



# L'esperimento CMS al CERN

Davide Bruschini<sup>1</sup>

1: Scuola Normale Superiore e INFN Sezione di Pisa

# L'esperimento CMS

- Costituito da vari detector disposti a strati disposti intorno alle collisioni pp di LHC
- Ogni detector rivela un determinato di particelle:
  - Le particelle interagiscono con il materiale del rivelatore
  - Produzione di un segnale elettrico, memorizzato e successivamente interpretato
- L'insieme dei segnali elettrici viene poi "ricostruito" e si risale alla fisica dell'evento

## CMS DETECTOR

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

## STEEL RETURN YOKE

12,500 tonnes

## SILICON TRACKERS

Pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ )  $\sim 1.9 \text{ m}^2 \sim 124\text{M}$  channels  
Microstrips ( $80\text{--}180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200 \text{ m}^2 \sim 9.6\text{M}$  channels

## SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000 \text{ A}$

## MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 540 Cathode Strip, 576 Resistive Plate Chambers

## PRESHOWER

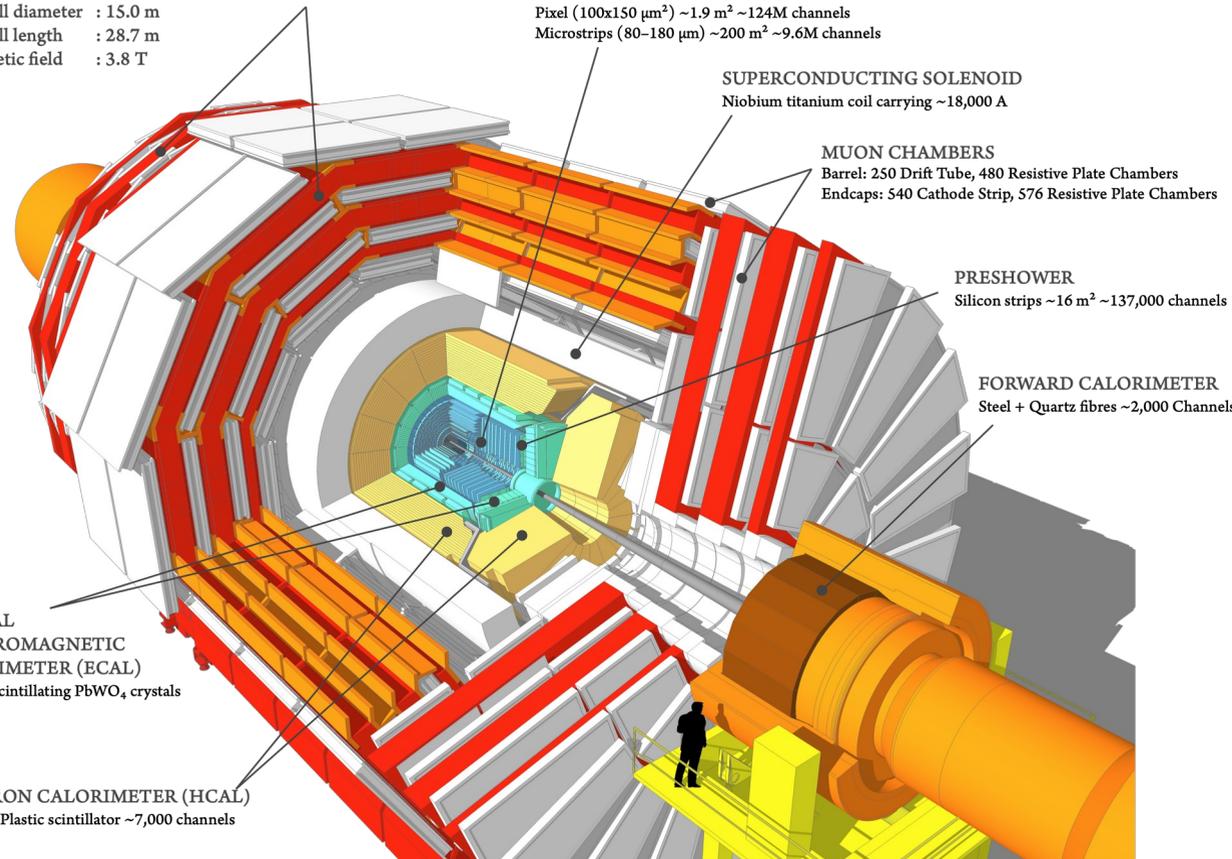
Silicon strips  $\sim 16 \text{ m}^2 \sim 137,000$  channels

## FORWARD CALORIMETER

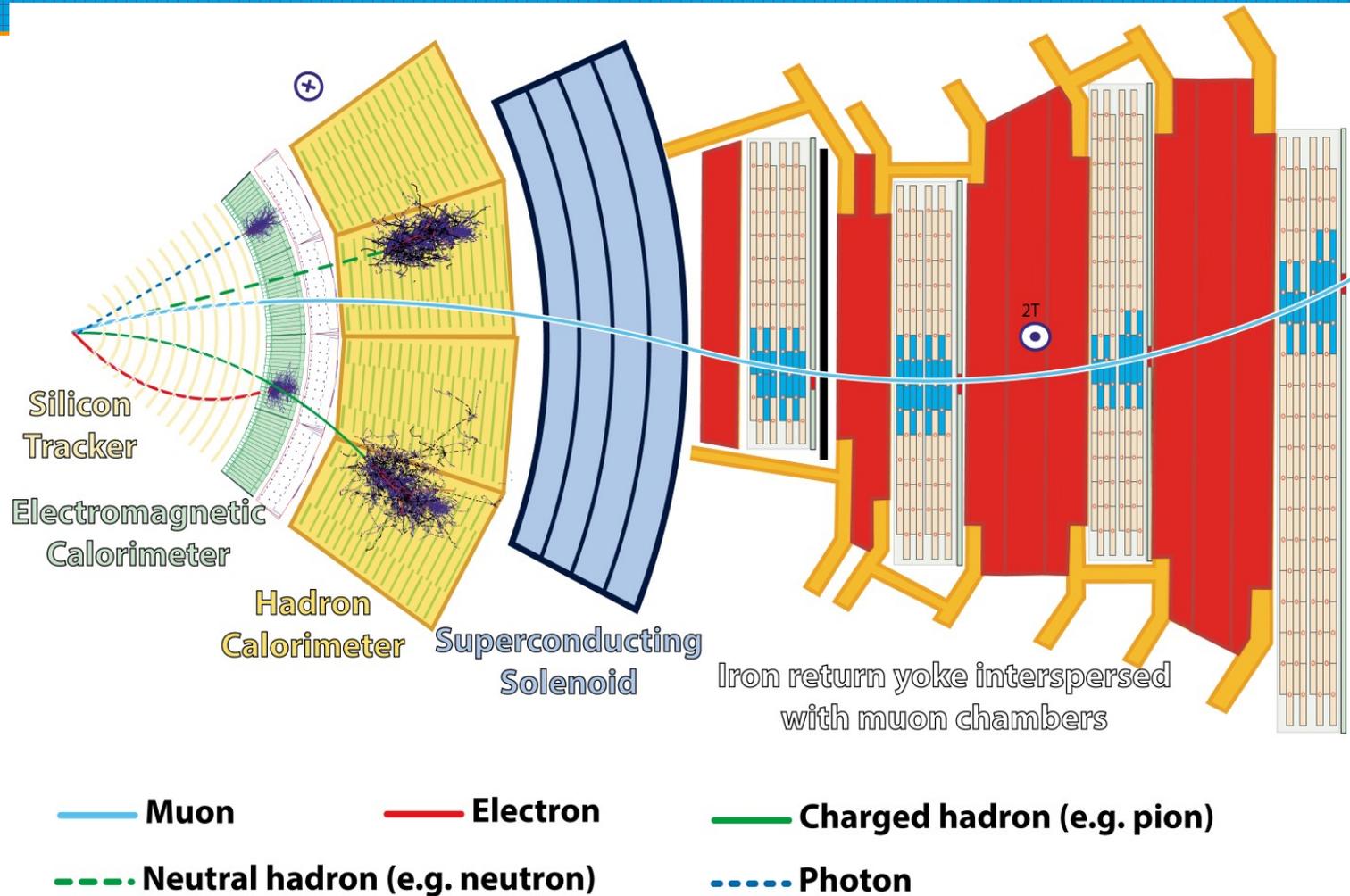
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)  
 $\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)  
Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels

