Mauro Mezzetto e Marco Laveder.

Programma del corso di dottorato “Fisica dei neutrini”.

PARTE PRIMA: PROPRIETÁ GENERALI DEI NEUTRINI

- Breve storia del neutrino
- Proprietá del neutrino nel modello standard
- La massa dei neutrini nel modello standard
- Massa dei neutrini e cosmologia sperimentale
- Misure dirette della massa dei neutrini
- Decadimenti doppio beta

PARTE SECONDA:OSCILLAZIONI DI NEUTRINI

- Descrizione quanto-meccanica
- Metodi statistici nell’analisi delle oscillazioni
- Neutrini solari
- Neutrini atmosferici
- Esperimenti ai reattori
- Esperimenti su fasci di neutrini
- Discussione dei risultati sperimentali sulle oscillazioni di neutrini. Soluzioni a 3 o piú neutrini.
- Prossime iniziative sulle oscillazioni di neutrini: esperimenti long-baseline, il programma CERN-Gran Sasso
- Prospettive sperimentali per la misura della violazione di CP leptonica

Bibliografia

La bigliografia sulla fisica del neutrino é infinita e si sta sviluppando a una velocitá insostenibile (al lettore).

Una bibliografia ragionata si trova in nella “Neutrino Unbound
`http://www.to.infn.it/~giunti/NU/`
(Pagina Web mantenuta da Carlo Giunti, Marco Laveder e Mauro Mezzetto.) I files

Postscript delle trasparenze del corso si trovano in
`http://axpd24.pd.infn.it/corso2003`

Introduzione

Gli articoli sperimentali piú citati negli ultimi 10 anni nel database QSPIRES (al 30/12/02):

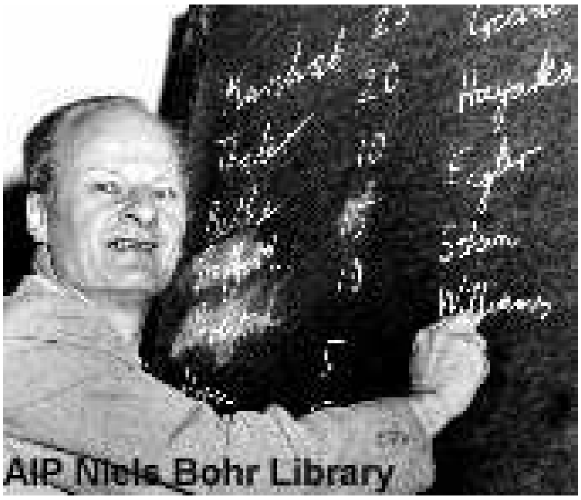
1	SuperKamiokande evidence of atmospheric ν oscillation	1468
2	Measurement of Ω and Λ from 42 high redshifts SuperNovae	1072
3	O bservational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant	1067
4	Structure in the COBE DMR first year maps	965
5	Top discovery at CDF	909
6	Top Discovery at D0	869
7	Kamiokande evidence of atmospheric ν oscillation	703
8	Chooz initial results	615
9	The ν_e and ν_μ content of the atmospheric flux	598

Breve storia del neutrino

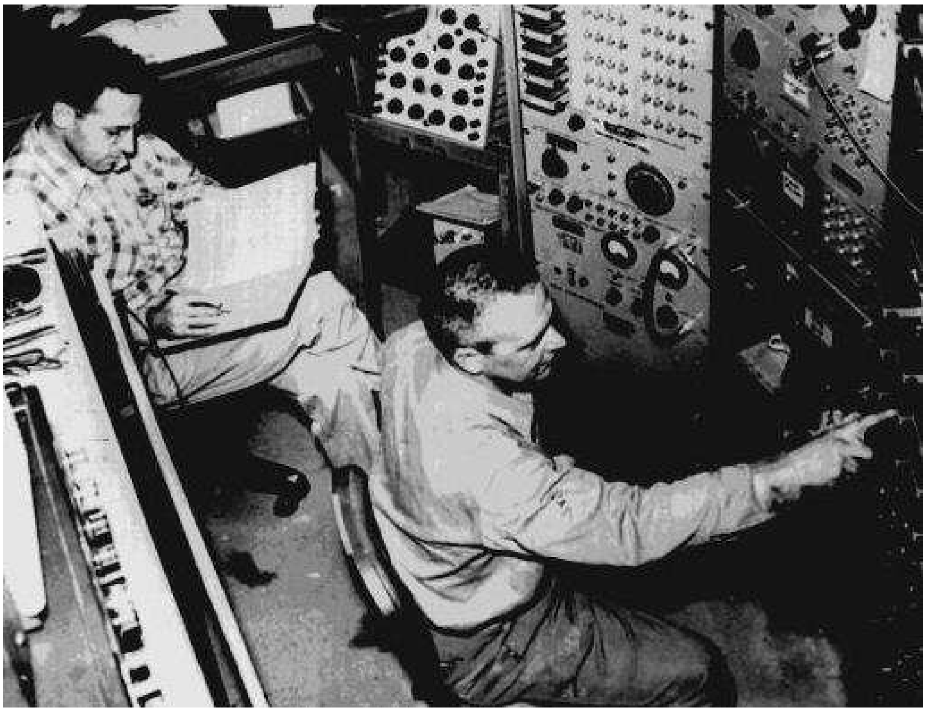
1930, W. Pauli propone l'esistenza di una particella neutra senza massa come ultima risorsa per spiegare lo spettro continuo degli elettroni emessi nello spettro beta. **E' la prima proposta di una particella che non fa parte della materia ordinaria**

1933, E. Fermi chiama questa particella neutrino e formula la teoria dei decadimenti deboli. Fermi afferma che dopo aver capito l'elettrodinamica quantistica, la teoria delle interazioni deboli conseguiva in modo naturale. **E' la prima proposta di una interazione senza analogo classico**

1934, Bethe e Peiers calcolano la sezione d'urto per i processi $\nu + n \rightarrow e^- + p$ e $\overline{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$. L'articolo conclude: "... This meant that one obviously would never be able to see a neutrino." In effetti $\sigma = 4 \frac{G_F^2}{\pi} p_e E_e \simeq 2.3 \cdot 10^{-44} cm^2 \ (\frac{p_e E_e}{m_e^2})$, ciò vuol dire che in acqua la lunghezza di assorbimento per un neutrino da 2.5 MeV ($\lambda = 1/n\sigma$) risulta $2.5 \cdot 10^{20}\ cm \simeq$ lo spessore del disco della galassia, o un anno luce di piombo.

