

# Tajemnice neutrin

**Jan Kisiel**

**Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski, Katowice**

*(Jan.Kisiel@us.edu.pl)*

*Katowice, 20.05.2015*

# Plan prezentacji:

- **Narodziny neutrin: pomysł, teoria, eksperyment**
- **Hipoteza oscylacji neutrin**
- **Neutrina wokół nas**
  - **Neutrina słoneczne**
  - **Neutrina z wybuchu supernowej**
  - **Geoneutrina**
  - **Neutrina reaktorowe**
  - **Neutrina atmosferyczne**
  - **Wiązka neutrin**
- **Udział polskich fizyków (w tym z IF UŚ) w badaniach neutrin: eksperymenty T2K i ICARUS T600**
- **Podsumowanie**

# Tajemnice neutron – początek (1930)

**Neutrino „wymyślił”  
W.Pauli aby uratować  
zasadę zachowania  
energii w rozpadzie  $\beta$ :**

*„Dzisiaj zrobiłem coś czego nikt  
nigdy nie powinien robić w fizyce  
teoretycznej: Wyjaśniłem coś co  
było niezrozumiałe przy pomocy  
czegoś co nigdy nie uda się  
zaobserwować .....*”

*“Today I did something which one  
should never do in theoretical  
physics: I explained something  
which is not understood with the  
help of something which cannot  
be observed .....*”

**Wolfgang Pauli, 1930**

*Original: Pflanzmann auf 1930 0373  
Abschrift/15.12.56 PW*

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen..

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Bleriastrasse

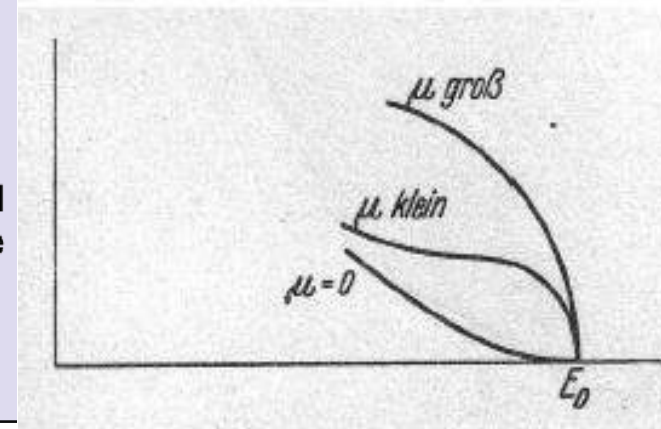
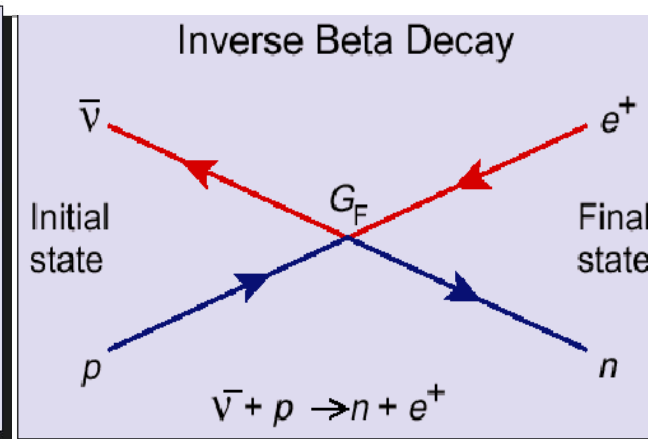
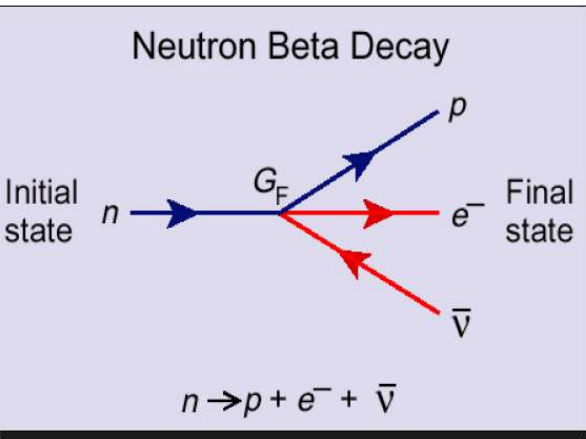
Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich kuldvollst  
anzuhören bitte, Ihnen das näherem auseinandersetzen wird, bin ich  
angeichts der "falschen" Statistik der  $\beta$ - und  $\text{Li-6}$  Kerne, sowie  
des kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselstab" (1) der Statistik und den Energiesatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
würde von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.. Das kontinuierliche  
 $\beta$ -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
 $\beta$ -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
würde, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

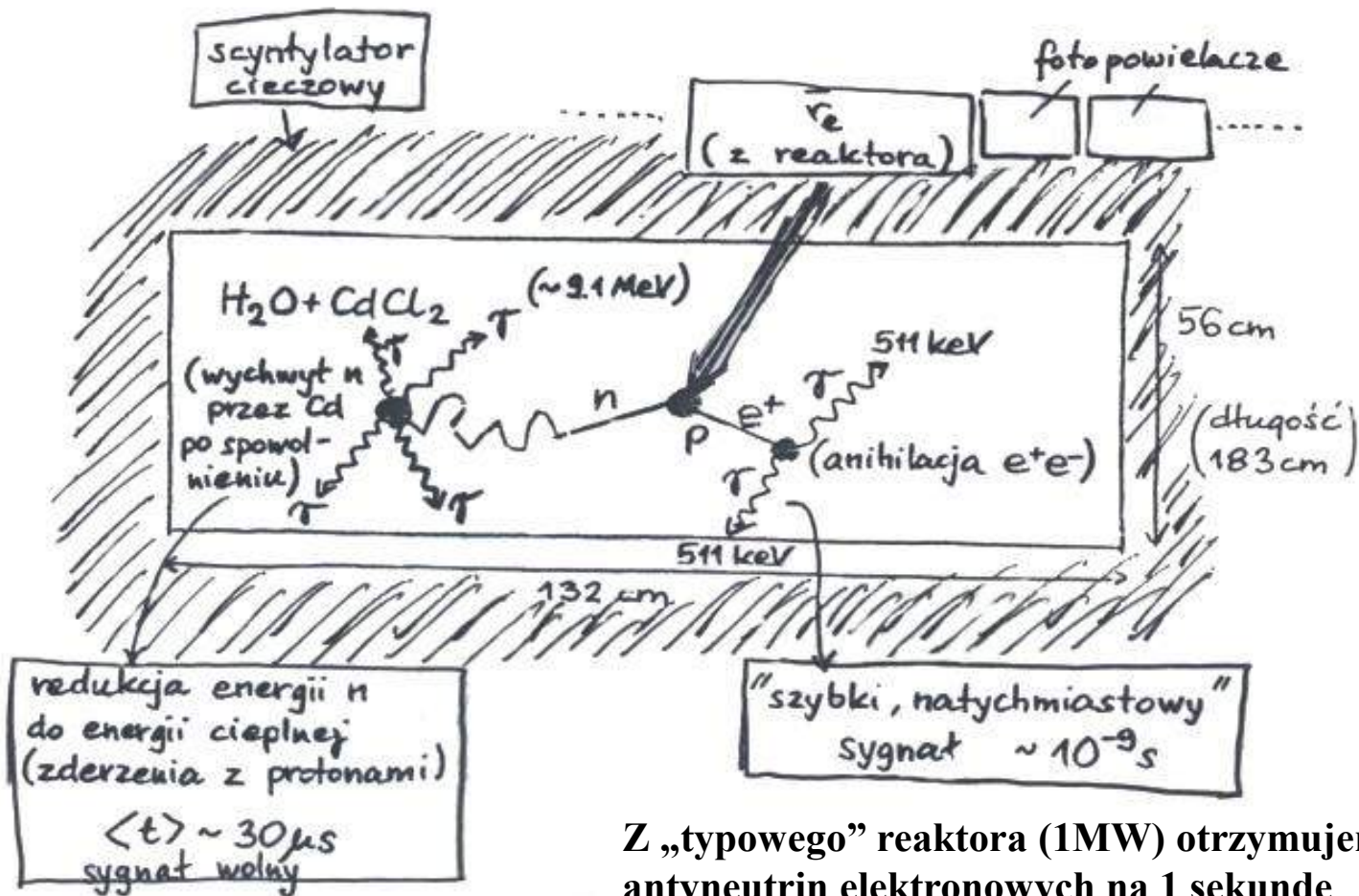
# E.Fermi – pierwsza teoria neutrin (1934)

E.Fermi – Tentativo di una teoria dei raggi beta, Nuovo Cim. 11 (1934) 1-19,  
E.Fermi - Versuch einer Theorie der beta-strahlen.I., Z. Phys. 88 (1934) 161-117,  
(rejected by Nature)

- Punktowe oddziaływanie czterech cząstek o spinie  $\frac{1}{2}$
- Funkcje falowe cząstek – spinory spełniające równanie Diraca
- Teoria relatywistyczna
- Konieczność wyznaczenia w eksperymencie tylko jednej stałej GF
- Możliwość wyznaczenia masy neutrina z widma energetycznego elektronów



# Odkrycie neutrino, ... czyli Pauli się mylił



Z „typowego” reaktora (1MW) otrzymujemy ok.  $10^{20}$  antyneutrino elektronowych na 1 sekundę

Obserwacja neutrino elektronowego (z reaktora atomowego), ok. 3 przypadki/godzinę,

F.Reines i C.L.Cowan, 1956. (F.Reines nagroda Nobla 1995),

[L.M.Lederman, M.Schwartz, J.Steinberger Nagroda Nobla 1988, odkrycie neutrino mionowego]

# B.Pontecorvo - pomysł oscylacji neutrin (1957)

- Pierwszy wysunął hipotezę oscylacji neutrin – analogia do oscylacji kaonów. Oscylacja neutrin – antyneutrino. W 1957 znano tylko jeden rodzaj neutrin.
- Hipoteza oscylacji dwóch zapachów neutrin (1968). Oscylacje neutrin słonecznych – deficyt neutrin elektronowych, 3 lata przed pierwszymi wynikami Davisa.
- Z.Maki, M.Nakagawa i S.Sakata (1962) – mieszanie dwóch zapachów neutrin.
- Y.Gribov and B.Pontecorvo (1969) – pierwsza fenomenologiczna teoria mieszania dwóch zapachów neutrin.

