



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Il Large Hadron Collider e la scoperta del Bosone di Higgs

Dr. Vitaliano Ciulli

Dip. di Fisica e Astronomia



Alle frontiere della Fisica Moderna - 8 Maggio 2014



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

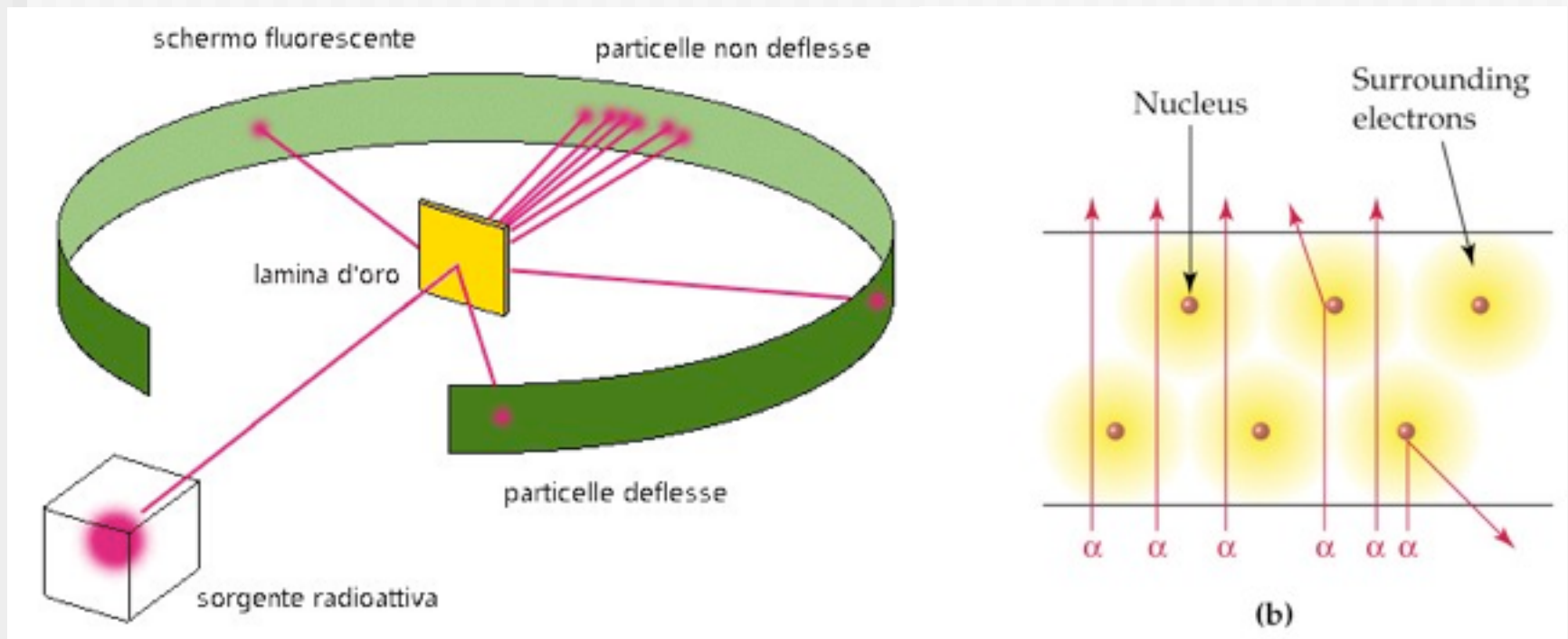
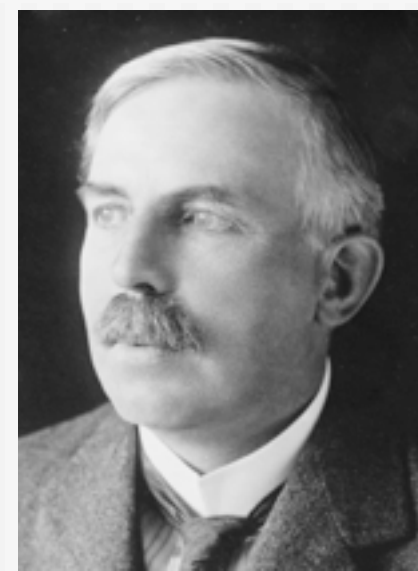
François Englert
Peter W. Higgs



Facciamo qualche passo indietro...

L'esperimento di Rutherford

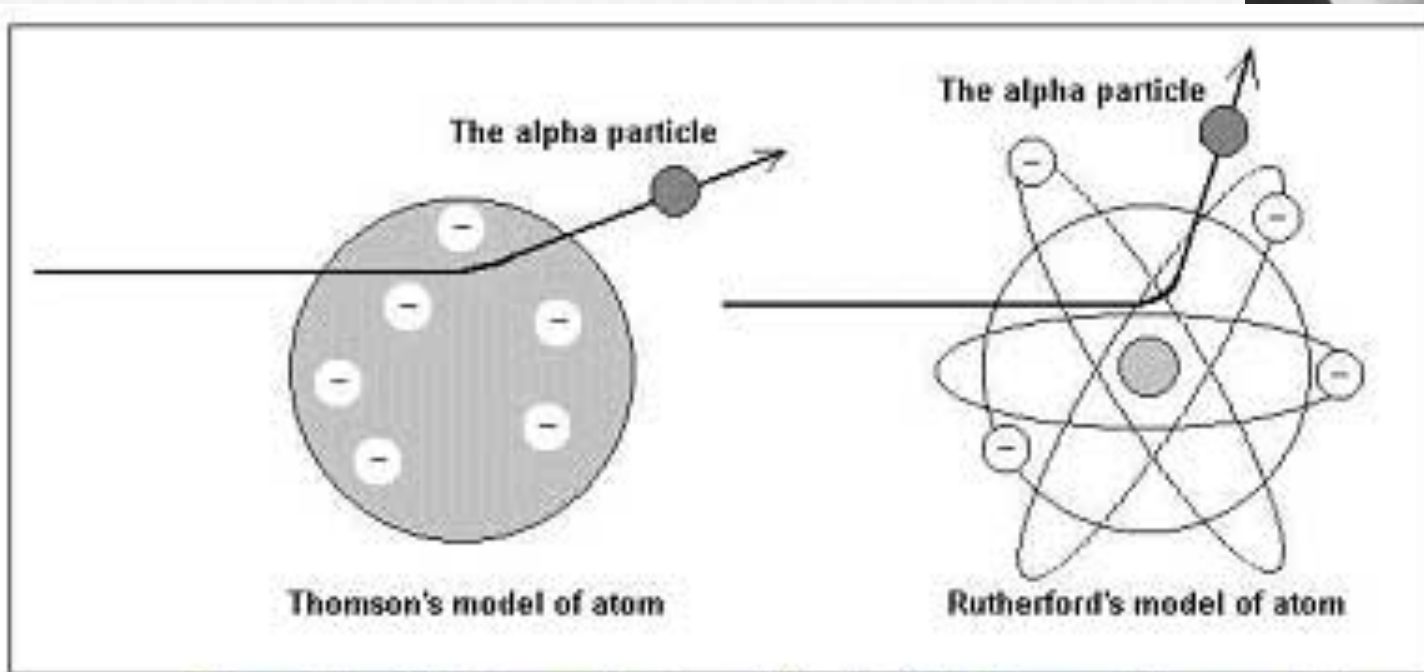
Nel 1911 guardando come delle particelle alpha erano deflesse da un foglio di oro stabilì che gli atomi erano vuoti e tutta la massa era nel nucleo



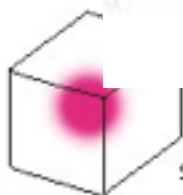
L'esperimento di Rutherford



Nel 1911 guardando come delle particelle alpha erano deflesse da un foglio di oro stabilì che gli atomi



The models of the Thomson's atom and Rutherford's atom; and the expected aberrations of alpha particle in both cases.



sorgente radioattiva

α α α α α α

(b)

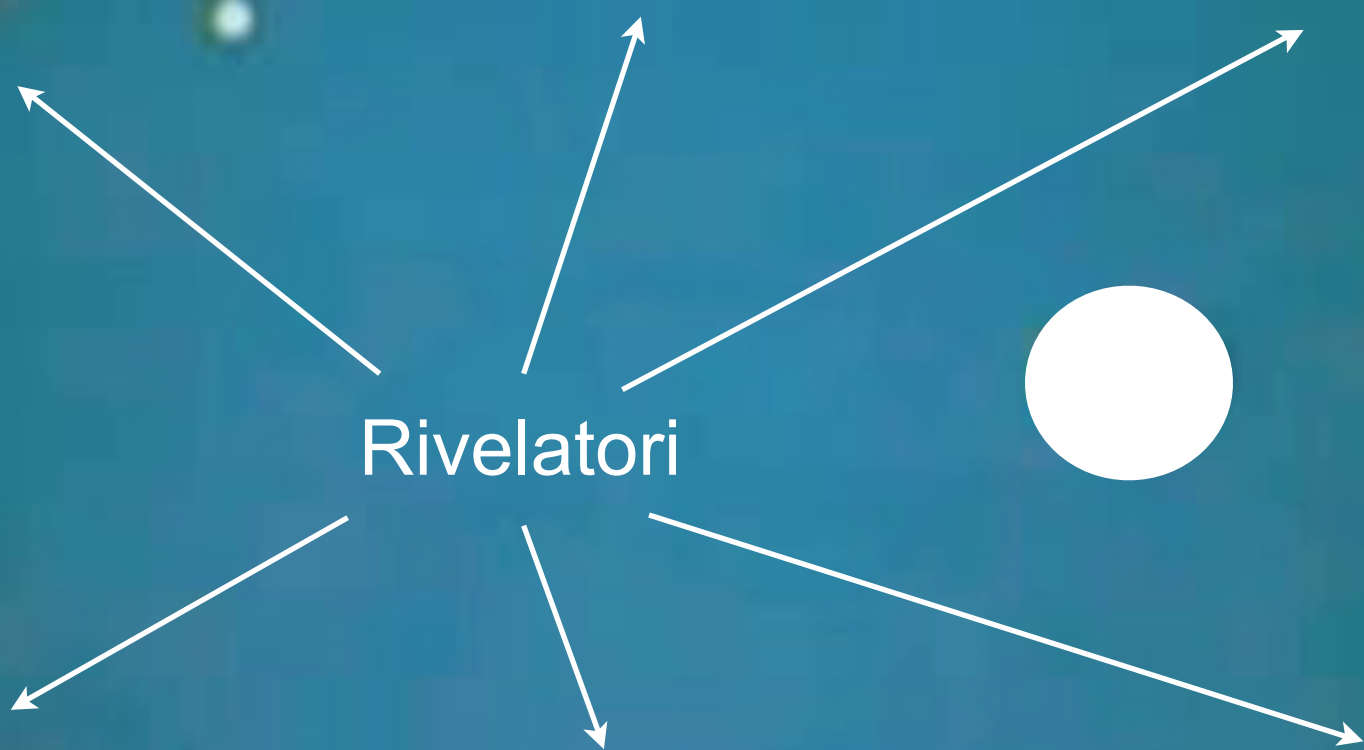
scattering
of
alpha
particles



Un esperimento



Rivelatori

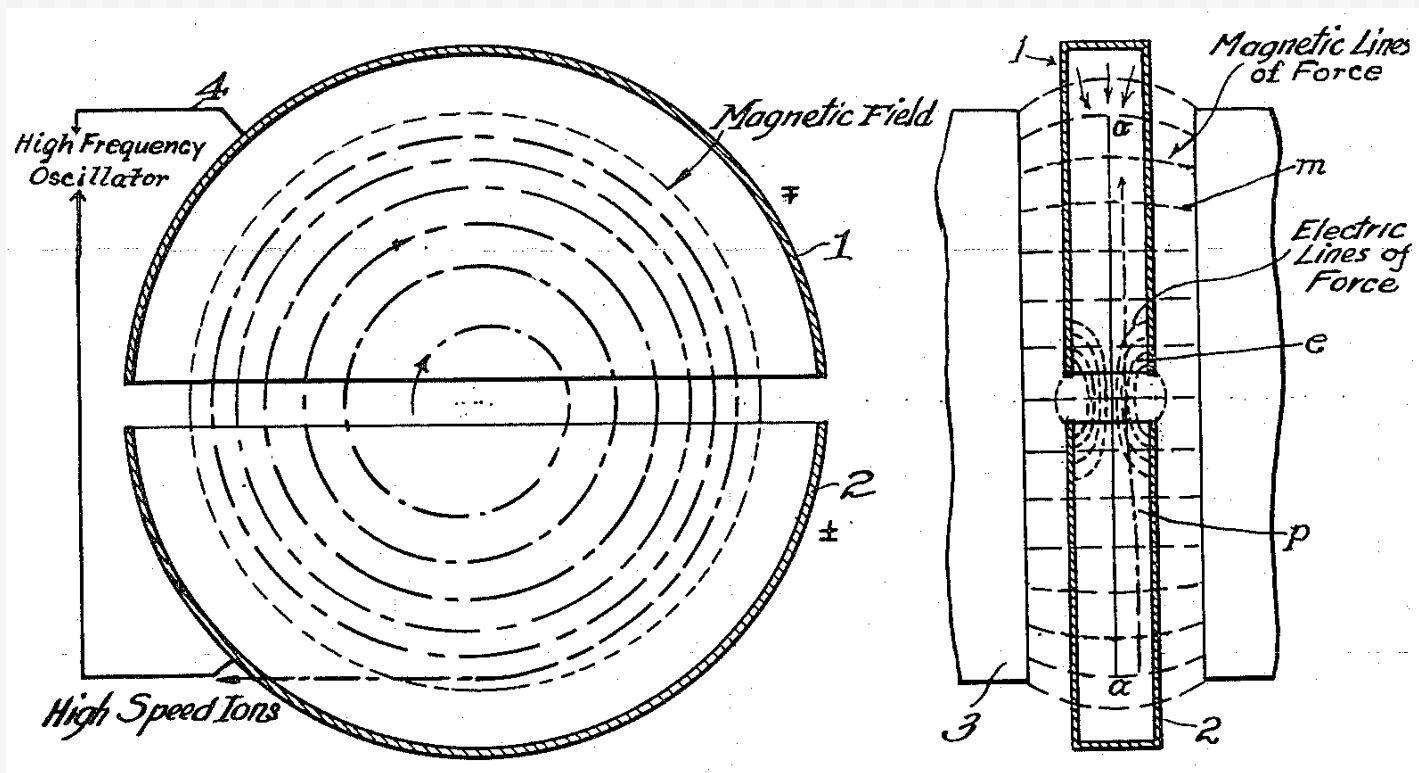


SPORTS

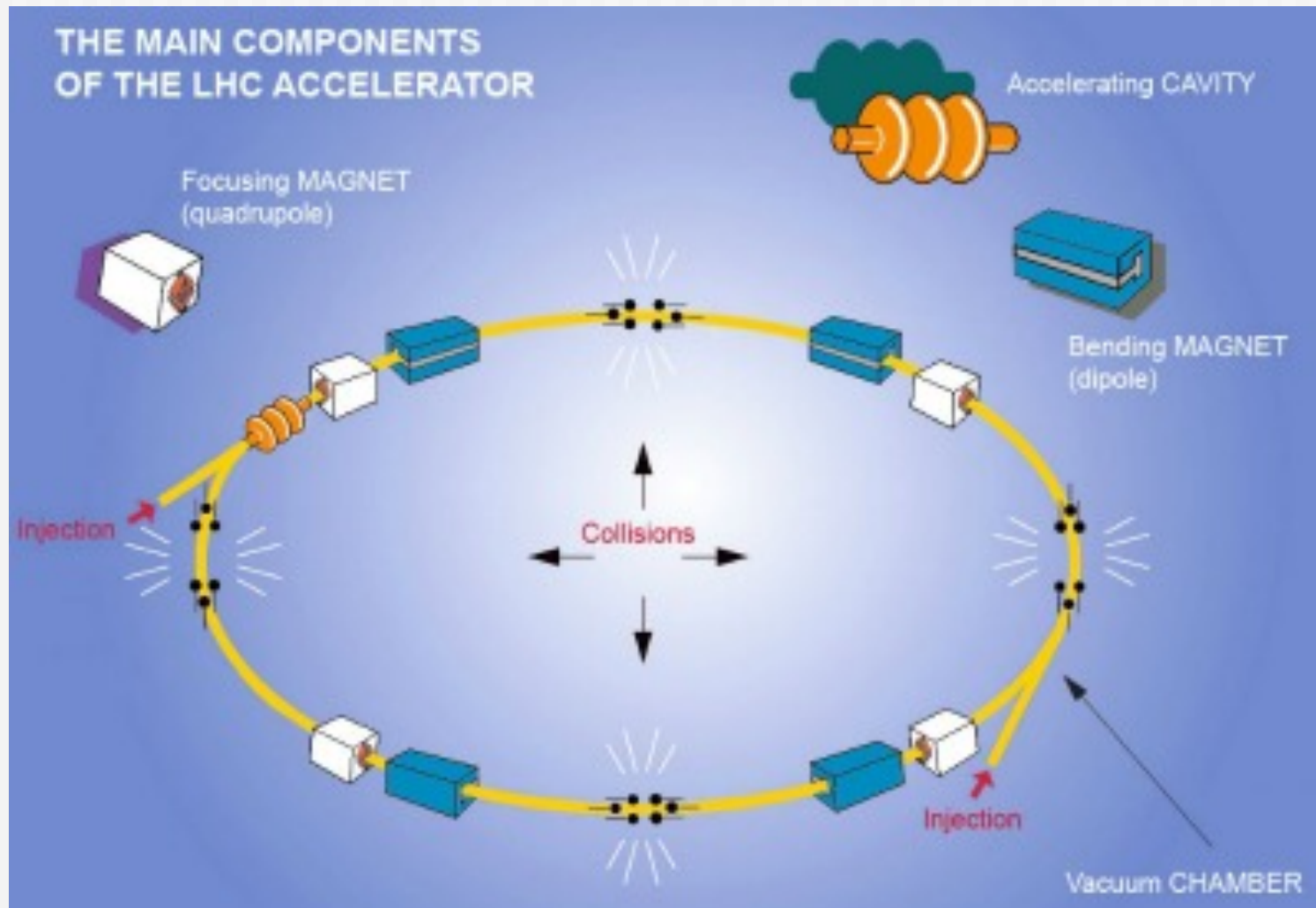


Un acceleratore

- il primo ciclotrone entrò in funzione a Berkley nel 1932
 - accelerava protoni fino ad una energia di 1.2 MeV



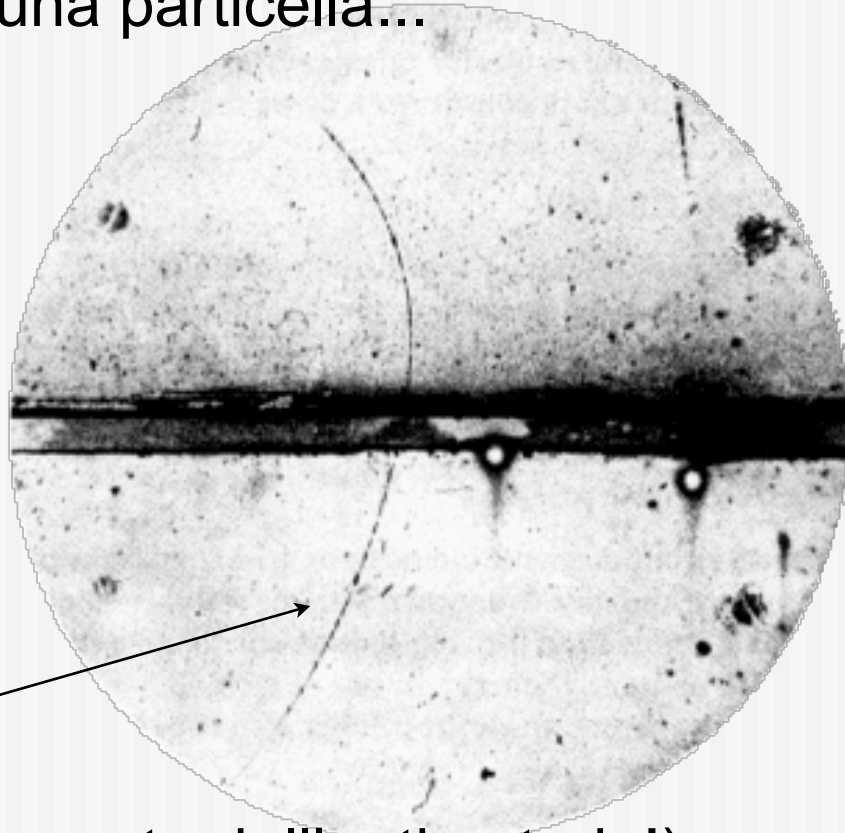
Gli acceleratori circolari



Il rivelatore

La camera a nebbia è il primo rivelatore che permette di *vedere* la “traiettoria” di una particella...

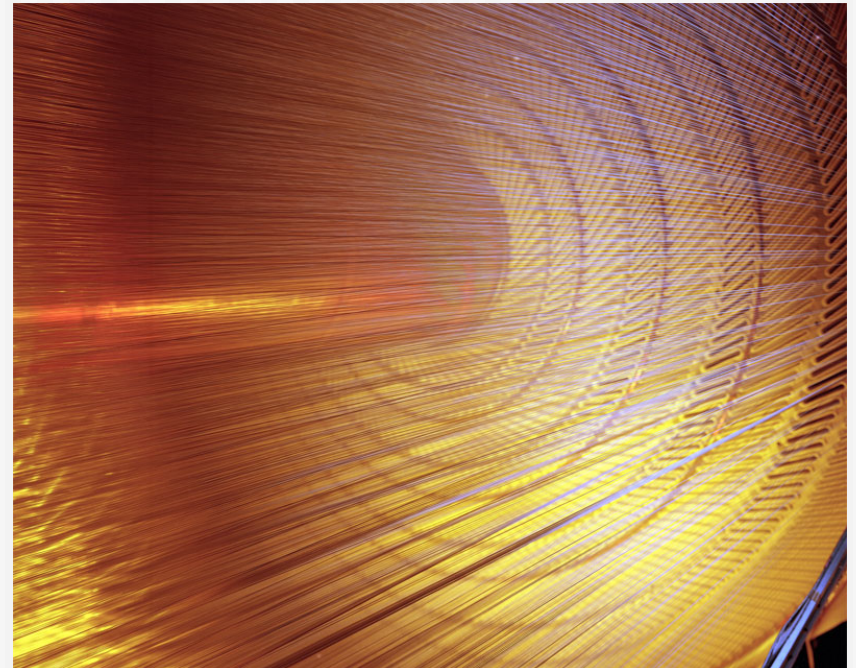
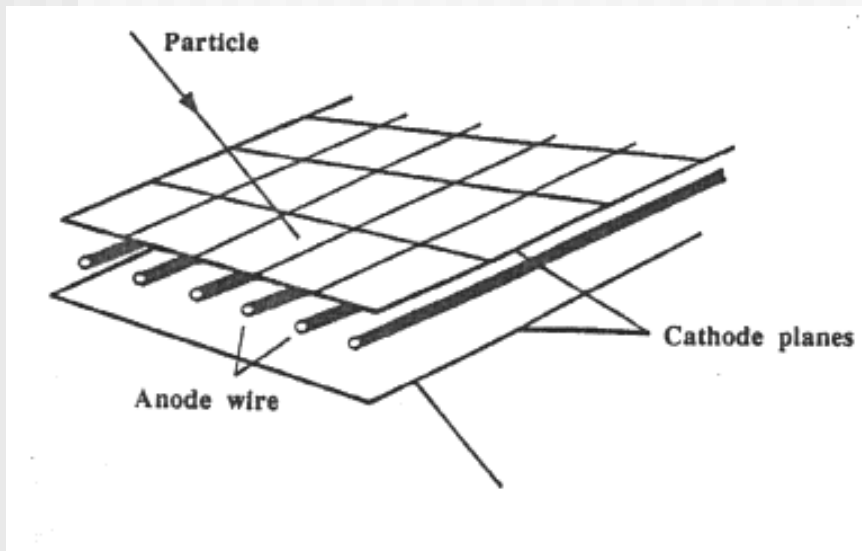
Lastra di piombo di 6 mm



Un positrone (ovvero la scoperta dell'antimateria!)

