

**Ottavio Serra**  
**I neutrini nella fisica dal 1933 al 2011.**  
**(Neutrini più veloci della luce e tachioni)**

**Premessa.**

Il 23 settembre 2011 gli scienziati del CERN di Ginevra e dell'INFN del Gran Sasso hanno annunciato che un fascio di neutrini prodotto all'LHC di Ginevra e raccolto nei laboratori del Gran Sasso (inizialmente utilizzati per l'esperimento "OPERA") hanno percorso la distanza (in linea retta, ovvio) tra i due centri ad una velocità maggiore di quella della luce. I dati erano esaminati da alcuni anni, ma i fisici impegnati nell'esperimento (160 di 11 paesi) hanno deciso di pubblicare i risultati senza aspettare i controlli internazionali, forse temendo di essere scavalcati da altri gruppi di ricerca. E' da osservare, peraltro, che 30 ricercatori dell'equipe non hanno sottoscritto l'annuncio, ritenendolo prematuro.

Se la notizia odierna verrà confermata, si ritiene che occorrerà mettere mano a una revisione del paradigma della teoria della relatività di Einstein, che domina la fisica dal 1905.

Lo scalpore suscitato dalla notizia è dovuto al fatto che secondo la "Vulgata corrente" della fisica relativistica la velocità della luce è il limite massimo al quale possono propagarsi gli agenti fisici e che le particelle che viaggiano a questa velocità devono avere massa zero<sup>1</sup>. Si riteneva (fino al 1960) che i neutrini avessero massa zero (come i fotoni, le particelle di luce) o tutt'al più una massa estremamente piccola, ma non nulla, per spiegare il cambiamento di "sapore" da neutrino elettronico a muonico, o da muonico a tauonico, osservato sia al Gran Sasso sia in Giappone (esperimento Kamiokande). Ciò richiede però che la velocità dei neutrini sia, anche se di poco, minore della velocità massima  $c$  degli agenti fisici, che storicamente da Einstein è stata identificata con la velocità della luce. Però la relatività (ristretta) può essere reinterpretata senza assegnare uno status privilegiato alla luce (ai fotoni), come espose il matematico Francesco Severi in un magistrale articolo monografico: "Aspetti matematici dei legami tra Relatività e senso comune" pubblicato nel volume "Cinquant'anni di Relatività" a cura di Mario Pantaleo, Edizioni Giunti – Sansone, Firenze 1955. Nel suo articolo Severi espone la cinematica relativistica in modo originale, arrivando a una costante universale  $c$  che ha le dimensioni di una velocità ed è la stessa per ogni osservatore, che non si somma con la velocità della sorgente, e che a priori può essere finita o infinita. Se  $c$  è infinita, si ritrova la cinematica di Galilei e il tempo assoluto di Newton, se  $c$  è finita, si trova la trasformazione di Lorentz e la cinematica di Einstein. Segue poi la dinamica relativistica e la conseguenza che le eventuali particelle aventi la velocità limite  $c$  devono avere massa zero. La ricerca di particelle aventi la velocità limite  $c$  è un problema sperimentale. Tra la fine del secolo XIX° e i primi anni del '900 si era accertato, nei limiti degli errori di misura, che la velocità della luce è indipendente dal sistema di riferimento e non si somma con la velocità della sorgente, perciò Einstein concluse che la velocità limite fosse quella della luce. Se così non fosse, la velocità limite deve essere di pochissimo maggiore della velocità della luce, perché questa è oramai nota con grande precisione e nessuna particella elementare, per quanta energia le si fornisca, ha mai raggiunto tale velocità. Del resto occorre sottolineare che gli stessi acceleratori, dall'Adone di Frascati, all'acceleratore lineare Slac della Stanford University, al Bevatron di Berkeley, al Fermilab di Chicago, all'LHC del Cern, funzionano

---

<sup>1</sup> Vedi ad es. sul sito [digilander.libero.it/ottavioserra0](http://digilander.libero.it/ottavioserra0) la cartella Articoli/Liceo Scorza/Teoria della Relatività.

solo in quanto progettati e costruiti con ingegneria relativistica. Una conferma definitiva del risultato dell'esperimento CnGS (Cern neutrino Gran Sasso) comporta che la velocità limite non è quella dei fotoni, ma un po' maggiore, (Quella dei neutrini? Di qualche altro tipo di particelle?). In ogni caso la velocità limite non può essere infinita, altrimenti varrebbe la meccanica classica, ma i sincrotroni progettati con ingegneria classica non funzionerebbero. Anche il "GPS", il Sistema di Posizionamento Globale, richiede ingegneria relativistica.

