

MATERIA, ENERGIA, PARTICELLE

Modello Standard: il DNA delle cose

Bardonecchia, Gennaio 2016

E.Menichetti – Dip. di Fisica e INFN, Torino

Il Modello Standard

Che cos'è?

Una versione moderna del «De Rerum Natura» (Lucrezio, I sec. a.C.)

Rielaborazione poetica delle teorie di Epicuro riguardo alla natura:
Universo *materialistico, atomistico, meccanicistico*

*Il Modello Standard è (parte del)la spiegazione
di come è fatto l'Universo*

Spiegazione basata sull'esperimento, codificata matematicamente

L'origine della fisica, 'scienza della natura'

Uno sguardo al cielo....



Ordine e regolarita'
nel moto degli astri:
Da dove hanno origine?

....e uno alla terra



La materia:
Di cosa sono fatte le cose?

Fisica e realta'

Per quel che possiamo osservare, le leggi della fisica sono *universali*

Da dove ha origine l'universalita'?

Domanda difficile..

Ipotesi che aiuta a rispondere:

*L'universo e' costruito, in ogni sua parte,
con gli stessi costituenti elementari ,
che interagiscono attraverso le medesime forze*

Meta-ipotesi alla base del Modello Standard

Cosa c'è la' fuori?

All'inizio la fisica e' essenzialmente *cosmologia*

Come e' strutturato il cosmo?

Come ha avuto origine?

Mix indistinto di filosofia, scienza, religione, ...

La fisica ragiona sulla natura dei corpi e dei moti *terrestri* (imperfetti) e *celesti* (perfetti), quindi:

Prima di tutto, astronomia

Un'interazione fondamentale (1687)...

Newton: Sistema solare = Insieme di molti corpi legati fra loro dalla *forza di gravitazione*

Idea estremamente unificante:

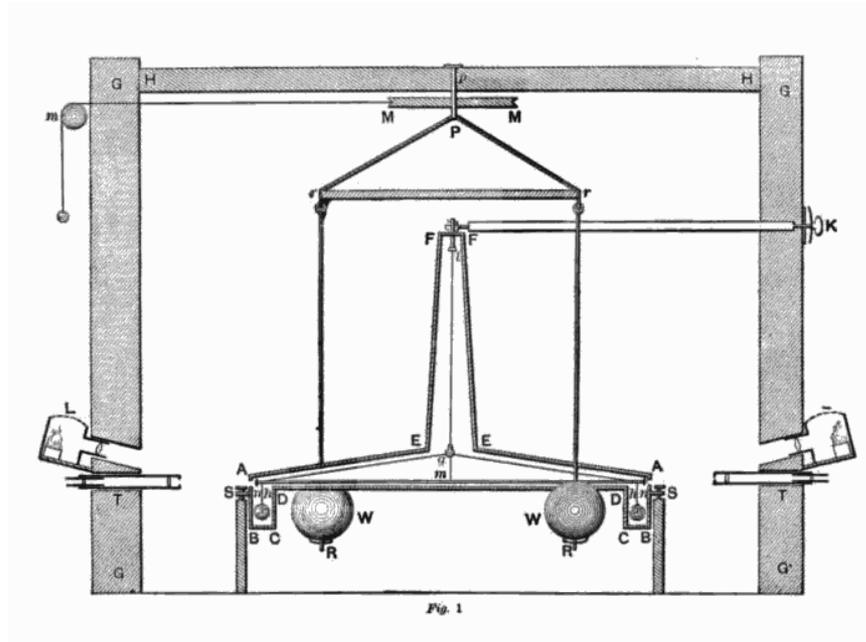
*All'origine di tutti i fenomeni
di tipo gravitazionale
c'è un' unica forza, quella newtoniana*

Quindi, misurare p.es. l'accelerazione di gravità consente di misurare la massa del Sole, della Luna, di predire la posizione e la velocità delle comete, etc ...

...e una costante universale (1797)

....se si conosce una *costante universale*: G

Newton non la conosceva, ma nella sua stessa universita'
Cavendish un secolo dopo la misuro' in laboratorio



Molto, molto piccola: $6,67 \cdot 10^{-11}$ in unita' SI

Effetti grandi solo fra corpi 'grandi' (\sim astronomici)

Trionfi newtoniani: XVIII-XIX secolo

Possibile misurare la massa della Terra, della Luna, del Sole, ...

→Sviluppo impetuoso della meccanica celeste:

Scoperta di nuovi pianeti, satelliti, pianetini, comete

Per non parlare di astronautica, satelliti artificiali, uomini sulla Luna, sonde interplanetarie, telescopi spaziali etc

E qualcosa anche per i filosofi:

Meccanicismo, oggi passato di moda; piuttosto *Riduzionismo*:

Gli enti e i concetti usati per spiegare la realta' dovrebbero essere ridotti al minimo necessario per spiegare i fatti osservati, e non moltiplicati senza motivo (un po' a' la Ockham)

Il secolo di Einstein

1905: 'Annus mirabilis'

Relativita' ristretta, Effetto fotoelettrico, Moto browniano, $E=mc^2$

1907: 'Il pensiero piu' felice della mia vita'

In un ascensore in caduta libera, il campo gravitazionale e' zero

→Principio di relativita' esteso a riferimenti qualsiasi

1915: Un altro 'Annus Mirabilis'

La gravitazione e' geometria

La materia dice allo spazio come curvarsi

La geometria e' gravitazione

Lo spazio curvo dice alla materia come accelerare

(©John Wheeler)

Espansione conoscitiva

2015: Un secolo di grande progresso in gravitazione, astrofisica e cosmologia

Espansione dell'universo: Hubble, 1929

Modello a Big Bang: Lemaitre, 1931, Gamow anni '40, e altri

Evoluzione Stellare: Schwarzschild, Bethe, Chandrasekhar, ...

Radiazione fossile: Gamow, Alpher, Herman, 1948; Penzias e Wilson, 1964

Buchi neri: Schwarzschild, Hawking, Oppenheimer, Wheeler, ...

...e molto altro ancora

Ma: Ancora non abbiamo osservato le onde gravitazionali, ne' sappiamo quantizzare la relativita' generale, ne' sappiamo cosa siano materia oscura ed energia oscura

Materia ed energia nel XX secolo

Tutto chiaro?

La composizione dell'universo e' uno dei misteri piu' profondi: i conti non tornano...

Lo studio della gravitazione a livello cosmologico indica:

- 5% materia barionica (quella ordinaria)
- 30% materia oscura (che cos'e? Mah...)
- 65% energia oscura (che cos'e'? Mah al cubo...)

La gravitazione ha ancora molti lati poco conosciuti...

Cosa c'è là dentro?

La curiosità di sapere come è fatto l'universo si accompagna da sempre a quella di sapere di cosa sono fatti gli oggetti

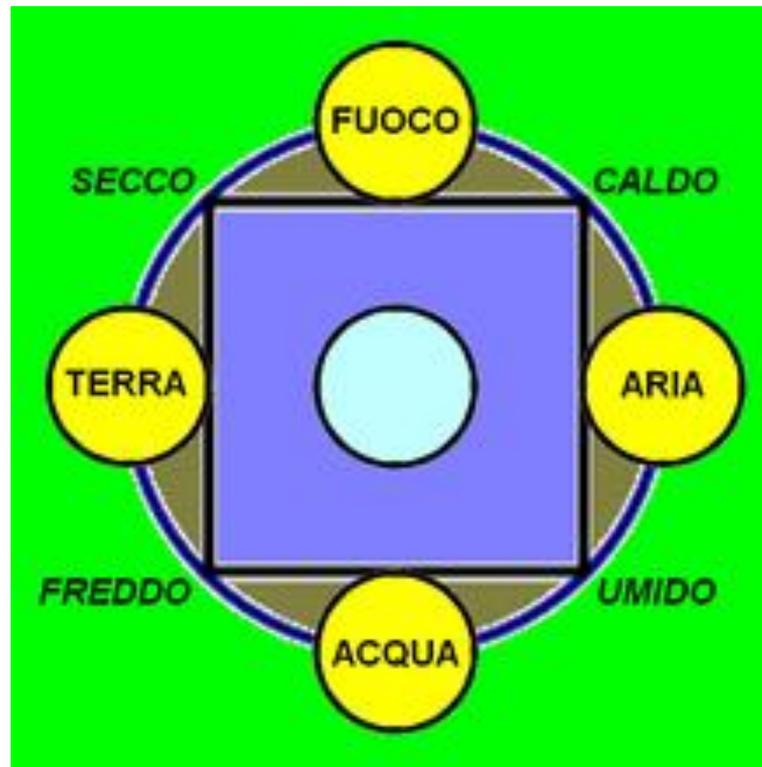
Che cos'è la materia?

Che cosa rende gli oggetti solidi, liquidi, gassosi?

Come si trasforma la materia?

Dai Presocratici ad Aristotele

Risposta: Gli elementi!
Terra, Fuoco, Acqua, Aria
...con i loro attributi



Una vecchia questione di principio...