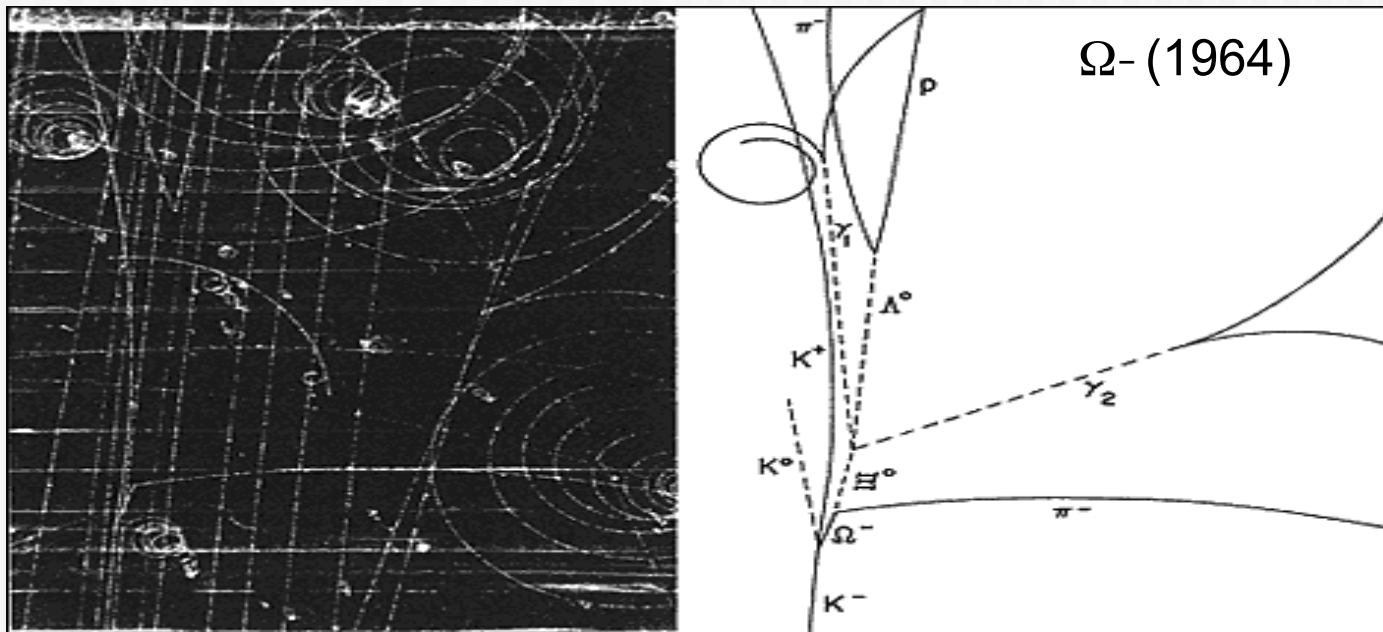
Le camere a fili

- il passaggio della particella genera un segnale sull'anodo che può essere processato in modo elettronico



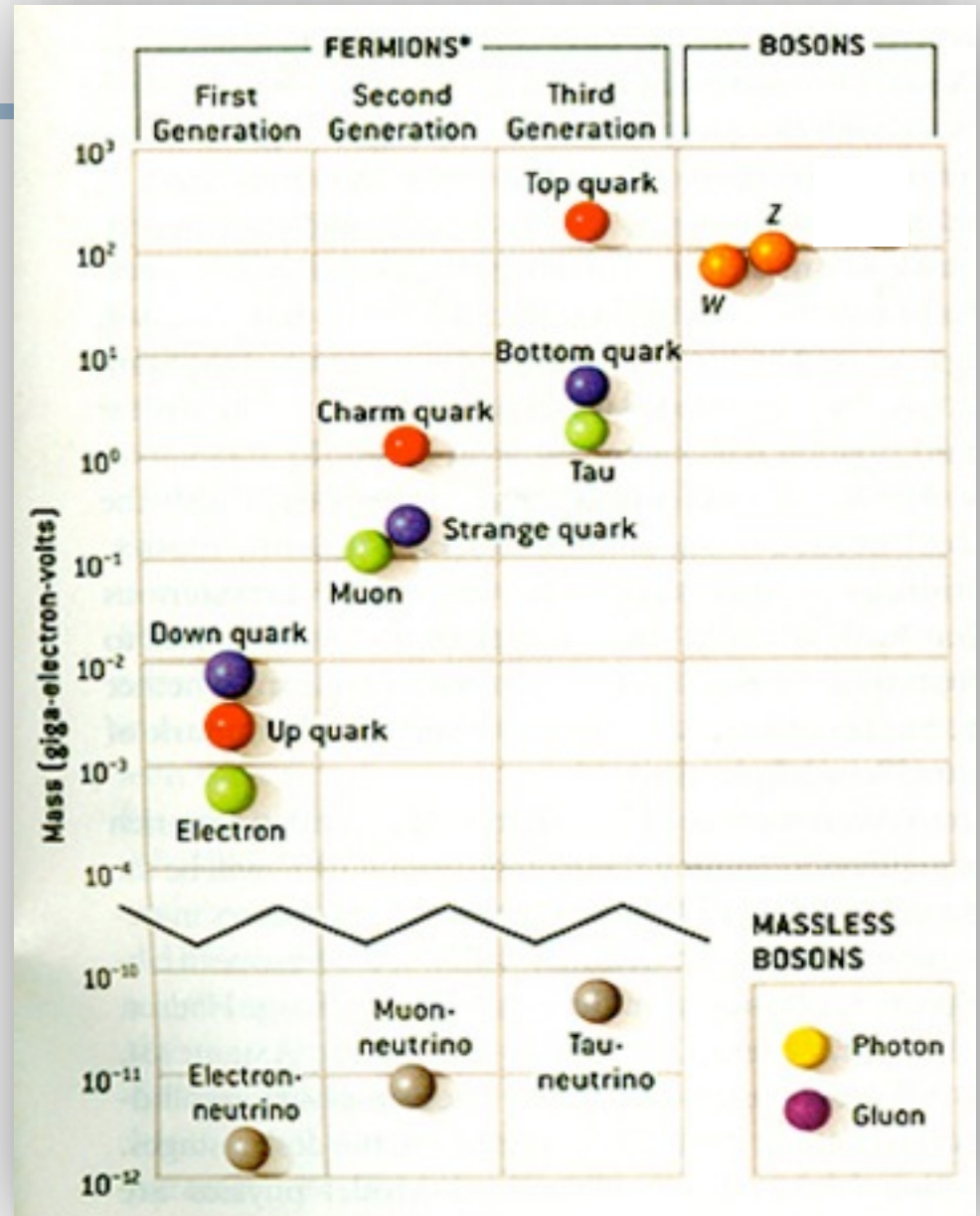
Una moltitudine di particelle

- Elettroni, protoni e neutroni non sono le uniche particelle, ma sono tra le poche particelle **stabili**
- Molte altre particelle esistono ma sono molto instabili
- Il loro decadimento è l'impronta che lasciano e che ci permette di identificarle



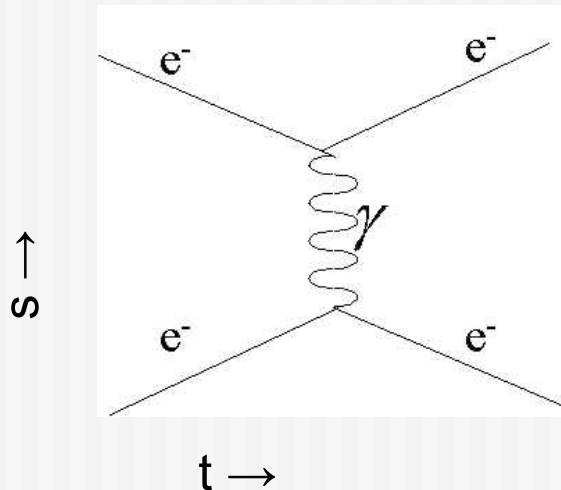
Il Modello Standard

- Via, via, abbiamo continuato a scoprire sempre più particelle
- Finchè abbiamo capito quali sono le (poche) particelle fondamentali che formano la materia:
 - quarks
 - leptoni
- E le forze tra di loro
 - le forze sono quattro e sono anch'esse dovute a particelle



Le forze

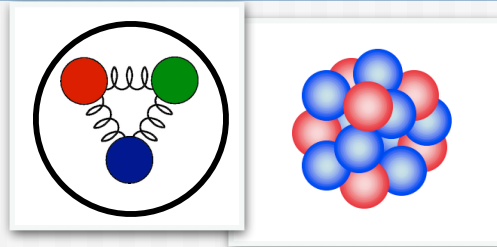
- In fisica delle particelle anche le forze sono dovute.... a particelle !
- In QED (Quantum Electrodynamics) le particelle si “attraggono” o si “respingono” scambiandosi tra loro **un quanto di luce, ovvero un fotone**



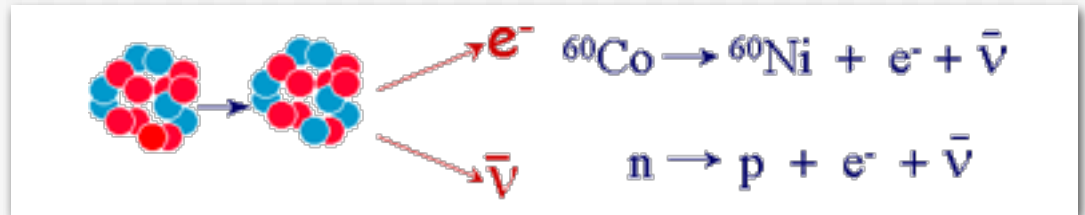
- Il fotone e' il “mediatore” dell'interazione elettromagnetica

Le quattro forze fondamentali

- Forte: gluoni



- Debole: W, Z



- Elettromagnetica: fotone

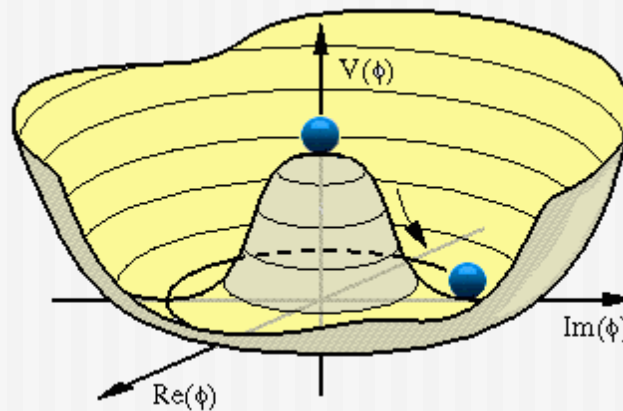


- Gravitazionale: ?



Il Bosone di Higgs

- Le forze si possono ricavare da “principi di simmetria”, ma soltanto se le particelle non hanno massa
- Nel 1964 R. Brout, F. Englert e P. Higgs immaginarono un meccanismo per dare massa alle particelle, senza violare la simmetria fondamentale della natura

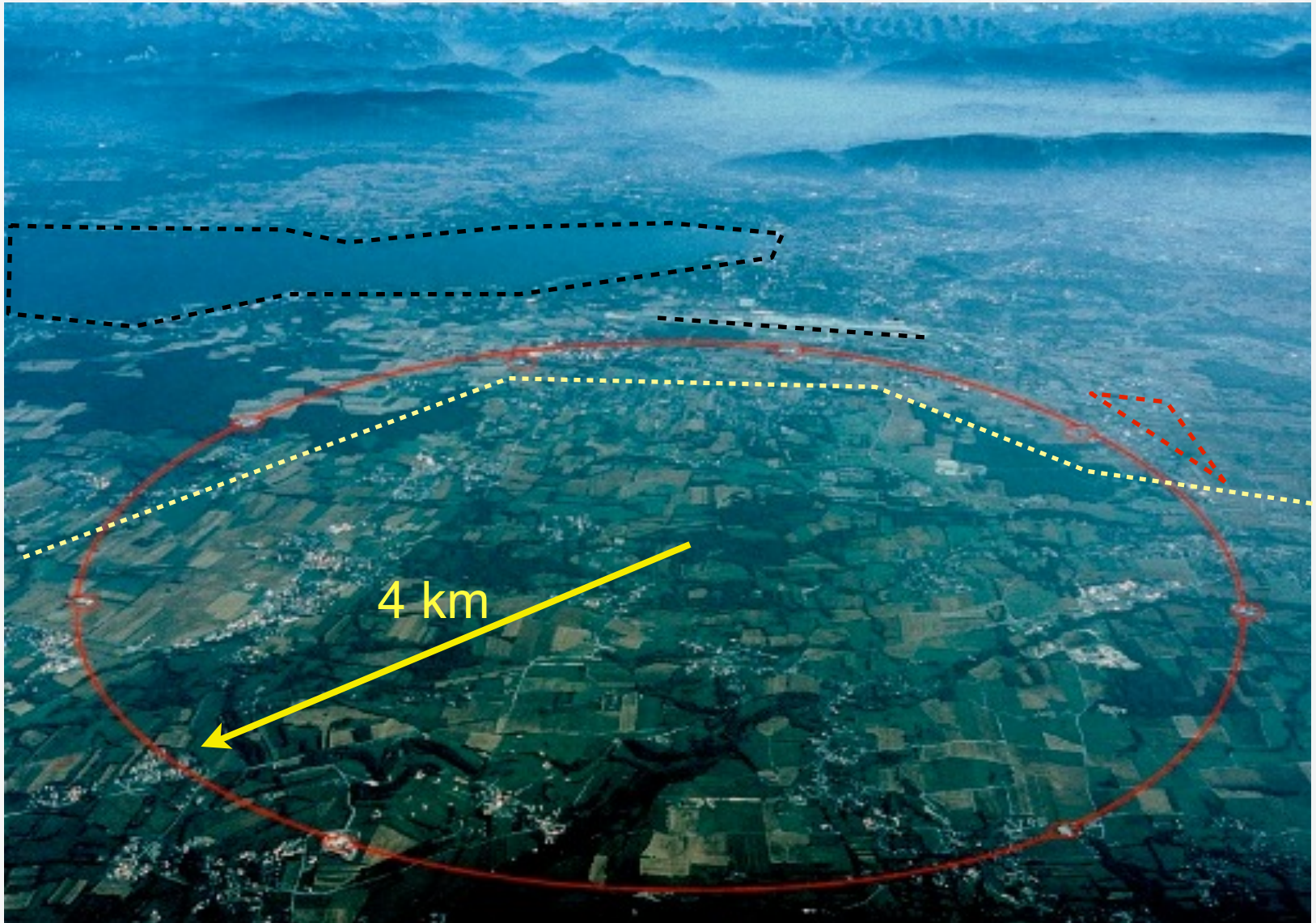


- Come conseguenza di questo meccanismo doveva però esistere una particella che aveva proprietà molto particolari: il Bosone di Higgs

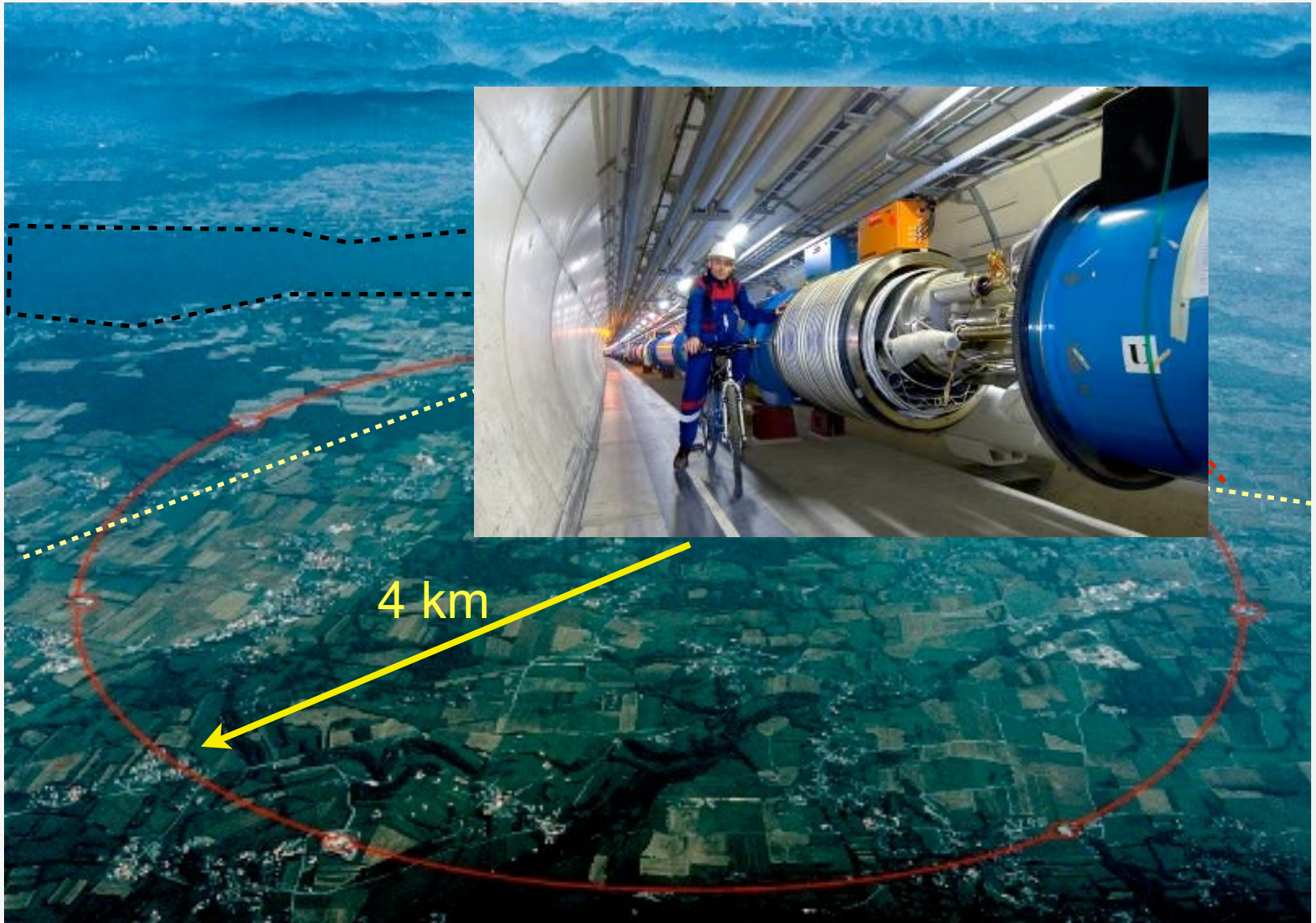
Alla ricerca del Bosone di Higgs: Il Large Hadron Collider



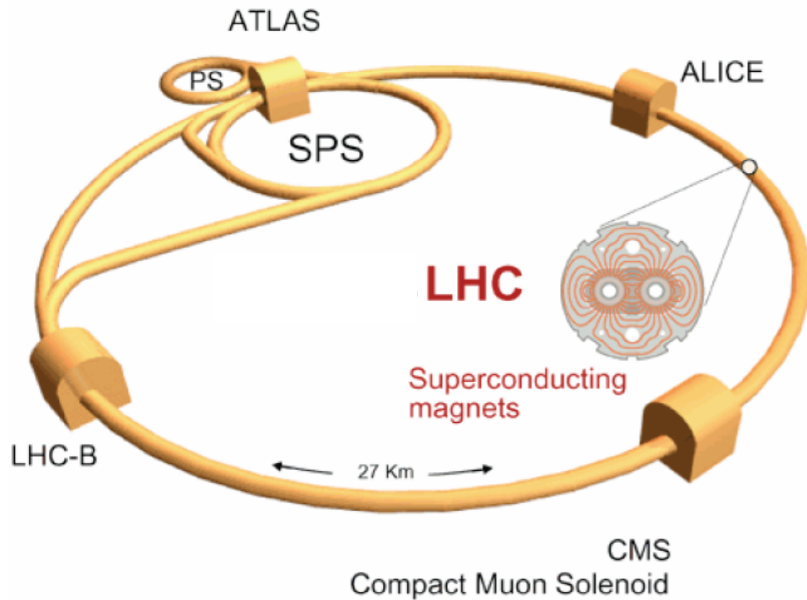
Alla ricerca del Bosone di Higgs: Il Large Hadron Collider



