



Le particelle elementari

Masterclass Europea

Fisica delle Particelle Elementari

Students' Day – Torino, 18 marzo 2009



Fisica e realta'

Per quel che possiamo dire, 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*



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



La fisica di Newton

Proprieta' del sistema solare (orbite di pianeti, satelliti comete,...) ben comprese in termini delle masse dei "costituenti" e della legge di gravitazione universale

Potere post-dittivo: ottima consistenza fra misure e calcoli

(Es. estrema accuratezza nella previsione delle eclissi, fino allora ottenuta per via esclusivamente empirica)

Potere pre-dittivo: previsione di fenomeni nuovi

(Es. scoperta di Nettuno, avvenuta sulla base delle anomalie osservate nell'orbita di Urano)



Un'interazione fondamentale

Idea estremamente unificante:

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

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...



La gravitazione oggi

Interazione fondamentale ben conosciuta a livello macroscopico, anche nella versione di Einstein: in ottimo accordo con molte verifiche sperimentali

Fino ad oggi, tuttavia, impossibile costruirne una versione microscopica che incorpori i principi della meccanica quantistica

Poco rilevante per le particelle elementari ?



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

Oggi sappiamo che le due curiosità sono in realtà una sola: le leggi fisiche che determinano la struttura della materia determinano anche quella dell'universo



La struttura della materia

Origini nella chimica: Dalton, Avogadro...
Elementi, composti e leggi empiriche

Esempio: Legge delle proporzioni multiple e definite
(Dalton)

Se due elementi formano piu' di un composto, i rapporti fra le quantita' dell'uno che si combinano con una quantita' fissa dell'altro sono numeri interi



Molecole

La legge di Dalton conduce all'idea di *molecola*

Avogadro, 1811:

"La parte piu' piccola di ogni sostanza"

Molecole come *costituenti* della materia



Atomi

Ci sono moltissime sostanze diverse

Ipotesi: *Le molecole sono fatte di atomi*

Da >10000000 specie molecolari a <100 specie atomiche!

Straordinario passo avanti nella comprensione delle proprietà della materia

Il sistema periodico: Mendeleev

Sistematicita' nelle proprieta' chimiche degli elementi...

Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. A large, semi-transparent yellow watermark with the text 'Indizi di una sottostuttura' is overlaid across the center of the table. Below the main table, there are two rows of elements: the Lanthanide Series (Ce to Lu) and the Actinide Series (Th to Lr).

1	2																	10	11
H	He																	Ne	Ar
3	4											5	6	7	8	9	10		
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
11	12											13	14	15	16	17	18		
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104		
Fr	Ra	+AC	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113							

* Lanthanide Series
+ Actinide 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
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 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

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: *campo elettromagnetico*
Già noto dallo studio sperimentale dei fenomeni elettrici e magnetici a livello macroscopico



Un'altra interazione fondamentale

La seconda interazione fondamentale:

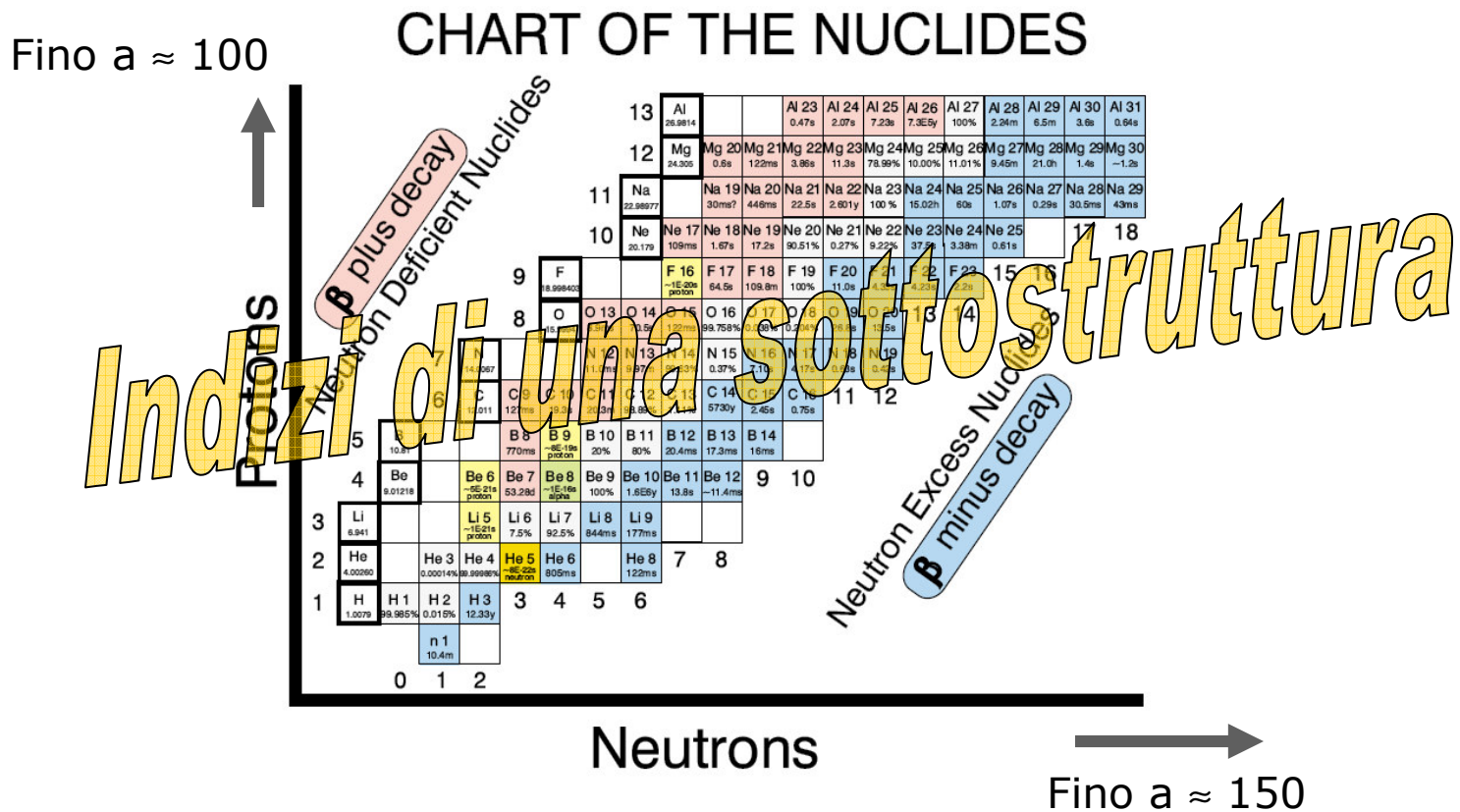
Le forze elettromagnetiche hanno gli stessi effetti per tutte le cariche elettriche

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

Un altro sistema periodico...





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*: Rutherford, Chadwick

Particella pesante, con carica +va
Particella pesante, priva di carica



Radioattività

Becquerel, Rutherford, i Curie, ...

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 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 elettrica fra i protoni



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: Nuova interazione, piu' intensa di quella elettromagnetica, non si manifesta fra oggetti macroscopici perche' ha un raggio d'azione estremamente piccolo: 10^{-13} cm!

Ruolo centrale nella formazione dei nuclei atomici

Interazione debole: Un'altra interazione fondamentale, bizzarra e capricciosa! Incline a violare molte delle regole piu' sacre e rispettate dalle altre interazioni..

Per quanto debole, ha p.es. un ruolo centrale nell'innesco dell' "accensione" delle stelle...



