

Le particelle elementari

Masterclass Europea

Fisica delle Particelle Elementari

Students' Day – Torino, 20 marzo 2007

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. *Non si osservano fenomeni in contrasto con le leggi note della fisica*
3. *Le leggi della fisica sono espresse in linguaggio matematico, internamente coerente e falsificabile*
4. *Le leggi fisiche si auto-fondano sull'esperimento, non sono basate su ipotesi metafisiche o extrascientifiche*

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*

Riduzionismo

Il successo dell'ipotesi porta ad un punto di vista generale (ma di sicuro non condiviso da tutti!):

Le proprietà dei sistemi complessi si possono interpretare in termini delle proprietà delle parti più semplici che li compongono e delle forze che intervengono a comporli

Limiti del riduzionismo

- Quante e quali proprietà dei sistemi complessi si possono ridurre a quelle dei loro costituenti? Tutte? Molte? Poche?...
- Diverse opinioni...Semplificando:
 - ◆ **Riduzionisti:** *Tutte, e' solo un problema tecnico...Aspettate e vedrete*
 - ◆ **Emergentisti:** *Poche, i sistemi complessi hanno caratteristiche extra rispetto a quelle dei loro costituenti...*

Origine del riduzionismo

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

■ Potere pre-dittivo: previsione di fenomeni nuovi
(Es. scoperta di Nettuno, avvenuta sulla base delle anomalie osservate nell'orbita di Urano)

La legge di gravitazione universale e' *unica*, la stessa per tutti i sistemi fisici (mele, Luna, pianeti, satelliti artificiali, galassie, pattinatori, ...).
Primo esempio di interazione fondamentale

Cos'è un'interazione fondamentale?

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

Le differenze fra i tanti fenomeni osservati sono solo apparenti, legate a dimensioni, forme, distanze, che variano caso per caso

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 ...

L'interazione gravitazionale

Le masse “si sentono” attraverso il **campo gravitazionale**: ogni massa dà origine ad una perturbazione dello spazio circostante, che è in grado di esercitare azioni meccaniche su altre masse

Lo spazio della fisica è più complicato e ricco di quello della geometria

La gravitazione oggi

- Interazione fondamentale ben conosciuta a livello macroscopico: 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

Un grande successo

...la riduzione della complessita' di un sistema fisico, che individua i suoi componenti semplici e studia separatamente le loro proprieta', e' risultata un passo essenziale nella comprensione dei fenomeni gravitazionali

La struttura della materia

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

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

Le molecole

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

Avogadro, 1811:

“La parte piu’ piccola di ogni sostanza”

Molecole come costituenti della materia

Riduzionismo in azione: atomi

- Ci sono moltissime sostanze diverse
- Ipotesi: *Le molecole sono fatte di atomi*
- Da >100000000 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																	10	11
H	He																	Ne	Ar
Li	Be																	Ne	Ar
Na	Mg																	Ar	Kr
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		
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							

* 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?
- Perché gli atomi si dispongono secondo una gerarchia di massa?

Possibile spiegazione:

Gli atomi sono sistemi composti

I costituenti atomici

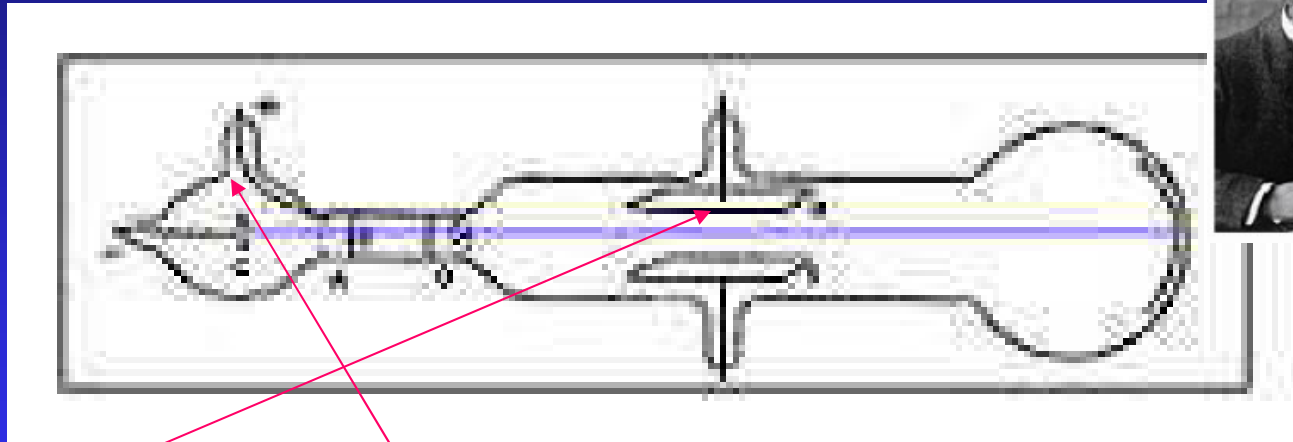
Ricerca di *evidenze fisiche* che comprovino
gli *indizi di origine chimica* sulla struttura
complessa degli atomi

