

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

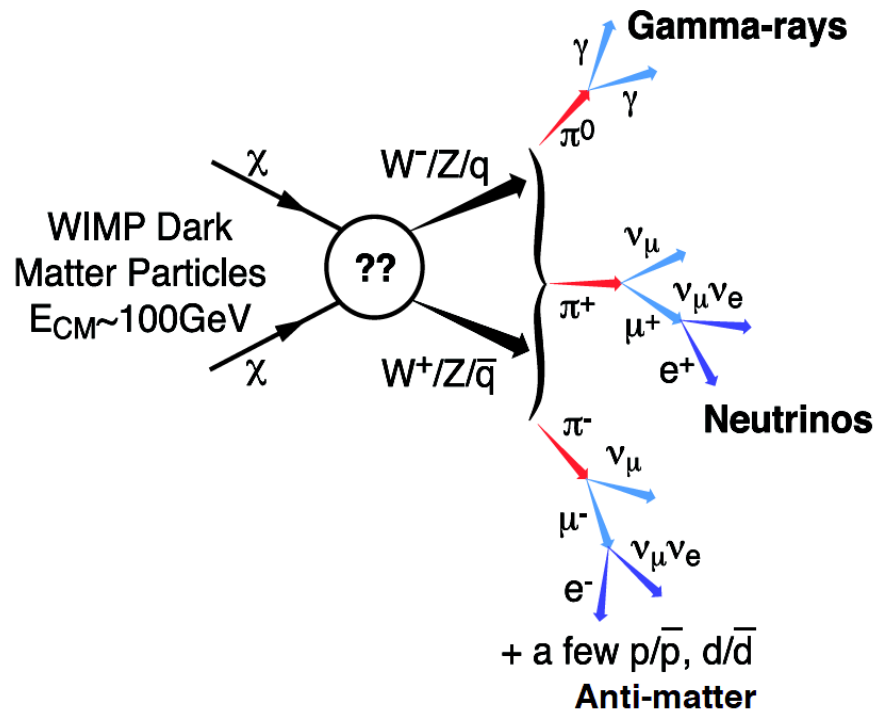
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład XII

- Neutrino i ich własności
- Super Kamiokande
- Ice Cube

Ciemna materia

Anihilacja DM



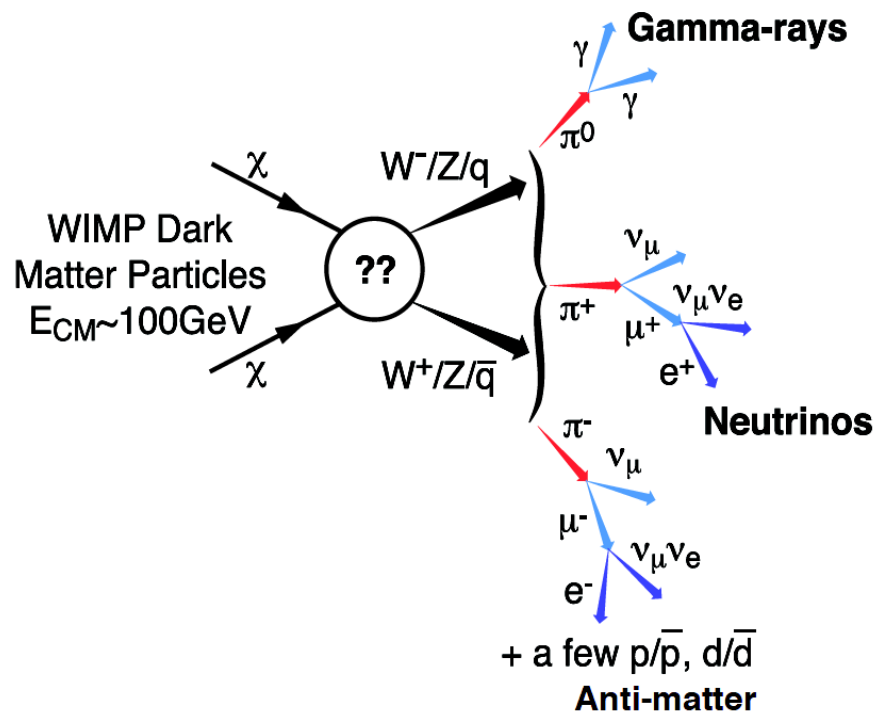
Poszukiwania sygnałów anihilacji DM we wszystkich możliwych kanałach:

- promieniowanie gamma,
- pozytony,
- antyprotony ...

⇒ możemy też szukać neutrin!

Ciemna materia

Anihilacja DM



Zalety "astronomii neutrin":

- wydostają się bez przeszkód ze źródeł
 - nie odchylane w polach magnetycznych
 - nie oddziałują z materią międzygwiazdową
nieograniczony zasięg
- ⇒ możliwa identyfikacja źródeł
- niosą informację o procesie produkcji
(zapach leptonu)

Niestety, bardzo trudno je zmierzyć!...

Neutrino

Źródła kosmologiczne

Wysokoenergetyczne neutrino mogą być produkowane nie tylko w **anihilacji DM**.

Powinny też powstawać w procesach związanych z produkcją i oddziaływaniem **promieniowania kosmicznego**, w aktywnych jądrach galaktyk (AGN), błyskach gamma (GRB) itp.

Główne reakcje produkcji

- rozpad pionu: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- rozpad mionu: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- rozpad neutronu: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Produkcja pionów związana w szczególności z obcięciem GZK:



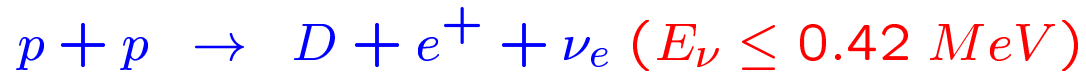
⇒ oczekujemy produkcji powiązanej ze **źródłami UHECR**

W zależności od źródła i mechanizmu produkcji, skład zapachowy może być różny...

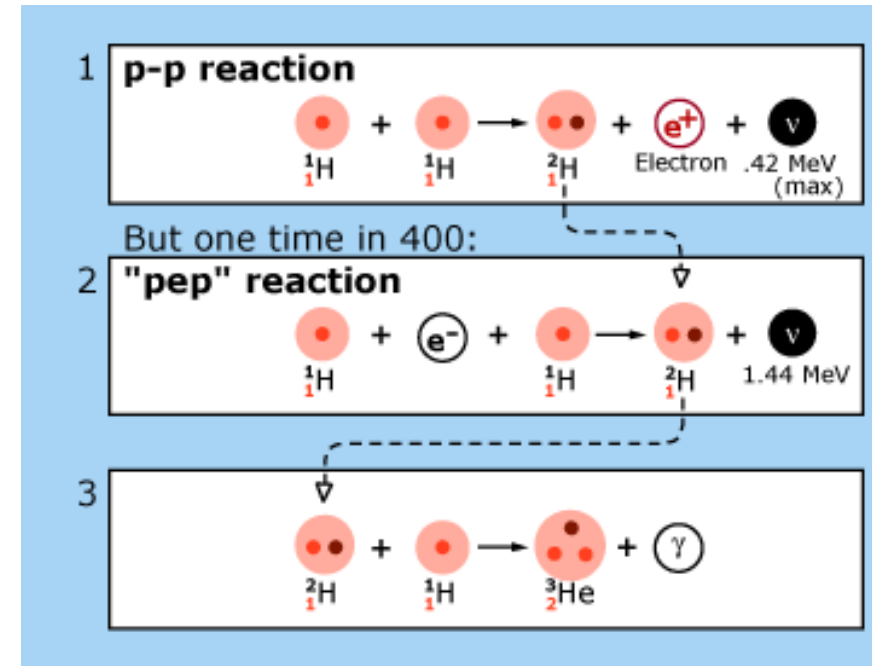
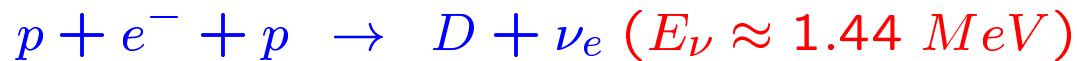
Neutrina

Źródła

Słońce jest niezwykle intensywnym źródłem neutrin elektronowych, głównie pochodzących z procesu **p-p**:



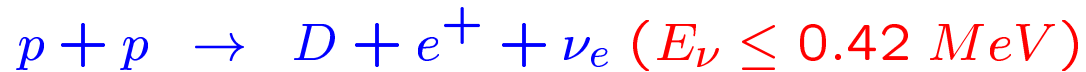
Trochę wyższe energie w procesie **“pep”**:



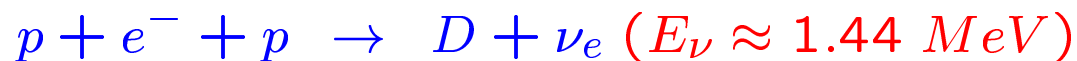
Neutrino

Źródła

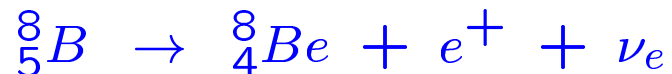
Słońce jest niezwykle intensywnym źródłem neutrino elektronowych, głównie pochodzących z procesu **p-p**:



Trochę wyższe energie w procesie **“pep”**:

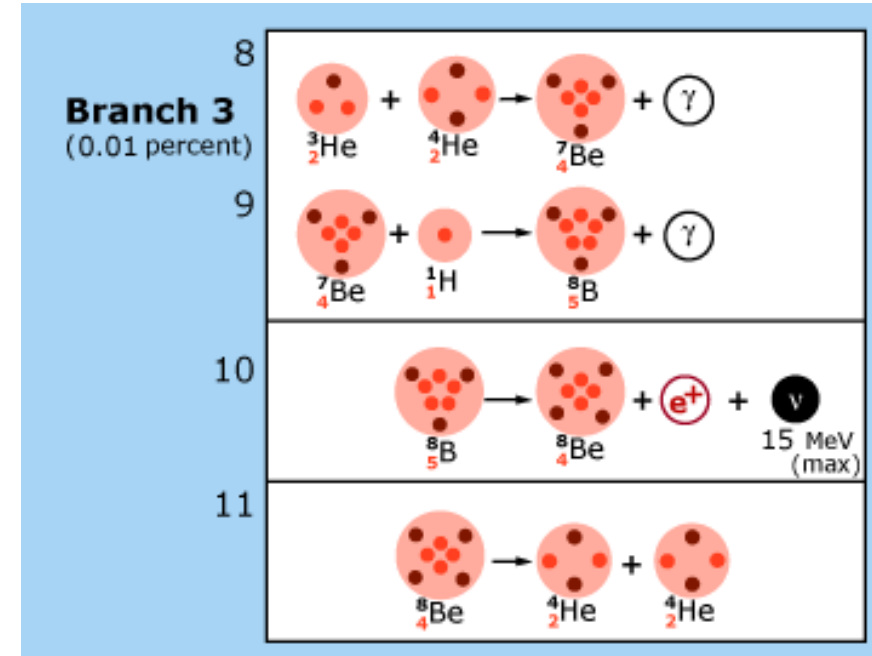


Najwyższe energie dostępne w rozpadzie ${}^8\text{B}$:



⇒ energia neutrino do **15 MeV**

Tylko te neutrino obserwowalne detektorami fizyki cząstek...

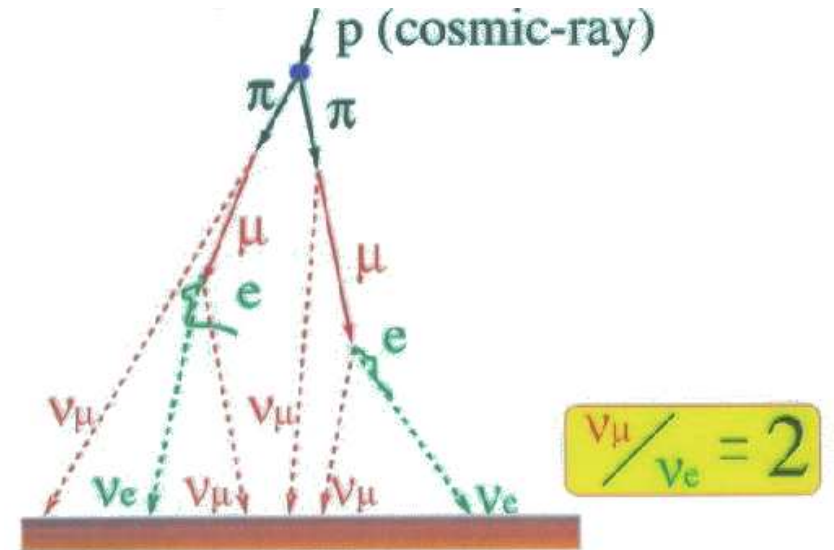
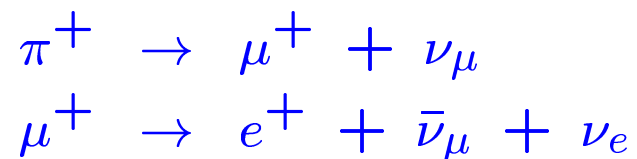


Neutrino

Źródła

Pierwotne promieniowanie kosmiczne (głównie protony i jądra lekkich pierwiastków o energiach do $\sim 10^{20}$ eV; cięższe jądra dla UHECR) oddziałuje z jądrami O i N w atmosferze wywołując kaskady **cząstek wtórnych**, głównie pionów π^\pm .

Neutrino powstają w łańcuchu rozpadów:

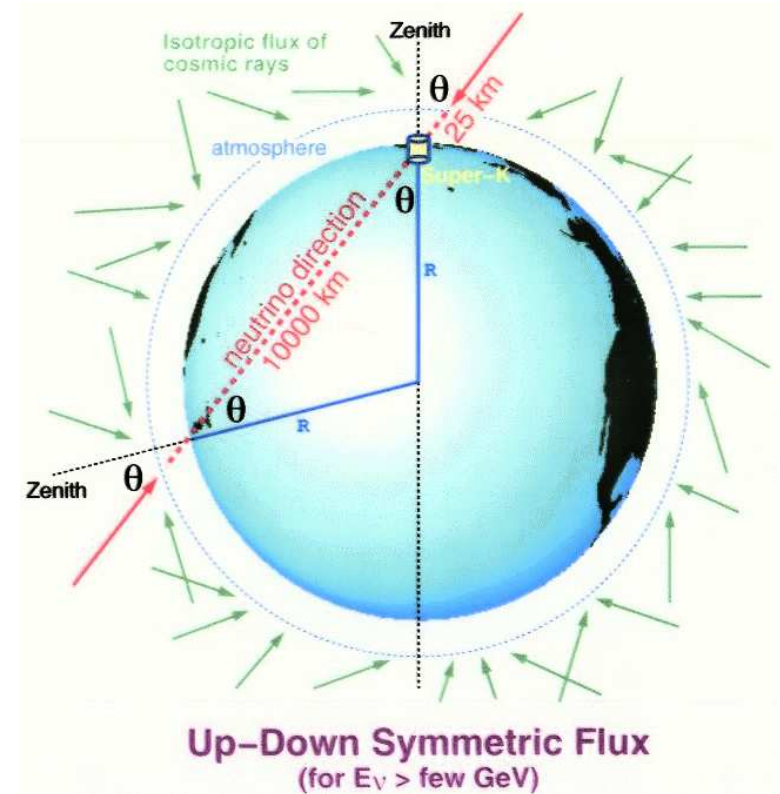
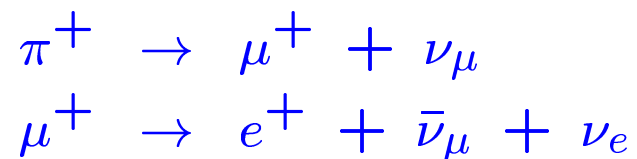


Neutrino

Źródła

Pierwotne promieniowanie kosmiczne (głównie protony i jądra lekkich pierwiastków o energiach do $\sim 10^{20}$ eV; cięższe jądra dla UHECR) oddziałuje z jądrami O i N w atmosferze wywołując kaskady **cząstek wtórnych**, głównie pionów π^\pm .

Neutrino powstają w łańcuchu rozpadów:



Ponieważ pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe, oczekujemy, że także strumień **neutrino atmosferycznych** będzie izotropowy!

Neutrino

Neutrino reaktorowe

Rozszczepienie jednego jądra ^{238}U wyzwala energię ok. 200 MeV

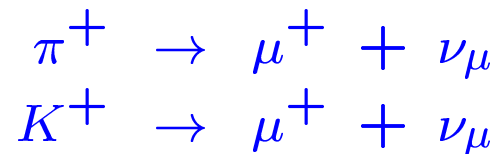
Średnio produkowane jest przy tym sześć **entyneutrino elektronowych**,
głównie w rozpadach neutronów: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Reaktor o mocy 1GW $\Rightarrow \sim 10^{20}$ rozszczepień na sekundę $\Rightarrow \sim 6 \cdot 10^{20} \nu/s$

Neutrino akceleratorowe

Potrafimy wytwarzać wiązki protonów o **wysokiej energii**, **bardzo dużym natężeniu**.

Oddziałując z gęstą tarczą, protony produkują liczne cząstki wtórne, głównie piony i kaony (jak w kaskadzie atmosferycznej). **Neutrino mionowe** powstają z rozpadów:



Poprzez ogniskowanie wiązek pionów i kaonów przed ich rozpadami, możemy uzyskać wysokiej energii wiązki neutrino lub antyneutrino...

Neutrina

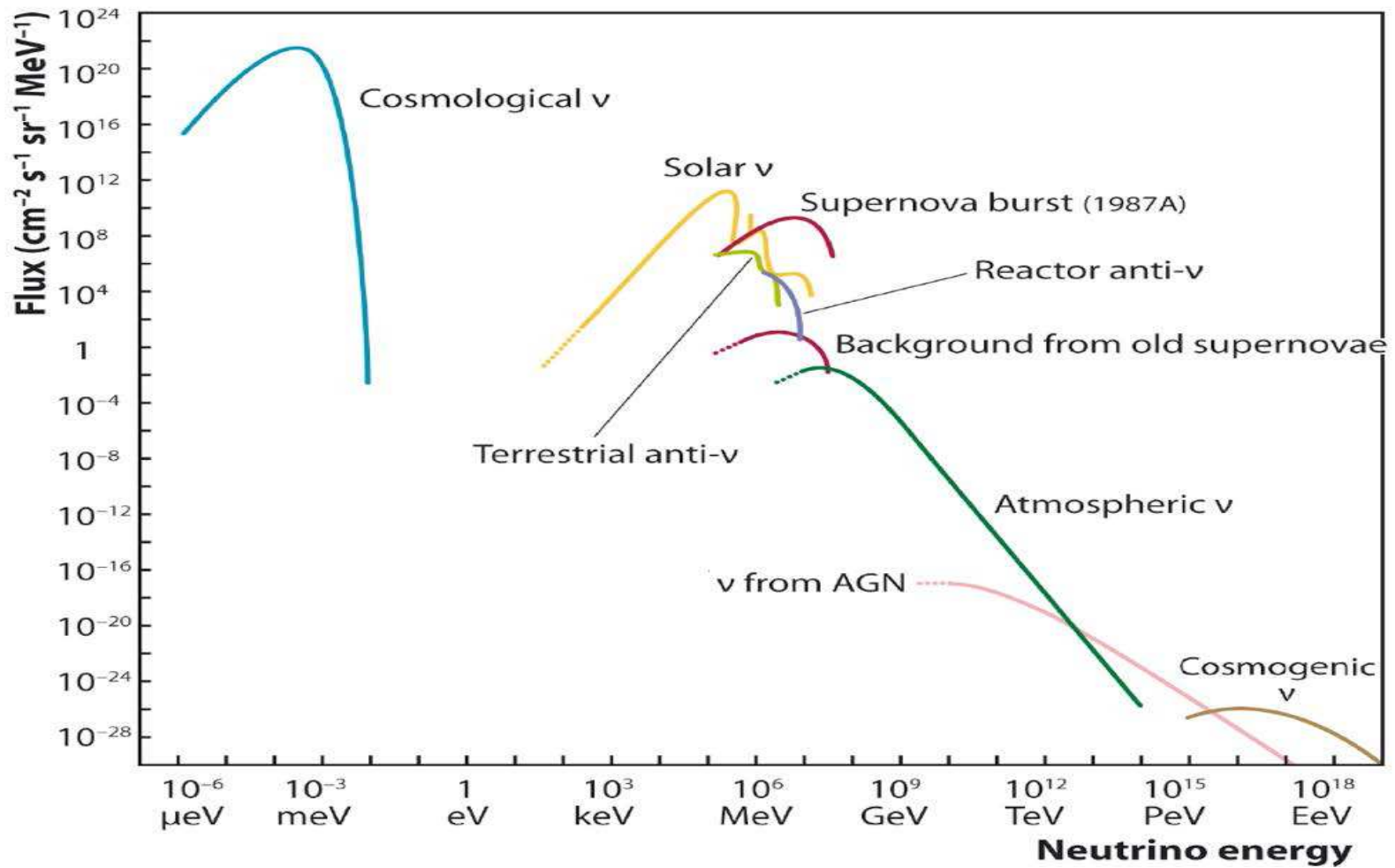
Źródła

Typ	Zapach	Energie	Strumień
Słoneczne	ν_e	$\leq 15 \text{ MeV}$	$6 \cdot 10^{10} \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (na Ziemi)
Atmosferyczne	$\nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$	100 MeV - TeV	$3 \cdot 10^7 \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (powyżej 10 MeV)
Reaktorowe	$\bar{\nu}_e$	rzędu MeV	$5 \cdot 10^9 \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (1 GW z odl. 1 km)
Akceleratorowe	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	rzędu GeV	10^{20} (całkowita statystyka)

