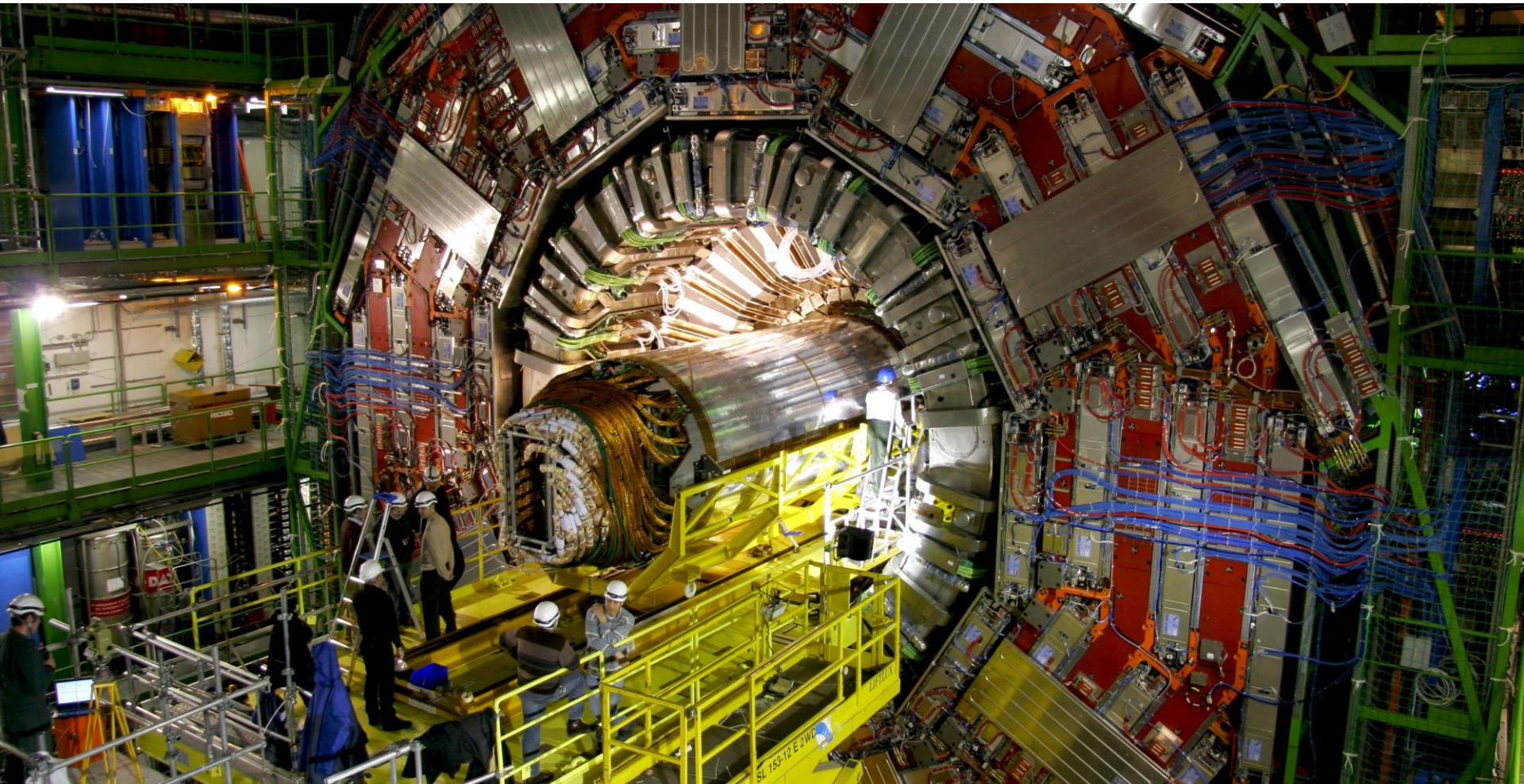


Misure di particelle a CMS



Ruben Gargiulo, 24/02/2025



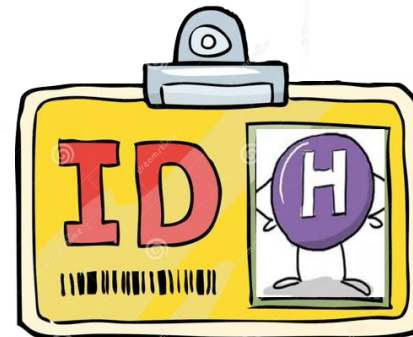
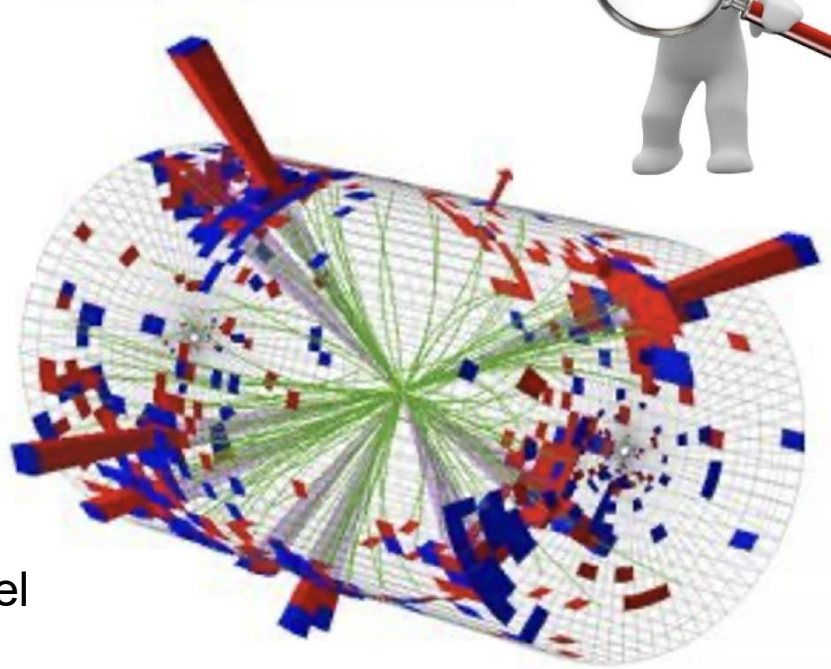
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sezione di Roma



Particle identikit

- Nelle collisioni a LHC si producono **diversi tipi di particelle**
- Ogni **particella** lascia un **segnale** caratteristico nei **rivelatori**
- Per ogni particella che passa nel rivelatore vogliamo misurare:
 - **Direzione**
 - **Energia** (o massa + velocità)
 - **Carica elettrica**
 - **Tipologia** (gratis: mass, e carica)

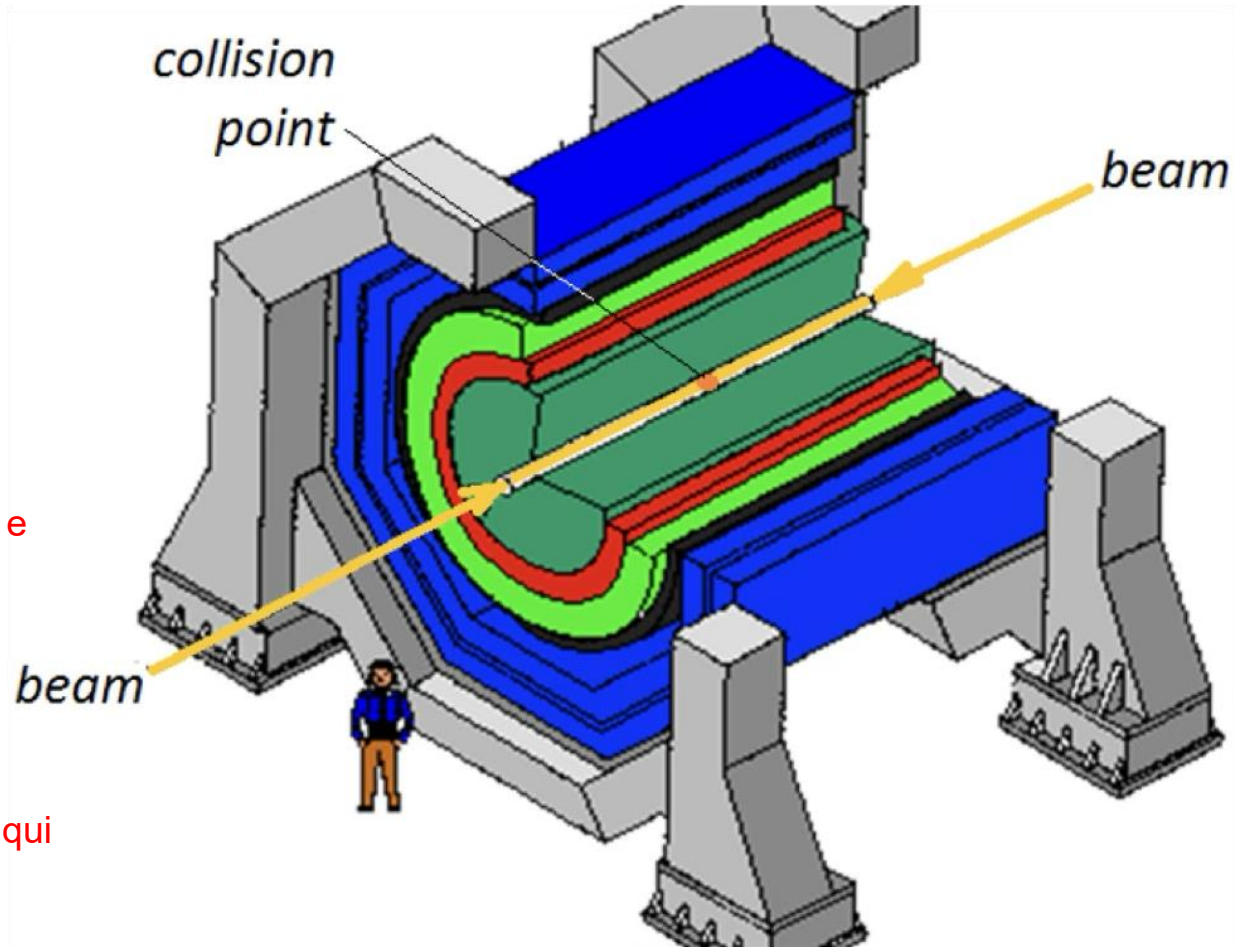


Quali particelle si osservano?

