

Fizyka neutrin – wykład 1

Agnieszka Zalewska

27.02.2008

Wprowadzenie eksperymentalne:

Źródła neutrin: neutrina reliktowe, słoneczne, z
wybuchu supernowych, geofizyczne, reaktorowe,
atmosferyczne, akceleratorowe, astrofizyczne

Oddziaływania neutrin – konsekwencje eksperymentalne
bardzo małego przekroju czynnego

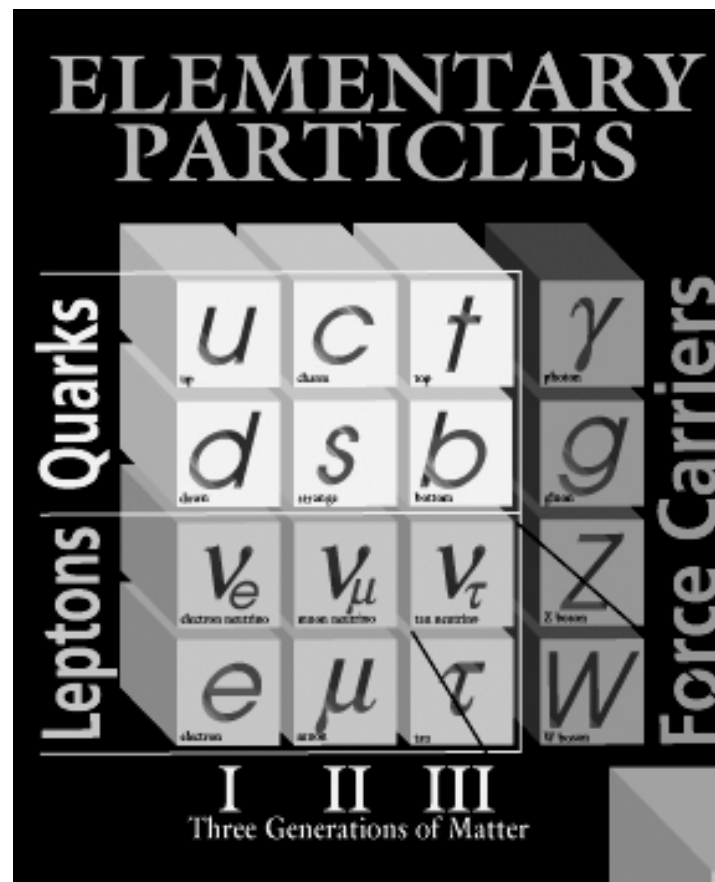
Trzy zapachy neutrin

Co to jest neutrino?

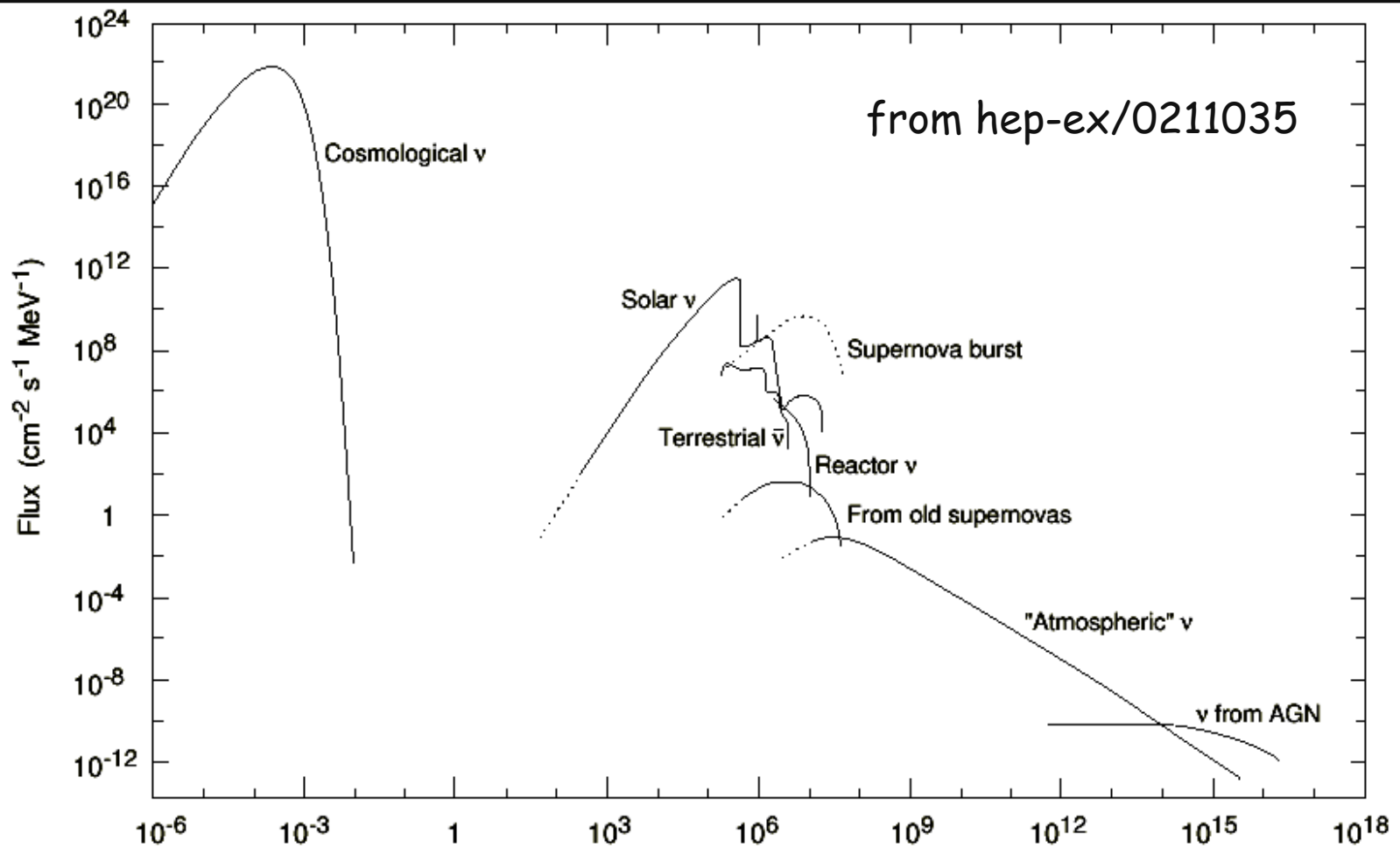
Elementarna cząstka materii

Neutrino to neutralne leptony

- oddziałują tylko słabo
- mają bardzo małą masę
- drugie po fotonach, jeśli idzie o częstość występowania
- występują w trzech „zapachach” ν_e , ν_μ , ν_τ



Źródła neutrin



Trzy rodzaje lekkich neutrin: ν_e , ν_μ , ν_τ

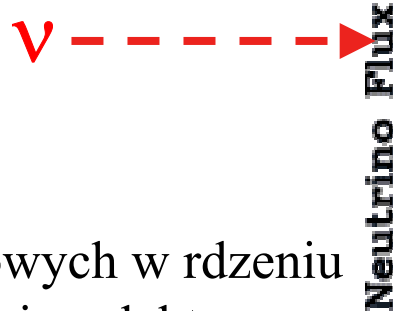
Neutrino z Kosmosu

- Ů Neutrino z Big Bangu - szacuje się, że jest ich ok. $300/\text{cm}^3$ przestrzeni, ale ich energia wynosi zaledwie 0.0004 eV
- Ů Neutrino gwiazdne: powstające w procesach termojądrowych wewnątrz Słońca i w wybuchach Supernowych - na przykład w 1987 roku zaobserwowano neutrino pochodzące z wybuchu Supernowej 1987A w Wielkim Obłoku Magellana w odległości 150000 lat świetlnych; dało to początek tzw. astronomii neutrinowej
- Ů Neutrino najwyższych energii - skąd przychodzą? Jaka jest ich maksymalna energia?



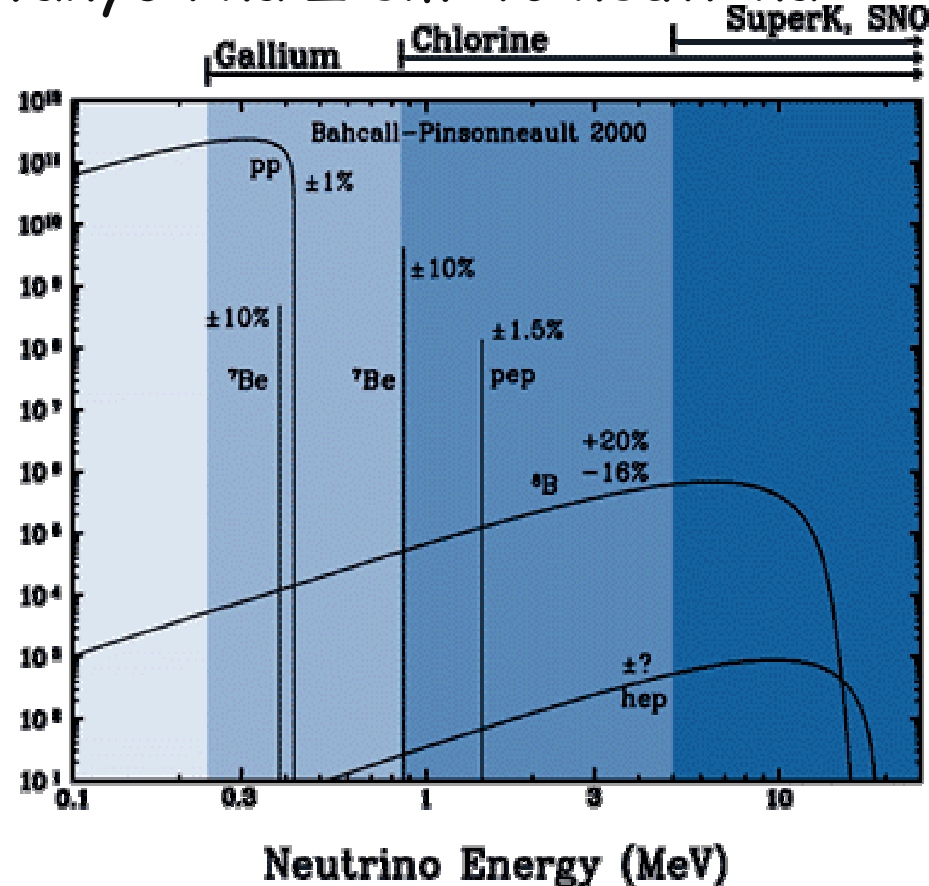
Neutrina słoneczne

Ů Większość neutrino obserwowanych na Ziemi to neutrina słoneczne



Podczas reakcji jądrowych w rdzeniu Słońca powstają neutrino elektronowe $2 \times 10^{38} \nu/s$. Na powierzchni Ziemi, zarówno w dzień jak i w nocy, ich całkowity strumień wynosi $10^{11} \nu/cm^2/s$. Ich energia jest na ogół bardzo mała i trudna do zmierzenia.

