

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*

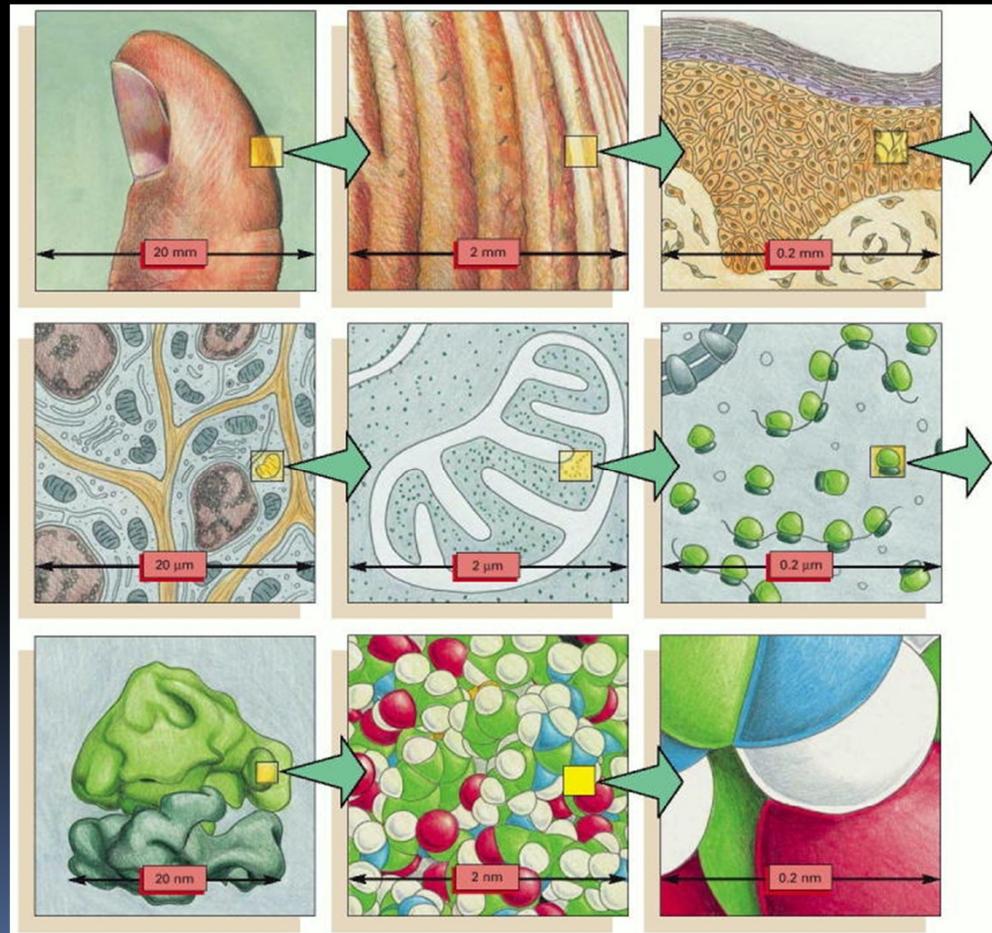
Mattoni da costruzione degli atomi: *Elettroni, nuclei*

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

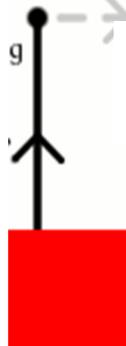
Elettromagnetica, Debole, Forte: nel loro insieme, il *Modello Standard*

Un esempio casalingo

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



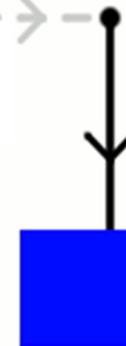
Gli elettroni nel metallo dell'antenna, fatti oscillare dalla corrente di pilotaggio, emettono onde radio



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, ...)

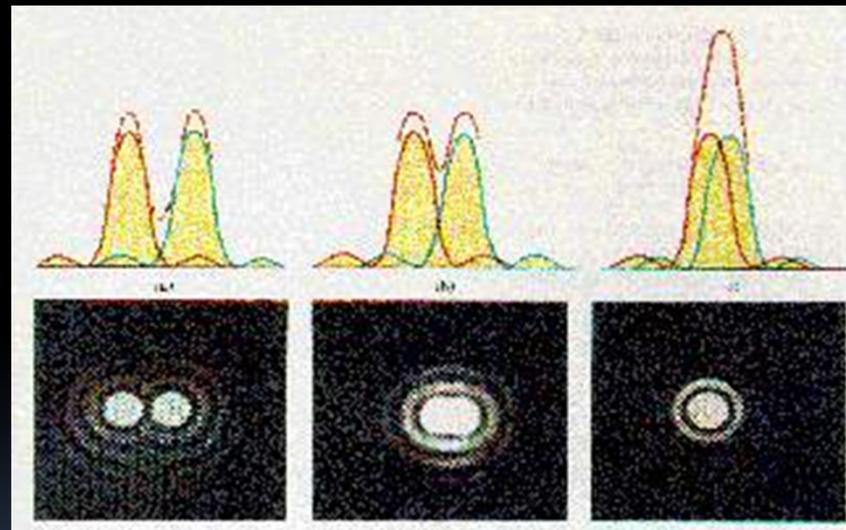
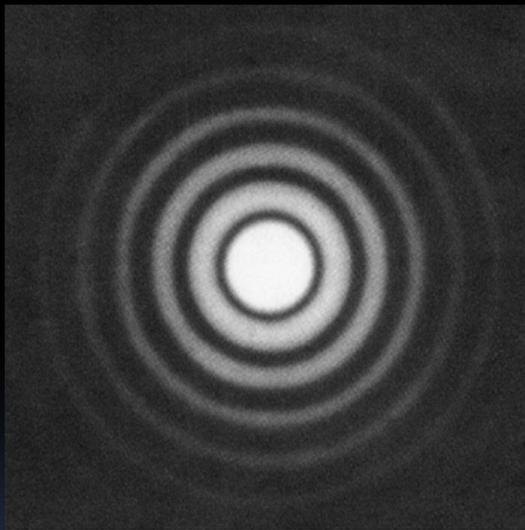
Anni '30-'40: Prime reazioni nucleari ottenute con *acceleratori*

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*

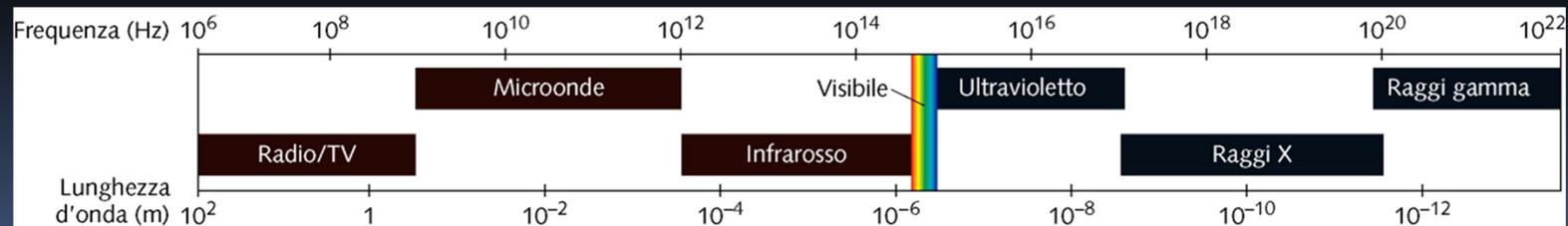


Limite al dettaglio osservabile:

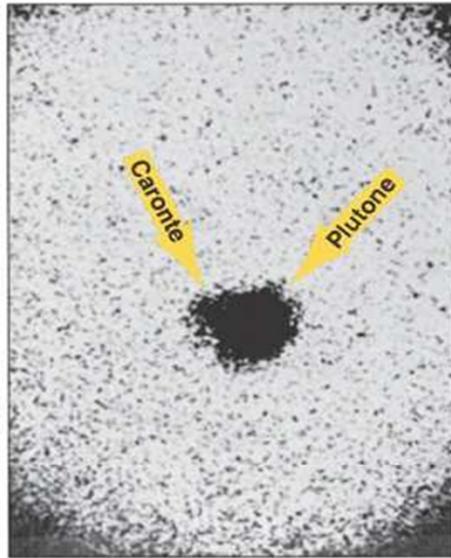
Per es, ingrandimento max di un microscopio ottico convenzionale attorno a 2000x