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



Principi fondamentali

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

Teoria della relativita’

Meccanica quantistica



Effetti relativistici

Nuovo modo di considerare materia ed energia
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



Effetti quantistici

Nuovo modo di considerare materia e forze
Due conseguenze importanti:

Quantizzazione dell'energia

→Esistenza di *livelli energetici* discreti

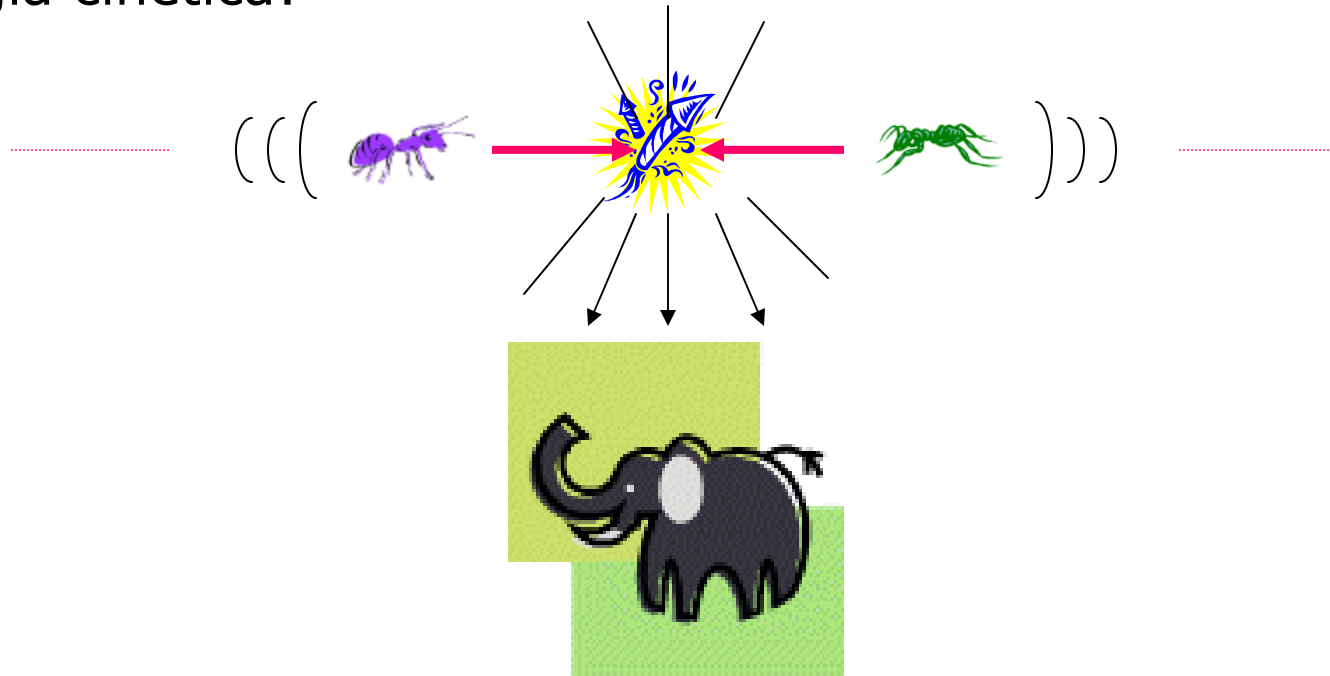
Caratteristiche ondulatorie nel comportamento delle particelle

→Il moto delle particelle assomiglia a quello di un'onda

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:

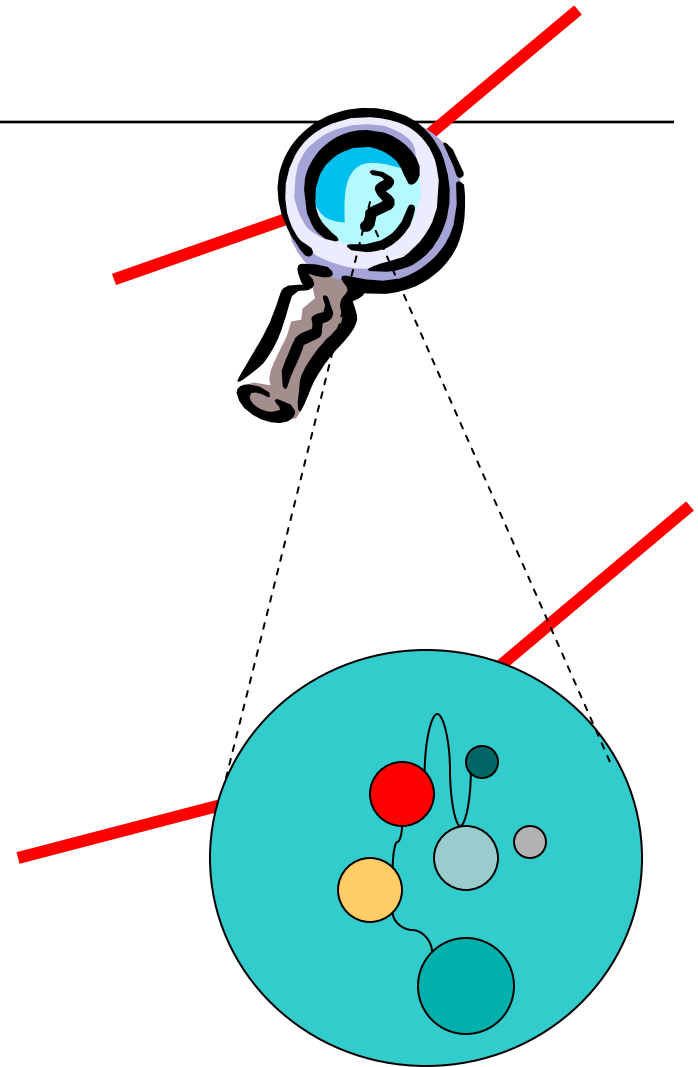


Proiettili e sonde

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

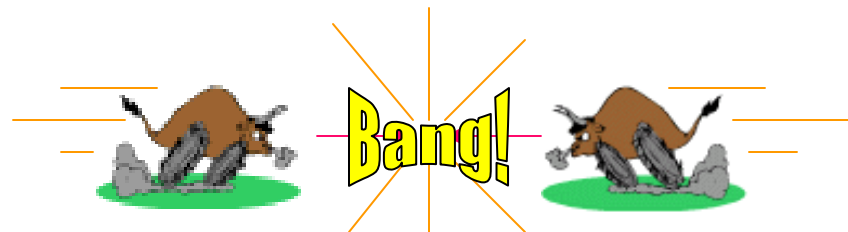


Acceleratori

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)



CERN, SLAC e compagnia

Gli eredi del microscopio: macchine enormi e complesse



SLAC – Stanford, California
Acc. Lineare – 3 km



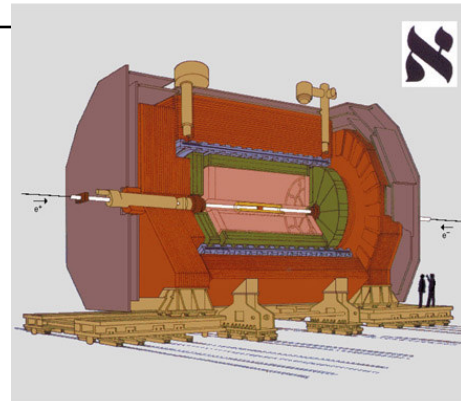
CERN, Ginevra, Svizzera
Acc. circolari
SPS (7 km), LEP/LHC (27 km)

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



ALEPH/CERN



CDF/FNAL



Fisica ed alta tecnologia

- Da acceleratori e rivelatori: straordinari sviluppi tecnologici
- “Ricadute” in molti campi di applicazione
(*magneti, elettronica, fisica medica, software, WWW,...*)
- Comunità mondiale impegnata nella ricerca
- Gigantismo di acceleratori e rivelatori (e costi)
- Collaborazioni di centinaia (oggi, migliaia) di ricercatori
- Enorme quantità di dati raccolti
- Interpretazione: analisi dati, computers, reti,...

