



# FISICO PER UN GIORNO - MASTERCLASS 2006



$e^-$  e i suoi fratelli

(foto: courtesy CERN)

## Una visita allo zoo delle particelle elementari

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# ATTENZIONE!



La FISICA DELLE PARTICELLE è **STUPEFACENTE**:  
una sua frequentazione può dare stati di euforia,  
alterazioni nella percezione della realtà e forte  
dipendenza psichica...

Per evitare gli effetti collaterali, si consiglia di  
precedere il suo studio con l'assunzione di opportuno  
antidoto, in forma di pillola trifase...



fisica classica



relatività



quantistica

...e buon divertimento nello zoo delle particelle!

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# LEGGI DI CONSERVAZIONE:



In ogni sistema fisico isolato si conservano

- L'energia totale  $E_{\text{tot}}$  (cinetica+potenziale+cost. arbitraria)
- La carica elettrica totale  $Q_{\text{tot}}=q_1+q_2+\dots$
- La quantità di moto totale (vettore)  $\vec{p}_{\text{tot}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$
- Il momento angolare totale (vettore)  $\vec{L}_{\text{tot}} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \dots$

## TEOREMA DI EMMY NÖTHER:

Ad ogni invarianza di un sistema fisico corrisponde una legge di conservazione, quindi ad ogni simmetria (fisica o matematica) del sistema farà riscontro una quantità conservata (vedi sopra).





# LA VELOCITÀ DELLA LUCE



La velocità della luce nel vuoto,  $c \cong 3 \cdot 10^8$  m/s, è la stessa in TUTTI i sistemi di riferimento ed è la massima raggiungibile da una particella (a massa nulla) o da un segnale fisico: ne consegue che gli intervalli spaziali  $\Delta s$  e temporali  $\Delta t$  non sono più gli stessi se misurati in diversi s.r.i. (dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze, relatività della simultaneità);

LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ PER LO SPAZIO E IL TEMPO  
(per sistemi in moto relativo lungo l'asse  $x$  con velocità  $v$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma (x - vt) \\ (y' = y \quad z' = z) \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \left( t - \frac{v}{c^2} x \right) \end{array} \right. \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \geq 1$$
$$\beta = \frac{v}{c} < 1$$



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# L'energia relativistica: $E=mc^2$



La massa  $m$  di una particella non ha sempre lo stesso valore se misurata in diversi s.r.i., perché dipende dalla velocità:  $m = \gamma m_0$ ; è il valore  $m_0$  misurato "a riposo" ad essere invariante. Anche la sola energia non è relativisticamente invariante: si può scrivere

$$E=mc^2 (= \gamma m_0 c^2)$$

Neppure la quantità di moto da sola è costante nei vari s.r.i.: conviene fare i calcoli riferendosi a nuove quantità invarianti relativistiche: le più "quotate" sono

$$I^2 = \sum_i x_i x_i = (c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2)$$

$I$  è l'intervallo spaziotemporale (distanza) tra due eventi

$$P^2 = \sum_i p_i p_i = (E^2/c^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2)$$

$P$  è detto quadrimpulso della particella; in particolare, risulta  $E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$ ,  $\rightarrow$  per particelle in quiete  $E = m_0 c^2$





## Il limite classico dell'energia



Per particelle libere con piccole velocità si può sviluppare l'energia in serie di Taylor nella variabile  $v/c$ , fermandosi ai primi termini ( $v \ll c$ ):

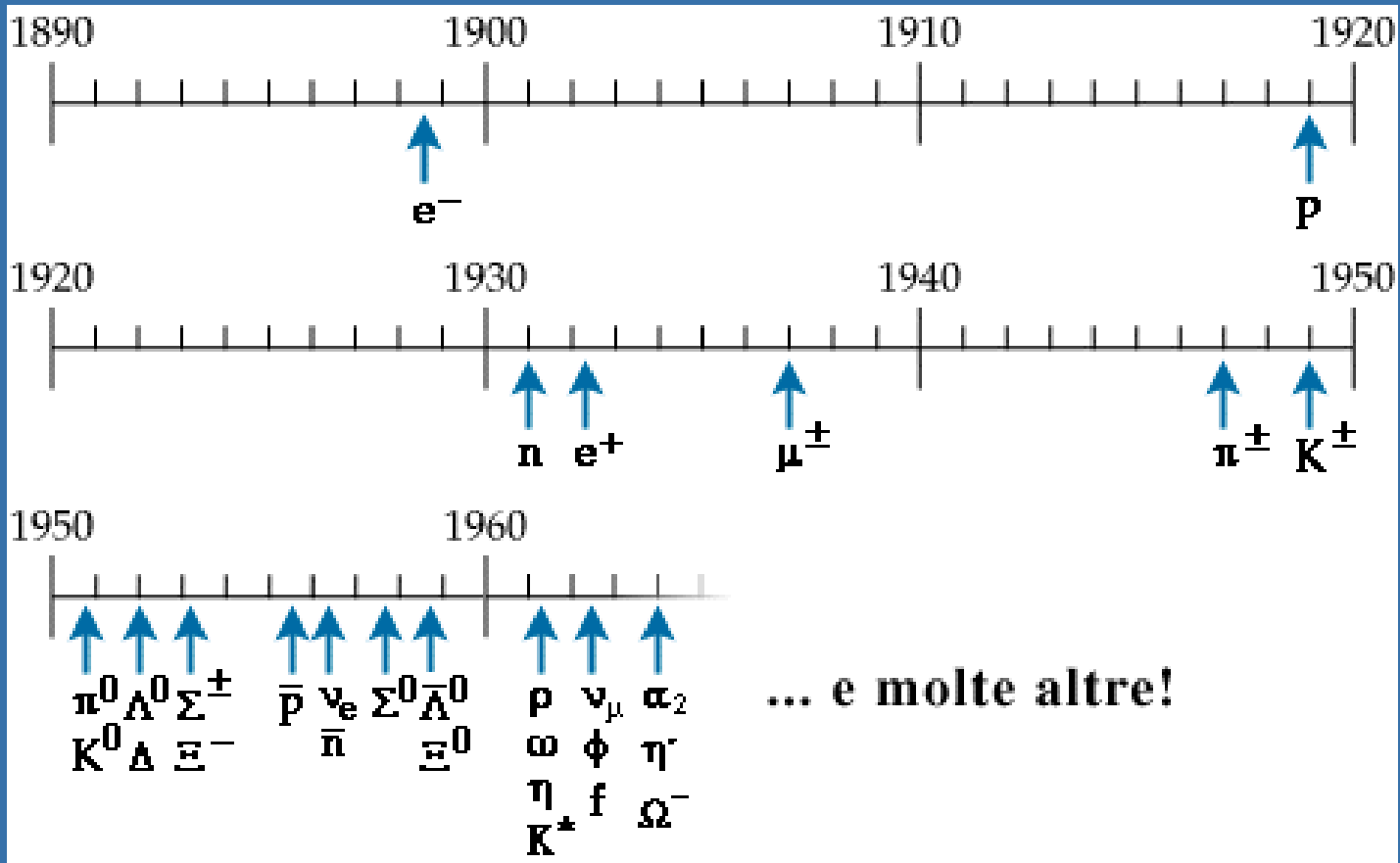
$$E_{REL} = mc^2 = \gamma m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \right)$$
$$E_{TOT} \cong m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 = E_{massa} + E_{cinetica}$$

cioè una costante (non più arbitraria), data dall'energia di massa "congelata" e l'energia cinetica nella sua formulazione classica!





# L'elettrone è il primogenito di una lunga serie di particelle elementari...



Come fu scoperto? Che caratteristiche ha?



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





Nel 1897, J.J. Thomson, lavorando con i tubi di Crookes, osservò che i "raggi catodici" sono

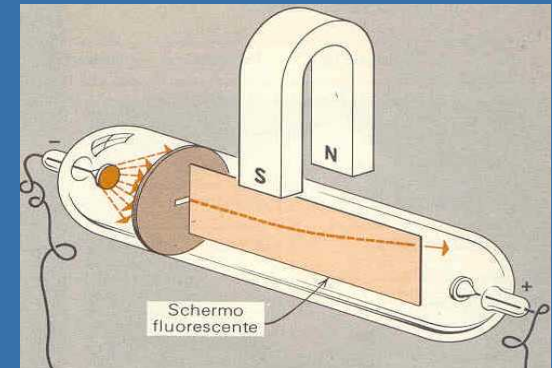
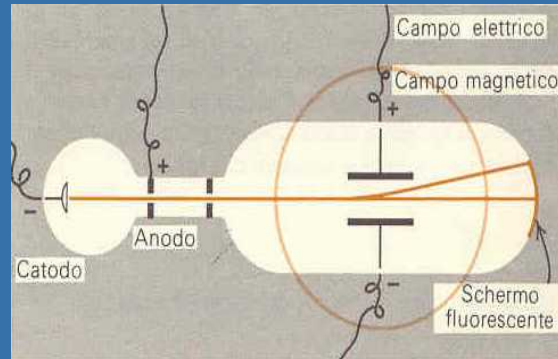
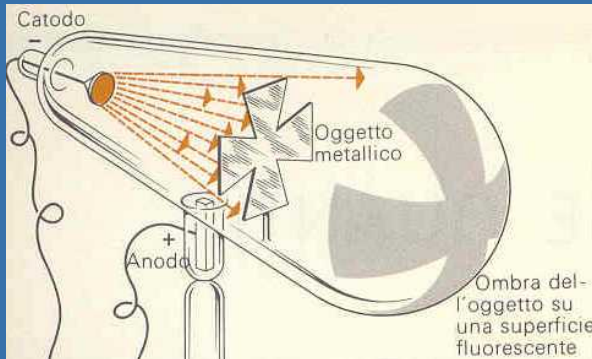
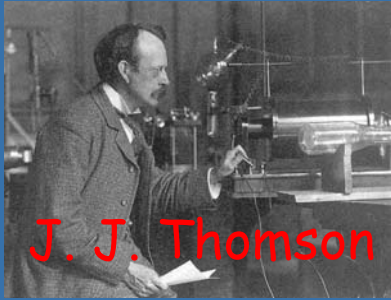


cariche elettriche in moto.

