



L'esperimento CMS al CERN

Davide Bruschini¹

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

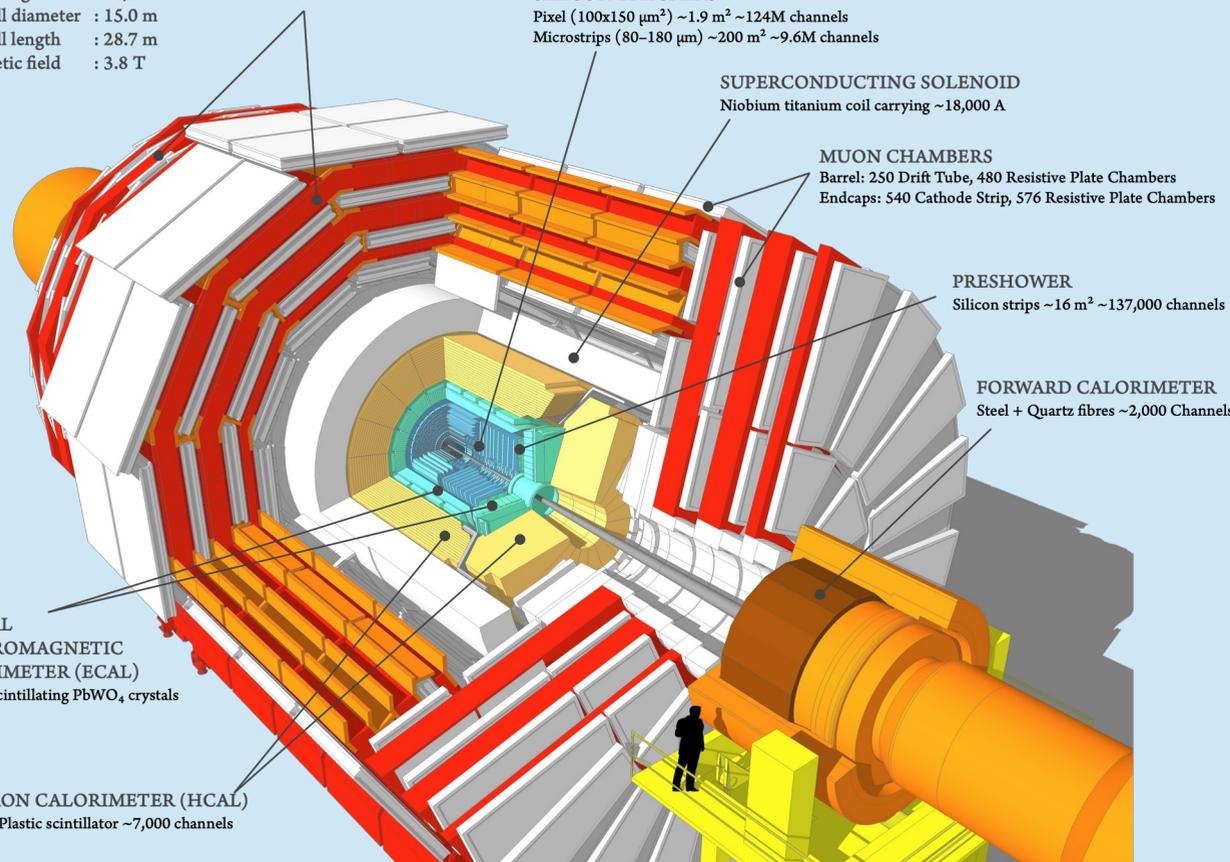
Silicon strips $\sim 16 \text{ m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER

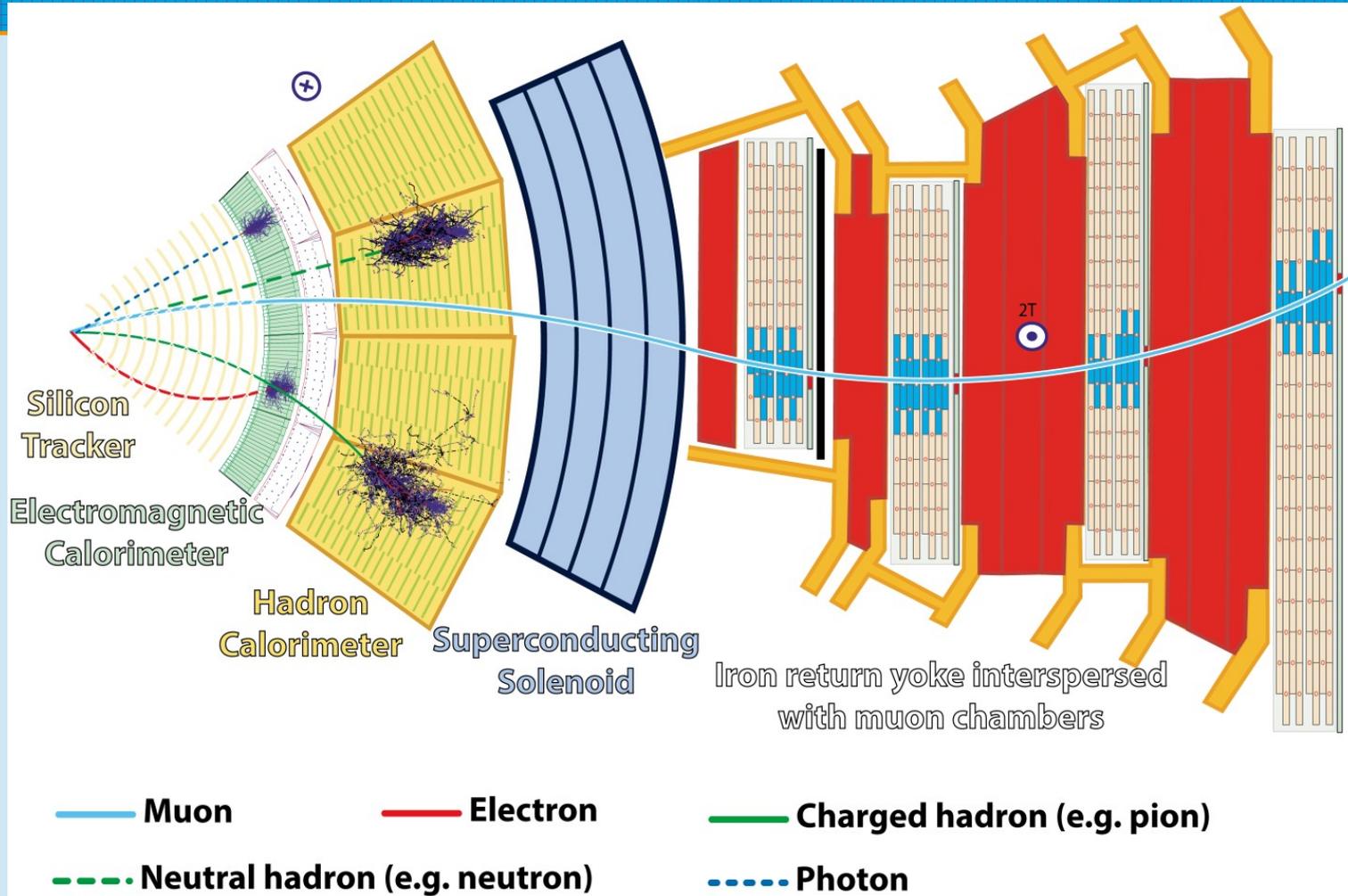
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