Democrito

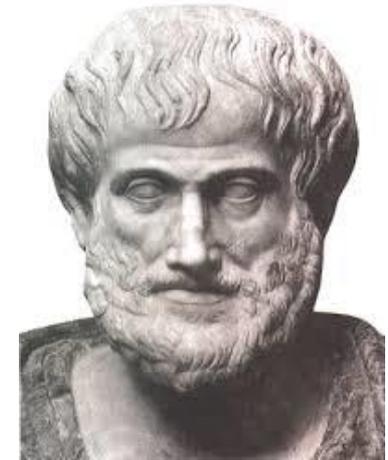


Esistono parti minime
degli oggetti materiali:
Atomi

contro



Aristotele



La materia e'
infinitamente
divisibile

Per duemila anni, rimasta una questione filosofica:
Non sorprendentemente, vince Aristotele

...ma poi la chimica fa progressi

Boyle (Regno Unito, XVII secolo)

Gay-Lussac (Francia, XVIII secolo)

Proust (Francia, XVIII-XIX secolo)

Proprietà dei gas, Legge delle proporzioni definite

Lavoisier (Francia, XVIII secolo)

Idea di elemento chimico: differenza fra elementi e composti

Legge di conservazione della massa

Chimica: XVIII-XIX secolo e il ritorno dell'atomo



Dalton: La materia è formata da particelle indivisibili e indistruttibili: gli atomi - Atomi di elementi diversi sono diversi tra loro e hanno masse diverse - I composti sono sostanze pure formate da due o più atomi diversi che si combinano secondo un rapporto definito

Avogadro: La molecola è la più piccola aggregazione di atomi di una stessa sostanza

Il sistema periodico

Mendeleev: Gli elementi si raggruppano in famiglie i cui membri hanno proprietà chimiche simili, secondo un ordine preciso con evidenti periodicità e ricorrenze

Sistematicità nelle proprietà chimiche degli elementi...

Indizi di una sottostuttura

Periodic Table of the Elements

1	IA																O															
1	H																	He														
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne								
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar														
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr														
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe														
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn														
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113																			

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

...Somiglianze e regolarità nelle proprietà fisiche degli atomi

La struttura degli atomi

Che cosa rende l'atomo di un elemento chimicamente diverso o simile a quello di un altro elemento?

Perche' gli atomi si dispongono secondo una gerarchia di massa?

Possibile spiegazione: malgrado il loro nome...

Gli atomi sono sistemi composti

I costituenti atomici

Ricerca di *evidenze fisiche* che comprovino gli *indizi di origine chimica* sulla struttura composta degli atomi

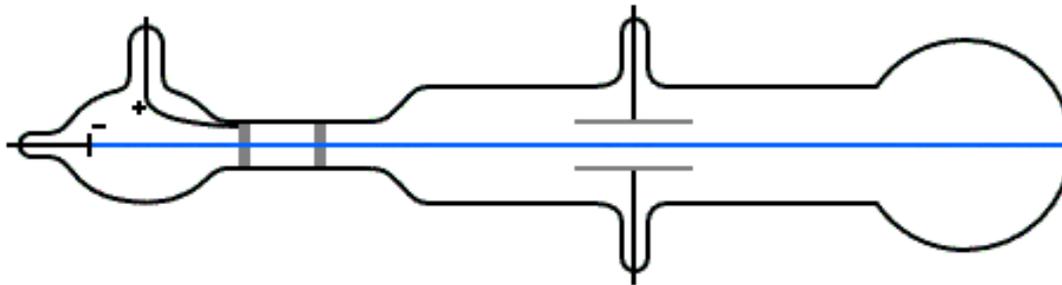
Primi elementi del Modello Standard (fra '800 e '900):

Elettrone: *Thompson*

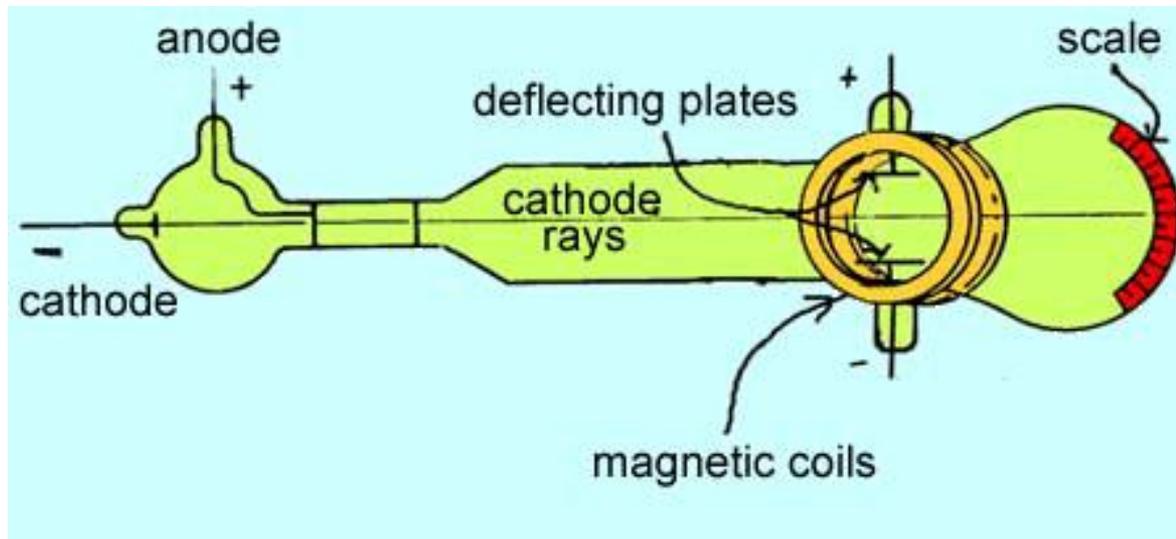
Nucleo: *Rutherford*

La scoperta dell'elettrone

Thomson (Cambridge, 1896 – 1897)



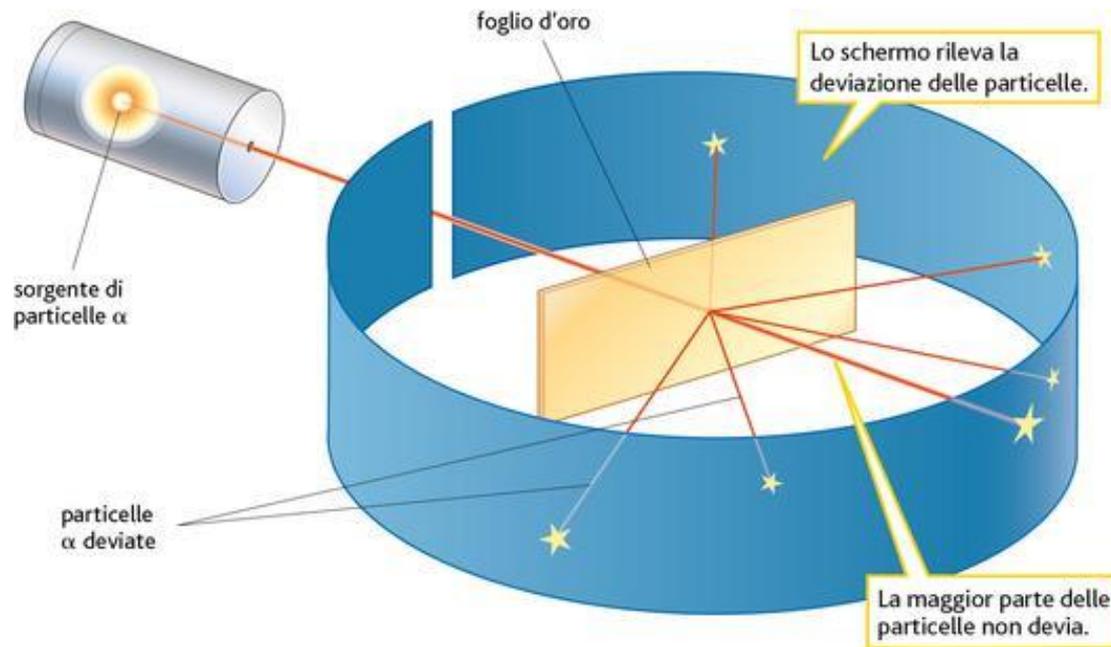
Carica negativa



Massa migliaia
di volte inferiore
a quella degli atomi

La scoperta del nucleo

Rutherford, Geiger, Marsden (Cambridge, 1911)



Uso innovativo della radioattività alfa, scoperta da Rutherford pochi anni prima

La struttura atomica

Si individuano due tipi di costituenti atomici:

Nuclei ed elettroni

Possibile costruire un modello dell'atomo basato su questi costituenti

“Colla” che li tiene uniti:

Forza elettromagnetica

Gia' nota dallo studio sperimentale dei fenomeni elettrici e magnetici

Un'altra interazione fondamentale

La seconda interazione fondamentale:

Le forze elettromagnetiche hanno gli stessi effetti per tutte le cariche elettriche

Poche, semplici leggi spiegano il funzionamento delle batterie, la propagazione della luce, il magnetismo, ...

Piu' complicate (o piu' semplici ?) di quella gravitazionale

G piccolissimo \rightarrow Gravitazione \sim irrilevante a livello atomico

Forze

Da Newton in poi:

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

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*

L'idea originale

Approccio iniziale alle interazioni gravitazionali:

Azione diretta fra masse

Ossia: Ogni data massa esercita una forza su ogni altra

Proprietà principale: *Principio di sovrapposizione*

(In linguaggio matematico: dovuto alla *linearità* delle equazioni)

Es.: Se la massa **A** risente delle azioni delle masse **B** e **C**, la forza totale su **A** è la somma delle forze dovute a **B** e **C**

O anche: *l'effetto della somma è la somma degli effetti*

Campo

Invece dell' azione diretta:

- Ogni massa *modifica le proprietà dello spazio*
- Lo spazio modificato *modifica lo stato di moto* di altre masse che vi si trovino

→ La massa, o carica, *crea un campo gravitazionale che agisce* su altre masse

Campo come *mediatore* delle forze fra masse

Statico: effetto immediato, senza ritardo

L'idea intuitiva di spazio viene caricata di proprietà nuove, inizialmente non molto giustificate

Effetti delle forze statiche: Descritti in modo equivalente

Azione diretta ↔ *Campo mediatore*

Fenomeni elettromagnetici

Fenomeni *elettrici* e *magnetici*: legati alla presenza di cariche e correnti

Fenomeni statici:

Descrizione equivalente in termini di campi oppure di azioni dirette, come nel caso gravitazionale

Ma: due fatti sorprendenti!

