The background of the title section is a complex, abstract graphic. It features a network of glowing green and blue lines and circles, resembling a particle detector or a complex mathematical structure. Some elements are labeled with mathematical symbols like  $\pi$  and  $z(2, 2)$ , and  $z(1, 1, 2)$ .

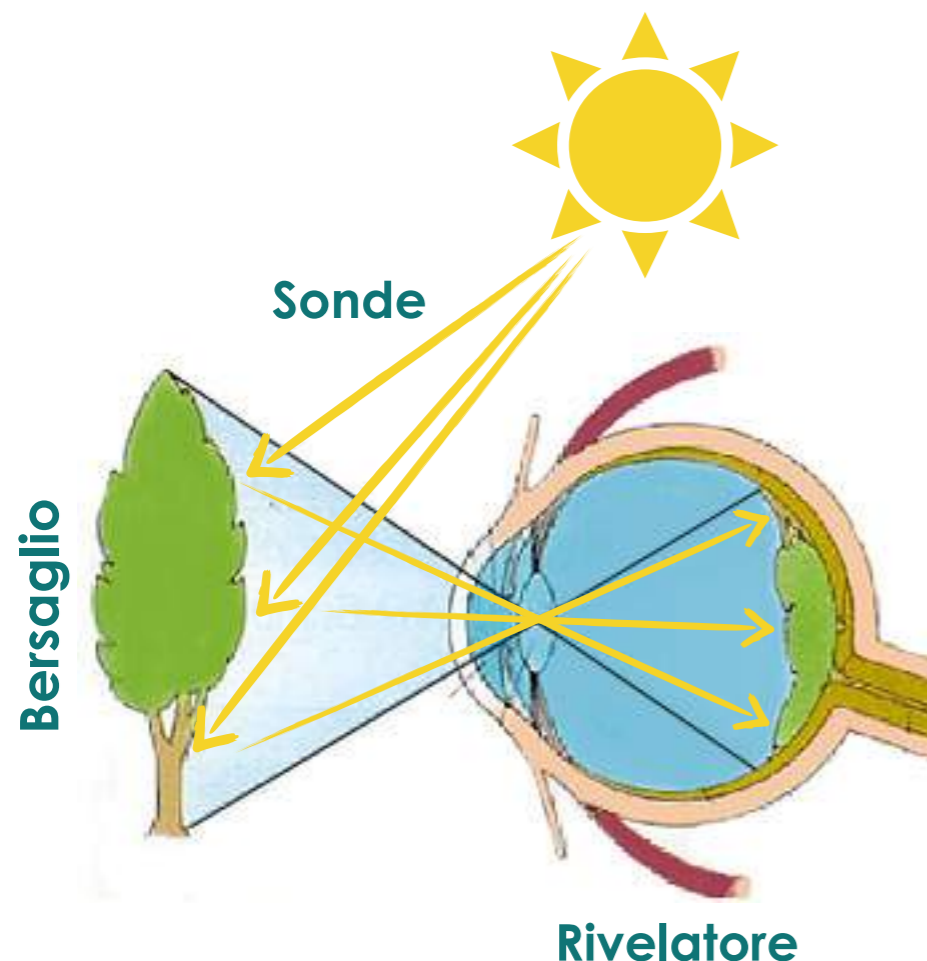
# International MasterClasses 2019: Rivelazione di particelle

**Silvia Biondi** - University & INFN of Bologna

---

Un'iniziativa **IPPOG** (International Particle-Physics Outreach Group)  
con la partecipazione della sezione INFN di Bologna





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!**



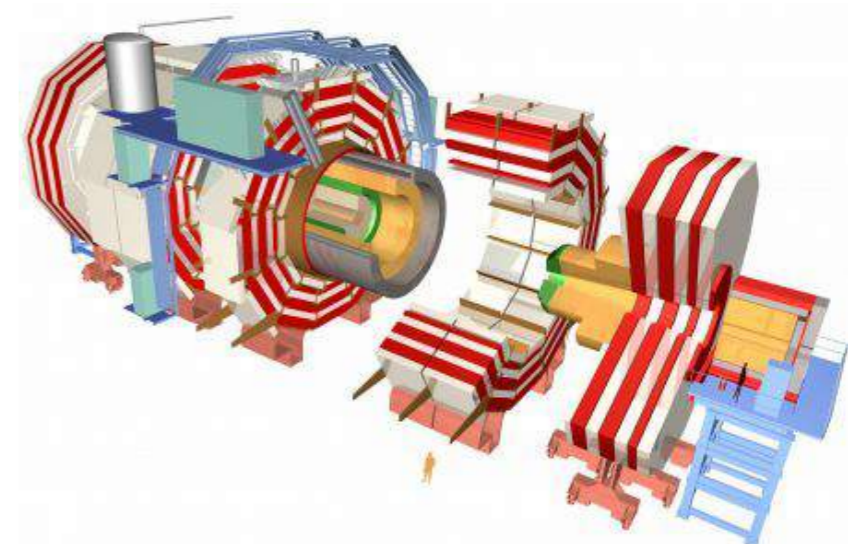
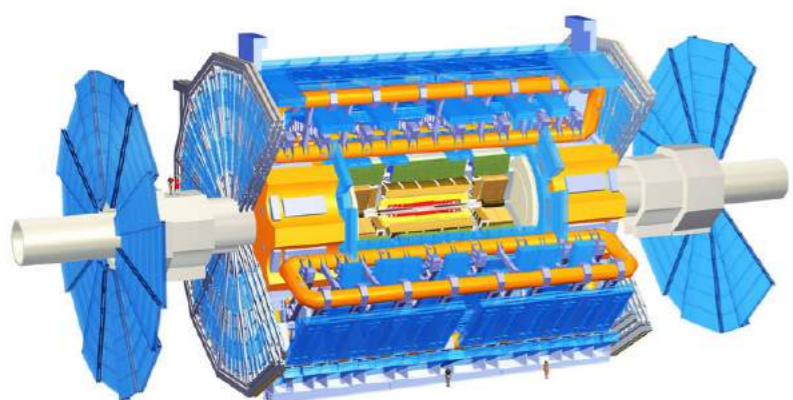
(i pipistrelli usano come “sonde” le onde sonore)



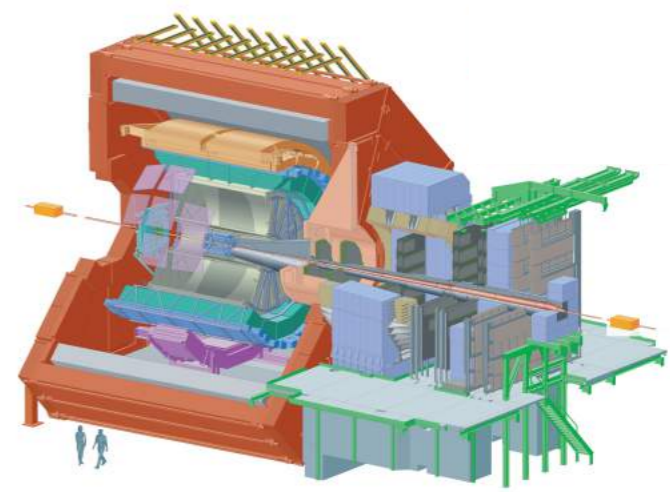
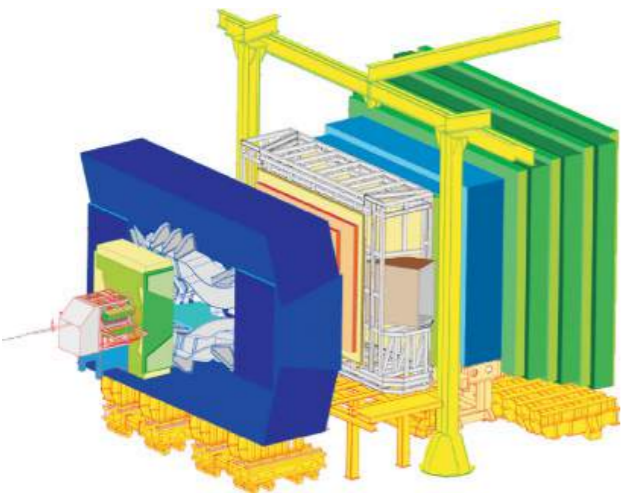




# “Vedere” con i rivelatori di particelle



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





# Ingrandimento $\neq$ risoluzione

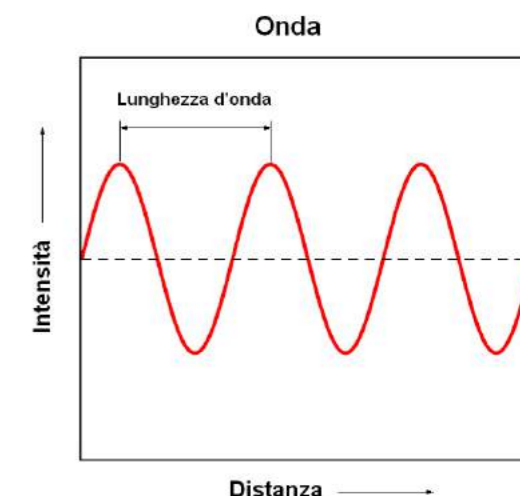




La capacità di distinguere due punti il più possibile vicini tra loro.

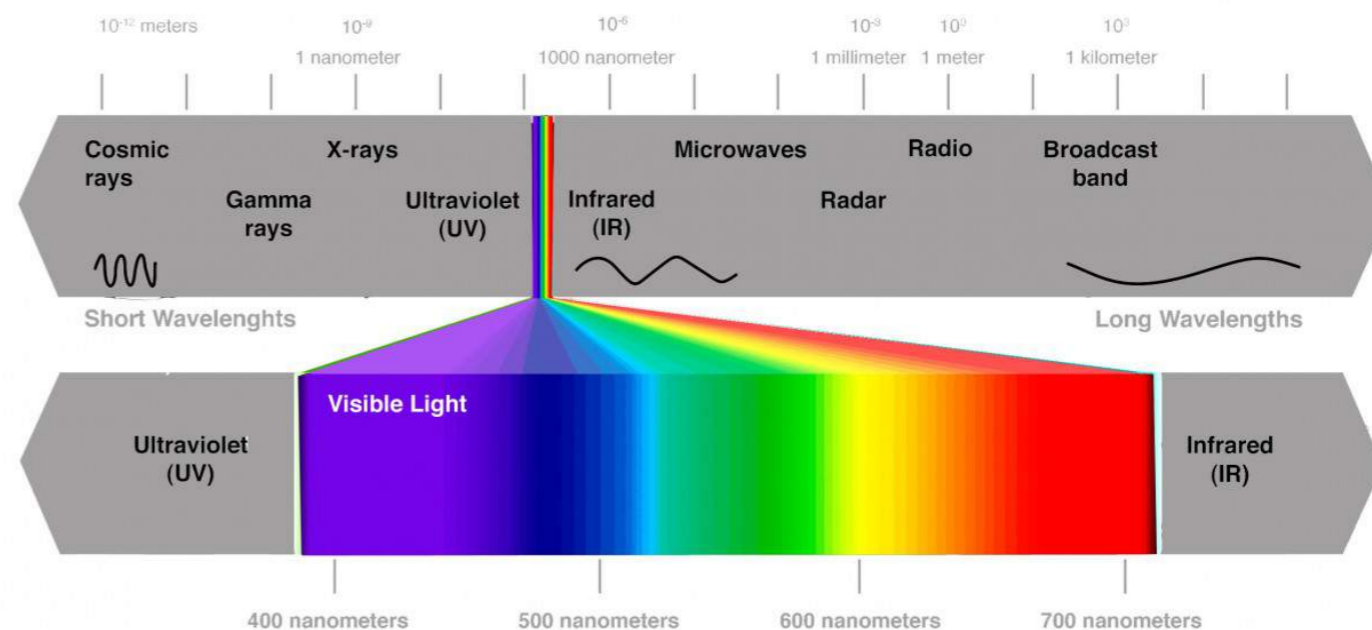
I rivelatori sono limitati dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  della "sonda" che utilizzano per "vedere".

$$\text{risoluzione} \propto \frac{1}{\lambda}$$



Microscopio ottico limitato dalla lunghezza d'onda della luce visibile.

~ 0.2  $\mu\text{m}$



Microscopio elettronico usa fascio di elettroni per "vedere", invece dei fotoni.