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



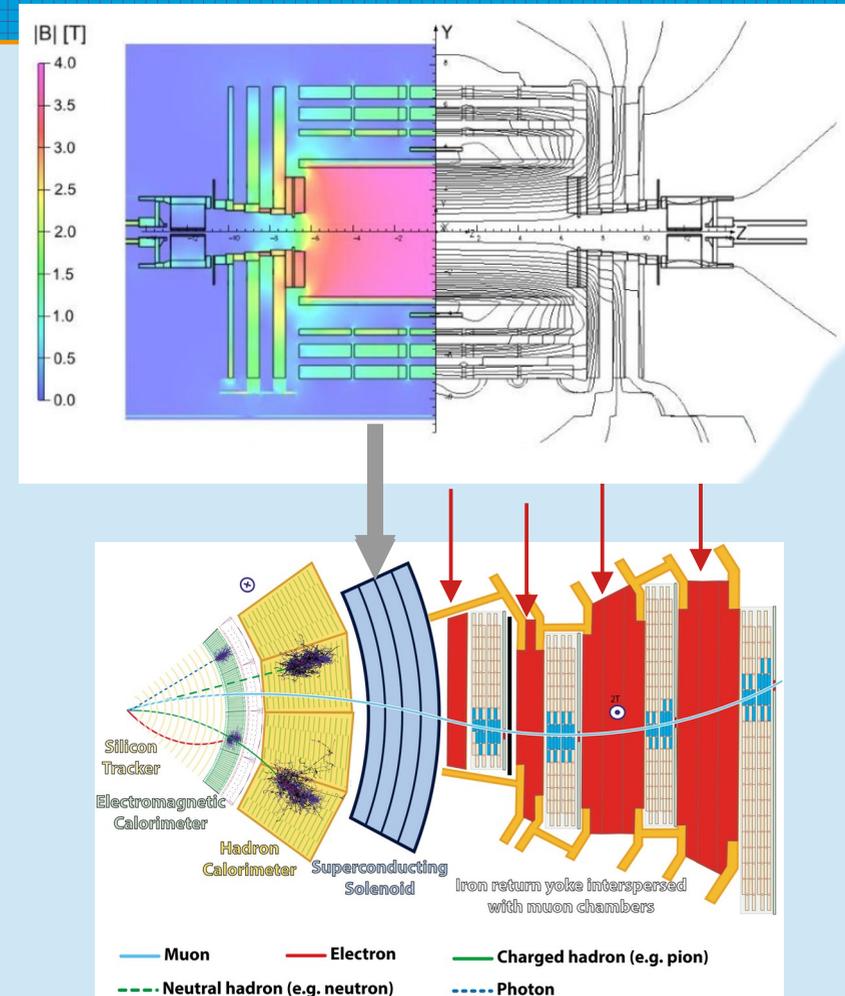
Gli strati di CMS

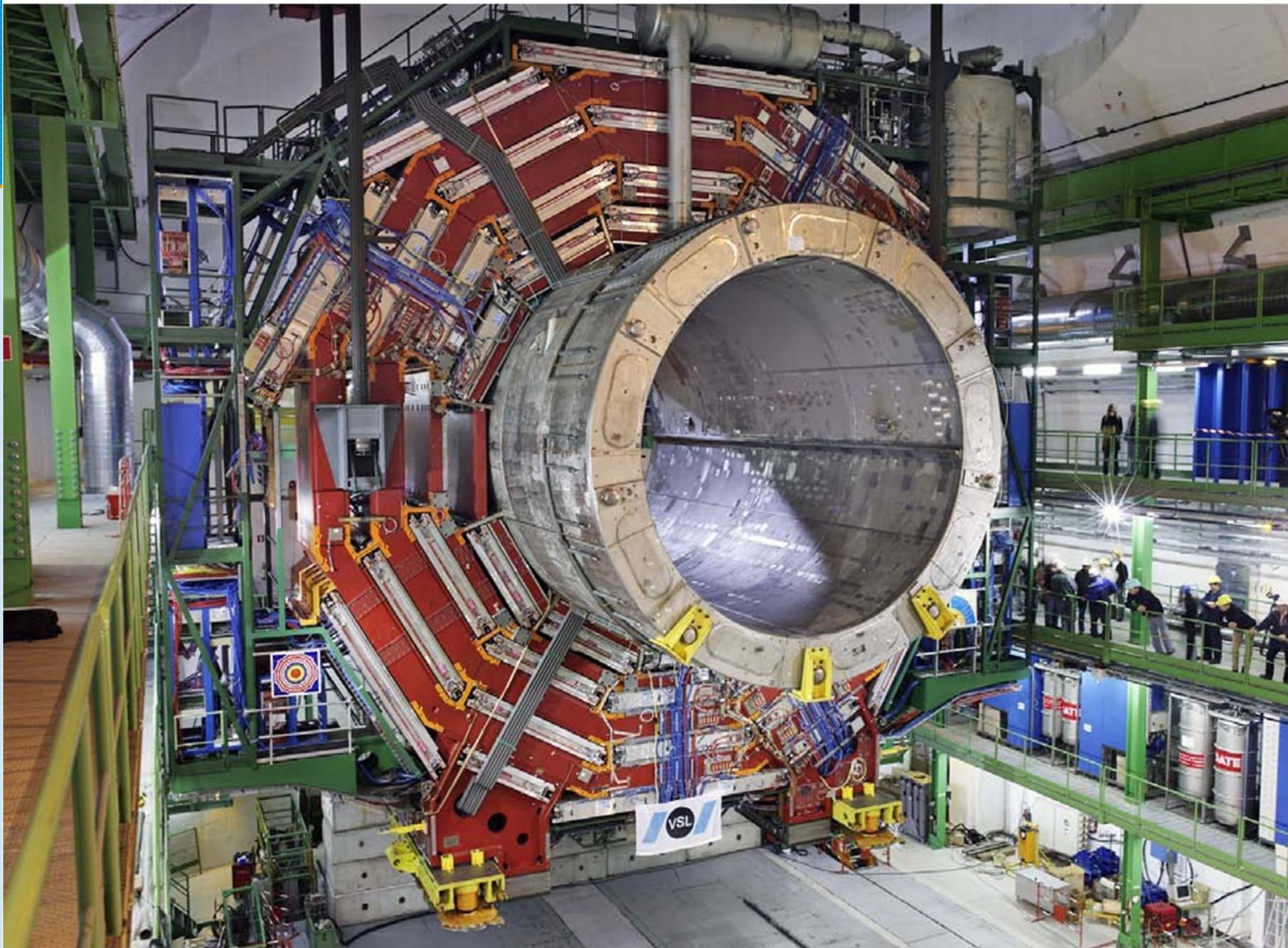


Solenoidi superconduttore

- 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.

