

Le particelle elementari

Masterclass Europea

Fisica delle Particelle Elementari

Students' Day – Torino, 12 marzo 2008

Oggi, la fisica è...

(alla base di tutta)

...la scienza della natura

Con un consapevole eccesso di orgoglio, Rutherford disse una volta:

La scienza e' fisica, oppure e' collezionare francobolli

Perchè?

1. *In chimica, biologia, astronomia, cosmologia, geologia, ... le leggi naturali trovano interpretazione e spiegazione nelle leggi della fisica*
2. *Le leggi fisiche si auto-fondano sull'esperimento, non sono basate su ipotesi metafisiche o extrascientifiche*
3. *Le leggi della fisica sono espresse in linguaggio matematico, internamente coerente e falsificabile*
4. *Non si osservano fenomeni in contrasto con le leggi note della fisica*

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, quella newtoniana*

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

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 ?

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

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

1	2																	3	4											18	19																								
H	He																	B	C	N	O	F	Ne											Kr	Xe																				
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar											Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Na	Mg			III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	IX B	X B	XI B	XII B	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr											Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr											Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe											Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn											Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn										
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113																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 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

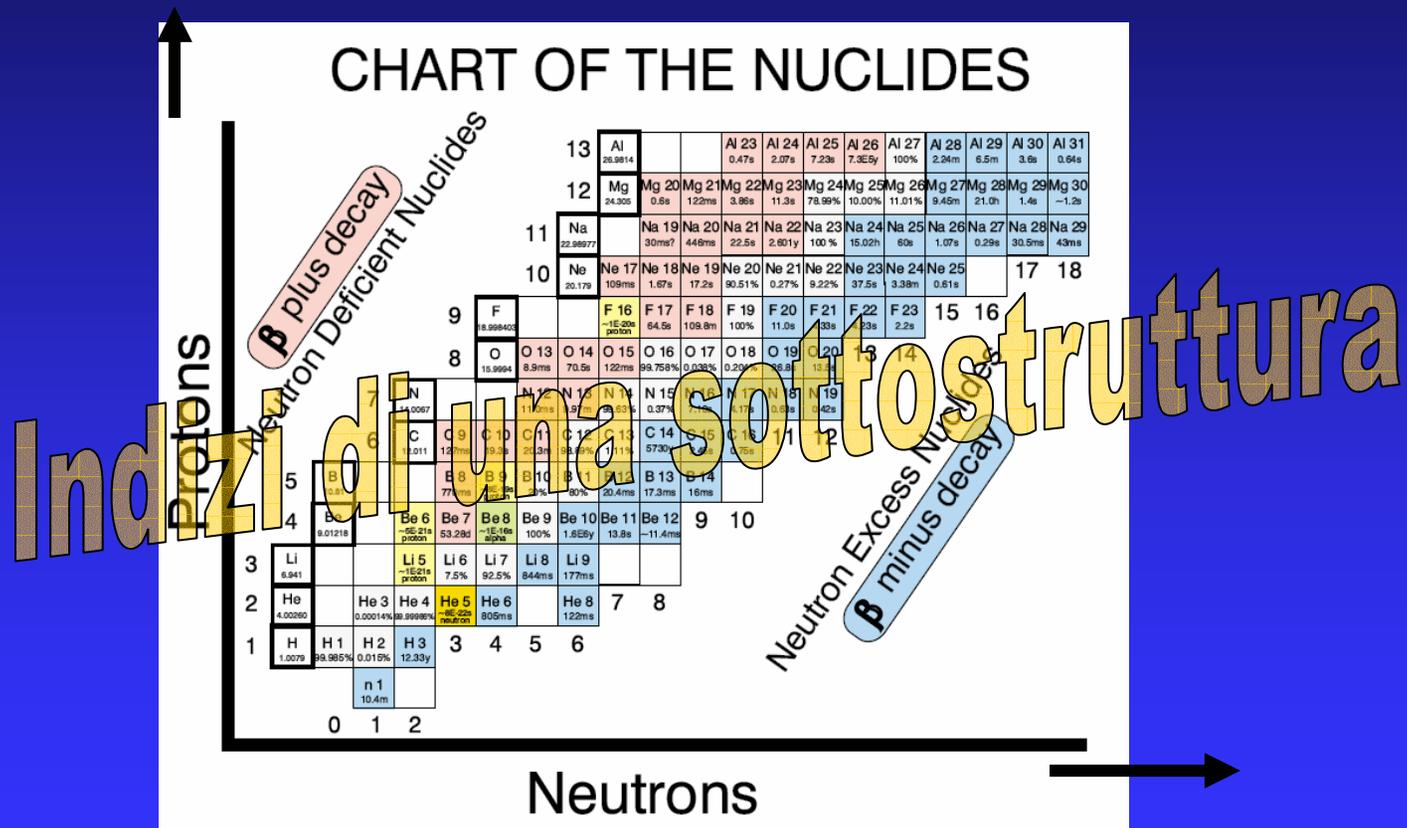
Poche, semplici leggi spiegano il funzionamento delle batterie, la propagazione della luce, il magnetismo, ...

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

La storia si ripete

Un altro sistema periodico...

Fino a ≈ 100



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*: 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

*Teoria della relativita’
Meccanica quantistica*

Perche’?