A.Zalewska, wykład 1, 27.02.2008



Neutrina słoneczne

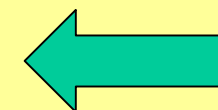
Powstają w Słońcu w procesach syntezy jąder lekkich pierwiastków - ich strumień opisywany jest przez tzw. Standardowy Model Słońca

$pp \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	
${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	85%
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	15%
$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	
${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2{}^4\text{He}$	
$p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	0.02%
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	
${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2{}^4\text{He}$	

Neutrino z Supernowych

Ważniejsze reakcje termojądrowe:

Reaction	Ignition temperature (in millions of deg K)
$4\ ^1\text{H} \cdots\ ^4\text{He}$	10
$3\ ^4\text{He} \cdots\ ^8\text{Be} +\ ^4\text{He} \cdots\ ^{12}\text{C}$	100
$^{12}\text{C} +\ ^4\text{He} \cdots\ ^{16}\text{O}$	
$2\ ^{12}\text{C} \cdots\ ^4\text{He} +\ ^{20}\text{Ne}$	600
$^{20}\text{Ne} +\ ^4\text{He} \cdots\ \text{n} +\ ^{23}\text{Mg}$	
$2\ ^{16}\text{O} \cdots\ ^4\text{He} +\ ^{28}\text{Si}$	1500
$2\ ^{16}\text{O} \cdots\ 2\ ^4\text{He} +\ ^{24}\text{Mg}$	4000
$2\ ^{28}\text{Si} \cdots\ ^{56}\text{Fe}$	6000



Słońce

Neutrina z Supernowych

Żelazo ma maksymalną energię wiązania, więc kończy procesy fuzji termojądrowej

Jeśli żelazny rdzeń gwiazdy ma masę > 1.4 masy Słońca, to następuje kolaps grawitacyjny tego rdzenia

elektrony z atomów Fe absorbowane są przez protony:



termiczne fotony są źródłem par $e^{+}e^{-}$, a te z kolei termicznych neutrino:

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$$

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}$$

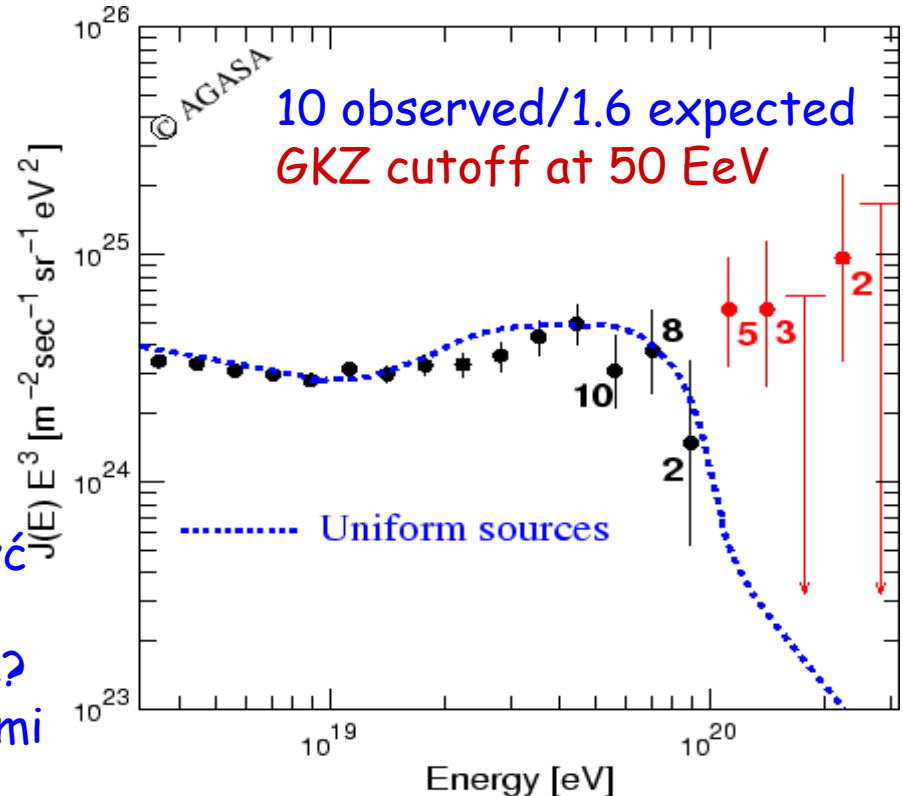
$$e^{+} + e^{-} \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu_{\tau} + \bar{\nu}_{\tau}$$

Neutrina skrajnie wysokich energii

Czy istnieją?
Skąd pochodzą?

Poszukiwania spowodowane obserwacją pęków kosmicznych skrajnie wysokich energii w eksperymencie AGASA

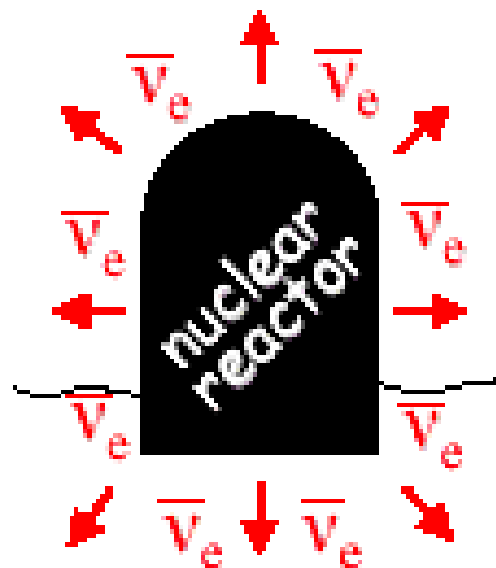
Promienie kosmiczne o energiach powyżej granicy GKZ nie powinny być obserwowane. Jeśli docierają do Ziemi, to jakie jest ich pochodzenie? Może mają jakiś związek z neutrinami skrajnie wysokich energii?



(Anty)neutrino geofizyczne i reaktorowe

- z jądrowych rozpadów β naturalnych izotopów promieniotwórczych (przeważają $\beta^- \rightarrow$ przeważają antyneutrino) - ok. 6×10^6 (anty) $\nu/\text{sek}/\text{cm}^2$
- stąd bardzo dużo antyneutrino znajduje się w pobliżu siłowni jądrowych, działających w oparciu o bogate w neutrony materiały rozszczepialne.