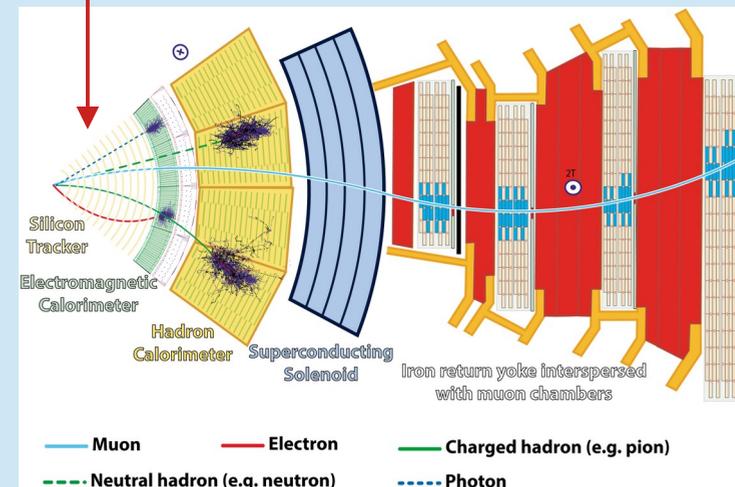
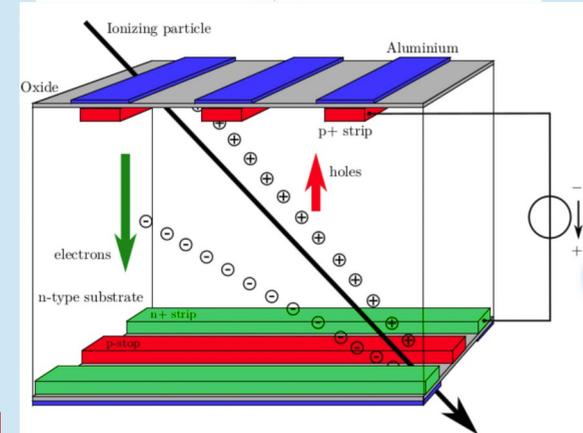
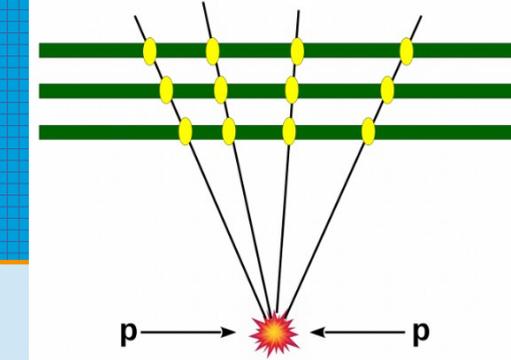
$$p_T[\text{GeV}] = 0.3B[\text{T}]R[\text{m}]$$





