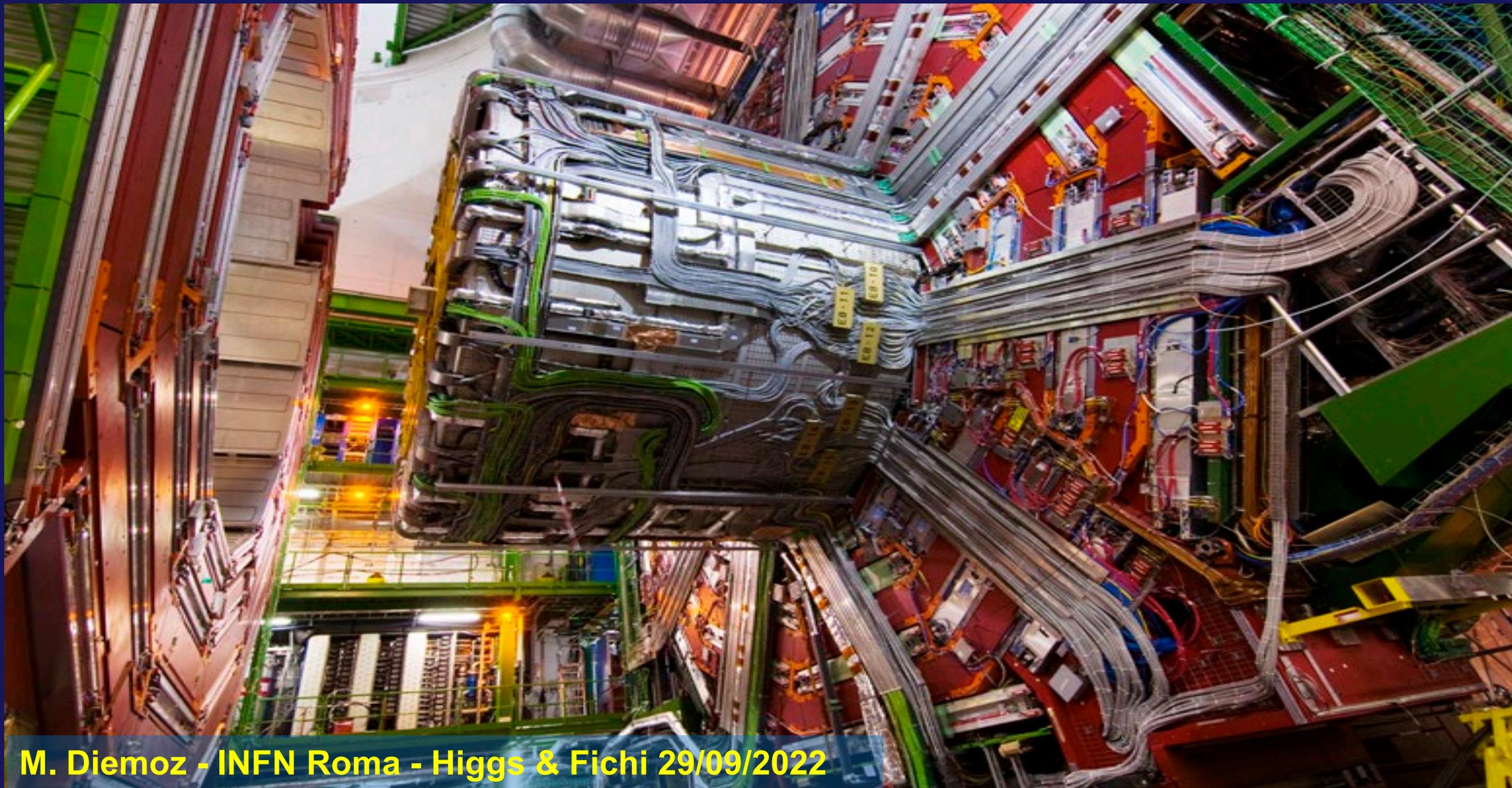
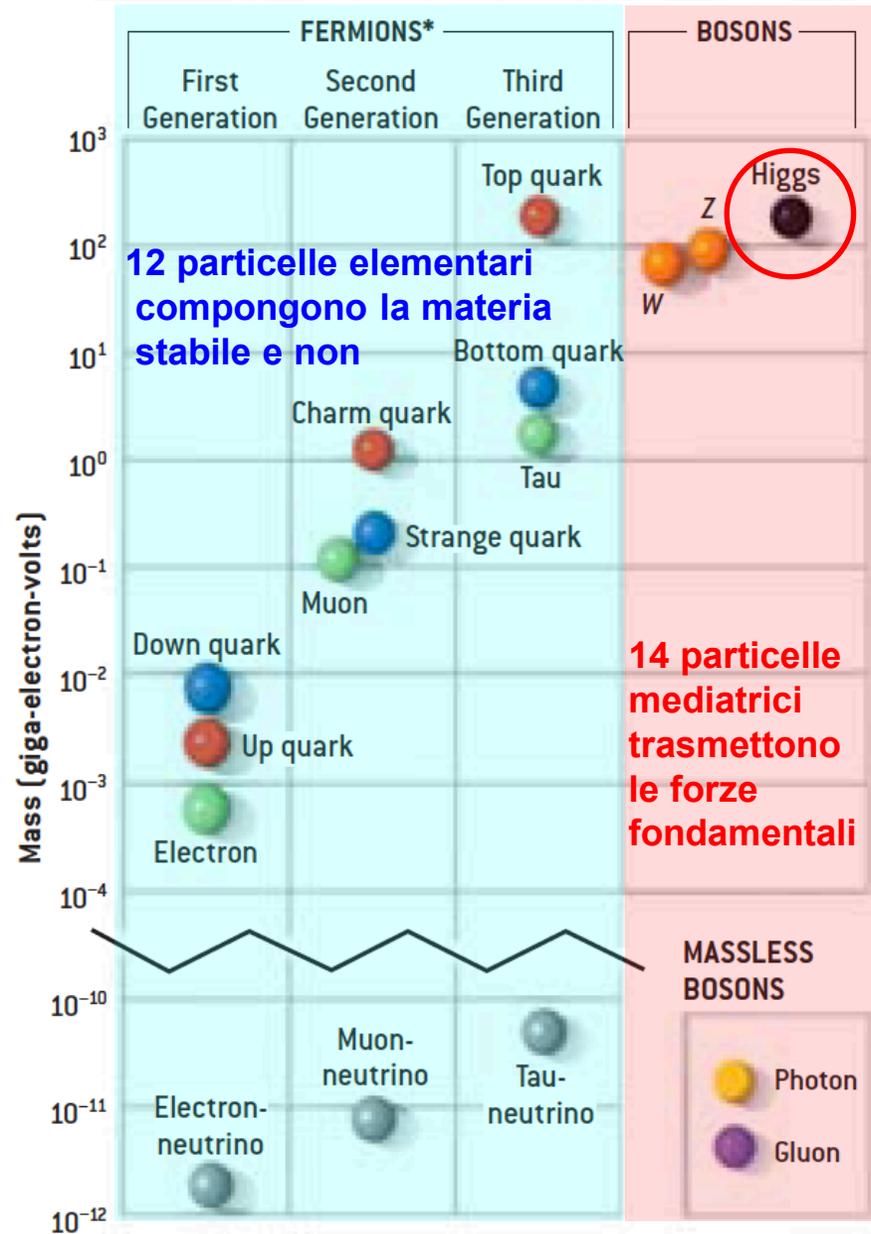


Compact Muon Solenoid



M. Diemoz - INFN Roma - Higgs & Fichi 29/09/2022

Il problema e la soluzione



$$\sigma_{inel} = 100 \text{ mb} \rightarrow 10^9 \text{ eventi/s}$$

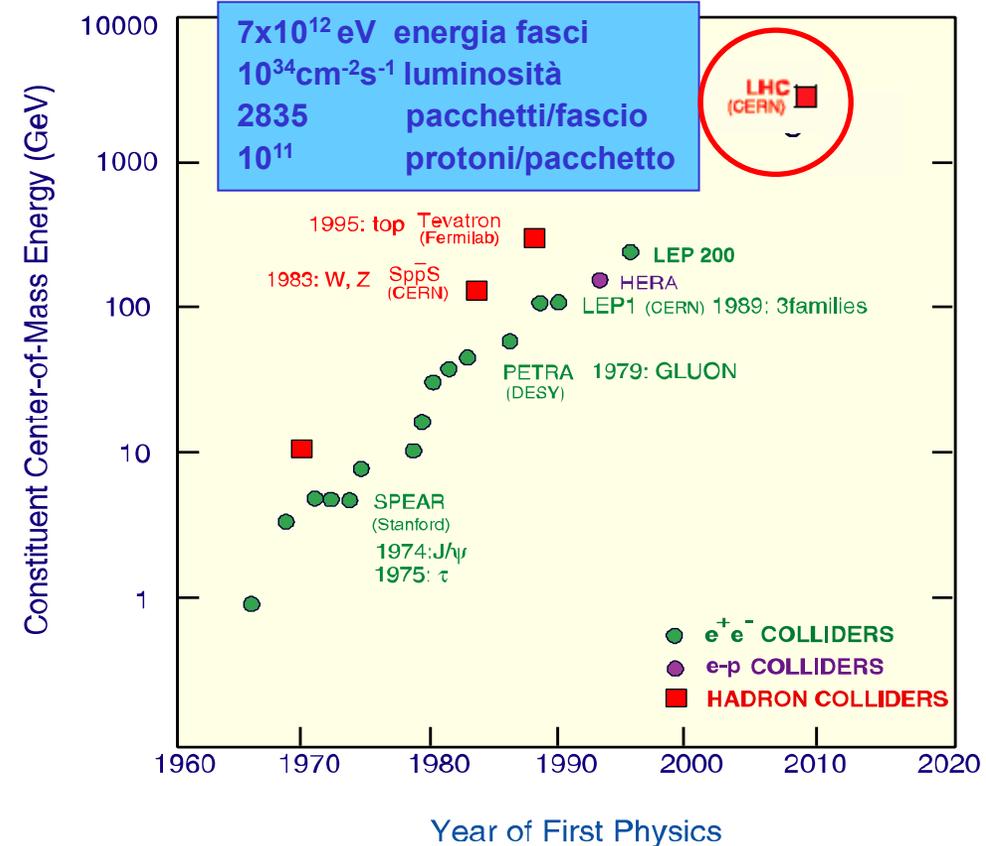
$$\sigma_{higgs} = 1 \text{ pb} \rightarrow 10^{-2} \text{ eventi/s}$$

1 incrocio/25 ns
20 eventi/incrocio \rightarrow 1000 tracce

Neutroni: fino a 10^{17} n/cm^2 in 10 anni
Gamma: fino a 10^7 Gy^*

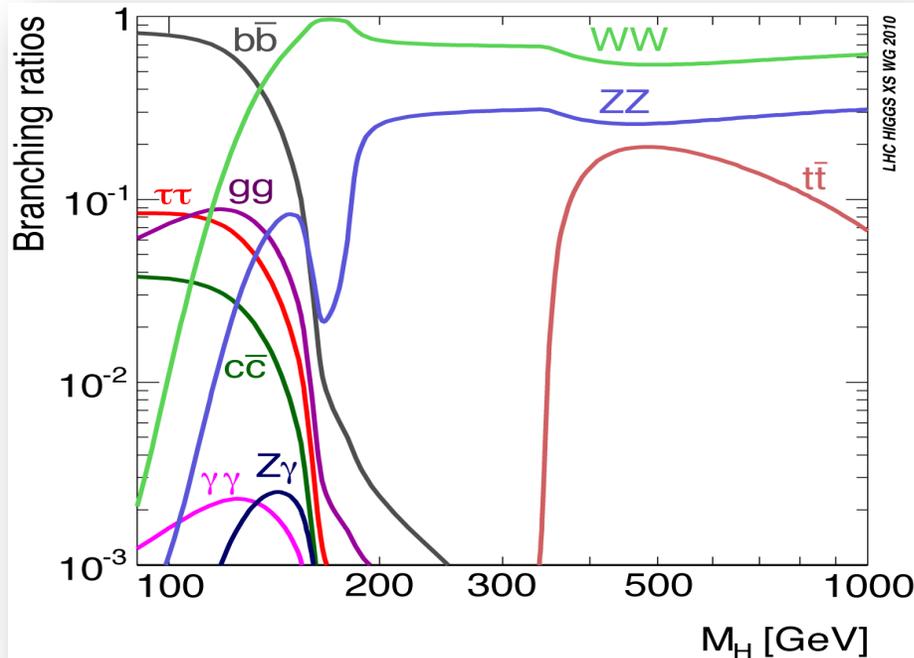
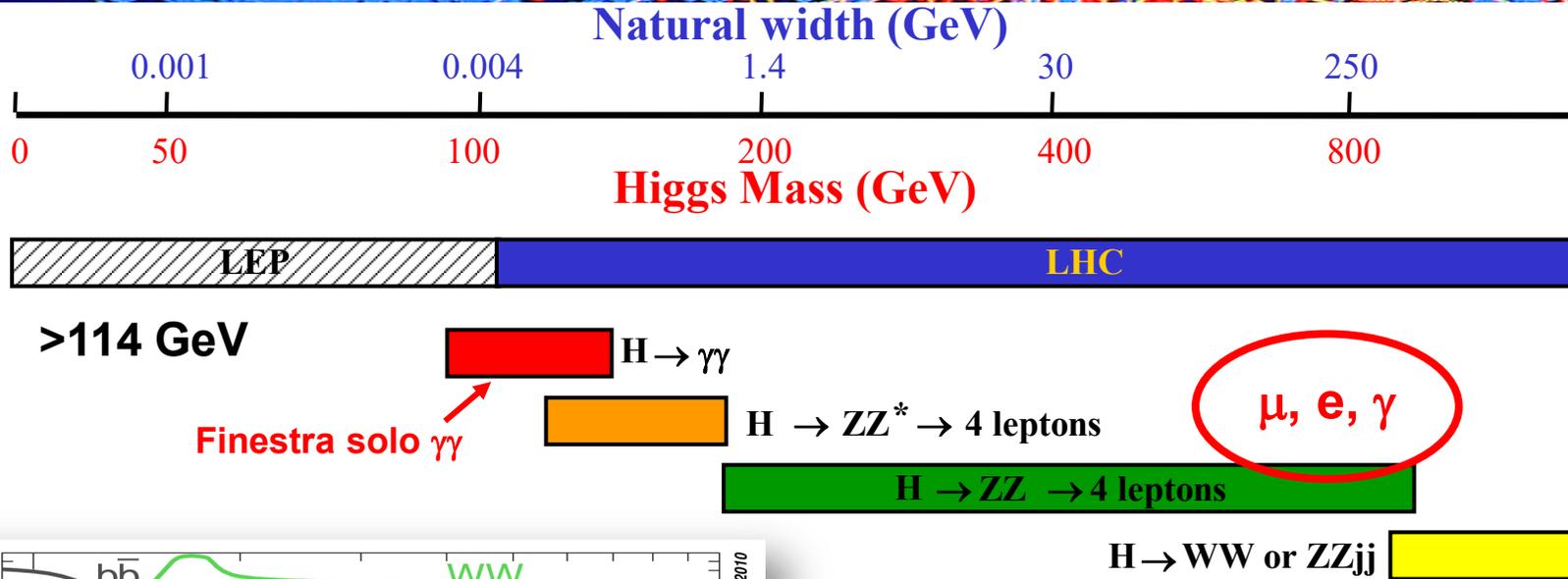


- Granularità ($10^5 \div 10^7$ canali)
- Velocità di risposta (25-50 ns)
- DAQ + trigger ($10^9 \rightarrow 10^2 \text{ ev/s}$)
- Alta resistenza alle radiazioni

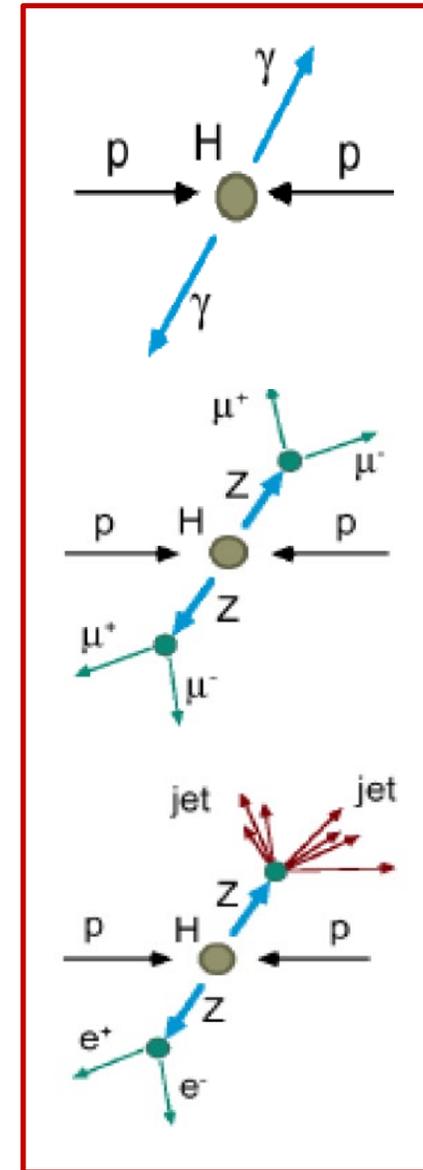


Macchine fotografiche che scattano 40 milioni di volte ogni secondo!

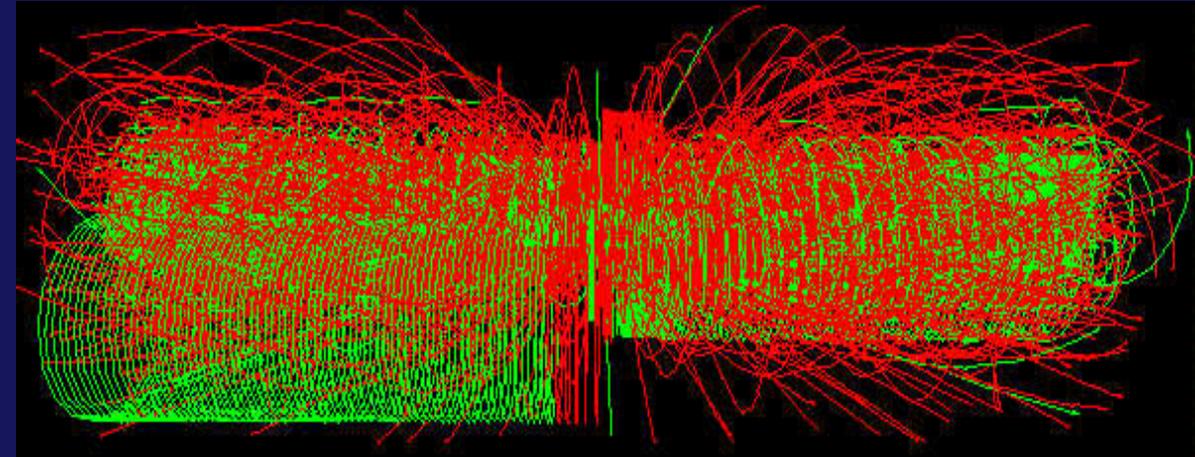
Caccia al Bosone di Higgs



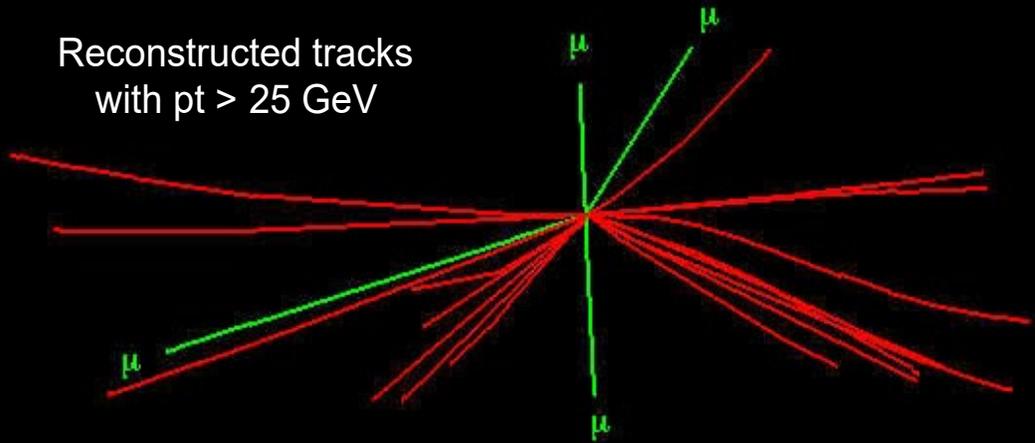
Accoppiamenti proporzionali alla massa delle particelle:
il Bosone di Higgs decade di preferenza nella coppia di particelle più pesanti che gli sono accessibili. Ma la sua massa non si conosce a priori...