L'esistenza di particelle più veloci della luce fu immaginata dal fisico statunitense Gerald Feinberg verso il 1967 e un suo articolo "*Particelle più veloci della luce*" fu pubblicato sul numero 21, maggio 1970, di "*Le Scienze*", edizione italiana dello *Scientific American*. Tali ipotetiche particelle, battezzate da Feinberg con parola greca "*tachioni*", non violano la teoria della relatività, contrariamente a quanto si potrebbe credere, però la loro massa, se si richiede che l'energia e la quantità di moto siano reali, deve essere espressa da un numero immaginario; inoltre la loro energia diminuisce al crescere della loro velocità e tende a zero per velocità tendente all'infinito, mentre tende all'infinito man mano che la loro velocità, decrescendo, si avvicina alla velocità limite  $c$  (della luce o dei neutrini o di altro). In ogni caso la velocità  $c$  si comporta come velocità limite, sia per le particelle ordinarie aventi velocità sempre minore di  $c$ , sia per i tachioni condannati a viaggiare sempre a velocità maggiore di  $c$ . Feinberg discute anche gli esperimenti realizzati per trovare i tachioni, ma questi diedero risultato negativo. Potrebbero essere i neutrini gli ipotetici tachioni di Feinberg?

La situazione mi ricorda la scoperta delle temperature assolute negative. Nel trattato "*Calore e termodinamica*" di Mark Zemansky, Zanichelli 1970, pag. 441 e seguenti, l'Autore tratta di temperature Kelvin negative, di come va modificata la definizione data da Lord Kelvin e del successo degli esperimenti condotti da Pound, Purcell e Ramsey alla Columbia University per realizzare in un cristallo una temperatura al di sotto dello zero assoluto. Naturalmente, questo esperimento non ha comportato nessuna "*bancarotta*" della termodinamica classica, ma soltanto un ampliamento della definizione di temperatura Kelvin. Per le sostanze ordinarie le temperature assolute negative sono inaccessibili, si possono realizzare solo in materiali speciali per esempio nei cosiddetti "vetri di spin", in generale in sistemi aventi un numero finito di livelli energetici (un atomo ne ha infiniti).

Tornando ai neutrini, è probabile, e da molto tempo auspicato, l'avvento di una teoria più ampia di quella relativistica, che contenga in sé la prima come caso limite, così come la relatività non significò l'abbandono della meccanica newtoniana, che resta valida alle basse velocità (basse rispetto alla velocità  $c$ ), come caso limite della meccanica relativistica e perfettamente adeguata per progettare treni, aerei e sonde interplanetarie.

Occorre anche ricordare che dalle equazioni di Maxwell segue che le onde elettromagnetiche (e quindi i fotoni, quanti di luce) si propagano nel vuoto con la velocità  $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ . Questa velocità è

data da due costanti statiche, la costante dielettrica e la permeabilità magnetica del vuoto, che non dipendono dal sistema di riferimento, pertanto la velocità  $V$  è la stessa in ogni sistema di riferimento. Ciò corrobora l'ipotesi che la velocità limite  $c$  debba essere  $V$ , la velocità delle onde elettromagnetiche. Se sarà confermato che i neutrini hanno una velocità maggiore di  $V$ , occorrerà modificare inevitabilmente la teoria elettromagnetica di Maxwell e ciò richiederà una revisione profonda di tutta la fisica. Va inoltre tenuto presente che la relatività spiega il campo magnetico come correzione

relativistica del campo elettrico<sup>2</sup> e perciò una modifica della teoria elettromagnetica coinvolge anche la teoria della relatività, e questa è una grossa complicazione, perché abbiamo visto che una velocità maggiore della velocità  $V$  della luce sembra che non intacchi la teoria della relatività.