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



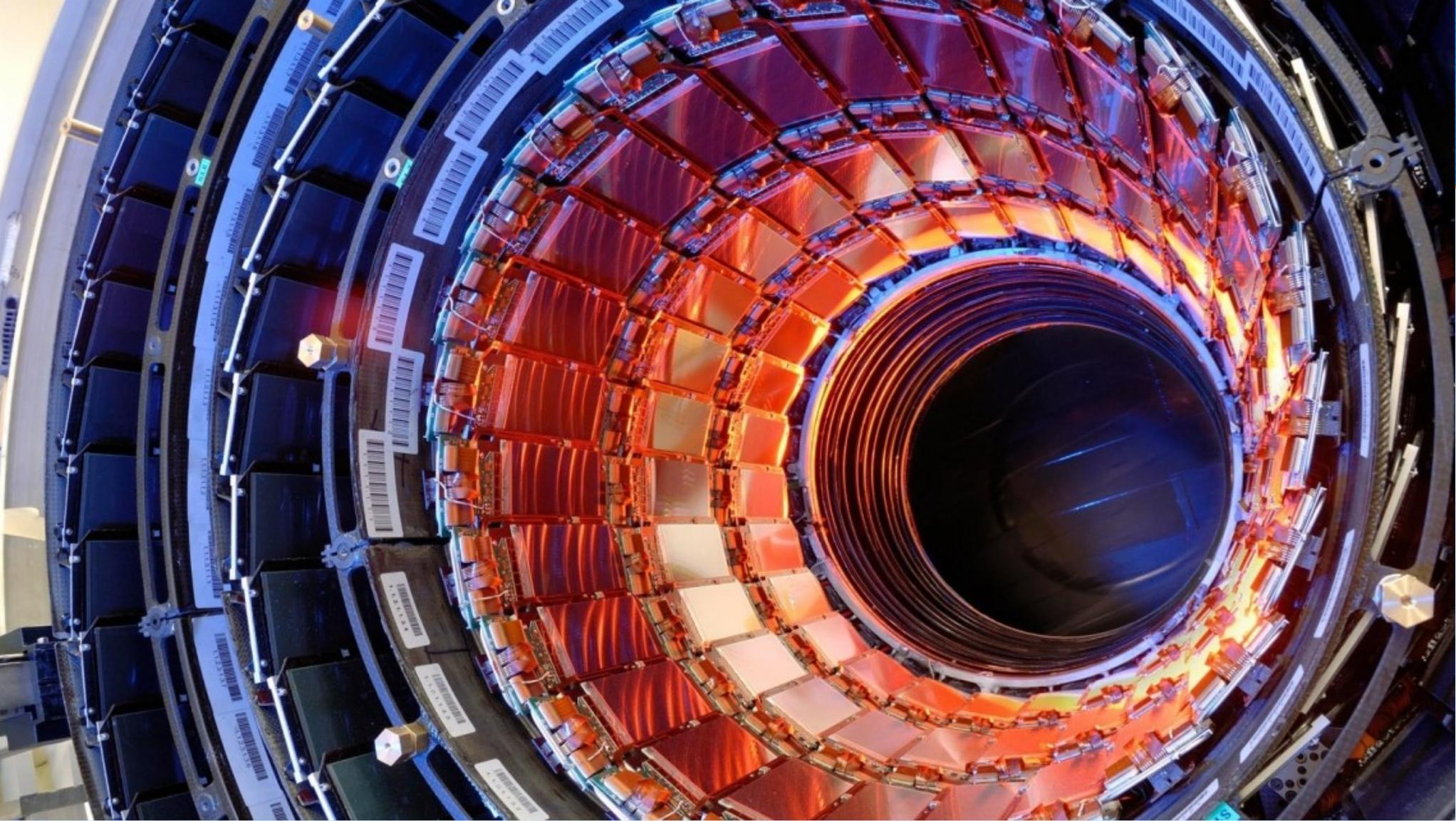


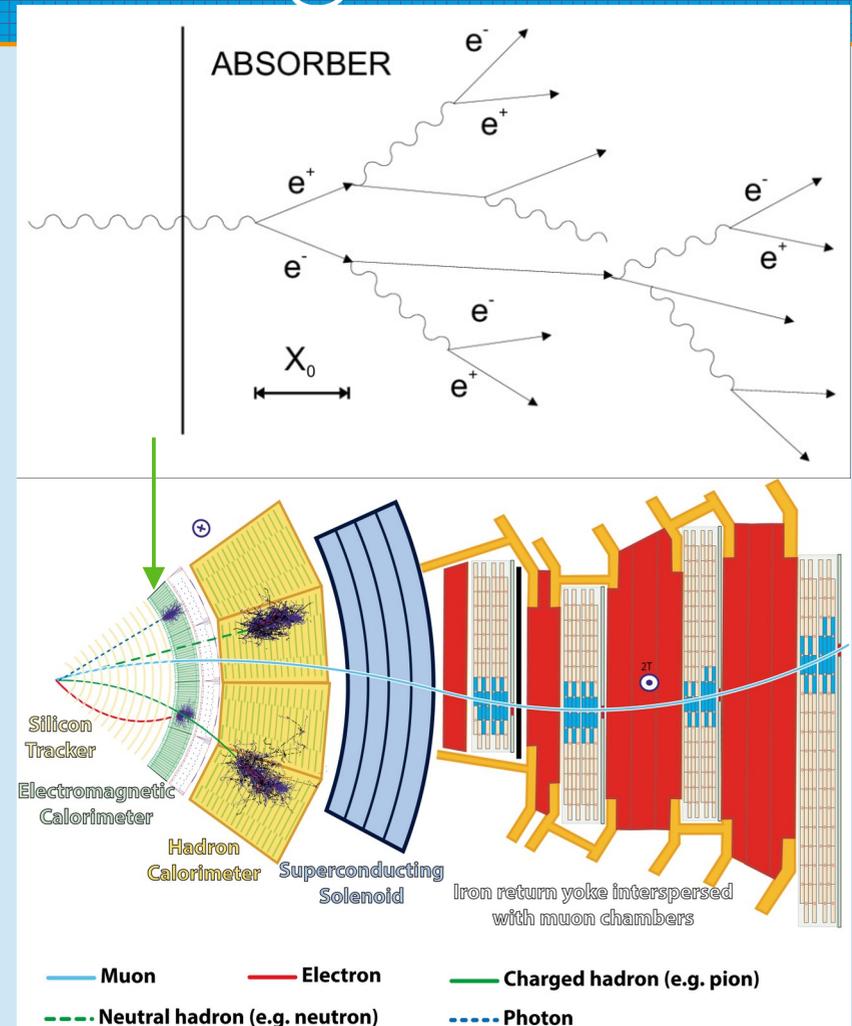
Foto del CMS outer tracker. Pisa è direttamente coinvolta nello sviluppo di questo rivelatore

Il calorimetro elettromagnetico

- Permette di misurare interamente l'energia di γ , 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 spesso 23 cm
- La risoluzione in energia è data dalla seguente formula

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

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

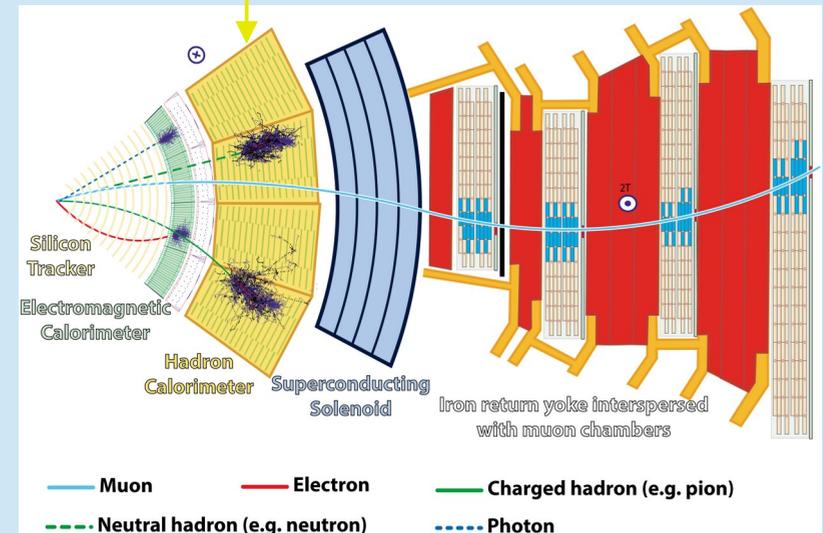
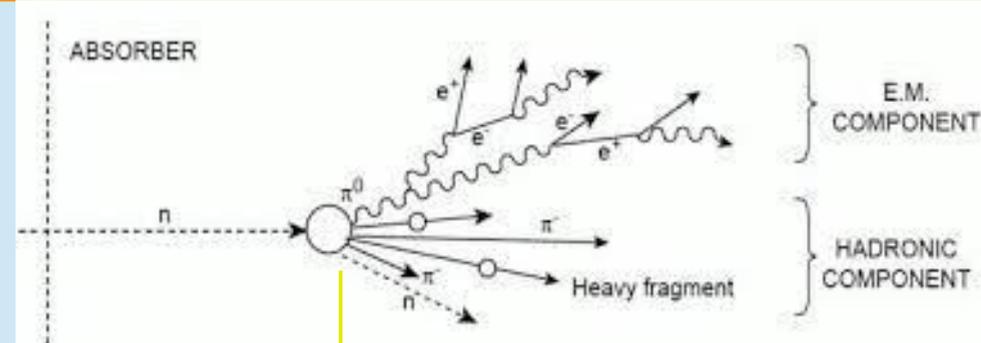


