



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

# *La Fisica delle Particelle e i laboratori del CERN di Ginevra*

Vincenzo Vagnoni

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Fondazione "Giuseppe Occhialini"

# Di cosa e' fatto il mondo?

Anticamente: 4 elementi

19<sup>mo</sup> secolo: atomi

Inizio 20<sup>mo</sup> secolo:  
elettroni, protoni,  
neutroni

Oggi: quark e leptoni



(c) Andy Brice 1998

# Modello per l'atomo

Con gli esperimenti si riesce a  
"spaccare" gli atomi

Particelle leggere a carica  
negativa (elettroni) intorno ad un  
nucleo positivo e pesante

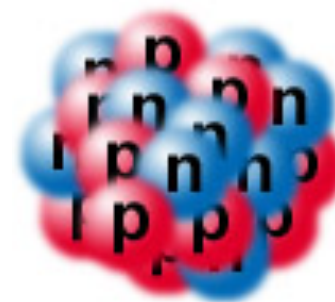
L'atomo e' praticamente vuoto



Il nucleo e' piccolo e denso.

Per un po' si penso' che fosse puntiforme

Ma vi erano tanti nuclei diversi  
quanti erano gli atomi



Semplificazione: tutti i nuclei sono fatti di  
**protoni** carichi e **neutroni** neutri.



Adesso sappiamo che anche protoni e neutroni non sono unita' fondamentali

Sono composti da particelle piu' piccole dette quarks

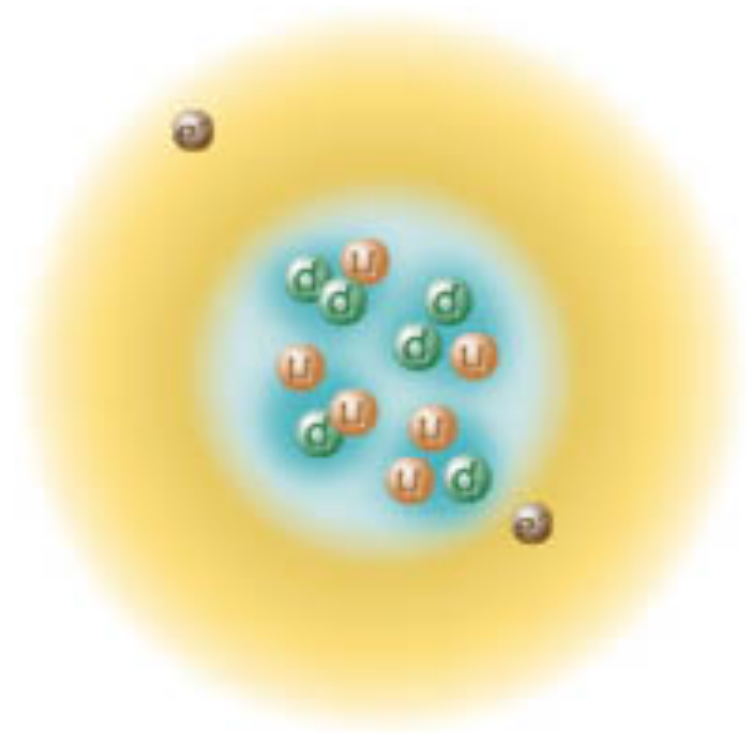
Per il momento questi quarks sembrano essere puntiformi



Una nuvola di elettroni in  
moto costante intorno al  
nucleo

Protoni e neutroni in moto  
nel nucleo

Quarks in moto nei protoni e  
nei neutroni

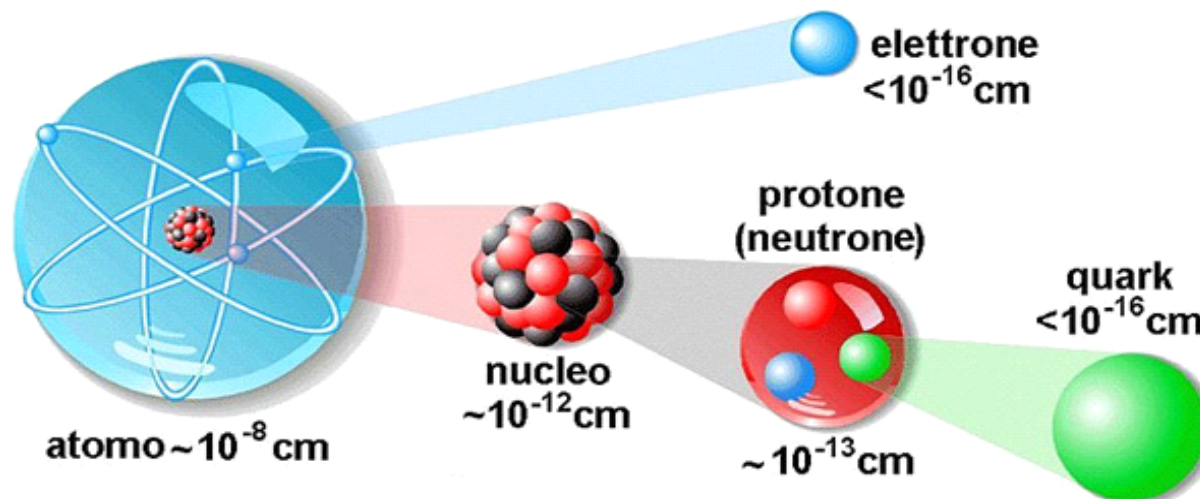


# Dimensioni (sub)-atomiche

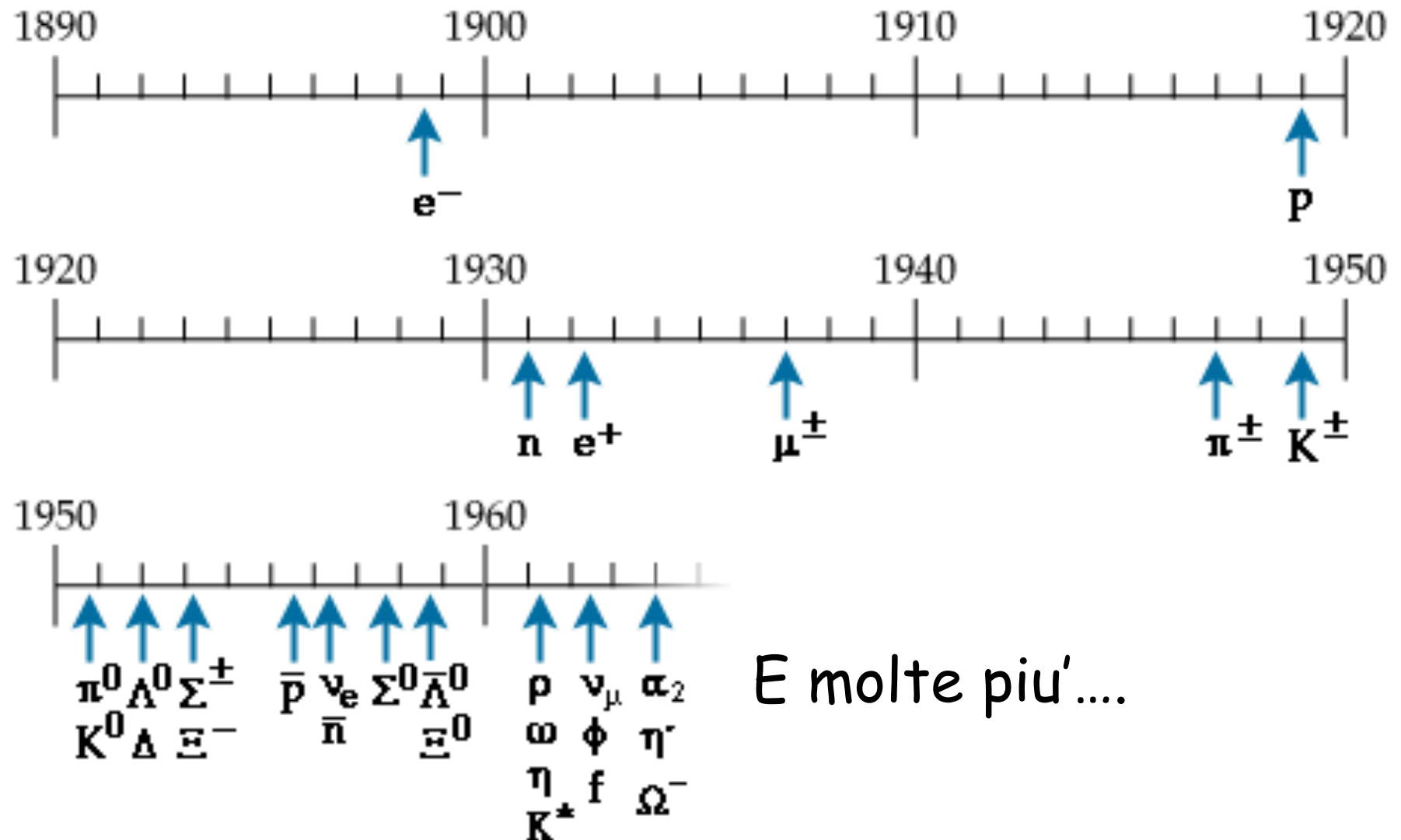
Il nucleo e' 10000 volte piu' piccolo dell'atomo

Il protone ed il neutrone sono 10 volte piu' piccoli del nucleo

Elettroni e quark sono almeno 1000 volte piccoli dei protoni

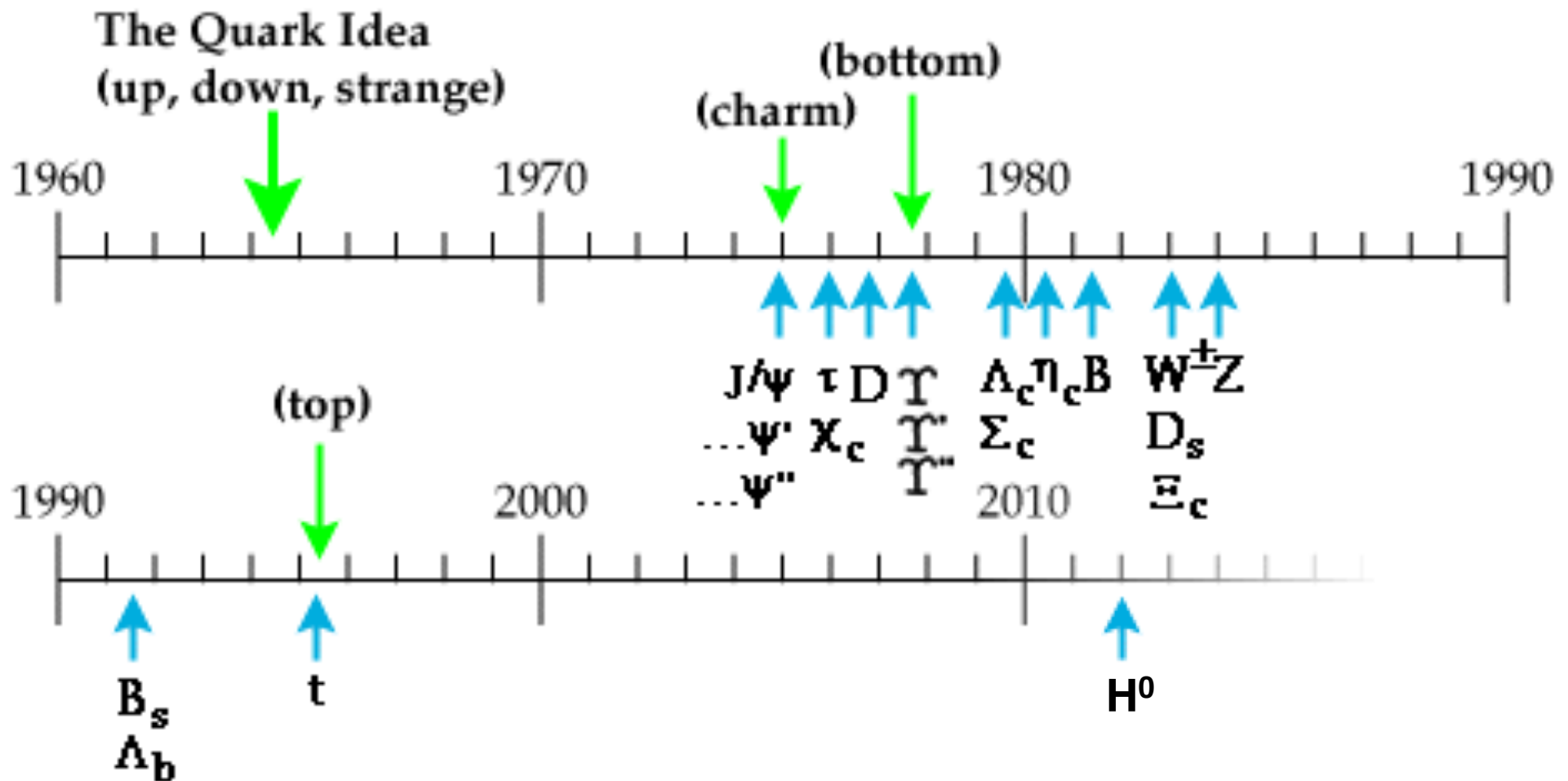


# Esistono tante particelle...



E molte piu'....