In ogni caso una modifica delle basi della meccanica relativistica e dell'elettromagnetismo, anche se molto lontana teoricamente dalle teorie vigenti, deve rendere conto di una mole immensa di applicazioni tecnologiche dell'elettromagnetismo su cui si regge la tecnologia moderna.

Si è anche detto che la scoperta di particelle più veloci della luce violerebbe il principio di causalità per quanto riguarda la proprietà di antecedenza (*la causa deve precedere l'effetto*). Nella teoria della relatività è possibile un'inversione temporale se, in un sistema di riferimento  $K$ , l'intervallo di tempo che separa i due eventi è minore del tempo che la velocità limite  $c$  impiega per coprire la loro distanza spaziale; in tal caso si può trovare un altro sistema di riferimento  $K'$  in cui l'ordine temporale è invertito e perciò i due eventi non possono essere in relazione causale. Certamente l'esistenza di particelle aventi velocità maggiore della velocità limite  $c$  (che non è detto sia la velocità della luce) violerebbe la proprietà di *antecedenza* del principio di causalità; questo potrebbe essere il caso degli ipotetici tachioni.

Riporto dal mio articolo citato in nota<sup>1</sup> il paragrafo

**Inversione temporale e causalità.**

Dato che la durata di un processo è relativa allo stato di moto del sistema di riferimento in cui è studiata, vediamo sotto quali condizioni un evento  $A$  che precede un evento  $B$  nel riferimento  $K$  possa avvenire dopo di  $B$  in un riferimento  $K'$ . Sia dunque  $t_A < t_B$ .

Dalla trasformazione di Lorentz 
$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ segue } t'_A > t'_B \text{ se } t_A - \frac{v}{c^2}x_A > t_B - \frac{v}{c^2}x_B$$

ovvero 
$$t_B - t_A < \frac{v}{c^2}(x_B - x_A), \text{ il che implica, essendo } v < c, \quad c(t_B - t_A) < x_B - x_A .$$

Ciò significa che si può avere inversione temporale, se la separazione spaziale tra  $A$  e  $B$  nel verso del moto relativo di  $K'$  rispetto a  $K$  è maggiore della distanza che la *luce* (dico *luce* per abuso di linguaggio,  $c$  deve essere intesa come la velocità limite in natura) può percorrere nell'intervallo di tempo che in  $K$  separa i due eventi. In tal caso la velocità  $v$  di  $K'$  rispetto a  $K$  deve essere maggiore

di 
$$\frac{c^2(t_B - t_A)}{x_B - x_A} .$$

Supponiamo ora che l'evento  $A$  sia causa di  $B$ . In tal caso l'ordine temporale deve essere **assoluto**, cioè, in ogni possibile riferimento,  $A$  (causa) deve precedere  $B$  (effetto). Se infatti in qualche riferi-

---

<sup>2</sup> Vedi Jay Orear, "Fisica generale, Zanichelli 1970 ; vedi anche il mio articolo nel sito citato in nota<sup>1</sup>, Lezioni allo Scorza Bravi in fisica 2011 "Il campo magnetico come correzione relativistica del campo elettrico".

mento K' l'effetto B potesse precedere la causa A, l'agente fisico che causa B dovrebbe propagarsi con velocità maggiore della velocità limite  $c$  (il che non può avvenire per le particelle ordinarie, ma solo per gli ipotetici tachioni). Vediamo dunque che la teoria della relatività è coerente col principio di precedenza della causalità, almeno per le particelle ordinarie; i tachioni violerebbero il principio di precedenza.

Per altre, più serie, difficoltà della fisica relativistica, che è nata e si è sviluppata nel contesto filosofico di "realtà obiettiva", confutata dall'*entanglement* quantistico, si veda l'articolo "*Teletrasporto quantistico*" nel mio sito e il libro *Il velo di Einstein, il nuovo mondo della fisica quantistica*, Einaudi 2005, del fisico austriaco Anton Zeilinger.