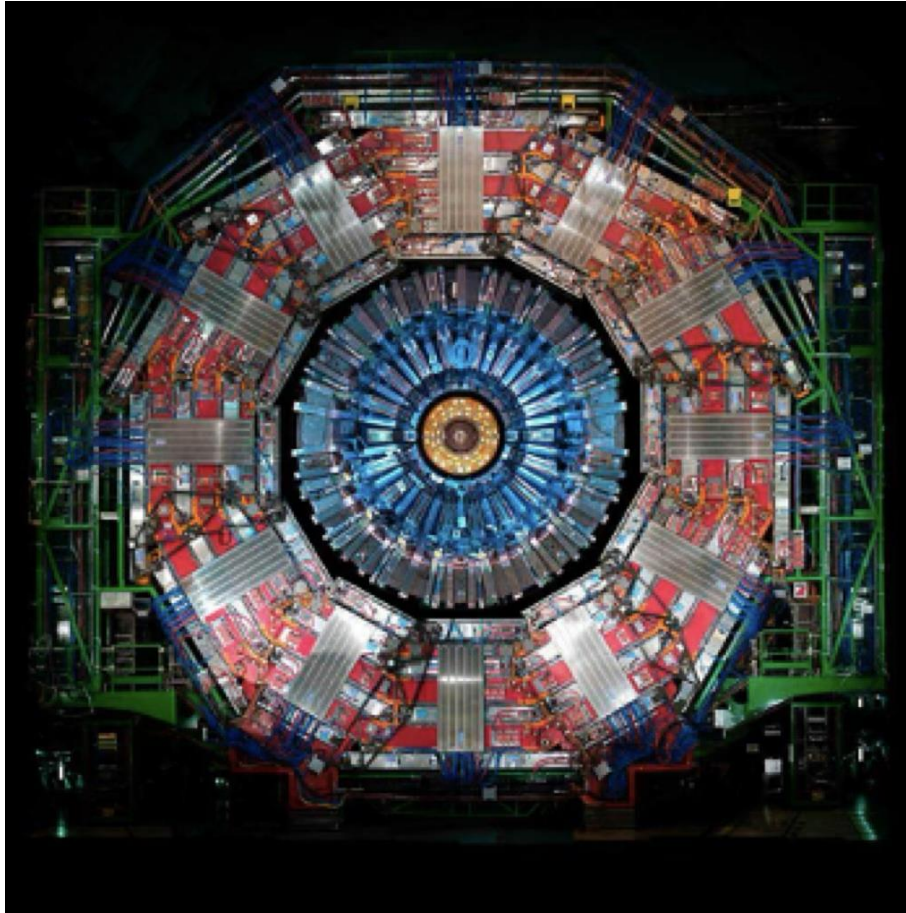
- Classificate in base a quanto materiale serve per fermarle:
 - Circa 30 cm di acciaio (interazioni elettromagnetiche coi nuclei):
 - Elettroni (componenti dell'elettricità): carica negativa, massa molto piccola
 - + Positroni: elettroni con carica positiva
 - Fotoni: particelle della luce, a energia molto più alta, carica zero (neutre), massa zero
 - Tutti e tre «sciamano»
 - producono «valanghe» (o «cascate») di altri elettroni e fotoni a energie sempre più basse
 - Circa 150 cm (un metro e mezzo) di acciaio (interazioni forti coi nuclei):
 - Adroni: protoni, neutroni, e loro «cugini» instabili (pioni, kaoni)
 - Anch'essi «sciamano»:
 - Producono cascate di altri adroni a energie sempre più basse
 - Circa 10 metri di acciaio (interazioni elettromagnetiche con gli atomi):
 - Muoni: uguali agli elettroni, ma 200 volte più pesanti
 - L'interazioni coi nuclei è parecchio indebolita per via della massa più alta
 - Non sciamano

Geometria di CMS

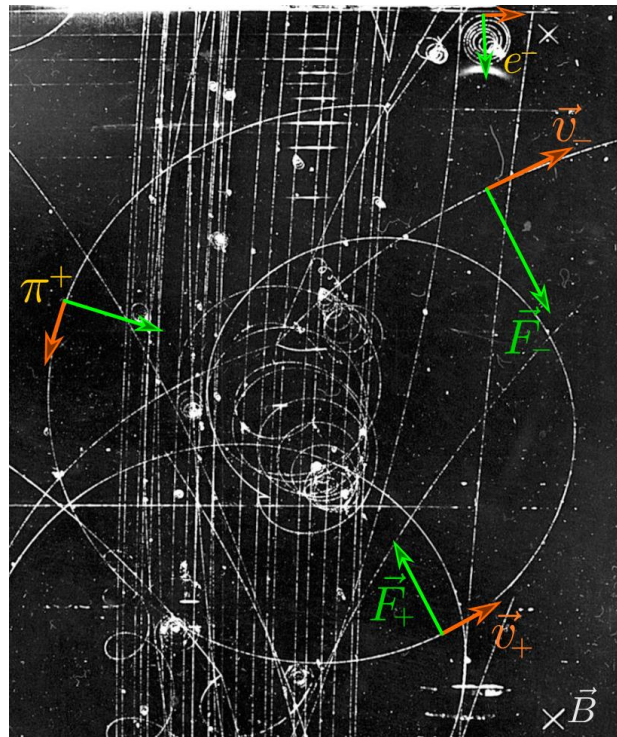
- *Dall'interno all'esterno* le particelle attraversano:
 - Tracciatore
 - Calorimetri (elettromagnetico + adronico):
 - Elettroni/positroni/fotoni e adroni «sciamano»
 - Magnete
 - Rivelatori di muoni
 - Unici a sopravvivere fin qui



CMS: un enorme fotocamera

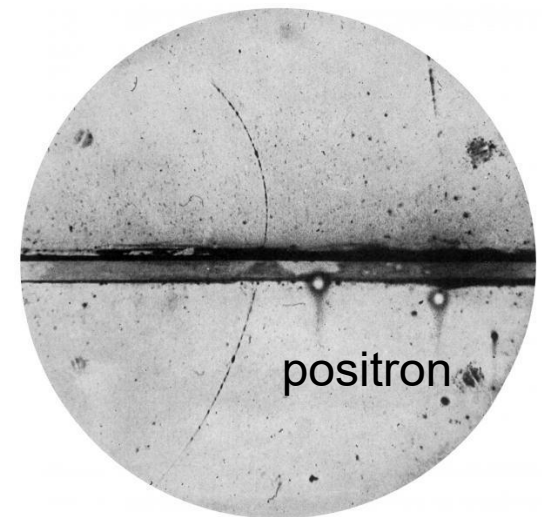


Tracciamento delle particelle

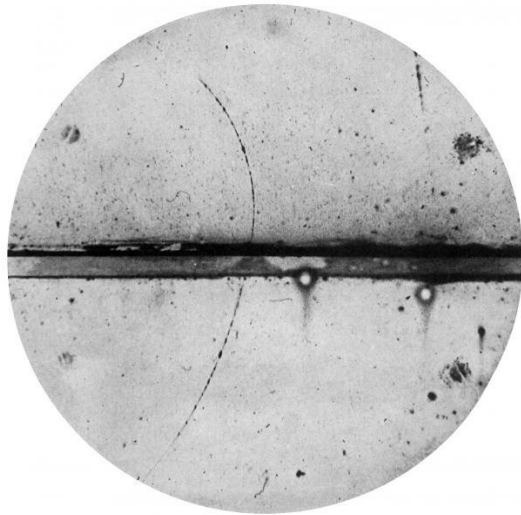


- Le particelle **cariche** in un **campo magnetico (B)** vengono **curvate** dalla forza di Lorentz: $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- In base al **verso** in cui curvano si sa il **segno** della carica
- In base al **raggio** del cerchio lungo il quale curvano si sa la **velocità** (conoscendo la **massa**)

1932, Anderson (Nobel prize)



Tracciatore di CMS



Camera a nebbia
(vapore super-sensibile) + fotografia
1920-1960
molto lento



- Ogni pixel di una fotocamera misura la luce tramite segnali elettrici
- Qui è uguale ma si misura l'energia depositata dalle particelle

10mila pixel/cm² (CMS)
vs 60 milioni/cm² (fotocamera)



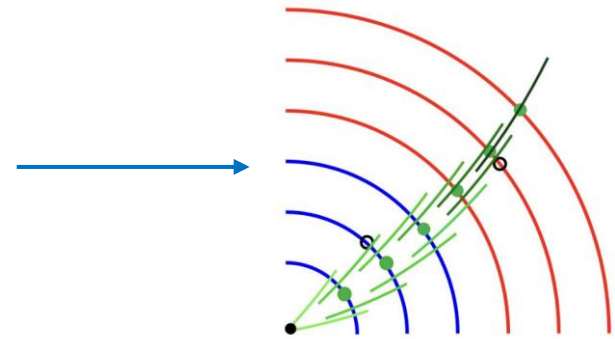
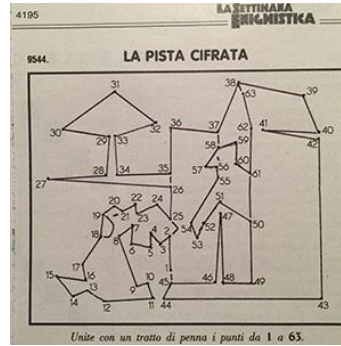
Tubo con fascio di protoni

Rivelatore a «pixel»:
Come una fotocamera,
scatta foto **40 milioni di volte al secondo**

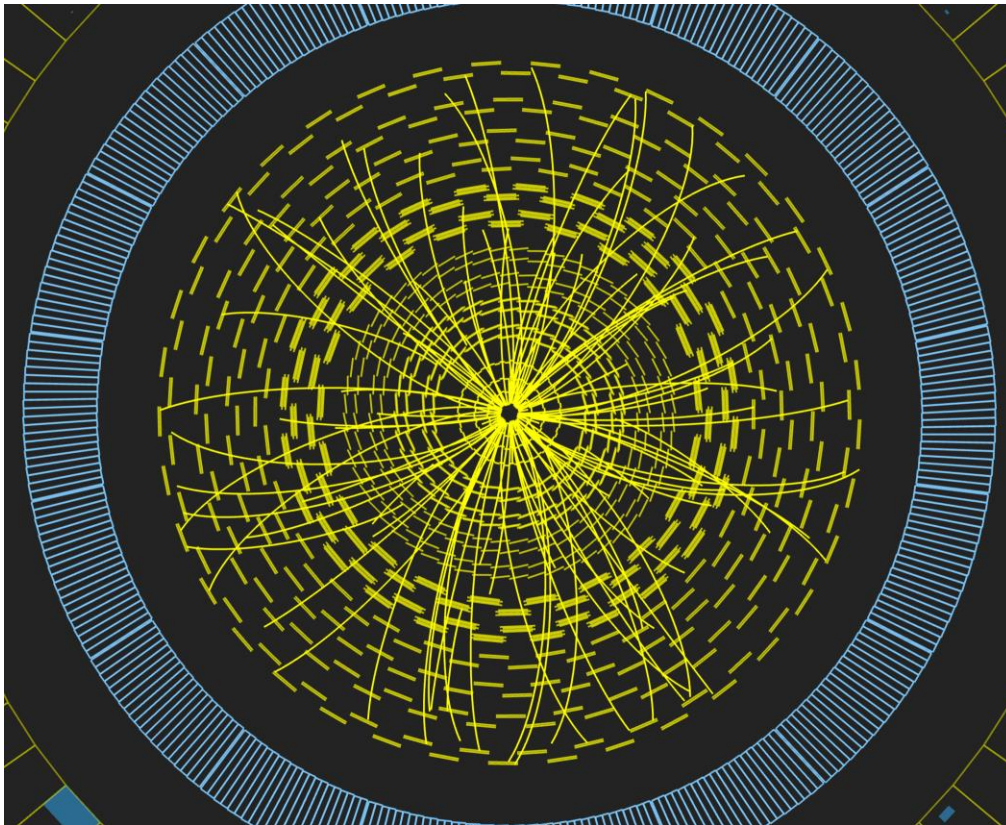
Singola «fotocamera»

Costruzione delle tracce

- Uniamo i puntini...



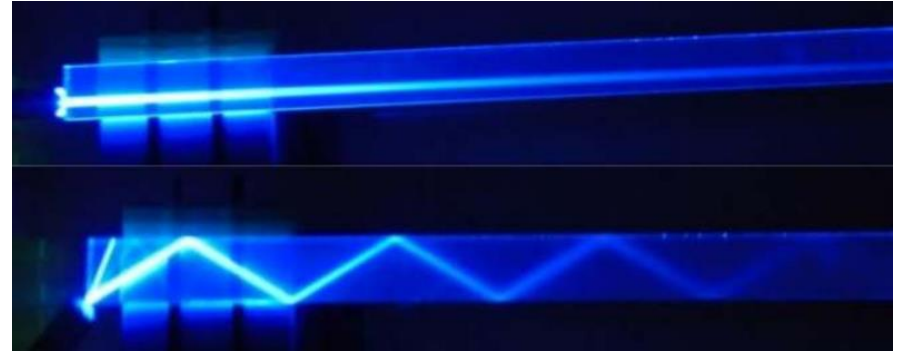
Tracciatore CMS
con 1 traccia sola



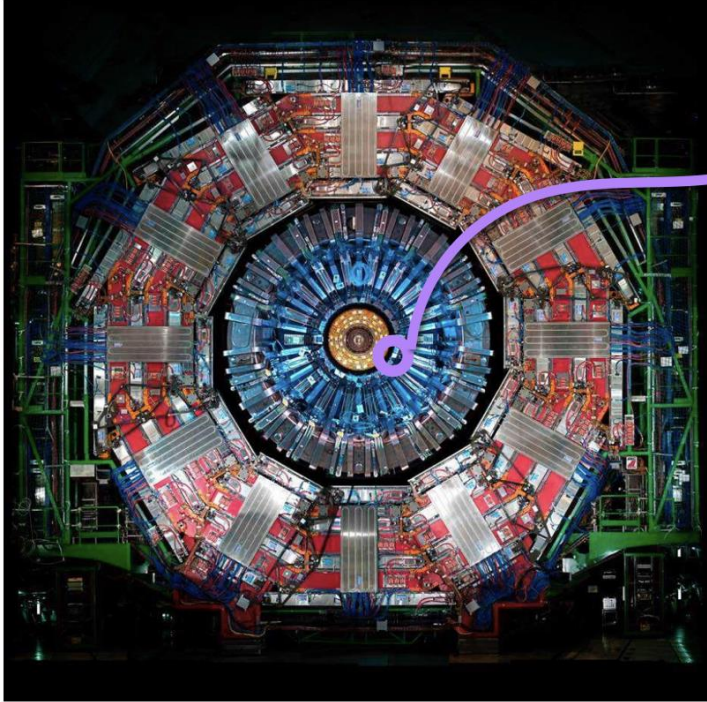
- In ogni evento (40 milioni di volte al secondo) con un po' di intelligenza artificiale (dal 2010...)

