

Fizyka neutrin - wykład 3

Agnieszka Zalewska

19.03.2008

Własności neutrin - najważniejsze pomiary:

- Niezachowanie parzystości P w słabych oddziaływaniach
- Pomiar skrętności neutrin
- Odkrycie prądów neutralnych
- Pomiar $\sin^2\theta_w$
- Liczba zapachów neutrin - pomiar z akceleratora LEP

Przekroje czynne na oddziaływania neutrin

Parzystość P

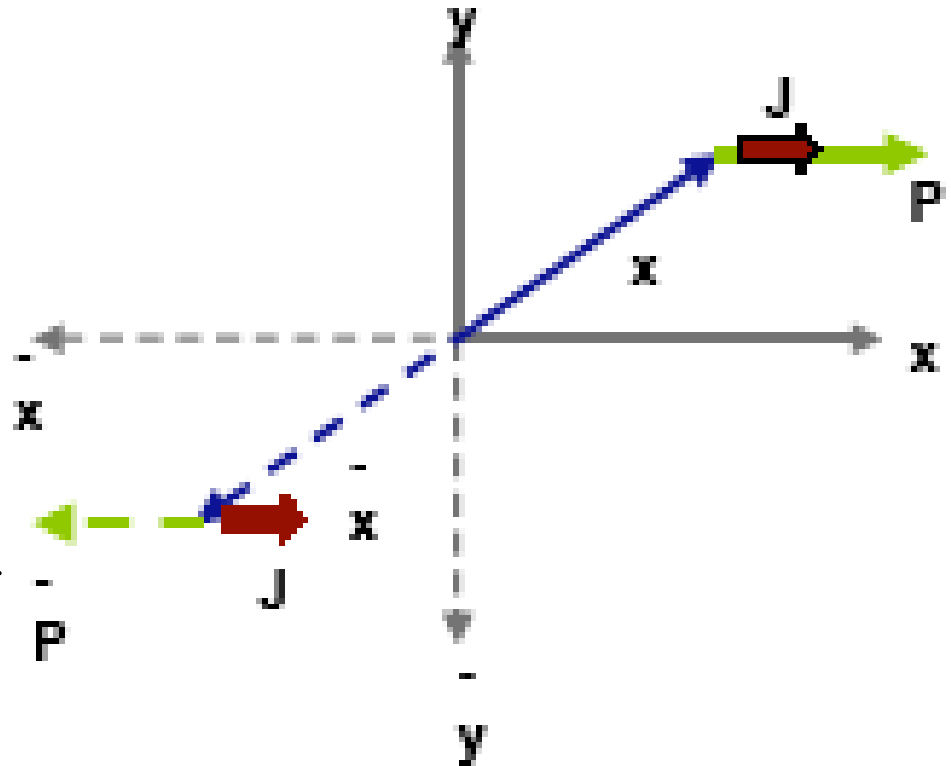
Zachowanie parzystości P to niezmienniczość względem zamiany prawo-lewo (symetria obiektu i jego odbicia w lustrze)

Operacja parzystości P
(odbicie przestrzenne)
zmienia znak zwykłych
wektorów, np. wektora pędu

$$\vec{x} \xrightarrow{P} -\vec{x}, \quad \vec{p} \xrightarrow{P} -\vec{p}$$

Natomiast wektory aksjalne,
jak moment pędu, pozostają
niezmienione

$$\vec{J} \xrightarrow{P} \vec{J}$$

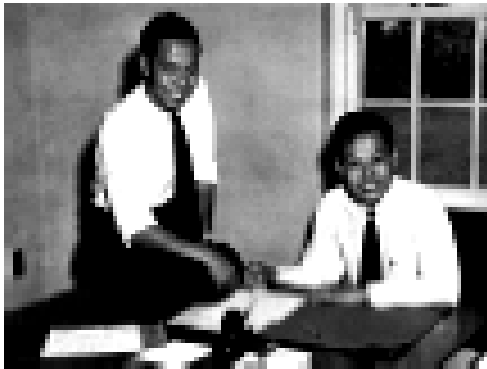


Łamanie parzystości P w słabych oddziaływaniach

Intrygujący fakt doświadczalny - obserwacja rozpadów mezonów K^+ na 2π i na 3π (układy o przeciwnych parzystościach)

1956 - Lee i Yang stwierdzają, że w słabych oddziaływaniach parzystość nie jest zachowywana

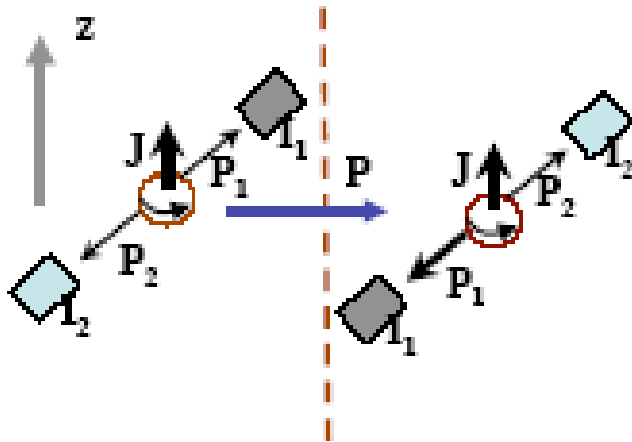
Aby to potwierdzić doświadczalnie, trzeba było przeprowadzić eksperyment wykazujący, że słabe oddziaływania rozróżniają prawo-lewo



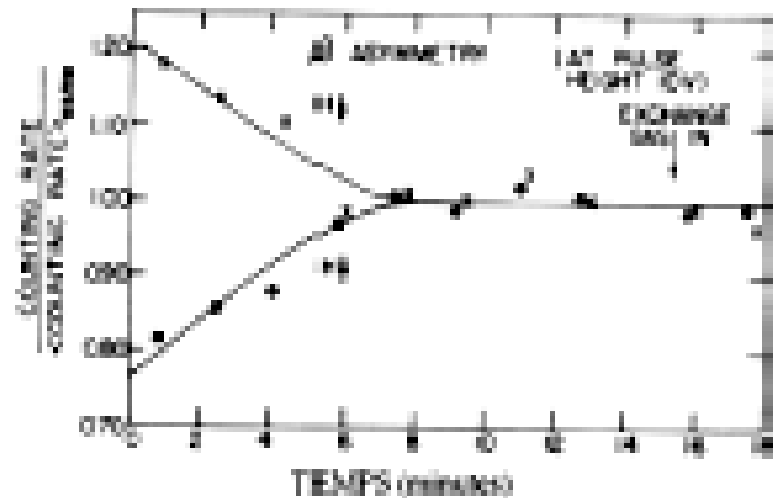
W tym celu należało zmierzyć rozkłady kątowe elektronów z rozpadów β spolaryzowanych jąder - asymetria tych rozkładów stanowiłaby dowód na niezachowanie P w słabych procesach

Eksperyment pani Wu

Koncepcja: pomiar elektronów z rozpadu ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}$ w polu magnetycznym, w temperaturze 0.01K. Spiny jąder ${}^{60}\text{Co}$ ustawiają się wzdłuż kierunku pola magnetycznego.



Przy zachowaniu parzystości P intensywność elektronów emitowanych zgodnie i przeciwnie do kierunku pola magnetycznego powinna być taka sama