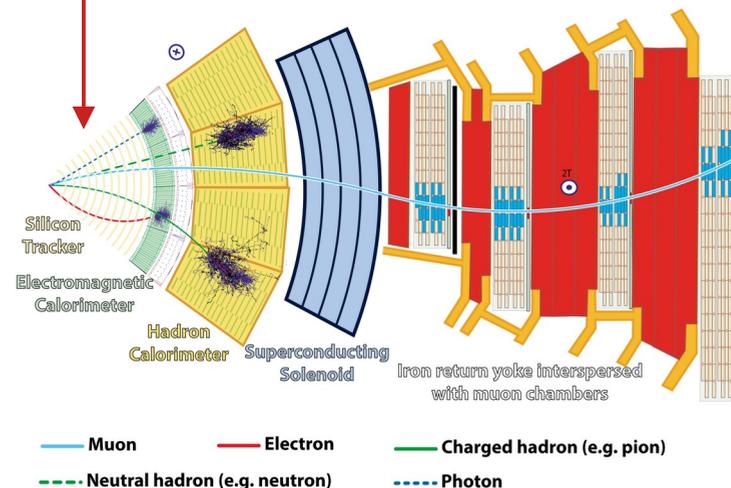
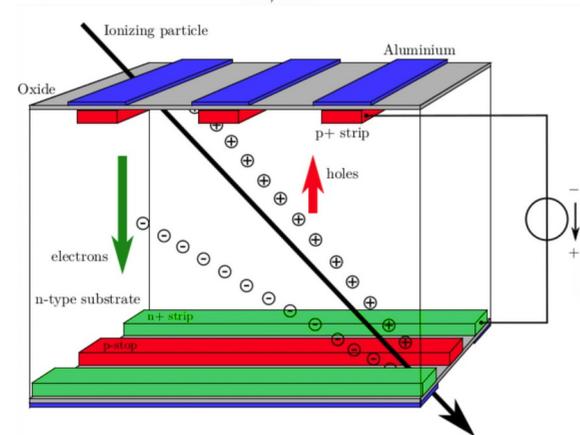
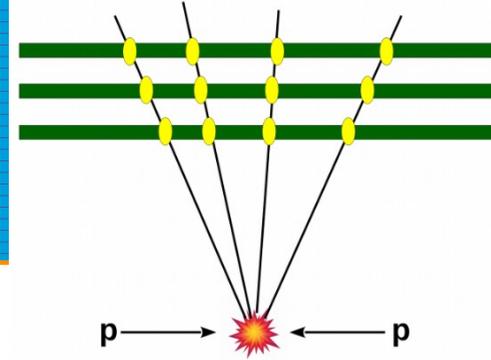
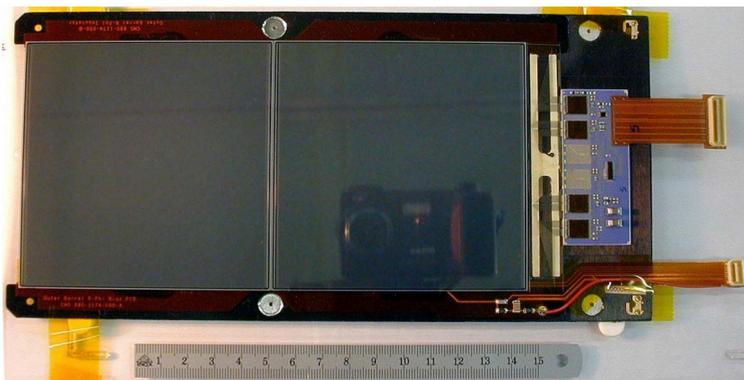


# Gli strati di CMS



# Il tracciatore

- Il detector più vicino al punto di interazione, composto interamente di silicio
- Permette di ricostruire le traiettorie delle particelle cariche
- Le particelle cariche interagiscono con gli atomi di silicio, strappando i loro elettroni:
  - Si produce un segnale elettrico che viene poi raccolto
- Il forte campo elettrico presente sposta gli elettroni generando quindi un segnale elettrico.
- CMS tracker:
  - 4 layer di pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ )
  - 10 layer di strip ( $5 \text{ cm} \times 100 \mu\text{m}$ )
  - 124 M di pixel, 10 M di strip