Come dice Einstein a pag. 12 de "*Il significato della relatività*", Einaudi 1950, "*la sola giustificazione delle nostre teorie sta nel fatto che esse servono a rappresentare il complesso delle nostre esperienze (a salvare i fenomeni, direbbero i Greci); oltre a ciò, esse non hanno nessuna legittimità*".

Una futura teoria, magari unificante elettromagnetismo, relatività speciale e generale e fisica quantistica, per essere più comprensiva e più potente non potrà che essere ancora più lontana dall'esperienza e dall'intuizione immediata di quanto non siano le teorie attuali.

### **Riporto ora le equazioni relativistiche per i tachioni, secondo le idee di Feinberg.**

La teoria della relatività ristretta di Einstein impone che la velocità massima alla quale i corpi materiali possono viaggiare sia minore della velocità della luce, cioè circa 300.000 km/s (in generale, della velocità limite  $c$ ). Vediamo allora se possono esistere, almeno in linea di principio, particelle più veloci di  $c$ . La teoria della relatività ristretta, infatti, non esclude in modo categorico l'esistenza di particelle superluminali (cioè più veloci della luce), si tratta di particelle ipotetiche che scaturiscono dalle equazioni della teoria, quando in esse si inseriscono numeri immaginari. A queste particelle è stato dato il nome di *tachioni* che significa "oggetti che si muovono rapidamente" (dall'aggettivo greco *takhýs* che significa *veloce*). I *tachioni* dovrebbero viaggiare esclusivamente a velocità superiori a quelle della luce. La velocità della luce rappresenterebbe quindi una specie di spartiacque fra le particelle ordinarie, più lenti della luce, e i *tachioni* più veloci della luce (continuo a dire velocità della luce per indicare la velocità limite  $c$ ).

Per capire come stanno le cose, partiamo dalle equazioni della dinamica relativistica.

[1] Quantità di moto 
$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

[2] Energia 
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dividendo membro a membro e poi eliminando  $v$ , si ottiene

$$[3] \quad \frac{E}{p} = \frac{c^2}{v} \quad (v < c \text{ implica } pc < E)$$

$$[4] \quad (E)^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$$

Da queste si ricava che una particella va alla velocità limite  $c$  (alla velocità della luce, secondo l'esposizione originaria di Einstein), se e solo se la sua massa  $m$  (di quiete) è zero.

Se  $m$  è diversa da zero, allora, per una particella ordinaria,  $v$  deve essere minore di  $c$ ; se infatti  $v$  fosse uguale a  $c$ ,  $p$  ed  $E$  sarebbero infinite.

Per gli ipotetici tachioni può essere però  $v > c$ . In tal caso, volendo che  $p$  ed  $E$  siano misurati da numeri reali, occorre che la massa sia immaginaria. Posto  $m = i\mu$ , le formule diventano

$$[1'] \quad p = \frac{\mu v}{\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}}$$

$$[2'] \quad E = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}}$$

Da queste equazioni segue che i tachioni hanno velocità compresa tra  $c$  (esclusa) e infinito.

Segue inoltre che se  $v$  tende all'infinito  $p$  ed  $E$  tendono a zero, mentre se  $v$ , decrescendo, tende a  $c$ ,  $p$  ed  $E$  tendono ad infinito. La velocità  $c$  è dunque elemento di separazione per le velocità delle particelle ordinarie e dei tachioni, estremo superiore per le prime, estremo inferiore per quelle dei tachioni.

### L'introduzione dei neutrini nella fisica.

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  $\alpha$ , nucleo dell'elio, si pensava costituito da 4 protoni e due elettroni:  $He_2^4$ .

