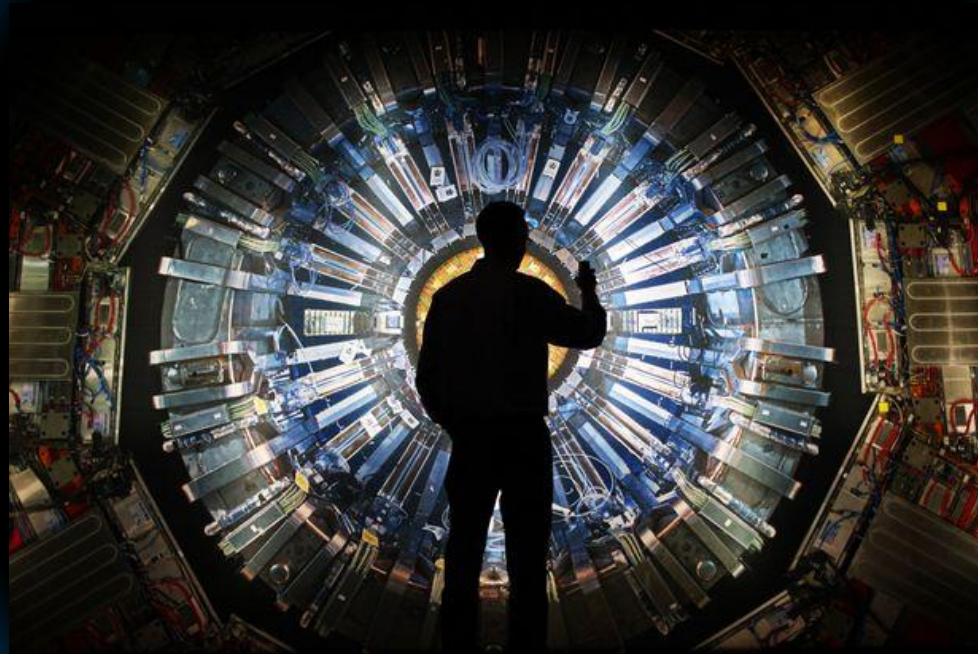


CMS @ CERN: *fotocamere potentissime* *e come usarle*



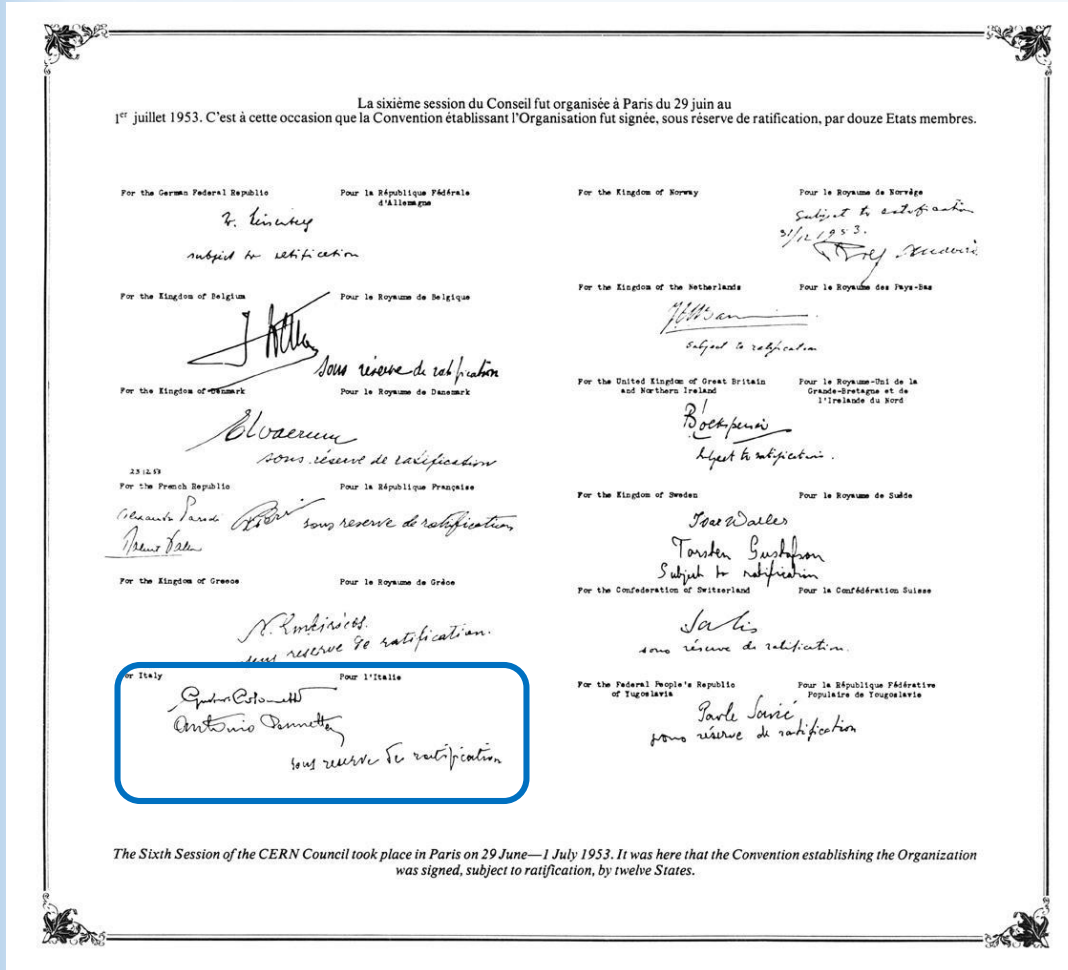
Raffaella Tramontano
International day of Women in Science
02-11-2020



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

II CERN:

Nel 1954 12 paesi europei, tra cui **l'Italia**, costituiscono il CERN (organizzazione europea per la ricerca nucleare)



Il CERN:



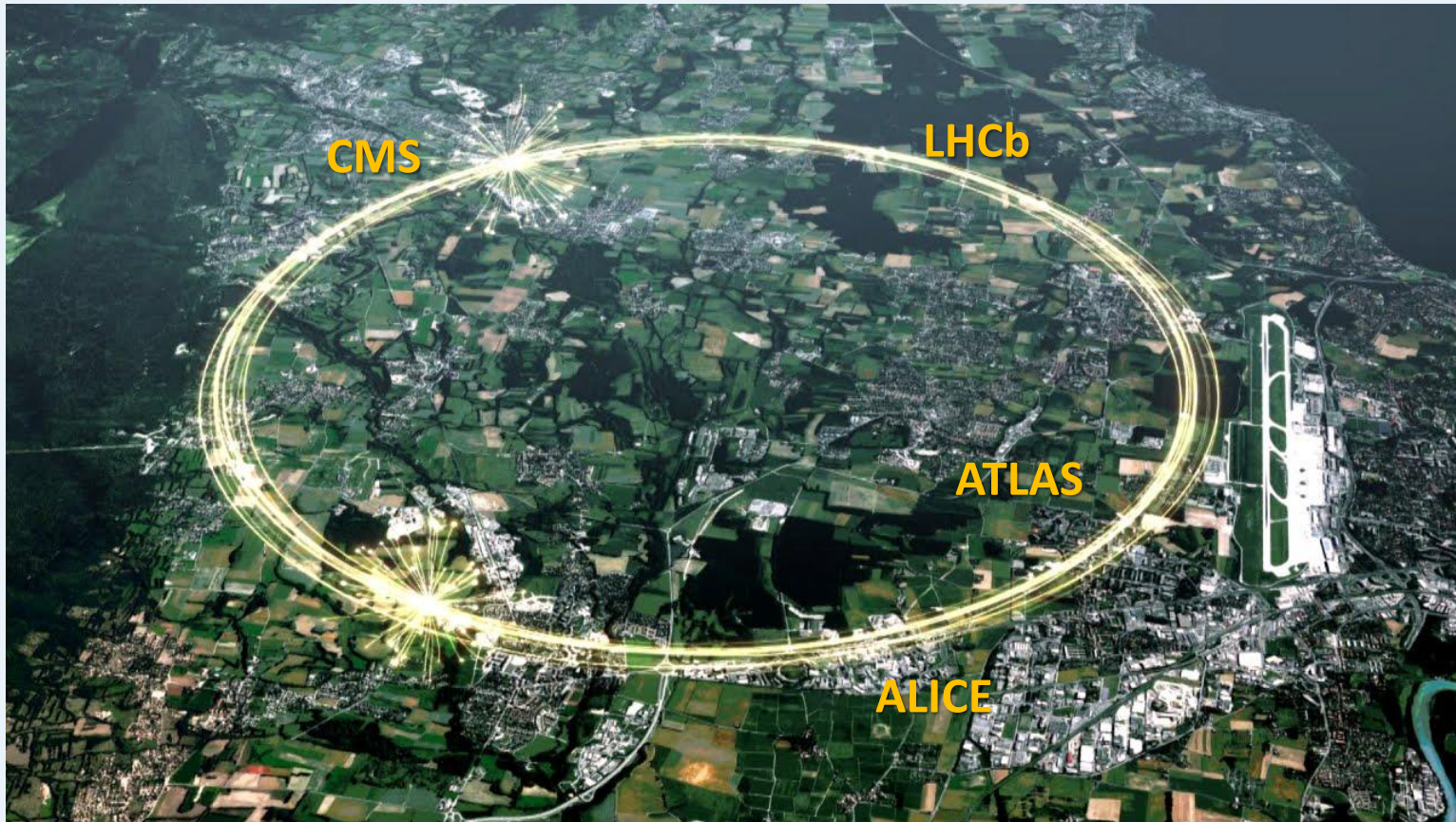
Oggi gli stati membri sono
23.
Ogni paese contribuisce in
base al PIL

L'Italia contribuisce per circa il 12% al budget del laboratorio.

**Quattro sono stati i direttori Italiani del CERN:
Edoardo Amaldi, Carlo Rubbia, Luciano Maiani e
Fabiola Gianotti**



Il Large Hadron Collider:



- Anello di 27 Km in circonferenza
- A 100 m di profondità;
- Due fasci di protoni a velocità prossime a quella della luce si scontrano in 4 punti

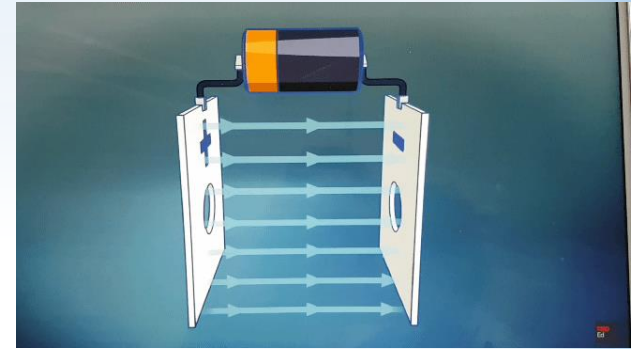
LHC: come accelerare

• Come accelerare una particella carica:

- Una particella di carica q in un campo elettrico E subisce una forza $F = Eq$

- $$F = m \cdot a \rightarrow m \cdot a = E \cdot q \rightarrow a = \frac{E \cdot q}{m}$$

- I protoni ad LHC sono accelerati fino ad un'energia di $7 \text{ TeV} = 7 \cdot 10^9 \text{ eV}$
- Sono necessari 5 milioni di milioni di pile da 1.5 V per raggiungere tale energia!