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

Fino a prova contraria

Effetti relativistici

Molti, stupefacenti, controintuitivi: 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

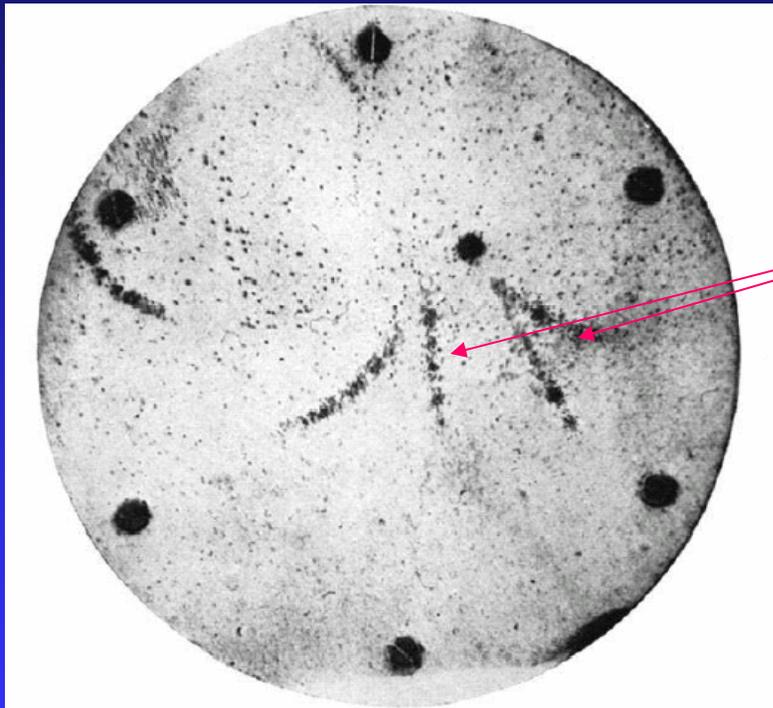
- Ogni particella (elettrone, protone, ..) ha una “gemella” di uguale massa e carica opposta

Il positrone - 1932

Foto in camera a nebbia

Fra gli altri processi:

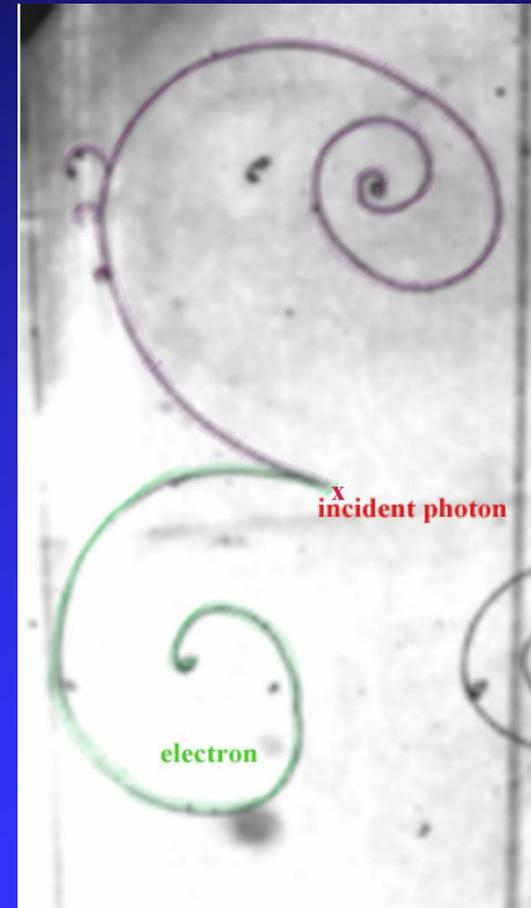
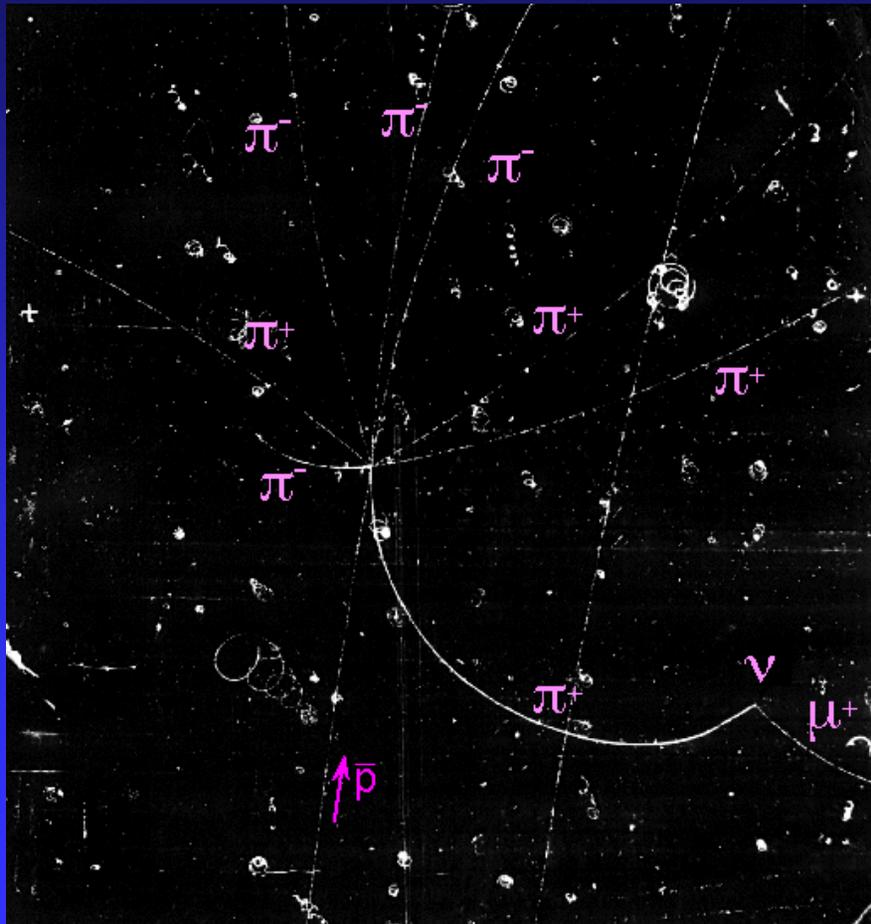
2 esempi di *produzione di coppie*



