

Il CERN nel III millennio

**LHC!**

**HIGGS, BIG BANG E ALTRO**

# IL CERN

Vicino a Ginevra, al confine con la Francia



# Che cos'è, e che cosa fa?

Acronimo e nomi equivalenti:

*Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire*  
*European Organization for Nuclear Research*  
*European Laboratory for Particle Physics*

Fondato nel 1954 : 12 stati membri, fra cui l'Italia  
2011: 20 stati membri, 6 stati + 2 organizzazioni (EU, UNESCO) osservatori  
2400 dipendenti  
10000 scienziati associati di 610 universita' o laboratori da 113 paesi  
Budget annuale: ~920 M€, Italia 107 M€

*Non si occupa di energia:*

Struttura della materia al livello piu' fondamentale

→ *Particelle, Nuclei, Astroparticelle, Astrofisica, Cosmologia*

# Materia

'800: *Molecole ed atomi*

Mattoni da costruzione degli oggetti materiali, inclusi gli esseri viventi: *Molecole, atomi*

Fine '800-Inizio '900: *Struttura corpuscolare della materia*

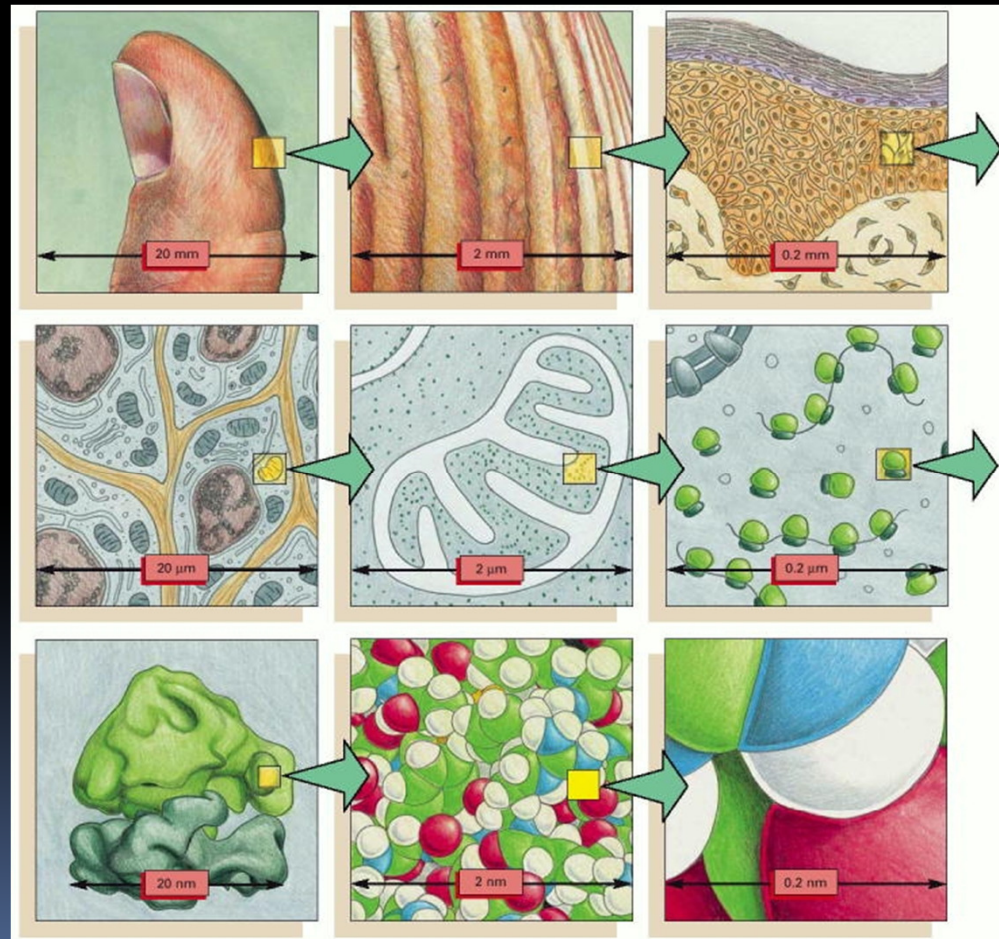
Mattoni da costruzione degli atomi: *Elettroni, nuclei*

Anni '30: *Costituenti dei nuclei*

I nuclei sono sistemi composti  
Gli elettroni sono privi di struttura

# Dal dito all' atomo

Zoom x10 ad ogni transizione  
fra due quadrati: 8 transizioni → x 100 milioni



# Campo

Da Galilei a Fermi:

Scoperta delle *forze, o interazioni* che determinano le proprietà della materia

Costituenti di nuclei e atomi: scambiano energia in modi diversi tramite l'emissione e l'assorbimento di *quanti* di vari campi di forze (p es il campo elettromagnetico)

Interazioni fondamentali:

*Elettromagnetica, Debole, Forte, Gravitazionale*

*Gravitazionale*: alla base di astrofisica e cosmologia, non rilevante (?) a livello di particelle elementari

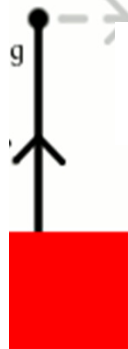
*Elettromagnetica, Debole, Forte*: nel loro insieme, il *Modello Standard*

# Un esempio casalingo

Scambio di energia fra due elettroni, uno a Torino e uno a Roma:



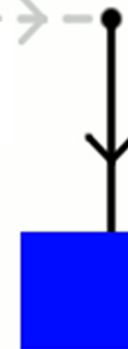
Gli elettroni nel metallo dell'antenna, fatti oscillare dalla corrente di pilotaggio, emettono onde radio



Antenna trasmittente

Le onde radio viaggiano attraverso lo spazio

Gli elettroni nel metallo dell'antenna, assorbendo onde radio, oscillano e formano la corrente di segnale



Antenna ricevente

# Nuclei e particelle

Costituenti nucleari: protoni, neutroni  
Facilmente osservabili in molti processi:

*Disintegrazione nucleare spontanea (p es la fissione)*

*Radiazione cosmica*

*Reazioni nucleari* indotte da proiettili carichi ad energia elevata  
(protoni, nuclei leggeri, ...)

Anni '30-'40: Prime reazioni nucleari ottenute con *acceleratori*

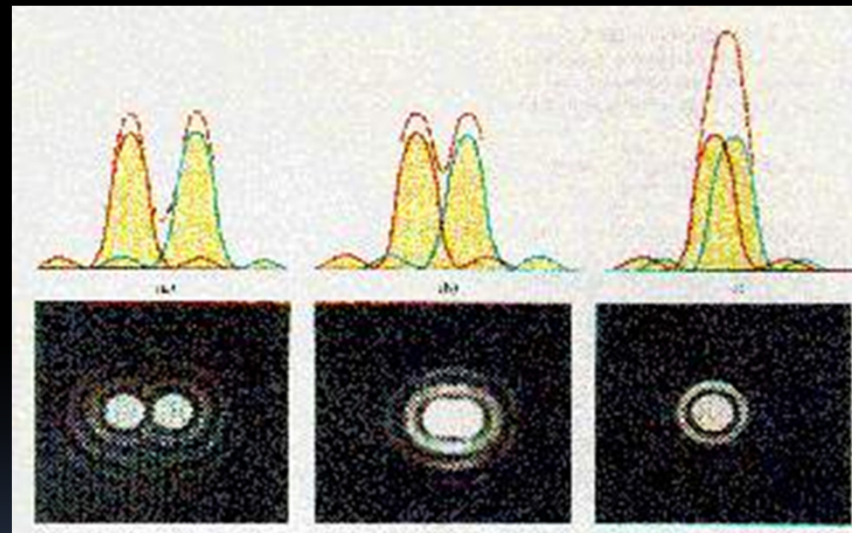
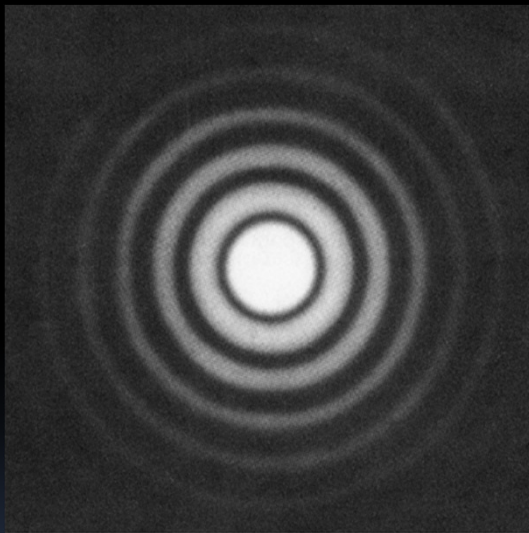


# Perche' gli acceleratori?

Domanda: perche' il dito lo vediamo e l'atomo no?

