

# Neutrino - takie lekkie, a takie ważne

Agnieszka Zalewska  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
im. H.Niewodniczańskiego

Colloquium w Toruniu, 19.01.2006

Średnio 3 prace dziennie ze słowem „neutrino”  
w tytule

Czym są neutrino i skąd się biorą?

Oscylacje neutrin

Ile waży neutrino?

Cząstka Diraca czy Majorany?

Związki z astronomią i astrofizyką

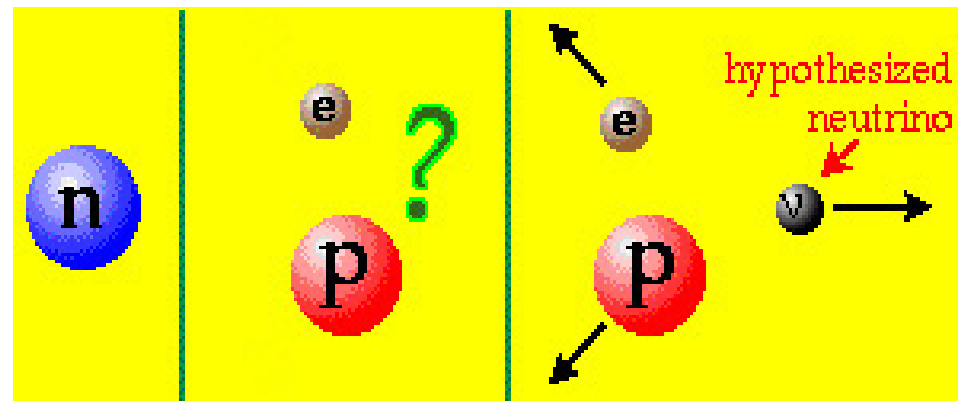
Neutrino w służbie geofizyki

A co w Polsce?

# Narodziny neutrina



1930 - Wolfgang Pauli postuluje istnienie nowej, neutralnej cząstki, aby ratować prawo zachowania energii i krętu w jądrowych rozpadach  $\beta$

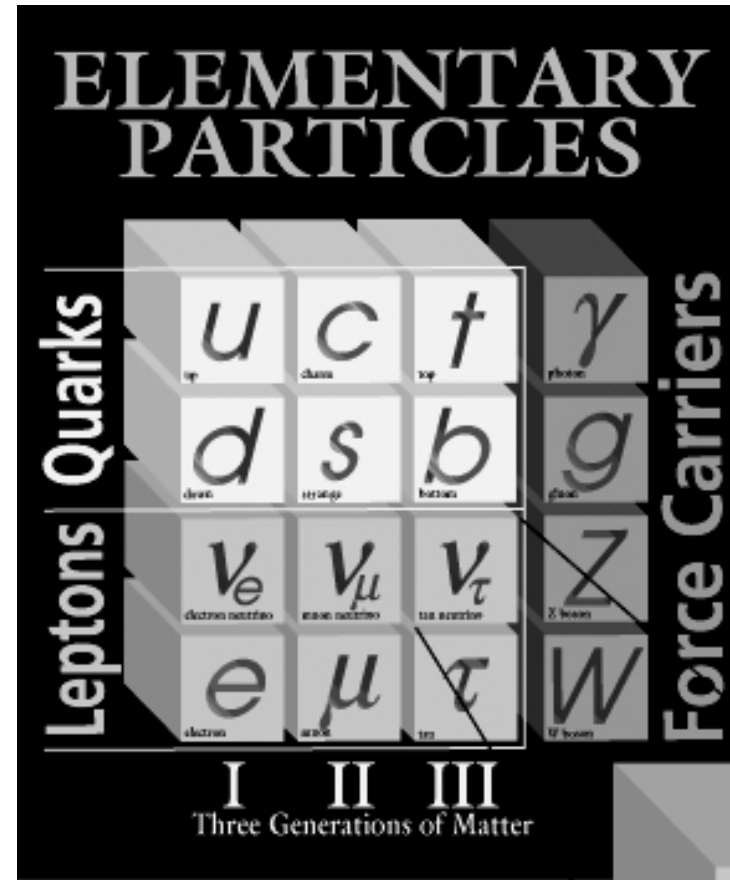


„Zrobiłem straszną rzecz. Zaproponowałem cząstkę, która nie może być wykryta. To jest coś, czego teoretyk nie powinien nigdy robić”  
Wolfgang Pauli

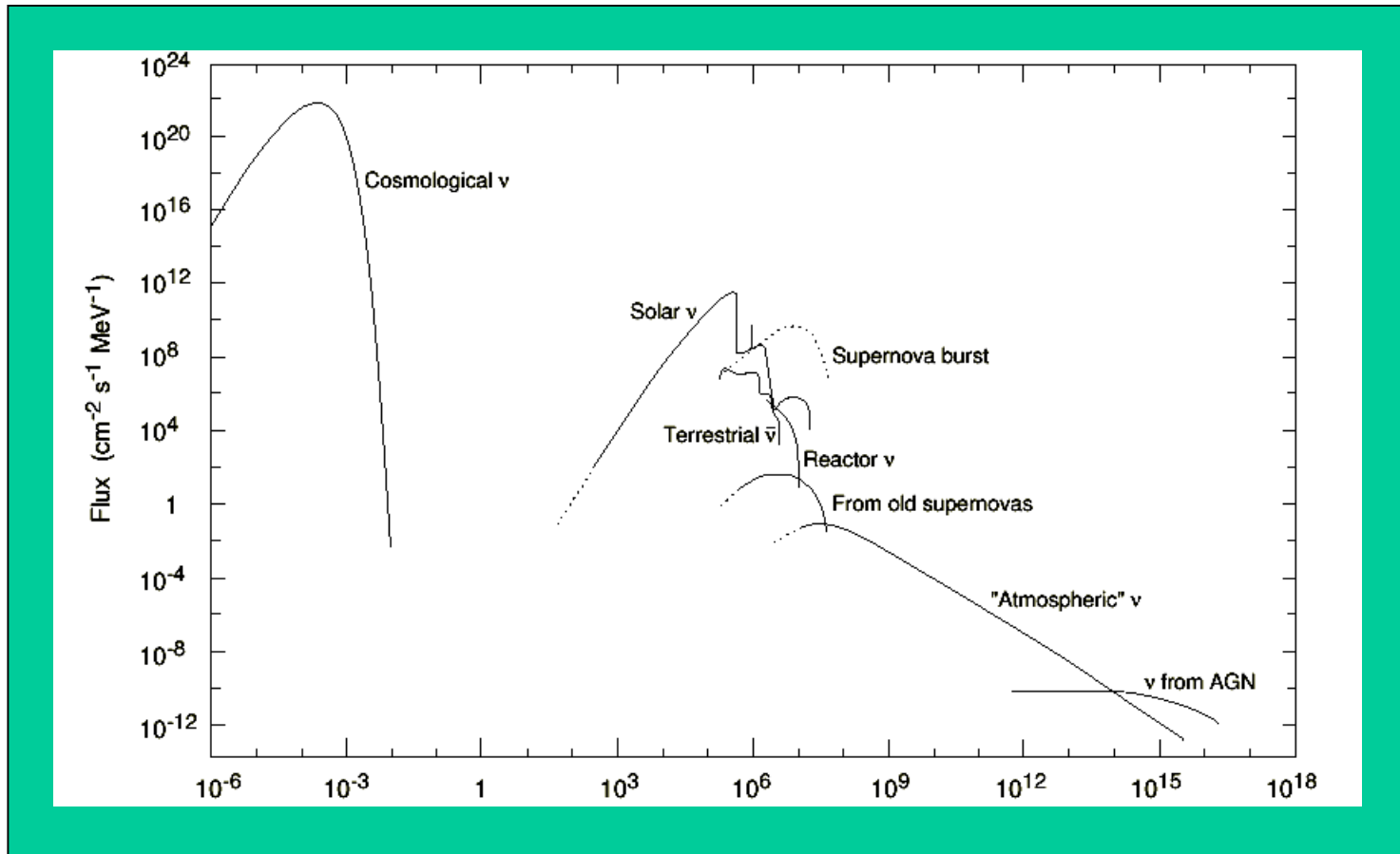
# Czym są neutrina?

W Modelu Standardowym to elementarne cząstki materii

- są neutralnymi leptonami, które oddziałują wyłącznie słabo  
np. średnia droga na oddziaływanie neutrin z rozpadu  $\beta$  neutronu w wodzie jest rzędu kilku tysięcy lat świetlnych
- drugie po fotonach, jeśli idzie o częstość występowania we Wszechświecie
- istnieją trzy rodzaje („zapachy”) lekkich neutrin  
wynik bardzo dokładnych pomiarów w eksperymentach przy zderzaczu LEP



# Źródła neutrin



Neutrina kosmologiczne, słoneczne, z wybuchów Supernowych, z rozpadów  $\beta$  naturalnych pierwiastków promieniotwórczych (w tym neutrina reaktorowe), atmosferyczne i akceleratorowe oraz skrajnie wysokich energii

---

# Oscylacje neutrin

---

Przy założeniu dwu stanów zapachowych neutrin  $\alpha$  i  $\beta$  oraz dwu stanów masowych 1 i 2, prawdopodobieństwo przejścia  $\alpha$  w  $\beta$  w próżni:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right)$$

gdzie  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$  wyrażone jest w  $[\text{eV}^{-2}]$ ,  $L$  w  $[\text{km}]$ , a  $E$  w  $[\text{GeV}]$

$\Delta m^2$  i  $\theta$  (kąt mieszania stanów 1 i 2) to parametry teoretyczne,  $L$  (długość bazy pomiarowej) i  $E$  (energia neutrin) są dobierane eksperymentalnie

**Wpływ materii:** wzory na prawdopodobieństwa takie same jak dla oscylacji w próżni, ale efektywne masy i efektywne kąty mieszania - na razie ważny tylko w przypadku neutrin słonecznych

---

# Oscylacje neutrin

---

## Przykłady:

$L \sim 1 \text{ km}, E_\nu \sim 1 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim eV^2$  (eksp. NOMAD i CHORUS)

$L \sim 10^4 \text{ km}, E_\nu \sim 100 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-5} eV^2$  ( $\nu_{\text{atm}}$  niskiej en. i średnica Ziemi)

$L \sim 10^3 \text{ km}, E_\nu \sim 1 \text{ GeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-3} eV^2$  ( $\nu_{\text{accel}}$  i baza L rzędu kilkuset km)

$L \sim 10^8 \text{ km}, E_\nu \sim 10 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta m^2 \sim 10^{-10} eV^2$  ( $\nu_{\text{ston}}$  i odległość Słońce-Ziemia)

Oscylacje neutrin słonecznych i atmosferycznych są całkiem nieźle opisywane przez ten prosty model z udziałem dwu stanów zapachowych i dwu stanów masowych

# Aspekty eksperymentalne

Eksperymenty poszukujące sygnału  $\beta$  w wiązce  $\alpha$ :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \geq 0$$

Eksperymenty mierzące osłabienie wiązki  $\alpha$ :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) \leq 1$$

Liczba obserwowanych przypadków  $N_{\text{obs}}$  oddziaływań neutrin jest proporcjonalna do fizycznego przekroju czynnego na oddziaływanie  $\sigma$  [ $\text{cm}^2$ ], wielkości strumienia neutrin  $\Phi$  [ $\text{cm}^{-2}$ ] oraz liczby atomów tarczy  $N$  na ich drodze:

$$N_{\text{obs}} \approx \sigma * \Phi * N \quad (\sigma < 10^{-40} \text{ cm}^{-2} \text{ dla energii rzędu MeV})$$

→ **Potrzebne jak najsilniejsze źródło neutrin i wielki oraz wydajny detektor; optymalizacja eksperymentów neutrinowych polega na łącznym traktowaniu źródła neutrin, bazy pomiarowej  $L$  i detektora**



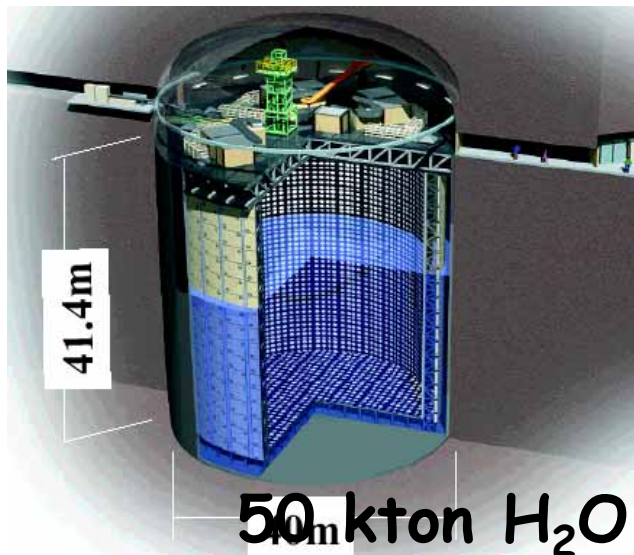
# Pomiary oscylacji

## 1998-2002 wielkie odkrycia

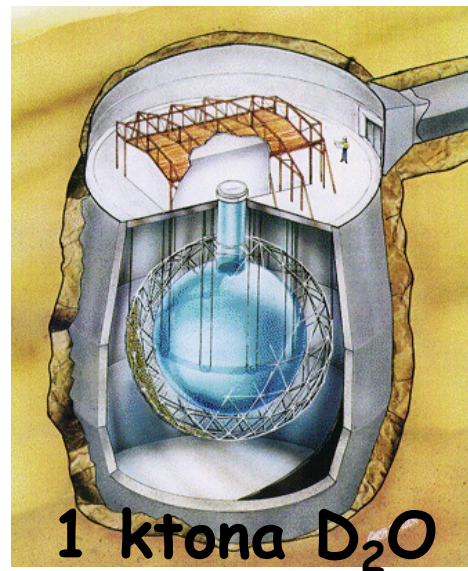
w eksperymentach SuperKamiokande ( $\nu$  atmosferyczne), K2K (akceleratorowe), SNO ( $\nu$  słoneczne) i KamLAND ( $\nu$  reaktorowe)

