

# Le particelle elementari

Masterclass Europea

in

*Fisica delle Particelle Elementari*

Students' day – Torino, 20 marzo 2006

# 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. *Chimica, biologia, astronomia, cosmologia, geologia, ... trovano interpretazione e spiegazione nelle leggi della fisica*
2. *Non si osservano fenomeni naturali che siano 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*

# Riduzionismo

Punto di vista generale (ma di sicuro non proprio 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*

# Valore del riduzionismo

Origine: meccanicismo

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

*La legge di Newton e' unica, la stessa per tutte le masse (mele, Luna, pianeti, satelliti artificiali, pattinatori, ...). Primo esempio di interazione fondamentale*

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)

# Cos'è un'interazione fondamentale?

Idea estremamente unificante:

*All'origine di tutti i fenomeni di tipo gravitazionale c'è una  
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 ...

## In altre parole....

*...la riduzione della complessità di un sistema fisico, che individua i suoi componenti semplici e studia separatamente le loro proprietà, risulta un passo essenziale nella comprensione delle leggi naturali*

Almeno fino ad ora

# La struttura della materia

Origini nella chimica: Dalton, Lavoisier, Avogadro... e il concetto di *elemento chimico*

*Molecole come costituenti della materia*

*“La parte piu’ piccola di ogni sostanza”*

# Riduzionismo in azione

- 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																	10
H	He																	Ne
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	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113						
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	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

# I costituenti atomici

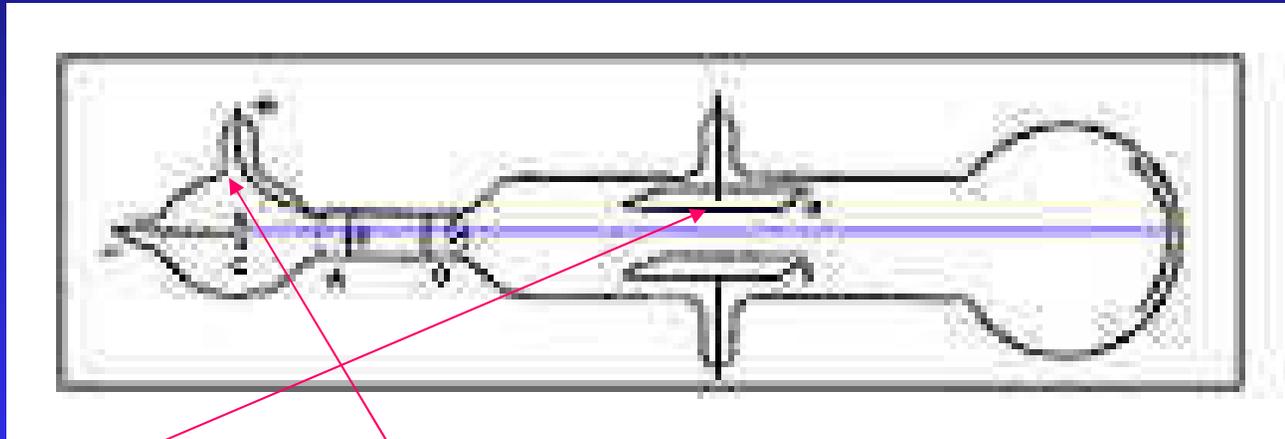
Ricerca di *evidenze fisiche* che comprovino gli *indizi di origine chimica* sulla struttura complessa degli atomi

Elettrone: *Thompson*

Nucleo: *Rutherford*

# Thompson: l'elettrone

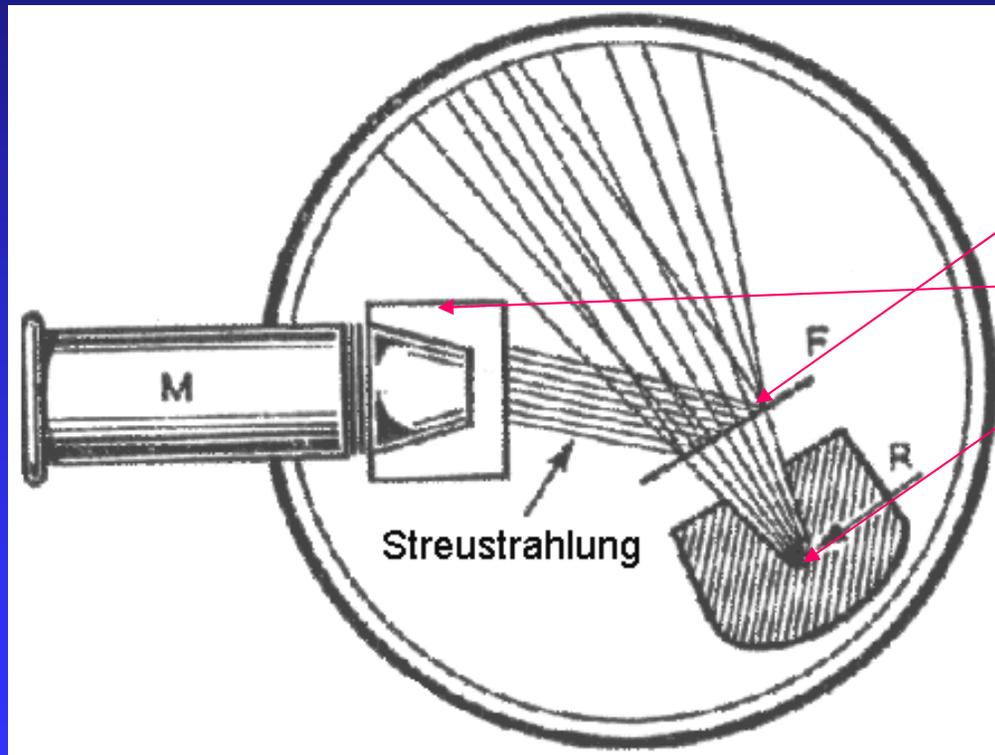
*Raggi catodici*: radiazione emessa dai metalli quando sono riscaldati



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  $\alpha$*  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  $\approx 100$  specie atomiche...*

