



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

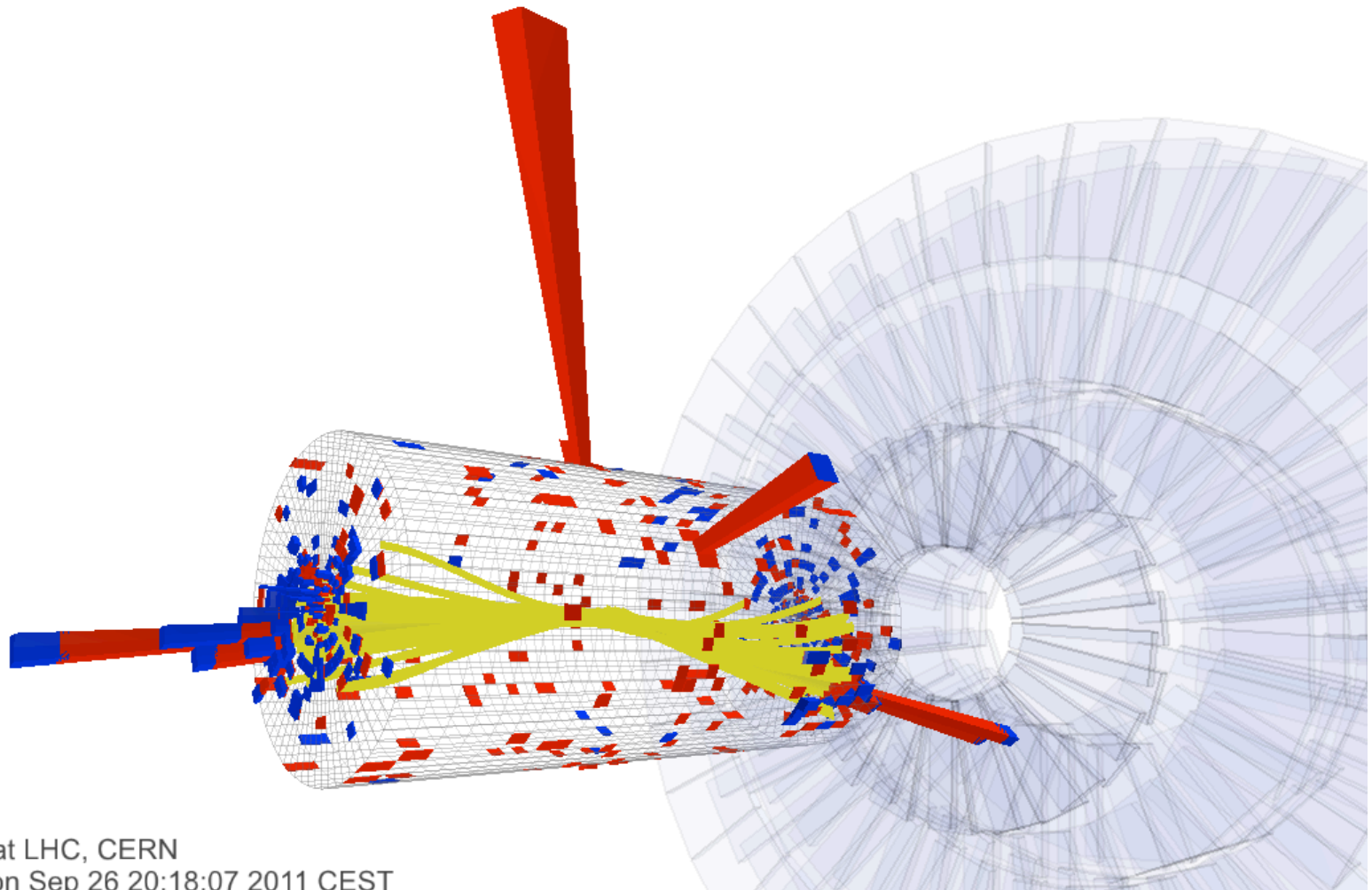


© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Peter W. Higgs

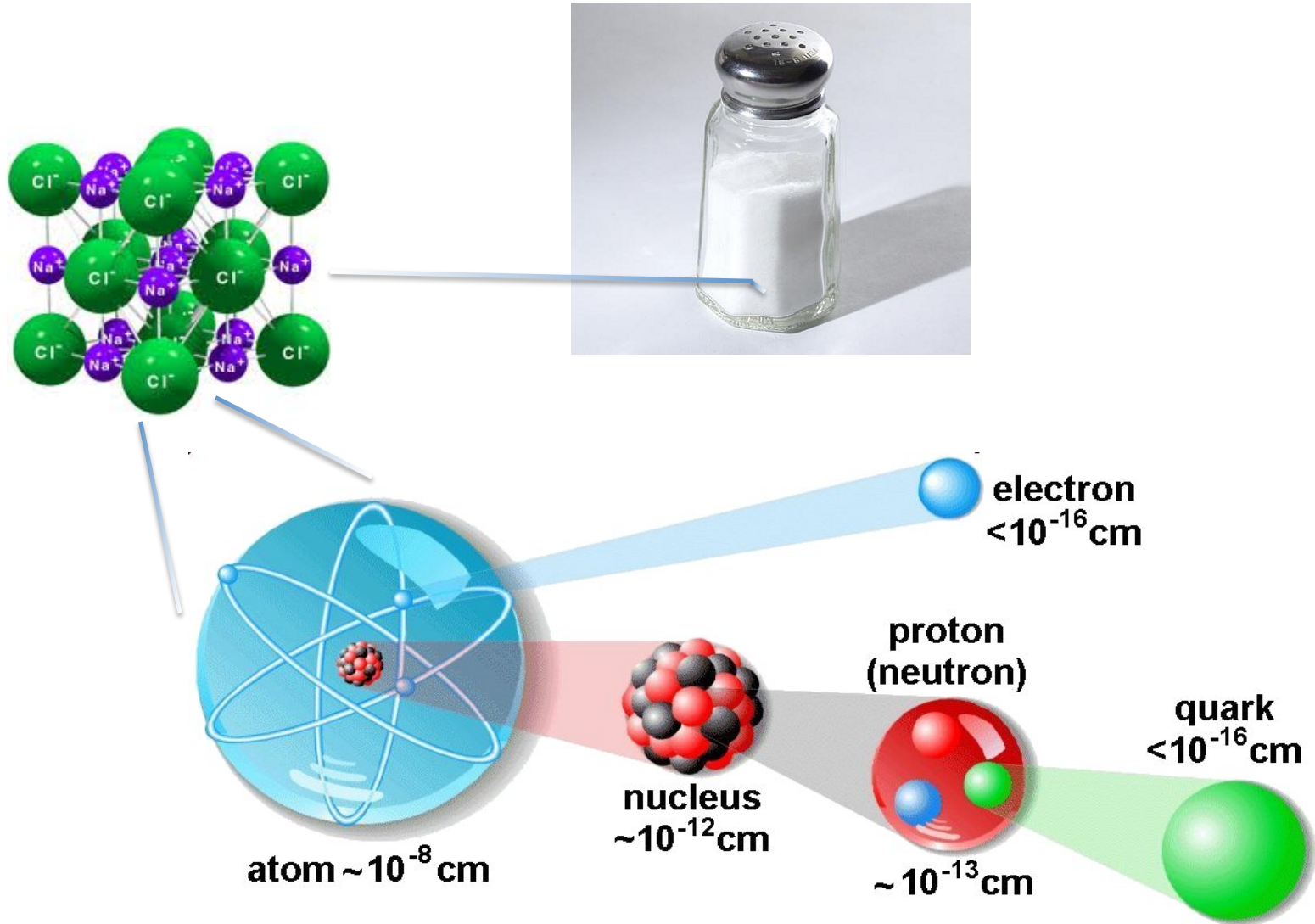
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental 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 → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  up	mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  charm	mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  top
	mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  down	mass → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  strange	mass → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  bottom
	mass → $0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$  electron	mass → $105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$  muon	mass → $1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$  tau
	mass → $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$  electron neutrino	mass → $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$  muon neutrino	mass → $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$  tau neutrino
	LEPTONS		

Esistono altre particelle elementari:

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

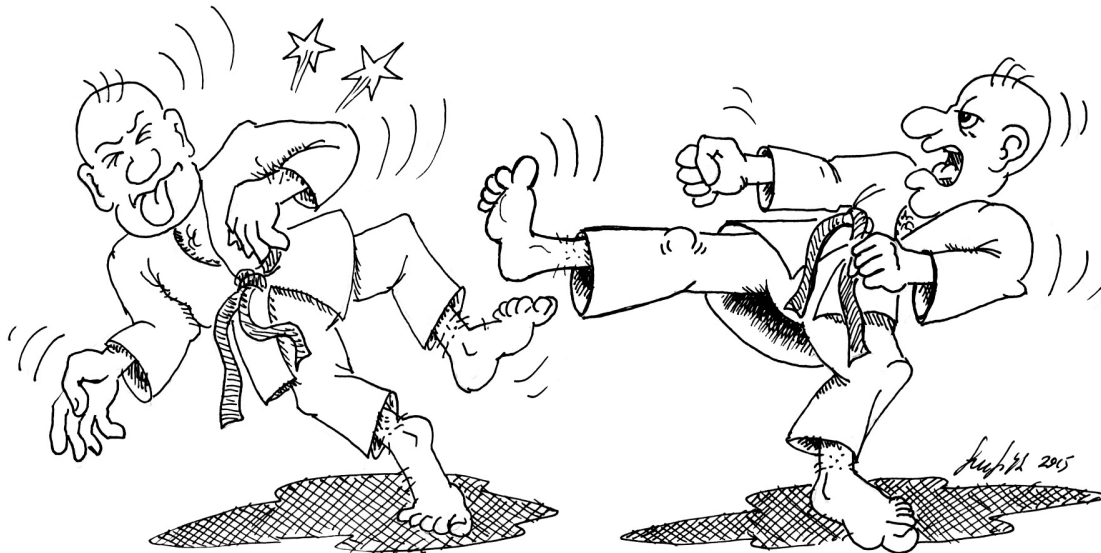
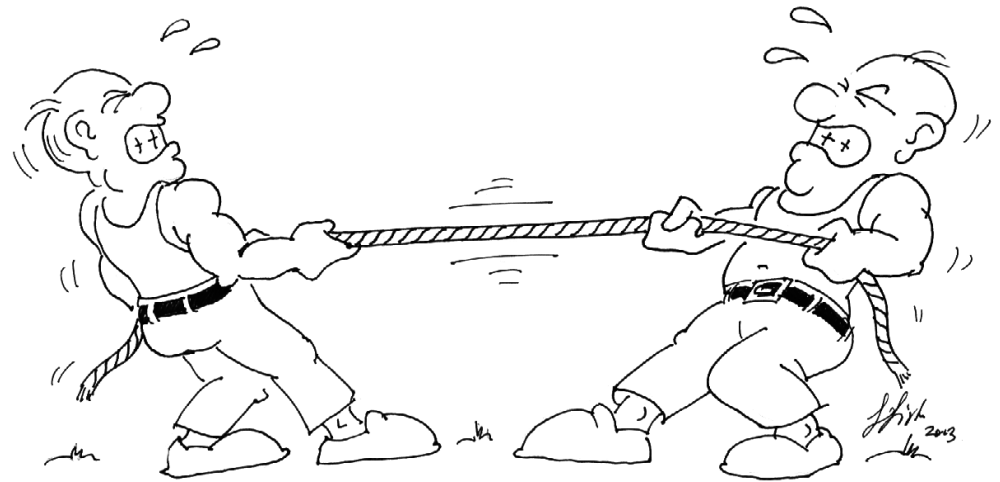
Formate al momento del Big-Bang.

Oggi vengono “ricreate” dove c’è abbastanza energia

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

Forze e interazioni

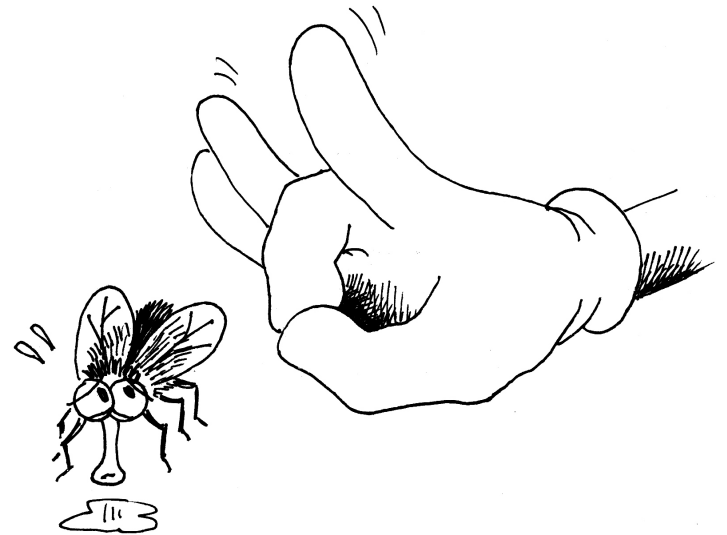
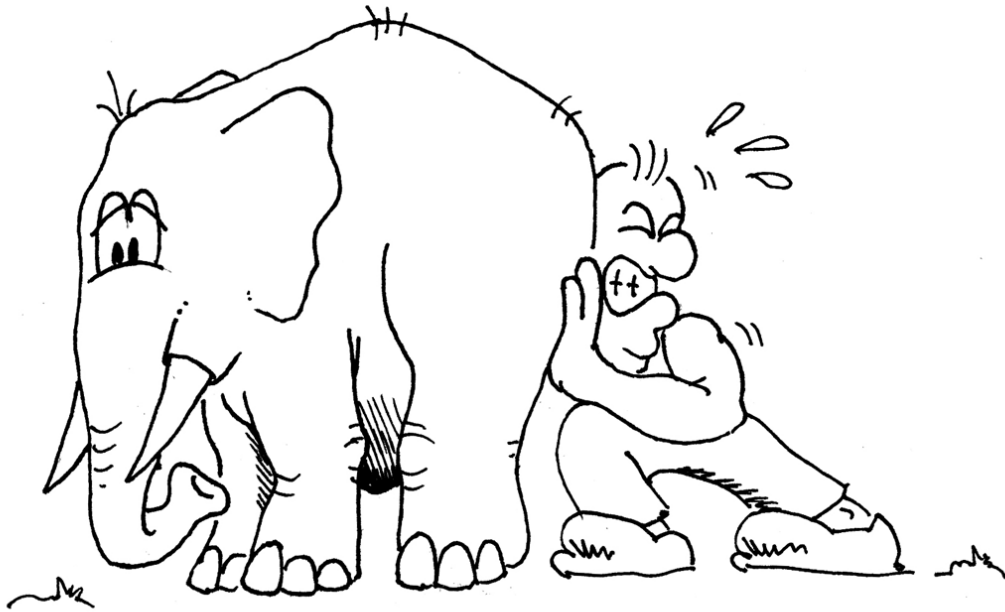
La materia macroscopica, così come le particelle, interagisce attraverso le **forze**.



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



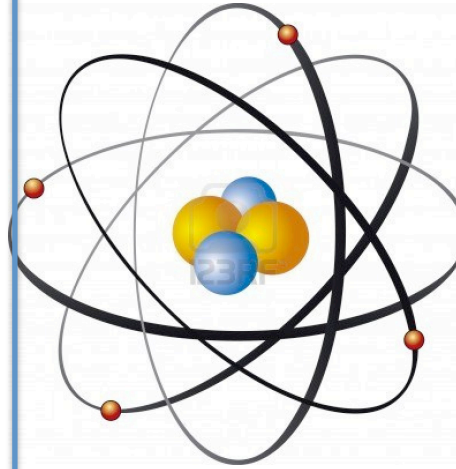
Quattro tipi di forze

Gravitazionale (intensita' 10^{-40})



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

Elettromagnetica (intensita' 10^{-2})



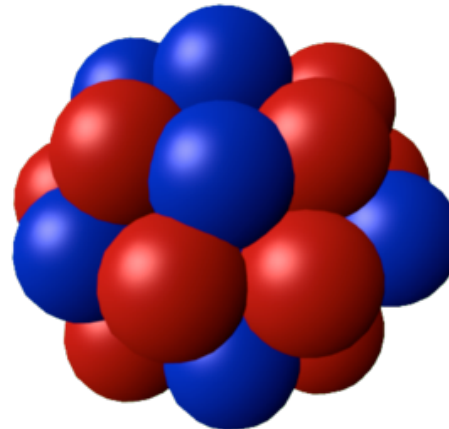
Interazione tra *cariche elettriche*: struttura atomi e molecole, processi chimici e biologici

Nucleare debole (intensita' 10^{-6})



Decadimenti radioattivi, dinamica stellare...

Nucleare forte (intensita' 1)

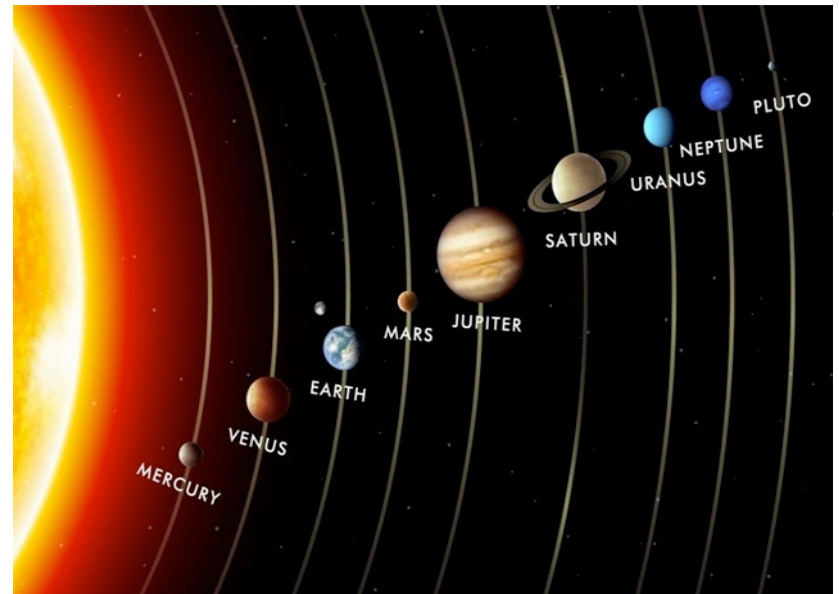


Interazione tra *quark*: struttura nuclei atomici, processi fissione e fusione nucleare

Forze e campi

Le interazioni possono agire a distanza grazie a campi di forza

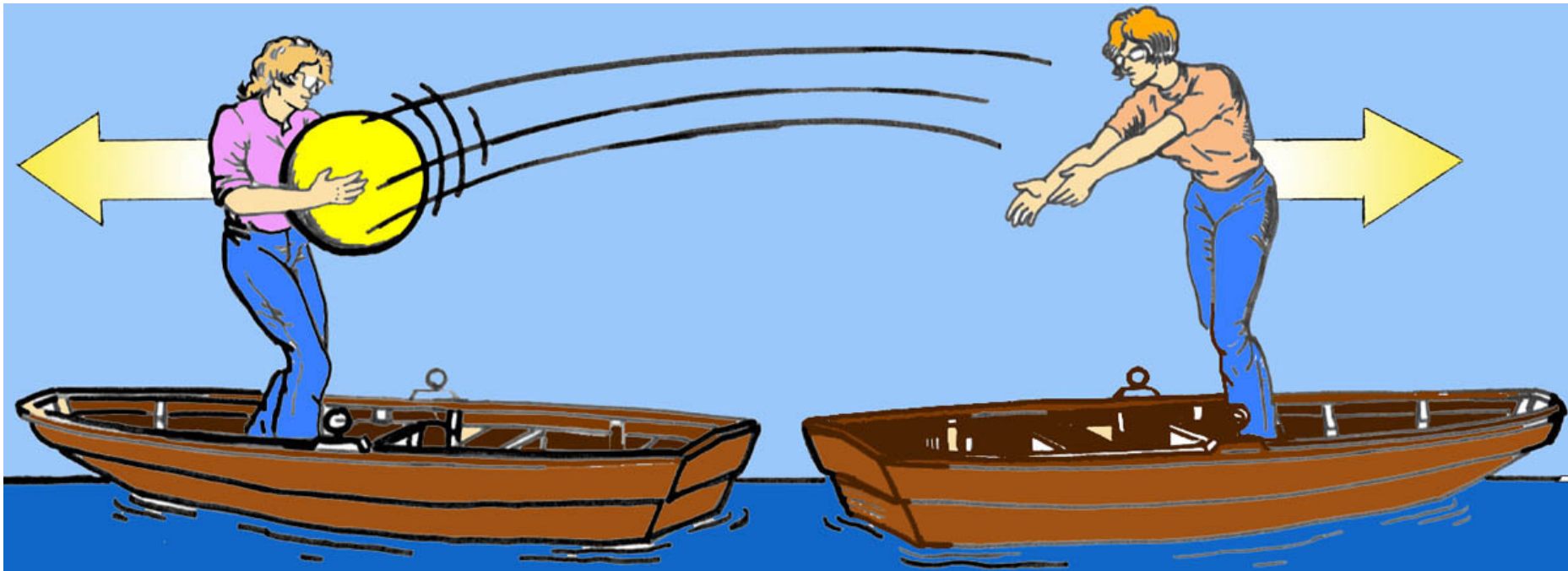
Es. il campo gravitazionale generato dal Sole determina il moto dei pianeti