Calorimetri

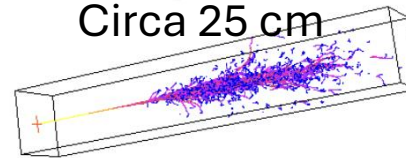
- Elettroni/fotoni/adroni **sciamaano** e depositano tutta la loro energia nei **calorimetri**
- I **materiali** che li compongono “**scintillano**” cioè emettono una **luce** **proporzionale all’energia depositata**
- Più o meno simile a misurare l’energia di un proiettile misurando la profondità del buco dovuto all’impatto
- Il «danno» che fa la particella al materiale è proporzionale alla luce emessa



Calorimetro elettromagnetico



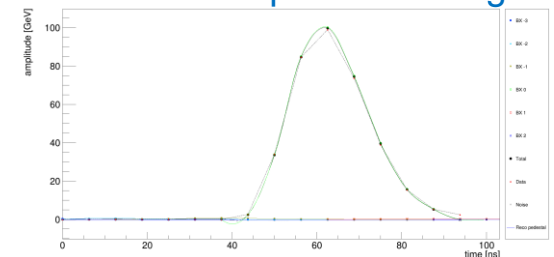
Circa 25 cm



Elettroni e fotoni interagiscono col materiale (tungstanato di piombo), «sciama» e producono una cascata di particelle

Misurando l'energia totale depositata nel materiale si misura l'energia della particella iniziale, tramite la luce emessa (usando 2 sensori $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ per cristallo)

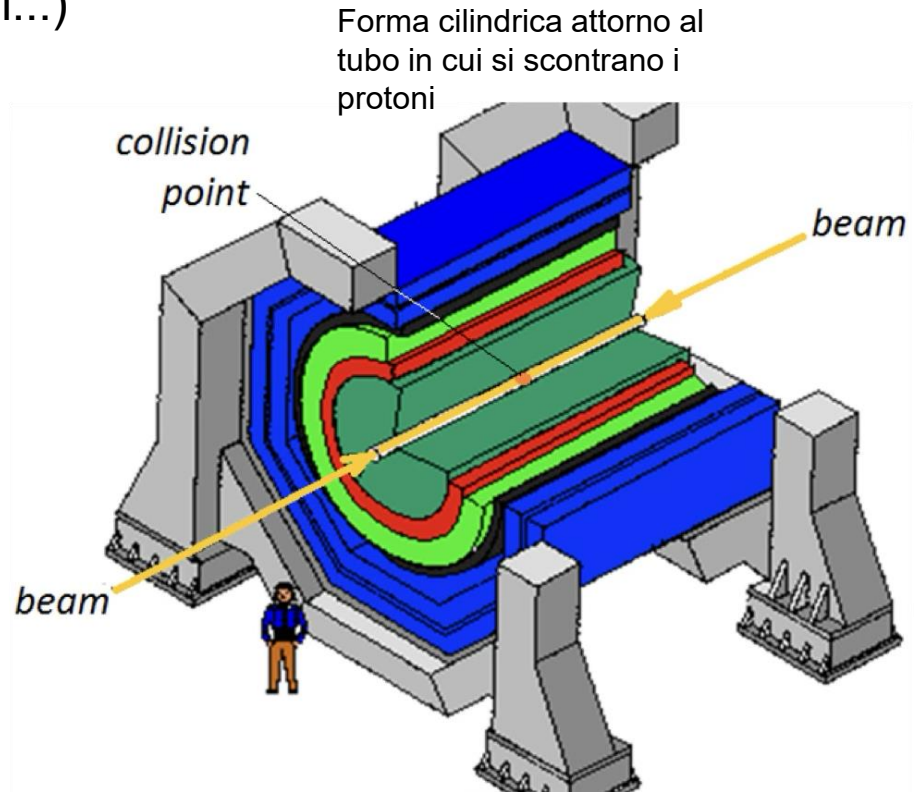
Segnale elettrico dal sensore raccogliendo la luce emessa
Altezza del picco -> energia



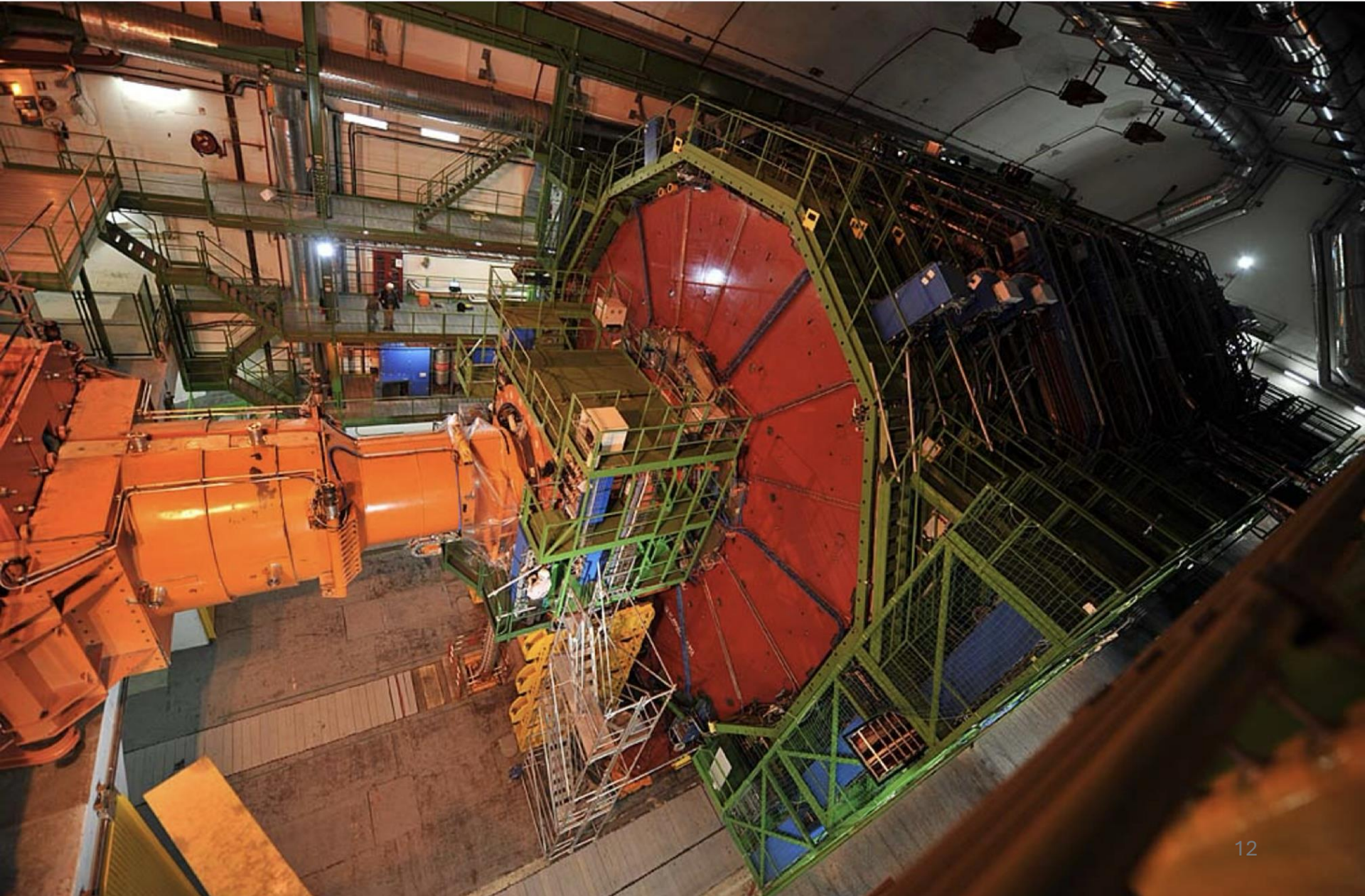
Identificazione delle particelle

- Dall'interno verso l'esterno:
 - **Tracciatore** (in campo magnetico): curva percorsa -> **direzione + curvatura**
 - SOLO particelle cariche -> **carica** (>0 , <0 , 0) in base alla curvatura
 - Calorimetro -> **energia**
 - Elettromagnetico (elettroni/positroni/fotoni) - ECAL
 - Adronico (adroni = protoni, neutroni, pioni, kaoni) - HCAL
 - Magnete (ferma tutto tranne i muoni...)
 - Rivelatori di muoni -> **ID**

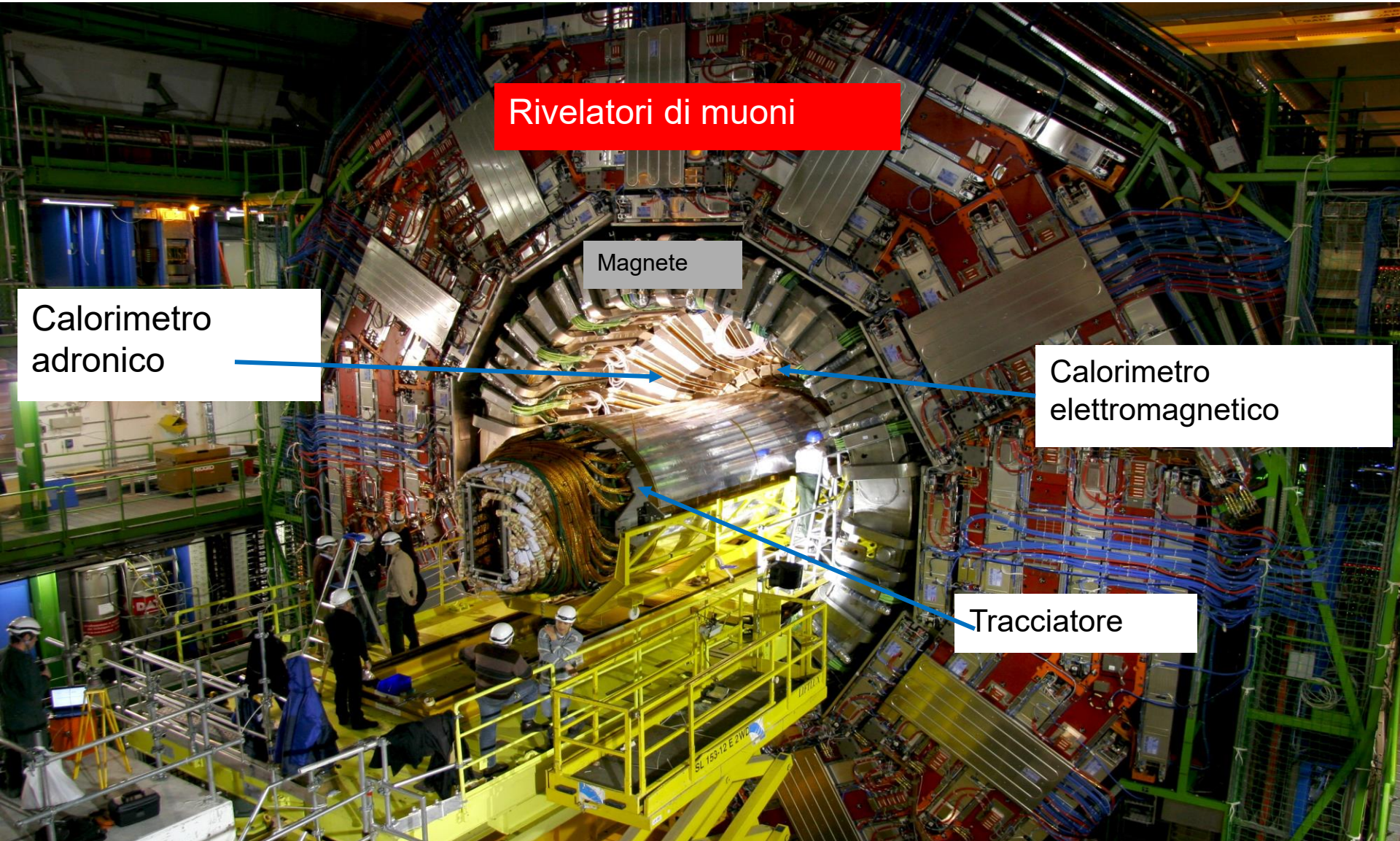
- Si ferma in ECAL -> **elettrone/fotone**
 - È carico -> elettrone/positrone
 - Segno ?: positrone/elettrone
- Si ferma in HCAL -> **adrone**
- Prosegue oltre il magnete -> **muone**