~ 0.1 nm

**NB!**

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$$

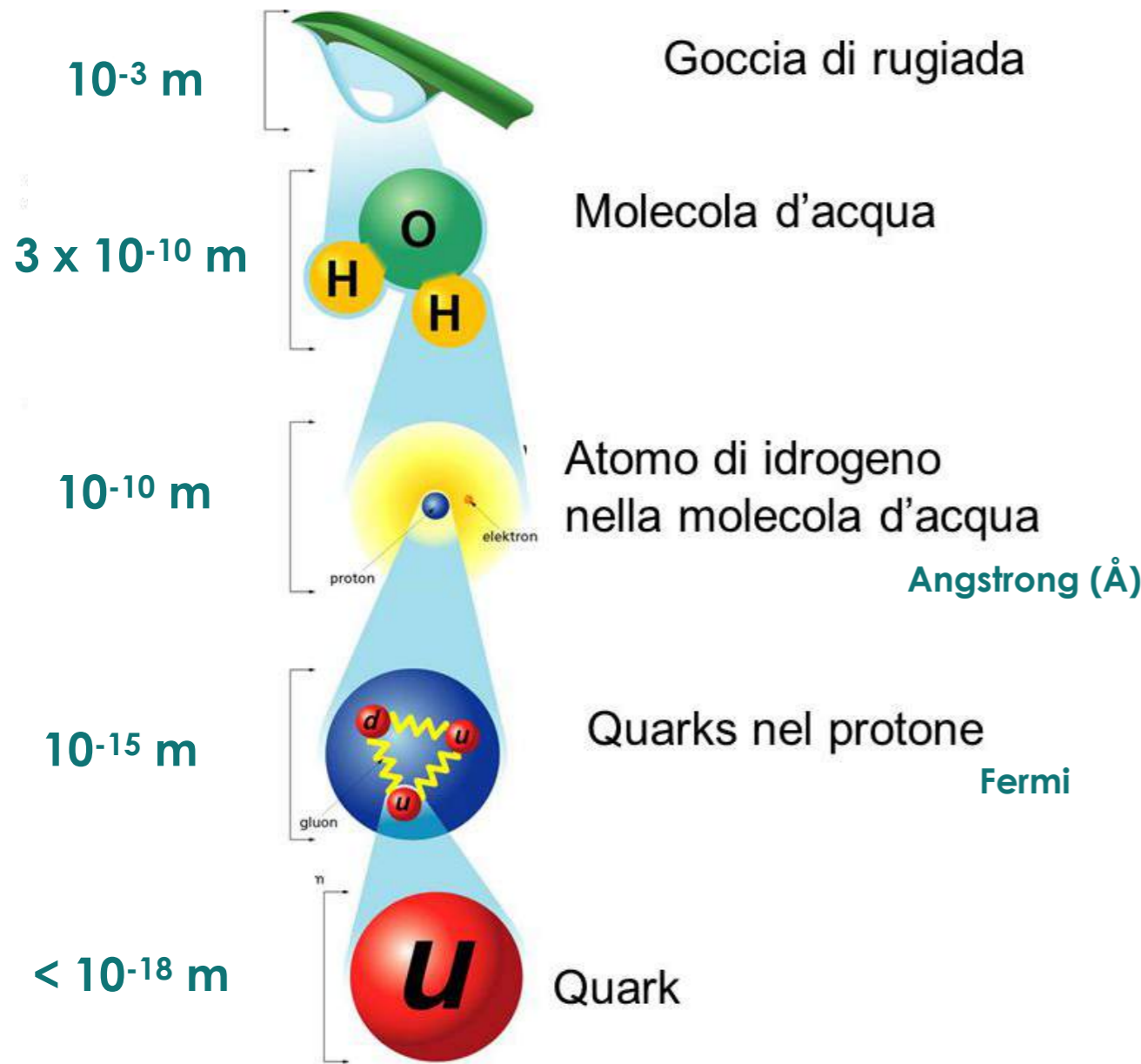
$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$



Nel mondo dei quanti:

$$\lambda \propto \frac{1}{p}$$

$p$  = quantità di moto ( $m \times v$ )

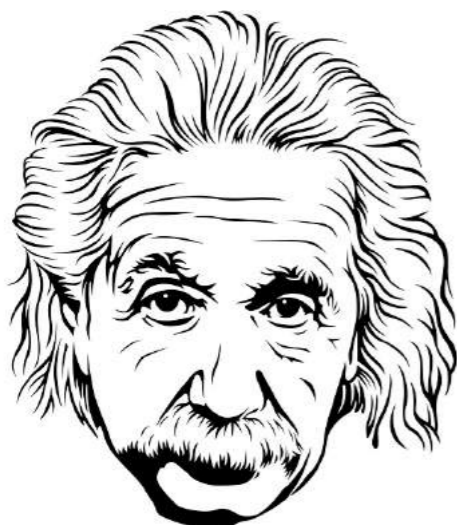


Particelle relativistiche con energia dell'ordine di **1 GeV** (un miliardo di eV) hanno lunghezza d'onda di de Broglie dell'ordine di **1 Fermi**.

**NB!**

**1 eV** = energia guadagnata o persa da una carica elementare che si sposta nel vuoto tra due punti con differenza di potenziale di 1 Volt

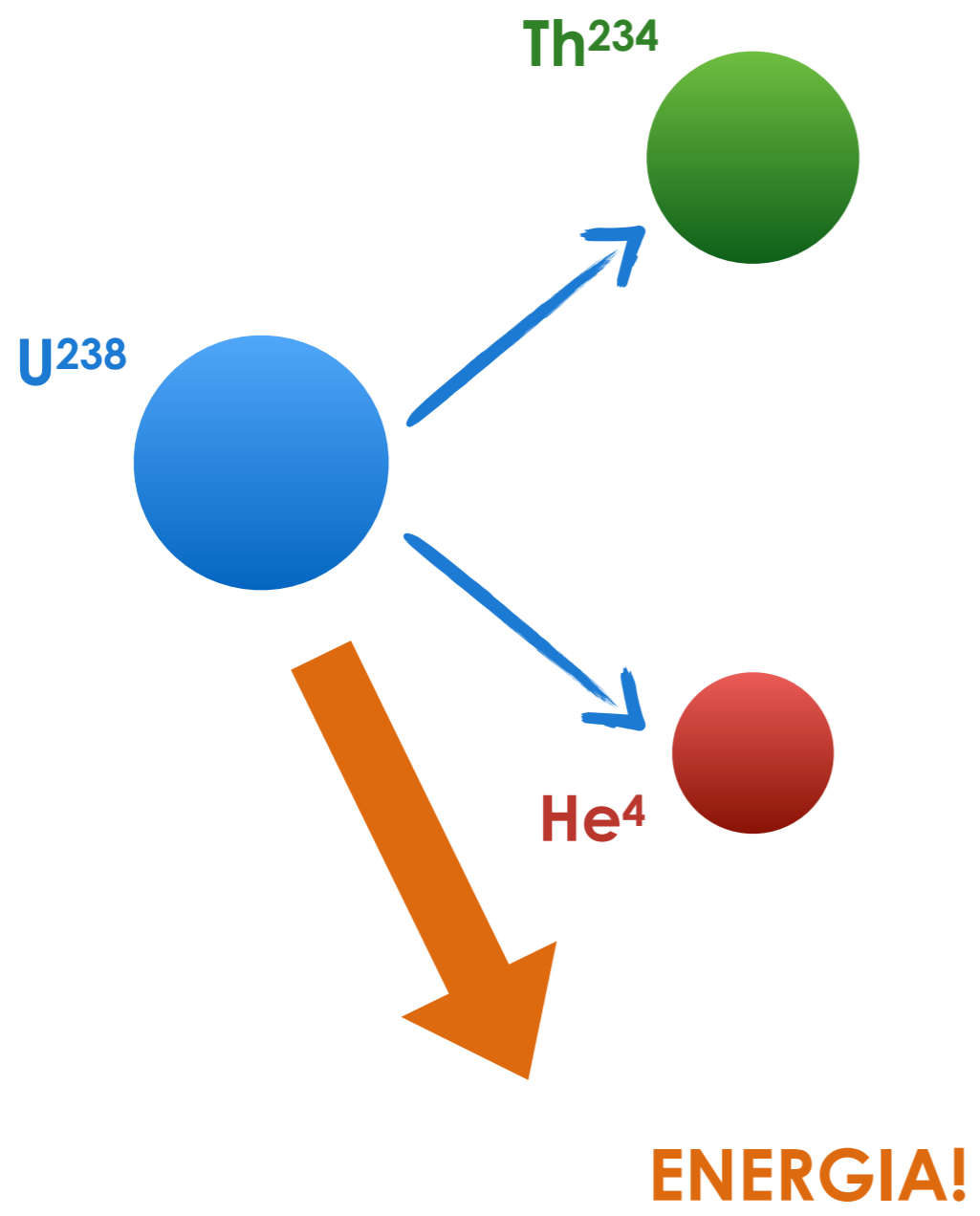




$$E = m c^2$$

1. La massa, considerata isolatamente, non si conserva, ma subisce continue variazioni (aumenta quando assorbe energia, diminuisce quando la perde).
2. La massa è una forma di energia.
3. Qualsiasi corpo a riposo possiede un'energia per il solo fatto di avere una massa.
4. La conservazione dell'energia comprende: energia cinetica, energia potenziale e massa.

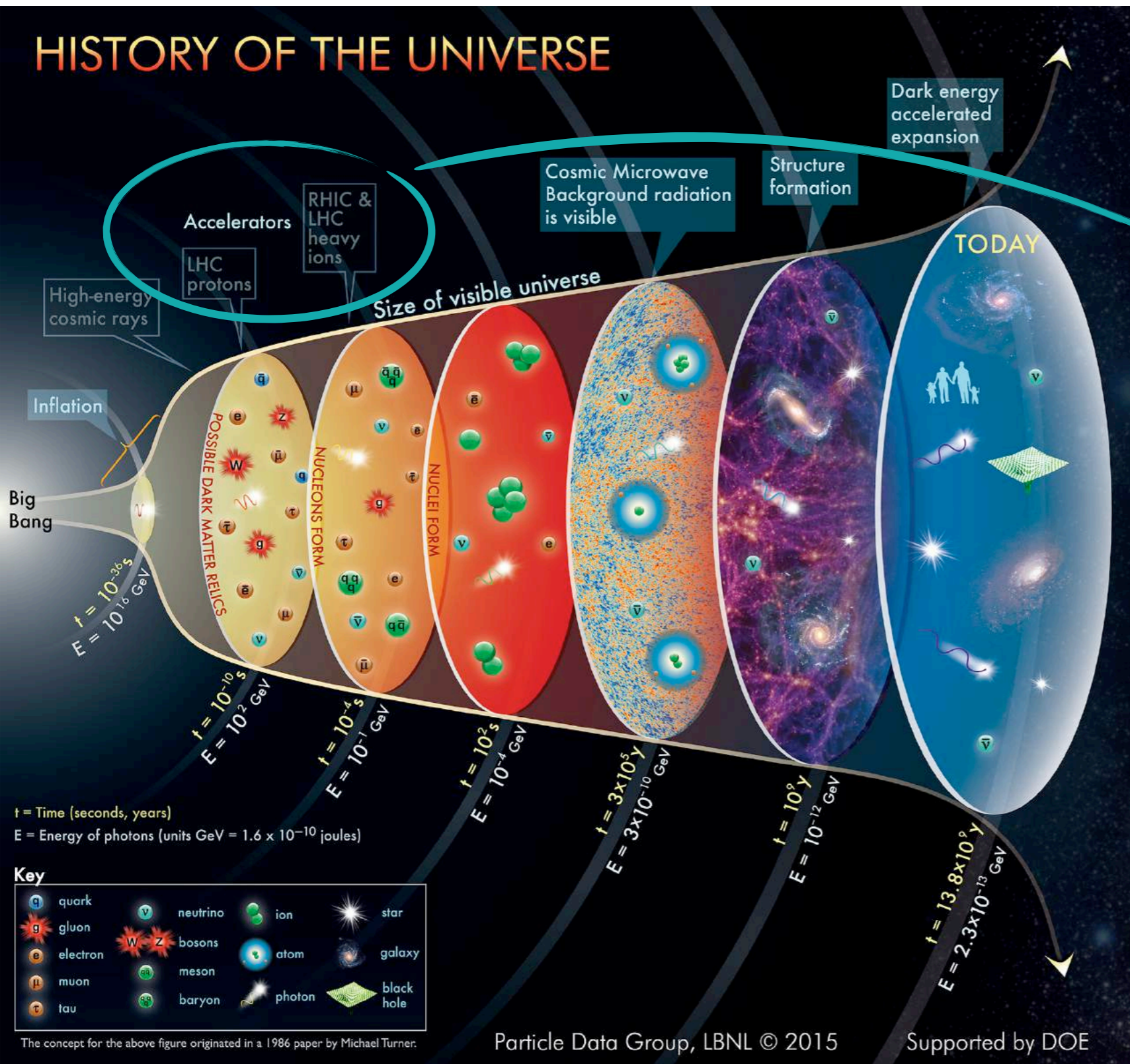




La somma della massa dei due prodotti è minore della massa iniziale!

Massa mancante:  
 $7,6 \times 10^{-30}$  kg





## SCOPO

capire la nascita e l'evoluzione dell'Universo.

Dobbiamo riprodurre condizioni: grande **densità di energia** fondamentale!

Molto difficile, ma....





## Acceleriamo le particelle!

- ▶ **Aumentiamo la loro energia e, quindi, il loro potere risolutivo**
  - ★ possiamo indagare dimensioni sempre più piccole.
- ▶ **Aumentiamo la densità di energia nella zona in cui interagiscono**
  - ★ Possiamo “creare” particelle più pesanti.



## Acceleriamo le particelle!

- ▶ **Aumentiamo la loro energia e, quindi, il loro potere risolutivo**
  - ★ possiamo indagare dimensioni sempre più piccole.
- ▶ **Aumentiamo la densità di energia nella zona in cui interagiscono**
  - ★ Possiamo “creare” particelle più pesanti.