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

Forze e particelle

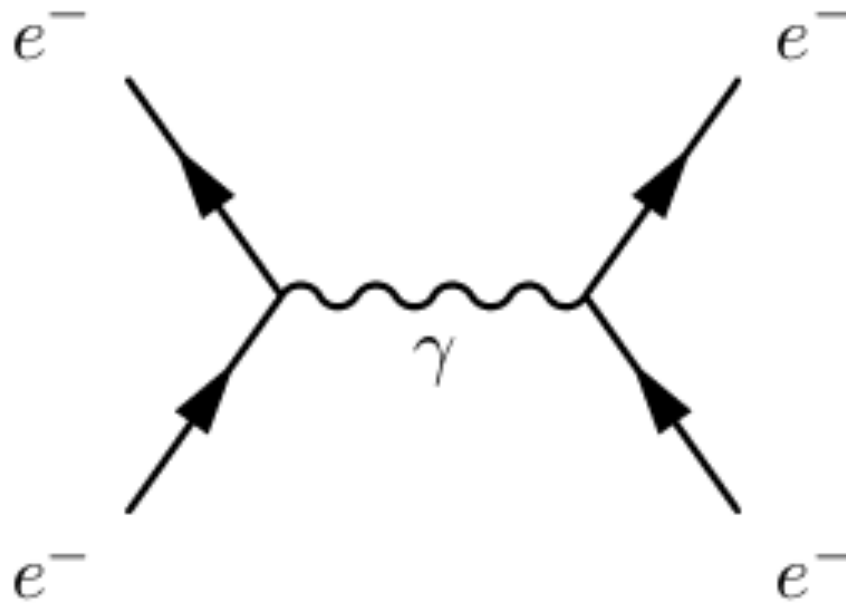
Le forze si possono spiegare su **dimensioni microscopiche** come scambio tra due particelle di un'altra particella che fa da **mediatore**



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

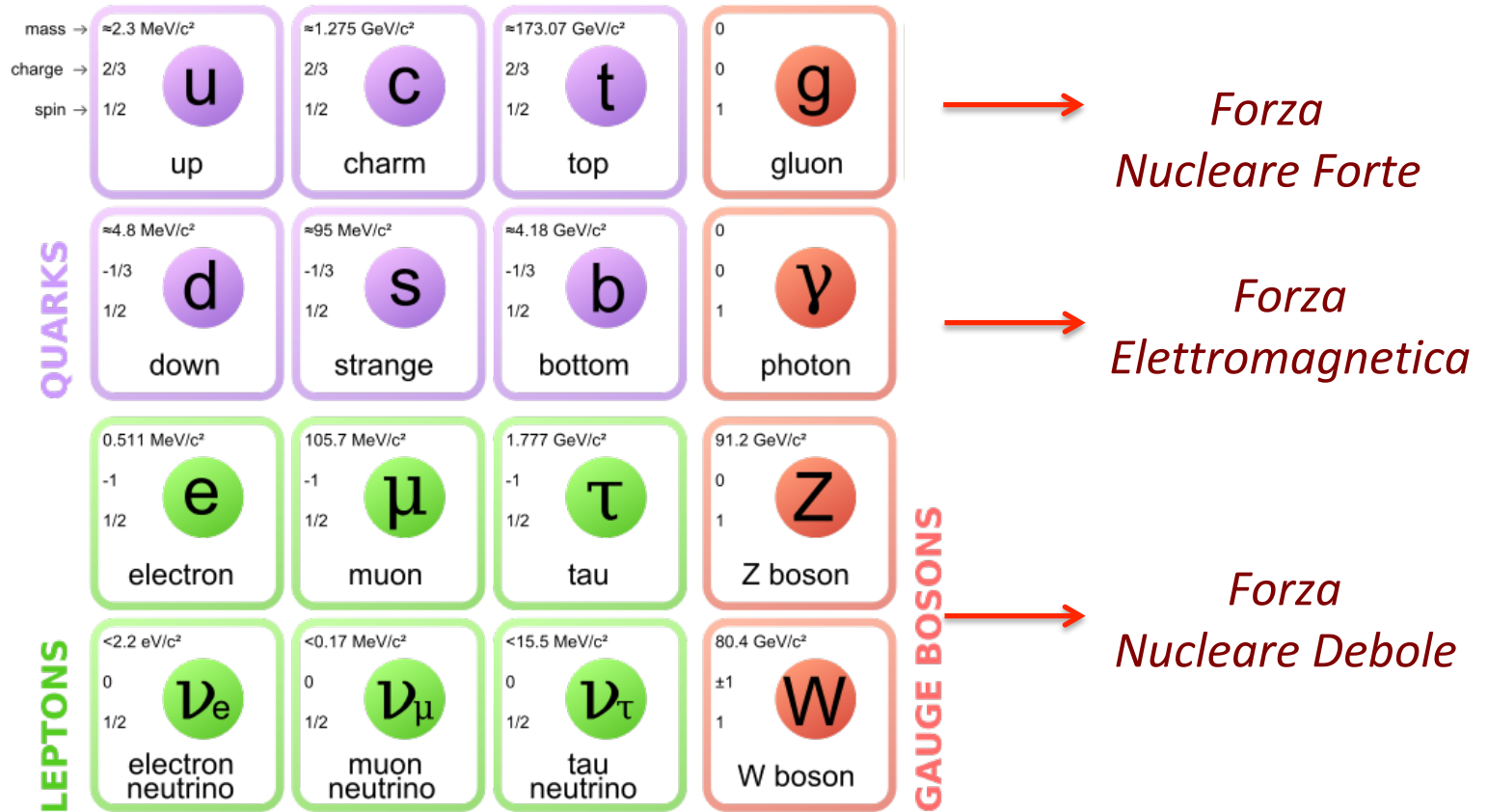
Il Modello Standard

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

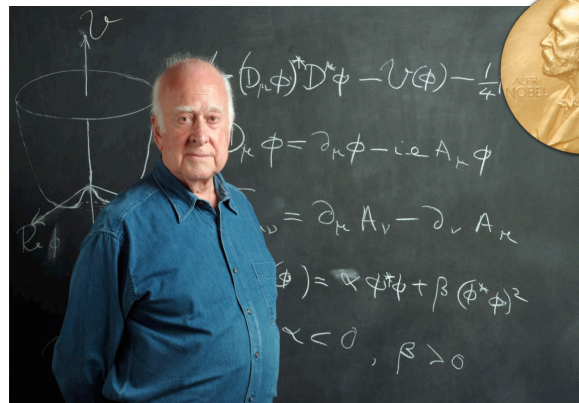
- Come il fotone

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

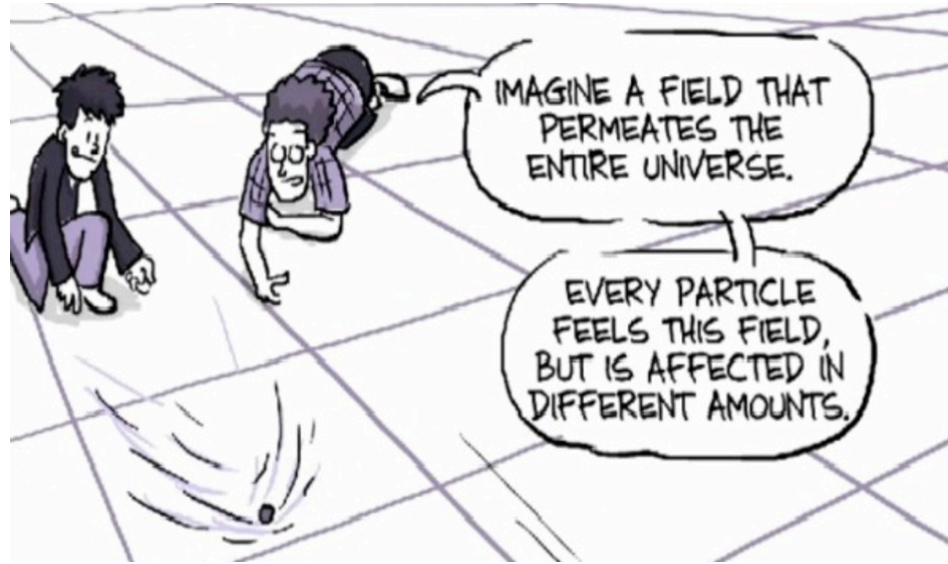
- Es. la particella W ha $m_W \sim 80 m_{\text{protone}}$

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

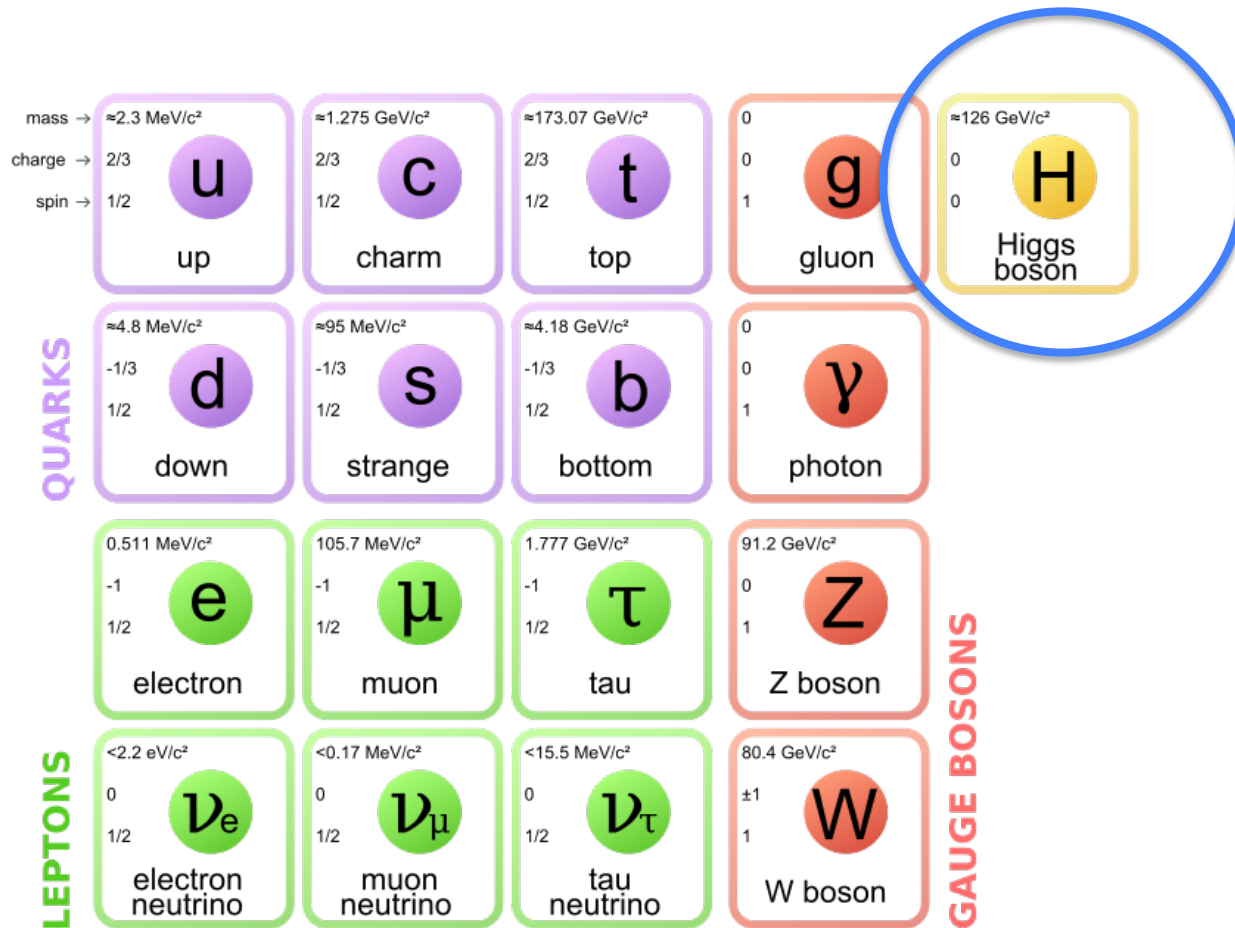
Interagisce con le particelle in modo diverso

- 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

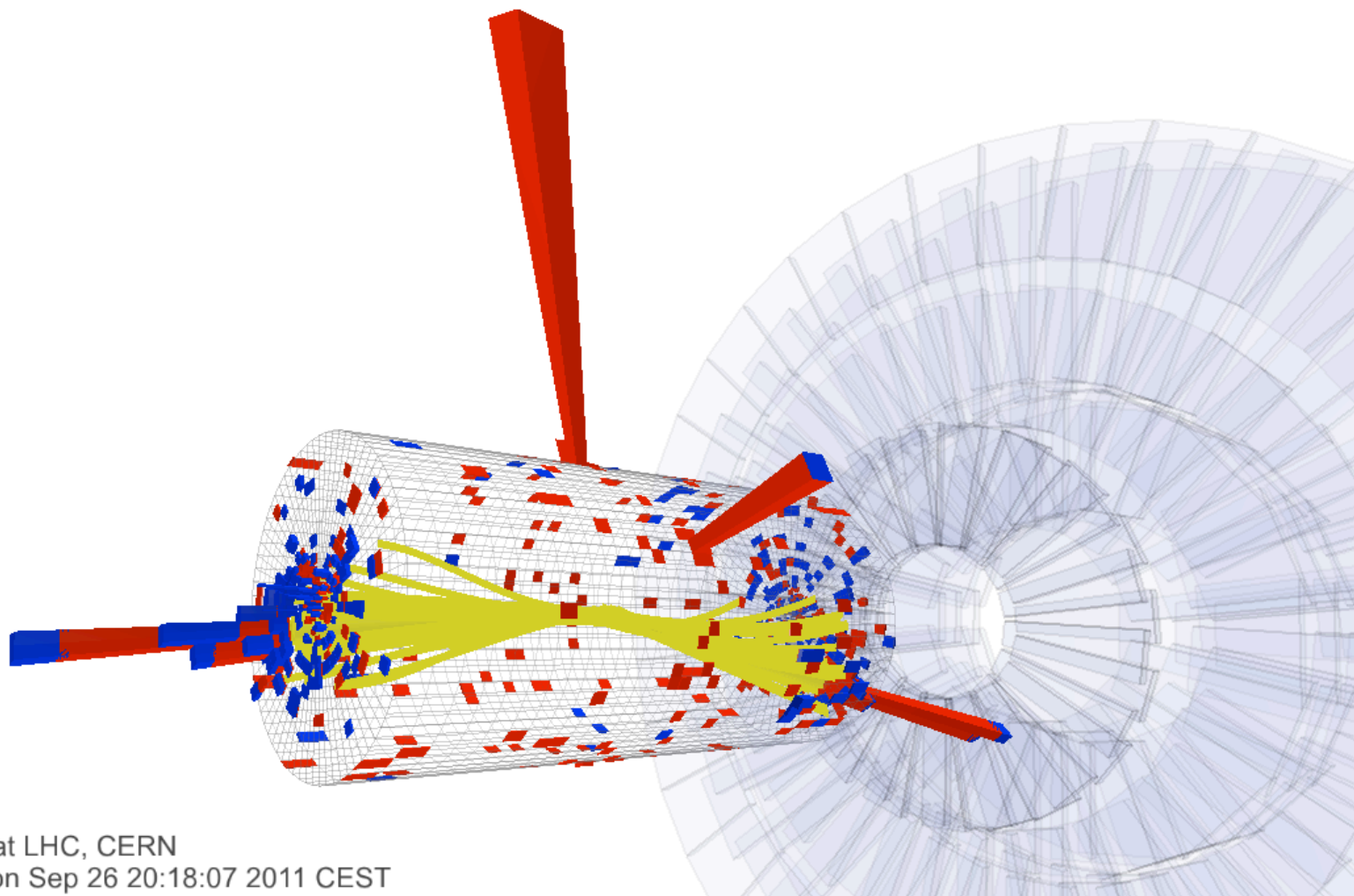
- Anche questa particella "sente" il suo campo e quindi ha una massa *diversa da zero, ma non predetta dalla teoria*

La ricerca del Bosone di Higgs



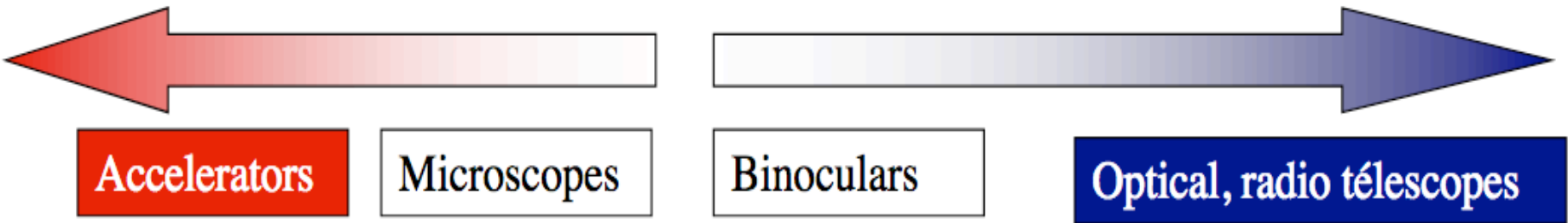
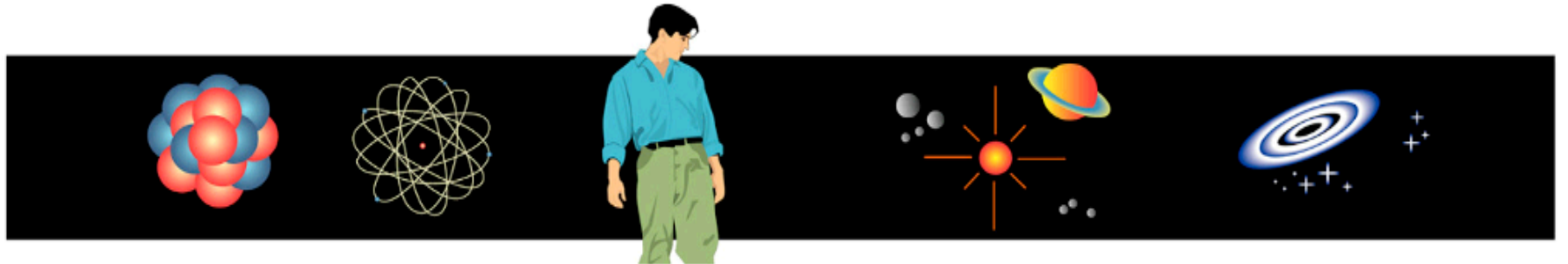
Se il campo di Higgs e' invisibile come provare la sua esistenza?
 Producendo in laboratorio il Bosone di Higgs

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

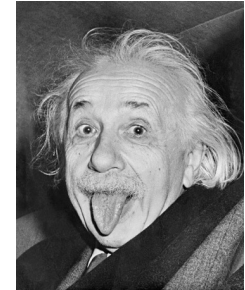
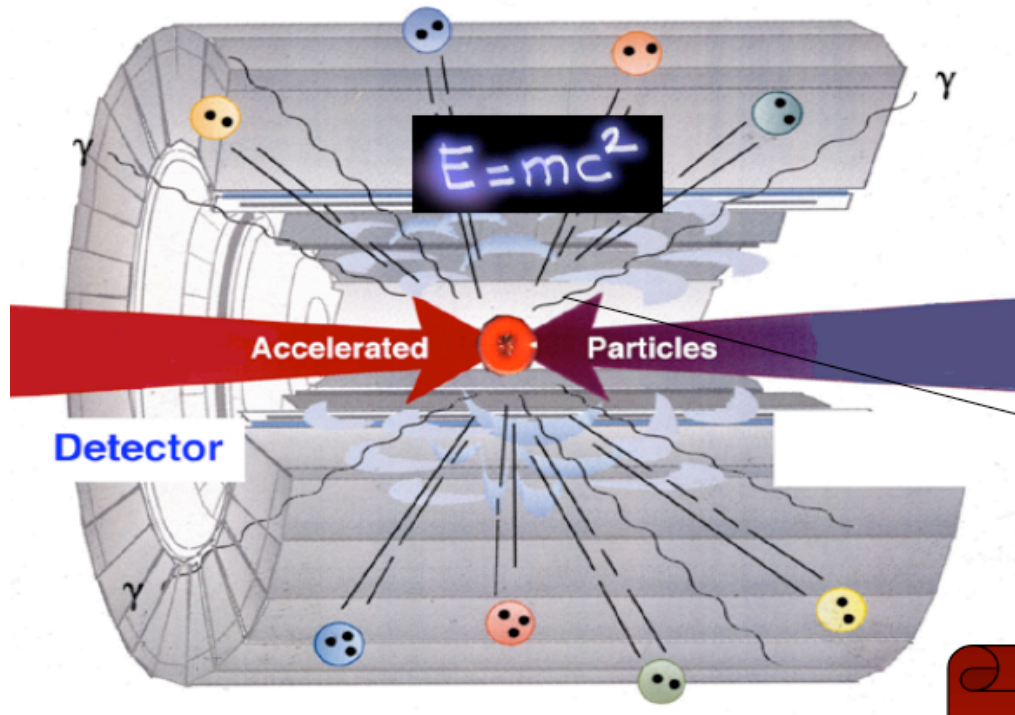
Studiare il mondo sub-atomico