Elettrone: *Thompson*

Nucleo: *Rutherford*

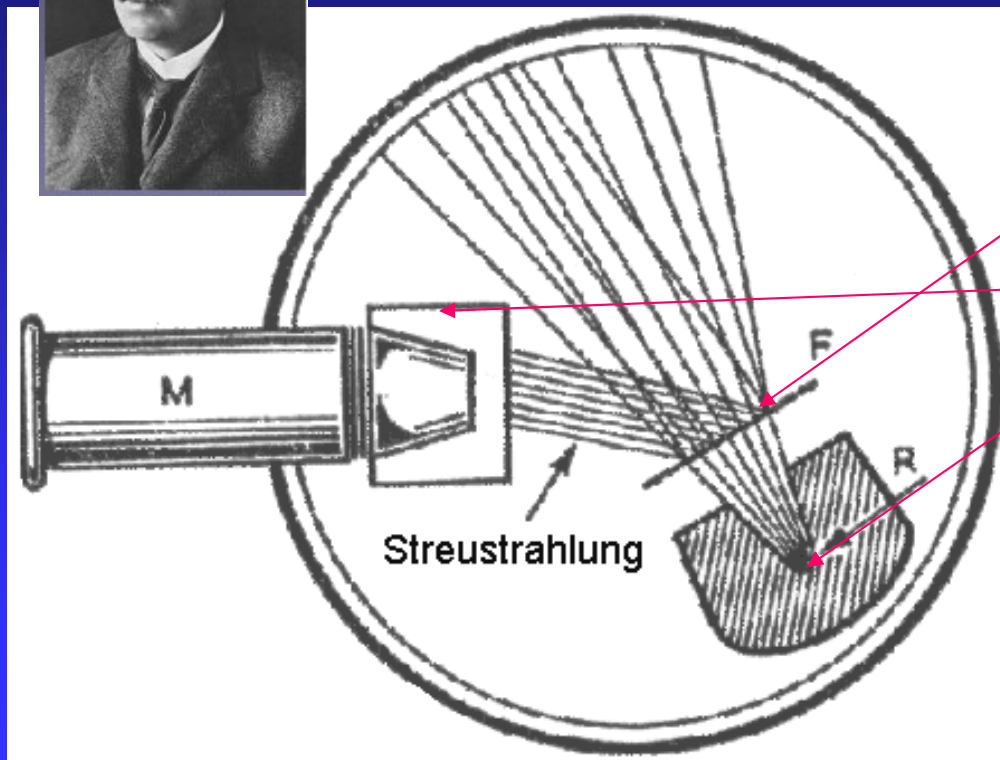
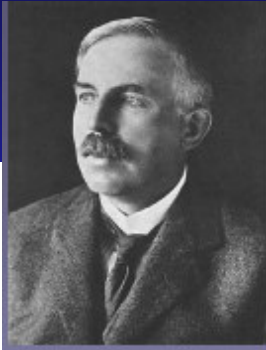
Thompson: l'elettrone

Raggi catodici: radiazione emessa dai metalli quando sono riscaldati



Deflessione di raggi catodici in campi elettrici e magnetici
→ Sono *elettroni*, particelle di piccola massa e carica -va

Rutherford: il nucleo



Oggi sappiamo:
nuclei di elio

Urti fra *particelle α* e
atomi di oro

Si osservano a volte
grandi deflessioni

→ *Nocciolo pesante,
di piccole dimensioni,
carico positivamente,
al centro dell'atomo*

La struttura atomica

Altro passo nella riduzione dei sistemi complessi a quelli piu' semplici:

Da ≈ 100 specie atomiche...

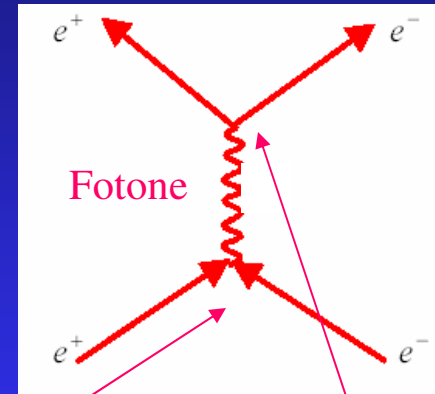
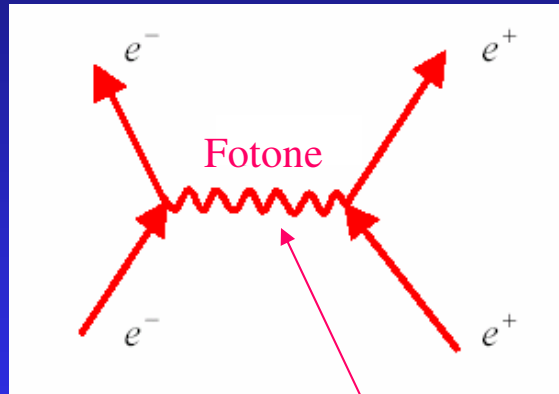
...a 2 costituenti atomici: nucleo ed elettrone

“Colla” che li tiene uniti: *forza elettromagnetica*

Una seconda interazione fondamentale: i campi elettromagnetici hanno gli stessi effetti per tutte le cariche elettriche