Wszystkie te źródła są obecnie wykorzystywane w badaniu własności neutrin

Neutrino

Źródła



Super-Kamiokande

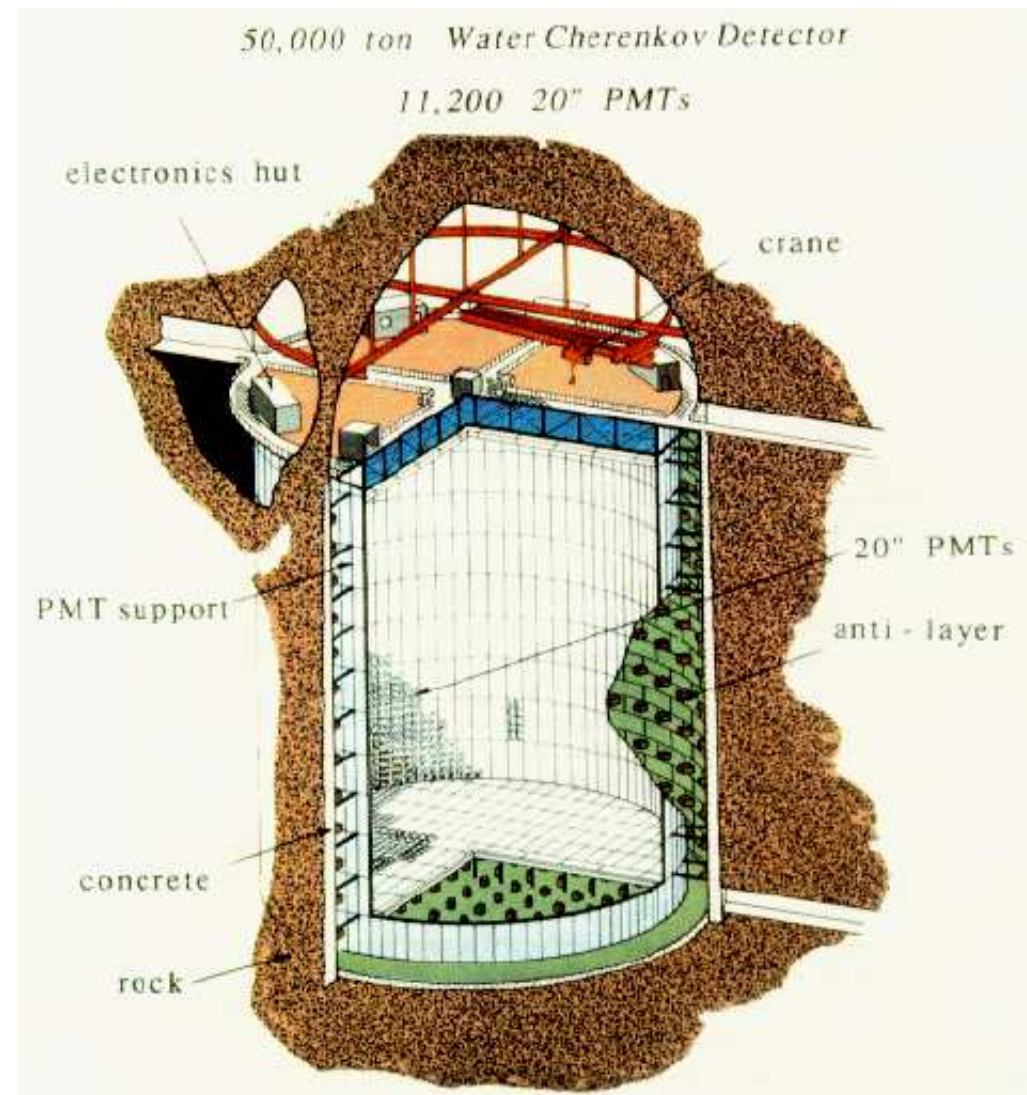
Eksperyment

Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

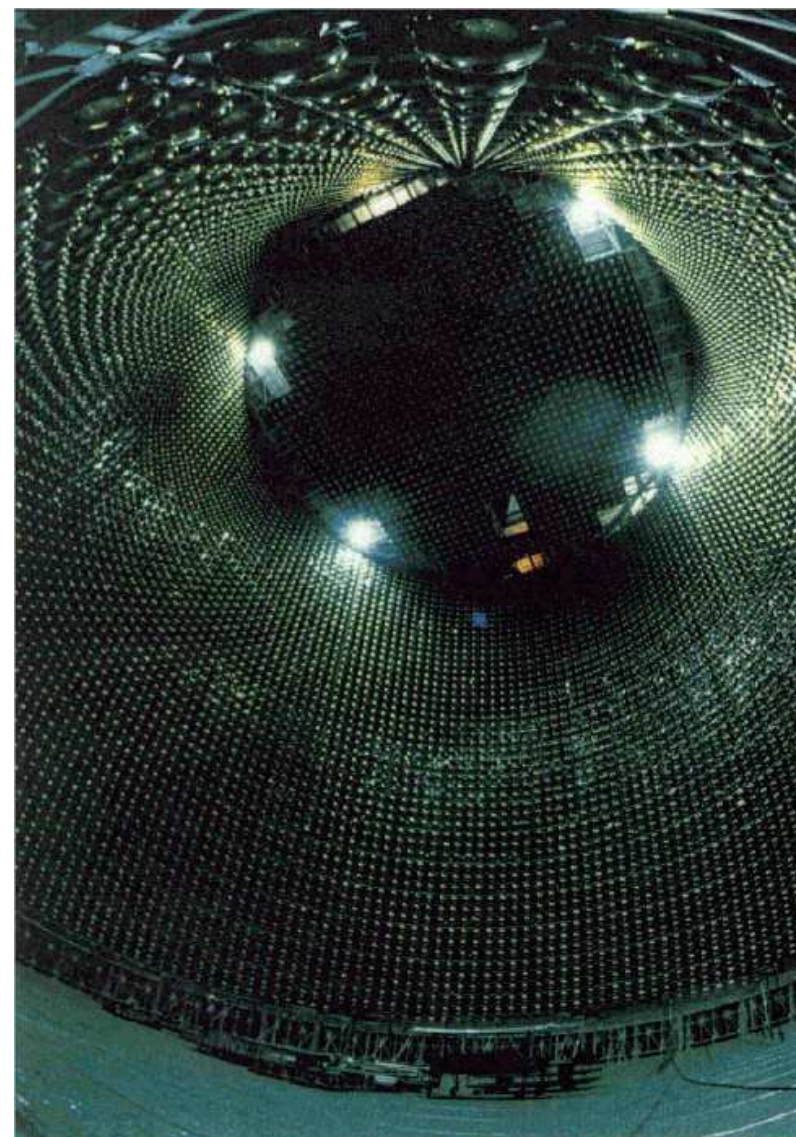
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**

Jak można mierzyć tak małe sygnały ($\sim 5MeV$) w tak ogromnym detektorze?



Super-Kamiokande



Napełnianie



Super-Kamiokande

Tło

Mimo ogromnej masy detektora oczekiwano jedynie około **30 przypadków** oddziaływań neutrin słonecznych **na dobę**.

Przypadki skrajnie niskich energii (rzędu 10 MeV) - konieczność **redukcji tła**.

Główne tło: **naturalna promieniotwórczość**.

Stężenie radonu w powietrzu w kopalni $\sim 3000 Bq/m^3$

- ⇒ hermetyczne drzwi, intensywna wentylacja powietrzem zewnętrznym
- ⇒ cała komora wyłożona specjalną plastikową osłoną zabezpieczającą przed przenikaniem radonu ze skał
- ⇒ hermetyczny zbiornik, dopełniony specjalnie oczyszczonym powietrzem ($3mBq/m^3$) pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego
- ⇒ intensywne filtrowanie wody (ok. 35 t/h, czyli cały detektor w ok. 2 miesiące)

Super-Kamiokande

Wyzwalanie

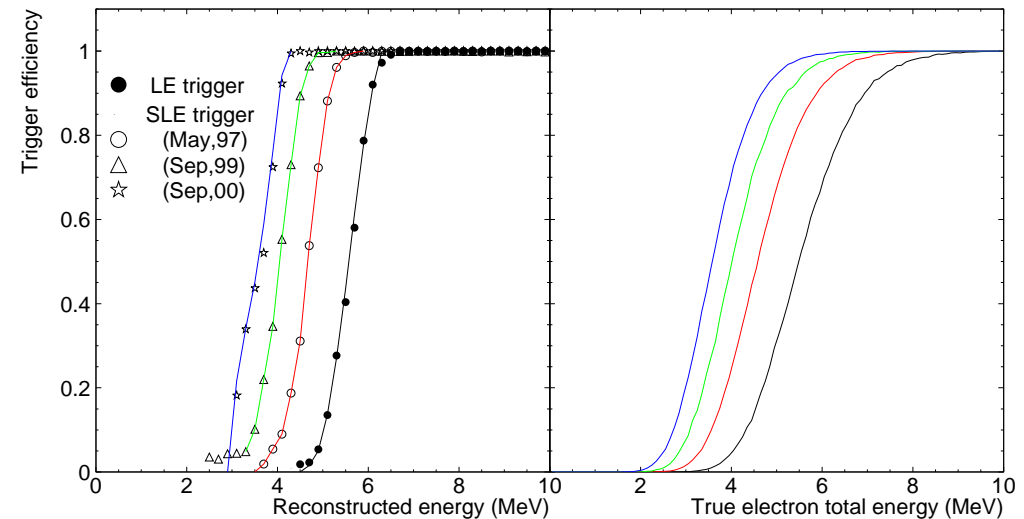
Średni poziom sygnału z pojedynczego fotopowielacza: 3.5 kHz.

Układ wyzwalania wymagał przyjęcia sygnału z wielu PMT w oknie czasowym 200 ns.

Średnia oczekiwana liczba zliczeń: ok. 8.

Różne progi wyzwalania:

- High Energy (HE) - 33 PMT
- Low Energy (LE) - 29 PMT
- Super Low Energy (SLE) - 24 PMT



Próg wyzwalania mógł być obniżany w miarę oczyszczania detektora.

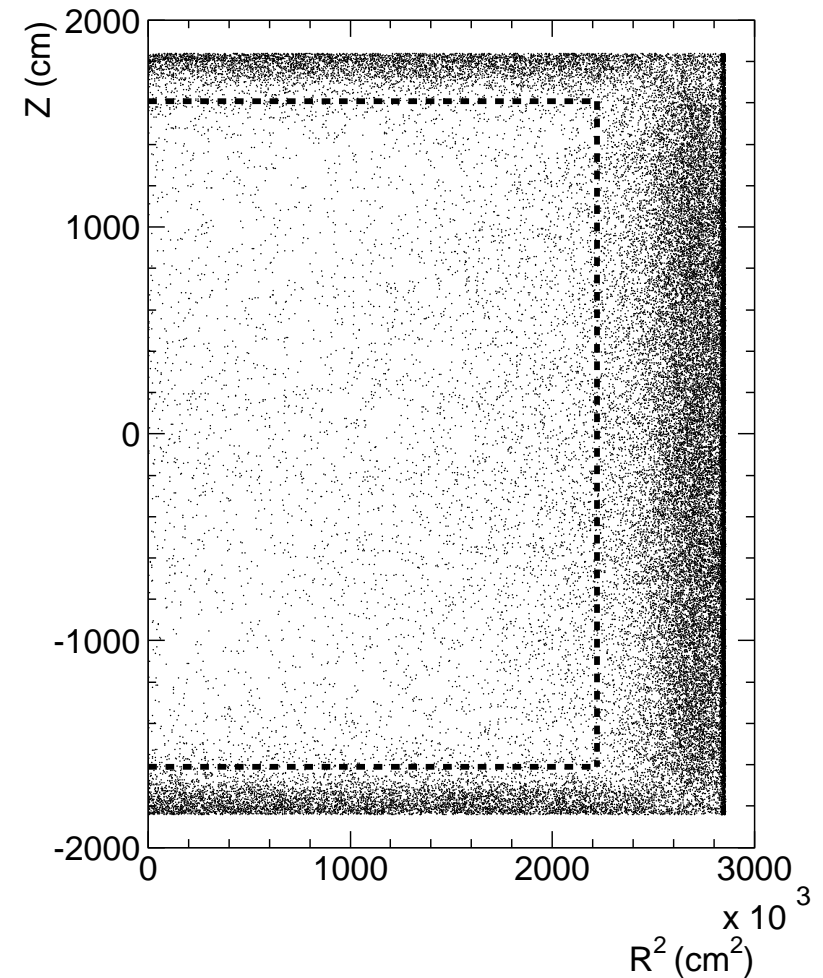
Super-Kamiokande

Wyzwalanie

Typowy rozkład rekonstruowanych wierzchołków po wstępnej selekcji przypadków niskiej energii (próg 5 MeV).

Wyraźny wkład **naturalnej promieniotwórczości** ścian komory.

Przerywana linia: “fiducial volume”
obszar z którego wybieramy przypadki do dalszej analizy.



Super-Kamiokande

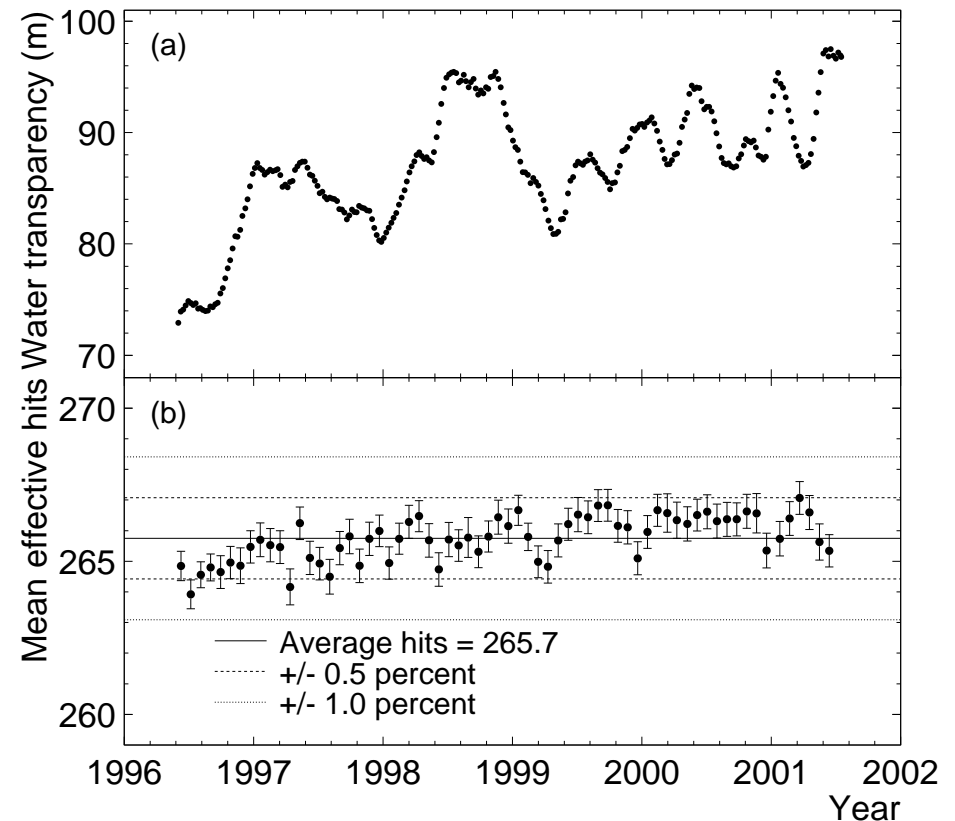
Kalibracja

Fotony przebiegają w wodzie do 60 m - **atenuacja światła** musi być dokładnie znana i monitorowana.

Można ją wyznaczyć z obserwacji sygnału z **rozpadu zatrzymujących się mionów**.

Okolo 1500 “kalibracyjnych” rozpadów dziennie.

Wystarcza do bardzo dokładnego monitorowania zmian w **skali tygodni**.



Super-Kamiokande

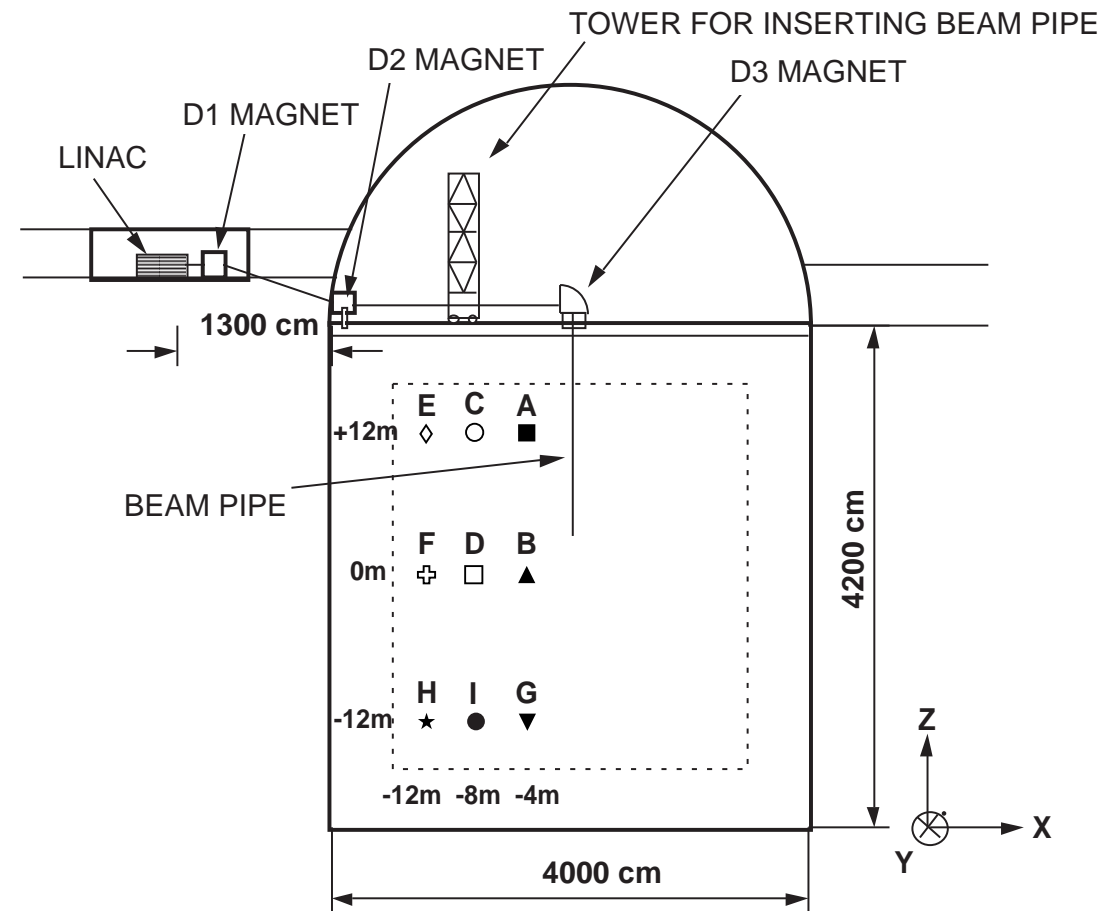
Kalibracja

Kalibracja energetyczna: kluczowa przy niskich energiach.

Główna metoda:

własny akcelerator (!) 5-16 MeV
(zakres energii mierzonych neutron)

Wiązka wprowadzana pionowo w kilku wybranych punktach.



