

# Il rivelatore CMS

Masterclass 2021, Roma

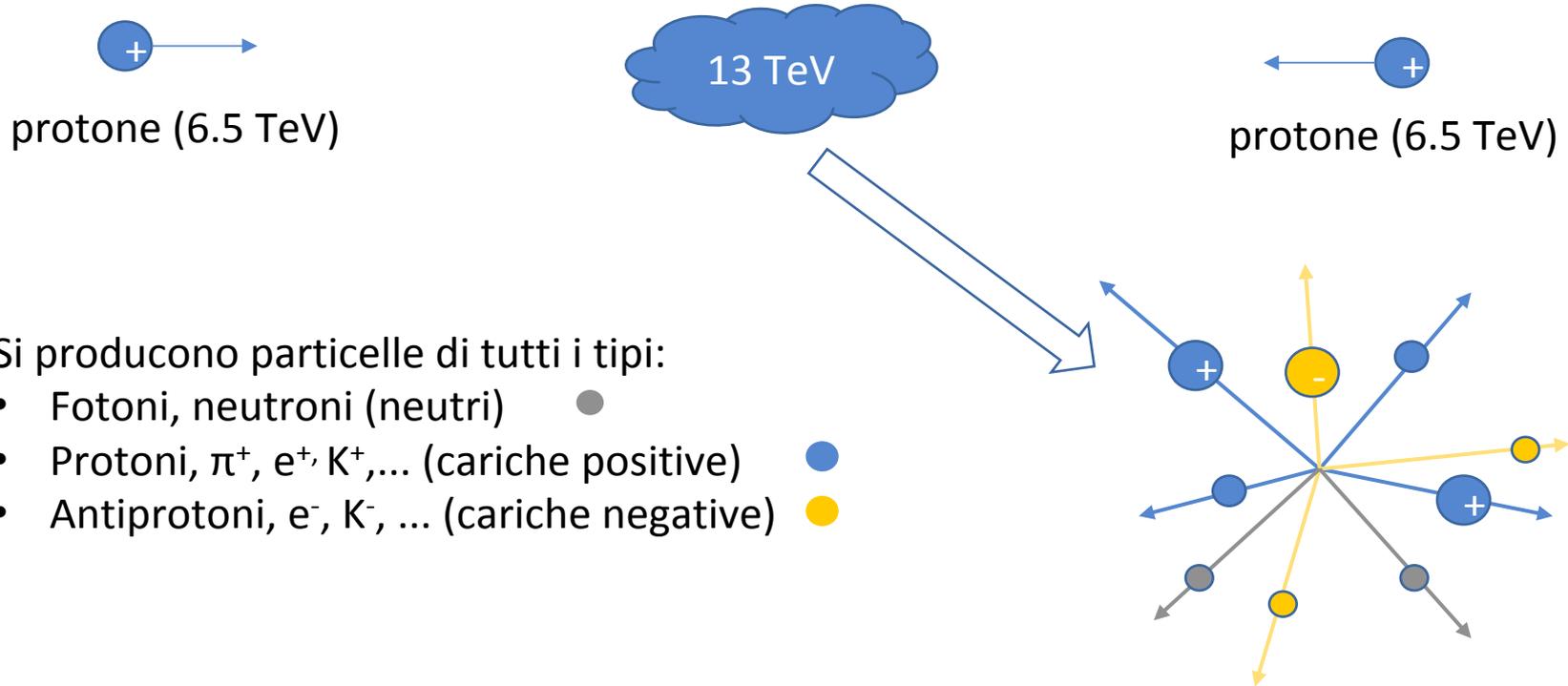
22/02/2021

Chiara Rovelli

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione di Roma

# Un “evento” a un collisore

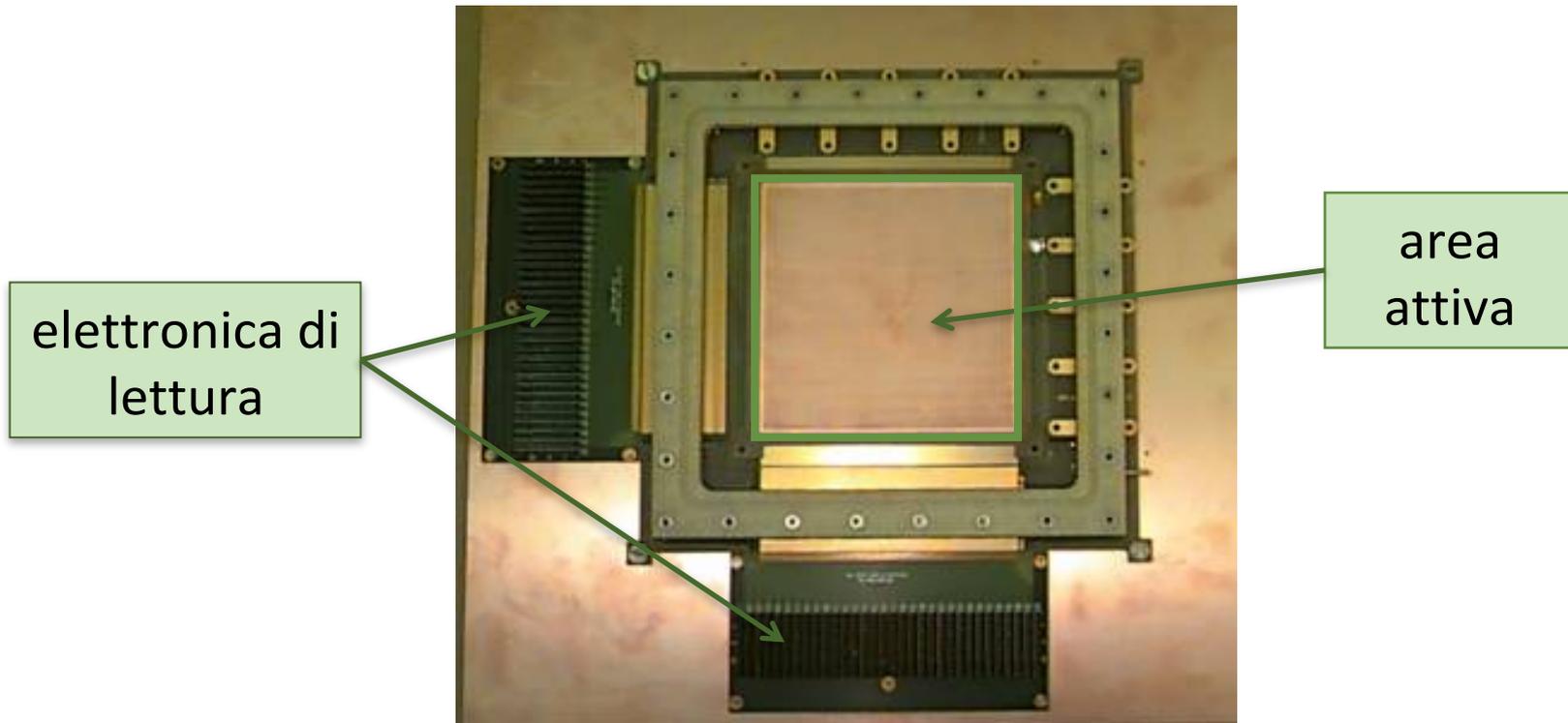
Ad un *collisore* un *evento* è una collisione tra particelle accelerate ad una data energia in un punto



Il rivelatore di particelle si colloca nel punto di interazione per **identificare** il tipo di particella e **misurarne la carica, l'energia...**

# Cos'è un rivelatore di particelle

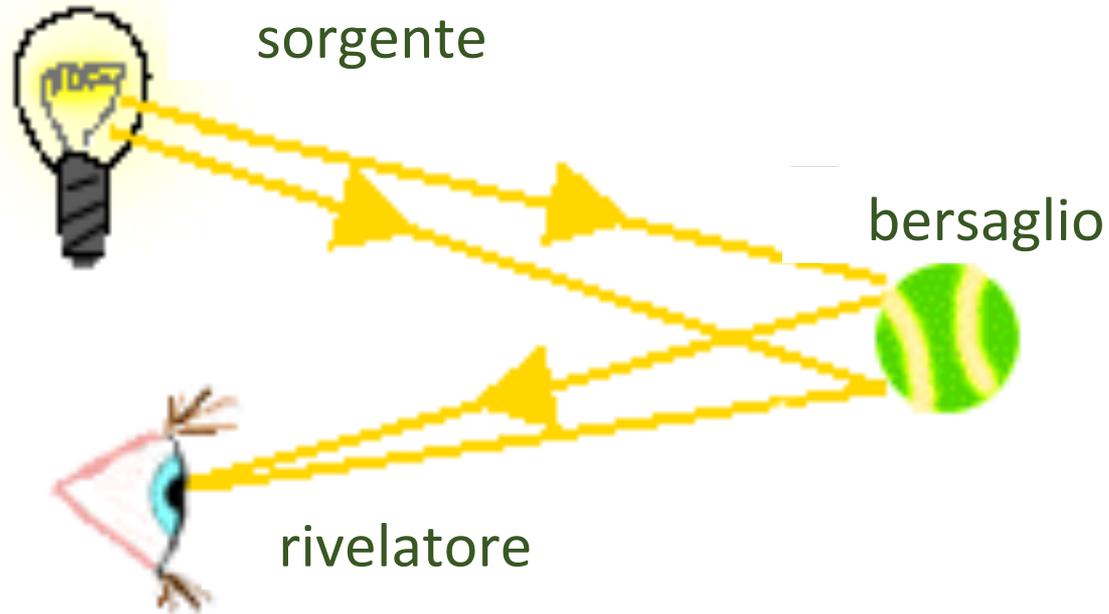
Nella **fisica sperimentale** un **rivelatore di particelle** o **rivelatore di radiazione** è uno strumento usato per **rivelare**, **tracciare** e **identificare** particelle. (Wikipedia)



Strumento che produce un **segnale osservabile** se colpito da una particella.

Solitamente costituito da un **elemento attivo** (con cui interagisce la radiazione) e da un **sistema di lettura** (che forma il segnale e lo invia all'acquisizione dati)

# L'occhio umano: un rivelatore di fotoni



I **fotoni** sono le particelle elementari di cui è costituita la **luce**

Noi vediamo un oggetto perché viene colpito da fotoni che poi rimbalzano e vengono rivelati dal nostro occhio

# Interazioni delle particelle con la materia

Le particelle non possono essere viste direttamente

Solo la loro **interazione con la materia** può essere misurata

Questa è convertita in:

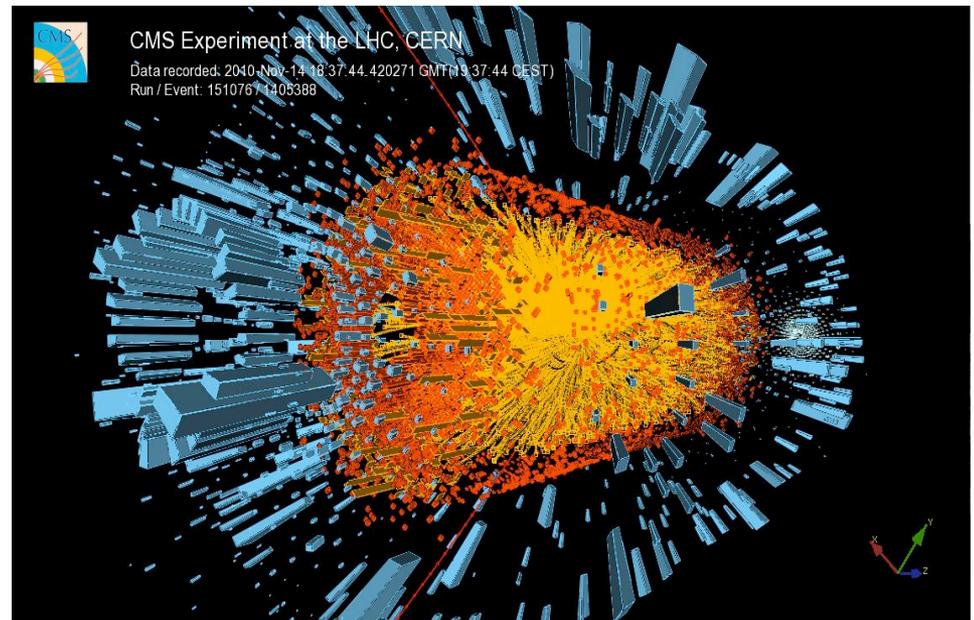
- fotografie ottiche
- *segnali* in corrente o tensione elettrica



“Gargamelle” (1970-1978)



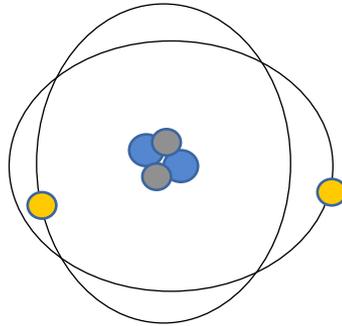
CMS @ LHC (oggi) – collisione Pb-Pb



# Rivelazione di particelle cariche



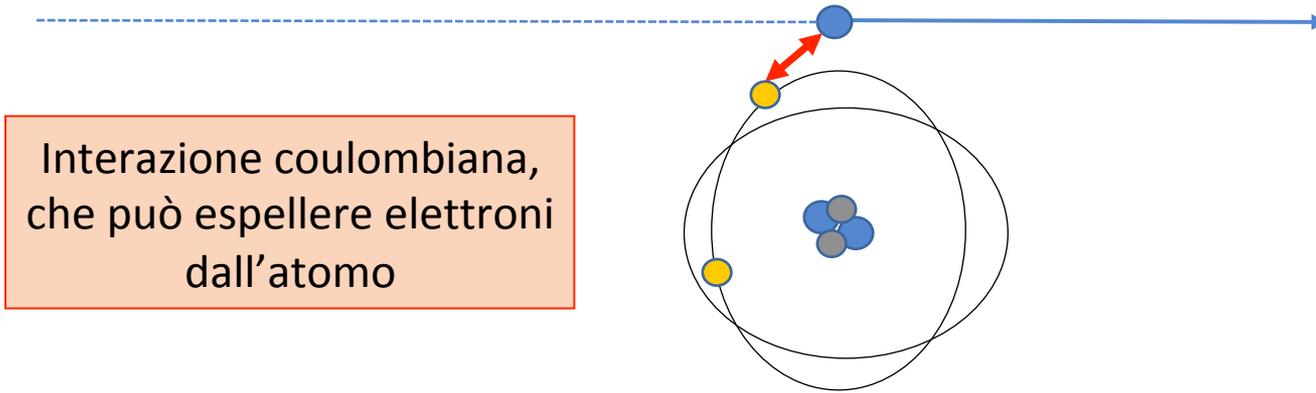
Una particella carica di alta energia prodotta in un evento