Typowa siłownia
jądrowa daje 6×10^{20}
anty- ν/sek i 3 GW
mocy

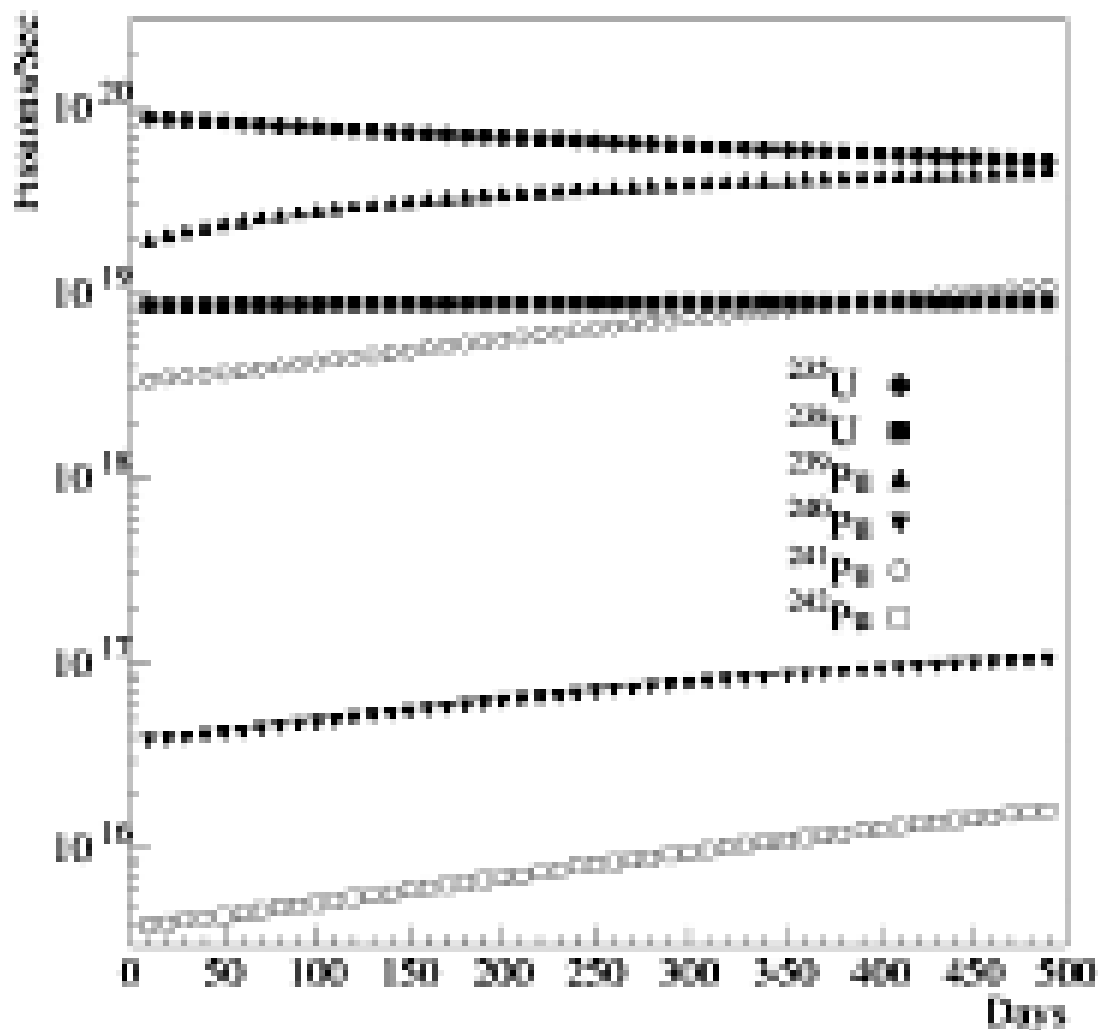


Antyneutrina reaktorowe

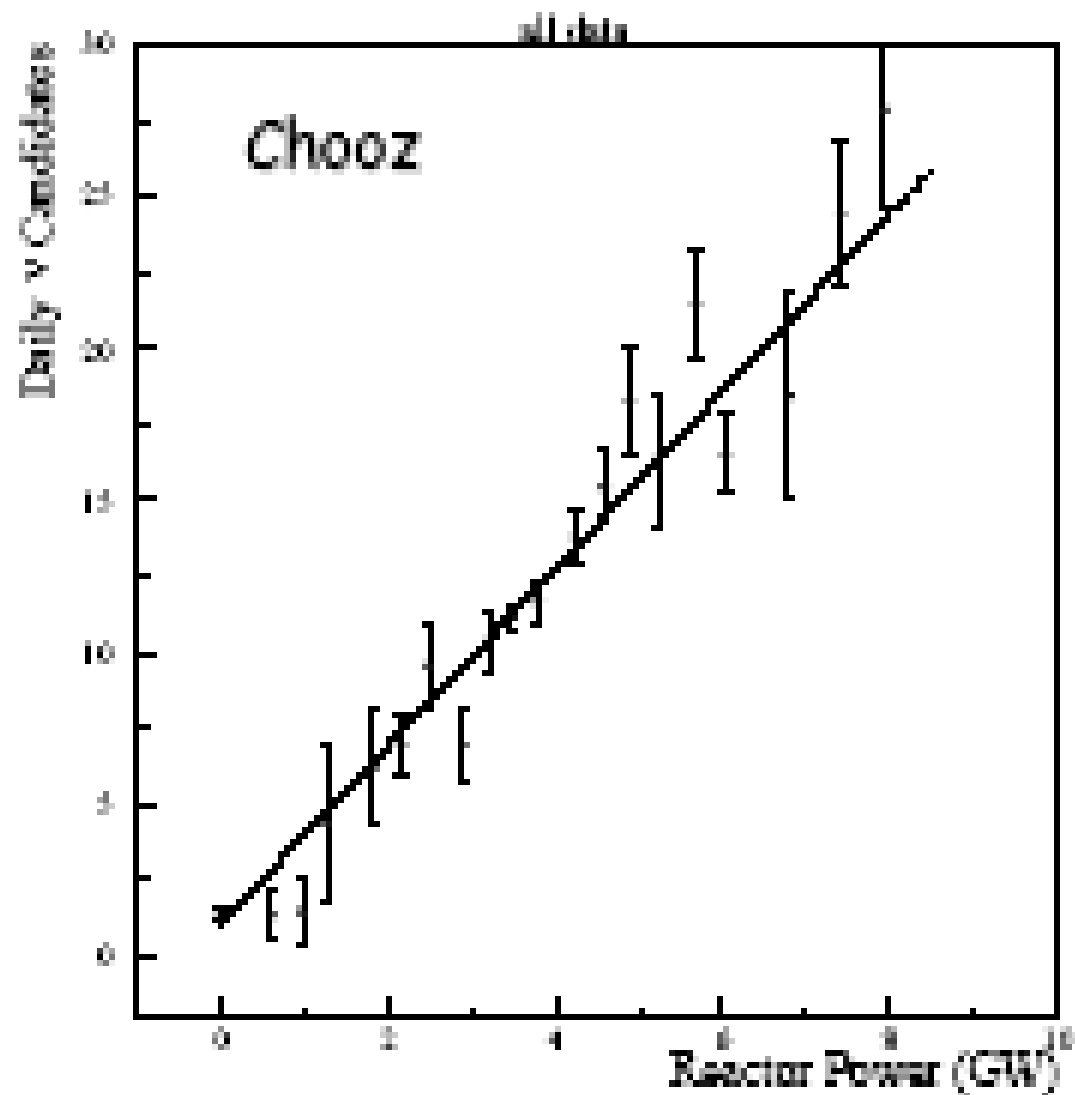
>99.9% antyneutrin reaktorowych pochodzi z rozszczepień jąder ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu

Na jedno rozszczepienie przypada 200 MeV energii i 6 antyneutrin

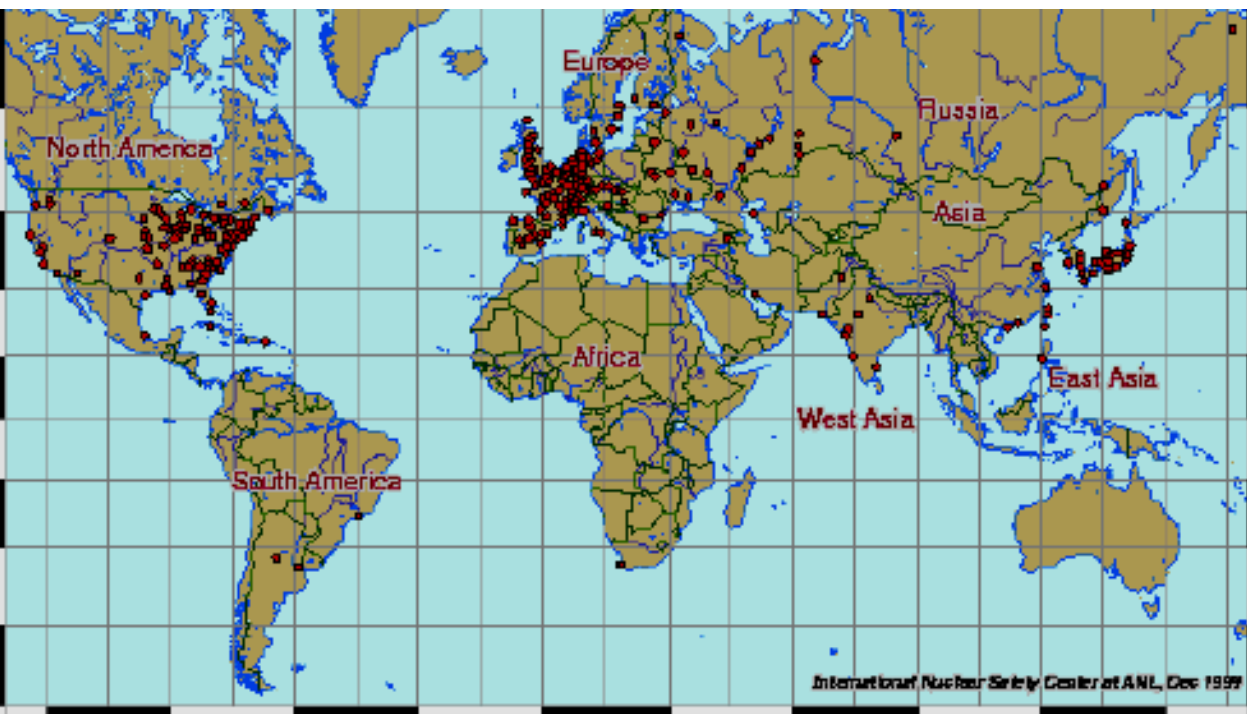
Typowa siłownia jądrowa produkuje 3 GW mocy i 6×10^{20} antyneutrin



Dane z
eksperymentu
Chooz (Francja):
liczba
zarejestrowanych
antyneutrin jest
proporcjonalna do
termicznej mocy
reaktora



Antyneutrina reaktorowe



Długa tradycja wykorzystywania antyneutrin z reaktorów do badań ich oddziaływań – zapoczątkowana w 1953 roku przez eksperyment Reinesa-Cowana

Typowa siłownia jądrowa daje 6×10^{20} anty- ν /s i 3GW mocy

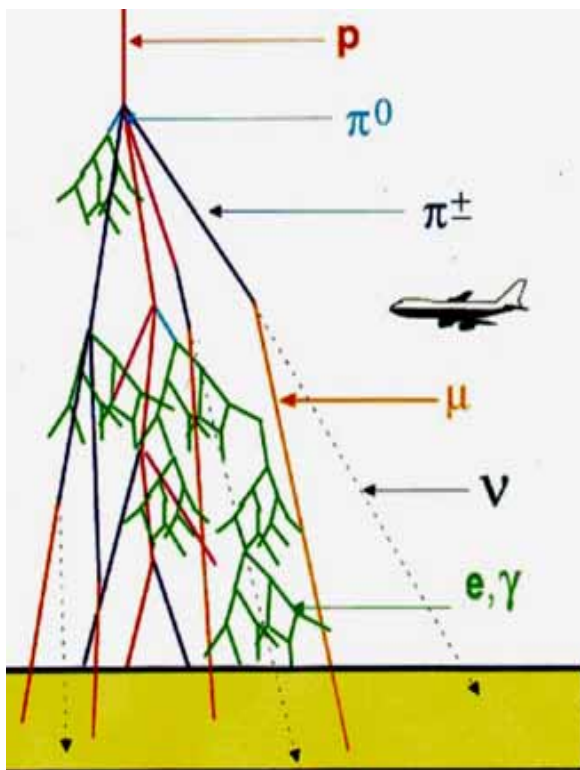
Eksperyment reaktorowy w Palo Verde

A.Zalewska, wykład 1, 27.02.2008



Neutrino atmosferyczne

Ū z rozpadów cząstek wytwarzanych w oddziaływaniach promieni kosmicznych z materią górnej warstwy atmosfery ziemskiej - neutrino atmosferyczne



Powstaje wtedy potężny pęk cząstek wtórnych, wśród których przeważają mezony π i K , które rozpadają się z udziałem neutrin. Przeważają neutrino o energiach poniżej 1 GeV-y.