Gia' a livello di fisica pre-quantistica : la luce e' un fenomeno ondulatorio

Caratteristica di ogni fenomeno ondulatorio: *Diffrazione*

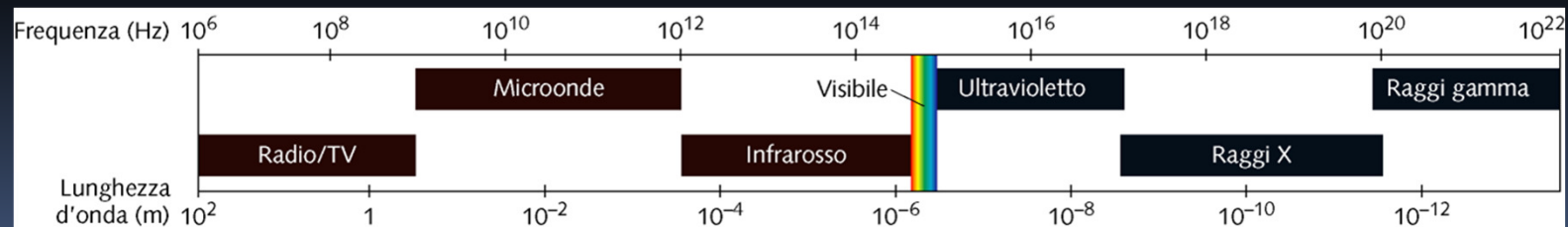


Limite al dettaglio osservabile:

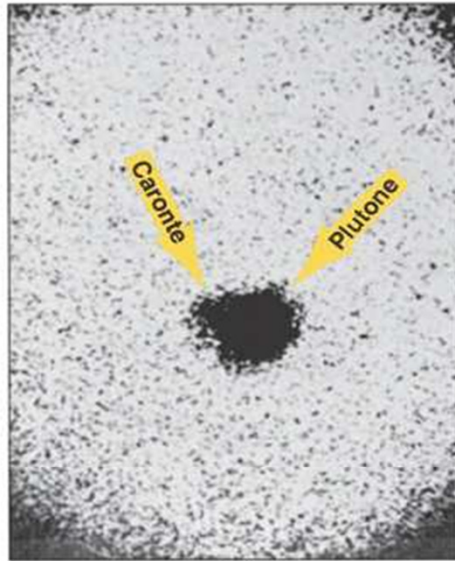
Per es, ingrandimento max di un microscopio ottico convenzionale attorno a 2000x

# Occhio grande, $\lambda$ piccola

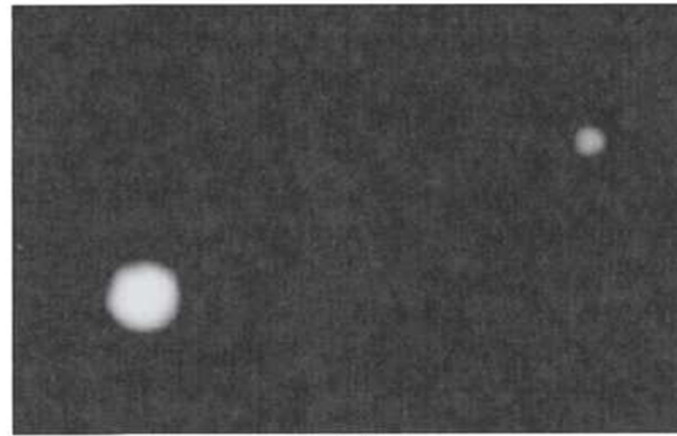
Dettaglio minimo: fissato da grandezza dell' "occhio" e colore della luce



# Occhio grande ?



(a)



(b)

**Figura 27.19**

: (a) La fotografia con la quale fu scoperto Caronte, la luna di Plutone, nel 1978. Da un telescopio terrestre, la turbolenza atmosferica fa apparire Caronte soltanto come un sottile bernoccolo sul bordo di Plutone. (b) Una fotografia di Plutone e Caronte con il Telescopio Spaziale Hubble che risolve chiaramente i due oggetti. (a, *U.S. Naval Observatory/James W. Christy, U.S. Navy photography*; b, *Foto per gent. conc. di Gemini Observatory*)



Serway - Jewett  
Principi di Fisica Vol.I  
EdiSES

# $\lambda$ piccola ?



Suggerimento di Superman:  
Perche' non usare i raggi X?

Utilissimi per fare radiografie o per  
studiare strutture cristalline

Meno utili per rivelare dettagli minuti:  
Ottica a RX poco o niente fattibile

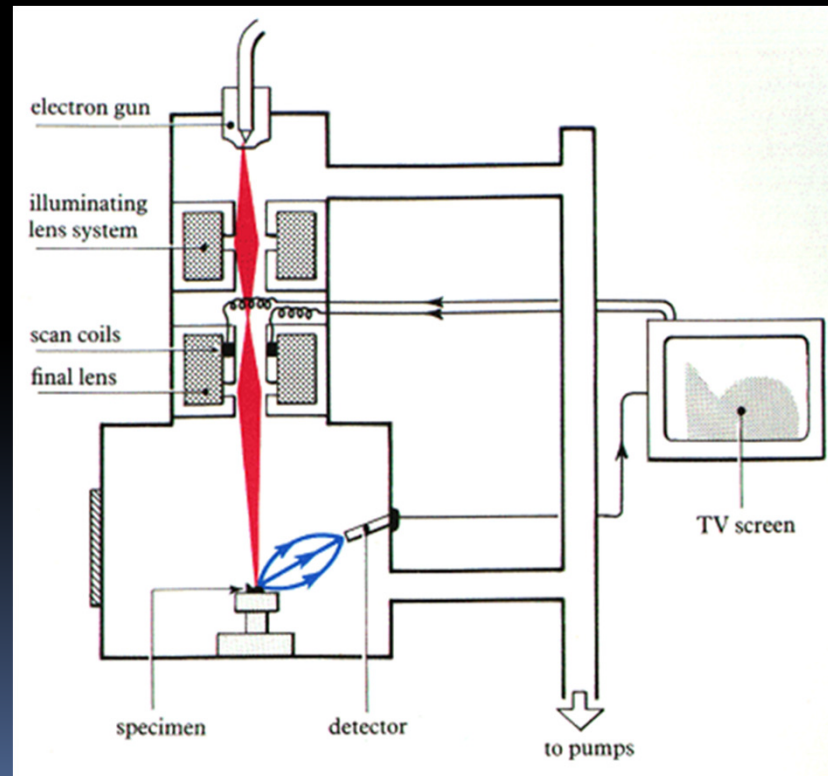
# Accelerare per 'illuminare'

Particelle: anche caratteristiche ondulatorie...

Elettroni di energia molto elevata:  $\lambda$  molto piccola!

Elettroni invece di luce per 'illuminare' l'oggetto:  
dettaglio minimo osservabile con dimensioni molto piu' piccole

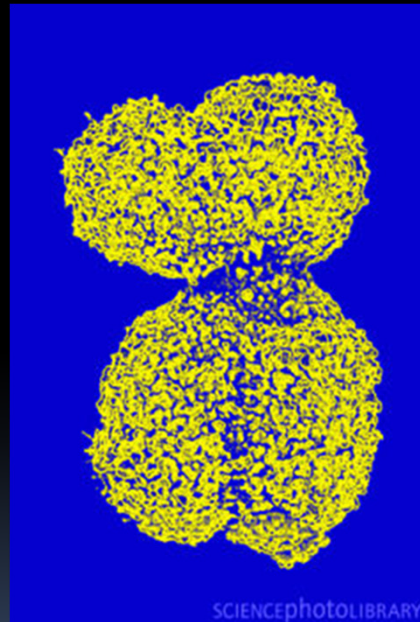
→ Microscopio elettronico



# Rivelare per 'vedere'

Immagine da un microscopio elettronico:  
Ricostruita con tecniche piuttosto diverse da quelle di uno ottico

Rivelazione *elettronica* degli elettroni diffusi dall'oggetto



~2  $\mu\text{m}$

Cromosoma umano  
X 20000

# Tre piccioni con una fava

Proiettili di energia grande hanno lunghezza d'onda piccola:  
OK per 'vedere' i dettagli di una struttura microscopica

In piu':

Cessione di grandi quantita' di energia al bersaglio consente di  
'staccarne' efficacemente i costituenti fortemente legati

In piu':

Equazione piu' famosa della fisica:  $E = mc^2$

Grandi quantita' di energia possono essere trasformate in particelle di  
massa elevata (e viceversa)

Visione pittoresca: come se le particelle pesanti, come l'Higgs, fossero  
sempre presenti allo stato latente, come sfondo del vuoto, e potessero  
essere fatte 'emergere' e osservate attraverso collisioni con grandi scambi  
di energia

# Acceleratori

Dimensioni di un atomo  $10^{-8}$  cm =  $10^{-4}$  micron !

Dimensioni di un nucleo  $10^{-9}$  micron !!

*Non osservabili* con luce visibile

*Osservabili* con 'microscopi elettronici' di  $\lambda$  sufficientemente piccola

$\lambda$  piccola  $\rightarrow$  Energia grande

Elettroni, o altri proiettili carichi, di energia elevata: necessita' di *acceleratori*

Molte tecniche sviluppate fra gli anni '30 e oggi:

Uso di campi elettromagnetici di tutti i tipi

Dagli anni '70: *Colliders*

Proiettile e bersaglio sparati l'uno contro l'altro a velocita' relativistiche



# Il quadro osservativo

Molte scoperte dal dopoguerra in poi:  
effetto di notevoli sviluppi tecnologici (elettronica, computers, magneti, ottica, ...)

Dalla famigliola *protone + neutrone + elettrone* si e' passati a:

una vasta popolazione di parenti di neutrone e protone (gli *adroni*: parecchie centinaia!)

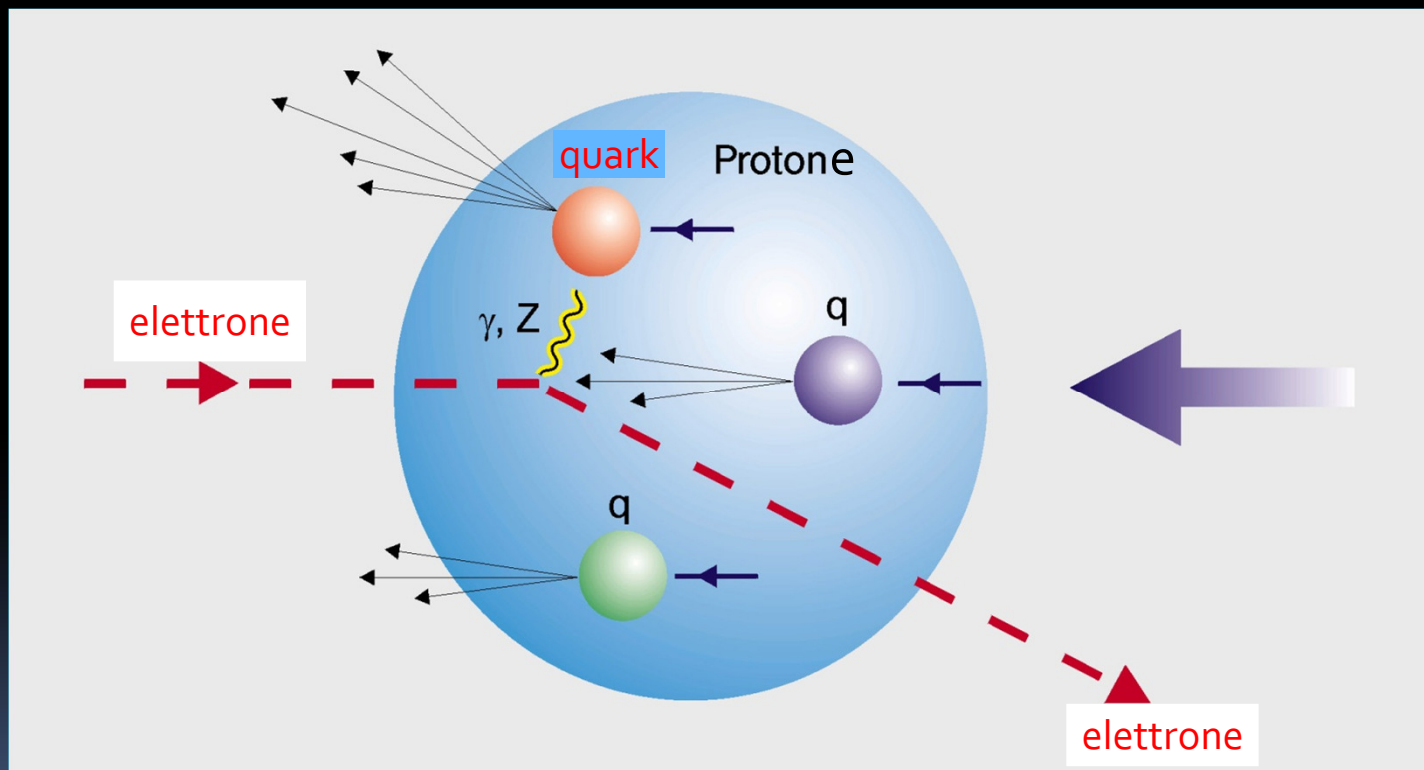
una piu' modesta etnia di parenti dell'elettrone, i *leptoni*