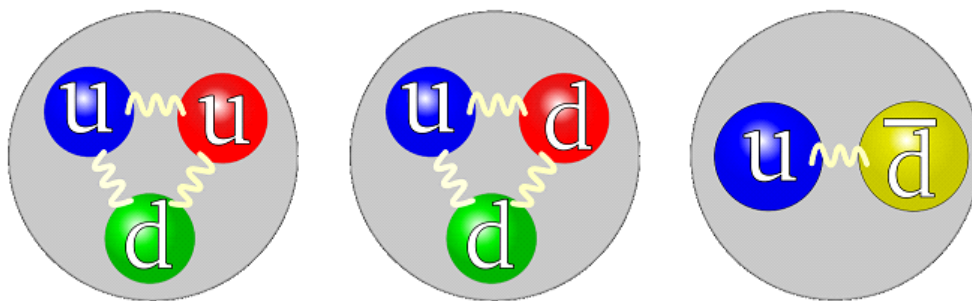
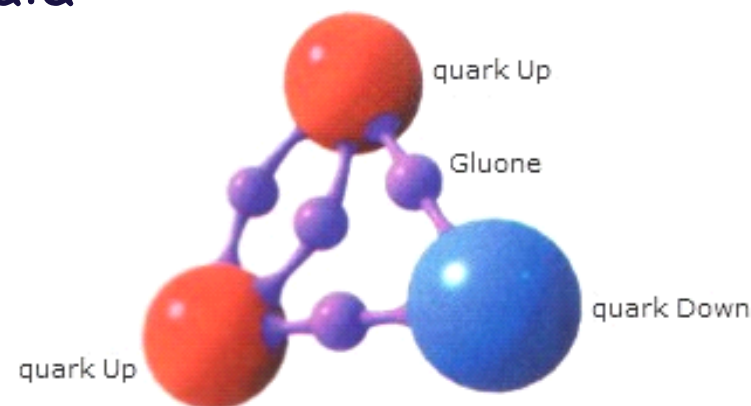
# Ma oggi sappiamo che sono costituite da quark





# I costituenti fondamentali della materia

- ❑ Infatti conosciamo svariate centinaia di particelle
- ❑ Ma tutte sono generate dall'unione di un insieme molto piccolo di particelle elementari
- ❑ 6 quark + 6 leptoni + 4 portatori di forza + la particella di Higgs



|               |         |           |            |                    |
|---------------|---------|-----------|------------|--------------------|
| Leptoni Quark | Quark   |           |            | Portatori di Forza |
|               | u       | c         | t          | $\gamma$           |
|               | d       | s         | b          | g                  |
|               | $\nu_e$ | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ | Z                  |
|               | e       | $\mu$     | $\tau$     | W                  |

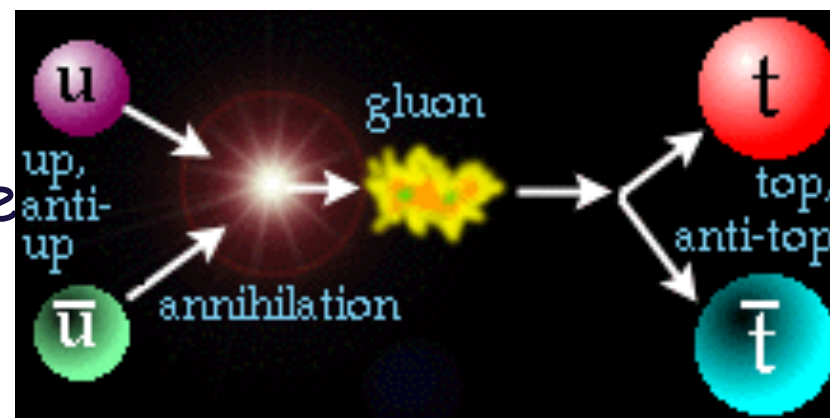
# Materia ed Antimateria

Per ogni particella infine esiste una corrispondente particella di antimateria, o anti-particella

↪ 6 anti-quark + 6 anti-leptoni

Queste particelle appaiono come le loro sorelle di materia, ma hanno carica opposta.

Le particelle sono create o distrutte in coppia.



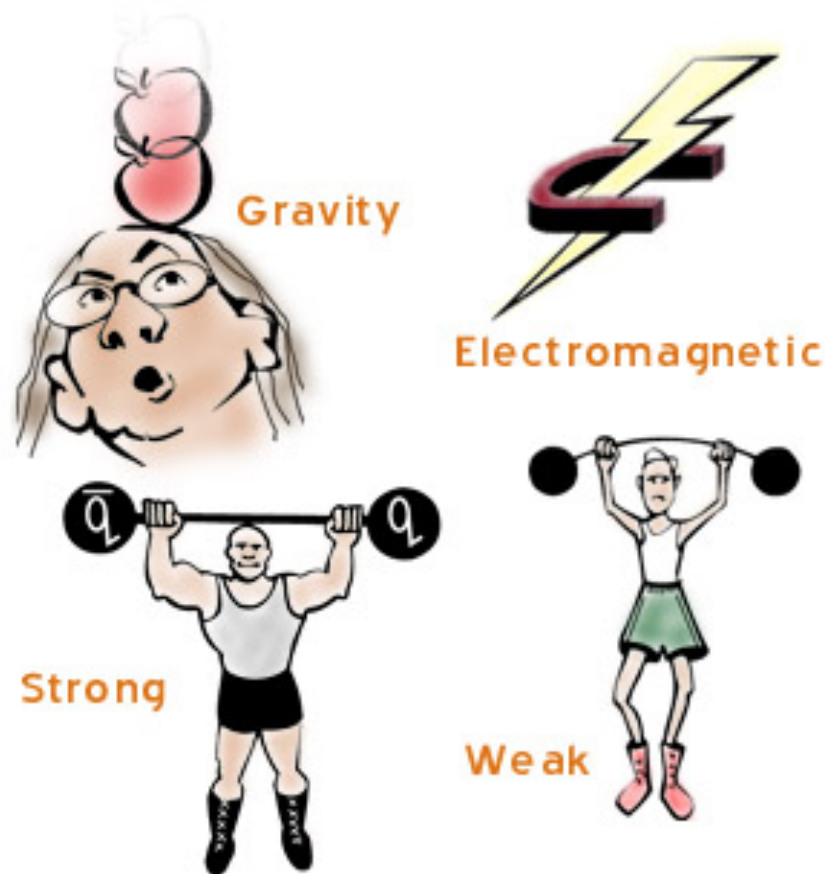
# Quattro Forze Fondamentali

Ci sono 4 interazioni fondamentali in natura

Tutte le forze possono essere attribuite a queste interazioni

La gravita' e' attrattiva, le altre possono essere repulsive

Le interazioni sono anche responsabili dei decadimenti



Le forze elettromagnetiche fanno sì che cariche opposte si attraggano e cariche uguali si respingano



Il portatore della forza è il fotone ( $\gamma$ )



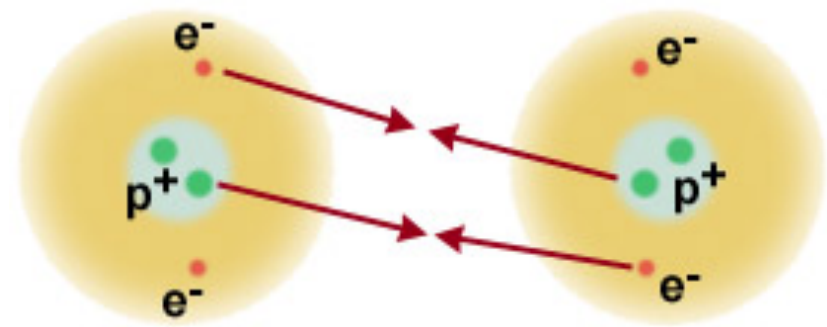
Il fotone è senza massa e si propaga alla velocità della luce

# Forza Elettromagnetica residua

Normalmente gli atomi sono neutri avendo lo stesso numero di protoni e neutroni

La parte carica di un atomo può attrarre la parte carica di un altro atomo

Gli atomi si possono così legare in molecole.



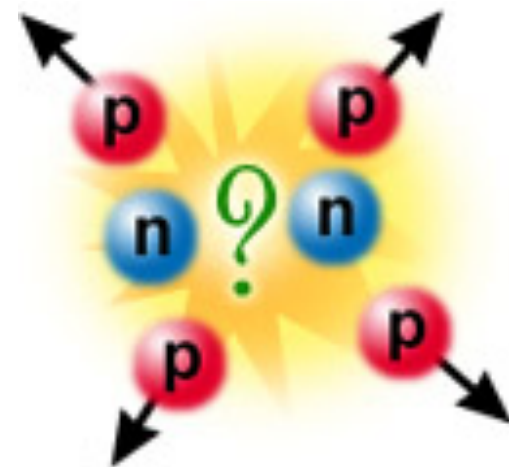
**Residual E-M force in action: the atoms are electrically neutral, but the electrons in one are attracted to the protons in another, and vice versa!**

# Perche' un nucleo non esplode?

Un nucleo pesante contiene molti protoni, tutti con carica positiva

Questi si respingono

Perche' allora il nucleo non esplode?





In aggiunta alla carica elettrica, i quarks portano anche un nuovo tipo di carica, detta "carica di colore"

La forza tra le particelle che hanno carica di colore e' detta forza forte



# Il mediatore della forza forte il Gluone

La forza forte tiene insieme i quarks a formare gli adroni

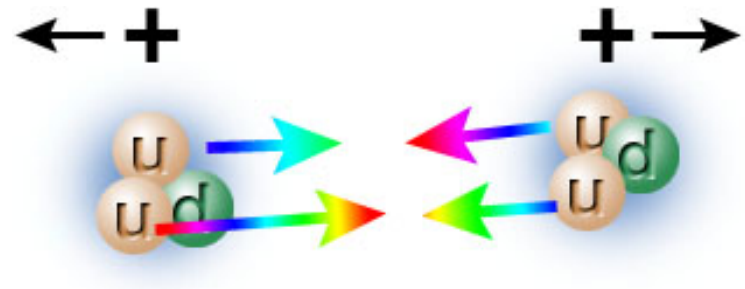
I portatori della forza forte sono i gluoni: ci sono 8 diversi gluoni



La forza forte agisce solo su corte distanze

# Forza Forte residua

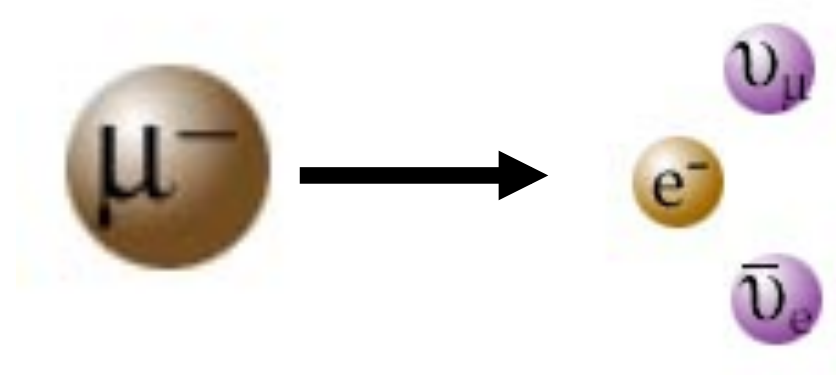
La forza forte tra i quarks  
 in un protone ed i quarks in  
 un altro protone e'  
 abbastanza intensa da  
 superare la forza di  
 repulsione  
 elettromagnetica.



# Decadimento delle particelle

In un decadimento, una particella "instabile" scompare trasformandosi in un certo numero di particelle più leggere

Qui le particelle prodotte non sono "pezzi" della particella iniziale, ma sono altre particelle completamente nuove.