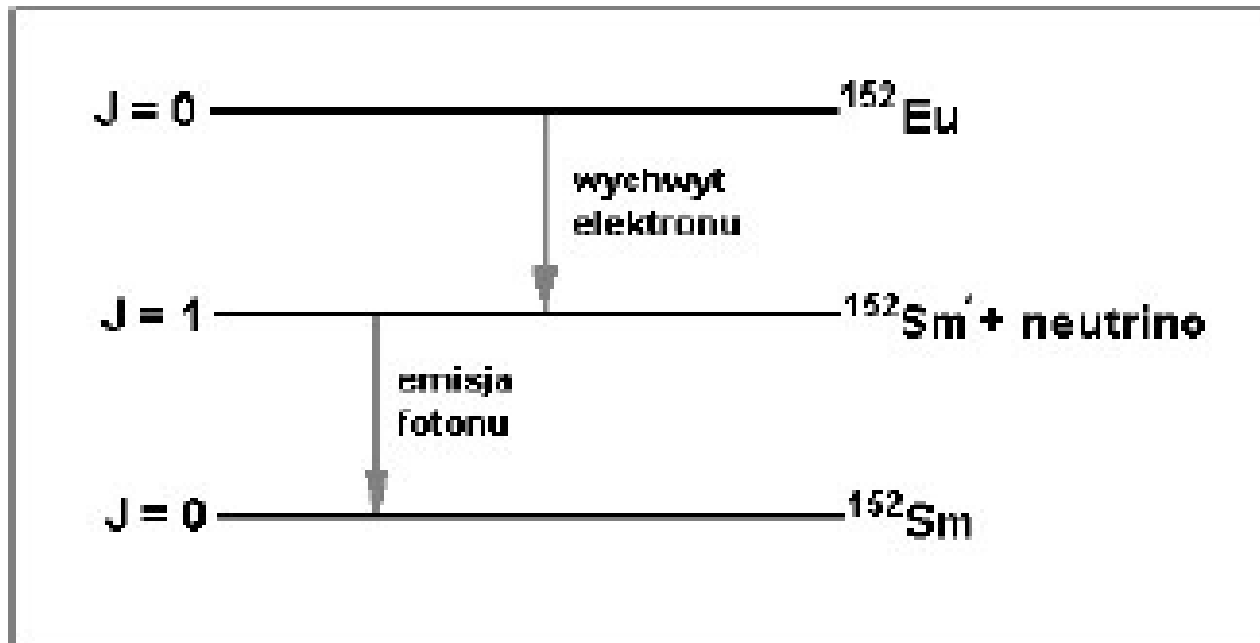
Pomiar wykazał asymetrię rozkładu elektronów - więcej było rejestrowanych w kierunku przeciwnym do spinów jąder ${}^{60}\text{Co}$

Wyznaczenie skrętności neutrina

1958 - Eksperyment Goldhabera, Grodzins, Sunyara

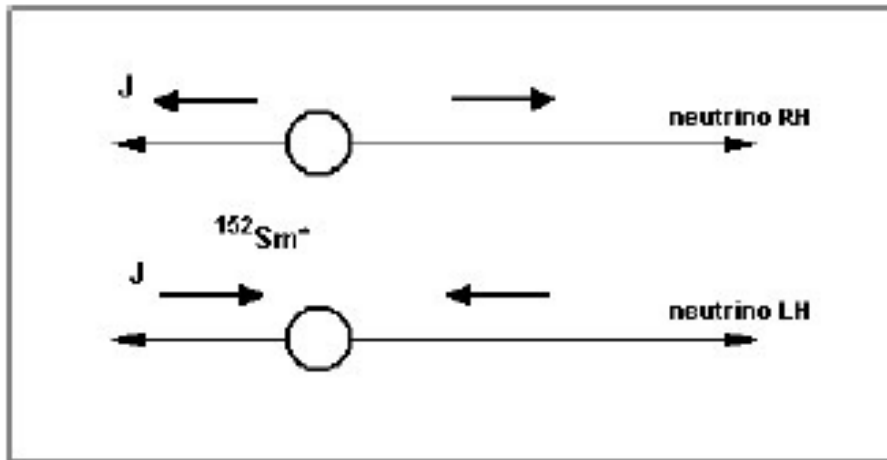
$$H = \frac{\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}}{|\mathbf{p}|}$$

Skrętność to rzut spinu na kierunek pędu - dobra liczba kwantowa dla cząstek bezmasowych, dla innych $h = \pm v/c$



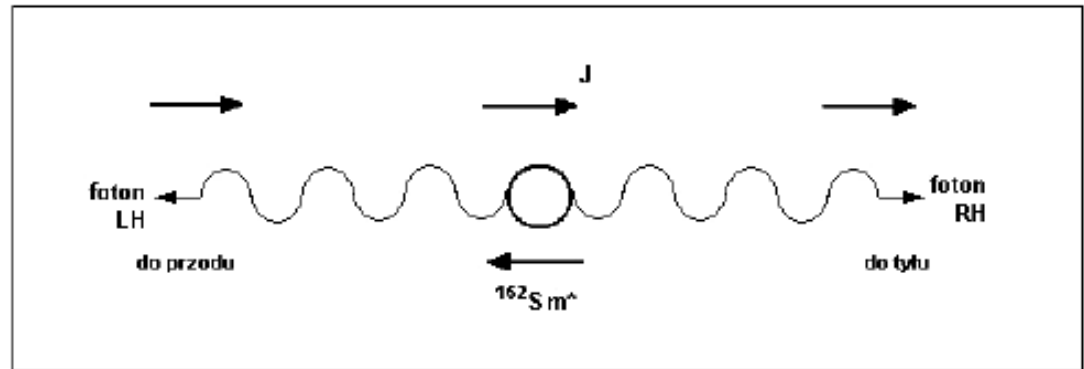
Eksperyment Goldhabera - c.d.

1958 - Eksperyment Goldhabera, Grodzins, Sunyara



Skrętności neutrina i jądra są jednakowe

Skrętności fotonu lecącego do przodu i jądra (a więc i neutrino) są jednakowe (albo oba są lewoskrętne-patrz rysunek, albo oba są prawoskrętne)



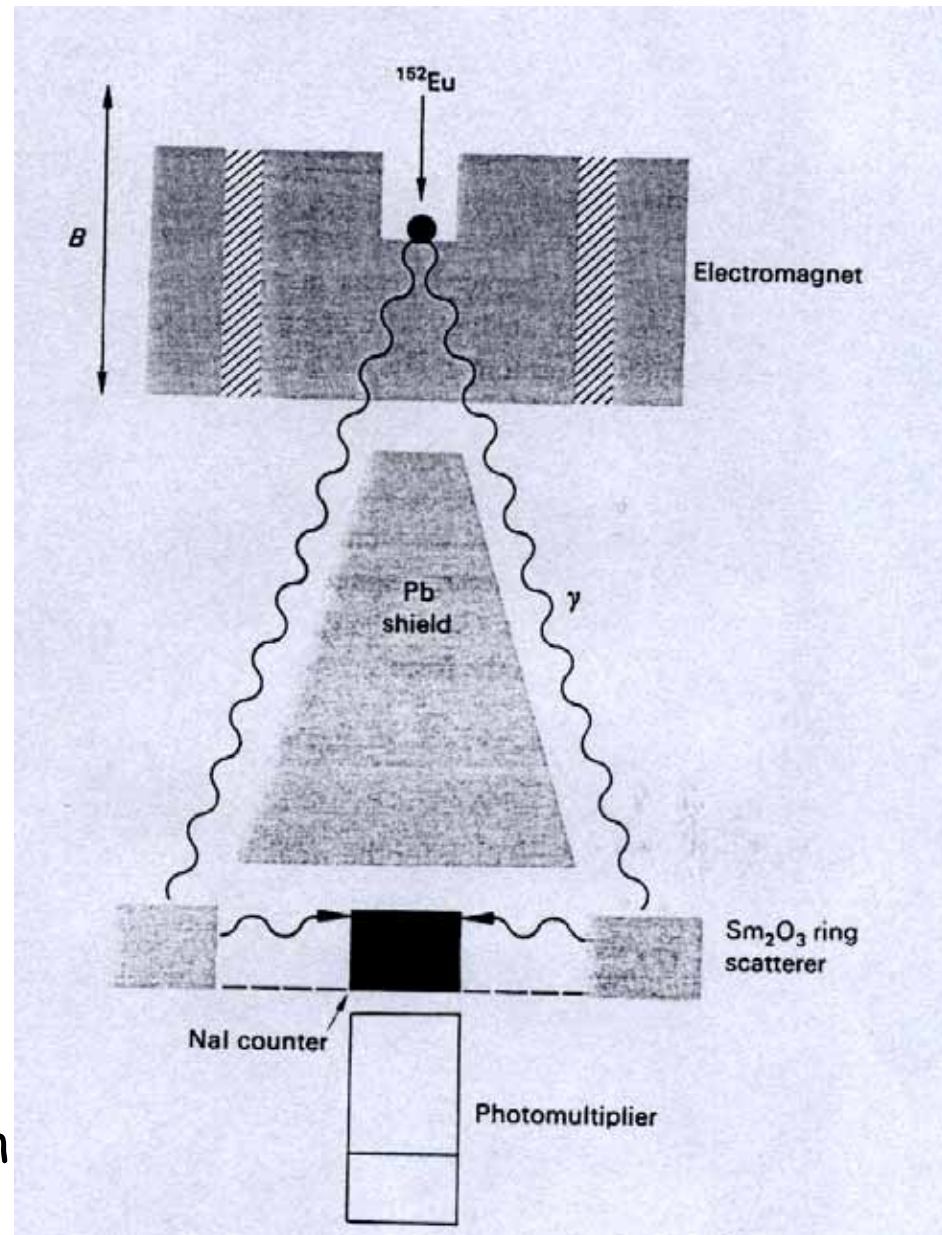
Eksperyment Goldhabera - c.d.