La caverna di CMS (-100 metri)



I vari sotto-rivelatori



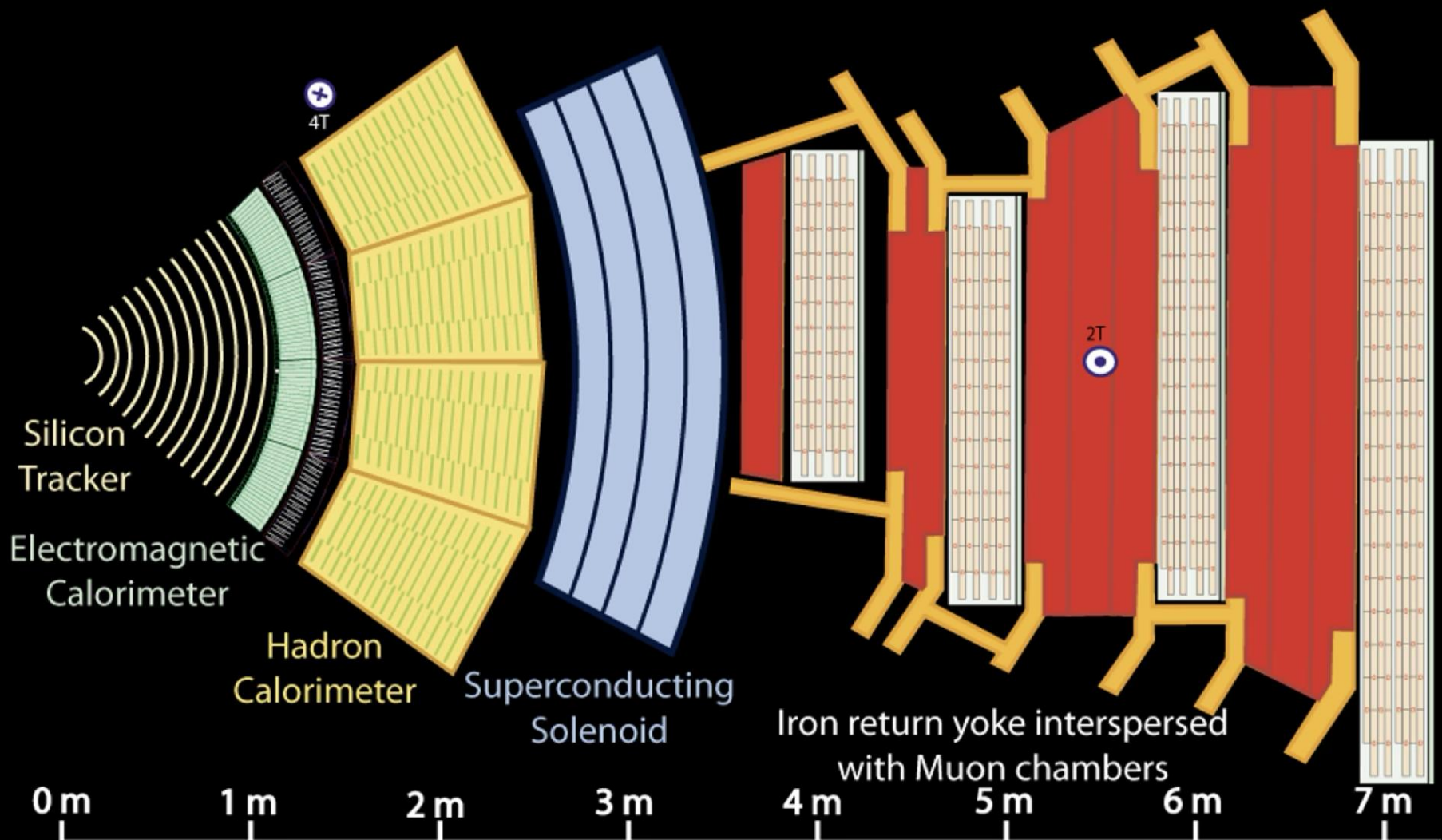
Rivelatori di muoni

Magnete

Calorimetro
adronico

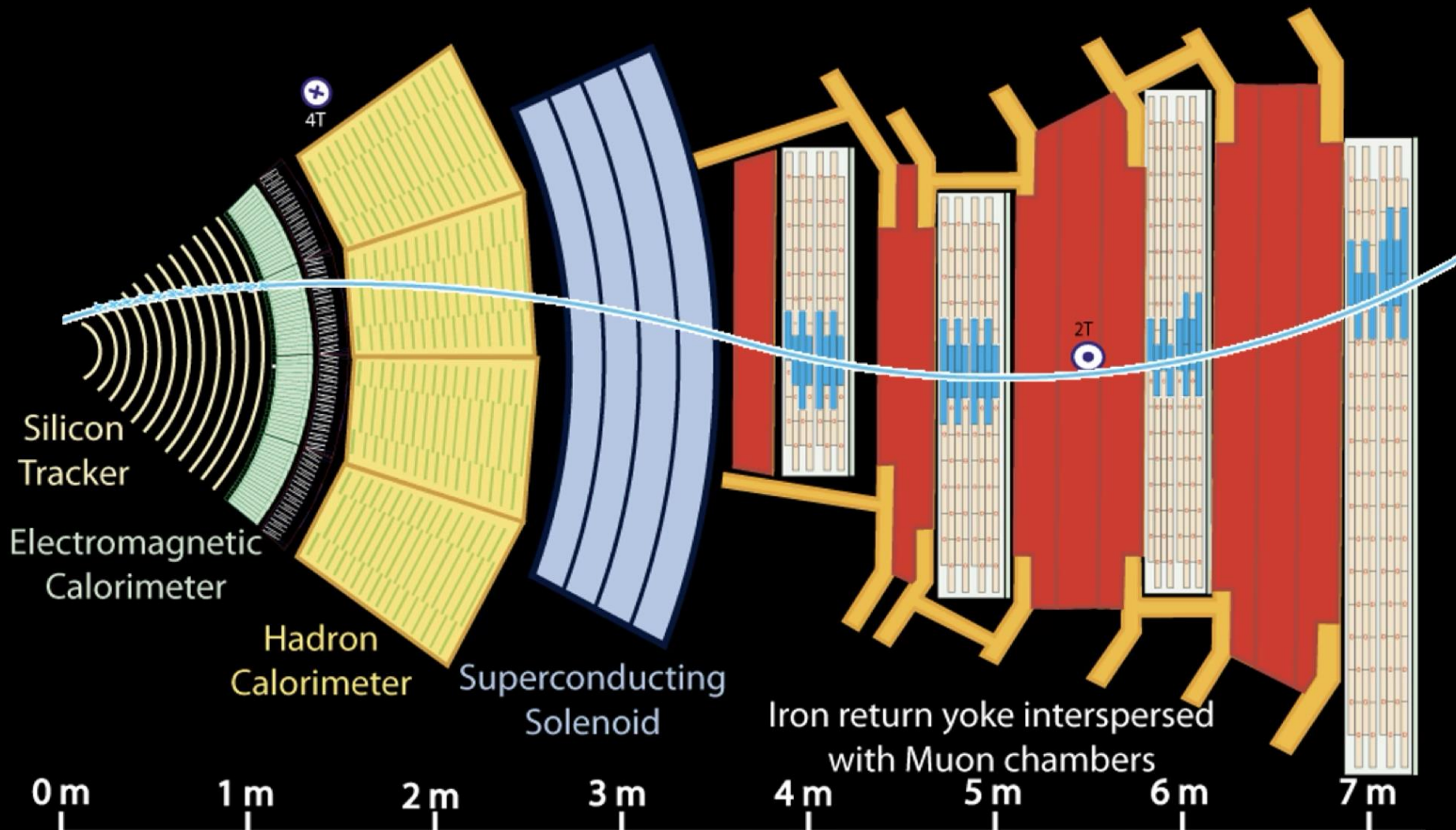
Calorimetro
elettromagnetico

Tracciatore



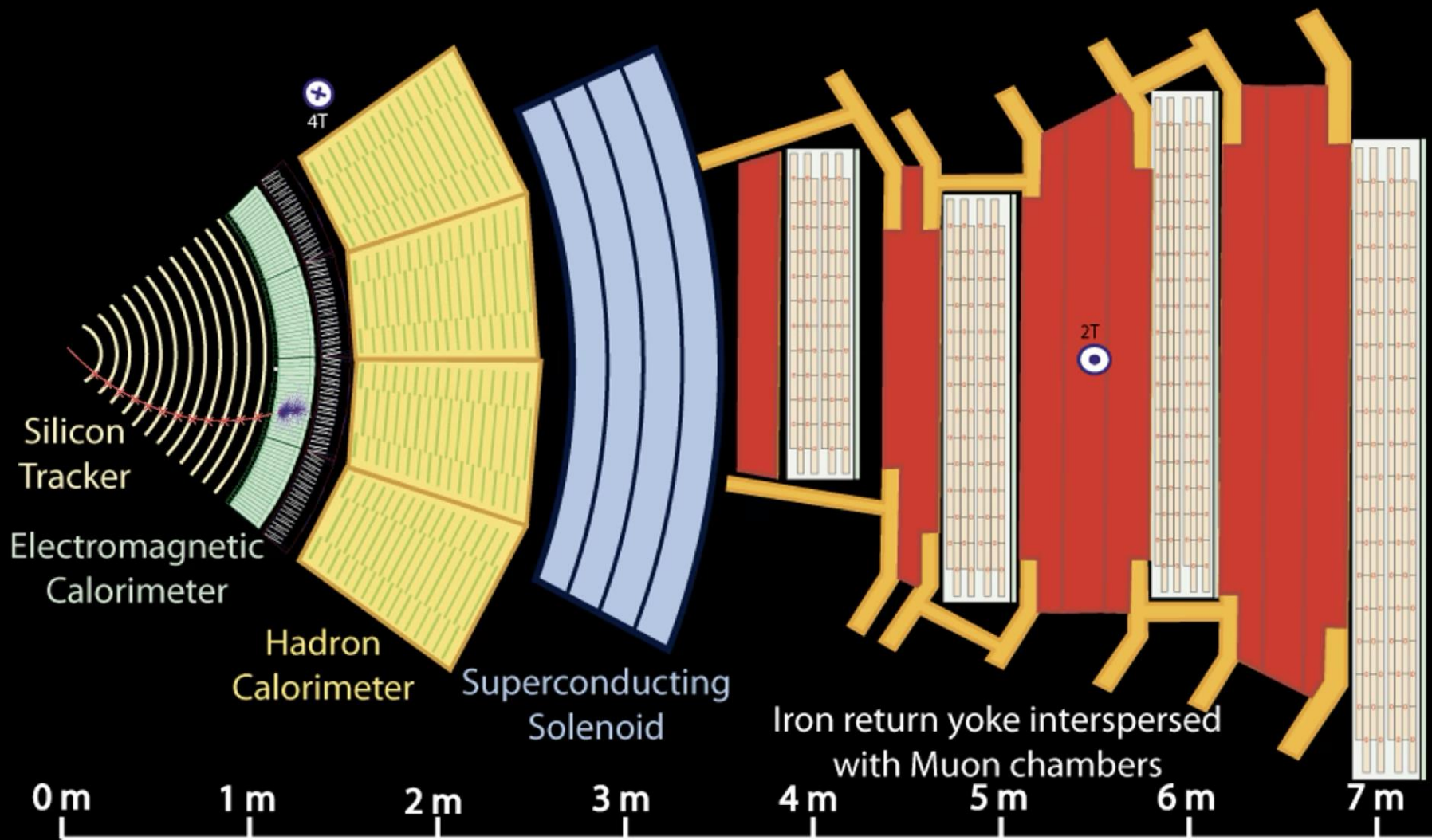
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