Le interazioni deboli sono responsabili del decadimento dei quarks e dei leptoni pesanti in quarks e leptoni più leggeri

I portatori della forza sono le particelle  $W$  e  $Z$



La gravita' e' molto debole

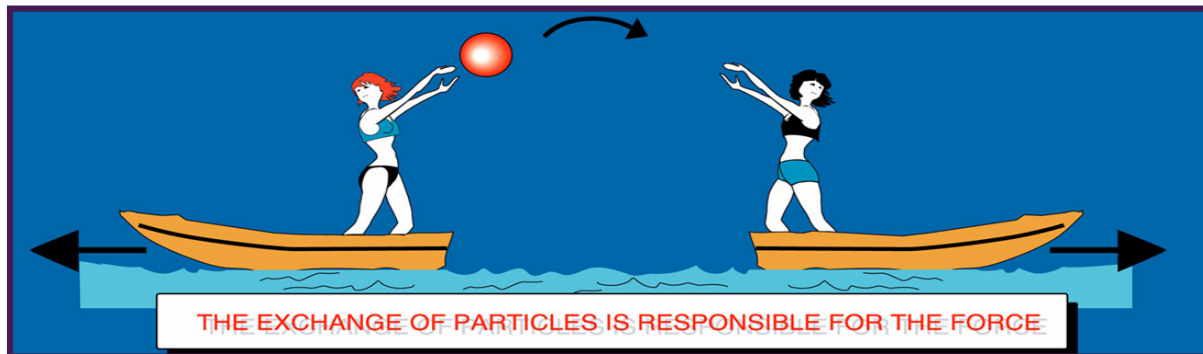
E' importante a distanze  
macroscopiche

Il portatore della forza  
gravitazionale, il gravitone, e'  
predetto dalla teoria ma non e'  
mai stato osservato

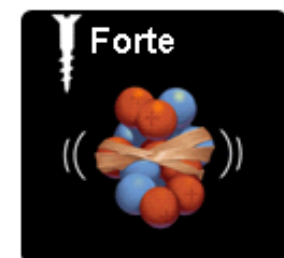
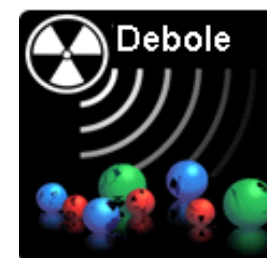




# Riassunto: le quattro forze che tengono insieme la materia



**Lo scambio di particelle è responsabile della forza**



| Tipo di forza          | Intensità relativa delle forze | Particelle scambiate | Dove si manifesta                     |
|------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Forza forte            | $\sim 1$                       | gluoni               | Nuclei atomici                        |
| Forza elettromagnetica | $\sim 10^{-3}$                 | fotoni               | Elettricità                           |
| Forza debole           | $\sim 10^{-5}$                 | bosoni W,Z           | Sole, decadimento radioattivo $\beta$ |
| Gravità                | $\sim 10^{-38}$                | gravitoni            | Mantiene i nostri piedi per terra     |

# Dove si studiano le particelle LHC in 10 minuti

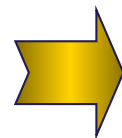


# Ma siamo ben lontani dal conoscere tutto, ad esempio...

Mystery



Chi dà alle particelle esattamente la massa che hanno?



Bosone di Higgs!

Mystery



Da dove viene la materia oscura nell'Universo?



Supersimmetria?

Mystery



Com'era l'Universo alla nascita (o quasi)?



Plasma quark-gluoni?

Mystery



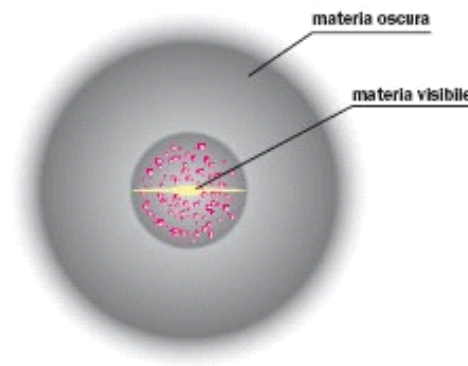
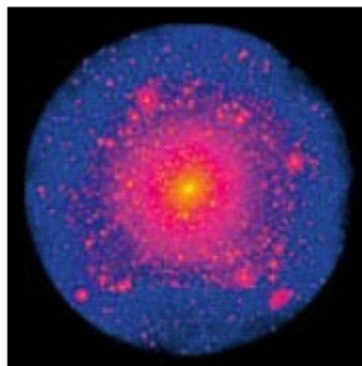
Perchè l'Universo a noi noto è composto esclusivamente di materia e non vi è traccia di anti-materia?



Materia e anti-materia non sono simmetriche?

# Che cos'è la Materia Oscura

- Dalle osservazioni astronomiche sappiamo che la materia a noi visibile mediante i più potenti telescopi costituisce una piccola percentuale della materia totale presente nell'Universo.



- La materia mancante non emette evidentemente luce, e per questo motivo è stata denominata "materia oscura".

- LHC potrebbe in questo caso darci la possibilità di produrre e studiare in laboratorio particelle di materia oscura.

# Evidenze sperimentali di materia oscura

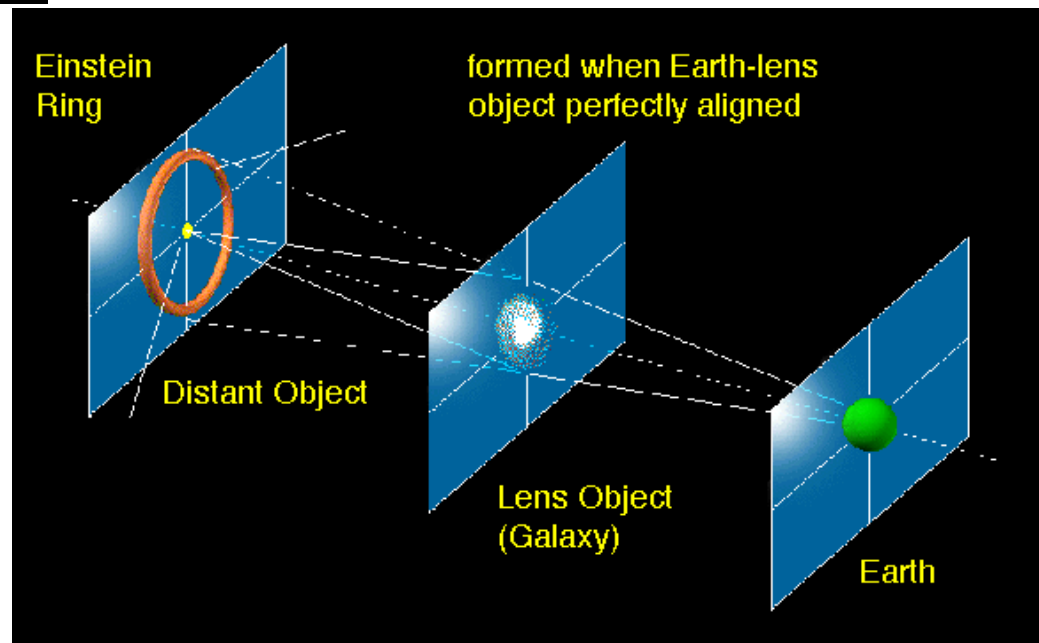
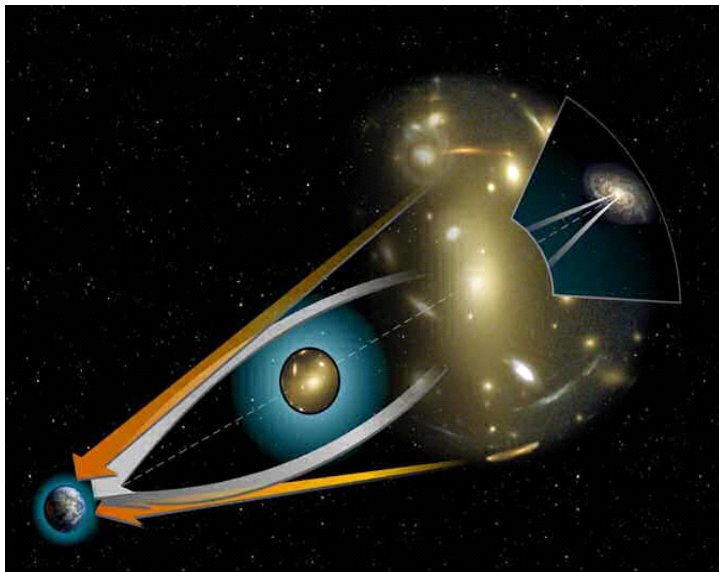


**Gravitational Lens in Abell 2218**

HST - WFPC2

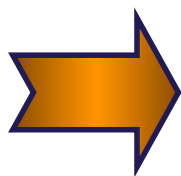
PF95-14 - ST ScI OPO - April 5, 1995 - W. Couch (UNSW), NASA

- A livello astronomico si osservano effetti di tipo lente gravitazionale che possono essere spiegati soltanto se lungo il tragitto la luce è curvata dalla presenza di una grossa quantità di materia, che risulta però invisibile



# Come si studiano le particelle?

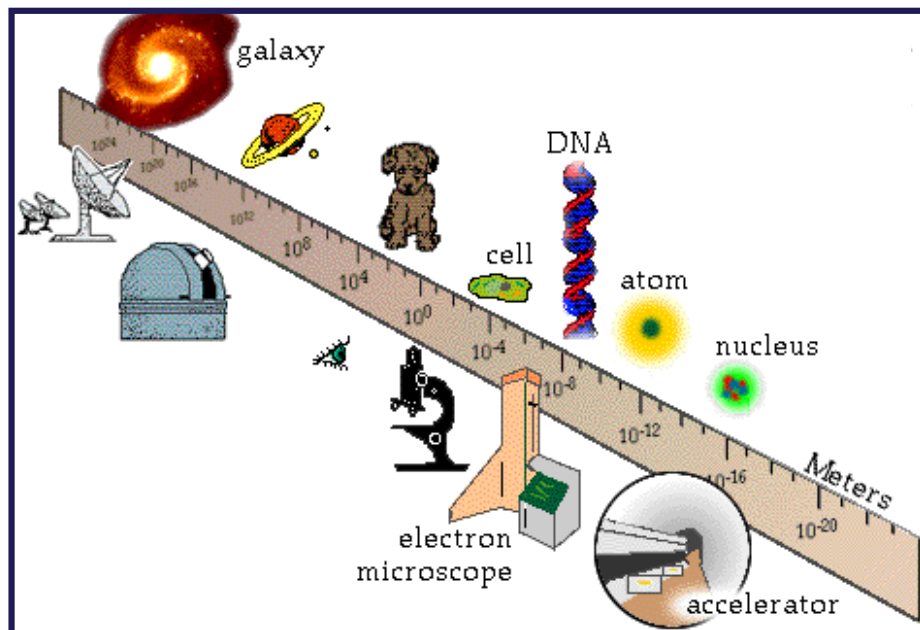
Cerchiamo di studiare  
i costituenti  
elementari della  
materia



Abbiamo bisogno di  
"vedere" oggetti  
molto piccoli



E come si vede un  
oggetto molto piccolo  
come una particella?





# Come si "vedono"?

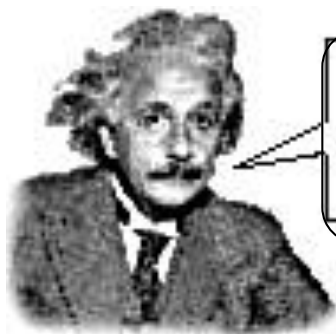
Serve una radiazione molto energetica, cioè con lunghezza d'onda molto piccola:

usiamo gli acceleratori di particelle!

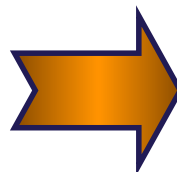




# Come si producono?

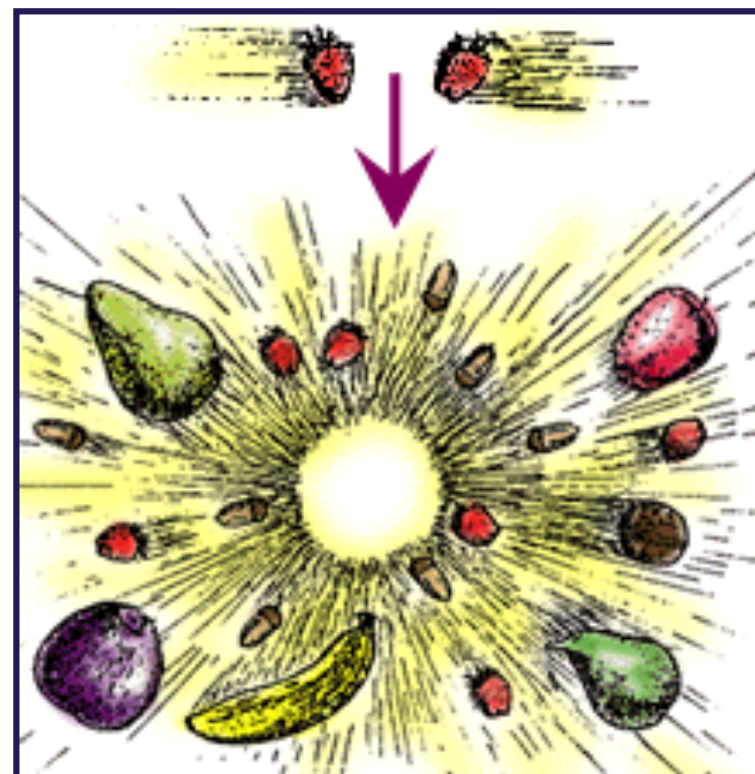


*La massa è una  
forma di **energia***

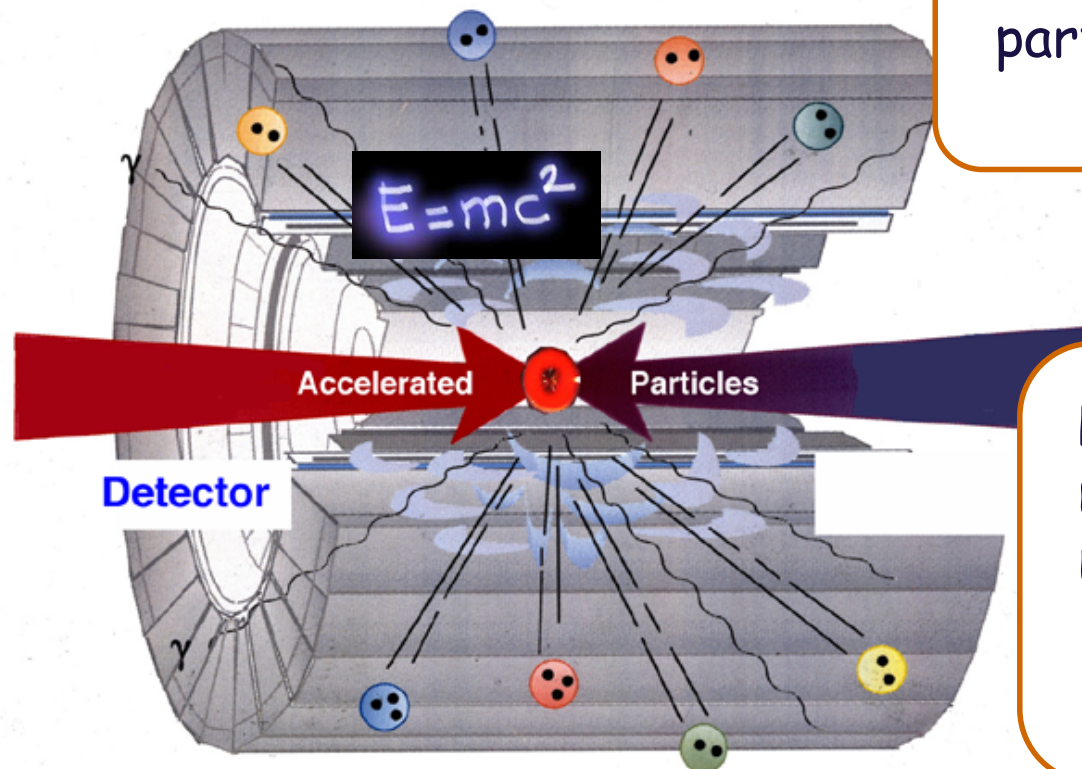


$$E=mc^2$$

- ❑ Per studiare particelle di grande massa e molto instabili si utilizzano particelle ordinarie, di piccola massa cui viene fornita una energia cinetica elevata **mediante un acceleratore**