Trovare l'ago nel pagliaio!



Reconstructed tracks
with $pt > 25$ GeV

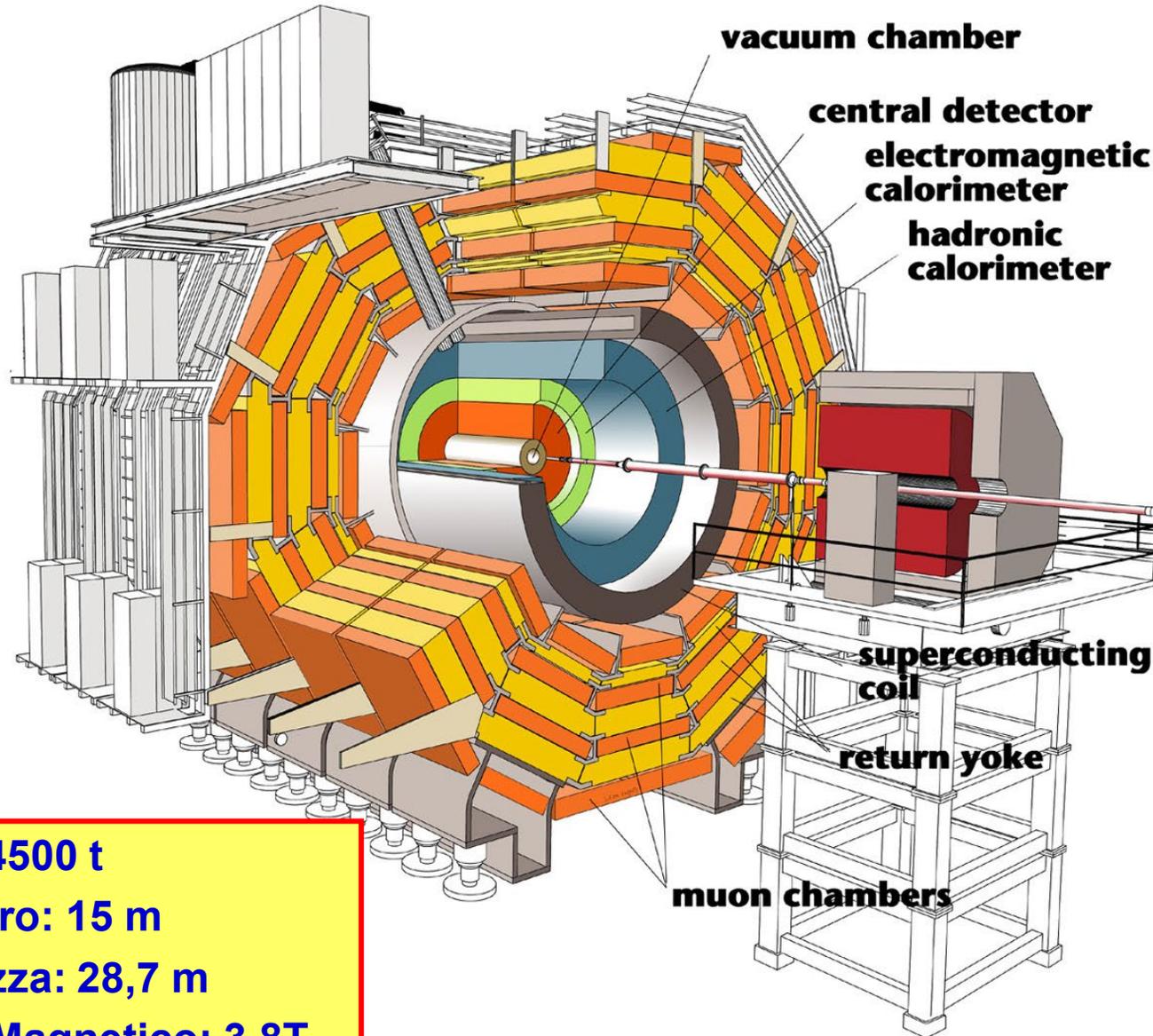


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \mu$

Sistema di rivelatori in grado di:

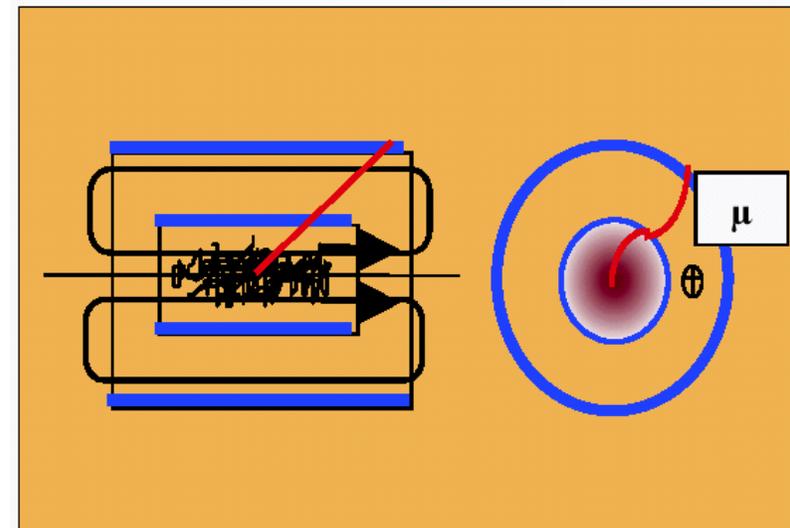
- Misurare il momento di particelle cariche, in particolare muoni da 1 TeV con precisione del 10%
- Misurare con buona precisione fotoni ed elettroni
- Misurare con buona precisione Jet adronici e energia mancante
- Identificare vertici secondari, buona capacità di tracciamento nel rivelatore centrale

CMS: visione d'insieme



Struttura “classica” a Strati, ma non c'è nulla di scontato! E non si trova nulla di già fatto...

Schema magnetico solenoidale (curva particelle cariche nel piano radiale)

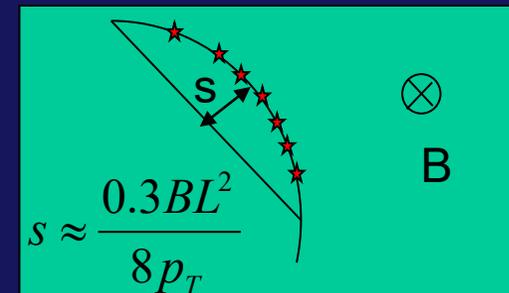


- **Peso: 14500 t**
- **Diametro: 15 m**
- **Lunghezza: 28,7 m**
- **Campo Magnetico: 3.8T**

Il cuore di CMS: il magnete

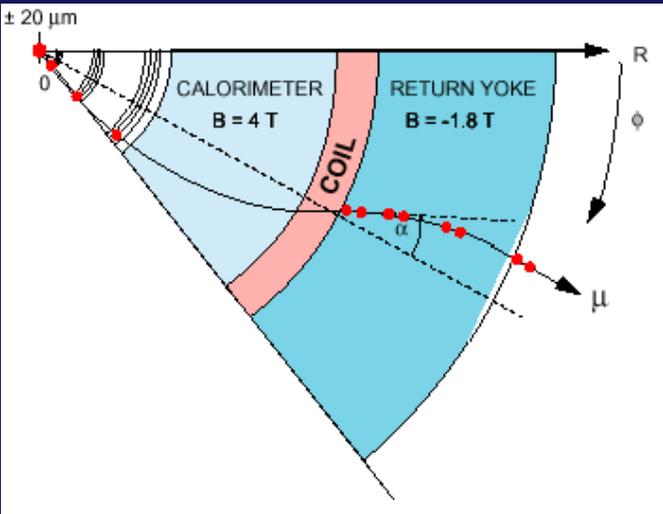
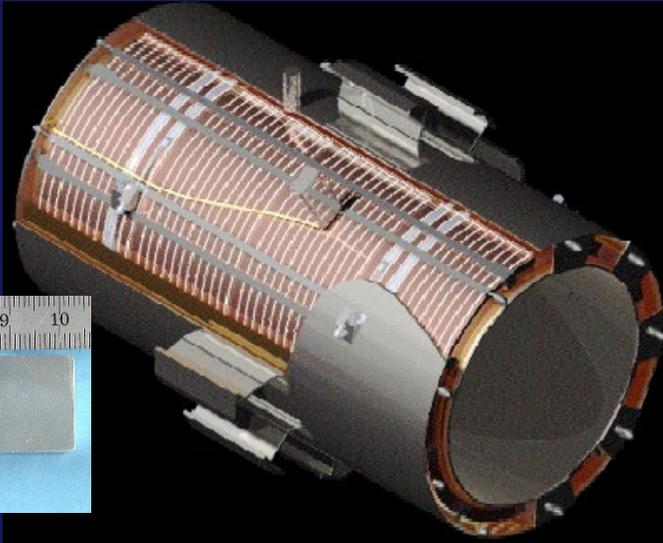
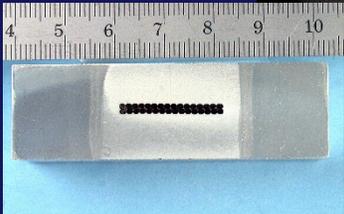
Solenoid Super Conduttore: B=3.8 T su 1.2m + 2T su 3m

Solenoid composed by 5 modules (CB-2, CB-1, CB0, CB+1, CB+2)



$$\frac{\sigma(P_T)}{P_T} \approx \sqrt{\frac{720}{N+4}} \sigma \frac{p_T}{0.3BL^2}$$

$\sigma = 100\mu\text{m}$
nelle camere
per muoni

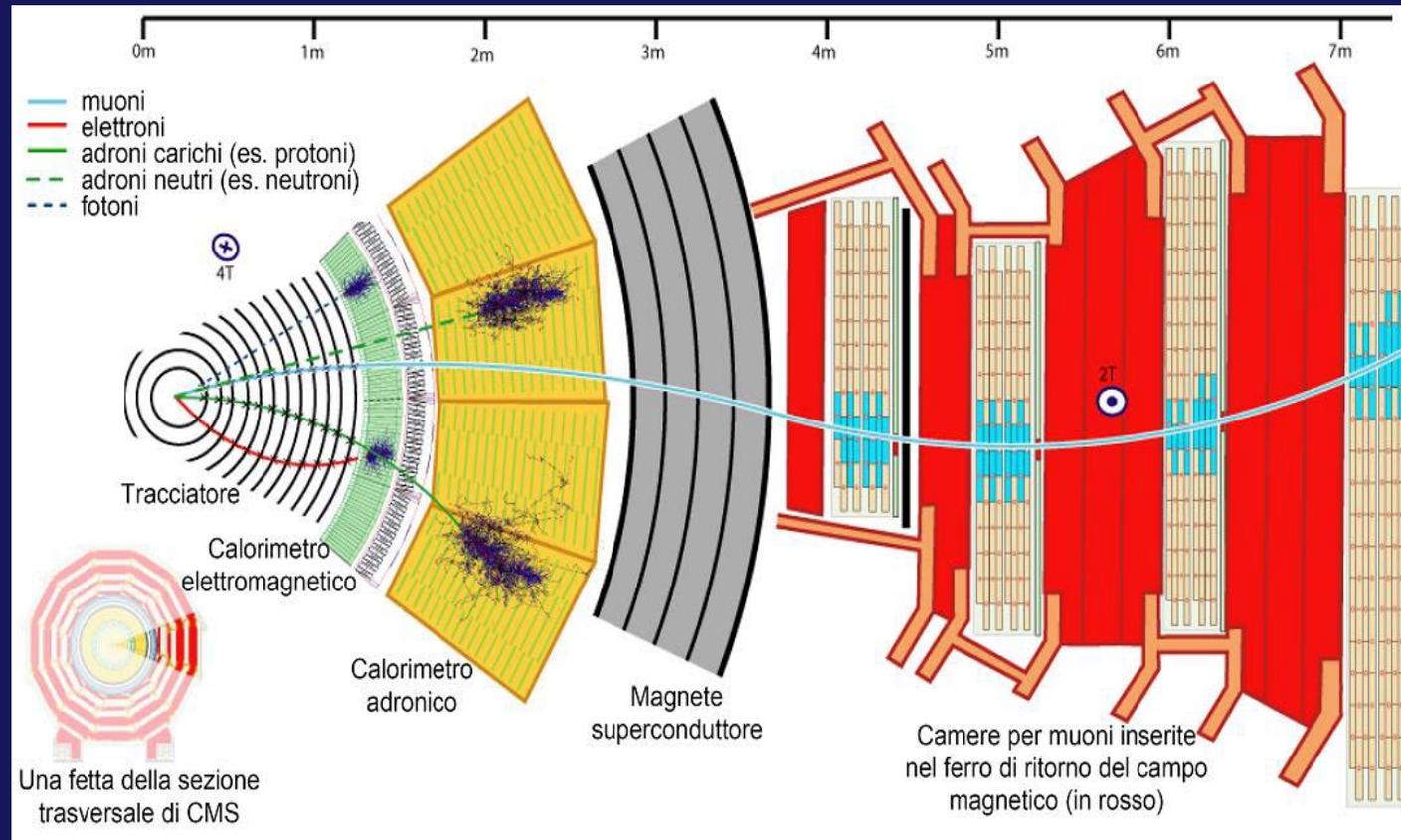


Parameter	Solenoid
Inner diameter	5.9 m
Outer diameter	6.5 m
Axial length	12.9 m
Number of coils	1
Number of turns per coil	2168
Conductor size (mm ²)	64 x 22
Current	19.5 kA
Stored energy	2700 MJ

L'impatto del magnete

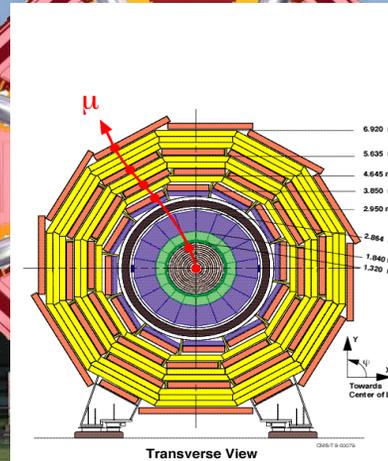
La scelta del sistema magnetico influenza il disegno dei rivelatori, in particolare CMS (deve essere compatto...)

Scelta impegnativa per calorimetria elettromagnetica e tracciamento: tutto contenuto in un raggio di ~3m



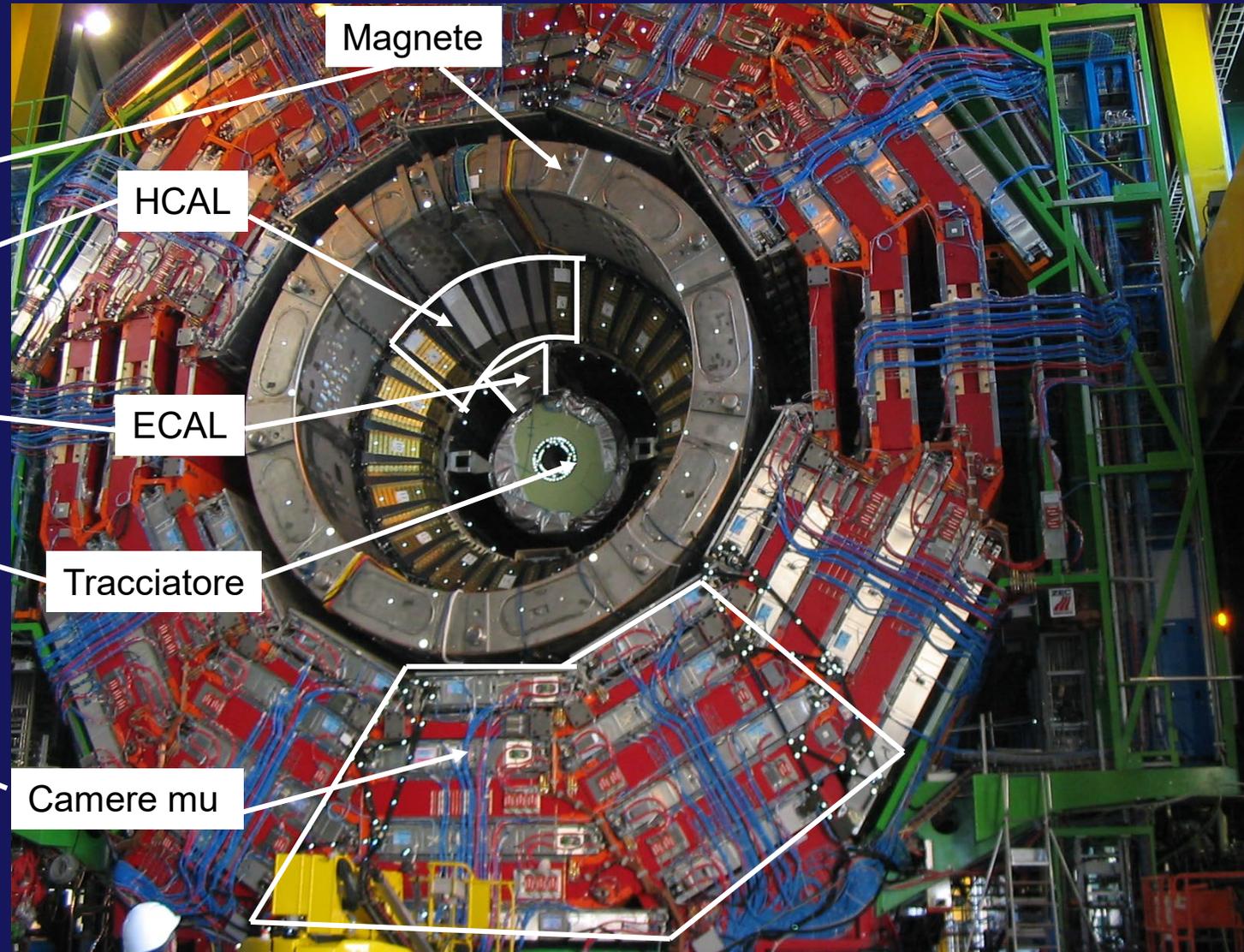
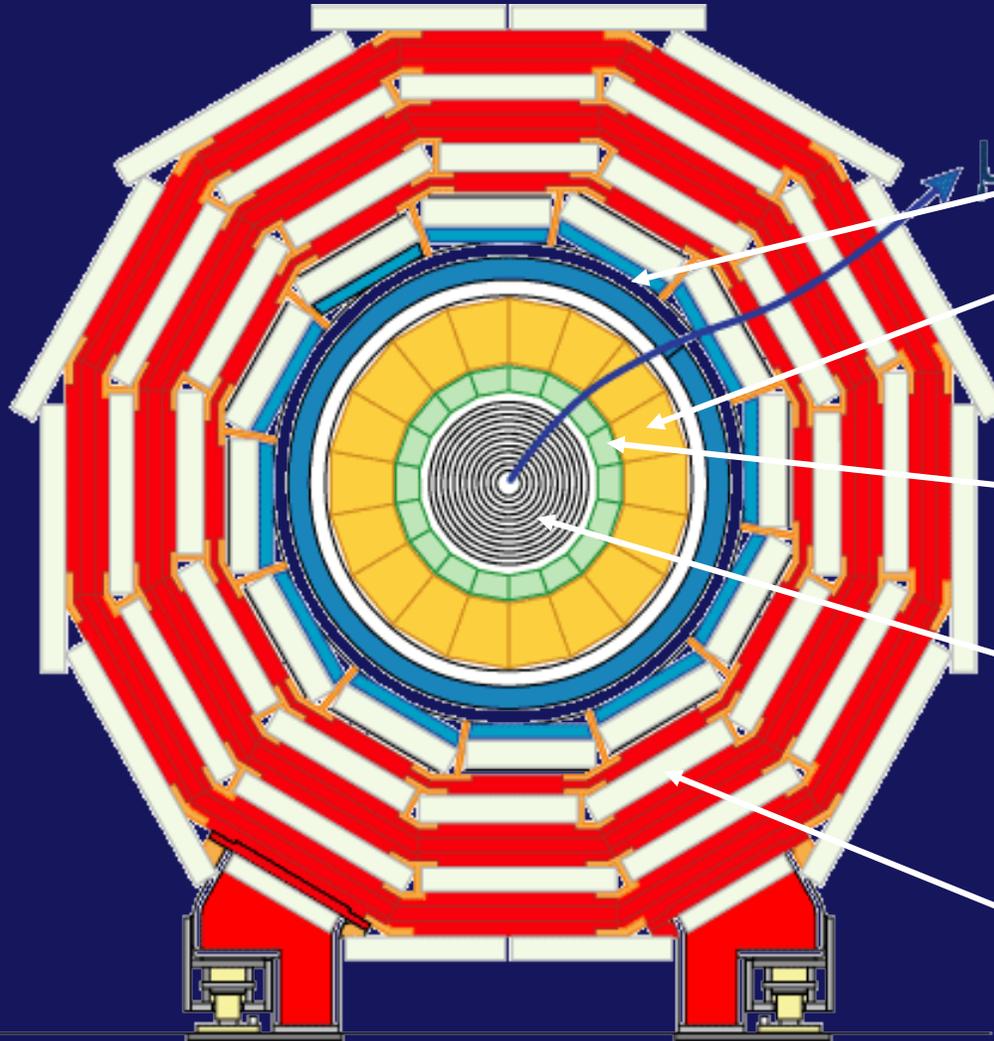
C di compatto

building 40
palazzo di 5 piani
Al CERN



**ATLAS & CMS:
Esperimenti generalisti, stessi obiettivi di fisica, differenti filosofie di
rivelazione.**

Dal disegno alla realtà!