Occhio grande, λ piccola

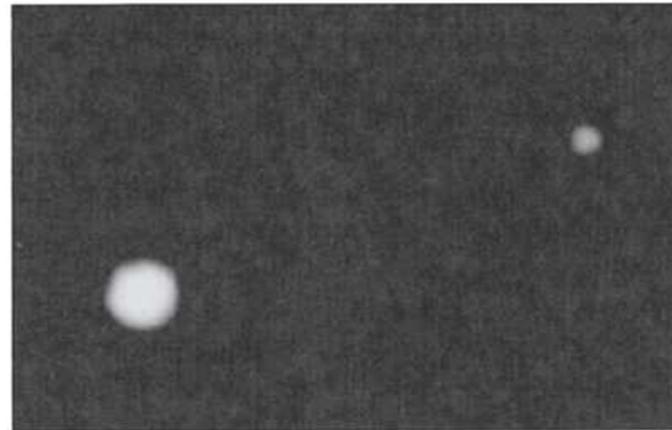
Dettaglio minimo: fissato da grandezza dell' "occhio" e colore della luce



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

λ 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

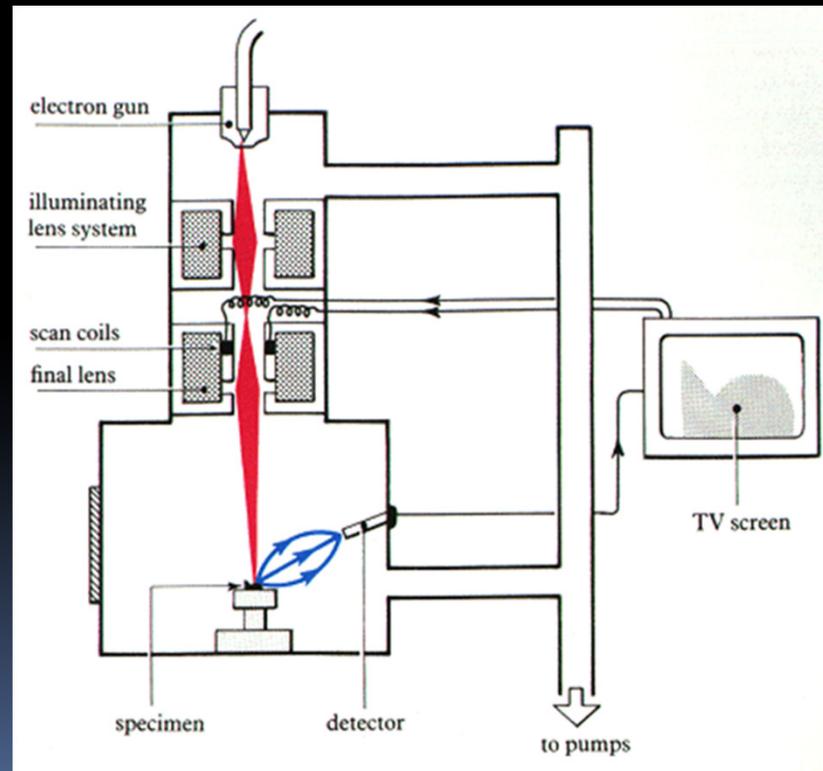
Accelerare per 'illuminare'

Particelle: anche caratteristiche ondulatorie...

Elettroni di energia molto elevata: λ molto piccola!

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

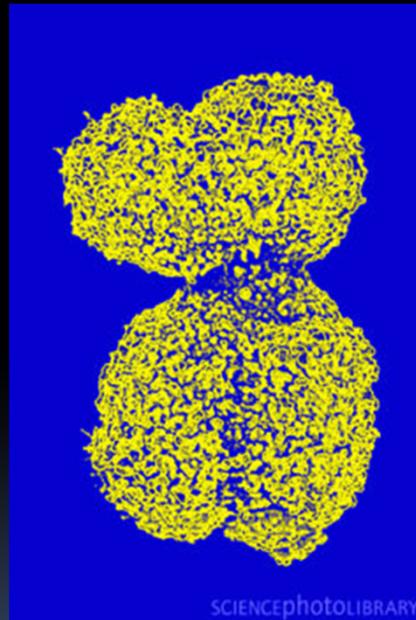
→ Microscopio elettronico



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 μm

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 λ sufficientemente piccola

λ 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!)

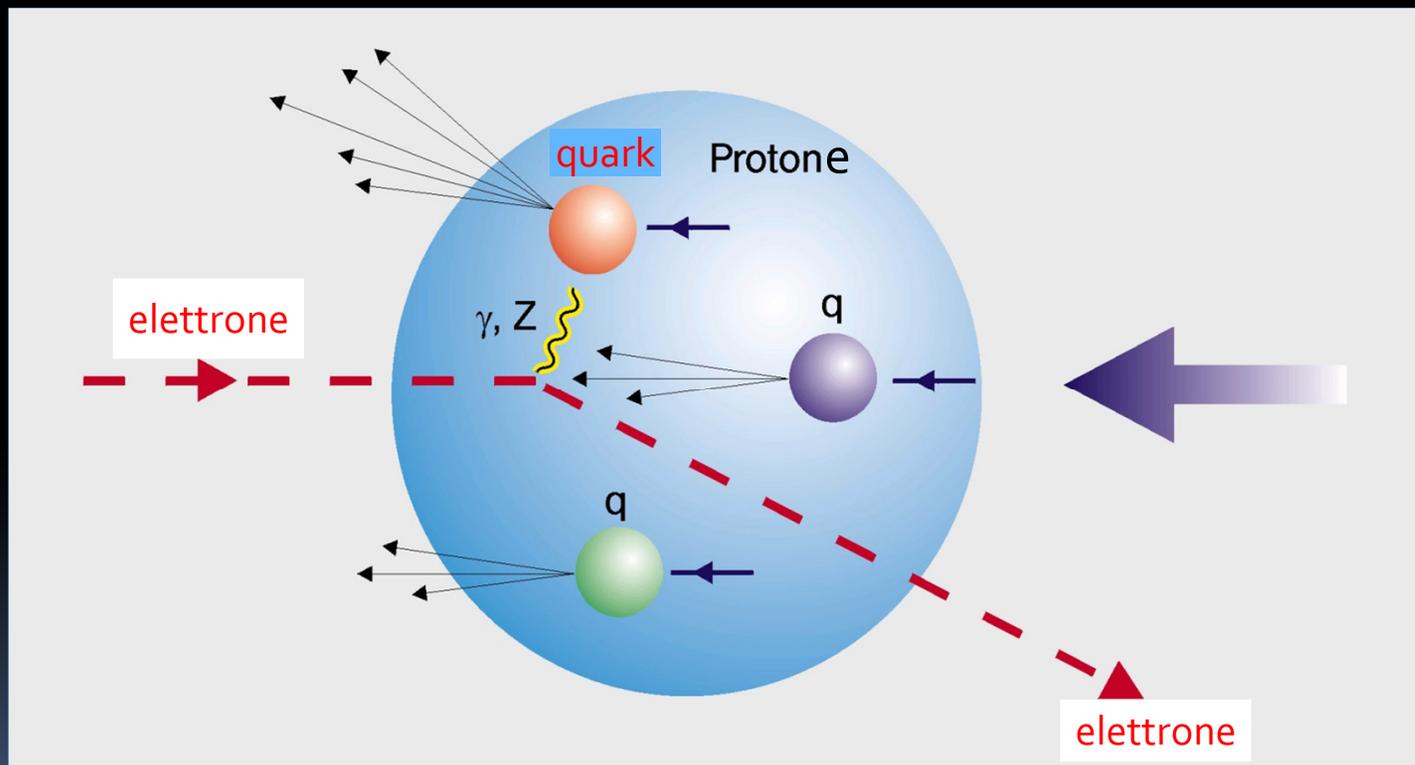
una piu' modesta etnia di parenti dell'elettrone, i *leptoni*

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)