Verso il 1926 si cominciò a capire che gli elettroni non potevano stare nel nucleo, perché la lunghezza d'onda di de Broglie associata agli elettroni è alcune migliaia di volte maggiore del raggio nucleare e perciò non si possono formare onde elettroniche stazionarie nel volume del nucleo. C'era anche un problema legato allo spin e alla statistica: l'elettrone e il protone hanno spin  $\frac{1}{2}$  e perciò un nucleo come quello dell'azoto, numero atomico 7, numero di massa 14, sarebbe costituito da 21 fermioni e quindi sarebbe un fermione (spin semintero); invece era stato accertato che fosse un bosone (spin intero). Si cominciò a pensare perciò che il nucleo fosse costituito da protoni e particelle neutre aventi all'incirca la massa del protone e spin  $\frac{1}{2}$ : i neutroni. In questo modo il nucleo di azoto era costituito da 7 protoni e 7 neutroni e perciò lo spin totale era intero, come aveva scoperto Franco Rasetti nel 1929. I neutroni furono effettivamente scoperti da Chadwick nel 1932.

Il decadimento  $\alpha$  seguiva lo schema della seguente reazione  $Ra_{88}^{226} \rightarrow Rn_{86}^{222} + He_2^4$ .

Da essa si vede che si conserva il numero dei protoni e quello dei neutroni. Inoltre l'energia della particella  $\alpha$  emessa è la differenza tra l'energia del nucleo *padre* e del nucleo *figlio* ed è fissa: 4,88MeV.

Anche la radioattività  $\gamma$  non pone problemi : il nucleo si assesta emettendo un fotone di altissima energia e il processo è analogo all'emissione di luce in una transizione elettronica.

L'emissione  $\beta$  (emissione di elettroni dal nucleo) diede subito grossi problemi. Gli elettroni  $\beta$  non potevano essere elettroni orbitali, perché la loro energia era di gran lunga maggiore dell'energia degli elettroni K. Dunque dovevano provenire dal nucleo, che però non può contenere elettroni. Un'altra grossa difficoltà era dovuta al fatto che 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 cinetica 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. La teoria quasi definitiva del decadimento  $\beta$  è dovuta a Fermi che la espose nella rivista italiana "*La ricerca scientifica*" nel 1933, dopo che la rivista internazionale "*Nature*" gli aveva respinto l'articolo.

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  $\nu$  va sostituito dall'antineutrino  $\bar{\nu}$ , ma ancora non si sapeva che ogni particella ha la sua antiparticella e che deve valere la legge di conservazione dei *leptoni*.<sup>3</sup> 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  $10^{13}$  volte più debole dell'interazione elettromagnetica di Maxwell. Essa è tuttavia essenziale per innescare la fornace termonucleare delle stelle, secondo lo schema:  $p_1^1 + p_1^1 \rightarrow d_1^2 + e^+ + \nu$ , seguita dall'interazione nucleare *forte*  $d_1^2 + d_1^2 \rightarrow He_2^4 + \gamma$  (trascurando reazioni intermedie).

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.**

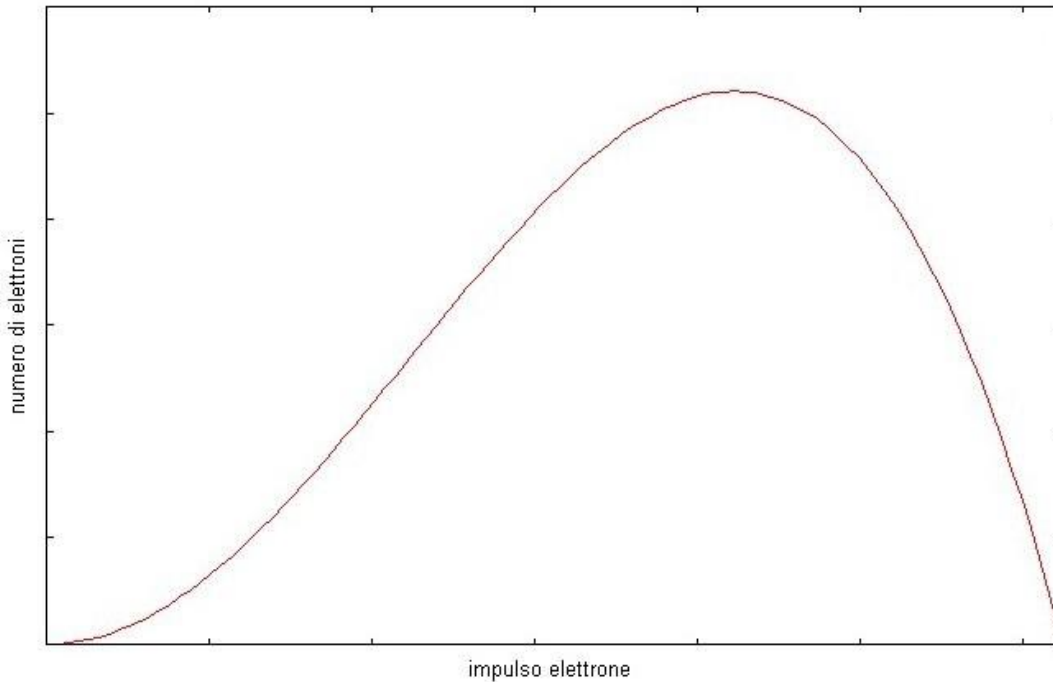
Dato che i neutrini interagiscono debolmente con la materia, quando Marie Curie<sup>4</sup> osservò per la prima volta il decadimento beta lo associò alla sola emissione di un elettrone; fu Enrico Fermi che,

