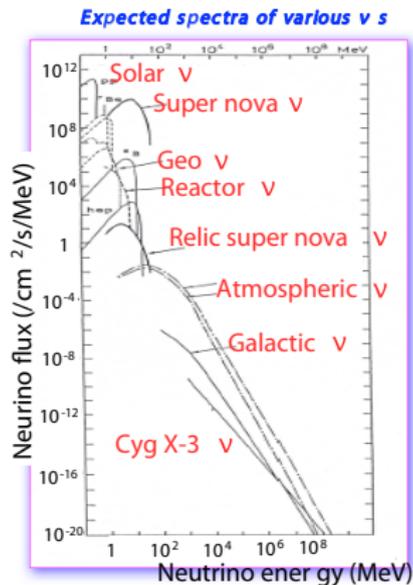
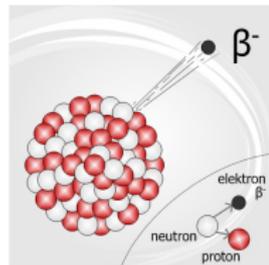


# Noi siamo pervasi da un flusso di neutrini

- $\sim 10^7 \nu$  relici dal Big Bang
- $\sim 10^{14} \nu/s$  dal sole
- $\sim 5 \cdot 10^{10} \nu/s$  dalla radioattività 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 ( $\sim 20 \text{ mg}$ ).



# La prima evidenza dei neutrini



Decadimenti beta (Becquerel (44), 1896):

nucleo  $(A,Z) \rightarrow (A,Z+1) + \text{elettrone}$

Decadimento a due corpi, conservazione di energia e impulso  $\rightarrow$   
l'elettrone deve uscire ad energia fissa

Evidenze sperimentali: Hahn (32) e Meitner (43), 1911, Chadwick (29) 1920-1927 e molti altri:  
l'elettrone ha uno spettro di energia continuo.

Lettera di Hahn a Rutherford: "... radium E (ora  $^{210}\text{Bi}$ ) is the worst of all. We can only obtain a fairly broad band. We formerly thought that it was as narrow as the other bands [as found in other emitters], but that is not true. It looks as if secondary effects had a maximum influence on rays of a medium velocity like radium E."

Risposta di Rutherford: "... The continuous  $\beta$ -ray spectrum observed for uranium X and radium E may be ultimately resolved for a number of lines."

Problemi sperimentali: effetti secondari nella propagazione degli elettroni dalla sorgente al rivelatore (spesso lastra fotografica in campo magnetico) Produzione di raggi  $\gamma$  dalla sorgente. Insufficiente risoluzione sperimentale.

Alla fine degli anni '20 comunque l'evidenza sperimentale dello spettro continuo degli elettroni era ormai inconfutabile.

N. Bohr: " Nei decadimenti beta non si conserva l'energia-impulso"

# L'ipotesi (disperata) di Pauli

Il decadimento è a tre corpi  $\rightarrow$  lo spettro dell'elettrone deve essere continuo.  
Lettera del 1930 ad un meeting di fisici a Tübingen Wolfgang Pauli (30) scrive

*" Dear radioactive ladies and gentlemen,  
I have come upon a desperate way out regarding ... [some fairly obscure data], as well as to the continuous  $\beta$ -spectrum, in order to save ... The energy law. To wit, the possibility that there could exist in the nucleus electrically neutral particles, which I shall call neutrons, which have spin 1/2 and satisfy the exclusion principle and which are further distinct from light-quanta in that they do not move with light velocity. ... The continuous  $\beta$ -spectrum would then become understandable from the assumption that in  $\beta$ -decay a neutron is emitted along with the electron, in such a way that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant."*



Pauli lascia scritto nei suoi diari: *"Today I have done something which no theoretical physicist should ever do in his life: I have predicted something which shall never be detected experimentally."*

# L'ipotesi (disperata) di Pauli

Il decadimento è a tre corpi  $\rightarrow$  lo spettro dell'elettrone deve essere continuo.  
Lettera del 1930 ad un meeting di fisici a Tubingen Wolfgang Pauli (30) scrive