(Sperimentale) **Faraday** →

C. Elettrici originati da campi magnetici variabili nel tempo

(Teorico) **Maxwell** →

C. Magnetici originati da campi elettrici variabili nel tempo

Onde elettromagnetiche

Legame fra campi elettrici e magnetici:

Quando si hanno campi variabili

Fenomeni concatenati → *Propagazione*

Propagazione *per onde* di energia e altre grandezze

Nuova proprietà' dei campi elettromagnetici:

Possono sussistere senza la presenza di cariche o correnti

Ma: Solo insieme !

→ Indipendentemente dalle sorgenti da cui ha origine,
il campo elettromagnetico ha un'esistenza propria

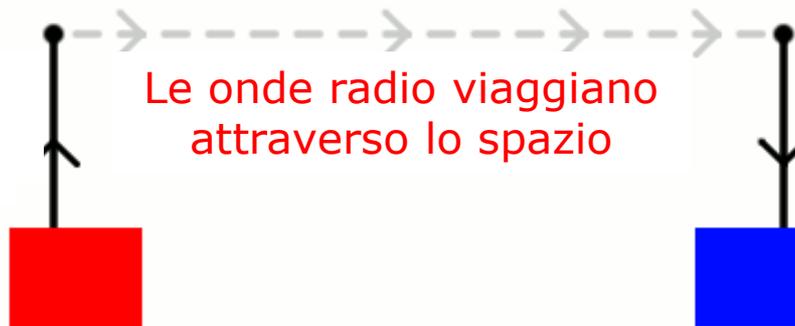
Un esempio casalingo...

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

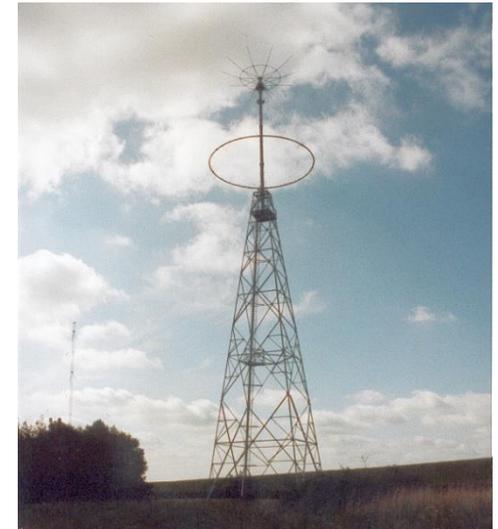


Elettrone nel metallo dell'antenna: fatto oscillare dalla corrente di pilotaggio, emette onde radio

Antenna trasmittente



Le onde radio viaggiano attraverso lo spazio



Elettrone nel metallo dell'antenna: assorbendo onde radio, oscilla e forma la corrente di segnale

Antenna ricevente

...e uno un po' meno

SN1572

La supernova di Tycho Brahe, osservata nel 1572:

Primo esempio di fenomeno che dimostrava che i cieli non sono immutabili

Distanza circa 9000 anni luce:

Quando la luce dell'esplosione e' stata emessa, a casa di Tycho circolavano i mammoth

Quando la luce dell'esplosione e' stata osservata, la supernova era spenta da migliaia di anni



→Durante il viaggio, per la maggior parte del tempo non esistevano piu'/ancora ne' sorgente ne' osservatore

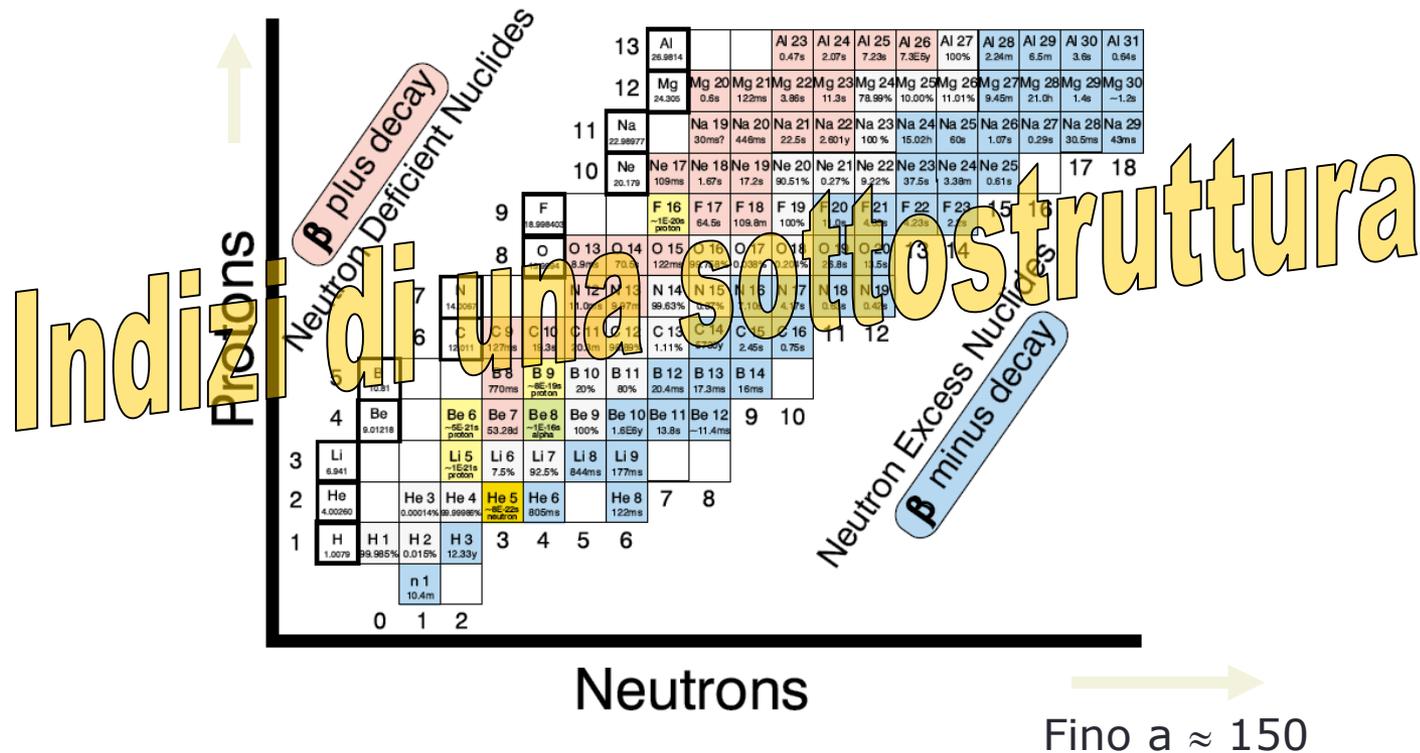
La storia si ripete

Nuclei: un altro sistema periodico

Catalogato a partire dagli anni '30, con l'introduzione dei primi acceleratori

Fino a ≈ 100

CHART OF THE NUCLIDES



I costituenti nucleari

Circa 3000 nuclei diversi conosciuti....

Situazione simile a quella incontrata a proposito delle specie atomiche: similarita', regolarita', ricorrenze

Ricerca dei *costituenti nucleari*

Identificazione di *protone e neutrone*:

Particella pesante, con carica +va

Particella pesante, priva di carica

Cosa rende stabile il nucleo?

Problema: i costituenti nucleari sono a carica positiva o nulla

Come fa il nucleo a restare unito, visto che cariche di ugual segno si respingono?

I costituenti sono legati dalla forza nucleare

A distanze dell'ordine delle dimensioni dei costituenti nucleari essa prevale sulla repulsione elettrostatica fra i protoni

Radioattività'

Scoperta dell'emissione di radiazione da parte di certi elementi

In seguito, messa in relazione con la *instabilità nucleare*: tendenza osservata di diverse specie nucleari a *disintegrarsi spontaneamente* in frammenti più leggeri, con varie modalità

Cosa rende instabile il nucleo?

Perche' alcune specie nucleari sono instabili e si disintegrano spontaneamente?

Diverse modalita' di disintegrazione: la piu' interessante, nota come *decadimento beta*, ha strane caratteristiche Governata dall' *interazione debole*, molto meno intensa dell'interazione elettromagnetica

Anch'essa non si manifesta fra corpi macroscopici: raggio d'azione piccolissimo $< 10^{-16}$ cm!

Due nuove interazioni

Interazione forte:

Piu' intensa di quella elettromagnetica, ha un raggio d'azione estremamente piccolo: $10^{-13}cm!$

Ruolo centrale nella formazione dei nuclei atomici

Interazione debole:

Incline a violare molte delle regole piu' sacre e rispettate dalle altre interazioni...

Le interazioni fondamentali

L'indagine sulla struttura della materia conduce dunque a studiare le proprietà dei *costituenti* e delle quattro *interazioni fondamentali*

Gravitazionale

Elettromagnetica

Debole

Forte

Come si fa?

Teoria: costruzione di *modelli*

Esperimento: uso di *sonde* di vario tipo

Quadro di riferimento

Modelli e sonde funzionano in accordo con i “sacri” principi canonici

*Teoria della relativita’
Meccanica quantistica*

Perche’?

*Non abbiamo evidenze contrarie a questi principi,
mentre ne abbiamo moltissime in favore*

Fino a prova contraria

Effetti quantistici & relativistici

Tre conseguenze importanti:

Dualismo onda-particella

- Le onde si propagano *anche* come particelle
- Le particelle si propagano *anche* come onde

Equivalenza fra massa ed energia

- Possibilita' di trasformare l'una nell'altra

Esistenza delle antiparticelle

- Ogni particella (elettrone, protone, ..) ha una "gemella" di uguale massa e carica opposta

Come funziona?