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( \frac{1.27 \times \Delta m^2 [eV^2] \times L [km]}{E_\nu [GeV]} \right)$$

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix}$$



Nie zależy od:

Zależy od  $L/E_\nu$  :

→ znaku  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$

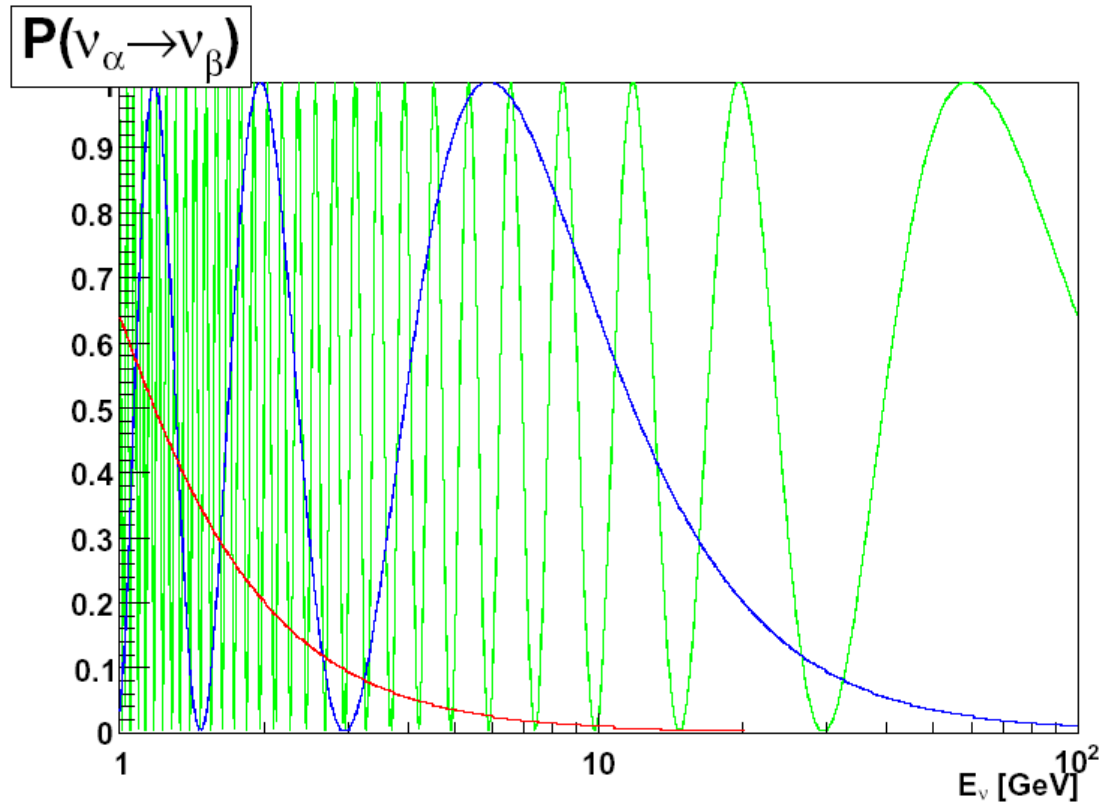
$L$  – tzw. baza, odległość źródło neutrin - detektor

→  $\theta \leftrightarrow \frac{\pi}{2} - \theta$

$E_\nu$  – energia wiązki neutrin

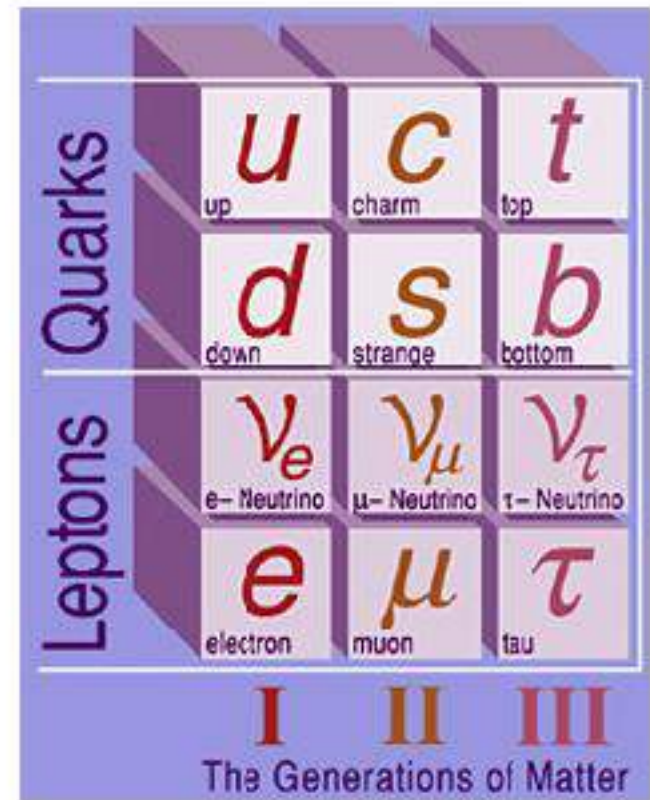
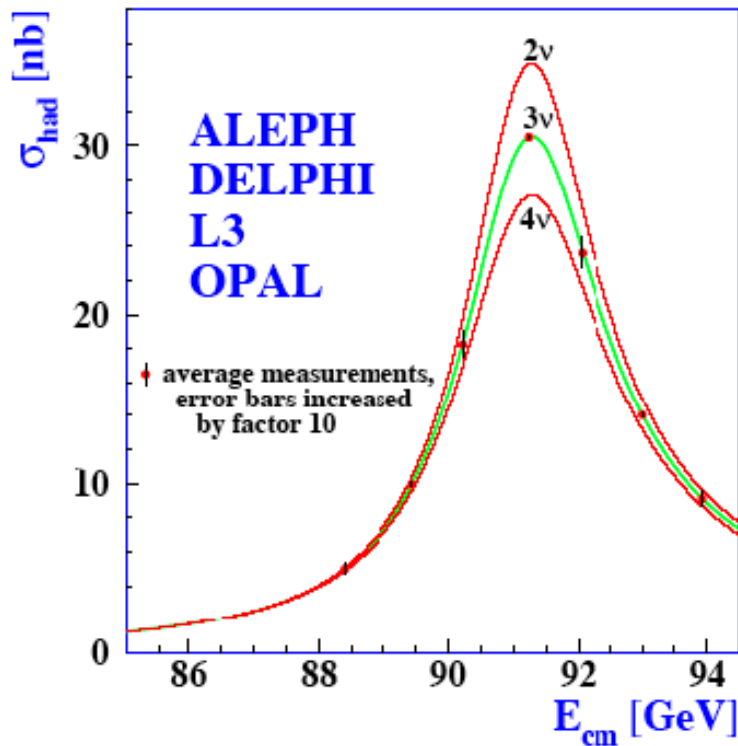
(warunki eksperymentu)

# Oscylacje neutrin: 2 zapachy w próżni, przykład



$$L = 732\text{km}, \theta = 45^0: \Delta m^2 = 10^{-3} \quad 10^{-2} \quad 10^{-1} \text{ eV}^2$$

# Obecnie znamy 3 rodzaje (zapachy) neutrin



- neutrina nie posiadają ładunku elektrycznego,
- masa neutrin jest bardzo mała, ale nie wiemy jaka, chociaż wiemy że jest „niezerowa”.



# Neutrino wokół nas: wszędzie i ... dużo

## Naturalne źródła neutrin:

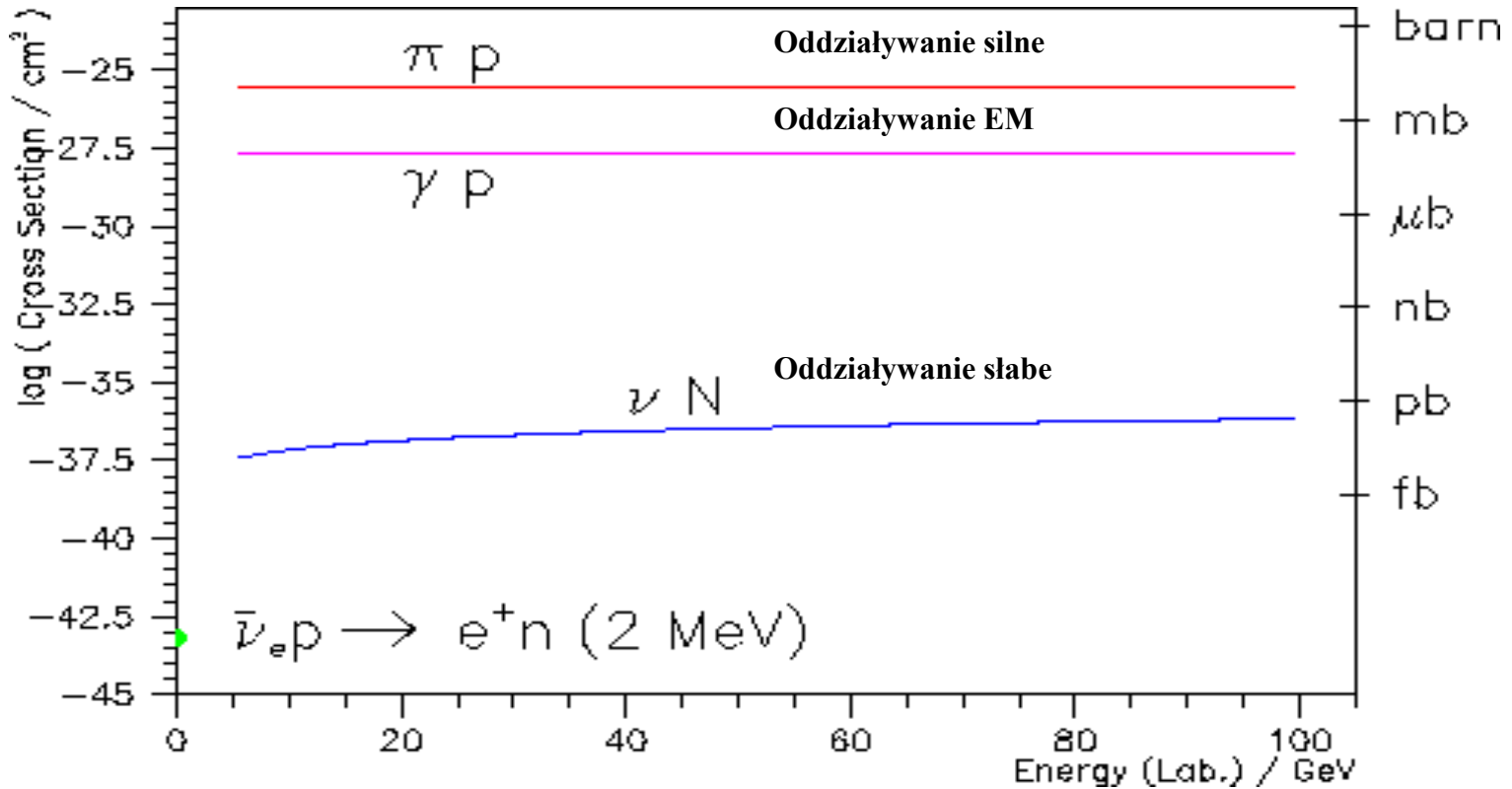
- Neutrino ze Słońca (**neutrino słoneczne**), ok.  $10^{11}/\text{cm}^2/\text{s}$  na Ziemi.
- Neutrino z atmosfery (**neutrino atmosferyczne**),
- Neutrino z wnętrza Ziemi (**geo-neutrino**),
- **Neutrino z wybuchu Supernowej**, Supernova 1987A wyemitowała w ciągu 20s wybuchu 100 razy więcej neutrin niż Słońce wyprodukuje w ciągu całego swojego życia,
- Neutrino jako pozostałość po Wielkim Wybuchu (**neutrino reliktowe**), ok. 330 w  $\text{cm}^3$ .
- Wszystko (także my) co zawiera potas  $^{40}\text{K}$ , który rozpada się z emisją neutrin. (Przeciętny człowiek zawiera w sobie ok. 20 miligramów  $^{40}\text{K}$ , zatem każdy z nas emituje ok. 340 milionów neutrin w ciągu dnia).

