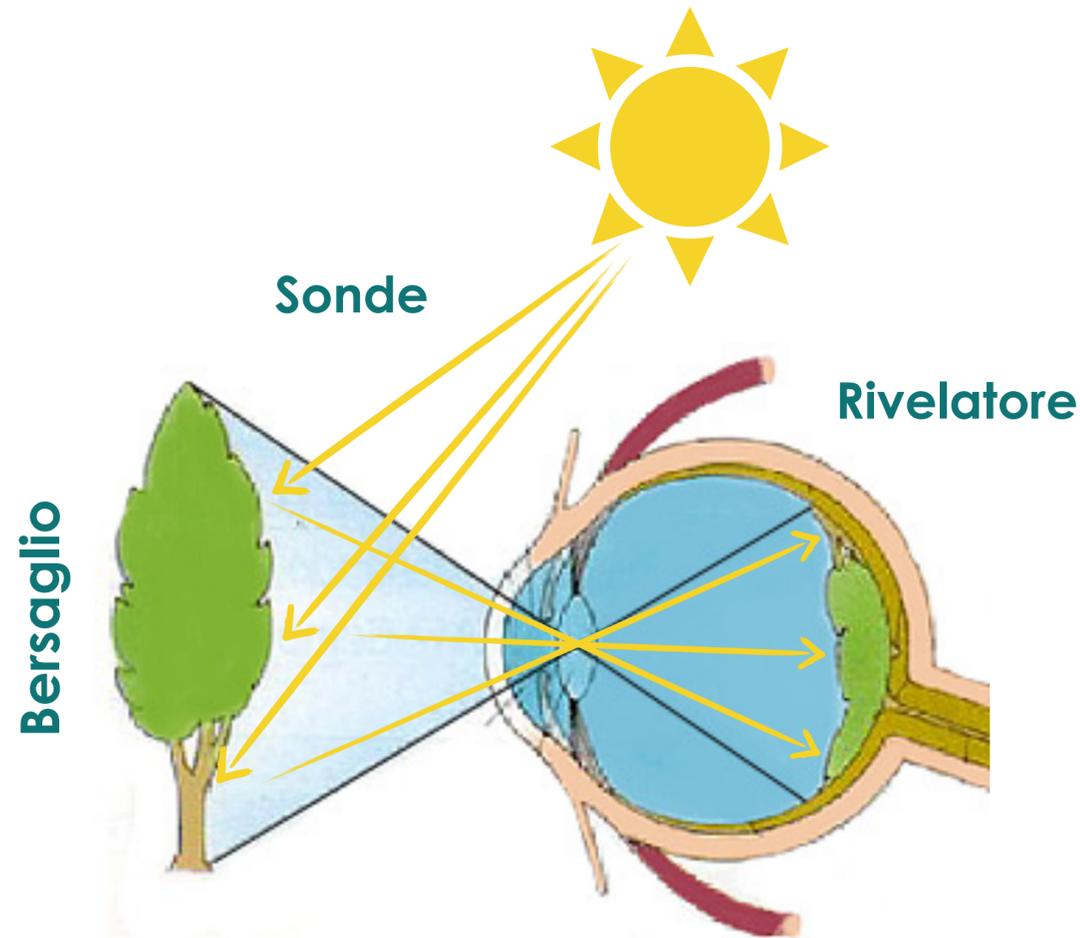
The background of the title section is a dark green and blue abstract graphic. It features numerous glowing lines and points, some of which are labeled with mathematical expressions like $z(2, 2)$ and $z(1, 1, 2)$. The overall effect is that of a complex particle detector or a network of data points.

International MasterClasses 2021: Rivelazione di particelle

Dott.ssa **Silvia Biondi** - Università e INFN di Bologna

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

“Vedere” con gli occhi



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!

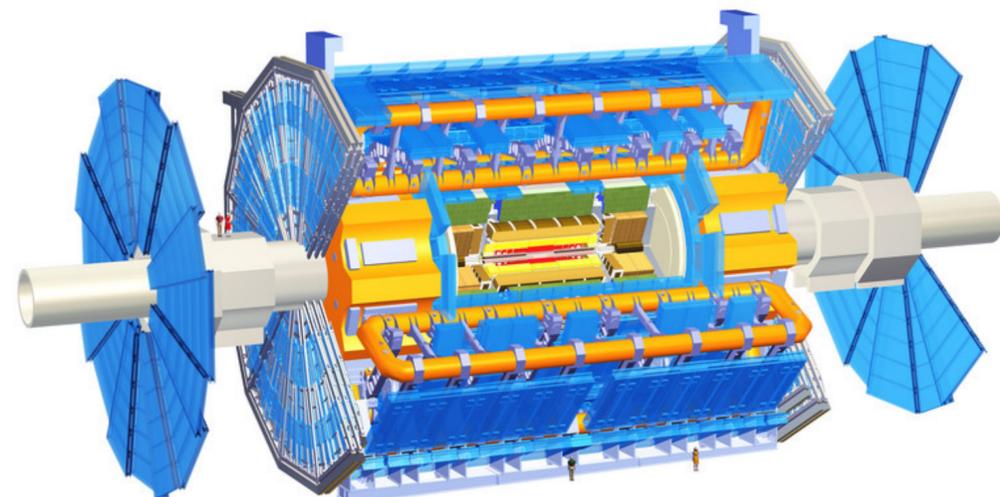


(i pipistrelli usano come “sonde” le onde sonore)

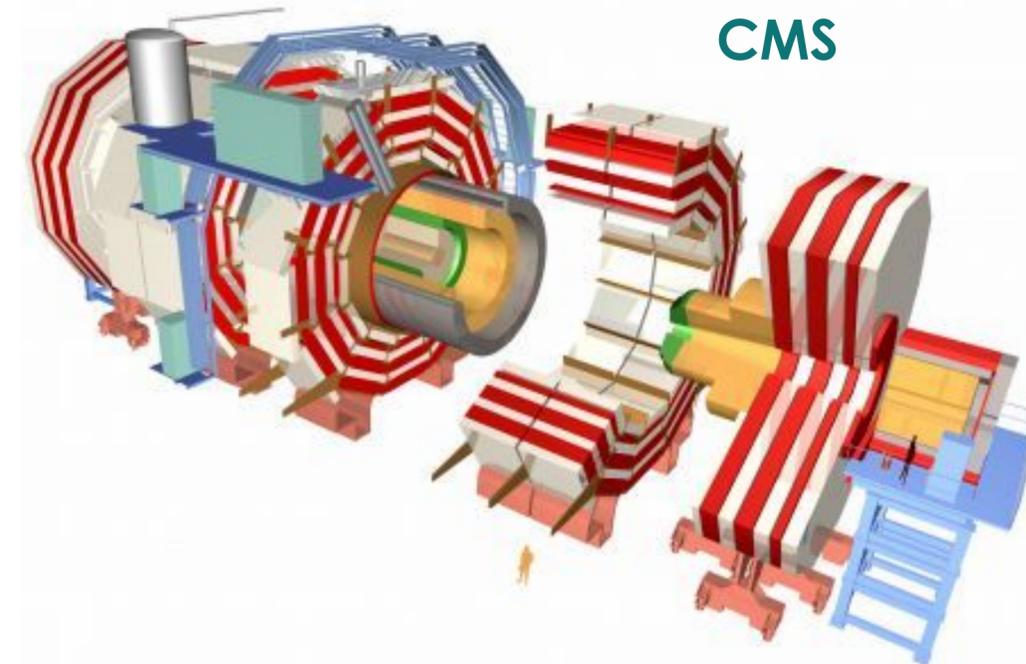
“Vedere” indirettamente



“Vedere” con i rivelatori di particelle

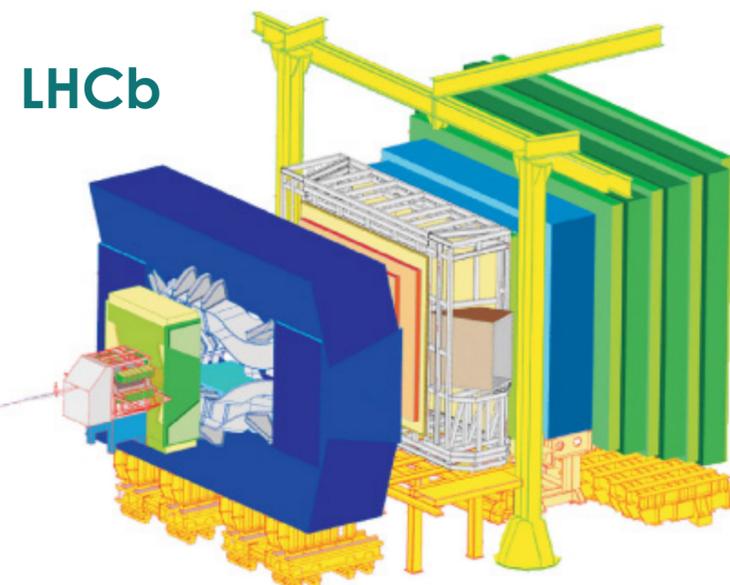


ATLAS

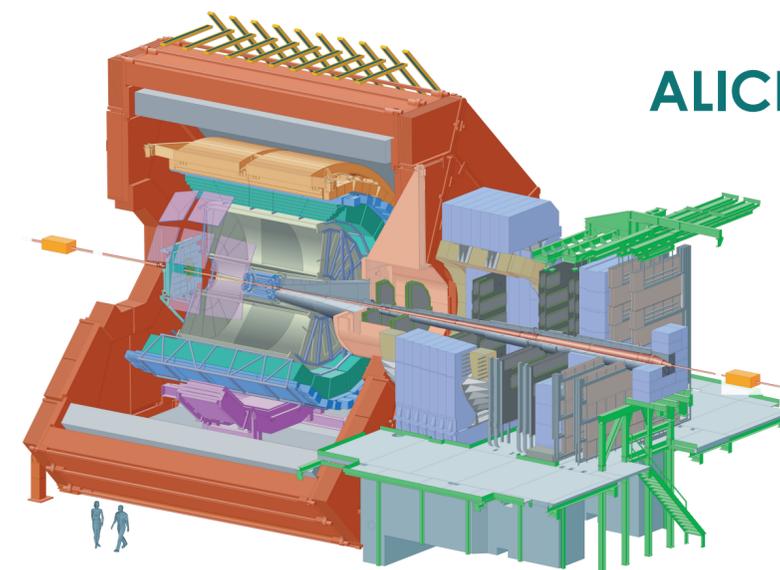


CMS

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



LHCb



ALICE

Ingrandimento non è risoluzione

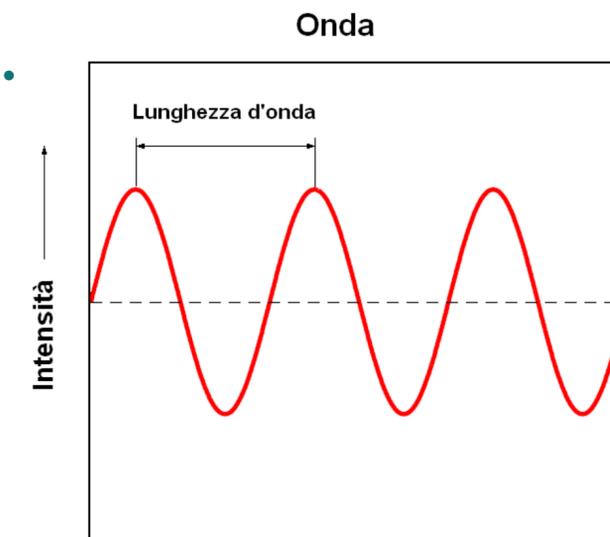


Potere risolutivo

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

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

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



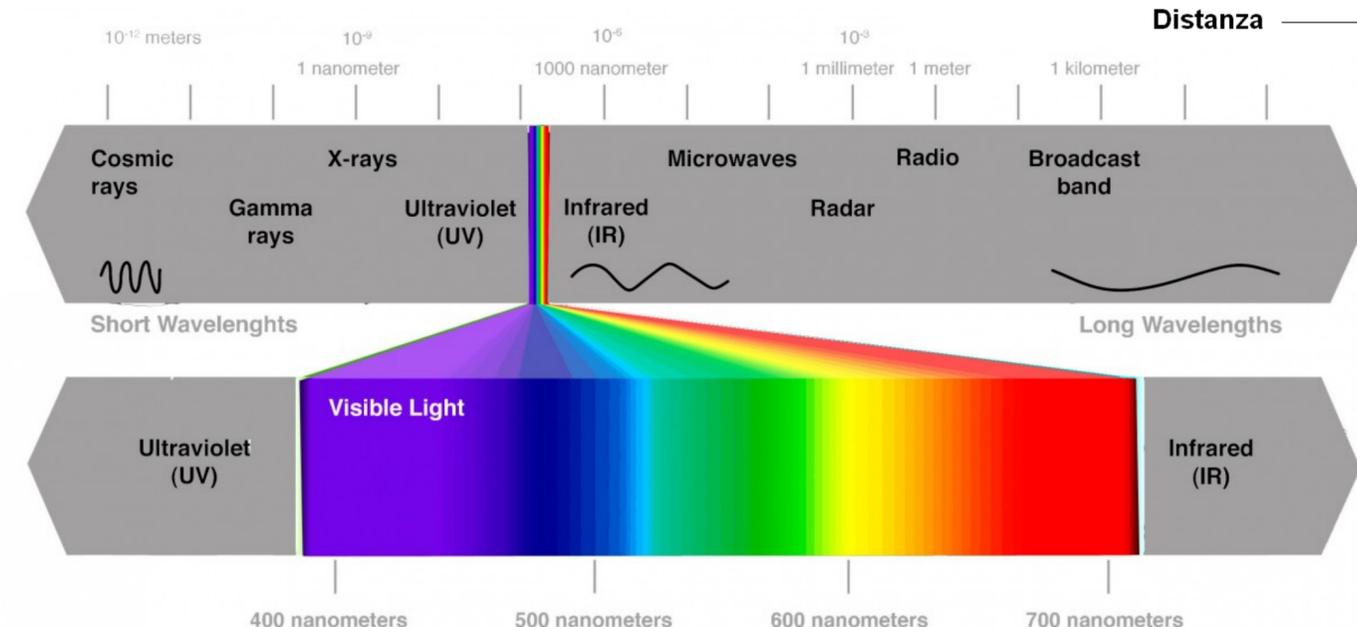
Microscopio ottico limitato dalla lunghezza d'onda della luce visibile.