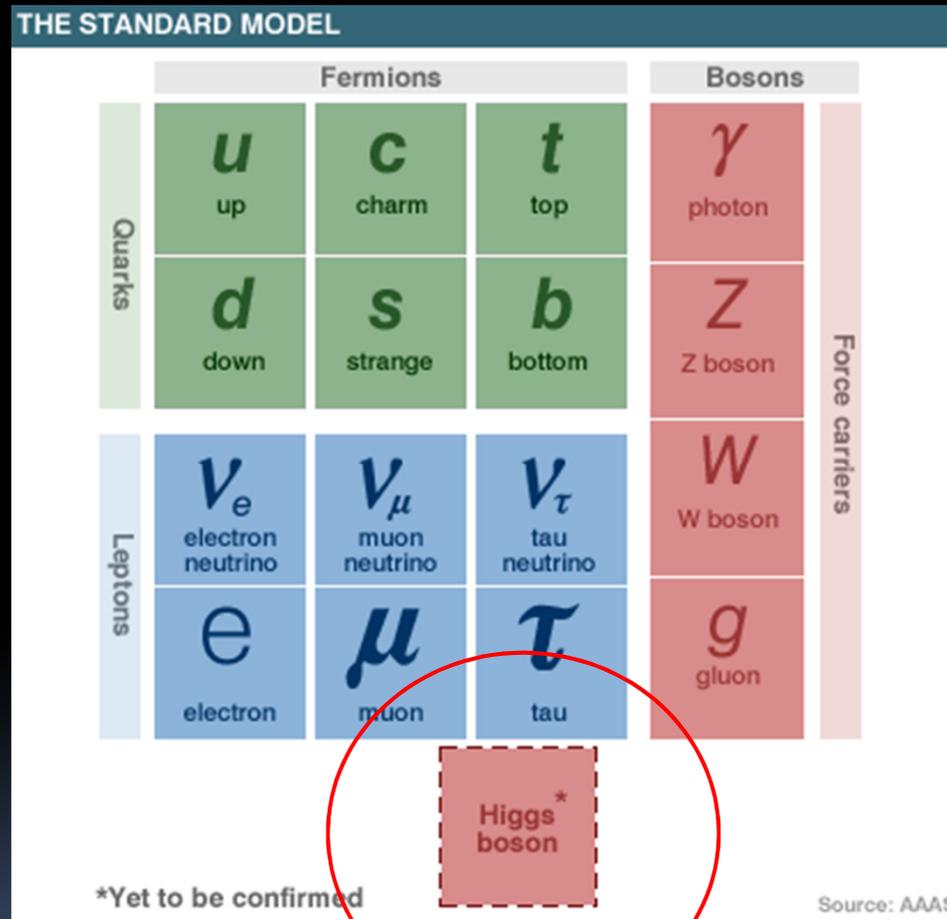
I costituenti elementari interagiscono scambiandosi i quanti di diversi campi di forze, continuamente emessi e assorbiti

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

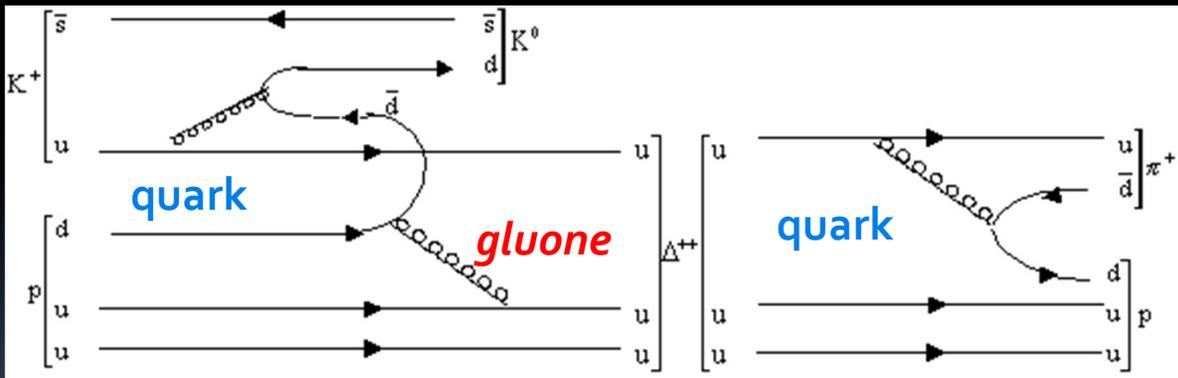
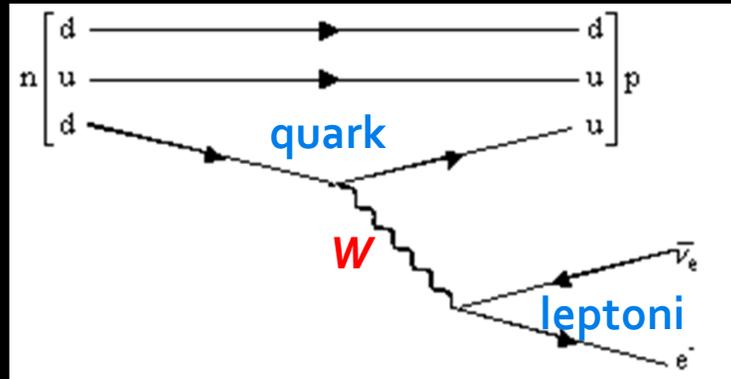
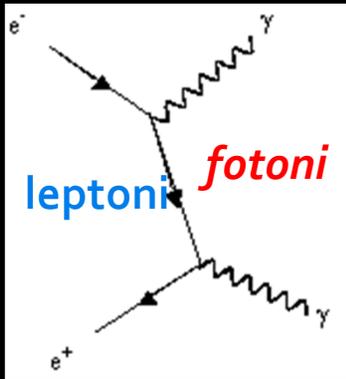
NB Il nome interazione di colore è *figurativo e convenzionale*: le particelle elementari non hanno colore

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

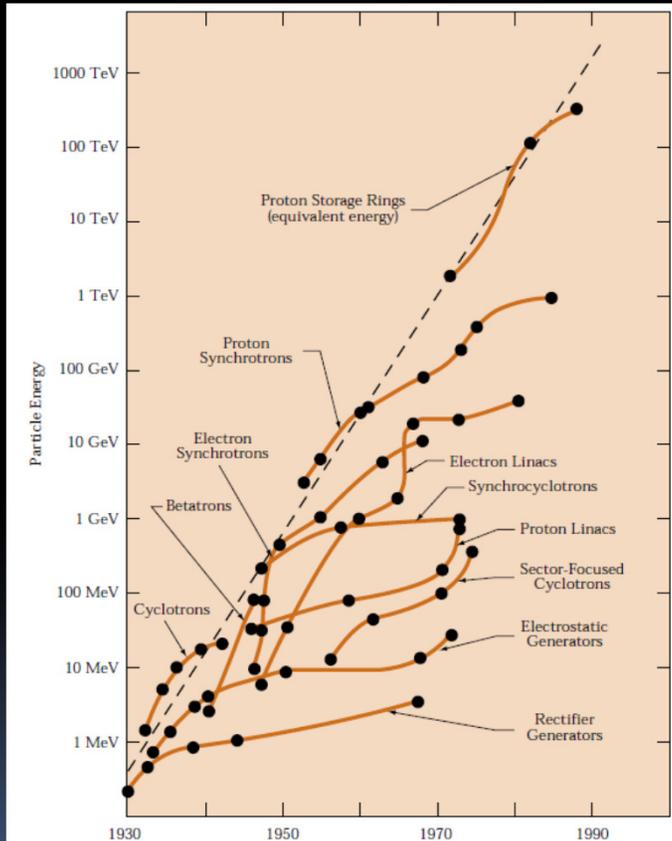
Meccanica quantistica

Fra le molte altre, diverse conseguenze notevoli:

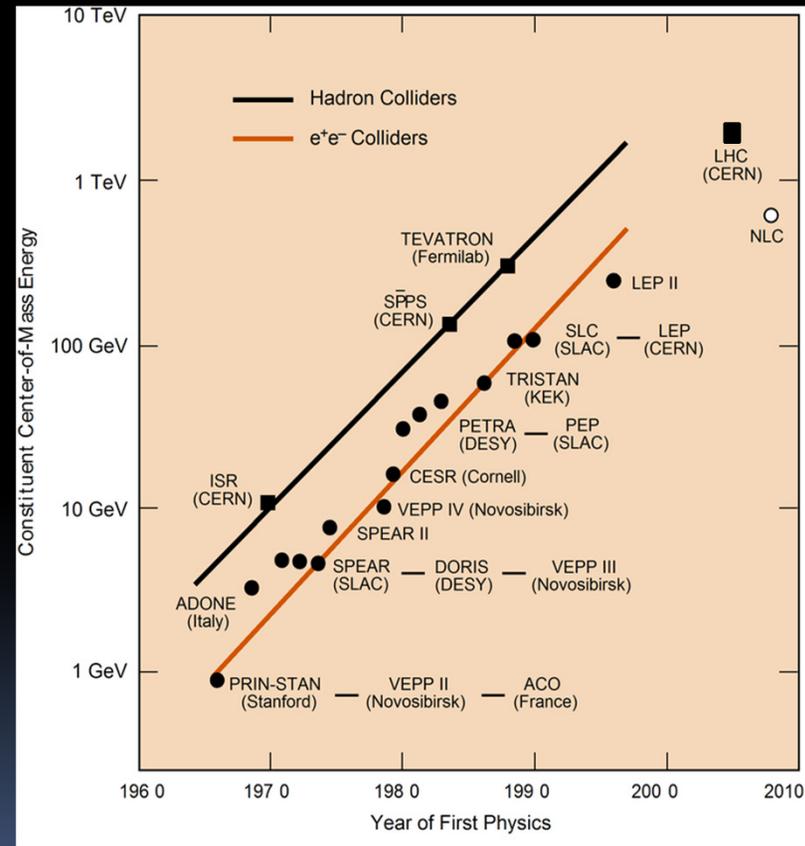
*Equivalenza massa–energia,
Proprietà ondulatorie della materia,
Antiparticelle,*

...