<sup>3</sup> Sulle leggi di conservazione, vedi il mio articolo "Principi di simmetria e leggi di conservazione", sul sito citato, cartella Articoli/ "Il figlio del Liceo classico Garibaldi di Castrovillari.

<sup>4</sup> (1867 – 1934). Premio Nobel per la fisica nel 1903, per la chimica nel 1911. Sepolta al Pantheon di Parigi.

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.

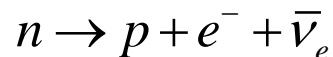
Spettro decadimento beta



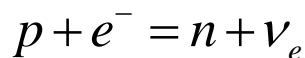
(Grafico sperimentale dovuto a Fermi)

Dal grafico 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:



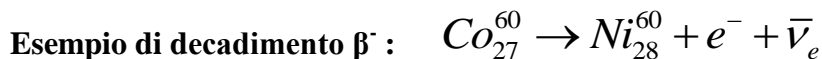
Il processo inverso si ottiene bombardando i protoni con elettroni di alta energia (accelerati in un elettrosincrotrone), oppure nella "cattura K":



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

$$m_n c^2 \approx m_p c^2 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2} + p_\nu c .$$

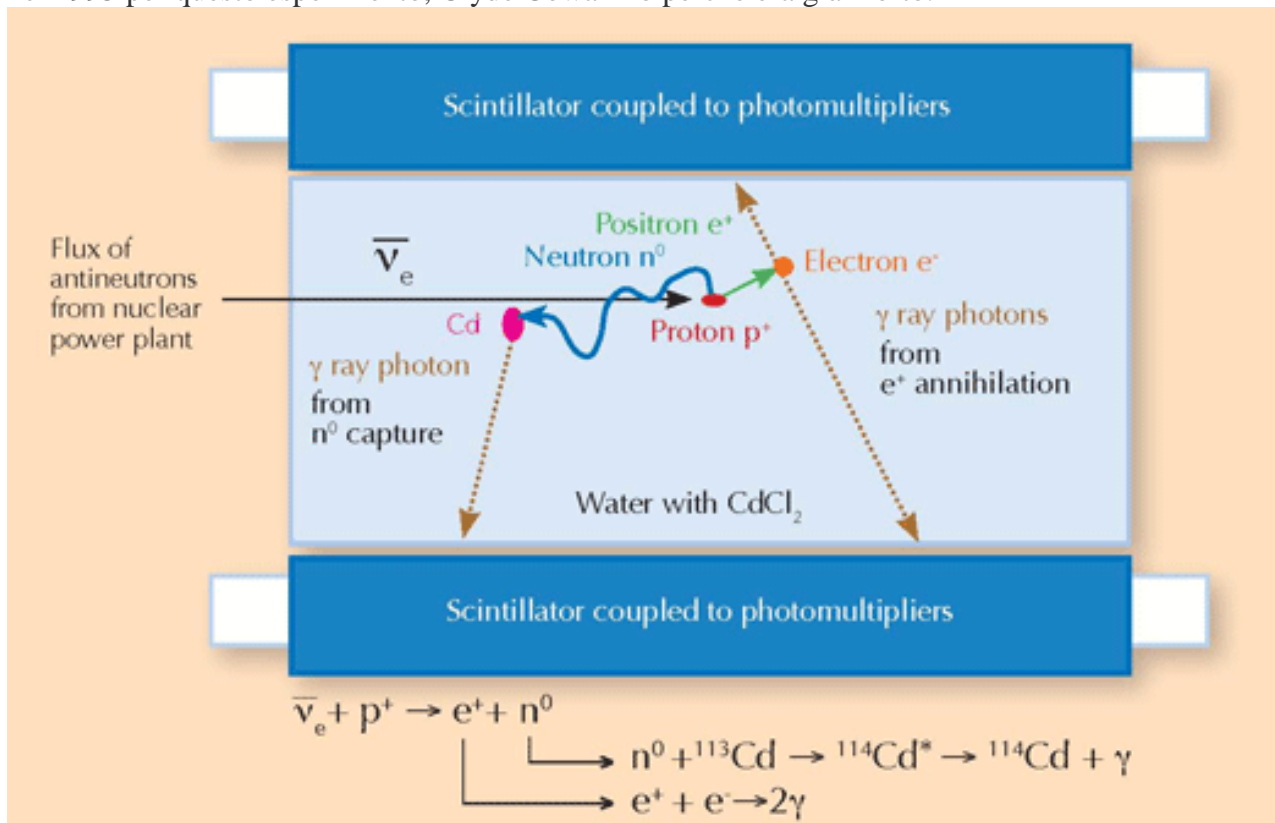
(Se si ipotizza massa zero o quasi zero per il neutrino).