## Sztuczne źródła neutrin:

- Neutrino z elektrowni atomowych (**neutrino reaktorowe**), ok.  $10^{20}/\text{s}$  dla „typowego” reaktora (1MW).
- **Neutrino z wiązki neutrin**: CERN – wiązka do Gran Sasso we Włoszech, Japonia – wiązka z JPARC do Kamioka, USA – wiązka z Fermilab do Soudan.

**ale ... bardzo trudno je „zaobserwować”, ponieważ bardzo niechętnie oddziałują z materią**

# Neutrino niechętnie oddziałują z materią



**Przekrój czynny, czyli miara prawdopodobieństwa oddziaływania różnych cząstek z materią**

*Neutrino wyprodukowane w Słońcu przebędzie w wodzie drogę (średnio!) ok. 53 lat świetlnych zanim znajdzie oddziaływanie, a dla pozytonu o takiej energii droga ta wynosi ... 3cm.*

# Co trzeba zrobić aby jednak złapać neutrino?

1. Zbudować bardzo duży (olbrzymi!) detektor, aby neutrino miało jednak szansę oddziaływania z materią.
2. Być cierpliwym, czyli mierzyć wystarczająco długo.
3. Mierzyć głęboko pod Ziemią (np. w kopalni lub we wnętrzu góry) aby nie dać możliwości oddziaływania innym cząstkom (chętniej oddziałującym z materią) stłumienia oddziaływań neutrin.

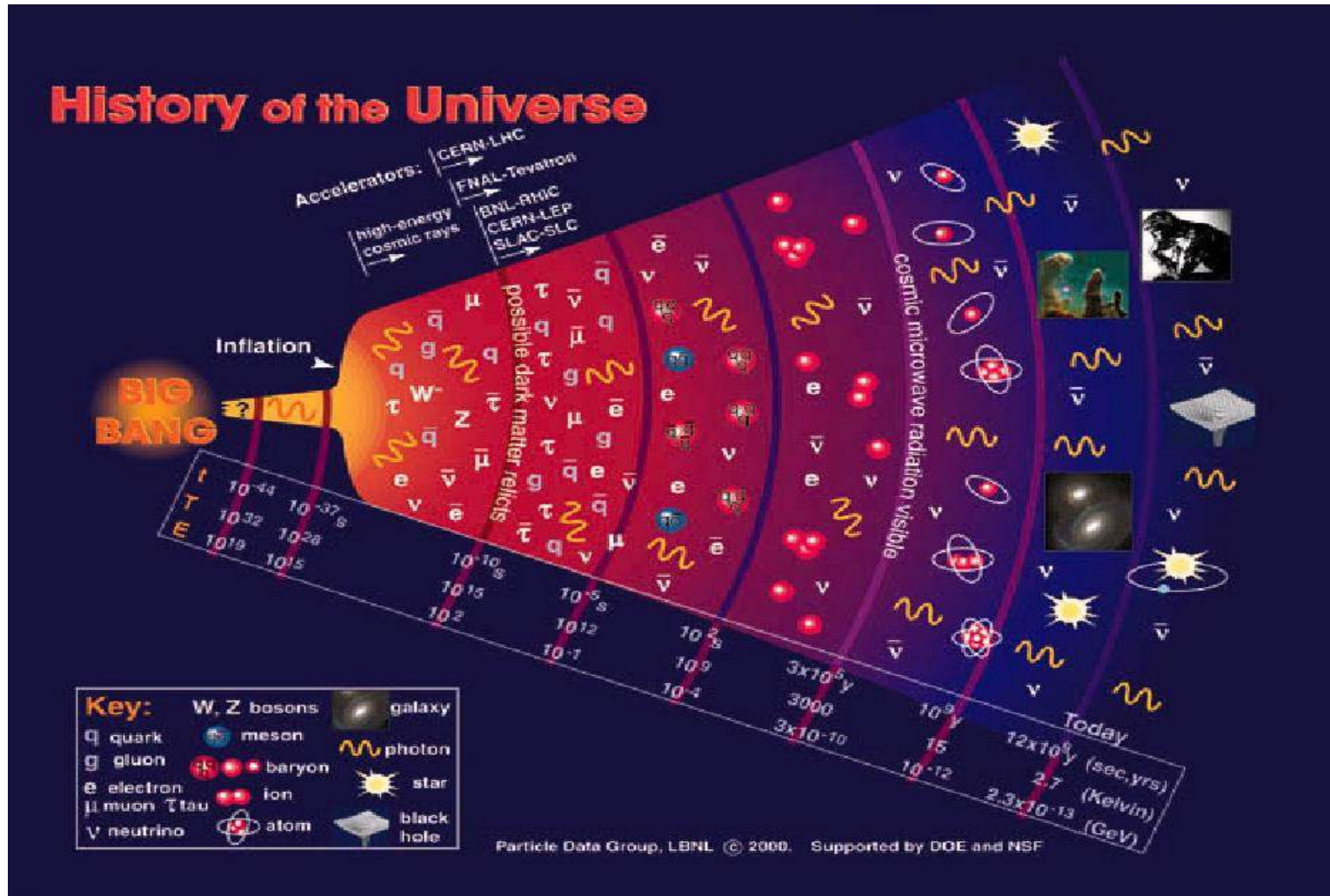
**ale ... czy warto tak się trudzić, aby złapać coś czego jest bardzo dużo, ale tak naprawdę ... „nic nie robi”**

**może lepiej uważać, że: nie ma ładunku, nie ma masy (prawie!), czyli nie ma problemu**

# Tak, warto badać neutrina bo ...

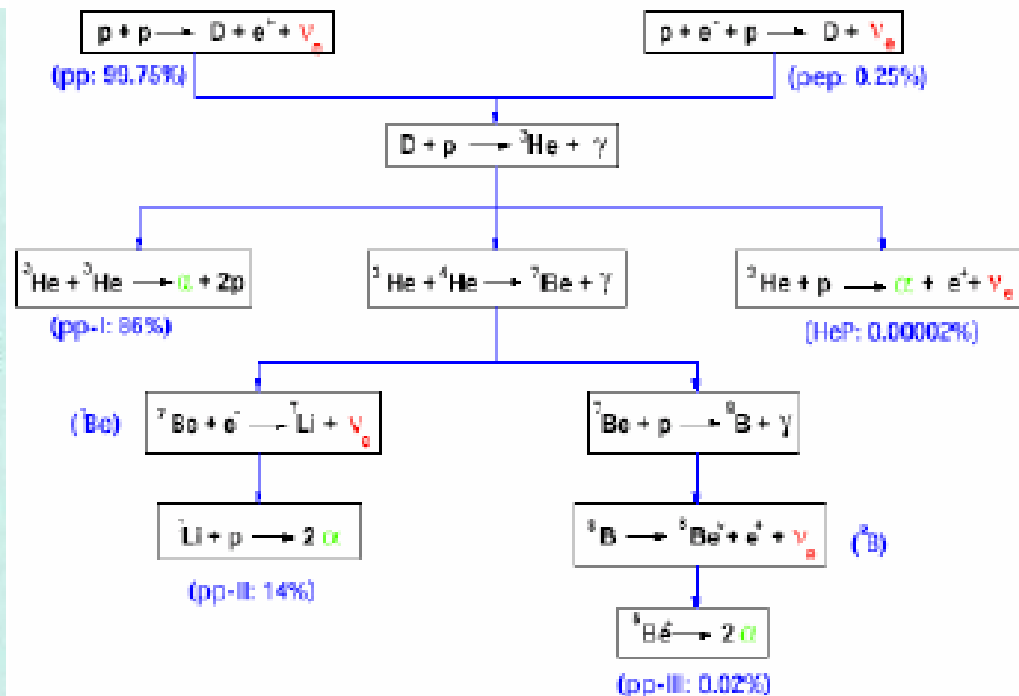
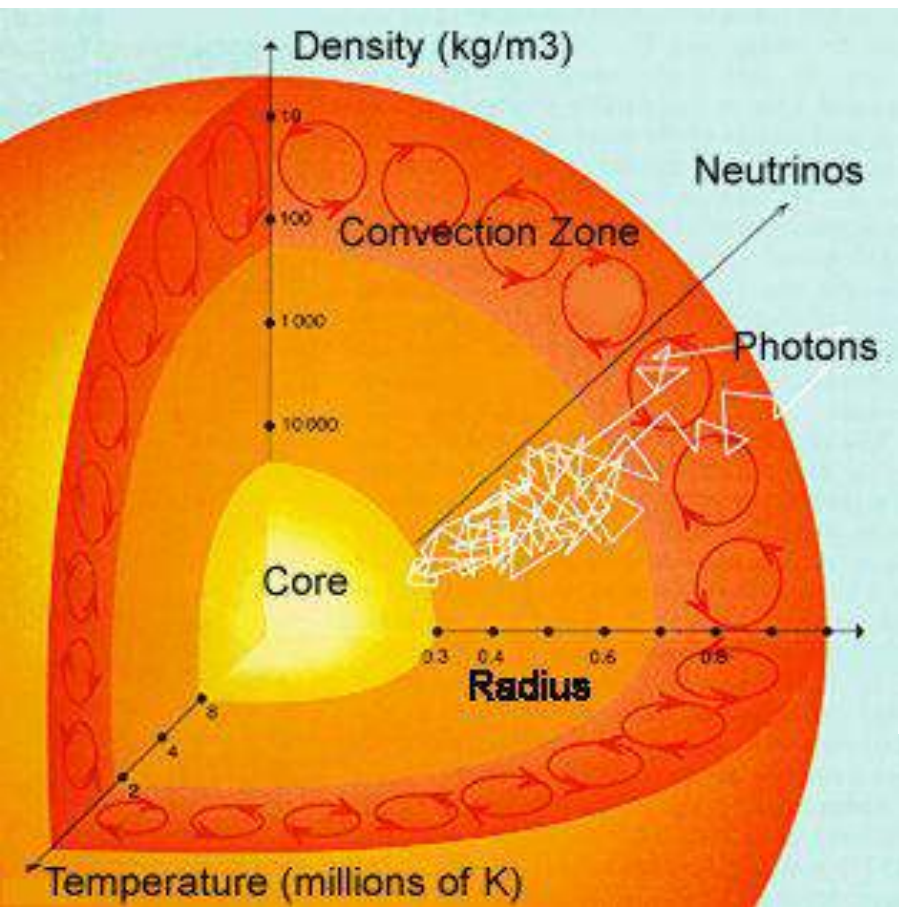
- **Neutrino są we Wszechświecie i jest ich bardzo dużo.**
- **Niosą „niezakłóconą” informację o Wielkim Wybuchu.**
- **Niosą bezpośrednią informację o wnętrzu gwiazd (Słońca), o Supernowych.**
- **Pozwalają na weryfikację modeli oddziaływań elementarnych (Model Standardowy).**
- **Nie znamy ich wszystkich właściwości: masa, natura (cząstka Majorany/Diraca),...**
- **...**

# Wszechświat: rozwój po Wielkim Wybuchu



W Wielkim Wybuchu powstało ok. 330 neutronów na  $\text{cm}^3$ , we Wszechświecie jest więcej neutronów niż protonów, neutrony niosą bardzo ważną informację o historii Wszechświata.