*" Dear radioactive ladies and gentlemen,  
I have come upon a desperate way out regarding ... [some fairly obscure data], as well as to the continuous  $\beta$ -spectrum, in order to save ... The energy law. To wit, the possibility that there could exist in the nucleus electrically neutral particles, which I shall call neutrons, which have spin 1/2 and satisfy the exclusion principle and which are further distinct from light-quanta in that they do not move with light velocity. ... The continuous  $\beta$ -spectrum would then become understandable from the assumption that in  $\beta$ -decay a neutron is emitted along with the electron, in such a way that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant."*



Pauli lascia scritto nei suo diari: *"Today I have done something which no theoretical physicist should ever do in his life: I have predicted something which shall never be detected experimentally."*

**La proposta di Pauli è assolutamente innovativa, in quanto il suo "neutrone" è la prima proposta di una particella che non faccia parte della materia ordinaria.**

# 1933: Enrico Fermi battezza e quantizza il neutrino

Nel 1933 Enrico Fermi (32) propone una teoria generale per spiegare i decadimenti beta: la teoria delle interazioni deboli.

È la prima forma di interazione proposta senza analogo classico

Inoltre, siccome la terza particella emessa nel decadimento beta è molto leggera, propone di chiamarla **neutrino**.



# 1933: Enrico Fermi battezza e quantizza il neutrino

Nel 1933 Enrico Fermi (32) propone una teoria generale per spiegare i decadimenti beta: la teoria delle interazioni deboli.

È la prima forma di interazione proposta senza analogo classico

Inoltre, siccome la terza particella emessa nel decadimento beta è molto leggera, propone di chiamarla **neutrino**.



Scanned at the American Institute of Physics



Scanned at the American Institute of Physics

Fermi sottomette l'articolo a Nature, che lo rigetta con questa motivazione:

**“Abstract speculations too far from physical reality to be of any interest to the readers”**

... one obviously would never be able to see a neutrino

**1934, Bethe (28) e Peierls (27)** calcolano la sezione d'urto per i processi  $\nu + n \rightarrow e^- + p$  e  $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$ .

L'articolo conclude: "... This meant that one obviously would never be able to see a neutrino."

La sezione d'urto ( $\sigma$ ) risultava essere

$$\sigma \simeq 2.3 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2 \left( \frac{p_e E_e}{m_e^2} \right)$$

$\Rightarrow$  in acqua il cammino libero medio ( $\lambda$ ) di un neutrino da 2.5 MeV risulta  $2.5 \cdot 10^{20} \text{ cm} \simeq$  lo spessore del disco della galassia; in piombo circa un anno luce.



$$\text{Flusso } (\nu/\text{cm}^2/\text{s}) \times \sigma (\text{cm}^2) \times \text{Particelle bersaglio} = \text{Interazioni di } \nu/\text{s}$$
$$\lambda = \text{Peso Atomico (g)} / (\text{Avogadro} \times \text{densità (g/cm}^3) \times \sigma (\text{cm}^2))$$

# 1937: Neutrini di Majorana

Nel 1937 E. Majorana (31) pubblica la sua teoria delle forze nucleari.

In questa prevede che il neutrino corrisponda alla sua antiparticella.

A tutt'oggi questa ipotesi è ancora al centro di indagini sperimentali.



# Neutrini da reattori nucleari

I reattori nucleari sono una sorgente intensa di  $\bar{\nu}_e$  dai decadimenti  $\beta$  dei frammenti di fissione.

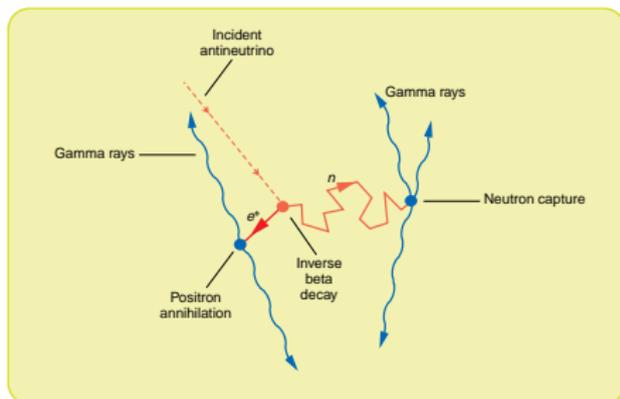
Ogni reazione di fissione libera circa 200 MeV di energia e 6  $\bar{\nu}_e$ .

Il flusso è di circa  $2 \cdot 10^{20} \bar{\nu}_e \text{ s}^{-1} \text{ GWatt}^{-1}$ , isotropo,  $\langle E(\bar{\nu}_e) \rangle \simeq 0.5 \text{ MeV}$ .