# Con quali strumenti si osservano?



Per concentrare l'energia sulle particelle e farle collidere

↳ Acceleratori

Per osservare, identificare, misurare le proprietà delle nuove particelle così create

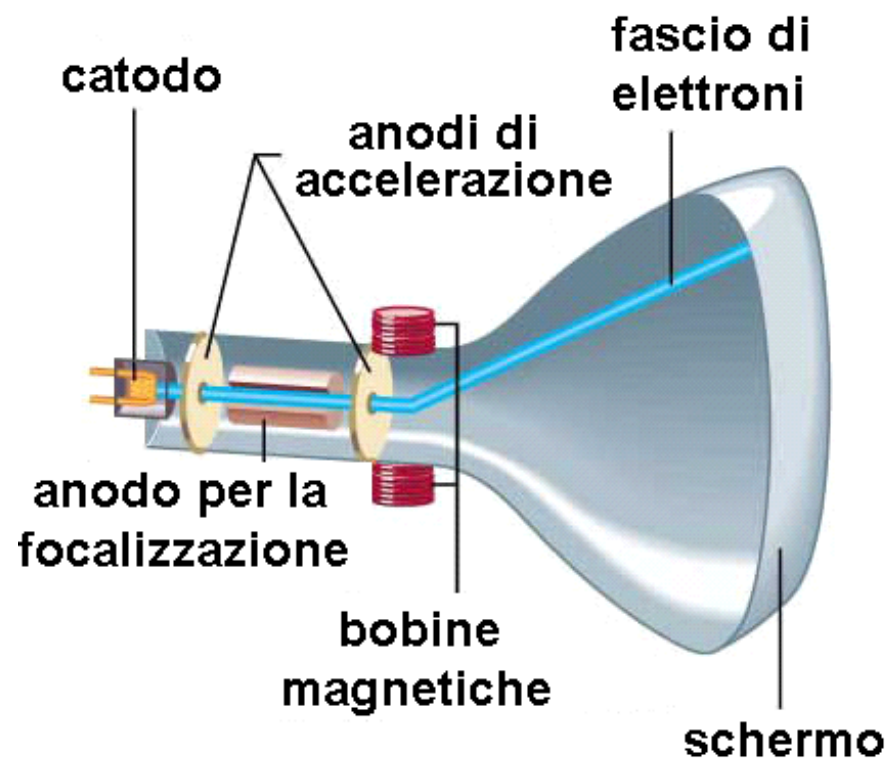
↳ Rivelatori  
("occhi elettronici")

Per raccogliere ed analizzare i dati

↳ Calcolo, reti

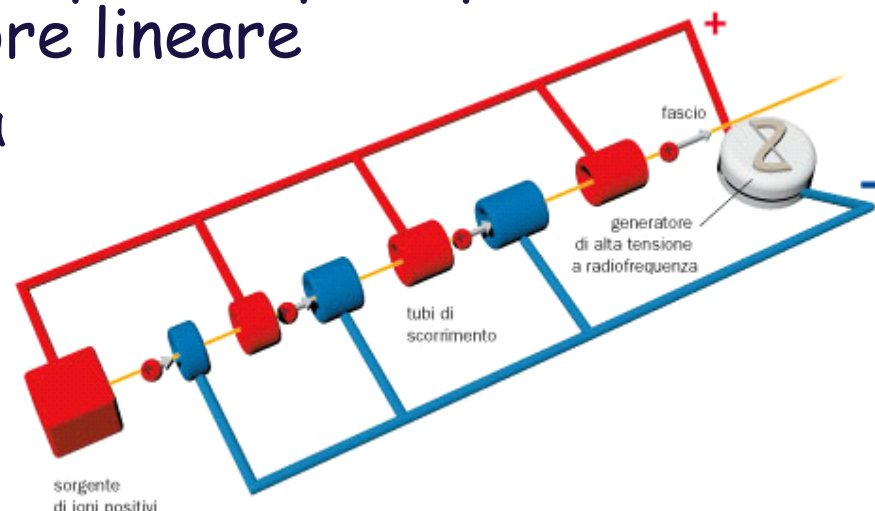
# Acceleratori di particelle

- ❑ Con il nome di acceleratore di particelle si intende una macchina capace di immagazzinare e far raggiungere energie elevate a particelle di vario genere, costringendole a seguire una traiettoria data, per essere poi impiegate come proiettili contro bersagli fissi o altre particelle.
- ❑ Un'acceleratore di elettroni diffusissimo fino a pochi anni fa, oramai del tutto rimpiazzato da nuove tecnologie, è il televisore a tubo catodico.



# L'acceleratore lineare

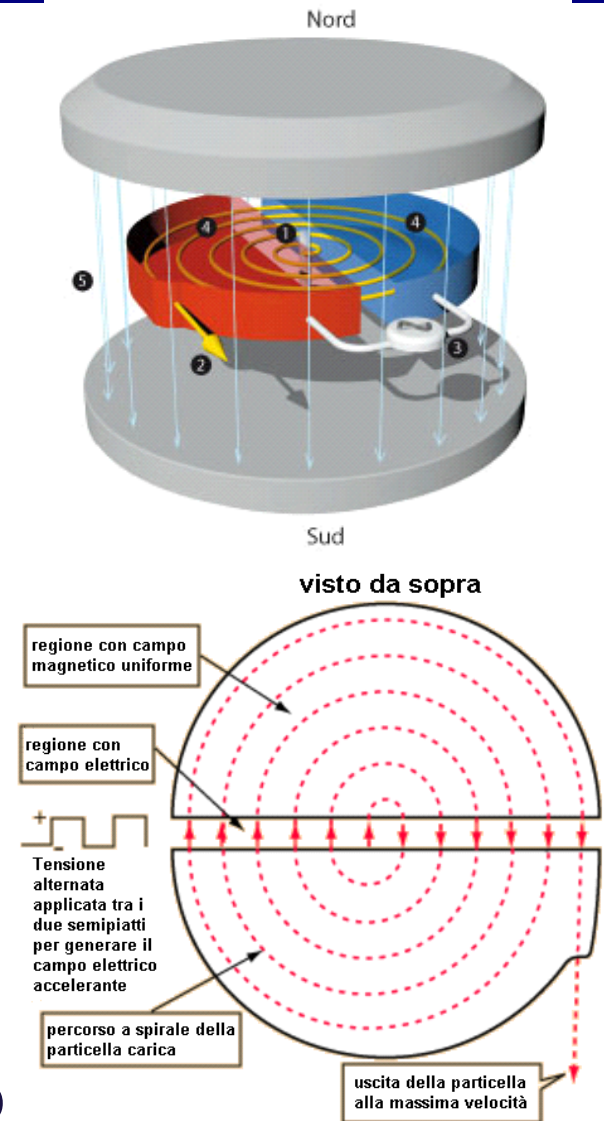
- ❑ Il dispositivo concettualmente più semplice per accelerare delle particelle è l'acceleratore lineare
- ❑ Si estende su una traiettoria rettilinea lungo la quale sono posti dei segmenti di tubo metallico collegati ad un generatore di tensione ad altissima frequenza
- ❑ Una particella carica (ad esempio un protone o un elettrone) attraversando lo spazio tra due segmenti di tubo aumenta la propria energia a causa della differenza di potenziale fornita dal generatore di alta tensione
- ❑ Attraversando un gran numero di questi segmenti la particella assume via via un'energia maggiore fino ad essere espulsa alla massima energia





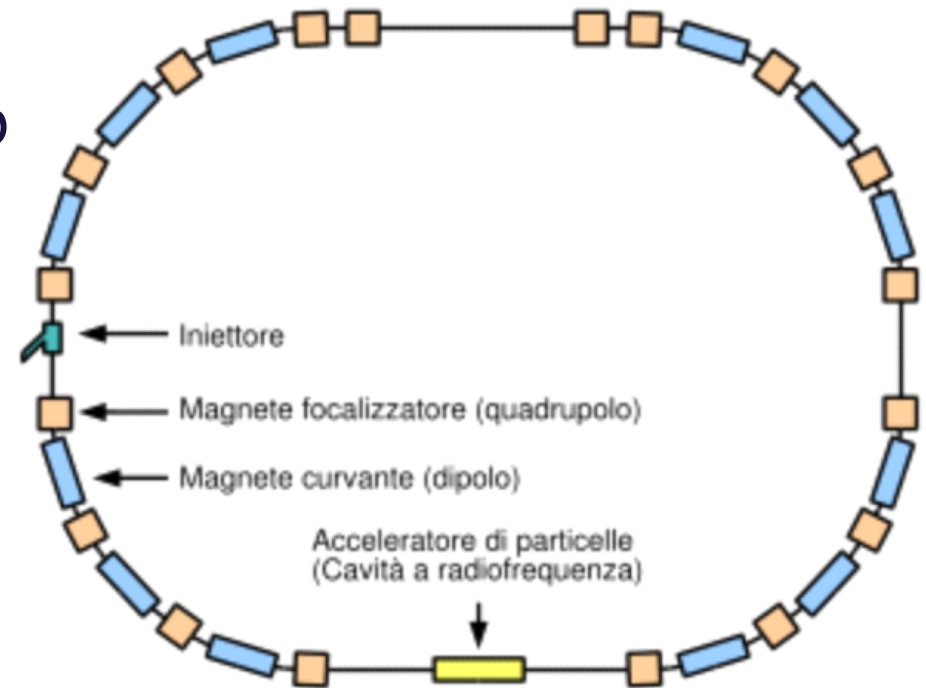
# Il ciclotrone

- ❑ Un approccio molto più efficace consiste nell'impiego di acceleratori circolari
- ❑ Grazie al fatto che una particella carica sotto l'azione di un campo magnetico segue una traiettoria circolare, è possibile guidare la particella lungo un percorso prestabilito in modo da farla ripassare molte volte tra gli stessi stadi di accelerazione
- ❑ In questo modo l'acceleratore, a parità di energia che si vuole imprimere alle particelle, è estremamente più compatto



# Gli acceleratori moderni il sincrotrone

- Il sincrotrone è un acceleratore nel quale le particelle sono accelerate lungo una traiettoria (grosso modo) circolare
- Il vantaggio principale rispetto ad un dispositivo come il ciclotrone è che il campo magnetico è presente soltanto lungo il circolo descritto dalla particella
- L'accorgimento da prendere, poiché l'aumento di energia viene impresso alle particelle ad ogni rivoluzione, è che l'intensità del campo magnetico necessaria alla curvatura sia incrementata man mano che l'energia delle particelle aumenta