Neutrina atmosferyczne

from Hayato at EPS2003

pierwotny promień
kosmiczny $p, He \dots$

atmosfera

oddziaływanie
10~30km

$\pi^\pm, K^\pm$

$\mu^\pm$

$e^\pm$

ν_μ

ν_μ

ν_e



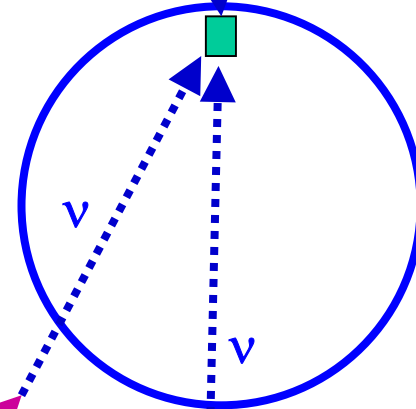
$$\frac{\phi(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{\phi(\nu_e + \bar{\nu}_e)} \begin{cases} \sim 2 \text{ (for } E_\nu < 1 \text{ GeV)} \\ > 2 \text{ (for } E_\nu > 1 \text{ GeV)} \end{cases}$$

A.Zalewska, wykład 1, 27.02.2008

$p, He \dots$

ν

Droga 10~30km



Droga do 13000km

$p, He \dots$

$p, He \dots$

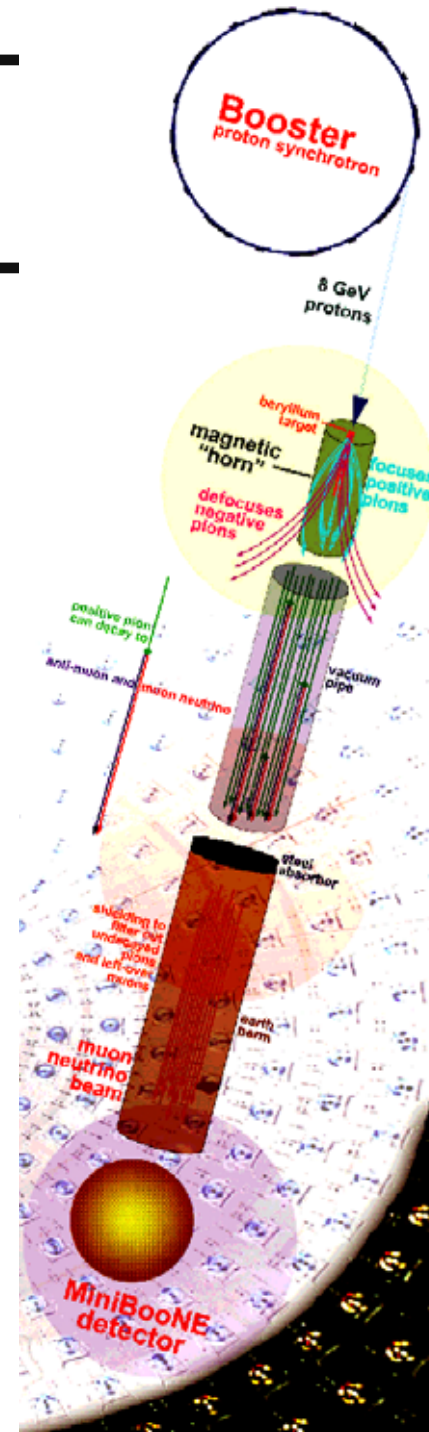
dla $E_\nu > \text{kilka GeV}$,

(Up-going / down-going) ~ 1

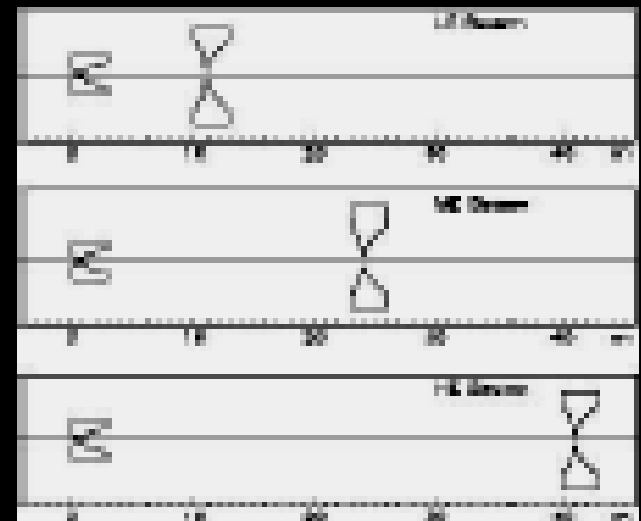
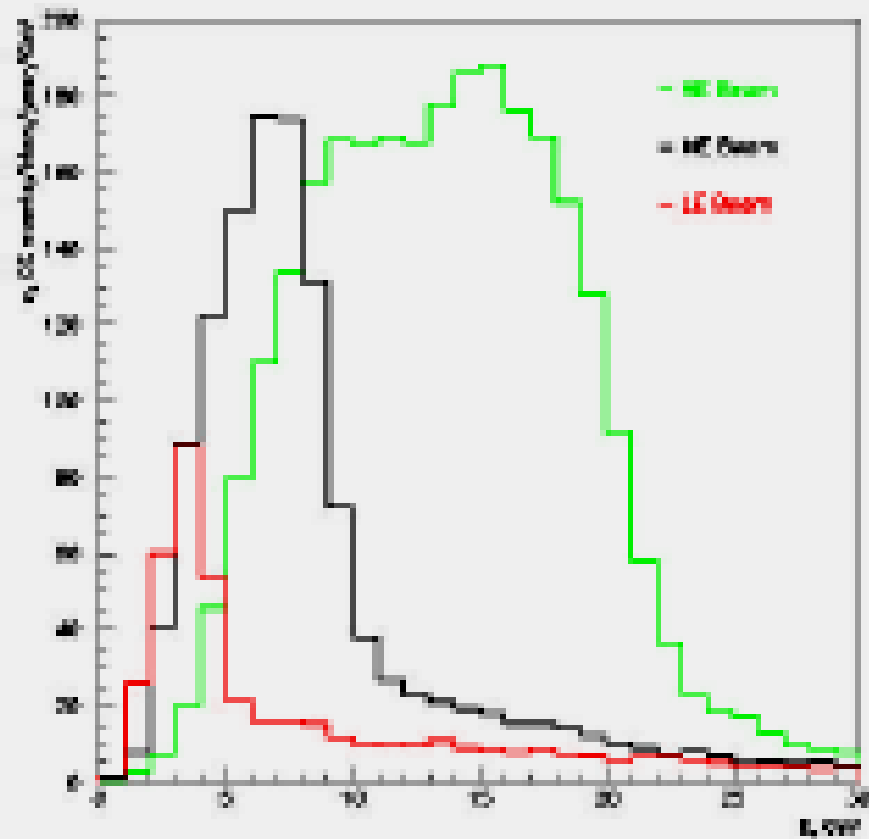
niepewność wyznaczenia
tego stosunku $< \text{kilku \%}$

Neutrino akceleratorowe

Ų sztucznie wytwarzane wiązki neutrin
w oparciu o przyspieszane w
akceleratorach wiązki protonowe -
podobnie jak dla neutrin
atmosferycznych neutrino pochodzą z
rozpadów mezonów π i K , powstałych w
wyniku oddziaływania protonów z
wiązką z materiałem tarczy; możliwe
jest „sterowanie” energią, kierunkiem
i rozmiarami wiązki



NuMI: Flexible Neutrino Beam

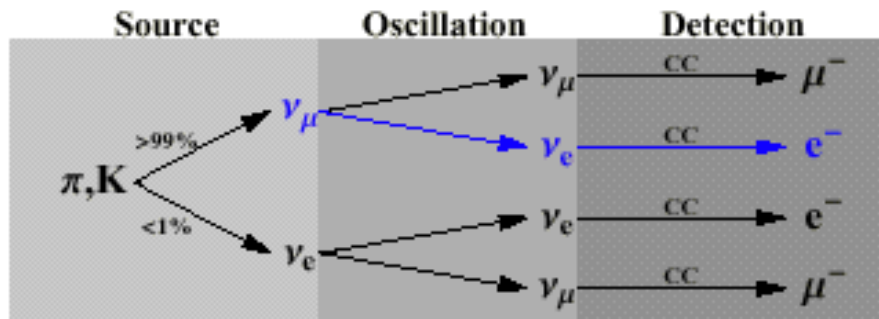


CC Events Rates in Minos 5kt detector

- High 16,000/yr
- Medium 7,000/yr
- Low 2,500/yr

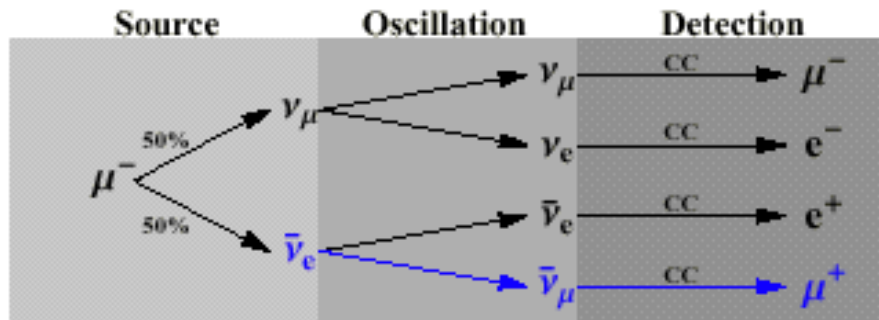
Przyszłe intensywne źródła neutrin akceleratorowych

Superbeams



Superwiązki
-konwencjonalne wiązki
dużej intensywności,
Neutrina z rozpadów π

Neutrino Factories



Fabryki neutrin
- nowy typ akceleratora,
neutrina z rozpadów μ

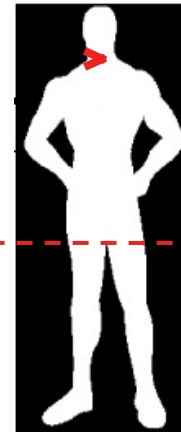
Wiązki β

Świeży pomysł (2002 rok)
- przyspieszać ^6He (źródło
antyneutrin) i ^{18}Ne (źródło
neutrin)

Neutrino oddziałują słabo

Promieniowanie elektromagnetyczne (γ) zostaje zaabsorbowane

γ



Neutrino oddziałują z materią tylko słabo.