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

Energia \rightarrow Massa

Conversione massa \leftrightarrow energia



Effetti quantistici

Molti, stupefacenti, controintuitivi: Nuovo modo di considerare materia e campo

Due conseguenze importanti:

Quantizzazione dell'energia

→ Esistenza di *livelli energetici* discreti

Caratteristiche ondulatorie nel comportamento delle particelle

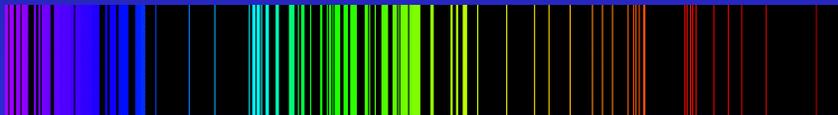
→ Il moto delle particelle assomiglia a quello di un' *onda*

I livelli atomici

Gli atomi eccitati (p.es. in un gas caldo) emettono luce di colori caratteristici, diversi per ogni atomo



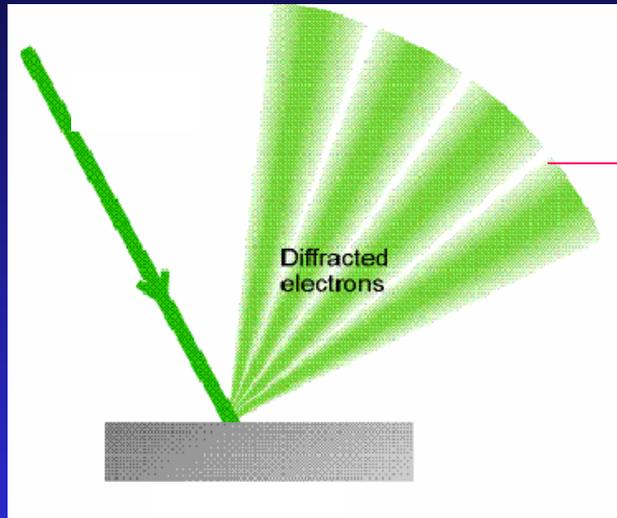
Idrogeno (atomo semplice)



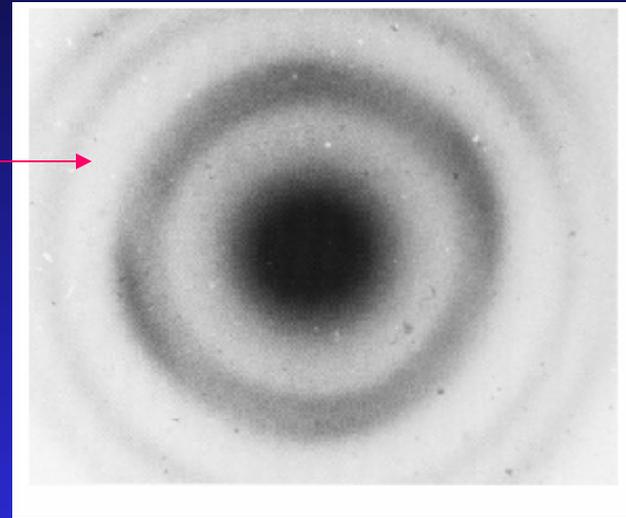
Ferro (atomo complicato)

*Legame stretto fra livelli energetici dell'atomo
e colore delle righe spettrali*

La diffrazione degli elettroni



Fascio di elettroni su cristallo



Intensita' degli elettroni diffratti

Figura di diffrazione, simile a quelle che si ottengono quando la luce passa attraverso fenditure sottili
→ *Le particelle hanno una lunghezza d'onda*

$$\lambda = h/mv$$

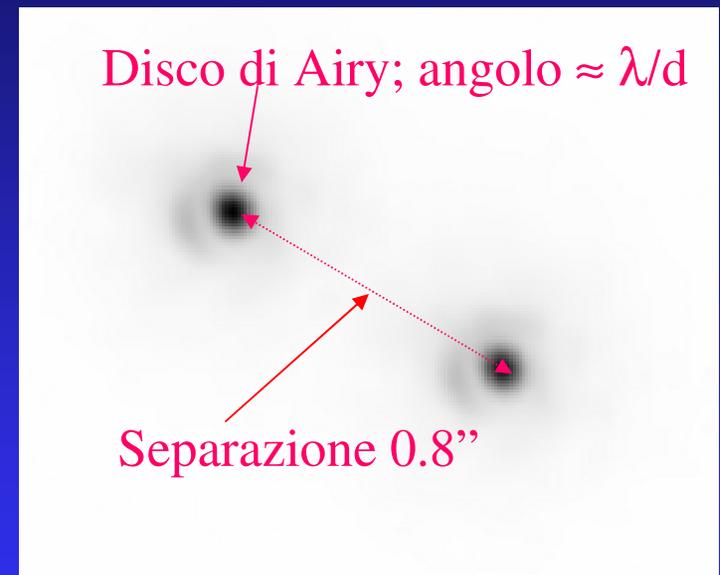
Velocita' grandi = Lunghezze d'onda piccole

Onde e dettagli geometrici

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

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 - $d = 2.56 \text{ m}$

Il microscopio

Per osservare la struttura di oggetti piccoli (cellule, ...)