Super-microscopi: Collideri

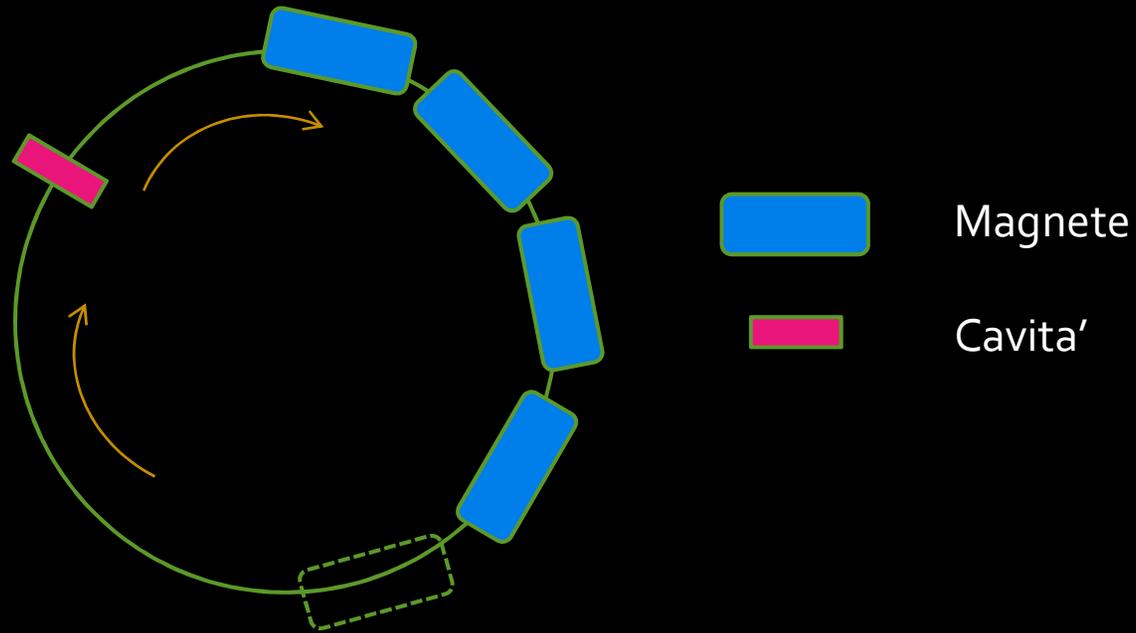


Bersaglio fisso



Collideri

Come accelerare

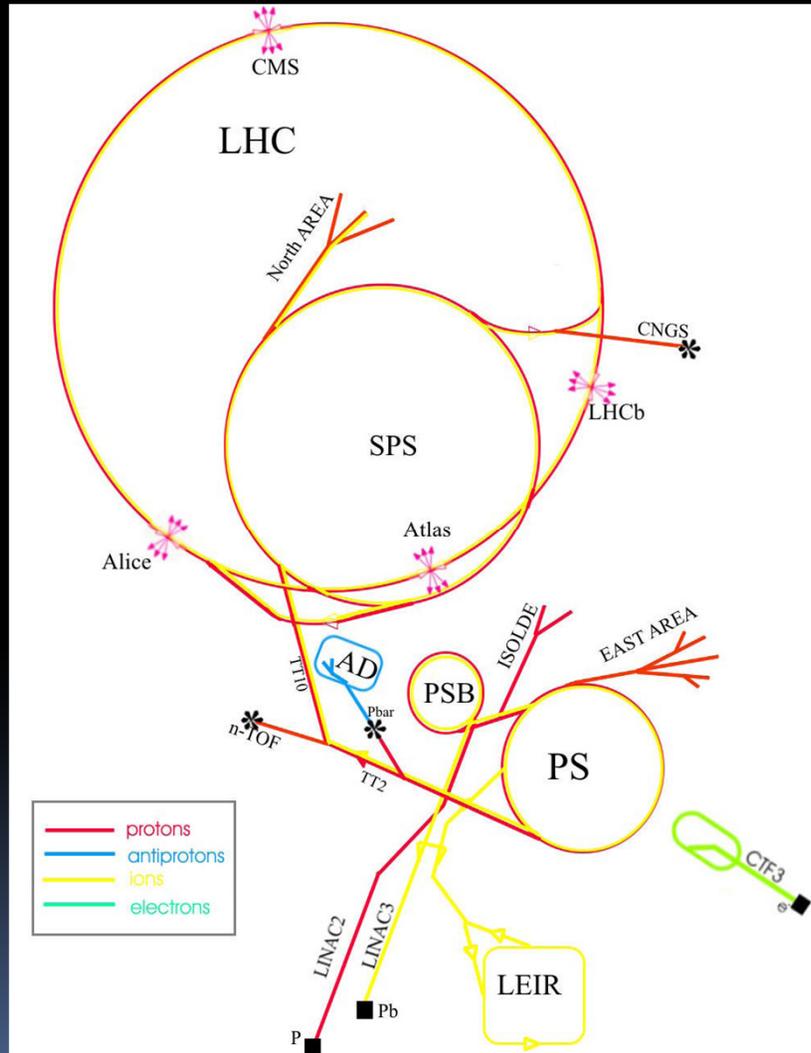


Campi magnetici: curvano la traiettoria delle particelle cariche in movimento
→ orbite chiuse ~ circonferenze

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

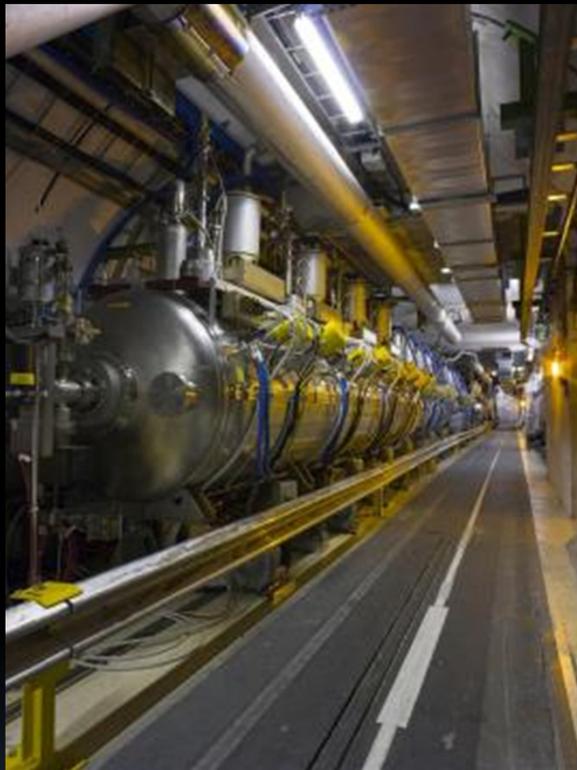
Processi di accelerazione per
LHC: sequenza di diverse
macchine

LHC:

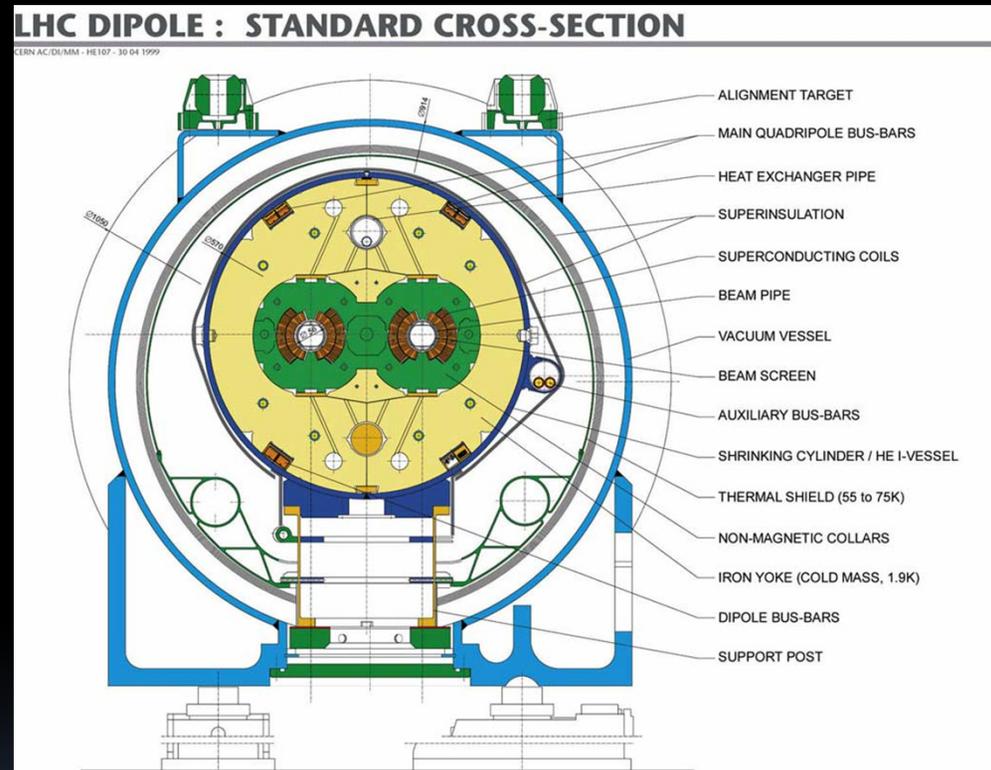
Energia massima 7+7 TeV
(oggi a meta' strada)

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:

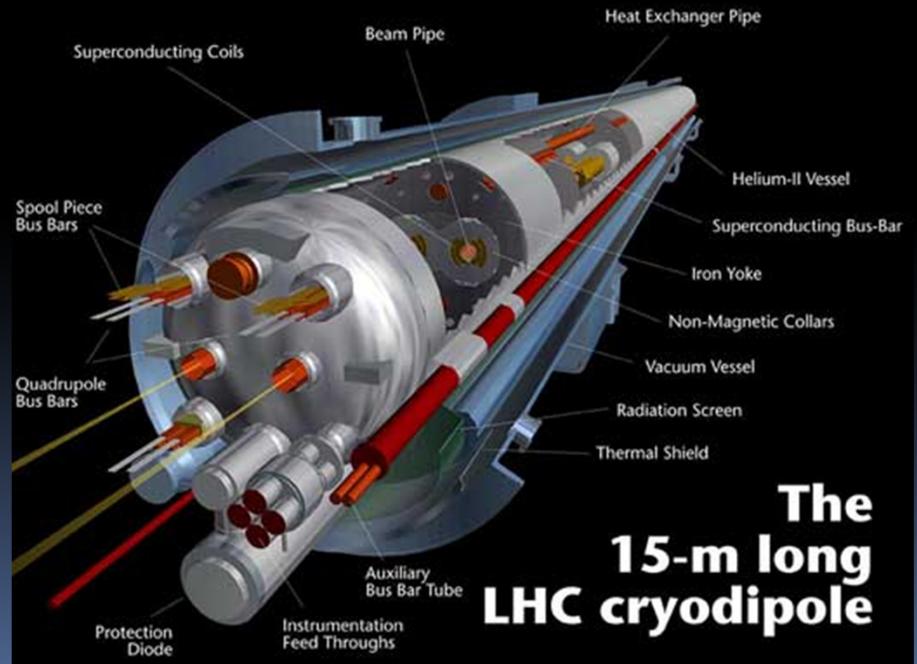
~ 1000+ Magneti superconduttori

Campo magnetico: 8 tesla

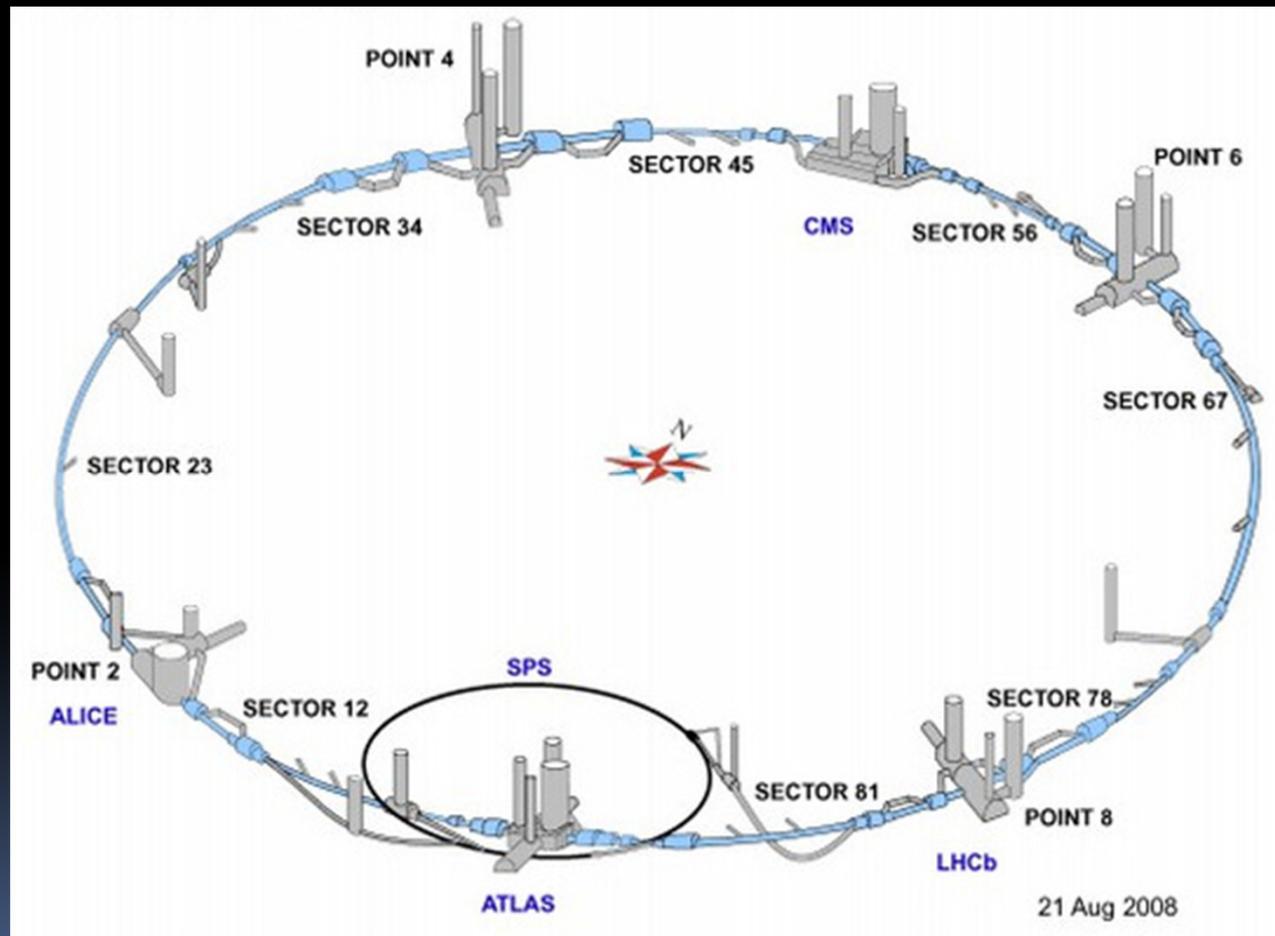
~ 20000 volte quello terrestre

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

~ 1° 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

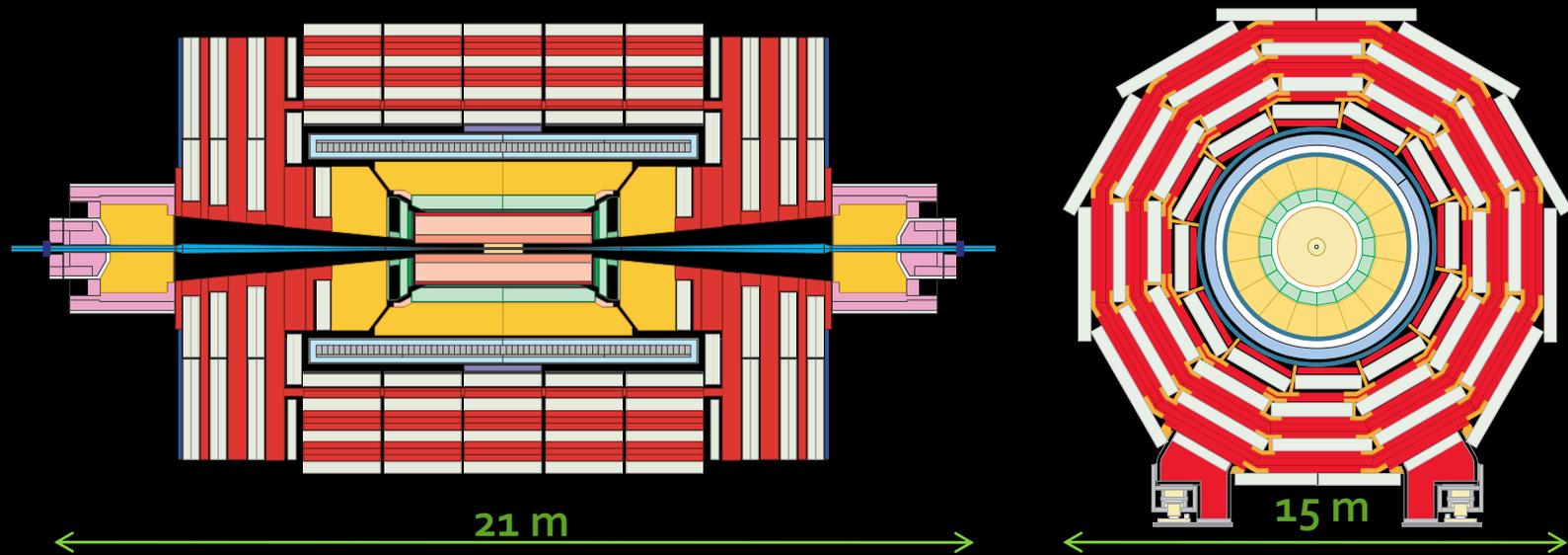
Al pari di quasi tutte le altre particelle, anche la particella di Higgs è altamente instabile: In tempi brevissimi si disintegra in altre particelle più stabili, e quindi più facili da osservare

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

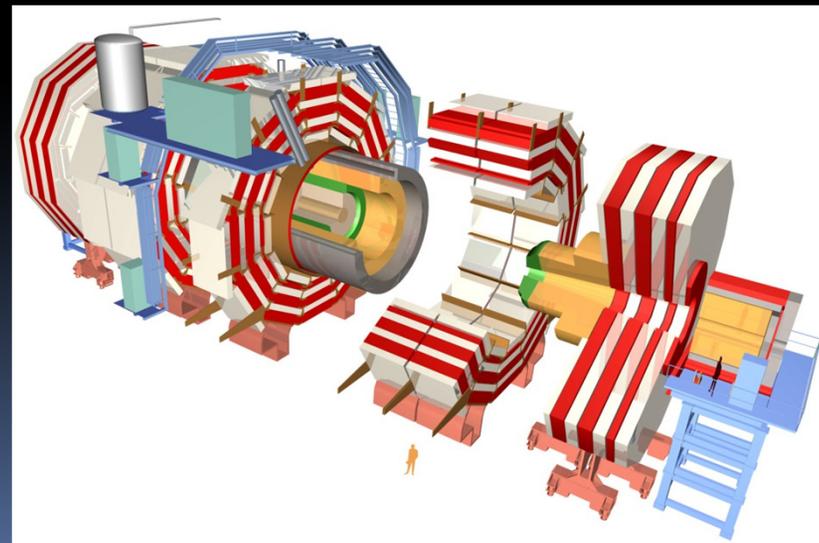
Compact Muon Solenoid



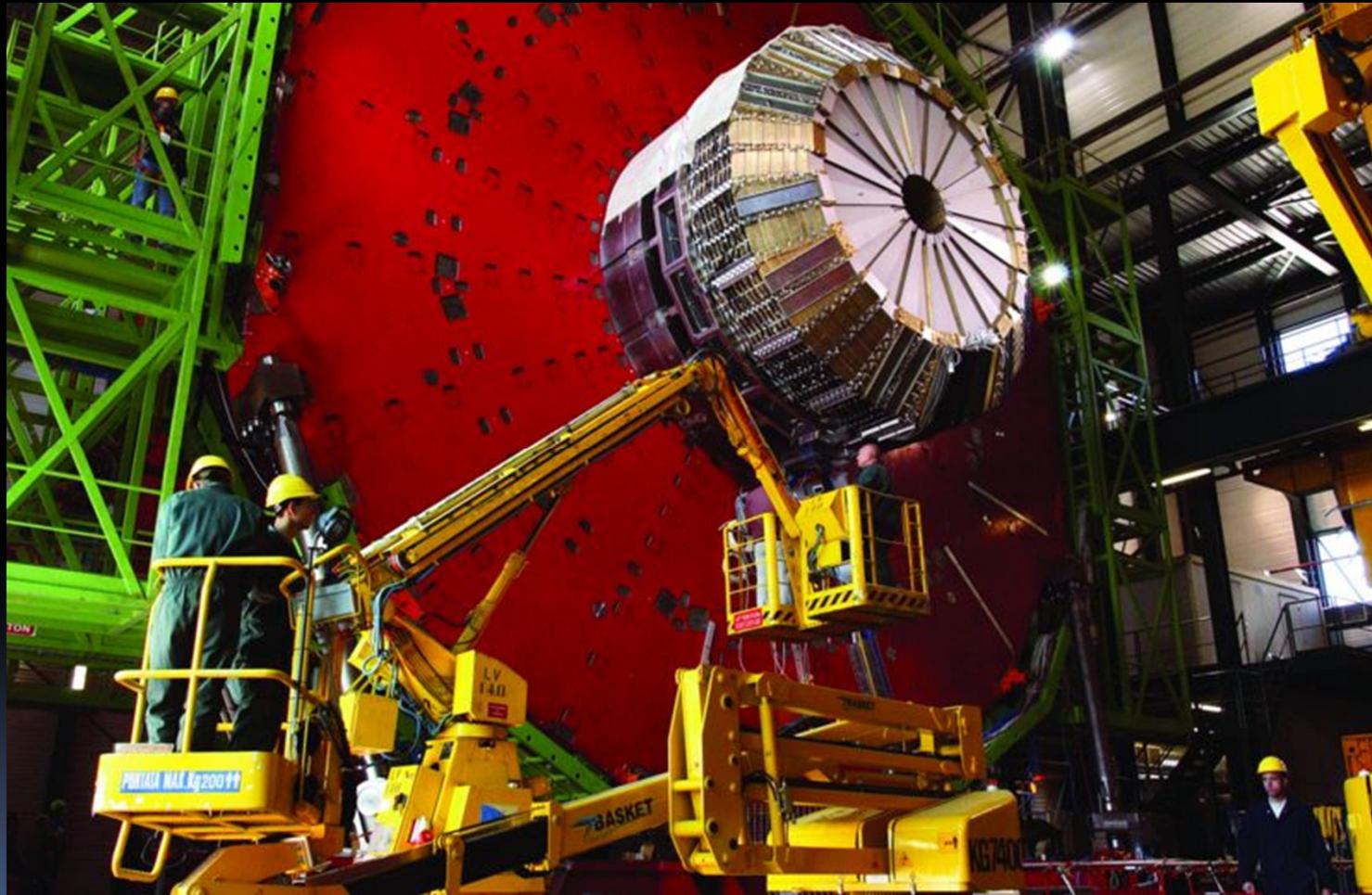
2000 ricercatori!
(fra cui una 30ina di torinesi)