Zmierzenie polaryzacji fotonów lecących do przodu jest więc równoważne ze zmierzaniem polaryzacji (skrętności) neutrin

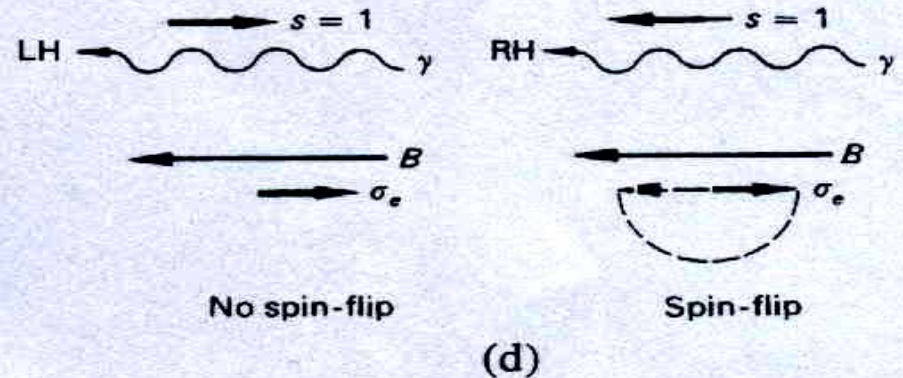
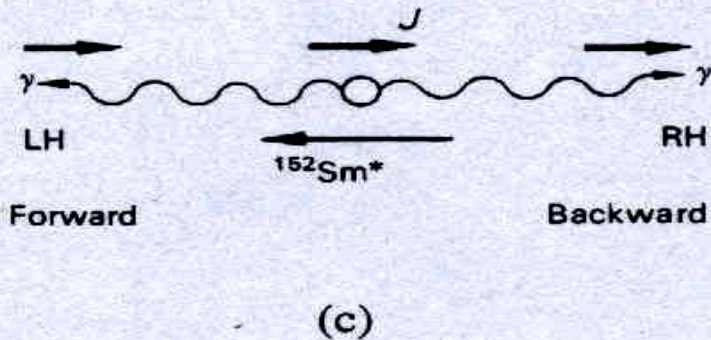
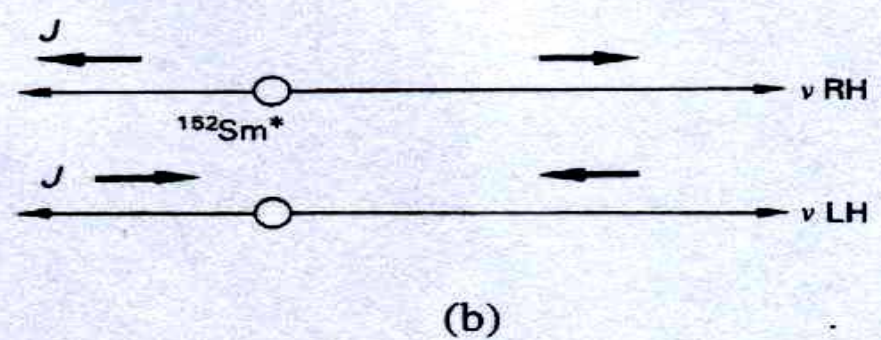
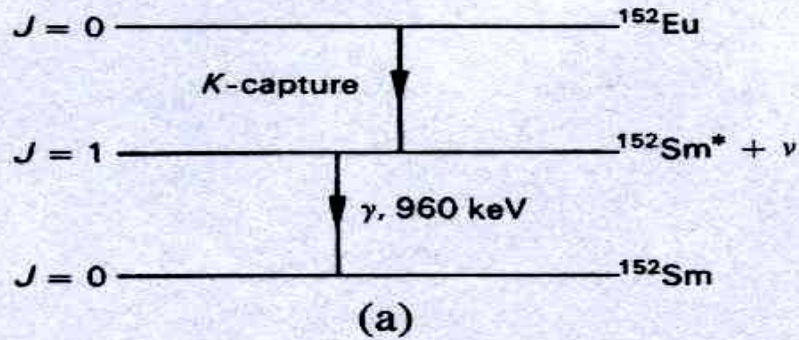
Fotony przechodzą przez żelazo znajdujące się w polu magnetycznym, a więc o spolaryzowanych elektronach

Oddziałują silniej z elektronami o spinie antyrównoległym do kierunku swojego spinu
→ mniej wzbudzeń jąder Sm dla rozpraszania fotonów na Sm_2O_3

Pomiar liczby wzbudzeń jąder Sm przy dwu kierunkach pola magnetycznego pozwala rozstrzygnąć o skrętności neutrin



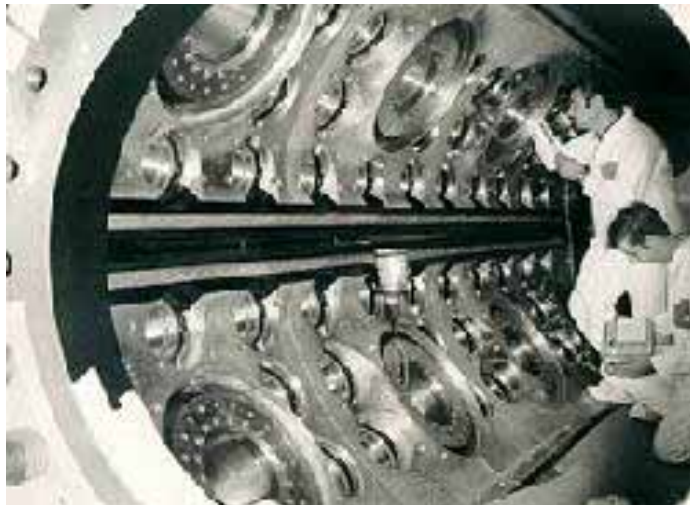
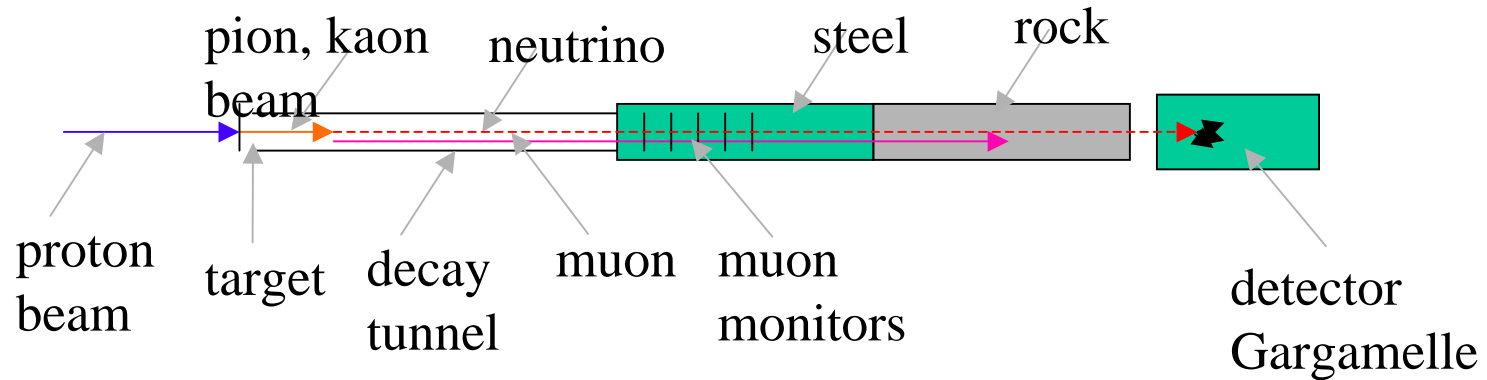
Eksperyment Goldhabera - c.d.