Un formidabile tracciatore

Interamente di silicio (precisione tipica sul punto 10μ)! 220 mq (esperimenti precedenti 1 mq)

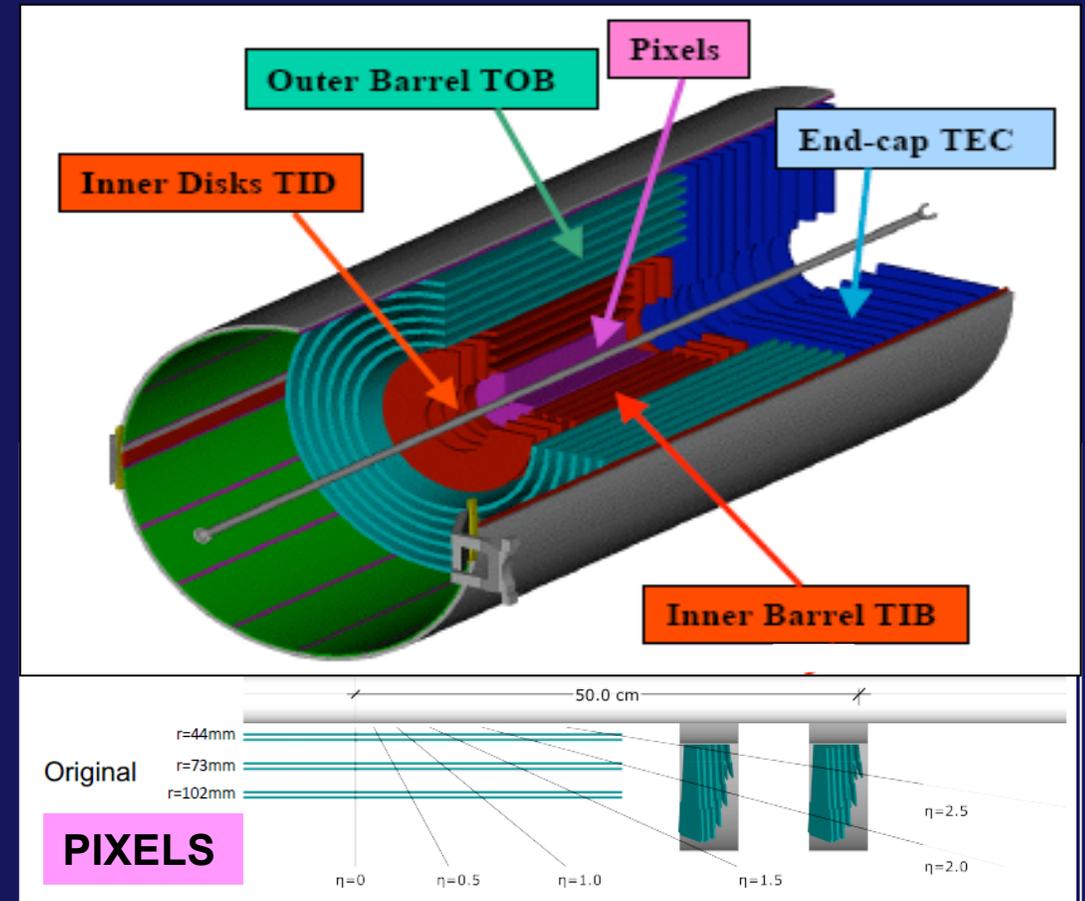
Densità di tracce per unità di rapidità a distanza r (cm) dal vertice: a $\eta = 0$: $\sim 30 / r^2$

PILE UP: oltre 25 eventi sovrapposti

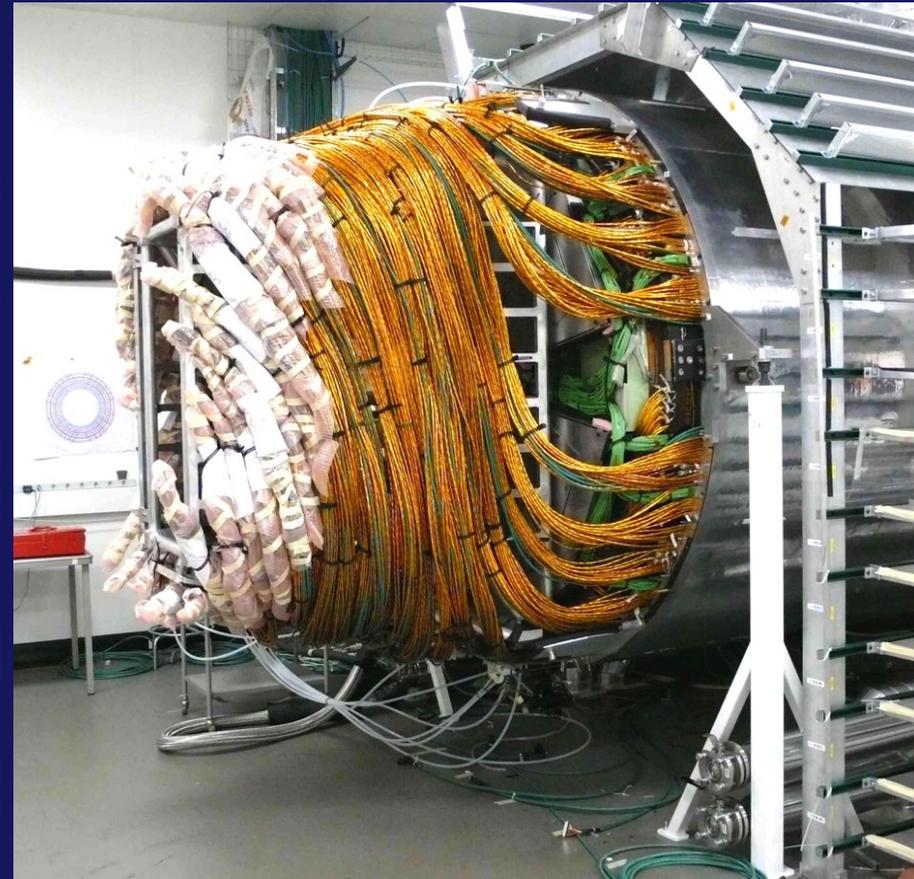
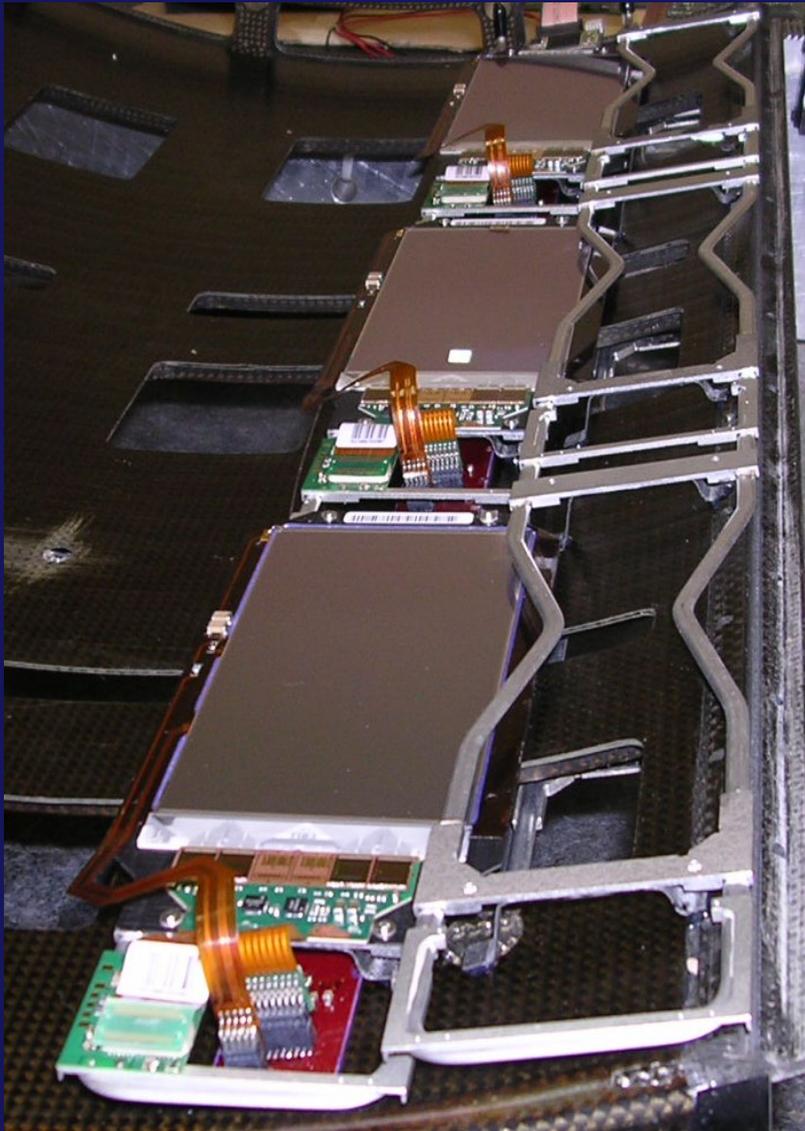
- Concetto: pochi strati di misura molto precisi e puliti.
 - 3 Strati a Pixel di Silicio
 - 10-14 Strati di misura a Strisce di Silicio.

Pixels: $\sim 1 \text{ m}^2$ di sensori di silicio, 65 M pixels, $100 \times 150 \mu\text{m}^2$, $r = 4, 7, 11 \text{ cm}$

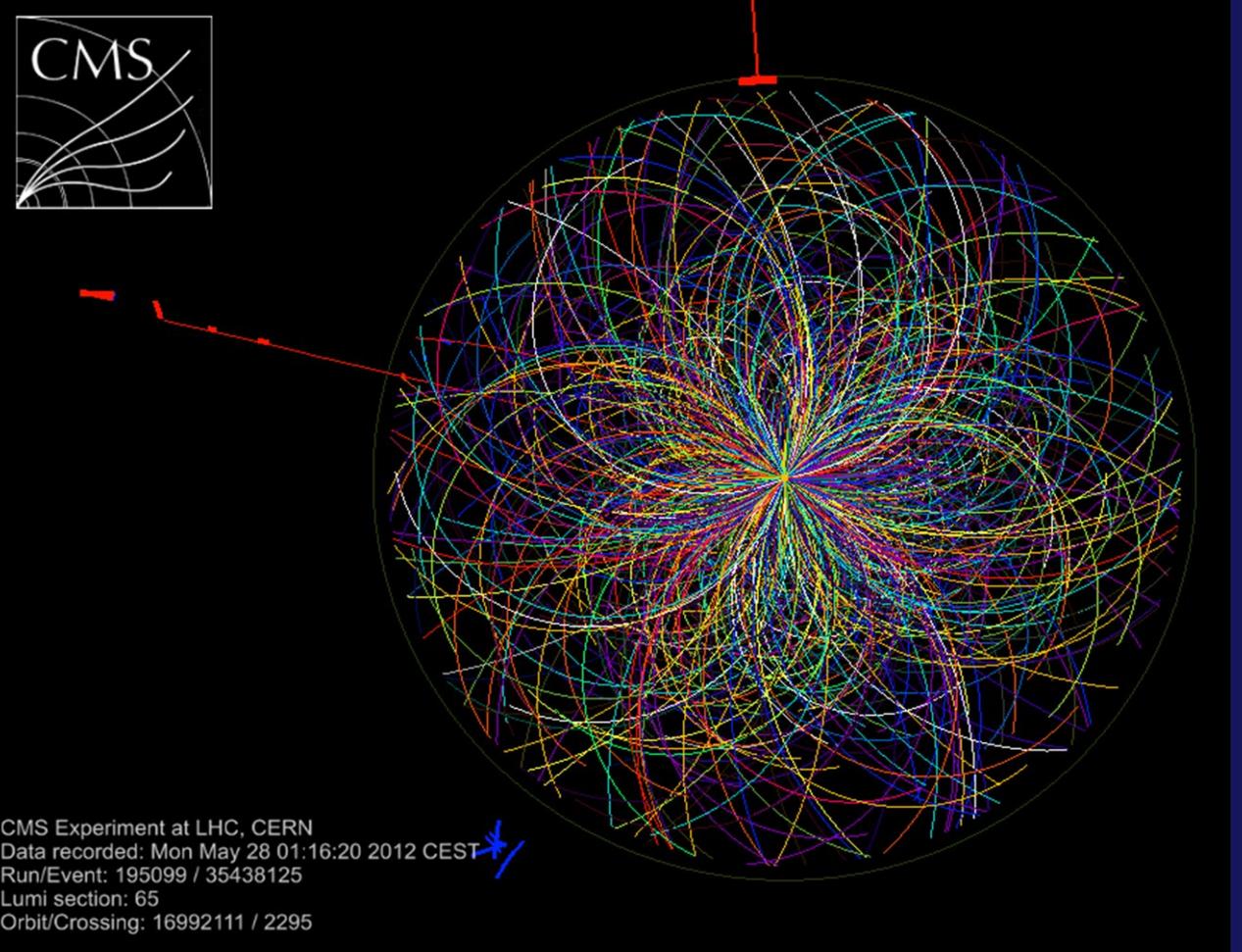
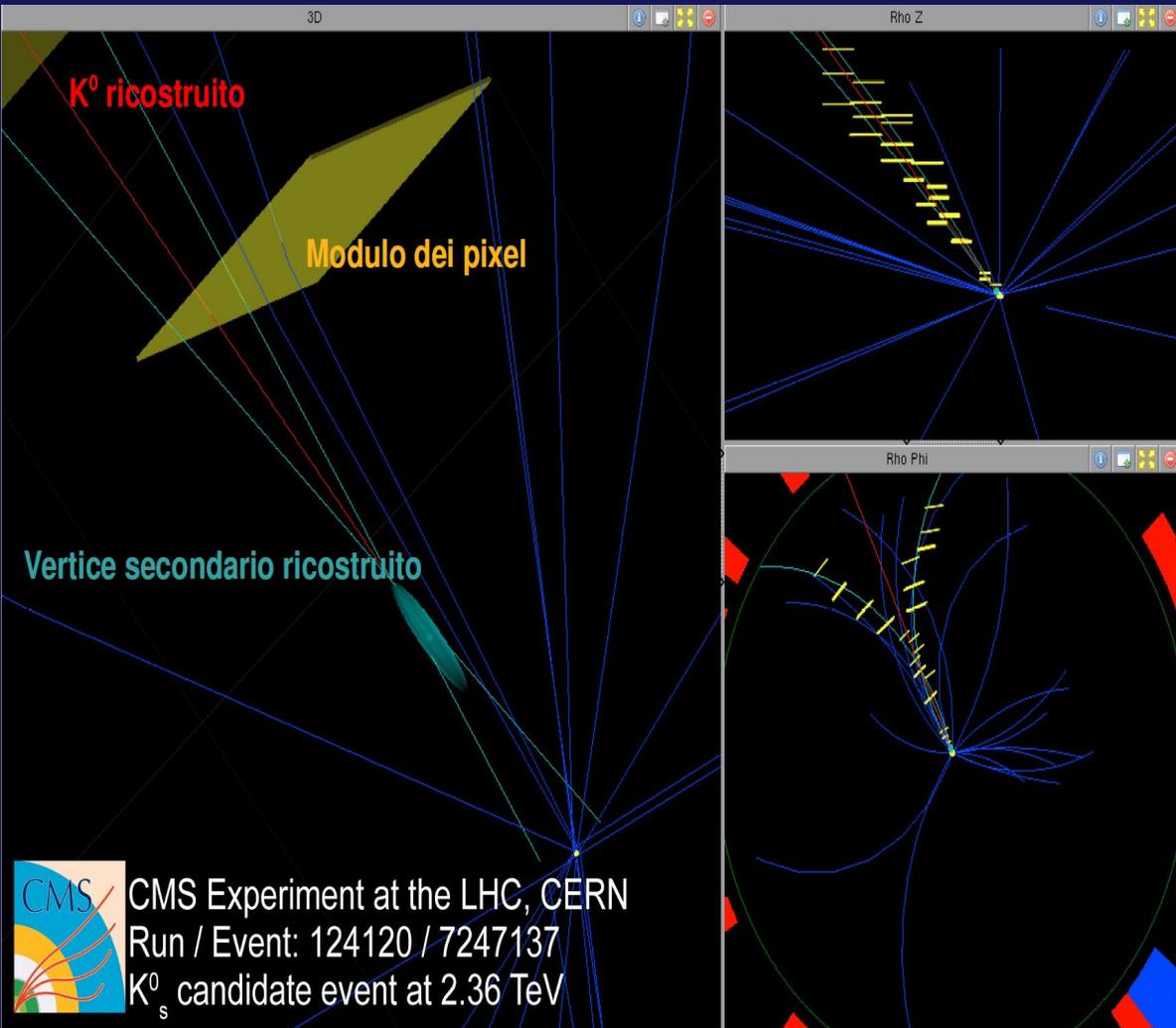
Si μ strips : 223 m^2 di sensori di silicio, 10 M strips, 10 punti tra $r = 20 - 120 \text{ cm}$