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



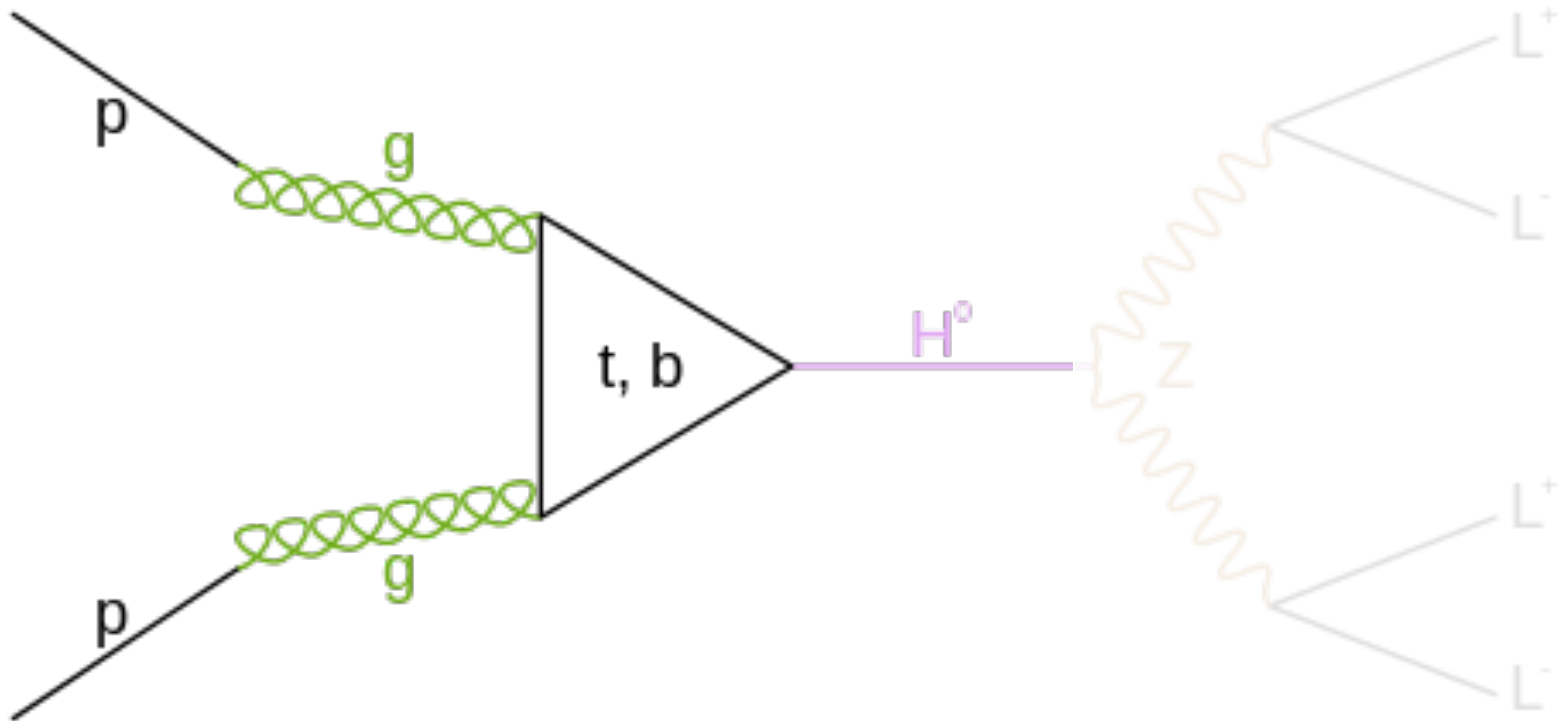
$$E = mc^2$$

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



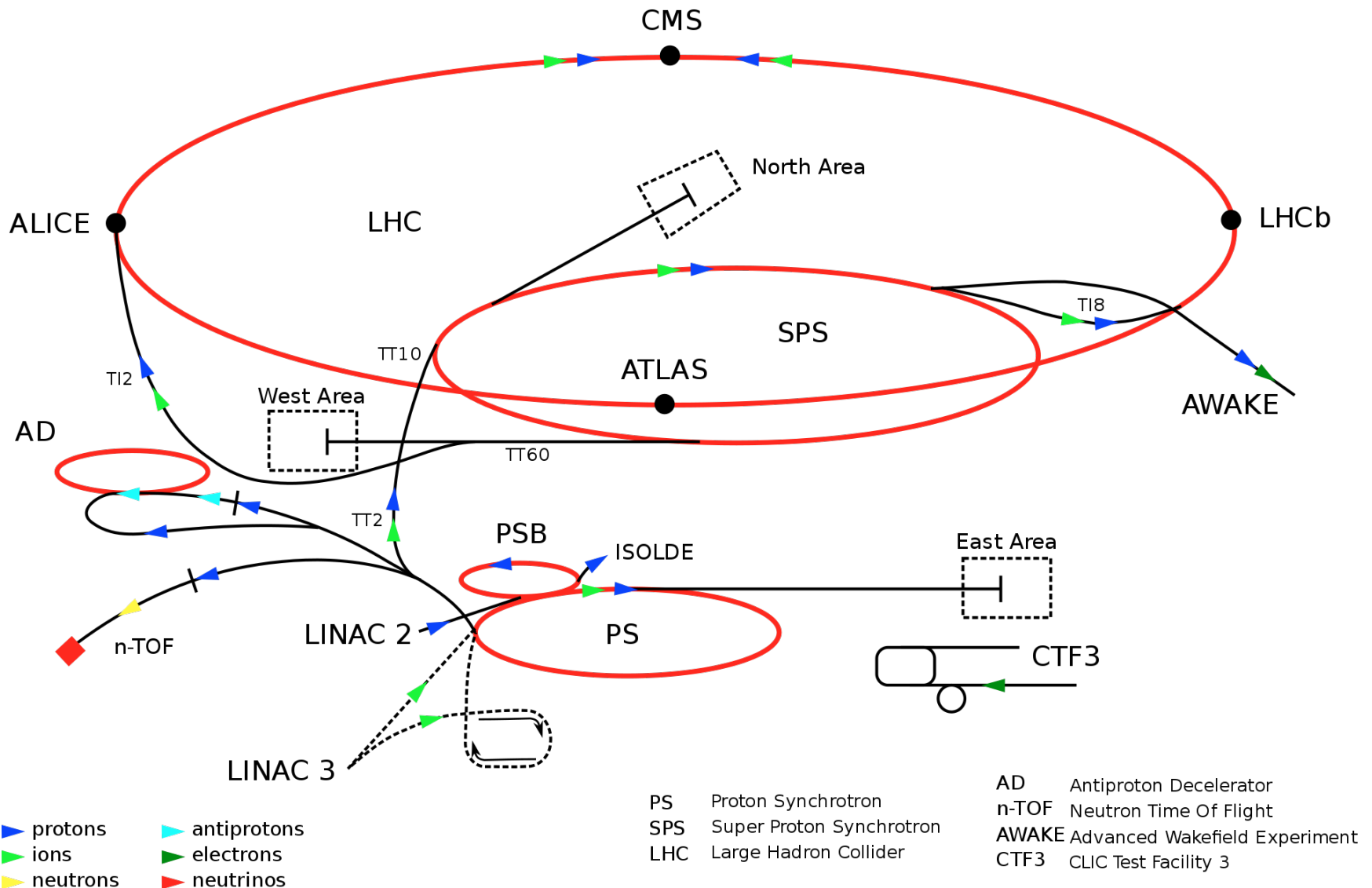
Member States (Dates of Accession)

AUSTRIA (1959)	DENMARK (1965)	GREECE (1961)	NORWAY (1965)	SPAIN (1961-62, 1963, 1964)
BELGIUM (1955)	IRELAND (1966)	NETHERLANDS (1962)	PORTUGAL (1961)	SWEDEN (1965)
FRANCE (1955)	GERMANY (1965)	ITALY (1955)	SWITZERLAND (1955)	UNITED KINGDOM (1955)

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**



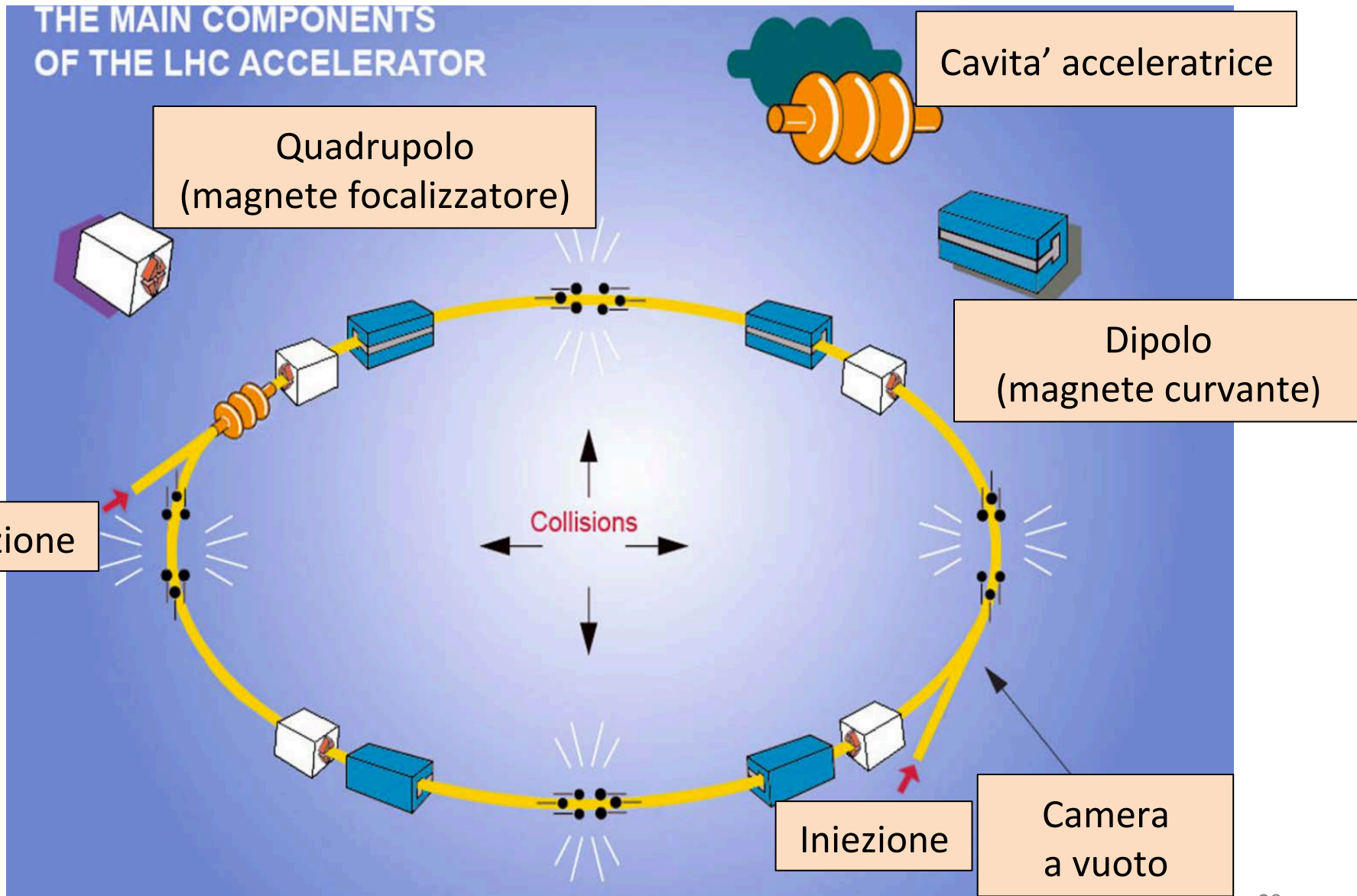
Situato in una galleria
sotterranea lunga 27 Km
tra Francia e Svizzera

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*:

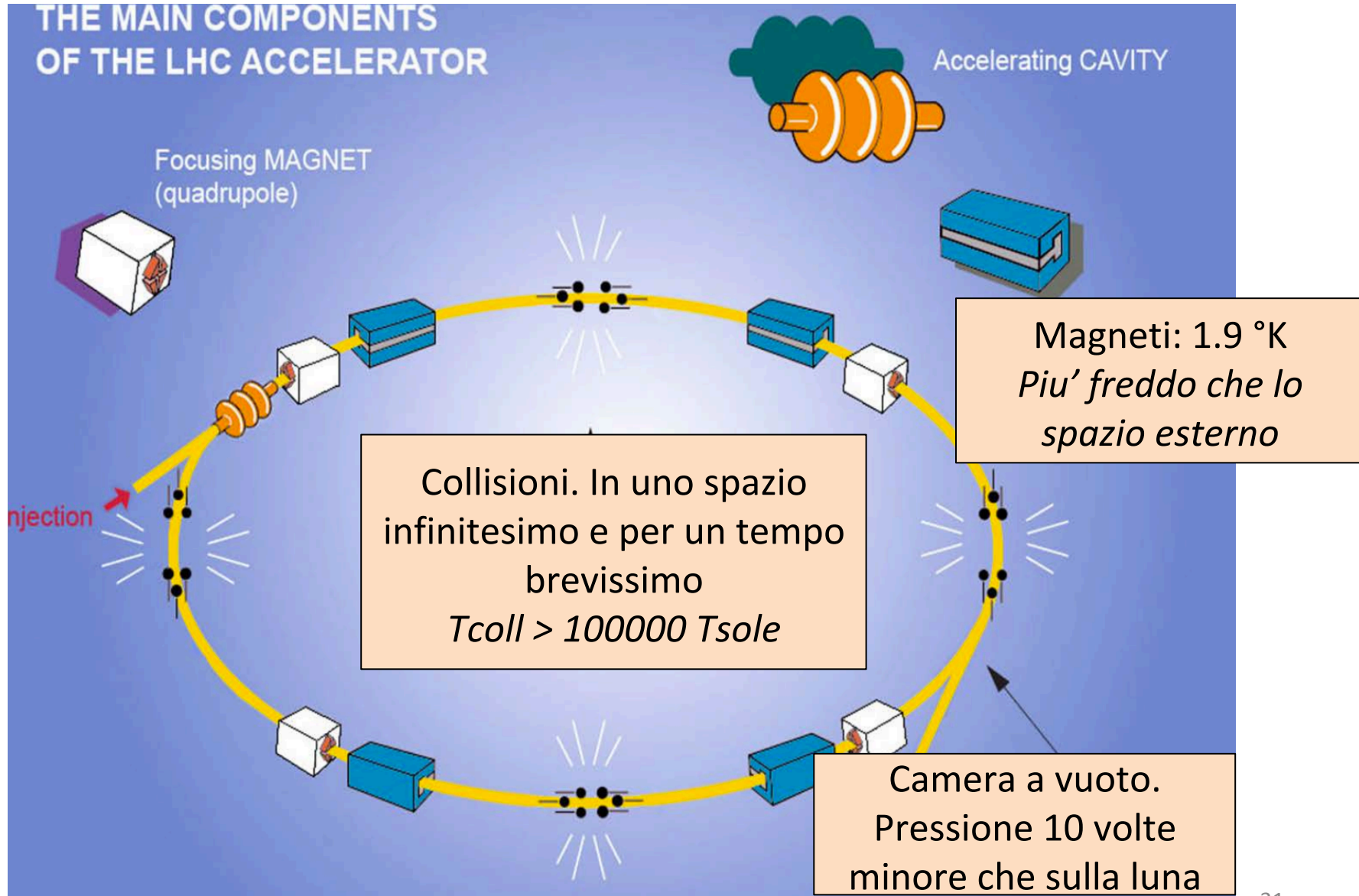
- $B = 8.3 \text{ T}$ (~ 100.000 campo magnetico terrestre)
- Raffreddati ad elio liquido: $-271.25^\circ\text{C} = 1.9 \text{ }^\circ\text{K}$
- $I = 12000 \text{ A}$ (*utenze domestiche: $\sim 13 \text{ A}$*)



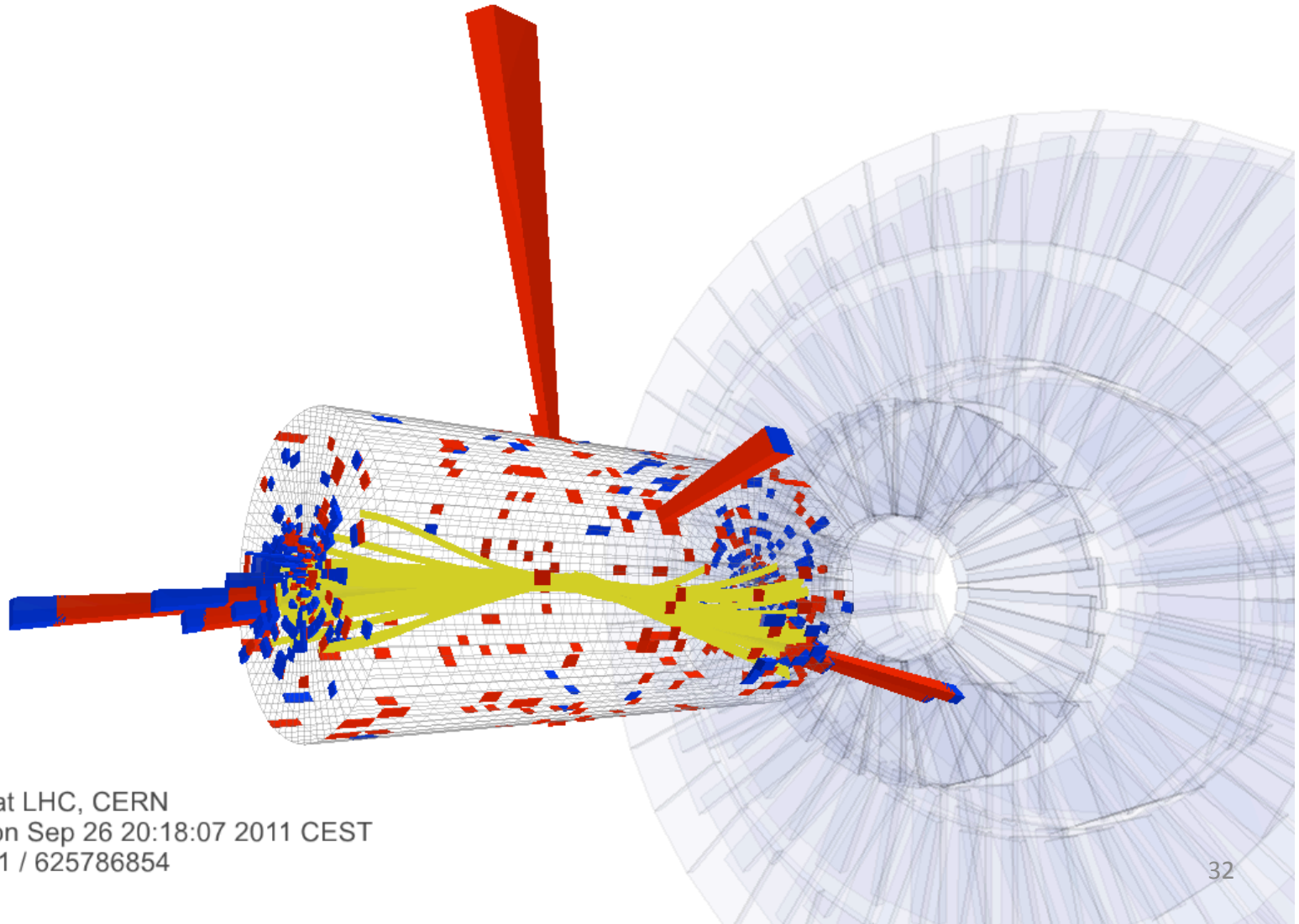
Grande sfida tecnologica!