Versione quantistica delle vecchie idee classiche

Se si 'scuote' una particella carica, essa emetterà onde elettromagnetiche = quanti di luce \equiv *fotoni*

Le onde elettromagnetiche = quanti di luce \equiv *fotoni* 'scuotono' le particelle cariche che incontrano

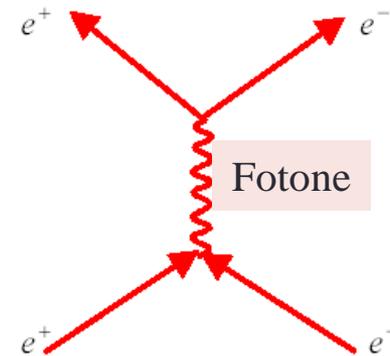
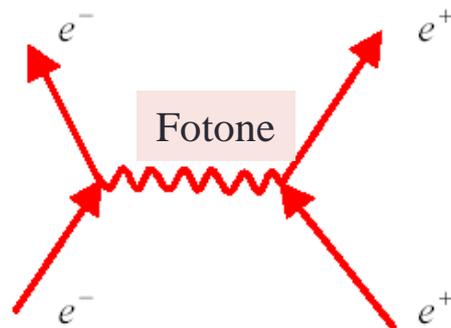
E così via...

Interazione elettromagnetica:

Scambio di fotoni fra correnti elettriche

QED: Interazione elettromagnetica

Nella visione moderna, le cariche elettriche “si sentono” emettendo e assorbendo continuamente *fotoni*: quanti di luce



Diversi processi elementari :

collisione, materializzazione, annichilazione,...

alla base dell'Elettrodinamica Quantistica, o QED

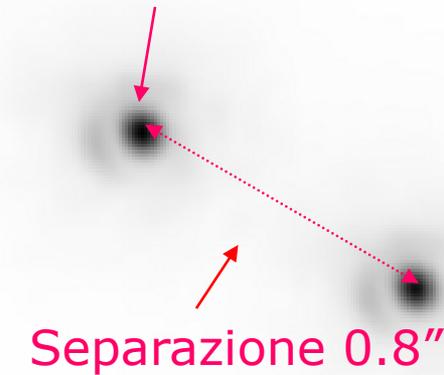
Onde e dettagli geometrici

Natura ondulatoria della luce:
Definisce il dettaglio minimo che
si puo' osservare

La stella binaria ζ di Boote
osservata in luce visibile
 $\lambda \approx 530 \text{ nm}$
Nordic Telescope - $d = 2.56 \text{ m}$

Se la separazione fosse inferiore,
gli effetti ottici non
permetterebbero di separare le
due stelle

Disco di Airy; angolo $\approx \lambda/d$



Il disco di Airy *non* e' la dimensione della stella, ma un effetto
ottico ondulatorio, che dipende solo da λ e da d

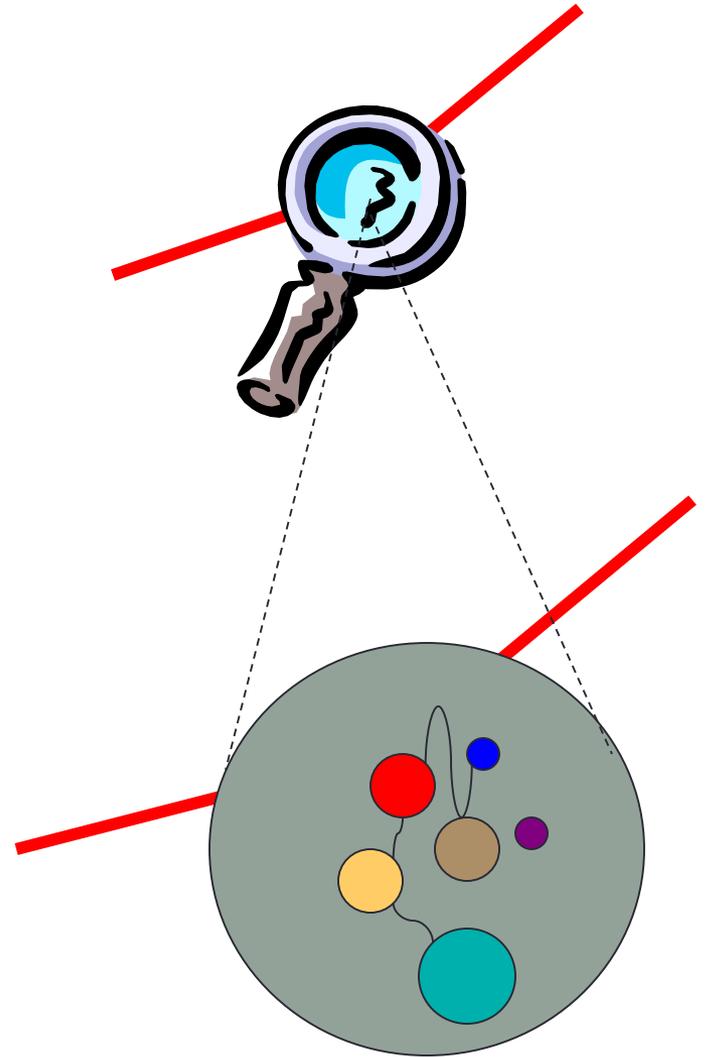
Proiettili e sonde

Quando si ha a che fare con fenomeni ondulatori, il dettaglio minimo che si può osservare ha dimensione $\approx \lambda$

Proiettili di energia elevata hanno velocità elevata

Secondo la meccanica quantistica, hanno lunghezza d'onda piccola:
 $\lambda = h/mv$

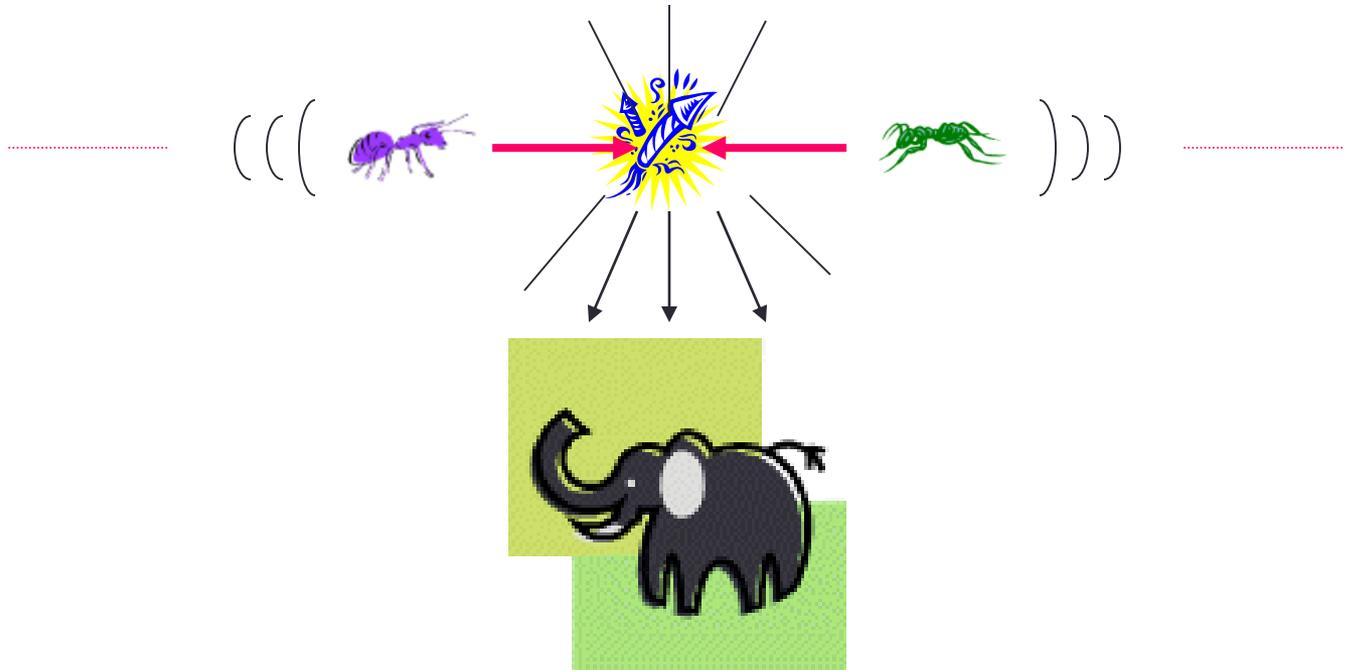
Quindi sono in grado di mettere in evidenza dettagli minuti della struttura dei bersagli



Massa ed energia

Particelle di massa elevata possono essere create trasformando energia cinetica in massa.