## 2003

początek precyzyjnych pomiarów w badaniach oscylacji neutrin



SuperKamiokande



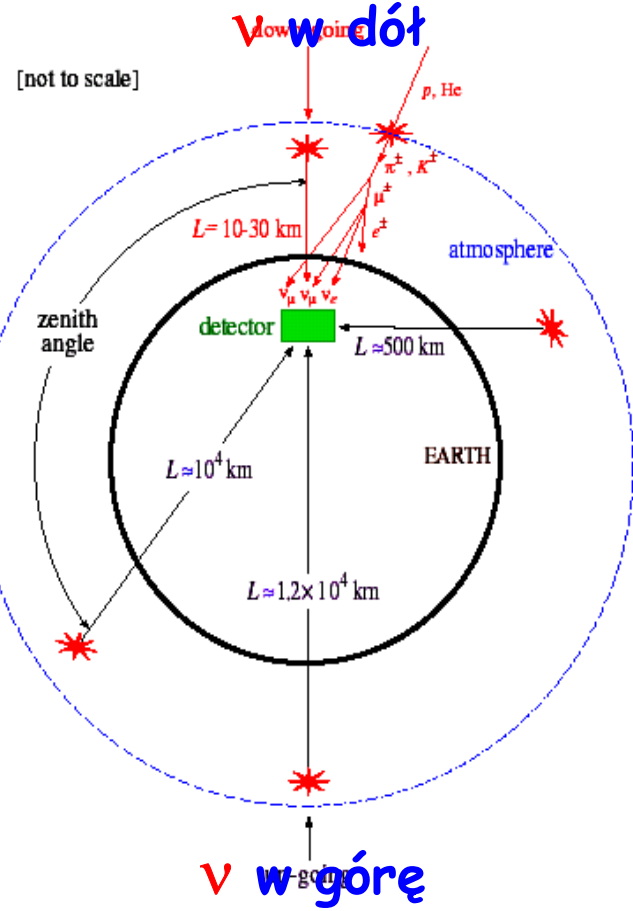
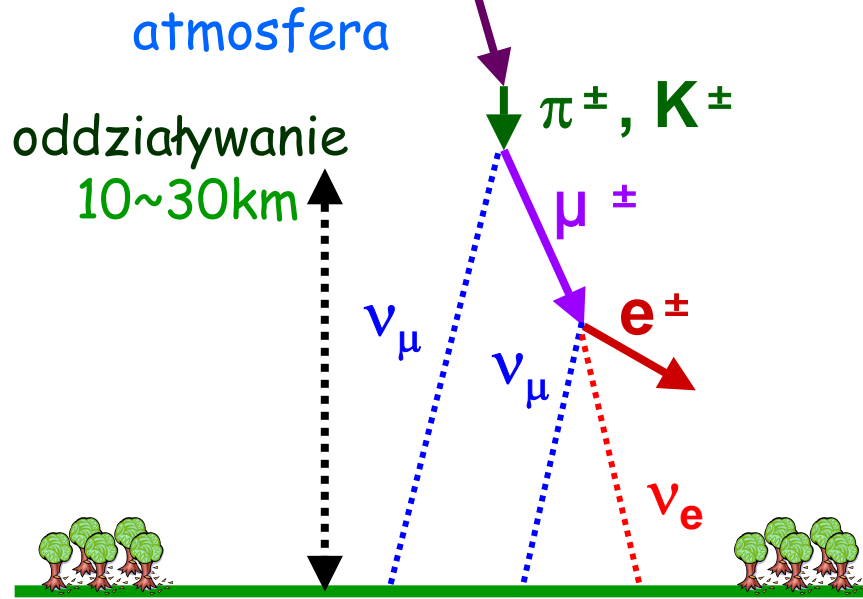
SNO



KamLAND

# Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promienie  
kosmiczne  $p, He \dots$

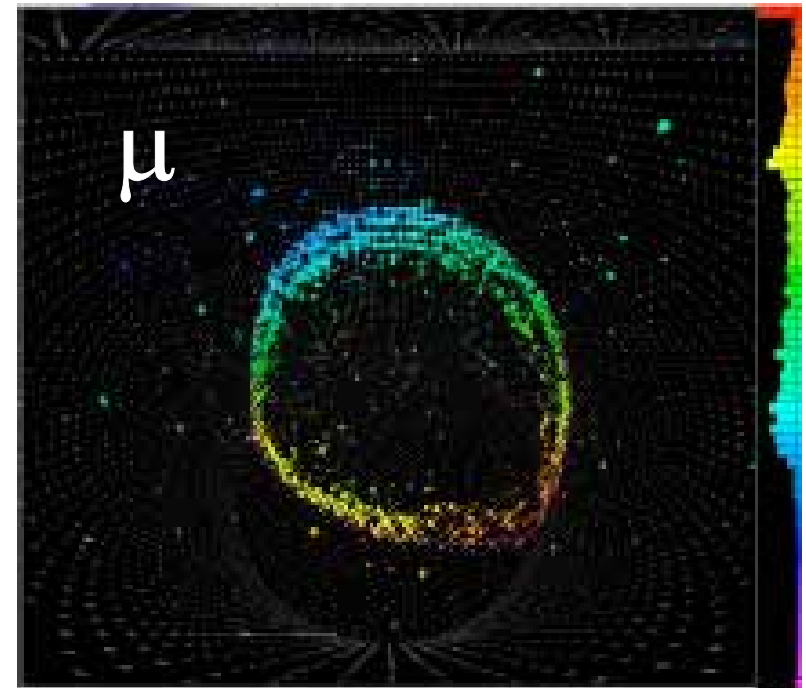
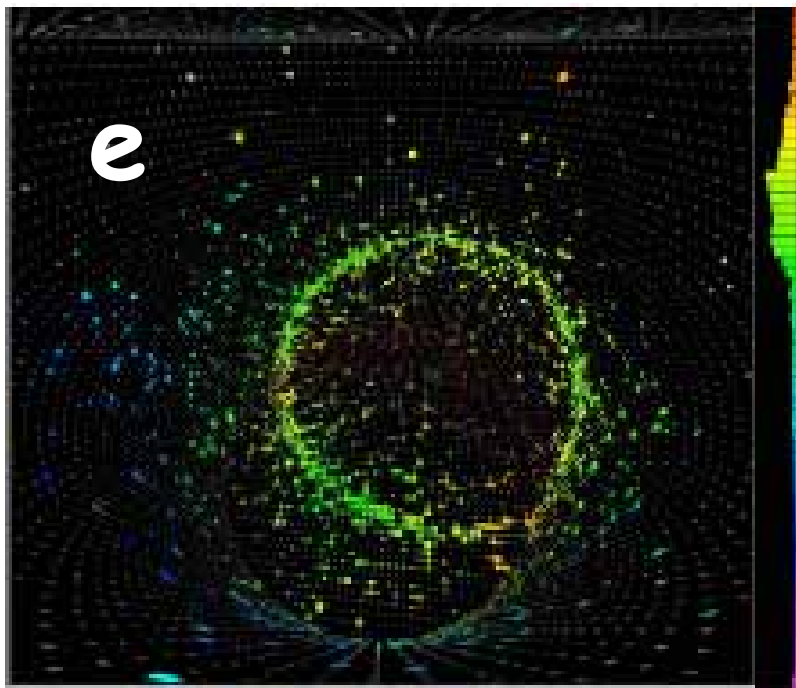
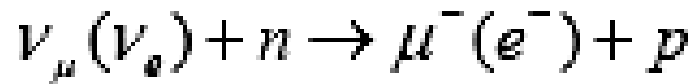


$$\frac{\phi(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{\phi(\nu_e + \bar{\nu}_e)} \begin{cases} \sim 2 (\text{dla } E_\nu < 1 \text{ GeV}) \\ > 2 (\text{dla } E_\nu > 1 \text{ GeV}) \end{cases}$$

Toruń, 19.01.2006

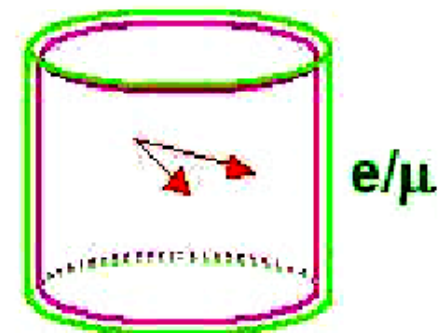
$\nu_{\text{atm}}$  - tło dla poszukiwań  
rozpadu protonu

# „Oczy” SuperKamiokande



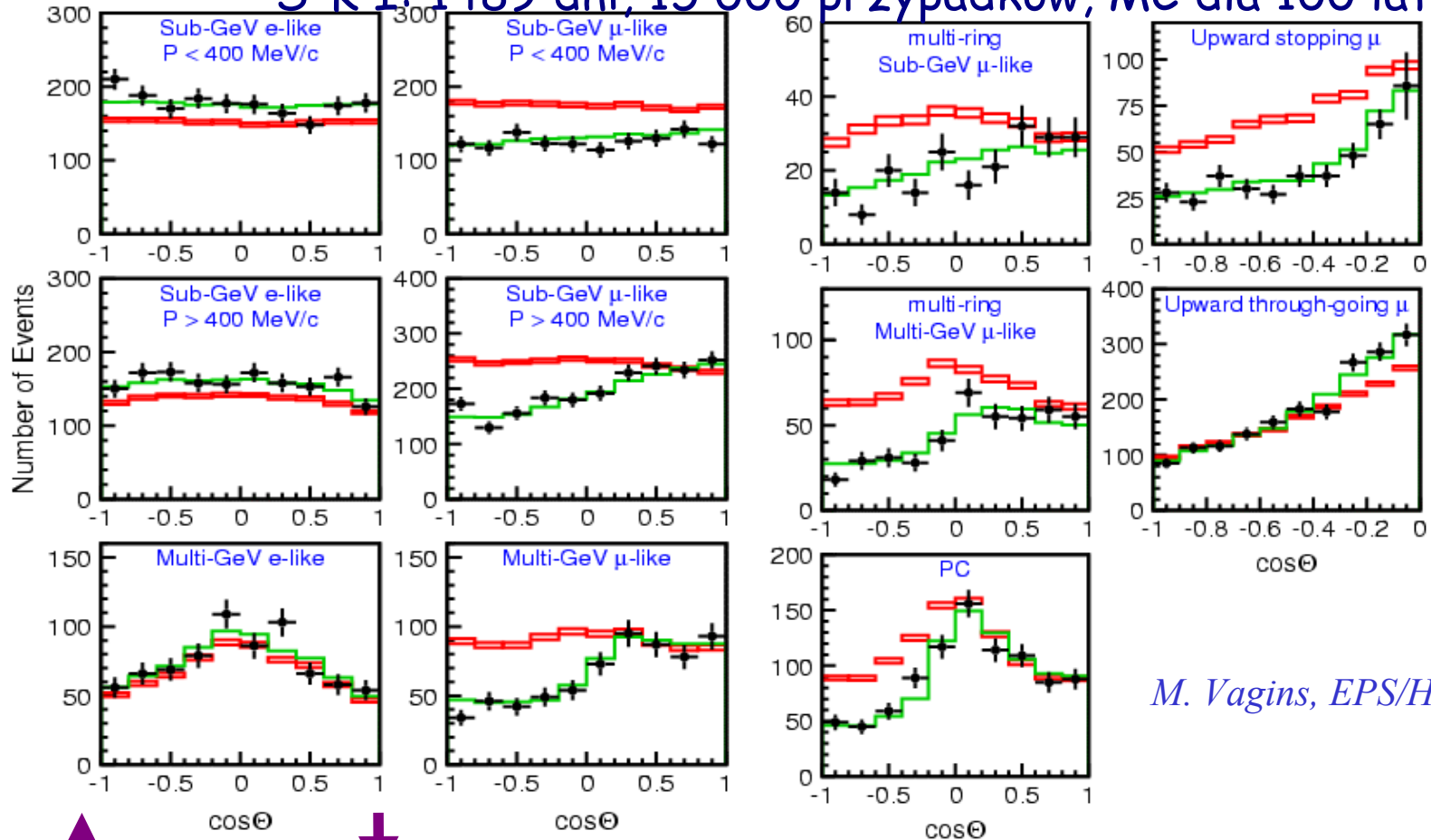
Pomiar energii oraz kierunku  $\mu$  i  $e$ , łącznie ok. 20000 oddziaływań neutronów atmosferycznych, dane zebrane w latach 1996-2005 (SKI - do 2001, wypadek w 2001, SKII - od grudnia 2002)

Toruń, 19.01.2006



# SuperK - $\nu_{atm}$ , rozkłady kąta zenitalnego

S-K I: 1489 dni, 15 000 przypadków, MC dla 100 lat danych



↑  
w górę  $\nu$  w dół  
Toruń, 19.01.2006

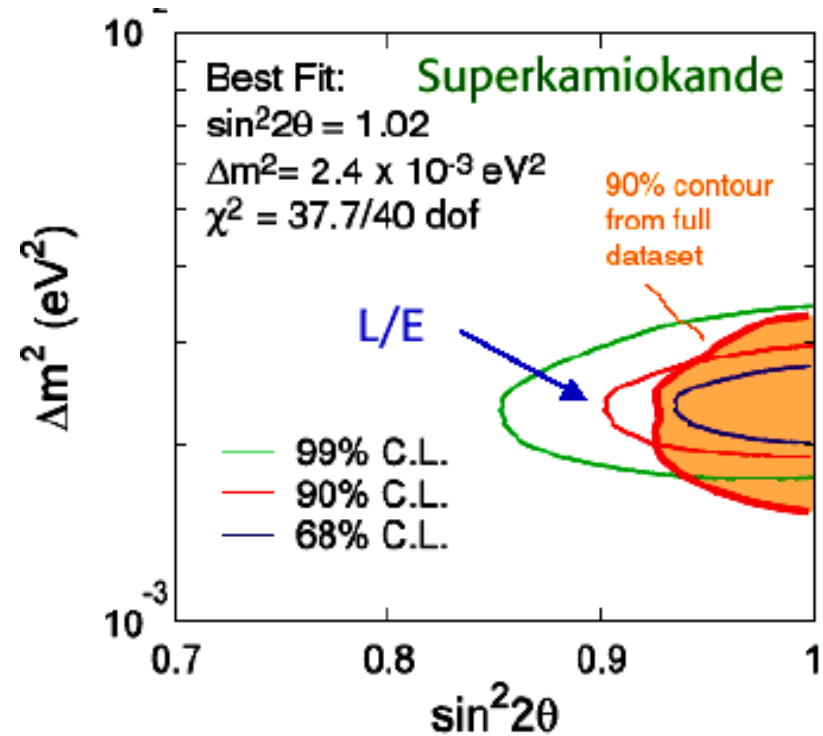
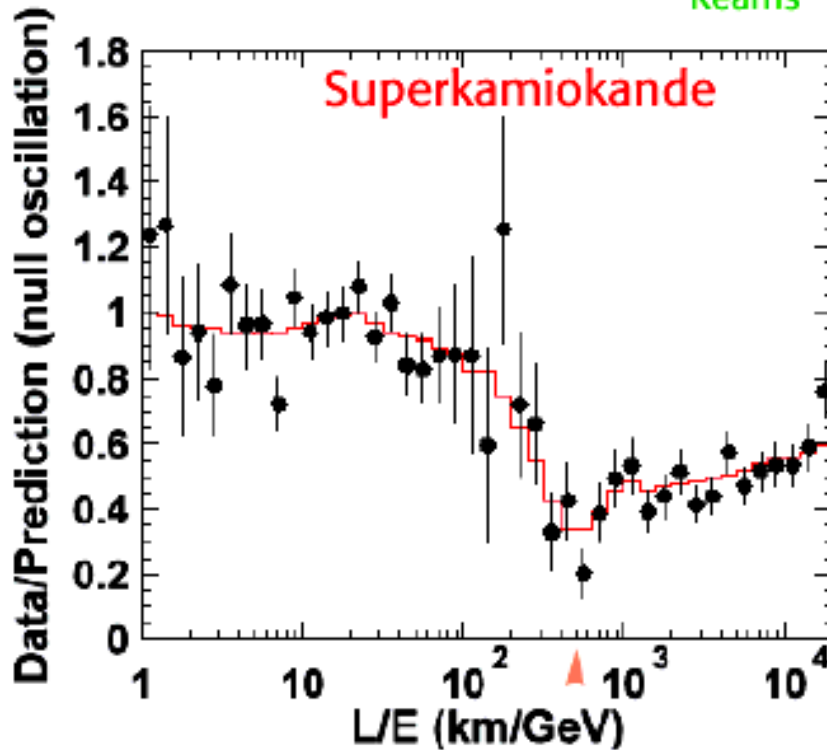
Pełne dane, najlepszy fit daje  
 $\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ ,  $\sin 2\theta = 1.0$