Super-Kamiokande

Kalibracja

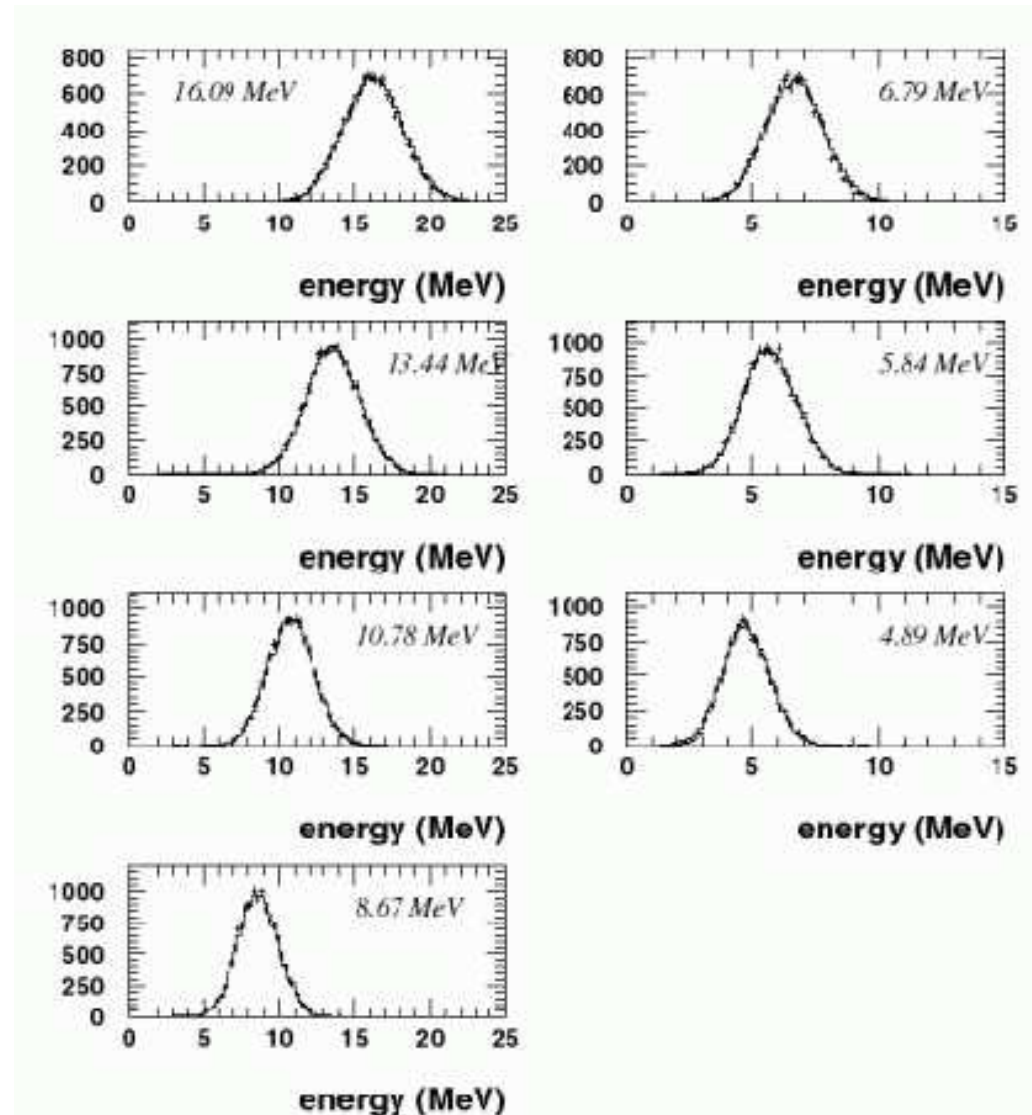
Wyniki kalibracji przy pomocy akceleratora

Rozdzielczość energetyczna

- 18.4% przy 5 MeV
- 14.2% przy 10 MeV
- 11.3% przy 20 MeV

Tłumacząc to na parametry kalorymetru

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{1.2\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}} \oplus 7.6\%$$



Super-Kamiokande

Kalibracja

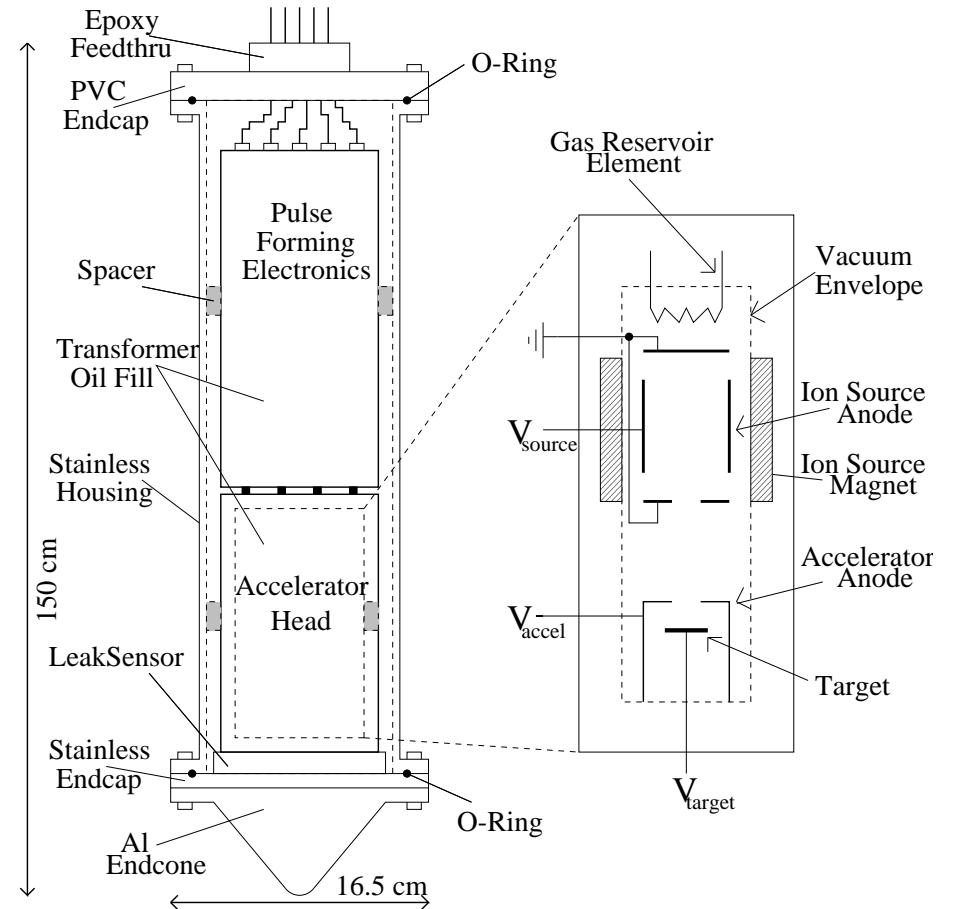
Wada akceleratora: tylko wybrane pozycje i jeden kierunek wiązki (pionowy).

Drugie narzędzie: "generator DT" - źródło neutronów.



Izotropowy strumień neutronów 14.2 MeV.

W oddziaływaniu z tlenem (w wodzie):

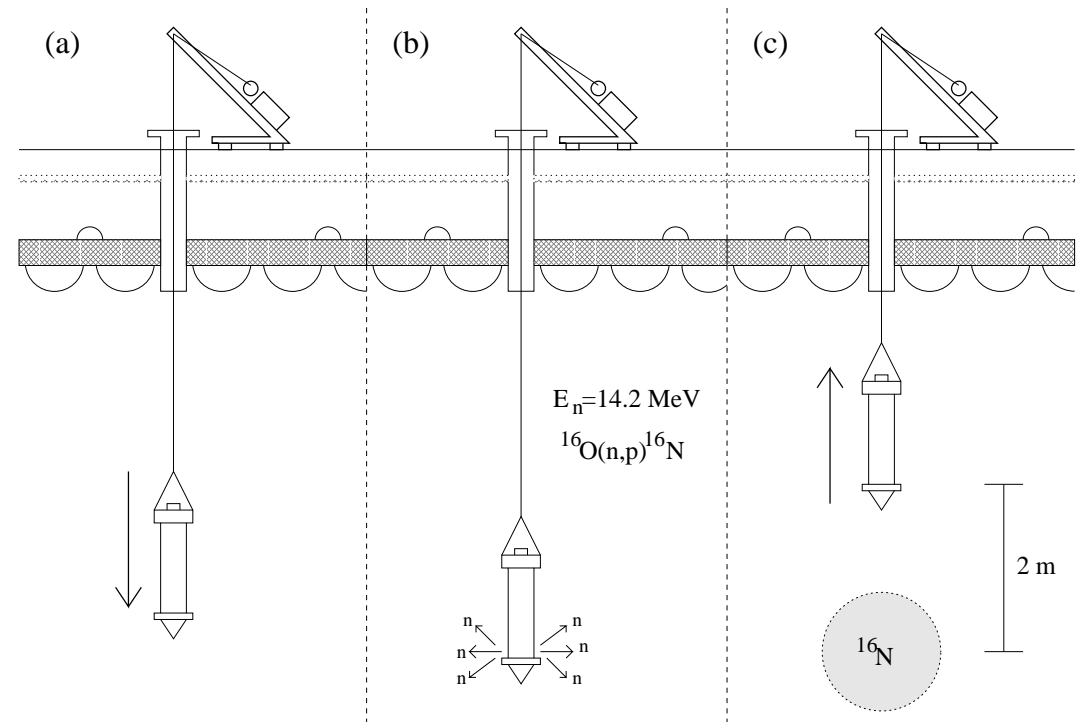
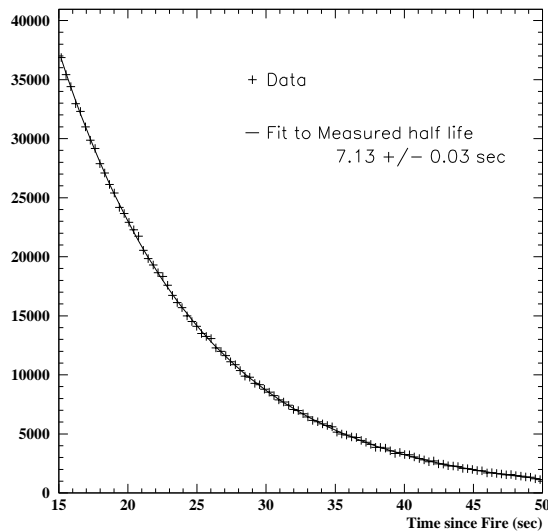


Super-Kamiokande

Kalibracja

Rozpady ^{16}N dokładnie znane:

- 66%: $6.129\text{MeV } \gamma + 4.29\text{MeV } \beta$
- 28%: $10.419\text{MeV } \beta$



Rozpady ^{16}N mierzone po wyciągnięciu “generatora”

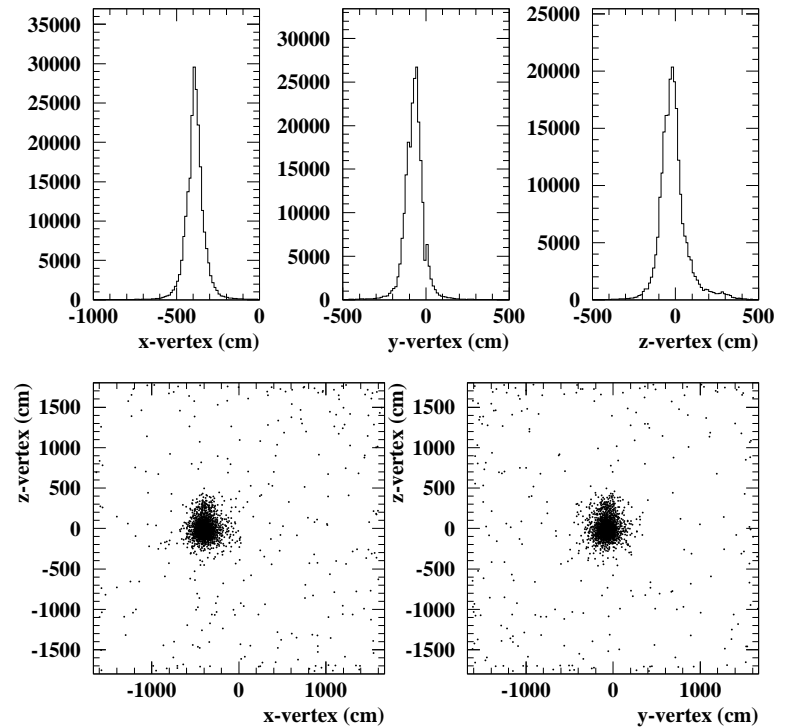
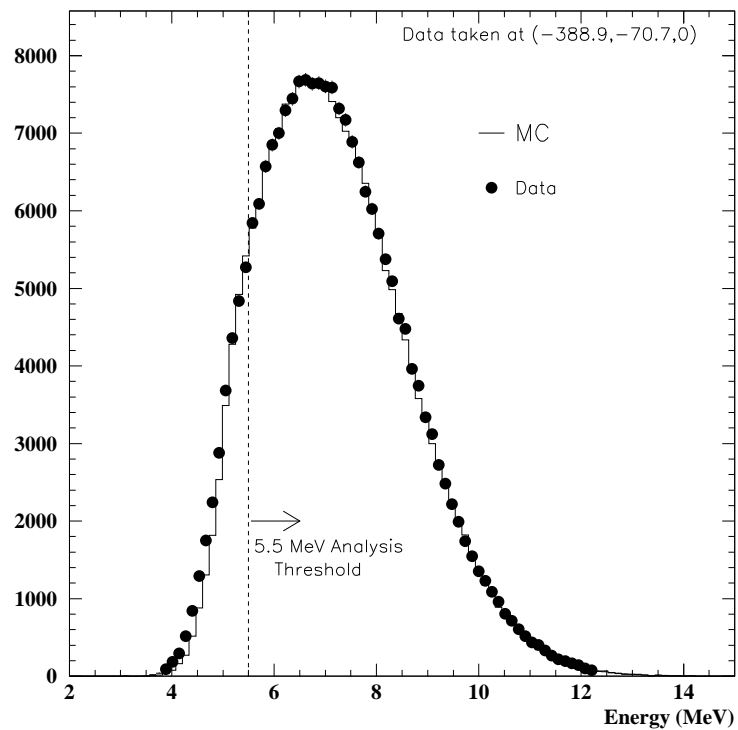
Super-Kamiokande

Kalibracja

Mierzone rozkłady dla przypadków kalibracyjnych ^{16}N :

Energii

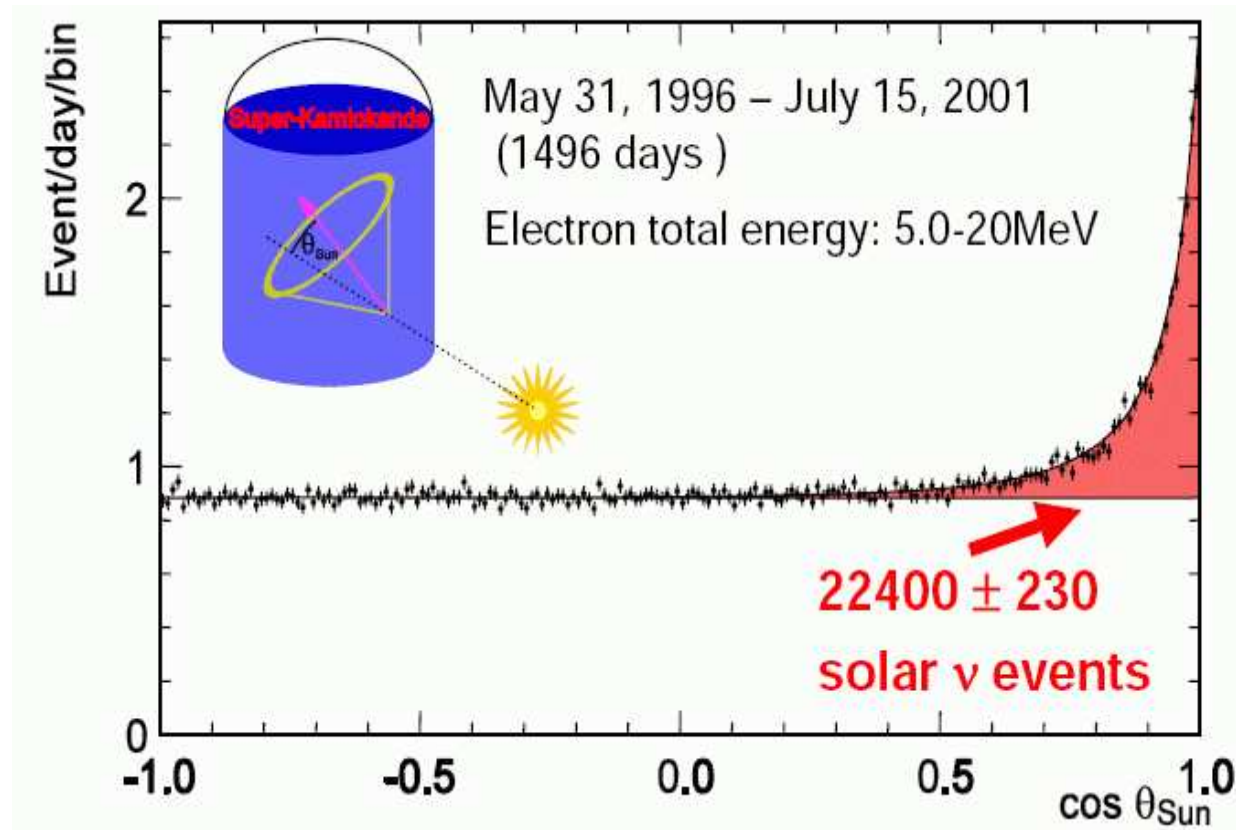
Położenia wierzchołka



Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od słońca**



Zmierzono:

$$\Phi_S^{(B)} = 2.4 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

Przewidywania:

$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

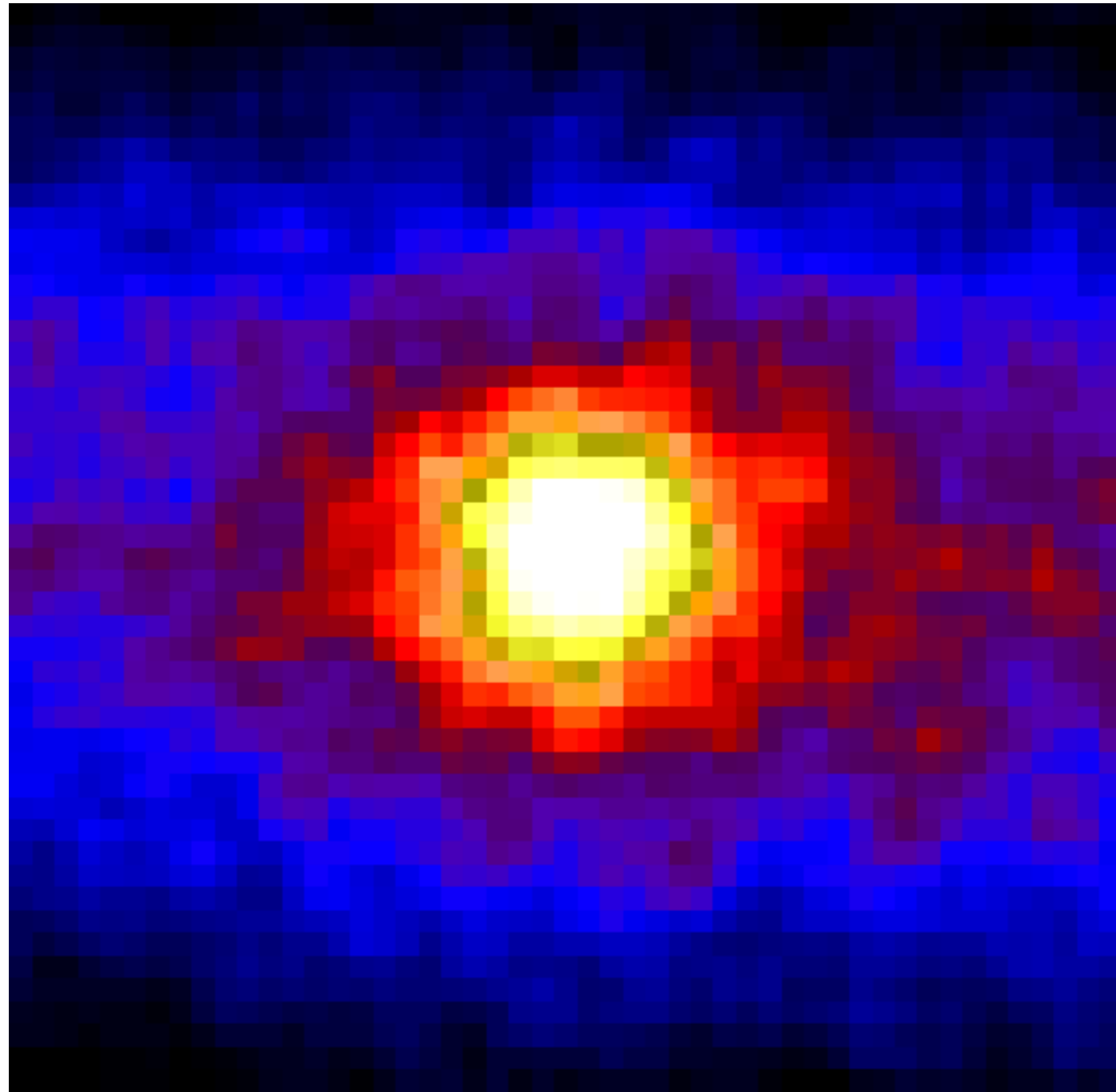
Deficyt neutrin słonecznych był już mierzony w latach '60 XX w. !

Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.

Super-Kamiokande

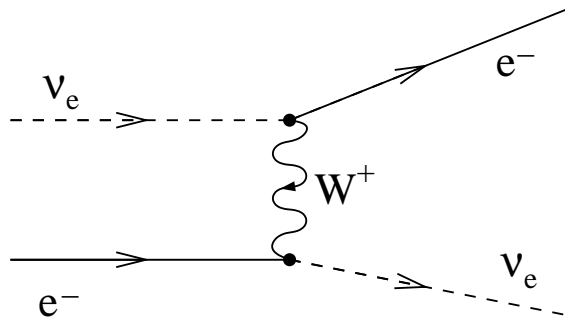
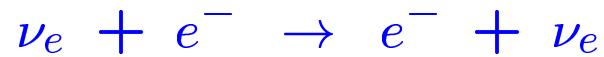
“Zdjęcie” Słońca
w “świele” neutrin

rzeczywisty rozmiar
Słońca $\sim \frac{1}{2}$ pixla

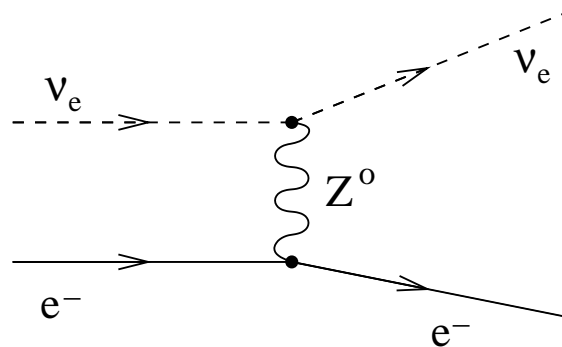
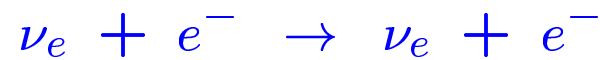


Super-Kamiokande

Neutrina słoneczne obserwowane w SK pochodzą głównie z reakcji typu **CC**

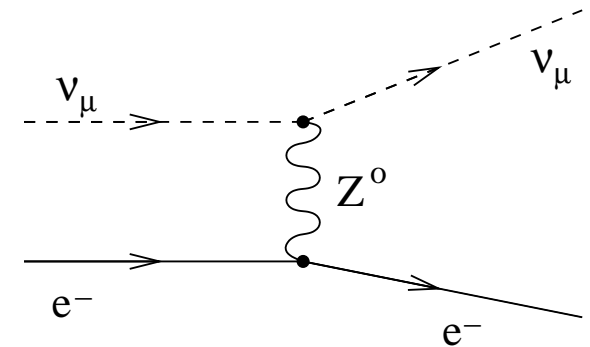


Możliwa jest też detekcja ν_e poprzez proces typu **NC**:



przekrój czynny ~ 5 razy mniejszy...