Leptoni: privi di struttura

Adroni: sistemi composti, fatti di *quark* tenuti assieme dalle forze di colore

# La TAC del protone

Collisioni violente di elettroni di alta energia su protoni:  
chiari segni di costituenti puntiformi, i *quark*



# Che cos'è il Modello Standard?

'Codice Genetico' della materia e del campo:

Codifica matematica delle leggi fisiche che dettano le proprietà delle interazioni e dei costituenti

La materia di tutto l'universo è fatta di costituenti elementari

*Leptoni* (6 varietà, divise in 3 famiglie)

*Quark* (6 varietà, divise in 3 famiglie; ogni varietà viene in 3 sottovarietà)

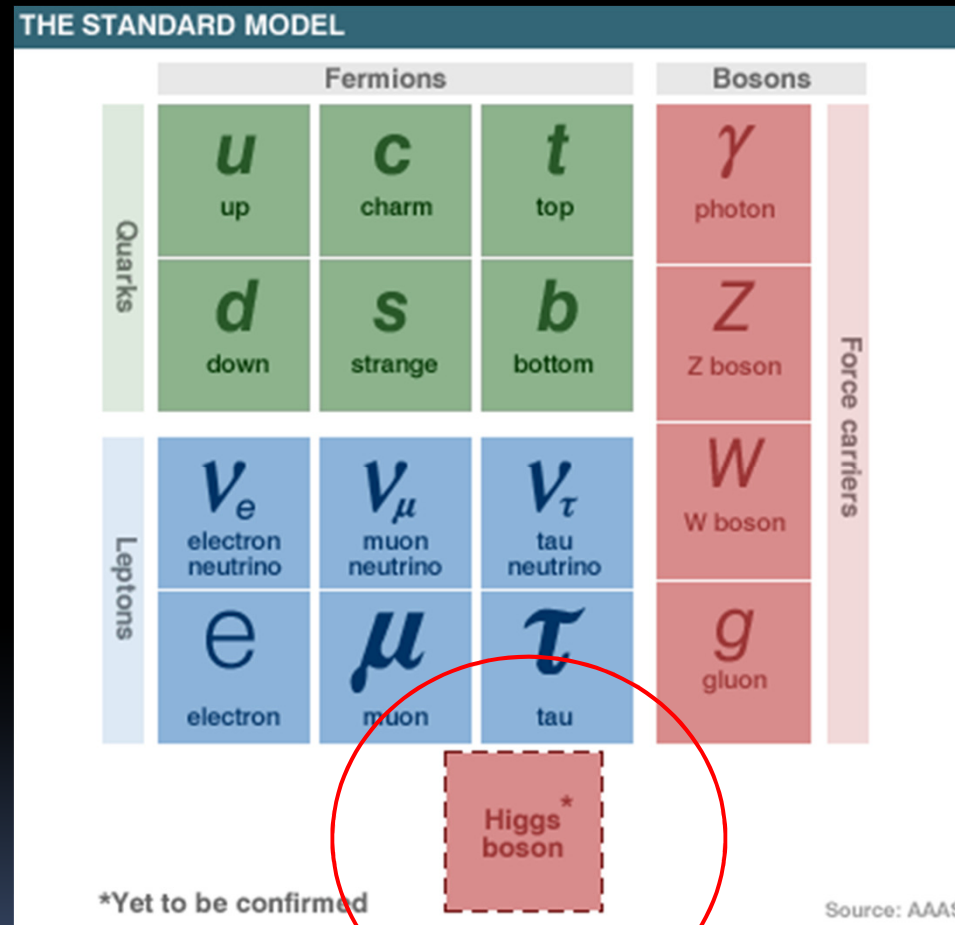
I costituenti elementari interagiscono scambiandosi i quanti di diversi campi di forze, continuamente emessi e assorbiti

*Leptoni* : campo elettrodebole, i cui quanti sono il fotone e i tre bosoni  $W^\pm, Z^0$

*Quark*: campo elettrodebole, come sopra, e campo di colore, i cui quanti sono gli 8 gluoni

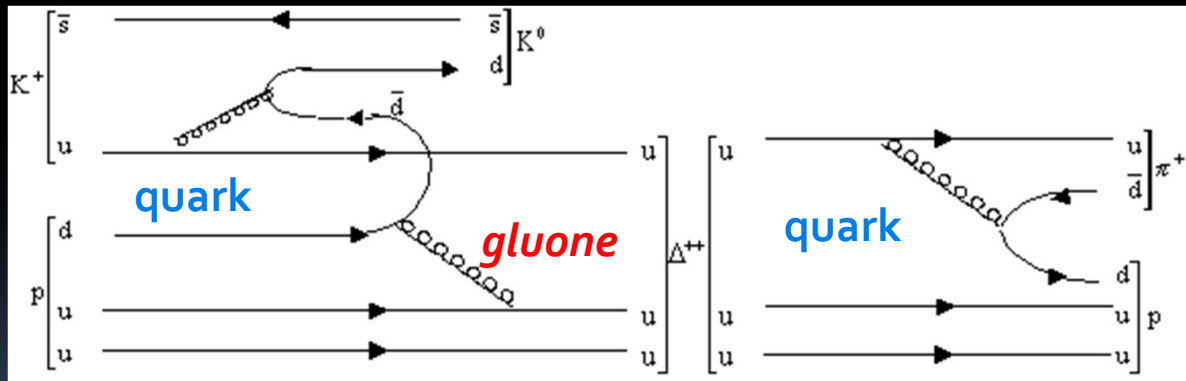
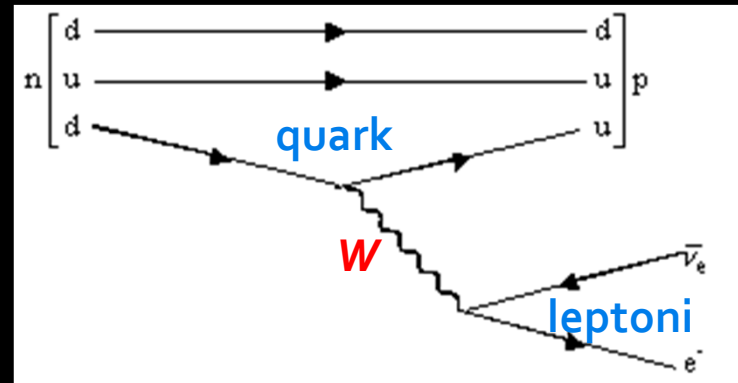
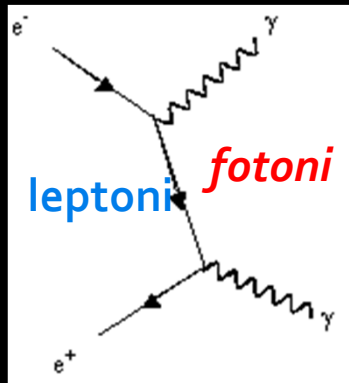
NB Il nome interazione di colore è *figurativo e convenzionale*: le particelle elementari non hanno colore

# I costituenti



# Il Modello Standard a fumetti

Diagrammi di Feynman per reazioni fra particelle elementari



Molto piu' di semplici fumetti: usati per calcolare ogni cosa!