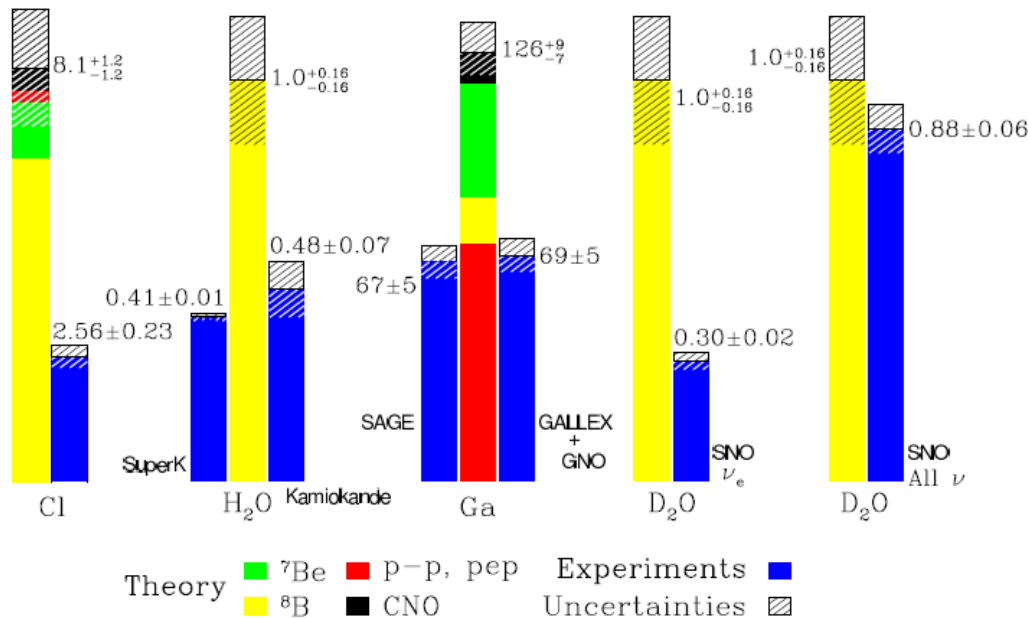
# Reakcje termojądrowe w Słońcu jako źródło energii i ... neutron „słonecznych”



Foton wyprodukowany we wnętrzu Słońca potrzebuje ok. 100000 lat aby dotrzeć na jego powierzchnię, a neutrino tylko 2 sekundy.

# Deficyt neutrin słonecznych i wyjaśnienie przez oscylacje neutrin

Total Rates: Standard Model vs. Experiment  
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]

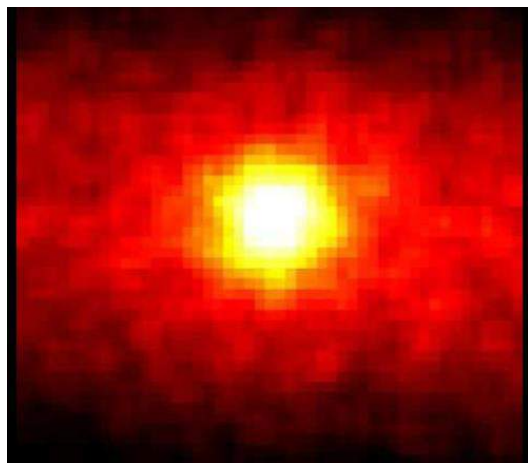


- Eksperyment SNO obserwował neutrina **wszystkich** zapachów, a nie **jedynie**  $\nu_e$ .
- Tylko neutrina elektronowe są produkowane w Słońcu i dlatego oscylacja (czyli „zmiana”)  $\nu_e$  na inne zapachy neutrin pozwala wyjaśnić deficyt neutrin słonecznych.
- Parametry oscylacji:  
 $\theta_{12} \approx 34^\circ$ ,  
 $\Delta m_{21}^2 \approx 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$

[SNU (Solar Neutrino Units): 1 SNU = 1 oddziaływanie / (10<sup>36</sup> atomów tarczy / 1s)]

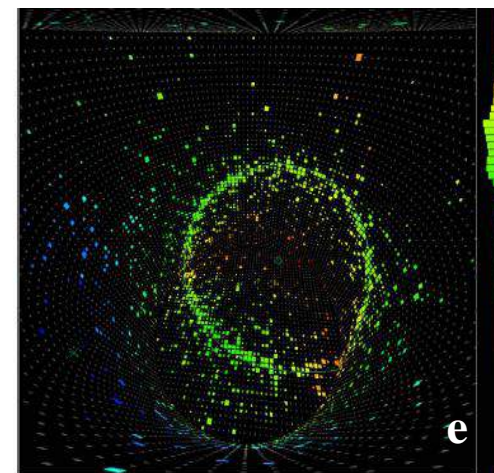
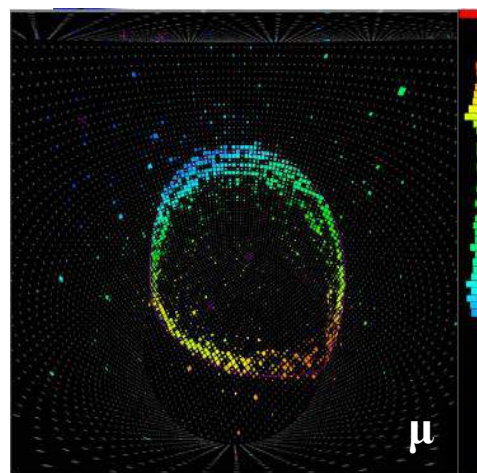
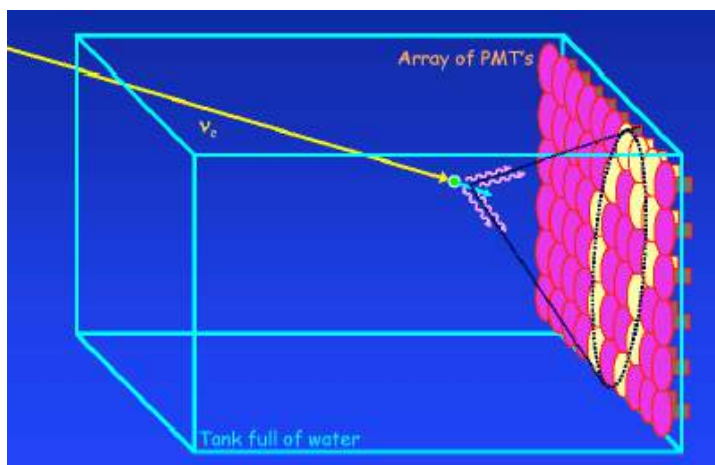
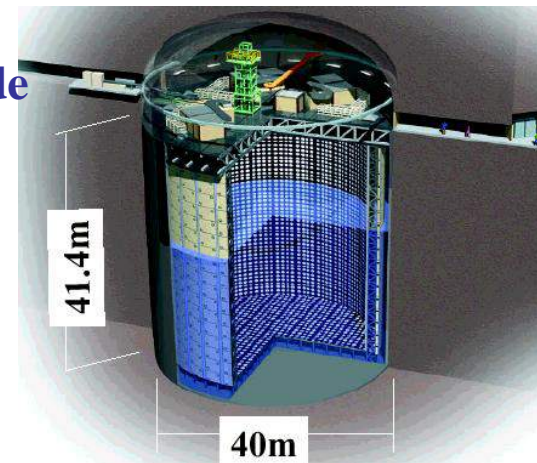


# Fotografia Słońca w promieniach neutrin



## Eksperyment Super-Kamiokande

- 50000 ton ultra czystej wody,
- ok. 1000m „pod Ziemią”,
- detekcja promieniowania Czerenkowa,
- ponad 5000 fotopowielaczy,
- pomiar kierunku neutrin



**Pierścienie promieniowania Czerenkowa: schematycznie i widziane przez fotopowielacze SK**

PTF Katowice, 20.05.2015



# Neutrino z wybuchu supernowej 1987A

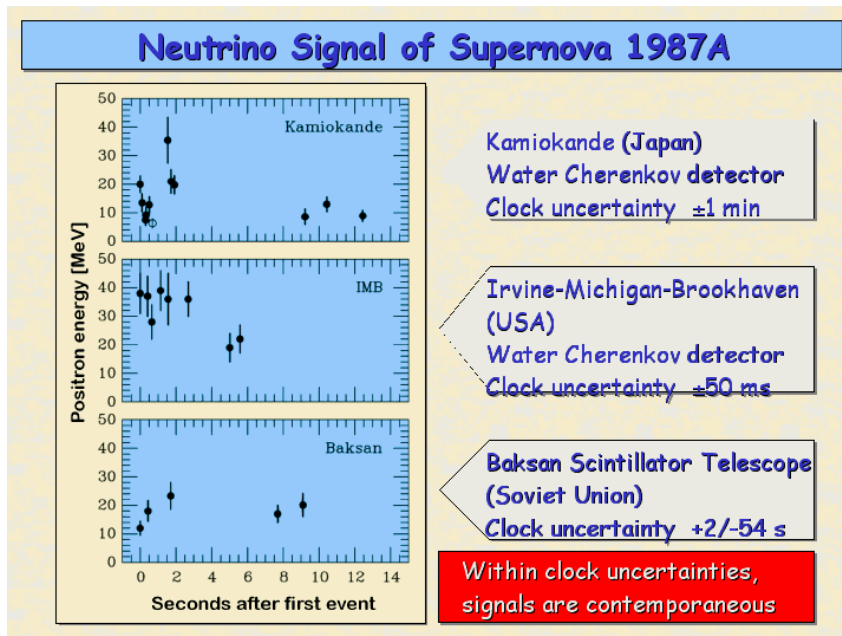


## Supernova 1987A:

- wybuch 23.02.1987,
- w Wielkim Obłoku Magellana, w odległości 50 kpc (170000 lat świetlnych) od Ziemi,
- neutrino unoszą prawie całą energię wybuchu Supernowej (ok.  $10^{53}$  erg w ciągu 20s),
- neutrino przybyły na Ziemię ok. 4 godziny wcześniej niż światło (alert neutrinowy dla innych obserwacji!),
- obserwacja 24 przypadków oddziaływania neutrin w trzech detektorach (Kamiokande/Japonia , IMB/USA i Baksan/ZSRR).