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

I record di LHC



Come si osserva un Bosone di Higgs

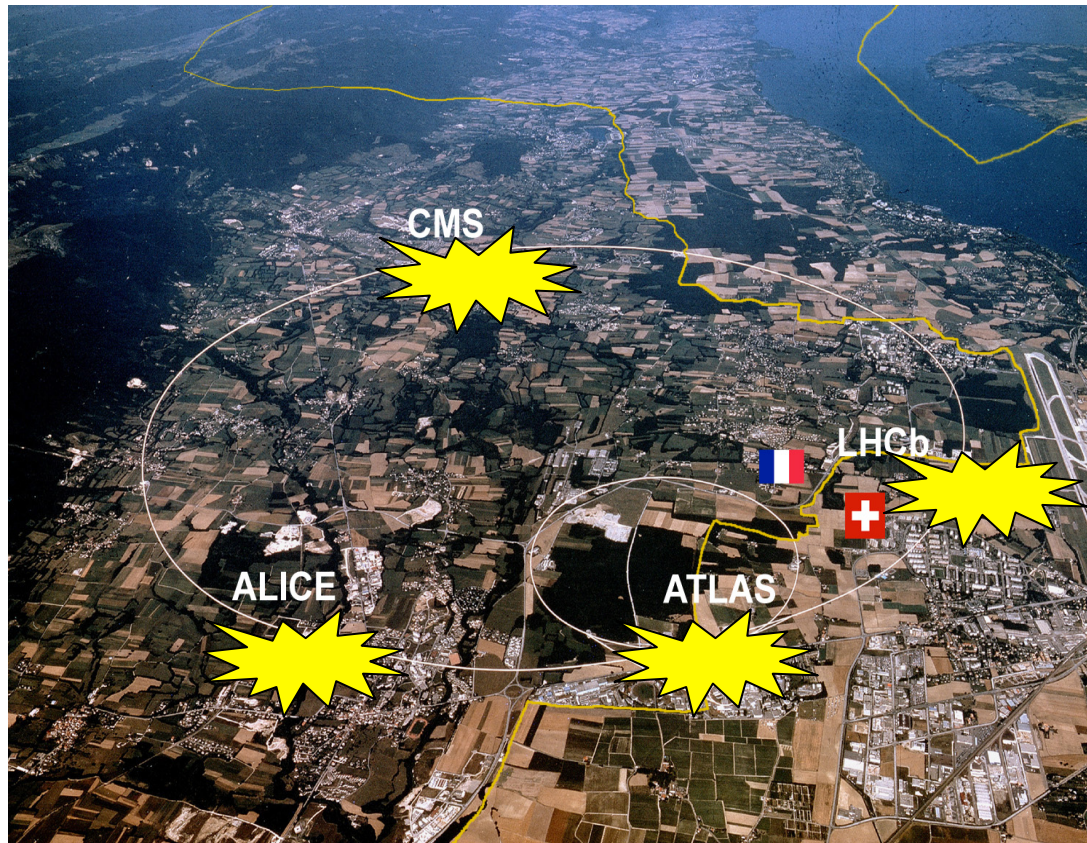


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST
Run/Event: 177201 / 625786854
Lumi section: 450

Rivelatori agli acceleratori

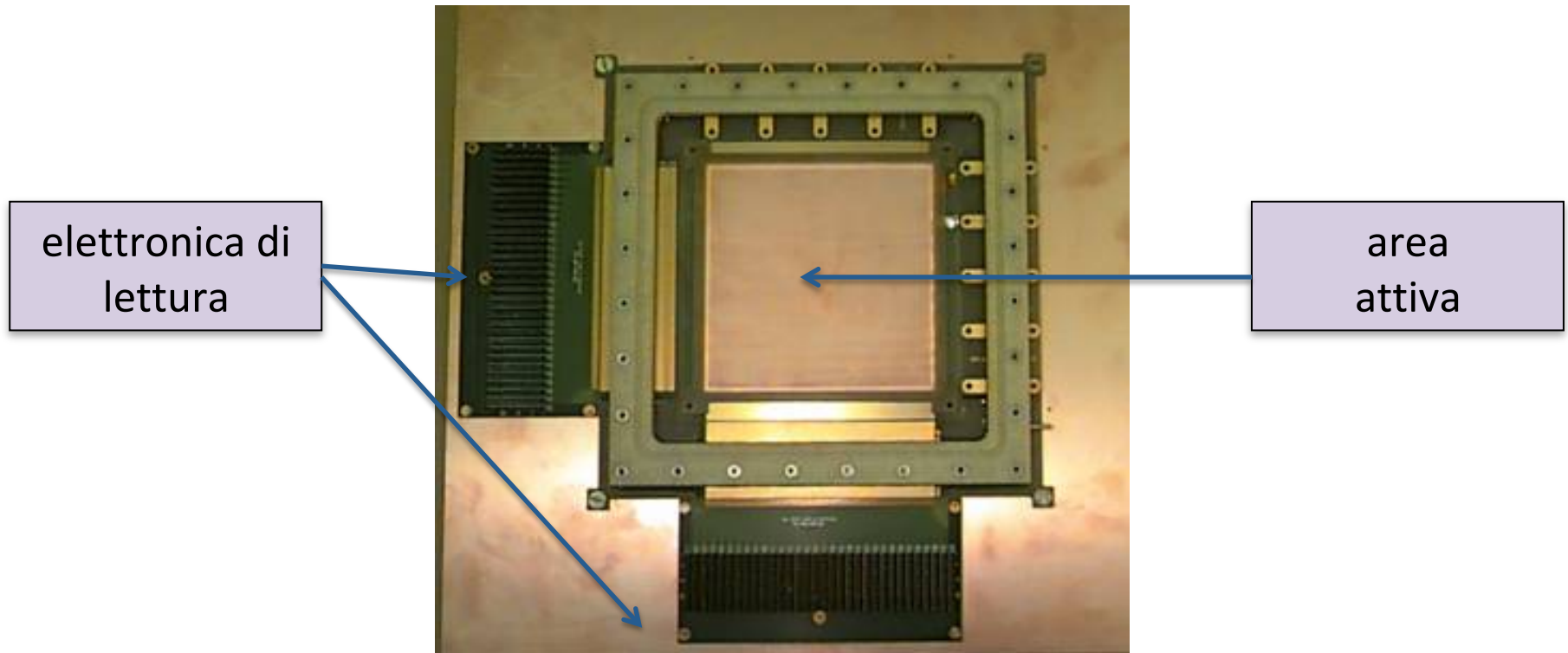
Il rivelatore di particelle si colloca nel punto di interazione per

- 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



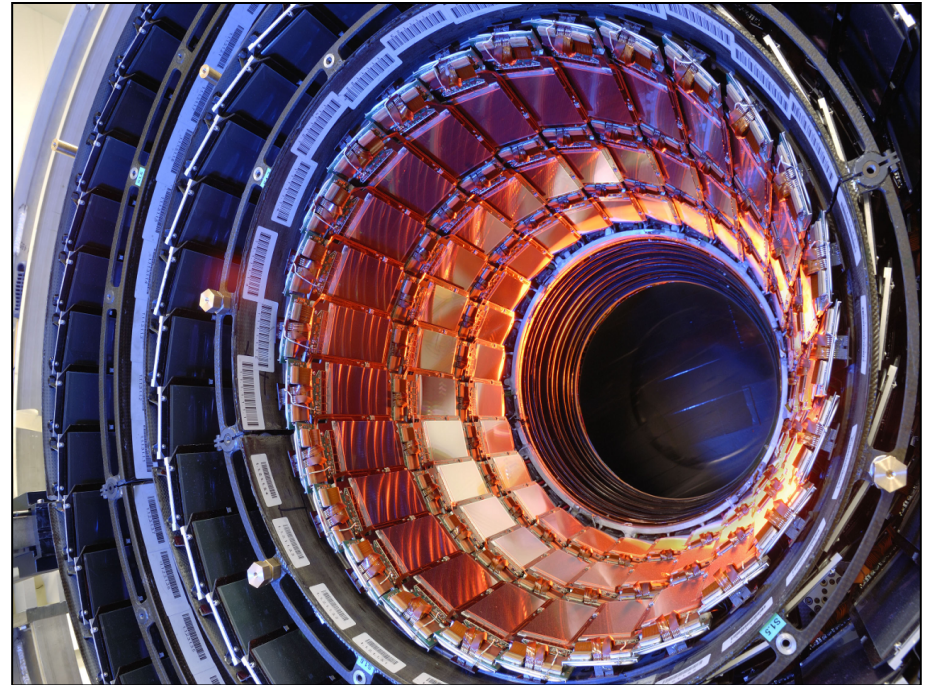
È uno strumento che produce un *segnale osservabile* quando viene colpito da una particella.

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



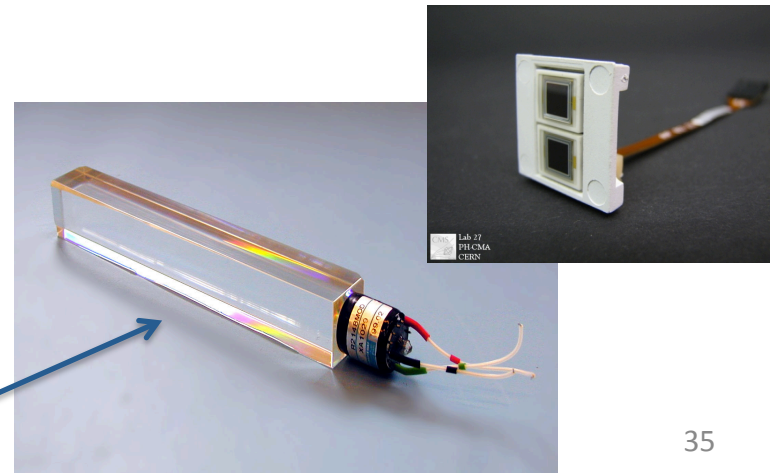
“Gargamelle” (1970-1978)
Camera a bolle



CMS (oggi @LHC):

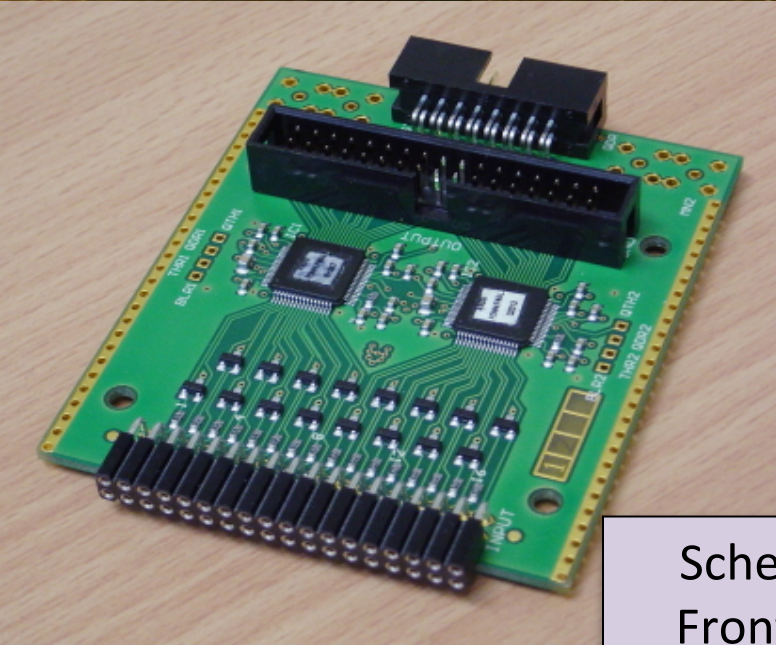
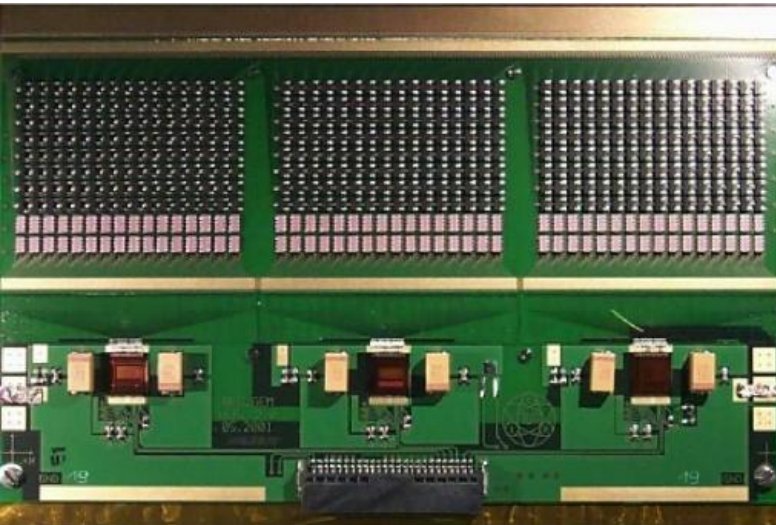
Es. Tracciatore al Silicio

Es. Calorimetro a cristalli scintillanti di PbWO_4

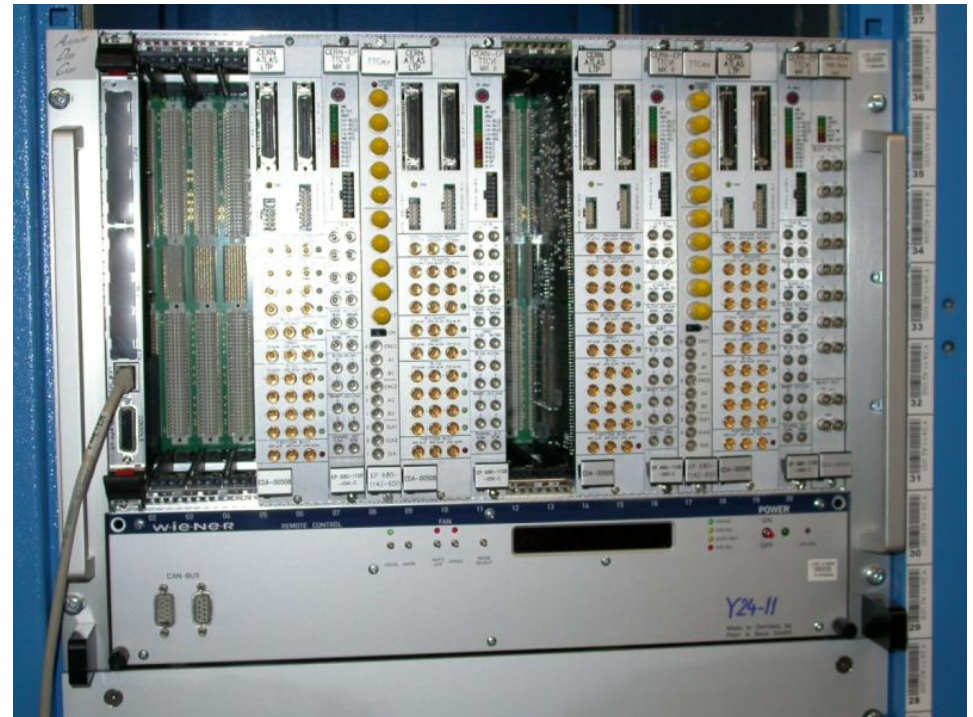


Elettronica di lettura

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

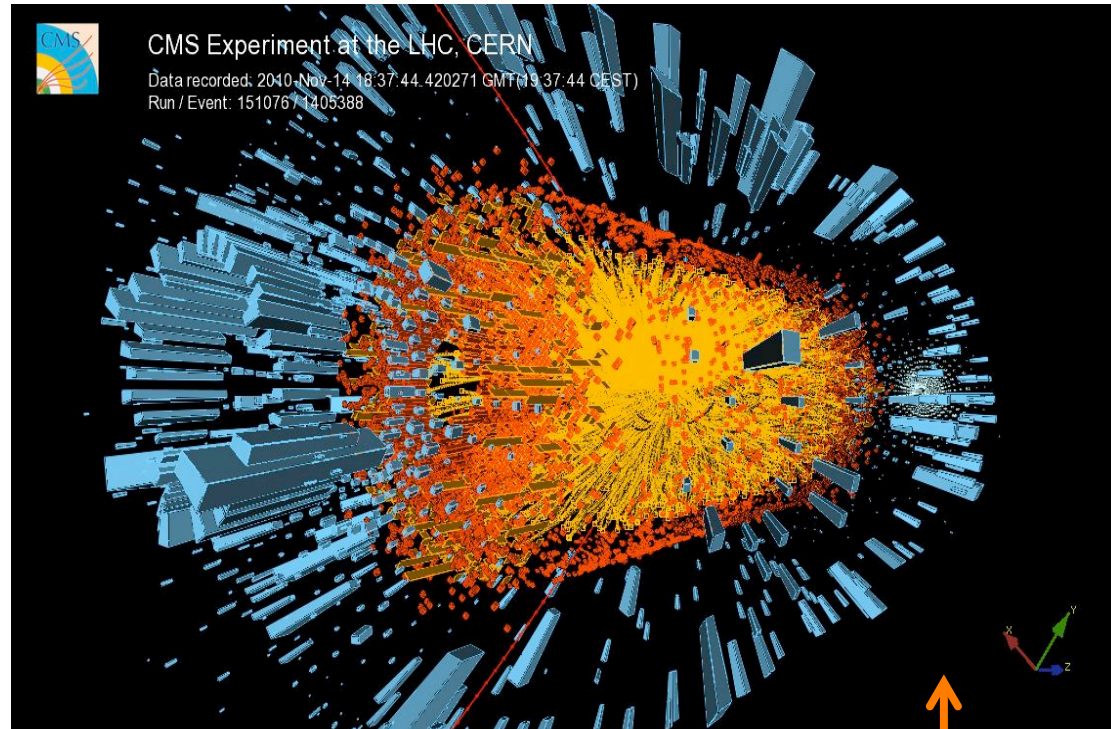
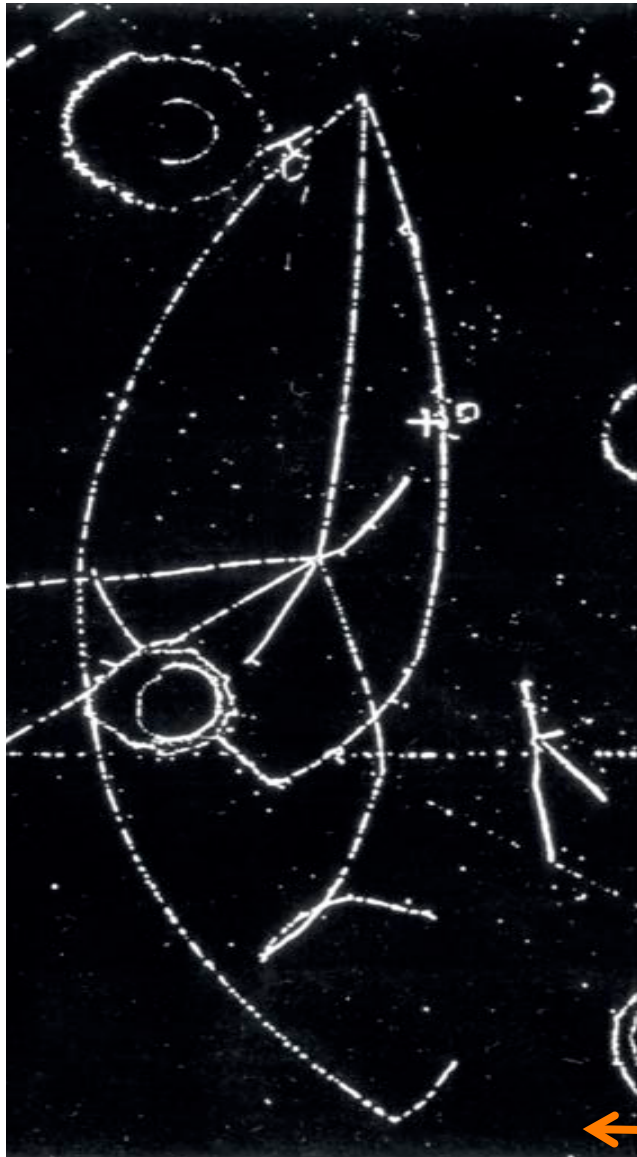
Sono tra i più complessi strumenti scientifici mai costruiti

- 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:

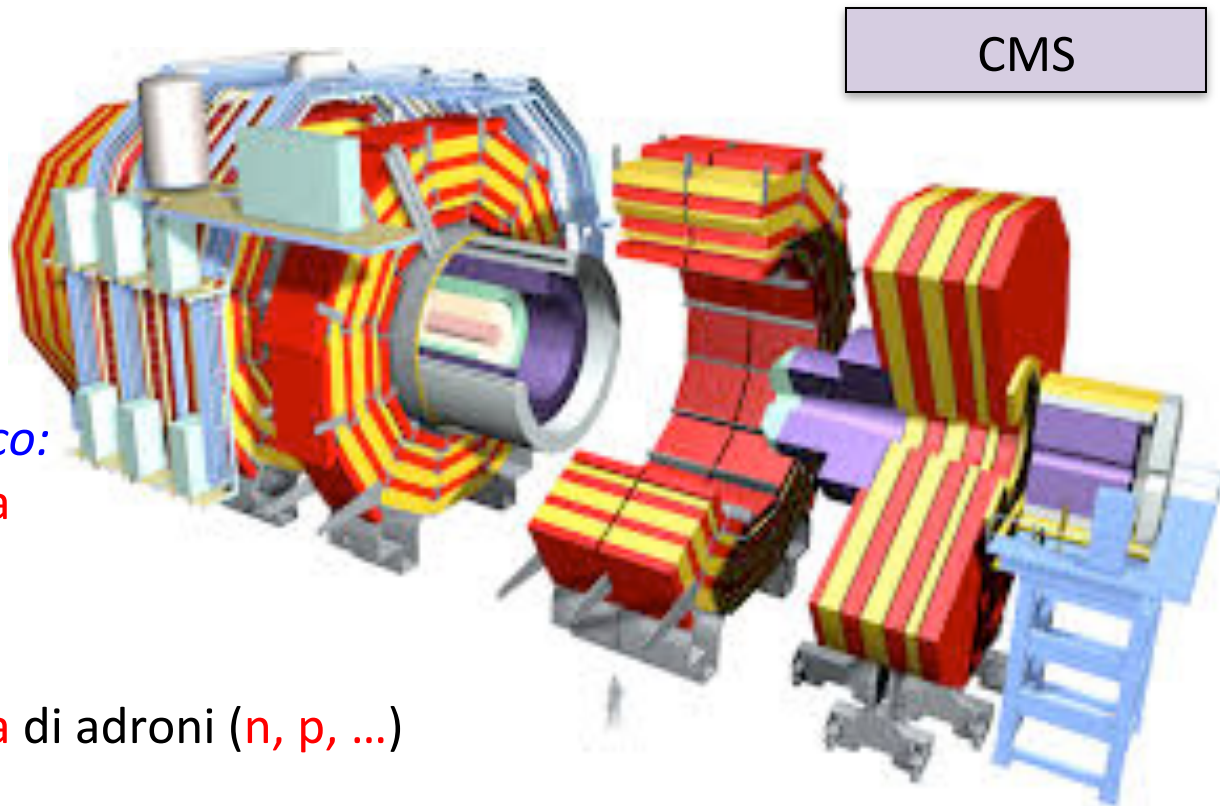
Tracciatore :
ricostruire la **traiettoria**
delle particelle **cariche**

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

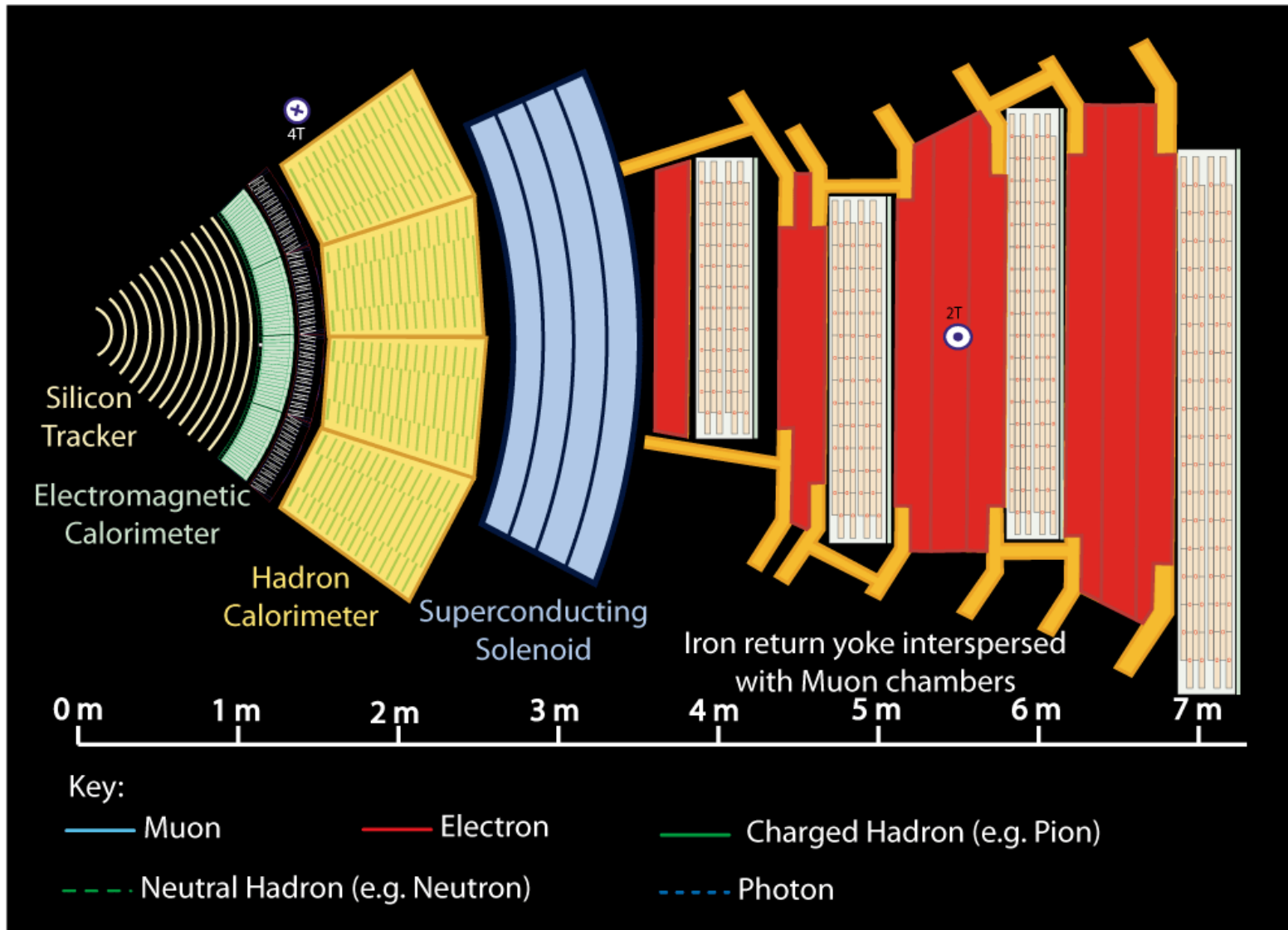
Calorimetro adronico:
assorbire e misurare **energia** di adroni (**n**, **p**, ...)