# Come fare il Modello Standard

Proprietà di costituenti e interazioni descritte matematicamente restando all'interno di un vasto framework concettuale, assunto esplicitamente come universalmente valido:

*Relatività*

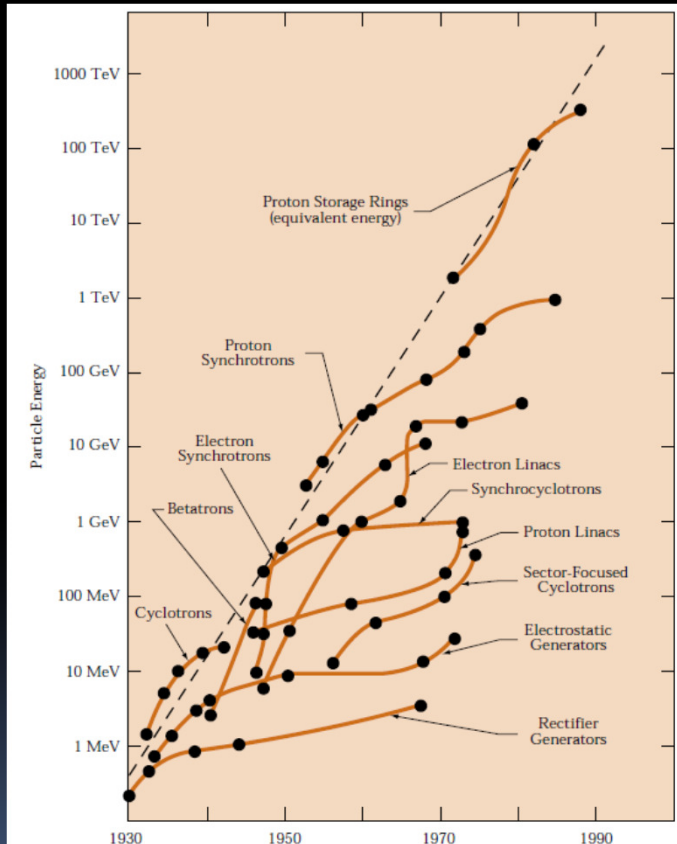
*Meccanica quantistica*

Fra le molte altre, diverse conseguenze notevoli:

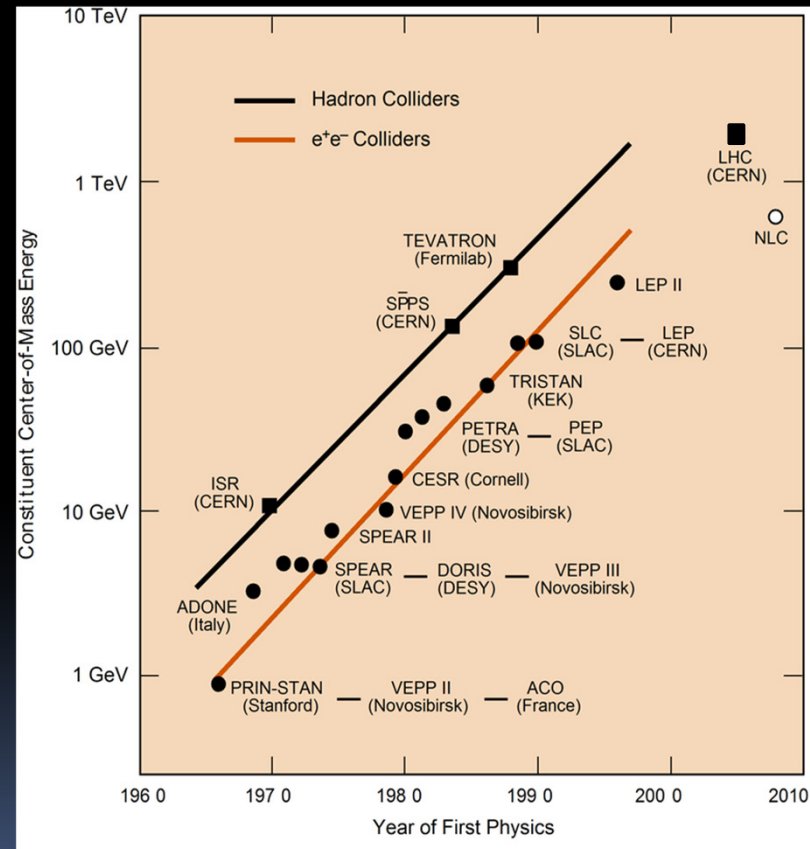
*Equivalenza massa–energia,  
Proprietà ondulatorie della materia,  
Antiparticelle,*

...

# Super-microscopi: Collideri

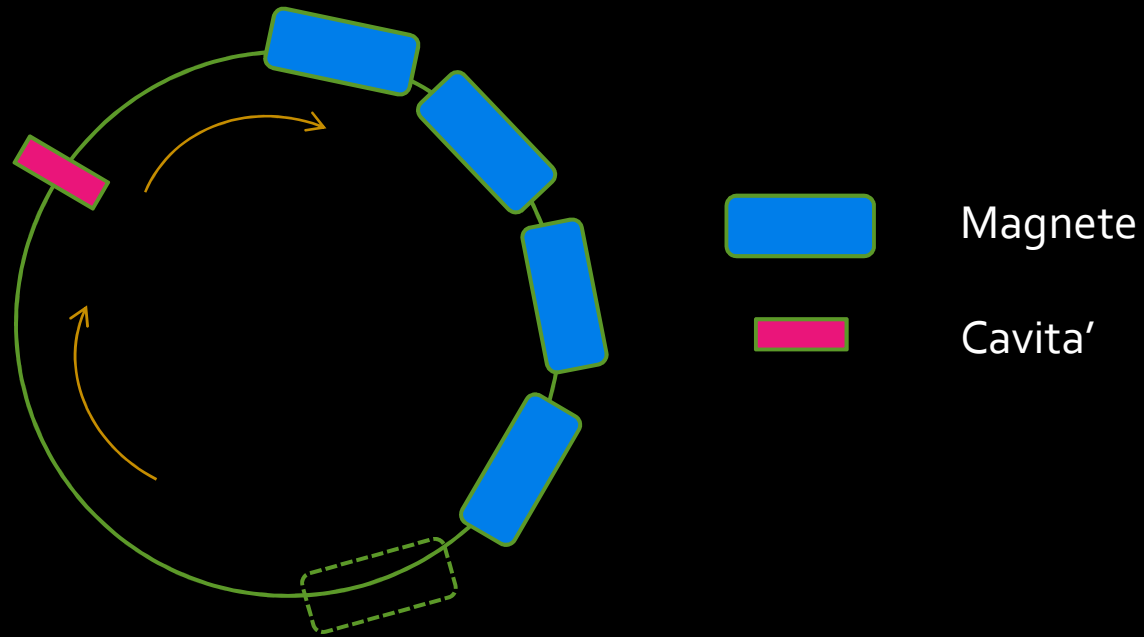


Bersaglio fisso



Collideri

# Come accelerare



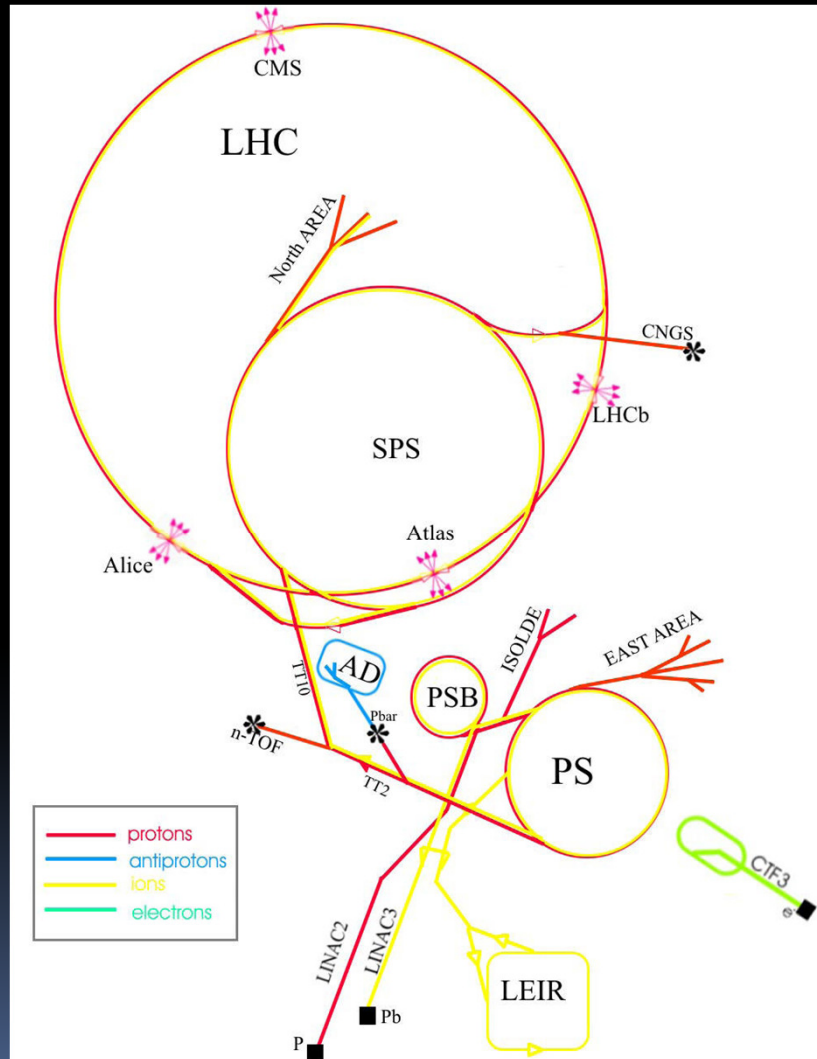
Campi magnetici: curvano la traiettoria delle particelle cariche in movimento  
→ orbite chiuse ~ circonferenze

A ogni giro, le particelle ricevono energia da campi elettrici oscillanti in apposite cavita' a radiofrequenza

→La loro energia aumenta (anche la loro velocita', ma senza mai superare quella della luce)



# Gli acceleratori del CERN



Oggi:

Accelerazione di protoni, (antiprotoni), ioni pesanti

Processi di accelerazione per LHC: sequenza di diverse macchine

LHC:

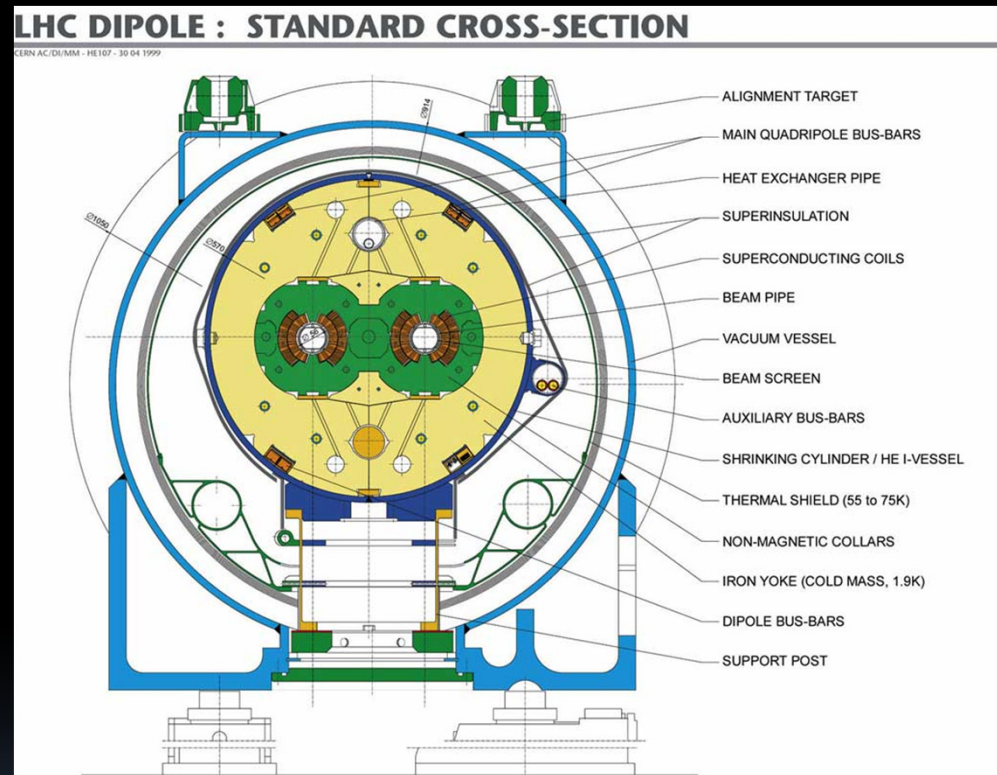
Energia massima 7+7 TeV (oggi a meta' strada)

Rateo di collisioni 40 milioni di collisioni al secondo (oggi a 1/10)

# Large Hadron Collider



Cavita' acceleratrici



Magnete dipolare

# Magneti di LHC



Ciclo di accelerazione in LHC:

Velocita' dei protoni ~ vel. luce

Tempo per un giro ~ 90 milionesimi di sec

Per arrivare a 7 TeV ~ 10 milioni di giri (20')

Durata di un fascio ~ 10 ore

Distanza percorsa ~ 2x quella di Nettuno

Per mantenere le particelle sull'orbita:

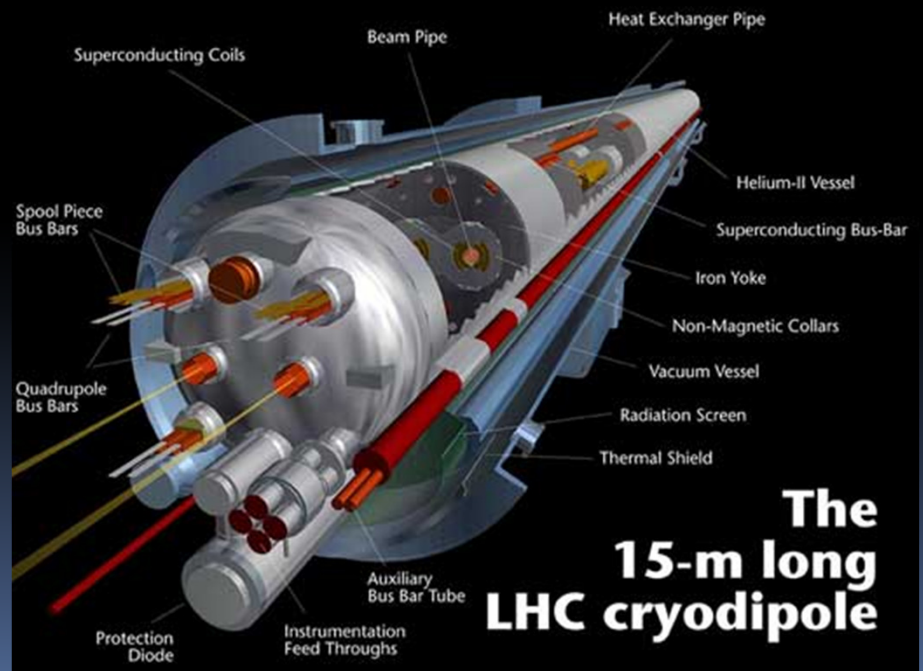
~ 1000+ Magneti superconduttori

Campo magnetico: 8 tesla

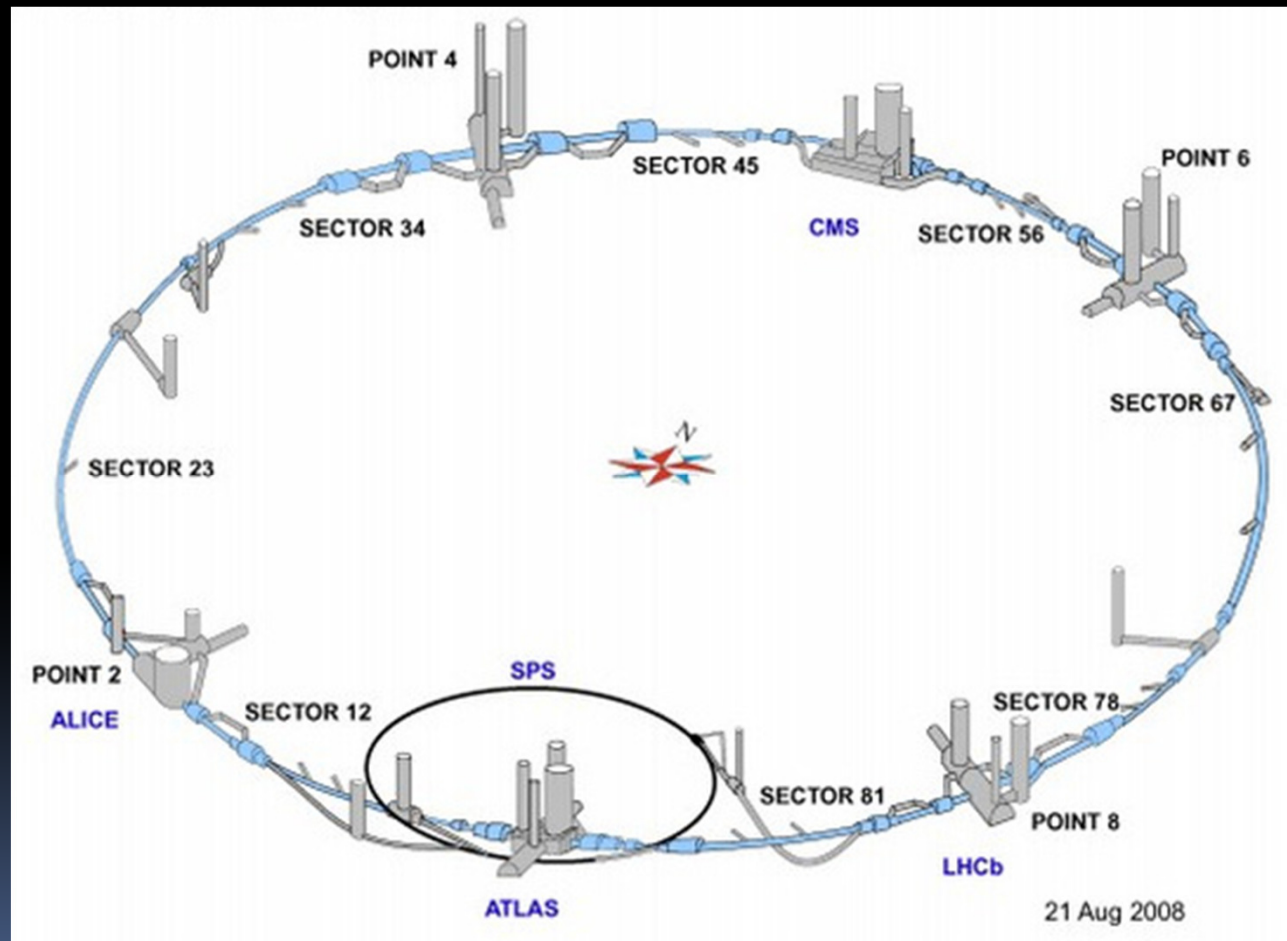
~ 20000 volte quello terrestre

Temperatura:  $-271,25^{\circ}\text{C}$

~  $1^{\circ}$  piu' bassa della T dello spazio interstellare



# LHC & Esperimenti



# Ma cosa si spera di trovare?

Prima di tutto:

Il Modello Standard ha superato un gran numero di verifiche sperimentali  
Come e' stato detto, *la teoria scientifica piu' testata della storia!*  
(E anche: *la madre di tutte le teorie scientifiche* - Sara' vero ??)

Ma questo non basta:

Manca un passo-chiave per convalidarlo definitivamente, perche' fino ad ora non si e' chiarita l'origine delle *masse* dei costituenti

La "particella di Dio", se esiste, e' la risposta a questa domanda

[Molti pensano che se non venisse trovata, le cose sarebbero anche piu' interessanti: come spesso accade, persone diverse trovano interessanti cose diverse]

# Massa zero

Come sono fatte le interazioni fondamentali?

Pur rispettando il principio di relatività e le leggi della meccanica quantistica, le possibilità restano molte

Osservazioni sperimentali: delimitano il campo delle possibilità

Per trovare la forma matematicamente corretta delle interazioni: come guida ulteriore, qualche *principio di simmetria*

→OK, questo sembra proprio funzionare bene per il Modello Standard!

Anzi, dicono i teorici:

*Niente è calcolabile nel MS se non sono rispettate le leggi di simmetria*

Problema:

*Le leggi di simmetria valgono solo se tutte le particelle fondamentali, costituenti e quanti dei campi di forza, sono prive di massa!*

# Higgs

Idea curiosa: come fa un corpo a essere privo di massa??