Segnale del positrone



Segnale ritardato  $\gamma$ .



## Rivelazione diretta dei neutrini, Reines, Cowan et al 1956

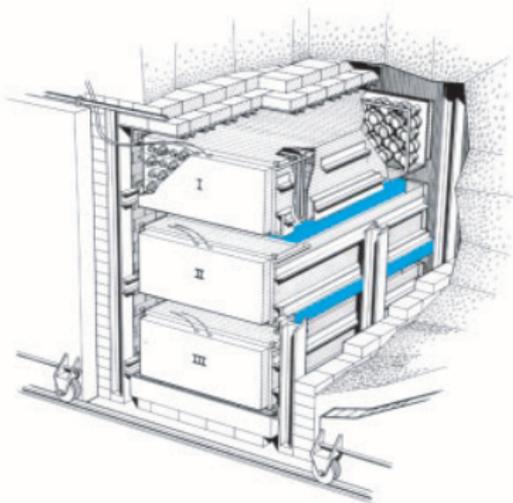
- Un primo disegno concettuale per rivelare neutrini da una esplosione nucleare nel 1952.
- Un primo esperimento per la rivelazione di neutrini al reattore di Hanford nel 1953. Il rivelatore era una tank di 300 l di scintillatore liquido (in precedenza il piu' grande rivelatore di scintillatore liquido 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 radioattivitav'
- Schermi anti-radiazioni.
- Disegno di un rivelatore in grado di vetare i raggi cosmici
- Sviluppo dell'elettronica per le coincidenze ritardate

# L'esperimento di Savannah River



- Due grandi vasche di plastica (A e B) riempite d'acqua  $\Rightarrow$  bersaglio per le interazioni degli antineutrini.
- Cloruro di Cadmio sciolto nell'acqua  $\Rightarrow$  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 capacità 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  $\Rightarrow$  coincidenza veloce dei segnali nelle tank I e II.
- Cattura del neutrone  $\Rightarrow$  segnali di gamma nella tank I o II separati in tempo fra i 3 e  $10 \mu s$ .
- Nessun segnale dalla tank III perché la tank II era abbastanza grande da fermare tutti i raggi gamma prodotti dalla interazione.

# 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  
 $= 3 \pm 0.2/\text{ora}$ .

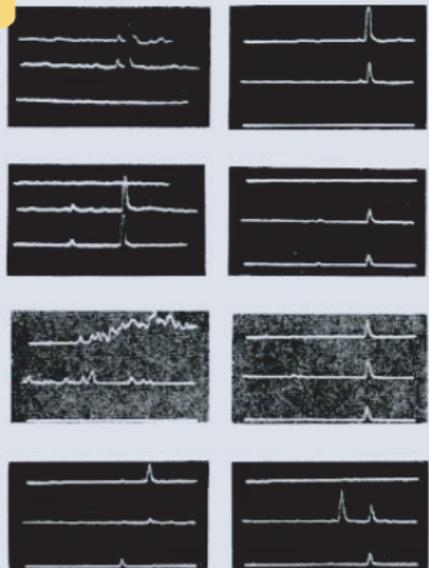
Verifiche sperimentali:

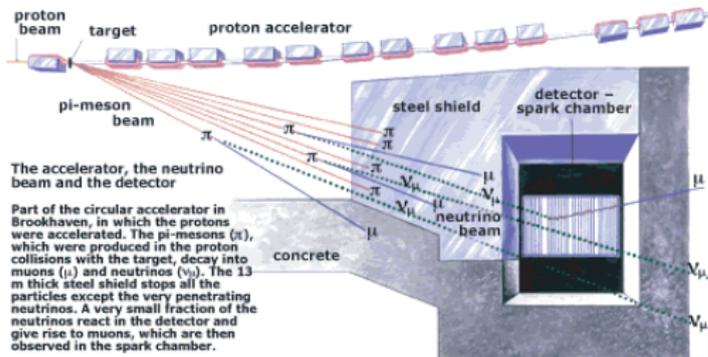
- Verifica che il segnale prompt e' dovuto a raggi gamma da 0.5 MeV: inserzione di fogli di Piombo di spessore variabile fra bersaglio e rivelatore  $\Rightarrow$  il segnale diminuisce come previsto.
- Verifica che il segnale ritardato e' dovuto a cattura del neutrone da cadmio: sostituendo il bersaglio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