## Acceleratori naturali!

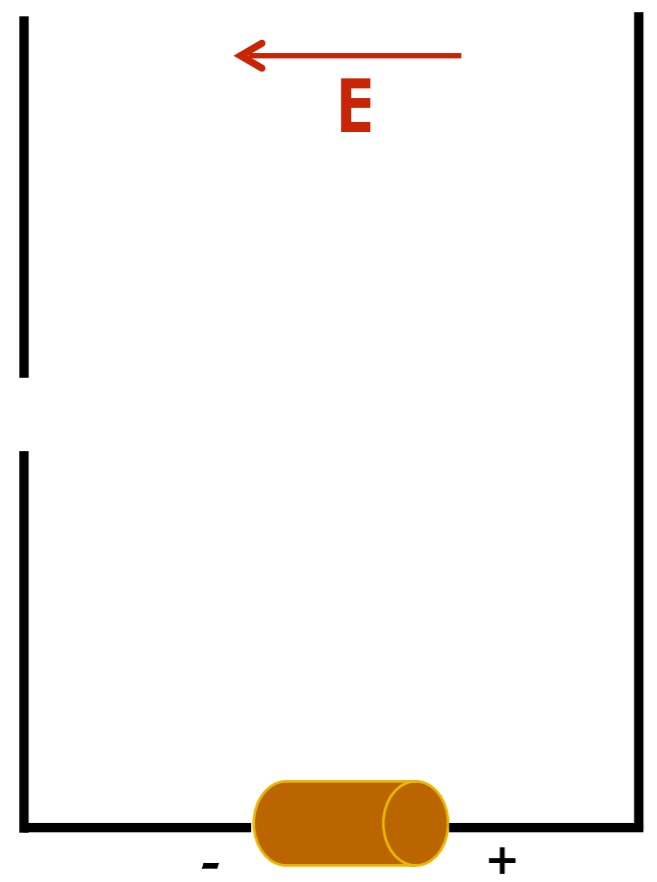
- ▶ **Raggi cosmici**
  - ★ Raggiungono energie molto maggiori di quelle accessibili con gli acceleratori più avanzati.





**NB!** Acceleriamo sempre e solo particelle cariche **NB!**

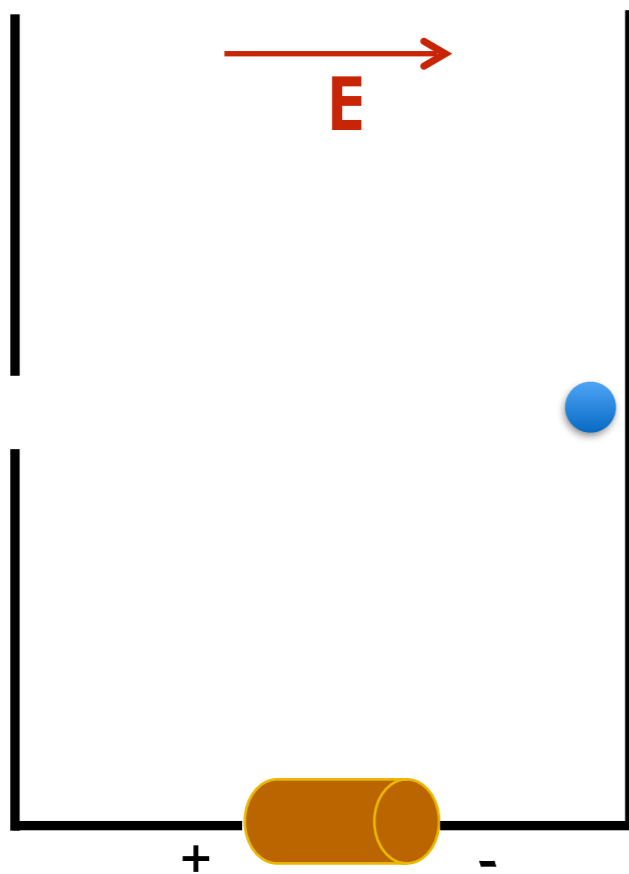
Campi elettrici  
per fornire energia





**NB!** Acceleriamo sempre e solo particelle cariche **NB!**

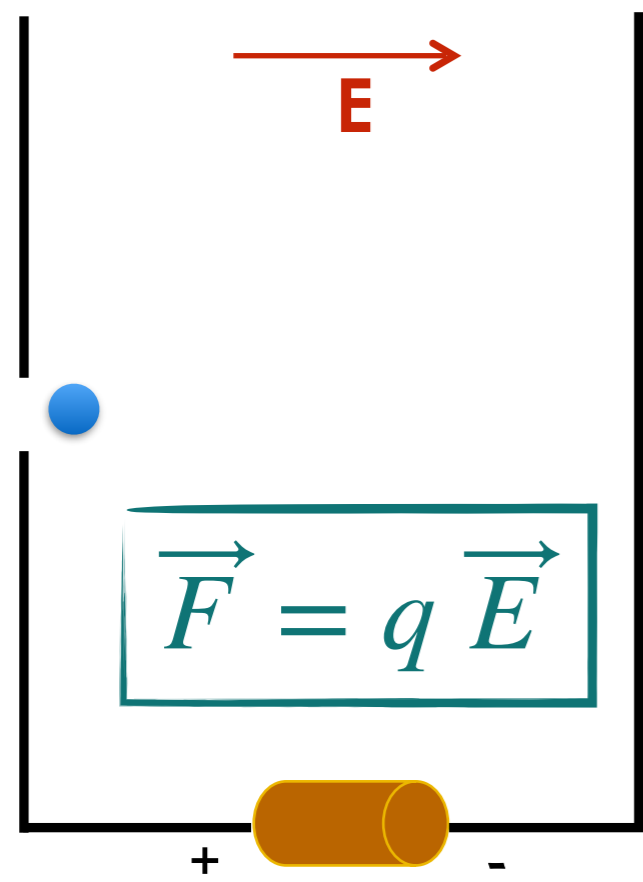
Campi elettrici  
per fornire energia





**NB!** Acceleriamo sempre e solo particelle cariche **NB!**

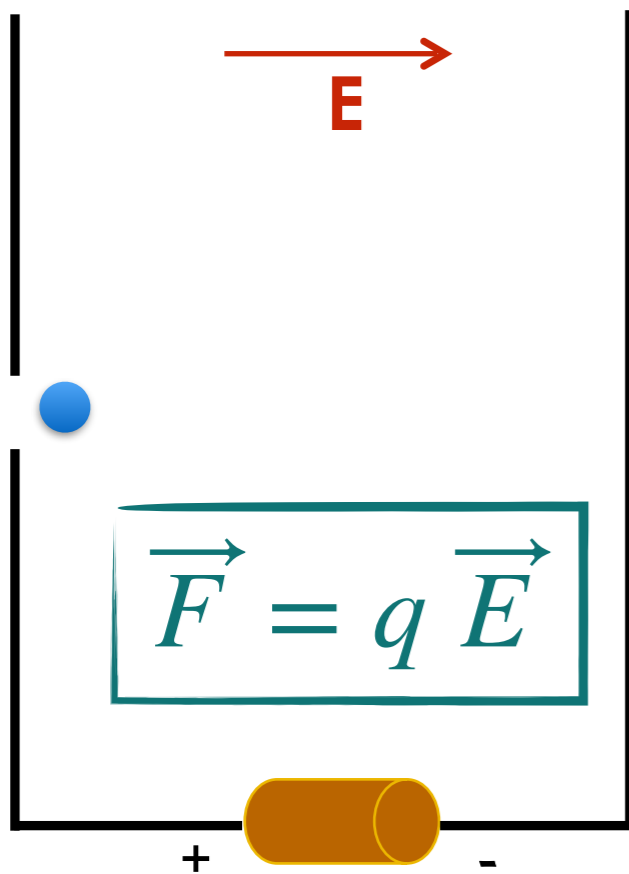
Campi elettrici  
per fornire energia





**NB!** Acceleriamo sempre e solo particelle cariche **NB!**

Campi elettrici  
per fornire energia

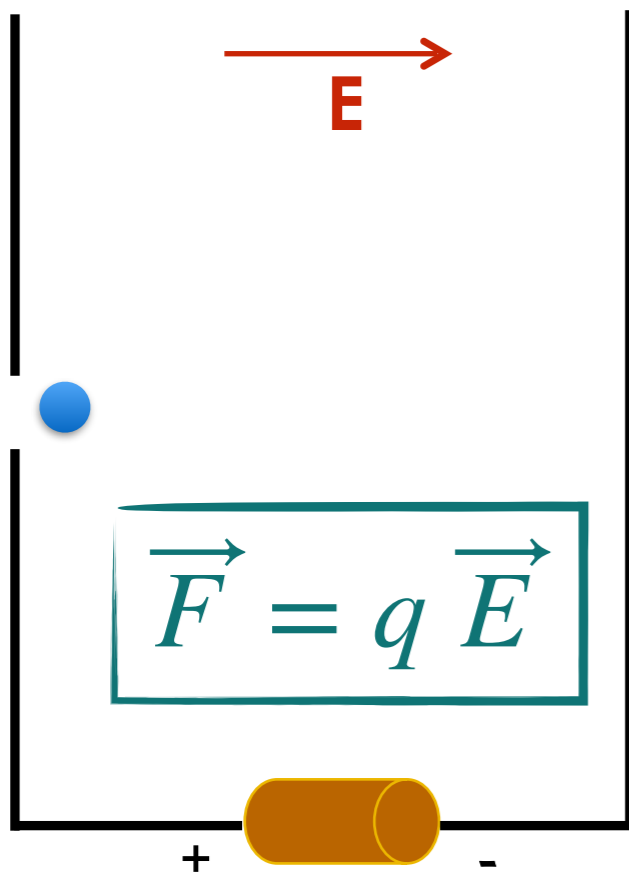


Campi magnetici  
per guidare e focalizzare



**NB!** Acceleriamo sempre e solo particelle cariche **NB!**

Campi elettrici  
per fornire energia



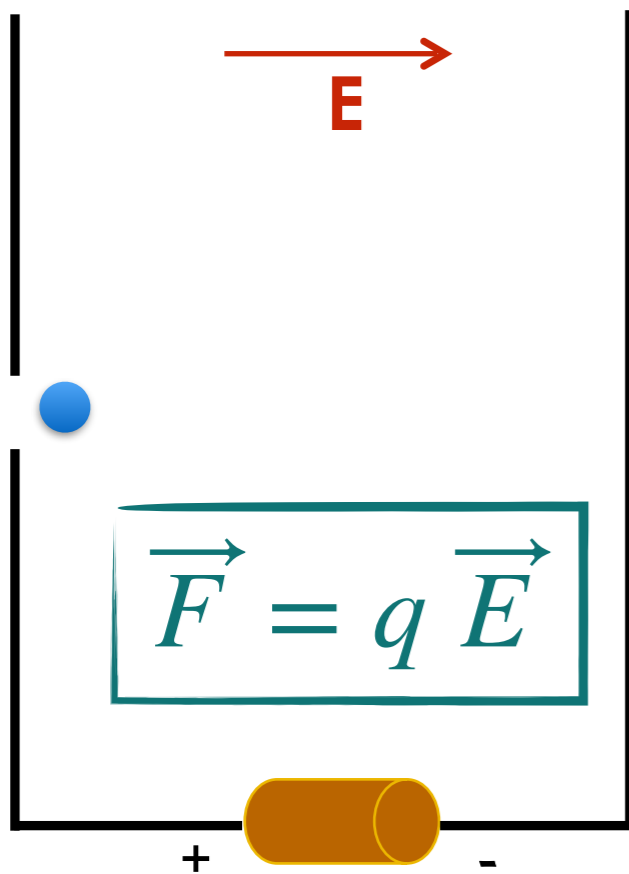
Campi magnetici  
per guidare e focalizzare



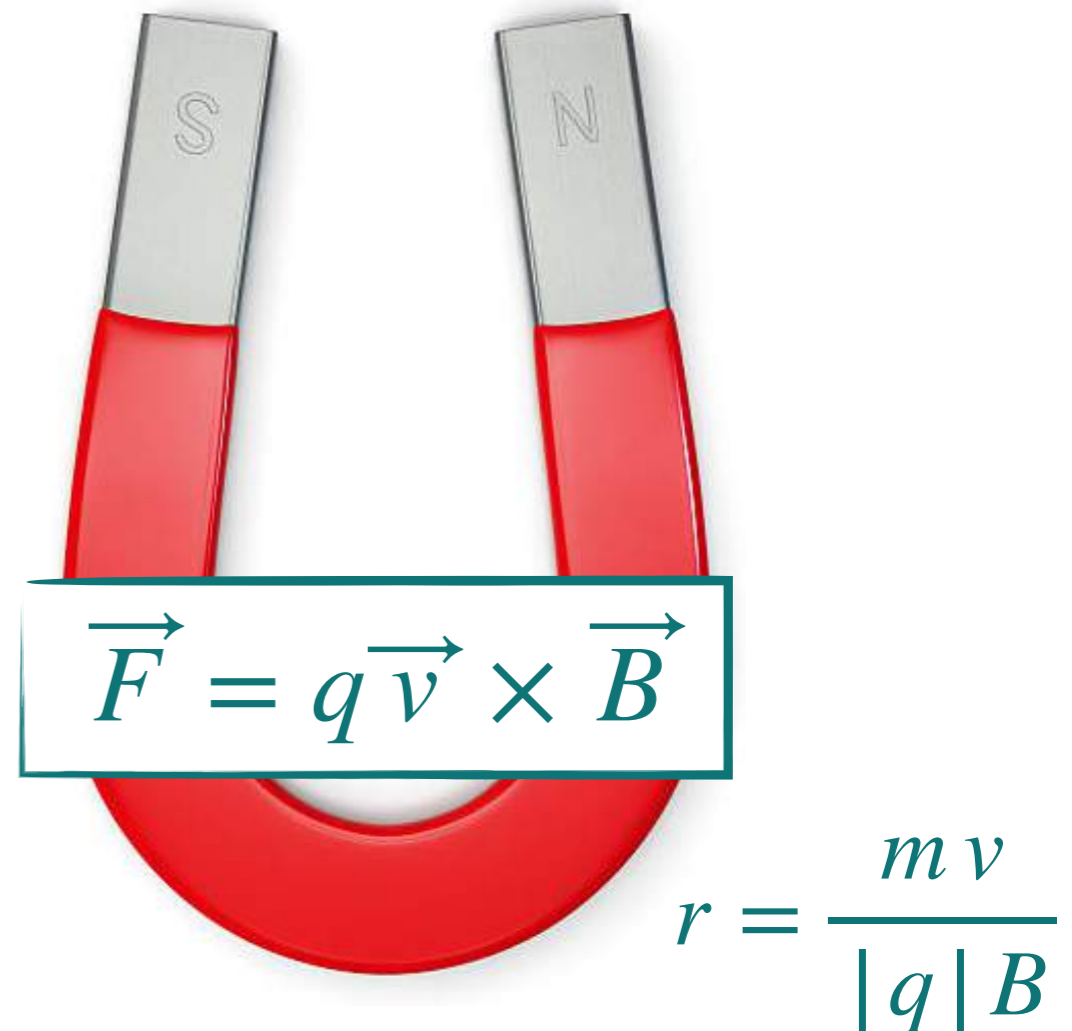


**NB!** Acceleriamo sempre e solo particelle cariche **NB!**

Campi elettrici  
per fornire energia



Campi magnetici  
per guidare e focalizzare



★ **Struttura:**

- **Sorgente** (elettroni, protoni):
- Uno o più **tubi a vuoto**;
- Elementi **acceleranti** e di **guida/focalizzazione**;
- **Bersaglio** (o target o fascio stesso).





