

# INTRODUZIONE ALLA FISICA DELLE PARTICELLE



Università  
di **Genova**



DIFI  
2018-2022

DIPARTIMENTO  
DI ECCELLENZA  
MIUR



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

# Domande fondamentali

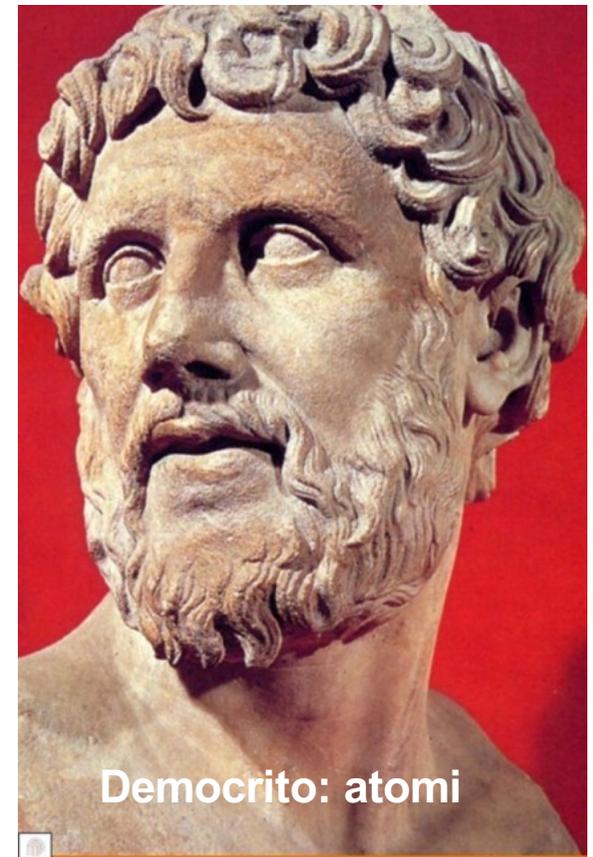
- Quali sono i costituenti elementari della materia?
- Quali sono le forze con cui interagiscono e che li legano a formare la materia come la osserviamo?
- Come ha avuto origine l'universo, come si è evoluto fino a quello che vediamo oggi?

Acqua

Aria

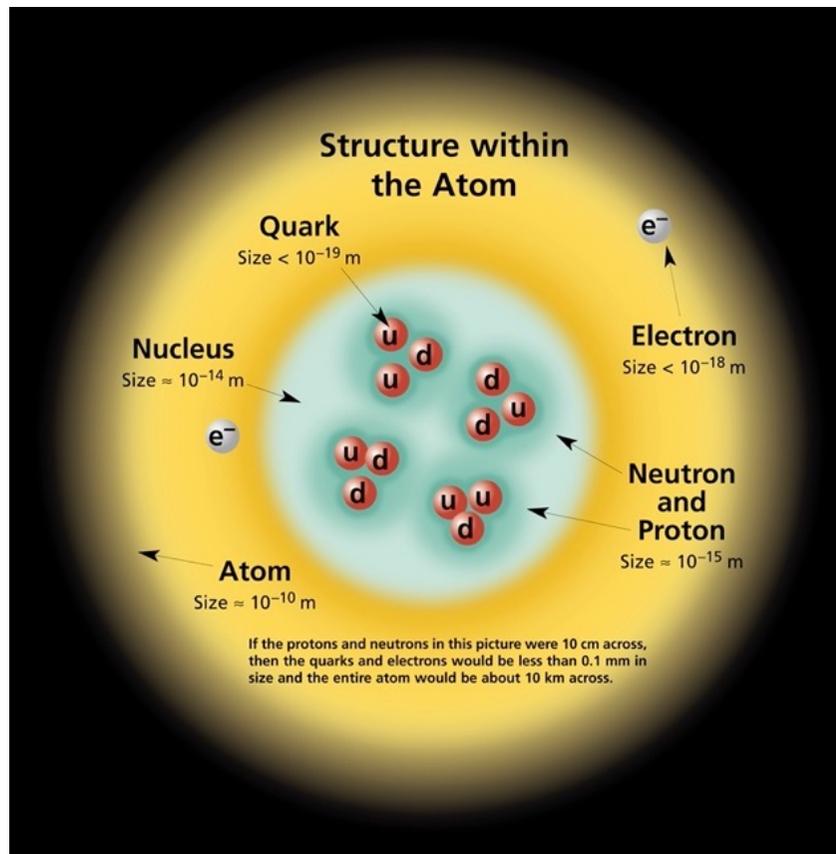
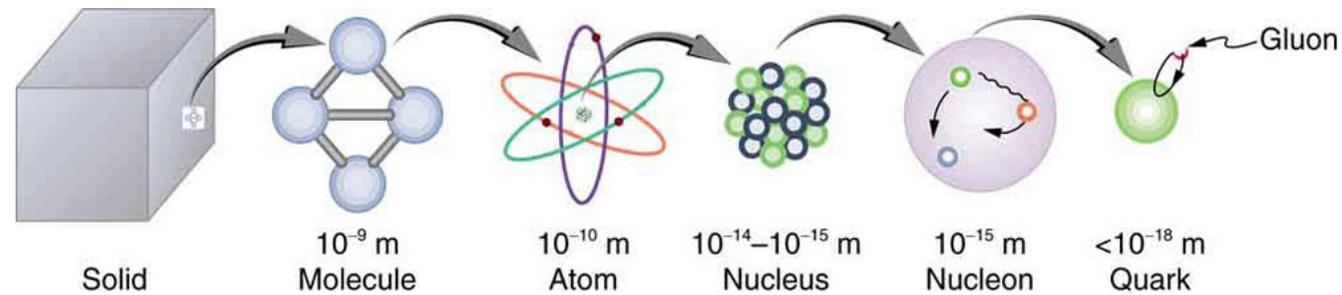
Fuoco

Terra



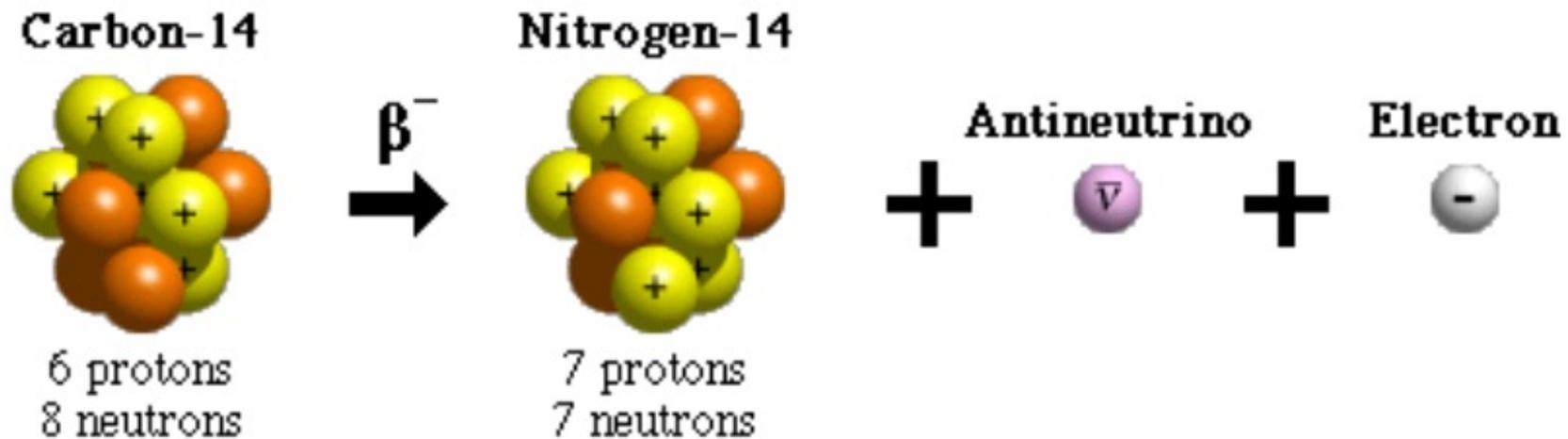
Democrito: atomi

# I costituenti elementari della materia?



Se in questa figura protone e neutrone avessero dimensione di 10 cm, elettrone e quark avrebbero diametro inferiore a 0.1 mm e l'atomo sarebbe largo 10 km

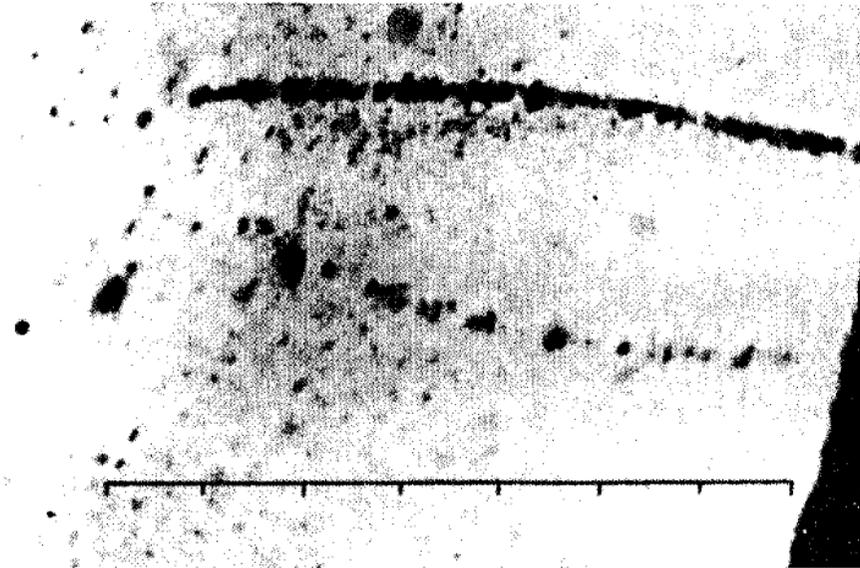
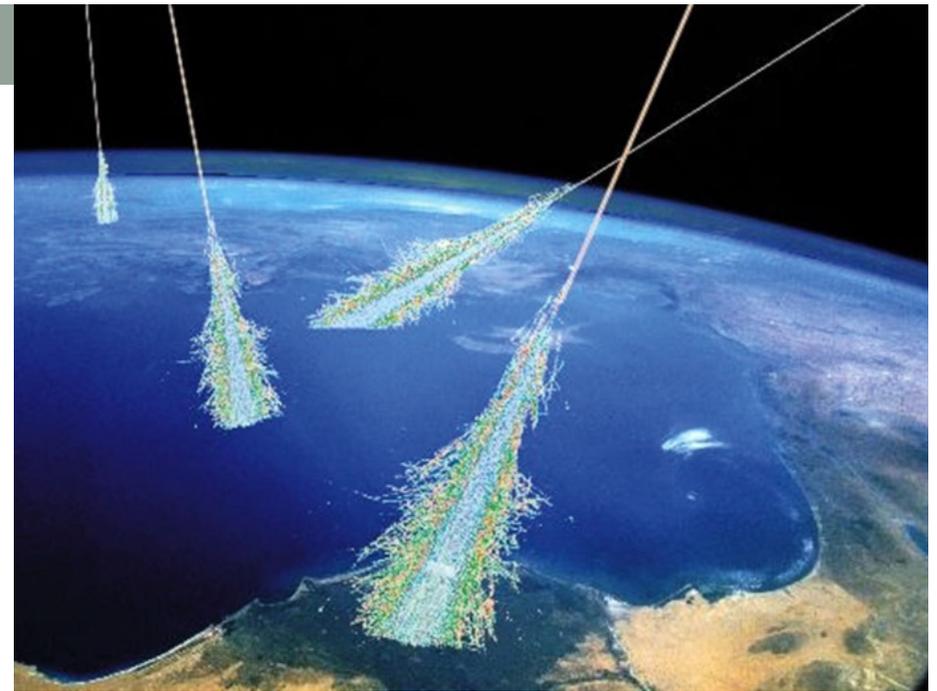
# Altre particelle elementari



Si osservavano decadimenti di nuclei (detti beta): es. un neutrone si trasforma in un protone con emissione di un elettrone.