## Czego się dowiedzieliśmy?

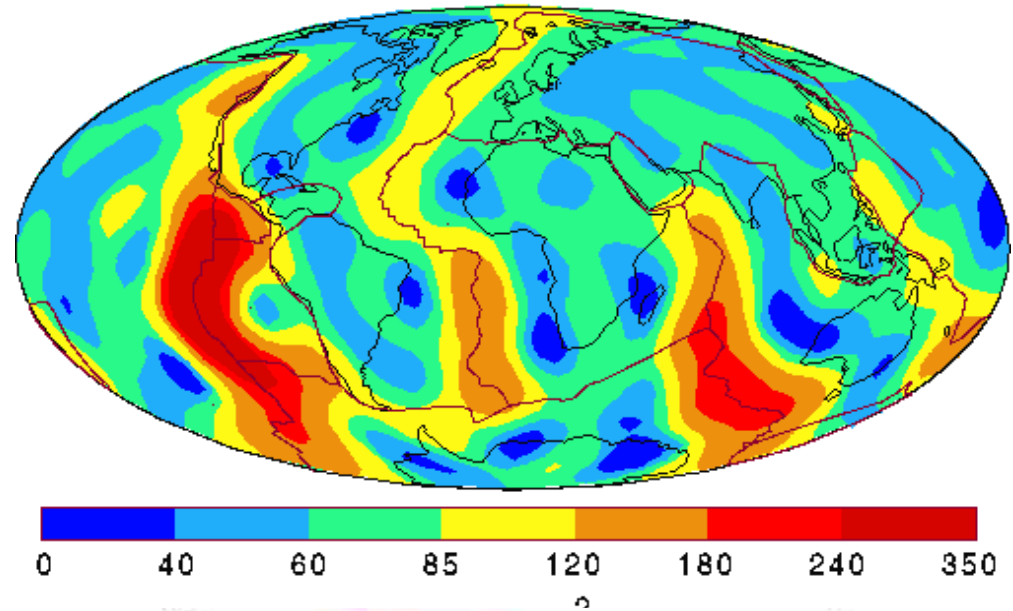
- własności neutrin, np. masa  $< 11\text{eV}$ ,
- weryfikacja modeli ewolucji gwiazd



# Geoneutrina

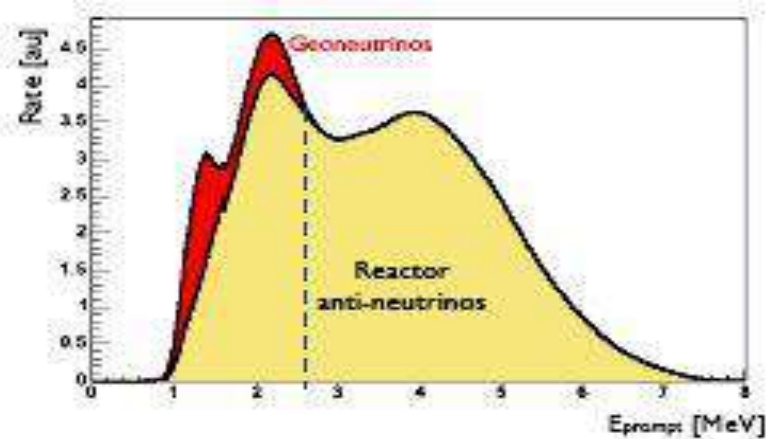
- Całkowita moc emitowana przez Ziemię to ok. 31TW, średnio ok. 90 mW/m<sup>2</sup>
- ok. 16 TW pochodzi z rozpadów <sup>238</sup>U i <sup>232</sup>Th, które prowadzą do emisji antyneutrino elektronowych

Heat Flow

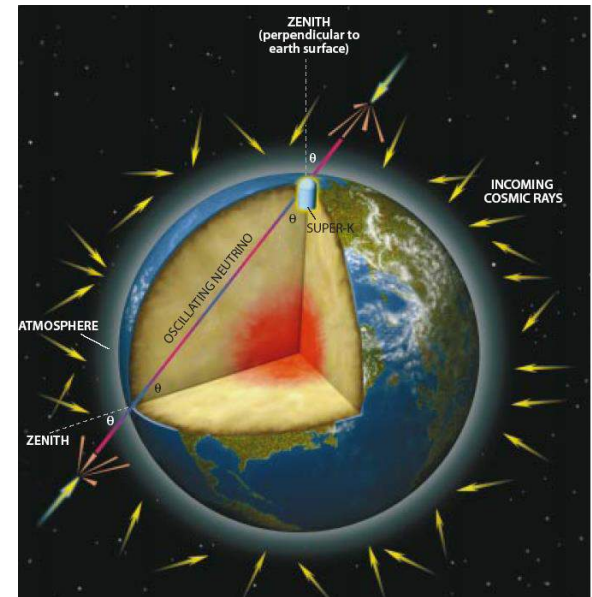
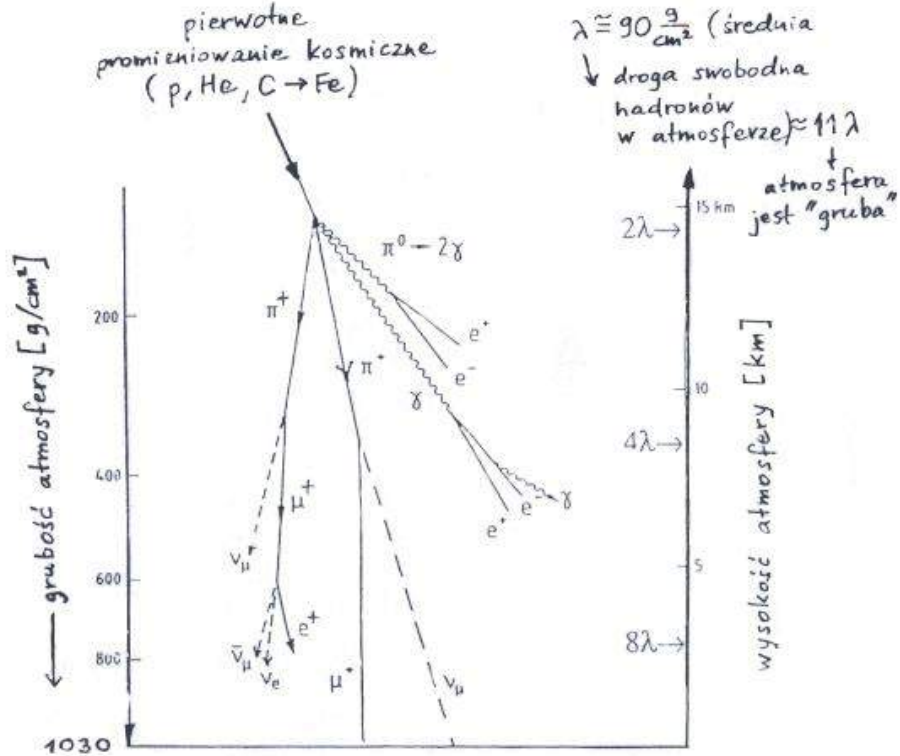


**Pierwszy pomiar geoneutrino (2005):**  
eksperyment KAMLAND/Japonia (1000 ton ciekłego scyntylatora):

- wyznaczenie górnej granicy dla całkowitej mocy (z rozpadów uranu i toru) emitowanej przez Ziemię: < 60 TW,
- b. duże tło neutrin reaktorowych.

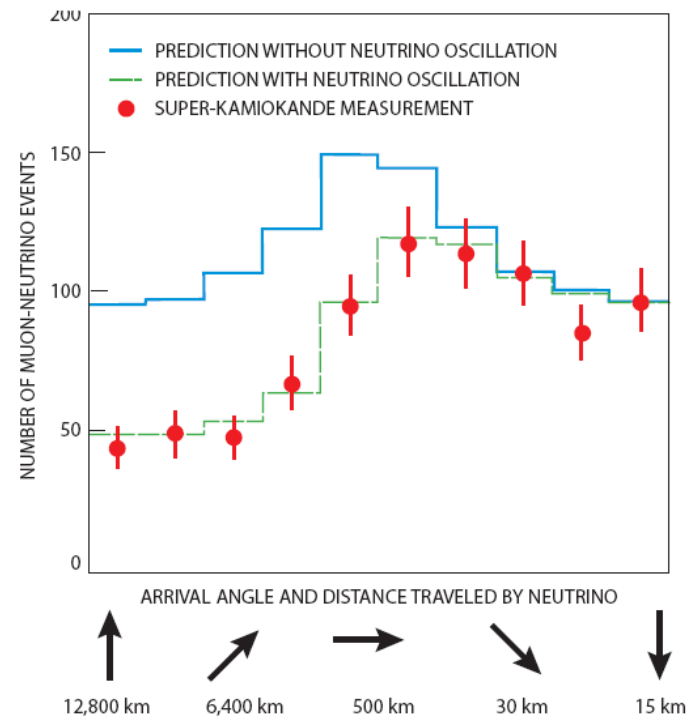


# Neutrina atmosferyczne



## Eksperyment Super-Kamiokande:

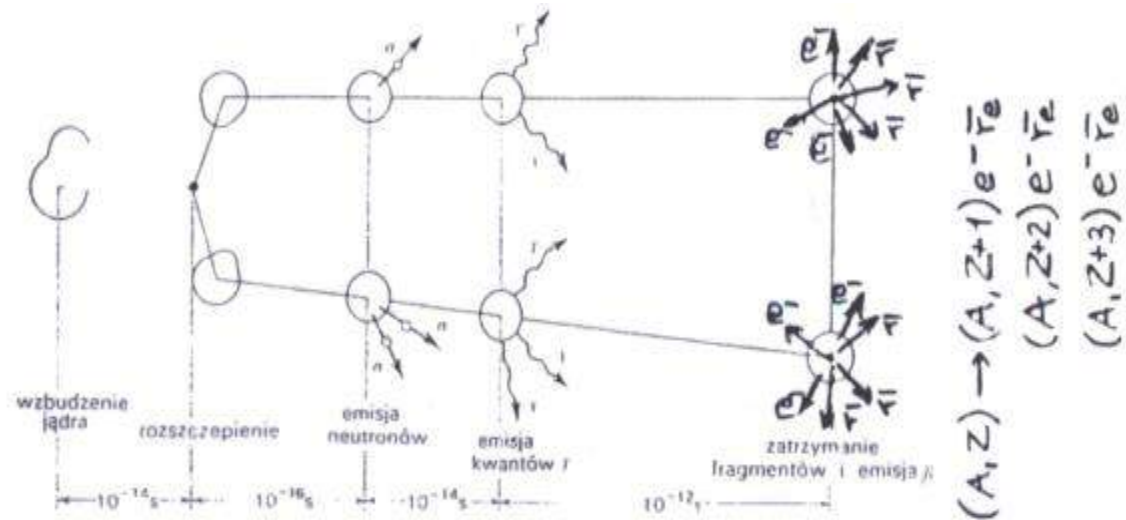
- detekcja neutrin elektronowych i mionowych
- potwierdzenie hipotezy oscylacji neutrin
- rozwiązanie zagadki „deficytu” atmosferycznych neutrin mionowych
- M.Koshiaba – nagroda Nobla, 2002 (wspólnie z R.Davisem)



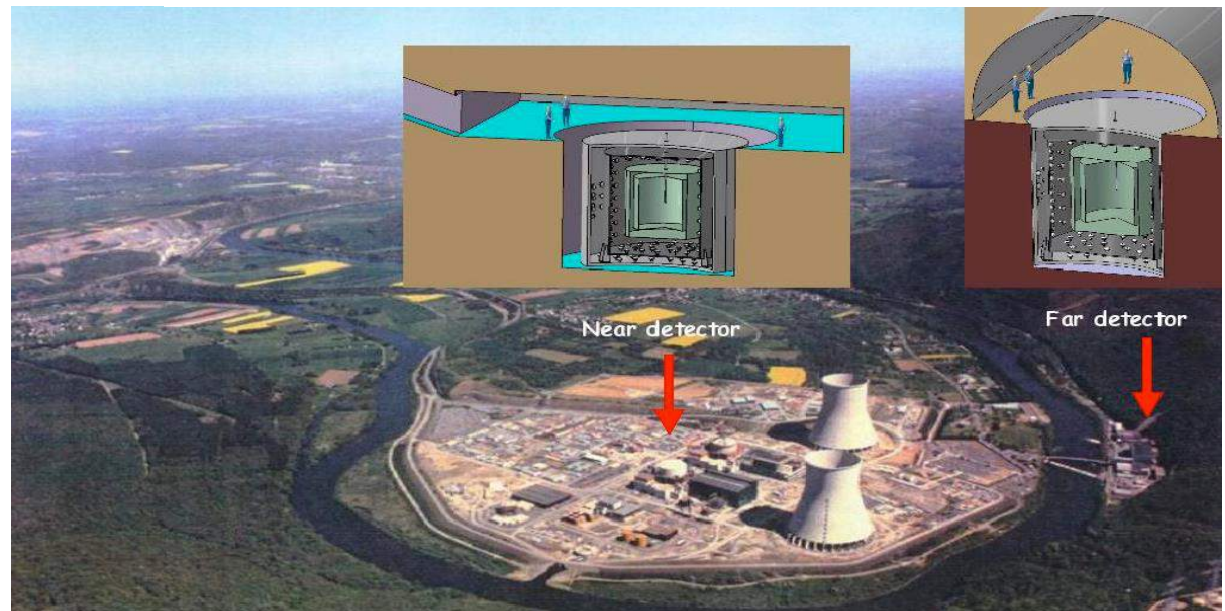


# Neutrina reaktorowe

- reaktor jądrowy jest intensywnym źródłem antyenuclrin elektronowych
- w jednym procesie rozszczepienia powstaje ok. 6 neutrin
- dla typowego reaktora o mocy 1000 MW daje to strumień neutrin ok.  $2 \times 10^{20}$  na sekundę