★ **Struttura:**

- **Sorgente** (elettroni, protoni):
- Uno o più **tubi a vuoto**;
- Elementi **acceleranti** e di **guida/focalizzazione**;
- **Bersaglio** (o target o fascio stesso).



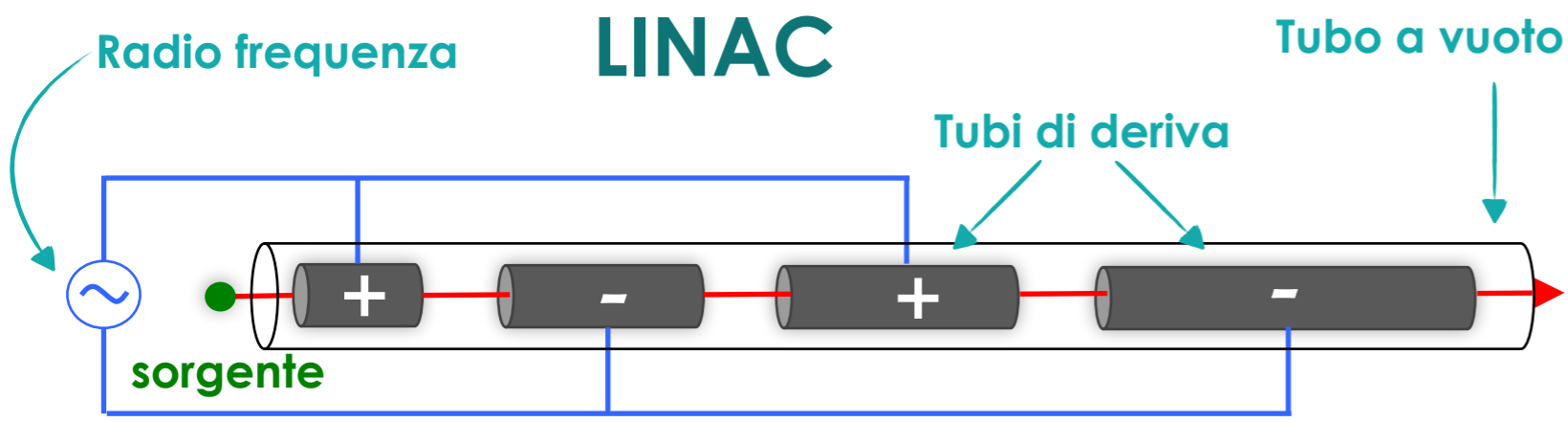
★ **Tipologia dipende da:**

- **Tipo di particella accelerata** ( $e^+/e^- + p/\text{anti-}p$ );
- **Forma**: lineare o circolare;
- **Bersaglio**: fisso o collisionatori (collider).

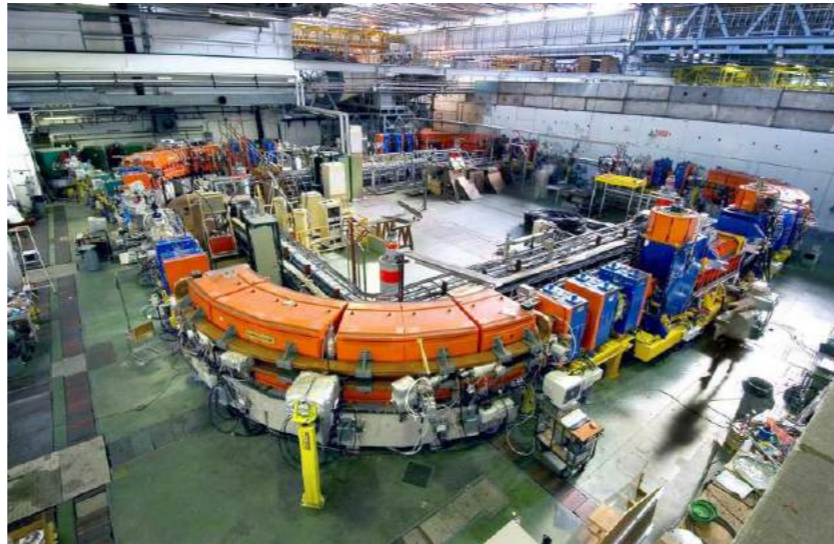
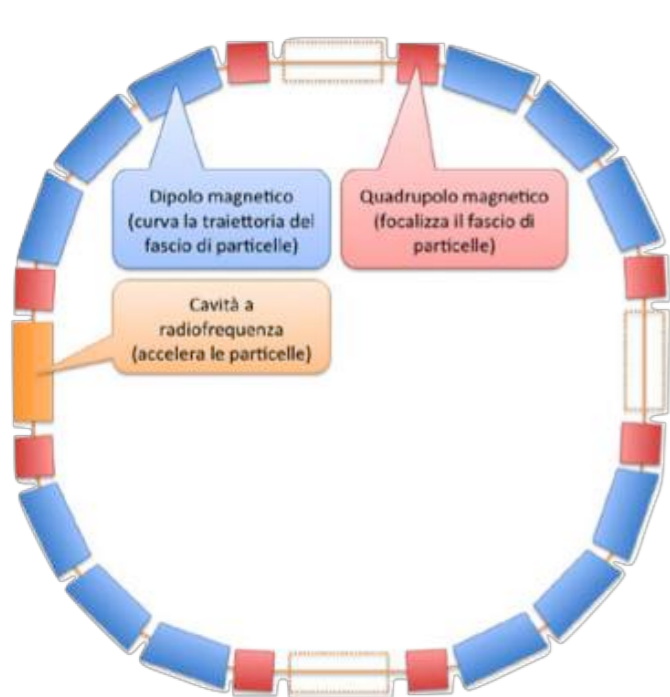


**Diversi limiti:**  
 $E_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{max}}$ , **costi**





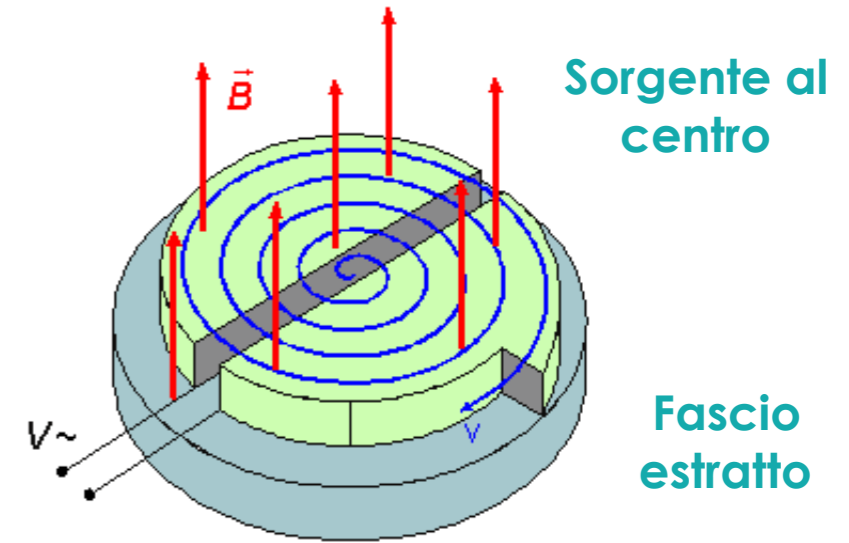
## SINCROTRONI



## CNAO



## CICLOTRONI







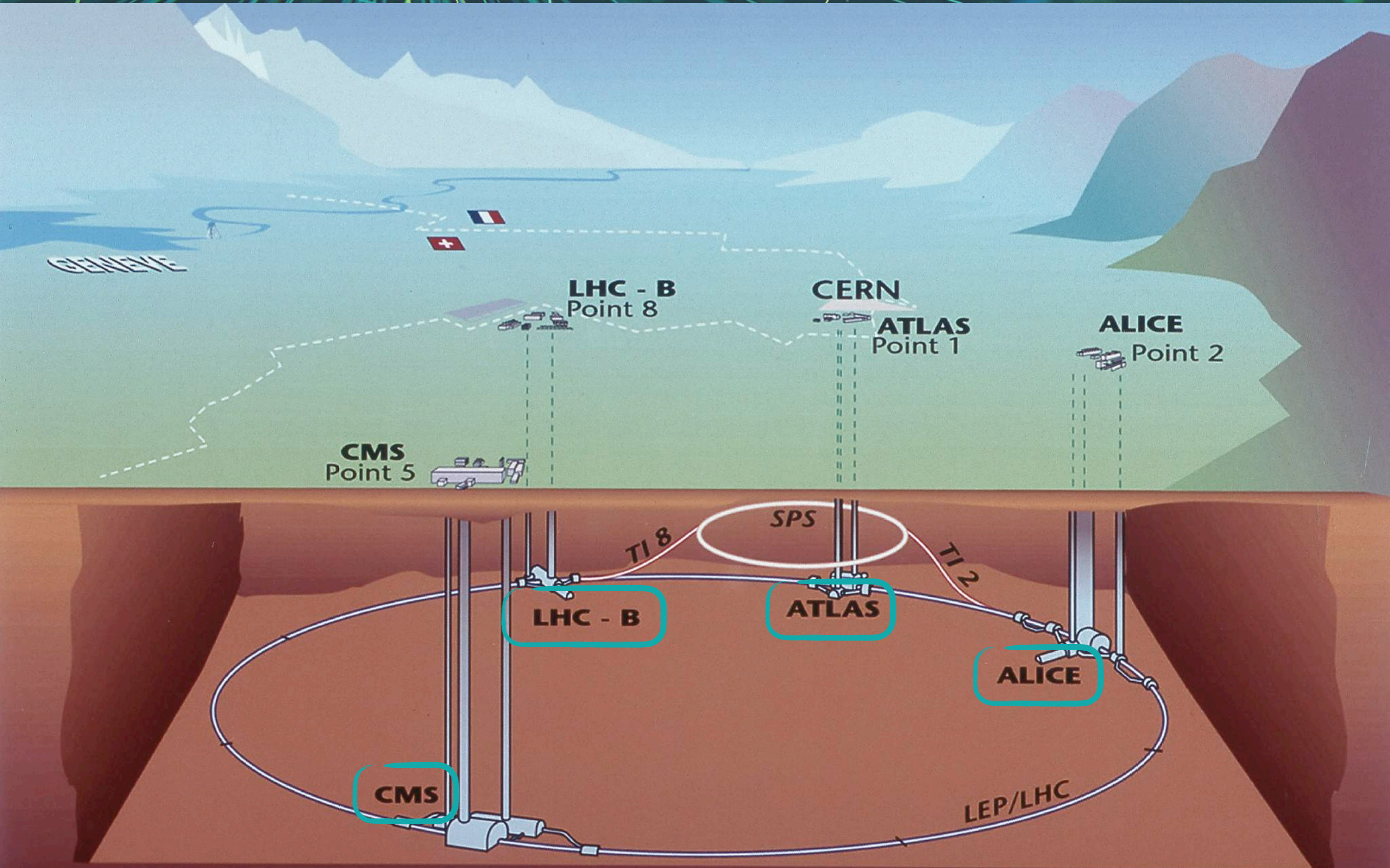
## LHC Large Hadron Collider

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



- **1.8 K (-271.3°)**, nello Spazio 2.7 K (-270.5°C)
  - in ogni fascio: **2808 pacchetti (~10<sup>11</sup> protoni)**
  - **luminosità**: n° particelle in ogni pacchetto, frequenza di fascio, n° di pacchetti, area trasversale del fascio
- ➔ influenza **probabilità che un dato processo avvenga**