Per spiegare leggi di conservazione nel decadimento, Pauli ipotizzò una nuova particella, neutra, debolmente interagente e di massa piccolissima: il **neutrino**!

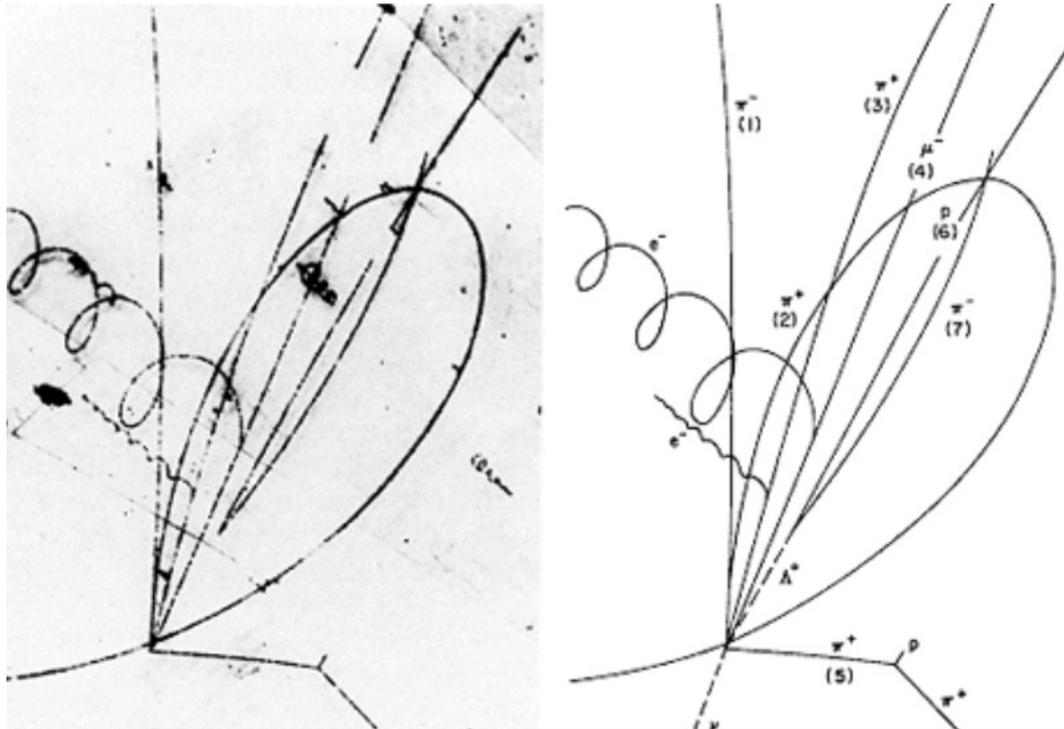
Raggi cosmici (principalmente protoni) impattano continuamente sull'atmosfera. Nelle collisioni con i nuclei dell'atmosfera, si originano varie particelle



"The other double trace of the same type (figure 5) shows closely together the thin trace of an electron of 37 MeV, and a much more strongly ionizing positive particle with a much larger bending radius. The nature of this particle is unknown; for a proton it does not ionize enough and for a positive electron the ionization is too strong. The present double trace is probably a segment from a "shower" of particles as they have been observed by Blackett and Occhialini, i.e. the result of a nuclear explosion".

**Il muone!** Una sorella dell'elettrone, ma più pesante

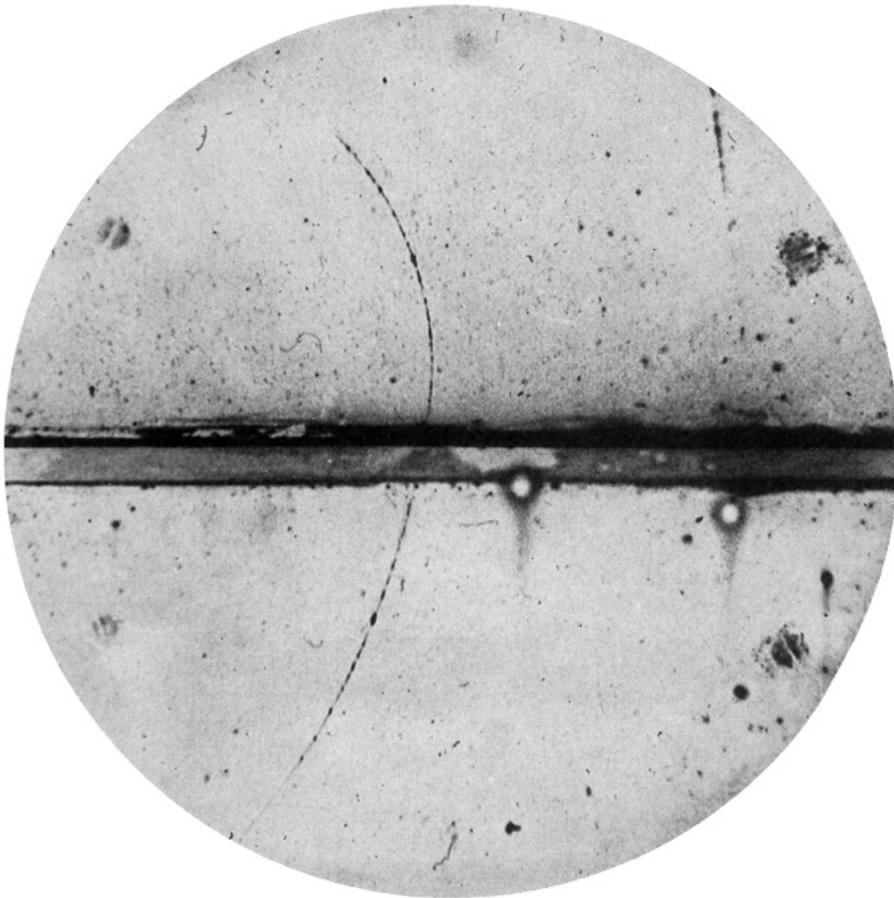
Nuove particelle vengono ricreate da collisioni riprodotte in laboratorio, usando acceleratori: si scopre che non ci sono solo due tipi di quark !



### Il quark «strano»

- Adroni** = particelle formate da quark  
 -> **barioni** : 3 quark (come il protone)  
 -> **mesoni**: 1 quark e un antiquark

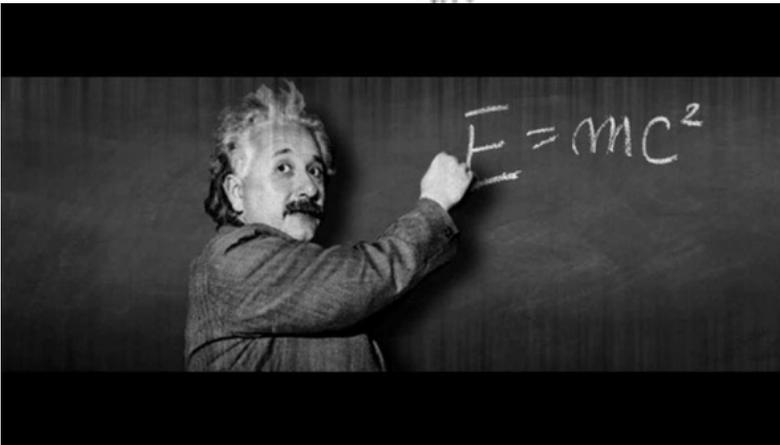
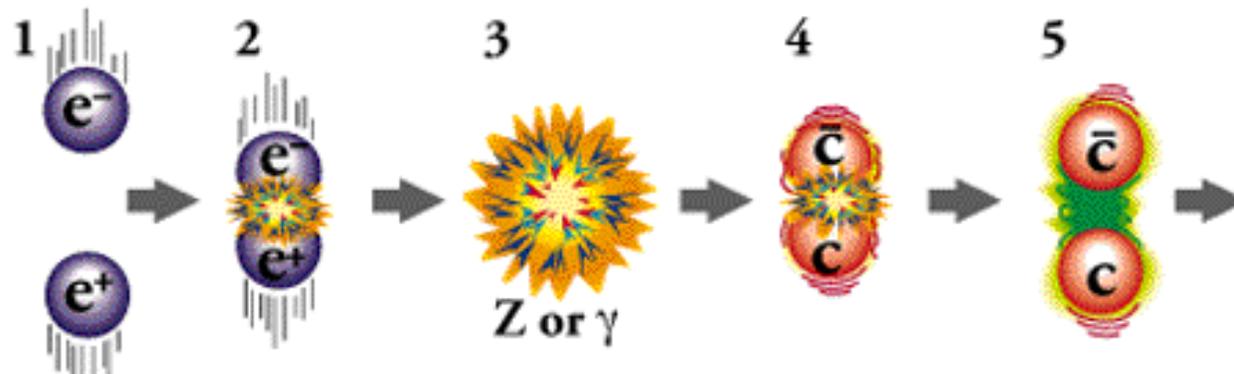
## E le antiparticelle....



Osservazione in camera a bolle di una traccia simile a un elettrone, ma con carica elettrica opposta!

Un partner dell'elettrone, con uguale massa ma carica opposta era stato previsto da Dirac.  
**L'anti-elettrone!**

Oltre alle particelle, esistono quindi le antiparticelle (anti-quark, anti-leptoni): stessa massa, ma carica elettrica opposta.  
 Quando particelle e antiparticelle si scontrano, le loro masse vengono trasformate in radiazione. E viceversa.... si possono produrre nuove particelle-antiparticelle a partire da fotoni



Spesso misuriamo massa e energia nelle stesse quantità.