Ale proces typu **NC** możliwy jest też dla innych neutrin, np:



(także dla ν_τ)

Pomiar Super-Kamiokande:
$$\Phi^{SK} \approx \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$

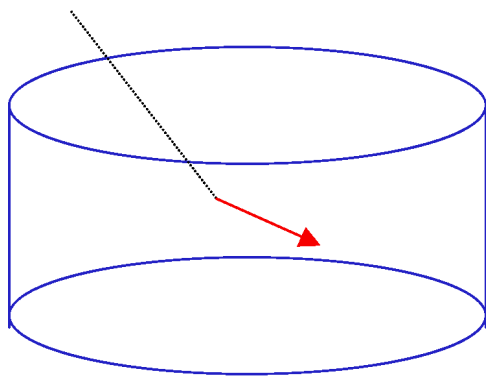
Super-Kamiokande

Klasyfikacja przypadków

Przypadki które rozpoznajemy jako **oddziaływania neutrin**:

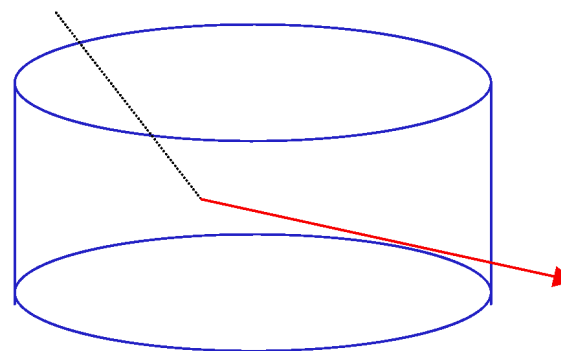
FC: Fully Contained

Elektron lub niskoenergetyczny mion **wyprodukowany** w detektorze **zatrzymuje się** w nim



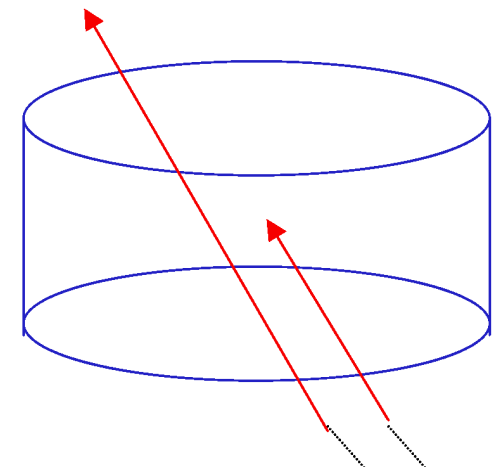
PC: Partially Contained

Wysokoenergetyczny mion **wyprodukowany** w środku **ucieka** z detektora



Upward

Miony **wpadające** do detektora **od dołu**

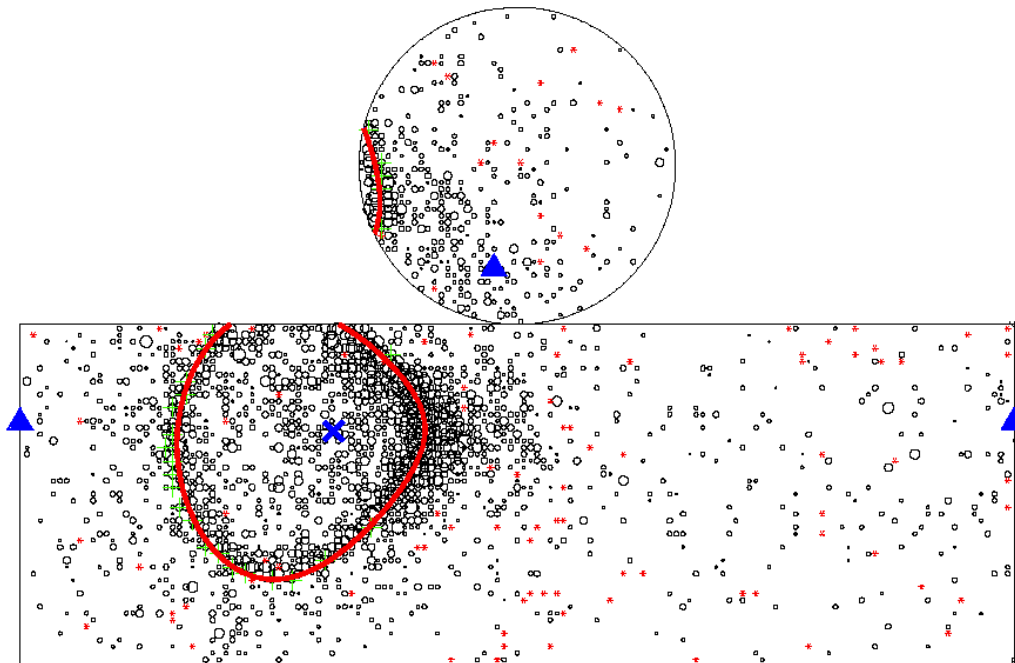


Super-Kamiokande

Neutrino elektronowe

Przypadek $\nu_e n \rightarrow e^- p$

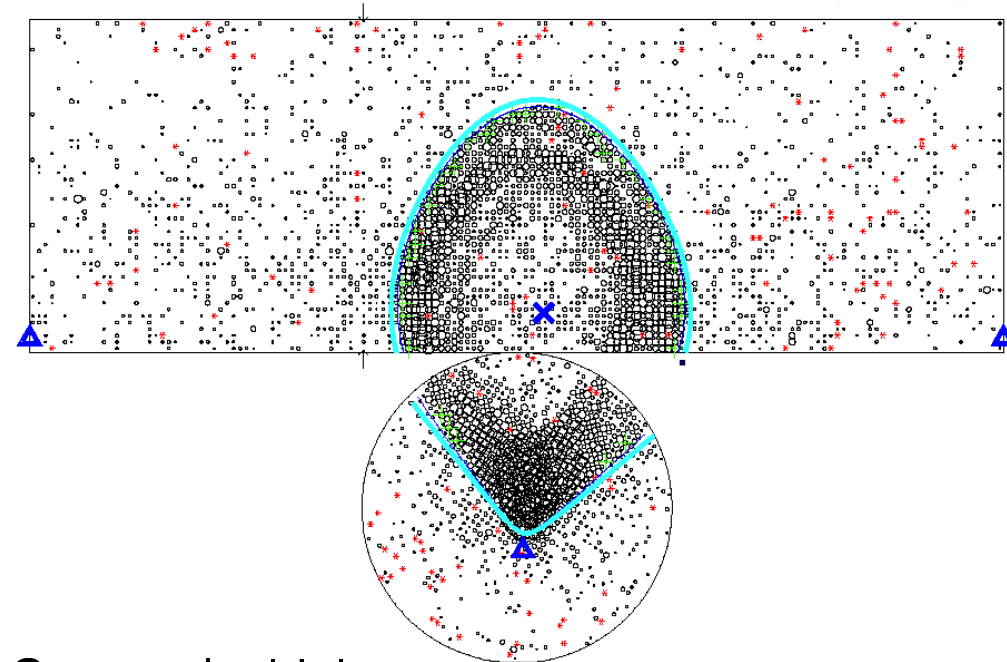
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

Przypadek $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



Gzasi widzimy
też opóźniony sygnał e^- z rozpadu μ^- .

Super-Kamiokande

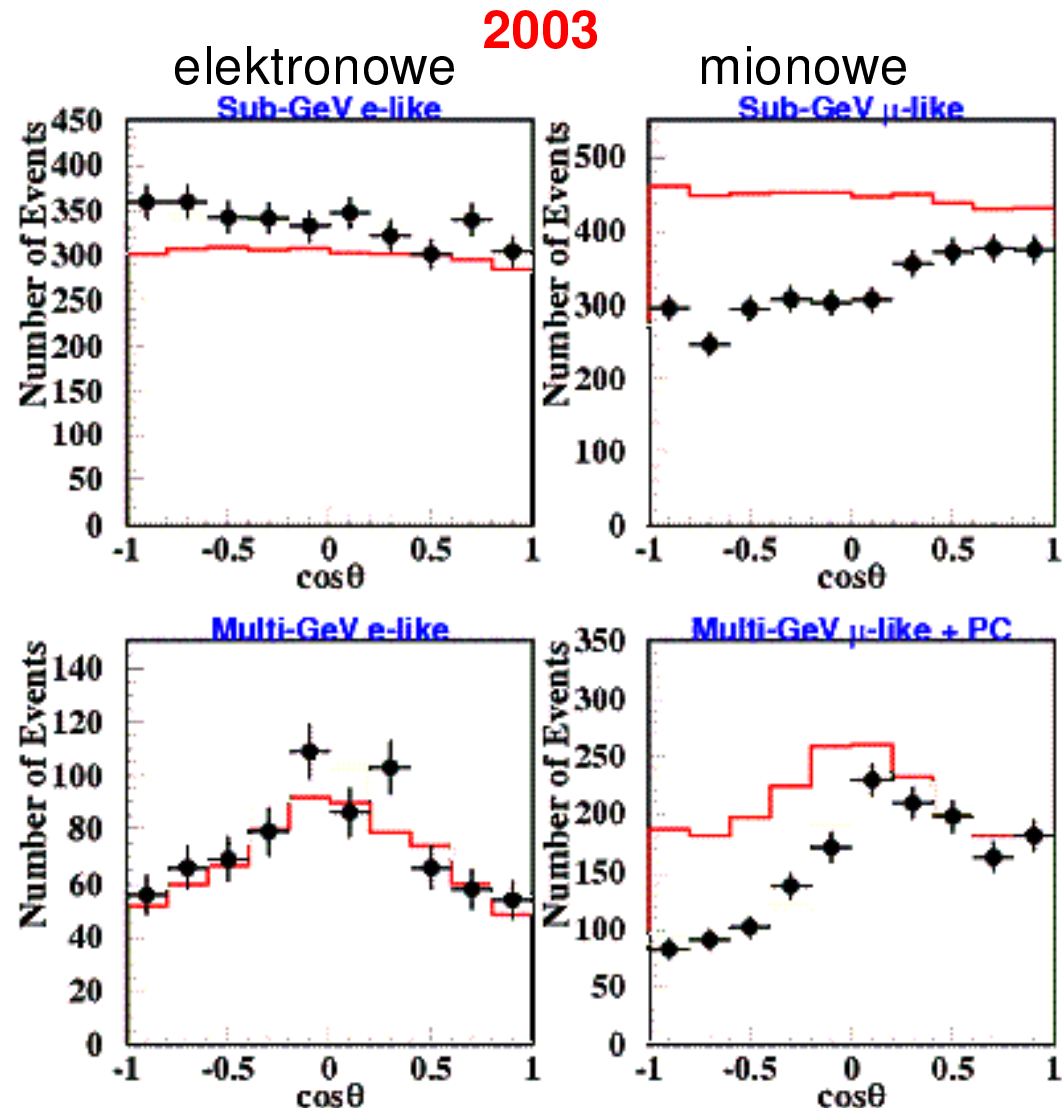
Neutrina atmosferyczne

Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

Zgodnie z oczekiwaniami **tylko** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?



Super-Kamiokande

Neutrina atmosferyczne

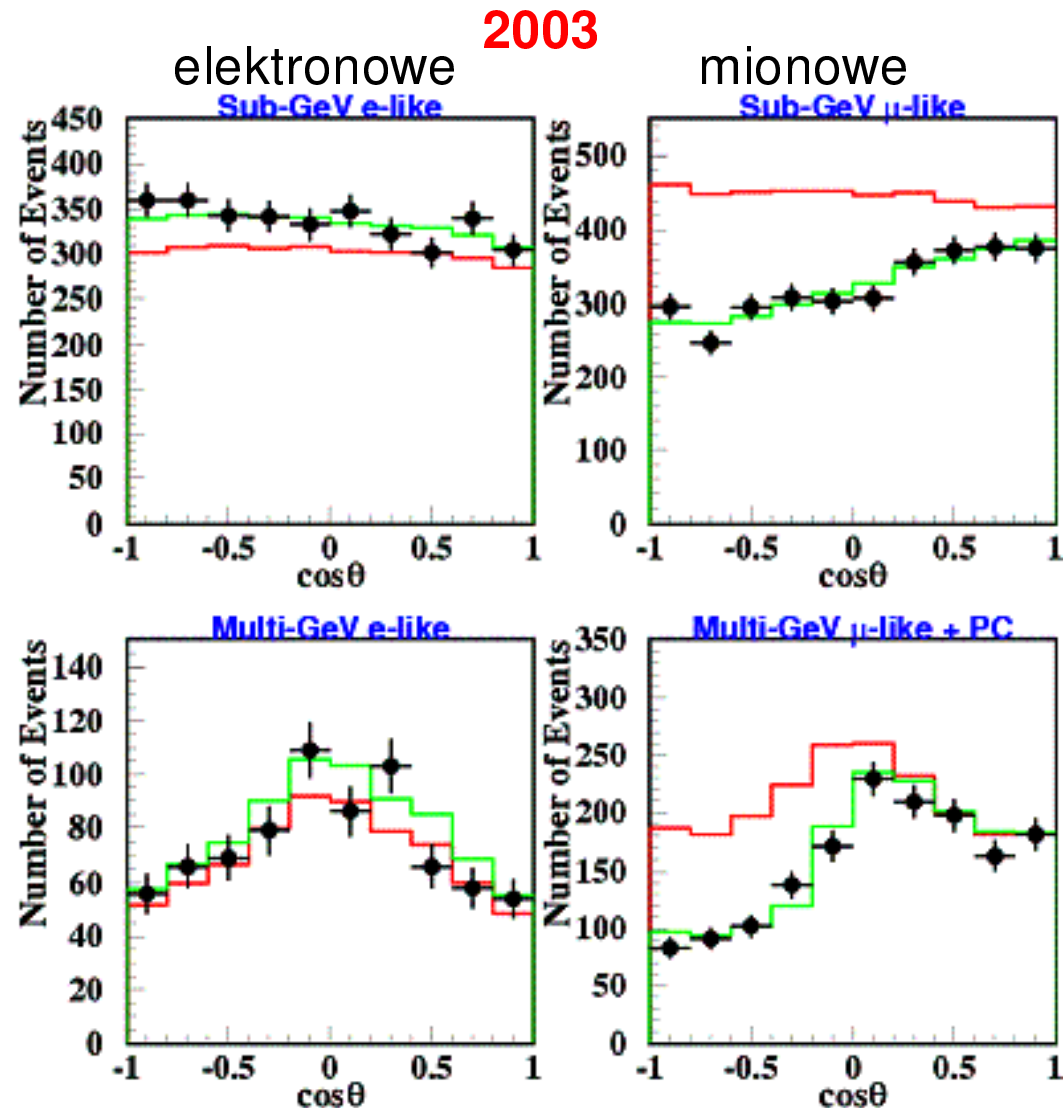
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

Zgodnie z oczekiwaniami **tylko** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

Musimy przyjąć, że neutrina oscylują...

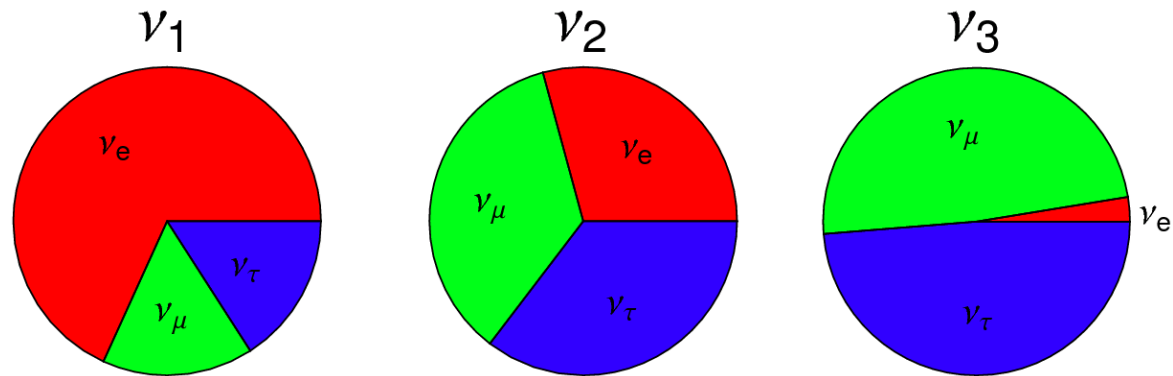


Neutrino

Oscylacje

W oddziaływaniach słabych produkowane są zawsze neutrino o określonym zapachu.

Jednak stany fizyczne (stany własne masy) neutrin są mieszankami tych stanów:



⇒ produkcja neutrino o określonym zapachu oznacza produkcję mieszanki ν_1 , ν_2 i ν_3

Gdyby neutrino nie miały masy to produkowana kombinacja (superpozycja) stanów nie zmieniałaby się w czasie ⇒ zachowanie liczby leptonowej.

Jeśli przyjmiemy, że neutrino mają masę to każdy stan porusza się z inną prędkością.

⇒ własności kombinacji zależą od przebytej odległości, zmieniają się w czasie...

Neutrino

Oscylacje dla dwóch generacji

Produkowane stany zapachowe są mieszanką stanów własnych masy:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Zakładając, że w chwili $t = 0$ produkowane jest ν_e , stan neutrino opisać możemy jako:

$$|\nu\rangle_0 = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle_0 + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle_0 = |\nu_e\rangle$$

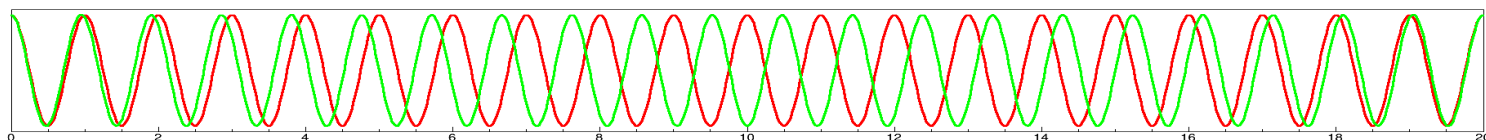
Propagacja swobodnego stanu $|\nu_i\rangle$:

$$|\nu_i\rangle(t, \vec{x}) = |\nu_i\rangle_0 \cdot \exp\left(-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})\right)$$

\Rightarrow **Jeśli** $m_1 \neq m_2$ to względna **faza** wkładów $|\nu_1\rangle$ i $|\nu_2\rangle$ zmienia się

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = a(t) |\nu_1\rangle + b(t) |\nu_2\rangle \neq |\nu_e\rangle(t, \vec{x})$$

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = A(t) |\nu_e\rangle + B(t) |\nu_\mu\rangle$$



Neutrina

Oscylacje dla dwóch generacji

Prawdopodobieństwo, że ν_e wyprodukowane w $t_0 = 0$ oddziała jak ν_e po czasie t

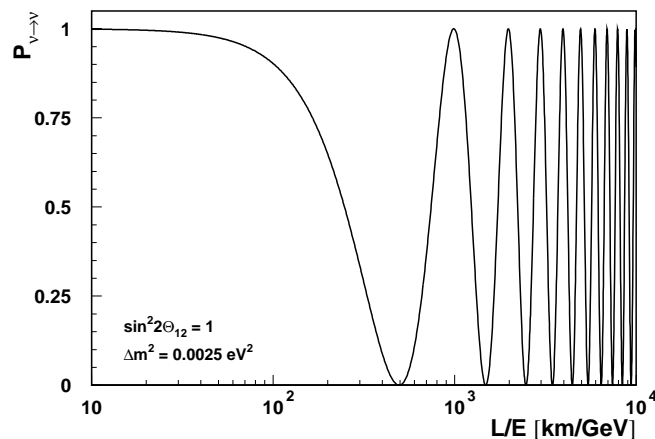
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = |A(t)|^2$$

Przyjmując, że różnice mas są bardzo małe, $|m_1 - m_2| \ll m_1 \sim m_2 \ll E_\nu$

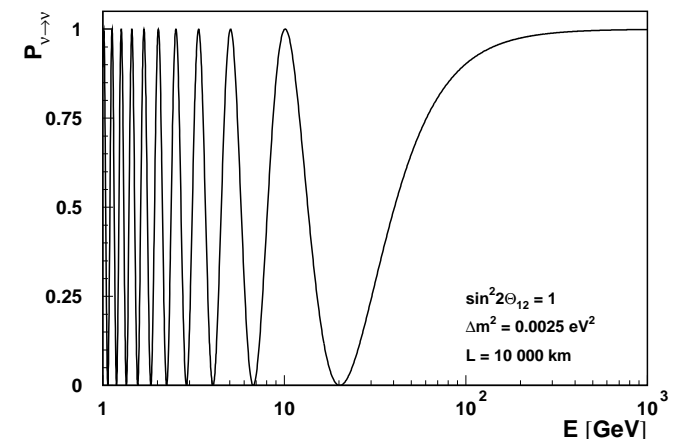
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(1.27 \cdot \Delta m^2 \frac{L}{E}\right)$$

$L = ct$ [km], Δm^2 [eV²] i E [GeV].