L'interazione elettromagnetica

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

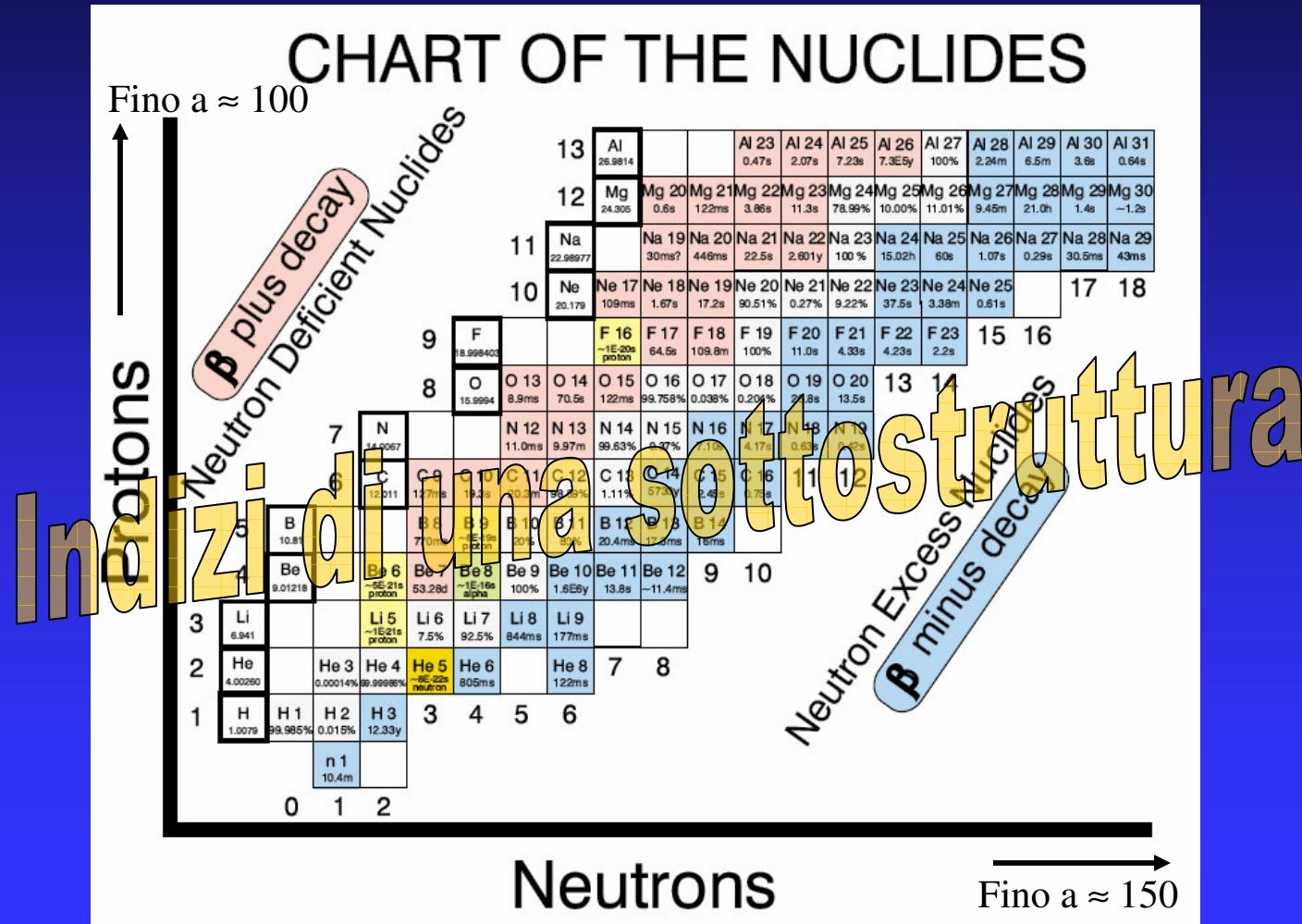


Molti processi: *collisione, annichilazione, materializzazione,..*
Tutti descritti dalla stessa legge della forza

Come funziona?

- Versione **quantistica** delle vecchie idee classiche
- Se ‘scuotete’ una particella carica, essa emetterà onde elettromagnetiche = quanti di luce
- Le onde elettromagnetiche = quanti di luce ‘scuotono’ le particelle cariche che incontrano
- E così via...

Nuclei, stabili e instabili



I costituenti nucleari

Circa 3000 nuclei diversi conosciuti....

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

Riduzione: ricerca dei *costituenti nucleari*

Identificazione di *protone* e *neutrone*: Rutherford, Chadwick

Particella pesante, con carica +va

Particella pesante, priva di carica

Radioattivit 

Becquerel, Rutherford, i Curie, ...

Scoperta dell'emissione di radiazione da parte di certi elementi

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

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

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

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!

Una quarta interazione fondamentale, bizzarra e capricciosa!

Le interazioni fondamentali

L'indagine sulla struttura della materia conduce dunque a studiare le proprietà dei *costituenti nucleari* 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 perche’ siano sacri...

*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 spazio e tempo, 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