Atomo del materiale di cui è composto il rivelatore

Tempo  $t=0$

# Rivelazione di particelle cariche

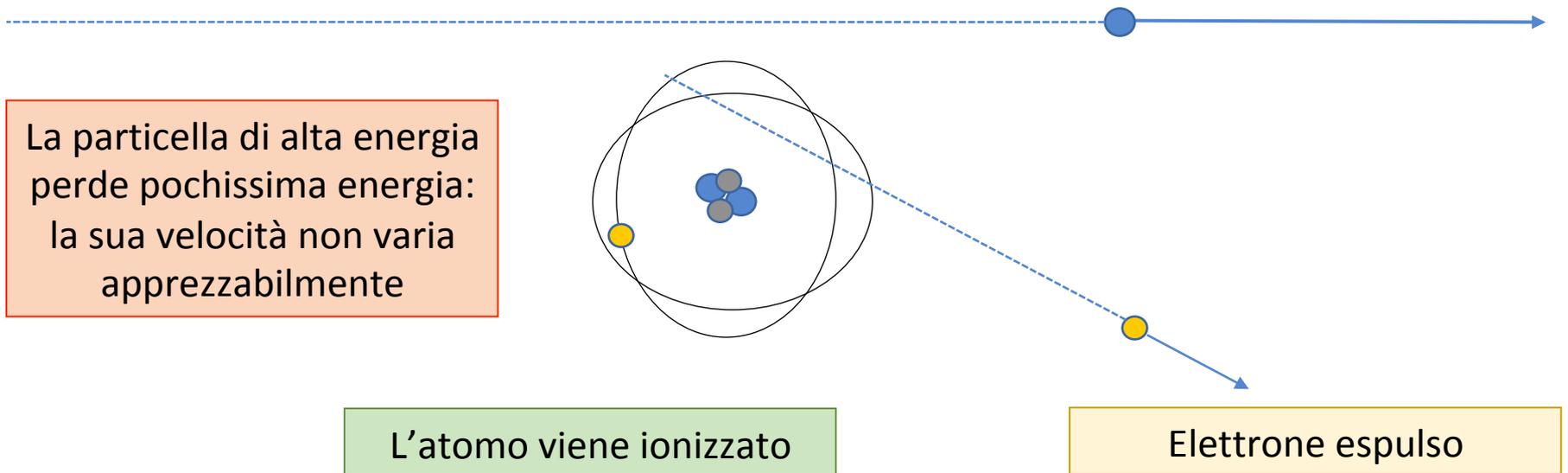


Interazione coulombiana,  
che può espellere elettroni  
dall'atomo

Atomo del materiale di cui  
è composto il rivelatore

Tempo  $t=1$

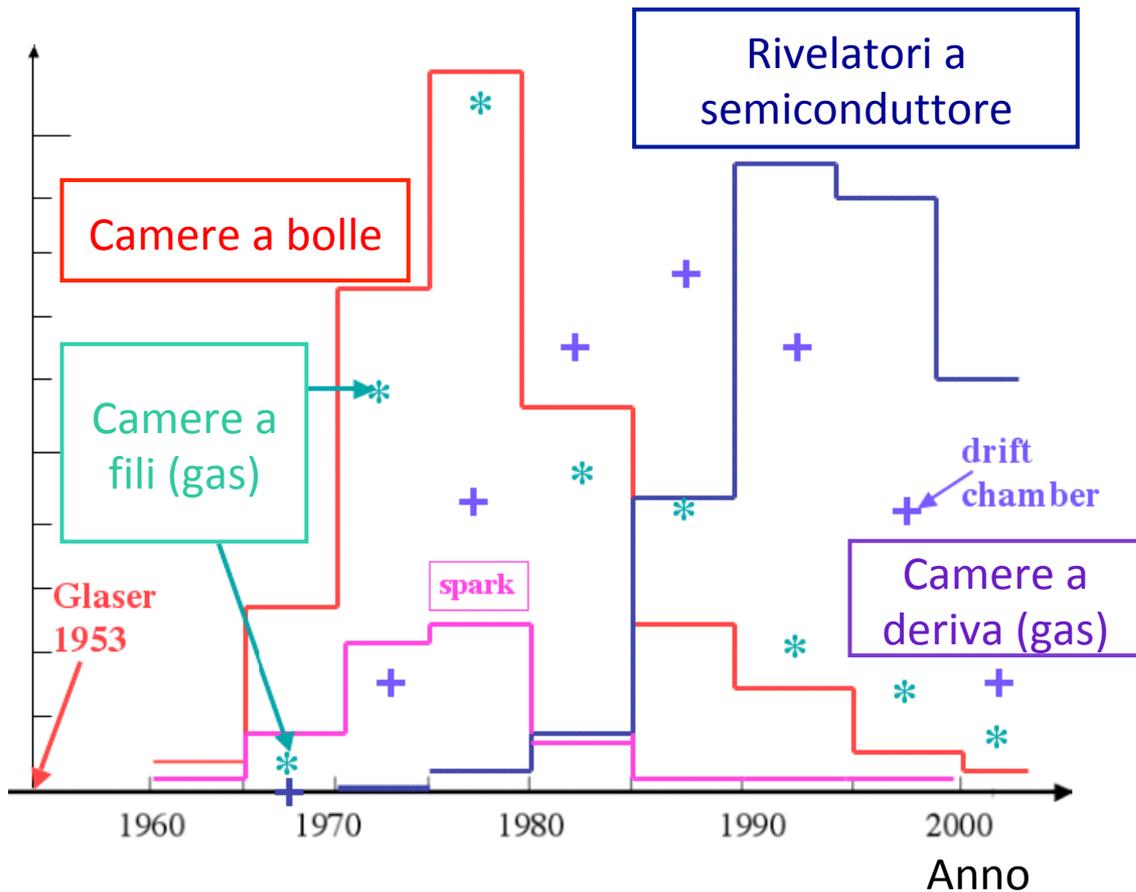
# Rivelazione di particelle cariche



Tempo  $t=2$

La *ionizzazione* è utilizzata principalmente nei **tracciatori**: il segnale elettrico generato consente di seguire il percorso della particella nel rivelatore

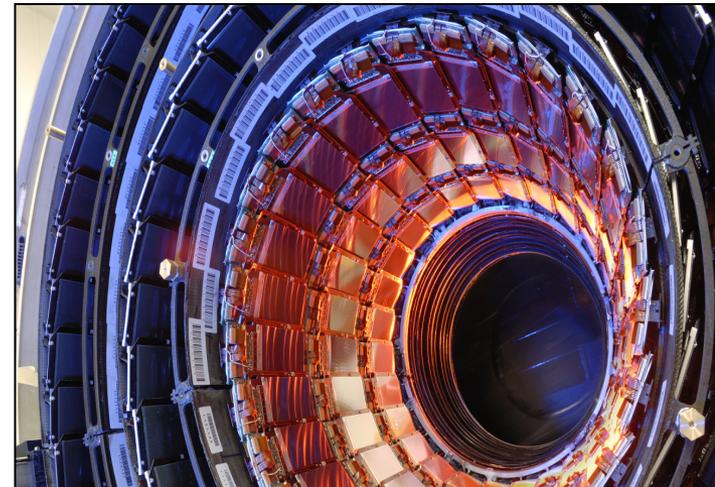
# Evoluzione dei tracciatori nel tempo



Oggi solitamente il rivelatore e' un recipiente ("camera") con gas, oppure un sottile cristallo di Silicio



Gargamelle, Camera a bolle, 1970-78



Tracciatore di CMS, Silicio, oggi

# Rivelatori al Silicio

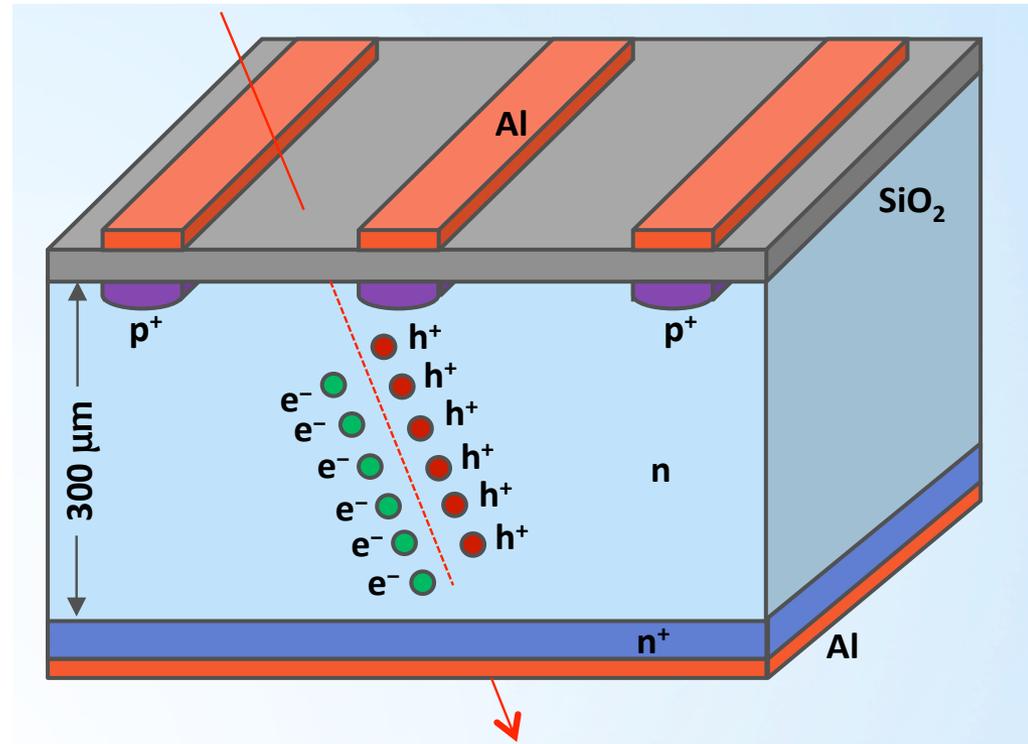
Usano un sottile strato di Silicio come elemento attivo

Il Silicio viene ionizzato dalle particelle cariche, che creano coppie elettrone ( $e^-$ ) lacuna ( $h$ )

- **Ionizzazione primaria**

In presenza di campo elettrico gli elettroni viaggiano verso l'**anodo** e le lacune verso il **catodo**, producendo un segnale elettrico

Sono rivelatori ad **altissima risoluzione spaziale** ( $50\mu\text{m}$ ) usati spesso come **rivelatori di vertice**, in zone molto vicine al punto di collisione dei fasci di particelle



# Rivelatori a scintillazione

Usano come elemento attivo materiali che emettono luce visibile quando sono attraversati da particelle cariche

Esistono vari tipi di materiali scintillanti

- Cristalli
- Materiali plastici

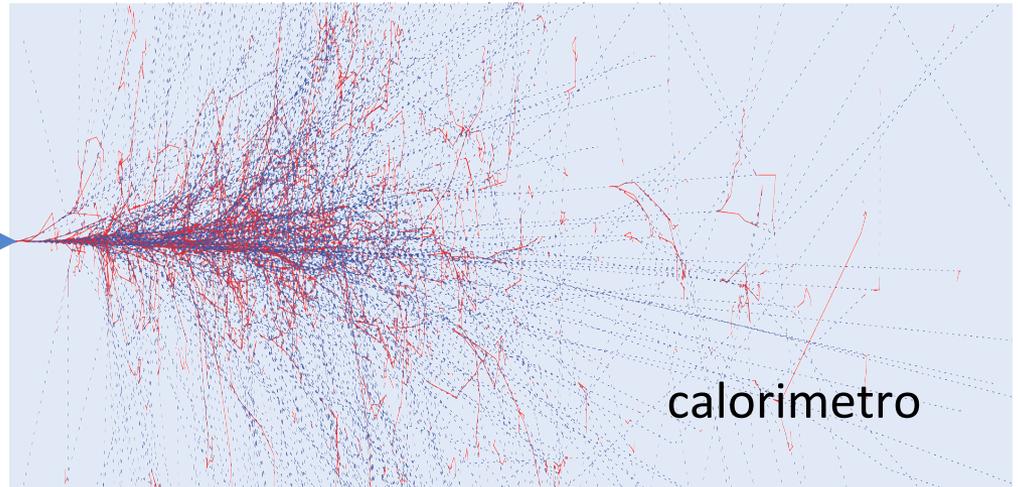
La luce di scintillazione prodotta propaga nel materiale e **viene raccolta da appositi sensori** (fotomoltiplicatori, fotodiodi...)

La scintillazione e' utilizzata principalmente nei calorimetri



# Calorimetri

particella incidente



Permettono la misura dell'energia di particelle cariche e neutre

La particella interagendo con il calorimetro crea uno sciame e viene **completamente assorbita**

Il segnale prodotto è **proporzionale all'energia** della particella:  $S = kE$

Esistono *2 tipi* di calorimetri:

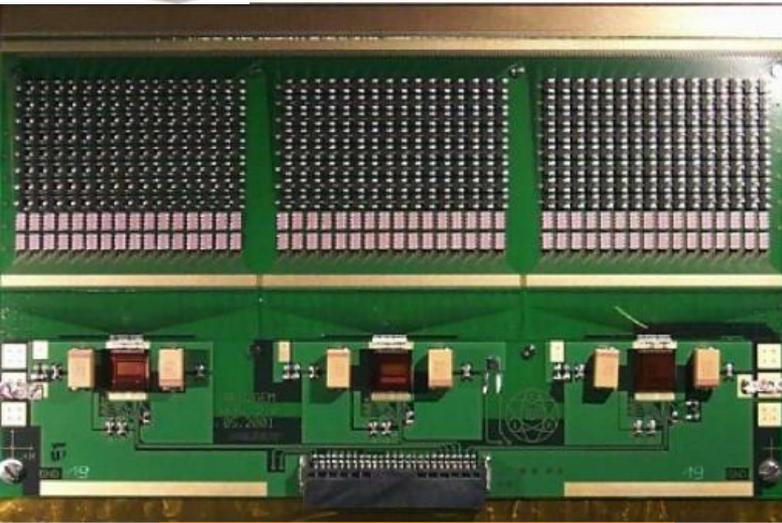
**Calorimetri Elettromagnetici:**

rivelazione di **elettroni, positroni e fotoni**

**Calorimetri Adronici:**

rivelazione di **adroni carichi e neutri:  $p, n, \pi, K$**

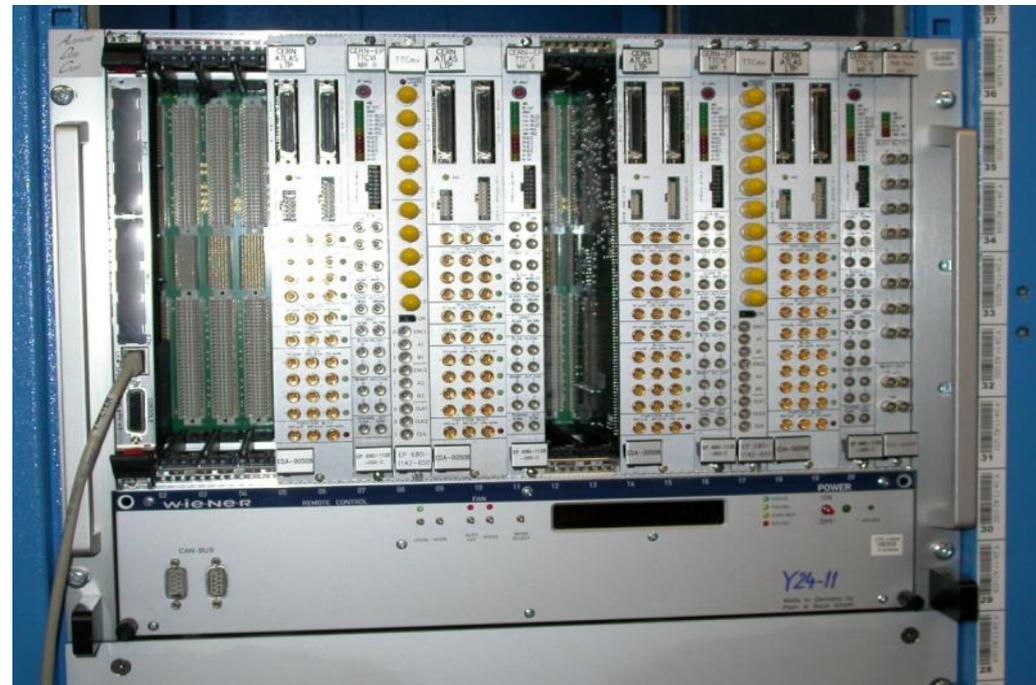
# Electronica di lettura



Schede di Front-End

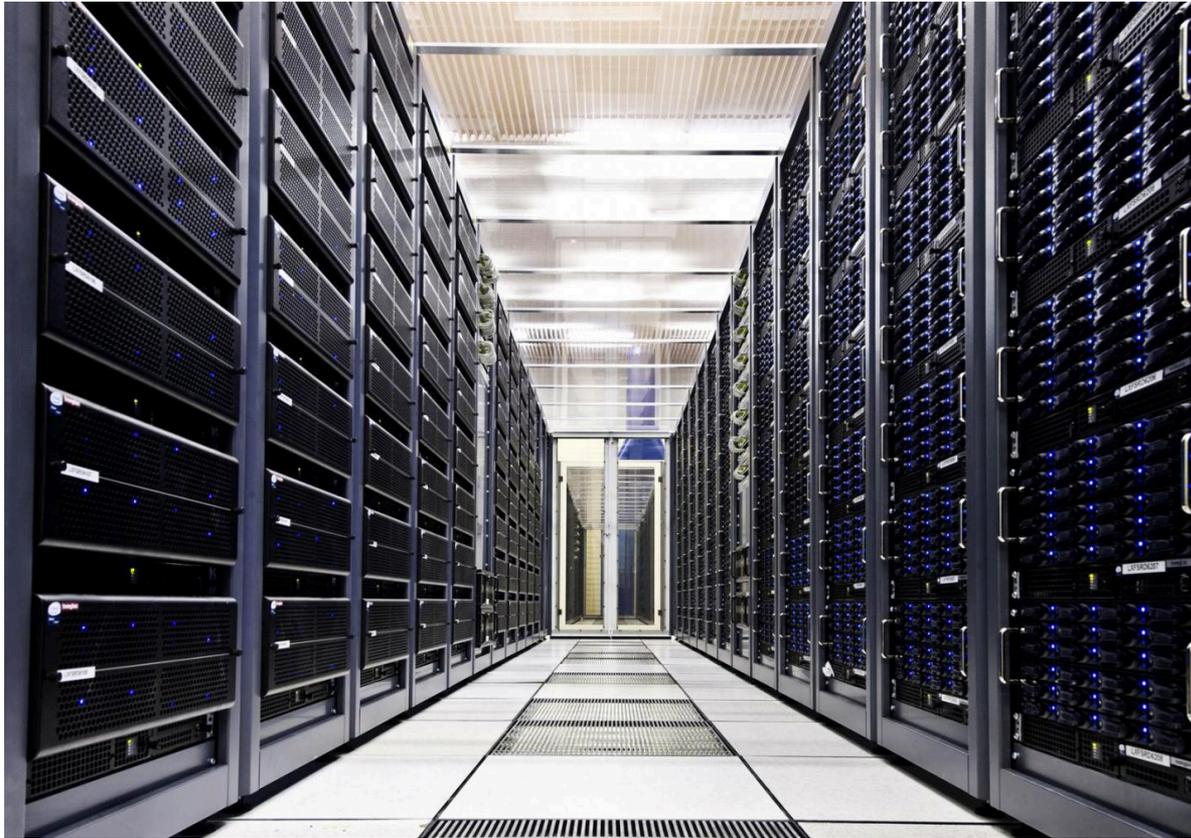


Per analizzare i segnali si usa **elettronica altamente specializzata**. I segnali vengono poi inviati a complessi **sistemi di acquisizione** che li analizzano e li memorizzano



Schede di acquisizione

# Infine i dati vengono analizzati da centinaia di computer



*15 Petabytes*

(15 milioni di Gb)  
generati ogni anno da LHC

Una “grid” di computer  
disegnata per distribuire  
e analizzare i dati

Circa 1 milione di  
programmi di analisi  
eseguiti in 1 giorno

Trasferimento di dati  
di circa 10 Gb/secondo

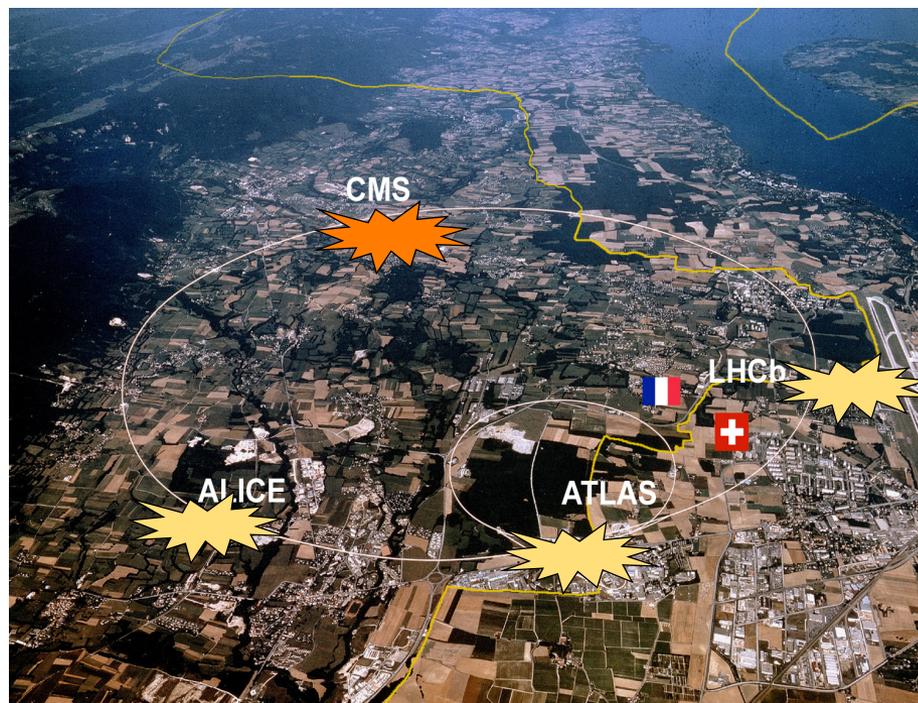
# Rivelatori a LHC

Sono tra i piu' complessi strumenti scientifici mai costruiti

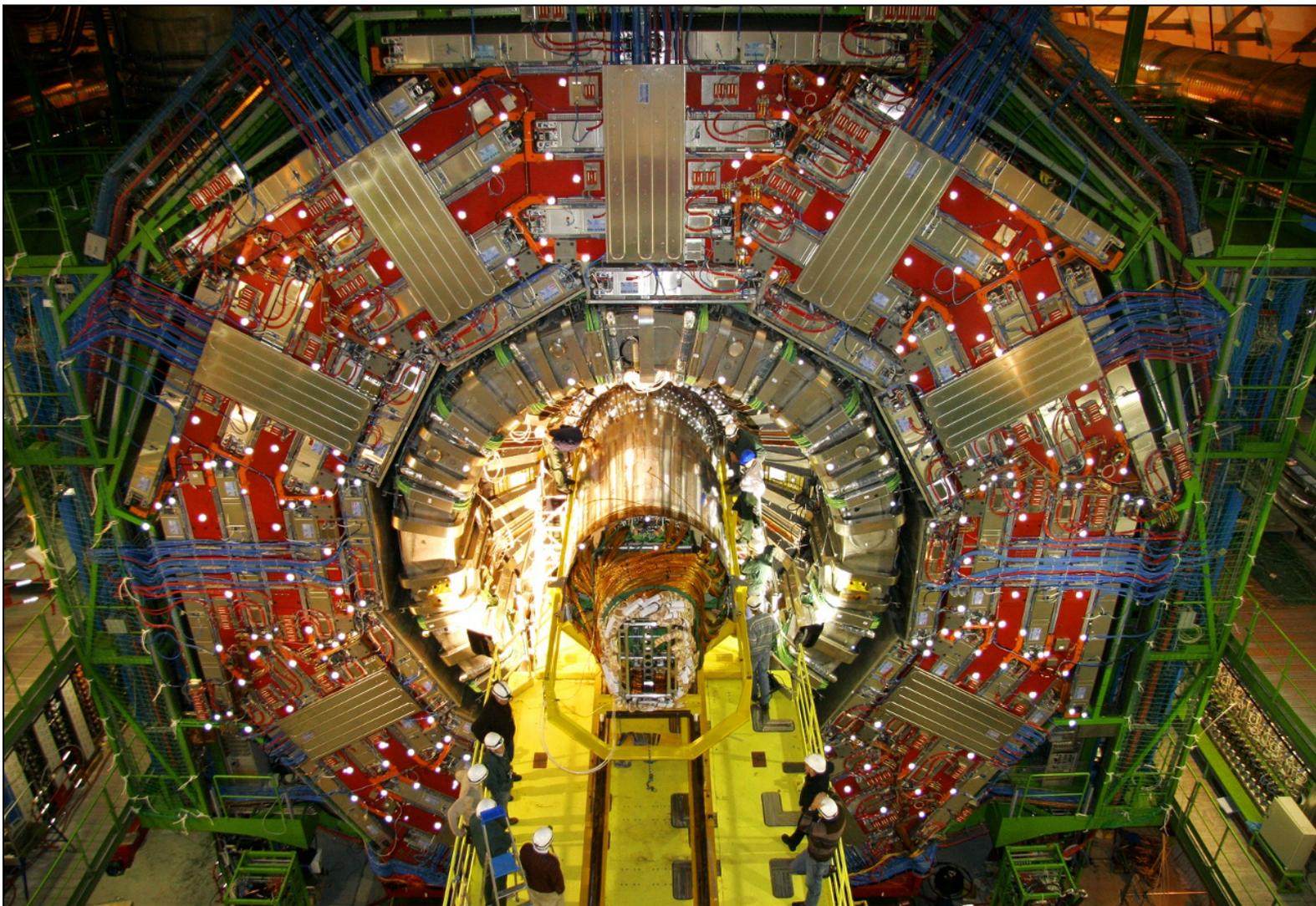
- Devono funzionare per piu' di 10 anni in un ambiente ostile senza o con poco intervento umano

## Gigantesche macchine fotografiche

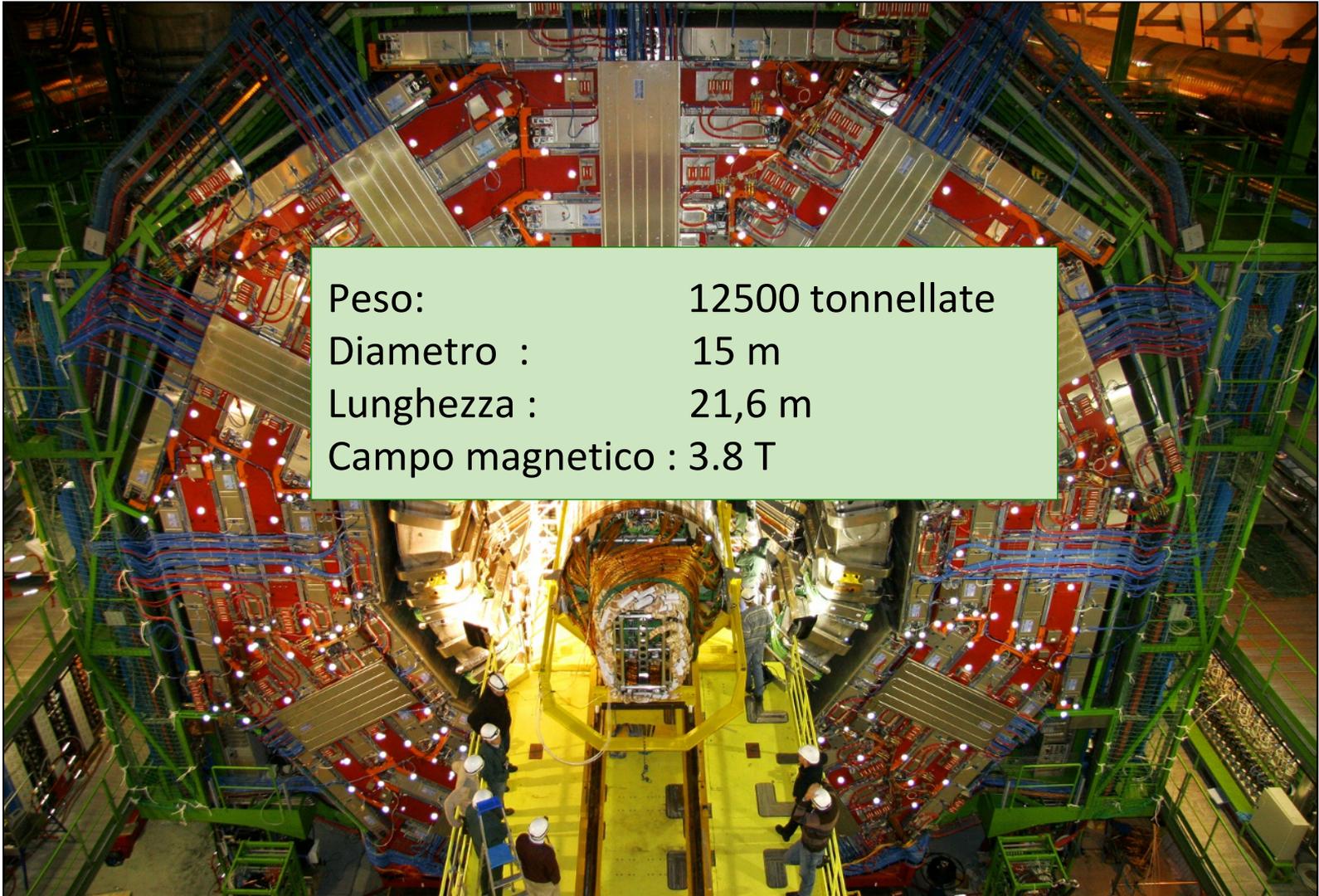
- Un rivelatore tipico di LHC ha 100 milioni di canali
  - Una videocamera ha  $\sim 6$  milioni di pixels
- Scatta una "fotografia" in 3 dimensioni **40 milioni di volte al secondo**