Infatti, essi vengono deviati da un campo elettrico  $E$  o da un campo magnetico  $B$  secondo le previsioni:

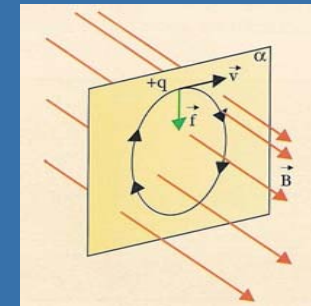
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$



Tubo di Crookes: schema e visualizzazione delle forze agenti sulle cariche in moto

NB: un caso particolare della forza di Lorentz: se  $\vec{E}=0$  e  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , la carica si muoverà lungo una traiettoria circolare di raggio  $R=mv/qB$



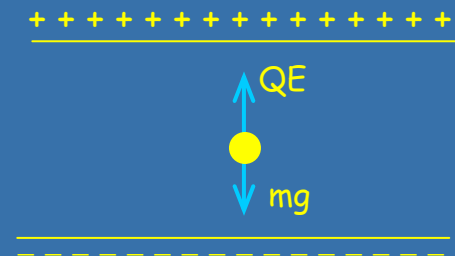
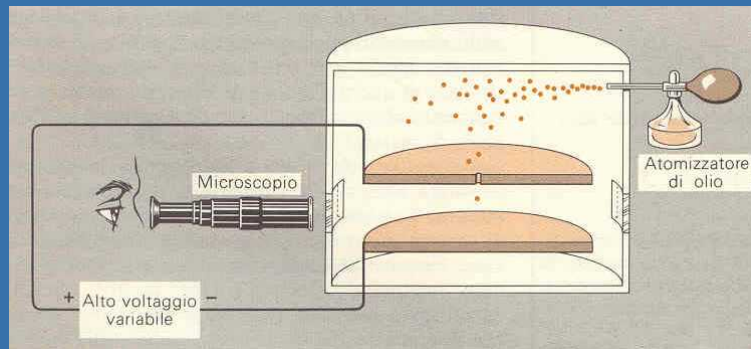




# L'esperimento di Millikan



Thomson misurò il rapporto  $q/m$  e dedusse che i portatori di carica sono tutti uguali: nacque così l'elettrone! Ma quanto vale la sua carica? Rispose Millikan nel 1911 con un celeberrimo esperimento:



In condizioni di equilibrio,  $mg = qE$ , da cui, conoscendo  $m$  (olio),  $Q = mg/E$ ; per TUTTE le gocce,  $Q$  è multiplo INTERO di una carica elementare  $q_e \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \rightarrow q_e = -e$ .

La carica  $e$  dell'elettrone è quantizzata!



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





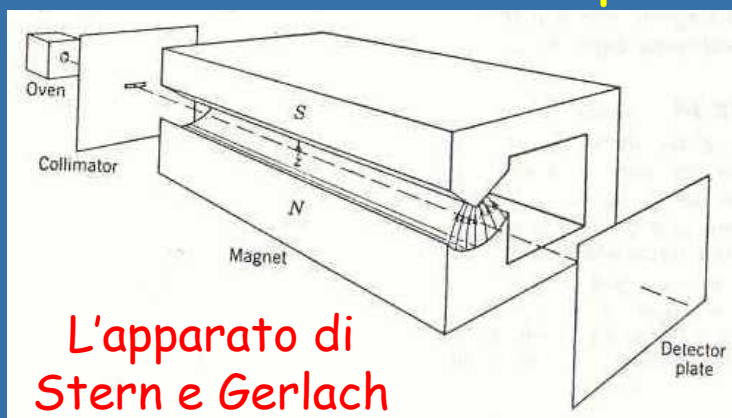
# Un marziano quantistico: lo SPIN



Cos'è esattamente lo spin di una particella?

- è una nuova grandezza quantizzata, come si vede bene negli esperimenti di Stern e Gerlach (1921);
- non è un momento angolare classico, anche se gli elettroni si comportano a volte come se lo fosse (Uhlenbeck & Goudsmit, 1925);
- è importante per spiegare la struttura atomica, e porterà W. Pauli a formulare il principio di esclusione (1925).

Come si manifesta  
sperimentalmente?

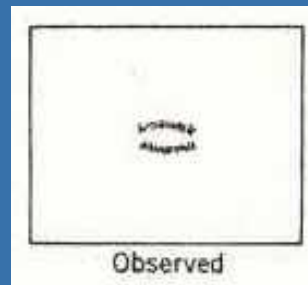
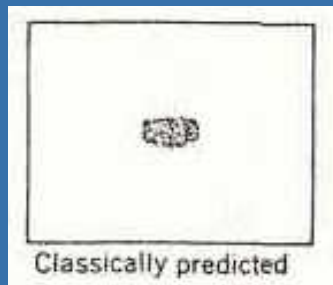
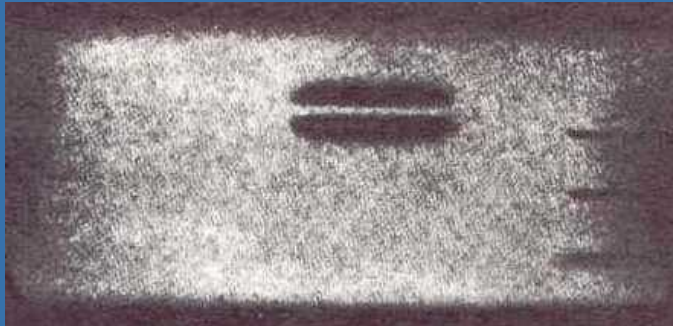


F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





Se l'atomo (o l'elettrone) ha un momento magnetico non nullo, esso verrà deviato con **CONTINUITÀ** lungo l'asse verticale;



Cosa videro di straordinario Stern e Gerlach?  
Il momento magnetico lungo l'asse z (in realtà, misurato lungo qualsiasi direzione) è sempre quantizzato!



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006

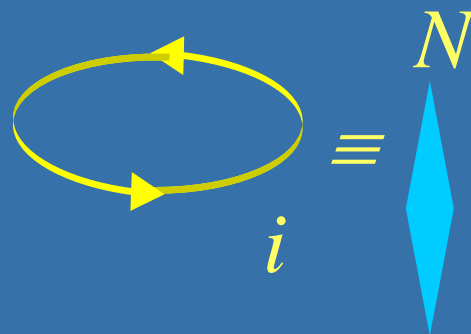




# Se lo spin di un elettrone vale $S = \hbar/2$



possiamo spiegare questo risultato ipotizzando che il momento magnetico sia direttamente proporzionale a  $S$  e alla carica dell'elettrone  $e$  (la classica ipotesi di Ampère, un anello di corrente equivale a un dipolo magnetico). Ma se facciamo bene i conti



$$\hbar = h / 2\pi \approx 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$e \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad m_e \approx 10^{-30} \text{ kg}$$

$$c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m / s} \quad \vec{M} \cong \frac{eh}{2m_e c} \vec{S}$$

l'elettrone dovrebbe ruotare piú velocemente di  $c$ ! Quindi lo SPIN NON è interpretabile come MOMENTO ANGOLARE meccanico di una particella CLASSICA!