# Acceleratori in uso nella vita comune



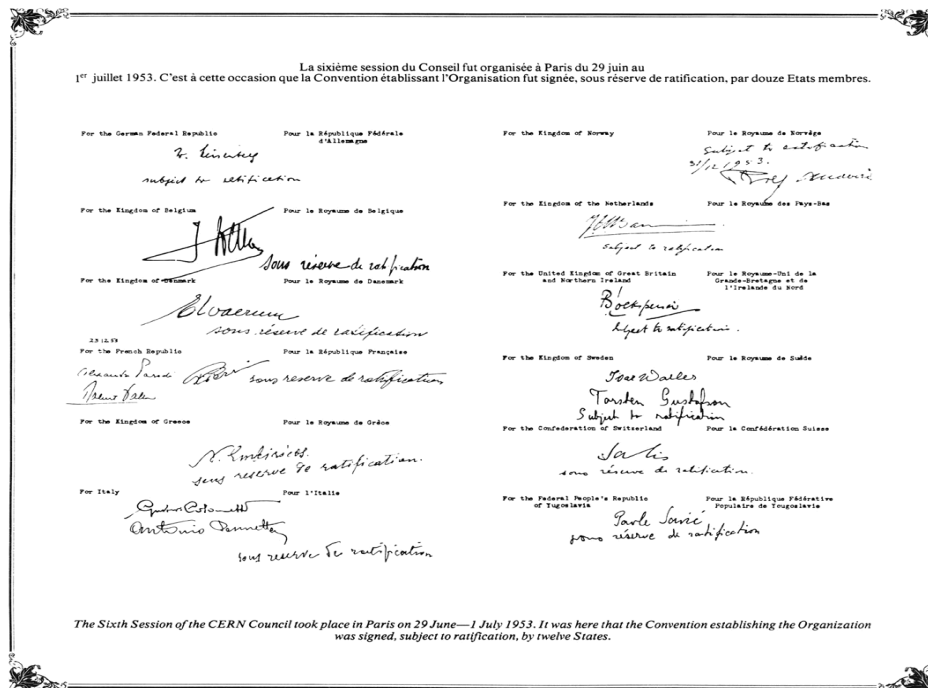
- ❑ gli acceleratori hanno innumerevoli applicazioni in settori quali la medicina, la microelettronica, i beni culturali e l'ambiente
- ❑ la percentuale di acceleratori impiegati per scopi di ricerca nella fisica delle particelle non raggiunge nemmeno l'uno per cento dei circa 15.000 acceleratori in funzione nel mondo
- ❑ i luoghi più comuni dove poter vedere un acceleratore non sono i laboratori di ricerca, bensì ospedali e grandi industrie
- ❑ Una delle applicazioni più importanti e diffuse degli acceleratori è la radioterapia, ossia la cura dei tumori tramite bombardamento con raggi X
- ❑ I raggi X sono tipicamente prodotti dall'urto contro un bersaglio metallico di elettroni accelerati ad una ventina di MeV mediante acceleratori lineari.



# II CERN

## Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare

- ❑ Fondata nel 1954 da 12 Paesi tra cui l'Italia
- ❑ Oggi: 20 stati membri
- ❑ Più di 7000 utilizzatori da tutto il mondo
- ❑ Budget annuale di 600-700 milioni di euro



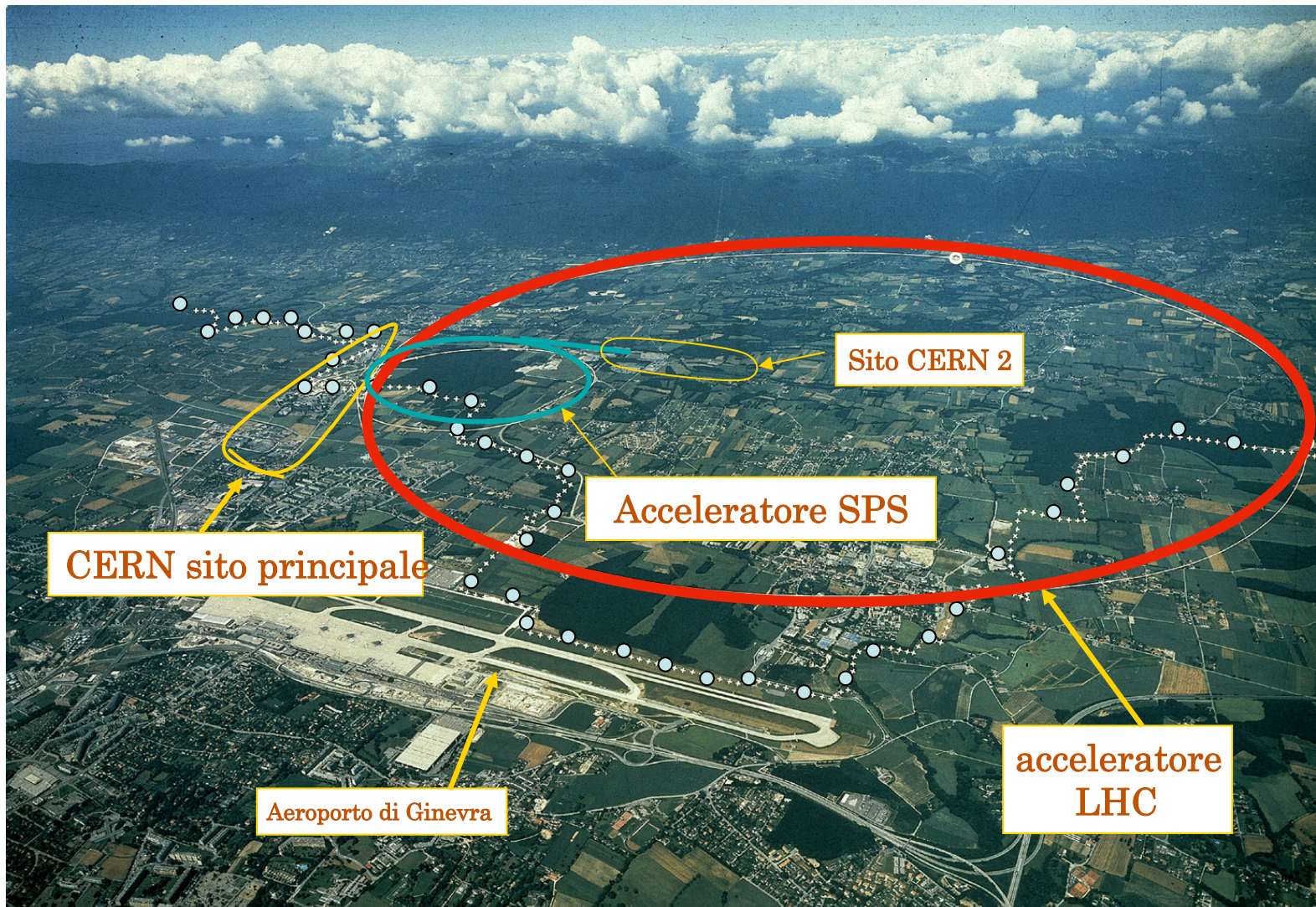
1954: La convenzione che ha dato nascita all'Organizzazione - firme originali



2004: 1 20 stati membri



# Il complesso di LHC visto dall'alto

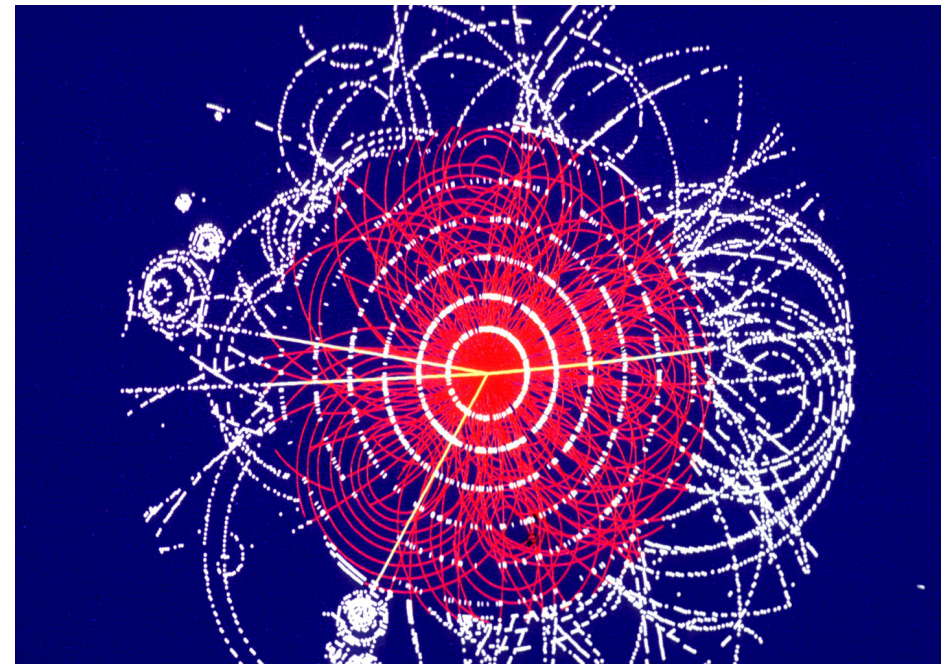




# L'energia di LHC

I due fasci di protoni collidono tra loro  
**800 milioni di volte al secondo**

- ❑ 100 milioni di volte l'energia degli elettroni nel tubo catodico della TV.
- ❑ L'energia immagazzinata nell'acceleratore è equivalente all'energia cinetica di una massa di 1 kg lanciata ad una velocità di ~100000 km/h
- ❑ Un "piccolo" dettaglio: il costo
  - ❑ **6 miliardi di euro** pagati in circa 10 anni dagli stati membri del CERN



