

Ottavio Serra

Fisica del '900 e sviluppi recenti

Le difficoltà della fisica classica.

La fisica classica, essenzialmente dovuta a Galileo e Newton per la meccanica, a Faraday e Maxwell per l'elettromagnetismo, negli ultimi decenni dell'800 era considerata una costruzione praticamente definitiva. Ricorda Planck che, avendo chiesto il parere del suo maestro Kirchhoff sull'idea di scrivere la tesi di laurea sui principi della dinamica, si sentì rispondere che nel campo della meccanica non c'era più nulla di nuovo da dire, che si rivolgesse piuttosto alla termodinamica, la quale, per merito di Boltzmann stava conoscendo una nuova fioritura come *meccanica statistica*.

In realtà non era tutto pacifico. L'elettromagnetismo pareva richiedere un riferimento assoluto, ma gli esperimenti di Michelson e Morley davano risultato negativo per il moto della Terra rispetto a tale riferimento (*dell'etere cosmico, la quint'essenza* di Aristotele). Del resto ciò faceva a pugni col principio di relatività di Galilei.

Come è noto, il problema del moto fu risolto da Einstein in modo inaspettato introducendo un nuovo paradigma per la relazione tra spazio e tempo. Le distanze e le durate erano relative allo stato di moto del riferimento (da cui il nome di *teoria della relatività*), ma lo spazio e il tempo erano fusi in un nuovo assoluto a livello più profondo (e ciò non si sottolinea mai abbastanza).

La meccanica classica è però un'approssimazione tanto più precisa della meccanica relativistica quanto più sono piccole le velocità dei corpi rispetto alla velocità della luce.

Intanto nuove difficoltà stavano spuntando nella fisica classica.

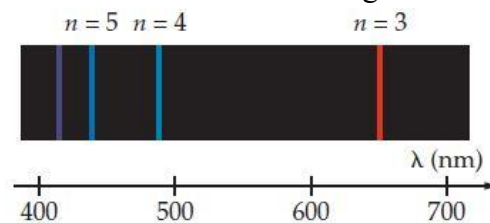
Ne elencherò alcune.

- 1) I corpi solidi incandescenti emettono luce (in generale radiazione elettromagnetica) in funzione della lunghezza d'onda e della temperatura in modo assolutamente diverso dalle previsioni fondate sull'elettromagnetismo classico e sulla termodinamica statistica di Boltzmann. La soluzione di questo problema per opera di Planck nel 1902 aprì le porte alla prima teoria dei quanti.
- 2) I calori specifici dei solidi (monoatomici) obbediscono per la maggior parte delle sostanze alla semplice legge di Dulong e Petit che si ricava in modo elementare dal principio di equipartizione dell'energia di Boltzmann. Se A è il peso atomico, c il calore specifico, $C_A = c \cdot A = 3R$, essendo R la costante dei gas perfetti: $C_A = 6 \text{ cal}/(\text{mole } ^\circ\text{K})$. Tuttavia sostanze di piccolo peso atomico come litio, berillio, carbonio hanno calori atomici nettamente minori (solo ad alte temperature si avvicinano a 6), e cosa ancora più grave, tutti i calori atomici tendono a 0, man mano che la temperatura scende verso lo zero assoluto. Il problema fu avviato a soluzione da Einstein usando la legge dell'irraggiamento termico di Planck e risolto dal fisico olandese Debye tenendo conto del reticolo cristallino che limita le frequenze di vibrazione possibili. Di un'altra difficoltà, come mai gli elettroni dell'atomo non contribuiscono con i loro gradi di libertà all'energia cinetica media e quindi al calore specifico, non parlerò; bisognerà aspettare Fermi (1926) per capirlo appieno. Qui dirò solo che il problema è legato alla quantizzazione dell'energia degli elettroni in un sistema *legato* come un atomo.
- 3) L'effetto fotoelettrico è in un certo senso il processo inverso dell'emissione di raggi X. Se un metallo è colpito da un fascio di luce, emette elettroni; però succedono cose strane. La luce deve avere una frequenza maggiore di una frequenza minima detta frequenza di soglia, altrimenti non viene emesso nessun elettrone. A parità di frequenza, aumentando l'intensità luminosa aumenta il numero degli elettroni emessi, ma non la loro velocità. Per aumentare la loro velocità occorre aumentare la frequenza. L'emissione degli elettroni è praticamente istantanea rispetto all'arrivo sul metallo del fascio luminoso, anche se l'intensità è così piccola che, secondo l'ottica classica, dovrebbero passare minuti o addirittura ore perché su un elettrone si accumuli l'ener-

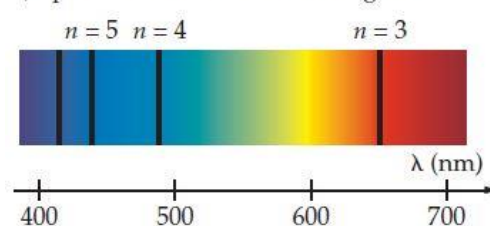
gia necessaria a compiere il lavoro di estrazione. Il mistero dell'effetto fotoelettrico fu chiarito da Einstein nella prima delle tre famose memorie pubblicate sugli *Annalen der Physik* di Berlino nella primavera del 1905. Ricordo che in questo lavoro Einstein afferma in modo netto che i quanti di energia di Planck hanno una effettiva realtà fisica: sono i quanti di luce, in seguito detti fotoni. (Per inciso, è per questo lavoro che Einstein ebbe il premio Nobel nel 1922). Proprio in quel periodo, 1922, Compton in America verificò che i fotoni, interagendo con gli elettroni, si comportano a tutti gli effetti come *particelle*.