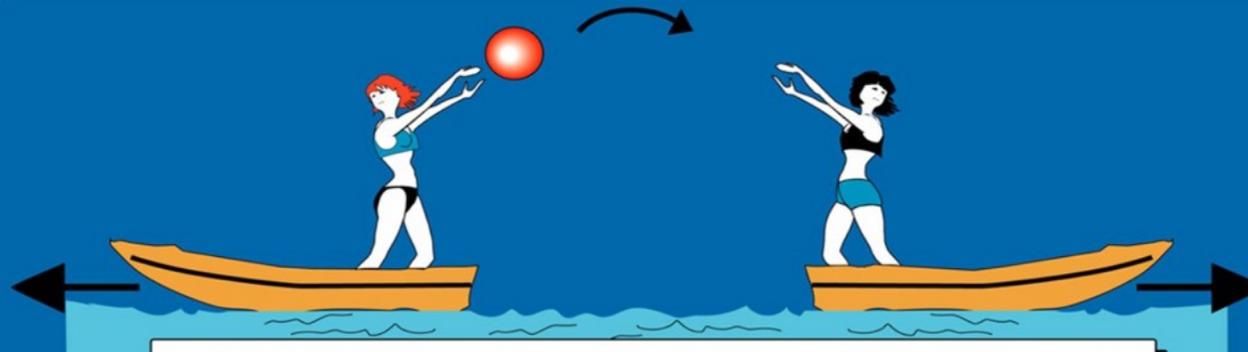
Sistema internazionale: Joule

Nel mondo microscopico:  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

# Le interazioni fondamentali

## The forces in Nature

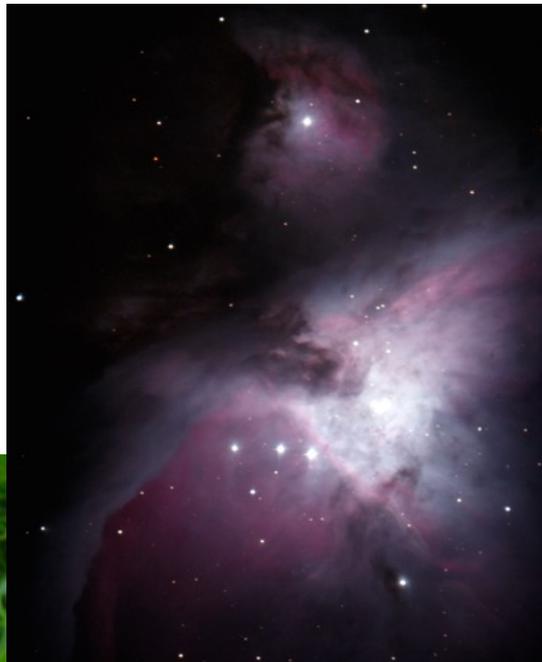
TYPE	INTENSITY OF FORCES ( DECREASING ORDER )	BINDING PARTICLE ( FIELD QUANTUM )	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	$\sim 1$	GLUONS ( NO MASS )	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS ( NO MASS )	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS $Z^0, W^+, W^-$ ( HEAVY )	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS ( ? )	HEAVENLY BODIES



THE EXCHANGE OF PARTICLES IS RESPONSIBLE FOR THE FORCE.

# Il Modello Standard

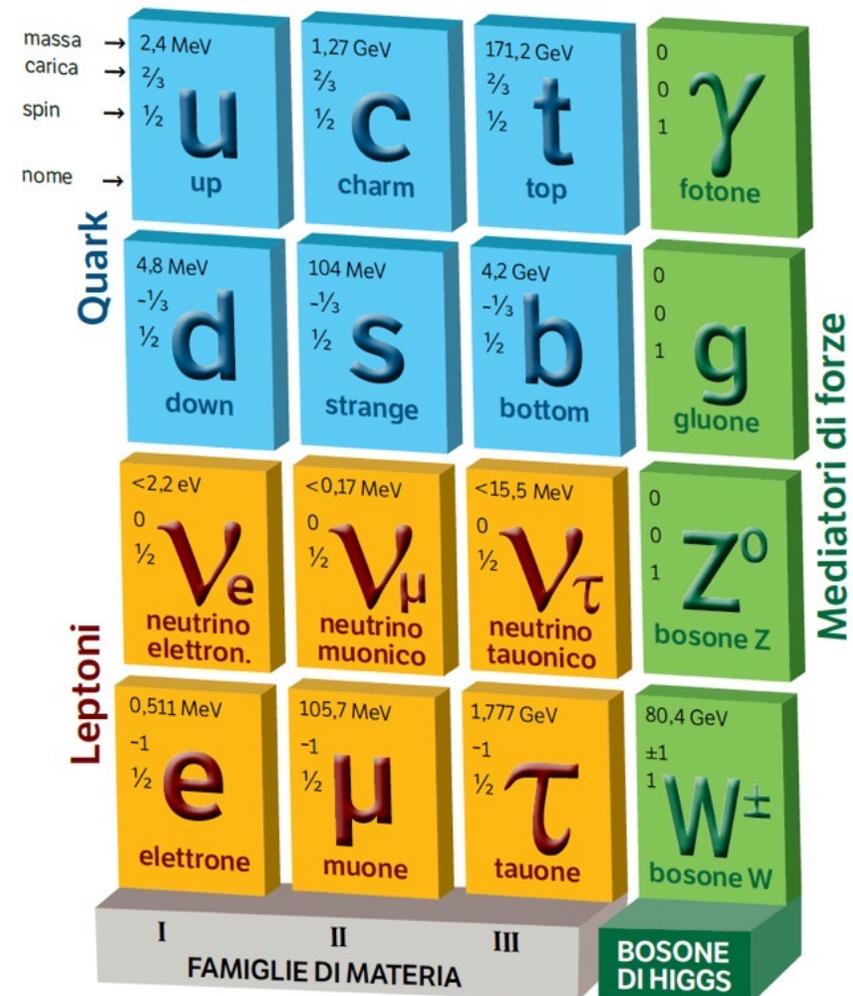
Questi mattoni elementari compongono tutto quello che ci circonda, dall'infinitamente piccolo, all'infinitamente grande



Più le rispettive antiparticelle

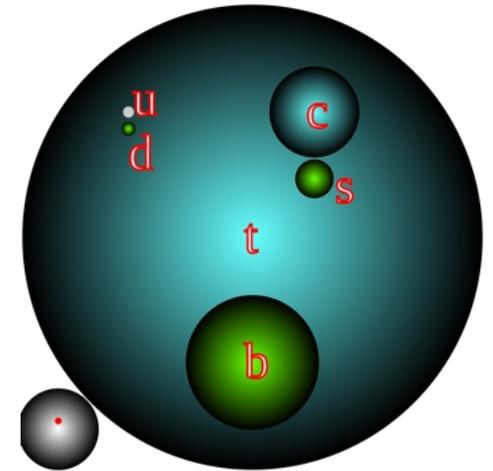
## Le particelle del Modello Standard

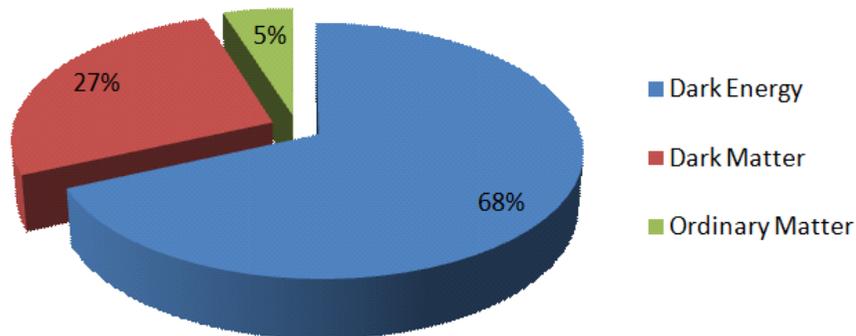
L'intera realtà è formata da questi 17 "mattoni".



# Problemi aperti

- Il Modello Standard è una teoria eccellente
  - Previsioni verificate con grandissima precisione
- .... ma sappiamo che ha dei problemi
  - Intanto.... troppi parametri !
  - Enorme differenza in massa tra le particelle elementari
  - Non include la gravità
  - Non prevede la **materia oscura**
  - Non prevede l'**energia oscura**
  - Non rende conto di **perché è scomparsa l'antimateria**....
- Molte teorie proposte in alternativa
  - SUSY: Supersimmetria (che aggiunge altre particelle....)
  - Teorie con addizionali dimensioni dello spazio-tempo
  - ....

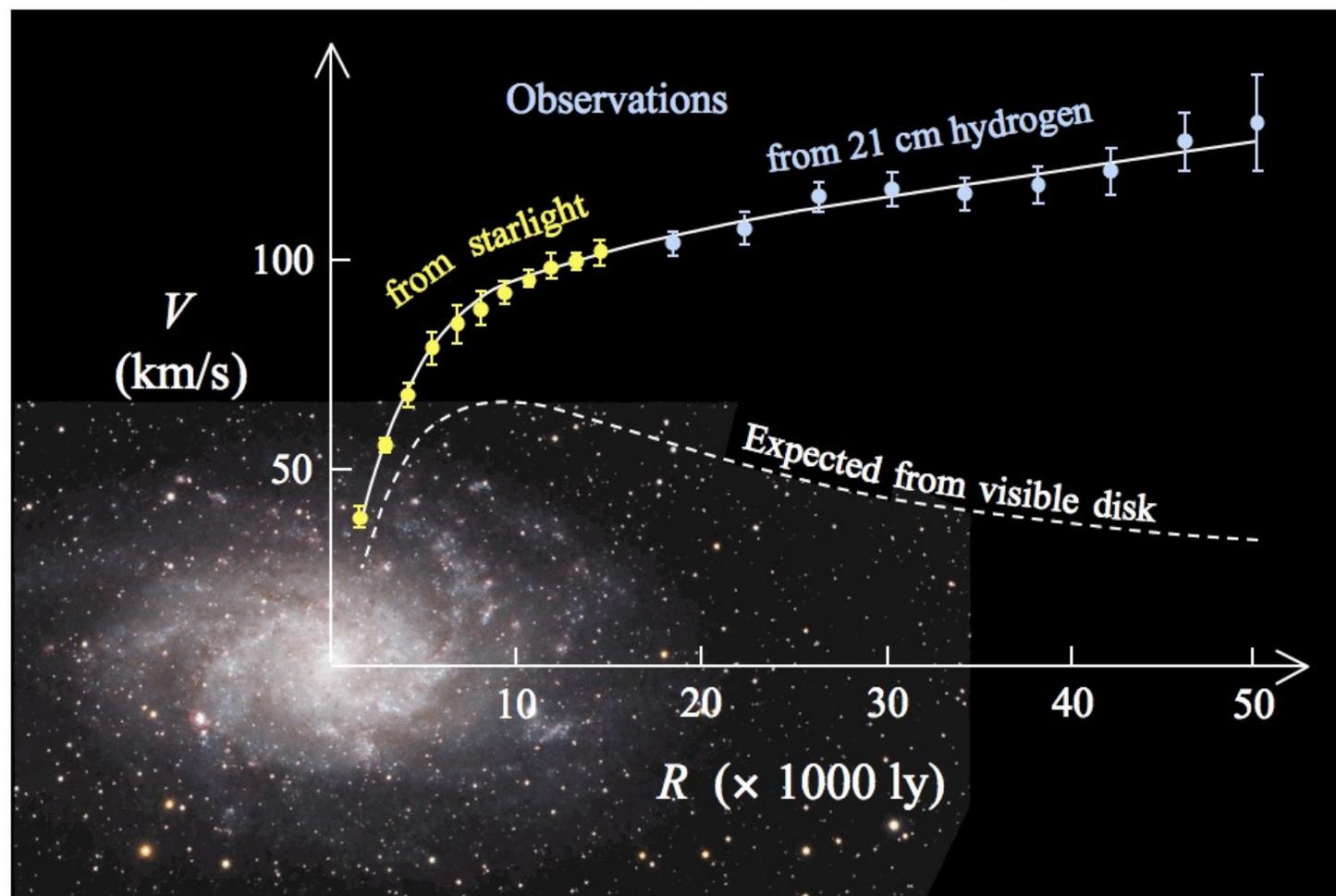




La materia ordinaria, mettendo assieme tutti i pianeti, le stelle, le galassie, il gas interstellare.... Arriva solo a <5% dell'universo!! E il resto??