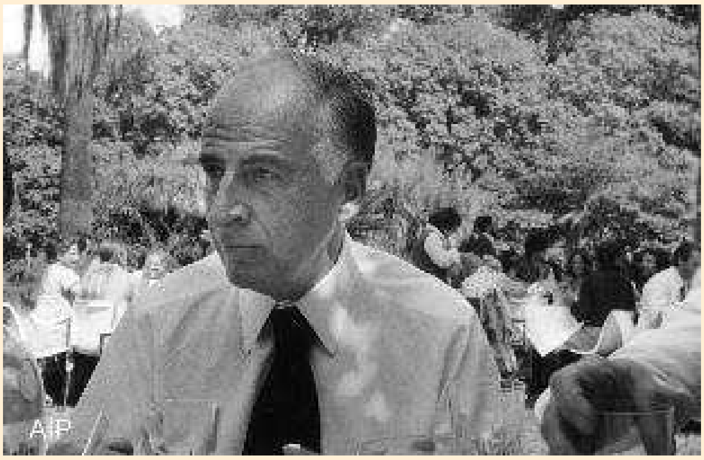


Reines e Cowan a Los Alamos, dopo la fine della II guerra mondiale, cominciano comunque a studiare la possibilitá di rivelare i neutrini emessi dai reattori nucleari. Un reattore nucleare emette un flusso di neutrini, fra 1 e 10 MeV:
$\frac{d\Phi}{d\Omega} \simeq \frac{2\cdot 10^{20}}{4\pi}\left(\frac{\mathrm{Potenza}}{\mathrm{GWatt}}\right)\frac{\overline{\nu}}{srad}$.
Piazzando un rivelatore di qualche centinaio di chili d'acqua a circa 10 m dal nocciolo di un reattore é cosí possibile rivelare qualche decina di eventi all'anno. (L'idea originale é di Pontecorvo, 1946.)
Evidenza di rivelazione di neutrini nell'esperimento decisivo al reattore di Savannah River nel South Carolina, 1956. Il premio Nobel verrá attribuito 40 anni dopo (!)



1958, Goldhaber, Grodzins e Sunyar conducono il famoso esperimento che dimostra che i neutrini sono left-handed. Un passo fondamentale verso la dimostrazione che le interazioni deboli sono (V-A).

B. Pontecorvo 1958 Propone di definire se esistono due tipi di neutrino (ν_e e ν_μ), costruendo un fascio di neutrini da decadimento di π e controllando se $\overline{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + \nu$ (si sapeva gia' che $\overline{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + \nu$)



Mel Schwartz 1959 Propone di costruire un fascio di neutrini da decadimenti di π ad alta energia per misurare la sezione d'urto $\sigma(\nu p)$ per esplorare il problema dell'unitarietá delle interazioni deboli.

1958, B.Pontecorvo postula per primo la possibilitá di oscillazioni di neutrini ($\nu\overline{\nu}$).

1962, Steinberger, Lederman e Schwartz conducono a Brookhaven l'esperimento che porta alla scoperta del secondo neutrino (Nobel nel 1988)

1962, Maki, Nakagawa e Sakata propongono per primi l'ipotesi di oscillazione di sapori di neutrini. L'articolo passa completamente inosservato finché viene riscoperto dai giapponesi di SuperKamiokande. (N.B. Questo molto prima dell'angolo di Cabibbo e della matrice di Kobayashi Maskawa)

1967, esperimento Homestake R. Davis e collaboratori installano nella miniera d'oro di Homestake, Sud Dakota, un rivelatore da 100000 galloni di C_2Cl_4 (520 ton di Cloro) per rivelare i neutrini solari attraverso la reazione $\nu_e + Cl^{37} \rightarrow e^- + Ar^{37}$ con soglia $E_\nu = 814KeV$ gli atomi di Ar^{37} prodotti vengono rivelati con metodi radiochimici. Il metodo era stato proposto da B. Pontecorvo nel 1946, quando lo scintillatore liquido non era conosciuto.
Il primo risultato é negativo: nessun neutrino viene rivelato. Solo dopo il miglioramento dell'elettronica dei rivelatori di Ar^{37} (1970) vengono rivelati i neutrini solari, con un flusso pari a 1/3 delle previsioni. Per almeno 15 anni questo risultato non viene collegato a oscillazioni di neutrini.
Premio Nobel nel 2003.

1973, esperimento Gargamelle scopre l'esistenza delle correnti deboli neutre.

Anni '70 Misure di sezioni d'urto di interazioni di neutrino, scattering su particelle point-like (partoni, quarks) e piú tardi studi di funzioni di struttura. Nel 1968 R.Davis comincia l'esperimento sui neutrini solari.

Anni '80, Struttura degli accoppiamenti delle correnti deboli, inizio delle ricerche di oscillazione

1984 Inizia l'esperimento Kamiokande, 5000 l d'acqua nelle miniere di Kamioka, Giappone. Team leader é T. Koshiba, premio Nobel nel 2003.

1987 Kamiokande e IMB riportano evidenza di segnale di neutrini da supernova.

1989 LEP riporta che la larghezza della Z° dimostra che i neutrini sono 3.

Noi siamo pervasi da un flusso di neutrini

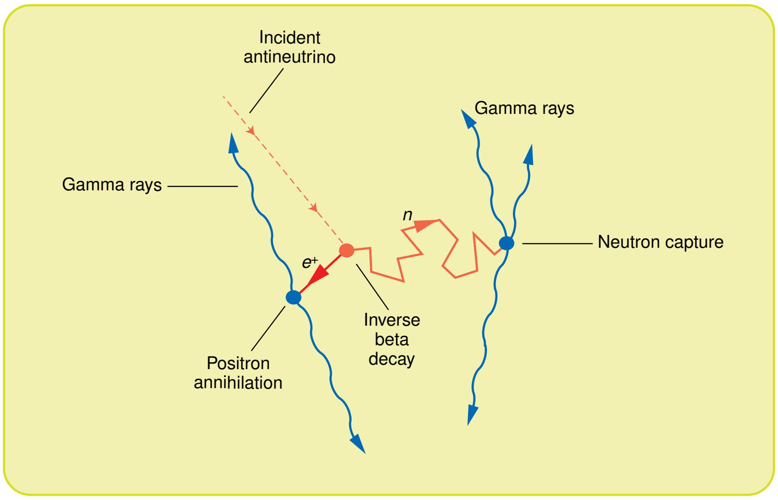
- $\sim 10^7 \nu$ relici dal Big Bang
- $\sim 10^{14} \nu/s$ dal sole
- $\sim 5 \cdot 10^{10} \nu/s$ dalla radioattivitá naturale
- $\sim 10^{10} \nu/s$ dai reattori nucleari
- $\sim 10^3 \nu/s$ dai interazioni di raggi cosmici nell'atmosfera
- $\sim 4 \cdot 10^3 \nu/s$ dai decadimenti del Potassio 40 presente nel nostro corpo ($\sim 20\ mg$).

Rivelazione diretta dei neutrini, Reines, Cowan et al 1956

Il processo considerato e'

$$\overline{\nu} + p \to e^{+} + n$$

la sorgente di antineutrini é un reattore nucleare, il principio sperimentale e' di rivelare l'annichilazione del positrone in due gamma in coincidenza ritardata con l'emissione di gamma dalla cattura del neutrone ($\langle t \rangle \simeq 30 \mu s$)