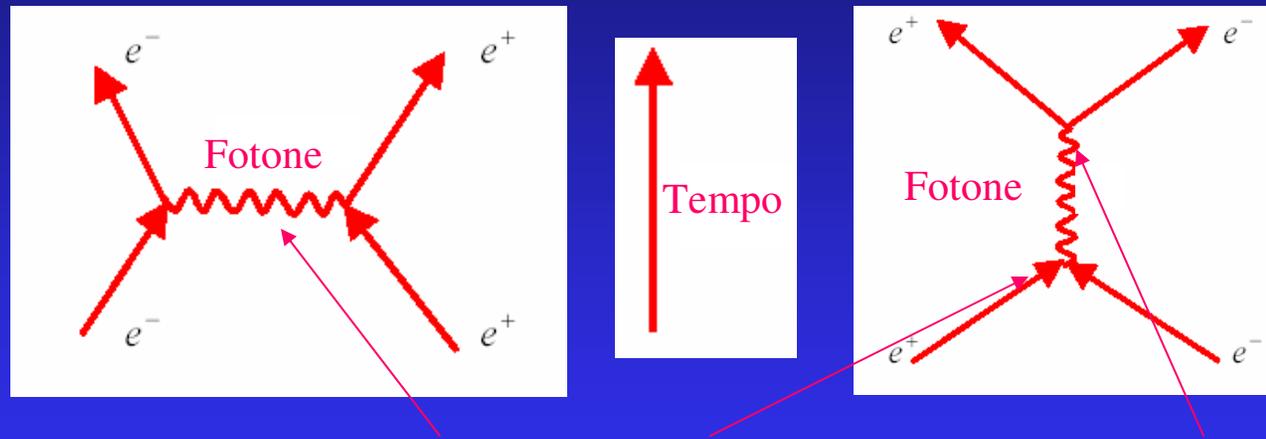
*...a 2 costituenti atomici: nucleo ed elettrone*

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

Una seconda interazione fondamentale: i campi elettromagnetici sono *unici*, 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

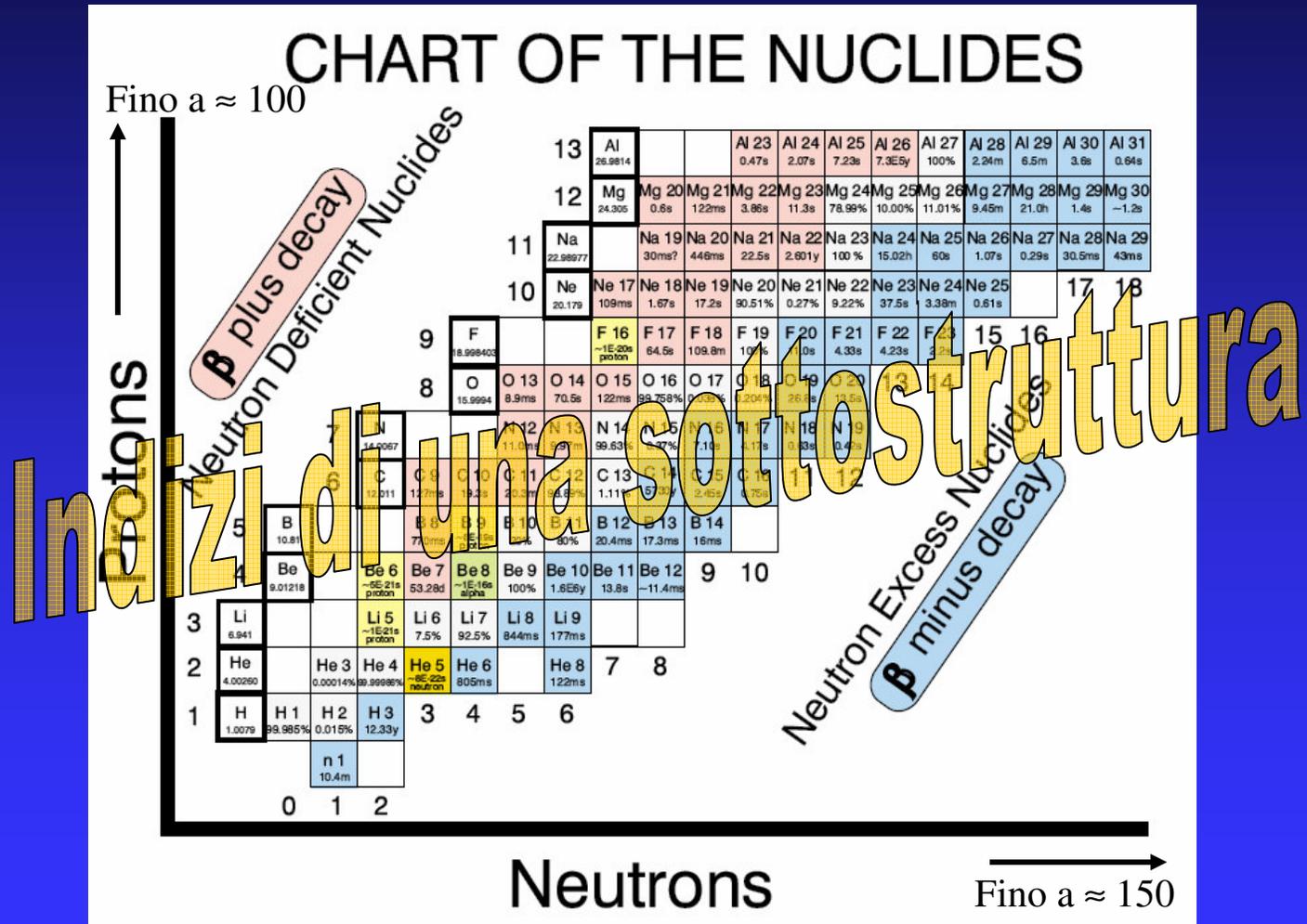


Molti processi: *collisione, annichilazione, materializzazione,..*  
Tutti descritti dalla stessa legge della forza

# 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?

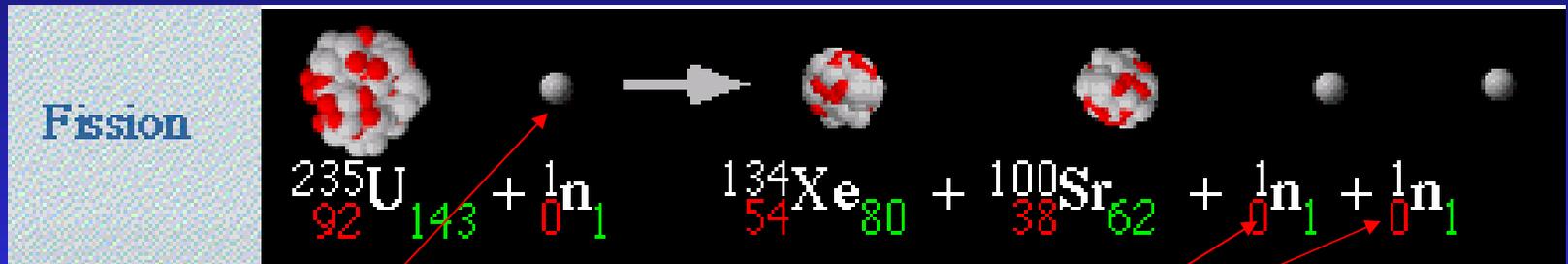
Problema: i costituenti nucleari sono a carica positiva o nulla  
Come fa il nucleo a restare unito, visto che cariche di ugual segno si respingono?