W funkcji odległości:



W funkcji energii: ($L \sim 2R_Z$)



Dla bardzo dużych **large** L/E ($E/L \ll \Delta m^2$) dostajemy: $P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \approx 0.5$

Neutrino

Oscylacje dla trzech generacji

Stany zapachowe są superpozycją stanów masowych:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

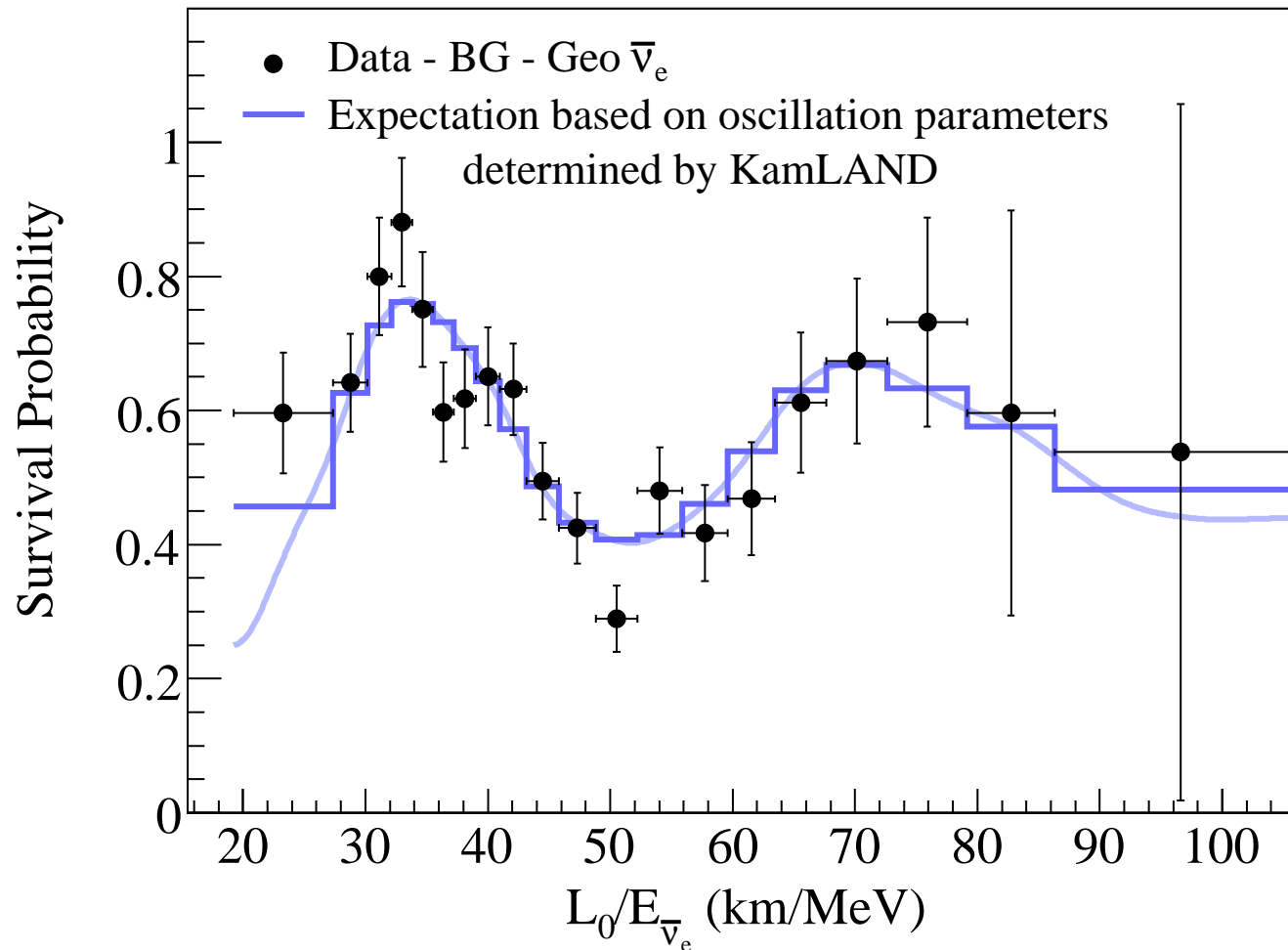
PMNS - macieź Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata
odpowiada macieży CKM mieszania kwarków

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \\ \text{słoneczne} \\ \theta_{12} \approx 35^\circ}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau \\ \text{atmosferyczne} \\ \theta_{23} \approx 45^\circ}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau \\ \text{reaktorowe, } \theta_{13} \sim 8^\circ \\ \text{potwierdzone w 2012!}}}$$

Neutrina

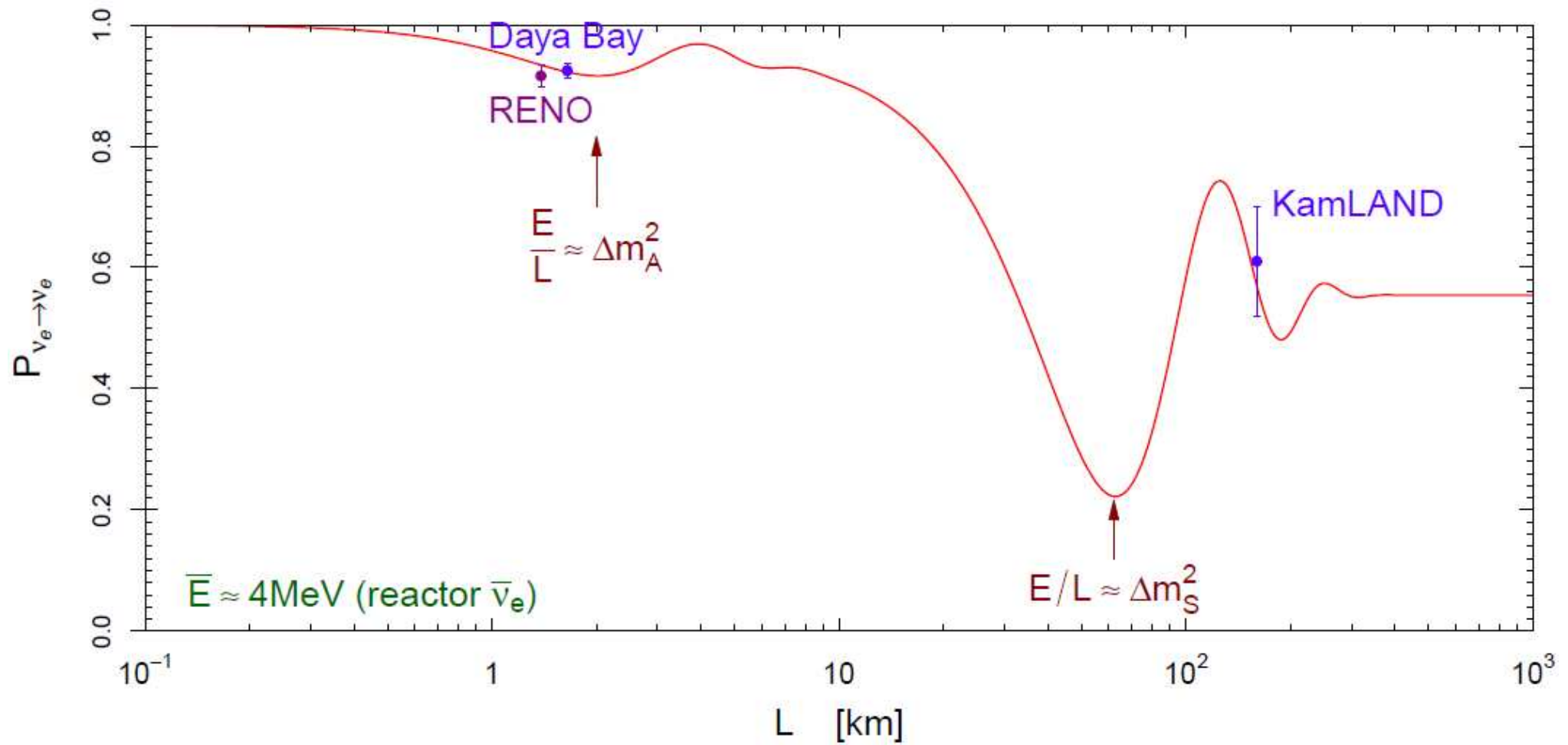
Wyniki KamLAND

neutrina reaktorowe



Neutrino

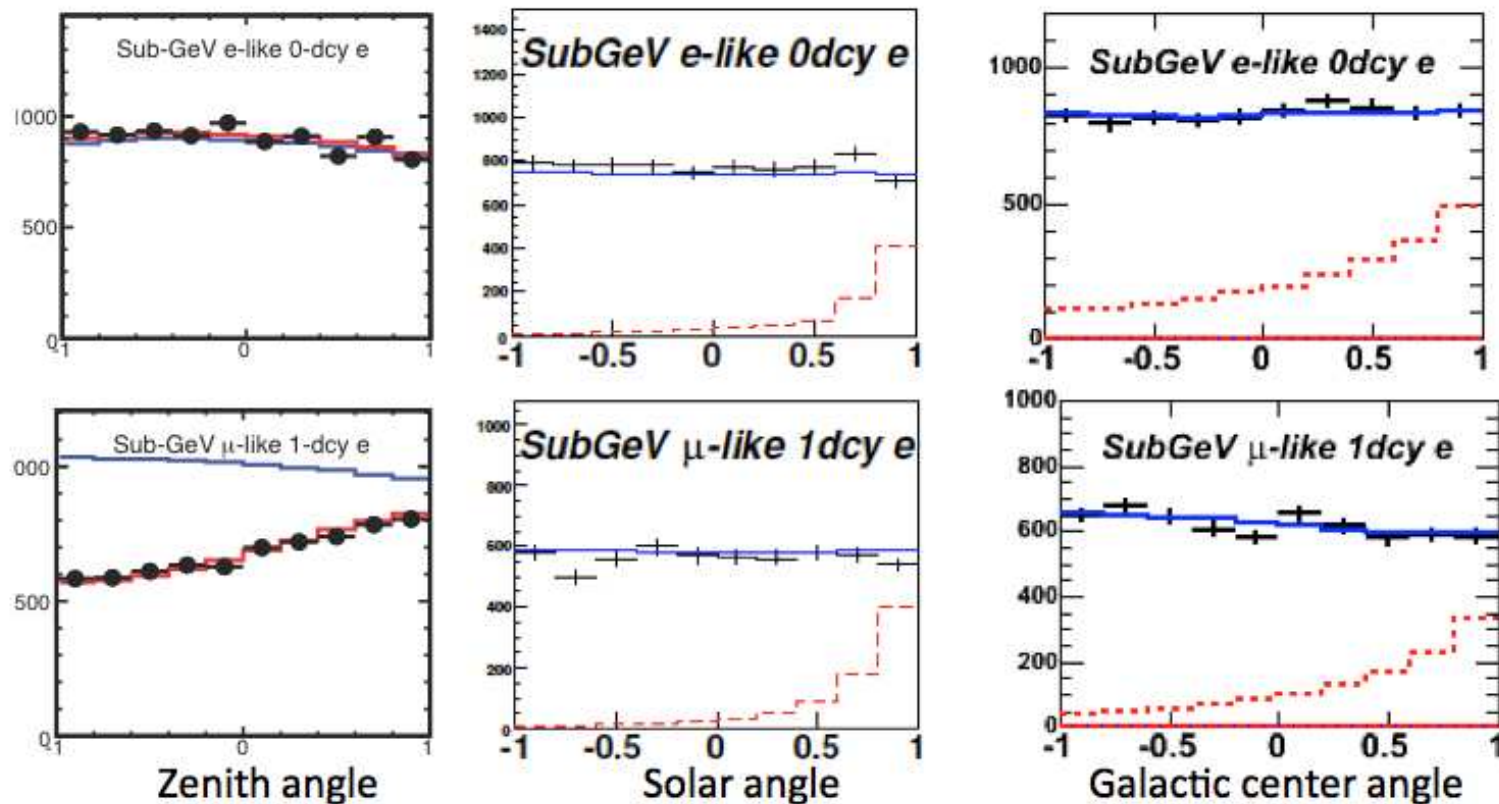
Neutrino reaktorowe



Super-Kamiokande

Ciemna materia

Słońce produkuje neutrino do 15 MeV. Wyżej energetyczne neutrino nie powinny być skorelowane z pozycją Słońca, ani tym bardziej centrum naszej Galaktyki.

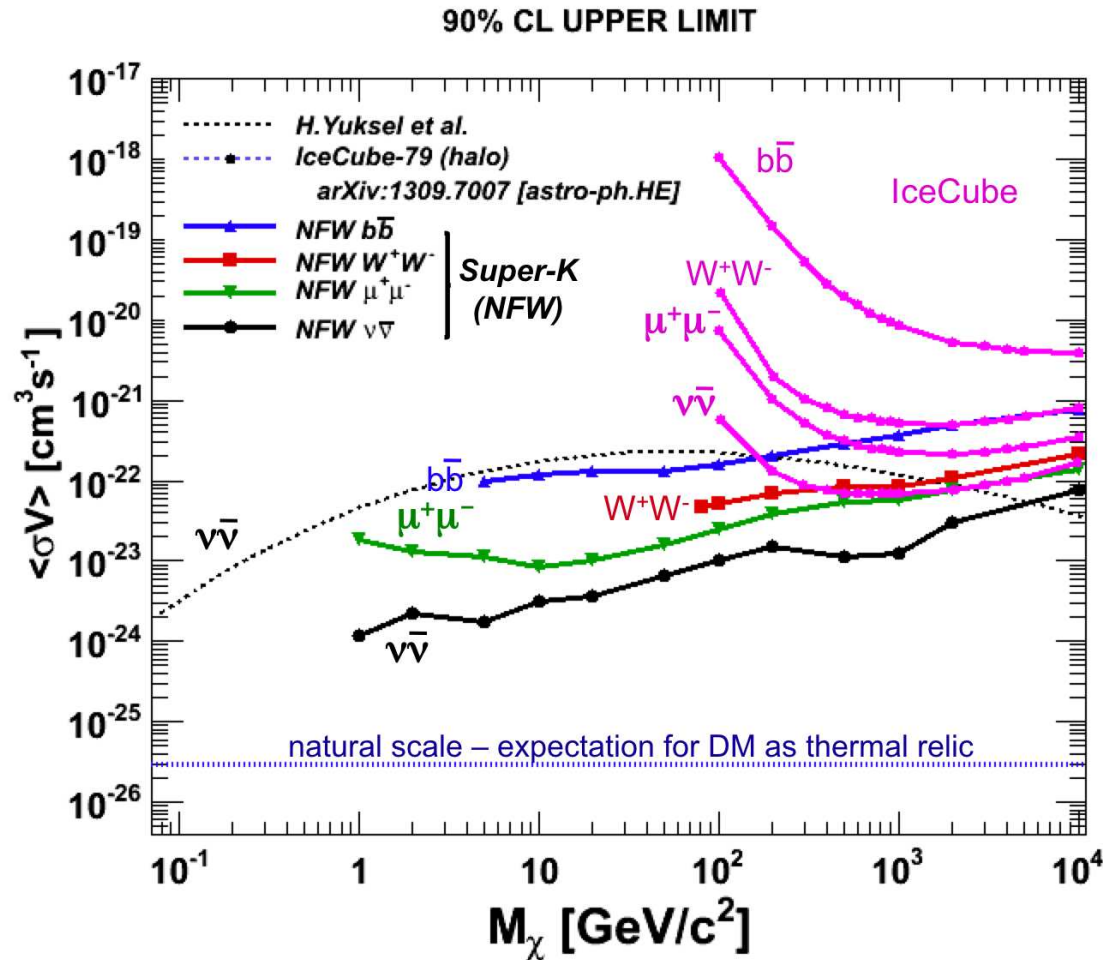


Porównanie rozkładów kątowych z **symulacją tła** oraz **anihilacją DM** w $b\bar{b}$ ($M=5$ GeV)

Super-Kamiokande

Wyniki

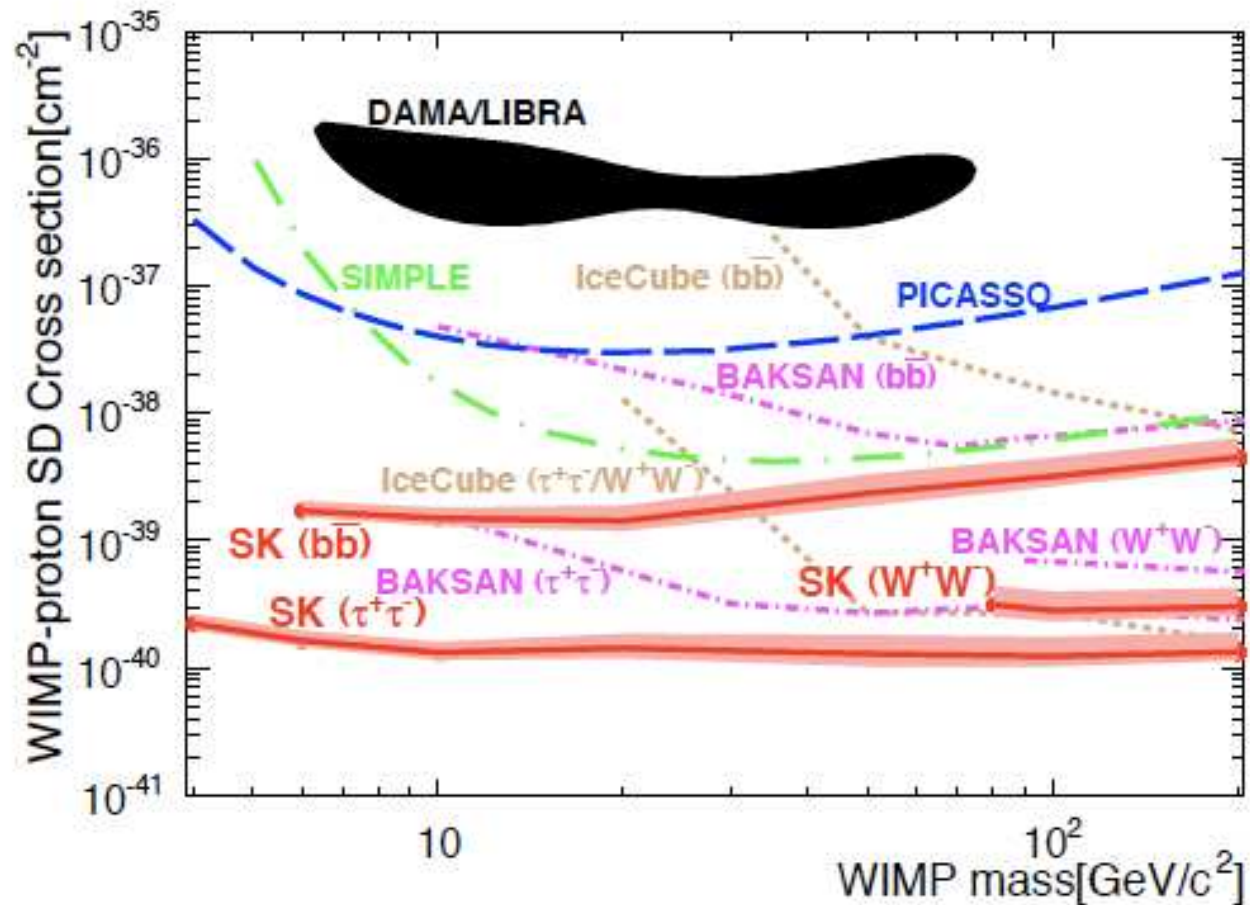
Ograniczenia z poszukiwania anihilacji DM w centrum Galaktyki



Super-Kamiokande

Wyniki

Ograniczenia z poszukiwania anihilacji DM w Słońcu



Nowe eksperymenty

Badanie neutrin o energiach powyżej TeV wymaga jeszcze **większych detektorów**

Wiele nowych eksperymentów w XXI wieku

AMANDA uruchomiona w 2000

(Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)

677 modułów na 19 “strunach”,
1500–2000 m pod lodem (**biegun południowy**)