- 4) Gli atomi sono stabili, mentre secondo la meccanica classica e l'elettromagnetismo di Maxwell dovrebbero avere una vita estremamente breve. Si sa che se un satellite artificiale perde energia per una causa qualsiasi, per esempio per attrito con gli alti strati atmosferici, esso diventa sempre più veloce, la sua orbita si restringe e, incontrando strati d'aria sempre più densi, il processo si accelera e il satellite in poco tempo precipita sulla Terra o brucia nei densi strati atmosferici inferiori. *Il calcolo non è difficile. Vi propongo per esercizio di calcolare come, al diminuire dell'energia, diminuisca il raggio dell'orbita satellitare e aumenta la velocità del satellite.* Qualcosa del genere dovrebbe accadere a un atomo, per esempio all'atomo di idrogeno. Secondo il modello *planetario* di Rutherford, l'elettrone gira intorno al protone, nucleo dell'atomo di idrogeno, secondo un'orbita ellittica o circolare. In ogni caso il moto è accelerato, perché c'è l'accelerazione centripeta, e perciò l'elettrone dovrebbe irradiare onde elettromagnetiche. E' un fenomeno analogo a quello che accade in un'antenna radio: l'energia irradiata dall'antenna sotto forma di onde elettromagnetiche per il moto periodico degli elettroni nell'antenna stessa deve essere infatti compensata da quella fornita continuamente da un generatore, altrimenti l'antenna non funzionerebbe. Qualcosa di analogo dovrebbe accadere all'elettrone dell'atomo di idrogeno e, non essendoci un apporto di energia dall'esterno, l'elettrone dovrebbe precipitare sul nucleo spiraleggiando con frequenza sempre più alta e si dovrebbero avere due conseguenze: 1°) l'atomo di idrogeno dovrebbe svanire nel giro di una decina di nanosecondi; 2°) dovrebbe emettere uno spettro continuo di radiazione elettromagnetica troncato bruscamente verso le alte frequenze con la morte dell'atomo. Sorte analoga dovrebbero avere tutti gli altri atomi, con la conseguenza chiaramente falsa che gli atomi (e noi stessi) non dovrebbero esistere. Invece gli atomi esistono, sono stabili e quando sono eccitati, per esempio da una scarica elettrica, emettono uno spettro di **righe** (perché **righe** e non **dischetti colorati?**), stabile e caratteristico della specie atomica, come un'impronta digitale o il DNA di un essere vivente.

Riporto qui sotto le righe della serie di Balmer dell'idrogeno atomico:



a) Spettro di emissione dell'idrogeno



b) Spettro di assorbimento dell'idrogeno



(Serie semiseria di Balmer secondo *Pierino*)

- 5) Il problema dello spettro di righe fu avviato a soluzione da Bohr nel 1913; la stabilità degli atomi e la teoria generale degli spettri dovrà aspettare la nascita della meccanica quantistica (1925: Heisenberg, Jordan, Born, Dirac), però una giustificazione elementare è possibile in base all'esistenza dei livelli energetici discreti.

Verso il 1925 abbiamo, dunque, due grandi teorie fisiche:

La Relatività di Einstein, speciale e generale, che studia i fenomeni macroscopici, unificando spazio e tempo, massa ed energia, gravità e curvatura dello spazio-tempo;

La meccanica quantistica, che studia i fenomeni microscopici, a livello molecolare, atomico e subatomico, in un paradigma ancor più rivoluzionario di quello einsteiniano, perché costringe a far convivere due descrizioni apparentemente contraddittorie dei fenomeni fisici, quella corpuscolare e quella ondulatoria, che valgono entrambe sia per la radiazione elettromagnetica tradizionalmente descritta come fenomeno ondulatorio negli esperimenti di diffrazione e interferenza, ma come una grandinata di particelle, i fotoni di Einstein, per spiegare fenomeni come l'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton; sia per quegli enti inizialmente pensati come particelle, elettroni, atomi, nuclei, per spiegare fenomeni d'urto e diffusione, ma interpretati anche in termini ondulatori, con De Broglie, perché anche essi mostrano fenomeni di interferenza tipici delle onde.

Il ponte tra i due modelli, ondulatorio e corpuscolare, è rappresentato dal principio di *indeterminazione* di Heisenberg e più in generale dal principio di *complementarità* di Bohr.