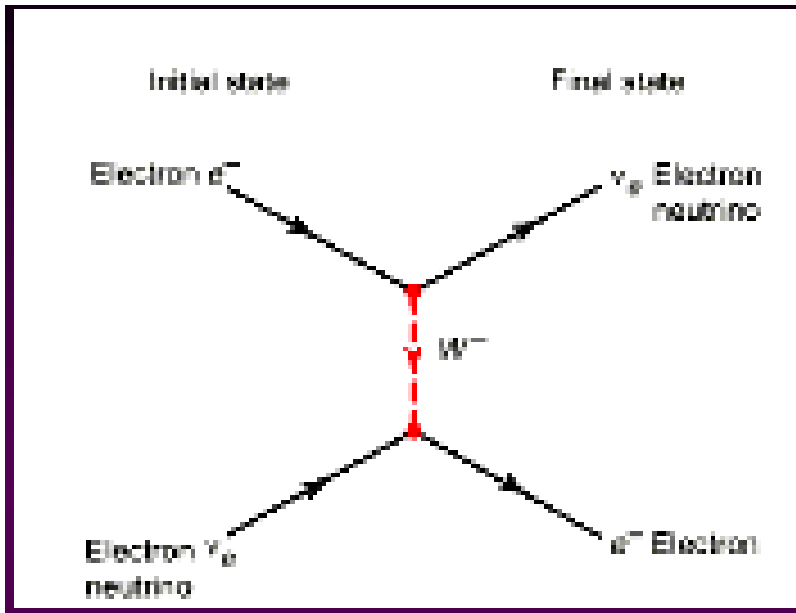
Wyznaczona w ten sposób skrętność
neutrin była równa -1 (neutrina są
lewoskrętne)

Odkrycie prądów neutralnych

1973 - w komorze pęcherzykowej Gargamelle na wiązce ν_μ w CERN-ie



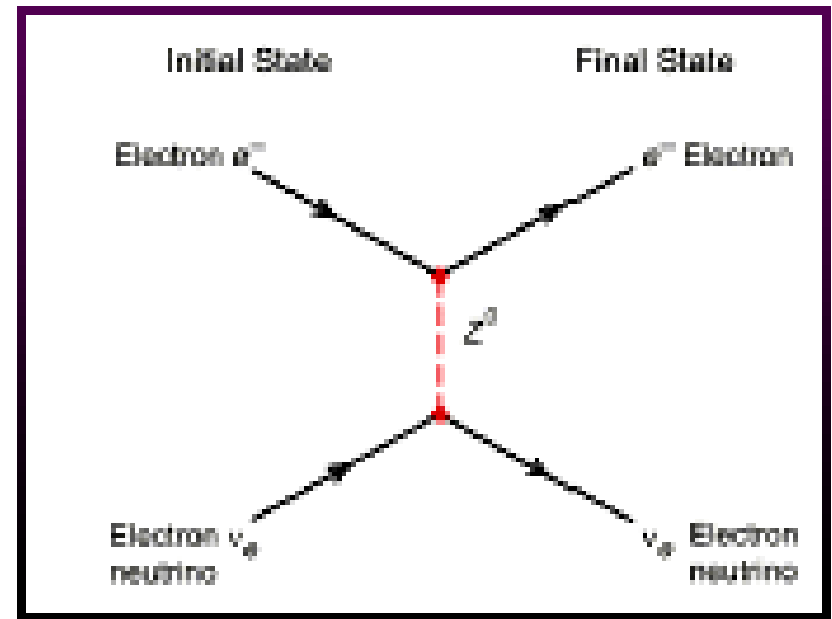
Proces CC i NC w rozpraszaniu $\nu_e e$



Wymiana prądu naładowanego CC

Wymiana prądu neutralnego NC

(dla rozpraszania $\nu_\mu e$ tylko ten proces jest możliwy)

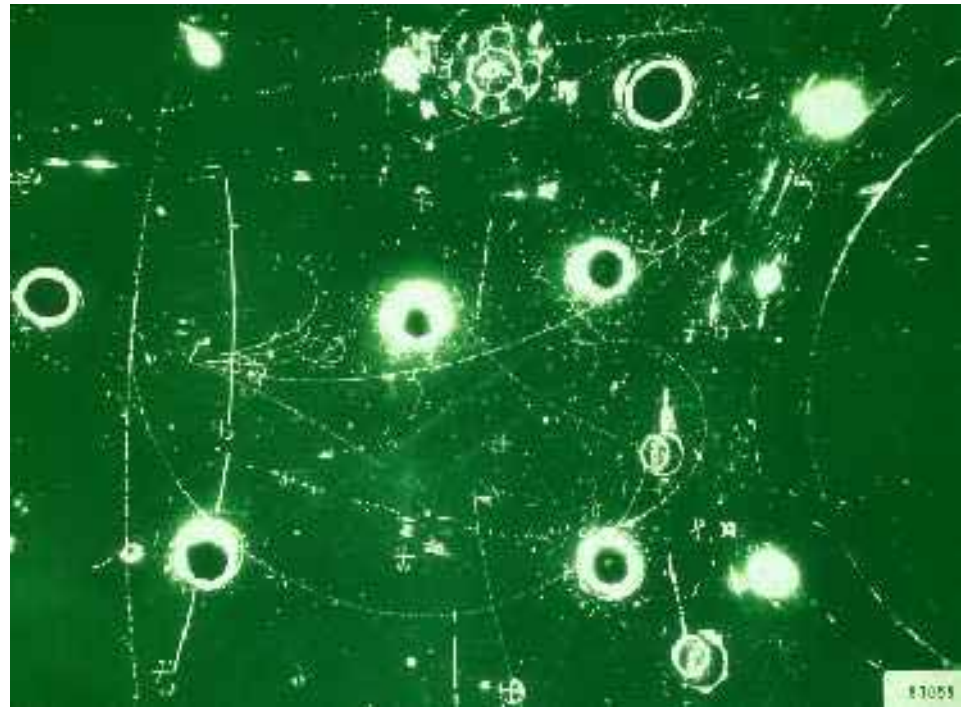


Przykłady zarejestrowanych oddziaływań

$$\nu_{\mu} e \rightarrow \nu_{\mu} e$$



$$\nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu} + N \rightarrow \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu} + \textit{hadrons}$$



Wyniki pomiarów w Gargamelle

Oddziaływania NC - brak mionu, wszystkie cząstki wtórne zidentyfikowane jako hadrony i wewnątrz detektora

Oddziaływania CC - dobrze widoczny mion wzdłuż kierunku wiązki, opuszczający detektor

Wiązka neutrin - 102 NC, 428 CC, 15 przypadków oddz. neutronów

Wiązka antyneutrin - 64 NC, 148 CC, 12 przypadków oddz. neutronów

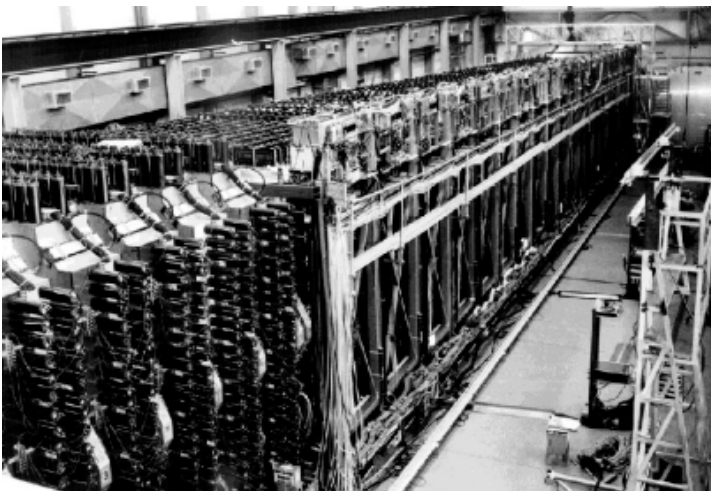
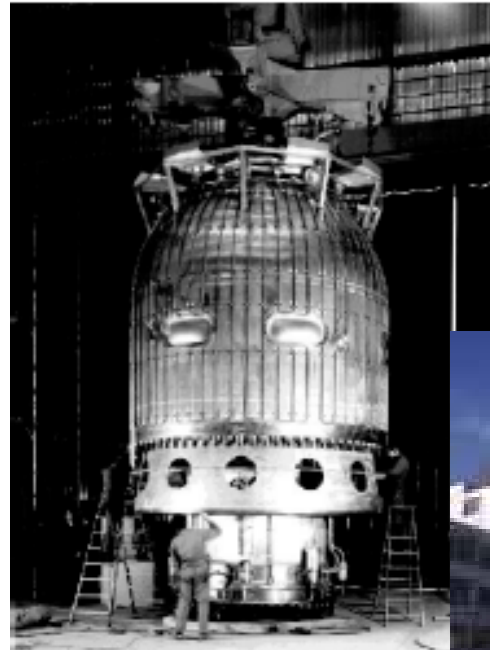
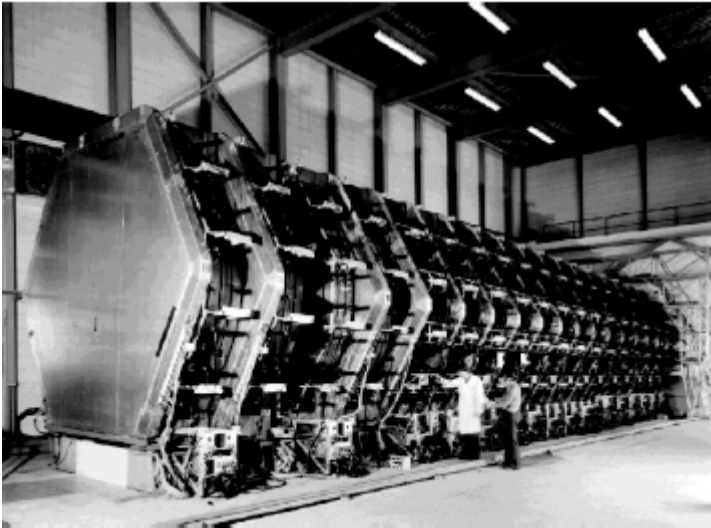
$$(NC/CC)_{\text{neutrino}} = 0.21 \pm 0.03$$