Alla ricerca del Bosone di Higgs: Il Large Hadron Collider

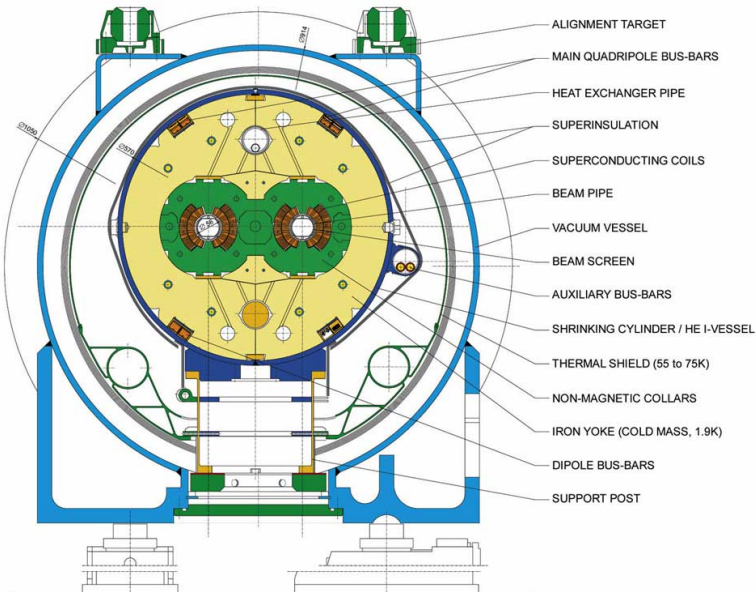


Il Large Hadron Collider



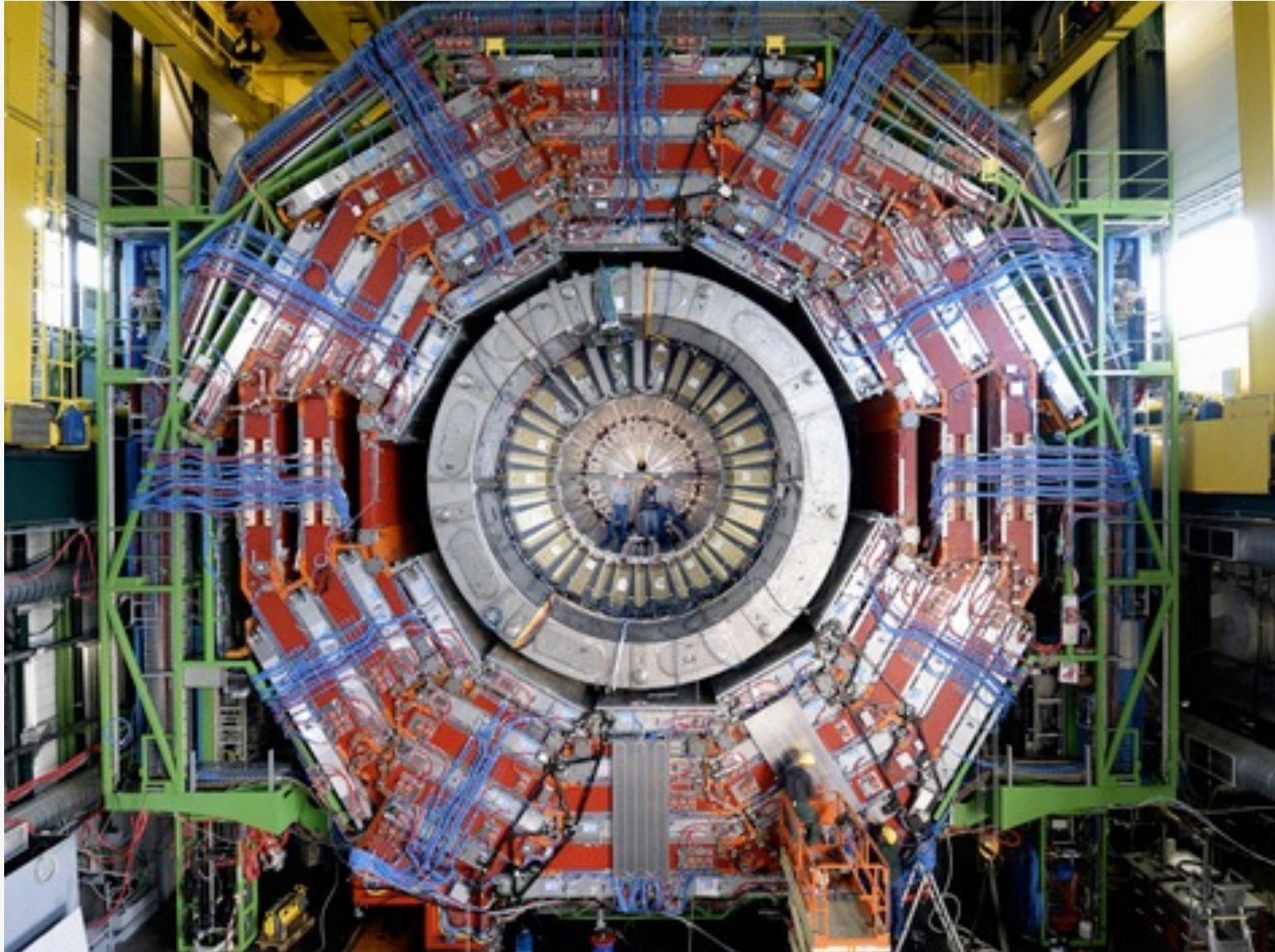
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN.AC/DI/MM - HE107 - 30.04.1999



- collisioni p-p (ma anche Pb-Pb e p-Pb)
- 14 TeV nel centro di massa
 - ▶ $m_p = 1 \text{ GeV}$
- 40 MHz è la frequenza di collisione
- 1200 dipoli di 8 T raffreddati a 2 K

Il rivelatore CMS



CMS Detector

Pixels
Tracker
ECAL
HCAL
Solenoid
Steel Yoke
Muons

SILICON TRACKER
Pixels ($100 \times 150 \mu\text{m}^2$)
~ 1m^2 ~66M channels
Microstrips ($80\text{-}180\mu\text{m}$)
~ 200m^2 ~9.6M channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
~76k scintillating PbWO_4 crystals

PRESHOWER
Silicon strips
~ 16m^2 ~137k channels

STEEL RETURN YOKE
~13000 tonnes

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium-titanium coil
carrying ~18000 A

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + plastic scintillator
~7k channels

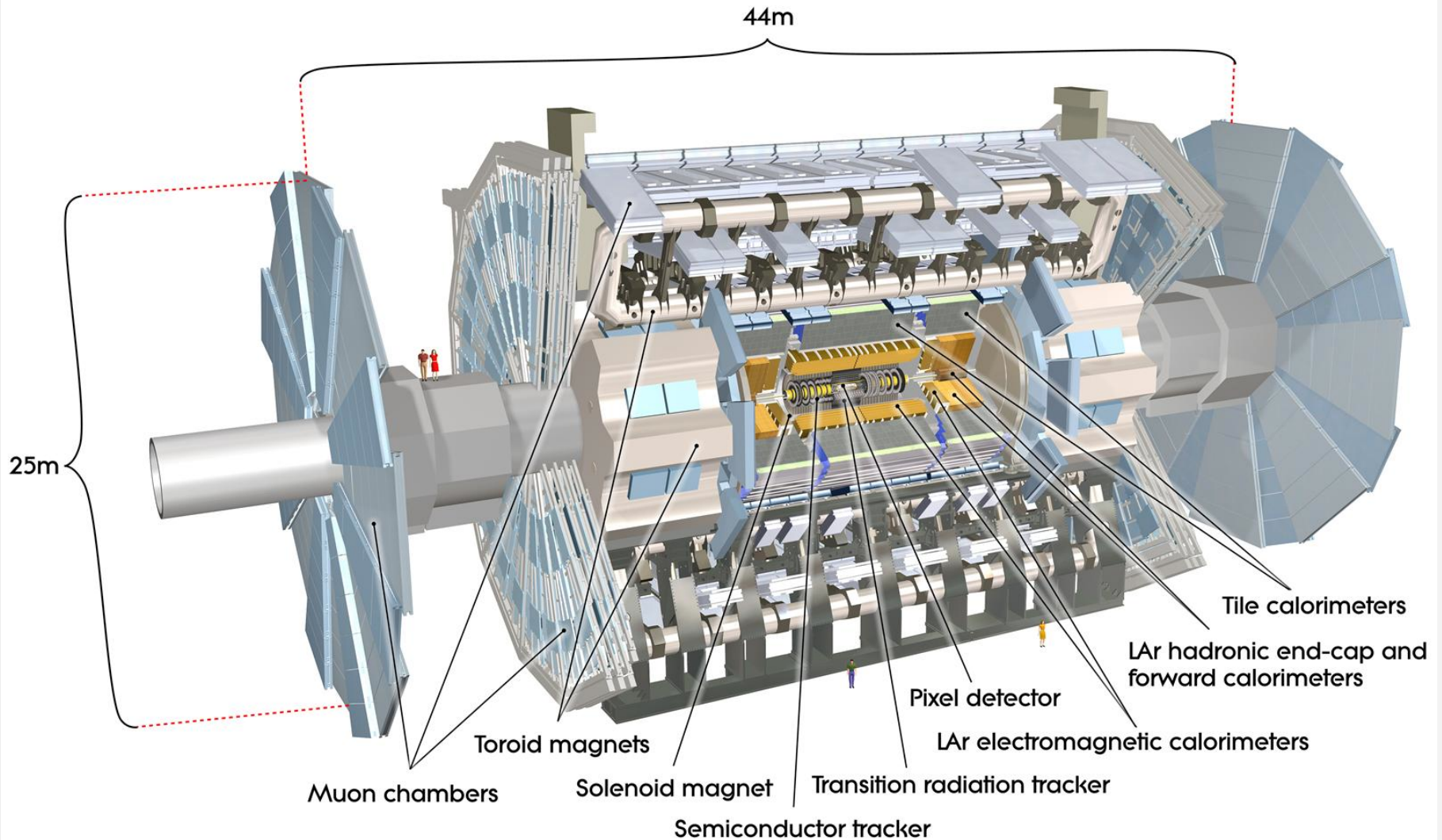
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube & 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 473 Cathode Strip & 432 Resistive Plate Chambers

FORWARD CALORIMETER
Steel + quartz fibres
~2k channels

Total weight : 14000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

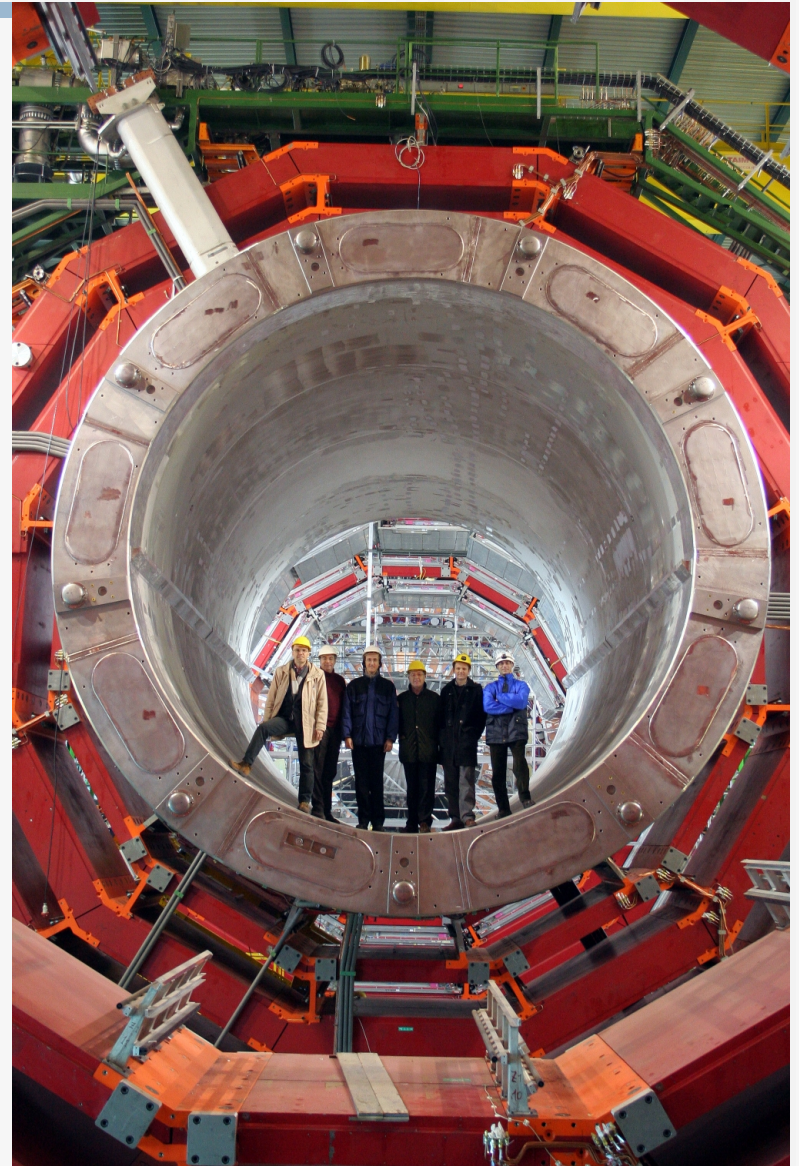
La collaborazione è formata da più di 2000 fisici da tutto il mondo

ATLAS

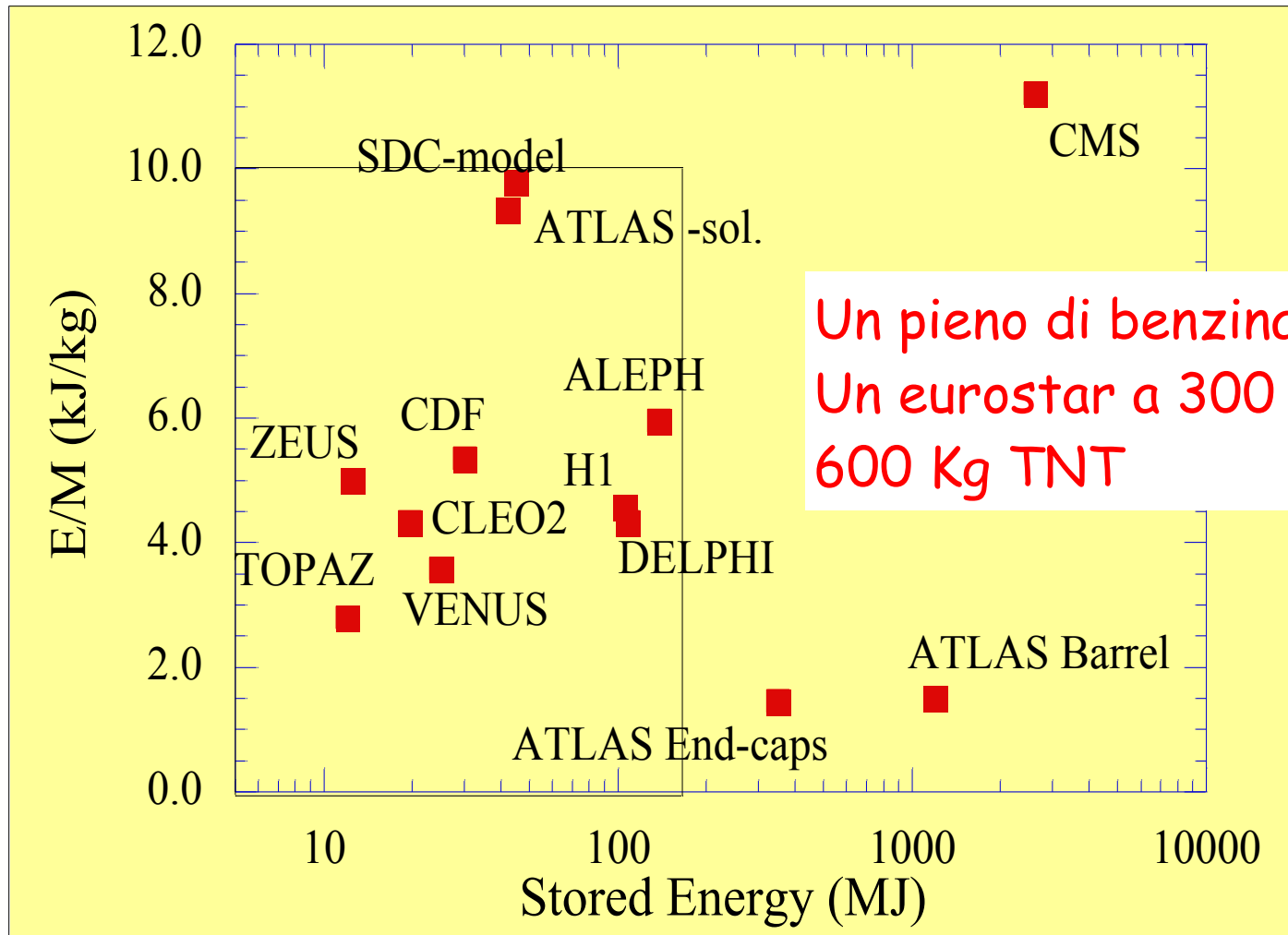


Il magnete

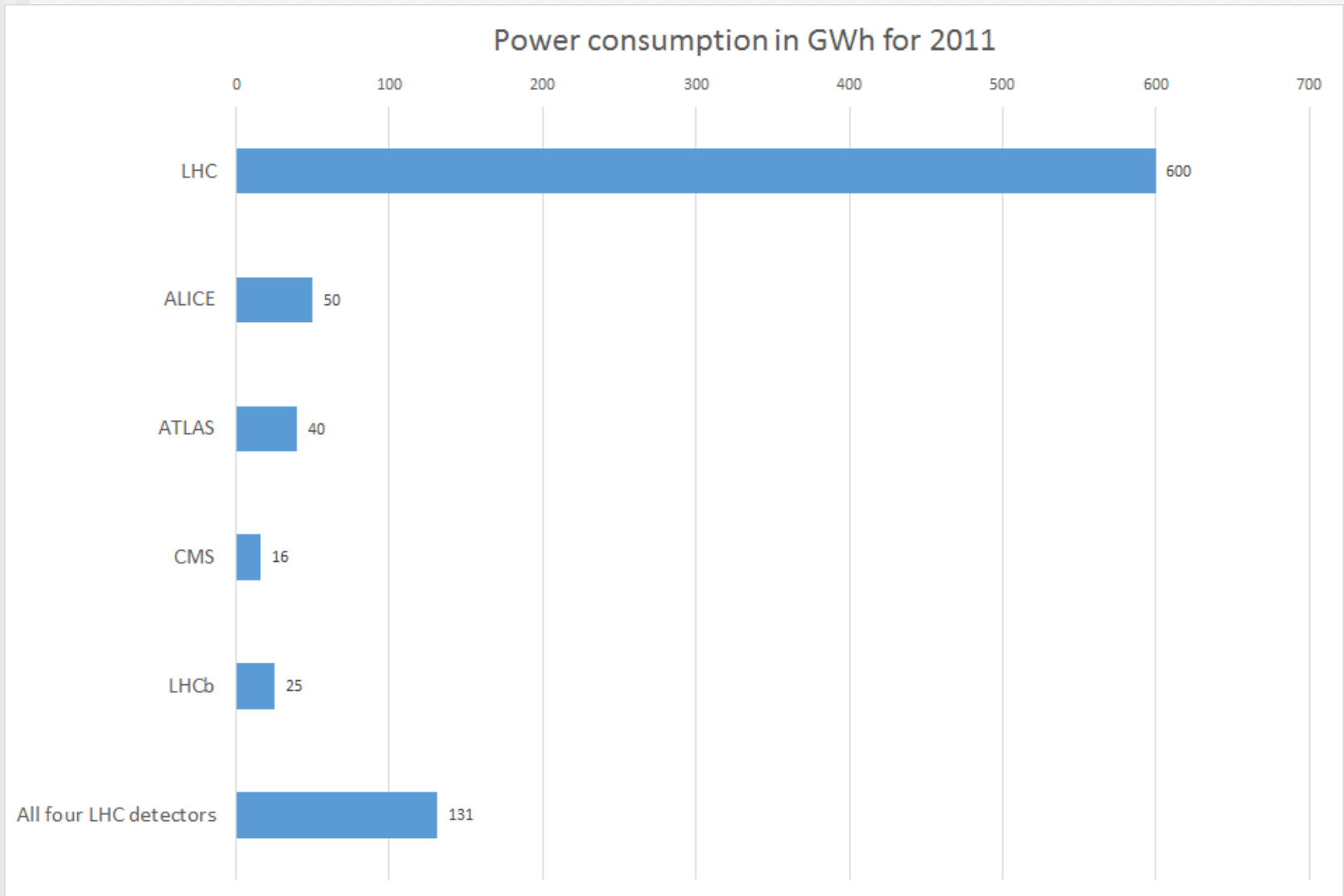
- dimensioni:
 - 13 m di lunghezza
 - 6 m di diametro
- superconduttore
 - raffreddato a 4K
 - 20000 A di corrente
- campo magnetico di 4 Tesla
- 2.5 GJ di energia
 - abbastanza per fondere 20 t di oro
- È stato costruito dall'ANSALDO



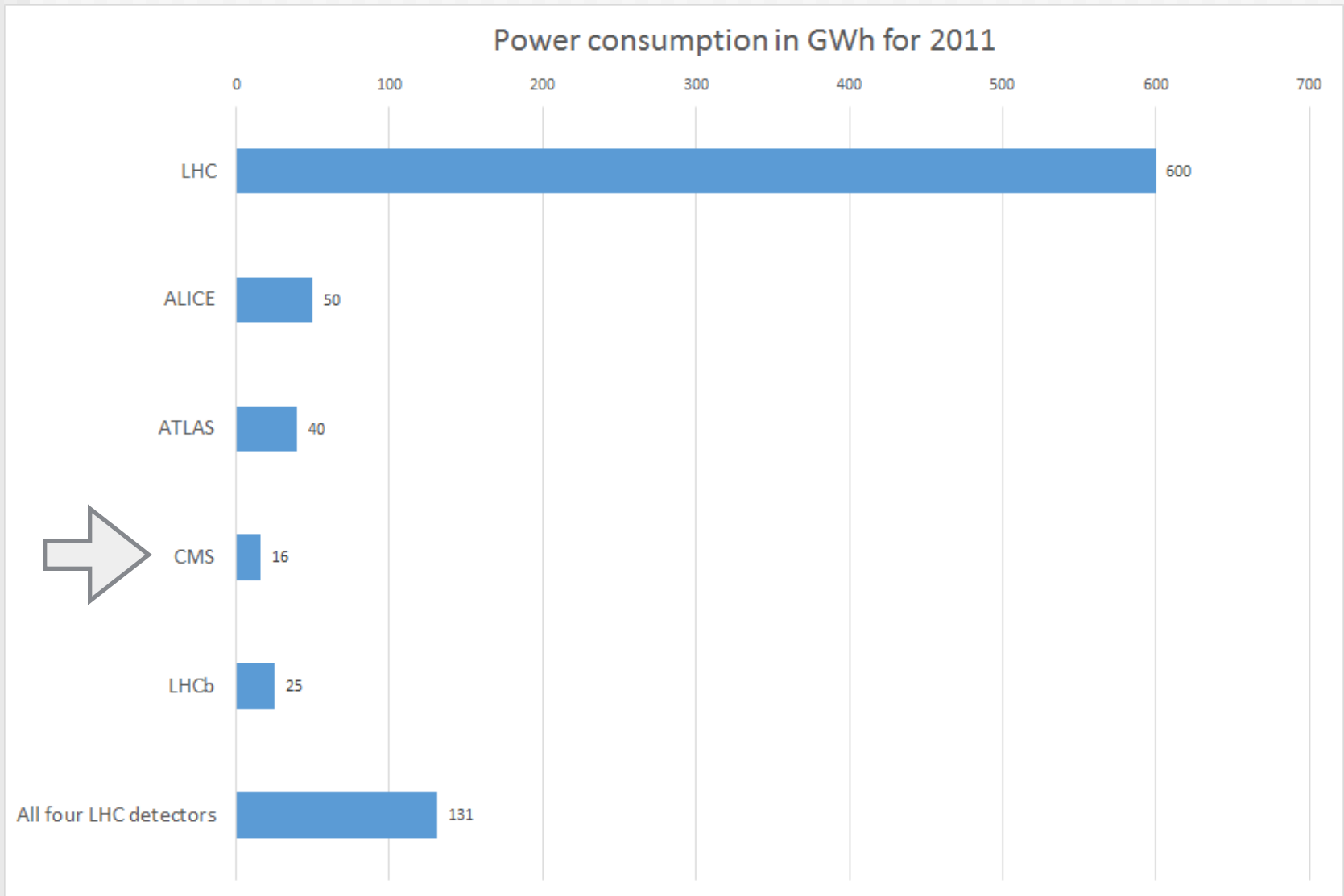
$$E = \int_{V_{air}} \frac{B^2}{2\mu_0} dv = 2.5 \cdot 10^9 = 2.5 \text{ GJ}$$



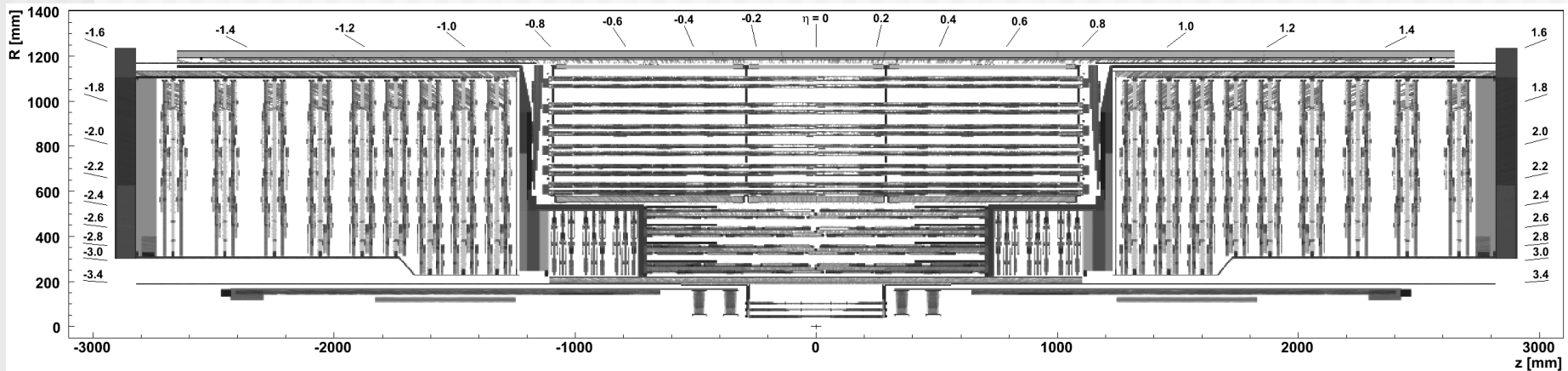
Un rivelatore “ecologico”...