# Il rivelatore CMS



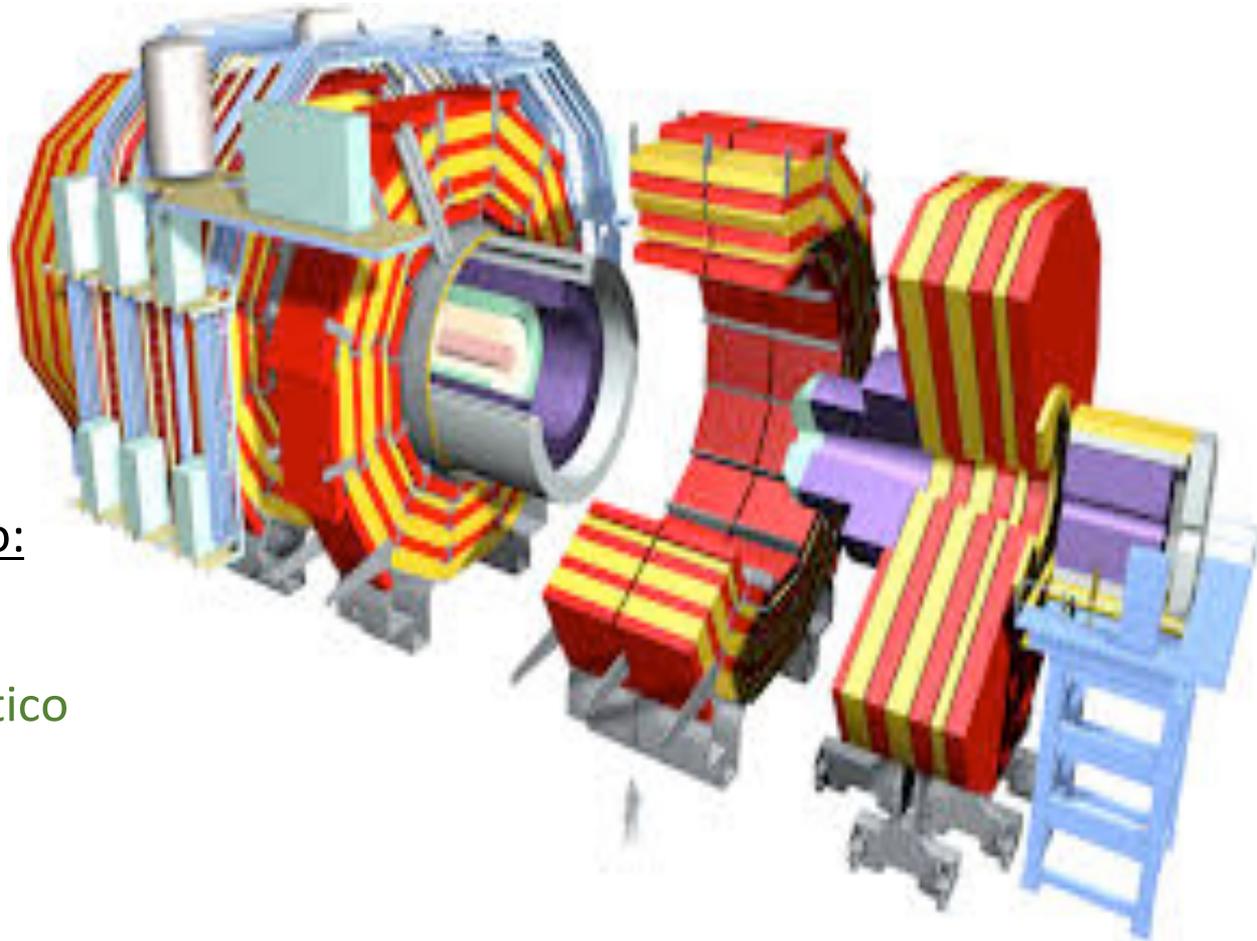
# Il rivelatore CMS



Peso:	12500 tonnellate
Diametro :	15 m
Lunghezza :	21,6 m
Campo magnetico :	3.8 T

# Struttura tipica di un rivelatore a LHC

Struttura “a cipolla”: tanti strati cilindrici  
Ciascuno con un suo ruolo!



Dall'interno verso l'esterno:

Tracciatore

Calorimetro elettromagnetico

Calorimetro adronico

Campo magnetico

Rivelatore di muoni

# CMS: Tracciatore

Cuore del rivelatore

Permette di ricostruire  
la traiettoria di particelle cariche

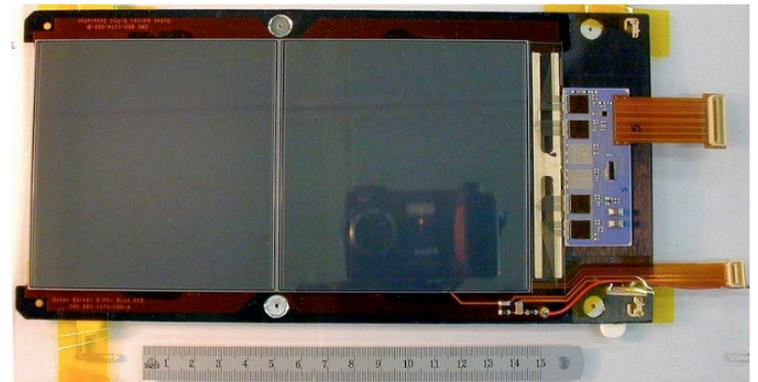
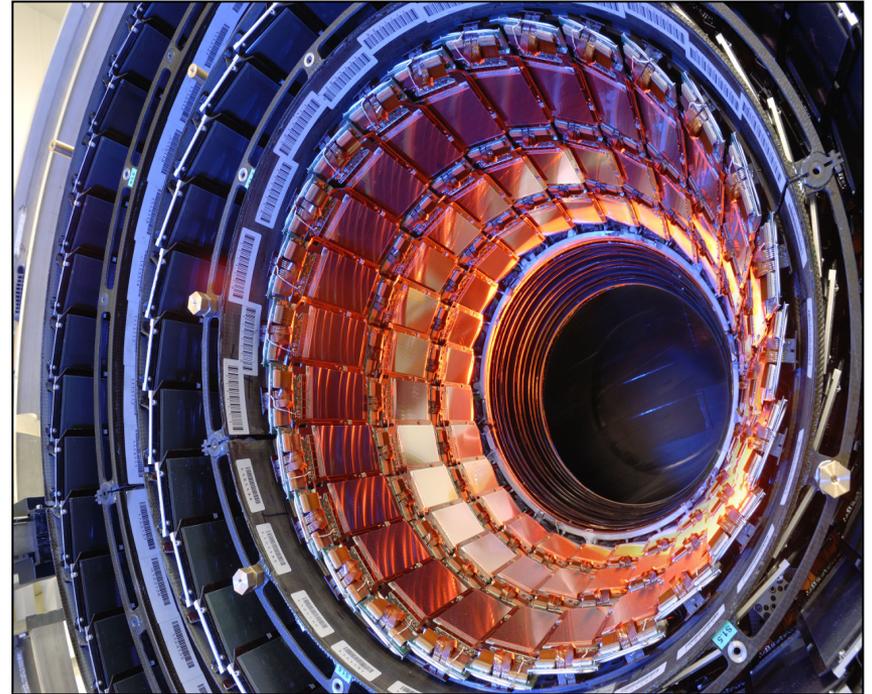
- impulso e carica

e il punto dove avviene l'interazione

Interamente a Silicio ( $\sim 200\text{m}^2$ )

- “pixel” ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  
nella parte interna
- “strip” ( $80 \mu\text{m} \times 10\text{-}25 \text{ cm}$ )  
nella parte esterna

75 milioni di canali di lettura



# CMS: Calorimetro elettromagnetico ECAL

Per assorbire elettroni e fotoni e misurarne l'energia

I fotoni interagiscono con ECAL producendo coppie  $e^+e^-$ , che a loro volta producono fotoni e così via

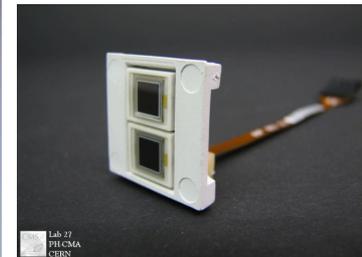
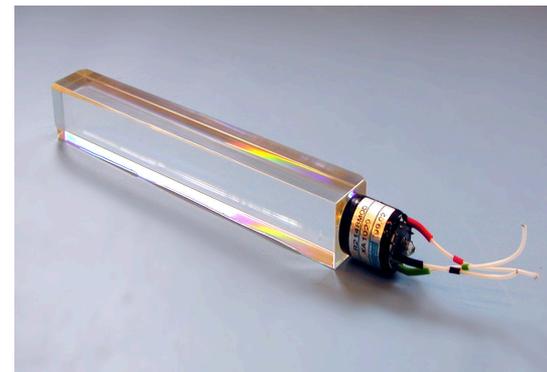
- *Sciame elettromagnetico*

Le particelle cariche originano luce di scintillazione

Calorimetro a cristalli di  $PbWO_4$

- Composti per oltre 80% di metallo, eppure trasparenti!

Circa 78000 canali



# CMS: Calorimetro adronico

Per assorbire adroni ( $\pi$ ,  $K$ , ...) e misurarne l'energia

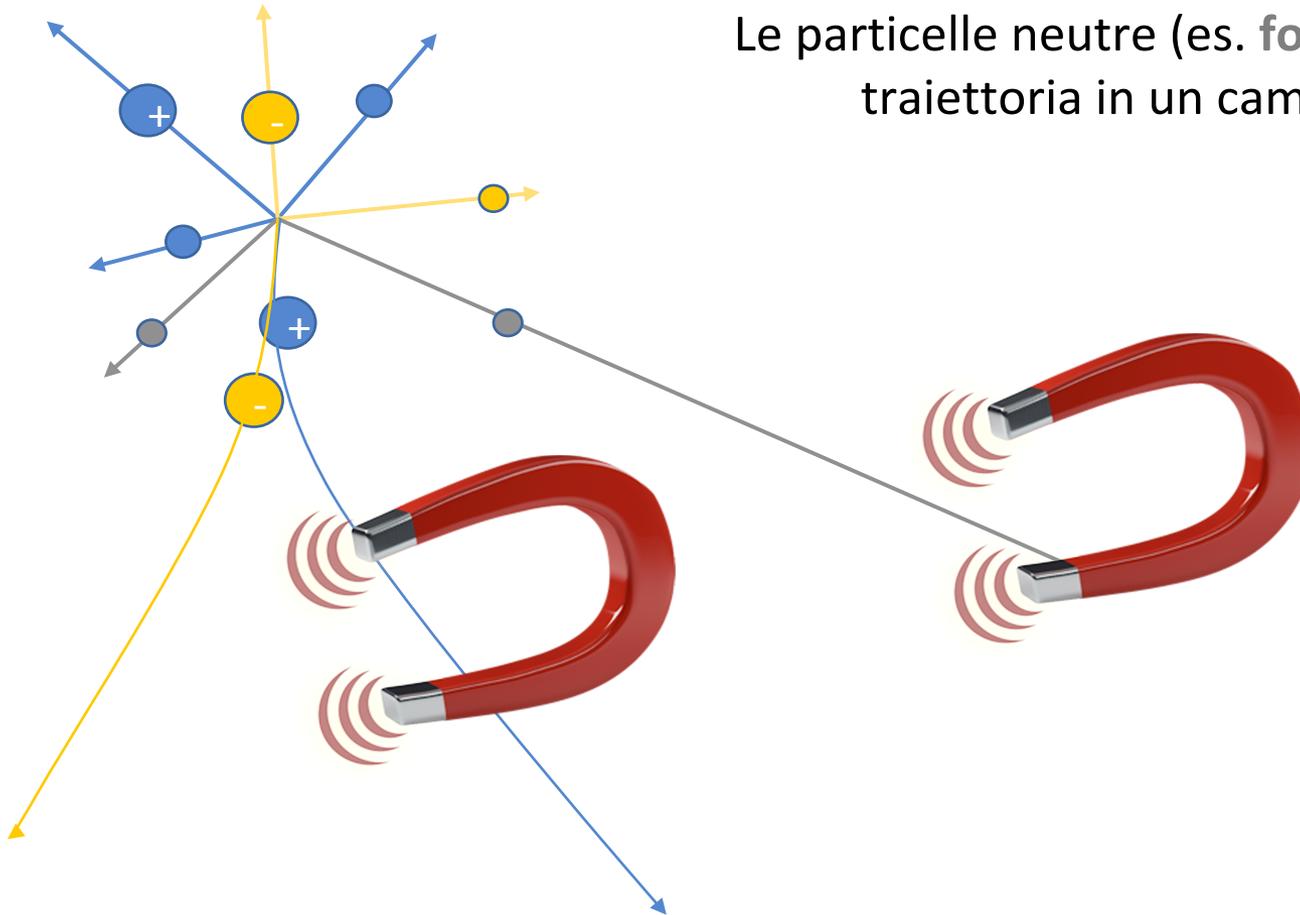
Gli adroni interagiscono con i nuclei del materiale che attraversano e originano sciame più complessi di quelli elettromagnetici

Calorimetro a campionamento: strati di ottone che sviluppa e assorbe lo sciame (*assorbitore*) alternati a strati di scintillatore plastico per rivelare e misurare energia



# Il campo magnetico

Le particelle neutre (es. **fotoni**) non cambiano traiettoria in un campo magnetico



Le particelle cariche curvano in un campo magnetico:

- il verso della deflessione dipende dalla carica
- il raggio di curvatura è inversamente proporzionale all'impulso