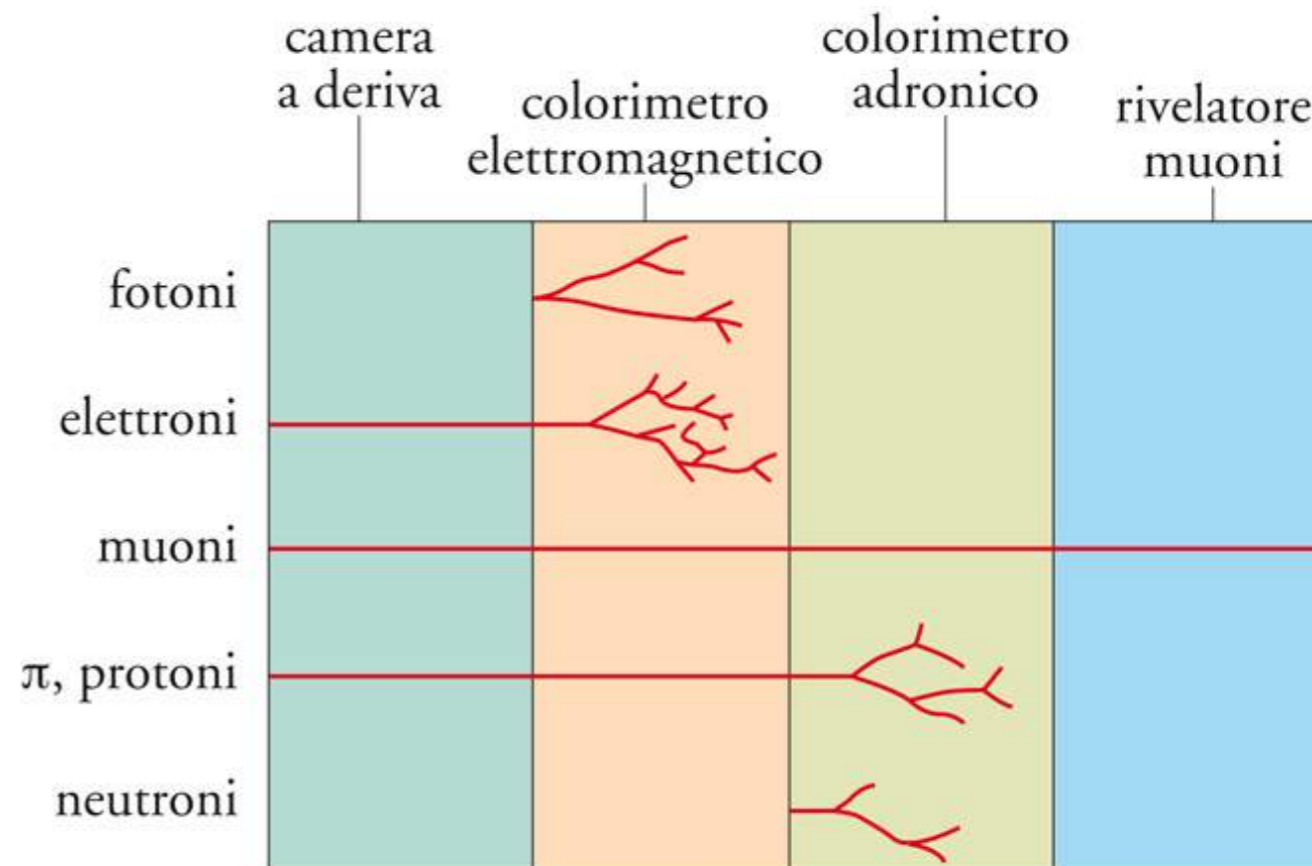
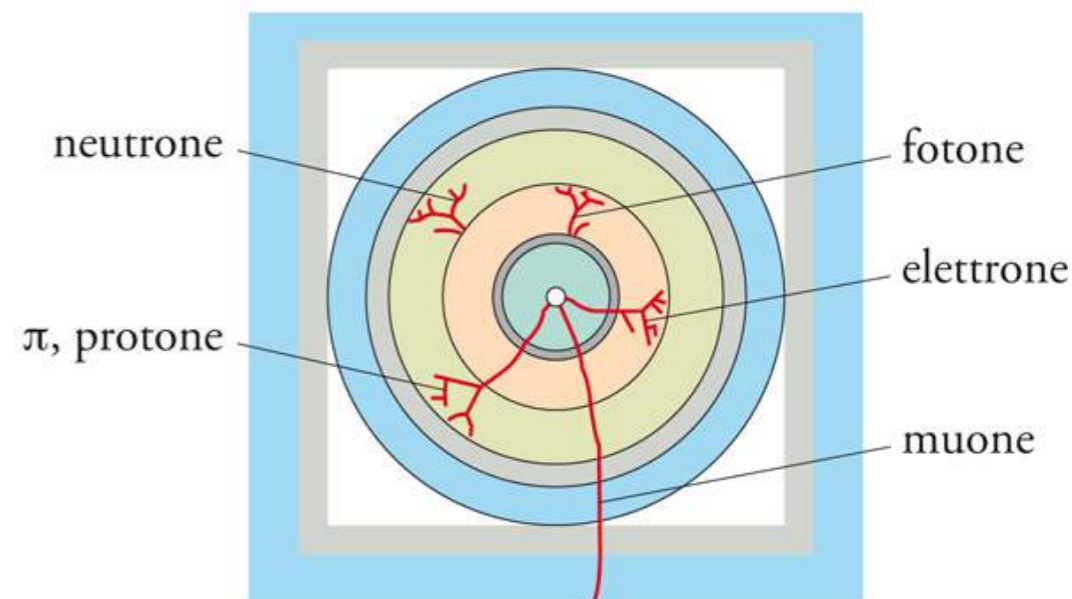




Struttura “**a cipolla**”: tanti strati cilindrici. Dal centro verso l'esterno:

- **tracciatore** per ricostruire la traccia della particella carica;
- **calorimetro elettromagnetico** per assorbire e misurare l'energia di  $e^\pm$  e  $\gamma$ ;
- **calorimetro adronico** per assorbire e misurare l'energia degli adroni ( $n$ ,  $p$ , ...);
- **rivelatore di muoni** (tracciatore esterno);
- **campo magnetico** per deviare le particelle cariche e misurarne la quantità di moto dal raggio di curvatura.

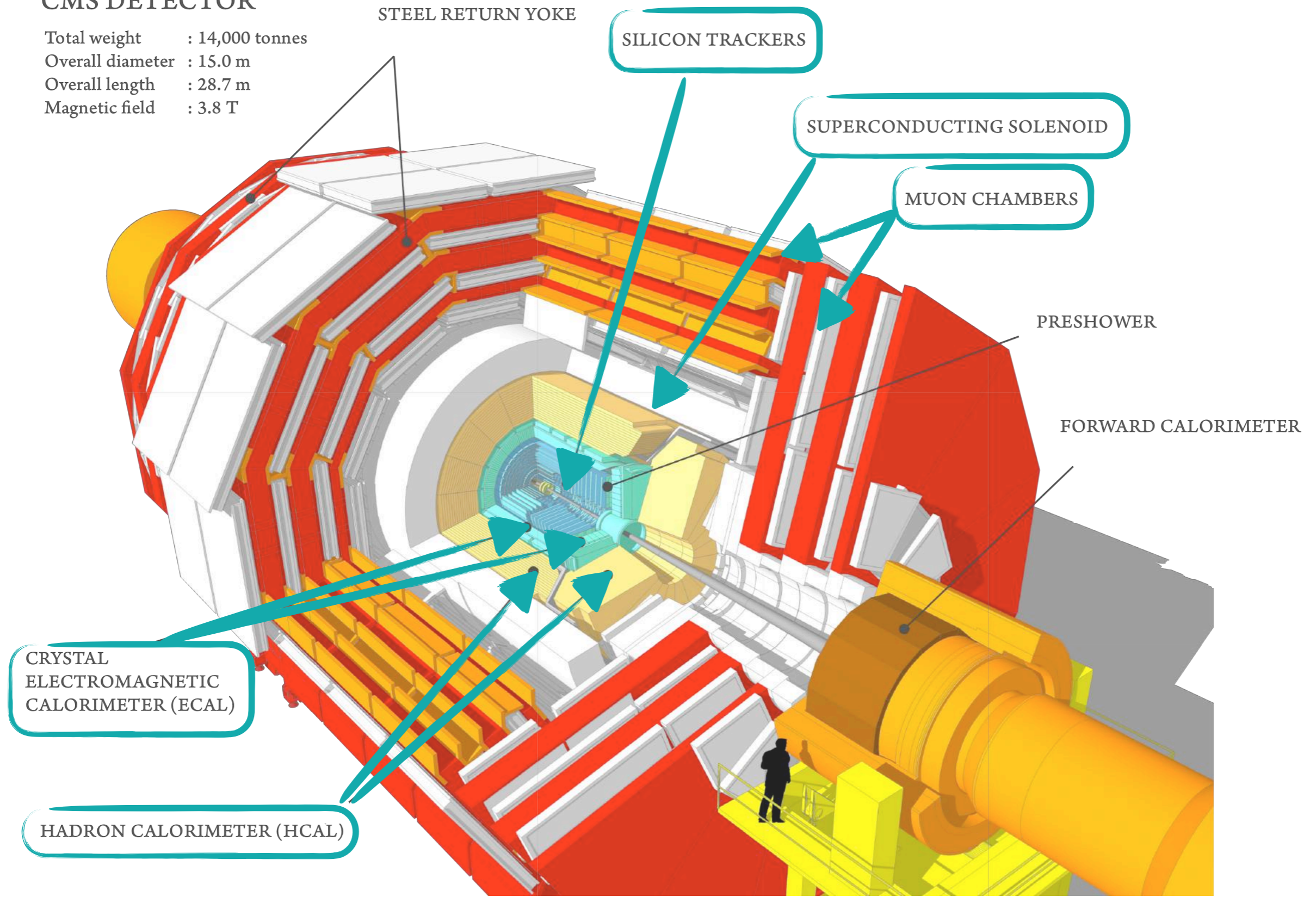
struttura a 'cipolla'





## CMS DETECTOR

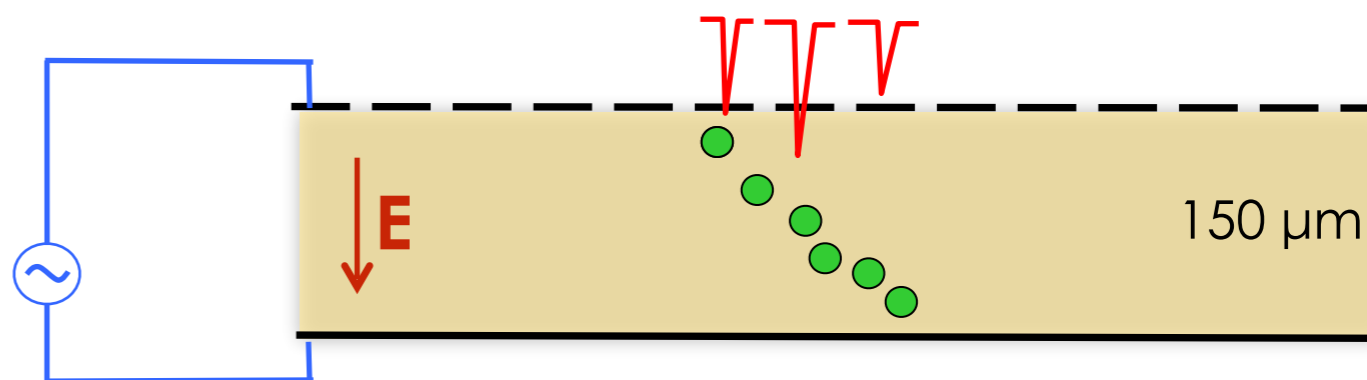
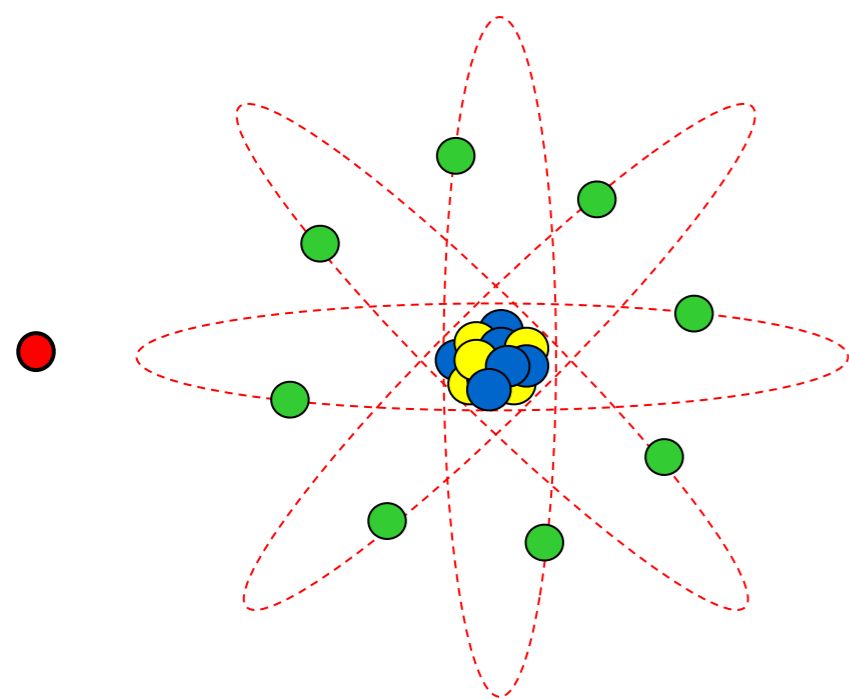
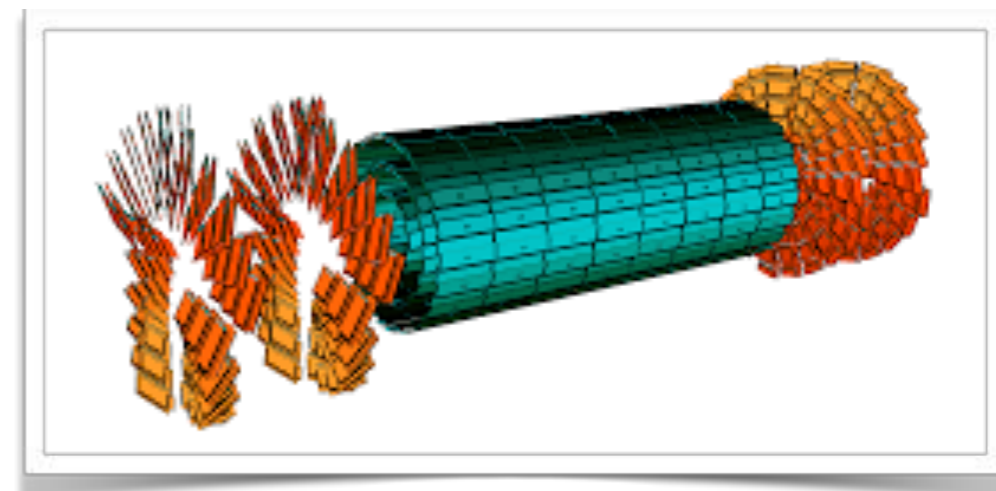
Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T





Le particelle cariche **ionizzano** il materiale che attraversano. Le cariche libere vengono raccolte su **elettrodi dove si registra un segnale**.