Risposta relativistica: e' perfettamente possibile, a livello microscopico, e se e' cosi' si muovera' sempre alla velocita' della luce. Esempio: fotone

La maggior parte dei costituenti e diversi dei quanti dei campi di forza, pero', hanno massa non nulla, proprio come gli oggetti "grandi" con cui siamo familiari

Negli anni '60, Peter Higgs e alcuni altri mostrarono come si potesse far convivere le belle proprieta' di simmetria del MS con la massa non nulla dei costituenti

In sintesi:

Tutto va bene se, accanto agli altri, esiste anche il quanto di *un nuovo campo di forza*, appunto il campo di Higgs: chiamato anche, piuttosto irriverentemente, la particella di Dio

# Trovare la particella di Dio

Al pari di quasi tutte le altre particelle, anche la particella di Higgs è altamente instabile: In tempi brevissimi si disintegra in altre particelle più stabili, e quindi più facili da osservare

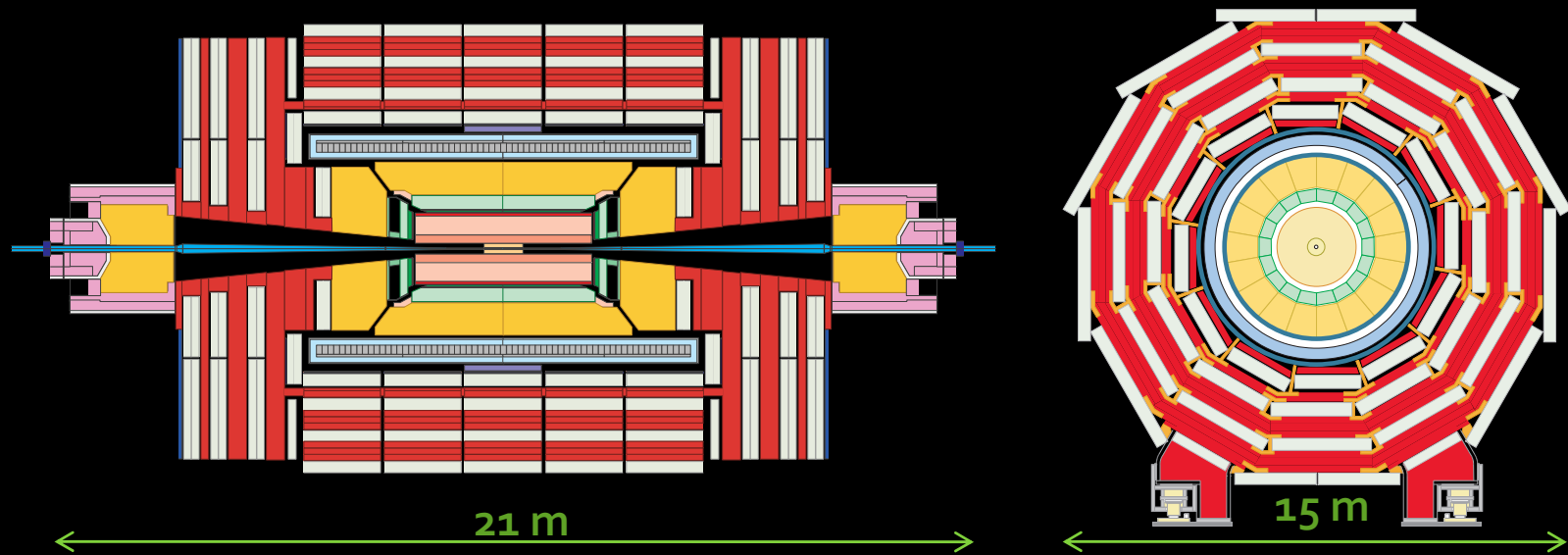
La massa della particella di Higgs non è nota, ma le indicazioni sono che sia molto alta, pesa attorno a 150 volte quella del protone; l'Higgs è anche previsto essere poco 'reattivo', quindi difficile da produrre in una collisione: per questo ci vuole un collider della classe di LHC

I teorici hanno previsto da tempo quali siano i modi di disintegrazione più favorevoli, ed è su quelle previsioni che gli sperimentali hanno disegnato e costruito i rivelatori di LHC

Diverse possibilità, fra le altre  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$



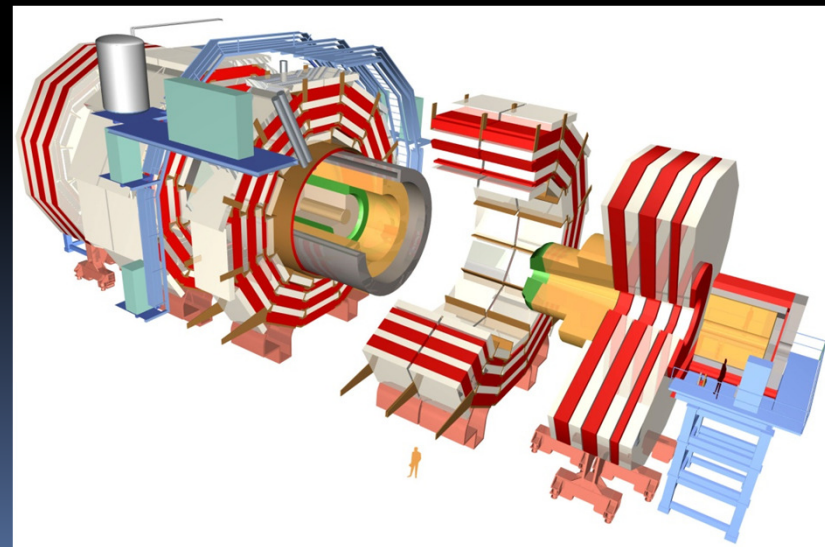
# Compact Muon Solenoid



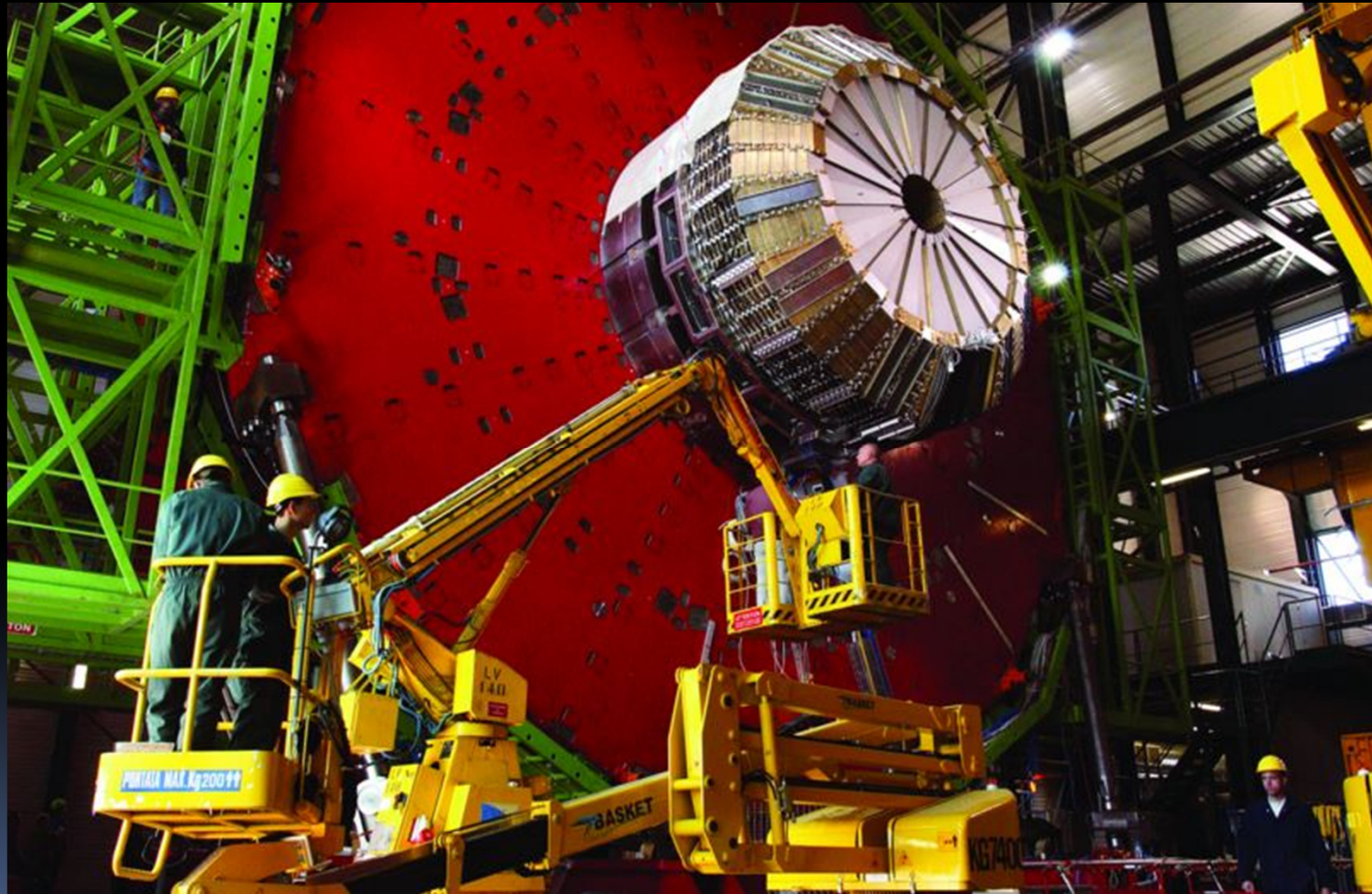
2000 ricercatori!  
(fra cui una 30ina di torinesi)

