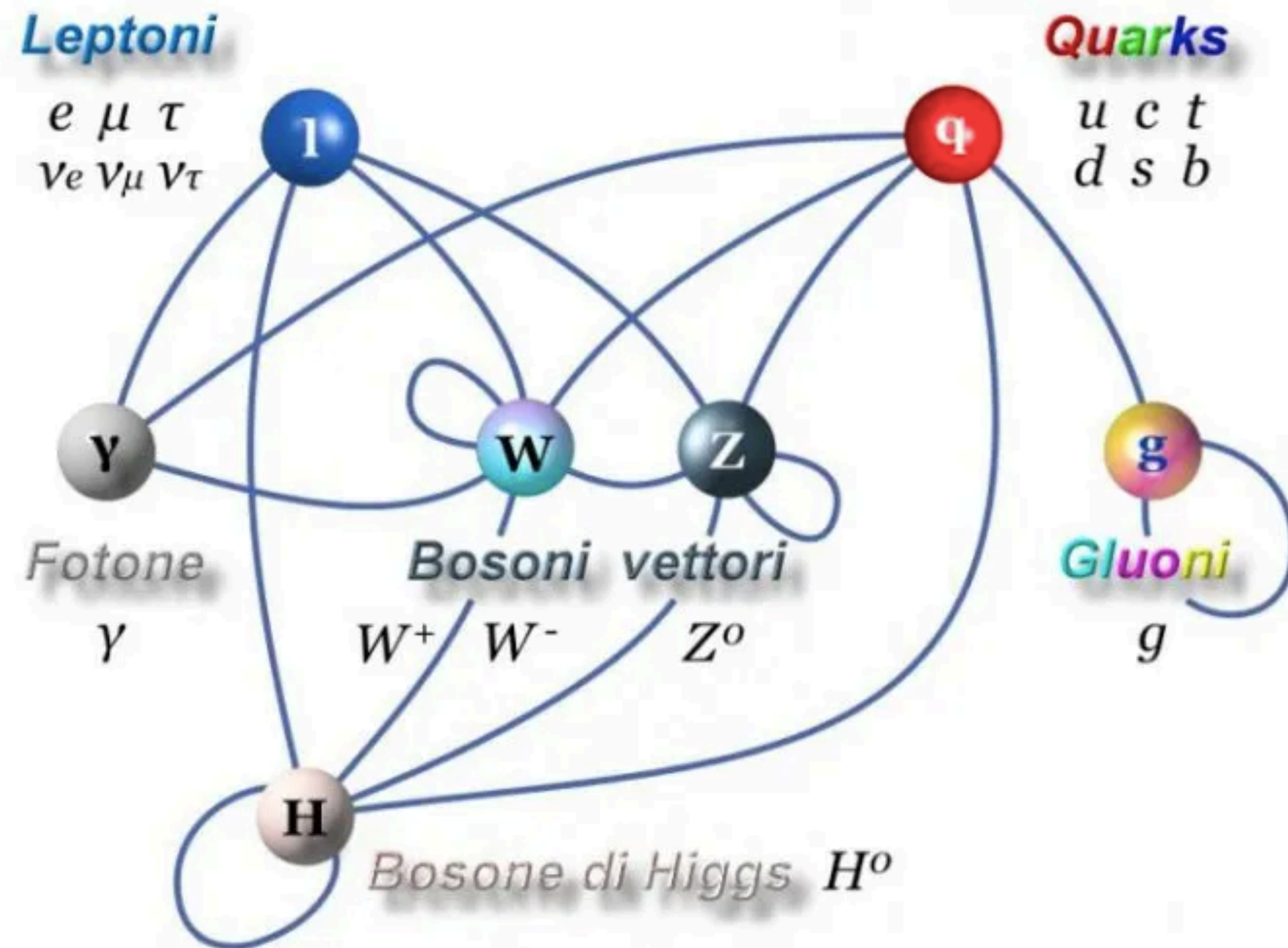
- le forze **gravitazionali** che tengono insieme l'universo, pur essendo le più deboli;
- le forze **elettriche** e **magnetiche** di cui fanno parte anche tutte le forze di contatto;
- le forze **nucleari deboli** responsabili della radioattività, processi in cui i nuclei di alcuni atomi emettono particelle e radiazione;
- le forze **nucleari forti** che tengono insieme i nuclei degli atomi, consentendo la stabilità degli atomi e quindi della materia.

# I mediatori delle forze

---



# Come interagiscono le particelle?



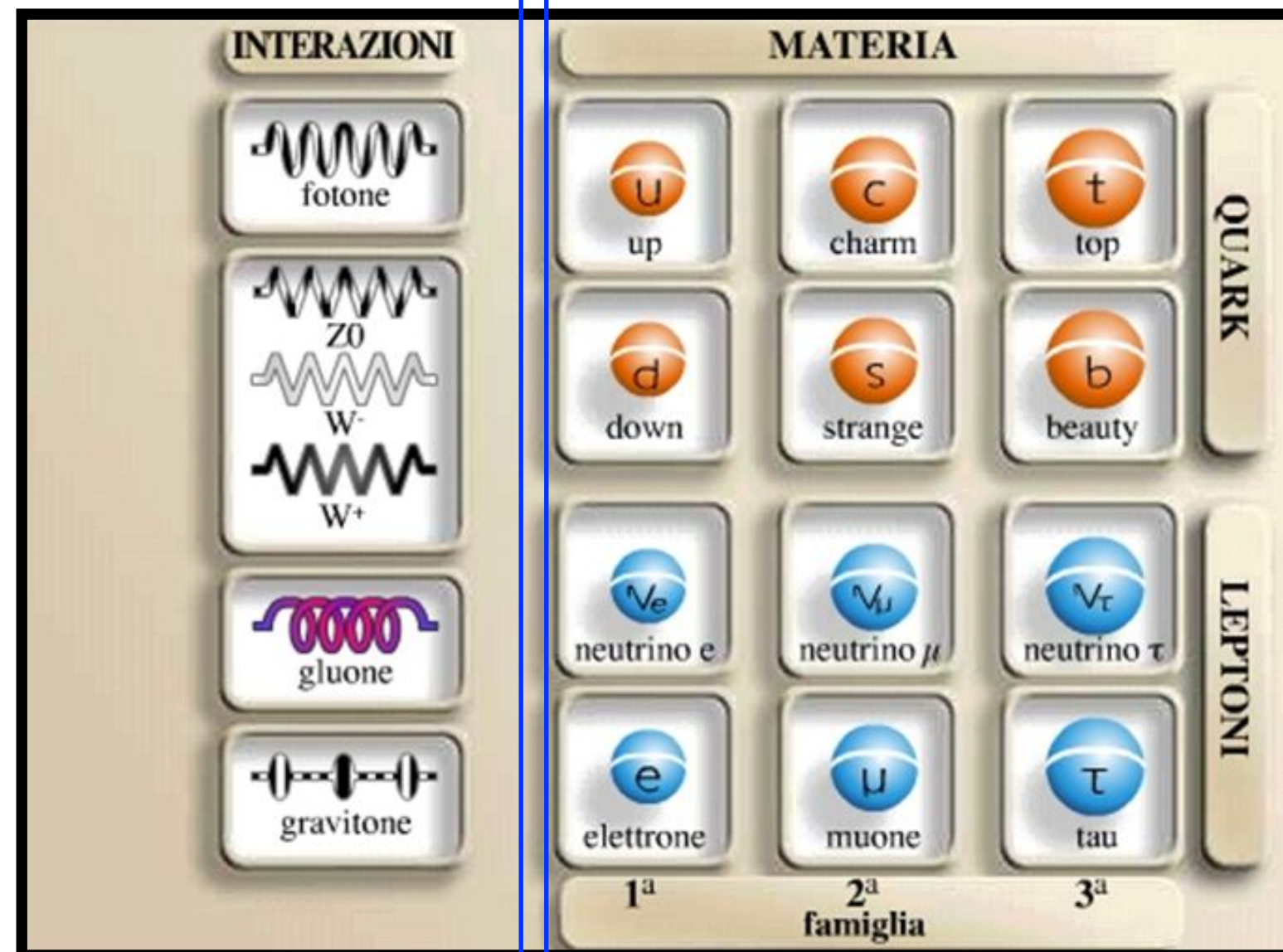
Qualche regola:

- 1) Solo sui quark agiscono tutte le forze fondamentali
- 2) La forza forte agisce sui quark ma non sui leptoni;
- 3) I leptoni neutri (neutrini) non hanno interazioni elettromagnetiche ma solo deboli;

Interazione	Mediatore	Magnitudine relativa	Raggio d'azione (m)
Forte	gluone	$10^{38}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$
Elettromagnetica	fotone	$10^{36}$	infinito
Debole	bosone W e Z	$10^{25}$	$10^{-18}$
Gravitazionale	gravitone	1	infinito

# MATTONI E FORZE

Particelle  
tipo FORZA

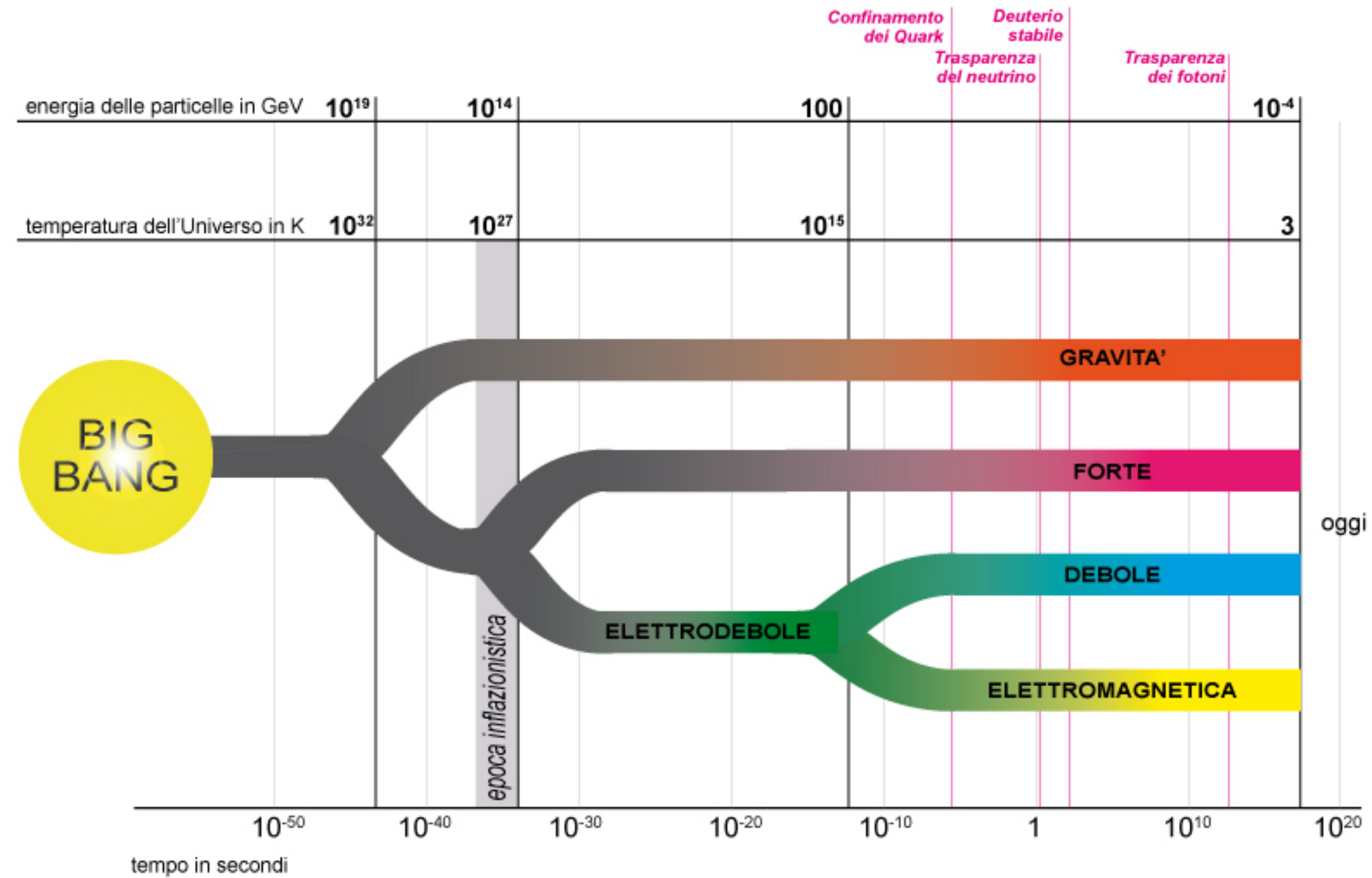


Particelle  
tipo  
MATERIA



+ Bosone di Higgs

# Unificazione delle forze





# I confini della conoscenza

---

*Ad oggi qual è la nostra attuale comprensione del mondo esterno?*

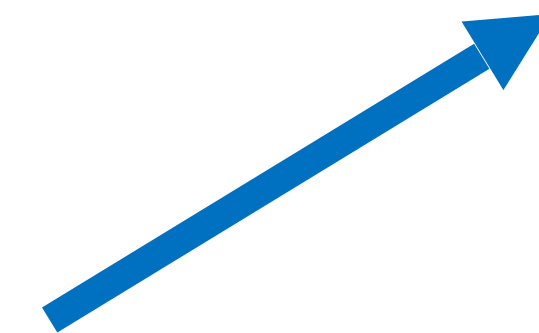
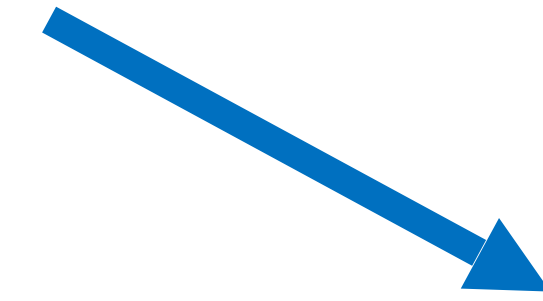
Meccanica Quantistica (relativistica)

