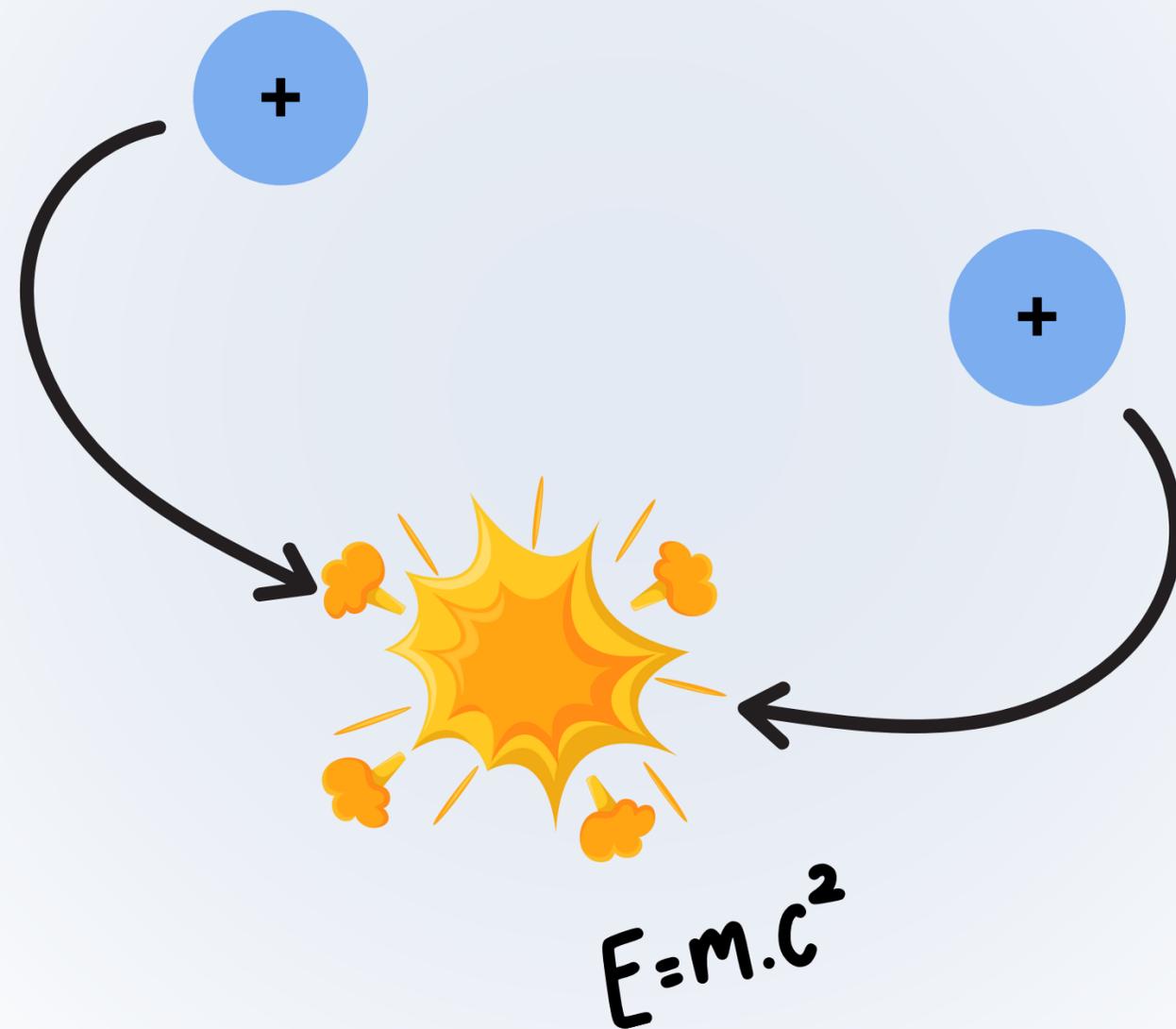


# ACCELERATORI E RIVELATORI DI PARTICELLE

Masterclass ATLAS-Pisa, 28 febbraio 2025

Martina Cucinotta



UNIVERSITÀ DI PISA



# Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.11 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
LEPTONS	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

**GAUGE BOSONS**  
VECTOR BOSONS

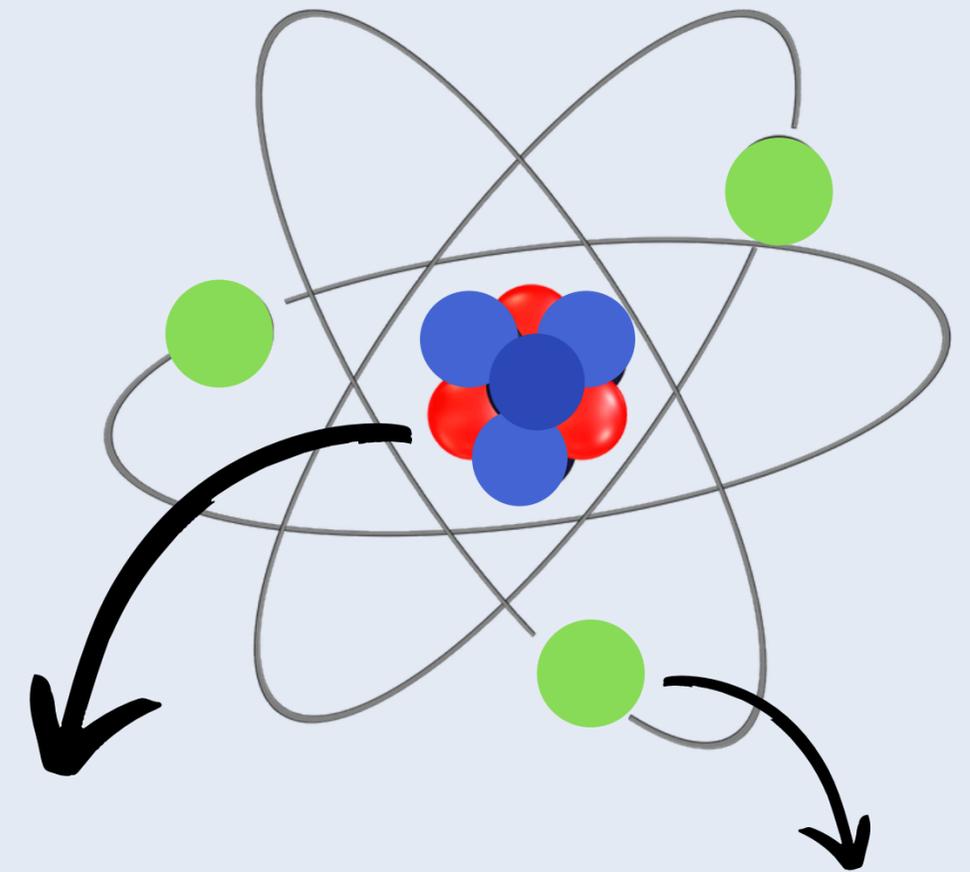
**SCALAR BOSONS**

# Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
QUARKS	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b>g</b> gluon	$\approx 125.11 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 <b>H</b> higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 <b>Z</b> Z boson	
LEPTONS	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ 1 <b>W</b> W boson	

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

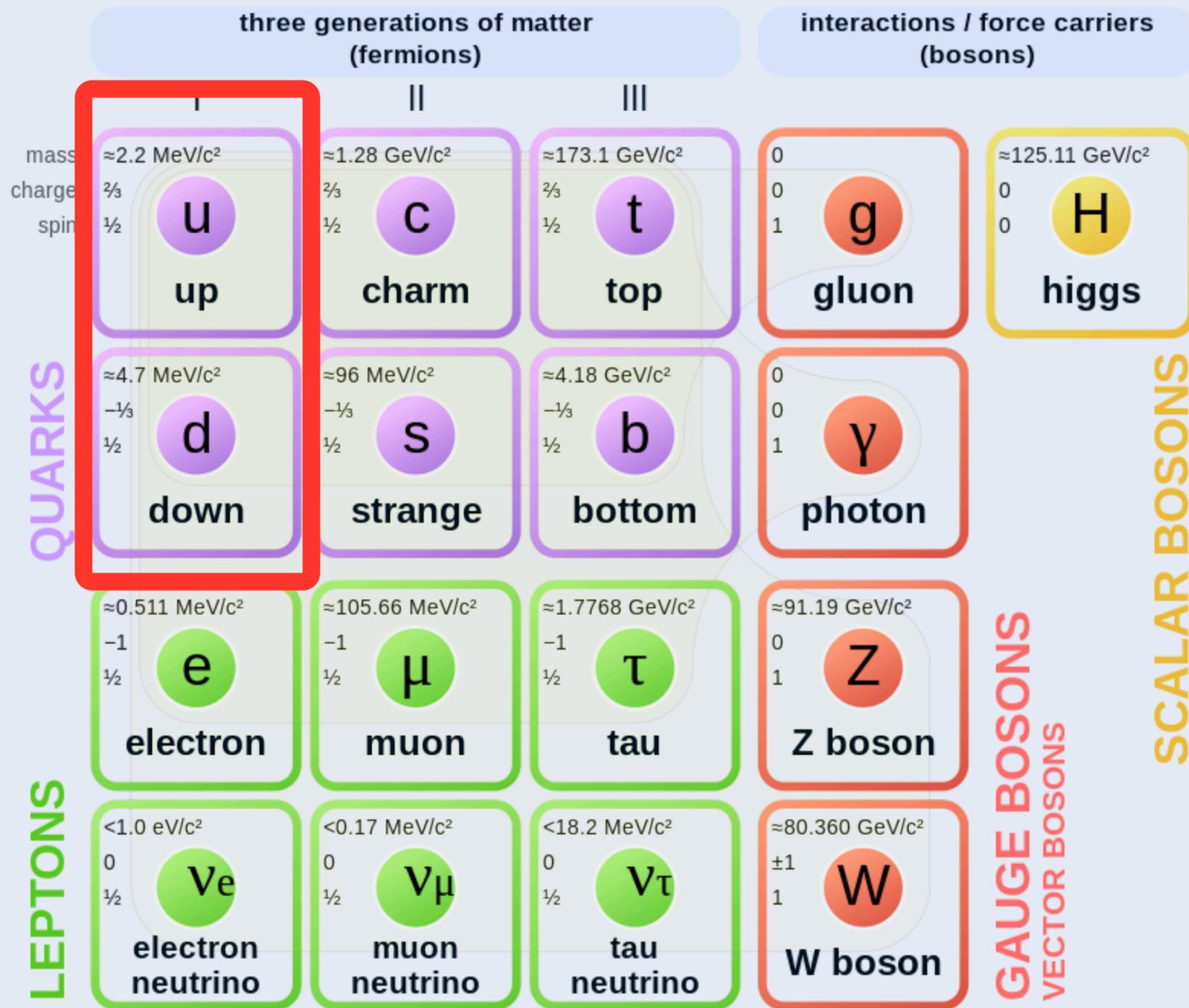


Nucleo atomico:

Elettrone

- Protoni +
- Neutroni •

# Standard Model of Elementary Particles

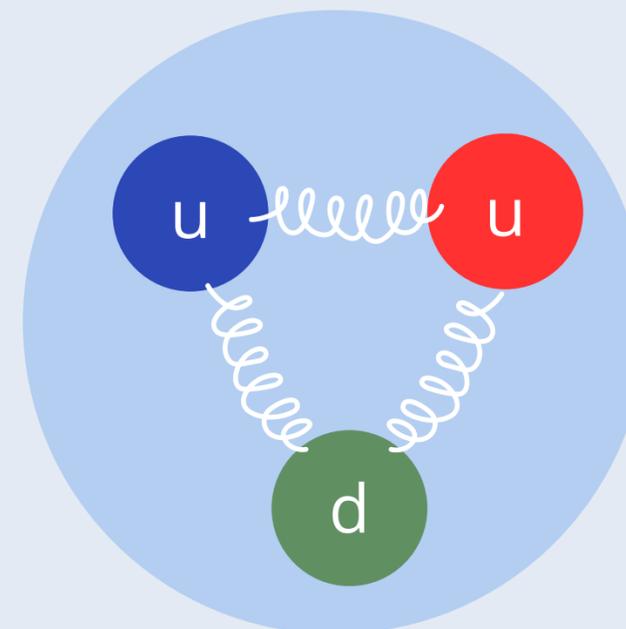


## Nucleo atomico:

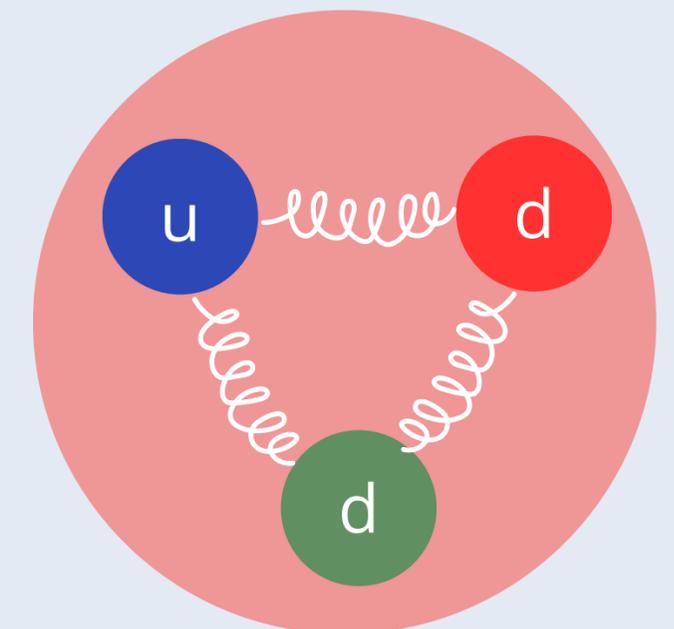
- Protoni 
- Neutroni 



**Protoni e neutroni sono composti da quark e gluoni !**



Protone



Neutrone

# Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
QUARKS	mass $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	mass $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	mass $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b>g</b> gluon	SCALAR BOSONS
	mass $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	mass $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> photon	
	mass $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1$ spin $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	mass $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1$ spin $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muon	mass $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ charge $-1$ spin $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	mass $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 <b>Z</b> Z boson	
LEPTONS	mass $< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 spin $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 spin $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 spin $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	mass $\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ 1 <b>W</b> W boson	GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

Come possiamo studiare le altre **particelle**?





L'interazione tra due particelle può produrne altre!

$$E = m \cdot c^2$$

THE THING IS, WE HAVE THIS COLLIDER...

THE MAGIC OF A COLLIDER IS THAT YOU CAN MAKE KINDS OF MATTER THAT YOU DON'T HAVE AROUND.

YOU TAKE TWO KINDS OF PARTICLES AND ANNIHILATE THEM...

WHAT COMES OUT DOESN'T HAVE TO BE A RE-ARRANGEMENT OF WHAT WENT IN.

IT'S A KIND OF QUANTUM MAGIC WHERE IT SORT OF DISAPPEARS INTO PURE ENERGY...\*

YOU CAN MAKE ANY SORT OF PARTICLE FOR WHICH YOU HAVE ENOUGH ENERGY.

\* a force-carrying boson

- Per produrre particelle di grande massa partendo da particelle di massa piccola dobbiamo fornire energia.



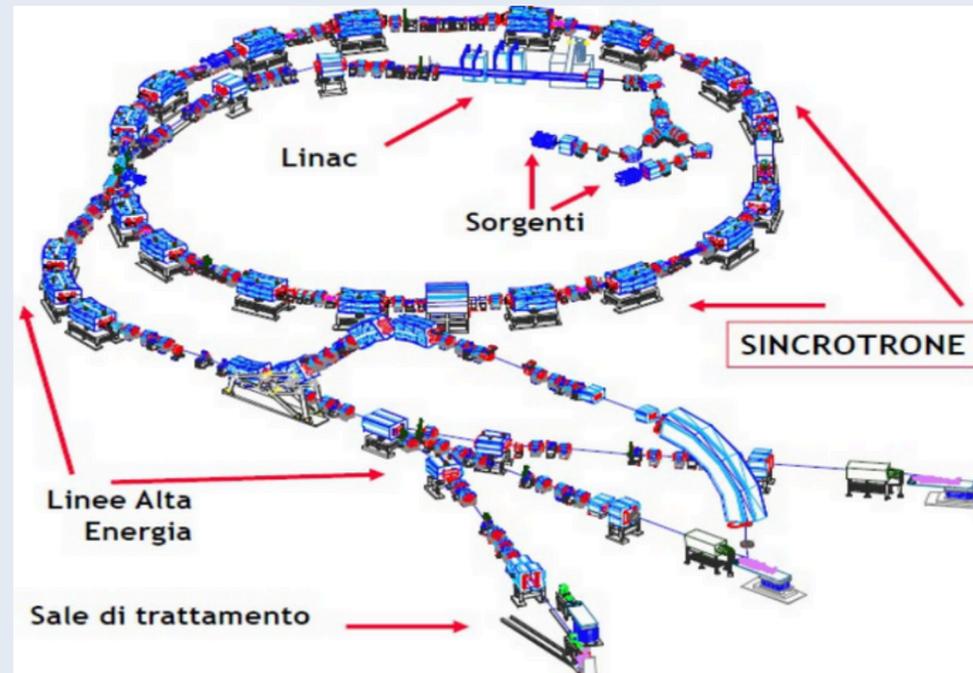
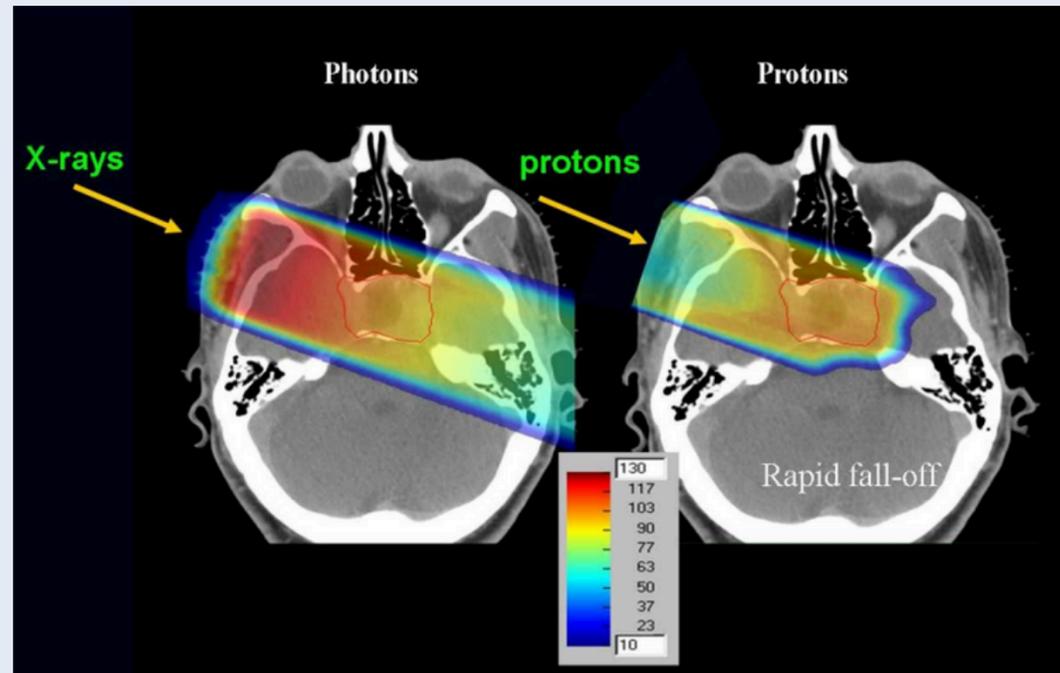
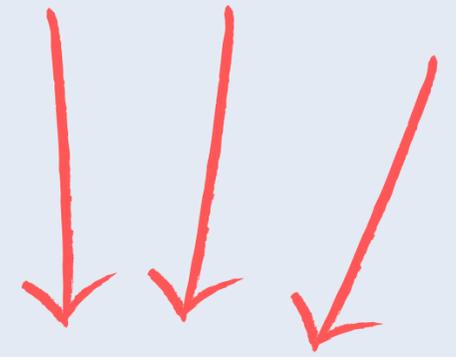
**Dobbiamo accelerare le particelle iniziali!**

# ACCELERATORI DI PARTICELLE

- Un acceleratore di particelle è una macchina il cui scopo è produrre particelle con **elevata energia cinetica**.