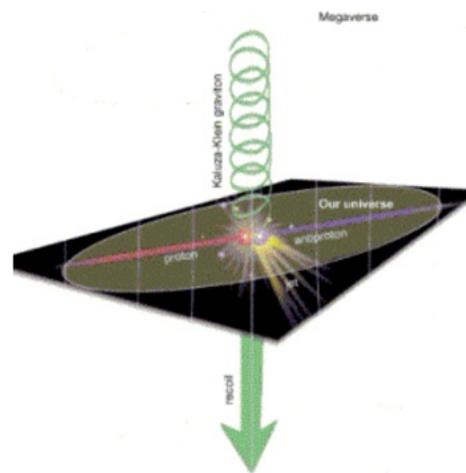
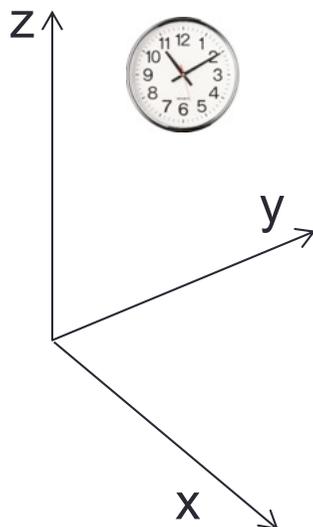
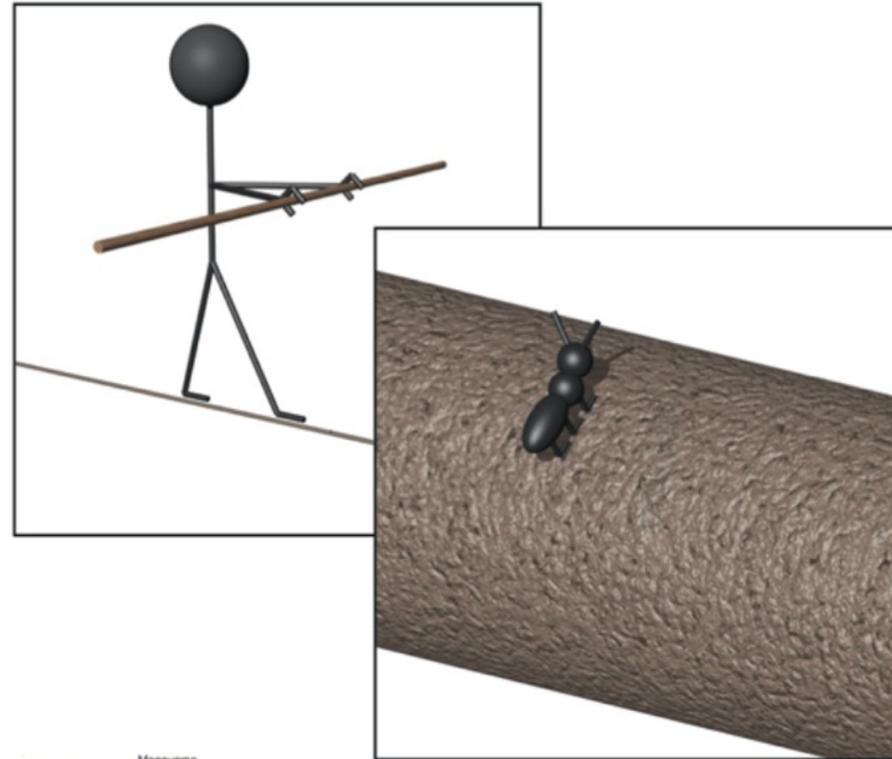
### Materia oscura per spiegare rotazione galassie

L'energia oscura è necessaria per spiegare per esempio l'accelerazione dell'espansione dell'universo e la curvatura nulla dell'universo



# Extra-dimensions

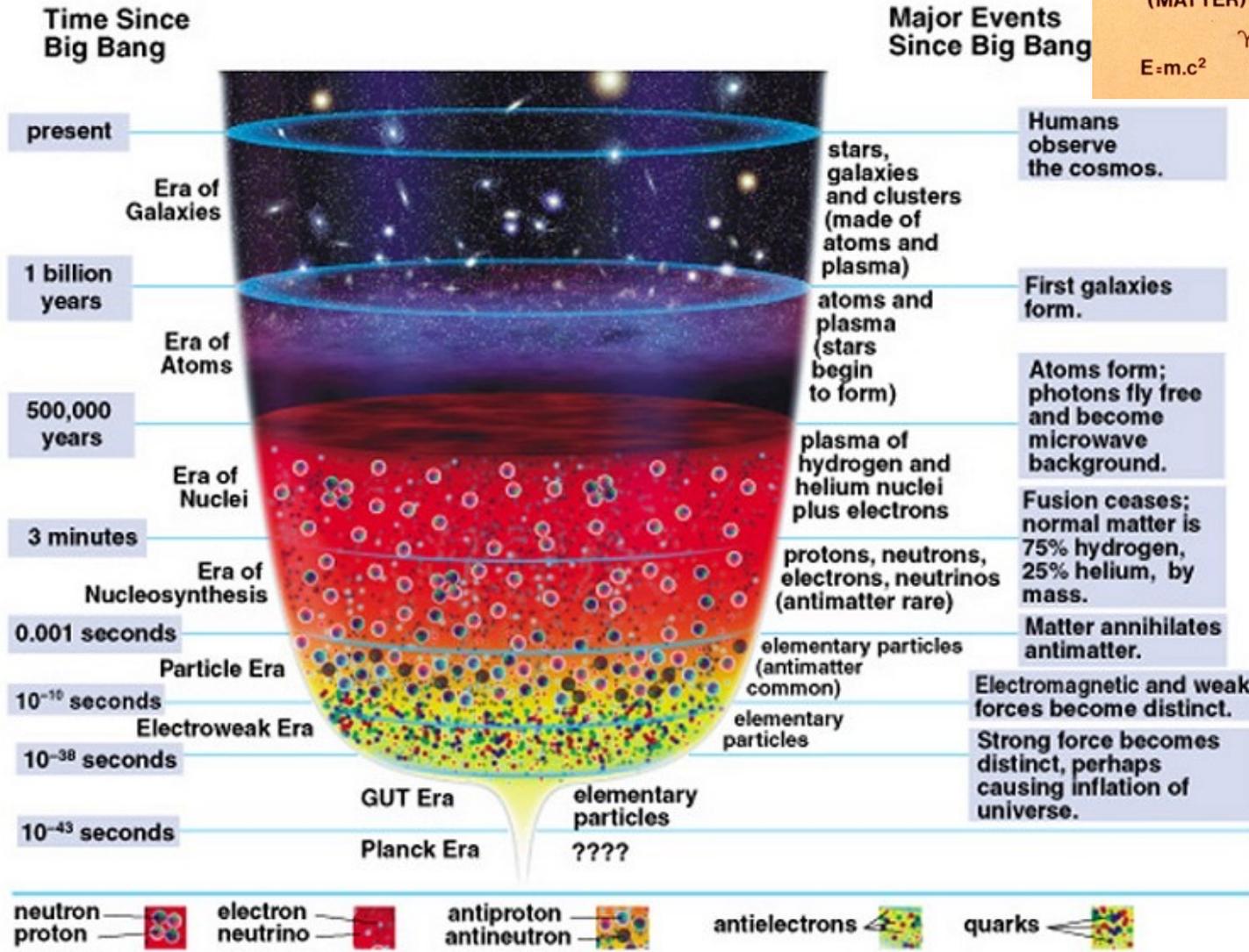
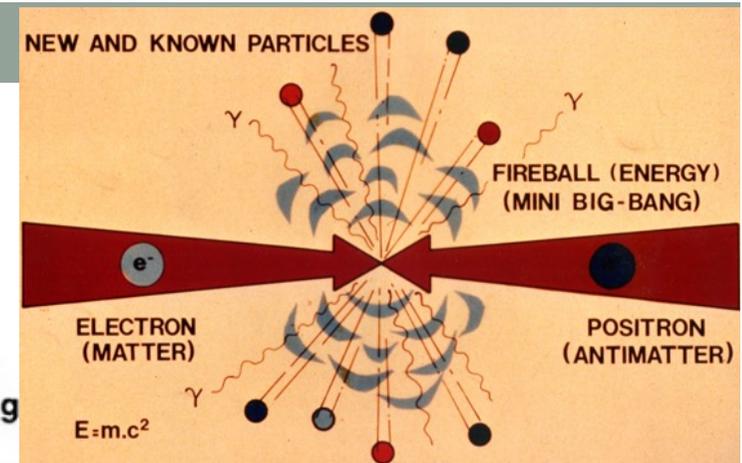
- Lo spazio-tempo ordinario ha 4 dimensioni
  - 3 spaziali
  - 1 temporale
  - Estese all'infinito
- Alcune teorie oltre il Modello Standard aggiungono extra dimensioni dello spazio tempo
  - Dimensioni «compatte»
  - Importanti per la gravità



Come vederle?

Es: un gravitone esce dal nostro universo 3D in extra-dimensions (megaverso): apparente «non conservazione» dell'energia