- Cose piccole: mondo subatomico

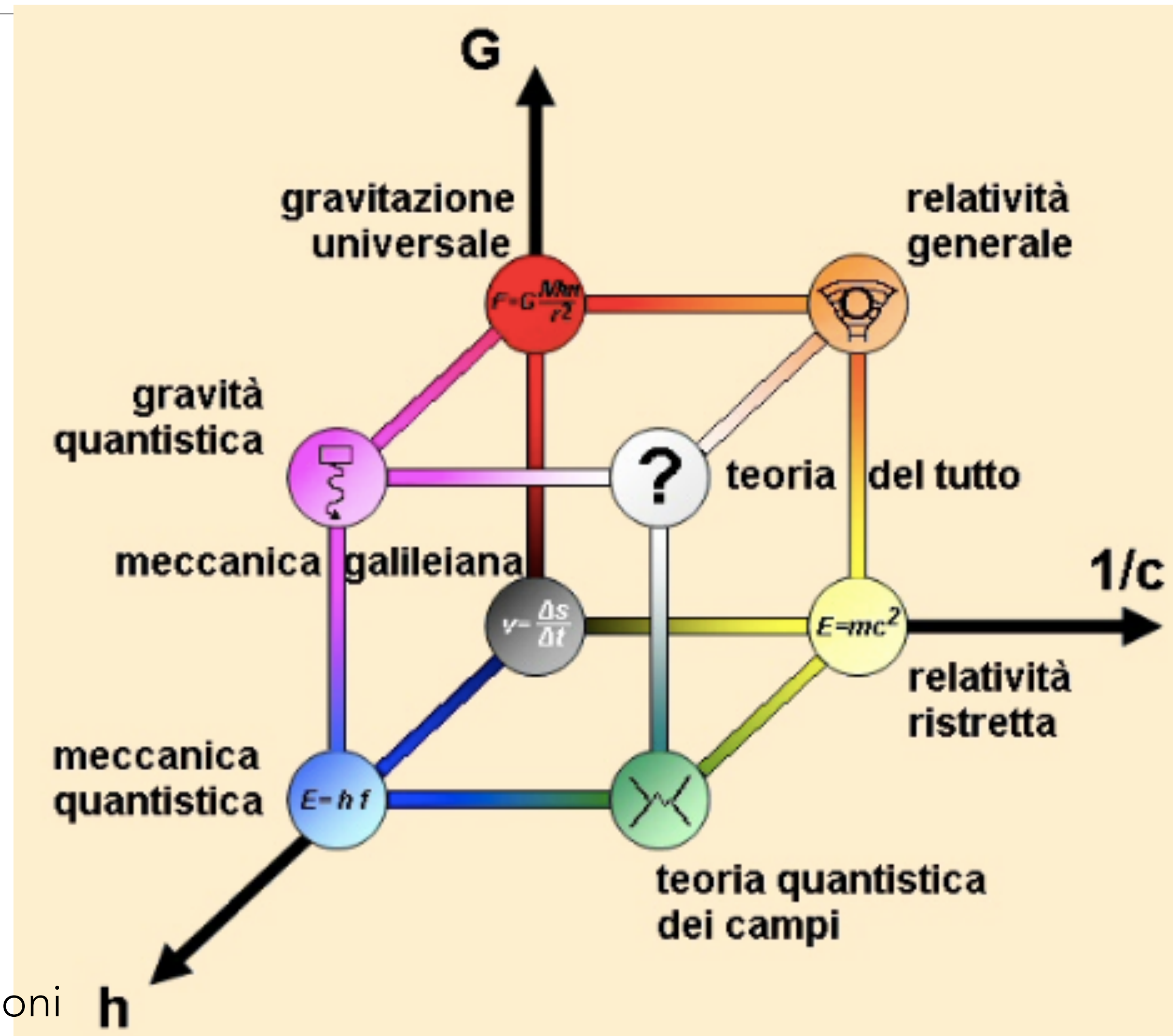
Relatività Generale

- Cose grandi: pianeti, stelle, cosmo

Meccanica Classica

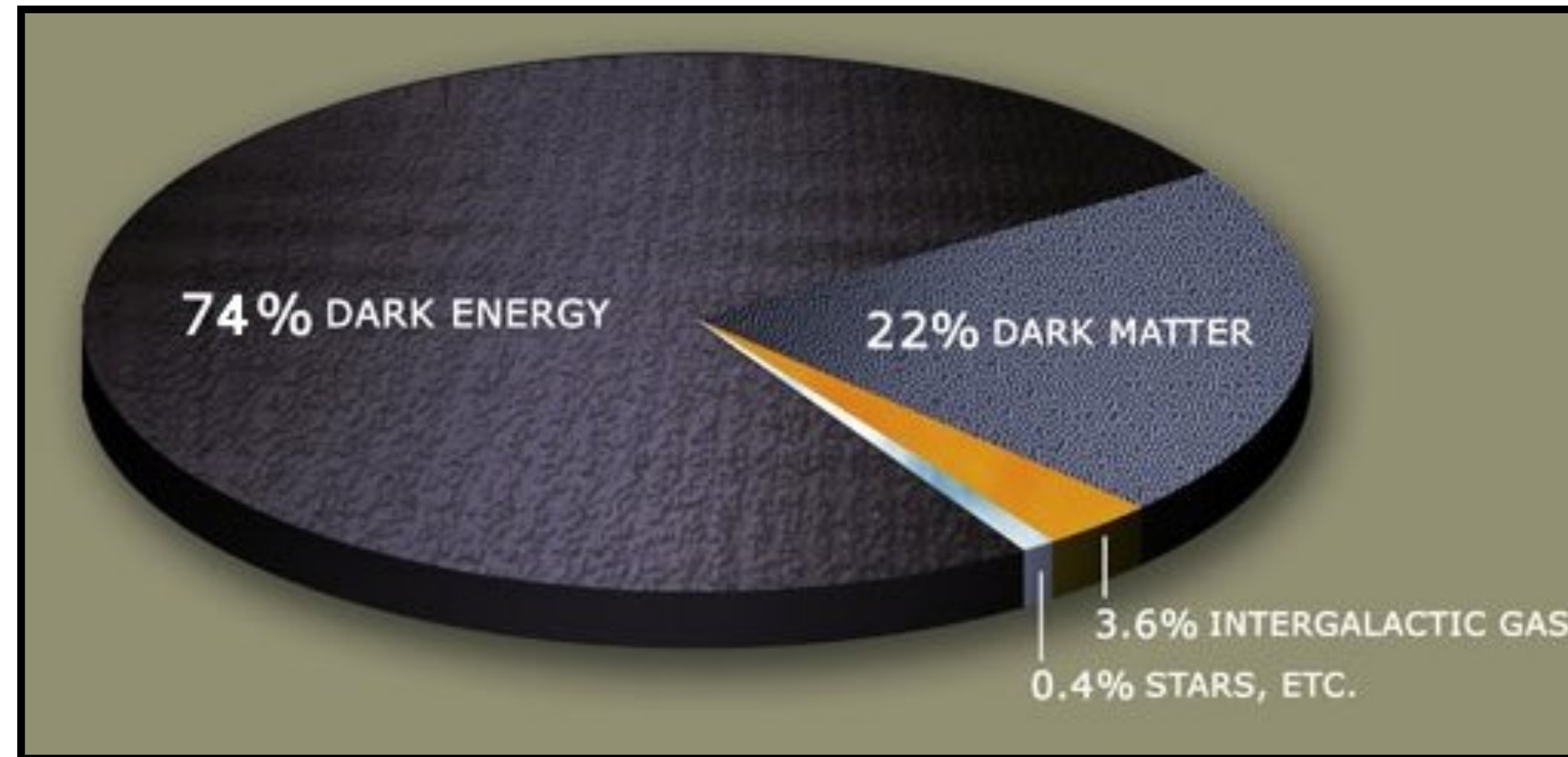


# I confini della conoscenza



# Sappiamo già tutto?

---



A quanto pare sappiamo pochissimo della  
composizione del nostro Universo!

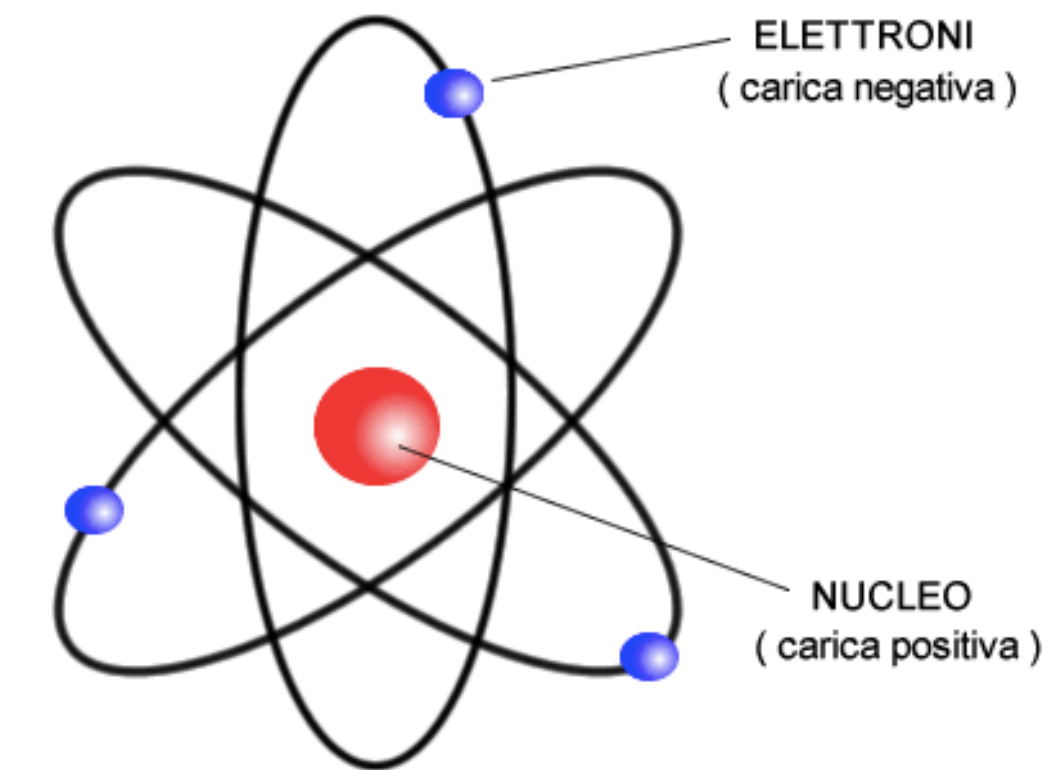
# L' atomo

Un atomo è composto da un **nucleo** di carica elettrica per convenzione **positiva** e dagli **elettroni**, di carica elettrica opposta (e quindi, sempre per convenzione, **negativa**).

L'atomo più semplice è l'atomo di **Idrogeno** (1 elettrone)

Quello più complesso è quello di **Uranio** (92 elettroni)

La somma delle cariche elettriche del nucleo e degli elettroni è **ZERO**.



# Il Nucleo dell'atomo

Il nucleo atomico è composto da: **protoni** (carica positiva uguale e ESATTAMENTE opposta a quella degli elettroni) e da **neutroni**, di carica elettrica zero (ESATTAMENTE zero!)

Cariche elettriche uguali si respingono:

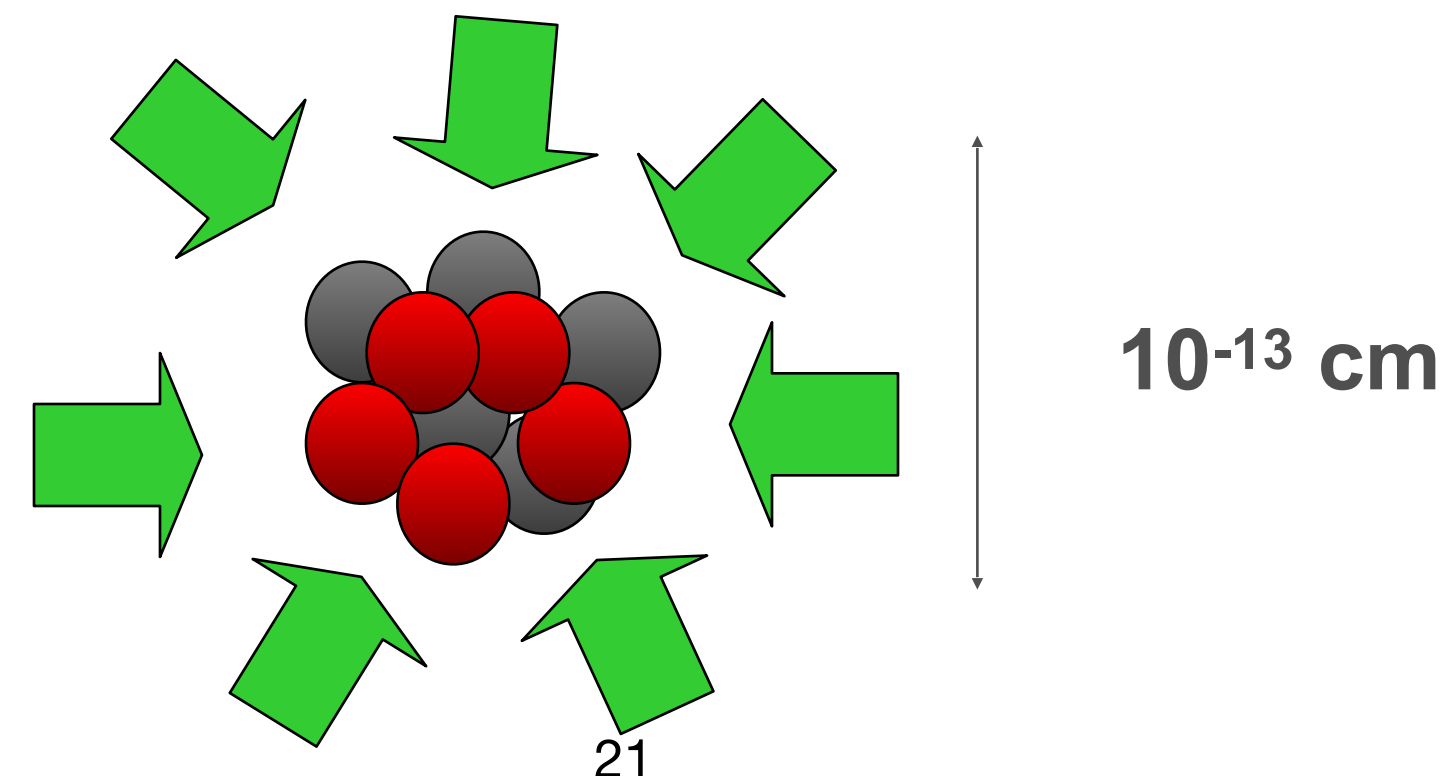
## Cosa tiene assieme i protoni nel nucleo?

Deve essere una forza attrattiva, più forte della repulsione elettromagnetica.

**LA FORZA NUCLEARE!** Protoni e neutroni hanno “carica nucleare” (in analogia alla forza elettrica) che li tiene uniti fra loro.

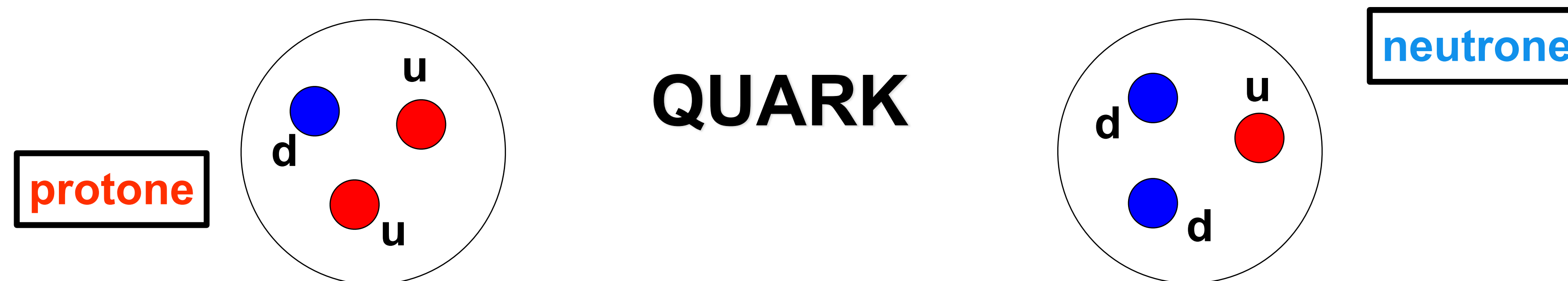
La forza nucleare agisce a distanze piccole (pari alle dimensioni del nucleo) ed è “schermata” a distanze maggiori.

I neutroni servono a dare stabilità al nucleo



# Protoni e Neutroni: I Nucleoni

Esperimenti condotti negli anni '70 hanno mostrato che protoni e neutroni (detti genericamente “nucleoni”) sono a loro volta composti di strutture più piccole, che sono state chiamate:



I quark hanno **CARICA ELETTRICA FRAZIONARIA**

**Carica up = + 2 / 3.**

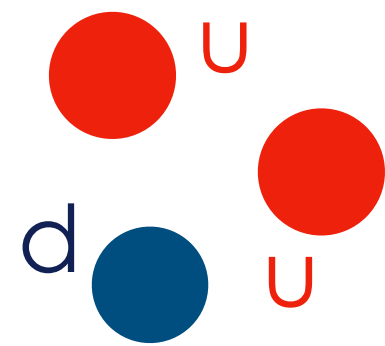
**Carica down = - 1 / 3**

Le proprietà del nucleone sono date dalle proprietà dei quark, e dalle loro interazioni.

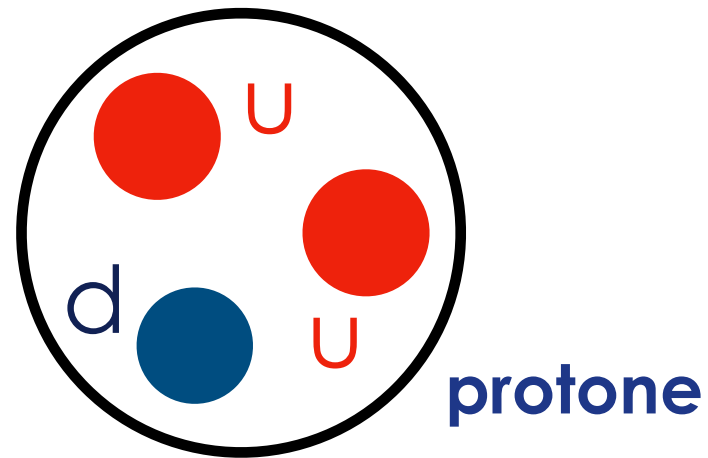
La forza nucleare fra nucleoni è in realtà la forza nucleare fra quark.

# Dagli ingredienti alla ricetta

Prendiamo qualche quarks



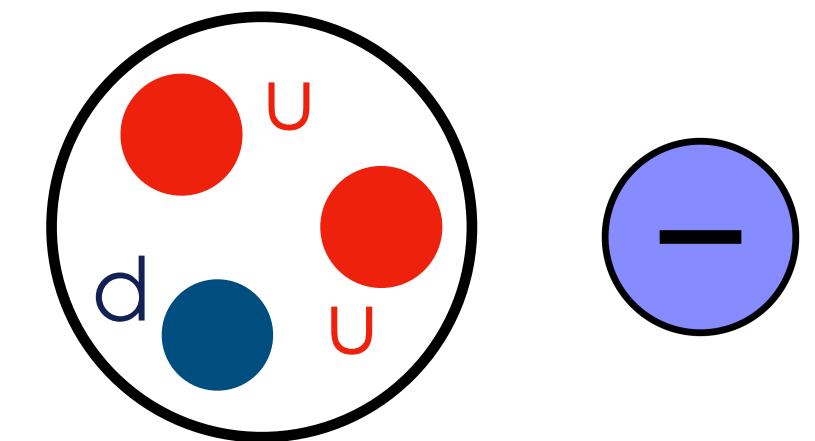
+



+

Aggiungiamo un leptone

(Elettrone)



protone

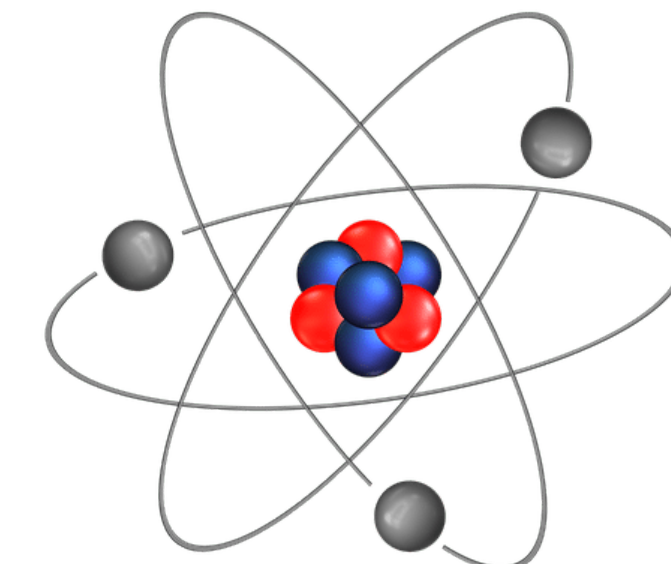
Aggiungiamo un po' di forza forte per "legarli"

+

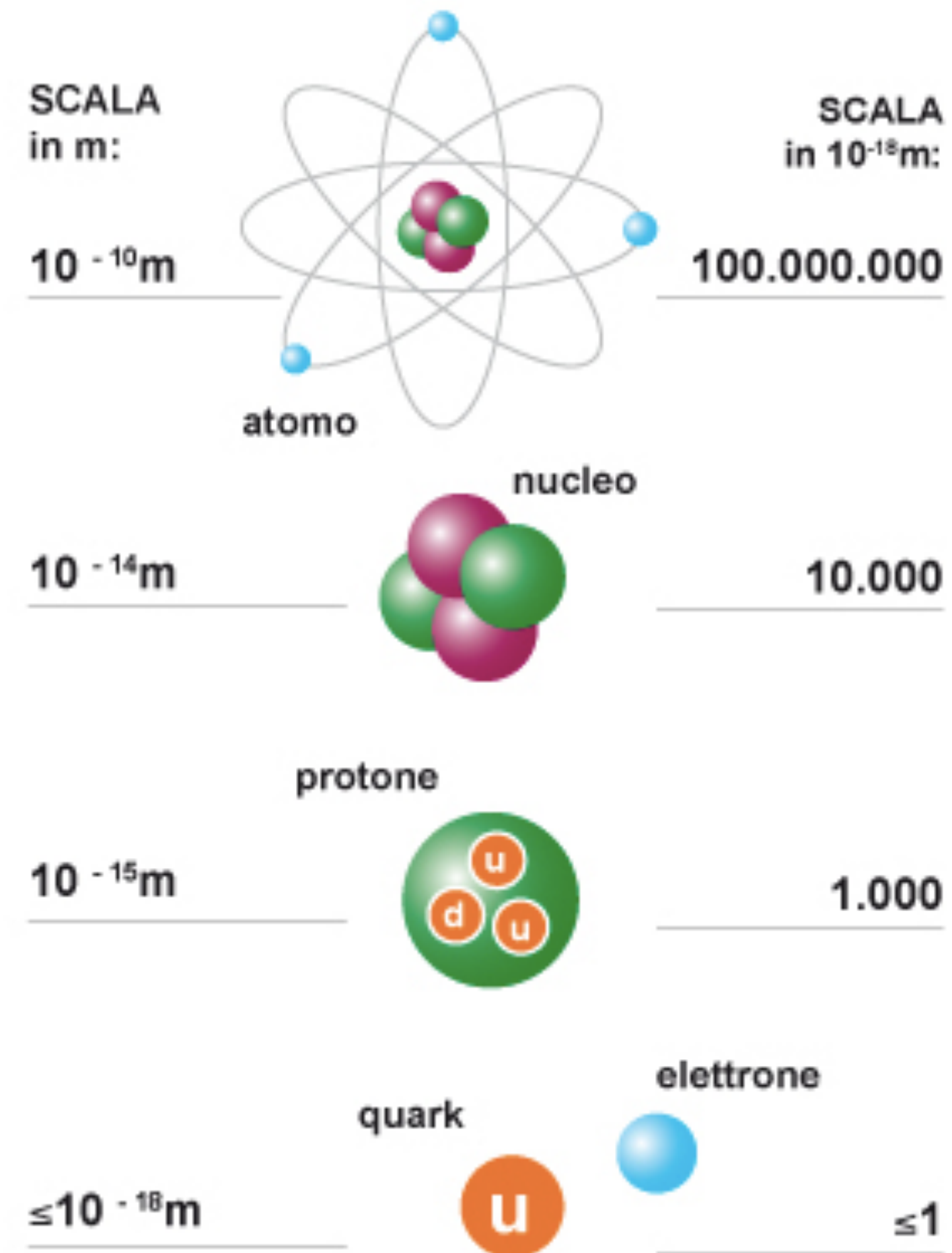
Forza Elettromagnetica



Atomo di idrogeno!