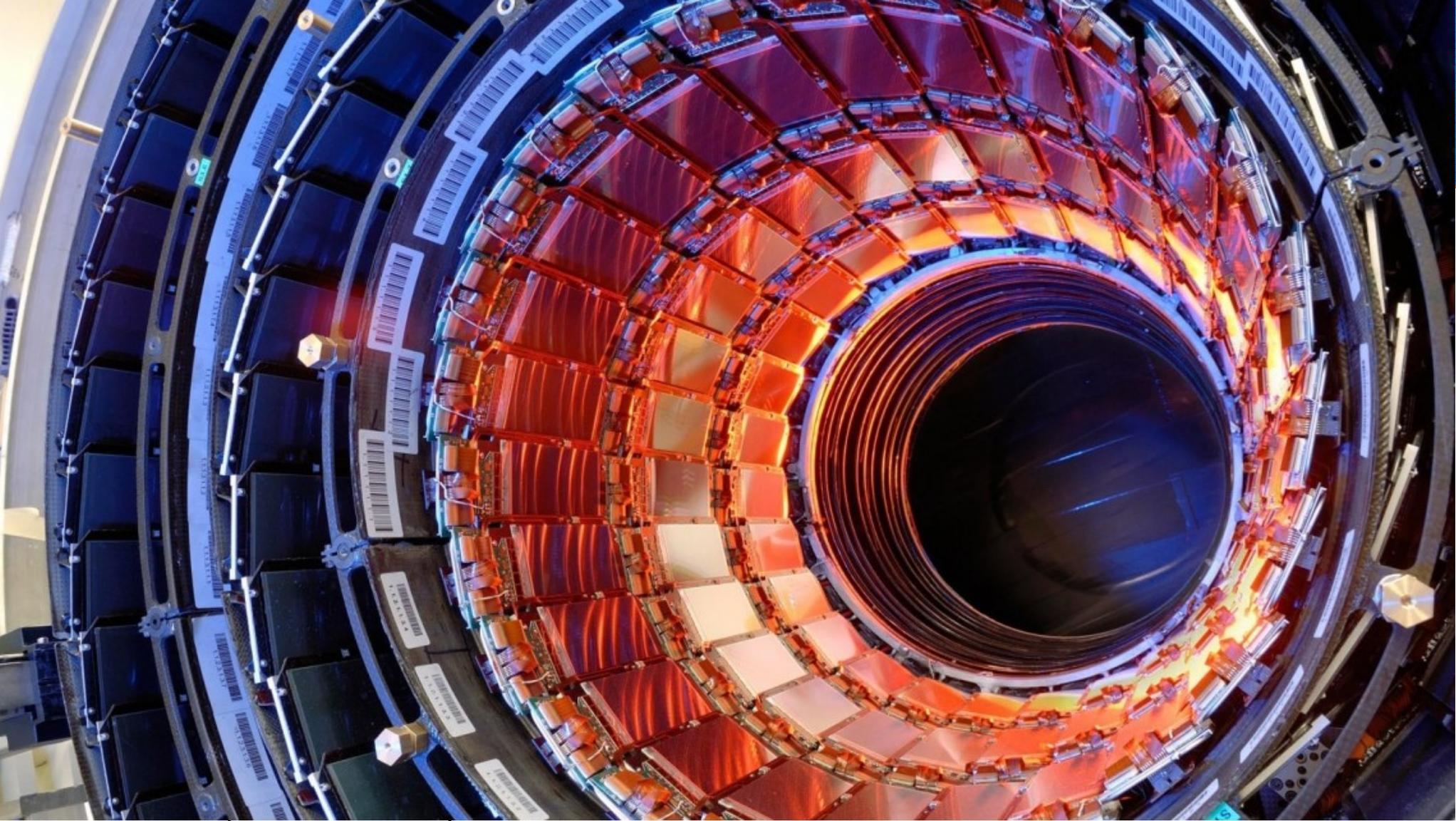


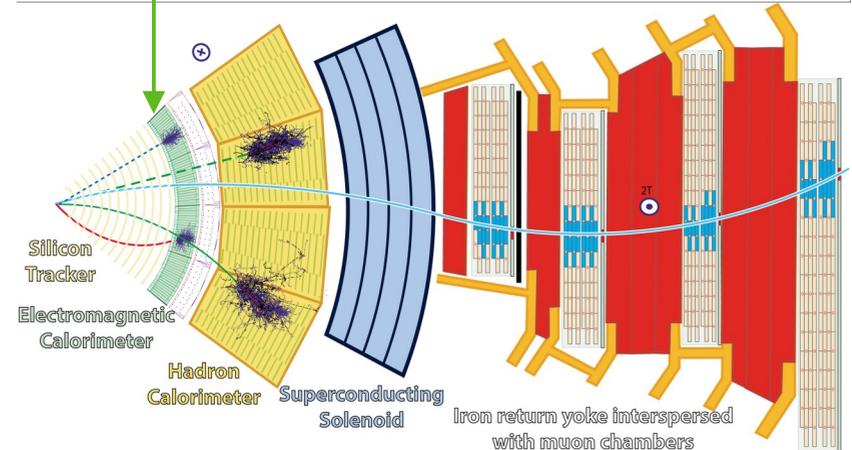
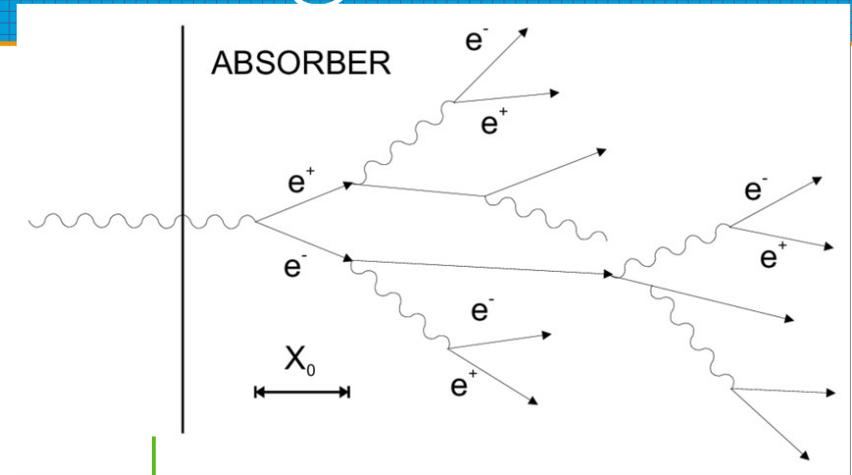
Foto del CMS outer tracker. Pisa è direttamente coinvolta nello sviluppo di questo rivelatore

# Il calorimetro elettromagnetico

- Permette di misurare interamente l'energia di  $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $e^+$
- Quando un fotone di alta energia attraversa il calorimetro, esso produce una coppia di  $e^+ e^-$ . Sia  $e^+$  che  $e^-$  possono perdere energia sotto forma di fotoni (bremsstrahlung), che a loro volta creano coppie  $e^+ e^-$ , formando uno sciame elettromagnetico
- Le particelle cariche prodotte nello sciame eccitano gli elettroni degli atomi del calorimetro, che poi emettono luce visibile, poi raccolta e convertita in un segnale elettrico.
- A CMS il calorimetro EM è costituito da cristalli di tungstenato di piombo ( $PbWO_4$ ). Riesce a contenere tutto lo sciame elettromagnetico pur essendo molto spesso 23 cm
- La risoluzione in energia è data dalla seguente formula

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E(GeV)}} \oplus \frac{12\%}{E(GeV)} \oplus 0.3\%$$

- Anche altre particelle cariche (muoni e adroni carichi) rilasciano piccoli segnali all'interno del calorimetro elettromagnetico.



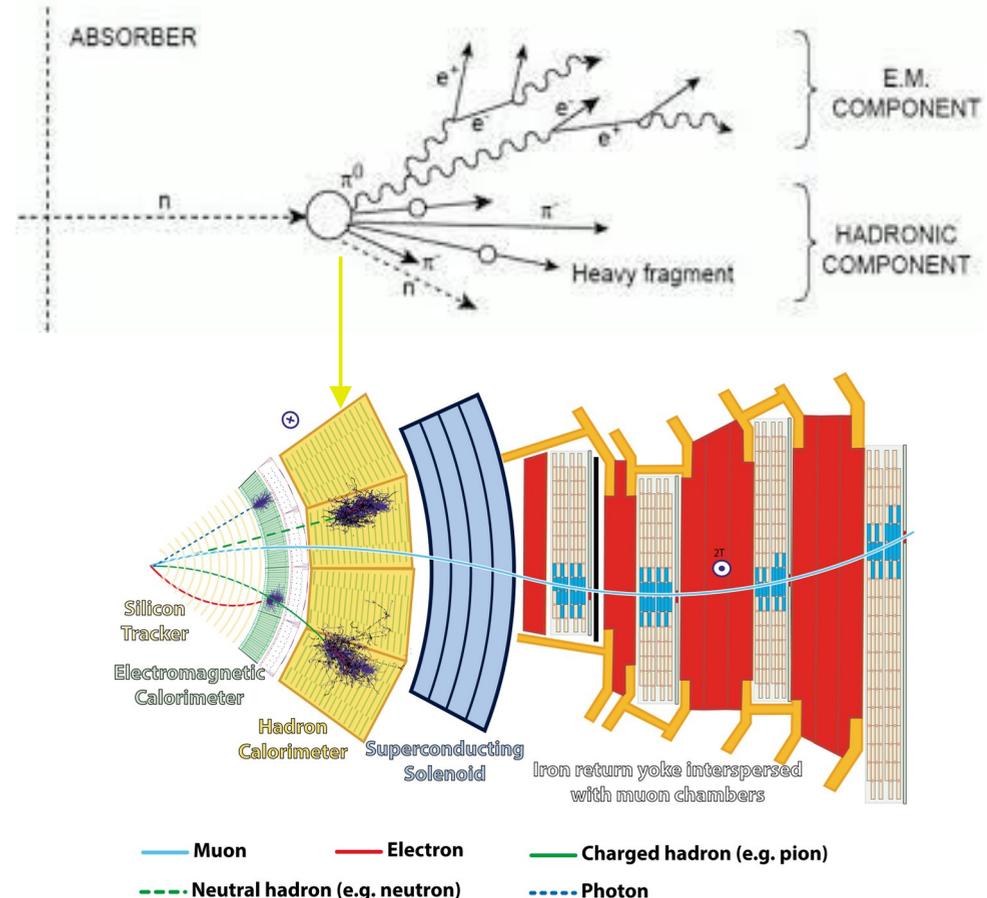
— Muon      — Electron      — Charged hadron (e.g. pion)  
- - - Neutral hadron (e.g. neutron)      ···· Photon