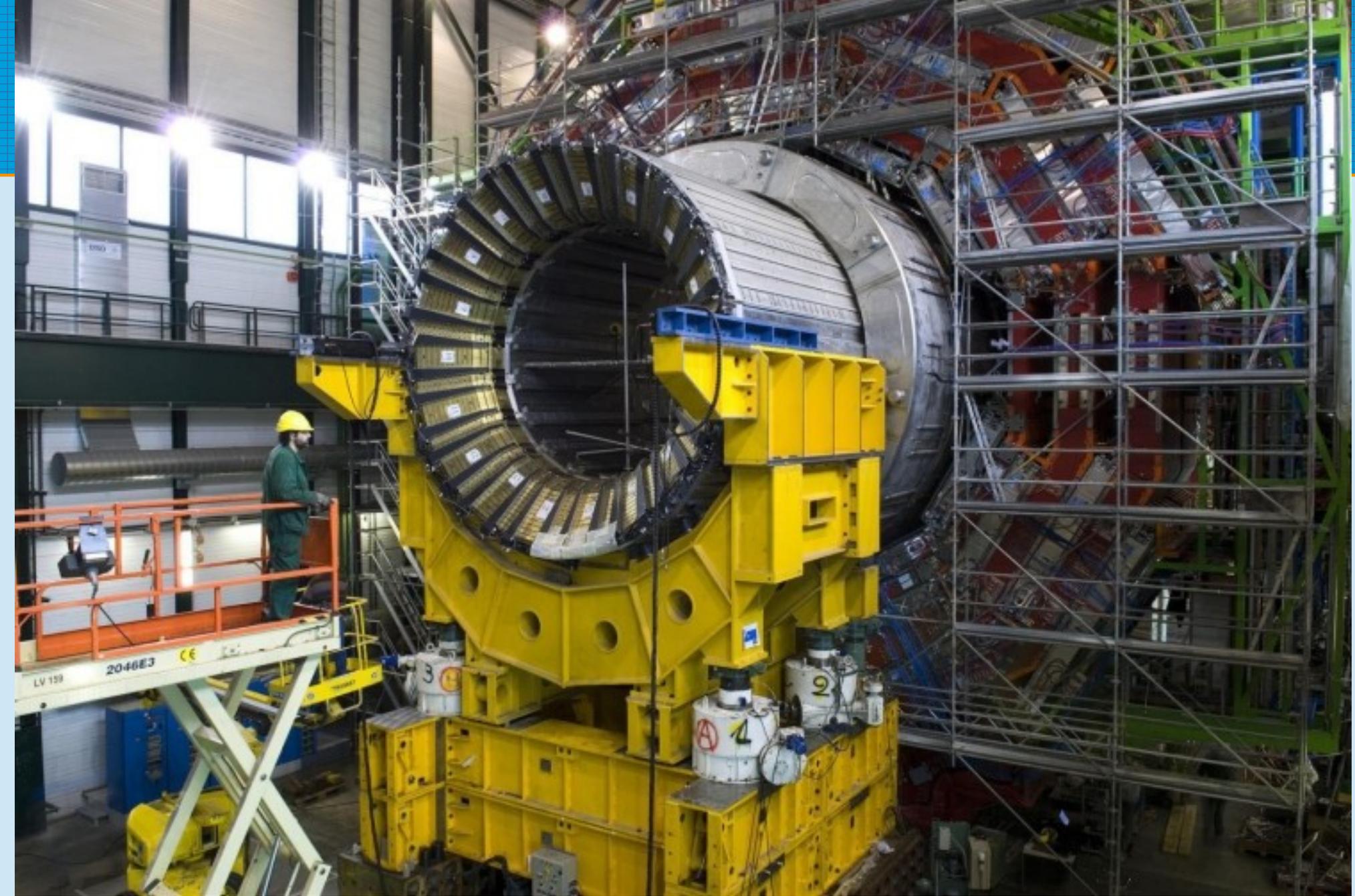


Il calorimetro adronico

- Deve fermare gli adroni, particelle che interagiscono con le interazioni forti.
- 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.
 - Le particelle cariche prodotte interagiscono con lo scintillatore → eccitazione degli atomi → emissione di luce.
- La risoluzione è data da:

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





Ottone usato in calorimetro CMS

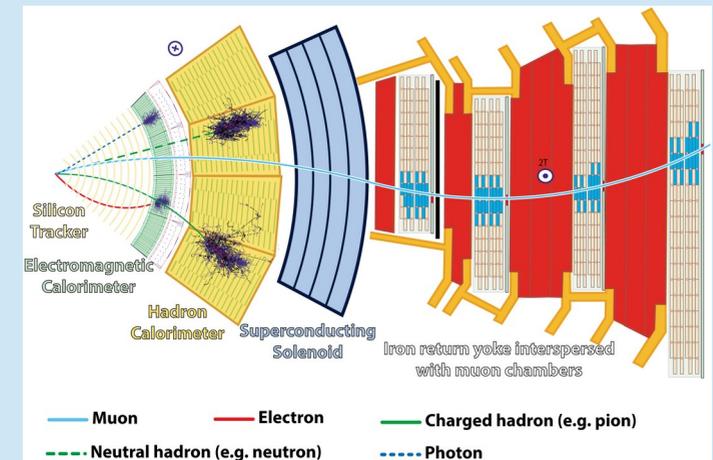
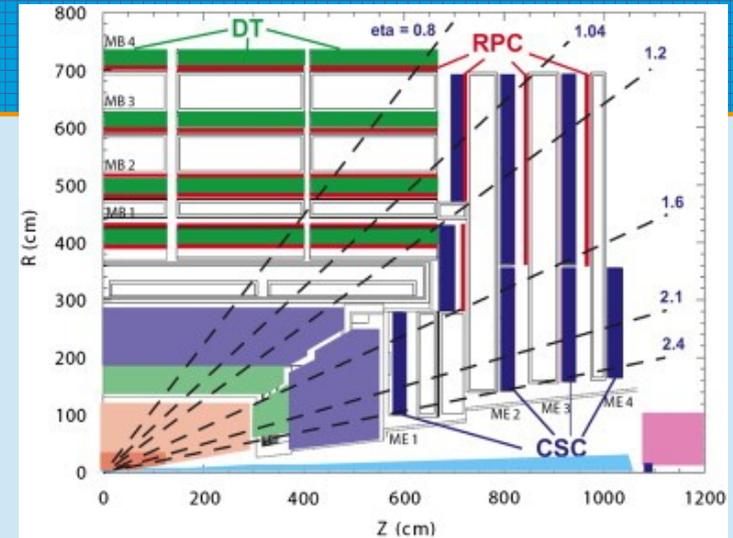
Dall'artiglieria usata dai Russi