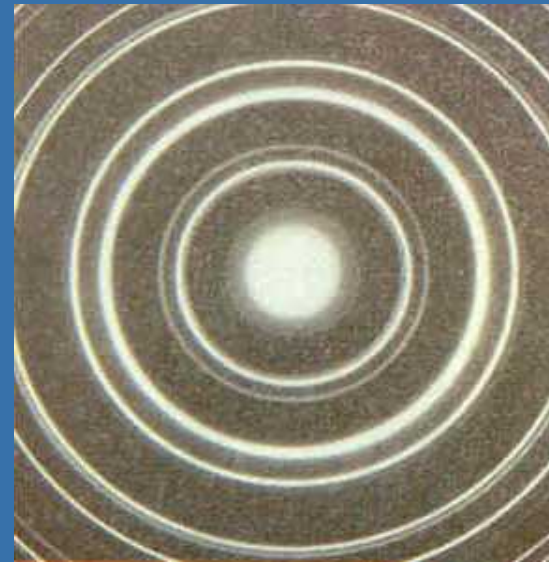




# Gli elettroni sono onde!



Cosa se possibile ancor più strana, Davisson e Germer, e in altro laboratorio, G. Thomson, verificarono sperimentalmente nel 1927 che gli elettroni mostrano un comportamento ondulatorio:



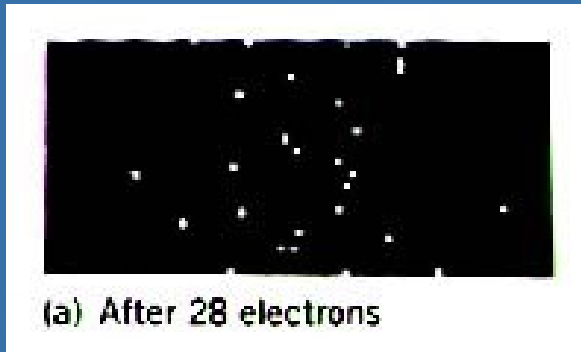
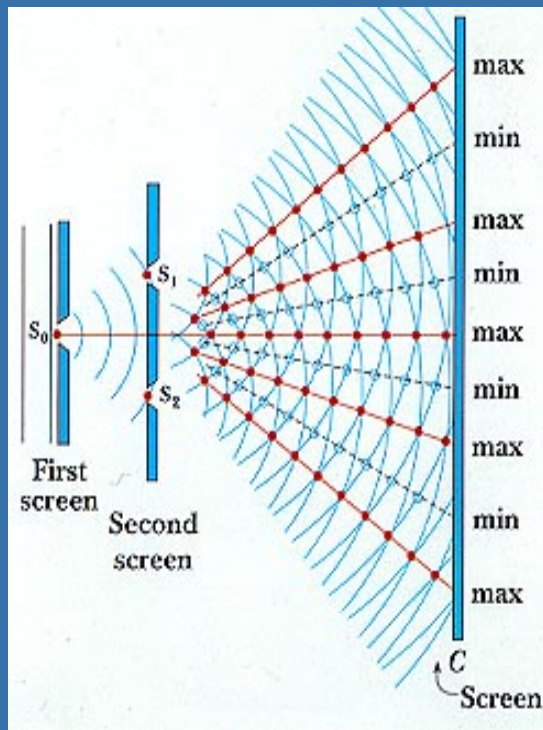
Diffusione di raggi X (a sinistra) e di elettroni (a destra) da un reticolo cristallino (G. Thomson)

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006

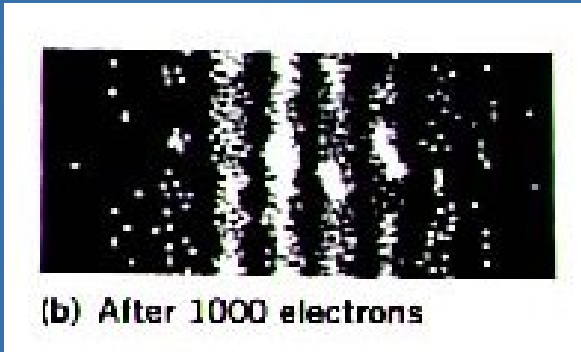




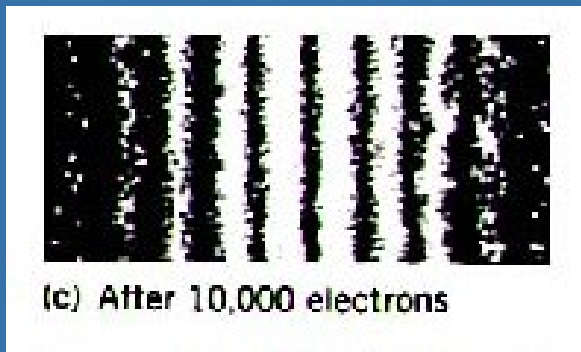
# Che succede allora se inviamo un fascio di elettroni attraverso due fenditure?



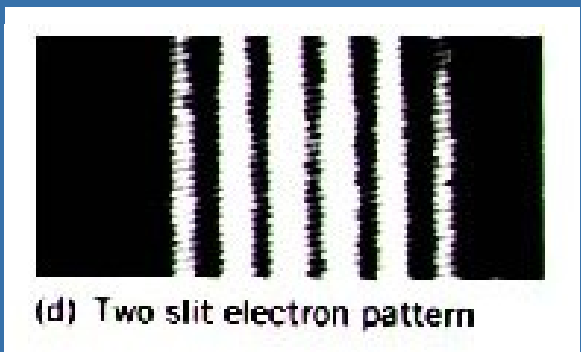
(a) After 28 electrons



(b) After 1000 electrons



(c) After 10,000 electrons



(d) Two slit electron pattern

La meccanica quantistica venne sviluppata "a più mani" a partire dagli anni '20 per descrivere questi ed altri fenomeni.



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# Riassumiamo le proprietà dell'elettrone:



## ❖ Particellari ("classiche"):

Massa:  $0.51099062 \text{ MeV}/c^2 = 1 m_e$

Carica:  $-1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -1 e$

## ❖ Ondulatorie ("quasi classiche"):

$$E = hf$$

$$p = h/\lambda$$

## ❖ Decisamente quantistiche:

Momento angolare orbitale (in un atomo)  $L = nh, n \in \mathbb{N}_0$

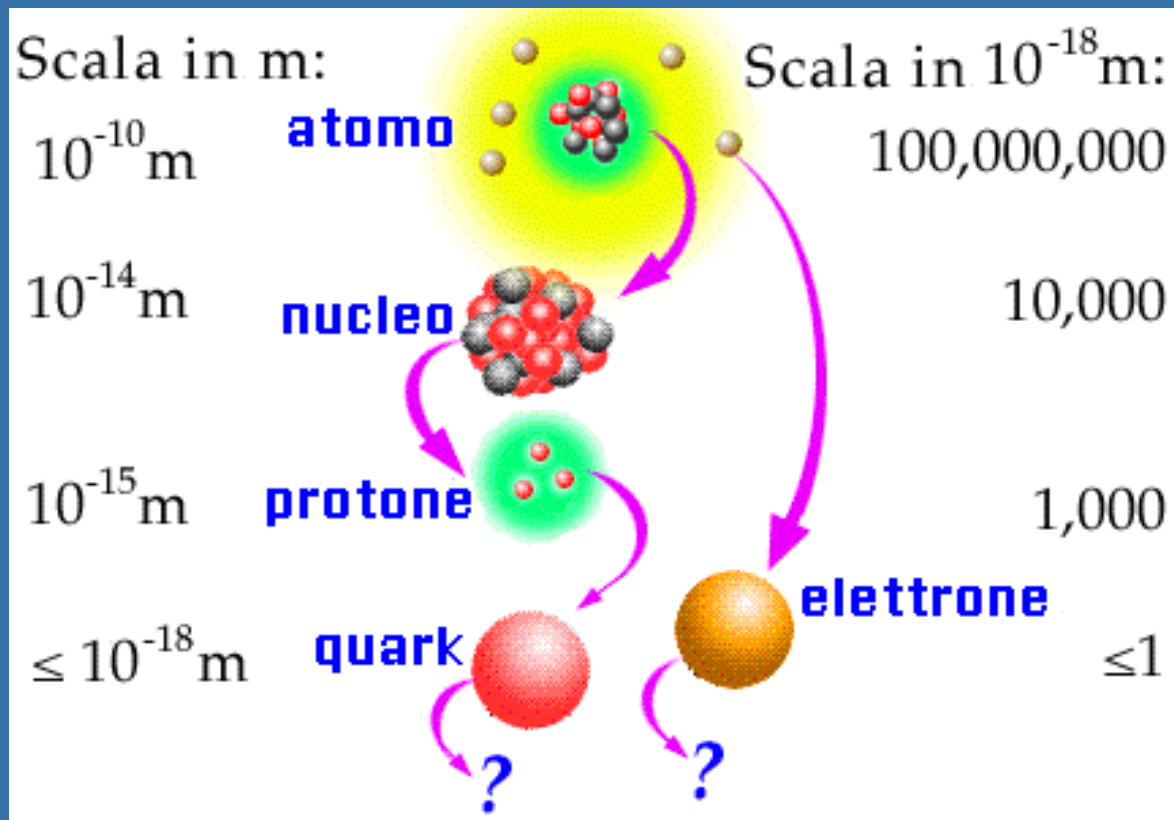
Spin:  $0.5027 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = (h/2\pi) \cdot 1/2 \rightarrow s = \hbar/2$

...inoltre, numero leptonico: + 1 (ci servirà...)





# Quanto è grande un elettrone?



Importante: per quanto ne sappiamo attualmente, l'elettrone è puntiforme e non mostra indizi di struttura interna: è davvero "elementare".