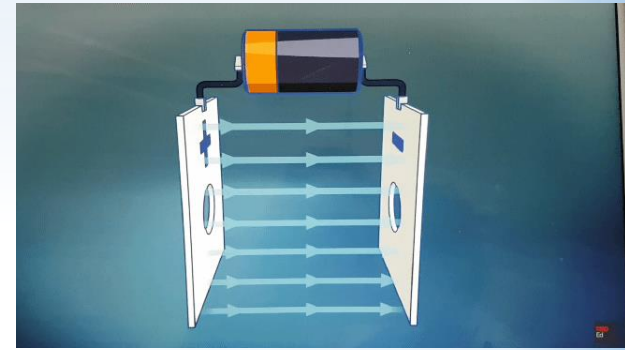
LHC: come accelerare

Come accelerare una particella carica:

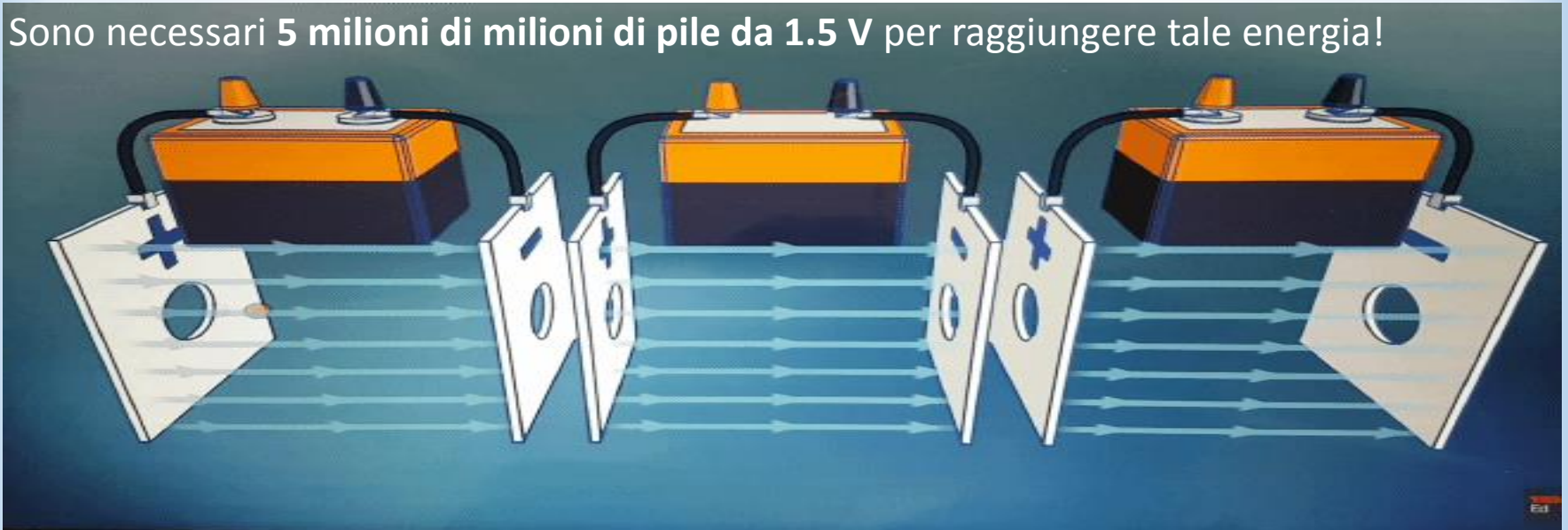
- Una particella di carica q in un campo elettrico E subisce una forza $F = Eq$

- $$F = m \cdot a \rightarrow m \cdot a = E \cdot q \rightarrow a = \frac{E \cdot q}{m}$$

- I protoni ad LHC sono accelerati fino ad un'energia di $7 \text{ TeV} = 7 \cdot 10^9 \text{ eV}$

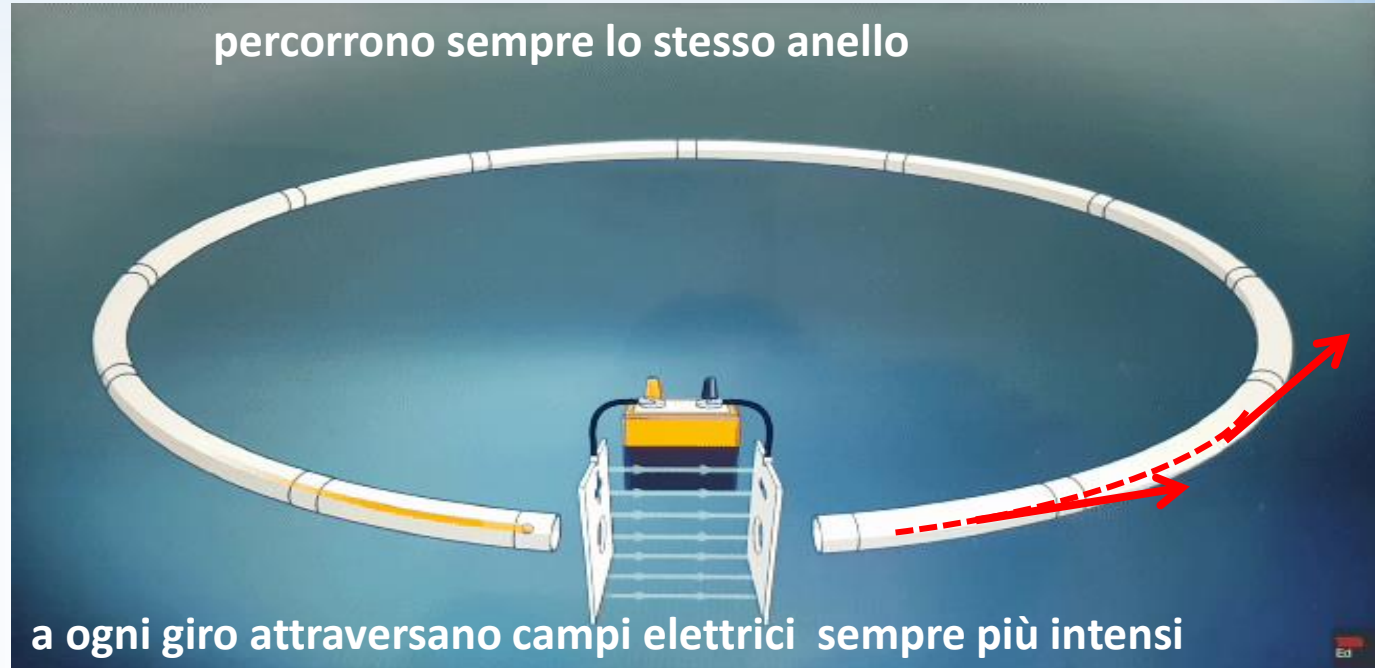


- Sono necessari **5 milioni di milioni di pile da 1.5 V** per raggiungere tale energia!



LHC: come accelerare in curva

- Accelerare lungo una circonferenza:

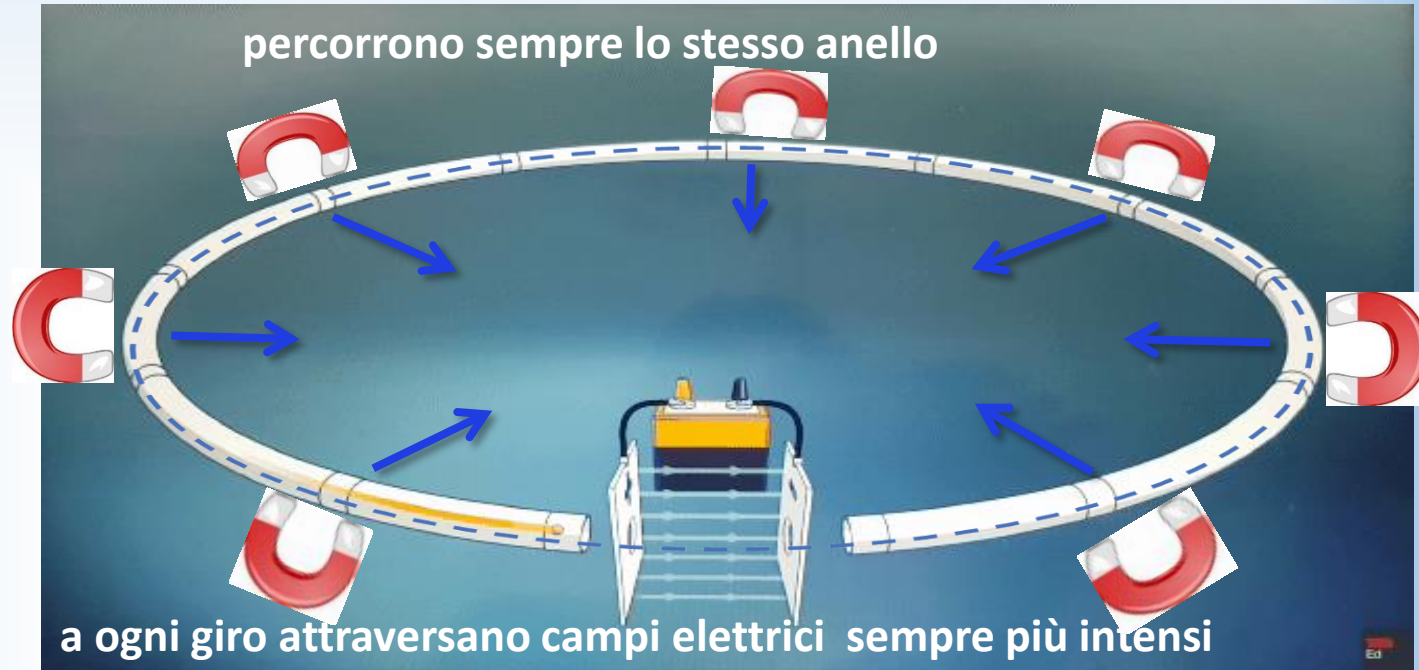


- Le particelle

- Tra una pila e l'altra, la particella non è soggetta ad alcuna forza:
per il **primo principio della dinamica** dovrebbe proseguire in **moto rettilineo!**

LHC: come accelerare in curva

- Accelerare lungo una circonferenza:



- Le particelle

- Tra una pila e l'altra, la particella non è soggetta ad alcuna forza: per il **primo principio della dinamica** dovrebbe proseguire in **moto rettilineo!**

un **campo magnetico** agisce su una particella carica in moto con la

forza di Lorentz $\vec{F} = q \cdot \vec{B} \times \vec{v}$, modificandone la direzione
può essere usato per mantenere le particelle in traiettoria circolare!