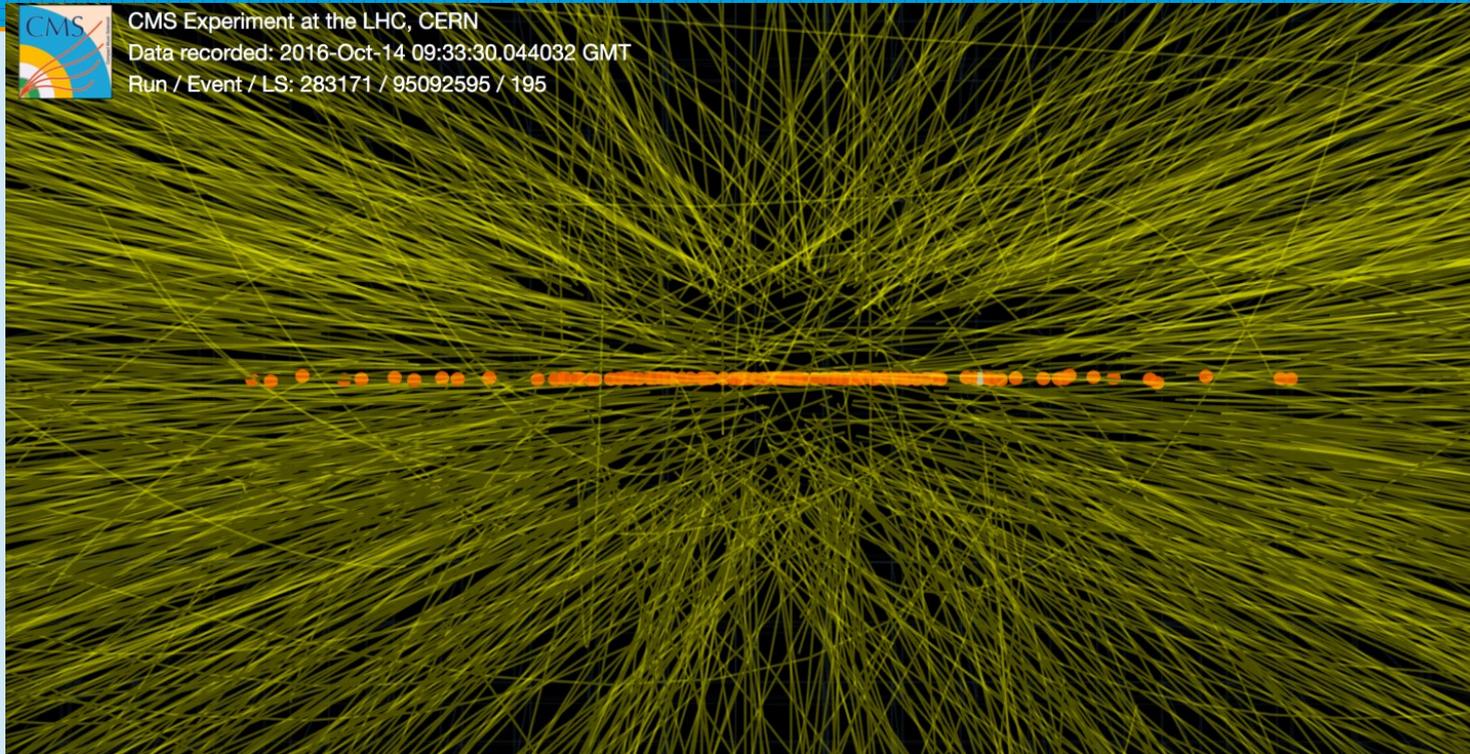
Spettrometro muonico

- 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

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



Presca dati: trigger



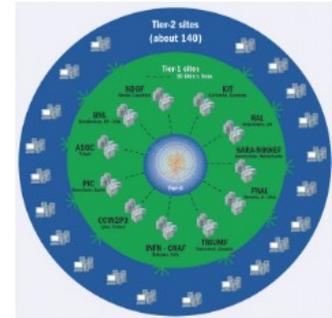
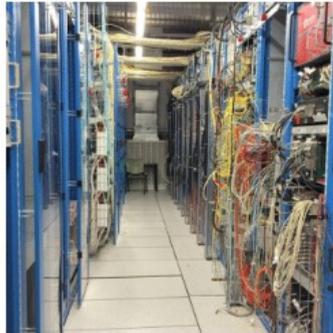
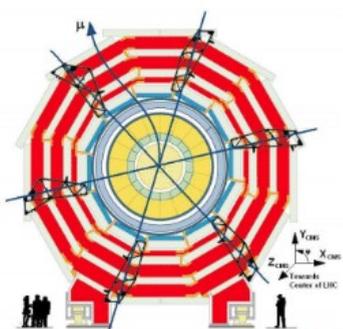
- LHC fa collidere protoni con protoni circa 40 milioni di volte al secondo
- In ciascuna di queste collisioni vengono prodotte fino a 60 interazioni simultanee (pile-up)
- Quindi i rivelatori di CMS devono essere in grado di processare i segnali in soli 25 ns

Preso dati: trigger



- Non tutti gli eventi possono essere salvati (40 kB/evento \rightarrow 16 TB/s).
- 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

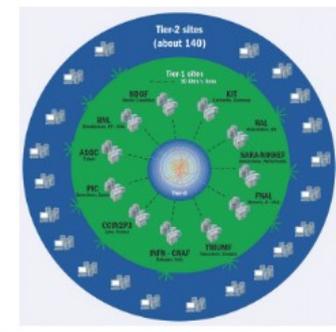
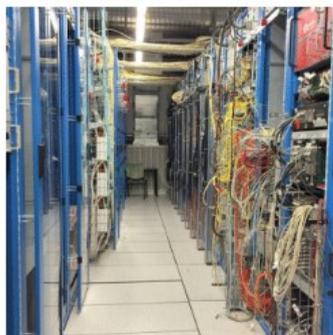
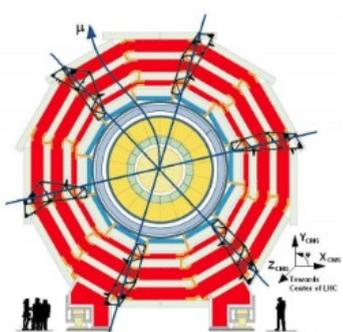
100 kHz
~400 m

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

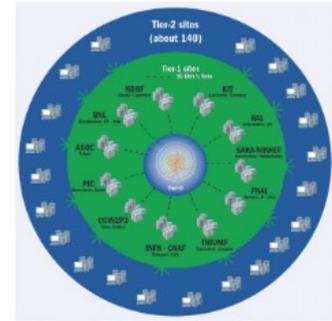
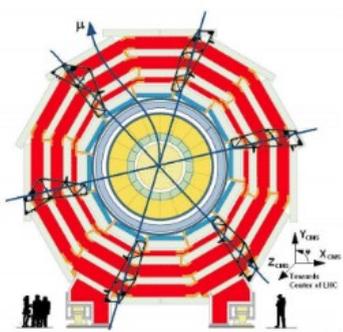
100 kHz
~400 m