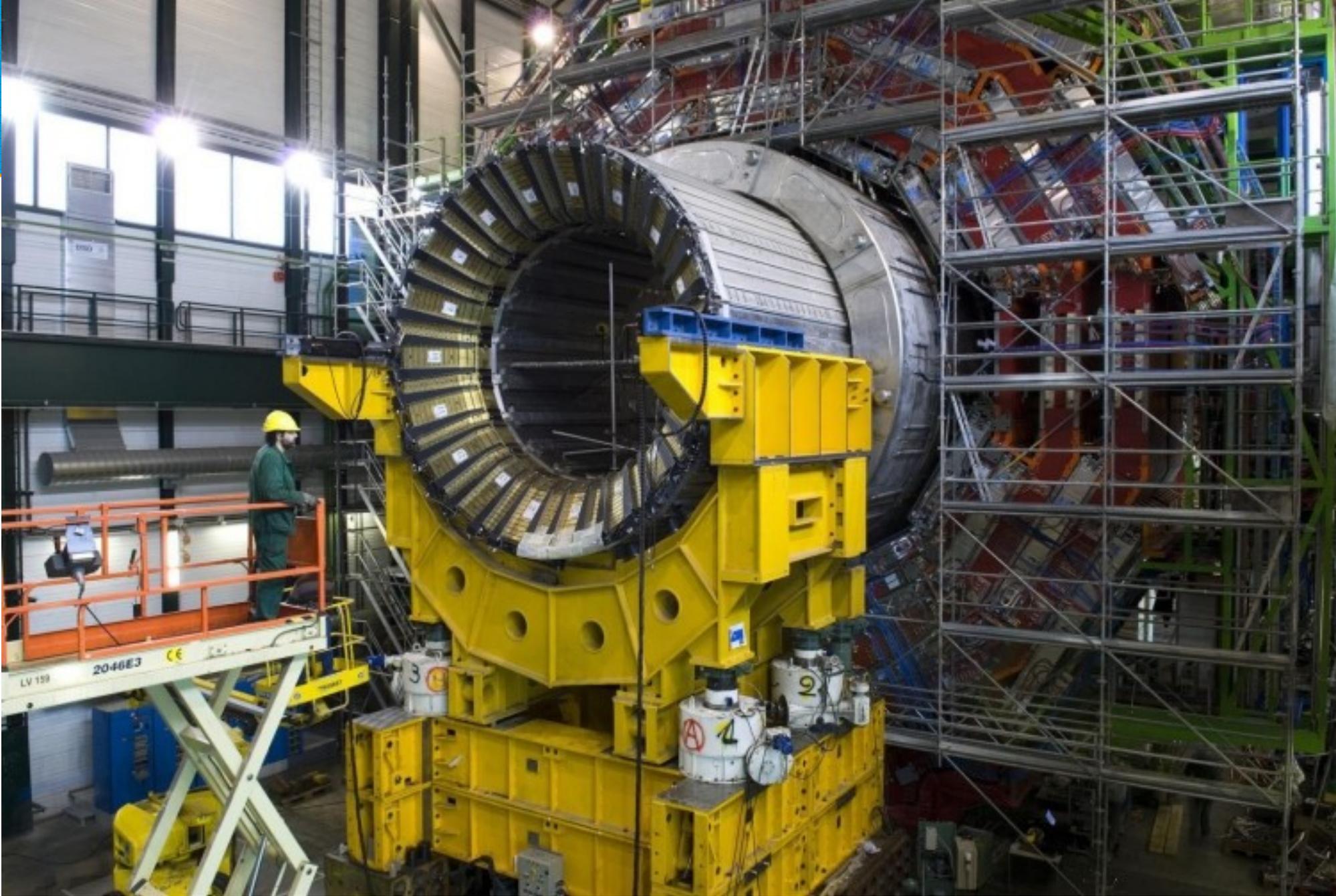


# Il calorimetro adronico

- Deve fermare gli adroni, particelle che interagiscono con le interazioni forti.
- Le particelle cariche formatesi rilasciano parte della loro energia in luce che viene raccolta e misurata.
- È costituito da lastre di ottone o di acciaio (mezzo passivo) alternate a strati di scintillatore (mezzo attivo):
  - Le interazioni forti degli adroni avvengono nelle lastre di ottone o acciaio e l'energia rilasciata dalle particelle prodotte è rilasciata negli scintillatori.
- La risoluzione è data da:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{110\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 9\%$$





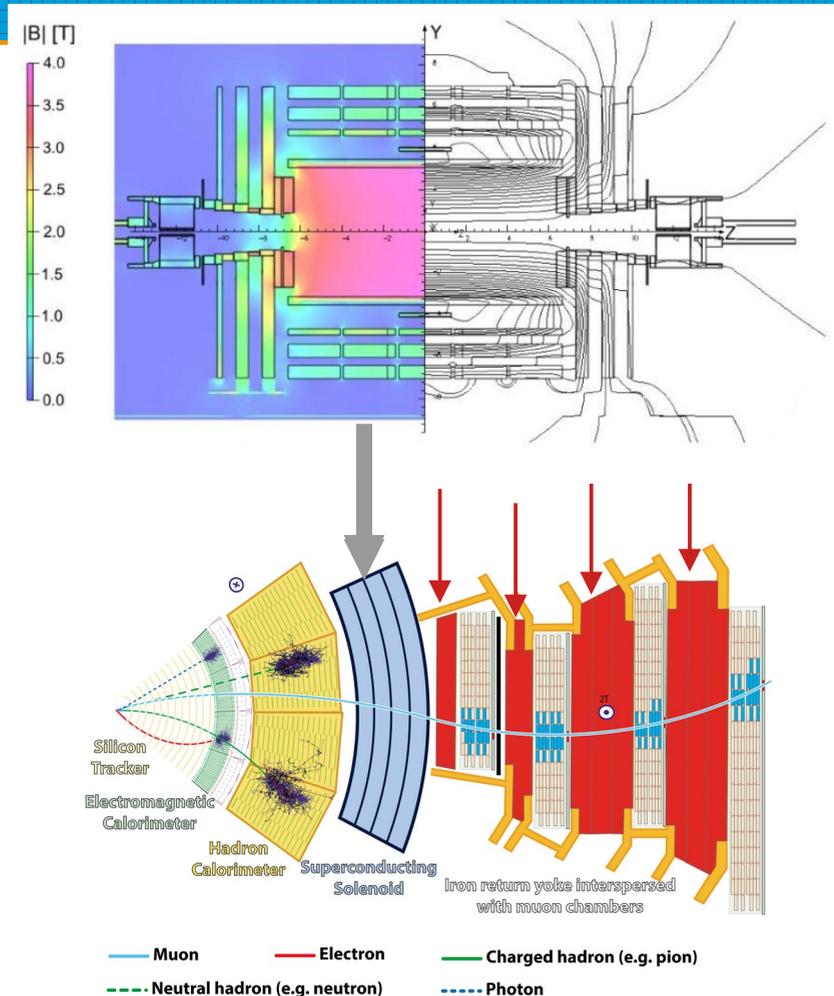
**Ottone usato in calorimetro CMS  
Ricavato dai carri armati russi  
Della prima guerra mondiale**