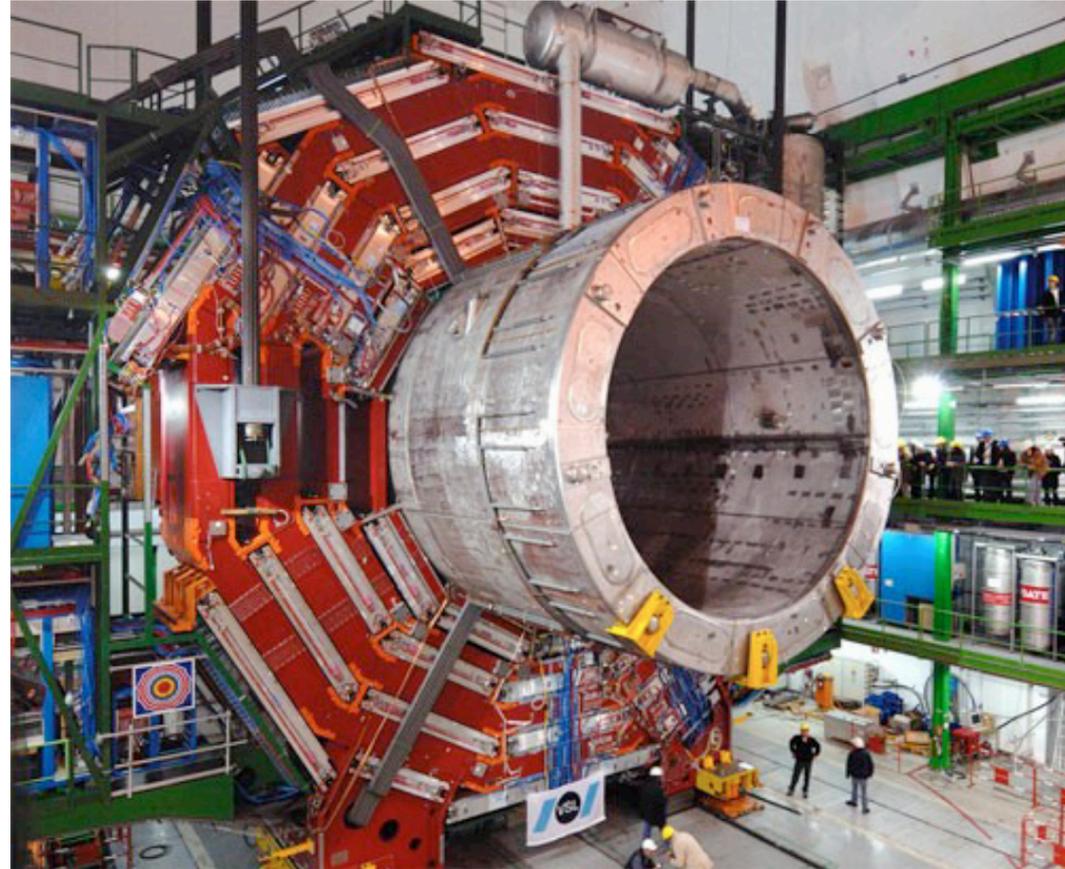
# CMS: Magnete

Permette di identificare la carica e misurare la quantità di moto delle particelle cariche

**NB: NON e' un rivelatore!**

Campo magnetico da 3.8T  
(~76000 volte il B terrestre!)  
generato da un solenoide  
superconduttore

Il ferro presente nelle camere  
a muoni permette di avere un  
campo di ~2T anche nella parte  
esterna al solenoide



# CMS: Camere a muoni

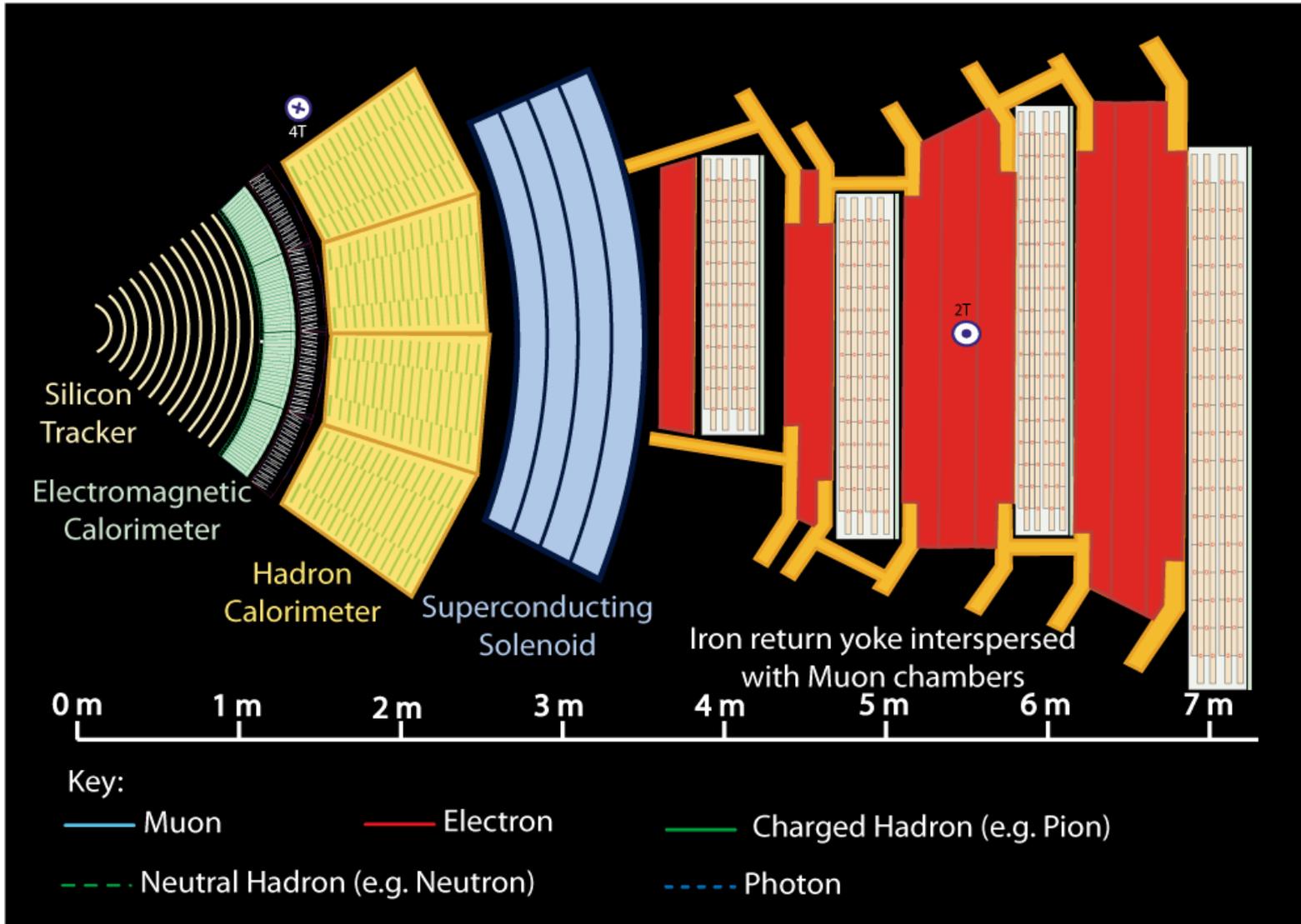
I muoni sono le uniche particelle (assieme ai neutrini) ad attraversare interamente CMS  
Le camere a muoni sono i rivelatori piu' esterni

Permettono di identificare i muoni (unici a raggiungerle!) e misurarne l'impulso

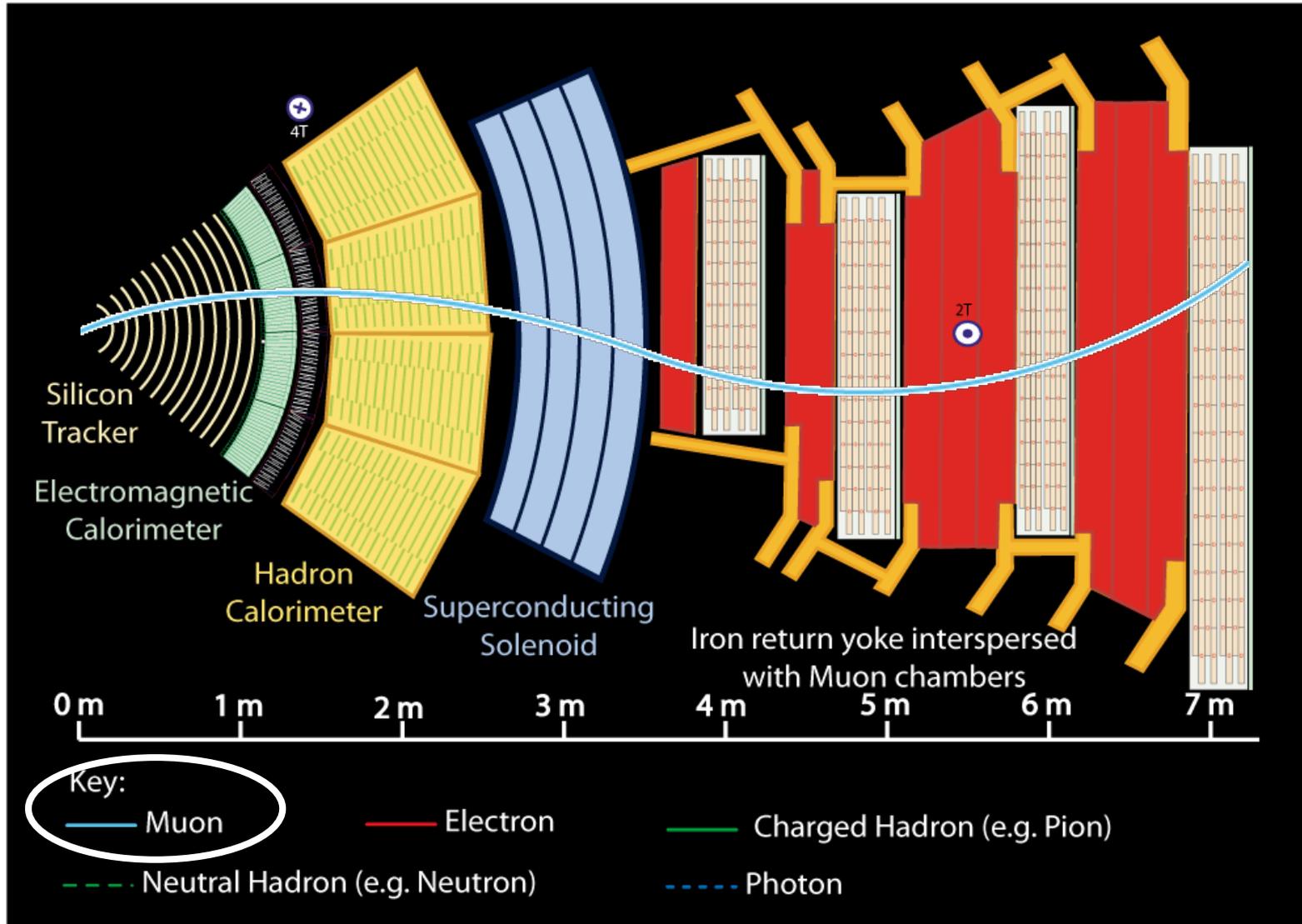
Area molto estesa:  
il silicio sarebbe troppo costoso!  
Utilizzano diverse tecnologie di rivelatori a gas:  
cathode strip chambers, drift tubes  
resistive plate chambers



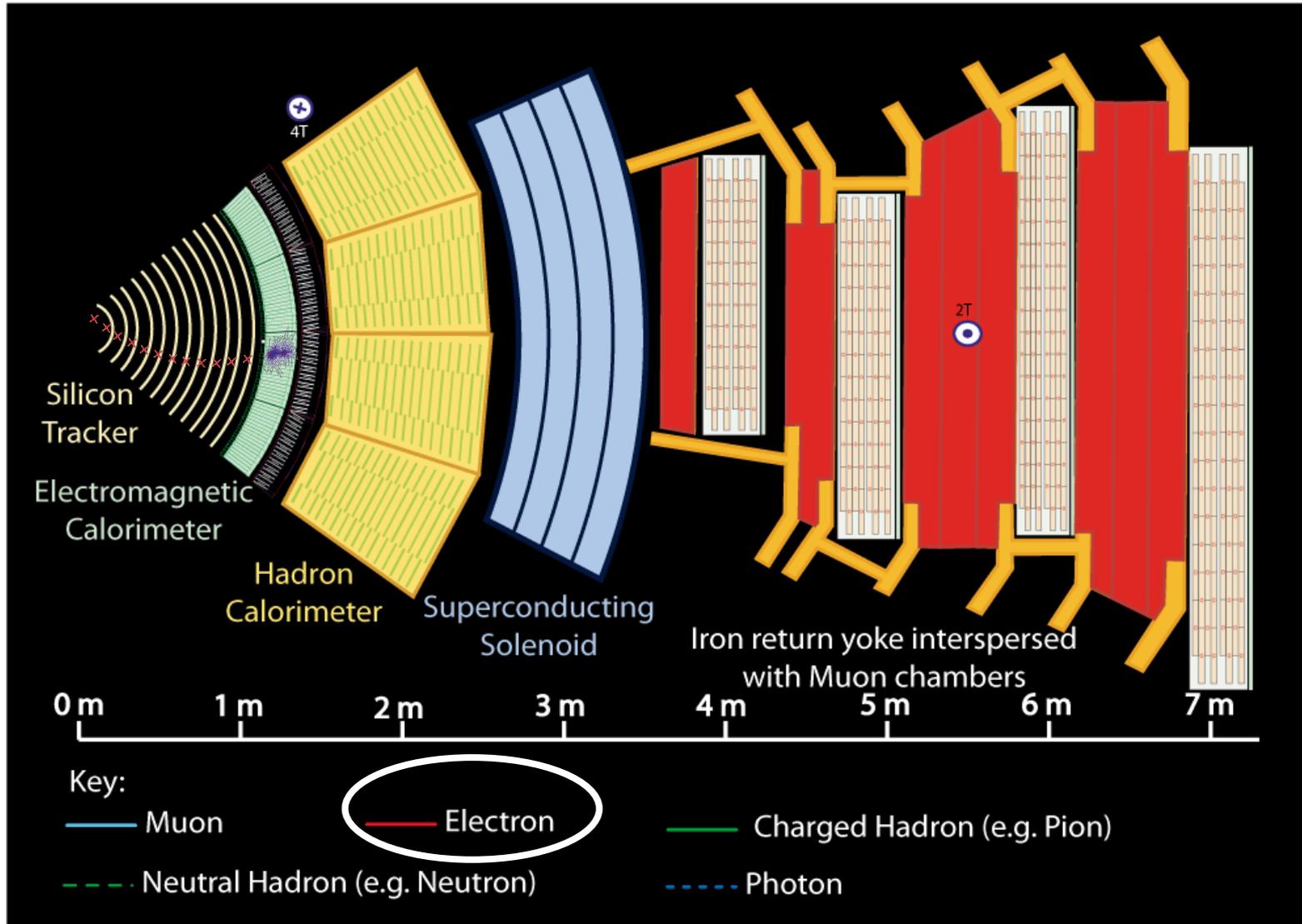
# Passaggio delle particelle nel rivelatore