➔ Vengono usati per scopi:

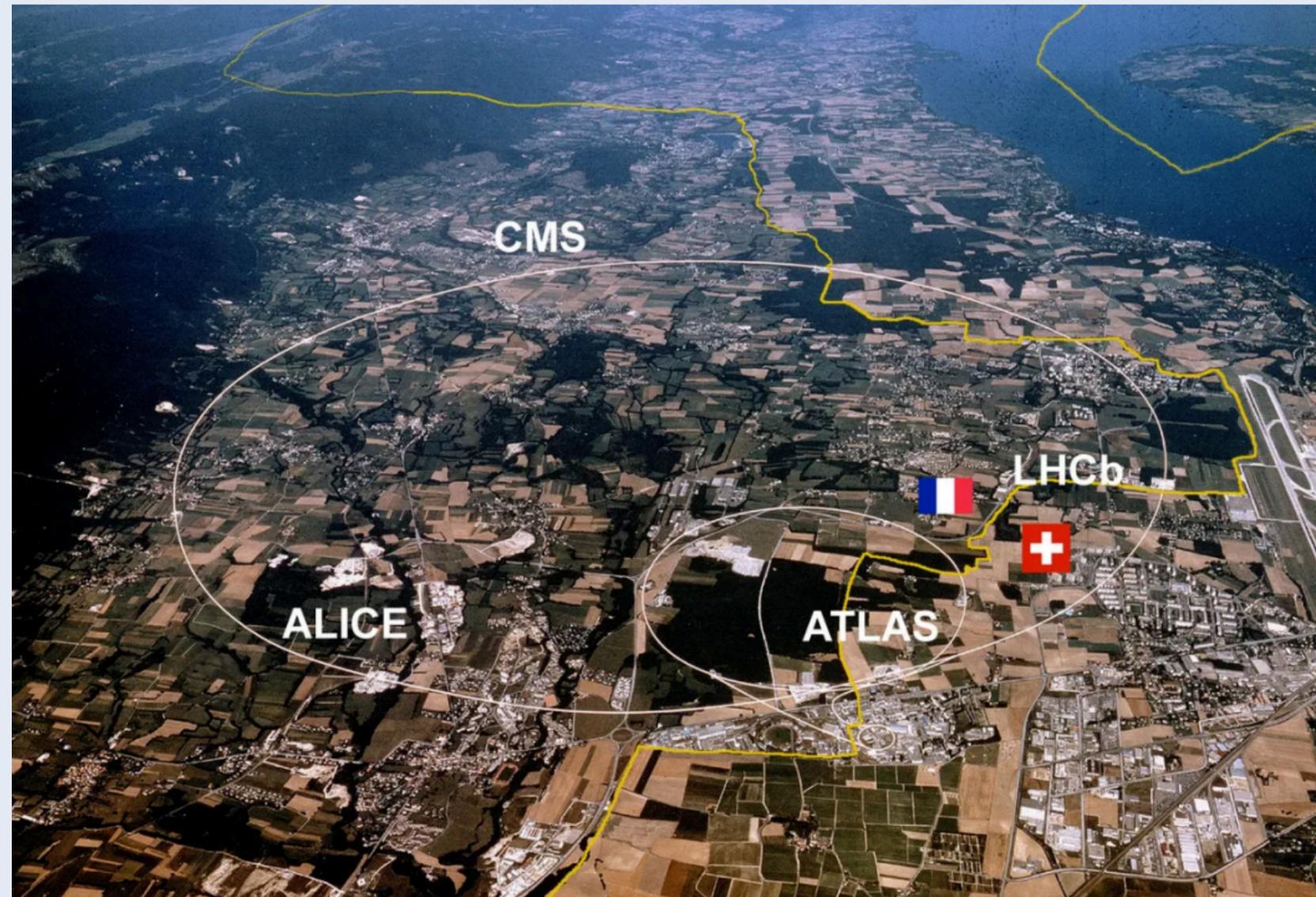
- Industriali (60%): impiantazione ioni, sterilizzazione;
- Medici (35%): adroterapia (cura dei tumori), produzione isotopi;
- Ricerca (5%): materiali, particelle.



Acceleratore del CNAO di Pavia

# LHC

Il **Large Hadron Collider** è l'acceleratore di particelle più grande e potente esistente sulla Terra.



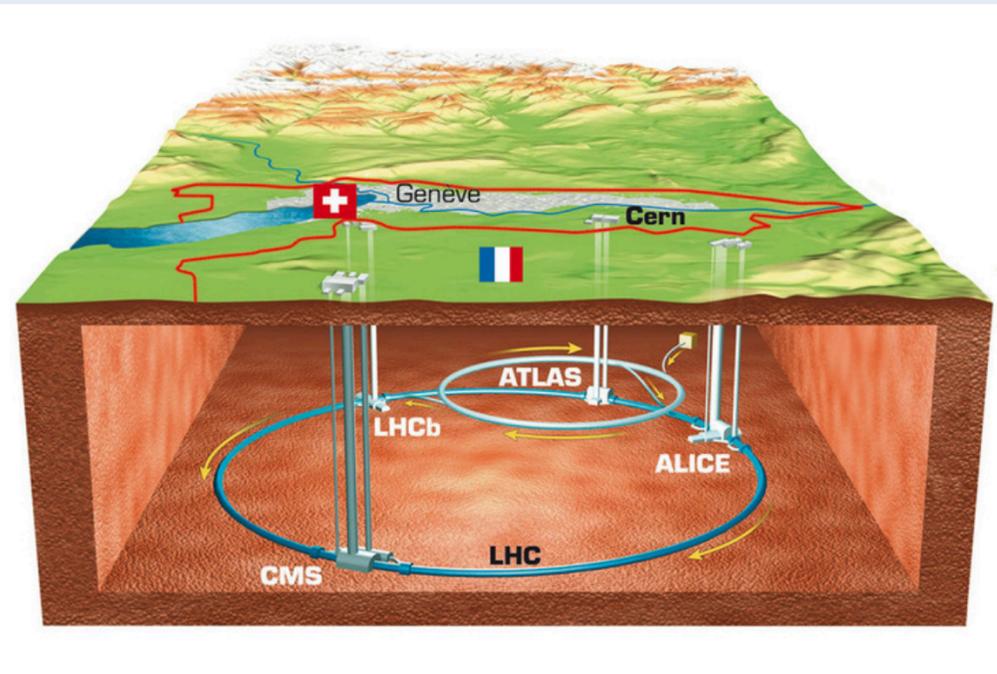
# LHC



## LARGE

**CIRCONFERENZA 27 KM**

Tunnel a 100 metri di profondità

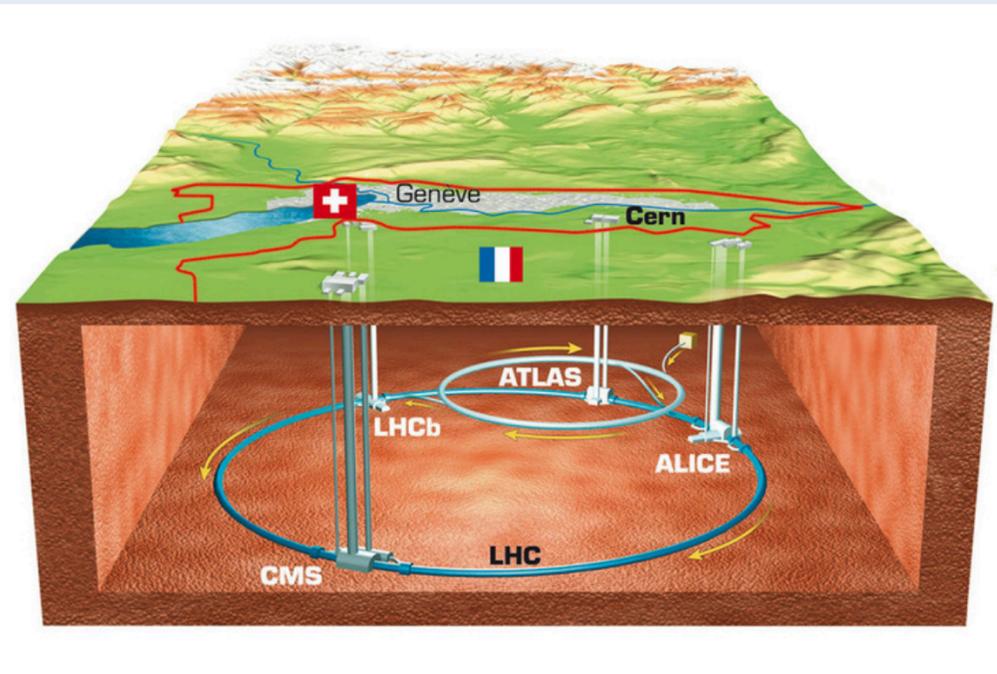


# LHC

**LARGE**

**CIRCONFERENZA 27 KM**

Tunnel a 100 metri di profondità



**HADRON**

**ACCELERA PROTONI FINO A  
7 TEV**

7 TeV è circa l'energia di una  
mosca che vola, ma **concentrata**  
**in un solo protone!**

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} * \text{eV}$$

# LHC



# COLLIDER

I PROTONI VENGONO  
RAGGRUPPATI IN  
"PACCHETTI"



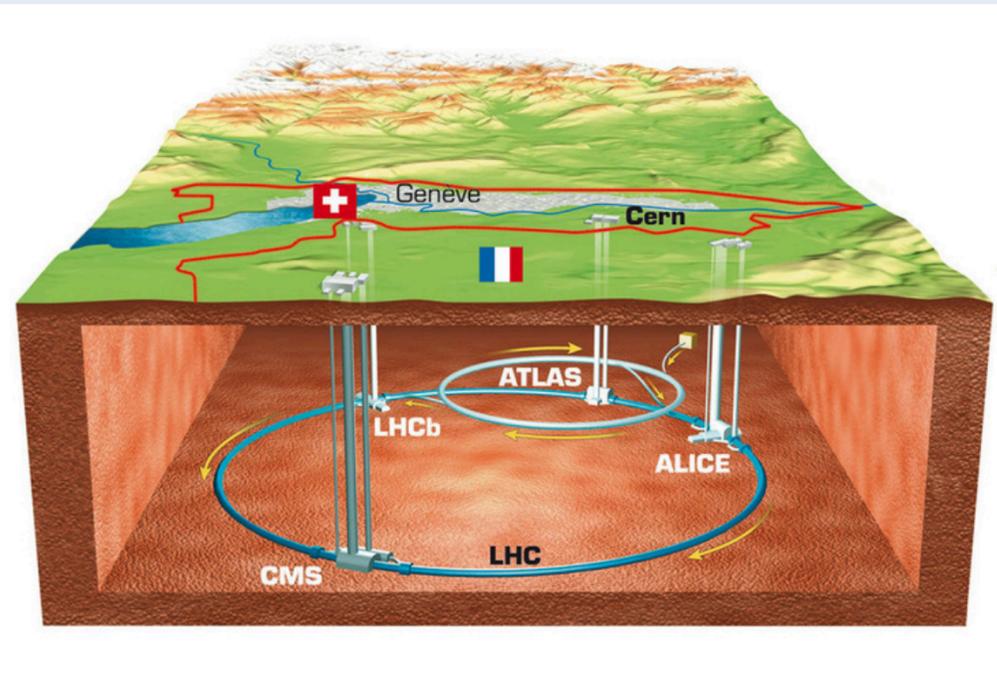
Circa 100 miliardi di protoni in  
ogni pacchetto.

I pacchetti collidono 40 milioni  
di volte al secondo.

# LARGE

## CIRCONFERENZA 27 KM

Tunnel a 100 metri di profondità.



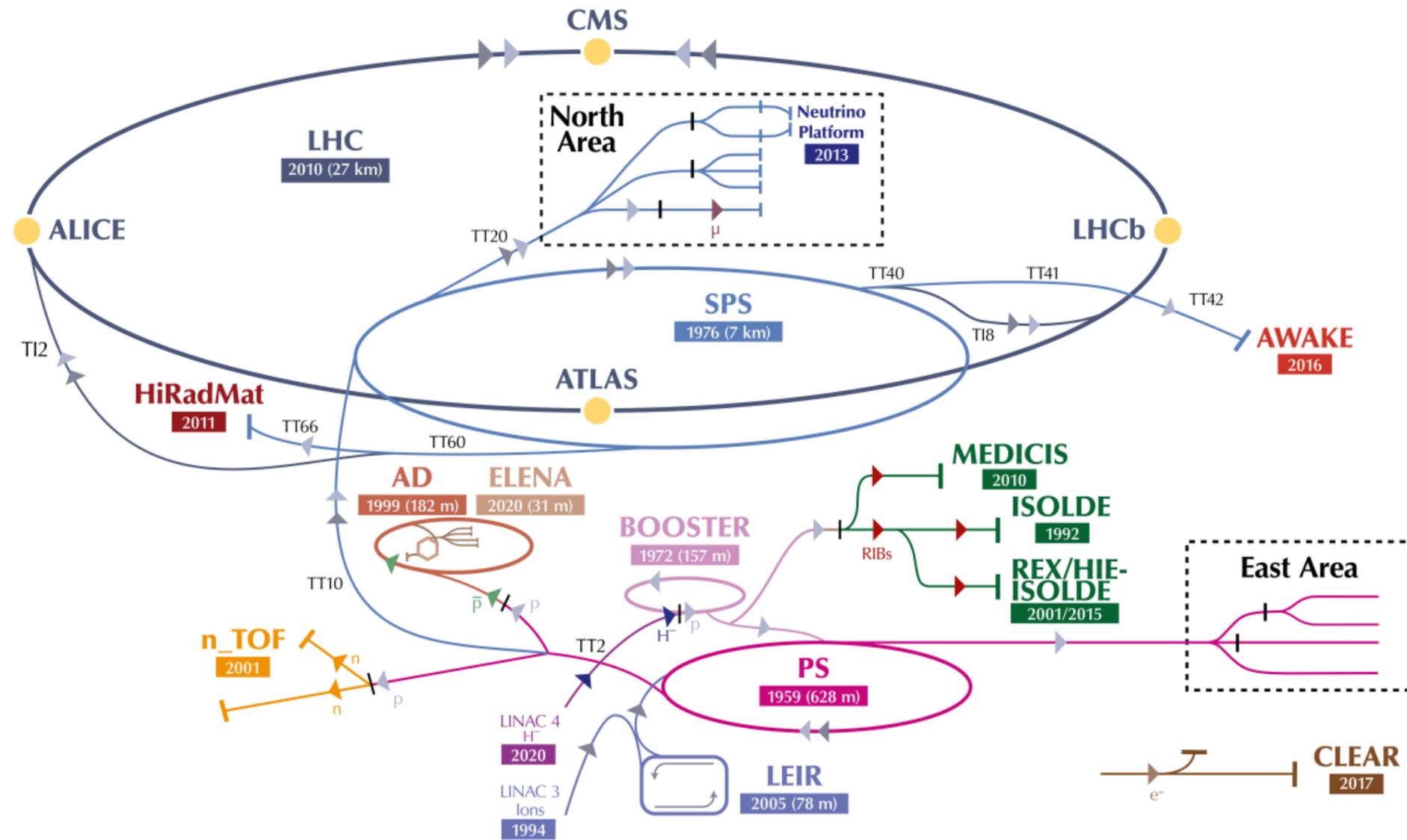
# HADRON

## ACCELERA PROTONI FINO A 7 TEV

7 TeV è circa l'energia di una  
mosca che vola, ma **concentrata**  
**in un solo protone!**

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} * \text{eV}$$

# COSA IMPAREMO?



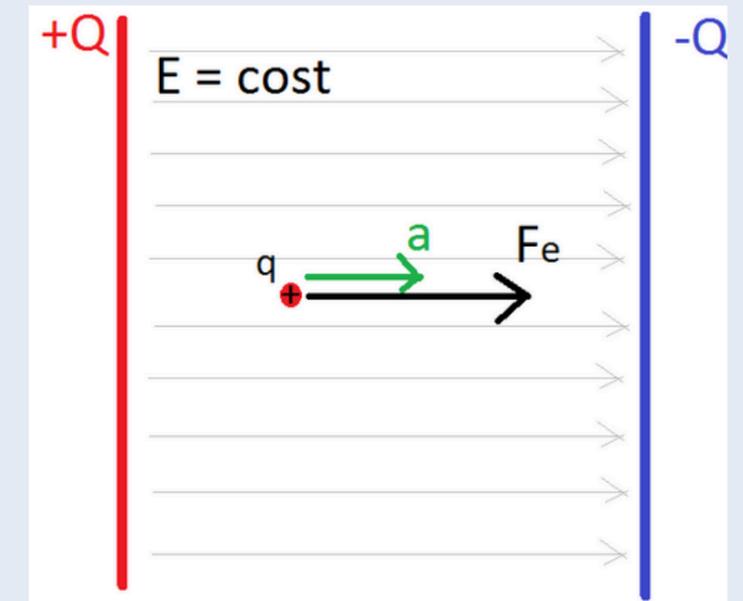
▶  $H^-$  (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons) ▶  $\mu$  (muons)

- Cosa rappresentano le linee colorate?
- Cosa rappresentano i “punti gialli”?

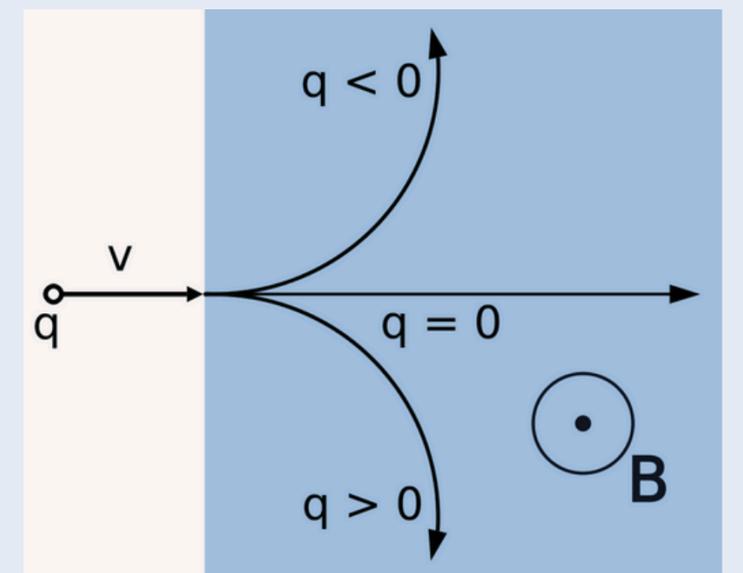
# INGREDIENTI PER COSTRUIRE UN ACCELERATORE



→ Campo elettrico per accelerare i protoni.

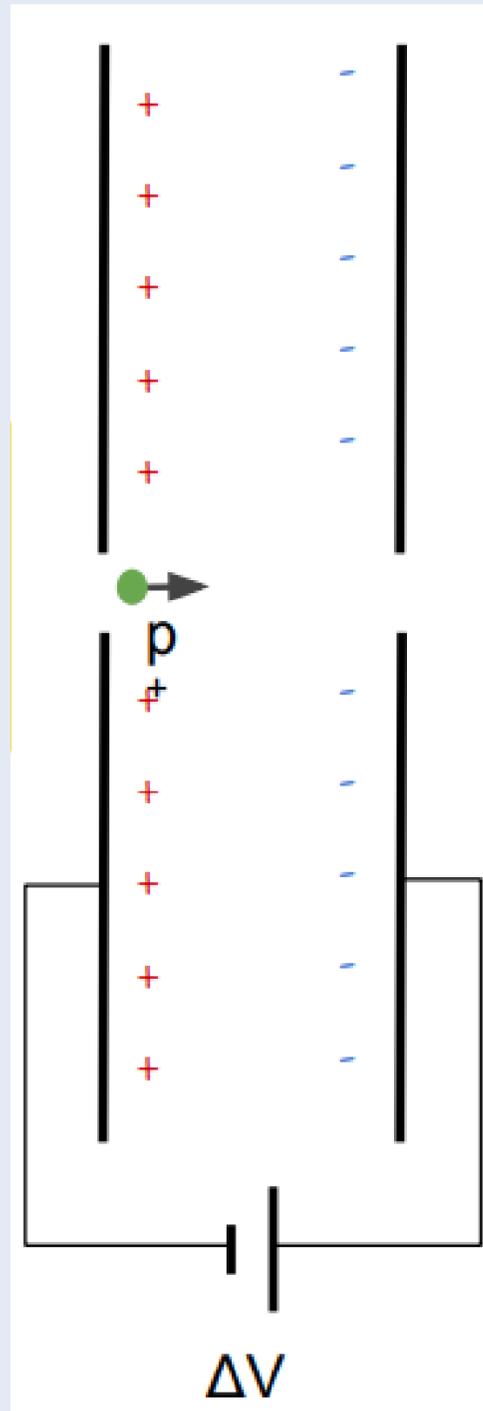


→ Campo magnetico per curvare la loro traiettoria.



# ACCELERATORI ELETTROSTATICI

Sorgente  
di protoni



Il **campo elettrico** accelera le particelle cariche.