Sistemi ottici per convogliare e raccogliere la luce

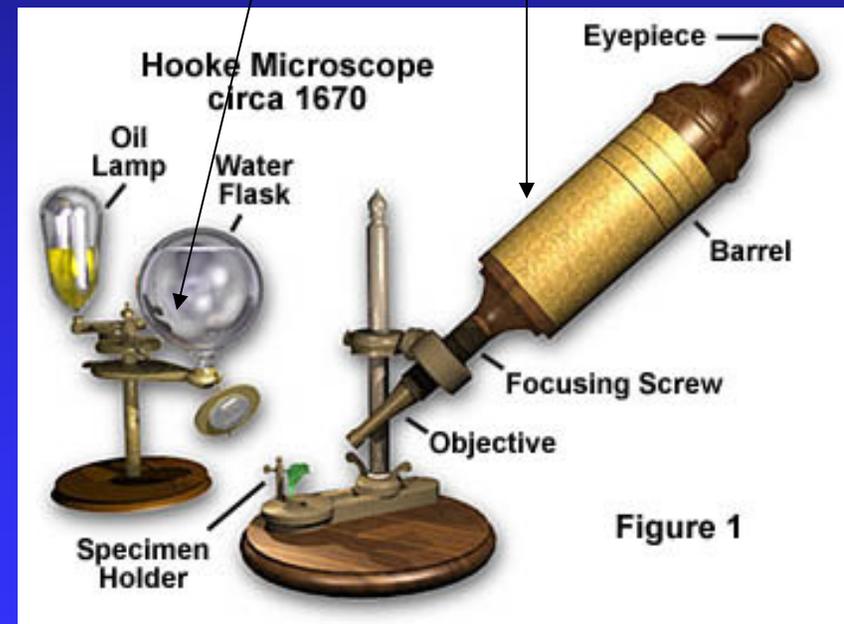
Sorgente di radiazione (lampada)

Bersaglio (campione)

Rivelatore di radiazione (occhio)

Qual e' il dettaglio minimo osservabile?

Dipende dalla lunghezza d'onda (colore) della luce usata: $d_{min} \sim \lambda$



Il microscopio elettronico

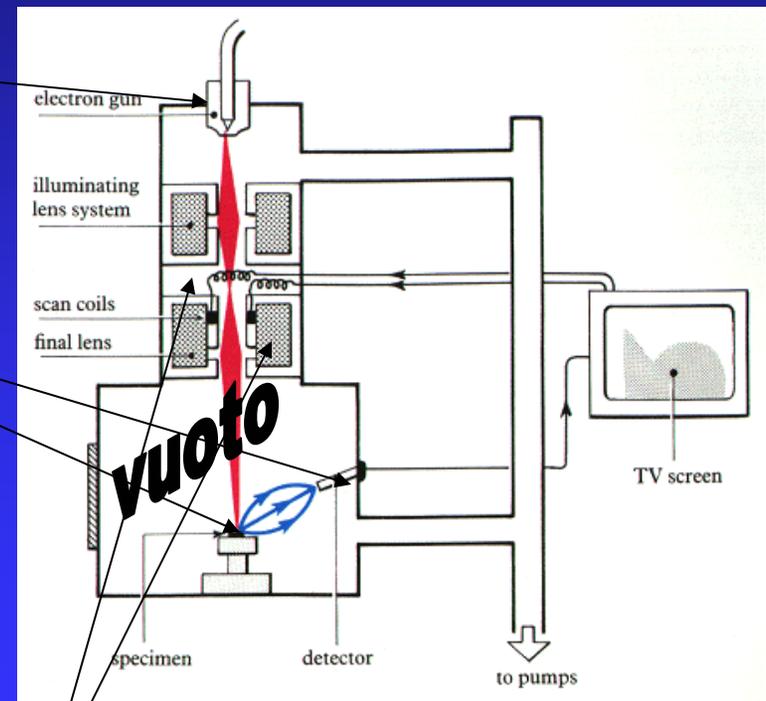
Per osservare dettagli piu' piccoli (virus, ...): λ piccola!
Conviene usare *elettroni* ad energia elevata:
Piu' facile guidarli e foccheggiarli con campi elettromagnetici

Sorgente di radiazione (elettroni)

Bersaglio (campione)

Rivelatore (misura della corrente di elettroni diffusi dal bersaglio)

Anche gli elettroni hanno una λ !
Accelerandoli ad energie elevate
(p.es. con 100000 volt) la loro λ e'
10000 volte piu' piccola di quella
della luce visibile!