*M. Vagins, EPS/HEPP2005*

# SuperKamiokande - zależność L/E

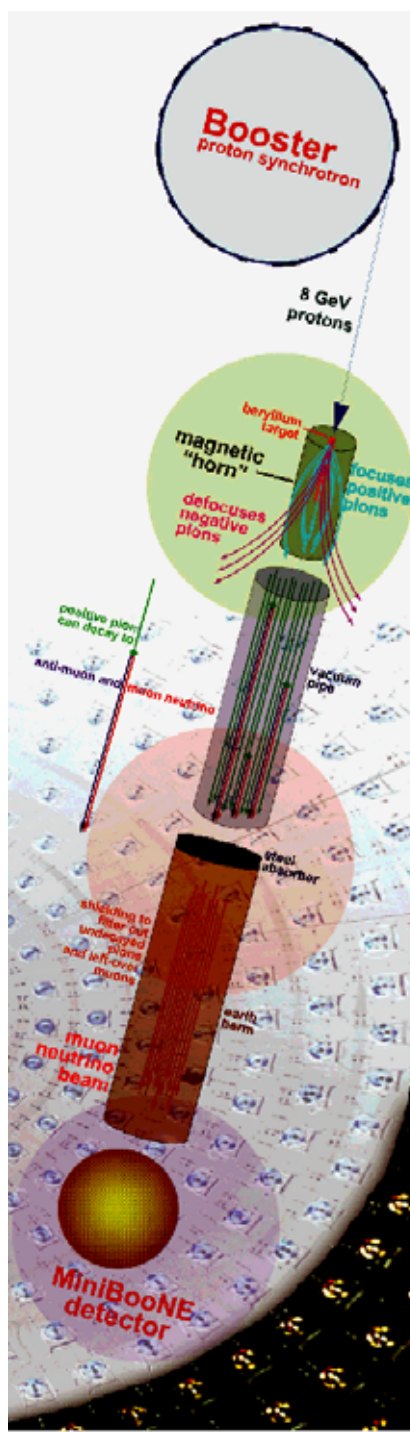
Rozkład L/E - bezpośrednio wskazanie na oscylacje

Kearns



Wszystkie pomiary SuperK wskazują na oscylacje  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

# Neutrino akceleratorowe



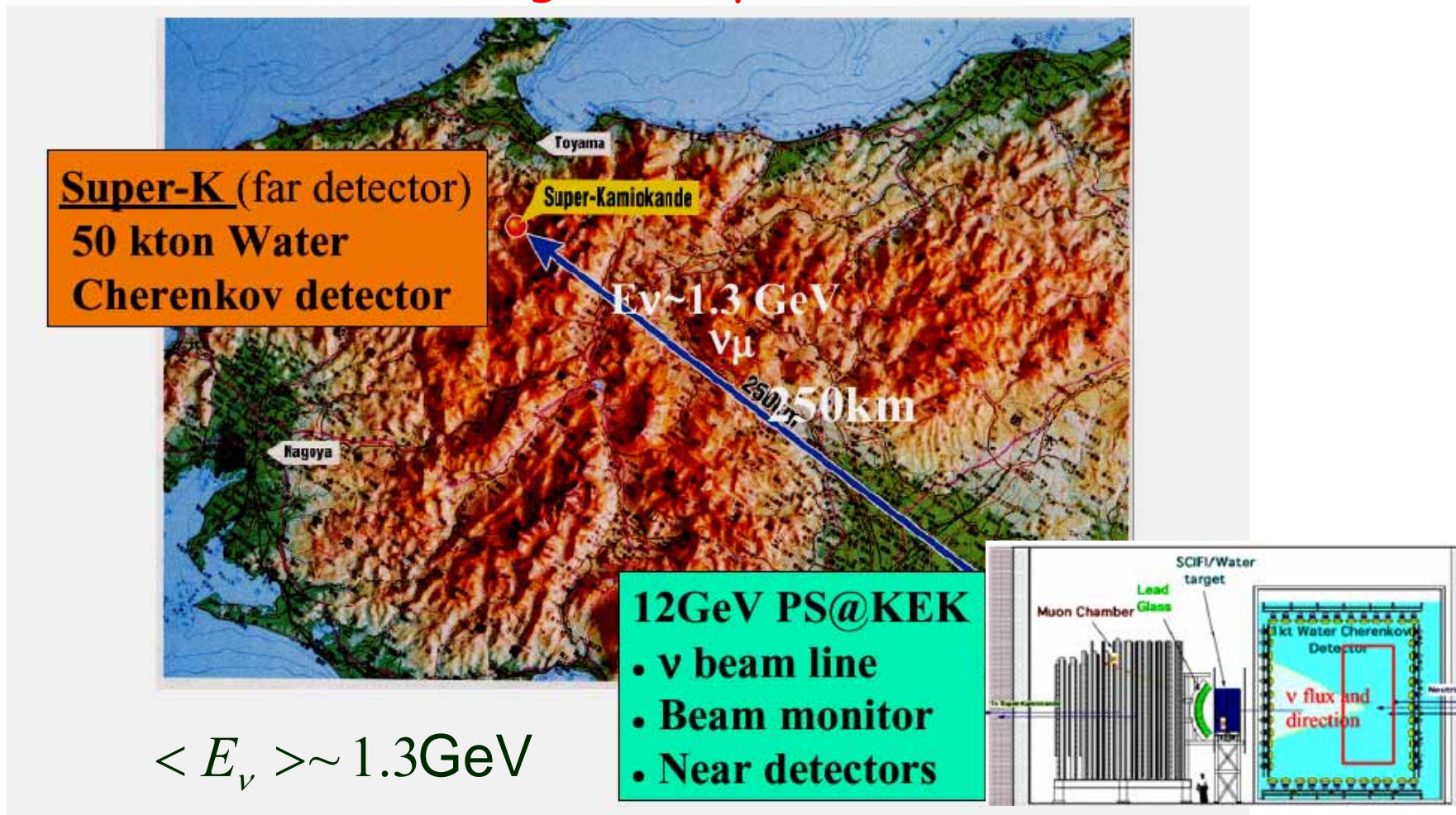
W przypadku neutrino akceleratorowych rolę promieni kosmicznych pełnią protony przyspieszone w akceleratorze  
Obecnie wykorzystywane są tylko  $\nu_{\mu}$  z rozpadów  $\pi$

→ Lepsza kontrola strumienia i energii neutrino

Pierwsza wiązka  $\nu_{\mu}$  – 1961 rok

# Eksperyment K2K

pierwszy eksperyment akceleratorowy  
z długą bazą pomiarową



# K2K - zasada i wyniki pomiaru

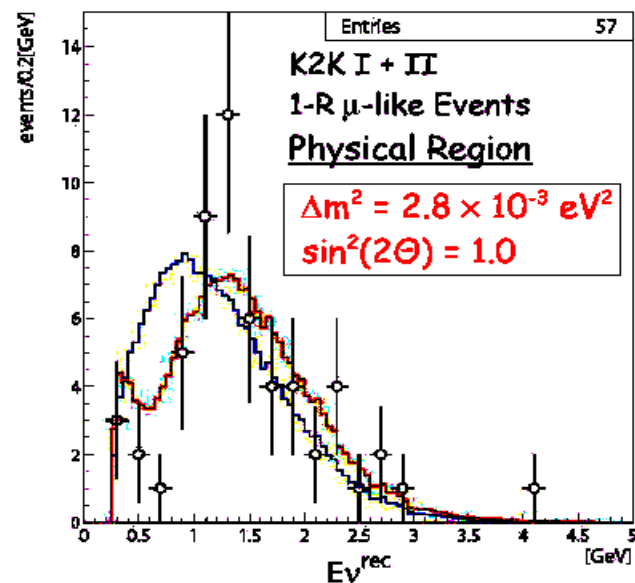
Pomiar pędów i kierunków mionów w bliskim detektorze w KEK  
→ strumień neutrin i rozkład energii neutrin w bliskim detektorze

→ przewidywania strumienia i rozkładu energii w det. SuperK

Pomiar oddziaływań neutrin w detektorze SuperK

→ wnioski na temat oscylacji na podstawie zanikania strumienia i kształtu widma energii neutrin

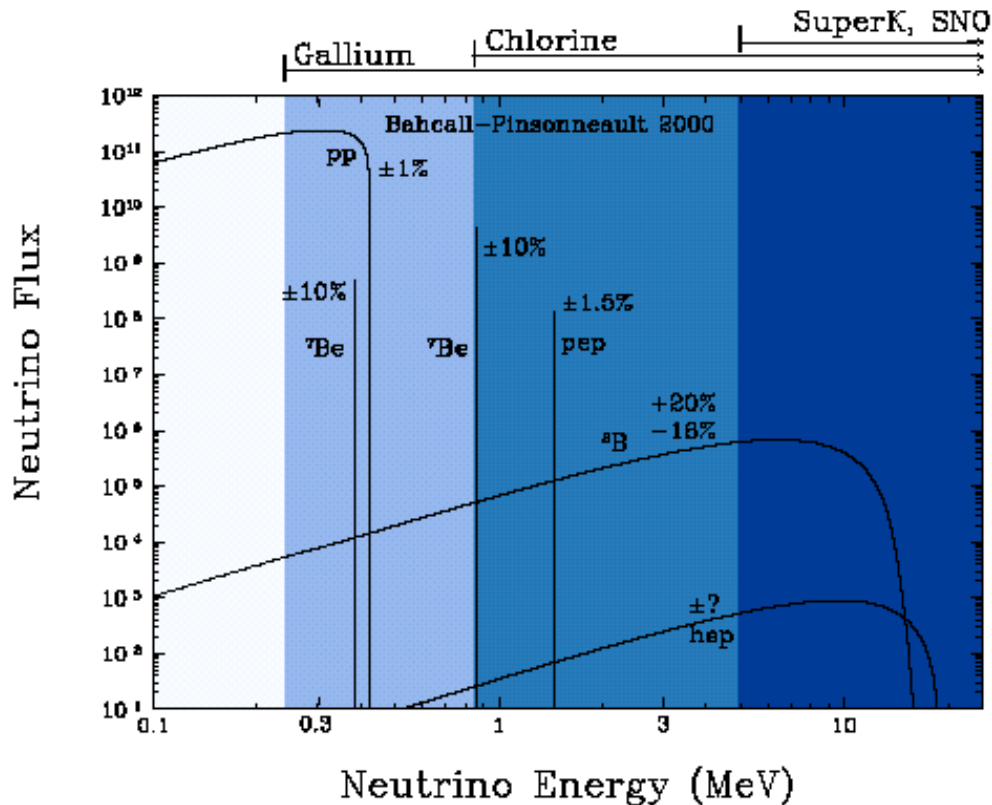
Zaobserwowano 107 przypadków oddziaływań  $\nu_\mu$  wobec oczekiwanych 149.7



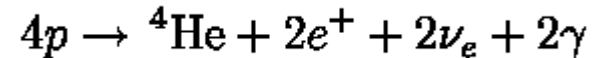
→ Zgodność wyników z SuperKamiokande



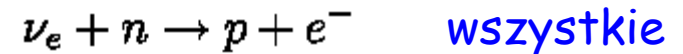
# Neutrina słoneczne



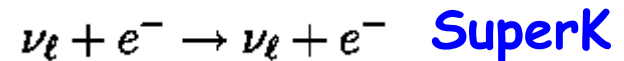
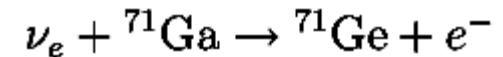
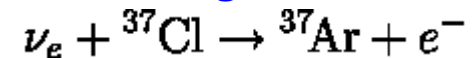
Większość neutrin słonecznych pochodzi z reakcji pp



Eksperymenty (od 1969 r) mierzą reakcje:

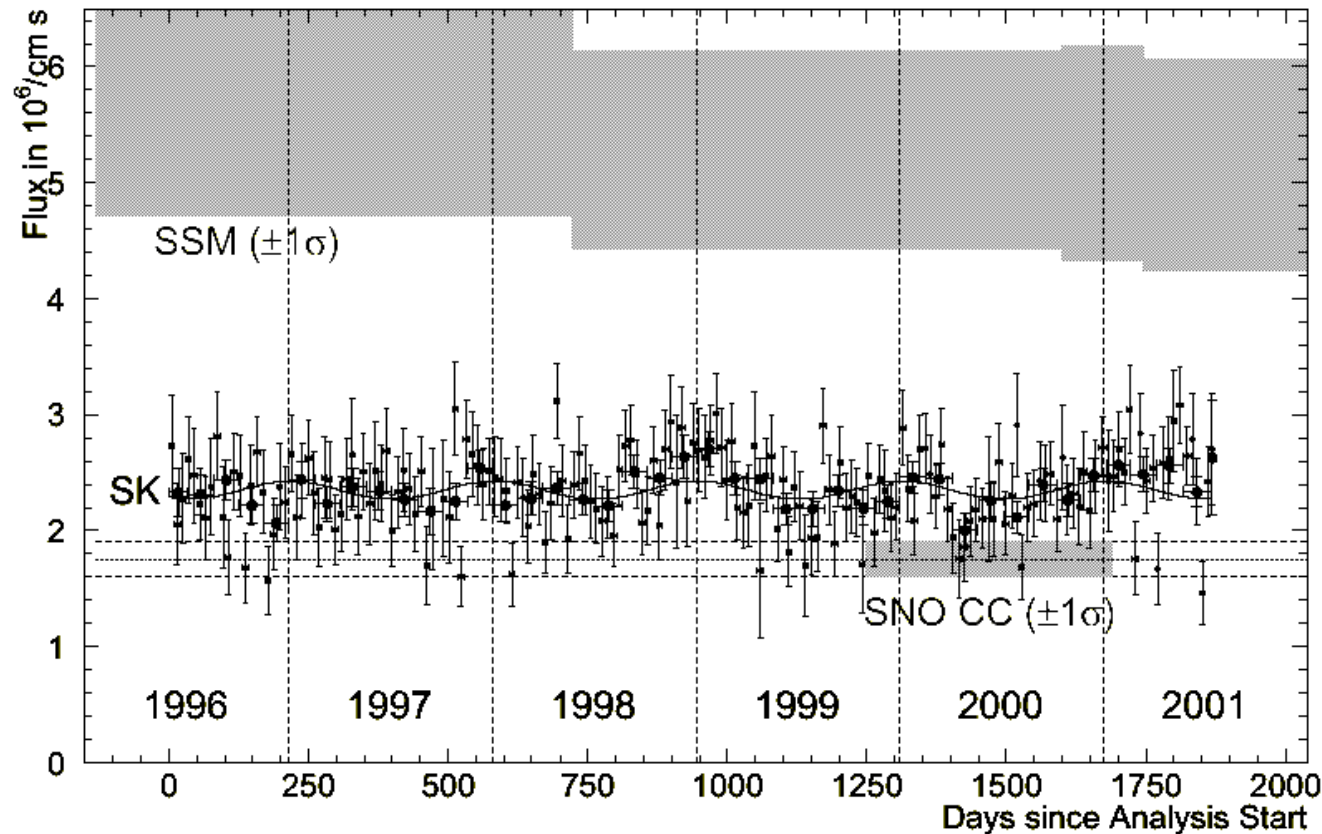


W szczególności:



- Słoneczne  $\nu_e$  powstają w samym środku Słońca
- Przez ponad 30 lat obserwowano na Ziemi niedobór  $\nu_{\text{ston}}$  względem przewidywań modelu Słońca (od 40% do blisko 70%)
- Częściowe wyjaśnienie dzięki pomiarom SuperK, **całkowicie -SNO**

# SuperKamiokande - zależność roczna $\Phi(\nu_{\text{stón}})$

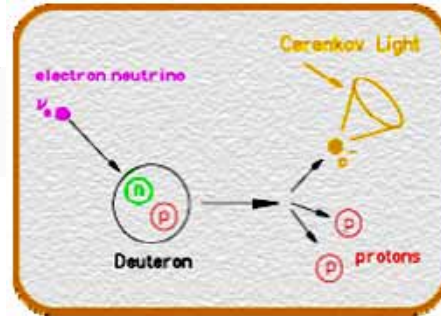


Roczne zmiany wielkości strumienia neutrin słonecznych są zgodne z rocznymi zmianami odległości Ziemia-Słońce

→ To efekty masywne przy przejściu neutrin z wnętrza do powierzchni Słońca decydują o zmianie zapachu neutrin

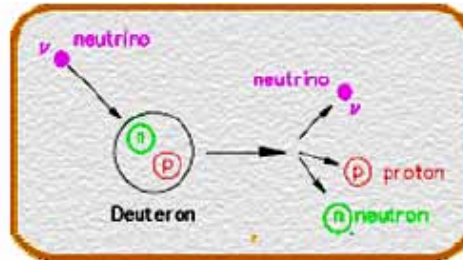
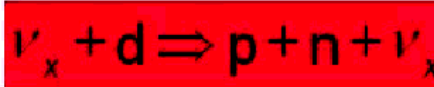
# Procesy mierzone w eksperymencie SNO

CC



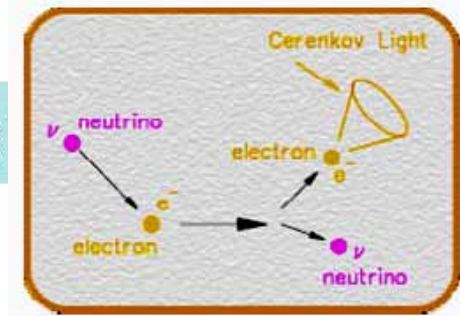
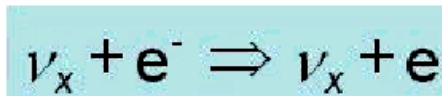
tylko  $\nu_e$   
dobry pomiar energii  $\nu_e$ , mała  
czułość na kierunek  $1-1/3\cos\theta$   
 $E_{th}=1.4\text{MeV}$

NC



wszystkie rodzaje neutrin,  
ten sam przekrój czynny,  
pomiar całkowitego strumienia  
neutrin borowych  $E_{th}=2.2\text{MeV}$

ES



mała liczba przypadków, **głównie**  
czuły na  $\nu_e$ , duża czułość na  
kierunek  
reakcja mierzona w SuperK

Trzy fazy eksperymentu (obecnie trzecia) - cele: jak najlepsza wydajność rejestracji neutronów i jak najlepsze odróżnienie reakcji NC

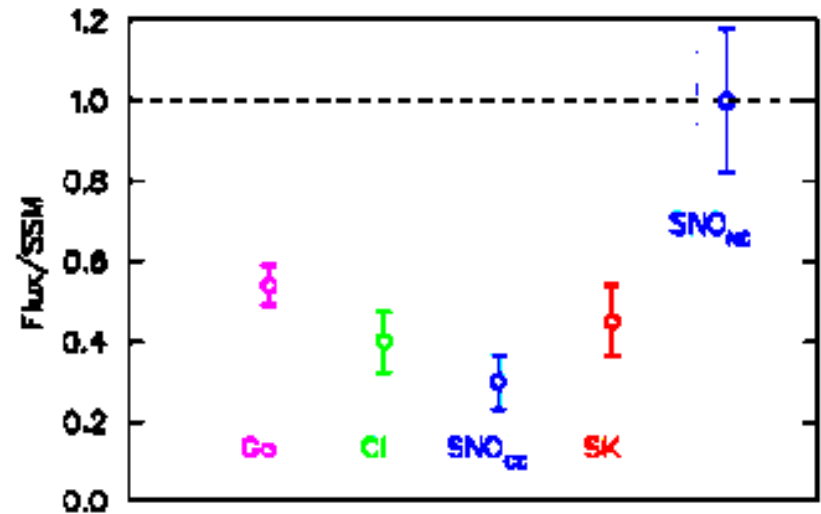
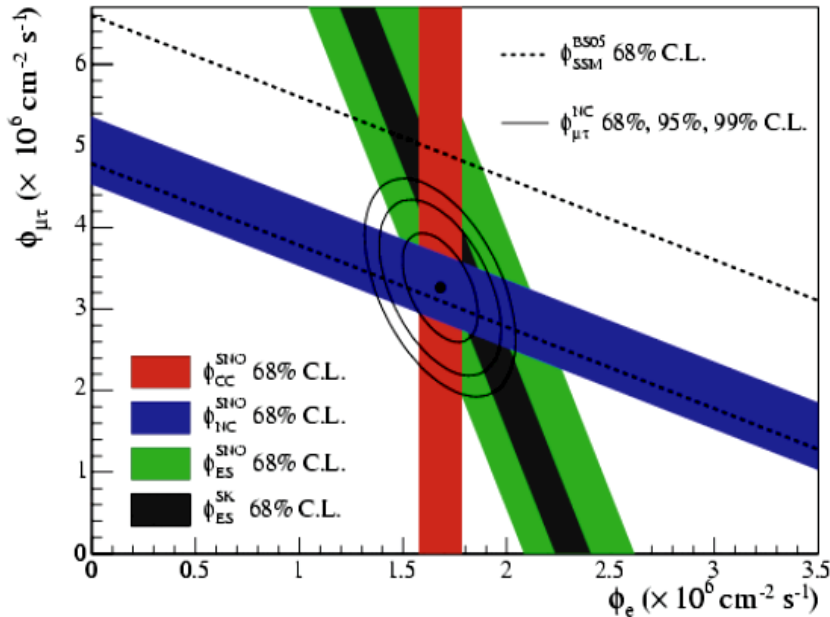
# SNO - wyniki

2002

$$\Phi_{\text{SSM}} = 5.05^{+1.01}_{-0.81} \quad \Phi_{\text{SNO}} = 5.09^{+0.44+0.46}_{-0.43 -0.43}$$

2005

Flavor content of solar flux.



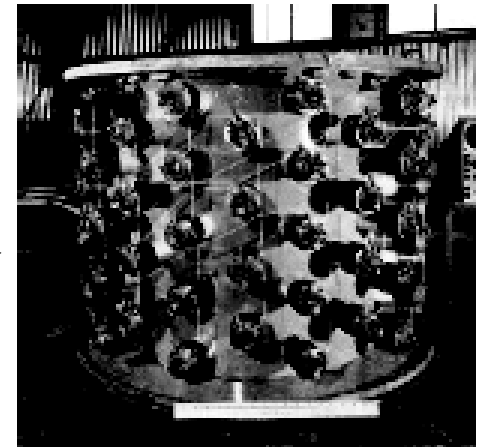
Całkowity strumień neutrin zgodny z przewidywaniami Modelu Słońca, niedobór  $\nu_e$  spowodowany ich przejściem w  $\nu_{\mu,\tau}$  w drodze z wnętrza do powierzchni Słońca

# Antyneutrino z reaktorów

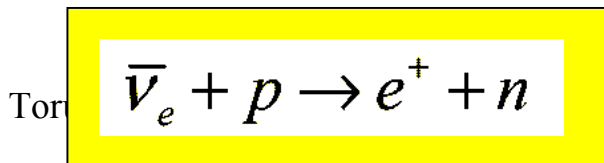


Duża siłownia jądrowa daje  $6 \times 10^{20}$  anty- $\nu$ /sek i 3 GW mocy cieplnej

Detector at the Savannah River nuclear reactor



Pierwsza obserwacja oddziaływań (anty)neutrin w eksperymencie Reinesa-Cowana (1955) przy siłowni jądrowej



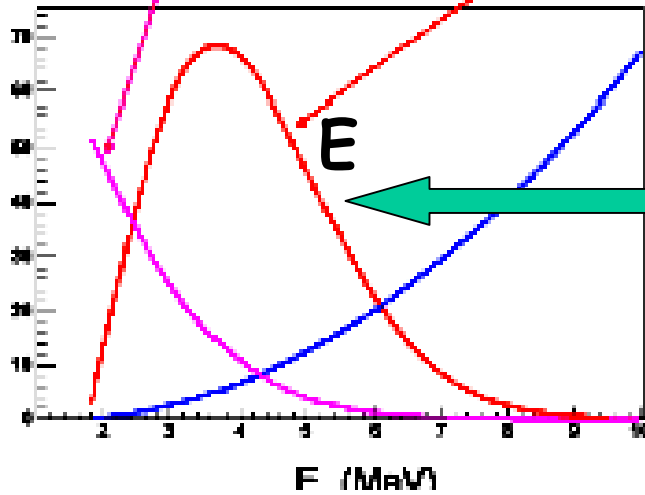
"We are happy to inform you [Pauli] that we have definitely detected neutrinos"

# KamLAND - rozkład energii anty- $\nu_e$ i drogi L

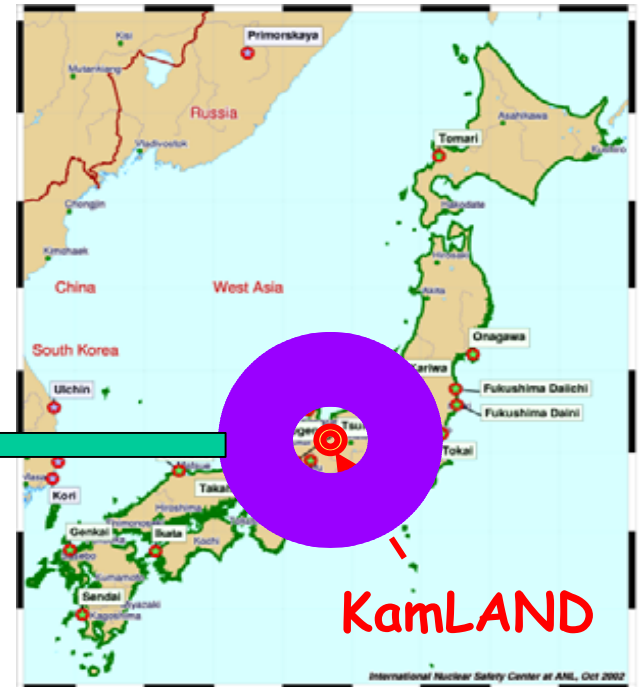
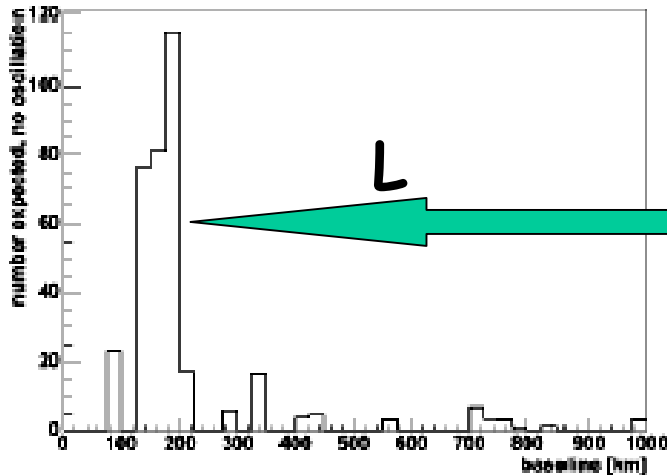
Reactor  $\nu_e$  spectrum (a.u.)

Observed spectrum

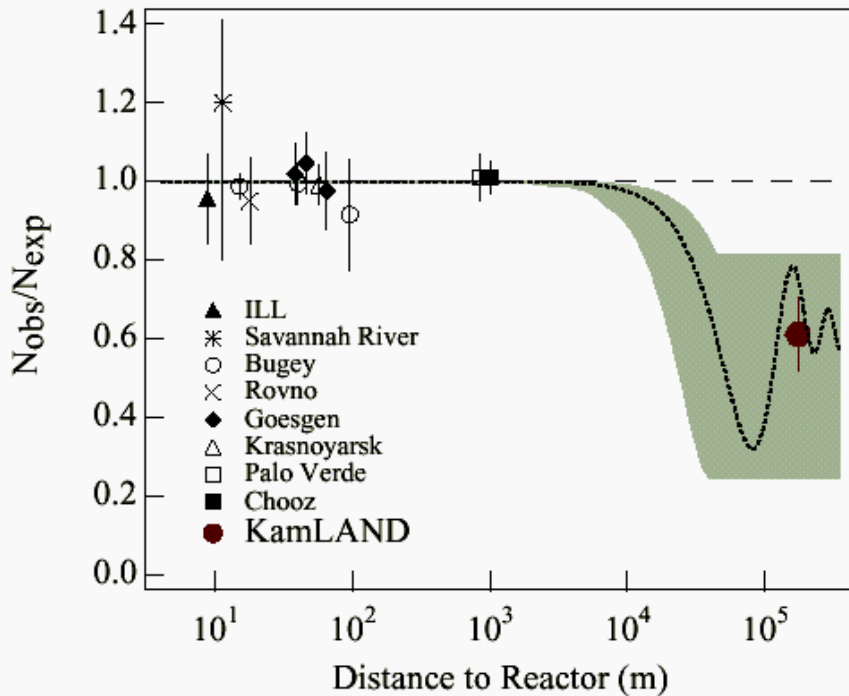
$\nu_e + p \rightarrow n + e^+$  cross section ( $10^{-41}$  cm<sup>2</sup>)



Obserwowane w detektorze widmo energii antyneutrino jest wynikiem złożenia widma antyneutrino powstałych w reaktorze i przekroju czynnego na ich oddziaływanie