~ 0.2 μm



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

~ 0.1 nm



NB!

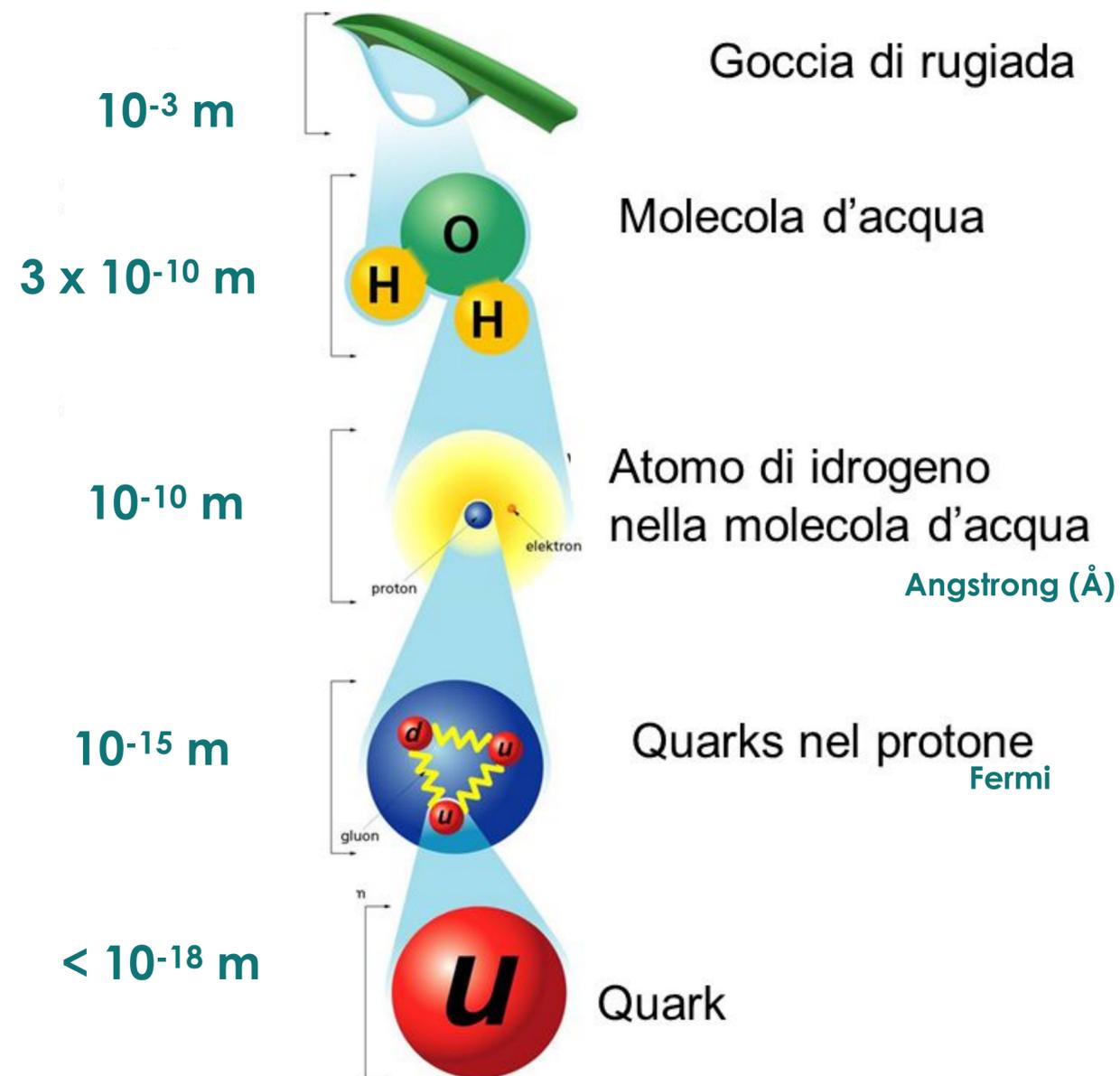
$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$$
$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

Dimensioni nucleari e sub-nucleari

Nel mondo dei quanti:

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

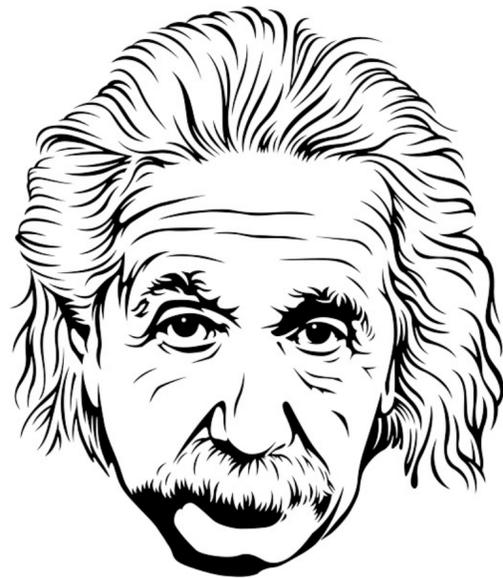
p = quantità di moto ($m \times v$)



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**.

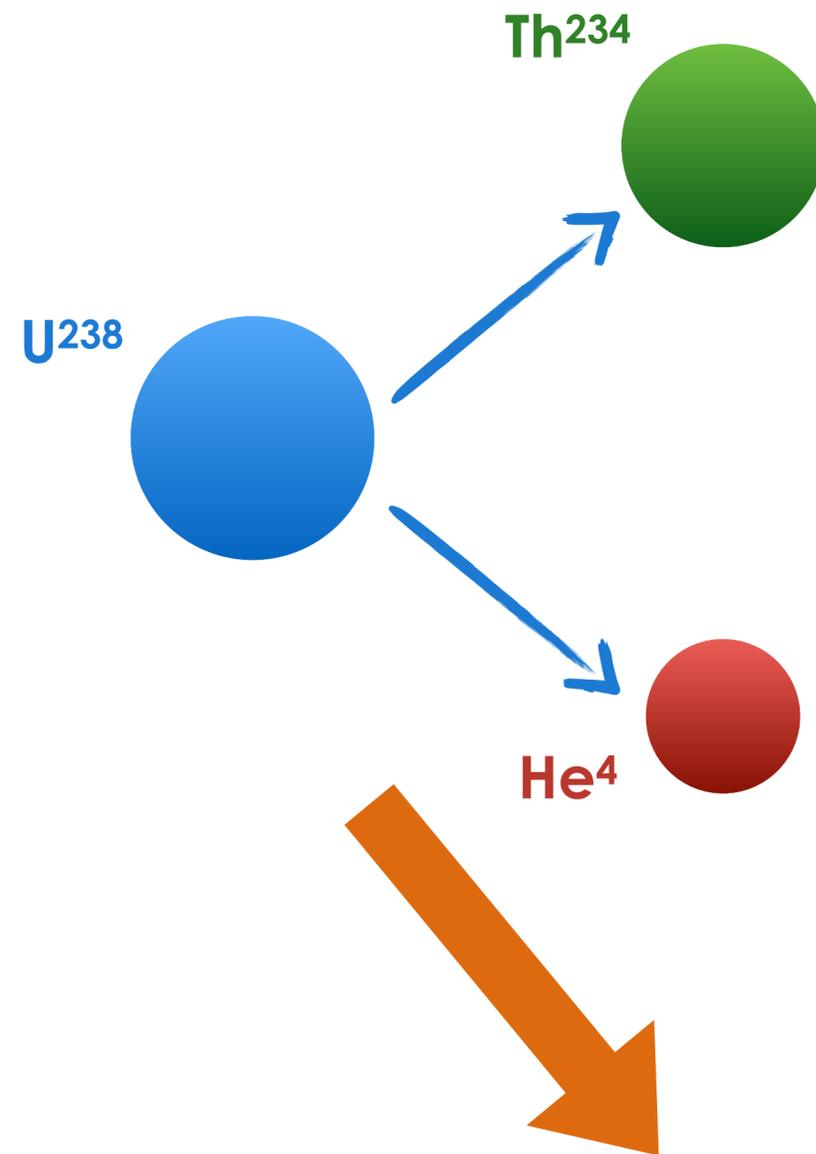
NB!

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



$$E = m c^2$$

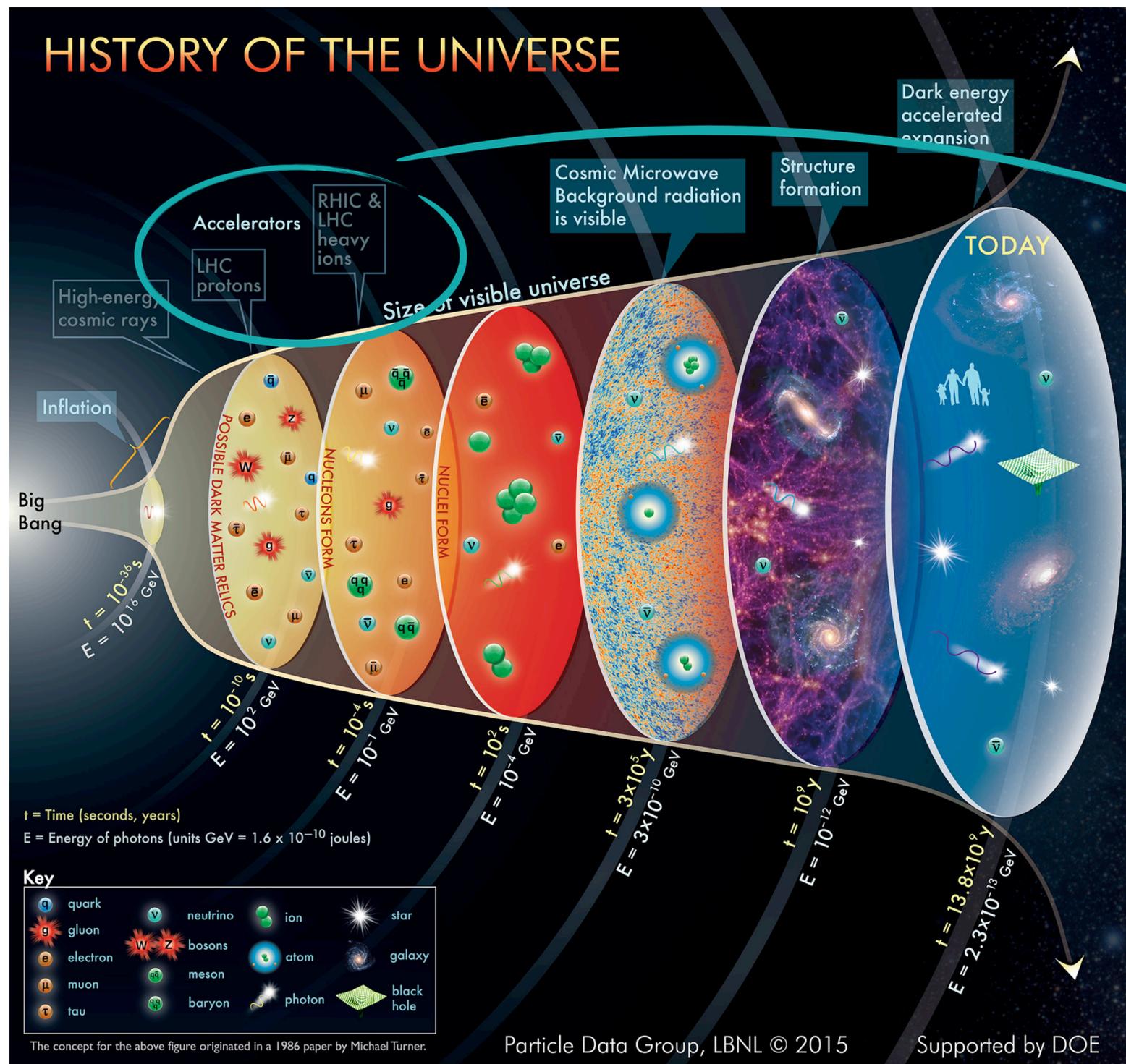
1. La massa, considerata isolatamente, non si conserva, ma subisce continue variazioni (aumenta quando assorbe energia, diminuisce quando la perde).
2. La massa è una forma di energia.
3. Qualsiasi corpo a riposo possiede un'energia per il solo fatto di avere una massa.
4. La conservazione dell'energia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

ENERGIA!



SCOPO

capire la nascita e l'evoluzione dell'Universo.

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

Molto difficile, ma....



Come facciamo?



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!

