

L'origine della massa delle particelle: una misura da Premio Nobel

Scuola di Storia della Fisica – 5 Marzo 2021

Roberta Arcidiacono

Università del Piemonte Orientale

4 luglio 2012 al CERN: un grande annuncio

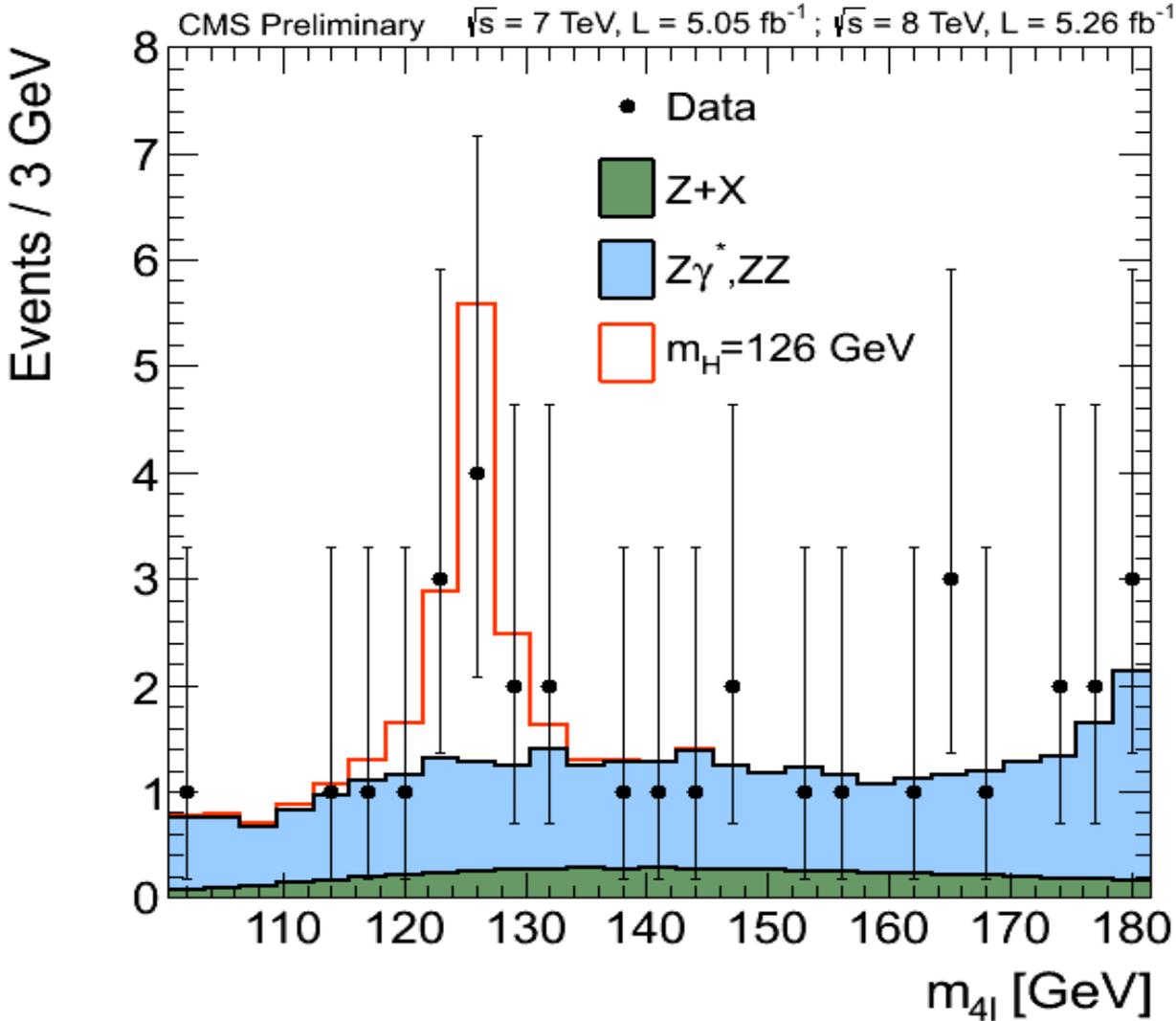


Fabiola Gianotti
Spokesman
ATLAS

Rolf Heuer
Direttore Generale
del CERN

Joe Incandela
Spokesman
CMS

Il grafico dell'incanto





François Englert

Peter Higgs

Tra i piú felici quel giorno...

La loro teoria riceve conferma!

Nel 1964, ipotizzarono un meccanismo che permettesse di dare origine alla massa dei bosoni W e Z, di quark e leptoni.

Essi formulano l'ipotesi che lo spazio sia pervaso da un campo scalare uniforme, il "campo di Higgs", in grado di interagire con tutte le particelle fondamentali, dando loro massa.



François Englert

Peter Higgs

Tra i piú felici quel giorno...

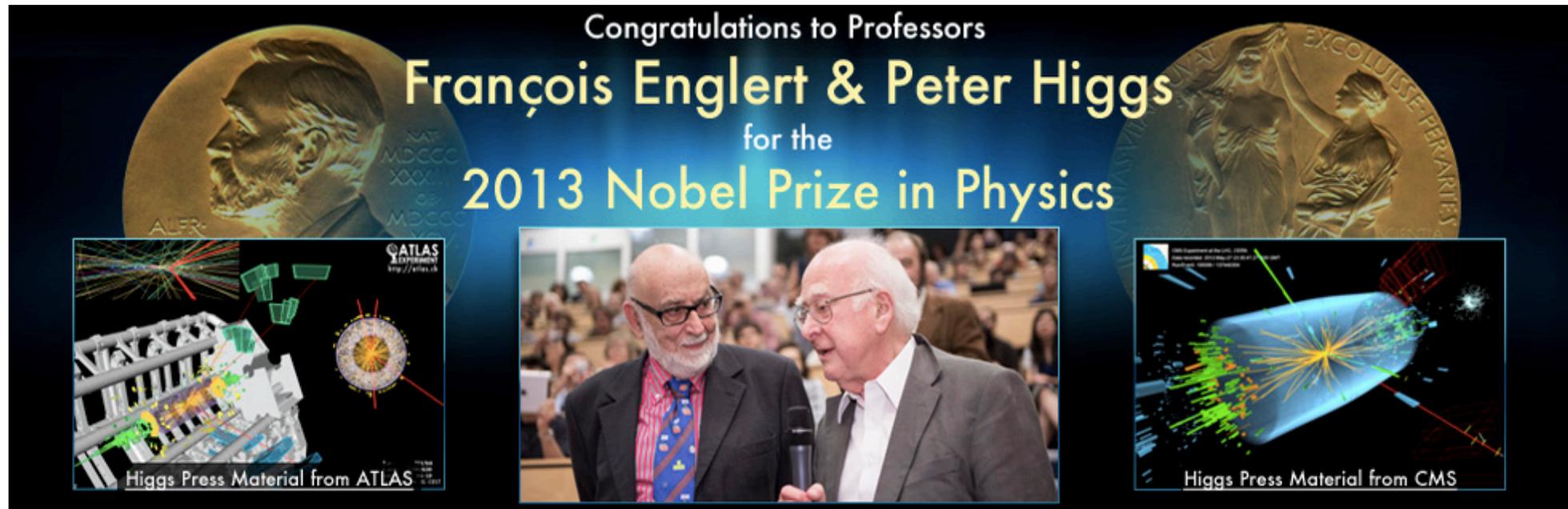
Un percorso lunghissimo per ottenere l'evidenza sperimentale della loro teoria:

- **1970s:** si inizia a pensare a come può essere prodotto ed osservato l'Higgs
- **1982:** iniziano gli studi preliminari per la macchina acceleratrice
- **1994:** CERN Council approva LHC
- **1996:** decisione finale per la sua costruzione
- **2004:** inizia installazione acceleratore
- **2008:** circolano i primi fasci
- **Marzo 2010:** prime collisioni p-p a 7 TeV
- **4 Luglio 2012:** il CERN annuncia la scoperta di un **NUOVO BOSONE**

Premio Nobel per la Fisica 2013

- **Marzo 2013:** le caratteristiche di questa particella sono esattamente quelle predette dalla teoria nel 1964
- **8 Ottobre 2013:** annuncio Premio Nobel Fisica

"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"



Facciamo un passo indietro... il Modello Standard delle particelle elementari

**FERMIONI,
costituenti della
materia**

Due **fermioni** non
possono avere gli
stessi numeri quantici.

**OCCUPANO SPAZIO
→ MATERIA**

		Three generations of matter (fermions)				
		I	II	III		
mass →		2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	? GeV/c ²
charge →		2/3	2/3	2/3	0	0
spin →		1/2	1/2	1/2	1	0
name →		u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
	Quarks	4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	104 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon	
	Leptons	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ tau neutrino	91.2 GeV/c ² 0 1 Z⁰ Z boson	
		0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	80.4 GeV/c ² ±1 1 W[±] W boson	Gauge bosons

**BOSONI,
trasmettono le forze**

Due **bosoni** possono
avere gli stessi
numeri quantici.

**SI POSSONO
ACCATASTARE →
FORZE**

Facciamo un passo indietro... il Modello Standard delle particelle elementari

Three generations

Descrive la materia come composta da un piccolo numero di componenti fondamentali...

Fermioni: Quark e Leptoni

e le loro interazioni tramite lo scambio di "mediatori" delle forze

Bosoni

Una teoria di **incredibile successo!**

FERMION
costituenti
materia

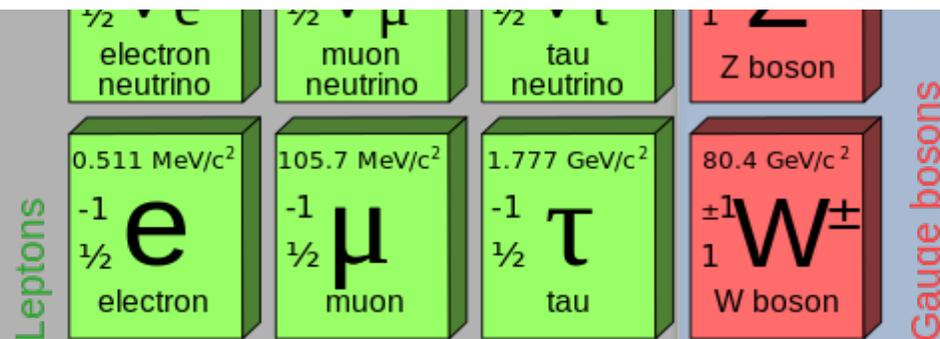
Due **fermi**
possono a
stessi num

OCCUPAN
→ **MATER**

no le forze

li possono
essi
ntici.

NO
TARE→



Il problema della massa

- Ma non descrive tutto quello che osserviamo...
- Non c'è una spiegazione della massa delle particelle.

Il modello in origine considera che **tutte le particelle elementari abbiano massa nulla** e, per questa ragione, che **viaggino tutte alla velocità della luce**

In particolare, la simmetria responsabile della riunificazione della forza elettromagnetica e di quella debole richiede che le particelle messaggere (mediatrici dell'interazione) abbiano massa nulla.

Questo è vero per il fotone, ma non lo è per i bosoni W e Z

$$m_{\gamma} = 0 \quad m_{W/Z} \sim 90 \text{ GeV}$$

masse misurate in termini della loro energia a riposo m_0c^2
Es: un protone \rightarrow massa di 1GeV

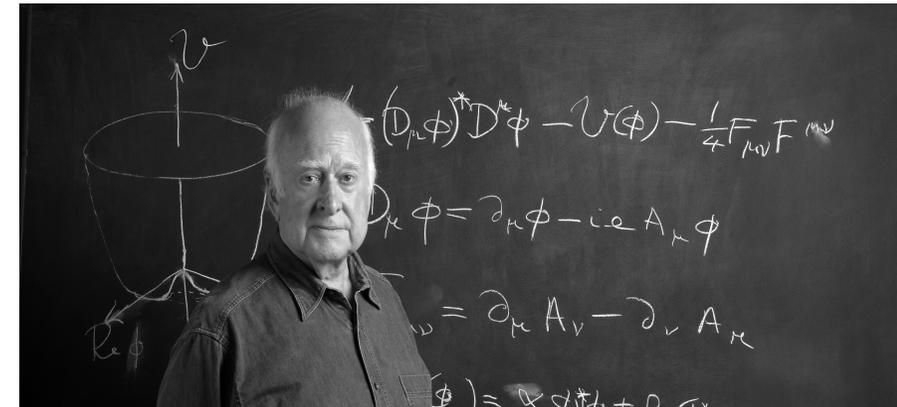
Il problema della massa

- Le interazioni deboli sono mediate da particelle pesanti (e a corto raggio d'azione)
- e le particelle elementari hanno una massa, che è enormemente diversa fra loro!



Il “meccanismo di Higgs”

- Brout, Englert e Higgs (indipendentemente), notano che una **piccola aggiunta** alle equazioni del Modello Standard permetterebbe di risolvere il problema...
 - si ipotizza l'esistenza di un **campo scalare** complesso, il **campo di Higgs**, che permea tutto l'Universo come un liquido viscoso:
 - le particelle elementari, interagendo con questo campo, si comportano come palline di diversa grandezza e velocità che attraversano il fluido viscoso
 - il fluido si appiccica in modo diverso alle varie palline, rallentandole in misura maggiore o minore
- Il ruolo del campo di Higgs è quindi fondamentale: le particelle elementari acquistano massa in seguito proprio all'interazione con esso.
- Questo implica che debba esistere anche una particella mai vista prima: il bosone di Higgs (l'oscillazione localizzata del campo)



Creare la particella di Higgs in laboratorio è la prova sperimentale dell'esistenza del campo di Higgs

Bosone di Higgs e massa gravitazionale: che legame c'è?

- la massa di un corpo compare nella legge gravitazionale di Newton (1687)
- Einstein all'inizio del 1900 ci insegna che la teoria di Newton funziona bene per corpi che si muovono lentamente, mentre per particelle che viaggino a velocità vicine a quella della luce, bisogna fare un cocktail di impulso e massa a riposo, dato dall'energia $E=pc+mc^2$
- Nella relatività, le equazioni del campo gravitazionale di Einstein si basano su una mistura di energia ed impulso la cui presenza genera la curvatura dello spazio-tempo, costringendo i corpi a certe traiettorie

relazione tra campo di Higgs e campo gravitazionale?

Bosone di Higgs e massa gravitazionale: che legame c'è?

relazione tra campo di Higgs e campo gravitazionale?

quasi nulla!

Il campo di Higgs fornisce la massa alle particelle elementari, quarks, elettroni, neutrini, bosoni vettori W e Z ...

questo campo non basta a spiegare l'origine della massa anche solo di un semplice protone, all'interno del quale sono confinati i quarks e dove esistono fenomeni legati alla cromodinamica quantistica, non ancora completamente chiariti...

il campo di Higgs non è l'unico responsabile della massa dei corpi macroscopici

Il Large Hadron Collider

Quanta energia dobbiamo avere per produrre l'Higgs??