$$\sin^2 \theta_W = 0.3 - 0.4$$

$$(NC/CC)_{\text{antineutrino}} = 0.45 \pm 0.09$$

Dalsze pomiary $\sin^2\theta_W$

Eksperymenty CDHS, CHARM i w komorze pęcherzykowej BEBC



$$\sin^2\theta_W = 0.233 \pm 0.003 \pm 0.005$$

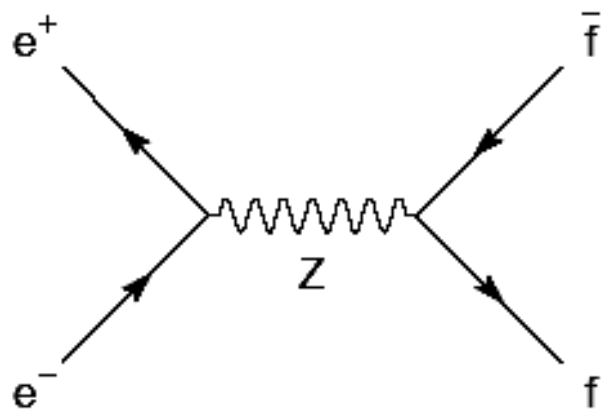
$$\text{Obecnie: } 0.2312 \pm 0.0002$$

Istnieją trzy rodzaje lekkich neutrin

1989: pierwszy rok zbierania danych w czterech eksperymentach przy akceleratorze LEP, wyznaczona zostaje liczba lekkich neutrin (a tym samym liczba rodzin kwarkowo-leptonowych)

Pomiar szerokości $Z0$ jest zgodny z trzema rodzajami lekkich neutrin (sprzęgających się do $Z0$)

Jak wyznaczyć N_ν ?



Z^0 rozpada się na pary $f \bar{f}$:

kwarki: $u \bar{u}$, $d \bar{d}$, $s \bar{s}$, $c \bar{c}$, $b \bar{b}$

naładowane leptony: e^-e^+ , $\mu^-\mu^+$, $\tau^-\tau^+$

neutrino: $\nu_e \bar{\nu}_e$, $\nu_\mu \bar{\nu}_\mu$, $\nu_\tau \bar{\nu}_\tau$ + ??

$$\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{\text{had}} + \Gamma_{\text{inv}}$$

$$\sigma_{\text{had}}^0 \equiv \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{\text{had}}}{\Gamma_Z^2}$$

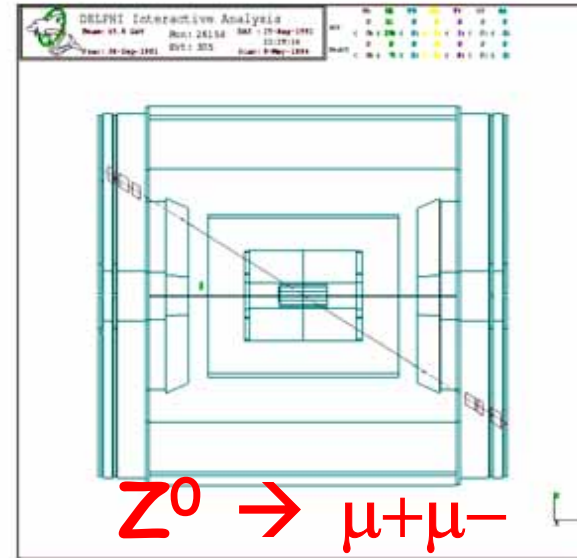
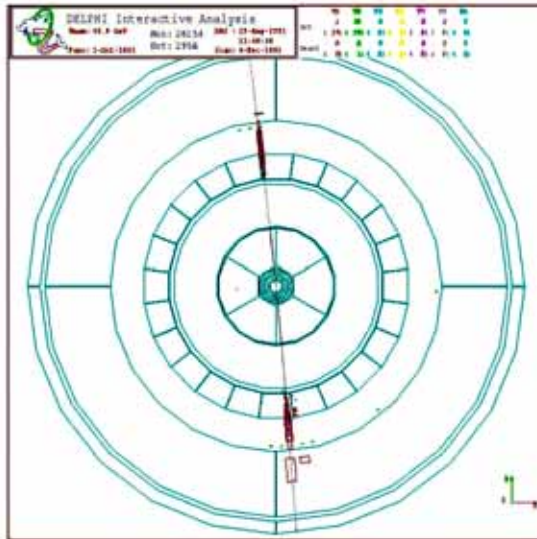
$$R_\ell^0 \equiv \Gamma_{\text{had}}/\Gamma_{\ell\ell}$$

$$R_{\text{inv}}^0 = \left(\frac{12\pi R_\ell^0}{\sigma_{\text{had}}^0 m_Z^2} \right)^{\frac{1}{2}} - R_\ell^0 - (3 - \delta_\tau)$$

$$R_{\text{inv}}^0 = N_\nu \left(\frac{\Gamma_{\nu\bar{\nu}}}{\Gamma_{\ell\ell}} \right)_{\text{SM}}$$