# Come si studiano le particelle

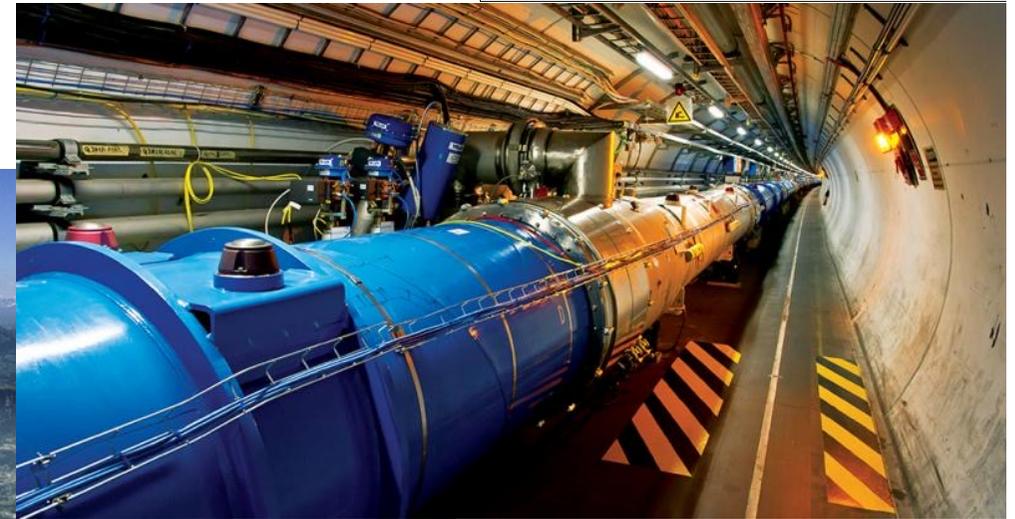


Possiamo sfruttare particelle di origine cosmica che raggiungono la Terra

Oppure riprodurre le particelle sulla Terra tramite acceleratori

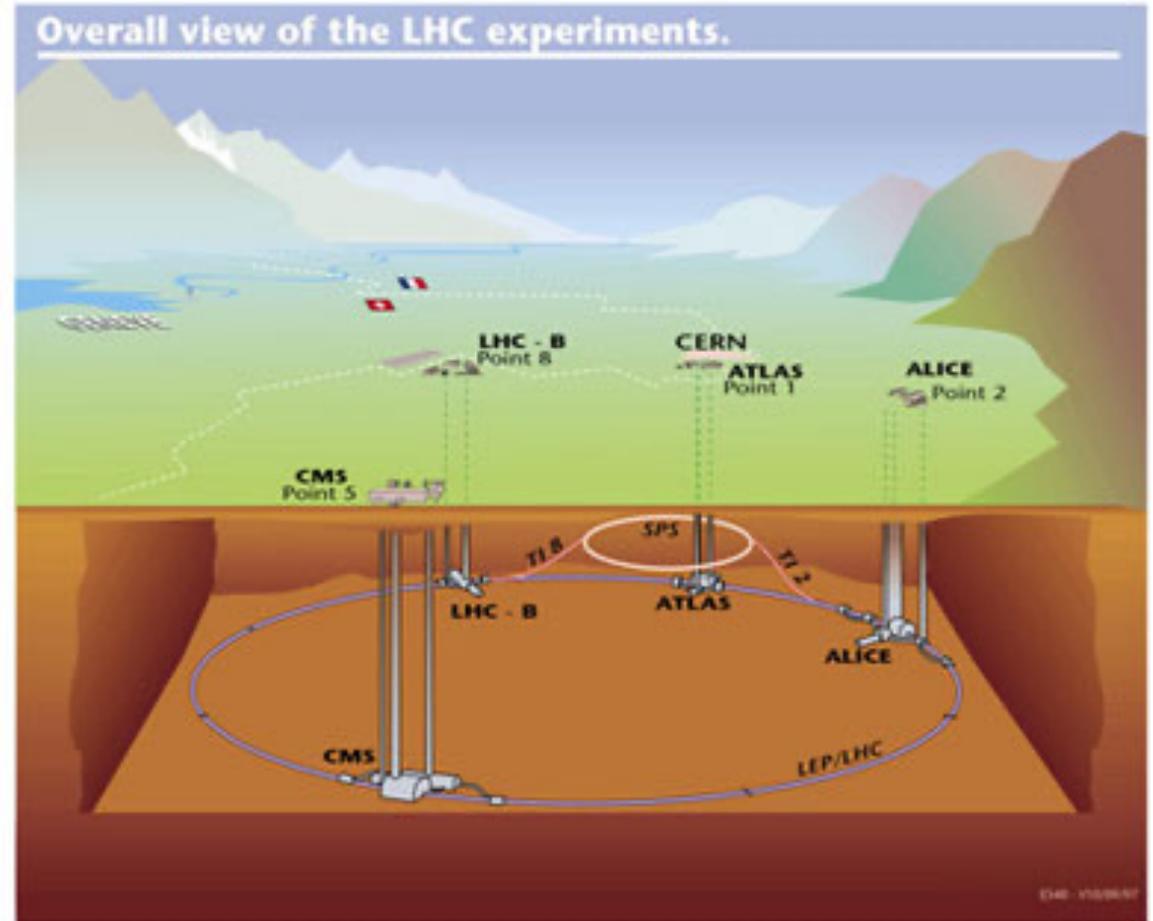
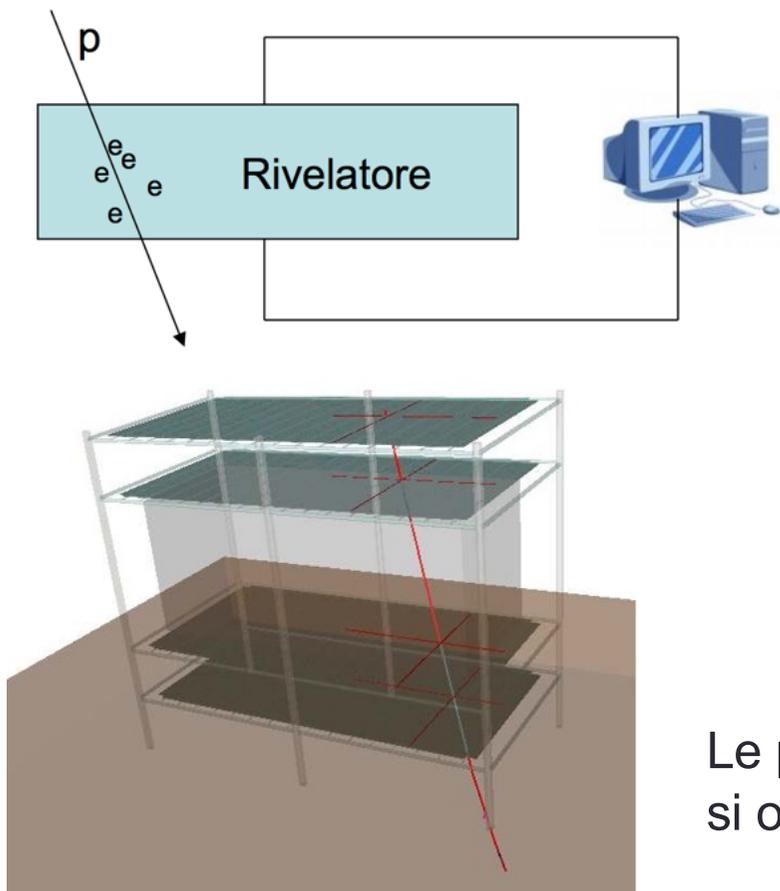
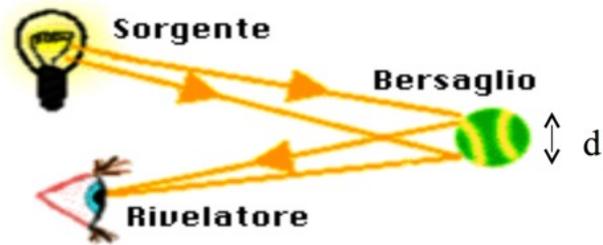
Alte energie: possiamo riprodurre particelle massive, possiamo esplorare dimensioni più piccole ( $E \sim 1/L$ )

# L'acceleratore LHC del CERN



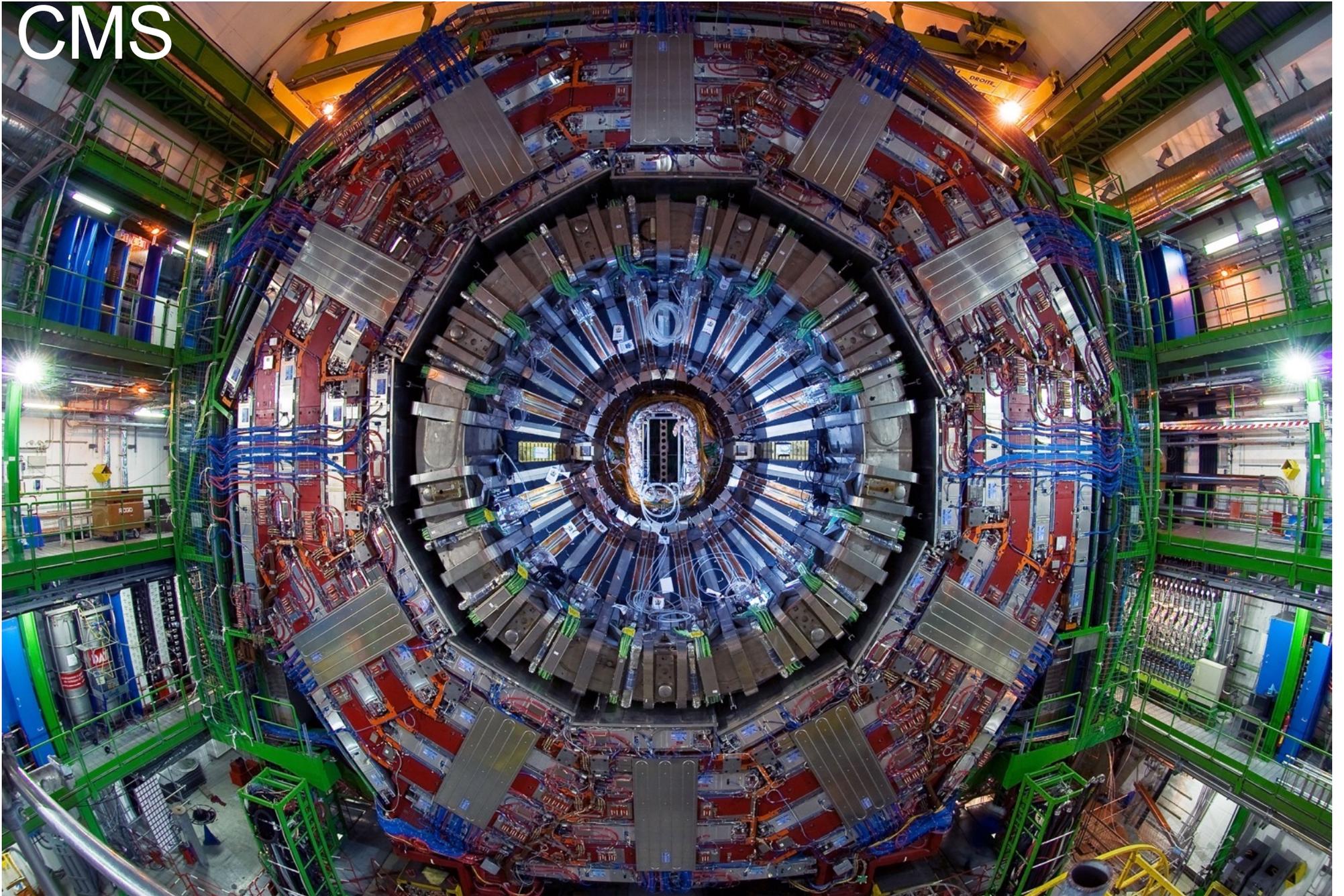
- Collisione di protoni ad altissima energia (13.5 TeV)
- Campi magnetici molto intensi: magneti superconduttori (raffreddati a -271 C)
- 4 zone di collisione