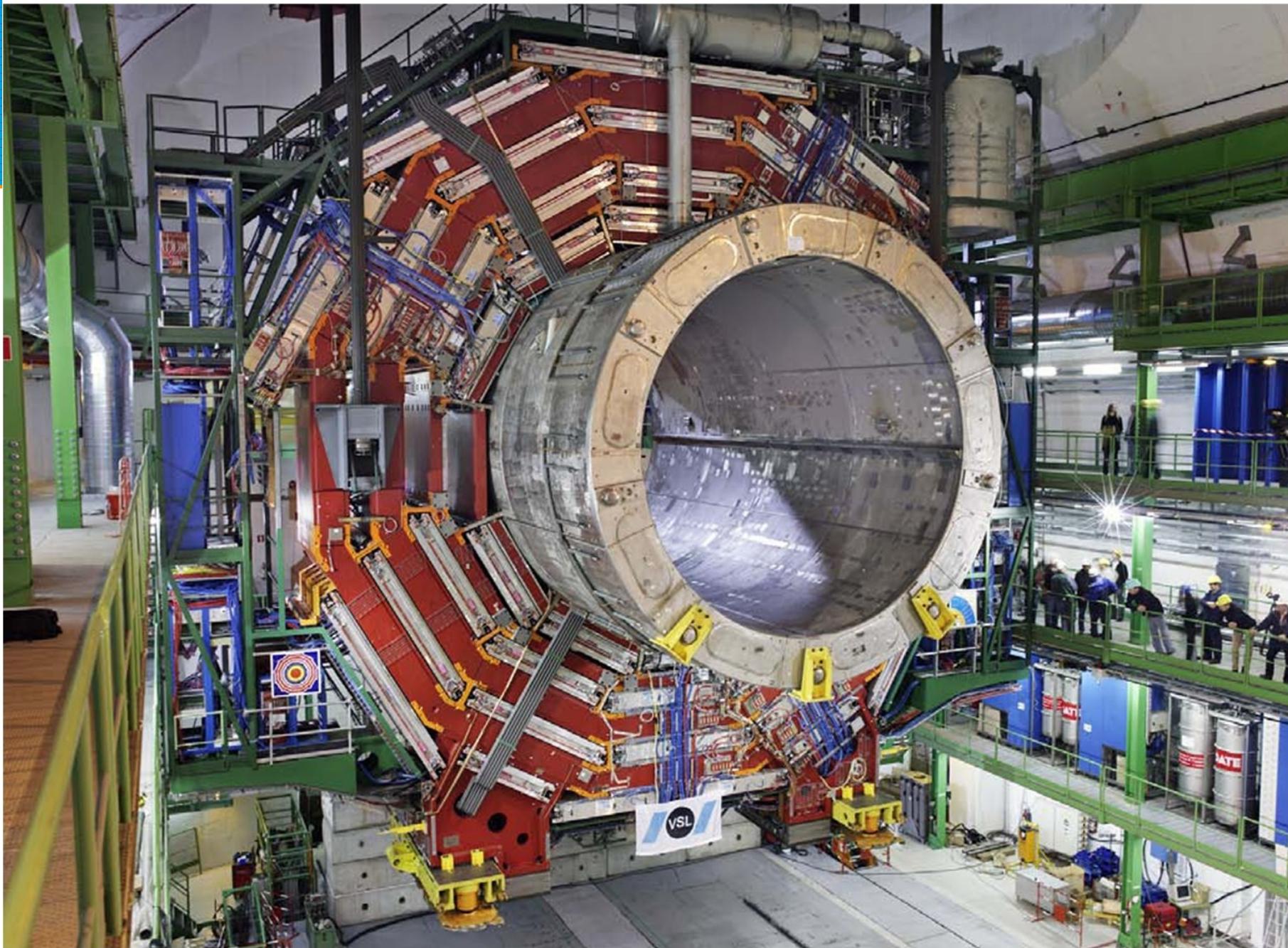


# Solenoidi superconduttore

- In CMS circonda tutti i rivelatori tranne lo spettrometro muonico (descritto nel seguito).
- Il solenoide di CMS fornisce al suo interno un campo magnetico pressoché uniforme di 3.8T.
- È circondato da strati di ferro collocati all'interno delle camere muoniche per concentrare le linee di ritorno del campo magnetico, generando un campo magnetico di 2T.
- Le particelle cariche curvano per effetto del campo magnetico e questo serve per misurare il loro impulso.

$$p_T[\text{GeV}] = 0.3B[\text{T}]R[\text{m}]$$

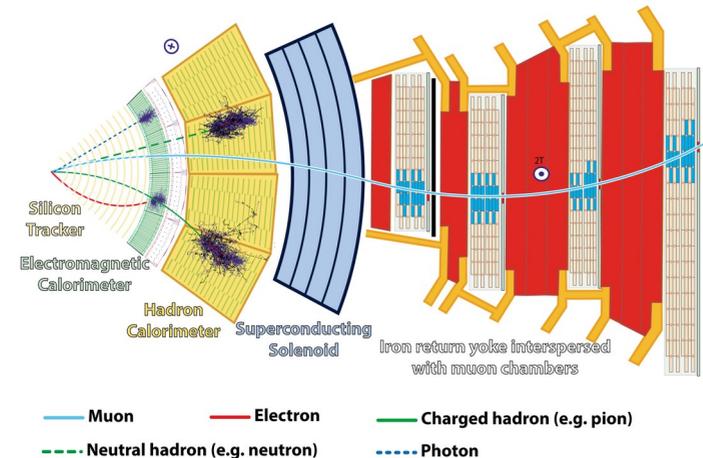
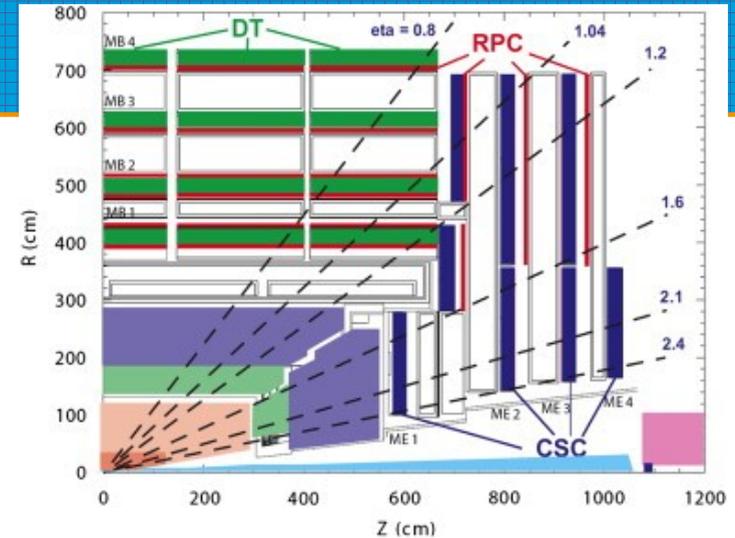