La forza che agisce sull'elettrone è:

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E}$$

L'energia guadagnata da un elettrone è:

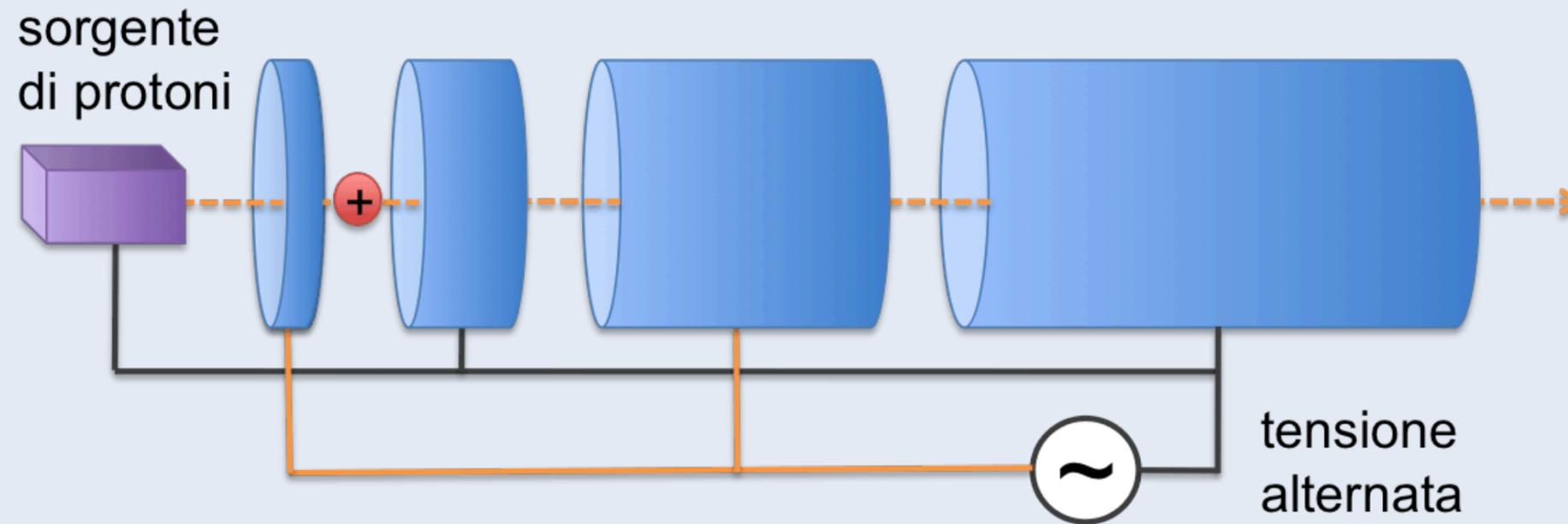
$$\int_0^l \mathbf{F} d\mathbf{x} = e \int_0^l \mathbf{E} d\mathbf{x} = e\Delta V$$

Se misuriamo la carica in "elettroni" l'energia ha le dimensioni di:

$$\text{elettroni} * \text{Volt} = [\text{eV}]$$

Energie: da 1 MeV a 30 MeV.

# ACCELERATORI LINEARI E CIRCOLARI

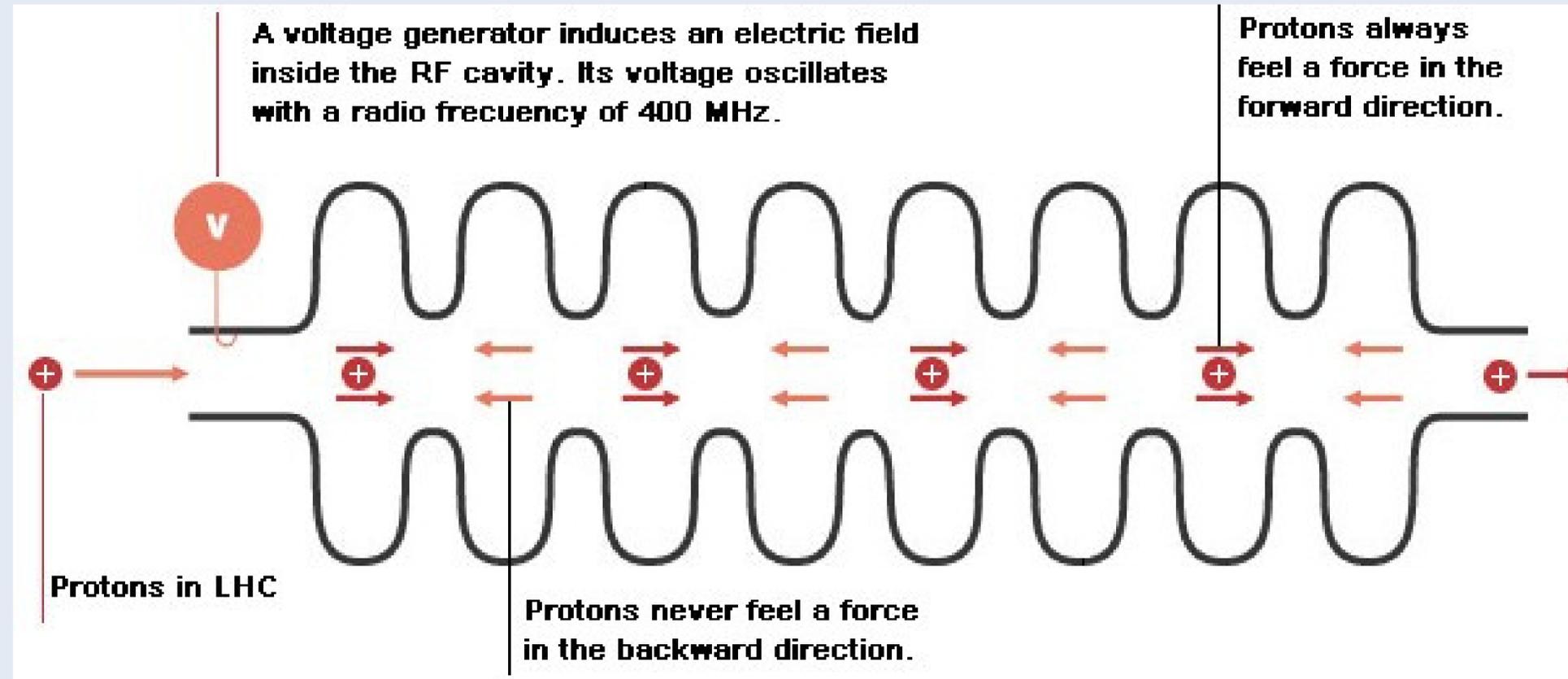


- Negli **acceleratori lineari** i protoni vengono accelerati fino ad energie di 50 MeV. Utilizzati come iniettori (di protoni) nell'acceleratore (circolare) principale.

## Come aumentano ancora l'energia dei protoni?

- 💡 Gli **acceleratori circolari** permettono di accelerare i protoni fino a 7 TeV. I protoni ad LHC passano 10 milioni di volte dallo step di accelerazione.

# CAVITÀ A RADIOFREQUENZA



- In LHC i pacchetti di protoni vengono accelerati da 16 cavità a radiofrequenza.

# MAGNETI SUPERCONDUTTORI

- Ad **LHC** vengono usati circa 1600 **magneti superconduttori** che generano un campo magnetico di 8 Tesla.

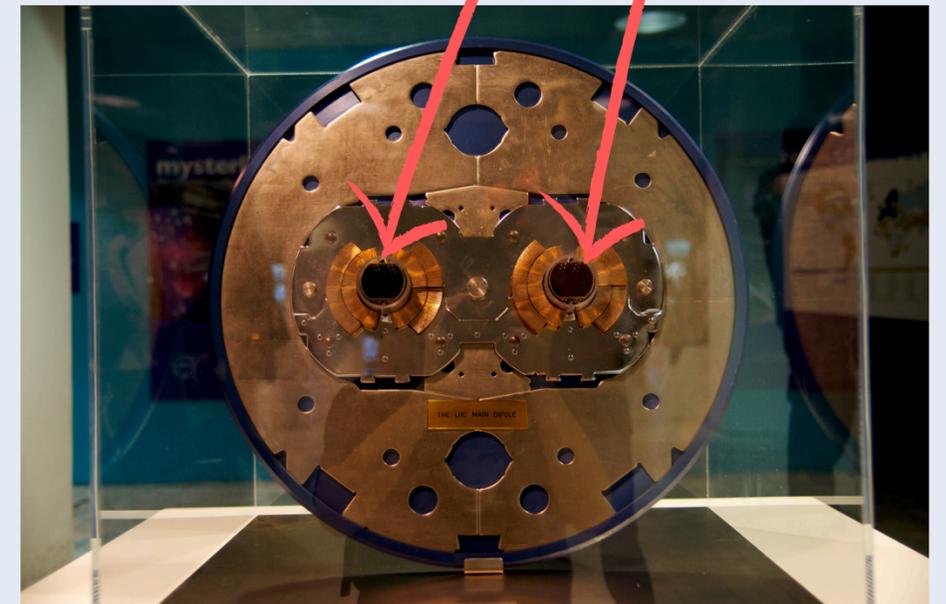
- limite della tecnologia esistente;
- fissa le dimensioni/energia dell'acceleratore;



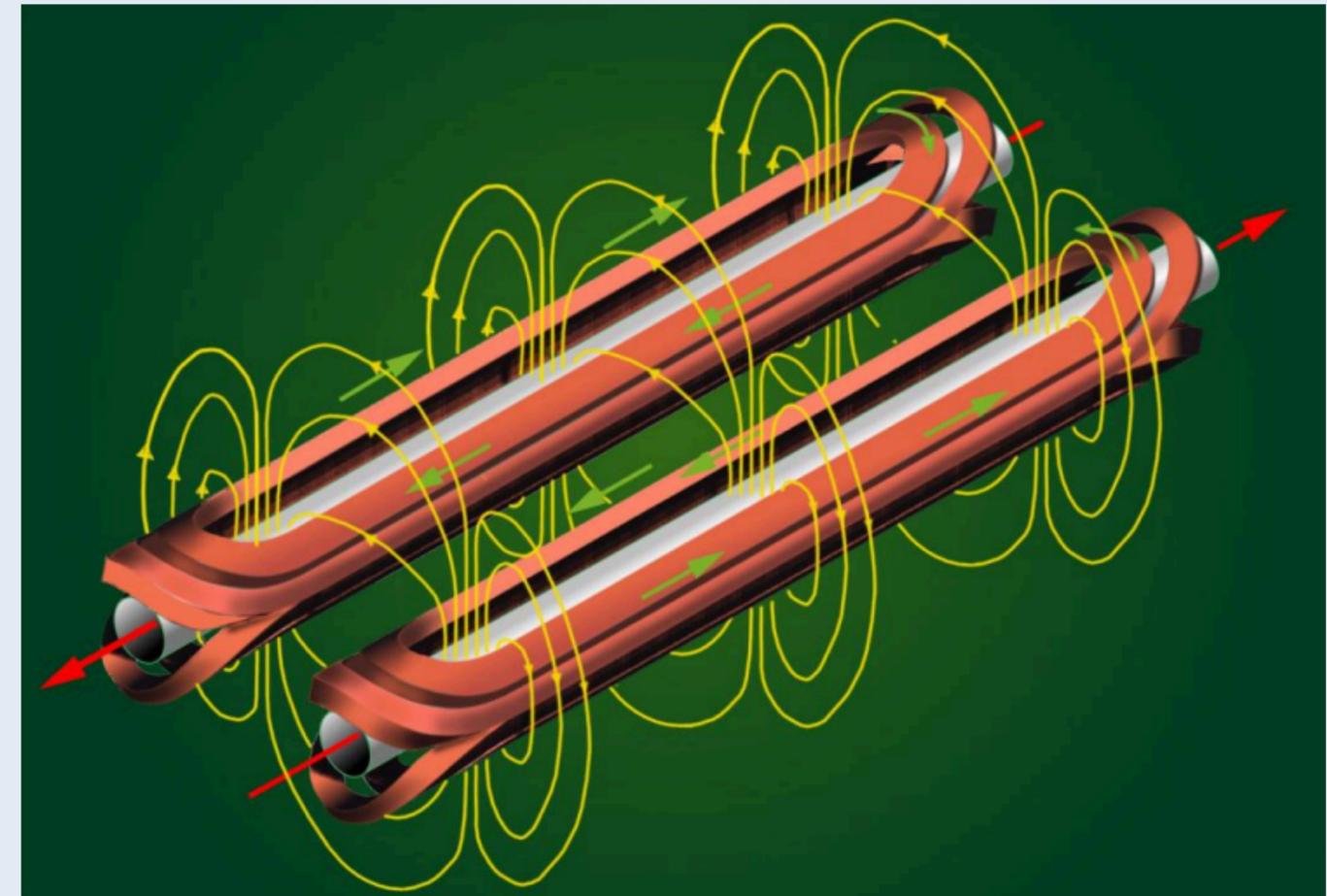
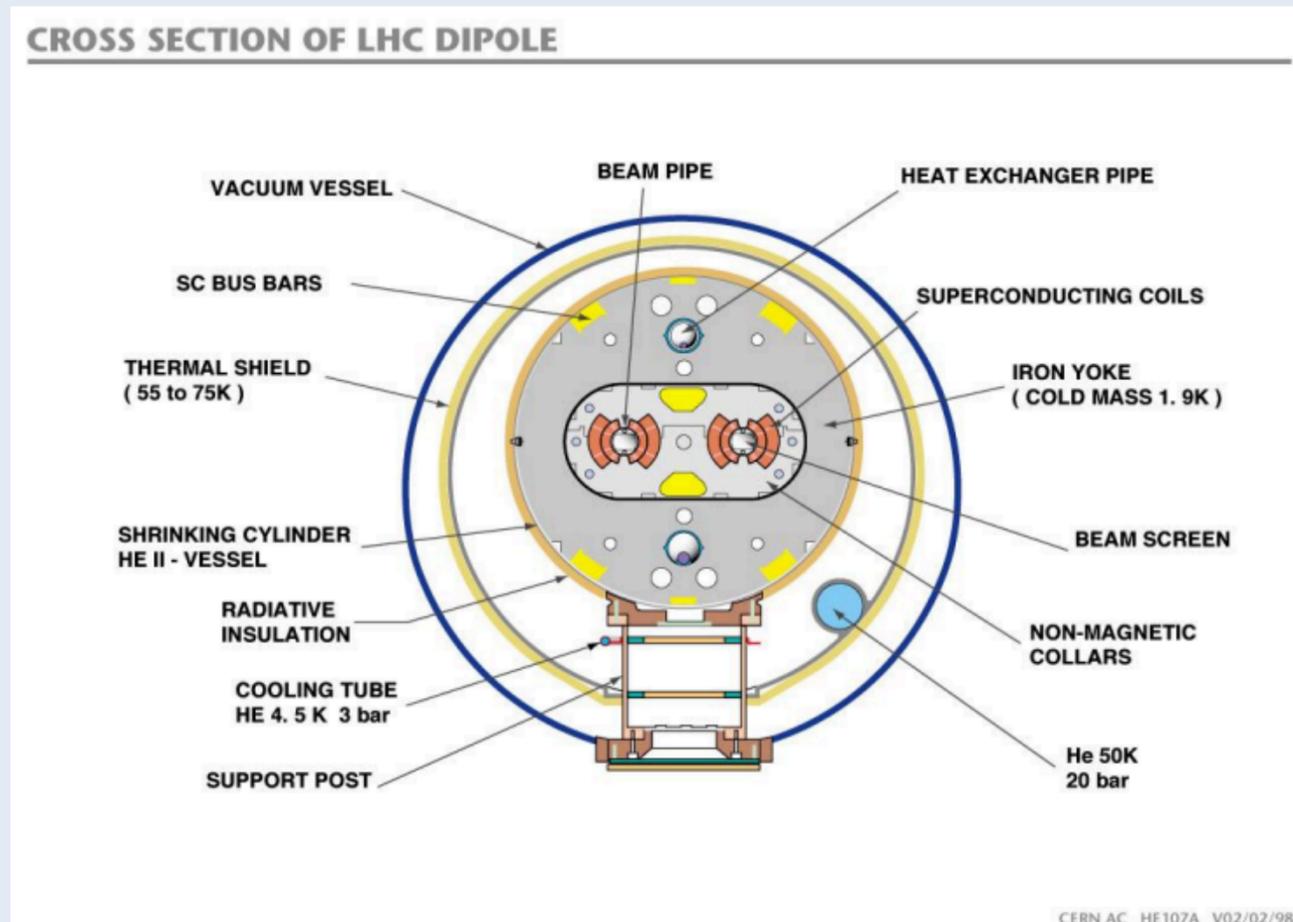
raffreddati a 1,9 K (-271,25 °C) da elio liquido;

- Ogni magnete ha 2 tubi in cui vengono fatti circolare i fasci. Due fasci di protoni girano in senso opposto.

Qui passano i fasci



# MAGNETI SUPERCONDUTTORI: DIPOLI



- I **dipoli** curvano la traiettoria delle particelle.
- 1232 dipoli superconduttori.

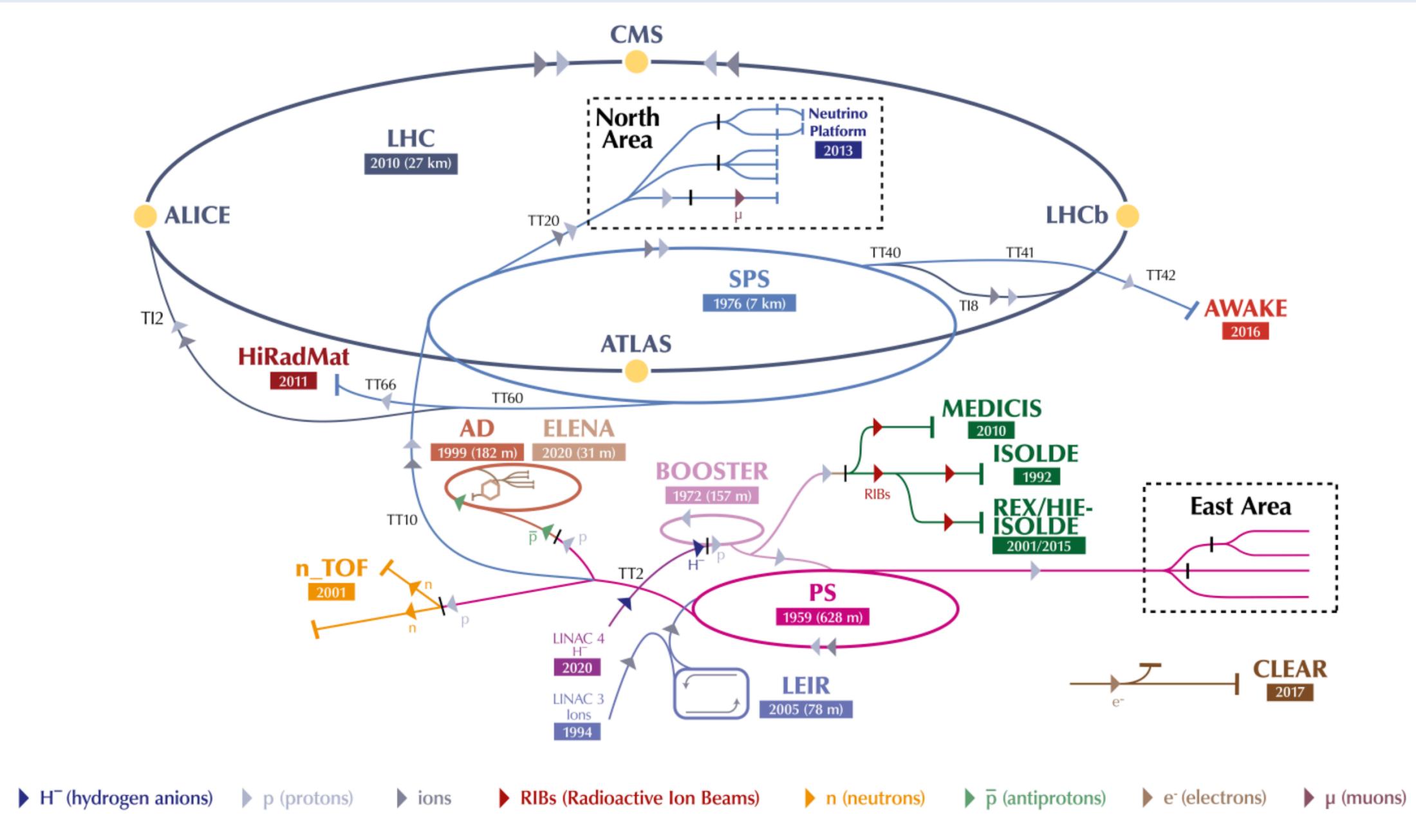
# COSA IMPAREREMO?

- Cosa rappresentano le linee colorate ?

