



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

# La Ricerca del Bosone di Higgs al Large Hadron Collider

Chiara Rovelli

INFN – Sezione di Roma

Liceo Scientifico Evangelista Torricelli, Roma

31 Gennaio 2019

*Progetto Art & Science Across Italy*

# Qualche informazione pratica

Oltre a questo seminario dovete organizzare un'altra uscita scolastica scientifica di un paio d'ore

Ad esempio:

- Una visita ad un laboratorio scientifico
- Una visita al museo del dipartimento di Fisica della Sapienza
- Altro... ?

Martedì 5 febbraio alle 15:15 incontro nell'aula magna dell'Accademia

- Si parlerà di progettazione artistica, di cosa rende un'opera "arte"
- Assolutamente *da non perdere* (max 10 studenti / scuola)



# Qualche informazione pratica

Dovete concordare con il tutor dell'Accademia la data del suo seminario

- L'equivalente di questo, ma artistico
- Per favore, **fatemi sapere** la data! Vorrei essere presente

Dopo Pasqua riceverete il modulo con cui presentare il progetto

- Da consegnare entro la fine dell'anno scolastico
- Dovrete metterci una breve descrizione del vostro progetto





# Il Premio Nobel per la Fisica 2013

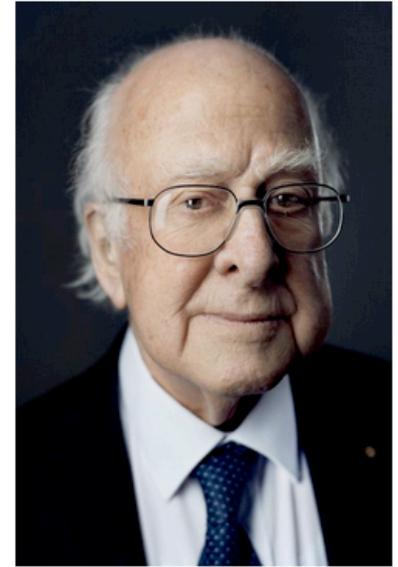


Cern, 4 luglio 2012



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

François Englert

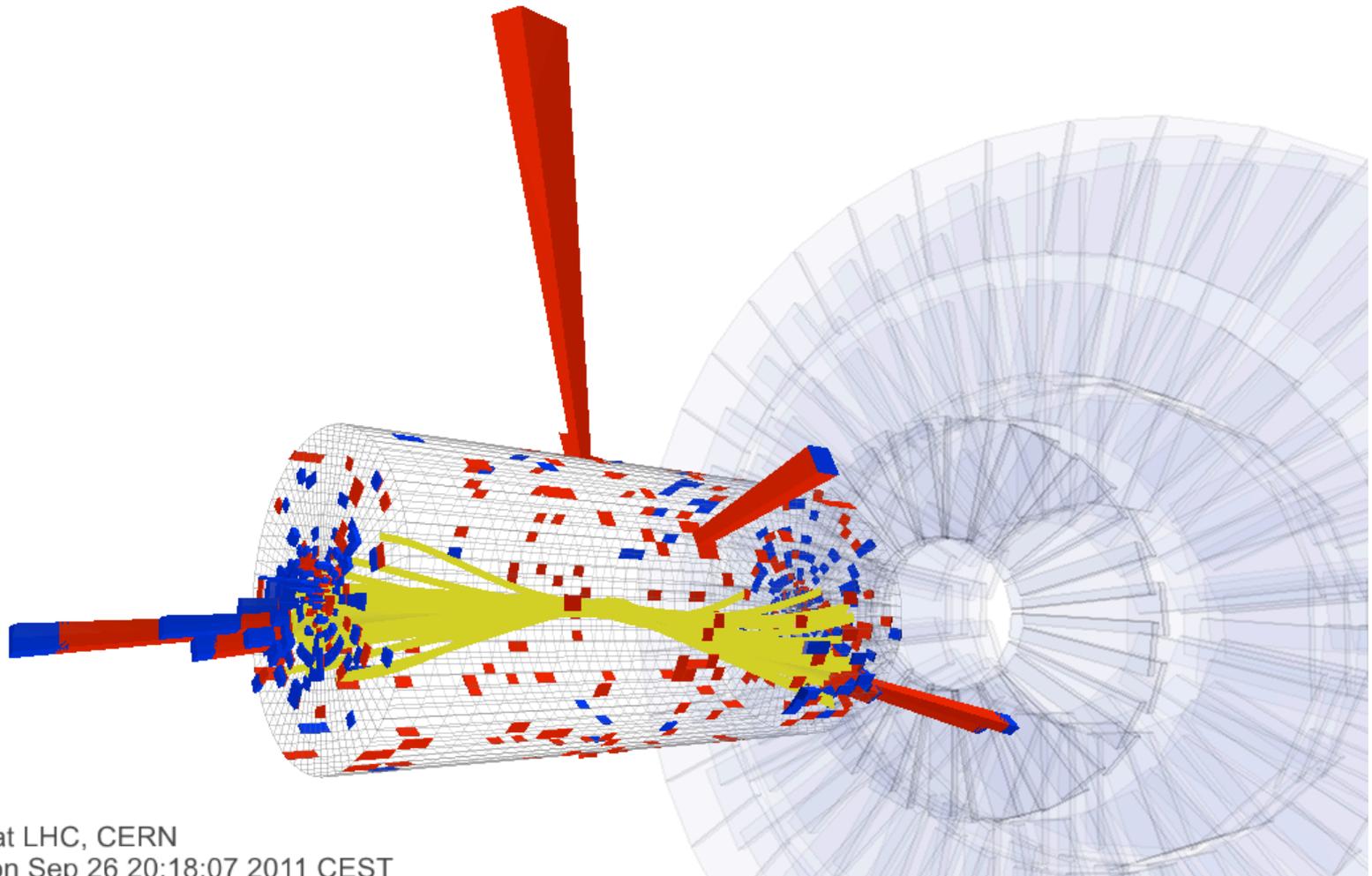


© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Peter W. Higgs

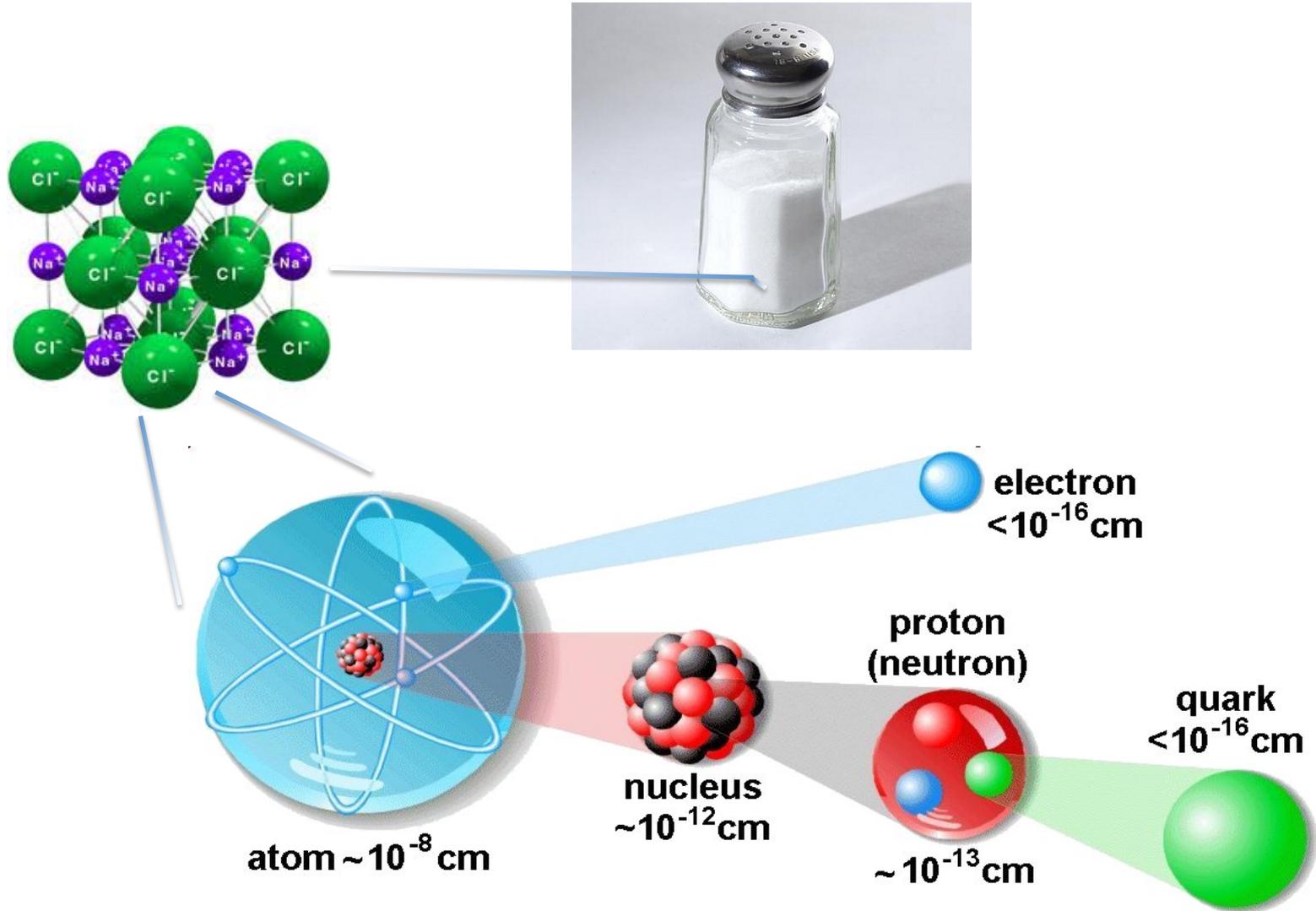
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider."

# Cos'è un Bosone di Higgs



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST  
Run/Event: 177201 / 625786854  
Lumi section: 450

# La materia che conosciamo



# I costituenti della materia

	mass	charge	spin
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$-1$	$1/2$
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$0$	$1/2$

Materia: QUARK e LEPTONI

Atomo: elettrone + nucleoni

Elettrone = Leptone

Nucleone = 3 quark

- Protone: uud
- Neutrone: ddu

# Altre particelle elementari

QUARKS	mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
	charge → $2/3$	$2/3$	$2/3$
	spin → $1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>
	up	charm	top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
charge → $-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	
spin → $1/2$	$1/2$	$1/2$	
<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	
down	strange	bottom	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	charge → $-1$	$-1$	$-1$
	spin → $1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>
	electron	muon	tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
charge → $0$	$0$	$0$	
spin → $1/2$	$1/2$	$1/2$	
<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>	
electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	

Esistono altre particelle elementari:

- Tutte puntiformi
- Copie pesanti delle prime
- 3 “famiglie” di quark e 3 di leptoni

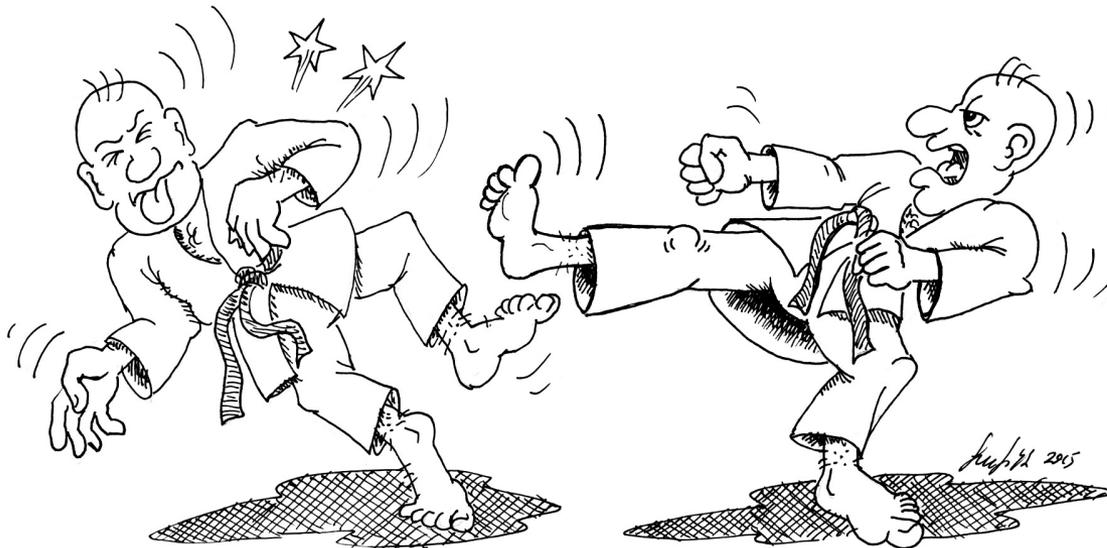
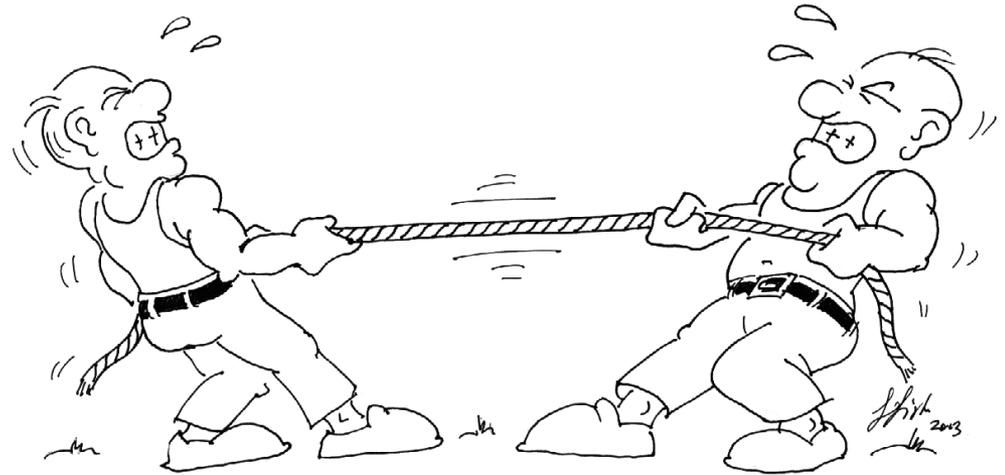
Formate al momento del Big-Bang.

Oggi vengono “ricreate” dove c’è abbastanza energia

- es. muoni nei raggi cosmici
- es. acceleratori di particelle

# Forze e interazioni

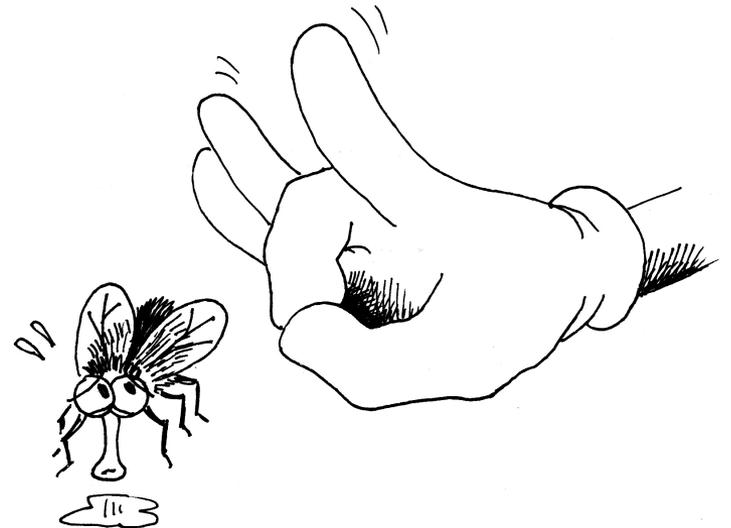
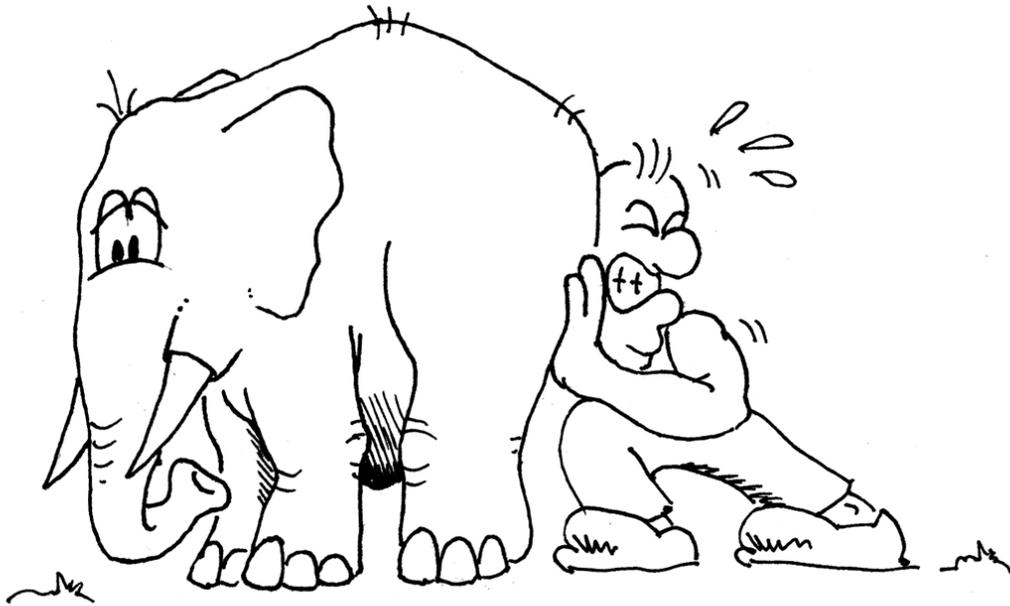
La materia macroscopica, così come le particelle, interagisce attraverso le **forze**.



Applicando una forza a un oggetto (o una persona...!) si cambia il **modo in cui si sta muovendo**

# La massa

Minore è la **massa** di un oggetto, più facile è cambiare il suo movimento



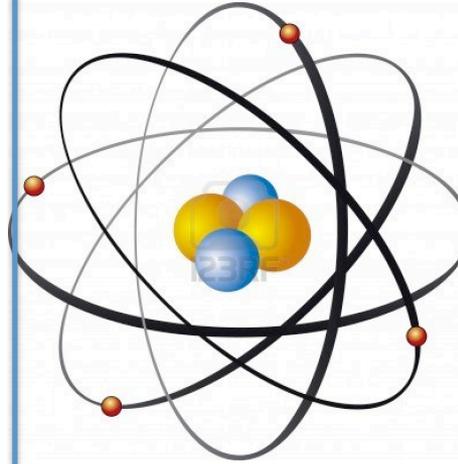
# Quattro tipi di forze

Gravitazionale (intensità'  $10^{-40}$ )



Interazione tra *masse*: pianeti, stelle, galassie...

Elettromagnetica (intensità'  $10^{-2}$ )



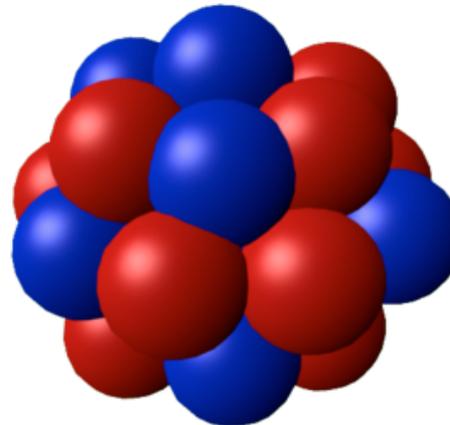
Interazione tra *cariche elettriche*: struttura atomi e molecole, processi chimici e biologici

Nucleare debole (intensità'  $10^{-6}$ )



Decadimenti radioattivi, dinamica stellare...

Nucleare forte (intensità' 1)

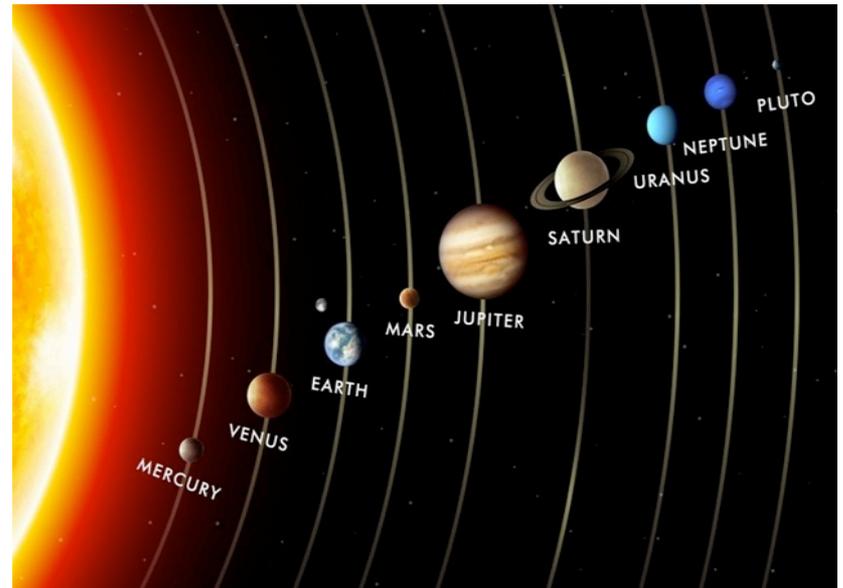


Interazione tra *quark*: struttura nuclei atomici, processi fissione e fusione nucleare

# Forze e campi

Le interazioni possono agire a distanza grazie a campi di forza

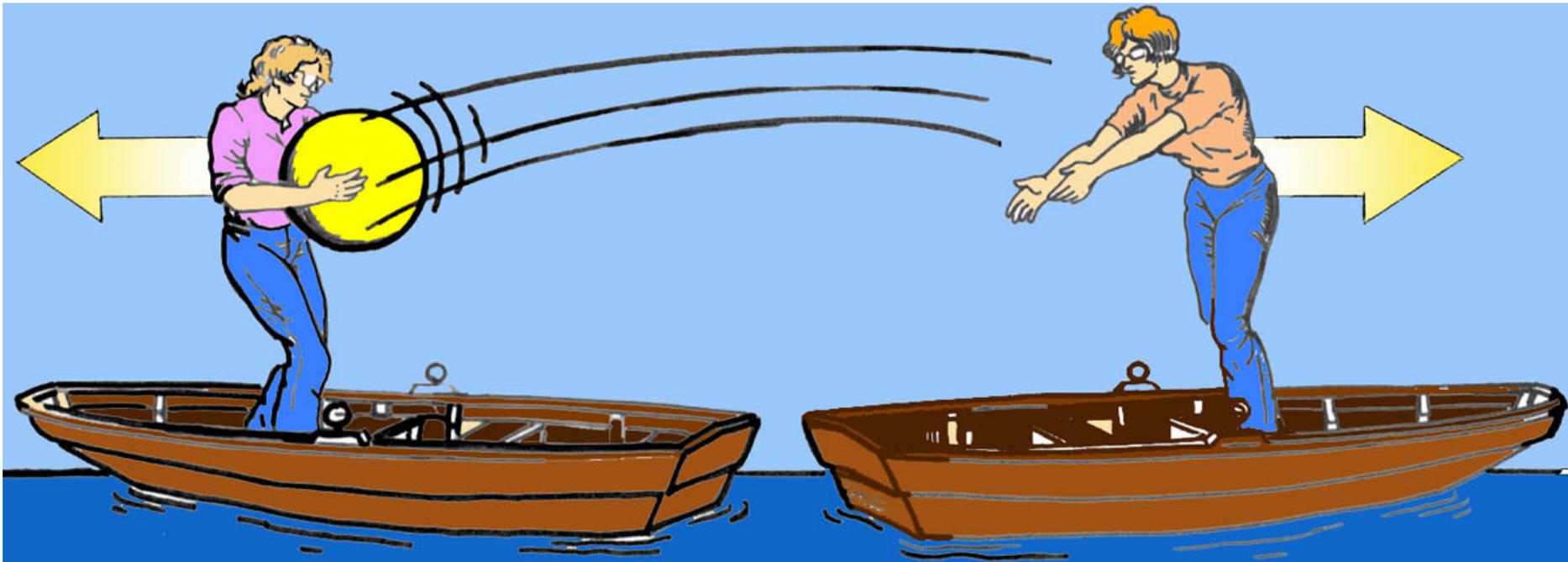
Es. il campo gravitazionale generato dal Sole determina il moto dei pianeti