Lezione del prof. E. Vercellin a seguire



Fisica dal Cielo...

Molte delle prime scoperte in fisica delle particelle sono venute dallo studio della *radiazione cosmica*

Prime scoperte

- *Muone*, un fratello pesante dell'elettrone
- *Pione*, un parente di neutrone e protone
- *Particelle strane*, tipi un po' originali nella famiglia del protone e neutrone



...e in Terra

Tutte queste particelle presto prodotte e studiate, con grande successo, ai primi *acceleratori*

Si osservano moltissime particelle parenti di protone e neutrone, di solito estremamente instabili ma perfettamente rivelabili

Come un *puzzle*, complicato e affascinante

Lo zoo delle particelle

Moltissimi parenti di protone e neutrone:
 Particelle che interagiscono *fortemente*
 Chiamate collettivamente: *adroni*

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

→ *Indizi di una sottostruttura*

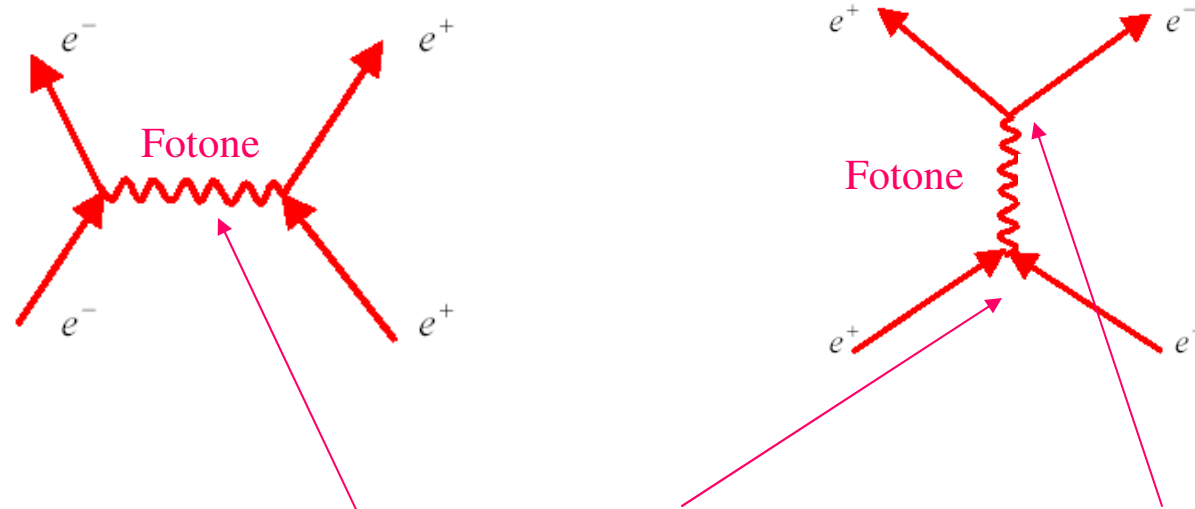
Un angolino di 'tavola periodica'...