La cosa interessante è che per velocità piccole rispetto a quella della luce la meccanica relativistica converge alla meccanica classica, così come alla meccanica classica converge la meccanica quantistica per *azione grande* rispetto alla costante h di Planck, il quanto elementare di azione. Si ha, cioè il *limite classico* rispettivamente per $c \rightarrow \infty$ e per $h \rightarrow 0$.

Vediamo ora come era concepito l'atomo negli anni '20 del '900.

Al centro c'era il nucleo di carica positiva in cui era concentrata quasi tutta la massa, di dimensione piccolissima rispetto all'atomo, intorno al quale *stazionavano* (ruotavano?) gli elettroni esterni.

Il nucleo era concepito come formato da tanti protoni quanto era il numero di massa e da tanti elettroni quanto bastava a rendere neutro l'atomo. Per esempio, il nucleo del carbonio 12 era formato da 12 protoni e 6 elettroni, quello del carbonio 14 da 14 protoni e 8 elettroni.

Ma ci si era accorti quasi subito che ciò non era sostenibile per diversi motivi: l'elettrone, 2000 volte più leggero del protone, ha una lunghezza d'onda di De Broglie molto grande e non può stare nel piccolissimo nucleo; inoltre, dopo la scoperta dello *spin*, $1/2$ per elettroni e protoni, c'erano difficoltà con la statistica: un nucleo con spin semintero obbedisce alla statistica di Fermi-Dirac, è un fermione e sottostà al principio di esclusione di Pauli; se ha spin intero, è un bosone e obbedisce alla statistica di Bose-Einstein. Ora, c'è almeno un nucleo, l'azoto 14, che è certamente un bosone, come verificò Franco Rasetti utilizzando l'effetto Raman, mentre secondo il modello di allora sarebbe costituito da un numero dispari di fermioni (14 protoni + 7 elettroni) e quindi dovrebbe essere un fermione.

Si cominciò a pensare che il nucleo fosse formato da protoni positivi e "*protoni neutri*", anche essi di spin $1/2$, in modo da salvare la statistica. Il "*protone neutro*" fu effettivamente scoperto da Chadwick nel 1932 e fu detto *neutrone*, ma alcuni anni prima Pauli aveva ipotizzato un'altra parti-

cella con lo stesso nome di *neutrone* per spiegare una grossa difficoltà connessa all'emissione dei raggi β , che sono elettroni emessi dai nuclei radioattivi. Siccome il neutrone di Pauli aveva una massa estremamente piccola, forse addirittura nulla, Fermi lo battezzò scherzosamente *neutrino*.

Ma se il nucleo è costituito di protoni e neutroni, come fa ad emettere elettroni? (Questo lo spiegò Fermi); come mai non si disintegra per la repulsione elettrostatica dei protoni? L'energia di legame dei nuclei è un milione di volte maggiore di quella che lega gli elettroni al nucleo degli atomi, perciò doveva esistere una nuova forza, detta *nucleare forte*, per spiegare la grande stabilità dei nuclei. Il fisico giapponese Ideki Yukawa ideò una teoria che giustificava tale forza a breve raggio di azione, praticamente nulla fuori del nucleo, il cui raggio era stato determinato da Rutherford. Siccome secondo la fisica quantistica ogni campo di forze è mediato da un quanto (il quanto del campo elettromagnetico è il fotone), anche il campo nucleare doveva essere mediato da un quanto, del quale Yukawa stimò la massa, applicando il principio di indeterminazione e trovando una massa di circa 270 masse elettroniche (140 MeV), intermedia tra quella del protone (938 MeV) e quella dell'elettrone (0,511 MeV). Per questo motivo chiamò *mesone* tale particella. Nel 1938 Anderson, che già nel 1932 aveva scoperto l'elettrone positivo, la prima particella di anti materia prevista teoricamente due anni prima da Dirac, scoprì nei raggi cosmici una particella di massa compatibile col mesone di Yukawa, detta *mesotrone*. In realtà i mesotroni erano due, uno negativo e uno positivo, antiparticella del primo. Ma tra il 1943 e il 1946 i fisici Conversi, Pancini e Piccioni, allievi di Amaldi, lavorando a Roma con mezzi di fortuna, scoprirono che il mesotrone negativo, che avrebbe dovuto essere il collante nucleare, interagiva con i nuclei in modo molto debole; non poteva essere perciò il mesone di Yukawa. Ora è chiamato *muone* (simbolo: μ). Pochi anni dopo Powell, Lattes e Occhialini scoprirono il vero mesone di Yukawa, che ora si chiama *pione* (π). Il pione si presenta negativo (π^-), positivo (π^+) e neutro (π^0) e *così deve essere*. Risulta che π^+ è l'antiparticella di π^- , π^0 è 'antiparticella di se stesso. Ciò sarà giustificato dalla teoria dei *quark*.

I quark.

Tra il 1950 e il 1960 si scoprirono, con i sincrotroni di nuova generazione, molte particelle e antiparticelle; nel 1955 l'antiprotone (E. Segrè, Chamberlain, Wiegand e Ypsilantis) a Berkeley, l'anno dopo l'antineutrone (Bruce Cork), e poi tante altre; troppe particelle per essere tutte elementari.