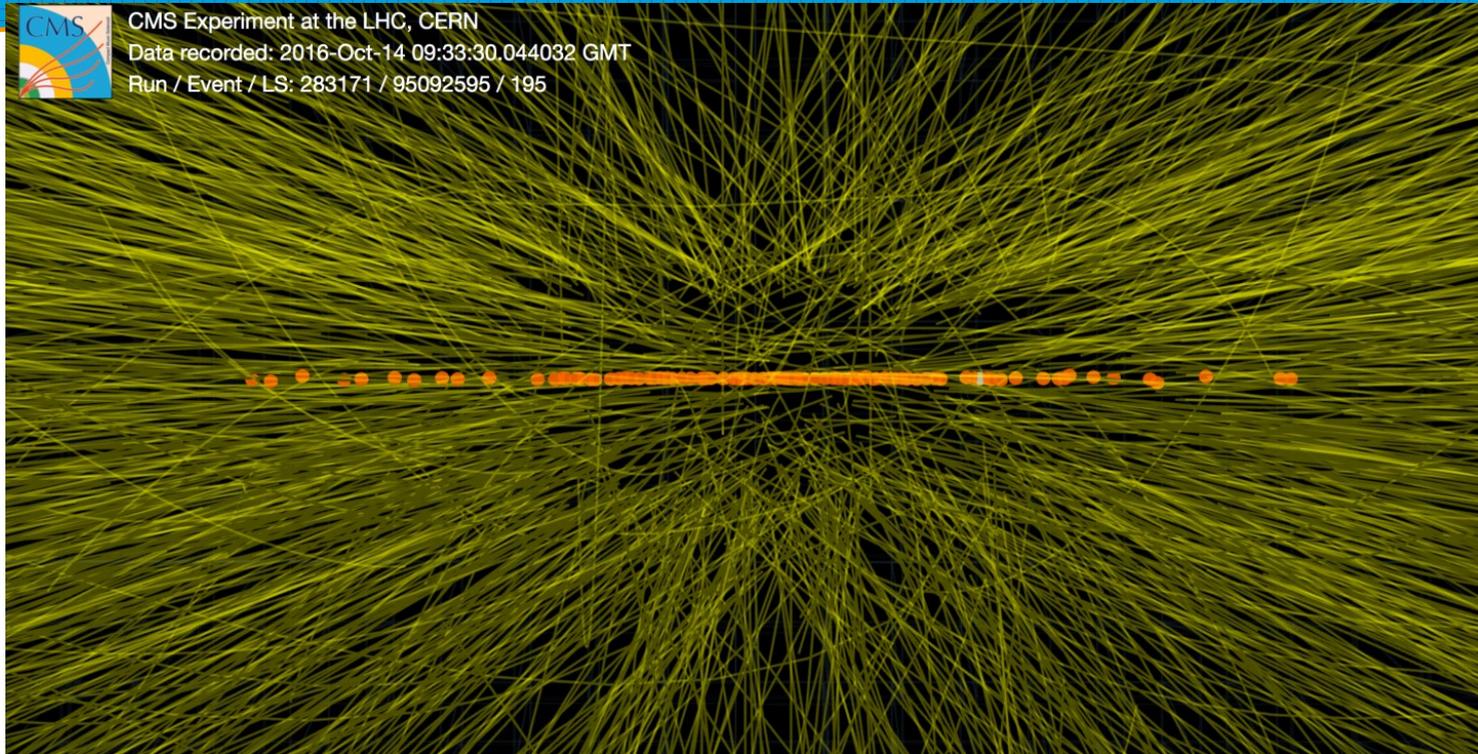
# Spettrometro muonico

- Rivelatori a gas che misurano la posizione dei muoni.
- I muoni, a differenza delle altre particelle, sono estremamente penetranti, e sono gli unici che arrivano alle camere, tutte le altre vengono fermate negli strati precedenti.
- I neutrini, che interagiscono solo attraverso le interazioni deboli, non vengono rivelati:
  - Nelle collisioni tra protoni la somma vettoriale degli impulsi delle particelle nel piano trasverso è uguale a zero, quindi si usa energia trasversa mancante o MET per dedurre l'esistenza di neutrini nell'evento

$$\vec{MET} = - \sum_{\text{particelle misurate}} \vec{p}_T$$

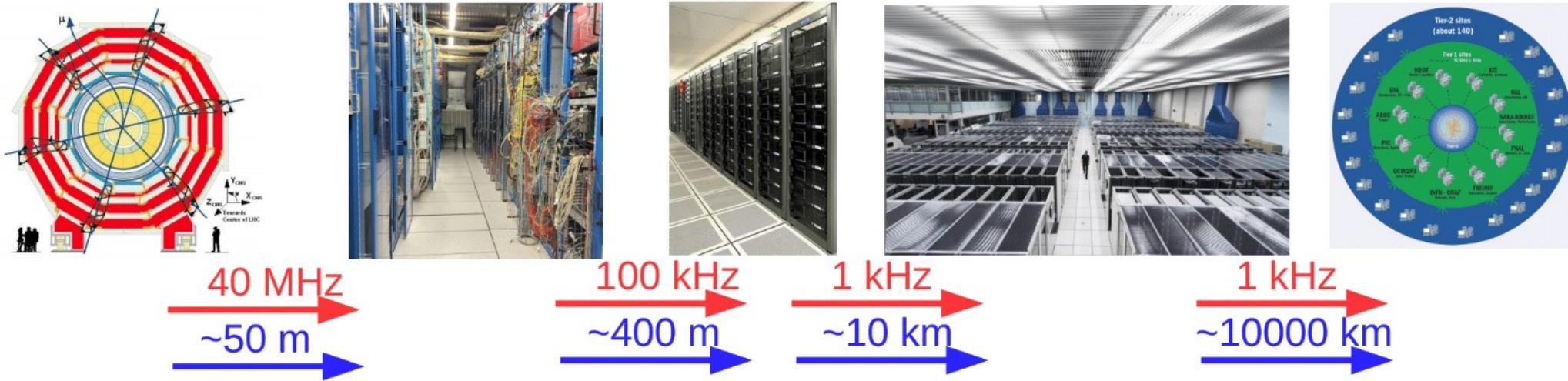


# Preso dati: trigger



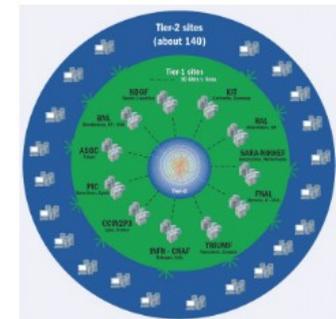
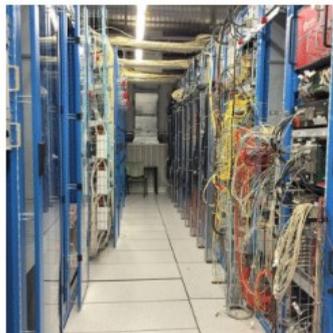
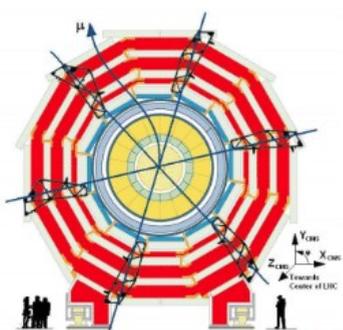
- LHC fa collidere protoni con protoni circa 40 milioni di volte al secondo
- In ciascuna di queste collisioni vengono prodotte fino a 60 interazioni simultanee (pile-up)
- Quindi i rivelatori di CMS devono essere in grado di processare i segnali in soli 25 ns

# Preso dati: trigger



- Non tutti gli eventi possono essere salvati.
- Il sistema di trigger serve a selezionare gli eventi interessanti
- Lo fa in due step:
  - In uno stadio in cui viene utilizzato solo hardware (L1 trigger), a fianco di CMS
  - In superficie, dove viene impiegato il software di ricostruzione (HLT)

# Preso dati: L1



40 MHz  
~50 m

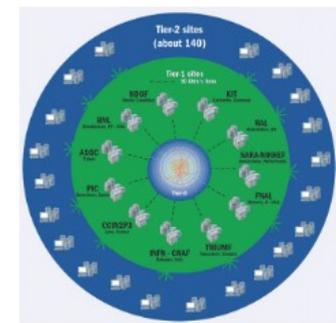
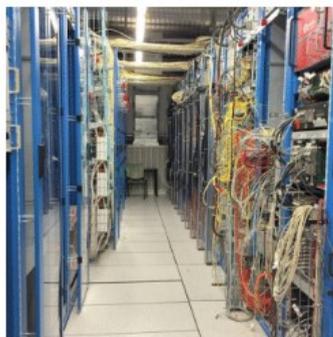
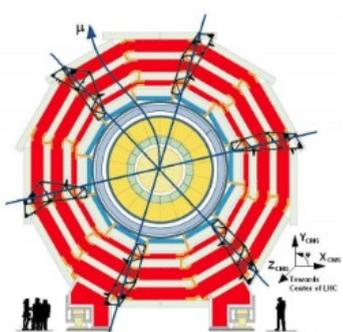
100 kHz  
~400 m

1 kHz  
~10 km

1 kHz  
~10000 km

- I segnali elettronici prodotti dai rivelatori vengono portati nella “counting room” a 50 m da CMS
- Si ha una prima ricostruzione semplificata dei vari oggetti usando le informazioni dei calorimetri e dello spettrometro muonico, a 40 MHz
- Gli eventi che passano alcuni requisiti vengono passati al livello successivo, altrimenti vengono scartati (e quindi persi)
- Questo riduce il rate di eventi da processare da 40 Mhz a circa 100 kHz
- Per ogni evento questo richiede qualche microsecondo

# Preso dati: HLT



40 MHz  
~50 m

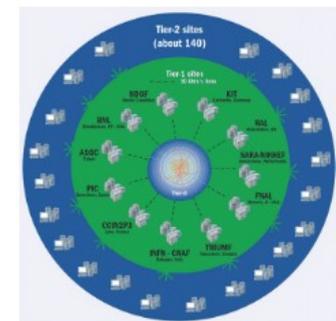
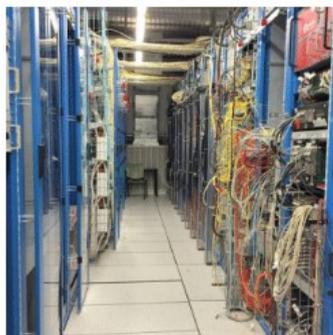
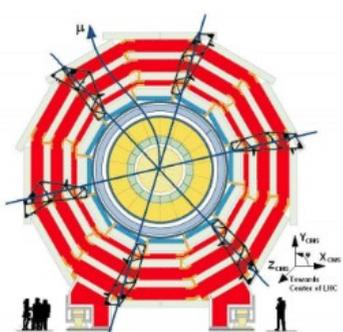
100 kHz  
~400 m