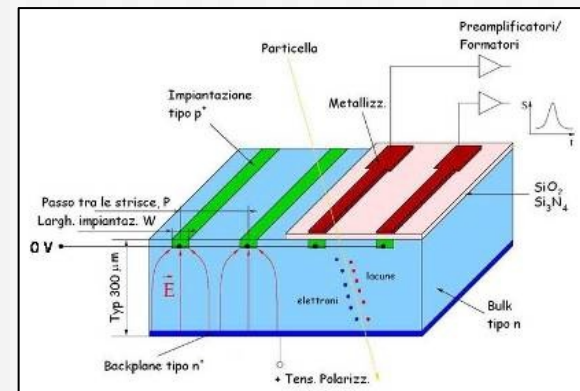
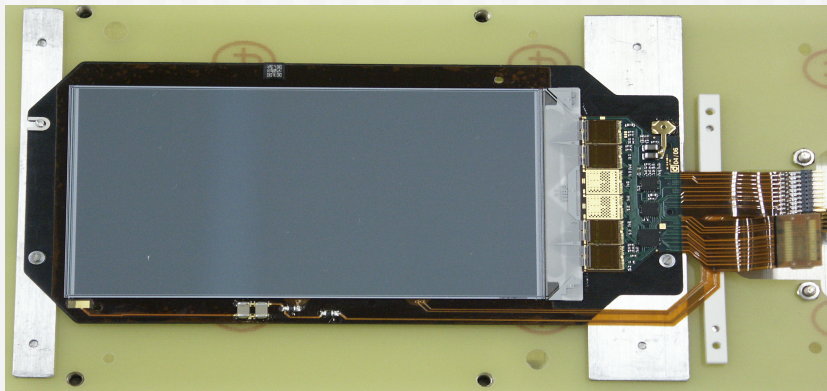
Un rivelatore “ecologico”...

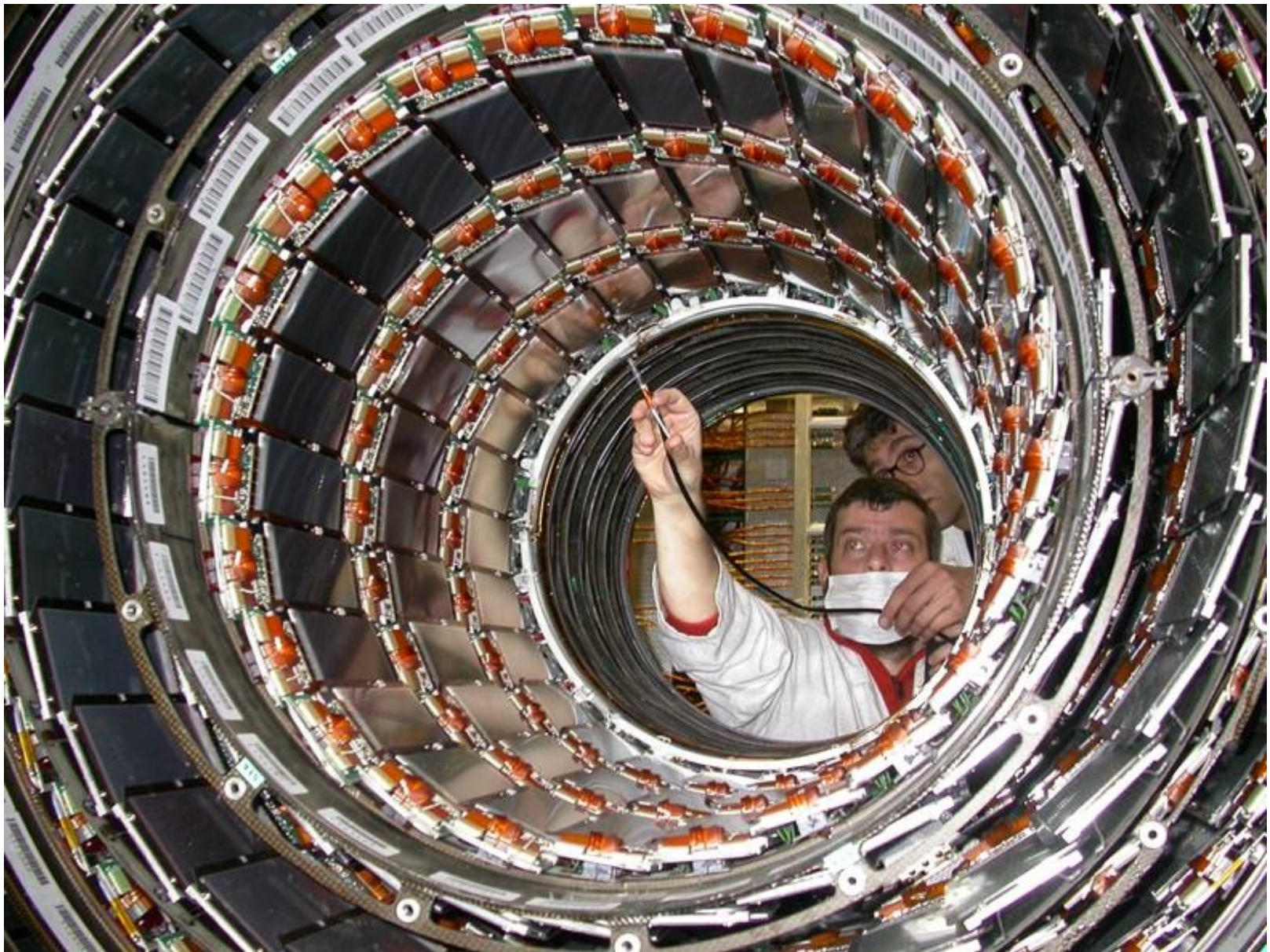


Il tracciatore

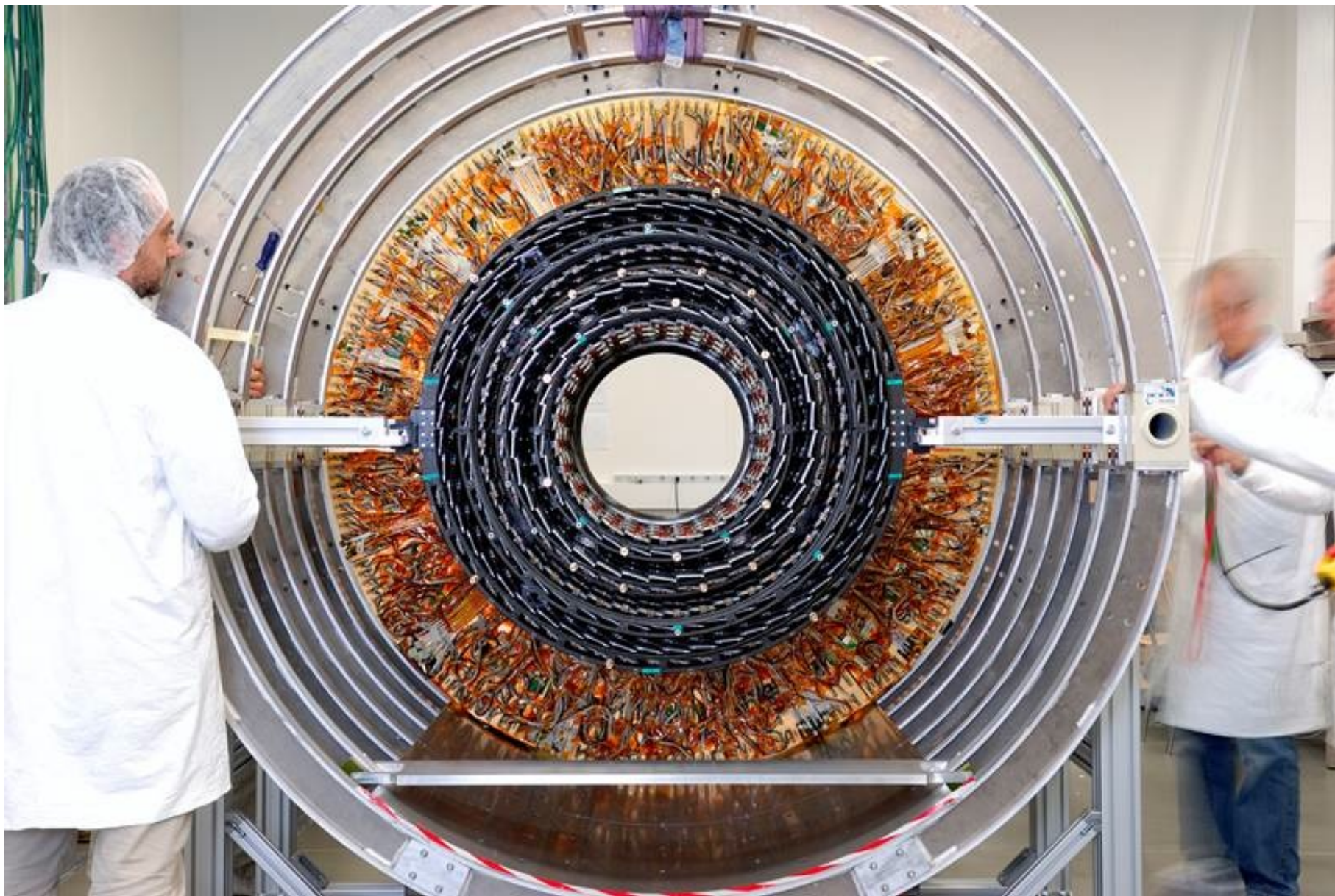


- È il più grande tracciatore al silicio mai costruito
 - 1.2 m di raggio, 5.5 m di lunghezza
 - 210 m² di superficie, 10⁷ canali in 15k moduli
 - Raffreddato a -10° C per resistere alla radiazione

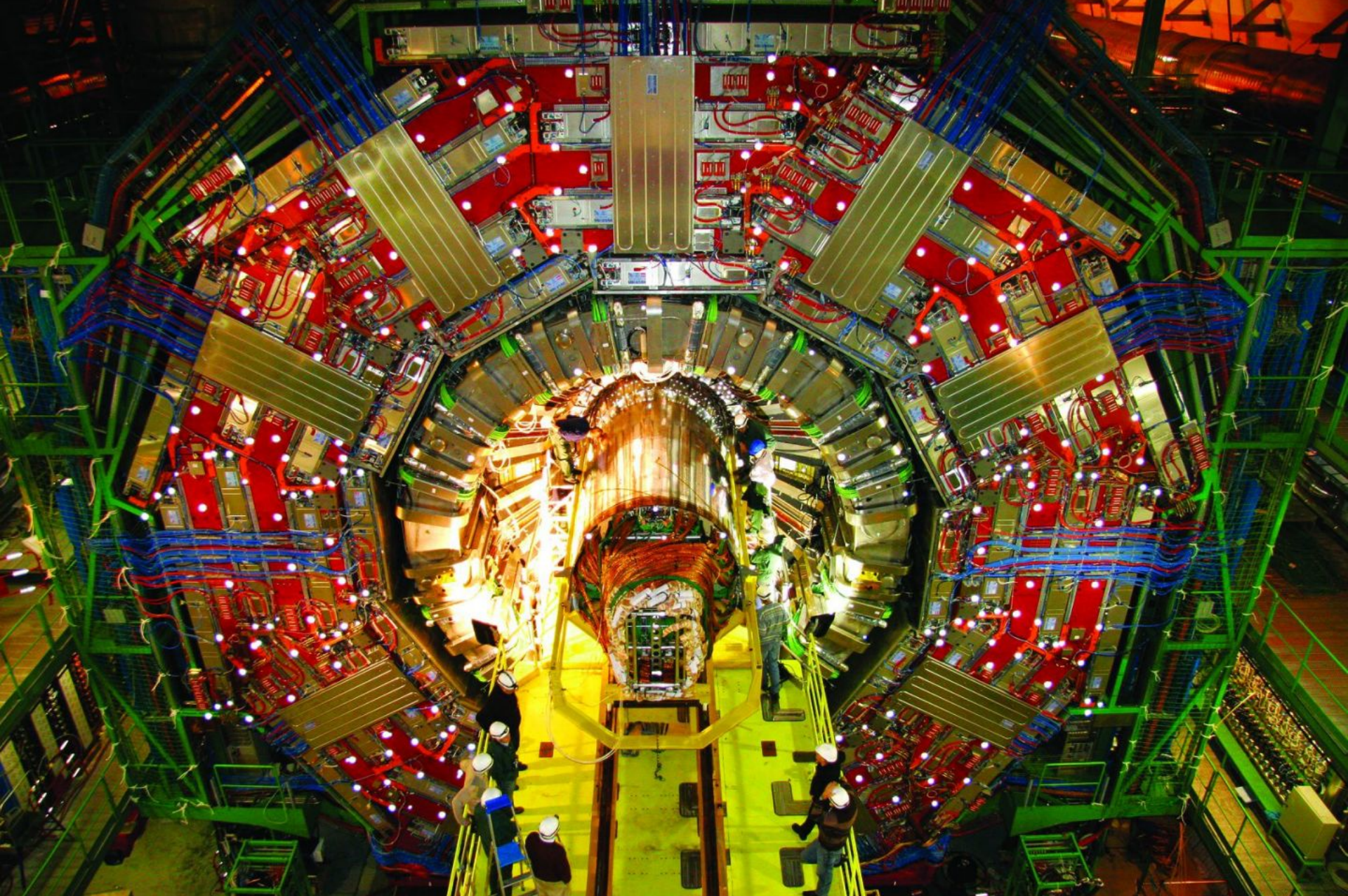




Il gruppo CMS di Firenze ha contribuito alla costruzione, al test e alla messa opera della parte più interna del rivelatore a microstrisce

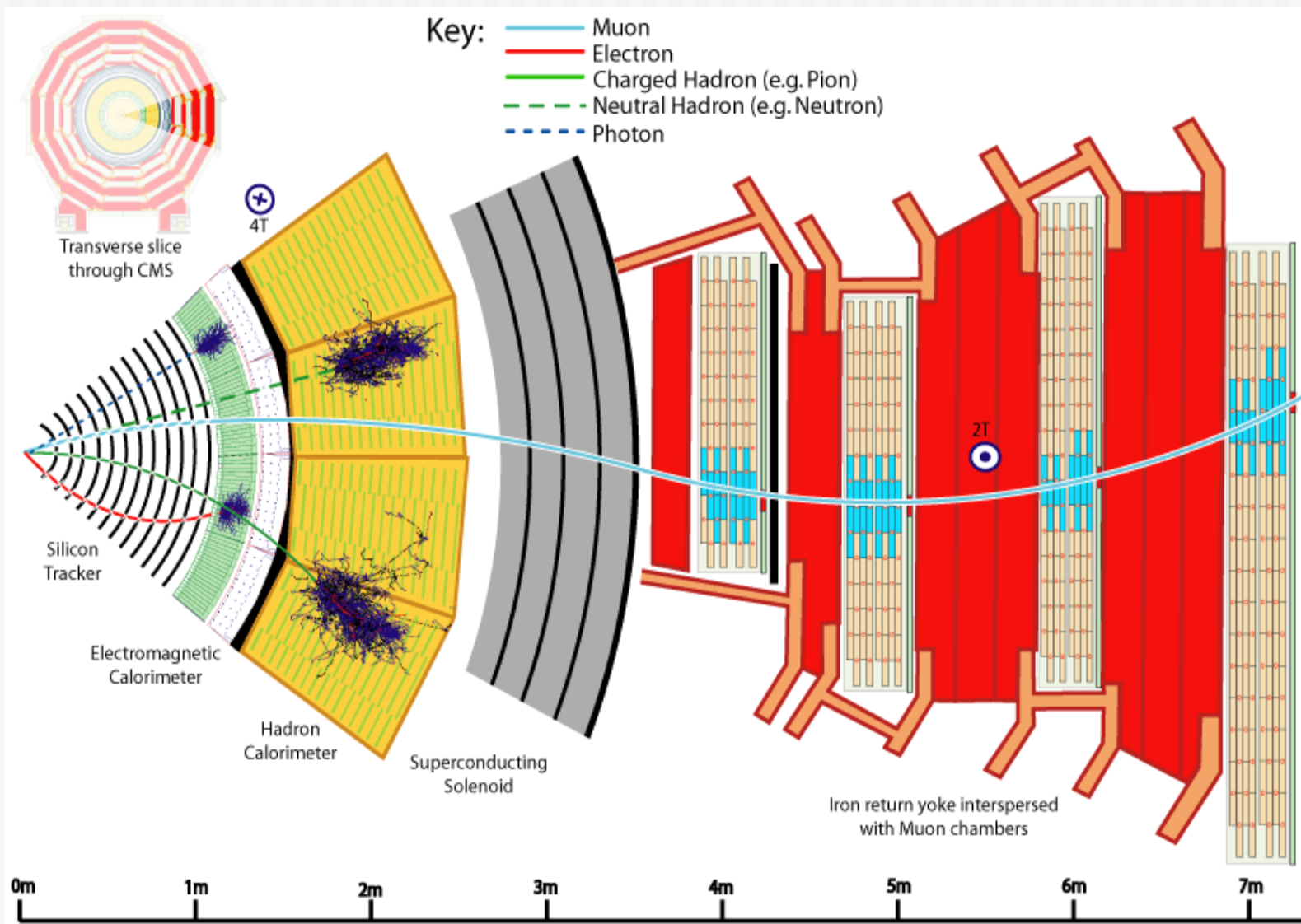


I quattro strati più interni del tracciatore a microstrisce

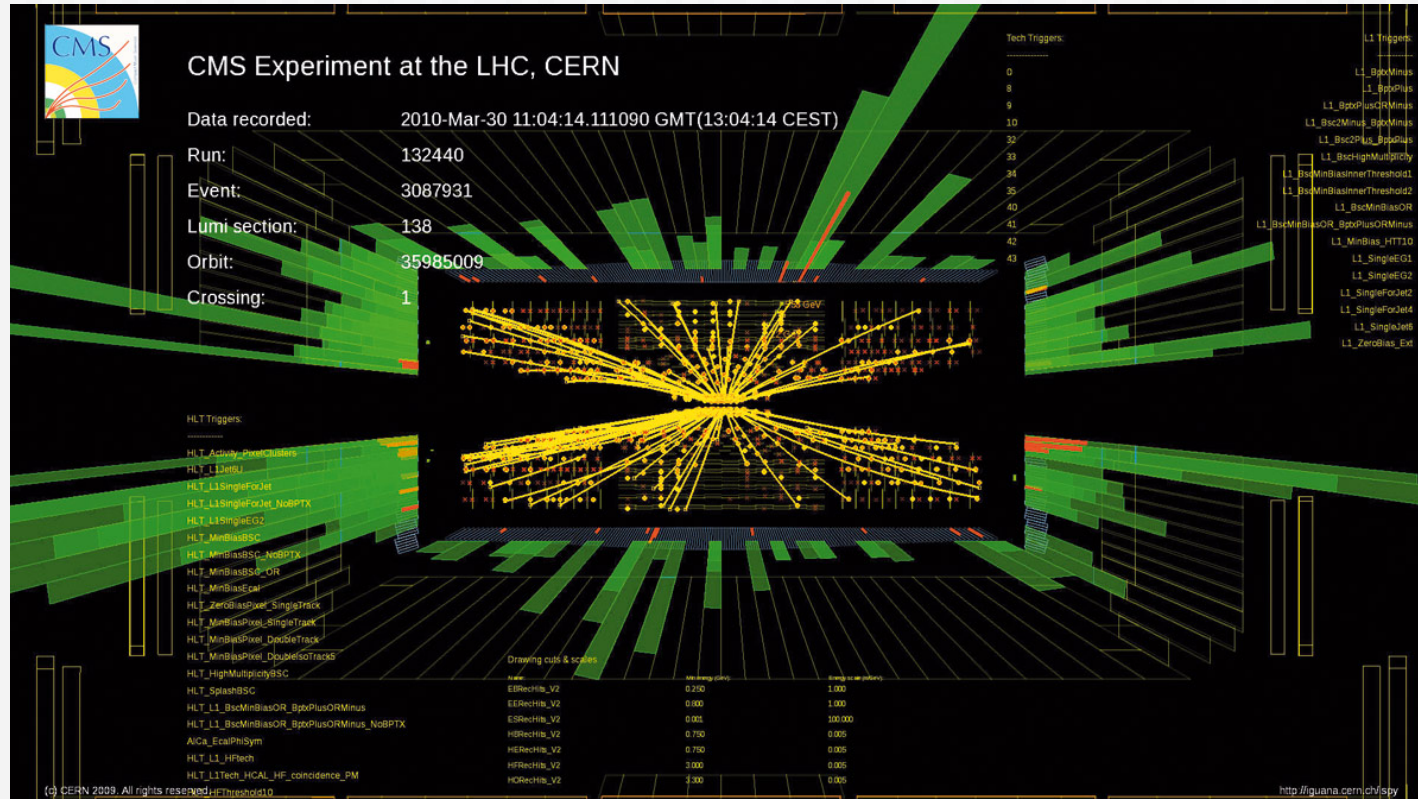


L'inserimento del tracciatore dentro CMS nel 2007

Le particelle nel rivelatore CMS

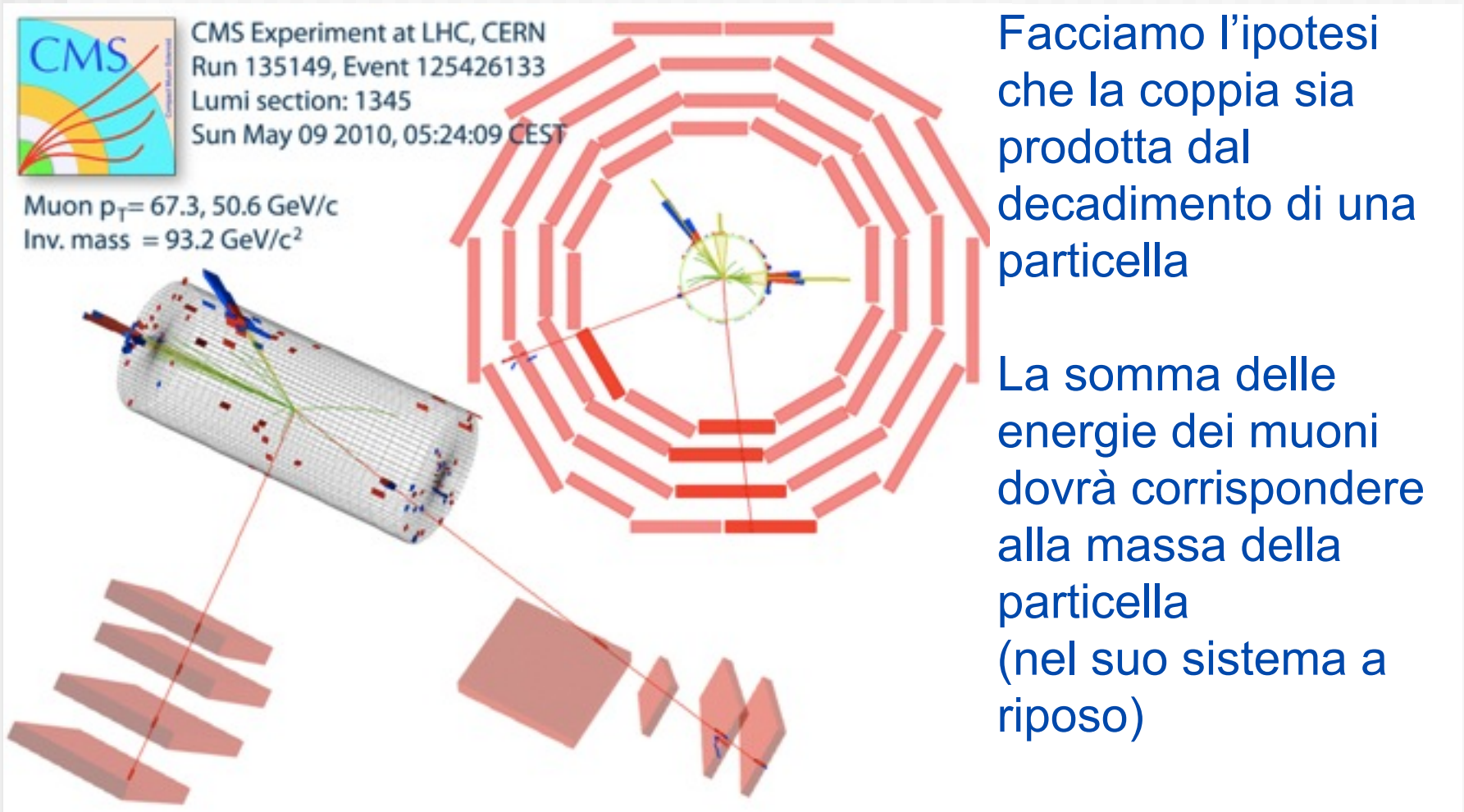


Il nostro microscopio!...