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

Preso dati: ricostruzione



40 MHz
~50 m

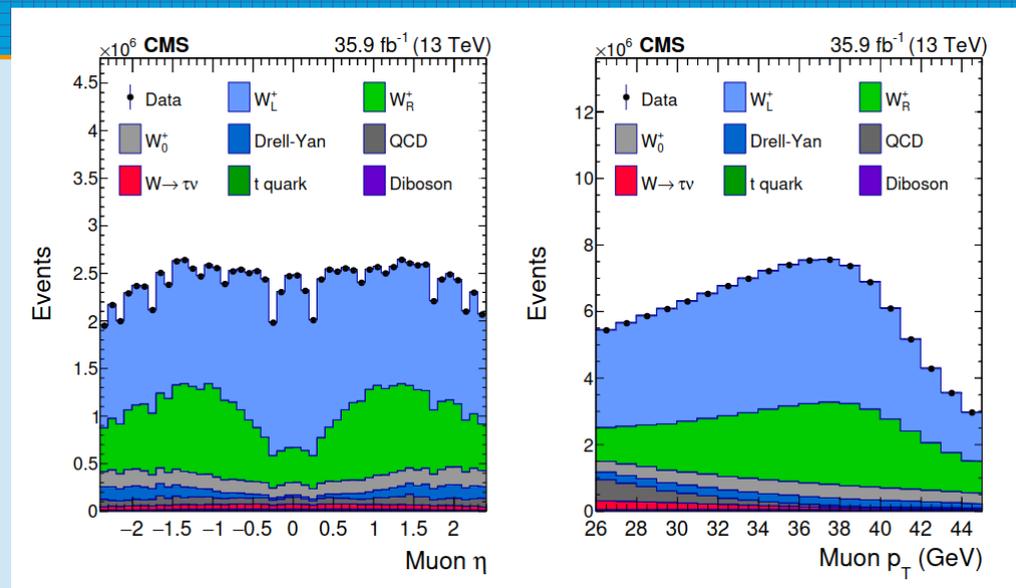
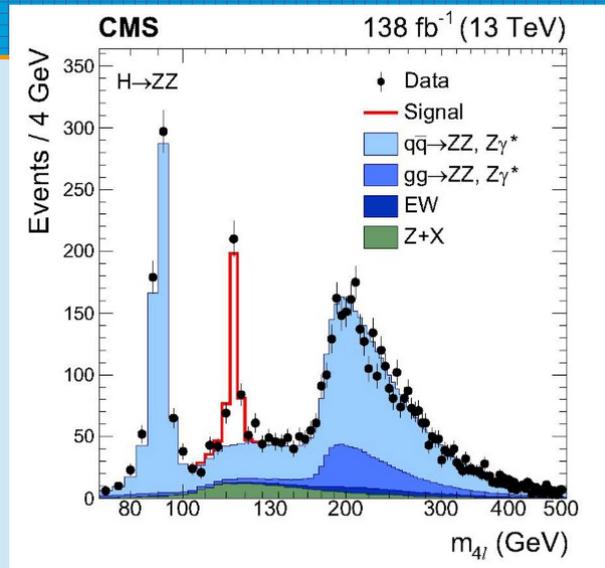
100 kHz
~400 m