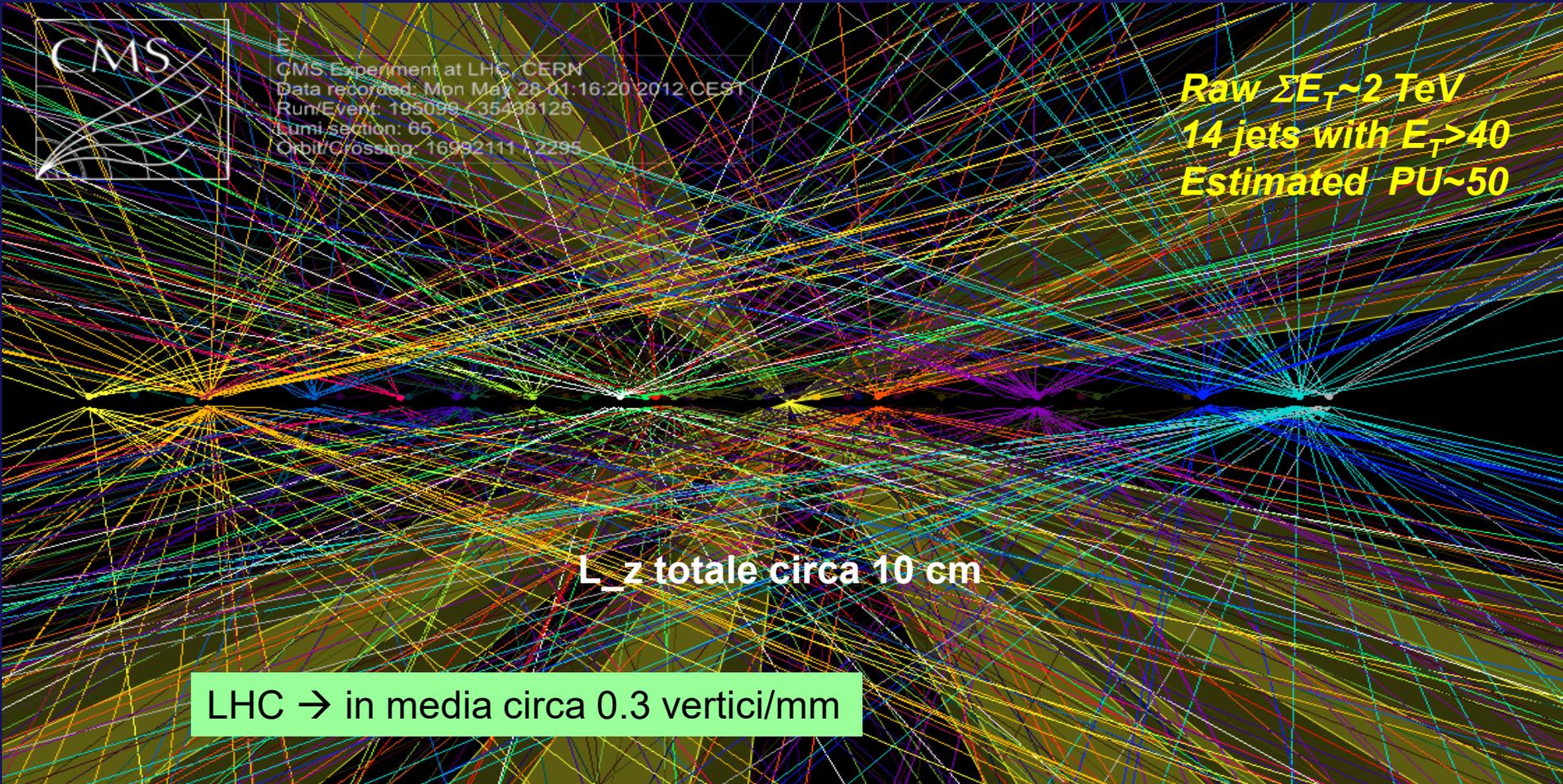
La costruzione



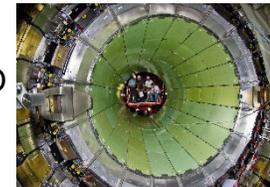
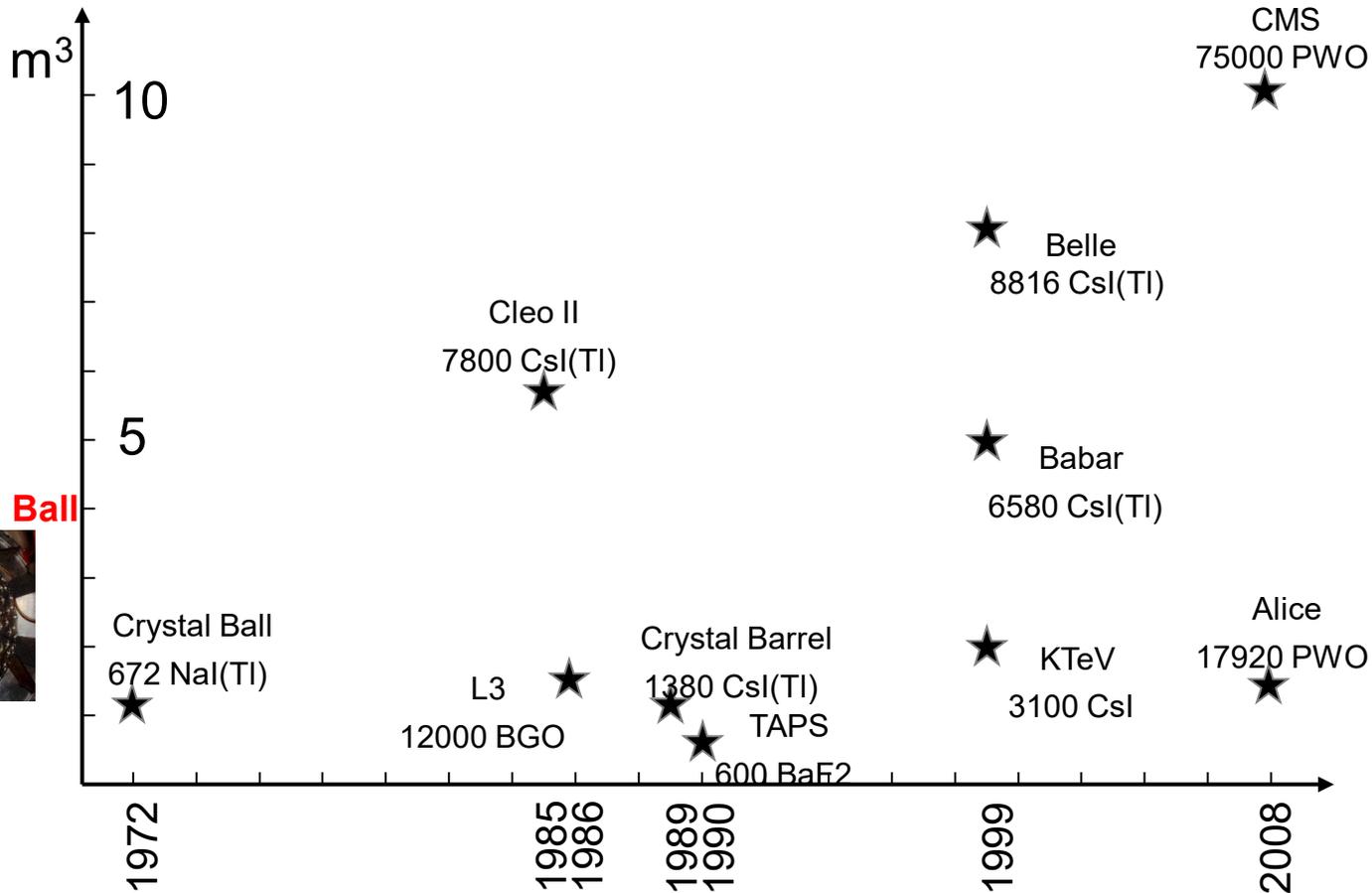
La prestazione



Spettacolare!



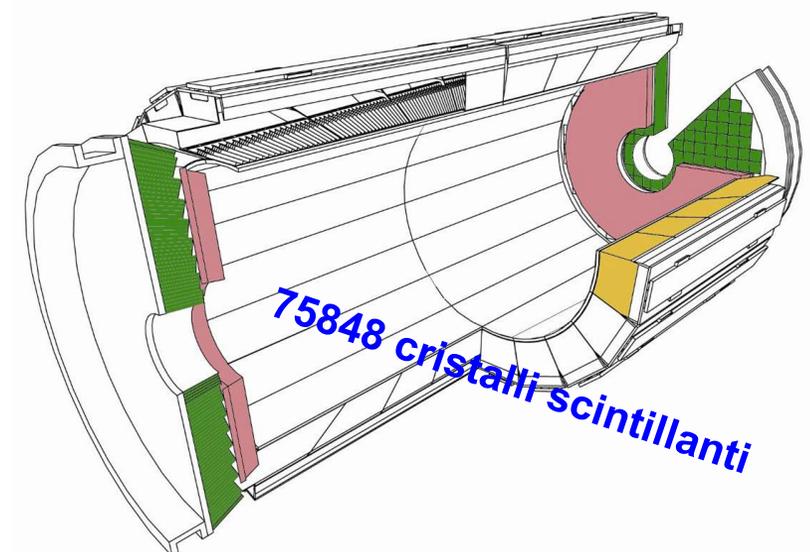
Calorimetro elettromagnetico ECAL



La scala è una sfida di per sè!

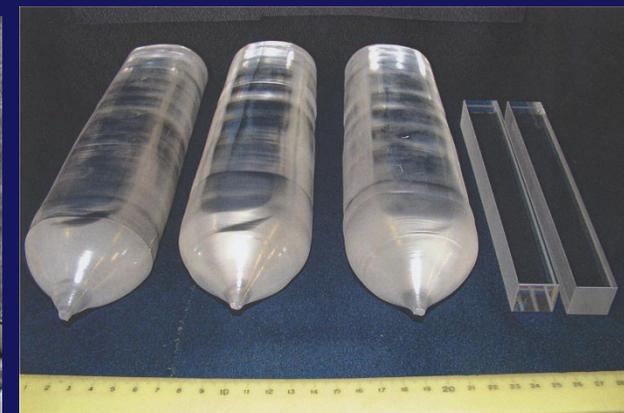
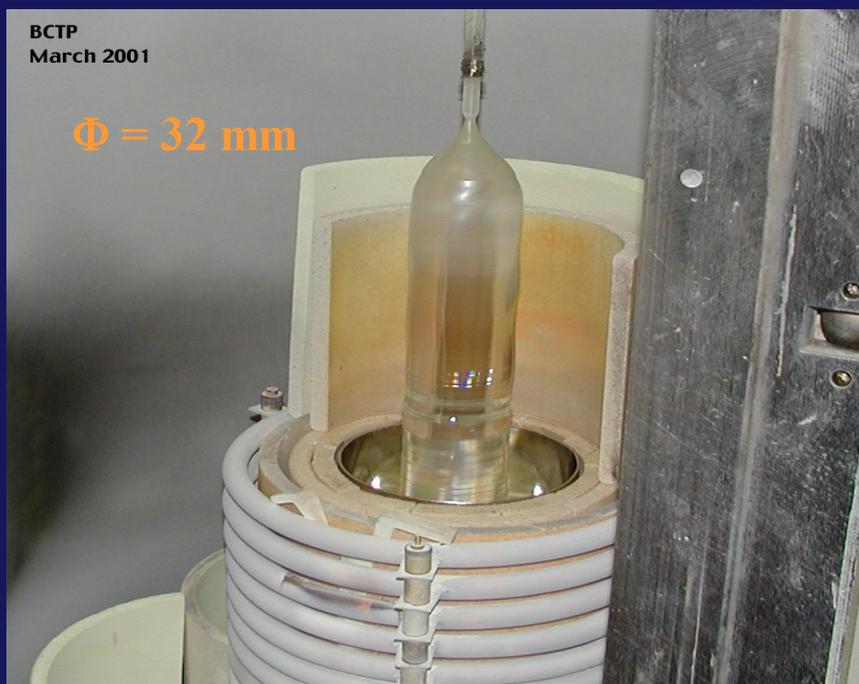
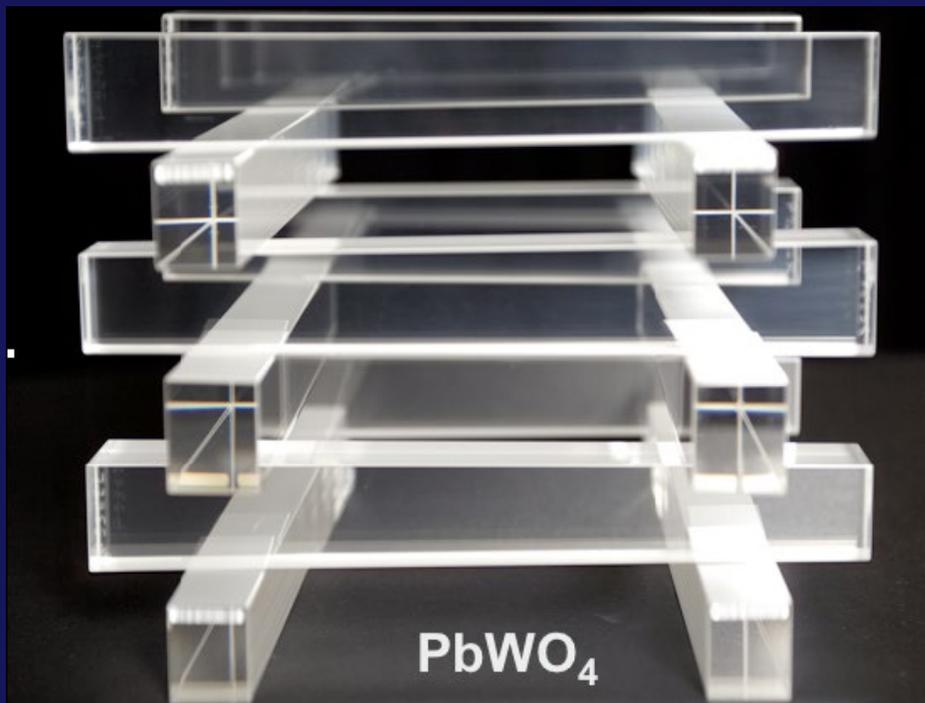
To CMS

- **Compatto**
- **Eccellente risoluzione in energia**
- **Veloce**
- **Alta granularità**
- **Resistenza alla radiazione**
- **E range MIP → TeV**



**Calorimetro omogeneo costituito da cristalli scintillanti PWO:
assorbimento sciame di alta energia in 23 cm**

R&D: il cristallo

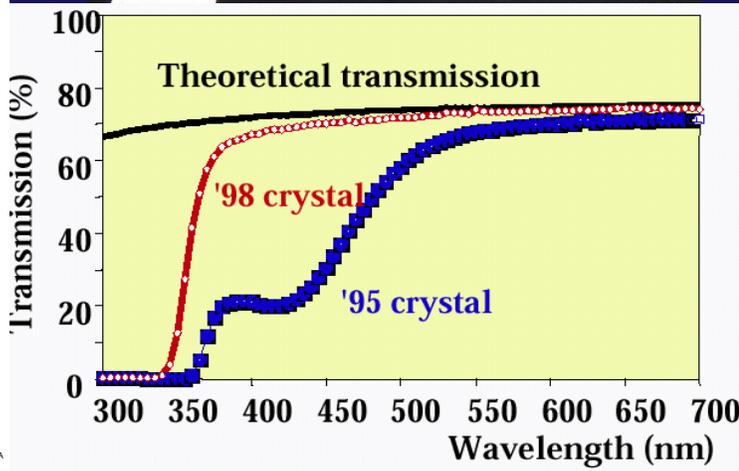
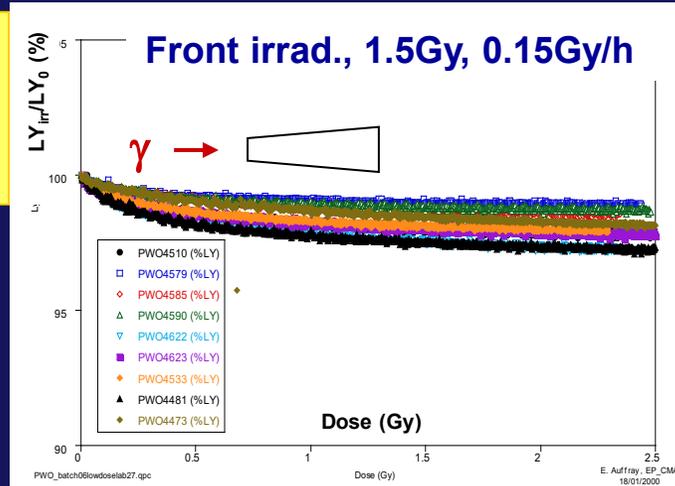


Parameter		Value
Radiation length	cm	0.89
Moliere radius	cm	2.2
Hardness	Moh	4
Refractive index		2.3
Peak emission	nm	440
% of light in 25 ns		80%
Light yield (23 cm)	γ/MeV	100

contenimento molto efficace per γ/e

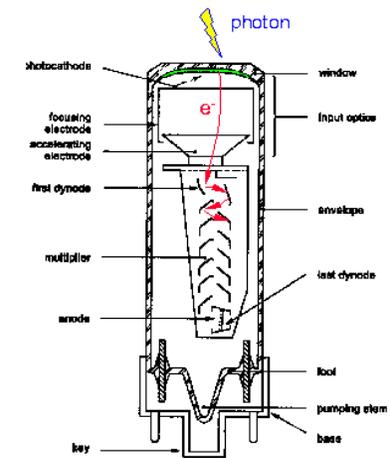
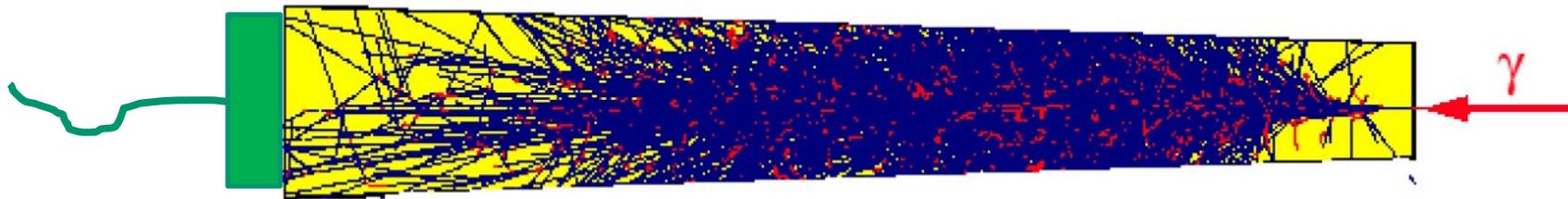
veloce

poca luce



R&D: il fotorivelatore

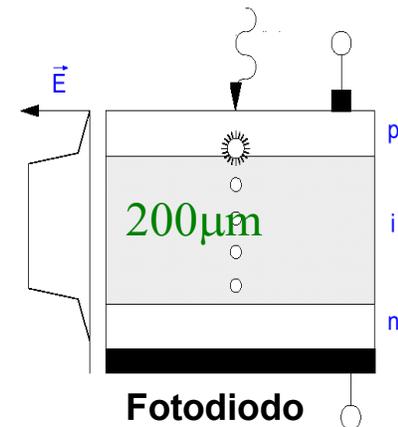
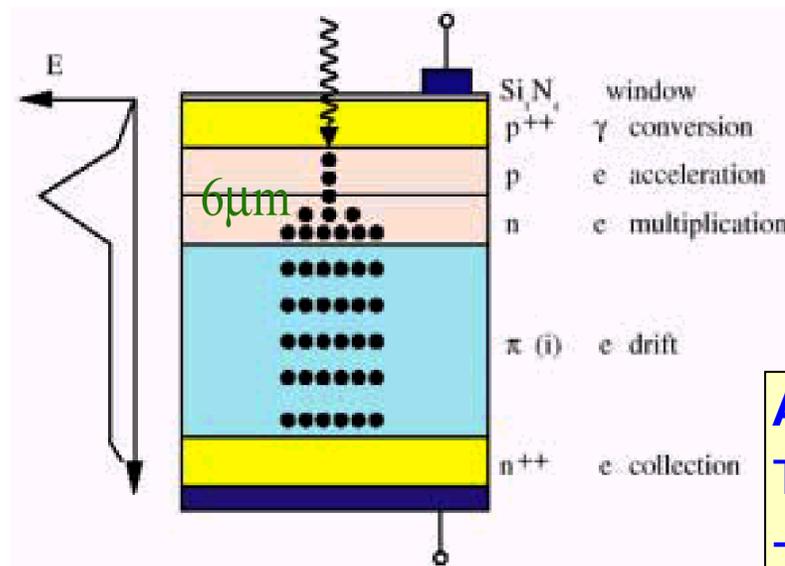
Essere insensibile al campo magnetico, avere alta efficienza quantistica, amplificare il segnale, occupare poco spazio, essere resistente alle radiazioni.