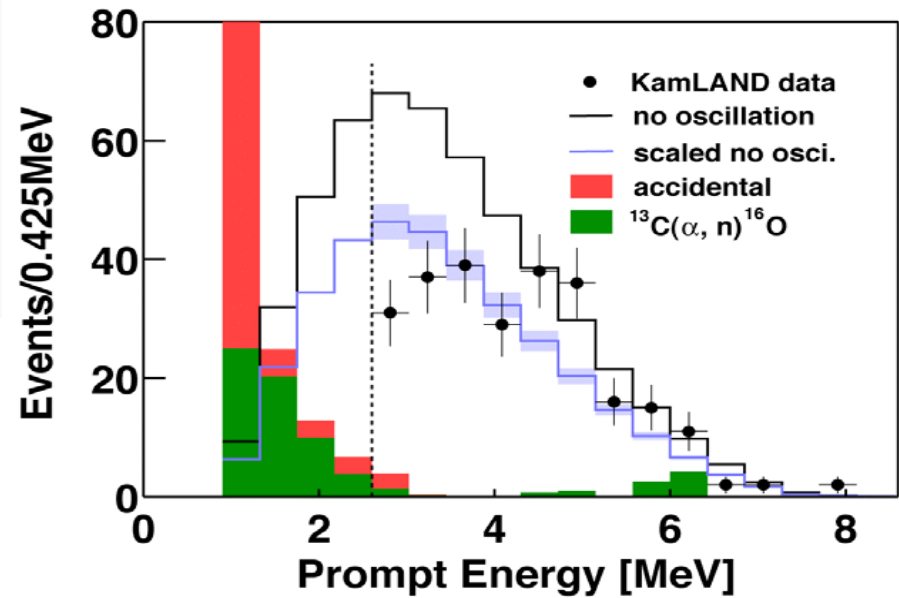
# KamLAND - strumień i widmo energii



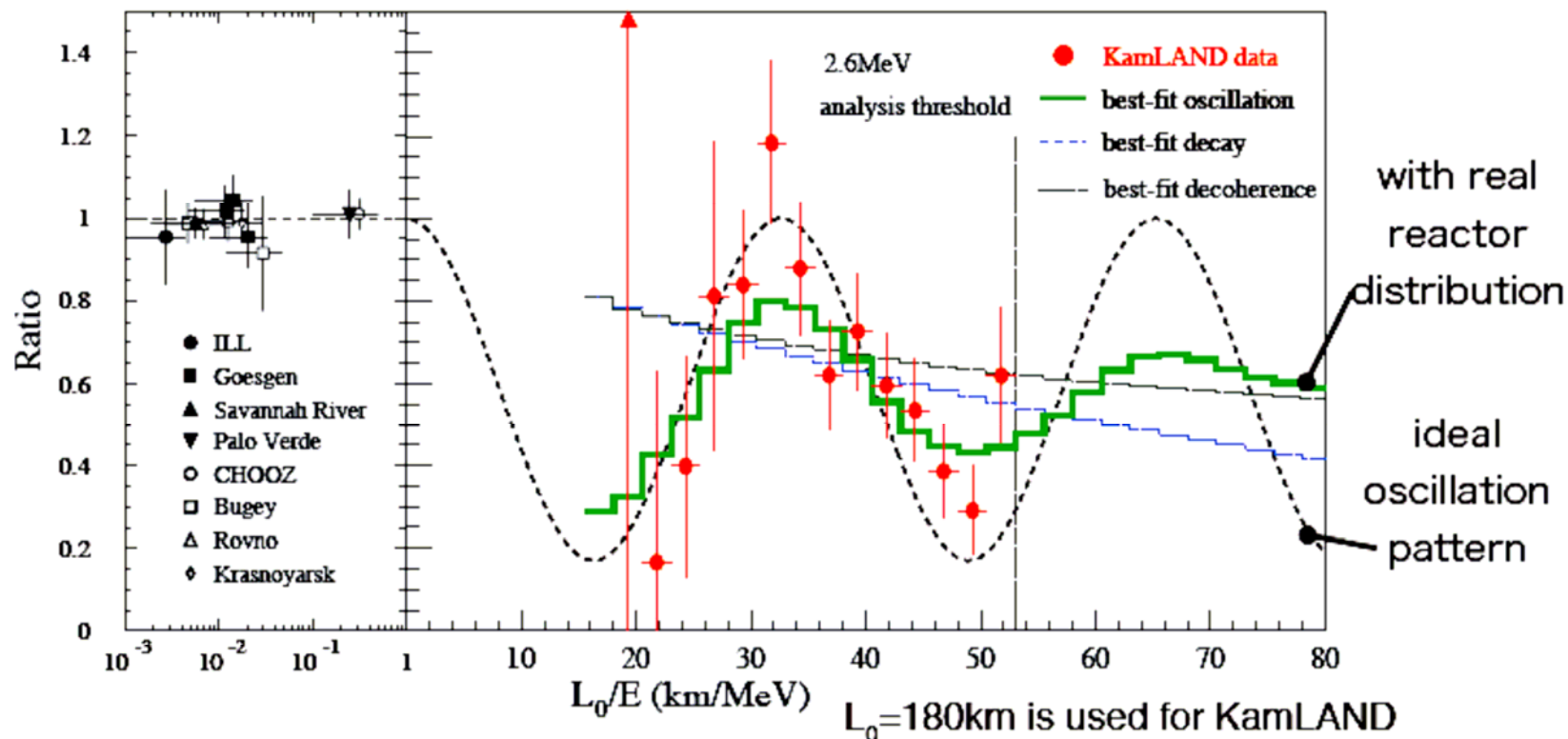
Oslabienie strumienia neutrin  
i widmo energii  
wykluczają brak oscylacji na  
poziomie ufności 99.999995%

258 zaobserwowanych oddziaływań  
 $365.2 \pm 23.7$  oczekiwanych  
 $17.8 \pm 7.3$  zdarzeń tła

KamLAND, PRL 94, 2005  
J.Klein, EPS HEP2005



# KamLAND - zależność strumienia od L/E



Bardzo dobra zgodność wyników dla neutronów słonecznych i antyneutronów reaktorowych:  
 $\Delta m_{st}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{eV}^{-2}$ , kąt mieszania duży, ale nie maksymalny



# Wiemy jednak, że są trzy rodzaje neutrin

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

5 parametrów oscylacyjnych: dwie niezależne różnice kwadratów mas, trzy kąty mieszania, faza odpowiedzialna za zachowanie/łamianie symetrii CP

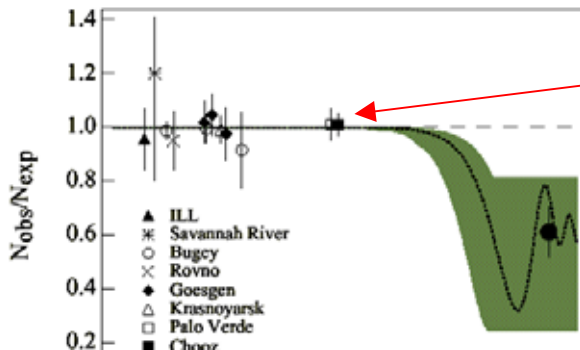
neutrino atmosferyczne

faza łamiąca CP

neutrino słoneczne

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

wiąże sektor atmosferyczny i słoneczny



---

## Bardzo ważne pytania

---

Kąt  $\theta_{23} = 45^\circ$  (maksymalny),  $\theta_{12} = 33^\circ$  (duży),  $\theta_{13} < 10^\circ$  (mały), inaczej niż dla kwarków

→ Czy to przejaw jakiejś nowej symetrii przyrody?

$$\Delta m_{23}^2 \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \Delta m_{12}^2 \approx 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2,$$
$$|\Delta m_{13}^2| = |\Delta m_{23}^2 - \Delta m_{12}^2|$$

→ Czy symetria CP w sektorze leptonowym jest zachowana czy jest łamana?

Pomiar możliwy, jeśli  $\theta_{13}$  nie jest zbyt mały

Bardzo ważne pytanie, bo łamanie symetrii CP dla kwarków nie wystarcza dla wyjaśnienia asymetrii między materią i antymaterią

# „Efekt LNSD” – dodatkowy obszar oscylacji?

Trzeci obszar na rozkładzie parametrów oscylacji

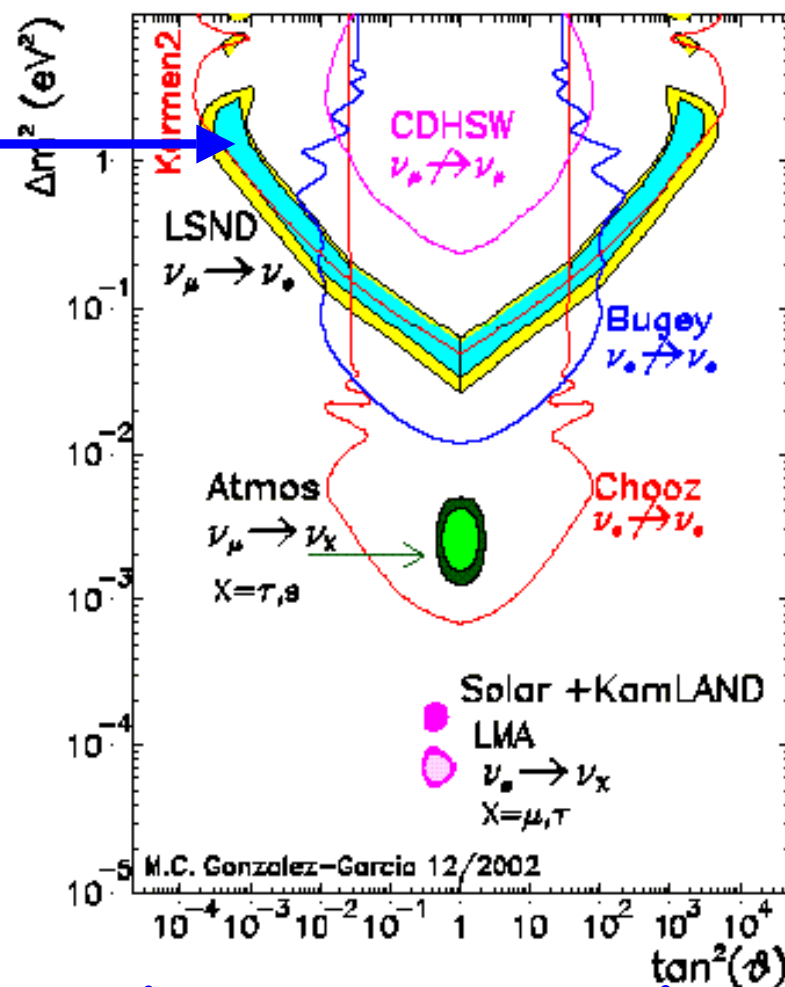
$\Delta m^2 \cong 1 \text{eV}^2$ , kąt mieszania bardzo mały

Trzy skale dla różnicy kwadratów mas  $\rightarrow$  cztery stany zapachowe neutrin

Problem: istnieją tylko trzy stany zapachowe lekkich neutrin (wynik z LEP-u)  $\rightarrow$  czwarte neutrino jakiegoś inne, nazwane „sterylnym”

Sprawdzenie w eksperymencie MiniBoone, pierwsze wyniki mają być ogłoszone wkrótce

Toruń, 19.01.2006



Jeśli potwierdzony, to rewolucja!

---

# Przyszły program badań oscylacji

---

## Potrzebne bardzo precyzyjne pomiary

Pierwsza generacja eksperymentów (rozpoczęte lub bliskie realizacji)

- lata 2005-2010:

- Eksperyment MINOS na wiązce NuMi
- Eksperyment OPERA na wiązce CNGS
- Eksperymenty Borexino (słoneczny) i Double-CHOOZ (reaktorowy)

Druga generacja eksperymentów (w trakcie zatwierdzania i finalnych dyskusji) - lata 2010-2015:

- Eksperyment T2K w Japonii na super-wiązce z Tokai do Kamioki
- Eksperyment NO<sub>v</sub>A na wiązce (potem super-wiązce) NuMi
- Eksperymenty reaktorowe nowej generacji

Trzecia generacja eksperymentów (w realizacji tylko programy R&D)

- po 2015:

- Eksperymenty na wiązках z fabryki neutrin lub wiązках  $\beta$
- Gigantyczne detektory, bardzo długie bazy pomiarowe

# Projekty akceleratorowe NuMi i CNGS

W realizacji:

◆ NuMi - wiązka neutron z FNAL do detektora MINOS w kopalni Soudan, start in 2005, pomiar osłabienia wiązki  $\nu_\mu$  w oparciu o bliski i daleki detektor  $\rightarrow$  lepszy pomiar parametrów w obszarze  $\nu_{atm}$

◆ CNGS - wiązka z CERN do LNGS, daleki detektor OPERA (i mały detektor ICARUS), start w 2006, poszukiwania oddziaływań  $\nu_\tau$ , pochodzących z oscylacji  $\nu_\mu$

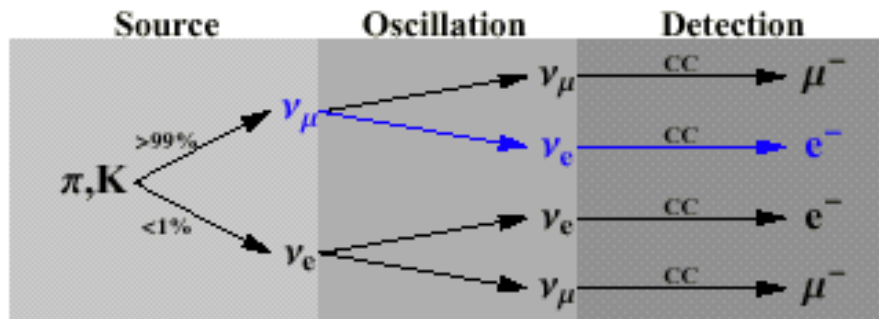
USA: NUMI  
(732 km)

Europe: NGS  
(732 km)



# Przyszłe intensywne źródła neutrin

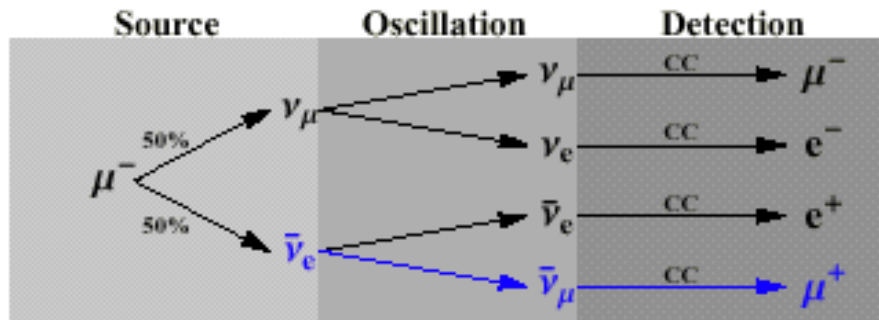
## Superbeams



## Superwiązki

-konwencjonalne wiązki dużej intensywności, Neutrina z rozpadów  $\pi$

## Neutrino Factories



## Fabryki neutrin

- nowy typ akceleratora, neutrina z rozpadów  $\mu$

## Wiązki $\beta$

Nowy pomysł (2002 rok)  
- przyspieszać  ${}^6\text{He}$  (źródło antyneutrin) i  ${}^{18}\text{Ne}$  (źródło neutrin)