Es. il campo elettromagnetico permette comunicazioni a distanza con la trasmissione di onde

# Forze e particelle

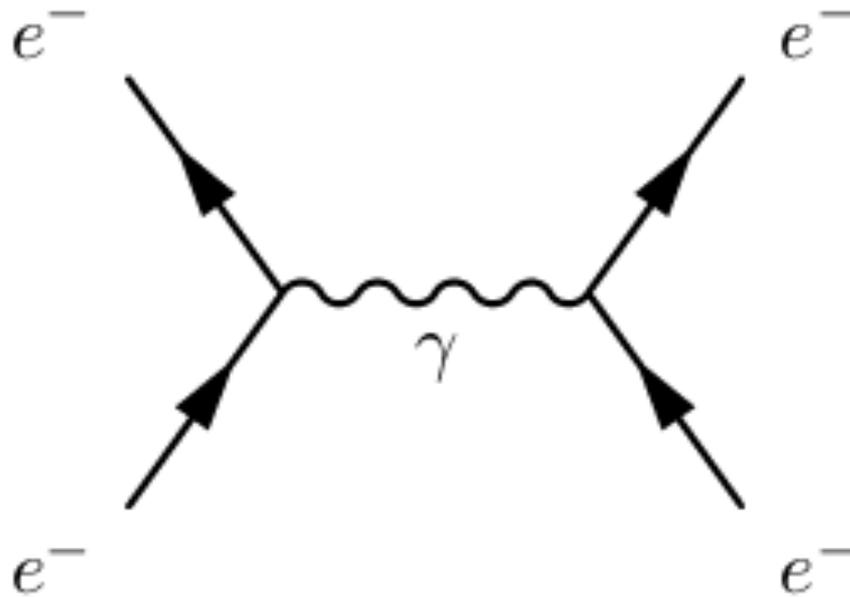
Le forze si possono spiegare su **dimensioni microscopiche** come scambio tra due particelle di un'altra particella che fa da **mediatore**



*2 barche si allontanano scambiandosi una palla*

# Forze e particelle

Le forze si possono spiegare su **dimensioni microscopiche** come scambio tra due particelle di un'altra particella che fa da **mediatore**



*2 elettroni si allontanano scambiandosi un fotone*

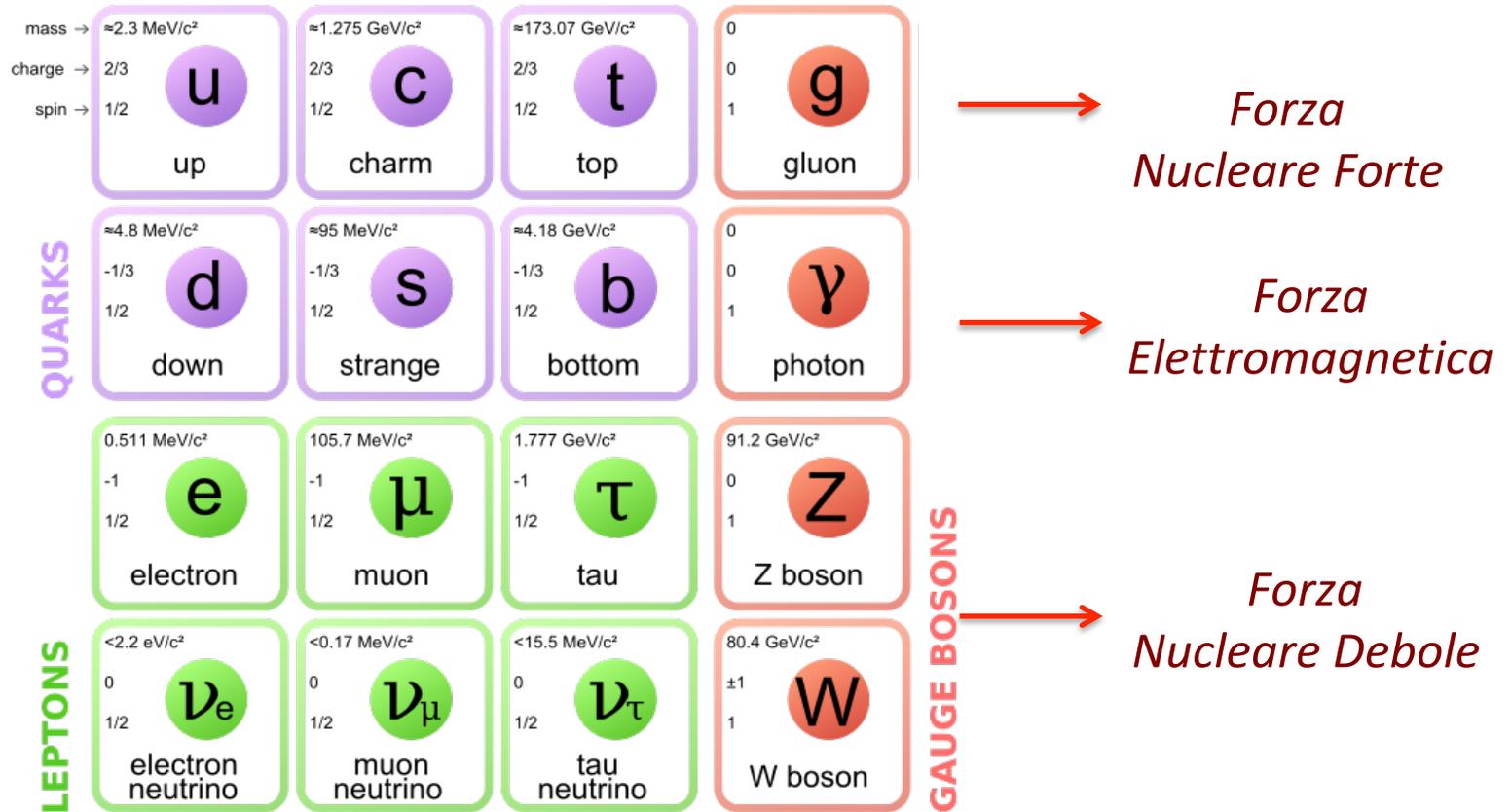
# Il Modello Standard

Il Modello Standard e' il modello teorico che riunisce tutte le particelle elementari

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	$-1$	$-1$	$-1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	$0$	$0$	$0$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino

# Il Modello Standard

Il Modello Standard e' il modello teorico che riunisce tutte le particelle elementari e le interazioni tra loro



Sappiamo che non e' completo, anche se l'accordo con gli esperimenti e' ottimo

- ad esempio non include la gravita'

# Il problema della massa

Nel Modello Standard tutte le particelle sono senza massa

- Altrimenti la teoria sarebbe inconsistente matematicamente

Tutte le particelle dovrebbero viaggiare alla velocità della luce

- Come il fotone

Ma non è così: *quasi* tutte le particelle elementari hanno massa

- Es. la particella W ha  $m_W \sim 80 m_{\text{protone}}$



# Il problema della massa

Nel Modello Standard tutte le particelle sono senza massa

- Altrimenti la teoria sarebbe inconsistente matematicamente

Tutte le particelle dovrebbero viaggiare alla velocità della luce

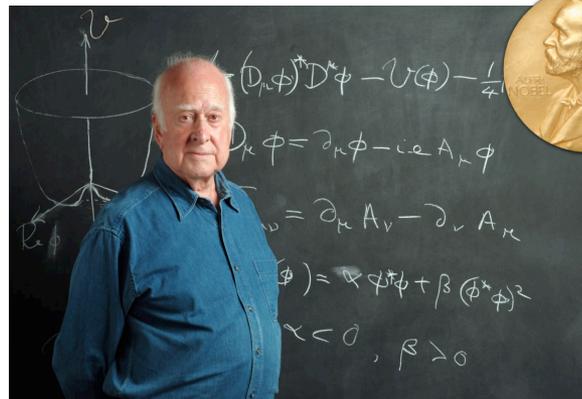
- Come il fotone

Ma non è così: *quasi* tutte le particelle elementari hanno massa

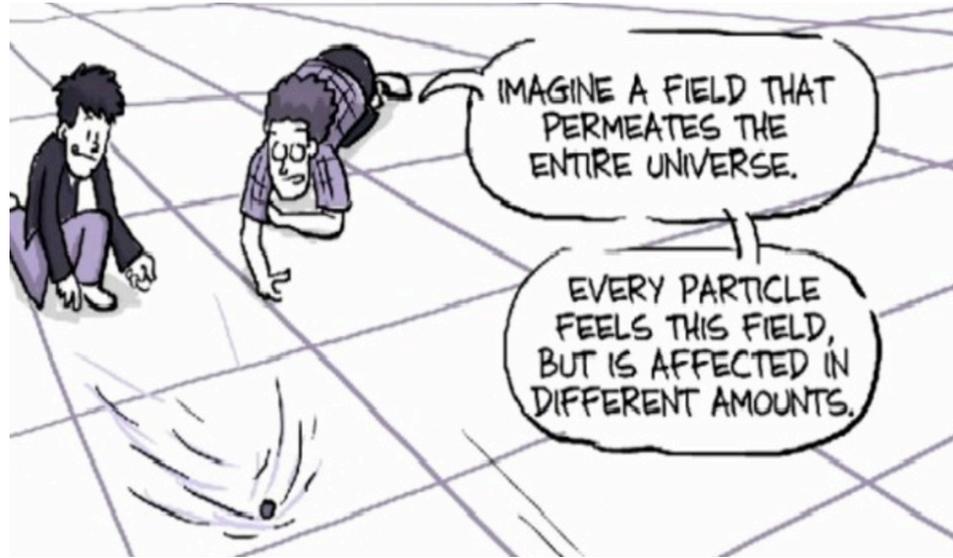
- Es. la particella W ha  $m_W \sim 80 m_{\text{protone}}$

Prof. Brout, Englert e Higgs, nel 1964, hanno introdotto

il meccanismo che spiega perché le particelle elementari hanno massa:  
la massa viene generata da un campo che è presente in tutto lo spazio



# Il campo di Brout-Englert-Higgs (per brevità': di Higgs)



Il campo di Higgs e' invisibile e permea tutto l'universo

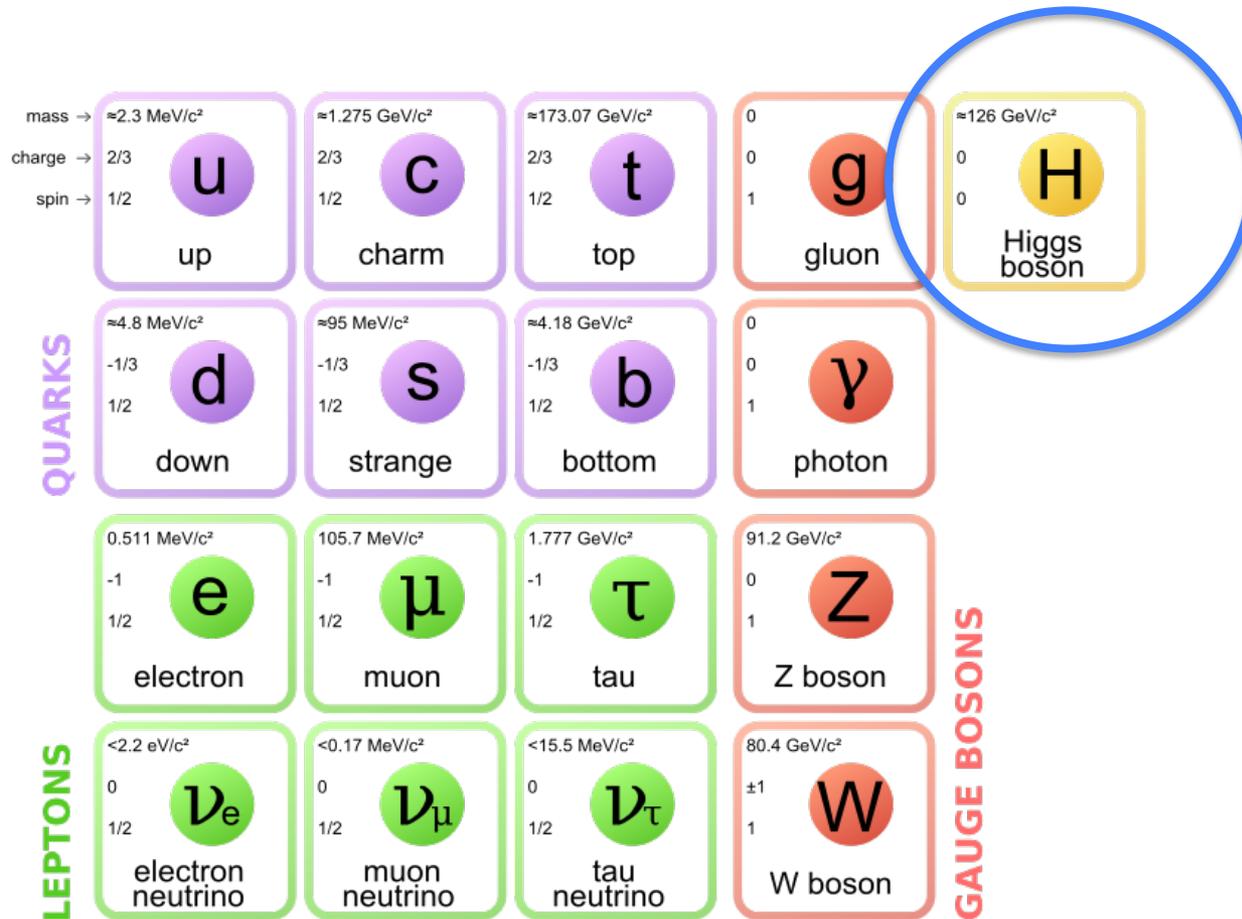
Interagisce con le particelle in modo diverso

- Più una particella lo "sente", maggiore e' la sua massa
- Il fotone non si accorge del campo di Higgs e resta senza massa

Anche al campo di Higgs corrisponde una particella, il Bosone di Higgs

- Anche questa particella "sente" il suo campo e quindi ha una massa *diversa da zero, ma non predetta dalla teoria*

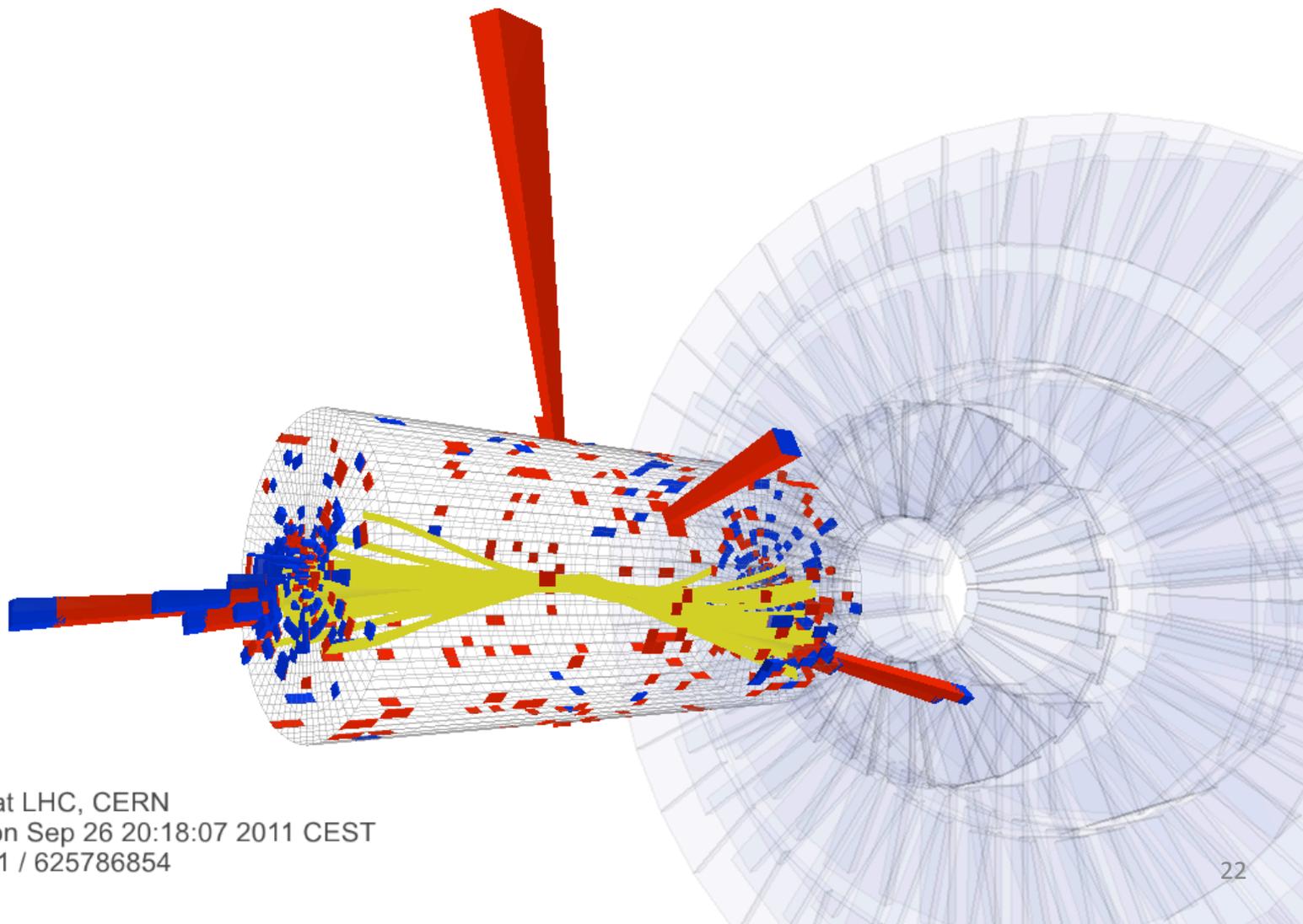
# La ricerca del Bosone di Higgs



Se il campo di Higgs e' invisibile come provare la sua esistenza?

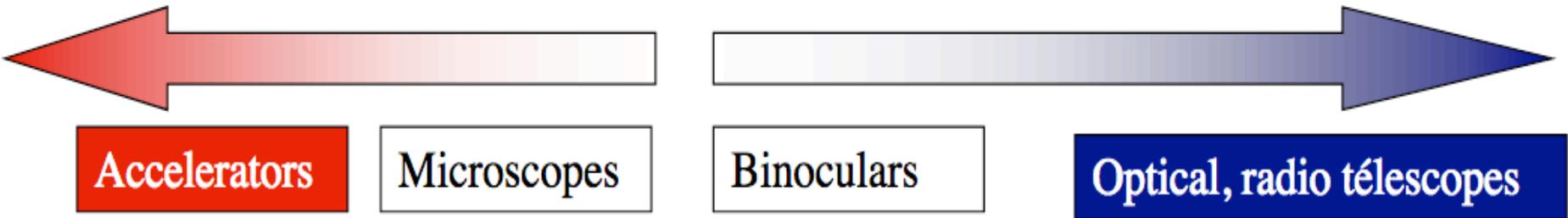
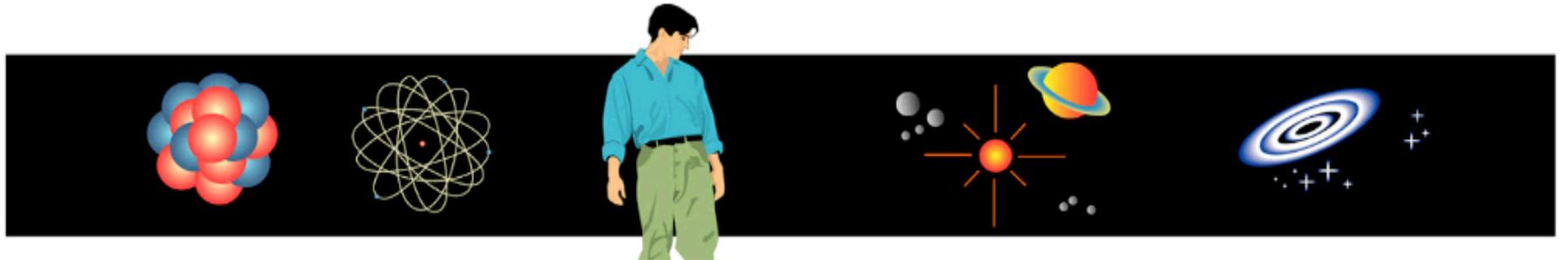
Producendo in laboratorio il Bosone di Higgs

# Come si produce un Bosone di Higgs



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST  
Run/Event: 177201 / 625786854  
Lumi section: 450

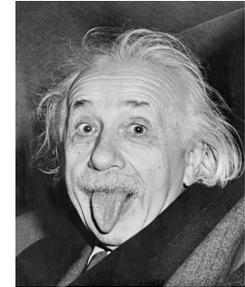
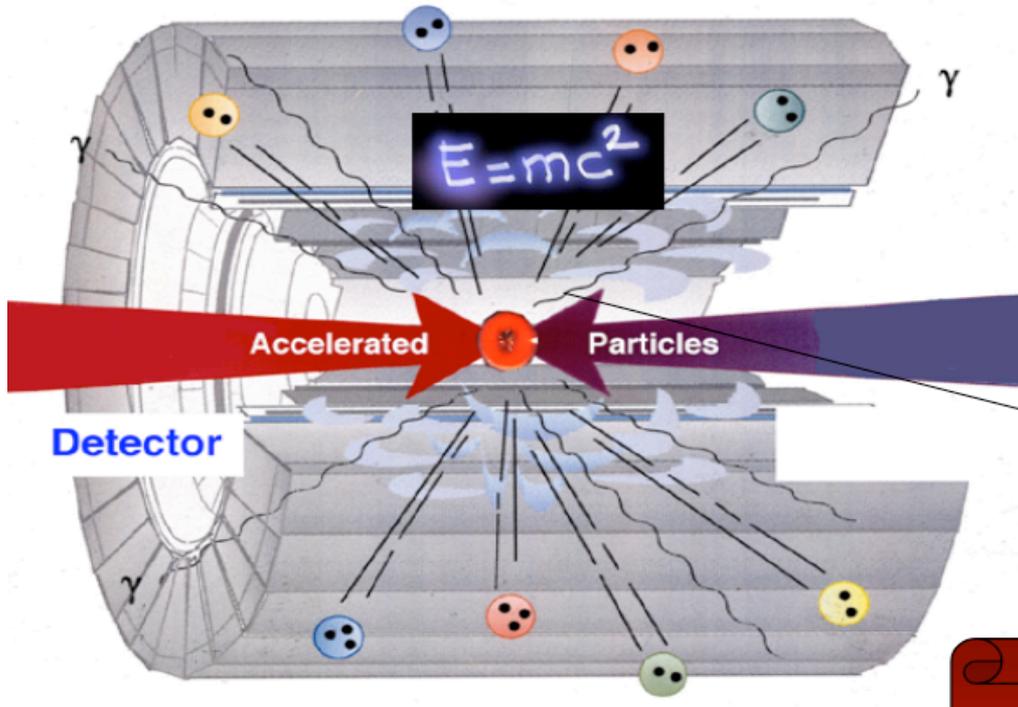
# Studiare il mondo sub-atomico