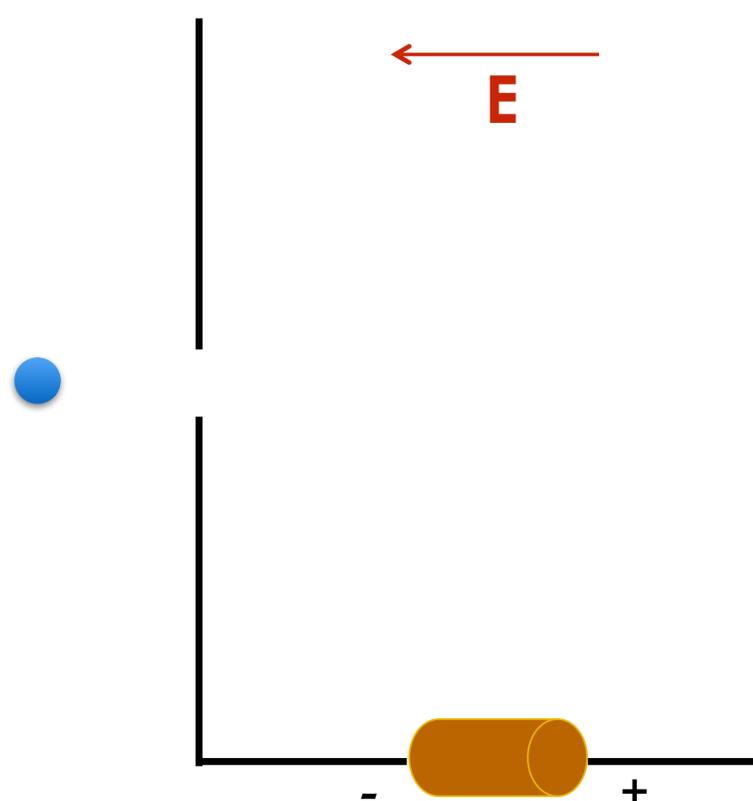
- ▶ **Raggi cosmici**
 - ★ Raggiungono energie molto maggiori di quelle accessibili con gli acceleratori più avanzati.



Acceleratori: come funziona?

NB! Acceleriamo sempre e solo particelle cariche NB!

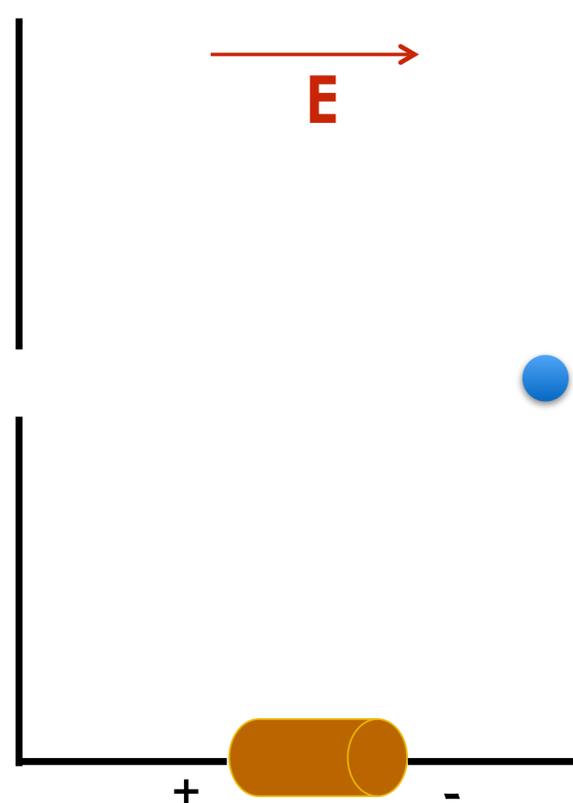
Campi elettrici
per fornire energia



Acceleratori: come funziona?

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

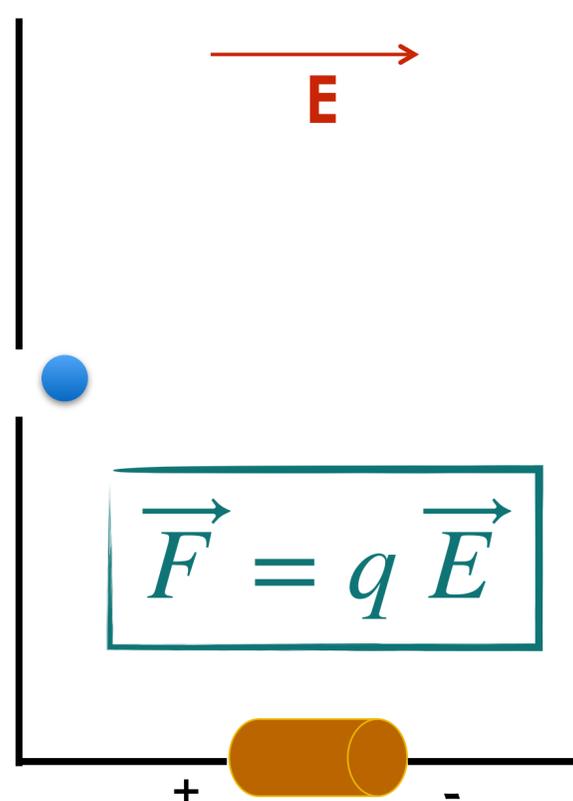
Campi elettrici
per fornire energia



Acceleratori: come funziona?

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

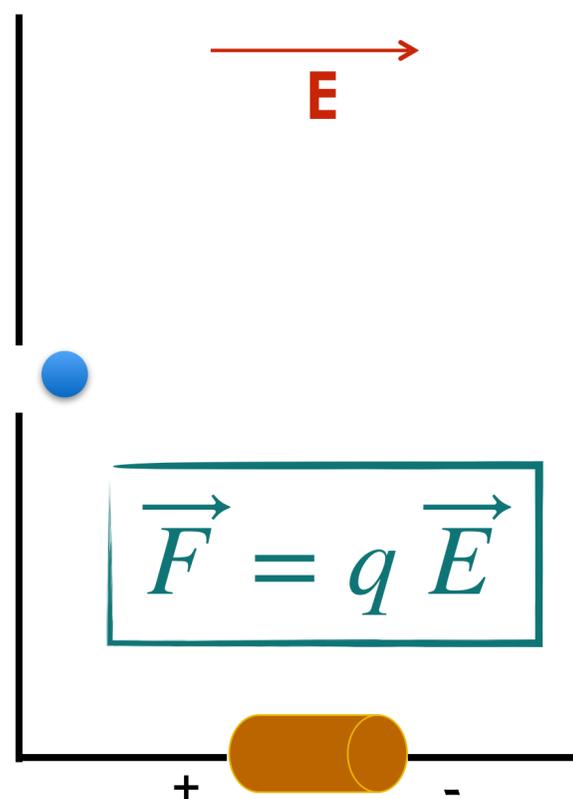
Campi elettrici
per fornire energia



Acceleratori: come funziona?

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

Campi elettrici
per fornire energia



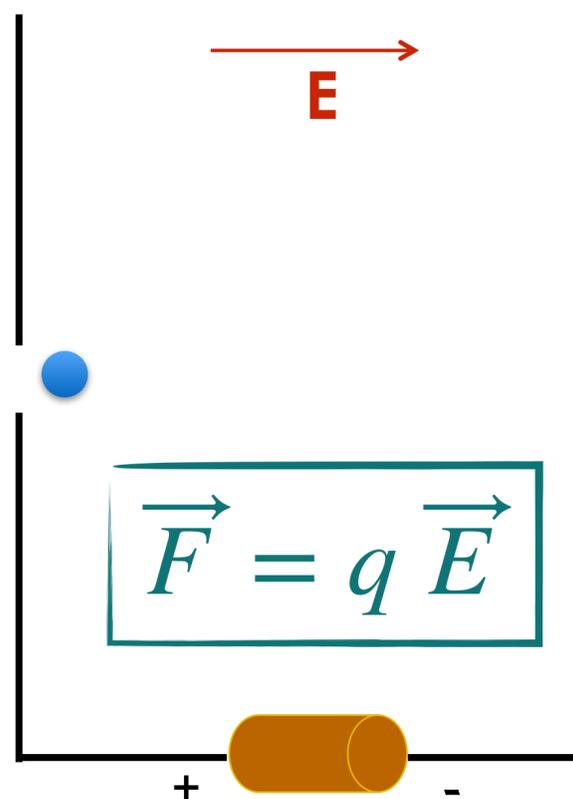
Campi magnetici
per guidare e focalizzare



Acceleratori: come funziona?

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

Campi elettrici
per fornire energia



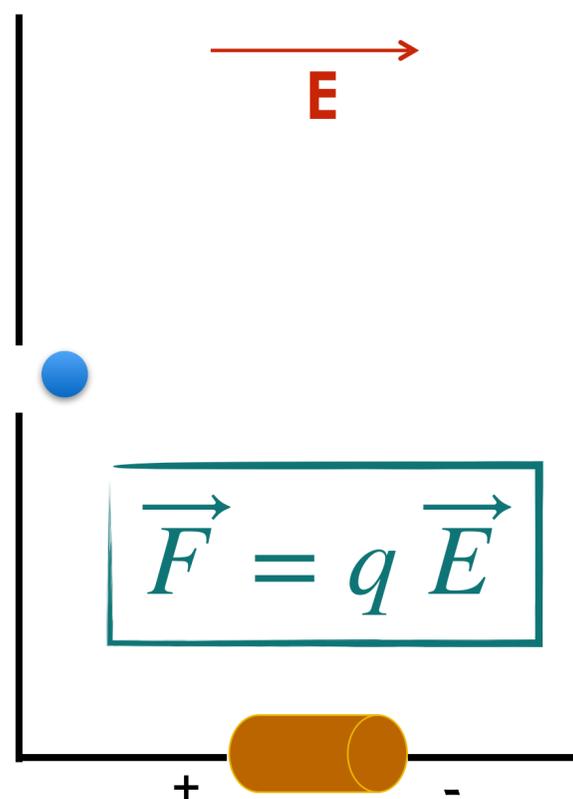
Campi magnetici
per guidare e focalizzare



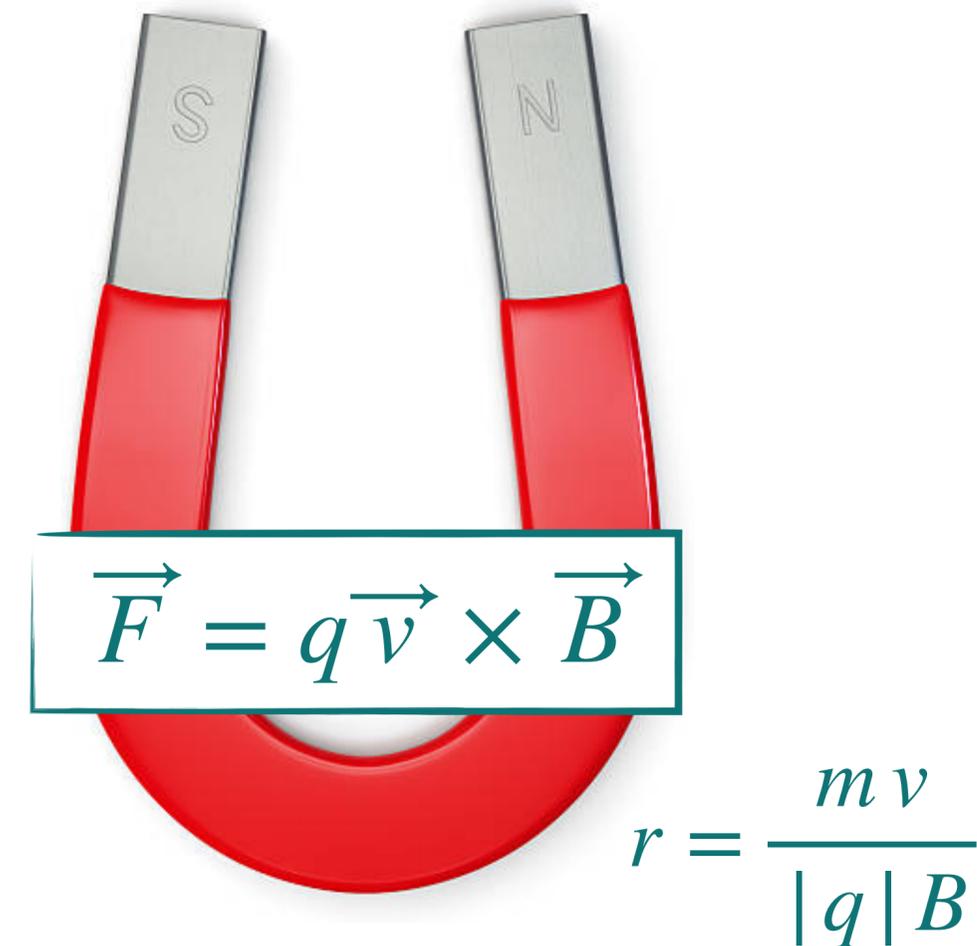
Acceleratori: come funziona?

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).