# Pierwsza superwiązka



Baza pomiarowa ~295km

Wiązka  $\nu_\mu$

Energia wiązki ~1GeV

→ Zostanie dopasowana tak, aby trafiać na maksimum oscylacji

	Moc wiązki	Daleki detektor	Fizyka
1-szy etap	0.75MW	Super Kamiokande(50kt)	$\theta_{23}(<\text{max?})$ , $\Delta m^2_{23}$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_X$ $\theta_{13}(>0?)$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Pomiary NC
2-gi etap	~4MW	Hyper Kamiokande(1Mt)	Niezachowanie CP Rozpad protonu

Toruń, 19.01.2006

# T2K - etap 2

0.77 4 MW

~ detektor 1 Mton  
(Hyper-Kamiokande)

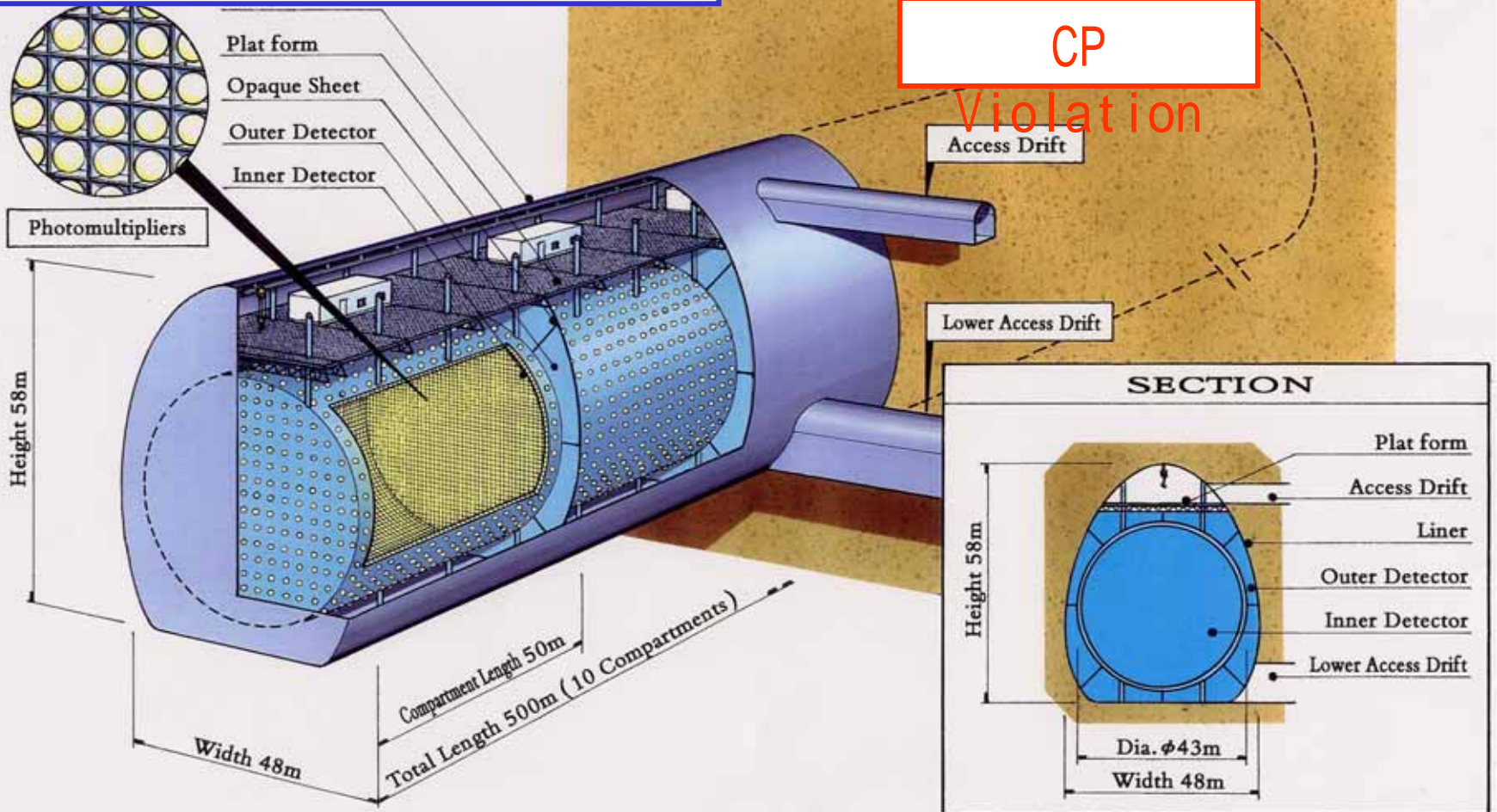


$10^6$  przypadków  
(razem  $\nu_\mu$  i  $\text{anti-}\nu_\mu$ )



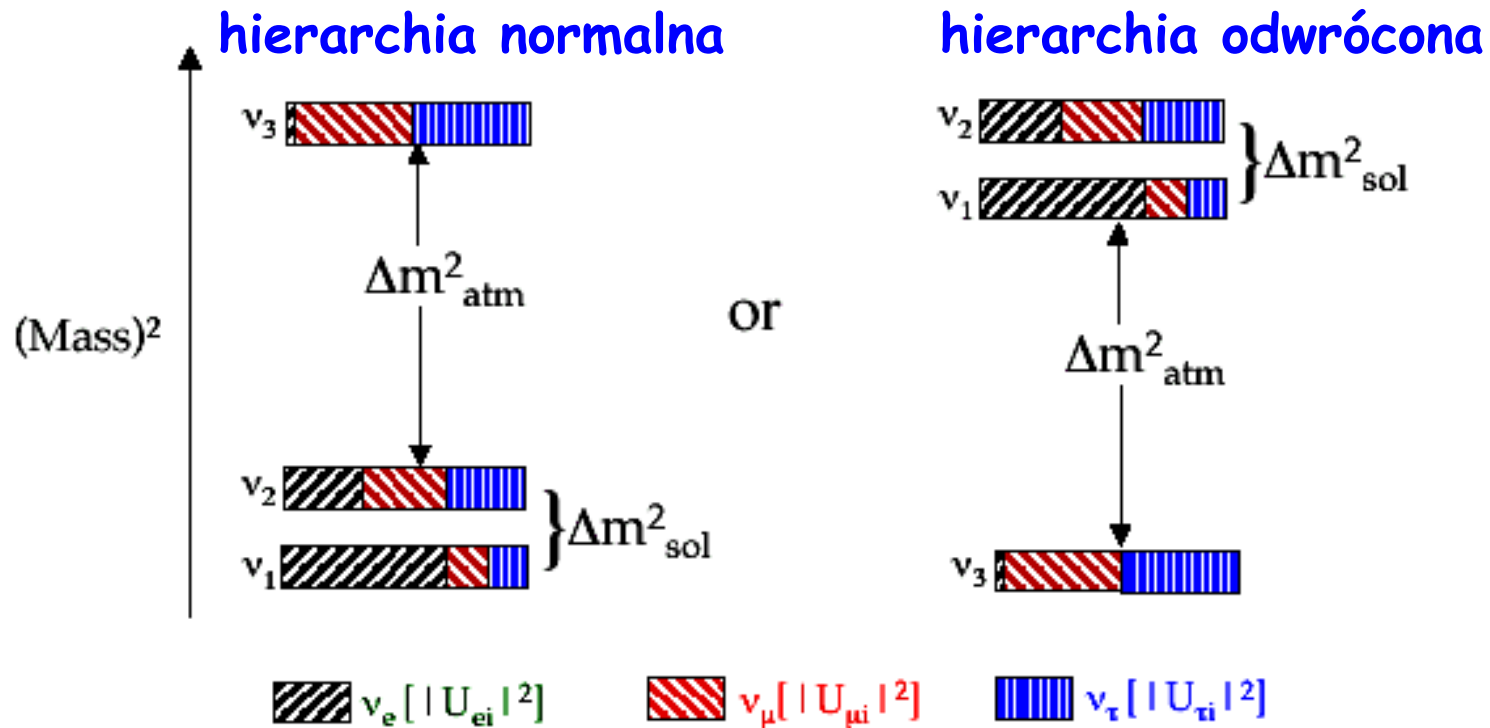
CP

Violation





# Masy neutrin - czego uczą oscylacje



→ Najcięższe z neutrin musi mieć masę większą niż 50 meV

Dwa ważne pytania:

Gdzie jest zero na tej skali masy?

Czy hierarchia jest normalna czy odwrócona względem  $\Delta m^2_{\text{atm}}$

---

# Jak można zmierzyć masy neutrin?

---

**Bezpośredni pomiar masy:**

niepotrzebne są żadne dodatkowe założenia

-- w oparciu o analizę kinematyczną słabych rozpadów

(pomiar naładowanych produktów rozpadu i zastosowanie prawa zachowania energii i pędu)

-- z czasu przelotu neutrin z wybuchu gwiazdy supernowej

(Nagroda Nobla w 2002 roku za obserwację neutrin z wybuchu supernowej 1987A - początek astronomii neutrinowej)

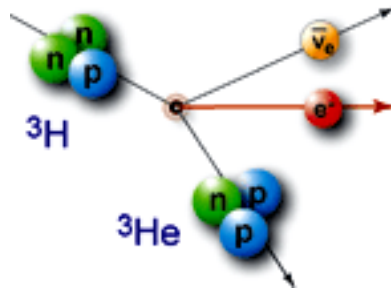
**W oparciu o pomiary kosmologiczne:**

bardzo czuła metoda, ale zależna od modelu

**W oparciu o podwójny bezneutrinowy rozpad  $\beta$ :**

bardzo czuła metoda, ale neutrino musi być cząstką Majorany

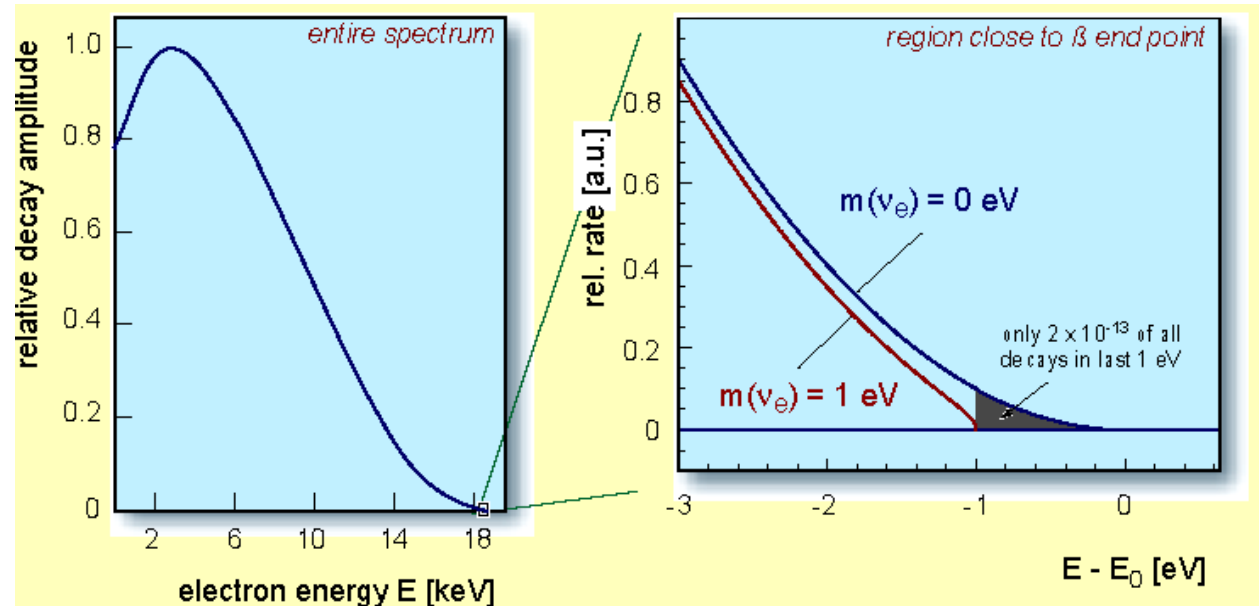
# Pomiar masy $\nu_e$ w oparciu o rozpad $\beta$ trytu



$$E_0 = M(^3H) - M(^3He) - m_e$$

$$= 18.6 \text{ keV}$$

$$\tau_{1/2} = 12.3 \text{ years}$$



Obecne ograniczenie  $m(\nu_e) < 2.2 \text{ eV}$  - eksperymenty Mainz i Troitsk  
W przygotowaniu eksperyment KATRIN (start w 2008 roku), który ma osiągnąć 0.2 eV

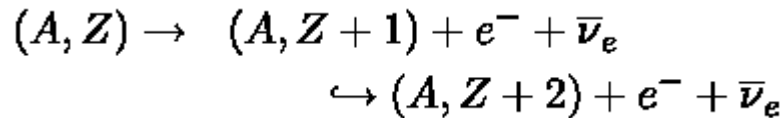
10-krotne zmniejszenie górnej granicy masy oznacza 100-krotnie mniej przypadków  $\rightarrow$  czułość eksperymentu musi być 100 razy większa