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006



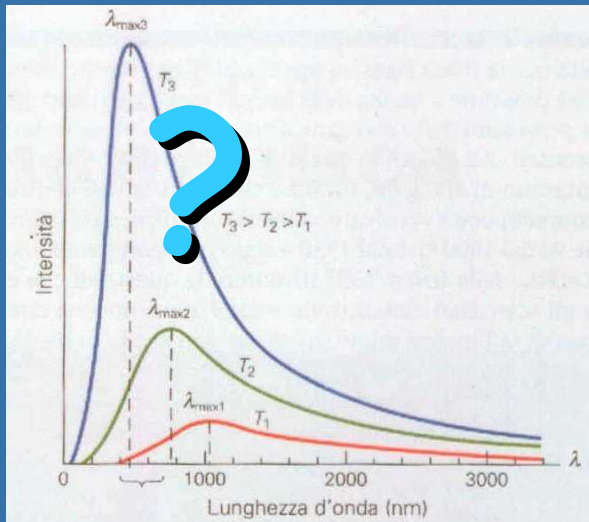




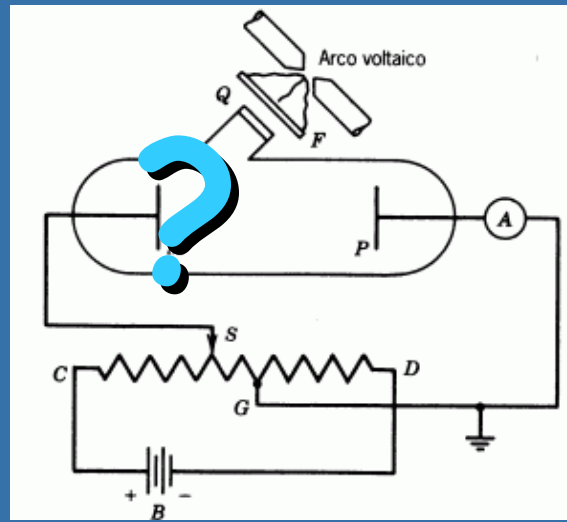
# I fotoni, "palline di luce"



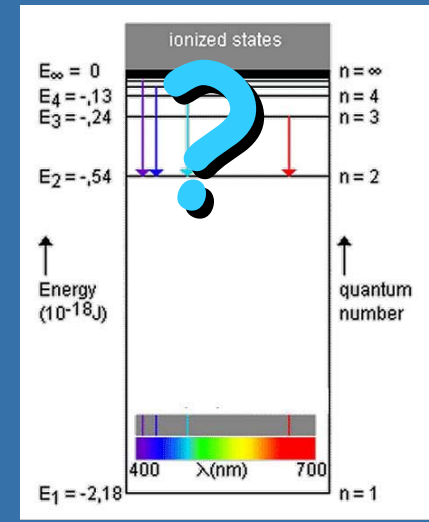
Nello stesso periodo, esperimenti e teoria portano a strane conclusioni sulla vera natura della luce:



Lo spettro di emissione "di corpo nero"



L'effetto fotoelettrico



Lo spettro "discreto" dei gas

... se sperate che vi spieghi tutto OGGI, potete anche andavene a casa subito!!! ..però...

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006



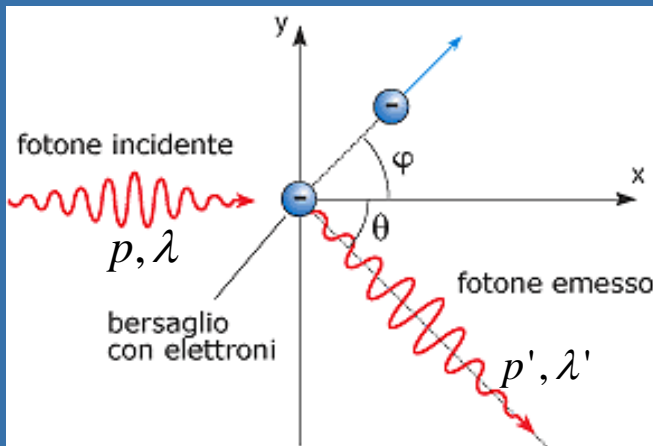


# Natura corpuscolare della luce



Una verifica "spettacolare" del comportamento corpuscolare della radiazione elettromagnetica è la diffusione di raggi X da elettroni "liberi": l'effetto **COMPTON** si spiega ipotizzando un urto elastico (trattato relativisticamente) tra le particelle fotone ed elettrone!

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \vartheta)$$



Dopo questo esperimento, l'ipotesi di Einstein sulla realtà dei fotoni (1905) venne premiata con il Nobel e accettata da tutti.





# La luce è fatta di particelle!



Se crediamo agli esperimenti dobbiamo ammettere che anche la luce abbia una duplice natura, sia ondulatoria che corpuscolare, che si manifesta evidenziando l'uno o l'altro aspetto nei vari casi, ma non entrambi simultaneamente.

Le relazioni tra grandezze ondulatorie (frequenza  $f$ , lunghezza  $\lambda$ ) e corpuscolari (energia  $E$ , quantità di moto  $p$ ) per il fotone sono le seguenti:

$$E=hf$$

$$p=h/\lambda$$

$$h \cong 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

inoltre

$$f\lambda=c$$

$$p=E/c$$

$$c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$





# Il dualismo onda/corpuscolo



In sintesi, gli esperimenti realizzati nei primi anni del XX secolo sia con gli elettroni che con i fotoni mostrano che entrambi hanno una duplice natura, sia ondulatoria che corpuscolare. Una teoria che voglia descrivere i fenomeni atomici (e subatomici) deve tener conto di tale aspetto → La MECCANICA QUANTISTICA è una teoria ondulatoria.  
(...e probabilistica...)

Il principio di indeterminazione di Heisenberg  
Esistono coppie di grandezze osservabili "coniugate" (come  $x$  e  $p$ ,  $t$  ed  $E$ ) il cui valore non può essere conosciuto contemporaneamente con precisione arbitraria: misurando tali grandezze per uno stesso sistema fisico, la precisione è limitata teoricamente da

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar/2$$

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# Una prima descrizione ondulatoria delle particelle quantistiche



Nell'impostazione di Schrödinger, lo stato di un sistema è completamente definito da una funzione d'onda  $\Psi(x,t)$ . L'evoluzione temporale del sistema a partire da condizioni iniziali note,  $\Psi(x,t_0) \rightarrow \Psi(x,t)$ , è governato dalla celebre equazione d'onda (1926)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x,t) = H\psi(x,t) = \left( \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + U(x) \right) \psi(x,t)$$

Pur essendo formalmente corretta e descrivendo abbastanza bene i sistemi semplici, l'equazione non soddisfa appieno i fisici, perché, tra l'altro

- non è relativisticamente covariante;
- non considera l'energia di massa;
- non considera lo spin...



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





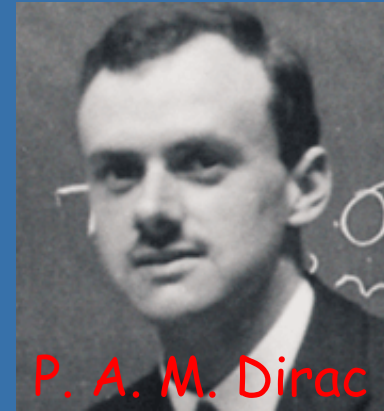
# Meccanica quantistica e relatività: l'equazione di Dirac (1928)



Visti i limiti della teoria di Schrödinger, Dirac propose di impiegare un'altra equazione per descrivere l'elettrone libero:

$$(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc)\psi = 0$$

lineare nelle derivate in  $x,y,z,t$  (le  $\partial_\mu$ ) e relativisticamente covariante; il prezzo matematico da pagare è nella necessità di usare matrici  $\gamma$   $4\times 4$  e  $\psi$  a 4 componenti (spinori), che rendono conto della duplicità di segno (+/-) per lo spin e per l'energia ( $E=mc^2$ ), che in questo modo può essere anche negativa... Quale potrà essere il significato fisico di un'energia di massa negativa?...



P. A. M. Dirac



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006

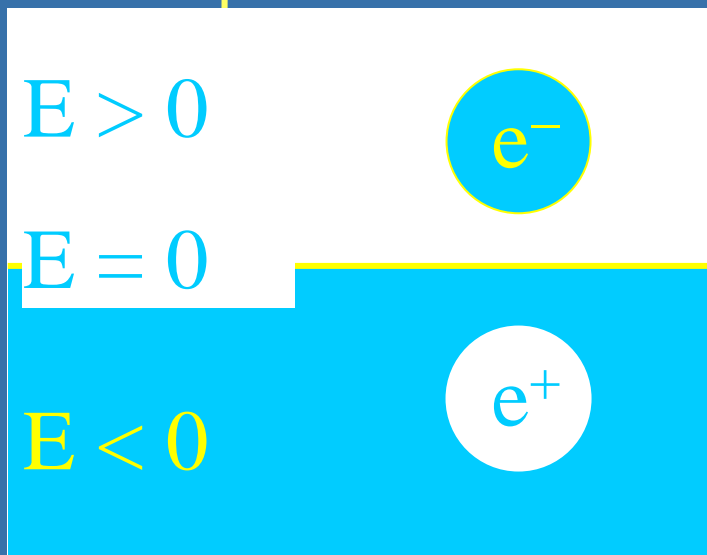




# La previsione dell'antimateria



Secondo Dirac, gli infiniti livelli di energia negativi sono tutti pieni di elettroni non rivelabili, mentre le particelle reali sono quelle a energia positiva. Può accadere che un elettrone del mare acquisti sufficiente energia per diventare reale; in tal caso, lascia un "posto vuoto" nei livelli negativi



...che si comporta a tutti gli effetti come un elettrone POSITIVO!

NB  $e^+$  può anche essere pensato come un  $e^-$  che si muova all'indietro nel tempo...