12000 tonnellate

Decine di milioni di sensori



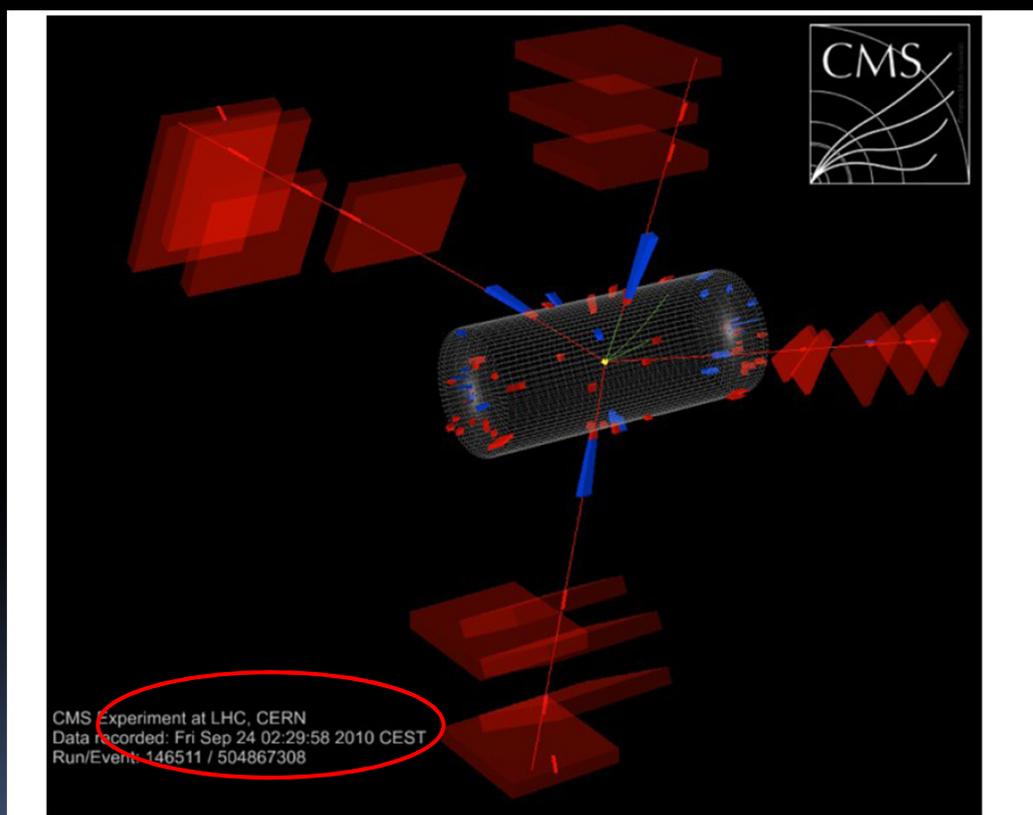
CMS dal vero



'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 incolore

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...)

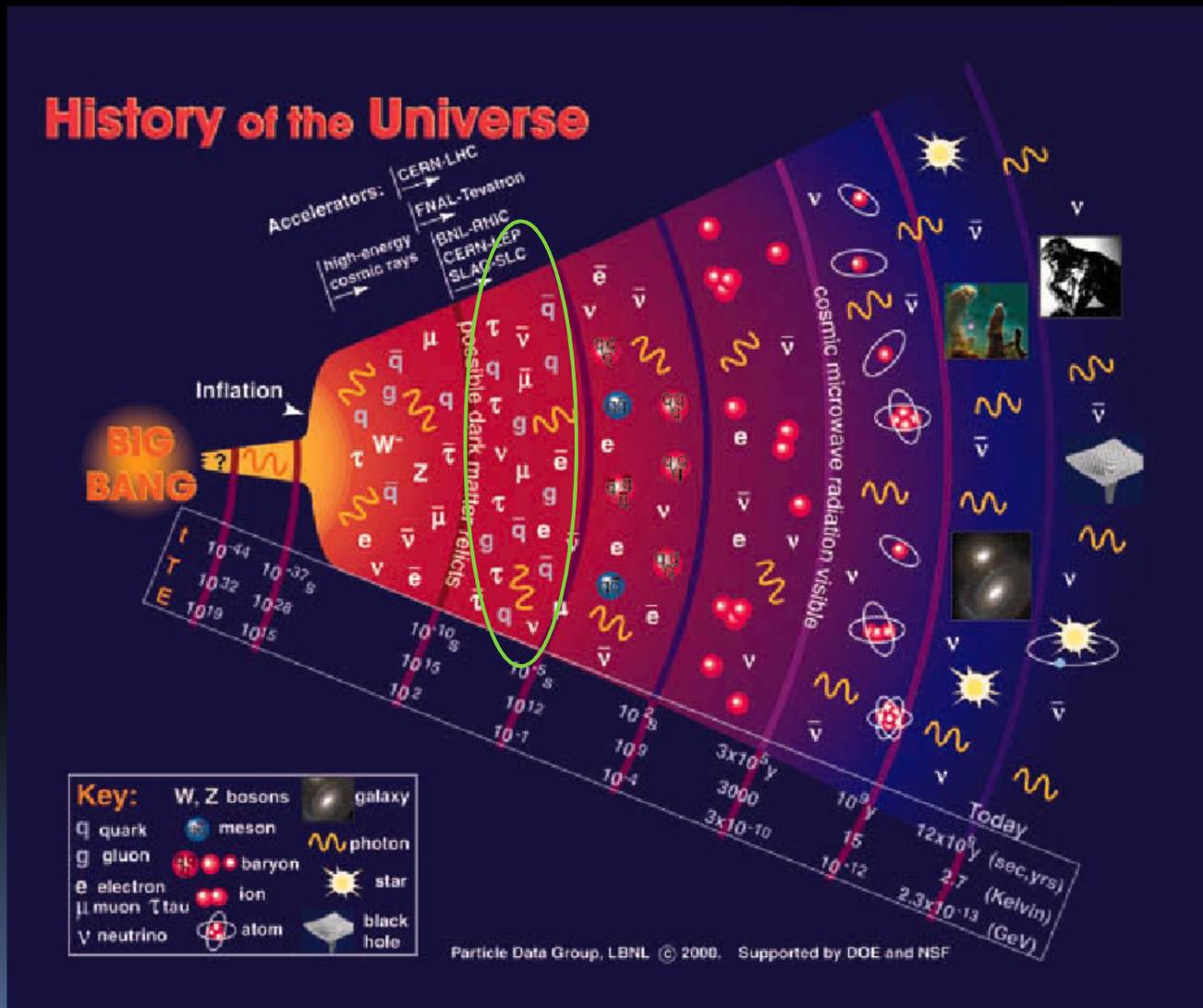
Nel modello cosmologico con maggiori conferme osservative:

'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

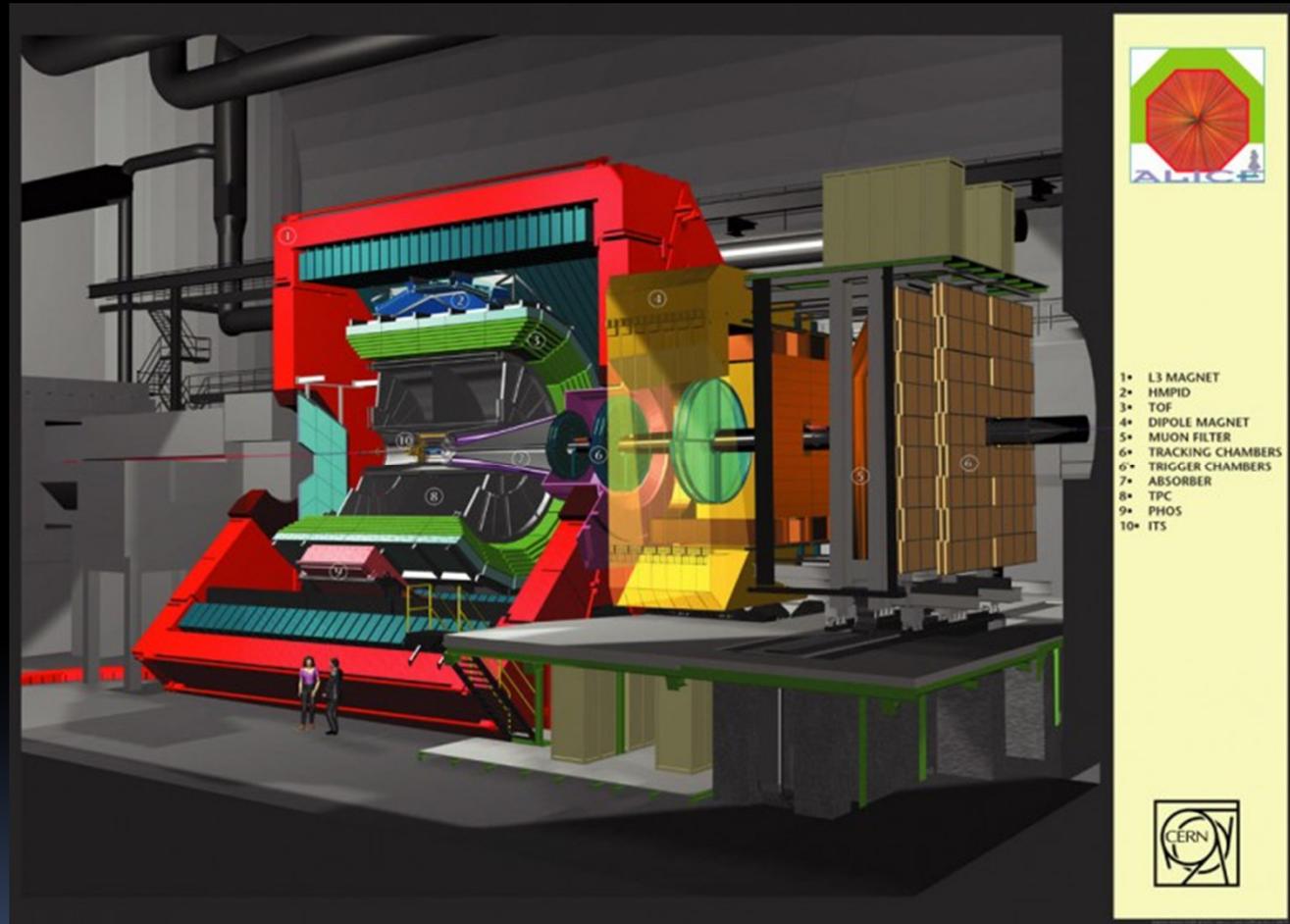
Facendo collidere in LHC, invece di protoni , nuclei pesanti (es Piombo) accelerati ad energie relativistiche, durante la collisione si ottengono temperature e densita' molte elevate