# Come si “vedono” le particelle



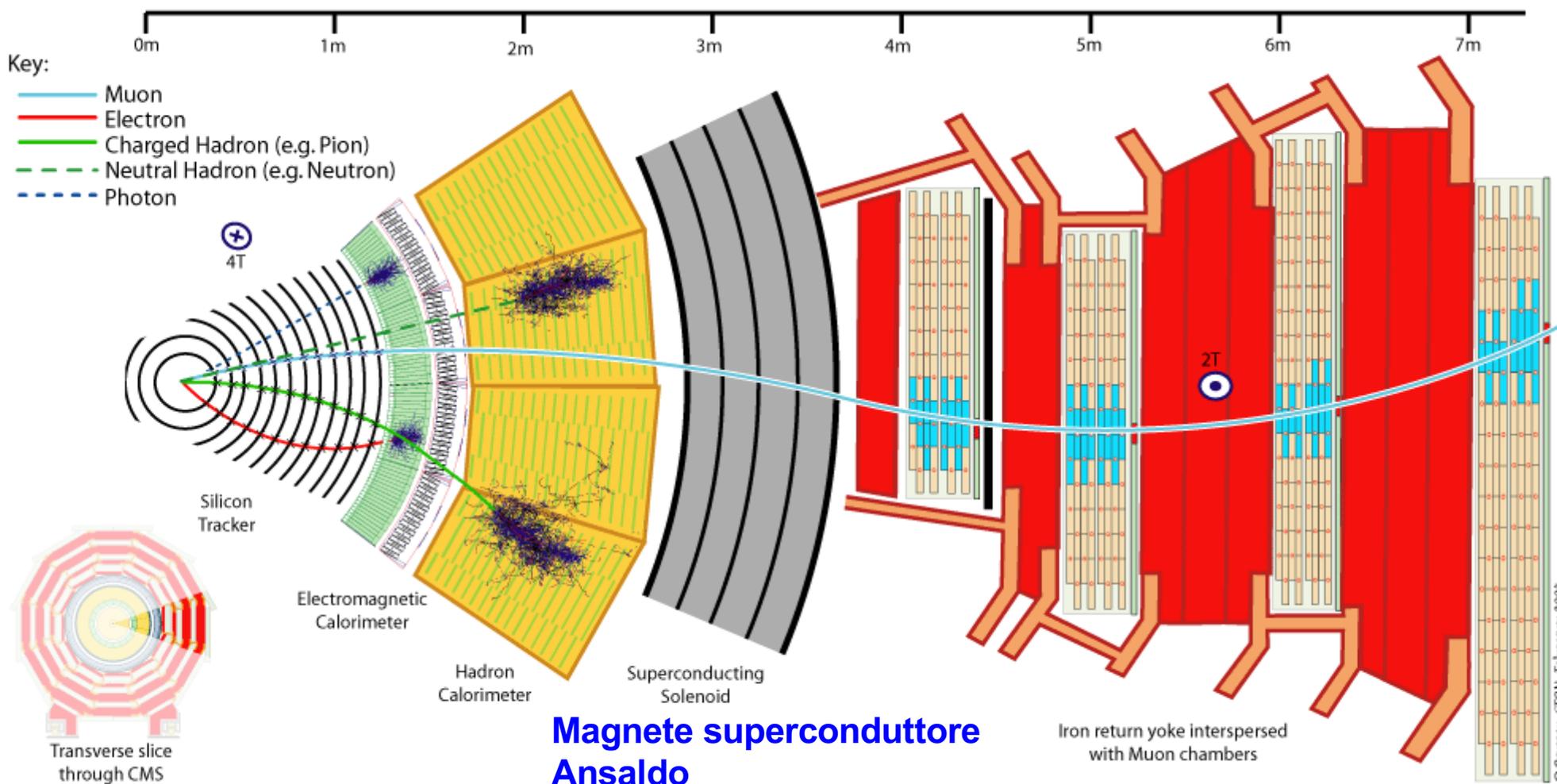
Le particelle vengono fatte interagire con dei materiali e si osservano gli effetti delle loro interazioni

# CMS

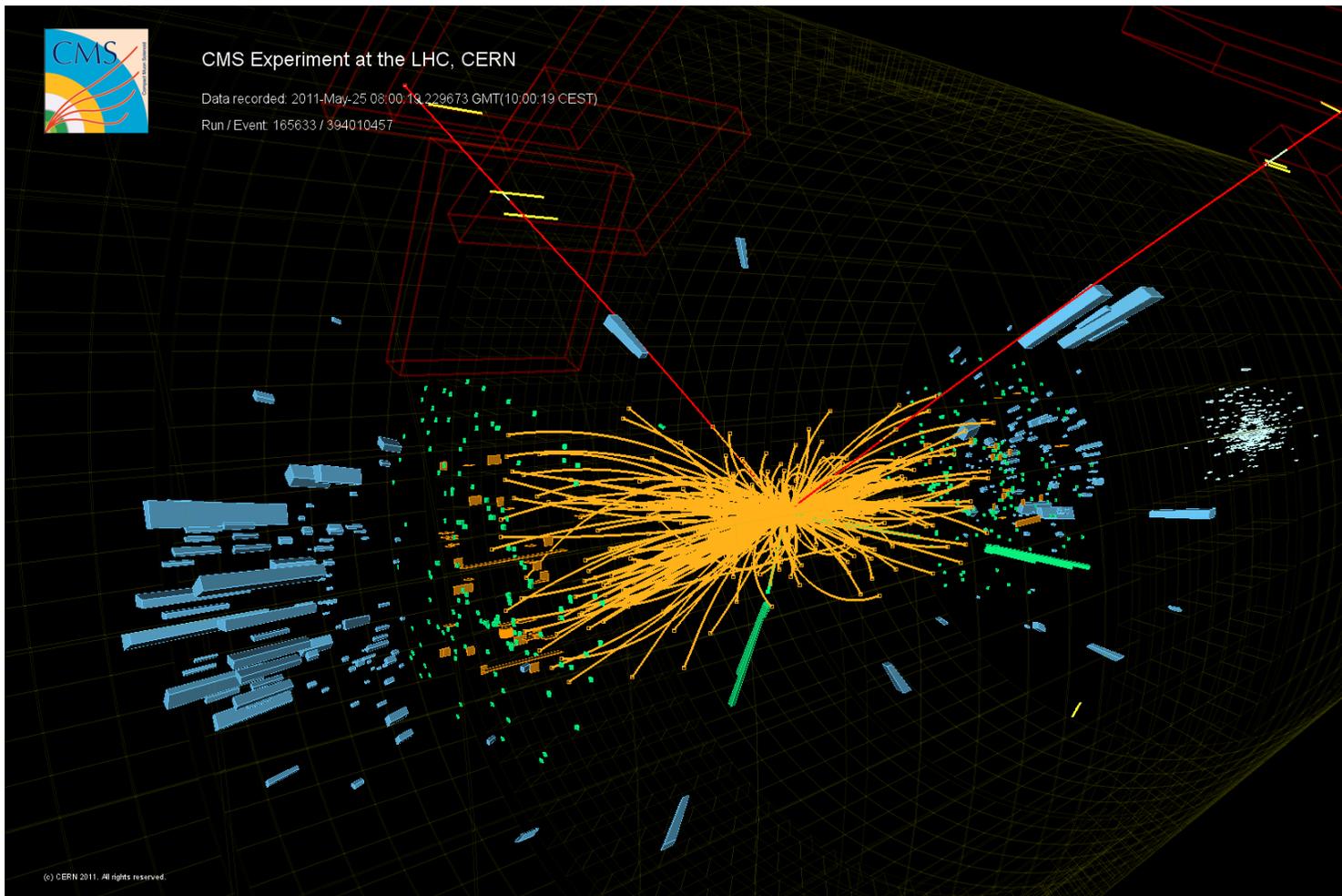


# Tanti rivelatori

Molte particelle hanno vita brevissima. Decadono in altre particelle (note) prima di lasciare traccia. Si rivelano i prodotti di decadimento e si ricostruiscono le proprietà della particella madre