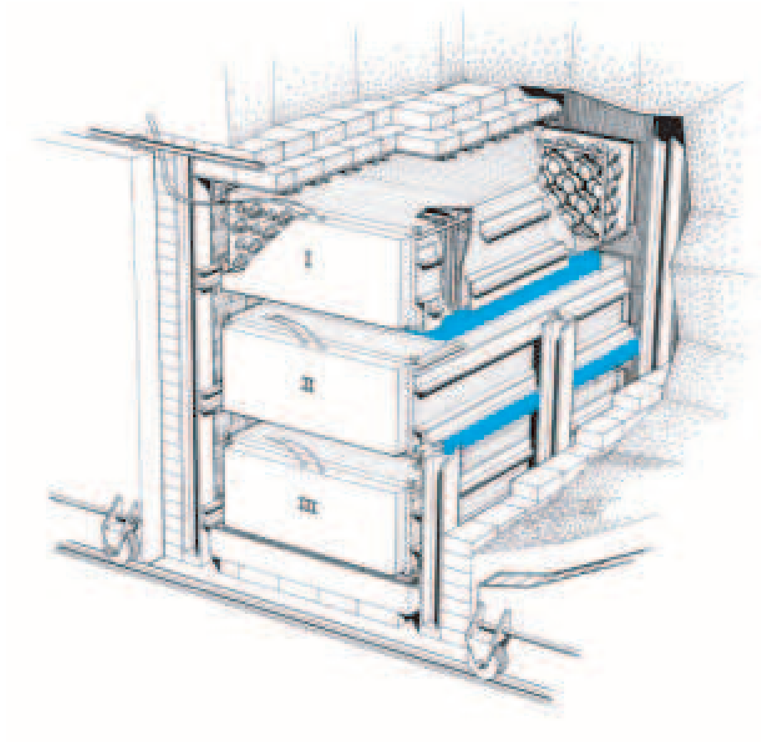
- Un primo disegno concettuale per rivelare neutrini da una esplosione nucleare nel 1952.
- Un primo esperimento per la rivelazione di neutrini al reattore di Hanford nel 1953. Il rivelatore era una tank di 300 l di scintillatore liquido (in precedenza il piu' grande rivelatore di scintillatore liquido non superava i 10 l). I fondi dal reattore erano fermati da schermi in boro-paraffina intervallati con lastre di piombo. I fondi da raggi cosmici risultarono essere piu' di un ordine di grandezza maggiori dal segnale atteso:

> *” The lesson of the work was clear: It is easy to shield out the noise men make, but impossible to shut out the cosmos. Neutrons and gamma rays from the reactor, which we had feared most, were stopped in our thick walls of paraffin, borax and lead, but the cosmic ray mesons penetrated gleefully, generating backgrounds in our equipment as they passed or stopped in it. We did record neutrino-like signals but the cosmic rays with their neutron secondaries generated in our shields were 10 times more abundant than were the neutrino signals. We felt we had the neutrino by the cottails, but our evidence would not stand up in count.”*

Per upgradare il rivelatore il gruppo dovette impegnarsi ad affrontare per la prima volta enormi problemi sperimentali:

- Sviluppo di rivelatori liquidi: resa in luce, stabilita’, dipendenza dalla temperatura, produzione in larga scala etc.
- Componenti a bassa radioattivita’
- Schermi anti-radiazioni.
- Disegno di un rivelatore in grado di vetare i raggi cosmici
- Sviluppo dell’elettronica per le coincidenza ritardate
- Analisi dei dati in grado di dedurre le frequenze delle coincidenze accidentali.

L’esperimento di Savannah River



- Due grandi vasche di plastica (A e B) riempite d’acqua ⇒bersaglio per le interazioni degli antineutrini.
- Cloruro di Cadmio sciolto nell’acqua ⇒nuclei con grande sezione d’urto per la cattura dei neutroni.
- Le vasche d’acqua erano interposte fra 3 grandi vasche di scintillatore liquido (I, II e III), con una capacita’ totale di 4200 litri, ognuna con 110 fotomoltiplicatori per rivelare i gamma dell’annichilazione del positrone e la cattura del neutrone

Un evento di neutrino nella tank avrebbe prodotto:

- Un positrone la cui annichilazione avrebbe prodotto due gamma back to back ⇒ coincidenza veloce dei segnali nelle tank I e II.
- Cattura del neutrone ⇒ segnali di gamma nella tank I o II separati in tempo fra i 3 e 10 μs.
- Nessun segnale dalla tank III perche’ la tank II era abbastanza grande da fermare tutti i raggi gamma prodotti dalla interazione.

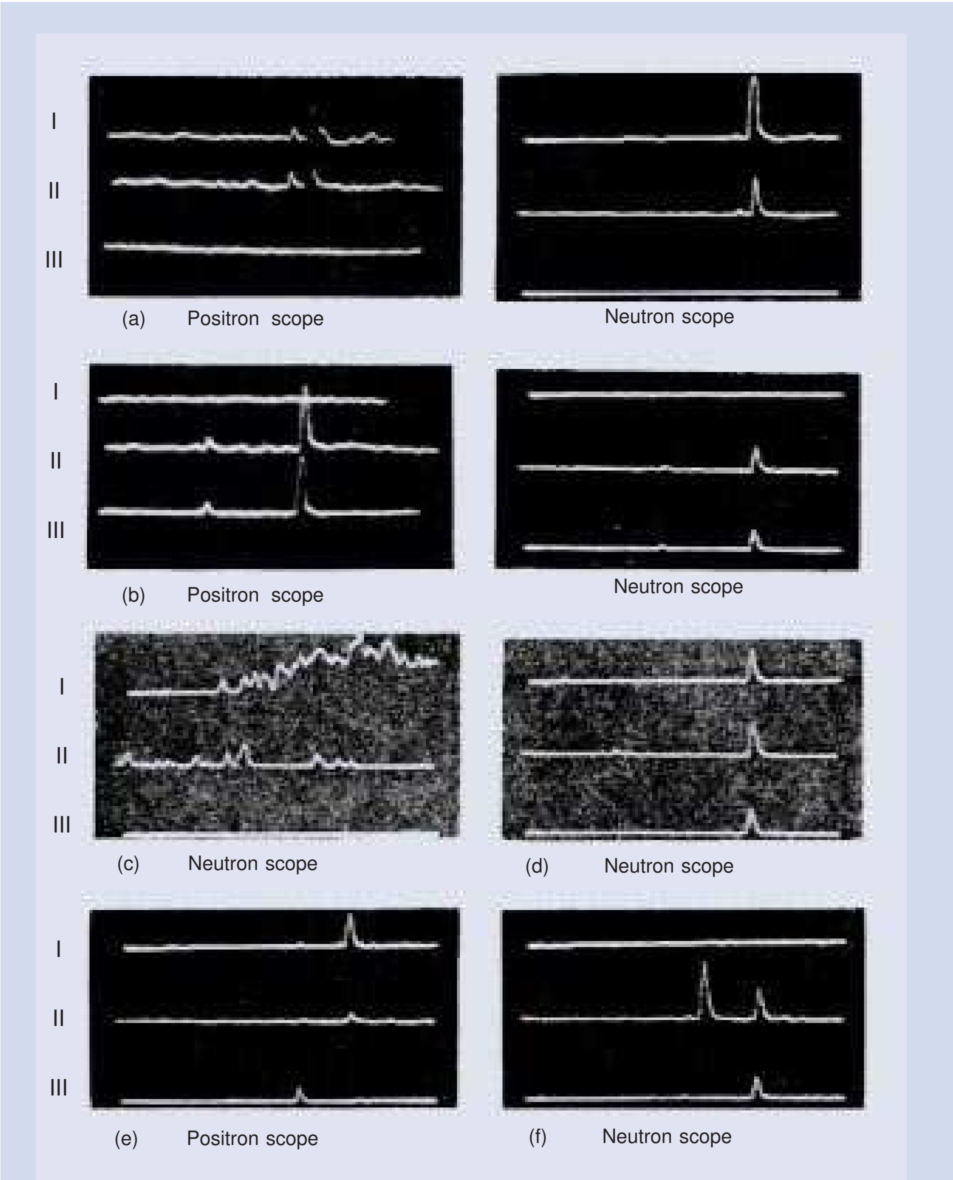


Figure 5. Oscilloscope Traces from the Savannah River Experiments

In these oscilloscope pictures, traces from detectors I, II, and III are labeled I, II, and III, respectively. The label under each frame indicates whether the signals were recorded by the scope for positron annihilation or the scope for neutron capture. Acceptable delayed-coincidence signals are shown in (a) and (b), while rejected signals are pictured in (c) through (f).