# La materia è fatta di....



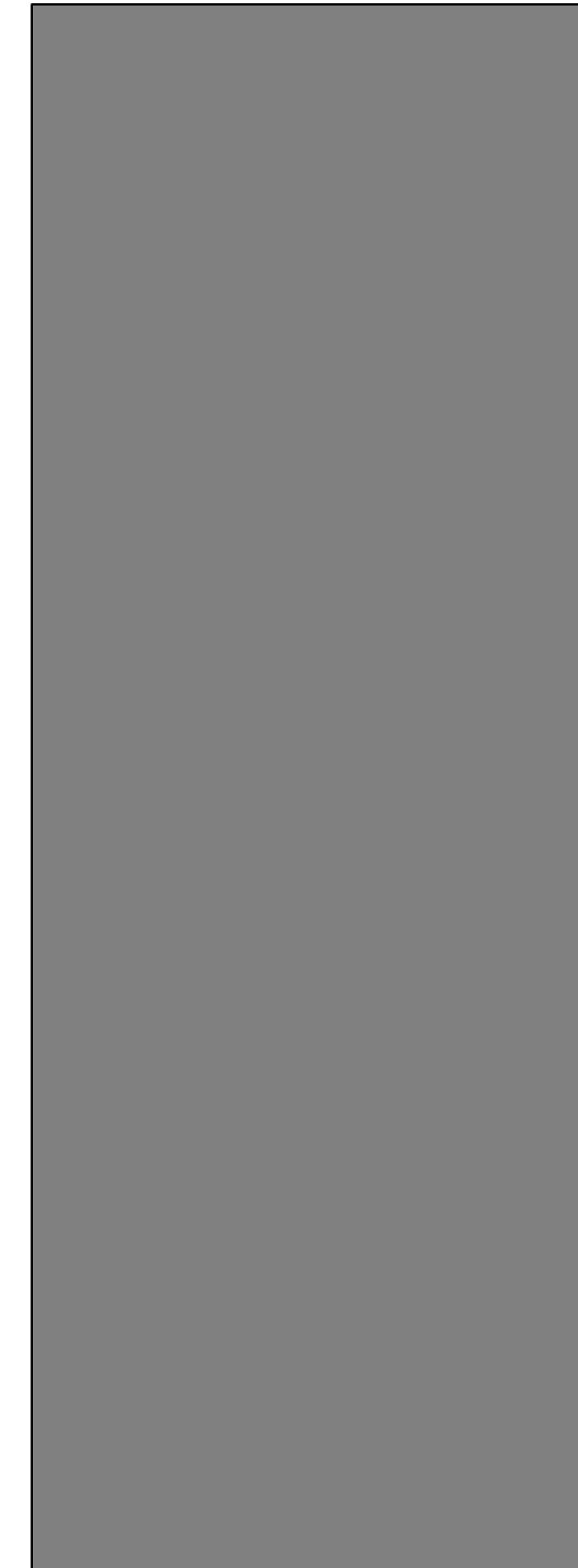
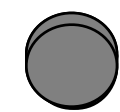
....VUOTO!!!!

Se il nucleo avesse le dimensioni di una testa di spillo il primo elettrone sarebbe a 200 m!



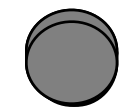
# Come si è scoperto il nucleo?

---



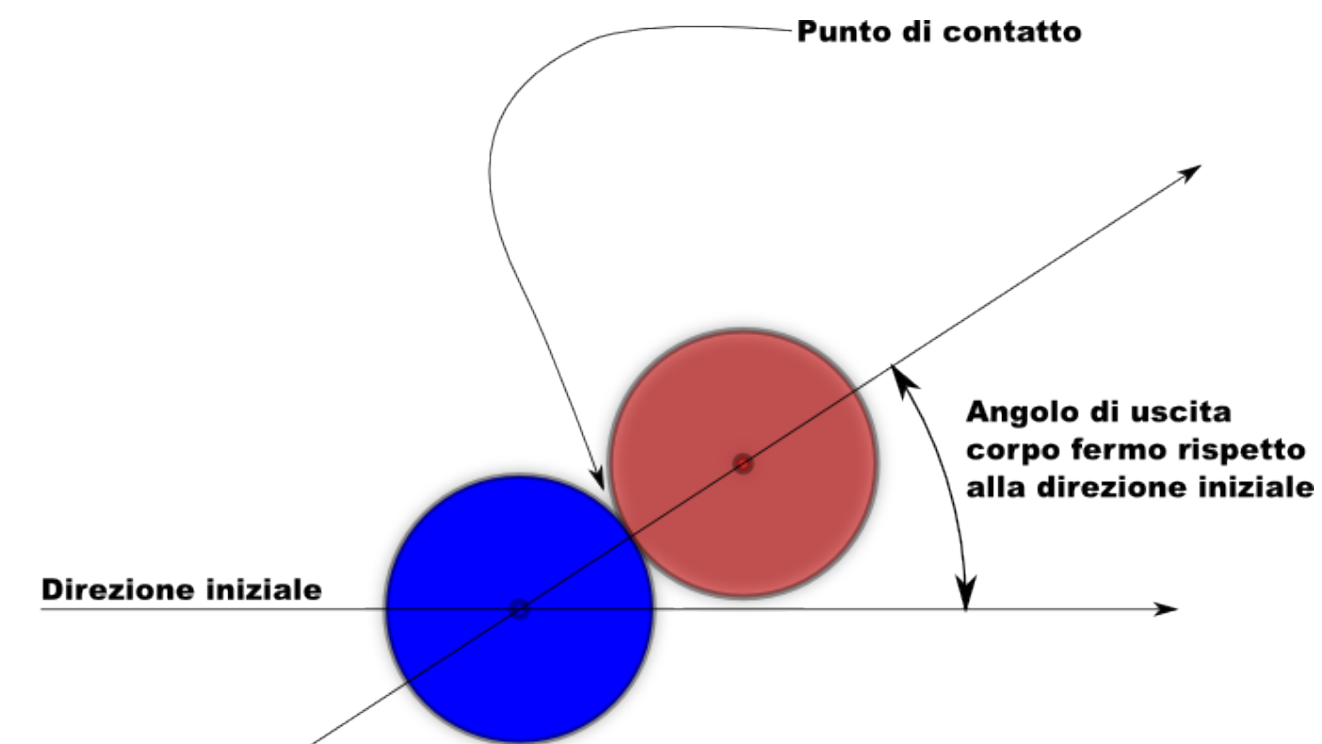
# Come si è scoperto il nucleo?

---



# La sezione d'urto

- Se spedisco due palline l'una contro l'altra, la probabilità che si scontrino dipende: dalle loro **dimensioni** e dalla distanza delle loro **rette d'azione**
- Nel mondo sub-atomico la probabilità dipende principalmente dal tipo di **interazione** coinvolta: più l'interazione è «forte» più è probabile che l'urto avvenga



# I *quark* sono particelle elementari

---

Nessuno, finora, è mai riuscito a guardare dentro un quark, a spezzarlo e a trovare qualcosa di più piccolo all'interno.

I quark quindi si comportano come oggetti puntiformi, senza struttura interna. **Sono particelle elementari nel senso stretto della parola.**

Questo non vuol dire che sia vero in assoluto, ma, con gli strumenti che abbiamo adesso a disposizione, **non riusciamo a vedere strutture interne al quark, più piccole di  $10^{-15}$  cm.**

In futuro niente ci garantisce che, con tecniche più raffinate e strumenti con una migliore risoluzione spaziale, non riusciremo a trovare strutture interne ai quark.

# Gli elettroni sono particelle elementari

---

Come per i quark, nessuno, finora, è mai riuscito a guardare dentro un elettrone, a spezzarlo e a trovare qualcosa di più piccolo all'interno.

**Anche gli elettroni quindi si comportano come oggetti puntiformi, senza struttura interna.** Sono particelle elementari nel senso stretto della parola.

Questo non vuol dire che sia vero in assoluto, ma, con gli strumenti che abbiamo adesso a disposizione, non riusciamo a vedere strutture interne agli elettroni, più piccole di  $10^{-15}$  cm

# Come facciamo a vedere oggetti piccoli $10^{-15}$ cm ?

---

**Per rispondere a questa domanda, è necessario capire:**



Cosa ci permette di vedere un oggetto ?

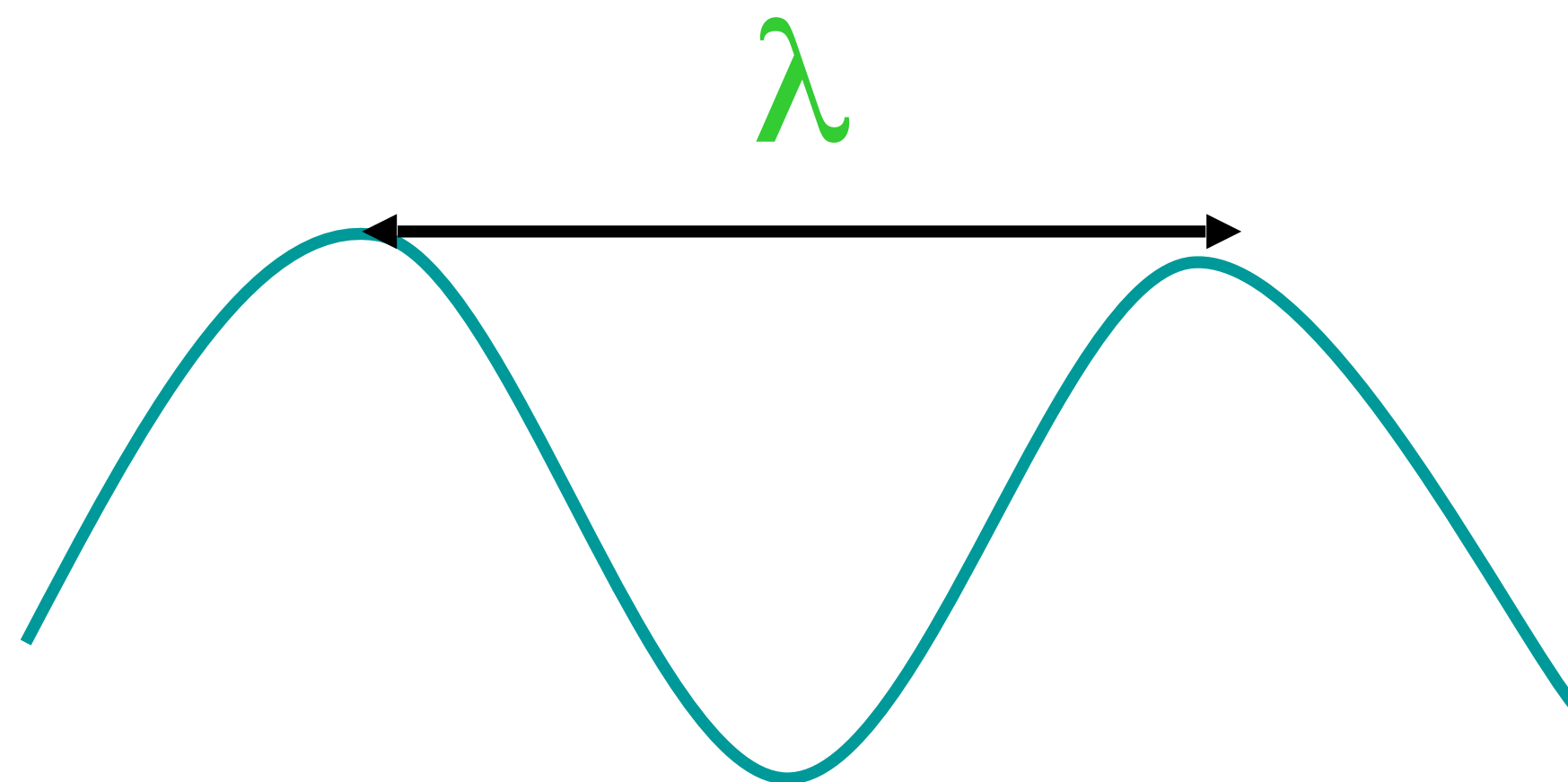


Per vedere un oggetto abbiamo bisogno di qualcosa che lo illumini

# La luce

La **luce è un'onda elettromagnetica** (così come i raggi X, i raggi  $\gamma$ , i raggi UV, i raggi infrarossi, le microonde e le onde radio...)

Le onde sono caratterizzate da una loro **velocità** (velocità della luce) e da una **lunghezza d'onda  $\lambda$** :



**Per la luce visibile,  
 $\lambda = 0.00004 - 0.00007$  cm**

# Come facciamo a vedere un oggetto?

---

Il punto cruciale per vedere un oggetto è l'**interazione fra la luce e l'oggetto stesso**.

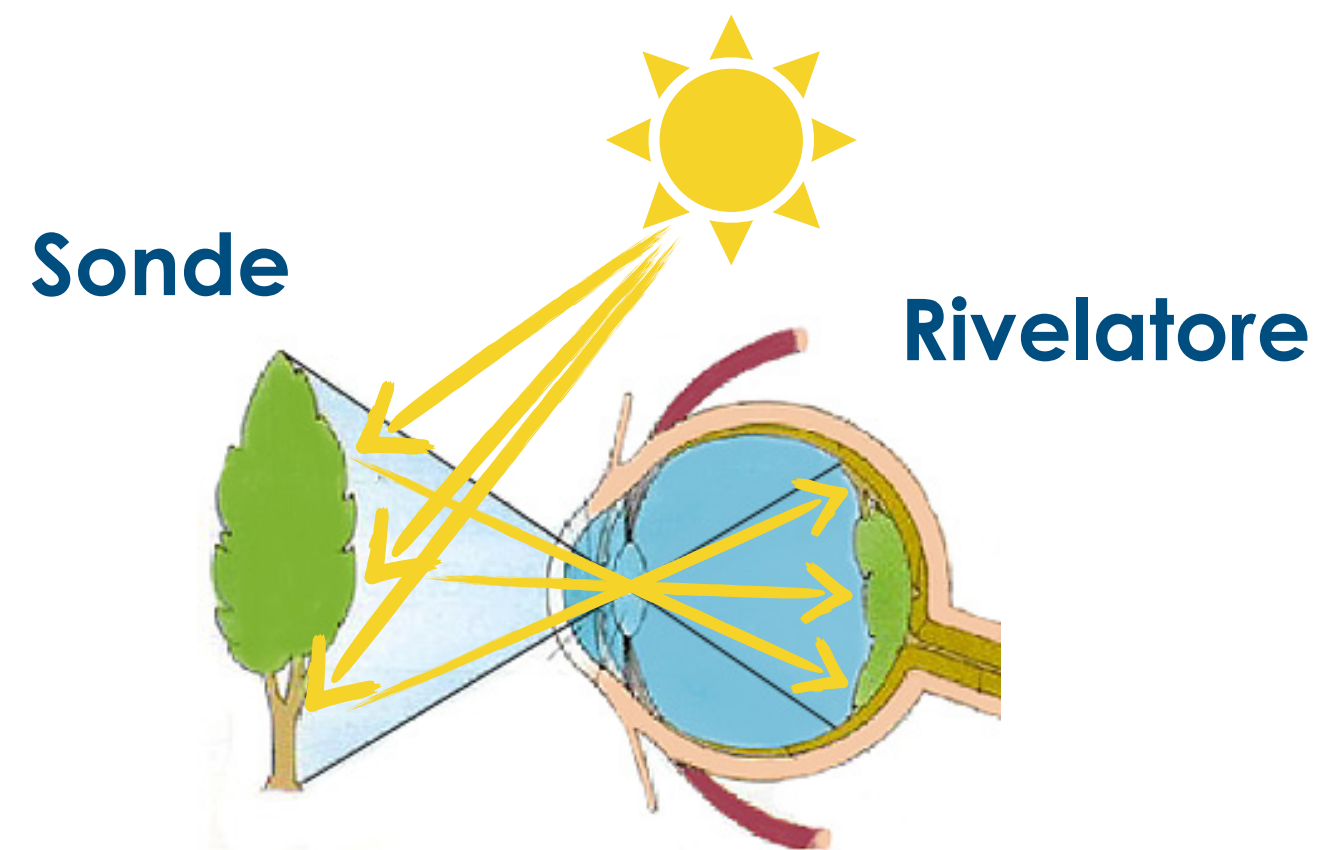
La luce DEVE interagire con l'oggetto per renderlo visibile, ovvero per "portarci" le informazioni sulla sua struttura, colore, forma, etc.

**Per interagire con un oggetto, la luce deve avere lunghezza d'onda più piccola dell'oggetto stesso**

Altrimenti l'oggetto diventa invisibile alla luce



# Come facciamo a vedere un oggetto?



Tramite i nostri occhi noi vediamo **direttamente** ciò che ci circonda.

1. La luce raggiunge l'albero;
2. Una parte viene assorbita, l'altra rimbalza e arriva all'occhio;
3. Il cervello analizza i dati e forma un'immagine.