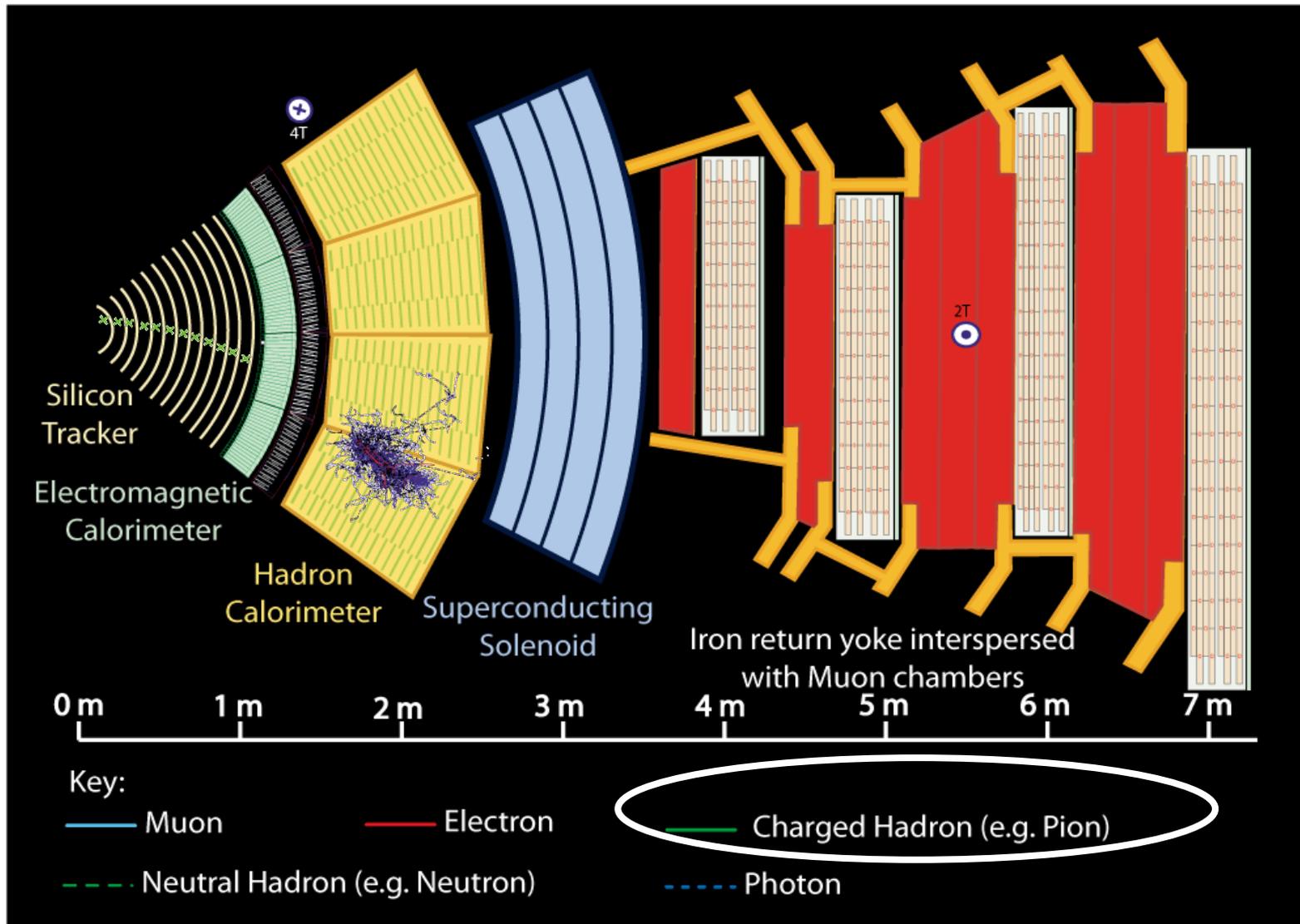
# Passaggio delle particelle nel rivelatore



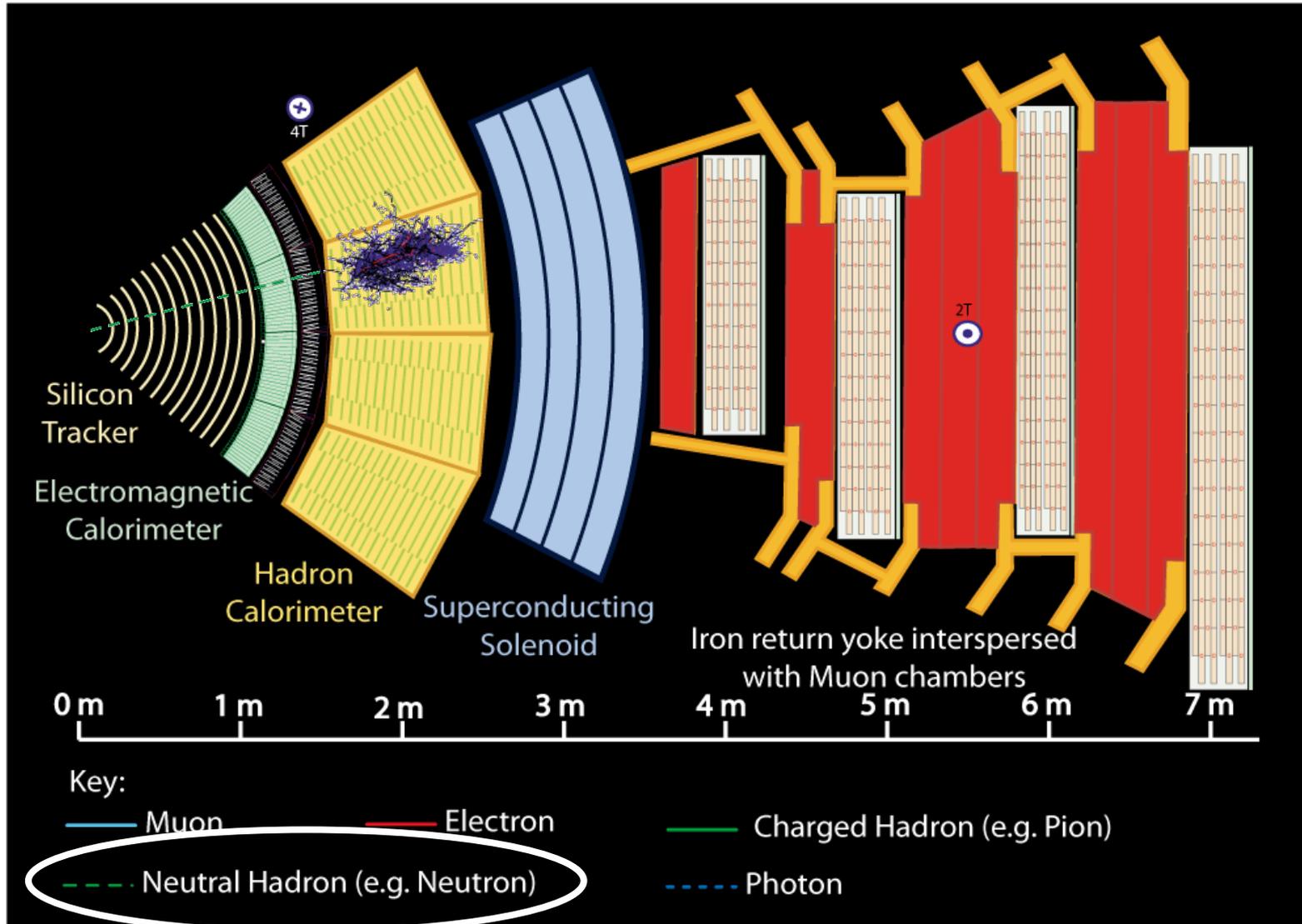
# Passaggio delle particelle nel rivelatore



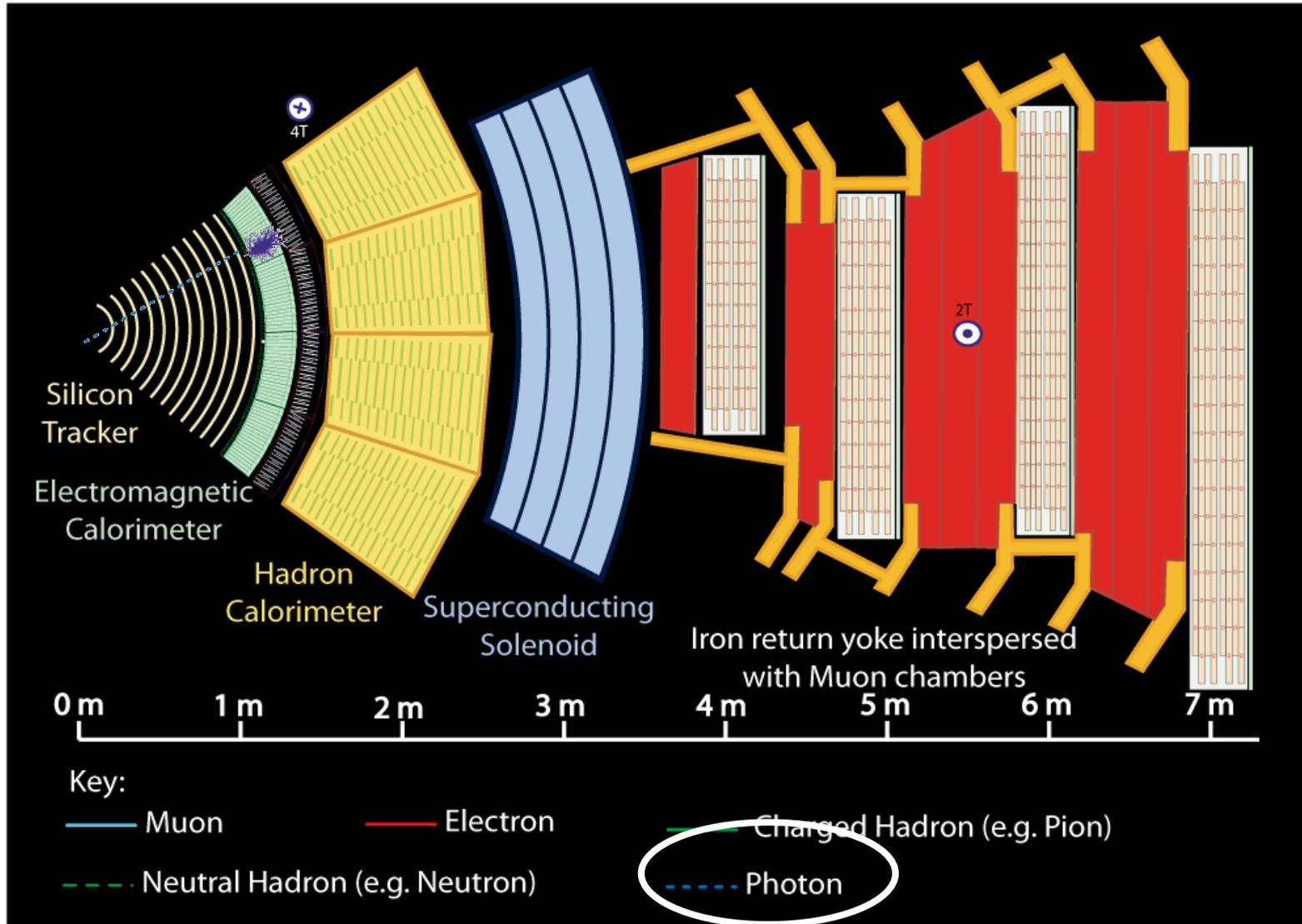
# Passaggio delle particelle nel rivelatore



# Passaggio delle particelle nel rivelatore



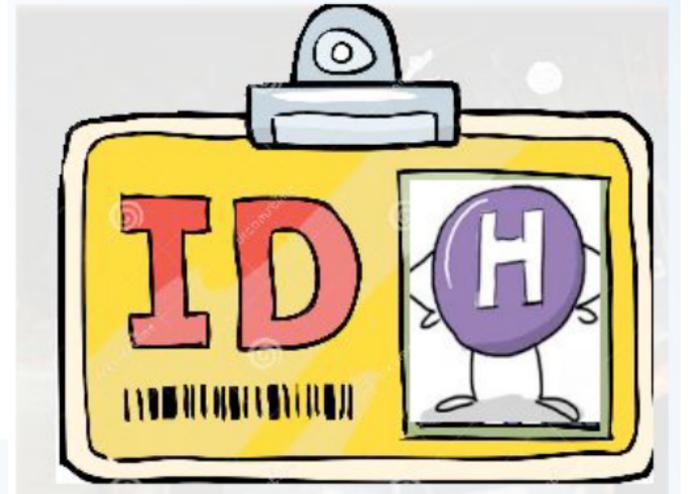
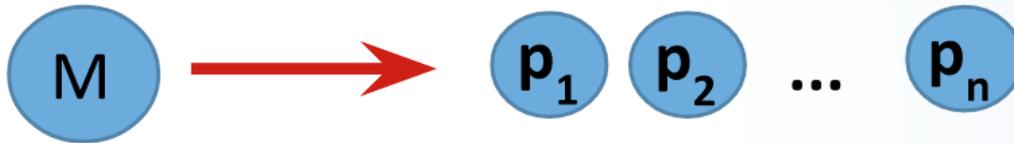
# Passaggio delle particelle nel rivelatore



# Identikit di una particella

Le particelle vengono identificate da proprietà come massa e carica

Le collisioni a LHC producono particelle instabili che decadono in altre che interagiscono come abbiamo visto con il rivelatore



**Fotografiamo i prodotti!**

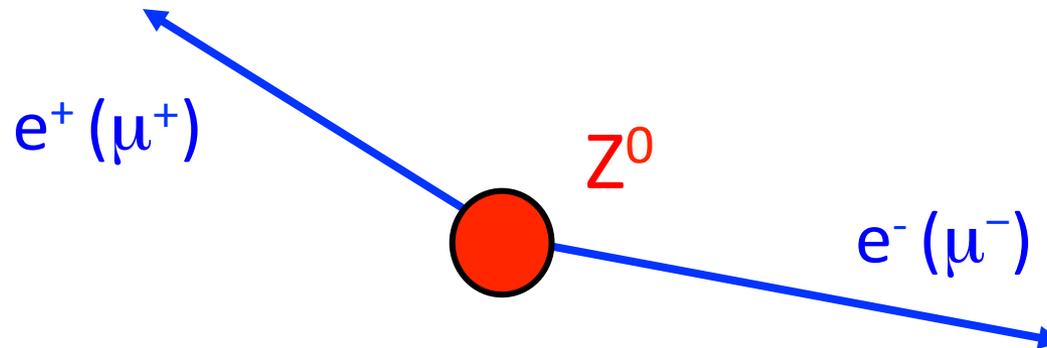
Per ricostruire le proprietà della particella madre dobbiamo misurare  
energia,  
impulso,  
vertice di produzione,  
massa e carica  
dei prodotti di decadimento

# Ricostruzione del bosone Z

$M_Z \approx 91 \text{ GeV}$

Vita media  $\tau \approx 3 \times 10^{-25} \text{ s}$  (decadimento immediato)

Consideriamo SOLO i decadimenti in coppie  $e^\pm$  e  $\mu^\pm$



Tutte le particelle dello stato finale sono rivelate!

