

LA COSTRUZIONE DEL MODELLO STANDARD

Scuola di Fisica

Torino, 5 febbraio 2014

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

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 là fuori?

All'inizio la fisica è essenzialmente *cosmologia*

*Come è 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

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

...

L'universo: materia ed energia

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 come sono fatti gli oggetti

Che cos'è la materia?

Che cosa rende gli oggetti solidi, liquidi, gassosi?

Come si trasforma la materia?

La struttura della materia

Origini nella chimica:

Elementi, composti e leggi empiriche

Nel tempo, chiarificazione: esistenza degli elementi chimici

Sostanze non ulteriormente scomponibili in altre più elementari per via chimica

Idea fondamentale: Atomi

Il sistema periodico

Sistematicita' nelle proprieta' chimiche degli elementi...

Periodic Table
of the Elements

The periodic table is color-coded by groups: IA (green), IIA (orange), IIIA (purple), IVA (green), VA (green), VIA (green), VIIA (orange), VIII (blue), IX (blue), X (blue), XI (blue), XII (blue), XIII (purple), XIV (purple), XV (purple), XVI (purple), XVII (purple), XVIII (orange), and O (orange). The lanthanide and actinide series are shown in blue at the bottom.

1	2																	10
3	4																	10
11	12																	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113						
* Lanthanide Series		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
+ Actinide Series		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			

...Somiglianze e regolarita' nelle proprieta' 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 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, ...

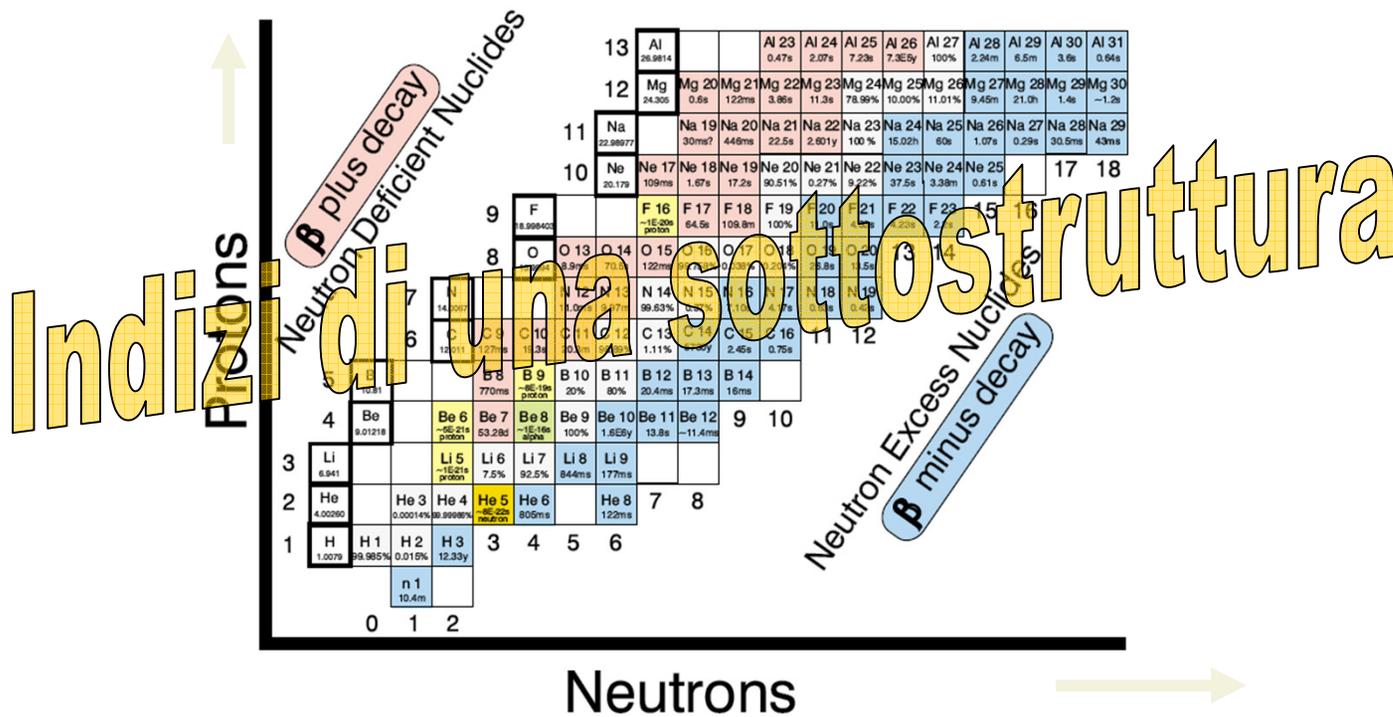
Piu' complicate (o piu' semplici ?) di quella gravitazionale

La storia si ripete

Nuclei: un altro sistema periodico

Fino a ≈ 100

CHART OF THE NUCLIDES



Fino a ≈ 150

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

Radioattivita'

Scoperta dell'emissione di radiazione da parte di certi elementi

In seguito, messa in relazione con la *instabilita' nucleare*: tendenza osservata di diverse specie nucleari a *disintegrarsi spontaneamente* in frammenti piu' leggeri, con varie modalita'

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*

Come si fa? Come sempre in fisica:

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

Due conseguenze importanti:

Equivalenza fra massa ed energia

- Possibilita' di trasformare l'una nell'altra
- Possibilita' di processi in cui le particelle si creano e distruggono