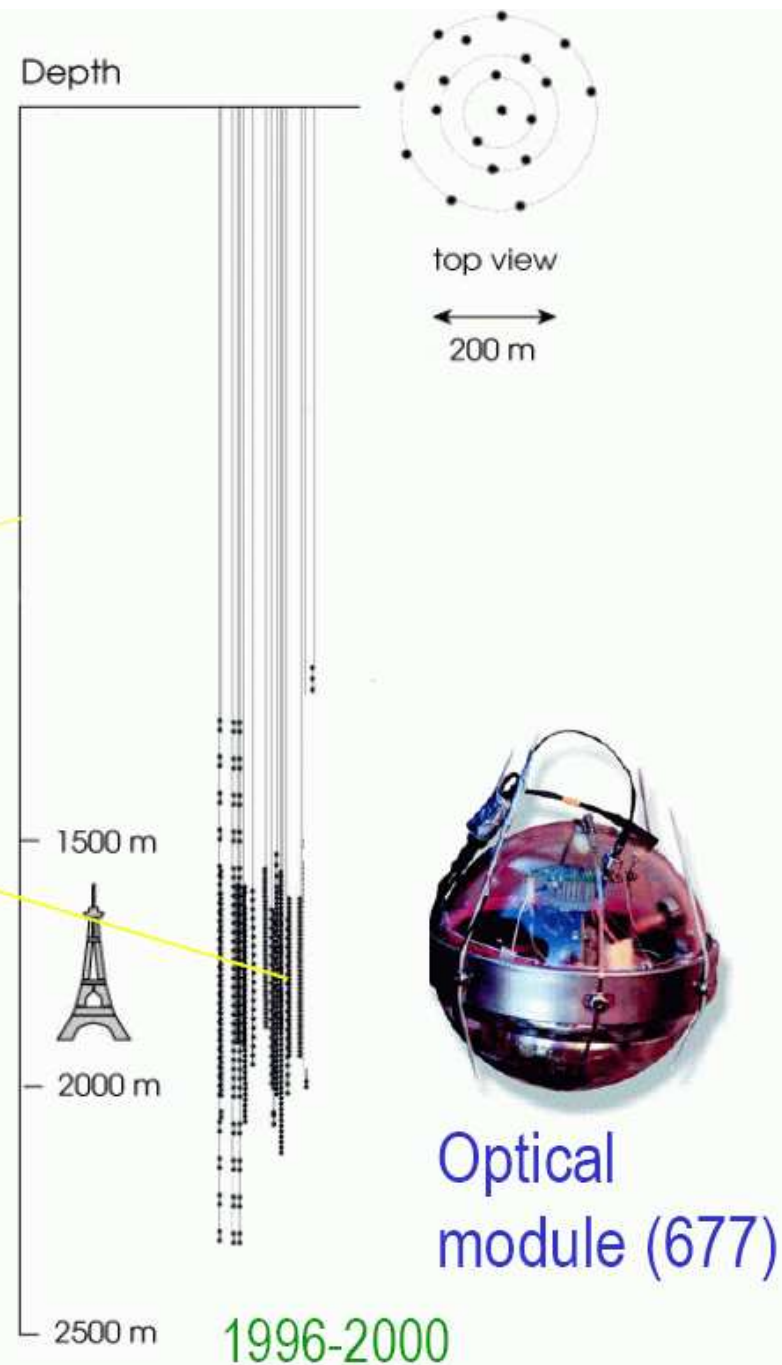
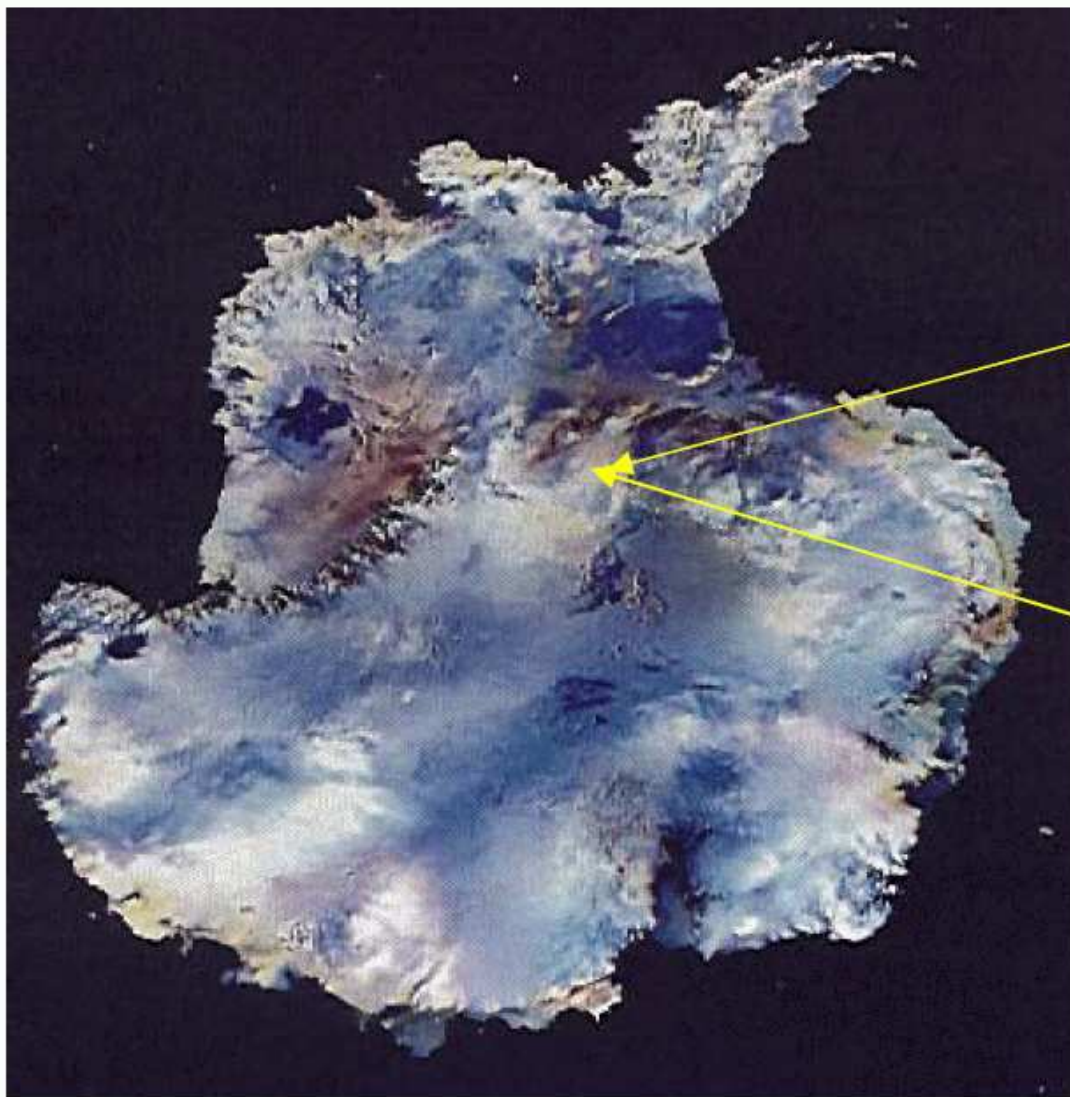
promieniowanie Czerenkowa mierzone przez skierowane do dołu fotopowielacze

Obszar aktywny: ok. **40 mln. ton lodu** (!)

Rejestracja **mionów** o energiach ≥ 50 GeV.



Eksperyment AMANDA w Amundsen-Scott Station South Pole



AMANDA

Wyniki

Duże odległości między licznikami powodują, że detektor czuły jest tylko na neutrina o bardzo wysokiej energii.

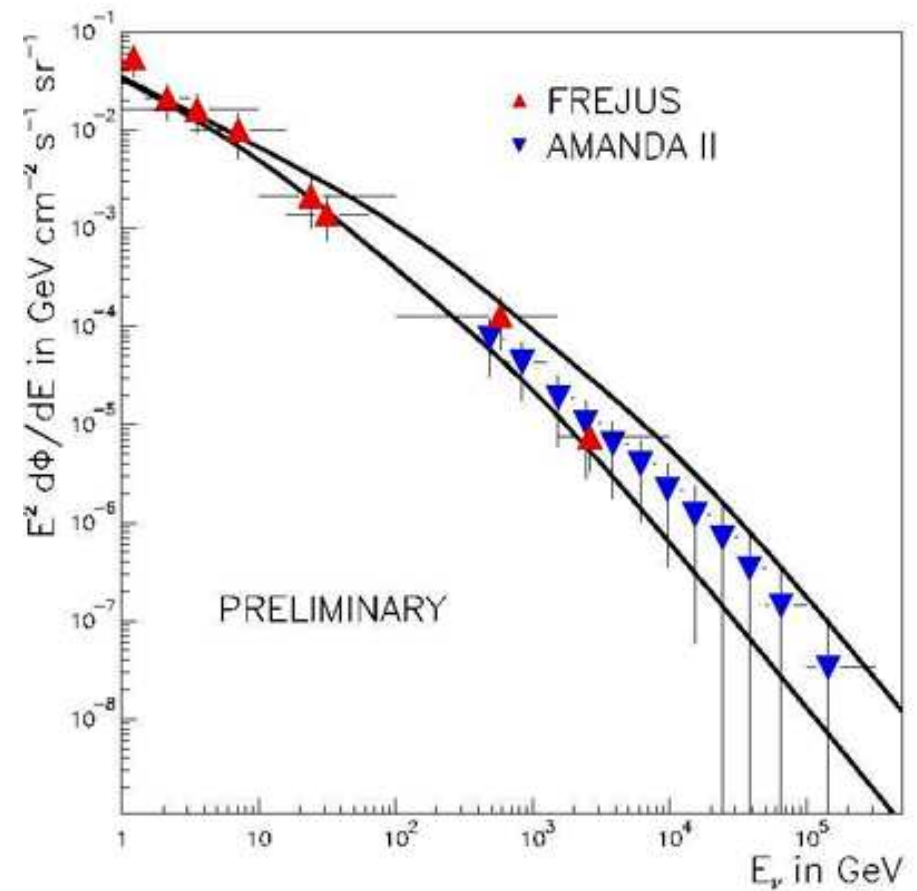
Jednocześnie jednak duża objętość umożliwia pomiar małych strumieni.

Detektor zadziałał bardzo dobrze i już w 2002 roku podjęto decyzję o jego rozbudowie

⇒ Ice Cube

Rozbudowa zakończona w grudniu 2010.

Mierzony rozkład energii neutrin



Ice Cube

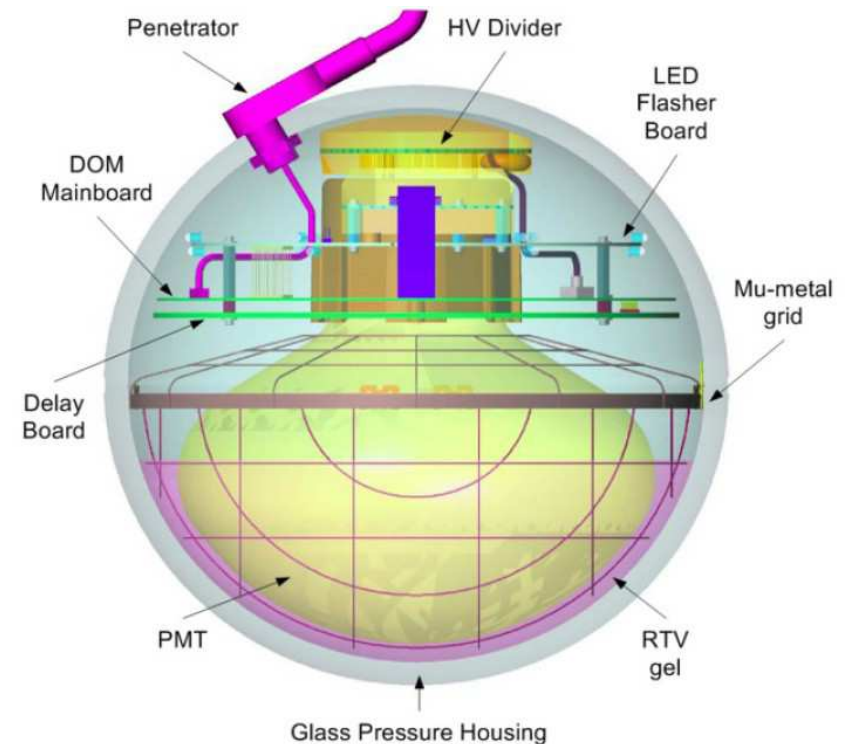
Detektor

Pojedynczy moduł optyczny (DOM) zawiera jeden fotopowielacz 10" oraz całą elektronikę (analogową, cyfrową, zasilanie HV, kalibracja LED).

Dwa kanały dygityzacji: 300 MHz (pomiar czasu) i 40 MHz (pomiar energii)

Zegar synchronizowany z dokładnością do 2ns ($<$ dokładność pomiaru)

Zużycie energii: 3.75 W.



Ice Cube

Detektor

Łącznie zainstalowano 86 lin z 5160 DOM, na głębokości 1450-2450 m, odstęp między linami 125 m, między DOM - 17 m

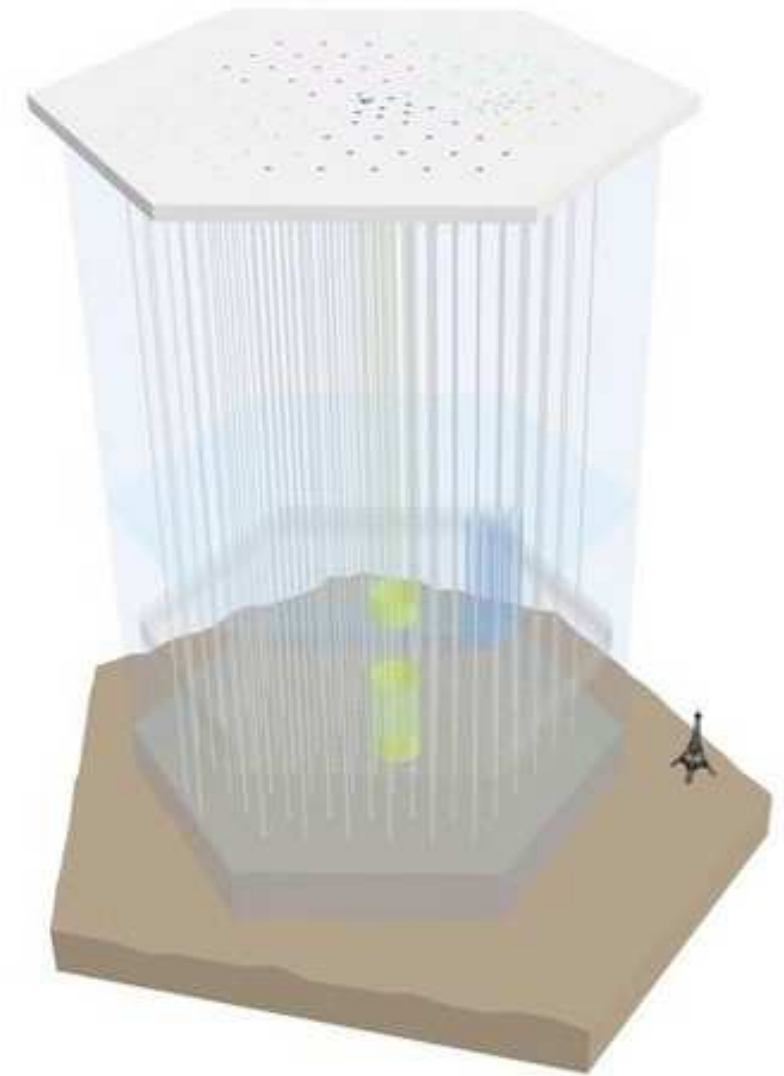
⇒ pomiar neutrin od 50 GeV
dokładność kierunku ok. 1°

DeepCore

6 lin z mniejszymi odstępami, aby móc mierzyć od ok. 10 GeV

IceTop

80 stacji powierzchniowych



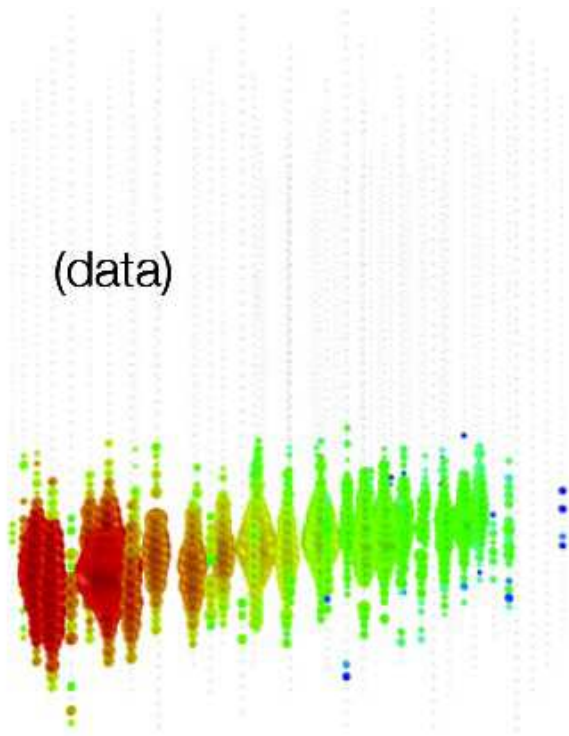
Ice Cube

Przypadki

Przypadki oddziaływań neutrin rekonstruowane w detektorze

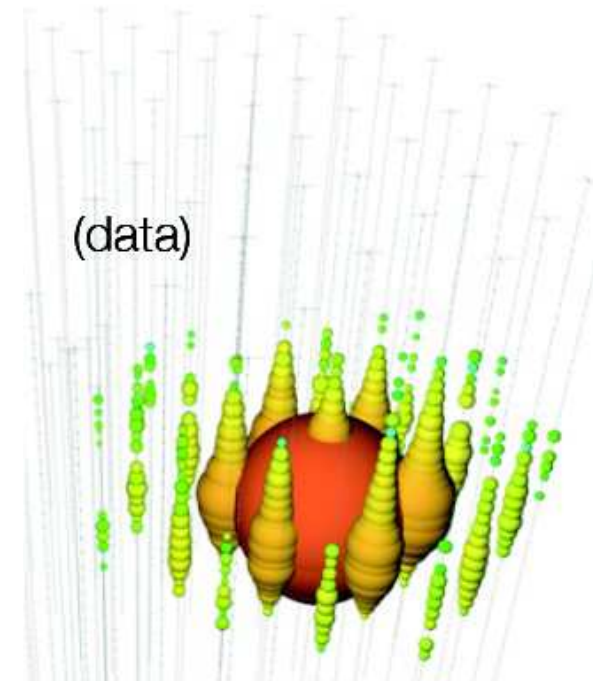
Tor

⇒ ν_μ (CC)



Kaskada

⇒ ν_e (CC) lub ν_τ (CC) lub NC



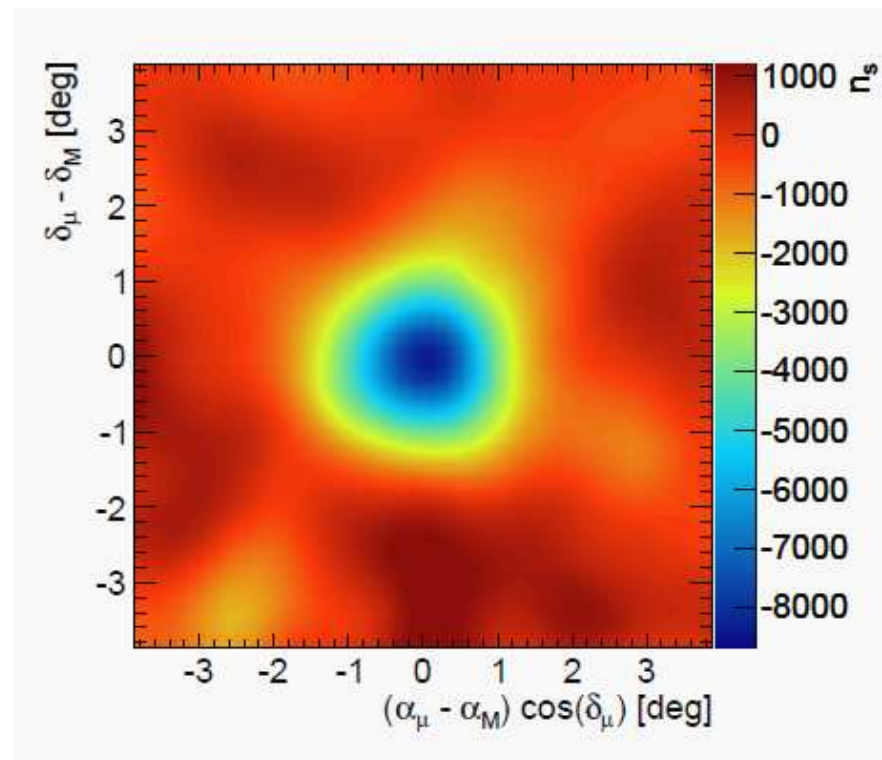
Rozmiar: energia, kolor: czas

Ice Cube

Kalibracja

Dokładne wyznaczenie kierunku mionu wymaga bardzo precyzyjnej synchronizacji poszczególnych detektorów. \Rightarrow dokładność dla mionów 100 TeV ok. 0.5°

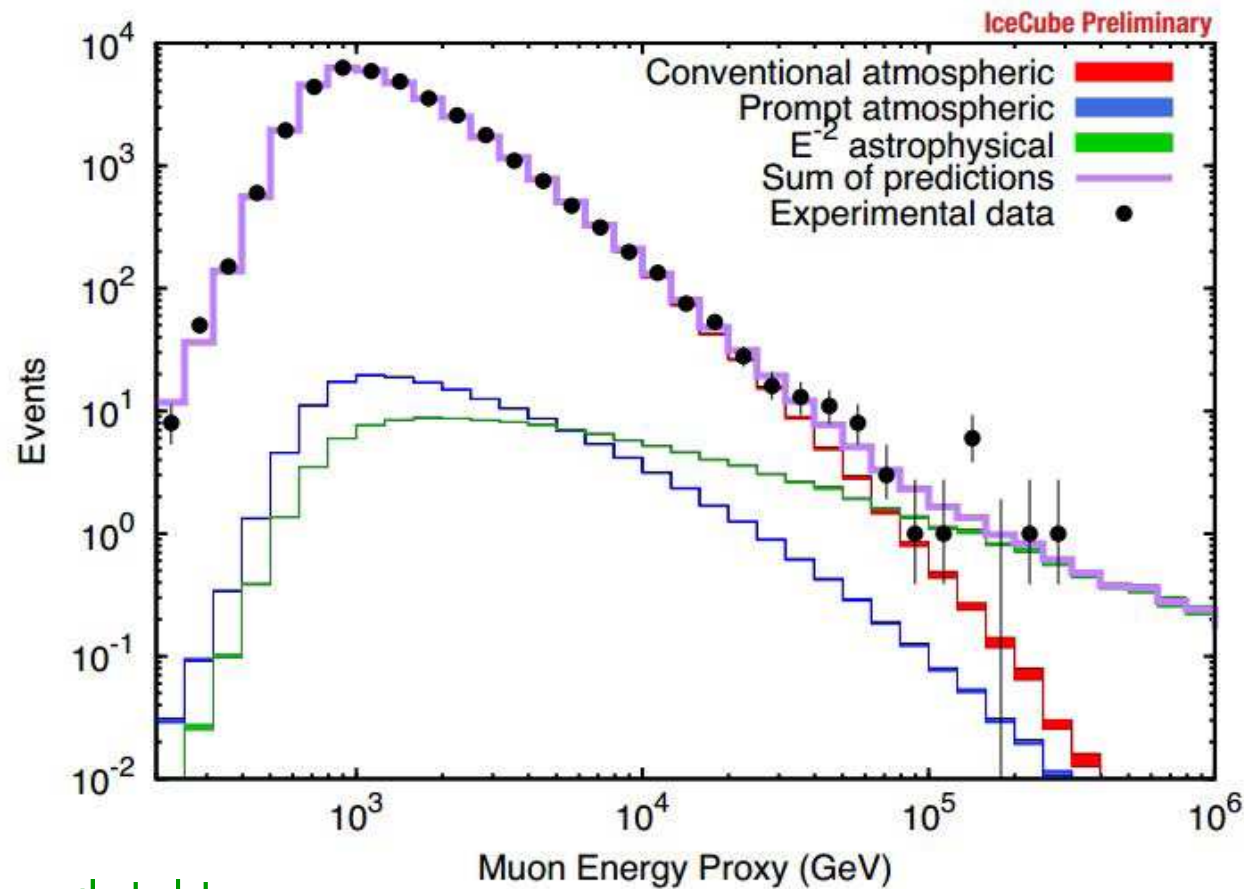
“Cień Księżyca” w mionach kosmicznych



Ice Cube

Wyniki

Rekonstruowane energie mionów lecących od dołu - muszą pochodzić z neutrin!
Widać wyraźną nadwyżkę w stosunku do oczekiwanych neutronów atmosferycznych.