**Viene prodotto solo 1 Higgs ogni  
1,000,000,000,000 eventi**

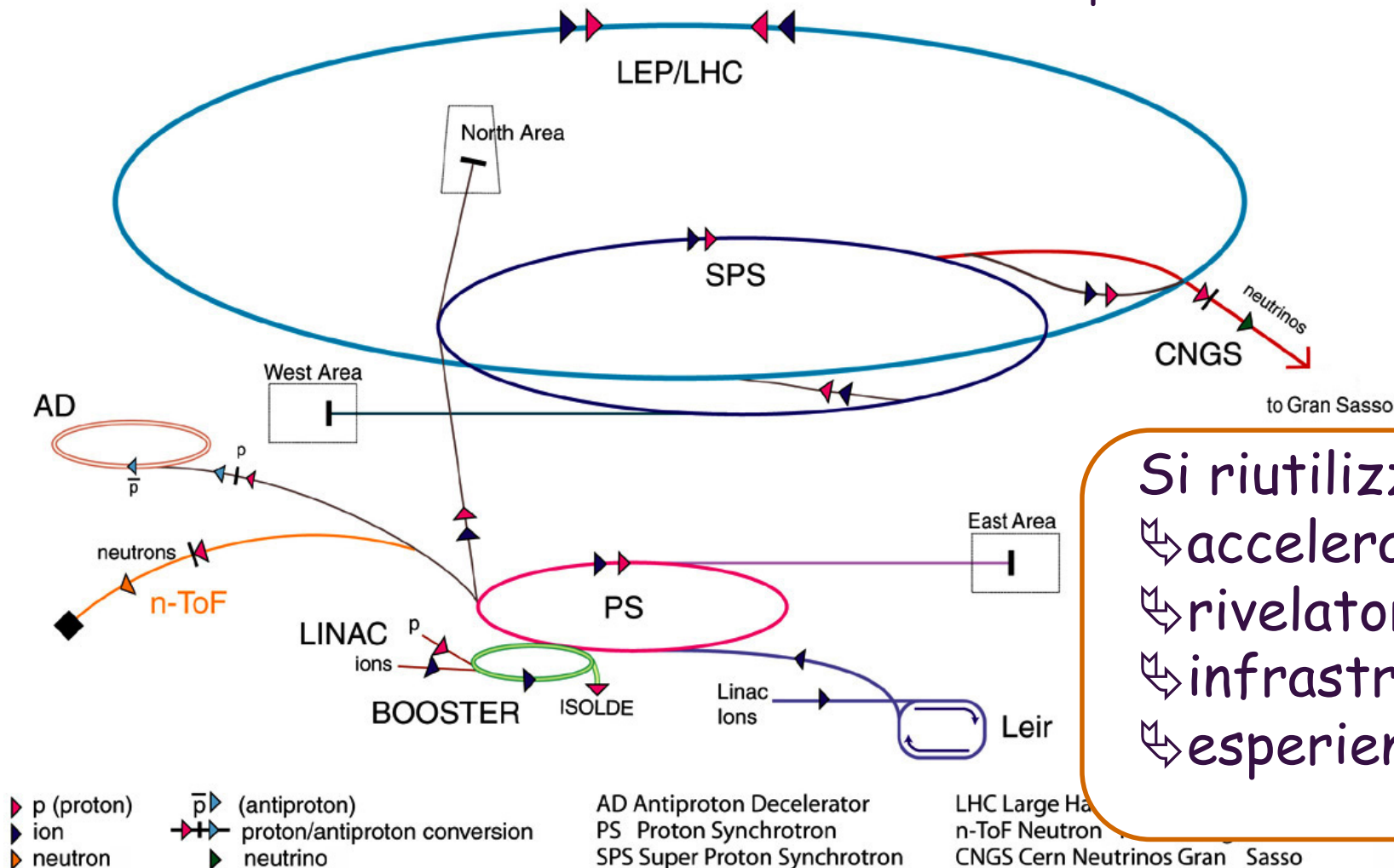
# Il tunnel e i magneti superconduttori





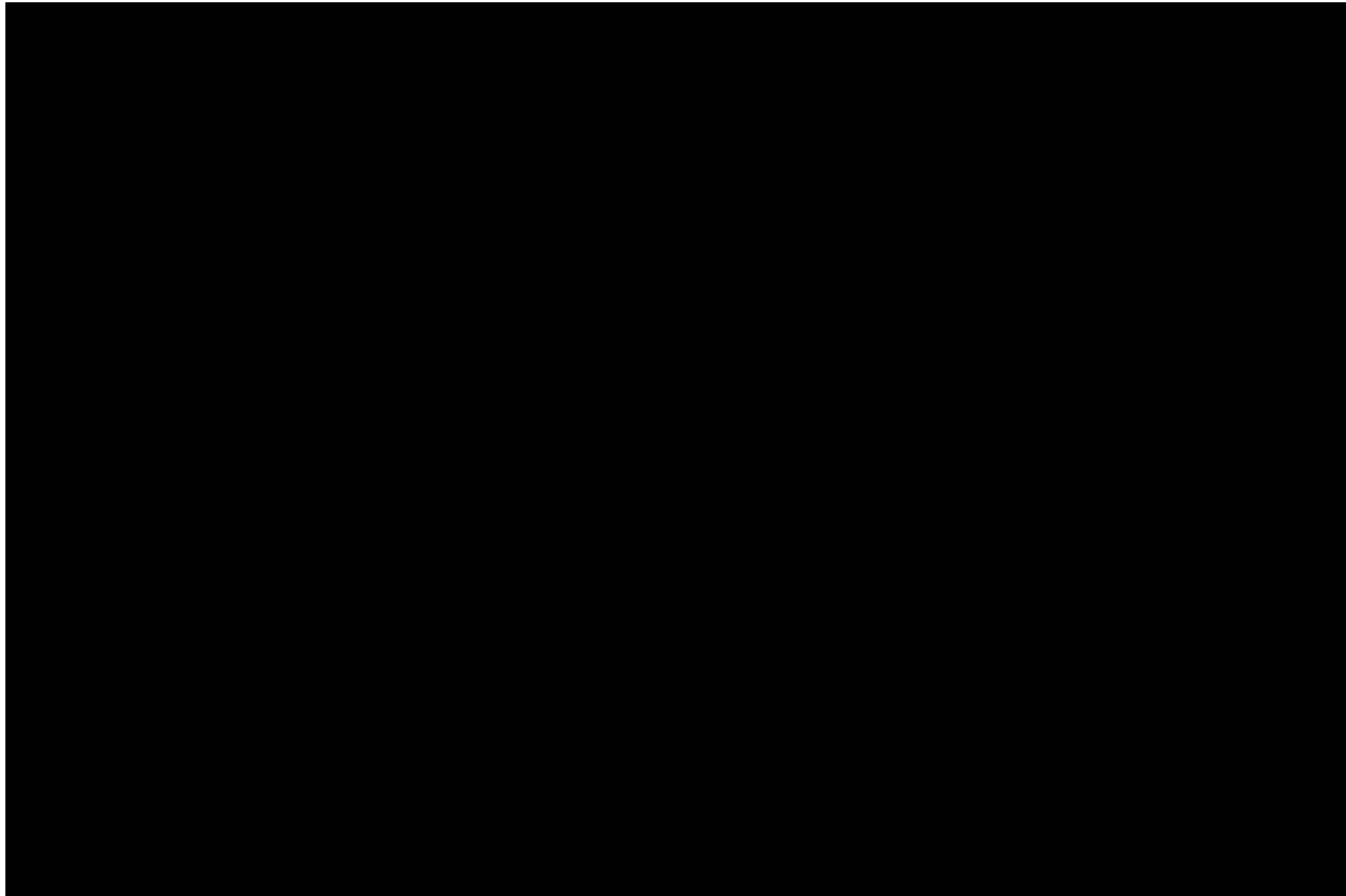
# Gli acceleratori del CERN

La catena degli acceleratori al CERN:  
un sistema che evolve nel tempo



Si riutilizzano:  
 ↳ acceleratori,  
 ↳ rivelatori,  
 ↳ infrastrutture  
 ↳ esperienza

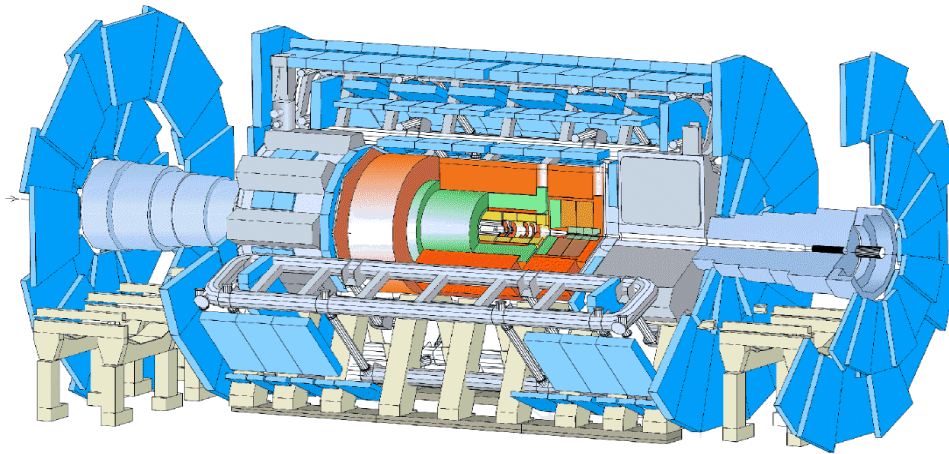
# Il funzionamento della catena di acceleratori di LHC



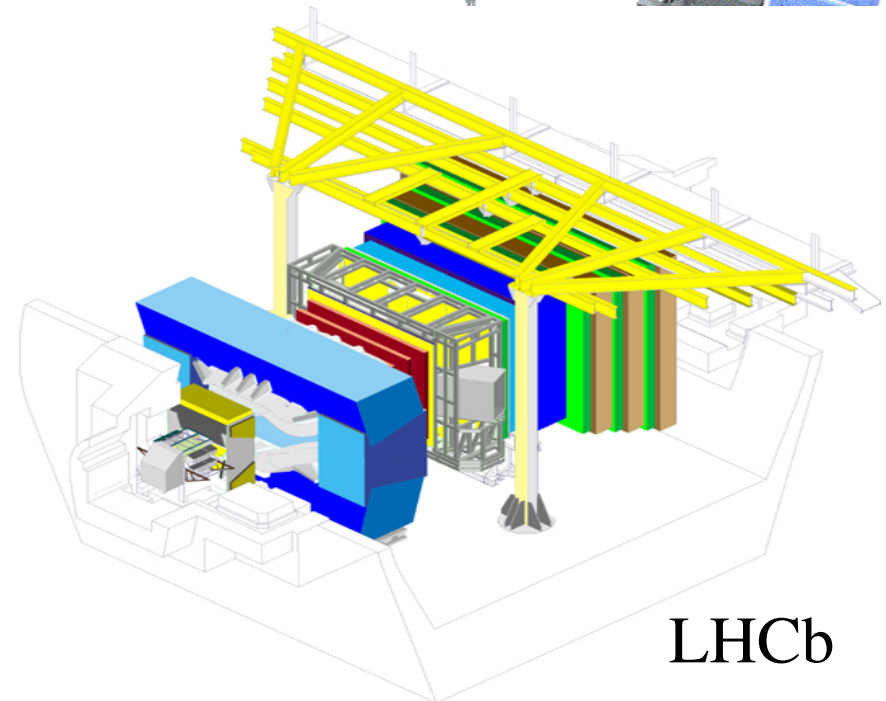
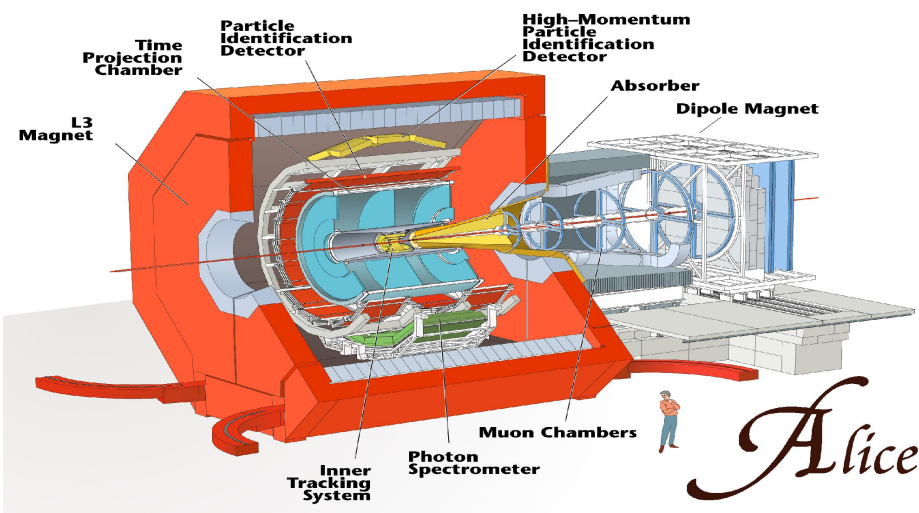
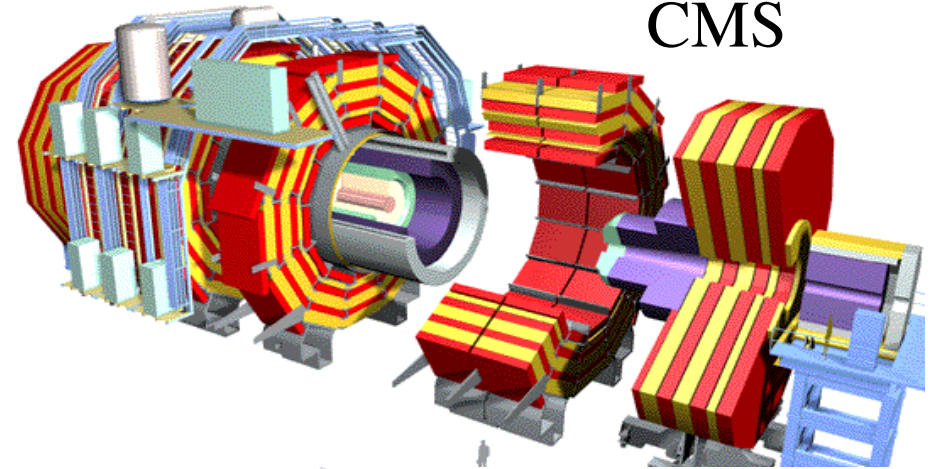


# I 4 grandi esperimenti di LHC

ATLAS



CMS



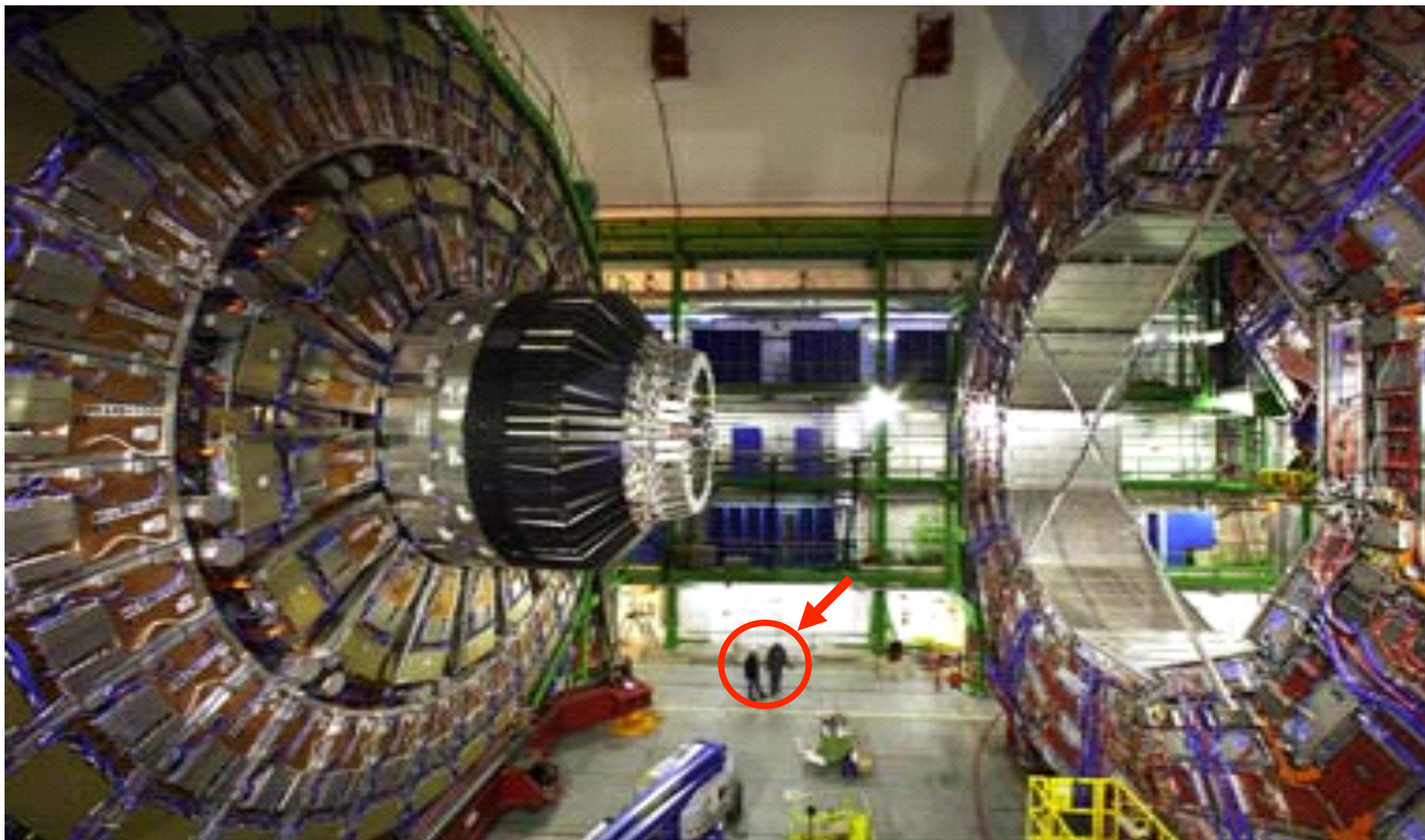
LHCb

# Perché 4 esperimenti

- ❑ Atlas e CMS
  - ❑ Cosiddetti General Purpose Detector → sono in grado di eseguire una varietà di misure in molti settori diversi, in particolare sono dedicati alla ricerca del bosone di Higgs e alla rivelazione di eventuali nuove particelle di alta massa (ad es. Supersimmetria)
- ❑ Alice
  - ❑ L'esperimento è dedicato allo studio delle collisioni di ioni pesanti (ad esempio urti di nuclei di piombo) ad altissima energia, ed è pensato per studiare il plasma di quark e gluoni che si crea nell'urto → condizioni di densità di energia molto simili ai primissimi istanti di vita dell'Universo dopo il Big Bang
- ❑ LHCb
  - ❑ È pensato per studiare con grande precisione le asimmetrie di comportamento tra materia e anti-materia con l'obiettivo di rispondere ad una delle domande fondamentali: per quale motivo l'Universo che osserviamo è costituito solo di materia mentre l'anti-materia sembra completamente scomparsa?