Esistenza delle antiparticelle

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

Antimateria

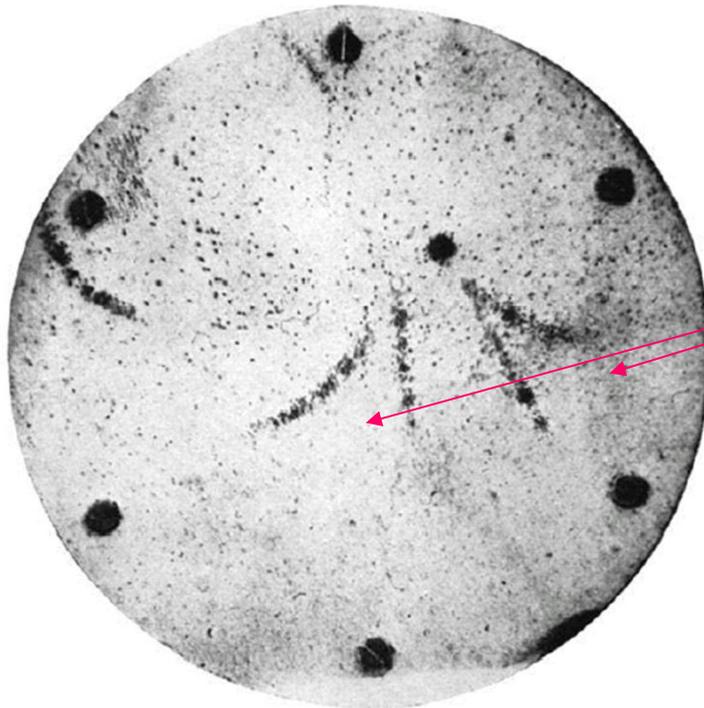


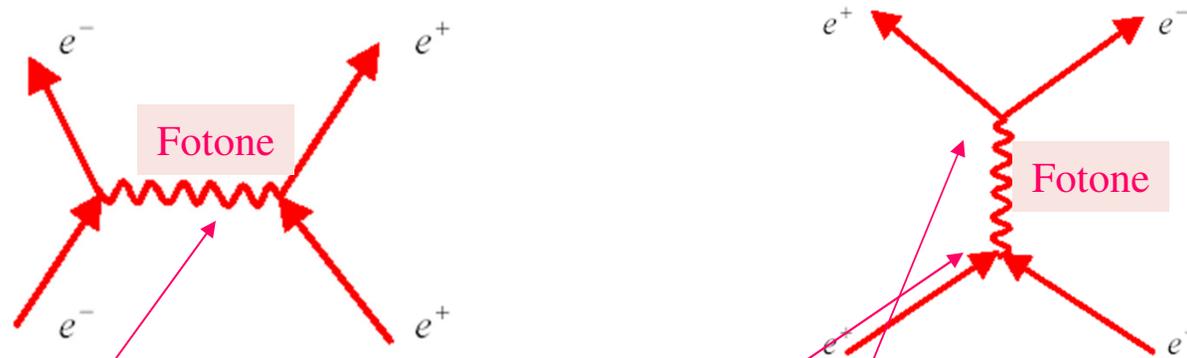
Foto camera a nebbia
(1932)

2 esempi di *produzione
di coppie*

Materializzazione di
raggi γ (radiazione
elettromagnetica di alta
energia) in una coppia
elettrone-positrone

L'interazione elettromagnetica

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



Molti processi:
collisione, annichilazione, materializzazione,...

Come funziona?

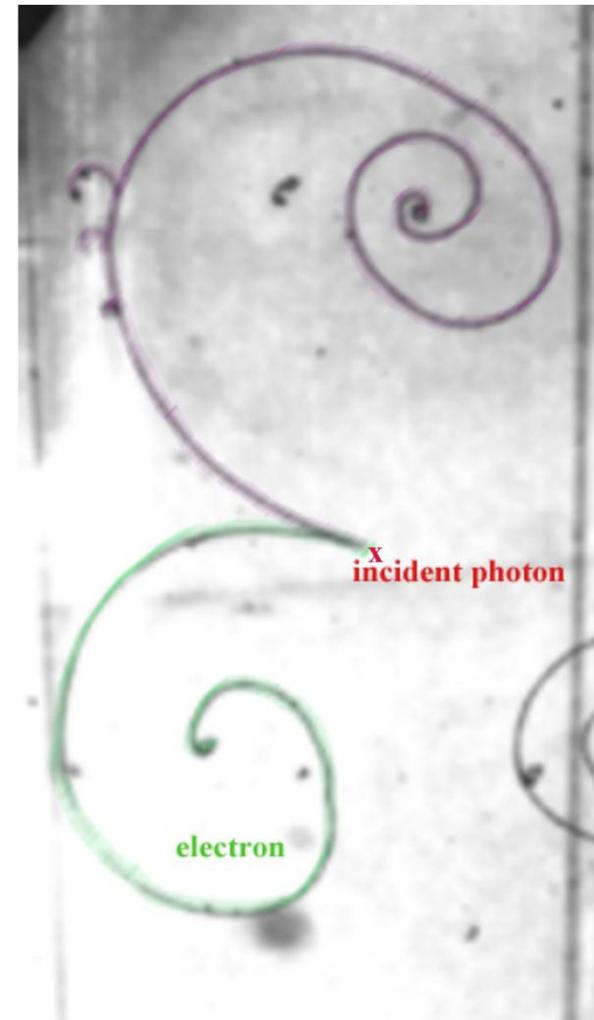
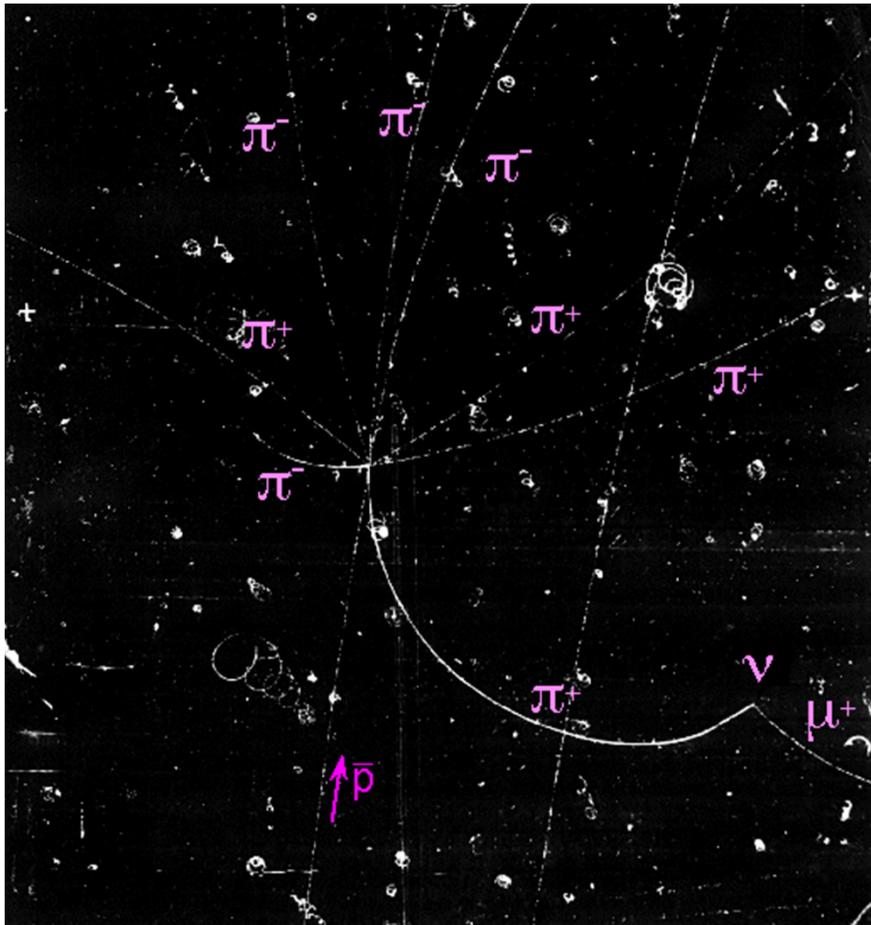
Versione quantistica delle vecchie idee classiche