Per la progettazione della macchina:

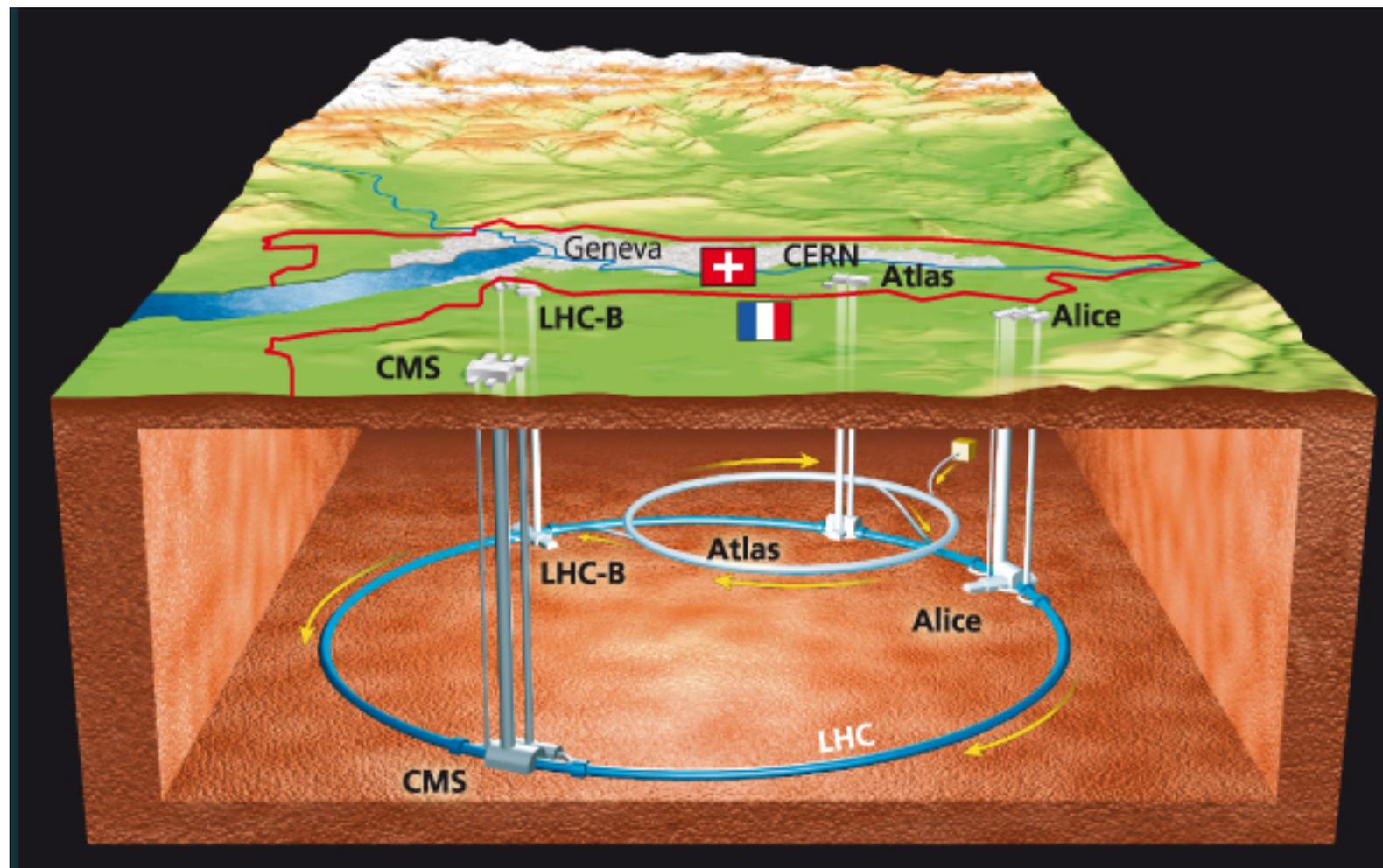
- l'intervallo di massa in cui l'Higgs era "atteso" si estendeva fino ad un massimo di 1 TeV, 1000 volte piu' pesante del protone ! (altrimenti la teoria non è valida).
- la teoria non prevede il valore della massa dell'Higgs con precisione...



Il Large Hadron Collider

Collisore di protoni disegnato per cercare il bosone di Higgs (e/o nuovi fenomeni):

- Alta energia: due fasci di protoni che circolano in senso inverso, incrociandosi in alcuni punti
 - 3,5 / 4 TeV ciascuno
 - 6,5 + 6,5 TeV a partire dal 2015
- estremamente intensi
 $\approx 7 \cdot 10^8$ interazioni/s
- Eventi interessanti:
circa 1 su 10^{13}
- 4 esperimenti posizionati lungo l'anello, dove avvengono gli incroci dei fasci



Perchè un acceleratore di particelle?

Andare ad energie sempre più alte ci permette:

- di guardare nella materia a **scale più piccole:**

$$E \sim 1/\lambda$$

- di creare/scoprire nuove **particelle più pesanti:**

$$E = mc^2$$

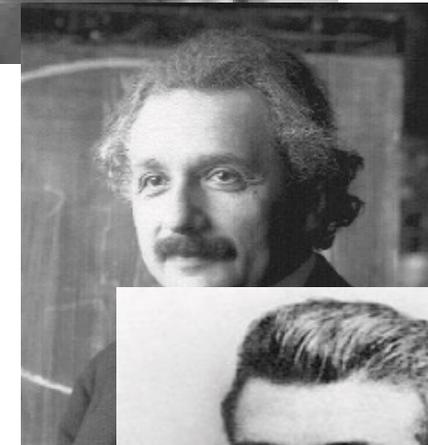
- di ricreare le condizioni dell'universo ai suoi inizi accedendo alle **alte temperature**

$$E = kT$$

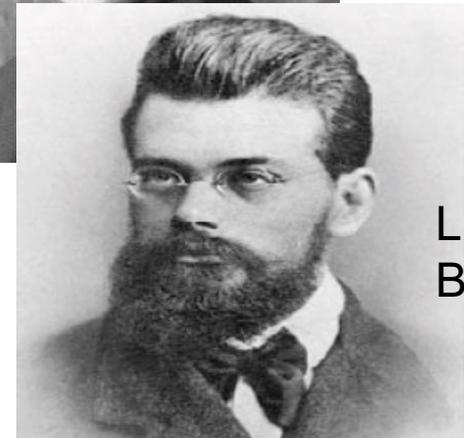
Gli acceleratori sono potenti microscopi e telescopi



Louis
de Broglie



Albert
Einstein



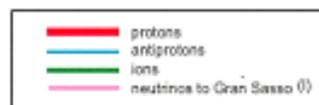
Ludwig
Boltzmann

Il destino dei protoni

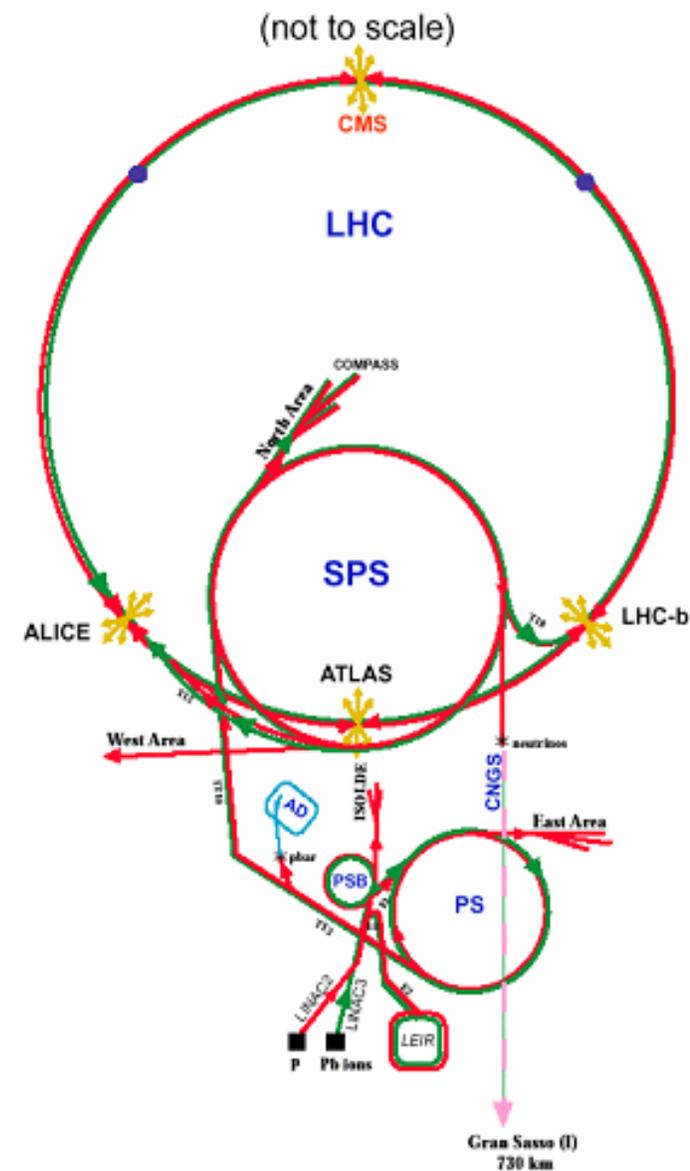


percorre 10 miliardi di km (11245 giri a

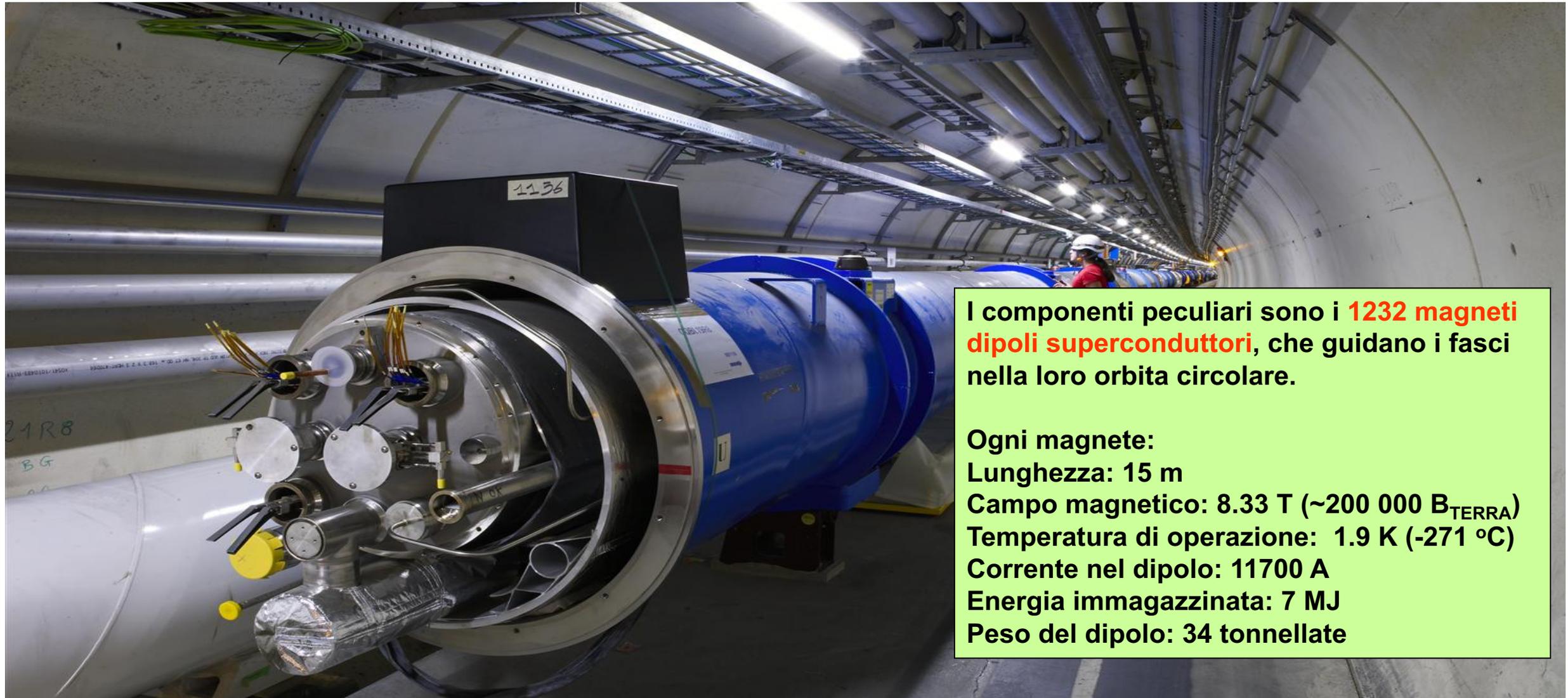
→ Due costituenti del protone collidono
origine a dei prodotti di collisione



LHC: Large Hadron Collider
SPS: Super Proton Synchrotron
AD: Antiproton Decelerator
ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
PSB: Proton Synchrotron Booster
PS: Proton Synchrotron
LINAC: LINear ACcelerator
LEIR: Low Energy Ion Ring
CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso



I dipoli di LHC



I componenti peculiari sono i **1232 magneti dipoli superconduttori**, che guidano i fasci nella loro orbita circolare.

Ogni magnete:

Lunghezza: 15 m

Campo magnetico: 8.33 T ($\sim 200\,000 B_{\text{TERRA}}$)

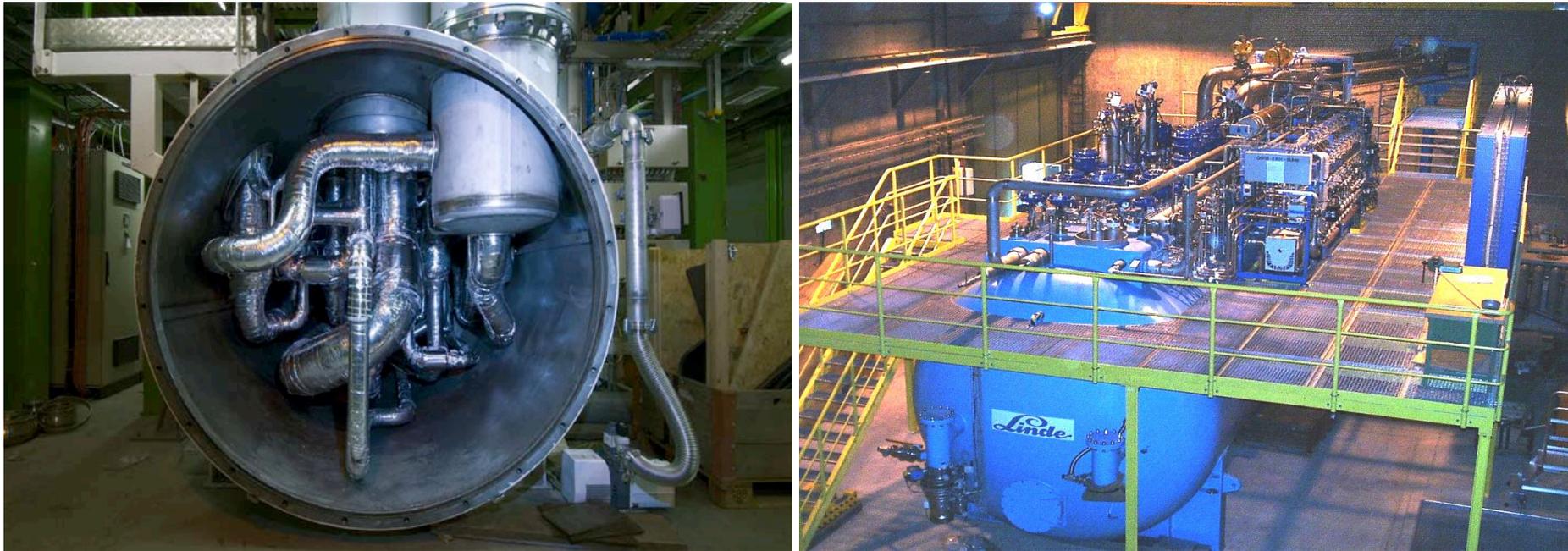
Temperatura di operazione: 1.9 K ($-271\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Corrente nel dipolo: 11700 A