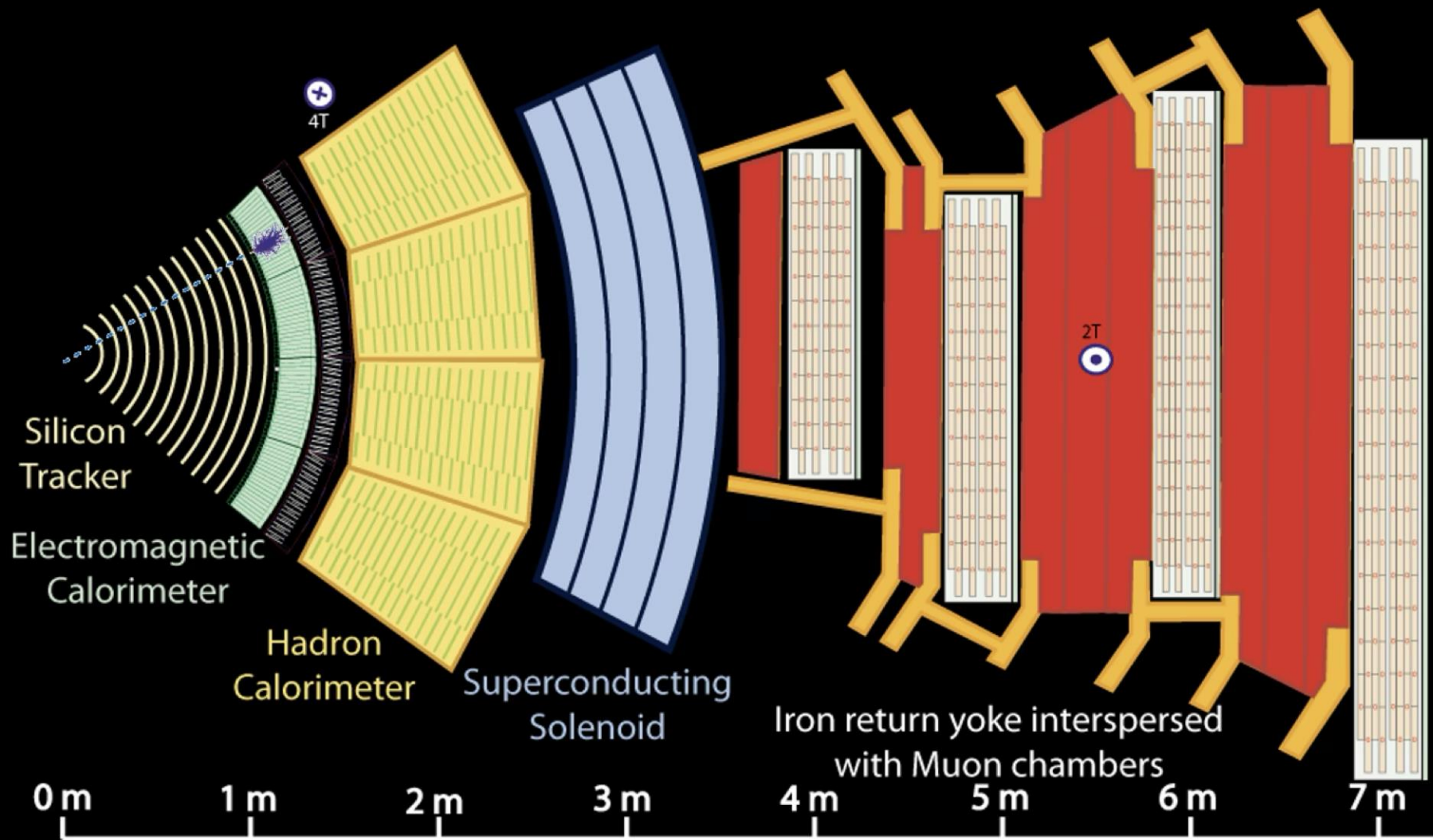
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

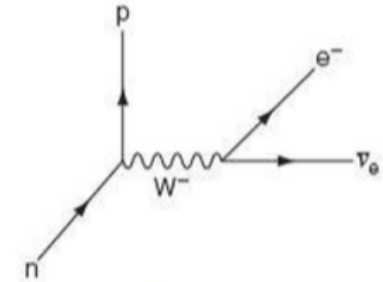
I bosoni W and Z

I bosoni **W** e **Z** sono le particelle **mediatrici della forza debole**

Sono stati **predetti negli anni '60** per spiegare i decadimenti “beta” osservati molto prima da **Fermi**

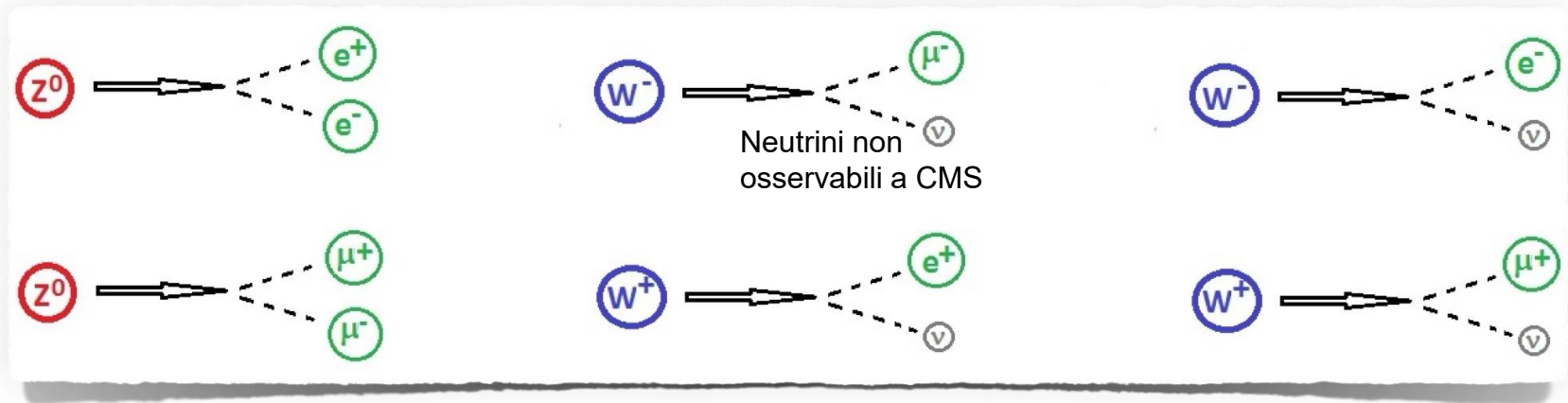
La teoria prevedeva masse dei bosoni **W** e **Z** intorno a **100 GeV**

I fisici del **CERN** costruirono, all’inizio degli anni '80, il primo collisore sufficientemente potente da raggiungere energie così elevate: lo **SppS (500 GeV)**



Prodotti di decadimento Z e W

- I bosoni Z e W prodotti al LHC hanno una vita molto breve (10^{-25} s) e decadono quasi immediatamente in altre particelle elementari, che possono poi essere rilevate da CMS



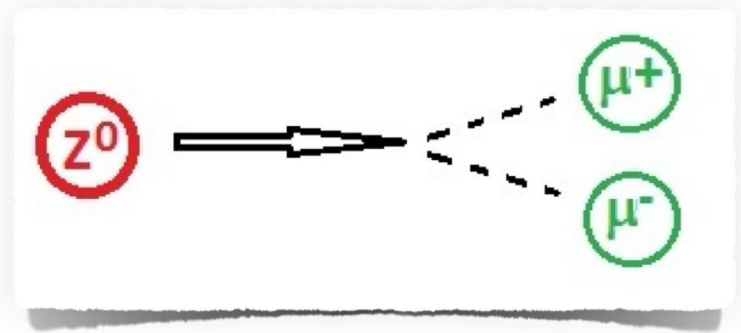
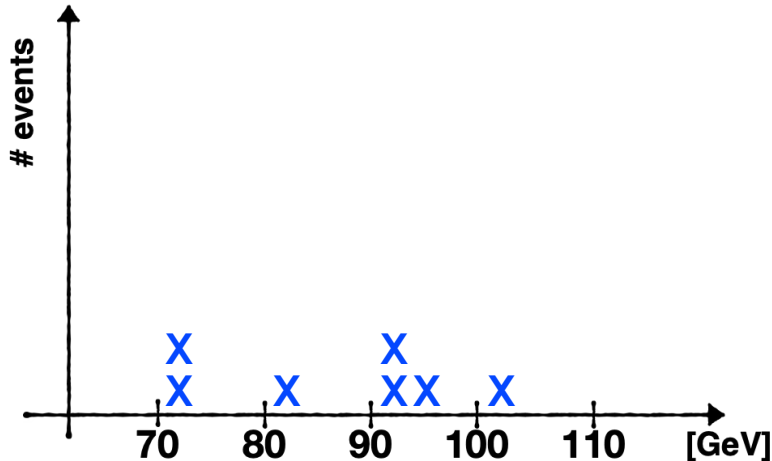
- Quindi, quando in una collisione al LHC produciamo un bosone Z o W, quello che rileviamo nei nostri esperimenti sono solo elettroni e muoni!
 - ~~In realtà non è così semplice~~

Calcolo della massa della Z

- Misurando le energie e la direzione di produzione dei due elettroni o muoni, possiamo calcolare la massa della particella che li ha prodotti nel suo decadimento

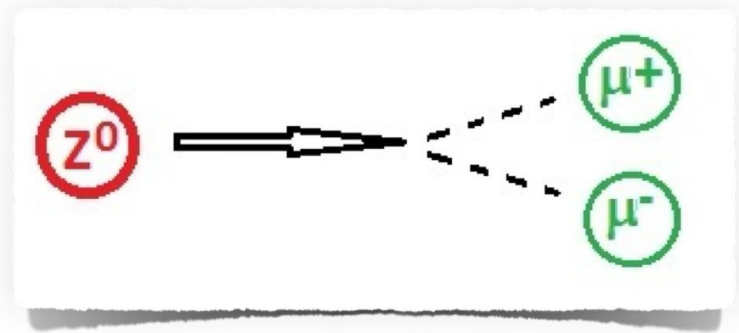
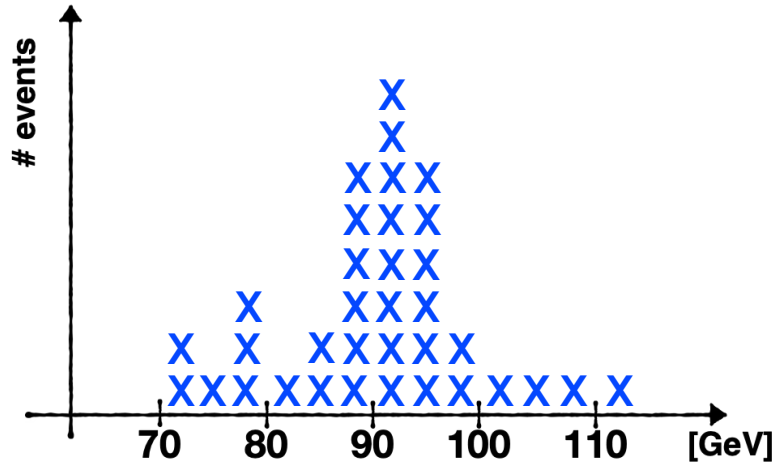
$$m_X = \sqrt{2E_1E_2(1 - \cos\theta)}$$