Inoltre c'era un grosso problema riguardante il momento magnetico.

Secondo la teoria relativistica dell'elettrone di Dirac, ad ogni particella di spin 1/2 è associato un momento magnetico $\mu = \frac{e\hbar}{2m}$. (In generale $\mu = g \frac{e}{2m} s$, dove g, fattore giromagnetico, vale 2; s è lo

spin). Per l'elettrone (spin $s = \frac{1}{2} \hbar$) $\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e}$, detto μ_B (magnetone di Bohr), d'accordo con le mi-

sure sperimentali. Per il protone dovrebbe essere $\mu_p = \frac{e\hbar}{2m_p}$, detto magnetone nucleare μ_N , per il

neutrone $\mu_n = 0$, perché è neutro. Invece le misure davano $\mu_p = 2,793 \mu_N$, $\mu_n = -1,913 \mu_N$. Le cose andavano come se il protone e il neutrone fossero particelle composte, a differenza dell'elettrone che si comportava come una particella *puntiforme* veramente elementare. Nel 1964 i fisici Murray Gell-Mann e George Zweig avanzarono una teoria rivoluzionaria secondo la quale tutte le particelle soggette a interazione forte, compresi i mesoni (in particolare i pioni) erano costituiti da particelle elementari con **carica frazionaria** dette *quark*. I quark furono scoperti tra il 1967 (quark up allo

Slac) e il 1995 (quark top al FermiLab) e ora costituiscono la base del modello standard della fisica delle particelle.

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome→	u up	c charm	t top	γ fotone
Quark	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluone
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elettronico	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonico	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauonico	91,2 GeV 0 1 Z⁰ forza debole
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e elettrone	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muone	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tauone	80,4 GeV ± 1 1 W[±] forza debole
Leptoni				Bosoni di gauge

Il protone è costituito da due quark u e un quark d, il neutrone da un quark u e due quark d. I mesoni sono coppie di un quark e di un anti quark. $\pi^+ = u\bar{d}, \pi^- = \bar{u}d, \pi^0 = \frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ (La somma va intesa come una sovrapposizione di stati). *Adroni* (cioè soggetti a interazione forte) sono i *barioni*, come i nucleoni, formati da tre quark e i *mesoni*, come i pioni, formati da due quark. I muoni, come gli altri *leptoni*, cioè soggetti a interazione debole, sono particelle *elementari*.
Accanto alle particelle (fermioni) e ai mediatori delle interazioni (bosoni) riporto anche le 4 forze:

Le quattro interazioni fondamentali

Interazione	Intensità	Mediatori	Raggio
FORTE *	1	Gluoni	$10^{-15} m$
ELETTROMAGNETICA*	10^{-3}	Fotone	∞
DEBOLE*	10^{-14}	Bosoni W e Z	$10^{-18} m$
GRAVITAZIONALE†	10^{-38}	Gravitone?	∞

*Unificate dalla teoria di Glashow, Weinberg, Salam
 *Descritta dalla "quantocromodinamica". EW + QCD = Modello Standard
 †Descritta dalla relatività generale, che non è una teoria quantistica

Per completezza ricordo che al CERN furono scoperti i bosoni W e Z (Carlo Rubbia 1983) e il bosone di Higgs (gruppo di Fabiola Gianotti 2012).

L'introduzione dei neutrini nella fisica.

Come abbiamo detto, negli anni '20 del XX° secolo si pensava che il nucleo atomico fosse costituito da protoni ed elettroni, le uniche particelle allora conosciute. Per esempio, la particella α, nucleo dell'elio, si pensava costituito da 4 protoni e due elettroni.

Una volta stabilito che il nucleo è costituito di protoni e neutroni, sorse il problema di spiegare l'emissione di elettroni (raggi beta) dai nuclei radioattivi.

Inoltre gli elettroni non erano emessi con un'energia definita e caratteristica, ma con un'energia compresa tra zero e il massimo pari alla differenza tra le energie dei nuclei padre e figlio. Per esempio, la reazione $H_1^3 \rightarrow He_2^3 + e^- + Q$ si bilancia esattamente se si pone Q uguale all'energia cine-

tica massima degli elettroni emessi. Ma non si conserva neanche il momento angolare (1/2 per il membro di sinistra e intero per quello di destra). Tutto si spiega se, con Wolfgang Pauli, postuliamo (1930) l'esistenza di un'ulteriore particella neutra, di massa piccolissima o nulla e spin 1/2, detta *neutrino* da Enrico Fermi.