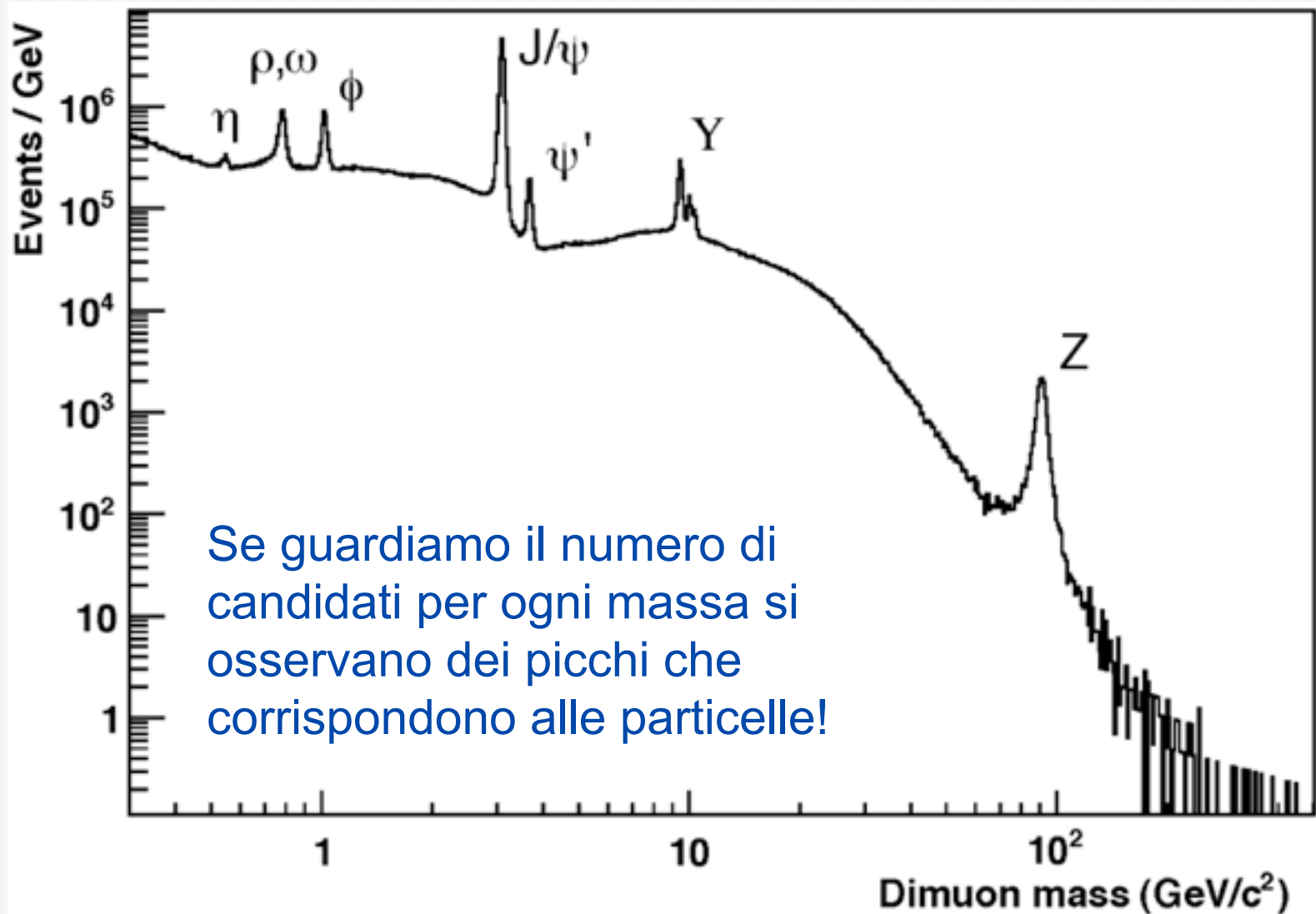


- **$E=mc^2$** : grazie all'energia dei protoni si producono altre particelle anche molto più pesanti

Un esempio: le coppie $\mu^+\mu^-$

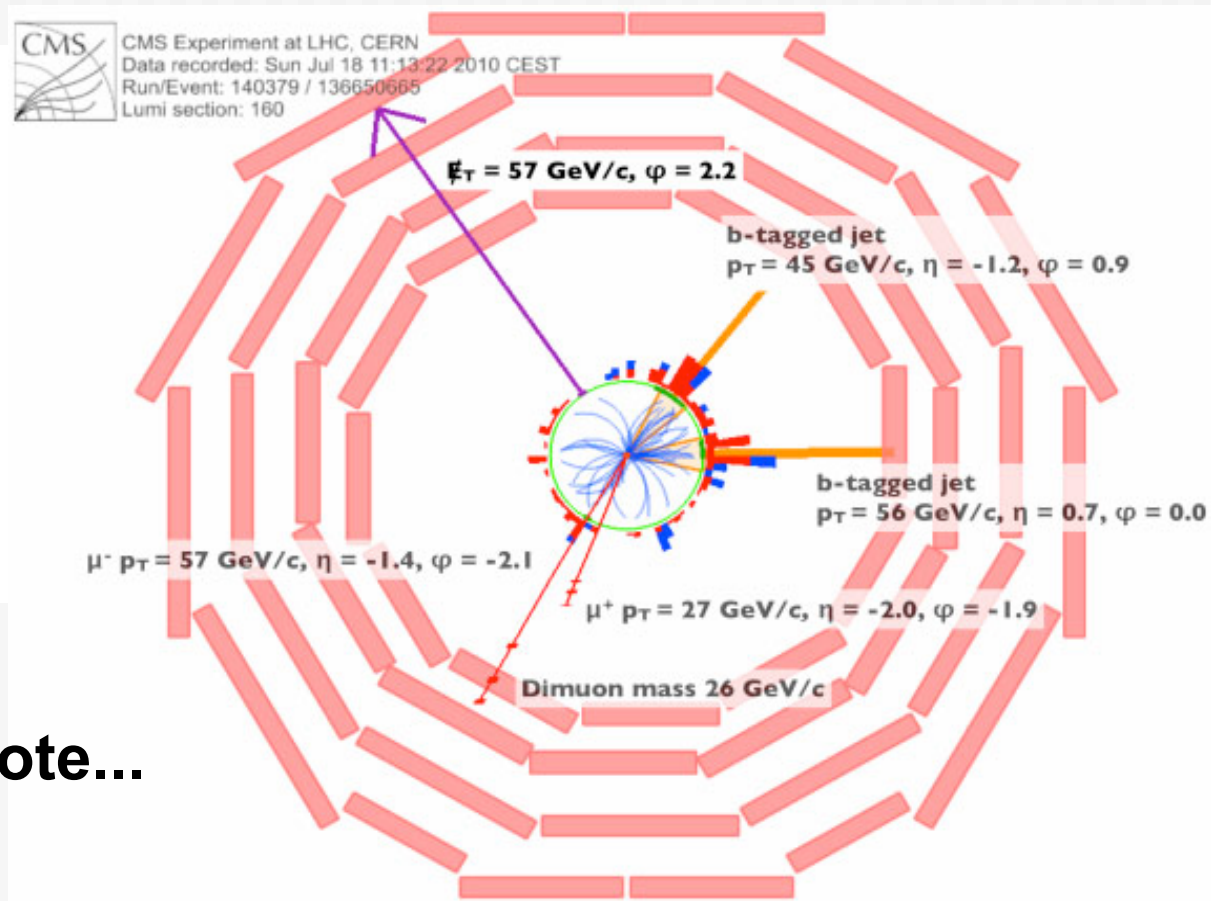
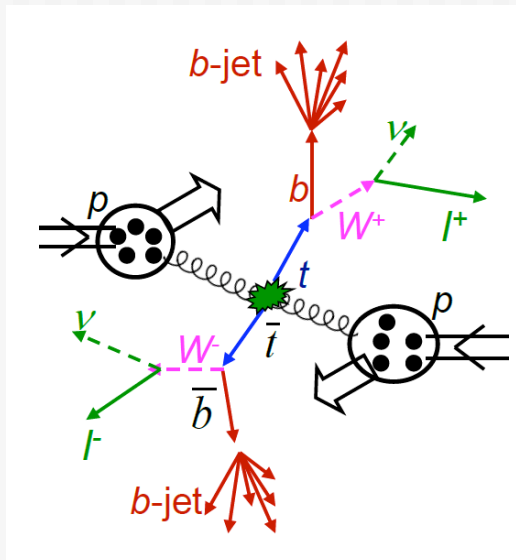


Un esempio: le coppie $\mu^+\mu^-$



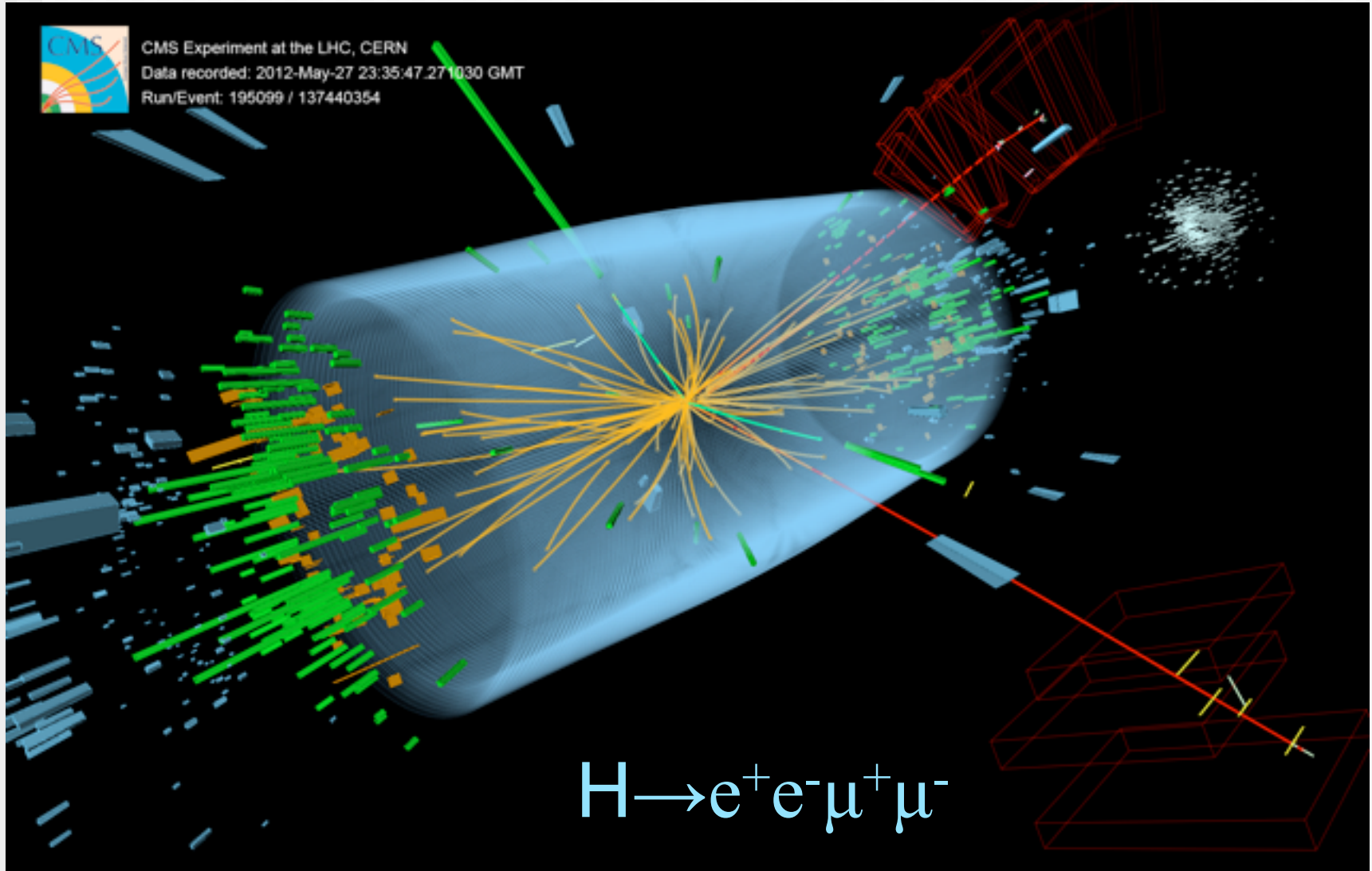
Il quark “top” ad LHC

- Il quark “top” è il più pesante tra tutti i quark, è prodotto raramente nelle interazioni e non forma stati legati
- Quello mostrato è uno dei primi candidati ad LHC



Fin qui le cose già note...

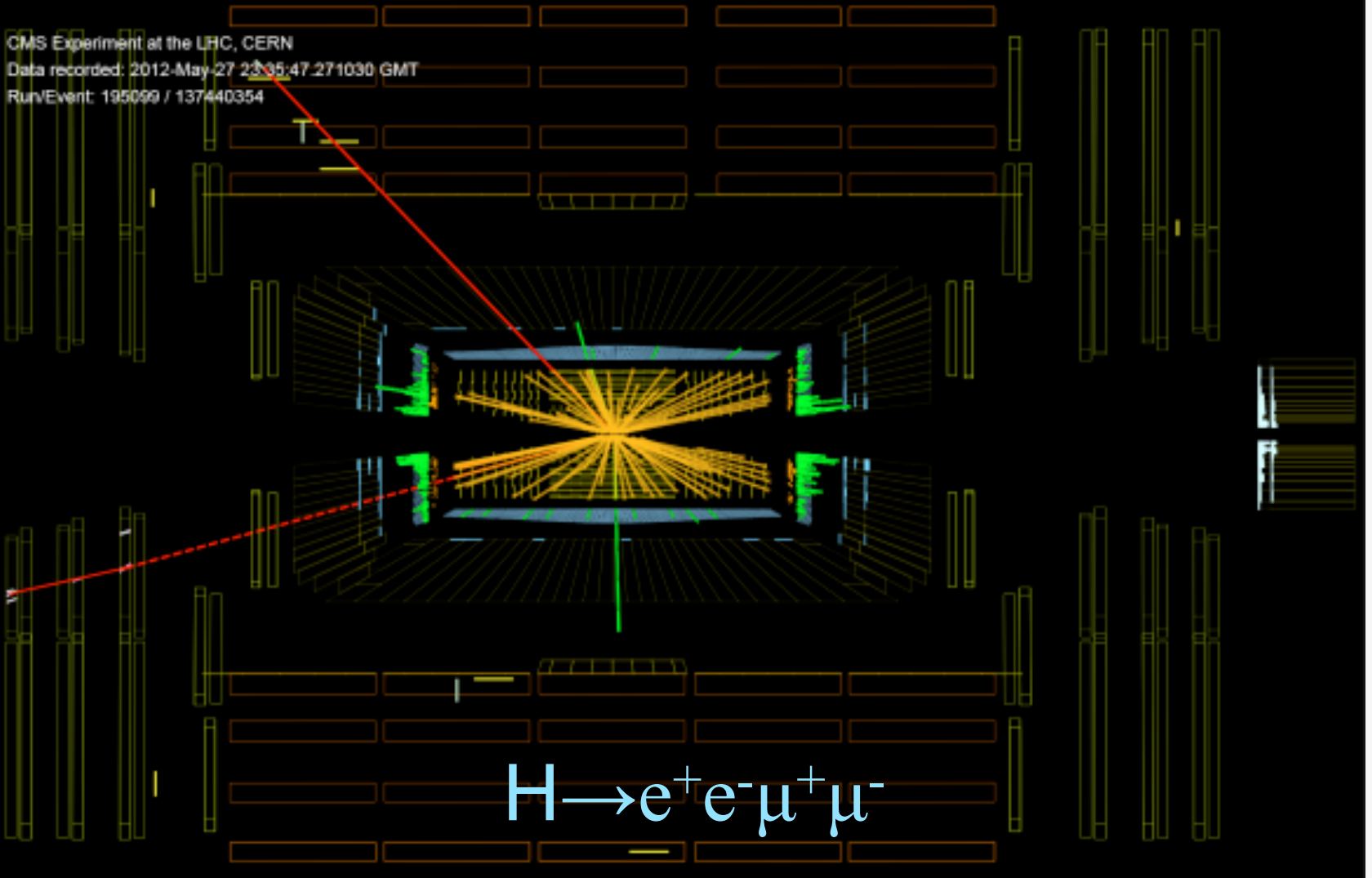
Un candidato Higgs



Un candidato Higgs

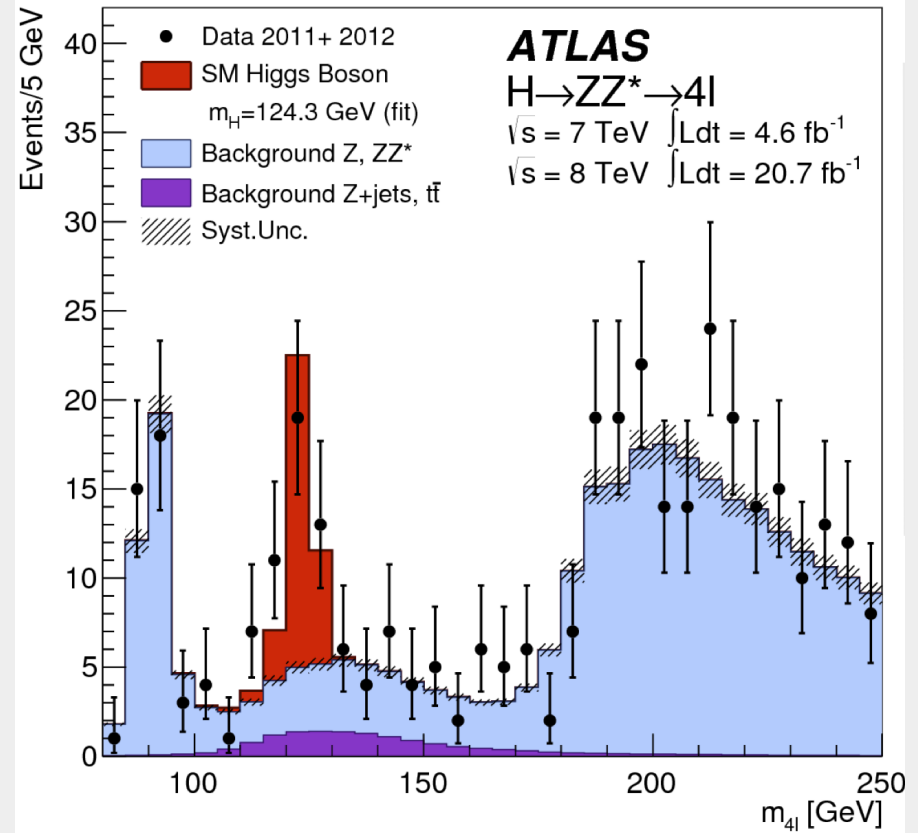
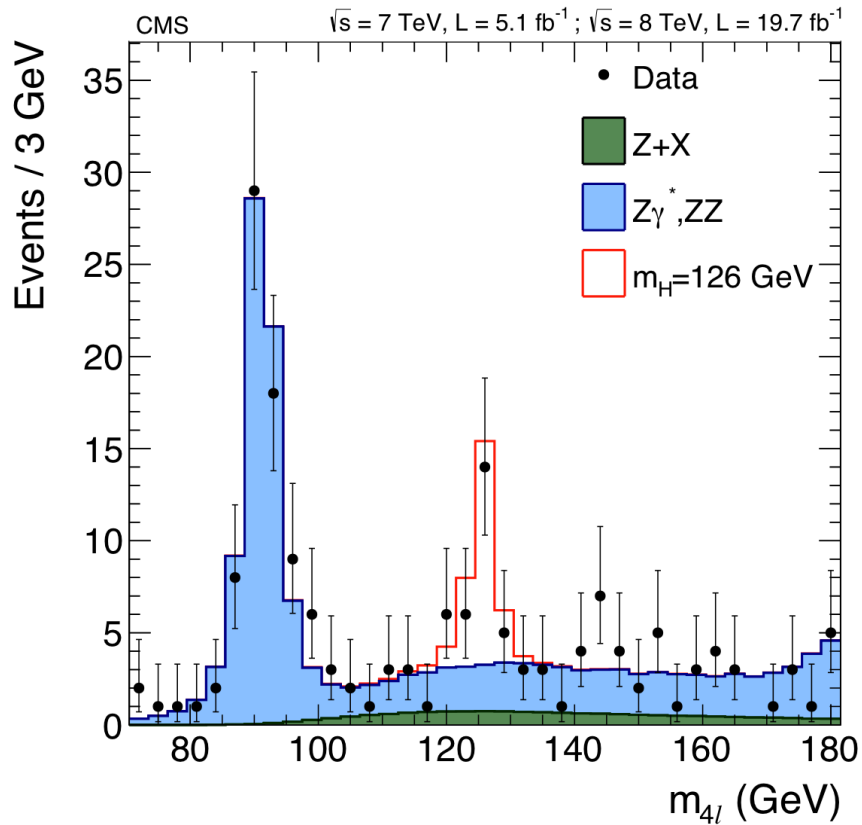