	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$
$S = +1$		K^0	K^+
$S = 0$	π^+	π^0, η	π^-
$S = -1$	K^+	K^0	K^-

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

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 emette onde elettromagnetiche = quanti di luce

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

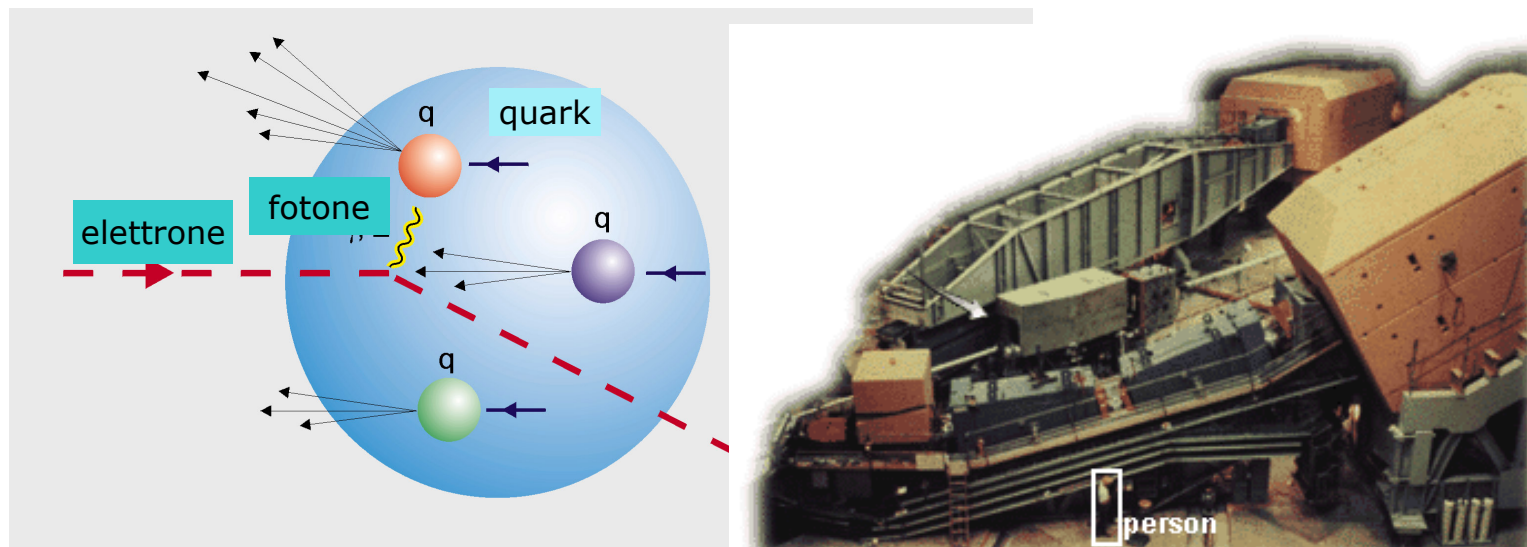
E così via...

I fotoni si possono usare come *sonde* per studiare la struttura delle particelle come il protone

Anche il protone e' un 'atomo'

Domanda: *il protone e gli altri adroni sono elementari o composti?*

Metodo: collisioni ad alta energia fra elettroni e protoni



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

Quark

Che cosa sono questi costituenti? I *quark*

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

Sono puntiformi

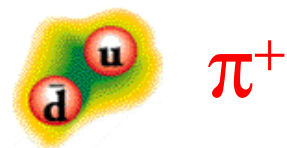
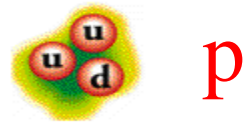
Interagiscono fortemente