L'ultima reazione $H_1^3 \rightarrow He_2^3 + e^- + Q$ va perciò scritta secondo Fermi così:

$H_1^3 \rightarrow He_2^3 + e^- + \nu$. A rigore il neutrino ν va sostituito dall'anti-neutrino $\bar{\nu}$, ma ancora non si sapeva che ogni particella ha la sua antiparticella e che deve valere la legge di conservazione dei *leptoni*.¹ Il fatto che nel nucleo non ci siano elettroni e tanto meno neutrini è spiegato da Fermi con la creazione di queste due particelle all'atto della transizione nucleare, così come i fotoni non ci sono nel fiammifero, ma vengono creati nell'atto della transizione elettronica. Ma la teoria di Fermi va molto più avanti, è la teoria dell'interazione nucleare debole, così detta perché è 10^{12} volte più debole dell'interazione elettromagnetica di Maxwell. Essa è tuttavia essenziale per innescare la fornace termonucleare delle stelle, secondo lo schema:

[1] $p_1^1 + p_1^1 \rightarrow d_1^2 + e^+ + \nu$, seguita dall'interazione nucleare *forte*

[2] $d_1^2 + d_1^2 \rightarrow He_2^4 + \gamma$ (trascurando reazioni intermedie. L'energia del fotone $\gamma = 28$ MeV.

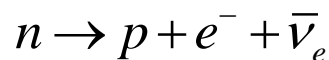
L'interazione elettromagnetica e l'interazione debole furono poi unificate nell'interazione elettrodebole di Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Abdus Salam premi Nobel nel 1979. Come la forza elettromagnetica è mediata dai fotoni, così la forza debole è mediata dai così detti vettori bosoni intermedi W^+ , W^- e Z^0 , la cui scoperta al CERN valse il premio Nobel a Carlo Rubbia nel 1983.

Il decadimento beta secondo Fermi.

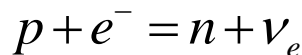
Dato che i neutrini interagiscono debolmente con la materia, quando Marie Curie osservò per la prima volta il decadimento beta lo associò alla sola emissione di un elettrone; fu Enrico Fermi che, seguendo un'idea di Wolfgang Pauli, introdusse l'idea del neutrino per risolvere un'apparente contraddizione fra i risultati sperimentali ed il principio di conservazione dell'energia.

Dallo spettro dell'energia Fermi dedusse che il neutrino doveva avere una massa non superiore a 1/200 della massa dell'elettrone. In seguito ci si convinse che dovessero avere massa zero, ora pare che abbiano una massa, sia pur piccolissima, minore di $2 \text{ eV}/c^2$.

Il decadimento beta deve essere, perciò, scritto nel modo seguente:



Il processo inverso si ottiene bombardando i protoni con elettroni di alta energia (accelerati in un elettrosincrotrone), oppure nella "cattura K":



La conservazione dell'energia per il decadimento del neutrone fornisce:

$$m_n c^2 \approx m_p c^2 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2} + p_\nu c \quad . (m_\nu \text{ assunta } \cong 0$$

¹ Sulle leggi di conservazione, vedi il mio articolo "Principi di simmetria e leggi di conservazione", sul sito citato, cartella Articoli/ "Il foglio" del Liceo classico Garibaldi di Castrovillari.

Identificazione dei neutrini (elettronici).

Nel 1956, Clyde Cowan e Frederick Reines costruirono due grandi serbatoi sotterranei pieni d'acqua, a pochi metri di distanza dall'impianto nucleare di Savannah River vicino ad Aiken, in Sud Carolina, USA, nei quali gli antineutrini prodotti nella centrale nucleare interagivano con i protoni dell'acqua. Frederick Reines ricevette il Premio Nobel per la Fisica nel 1995 per questo esperimento, Cowan no, perché intanto era morto.

Al super sincrotrone per protoni SPS del CERN, facendo collidere due fasci di protoni, tra la miriade di reazioni prodotte ci interessa la seguente:

$$p + p \rightarrow p + \pi^+ + \gamma$$

seguita, dopo un ritardo medio di $2 \cdot 10^{-8}$ s (vita media del pione), dal decadimento del pione:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}$$

E' il fascio di neutrini muonici che viene "sparato" verso il laboratorio OPERA del Gran Sasso per studiare l'oscillazione $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$. Il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini fu ipotizzato per la prima volta da Bruno Pontecorvo nel 1957 per spiegare come mai dell'intensità stimata dei neutrini elettronici provenienti dal Sole ne arriva soltanto 1/3. (L'oscillazione dei neutrini fu verificata nel 1998 in Giappone <esperimento Kamiokande> e in Italia al Gran Sasso <esperimento OPERA>.

Il muone positivo viene deviato con un campo magnetico verso un rivelatore e, con un ritardo medio di $2 \cdot 10^{-6}$ s, decade nel modo seguente:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_{\mu}$$

L'antielettrone si annichila con un elettrone del rivelatore generando due fotoni γ di energia 0,511 MeV ciascuno. Se l'antineutrino muonico interagisce con un protone del nucleo di un atomo dell'apparato, si ha la seguente reazione:

$$\bar{\nu}_{\mu} + p \rightarrow n + \mu^+$$

Il neutrone viene assorbito da un nucleo del rivestimento di cadmio del rivelatore, e il nucleo eccitato emette un fotone di alta energia. La sequenza dell'emissione di due fotoni da 0,511 MeV seguita da un fotone di alta energia è *la firma del neutrino muonico*.

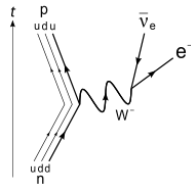
Appendice. Il decadimento beta secondo la teoria elettrodebole.