La fisica delle particelle guarda ai costituenti piu' piccoli della materia  
Gli acceleratori sono microscopi molto molto precisi, "*atto-scopi*"

$$\lambda = h/p : @LHC: E = 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} \Rightarrow \lambda \sim 10^{-18} \text{ m}$$

# Acceleratori di particelle



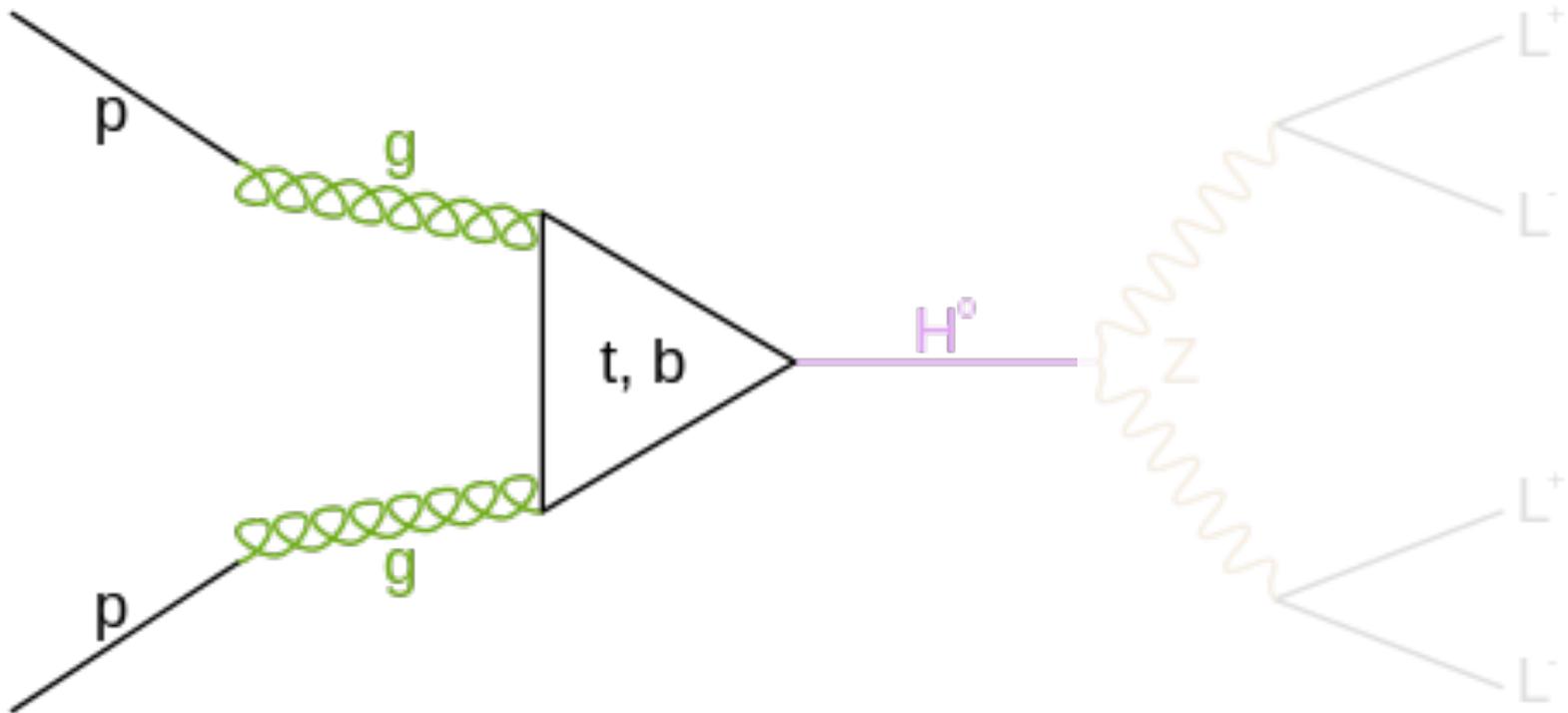
$$E = mc^2$$

Ovvero:  
L'energia si puo'  
trasformare in massa

In un acceleratore, l'energia delle particelle che si scontrano viene trasformata in altre particelle.

Tra queste c'e' (anche) il Bosone di Higgs, se l'energia lo permette

# Creare il Bosone di Higgs



# II CERN

Nel 1954 12 paesi europei tra cui l'Italia costituiscono il CERN (Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare)

The Twenty Member States of CERN



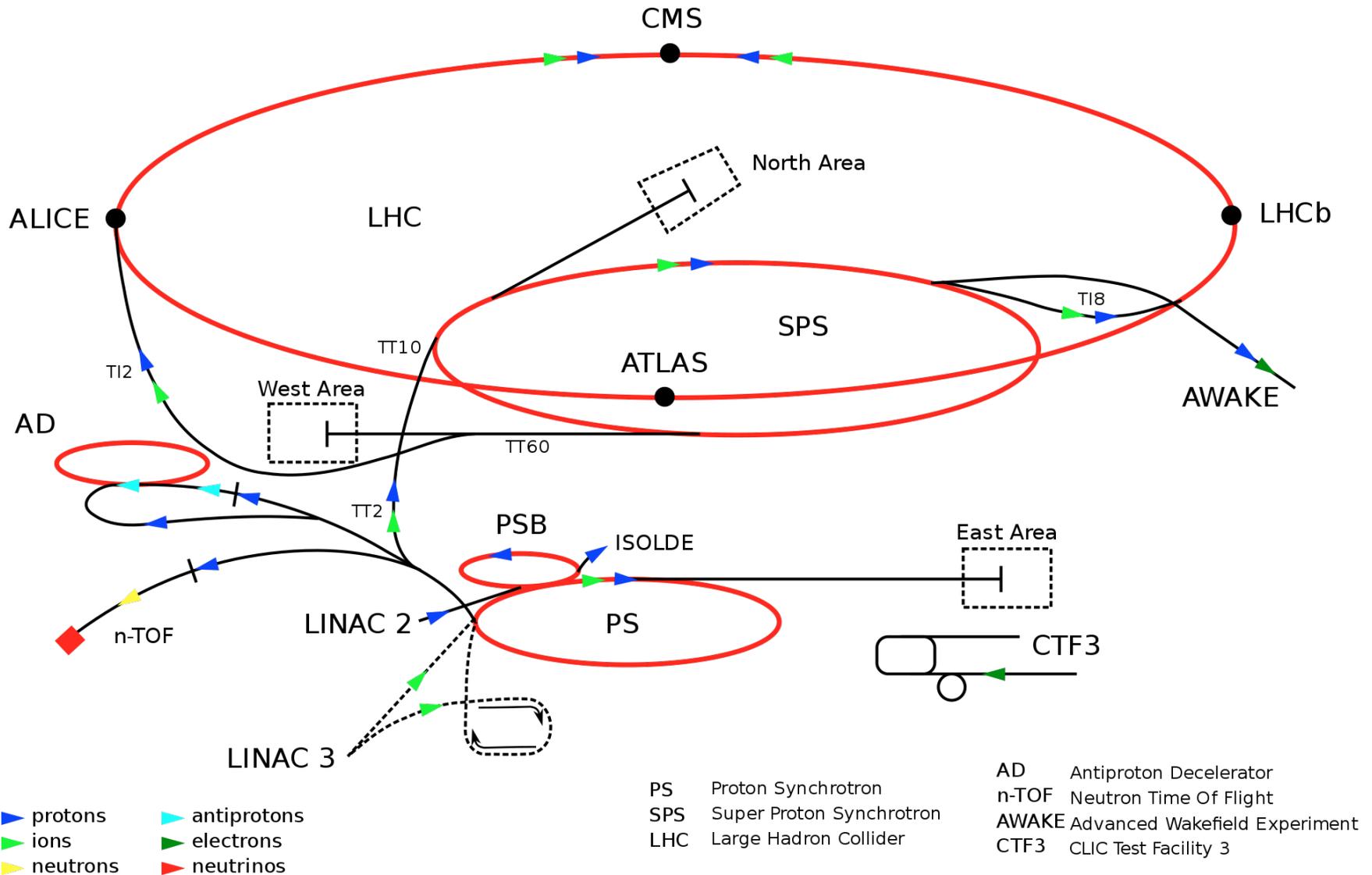
Member States (Dates of Accession)

AUSTRIA (1959)	DENMARK (1955)	GREECE (1959)	KOREA (1956)	SPAIN (1959-62, 1963, 1980)
BELGIUM (1955)	FRANCE (1955)	ITALY (1955)	NORWAY (1955)	SWEDEN (1955)
CZECHIA (1960)	GERMANY (1955)	NETHERLANDS (1955)	PORTUGAL (1963)	SWITZERLAND (1955)
	BELGIUM (1963)	FRANCE (1962)	POLAND (1961)	

Ogni paese membro contribuisce in base al PIL. L'Italia contribuisce per circa il 12% al budget del laboratorio

Quattro sono stati i direttori Italiani del CERN: Edoardo Amaldi, Carlo Rubbia, Luciano Maiani e Fabiola Gianotti

# Il complesso di acceleratori del CERN



# Il Large Hadron Collider @ CERN

LHC è un acceleratore di **protoni**



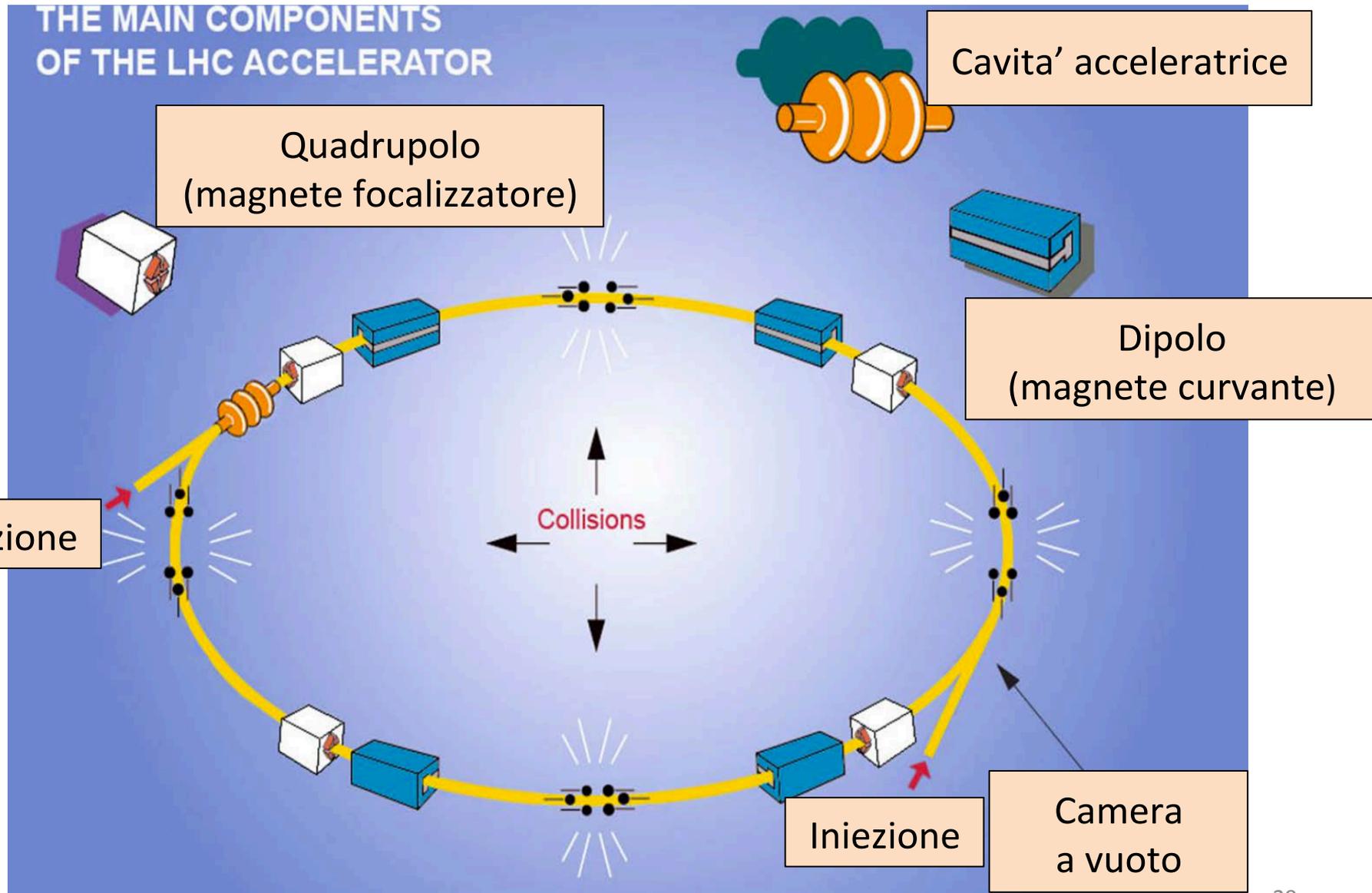
Situato in una galleria  
sotterranea lunga 27 Km  
tra Francia e Svizzera

I protoni sono accelerati  
ad un'energia di  
6.5+6.5 TeV

Frontiera dell'energia

Scopo: riprodurre le condizioni del Big-Bang, studiare fenomeni mai osservati

# Principali componenti di LHC



# I magneti di LHC

I protoni mantengono la loro orbita grazie a campi magnetici molto intensi

1232 x 15 m dipoli magnetici *super-conduttori*:

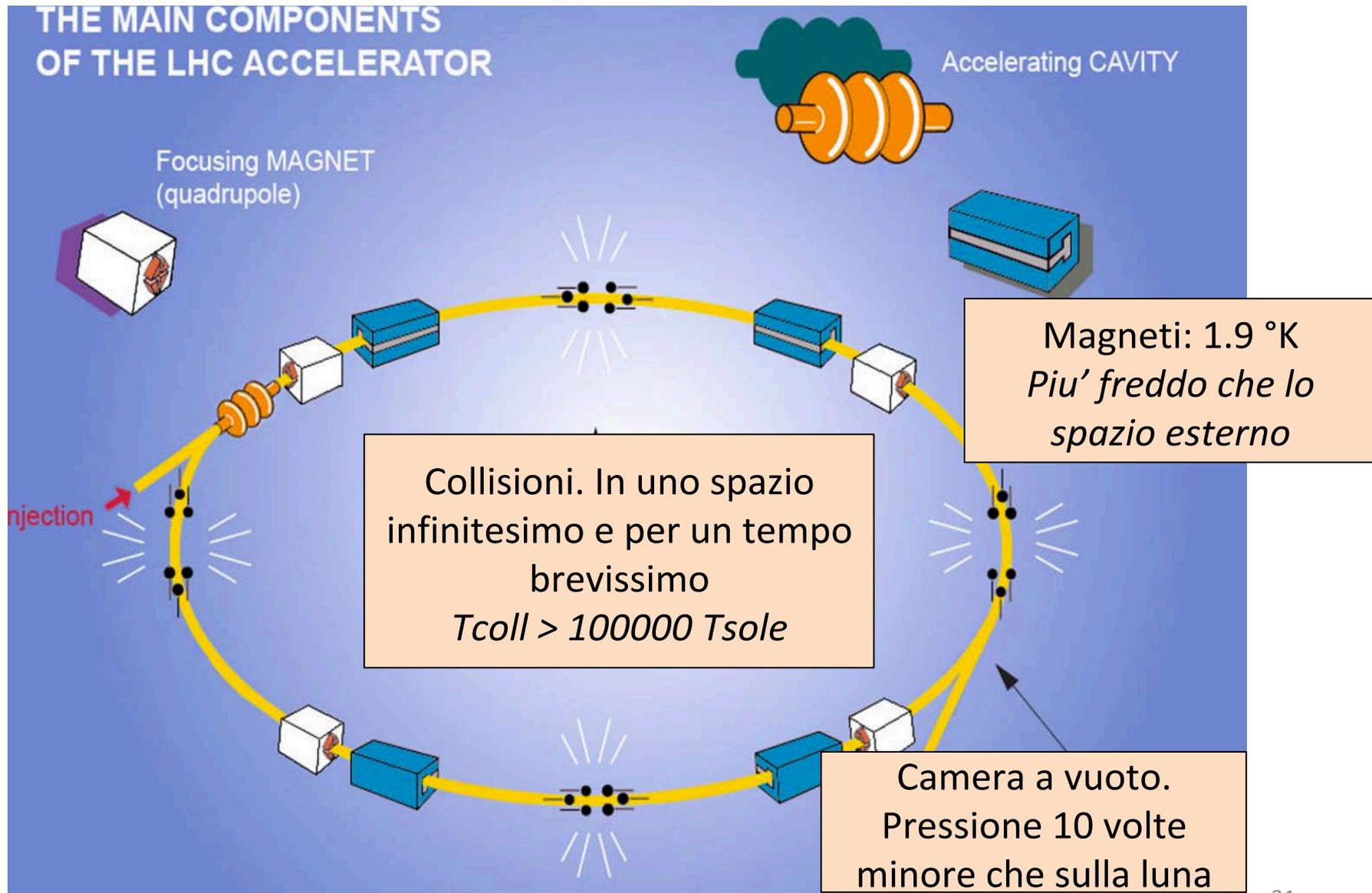
- $B = 8.3 \text{ T}$  ( $\sim 100.000$  campo magnetico terrestre)
- Raffreddati ad elio liquido:  $-271.25^\circ\text{C} = 1.9 \text{ }^\circ\text{K}$
- $I = 12000 \text{ A}$  (*utenze domestiche:  $\sim 13 \text{ A}$* )



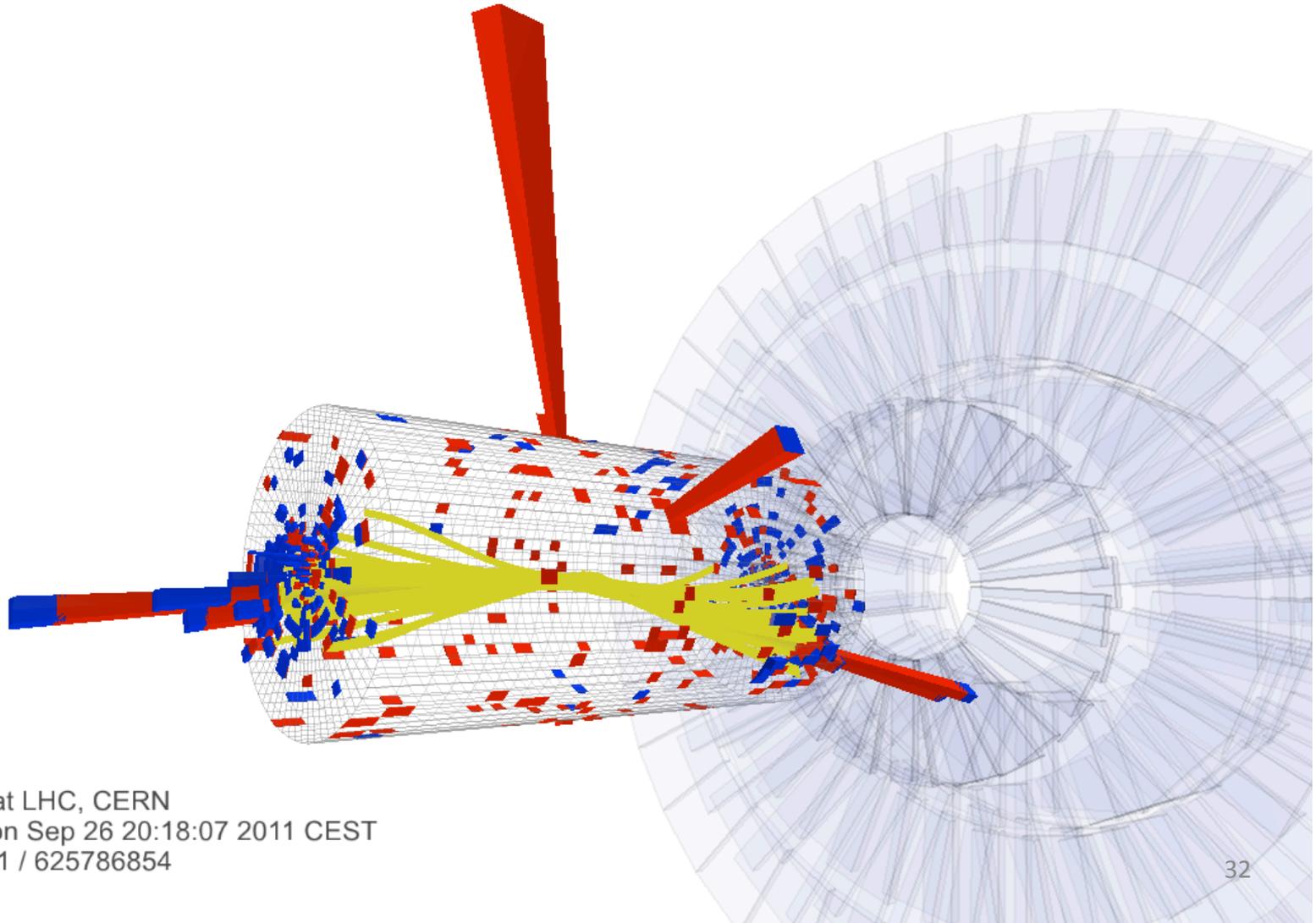
*Grande sfida tecnologica!*

1/3 dei magneti di LHC  
fabbricati in Italia, da Ansaldo SC

# I record di LHC



# Come si osserva un Bosone di Higgs

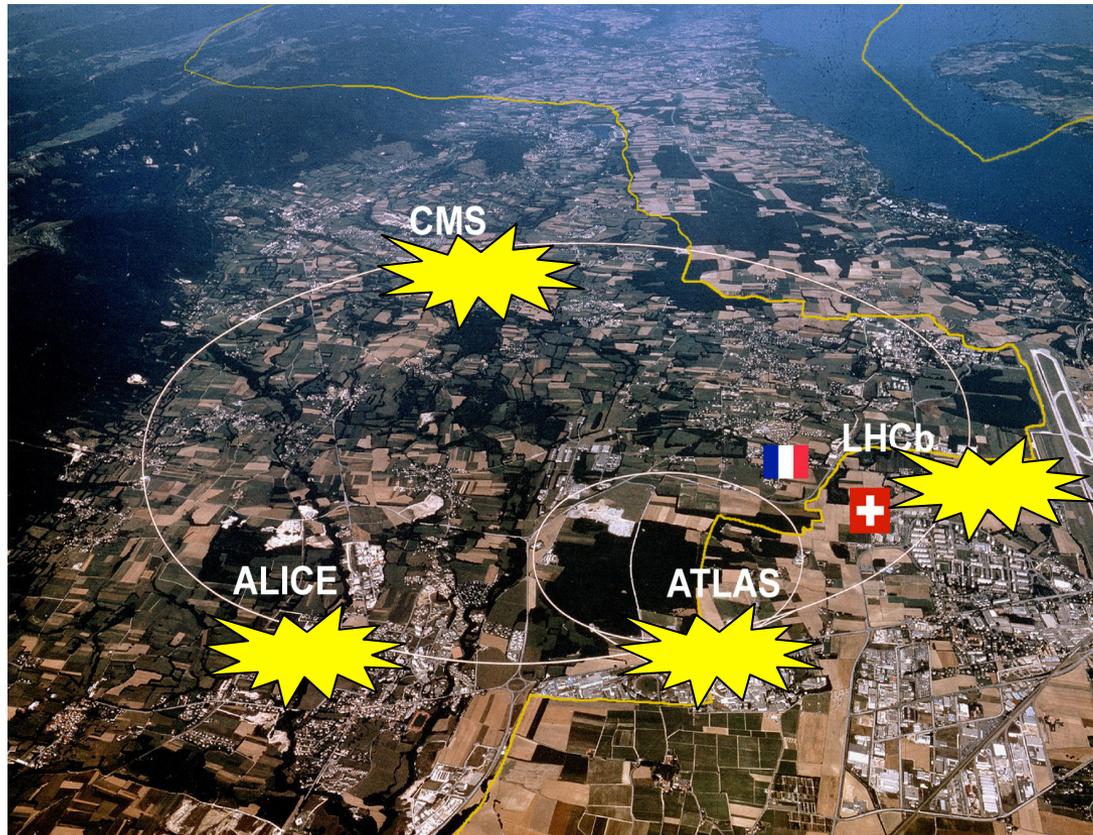


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST  
Run/Event: 177201 / 625786854  
Lumi section: 450