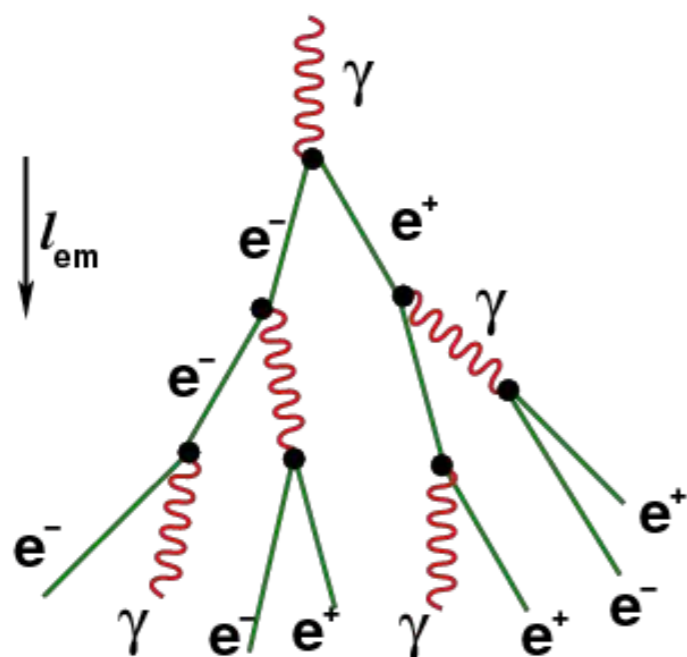
- volume cilindrico di **~ 2.5 m**;
- più di 10 strati di **pixel** (celle  $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ ) vicino al punto di interazione;
- fornisce tracce di particelle cariche con **alta precisione**.



- **Assorbono completamente** le particelle per cui sono costruiti e ne misurano **l'energia**;
- tipicamente composti da strati di **materiale passivo** (assorbitore) e strati di **materiale sensibile** (scintillatori, rivelatori a gas, liquidi,...);
- calorimetri elettromagnetici possono essere anche **omogenei** (cristalli, scintillatori,...).

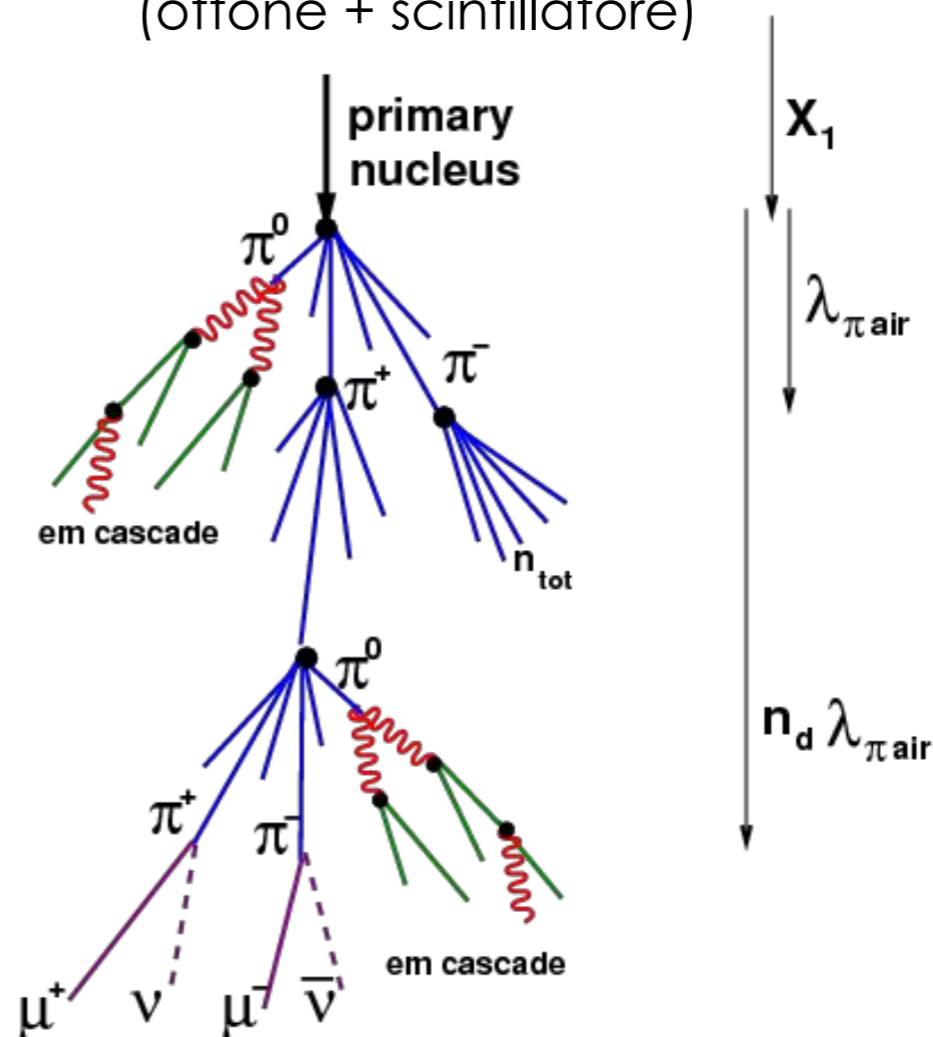
## Sciame elettromagnetico

calorimetro omogeneo  
(~70000 cristalli di PbWO4)



## Sciame adronico

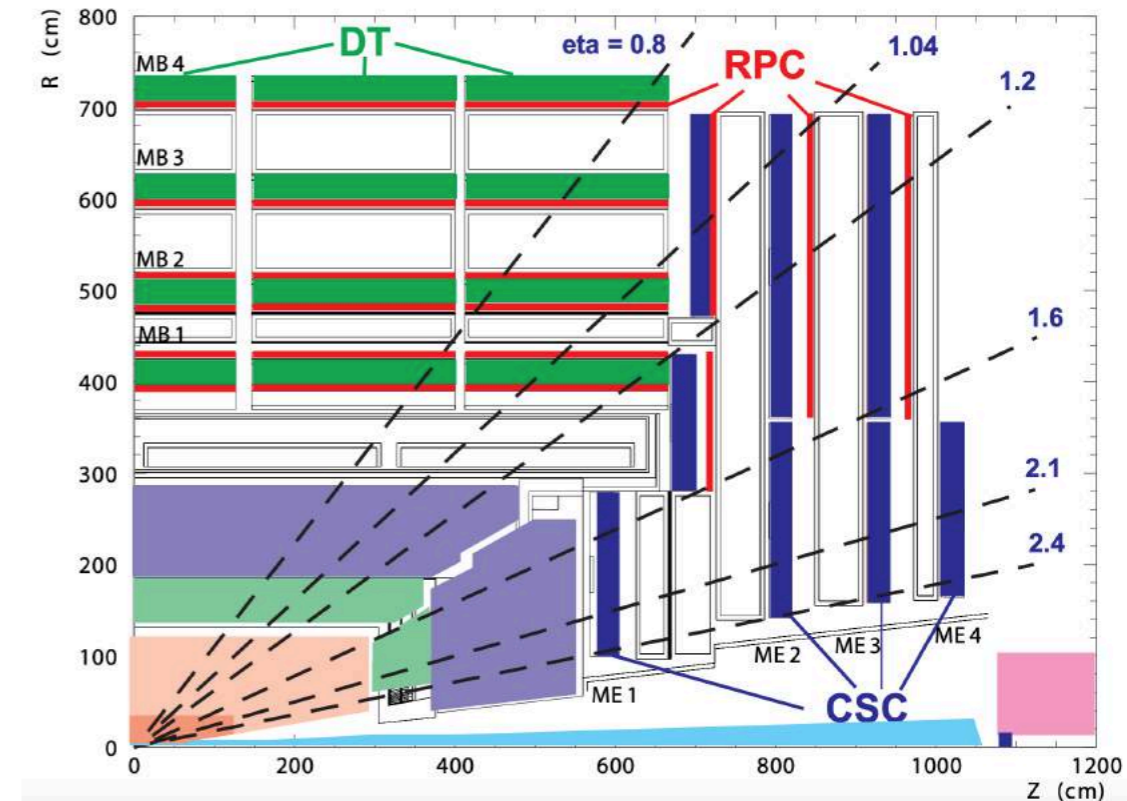
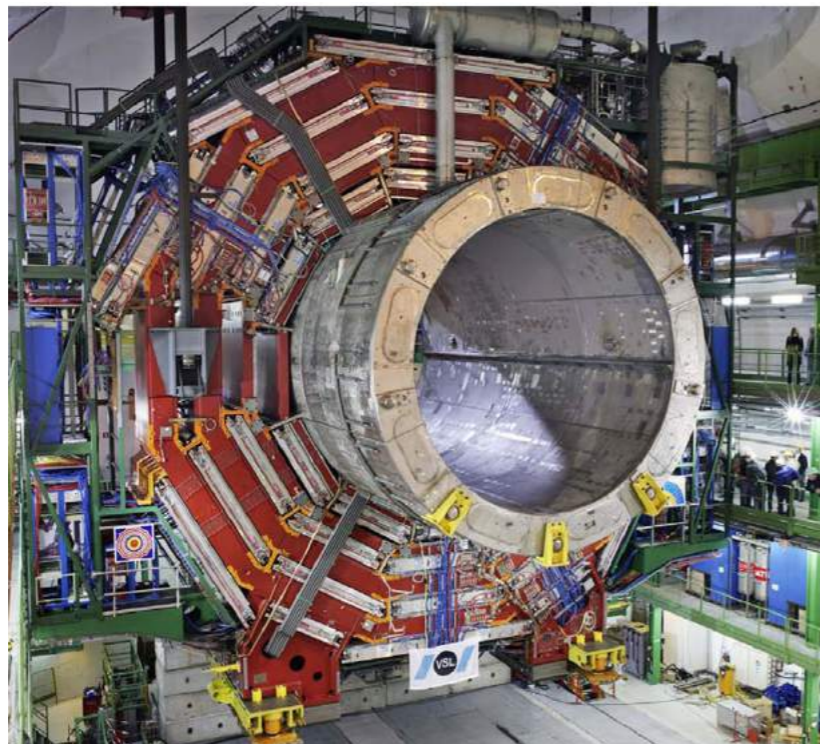
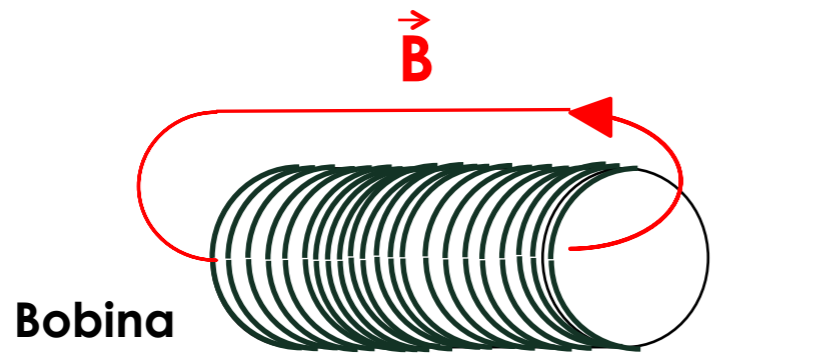
calorimetro a campionamento  
(ottone + scintillatore)





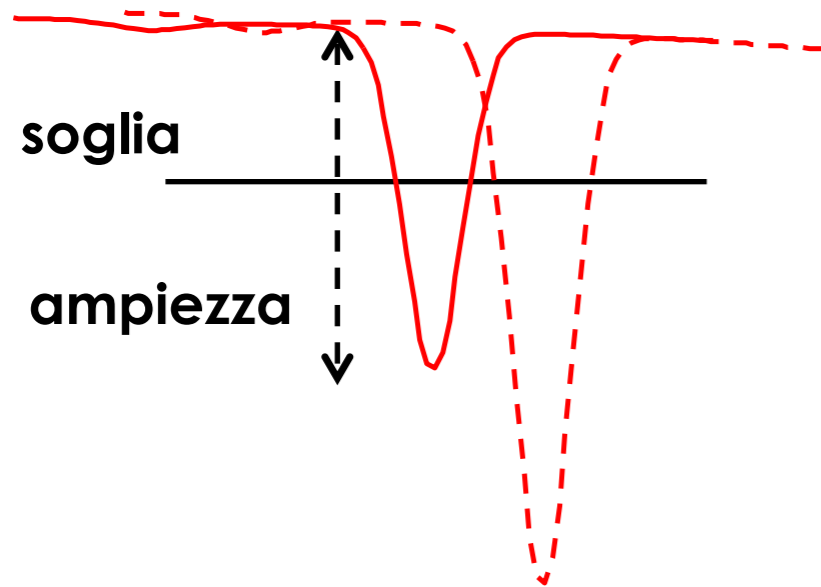
- **Grande magnete solenooidale superconduttore (~2000 spire)** circonda il tracciatore ed entrambi i calorimetri;
- magneti superconduttori per generare campo toroidale intorno a rivelatore.