## Acceleratori

- lineari e circolari
- usano tecnologie differenti
- usano magneti

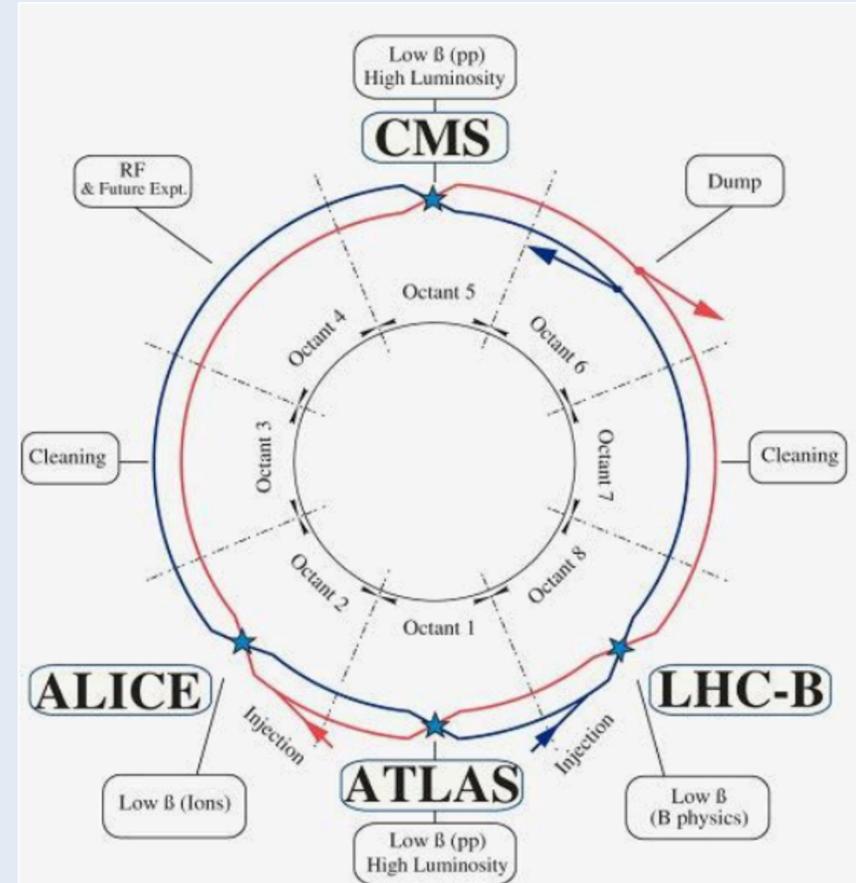
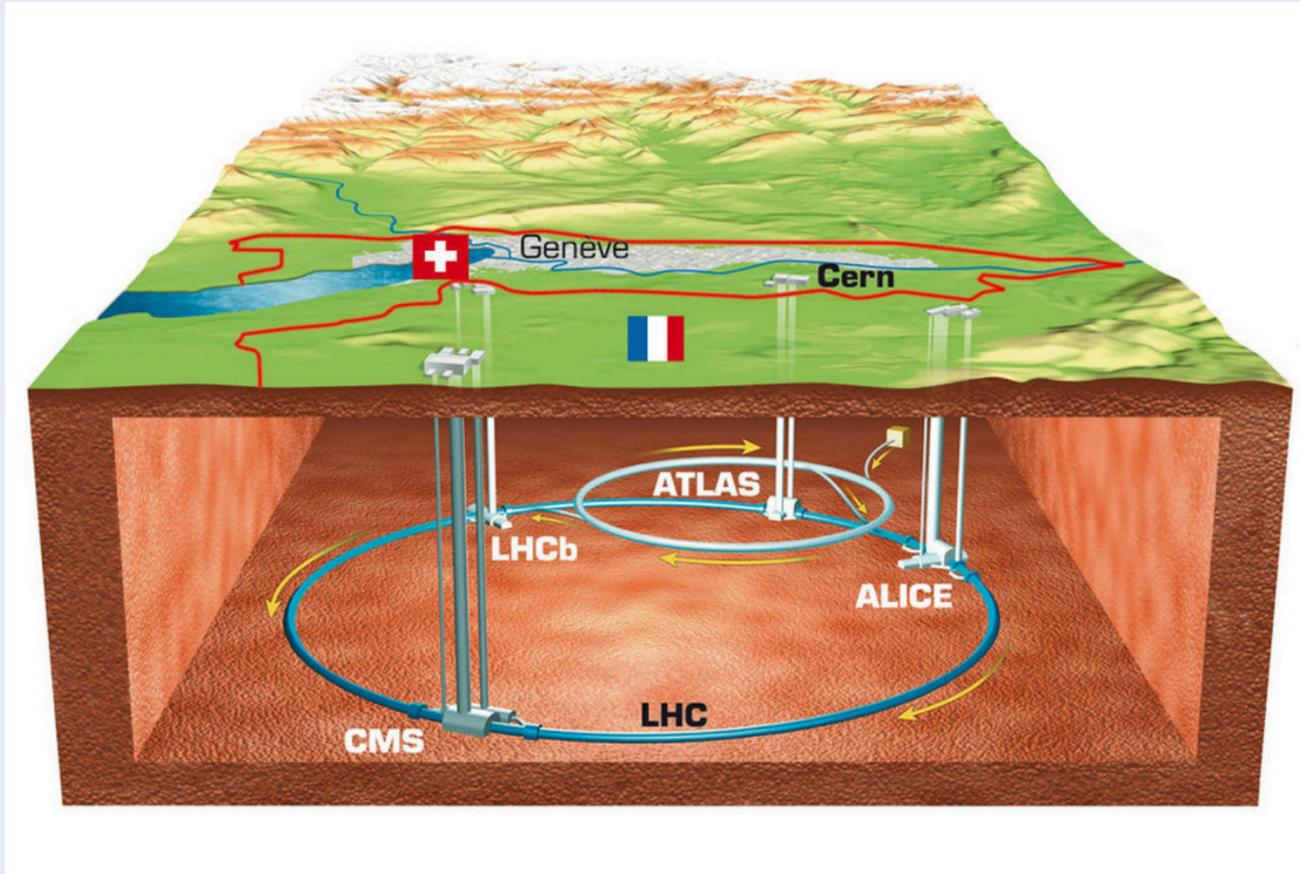
- Cosa rappresentano i “punti gialli” ?



## Energie in gioco:

○ <b>Booster:</b>	50 MeV-1.45 GeV
○ <b>Proton Synchrotron:</b>	1.45 GeV - 5.9 GeV
○ <b>Super Proton Synchrotron:</b>	5.9 GeV - 450 GeV
○ <b>Large Hadron Collider:</b>	450 GeV - <b>7 TeV</b>

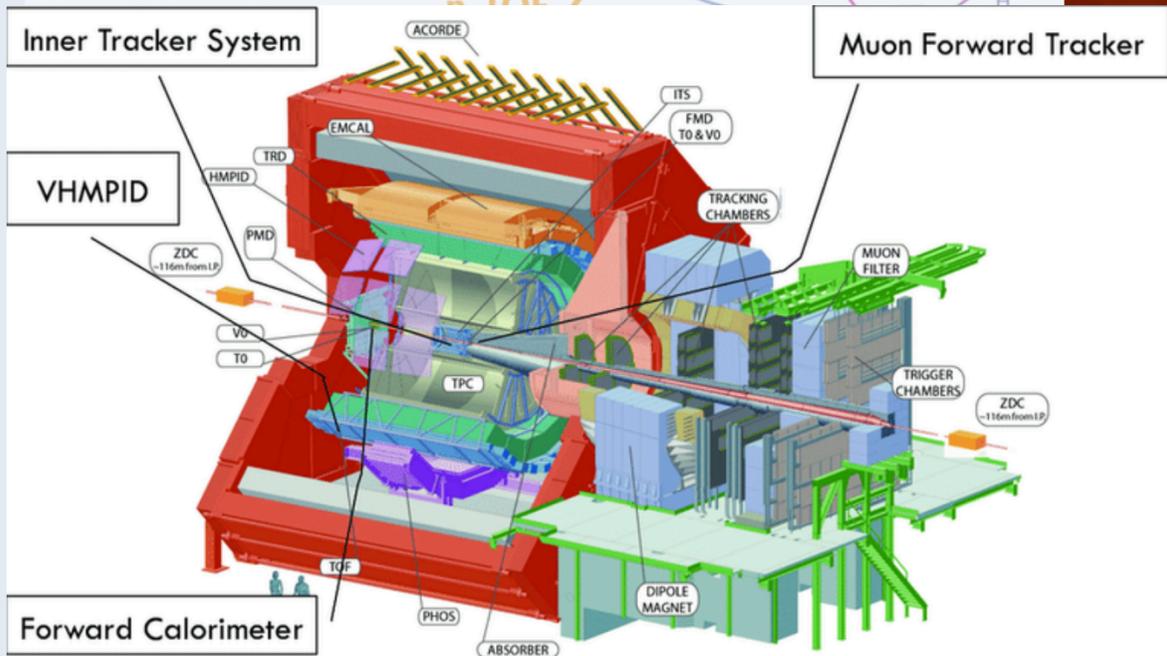
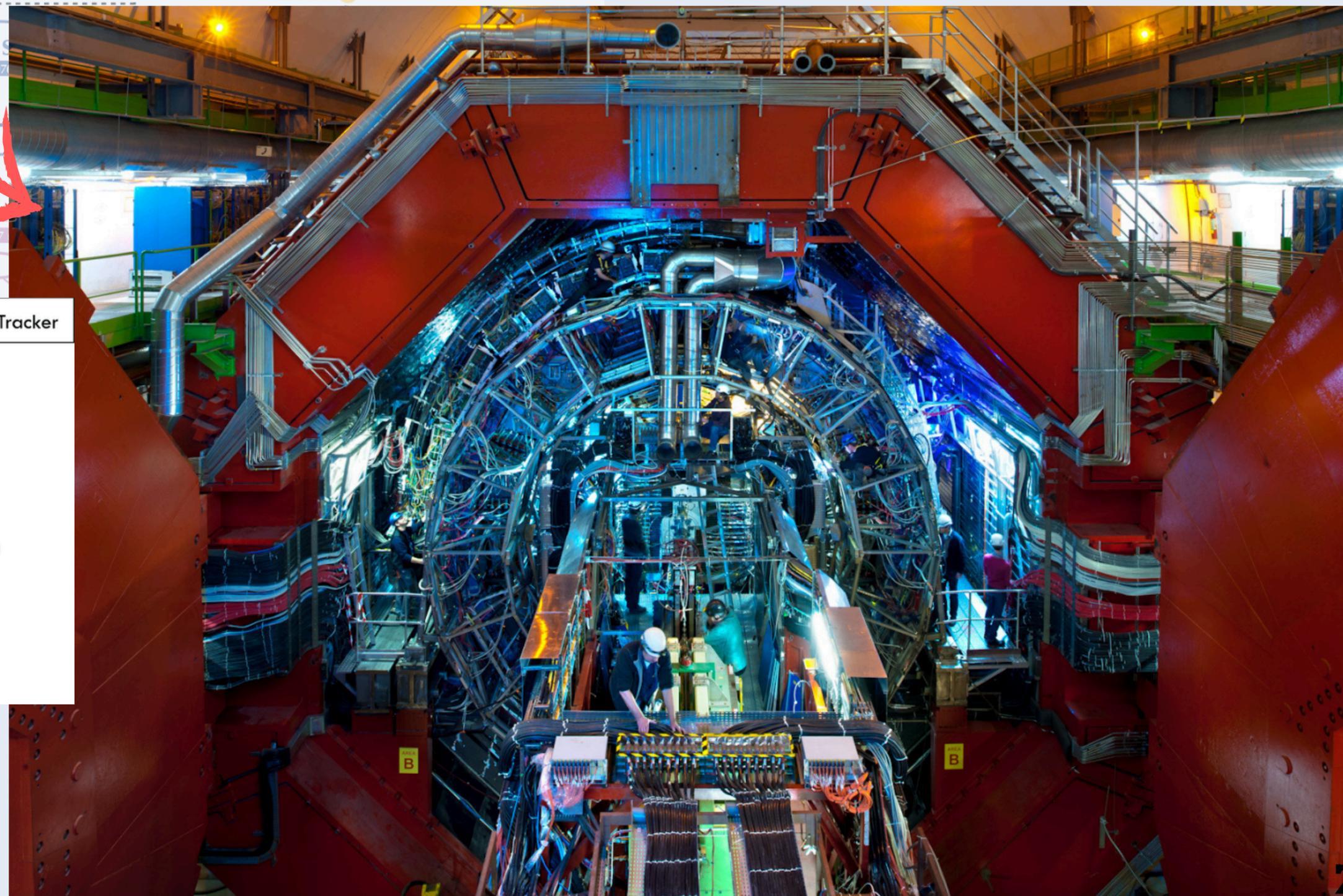
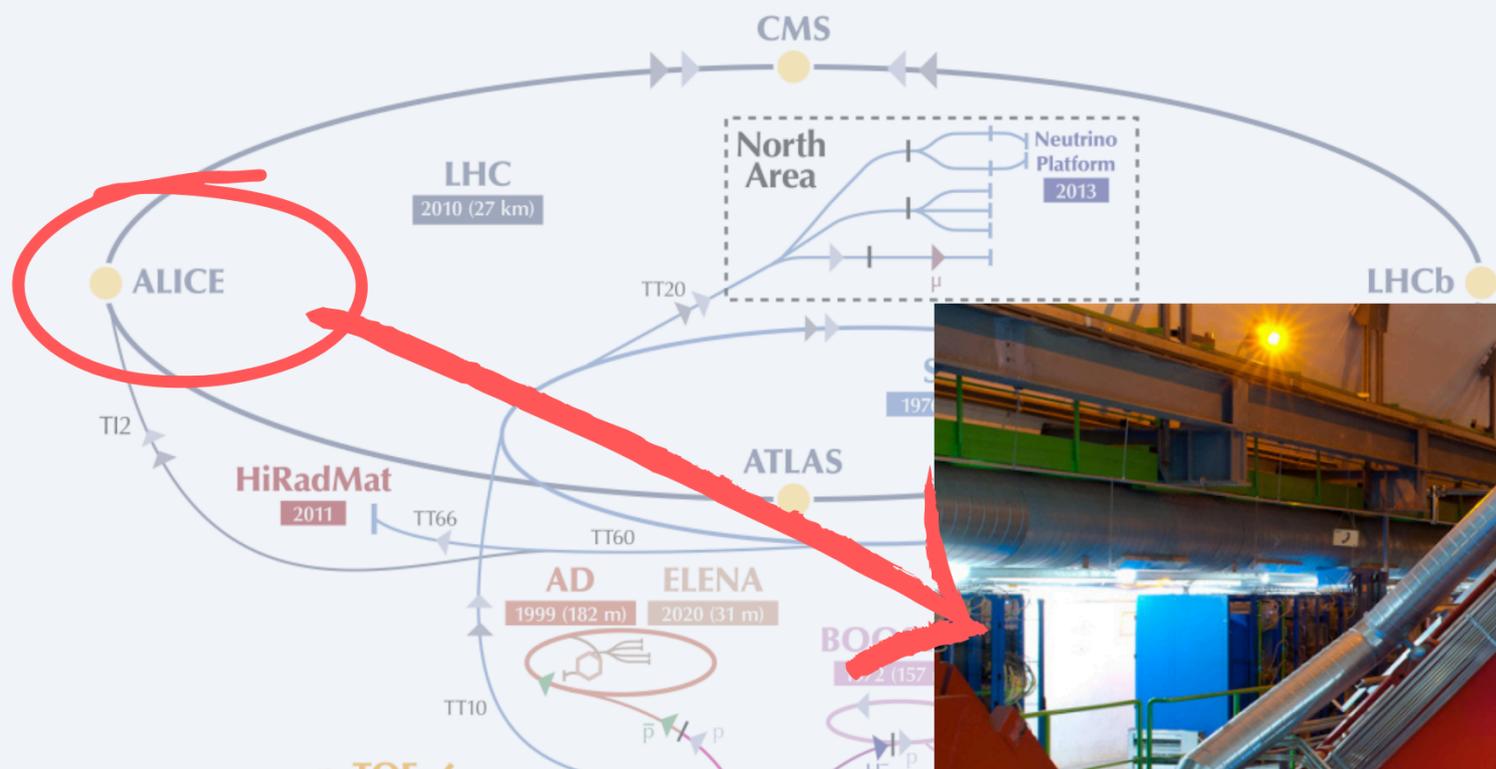
# RIVELATORI DI PARTICELLE



- Lungo LHC si trovano 4 punti di interazione.
- In corrispondenza di questi punti, si trovano 4 rivelatori di particelle molto diversi tra loro.

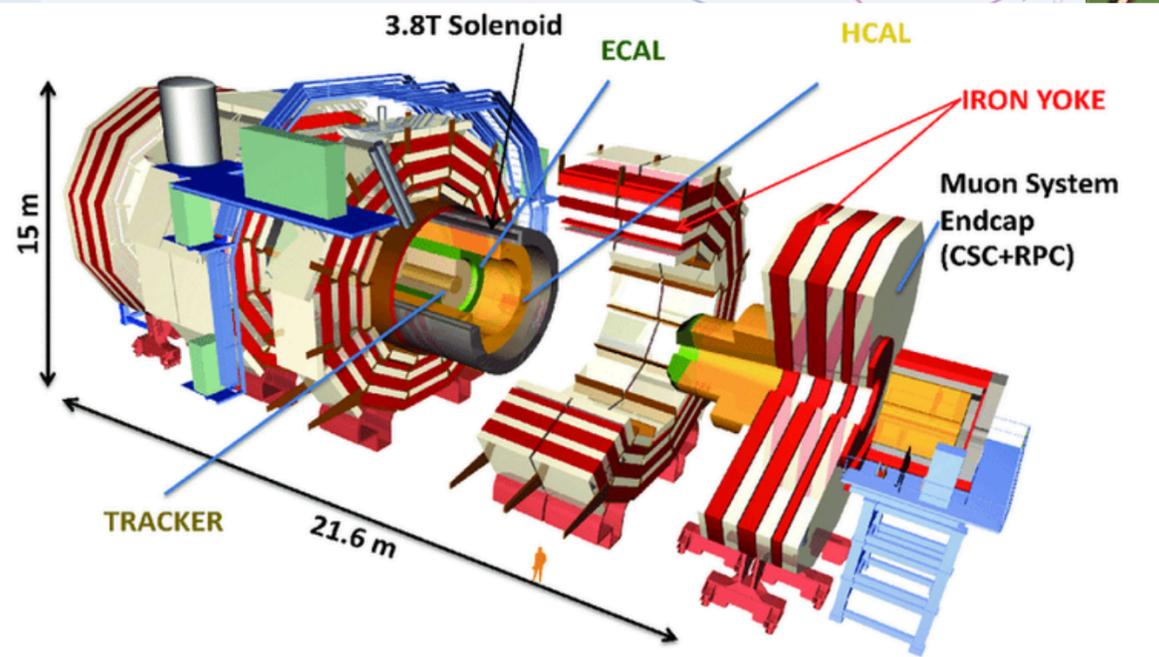
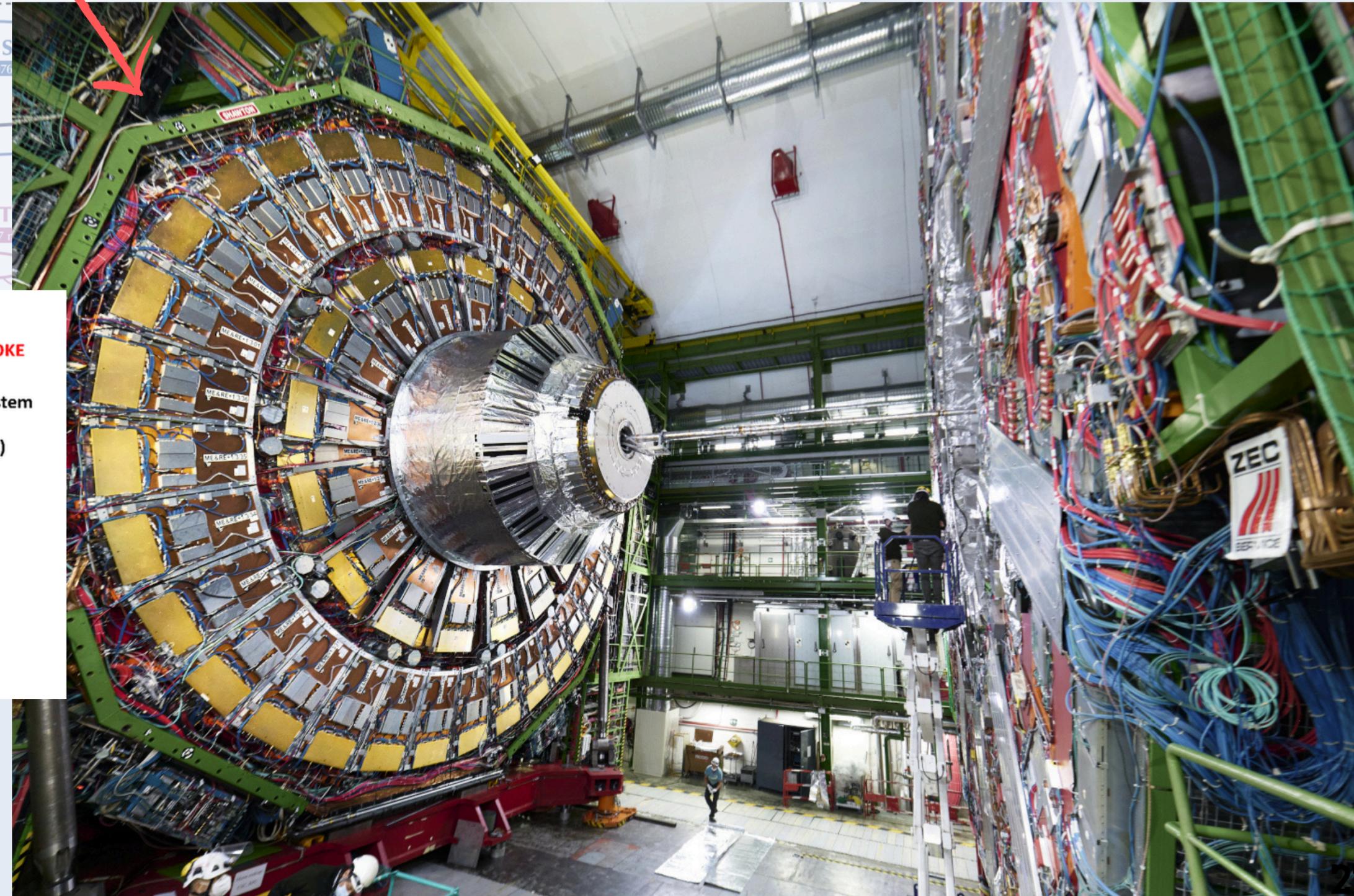
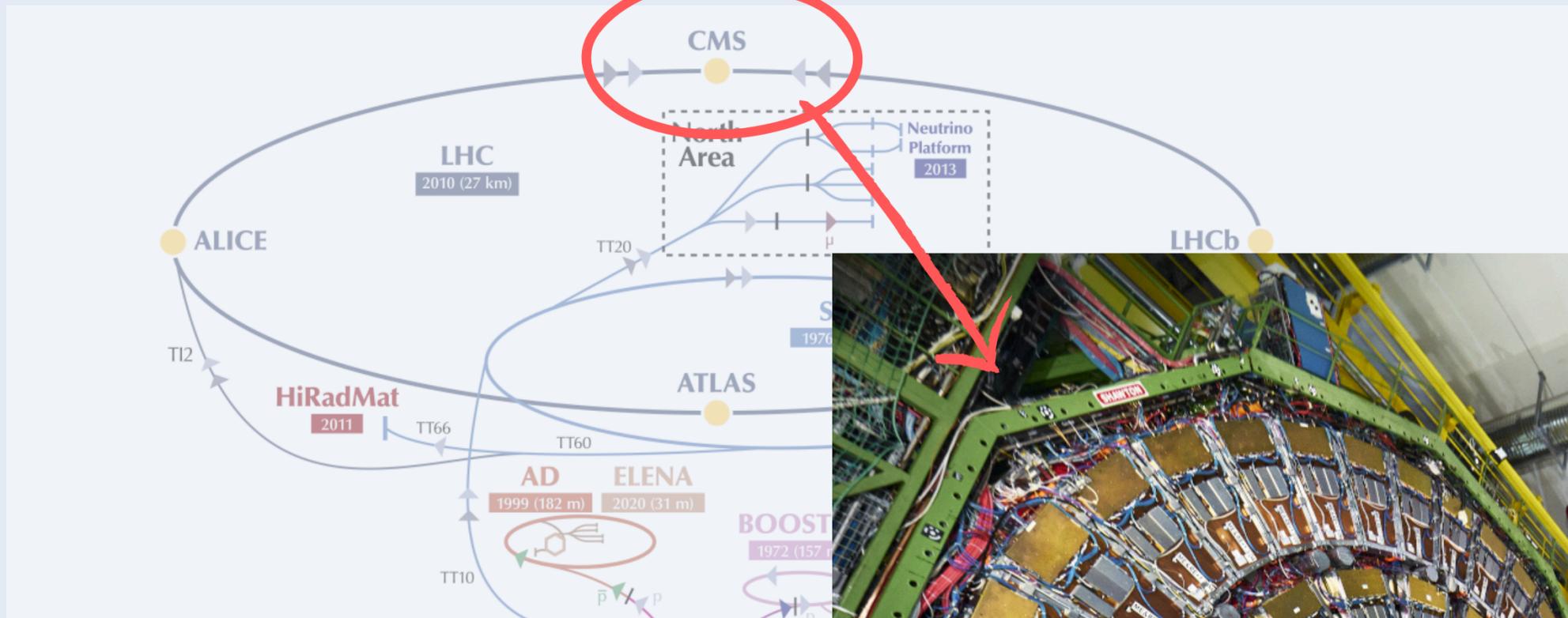
- I rivelatori principali lungo LHC:
  - ALICE (A Large Ion Collider Experiment)
  - ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)
  - CMS (Compact Muon Solenoid)
  - LHCb (LHC b)

