

Problemi correnti nella fisica dei neutrini

D.Orestano

AA2011/12

A Nanda,

*mia tutrice di dottorato, collega ed amica,
che a saputo trasmettermi una vera
passione per la particella piu' elusiva e
misteriosa, sperando di essere capace di
fare altrettanto con voi.*

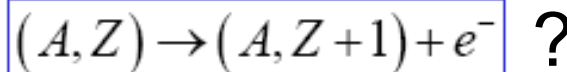
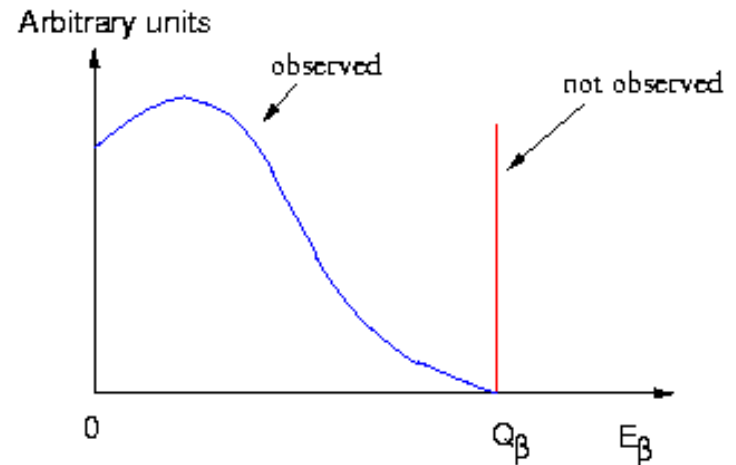
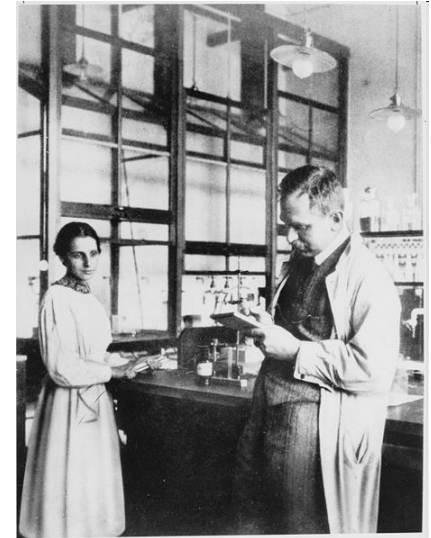
Sommario I

- Cominciamo con un percorso storico
 - Idea di neutrino
 - Scoperta del neutrino
 - Teoria a due componenti del neutrino e esperimento di Goldhaber
 - Esperimento dei due neutrini
 - Scoperta del terzo neutrino
 - Gli aspetti sperimentali (reattori e fasci come sorgenti di neutrini, approfondimento delle tecniche di rivelazione) verranno discussi nella seconda lezione

Decadimento β

- 1898 scoperta della radioattività
- problema col decadimento β dove si osservava emissione di elettroni con uno spettro continuo: 1911 Lise Meitner e Otto Hahn
- Se si fosse trattato di un decadimento in due corpi in cui un nucleo X emette un elettrone trasformandosi in un altro nucleo Y gli elettroni avrebbero dovuto essere monocromatici, con

$$E_{\beta} = (M_X^2 - M_Y^2 + m_e^2) / 2M_X$$



- Bohr era giunto a proporre che in questo caso l'energia non fosse esattamente conservata
- La soluzione di questo problema fu trovata da Pauli: nel decadimento beta non viene solamente emesso un elettrone, ma anche una seconda particella che sfugge alla rivelazione.
- Le due particelle emesse si suddividono l'energia a disposizione, questo può venire in proporzione differente, di modo che l'energia conferita all'elettrone non sia univocamente determinata.
- La seconda particella doveva essere
 - neutra, altrimenti sarebbe facilmente rilevata tramite il suo potere ionizzante,
 - non poteva essere un fotone, poiché i dati sperimentali sembravano escluderlo.
 - Si doveva trattare di una particella interamente nuova

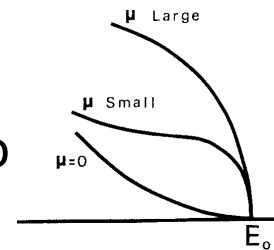
Lettera inviata da W.Pauli il 4 Dicembre 1930 ai partecipanti ad un congresso di fisica a Tubinga

Cari Signore e Signori Radioattivi,

a causa dello spettro continuo del decadimento beta, ho pensato a un possibile disperato rimedio per salvare le statistiche e il principio di conservazione dell'energia. Si tratta della possibilità che esista nel nucleo una particella elettricamente neutra, che chiamerò neutrone, con spin $1/2$, che rispetti il principio di esclusione, ma che sia diversa dai fotoni, in quanto non viaggia alla velocità della luce. La massa del neutrone dovrebbe essere simile a quella dell'elettrone e comunque non maggiore dell' 1% della massa del protone. Potremmo così spiegare lo spettro continuo assumendo che nel decadimento beta è emesso un neutrone assieme all'elettrone in maniera tale che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone sia costante.

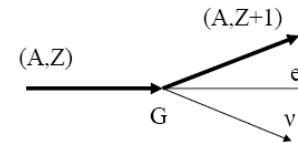
Concordo sul fatto che tale rimedio possa sembrare incredibile poiché avremmo già dovuto osservare tali neutroni. Ma solo chi osa può vincere e la situazione difficile in cui ci troviamo è ben illustrata da una frase che il mio illustre predecessore, il Sig. Debye, mi disse recentemente a Bruxelles: ..., è meglio non pensarci per nulla ...proprio come per nuove tasse... D'ora in avanti ogni soluzione merita di essere considerata. Sfortunatamente non potrò raccontarvi personalmente le mie idee a Tubinga in quanto dovrò restare qui a Zurigo a causa di una festa da ballo la notte tra il 6 e il 7 Dicembre...

- 1931 Fermi propone il nome di neutrino
- 1932 Chadwick scopre il neutrone
- 1933 viene definita la struttura del nucleo e si apre la strada ad un'interpretazione del decadimento β che non assuma che le particelle emesse fossero inizialmente contenute nel nucleo
- 1933 Fermi e Perrin propongono lo studio dell'end-point dello spettro per mettere in evidenza effetti di massa del neutrino

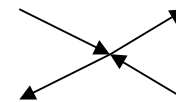


- 1934 teoria di Fermi:

- Ipotesi del neutrino, ν + teoria di Dirac ($\bar{\nu}$)
- Il decadimento β^- è riconducibile alla trasformazione di un neutrone in un protone



- Questo processo può essere trattato come un'interazione puntiforme tra 4 fermioni (teoria di Dirac)



Processo β inverso

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+) = \frac{G^2}{\pi} |M|^2 \frac{p^2}{v_i v_f}$$

- Con:
- G: costante di Fermi;
 - p: impulso nel CM
 - v_i e v_f : velocità relative delle particelle negli stati iniziale;
 - $|M|=1$ per transizione di Fermi, 3 per GT

Con E espressa in MeV:

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+) \approx 10^{-43} E^2 \text{ cm}^2$$

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+) \approx 10^{-43} E^2 \text{ cm}^2$$

Ovvero un (anti-)neutrino da 1 MeV ha una lunghezza di interazione in acqua pari a alcuni anni luce!

$$1/(\sigma n) = 1/(12 \times 10^{23} \sigma) \approx 10^{19} \text{ cm}$$

Hans Bethe: “e' proprio una gran sfortuna che la probabilita' di disintegrazione di nuclei da parte dei neutrini sia cosi' trascurabilmente piccola, poiche' la disintegrazione e' la sola manifestazione dei neutrini liberi che possa essere prevista con certezza.”

Idee per la rivelazione dei neutrini

Simultaneamente e indipendentemente

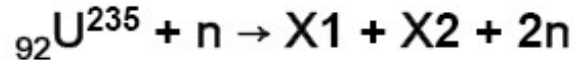
- Bruno Pontecorvo al Chalk River Laboratory, Canada, 1946
- Luis Alvarez al Lawrence Berkeley Radiation Laboratory, California, 1949

Elaborano la tecnica di rivelazione basata sul decadimento beta inverso che verrà sfruttata in seguito da Davis nella rivelazione dei neutrini solari.

Ma da dove prendere una sorgente intensa di neutrini?