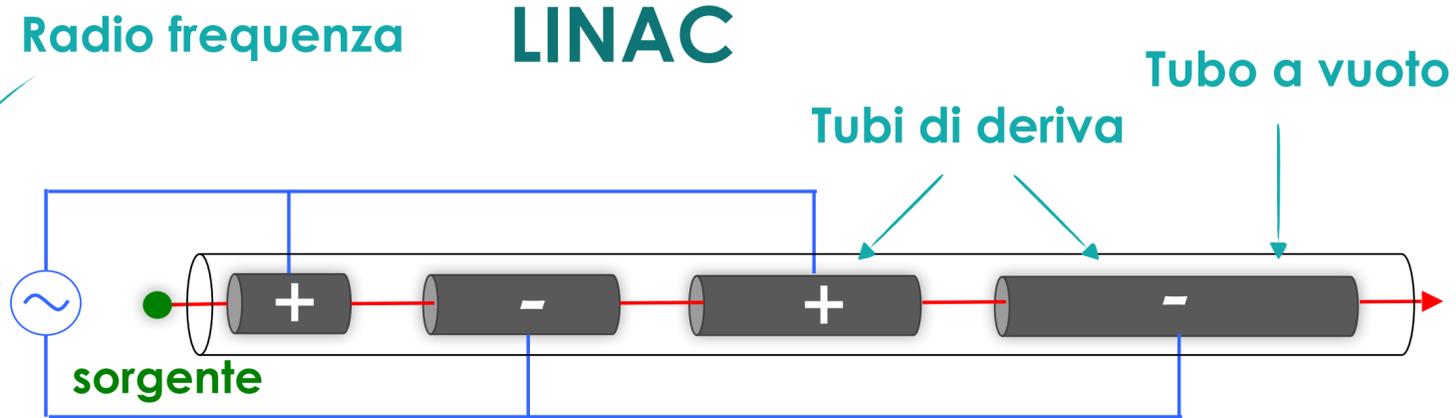
★ **Tipologia dipende da:**

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

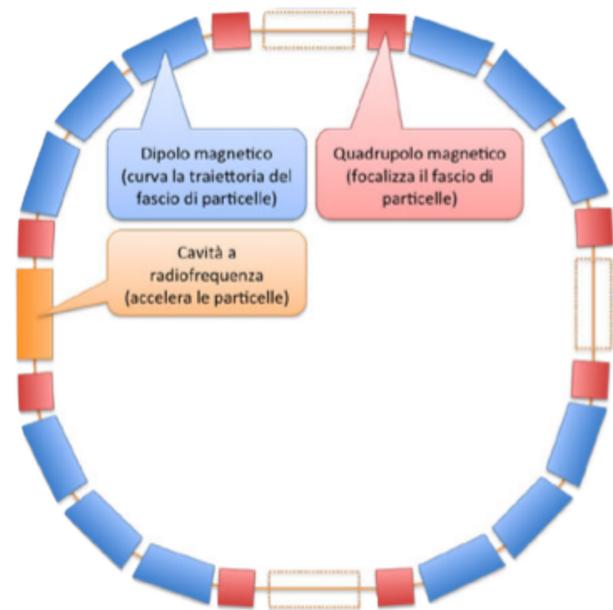


Diversi limiti:
 E_{max} , I_{max} , **costi**

Diversi tipi di acceleratori



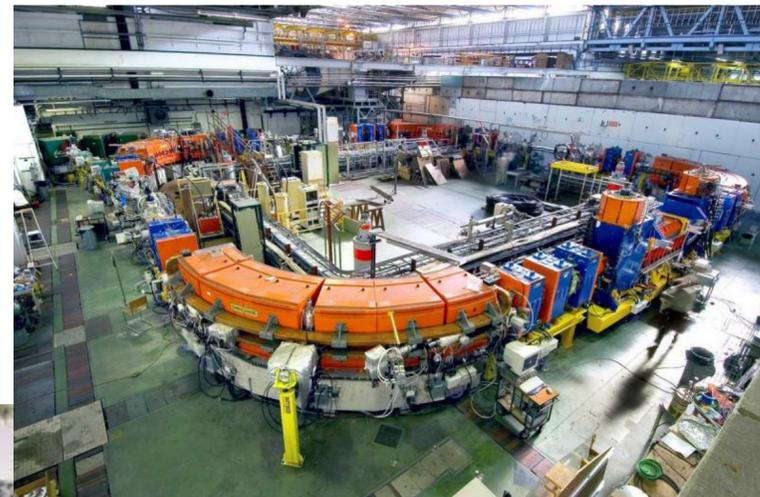
SINCROTRONI



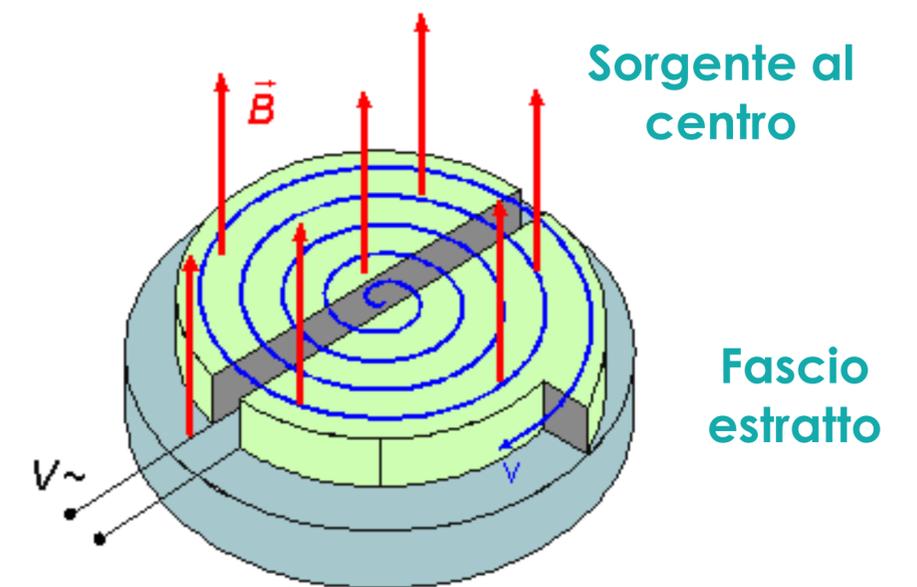
CNAO



LEIR



CICLOTRONI



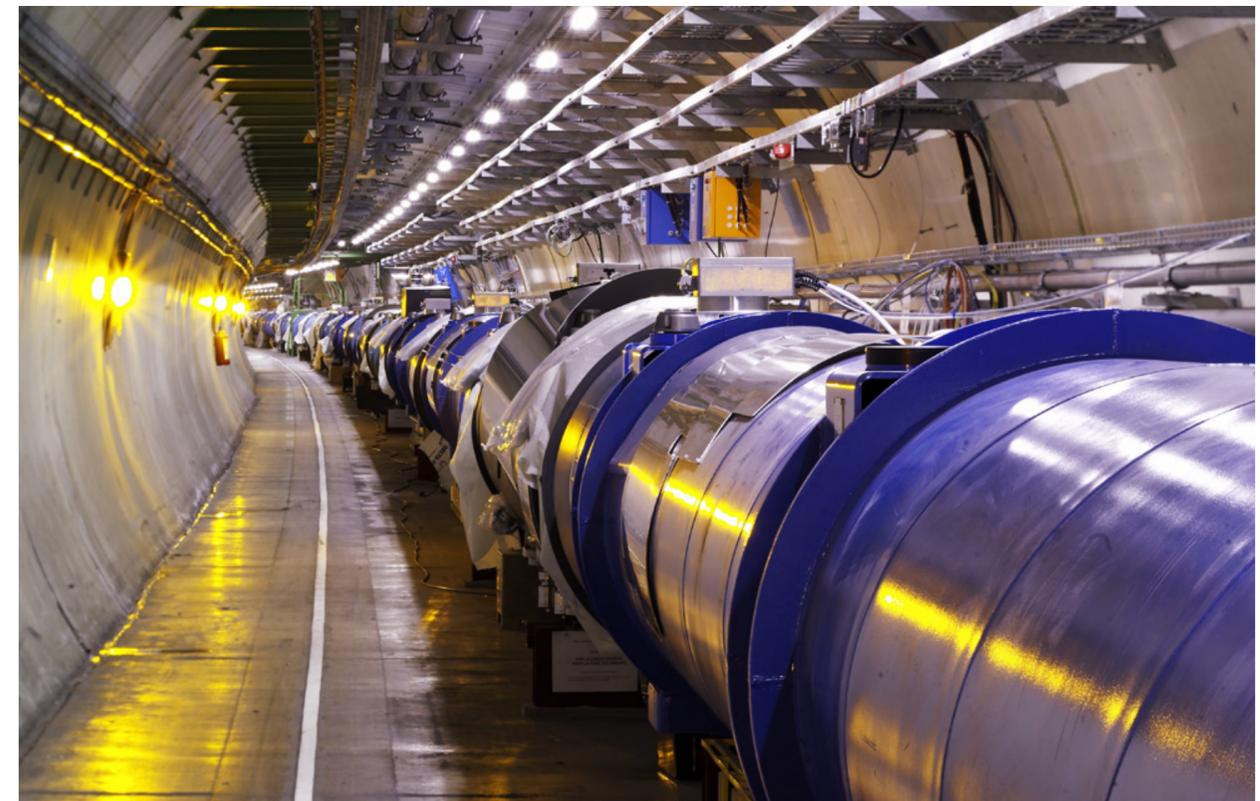
Benvenuti al CERN!



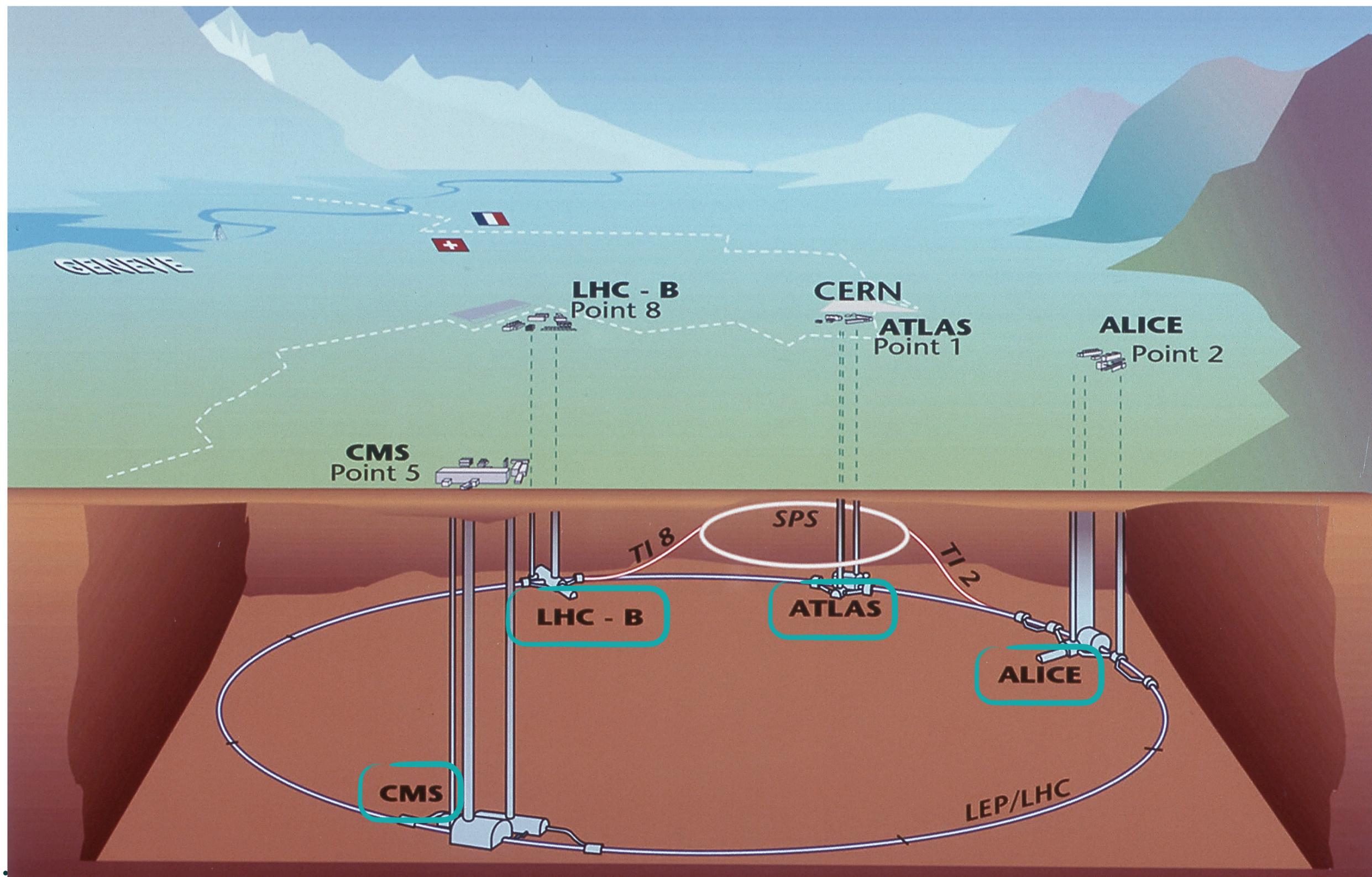
LHC Large Hadron Collider

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

- in ogni fascio: **2808 pacchetti** ($\sim 10^{11}$ protoni)
- **1.8 K (-271.3°)**, 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)!