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

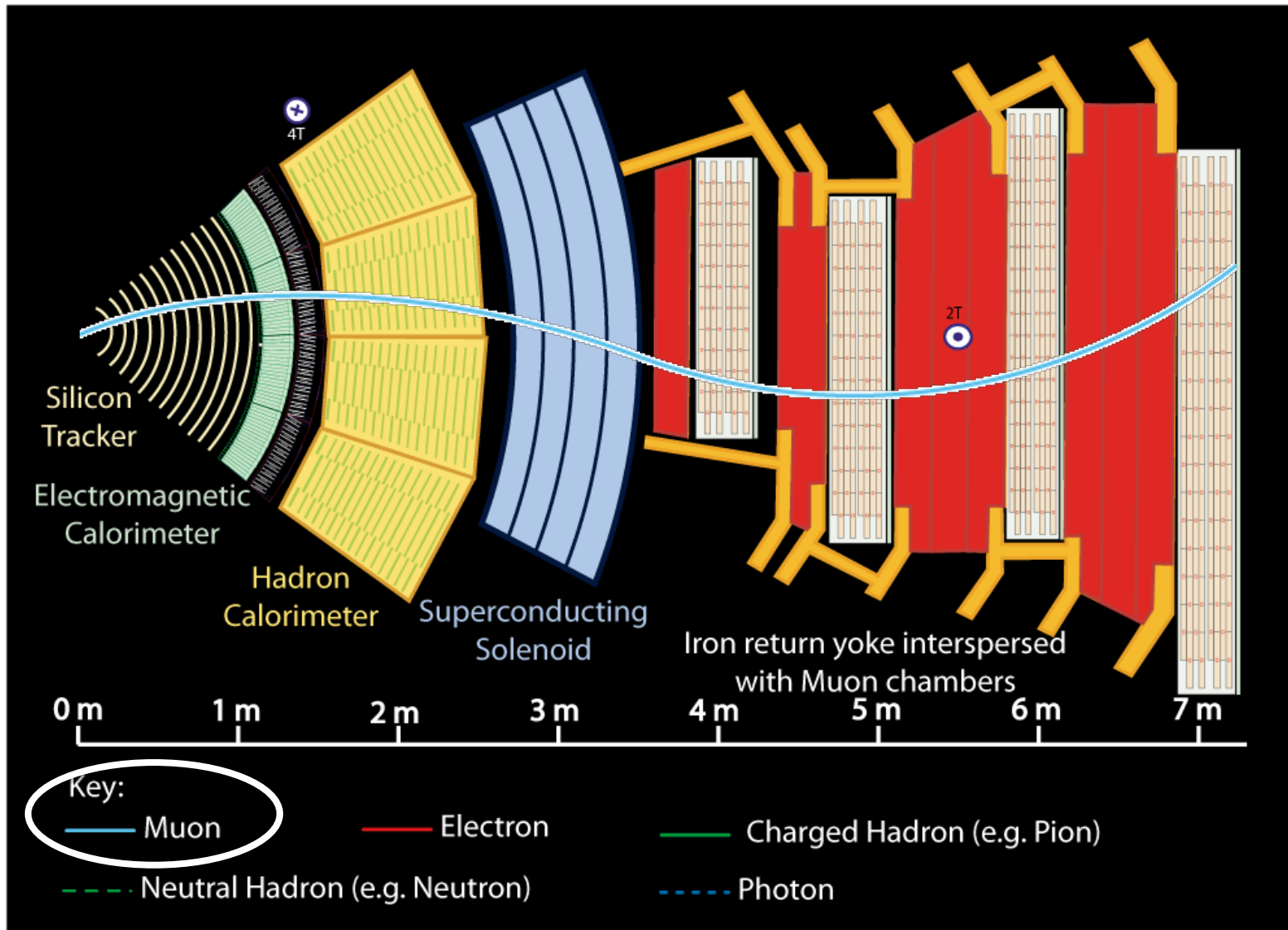
Rivelatore di muoni:
tracciatore esterno



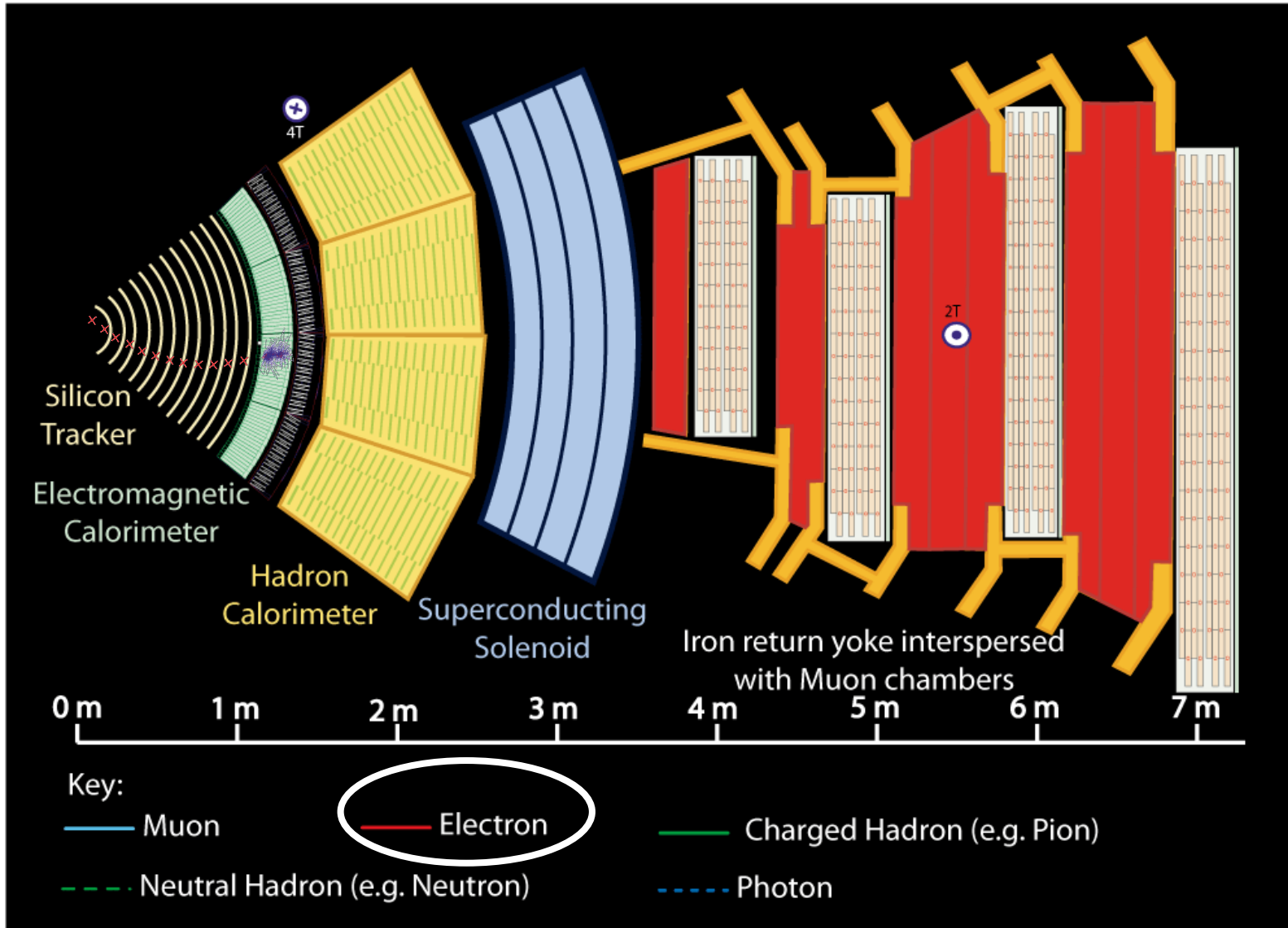
Interazioni delle particelle nel rivelatore



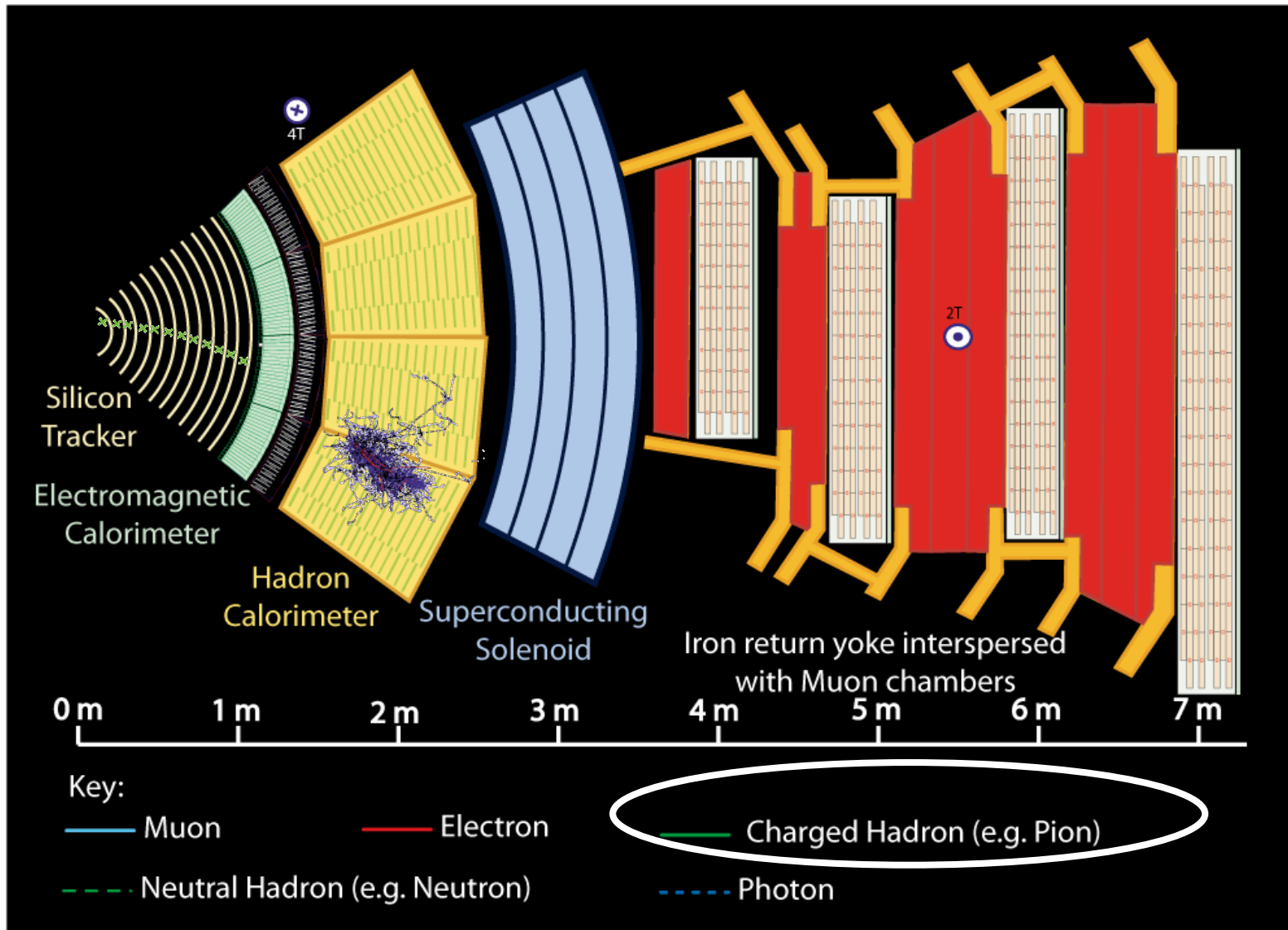
Interazioni delle particelle nel rivelatore



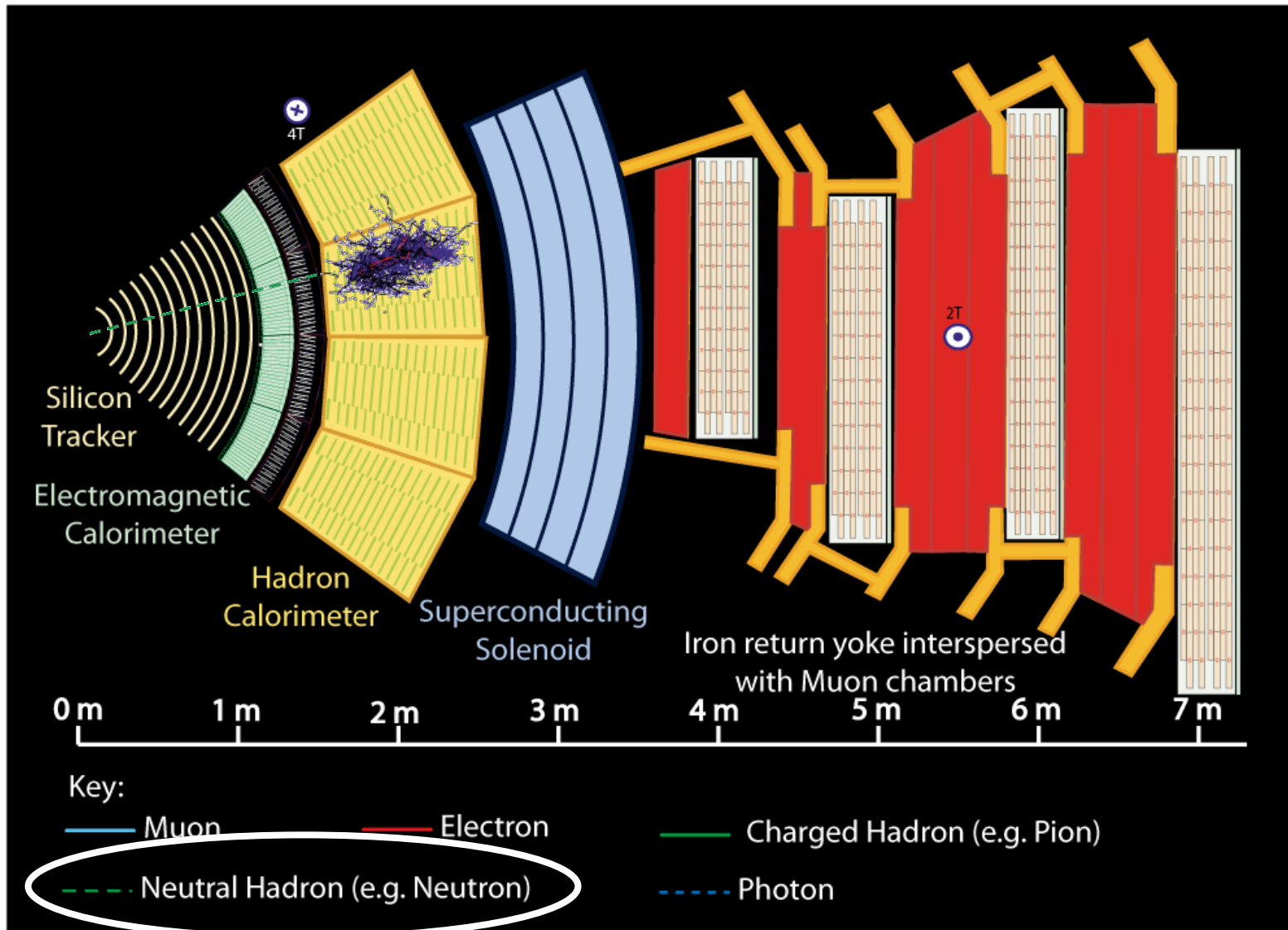
Interazioni delle particelle nel rivelatore



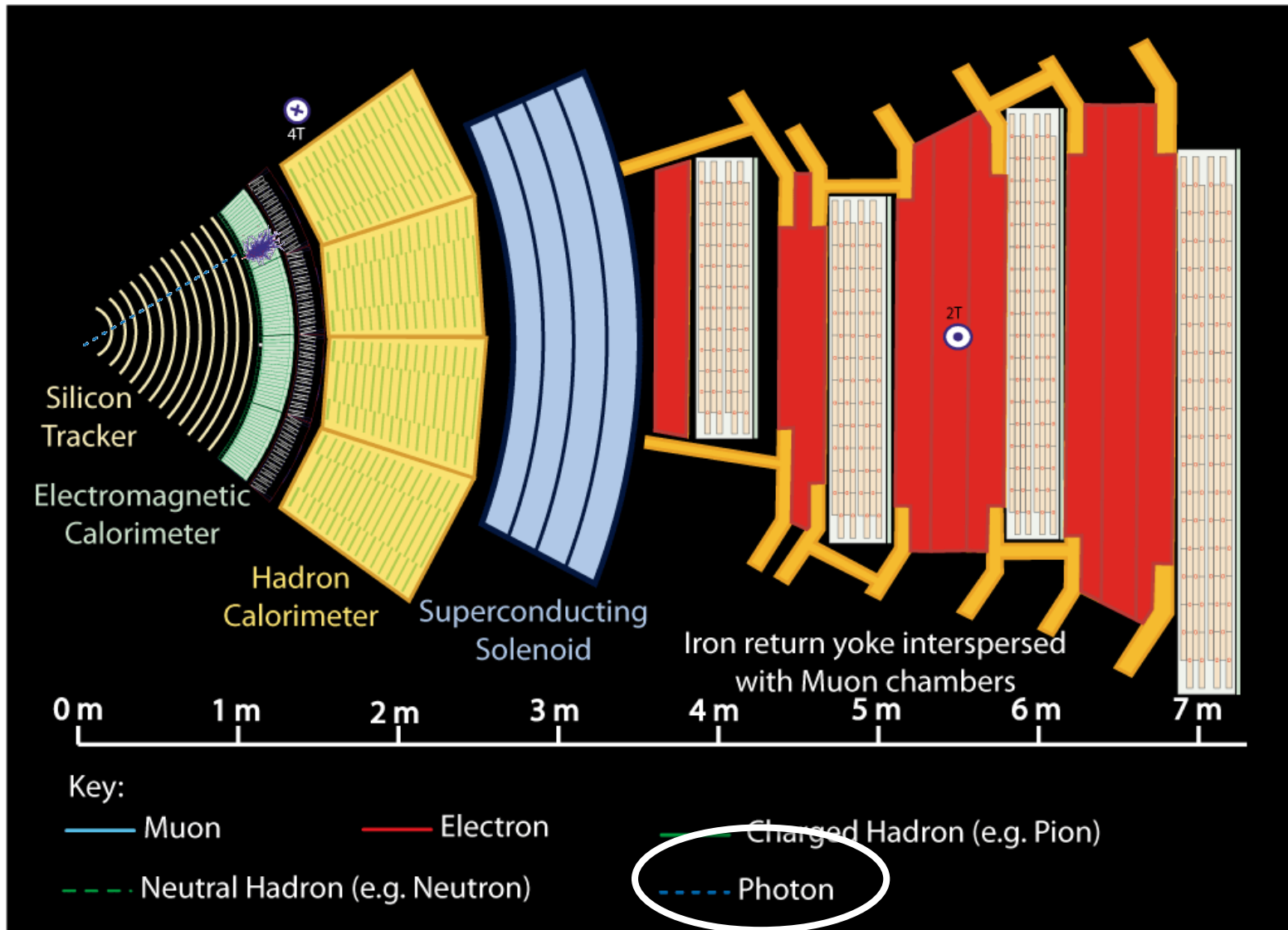
Interazioni delle particelle nel rivelatore