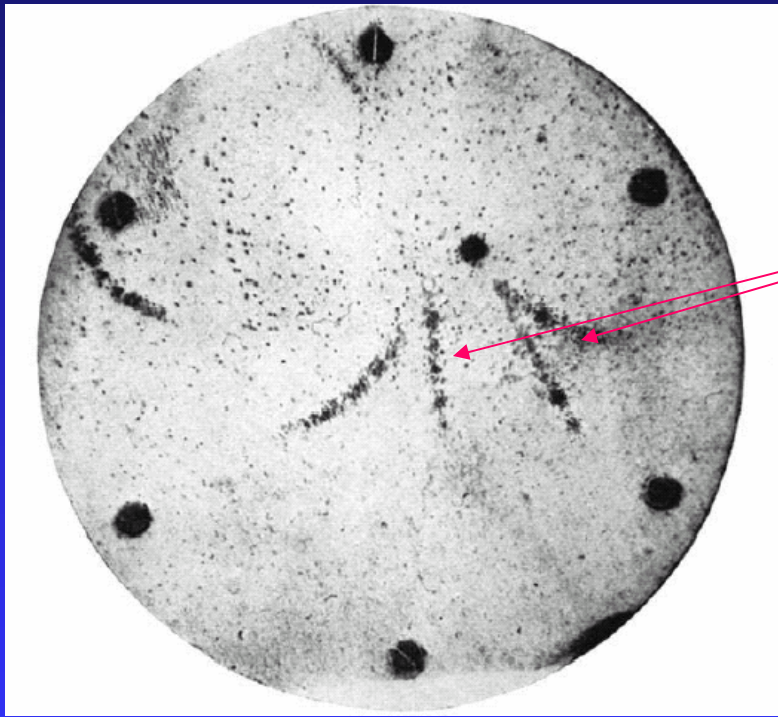


Foto in camera a nebbia

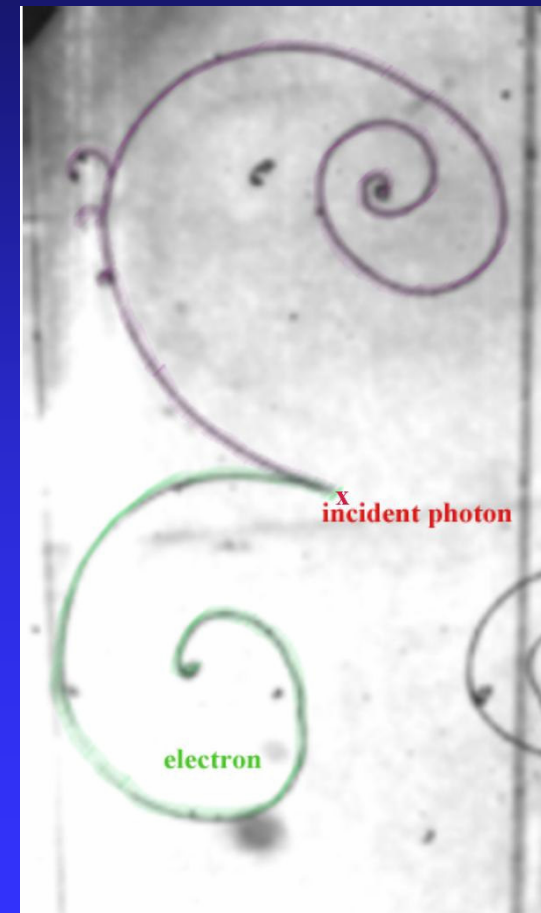
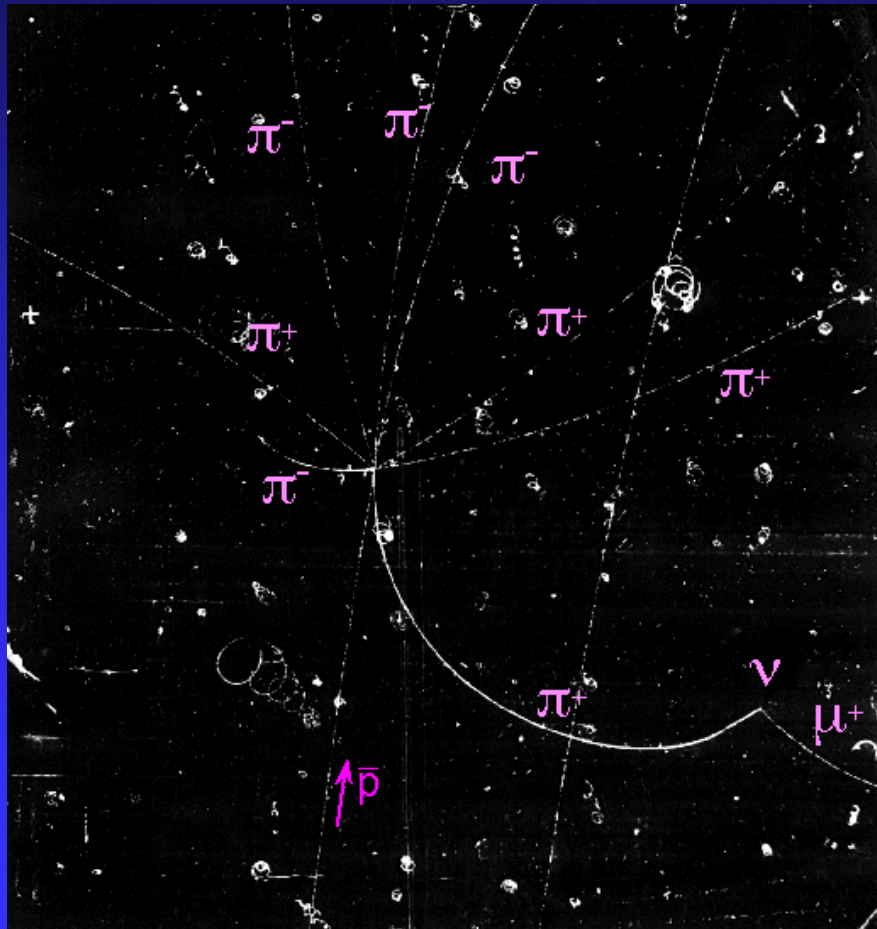
Fra gli altri processi:

2 esempi di *produzione di coppie*

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

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 nella dinamica delle particelle

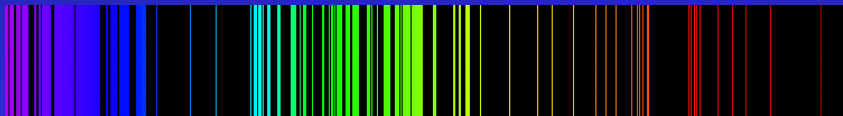
→ Il moto delle particelle assomiglia a quello di un' *onda*

La spettroscopia atomica

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



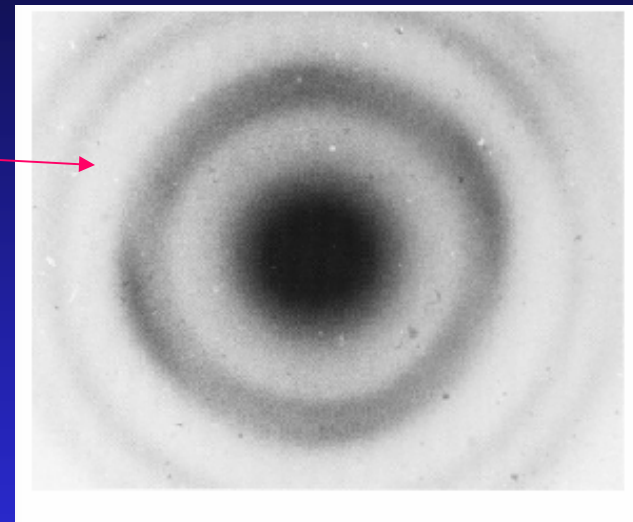
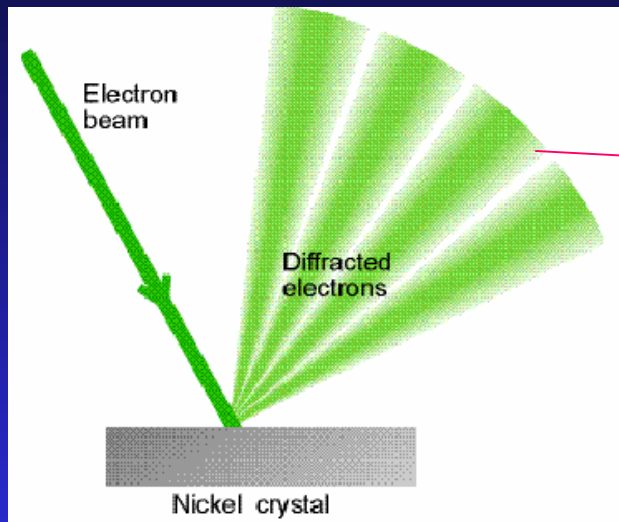
Idrogeno (atomo semplice)



Ferro (atomo complicato)