Per formare una massa grande, servono proiettili con grande energia cinetica:

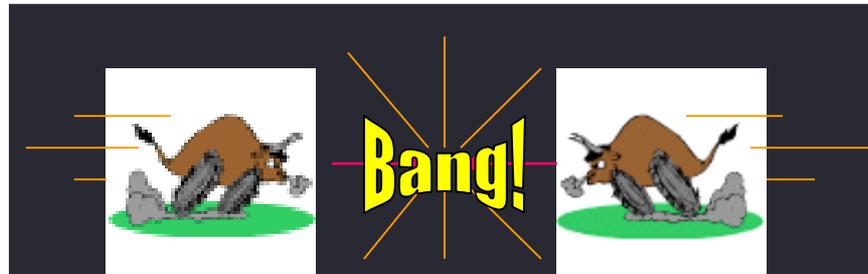


Acceleratori

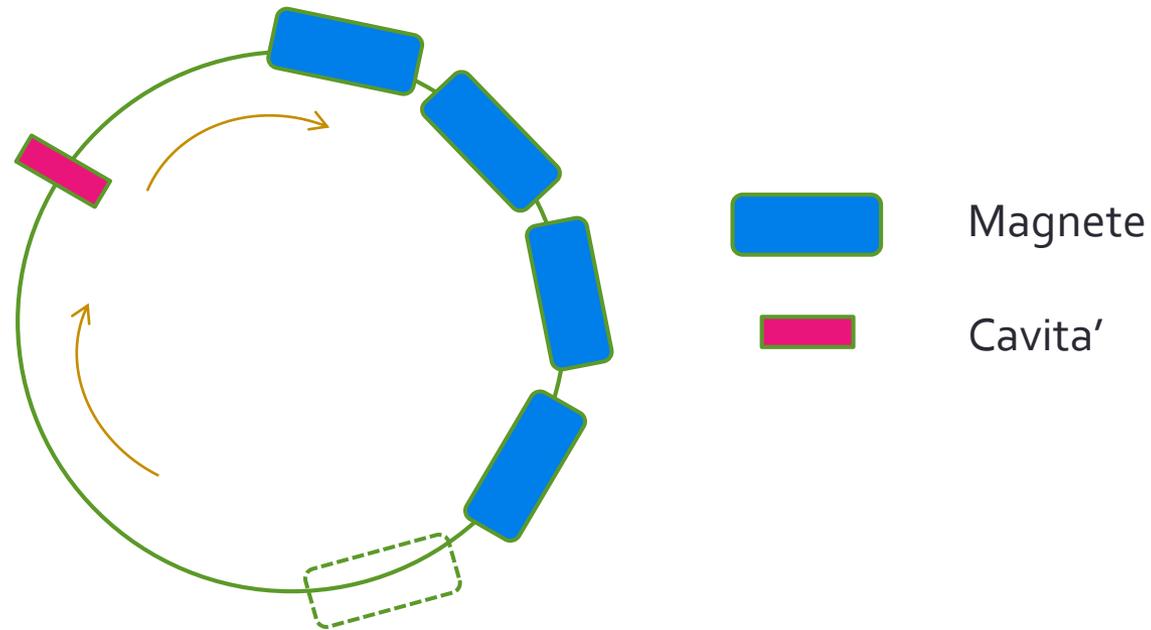
Per studiare la struttura della materia su piccole scale di distanze, occorrono sonde = proiettili energetici

Modo pratico: accelerare proiettili carichi per mezzo di campi elettromagnetici, e spararli su un bersaglio

Condizioni preferite: collisioni *testa a testa* fra coppie di particelle in movimento (piu' energia che puo' trasformarsi in massa)



Come accelerare



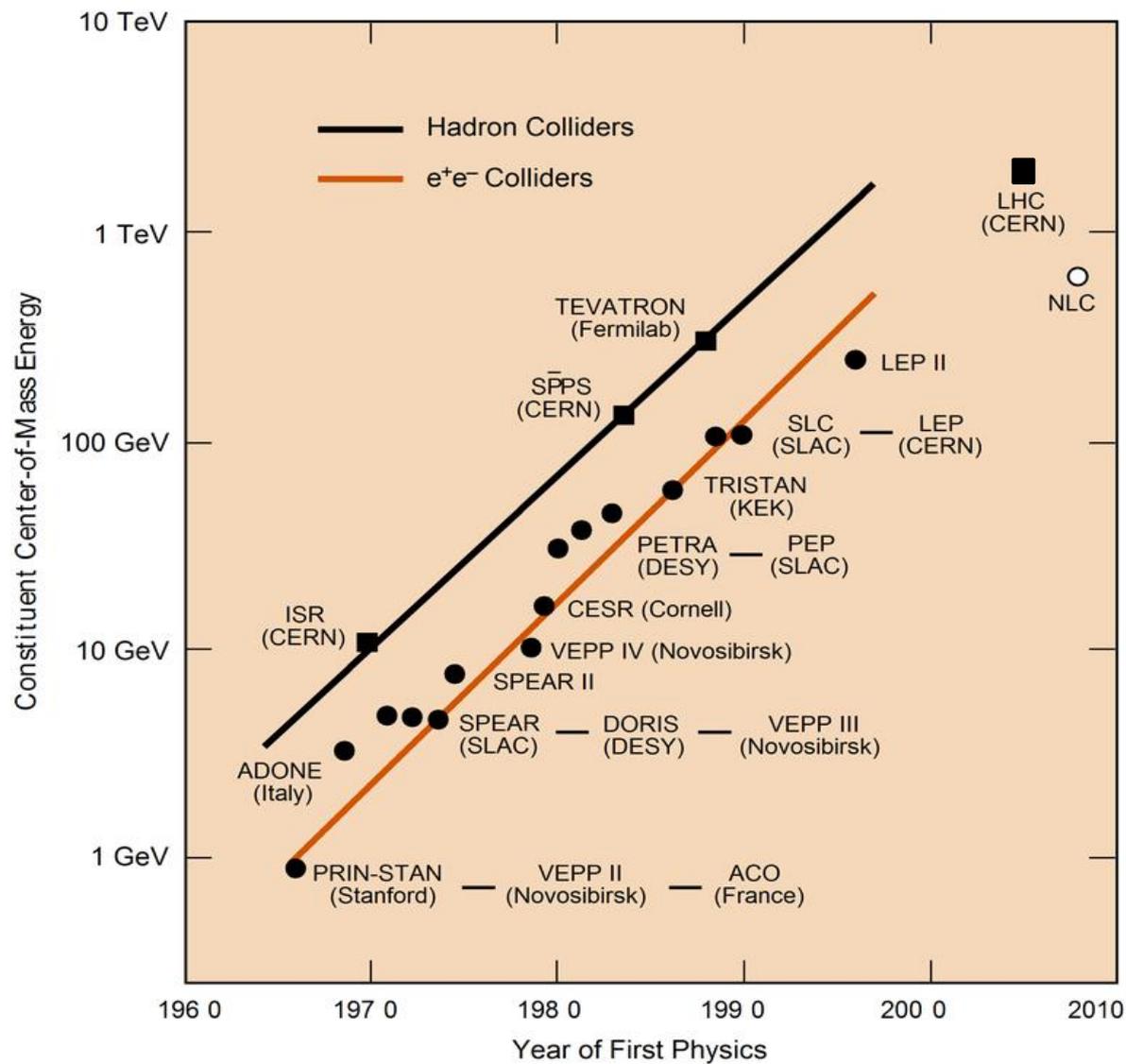
Campi *magnetici*: curvano la traiettoria delle particelle cariche in movimento

→ Orbite chiuse \sim circonferenze

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

→ La loro energia aumenta

Colliders

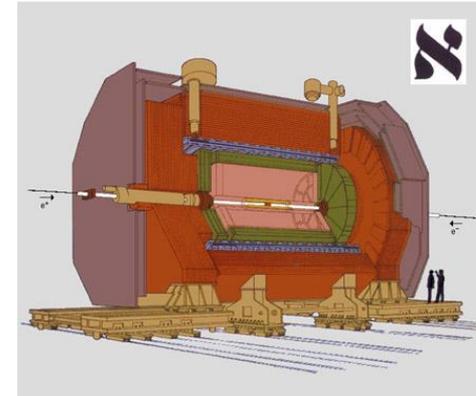


Rivelatori di particelle

I sostituti dell'occhio umano, per radiazioni di energia così alta, sono anche loro sistemi grandi e complessi...

Elettronica, ottica, meccanica di precisione

Migliaia di computer



The ALEPH Detector

ALEPH/CERN



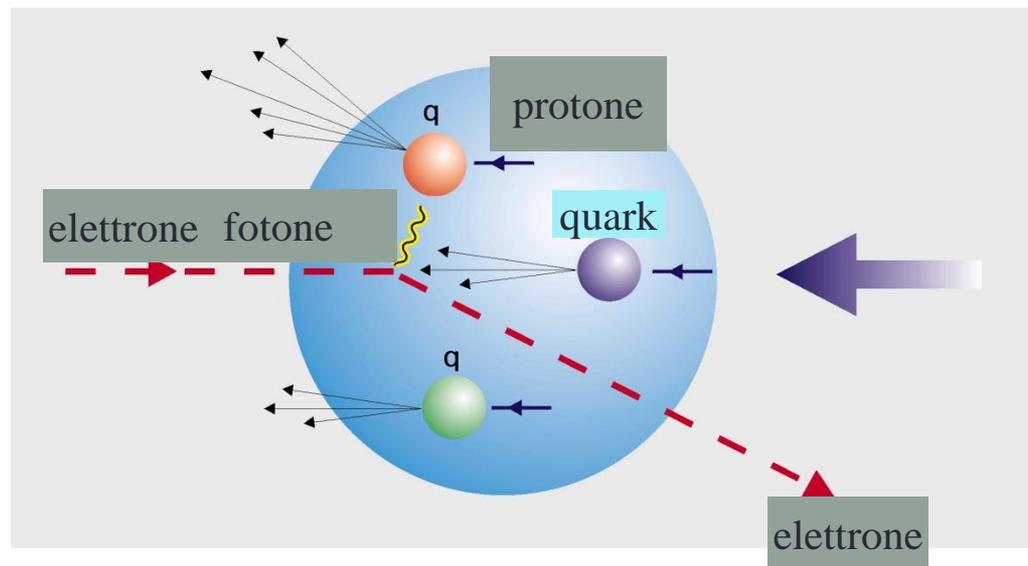
CDF/FNAL

Anche il protone e' un 'atomo'

Domanda: *il protone e' una particella elementare o composta?*

Metodo: collisioni ad alta energia fra elettroni e protoni

→ Una specie di TAC del protone



Si osservano spesso elettroni diffusi a grandi angoli

→ *Indicazione chiara di costituenti puntiformi: i quark*

Protoni e Neutroni hanno molti parenti

Studio dettagliato delle collisioni ad alta energia

Scoperta di moltissimi parenti di protone e neutrone:
Particelle che interagiscono *fortemente*

Due famiglie molto numerose:

Barioni (simili a protone e neutrone)

Mesoni (un po' diversi)

Chiamate collettivamente: *Adroni*

Lo zoo degli adroni

Centinaia di specie adroniche osservate in collisioni ad alta energia: situazione simile a quella incontrata per atomi e nuclei

→ *Indizi di una sottostruttura*

Un angolino di 'tavola periodica'...