I rivelatori di LHC

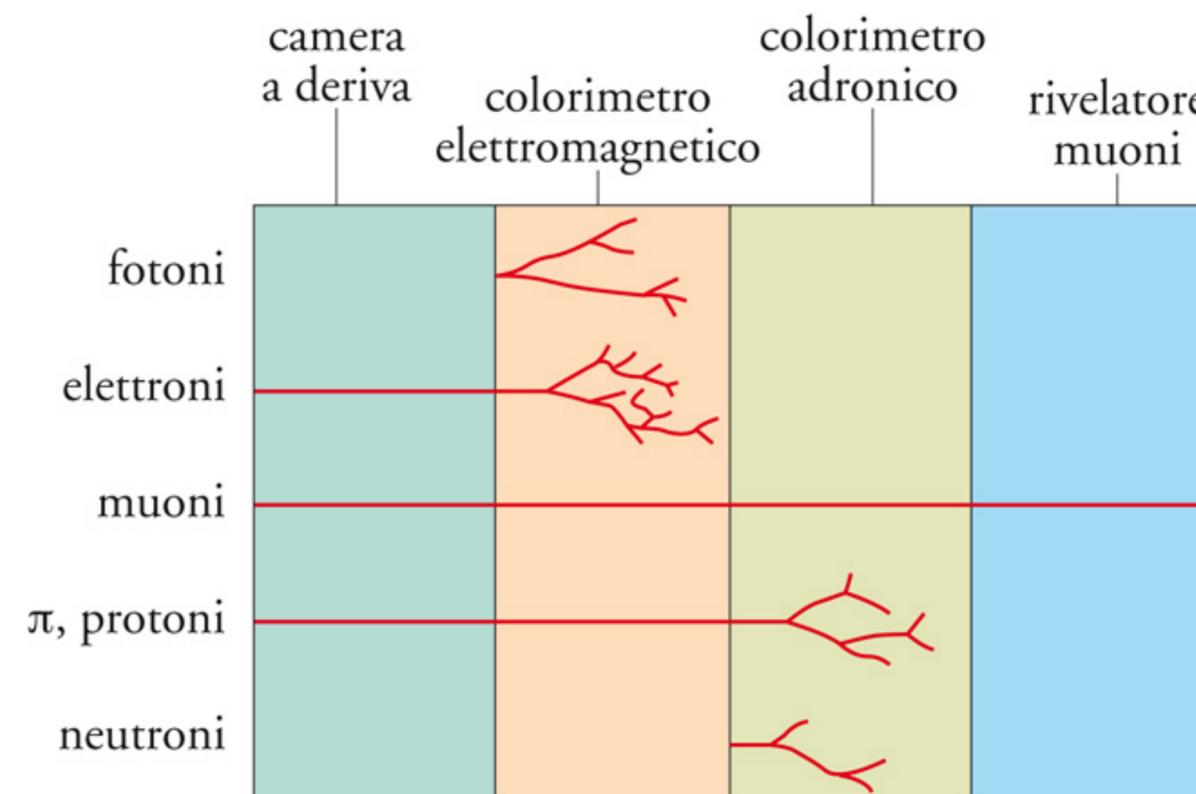
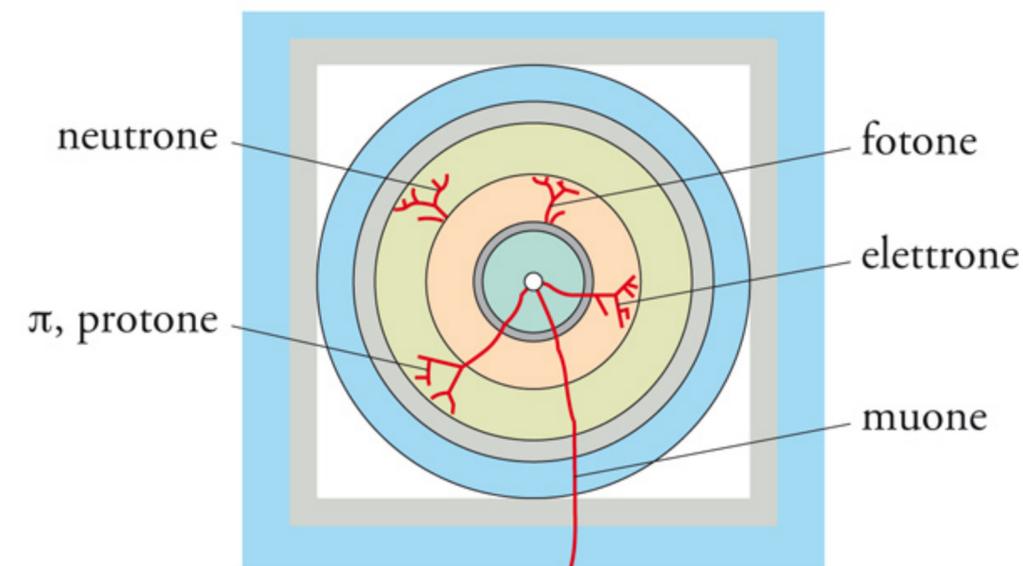


Struttura tipica di un rivelatore

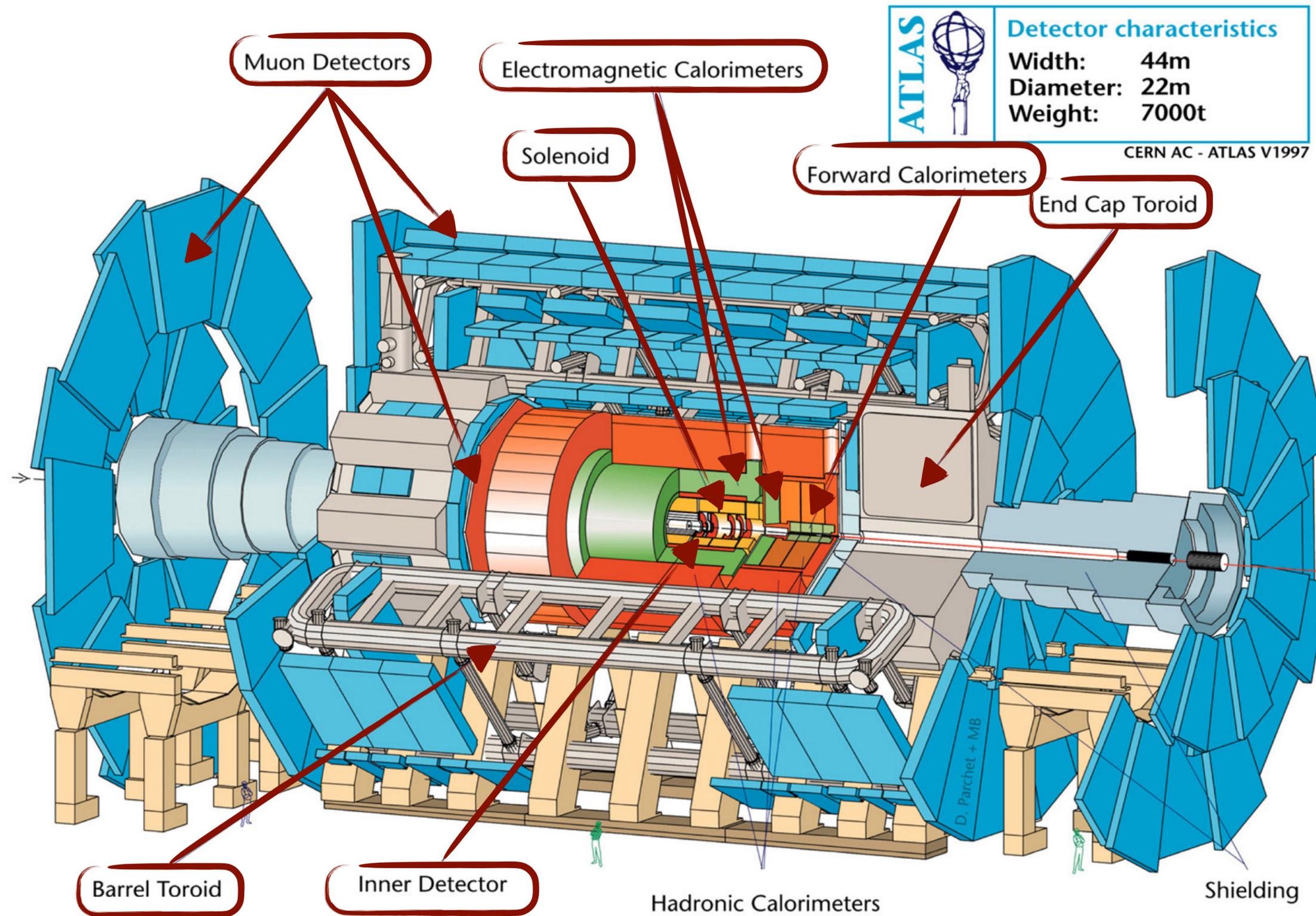
Struttura “a cipolla”: tanti strati cilindrici.
Dal centro verso l'esterno:

- **tracciatore** per ricostruire la traccia della particella carica;
- **calorimetro elettromagnetico** per assorbire e misurare l'energia di e^\pm e γ ;
- **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'



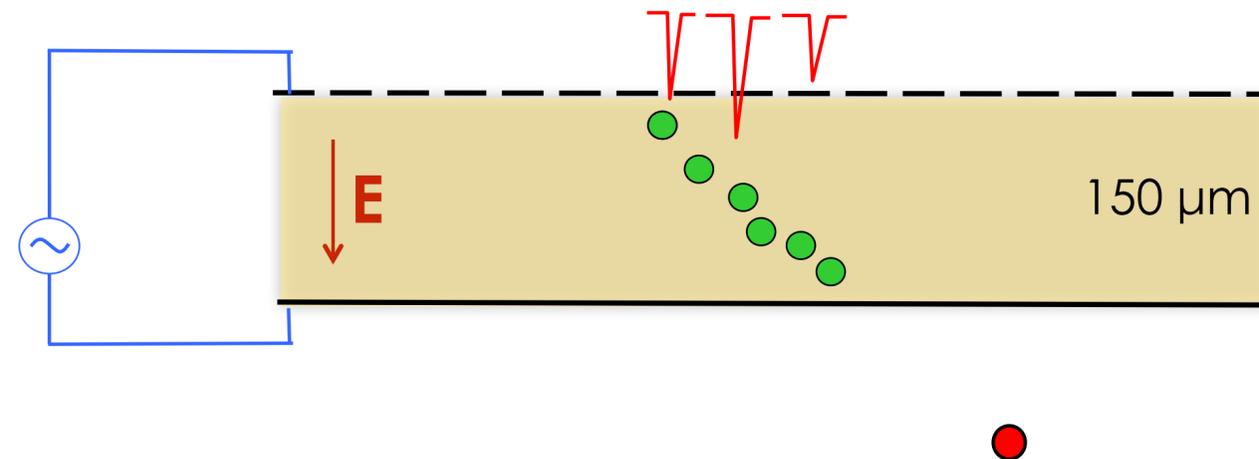
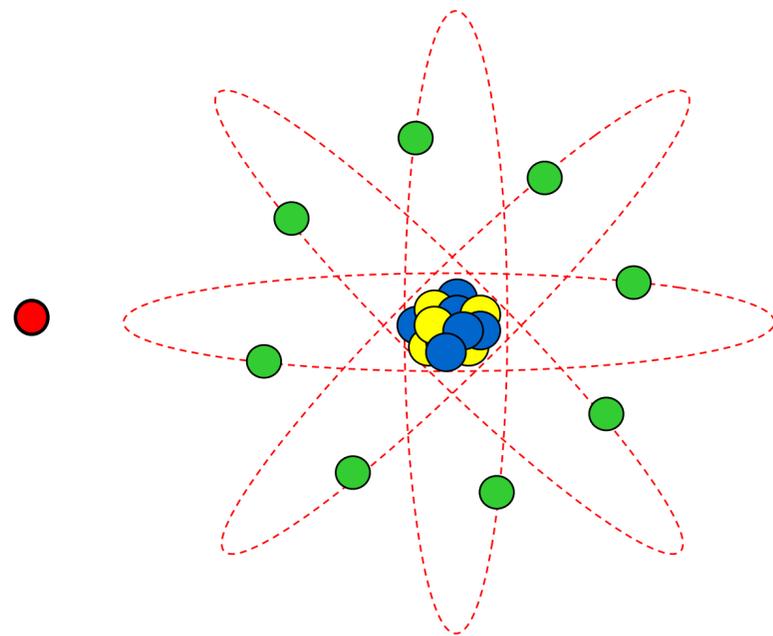
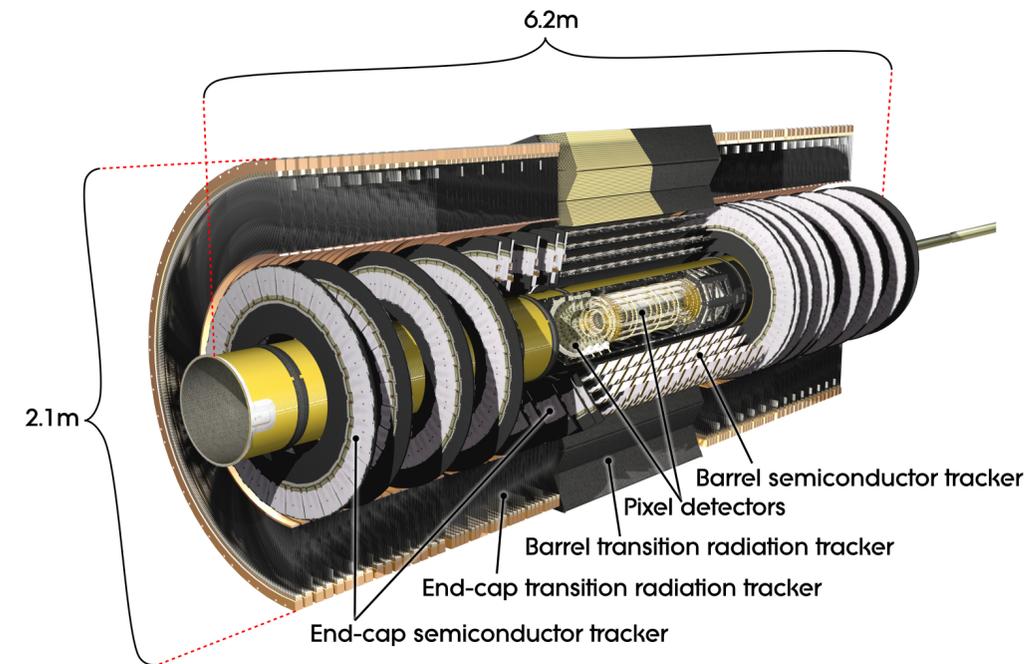
A Toroidal LHC Apparatus



Il tracciatore

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

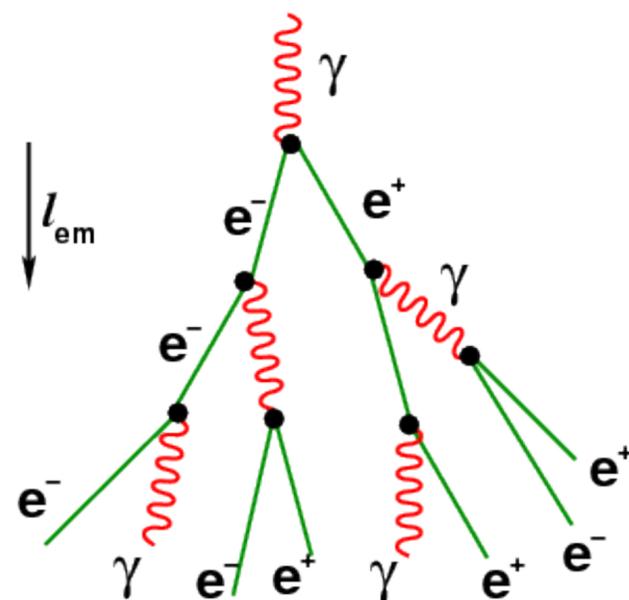
- volume cilindrico di **~ 2.0 m** di raggio;
- più strati di rivelatore al silicio con elettrodi a **pixel** (celle $100 \times 150 \mu\text{m}^2$) vicino al punto di interazione;
- fornisce tracce di particelle cariche con **alta precisione**.