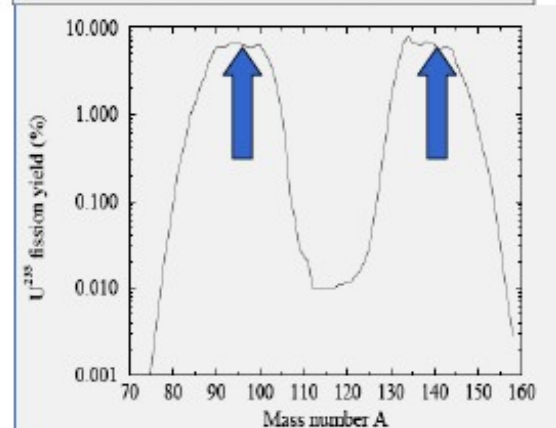
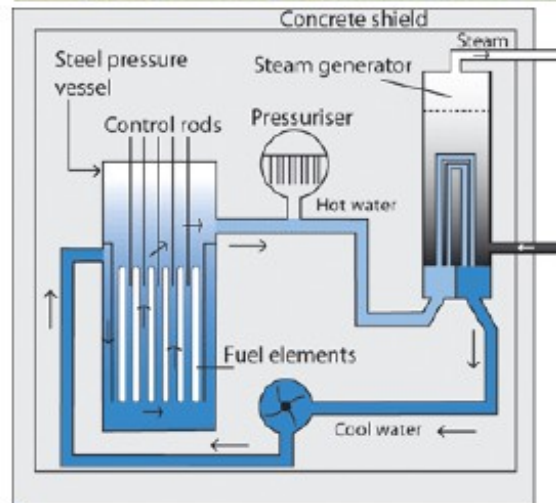
Sorgenti artificiali di neutrini: reattori nucleari

- I tipici reattori commerciali hanno potenze termiche di 3GW e utilizzano Uranio arricchito ^{235}U al 3%
- In media, ciascuna fissione nucleare produce $\Delta=200\text{MeV}$ quindi un tipico reattore produce 10^{20} fus/s
- E' facile comprendere che il numero medio di (anti) neutrini e' 6 per fissione. Nella fissione indotta da neutroni si ha



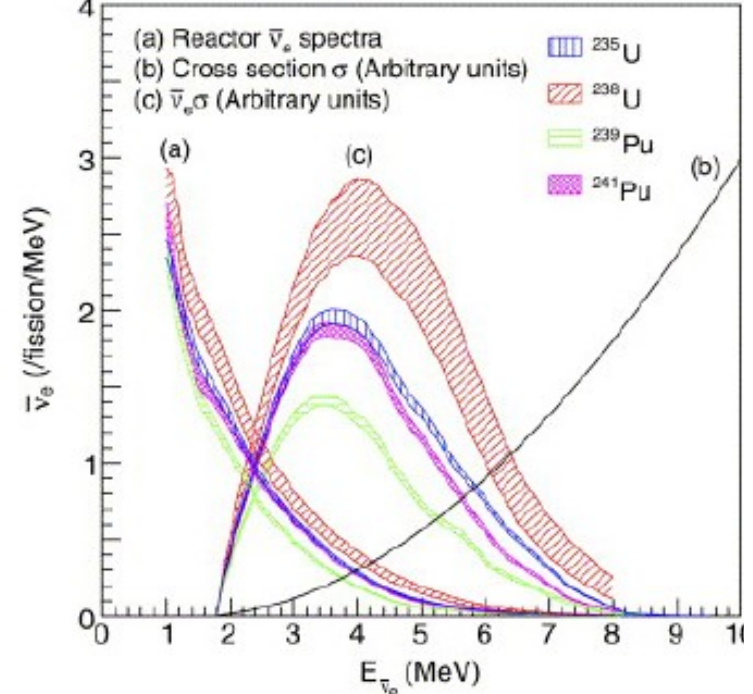
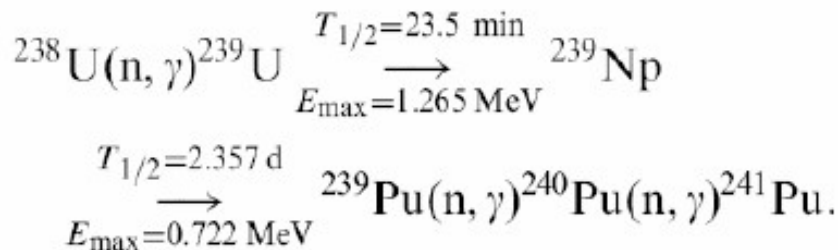
- La distribuzione dei prodotti di fissione e' piccata intorno a $A=94$ e $A=140$; per questi numeri di massa i nuclei stabili sono ${}_{40}\text{Zr}^{94}$ e ${}_{58}\text{Ce}^{140}$. Per raggiungere questi nuclei, in cui la carica totale e' 98, partendo da 92 protoni, e' necessario che 6 neutroni si trasformino in protoni, e dunque si hanno 6 decadimenti beta, ossia sei antineutrini.
- Dunque un reattore con potenza termica di 3GW produce $L_{\nu} \approx 6 \times 10^{20}$ neutrini/s, in maniera isotropa.
- A una distanza di 10 m il flusso e'

$$\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ anti } \nu / .\text{cm}^2/\text{s}$$



Lo spettro degli anti neutrini da reattore

- I neutrini della fissione portano via mediamente 1.6 MeV, il che vuol dire che dei 200 MeV di ciascuna fissione il 6% non va in calore, ma in neutrini
- I neutrini piu' abbondanti sono quelli provenienti dalla fissione con neutroni termici dell' ^{235}U , ma sono importanti anche quelli provenienti da ^{238}U , nonché da due isotopi del Plutonio, ^{239}Pu e ^{241}Pu , prodotti attraverso lo schema



- La figura mostra lo spettro delle varie componenti, con le relative incertezze, e il prodotto di questo con la sezione d'urto per la reazione tipica usata per la rivelazione (con soglia a 1.8 MeV



- Da notare il picco intorno a 4 MeV, cioè l'energia alla quale si trovano il maggior numero dei neutrini rivelati

Il sito di Savannah River

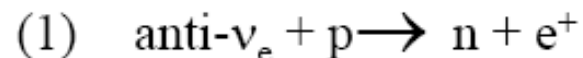
- Alvarez persuase l'Atomic Energy Commission a prevedere una sala sperimentale in prossimità del reattore in costruzione (per produrre Trizio per la bomba H) a Savannah River
- Si rese poi conto che il fondo da raggi cosmici sarebbe stato troppo alto e abbandonò il progetto
- Peraltro la reazione radiochimica di Pontecorvo ed Alvarez era sensibile ai neutrini e non agli anti-neutrini...

Reines e Cowan

- Reines e Cowan (Los Alamos Laboratory) decisero invece di sfruttare il decadimento beta inverso con la reazione indotta dagli anti-neutrini su protoni.
- Dopo avere abbandonato l'idea iniziale di usare un'esplosione nucleare installarono il loro rivelatore al reattore di Hanford (1953), per poi spostarsi a Savannah River (1956)

Il processo beta-inverso e la rivelazione degli antineutrini

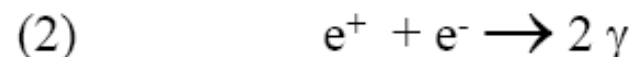
La rivelazione di antineutrini, cioè dei prodotti di loro interazioni, fu effettuata per la prima volta nel 1956, osservando un processo che è sostanzialmente l'inverso del decadimento β del neutrone e che ancora oggi rappresenta il modo classico di studio di queste particelle :



Il positrone, la particella leggera dello stato finale, porta con sé (quasi) tutta l'energia disponibile nel processo, la sua energia cinetica essendo $T_e = E_\nu + m_p - m_n - m_e = E_\nu - 1.8\text{MeV}$

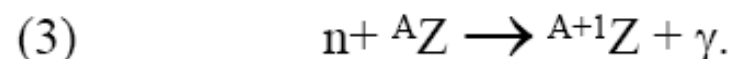
Il processo è dunque possibile per antineutrini con $E_\nu > 1.8\text{MeV}$.