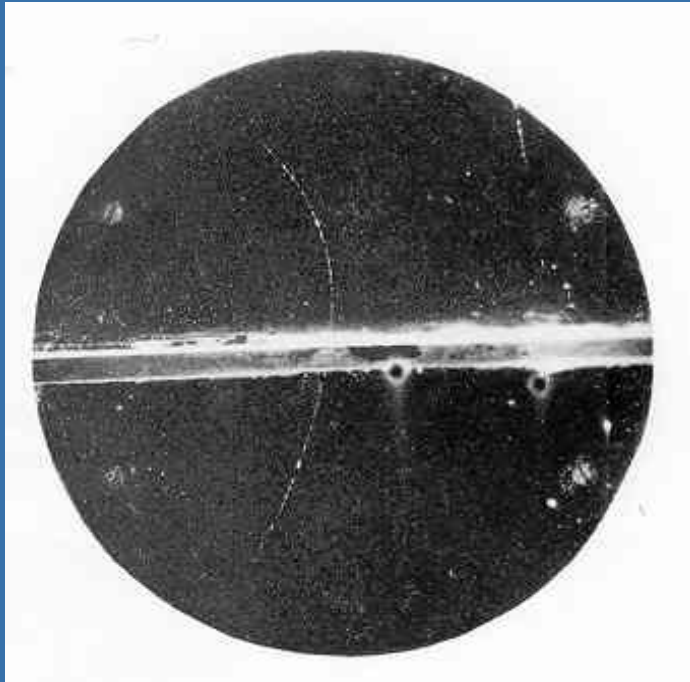


F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





Pochi credettero subito a Dirac, ma nel 1932...  
Anderson, visualizzando i raggi cosmici con una piccola camera a nebbia rivelò l'esistenza di  $e^+$ , il positrone: fu la conferma che l'ANTIMATERIA esiste!



non rimase altro da fare che premiare Dirac con il Nobel (1933).



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006



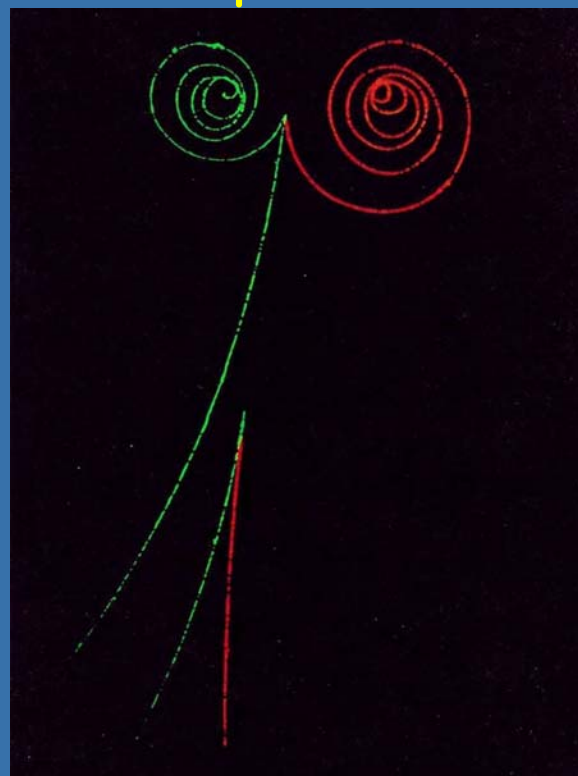




## La creazione di coppie $e^+ e^-$



Secondo la teoria di Dirac, se vi è energia sufficiente, essa si può "materializzare dal vuoto" ( $E = mc^2$ ):



purché siano rispettate le leggi di conservazione (carica elettrica, energia totale, quantità di moto, momento angolare totale e gli altri numeri quantici del sistema, tra i quali il numero leptonico, che vale +1 per l'elettrone e -1 per il positrone. Nella creazione di coppie  $e^+ e^-$  la conservazione della carica elettrica e del numero

leptonico è automaticamente soddisfatta.



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006



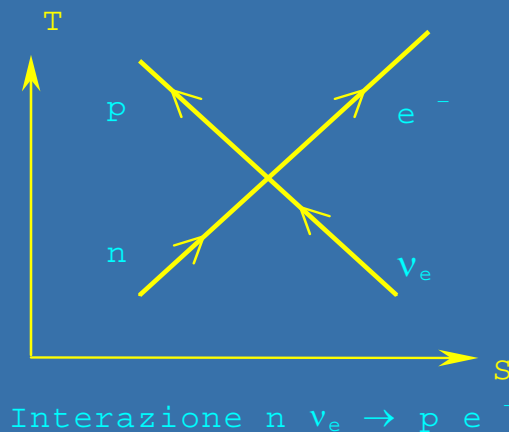


# L'ineffabile neutrino $\nu_e$



A volte, però, sembra che tali conservazioni non siano rispettate, come nella disintegrazione di certi nuclei radioattivi o, piú semplicemente, il decadimento  $\beta$  del neutrone, che sembra una semplice scissione di neutroni in protoni ed elettroni:  $n \rightarrow p e^-$ , ma non può esserlo, perché così mancano all'appello energia e quantità di moto! Deve esserci un quarto "giocatore nascosto", il neutrino:  $\nu_e$

W. Pauli ne ipotizza l'esistenza nel 1930 e Fermi lo impiega nel decadimento  $\beta$  visto come "incontro a quattro":  $\nu_e n \leftrightarrow e^- p$



Interazione  $\nu_e n \rightarrow p e^-$





## ...e chi l'ha mai visto?



Anche se fin dal principio si può dire molto di lui (deve avere carica 0, spin  $\frac{1}{2}$ , numero leptonico +1 e massa praticamente nulla), il neutrino è difficilissimo da rivelare, perché interagisce molto poco (solo interazioni deboli) con la materia e le altre particelle.

**Nota: le quattro interazioni fondamentali della natura:**

Interazione	Gravitazionale	Debole Elettrodebole	Elettromagnetica	Forte Fondamentale	Residua
Agisce su:	Massa-energia	Carica di sapore	Carica elettrica	Carica di colore	Vedi la pag.
Particelle soggette:	Tutte	Leptoni Quark	Particelle cariche	Quark Gluoni	Adroni
Particelle mediatrici:	Gravitone, non ancora osservato	$W^+ W^- Z^0$	$\gamma$	Gluoni	Mesoni
Intensità per: 2 quark $\left\{ \begin{array}{l} a 10^{-18} m \\ a 3 \times 10^{-17} m \\ \text{(rispetto a e-m)} \end{array} \right.$	$10^{-41}$ $10^{-41}$	0.8 $10^{-4}$	1 1	25 60	non vale per i quark
2 protoni nel nucleo	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	non vale per gli adroni	20

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





Solo nel '56 Reines e Cowan riuscirono a "catturare" i  $\nu_e$  prodotti da un reattore,



ma dovettero usare 10 tonnellate di materiale scintillatore per vedere i prodotti della reazione



Per rivelare i neutrini servono apparati enormi e tanta, tanta pazienza...

L'apparato di Reines & Cowan nella miniera di Homestake:



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# SIMMETRIE E NUMERI QUANTICI



Ad ogni particella corrisponde (per simmetria) un'antiparticella, quindi al neutrino  $\nu_e$ , associato all'elettrone, deve fare riscontro un antineutrino  $\bar{\nu}_e$  associato al positrone  $e^+$ ; conviene considerare la coppia  $(e^-, \nu_e)$  caratterizzata dal numero leptonico  $+1$  (materia) e la coppia di antimateria  $(e^+, \bar{\nu}_e)$  con numero leptonico  $-1$ ; questa classificazione è utile per identificare le quantità conservate nelle interazioni possibili tra particelle.

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \longleftrightarrow \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}$$



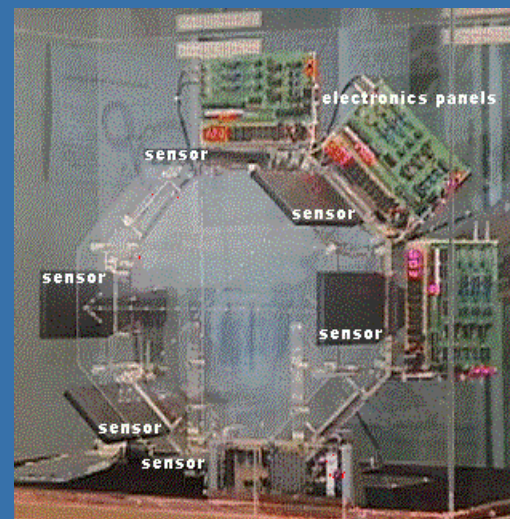
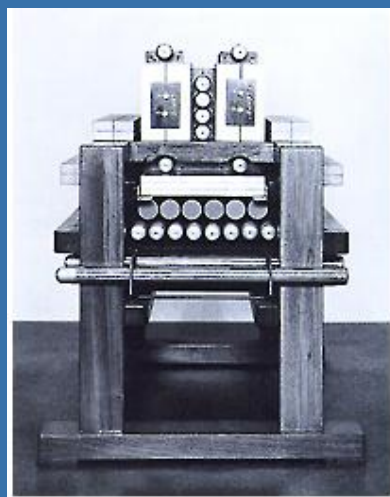
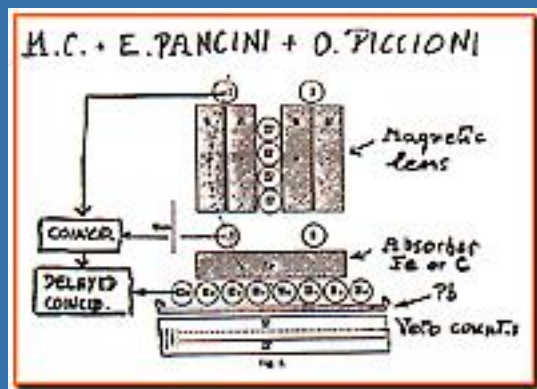
F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





Quando sembrava che tutto andasse a posto...