Nuova interazione fondamentale, *l'interazione forte*: 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!

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

# Il nucleo e le reazioni nucleari

Un esempio di reazione nucleare: la *fissione*



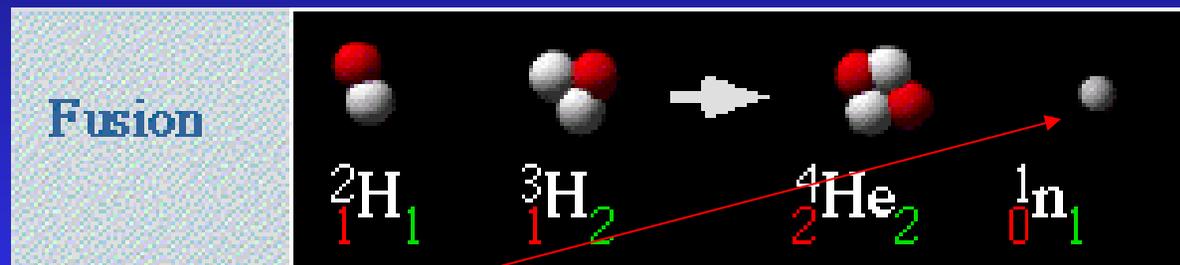
Bassa energia

Alta energia

Reazioni come questa: alla base del funzionamento dei reattori nucleari ( e della bomba A)

# Un'altra reazione

Un altro esempio di reazione nucleare: la  *fusione*



Alta energia

Reazioni come questa: alla base della produzione di energia  
Nelle stelle e dei futuri reattori a fusione (e della bomba H)

# Cosa rende instabile il nucleo?

Perche' alcune specie nucleari sono instabili?

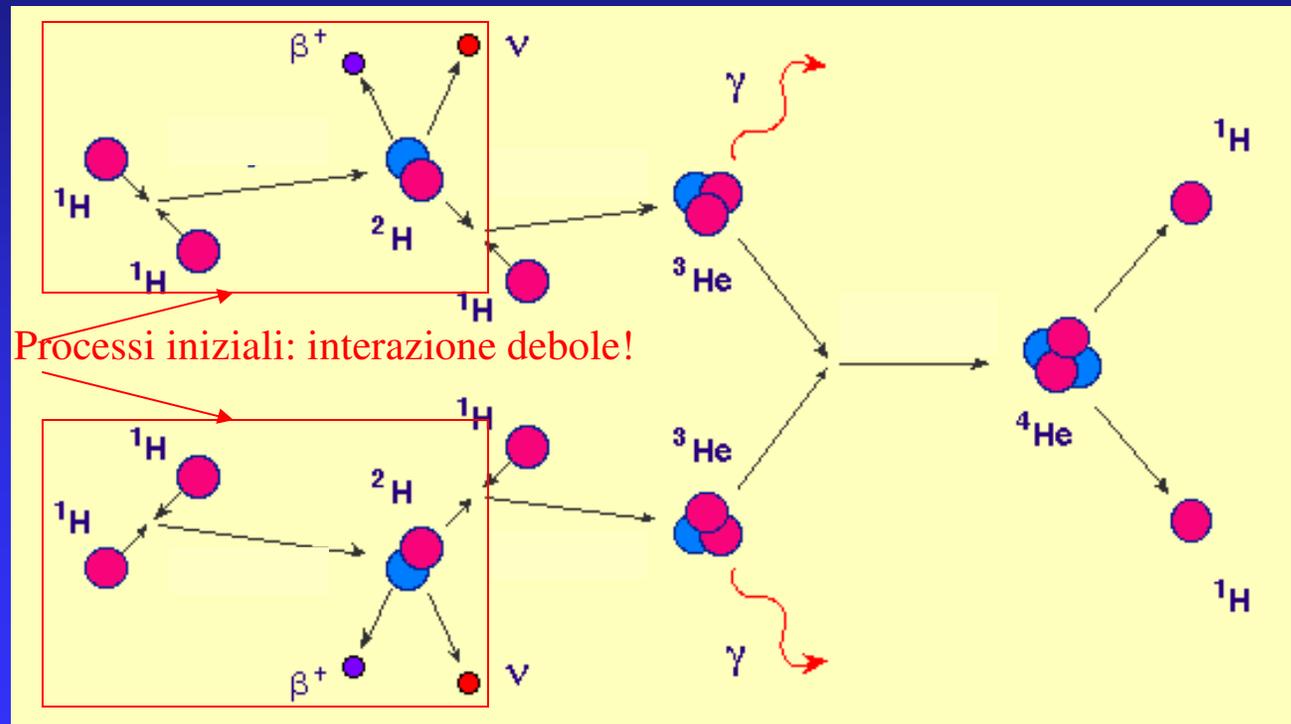
Diverse modalita' di disintegrazione: la piu' interessante, nota come *decadimento beta*, ha caratteristiche bizzarre

Governata da una quarta interazione fondamentale, *l'interazione debole*, molto meno intensa dell'interazione elettromagnetica

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

# Perche' e' interessante, se e' debole?

Catena di reazioni che fornisce energia alle stelle (incluso il Sole): *ciclo dell'idrogeno*



# Le interazioni fondamentali

L'indagine sulla struttura della materia conduce 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

Ogni modello deve essere formulato 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