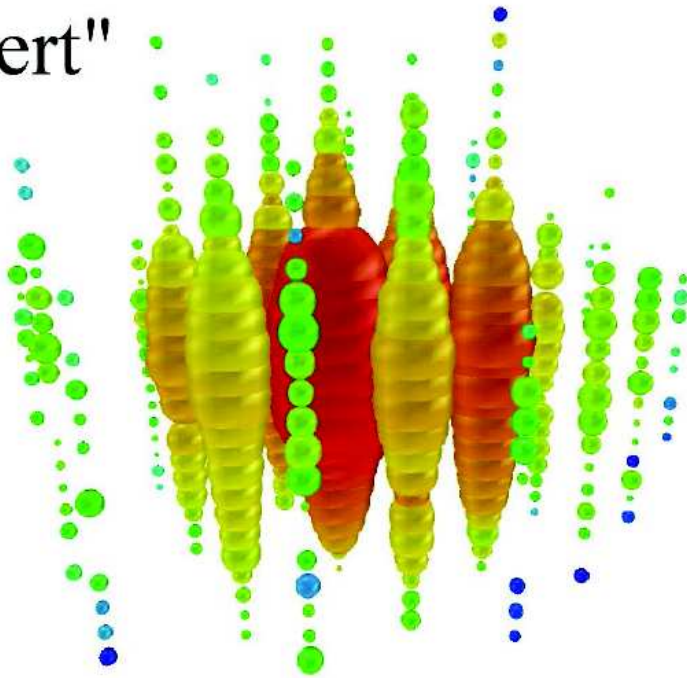
Wyniki z 2 lat pracy detektora

Ice Cube

Wyniki

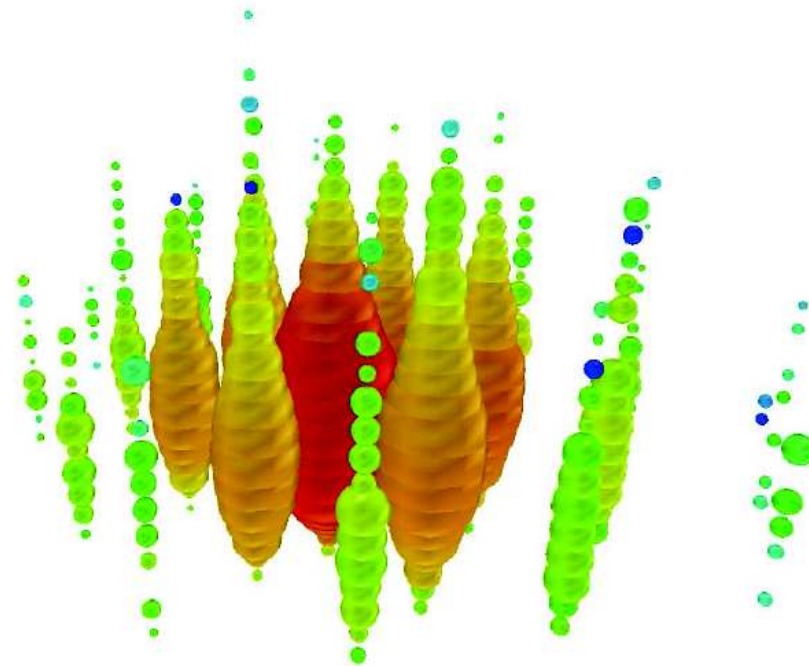
Pierwsze przypadki neutrin o energii powyżej 1 PeV (!)

"Bert"



August 9, 2011: 1.04 PeV

"Ernie"



January 3, 2012: 1.14 PeV

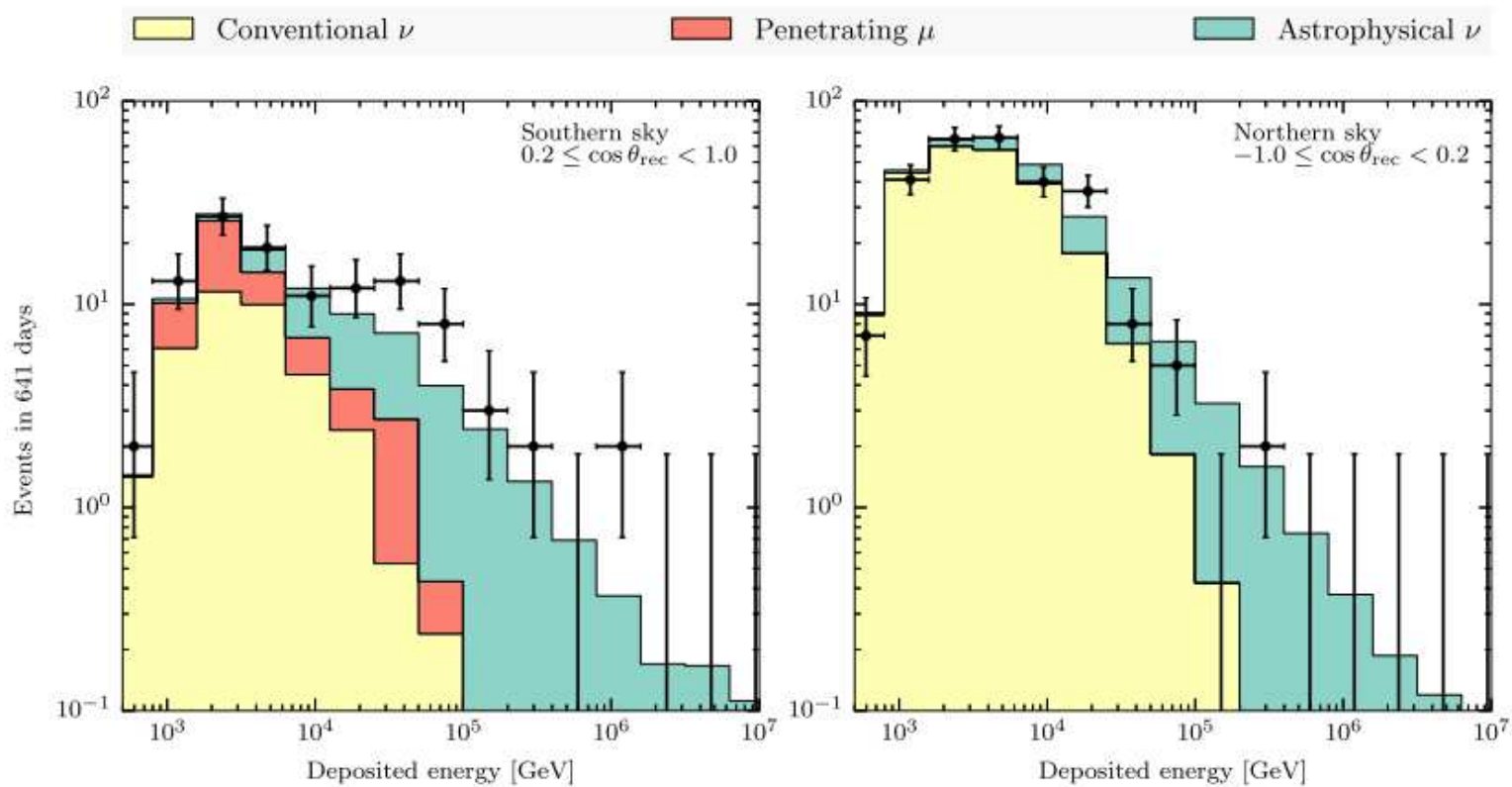
Przypadki typu "kaskada"

Ice Cube

Wyniki

Rekonstruowana energia dla wszystkich przypadków (105 torów + 283 kaskady)

Także w przypadku neutronów lecących “od góry” widoczna wyraźna nadwyżka.



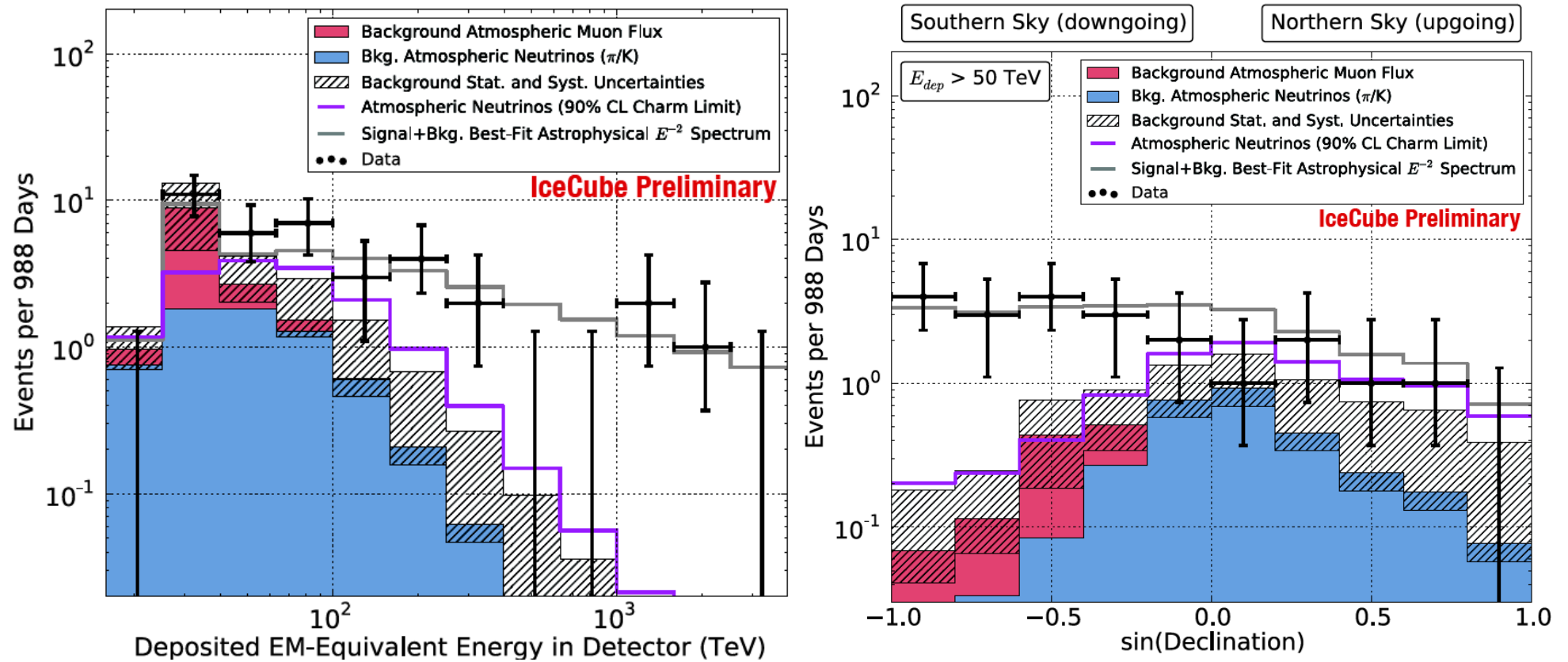
Wyniki z 2 lat pracy detektora

Ice Cube

Wyniki

Rozkład mierzonej energii przypadków (wyniki z 3 lat działania detektora)

Wyraźnie widoczna nadwyżka, konsystentna z rozkładem płaskim

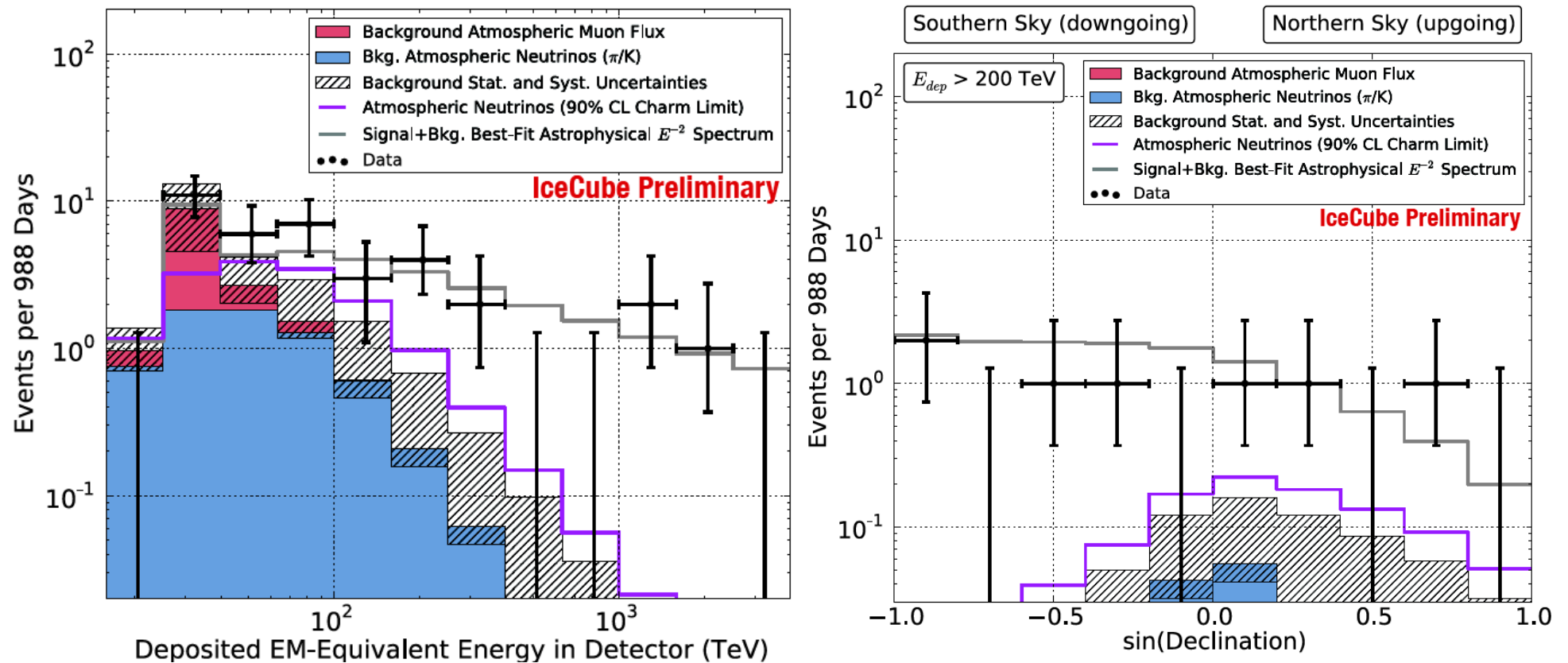


Ice Cube

Wyniki

Rozkład mierzonej energii przypadków (wyniki z 3 lat działania detektora)

Wyraźnie widoczna nadwyżka, konsystentna z rozkładem płaskim

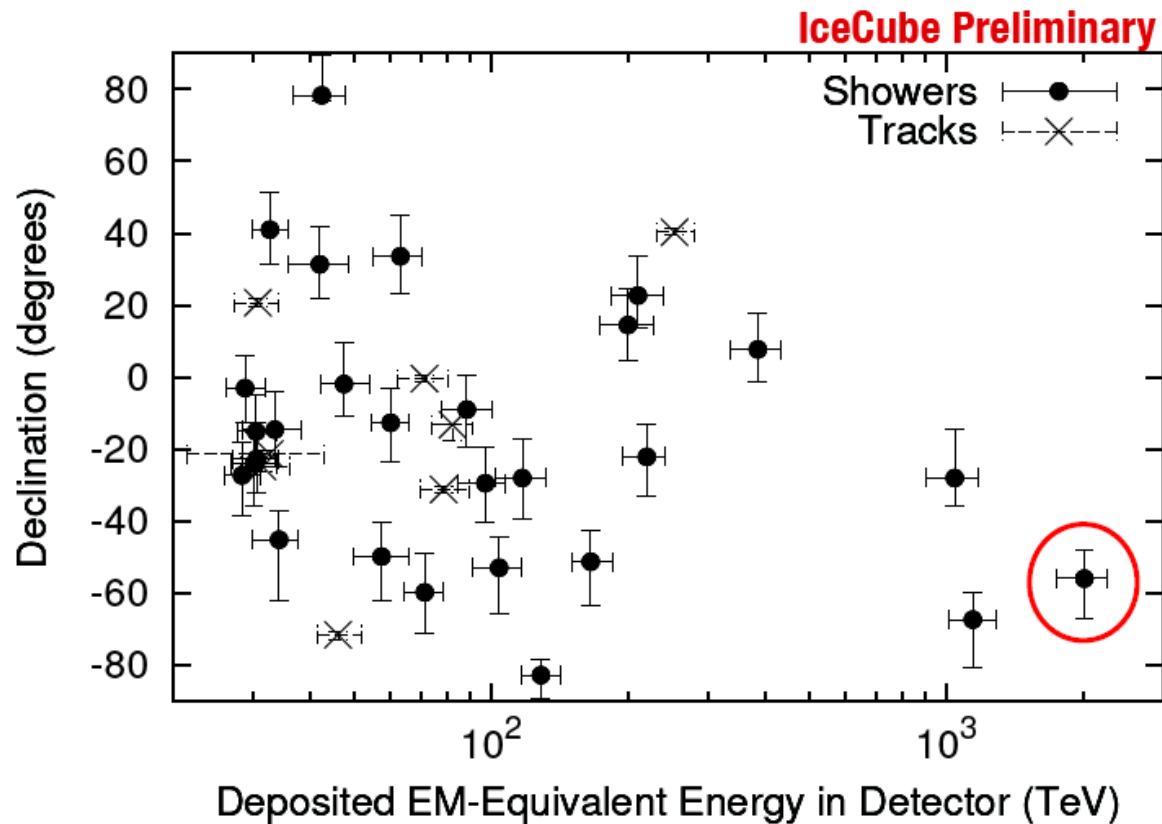


Ice Cube

Wyniki

2010-2013

37 przypadków, przy oczekiwanym tle $6.6^{+5.9}_{-1.6}$ (neutrino atm.) + 8.4 ± 4.2 (miony)



Potwierdzona na poziomie $> 5\sigma$ obecność składowej kosmologicznej...

Ice Cube

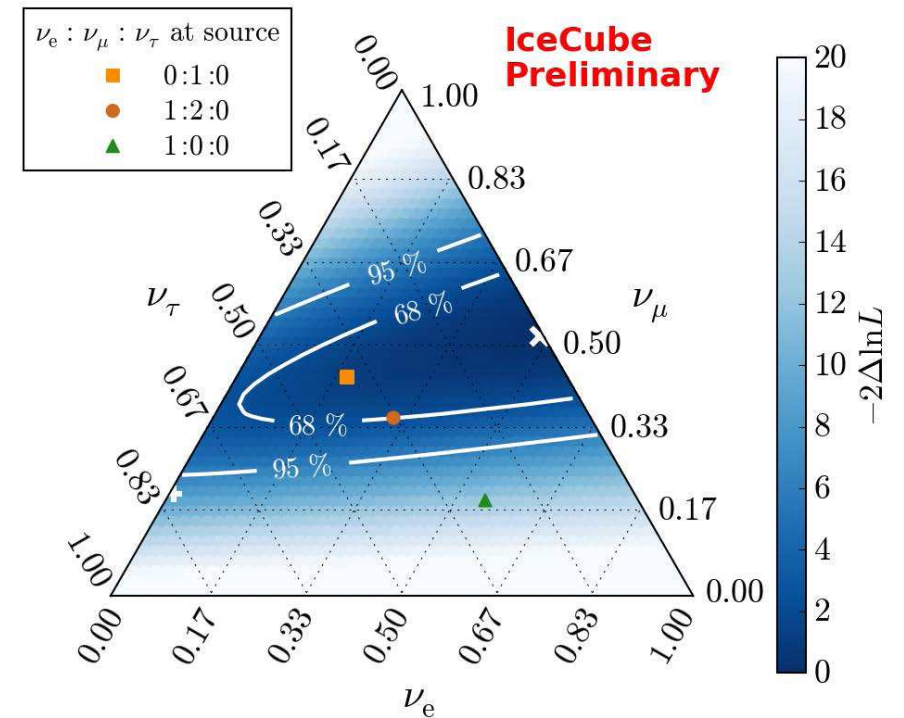
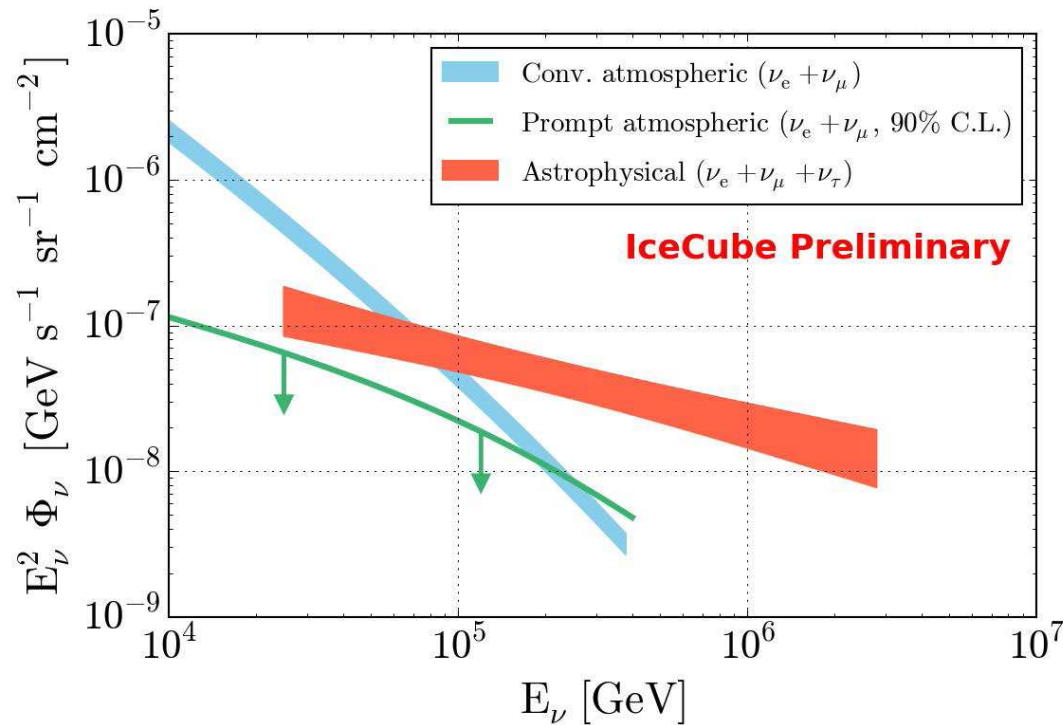
Wyniki