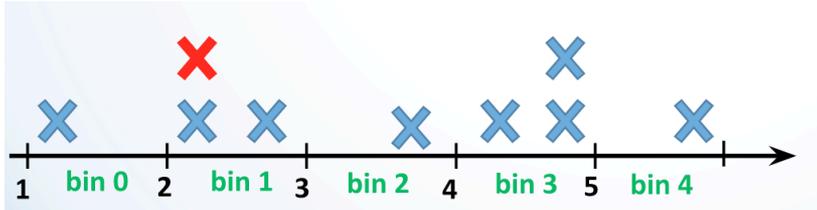
Ricostruiamo la massa del bosone Z usando la loro **energia** e l'**angolo tra le due direzioni**:

$$m_Z = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos\theta)}$$



# Misura della massa del bosone Z

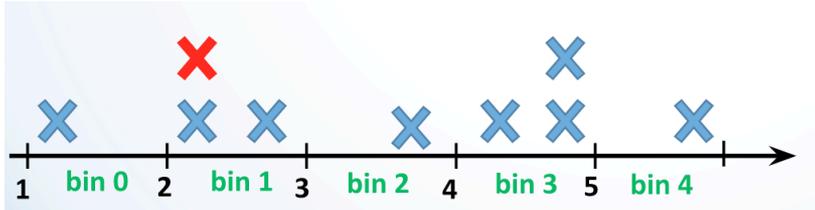
Per ogni coppia trovata calcoliamo la massa e la mettiamo in un istogramma



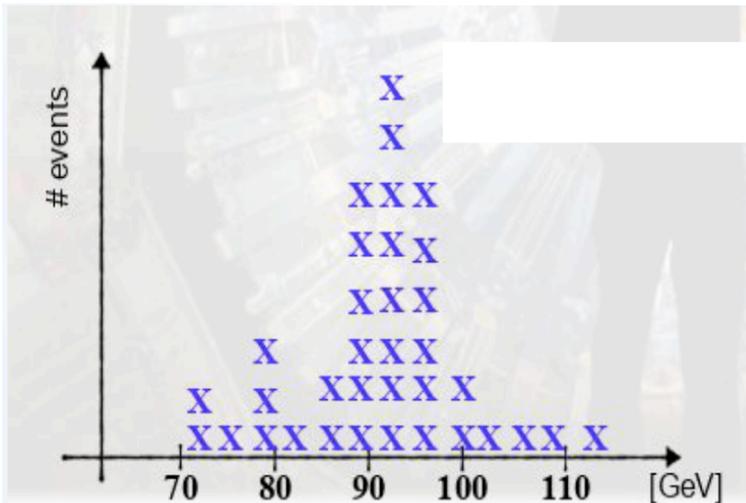
Se la misura **X** e' compresa tra 2 e 3  
la mettiamo nel secondo intervallo

# Misura della massa del bosone Z

Per ogni coppia trovata calcoliamo la massa e la mettiamo in un istogramma



Se la misura **X** e' compresa tra 2 e 3 la mettiamo nel secondo intervallo

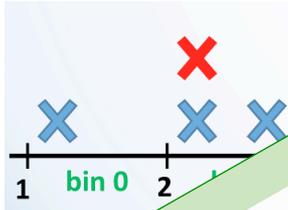


Le misure dovrebbero accumularsi intorno al valore della massa del bosone Z

Se l'eccesso e' significativo avremo "scoperto" in bosone Z

# Misura della massa del bosone Z

Per ogni coppia trovata calcoliamo l'energia in un istogramma



compresa tra 2 e 3  
secondo intervallo

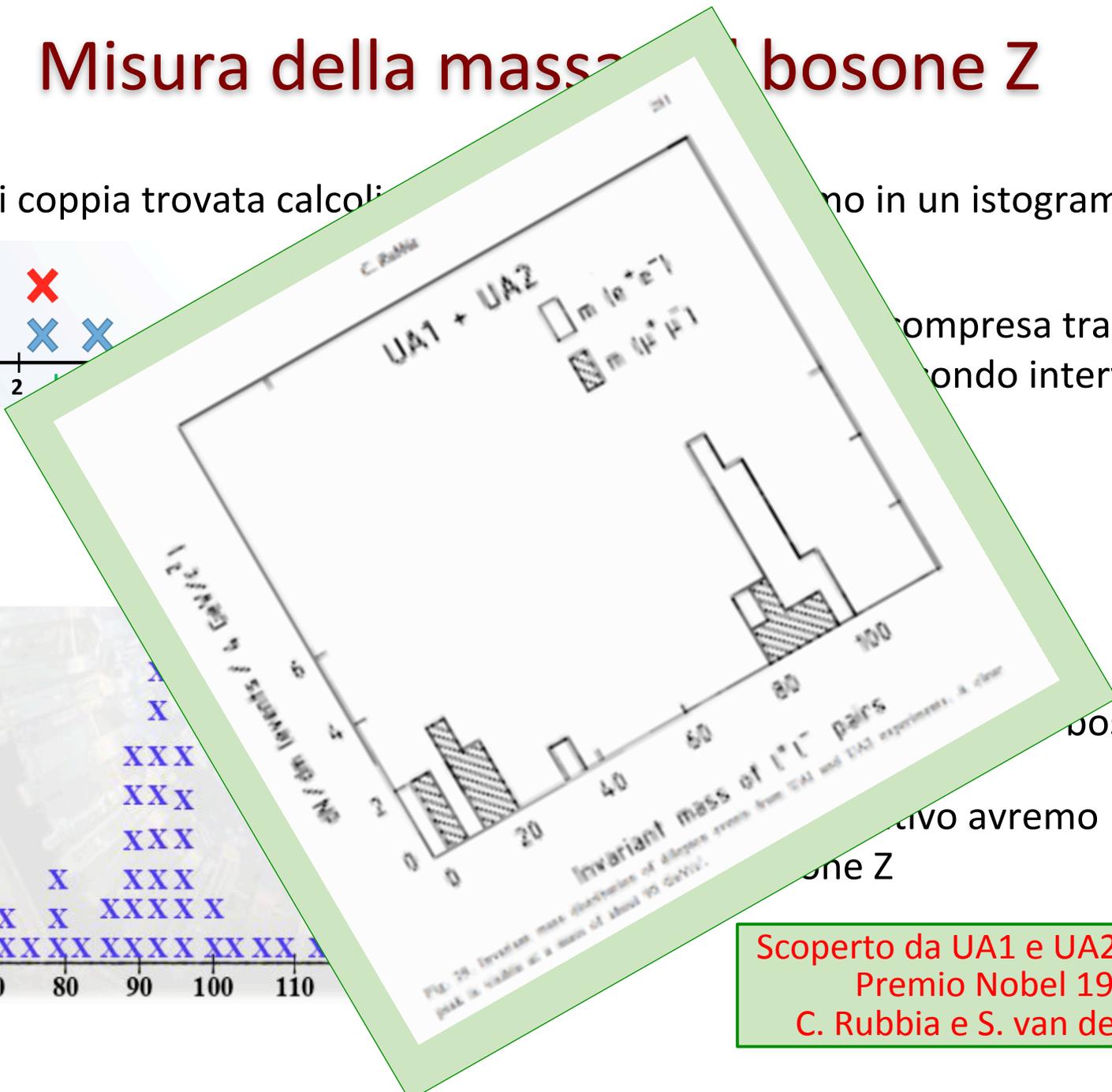
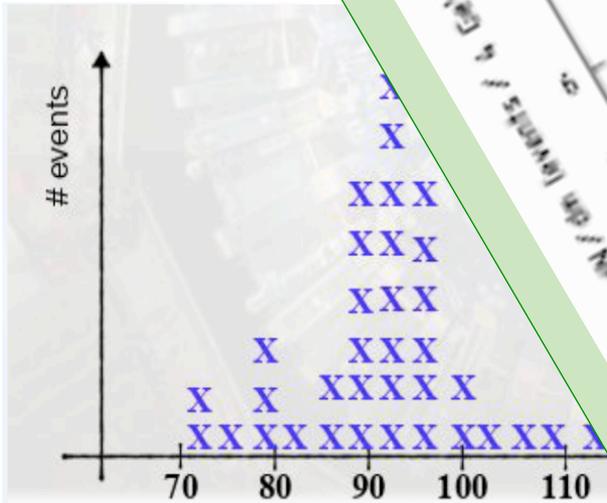


Fig. 26 Invariant mass distribution of dilepton pairs from UA1 and UA2 experiments. A clear peak is visible at a mass of about 90 GeV/c<sup>2</sup>.

bosone Z

avremo

one Z

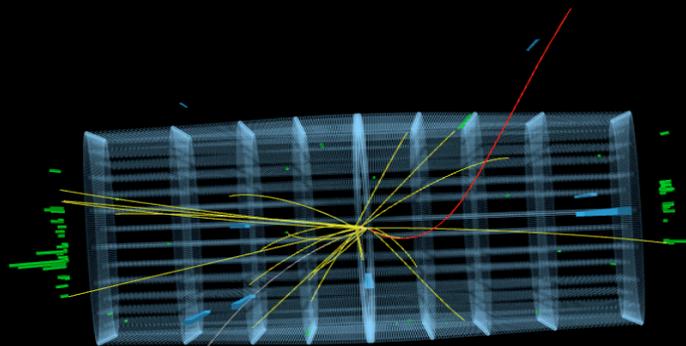
Scoperto da UA1 e UA2 nel 1983  
Premio Nobel 1984,  
C. Rubbia e S. van der Meer



Candidato

$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

Muoni in rosso



Particelle carica +  
curva in senso orario

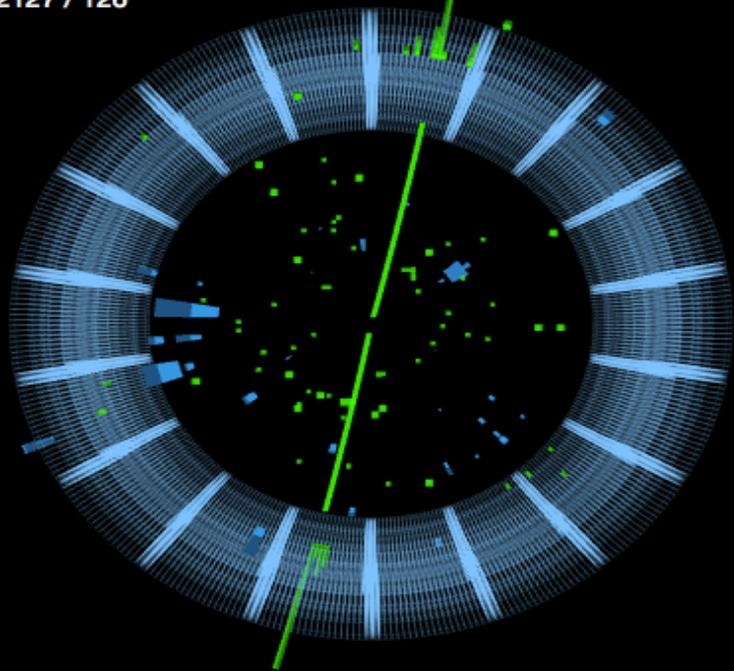
Particelle carica -  
curva in senso antiorario



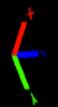
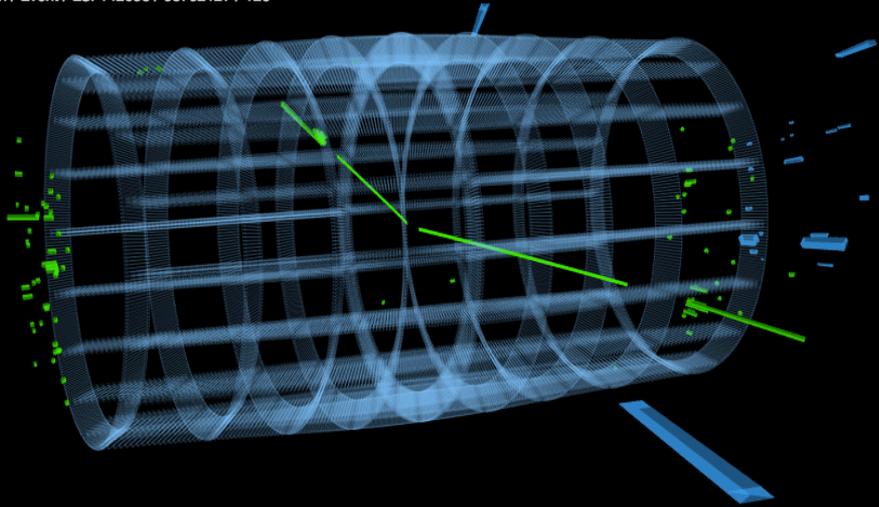
CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2010-Jul-31 02:58:59.163022 GMT  
Run / Event / LS: 142038 / 68762127 / 126

Candidato  
 $Z \rightarrow e^+e^-$

Elettroni  
in verde



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2010-Jul-31 02:58:59.163022 GMT  
Run / Event / LS: 142038 / 68762127 / 126