(a) The delayed-coincidence signal in these two frames has occurred in the top triad of the detector because the pulses appeared in detectors I and II. *Positron scope*: The pulse energies in detectors I and II were 0.30 MeV and 0.35 MeV, respectively. The pulses reached the positron circuit in prompt coincidence (less than 0.2 microsecond apart) and were accepted as a signal of positron annihilation. *Neutron scope*: The pulse energies in detectors I and II were 5.8 MeV and 3.3 MeV, respectively. These pulses arrived in prompt coincidence and were accepted as a signal of neutron capture. The delay between the positron and neutron signals was 2.5 microseconds. (b) The delayed-coincidence signal in these two frames has occurred in the bottom triad because the pulses appeared in detectors II and III. *Positron scope*: The pulse energies in detectors II and III were 0.25 MeV and 0.30 MeV, respectively. *eutron scope*: The pulse energies in detectors II and III were 2.0 MeV and 1.7 MeV, respectively. The delay between the positron and eutron signals was 13.5 microseconds. (c) The pulses from the neutron circuit were the result of electrical noise. (d) These three ulses from the neutron circuit were caused by a cosmic-ray event. (e) These three pulses from the positron circuit were caused by cosmic-ray event. (f) These pulses may have been caused by a cosmic-ray event. They were rejected as a signal of neutron capture ecause of the extra pulse from detector II. Frames like this one occurred more often than would be expected from chance oincidences. They were, however, not often enough to affect the results considerably. **These data appeared in Reines, Cowan, Harrison, et al. 1960.**

Risultati

14/6/1956, telegramma a Pauli:

> *"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"*

Numero di eventi con reattore acceso - numero di eventi con reattore spento

= $3 \pm 0.2/$ora.

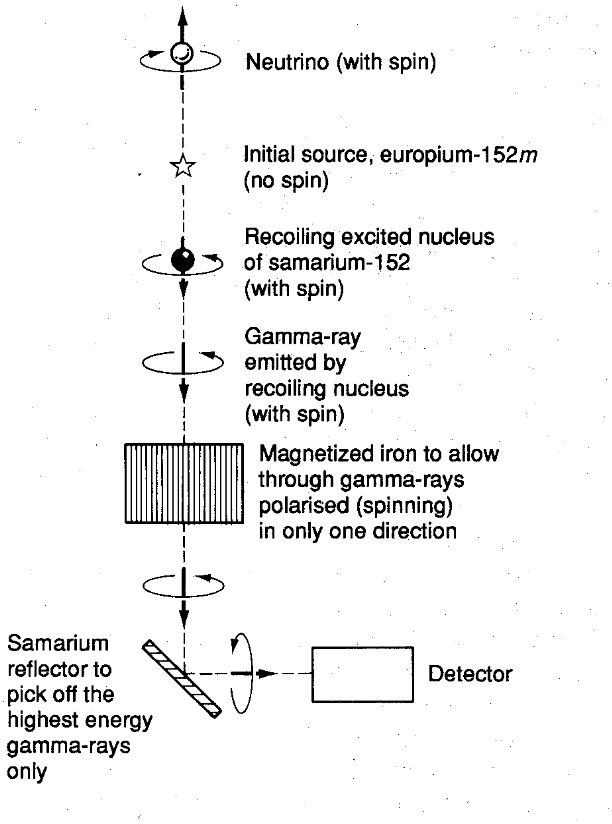
Verifiche sperimentali:

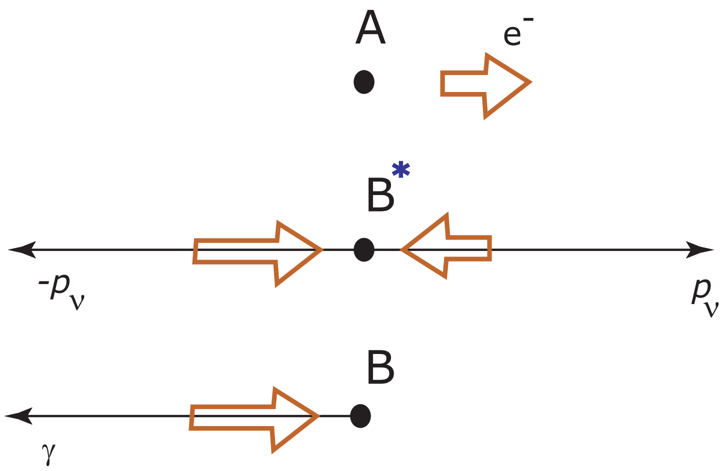
- Verifica che il segnale prompt e' dovuto a raggi gamma da 0.5 MeV: inserzione di fogli di Piombo di spessore variabile fra bersaglio e rivelatore $\Rightarrow$ il segnale diminuisce come previsto.
- Verifica che il segnale ritardato e' dovuto a cattura del neutrone da cadmio: sostituendo il bersaglio con acqua pura il segnale diminuiva di un fattore circa 100.

Primo articolo del 1956: sezione d'urto misurata in accordo entro il 5% rispetto alle stime teoriche. Gli errori sistematici sul flusso di neutrini dal reattore e l'efficienza di rivelazione erano almeno al 50%.

Articolo finale del 1960: la sezione d'urto misurata aumentava di un fattore 2 grazie alla miglior conoscenza delle efficienze di rivelazione. Nel frattempo anche la sezione d'urto teorica era aumentata di un fattore 2 includendo la violazione di parita'.

Elicita' del neutrino, Goldhaber, Grodzins e Sunyar, 1957





Il fotone emesso da questo processo, se emesso nella stessa direzione del nucleo di rinculo, ha la stessa elicita' del neutrino.

Principi sperimentali:

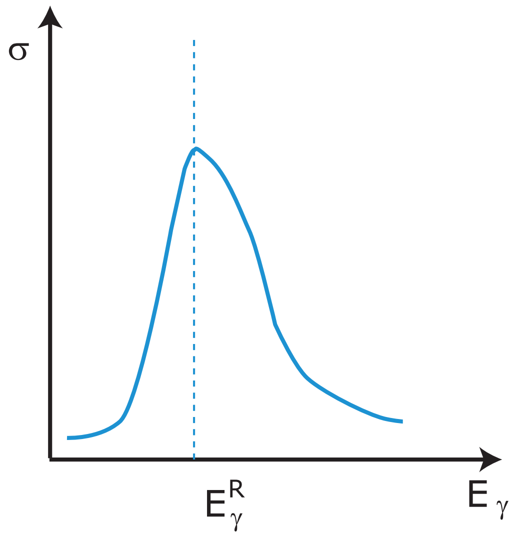
1. Misurare la polarizzazione dei γ emessi.
2. Stabilire che i γ emessi erano allineati con il nucleo di rinculo.

Il primo problema sperimentale era misurare la direzione di volo del neutrino $\Rightarrow$fluorescenza risonante: $\gamma + B \rightarrow \gamma + B$ attraverso la produzione di un nucleo eccitato B^*.

La condizione di risonanza e' che

$$(E_\gamma^R + M)^2 - P_\gamma^2 = 2ME_\gamma^R + M^2 = (M^*)^2$$

energia totale nel baricentro=massa dello stato eccitato.