Secondo la teoria "standard" il decadimento β coinvolge uno dei quark d (down) costituenti il neutrone che si trasforma in un quark u (up) con emissione di un vettore bosone W^- secondo la reazione:

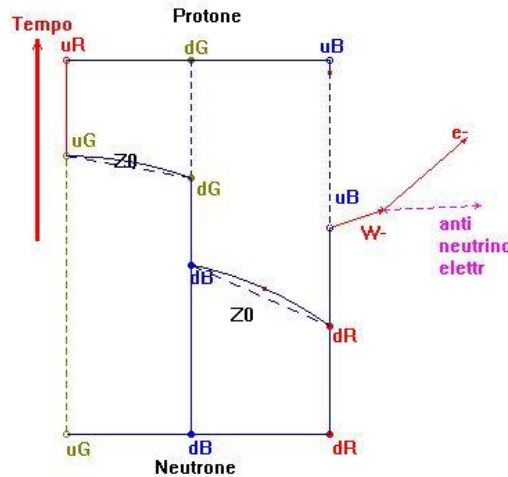
$$d \rightarrow u + W^- , \text{ seguita quasi istantaneamente } (10^{-25} \text{ secondi}) \text{ dal decadimento } W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e .$$

Alla fine il neutrone si è trasformato in un protone, un elettrone β (e^-) e un antineutrino elettronico. Ricordo che, in termini di carica elettronica, il quark d ha carica $-1/3$, il quark u ha carica $+2/3$, il bosone W ha carica -1 . I quark hanno spin $1/2$, i bosoni spin 1 . Siccome i bosoni W hanno una massa di circa 80 GeV, dal principio di indeterminazione si ricava per essi una vita media di circa 10^{-25} s.

Il seguente diagramma (di Feynman) illustra il decadimento β :



Il diagramma seguente, ripreso da Lederman, pag.232 (vedi bibliografia), illustra il decadimento β (e^-) in modo dettagliato, mostrando l'interazione debole dei quark e le cariche di colore:



Altri diagrammi di Feynman relativi al decadimento dei pioni:

Il decadimento principale (probabilità 99,9877%) per il pione carico ha come prodotti un muone e il suo neutrino

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

Il secondo tipo di decadimento (0,0123%) è in elettrone e il suo neutrino:

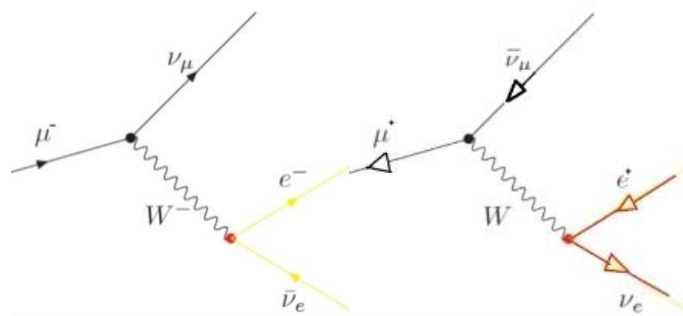
$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e, \quad \pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e.$$

Il decadimento principale per il pione neutro (98,798%) è in due fotoni:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

Il secondo decadimento più importante (1,198%) è chiamato decadimento Dalitz in un fotone e una coppia elettrone positrone:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^-.$$



Torniamo ai muoni.

Le particelle primarie dei raggi cosmici negli urti con i nuclei degli atomi di azoto e ossigeno dell'atmosfera terrestre producono pioni che decadono in muoni e neutrini muonici. Siccome i muoni decadono (in elettroni e neutrini) con vita media di $2 \cdot 10^{-6}$ secondi, possono percorrere al più pochi chilometri, anche tenendo conto della dilatazione relativistica del tempo; perciò sulla Terra non possono arrivare muoni "cosmici". Le particelle che ci possono portare informazioni cosmolo-

giche sono le particelle “*eterne*”: fotoni, protoni, neutrini. Quelle che possono andare più indietro nel tempo e nello spazio sono i neutrini, perché interagiscono pochissimo con la materia intergalattica e non sono deviati da campi magnetici. I neutrini associati alla rivelazione di muoni andrebbero benissimo, se sapessimo che tali neutrini sono di origine cosmologica e non prodotti a pochi chilometri dalla Terra per decadimento di pioni. Il modo più sicuro è di usare la massa terrestre come schermo per i componenti dei raggi cosmici diversi dai neutrini. E’ per questo motivo che è stato realizzato “*ICE CUBE*” sotto i ghiacci del continente antartico con i rivelatori di muoni rivolti verso il centro della Terra; così siamo sicuri che i muoni rivelati sono stati generati da neutrini cosmici. Le sorgenti dei neutrini provenienti dal basso potrebbero essere buchi neri, gamma ray bursters, o resti di supernovae. I dati che ICE CUBE raccoglierà potranno contribuire anche alla comprensione dell’origine dei raggi cosmici, della supersimmetria, delle particelle massicce debolmente interagenti (WIMP: materia oscura), e di altri aspetti della fisica nucleare e delle particelle.