- In ogni evento in cui abbiamo due elettroni o due muoni, calcoliamo la massa del bosone Z con questa formula e compiliamo un istogramma degli eventi

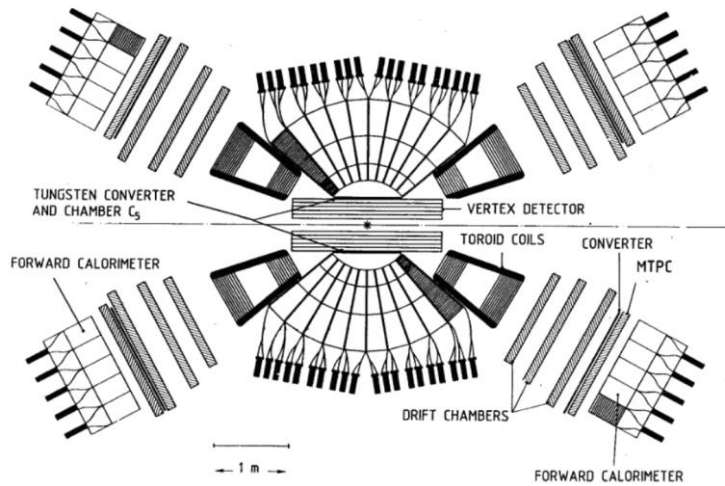


The Z boson mass reconstruction

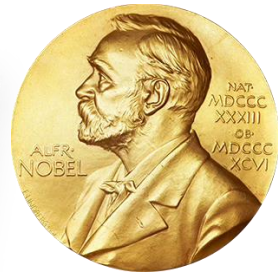
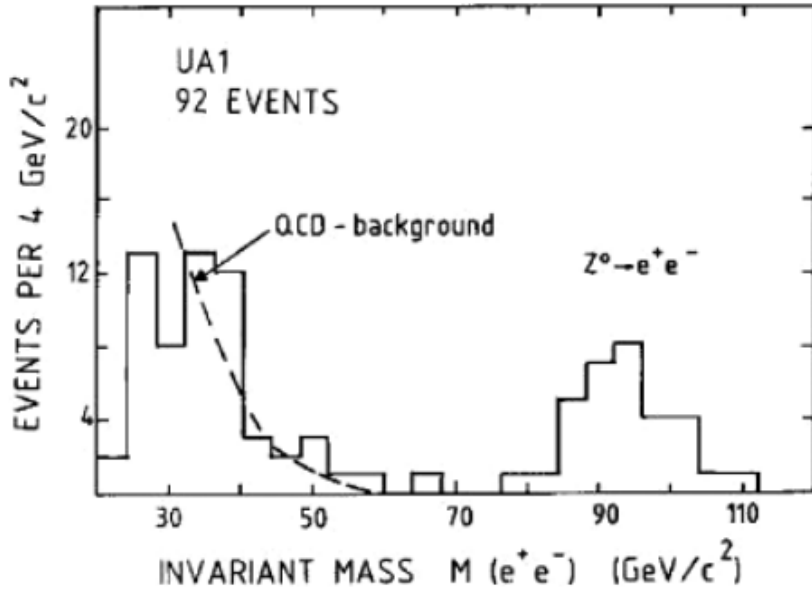
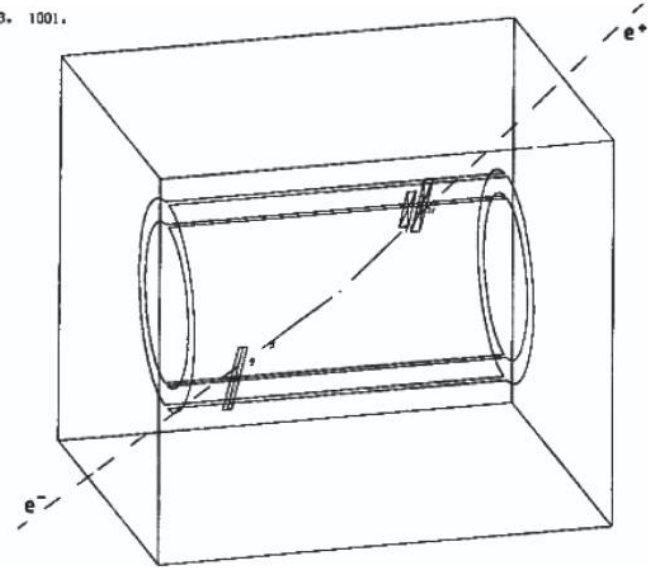
- se il bosone Z esiste un picco di eventi apparirà vicino al valore reale della massa del bosone Z
- Se il picco è abbastanza significativo -> **abbiamo scoperto lo Z**



Premio Nobel per Z e W

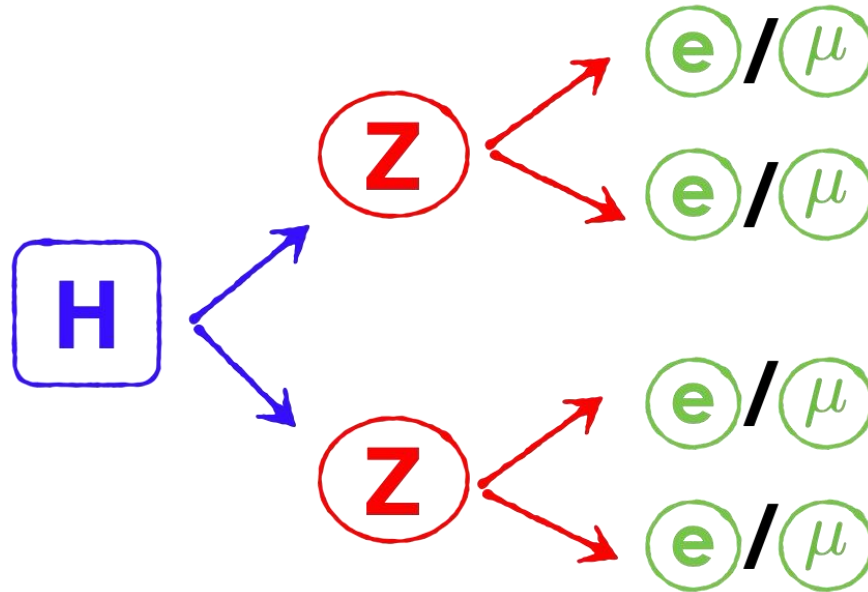


7493. 1001.



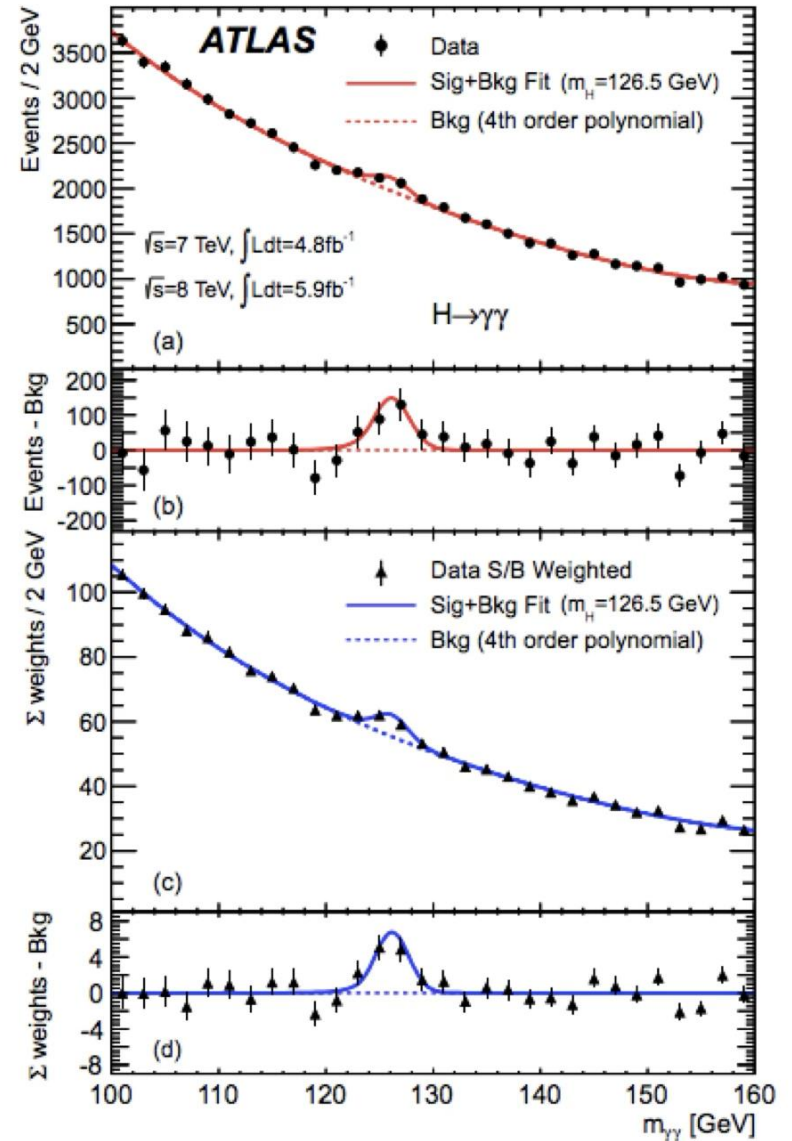
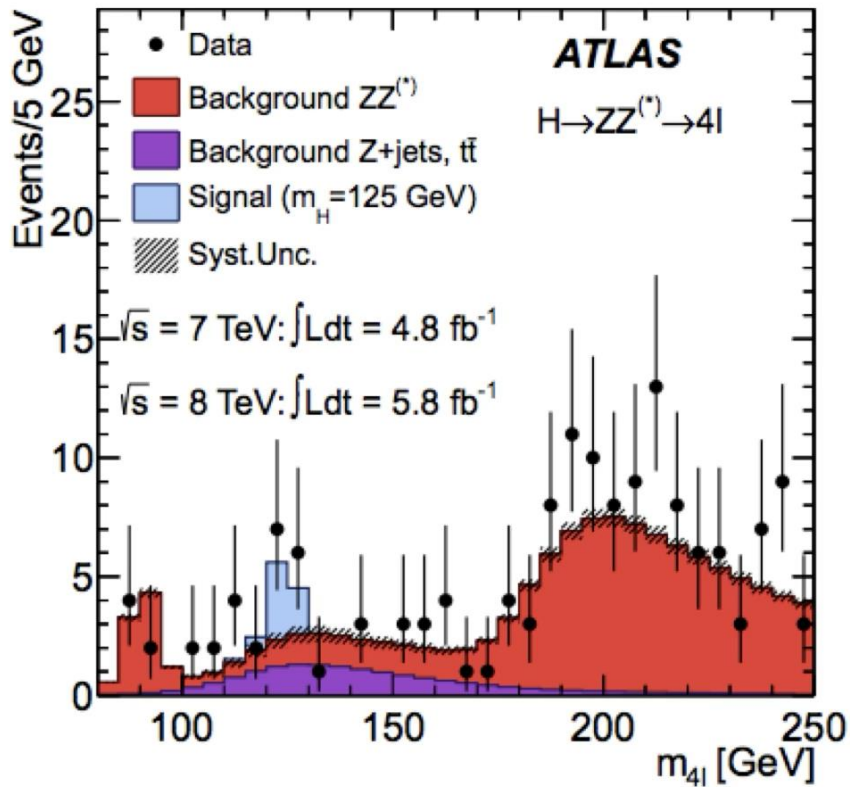
Usare lo Z nella scoperta dell'Higgs

- La scoperta del bosone Z ha aperto l'opportunità di “utilizzare” la particella recentemente scoperta per la ricerca del bosone di Higgs