# Rivelatori agli acceleratori

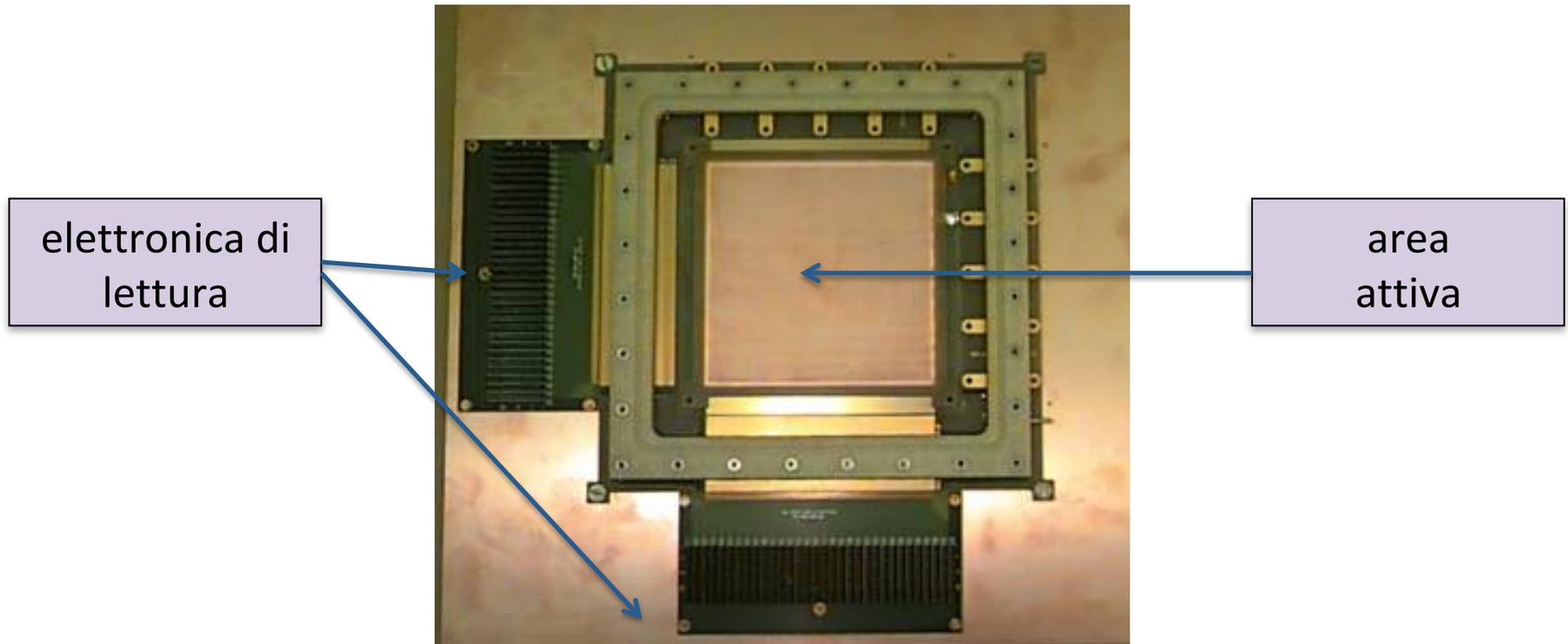
Il rivelatore di particelle si colloca nel punto di interazione per

- Identificare il tipo di particella
- Misurarne la carica, l'energia ...



4 grandi esperimenti a LHC: **ATLAS**, **CMS**, LHCb e ALICE

# Cos'è un rivelatore di particelle



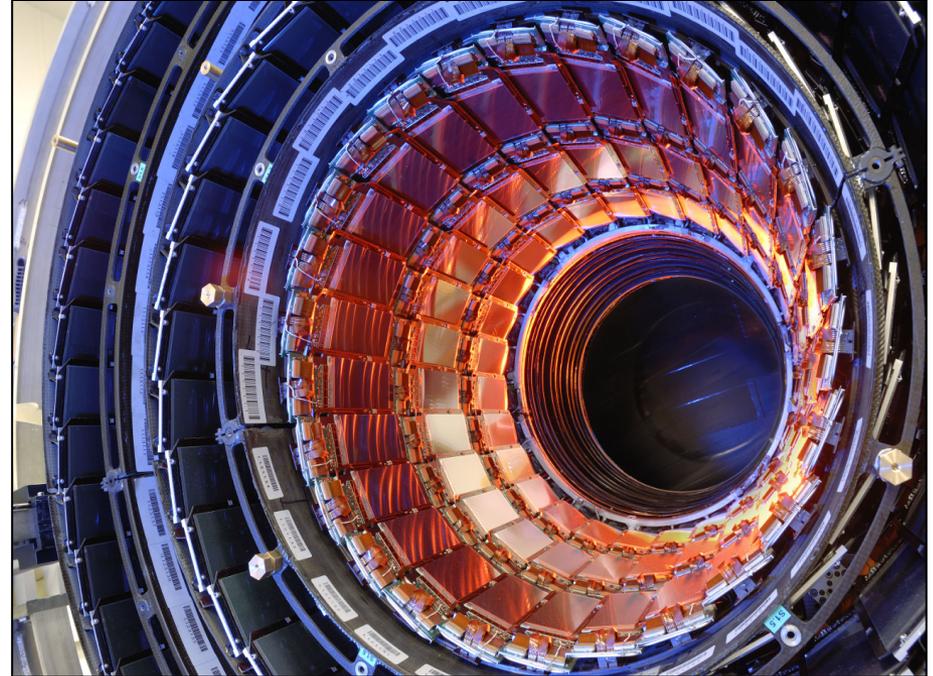
È uno strumento che produce un *segnale osservabile* quando viene colpito da una particella.

Solitamente è costituito da un *elemento attivo* (con cui interagisce la radiazione) e da un *sistema di lettura* (che forma il segnale e lo invia all'acquisizione dati)

# Tecnologie differenti e in evoluzione



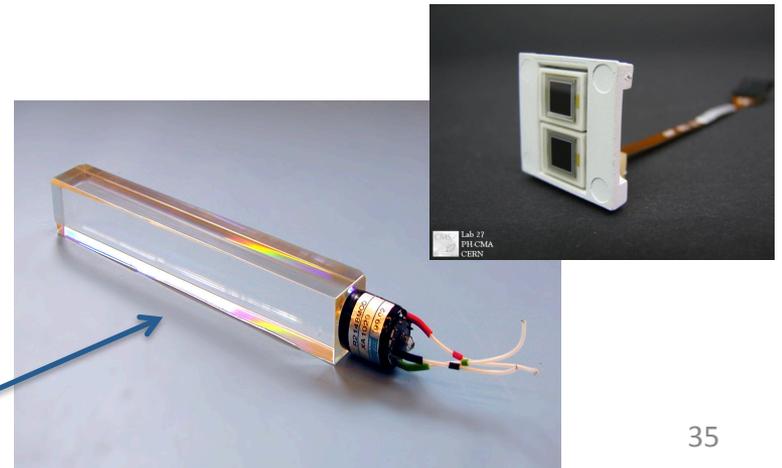
“Gargamelle” (1970-1978)  
Camera a bolle



CMS ( oggi @LHC):

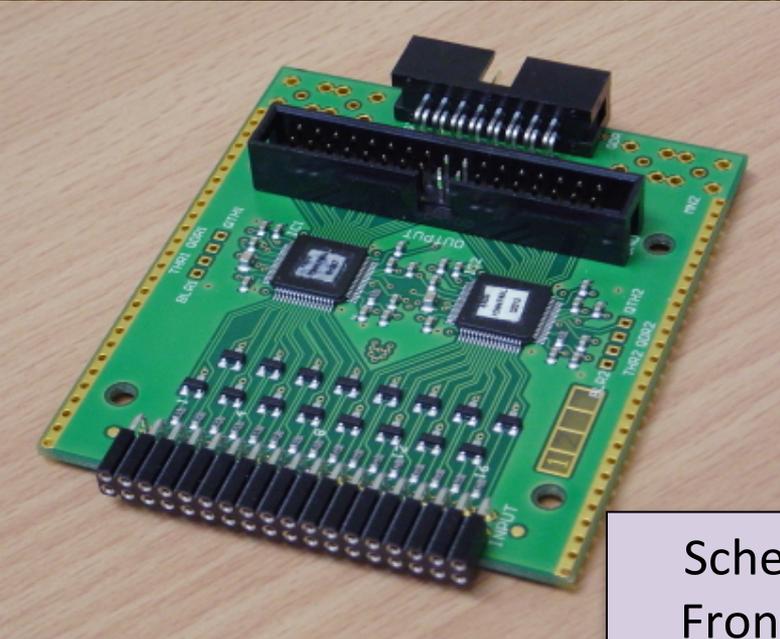
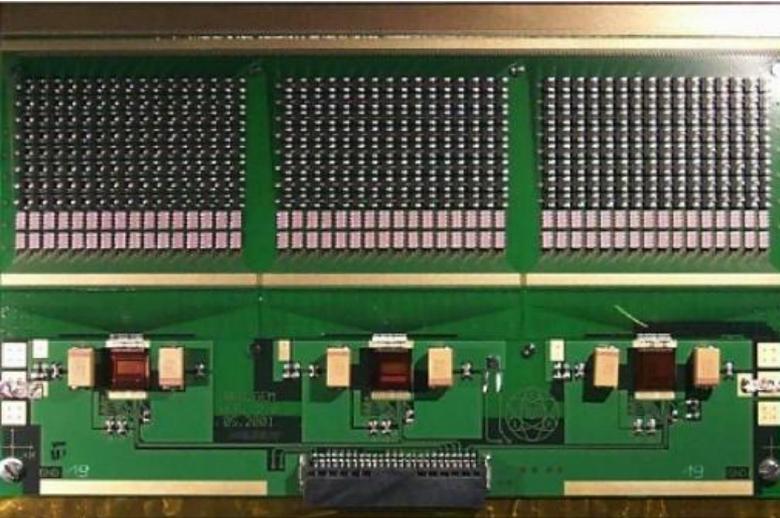
Es. Tracciatore al Silicio

Es. Calorimetro a cristalli scintillanti di  $\text{PbWO}_4$

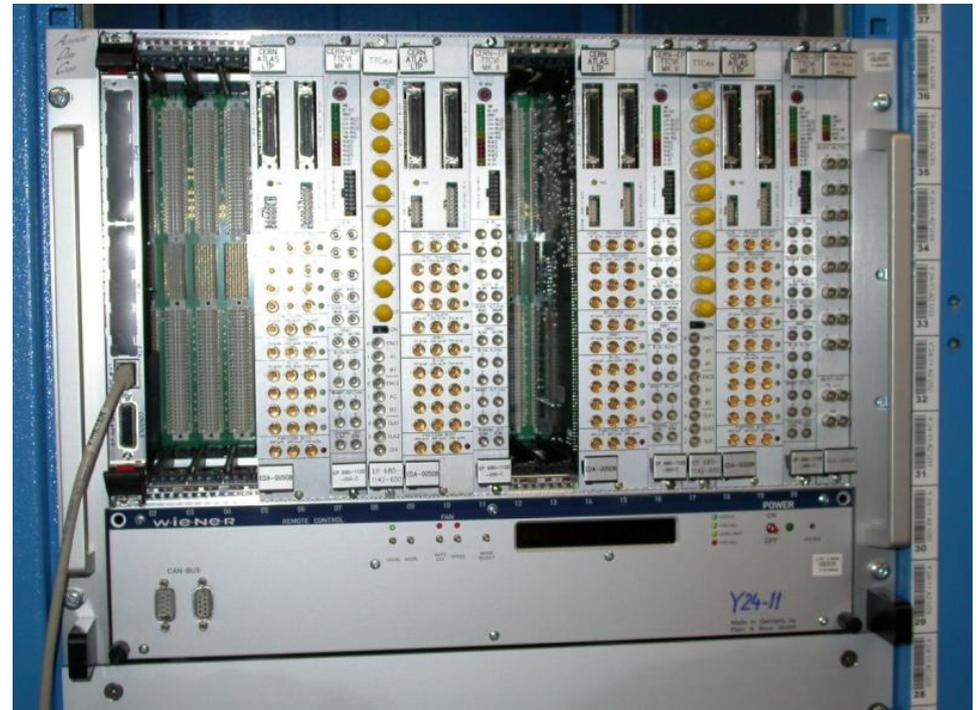


# Elettronica di lettura

Per analizzare i segnali dei rivelatori si usa *elettronica altamente specializzata*. I segnali vengono inviati a complessi *sistemi di acquisizione* che li analizzano e li memorizzano



Schede di  
Front-end



Schede di  
acquisizione

# Rivelatori a LHC

4 rivelatori a LHC: **ATLAS**, **CMS**, LHCb e ALICE

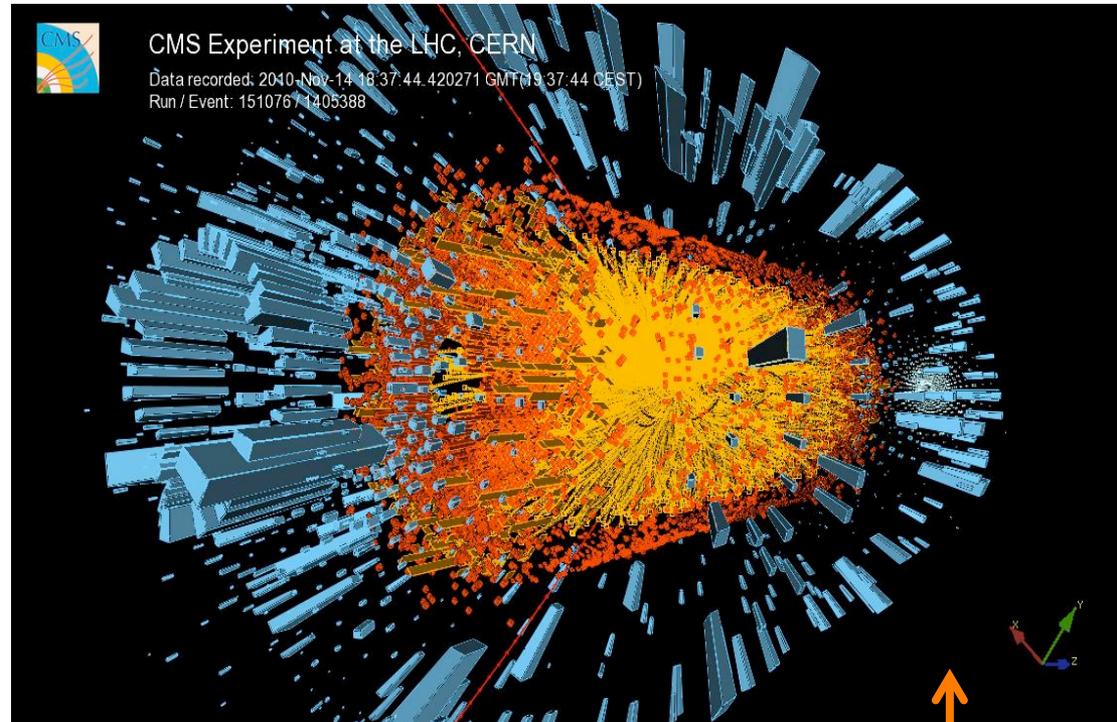
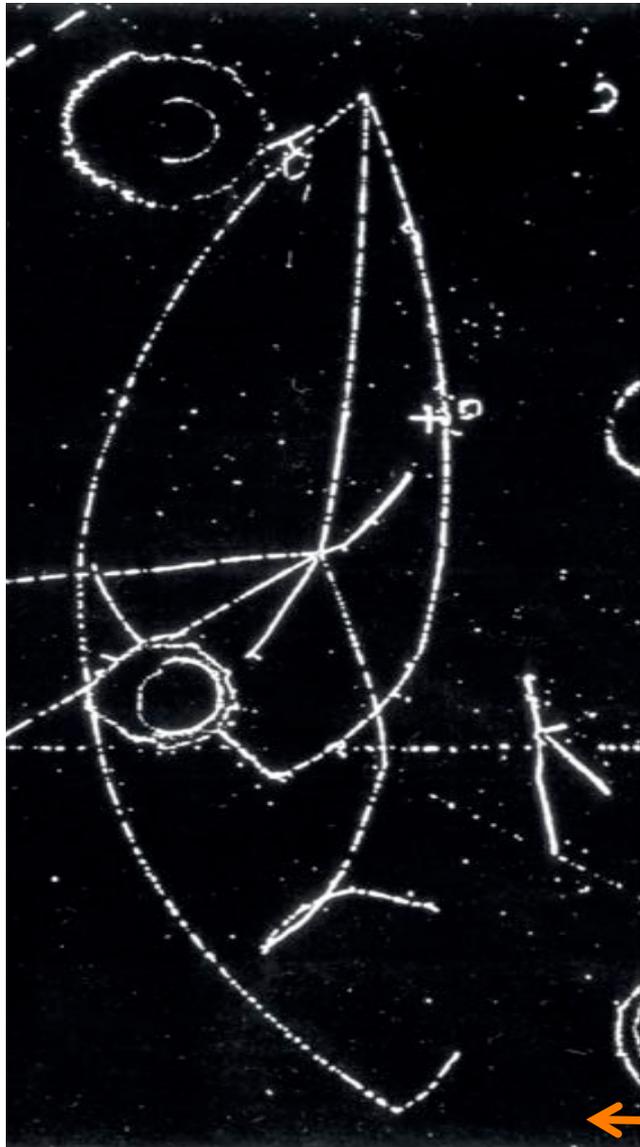
Sono tra i più complessi strumenti scientifici mai costruiti

- Devono funzionare per più di 10 anni in un ambiente ostile senza o con poco intervento umano

## Gigantesche macchine fotografiche

- Un rivelatore tipico di LHC ha 100 milioni di canali
  - Una videocamera ha ~ 6 milioni di pixels
- Scatta una “fotografia” in 3 dimensioni 40 milioni di volte al secondo
- Ovviamente non tutte vengono registrate!
  - Cruciale: selezionare eventi potenzialmente interessanti (“trigger”)

# Immagini di eventi



CMS @ LHC (oggi) – collisione Pb-Pb

“Gargamelle” (1970-1978)

# Struttura tipica di un rivelatore ad un acceleratore

Tanti “strati” cilindrici.  
Dal centro verso esterno:

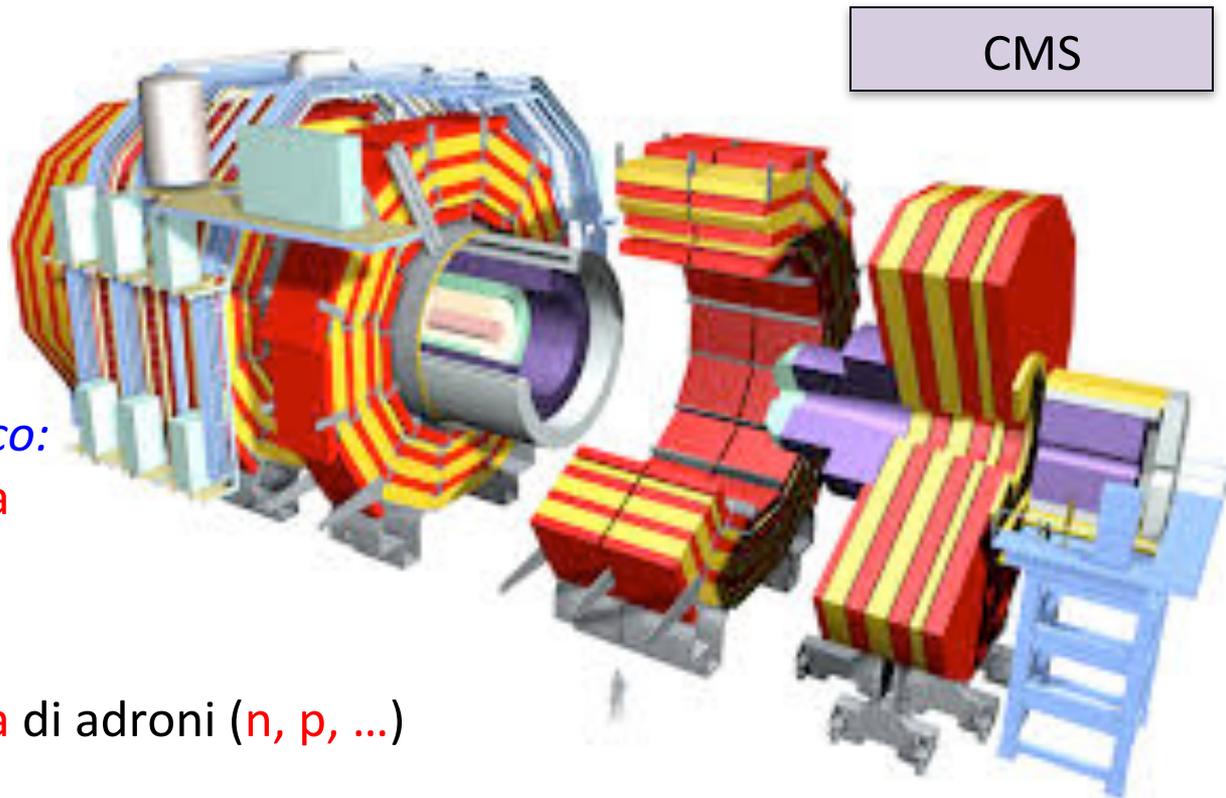
*Tracciatore* :  
ricostruire la **traiettoria**  
delle particelle **cariche**

*Calorimetro elettromagnetico*:  
**assorbire** e misurare **energia**  
di **elettroni** e **fotoni**