Energia immagazzinata: 7 MJ

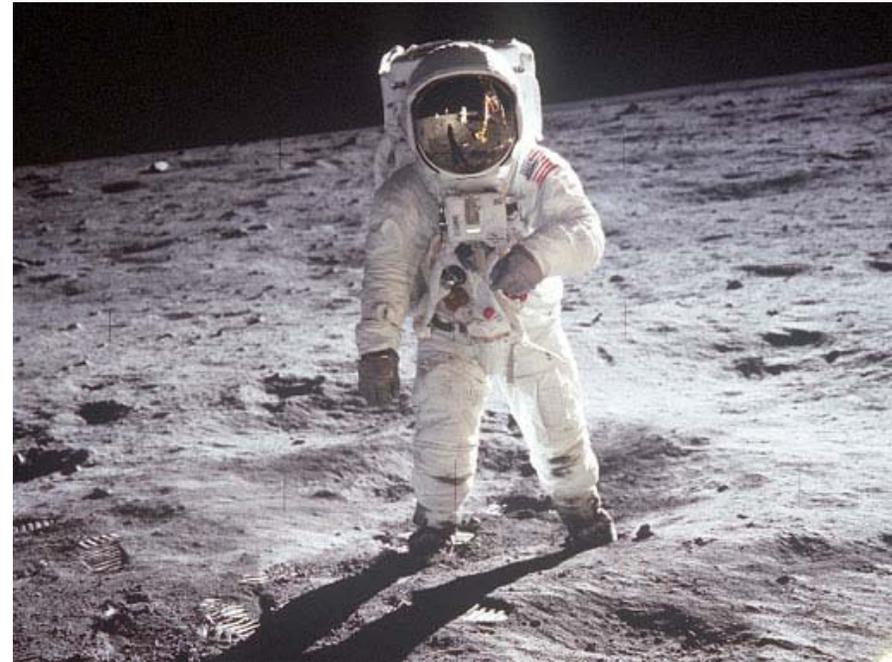
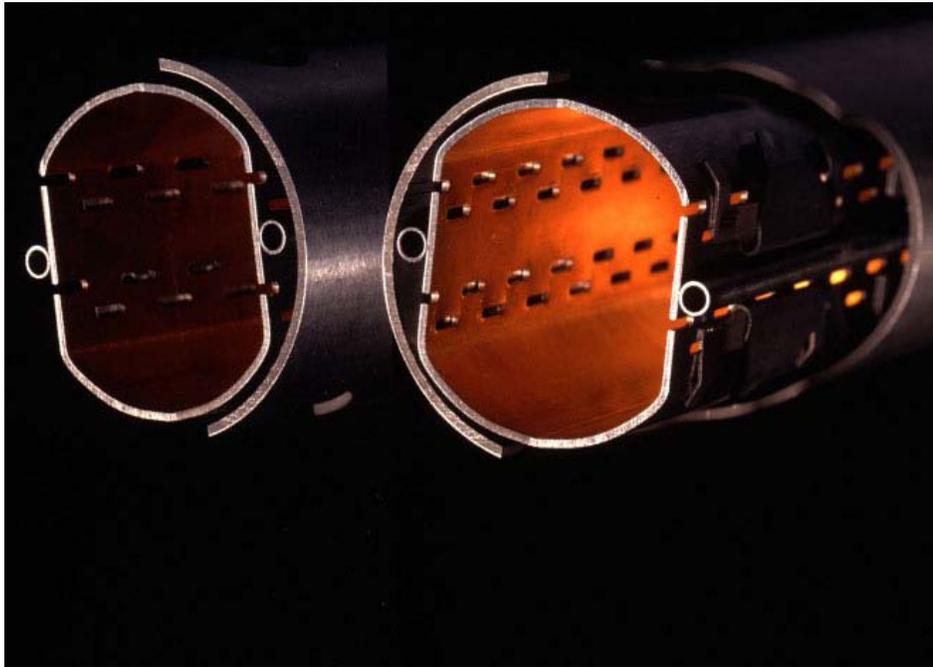
Peso del dipolo: 34 tonnellate

LHC is cool



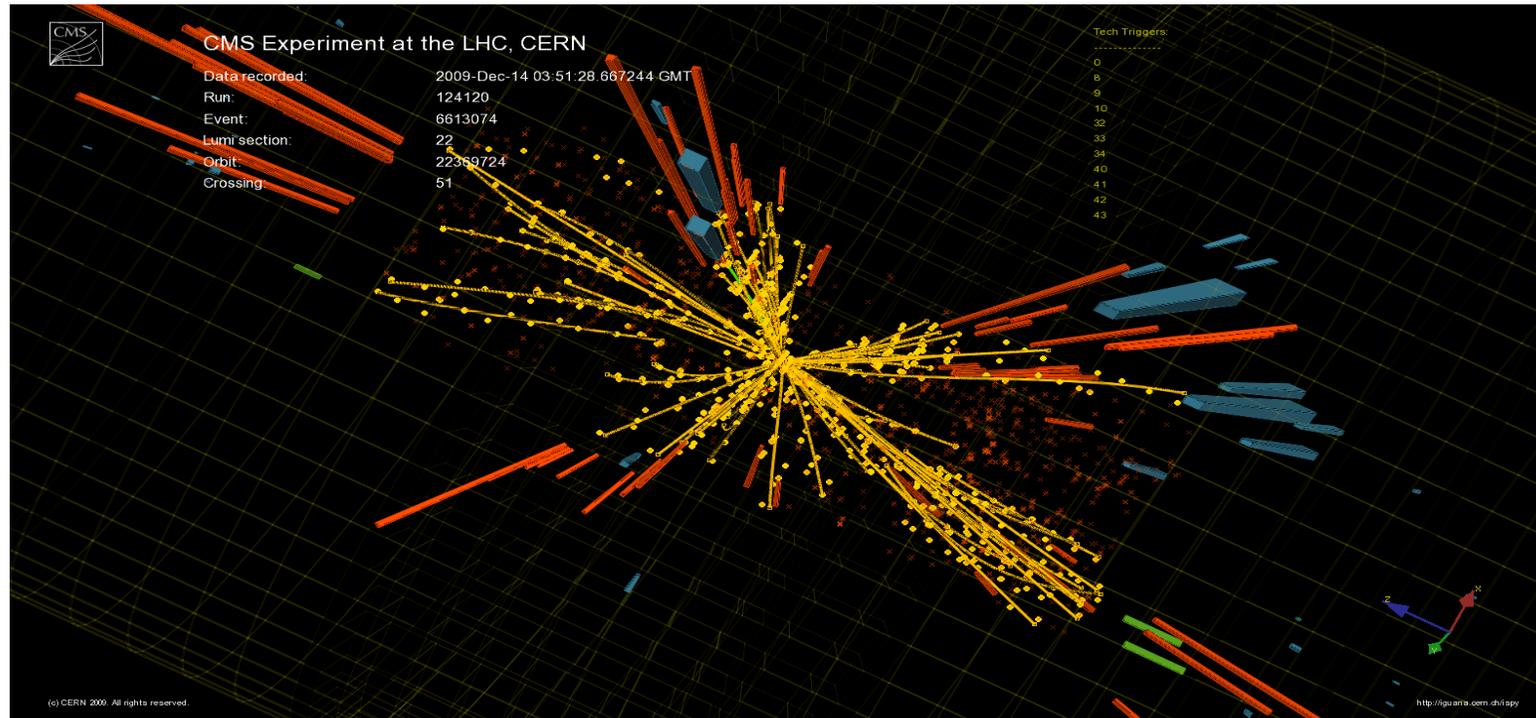
I magneti sono mantenuti alla temperatura di 1.9 K, inferiore a quella dello spazio interstellare, da più di 100 tonnellate di elio superfluido

... and empty ...



La pressione nei due tubi dove vengono accelerati e circolano i fasci di protoni è 10 volte inferiore a quella sulla Luna

And HOT!

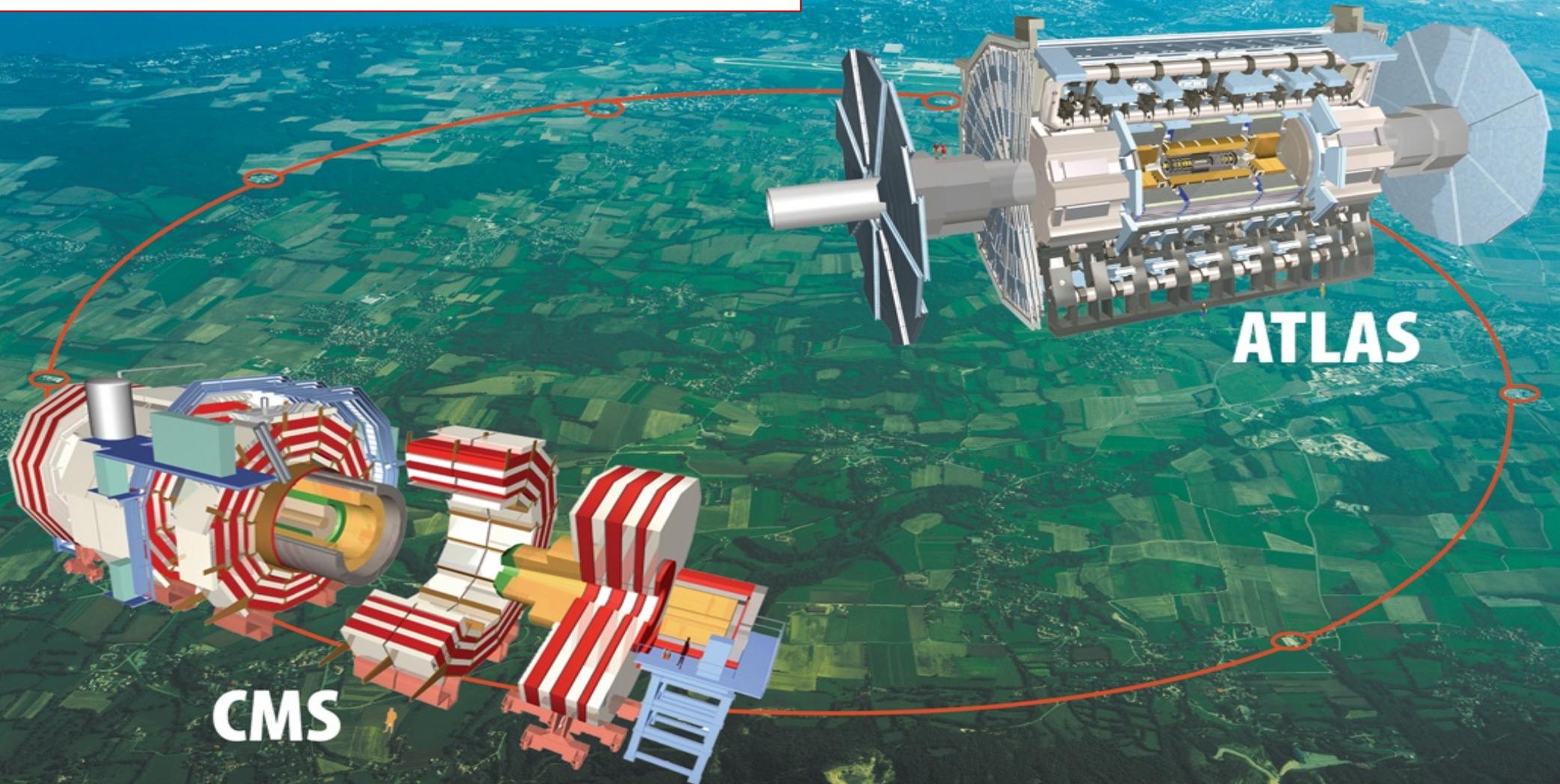


In ogni collisione l'energia disponibile è di 7-13 TeV (10^{12} eV), il che porta le particelle a fondersi nella collisione ad una temperatura 100.000 volte superiore a quella nel nucleo del Sole

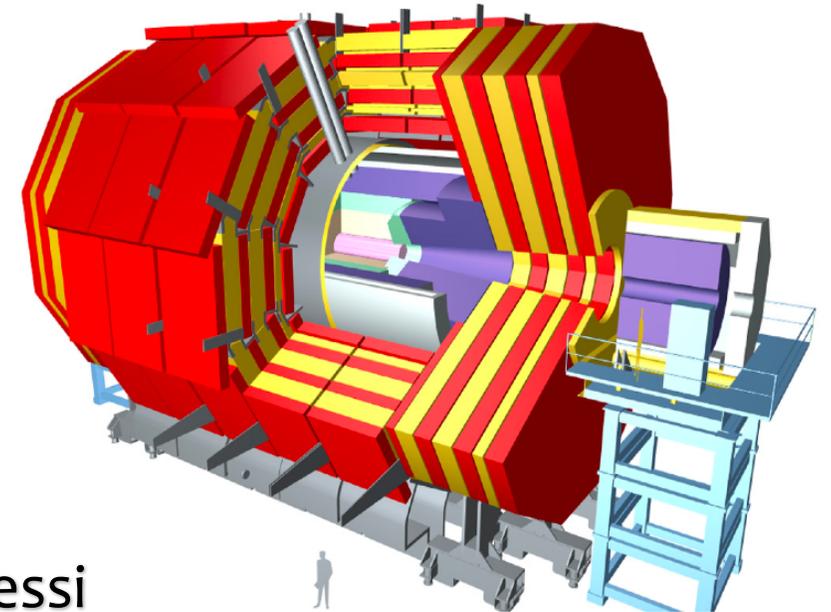
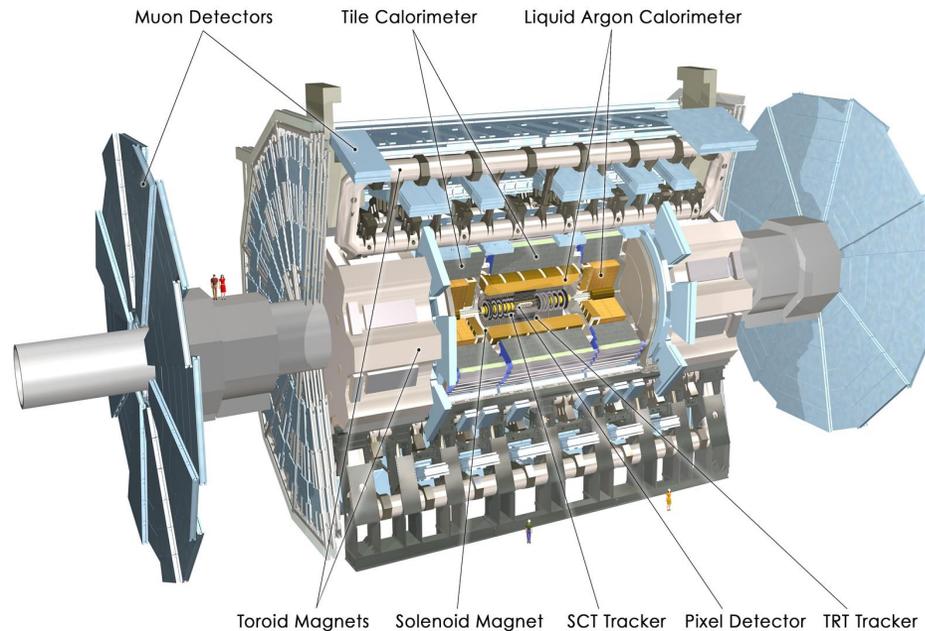
...e poi ci sono gli esperimenti!