Nel bersaglio, il positrone rallenta e annichila su un elettrone,



e si ha quindi un primo segnale, due fotoni in direzioni opposte e ciascuno con $E = m_e$

Il neutrone viene rallentato dagli urti fino ad energie termiche (in tempi Δt dell'ordine di decine di μs in un liquido); se nel bersaglio è presente un assorbitore di neutroni A_Z , può essere identificato dal γ emesso mediante la cattura:

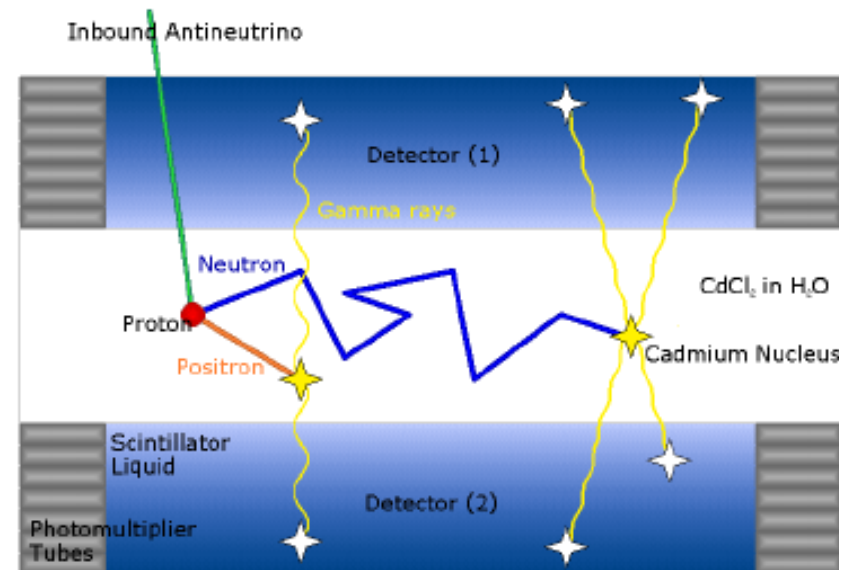


La presenza del γ di cattura ritardato rispetto al segnale dell'annichilazione è caratteristica e distintiva dell'interazione dell'antineutrino: si hanno molti conteggi di fondo (dovuti a cosmici e/o radioattività naturale) corrispondenti a (2) o (3), ma molti di meno se si richiede sia (2) che (3).

L'esperimento di Reines e Cowan (1)

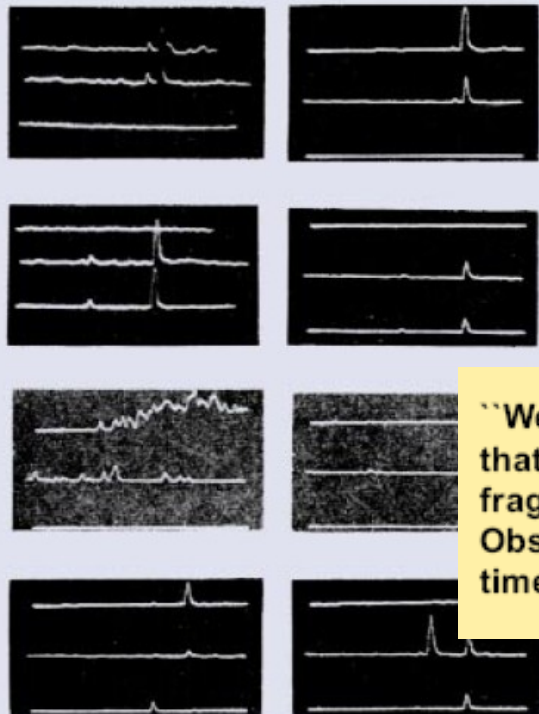
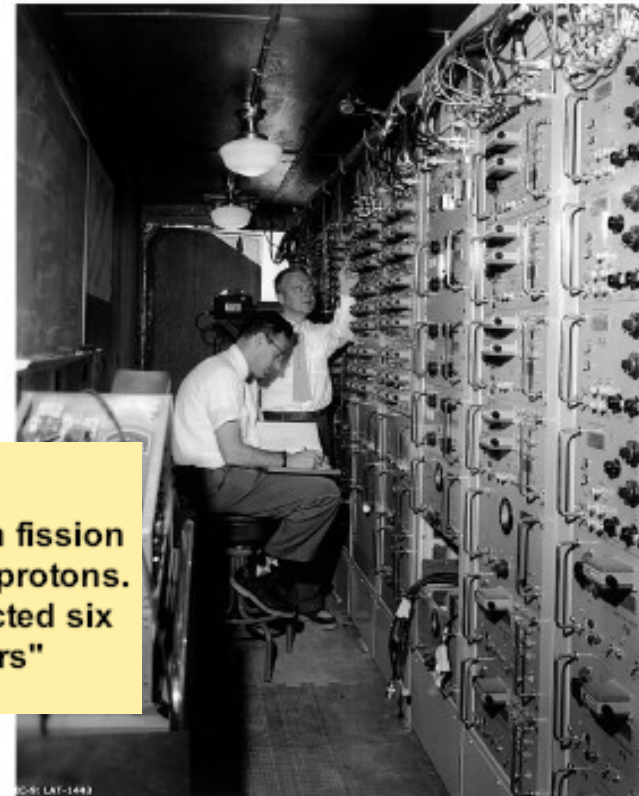
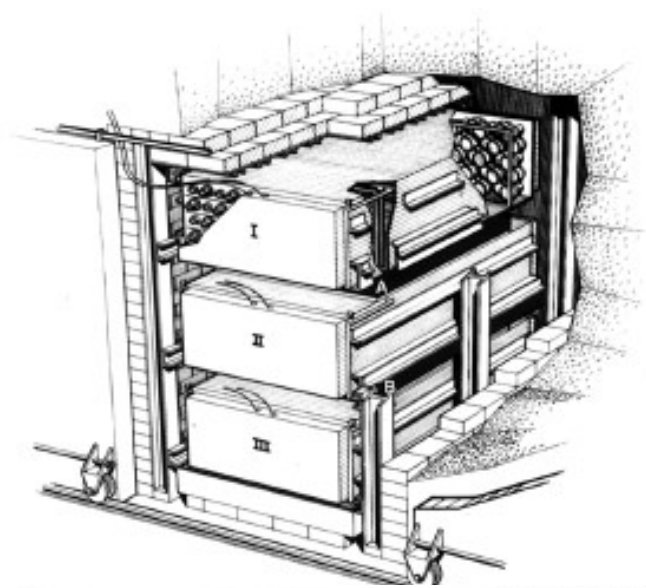
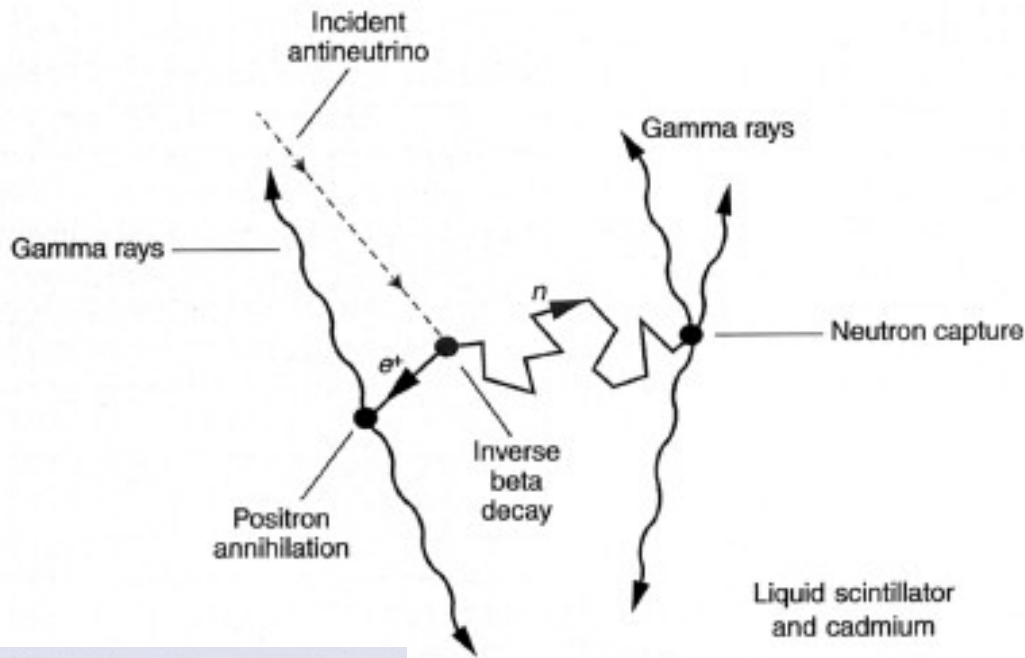
- 1) $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$
- 2) $e^+ + e^- \rightarrow 2 \gamma$
- 3) $n + {}^A_Z \rightarrow {}^{A+1}_Z + \gamma$