I γ emessi da B^* a riposo hanno

$$E_\gamma^0 = \frac{(M^*)^2 - M^2}{2M^*} < E_\gamma^R$$

ma i γ emessi paralleli a B^*, che ha momento P_ν, hanno:

$$E_\gamma \simeq E_\gamma^0(1 + v/c) = E_\gamma^0(1 + \frac{p_\nu}{M^*}) \sim E_\gamma^R$$

e quindi hanno una grande sezione d'urto per scattering sul nucleo B.
L'altro problema sperimentale era trovare la giusta sequenza di nuclei, che dovevano soddisfare alle seguenti condizioni:

1. La sequenza di spin deve essere 0-1-0
2. $p_\gamma \simeq E^0$. E^0 doveva essere dell'ordine di qualche centinaio di keV per poter misurare la polarizzazione dei γ
3. Il nucleo B deve essere un isotopo abbondante

Tutte queste condizioni sono soddisfatte per A=Eu^{152m}, B=Sm^{152}

$E_\nu = 840\,KeV$, $t_{1/2} = 9.3$ ore. L' Eu^{152m} era prodotto bombardando ~ 10 mg di Eu_2O_3 al rivelatore di Brookhaven.

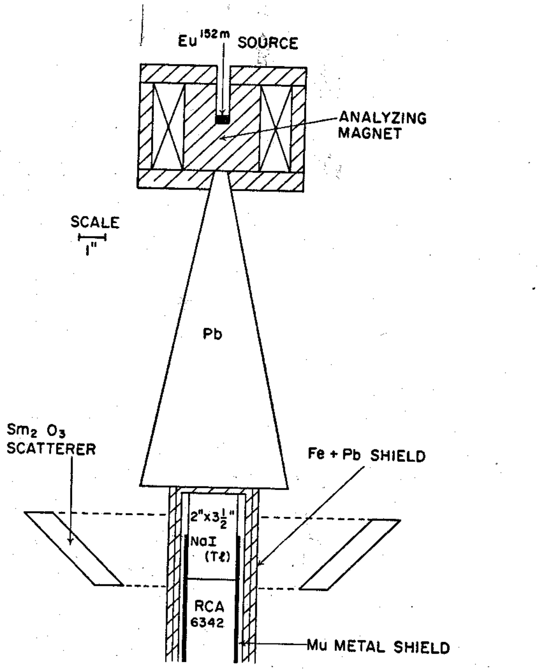


FIG. 1. Experimental arrangement for analyzing circular polarization of resonant scattered γ-rays. Weight of Sm_2O_3 scatterer: 1850 grams.

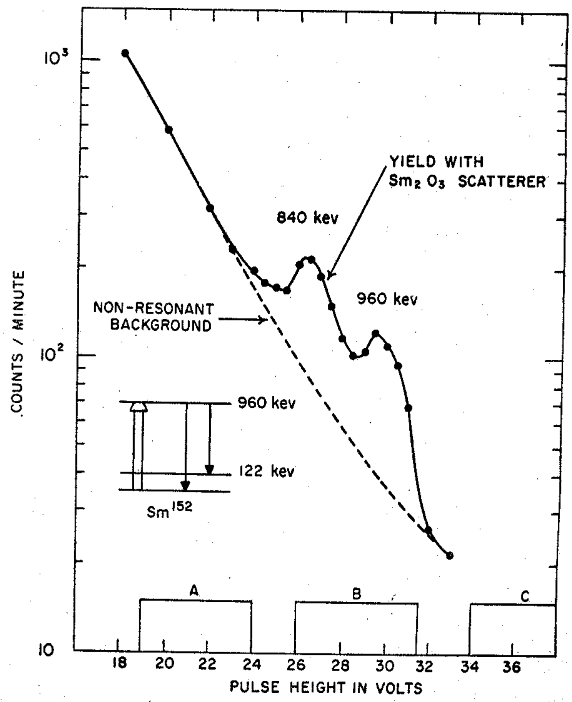


FIG. 2. Resonant-scattered γ rays of Eu^{152m}. Upper curve is taken with arrangement shown in Fig. 1 with unmagnetized iron. Lower curve shows nonresonant background (including natural background).

Asimmetria $\delta = \frac{N_- - N_+}{1/2(N_- + N_+)} = (1.7 \pm 0.3)\%$

N_+: conteggi con magnetizzazione verso l'alto

N_-: conteggi con magnetizzazione verso il basso

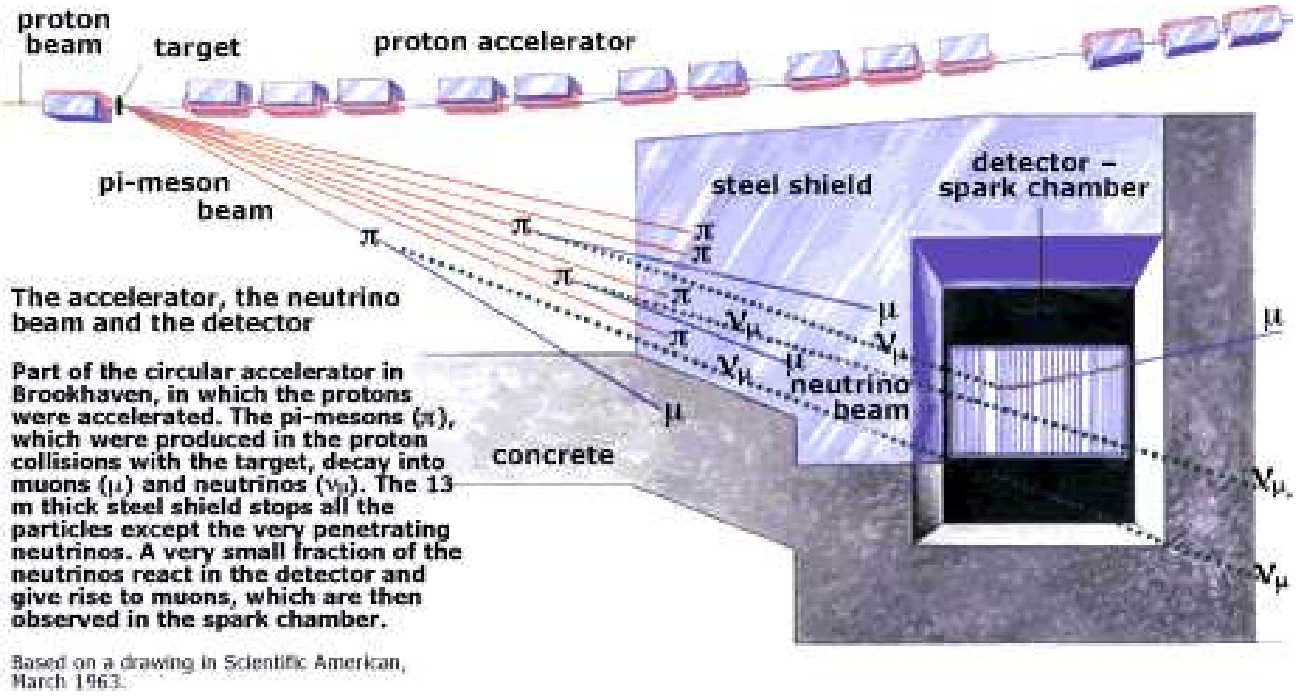
Elicita' γ (= elicita' ν) compatibile con 100%

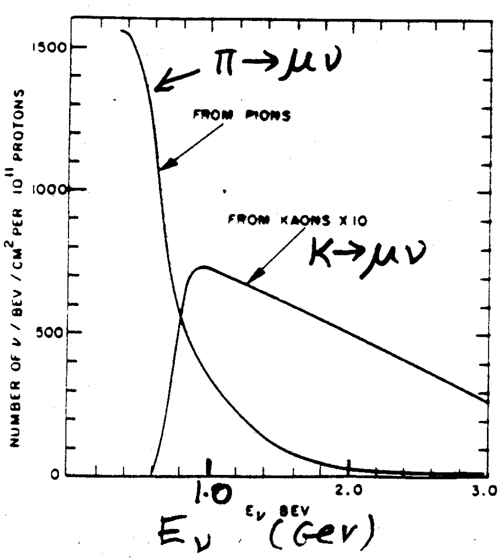
Esperimento BNL-Columbia (1962)

Danby, GAillard, Goulianos, Lederman, Mistry, Schwartz, Steinberger.