# Kosmologiczne ograniczenia na masę neutrin

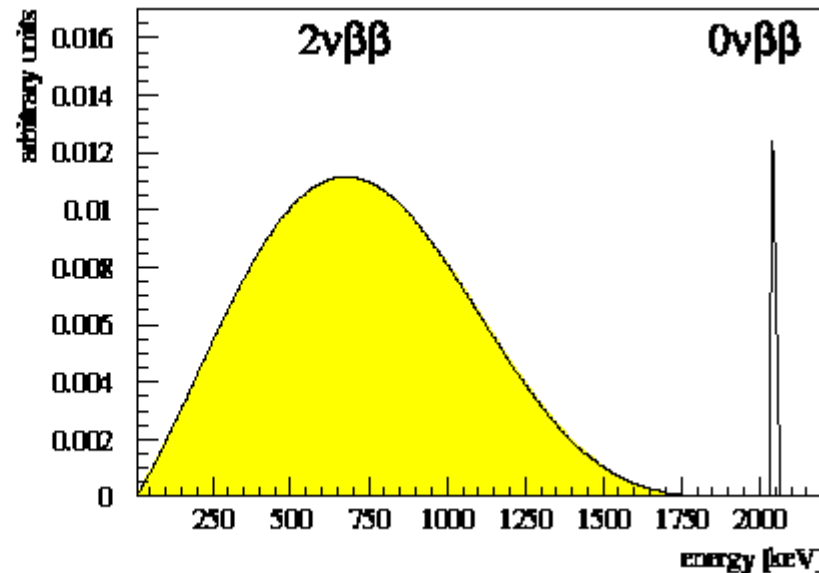
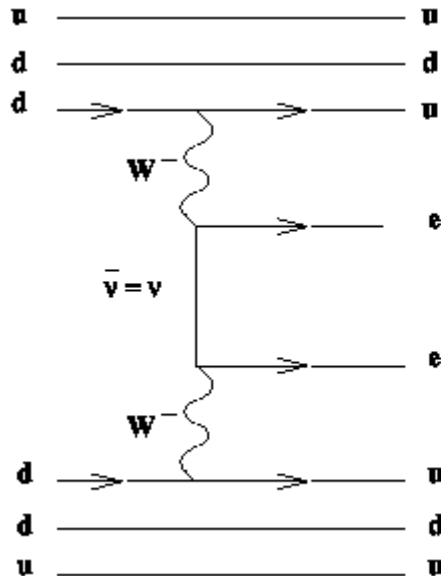
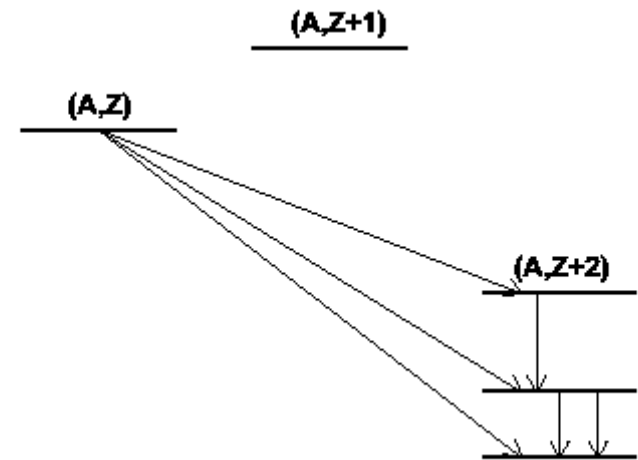
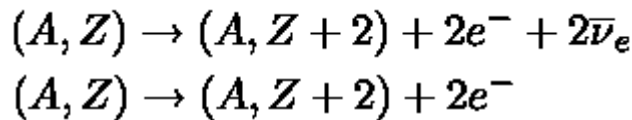
Authors	$\Sigma m_\nu / \text{eV}$ (limit 95%CL)	Data / Priors
Spergel et al. (WMAP) 2003 [astro-ph/0302209]	0.69	WMAP, CMB, 2dF, $\sigma_8$ , HST
Hannestad 2003 [astro-ph/0303076]	1.01	WMAP, CMB, 2dF, HST
Tegmark et al. 2003 [astro-ph/0310723]	1.8	WMAP, SDSS
Barger et al. 2003 [hep-ph/0312065]	0.75	WMAP, CMB, 2dF, SDSS, HST
Crotty et al. 2004 [hep-ph/0402049]	1.0 0.6	WMAP, CMB, 2dF, SDSS & HST, SN
Hannestad 2004 [hep-ph/0409108]	0.65	WMAP, SDSS, SN Ia gold sample, Ly- $\alpha$ data from Keck sample
Seljak et al. 2004 [astro-ph/0407372]	0.42	WMAP, SDSS, Bias, Ly- $\alpha$ data from SDSS sample

# Podwójny bezneutrinowy rozpad beta

Dla niektórych jąder parzysto-parzystych sekwencja rozpadów



jest zabroniona przez prawo zachowania energii i zachodzi podwójny rozpad  $\beta$



# Podwójny rozpad $\beta$

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

$$|M^{0\nu}|^2$$

Element macierzy jądrowej

$$\langle m_\nu \rangle^2$$

efektywna masa neutrina

$$\langle m_\nu \rangle = \sum_k \phi_k m_k U_{e,k}^2$$

nucl-ex/0410029

Ostateczny cel  
eksperymentów:  
czułość  $\sim 10$  meV

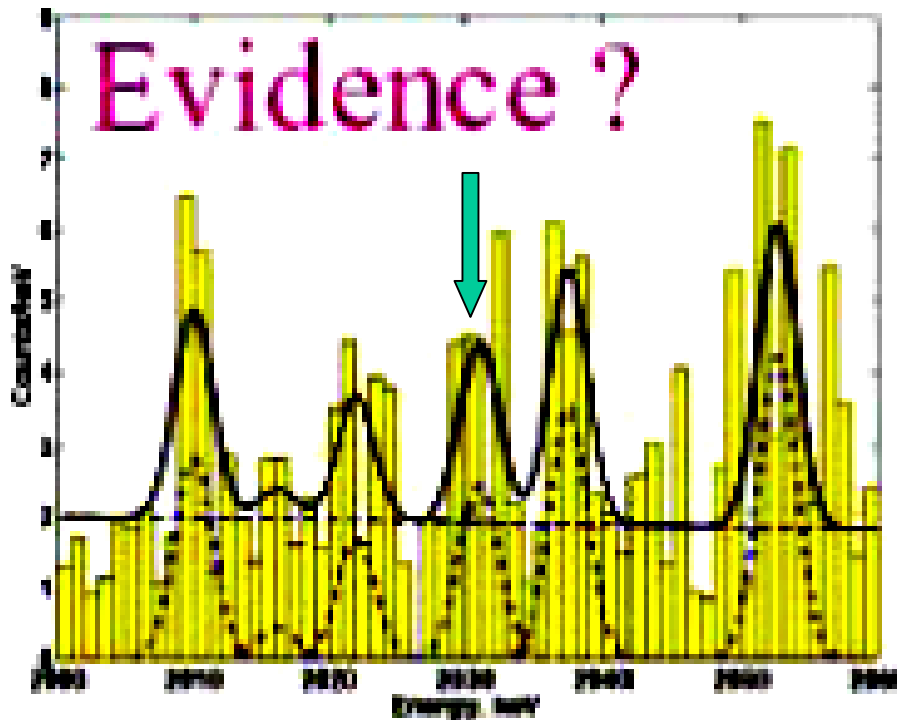
Bardzo liczne  
i wyrafinowane  
projekty

Isotope	$T_{1/2}^{0\nu}$ (y)	References	$\langle m_\nu \rangle$ (eV)
$^{48}\text{Ca}$	$> 1.4 \cdot 10^{22}$	[[77]]	$< 7.2 - 44.7$
$^{76}\text{Ge}$	$> 1.9 \cdot 10^{25}$	[[40]]	$< 0.35$
$^{82}\text{Se}$	$> 2.7 \cdot 10^{22}$ (68%)	[[43]]	$< 5.0$
$^{100}\text{Mo}$	$> 5.5 \cdot 10^{22}$	[[83]]	$< 2.1$
$^{116}\text{Cd}$	$> 1.7 \cdot 10^{23}$	[[89]]	$< 1.7$
$^{128}\text{Te}$	$> 7.7 \cdot 10^{24}$	[[58]]	$< 1.0 - 4.4$
$^{130}\text{Te}$	$> 5.5 \cdot 10^{23}$	[[85]]	$< 0.37 - 1.9$
$^{134}\text{Xe}$	$> 5.8 \cdot 10^{22}$	[[61]]	$< 17.0 - 27.0$
$^{136}\text{Xe}$	$> 1.2 \cdot 10^{24}$	[[61]]	$< 0.8 - 2.4$
$^{150}\text{Nd}$	$> 1.2 \cdot 10^{21}$	[[51]]	$< 3.0$
$^{76}\text{Ge}$	$(0.69 - 4.18) \cdot 10^{25}$	[[78]]	$0.24 - 0.58$
$^{76}\text{Ge}$	$1.19 \cdot 10^{25}$	[[78]]	$0.44$
$^{82}\text{Se}$	$> 1.4 \cdot 10^{23}$	[[82]]	$< 1.5 - 3.1$
$^{100}\text{Mo}$	$> 3.1 \cdot 10^{23}$	[[82]]	$< 0.8 - 1.2$
$^{130}\text{Te}$	$> 7.5 \cdot 10^{23}$	[[86]]	$< 0.3 - 1.6$

# Eksperyment Moskwa-Heidelberg - sygnał $0\nu\beta\beta$ ?

Nowa publikacja w 2004 roku w oparciu o dane z okresu 1990-2003

Klapdor-Kleingrothaus Phys. Lett. B586 (2004) 198



Maximum przy energii 2039 keV

$$T_{1/2} = 0.6-8.4 \times 10^{25} \text{ lat}$$

$$\rightarrow m_\nu = 0.17-0.63 \text{ eV}$$

Wynik musi być zweryfikowany przez inny eksperyment, np. eksperyment NEMO3 powinien za parę lat osiągnąć wystarczającą czułość



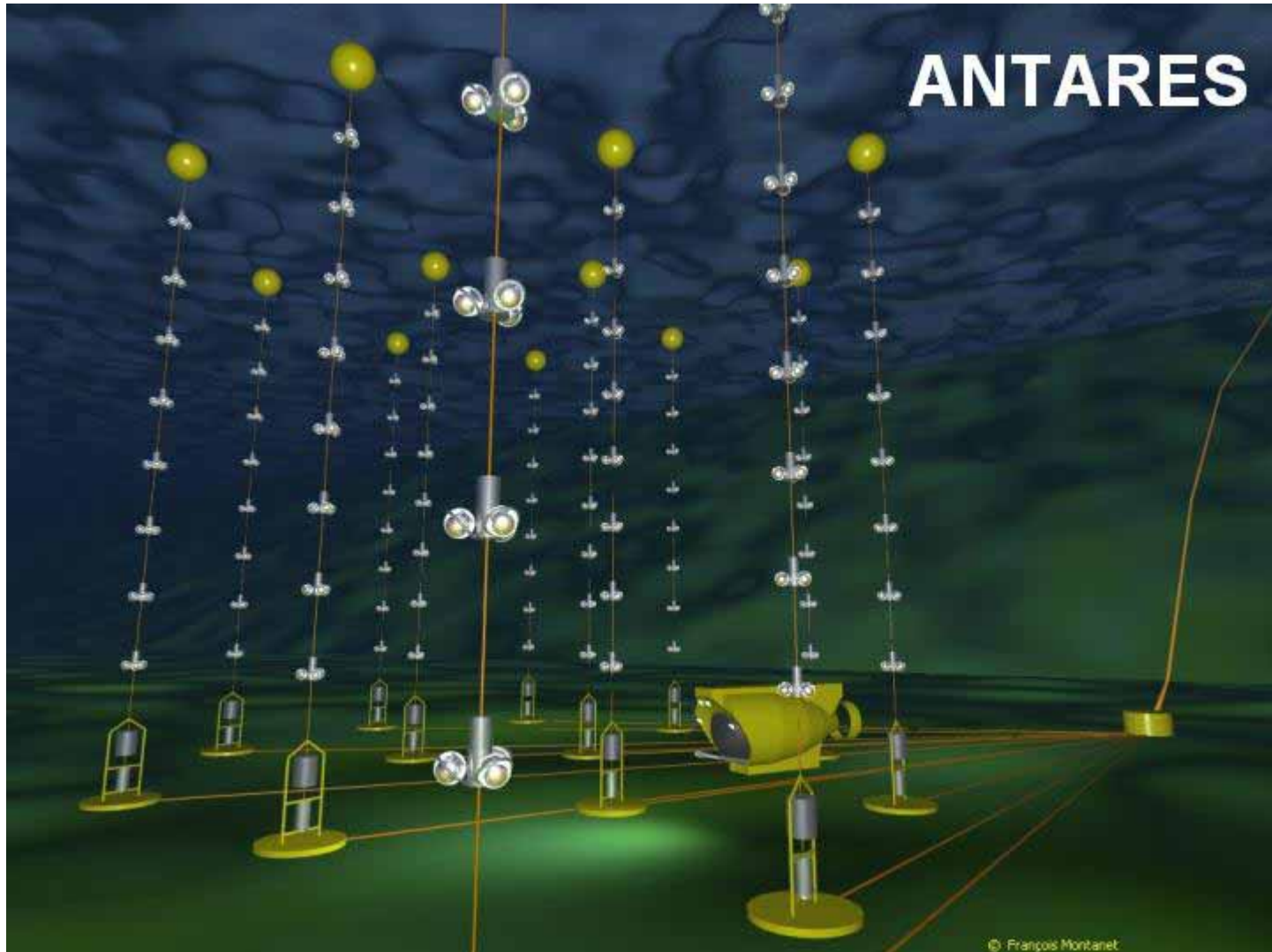


# AMANDA/ICECUBE - Antarctic experiments



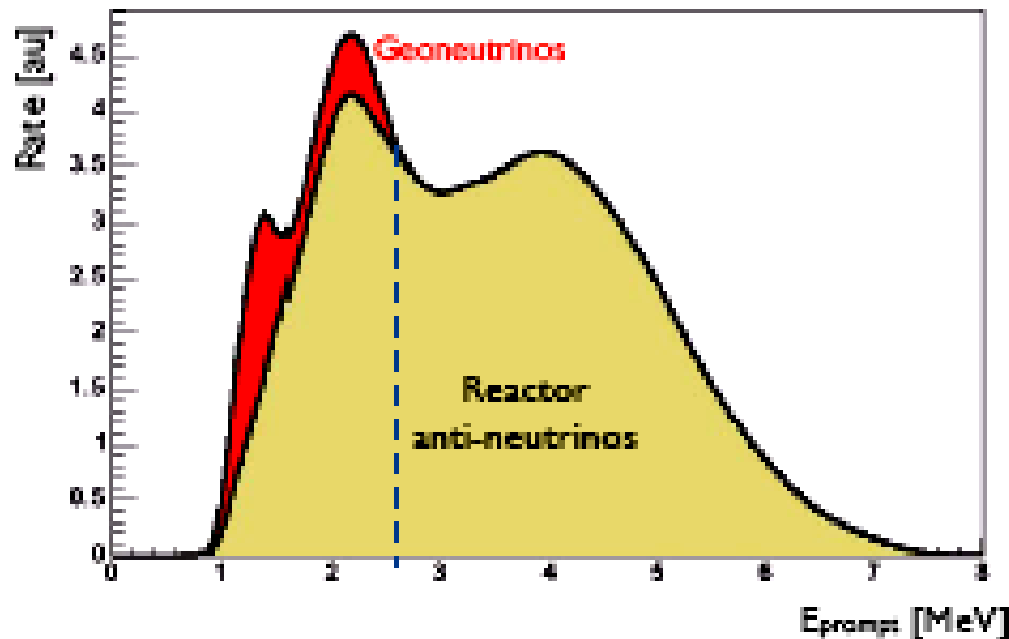
# Podwodne teleskopy neutrinowe

Blisko Tuluzy, na głębokości 2400 m, udane testy fragmentu detektora



# Geoneutrino w KamLAND

- Antineutrino z  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  dają możliwość zajrzenia do wnętrza Ziemi i zbadania mechanizmu generacji energii
- KamLAND jest pierwszym detektorem dostatecznie czułym, aby zmierzyć geoneutrino z tych rozpadów



Obecne ograniczenie  
z KamLAND-u  
na ciepło z rozpadów  
radioaktywnych < 60 TW  
(oszacowanie 31+-1 TW)

T.Araki et al.,  
Nature 436 (2005) 467

---

# Polacy w badaniach neutrin

---

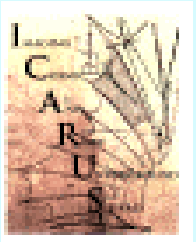
**Obecnie:**

D.Kiełczewska + doktoranci w eksperymencie  
SuperKamiokande

M.Wójcik + doktoranci w eksperymentach Gallex  
i Borexino

Ponad 20-osobowa polska grupa w eksperymencie  
ICARUS

→ polska grupa neutrinowa



# Eksperyment ICARUS

(Imaging Cosmic And Rare Underground Signals)

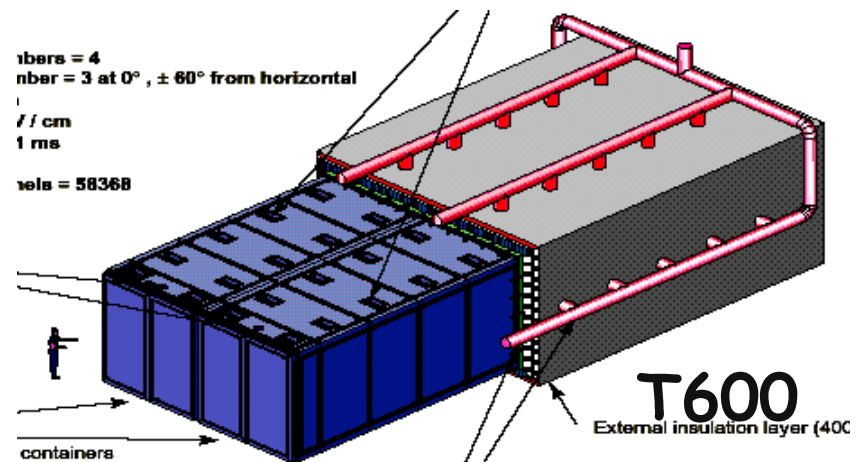
## Problematyka fizyczna:

Badanie oddziaływań neutrin słonecznych, atmosferycznych, z wybuchu Supernowej i z wiązki akceleratorowej CNGS oraz poszukiwanie rozpadu protonu przy użyciu wielkich komór TPC wypełnionych ciekłym argonem.