1 kHz  
~10 km

1 kHz  
~10000 km

- Per gli eventi che passano L1 viene poi processata l'informazione di tutti i rivelatori
- L'evento viene portato in superficie, dove una farm di 16000 CPU ricostruisce con una precisione superiore a L1 gli eventi, e vengono salvati solo quelli che passano alcuni requisiti particolari
- Questo riduce il rate da 100 kHz a circa 1 kHz
- Il tempo impiegato per processare un evento è circa 200 ms

# Presac dati: ricostruzione



40 MHz  
~50 m

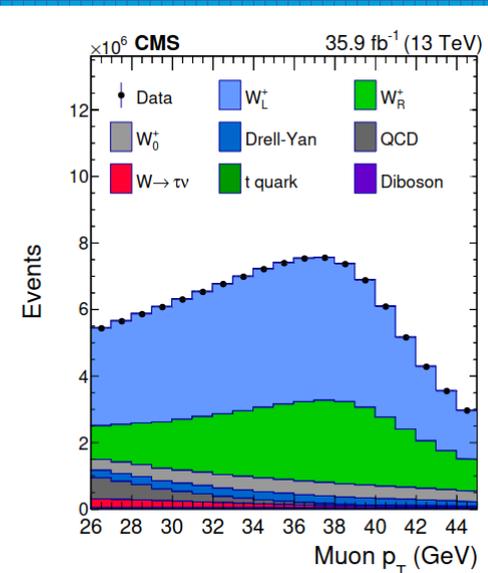
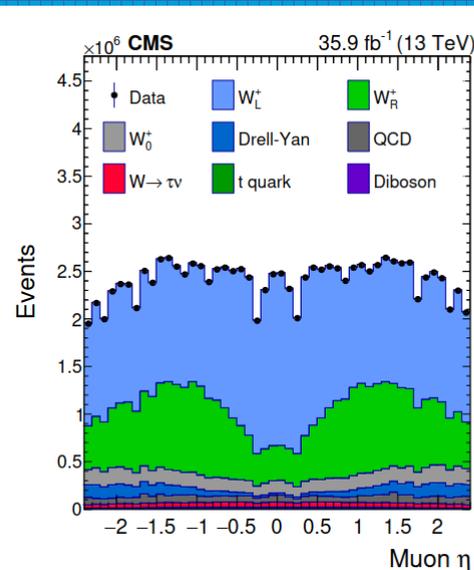
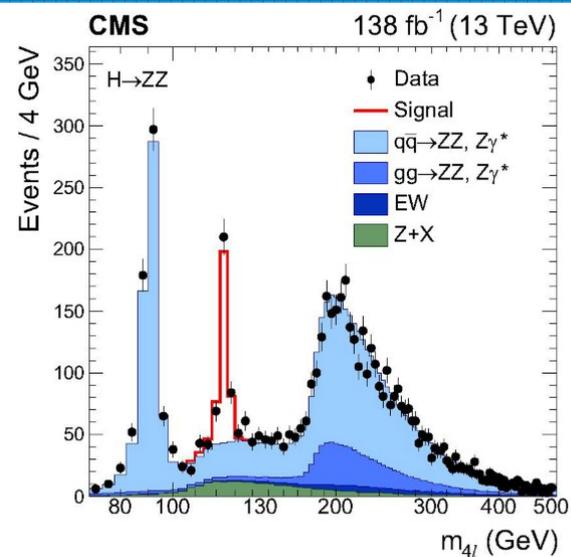
100 kHz  
~400 m