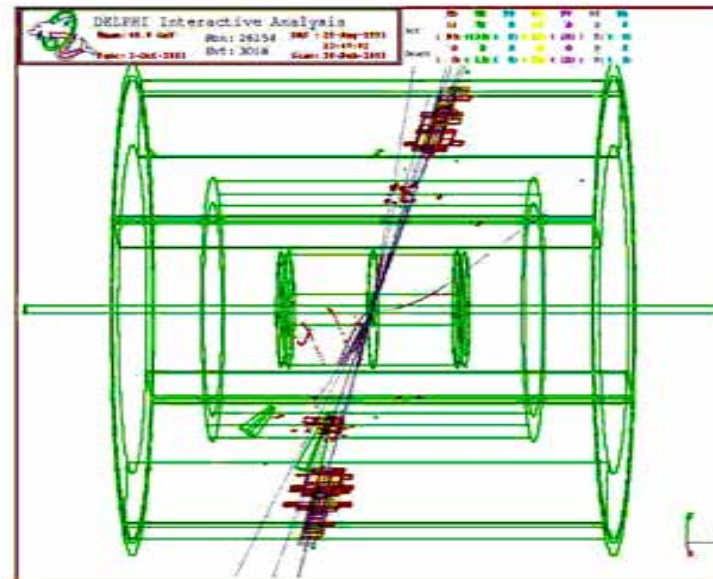
Klasyfikacja rozpadów Z^0

$Z^0 \rightarrow e^+e^-$



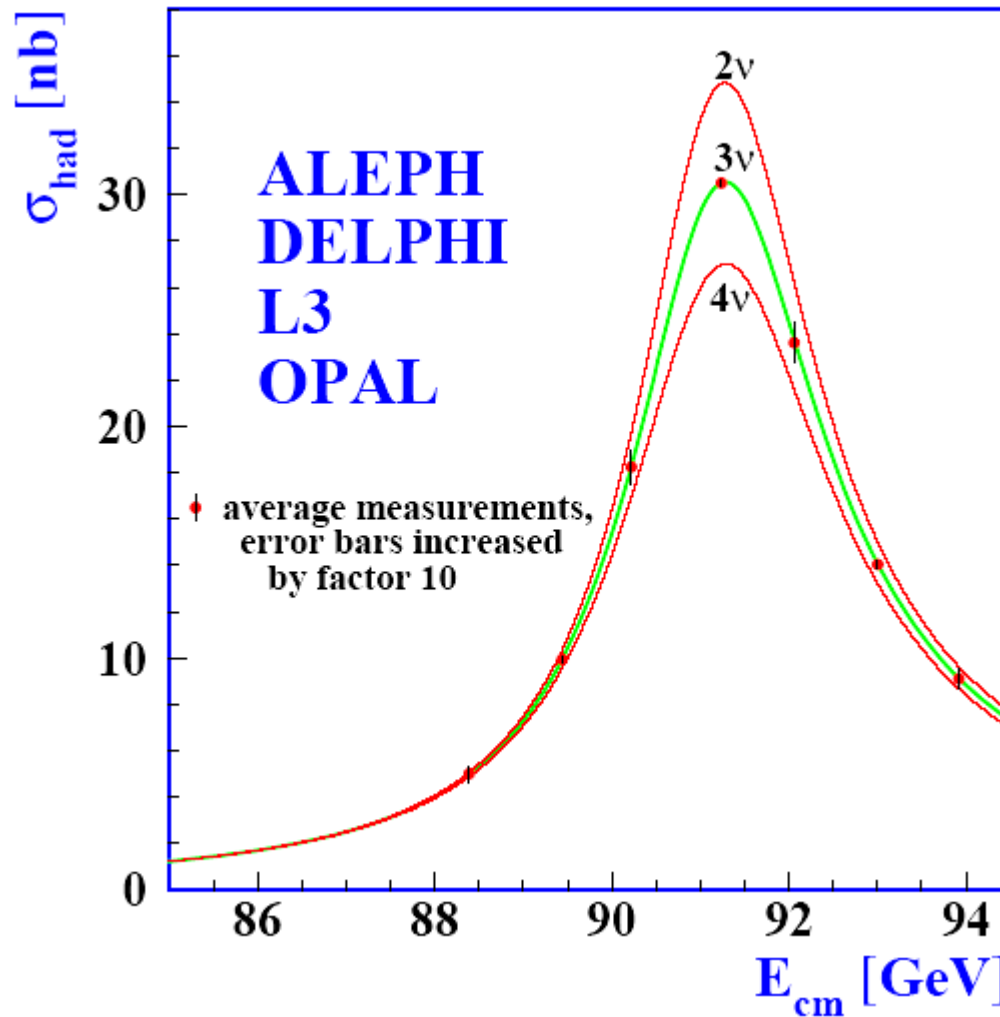
$Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$

$Z^0 \rightarrow \text{hadrony}$



Liczba zapachów neutrin = liczba rodzin

$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$



Rok 2005

Oddziaływania neutrin - liczba zdarzeń

Dla oddziaływań typu pocisk-tarcza liczba obserwowanych przypadków N_{obs} określonej reakcji jest proporcjonalna do fizycznego przekroju czynnego na tę reakcję σ [cm^2] i do świetlności eksperymentu, wyrażonej przez wielkość strumienia padających cząstek Φ [cm^{-2}] oraz liczbę atomów tarczy N na drodze tych cząstek:

$$N_{obs} \approx \sigma * \Phi * N$$

Przekroje czynne na oddziaływania neutrin o energiach rzędu MeV są mniejsze niż 10^{-40}cm^2 - dla porównania całkowite przekroje czynne na oddziaływania wysokoenergetycznych hadronów są bliskie 10^{-24}cm^2

Ź Potrzebne jak najsilniejsze źródło neutrin i/lub wielki oraz wydajny detektor; optymalizacja eksperymentów neutrinowych polega na łącznym traktowaniu źródła neutrin i detektora

Oddziaływania neutrin

To, jaki proces oddziaływania neutrina z materią detektora dominuje, zależy od energii neutrina E czyli odpowiadającej jej długości fali $\lambda = h/E$

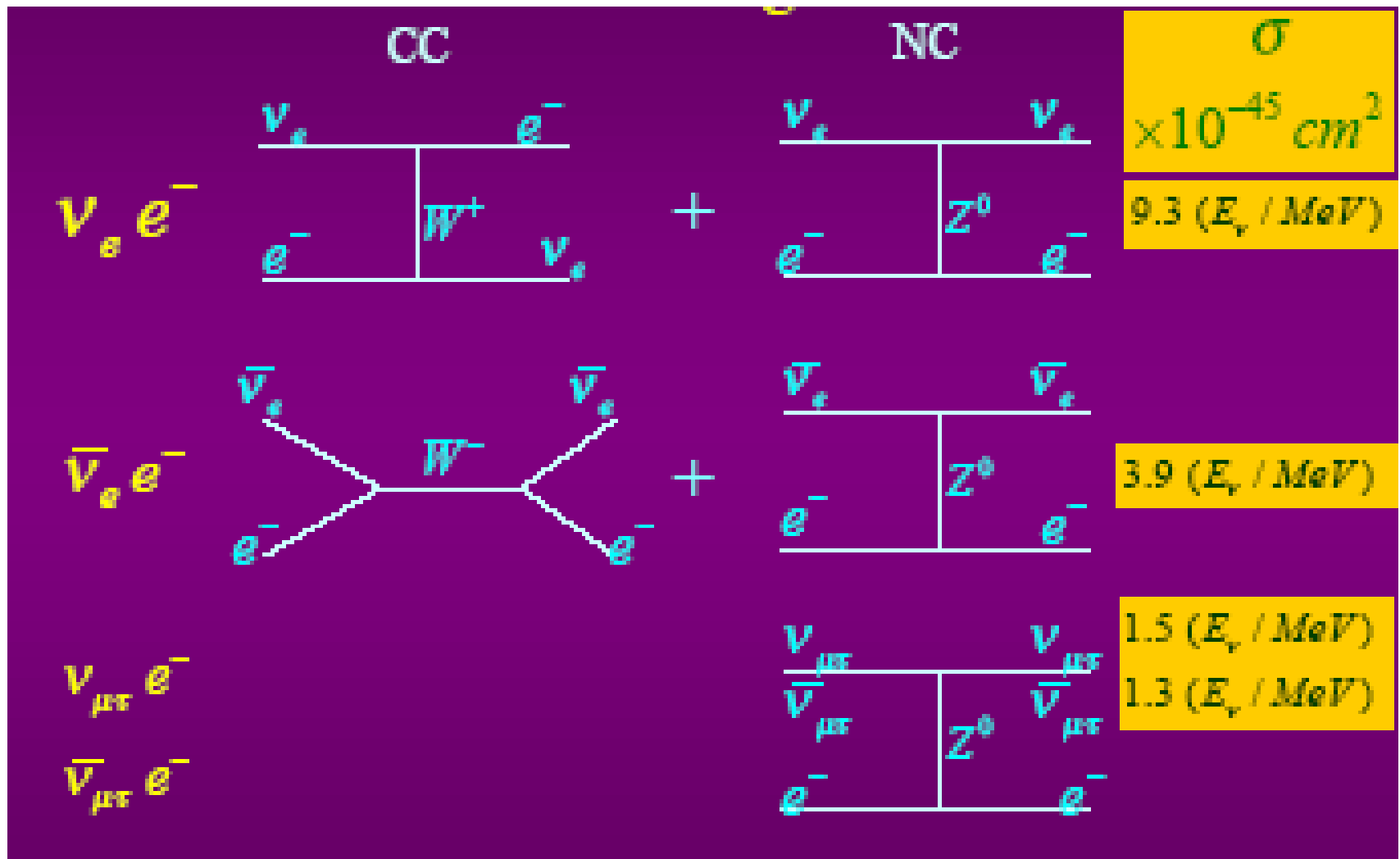
Dla $h=c=1$

$1 \text{ GeV}^{-1} = 0.2 \text{ fm}$

$R_{\text{protonu}} \approx 0.8 \text{ fm}$

- oddziaływanie z elektronem na orbicie atomowej (ważne przy małych E)
- oddziaływanie z całym jądrem - gdy λ rozmiaru jądra
- oddziaływanie z pojedynczym nukleonem w jądrze - gdy λ rozmiaru nukleonu
- oddziaływanie z kwarkiem - gdy $\lambda <$ rozmiaru nukleonu