I muoni generati nell’urto tra neutrini di alta energia e nuclei delle molecole della crosta terrestre e dell’acqua di mare, acquistano velocità superiore a quella della luce nel mezzo ed emettono luce “*Cerenkov*” che è rivelata mediante tubi fotomoltiplicatori.

Se i rivelatori di muoni sono rivolti verso l’alto, è molto difficile discriminare i neutrini di origine cosmica da quelli prodotti nell’atmosfera; sono necessari raffinati metodi matematico-statistici.

Un rivelatore simile a ICE CUBE, “*ANTARES*”, è in progettazione nel Mediterraneo a 2,5 chilometri di profondità al largo di Tolone da parte di una cooperazione europea per lo studio di neutrini cosmici di altissima energia provenienti dall’emisfero Sud, in modo da coprire, insieme con ICE CUBE, l’intera volta celeste.

Un esercizio.

Dalle formule [1] e [2] sappiamo che per ogni nucleo di elio formato sono emessi due neutrini (elettronici) e si liberano 28 MeV di energia sotto forma di fotoni γ . Calcolare quanti neutrini (tra elettronici e muonici) arrivano ogni secondo su un cm^2 della superficie terrestre, sapendo che la costante solare è $2 \text{ cal}/(\text{minuto} \cdot \text{cm}^2)$.

Il problema dei neutrini.

Secondo il modello standard della fisica attuale a ogni particella elementare è associata un’antiparticella avente le stesse osservabili scalari (massa, spin e vita media), ma grandezze con segno (carica elettrica, elicità, numero barionico, numero leptonico) opposte. Una particella neutra potrebbe coincidere con la sua antiparticella. Questo non è il caso del neutrone:

$$n^0 = \begin{pmatrix} u \\ d \\ d \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{d} \\ \bar{d} \end{pmatrix} = \bar{n}^0. \text{ Invece il pione neutro è l'antiparticella di se stesso: } \pi^0 = \begin{pmatrix} u \\ \bar{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ u \end{pmatrix} = \bar{\pi}^0.$$

Se una particella decade per interazione debole, la conservazione rigorosa del numero leptonico potrebbe non valere, come accade per la *parità*, perciò l’antineutrino potrebbe coincidere col neutrino, come ipotizzato verso il 1935 da Ettore Majorana. In tal caso l’emissione di un neutrino sarebbe equivalente all’assorbimento del neutrino stesso. Tra gli esperimenti che si stanno eseguendo c’è “*Gerda*” (Germanium detector array) al Gran Sasso, nel quale un nucleo di Ge_{32}^{76} si dovrebbe trasformare in un nucleo di Se_{34}^{76} con una doppia emissione β^- senza emissione di neutrini. Il decadimento *doppio beta* è molto raro e perciò ancora non confermato. Un altro doppio decadimento beta

è ricercato all'università di Como: $Te_{52}^{130} \rightarrow Xe_{54}^{130}$ (Il decadimento beta semplice $Te_{52}^{130} \rightarrow I_{53}^{130}$ non si verifica perché energeticamente proibito).

Se dovesse essere confermata la congettura di Majorana, si andrebbe oltre il modello standard.

Problemi aperti. Oltre alla questione del neutrino, ignoriamo tante altre cose. Ne elenco alcune:

- (1) La probabile simmetria primordiale tra materia e antimateria è venuta meno; l'antimateria è rarissima; non si sa perché questa simmetria è stata rotta.
- (2) La materia visibile (quella fatta di quark, leptoni e bosoni vettori) è solo il 5% del totale della massa-energia dell'universo, come gli astronomi ricavano dai dati gravitazionali. Il resto è *materia oscura* (25%) ed *energia oscura* (70%). (*Oscura= ignoranza*).
- (3) Perché l'espansione dell'universo, anziché rallentare per effetto della gravitazione, accelera? Forse l'energia oscura produce la dilatazione accelerata dello spazio, come previsto dalla *costante cosmologica* introdotta da Einstein nella sua Relatività Generale?
- (4) Esistono i monopoli magnetici? Se esistono, le equazioni di Maxwell sarebbero più simmetriche. Dirac dimostrò che la loro esistenza spiegherebbe tra l'altro la quantizzazione della carica elettrica. Nel 2014 furono pubblicati risultati sperimentali sulla possibile esistenza dei monopoli magnetici, ma non ci sono state conferme.
- (5) Relatività generale e meccanica quantistica, pur essendo entrambe valide nei rispettivi ambiti di applicazione, sembrano inconciliabili. Esistono tentativi di costruzione di una teoria della gravità quantistica, in particolare la *gravità quantistica a loop*, sulla quale lavora, tra gli altri, Carlo Rovelli, direttore del centro di Fisica Teorica dell'università di Aix-Marsiglia, ma per il momento non ci sono riscontri sperimentali.
- (6) Secondo il modello standard il bosone di Higgs dà massa alle particelle soggette all'interazione elettrodebole, ma (si chiede Lederman) chi dà la massa al bosone di Higgs?