1 kHz  
~10 km

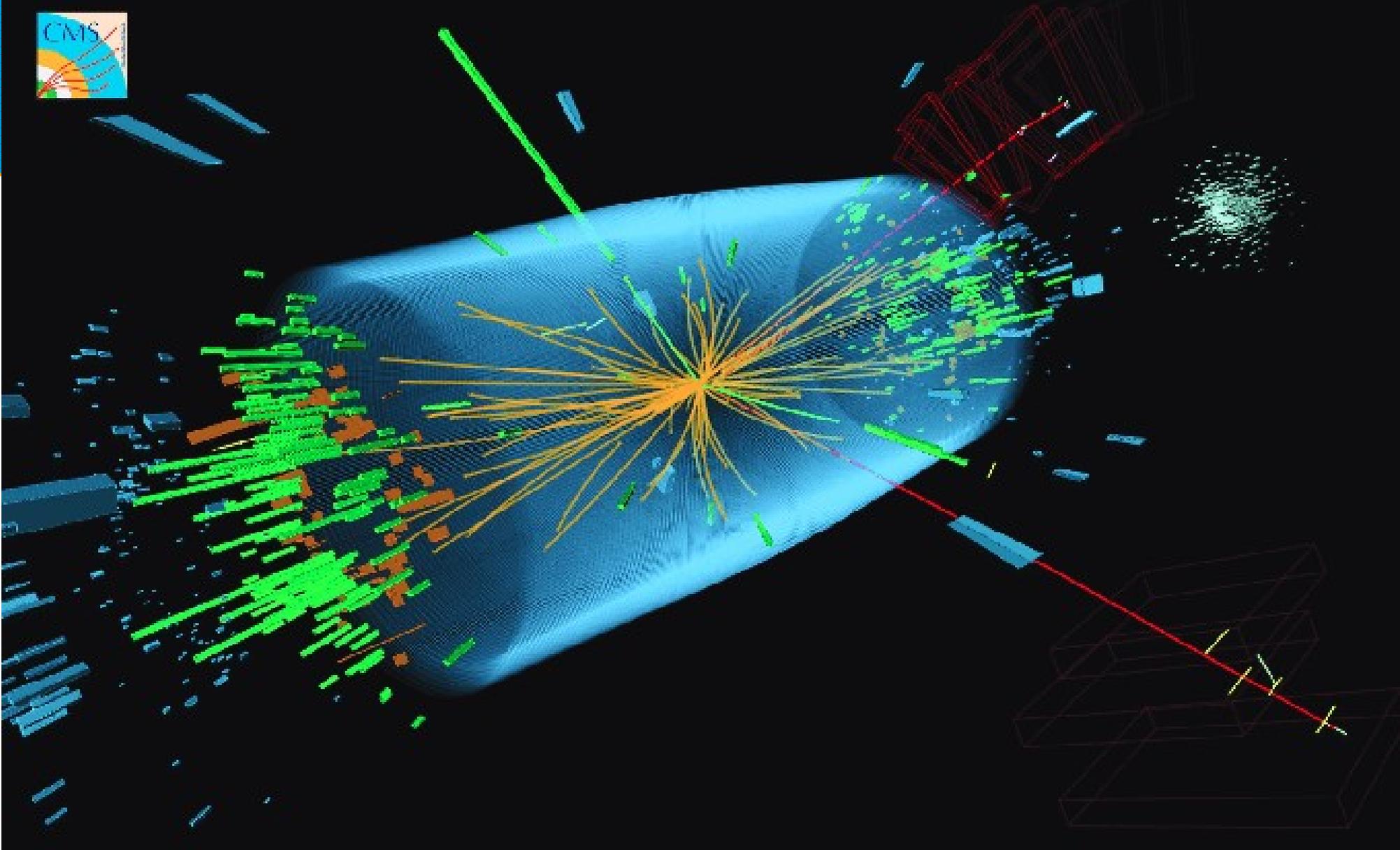
1 kHz  
~10000 km

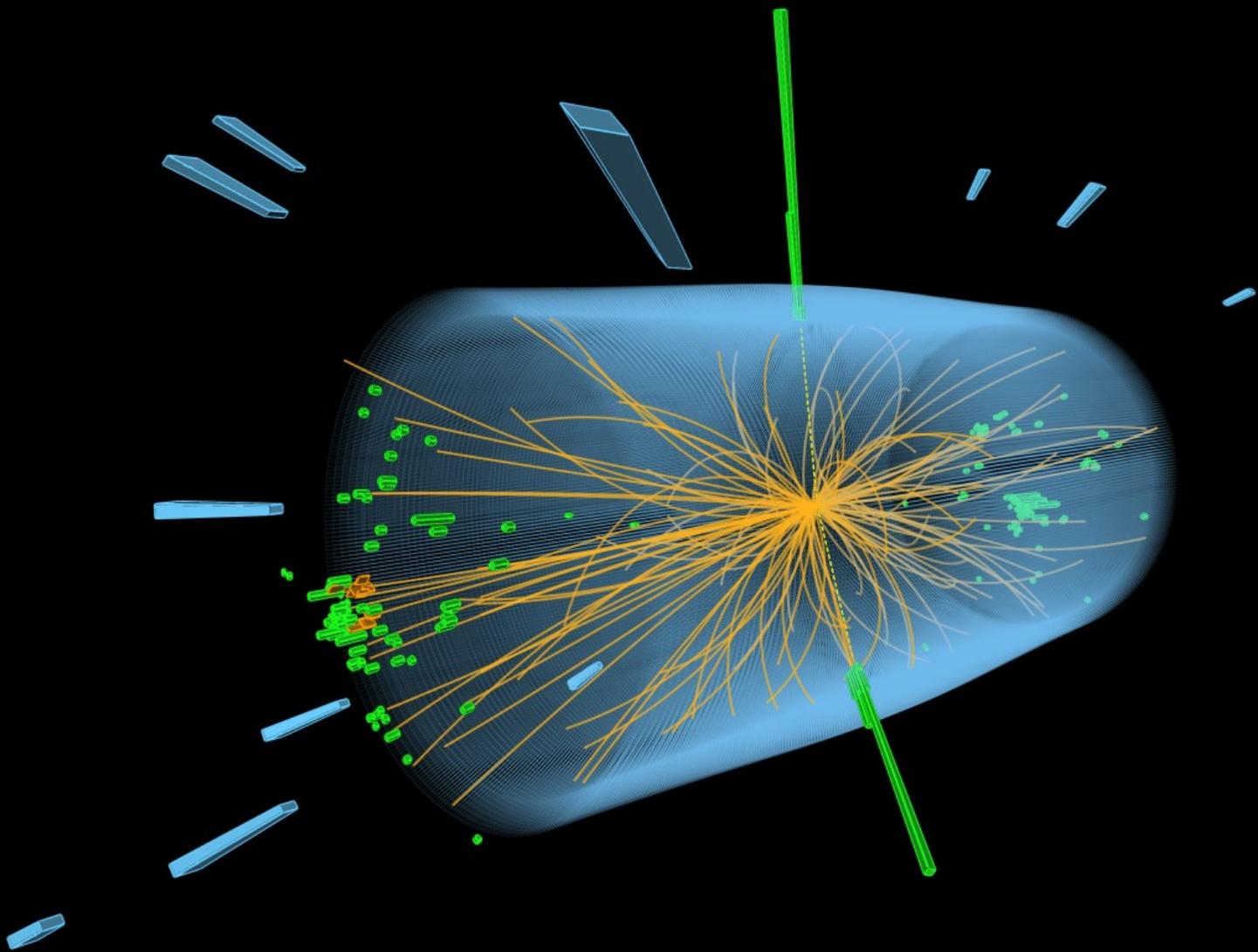
- Tutti gli eventi che vengono poi definitivamente salvati su nastro e portati al sito CERN di Meyrin dove si trova il Tier-0
- Vengono poi inviati ai centri sparsi per il mondo dove vengono poi ricostruiti con la massima precisione possibile dalle informazioni dei vari sottorivelatori per avere un'interpretazione completa dell'evento (Tier 1)
- Questo processo di ricostruzione richiede 60 s per evento
- Questi vengono poi inviati ai vari siti che effettuano l'analisi dei dati e generano le varie simulazioni degli eventi per estrarre i risultati di fisica

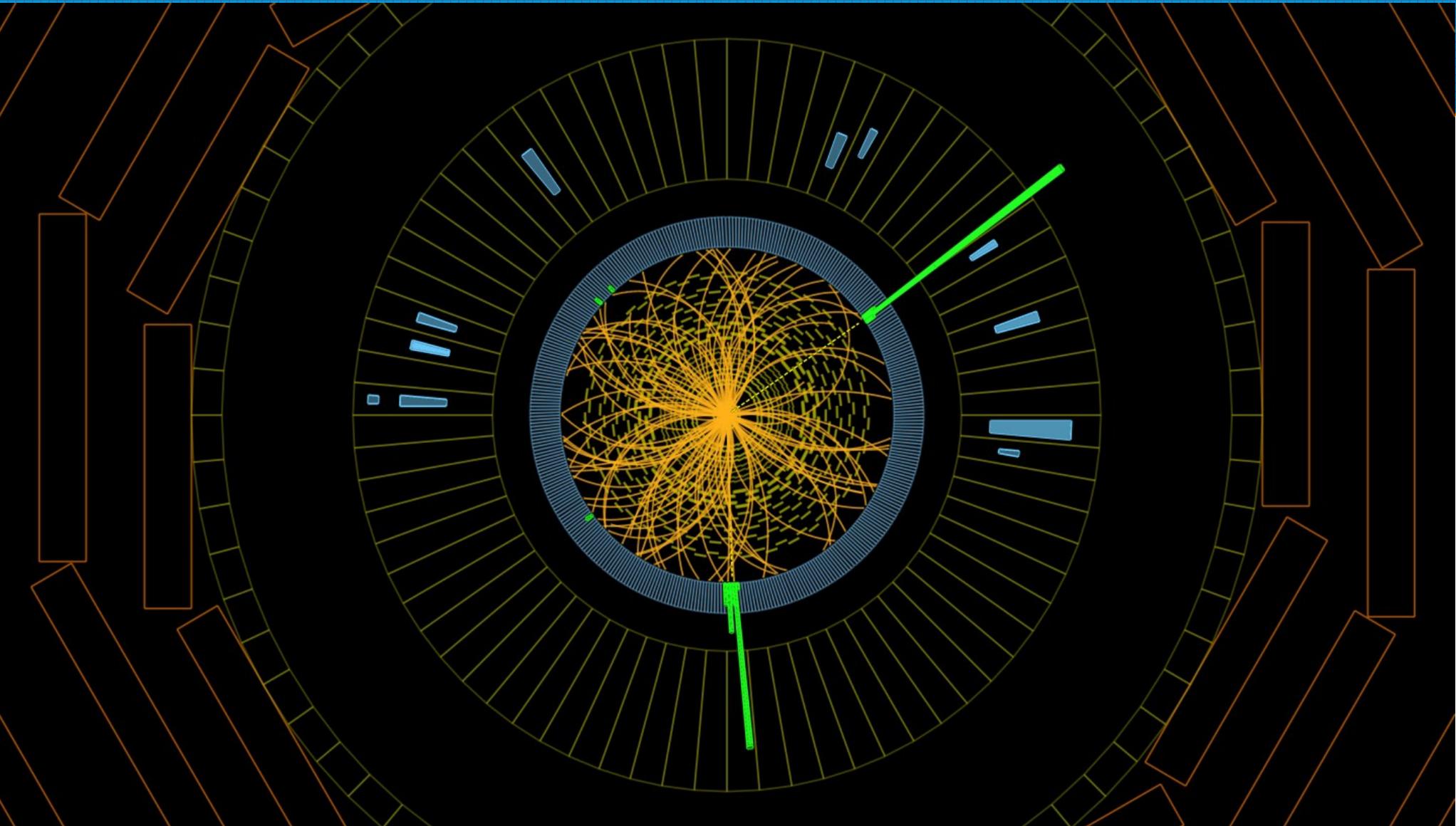
# Presi dati: analisi



- Questi vengono poi inviati ai vari siti che effettuano l'analisi dei dati e generano le varie simulazioni degli eventi per estrarre i risultati di fisica
- A sinistra un esempio di massa invariante di decadimenti del bosone di Higgs, a destra due plot per misurare le rapidità ed elicità del bosone W







**Grazie per l'attenzione e buon viaggio!**