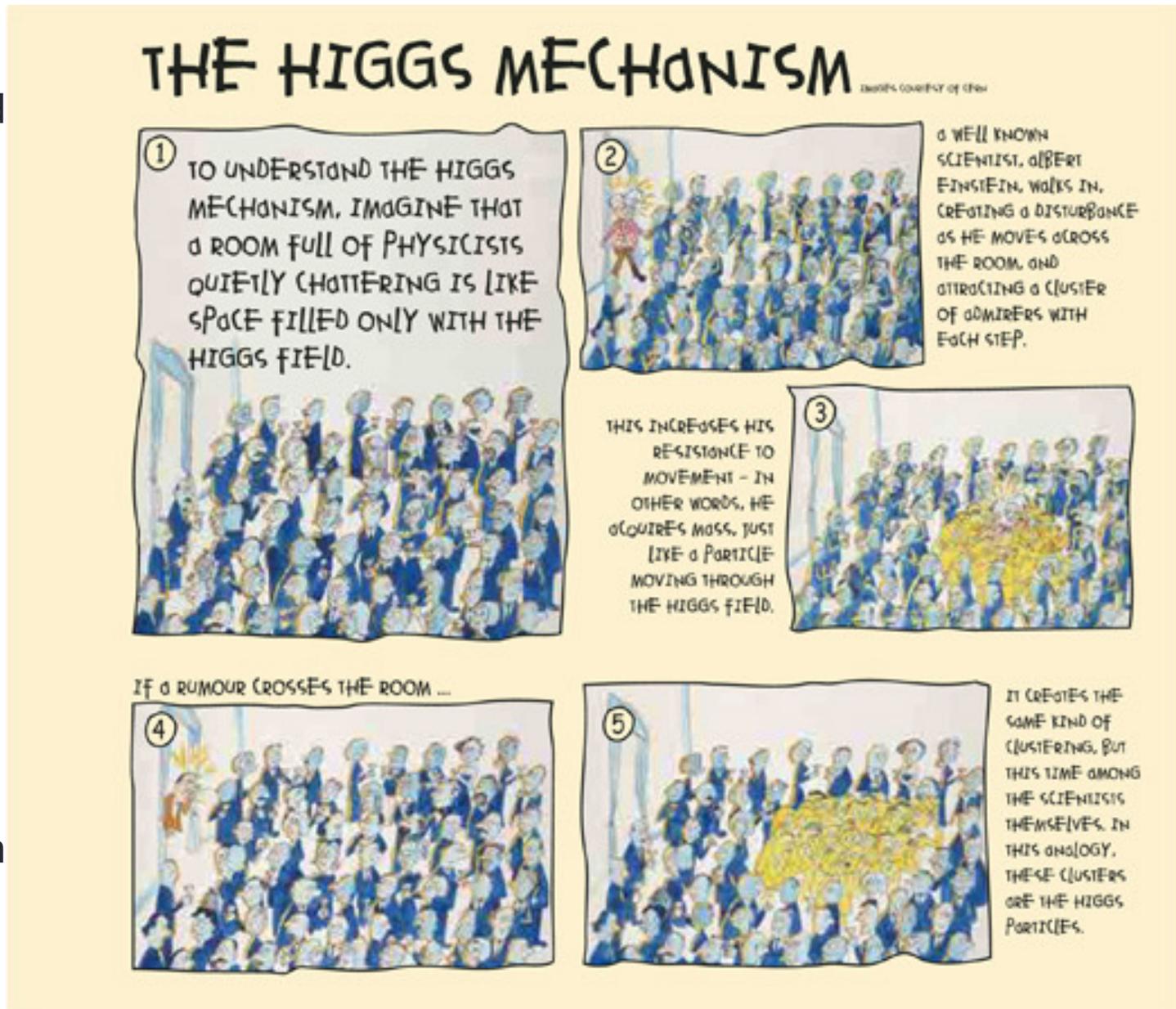
# Ricostruzione delle particelle



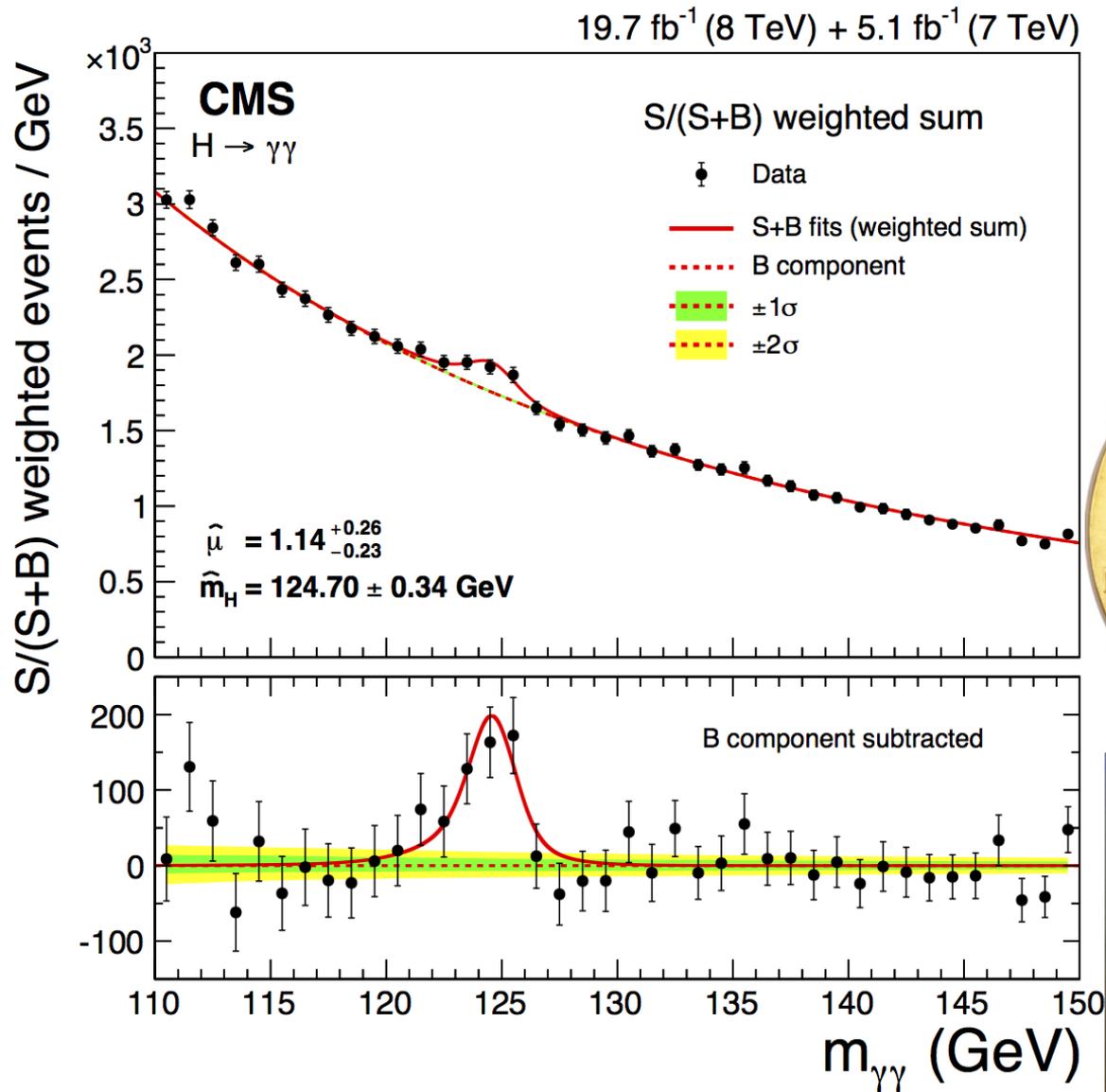
Ricostruzione software delle tracce e dei depositi di energia delle particelle: ipotesi sulle particelle prodotte nell'evento

# Che cosa abbiamo imparato

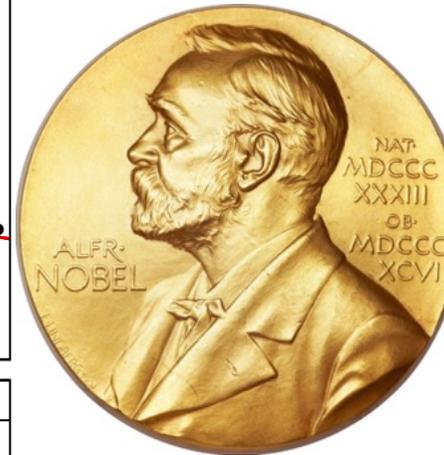
- Abbiamo verificato il Modello Standard ad una precisione eccellente
- Anche l'ultimo tassello mancante (bosone di Higgs) è stato trovato!
- Dal punto di vista matematico, il Modello Standard è consistente se le particelle hanno massa nulla.... In contrasto con la realtà
- Problema curato con il meccanismo di Higgs



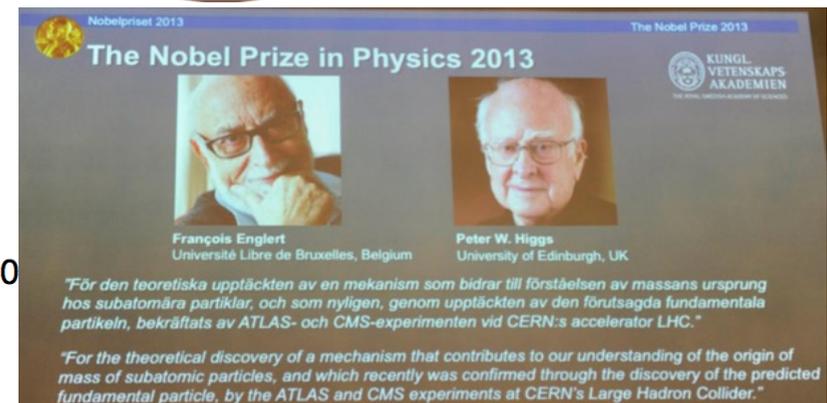
# Il bosone di Higgs



Consistente con le proprietà attese per il bosone di Higgs previsto dal Modello Standard....



Premio Nobel  
Fisica 2013  
Higgs e Englert



# Qualche applicazione immediata

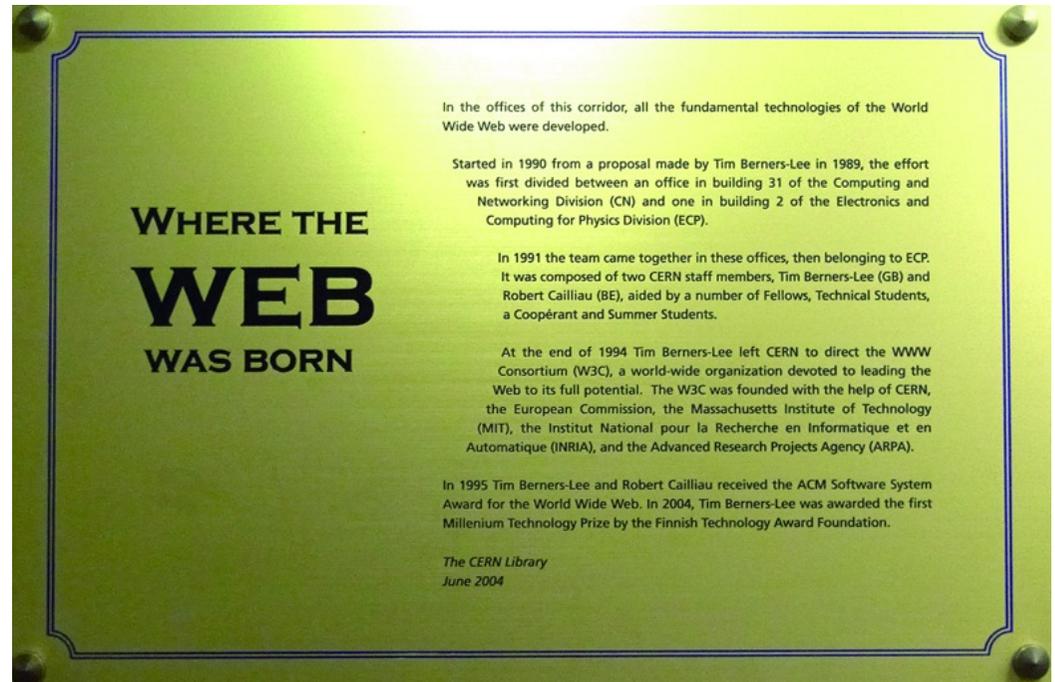
- Nella ricerca di base è difficile prevedere quali saranno le applicazioni di una nuova scoperta
  - Spesso un'applicazione si scopre molti anni dopo !
- Sviluppo di elettronica innovativa, nuovi materiali, software avanzato



Invenzione del **touch screen** al CERN



Invenzione del **WWW** al CERN



In the offices of this corridor, all the fundamental technologies of the World Wide Web were developed.

Started in 1990 from a proposal made by Tim Berners-Lee in 1989, the effort was first divided between an office in building 31 of the Computing and Networking Division (CN) and one in building 2 of the Electronics and Computing for Physics Division (ECP).

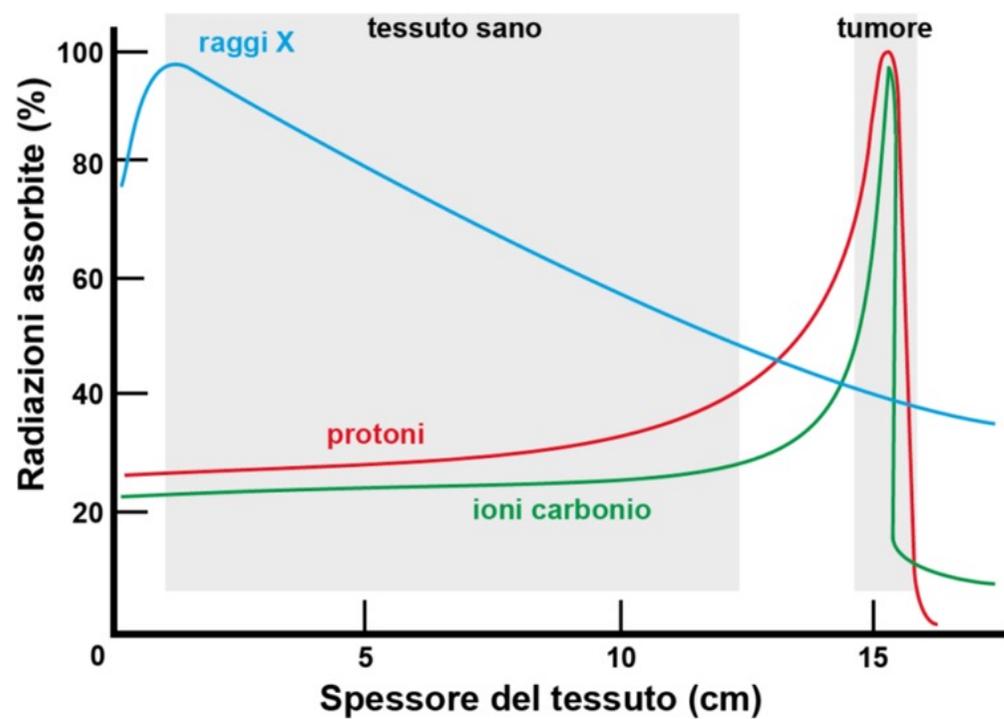
In 1991 the team came together in these offices, then belonging to ECP. It was composed of two CERN staff members, Tim Berners-Lee (GB) and Robert Cailliau (BE), aided by a number of Fellows, Technical Students, a Coopérant and Summer Students.

At the end of 1994 Tim Berners-Lee left CERN to direct the WWW Consortium (W3C), a world-wide organization devoted to leading the Web to its full potential. The W3C was founded with the help of CERN, the European Commission, the Massachusetts Institute of Technology (MIT), the Institut National pour la Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), and the Advanced Research Projects Agency (ARPA).