- Diversi tipi di **rivelatori a gas** (tubi, camere, strip,...);
- **intorno al magnete**, contengono il "ritorno" del campo magnetico;
- grande risoluzione per la misura delle **tracce lasciate dai muoni, curvate dal campo magnetico**.



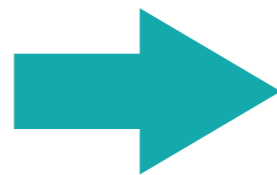
Molti rivelatori, un solo problema:

**estrarre informazioni da un segnale elettrico analogico.**



- è passata una particella?
- quando?
- di che energia?
- ...

**SEGNALE ELETTRICO ANALOGICO**



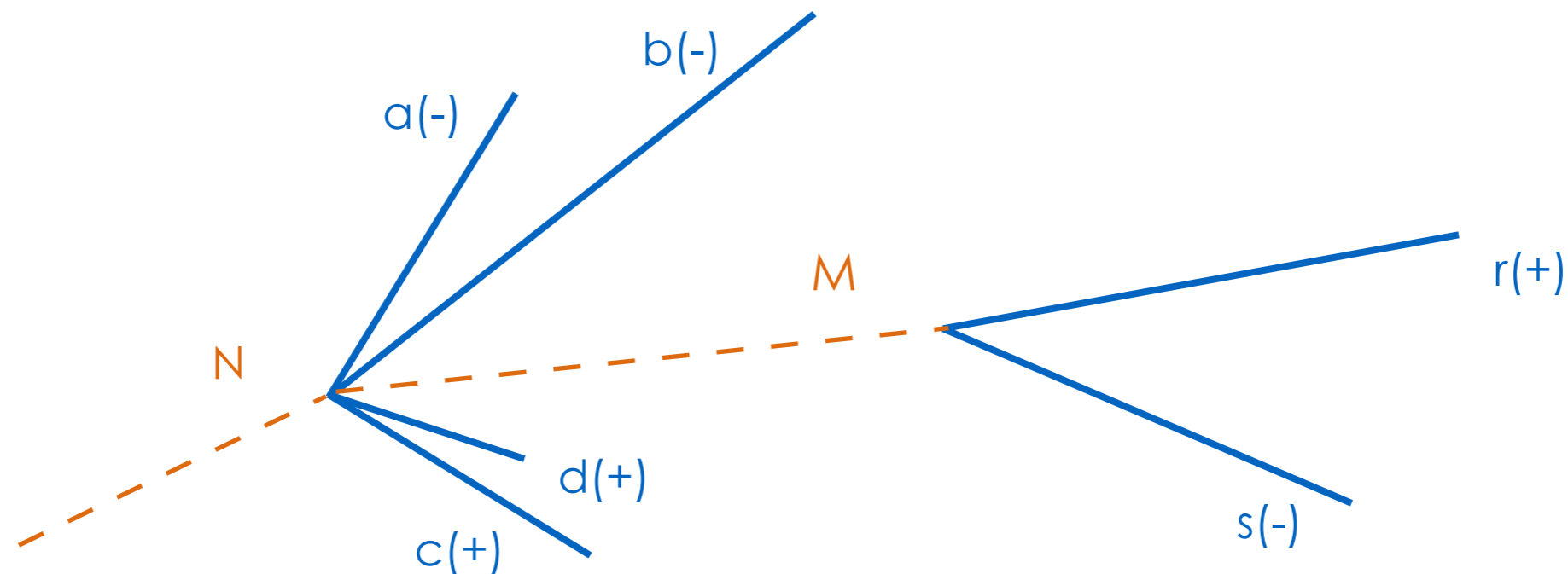
**INFORMAZIONE DIGITALE**

**~75 milioni di segnali per evento  
~ 40 milioni di eventi al secondo**



## Cosa vuol dire ricostruire una particella?

Supponiamo che il nostro rivelatore ricostruisca le **tracce** di alcune particelle cariche



- Si può facilmente dedurre che  $r$  e  $s$  provengano da una particella  $M$  neutra e che  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  hanno un “genitore”  $N$ ;
- è possibile, inoltre, che  $M$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  siano prodotte da un unico “genitore” ( $N$ );
- ciascuna combinazione  $(a,c)$ ,  $(b,d)$ ,  $(a,b,c)$ , etc. potrebbe a sua volta derivare da una particella a brevissima vita media.

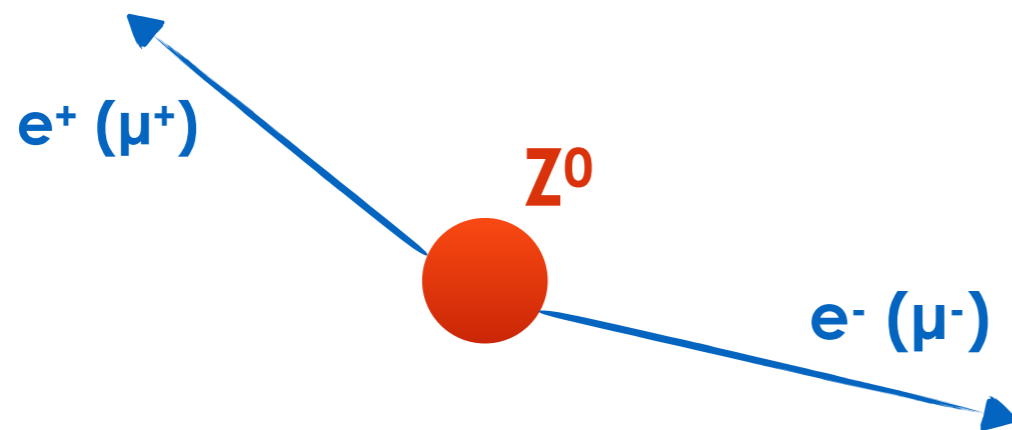


# Ricostruzione del bosone Z

$$M_Z \approx 91 \text{ GeV}$$

$$\text{vita media } \tau \approx 3 \times 10^{-25} \text{ s}$$

- Consideriamo solo i decadimenti in coppie  $e^\pm, \mu^\pm$
- Il decadimento è immediato:  $c\tau_Z \approx 10^{-16} \text{ m}$



## Segnatura dello stato finale:

- **2 muoni** segno opposto
- **2 elettroni** segno opposto

Conoscendo l'**energia** e l'**impulso** dei **prodotti di decadimento** si può calcolare la **massa del "genitore"** (leggi di conservazione + cinematica relativistica).

Se decade in una coppia di muoni (idem per elettroni):

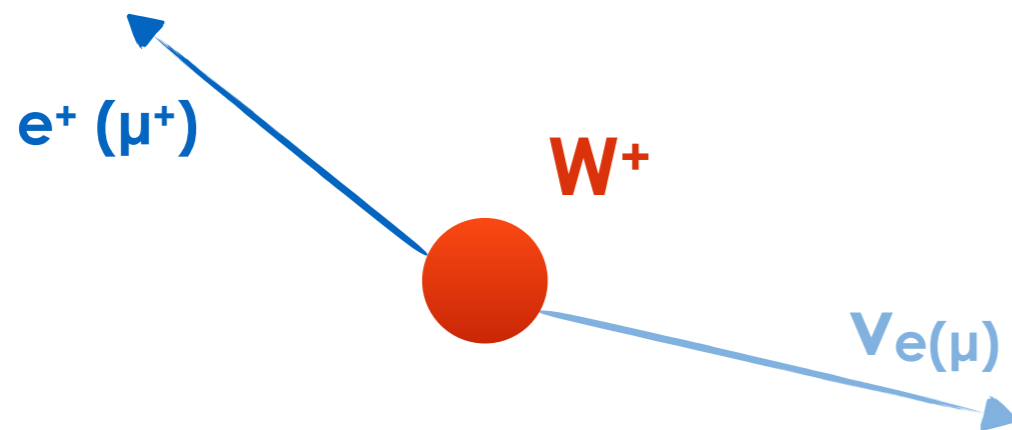
$$M_{Z_0} = \sqrt{\left(\frac{E_{\mu^+}}{c^2} + \frac{E_{\mu^-}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{\mu^+}}{c} + \frac{\vec{p}_{\mu^-}}{c}\right)^2}$$

# Ricostruzione del bosone W

$$M_W \approx 80 \text{ GeV}$$

$$\text{vita media } \tau \approx 3 \times 10^{-25} \text{ s}$$

- Consideriamo solo i decadimenti con elettroni e muoni
- Il decadimento è immediato:  $c\tau_W \approx 10^{-16} \text{ m}$



## Segnatura dello stato finale:

- **1 muone** e un neutrino
- **1 elettrone** e un neutrino

Non conosciamo l'**energia** e l'**impulso** di TUTTI i **prodotti di decadimento** (il neutrino non lascia traccia!), quindi abbiamo un momento trasverso mancante.

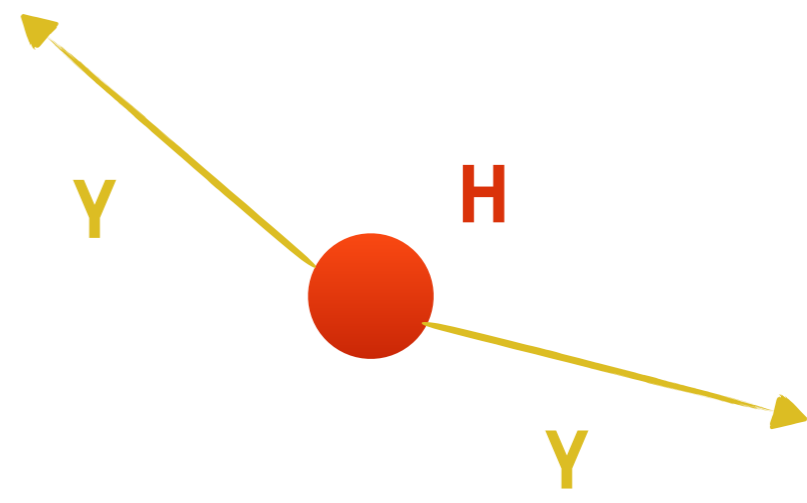
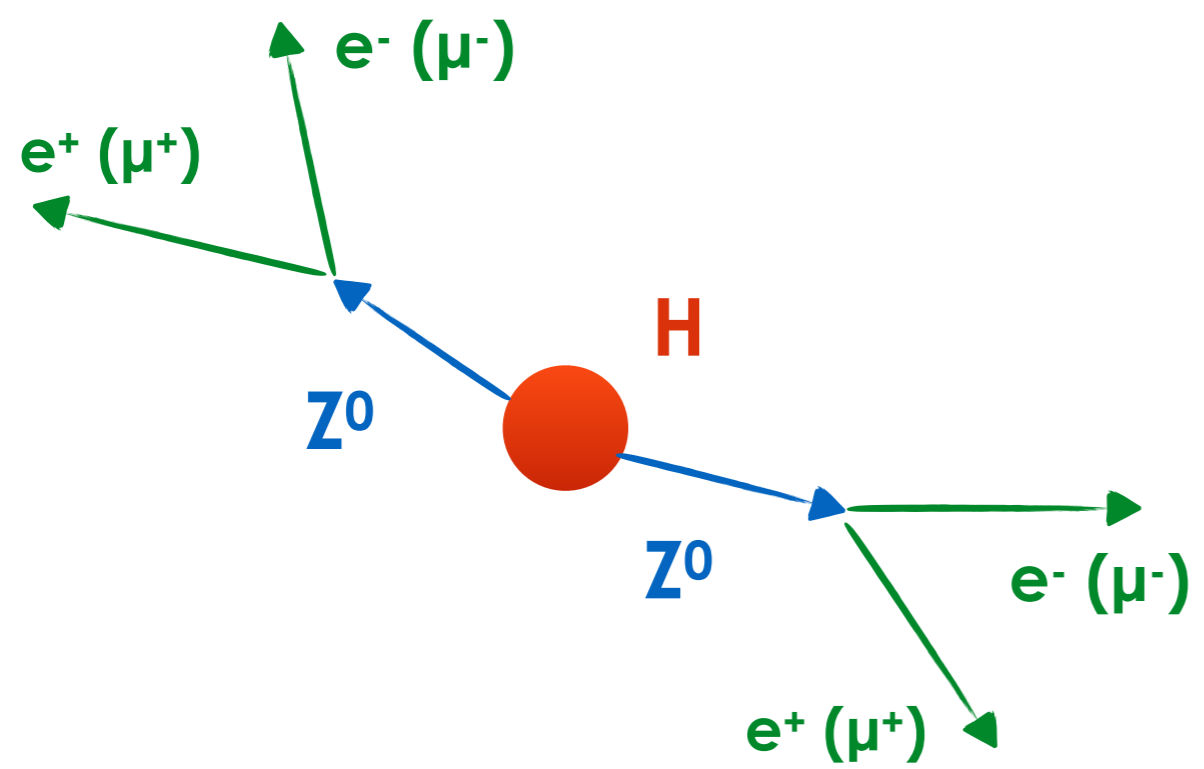
Bisogna calcolare la **massa trasversa** (leggi di conservazione + cinematica relativistica):

$$M_T = \sqrt{2 p_{e,T} E_T (1 - \cos(\phi_e - \phi_{E_T}))}$$



$M_H \approx 125 \text{ GeV}$   
 vita media  $\tau \approx 10^{-22} \text{ s}$

- Consideriamo due decadimenti:
  - 2 bosoni Z che decadono in **coppie di elettroni e muoni**
  - **2 fotoni**
- Il decadimento è immediato:  $c\tau_H \approx 10^{-14} \text{ m}$