- Che cercano disperatamente di raccogliere il maggior numero possibile di collisioni gentilmente fornite dall'acceleratore!
- in una quasi amichevole e necessaria collaborazione tra i competitori

2 esperimenti “general purpose”,
ma pensati per la ricerca del bosone di Higgs



Esperimenti ad LHC



- Sistemi di rivelazione enormi ed estremamente complessi costituiti da “strati” di rivelatore realizzati con disegni e tecnologie diverse, dedicati alla misura di proprietà specifiche delle particelle (prodotti di decadimento)
- Tecnologie di rivelazione, acquisizione, elaborazione sviluppate appositamente!

Le scoperte non si fanno da soli...

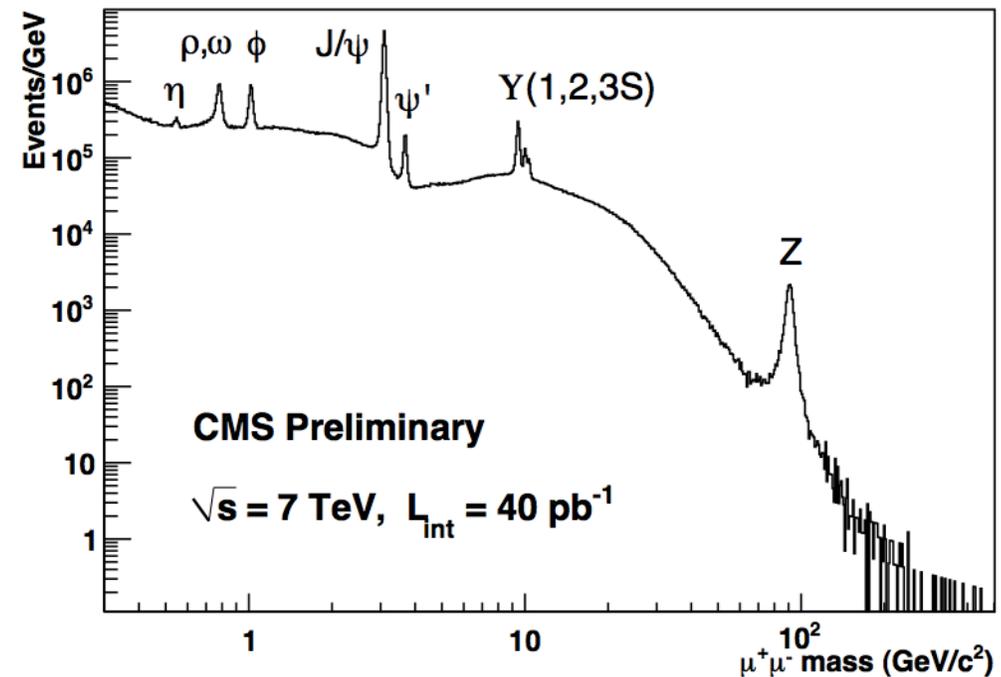
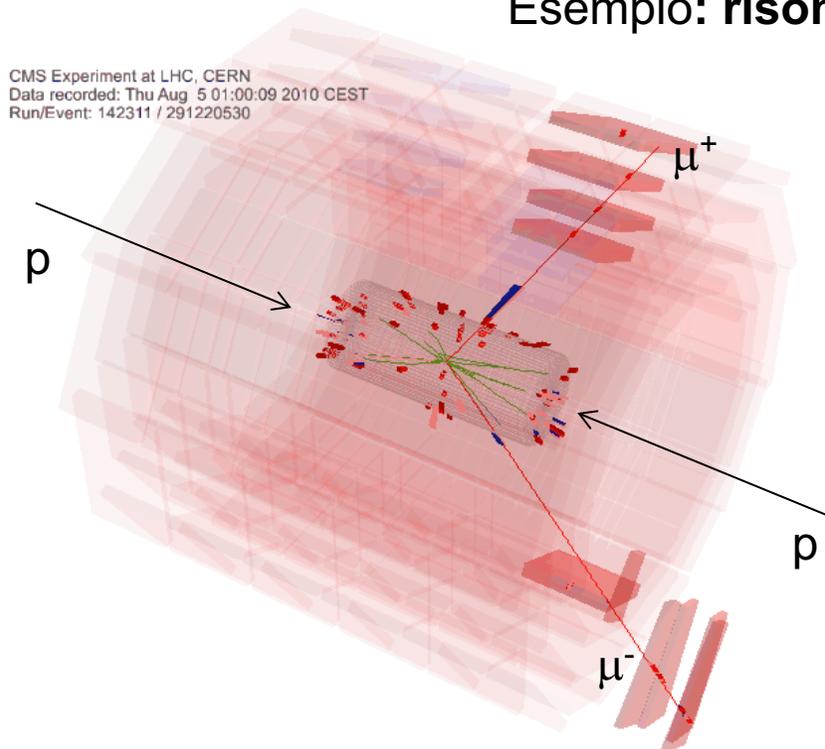
ATLAS e CMS: 6000 fisici e ingegneri di tutto il mondo
Qui sotto una piccola parte della collaborazione di CMS

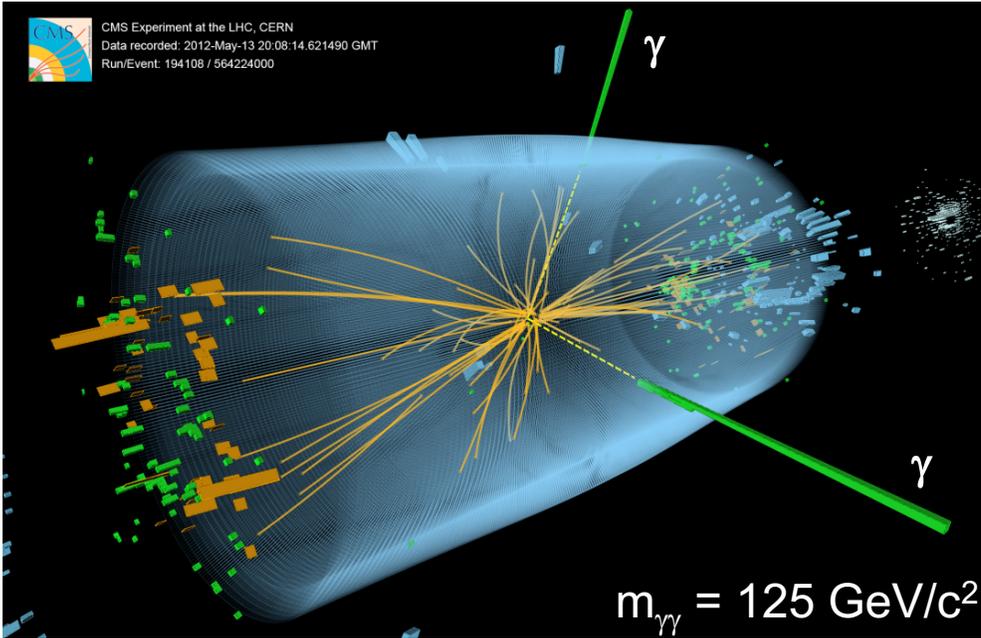


Che cosa osserviamo?

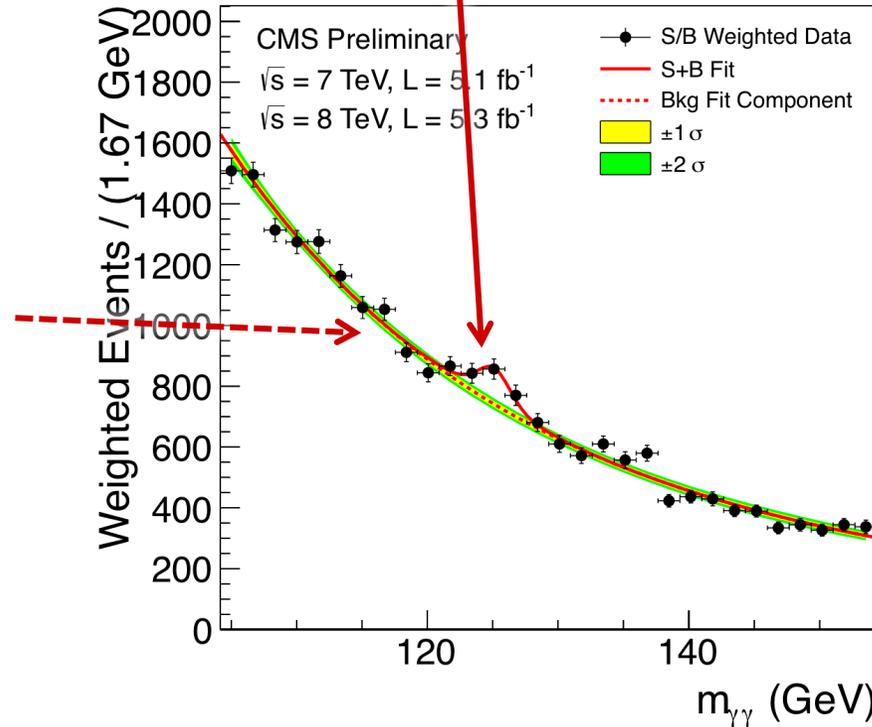
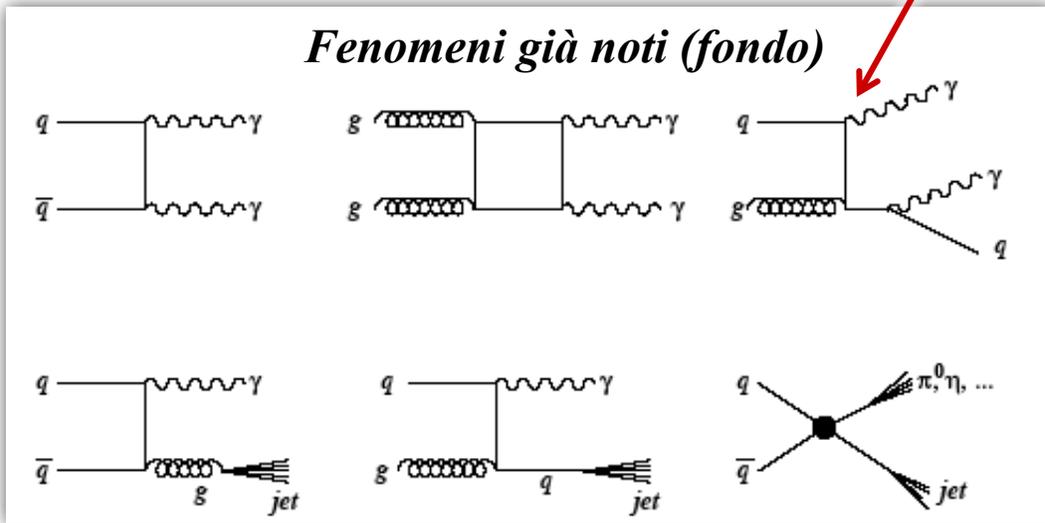
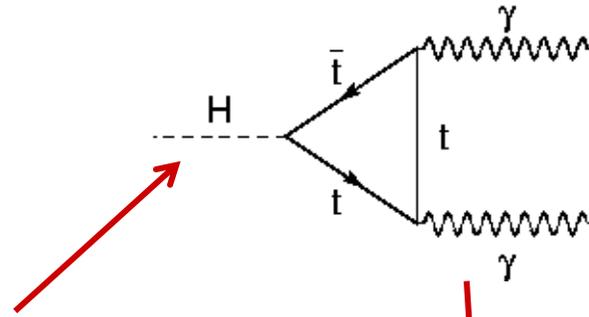
- Le particelle “interessanti” decadono istantaneamente
 - Dobbiamo cercare i **prodotti del loro decadimento**
 - Spesso in un fondo (“background”) di eventi simili prodotti per es. da processi già noti (non interessanti)

Esempio: risonanze nello spettro $\mu^+\mu^-$ in collisioni pp

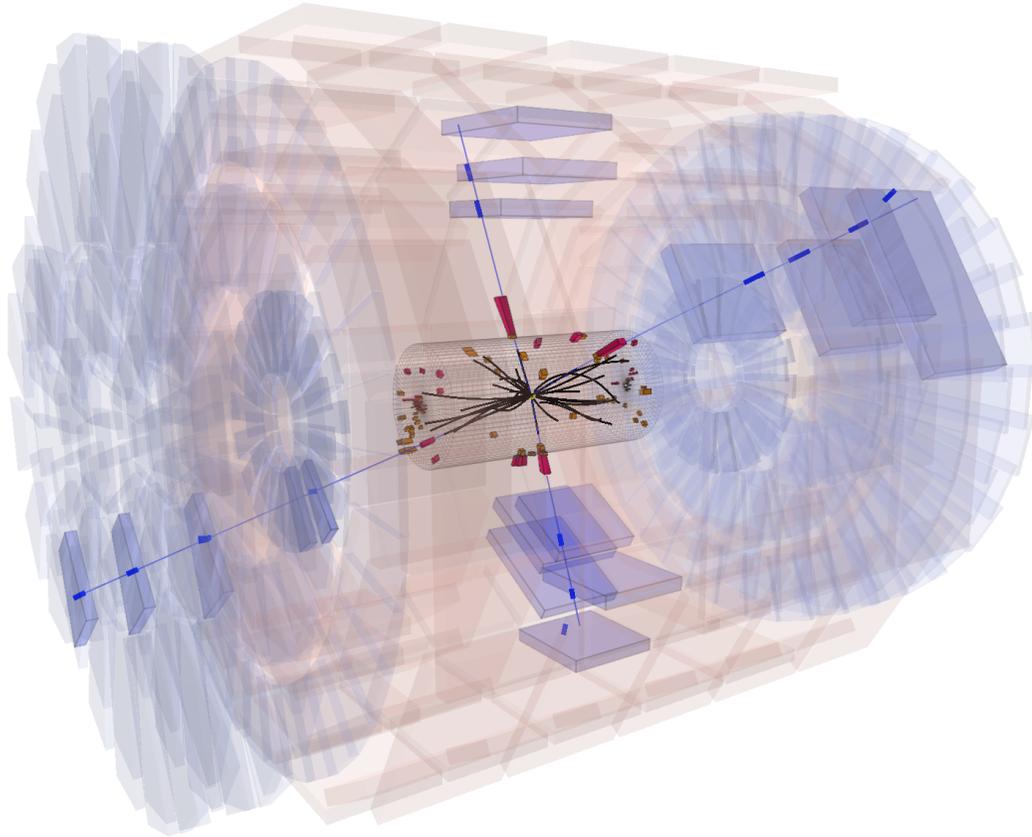




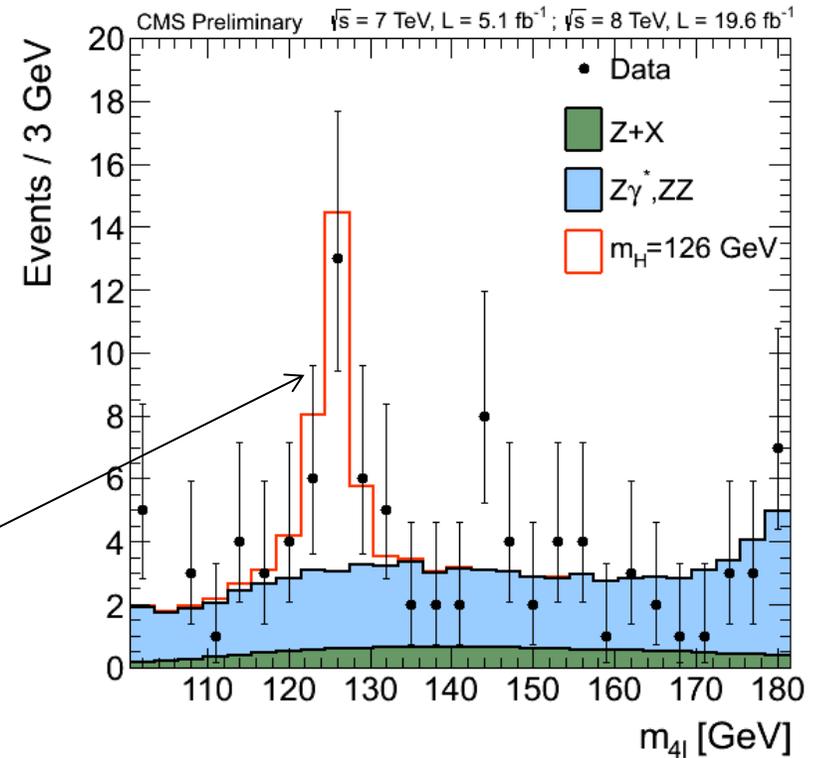
E' questo un candidato Higgs?