Premio Nobel  
1995





# I neutrini sono (almeno) due

Lederman (40), Steinberger (41), Schwartz (30). Brookhaven, 1962

- 64 eventi:
- 34 traccia singole,  $p > 300$  MeV.
- 22 con  $> 1$  traccia
- 8 compatibili con sciame da elettroni, compatibili con interazioni di neutroni (6), elettroni genuini dal fascio (2)

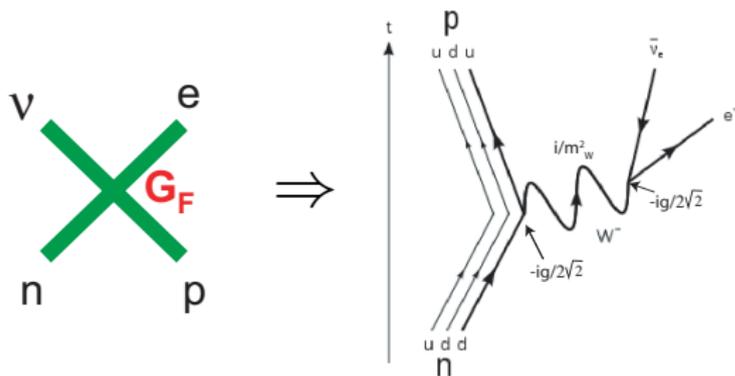
Esiste un secondo flavor di neutrini

Premio Nobel 1988



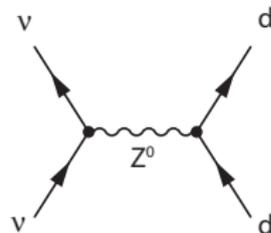
Mel Schwartz standing in front of the 10-tonne spark chamber used in the 'two-neutrino experiment'. Each of the ten modules contains 1 tonne of aluminium in the form of nine plates which are 2.5 centimetres thick and separated by a gas-filled gap of 1 centimetre. High voltage across the plates causes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

# Il Modello Standard



Con l'unificazione delle forze elettro-magnetica, debole e forte.

Esperimento chiave: correnti deboli neutre



Che permette di misurare uno dei parametri chiave del modello:  
l'angolo di Weinberg  $\sin \theta_W$ .

Processo particolarmente difficile da rivelare: l'unica "firma" sperimentale è una qualche attività adronica isolata (simile ad esempio a interazioni di neutroni)

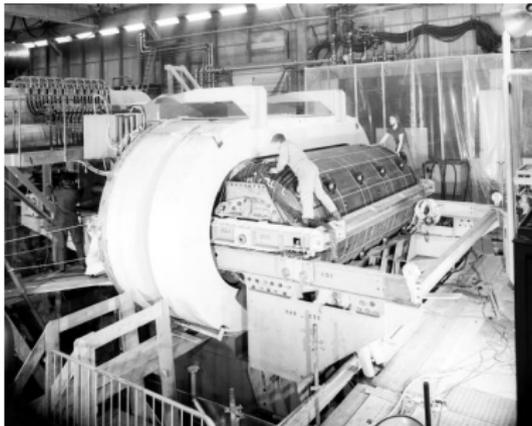
Il processo da rivelare e'