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

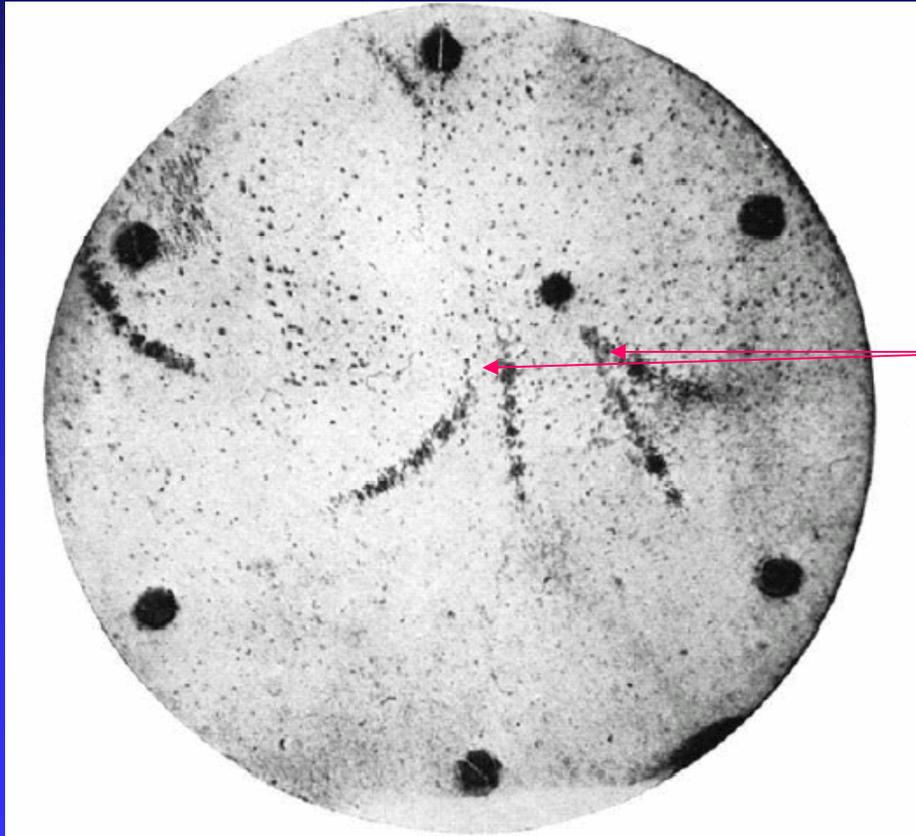


Foto in camera a nebbia

Fra gli altri processi:

2 esempi di *produzione di coppie*

Materializzazione di raggi  $\gamma$  di alta energia (radiazione elettromagnetica) in una coppia elettrone-positrone

# Effetti quantistici

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

Due conseguenze importanti:

*Quantizzazione dell'energia*

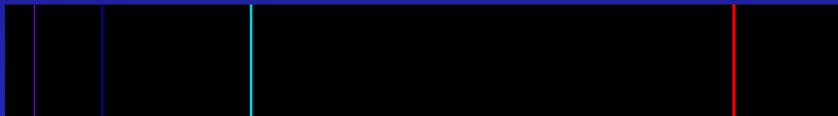
→ Esistenza di *livelli energetici* discreti

Caratteristiche *ondulatorie* nella dinamica delle particelle

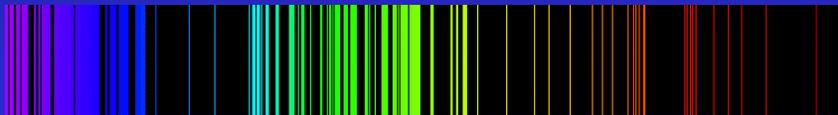
→ Il moto delle particelle assomiglia a quello di un' *onda*

# La spettroscopia atomica

Gli atomi eccitati (p.es. in un gas caldo) emettono luce di colori caratteristici



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

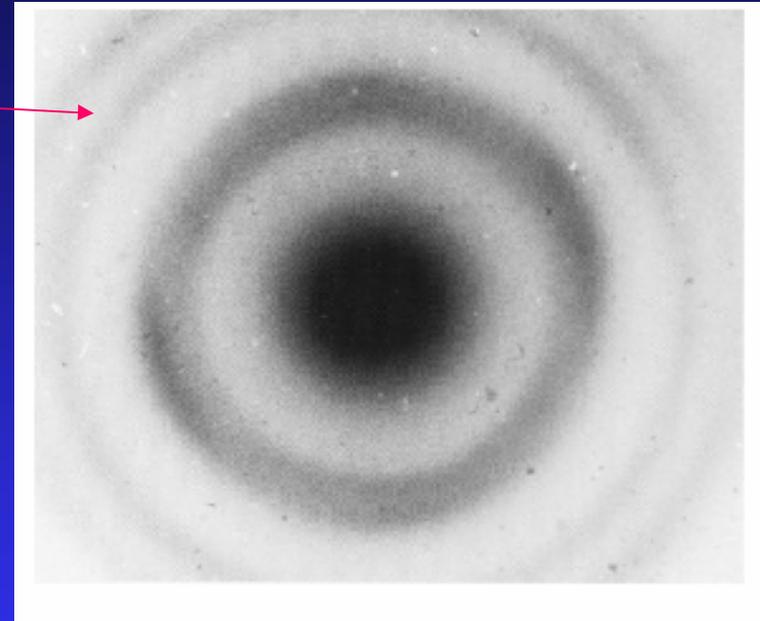
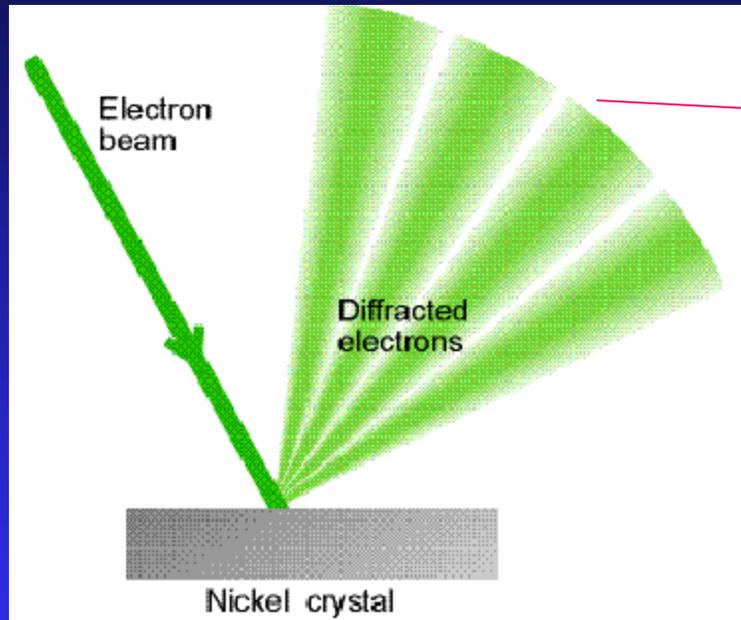


Figura di diffrazione, simile a quelle che si ottengono quando la luce passa attraverso piccole fenditure

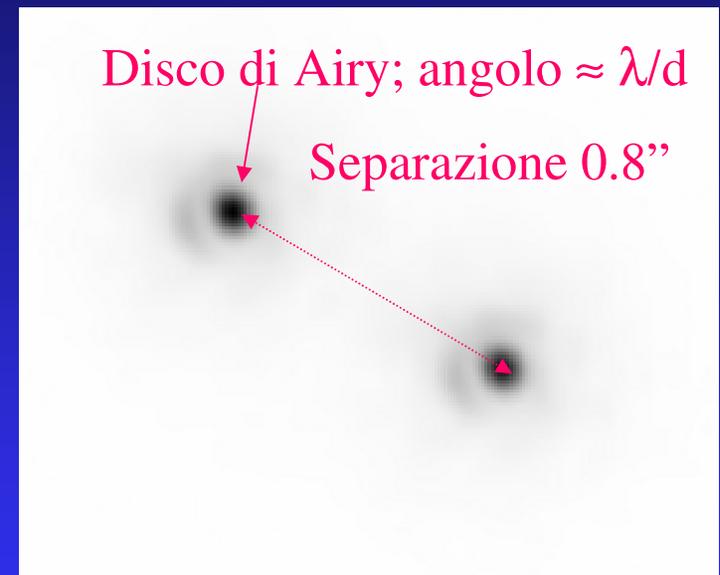
→Le particelle hanno una lunghezza d'onda  $\lambda = h/mv$