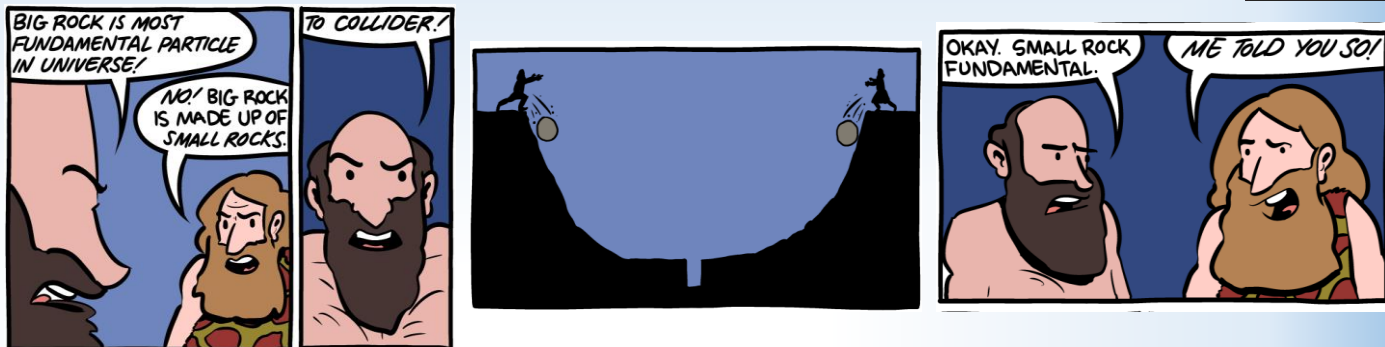
LHC: due fasci in collisione

- Da un'idea tutta italiana:



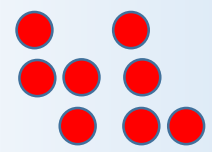
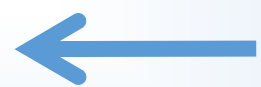
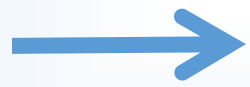
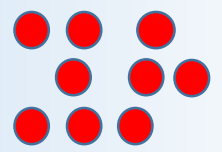
Le collisioni a LHC:

- Cosa si impara da una collisione:



- Ad LHC i protoni ad alta energia si “scompongono” nei loro componenti fondamentali, i quark
- I quark interagiscono nelle collisioni formando particelle diverse dai protoni di origine!

protoni con $v \sim c$



protoni con $v \sim c$

Cosa succede nel punto di collisione?

I rivelatori: fotocamere per collisioni



- Sui quattro punti di collisione ad LHC sono posizionati 4 detector

40 Milioni di foto al secondo

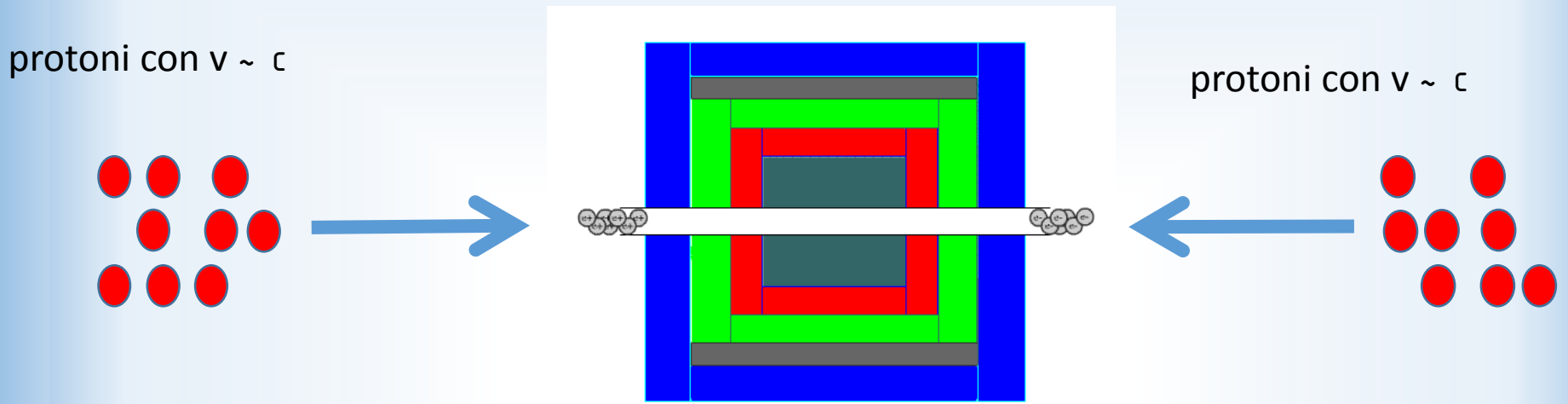
CMS

LHCb

Atlas

Alice

Fotografare una collisione:



- I detector su LHC sono costituiti da diversi sotto rivelatori
- Ciascun sottorivelatore è sensibile al passaggio di una categoria di particelle (particelle cariche, fotoni, adroni, leptoni...)
- Quando una particella passa attraverso un sottorivelatore sensibile lascia una traccia!

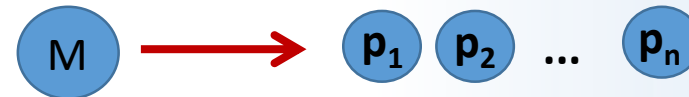
Identikit di una particella:

Le particelle possono essere discriminate in base a proprietà intrinseche come:

- Massa
- Carica



Le collisioni ad LHC producono molte particelle instabili, che **decadono** dentro il rivelatore in **altre particelle**

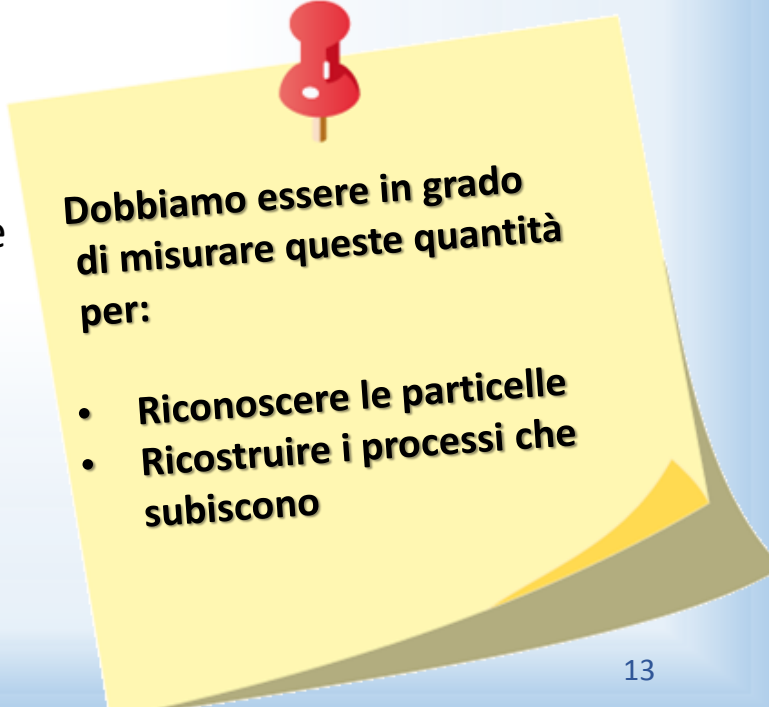


Fotografiamo i prodotti!

Per ricostruire le proprietà della particella madre dobbiamo conoscere

- **Energia**
- **Impulso**
- **Posizione del vertice di decadimento**
- **Massa e carica**

delle particelle prodotto



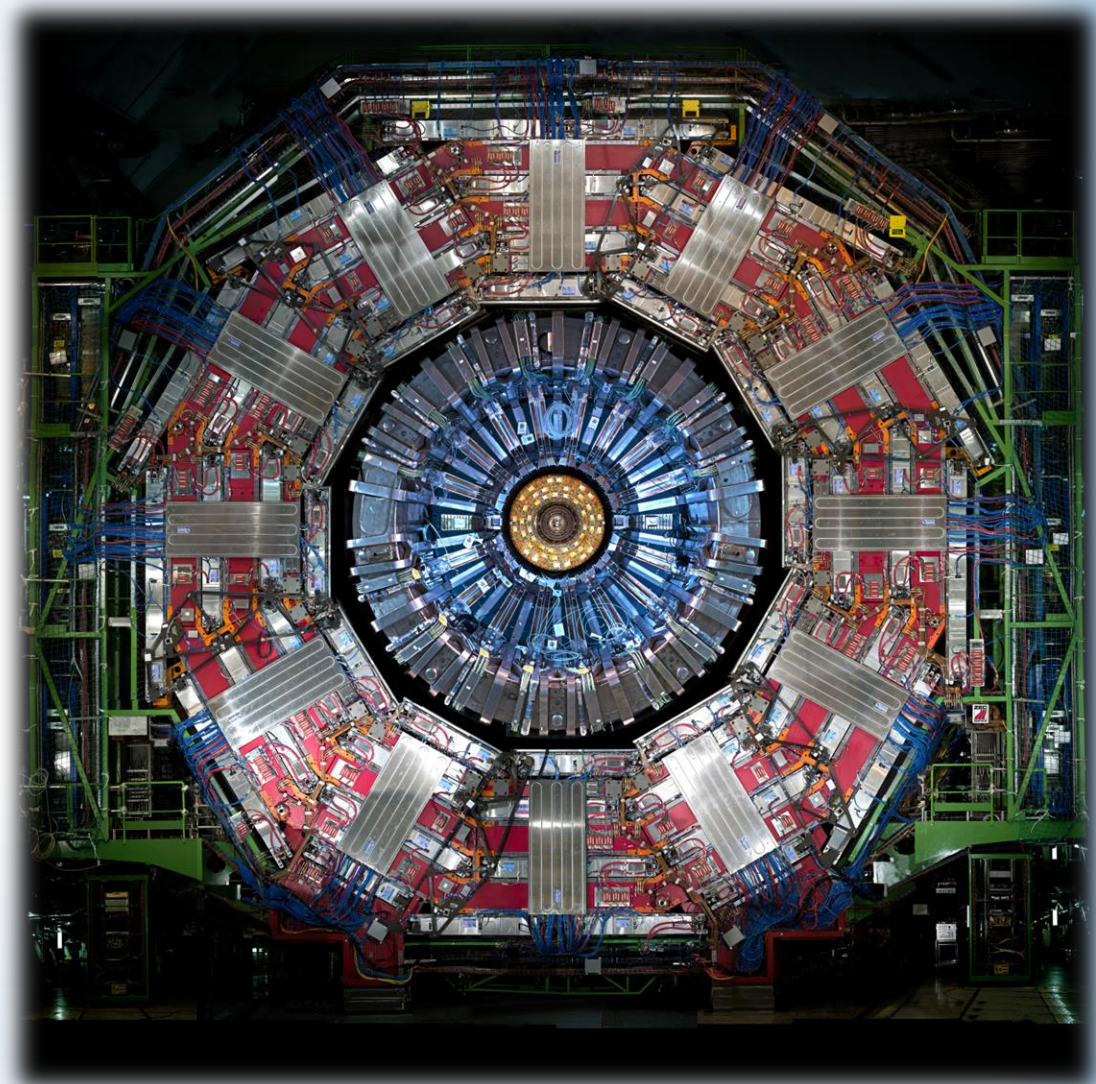
Dobbiamo essere in grado di misurare queste quantità per:

- Riconoscere le particelle
- Ricostruire i processi che subiscono

Compact Muon Solenoid:



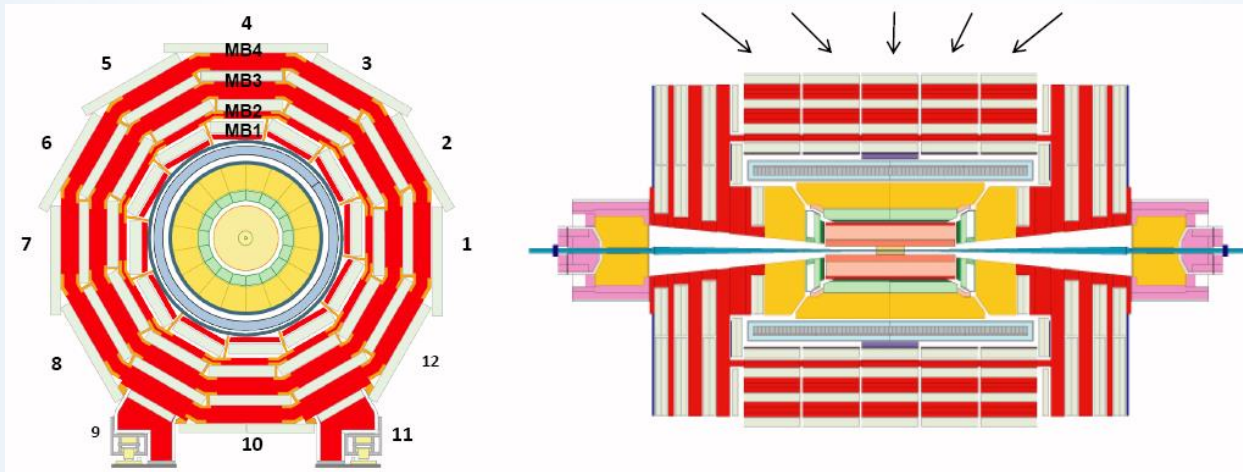
- La nostra macchina fotografica per oggi!
- Dimensioni:
 - 15.6 m diametro
 - 21,6 m in lunghezza
 - 125000 tonnellate
- **Compact:** è un rivelatore “compatto” paragonato ai suoi simili (vedi ATLAS)
- **Muon:** la ricostruzione dei muoni è una punta di diamante per CMS
- **Solenoid:** Il grande magnete solenoide che abbraccia la parte interna del detector



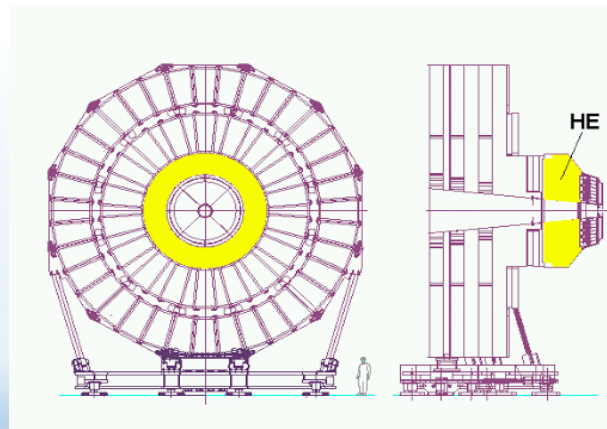
CMS:

CMS si trova, sull'anello di LHC, presso il Punto 5, diametralmente opposto ad ATLAS e al sito del CERN

- CMS e i suoi sotto rivelatori si sviluppano attorno al punto di collisione
 - Nel **Barrel** con struttura concentrica cilindrica attorno al tubo che ospita i fasci

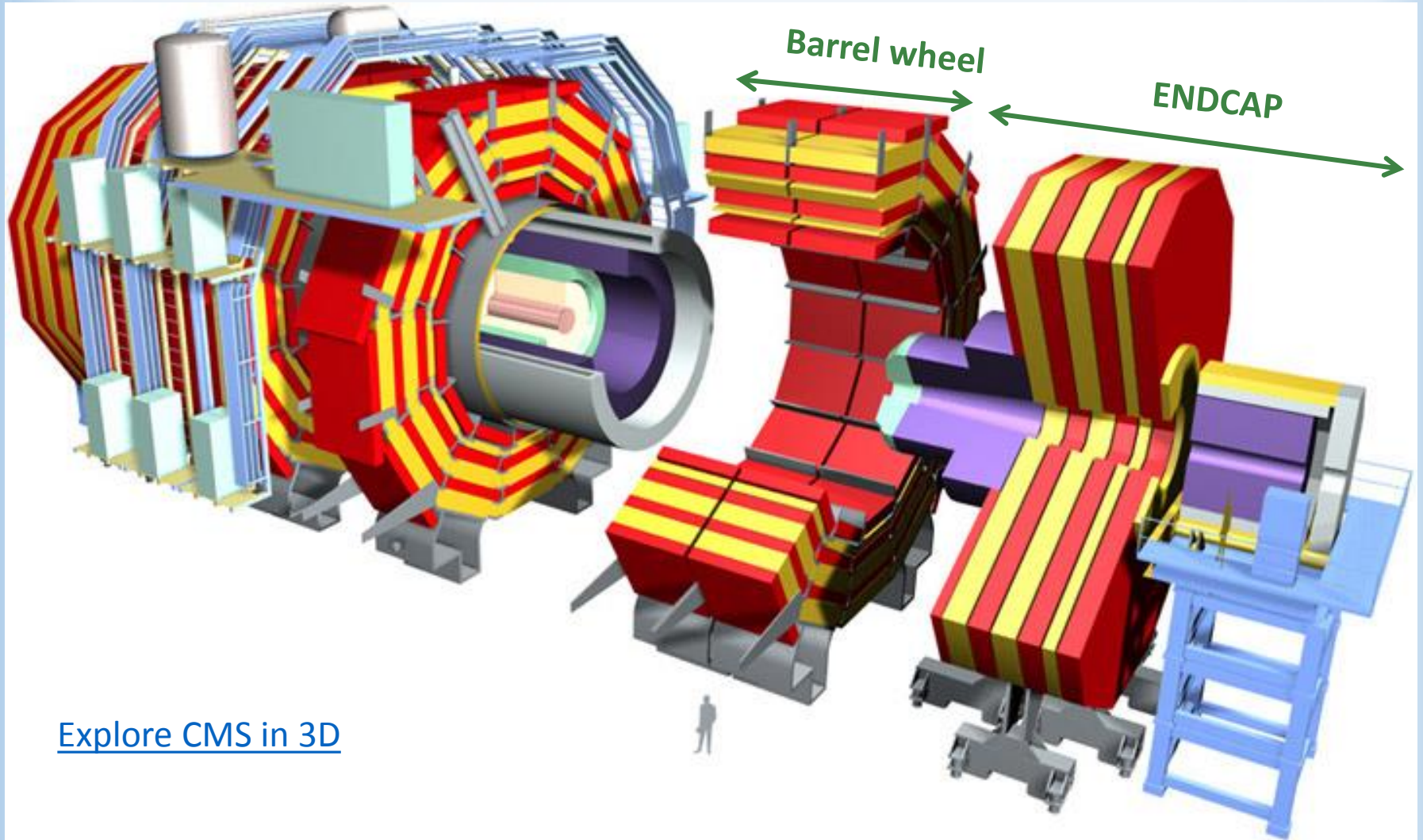


- Negli endcap che costituiscono le basi superiori e inferiori dei cilindri del barrel



CMS:

CMS si trova, sull'anello di LHC, presso il Punto 5, diametralmente opposto ad ATLAS e al sito del CERN

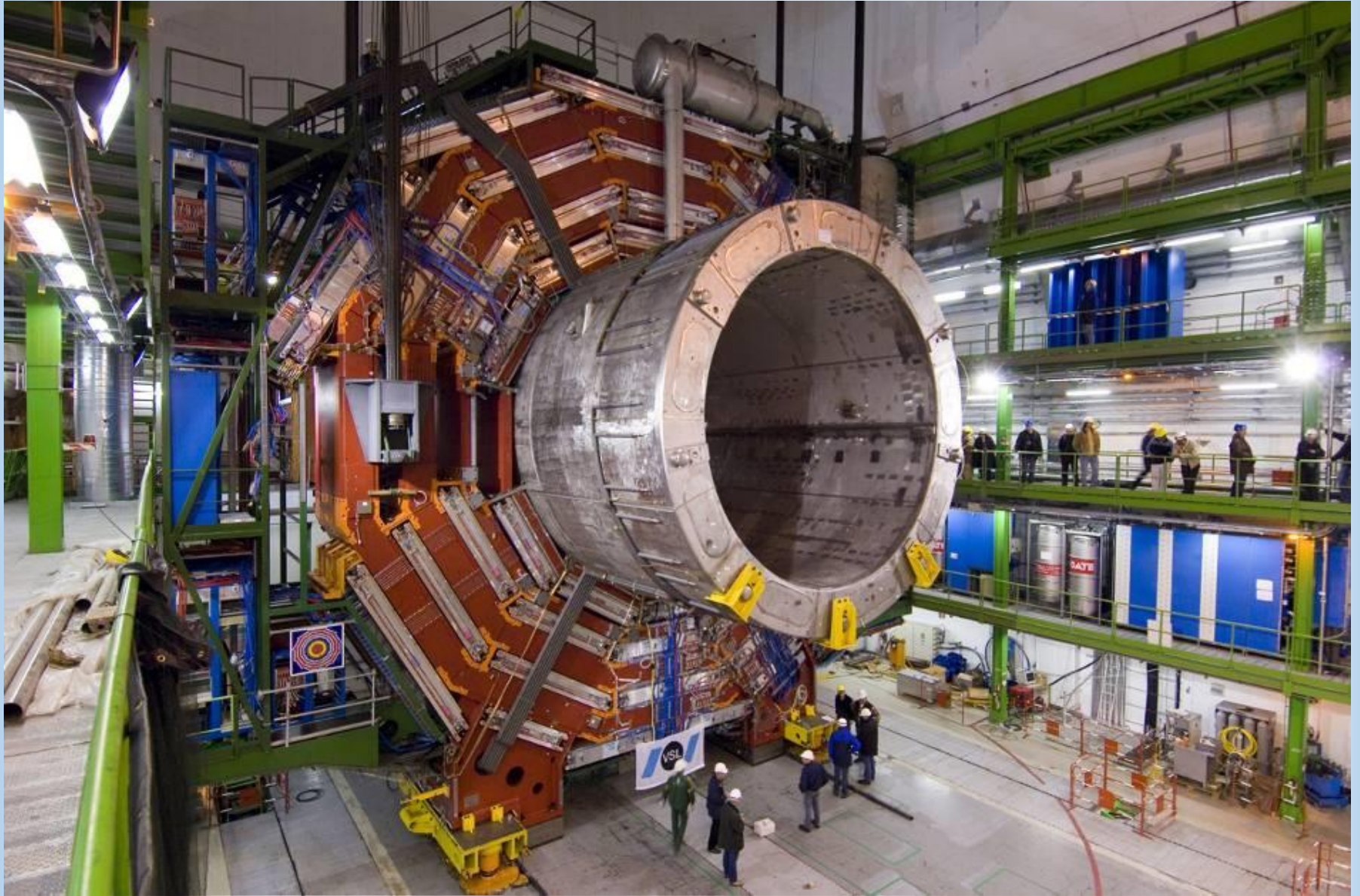


[Explore CMS in 3D](#)