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

La diffrazione degli elettroni



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

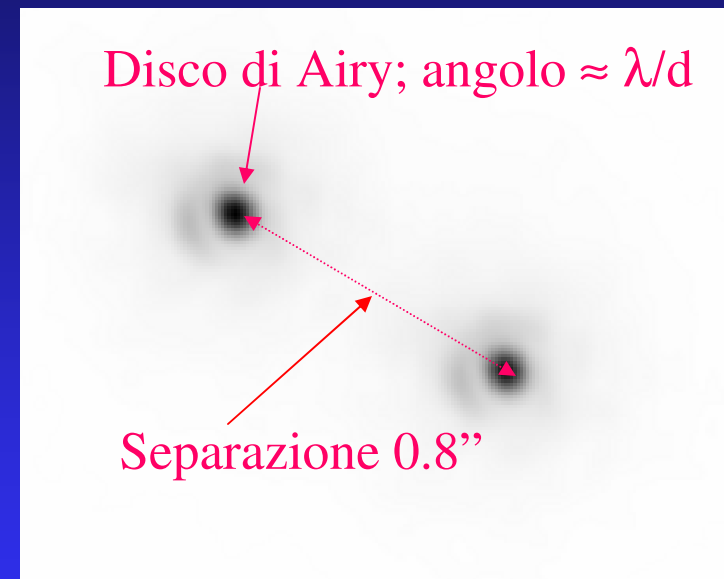
$$\lambda = h/mv$$

Velocita' grandi = Lunghezze d'onda piccole

Onde e dettagli geometrici

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



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

Il microscopio

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

Sistemi ottici per convogliare e raccogliere la luce

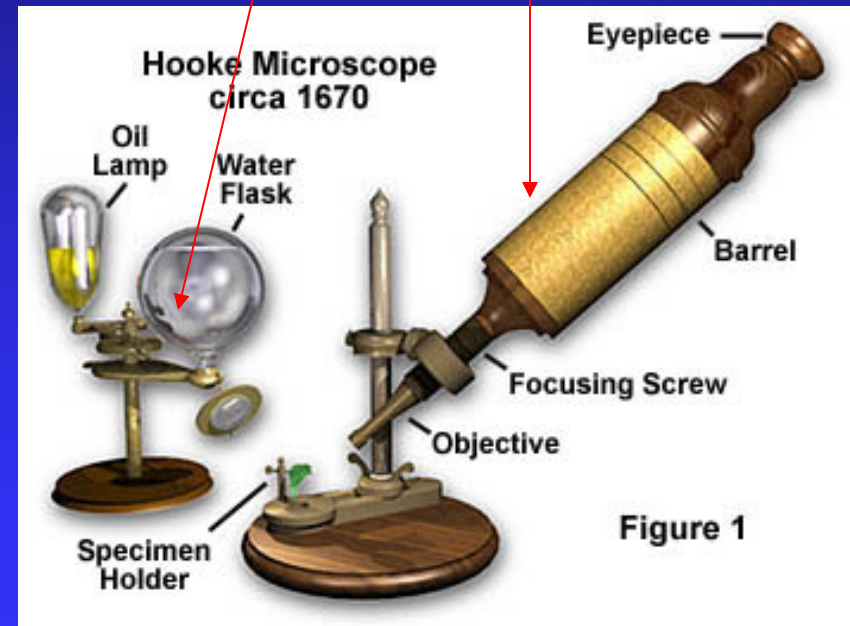
Sorgente di radiazione (lampada)

Bersaglio (campione)

Rivelatore di radiazione (occhio)

Qual e' il dettaglio minimo osservabile?

Dipende dalla lunghezza d'onda λ (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:

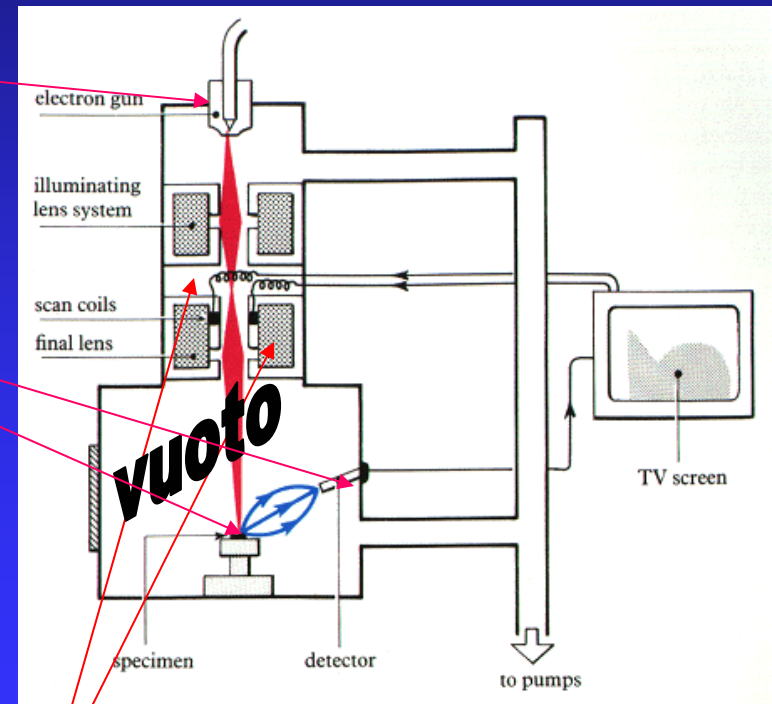
Piu' facile guidarli e foccheggiarli con campi elettromagnetici

Sorgente di radiazione (elettroni)

Bersaglio (campione)

Rivelatore (dispositivo che misura la 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

La formica e il microchip



Una formica operaia
trasporta un microchip

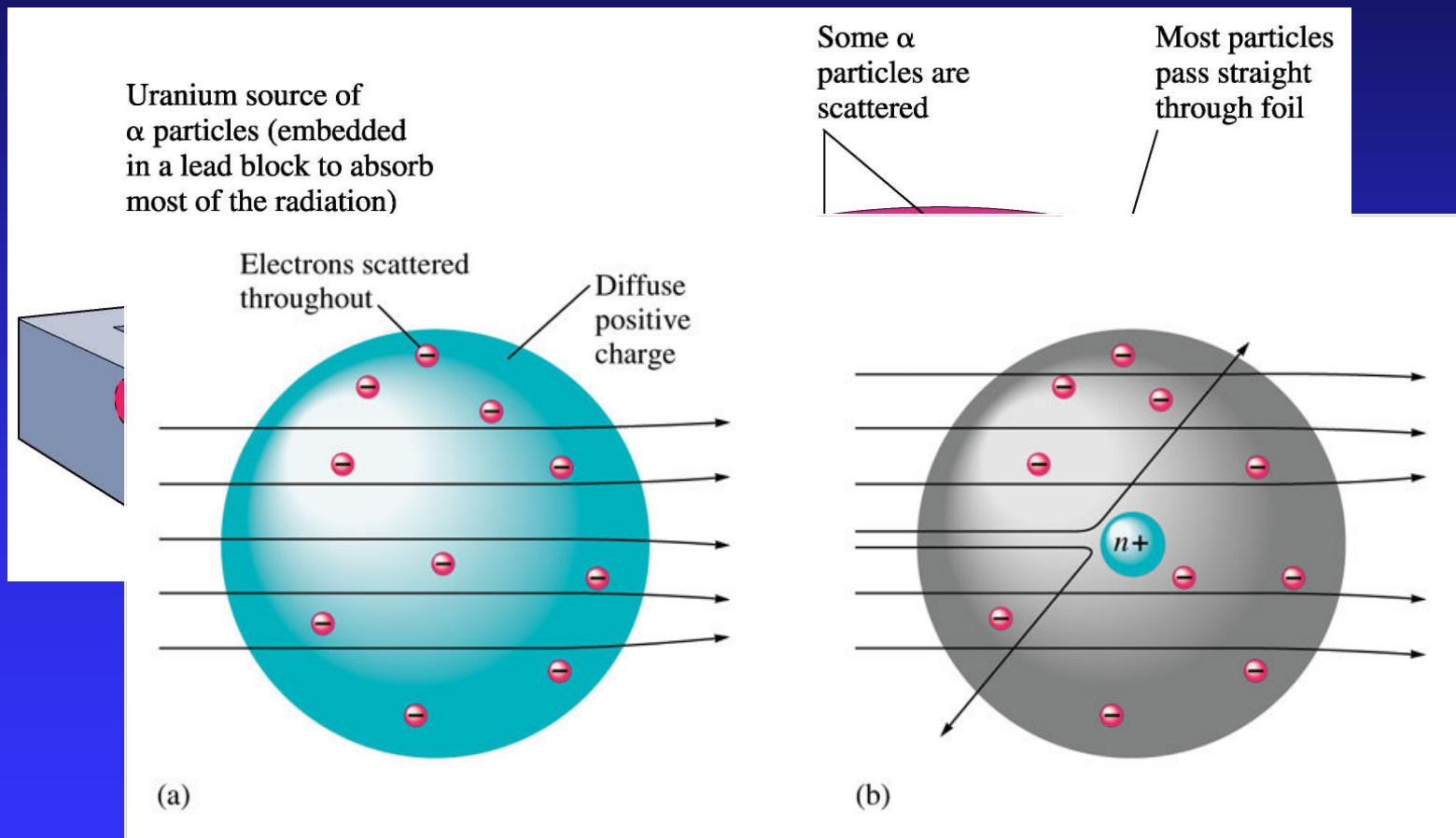
Microscopio elettronico a
scansione – 100X