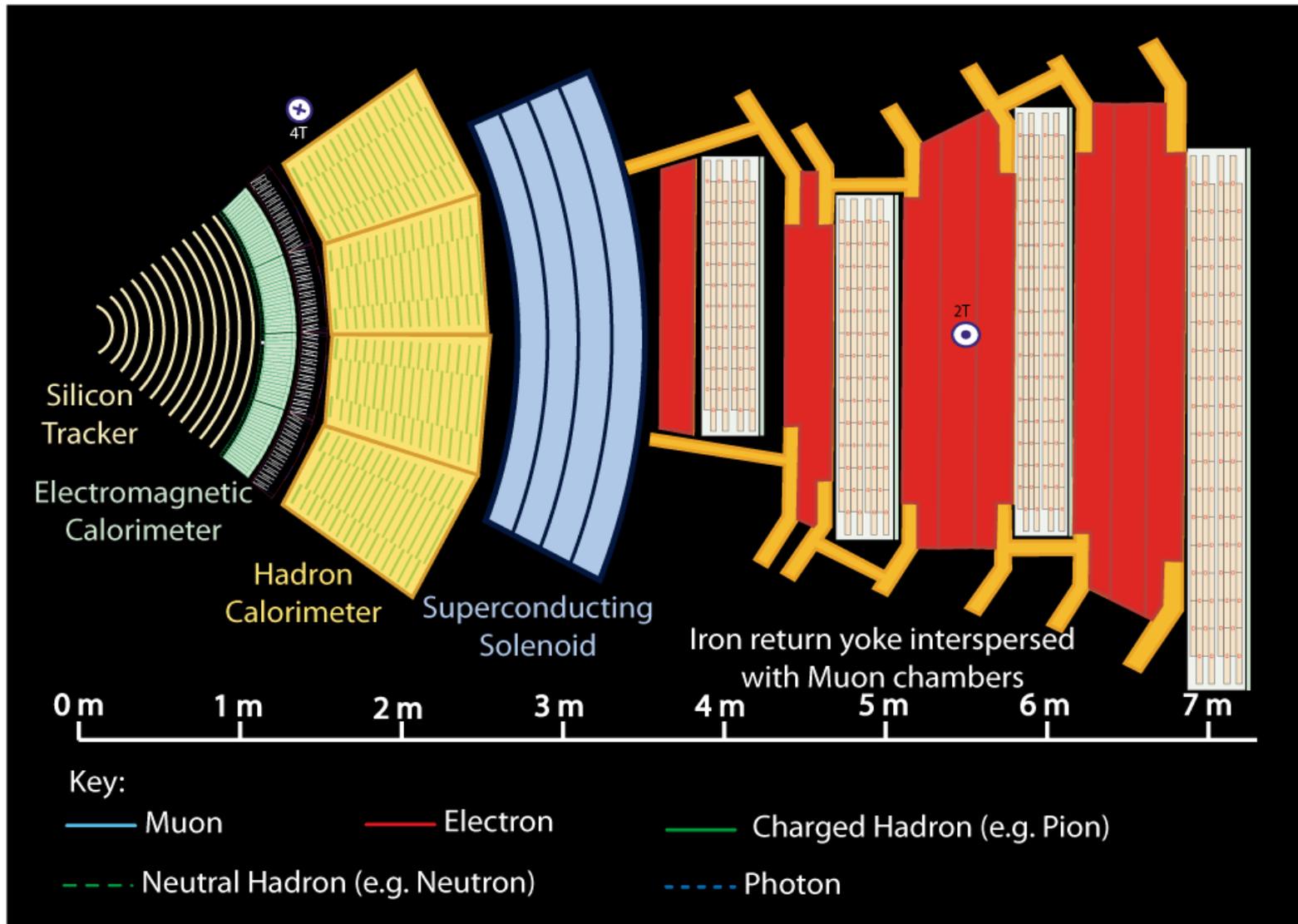
*Calorimetro adronico*:  
**assorbire** e misurare **energia** di adroni (**n**, **p**, ...)

*Campo magnetico*:  
deviare le particelle cariche e **misurarne la quantità di moto**

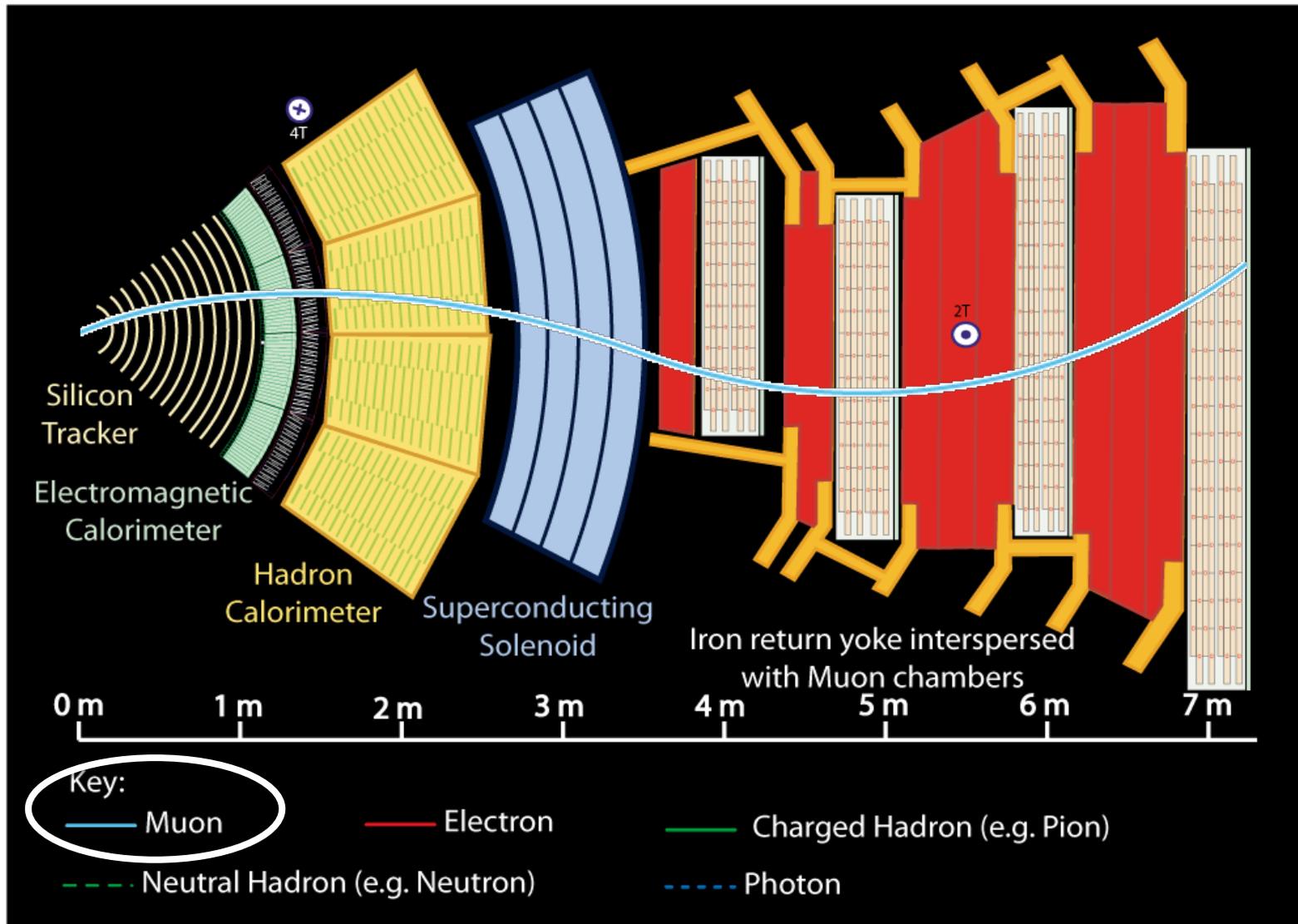
*Rivelatore di muoni*:  
tracciatore esterno



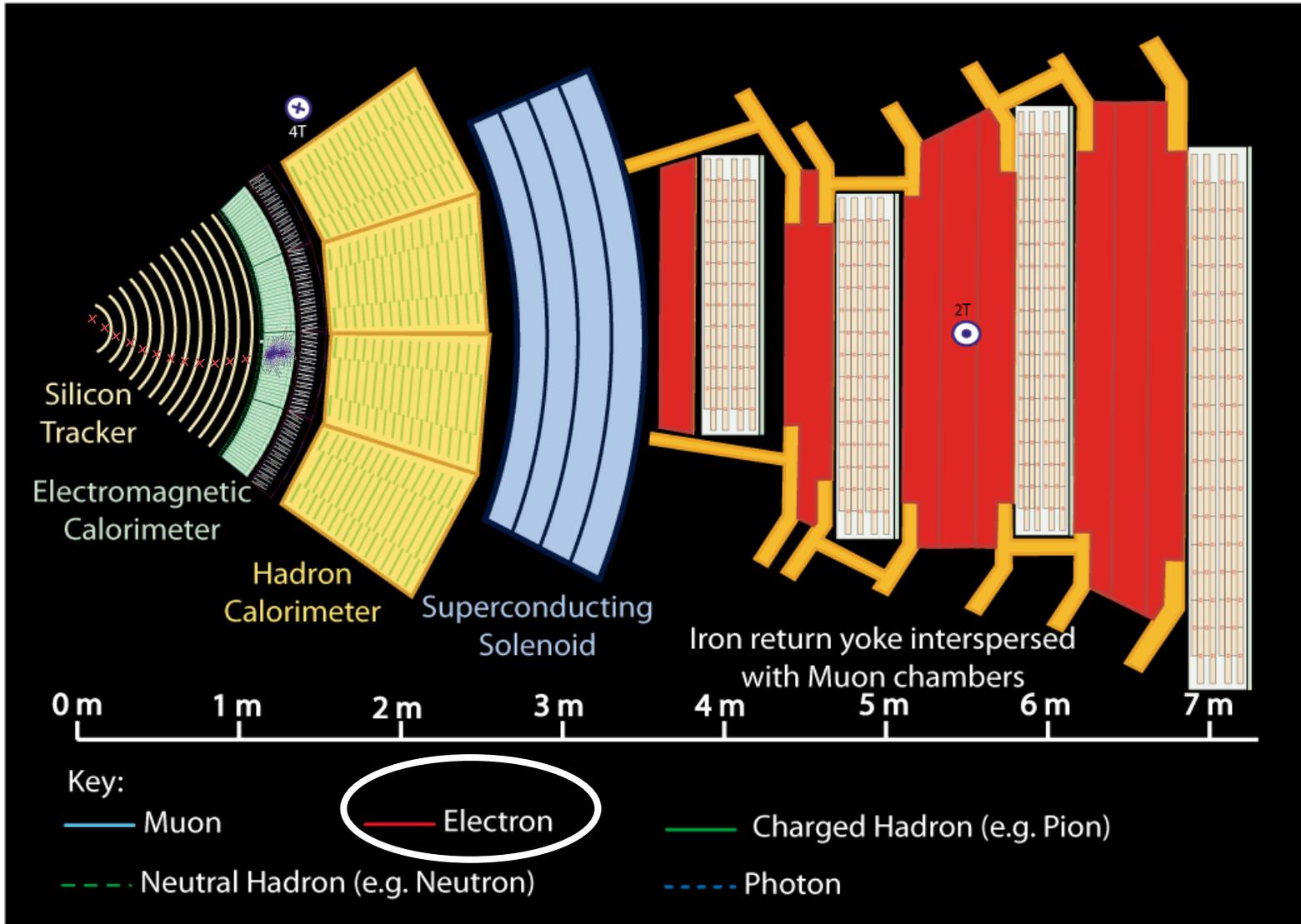
# Interazioni delle particelle nel rivelatore



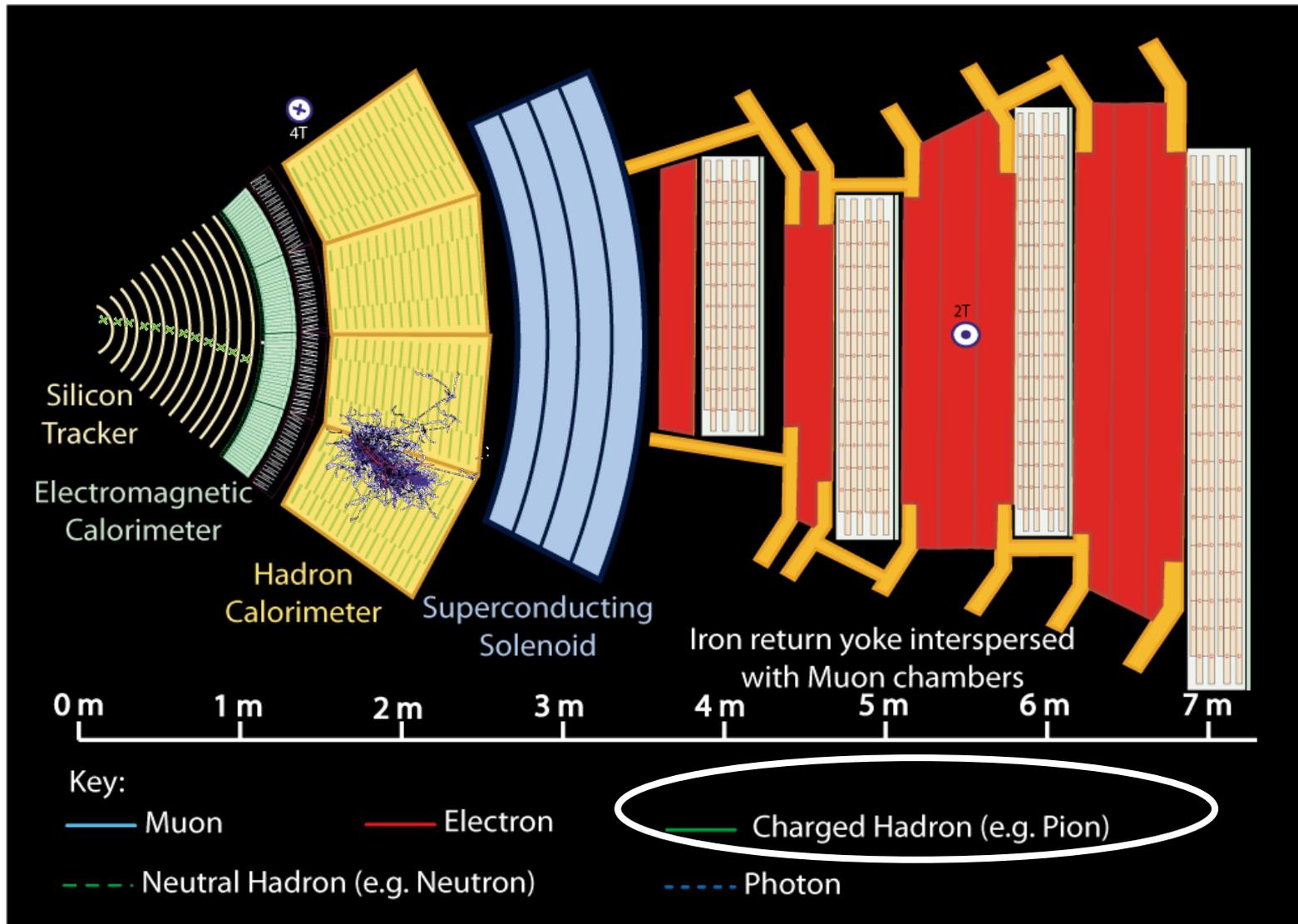
# Interazioni delle particelle nel rivelatore



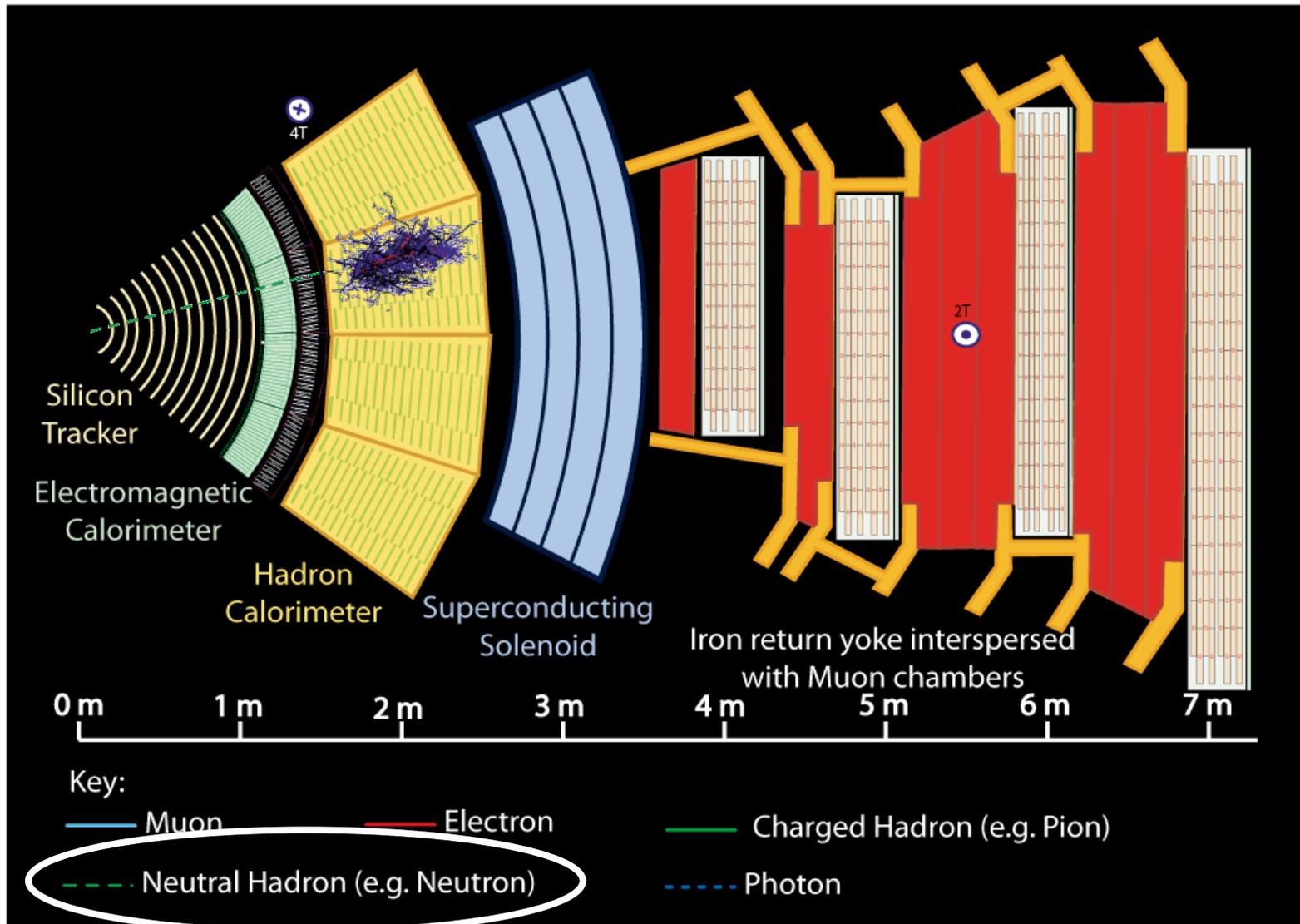
# Interazioni delle particelle nel rivelatore



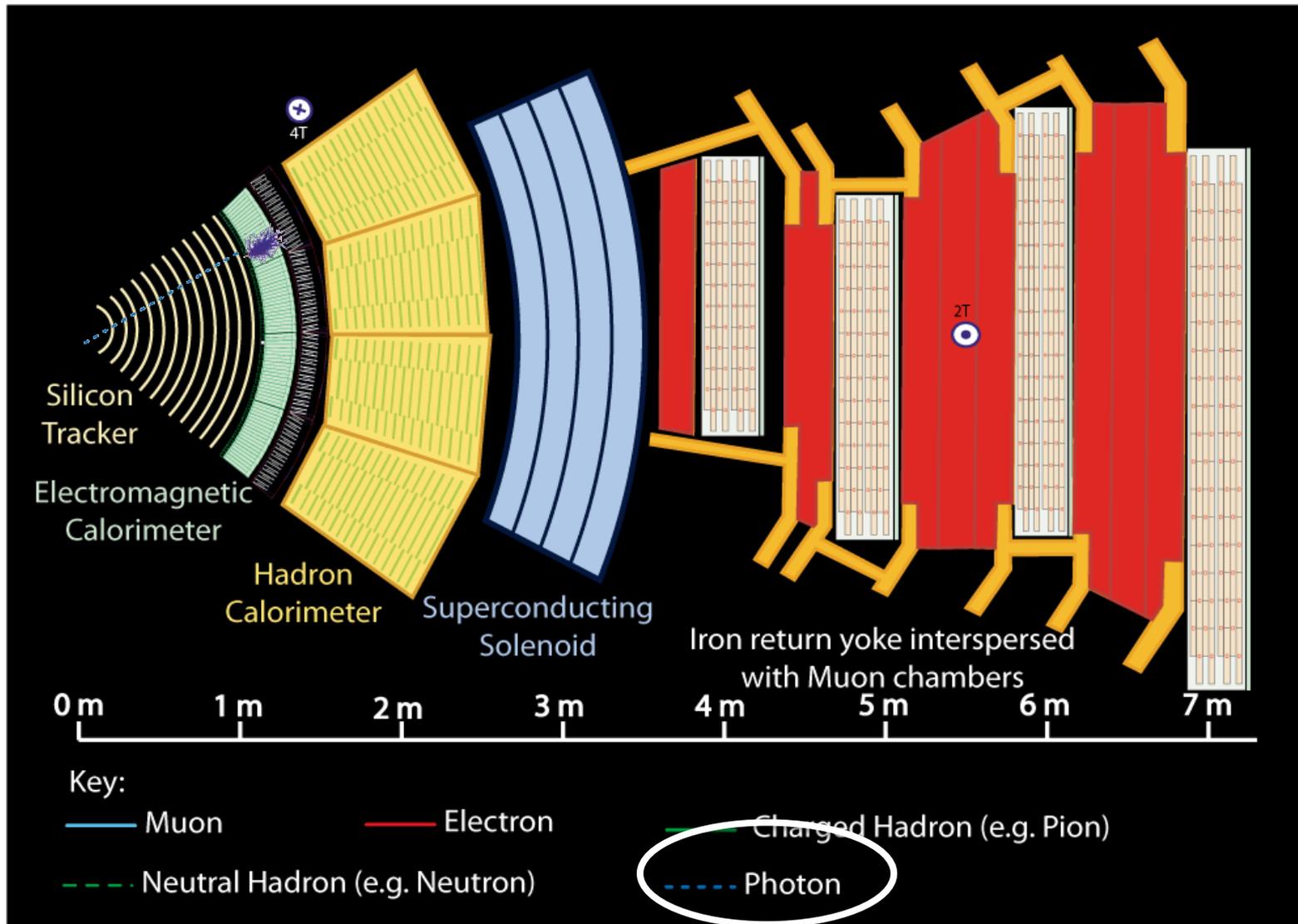
# Interazioni delle particelle nel rivelatore