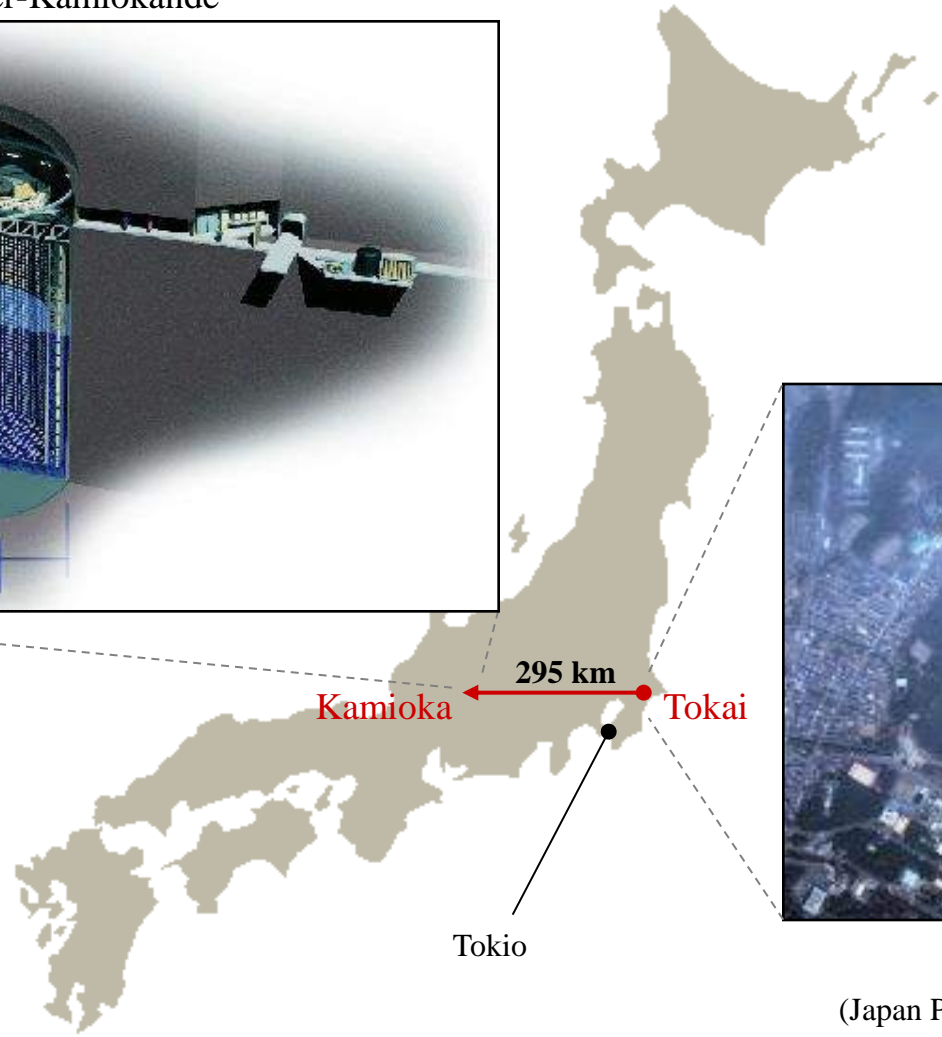
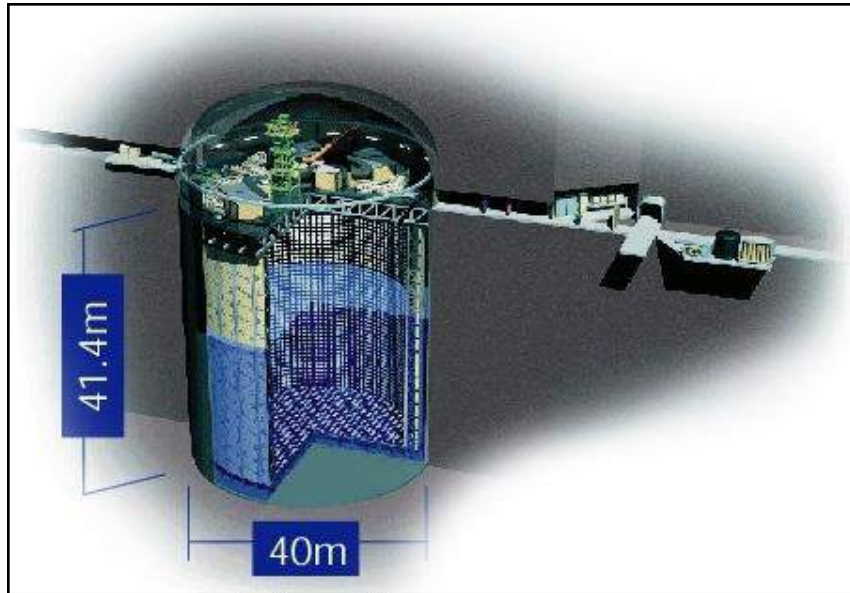
2 detektory eksperymentu Double Chooz w Ardenach we Francji



PTF Katowice, 20.05.2015

# T2K: eksperyment neutrinowy w Japonii

Super-Kamiokande

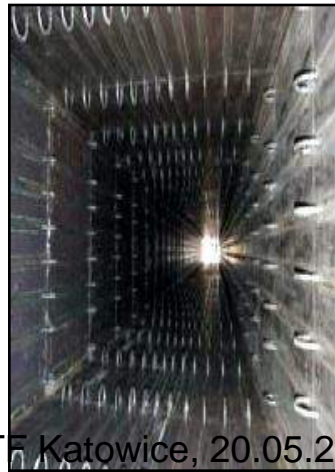
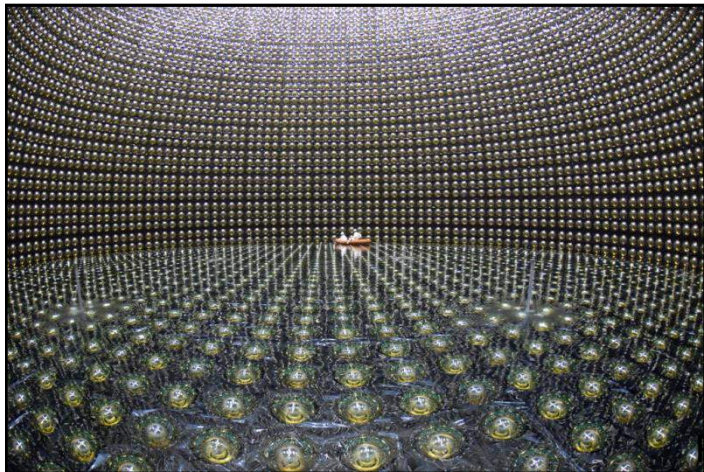
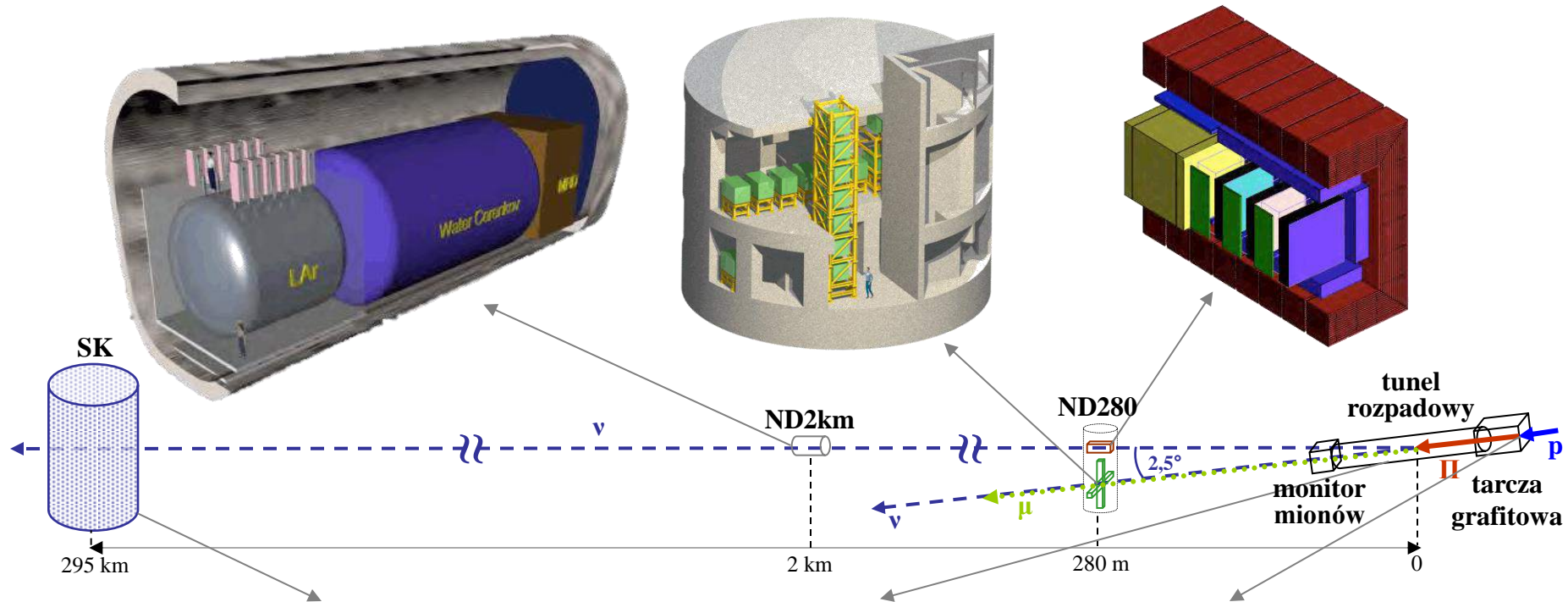