0.3 mm
Dettaglio minimo 1 μm

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*

Microscopia alla Rutherford



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

Nell'ultimo decennio, di nuovo al centro dell'interesse generale: molte domande senza risposta sui raggi cosmici!

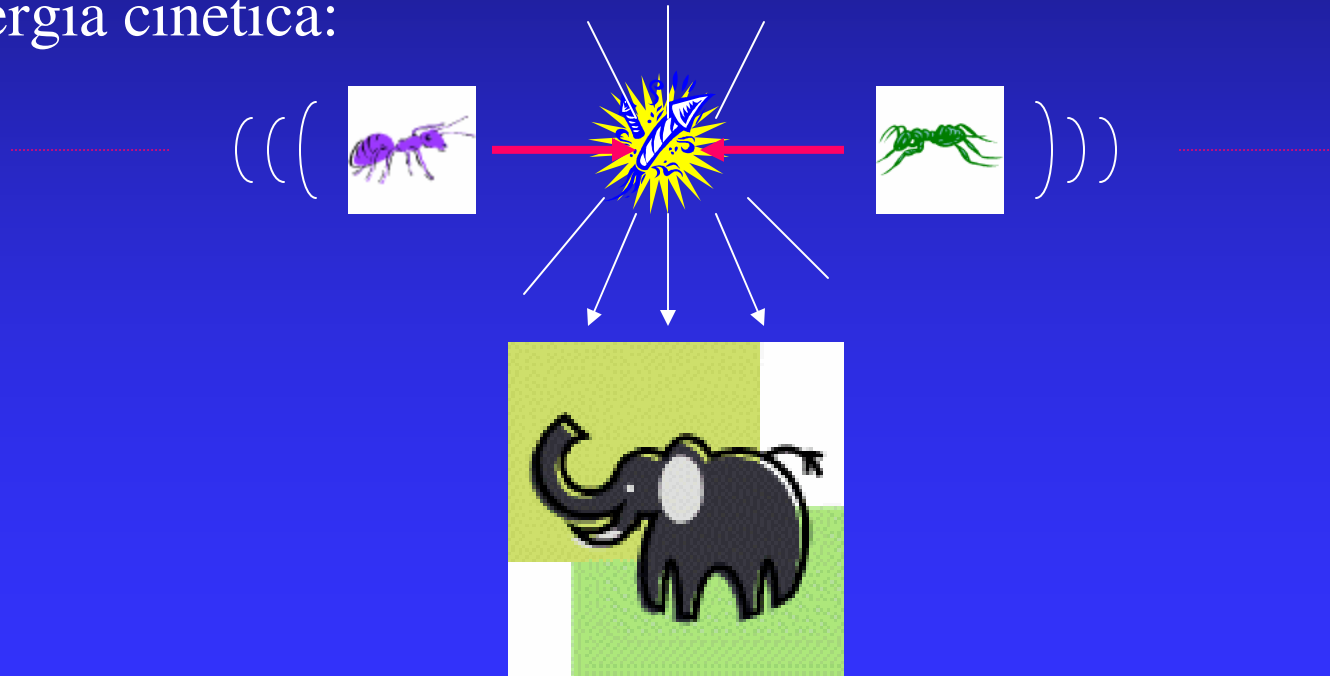
...e in Terra

- 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

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:



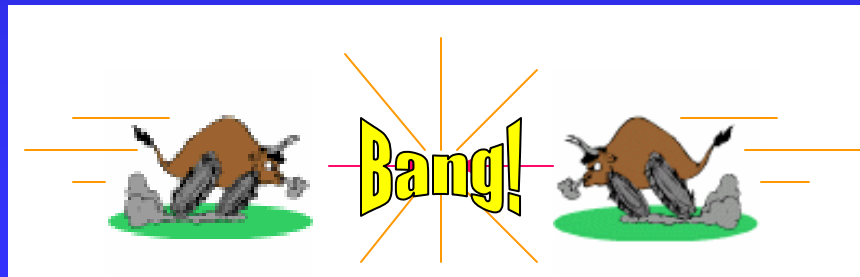
Acceleratori

Per esplorare scale di distanza piccole
Per consentire la formazione di particelle pesanti