- Sia i decadimenti dello **Z** in **elettroni/muoni** vengono utilizzati

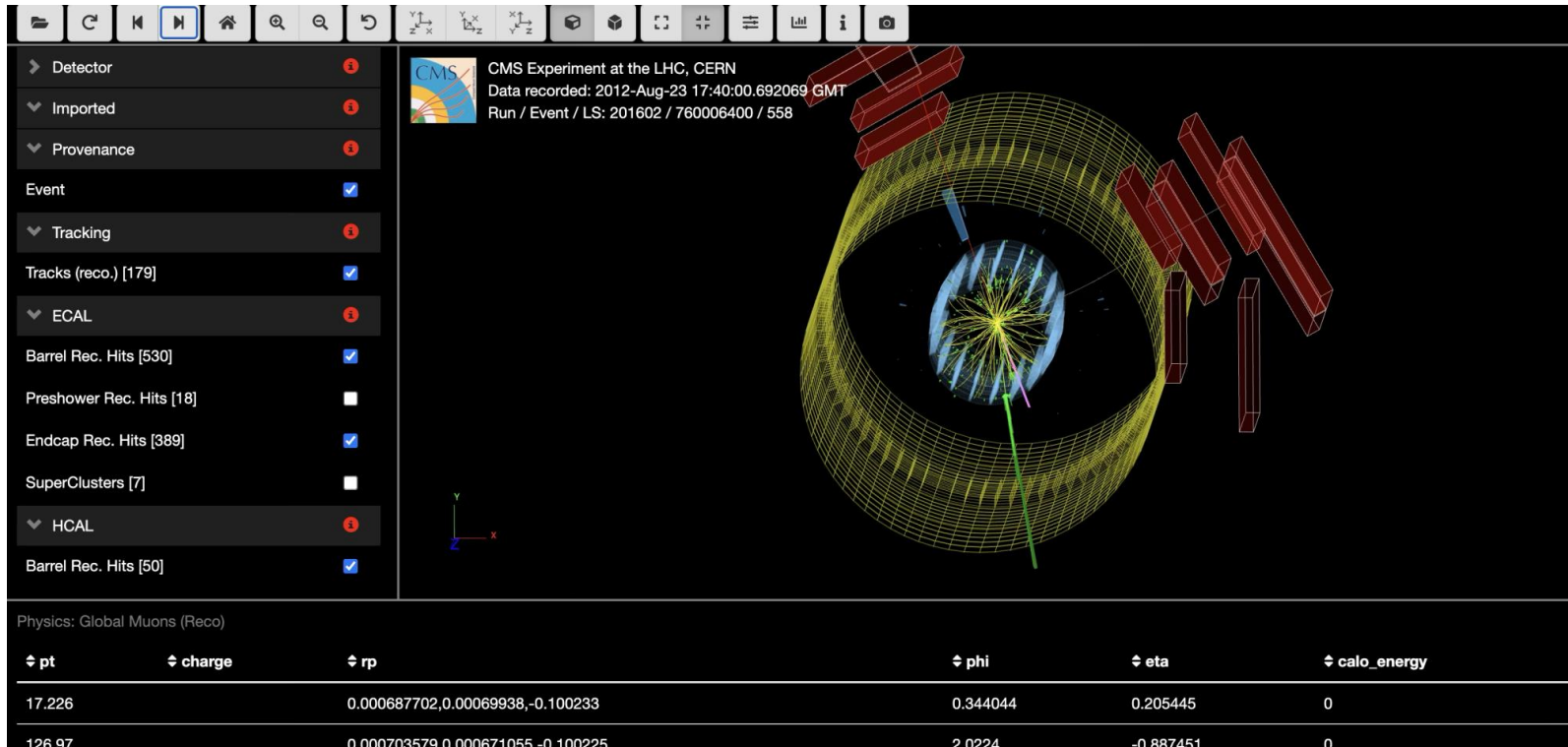
La scoperta dell'Higgs



Ora tocca a te!

Oggi osserveremo i **DATI** realmente raccolti dal CMS al LHC e cercheremo di “RI-SCOPRIRE” il bosone Z e il bosone W

Impareremo come lavorare in team all’analisi dei dati e come presentare i nostri risultati proprio come in una conferenza di fisica delle particelle!



Tool iSpy – evento di CMS

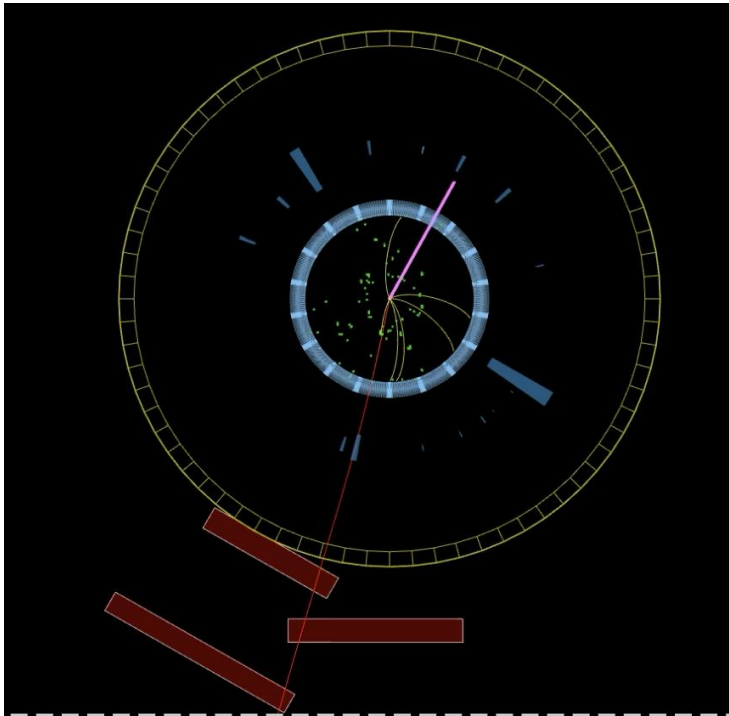
Diversi piani

The screenshot displays the iSpy tool interface for the CMS experiment. The top toolbar contains various navigation and viewing controls. The left sidebar shows a tree view of data objects, including Detector, Imported, Provenance, Event, Tracking, Tracks (reco.) [179], ECAL, Barrel Rec. Hits [530], Preshower Rec. Hits [18], Endcap Rec. Hits [389], SuperClusters [7], and HCAL. The central 3D view shows a wireframe model of the CMS detector with particle tracks originating from a central point. A yellow arrow points to the 'HCAL' object in the sidebar. The bottom table displays physics data for Global Muons (Reco).

| pt | charge | rp | phi | eta | calo_energy |
|--------|--------|-----------------------------------|----------|-----------|-------------|
| 17.226 | | 0.000687702,0.00069938,-0.100233 | 0.344044 | 0.205445 | 0 |
| 126.97 | | 0.000703579,0.000671055,-0.100225 | 2.0224 | -0.887451 | 0 |

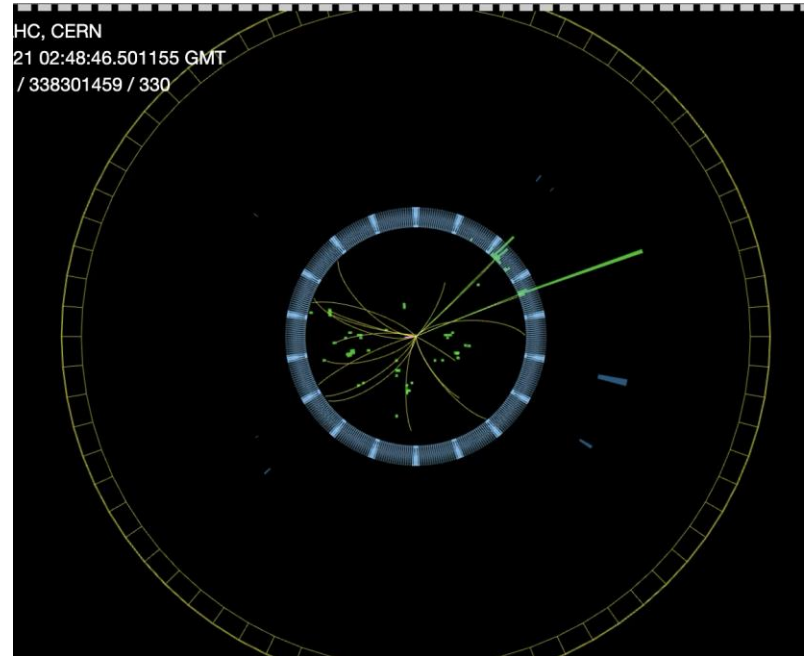
Sottorivelatori and visualizzazione delle single particelle