*Velocita' grandi = Lunghezze d'onda piccole*

# Onde e dettagli geometrici

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

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  $\zeta$  di Boote  
osservata in luce visibile -  $\lambda \approx 530 \text{ nm}$   
Nordic Telescope  $d = 2.56 \text{ m}$**

# Metodo sperimentale

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

Sistemi ottici per convogliare e raccogliere la luce

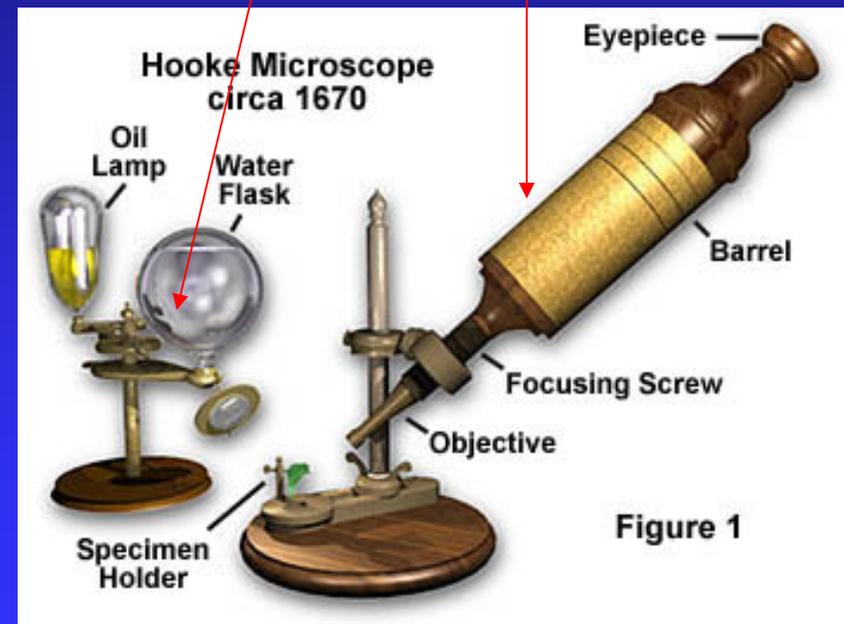
*Sorgente di radiazione (lampada)*

*Bersaglio (campione)*

*Rivelatore di radiazione (occhio)*

Qual e' il dettaglio minimo osservabile?

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



# Il microscopio elettronico

Se vogliamo osservare dettagli piu' piccoli (virus, ...):

Sistemi "ottici" per convogliare gli elettroni

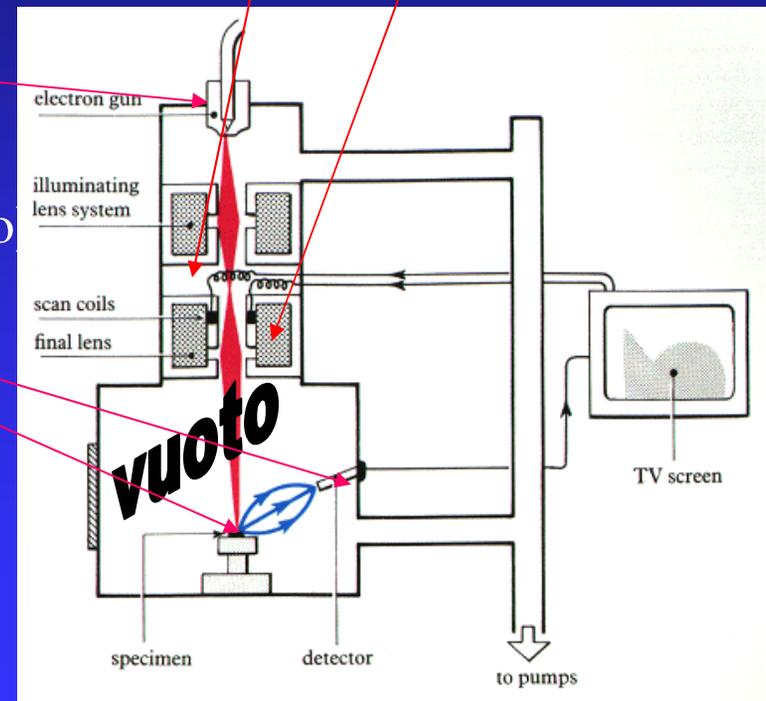
*Sorgente di radiazione (elettroni accelerati)*

(cannone elettronico, come in una TV)

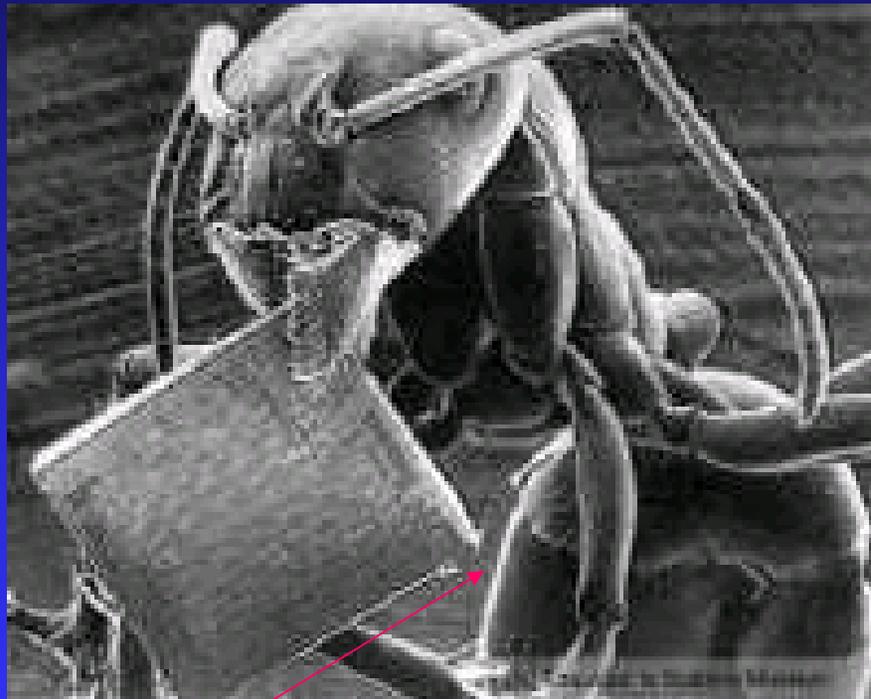
*Bersaglio* (campione)