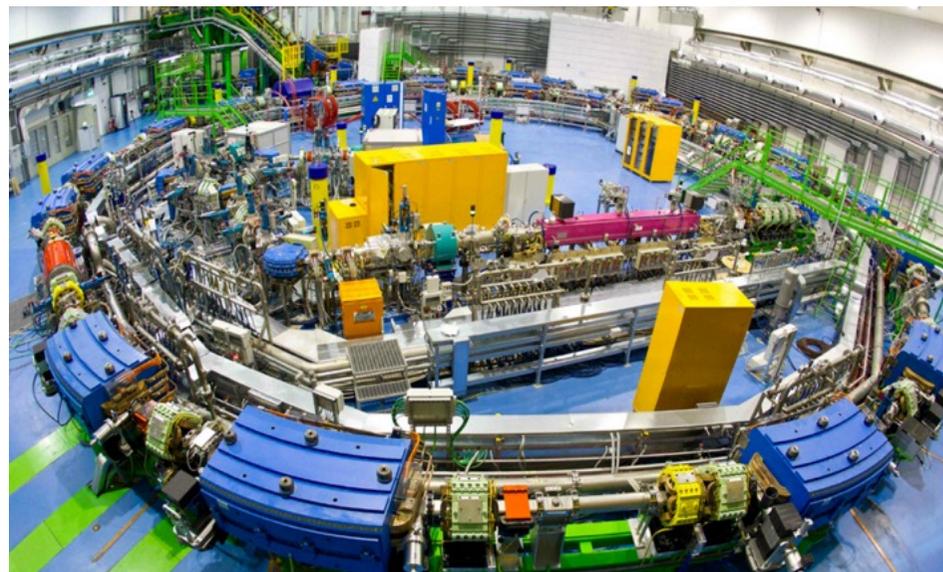
In 1995 Tim Berners-Lee and Robert Cailliau received the ACM Software System Award for the World Wide Web. In 2004, Tim Berners-Lee was awarded the first Millennium Technology Prize by the Finnish Technology Award Foundation.

*The CERN Library  
June 2004*

Energia rilasciata in funzione dello spessore attraversato



Acceleratore per **adroterapia** al CNAO di Pavia



PET



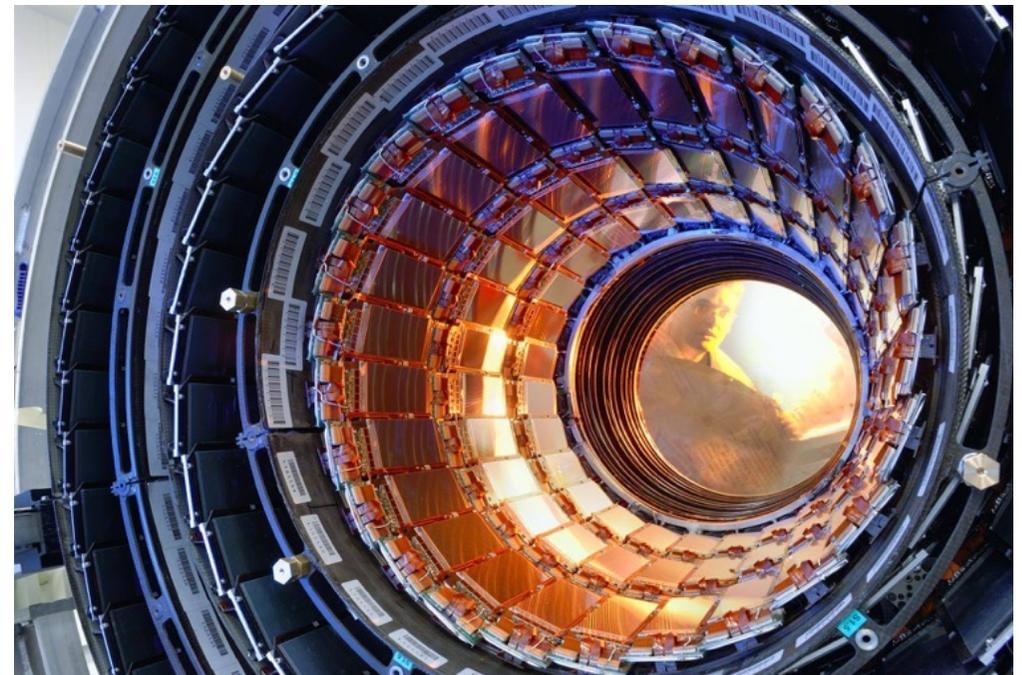
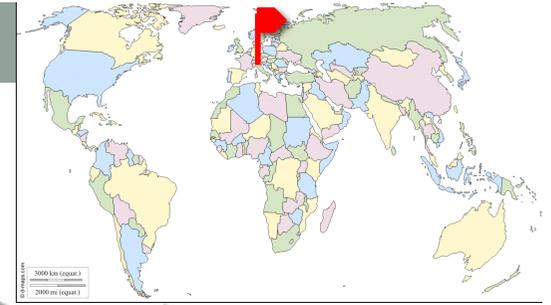
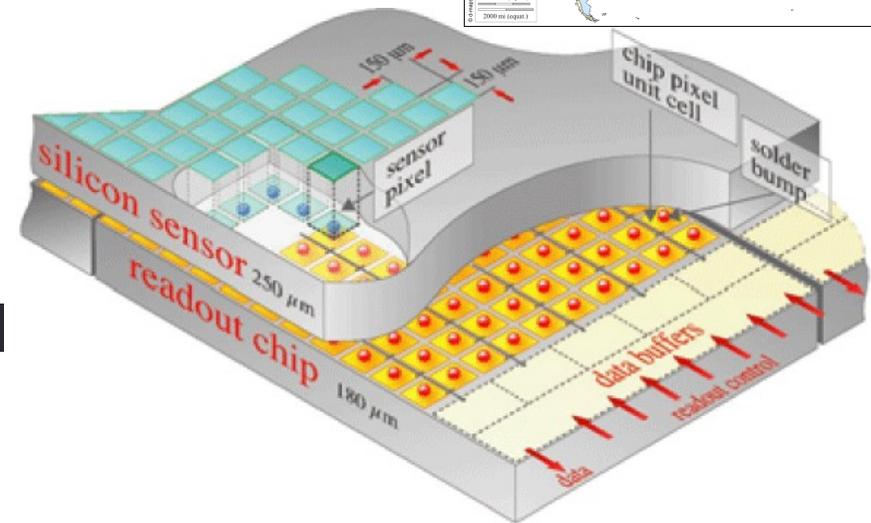
Muografie



BACKUP

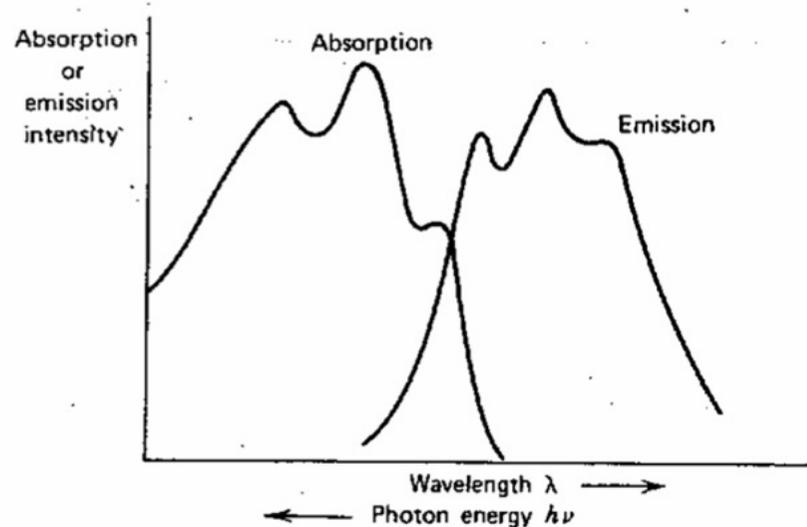
# Rivelatori al Silicio

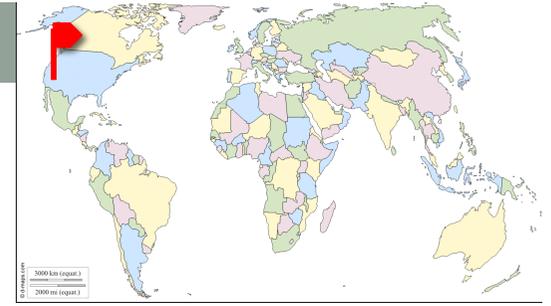
- Una particella carica incidente crea coppie elettrone-lacuna nel cristallo di Silicio
  - Raccolta degli elettroni e amplificazione del segnale
  - Ricostruzione della traccia della particella
  - Misura dell'impulso dalla curvatura della traccia



# Scintillatori organici

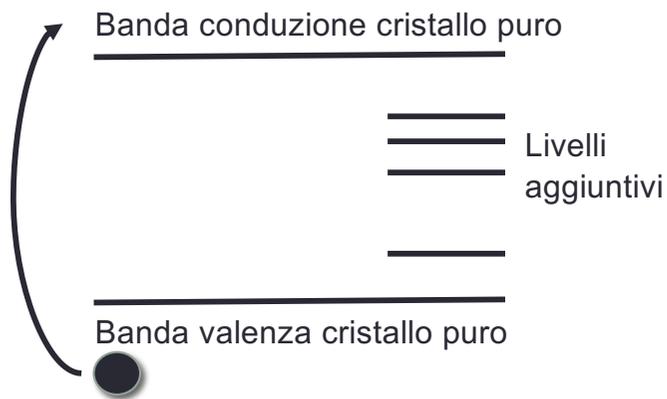
- Alcuni materiali organici (per es. plastici), quando vengono attraversati da una particella, emettono luce
  - Eccitazione ad un livello energetico superiore
  - Ri-emissione con frequenza inferiore
  - I materiali risultano trasparenti alla luce emessa
  - Meccanismo di fluorescenza o fosforescenza a seconda dei livelli energetici interessati

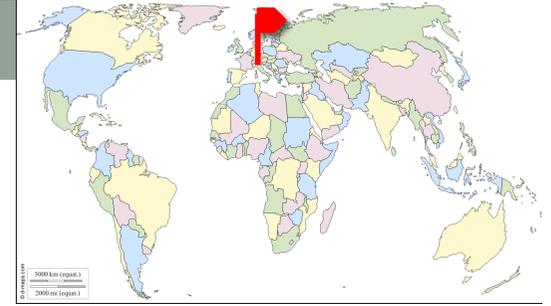




# Scintillatori inorganici

- Anche alcuni materiali inorganici si possono usare in maniera simile
    - Meccanismo molto diverso
    - Eccitazione di un elettrone da banda di valenza a banda di conduzione
    - Diseccitazione dell'elettrone ed emissione di fotoni con frequenza inferiore grazie a impurezze (drogaggio)
- Es. NaI(Tl)





# Ricerche di “Nuova Fisica”

- Ricerca di deviazioni dal Modello Standard ad ampio spettro !
- Sia effetti diretti, sia effetti indiretti
- Esempio: ricerca di particelle che decadono in coppie top-antitop
  - non esistono nel Modello Standard
  - Previste in altre teorie, per es con extra dimensioni dello spazio-tempo