- Come sorgente di anti- ν_e usavano i nuclei instabili prodotti mediante reazioni di fissione in un reattore nucleare (in cui si producono - in media - 6 anti- ν_e per ciascuna fissione). Lo spettro energetico è continuo, con un massimo intorno a 6 MeV. Fuori dal nocciolo di un reattore di potenza si hanno flussi $\Phi \approx 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Come bersaglio usavano 200 litri di acqua contenente un numero $N_p \approx 10^{28}$ di protoni "liberi" cioè in atomi di ${}^1_1\text{H}$, bersaglio per la reazione (1)
- Nell'acqua era dissolto un sale di Cadmio, un nucleo con grossa sezione d'urto per cattura di neutroni, in modo da poter rivelarli mediante (3)
- Il bersaglio era circondato da scintillatore liquido cui erano accoppiati dei fotomoltiplicatori, per rivelare i 2 γ di annichilazione (2) e il γ di cattura (3)



- Il rivelatore era situato a una dozzina di metri dal nocciolo del reattore e una dozzina di metri sotto terra, per avere uno schermo dai raggi cosmici
- Reines e Cowan, selezionavano gli eventi in cui compariva sia (2) che (3). Dai dati possiamo ricavare la sezione d'urto σ di (1), poiché $\nu = \epsilon \Phi \sigma N_p$:
- $$\sigma = \nu / \epsilon \Phi N_p \approx 10^{-43} \text{ cm}^2_{48}$$

3 eventi/h



“We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse beta decay of protons. Observed cross section agrees well with expected six times ten to minus forty-four square centimeters”

\not{P} nelle interazioni deboli

- 1957 scoperta della violazione della parità nelle interazioni deboli
- La forma generale dell'hamiltoniana fenomenologica che descrive l'interazione debole va modificata includendo termini non invarianti sotto parità e tenendo conto della violazione (massima!) osservata
- Compaiono termini proporzionali a $(1-\gamma^5)$ e a $(1+\gamma^5)$ davanti agli spinori che descrivono i neutrini
- L'equazione di Dirac descrive spinori a 4 componenti accoppiando la componente di elicità positiva e quella di elicità negativa

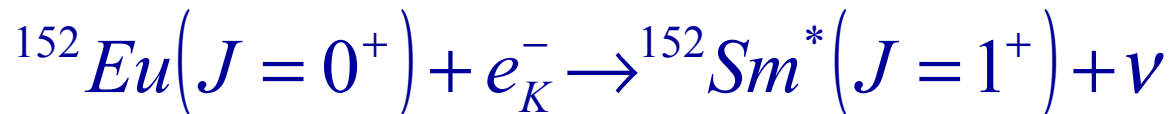
$$i\gamma^\alpha \partial_\alpha v_L(x) - m_\nu v_R(x) = 0,$$

$$i\gamma^\alpha \partial_\alpha v_R(x) - m_\nu v_L(x) = 0.$$

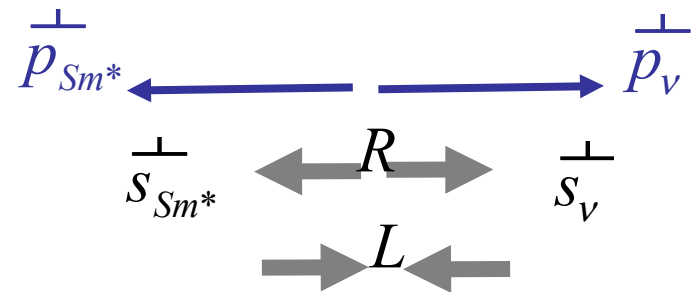
- Nel caso di massa nulla le due equazioni si disaccoppiano e le soluzioni v_L e v_R diventano alternative
- D'altra parte per particelle di massa nulla $(1-\gamma^5)$ e $(1+\gamma^5)$ sono proiettori di elicità \rightarrow l'hamiltoniana debole prevede l'interazione di v_L o di v_R ma non di entrambi!

Elicità dei neutrini

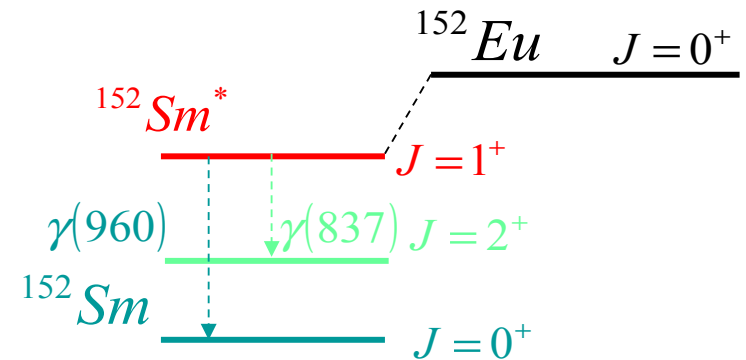
- Goldhaber: un ingegnoso esperimento nel quale l'elicità del neutrino è correlata a quella di una particella osservabile, il fotone
- Il nucleo metastabile di Europio 152 cattura un elettrone dalla shell K emettendo un nucleo di Samario 152 eccitato e un neutrino



- L'Eu è inizialmente a riposo, quindi Sm^* e ν vanno in direzioni opposte
- I momenti angolari orbitali sono nulli e il momento angolare totale si deve conservare: ci sono 2 possibilità: **in entrambi i casi il neutrino ha la stessa elicità dell'Sm***



- Il Sm^* si diseccita emettendo un γ da 960 KeV, passando allo stato fondamentale che ha spin 0.



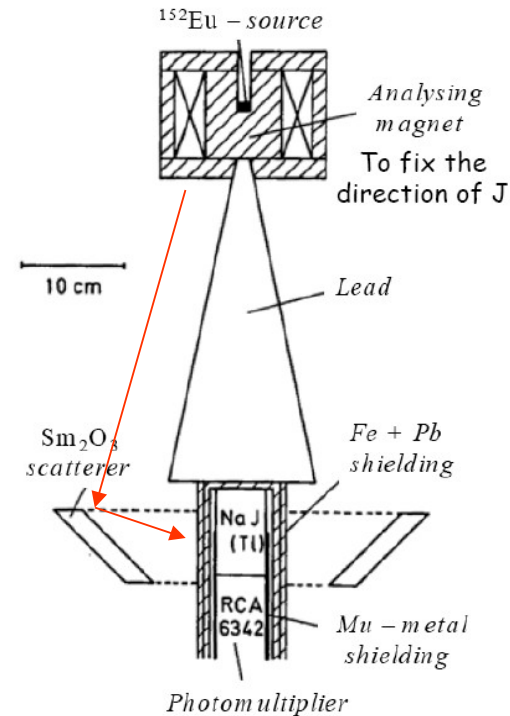
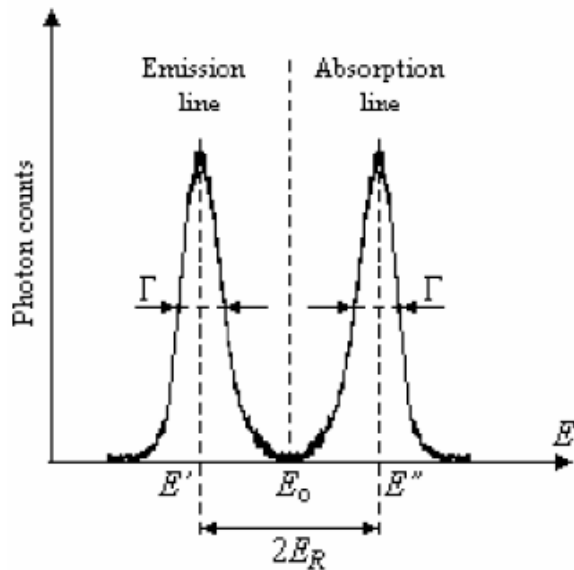
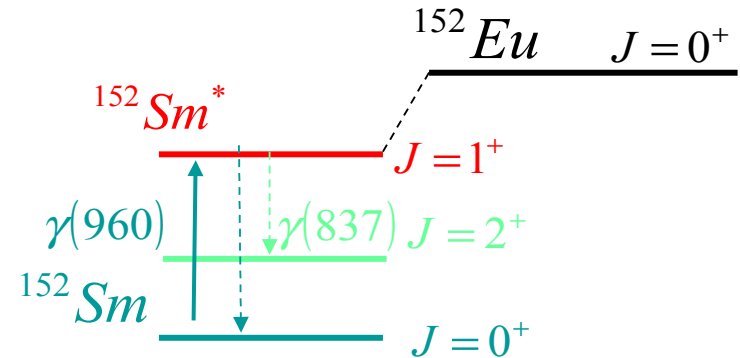
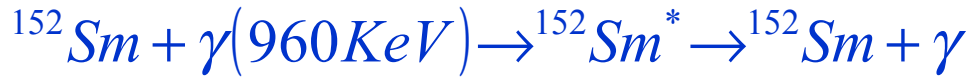
- il γ emesso ha lo spin diretto come quello del Sm^* che lo emette, sempre per la conservazione del momento angolare.