*Rivelatore* (dispositivo che misura la corrente di elettroni diffusi dal bersaglio)

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



# La formica e il microchip



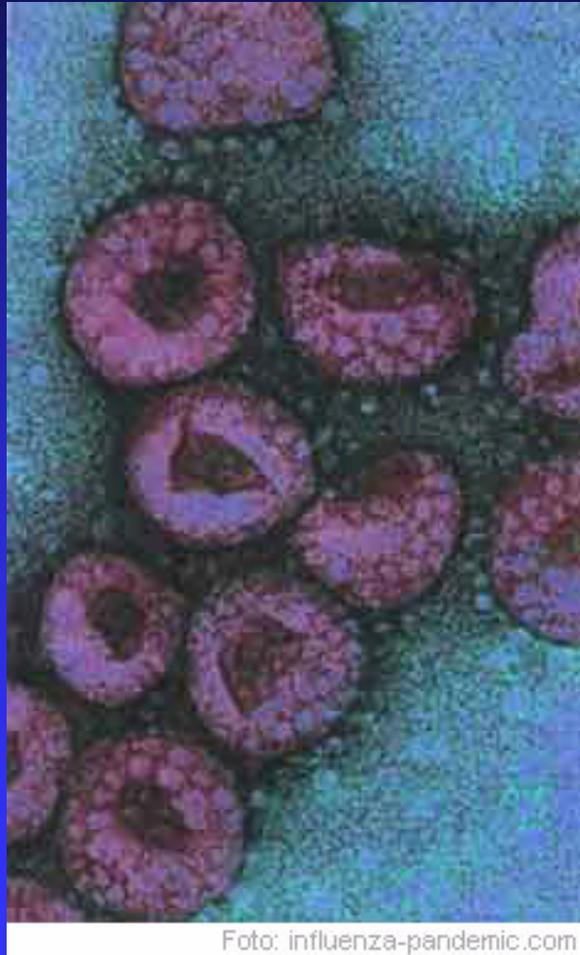
Un'operaia (formica...) trasporta un microchip

Microscopio elettronico a scansione – 100X

0.3 mm

Dettaglio minimo 1  $\mu\text{m}$

# Meno frivolo...



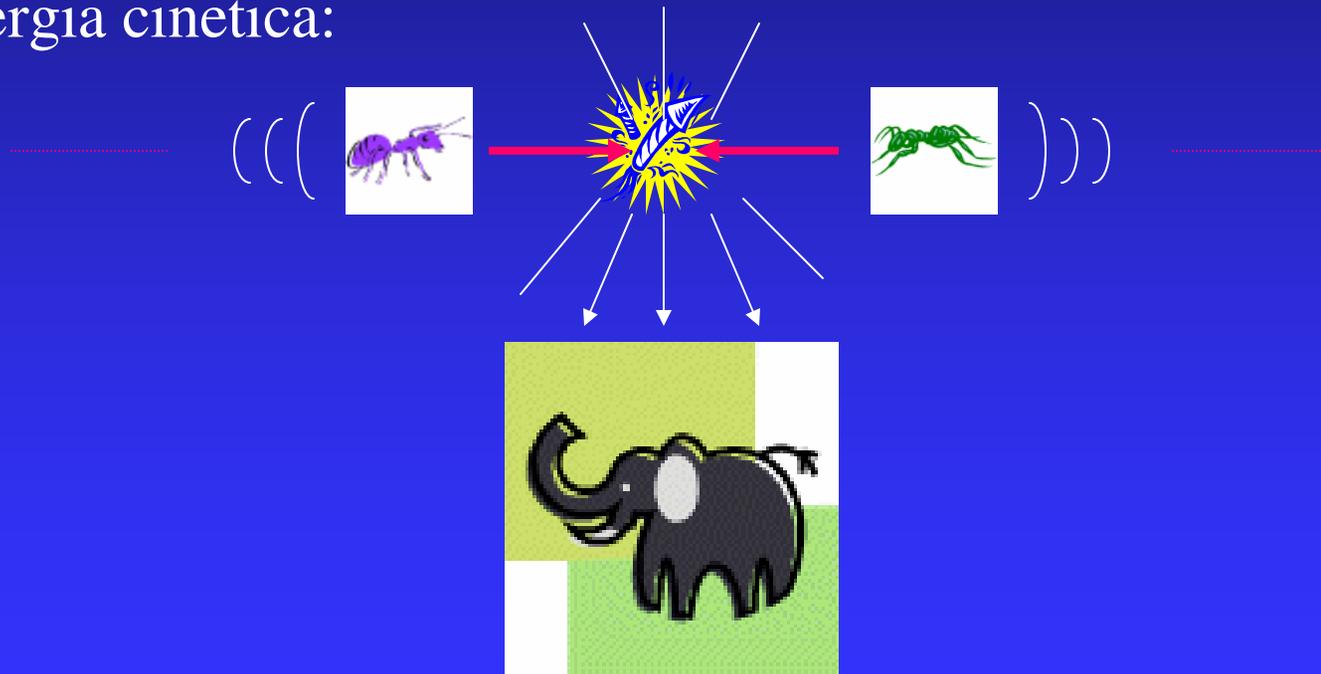
Virus H5N1  
(Influenza aviaria)