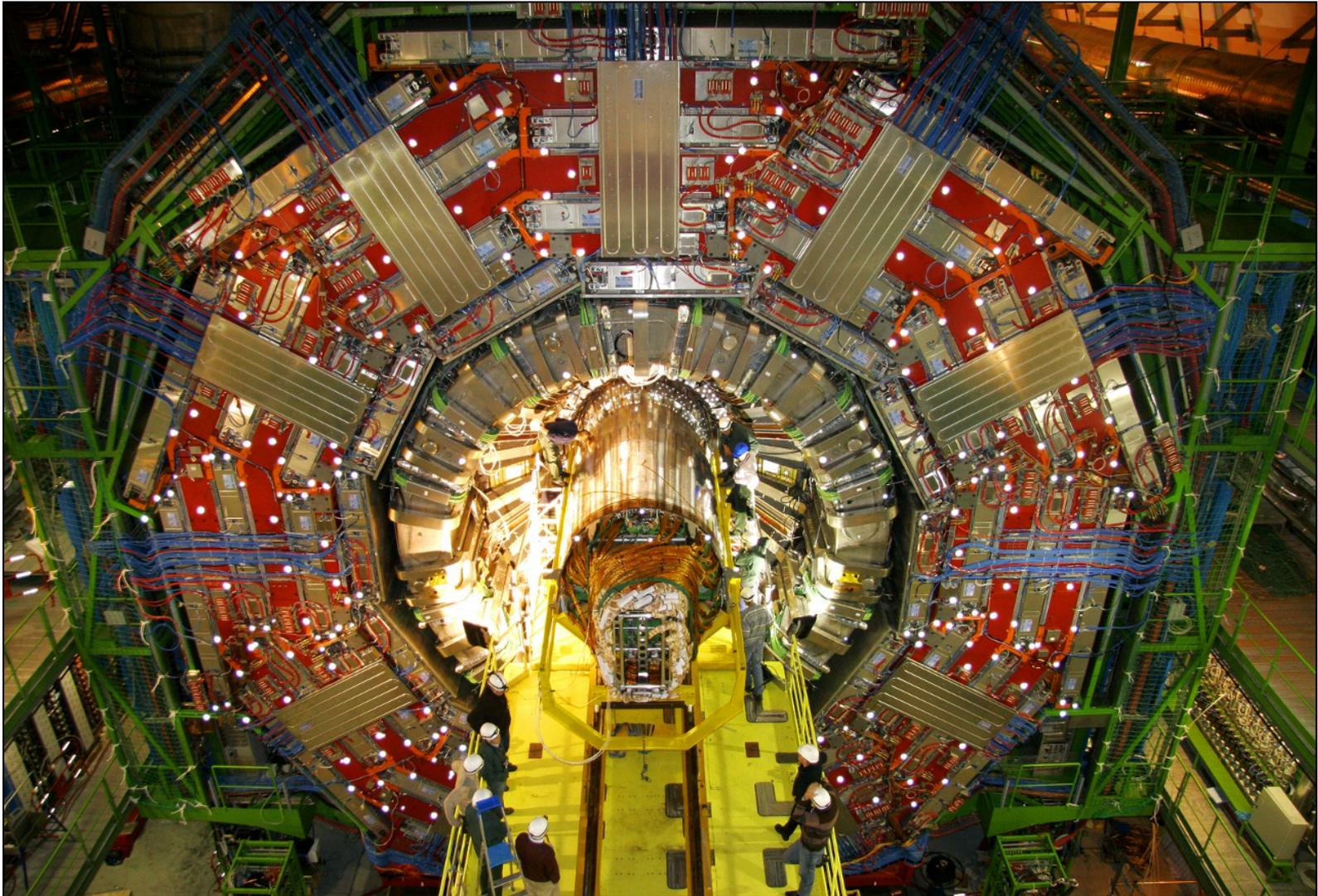
# Interazioni delle particelle nel rivelatore



# Interazioni delle particelle nel rivelatore



# Il rivelatore CMS



# Il rivelatore CMS

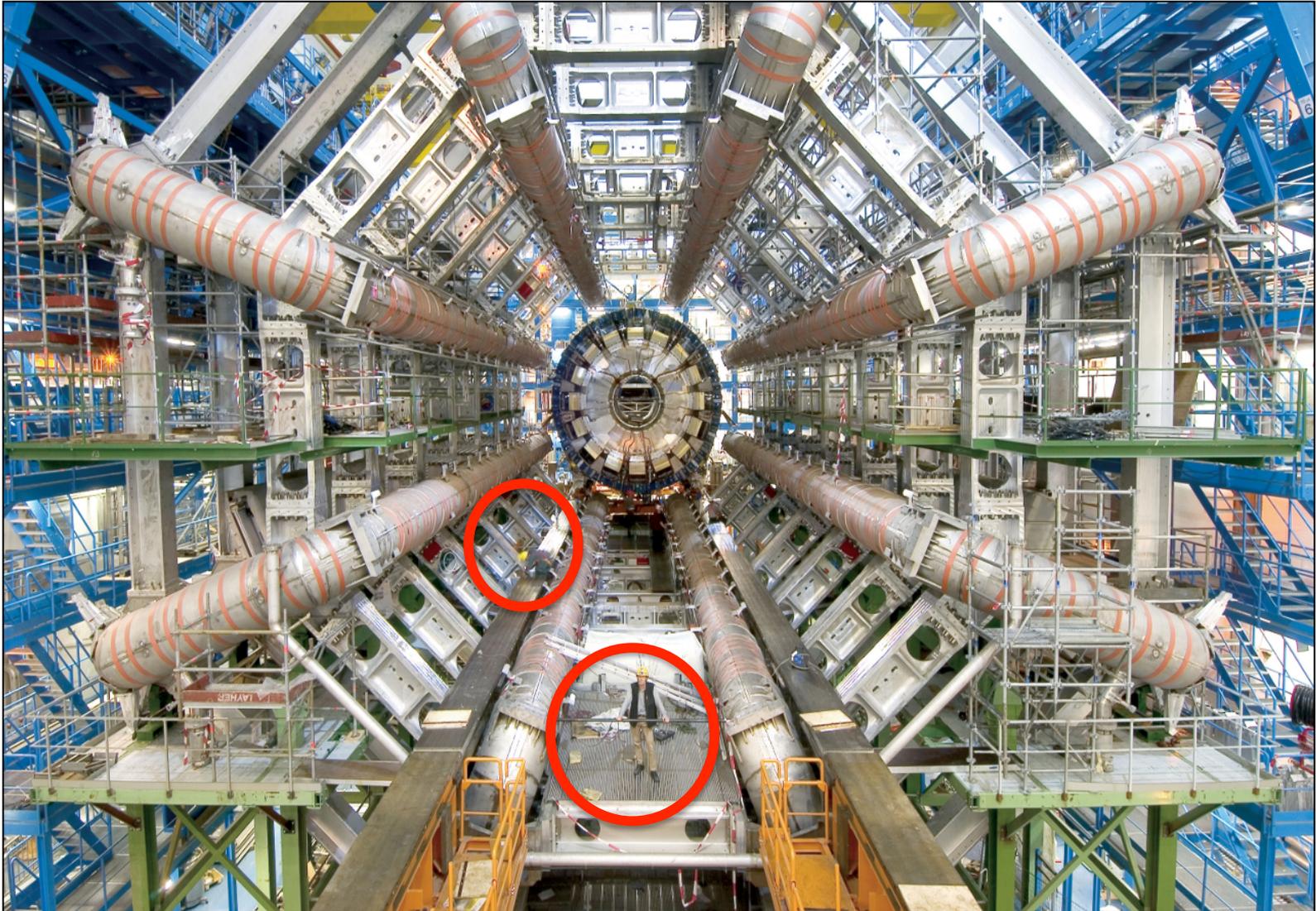


Peso: 12500 tonnellate  
Diametro : 15 m  
Lunghezza : 21,6 m  
Campo magnetico : 3.8 T

# Il calorimetro elettromagnetico di CMS (una piccola parte)

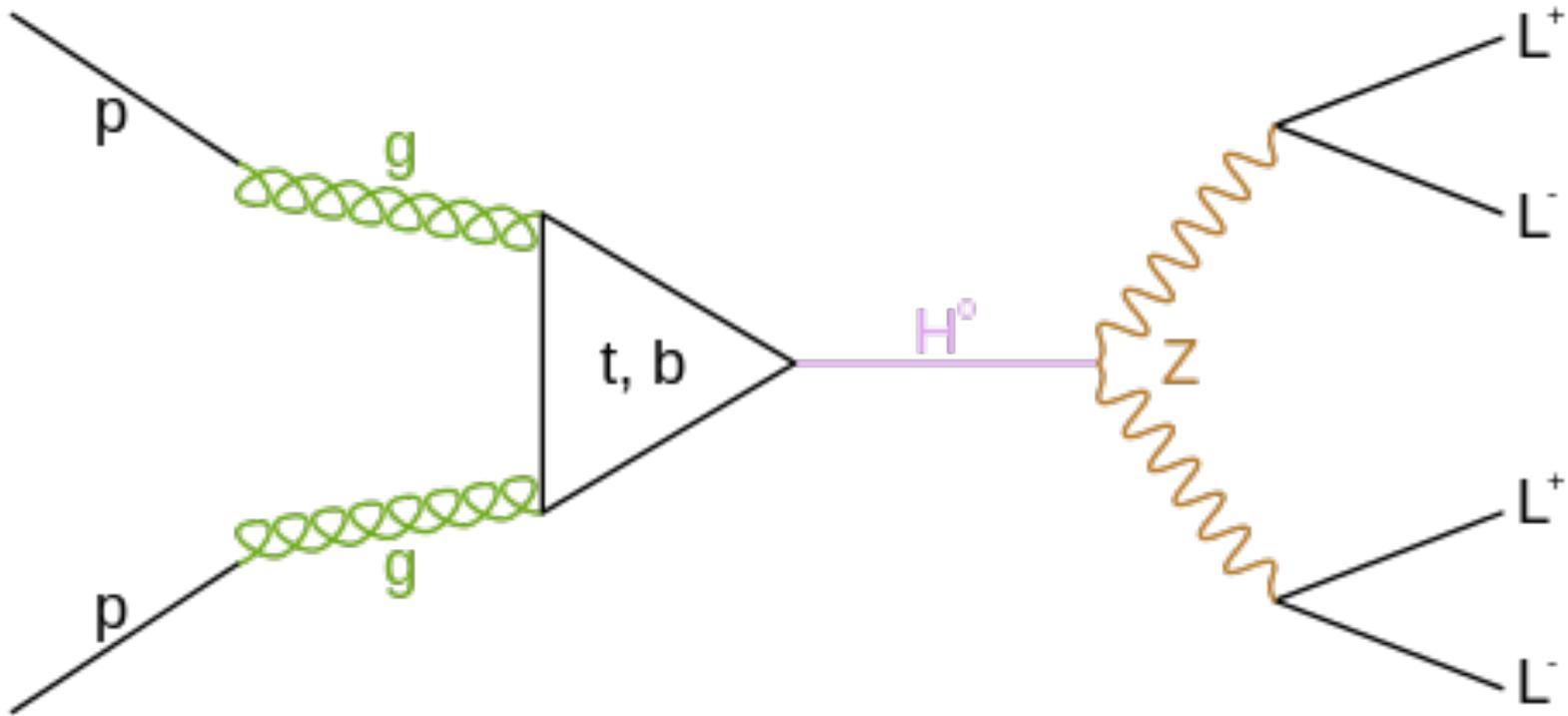


# Il rivelatore ATLAS



# Il decadimento del bosone di Higgs

Il Bosone di Higgs ( $M_H \approx 125 \text{ GeV}$ ) non e' stabile:  
decade in altre particelle e ha vita media  $t \approx 10^{-21} \text{ s}$

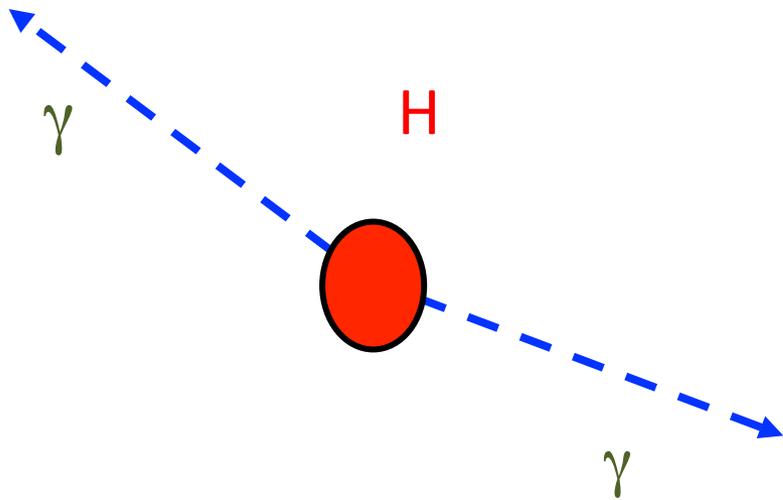


Non possiamo “vedere” la reazione, ma solo le particelle finali.

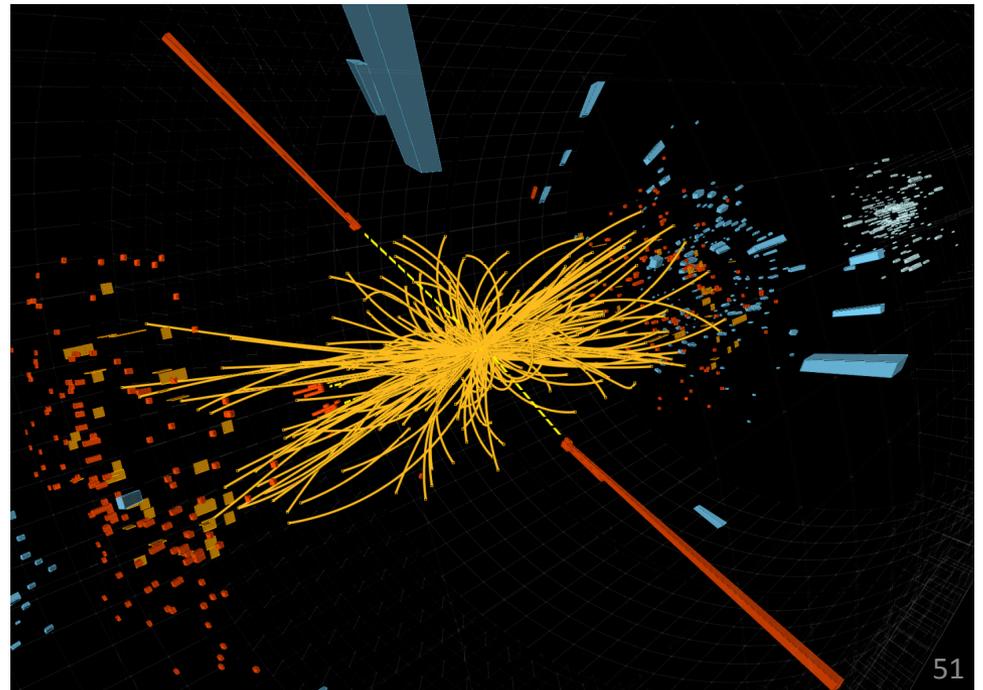
Ricostruiamo la massa del bosone misurando energia e direzioni delle particelle in cui decade (leggi di conservazione e cinematica relativistica)<sup>50</sup>

# Ricostruzione del bosone di Higgs

Tanti decadimenti diversi possibili. Concentriamoci solo su due:



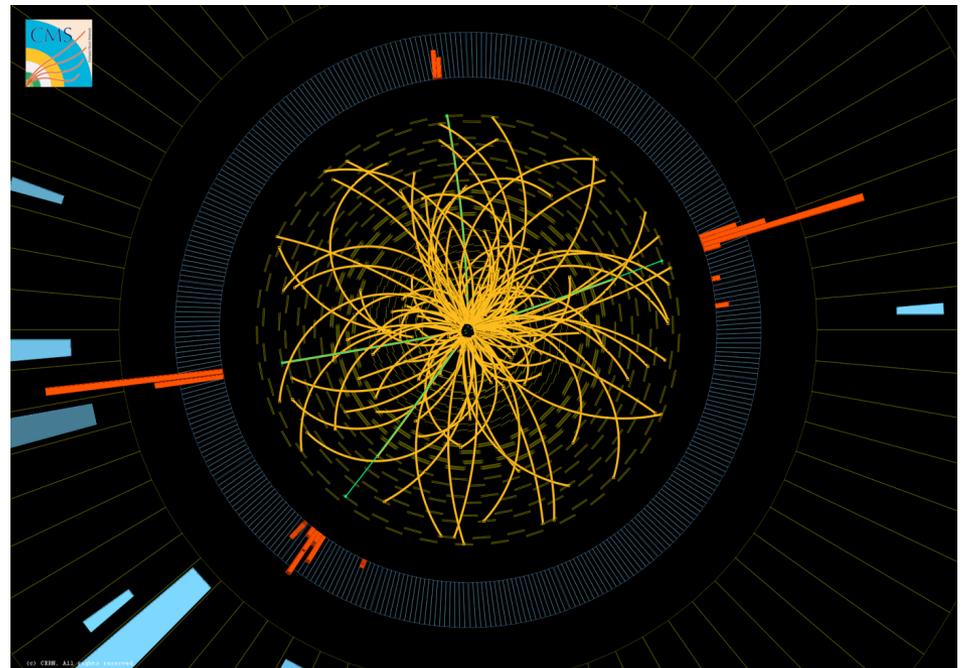
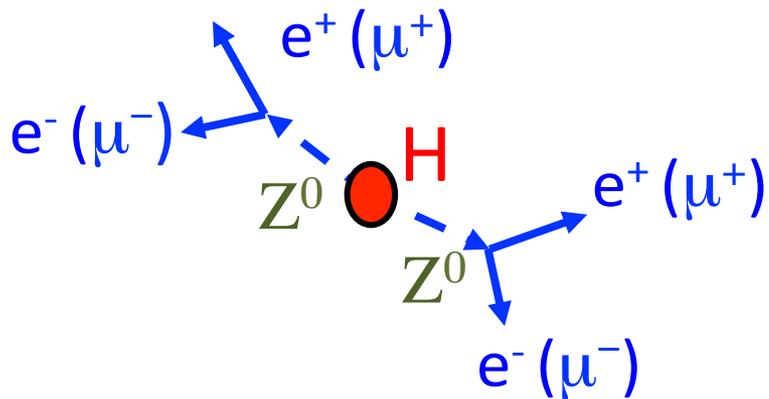
$H \rightarrow \gamma\gamma$   
*Stato finale: due fotoni  
isolati di alta energia*



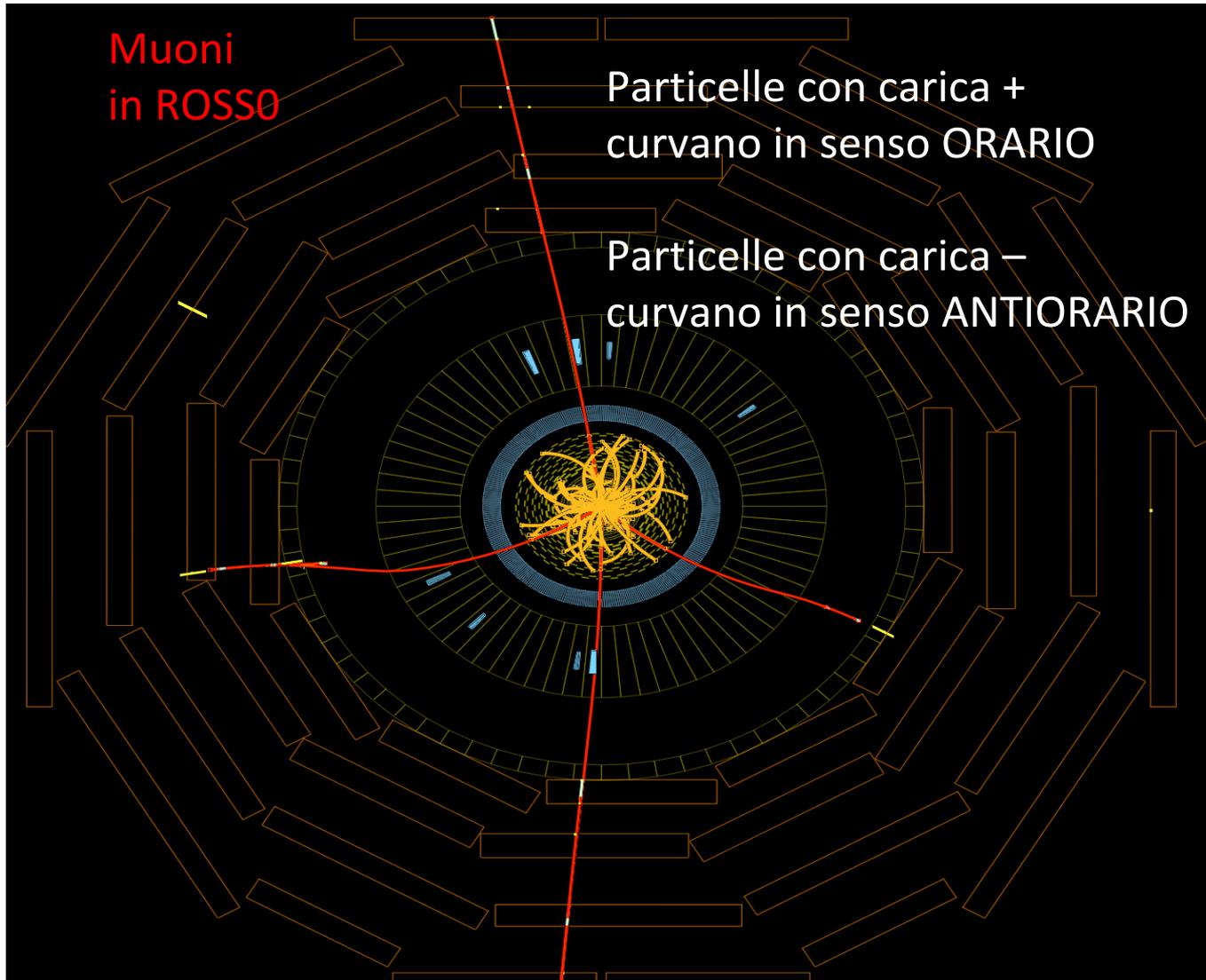
# Ricostruzione del bosone di Higgs

Tanti decadimenti diversi possibili. Concentriamoci solo su due:

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$   
*Stato finale: 4 leptoni ( $e^\pm, \mu^\pm$ )  
isolati, di alta energia e  
carica elettrica opposta*