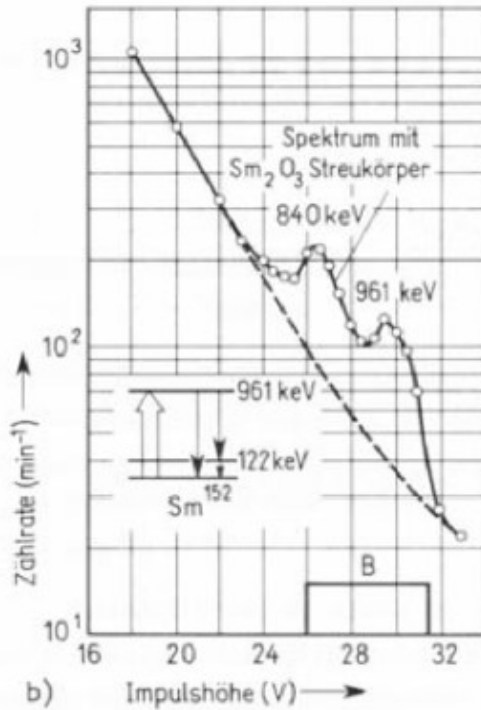
- Se il γ viene emesso nella direzione di volo del Sm^* allora è polarizzato come il Sm^* e quindi come il ν

- Bisognava quindi misurare la polarizzazione dei γ , ma solo di quelli emessi nella direzione di rinculo del Sm^*

- I γ emessi “in avanti” nel decadimento del Sm^* sono più energetici di quelli emessi nel riferimento di quiete del Sm^* (effetto Doppler o se volete boost di Lorentz) \rightarrow hanno l’energia necessaria per essere riassorbiti da un nucleo di Sm (e compensarne il rinculo), gli altri no!

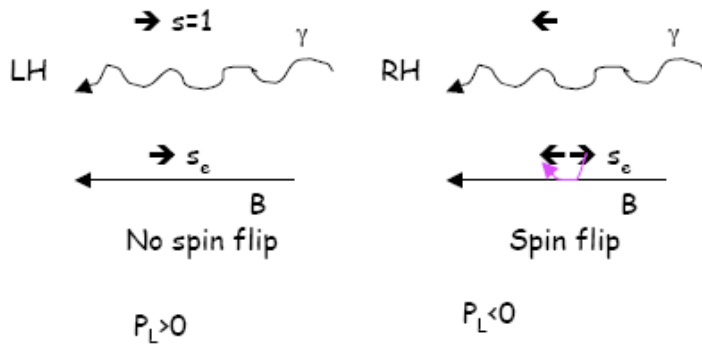
• La selezione dei γ emessi in avanti si basa quindi sulla loro capacità di indurre uno scattering risonante su altri nuclei di Sm





- Evidenza dello scattering risonante
 → si sanno selezionare i fotoni emessi nella direzione di volo del Sm*

- Per misurare la polarizzazione dei gamma (levogira o destrorsa?) i gamma vengono fatti diffondere da un materiale ferromagnetico, magnetizzato in un verso e nel verso opposto.



- La sezione d'urto di diffusione dei gamma dipende dalla loro polarizzazione rispetto alla direzione della magnetizzazione del materiale.

- $P_L = 0.66$ → i neutrini sono levogiri

Oscillazioni di neutrino

- Nel 1957 Pontecorvo ipotizza, in analogia con il sistema dei K neutri, che i neutrini levogiri possano oscillare in neutrini destrorgiri

Il decadimento del μ

- Decadimento in 3 corpi con elettrone e 2 particelle non rivelate

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu \bar{\nu} \quad ?$$

- Se così fosse dovrebbe esistere anche

$$\mu^- \rightarrow e^- \gamma$$

- Dalla teoria

$$\frac{\Gamma(\mu^- \rightarrow e^- \gamma)}{\Gamma(\mu^- \rightarrow e^- \nu \bar{\nu})} \sim \frac{1}{24\pi} \frac{e^2}{\hbar c} \sim 10^{-4}$$

- Ma sperimentalmente $< 10^{-11}$ (limite attuale):

$$V_\mu \neq V_e \quad ?$$

esperimento

Muon family

$$\begin{pmatrix} \nu_{\mu} \\ \mu \end{pmatrix}$$

Electron family

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$$

- Proposto da B.Pontecorvo nel 1959
- Eseguito nel 1962 a Brookhaven da Lederman, Steinberger e Schwarz
- fascio di neutrini “muonici”
- rivelatore
 - di grande massa
 - in grado di separare elettroni e muoni

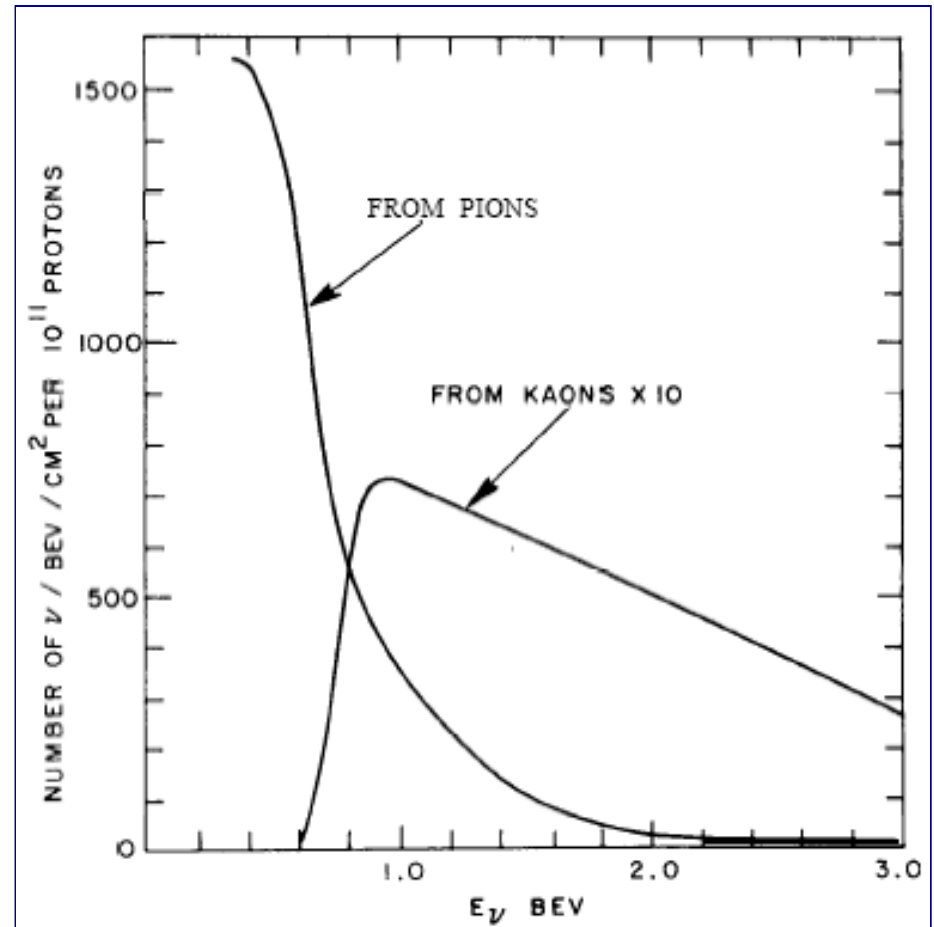
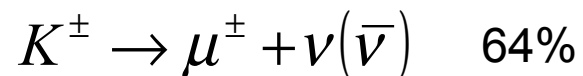
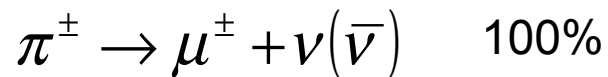
Fascio di neutrini

- Anni '50: avvento degli acceleratori di particelle
- Fasci di protoni con energie di alcuni GeV interagendo potevano produrre stati finali con π , carichi e neutri
- I π carichi decadono in muone e una particella non rivelata che si assume essere un neutrino $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$; $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$
- ✂ \rightarrow possibilità di realizzare un fascio di neutrini
- Se al muone è associato un neutrino diverso da quello associato all'elettrone allora tale fascio è composto da neutrini muonici (conservazione separata dei numeri leptonici)
- BNL:
 - fascio da 15 GeV su bersaglio di berillio
 - 21m per lasciare decadere i pioni
 - 13.5m di ferro per assorbire pioni e muoni

Non solo pioni...