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ ($\ell = e, \mu$)

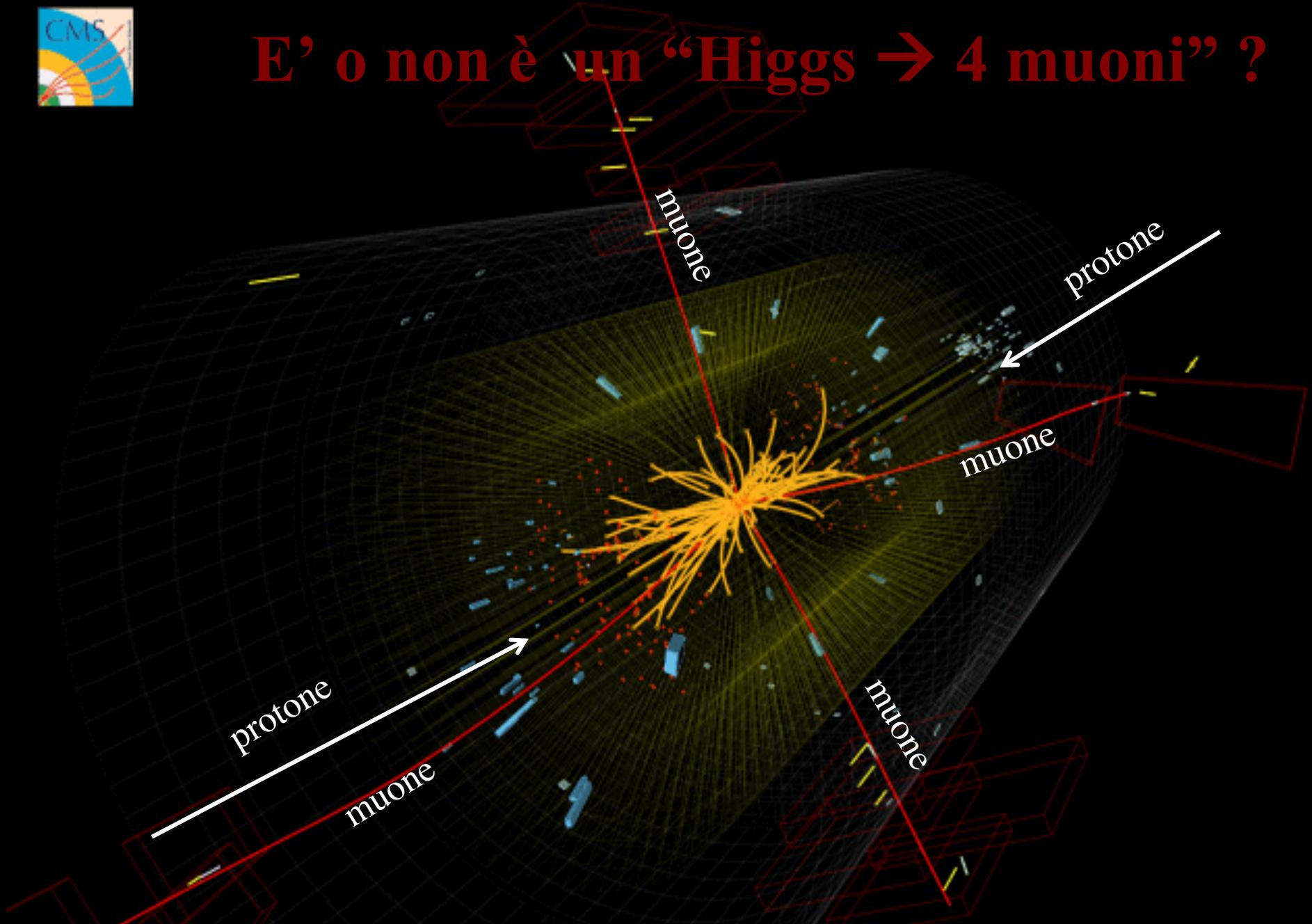


Si studiano eventi con 4 leptoni, cercando un eccesso nello spettro $m_{4\ell}$





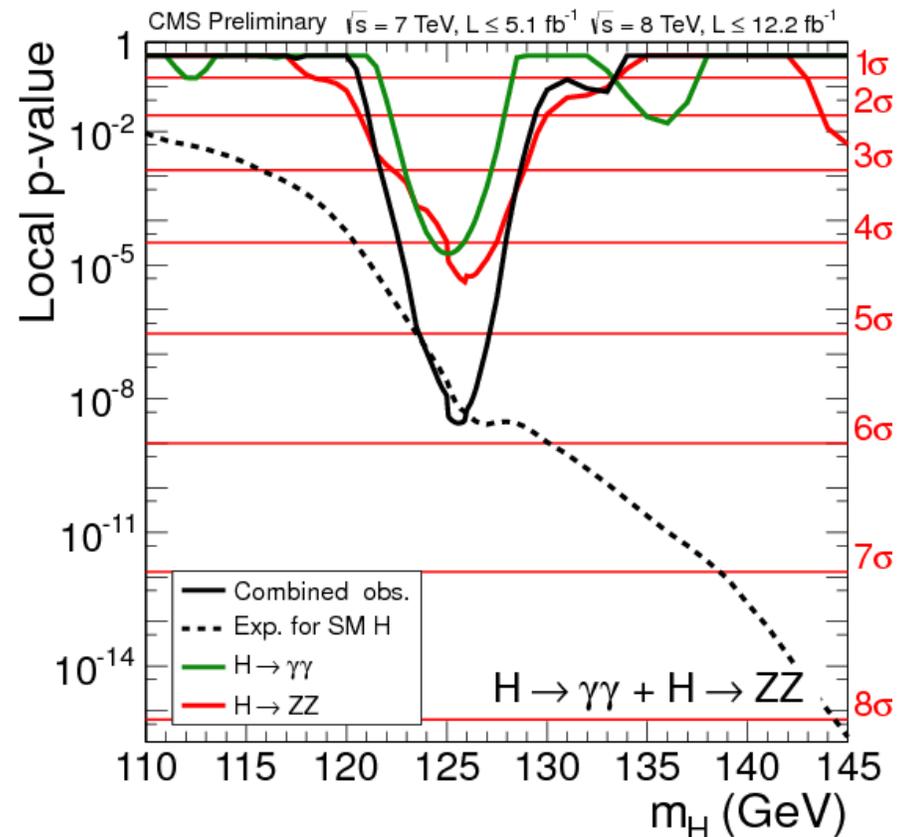
E' o non è un "Higgs \rightarrow 4 muoni" ?



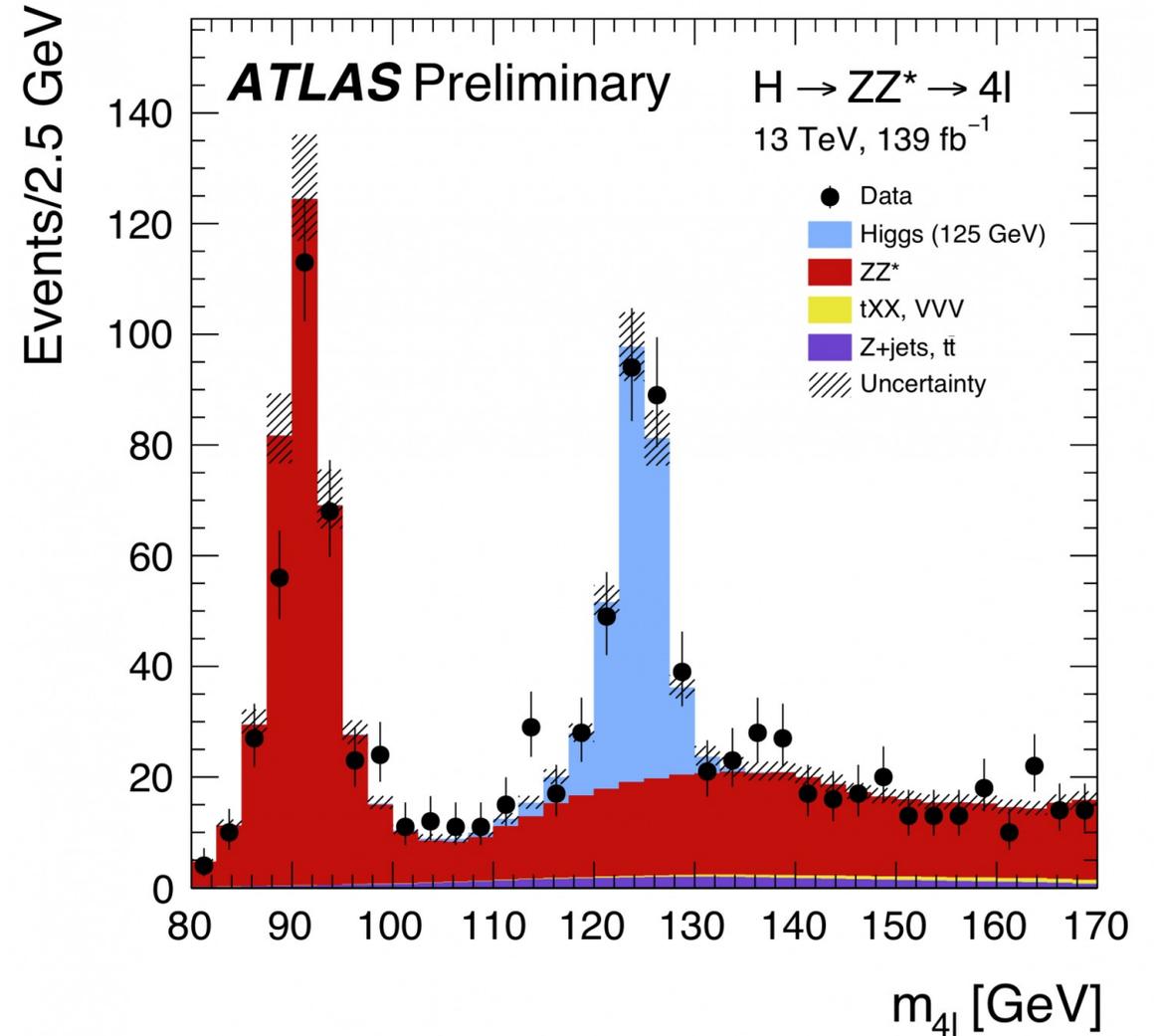
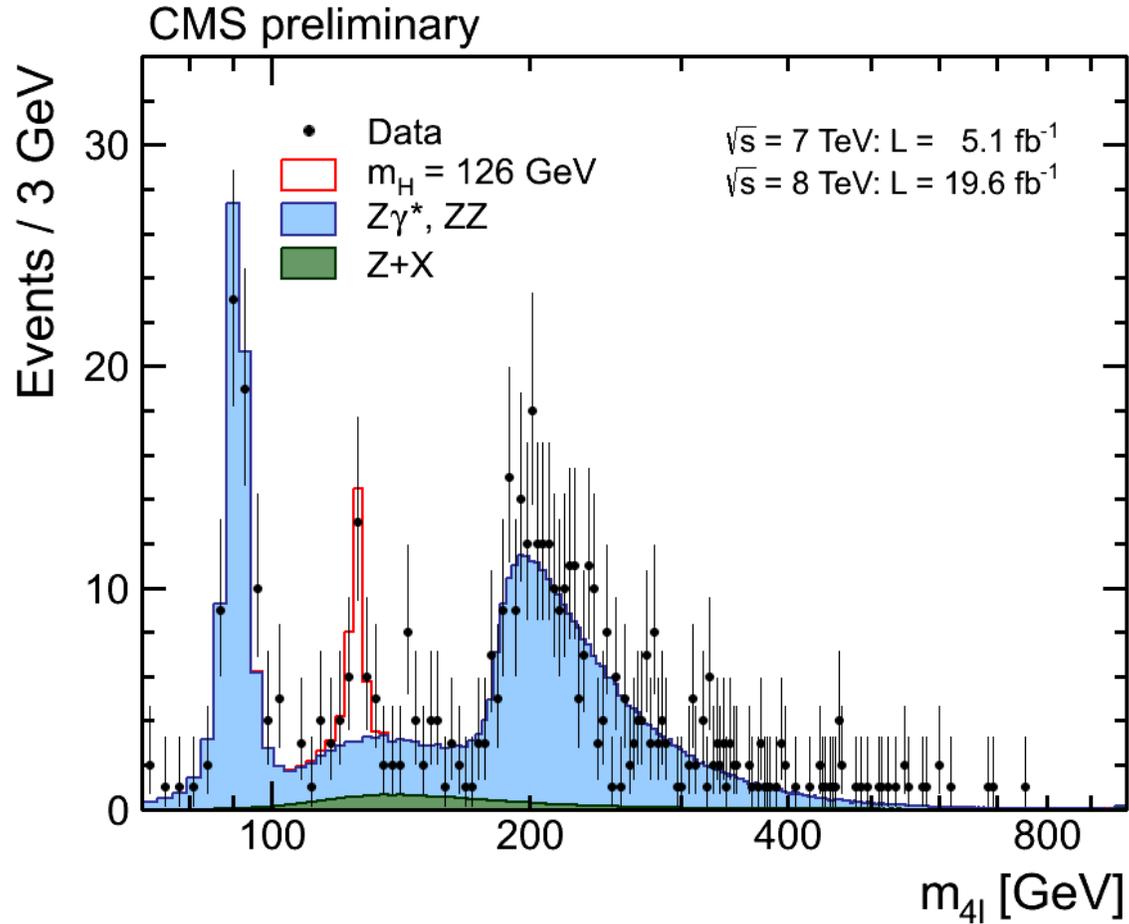
Evento misura a CMS ad Agosto 2011

Come definire se un eccesso è significativo?