Rozpraszanie neutrin na elektronach w atomie



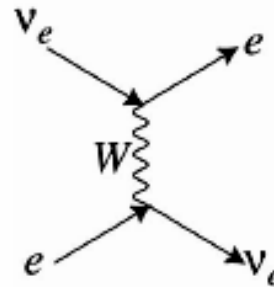
Rozpraszanie elastyczne na elektronie i nukleonach

Elastyczne rozpraszanie na elektronie

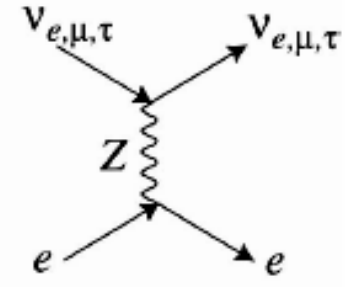
$$\nu e^- \rightarrow \nu e^-$$

$$\sigma(\nu e) \sim G_F^2 s \sim 10^{-41} \text{ cm}^2 \times E_\nu (\text{GeV})$$

$$s = E_{\text{CM}}^2 = m_e^2 + 2m_e E_\nu \sim 2m_e E_\nu$$



tylko ν_e

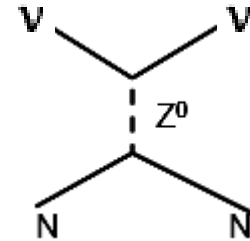


wszystkie neutrina

Przekrój czynny rośnie liniowo z energią, ale jest bardzo mały

Elastyczne rozpraszanie na nukleonach: n lub p

$$s = E_{\text{CM}}^2 = m_N^2 + 2m_N E_\nu \sim 2m_N E_\nu$$



Przy tej samej energii neutrino przekrój czynny jest ok. 2000 razy większy ze względu na większą masę nukleonu

Rozpraszanie quasi-elastyczne na nukleonach

Quasi-elastyczne rozpraszanie na nukleonach: n lub p

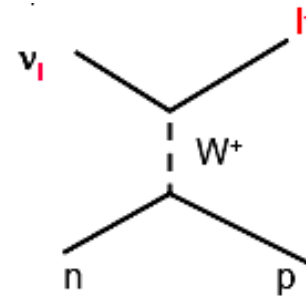
Jądro się modyfikuje, ale nie ulega rozbiciu

$$\sigma(\nu N) \sim 10^{-38} \text{cm}^2$$

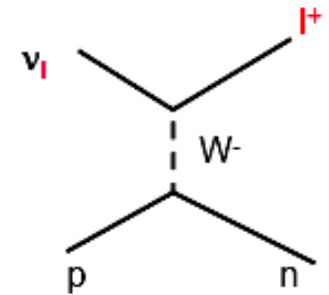
Przekrój czynny z progiem energetycznym, po wzroście przy progu praktycznie niezależny od energii

e	$E_\nu > 1.5 \text{ MeV}$
μ	$E_\nu > 110 \text{ MeV}$
τ	$E_\nu > 3500 \text{ MeV}$

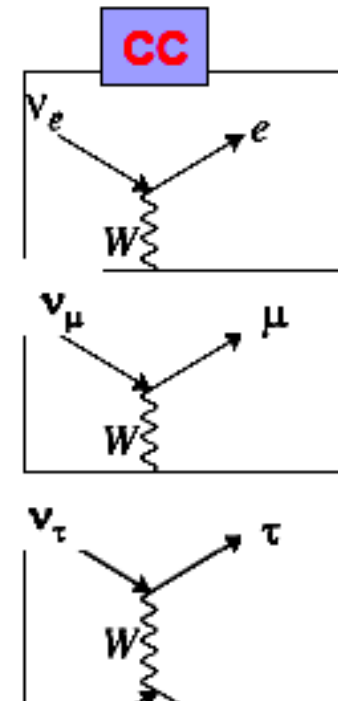
Proces bardzo użyteczny dla detekcji neutrin: zapach leptonu naładowanego identyfikuje zapach neutrina, a ładunek leptonu (-+) - identyfikuje neutrino/antyneutrino



neutrino

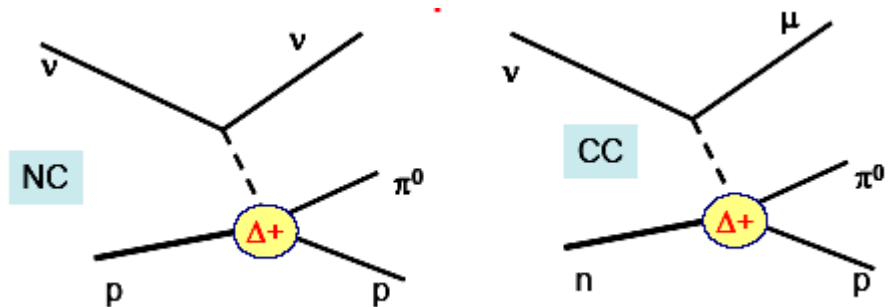


antyneutrino



Produkcja rezonansów barionowych

Produkcja rezonansów barionowych

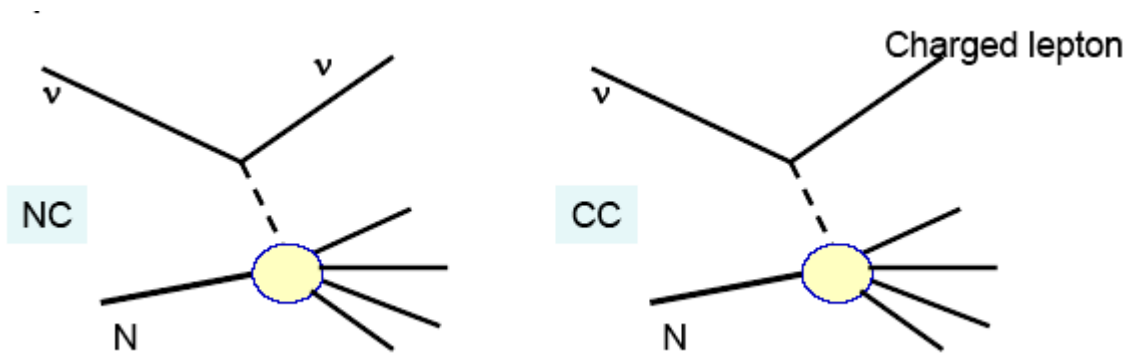


Także szereg innych rezonansów o masie poniżej kilku GeV , przekroje czynne porównywalne z tymi dla oddziaływań quasi-elastycznych

Rozpraszanie głęboko-nieelastyczne

Głęboko nieelastyczne rozpraszanie (DIS) na nukleonach (nawet na partonach)