Dimostrazione che esistono due specie diverse di neutrini.

Sperimentalmente: dimostrare che esistono neutrini che producono μ (e non elettroni) in processi di corrente carica.

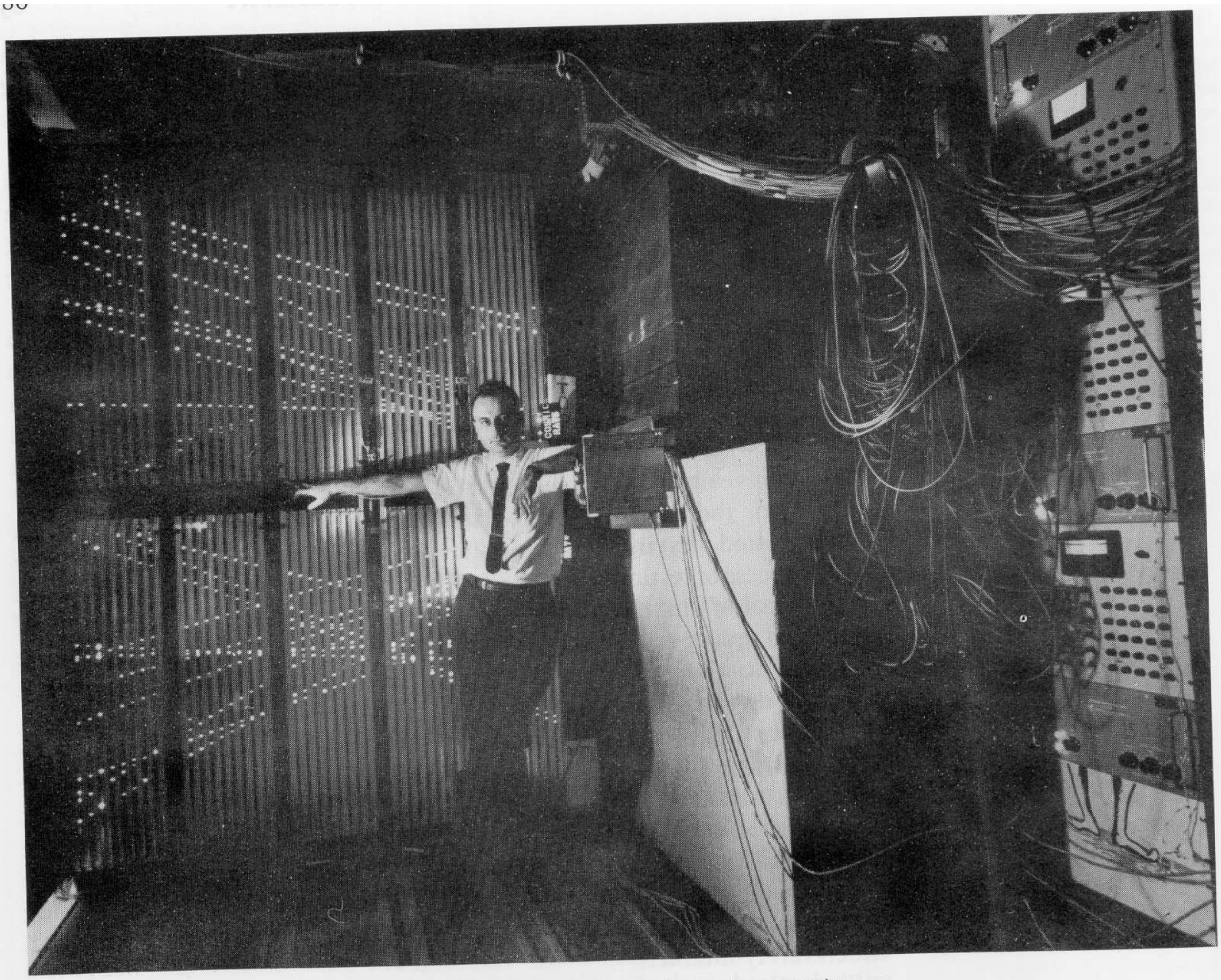




Neutrini da decadimento in volo di π e k

Rivelatore: 10 camere a scintilla ($112 \times 112 \ cm^2$) separate da lastre di alluminio spesse 2.5 cm (totale 10 ton)

Trigger attivo solo durante il bombardamento del bersaglio



Mel Schwartz standing in front of the 10-tonne spark chamber used in the 'two-neutrino experiment'. Each of the ten modules contains 1 tonne of aluminium in the form of nine plates which are 2.5 centimetres thick and separated by a gas-filled gap of 1 centimetre. High voltage across the plates causes the gas to spark along the tracks of charged particles, which, in this time-lapse picture, are cosmic rays. (Brookhaven National Laboratory.)

Risultati

Circa 300 ore di misura ($3.5 \cdot 10^{17}$ protoni sul bersaglio)

64 eventi:	34 tracce singole, $p > 300$ MeV.
	22 con > 1 traccia
	8 compatibili con sciami da elettroni

Gli eventi a traccia singola interpretati come eventi di μ.

- Il range nel rivelatore era 16 volte il cammino libero per un pione
- Eventi non dovuti a raggi cosmici (presa dati a beam off)
- Eventi non dovuti a interazioni di neutroni (distribuzione dei vertici uniforme)
- Eventi associati con decadimenti in volo di π e k, stabilito spostando lo schermo passivo vicino al bersaglio in modo da ridurre il cammino di decadimento dei mesoni

8 eventi di tipo "elettrone" compatibili con interazioni di neutroni (6), elettroni genuini (2)

Numero previsto di eventi di ν_e : 2, dai processi ($k^+ \to e^+\nu_e\, \pi^\circ$; $k^\circ \to e^\pm\nu_e\, \pi$)

CONCLUSIONE: il numero di μ osservati e' molto maggiore del numero di elettroni osservati