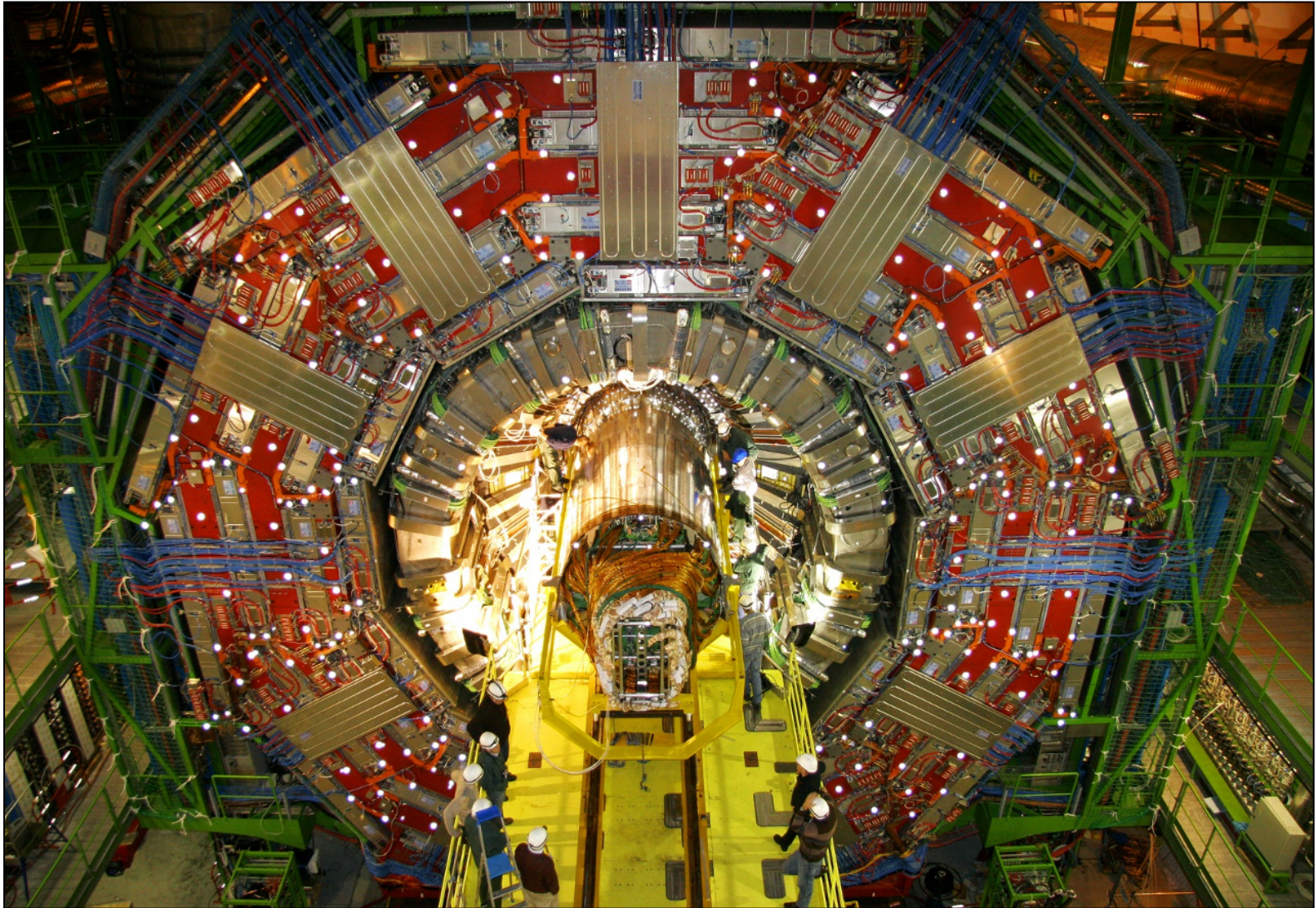
Interazioni delle particelle nel rivelatore



Interazioni delle particelle nel rivelatore



Il rivelatore CMS



Il rivelatore CMS

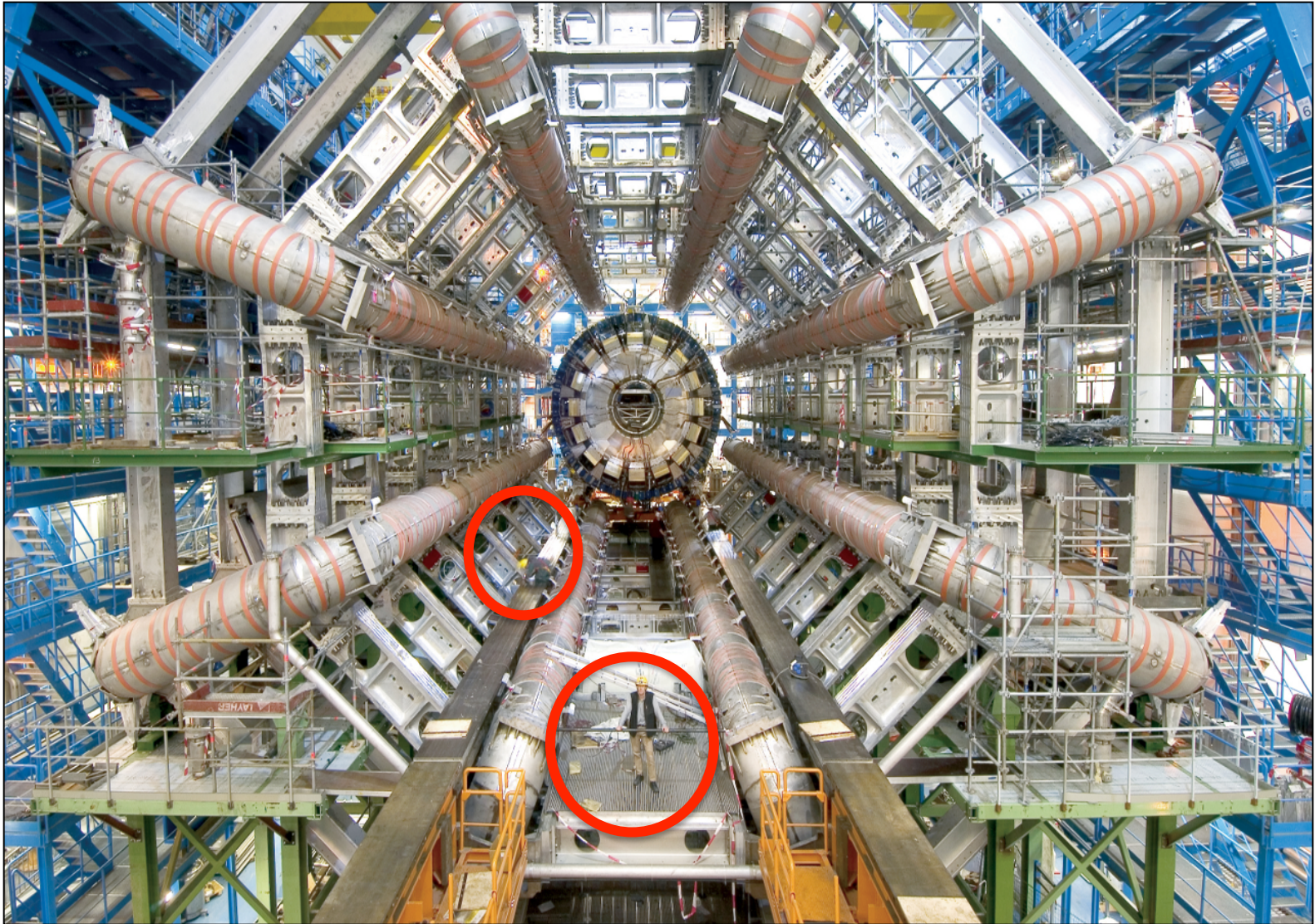


Peso: 12500 tonnellate
Diametro : 15 m
Lunghezza : 21,6 m
Campo magnetico : 3.8 T

Il calorimetro elettromagnetico di CMS (una piccola parte)

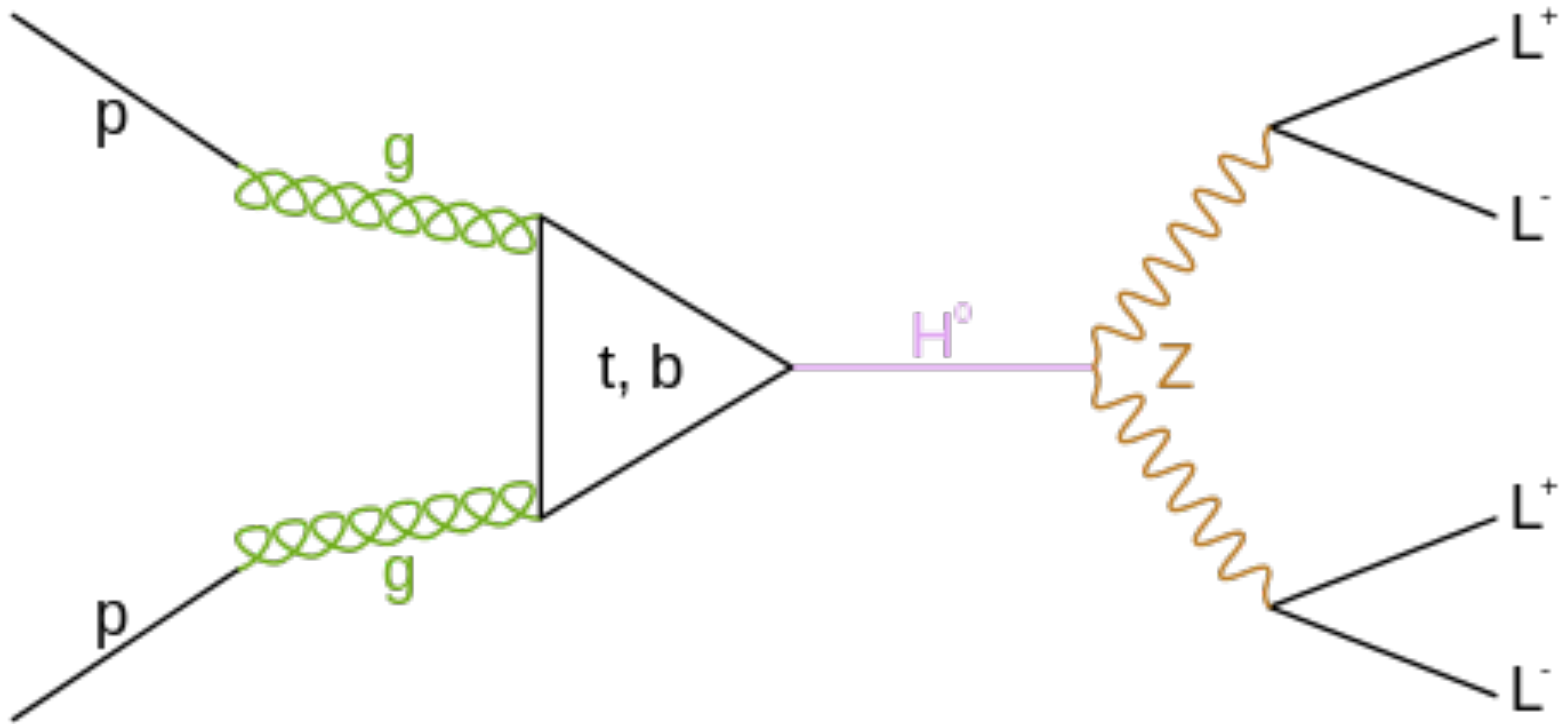


Il rivelatore ATLAS



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 $t \approx 10^{-21} \text{ s}$

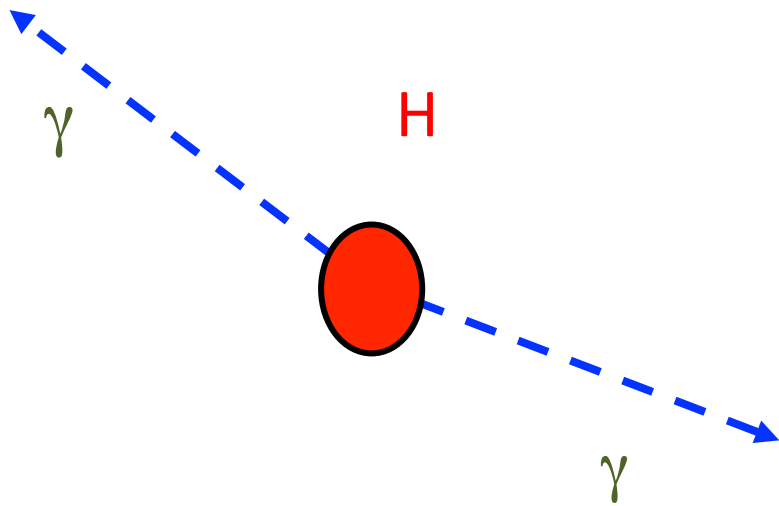


Non possiamo “vedere” la reazione, ma solo le particelle finali.

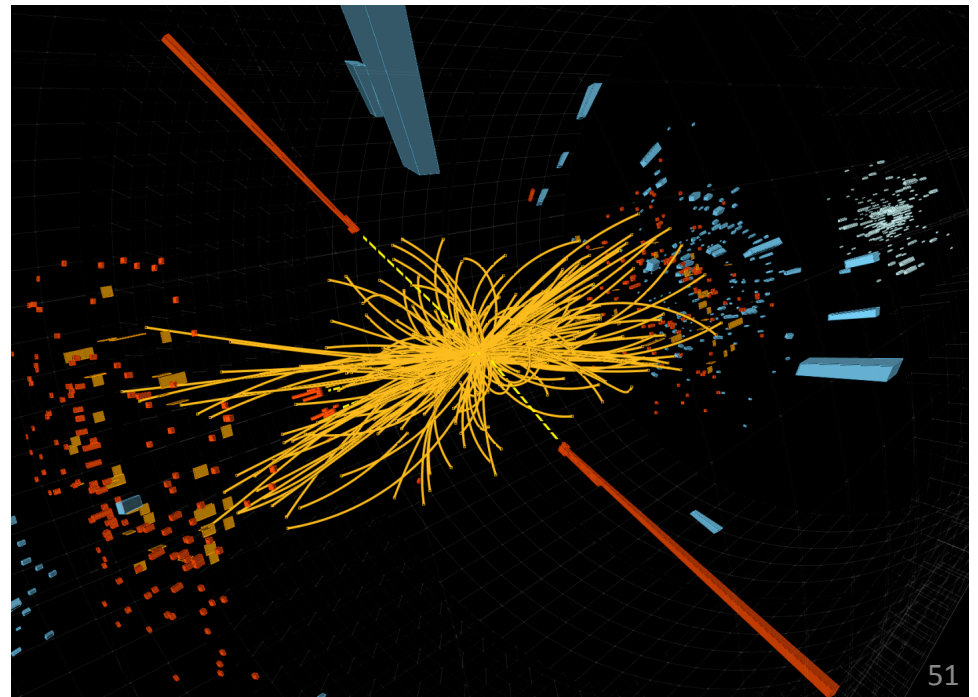
Ricostruiamo la massa del bosone misurando energia e direzioni delle particelle in cui decade (leggi di conservazione e cinematica relativistica)⁵⁰

Ricostruzione del bosone di Higgs

Tanti decadimenti diversi possibili. Concentriamoci solo su due:



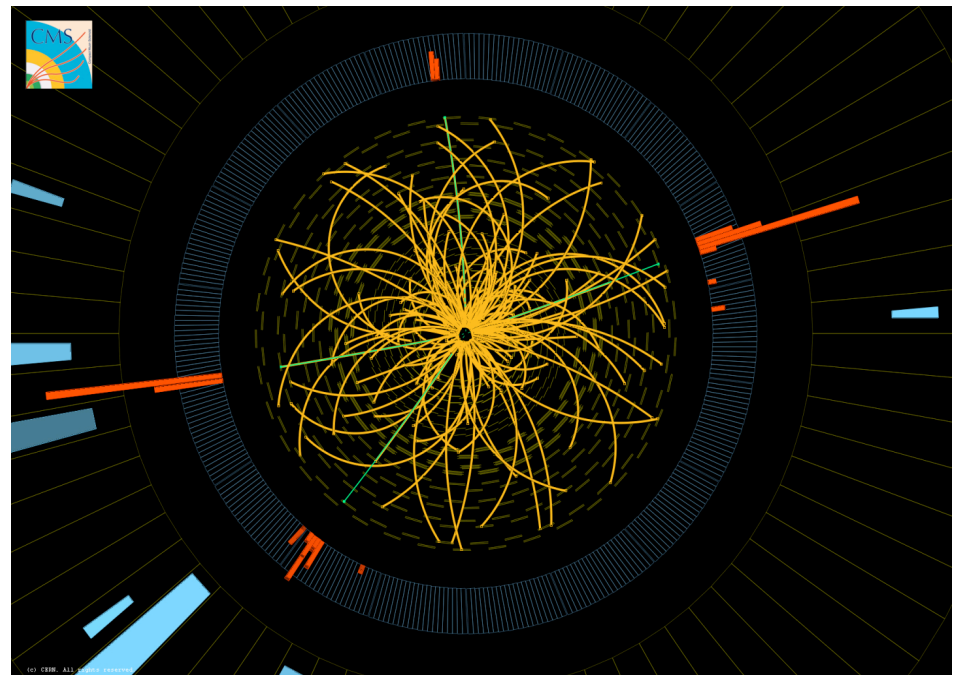
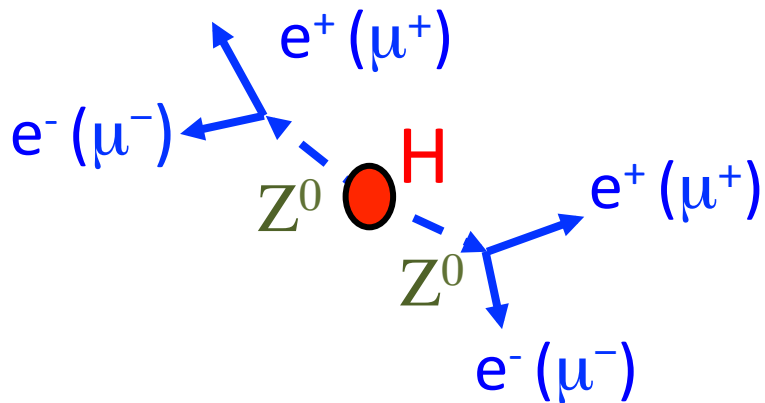
$H \rightarrow \gamma\gamma$
*Stato finale: due fotoni
isolati di alta energia*



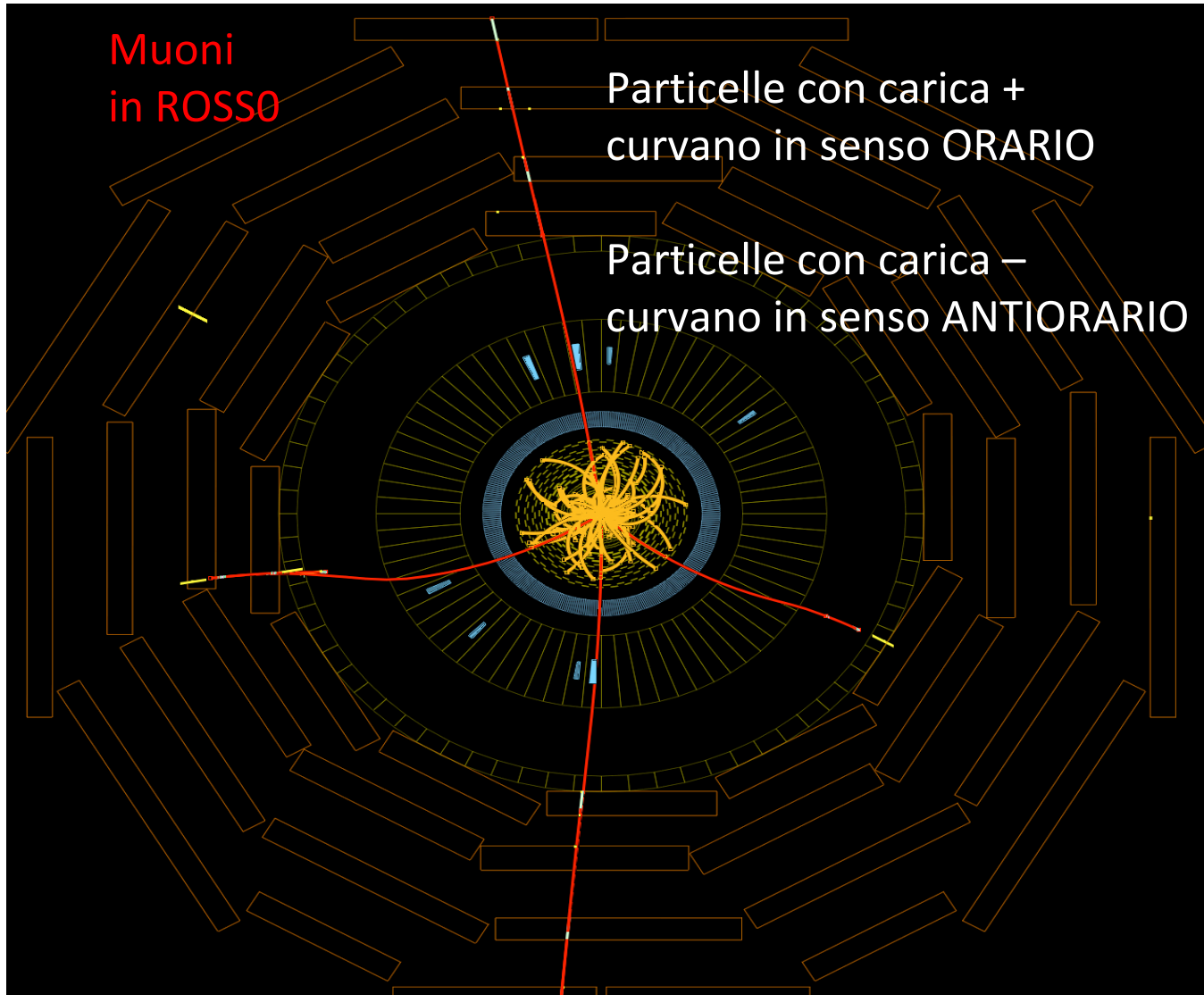
Ricostruzione del bosone di Higgs

Tanti decadimenti diversi possibili. Concentriamoci solo su due:

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

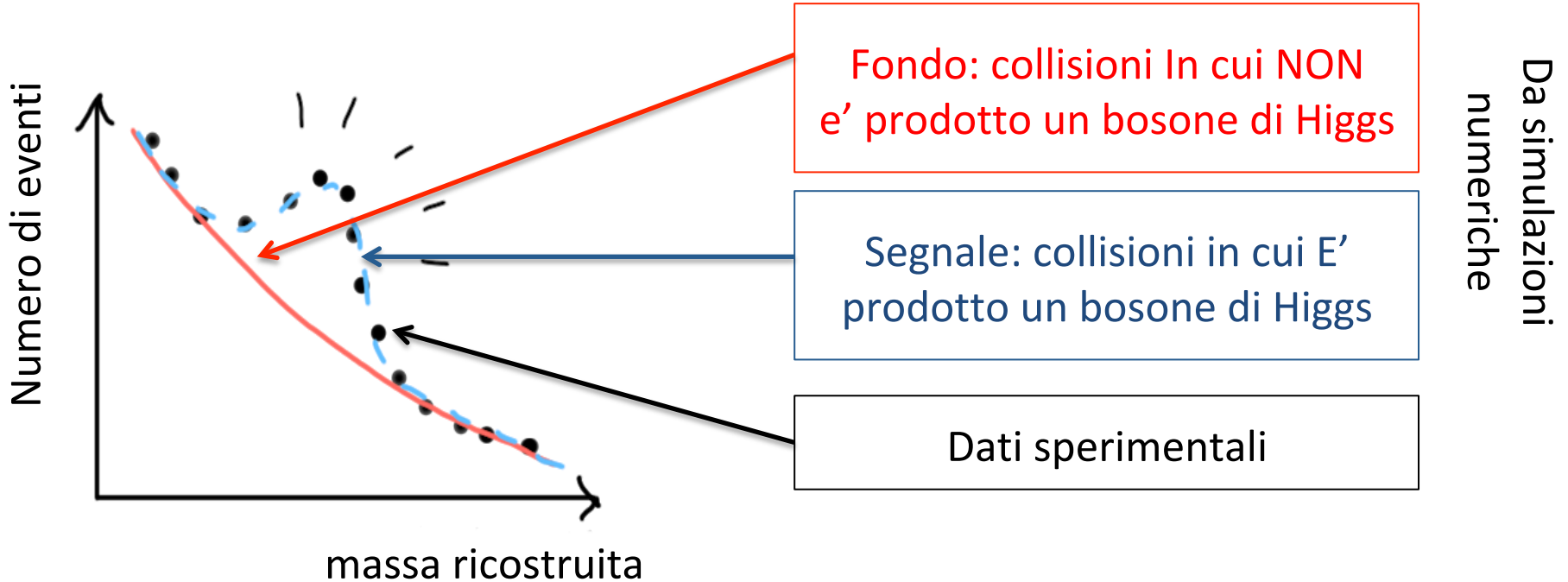


Higgs?



Scoprire una nuova particella

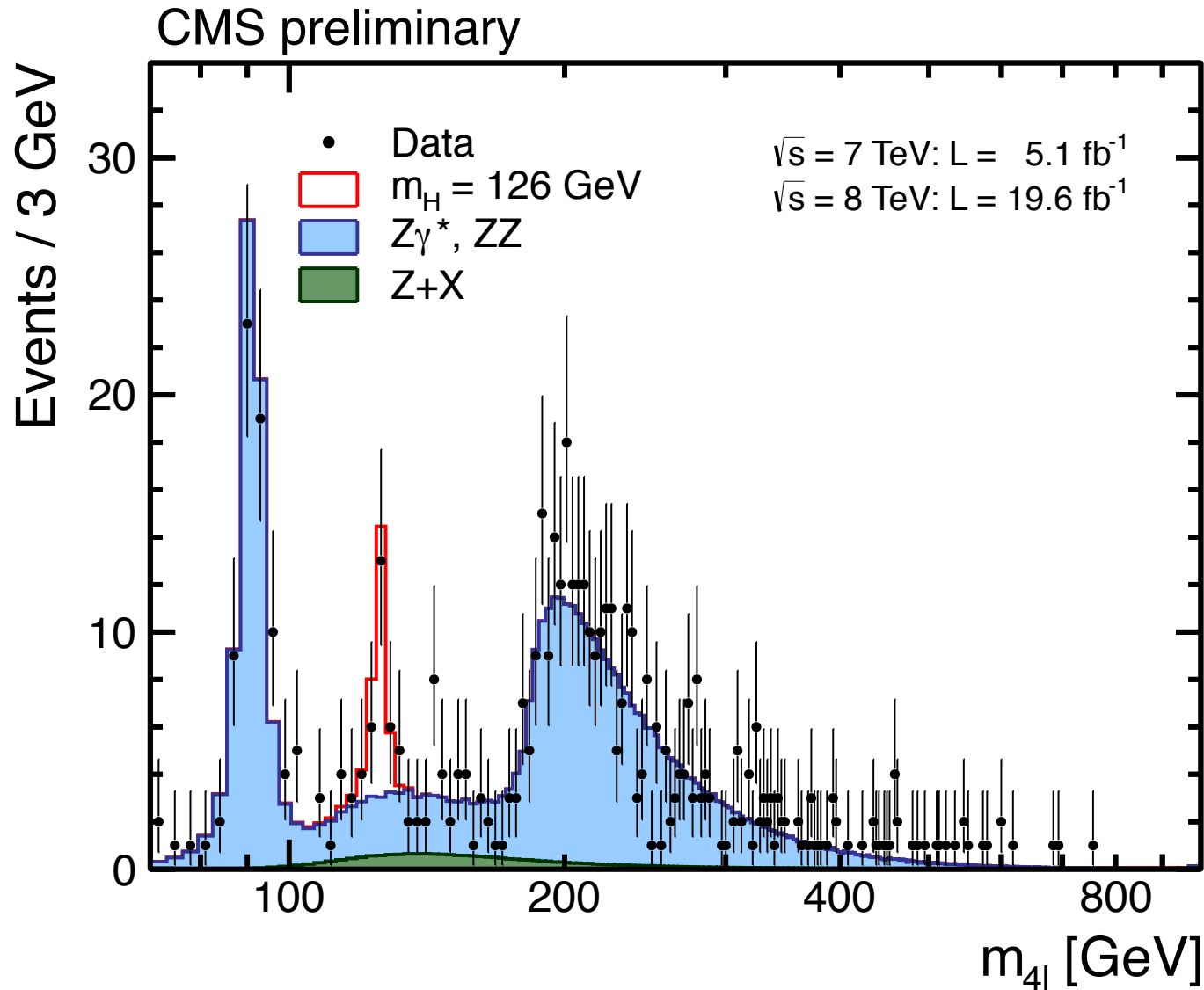
Ci sono tanti processi che possono avere 2 fotoni o 4 leptoni nello stato finale



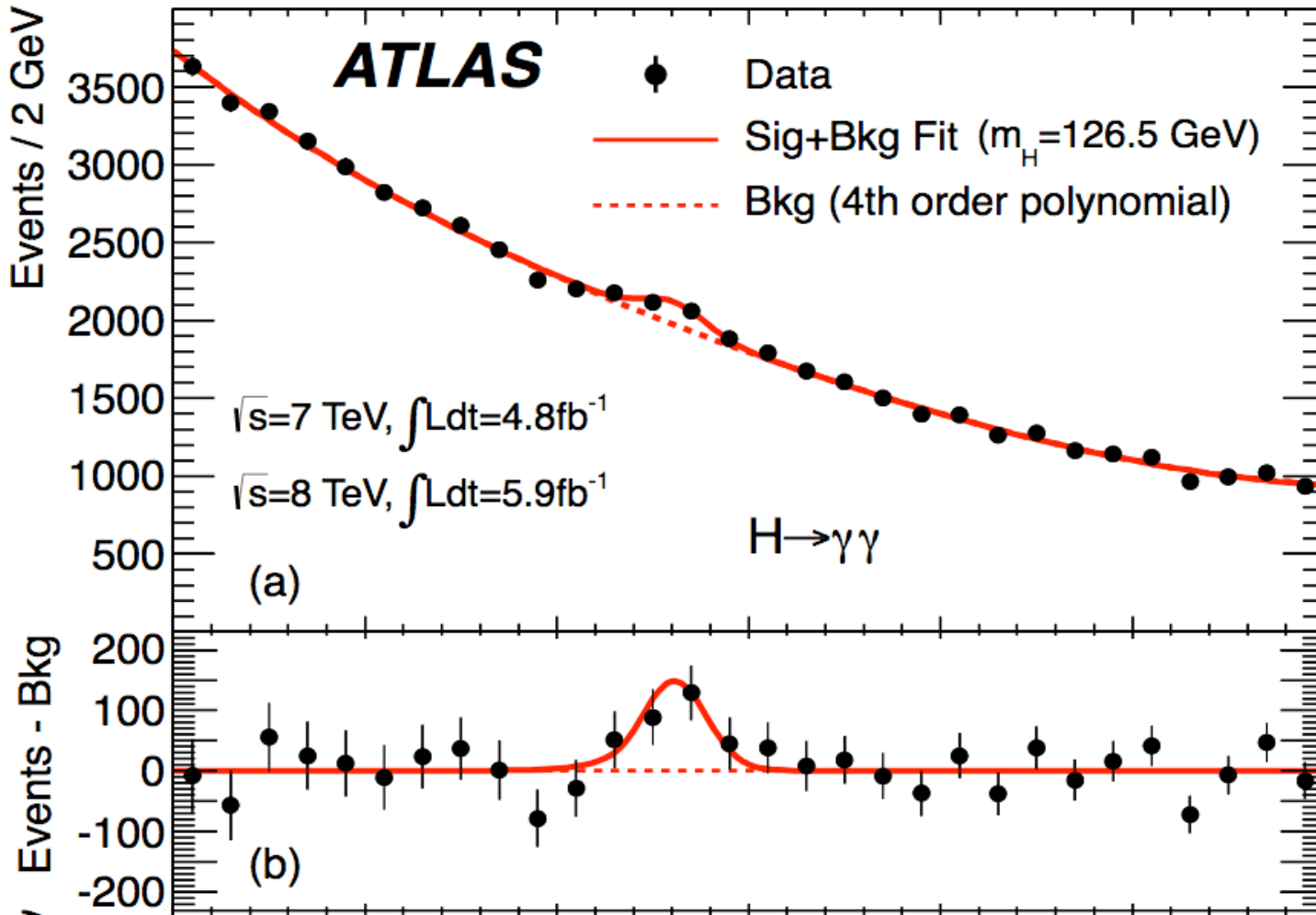
Se si osserva un eccesso localizzato rispetto alla distribuzione attesa per il fondo si può dire di aver scoperto una nuova particella

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

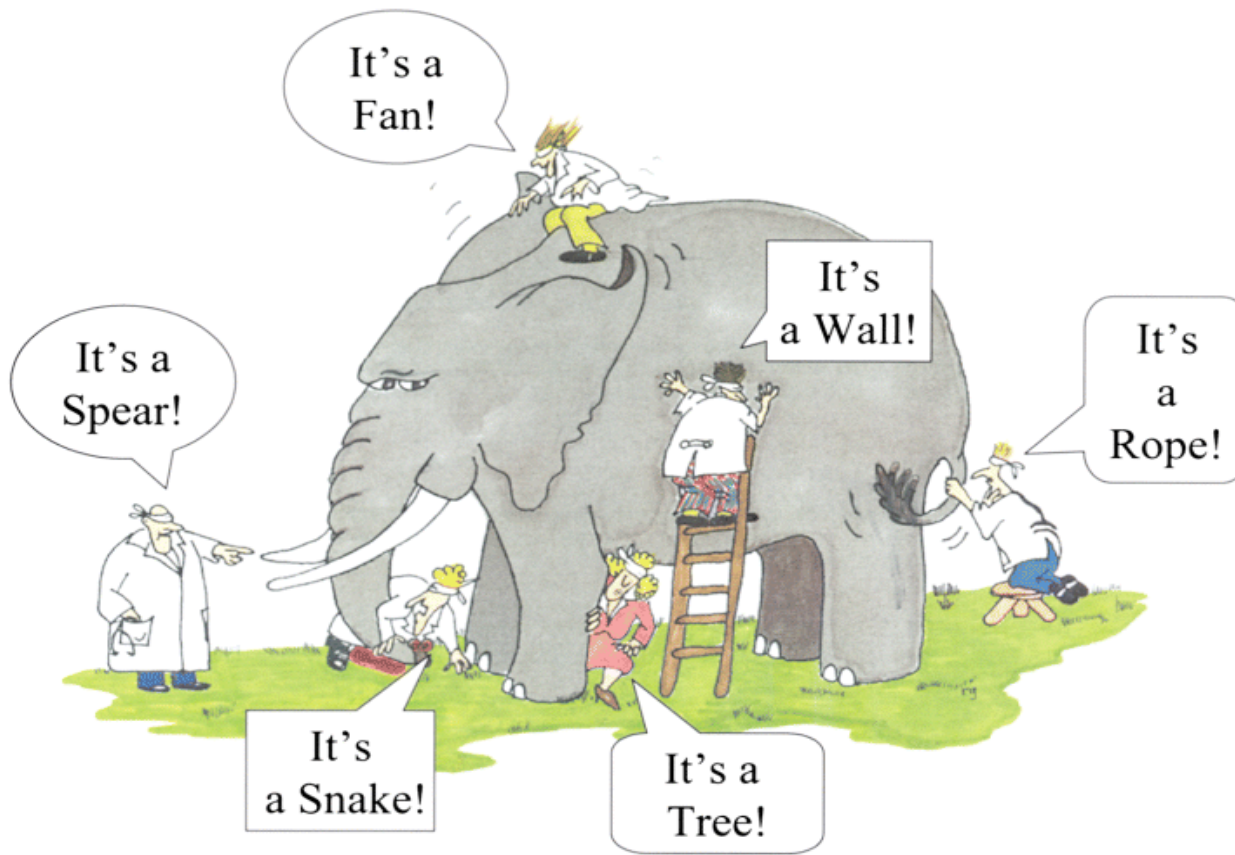


E' lui o non e' lui?

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

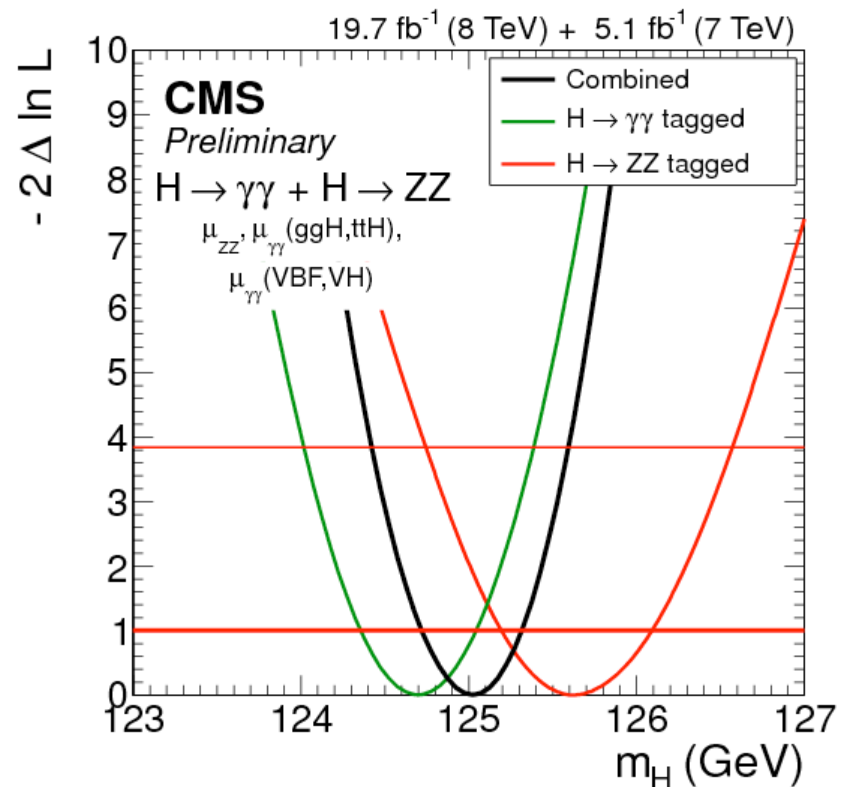
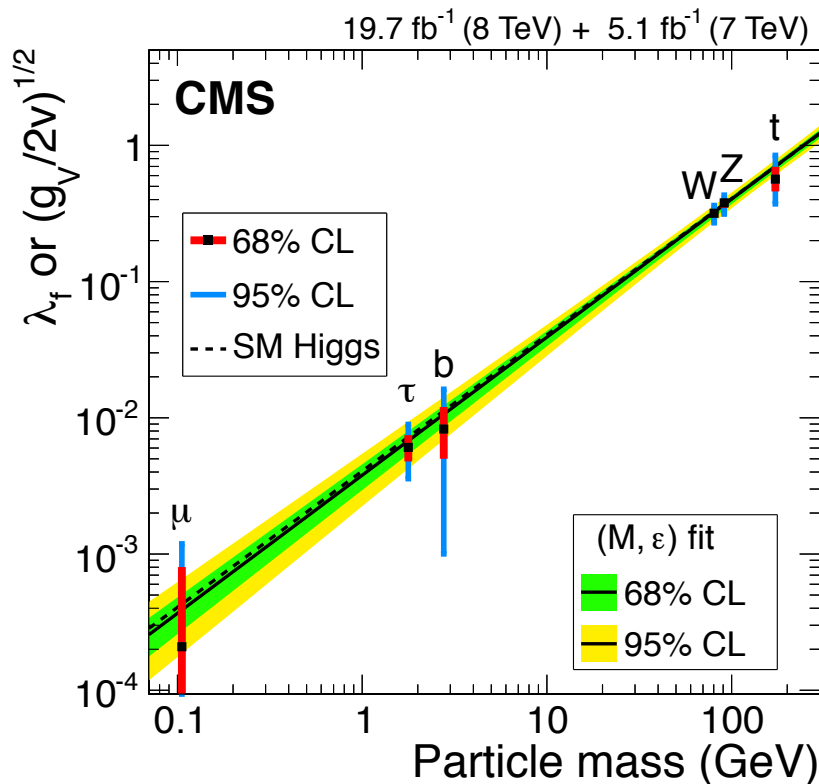


E' lui o non e' lui?

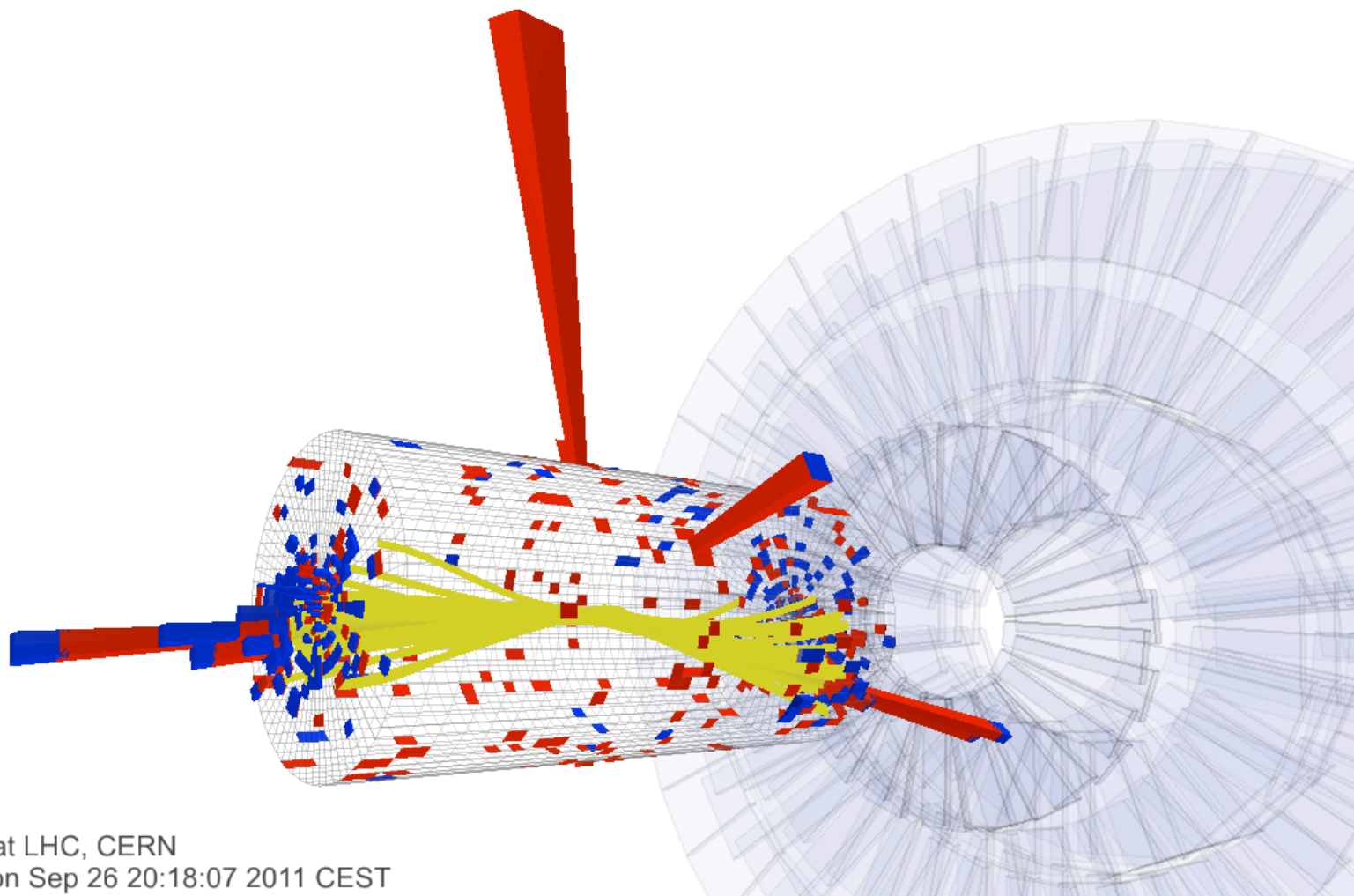
Esiste una nuova particella, con una massa di circa 125 GeV

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?