	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$		$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$
$S = +1$		K^0	K^+	$S = 0$	Σ^-	Σ^0	Σ^+
$S = 0$	π^+	π^0, η	π^+	$S = -1$	Λ	Λ	Λ
$S = -1$	K^+	K^0		$S = -2$	Ξ^+	Ξ^0	
	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$	$Q = +2$			
$S = 0$	Δ^-	Δ^0	Δ^+	Δ^{++}			
$S = -1$	Σ^{*-}	Σ^{*0}	Σ^{*+}				
$S = -2$	Ξ^{*-}	Ξ^{*0}					
$S = -3$	Ω^-						

Ipotesi: Gli adroni sono fatti di *costituenti*, i *quark*

Quark

Che cosa sono questi *quark*?

Un enorme lavoro, sperimentale e teorico, porta a concludere che:

Ne esistono di 6 tipi, o flavors:

Up, Down, Charm, Strange, Top, Bottom

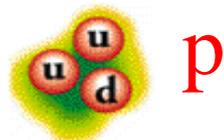
Sono puntiformi

Interagiscono fortemente fra loro

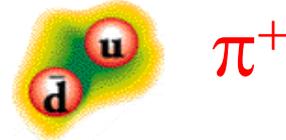
Non si osservano liberi

Si osservano sotto forma di stati legati, gli adroni appunto

Barioni: 3 quark



Mesoni: quark-antiquark



I leptoni, parenti dell'elettrone

Nel tempo, scoperta inattesa di 2 parenti dell'elettrone, "pesanti", carichi

Elettrone e

Muone μ

Tauone τ

nonche' di 3 neutrini, quasi privi di massa, scarichi

Neutrino elettronico ν_e

Neutrino muonico ν_μ

Neutrino tauonico ν_τ

Chiamati collettivamente *leptoni*:

non sentono l'interazione forte, solo quelle debole ed elettromagnetica

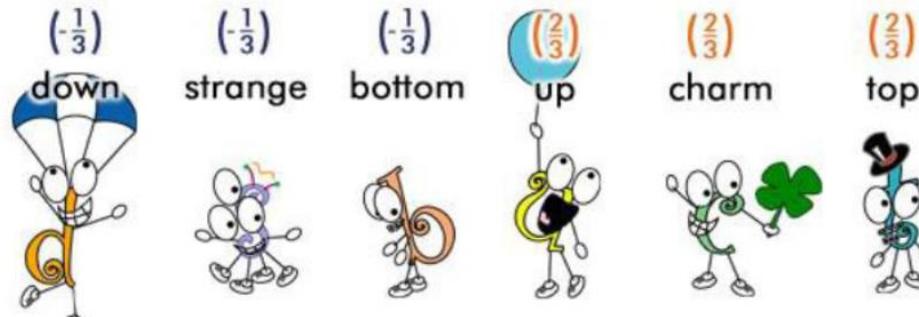
...I costituenti !

Particelle “prive di struttura”

6 leptoni

e^- elettrone	μ^- muone	τ^- tau
ν_e neutrino e	ν_μ neutrino μ	ν_τ neutrino τ

6 quark



Oltre alla carica elettrica (frazionaria!), ogni quark ha anche una carica di **colore**: nome fantasioso per una proprietà microscopica

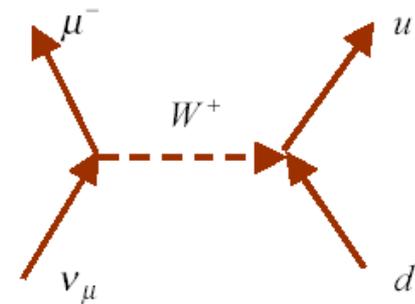
3 colori possibili per ogni quark, alla base dell'interazione forte



...Le interazioni !

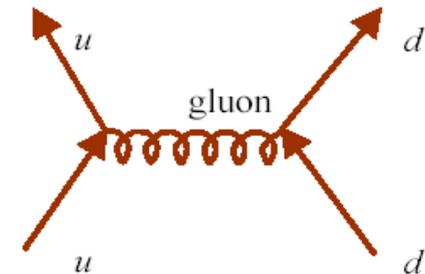
Interazioni elettromagnetica e debole: unificate ad alta energia nell' interazione elettrodebole, sentita da *quark e leptoni*

Avviene tramite lo scambio di 4
particelle mediatrici (*fotone, W^\pm, Z^0*)
 W^\pm, Z^0 :parenti "pesanti" del fotone



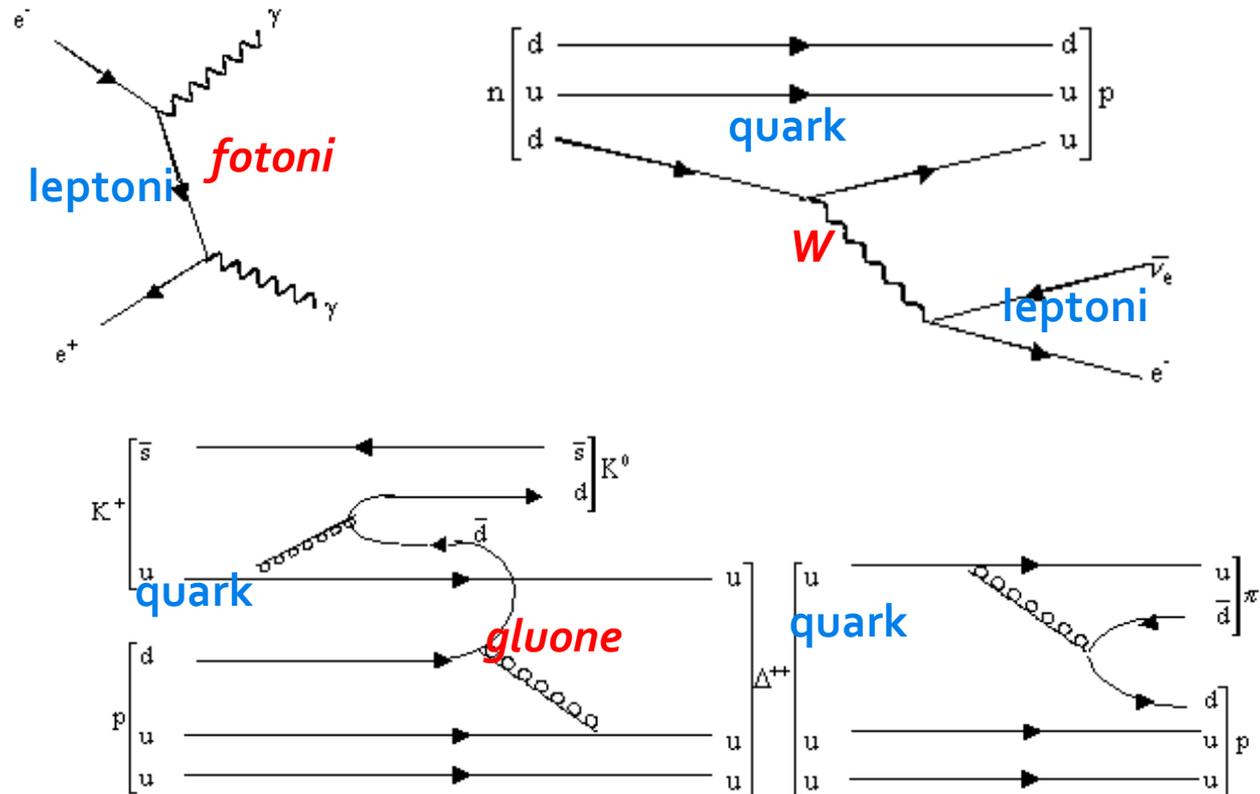
Interazione di colore: sentita dai soli *quark*

Avviene con lo scambio di 8
particelle mediatrici (*gluoni*)
Quark e gluoni apparentemente
sempre confinati dentro gli adroni



Il Modello Standard a fumetti

Diagrammi di Feynman per alcuni processi elementari



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

Dancing all the way

Evoluzione dell'universo: continuamente regolata da *emissione* e *assorbimento* di particelle mediatrici da parte di leptoni e quark

Danza di costituenti e interazioni, costantemente in moto

Quali sono le *regole* che governano questi processi elementari?

Come e' cominciato, e come finira' tutto questo?

La fisica delle particelle incontra la cosmologia

L'Universo in una slide

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

100÷200 miliardi di galassie, ognuna con 100÷400 miliardi di stelle

Radiazione fossile di fondo

Neutrini

Raggi cosmici

(E, probabilmente, altro ancora...)