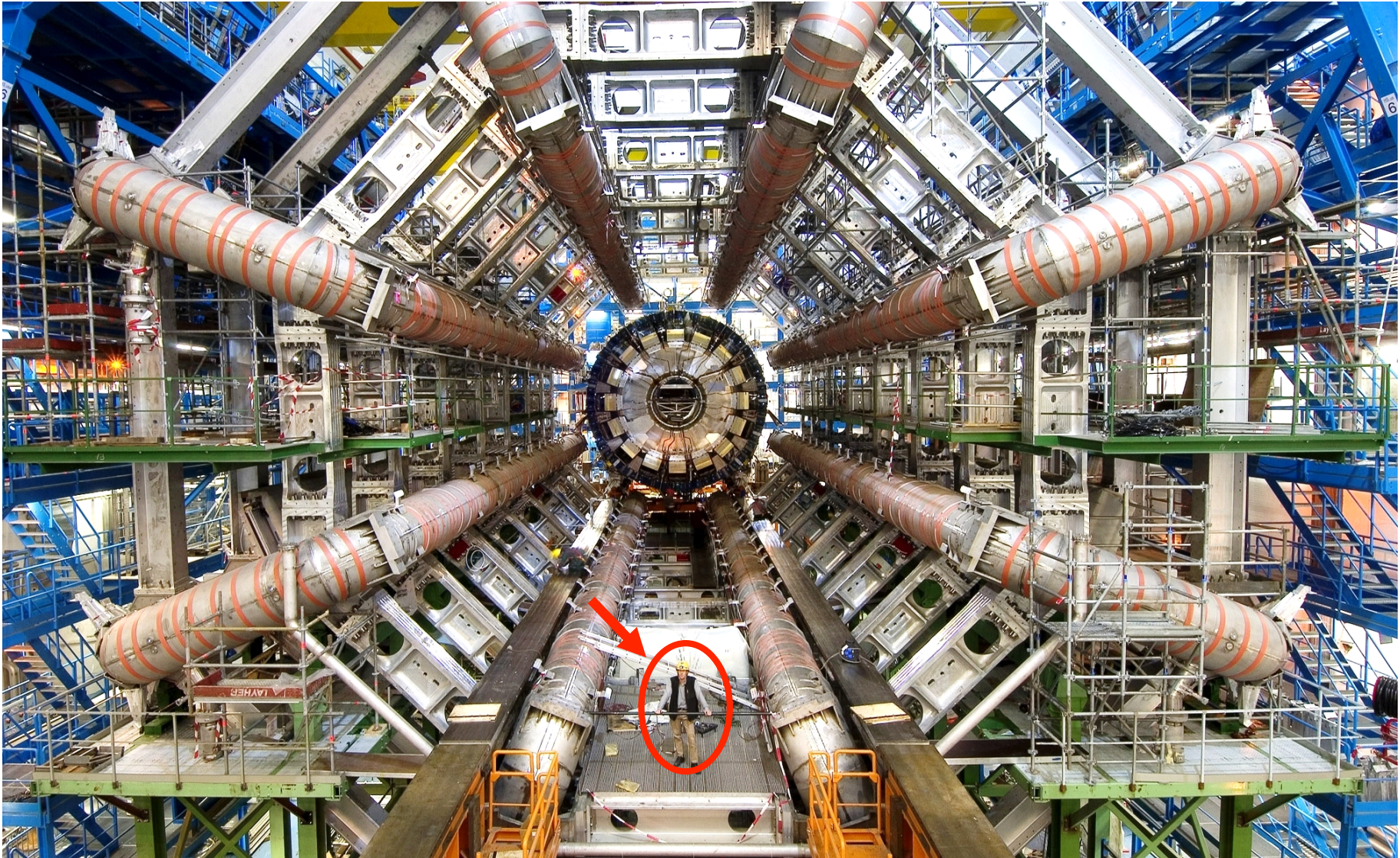


# Il rivelatore CMS durante la costruzione





# Il rivelatore ATLAS durante la costruzione



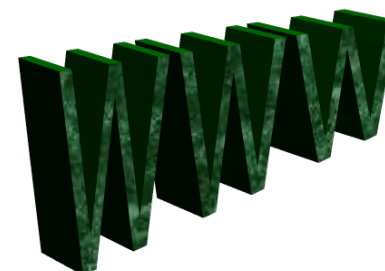
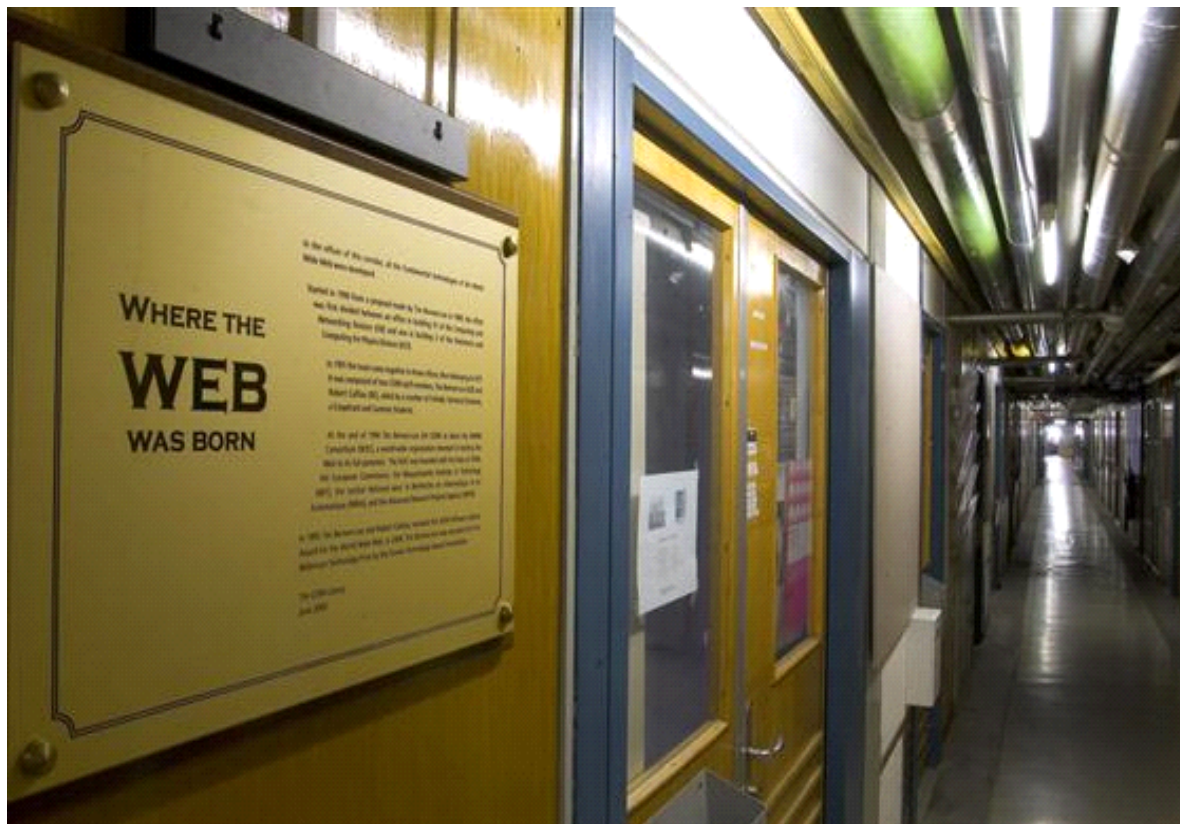


# Come funziona un rivelatore di particelle





# Un celebre esempio di ricaduta tecnologica: Internet e il WWW



Condividere l'informazione

# La Griglia Computazionale (GRID)

Il progetto LHC computing GRID è un progetto finanziato anche dall'Unione Europea. L'obiettivo è fornire l'enorme potenza di calcolo necessaria per analizzare la straordinaria quantità di dati attesi dall'LHC



**Condividere la potenza di calcolo**

# LHC: una montagna di dati da analizzare

- ❑ I quattro esperimenti di LHC producono circa 15 *Petabyte* di dati all'anno (1 *Petabyte* corrisponde a un milione di *Gigabyte*), sufficienti per riempire annualmente qualcosa come 20 milioni di *Compact Disk*
- ❑ Se volessimo memorizzare tutti i dati prodotti in un anno da LHC su dei Compact Disk, impilandoli potremmo costruire una colonna alta 20 km!
- ❑ I dati devono essere disponibili per qualcosa come 5.000 scienziati in 500 Istituti di ricerca e Università in ogni parte del mondo, e conservati per una quindicina di anni

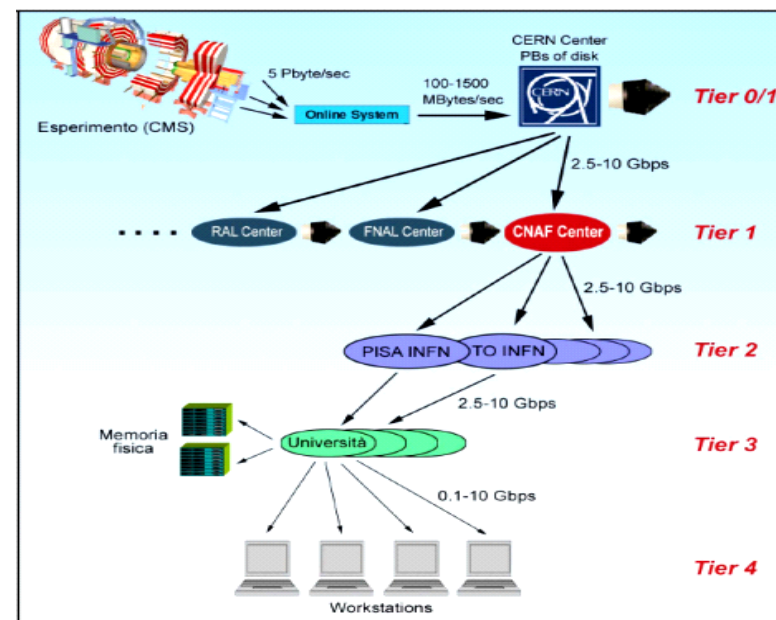
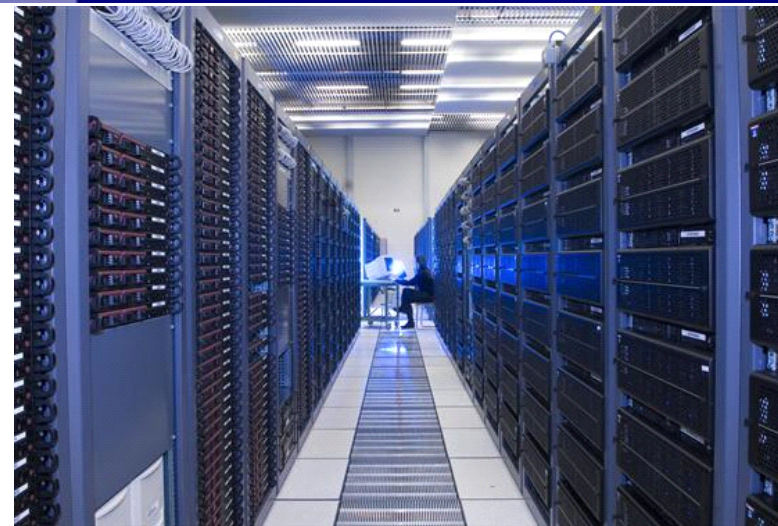