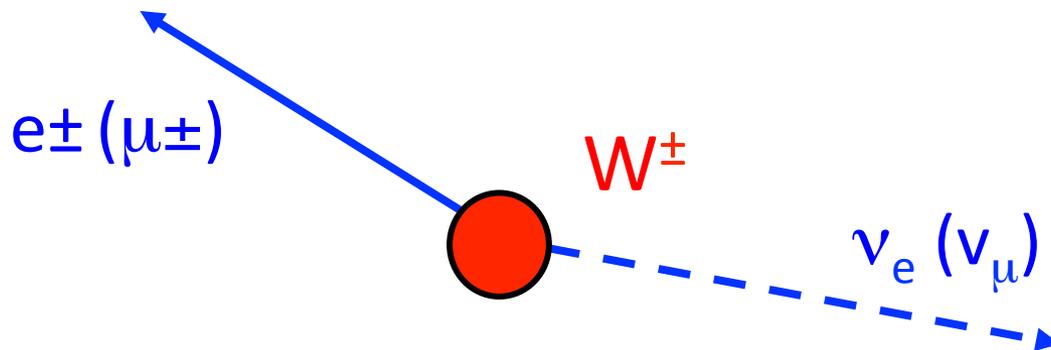


# Ricostruzione del bosone W

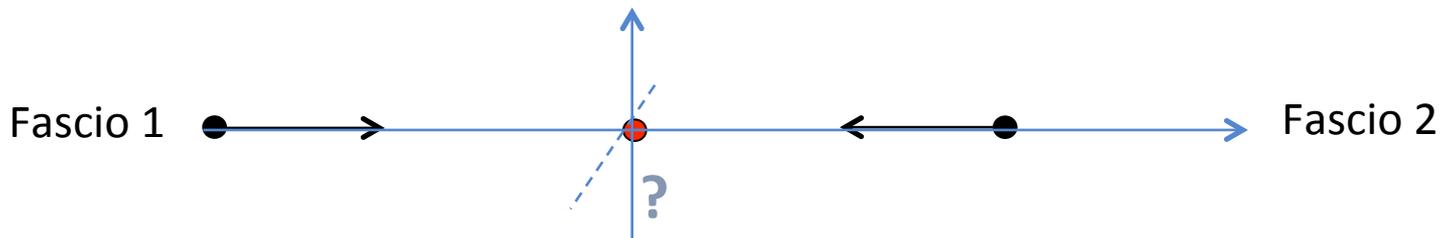
$M_W \approx 80 \text{ GeV}$

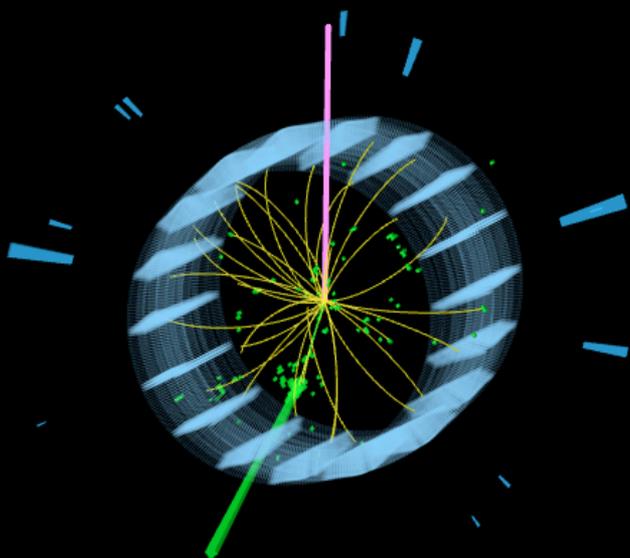
Vita media  $\tau \approx 2 \times 10^{-25} \text{ s}$  (decadimento immediato)

Consideriamo SOLO i decadimenti in coppie  $e^\pm \nu$ ,  $\mu^\pm \nu$



Il neutrino non è rivelato! Possiamo dedurre la sua presenza da un “non bilanciamento” energetico nel piano perpendicolare alla direzione dei fasci

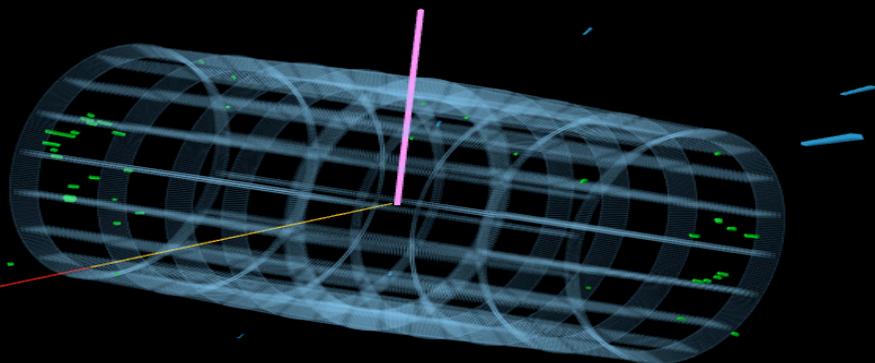




Candidato

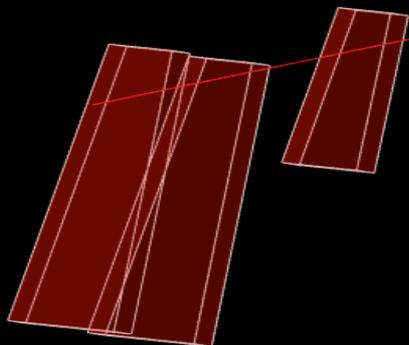
$W \rightarrow e\nu$

Energia mancante in rosa



Candidato

$W \rightarrow \mu\nu$



# Ricostruzione del bosone di Higgs

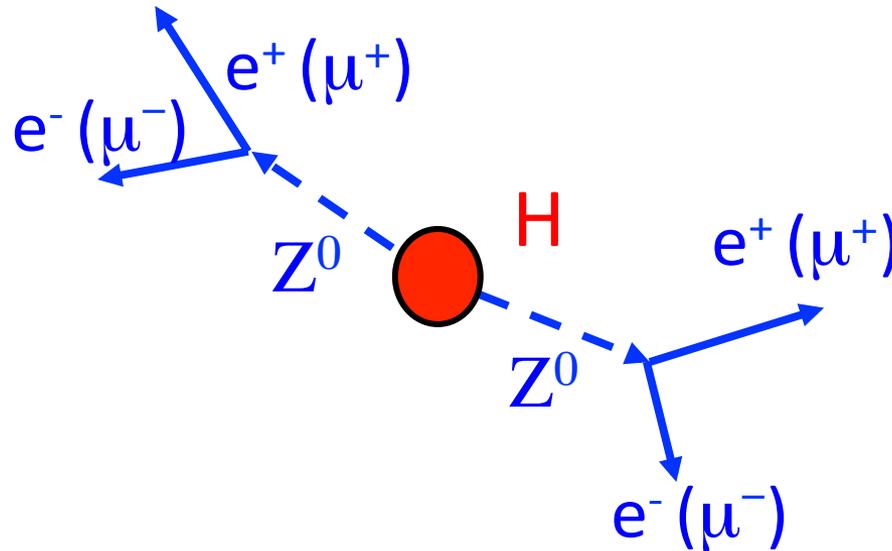


$M_H \approx 125 \text{ GeV}$

Vita media  $\tau \approx 2 \times 10^{-21} \text{ s}$  (decadimento immediato)

Consideriamo SOLO i decadimenti in coppie ZZ:

Nello stato finale  $4e, 4\mu, 2e+2\mu$  con cariche a due a due opposte



# Ricostruzione del bosone di Higgs



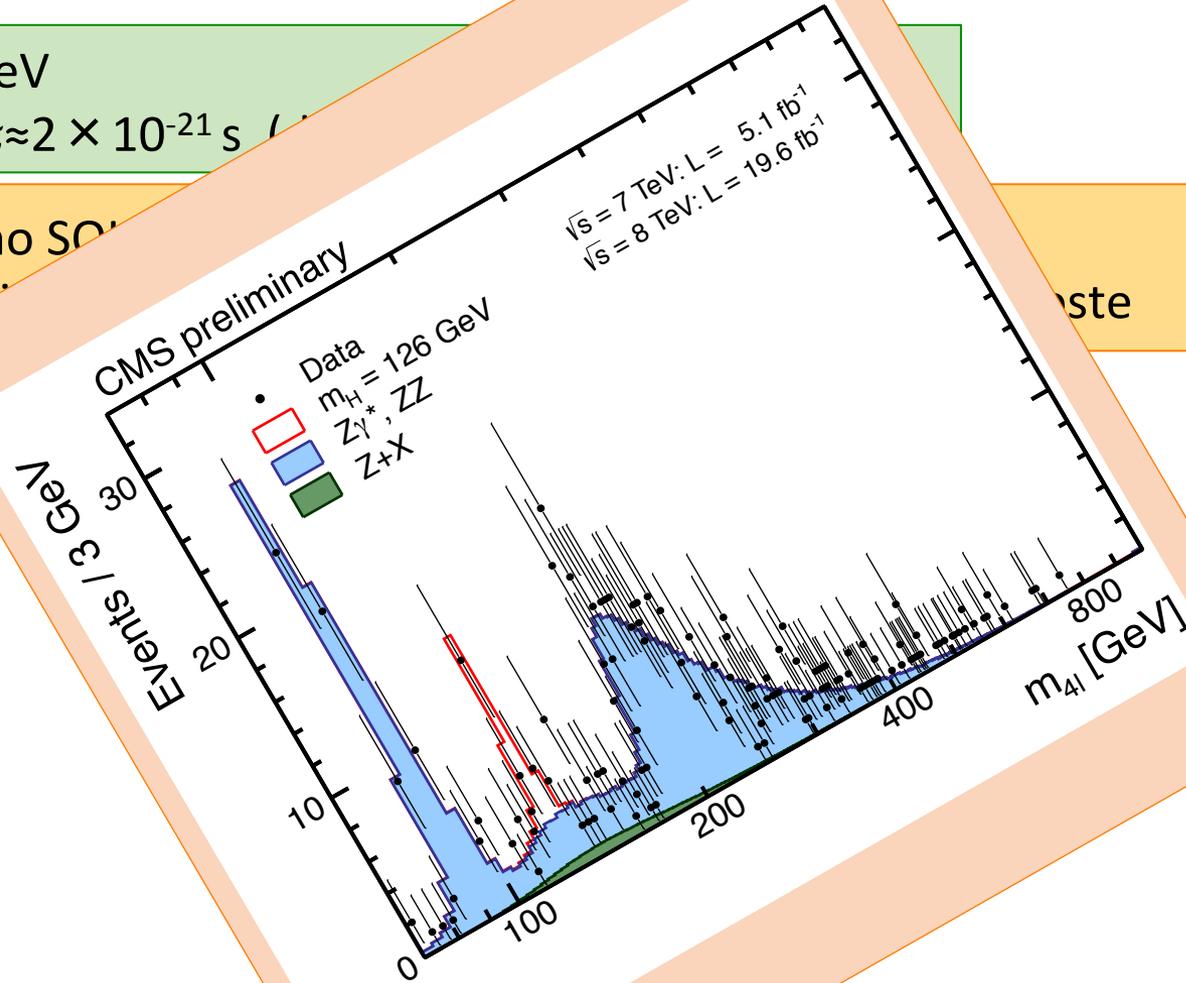
$M_H \approx 125 \text{ GeV}$

Vita media  $\tau \approx 2 \times 10^{-21} \text{ s}$

Consideriamo SO(4)

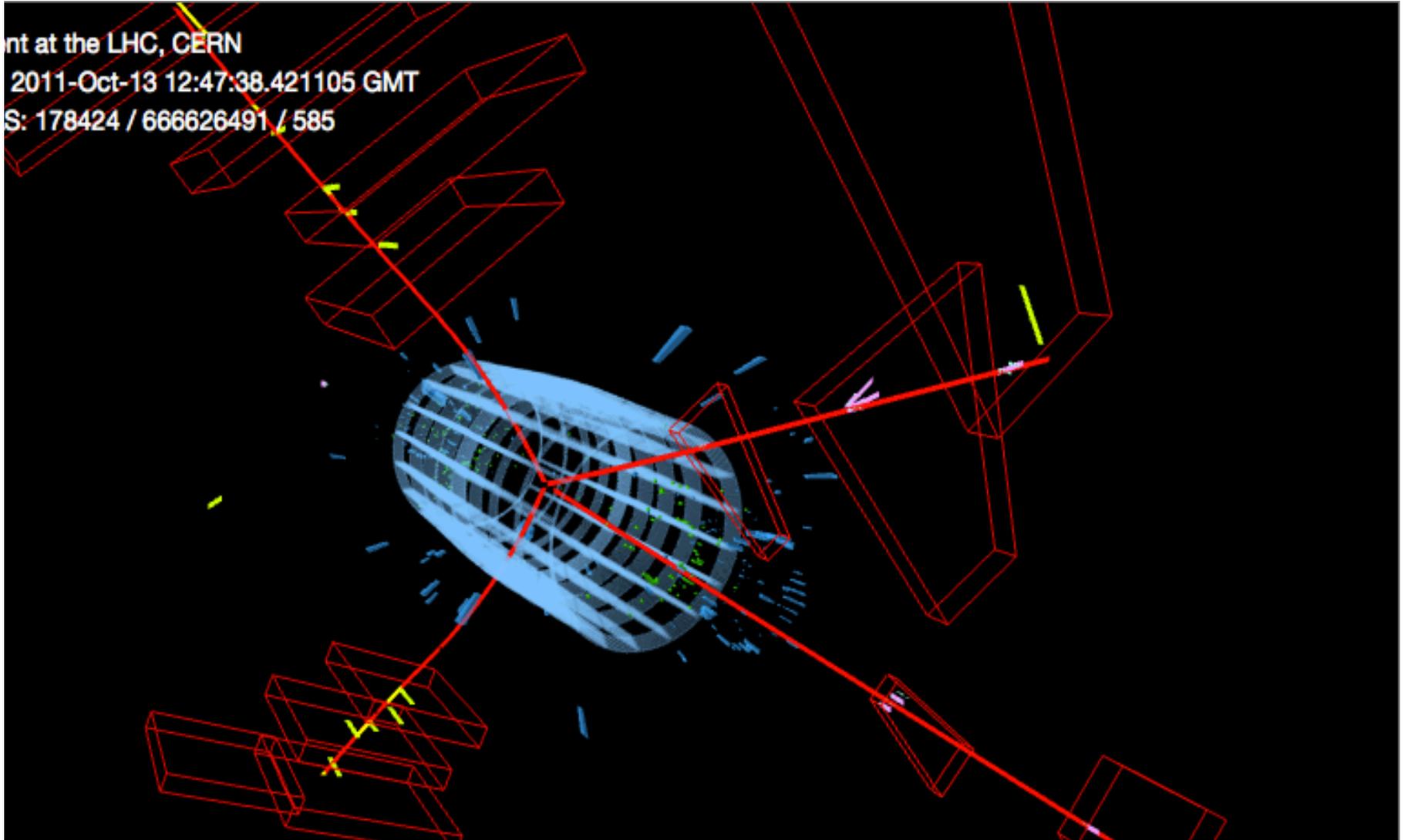
Nello stato f

ste



Scoperto da ATLAS e CMS nel 2012  
Premio Nobel 2013,  
P. Higgs e F. Englert

# Higgs?



E ora tocca a voi