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:05:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354

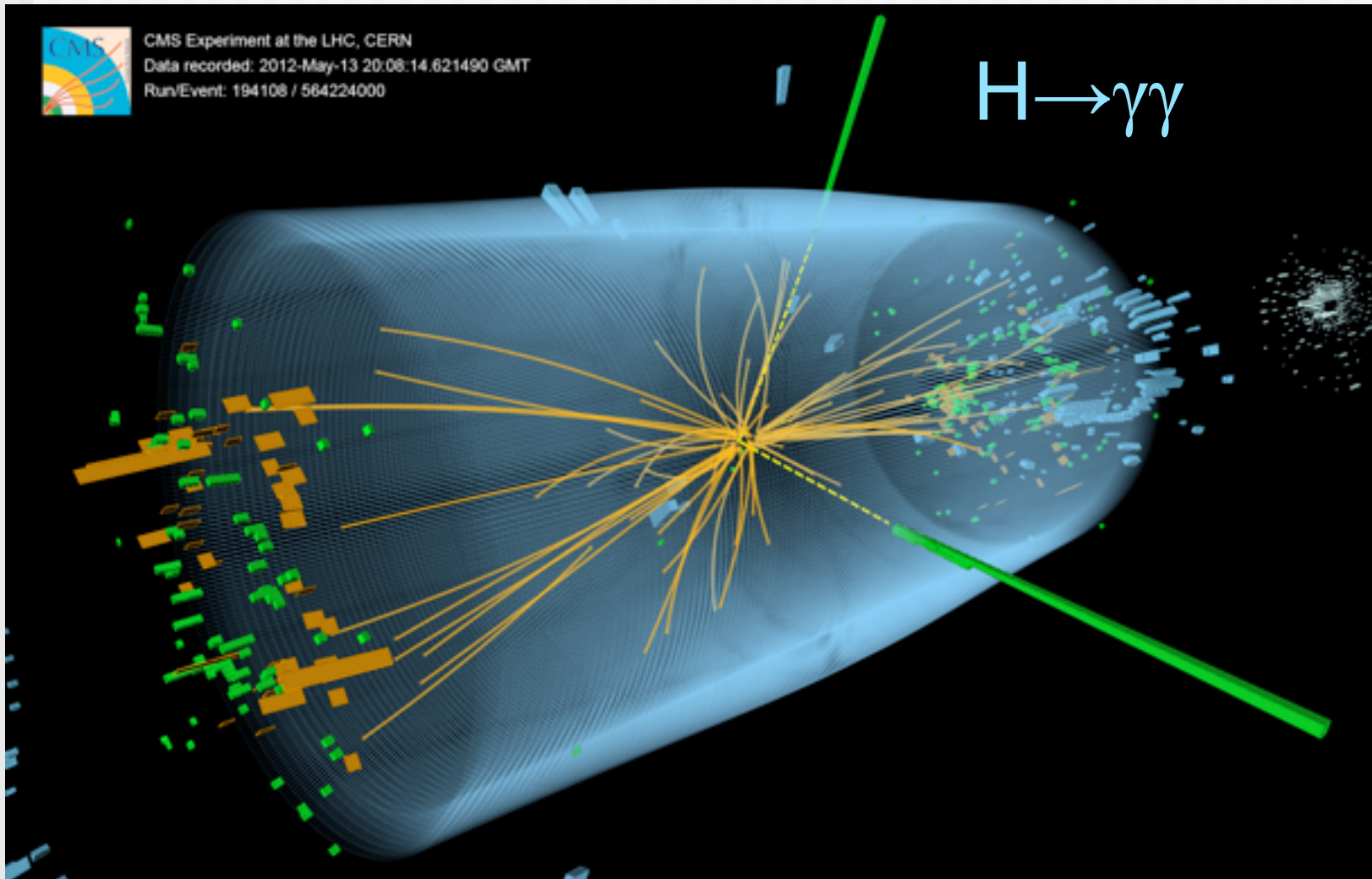


$$H \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$$

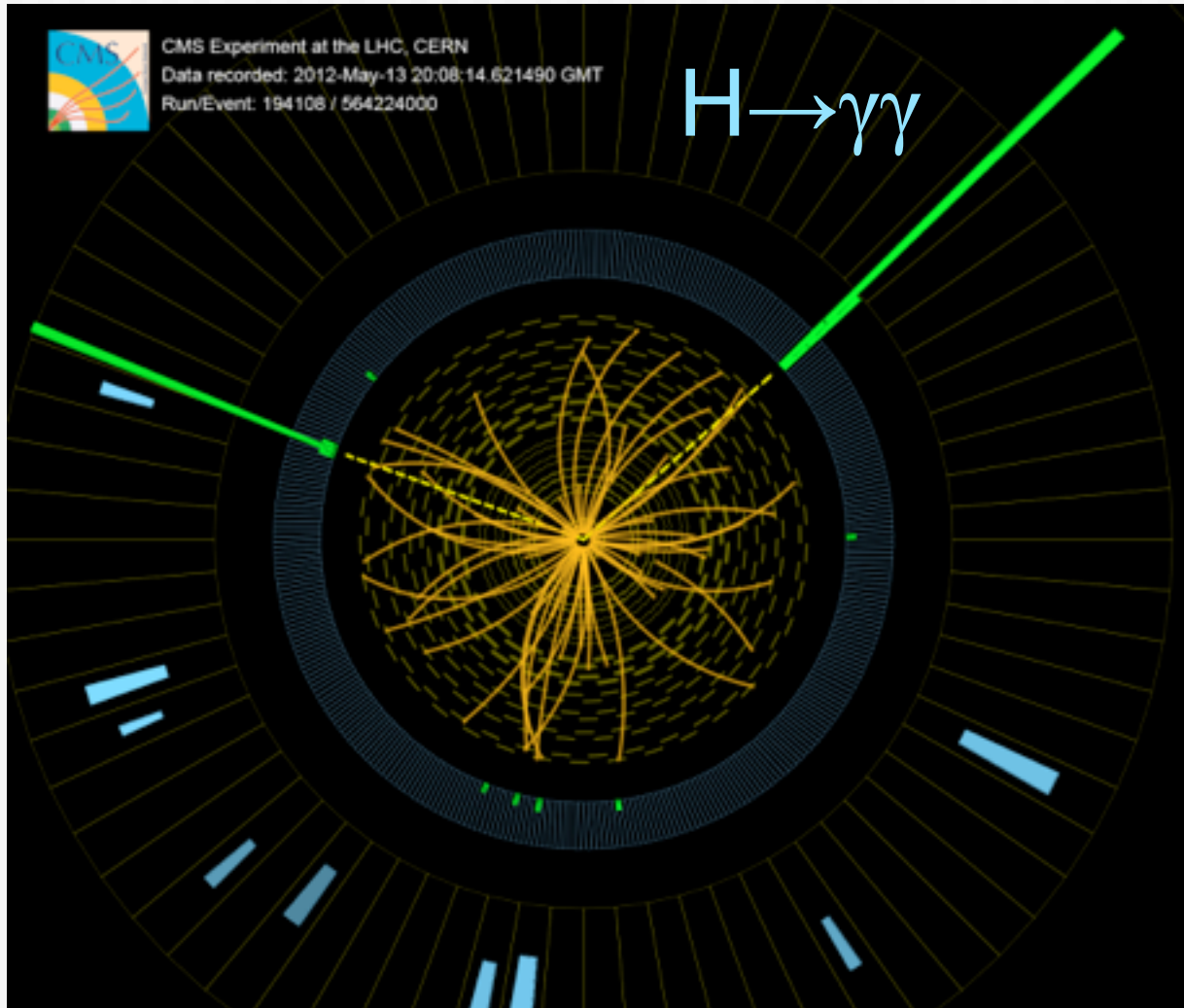
$$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$$



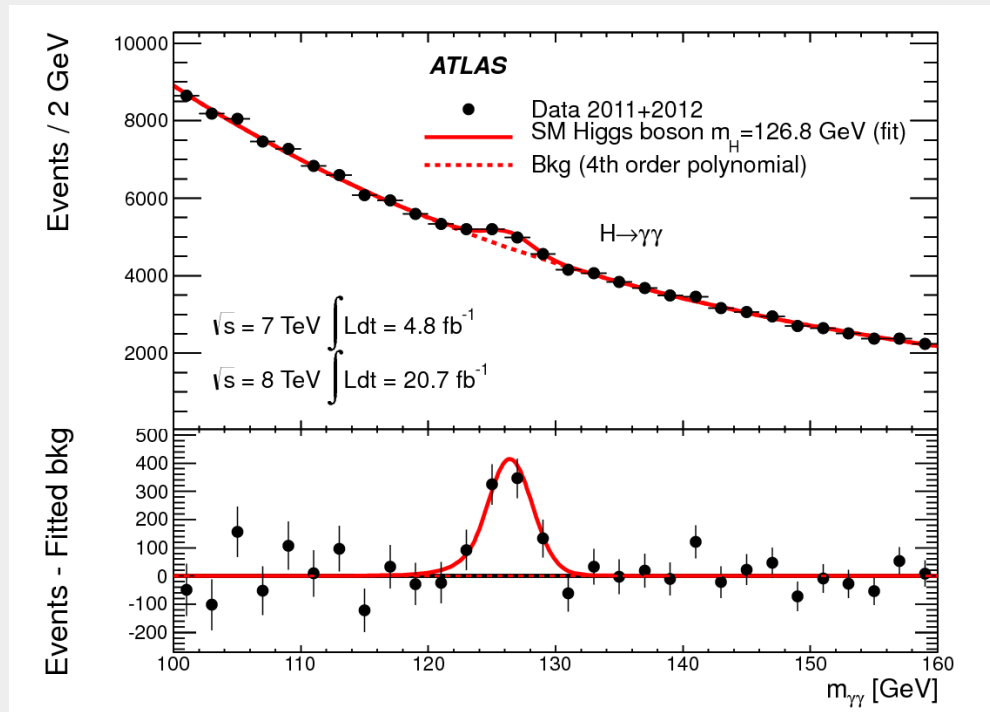
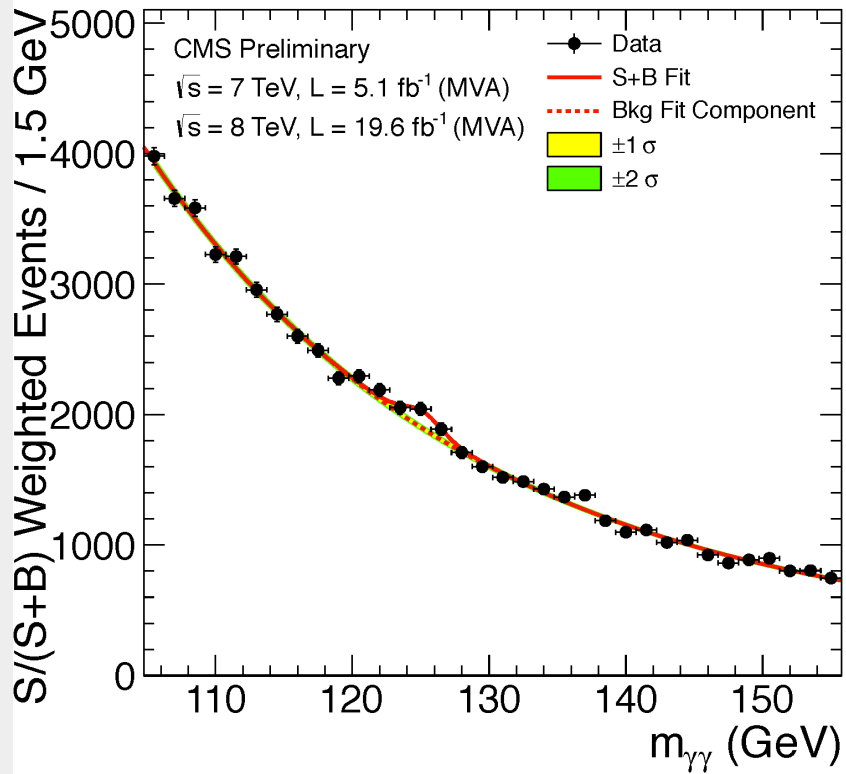
Un altro candidato Higgs



Un altro candidato Higgs

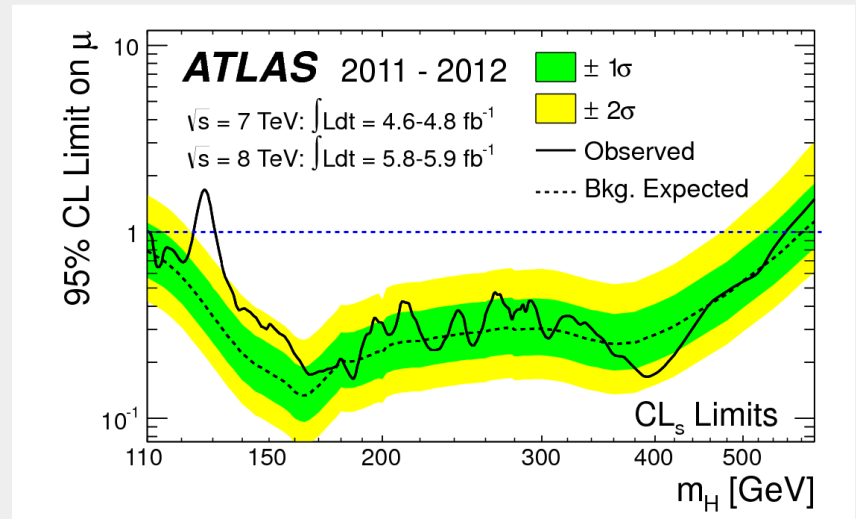
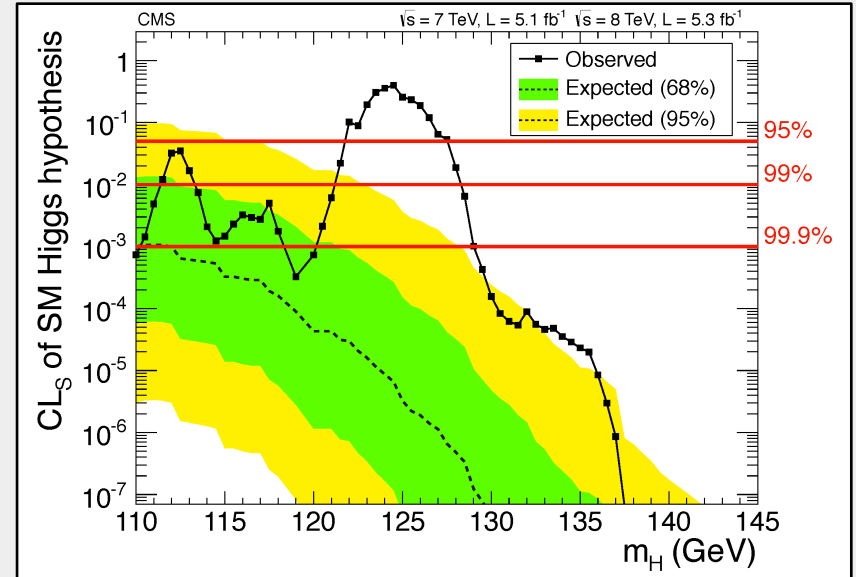


H \rightarrow $\gamma\gamma$



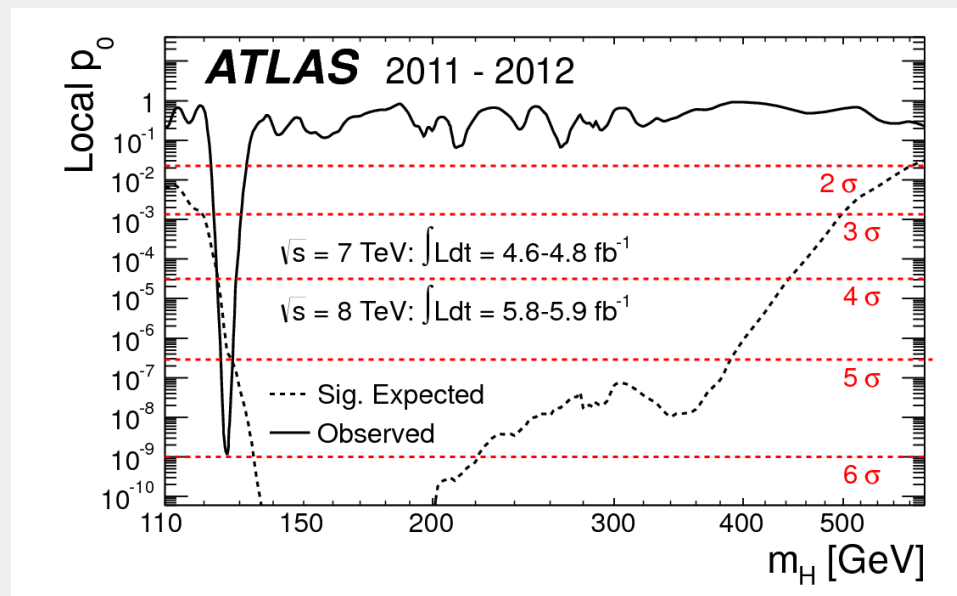
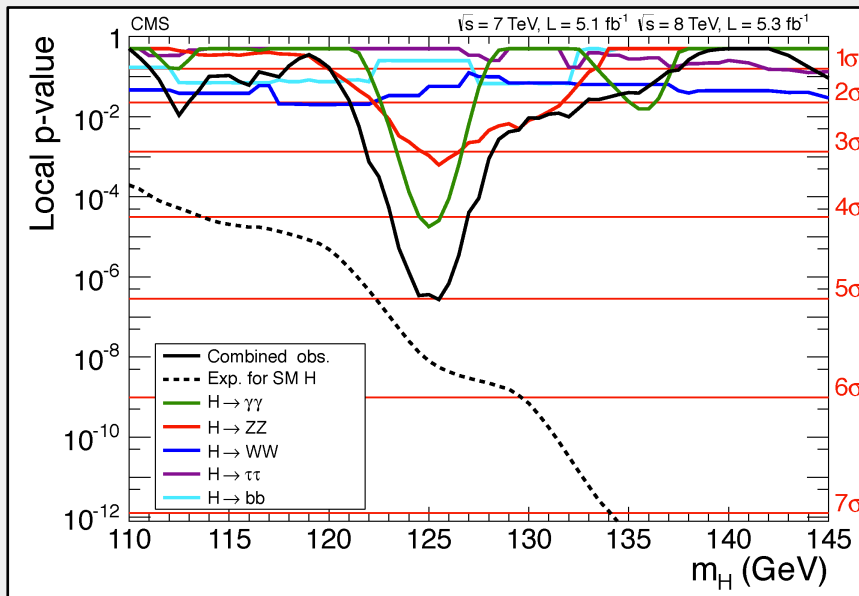
Plot di esclusione

- Riassume il significato statistico dei risultati
- Permette di combinare più canali
- Un eccesso rispetto alla linea *tratteggiata* può indicare la presenza di un segnale



p-value

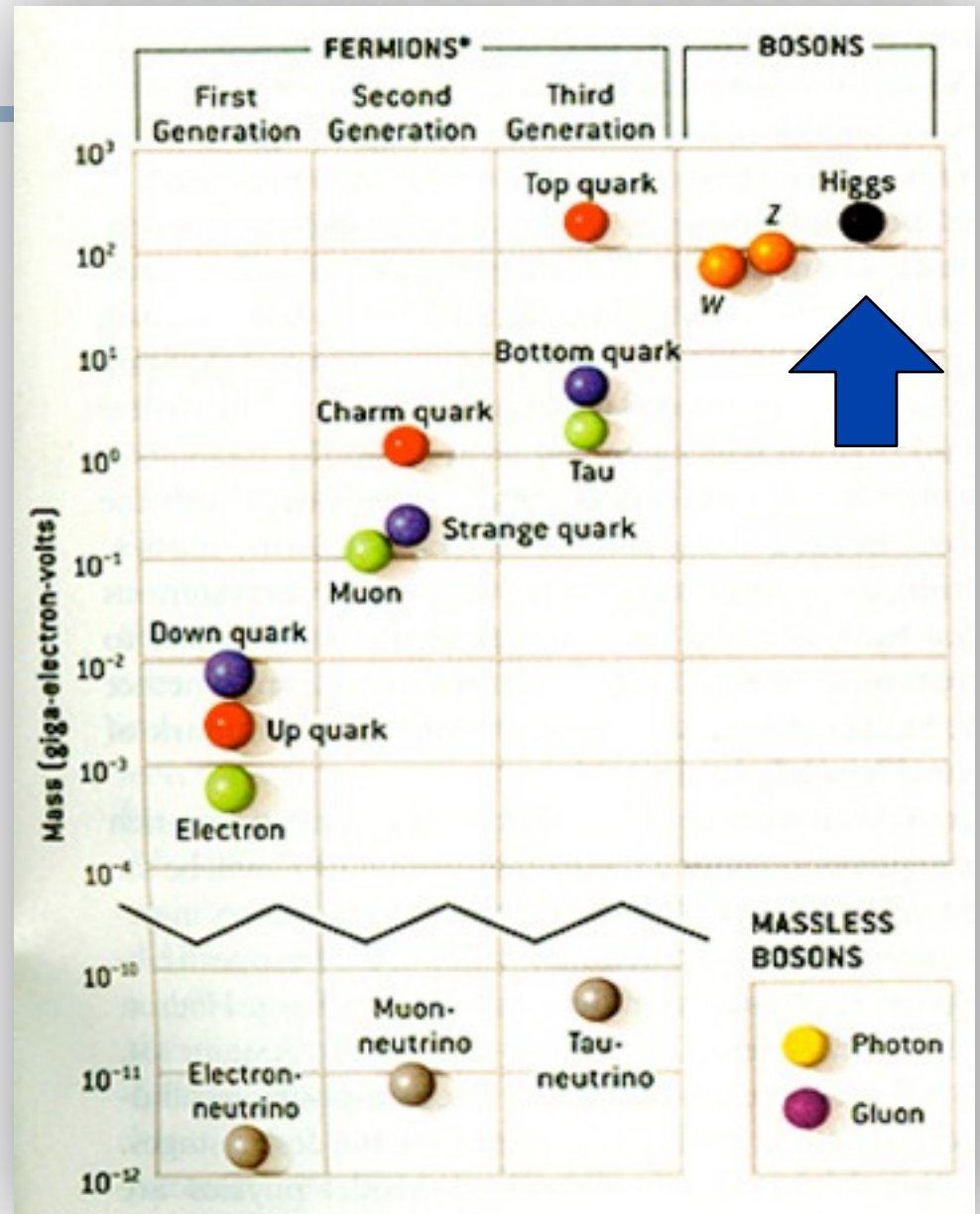
- Probabilità che il segnale osservato sia dovuto al fondo soltanto