Gli occhi (**rivelatore**) vedono le cose come risultato dell'interazione tra i fotoni della banda visibile (**sonde**) e gli oggetti che ci circondano (**bersagli**).

**Ogni tipo di onda può essere usata come sonda!**

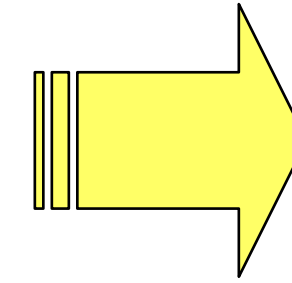


(i pipistrelli usano come "sonde" le onde sonore)

E' possibile vedere gli atomi con un microscopio ottico ?

---

**Atomo:  $\sim 10^{-8}$  cm**

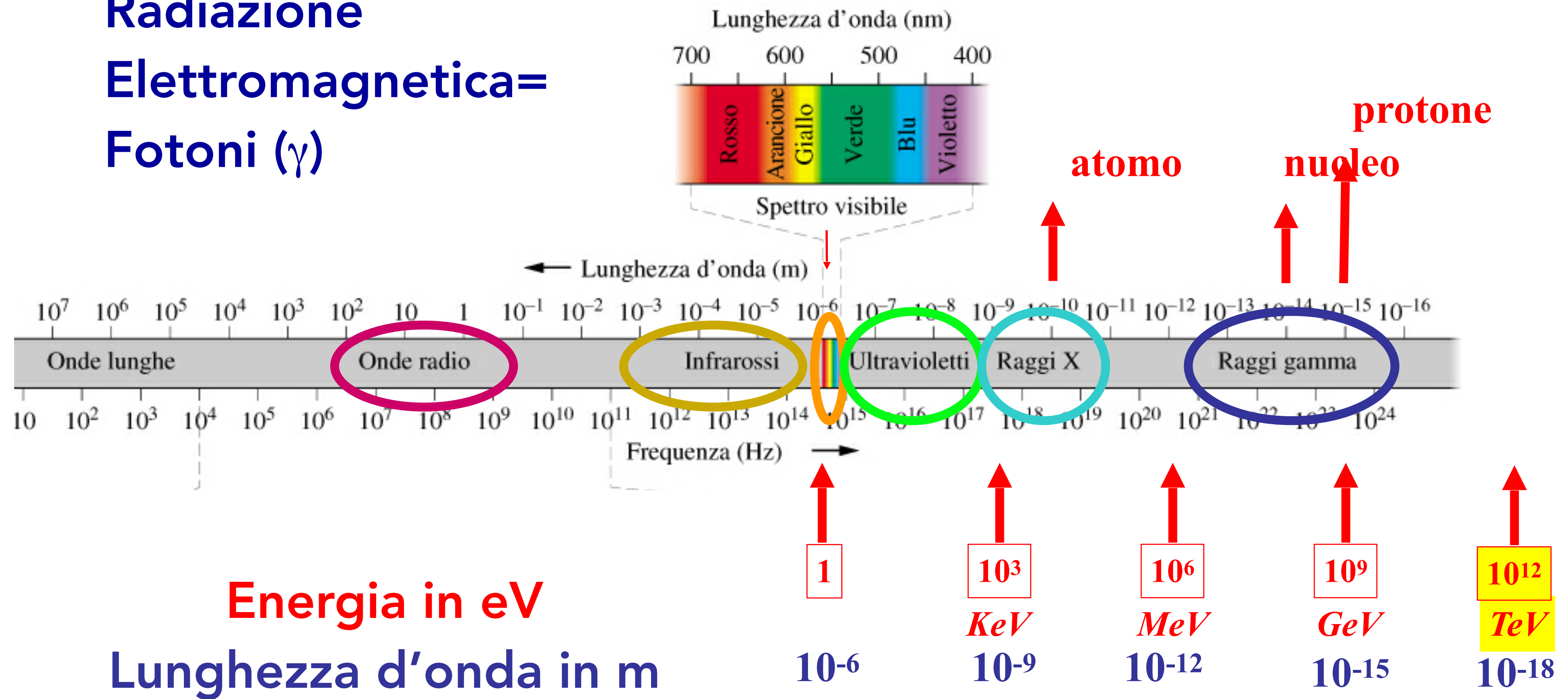


**NO !!!**

$\lambda_{\text{luce visibile}} : \sim 5 \times 10^{-5}$  cm

**Non è una questione di lenti o di microscopio potente.  
Esiste una **LIMITAZIONE FISICA** che impedisce alla luce  
visibile di farci vedere oggetti più piccoli della sua  
lunghezza d'onda.**

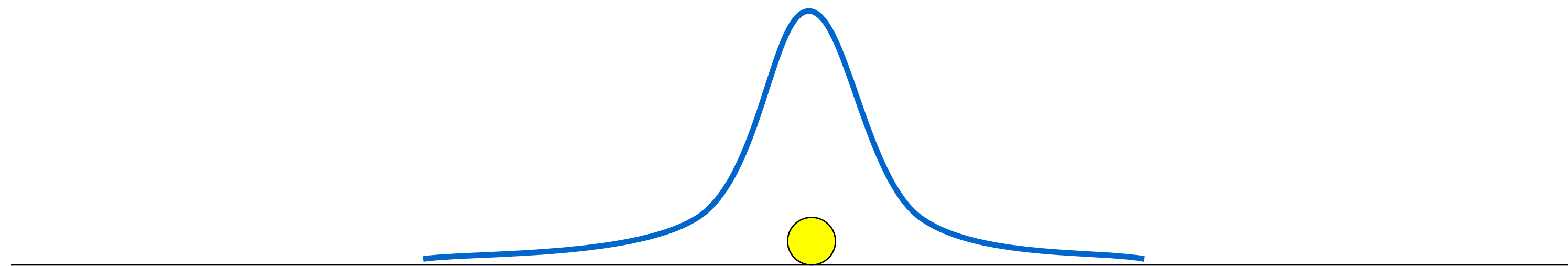
# Radiazione Elettromagnetica= Fotoni ( $\gamma$ )



eV= energia accumulata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

# Come facciamo quindi a veder oggetti così piccoli ?

La meccanica quantistica ci dice che qualunque oggetto è descrivibile da una “funzione d’onda”



Una funzione d’onda è la sovrapposizione di tante onde di lunghezza d’onda diverse.

La **lunghezza d’onda** di queste onde è legata all’impulso ( $mv = \text{massa} \cdot \text{velocità}$ ) dell’oggetto, secondo la relazione:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$h$  = costante di Plank  
 $m$  = massa dell'oggetto  
 $v$  = velocità dell'oggetto

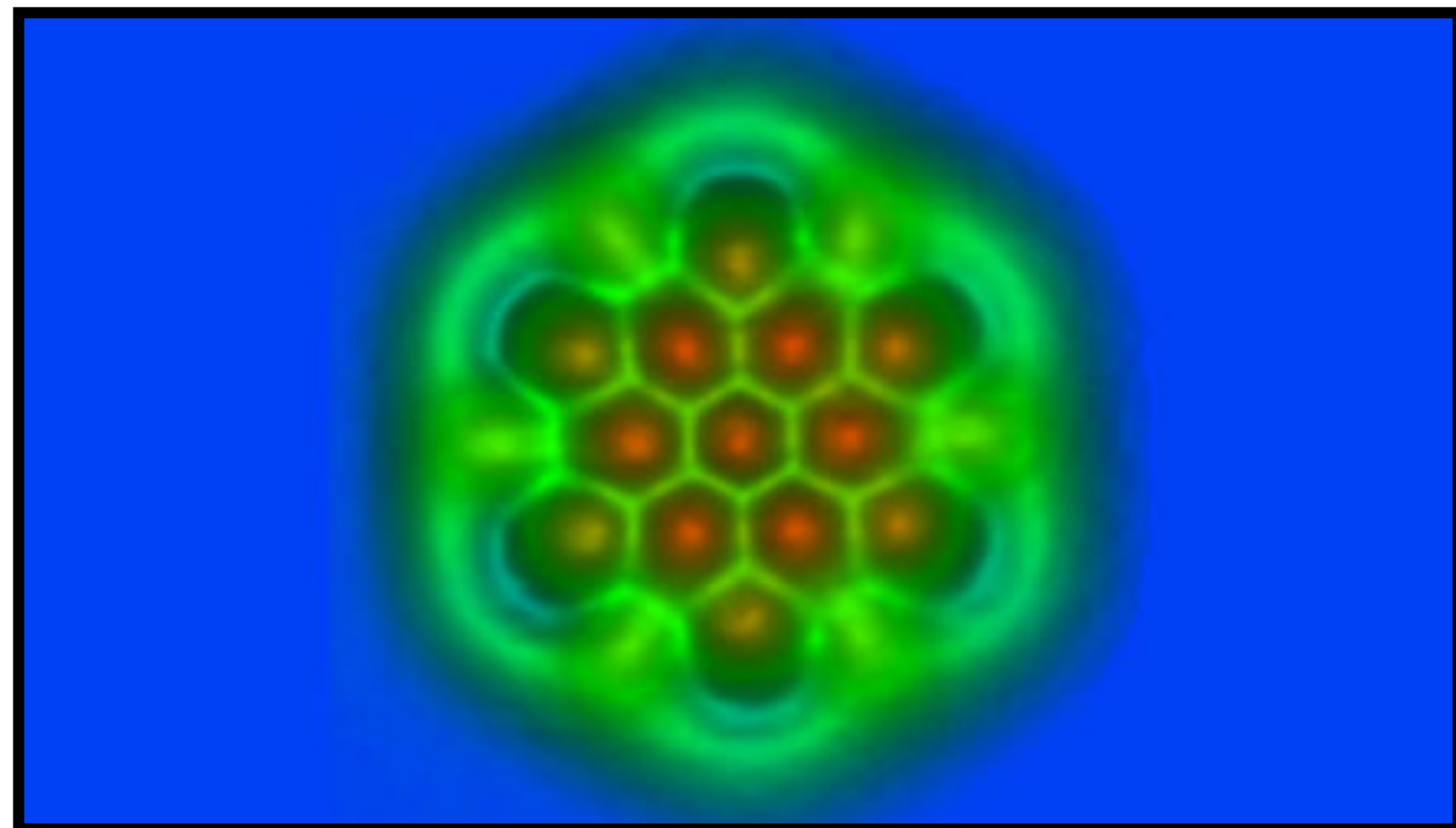
Se l'oggetto è un elettrone, accelerato da una differenza di potenziale di 1000 Volt (e quindi con una energia cinetica di 1000 eV), la sua lunghezza d'onda associata è di circa  **$10^{-9}$  cm** ovvero inferiore alle dimensioni di un **atomo**

**Un elettrone accelerato a questa energia riesce a “vedere” un atomo, se ci va a sbattere contro.**

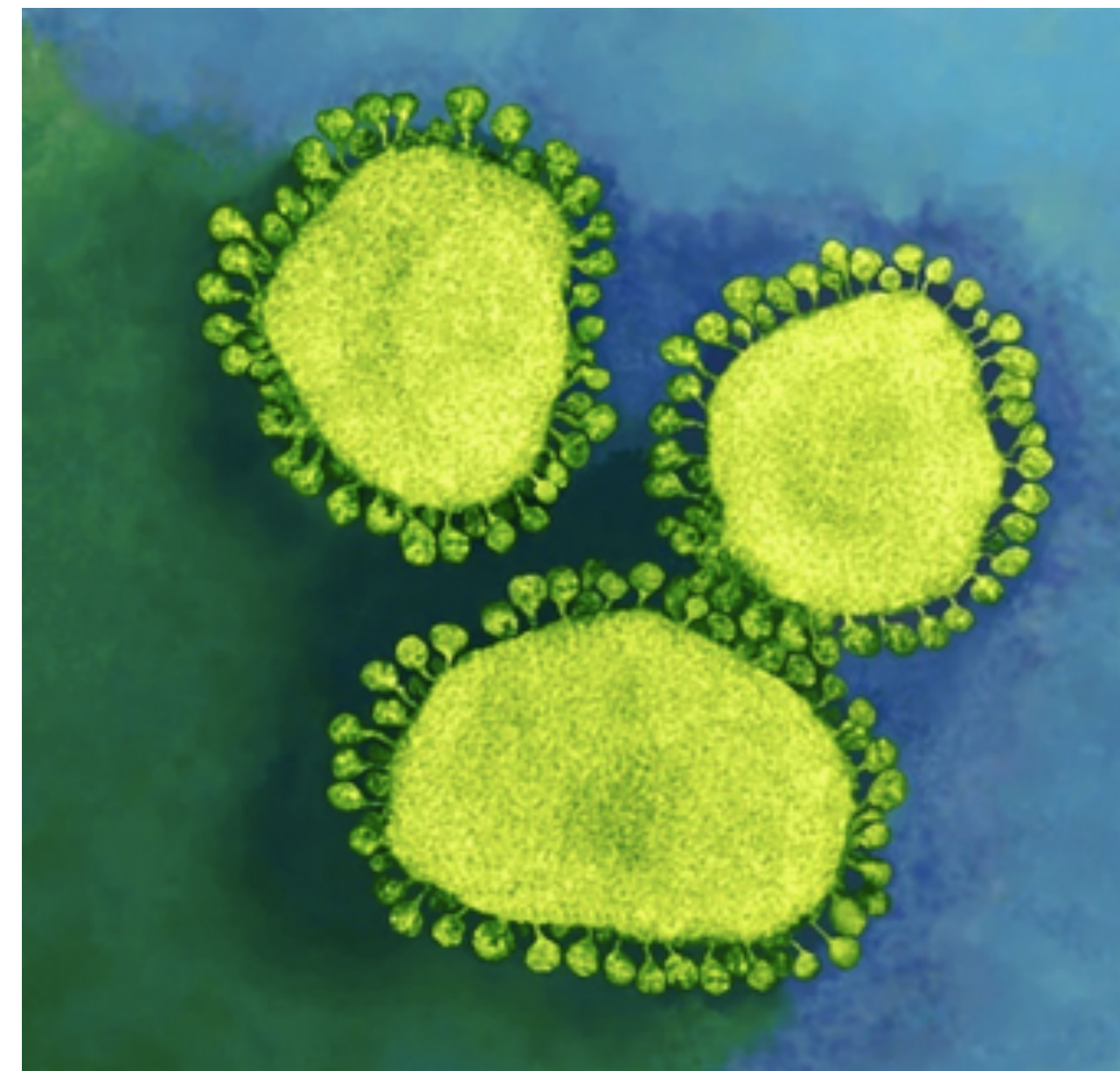
**Questo è il principio di funzionamento del microscopio elettronico**

# Vedere gli atomi..... e i virus

---



Molecola di *nanografene* vista con un particolare microscopio (microscopio a forza atomica): si vedono gli atomi di carbonio!



Corona Virus ottenuta con un microscopio elettronico a scansione

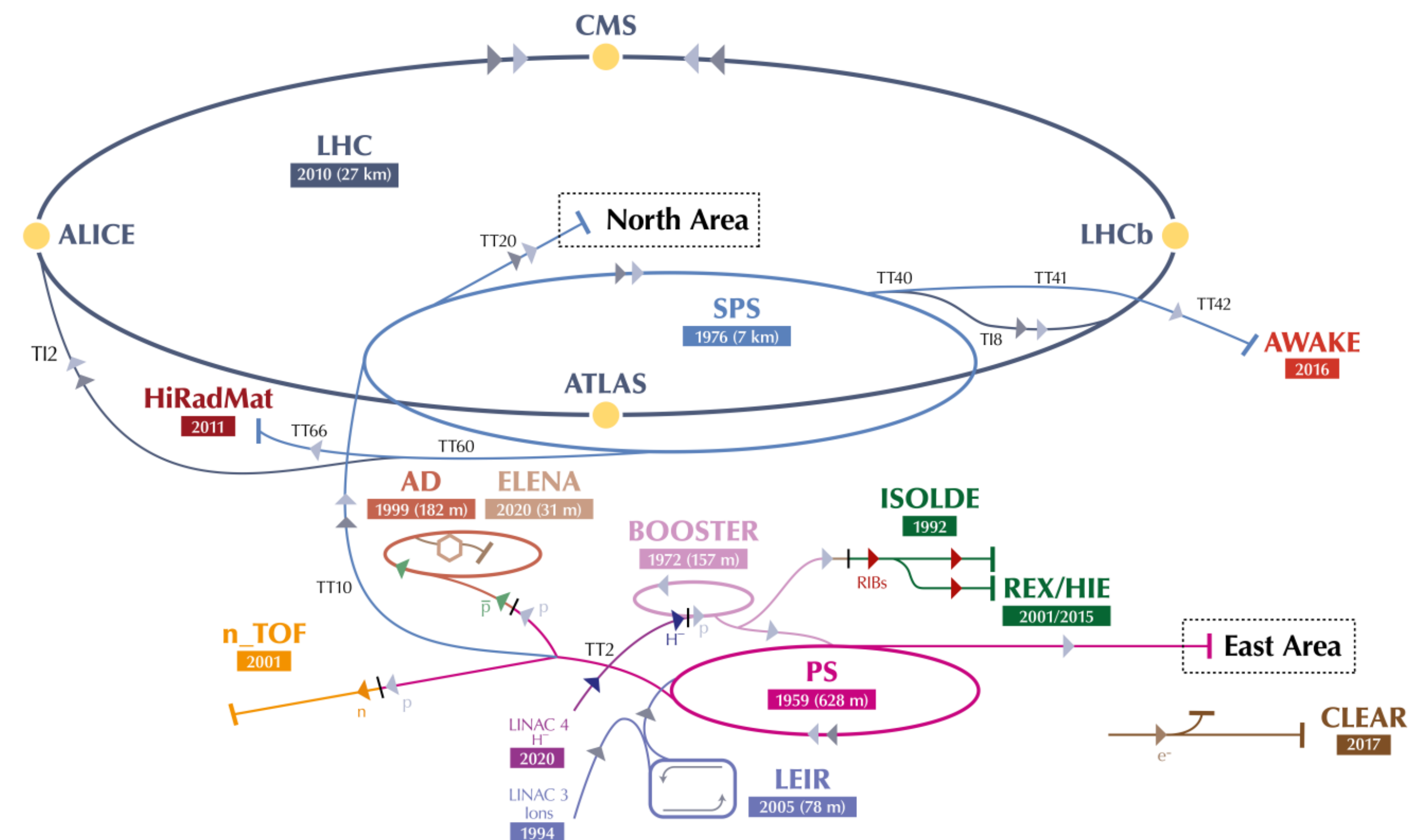
Se invece di accelerare un elettrone con 1000 Volt lo acceleriamo con **1 Miliardo di Volt** la sua lunghezza d'onda associata sarà più piccola delle dimensioni di un **NUCLEO** atomico.