Fotomoltiplicatore



2 APDs per cristallo: 50 mm² di area attiva

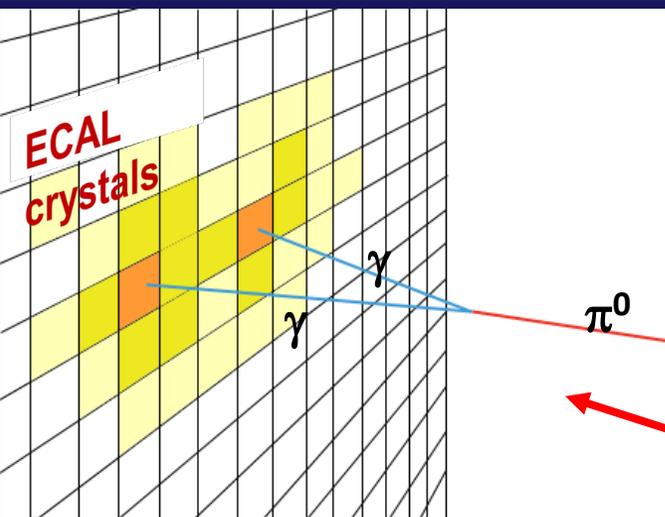
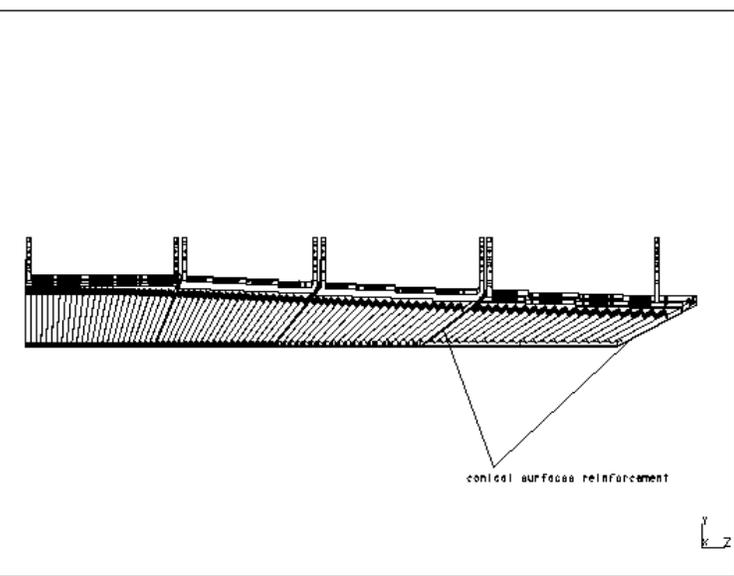
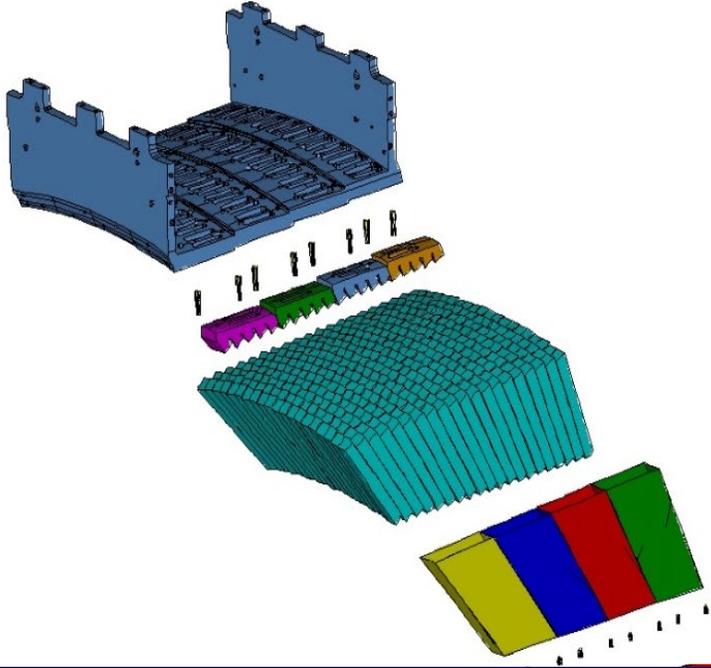


Avalanche photodiodes (APD)

Two 5x5 mm² APDs/crystal

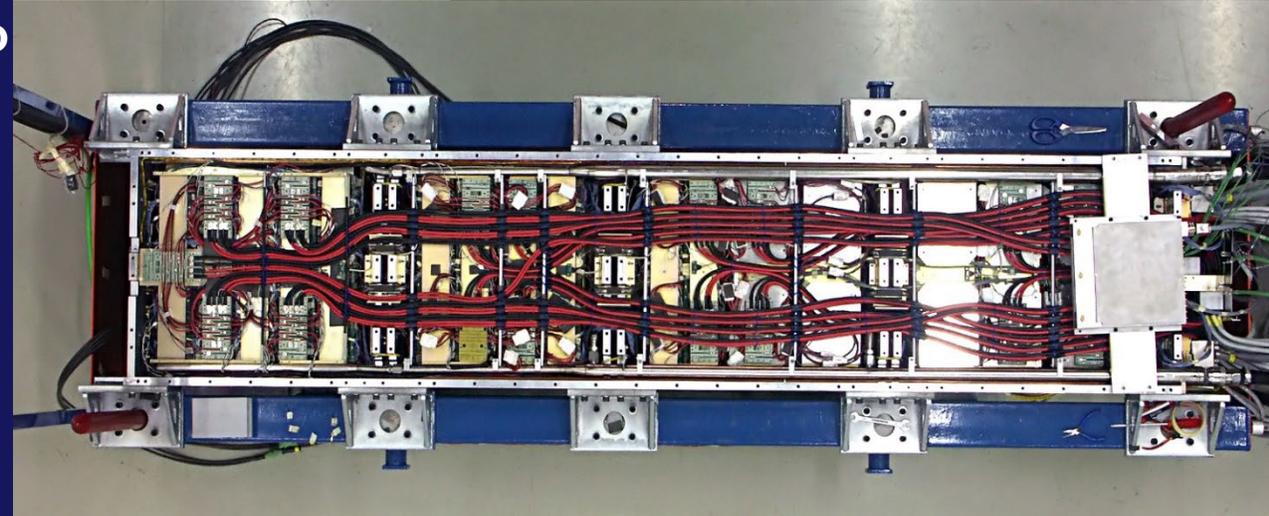
- Gain: 50 QE: ~75% @ λ_{peak} = 420 nm
- Temperature dependence: -2.4%/°C
- Gain dependence on bias V: 3%/V

Struttura granulare e semplice

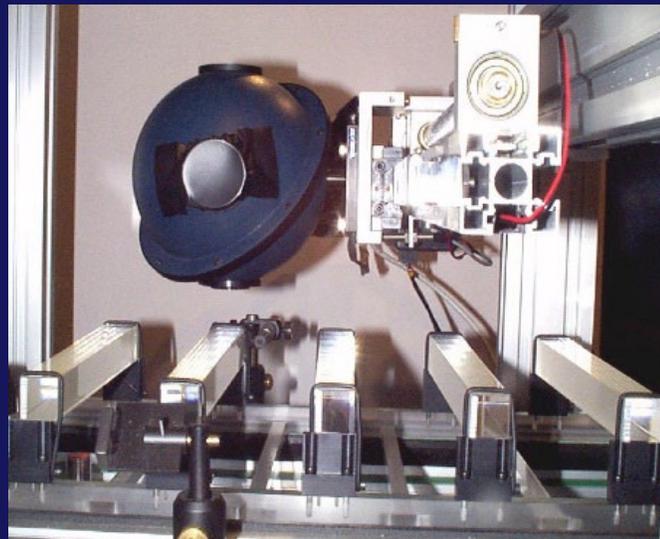
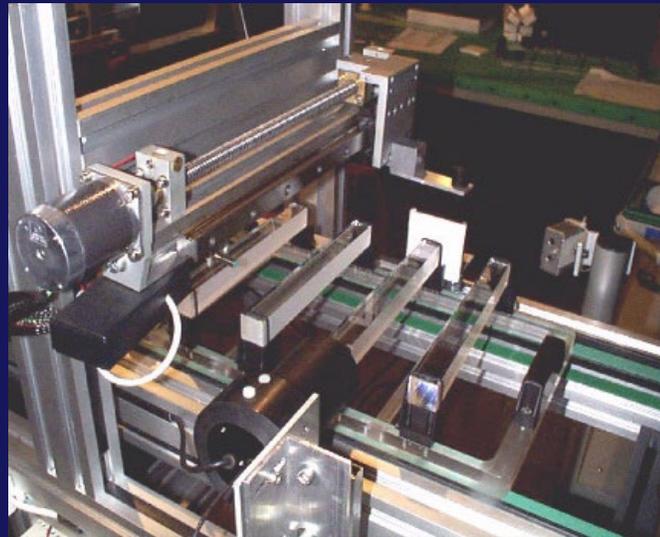


400/500 cristalli / modulo
144 moduli
4 moduli / supermodulo
36 supermoduli

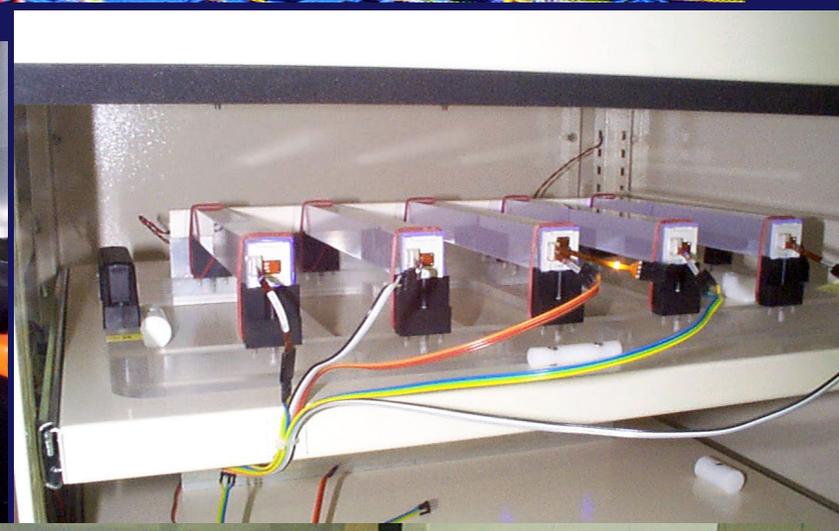
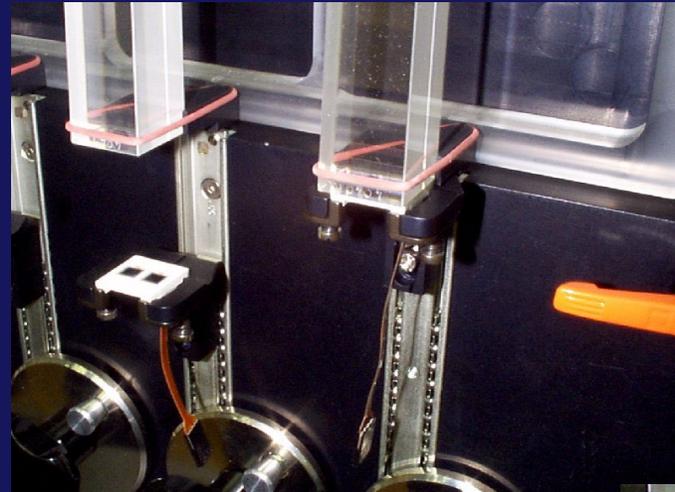
**Ricostruzione
semplice!**



Costruzione controllata in automatico



Da qui in poi servono gli umani...

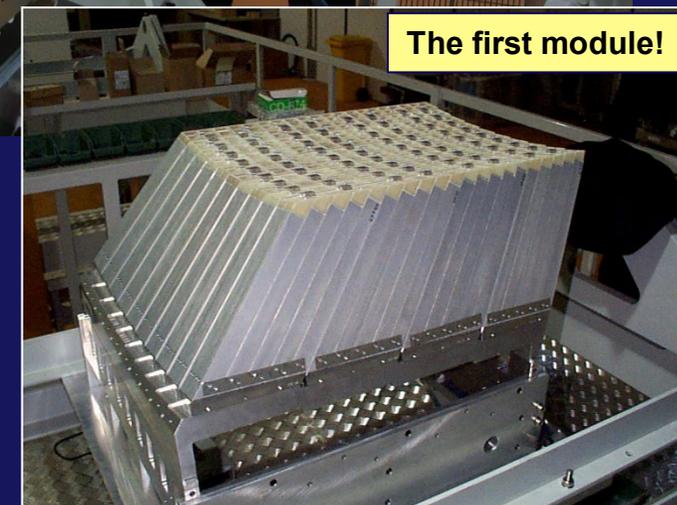
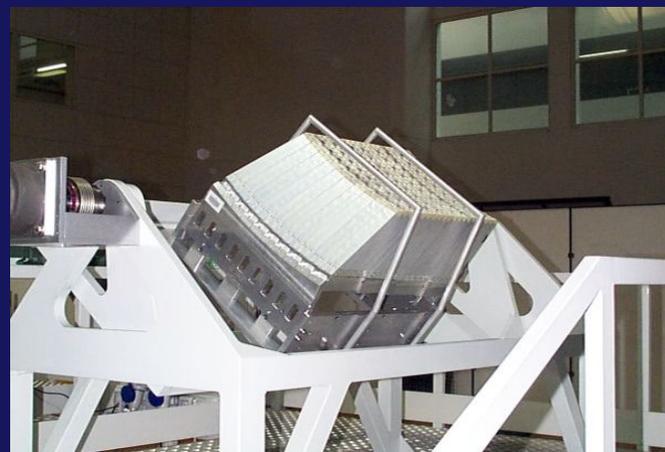


Operazioni e misure comunque sempre tracciate.

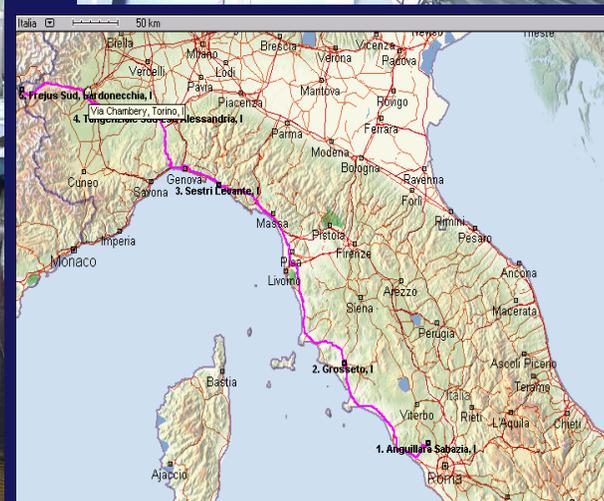
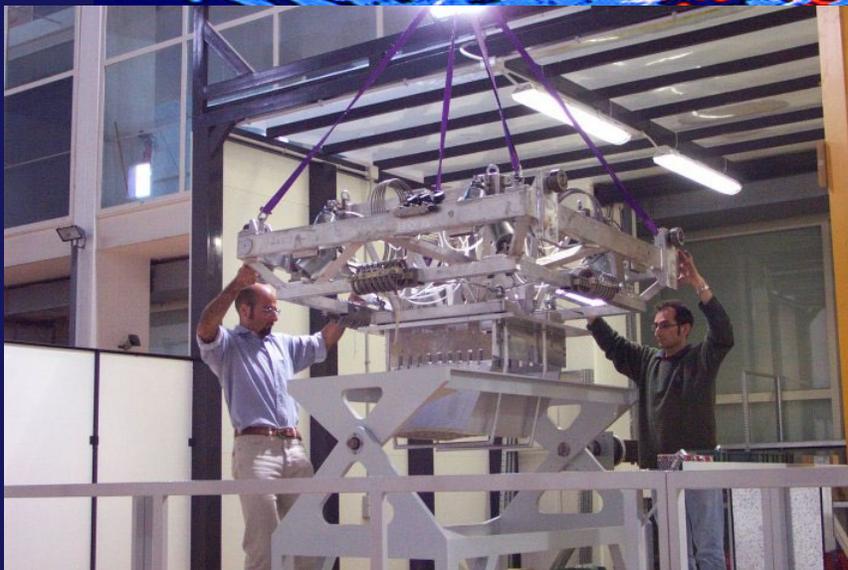
Il primo e il millesimo sottomodulo



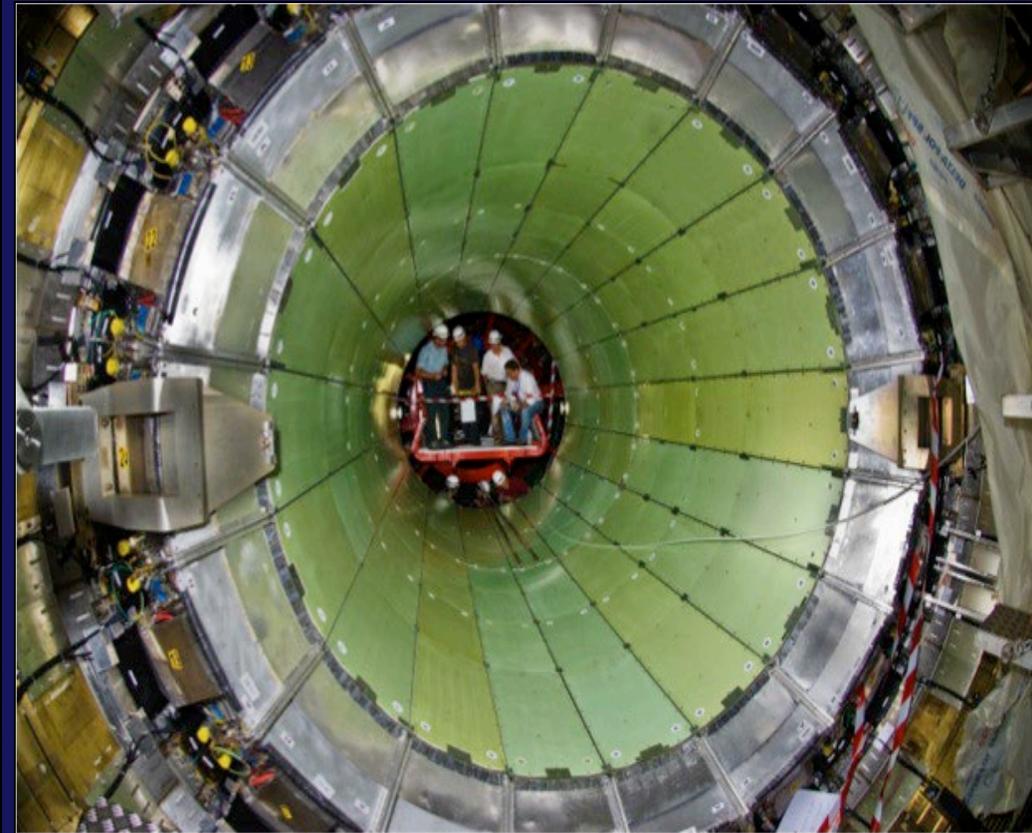
Moduli



I 36 viaggi verso il CERN



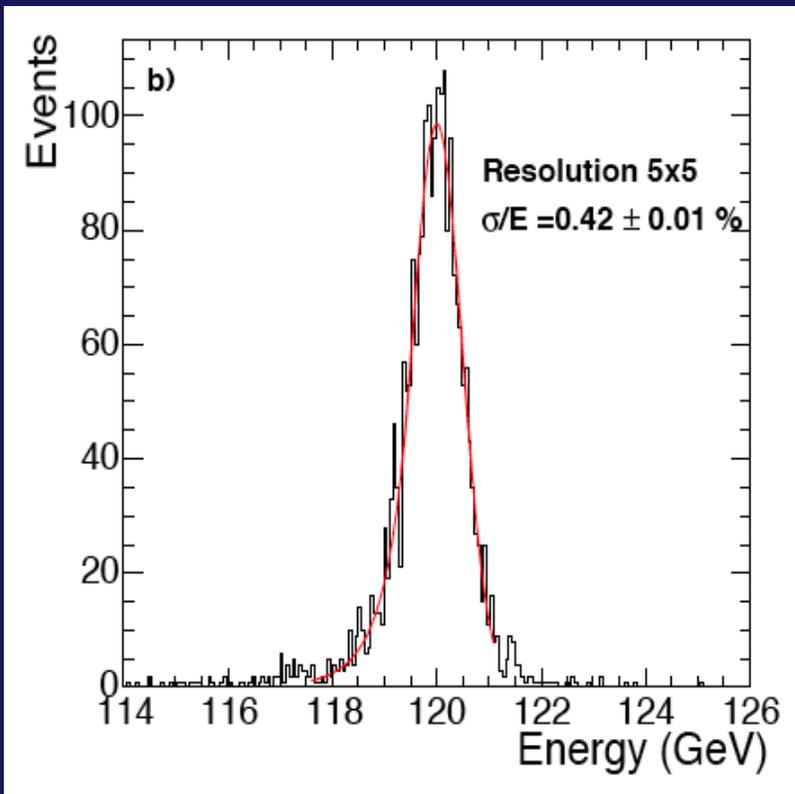
Installato in CMS!