Circa 280000X  
1micron → 28 cm

# 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:



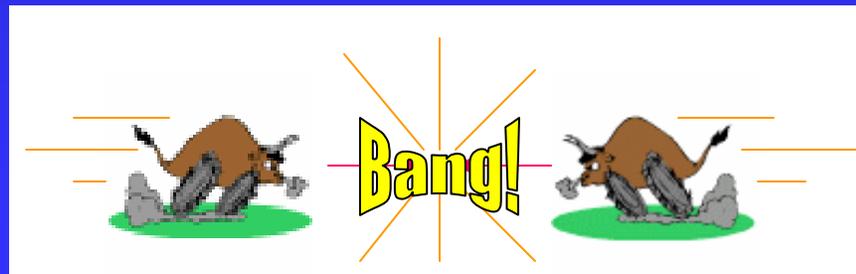
# Acceleratori

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

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

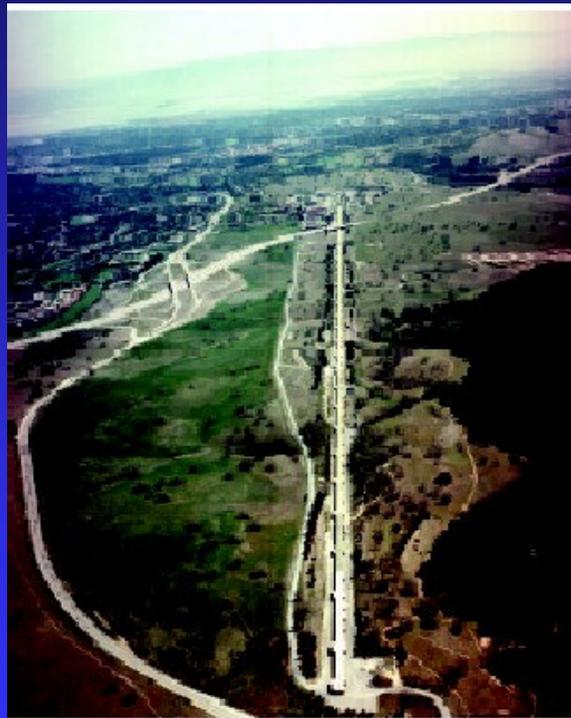
→ Super microscopio elettronico

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



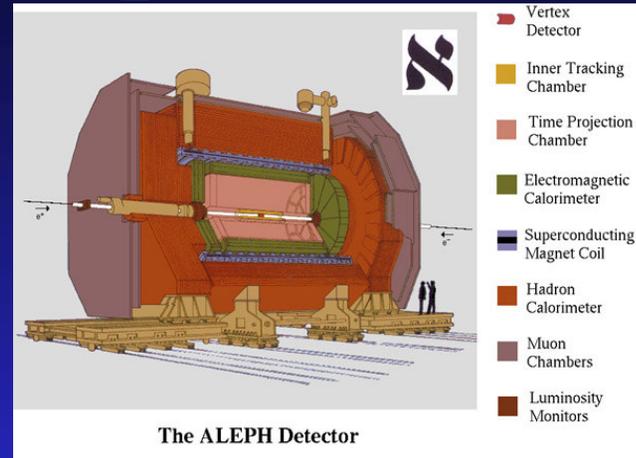
CERN, Ginevra, Svizzera  
Acc. circolari  
SPS (7 km), LEP/LHC (27 km)

# Rivelatori di particelle

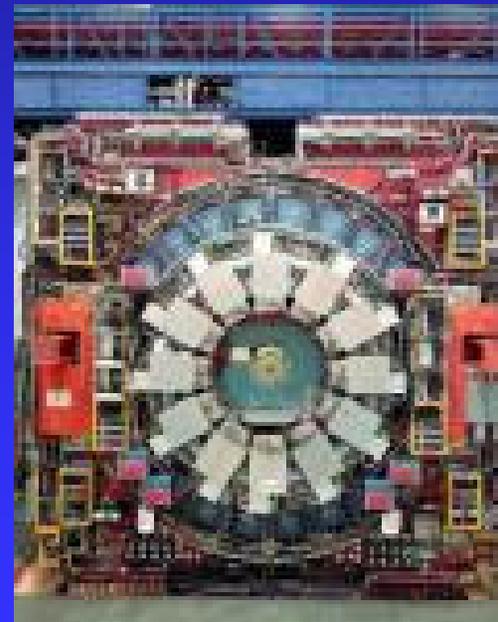
I sostituti dell'occhio umano, per radiazioni di energia così alta, sono anche loro sistemi grandi e complessi...

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

*Lezione del prof. E. Chiavassa a seguire*

# *La Big Science*

Studio su larga scala, soprattutto dal secondo dopoguerra

*Comunita' mondiale* impegnata nella ricerca

*Gigantismo* di acceleratori e rivelatori (e costi)

*Straordinaria ricaduta tecnologica*

(magneti, elettronica, fisica medica, software, WWW,...)

Collaborazioni di centinaia (oggi, *migliaia*) di ricercatori

Enorme quantita' di dati raccolti

Interpretazione: analisi dati, computers, reti,...

Negli ultimi 30 anni, crescenti prove a favore del

*Modello Standard*

# Lo zoo delle particelle

Moltissimi parenti di protone e neutrone...

Particelle che interagiscono *fortemente*: gli *adroni*

Centinaia di specie adroniche

Osservati in collisioni ad alta energia

Situazione simile a quella incontrata per atomi e nuclei

→ *Indizi di una sottostruttura*

	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$
$S = +1$		$K^0$	$K^+$
$S = 0$	$\pi^+$	$\pi^0, \eta$	$\pi^+$
$S = -1$	$K^+$	$K^0$	

	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$
$S = 0$		n	p
$S = -1$	$\Sigma^-$	$\Sigma^0, \Lambda$	$\Sigma^+$
$S = -2$		$\Xi^0$	

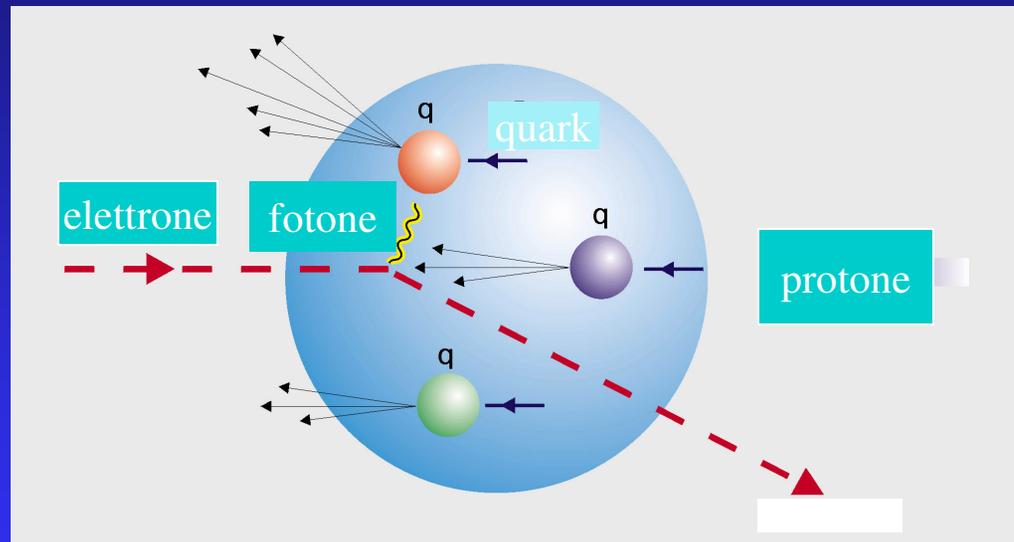
	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$	$Q = +2$
$S = 0$	$\Delta^-$	$\Delta^0$	$\Delta^+$	$\Delta^{++}$
$S = -1$	$\Sigma^{*-}$	$\Sigma^{*0}$	$\Sigma^{*+}$	
$S = -2$	$\Xi^{*-}$	$\Xi^{*0}$		
$S = -3$	$\Omega^-$			

Un angolino di 'tavola periodica'...

# Anche il protone e' un 'atomo'

Domanda: il protone e' elementare o composto?