J-PARC

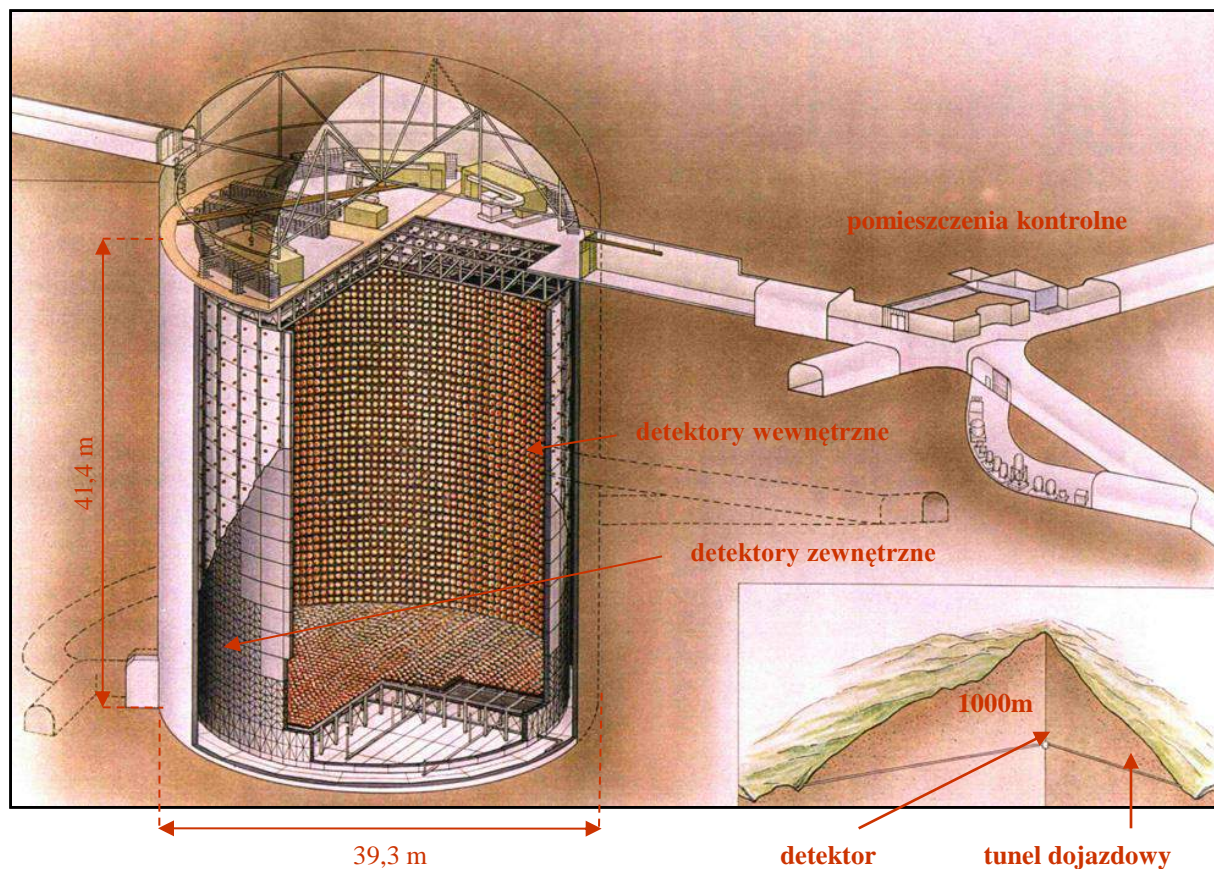
(Japan Proton Accelerator Research Complex)



# T2K: układ eksperymentalny



# Eksperyment T2K: detektor Superkamiokande



## Lokalizacja:

Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), University of Tokyo

## Położenie:

1000 m pod powierzchnią ziemi (ekwiwalent 2700 m wody),

## Wymiary:

średnica: 39,3 m,  
wysokość: 41,4 m,

## Układ detekcyjny:

50,000 ton czystej wody (część efektywna - 22,500 tony),  
11,146 detektorów wew. Ø 50 cm,  
1,885 detektorów zew. Ø 20 cm, (liczniki Czerenkowa)





11,146 - fotopowielaczy

5 200 po wypadku

Działanie fotopowielacza: (1) rejestracja impulsu światła,  
(2) zamiana impulsu świetlnego na sygnał elektryczny.

PTF Katowice, 20.05.2015



# **Eksperyment T2K: najważniejsze wyniki**

## **Wyniki dotyczące oscylacji neutrin:**

**Odkrycie oscylacji neutrin mionowych w neutrina elektronowe – obserwacja 11 przypadków: pierwszy pomiar kąta  $\theta_{13}$  mieszania neutrin**

**Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 041801,**

**liczba cytowań wg Web of Knowledge ~ 900.**

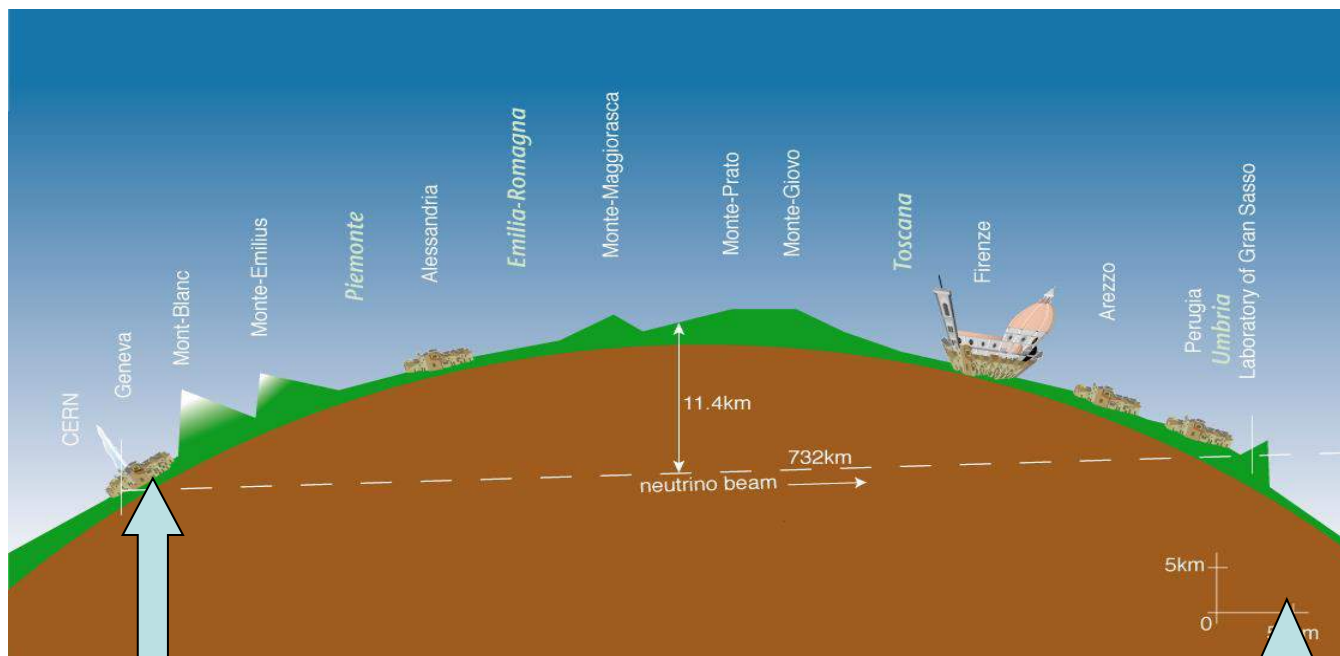
**(wynik T2K został potwierdzony w późniejszych eksperymentach z neutrinami reaktorowymi)**

**Pomiar „znikania” neutrin mionowych:**

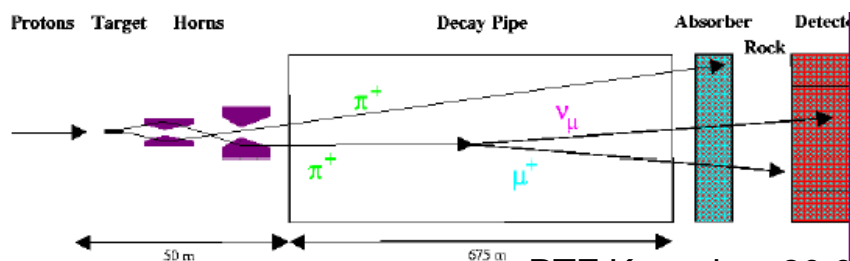
**precyzyjny pomiar parametrów oscylacji neutrin  $\theta_{23}$ ,  $\Delta m^2_{13}$**

**Phys. Rev. D 85 (2012) 031103(R)**

# Wiązka neutrin z CERN-u (Szwajcaria) do Gran Sasso (Włochy)



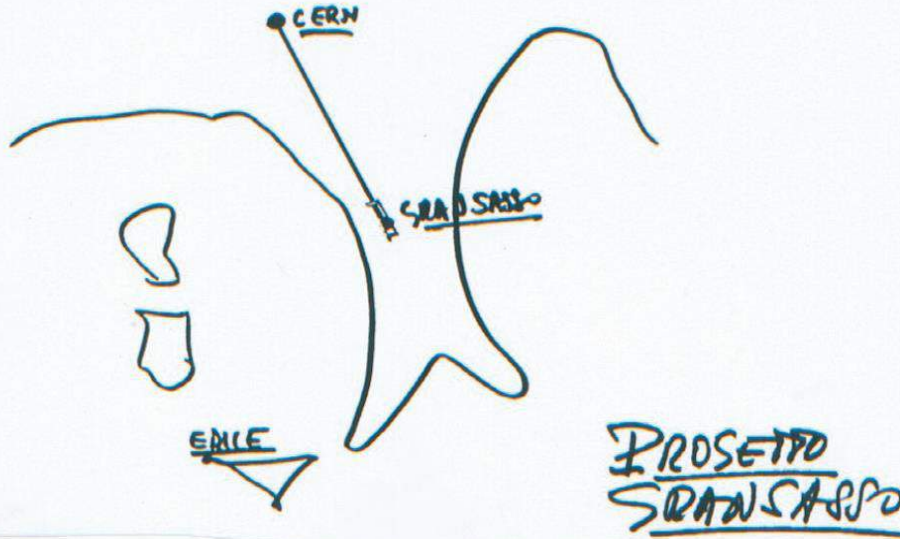
Produkcja neutrin w CERN-ie



Podziemne Laboratorium Fizyki  
w Gran Sasso: eksperymenty  
neutrinowe OPERA i ICARUS

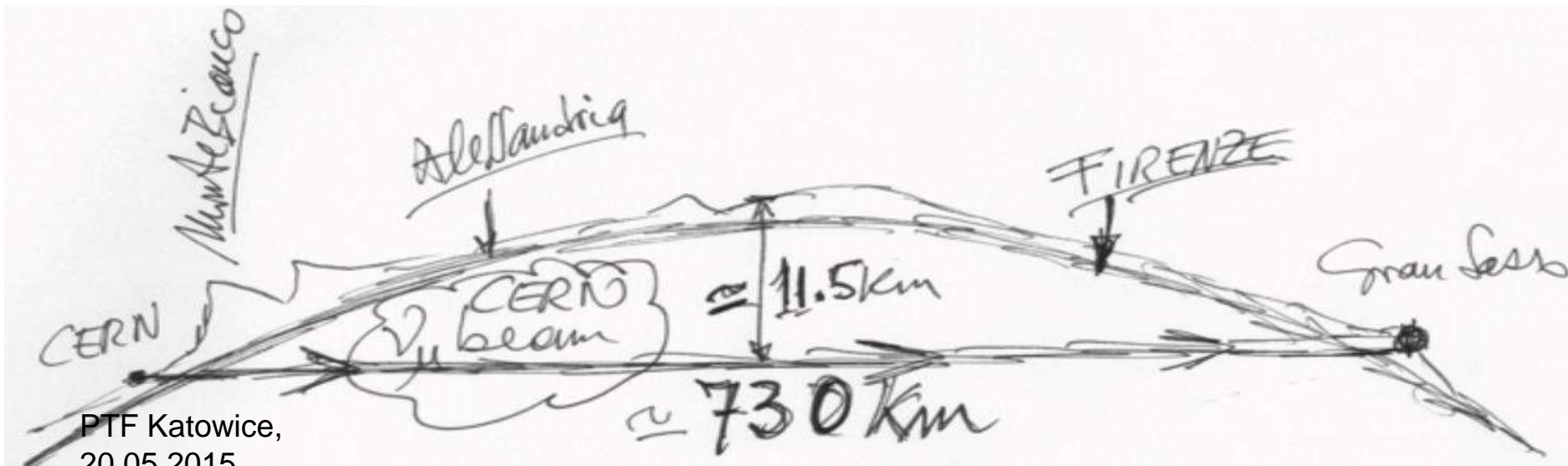
# A.Zichichi – podziemne lab. w Gran Sasso (1979)

CONDIZIONE E LAVORI PUBBLICI DEL SENATO



A.Zichichi – prezentacja dla Commission on Public Works of the Italian Senate (1979).