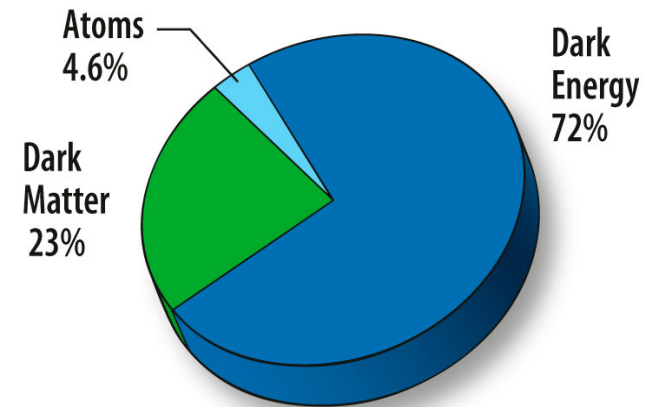
Il programma di LHC non si limita alla ricerca del bosone di Higgs

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

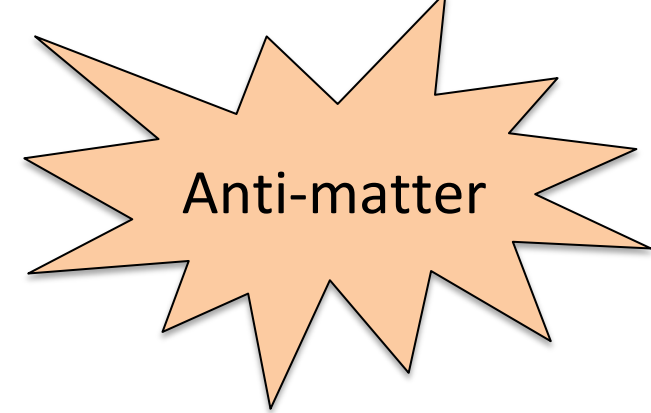
Gli astronomi ci dicono che solo il 5% dell'universo è fatto di materia visibile: il resto è costituito da *materia oscura* ed *energia oscura*



Cos'è la materia oscura?

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

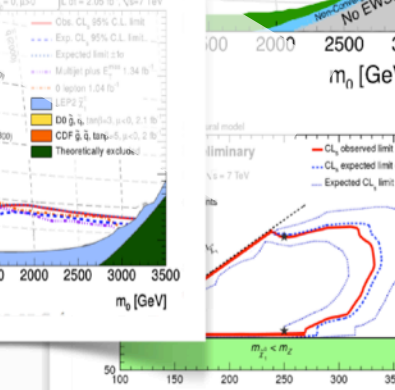
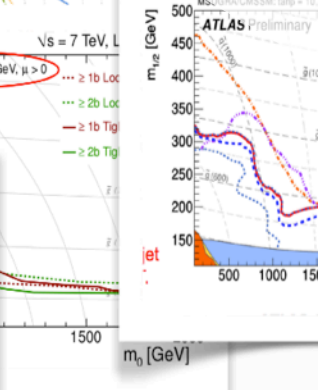
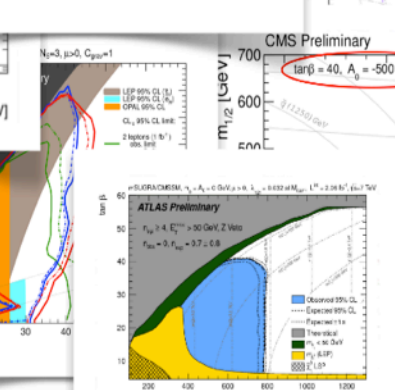
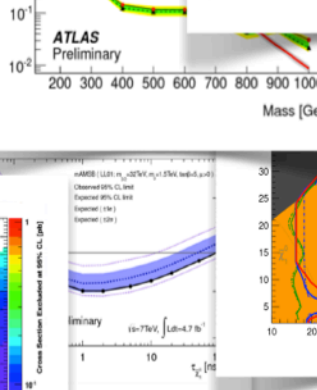
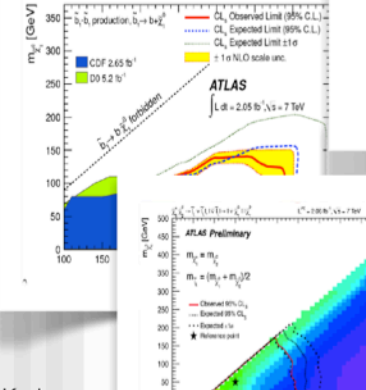
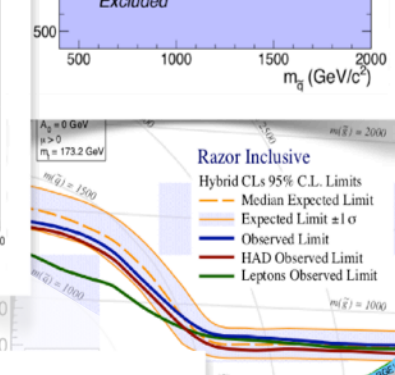
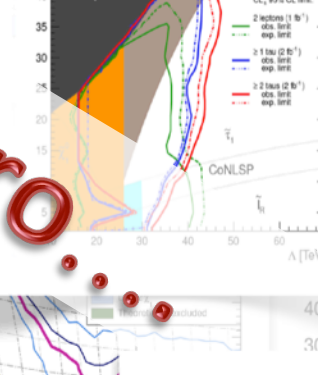
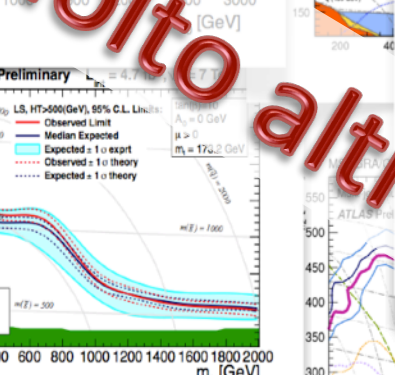
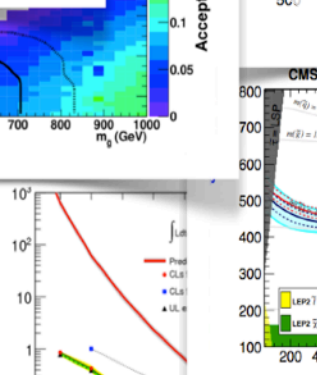
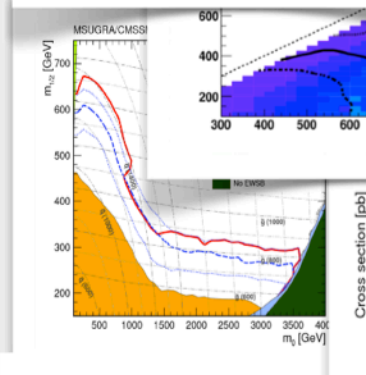
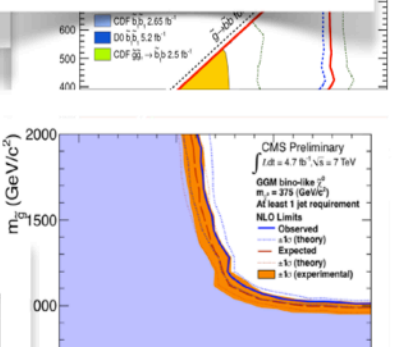
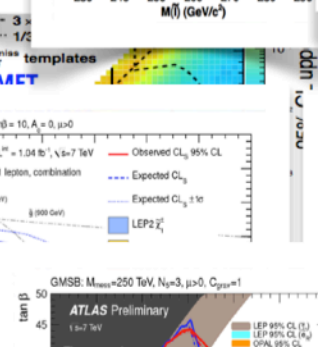
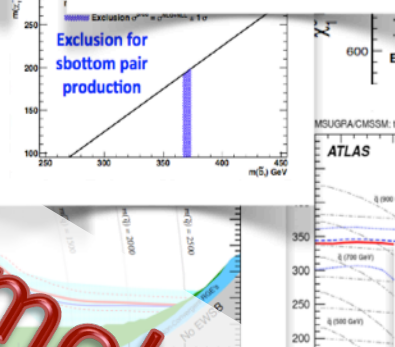
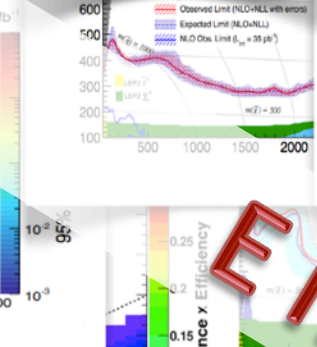
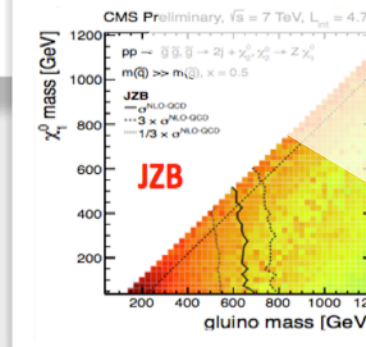
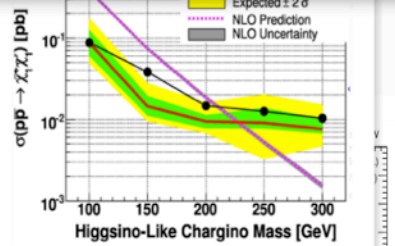
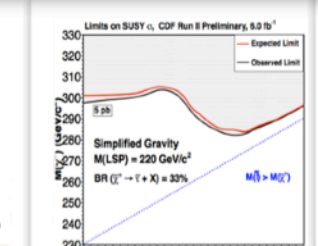
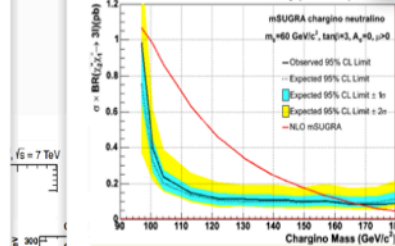
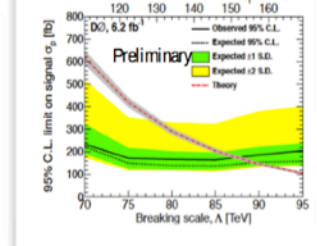
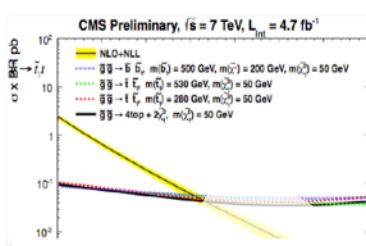
Molte questioni aperte



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

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

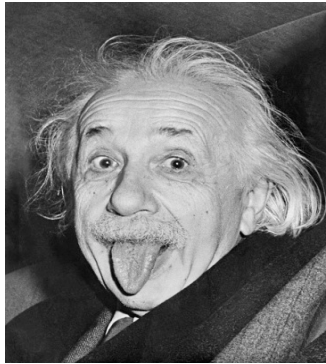
Dove e' andata a finire?



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

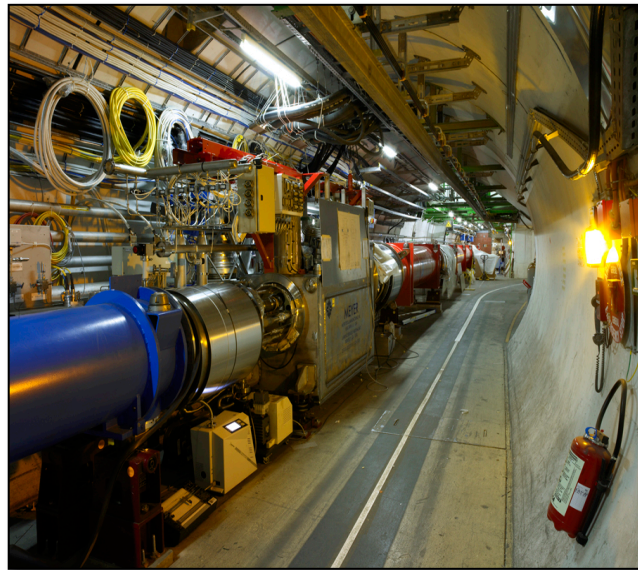
→ Elettro
magnetismo →

100%
scienza

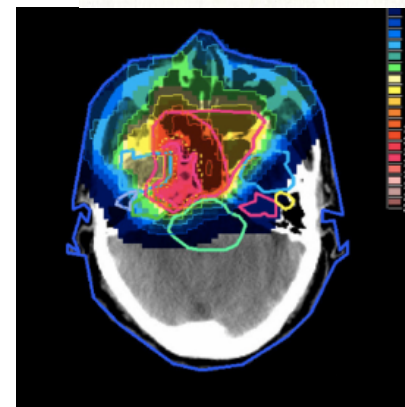
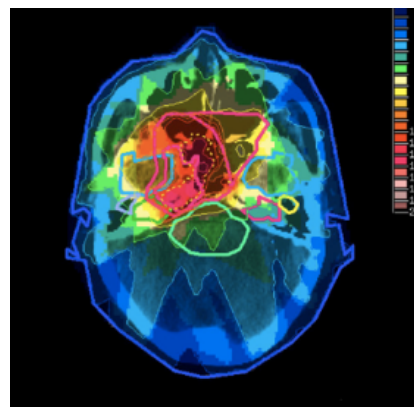
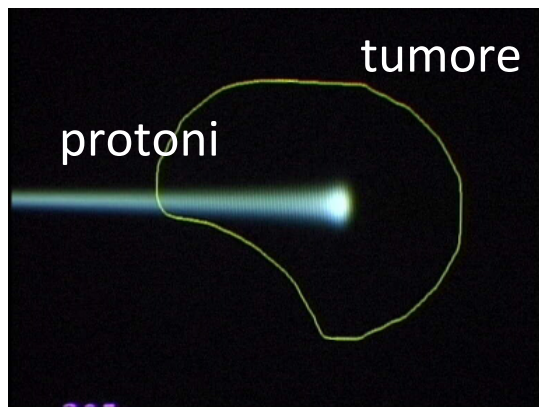
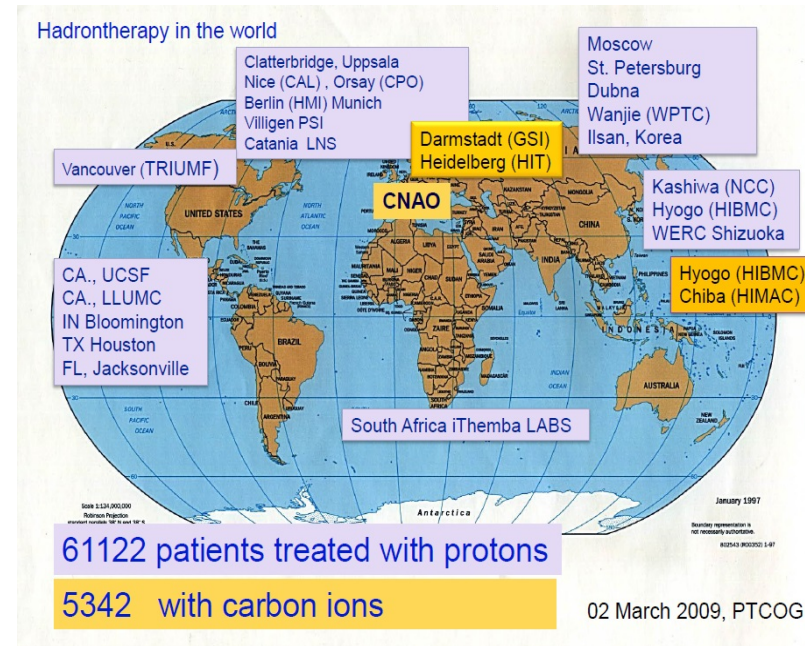


Telefoni:
usano le onde
elettromagnetiche
per comunicare

Acceleratori: sviluppati nei laboratori di fisica e usati negli ospedali

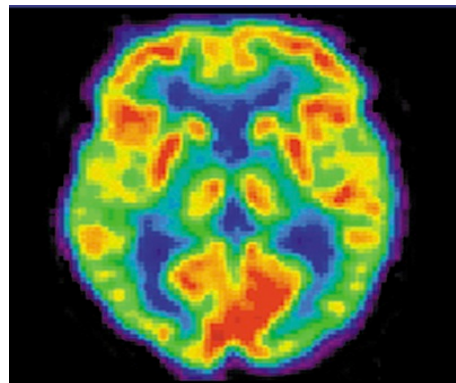
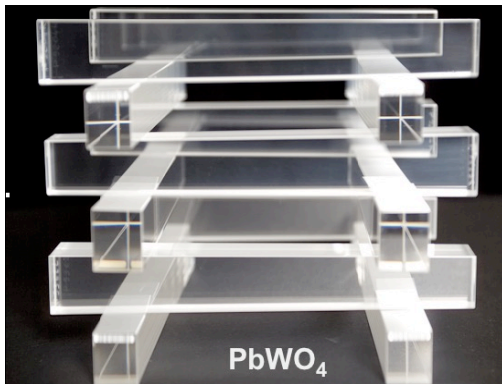
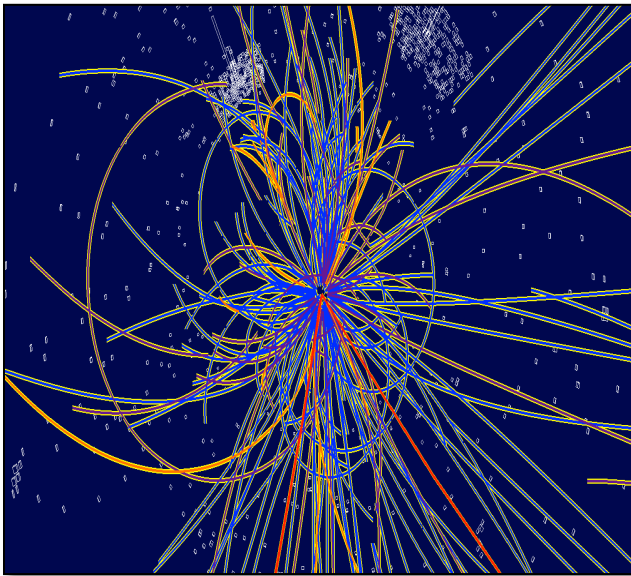


~30.000 acceleratori nel mondo
~17.000 usati in medicina



Esempio:
Adroterapia

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

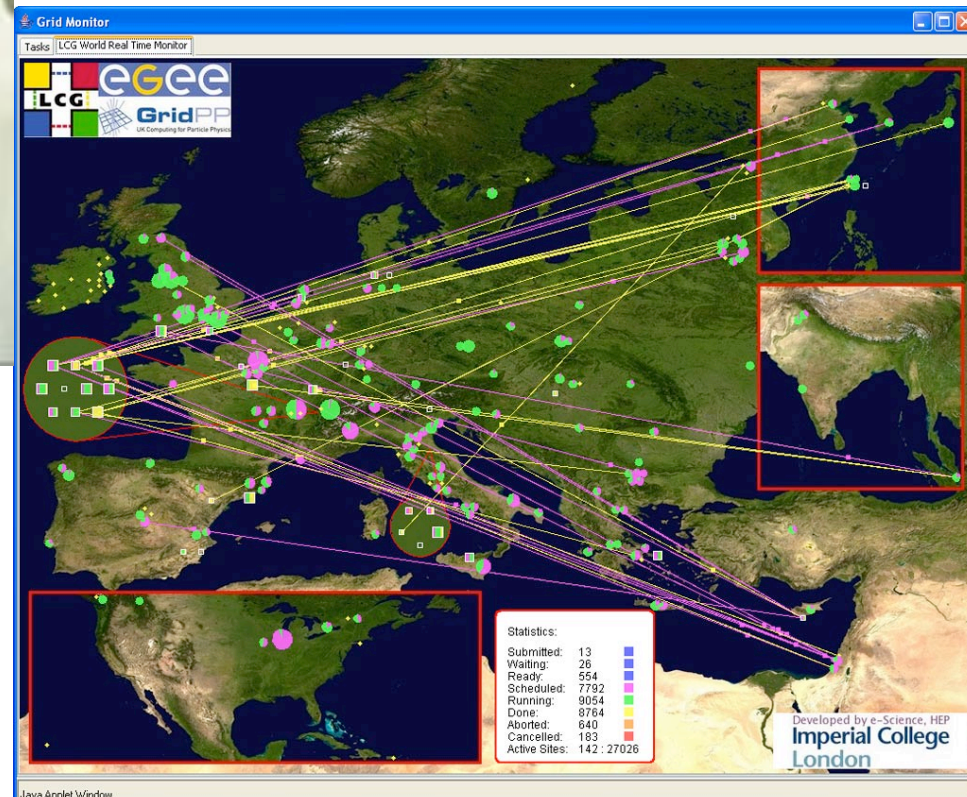


Esempio: PET scanner
(Positron Emission
Tomography)

Il Web e la Grid



Tim Berners-Lee,
padre del www



.... e molto altro