$$\Rightarrow \quad \nu_\mu \neq \nu_e$$

La scoperta della correnti deboli neutre, GARGAMELLE, 1973

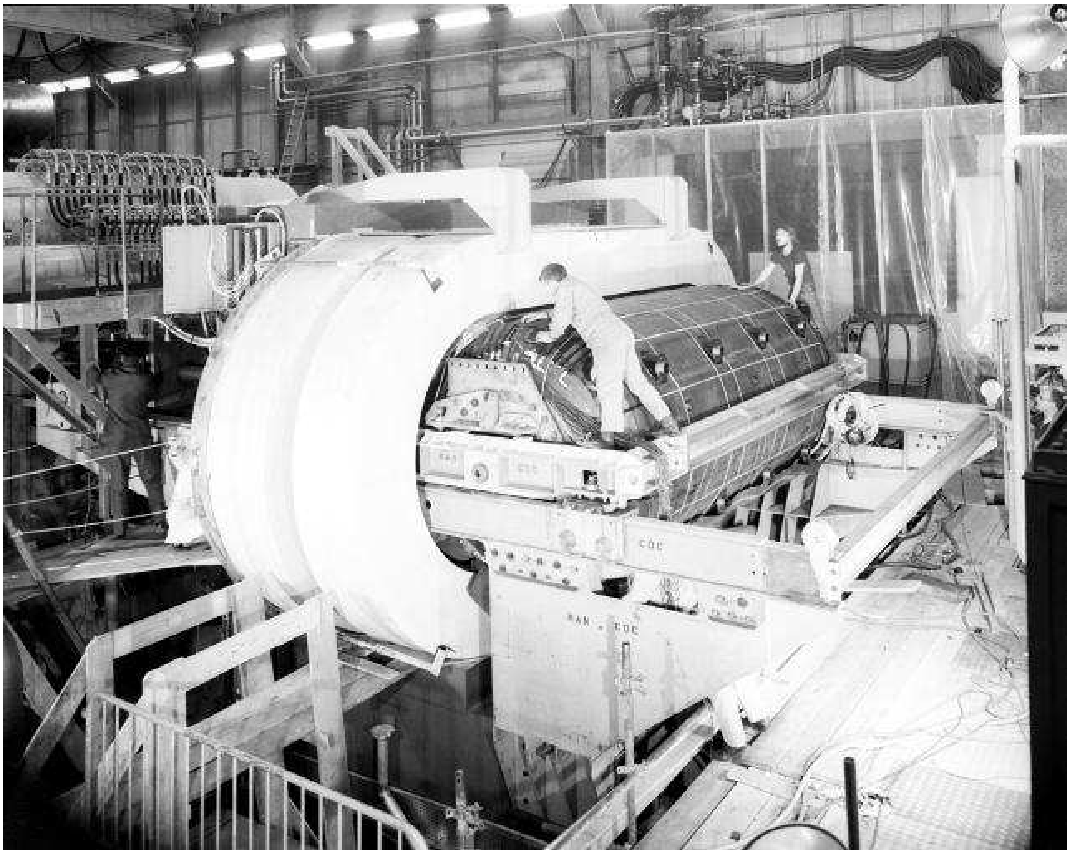
Il processo da rivelare e'

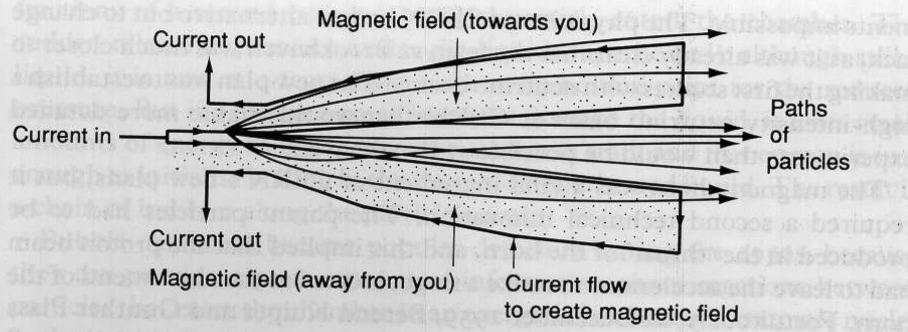
$$\nu + \mathcal{N} \rightarrow \nu + \mathrm{adroni}$$

E' un processo previsto dal modello delle interazioni deboli, collegato all'esistenza della Z° ma difficile da rivelare in quanto il segnale non ha la firma del leptone uscente.

Ci sono due importanti sviluppi sperimentali che permettono al CERN di "vincere" la gara sulla scoperta delle correnti deboli neutre.

- L'introduzione nel fascio di neutrini dell'horn magnetico (figura), che permette di focalizzare i mesoni di un segno e di defocalizzare i mesoni di segno opposto. Permette di guadagnare un fattore 5 in intensita' del fascio e di ridurre di un simile fattore i neutrini di segno opposto.
- Lo sviluppo di Gargamelle, camera a bolle da 6.2 m^3. Nell'esperimento e' riempita di freon liquido (CF_3Br) con densita' $1.5 \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$