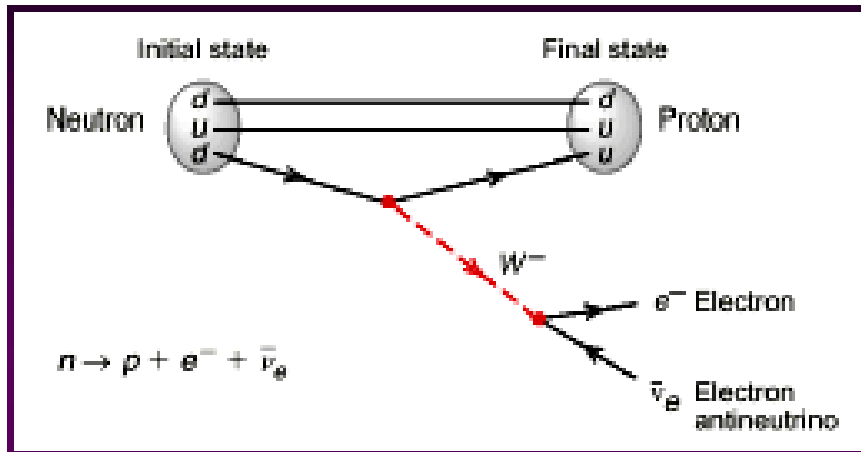
ν



Większość neutrin przechodzi przez Ziemię, nie oddziałując!

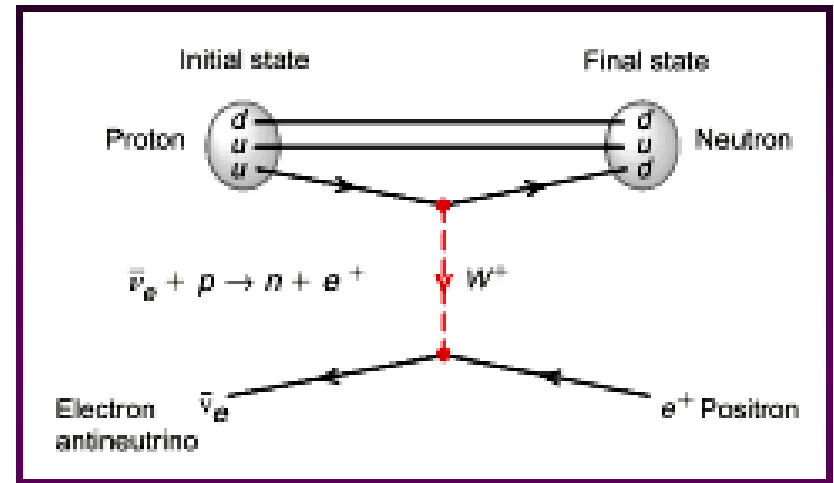
Średnia droga na oddziaływanie neutrino jest równa średnicy Ziemi dla neutrin o energii aż 10^6 GeV

Rozpad β i proces absorpcji anty- ν_e



Rozpad neutronu

„Odwrotny” proces β



Prawdopodobieństwo oddziaływania neutrin

Rozpad β neutronu: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

charakteryzuje czas rozpadu ok. 15 minut i emisja antyneutrino o energii rzędu 1 MeV-y

Odwrotnie, jeśli zachodzi absorpcja antyneutrino na protonie w jadrze: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

W ciągu 15 minut neutrino, poruszając się z prędkością światła, przeszłoby 300 000 000 km, jeśli by przechodziło przez materię tak gęstą jak jądra atomowe. Atomy zwykłej materii są około 10000 razy większe niż ich jądra. Wobec tego na jednostkę powierzchni neutrino znajduje $(10000)^2$ razy mniej neutronów. Aby zostać zaabsorbowane, musi więc przebyć drogę 30 000 000 000 000 000 km

... Czyli Wszechświat jest praktycznie przezroczysty dla neutrina o energii rzędu MeV-y

Rok 1930 – Pauli stawia hipotezę istnienia neutrina jako remedium na kłopoty z jądrowym rozpadem β (wykład 2)

„Zrobiłem straszną rzecz. Zaproponowałem cząstkę, która nie może być wykryta. To jest coś, czego teoretyk nie powinien nigdy robić”

Wolfgang Pauli

Ostatecznie Pauli postanowił dać szansę doświadczalnikom i obiecał skrzynkę szampana temu, kto pierwszy zaobserwuje oddziaływanie neutrin

25 lat później ...

Wymagania od eksperymentów

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:

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

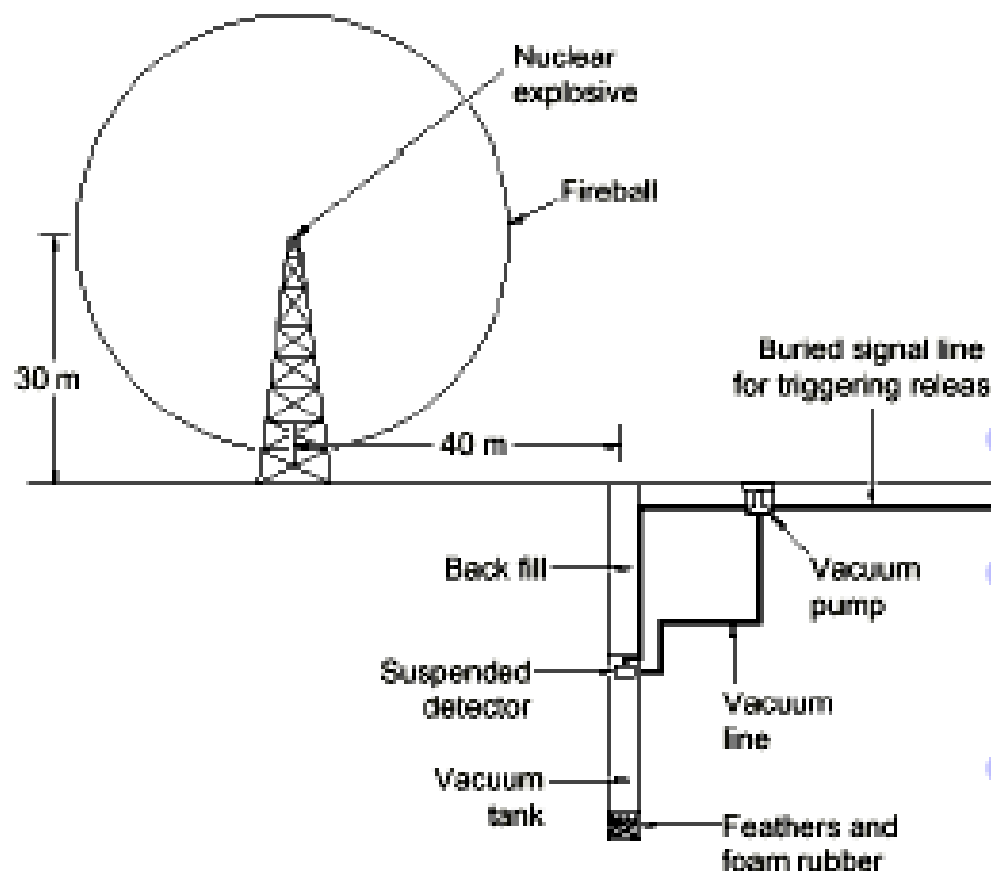
Przekroje czynne na oddziaływania neutrin o energiach rzędu MeV są mniejsze niż 10^{-40}cm^2 (dokładniejsze omówienie w dalszych wykładach)
- dla porównania całkowite przekroje czynne na oddziaływania wysokoenergetycznych hadronów są bliskie 10^{-24}cm^2

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

Skrajny sposób na obejście trudności

Reines and Cowan, 1946

Projekt prowadzenia
eksperymentu podczas
próby wybuchu jądrowego

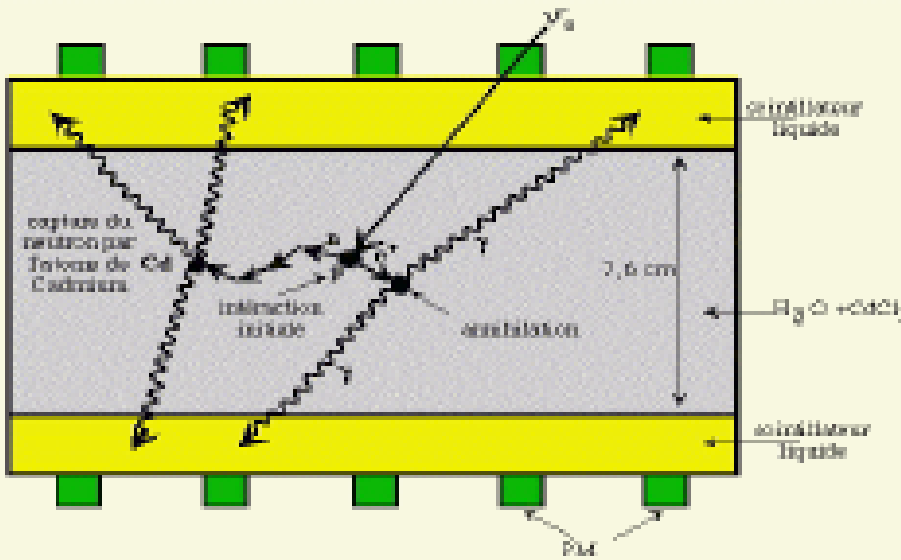


Pierwsza obserwacja oddziaływań ν_e

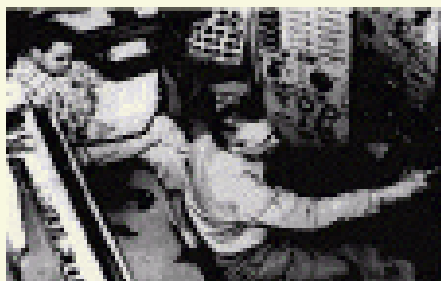
Eksperyment Reinesa-Cowana
1953 - pomiary przy siłowni jądrowej Hanford - niekonkluzywne