15 GeV > soglia di produzione dei K

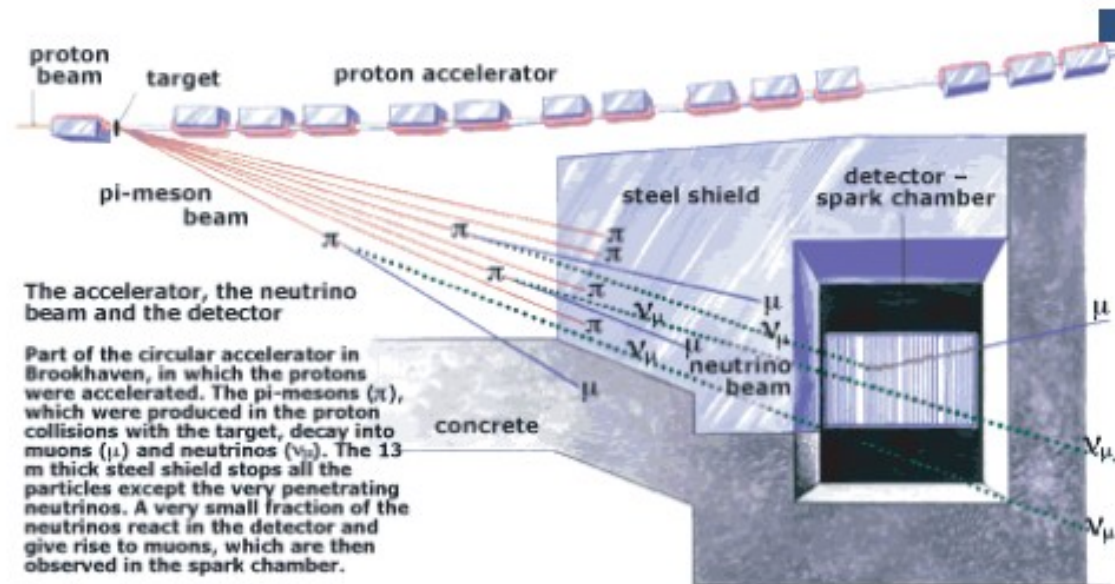
Il tasso di produzione di π e K era, in quel periodo, già ben noto e non fu difficile calcolare il flusso di ν atteso per un fascio di protoni p a 15 GeV, per mezzo dei decadimenti:



Ma attenzione! K_{3e} 5% → piccola contaminazione da elettroni

Rivelatore

- 10 moduli da 1t
- Ciascuno realizzato con gap di gas alternate a lastre di alluminio tra le quali si applicava una ddp
- La ionizzazione dovuta alle particelle cariche provocava delle scintille (spark chamber)
- I muoni lasciavano tracce dritte
- Gli elettroni sciamavano



The accelerator, the neutrino beam and the detector

Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

Risultati:

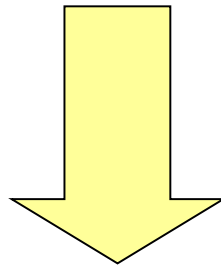
64 events:

34 one track, $p > 300$ MeV.

22 with >1 tracks

8 compatibles with showers:

neutrons (6), genuine electrons from
the beam (2)-



Osservazione del neutrino muonico!

Interazioni neutrino - materia

Cosa succede a
alta energia?

Scambio del bosone W^\pm : interazioni di Corrente Carica (CC)

Diffusione quasi-elastica

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p \quad \bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n \quad \text{Energia alla soglia: } \sim 112 \text{ MeV}$$

$$\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p \quad \bar{\nu}_\tau + p \rightarrow \tau^+ + n \quad \text{Energia alla soglia: } \sim 3.46 \text{ GeV}$$

Sezione d'urto a energie \gg soglia: $\sigma_{QE} \approx 0.45 \times 10^{-38} \text{ cm}^2$

Diffusione altamente inelastica (DIS) (diffusione su quarks – per esempio, $\nu_\mu + d \rightarrow \mu^- + u$)

$$\nu_e + N \rightarrow e^- + \text{adroni} \quad \bar{\nu}_e + N \rightarrow e^+ + \text{adroni} \quad (\text{N: nucleone})$$

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \text{adroni} \quad \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^+ + \text{adroni}$$

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + \text{adroni} \quad \bar{\nu}_\tau + N \rightarrow \tau^+ + \text{adroni}$$

Sezione d'urto a energie \gg soglia: $\sigma_{DIS}(\nu) \approx 0.68 E \times 10^{-38} \text{ cm}^2$ (E in GeV)

$$\sigma_{DIS}(\bar{\nu}) \approx 0.5 \sigma_{DIS}(\nu)$$

Scambio del bosone Z: interazioni di Corrente Neutra (NC)

Indipendenti dal "Flavour": identiche per i tre tipi di neutrino

$$\nu + N \rightarrow \nu + \text{adroni} \quad \bar{\nu} + N \rightarrow \bar{\nu} + \text{adroni}$$

Sezioni d'urto:

$$\sigma_{NC}(\nu) \approx 0.3 \sigma_{CC}(\nu)$$

$$\sigma_{NC}(\bar{\nu}) \approx 0.37 \sigma_{CC}(\bar{\nu})$$

**Sezioni d'urto molto piccole: percorso libero medio
di un ν_μ a 10 GeV $\approx 1.7 \times 10^{13} \text{ g cm}^{-2}$
equivalente a $2.2 \times 10^7 \text{ km}$ di spessore in Ferro**

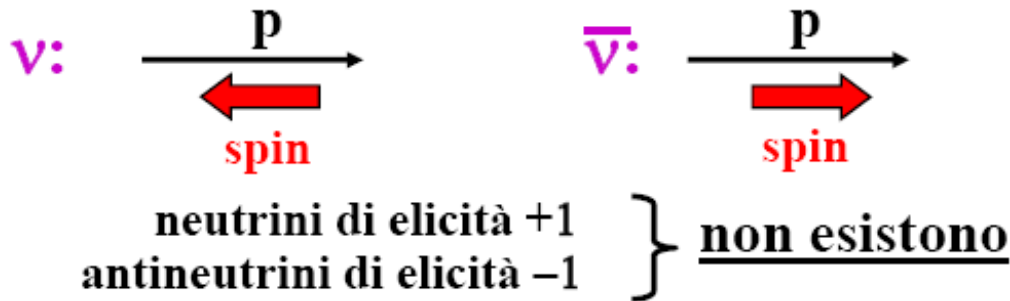
I neutrini nel Modello Standard

Misura della larghezza del bosone Z al LEP: solo 3 neutrini leggeri ($\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$)

Ipotesi: massa del neutrino $m_\nu = 0 \longrightarrow$ neutrini a due componenti :

elicità (componente dello spin parallela all'impulso) = - 1 (neutrini)

+ 1 (antineutrini)



Se $m_\nu > 0$ l'elicità non è un buon numero quantico

(l'elicità ha segno opposto in un sistema di riferimento che si muove più rapidamente del neutrino) \longrightarrow neutrini e antineutrini con $m_\nu > 0$ possono esistere in entrambi gli stati di elicità

Neutrini: particelle di Dirac o di Majorana?