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

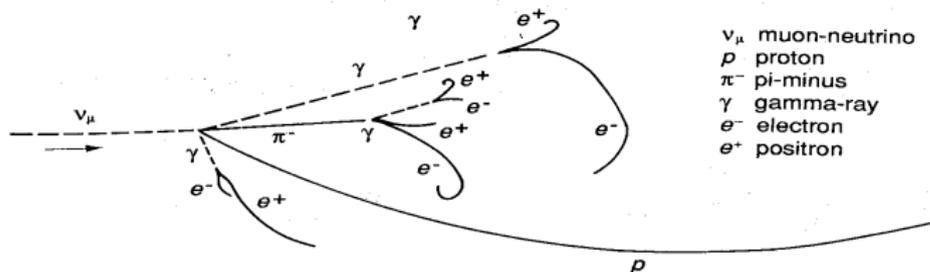
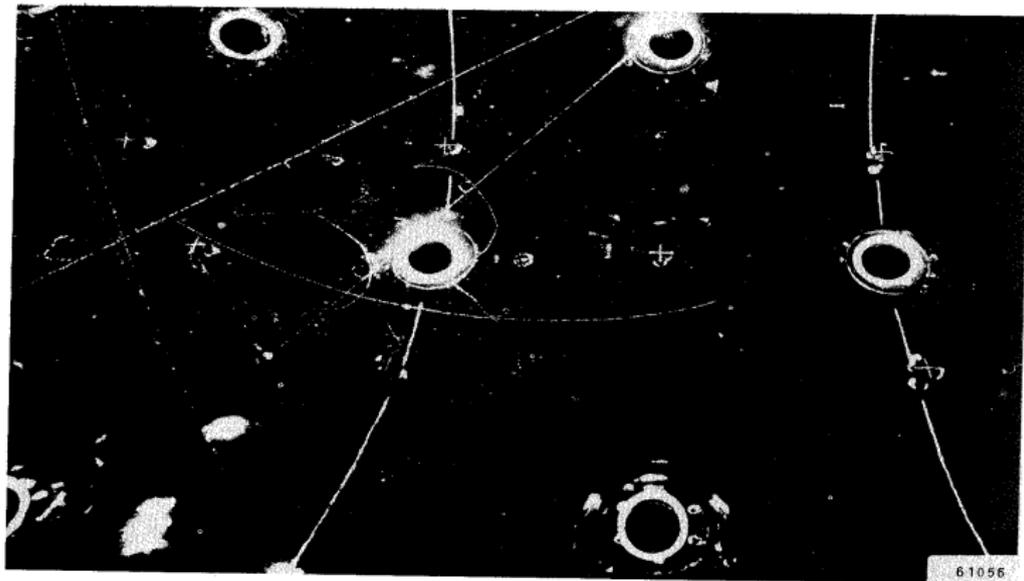
E' un processo previsto dal modello delle interazioni deboli, collegato all'esistenza della  $Z^0$  ma difficile da rivelare in quanto il segnale non ha la firma del leptone uscente.

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  $6.2 \text{ m}^3$ . Nell'esperimento e' riempita di freon liquido ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ) con densita'  $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$







# Risultati:

$\nu$  run: 102 NC, 428 CC, 15 AS

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

(AS: eventi di corrente carica con una chiara interazione di neutrone)  
**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  $\mu$  sotto soglia** Previsioni teoriche in accordo con i dati con i  $\mu$  sopra soglia. Nessun indizio di disaccordo a basso momento
- **Interazioni di neutroni prodotti dai protoni primari** Il contributo nei run di  $\nu$  e  $\bar{\nu}$  dovrebbe essere lo stesso, mentre nei dati la rate nel run di  $\nu$  e' 4 volte la rate nel run di  $\bar{\nu}$ .
- **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 questo 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  $\nu$  e 9 nel run di  $\bar{\nu}$ .

*"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."*

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

$$(NC/CC)_{\bar{\nu}} = 0.45 \pm 0.09$$

*sin<sup>2</sup> $\theta_W$  nel range 0.3-0.4."*

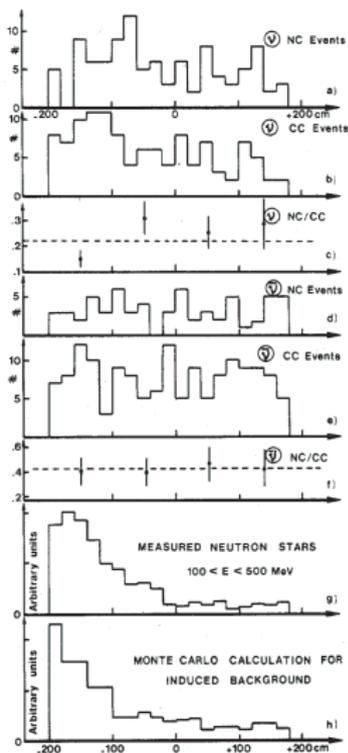


Fig. 1. Distributions along the  $\nu$ -beam axis. a) NC events in  $\nu$ . b) CC events in  $\nu$  (this distribution is based on a reference sample of  $\sim 1/4$  of the total  $\nu$  film). c) Ratio NC/CC in  $\nu$  (normalized). d) NC in  $\bar{\nu}$ . e) CC events in  $\bar{\nu}$ . f) Ratio NC/CC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