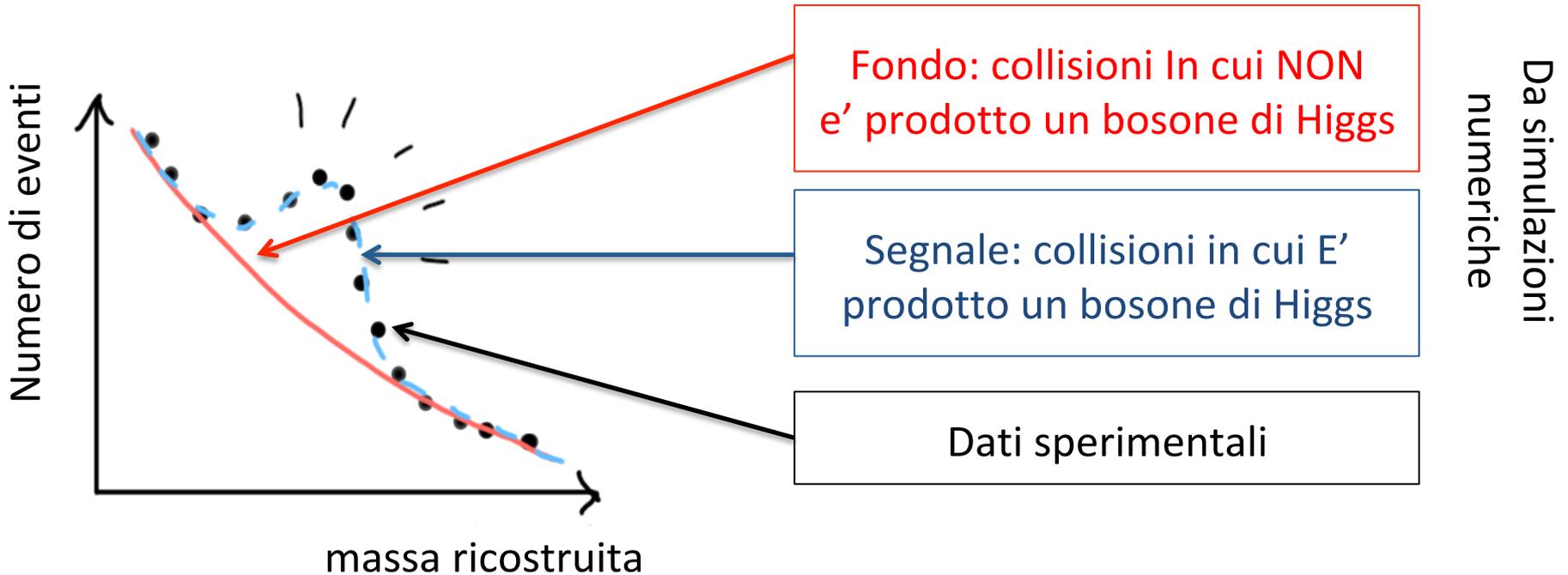


# Higgs?



# Scoprire una nuova particella

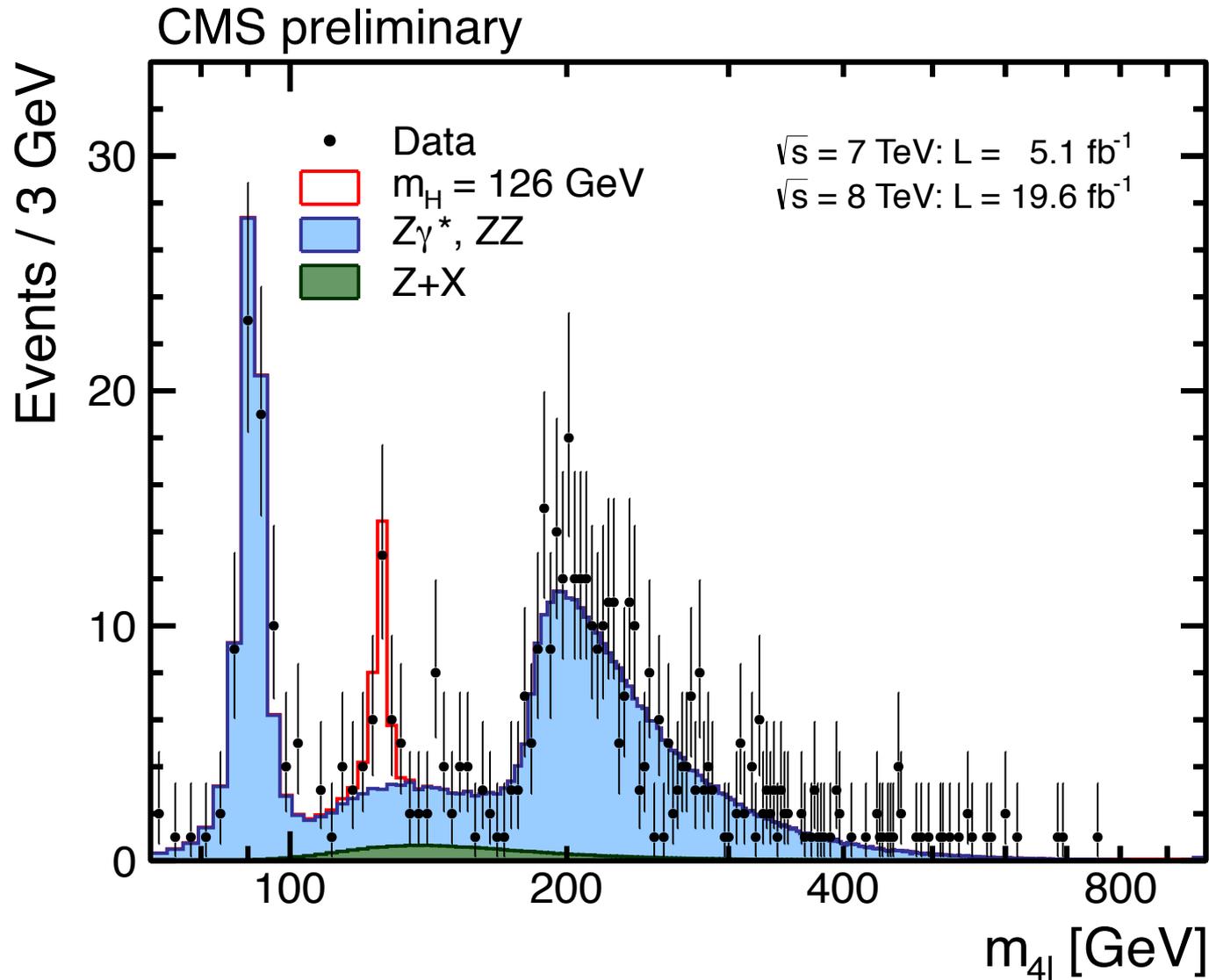
Ci sono tanti processi che possono avere 2 fotoni o 4 leptoni nello stato finale



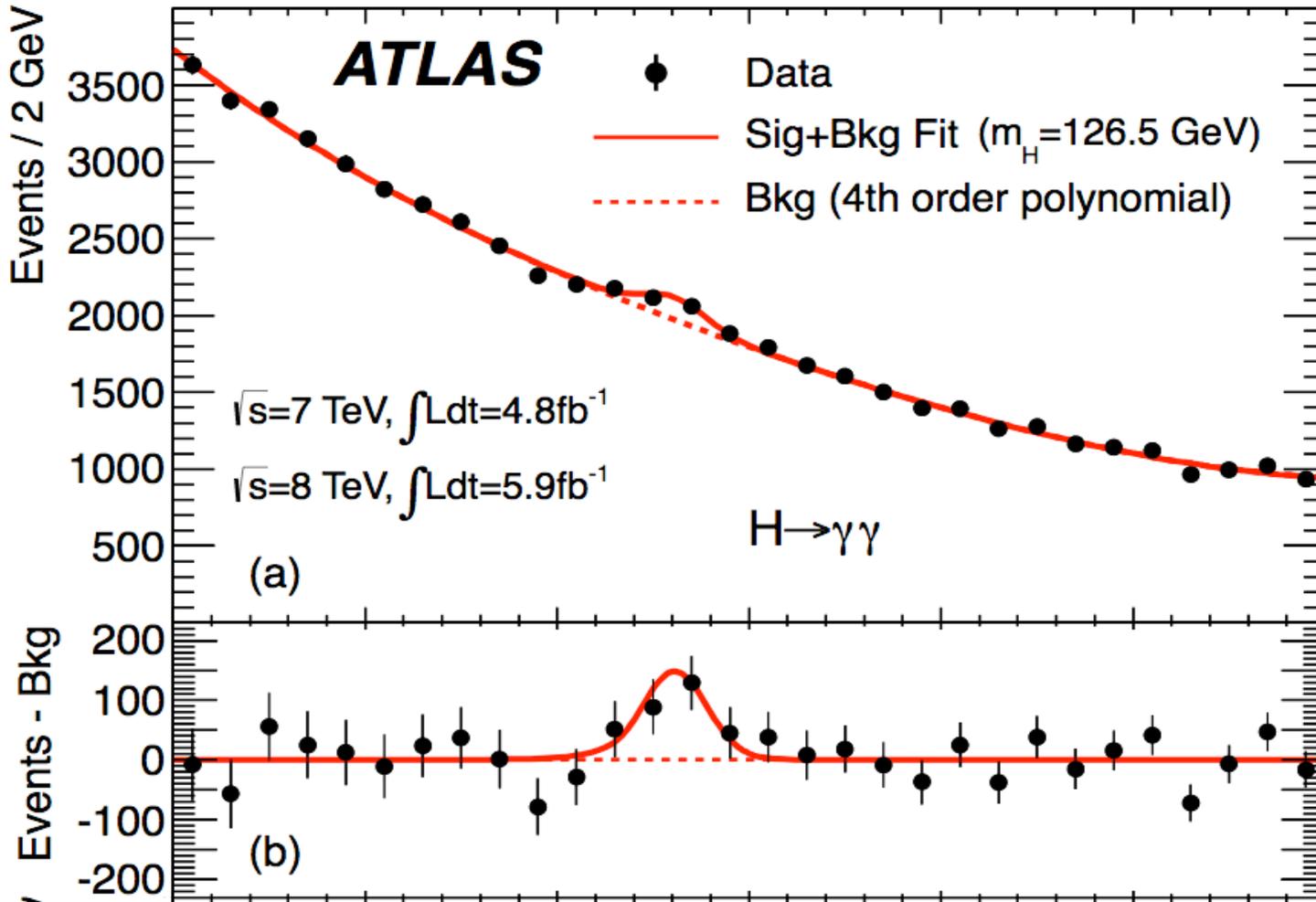
Se si osserva un eccesso localizzato rispetto alla distribuzione attesa per il fondo si può dire di aver scoperto una nuova particella

Attenzione agli effetti strumentali o alle "fluttuazioni" statistiche del fondo

# La scoperta: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ , CMS



# La scoperta: $H \rightarrow \gamma\gamma$ , ATLAS



# Un ago nel pagliaio



40 milioni di collisioni / secondo  
200 giorni/anno

14 milioni di miliardi di eventi/anno  
5 miliardi di eventi/anno selez.

400  $H \rightarrow \gamma\gamma$

# Una grande soddisfazione

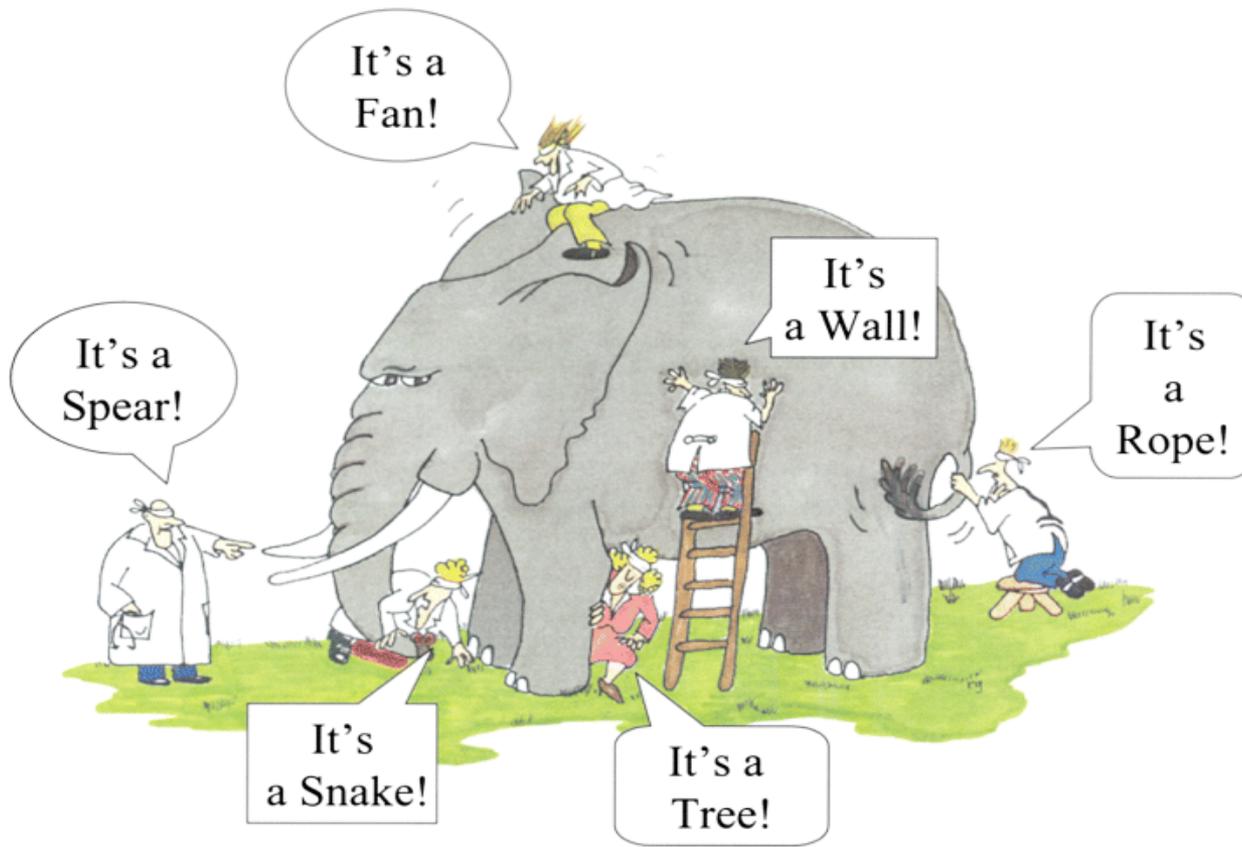


# E' lui o non e' lui?

Esiste una nuova particella, con una massa di circa 125 GeV

È il bosone di Higgs, o qualcosa che gli somiglia?

È importante studiare tutte le proprietà previste dalla teoria  
“guardando” alla nuova particella sotto tutti gli aspetti

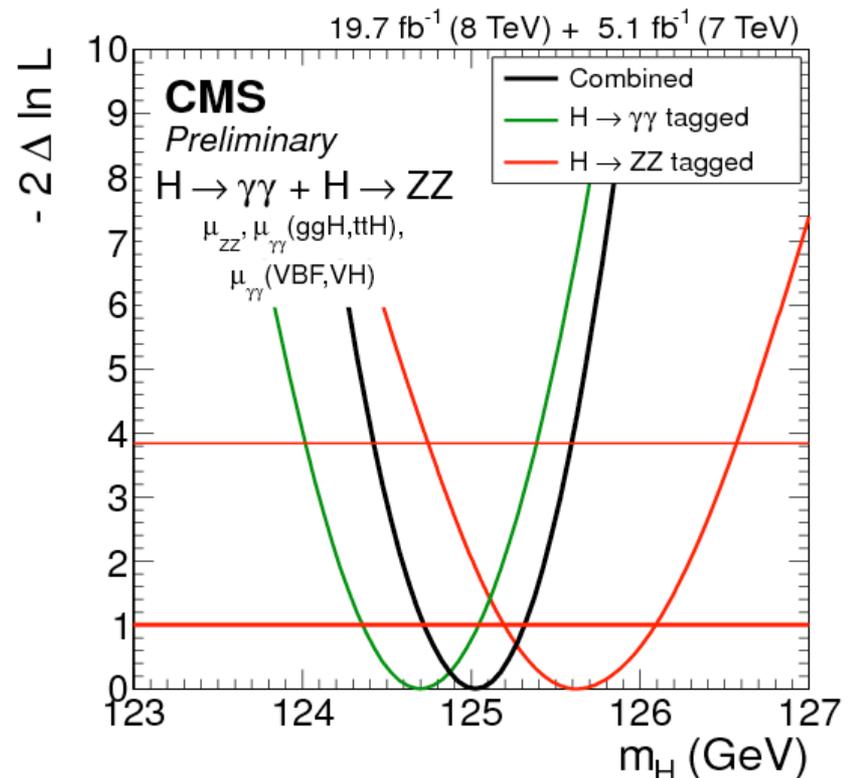
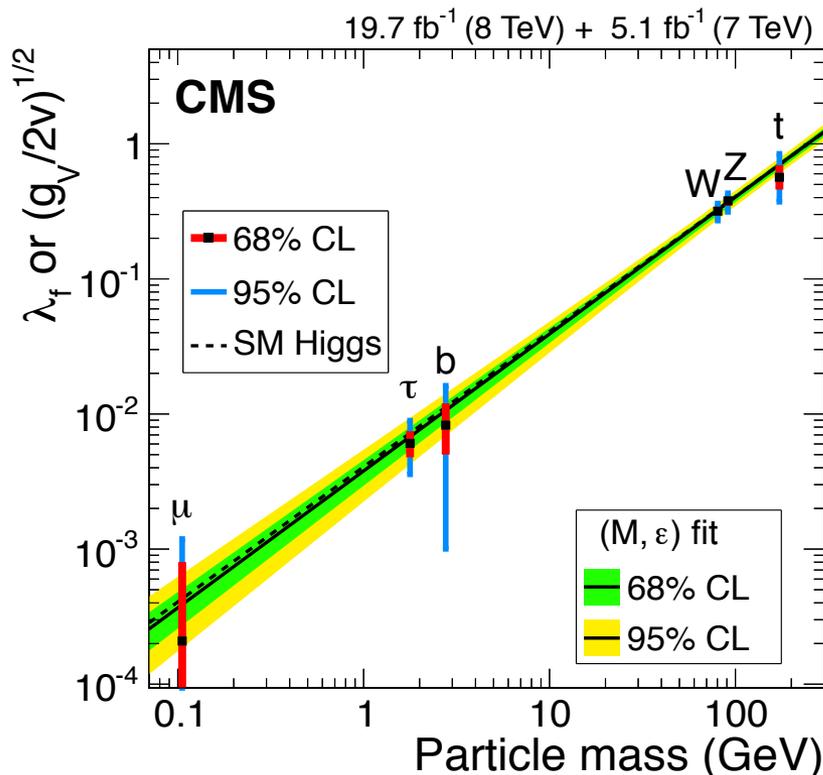


# E' lui o non e' lui?

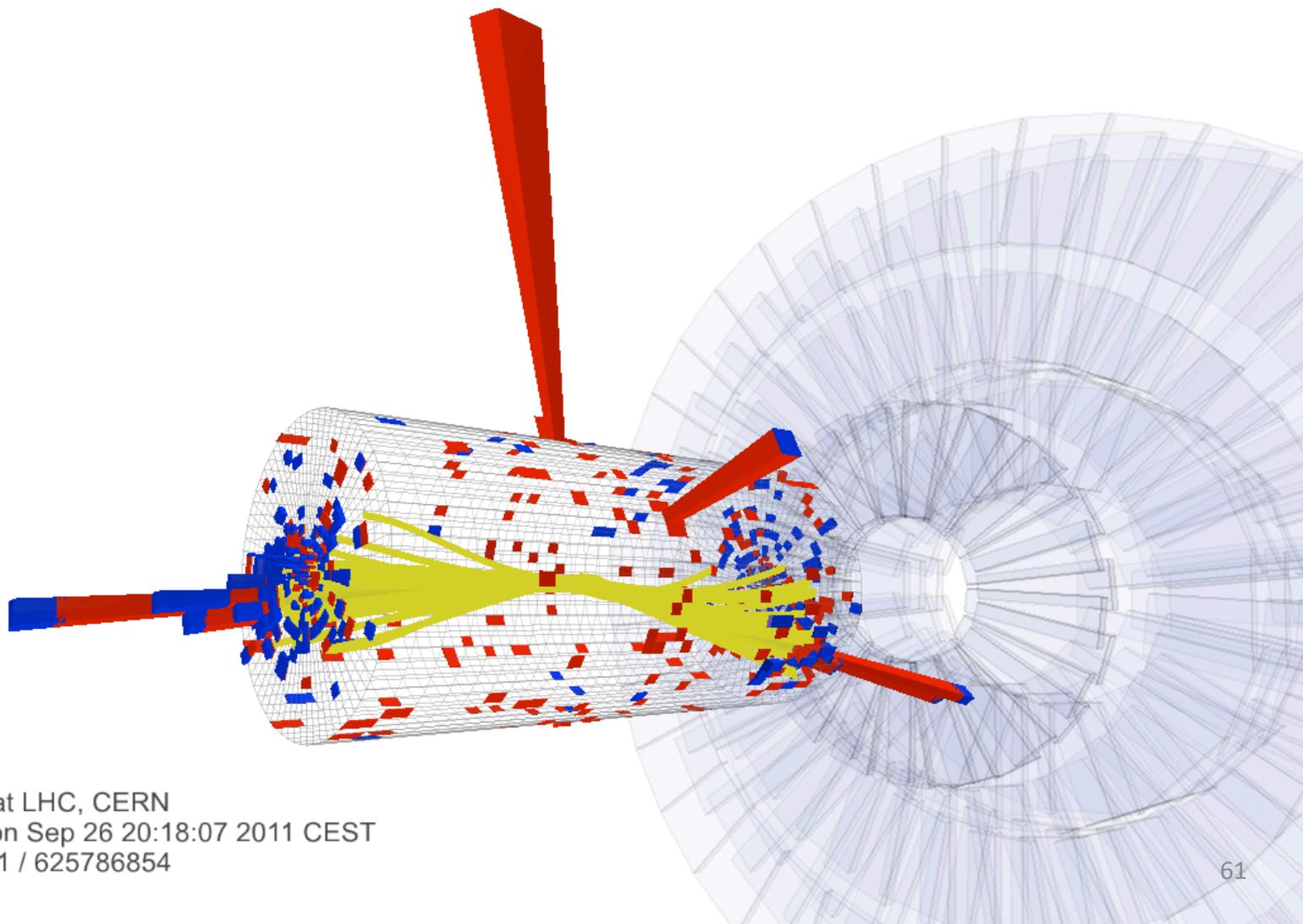
Esiste una nuova particella, con una massa di circa 125 GeV

È il bosone di Higgs, o qualcosa che gli somiglia?

È importante studiare tutte le proprietà previste dalla teoria  
“guardando” alla nuova particella sotto tutti gli aspetti



# Solo il Bosone di Higgs?



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST  
Run/Event: 177201 / 625786854  
Lumi section: 450

# Altre ricerche ad LHC



Abbiamo scoperto  
l'ultima particella  
elementare o c'è  
ancora molto  
da scoprire?