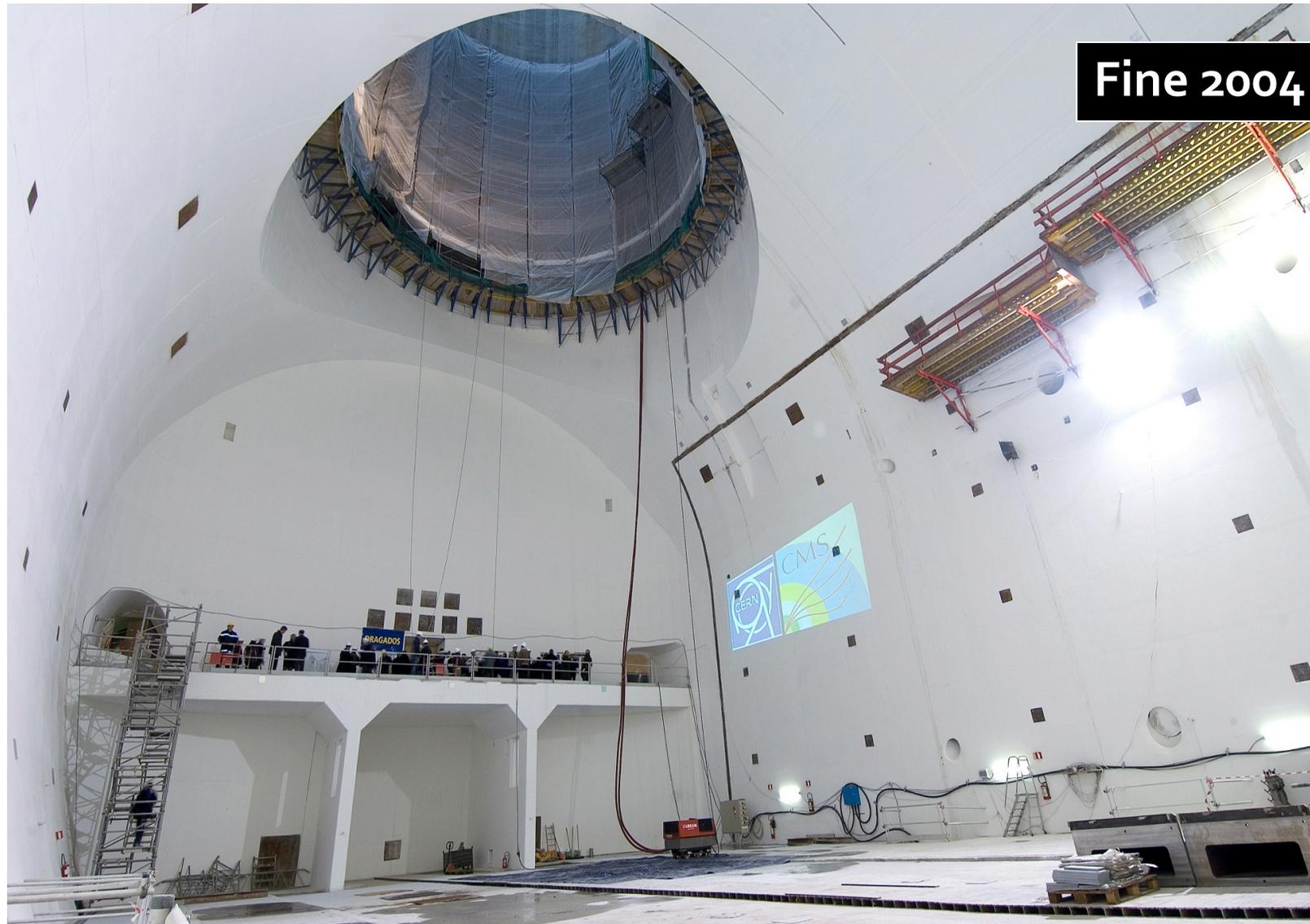
- Non è sufficiente vedere qualche evento compatibile con le attese per essere certi di aver scoperto un dato processo
 - **Analisi statistica**: determinare la probabilità che l'eccesso osservato sia una fluttuazione nel numero di eventi di fondo (**p-value**)



Raccogliere abbastanza dati



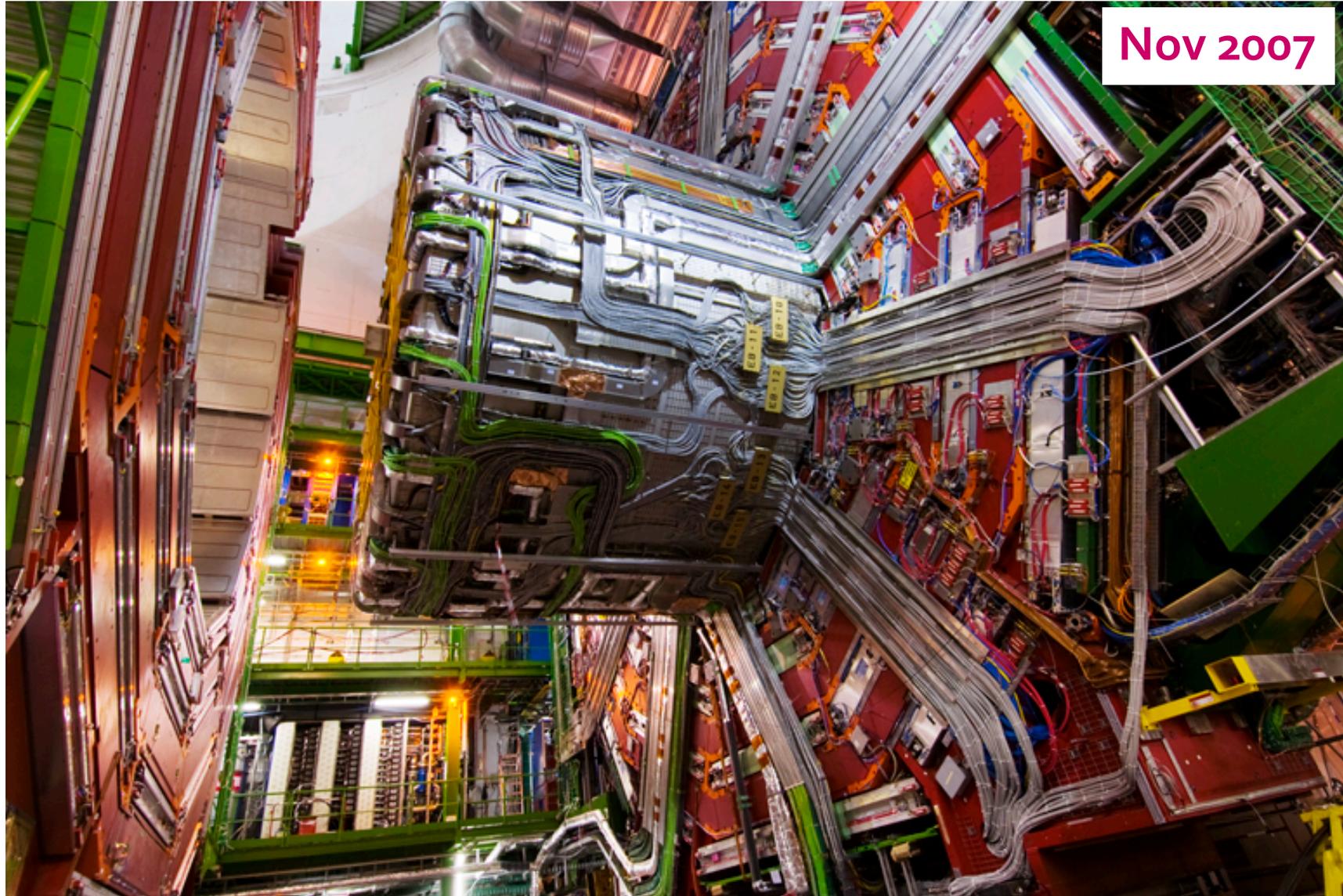
Inizia la costruzione...



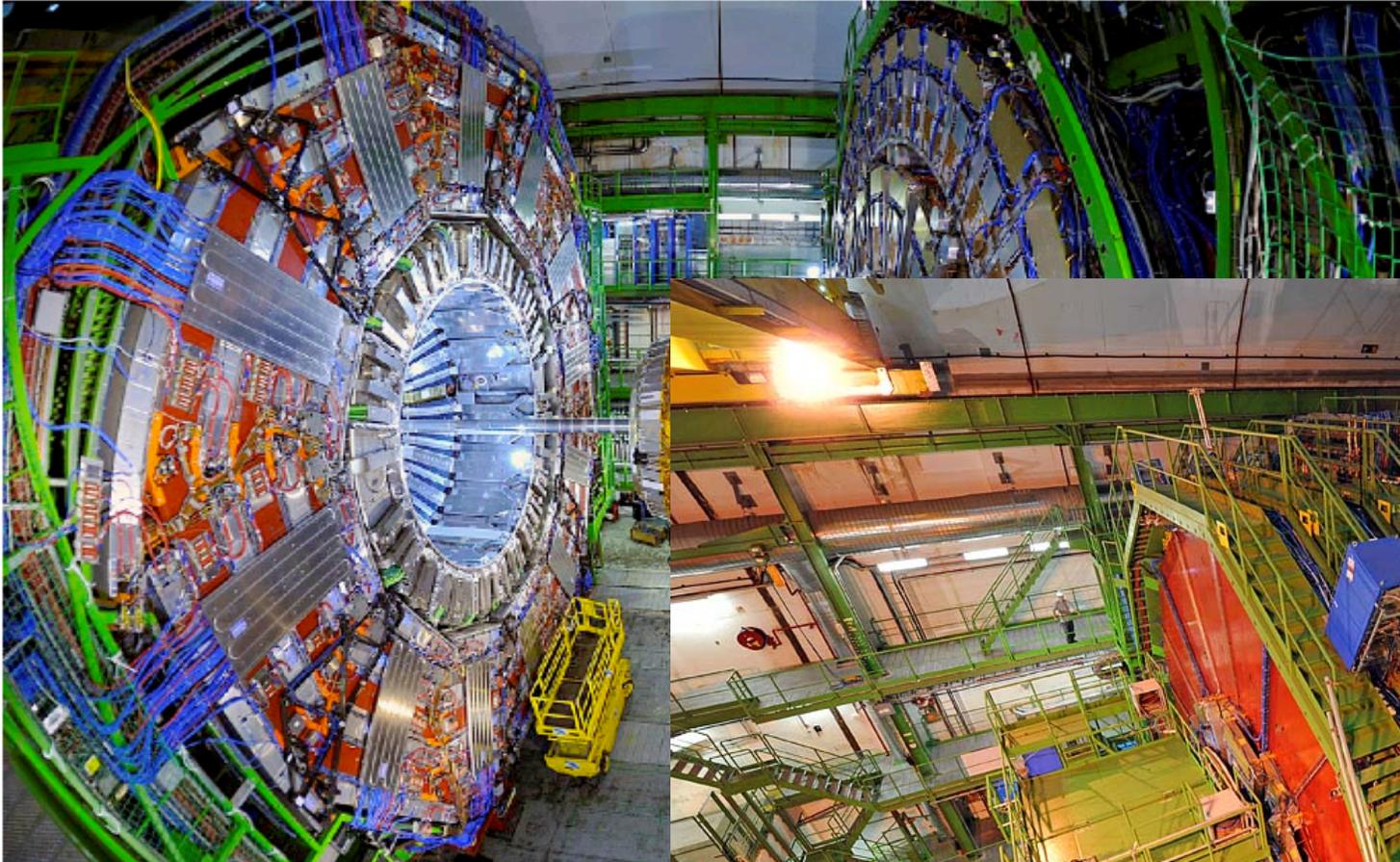
... in superficie e nelle viscere della terra...