Non si osservano liberi

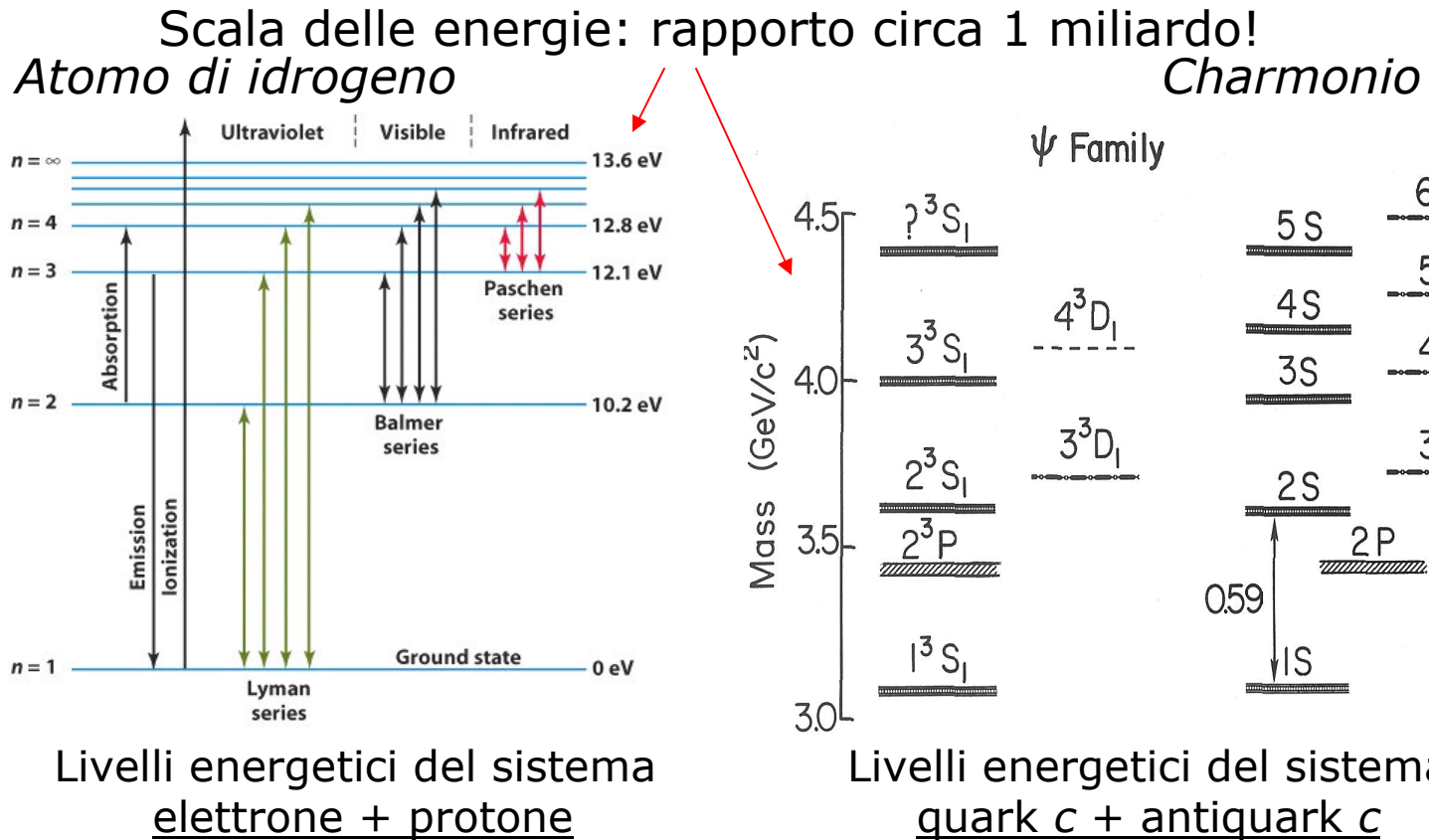
Si osservano sotto forma di stati legati, gli adroni appunto

Barioni: 3 quark

Mesoni: quark-antiquark



Quark: i costituenti degli adroni



Struttura, meccanismo simili : *costituenti elementari legati*



I leptoni, parenti dell'elettrone

Nel tempo, scoperta 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

Sono puntiformi

Sentono solo le interazioni elettromagnetica e debole

Si osservano liberi



Il Modello Standard

Negli ultimi 30 anni, crescenti prove a favore del

Modello Standard

dei costituenti della materia e delle loro interazioni

Interazione elettrodebole unificata

+

Cromodinamica quantistica





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

\uparrow up $2/3$	 charm $2/3$	 top $2/3$
\downarrow down $-1/3$	 strange $-1/3$	 bottom $-1/3$