- Convenzionalmente si parla di scoperta quando si raggiunge la linea delle 5σ ovvero una probabilità di $\sim 1/1'000'000$

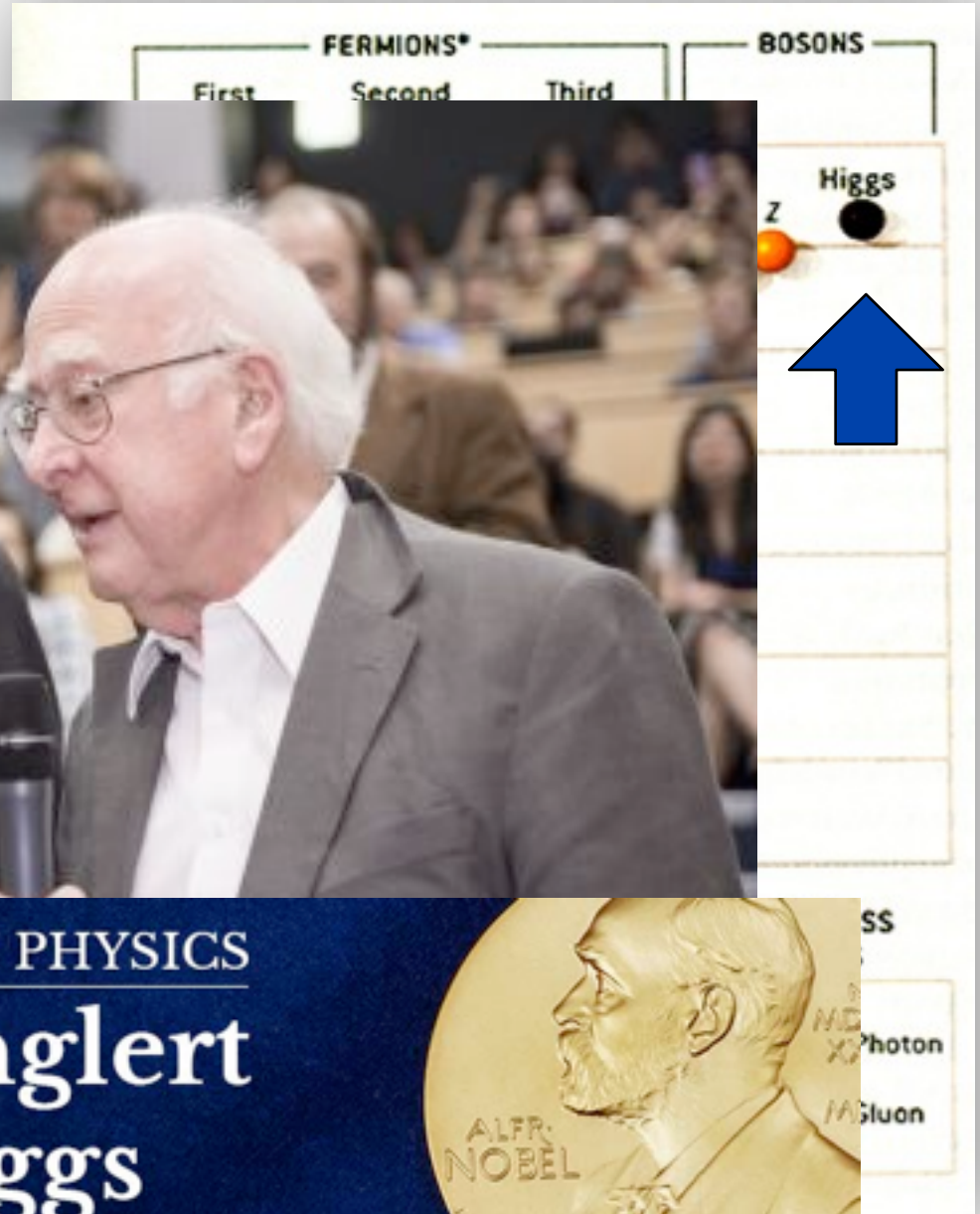
Il Modello Standard

finalmente completo!



Il Modello Standard

fi



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS
François Englert
Peter W. Higgs

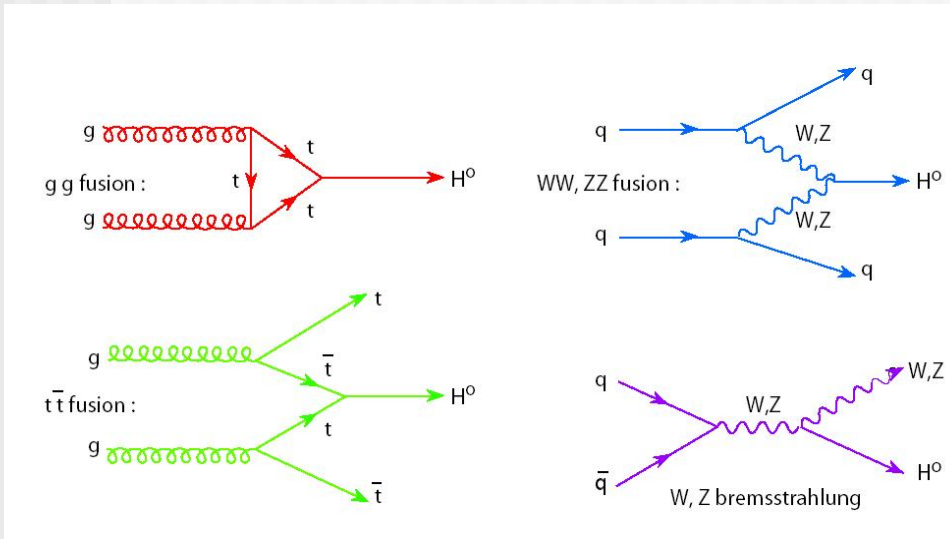


© The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.

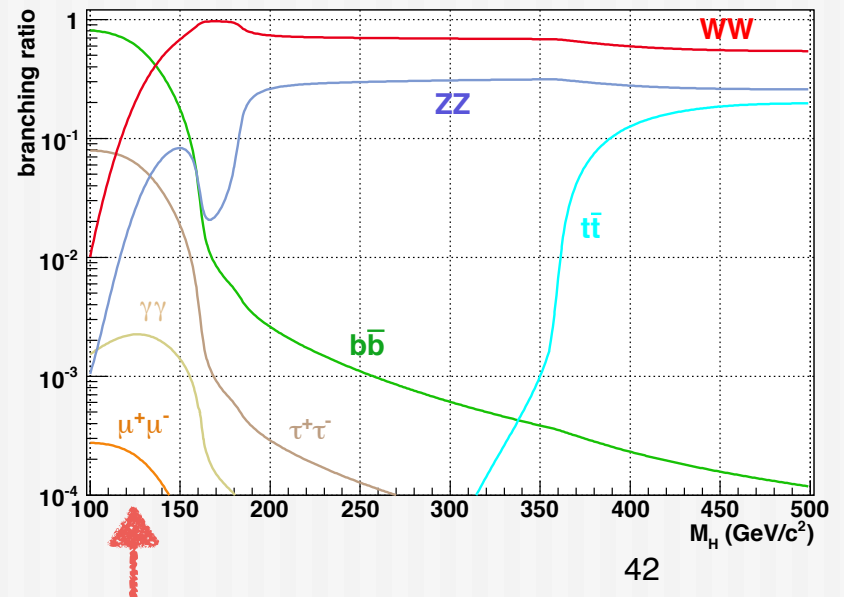
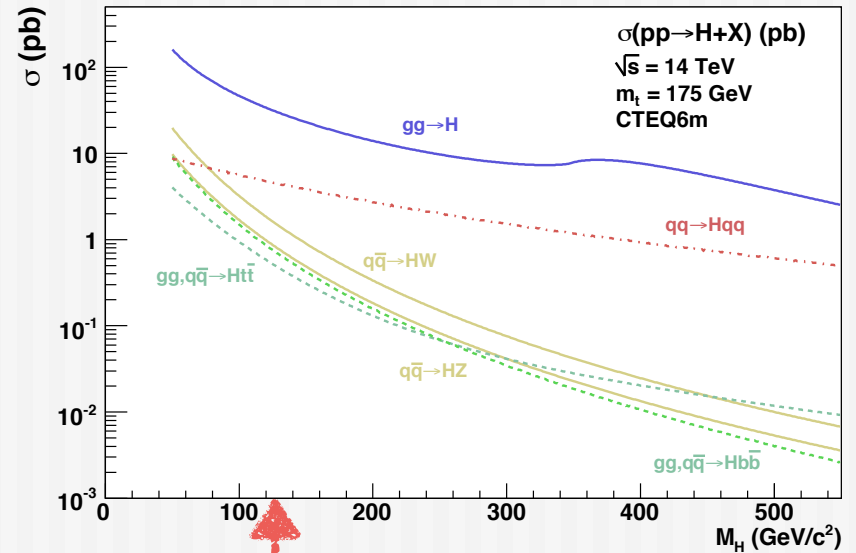
E adesso?

Accoppiamenti

- L'Higgs può essere prodotto in molti modi...

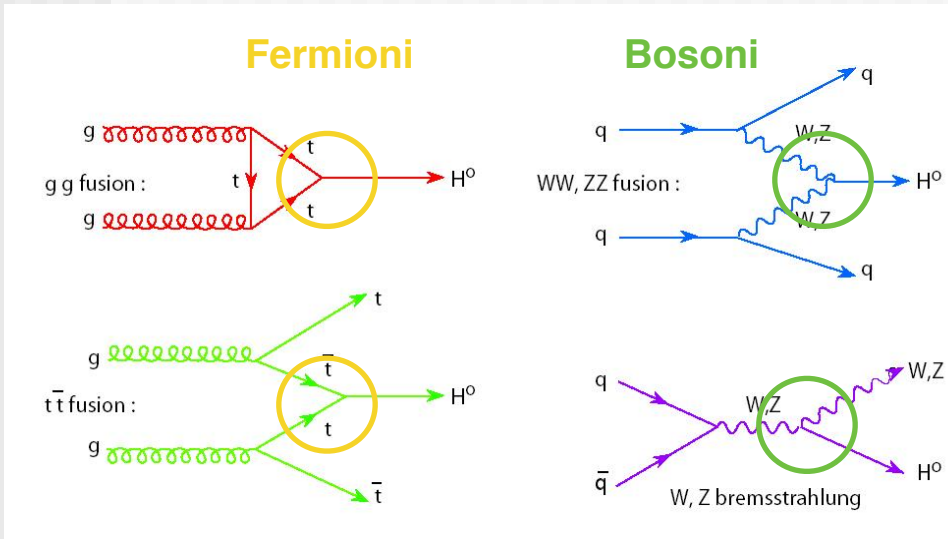


- ... e decadere in molti modi
- Mettendo insieme tutte le informazioni si possono misurare gli "accoppiamenti"

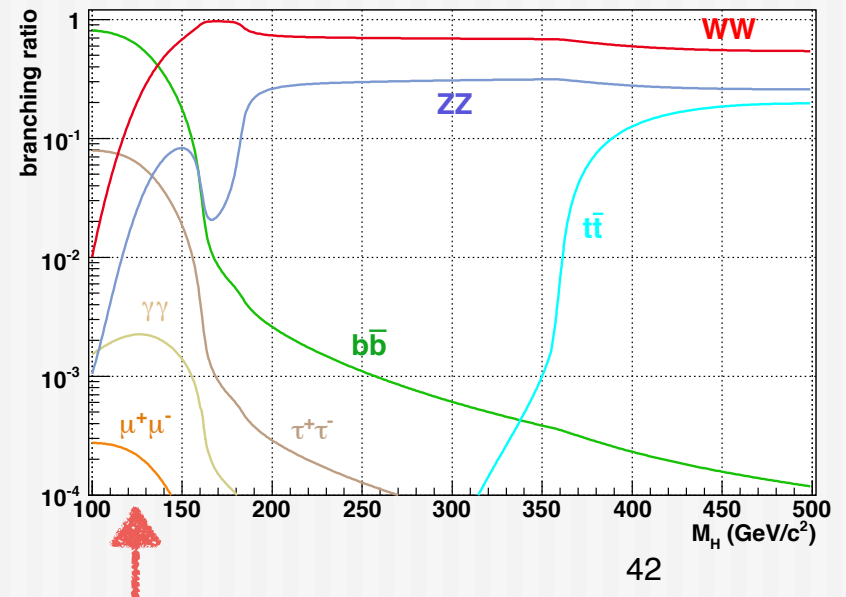
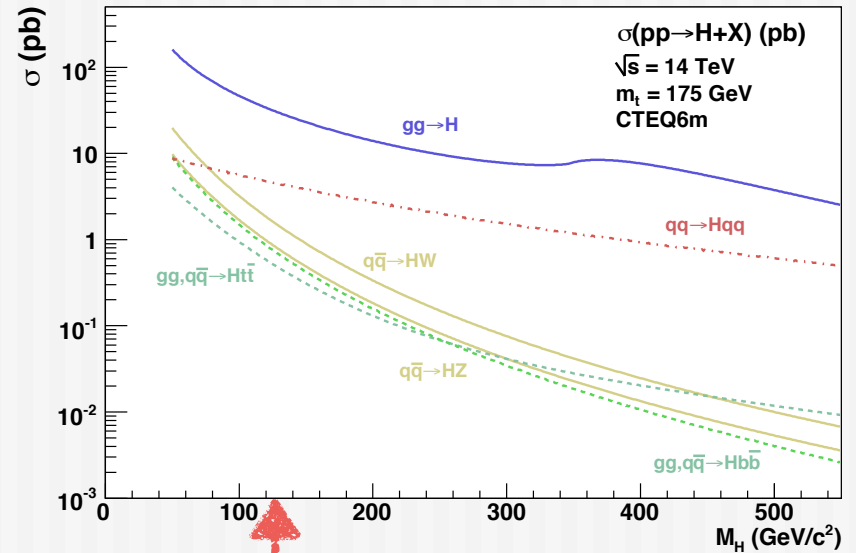


Accoppiamenti

- L'Higgs può essere prodotto in molti modi...

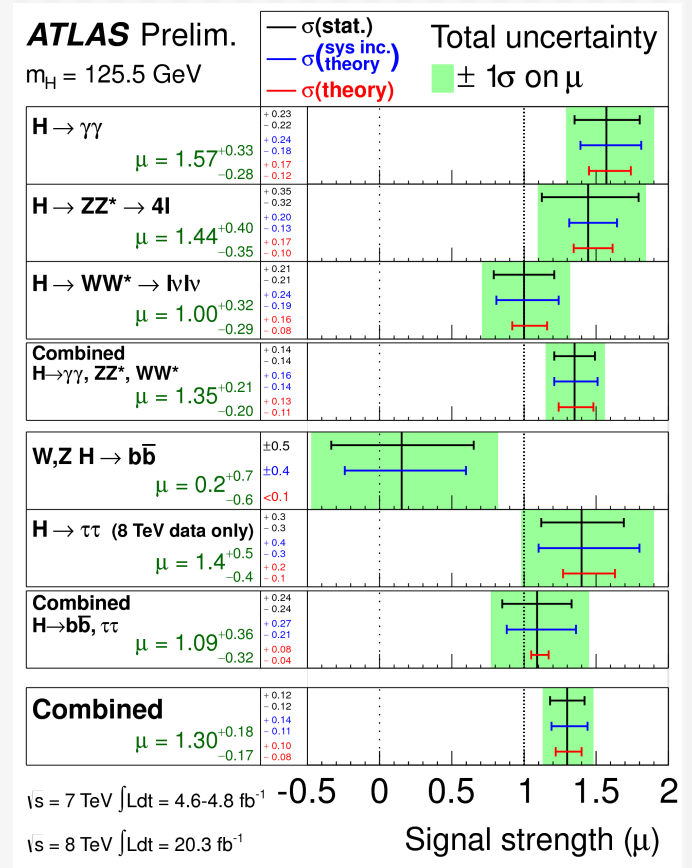
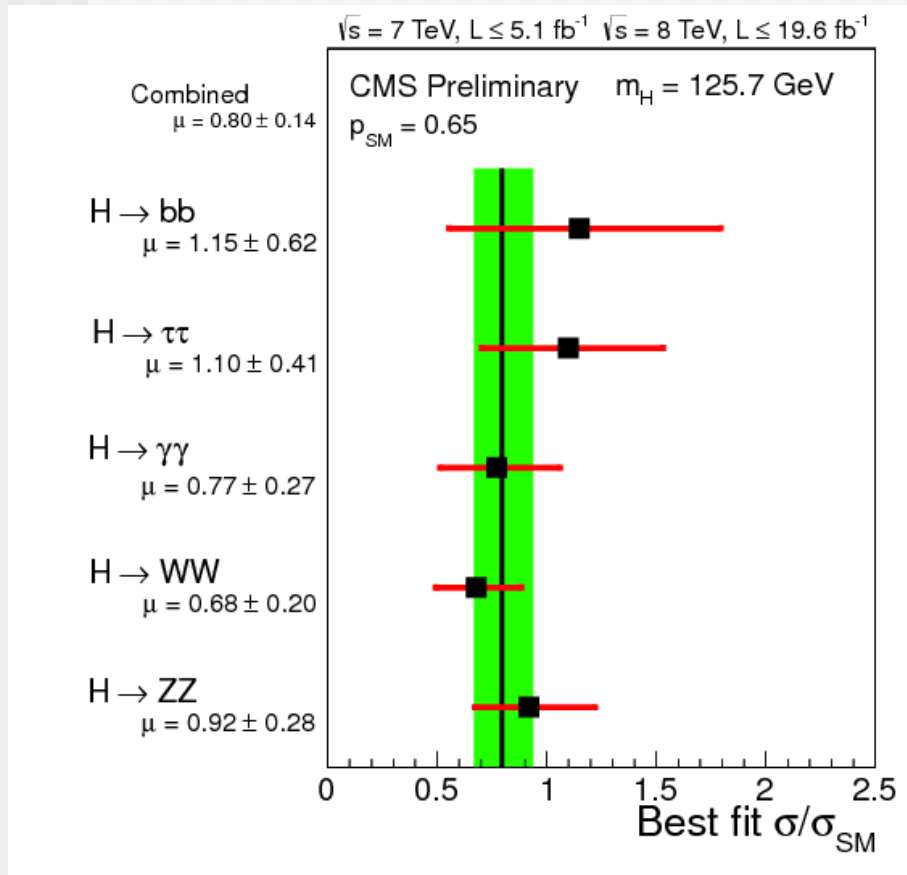


- ... e decadere in molti modi
- Mettendo insieme tutte le informazioni si possono misurare gli "accoppiamenti"



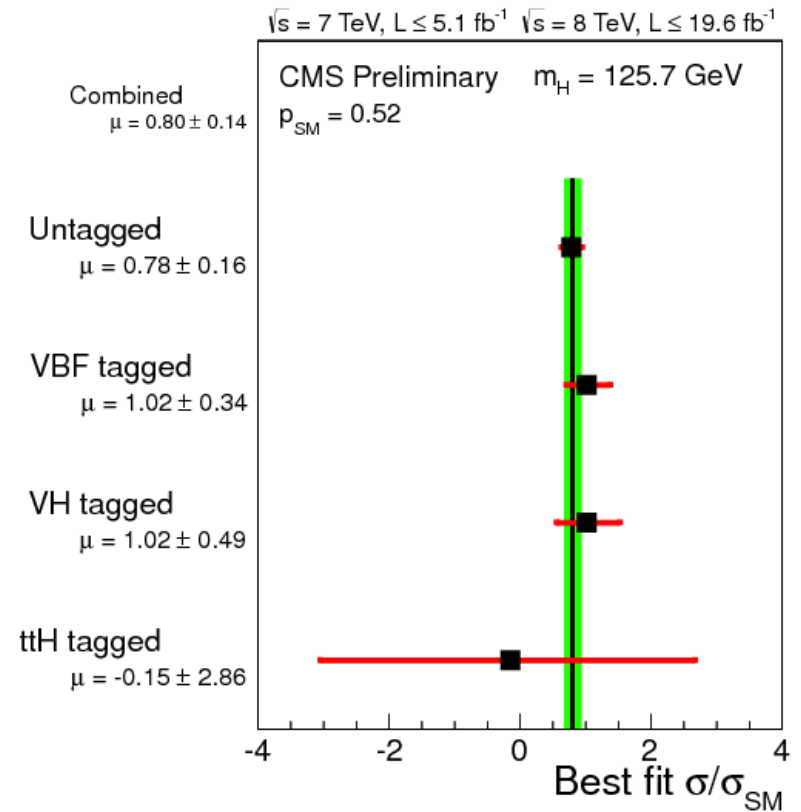
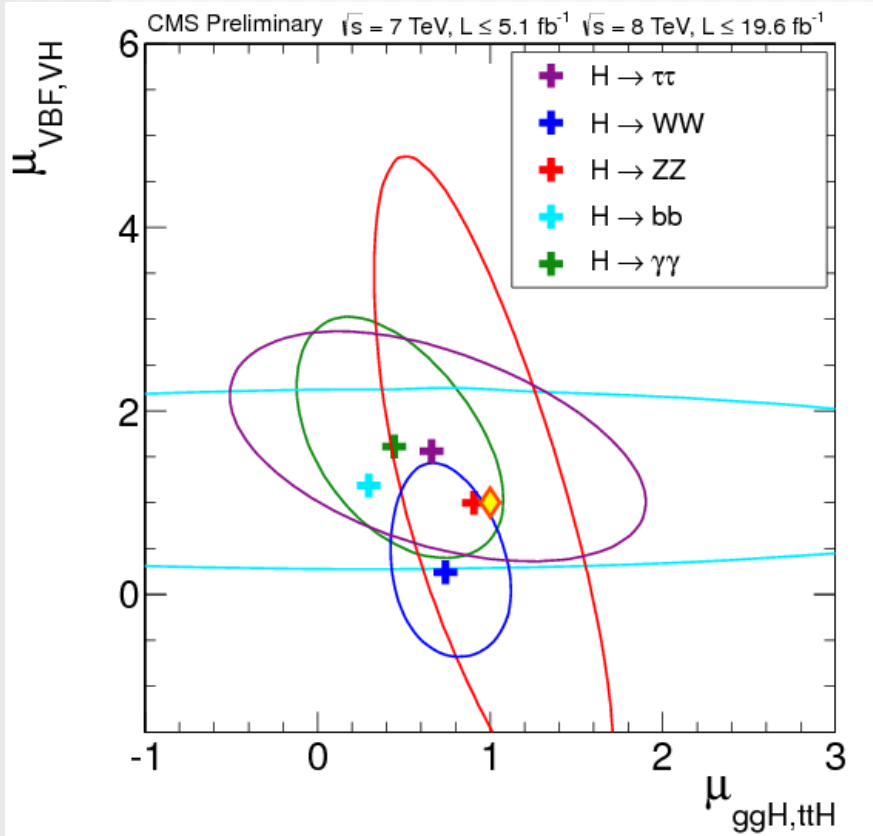
Accoppiamenti

- Il segnale osservato nei vari canali di decadimento è confrontato separatamente con le previsioni del Modello Standard