Identificazione delle particelle



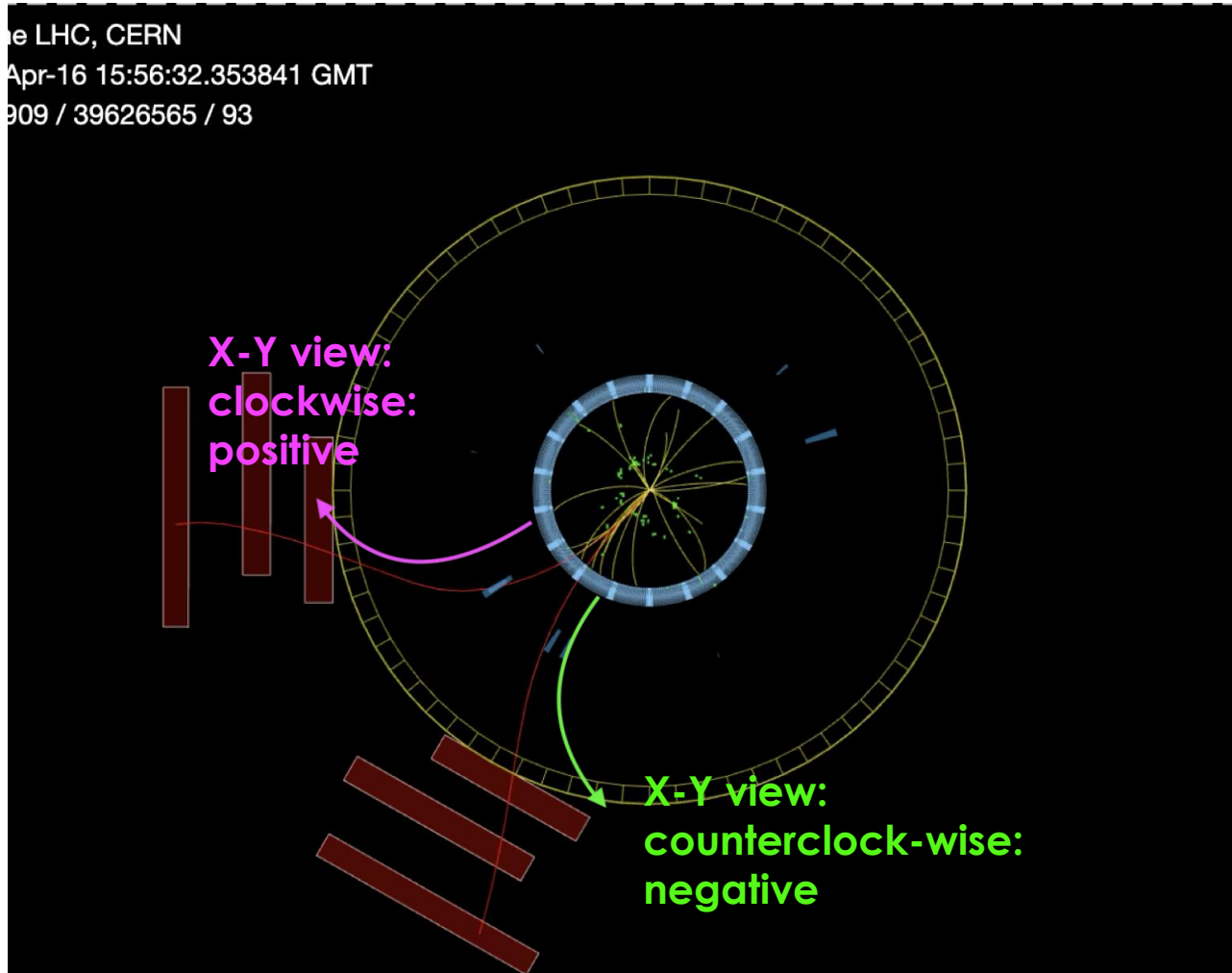
Muon μ

Neutrino ν



Electron e

Identificazione della carica

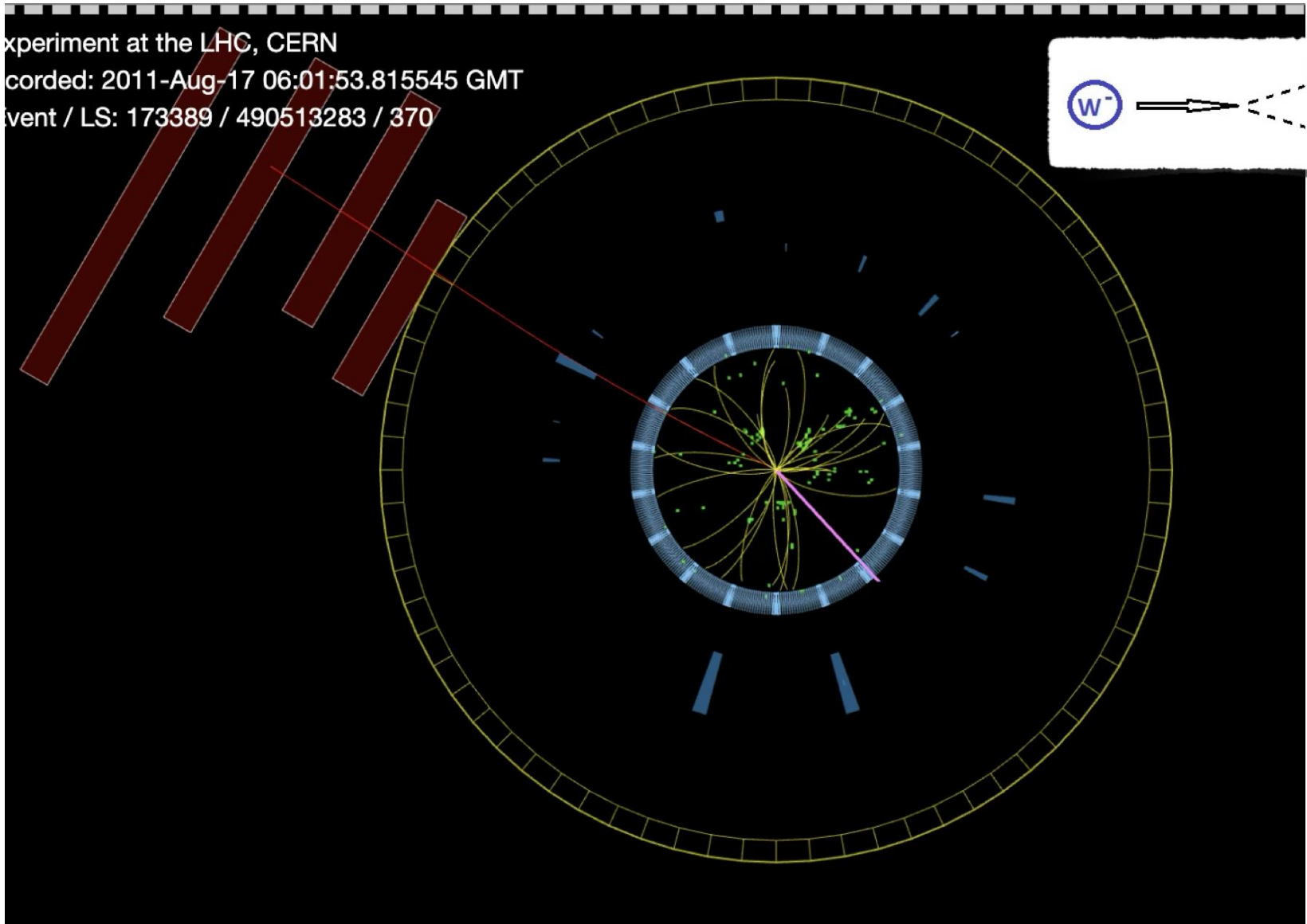
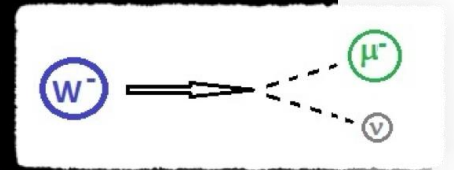


$$W \rightarrow \mu + \nu$$

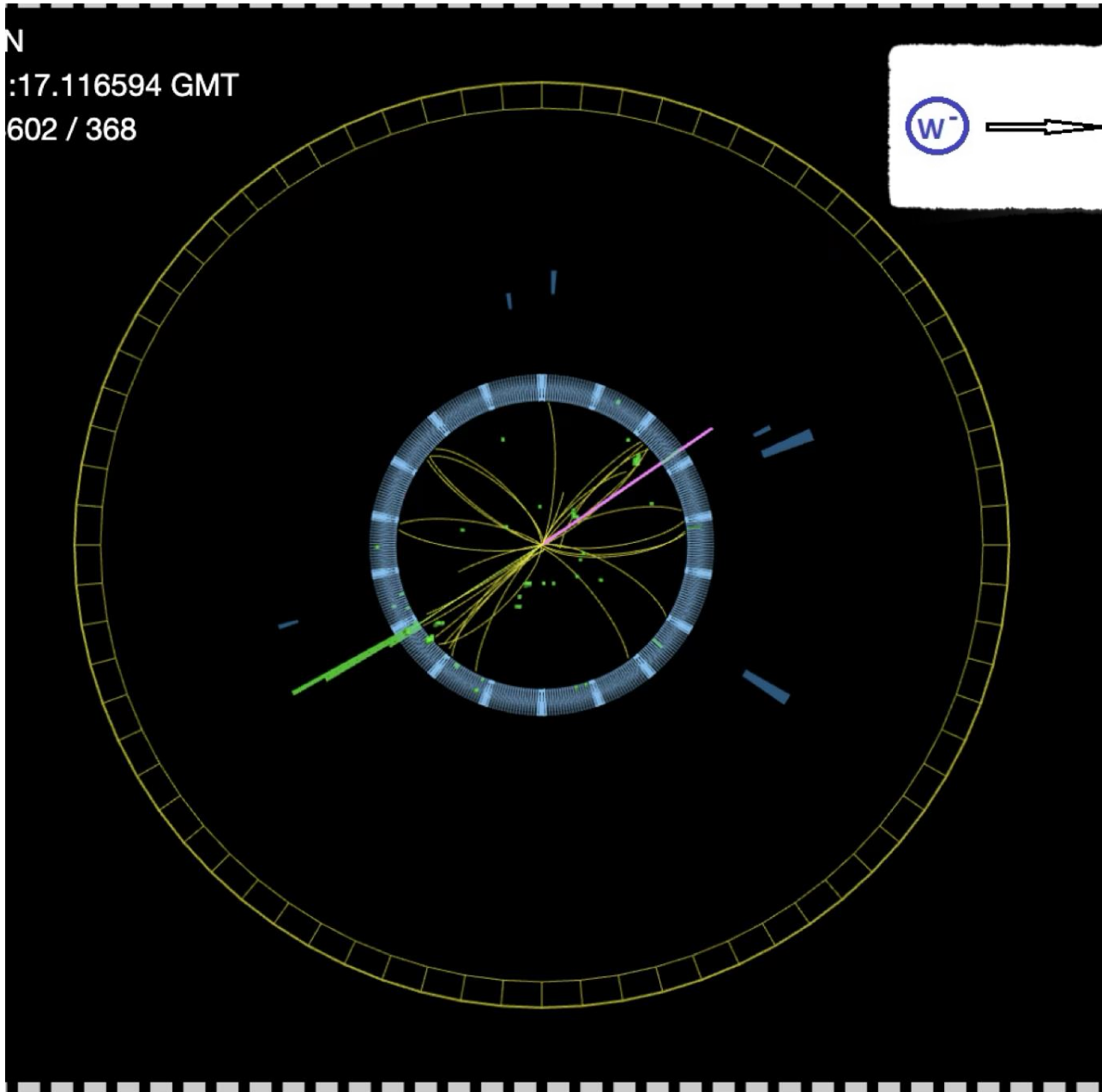
Experiment at the LHC, CERN

Recorded: 2011-Aug-17 06:01:53.815545 GMT

Event / LS: 173389 / 490513283 / 370



$$W \rightarrow e + \nu$$

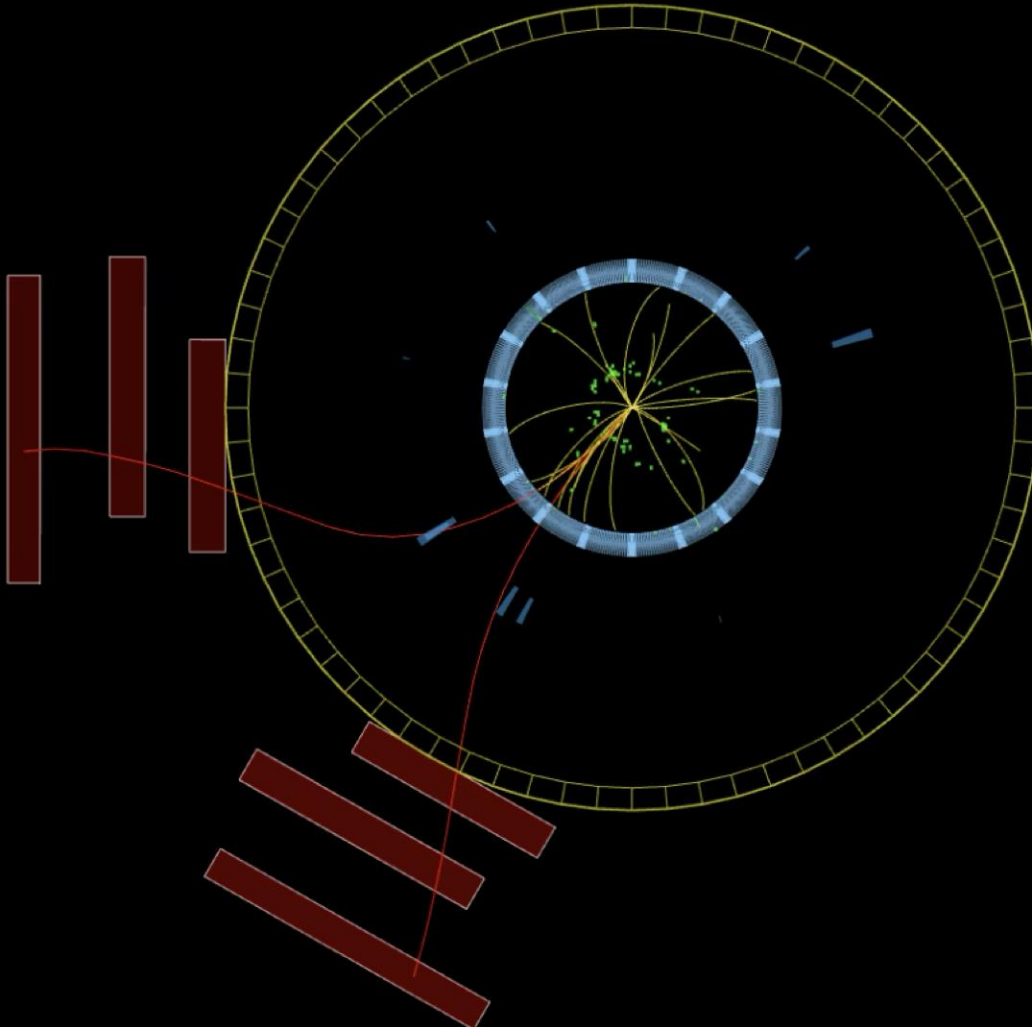
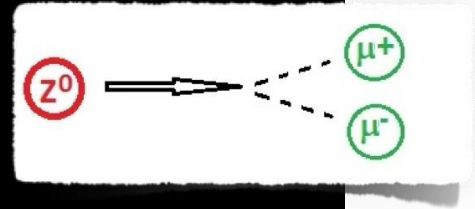


$$Z \rightarrow \mu + \mu$$

the LHC, CERN

Apr-16 15:56:32.353841 GMT

909 / 39626565 / 93



$$Z \rightarrow e + e$$

C, CERN

02:48:46.501155 GMT

338301459 / 330