Neutrini di Dirac : $\nu \neq \bar{\nu} \longrightarrow$ conservazione del numero leptonico

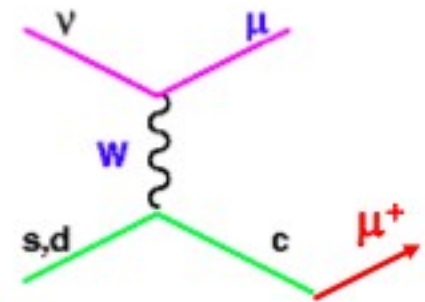
Esempi: decadimento del neutrone $N \rightarrow P + e^- + \bar{\nu}_e$

decadimento del pione $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

Neutrini di Majorana : $\nu \equiv \bar{\nu}$ (un solo spinore a 4 componenti)

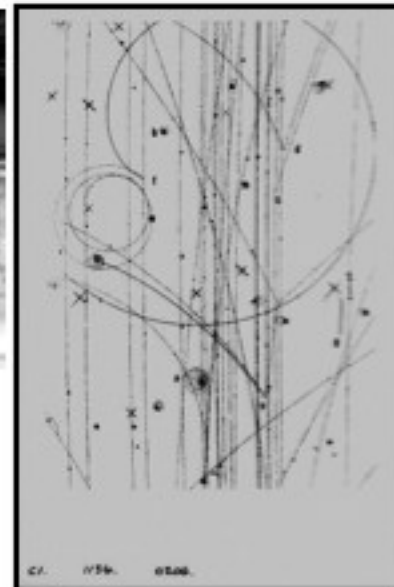
\longrightarrow numero leptonico NON conservato

Neutrino Experiments



- Beamline Progression: Add focusing horns
- Detector Progression: look at more than just “is there a muon or not”
- Sixties and Seventies: Measurements of nucleon structure

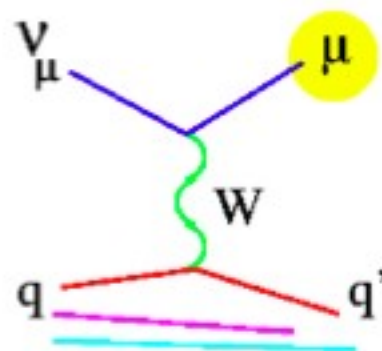
- CDHS,
CHARM,
CHARMII,
BEBC



Trying to see what else gets produced with neutrinos...Resonances
Kaons, Di-muons (evidence of charm)

What is and isn't measured in ν Scattering: Charged Currents

- Outgoing Lepton
 - Momentum (p_μ)
 - Charge (maybe: determines if ν or $\bar{\nu}$)
 - Flavor
 - Angle
- Other outgoing particles:
 - Total visible energy
 - If Particle Identification: could add rest masses too
- What is known *a priori*: ν direction



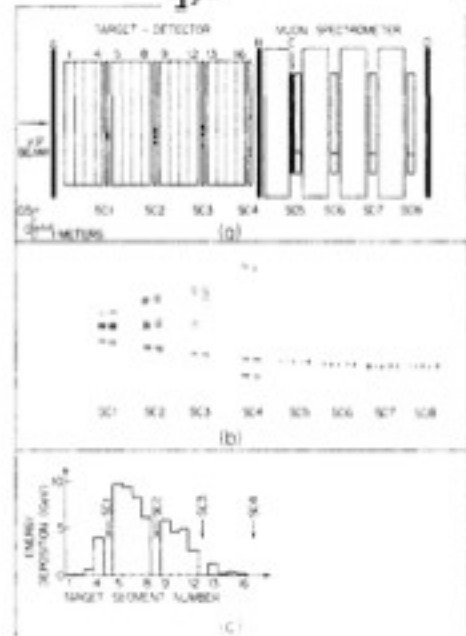
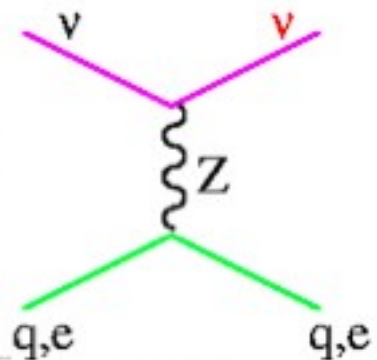
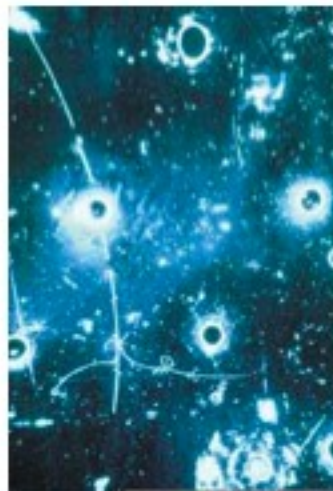
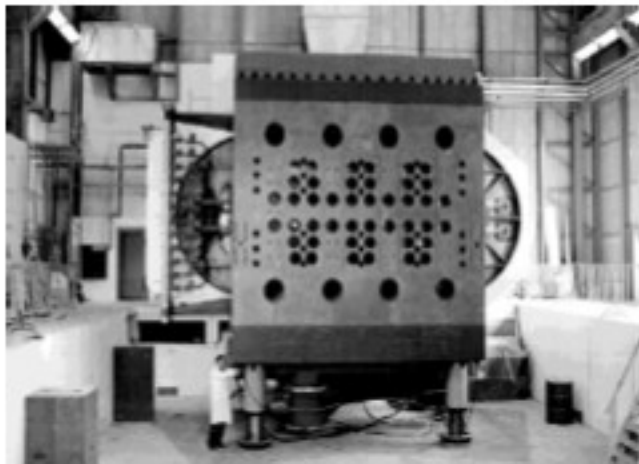
$$E_\nu = p_\mu + E_{\text{had}},$$
$$y = \frac{E_{\text{had}}}{E_\nu},$$

$$Q^2 = 4E_\nu p_\mu \sin^2\left(\frac{\theta_\mu}{2}\right)$$

$$x = \frac{Q^2}{2M_N E_{\text{had}}},$$

Neutral Currents with Neutrinos

- 1973: Neutral Currents first seen!
 - Gargamelle at CERN, E1A at Fermilab



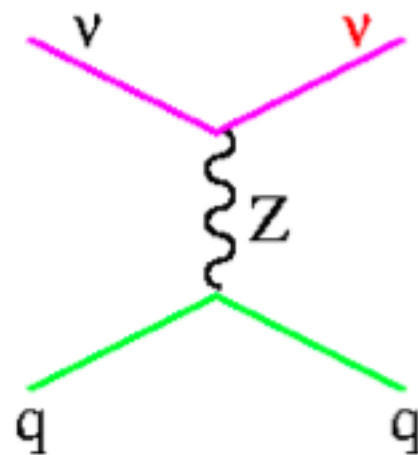
- 1980: Higher energy beams: higher Q^2 , more events, better precision on $\sin^2\theta$...

- CHARM, CCFR

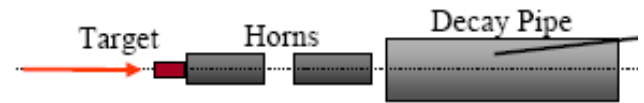
$$R^{\nu(\bar{\nu})} = \frac{\sigma_{NC}^{\nu(\bar{\nu})}}{\sigma_{CC}^{\nu(\bar{\nu})}} = \rho^2 \left(\frac{1}{2} - \sin^2 \theta_W + \frac{5}{9} \sin^4 \theta_W \left(1 + \frac{\sigma_{CC}^{\bar{\nu}(\nu)}}{\sigma_{CC}^{\nu(\bar{\nu})}} \right) \right)$$

What is and isn't measured in ν Scattering: Neutral Currents

- ~~Outgoing Lepton~~
 - Momentum (p_μ)
 - Charge (maybe: determines if ν or $\bar{\nu}$)
 - Flavor
 - Angle
- Other outgoing particles:
 - Total visible energy
 - If PID: could add rest masses too
- What is known *a priori*: ν direction
- And if you have really pure beams of only one charge of pion, can know if it's a neutrino vs antineutrino...