Sistemi "ottici" per convogliare gli elettroni

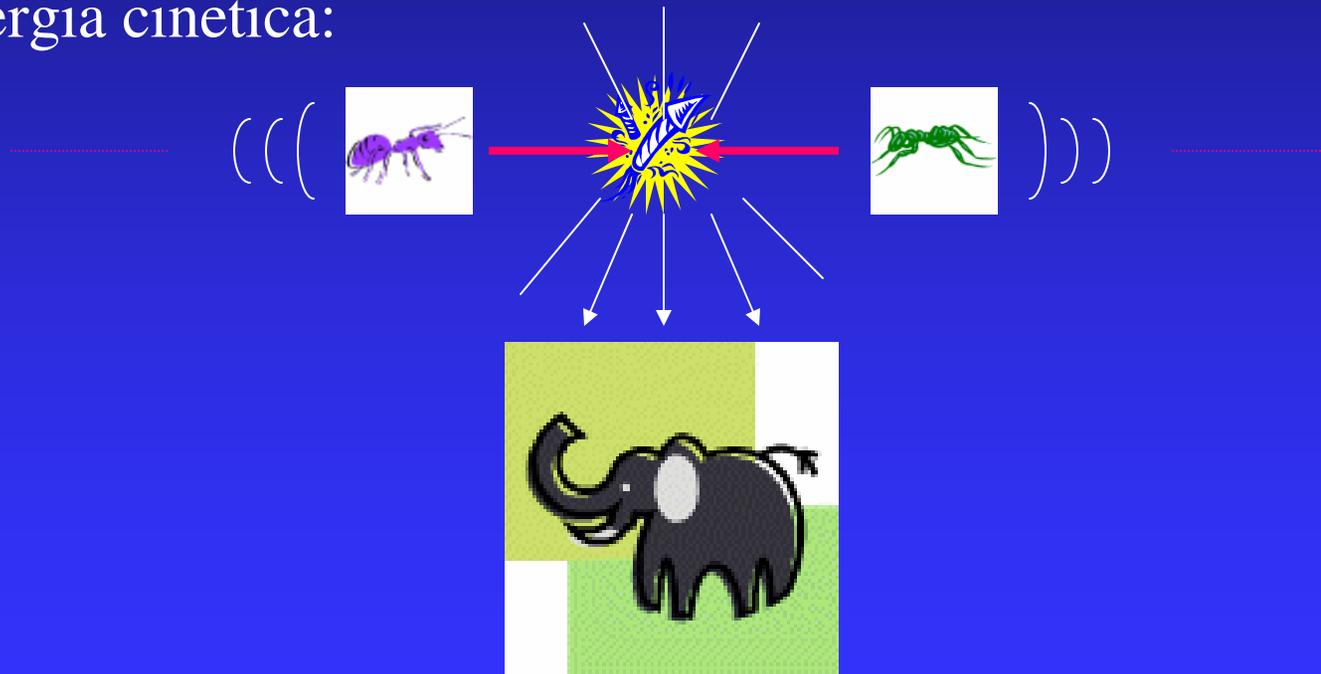
Metodo sperimentale

- Per creare particelle dotate di grande massa:
Conversione di energia in massa
- Per studiare la struttura di oggetti piccoli:
Sonde a piccola lunghezza d'onda
- Quindi:
Necessita' di proiettili ad energia elevata

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:

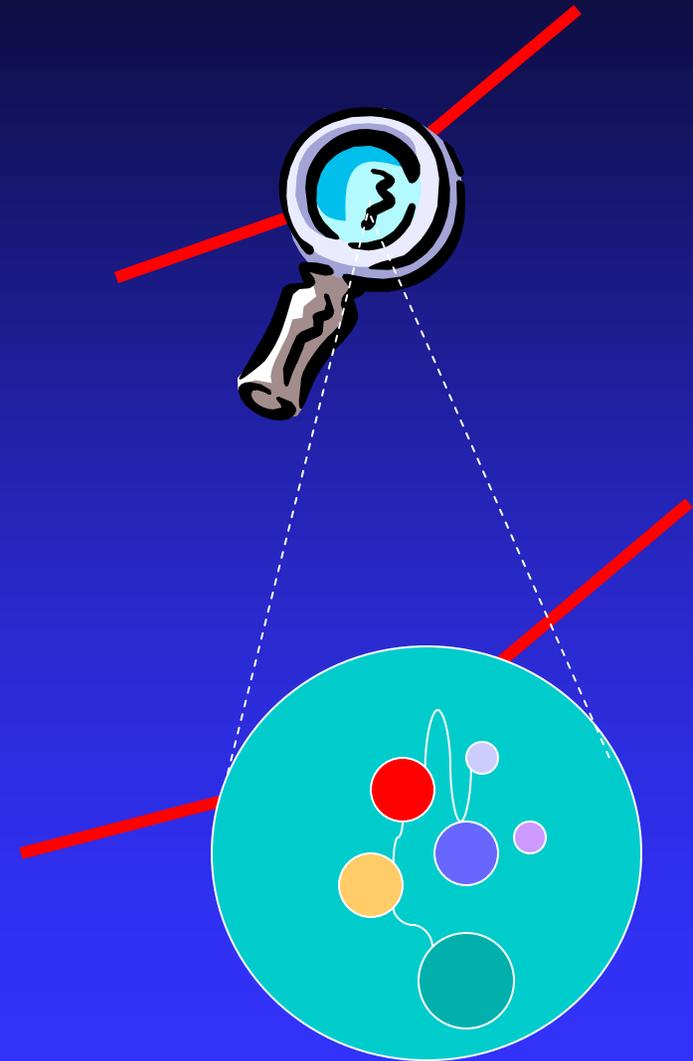


Proiettili e sonde

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

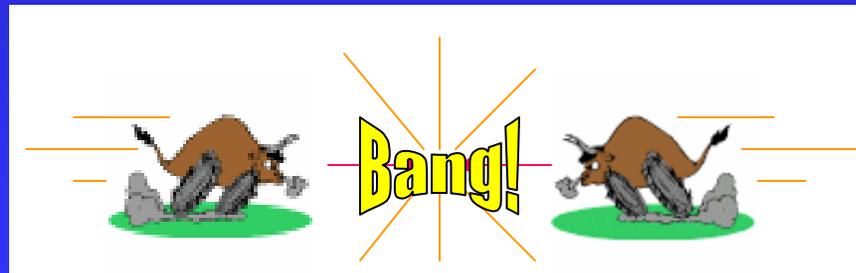


Acceleratori

Un acceleratore e' in pratica un

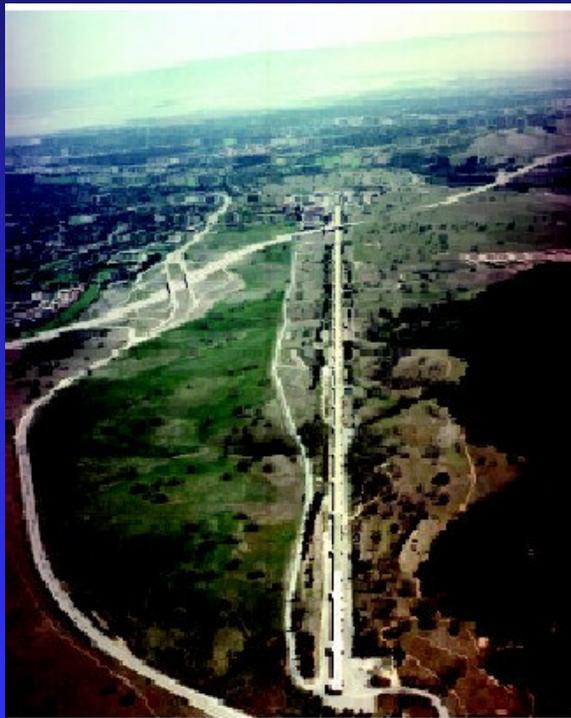
Super Microscopio Elettronico

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 elettronico sono macchine enormi e complesse



SLAC – Stanford, California
Acc. Lineare – 3 km



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

12/03/2008

E.Menichetti - Univ. di Torino

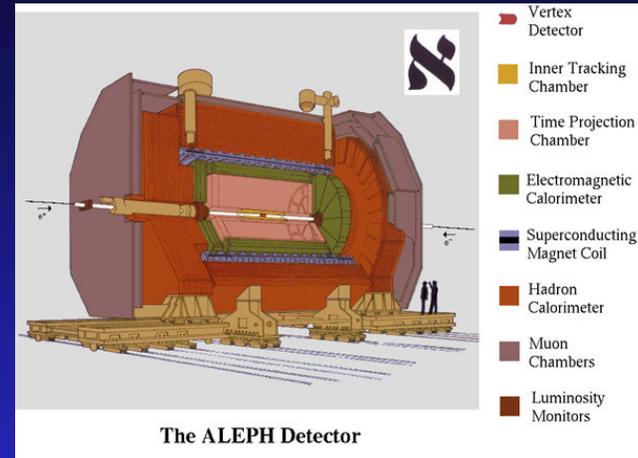
40

Rivelatori di particelle

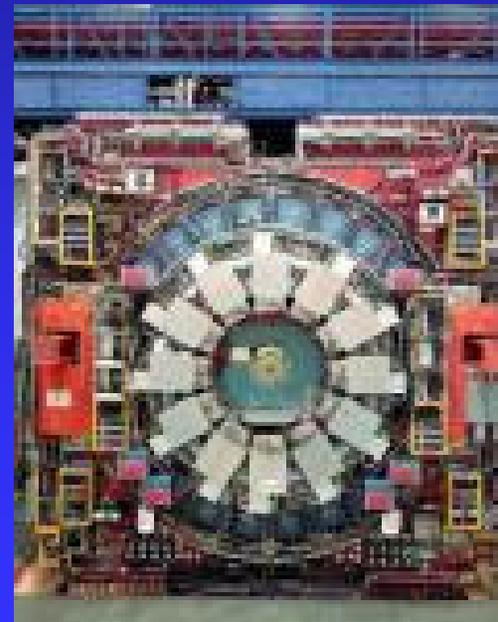
I sostituti dell'occhio umano, per radiazioni di energia così alta, sono anche loro sistemi grandi e complessi...

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,...*)
- Comunita’ mondiale impegnata nella ricerca
- Gigantismo di acceleratori e rivelatori (e costi)
- Collaborazioni di centinaia (oggi, migliaia) di ricercatori
- Enorme quantita’ di dati raccolti
- Interpretazione: analisi dati, computers, reti,...