# ALICE



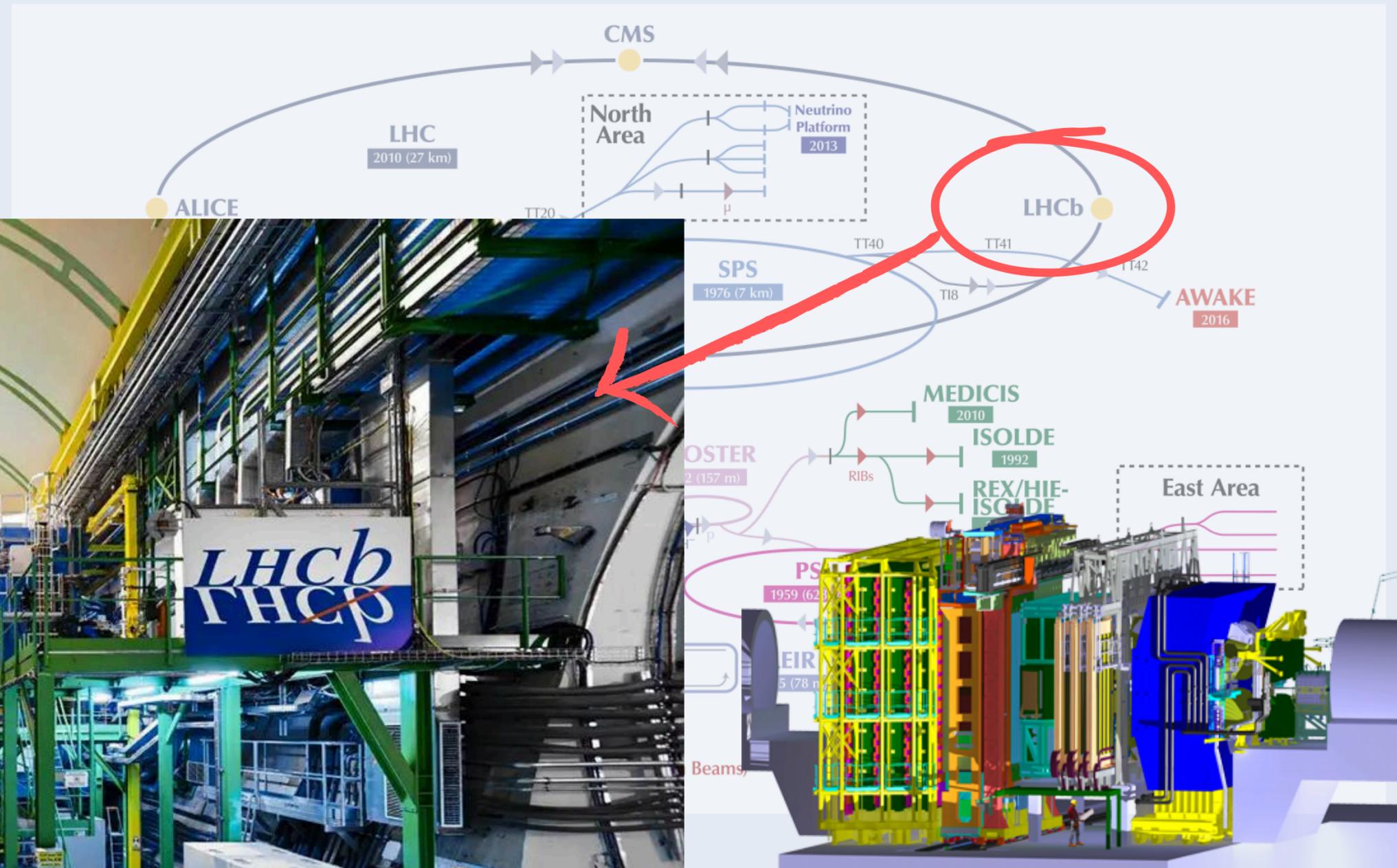
## COLLISIONI DI IONI

# CMS



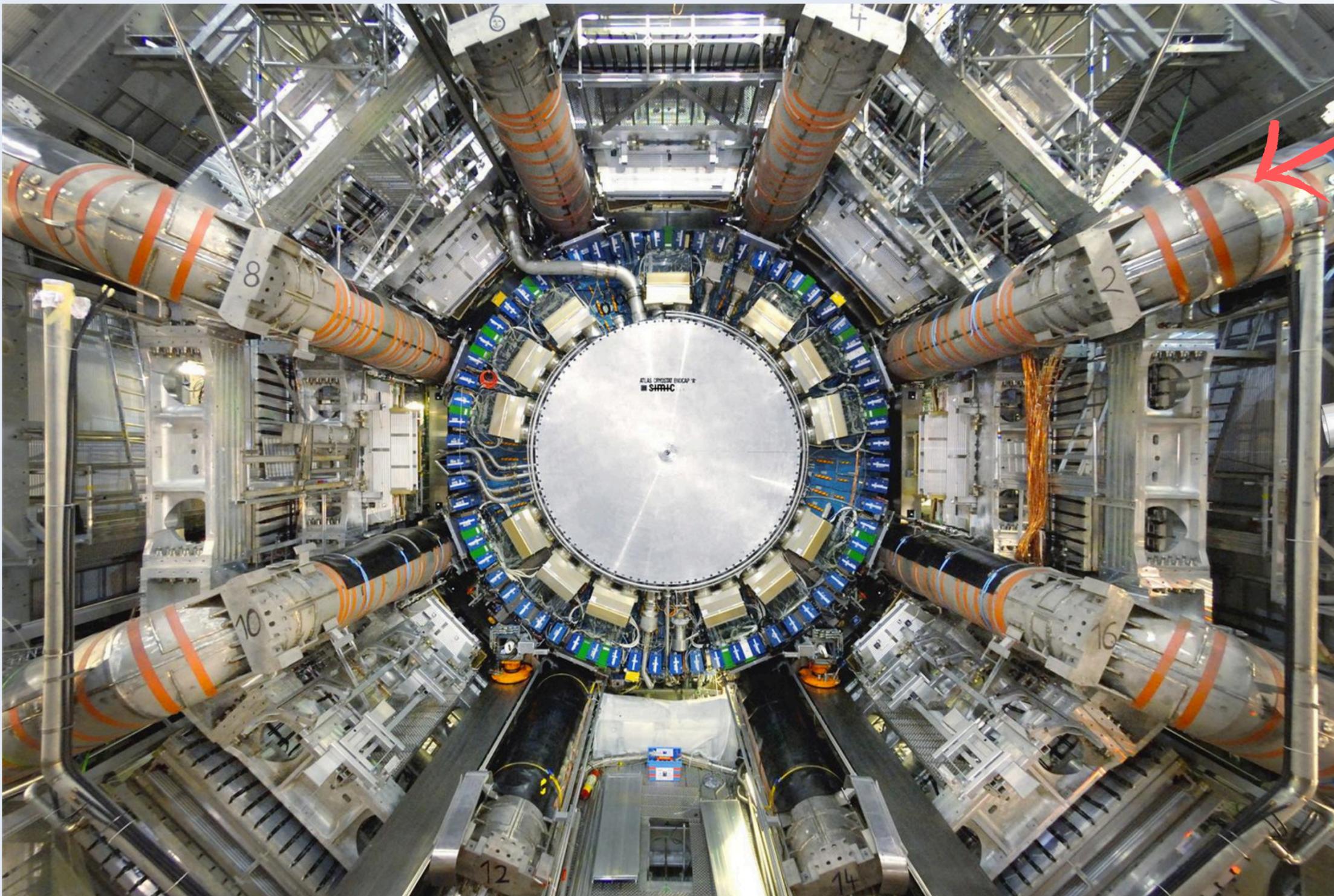
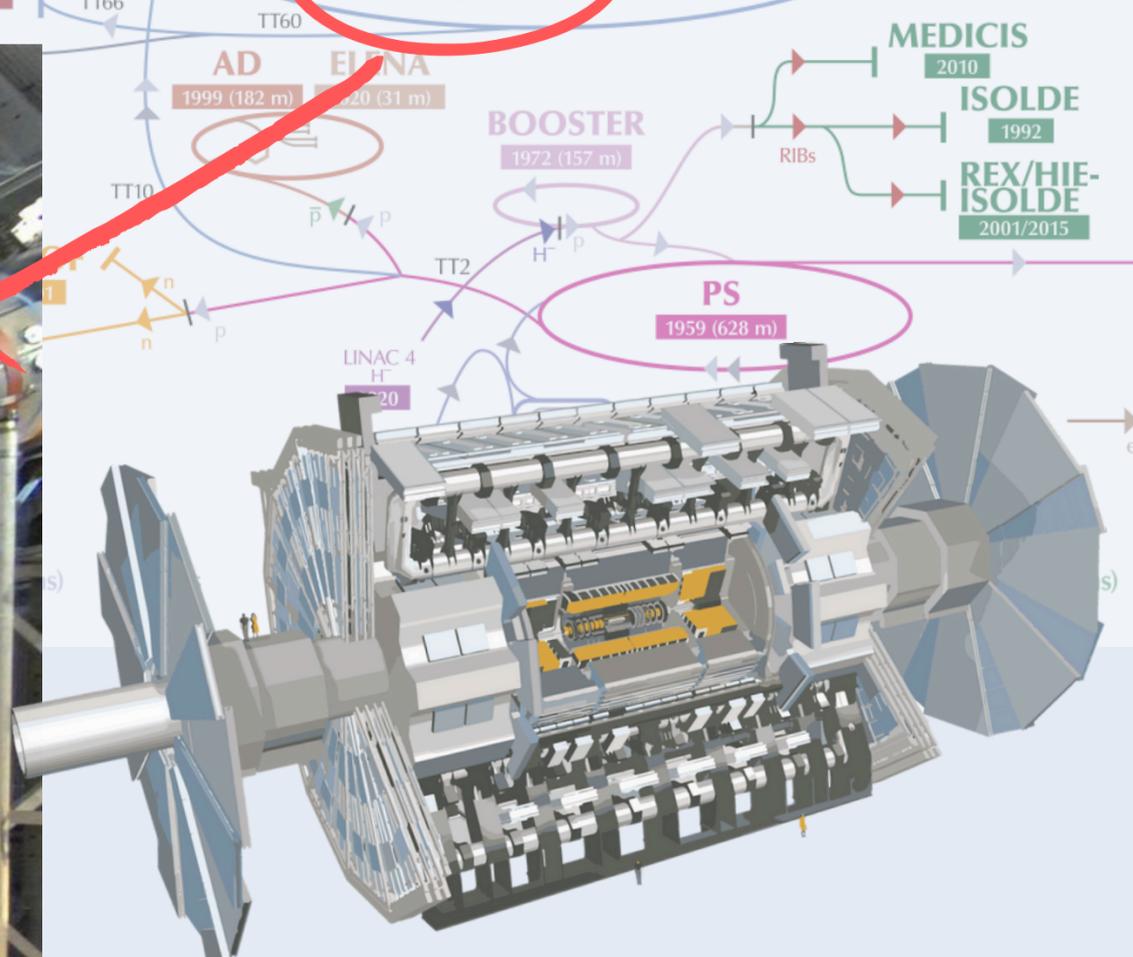
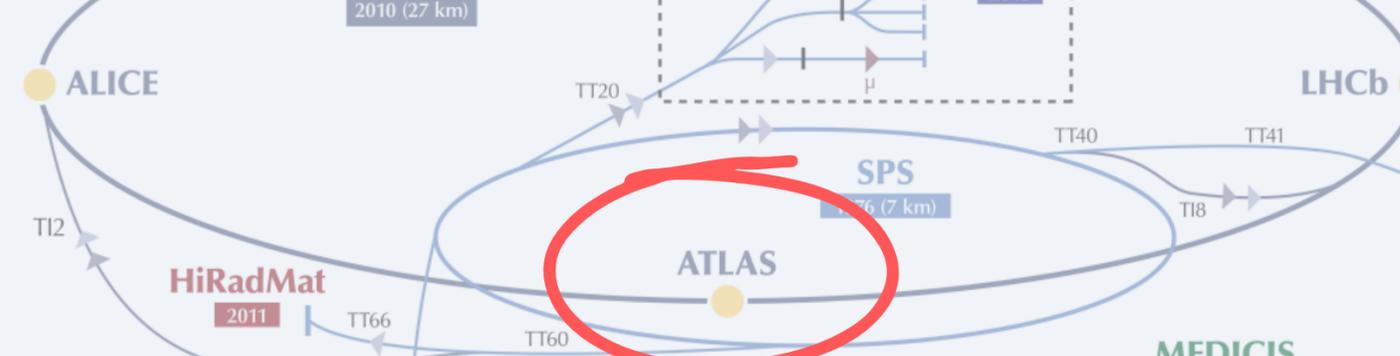
## MULTI-PURPOSE

# LHCb



## FISICA DEL QUARK B

# ATLAS



**MULTI-PURPOSE**

# COSA IMPAREREMO?

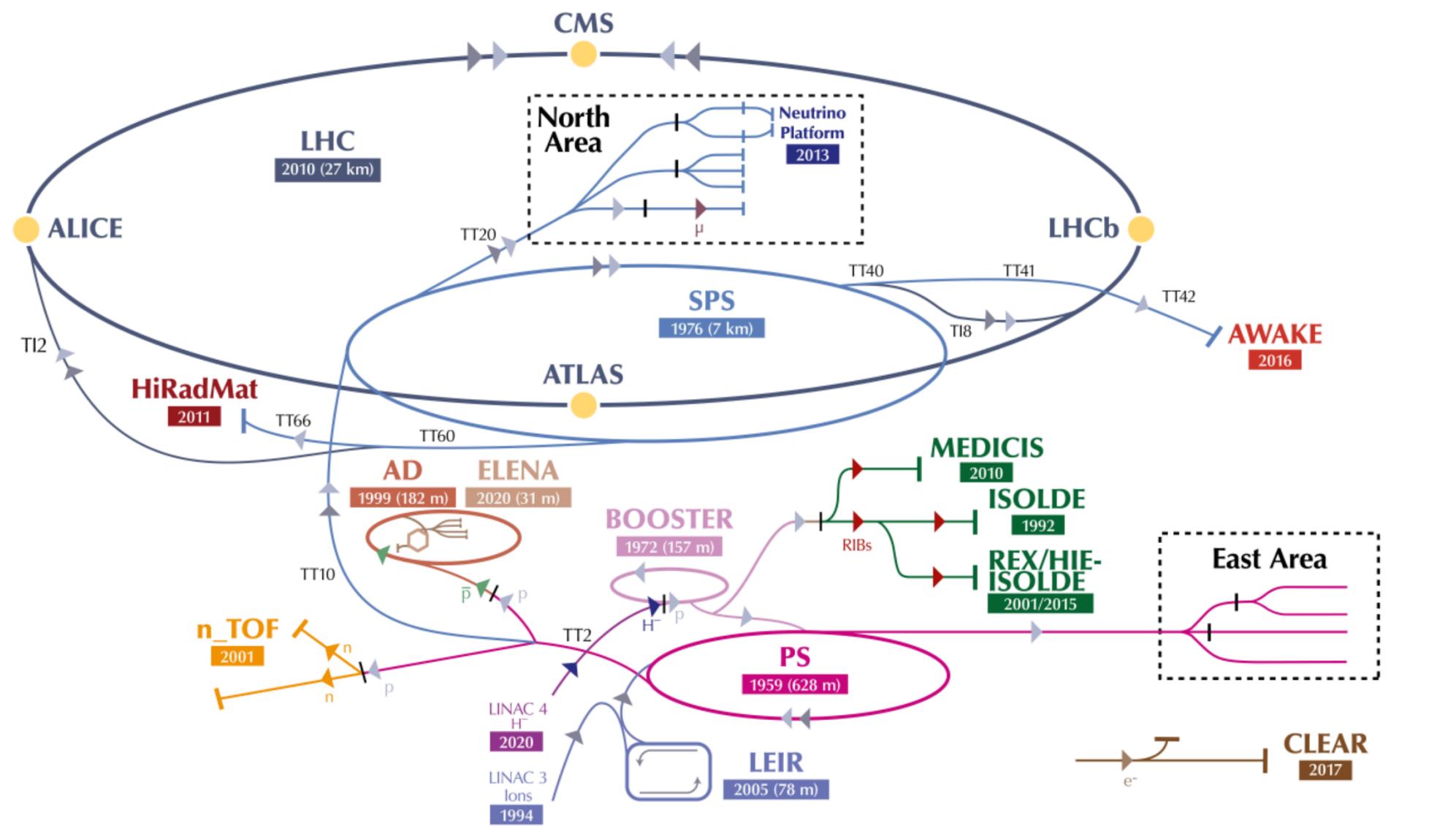
- Cosa rappresentano le linee colorate ?

## Acceleratori

- lineari e circolari
- usano tecnologie differenti
- usano magneti

- Cosa rappresentano i “punti gialli” ?