# Il sistema mondiale di calcolo

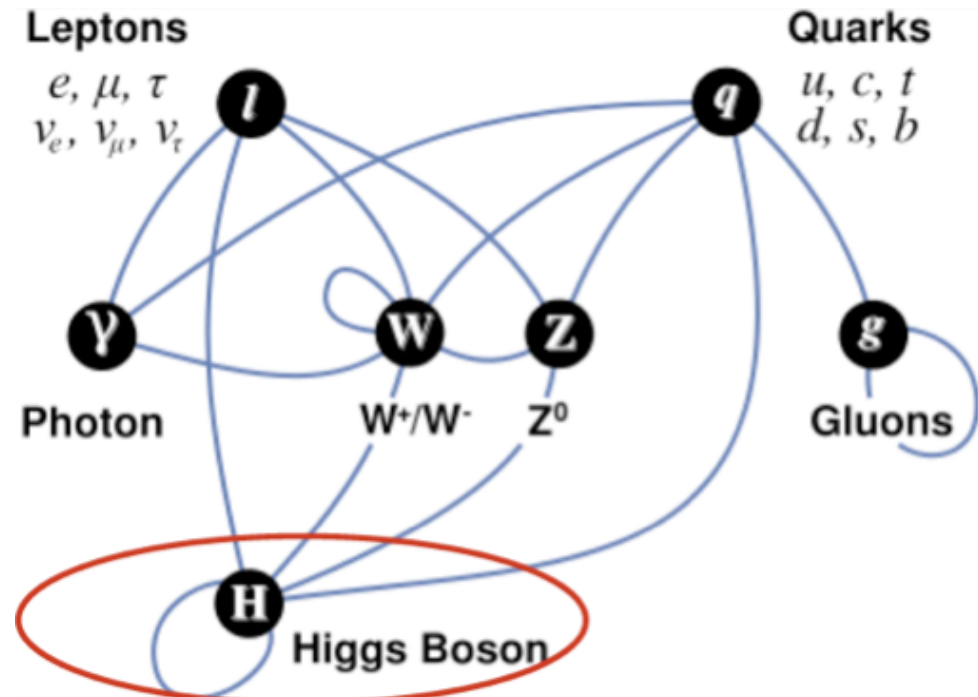
- ❑ I dati degli esperimenti sono acquisiti al CERN, e poi trasferiti secondo un modello gerarchico su più strati in tutto il mondo
- ❑ Dopo una prima fase di processo al CERN essi sono spediti ai centri di calcolo più grandi, che sono situati in Canada, Francia, Germania, Olanda, Paesi Scandinavi, Regno Unito, Spagna, Stati Uniti, Taiwan, e ovviamente Italia

↳ In Italia, in particolare, il centro di calcolo si trova a Bologna, presso una struttura dell'INFN appositamente delegata alle tecnologie informatiche, denominata *CNAF*





# Il Bosone di Higgs

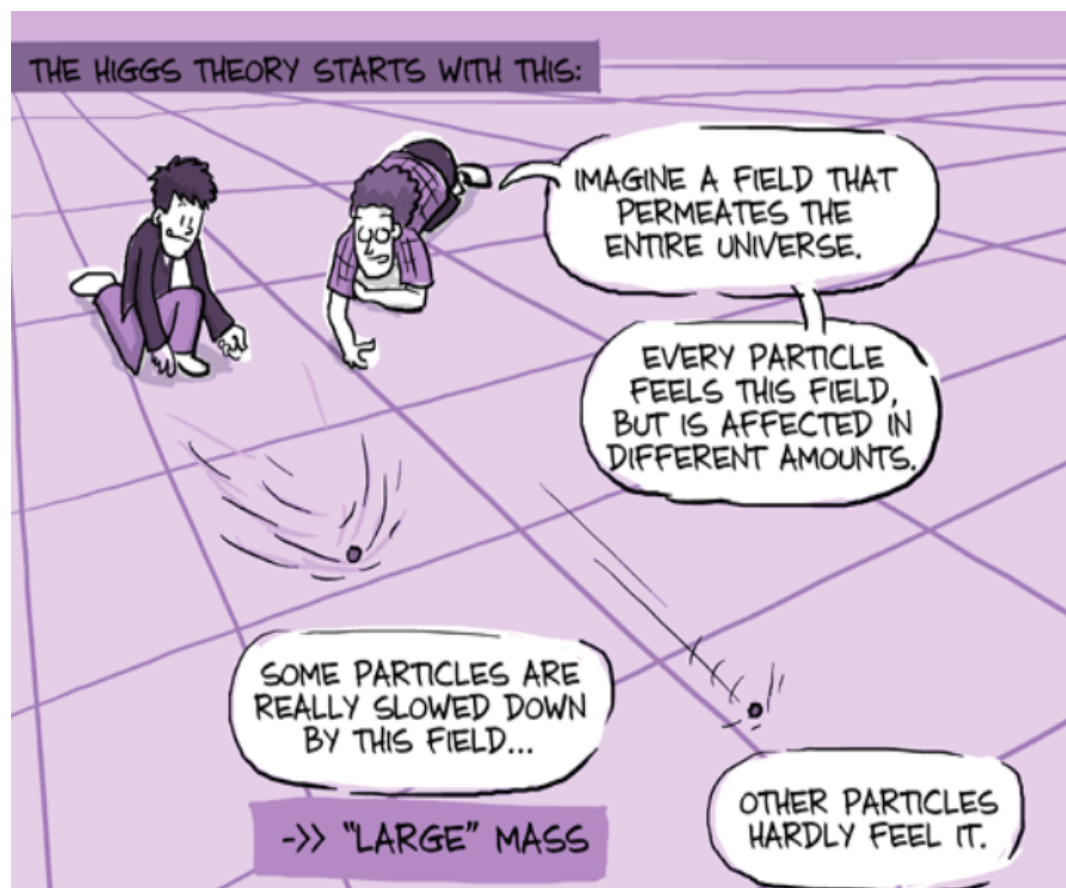


Tutte le particelle dotate di massa interagiscono con il bosone di Higgs

↳ Maggiore è la massa della particella e più è grande l'interazione con l'Higgs

# Il meccanismo di Higgs

Englert, Brout e Higgs postularono l'esistenza di un campo di forza che permea tutto l'Universo e che, interagendo con le particelle da' loro la massa



# Il meccanismo di Higgs



Per capire il meccanismo di Higgs,  
immaginiamo una stanza piena di fisici  
in quieta conversazione: è come lo  
spazio riempito del campo di Higgs

... Un famoso scienziato entra, creando  
disturbo quando si muove nella stanza,  
poiché ammiratori e curiosi si affollano  
intorno a lui ...



... l' affollamento è motivo di resistenza  
al suo movimento ... in altre parole lo  
scienziato **'acquista' massa**: così fa una  
particella che si muove nel campo di Higgs ...



# Il meccanismo di Higgs



... inoltre, se una notizia arriva  
nella stanza .....

.... può crearsi un raggruppamento fra  
gli scienziati stessi. Nell'analogia,  
questi addensamenti (di energia) del  
campo sono le **particelle (bosoni) di Higgs**



*L'analogia è stata pensata dal Prof. David J. Miller (U.C. London) che è  
stato anche premiato per la brillante spiegazione del bosone di Higgs  
al ministro inglese della scienza nel 1993*



# Un'altra analogia

Un altro modo per immaginare il Meccanismo di Higgs: lo spazio e' permeato di acqua (= campo di Higgs) che determina le caratteristiche di mobilita' (= massa) degli elementi che vi transitano (pesci = particelle)



pesante



leggero



# Come facciamo a "vedere" l'Higgs?

Abbiamo raccolto dati per 15 mesi (Marzo 2011- Giugno 2012) ~1600 milioni di milioni di collisioni protone-protone a LHC

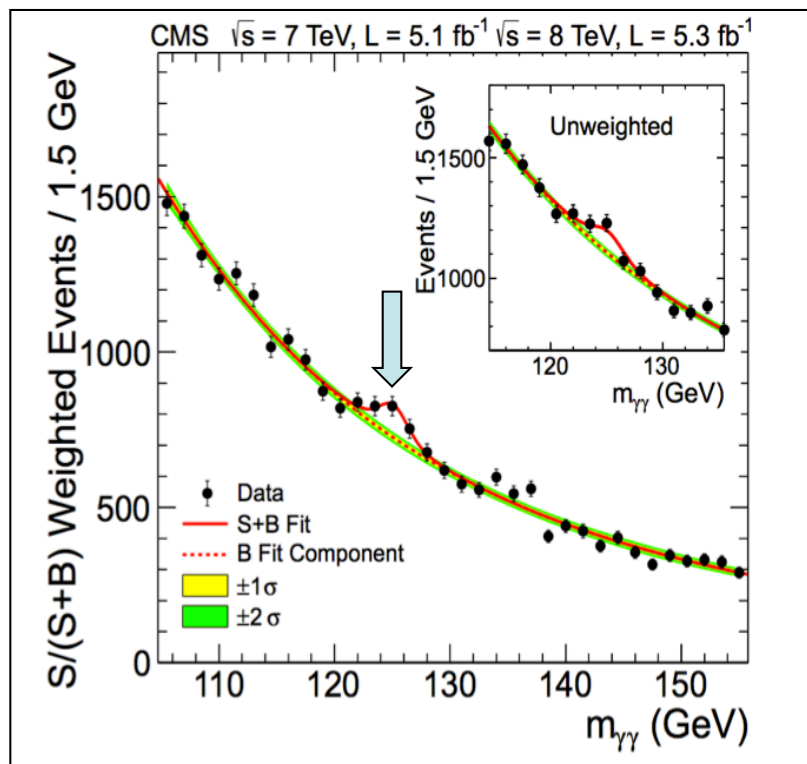
In base ai calcoli teorici ci aspettiamo ~200.000 bosoni di Higgs prodotti, che però sono altamente instabili e quindi decadono immediatamente dopo la loro creazione

Ci sono molti possibili modi di decadimento del bosone di Higgs → per vederlo bene, l'Higgs nel decadimento deve trasformarsi in particelle che si possono rivelare facilmente (ad esempio  $H \rightarrow \gamma\gamma$ )

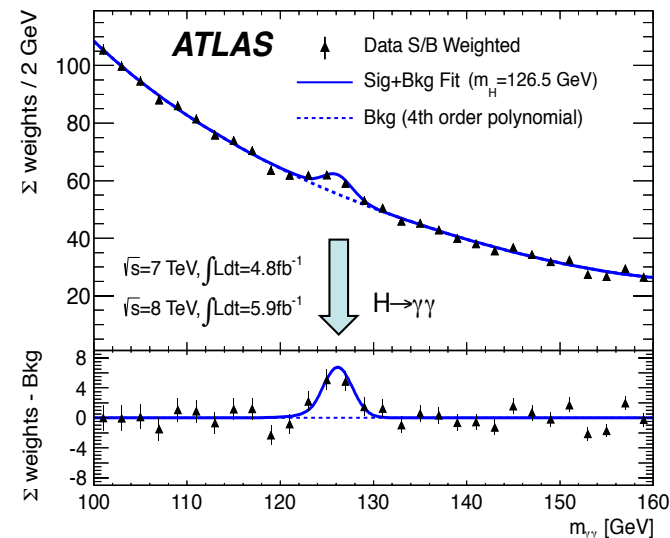
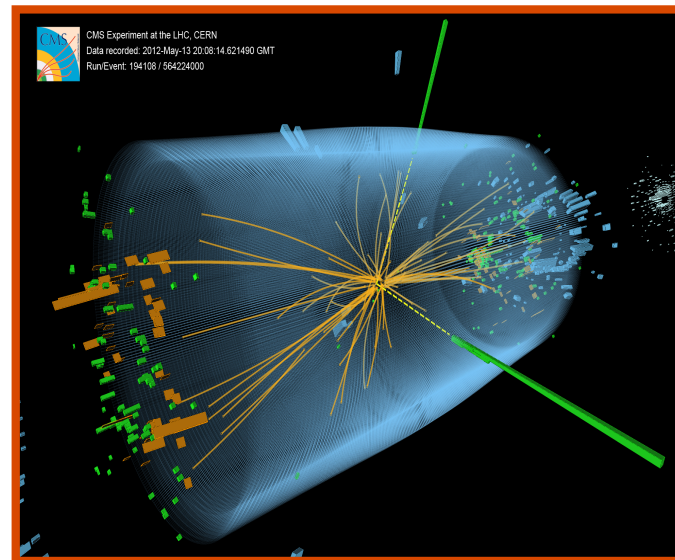
Ma solo una volta su 1000 il bosone di Higgs decade in due fotoni → alla fine ci aspettiamo solo ~200 eventi

# Cosa abbiamo osservato?

Selezionando eventi con  $2\gamma$  troviamo un eccesso intorno a  $M_{\gamma\gamma} \sim 126 \text{ GeV}$



Segnale simile nei 2 esperimenti  
ATLAS e CMS



# L'annuncio della scoperta dell'Higgs





# In conclusione

Per il mondo della scienza questa è dunque una fase di grande emozione

Dopo un paio di decenni di lavoro gli esperimenti del CERN sono riusciti finalmente a rivelare all'uomo l'origine e l'essenza della materia

Si apre ora una fase di studio delle proprietà della particella di Higgs, e la speranza è quella di scoprire un nuovo mondo di particelle ancora sconosciute

Vedremo cosa la natura ci riserverà...

Grazie per l'attenzione  
e in bocca al lupo!