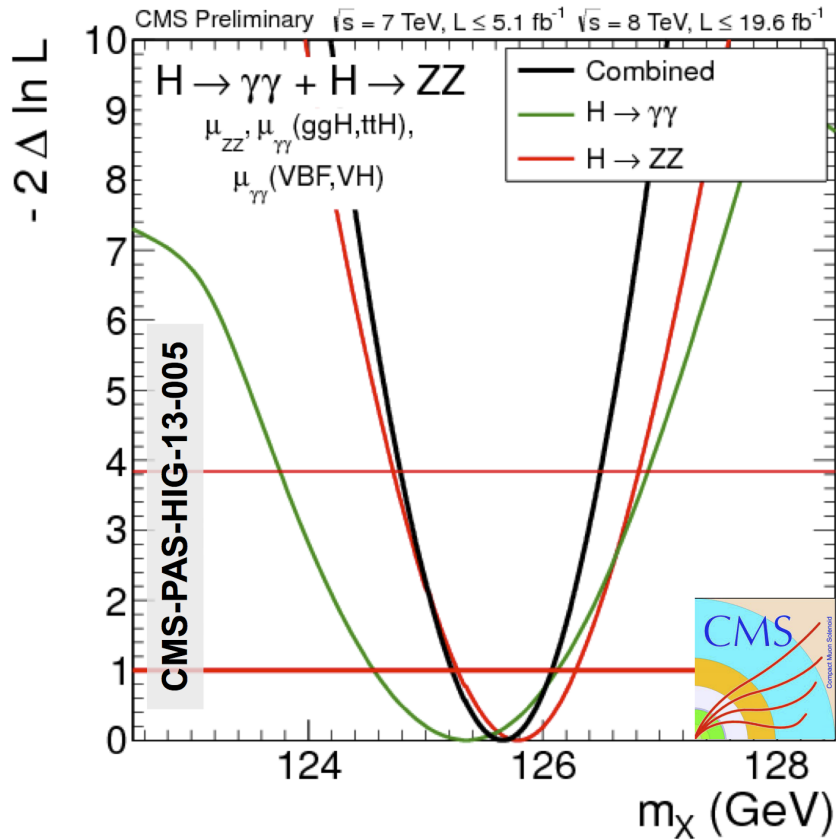


Accoppiamenti

- I vari canali si possono combinare distinguendo il meccanismo di produzione

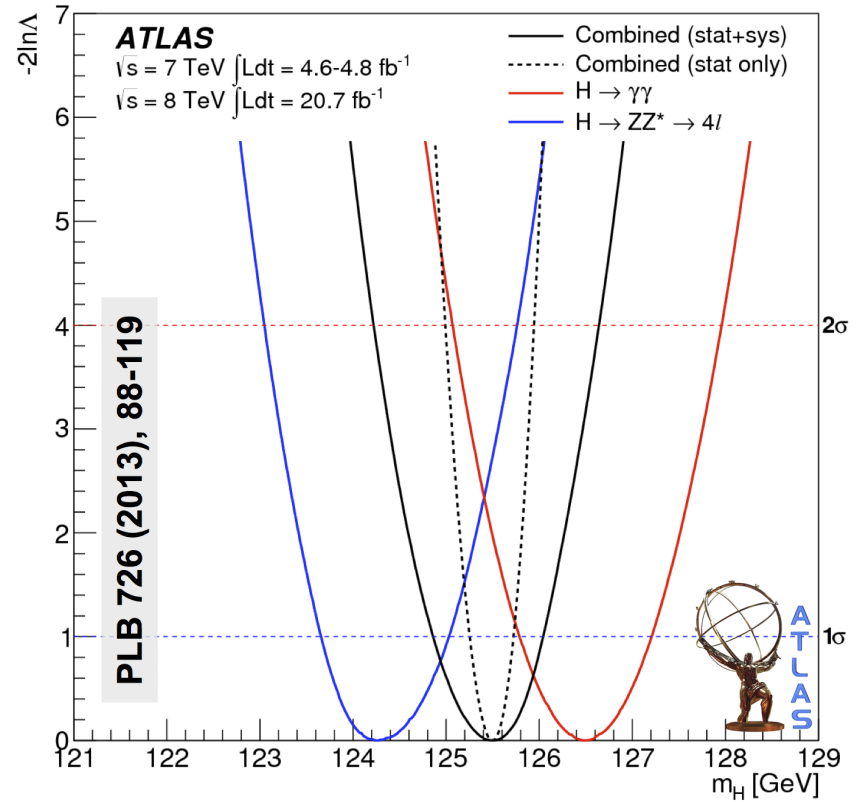


La massa



CMS:

$$m_H = 125.7 \pm 0.3(\text{syst}) \pm 0.3(\text{stat})$$

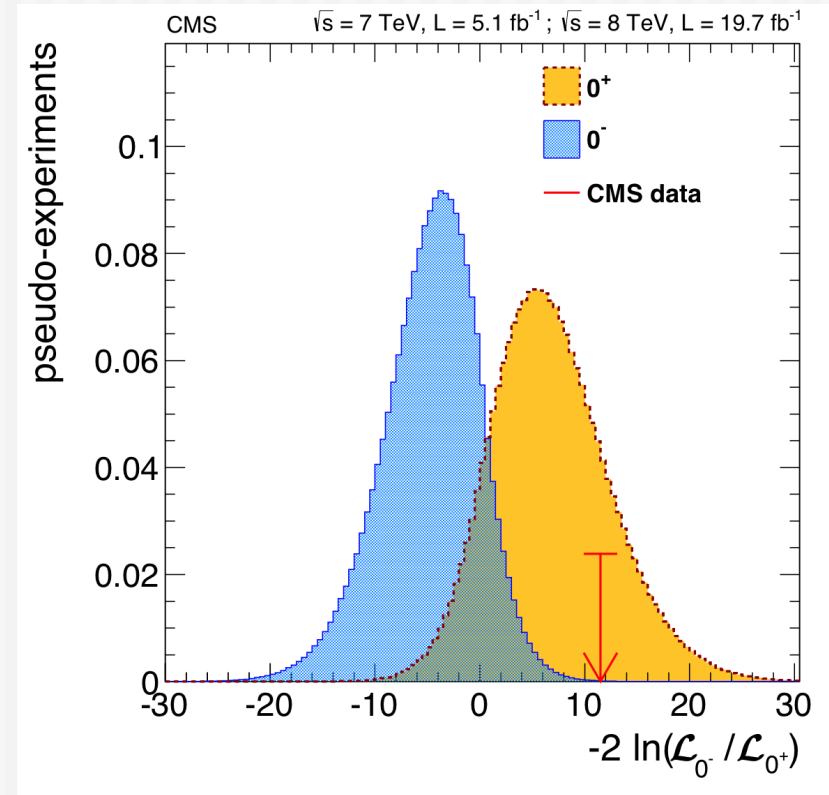
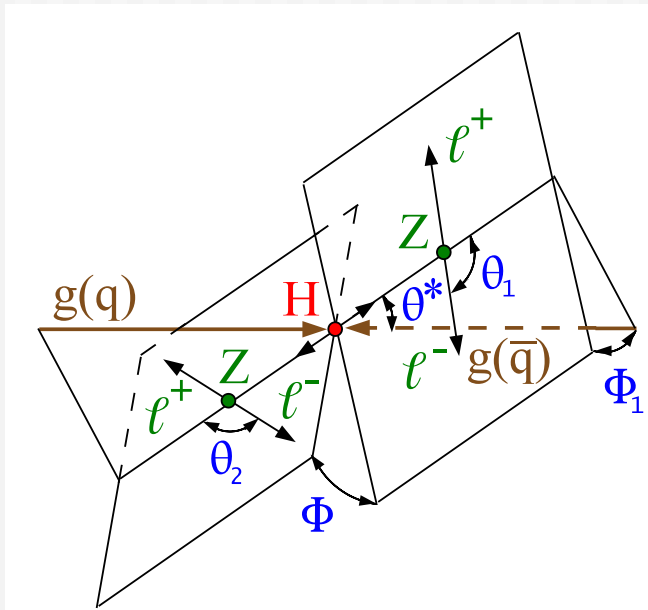


ATLAS:

$$m_H = 125.5^{+0.5}_{-0.6}(\text{syst}) \pm 0.2(\text{stat})$$

Spin e parità

- Lo Standard Model prevede che sia 0^+
- Si può ricavare dalle distribuzioni angolari dei prodotti di decadimento



0^- e 1^\pm esclusi al 99% CL, 2^\pm esclusi al 95% CL

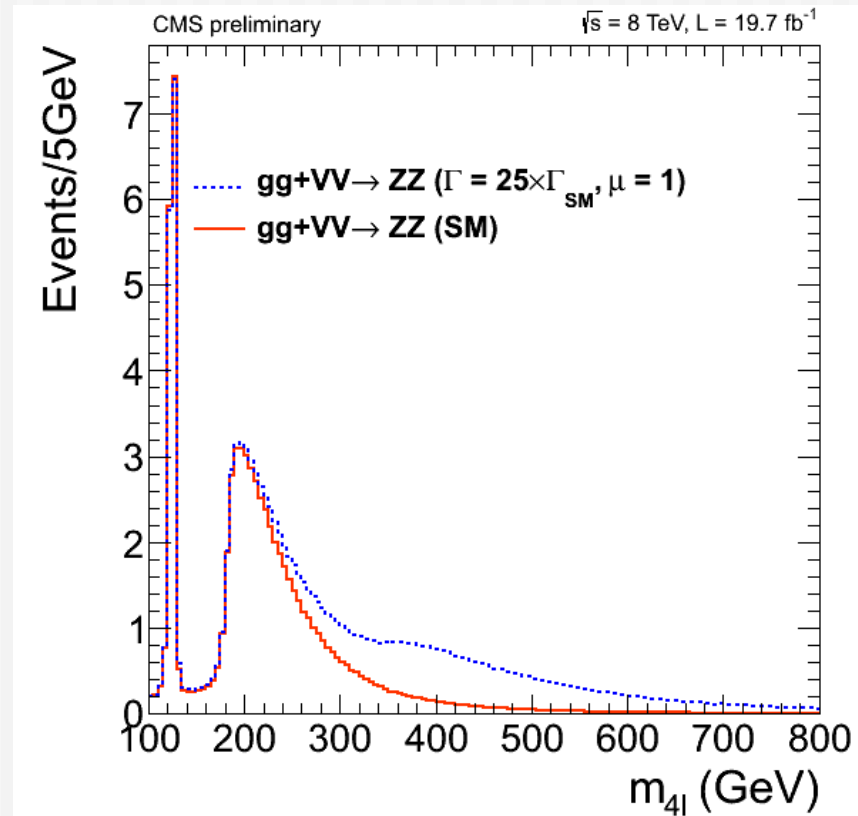
Larghezza dell'Higgs

- Modello Standard prevede $\Gamma_H \sim 4 \text{ MeV}$
- Misura diretta fortemente limitata dalla risoluzione sperimentale $O(1\%)$: limite diretto $\Gamma_H \leq 3.4 \text{ GeV}$ from $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
- Produzione *fuori dal picco* è piccola ma $BR(H \rightarrow ZZ)$ è grande per $m_H > 2m_Z$
 - simile all'effetto tunnel!

■ Al picco:
$$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow ZZ} \sim \frac{g_{Hgg}^2 g_{HZZ}^2}{\Gamma}$$

■ Fuori dal picco:
$$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow ZZ} \sim g_{Hgg}^2 g_{HZZ}^2$$

- Dalla misura simultanea si ricava $\Gamma_H < 17.4 \text{ MeV} !!!$



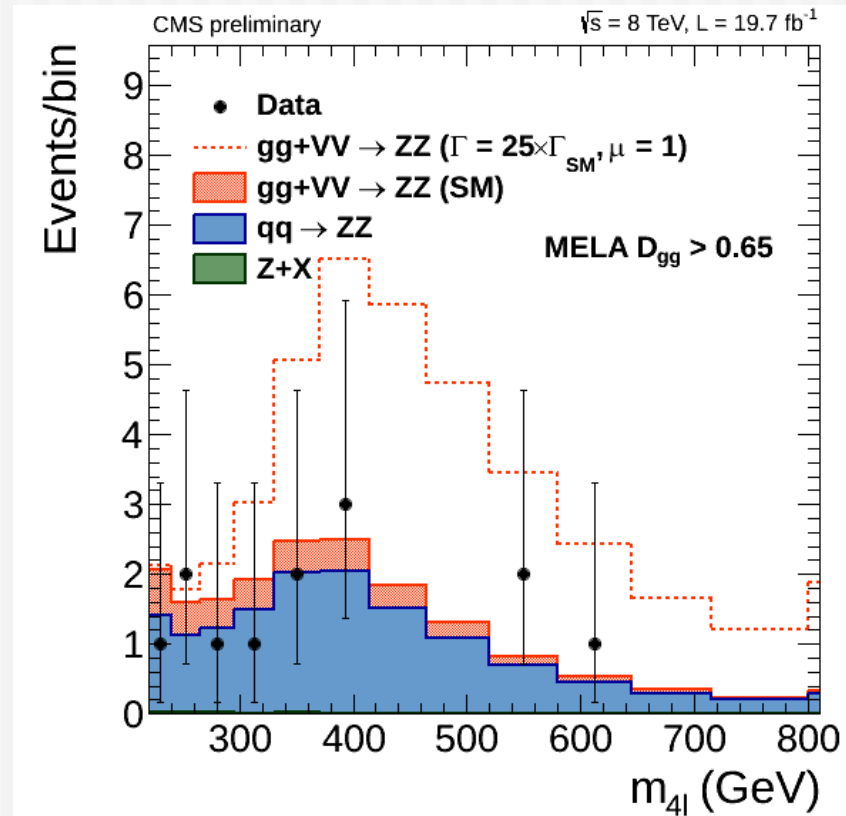
Larghezza dell'Higgs

- Modello Standard prevede $\Gamma_H \sim 4 \text{ MeV}$
- Misura diretta fortemente limitata dalla risoluzione sperimentale $O(1\%)$: limite diretto $\Gamma_H \leq 3.4 \text{ GeV}$ from $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
 - Produzione *fuori dal picco* è piccola ma $BR(H \rightarrow ZZ)$ è grande per $m_H > 2m_Z$
 - simile all'effetto tunnel!

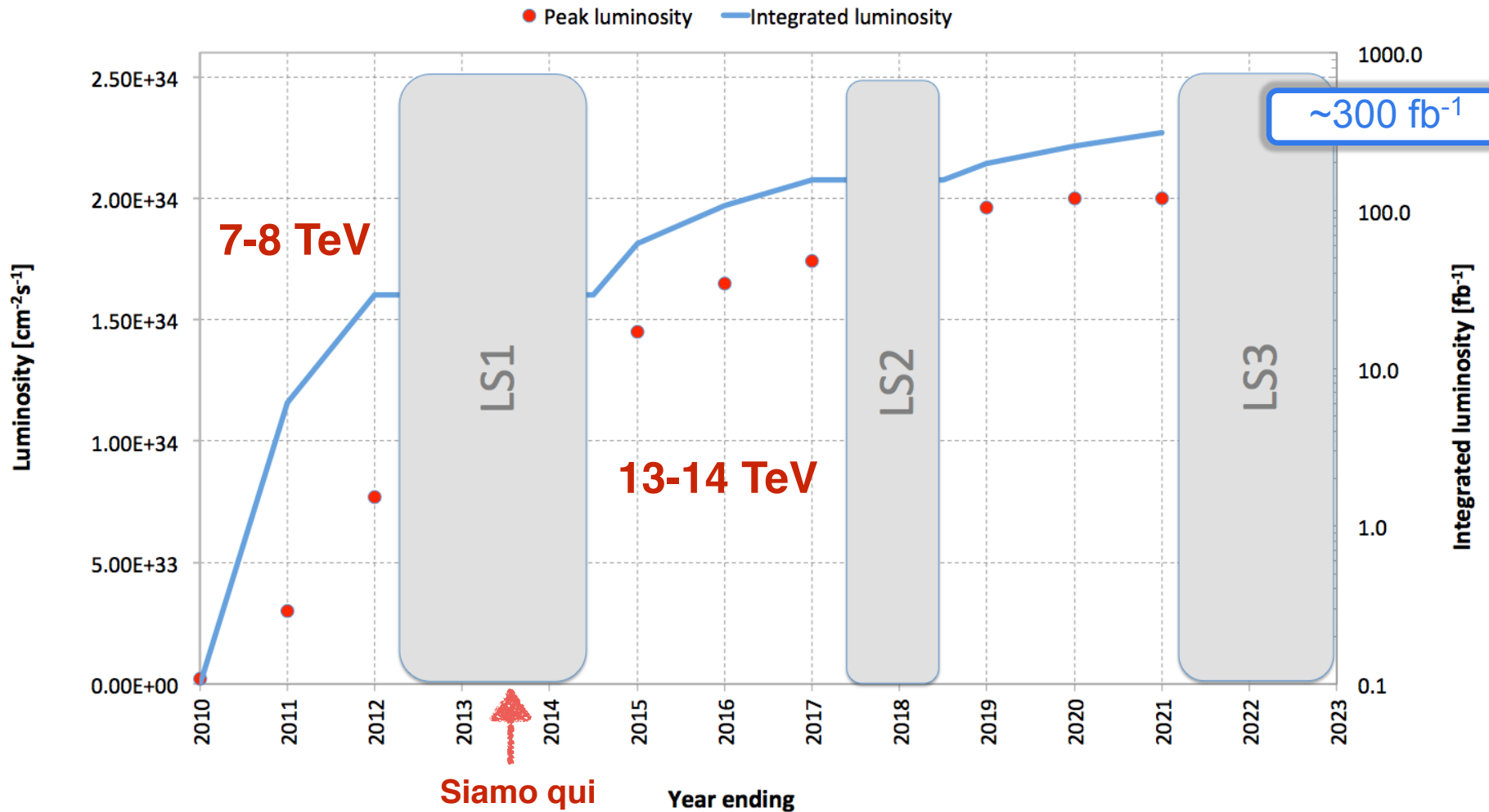
■ Al picco:
$$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow ZZ} \sim \frac{g_{Hgg}^2 g_{HZZ}^2}{\Gamma}$$

■ Fuori dal picco:
$$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow ZZ} \sim g_{Hgg}^2 g_{HZZ}^2$$

- Dalla misura simultanea si ricava $\Gamma_H < 17.4 \text{ MeV} !!!$



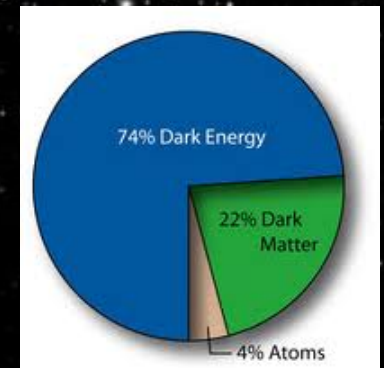
Il futuro (prossimo) del LHC

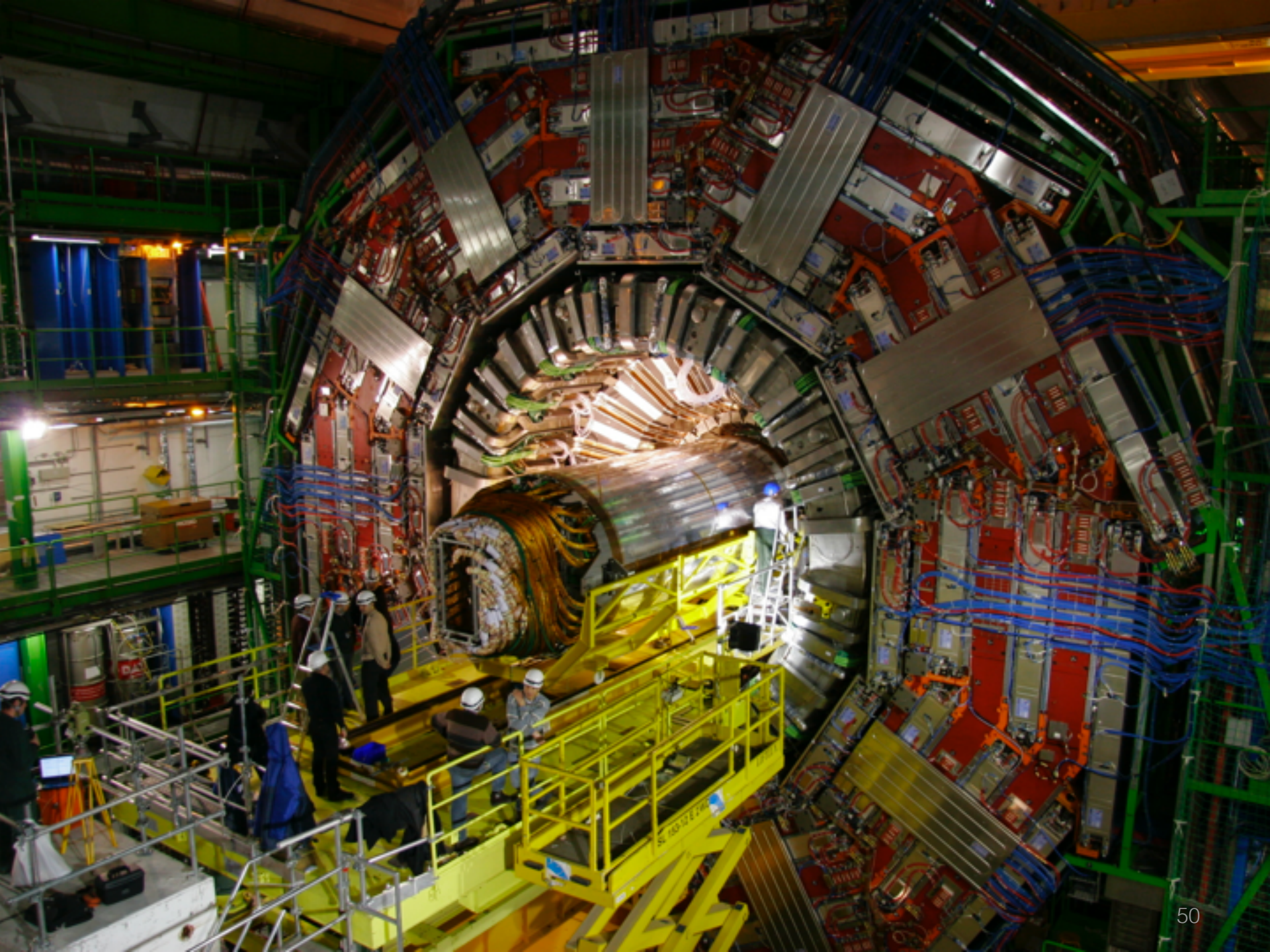



LHC riparte nel 2015 e grazie al salto in energia potremmo scoprire subito nuove particelle!

FAQ... ancora senza risposta!

- Se materia e antimateria sono tanto simili, come mai l'universo che conosciamo è fatto solo di materia?
- Perché la forza gravitazionale è tanto più debole delle altre?
- Perché le tre famiglie hanno masse così diverse?
- Che cos'è la materia oscura? Una particella sconosciuta?





A large, complex industrial facility, likely a particle accelerator, with a central tunnel and numerous workers on yellow scaffolding. The scene is filled with intricate machinery, cables, and structural elements, illuminated by bright lights. The overall atmosphere is one of a high-tech, industrial environment.

Grazie per l'attenzione!