Sono rivelatori di particelle



▶  $H^-$  (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons) ▶  $\mu$  (muons)

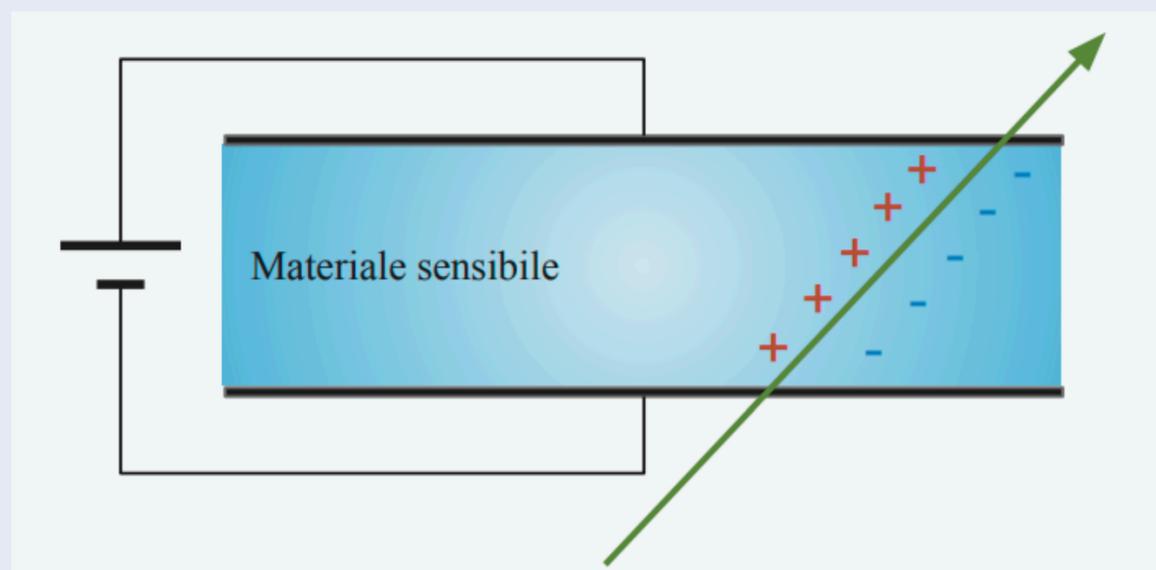
## Energie in gioco:

- **Booster:** 50 MeV-1.45 GeV
- **Proton Synchrotron:** 1.45 GeV - 5.9 GeV
- **Super Proton Synchrotron:** 5.9 GeV - 450 GeV
- **Large Hadron Collider:** 450 GeV - 7 TeV

# FUNZIONAMENTO DI BASE DEI RIVELATORI

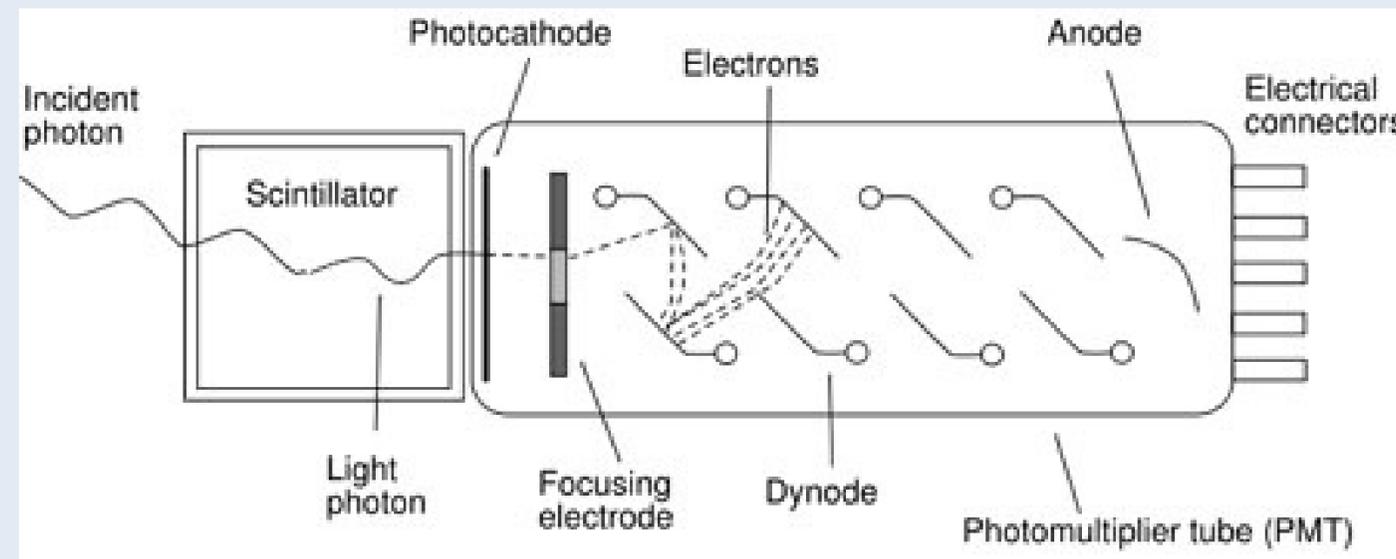
- I rivelatori di particelle sono formati da vari “strati” (sotto-rivelatori):
  - Tracciatori: misurano la **posizione** della particella. Sono solitamente basati sulla ionizzazione.
  - Calorimetri: misurano l'**energia** della particella. Solitamente basati su ionizzazione e scintillazione.

## Ionizzazione



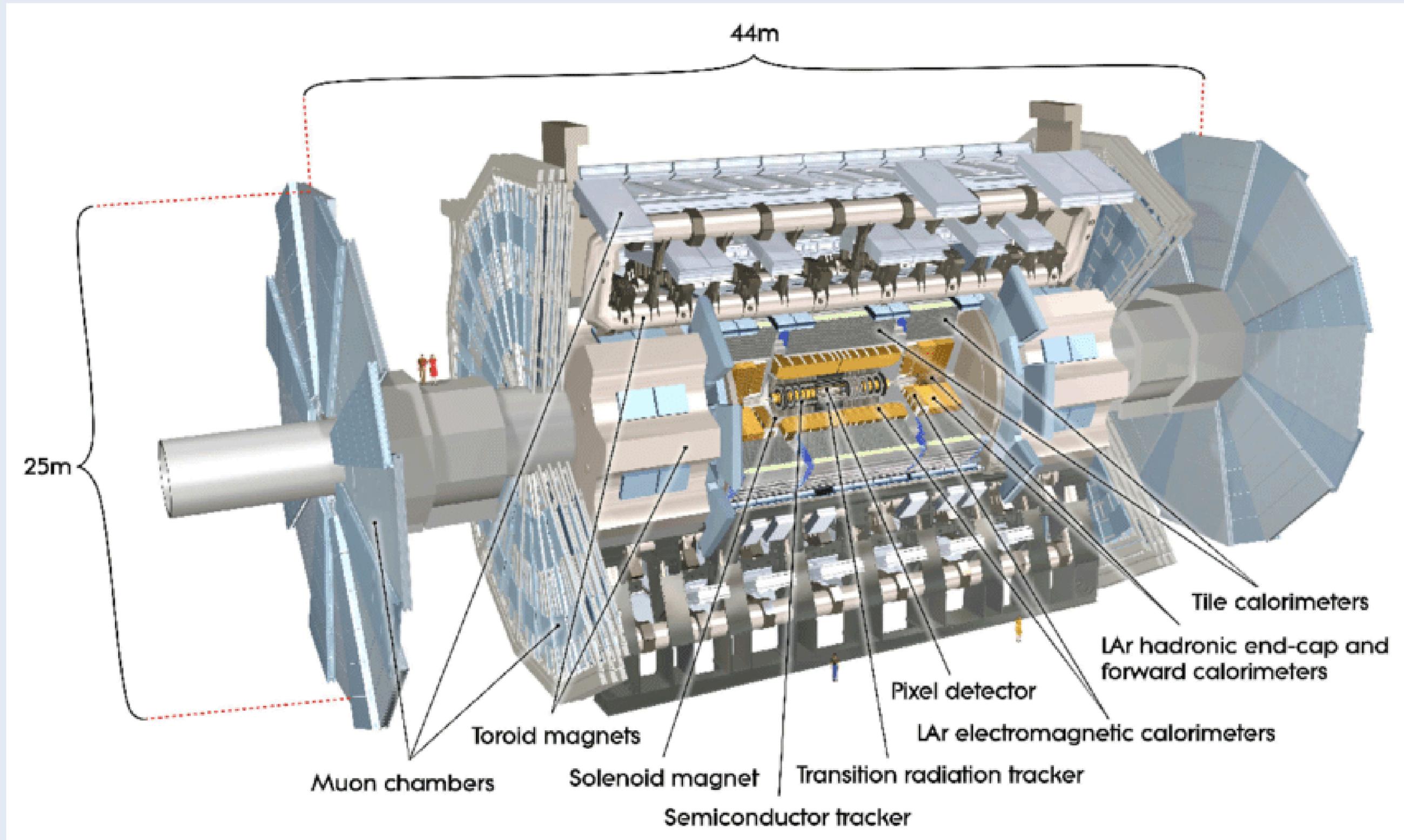
generazione e raccolta cariche elettriche

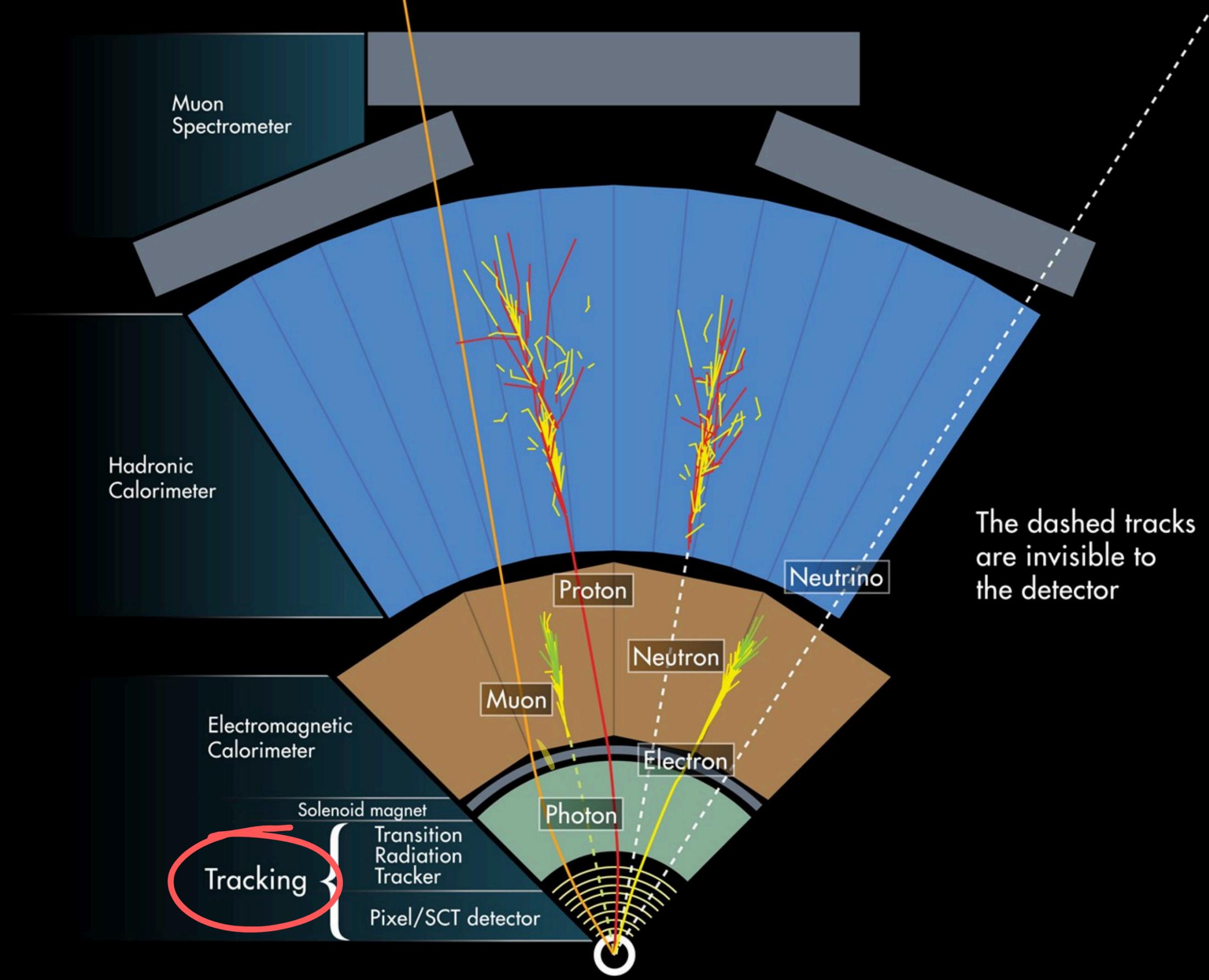
## Scintillazione



le particelle incidenti generano luce che viene convertita in un segnale elettrico

# ATLAS



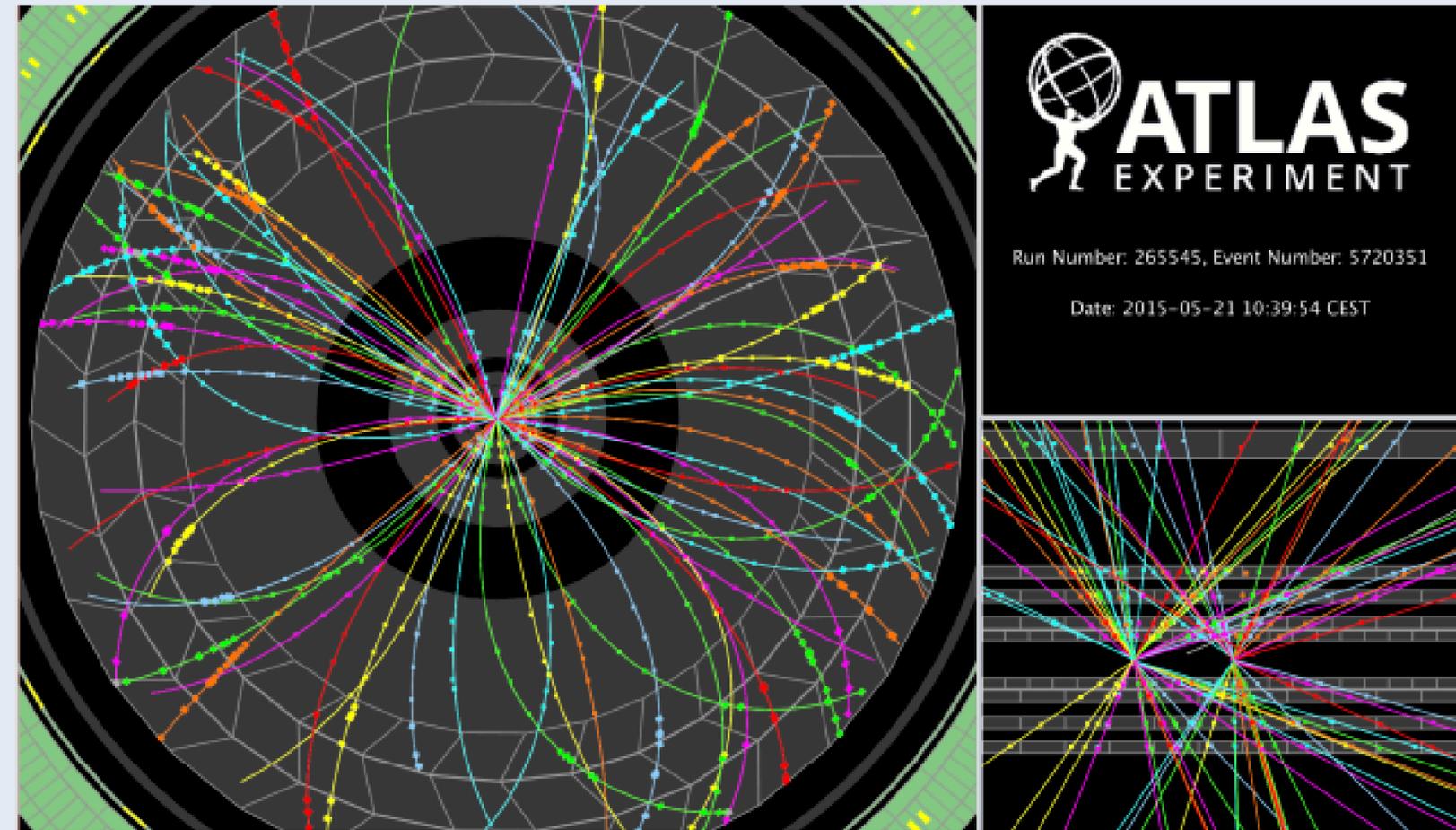
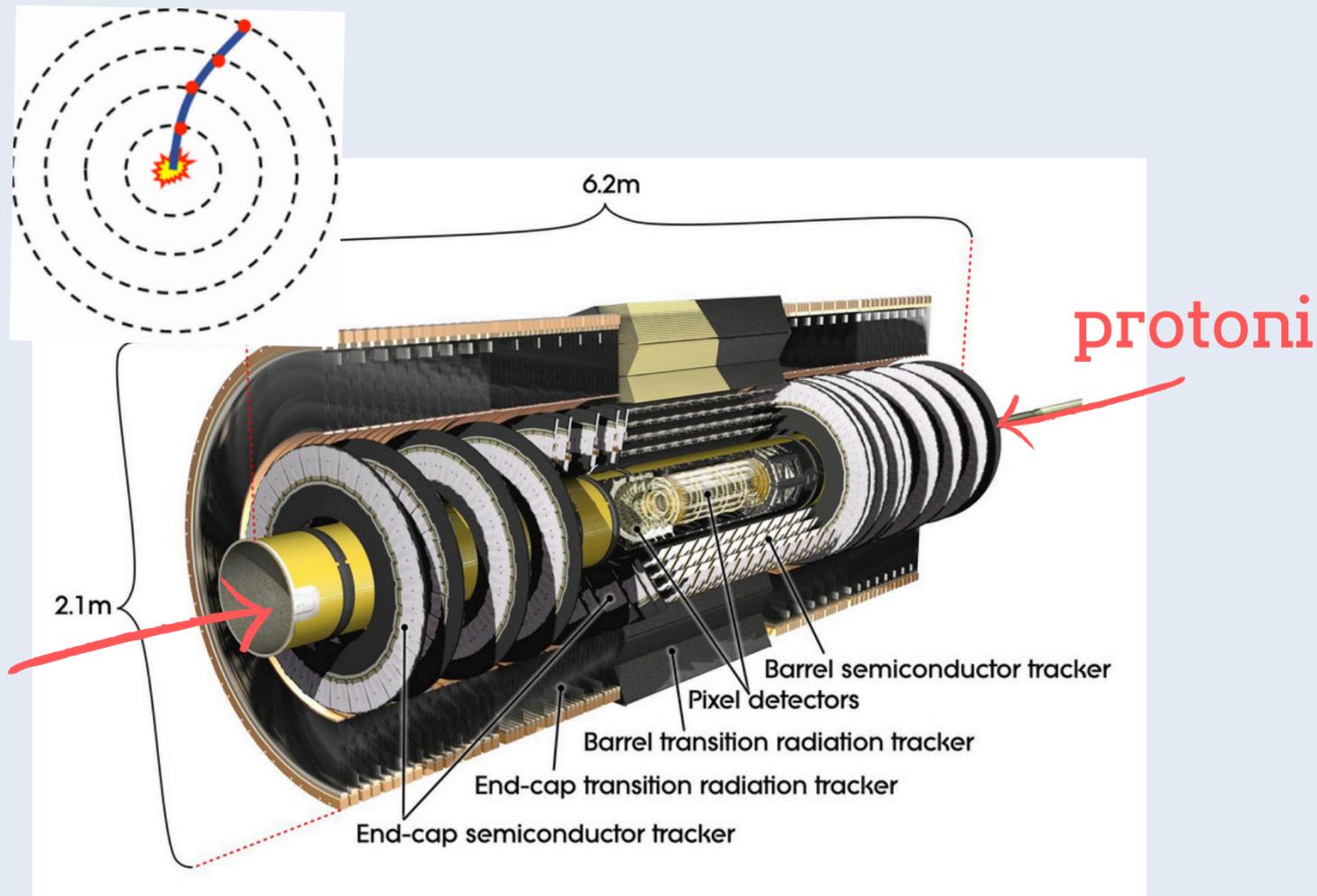


Tracking

The dashed tracks are invisible to the detector

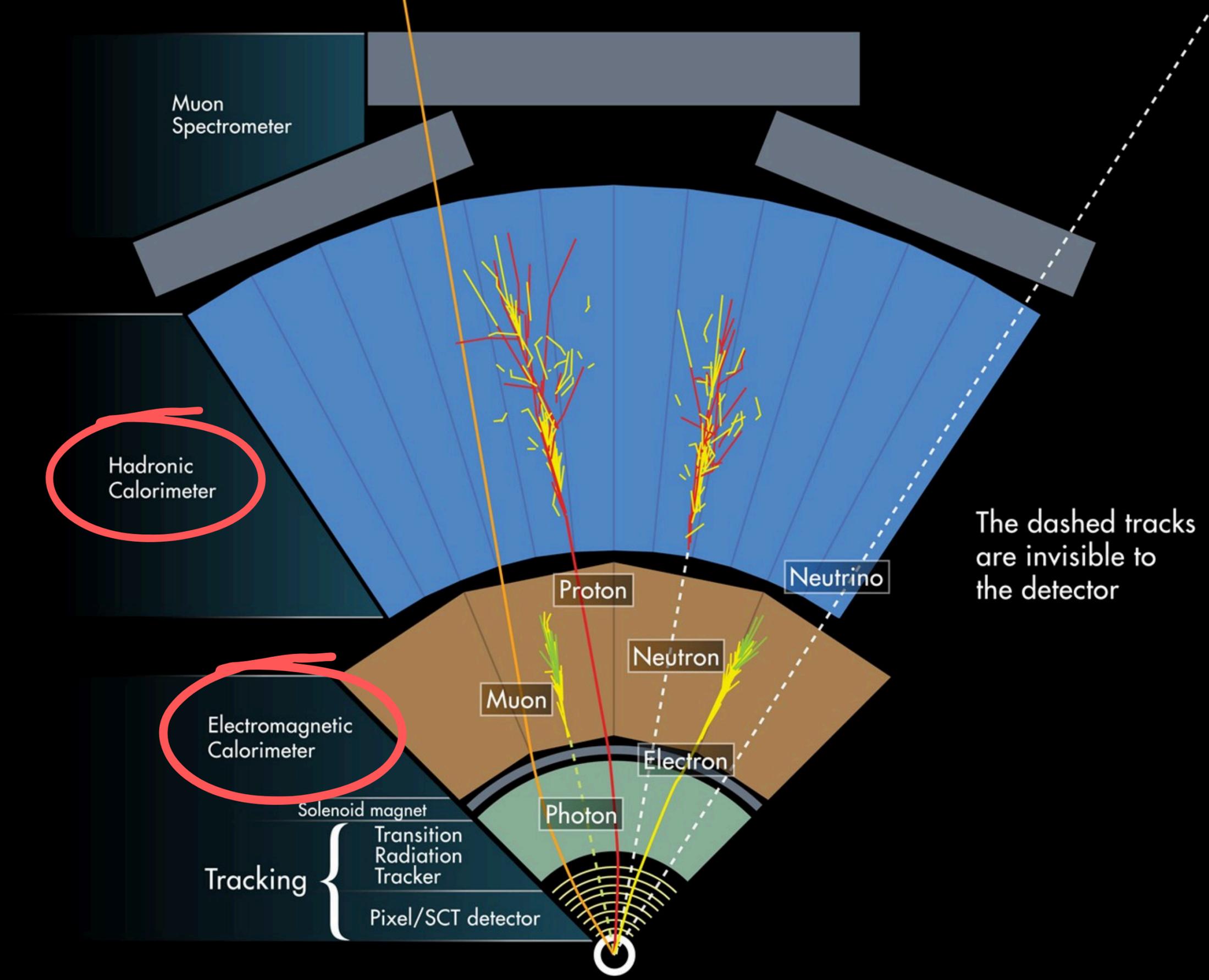
# TRACCIATORI

- E' un rivelatore di particelle cariche.
- ➔ Ne misura la traiettoria, la quantità di moto e la carica.