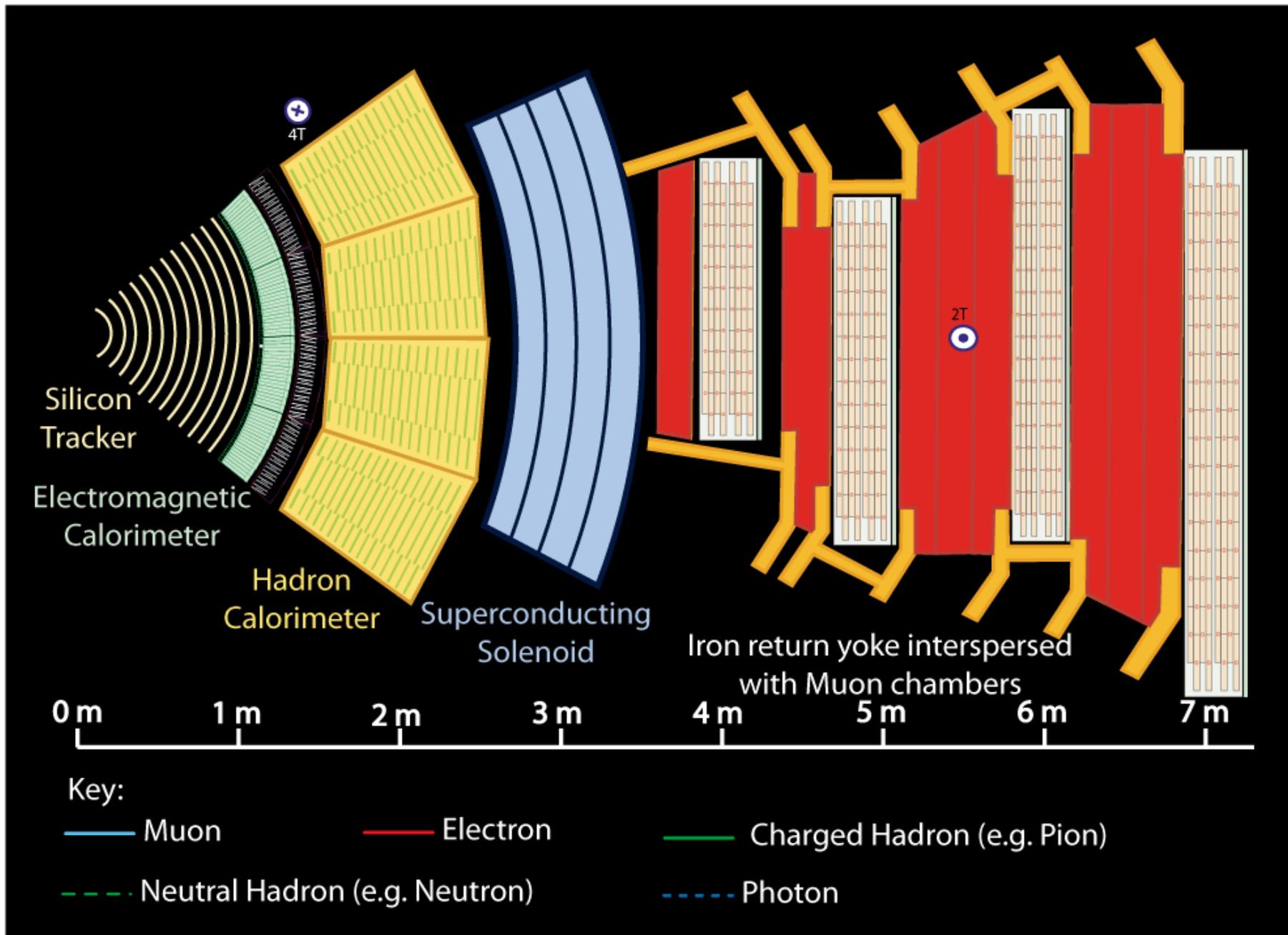
Cavi tubi e fibre ottiche

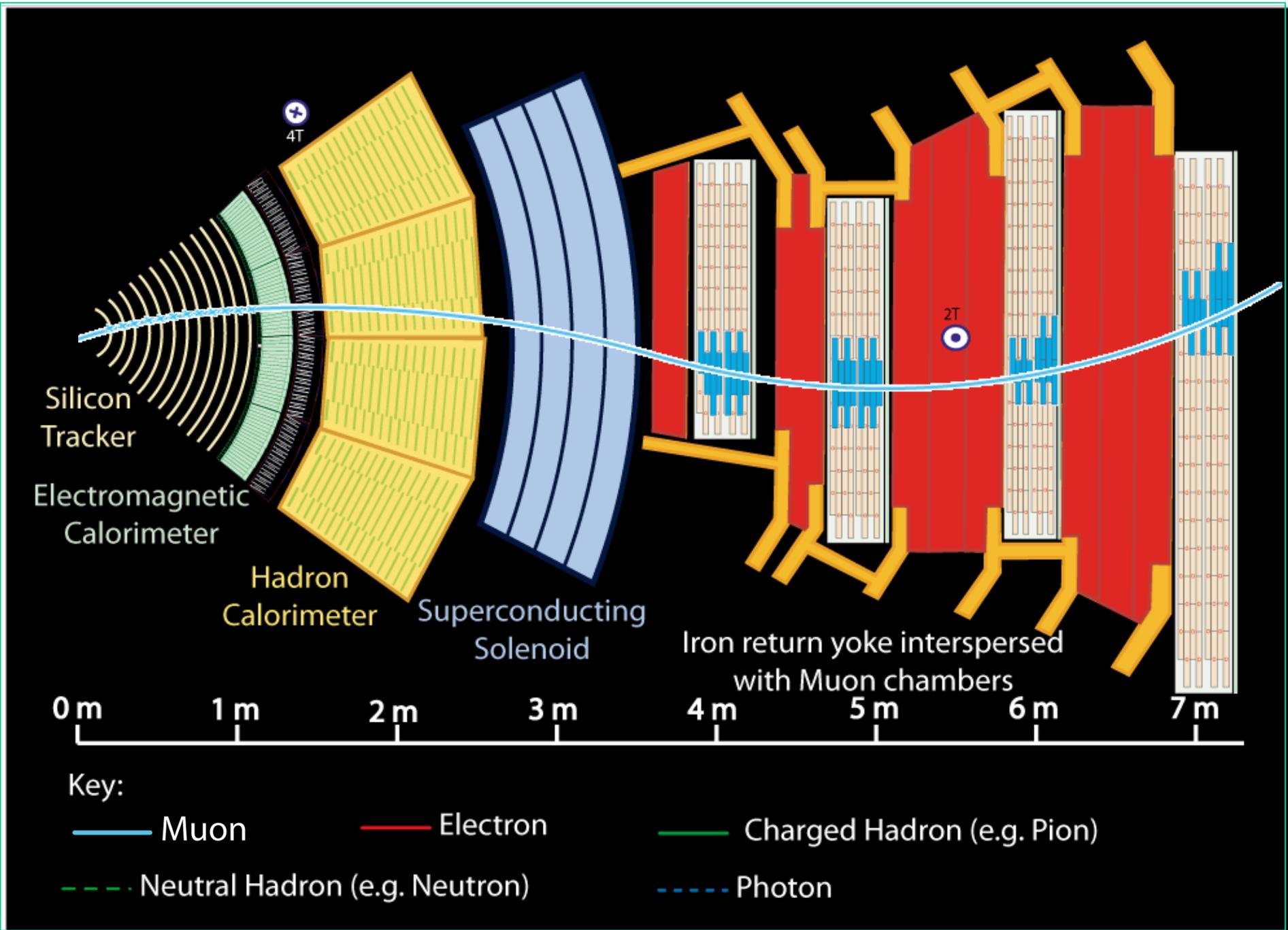


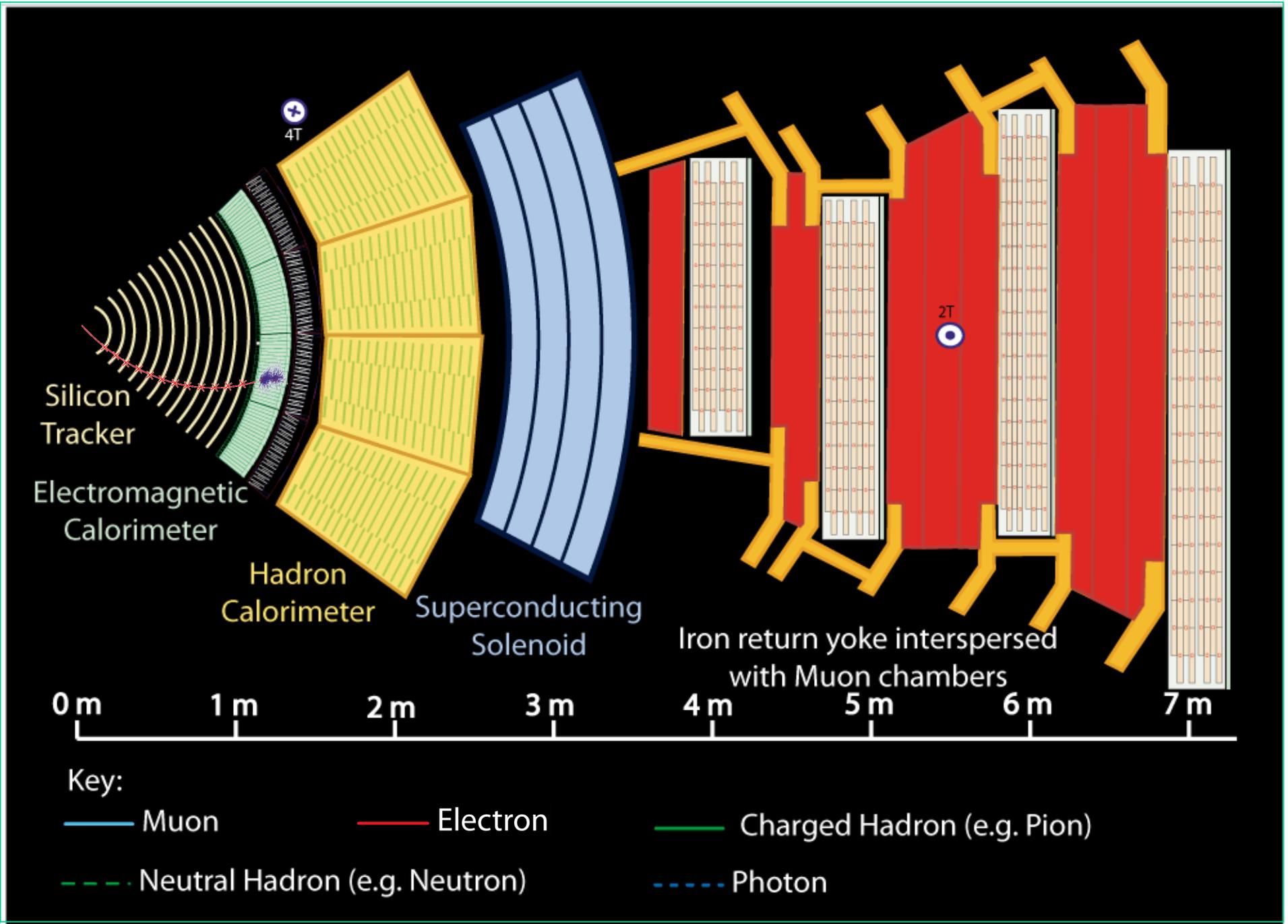
Si chiude il rivelatore!