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:

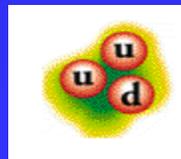
*Sono puntiformi*

*Interagiscono fortemente*

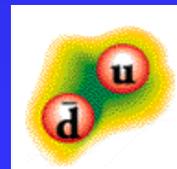
*Non si osservano liberi*

*Si osservano sotto forma di stati legati*

*Barioni: 3 quark      Mesoni: quark-antiquark*



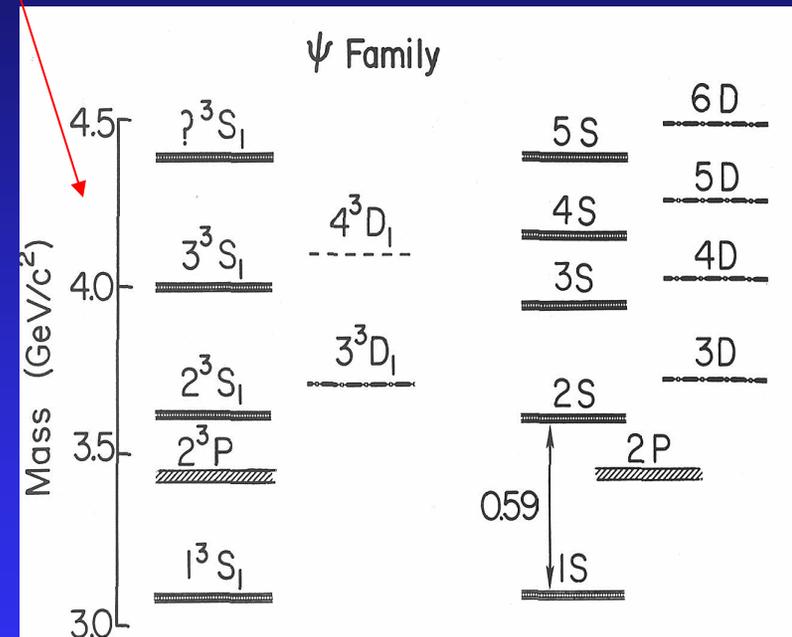
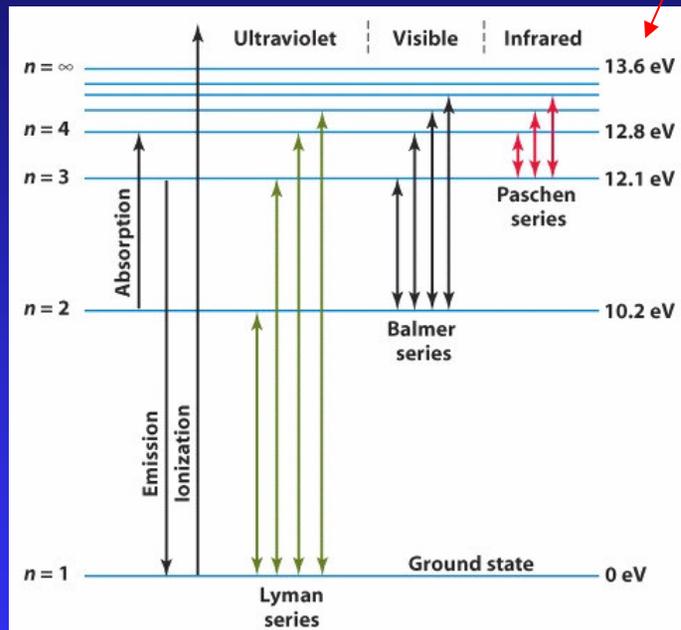
**p**



**$\pi^+$**

# Quark: i costituenti degli adroni

Scala delle energie: rapporto circa 1 miliardo!



Livelli energetici del sistema  
elettrone + protone: atomo di idrogeno

Livelli energetici del sistema  
quark  $c$  + antiquark  $c$ : charmonio

Struttura, meccanismo simili : costituenti elementari legati

# I leptoni, parenti dell'elettrone

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

*Muone*  $\mu$

*Tauone*  $\tau$

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

*Neutrino elettronico*  $\nu_e$

*Neutrino muonico*  $\nu_\mu$

*Neutrino tauonico*  $\nu_\tau$

*Sono puntiformi*

*Interazioni elettromagnetica e debole*

*Si osservano liberi*

*Non si osservano (quasi) sotto forma di stati legati*

# Il Modello Standard: i costituenti

Particelle “prive di struttura”

6 leptoni

$e^-$ elettrone	$\mu^-$ muone	$\tau^-$ tau
$\nu_e$ neutrino e	$\nu_\mu$ neutrino $\mu$	$\nu_\tau$ neutrino $\tau$

6 quark

Ognuno puo' avere 3 diverse cariche di *colore*



# THE PATRICK HALL STORY: a rock opera

By TC McManus and Quark Lepton

THE TRUE LIFE  
STORY OF A  
ROCK'N ROLL  
SUPERSTAR



"A noble and Majestic story told  
with the awesome storytelling  
ability that only TC McManus  
and that other guy can offer"

-TC McManus

[www.geocities.com/puppetregimeusc](http://www.geocities.com/puppetregimeusc)

**BENSON THEATRE:**

(across South Bull Street from Bates House)

**April 23 and 24 8pm**

**Admission:**

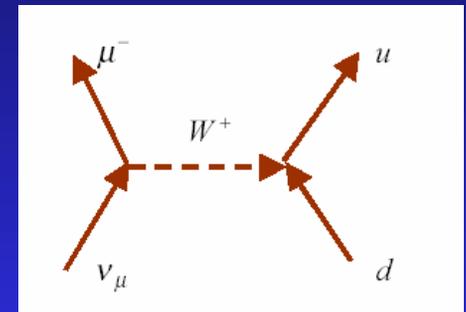
**\$1**

**Collect All 4!!!**

# Il Modello Standard: le interazioni

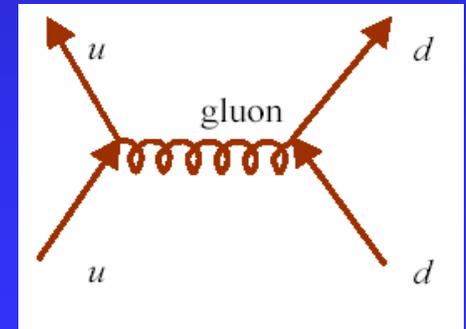
Interazioni elettromagnetica e debole: unificate ad alta energia nell' interazione elettrodebole, sentita da tutti i costituenti

*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 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 di questi processi elementari?
- Come e' cominciato, e come finira' tutto questo?
- Risposta: *esperimento e teoria*

# 'Toccare con mano' le particelle..

Nell'esercitazione guidata dal dott. E.Migliore:

*Misure sui decadimenti della  $Z^0$*