**Quindi, se lo mandiamo a sbattere contro un bersaglio, sarà in grado di vedere i nuclei del bersaglio o addirittura quello che c'è al suo interno.**

**Questo è quello che si fa negli acceleratori di particelle**

Per dimostrare che la teoria sviluppata rispecchi la realtà, abbiamo bisogno di evidenze sperimentali!

Nel caso della fisica delle particelle sfruttiamo gli acceleratori di particelle.

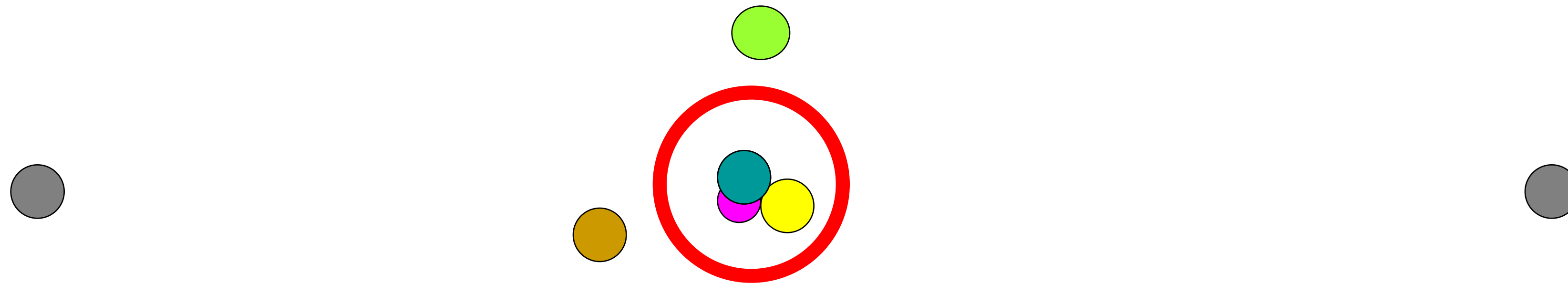




Cosa avviene concettualmente in un urto tra particelle ?

---

**Due protoni vengono fatti urtare fra loro ad altissima energia (accelerati da un acceleratore)**



**Quello che succede nell'urto avviene su scale spaziali piccolissime, tanto più piccole tanto maggiore è l'energia a cui avviene l'urto.**

**Lo studio dei prodotti della collisioni ci dà le informazioni per capire cosa è avvenuto nell'urto**

Negli urti ad alte energie fra particelle viene “creata” nuova materia, grazie alla relazione relativistica:

$$E = mc^2$$

L'energia **E** e la massa **m** sono **equivalenti** e, sotto opportune condizioni, **intercambiabili**.

**Una parte dell'energia cinetica iniziale dei proiettili si trasforma in materia dopo l'urto. Si assiste quindi alla “creazione” di nuove particelle, che non erano presenti prima dell'urto.**

In questo modo è possibile produrre particelle “pesanti” (più di 100 volte la massa del protone), che non esistono stabilmente in natura nella materia ordinaria, ma che possono essere prodotte in fenomeni naturali nei quali entra in gioco una altissima energia.

L’universo nei primi istanti di vita era estremamente caldo, e la materia era presente “disgregata” nei suoi componenti fondamentali.

Questo implica che la materia si “urtava” continuamente ad altissima energia.

Negli acceleratori di particelle si riproducono localmente le condizioni presenti nell’universo quando questo aveva 10 miliardesimi di secondo di vita

# Ma quindi come le vediamo??

---

Purtroppo **non possiamo vedere direttamente tutto** ciò che ci circonda.

**Però possiamo studiare ciò che vediamo per ricostruire cosa è successo** in precedenza!

**Che animale è  
passato da qui?**



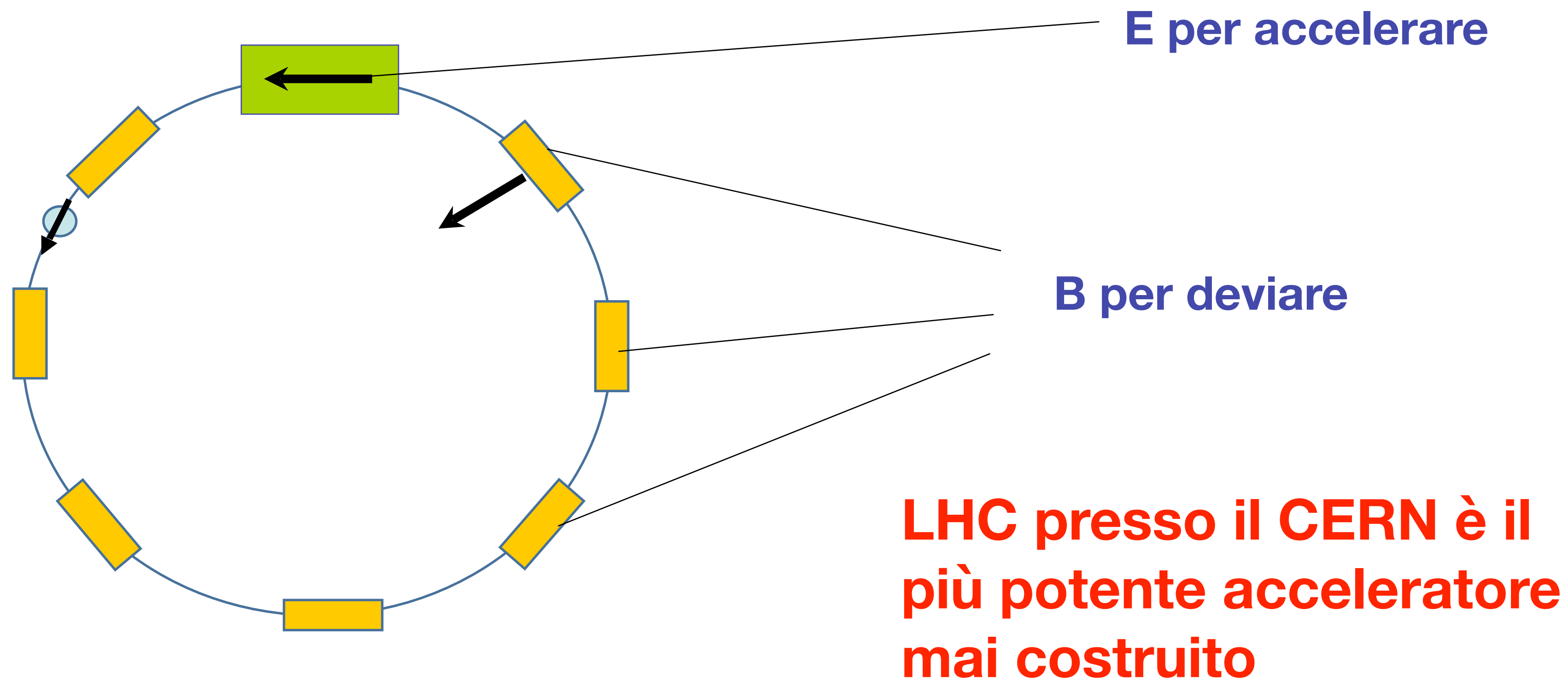
**Quale evento ha abbattuto  
questa foresta?**

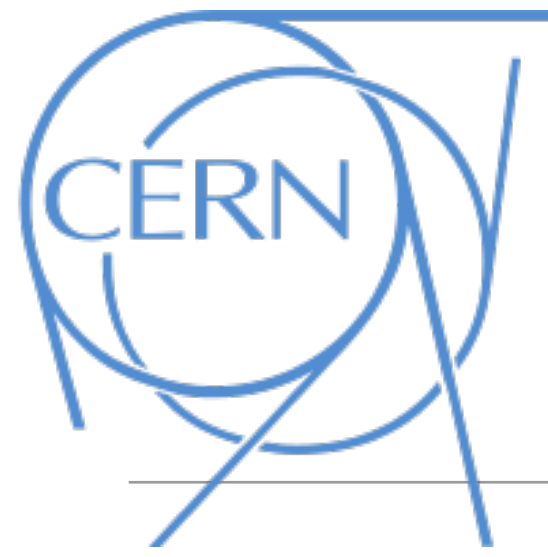
**Perché il mio cane ha mal di  
pancia?!?!**



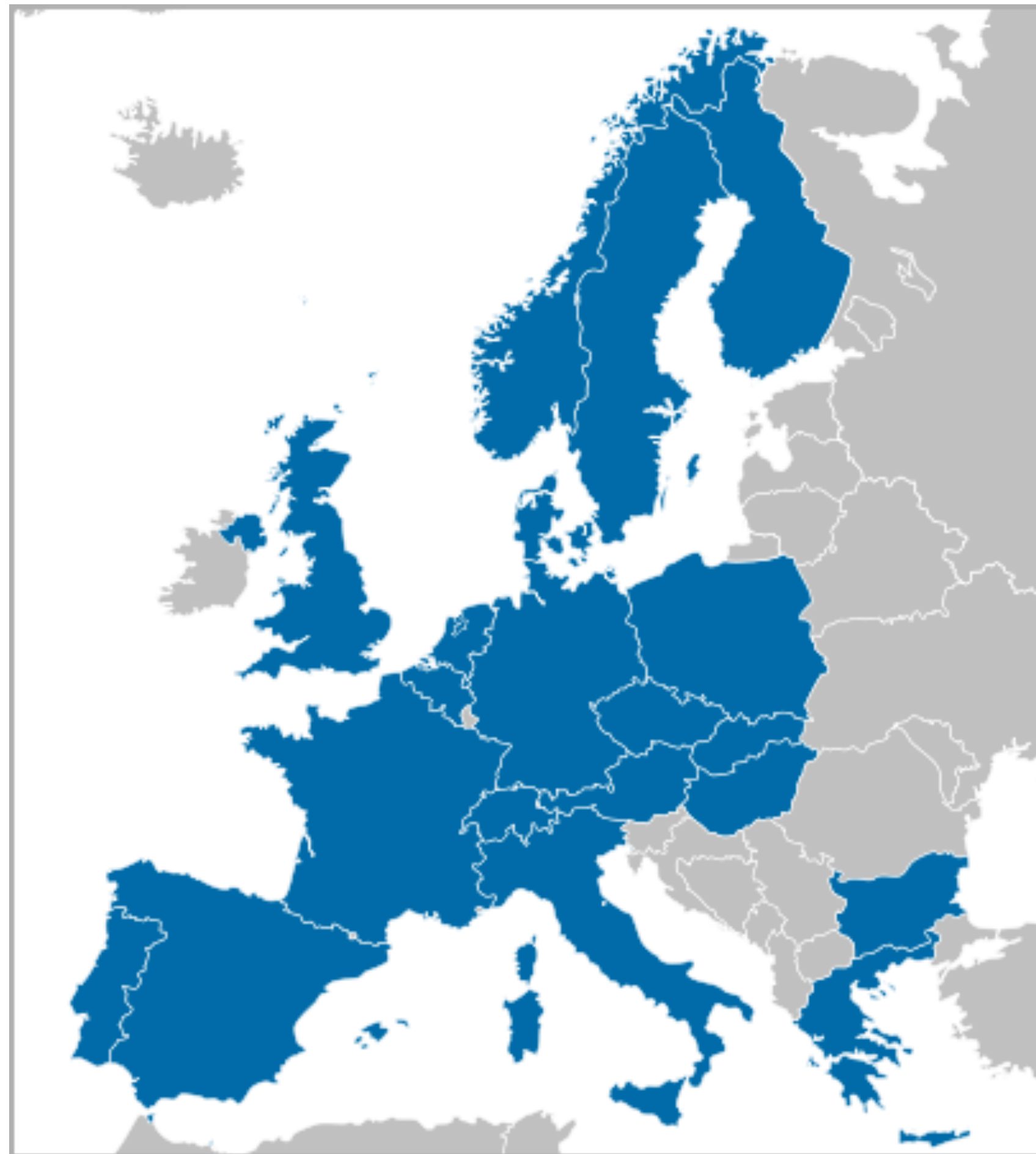
# Come funziona un acceleratore

- Le particelle sono guidate su orbite circolari per mezzo di campi magnetici e accelerate tramite campi elettrici





CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)  
è il più grande laboratorio di fisica delle particelle del mondo



~ 3000 dipendenti  
8000 ricercatori provenienti da  
più di 500 Istituzioni da  
80 paesi

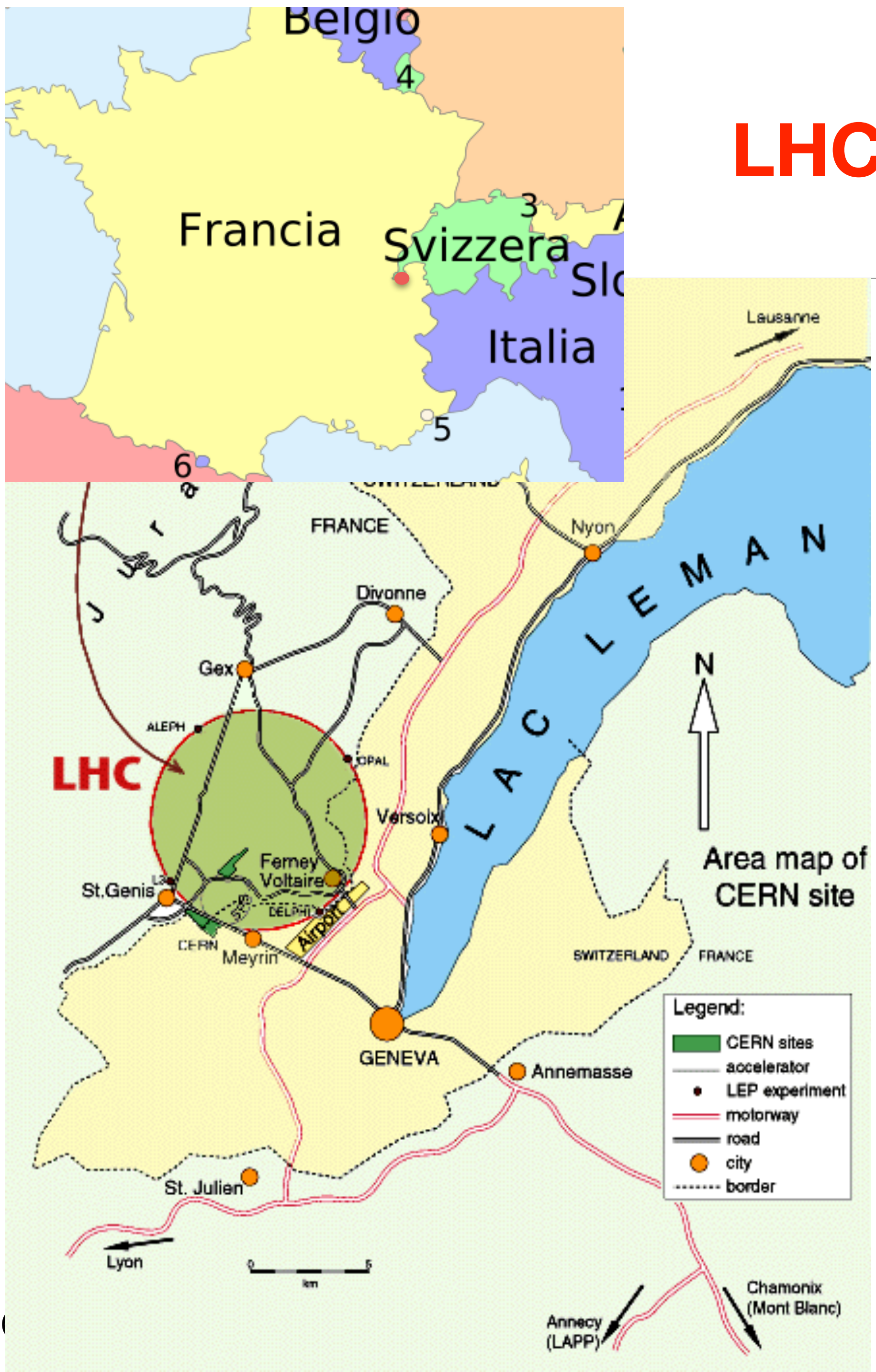
Istituito nel 1954 e supportato  
da 22 stati membri

Budget:  
600 milioni di euro per anno

**12% dall'Italia**

1,2 € l'anno<sub>46</sub> per cittadino italiano\*

# LHC (Large Hadron Collider)



Situato presso il CERN, nei dintorni di Ginevra al confine tra Francia e Svizzera.

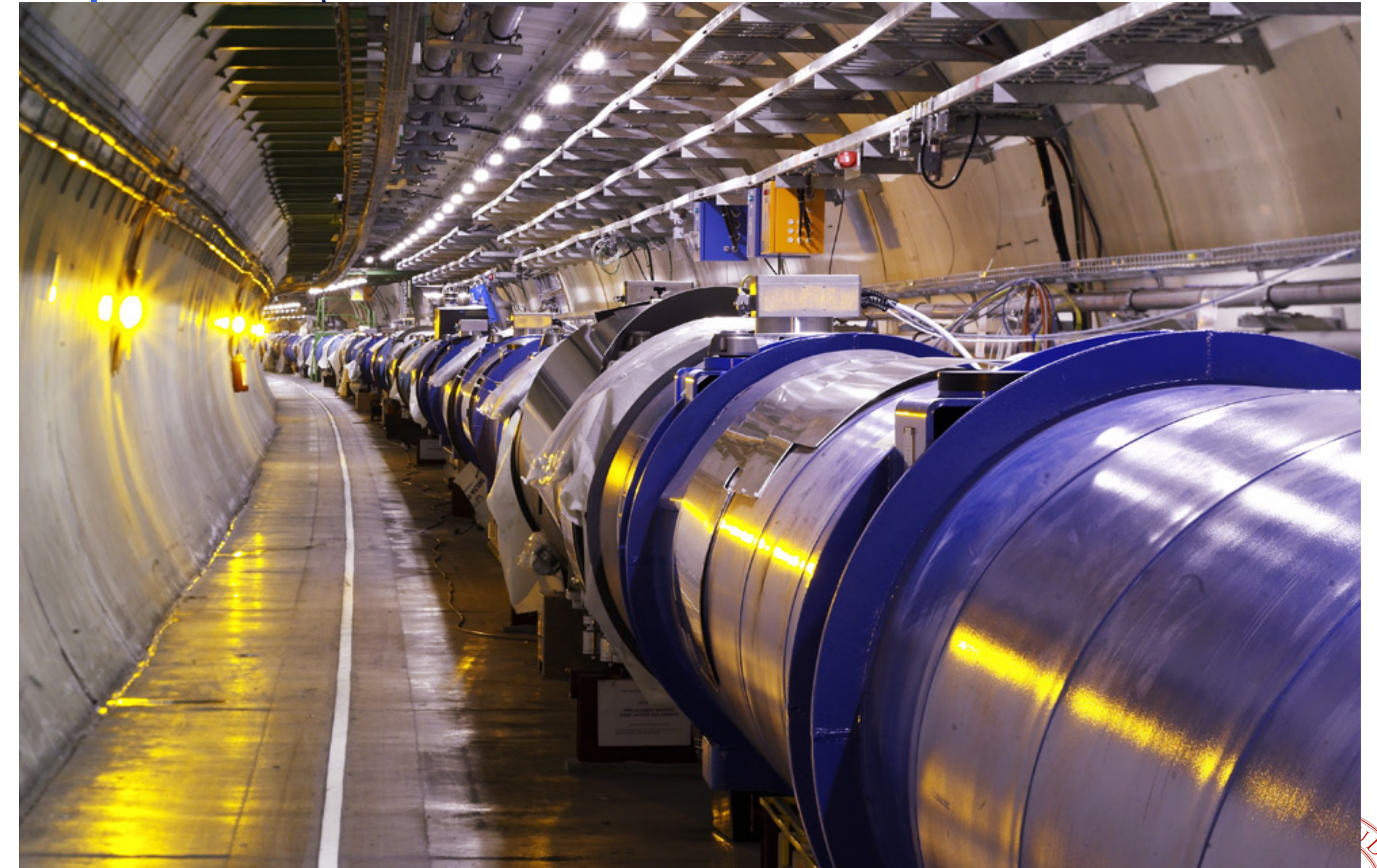
LHC con i suoi **27 chilometri** di circonferenza è il più grande acceleratore di particelle mai costruito al mondo.