## Dwa etapy:

T600 - detektor o całkowitej masie 600 ton, instalacja w Gran Sasso rozpoczęta

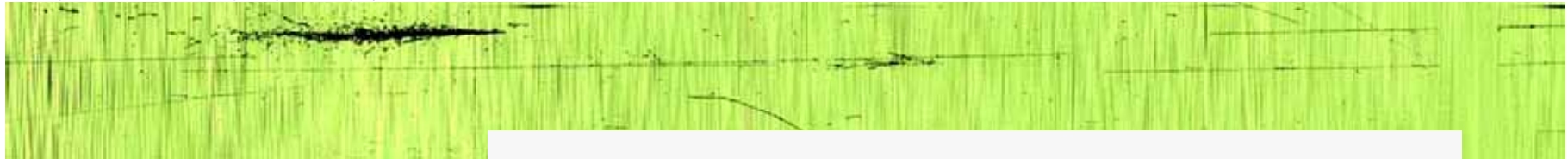
Detektor o całkowitej masie kilku (3-10) kton - R&D



# T600-dane z testów pierwszej komory TPC

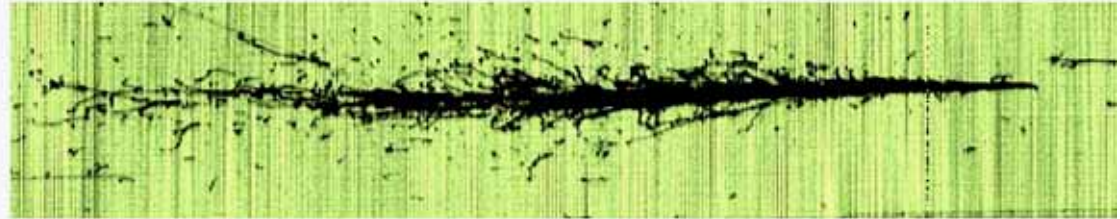
Nowatorska technika eksperymentalna: całkowicie elektroniczny detektor, dający trójwymiarowy obraz przypadku oddziaływania o jakości porównywalnej z obrazami z komór pęcherzykowych oraz bardzo dobry pomiar energii w oparciu o  $dE/dx$  na drutach.

Przykładowy przypadek:

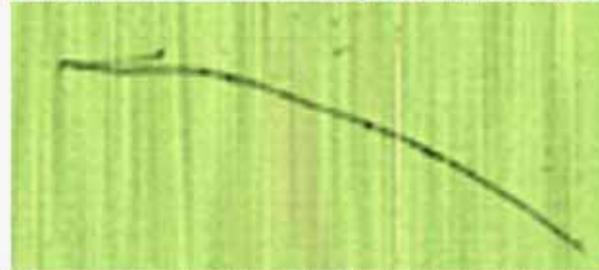


Długi tor mionu (14m)  
oraz

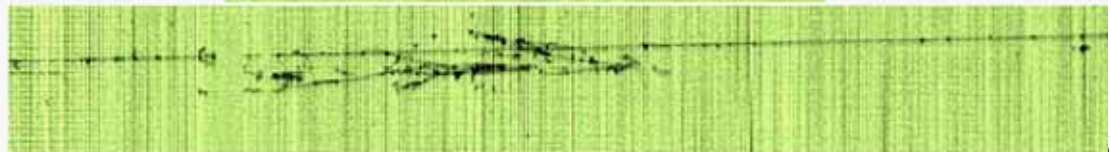
kaskada fotonowa



rozpad mionu

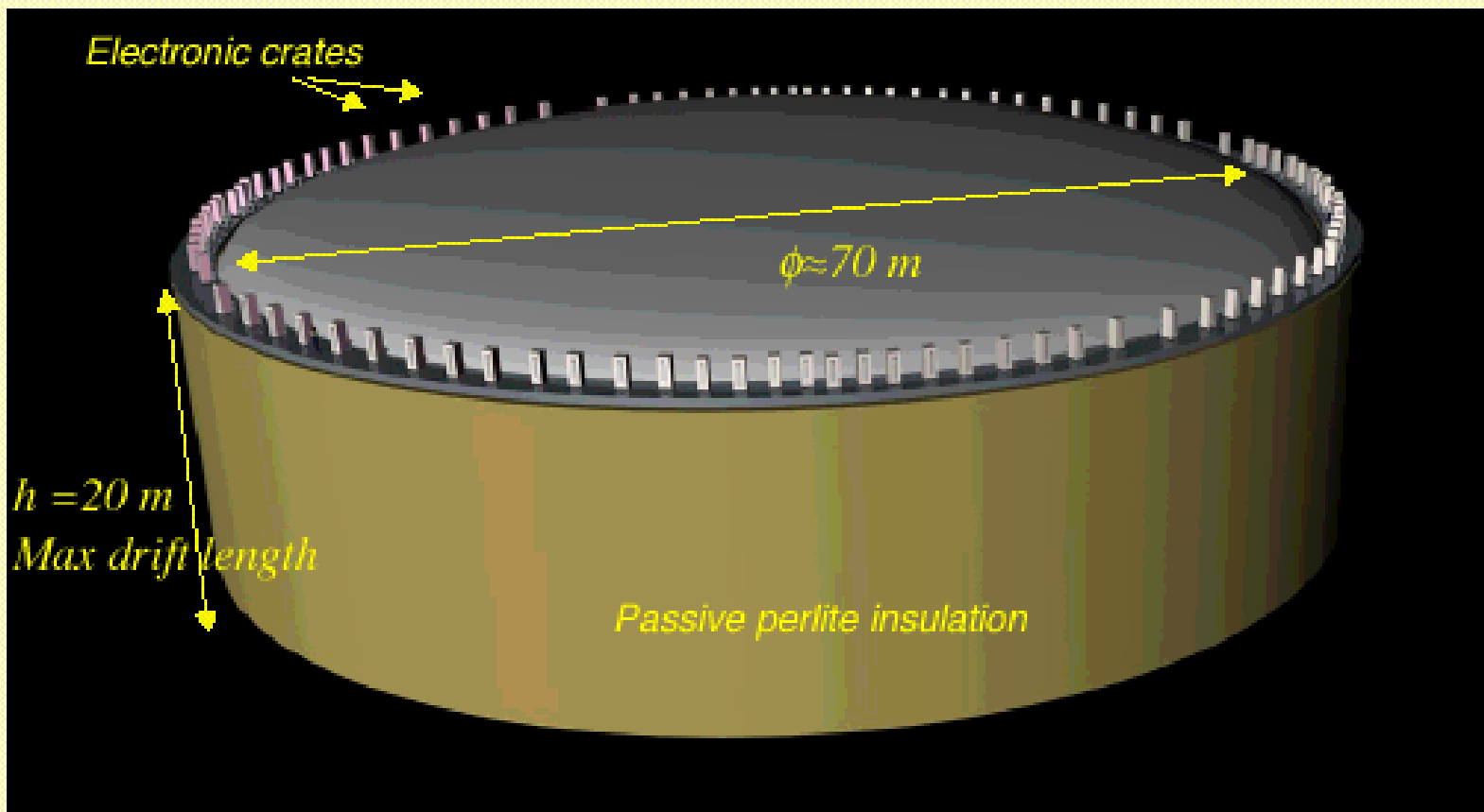


widoczne elektrony  
delta wzdłuż toru mionu



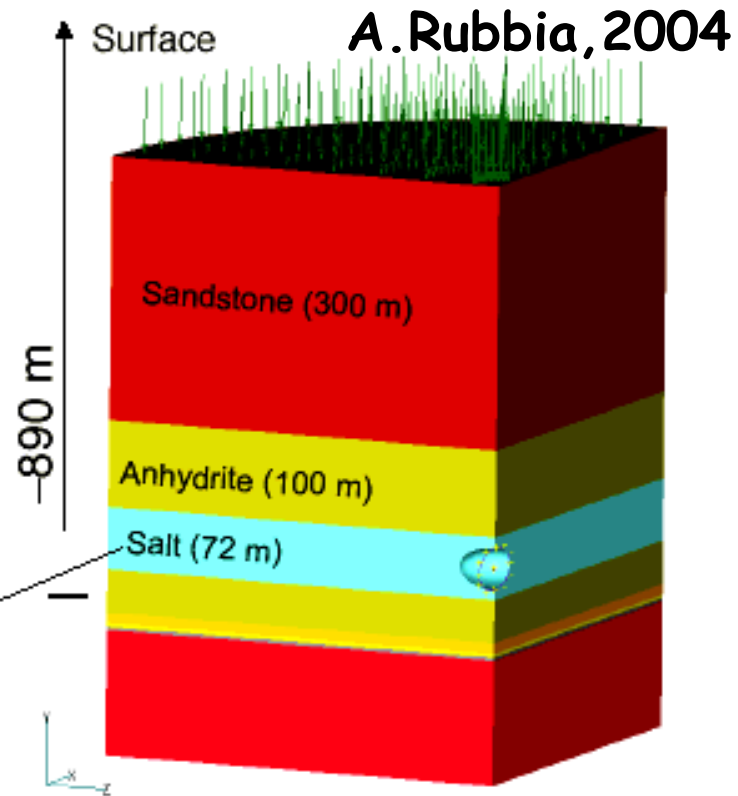
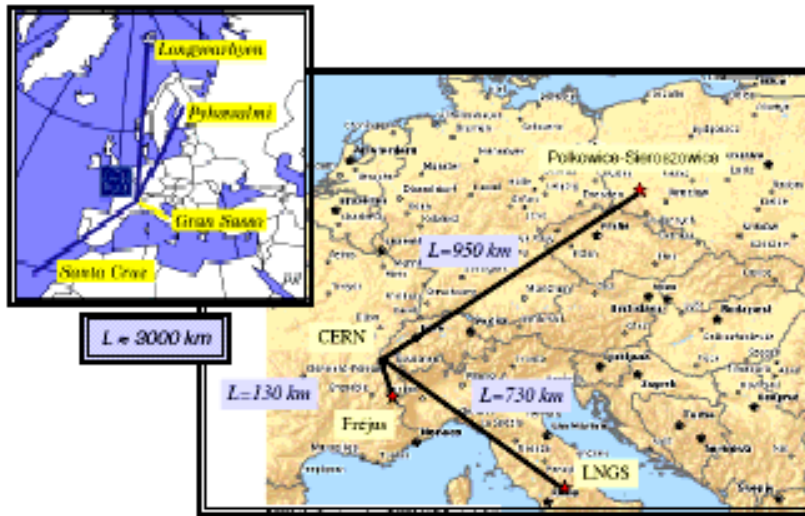
# A gdyby zamiast 1Mtony wody...

## A 100 kton liquid Argon TPC detector



# Gdzie go umieścić? Może dałoby się w Polsce?

## Possible European CERN-LBL sites



**Example:** Salt mine in Europe: Copper mines (owned by KGHM, one of the largest producers of copper and silver in the world). Salt layer at 1000 underground (dry) Very large caverns already exist (from mine exploitation).

Wstępna analiza geomechaniczna  
W. Pytel-Cuprum/Pol. Wrocławska  
Toruń, 19.01.2006

Niezależna analiza:  
J. Ślizowski, K. Urbańczyk-Kraków



# Naturalne tło promieniotwórcze

- Pomiary naturalnego tła promieniotwórczego: zapoczątkowane przez J.Kisiela i J.Dorę z U.Śl, dokładna analiza próbek w IFJ (J.W.Mietelski, E.Tomankiewicz, S.Grabowska)

**Tabela 1. Wyniki stężenia substancji radioaktywnych w badanych próbkach soli z kopalni Sieroszowice.**

Radionuklid	1	2	3	4
	[Bq/kg]			
$^{238}\text{U}$	$0.40 \pm 0.06$	$0.34 \pm 0.05$	$0.10 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.02$
$^{234}\text{U}$	$0.38 \pm 0.06$	$0.33 \pm 0.05$	$0.14 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.02$
$^{230}\text{Th}$	$0.29 \pm 0.05$	$0.34 \pm 0.06$	$0.10 \pm 0.03$	$0.19 \pm 0.03$
<i>Średnio sz. U</i>	<i>0.357</i>	<i>0.337</i>	<i>0.113</i>	<i>0.157</i>
$^{232}\text{Th}$	$0.09 \pm 0.03$	$0.08 \pm 0.02$	$0.03 \pm 0.02$	$0.11 \pm 0.02$
$^{235}\text{U}$	$0.015 \pm 0.006$	$0.015 \pm 0.007$	$< 0.005$	$0.008 \pm 0.004$
$^{40}\text{K}$	nd	nd	nd	$2.1 \pm 0.3$

→ Pomiary są kontynuowane, ale już widać, że tło jest **bardzo niskie**.

# Wielki Czwartek 2005 w Sieroszowicach



Komora solna na głębokości 950 m  
od powierzchni ziemi, kubatura  
(15x15x100) m<sup>3</sup>

---

## Zamiast podsumowania

---

1 eV przerwy energetycznej w krzemie stanowi podstawę współczesnej elektroniki, informatyki i telekomunikacji

Czy mała masa neutrin (prawdopodobnie sporo mniejsza niż 1 eV) jest przejawem istnienia cząstek o masach niedostępnych badaniom akceleratorowym i doprowadzi nas do poznania nowych praw przyrody?