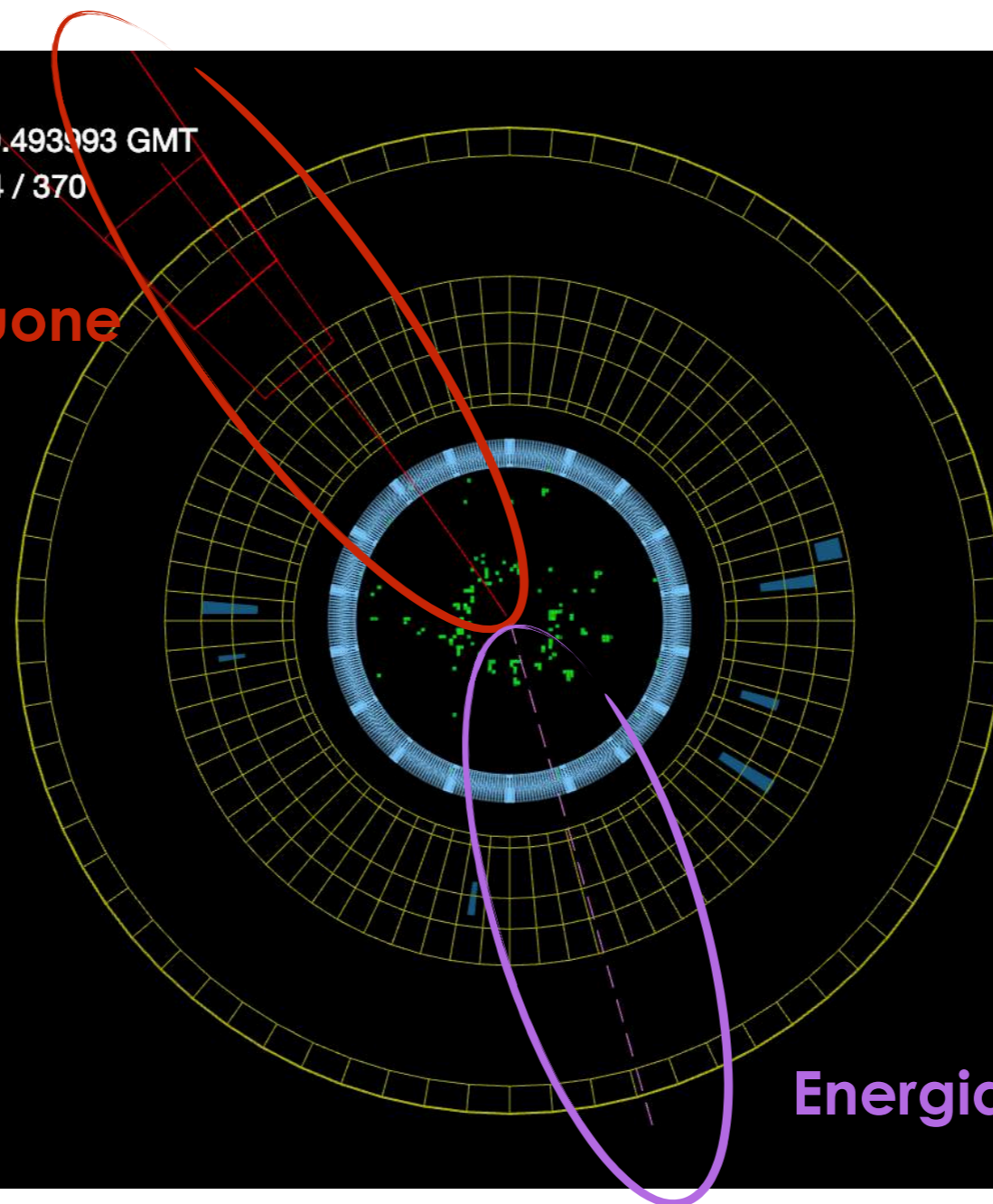


$$W \rightarrow \mu \nu$$



CMS Experiment at the LHC, CERN  
 Data recorded: 2011-Aug-17 06:01:59.493993 GMT  
 Run / Event / LS: 173389 / 490868544 / 370

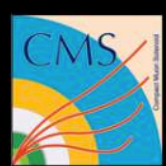
Traccia di un muone



Energia mancante

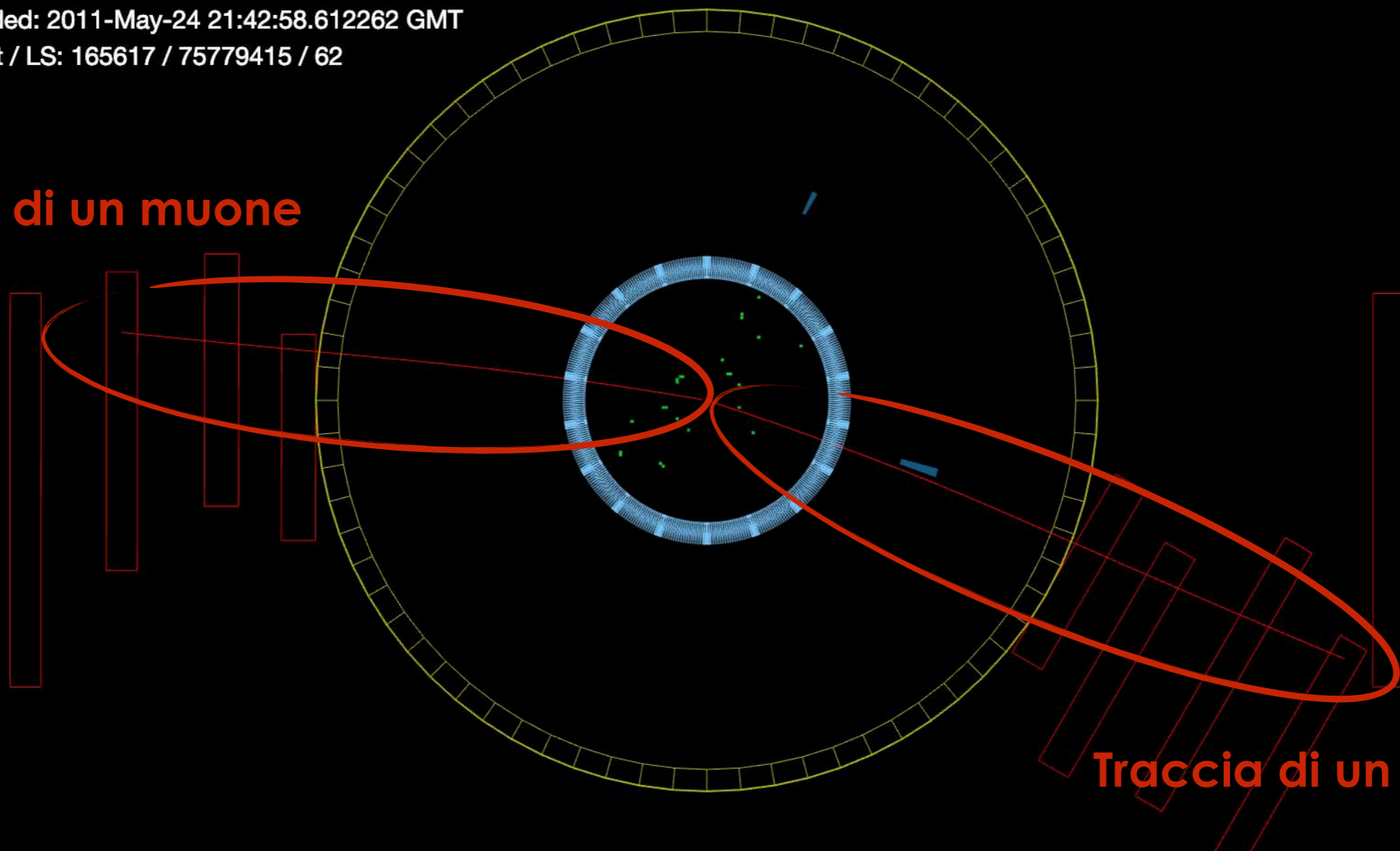


$$Z \rightarrow \mu\mu$$



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2011-May-24 21:42:58.612262 GMT  
Run / Event / LS: 165617 / 75779415 / 62

Traccia di un muone



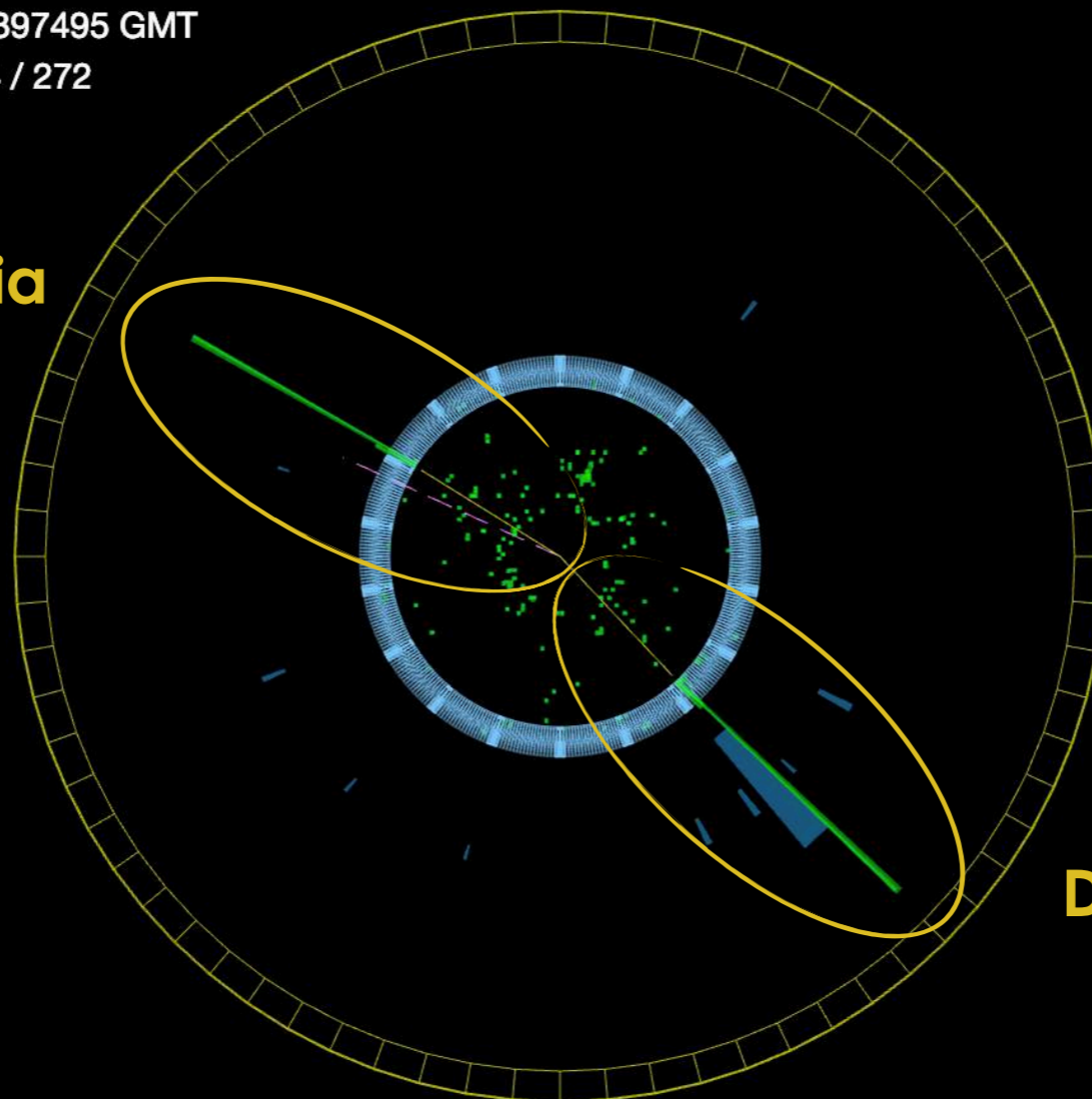
Traccia di un muone

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



CMS Experiment at the LHC, CERN  
 Data recorded: 2012-Jul-26 04:29:42.397495 GMT  
 Run / Event / LS: 199699 / 336259924 / 272

**Deposito di energia  
 di un fotone**



**Deposito di energia  
 di un fotone**



# E ORA TOCCA A VOI!