# LHC (Large Hadron Collider)



- anello di **27 km**;
- circa **100 m** sotto terra;
- 8 settori da circa **4700 tonnellate** di materiale;
- **7 esperimenti** (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, TOTEM, MoEDAL)

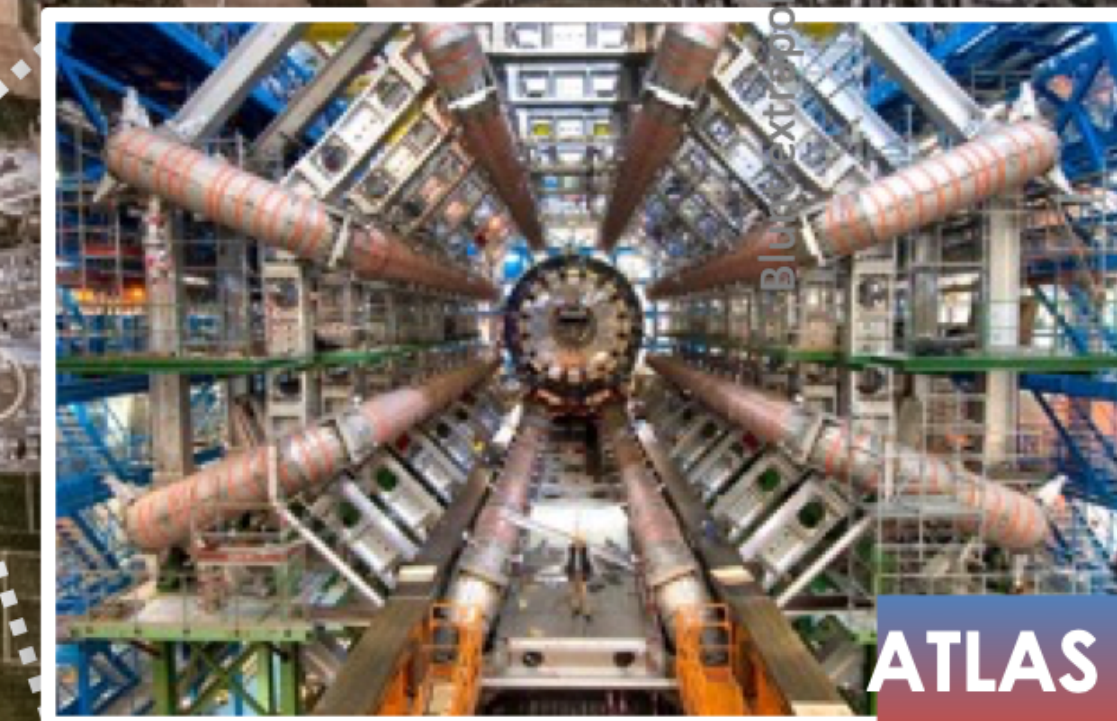


- **1.8 K (-271.3°C)**, nello Spazio 2.7 K (-270.5°C):
- negli **urti tra protoni** si raggiunge una temperatura circa **100000 volte quella del Sole** (~20 milioni°C)!
- In ogni fascio: **2808 pacchetti** (~ $10^{11}$  protoni).

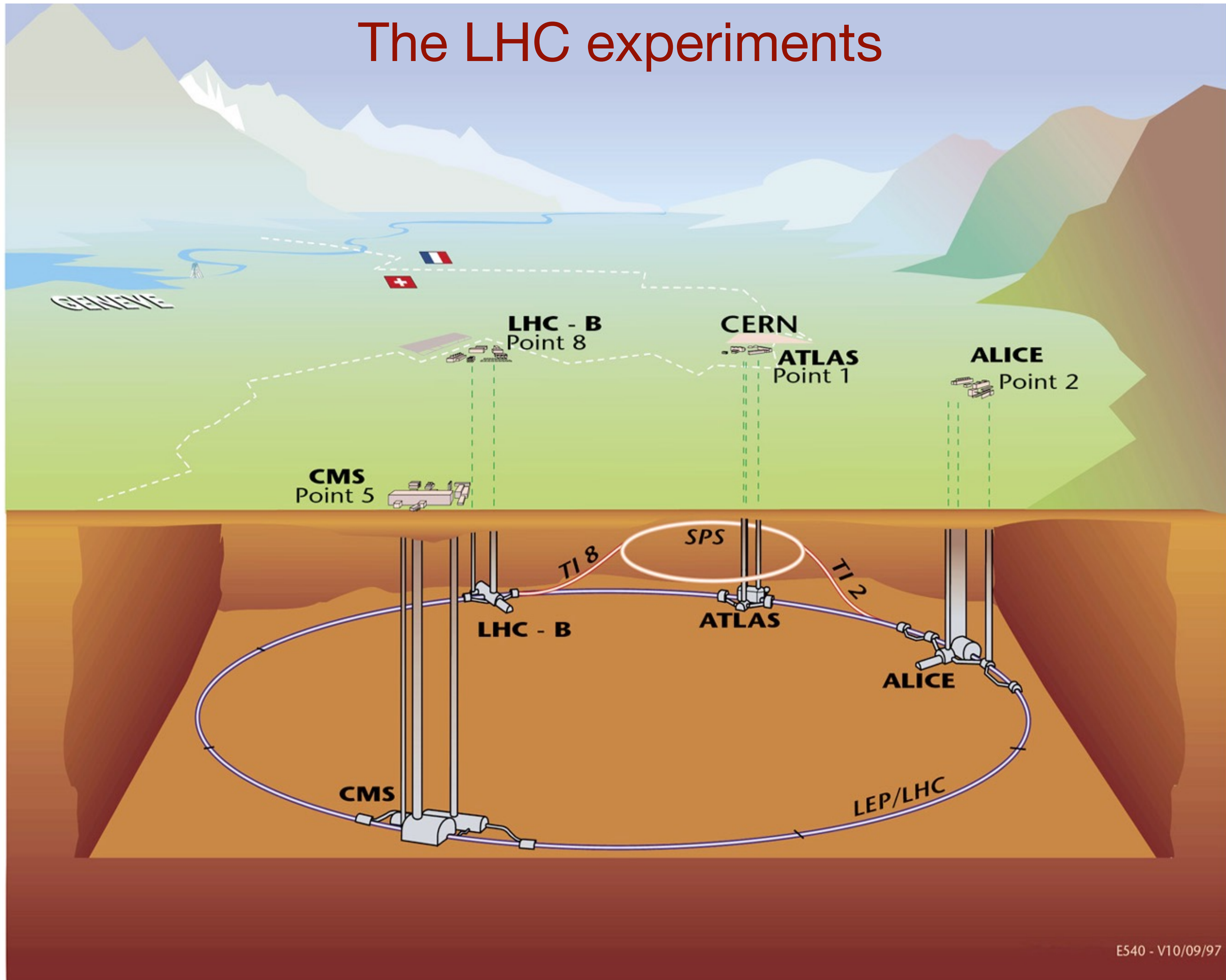


# LHC, Large Hadron Collider

2010-2012 : proton-proton collisions at 7 and 8 TeV  
since 2015: proton-proton at 13 TeV



# The LHC experiments



# Come vediamo oggetti invisibili?

---

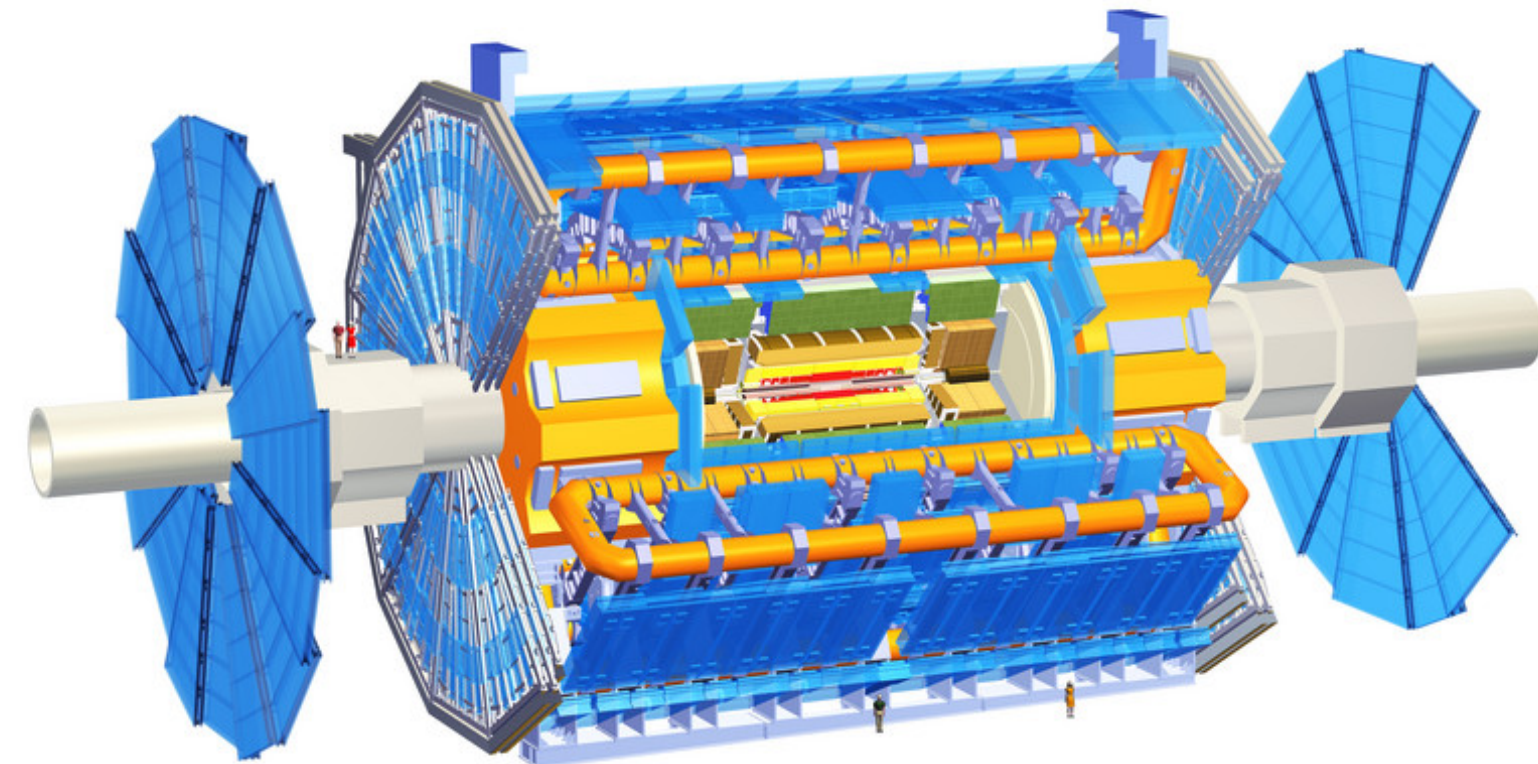


Andare alla ricerca di nuove particelle è come seguire le **orme sulla sabbia**.

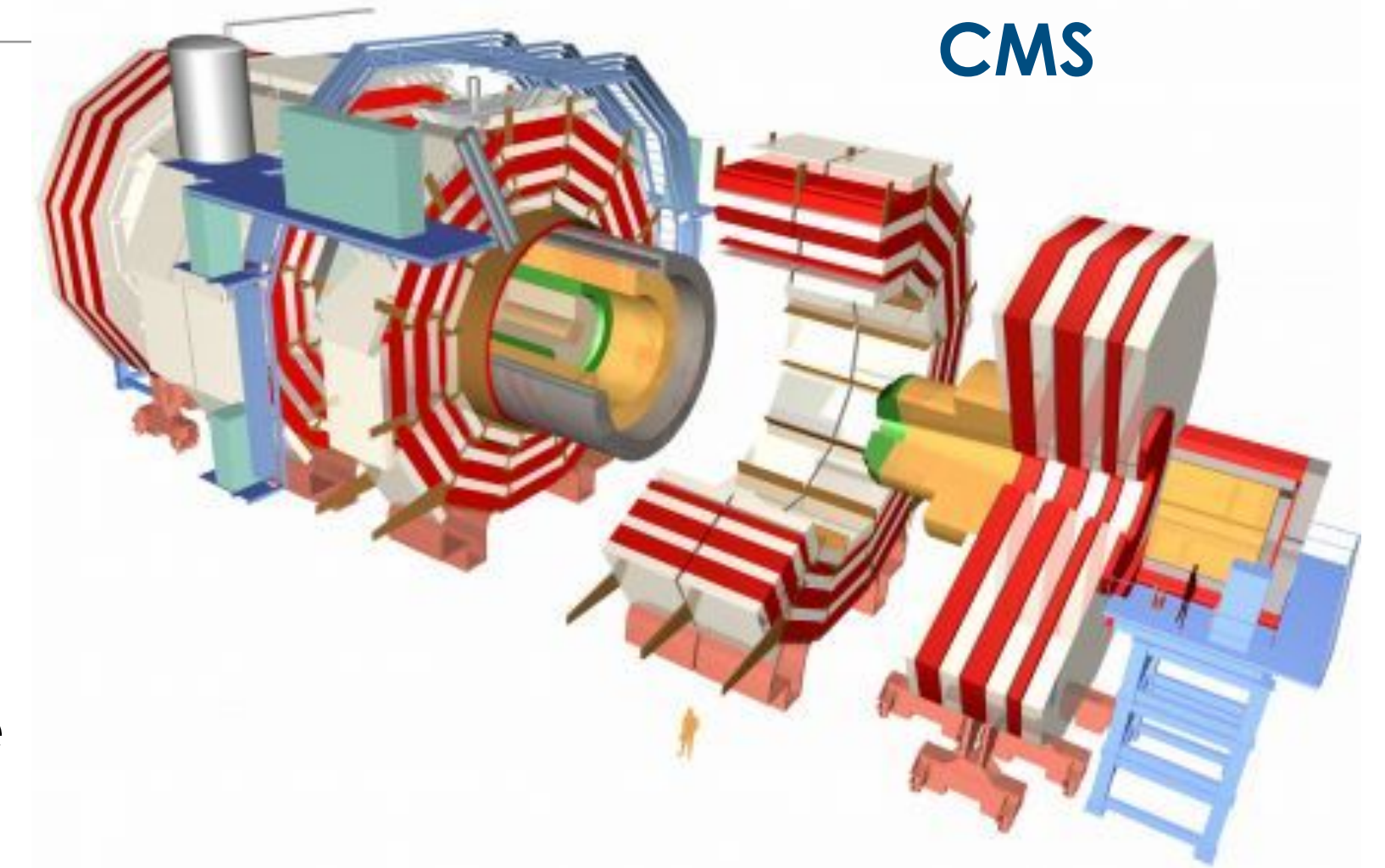
Anziché cercare direttamente le particelle, noi guardiamo le tracce che lasciano nel **rivelatore**.

Si studiano gli effetti che il passaggio delle particelle hanno nella materia.