...nel 1937 piove dal cosmo un "marziano": il muone,  $\mu$  simile a un "elettrone grasso" ( $m_{\mu} = 105,6 \text{ MeV}/c^2$ ), che può attraversare metri di ferro senza danno, per poi decadere rapidamente in un elettrone normale (e chissà che altro... non ci sarà per caso anche un altro neutrino,  $\nu_{\mu}$ ?!?)



Il rivelatore di un esperimento storico  
(Pancini, Piccioni e Conversi 1947)

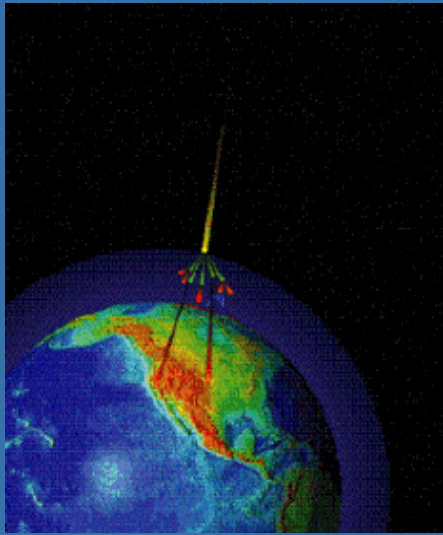
un rivelatore di  
muoni a SLAC

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





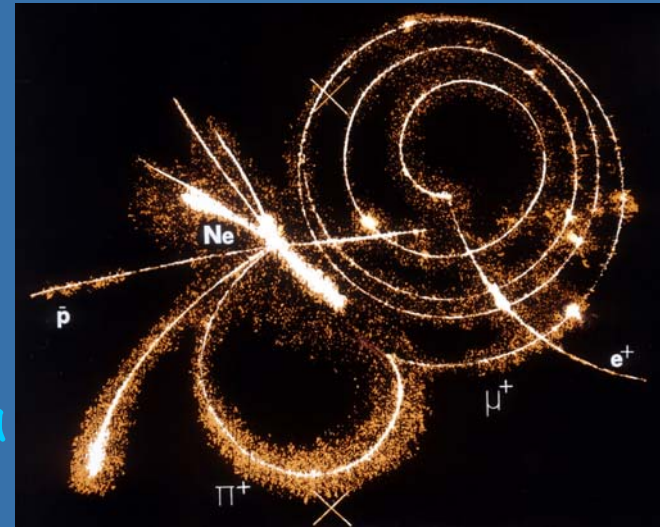
# I muoni cosmici testimoniano la dilatazione relativistica del tempo:



essendo particelle instabili, quando vengono prodotti in quiete in laboratorio hanno una vita media  $\Delta t$  di circa  $2 \mu\text{s}$ : quelli prodotti in alta atmosfera dai raggi cosmici, invece, sono molto energetici, percorrono tranquillamente chilometri prima di decadere, come se vivessero molto più a lungo  $\leftrightarrow \Delta t = \gamma \Delta t_0$ .

La produzione di muoni da raggi cosmici ([www.livescience.com](http://www.livescience.com))

Tracce di un decadimento  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  a bassa energia (Foto: CERN)



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006

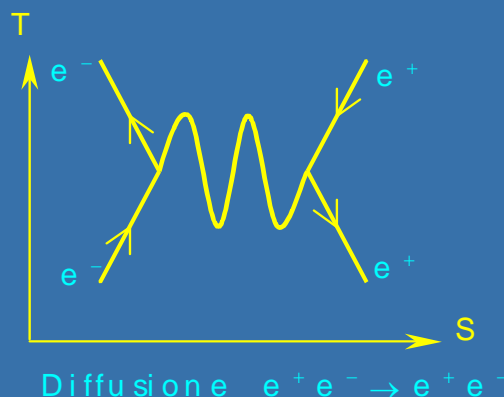
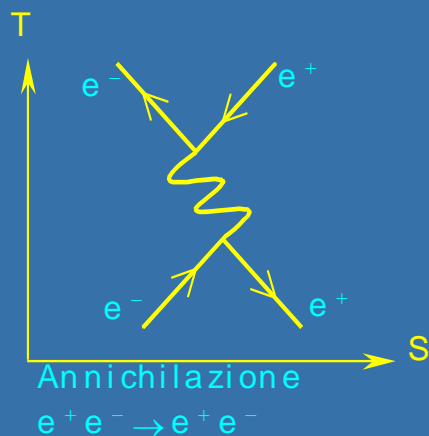
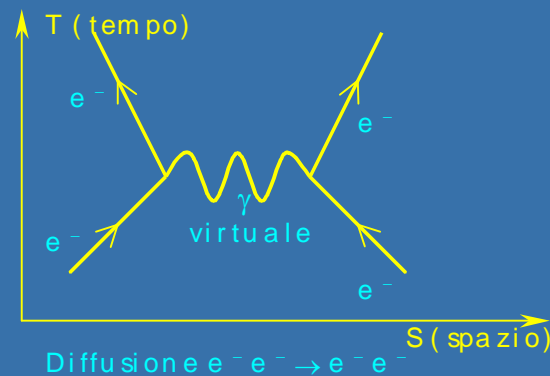




# Creazioni, annichilazioni e urti di particelle



Un modo "pratico" per rappresentare le interazioni tra particelle è dato dai grafici di Feynman: le linee spezzate rappresentano fermioni (qui elettroni)  $e$ , quelle ondulate i mediatori delle interazioni: l'orientamento delle spezzate è cruciale per capire l'evento e le particelle descritte...



La teoria e la matematica sottostanti ai grafici non sono proprio banali... Anche i mediatori sono particelle, nel caso di interazioni elettromagnetiche si tratta del nostro amico fotone, anche se con caratteristiche particolari  $\rightarrow$  fotone virtuale



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006



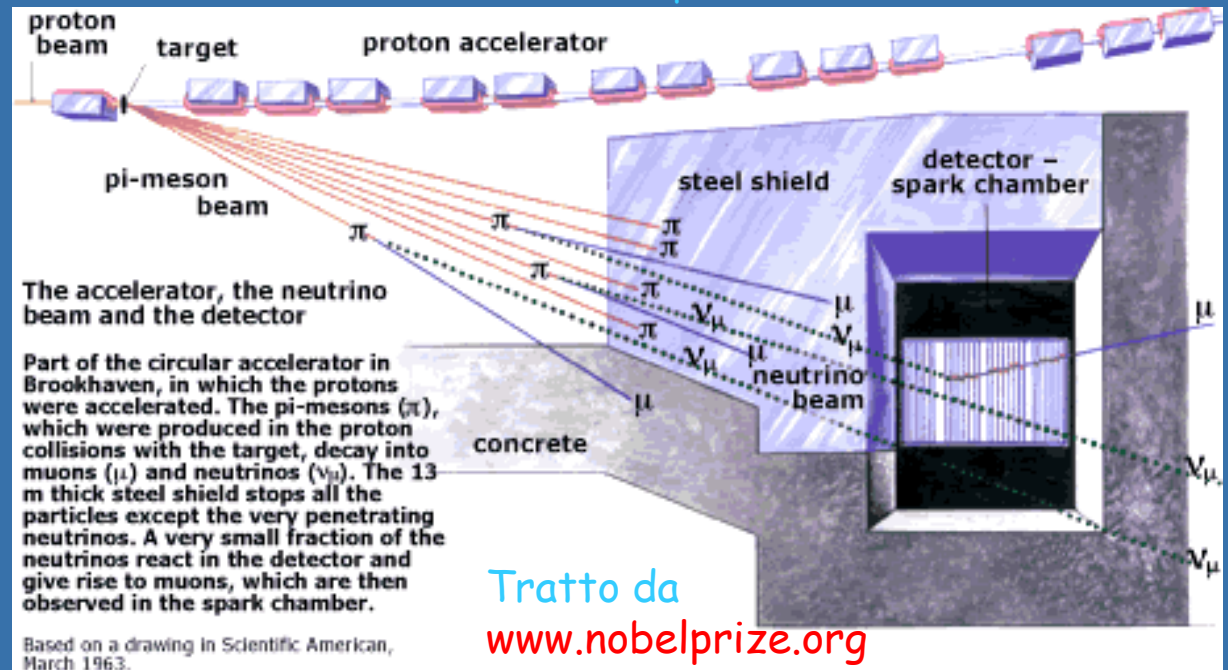
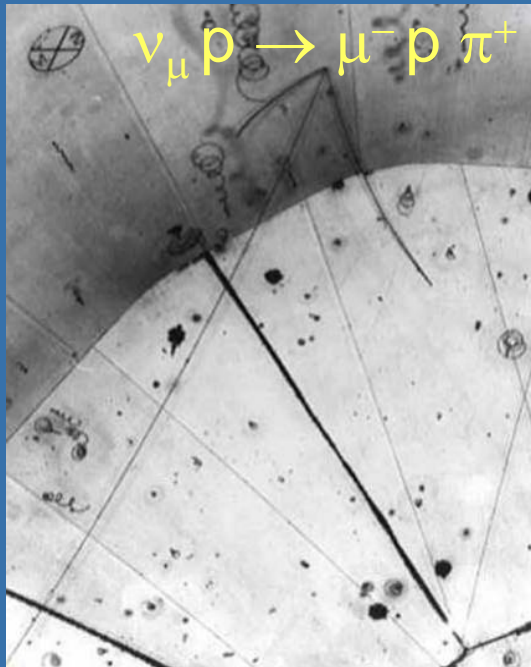




# La caccia a $\nu_\mu$ , il neutrino muonico



La rivelazione del neutrino  $\nu_\mu$ , "fratello" del muone, si fece attendere a lungo: solo nel 1962 a Brookhaven M. Schwartz riuscì a rivelarlo, attraverso la reazione  $\nu_\mu p \rightarrow \mu^- p \pi^+$



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# APPRENDISTI STREGONI



I fisici sperimentali a caccia di nuovi fenomeni e oggetti da indagare hanno costruito acceleratori di particelle a energie sempre maggiori:



Il LINAC a SLAC

Il CERN con il tracciato di LEP (e LHC)

Come vengono usati per studiare le interazioni e trovare le nuove particelle?