12000 tonnellate

Decine di milioni di sensori



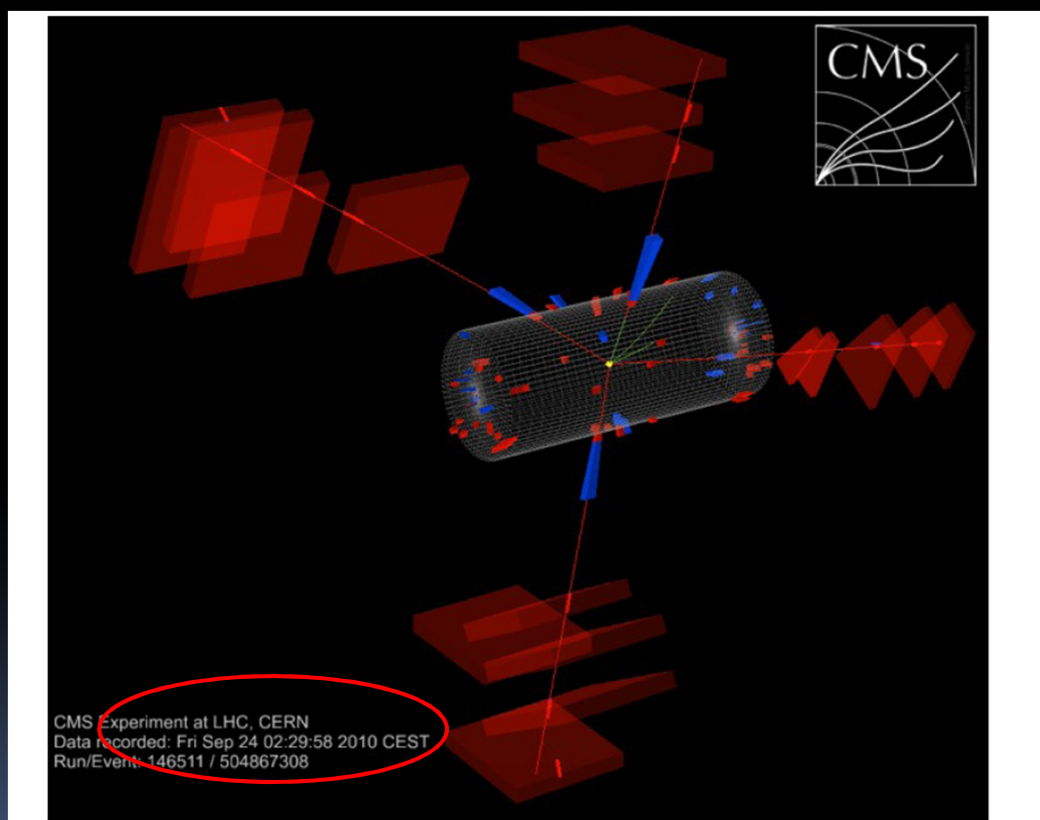
# CMS dal vero



# 'Golden Mode'

Fra i tanti possibili, un esempio di osservazione 'tipo Higgs' avvenuta l'anno scorso:

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$$



Basta trovare un evento come questo per annunciare la scoperta dell'Higgs??

No: l'esperimento raccoglie anche molti eventi di fondo

Come nei sondaggi d'opinione, e' solo accumulando una statistica significativa che si puo' concludere di aver scoperto qualcosa

# Quark, gluoni e adroni

Punto molto importante: l'interazione di colore ha una proprietà molto strana e non ben compresa

Mentre leptoni, fotoni e *bosoni*  $W^\pm, Z^0$  si osservano comunemente come particelle libere, quark e gluoni sono *confinati* dentro gli adroni, e la loro osservazione è 'indiretta'

Non si osservano particelle libere colorate, come quark rossi o gluoni verdi-blu: le particelle osservabili sono sempre incolori

Non si sa bene perché questo avvenga: ci sono però forti ragioni per pensare che in condizioni estreme (temperatura e densità elevatissime) questa regola venga a cadere, e i costituenti degli adroni siano allo stato libero

# Il Big Bang in una slide

Oggi pensiamo di sapere qualcosa sulla struttura a grande scala dell'universo:

400 miliardi di galassie, ognuna con 400 miliardi di stelle (circa ..)

Radiazione fossile di fondo

Neutrini

(E, forse, molto altro ancora...)

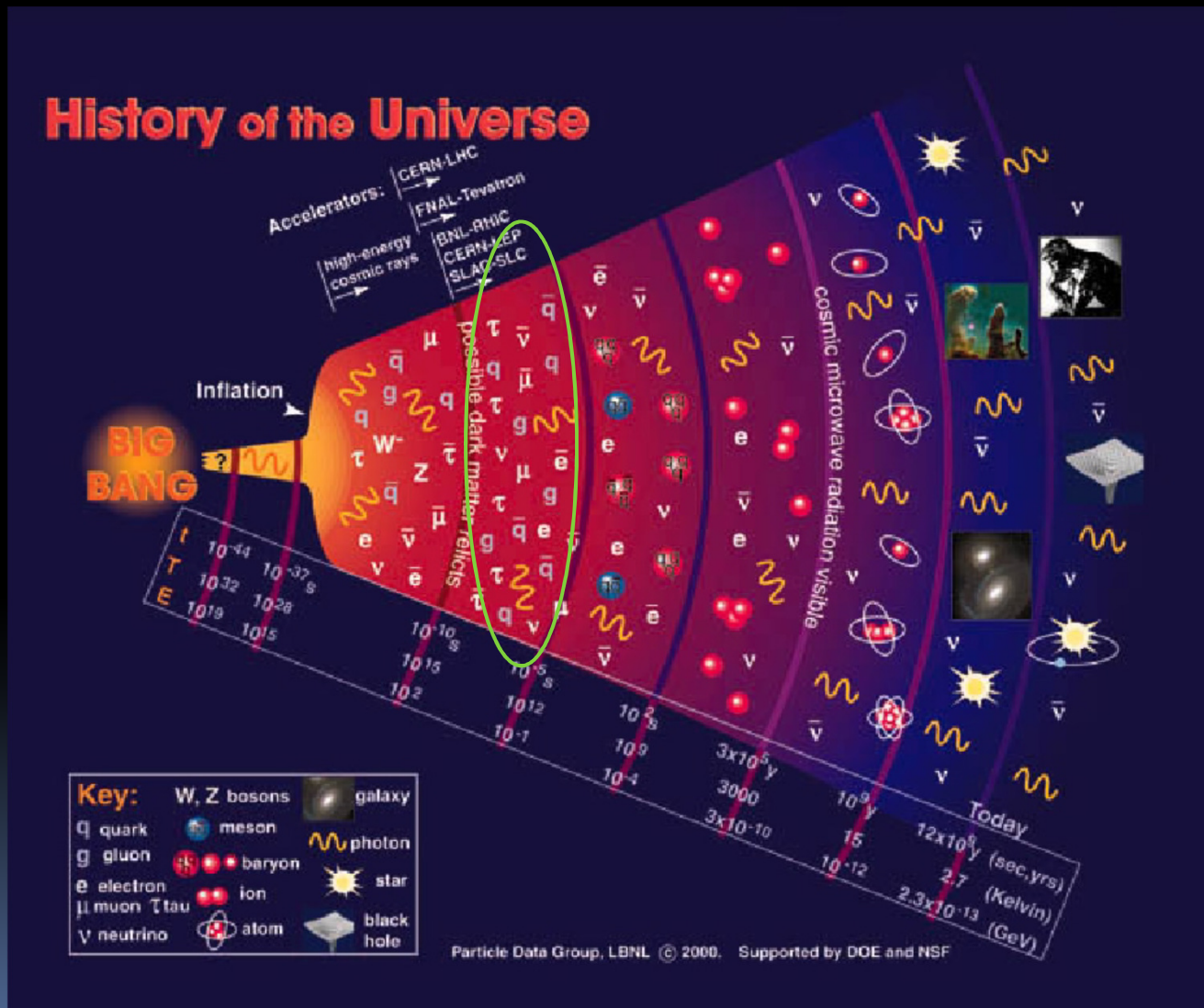
Nel modello cosmologico con maggiori conferme osservative:

*'Esplosione' iniziale di una proto-struttura infinitamente piccola e infinitamente calda*

Non un'esplosione in senso convenzionale:

Transizione da 'qualcosa' di non conosciuto e non strutturato nelle strutture attuali dello spazio e del tempo

# Storia dell'universo



# Dal caldo al freddo

Con il B.B. viene anche creata la materia  
(anche se diversi punti-chiave di questo processo restano oscuri..)

Punto interessante per LHC:

Dopo 10- 100 milionesimi di secondo dall'esplosione, la temperatura e' scesa a circa 1000 miliardi di gradi

Lo stato di plasma di quark e gluoni liberi si condensa nello stato 'normale' di quark e gluoni confinati nei protoni e neutroni

Per la cronaca: il mondo come lo conosciamo oggi (elementi chimici, a partire da quelli leggeri) e' cominciato circa 300000 anni dopo il B.B., e dura da un po' piu' di 13 miliardi di anni

# Ioni pesanti relativistici

Facendo collidere in LHC, invece di protoni , nuclei pesanti (es Piombo) accelerati ad energie relativistiche, durante la collisione si ottengono temperature e densita' molte elevate

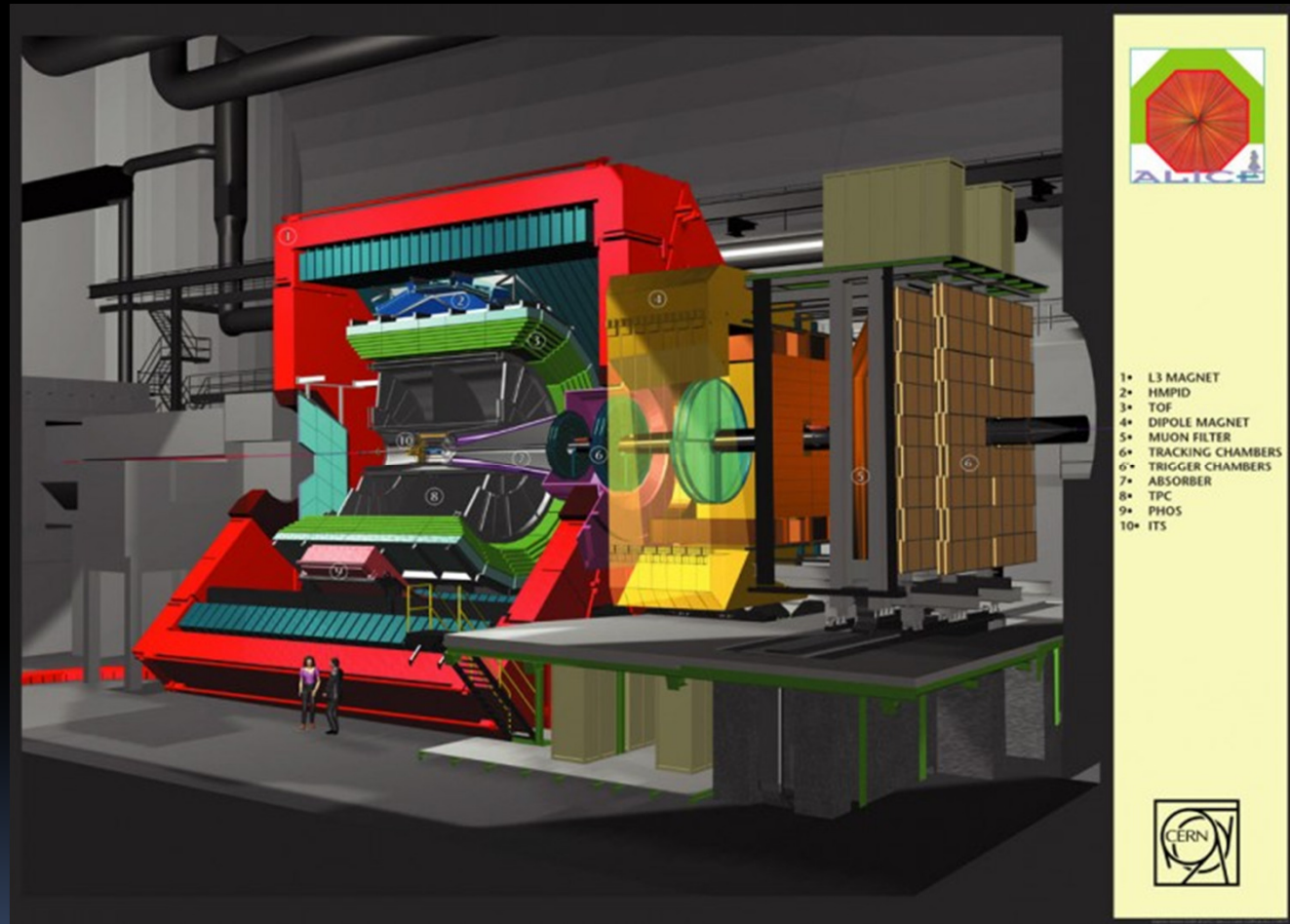
Forse si produce il plasma di quark e gluoni: esperimenti svolti fino ad oggi ad energie piu' basse indicano che la cosa e' molto verosimile