### Identificazione dei neutrini (elettronici).

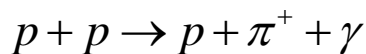
Nel 1956, Clyde Cowan e Frederick Reines costruirono due grandi serbatoi sotterranei pieni d'acqua, a pochi metri di distanza dall'impianto nucleare di Savannah River vicino ad Aiken, in Sud Carolina, USA, nei quali gli antineutrini prodotti nella centrale nucleare interagivano con i protoni

dell'acqua (vedi il diagramma sottostante). Frederick Reines ricevette il Premio Nobel per la Fisica nel 1995 per questo esperimento, Clyde Cowan no perché era già morto.

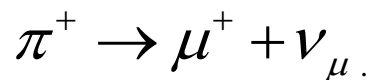


L'esperimento di Reines e Cowan: antineutrini elettronici interagiscono con i protoni dell'acqua ( $p^+$ ) in una grande cisterna riempita d'acqua e cloruro di cadmio ( $\text{CdCl}_2$ ); come risultato vengono prodotti positroni ( $e^+$ , antiparticelle degli elettroni) e neutroni ( $n^0$ ). I positroni vengono annichilati quando incontrano gli elettroni dell'acqua ( $e^-$ ): si creano due fotoni  $\gamma$  di 0,511 MeV ciascuno; i neutroni vengono assorbiti immediatamente dopo dai nuclei di cadmio (Cd) e provocano l'emissione di raggi gamma ad altissima energia. Tutti i fotoni ( $\gamma$ ) vengono rilevati per mezzo di scintillatori. Questi convertono il segnale in lampi di luce visibile, che possono essere rilevati e amplificati da tubi fotomoltiplicatori.

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

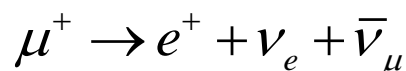


seguita, dopo un ritardo medio  $2.10^{-8}$  s (vita media del pione), dal decadimento del pione:



E' il neutrino muonico che viene "sparato" verso il laboratorio OPERA del Gran Sasso.

Il muone positivo viene deviato con un campo magnetico verso un rivelatore e, con un ritardo medio di  $2.10^{-6}$  s, decade nel modo seguente:



L'antielettrone si annichila con un elettrone del rivelatore generando due fotoni  $\gamma$  di energia 0,511 MeV ciascuno. Se l'antineutrino muonico interagisce con un protone 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  $\beta$  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  $\beta$  ( $e^-$ ) 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 illustra il decadimento  $\beta$ .