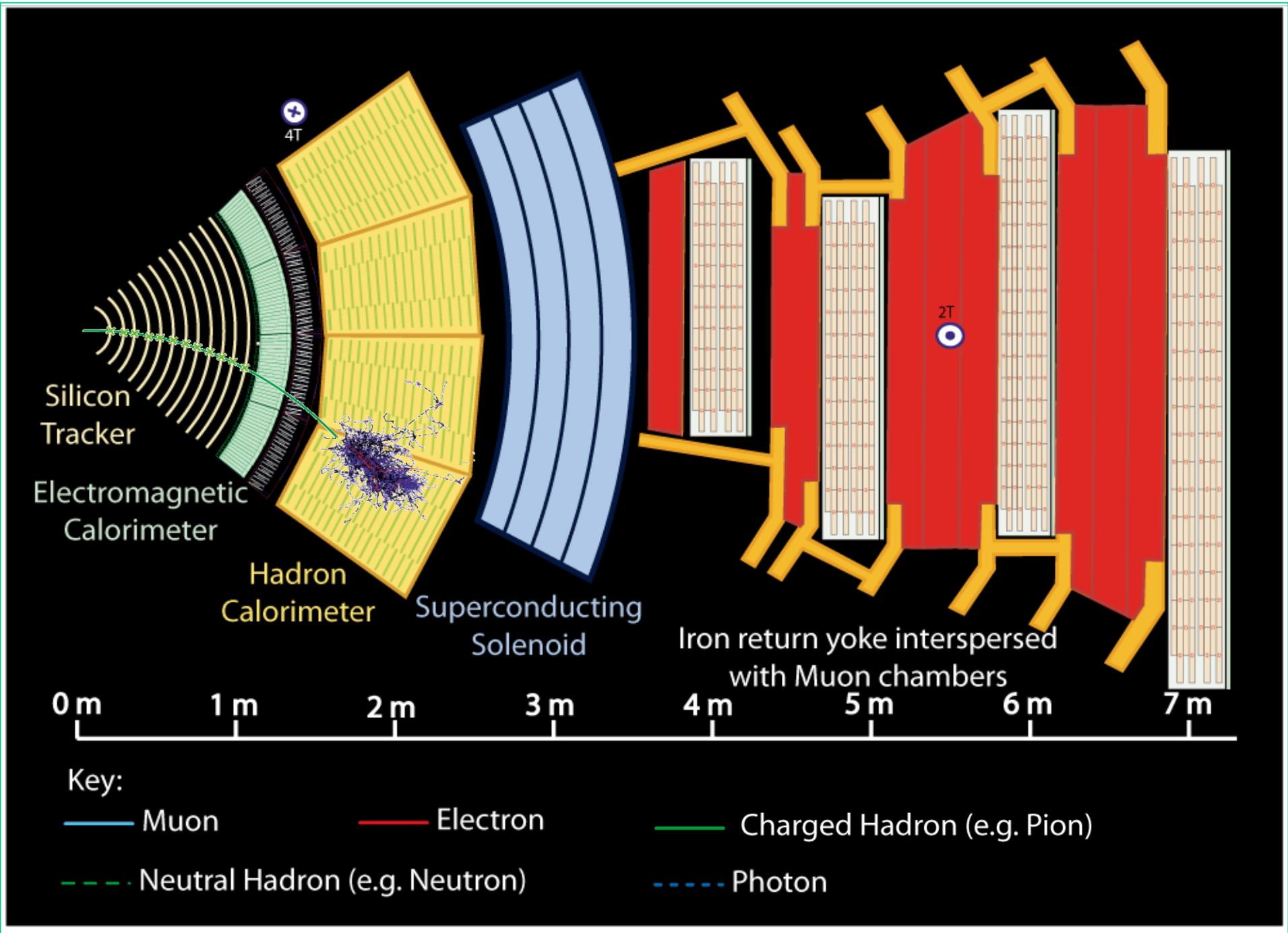


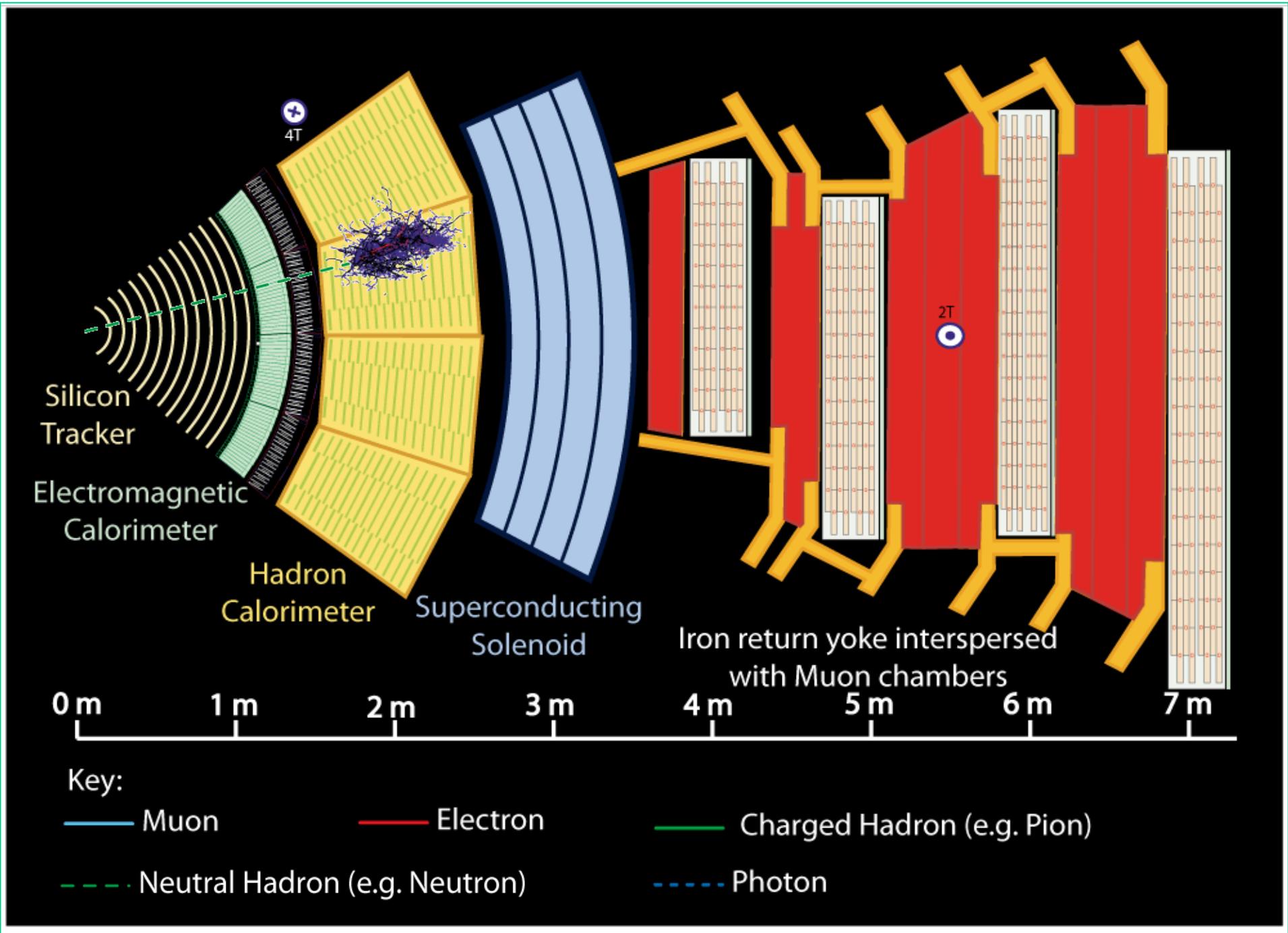
Sett 2008

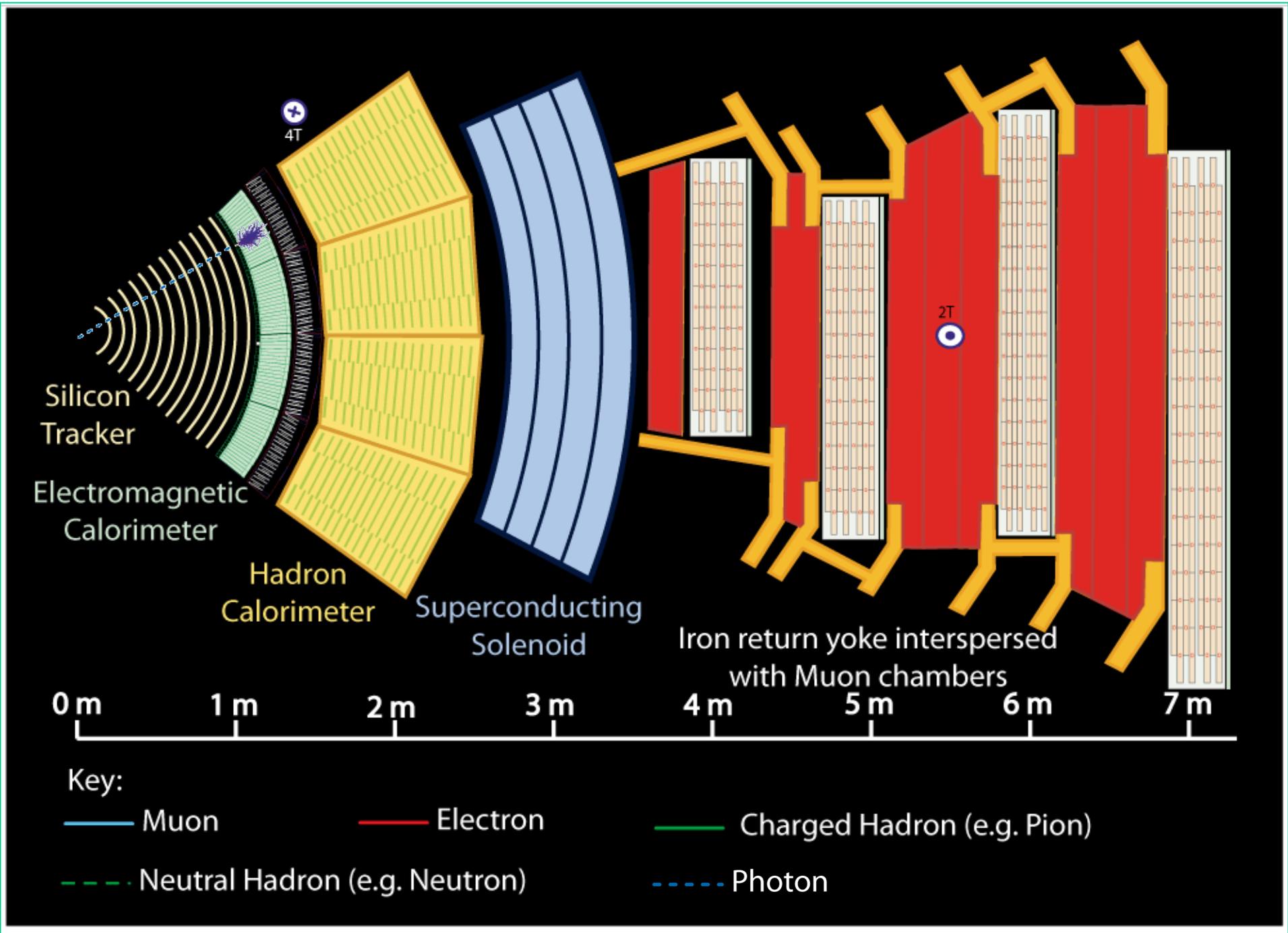






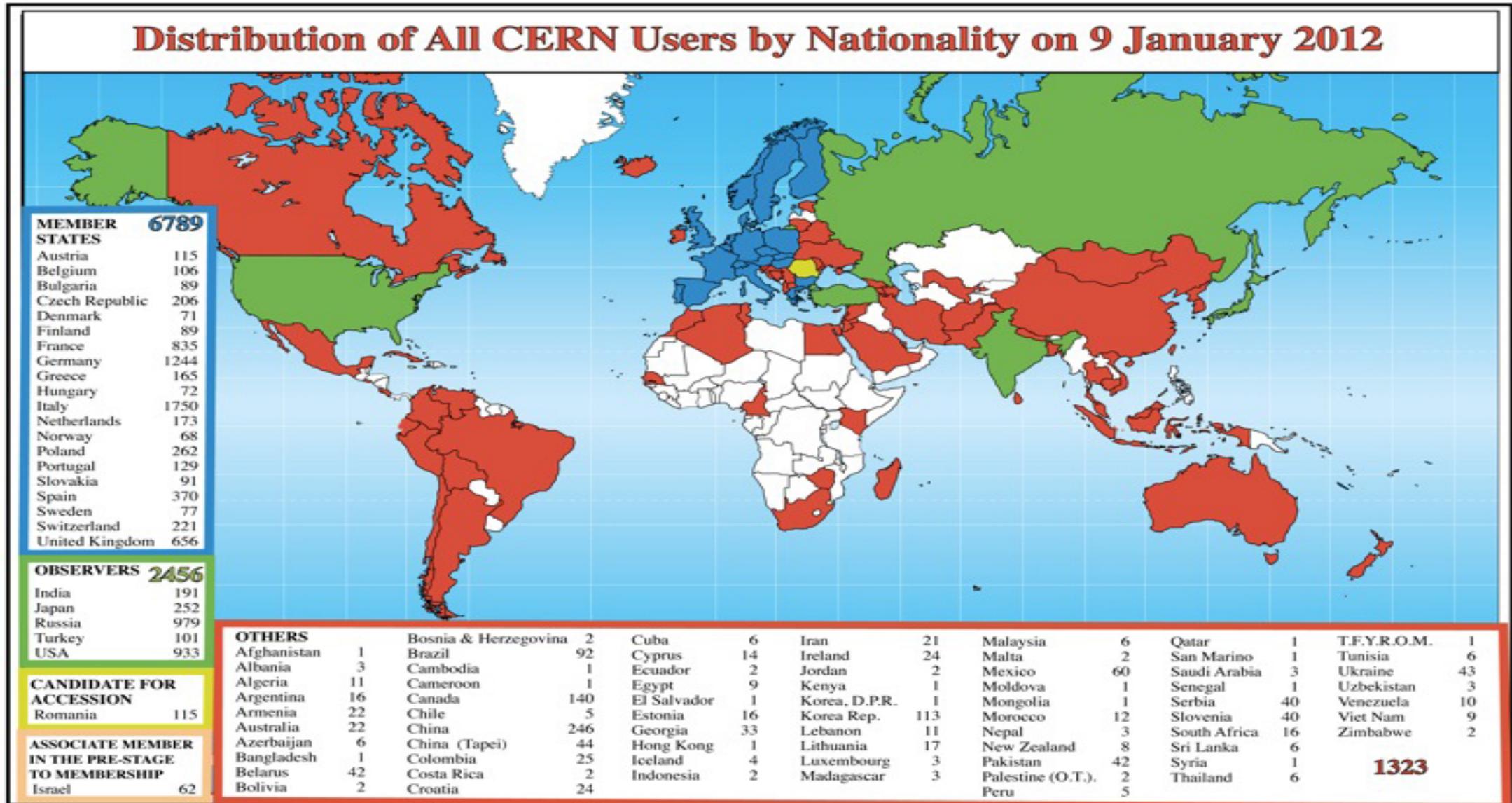




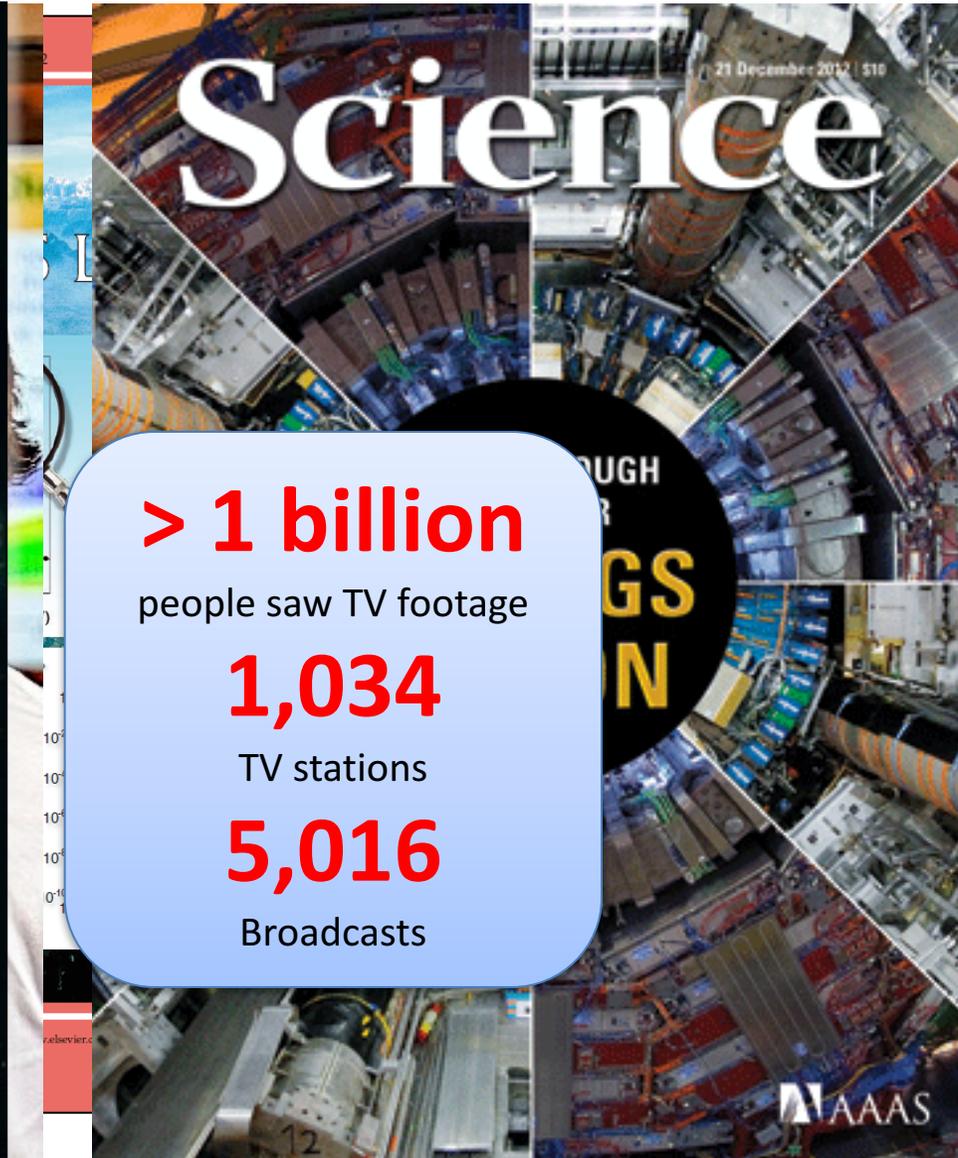


Il CERN come prototipo di collaborazione mondiale

Condivisione globale delle risorse e del sapere tecnico/scientifico



L'impatto mediatico



> 1 billion

people saw TV footage

1,034

TV stations

5,016

Broadcasts

Una sfida durata mezzo secolo

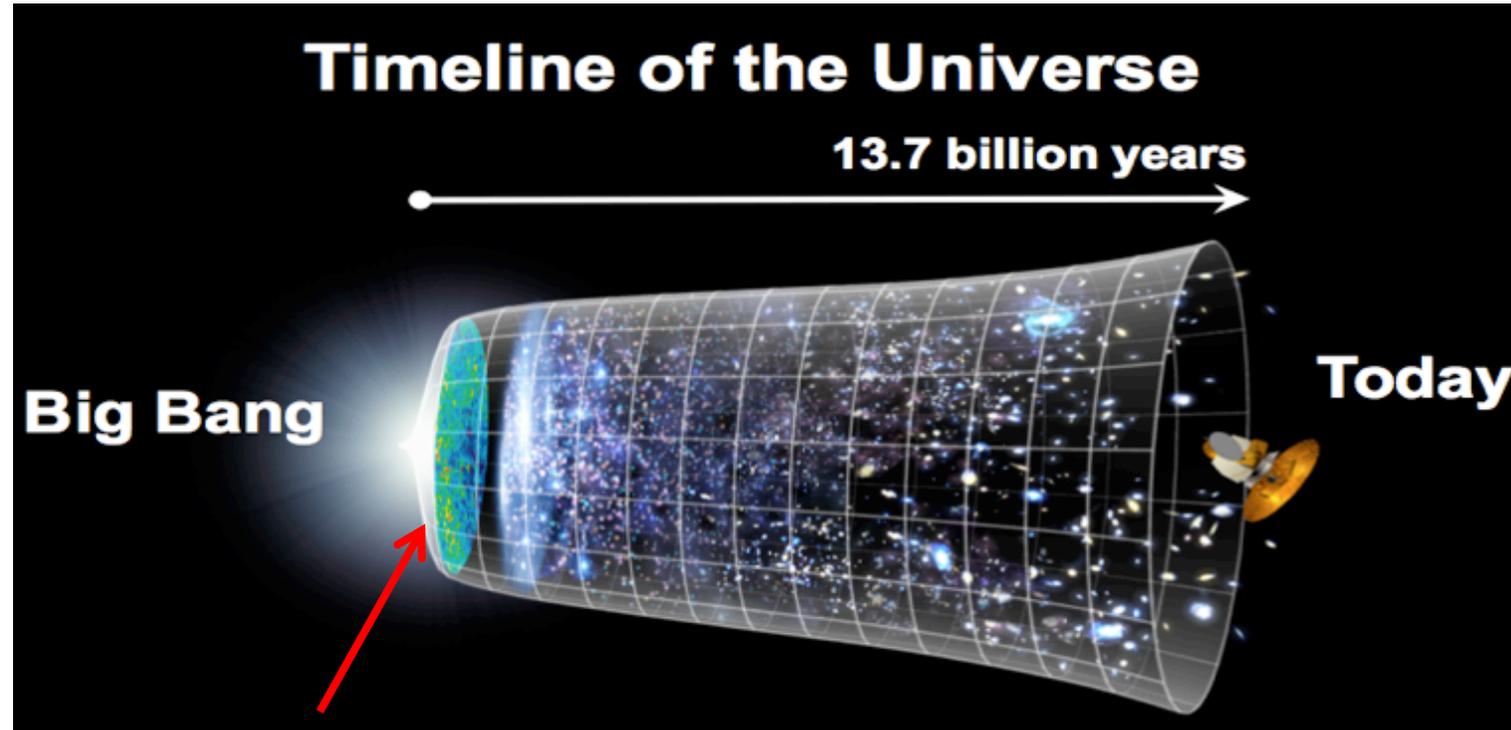
- **1964:** Papers sul **campo di Higgs** (Brout & Englert; Higgs; Guralnik, Kibble & Hagen)
- **1967:** Weinberg, Glashow, Salam: **unificazione elettrodebole** con il campo di Higgs responsabile della massa delle particelle
- **1970s:** Si inizia a pensare a come può essere prodotto ed osservato l'Higgs
- **1980s–90s:** Proposti il SSC (US, mai completato) e il Large Hadron Collider (**LHC**)
- **1990s–2000s:** Ricerche dirette e indirette a **LEP** e **Tevatron** in questi intervalli di massa 0 – 115, 140 – 170 GeV

Costruzione di LHC e dei relativi esperimenti

- **2012:** LHC osserva un nuovo bosone consistente con l'Higgs a circa **125 GeV**

...macchine del tempo

- Quando, come ad LHC, si scontrano particelle, date le energie in gioco si crea uno stato della materia che non esiste attualmente in nessun altro posto nell'universo
 - condizioni esistite solo negli attimi iniziali dopo il Big Bang



LHC ~ 10^{-11} sec

Un'analogia : il party (*Prof. David J. Miller (U.C. London)*)

Una sala piena di fisici che chiacchierano: lo spazio vuoto permeato dal campo di Higgs



Uno scienziato famoso attraversa la stanza e suscita l'interesse e l'attenzione dei fisici presenti che si avvicinano



L'interazione aumenta la resistenza al suo moto, quanto più il personaggio è famoso: acquisisce "massa" come una particella nel campo di Higgs



Anche un pettegolezzo può attraversare la sala



... e causa raggruppamenti di fisici: le particelle di Higgs