→ Proiettili con *velocita'* elevata, quindi con *energia* elevata

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



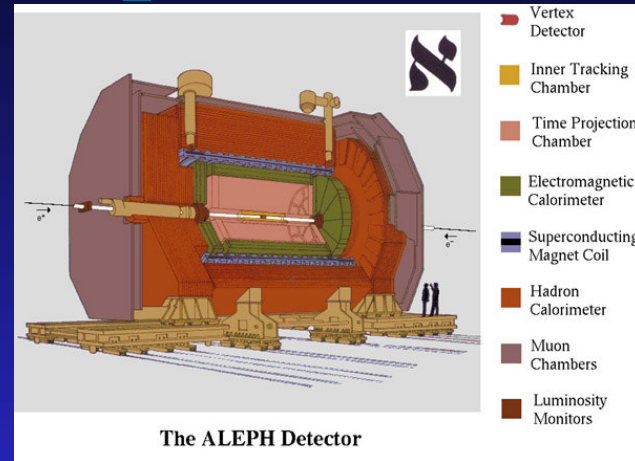
CERN, Ginevra, Svizzera
Acc. circolari
SPS (7 km), LEP/LHC (27 km)

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

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

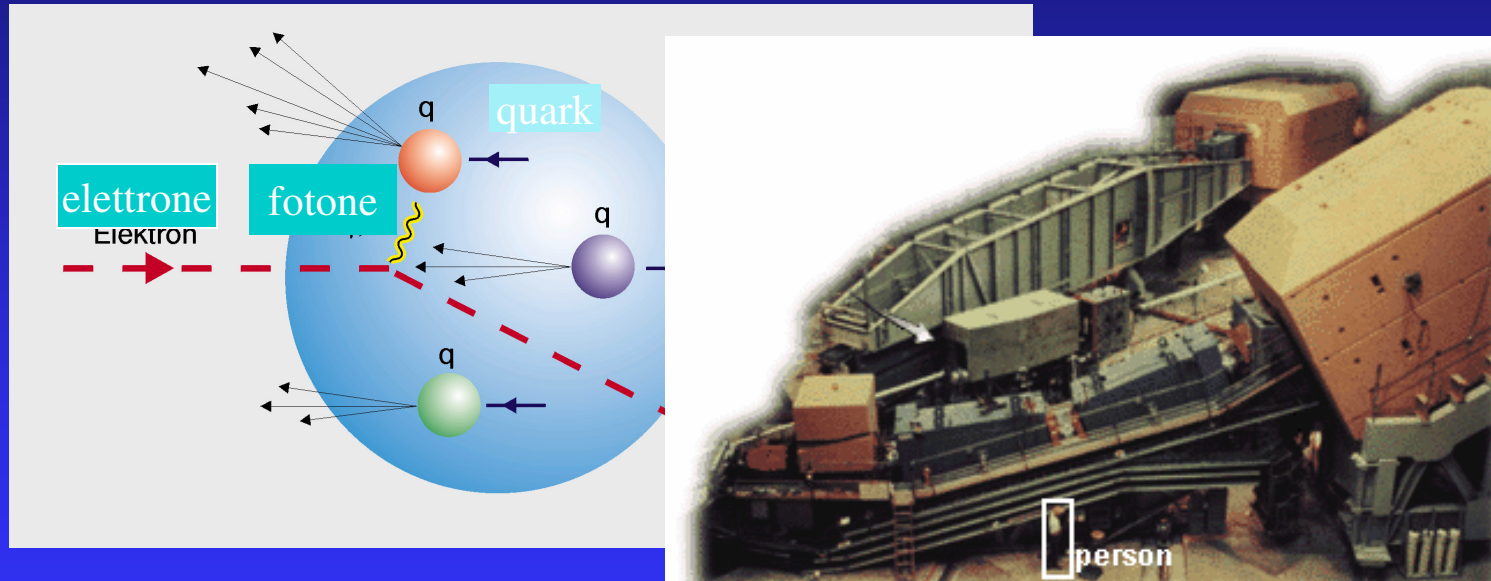
→ *Indizi di una sottostruttura*

	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$		$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$
$S = +1$		K^0	K^+	$S = 0$	n		p
$S = 0$	π^+	π^0, η	π^-	$S = -1$	Σ^-	Σ^0, Λ	Σ^+
$S = -1$	K^+	K^0	K^-	$S = -2$	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^-						

Anche il protone e' un 'atomo'

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

Metodo: versione ingrandita dell'esperimento di Rutherford



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

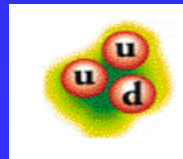
Interagiscono fortemente

Non si osservano liberi

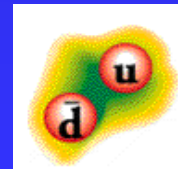
Si osservano sotto forma di stati legati, gli adroni appunto