2010-2013

Dopasowane widmo neutrin kosmicznych: $\gamma = 2.5 \pm 0.09$

Dopasowany skład na powierzchni Ziemi: $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 0$

(zgodny w granicach błędów z oczekiwanym 1 : 1 : 1)



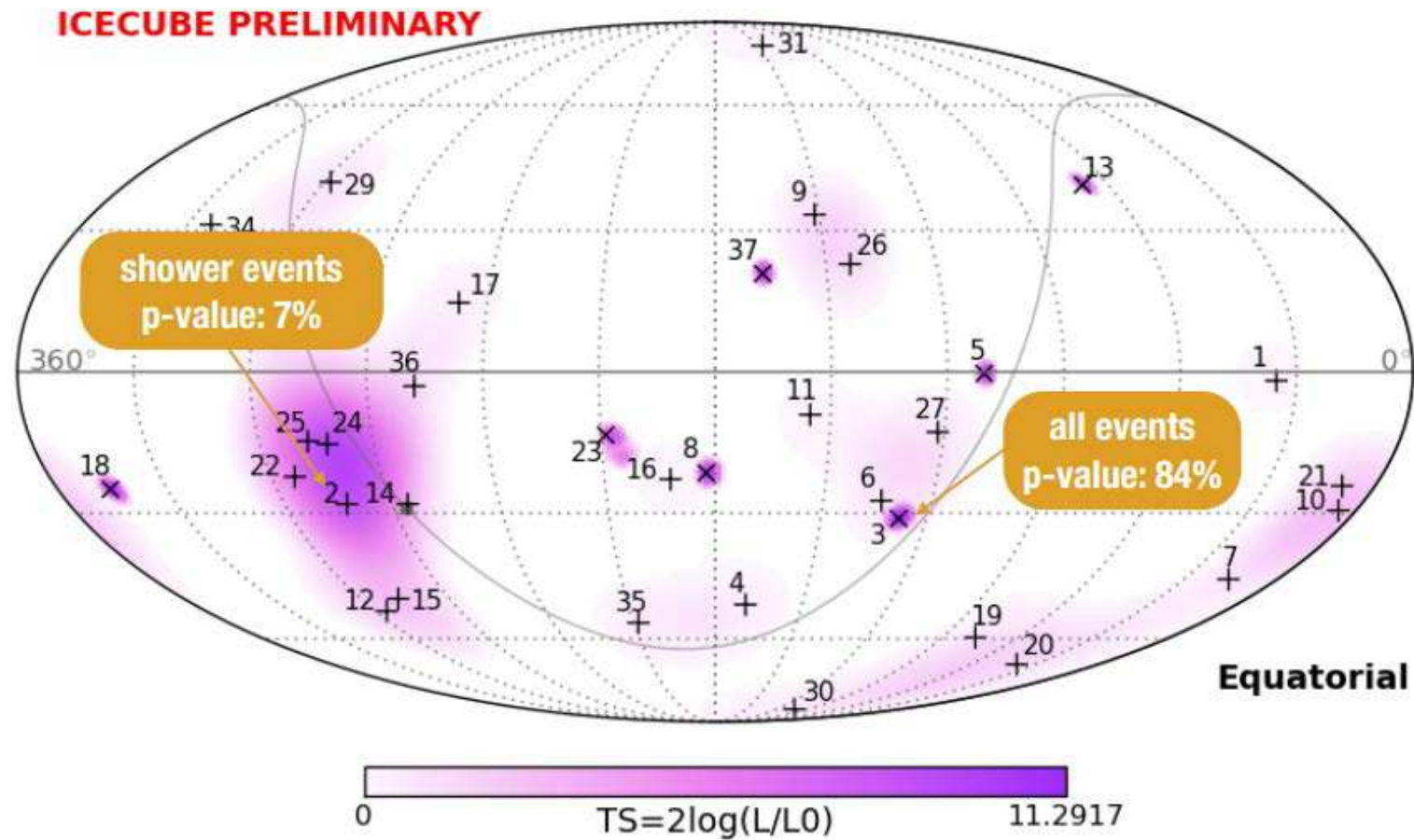
Ice Cube

Wyniki

2010-2013

Rozkład pozycji zgodny z rozkładem izotropowym

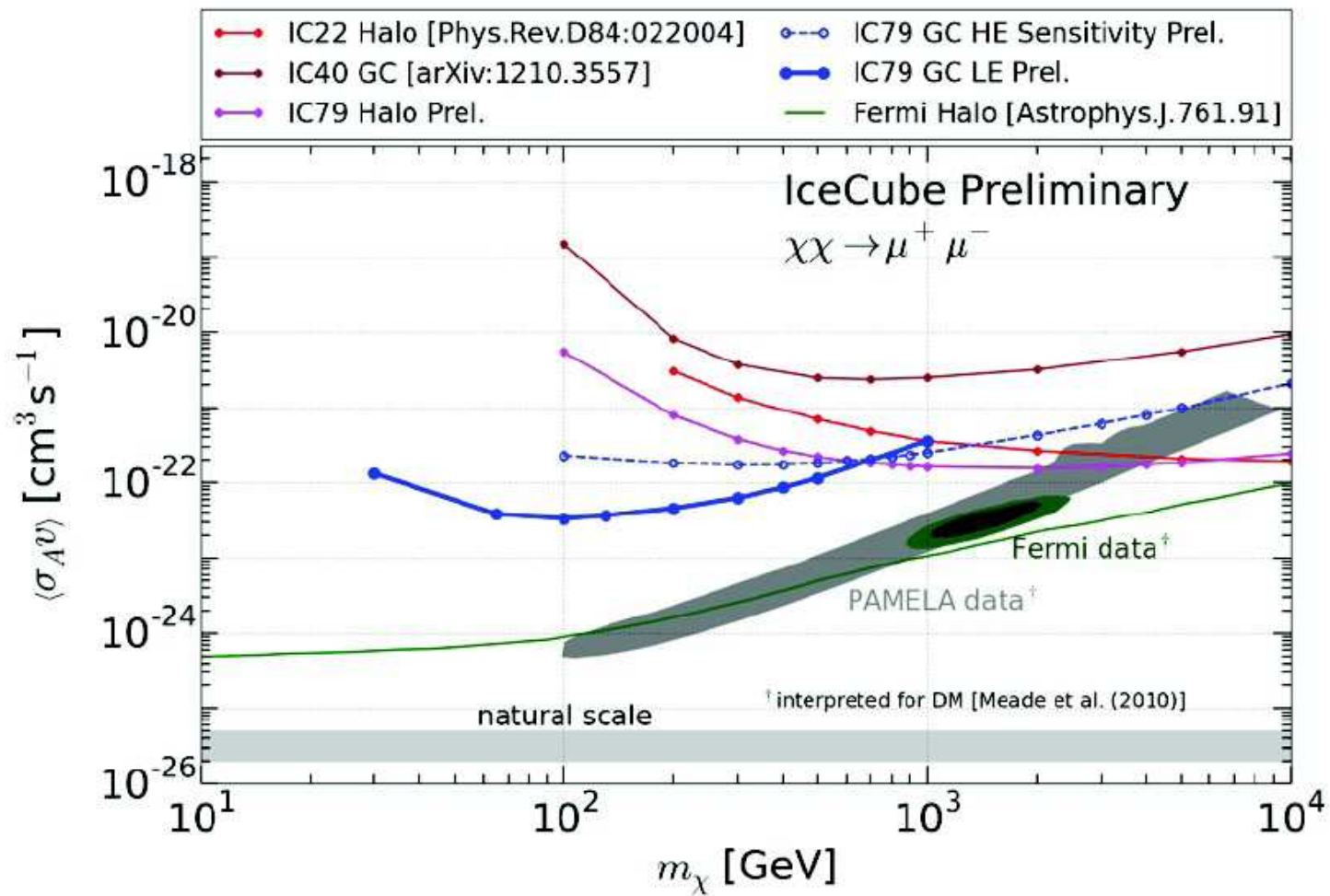
Fluktuacje oczekiwane przy tak małej liczbie przypadków.



Ice Cube

Wyniki

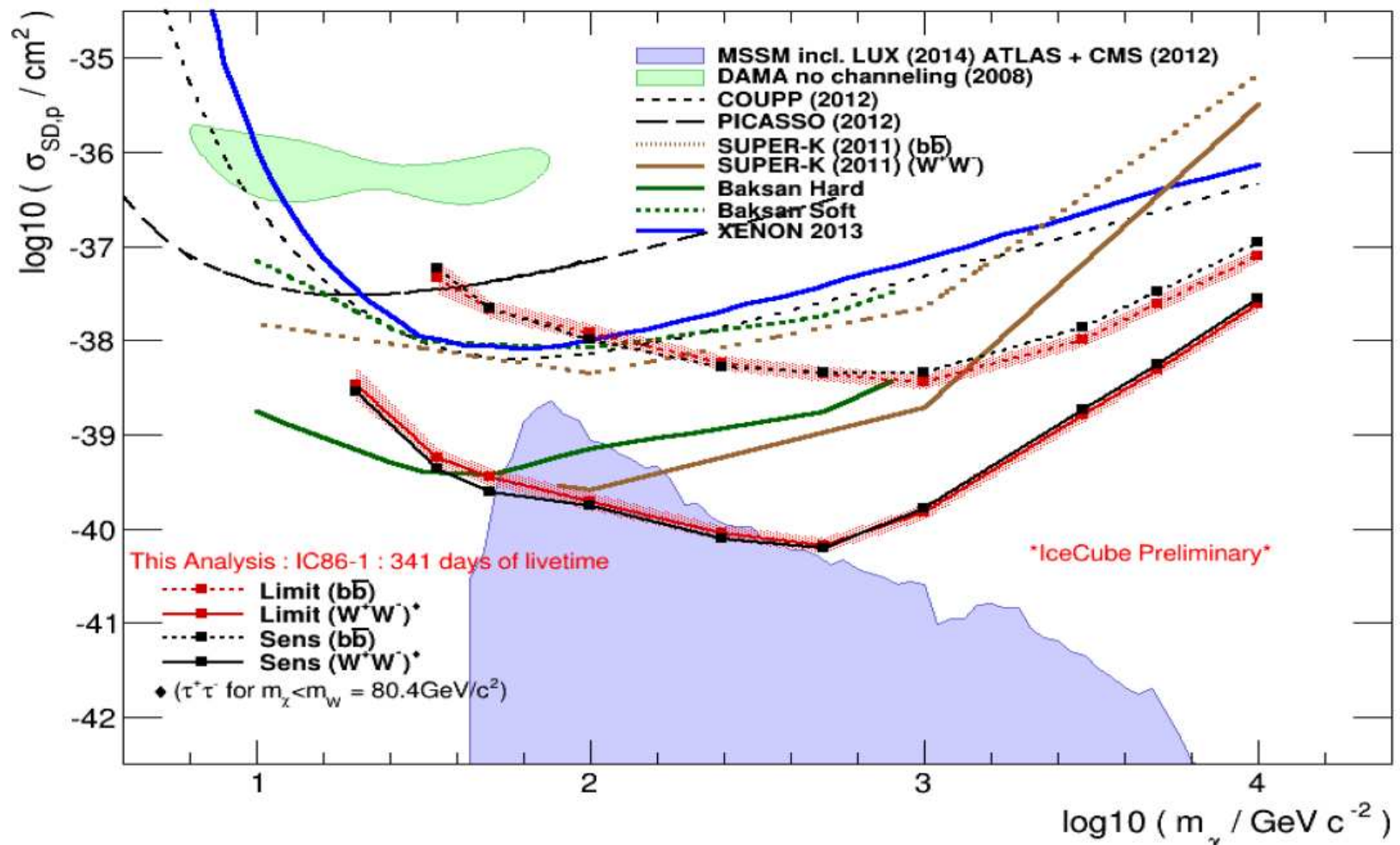
Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w Galaktyce



Ice Cube

Wyniki

Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w Słońcu

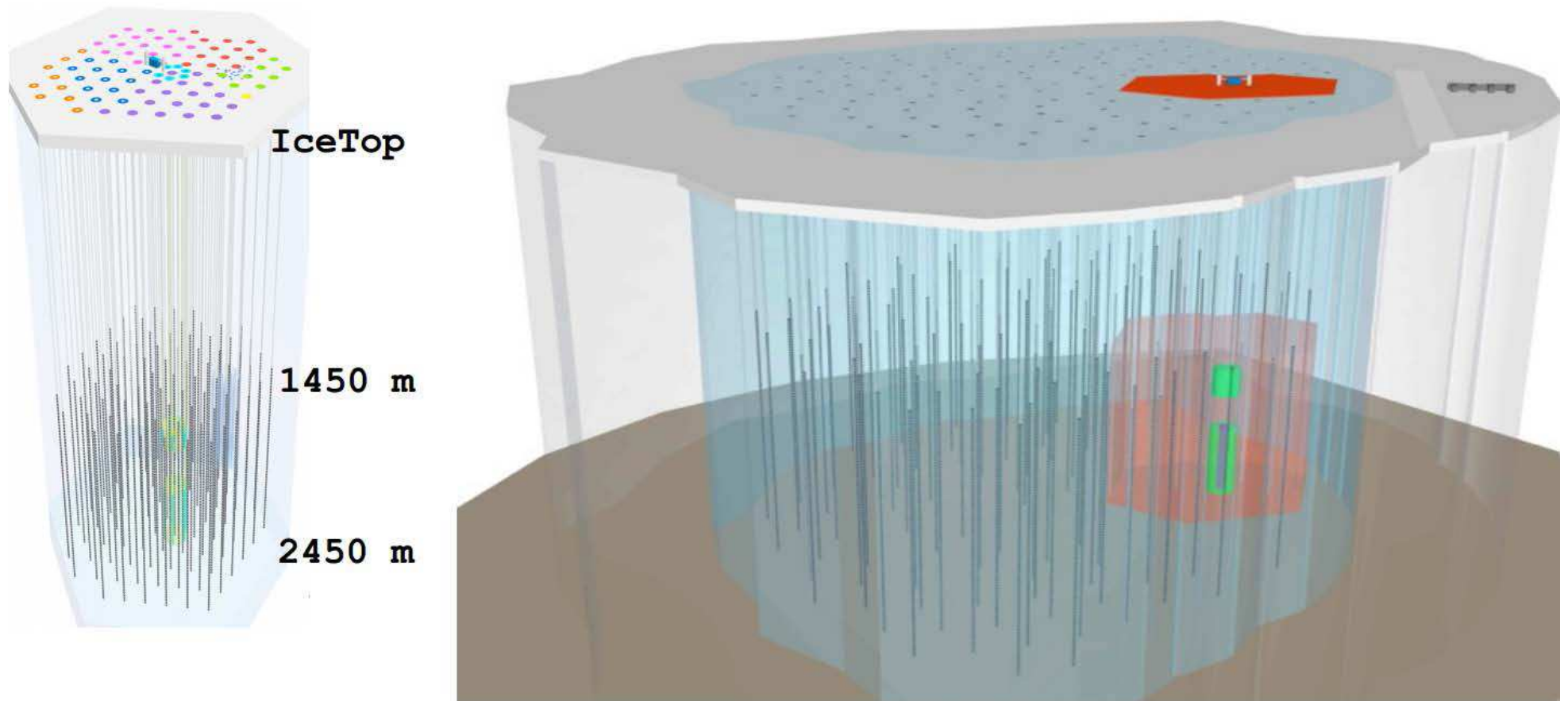


Ice Cube

Plany na przyszłość

Znaczne powiększenie detektora z większymi odstępami (większa objętość)

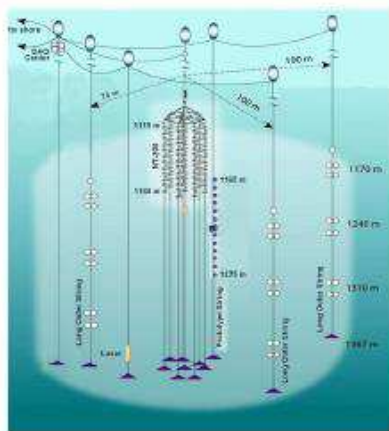
Uzupełnienie gęstszą siecią detektorów w środku - PINGU (niskie energie)



Inne eksperymenty

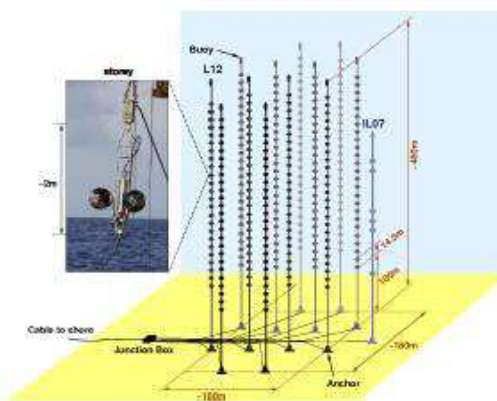
Alternatywą dla lodu jest woda - w przeszłości były już budowane detektory mierzące promieniowanie Czerenkowa w dużych zbiornikach wodnych

NT-200+



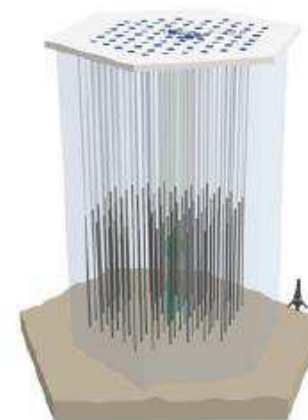
- Lake Baikal
- $1/2000 \text{ km}^3$
- 228 PMTs

ANTARES



- Mediterranean Sea
- $1/100 \text{ km}^3$
- 885 PMTs

IceCube



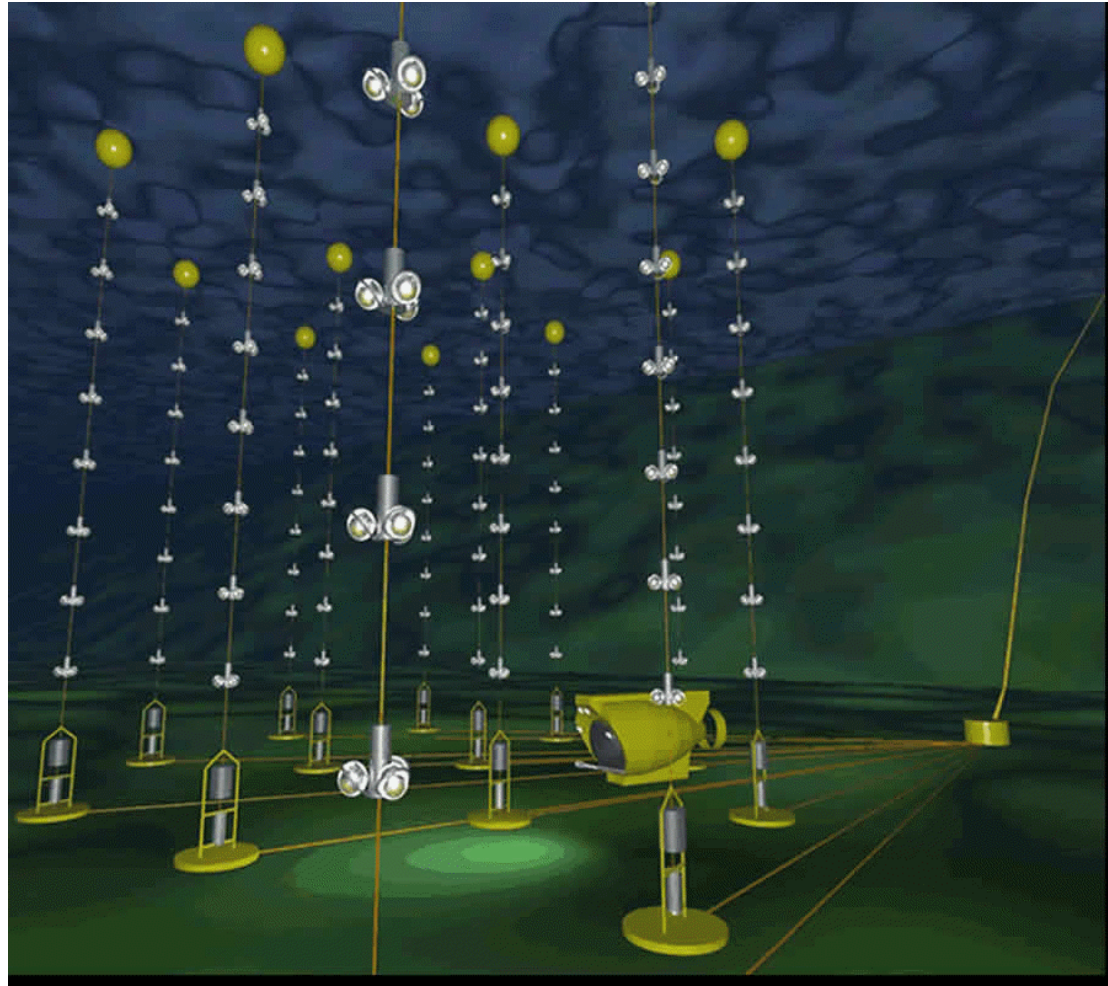
- South Pole glacier
- 1 km^3
- 5160 PMTs

Larger, sparser → higher energies

Inne eksperymenty

Antares

Uruchomiony 2007. 885 PM na głębokości 2.5 km



Inne eksperymenty

KM3NeT

W budowie. Francja + Włochy + Grecja. Na mapie ESFRI