# Come vediamo oggetti invisibili?

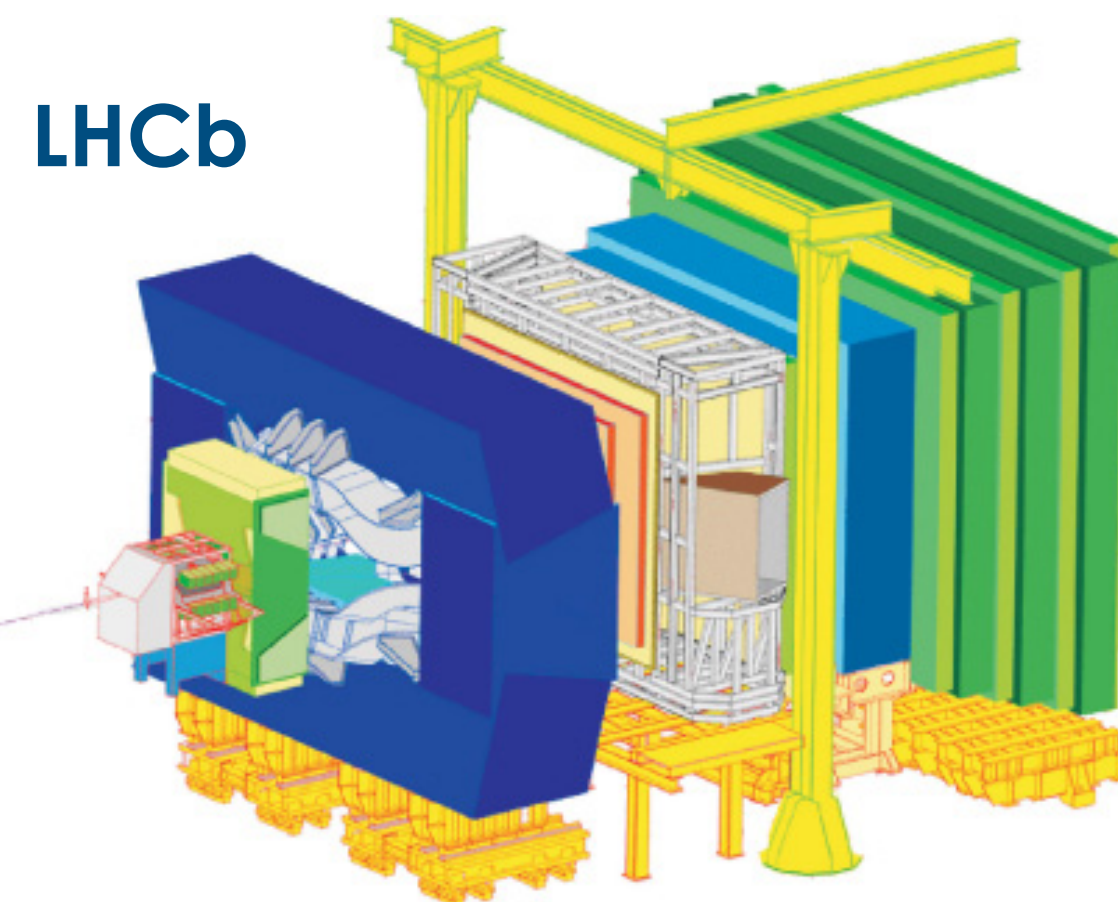


ATLAS

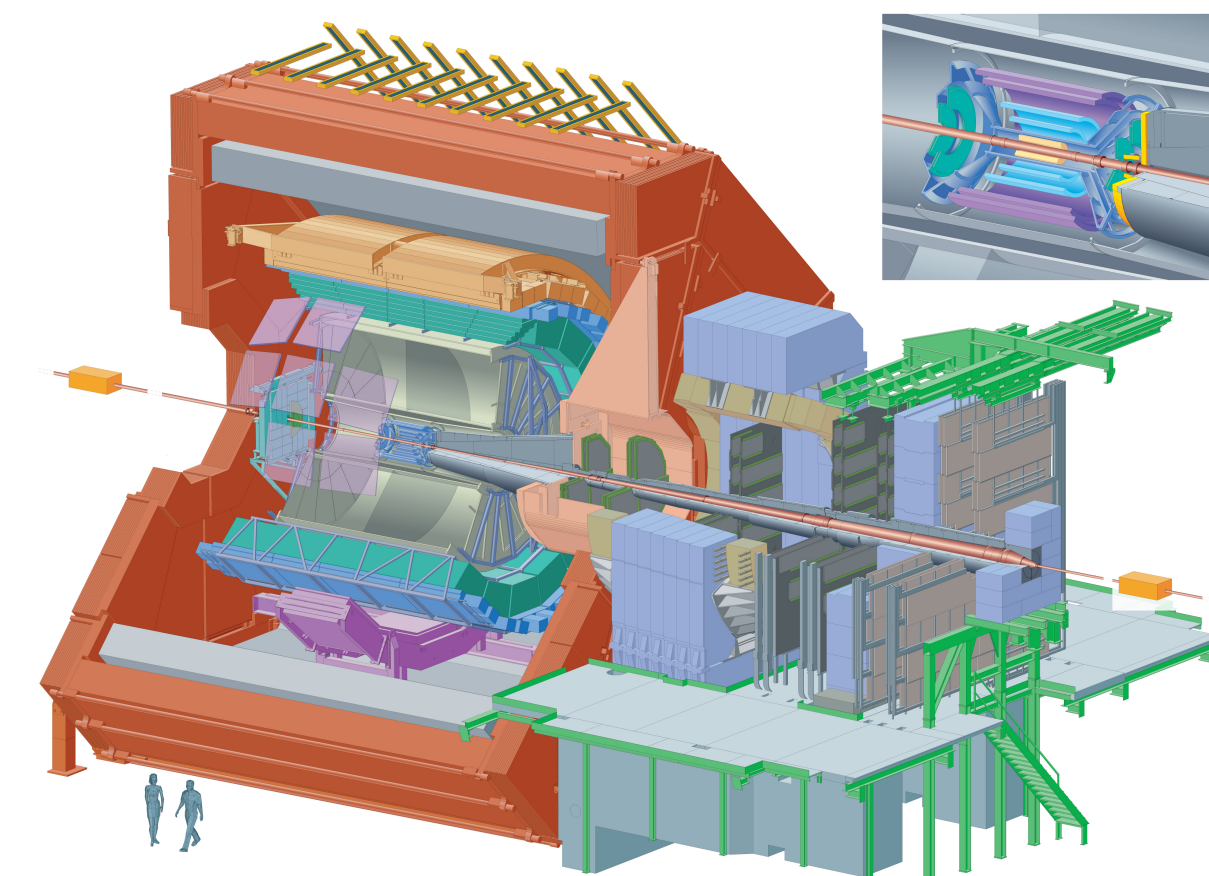


CMS

**Blocchi di materiale** con cui le  
**particelle interagiscono**  
producendo **effetti misurabili**  
(rilascio di cariche libere in zone ben definite)



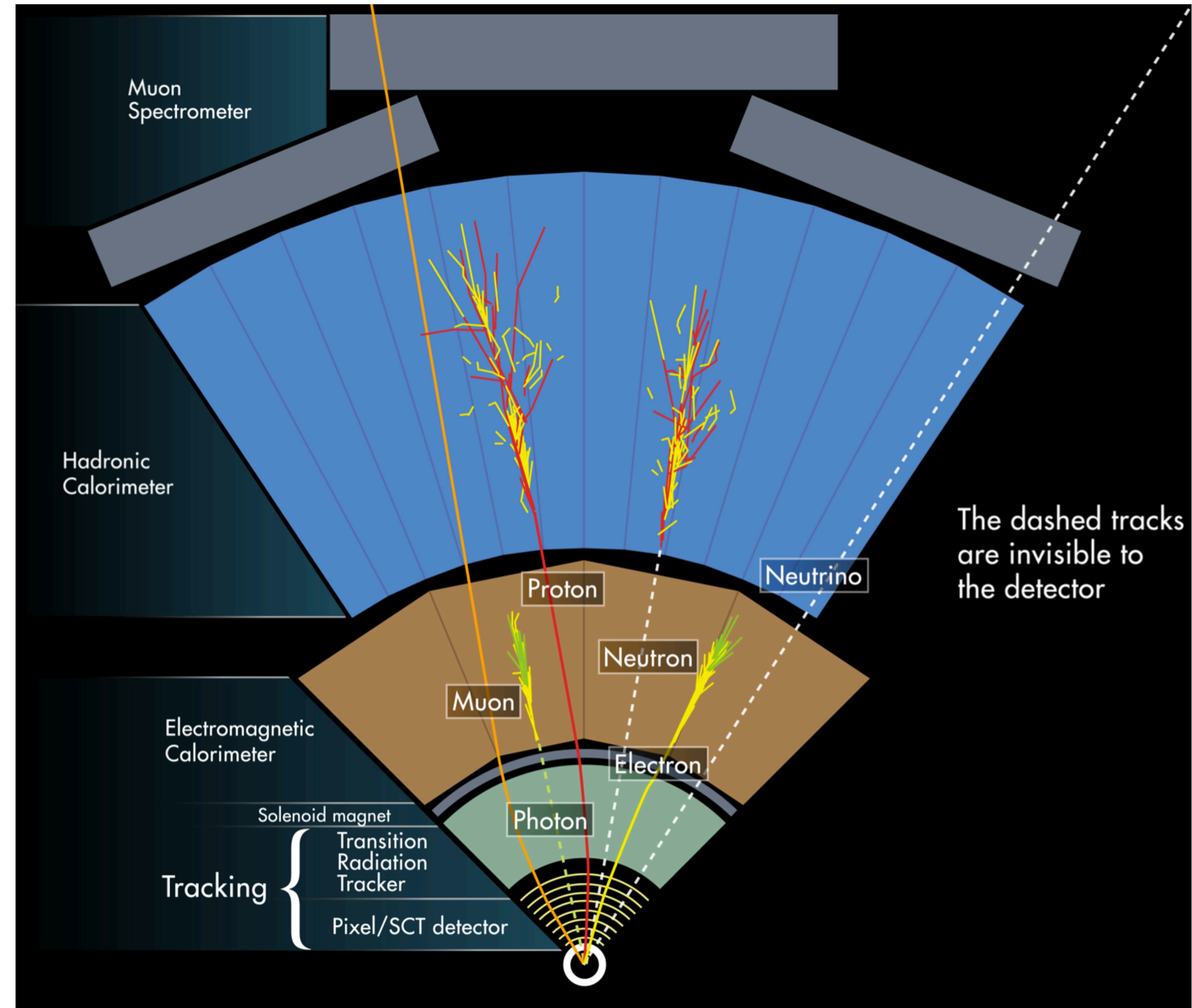
LHCb



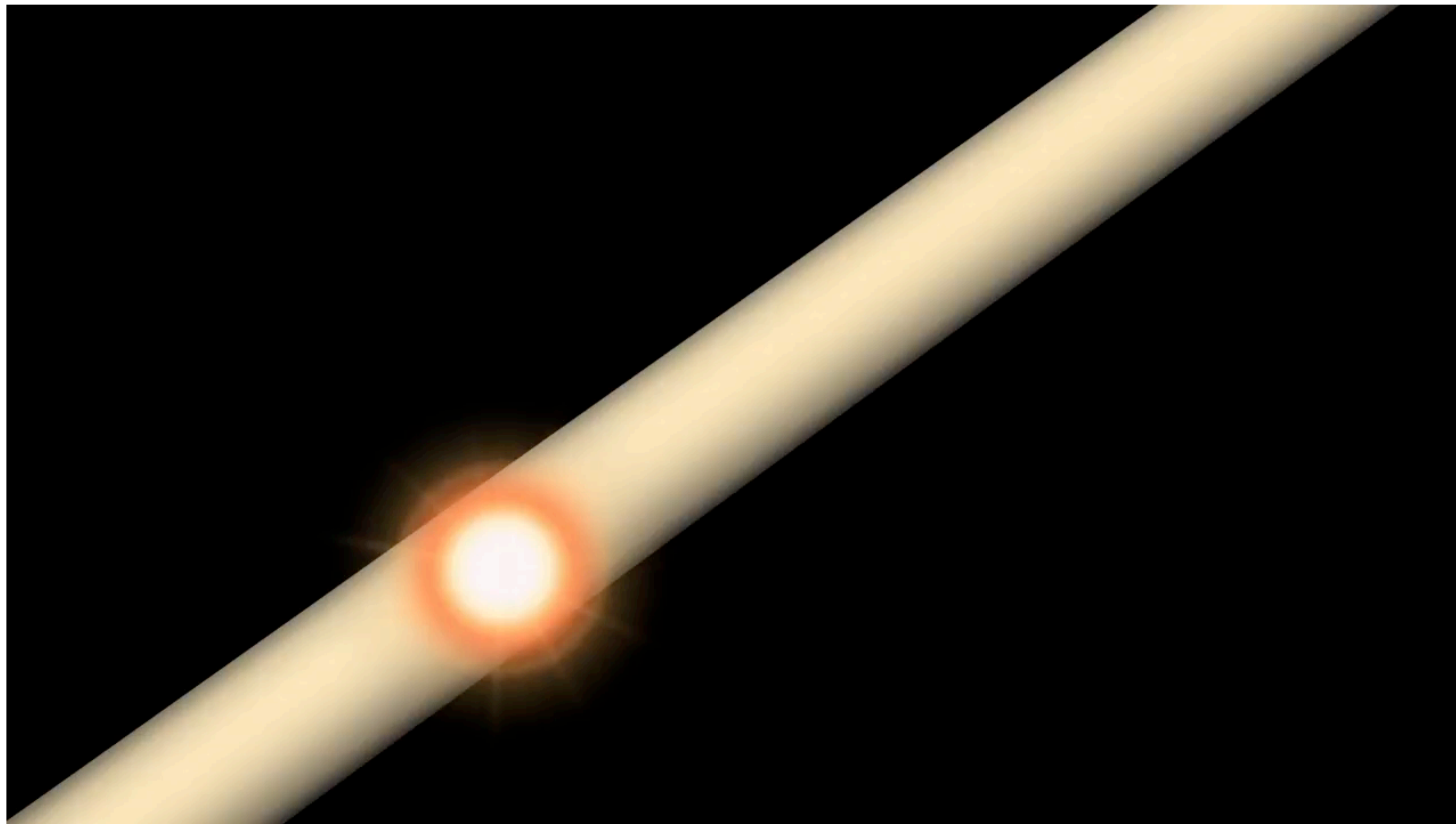
ALICE

# Come vediamo oggetti invisibili?

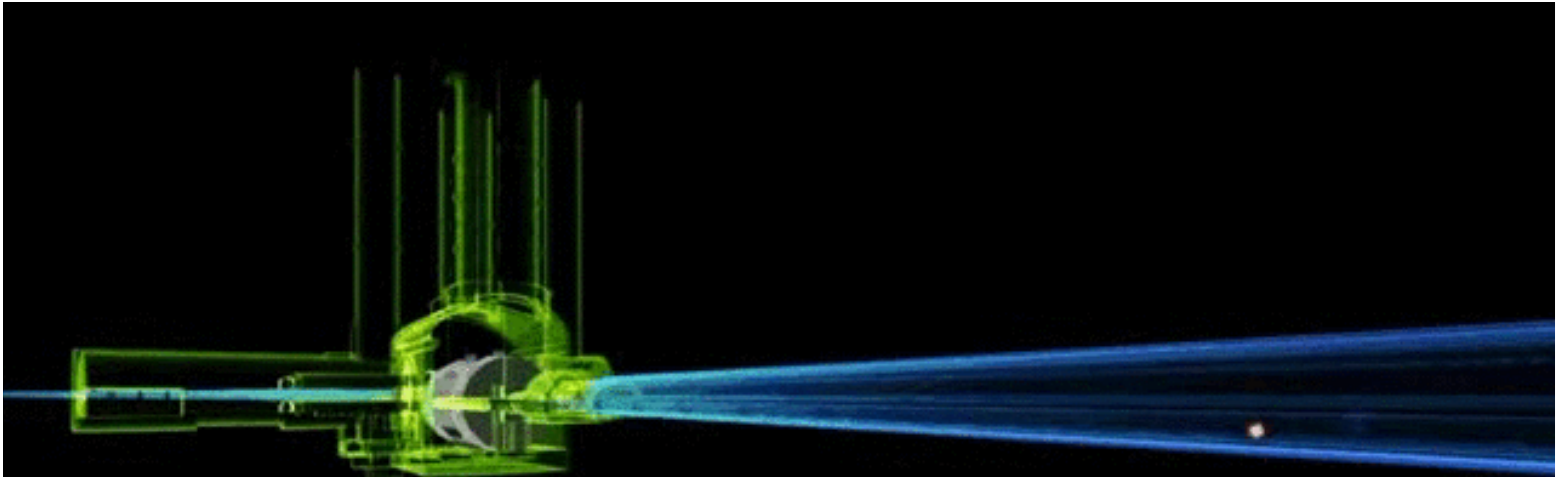
## ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