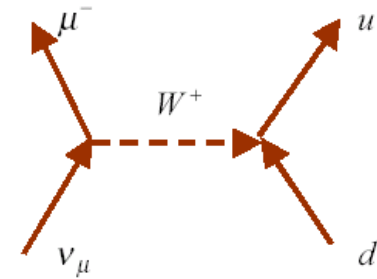
Ogni tipo di quark ha una carica di **colore**

3 'colori'
R G B

Le interazioni

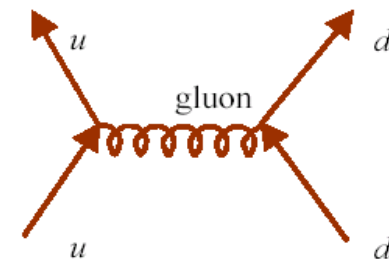
Interazioni elettromagnetica e debole: unificate ad alta energia nell' interazione elettrodebole, sentita da *quark e leptoni*

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*





La danza dei costituenti

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?

Risposta: *esperimento e teoria*



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?



LHC e il futuro

Lo scorso anno il CERN ha completato la costruzione del piu' grande acceleratore mai realizzato, il **Large Hadron Collider**

4 grandi esperimenti hanno costruito altrettanti enormi rivelatori (a due di essi, **ALICE** e **CMS**, partecipano decine di fisici torinesi)

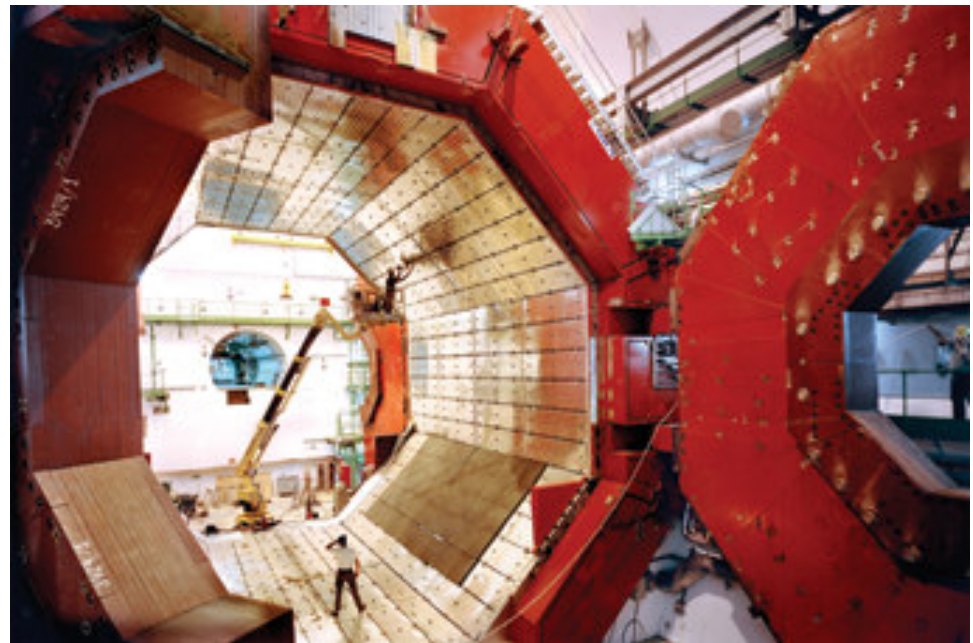
C'e' molta attesa per i risultati di questi esperimenti, che potrebbero confermare o rimettere in discussione alcune fra le ipotesi piu' importanti del Modello Standard

Due grandi rivelatori a LHC



CMS

ALICE



“Toccare con mano” le particelle..

Nell'esercitazione guidata dal dott. E.Migliore:
Misure sui decadimenti della Z^0