Se 'scuotete' una particella carica, essa emettera' onde elettromagnetiche = quanti di luce

Le onde elettromagnetiche = quanti di luce 'scuotono' le particelle cariche che incontrano

E cosi' via...

Conversione massa \leftrightarrow energia



Onde e dettagli geometrici

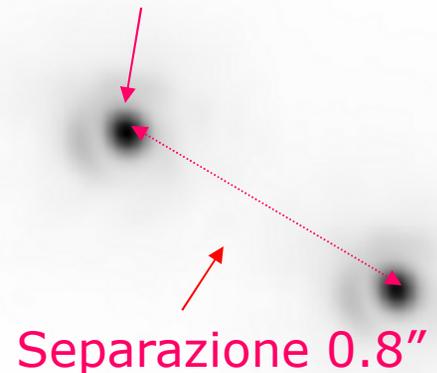
Natura ondulatoria della luce: Definisce il dettaglio minimo che si puo' osservare

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

→ *Quando si ha a che fare con fenomeni ondulatori, il dettaglio minimo che si puo' osservare ha dimensione $\approx \lambda$*

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

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

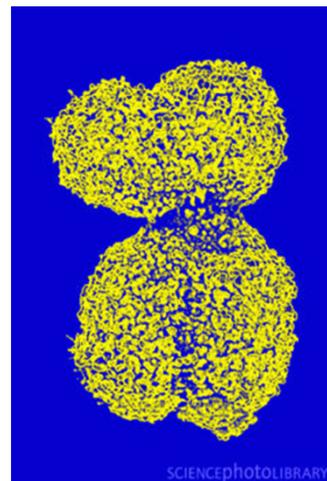


Il disco di Airy *non* e' la dimensione della stella, ma un effetto ottico

Rivelare per 'vedere'

Microscopio elettronico: invece di 'sparare luce' sull'oggetto, spariamo elettroni veloci
Funziona perche' anche gli elettroni sono onde!
Piu' sono veloci, piu' piccola e' λ

Immagine ricostruita con tecniche piuttosto diverse da quelle di uno ottico: rivelazione *elettronica* degli elettroni diffusi dall'oggetto

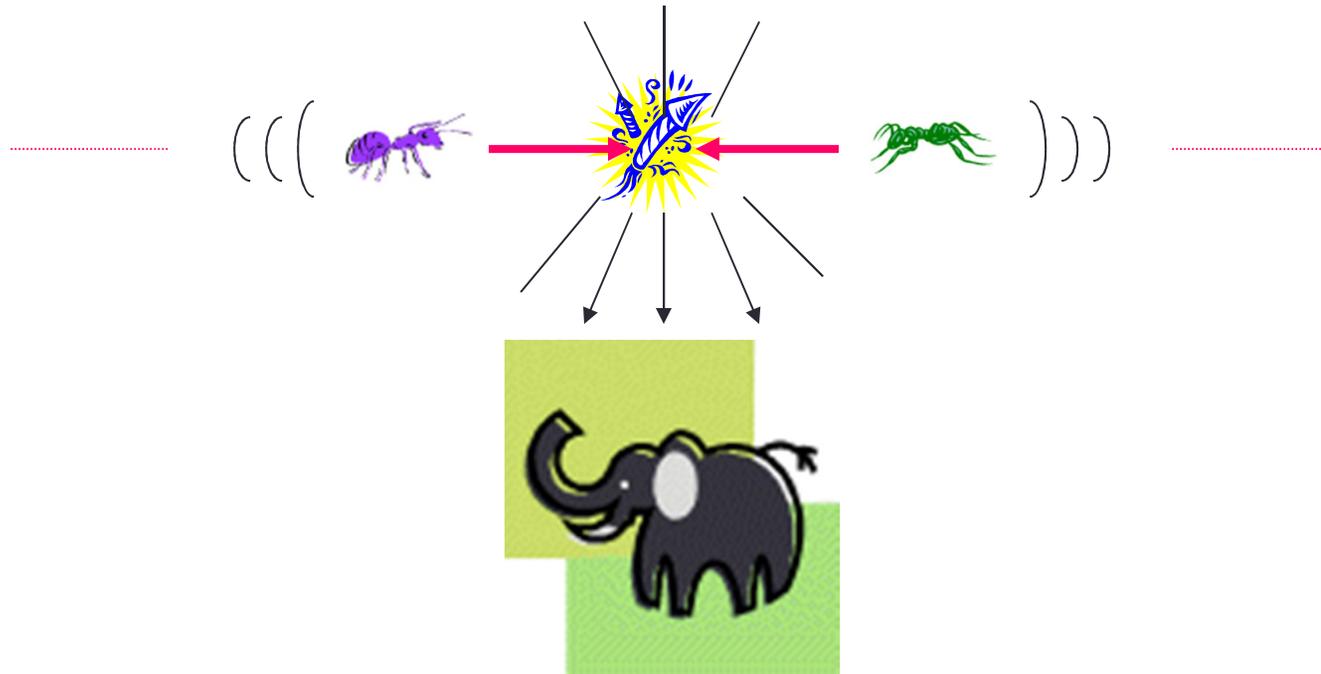


~2 μm

Cromosoma umano x 20000

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:

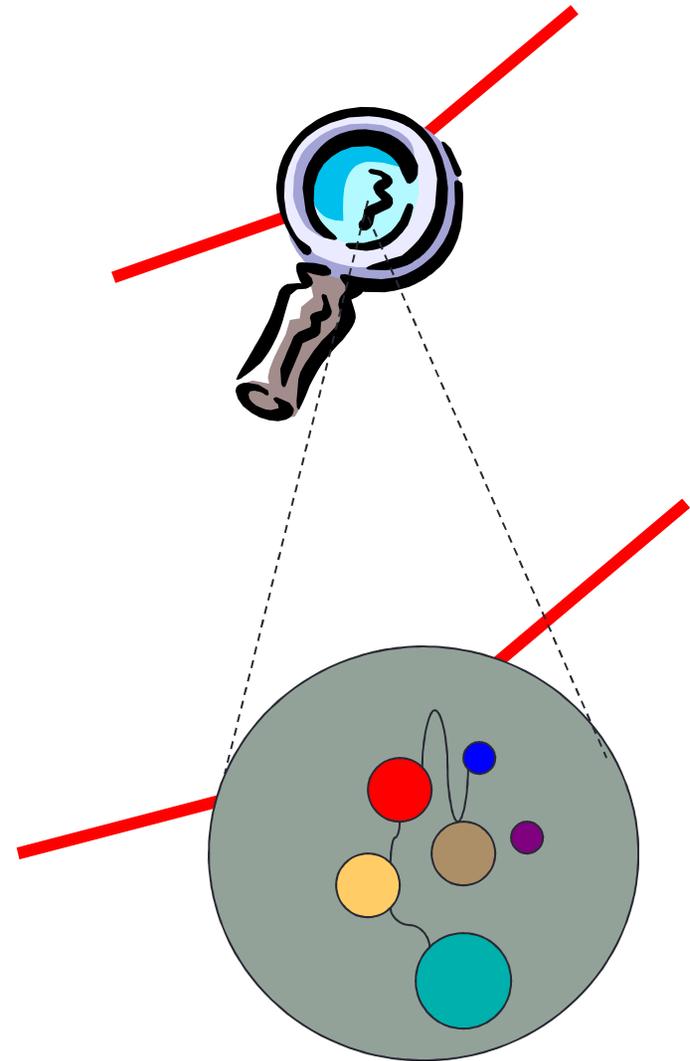


Proiettili e sonde

Proiettili di energia elevata hanno velocità elevata

Quindi, secondo la meccanica quantistica, hanno lunghezza d'onda piccola

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

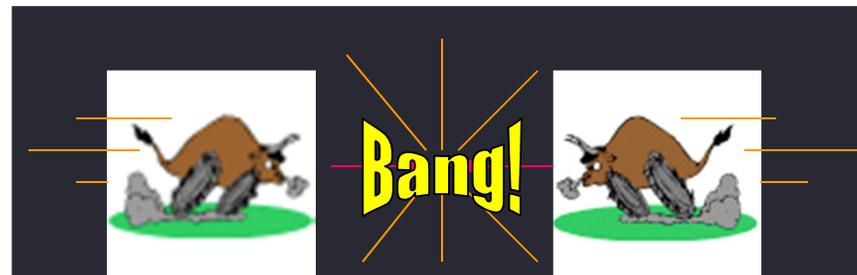


Acceleratori

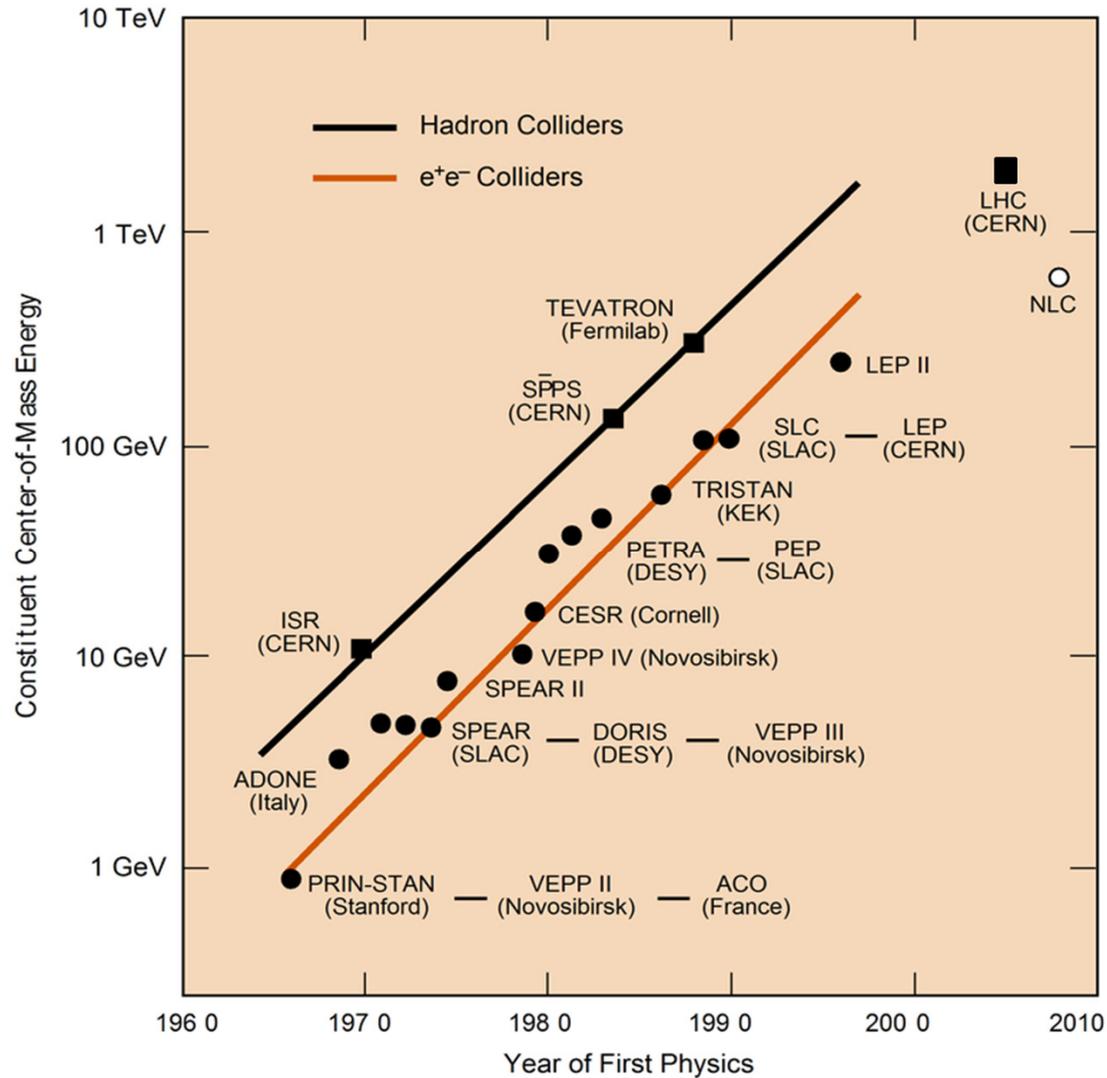
Un acceleratore e' in pratica un

Super Microscopio

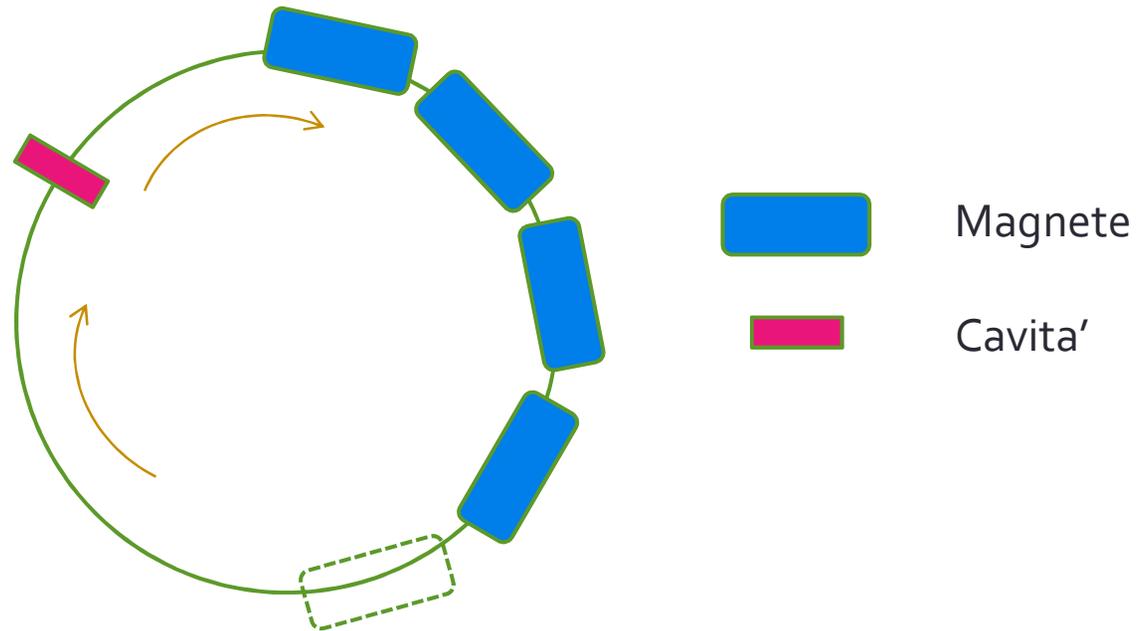