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

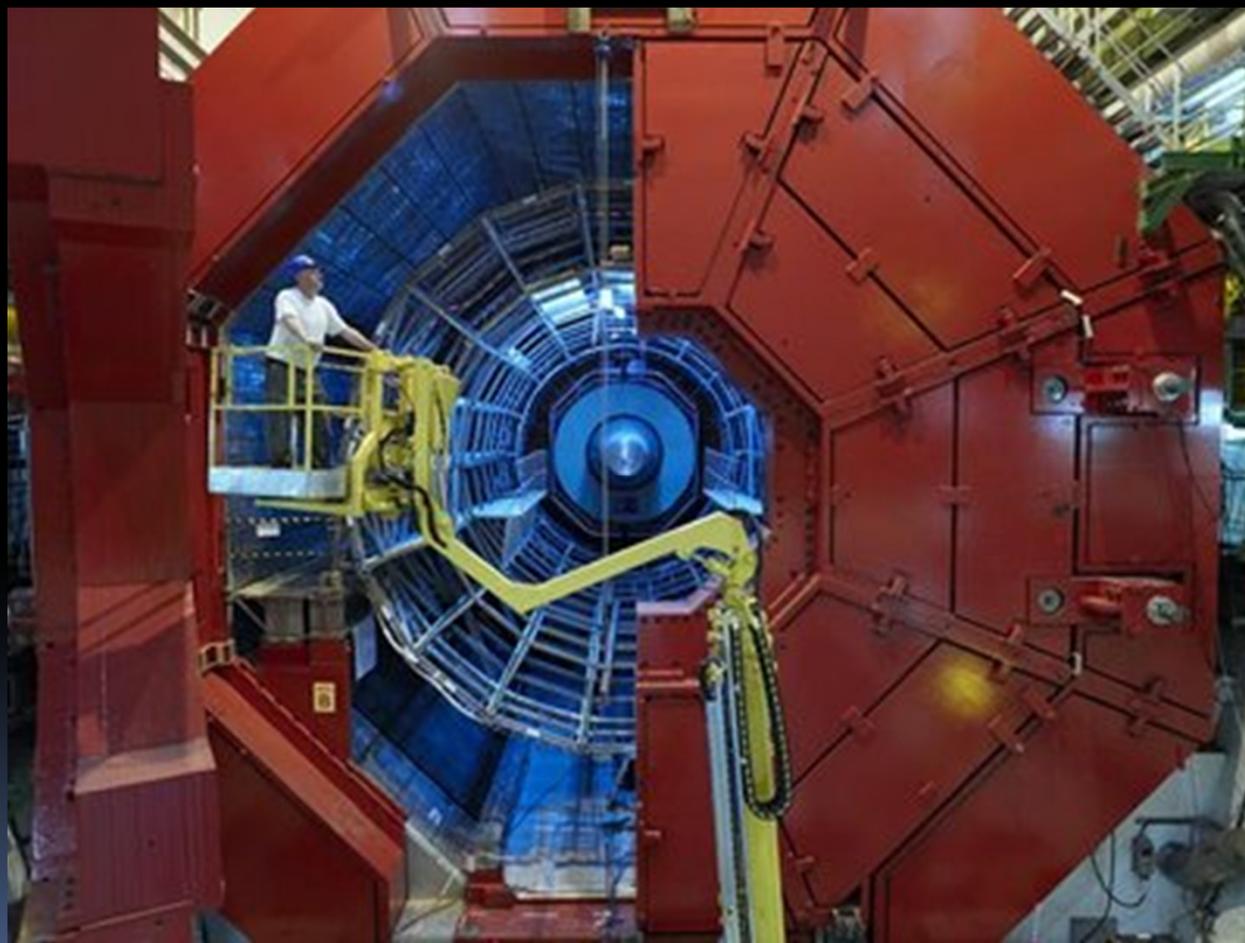
Molti segnali indiretti, attesa per eventi spettacolari

ALICE

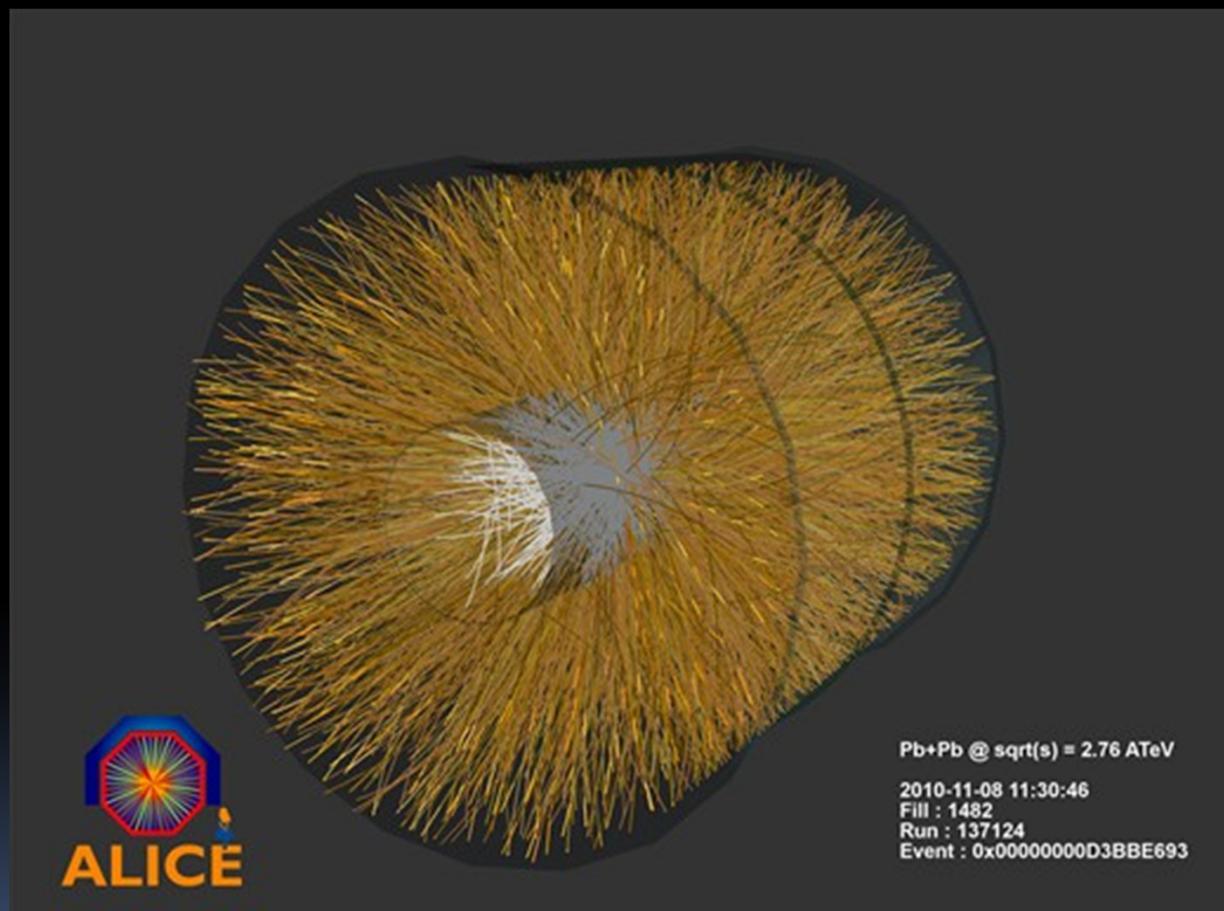


1000 ricercatori!
(fra cui una zoina di torinesi)

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