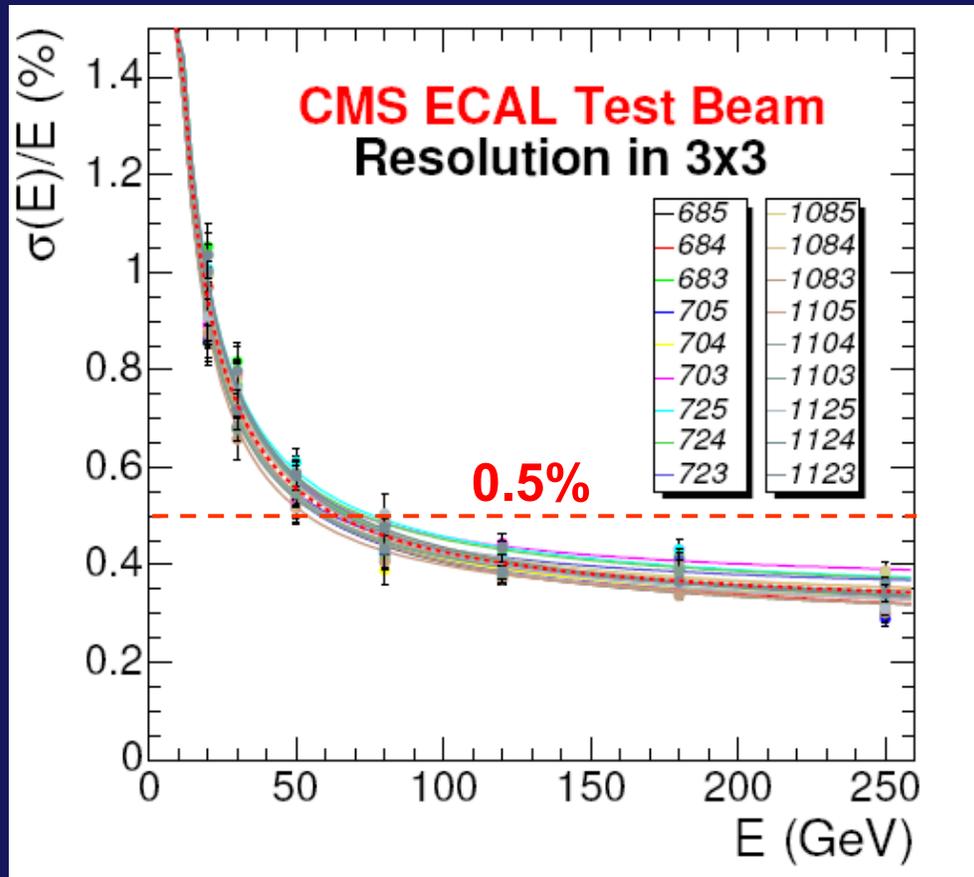
36 SuperModuli di 1700 cristalli ognuno
Canali non funzionanti < 1% !
Non necessita upgrade prima di HL-LHC

La precisione ha un costo...

Response to high energy electrons



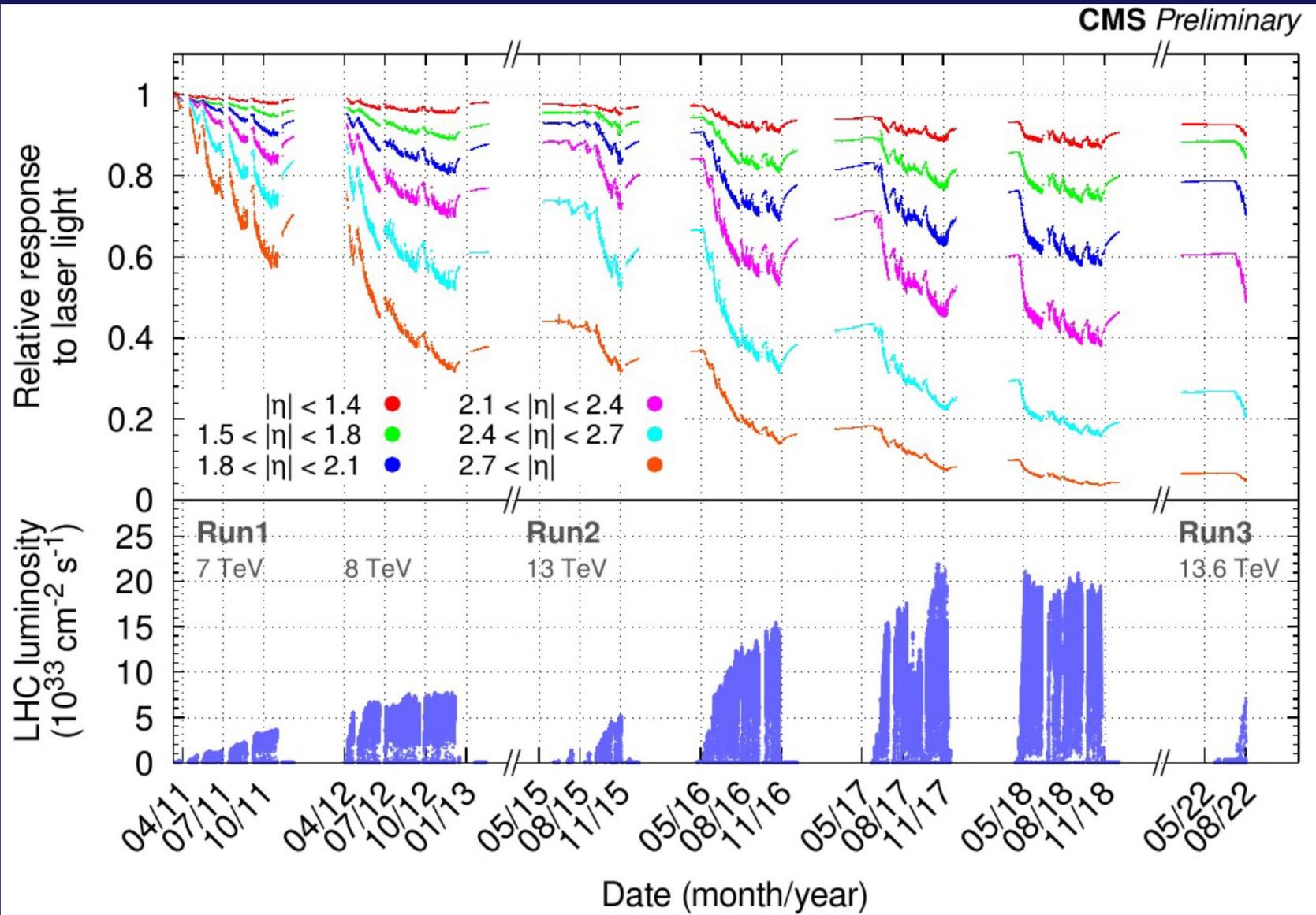
Temperature Stability: $\leq 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$
 Light response stability: $\leq 0.1\%$



$$\frac{\sigma}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{125}{E(\text{MeV})} \oplus 0.3\%$$

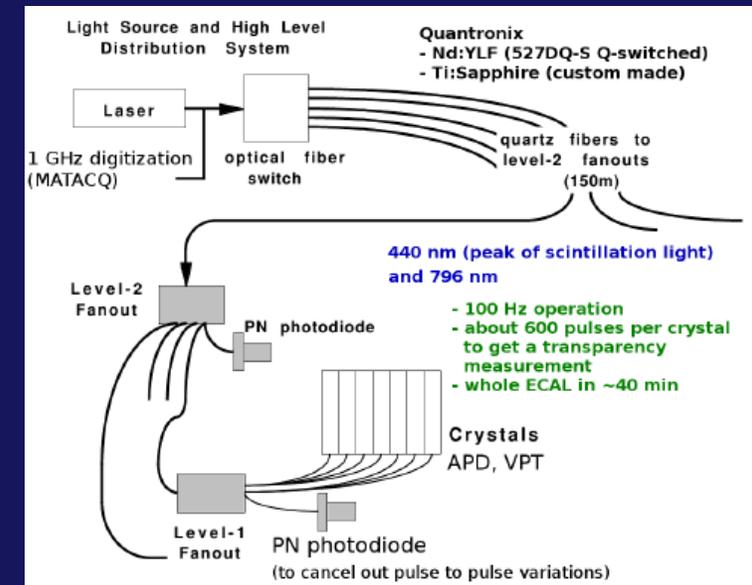
- Il problema è mantenere questa precisione nell'esperimento finale e nel tempo.
- Calibrazione con diversi processi fisici e monitor della risposta sono uno sforzo continuo!
- Operare il calorimetro richiede molto lavoro.

Controllo della risposta di ECAL

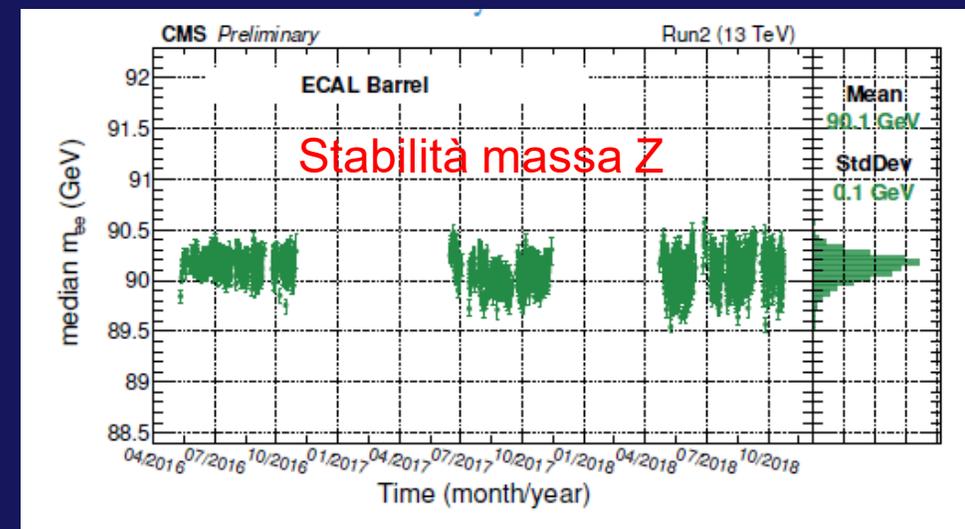
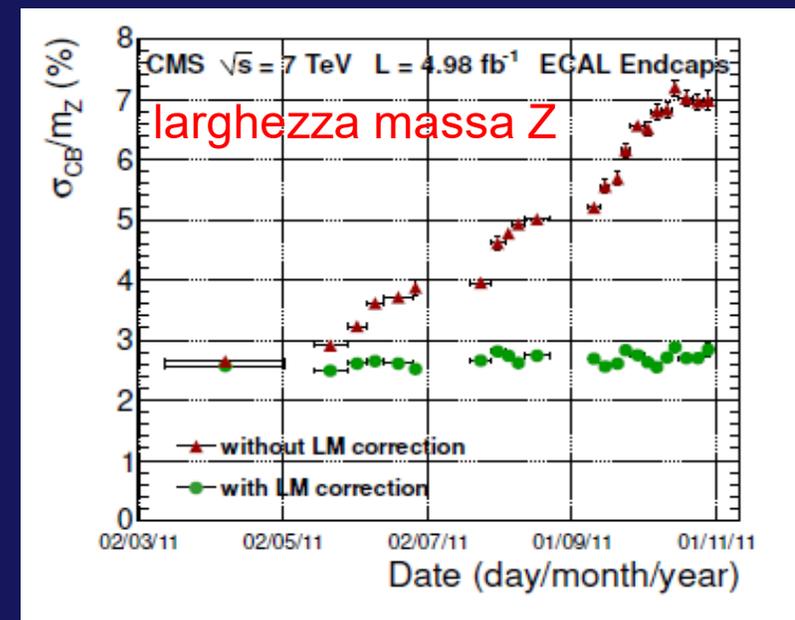
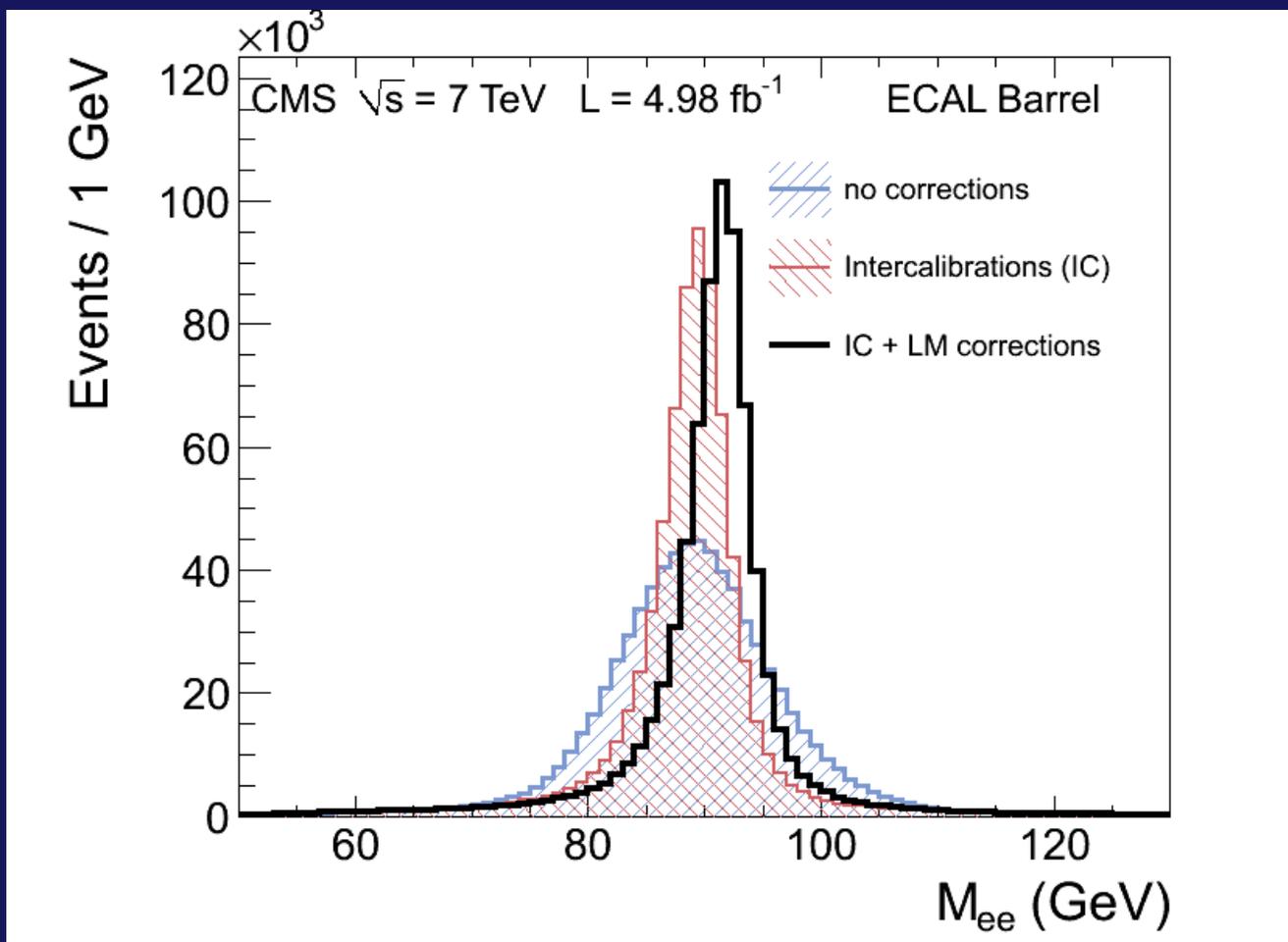


A causa dell'irraggiamento la trasparenza dei cristalli diminuisce e a fasci spenti risale: va seguita (laser) costantemente e la risposta del calorimetro va corretta!