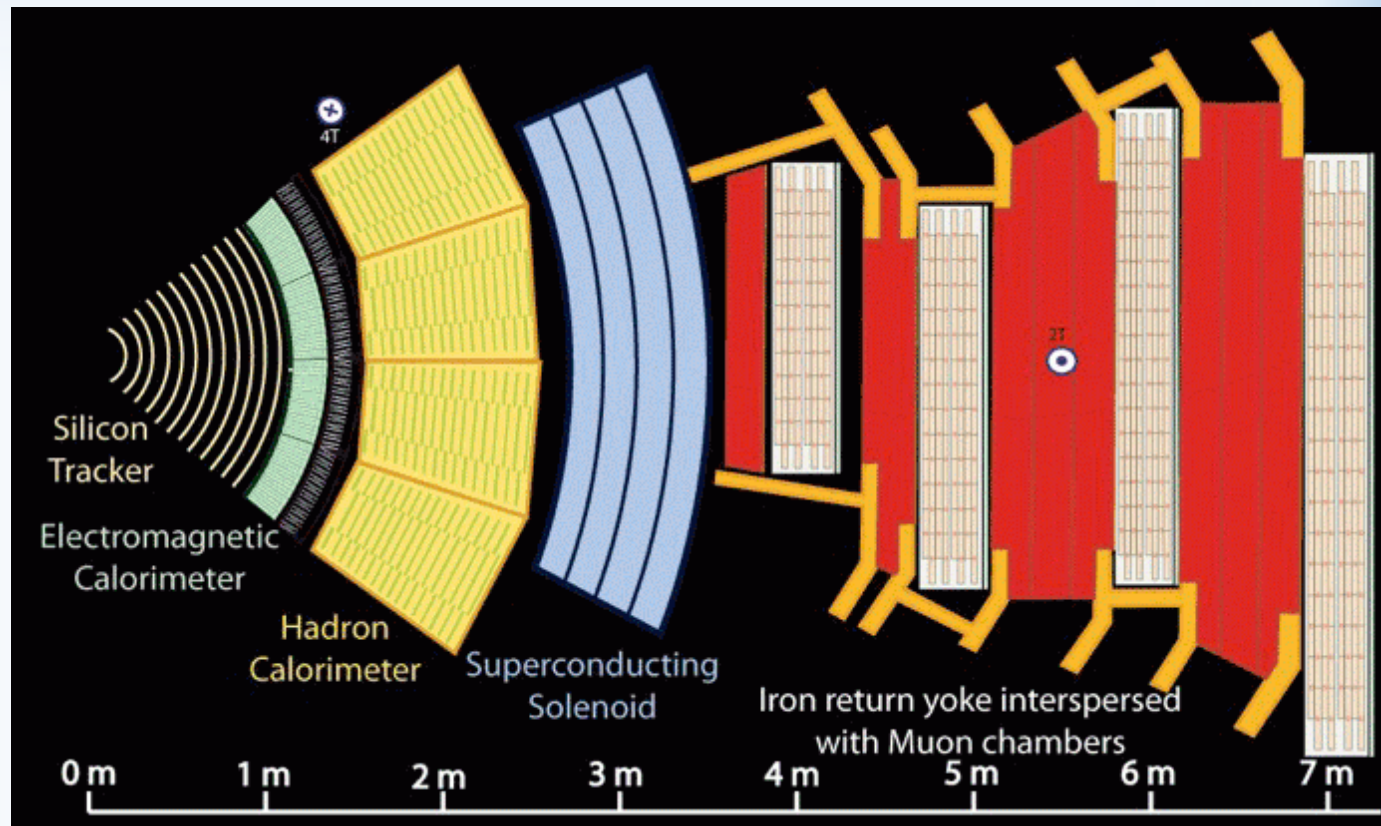
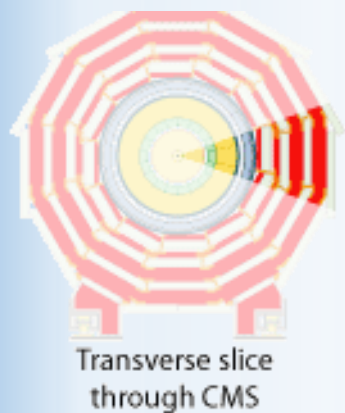
CMS: dalla superficie



...alla caverna:

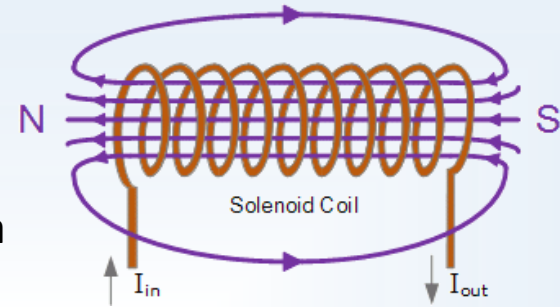


I sottorivelatori di CMS:



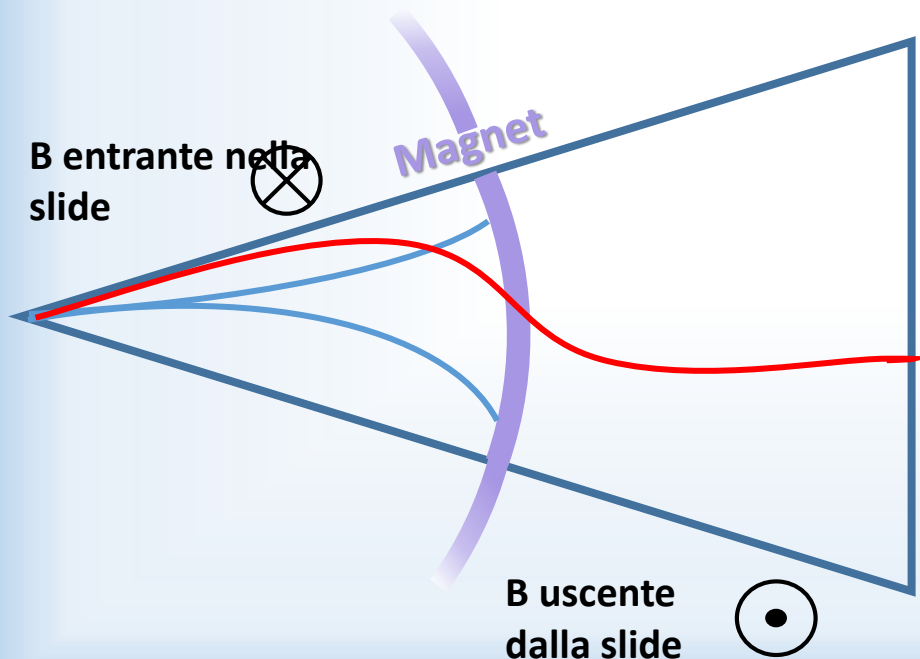
Il solenoide:

- **NON è un rivelatore!**
- Ma svolge un compito fondamentale per CMS
- Un elettromagnete solenoidale è una molla percorsa da corrente



Genera un campo magnetico B diretto lungo l'asse della molla (in CMS asse del fascio):

Le particelle cariche in moto provenienti dal punto d'interazione subiscono una forza di Lorentz $\vec{F} = q \cdot \vec{B} \times \vec{v}$ nel piano xy :

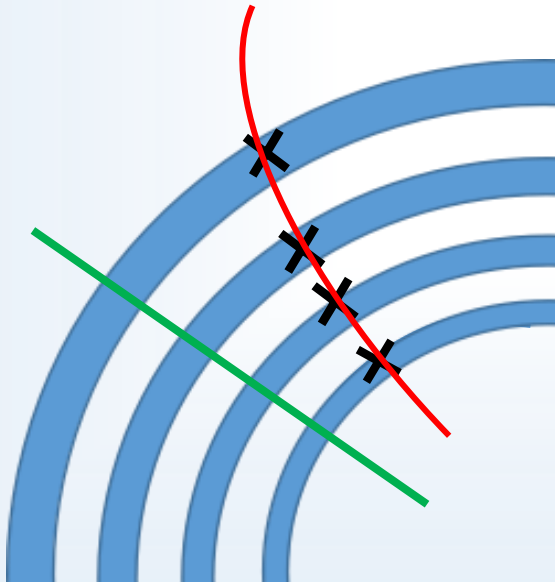
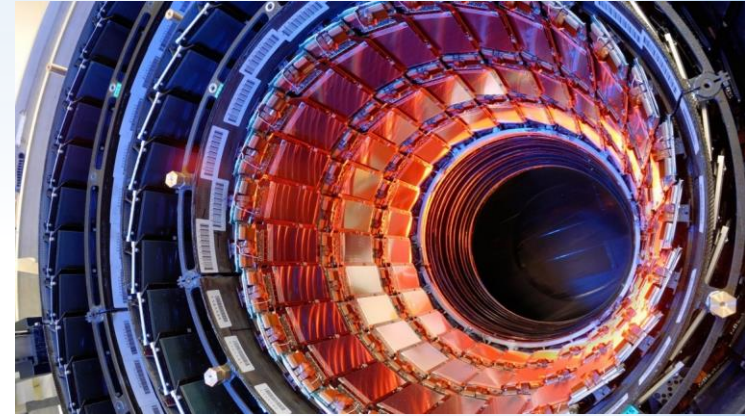


Il raggio di curvatura ρ della particella è proporzionale al suo impulso: $p \propto \rho$

- **Misura di ρ** \rightarrow **misura d'impulso**
- **Misura di carica:** la forza di Lorentz curva cariche opposte in direzioni opposte

Il tracciatore:

- Formato da strati concentrici di rivelatori al silicio;
- Le **particelle cariche** perdono una piccola porzione di energia nell'interazione con il silicio, generando **segnale** in uno strato
- Le **particelle neutre** NON danno segnale nel tracciatore
- Raccogliendo i segnali in più strati, è possibile ricostruire la traiettoria della particella