1955 - poprawiony eksperyment przy siłowni w Savannah River, dwa 200-litrowe baniaki wypełnione wodą z dodatkiem CdCl_2 między warstwami scyntylatora z odczytem sygnału przez fotopowielacze, detektor umieszczony 12m pod ziemią w odległości 11m od reaktora, dającego strumień 10^{13} antyneutrin/ cm^2s

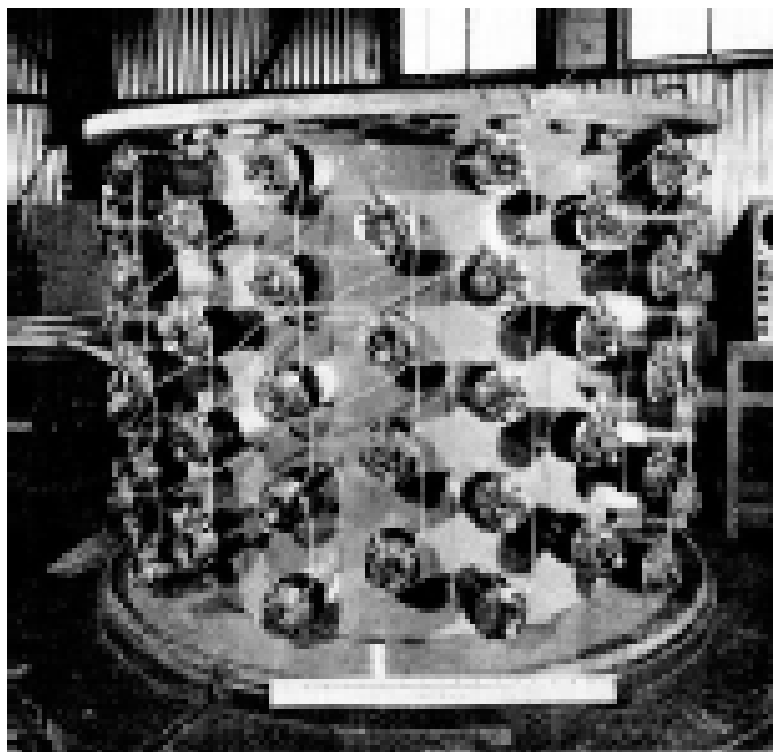
Sygnatura: dwa fotony w przeciwnych kierunkach w opóźnionej koincydencji (kilka μs) z fotonami z wychwytu n



Expérience de Reines et Cowan (1953)

$$\nu_e + p \rightarrow n + e^+$$
$$n + \text{Cd} \xrightarrow{\text{capture}} 3\gamma$$
$$e^+ + e^- \xrightarrow{\text{annihilation}} 2\gamma$$


Detector at the Savannah River nuclear reactor



"We are happy to inform you [Pauli]
that we have definitely detected neutrinos"

Reines i Cowan
twierdzili, że nigdy nie
dostali ani odpowiedzi
na ten telegram, ani
obiecanej skrzynki
szampana...

Pauli twierdził, że je
wysłał...

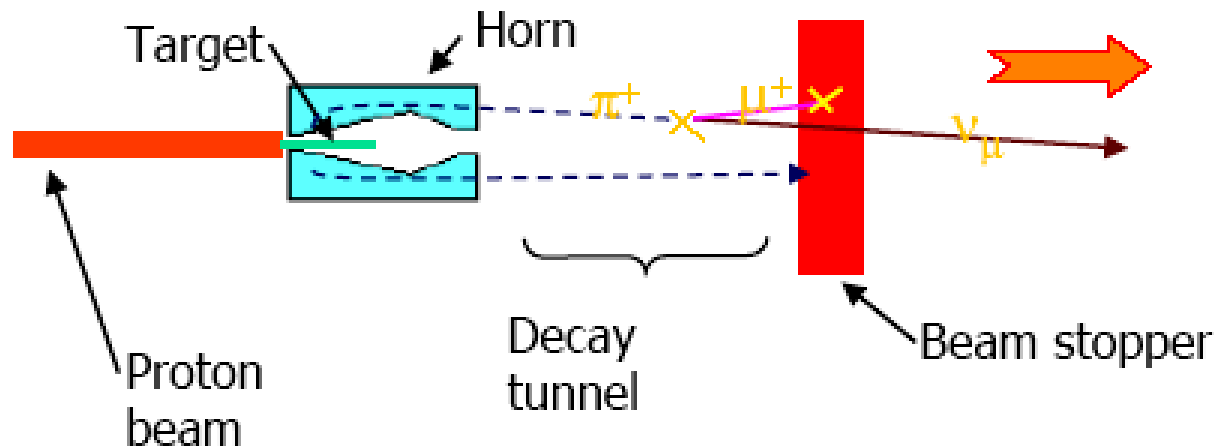
Po śmierci Pauliego jego
asystent znalazł wśród
papierów niewysłany list
gratulacyjny...

Odkrycie neutrino mionowego ν_μ

Intrygujący fakt braku pewnych rozpadów μ , np. $\mu \rightarrow e + \gamma$, $\mu \rightarrow 3e$
czyżby z mionem związane było jego neutrino, inne niż ν elektronowe?

Rok 1962 - eksperyment przy akceleratorze w Brookhaven:

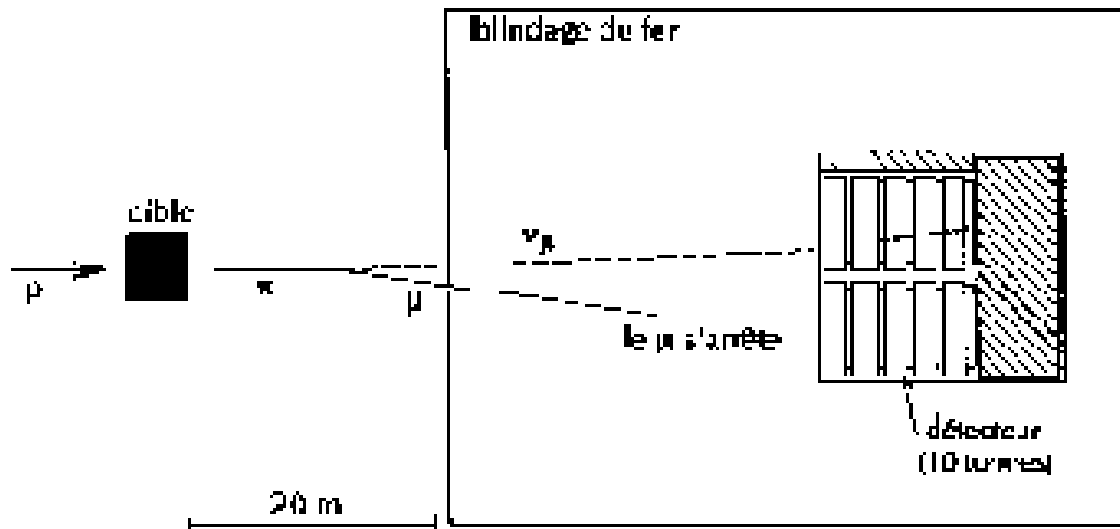
Wiązka protonów z akceleratora zderzana była z tarczą, w wyniku czego powstawały cząstki wtórne - głównie mezony π . Piony rozpadały się na miony i neutrino. Miony zatrzymywane były przez absorbent na ich drodze, a neutrino kierowane były do detektora, zbudowanego z warstw absorbenta i warstw komór iskrowych.



Odkrycie neutrino mionowego ν_μ

Idea eksperymentu - należy zbadać oddziaływania neutrin z rozpadów π . Jeśli w ich wyniku powstawać będą miony, tzn. że neutrino towarzyszące mionowi w rozpadzie pionu jest inne niż neutrino towarzyszące elektronowi w rozpadzie β .

Wynik: na 40 zarejestrowanych oddziaływań zaobserwowano 34 miony i 6 elektronów (zgodnie z oszacowaniem tła)



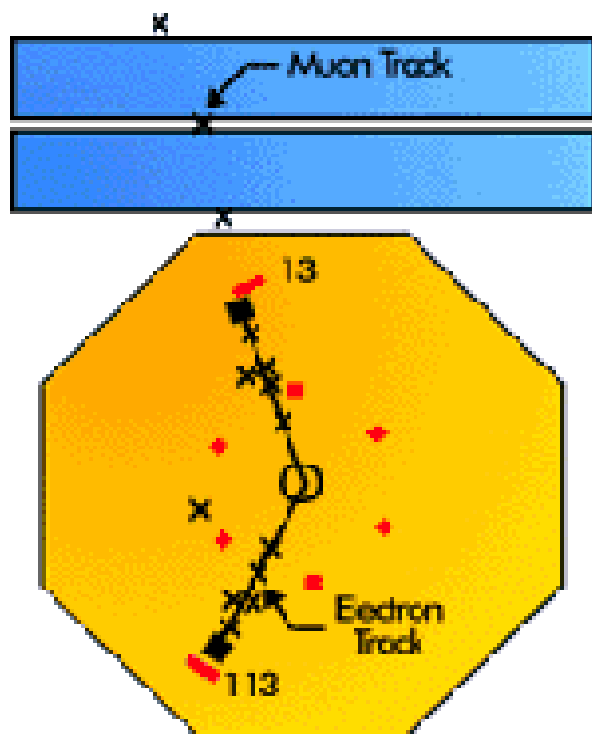
Rok 1987 - Nagroda Nobla dla L.Ledermana, J.Steinbergera i M.Schwartza za odkrycie oddziaływań ν_μ