# Per riassumere ...

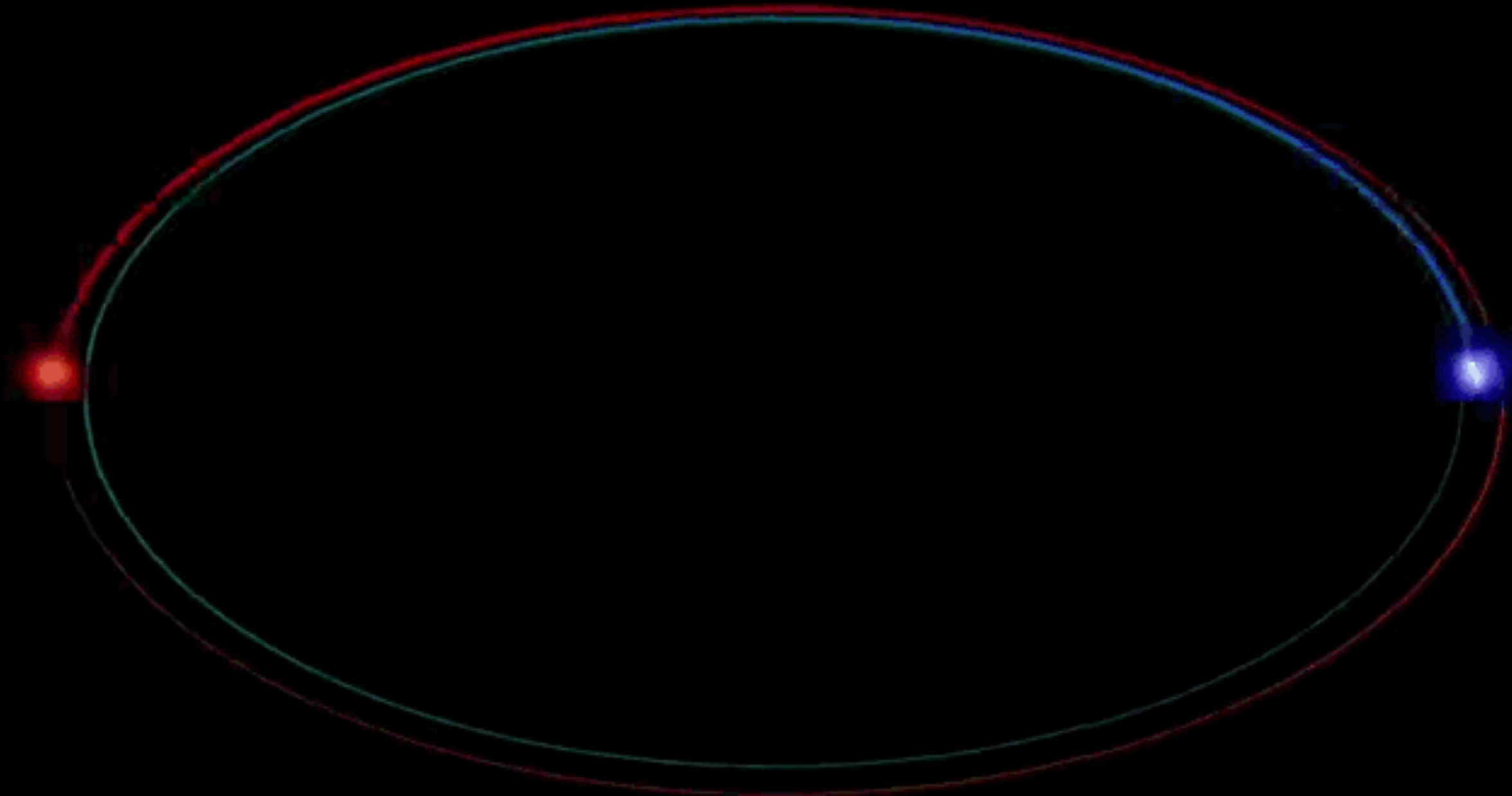


# Interazione tra particelle



# LHC - Dare energia alle particelle

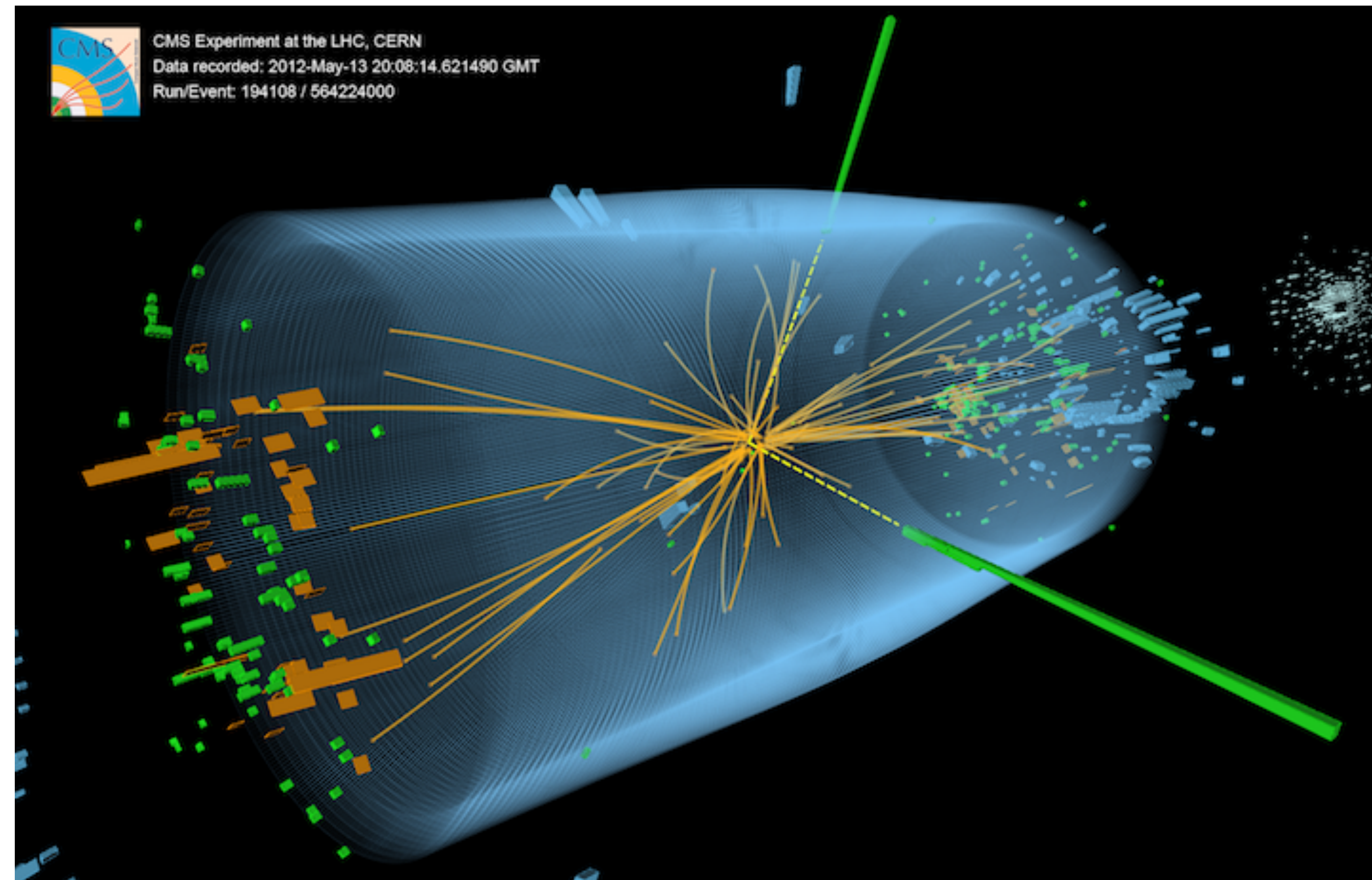
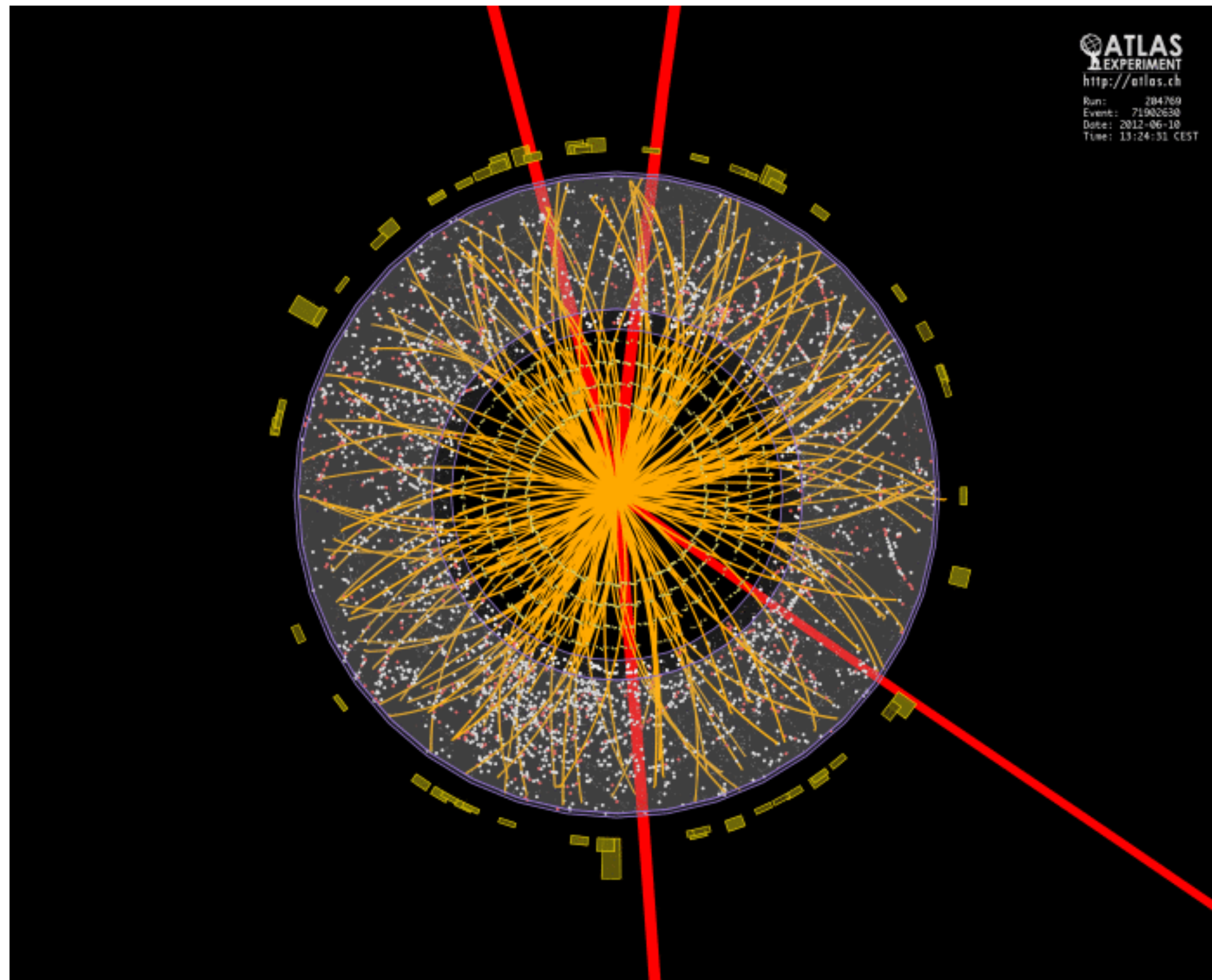
**Due fasci di particelle (protoni) vengono immessi nell'acceleratore e fatti girare, in senso diverso, più e più volte fino a raggiungere il 99.99% della velocità della luce!!**



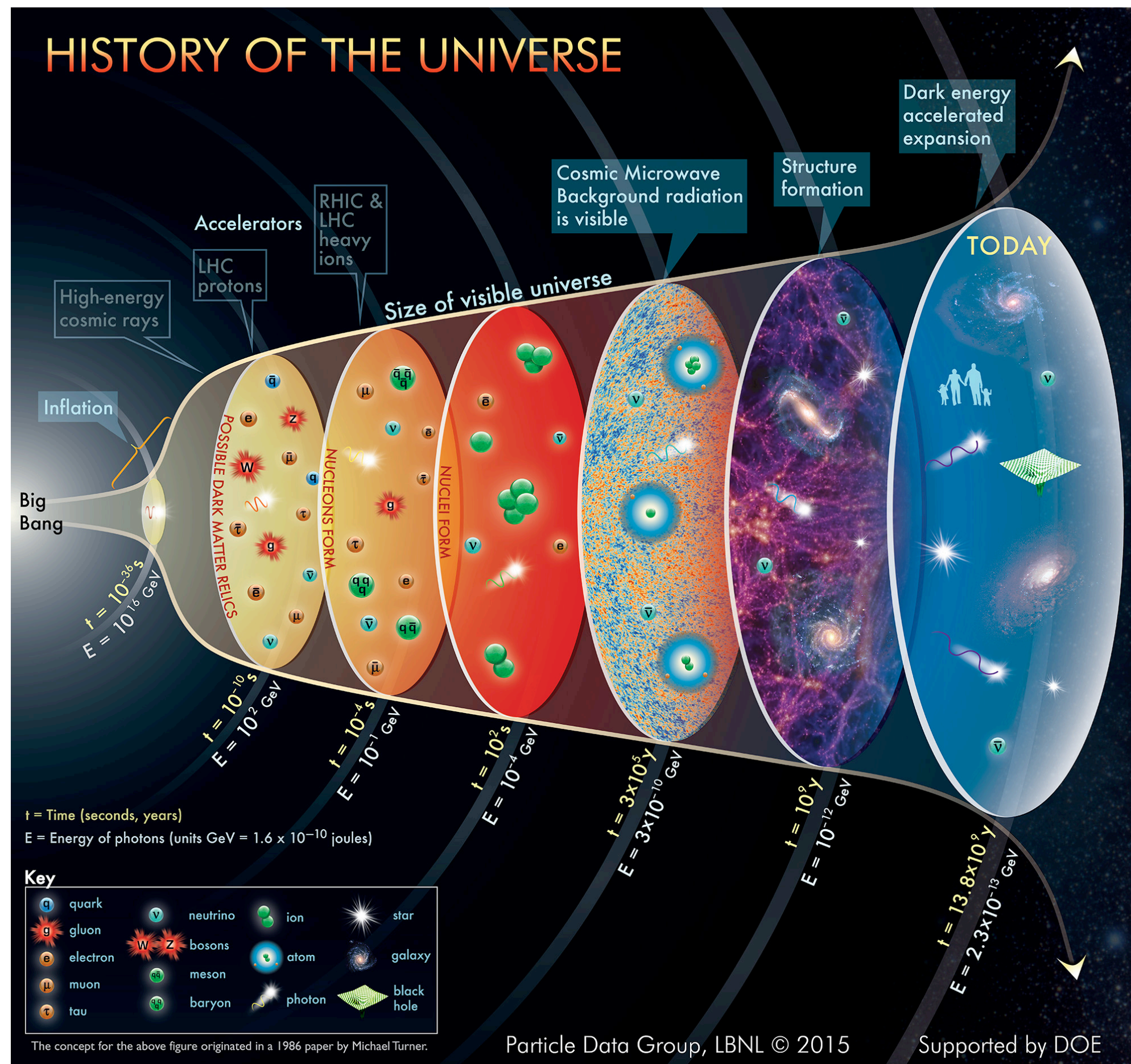


# Le orme del bosone di Higgs

scoperta di una particella compatibile con il bosone di Higgs, la cui massa risulta intorno ai 126,5 GeV per ATLAS e ai 125,3 GeV per CMS.

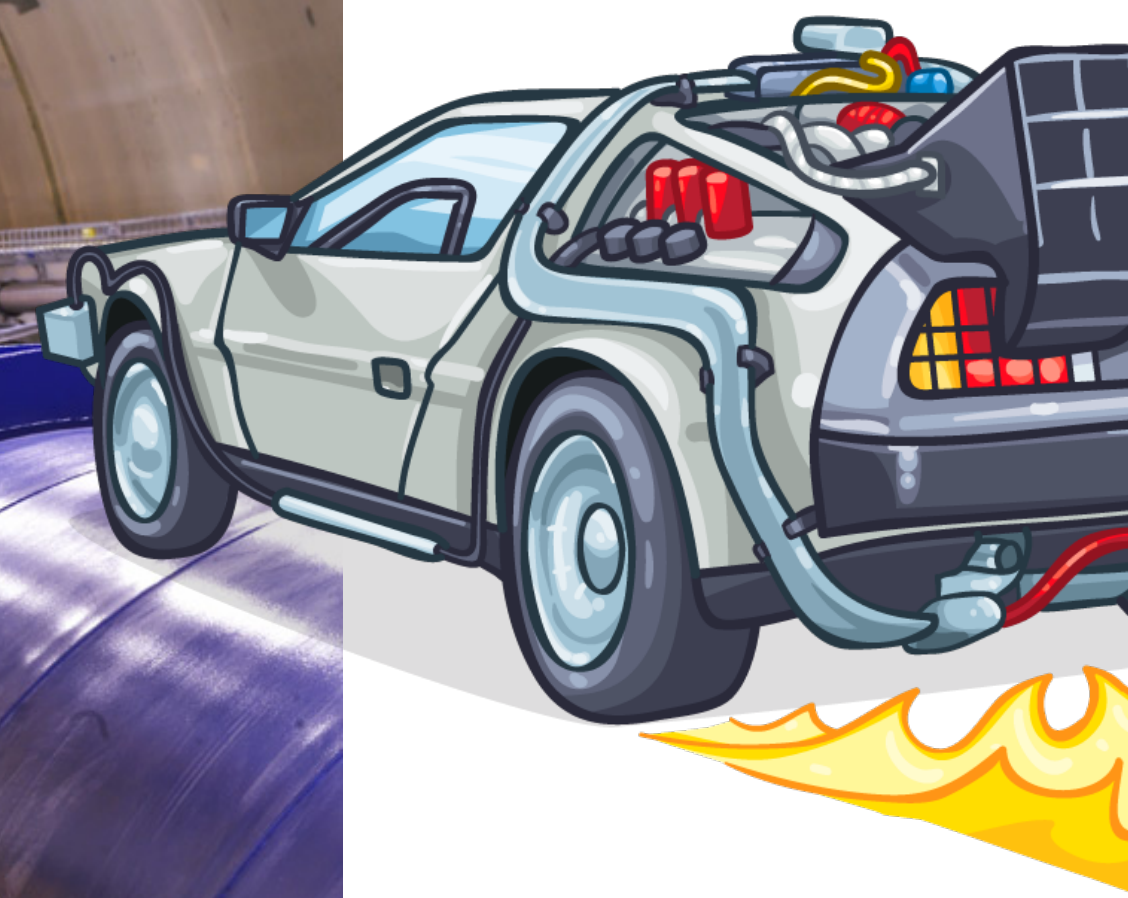


# LHC - Una “macchina del tempo”



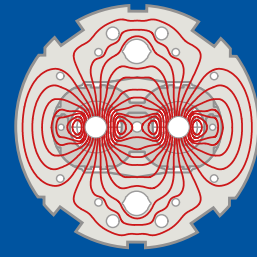
Con **LHC** si vuole capire la nascita e l'evoluzione dell'Universo.

Bisogna riprodurre le condizioni dell'Universo un infinitesimo dopo il Big Bang: ci serve una grande densità di energia fondamentale!

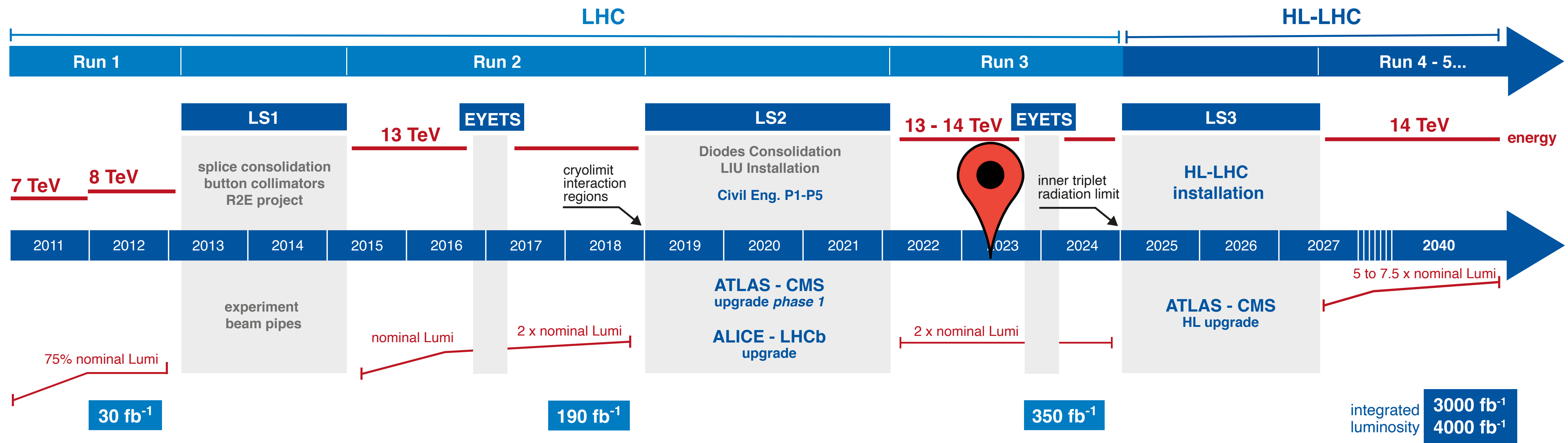


# CERN Grid Computing - Tier1

# Il futuro di LHC



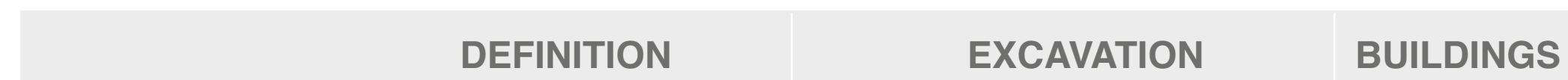
## LHC / HL-LHC Plan



### HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:



### HL-LHC CIVIL ENGINEERING:



Giuseppe Carratta

Leggero ritardo previsto per via della pandemia Covid-19.



---

# BACKUP