Lezione del prof. E. Chiavassa 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 neutron:

Particelle che interagiscono *fortemente*

Chiamate collettivamente: *adroni*

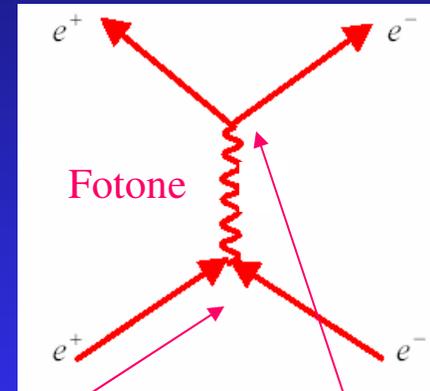
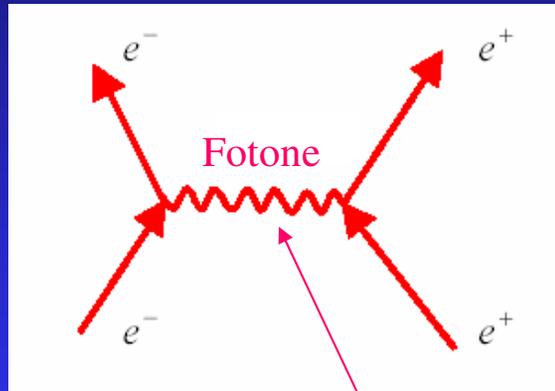
Centinaia di specie adroniche osservate in collisioni ad alta energia: situazione simile a quella incontrata per atomi e nuclei

→ *Indizi di una sottostruttura*

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

L'interazione elettromagnetica

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



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

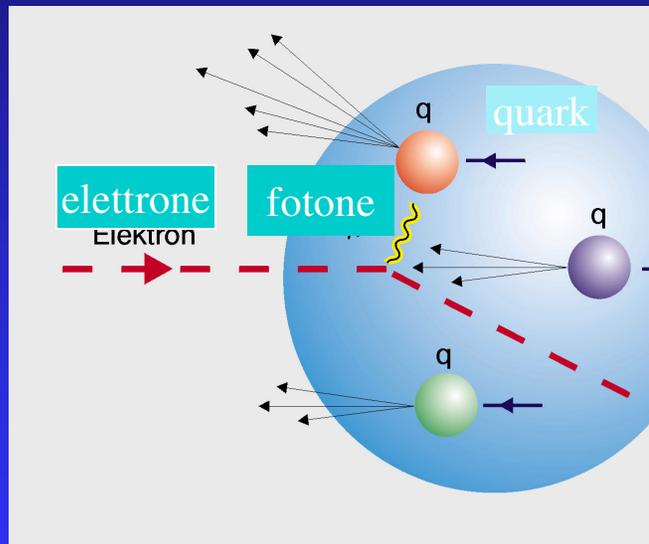
Come funziona?

- 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...
- I fotoni si possono usare come sonde per studiare la struttura degli adroni

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:

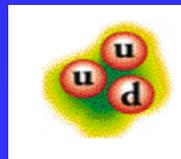
Sono puntiformi

Interagiscono fortemente

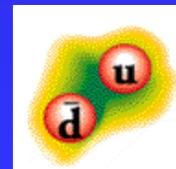
Non si osservano liberi

Si osservano sotto forma di stati legati, gli adroni appunto

Barioni: 3 quark Mesoni: quark-antiquark



p

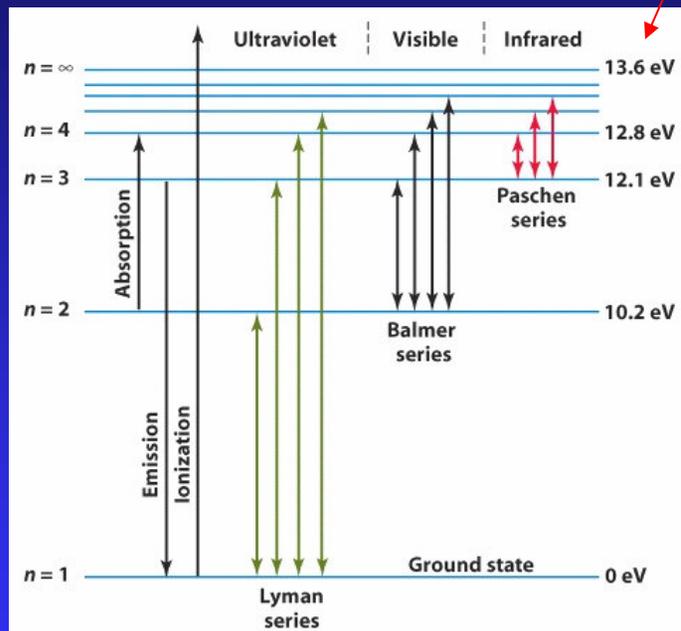


π^+

Quark: i costituenti degli adroni

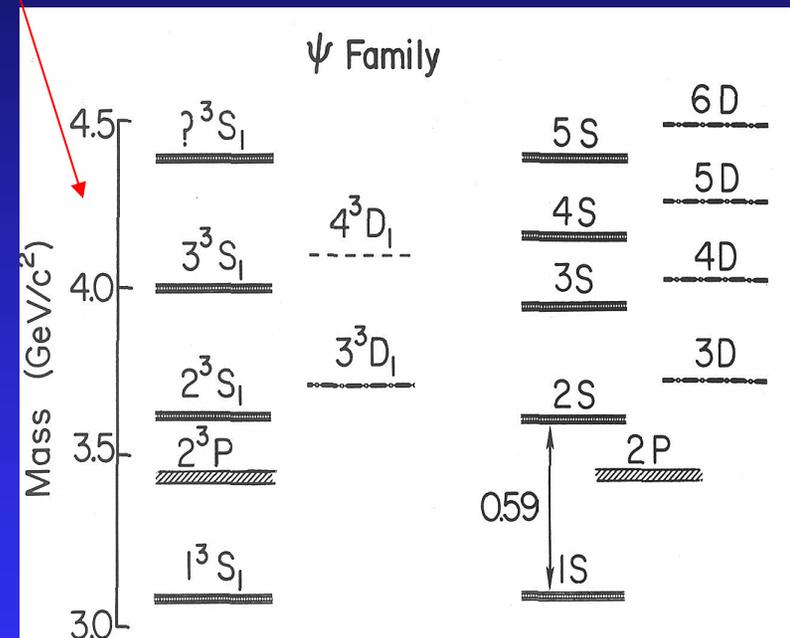
Scala delle energie: rapporto circa 1 miliardo!

Atomo di idrogeno



Livelli energetici del sistema
elettrone + protone

Charmonio



Livelli energetici del sistema
quark c + antiquark c

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

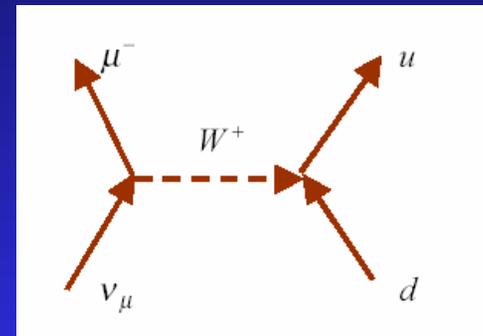


Ogni quark ha anche una carica di *colore*

Le interazioni

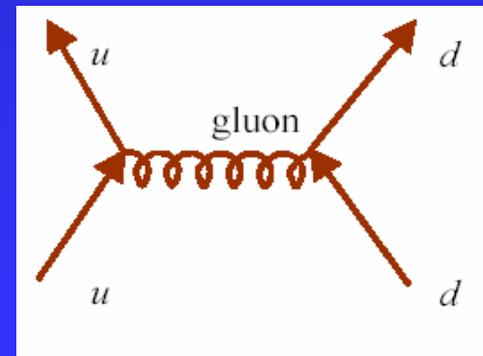
Interazioni elettromagnetica e debole: unificate ad alta energia nell' interazione elettrodebole, sentita da *quark e leptoni*

*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*



La danza perpetua

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*?

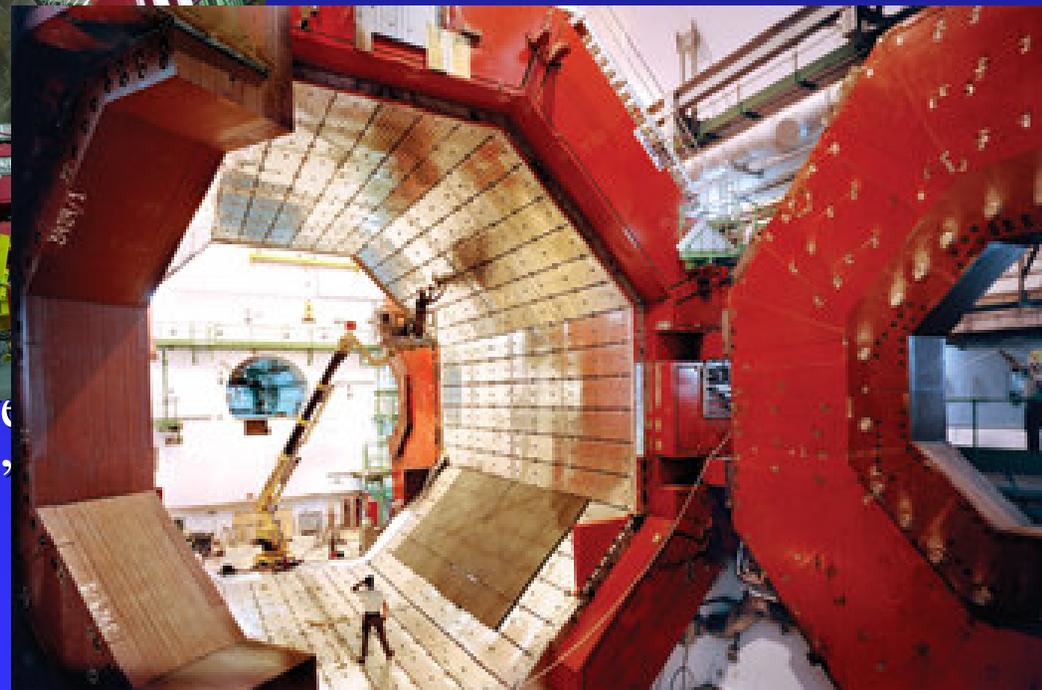
C'e' qualcosa di nuovo, oltre il Modello Standard?

LHC e il futuro



- C
 - 2
 - C
- potrebbero conie
fra le ipotesi piu'

pletera' la costruzione del piu'
realizzato, il *Large Hadron*



di
S,
ne
ne

“Toccare con mano” le particelle..

Nell'esercitazione guidata dal dott. E.Migliore:

Misure sui decadimenti della Z^0