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006

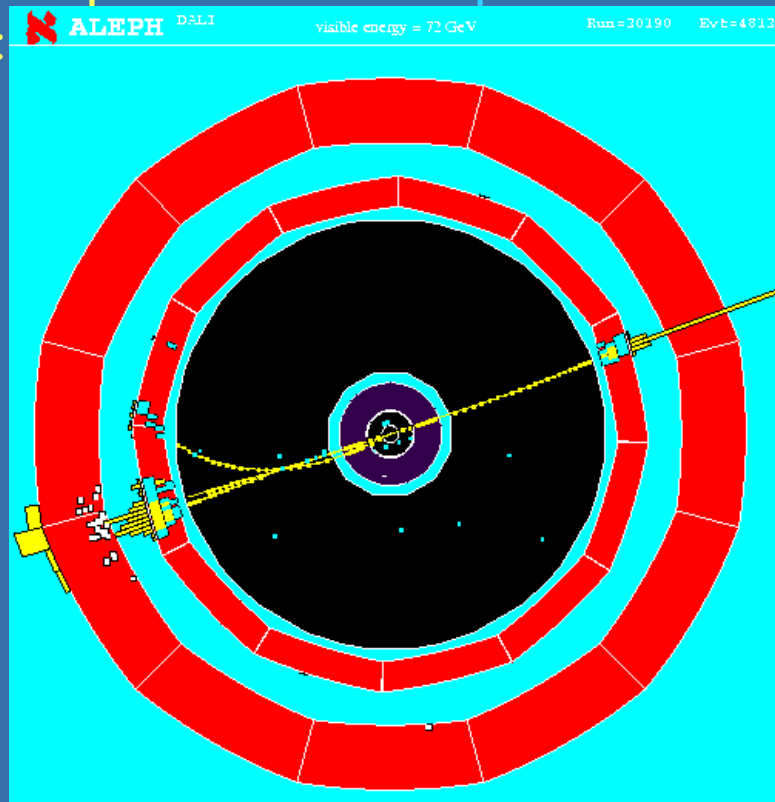




## La scoperta del leptone $\tau$



Nel 1975, usando il collider  $e^+e^-$  SPEAR, che produceva eventi con energie di massa fino a 8 GeV, i fisici produssero **inaspettatamente** una **NUOVA** coppia di leptoni,  $\tau^+ \tau^-$ : il  $\tau$  è ancora piú massiccio del  $\mu$  ( $m_\tau = 1,78 \text{ GeV}/c^2$ ), ha vita media ancora piú breve, circa  $3 \cdot 10^{-13}$  secondi; per analogia con le altre due coppie venne quindi ipotizzata l'esistenza di un **terzo neutrino**  $\nu_\tau$  (e del corrispondente antineutrino); riuscire a scovarli divenne una bella sfida...



...ma quanti sono i leptoni?

Un evento  $e^+e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$  a LEP (foto: courtesy CERN)



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006



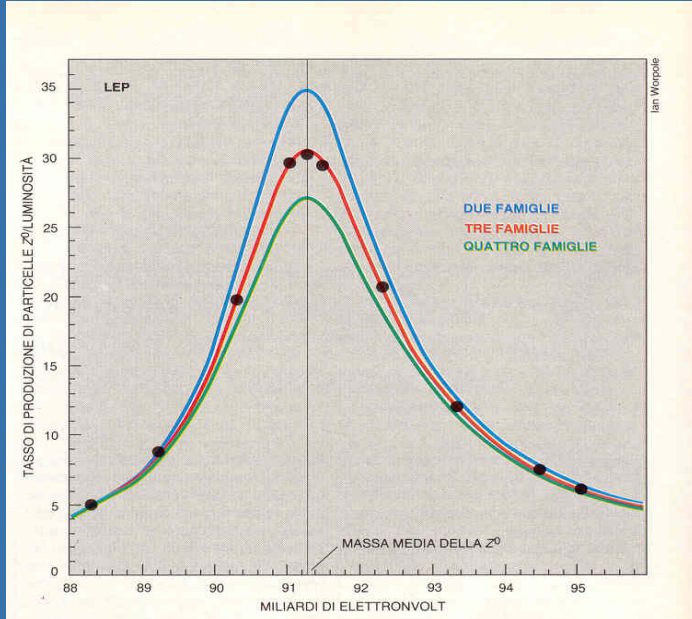


# LEP e le famiglie di leptoni



Fortunatamente (?) studi accurati svolti al CERN negli anni '90 hanno permesso di stabilire che non possono esserci piú di 3 tipi di neutrini:

siamo persuasi che esistano tre coppie di leptoni, caratterizzate ciascuna da un proprio numero leptonico (sí, ma perché solo tre e proprio tre?)



Misura della massa della  $Z^0$  a LEP (foto: courtesy CERN)

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

...con le relative antiparticelle...

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

...e vissero tutti felici e contenti...

...ehi, un momento! Siamo proprio sicuri che il  $\nu_\tau$  esista?

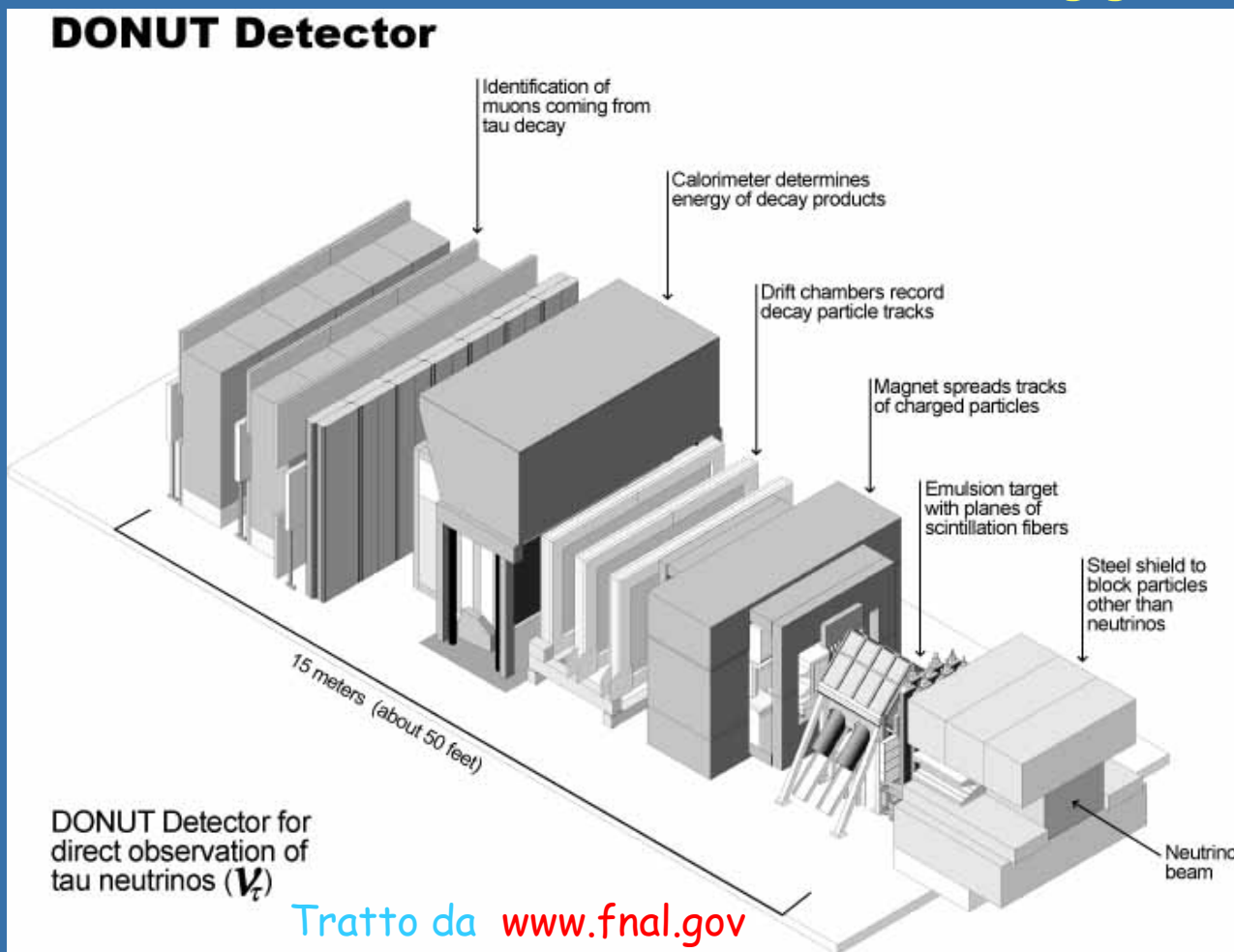
F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# DONUT: il cerchio si chiude?