ν_τ – całkiem długa historia

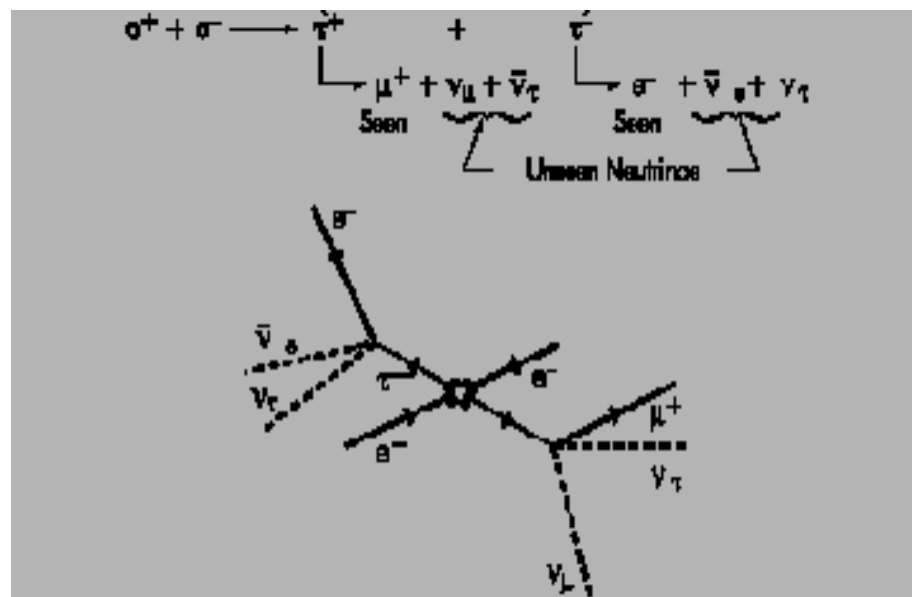
- Ů 1975 — odkrycie leptonu τ na akceleratorze SPEAR; bardzo naturalne założenie o istnieniu odpowiadającego mu neutrina ν_τ
- Ů 1986 — E531 stwierdza brak sprzężeń ν_e , ν_μ do leptonu τ
- Ů lata 80-90 — badania rozpadów leptonu τ : CLEO, ARGUS, eksperymenty przy akceleratorze LEP
- Ů 1989 — LEP stwierdza istnienie trzech lekkich neutrin
- Ů 1998 — SuperKamiodande wskazuje na oscylacje $\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$
- Ů 2000 — DONUT: pierwsza bezpośrednia obserwacja oddziaływań ν_τ

Odkrycie leptonu τ

1975 - M.Pert i in. - poszukiwanie takich przypadków oddziaływań e^+e^- , gdzie w stanie końcowym był tylko mion i elektron o przeciwnych ładunkach



Interpretacja:



1995 - Nagroda Nobla dla M.Perla za odkrycie τ i dla F.Reinesa za pierwszą obserwację oddziaływań ν_e

Rozpady leptonu τ

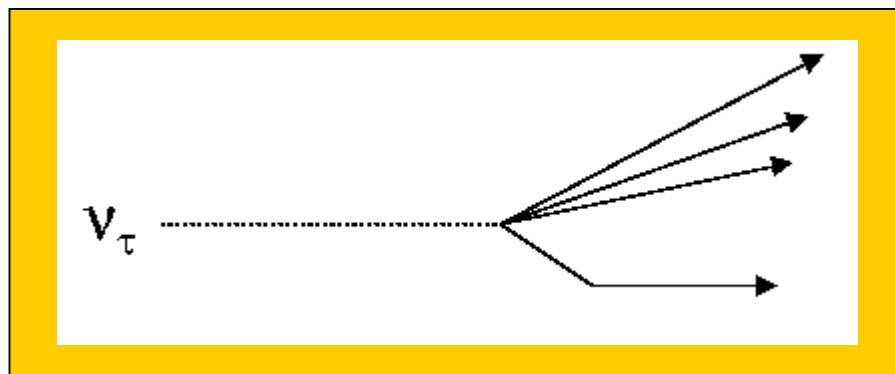
Wyniki eksperymentów ARGUS, CLEO i czterech eksperymentów przy akceleratorze LEP:

$$\tau \rightarrow 1 \text{ prong} + \text{neutrals} \quad 84.7\% :$$

$$\tau \rightarrow h + \text{neutrals} \quad 49.5\%$$

$$\tau \rightarrow e \nu \nu \quad 17.8\%$$

$$\tau \rightarrow \mu \nu \nu \quad 17.4\%$$



Masa ν_τ i czas życia leptonu τ

Masa $\nu_\tau < 18.2 \text{ MeV}$

- wyznaczona w oparciu o wysokokrotne rozpady τ (> 5 cząstek naładowanych) w eksperymentach przy akceleratorze LEP

Czas życia $\tau_\tau = (290.6 \pm 1.0) \times 10^{-15} \text{ s}$

$c\tau_\tau = 87.11 \text{ mikronów}$

- główny wkład od eksperymentów przy akceleratorze LEP

Obserwacja oddziaływania ν_τ w eksperymencie DONUT

CEL:

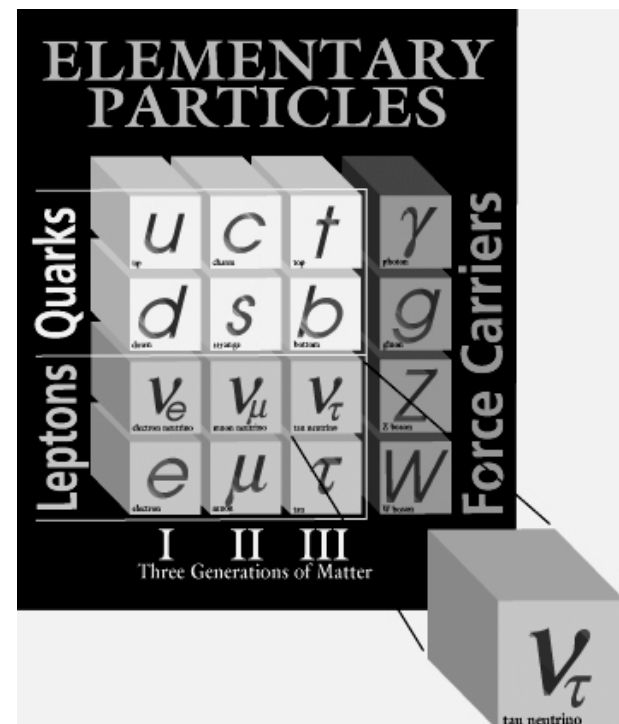
bezpośrednia obserwacja oddziaływań typu CC („charged current”) neutrina taonowego

$$\nu_\tau N \rightarrow \tau^- X$$

POPRZECZ:

lokalizację i identyfikację
rozpadów leptonu τ w
detektorze wyposażonym
w tarczę z emulsji
jądrowej i spektrometr
elektroniczny