I calorimetri

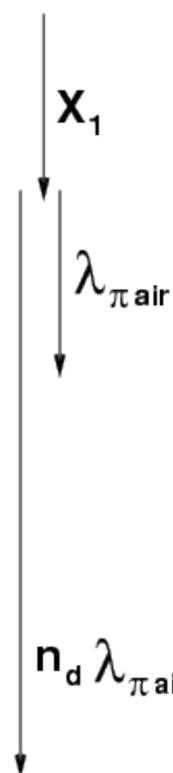
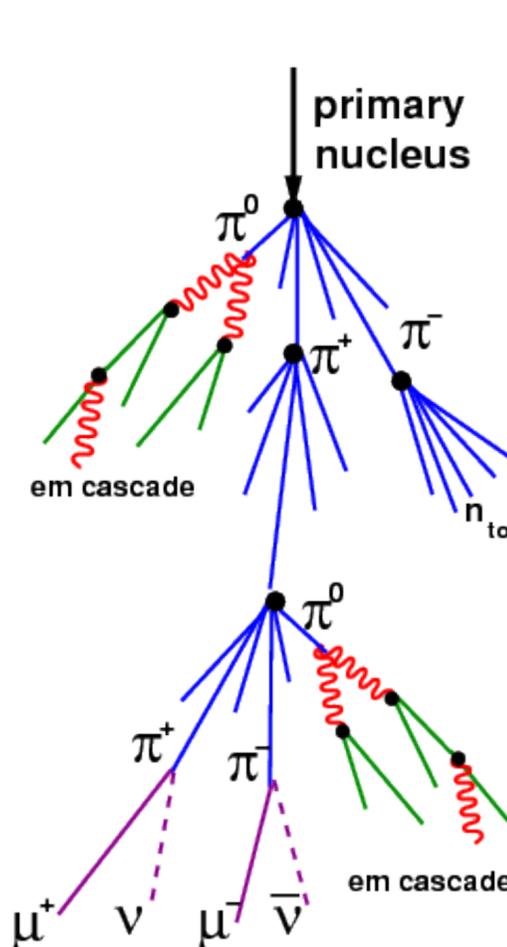
- **Assorbono completamente** le particelle per cui sono costruiti e ne misurano **l'energia**;
- tipicamente composti da strati di **materiale passivo** (assorbitore) e strati di **materiale sensibile** (scintillatori, rivelatori a gas, liquidi,...);
- calorimetri elettromagnetici possono essere anche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

Sciame elettromagnetico



calorimetro omogeneo
(~70000 cristalli di PbWO4)

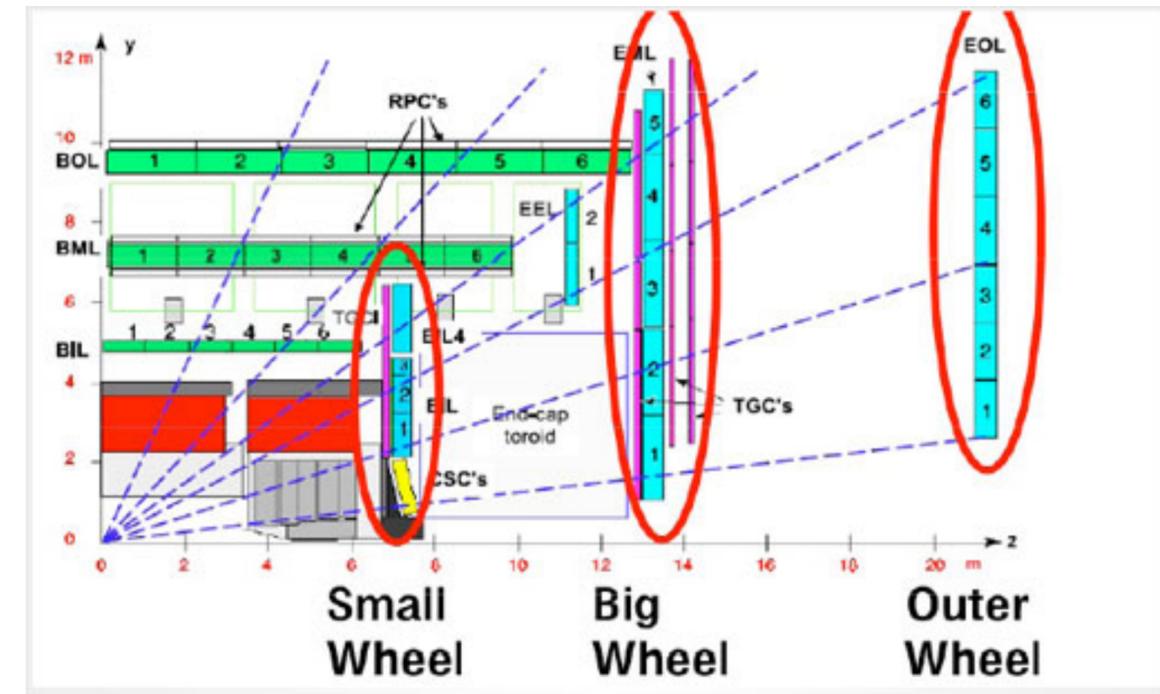
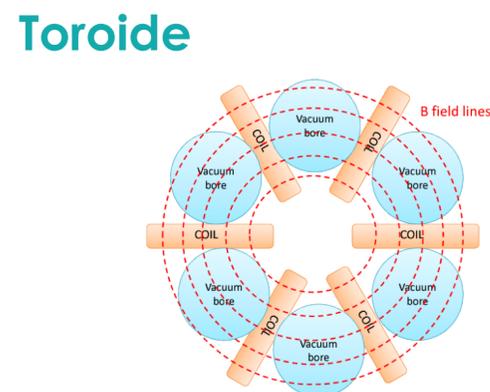
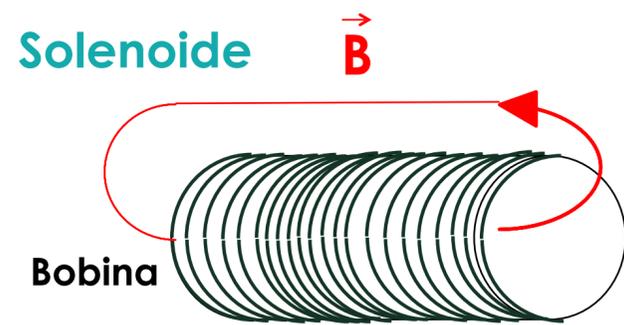
Sciame adronico



calorimetro a
campionamento
(ottone + scintillatore)

Magneti e rivelatore di muoni

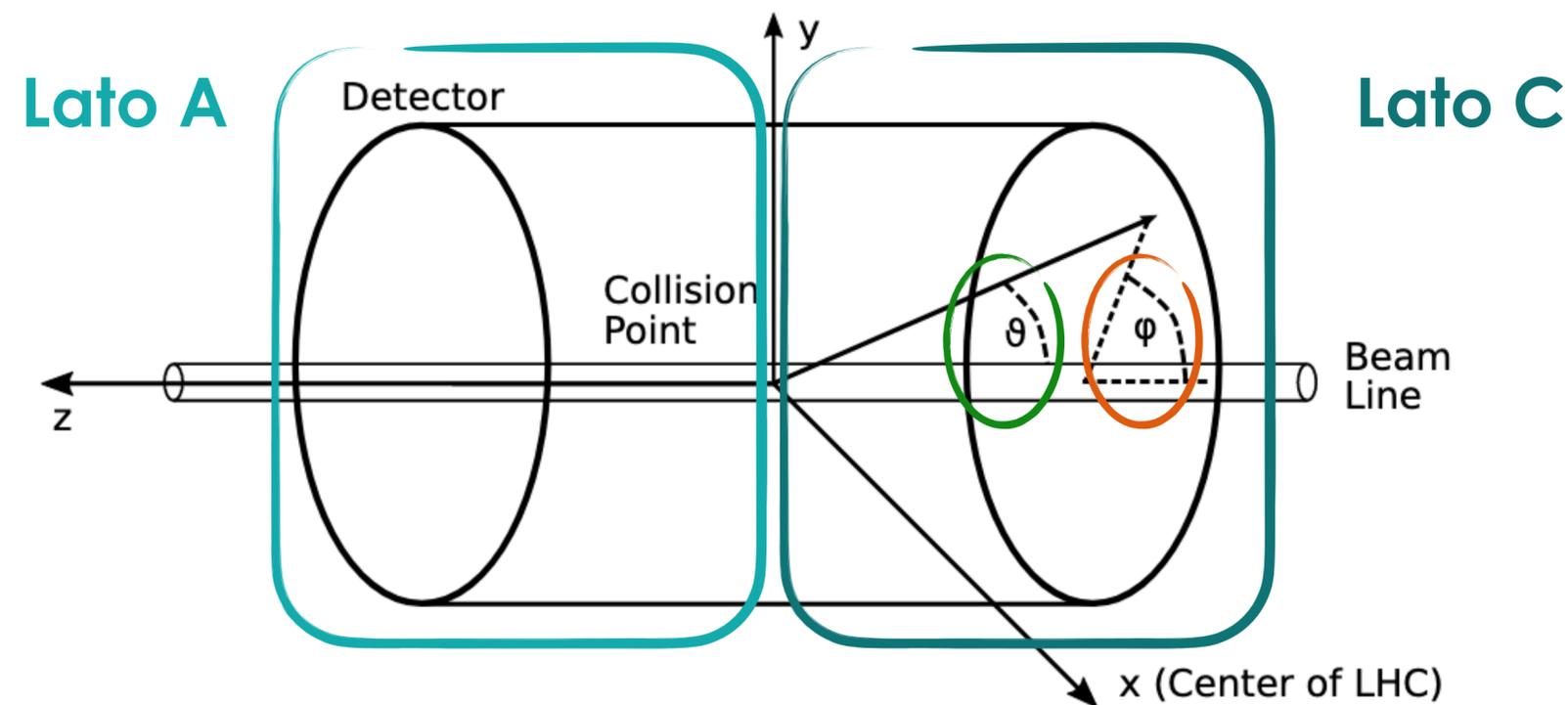
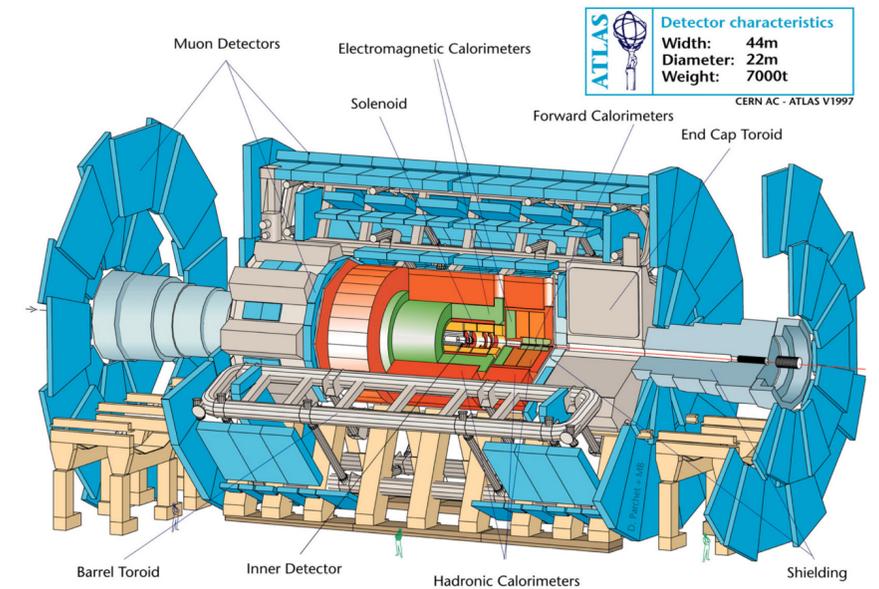
- Sistema magnetico costituito da due parti:
 - **magnete solenooidale superconduttore** circonda il tracciatore;
 - magneti superconduttori per generare **campo toroidale** all'esterno dei calorimetri.
- Diversi tipi di **rivelatori a gas** (tubi, camere, strip,...);
- **intorno al magnete e negli spazi vuoti tra i magneti**, contengono il "ritorno" del campo magnetico;
- grande risoluzione per la misura delle **tracce lasciate dai muoni, curvate dal campo magnetico**.