Raccogliendo i segnali in più strati, è possibile ricostruire la traiettoria della particella

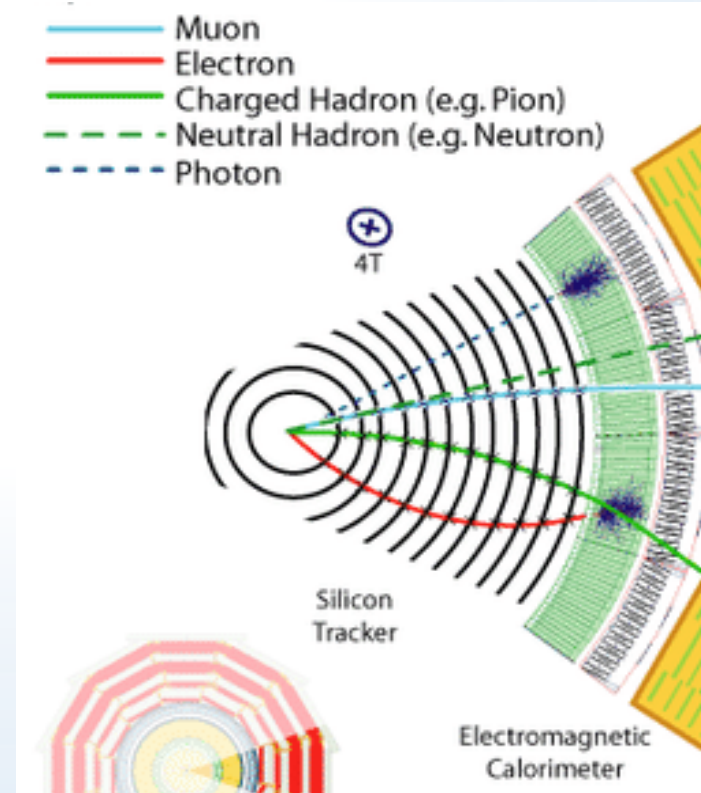
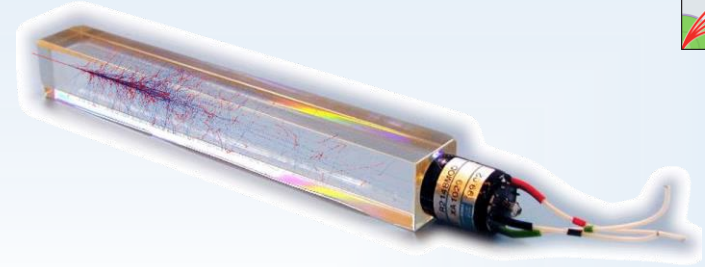


misurarne
raggio di curvatura, impulso e carica!

Il calorimetro elettromagnetico:



- E' formato da cristalli di tungstato di piombo accoppiati a rivelatori di luce
- Una particella soggetta ad interazione elettromagnetica (part. carica, fotone) genera nel cristallo una **cascata elettromagnetica**
- **Fotoni ed elettroni** perdono tutta la loro energia nel calorimetro elettromagnetico: **misura di energia**
- Gli **adroni carichi** perdono solo una piccola parte della loro energia, gli **adroni neutri** non interagiscono
- I **muoni** producono un segnale nel calorimetro EM ma non perdono tutta la loro energia



Il calorimetro adronico:

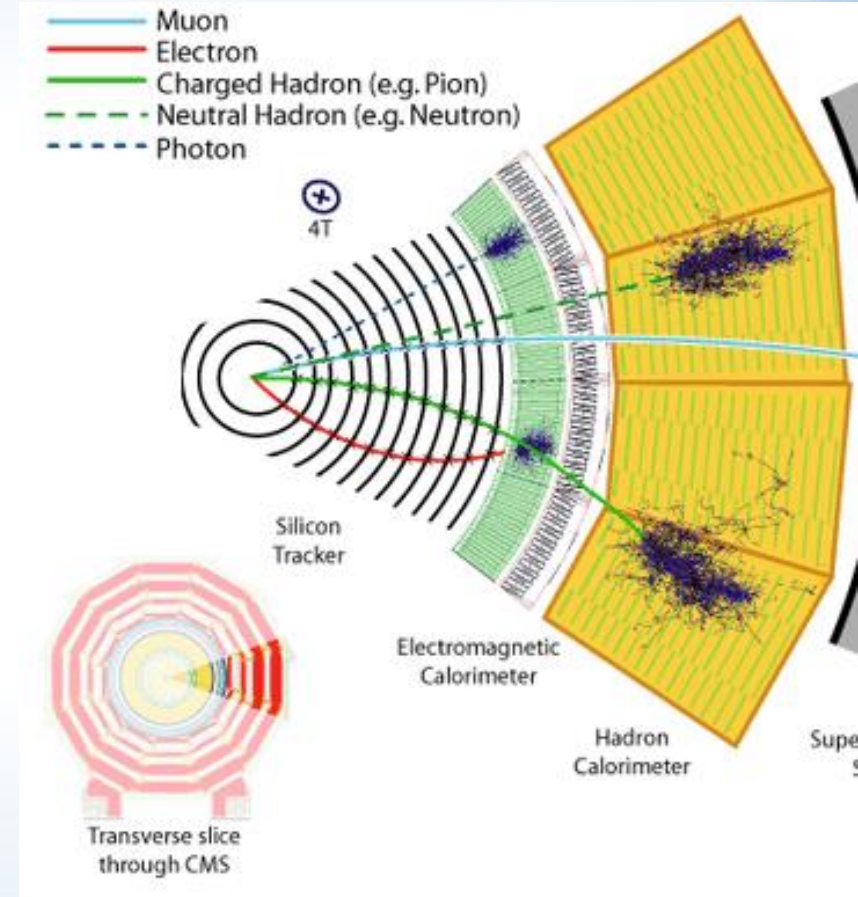


- E' composto di moduli in cui si intervallano strati di ottone o acciaio e materiale plastico sensibile

- Gli adroni (carichi E neutri) producono delle cascate adroniche all'interno dei moduli rilasciando **tutta la loro energia** nel materiale sensibile

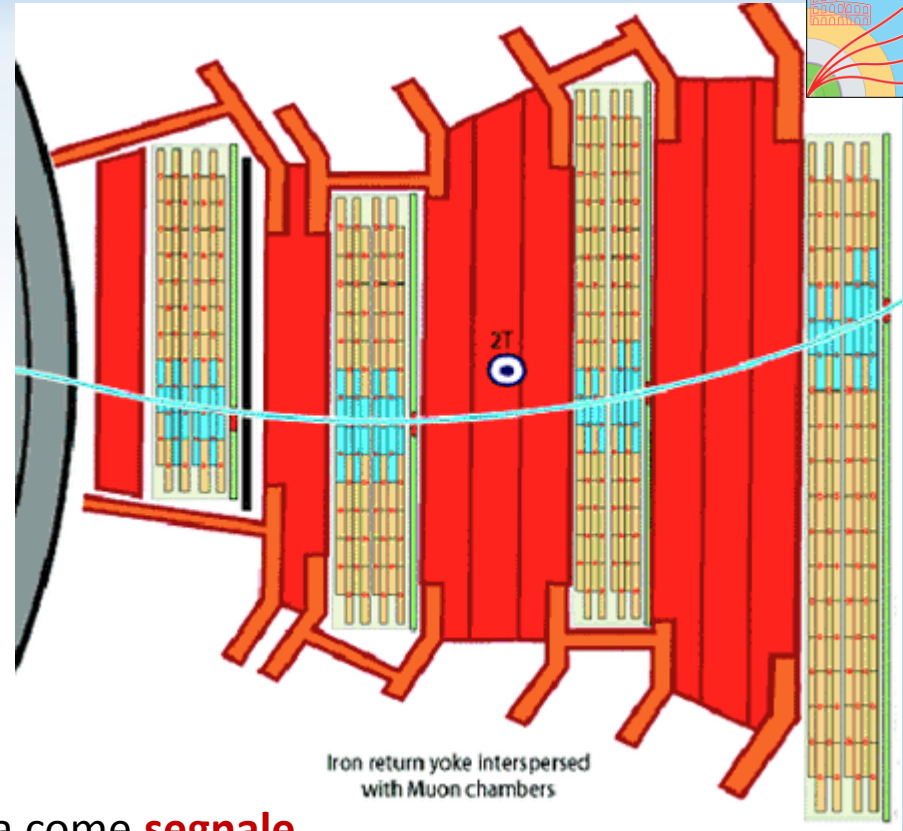


Misura di energia per gli adroni!



Il sistema dei muoni:

- I muoni hanno uno strato dedicato di sottorivelatori in CMS;
- **Non** vengono assorbiti nel calorimetro elettromagnetico, questo li distingue dagli elettroni!
- Le camere a muoni sono condensatori riempiti di gas:
- quando un muone passa nella camera, perde energia nel gas; l'energia rilasciata nel gas viene interpretata come **segnale**
- Attraverso il passaggio in più camere ricostruiamo la traccia



Misure di impulso e carica

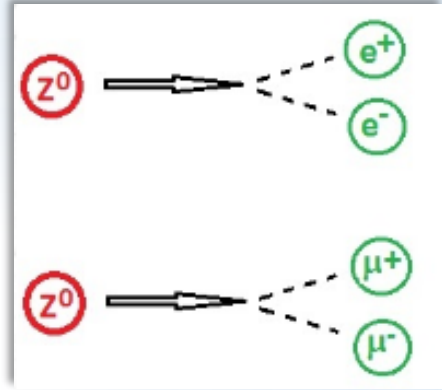


Misure di impulso e carica nel tracciatore

Misura di energia del muone

Ricostruire particelle decadute:

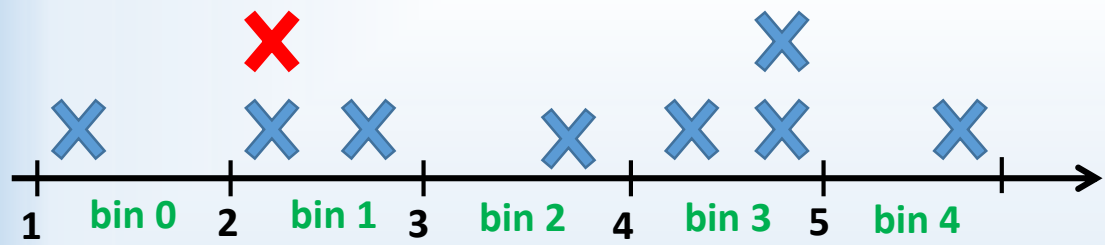
- Oggi misureremo la massa del **bosone Z** a partire dai suoi prodotti di decadimento:
 - Conoscendo le energie dei due **elettroni/muoni**;
 - Conoscendo l'angolo tra le loro direzioni;



Possiamo calcolare la massa del bosone come:

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

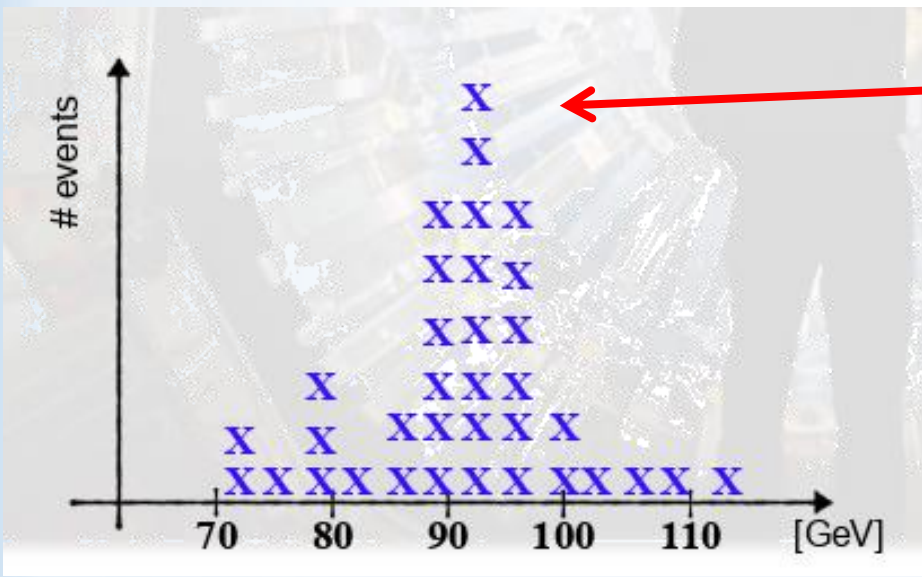
Per ogni coppia di elettroni/muoni trovata possiamo calcolare m_Z e riempire un istogramma:



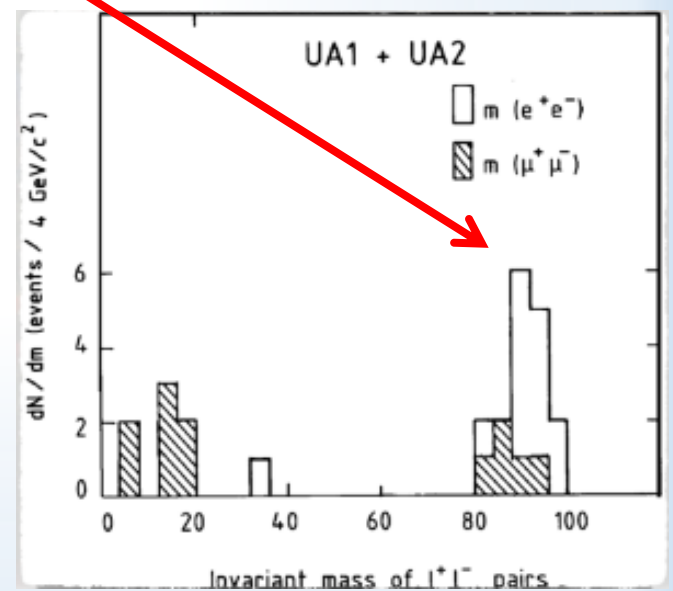
Se la misura **x** è compresa tra 2 e 3, la posizioniamo nel secondo intervallo

La misura della massa del bosone Z:

- Riempiendo l'istogramma, noteremo che molte misure cadono attorno ad uno stesso valore, quello della massa del bosone Z!
- Se l'eccesso è "significativo", possiamo dire di **aver "scoperto" il bosone Z!**



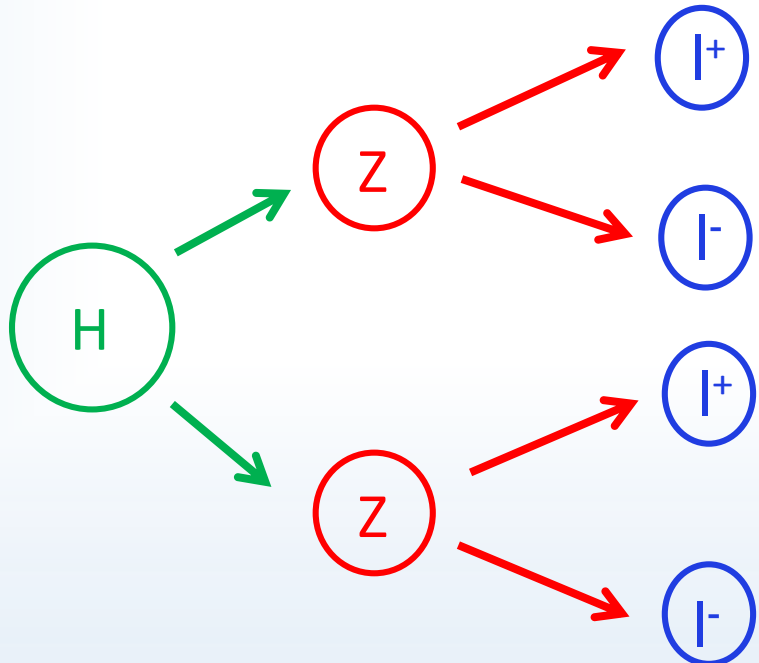
- Nel 1983 gli esperimenti UA1 e UA2 al cern scoprirono così i bosoni W e Z



Il bosone Z nella scoperta dell'Higgs:

- Il **bosone Higgs** è stato osservato ad LHC
 - nel 2012
 - da ATLAS e CMS
 - attraverso la ricostruzione dei suoi decadimenti in fotoni o leptoni

Il decadimento leptonic passa attraverso la produzione di due bosoni Z

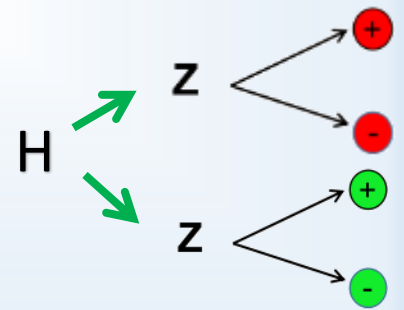
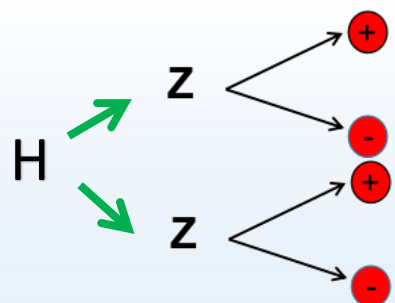
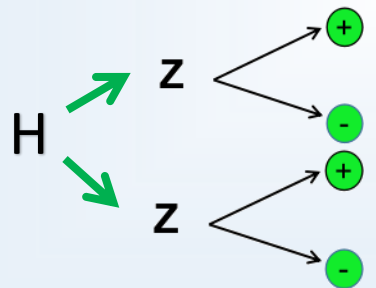
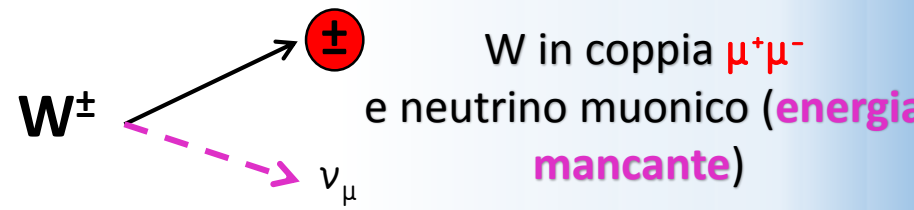
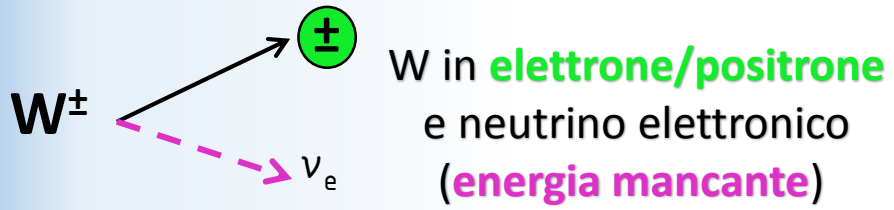
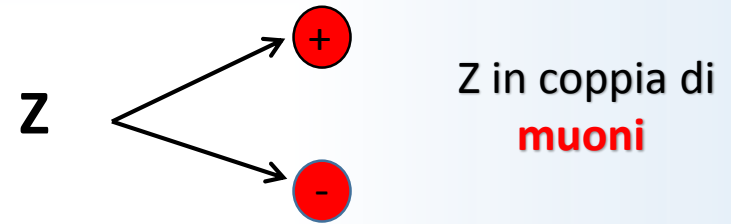


Ora tocca a voi!

- Oggi utilizzeremo i dati raccolti a CMS e cercheremo di “scoprire” i bosoni Z e W
- Scopriremo come si lavora all'analisi dati e impareremo come presentare i nostri risultati, come in una vera e propria conferenza!
- Nelle prossime slides introdurremo il tool di analisi dati e nostri obiettivi per la masterclass

Cosa ricostruiremo:

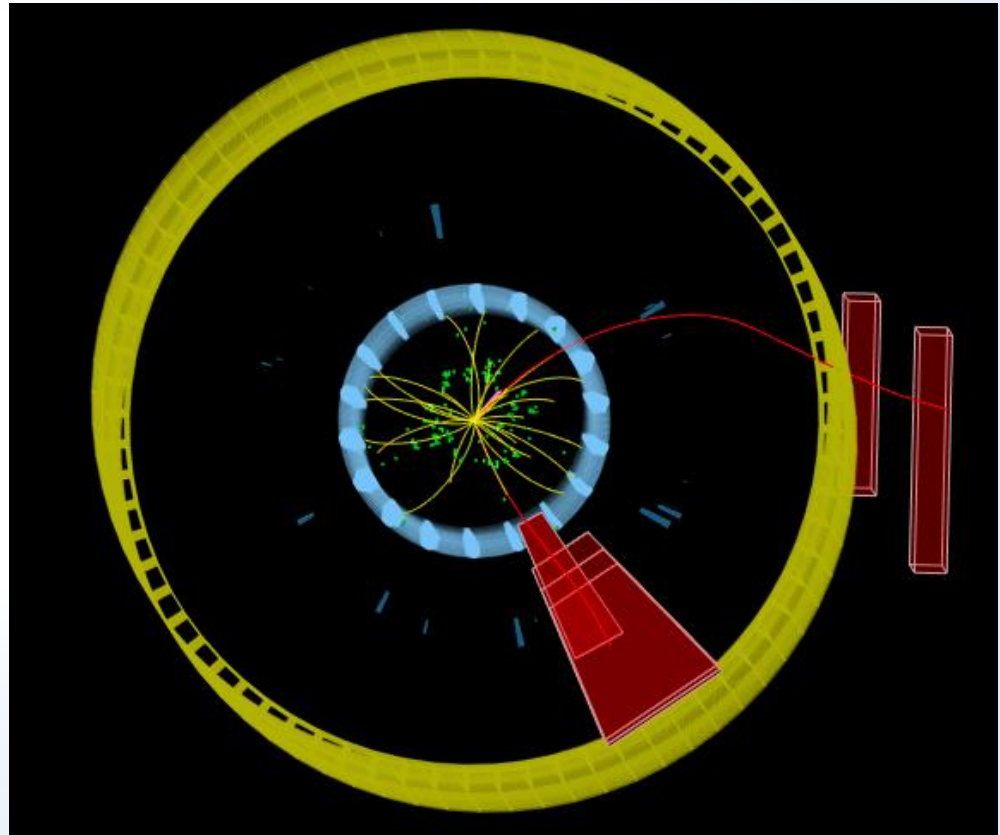
- Analizzeremo eventi **VERI** raccolti a CMS
- Di processi in cui vengono prodotti **bosoni carichi e neutri** che decadono in **stati finali leptonici**