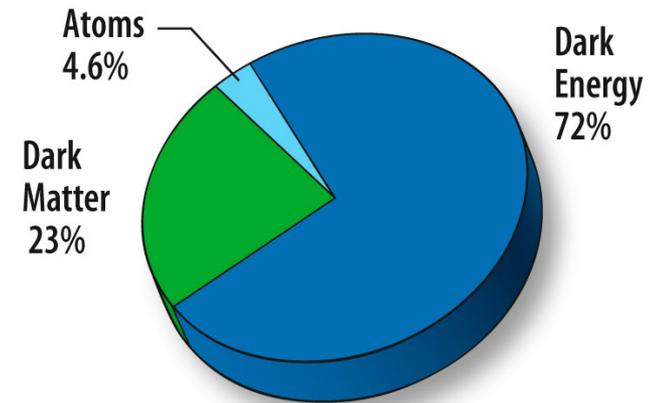
Il programma di LHC non si limita alla ricerca del bosone di Higgs

Si ricercano nuovi fenomeni oltre il Modello Standard

Alcune teorie prevedono possibili segnali mai visti  
e che potrebbero spiegare fenomeni noti in altri campi  
che al momento non hanno spiegazione

# Molte questioni aperte

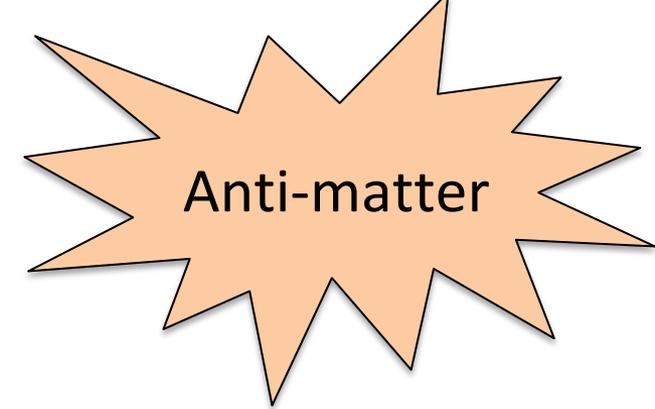
Gli astronomi ci dicono che solo il 5% dell'universo è fatto di materia visibile: il resto è costituito da *materia oscura* ed *energia oscura*



*Cos'è la materia oscura?*

*Potrebbe essere costituita da particelle predette da teorie oltre il Modello Standard ed accessibili a LHC*

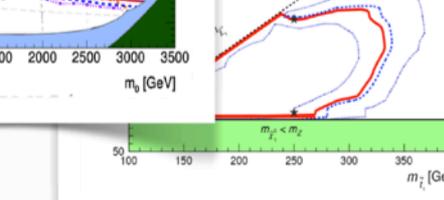
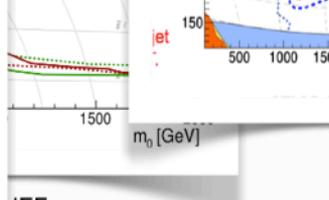
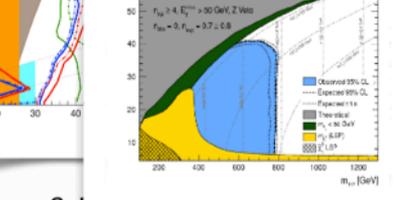
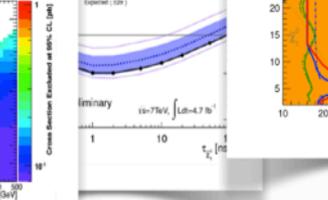
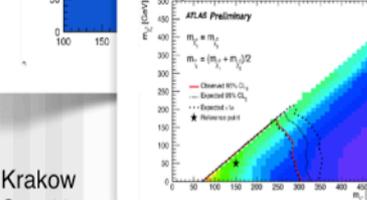
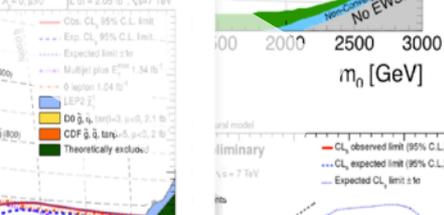
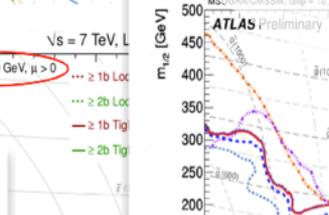
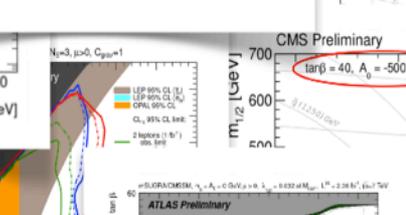
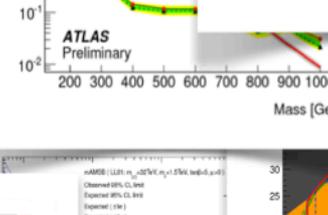
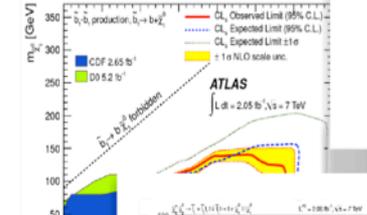
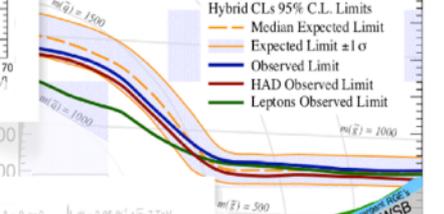
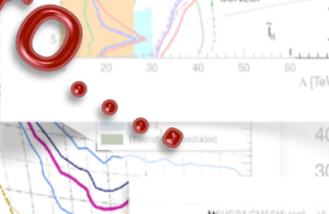
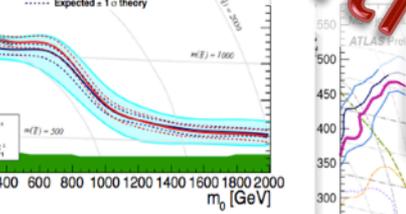
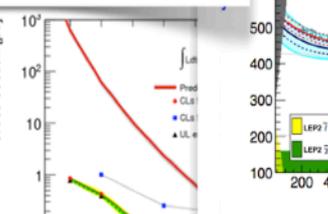
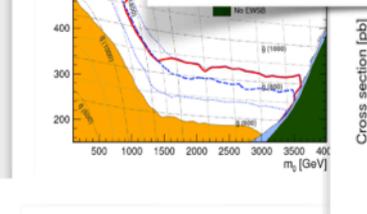
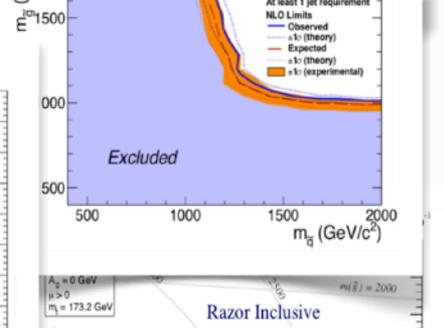
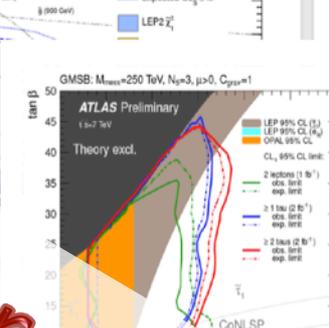
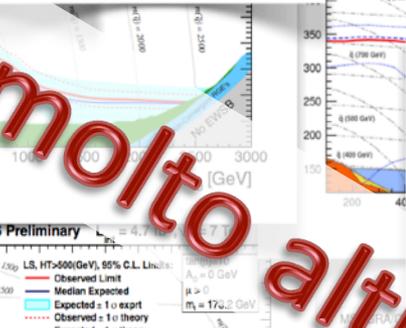
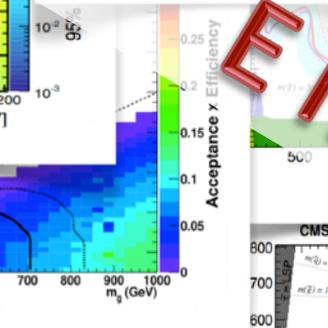
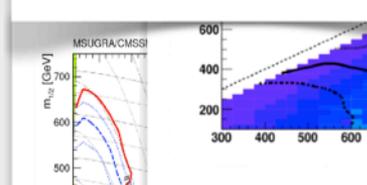
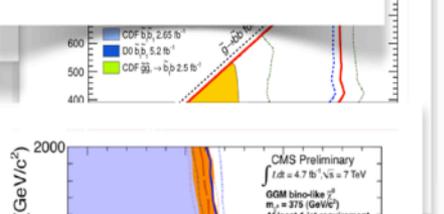
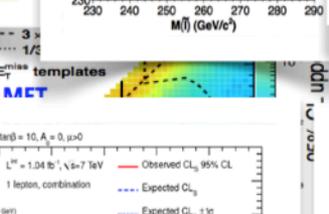
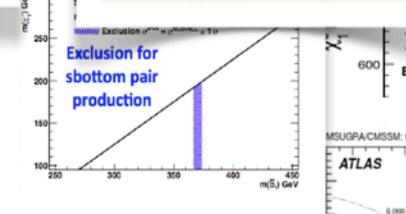
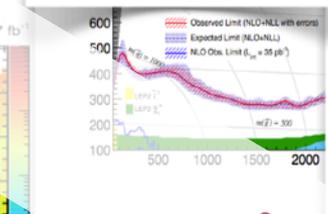
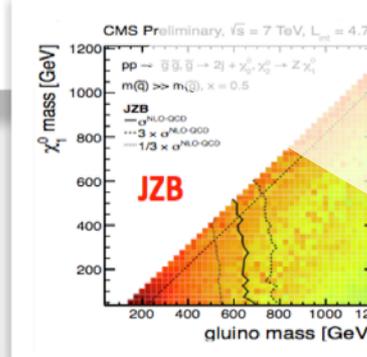
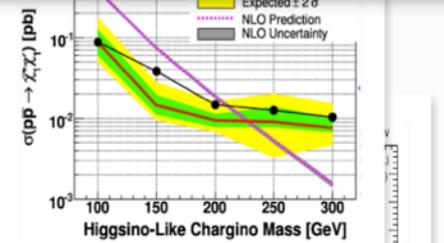
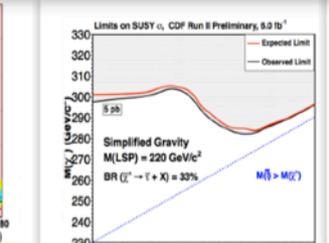
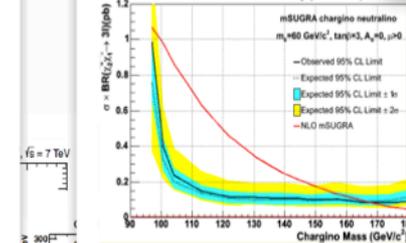
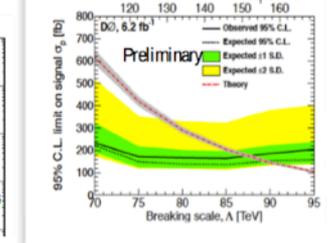
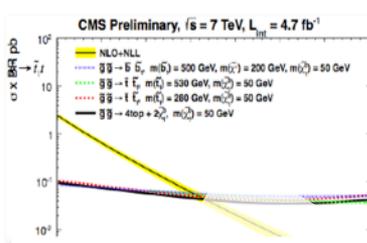
# Molte questioni aperte



Nel Big-Bang si sono creati  
materia e anti-materia  
in uguale quantita'

Noi esistiamo perche'  
c'e' poca anti-materia

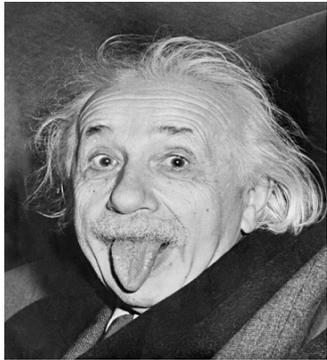
*Dove e' andata a finire?*



**Emolto altro**

# Ma a cosa serve?

La ricerca fondamentale ha sempre trainato l'innovazione  
(anche se non e' il motivo per cui la si fa)



A.Einstein

→ Relativita' →

100%  
scienza



GPS:  
deve considerare la  
dilatazione relativistica  
dei tempi per funzionare



J.C. Maxwell

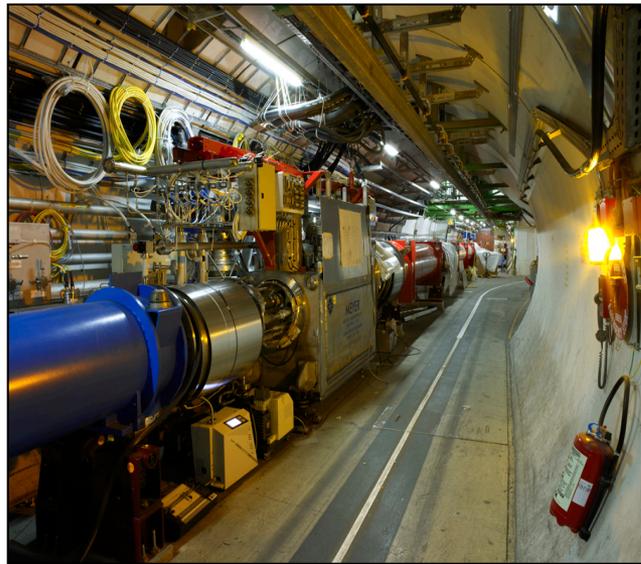
→ Elettro  
magnetismo →

100%  
scienza

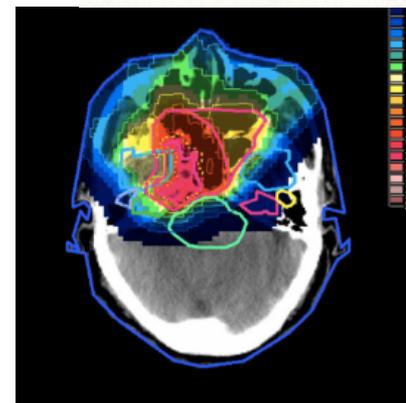
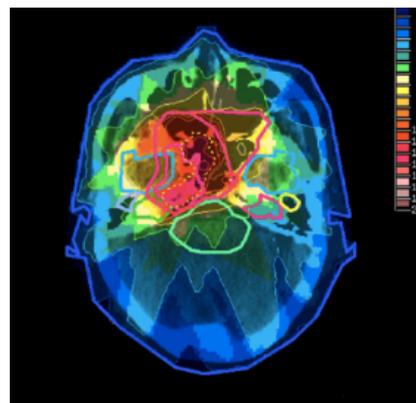
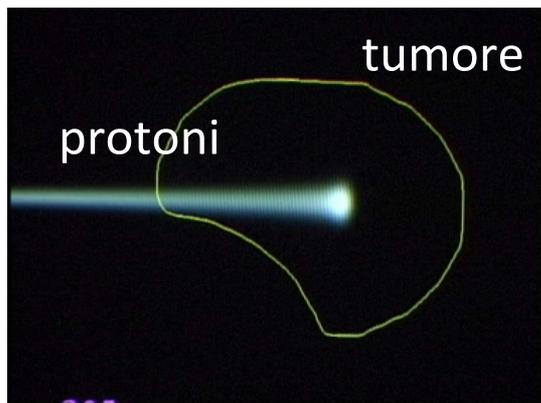
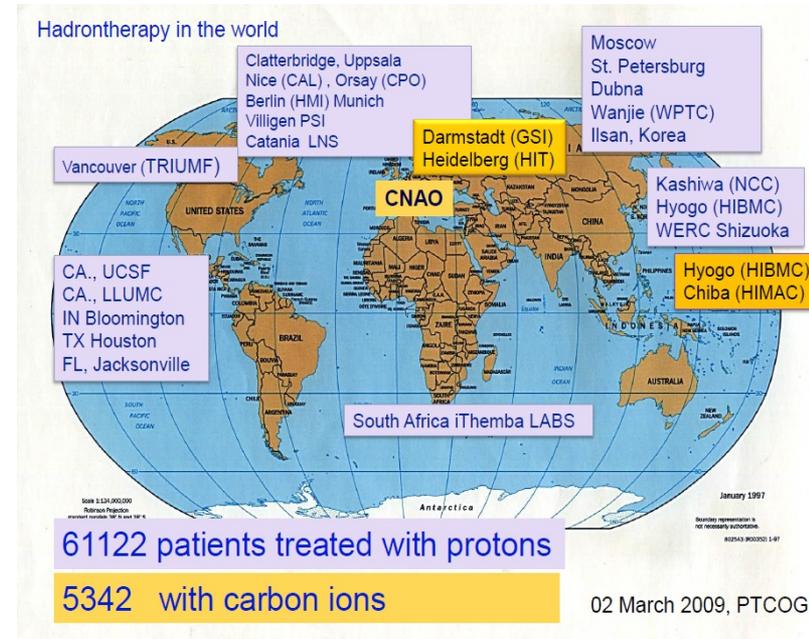


Telefoni:  
usano le onde  
elettromagnetiche  
per comunicare

# Acceleratori: sviluppati nei laboratori di fisica e usati negli ospedali

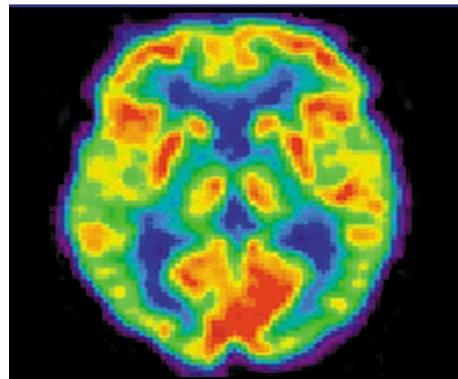
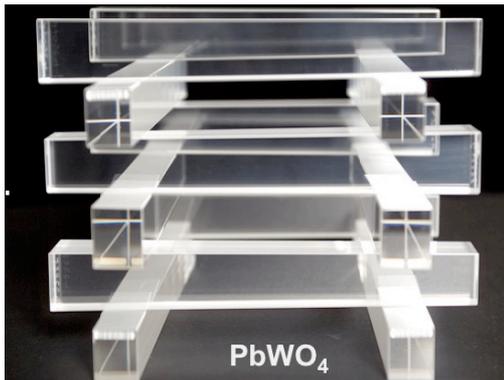
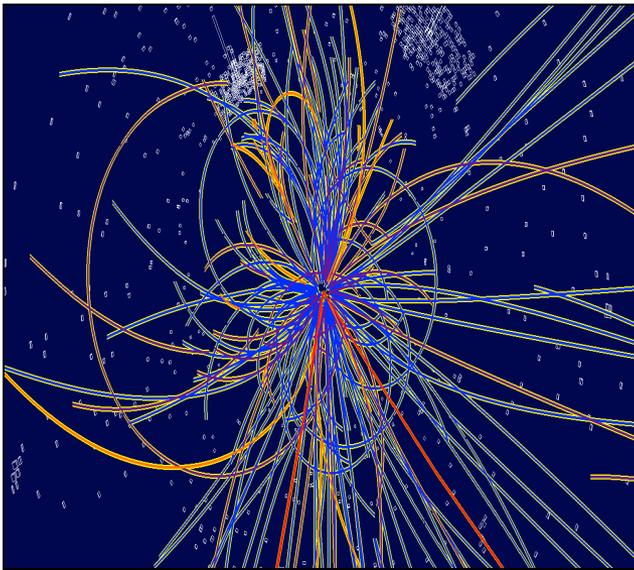


~30.000 acceleratori nel mondo  
~17.000 usati in medicina



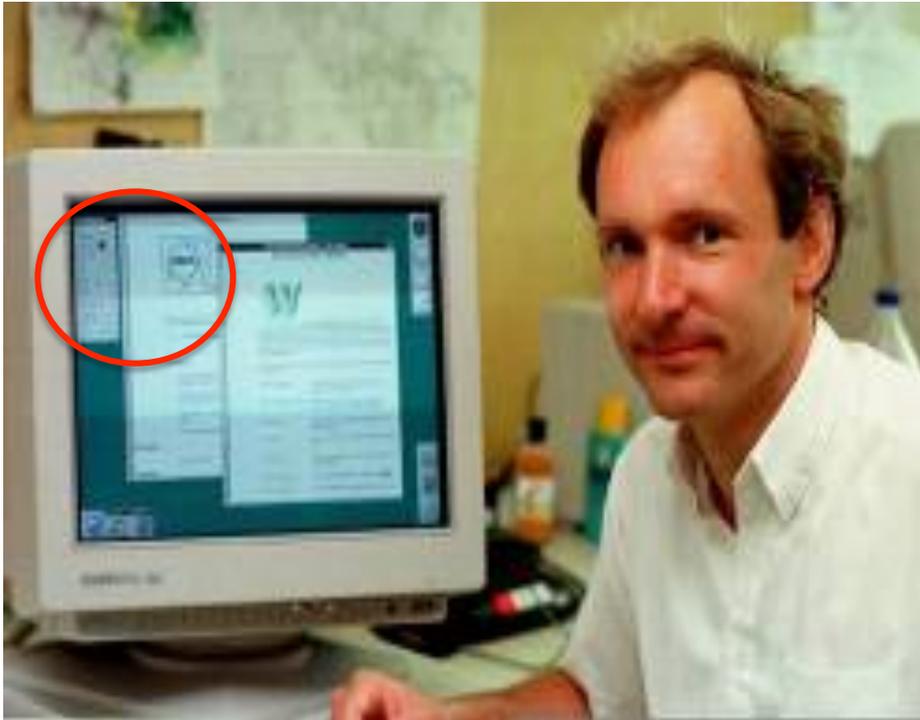
Esempio:  
Adroterapia

# Rivelatori: sviluppati nei laboratori di fisica e usati per imaging medico

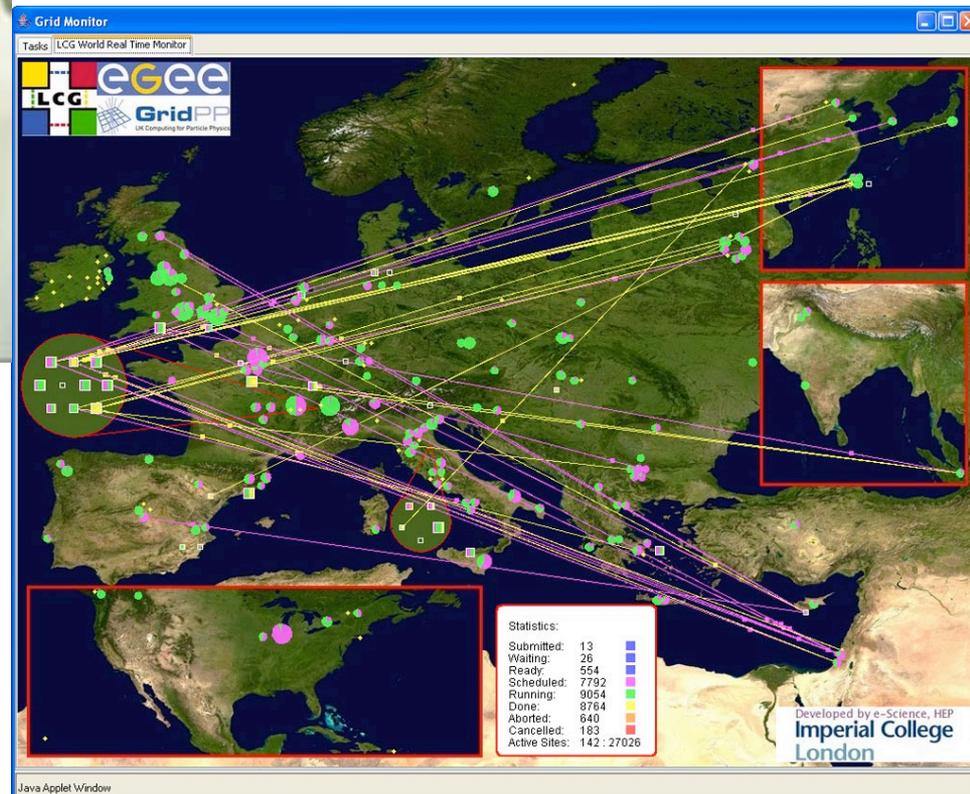


Esempio: PET scanner  
(Positron Emission  
Tomography)

# Il Web e la Grid



Tim Berners-Lee,  
padre del www



.... e molto altro