La durata della collisione e' molto breve, non si puo' `prendere la temperatura ` ai nuclei in collisione con un termometro

Molti segnali indiretti, attesa per eventi spettacolari

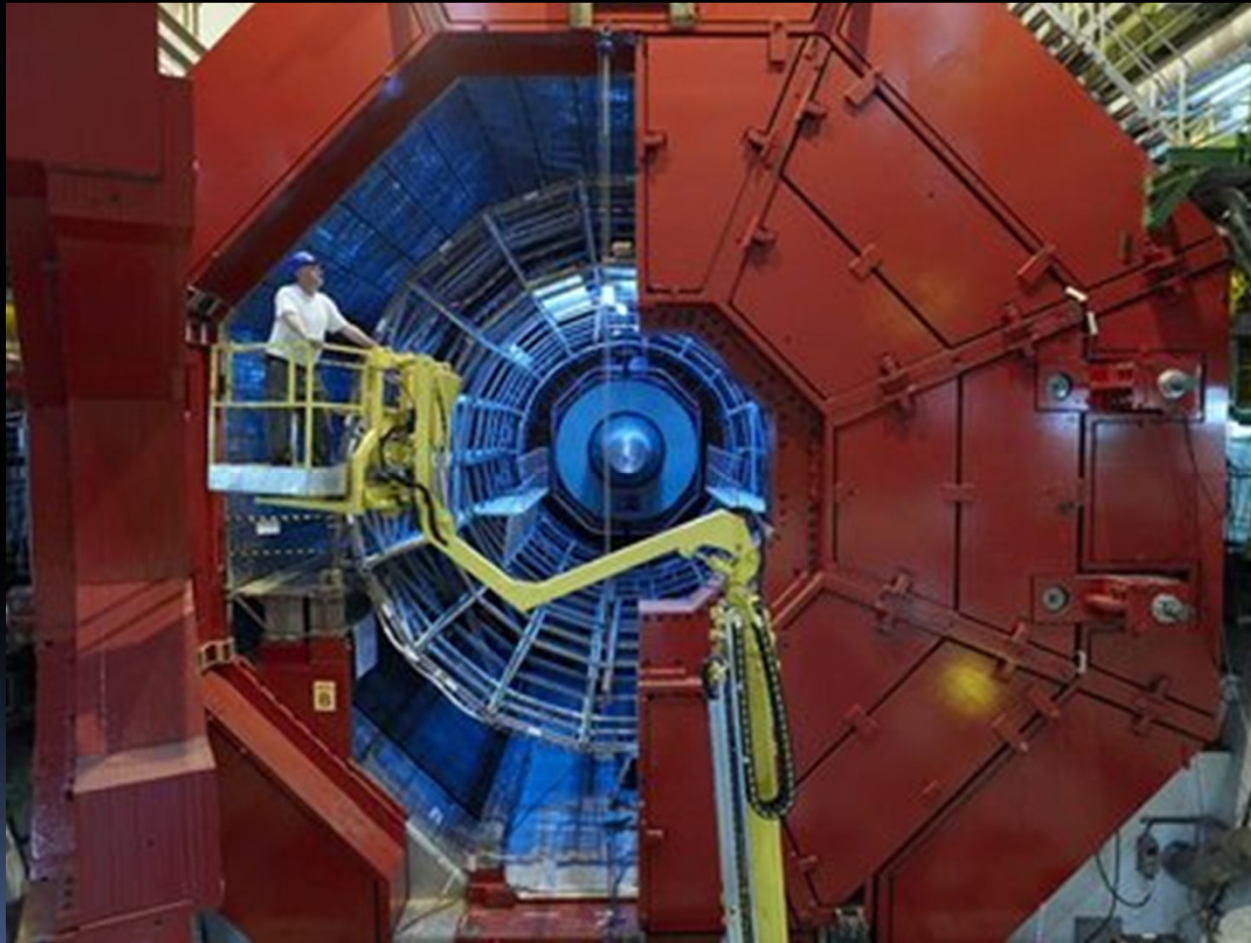


# ALICE

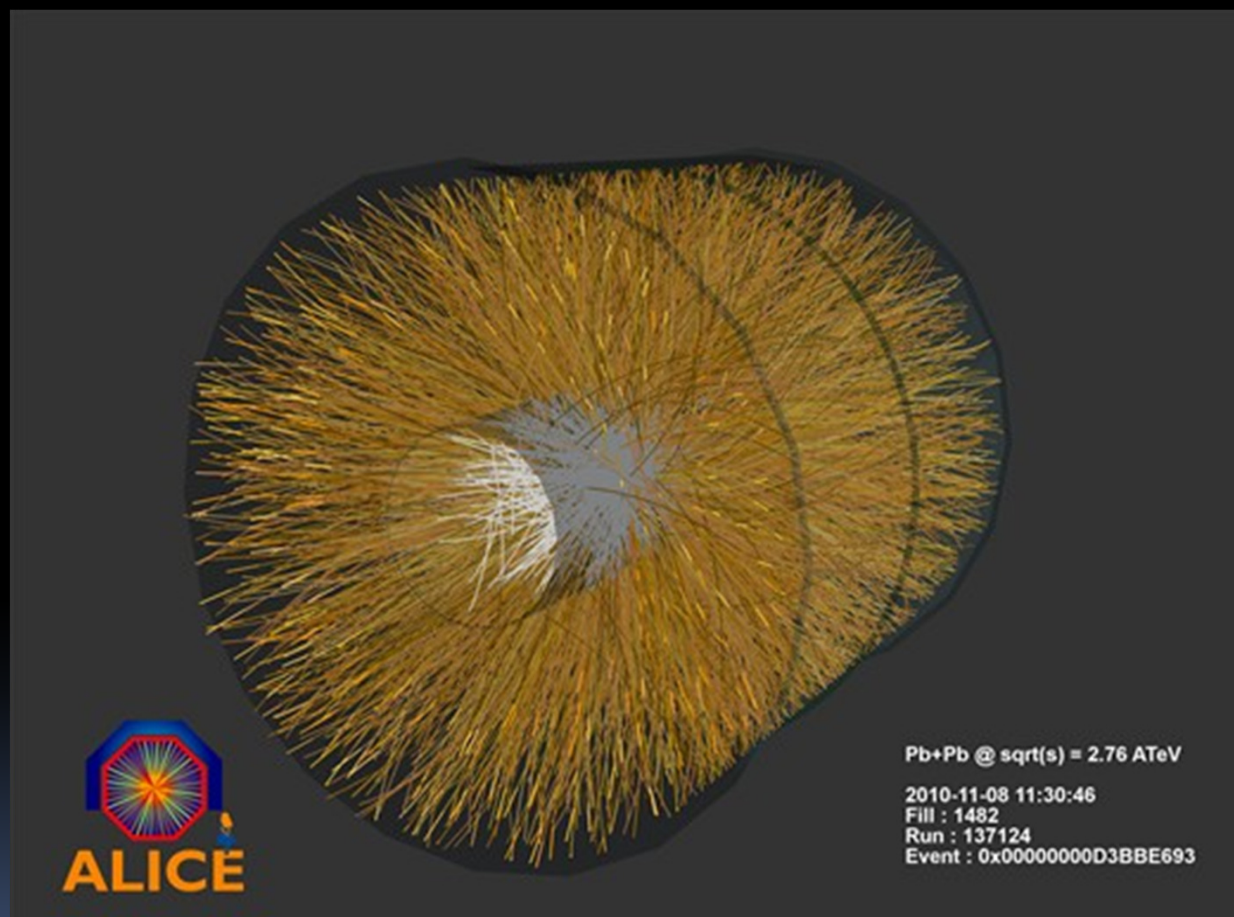


1000 ricercatori!  
(fra cui una zoina di torinesi)

# ALICE dal vero



# Collisione in ALICE



# Oltre il Modello Standard

Malgrado i suoi successi, probabilmente il Modello Standard non è l'ultima teoria possibile:

troppe costanti sperimentali, troppi costituenti, troppe interazioni

Molti modelli estendono quello standard:

LHC può convalidarli o escluderli

(e forse dare lavoro alla prossima generazione di fisici delle particelle!)

# Per concludere

CERN e LHC sono un ottimo esempio

... di uso di fondi pubblici

... di cooperazione internazionale

... di organizzazione della ricerca

... di quel che accade quando giovani e meno giovani sono motivati, ben guidati, e lasciati liberi di inventare

... di quel che ritorna sotto forma di tecnologia avanzata, personale specializzato, diffusione della cultura scientifica

*Soprattutto, del valore straordinario e insostituibile della ricerca fondamentale*