Dove ricostruiremo:



- Osserveremo gli eventi nell'Event display di CMS
- Dovremo essere in grado di identificare i depositi nel detector e riconoscere gli stati finali
- Dallo stato finale risaliremo alla particella che lo ha generato
 - **traiettorie ricostruite nel tracciatore**
 - **depositi del calorimetro elettromagnetico**
 - **depositi e le tracce dei muoni**
 - **energia mancante**



Dove ricostruiremo:



iSpy WebGL N100.Events/Run_1/Event_33 [33 of 100]

Barrel Rec. Hits [153]
Endcap Rec. Hits [40]
▼ HCAL
Barrel Rec. Hits [15]
Forward Rec. Hits [1]
▼ Muon
▼ Physics
Vertices (Reco) [3]
Electron Tracks (GSF) [1]
Photons (Reco) [1]
Jets (Reco) [4]
Missing Et (PF) [1]

CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Jun-25 10:31:11.066272 GMT
Run / Event / LS: 167676 / 328646051 / 368

Physics: Electron Tracks (GSF)

| ↕ pt | ↕ eta | ↕ phi | ↕ charge | ↕ E | ↕ px | ↕ py | ↕ pz |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
| 35.1215 | 0.799421 | 1.83922 | | 46.9547 | -9.31476 | 33.8638 | 31.1645 |

Barrel Rec. Hits [23]
▼ Muon
▼ Physics
Vertices (Reco) [3]
Electron Tracks (GSF) [1]
Photons (Reco) [1]
Jets (Reco) [13]
Missing Et (PF) [1]

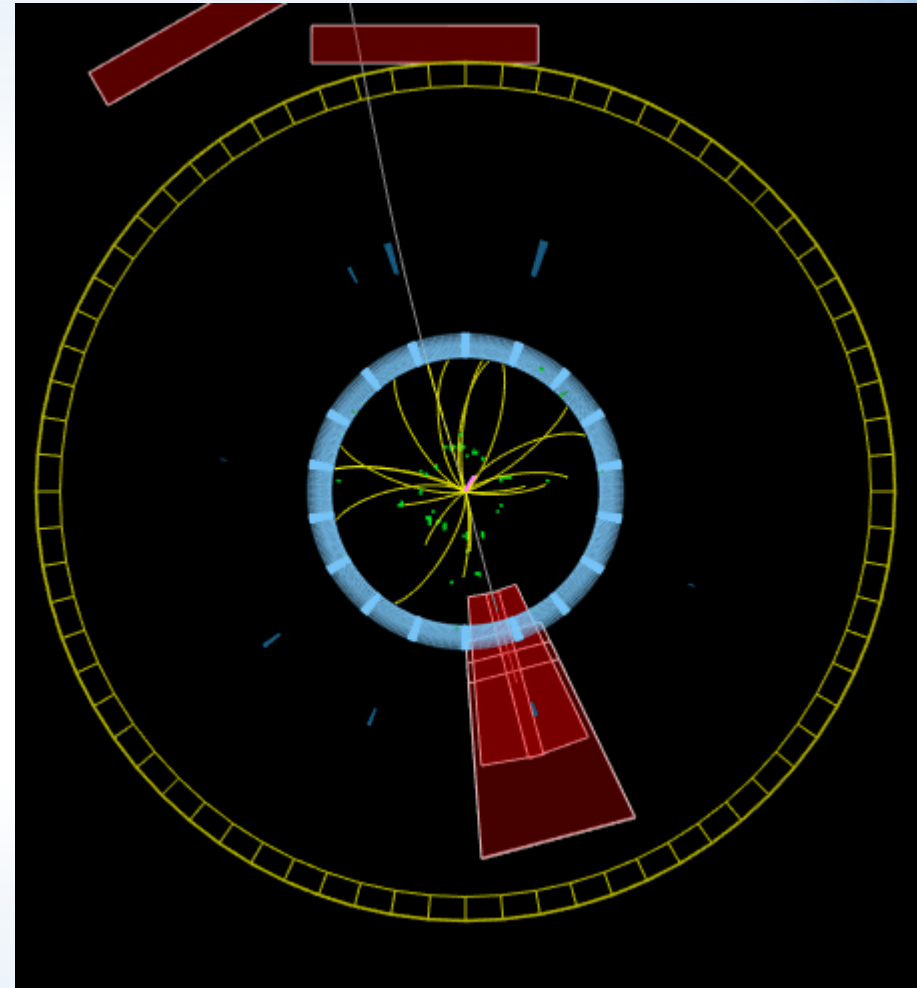
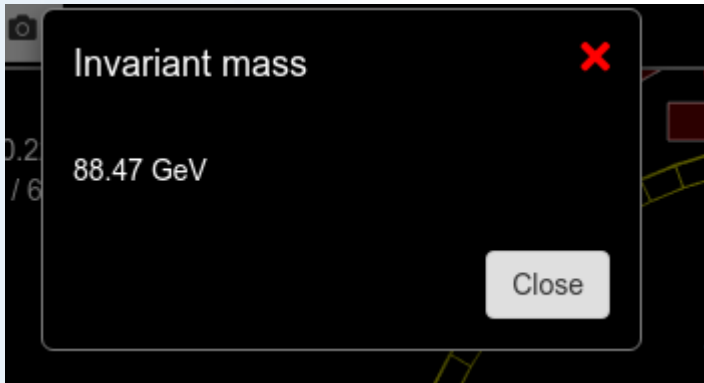
Raffaella Tramontano

Physics: Electron Tracks (GSF)

| ↕ pt | ↕ eta | ↕ phi |
|---------|---------|---------|
| 82.0825 | 2.29834 | 1.76524 |

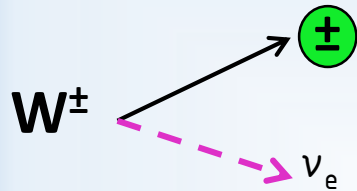
Massa invariante:

- Quando troviamo due o più coppie di leptoni:
 - Passiamo il mouse su una delle due tracce, diventerà grigia
 - La selezioniamo tenendo premuto il tasto shift e cliccando
 - Ripetiamo l'operazione con la seconda traccia
 - premiamo il tasto m sulla tastiera



- Un pop up apparirà indicandoci la massa della particella che ha prodotto i due leptoni

Carica del bosone W:



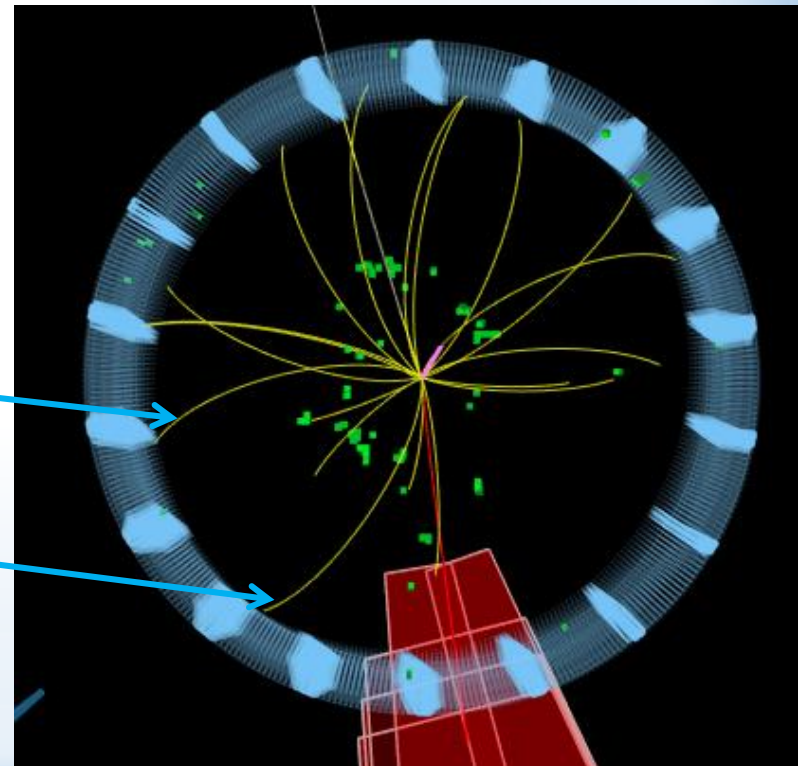
Possiamo identificare la carica del bosone W dalla carica del leptone che produce

Particelle con cariche opposte in CMS curvano in direzione opposta nel piano xy

- Se una traccia curva in senso orario nel piano xy, la sua carica è positiva
- Se curva in senso antiorario, è negativa

Senso antiorario: carica negativa

Senso orario: carica positiva



Dove analizzeremo:



Utilizzeremo per raccogliere i dati una tavola degli eventi online, CIMA

- Per ogni bosone identificato possiamo inserire

| | | | | |
|---|--|--|--|--|
| Select Event Event index: 1 Event number: 99-1 | final state <input type="checkbox"/> Electron <input type="checkbox"/> Muon (μ) | primary state candidate <input type="checkbox"/> W ⁻ <input type="checkbox"/> W ⁺ <input checked="" type="checkbox"/> NP <input type="checkbox"/> W | <input type="checkbox"/> Higgs <input type="checkbox"/> Zoo | NP Mass: <input type="text"/> GeV/c ² Submit |
|---|--|--|--|--|

Evento in cui è osservato

se lo stato finale è in elettroni o muoni

Quale bosone abbiamo visto
N.B : se abbiamo trovato un **bosone Z** selezioniamo **NP** (neutral particle) e inseriamo la massa calcolata come in slide precedente

- Cima riempirà degli istogrammi comuni a tutti i gruppi, del numero di W identificati e della massa del bosone Z, man mano che inserirete i dati nella tabella

Dove analizzeremo:

Commenteremo insieme i risultati ottenuti su CIMA

Ci collegheremo in video conferenza con il CERN per commentare i risultati ottenuti dal nostro gruppo e da quelli che hanno effettuato la masterclass in contemporanea:



Debrecen(Ungheria)

**Santiago de
Compostela(Spagna)**

San Paolo(Brasile)

Madrid(Spagna)

...lunch break!



Grazie per l'attenzione!