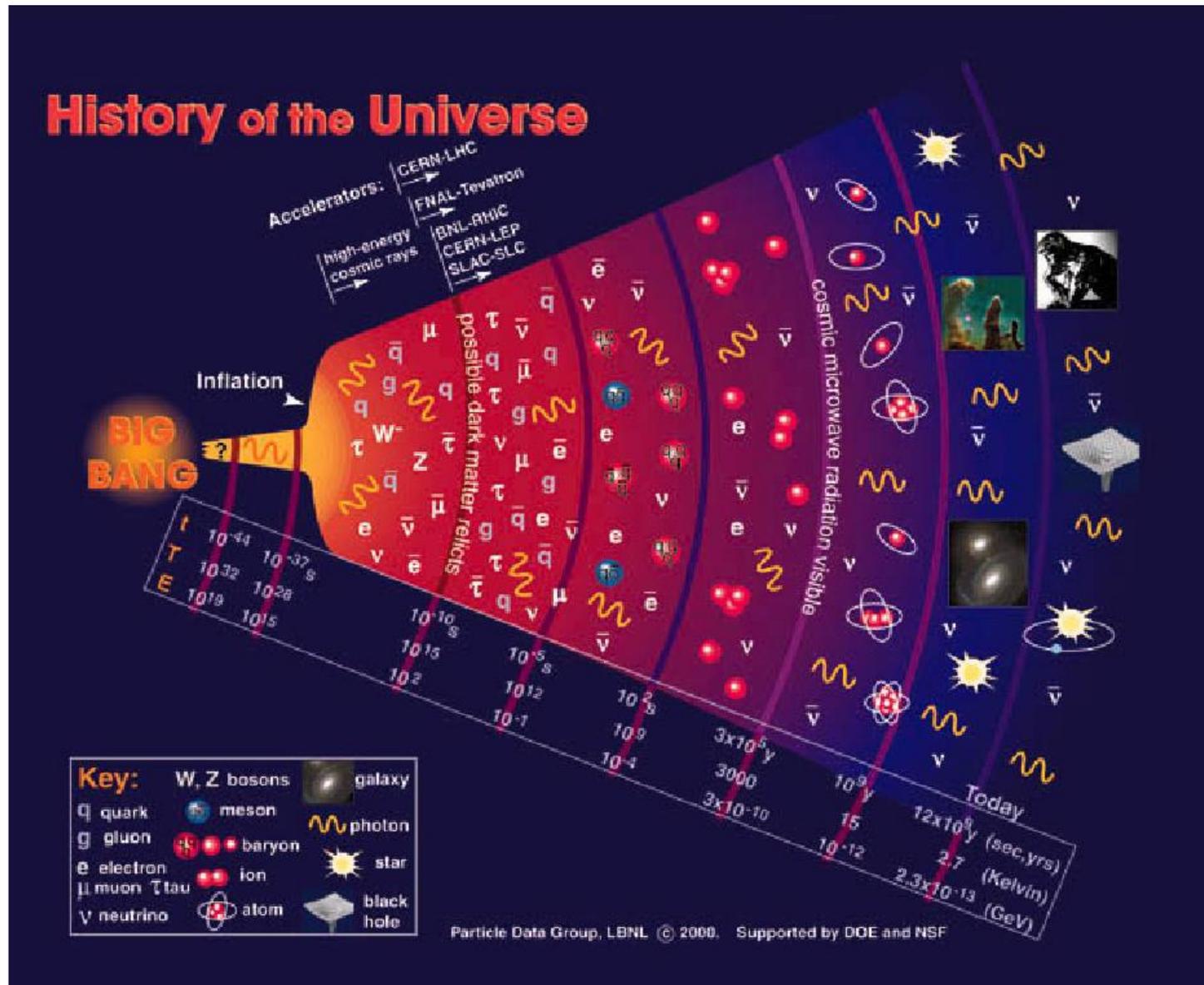
Nel modello cosmologico con maggiori conferme osservative:

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

Non un'esplosione convenzionale:

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

Il Big Bang in una slide

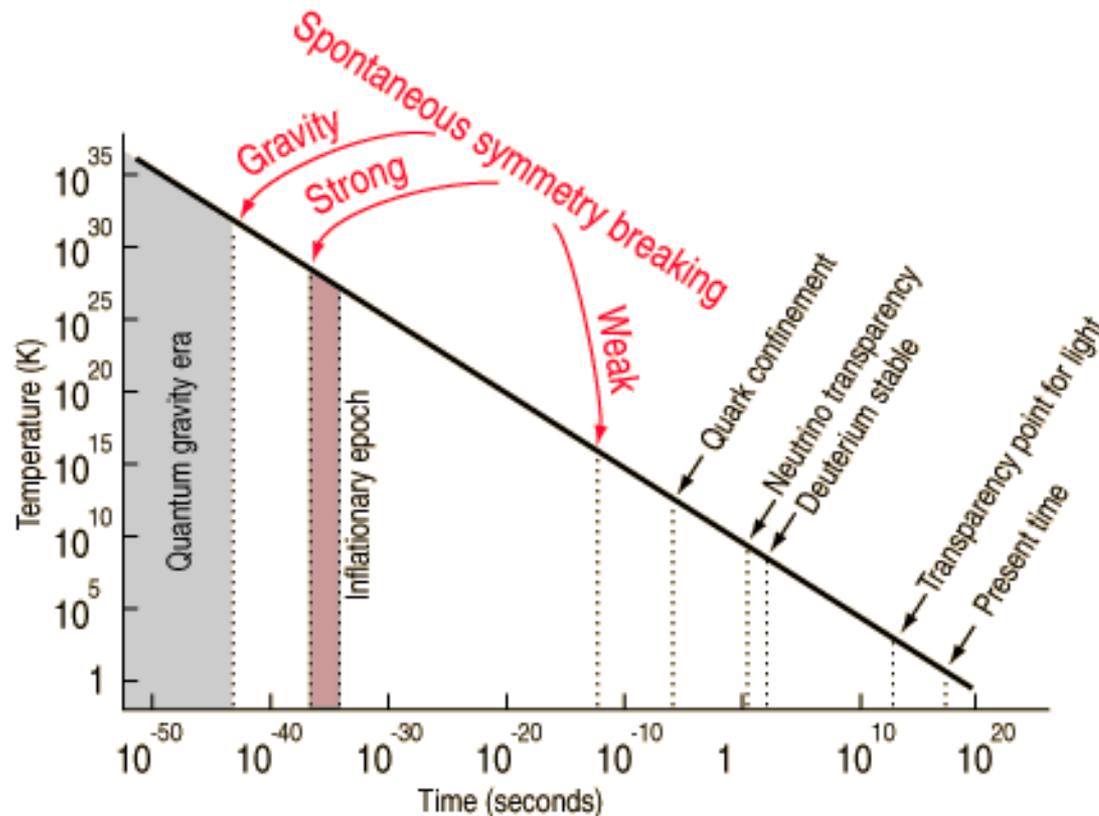


Cosmologia particellare

Per capire i primi minuti di vita dell'Universo:

Modello Standard !

Processi elementari fra costituenti (ad altissima energia) determinano l'evoluzione termica del fireball iniziale



Dal caldo al freddo, e senza antimateria

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

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 circa 13,7 miliardi di anni

Punto interessante :

Il Big Bang ha prodotto tanta materia quanta antimateria
Ma non abbiamo evidenza di antimateria nell'universo

→Dove e' finita l'antimateria?

Le domande difficili

Le particelle mediatrici, come il fotone e i bosoni intermedi W^\pm, Z^0 appartengono a una stessa famiglia.

Perche' il fotone e' privo di massa, mentre W^\pm, Z^0 sono cosi' pesanti?

Qual e', in generale, l'origine della massa? Esiste la *particella di Higgs*?

E' vero che quark e gluoni sono *sempre confinati*?

C'e' qualcosa di nuovo, oltre il Modello Standard?

Come sta il Modello Standard?

Bene, grazie!

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!*

Ma questo non basta:

Fino al 2012 mancava un passo-chiave per convalidarlo definitivamente, perche' fino ad allora non si era chiarita l'origine delle *masse* dei costituenti

Un passo indietro...

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, ma non interamente

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

Una specie di super-legge fisica che determina come possono essere fatte tutte le normali leggi: la Costituzione dell'Universo

...e due avanti

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

Anzi, dicono i teorici: *Niente e' calcolabile nel Modello Standard se non sono rispettate certe leggi di simmetria*

Problema:

Alcune delle leggi di simmetria di cui sopra valgono solo se tutte le particelle fondamentali, costituenti e quanti dei campi di forza, sono prive di massa!

Massa zero

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

Higgs

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

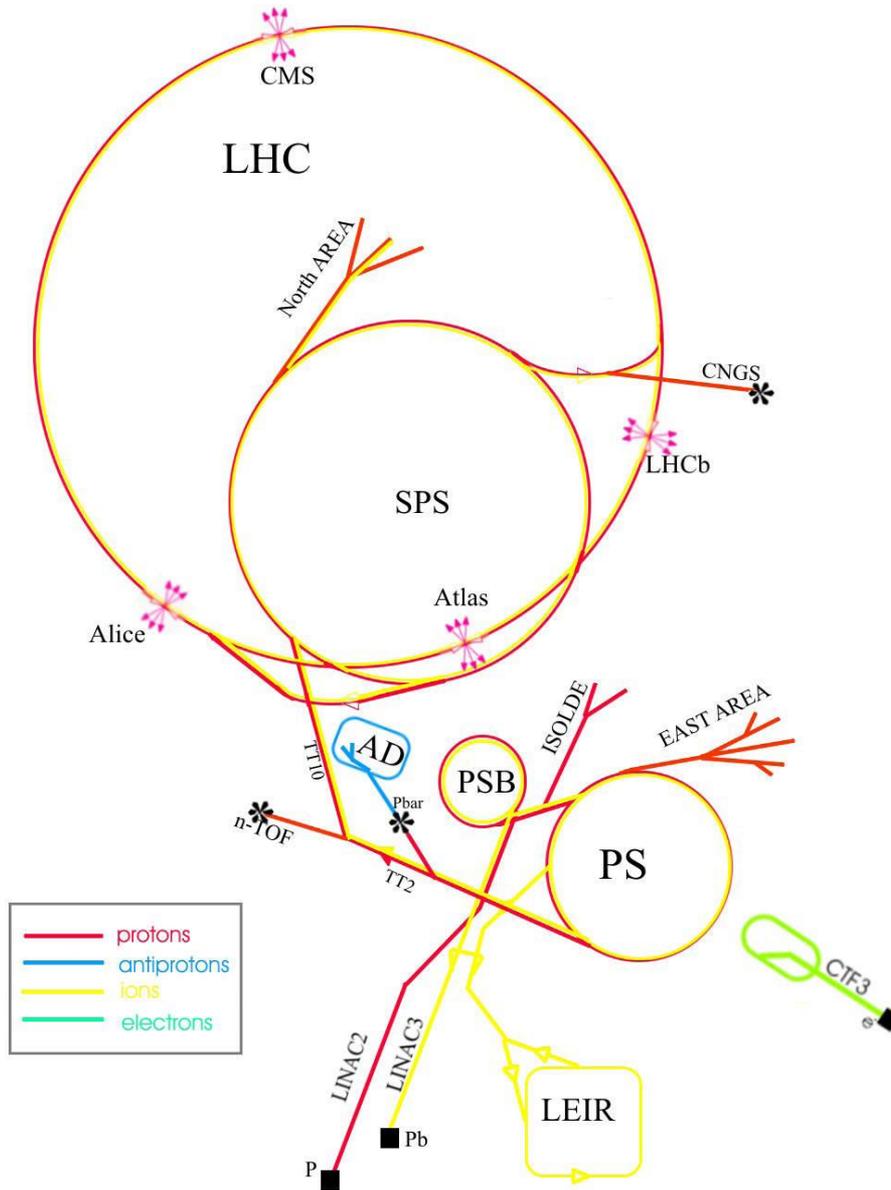
In sintesi:

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

Diverso dagli altri: non un campo mediatore di una nuova forza (tuttavia contribuisce – poco - alla interazione elettrodebole)

Attribuisce massa a tutti i costituenti e alcuni mediatori

Gli acceleratori del CERN



Oggi:

Accelerazione di protoni,
(antiprotoni), ioni pesanti

Processi di accelerazione per
LHC: sequenza di diverse
macchine

LHC:

Energia massima 6,5+6,5TeV

Rateo di collisioni

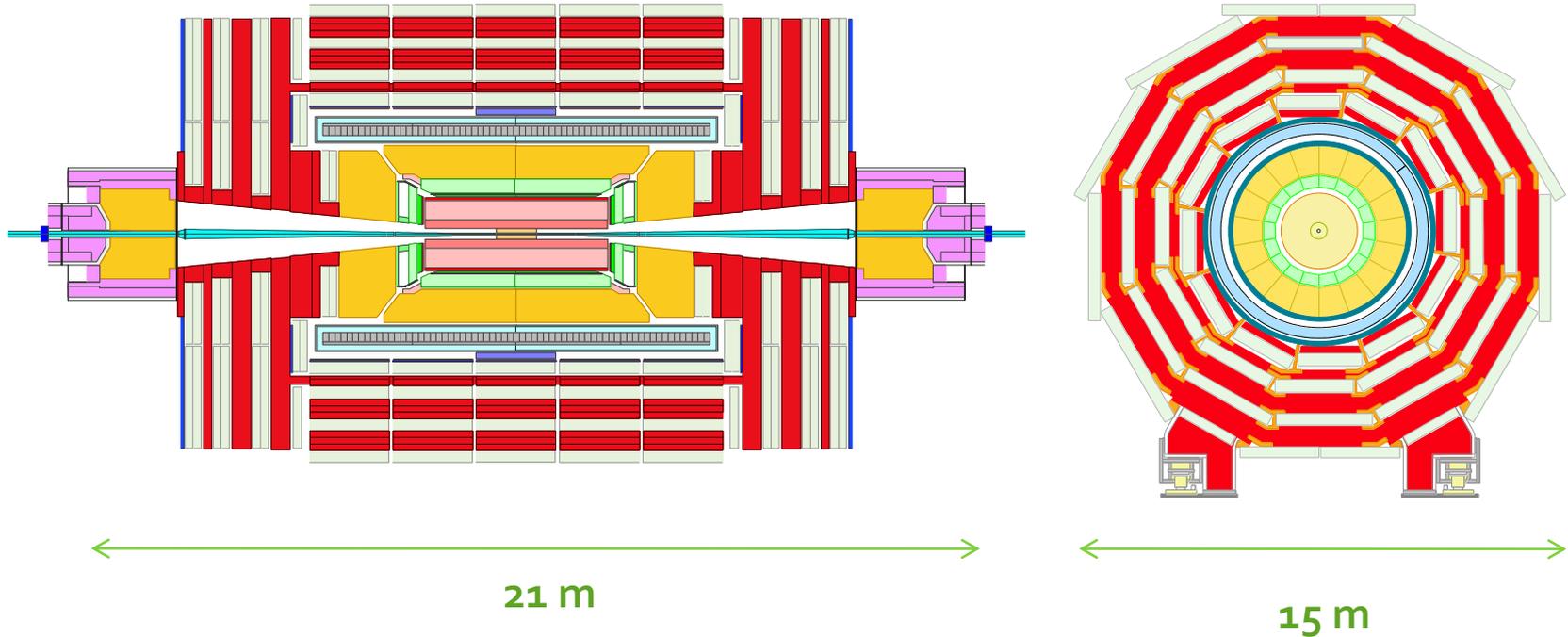
40 milioni di collisioni al
secondo

II CERN



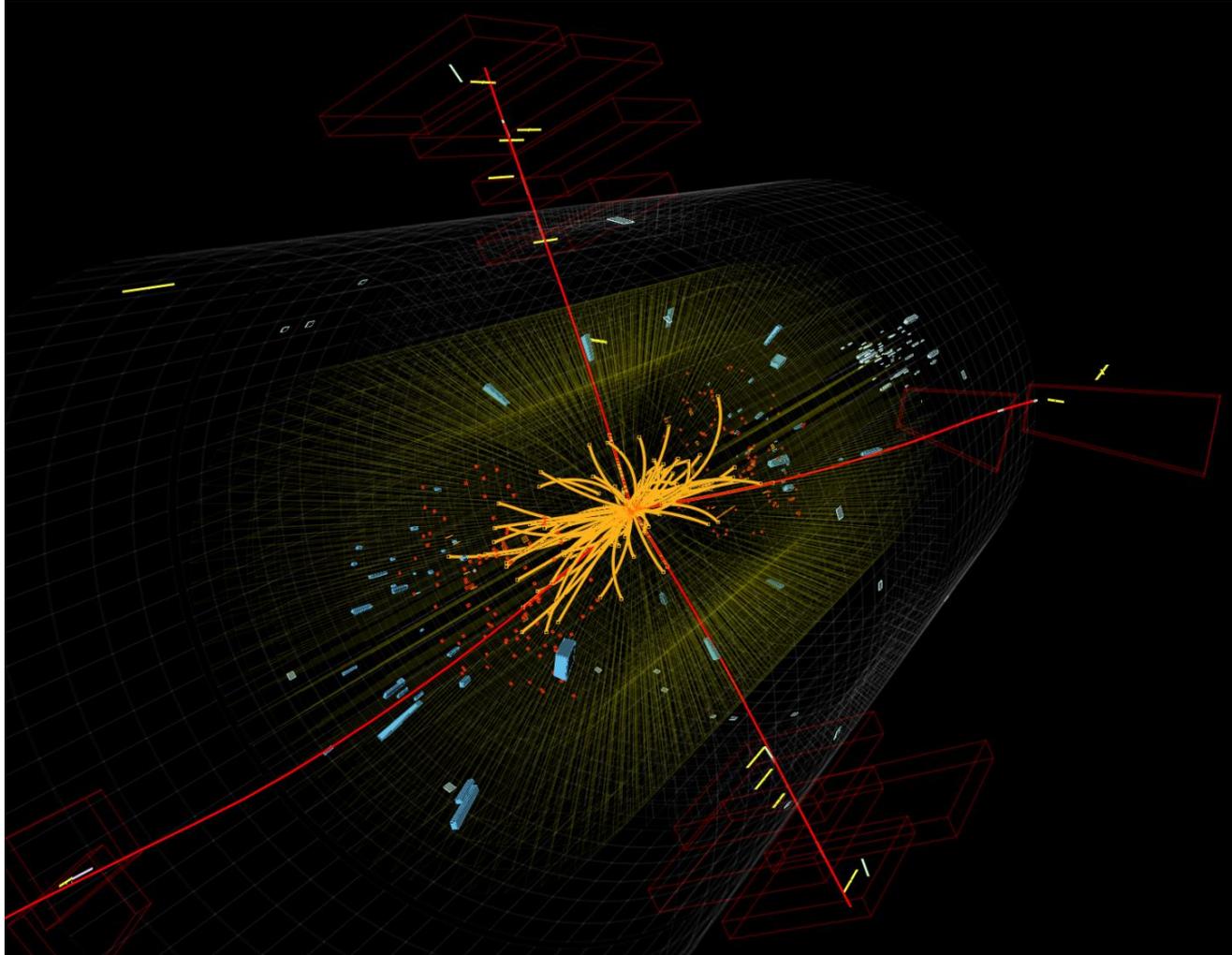
CERN, Ginevra, Svizzera
Acc. circolari
SPS (7 km), LEP/LHC (27 km)

Compact Muon Solenoid @ LHC...



2000 ricercatori!
(fra cui una 30ina di torinesi)
12000 tonnellate
Decine di milioni di sensori
Migliaia di computer

... la particella di Dio esiste!



CMS: Higgs in 4 muoni

Finale, in guisa di morale

Lo studio del mondo naturale e' stata la forza trainante che ha cambiato il modo di vivere e forse decidera' il destino dell'umanita'

Ci sono molti interessi pratici e concreti a motivare lo studio della natura, e anche l'investimento di risorse che oggi esso richiede

Ma non e' questa la ragione ultima per cui la studiamo, e alcuni lo hanno capito gia' molto, molto tempo fa

Felix qui potuit rerum cognoscere causas



(Verg., Georg., II, 530)