- Misuriamo la posizione di una particella carica
  - ➔ vicino alla regione di interazione meno disturbati dovuti all'interazione con il rivelatore
  - ➔ in un campo magnetico misuriamo l'impulso della particella

$$R = \frac{m_p v}{q B}$$



Muon Spectrometer

Hadronic Calorimeter

Electromagnetic Calorimeter

Tracking

Solenoid magnet

Transition Radiation Tracker

Pixel/SCT detector

Proton

Muon

Neutron

Electron

Photon

Neutrino

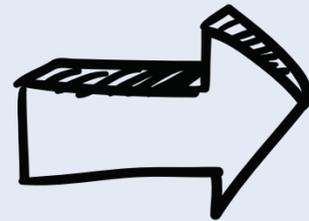
The dashed tracks are invisible to the detector

# CALORIMETRI

- I calorimetri vengono usati per misurare l'energia delle particelle.
- Le particelle che interagiscono con il materiale dei calorimetri generano “sciame” di particelle secondarie.

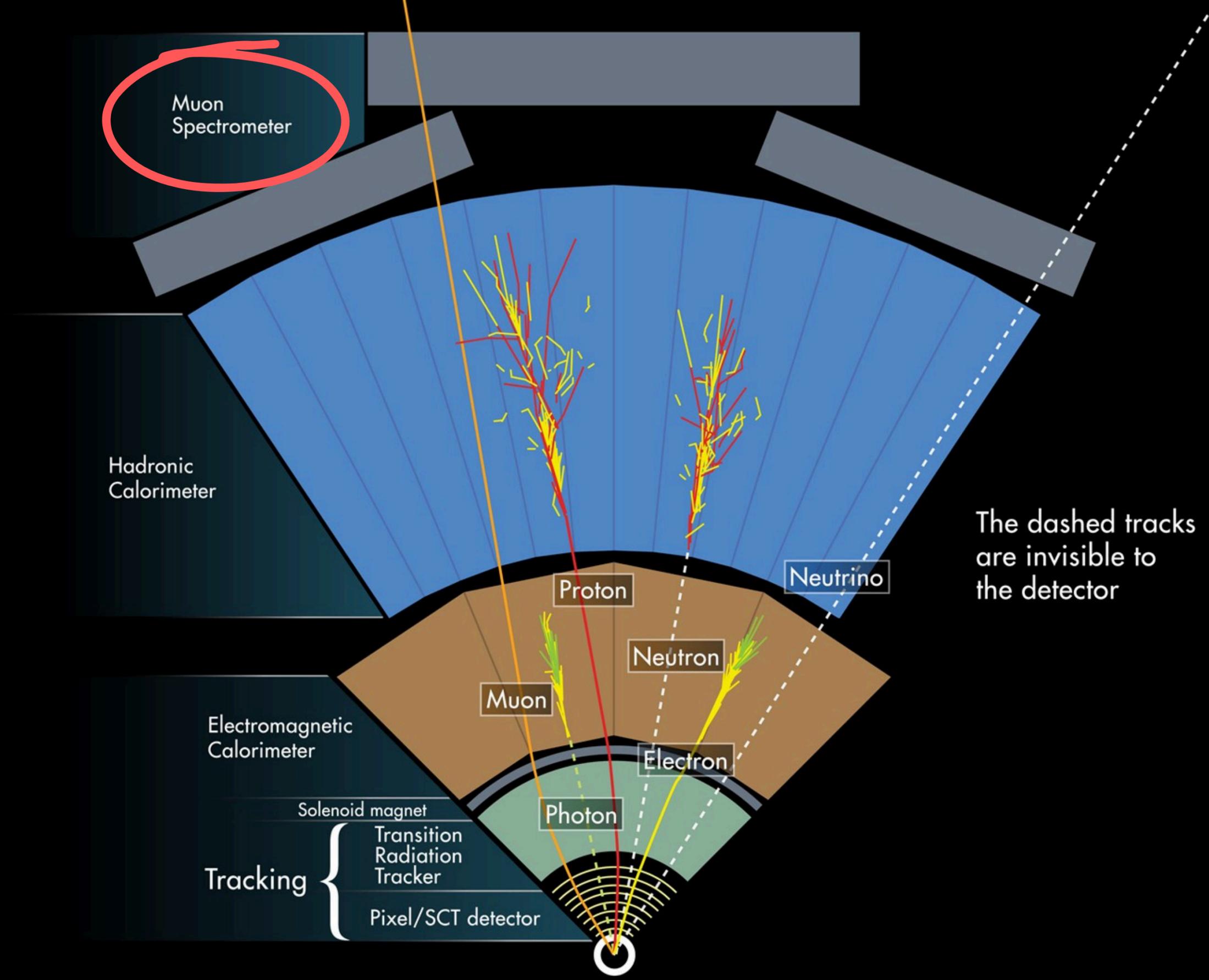
Richiede materiali diversi per:

- sciame elettromagnetici;
- sciame adronici;



Calorimetri:

- elettromagnetici (vede fotoni, elettroni e positroni);
- adronici (vede protoni, neutroni, pioni...);



Muon Spectrometer

Hadronic Calorimeter

Electromagnetic Calorimeter

Tracking { Solenoid magnet  
Transition Radiation Tracker  
Pixel/SCT detector

Proton

Neutron

Muon

Electron

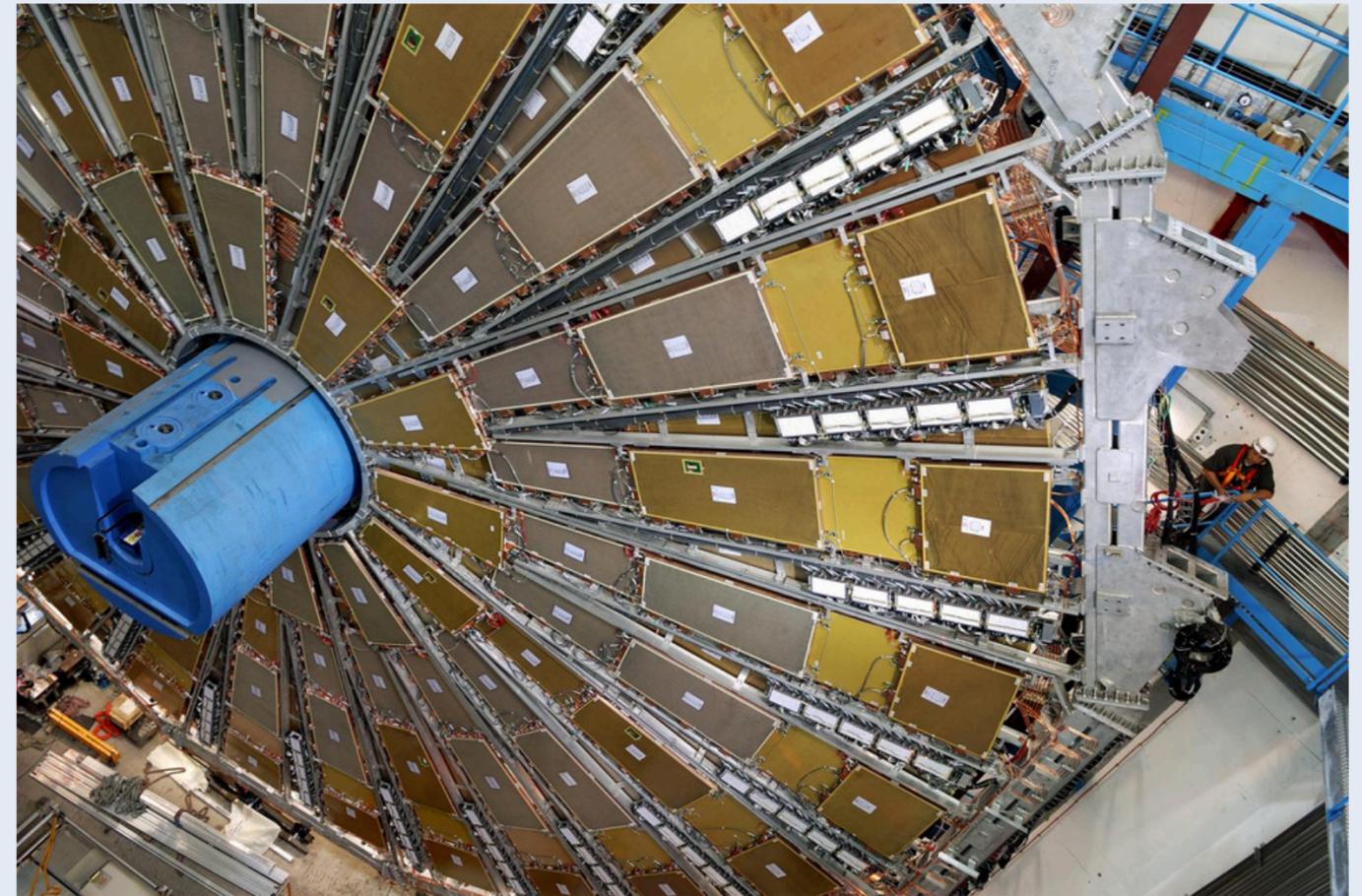
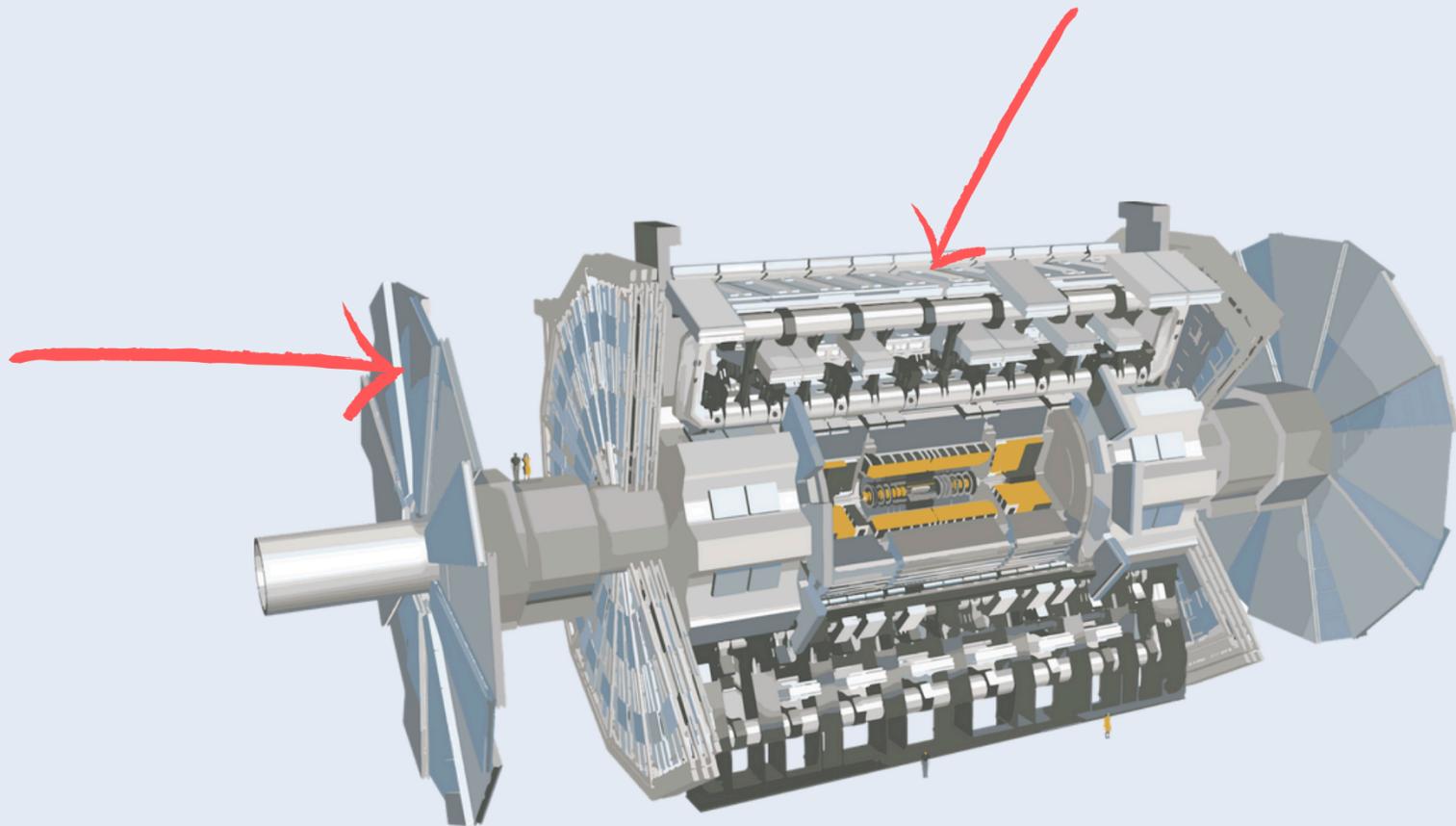
Photon

Neutrino

The dashed tracks are invisible to the detector

# RIVELATORI DI MUONI

- Per riconoscere i muoni e misurare la loro energia abbiamo un secondo tracciatore per i muoni all'esterno dei calorimetri.