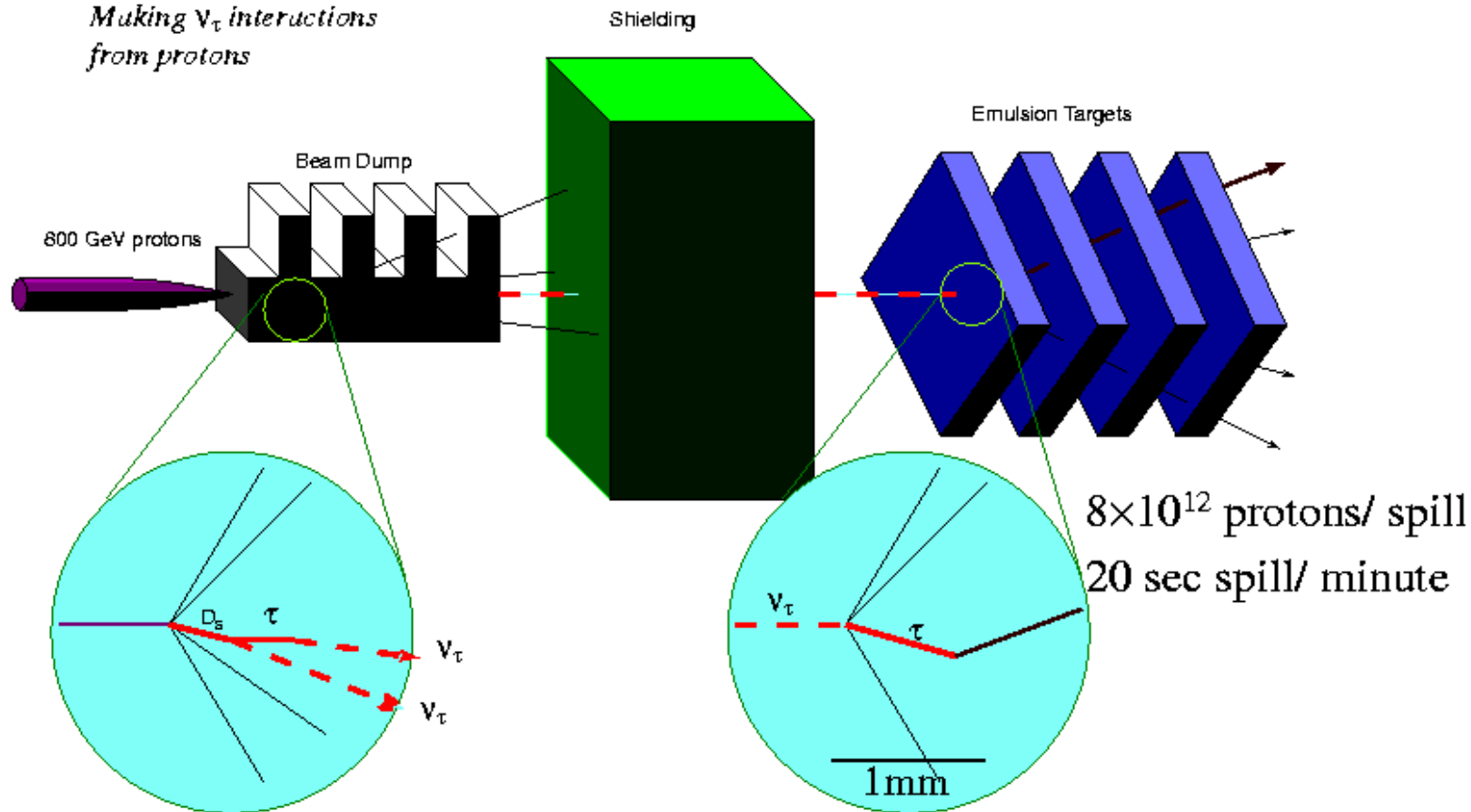
A.Zalewska, wykład 1, 27.02.2008



Eksperyment DONUT — wiązka neutrin

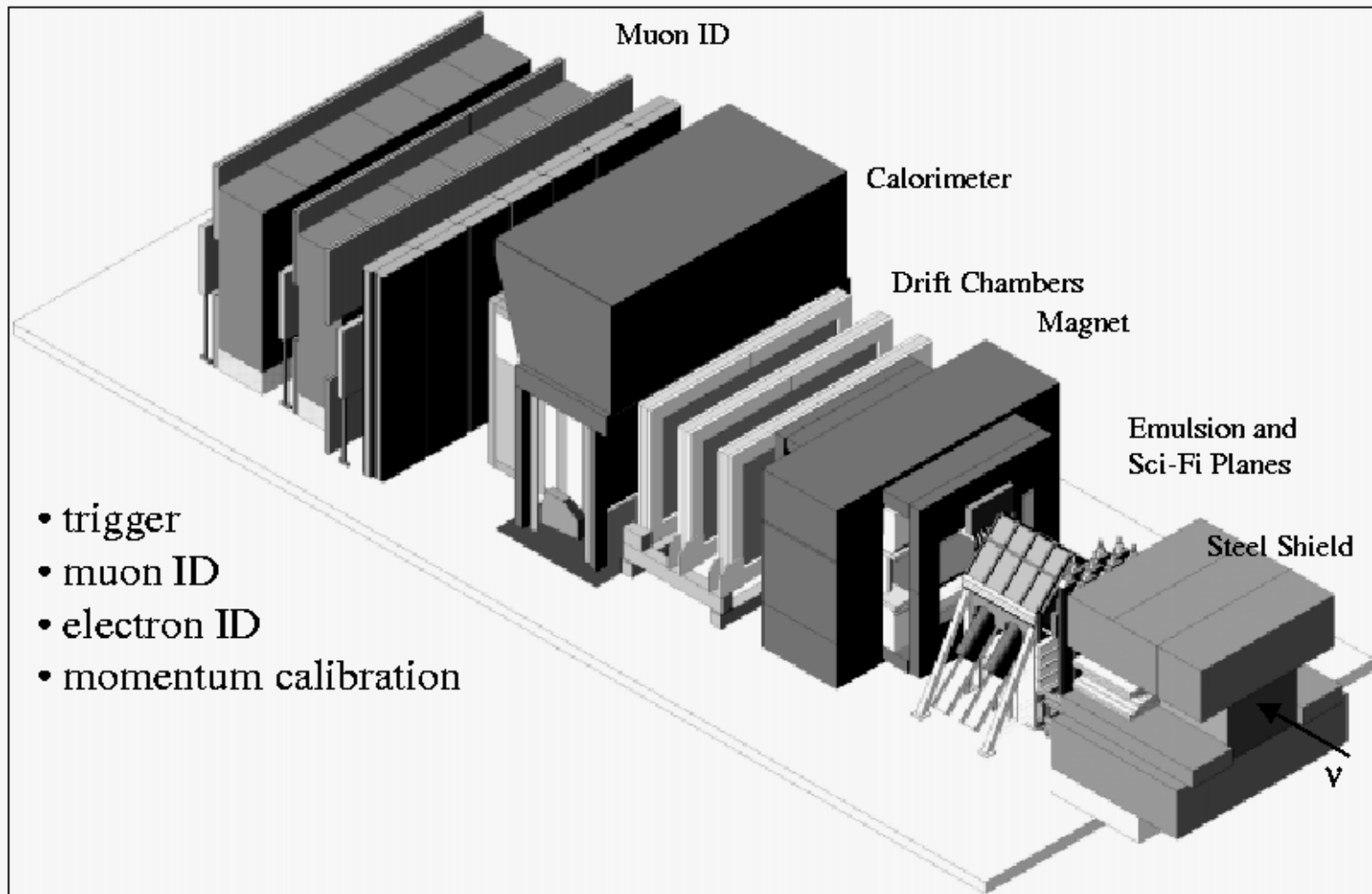
E-872

*Making ν_τ interactions
from protons*

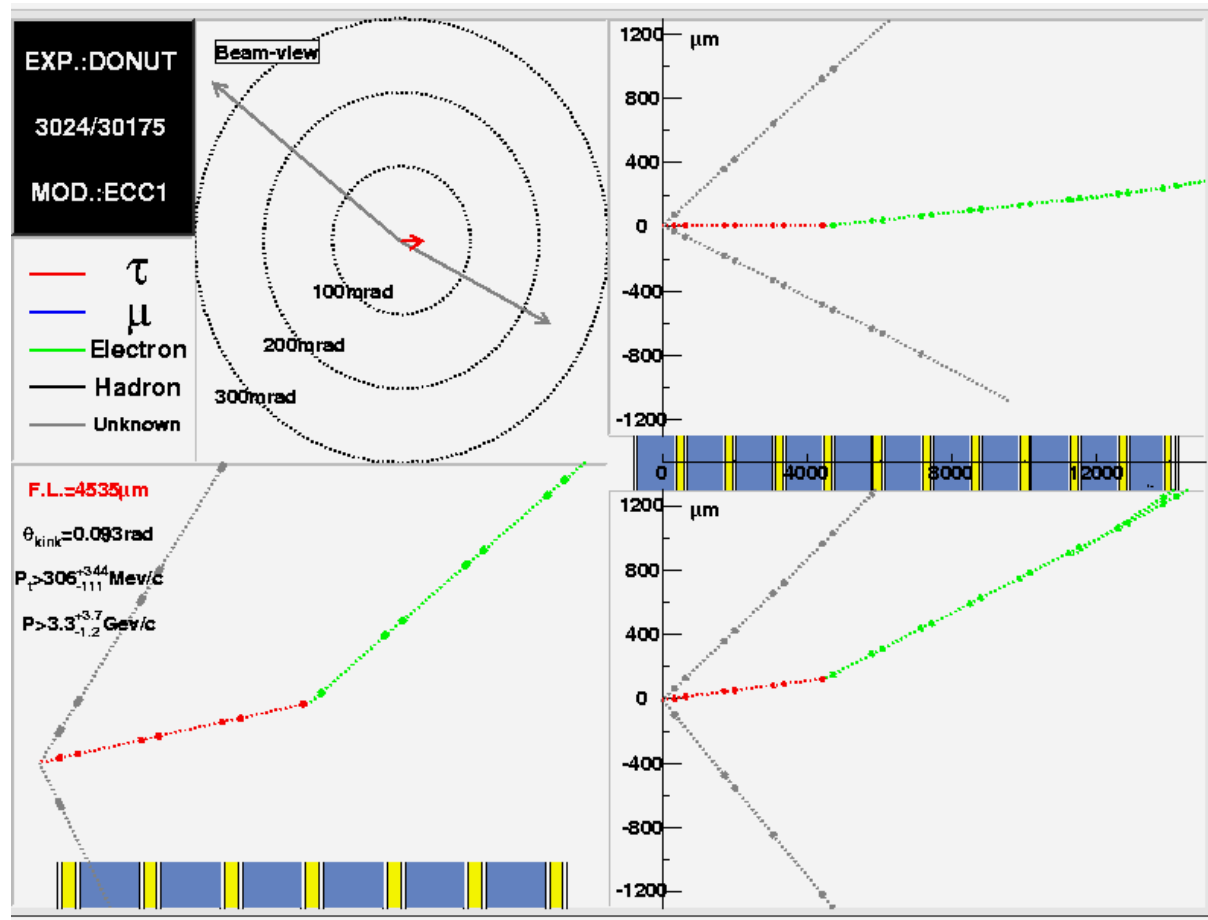


ν_τ stanowiły zaledwie 5% wszystkich neutrin w wiązce

Eksperyment DONUT — spektrometr



DONUT — przypadek oddziaływania ν_τ



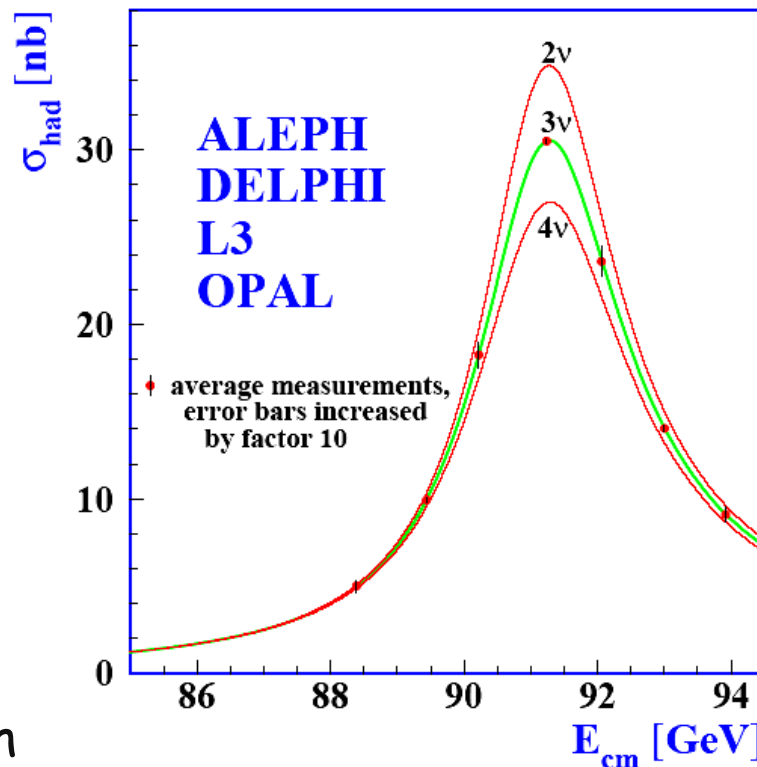
Łącznie w eksperymencie DONUT zaobserwowano około 10 przypadków oddziaływań ν_τ

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 Z^0 jest konsystentny z trzema rodzajami lekkich neutrin (sprzęgających się do Z^0)

2005: w oparciu o wszystkie dane z czterech eksperymentów LEP-owskich - końcowy wynik analizy:



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