Per rivelare il neutrino  $\nu_\tau$  fu realizzato nel 2000 l'esperimento DONUT a SLAC, con un rivelatore gigantesco:

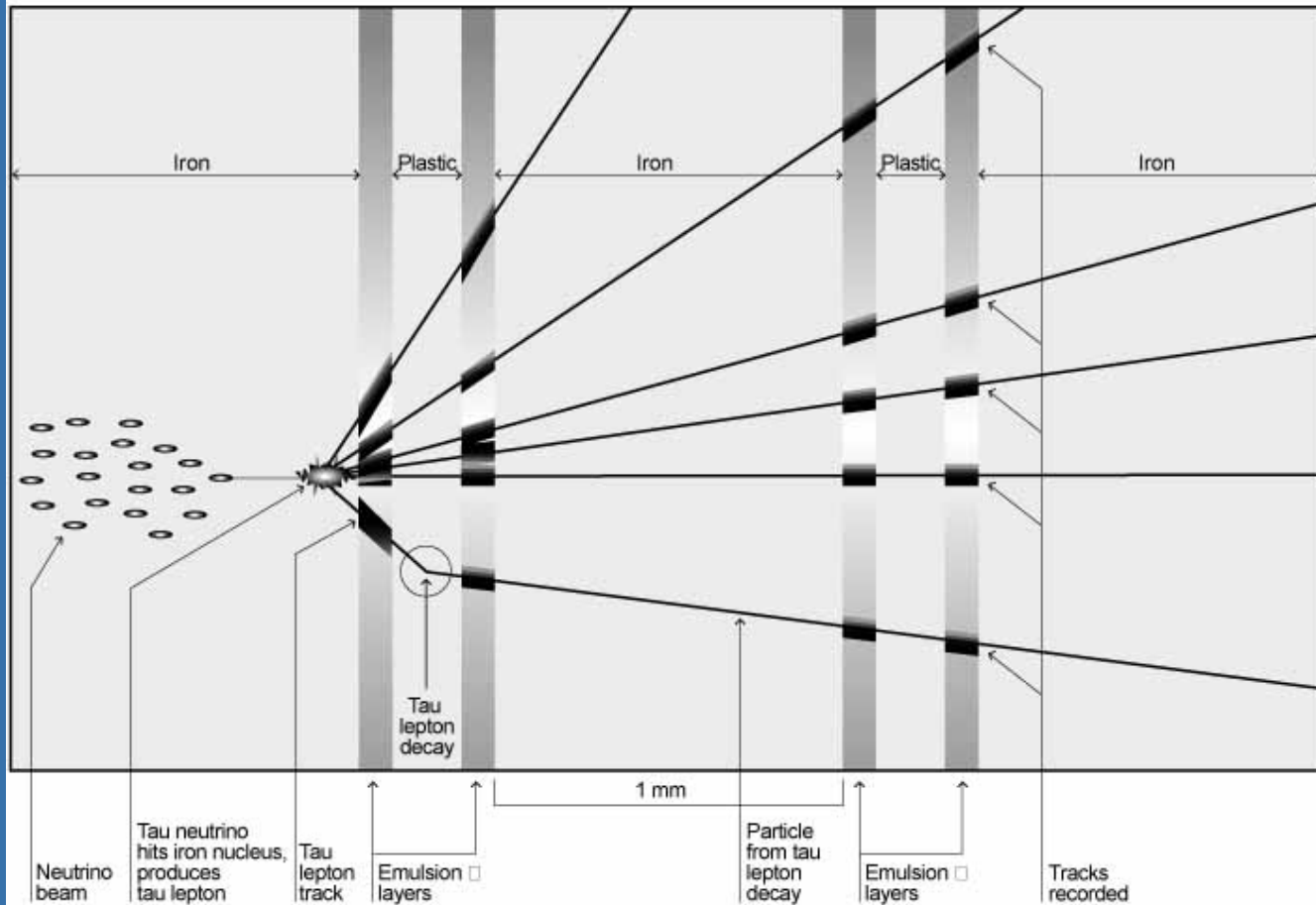


F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# Detecting a Tau Neutrino



Of one million million tau neutrinos crossing the DONUT detector, scientists expect about one to interact with an iron nucleus.

Tratto da [www.fnal.gov](http://www.fnal.gov)

...anche  $\nu_\tau$  esiste davvero!

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





# IL MODELLO STANDARD



## Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (Quantum Chromodynamics or QCD) and the unified Theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included in the chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model".

### FERMIONS

matter constituents, spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$< 1 \cdot 10^{-6}$	0	<b>u</b> up	0.003	-2/3
$e^-$ electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ muon neutrino	$< 0.0002$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
$\mu^-$ muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	$< 0.02$	0	<b>t</b> top	175	2/3
$\tau^-$ tau	1.7771	-1	<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum, where  $\hbar = \hbar/2\pi = 6.58 \cdot 10^{-27}$  GeV s =  $1.054 \cdot 10^{-34}$  J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge, in  $e$  units the electric charge of the proton is  $1.60 \cdot 10^{-19}$  coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$ ), where  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \cdot 10^{-10}$  Joules. The mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \cdot 10^{-27}$  kg.

### BOSONS

force carriers, spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
$W^-$	80.4	-1			
$W^+$	80.4	+1			
$Z^0$	91.187	0			

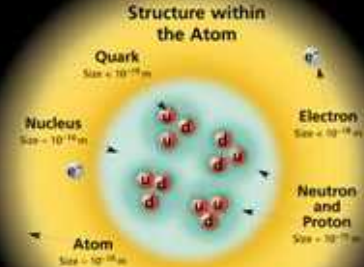
**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "strong charge", also called "color charge". These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for quarks, but it is electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and  $W$  and  $Z$  bosons have no strong interactions and hence no color charge.

#### Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. The confinement (confinement) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color flux field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons. Hence as the particles seem to emerge, two types of hadrons have been observed in nature: mesons ( $q\bar{q}$ ) and baryons ( $qqq$ ).

#### Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electromagnetic interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the proton and neutron in this picture were 10 m across, then the quarks and electrons would be less than 50 microns in size and the entire atom would be about 10 cm across.

### PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 100 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Spin
<b>p</b>	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\bar{n}$	anti-neutron	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1.116	1/2
$\bar{\Lambda}$	anti-lambda	$\bar{s}\bar{s}\bar{s}$	-1	1.113	1/2

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong
		Mass-Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Acts on		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons
Particles experiencing:		All	$W^+, W^-, Z^0$	Electrically charged	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)		$\gamma$	Gluons
(Strength) relative to remaining two types of quarks at:		$10^{-41}$	0.8	1	25
		$10^{-41}$	$10^{-6}$	1	60
		$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons
					20

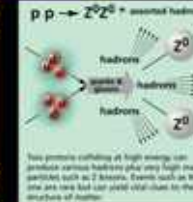
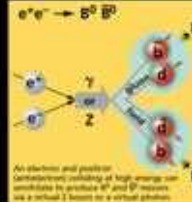
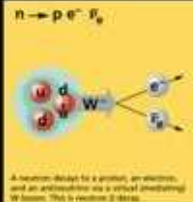
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 100 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^+$	kaon	$u\bar{s}$	+1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
$B^0$	barion	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	charmonium	$c\bar{c}$	0	2.980	0

#### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unity + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons ( $\pi^0, Z^0, \gamma$ , and  $\eta, \omega, \rho^0$ , but not  $B^0$ ) are their own antiparticles.

#### Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



#### The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature The Particle Adventure at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of: U.S. Department of Energy, U.S. National Science Foundation, Lawrence Berkeley National Laboratory, Stanford Linear Accelerator Center, American Physical Society, Division of Particle and Field Studies, DRIELE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization that produces, publishes, and distributes award-winning educational materials. Send mail to: CPEP, MS 50, 508 Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720. For information on charity, 501(c)(3) status, and other information, visit [www.cpep.org](http://www.cpep.org).



# Quarks e leptoni, insieme ai mediatori delle interazioni fondamentali, sono gli attori del MODELLO STANDARD.

F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006





## SITI WEB CONSULTATI:



<http://www.cern.ch>

<http://wwwps.inf.infn.it/divulgazione>

<http://www.anl.gov>

<http://www.fnal.gov>

<http://www.lbl.gov>

<http://www.phy.bnl.gov>

<http://www2.slac.stanford.edu>

Si ringraziano il CERN, il FERMILAB, i Lawrence Berkeley Lab's e SLAC per la cortese concessione a riprodurre il materiale fotografico.



F. de Sabata al liceo BROCCHI, 13 FEBBRAIO 2006