Cose che io non so:

- (1) In un nucleo l'energia di legame è dovuta al *difetto di massa*: la massa del nucleo è **minore** della somma delle masse dei nucleoni che lo costituiscono e questo è chiaro; ma la massa di un protone (o di un neutrone) è **di gran lunga maggiore** della somma delle masse dei quark costituenti e questo non lo capisco; è il campo gluonico che produce tutta questa massa?
- (2) Perché tutti concordano sul fatto che il fotone, avendo carica elettrica zero, sia l'antiparticella di se stesso, mentre per il neutrino il dibattito è aperto?
- (3) Se l'unico quanto del campo elettromagnetico è il fotone, come fa questo bosone a produrre **repulsione** tra cariche concordi e **attrazione** tra cariche discordi?
- (4) Perché nella cromodinamica quantistica (QCD) esistono tre tipi di *cariche di colore*, mentre nell'elettrodinamica, *classica e quantistica*, esistono solo due tipi di cariche elettriche?
- (5) Perché esistono otto gluoni diversi come mediatori dell'interazione nucleare forte, mentre esistono solo quattro mediatori dell'interazione elettro-debole? (E probabilmente un solo mediatore, il fantomatico *gravitone*, per il campo gravitazionale?)
- (6) Perché il fotone, mediatore del campo elettromagnetico, non ha carica elettrica, mentre i gluoni, mediatori dell'interazione forte (il campo della cromodinamica quantistica), hanno carica di colore (cromatica)?

- (7) **Eccetera.** *Ci sono più cose in cielo e in terra, O(ttavio)razio, di quante ne sogni la tua filosofia* (Shakespeare, “Amleto”).

BIBLIOGRAFIA.

- 1) Ottavio Serra: “Teoria dei quanti”, sull’Annuario del Liceo Scientifico Scorza e Sul mio sito <http://digilander.libero.it/ottavioserra0>, cartella *Articoli Liceo scientifico Scorza* (con ulteriore bibliografia);
- 2) Ottavio Serra: “Il neutrino. Breve storia” (Vedi sopra);
- 3) Ottavio Serra: “Il bosone di Higgs” (Vedi sopra);

A livello universitario:

- 4) Werner Heisenberg: "I principi fisici della teoria dei quanti", Boringhieri, Torino 1963 (Prima edizione tedesca Lipsia, *Verlag* 1930);
- 5) Max Born: “Fisica atomica”, Boringhieri 1976 (Dalla ottava edizione in inglese a cura di Blin-Stoyle e Radcliffe, Londra e Glasgow, *Blakie & Son* 1969);
- 6) Paul Dirac: “I principi della meccanica quantistica”, Boringhieri 1971 (dall’edizione inglese Oxford *Clarendon Press*, 1958);
- 7) Vind Wichmann “Fisica quantistica” 4° volume de “La fisica di Berkeley”, Zanichelli 1973;
- 8) Enrico Persico: “Gli atomi e la loro energia”, Zanichelli 1961;
- 9) Enrico Persico: “Fondamenti della meccanica atomica”, Zanichelli 1964;
- 10) L. D. Landau e E. M. Lifsic: “Meccanica quantistica”, Boringhieri 1969;
- 11) Emilio Segrè: “Nuclei e particelle”, 1966;
- 12) Piero Caldirola: “Istituzioni di fisica teorica”, Editrice Viscontea Milano 1966;
- 13) Piero Caldirola: " Dalla microfisica alla macrofisica", Mondadori, Milano 1974.
- 14) Richard Feynman: "La fisica di Feynman", volume 3°: meccanica quantistica, Zanichelli, Bologna 2001. (Prima Edizione 1958, California, *Caltec*).

A livello divulgativo (però concettualmente impegnativi):

- 15) Chen Ning Yang: “La scoperta delle particelle elementari”, Boringhieri 1969 (Princeton University Press, 1961);
- 16) Kenneth Ford: “La fisica delle particelle”, 1972;
- 17) Stephen Hawking: “Dal Big bang ai buchi neri (breve storia del tempo), Rizzoli 1990;
- 18) Richard Feynman: “QED, la strana teoria della luce e della materia”, Adelphi 1992;
- 19) Carlo Bernardini e Luisa Bonolis (a cura di): “Conoscere Fermi” (nel centenario della nascita), Editrice Compositori Bologna 2001;
- 20) Vincenzo Barone: “L’ordine del mondo”: la simmetria in fisica da Aristotele a Higgs, Bollati Boringhieri 2013;

- 21) Carlo Rovelli: “La realtà non è come ci appare: la struttura elementare delle cose”, Raffaele Cortina 2014;
- 22) Leon Lederman e Christopher Hill: “Oltre la particella di Dio”: la fisica del XXI secolo, Bollati Boringhieri 2014.
- 23) **Per la relatività**, vedi bibliografia in “*Teoria della relatività*” e in “*La relatività nella scuola*” nel mio sito:
<http://digilander.libero.it/ottavioserra0>, Articoli /Liceo Scientifico Scorza di Cosenza e /Liceo Classico Garibaldi di Castrovillari.