Uzyskał dziesięciokrotne zwiększenie pięcioletniego budżetu INFN (z 20 mld lirów do 200 mld lirów).

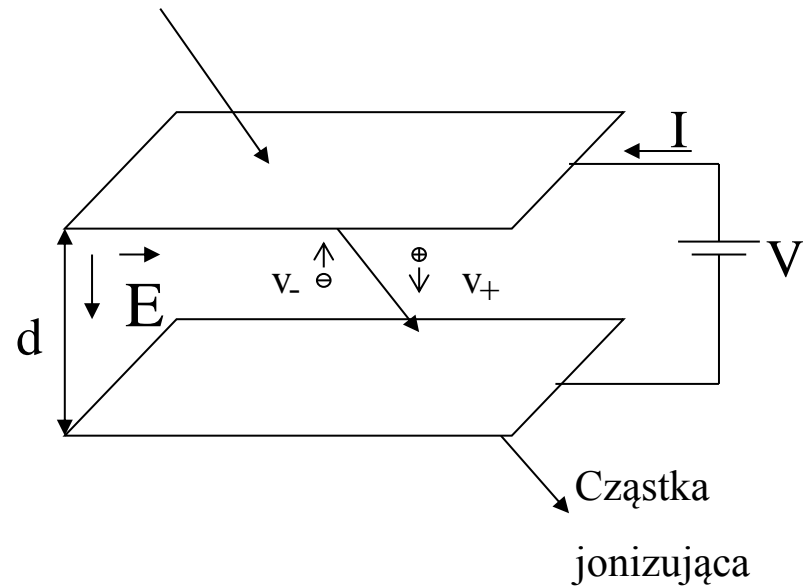
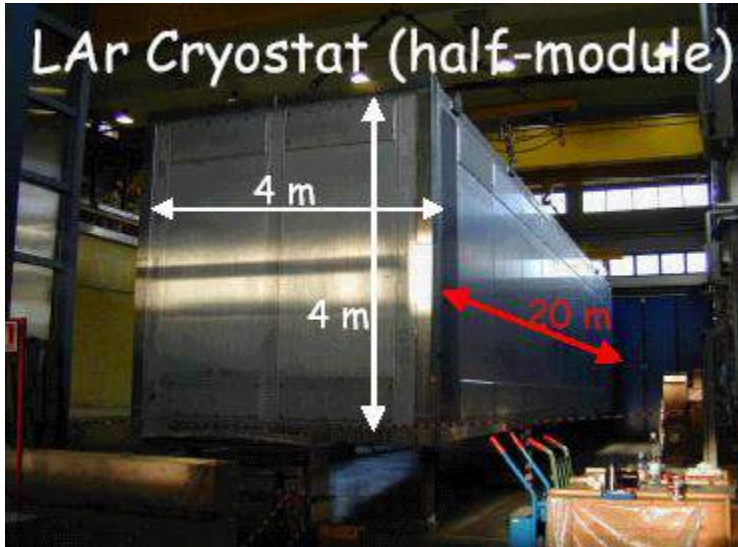


# LNGS – największe podziemne laboratorium fizyki

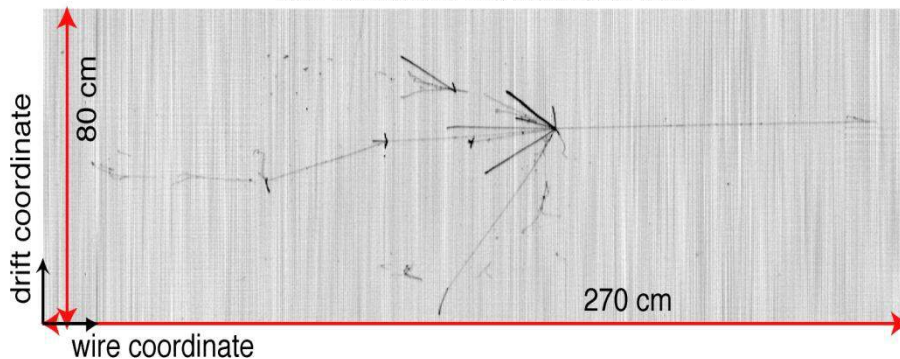




# Detektor ICARUS: zasada działania



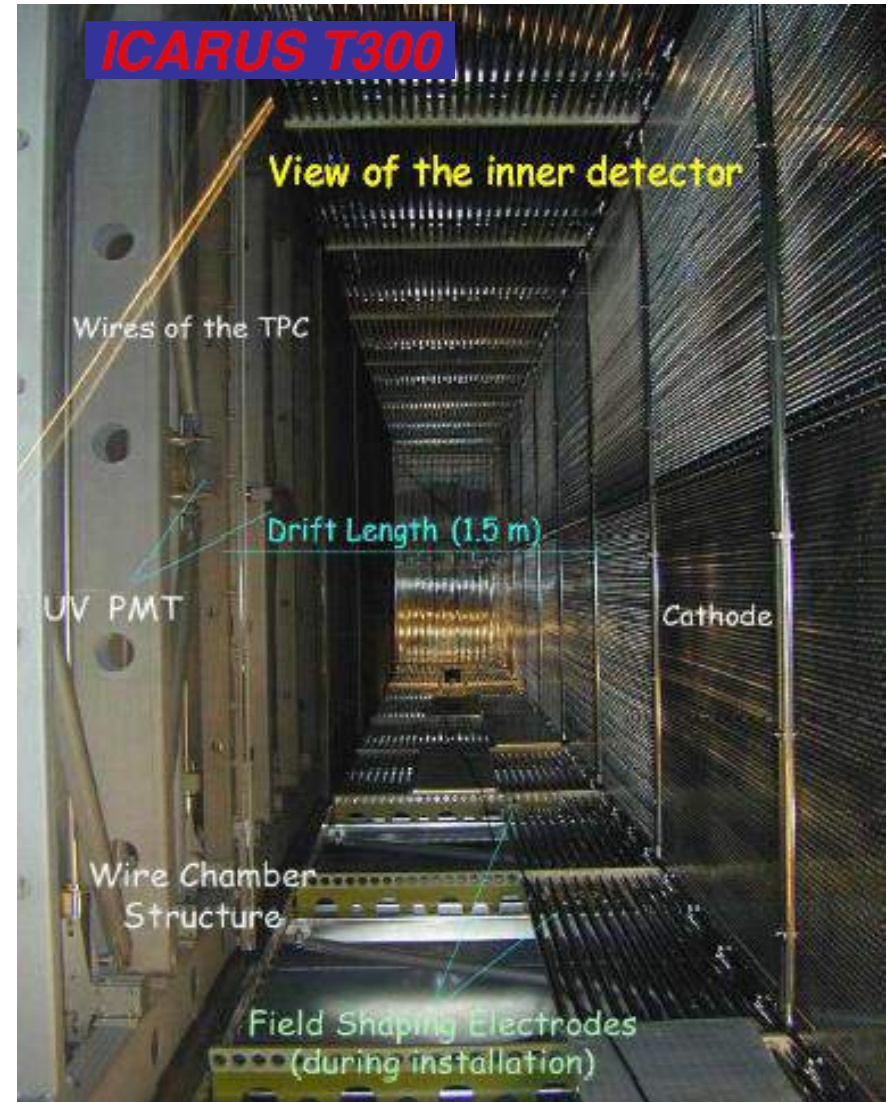
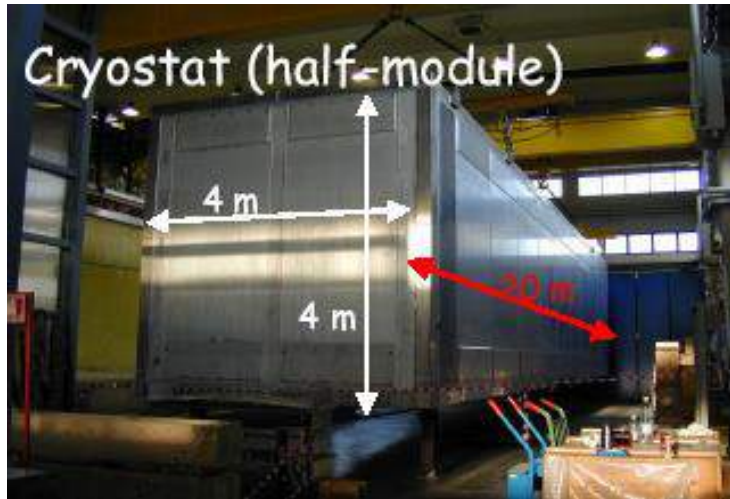
Run 308 Event 160 Collection view



## Detektor ICARUS – kilka liczb:

- 600 ton ciekłego argonu,
- pole elektryczne o napięciu: 75000V,
- szybkość dryfu elektronów: 1600m/s,
- ok. 54000 „kanałów” odczytu sygnału.

# Detektor ICARUS



# **Eksperyment ICARUS: najważniejsze wyniki**

## **Pomiar prędkości neutrin:**

$\delta t = t_{ofc} - t_{ofv} = 0.18 \pm 0.69$  (stat.)  $\pm 2.17$  (syst.) ns  
(wynik z pomiarów 2012);  $+0.3 \pm 4.9 \pm 9.0$  ns (wynik z pomiarów 2011)

$\delta t$  – różnica pomiędzy czasem „podróży” neutrin i czasem „podróży” światła na drodze 732 km (odległość CERN – Gran Sasso)

**Ograniczenie na istnienie tzw. neutrin sterylnych**

**Pierwszy pomiar oddziaływań neutrin w ciekłym argonie masywnego detektora pracującego w laboratorium podziemnym.**

# Zamiast podsumowania: problemy w fizyce neutrin

- **Masa neutrin**
- **Neutrino – cząstka Diraca, a może cząstka Majorany**
- **Określenie tzw. schematu masowego neutrin**
- **Łamanie symetrii CP w sektorze leptonowym**
- **....., a może jakaś niespodzianka .....**