# ELETTRONE

Particella con carica elettrica

Una traccia nel tracciatore  
+  
uno sciame nel calorimetro  
elettromagnetico

Muon Spectrometer

Hadronic Calorimeter

Electromagnetic Calorimeter

Solenoid magnet  
Tracking {  
Transition Radiation Tracker  
Pixel/SCT detector

Proton

Neutron

Muon

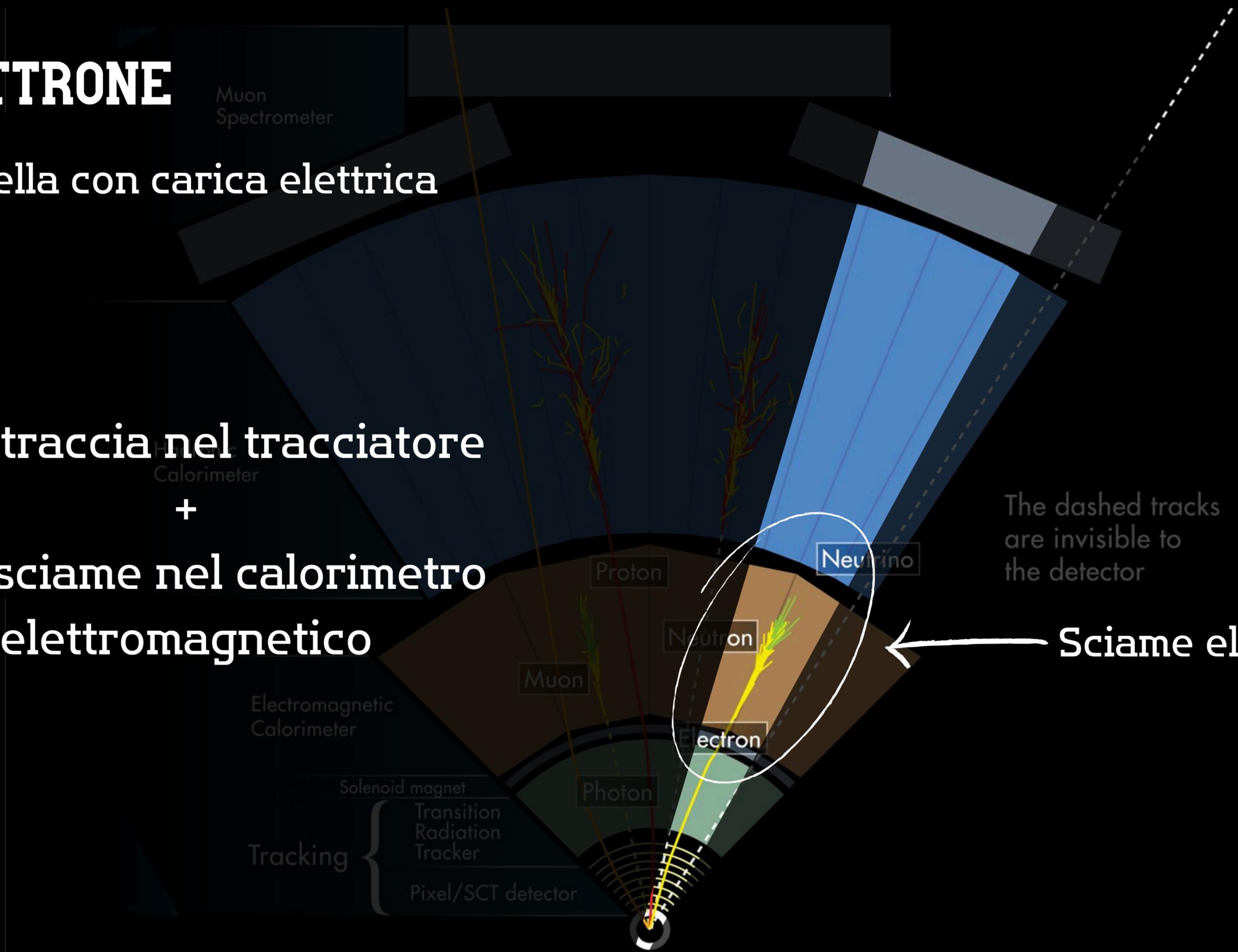
Electron

Photon

Neutrino

The dashed tracks are invisible to the detector

Sciame elettromagnetico

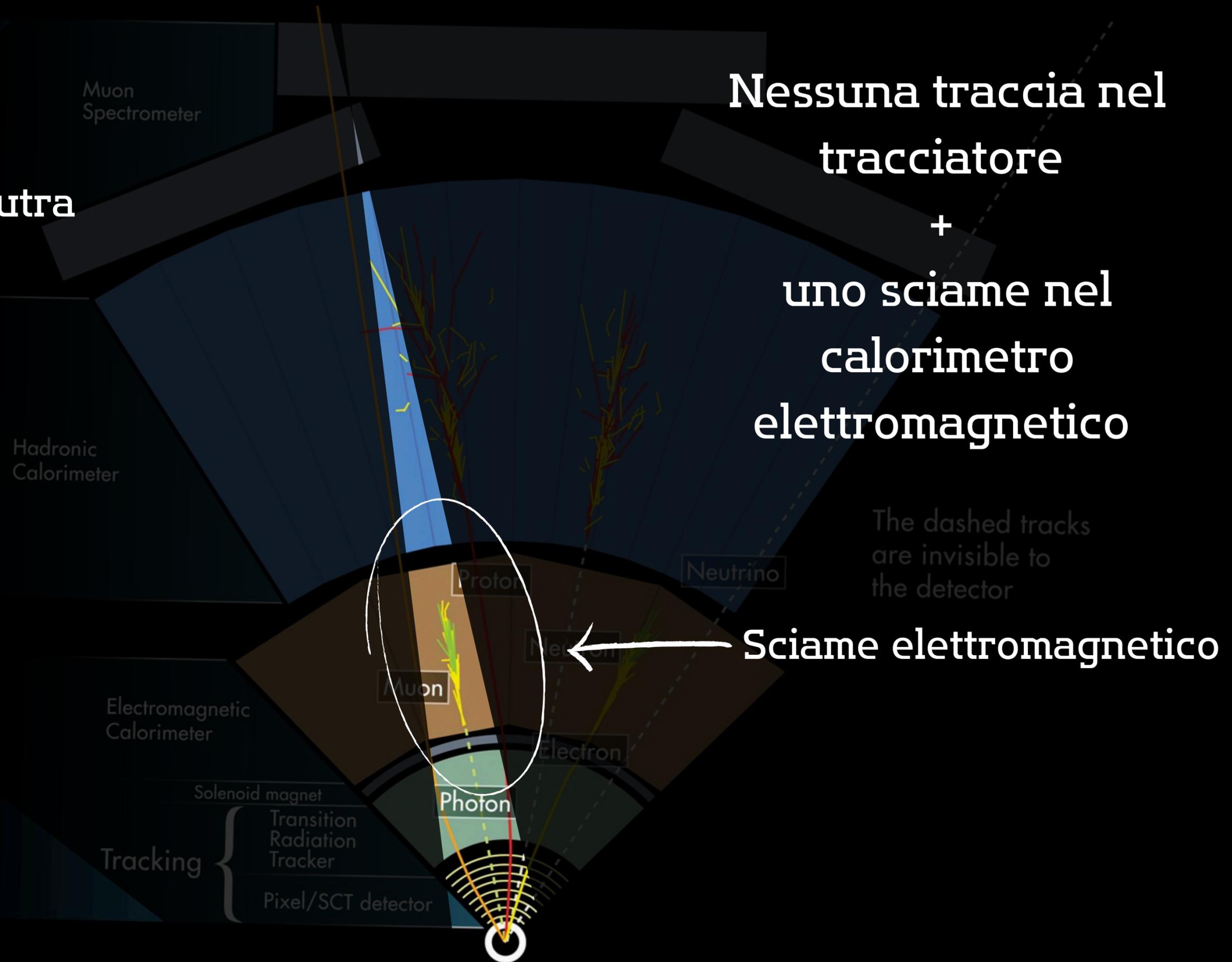


# FOTONE

Particella neutra

Nessuna traccia nel  
tracciatore

+  
uno sciame nel  
calorimetro  
elettromagnetico



Sciame elettromagnetico

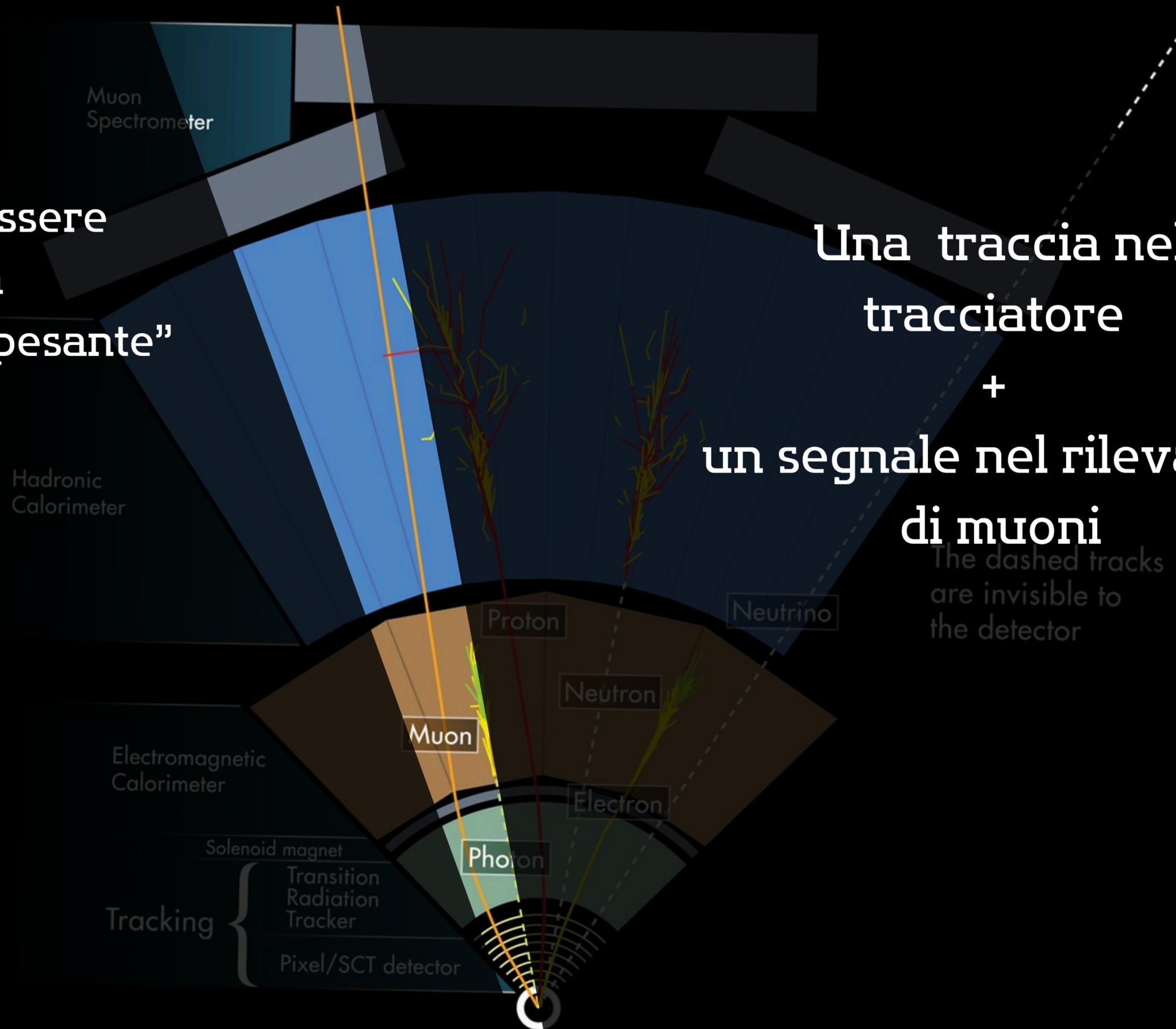
The dashed tracks  
are invisible to  
the detector

# MUONE

Il muone può essere considerato un “elettrone più pesante”

Una traccia nel tracciatore + un segnale nel rivelatore di muoni

The dashed tracks are invisible to the detector



# ADRONI

Ad esempio, protoni e neutroni

Sciame adronici

Muon Spectrometer

Hadronic Calorimeter

Electromagnetic Calorimeter

Tracking

Solenoid magnet

Transition Radiation Tracker

Pixel/SCT detector

Proton

Neutron

Muon

Electron

Photon

Neutrino

Una traccia nel tracciatore (se ha carica elettrica)

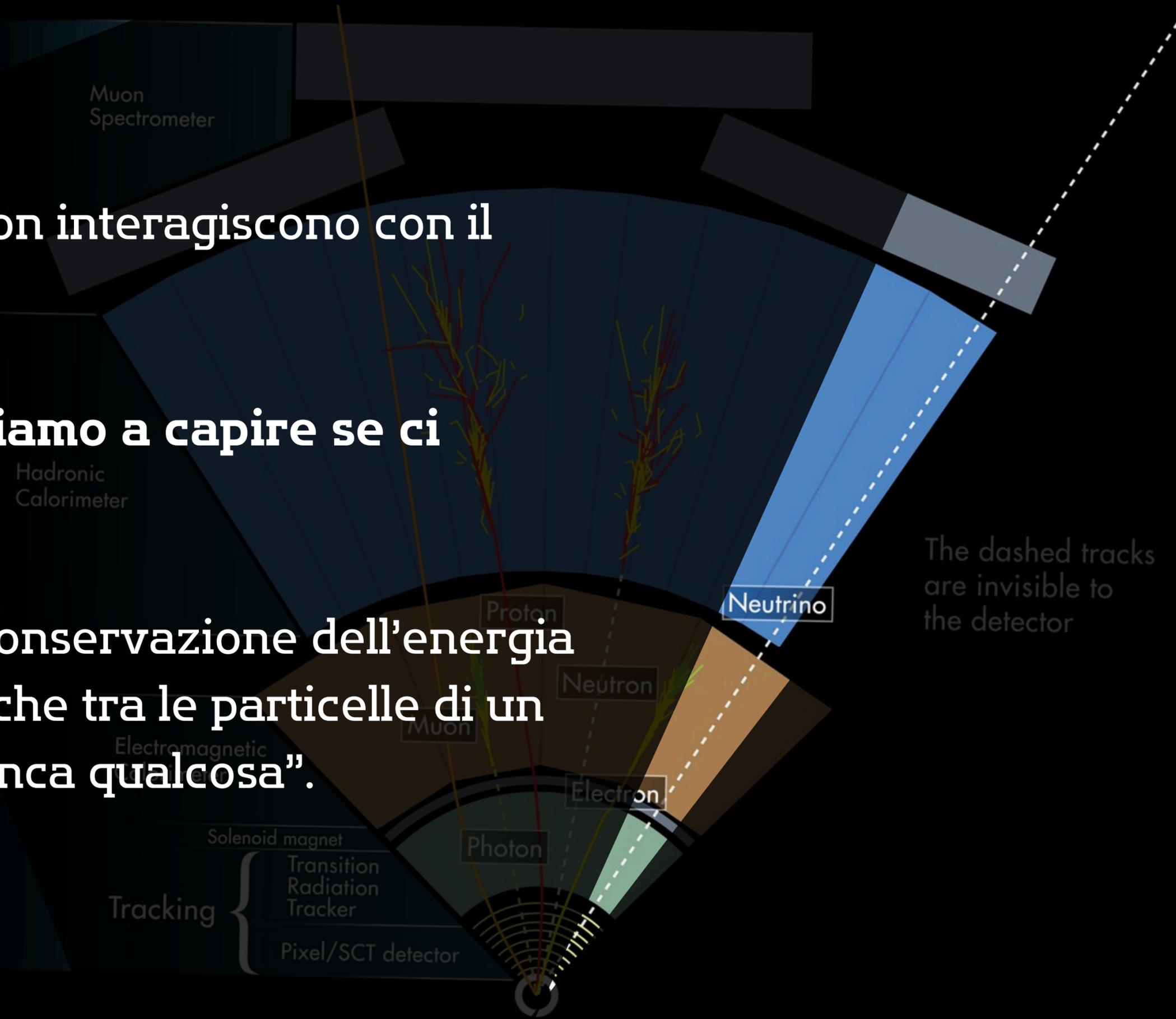
The dashed tracks are invisible to the detector  
+ uno sciame nel calorimetro adronico

# NEUTRINI

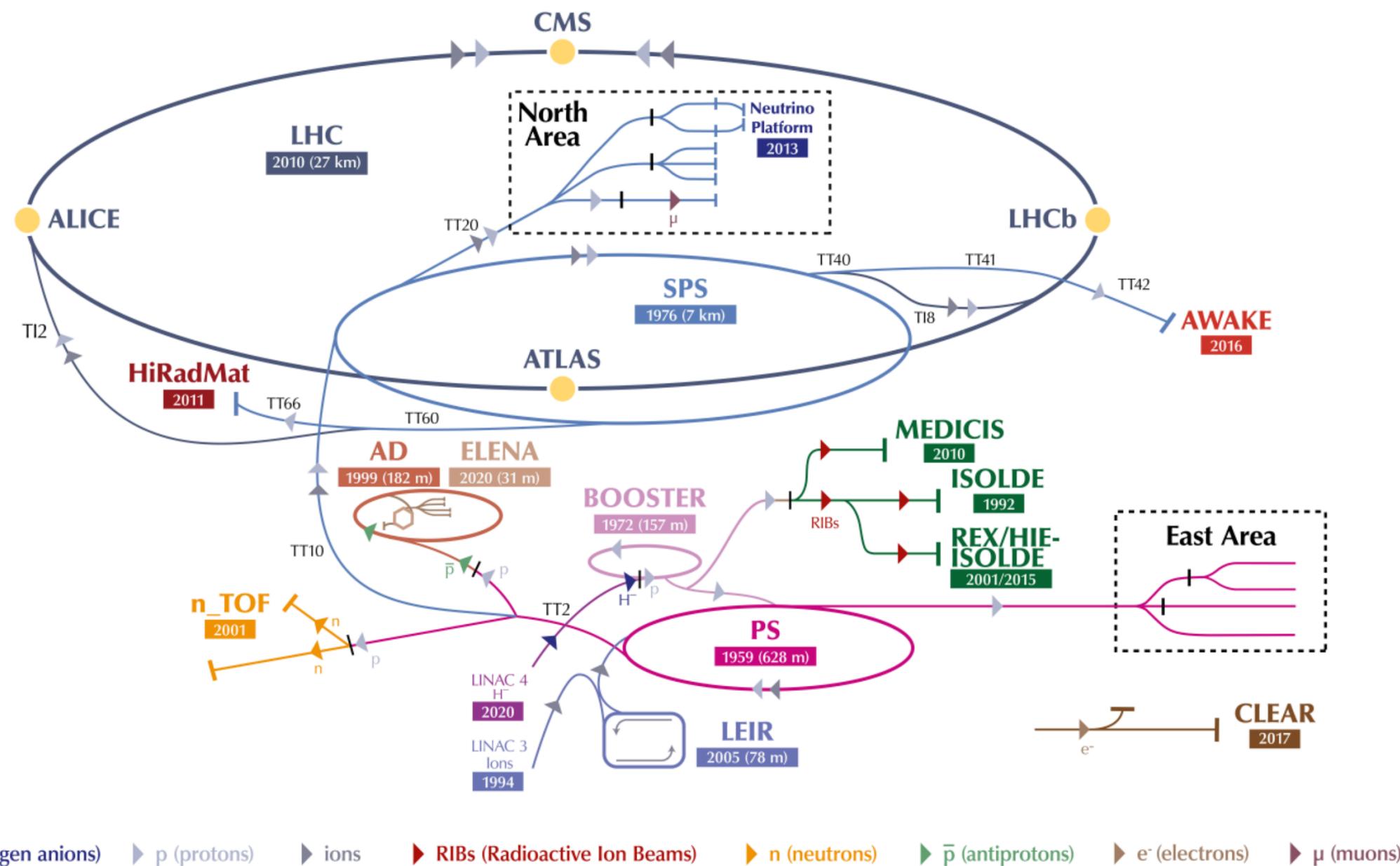
I neutrini non interagiscono con il rivelatore.

Come facciamo a capire se ci sono?

Usiamo la conservazione dell'energia che ci dice che tra le particelle di un evento "manca qualcosa".



# COSA ABBIAMO IMPARATO OGGI?



- Cosa rappresentano le linee colorate ?

## Acceleratori

- lineari e circolari
- usano tecnologie differenti
- usano magneti

- Cosa rappresentano i "punti gialli" ?

## Rivelatori di particelle

- usano sotto-rivelatori per misurare tracce ed energia
- usano diverse tecnologie

**BACKUP**

# DIPOLI...QUALCHE CONTO

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{F}{m_p} = \frac{q(vB)}{m_p}$$

$$R = \frac{m_p v}{q B}$$

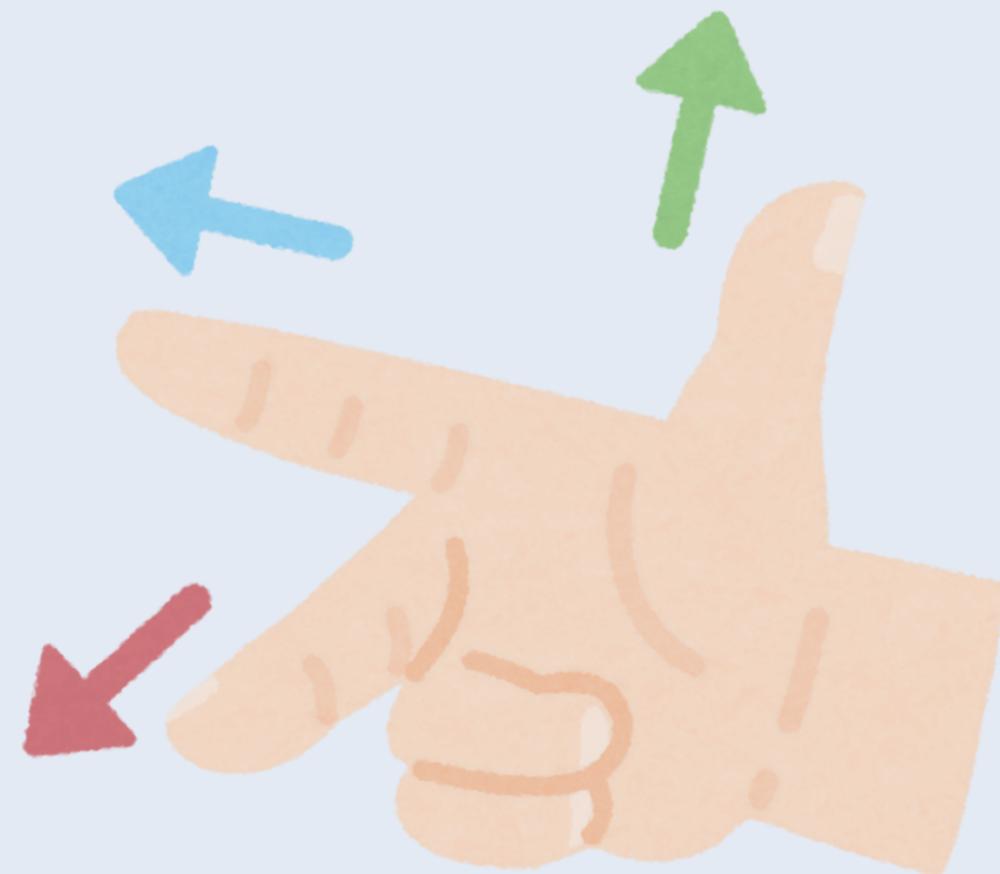
Forza di Lorentz

I protoni si muovono di moto circolare uniforme,  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{B}$  sono ortogonali

Semplificando

In realtà...

$$B[T] = 3.3 \frac{E [GeV]}{R [m]}$$



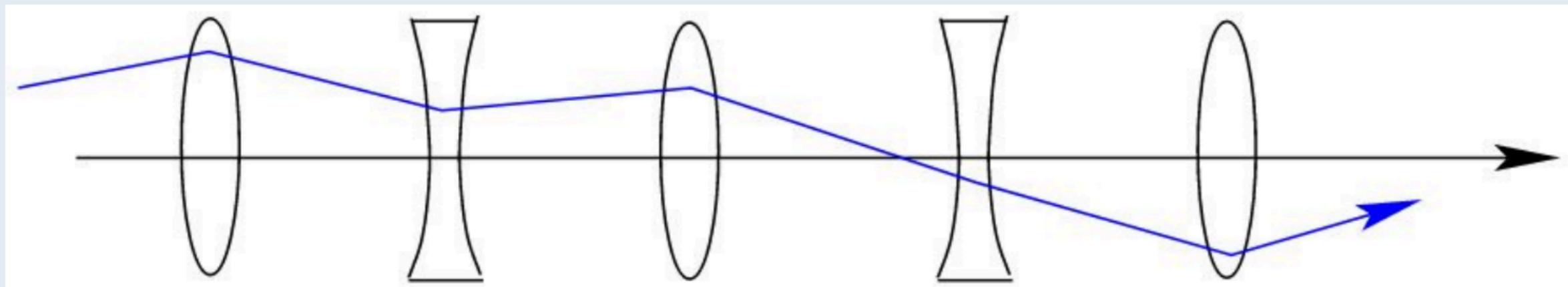
# MAGNETI SUPERCONDUTTORI: QUADRUPOLI

- I protoni nei “pacchetti” tendono ad allontanarsi a causa della repulsione elettromagnetica tra i protoni stessi.

E' necessario focalizzare i fasci!

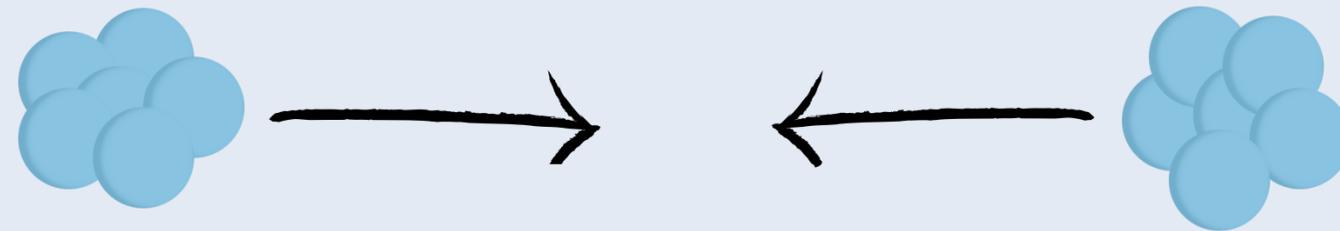
**Come?**

Usiamo dei quadrupoli magnetici. → “schiacciano” il pacchetto in una direzione; “allargano” il pacchetto nella direzione opposta;



# PILE-UP

- Collidono “pacchetti” di protoni! In ogni collisione tra pacchetti, più di due protoni interagiscono tra loro.



- Danno origine a quello che chiamiamo **pile-up**.

25 vertici di interazione!