Fasci di neutrini da acceleratori di particelle

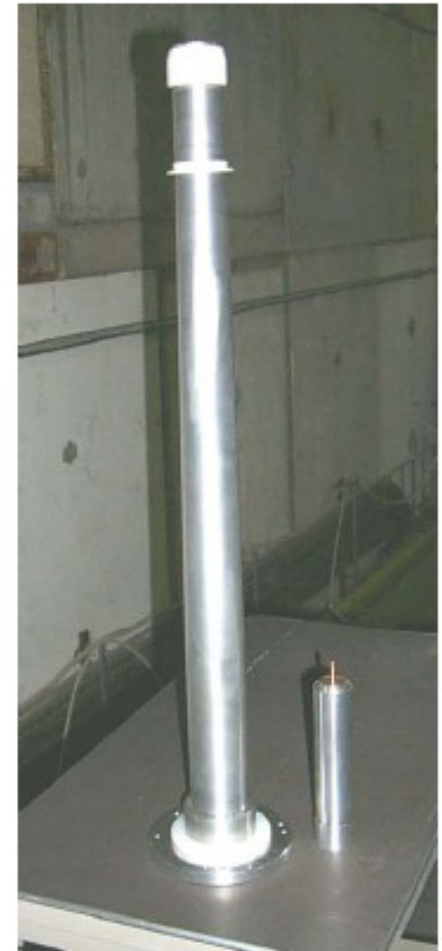


- Dagli acceleratori di particelle, sin dagli anni 60-70, si possono estrarre fasci di neutrini, principalmente di tipo muonico.
- Un fascio di protoni che sbatte su un bersaglio (Target), produce in abbondanza pioni
- Questi vengono focalizzati attraverso un corno magnetico (horn) e quindi attraversano una regione (decay pipe) dove possono decadere.
- Il decadimento principale è'
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

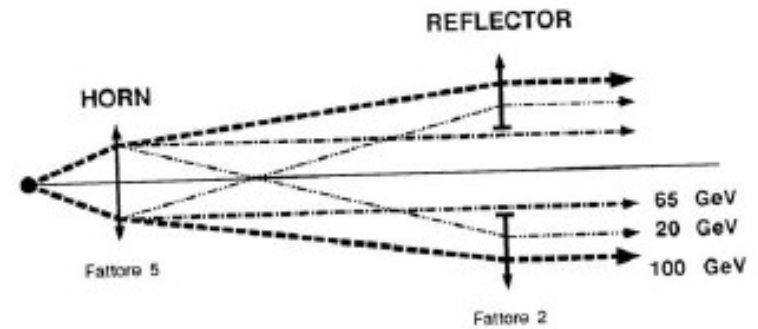
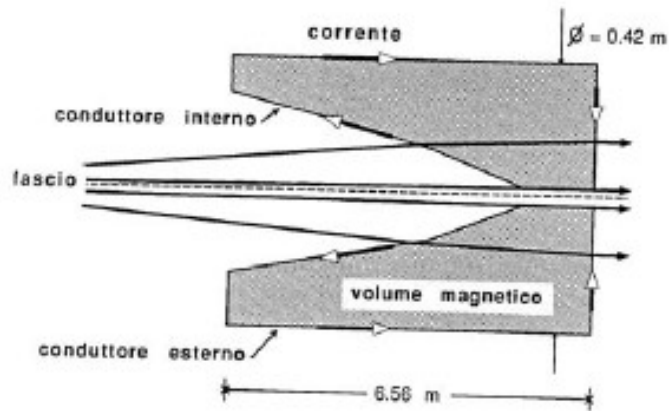
e analogamente per π^-
- A valle della decay pipe, fermati gli eventuali muoni in blocchi di cemento, restano solo i neutrini.
- Per la realizzazione del fascio di neutrini sono dunque necessari tre elementi (Target, horn, Decay pipe)

Bersagli

- In tutti I fasci neutrini il primo step e' costituito dalla produzione di secondari (π^\pm, κ^\pm) mediante interazione del fascio primario di protoni su un bersaglio
- Il bersaglio e' costituito da un insieme di barre cilindriche di qualche centimetro (fino a 10cm) di spessore separate da strati di aria in modo da minimizzare il riassorbimento dei secondari da parte del bersaglio stesso. La geometria e' ottimizzata per ridurre quanto possibile gli stress meccanici e termici dovuti all'intensita' del fascio primario
- Il materiale classicamente utilizzato e' il berillio (wanf al cern, miniboone al fermilab). I fasci neutrini piu' recenti utilizzano l'alluminio (K2K) o il Carbonio (CNGS)
- Dimensioni tipiche (Wanf 110cm , Miniboone 65 cm, k2k 60cm)

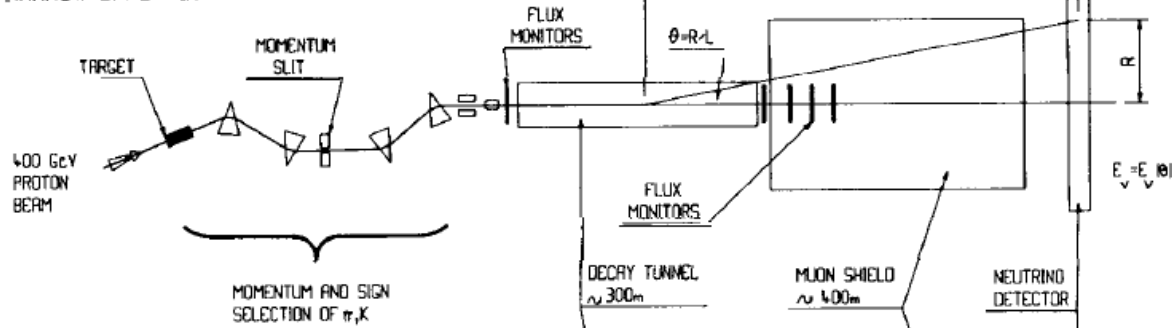


HORNs: Focalizzazione delle particelle secondarie

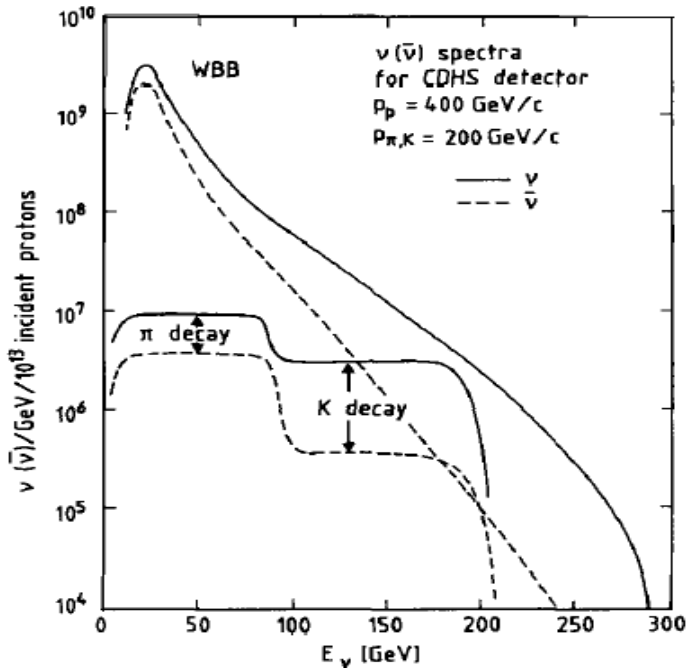
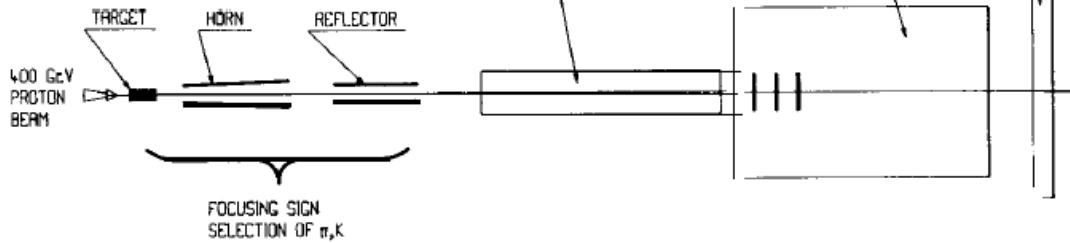


- L'horn non e' nient'altro che una lente magnetica
- Nell'horn le particelle sono deflesse da un campo magnetico radiale realizzato da 2 conduttori coassiali lungo i quali fluiscono correnti di uguale intensita' ma di direzioni opposte

NARROW-BAND NEUTRINO BEAM



WIDE-BAND NEUTRINO BEAM



WBBs are characterized by high intensity, a steep (generally undesirable) energy fall-off, and a substantial contamination of wrong-“sign” neutrinos. The NBBs have lower intensity, a flat energy dependence in the contribution from each of the two decays, and small wrong-sign background. They also have the important feature that the energy of the neutrino can be known, subject to a twofold π -K dichotomy, if the decay angle is known. In general this can be inferred from the impact parameter of the event in the detector.

J.Steinberger – Nobel lecture 1988

Bibliografia

- M. Goldhaber, L. Grodzins, and A. W. Sunyar, “Helicity of Neutrinos.” *Phys. Rev.*, **109**, 1015 (1958).
- C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, and A. D. McGuire “Detection of the Free Neutrino: a Confirmation” *Science 20 July 1956: 103-104.*
- G. Danby *et al.*, “Observation of High Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos.” *Phys. Rev. Lett.*, **9**, 36 (1962)
- Nobel lectures 1988
- J. Steinberger in CERN76-20, PROCEEDINGS OF THE CERN SCHOOL OF PHYSICS 1976, per i fasci di neutrini