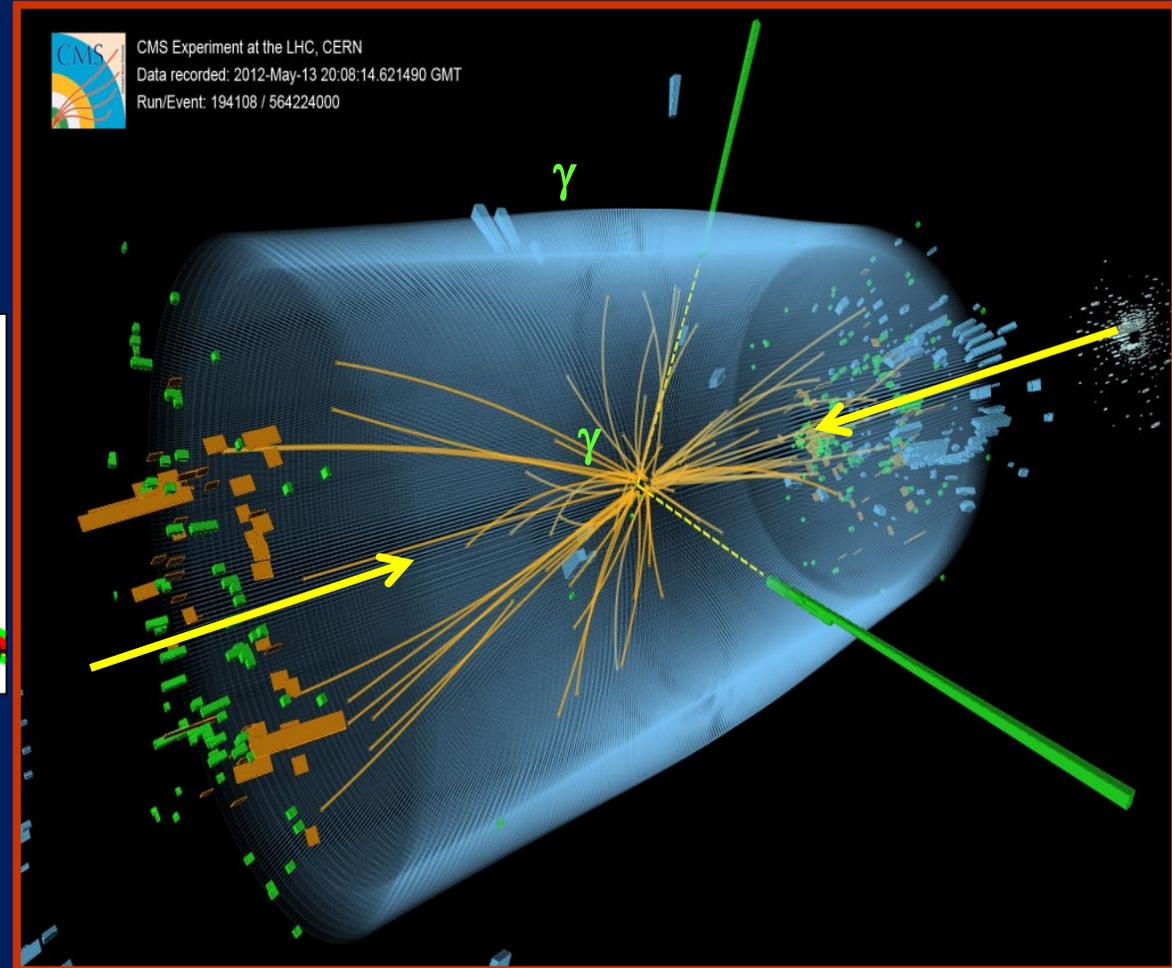
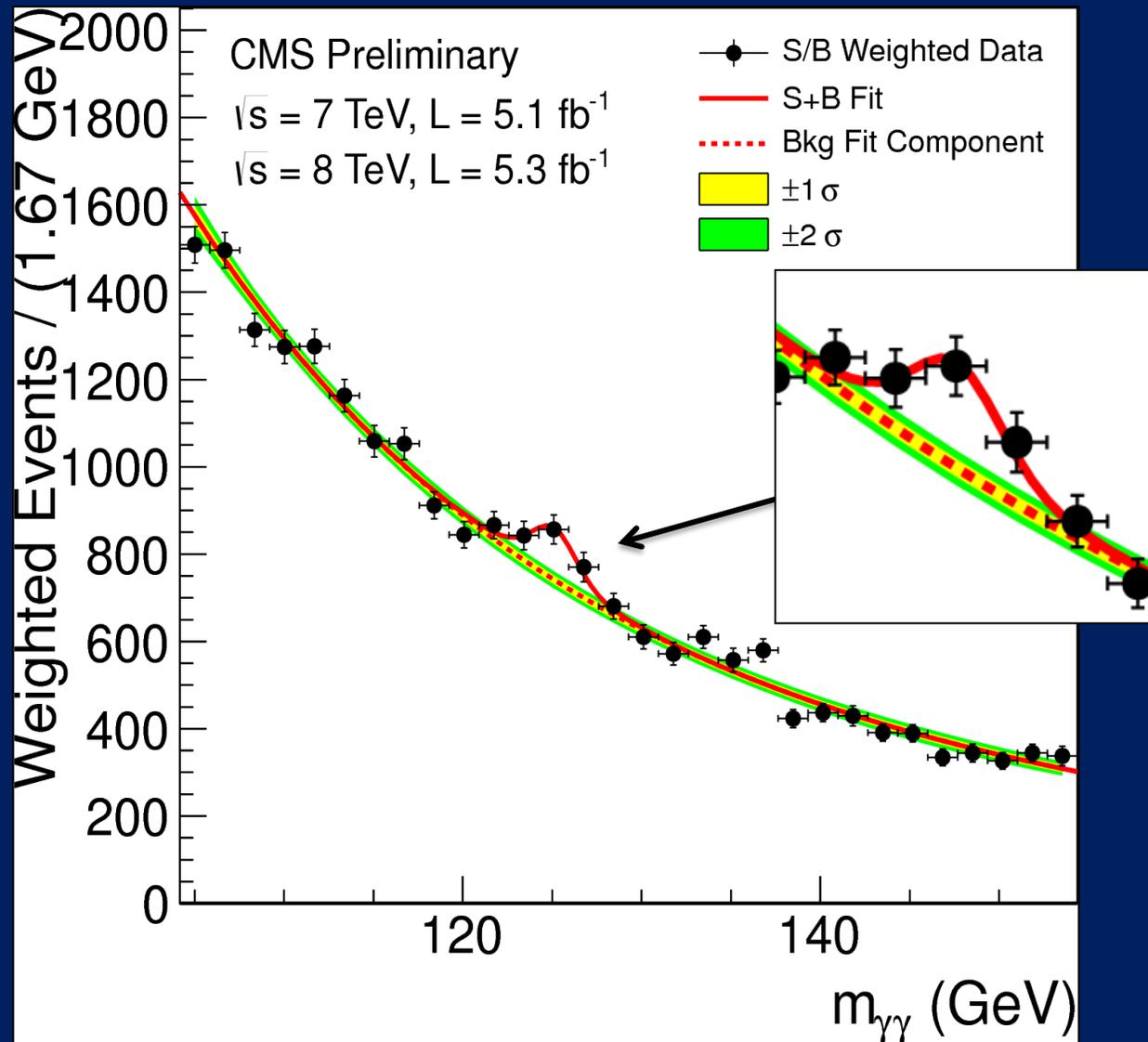
E' un sistema certamente complesso...



Se non facessimo nulla...



L'osservazione: $H \rightarrow \gamma\gamma$



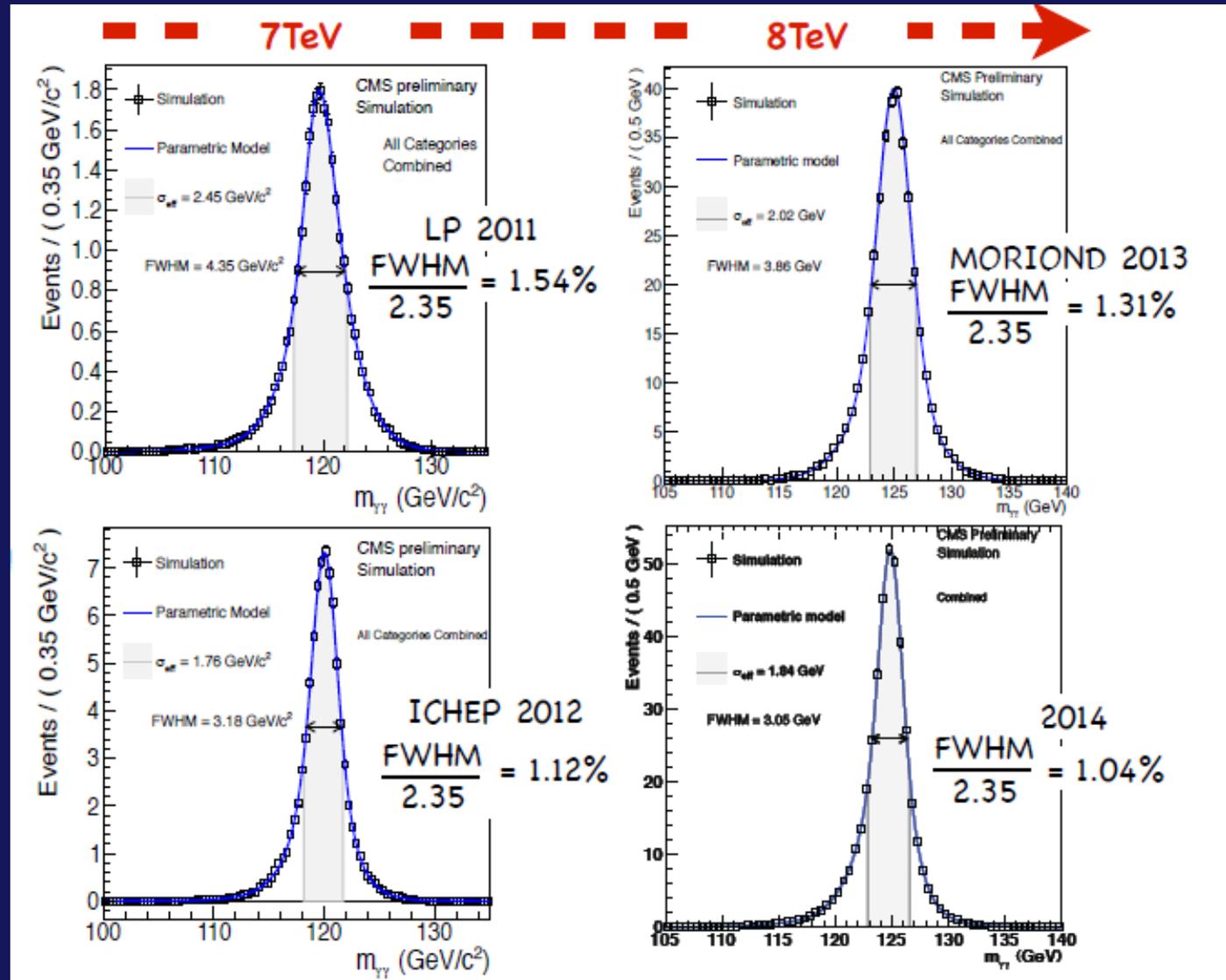
La combinazione di energia ed angolo dei 2 fotoni dà sempre (più o meno) lo stesso risultato: la massa del bosone.

Quanto siamo bravi a misurare M_H ?

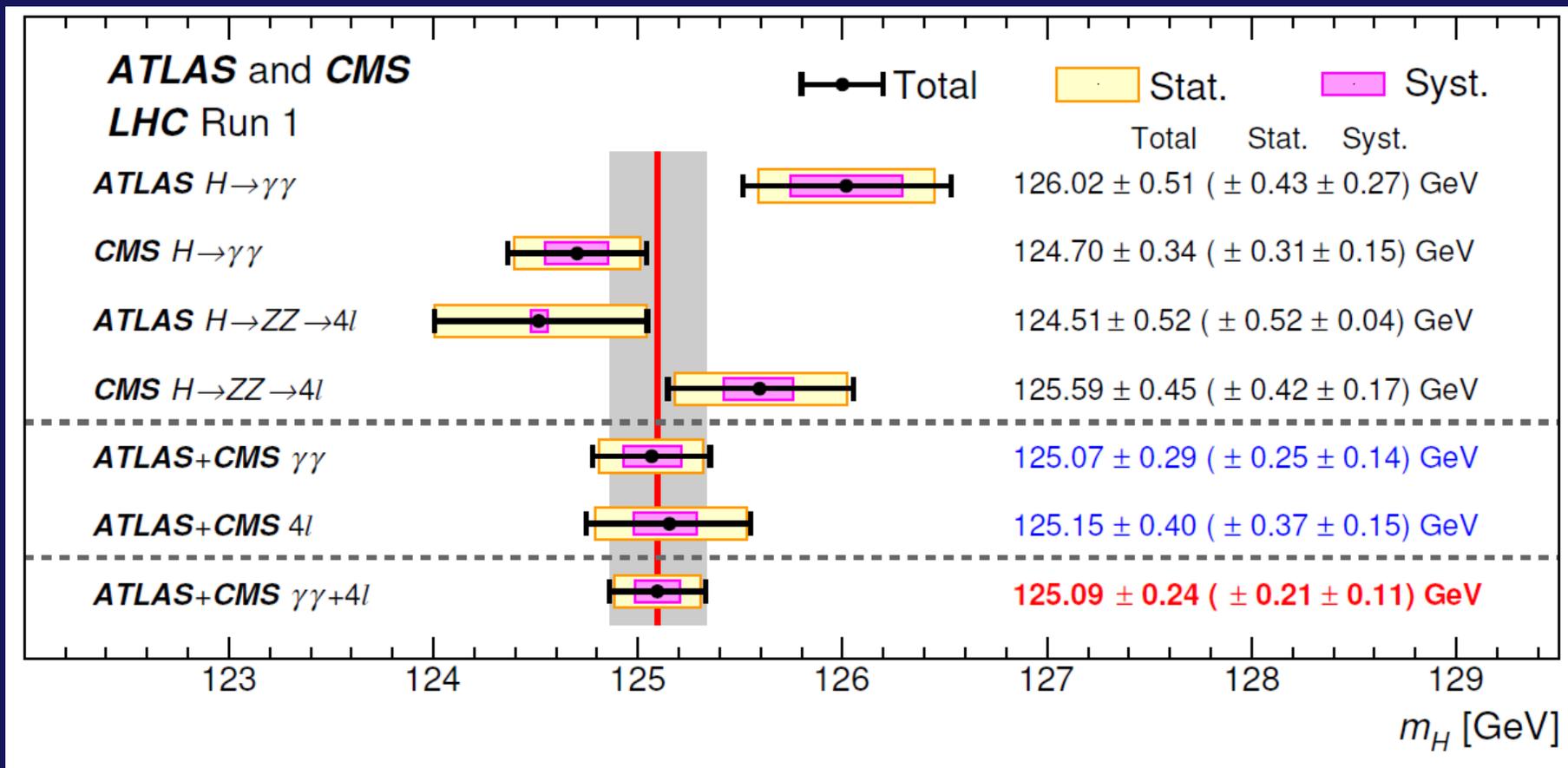
Ricostruzione “pronta”
entro 48h dalla presa dati

Ricostruzione al meglio
delle condizioni

1% alla massa dell'Higgs!



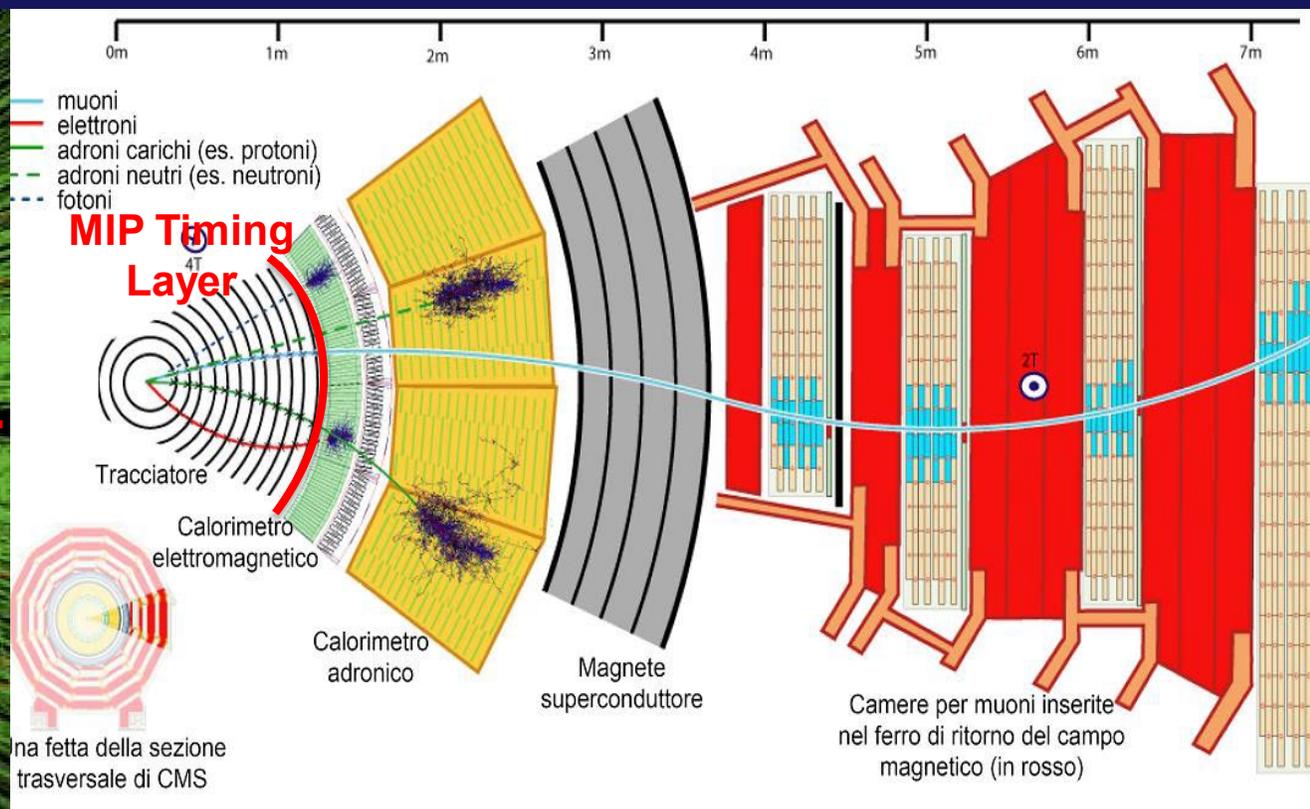
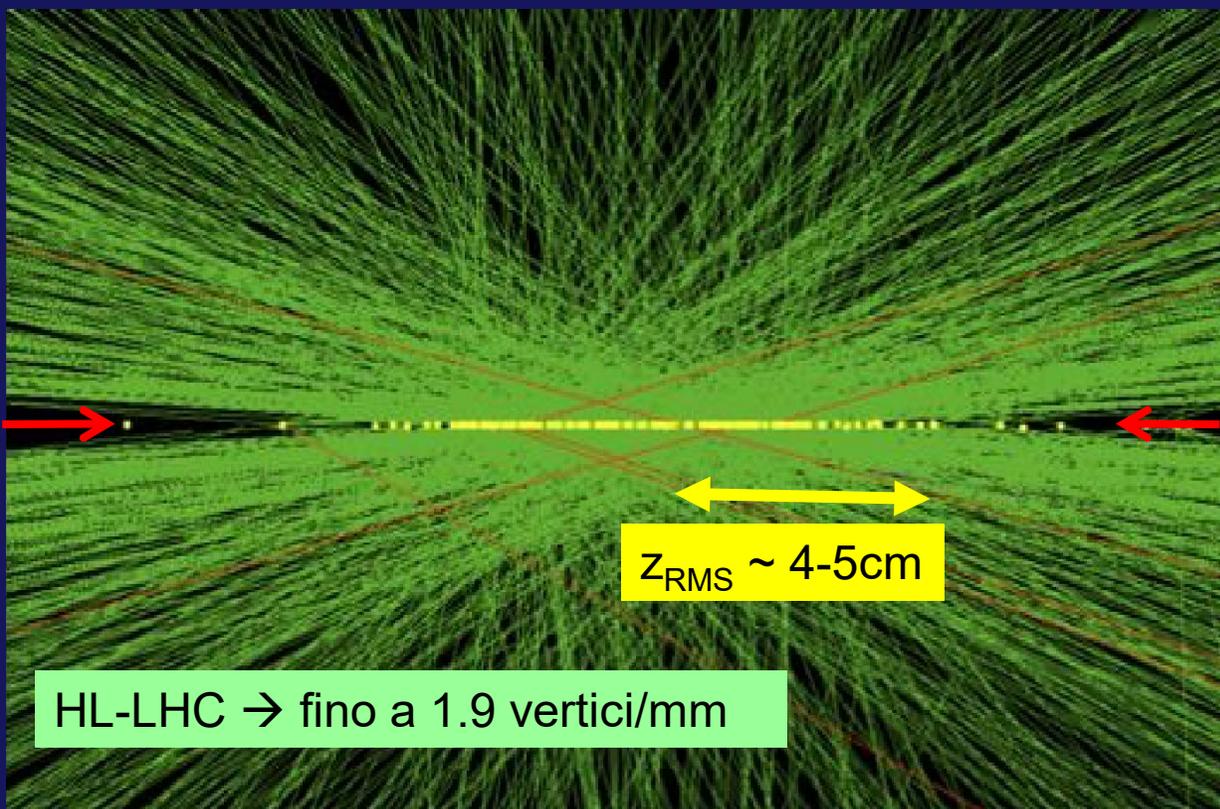
Alla fine del Run 1