Barioni: 3 quark

Mesoni: quark-antiquark



p

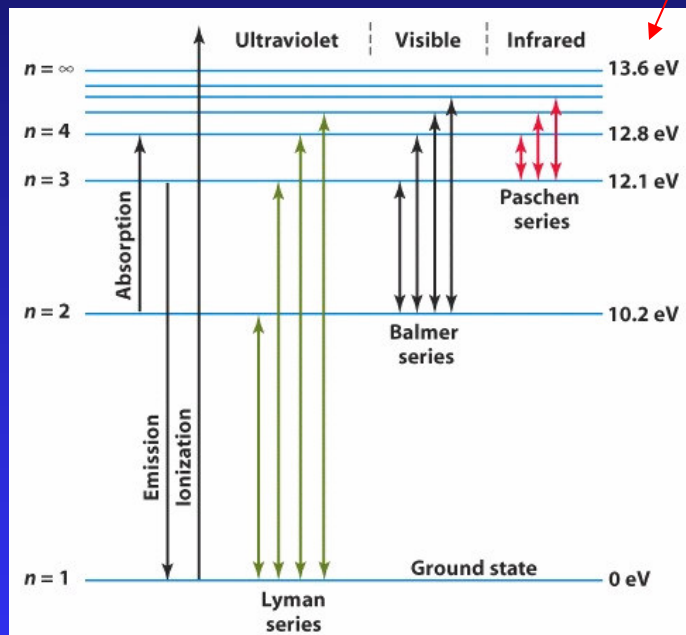


π^+

Quark: i costituenti degli adroni

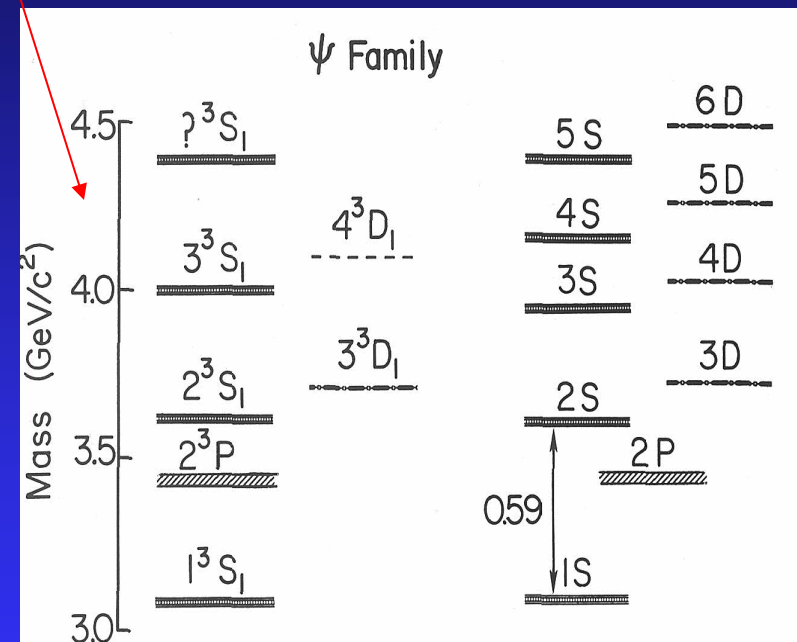
Scala delle energie: rapporto circa 1 miliardo!

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

Un corpo unificato di teorie avanzate, costruite rispettando i principi della teoria della relativita' e della meccanica quantistica, che ha ricevuto finora innumerevoli conferme sperimentali, e che necessita ora di risposte ad alcune domande fondamentali

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 $-1/3$

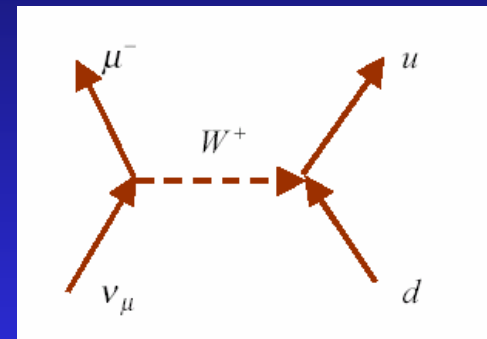


Ogni quark ha anche
una carica di **colore**

Le interazioni

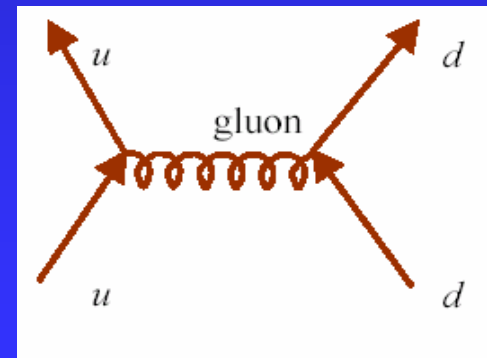
Interazioni elettromagnetica e debole: unificate ad alta energia nell' interazione elettrodebole, sentita da *quark e leptoni*

*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, le regole del gioco

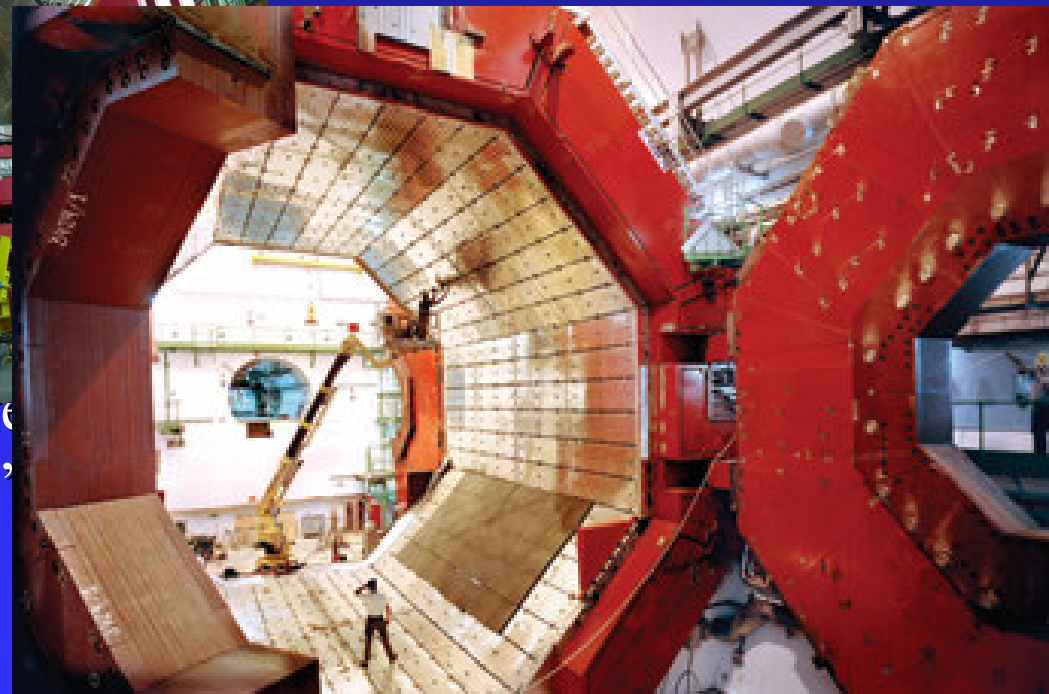
- *Emissione* e *assorbimento* di particelle mediatrici da parte di leptoni e quark
- Quali sono le *regole* che governano questi processi elementari?
- Come e' cominciato, e come finira' tutto questo?
- Risposta: *esperimento e teoria*

Le domande difficili

- Le particelle mediatrici, come il fotone e i bosoni intermedi $W^\pm, Z^0$ appartengono alla stessa famiglia. Perché il fotone è privo di massa, mentre $W^\pm, Z^0$ sono così pesanti?
- Qual è, in generale, l'origine della massa? Esiste la *particella di Higgs*?
- È vero che quark e gluoni sono *sempre confinati*?
- C'è qualcosa di nuovo, oltre il Modello Standard?

LHC e il futuro

- Completata la costruzione del più grande acceleratore realizzato, il *Large Hadron Collider*
 - 4 anni di lavoro
 - Completata la costruzione del più grande acceleratore realizzato, il *Large Hadron Collider*
 - Completata la costruzione del più grande acceleratore realizzato, il *Large Hadron Collider*
- potrebbero confermare fra le ipotesi più



“Toccare con mano” le particelle..

Nell'esercitazione guidata dal dott. E.Migliore:

Misure sui decadimenti della Z^0