Coordinate dell'esperimento ATLAS

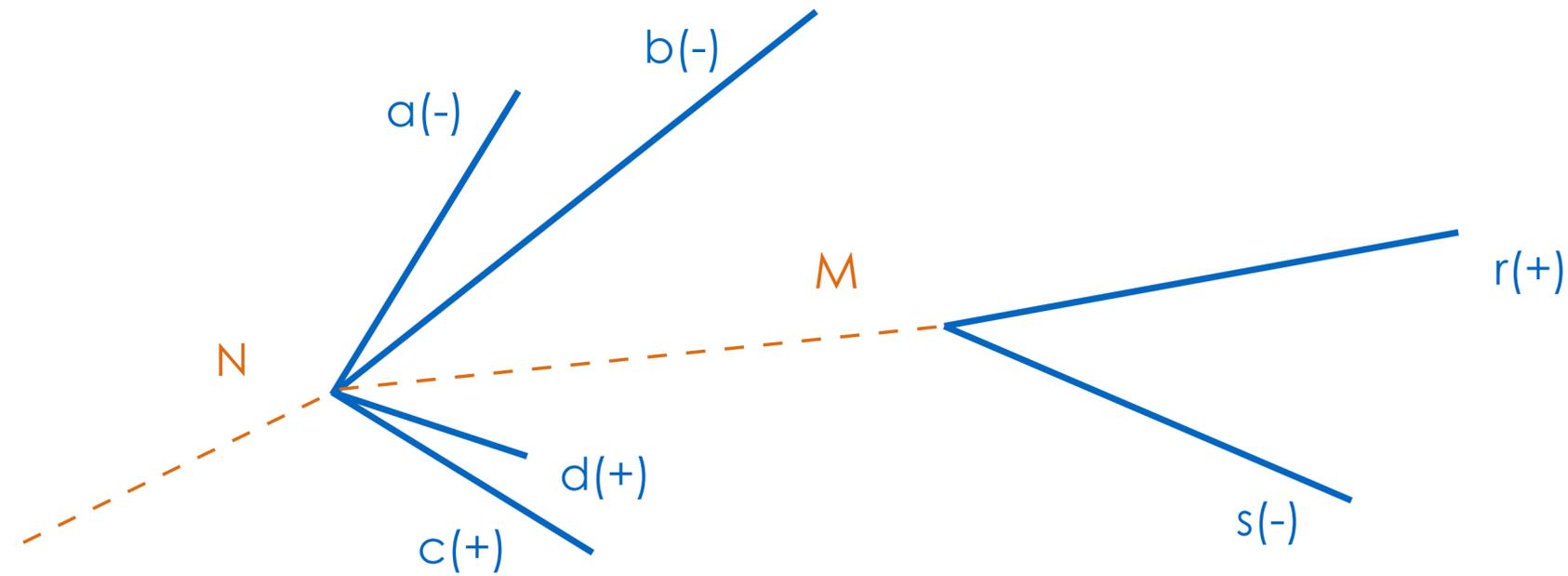
★ **Cruciale sapere qual è il sistema di coordinate usate dall'esperimento!**

- Due "lati": **lato A** ($z > 0$), **lato C** ($z < 0$);
- Due angoli fondamentali:
 - θ angolo polare (piano z-y)
 - ϕ angolo azimutale (piano x-y)



Cosa vuol dire ricostruire una particella?

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



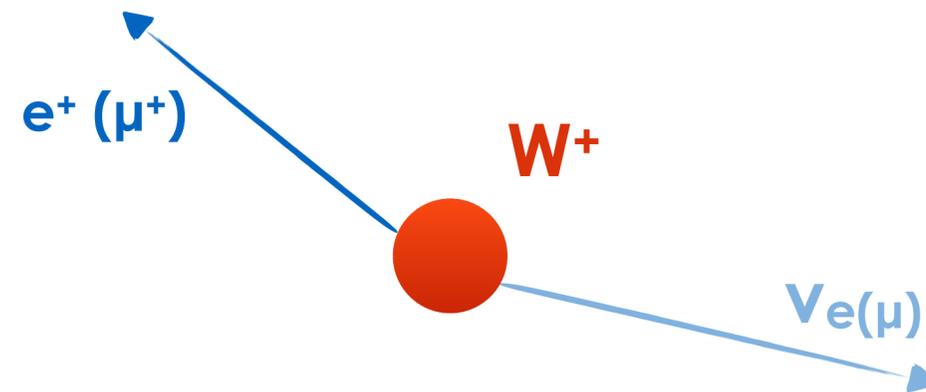
- Si può facilmente dedurre che **r** e **s** provengano da una particella **M** neutra e che **a**, **b**, **c**, **d** hanno un “genitore” **N**;
- è possibile, inoltre, che **M**, **a**, **b**, **c**, **d** siano prodotte da un unico “genitore” (**N**);
- ciascuna combinazione (**a,c**), (**b,d**),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

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**.

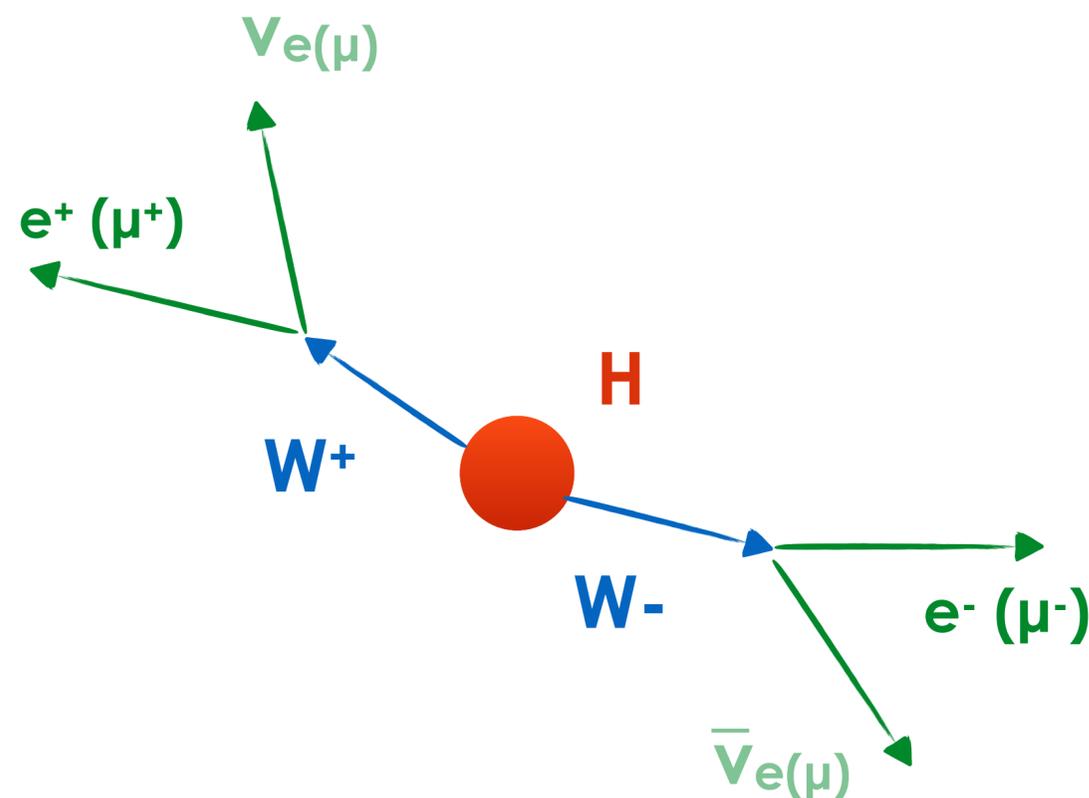
definito come la **somma vettoriale (negativa!) del p_T di tutti gli oggetti fisici selezionati nello stato finale**

Bilancia l'evento finale che altrimenti non conserverebbe l'energia!

Ricostruzione del bosone di Higgs

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

- Consideriamo un decadimento:
 - 2 bosoni W (stessi decadimenti visti poco fa)
- Il decadimento è immediato: $c\tau_H \approx 10^{-14} \text{ m}$

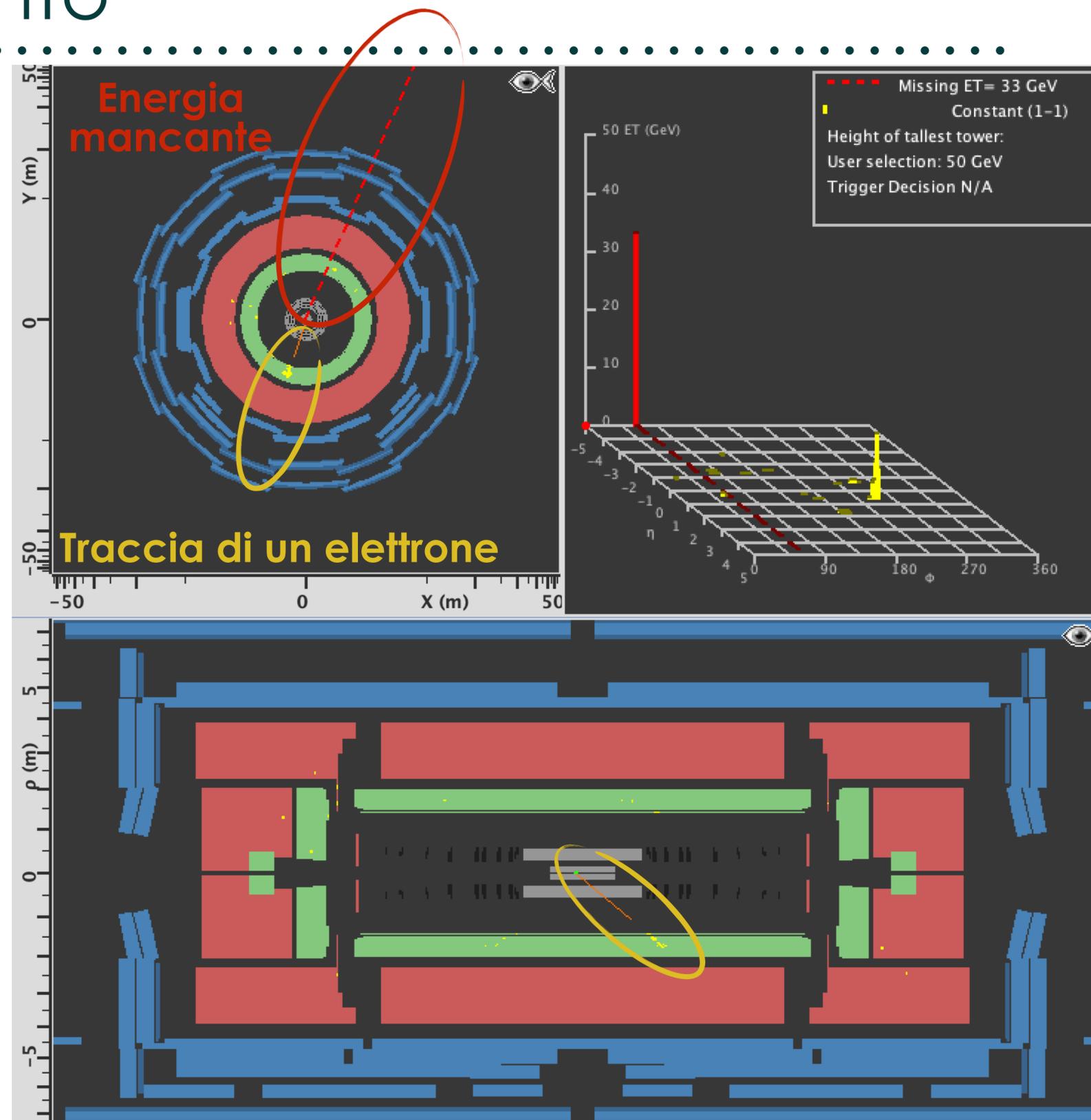


Segnatura dello stato finale:

- **1 muone e 1 elettrone** + due neutrini
- **2 elettroni (muoni)** + due neutrini

Esempio di evento

$$W \rightarrow e\nu$$



$p_T > 10 \text{ GeV}$

E ORA TOCCA A VOI!