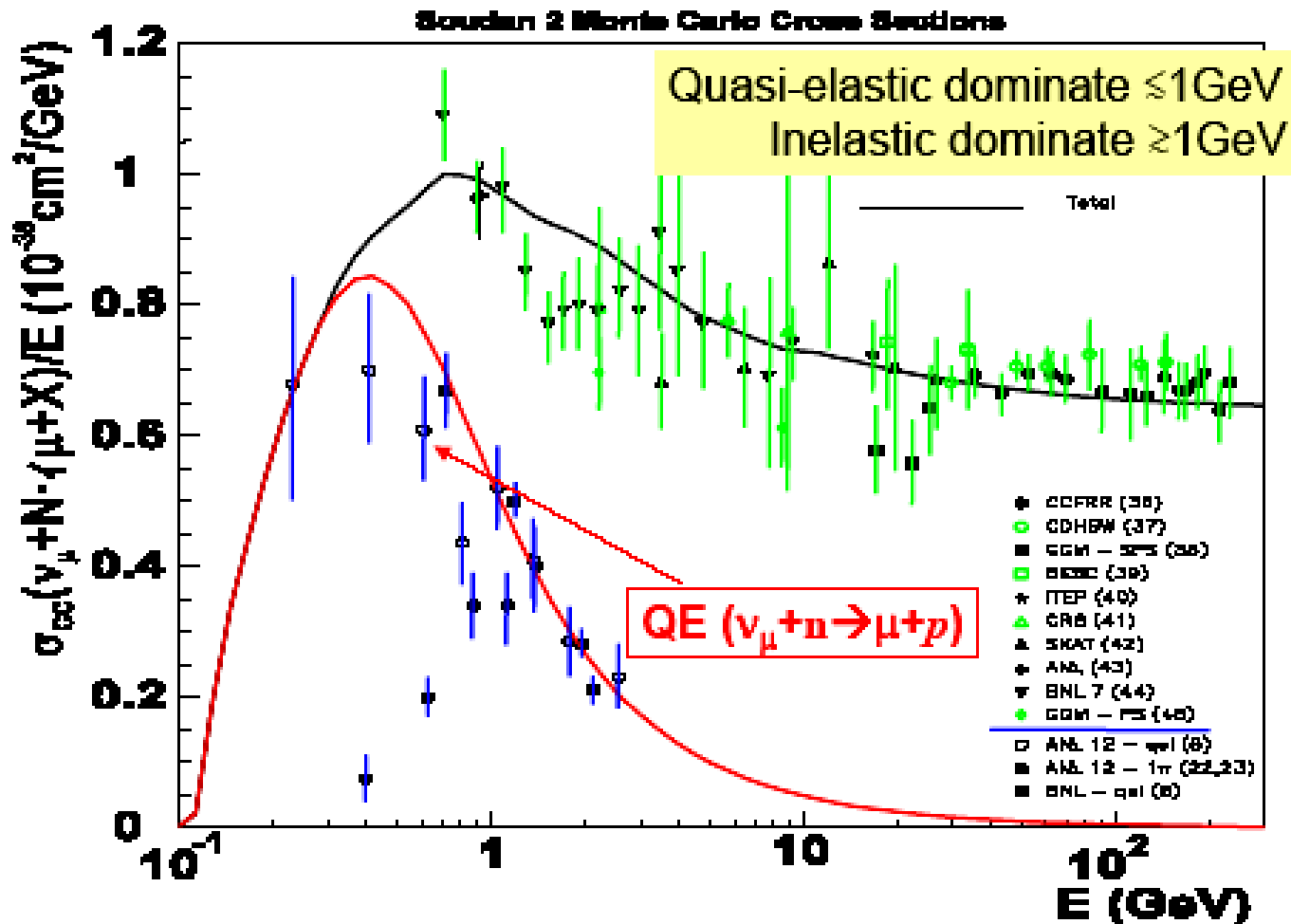
Rozpraszanie z wielkim przekazem pędu, $E_\nu \gg \text{GeV}$, jądro ulega rozbiciu



$$\text{CC: } \sigma_{\text{DIS}}(\nu N) = 0.67 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2 \times E_\nu (\text{GeV})$$

Daleko od progu przekrój czynny rośnie liniowo z energią neutrina, proces od dawna wykorzystywany do badania struktury nukleonu.

Przekroje czynne - stan obecny

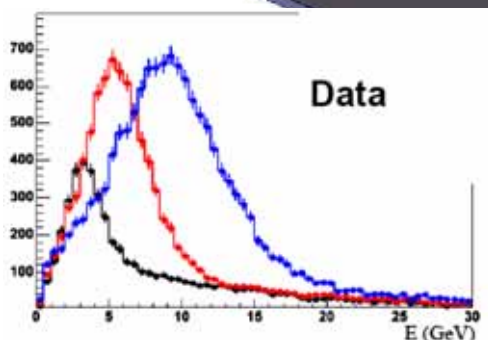
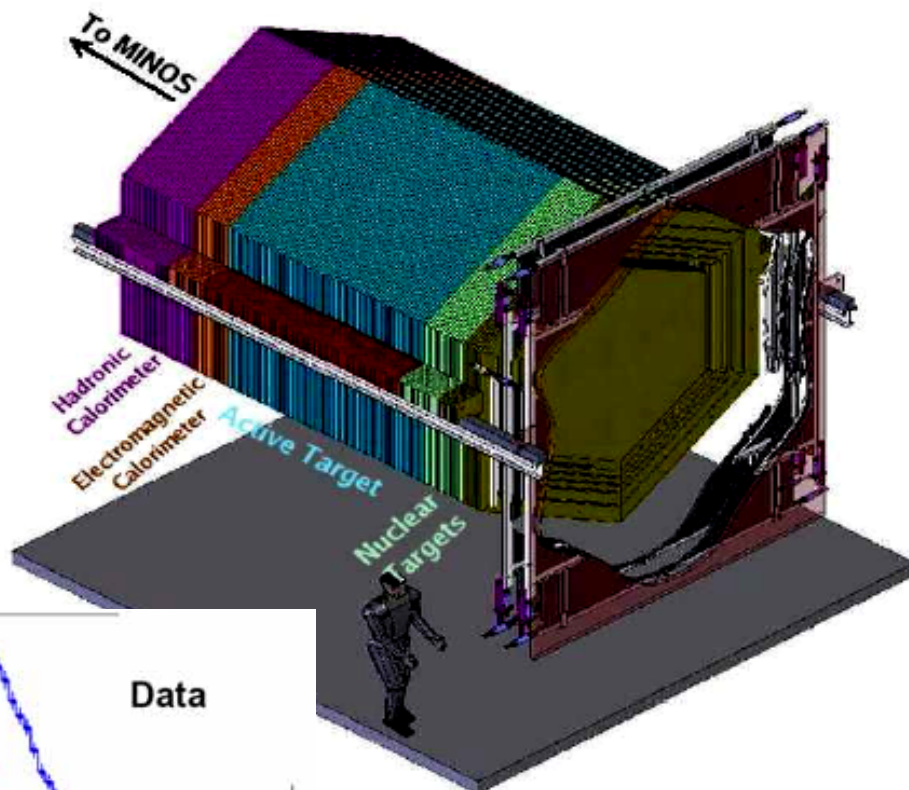
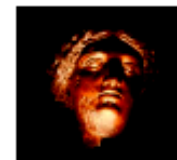


Zauważmy: Wykres przedstawia przekroje czynne podzielone przez energię neutrina

Przyszłość - eksperyment MINER ν A - start 2008



The MINER ν A Detector



- Nuclear Targets:
 - 1/2 Ton each carbon, iron, and lead
- Active Target:
 - 5.78 Tons segmented scintillator planes
- Electromagnetic Calorimeter:
 - Interleaved lead sheet (0.2 cm thick) with segmented scintillator planes
- Hadronic Calorimeter:
 - Interleaved Iron sheet (2.54 cm thick) with segmented scintillator planes

Eksperyment MINER ν A - 4 lata zbierania danych

Fiducial Volume:

3 tons Polystyrene, \approx 0.6 t C, \approx 1/2 t Fe and \approx 1/2 t Pb

Expected CC event samples:

8.6 M ν events in Polystyrene

1.4 M ν events in C

1.4 M ν events in Fe

1.4 M ν events in Pb

Charged-Current Physics Topic

Expected Statistics

3 Tons of Polystyrene

Quasi-Elastic

0.8 M

Resonance

1.6 M

Transition: Resonance to DIS

2 M

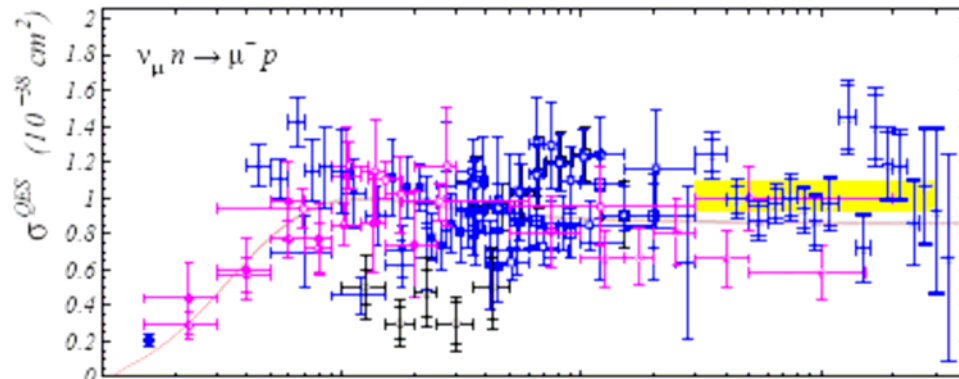
DIS and Structure Functions

4.1 M

Coherent Pion Production

85 K CC/37 K NC

Teraz



Po pomiarach eksp. MINERvA

QE scattering, ν_μ , EBA-2003 Form Factors