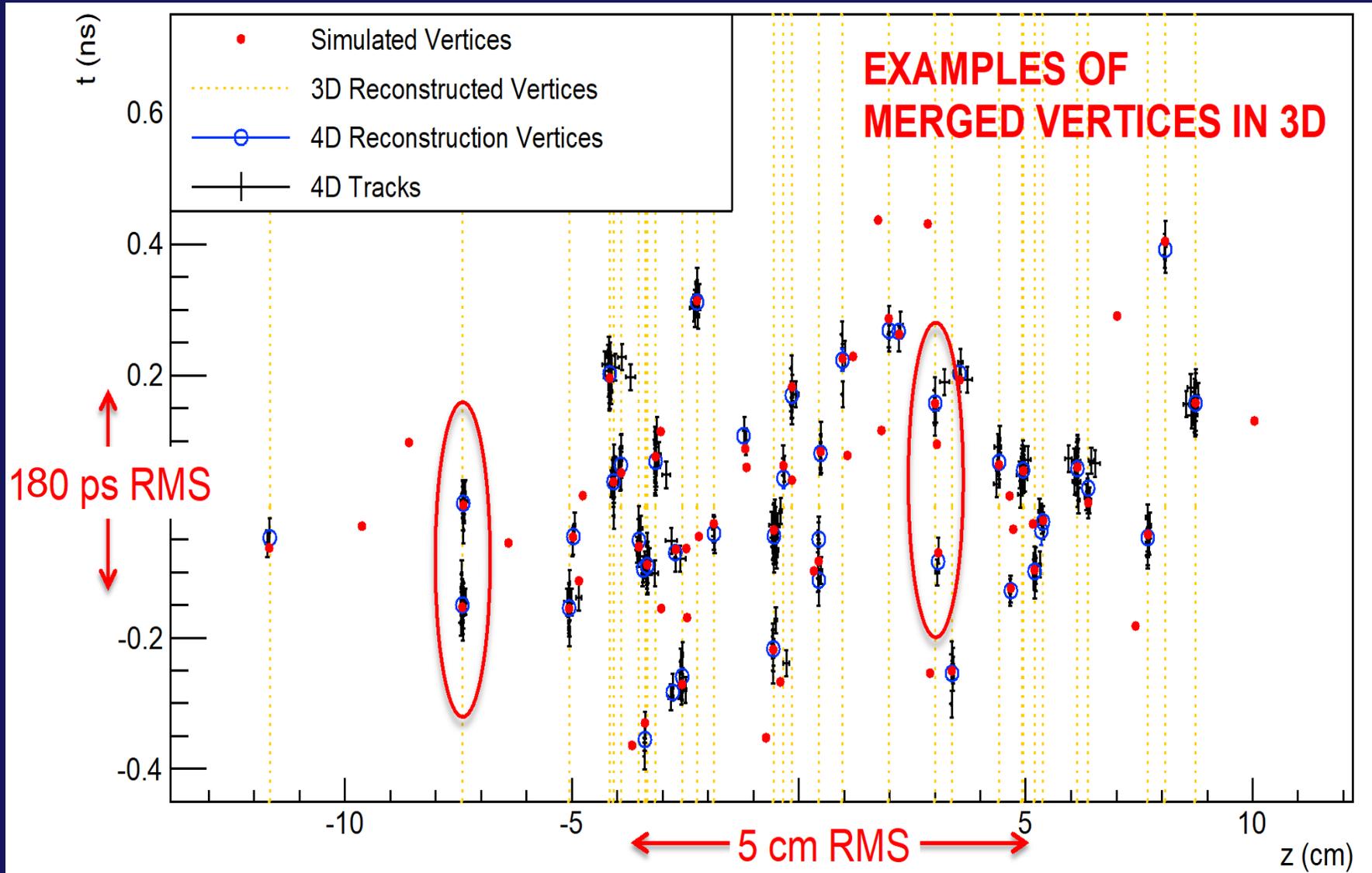
Upgrade: il futuro ad alta luminosità (HL-LHC)

Non è finita qui! Anzi, comincia una nuova avventura! Grande statistica per grande precisione e se siamo fortunati potremmo osservare eventi molto rari.

La sfida: **ricostruzione 4D**, oltre allo spazio misurare il tempo con grande precisione! Di minima risolviamo 200 vertici sovrapposti, di massima osserveremo nuova fisica.



Sgranare i vertici nel tempo



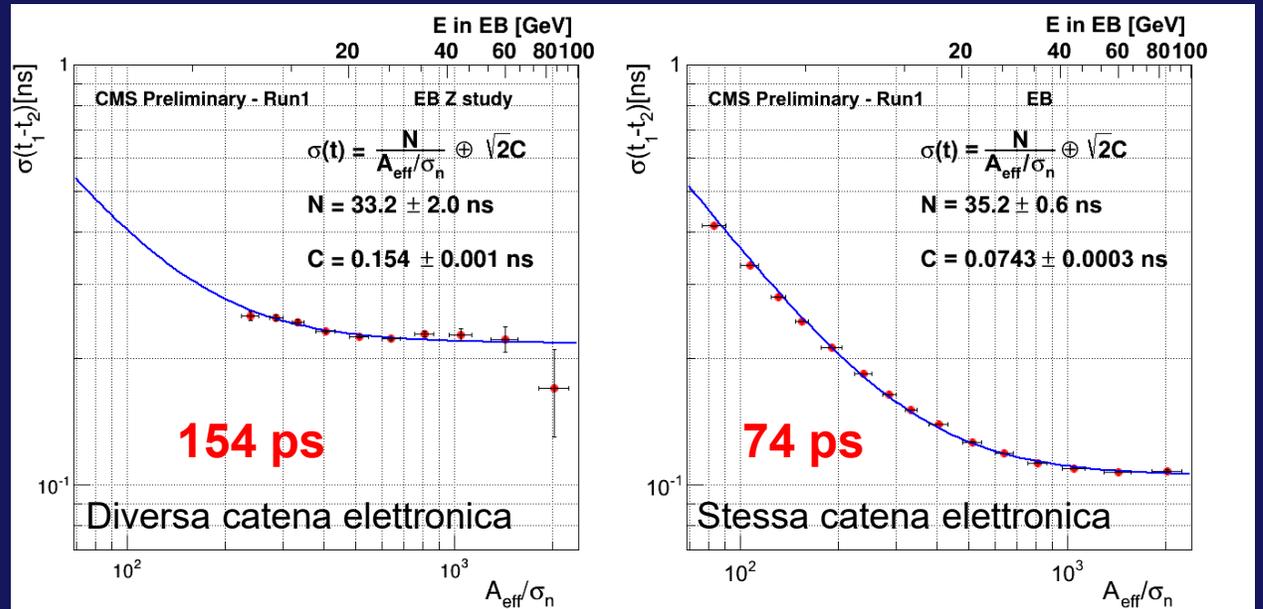
ECAL UPGRADE

I cristalli sono veloci, perchè non sfruttarli per misure di tempo?

Misure su fasci di test (2008) mostrano una risoluzione temporale di circa 30 ps!
Nell'esperimento, senza elettronica dedicata ovviamente si peggiora.

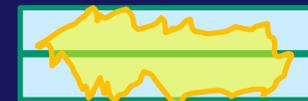
L'elettronica del rivelatore verrà tutta sostituita per essere adeguata alle condizioni di HL-LHC e sfruttare la velocità dei cristalli.

Risoluzione in tempo aspettata per sciami elettromagnetici: **30 ps**

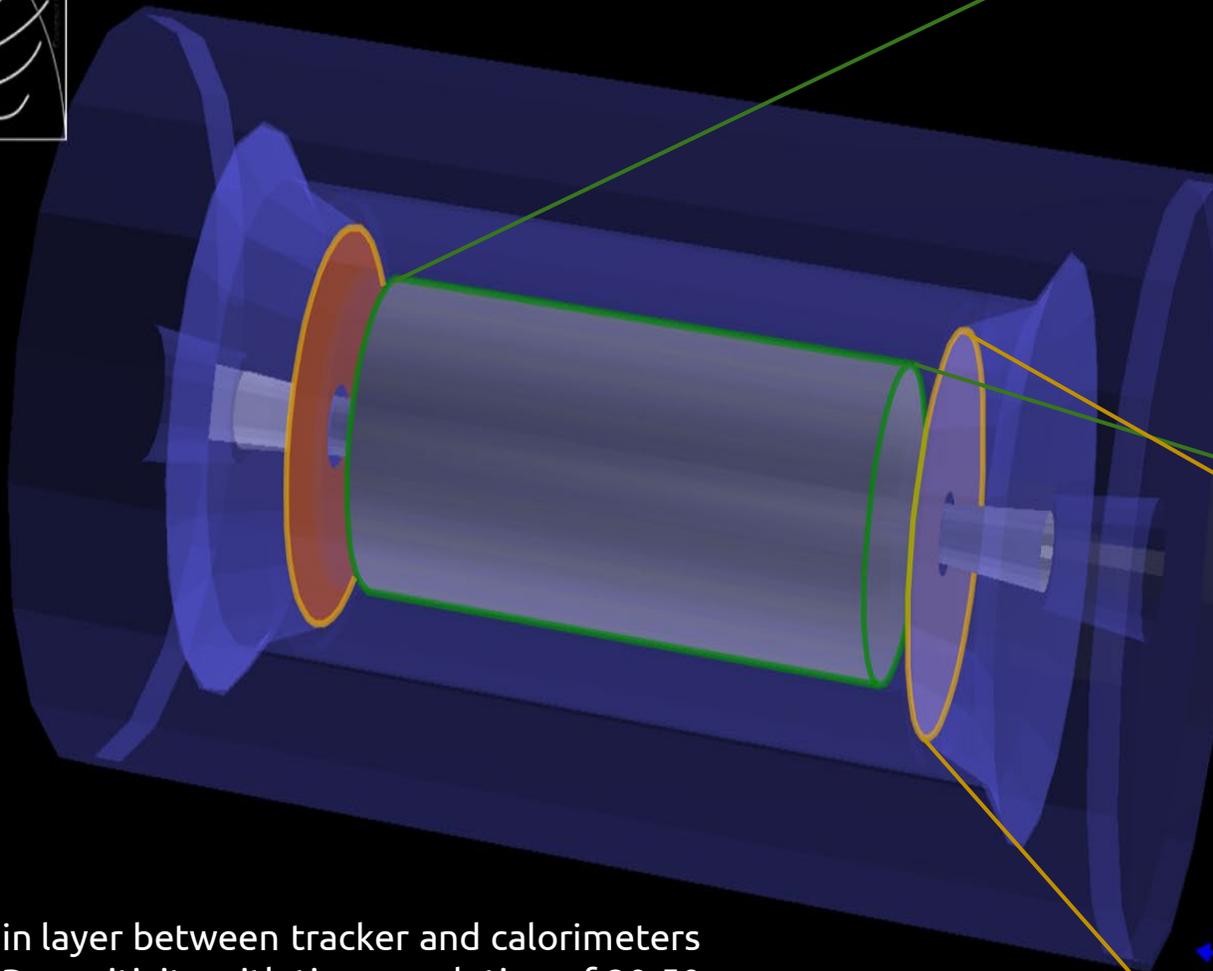


Risoluzione temporale misurata in ECAL usando gli elettroni di $Z \rightarrow ee$

Risoluzione temporale misurata in ECAL da sciami depositati tra 2 cristalli

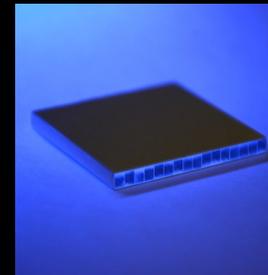
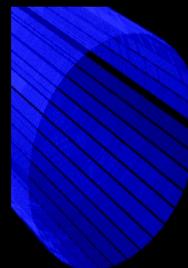


MTD: un nuovo rivelatore!



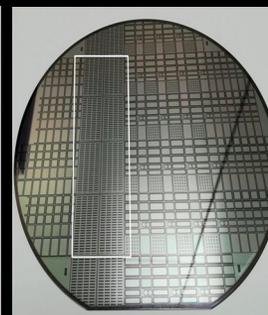
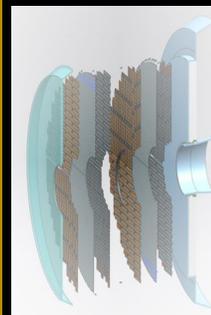
BARREL

Surface $\sim 40 \text{ m}^2$
Number of channels $\sim 332\text{k}$
Radiation level $\sim 2 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
Sensors: LYSO crystals + SiPMs



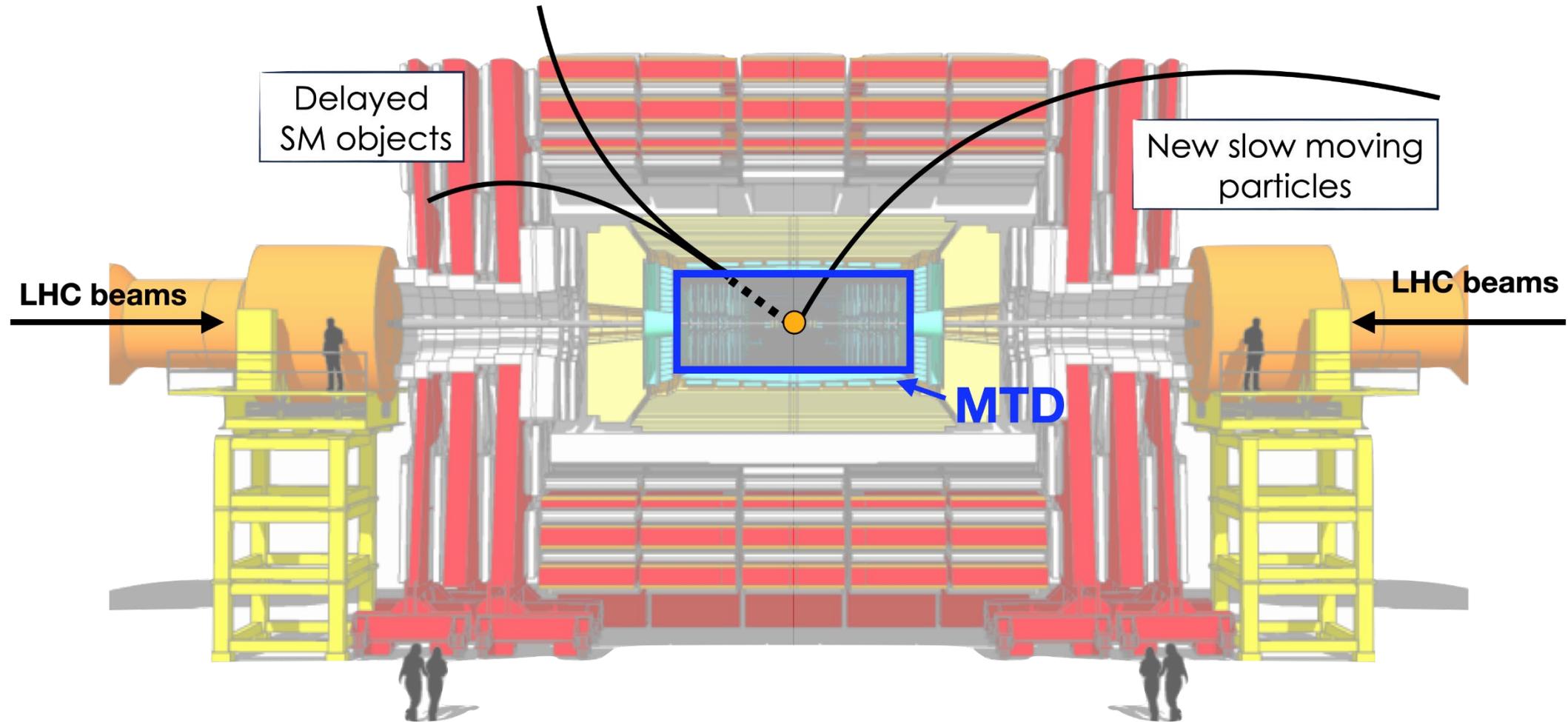
ENDCAPS

Surface $\sim 15 \text{ m}^2$
Number of channels $\sim 8000\text{k}$
Radiation level $\sim 2 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
Sensors: Low gain avalanche diodes

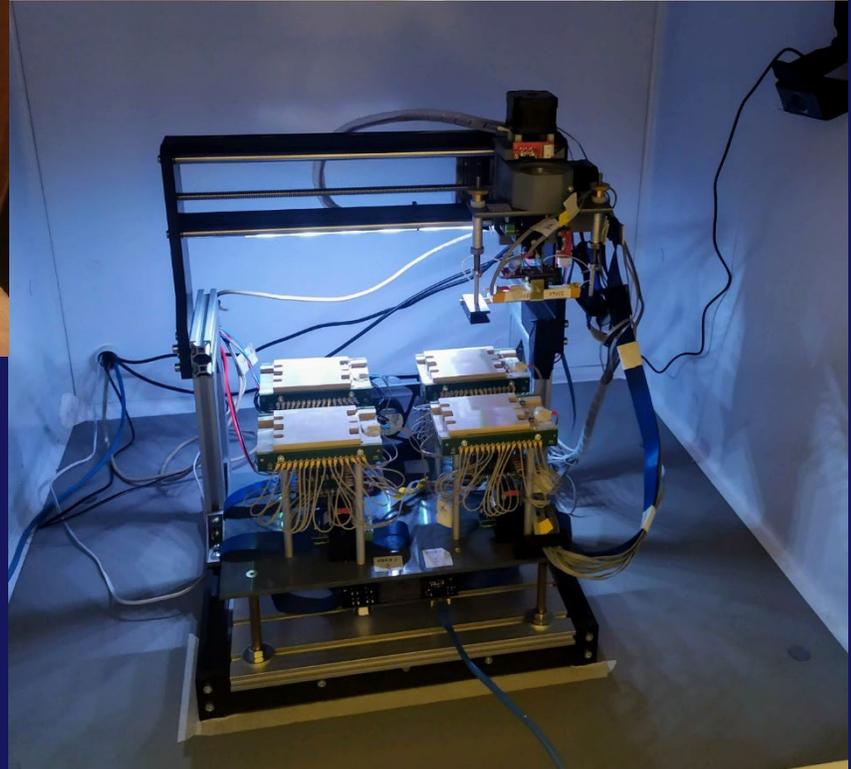


- Thin layer between tracker and calorimeters
- MIP sensitivity with time resolution of 30-50 ps
- Hermetic coverage for $|\eta| < 2.9$

Misure di tempo per ricerche di nuova fisica



Nuovi lavori in corso



**Misure di caratterizzazione delle matrici
di cristalli di LYSO in laboratorio a Roma**



In conclusione

**LHC e CMS sono una avventura incredibile!
Una sfida tecnologica e umana senza precedenti.
Non si affronta una sfida simile senza ottime idee,
giovani ricercatori e la collaborazione di personale
tecnico eccezionale (a cui va il mio personale
ringraziamento).**