Condizioni preferite: collisioni *testa a testa* fra coppie di particelle in movimento (piu' energia che puo' trasformarsi in massa)



Super-microscopi: Colliders



Come accelerare

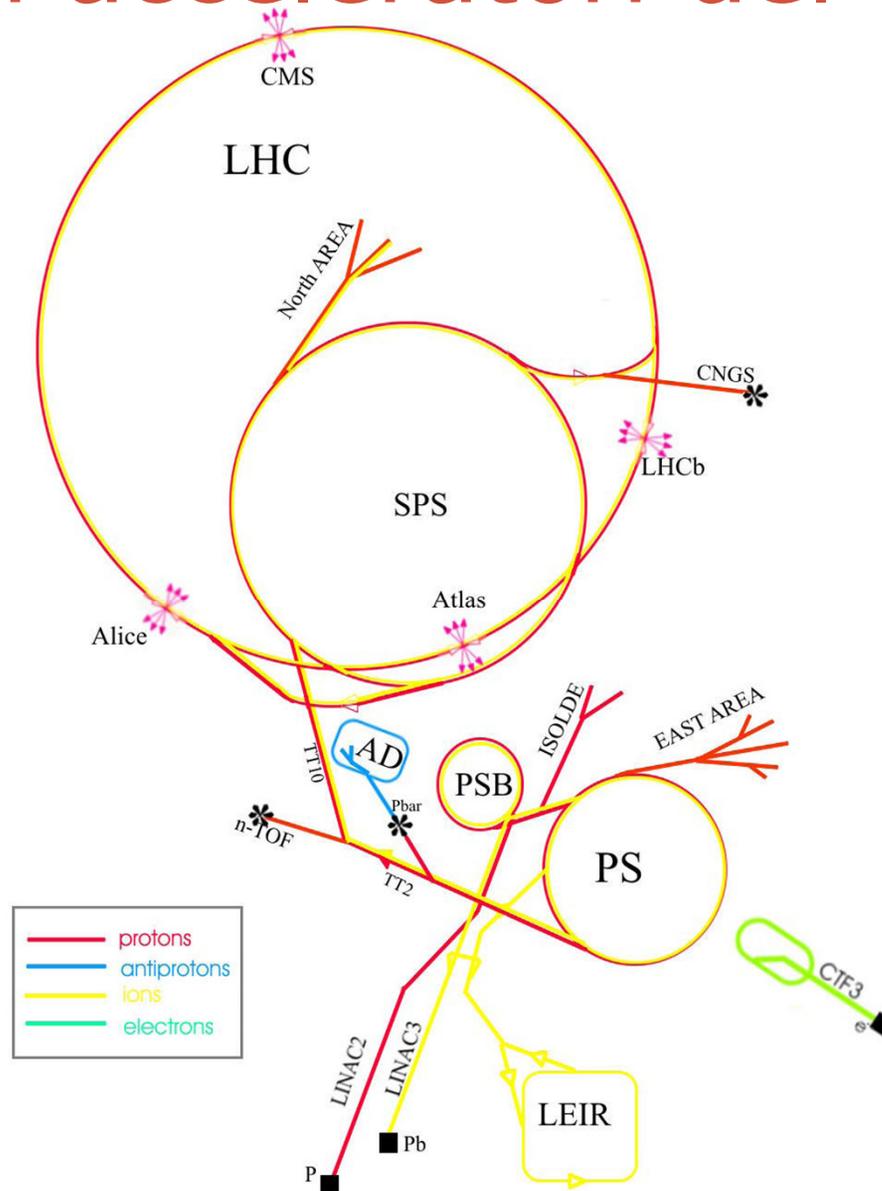


Campi magnetici: curvano la traiettoria delle particelle cariche in movimento

→ orbite chiuse \sim circonferenze

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

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)