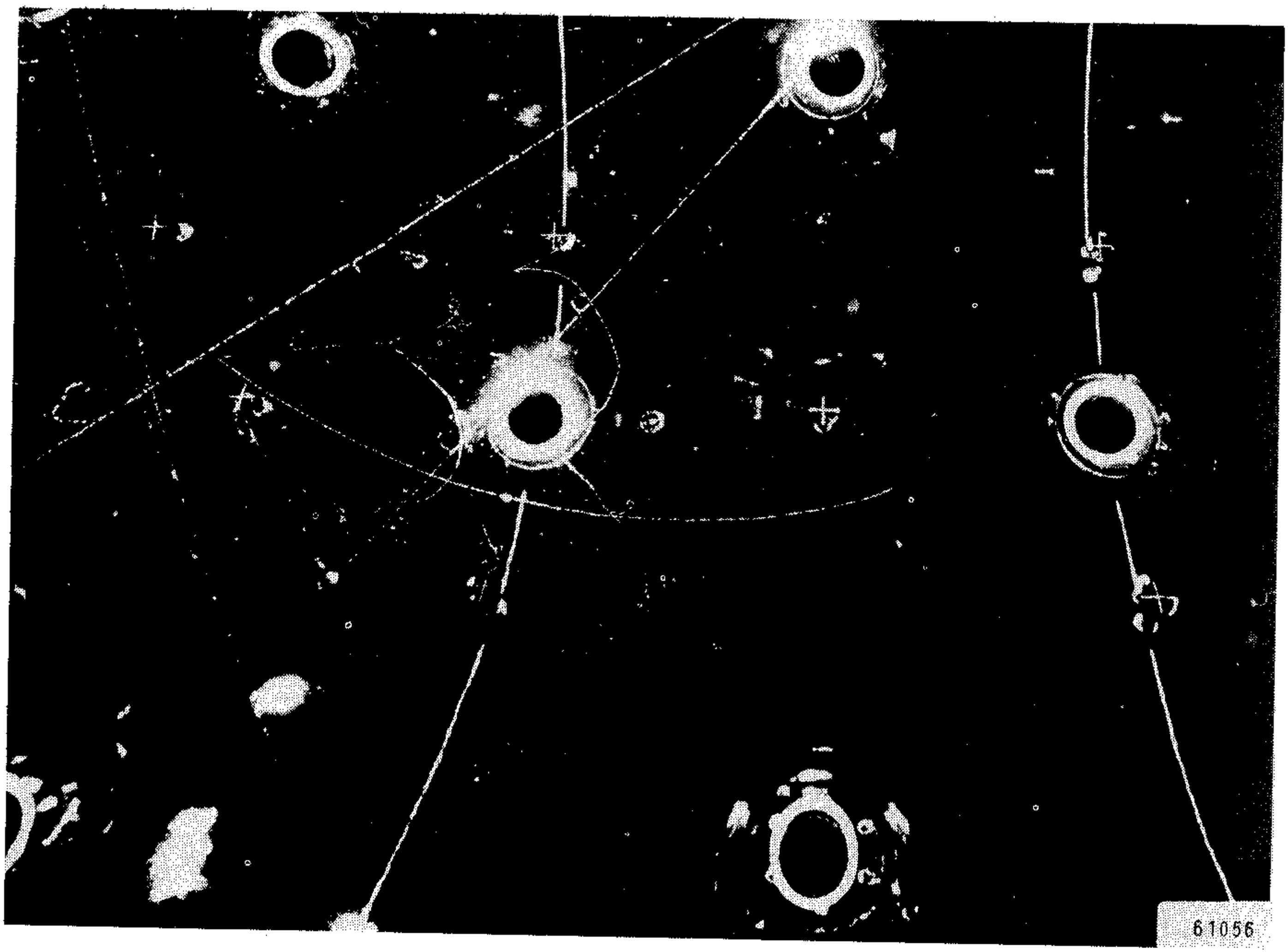


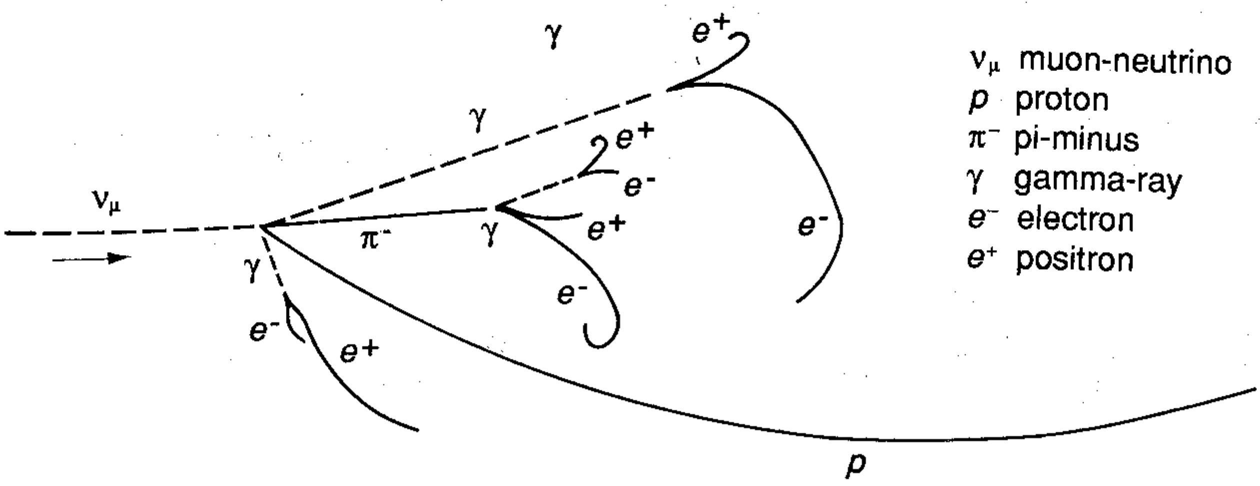
The first magnetic horn, built at CERN and photographed during assembly, was designed by Simon van der Meer to produce a more intense neutrino beam by focussing the pions and kaons before they decayed to produce neutrinos. The diagram shows how electric currents in the horn set up a magnetic field to focus the paths of the electrically charged parent particles. (CERN.)

1950s to serve particle physicists in Europe. Early in 1961, Simon van der Meer, a Dutch engineer, had published an internal report entitled 'A directive device for charged particles and its use in an enhanced neutrino beam'. In this report, van der Meer had described his ingenious idea for the device that has become known as the 'neutrino horn'.

One problem with forming a neutrino beam at an accelerator lies in the way the parent particles are produced when the high-energy beam from the accelerator strikes a target. These parents – charged pions and kaons – emerge at a variety of angles to the original beam direction, and give rise to a neutrino 'source' that is like a lamp that sprays light over a wide area. This effect is exacerbated by the several tens of metres that the charged particles must travel in order to produce enough decays to provide a reasonable number of neutrinos. It is not possible to focus the neutrinos themselves, because they are electrically neutral particles and so are unaffected by magnetic fields. So van der Meer realised that a device was needed to focus the parent pions and kaons. This would concentrate the spray of resulting neutrinos into a more parallel beam, rather as the lenses on a lighthouse concentrate the light from the central lamp.

Van der Meer's solution worked like the polished inner surface of a cone, which can direct light into a parallel beam through successive reflections. To


61056


γ
e^+
γ
e^+
e^-
ν_μ
π^-
γ
e^+
e^-
γ
e^-
e^-
e^+
p
ν_μ muon-neutrino
p proton
π^- pi-minus
γ gamma-ray
e^- electron
e^+ positron

Risultati:

ν **run**: 102 NC, 428 CC, 15 AS

$\overline{\nu}$ **run**: 64 NC, 148 CC, 12 AS

(AS: eventi di corrente carica con una chiara interazione di neutrone)

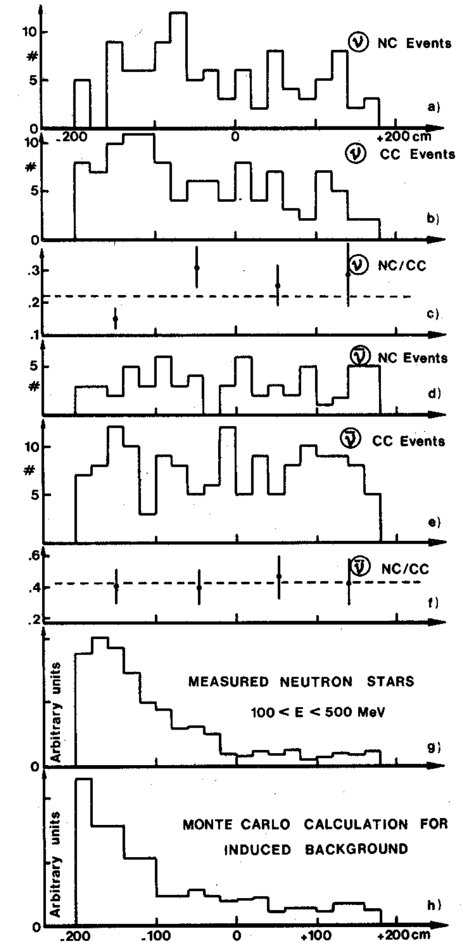


Fig. 1. Distributions along the ν-beam axis. a) NC events in ν. b) CC events in ν (this distribution is based on a reference sample of ~ 1/4 of the total ν film). c) Ratio NC/CC in ν (normalized). d) NC in $\overline{\nu}$. e) CC events in $\overline{\nu}$. f) Ratio NC/CC in $\overline{\nu}$. g) Measured neutron stars with $100 < E < 500$ MeV having protons only. h) Computed distribution of the background events from the Monte-Carlo.

Controllo dei fondi:

- **Raggi cosmici** Nessuna asimmetria up/down, nessun evento che soddisfa i criteri NC in una esposizione a raggi cosmici.
- **Eventi CC con il μ sotto soglia** Previsioni teoriche in accordo con i dati con i μ sopra soglia. Nessun indizio di disaccordo a basso momento
- **Interazioni di neutroni prodotti dai protoni primari** Il contributo nei run di ν e $\overline{\nu}$ dovrebbe essere lo stesso, mentre nei dati la rate nel run di ν e' 4 volte la rate nel run di $\overline{\nu}$.
- **Interazioni di neutroni prodotti da interazioni di neutrini nello schermo attorno a Gargamelle** La rate di AS permette di escludere che tutte le NC vengano da queso processo. La distribuzione spaziale dei vertici non e' compatibile con l'ipotesi di interazioni di neutroni. La stima e' di 10 fondi nel run di ν e 9 nel run di $\overline{\nu}$.

Conclusioni:

" We have observed events without secondary muon or electron, induced by neutral penetrating particles. We are not able to explain the bulk of the signal by any known source of background.

$$(NC/CC)_\nu = 0.21 \pm 0.03$$
$$(NC/CC)_{\overline{\nu}} = 0.45 \pm 0.09$$

$sin^2\theta_W$ *nel range 0.3-0.4."*