1 kHz
~10 km

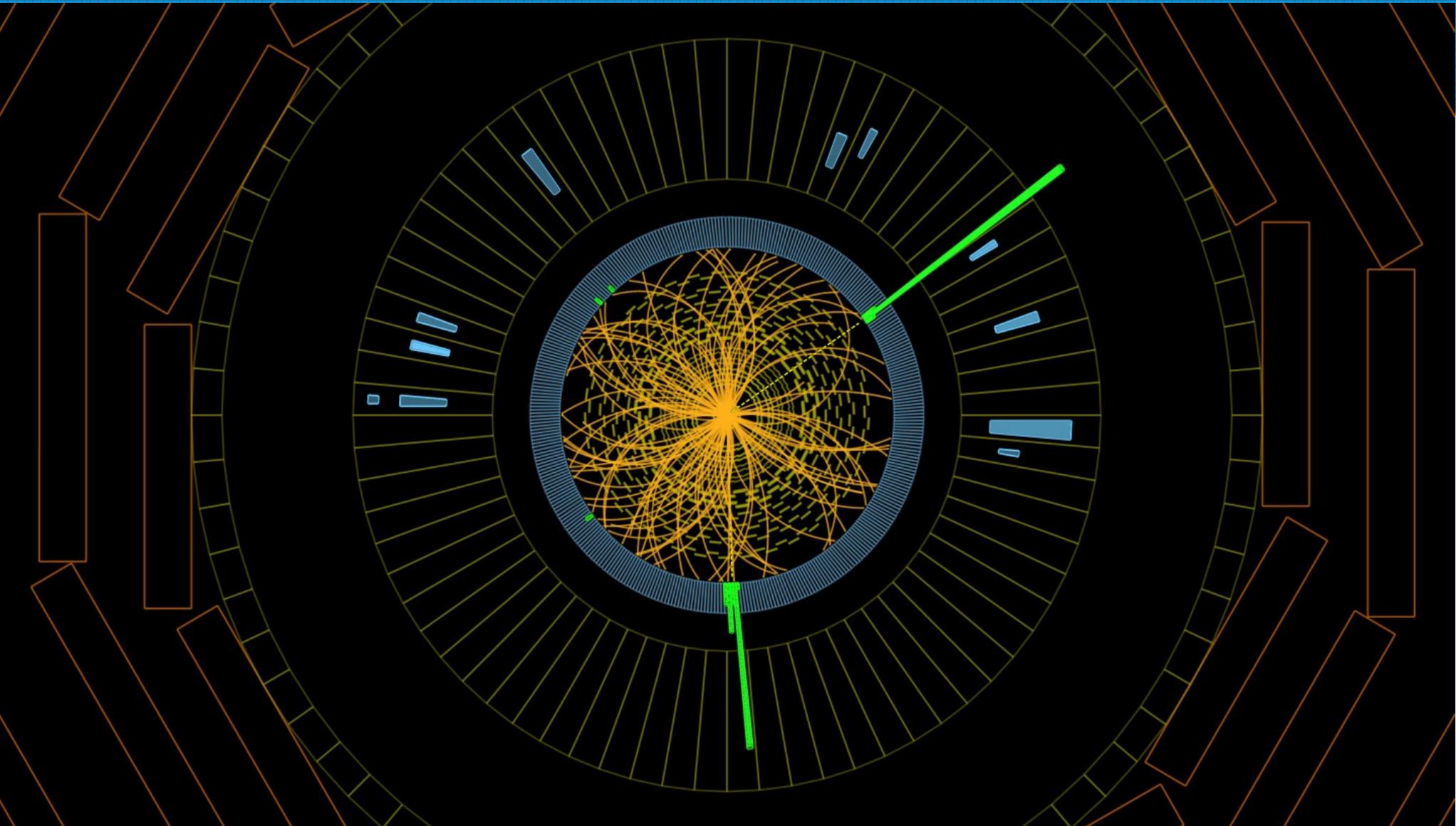
1 kHz
~10000 km

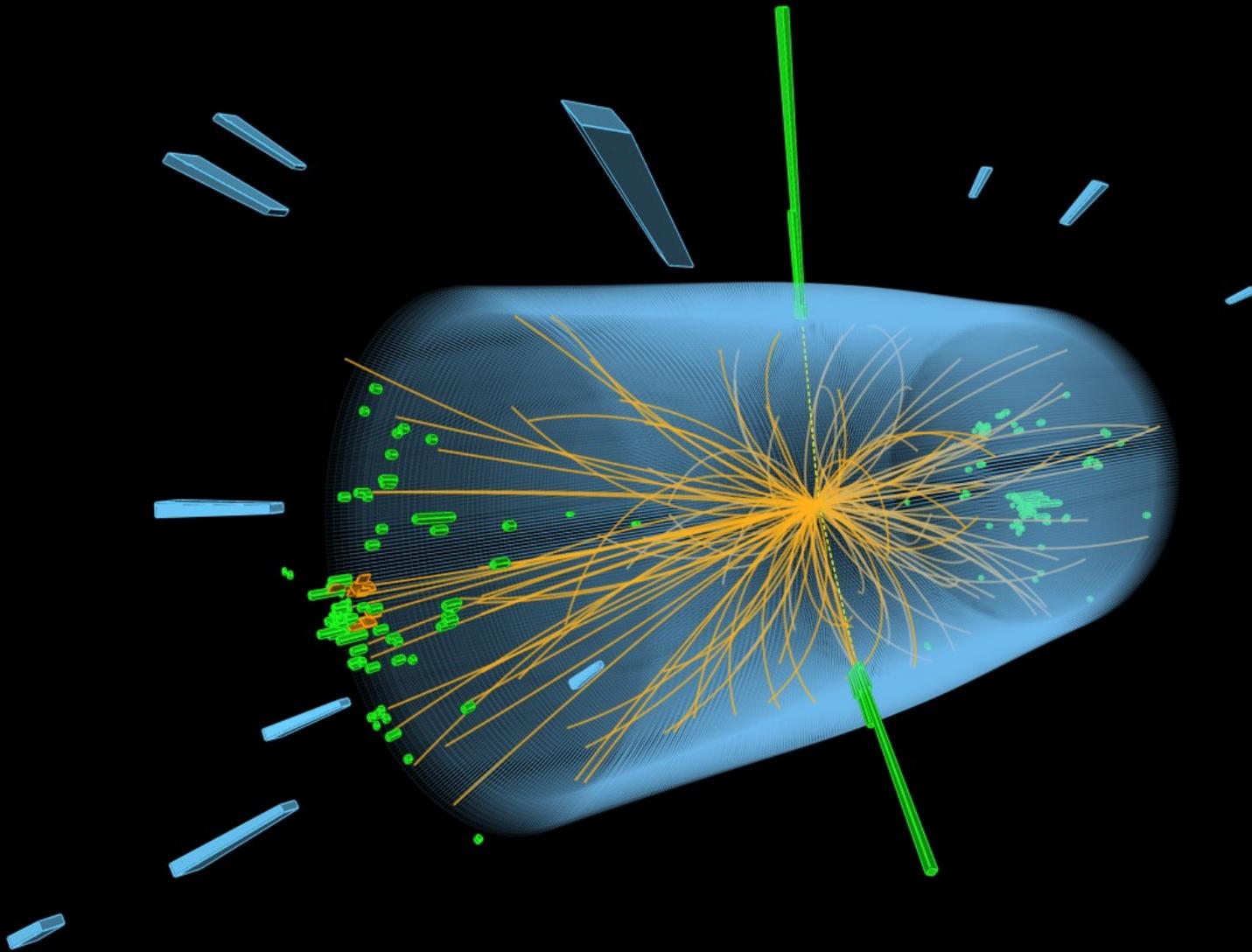
- Tutti gli eventi che vengono poi definitivamente salvati su nastro e portati al sito CERN di Meyrin dove si trova il Tier-0
- Vengono poi inviati ai centri sparsi per il mondo dove vengono poi ricostruiti con la massima precisione possibile dalle informazioni dei vari sottorivelatori per avere un'interpretazione 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

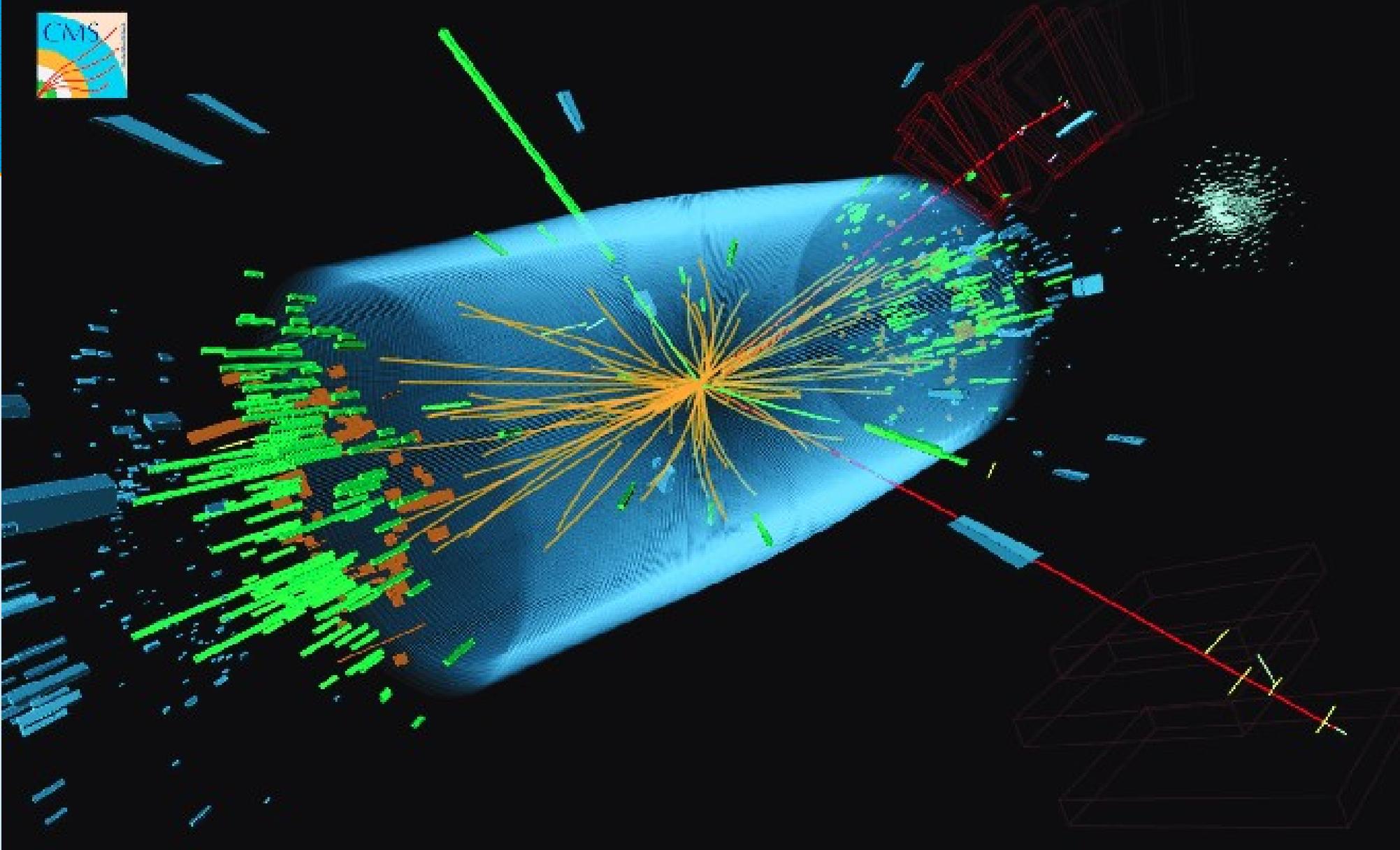
Presi dati: analisi



- 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







Buon viaggio!