II CERN



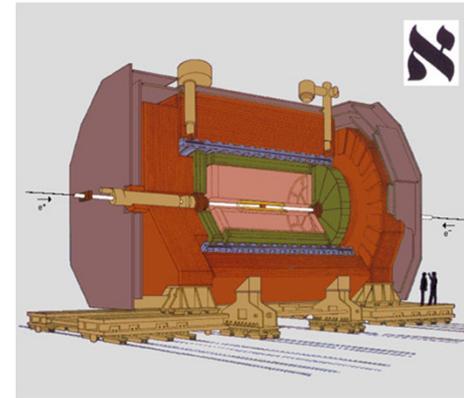
CERN, Ginevra, Svizzera
Acc. circolari
SPS (7 km), LEP/LHC (27 km)

Rivelatori di particelle

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

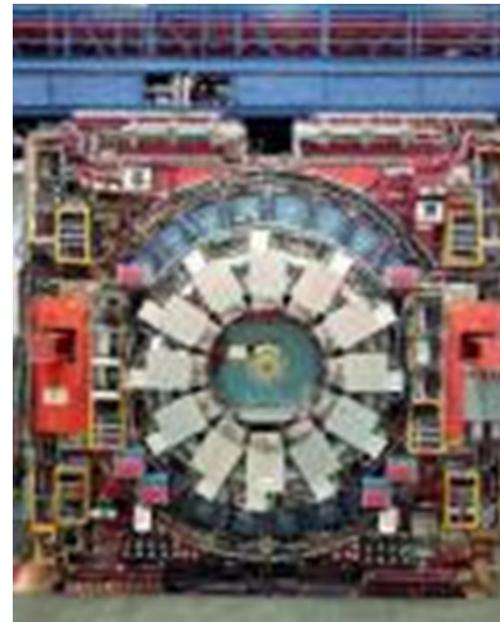
Elettronica, ottica, meccanica di precisione

Migliaia di computer



The ALEPH Detector

ALEPH/CERN

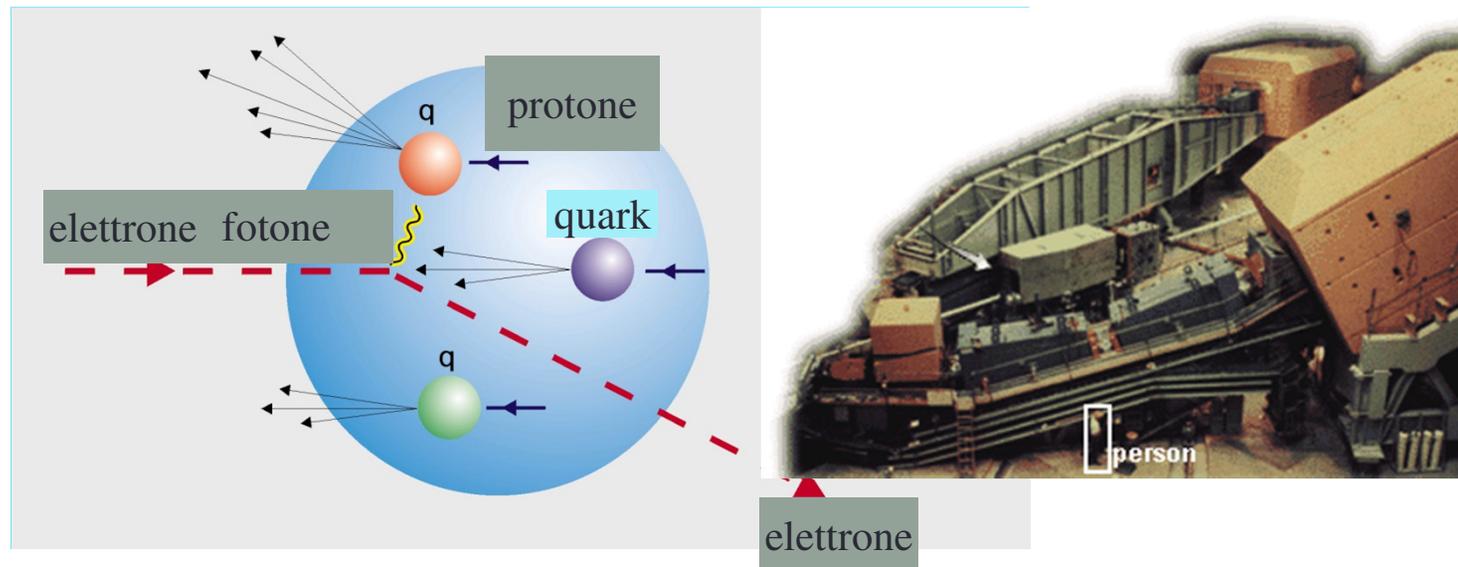


CDF/FNAL

Anche il protone e' un 'atomo'

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

Metodo: collisioni ad alta energia fra elettroni e protoni



Si osservano spesso elettroni diffusi a grandi angoli
→ *Indicazione chiara di costituenti puntiformi*

Lo zoo delle particelle

Studio dettagliato delle collisioni ad alta energia

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*

Zoologia applicata

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

Ipotesi: Gli adroni sono fatti di *costituenti*

Quark

Che cosa sono questi costituenti? I *quark*
Un enorme lavoro, sperimentale e teorico, porta
a concludere che:

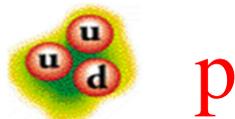
Sono puntiformi

Interagiscono fortemente

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

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



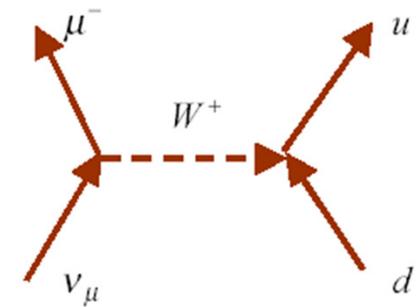
Ogni quark ha anche una carica di **colore**



Le interazioni

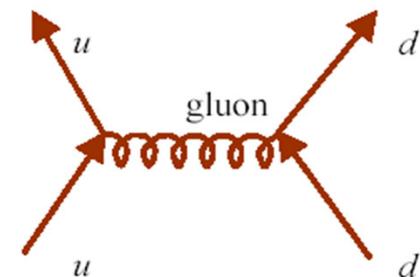
Interazioni elettromagnetica e debole: unificate ad alta energia nell' interazione elettrodebole, sentita da *quark e leptoni*

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



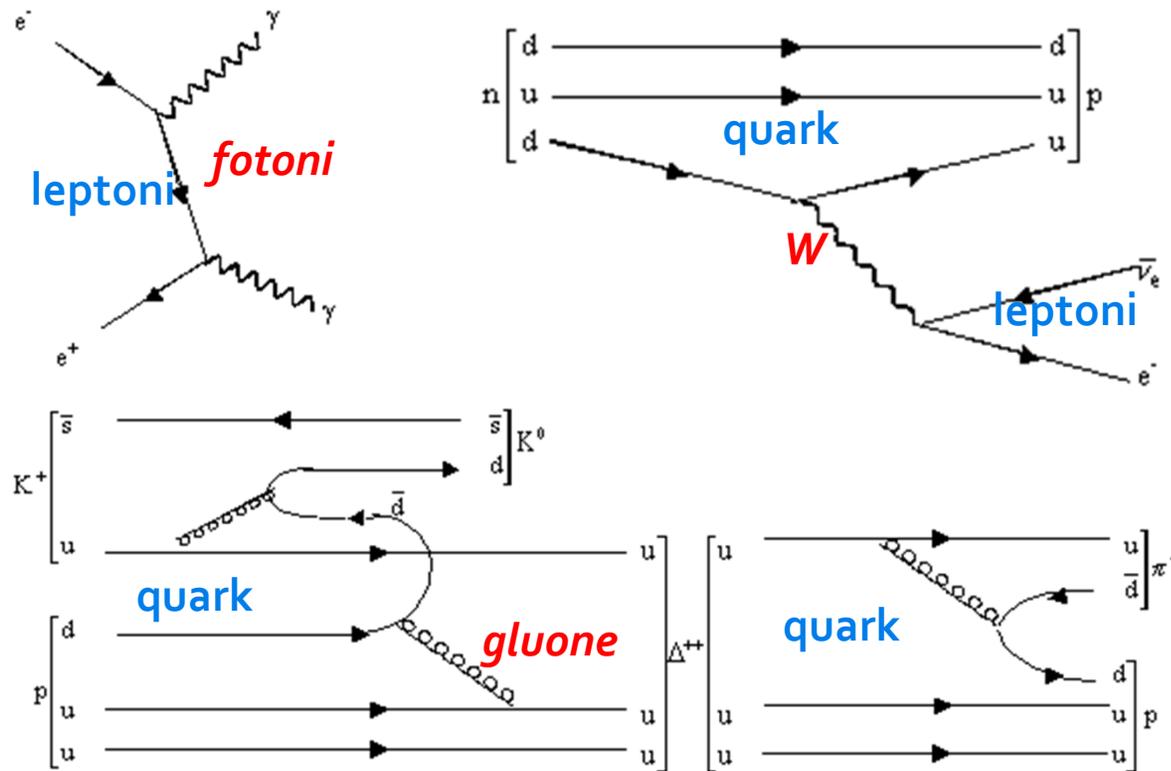
Interazione di colore: sentita dai soli *quark*

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 reazioni fra particelle elementari



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

Dancing all the way

Emissione e assorbimento di particelle mediatrici da parte di leptoni e quark

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

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

La fisica delle particelle incontra la cosmologia

Le domande difficili

Le particelle mediatrici, come il fotone e i bosoni intermedi W^\pm, Z^0 appartengono alla 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?

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:

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

Simmetrie

Come sono fatte le interazioni fondamentali?

Pur rispettando il principio di relativita' e le leggi della meccanica quantistica, le possibilita' restano molte

Osservazioni sperimentali: delimitano il campo delle possibilita', ma non interamente

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

Un problemino da niente

→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:

Le 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

Il campo di Higgs

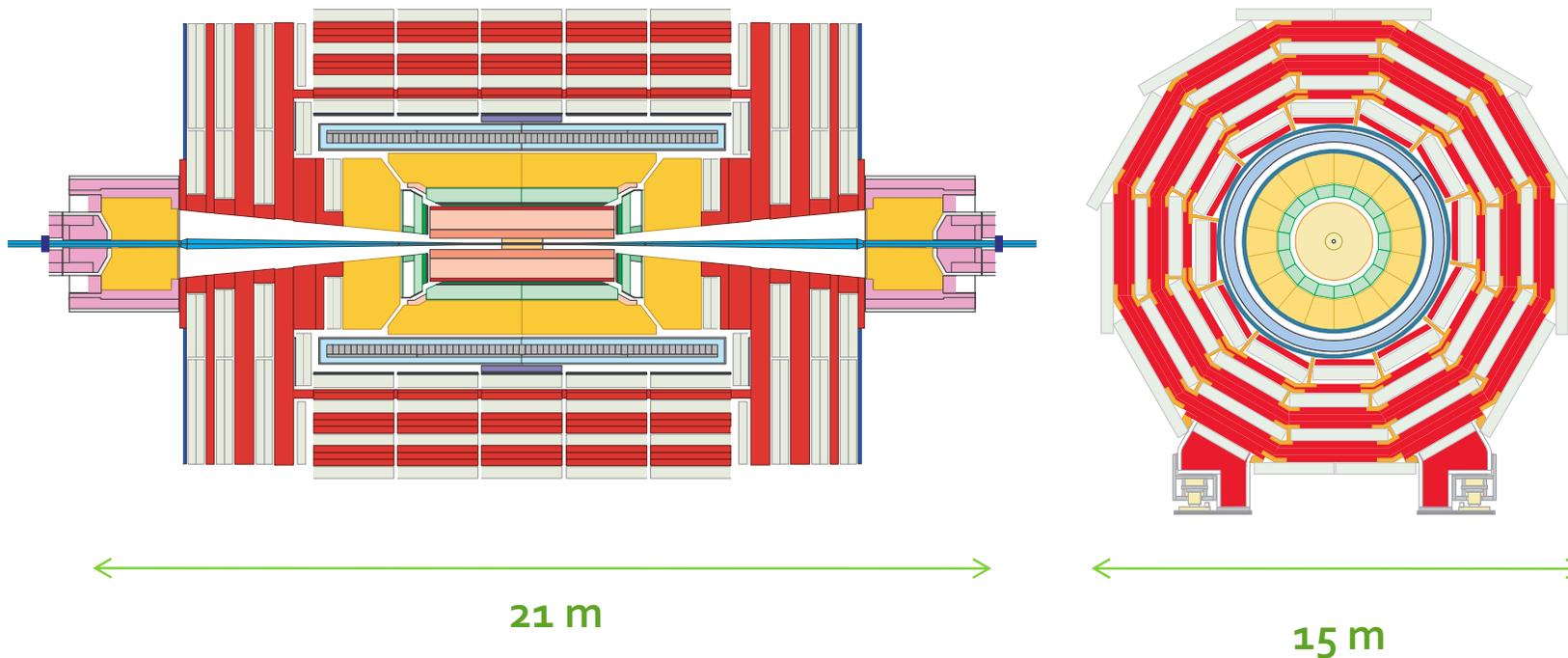
Diverso dagli altri: non un campo mediatore
Attribuisce massa a tutti i costituenti e alcuni mediatori

Analogia: effetto Meissner nei superconduttori
(origine puramente elettromagnetica)

Formazione di 'coppie di Cooper' – Stati legati $e-e$
dovuti a interazione elettrone-reticolo cristallino
→ Quanti del 'campo di Higgs' della superconduttività
→ Il fotone ha una 'massa efficace' nel superconduttore
→ Campo magnetico non penetra

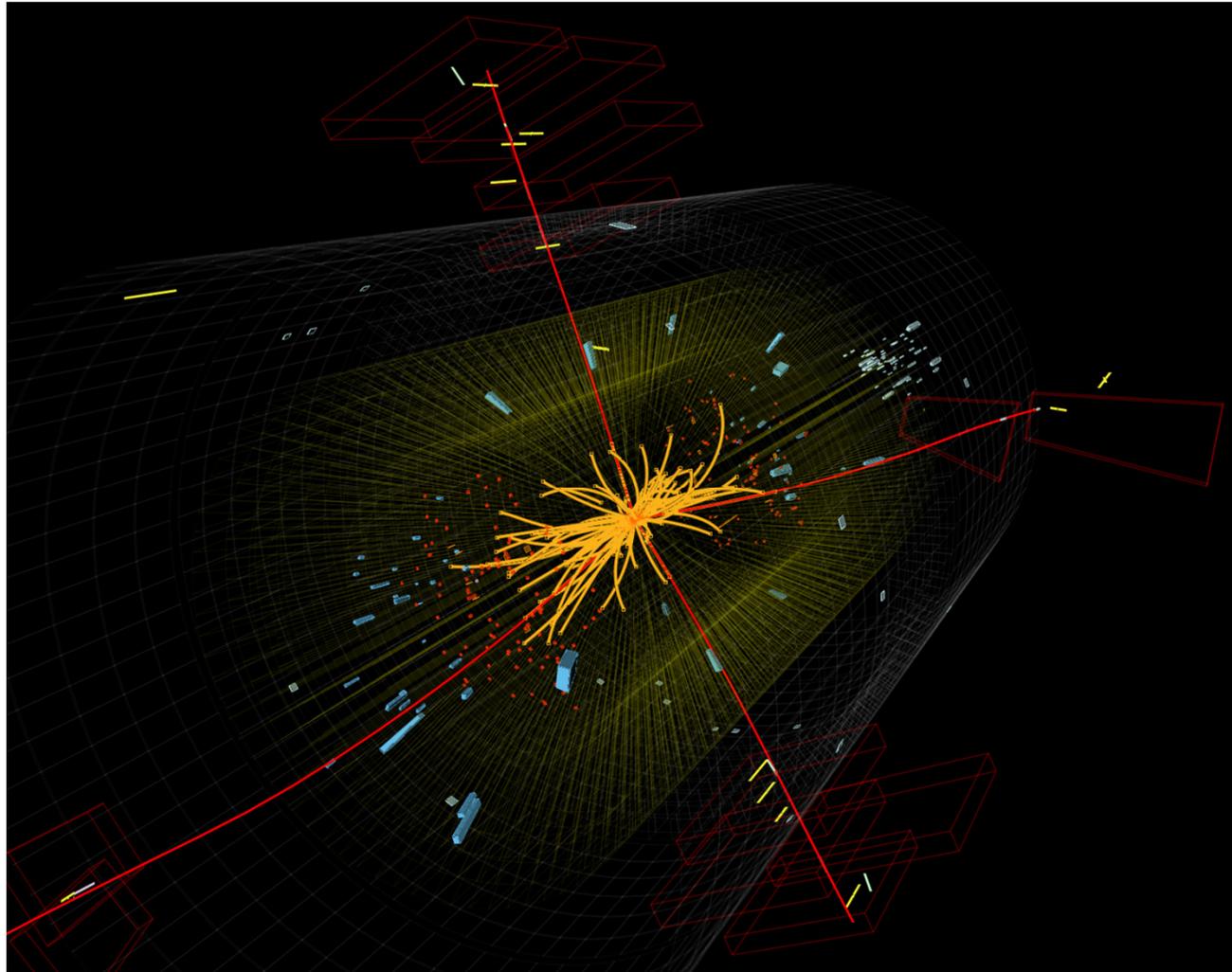
Nel MS il campo di Higgs non è fatto di coppie di Cooper, ma il risultato è lo stesso

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