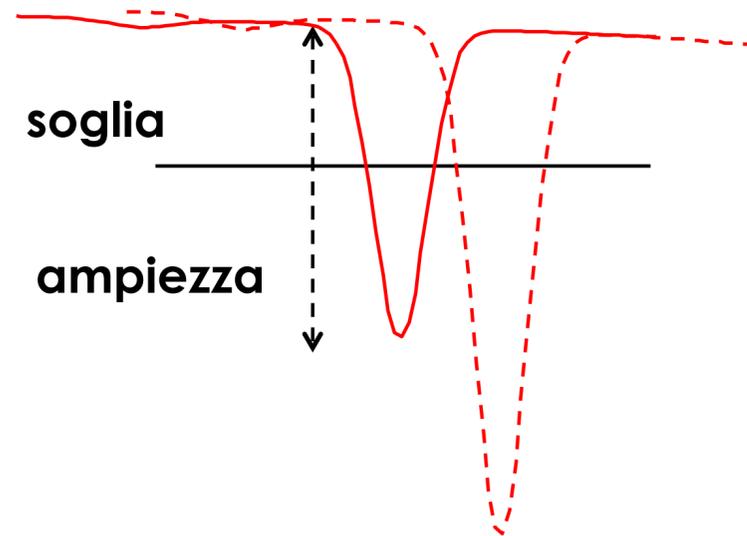


Backup

Acquisizione dei dati

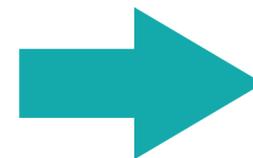
Molti rivelatori, un solo problema:

estrarre informazioni da un segnale elettrico analogico.



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

SEGNALE ELETTRICO ANALOGICO



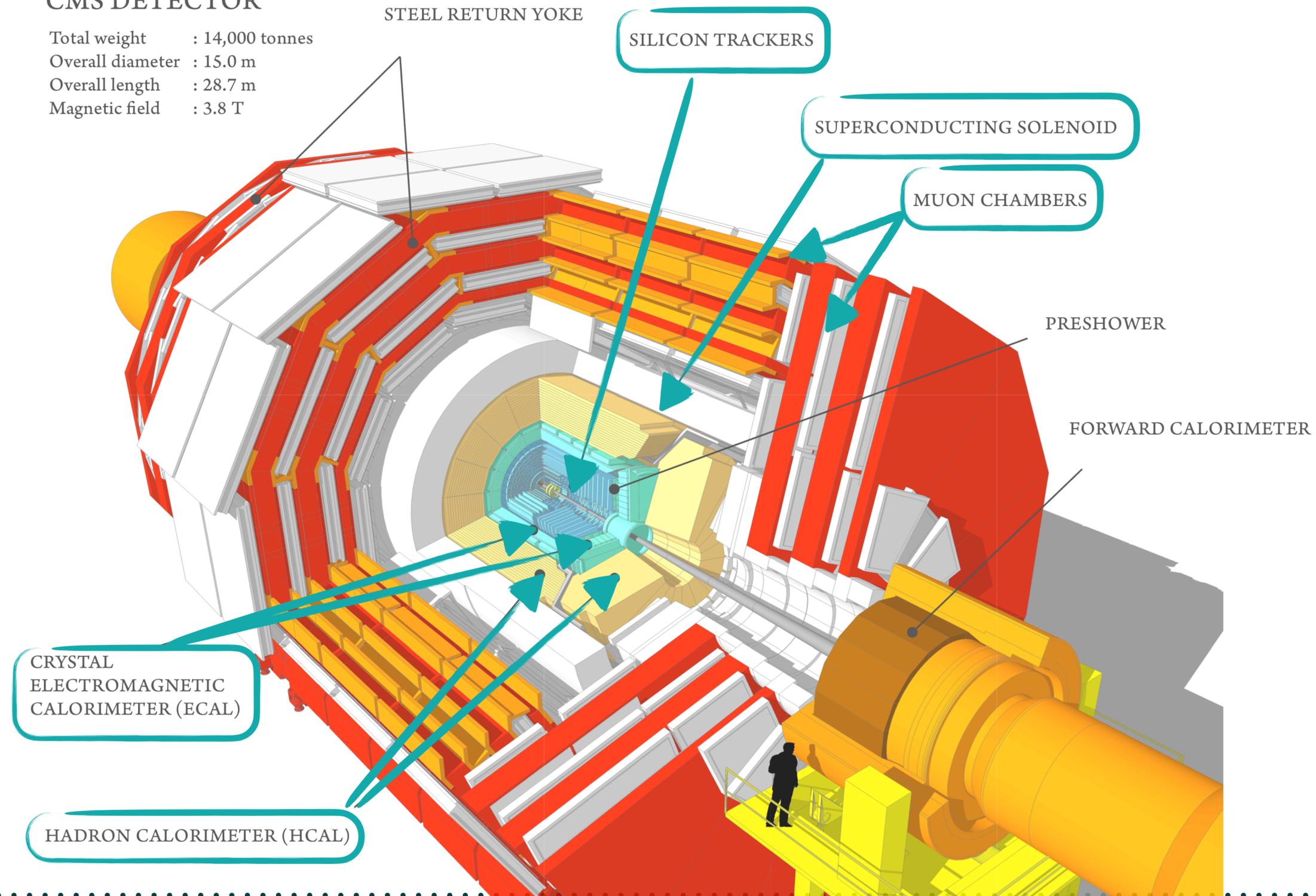
INFORMAZIONE DIGITALE

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

Compact Muon Solenoid

CMS DETECTOR

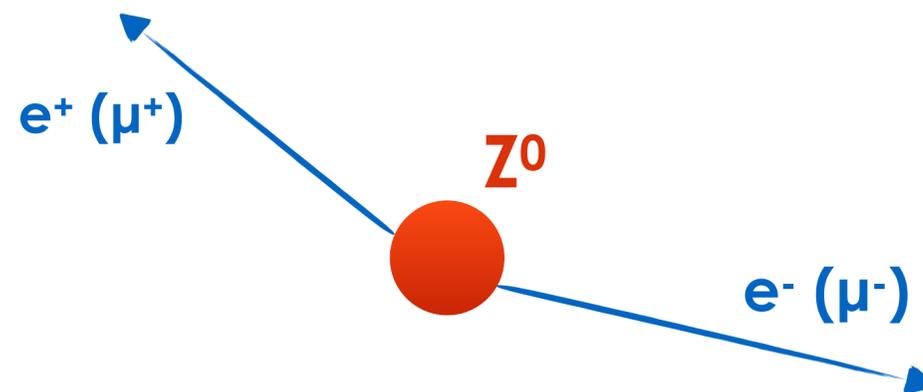
Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



Ricostruzione del bosone Z

$M_Z \approx 91 \text{ GeV}$
vita media $\tau \approx 3 \times 10^{-25} \text{ s}$

- Consideriamo solo i decadimenti in coppie e^\pm, μ^\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

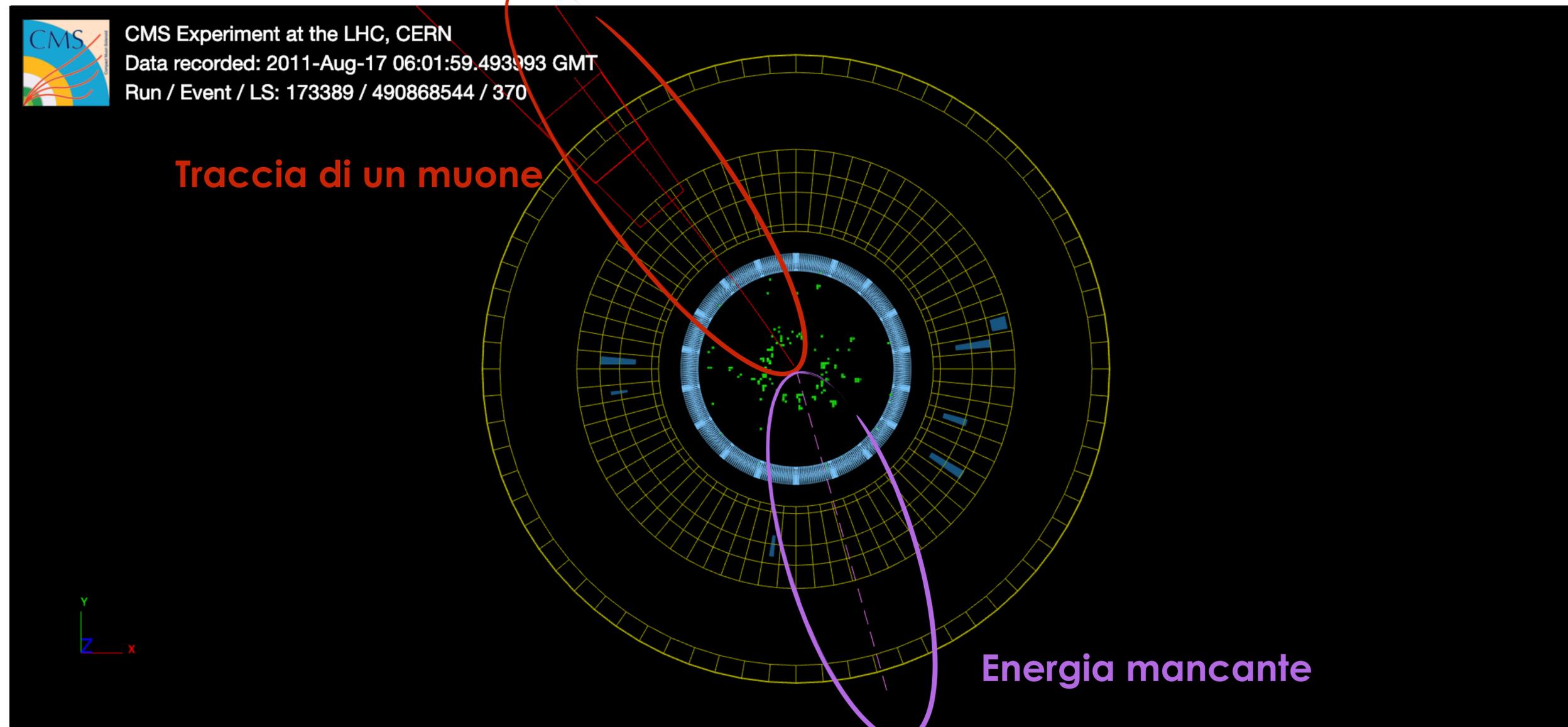
Conoscendo l'**energia** e l'**impulso** dei **prodotti di decadimento** si può calcolare la **massa del "genitore"** (leggi di conservazione + cinematica relativistica).

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

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

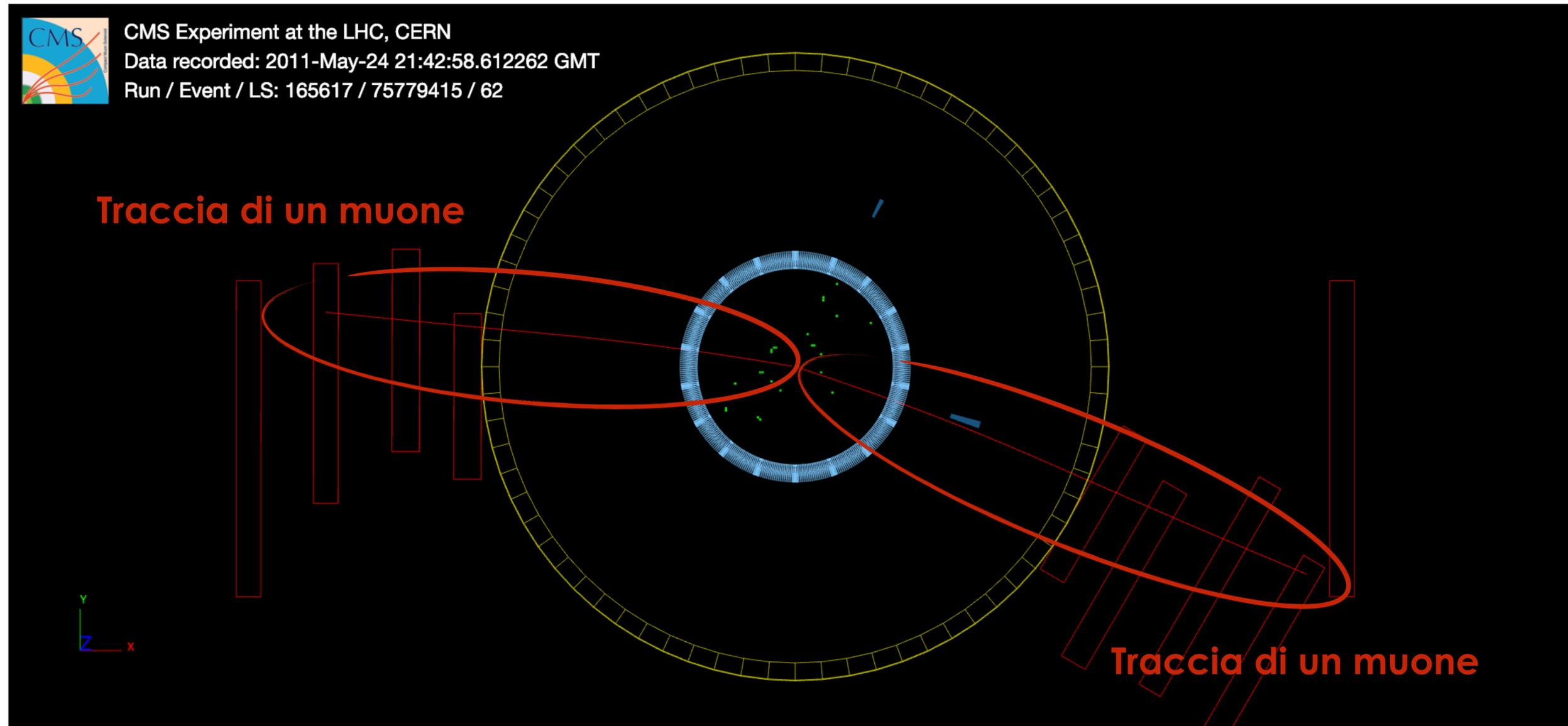
Esempi di eventi

$W \rightarrow \mu\nu$



Esempi di eventi

$Z \rightarrow \mu\mu$



Esempi di eventi

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

