

# Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład XI

- Astronomia neutrin
- ⇒ Eksperyment Super-Kamiokande
- ⇒ Eksperyment Ice Cube

# Astronomia neutrin

## Motywacja

Oczekujemy produkcji neutrin w wielu różnych procesach: produkcji i oddziaływaniu promieniowania kosmicznego, w aktywnych jądrach galaktyk (AGN), wybuchach supernowych (SN), błyskach gamma (GRB) itp.

Oczekiwane reakcje produkcji

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

Produkcja pionów związana w szczególności z obcięciem GZK:



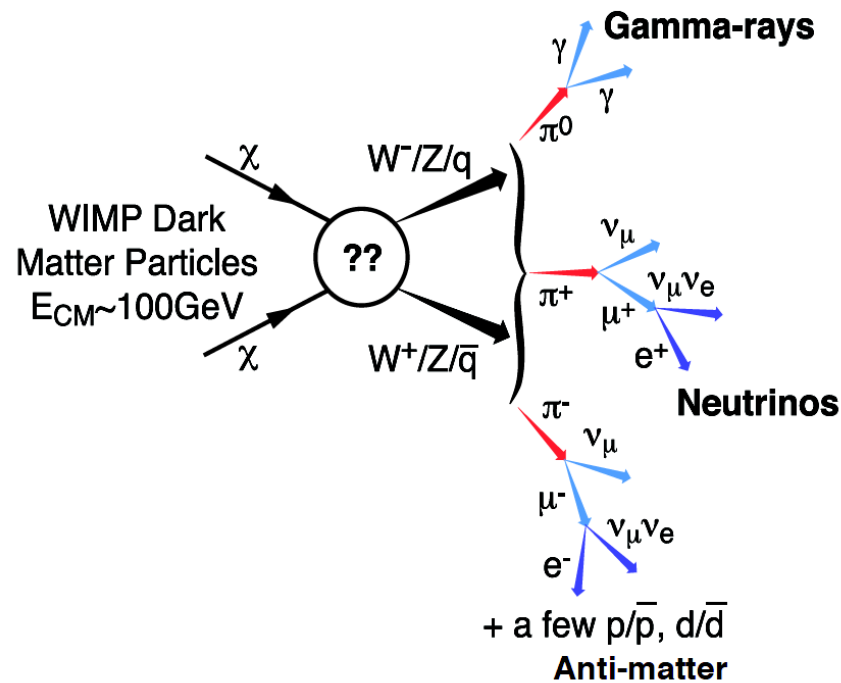
⇒ oczekujemy produkcji wysokoenergetycznych neutrin powiązanej ze źródłami UHECR

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

# Astronomia neutrin

## Motywacja

Neutrino mogą też być sygnałem anihilacji cząstek ciemnej materii...



Zalety “astronomii neutrin”:

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

Niestety, bardzo trudno je zmierzyć!...

Bardzo słabo oddziałują + mamy duże tło “lokalnych” neutrin...

# Źródła lokalne

## Neutrino słoneczne

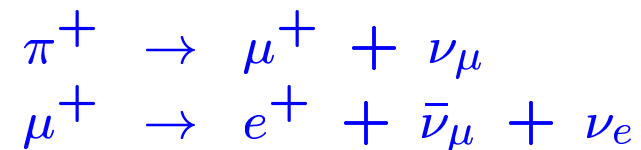
**Słońce** jest niezwykle intensywnym źródłem neutrin elektronowych, głównie pochodzących z procesu “**p-p**”:  $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$  ( $E_\nu \leq 0.42 \text{ MeV}$ ), trochę wyższe energie w procesie “**pep**”:  $p + e^- + p \rightarrow D + \nu_e$  ( $E_\nu \approx 1.44 \text{ MeV}$ ).

Najwyższe energie dostępne w rozpadzie  ${}^8_5B$ :  ${}^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$   
 $\Rightarrow$  energia neutrina do **15 MeV**  $\Rightarrow$  obserwowalne detektorami fizyki cząstek...

## Neutrino atmosferyczne

**Pierwotne promieniowanie kosmiczne** (o energiach do  $\sim 10^{20} \text{ eV}$ ) oddziałuje z jądrami O i N w atmosferze wywołując kaskady **cząstek wtórnych**, głównie pionów  $\pi^\pm$ .

Neutrino powstają w łańcuchu rozpadów:



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

# Sztuczne źródła

## Neutrina reaktorowe

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

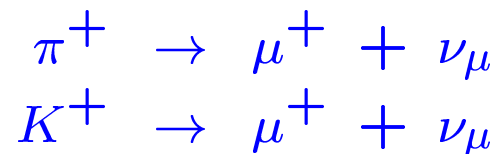
Średnio produkowane jest przy tym sześć **entyneutrin electronowych**, głównie w rozpadach neutronów:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

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

## Neutrina akceleratorowe

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

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



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

# Neutrina

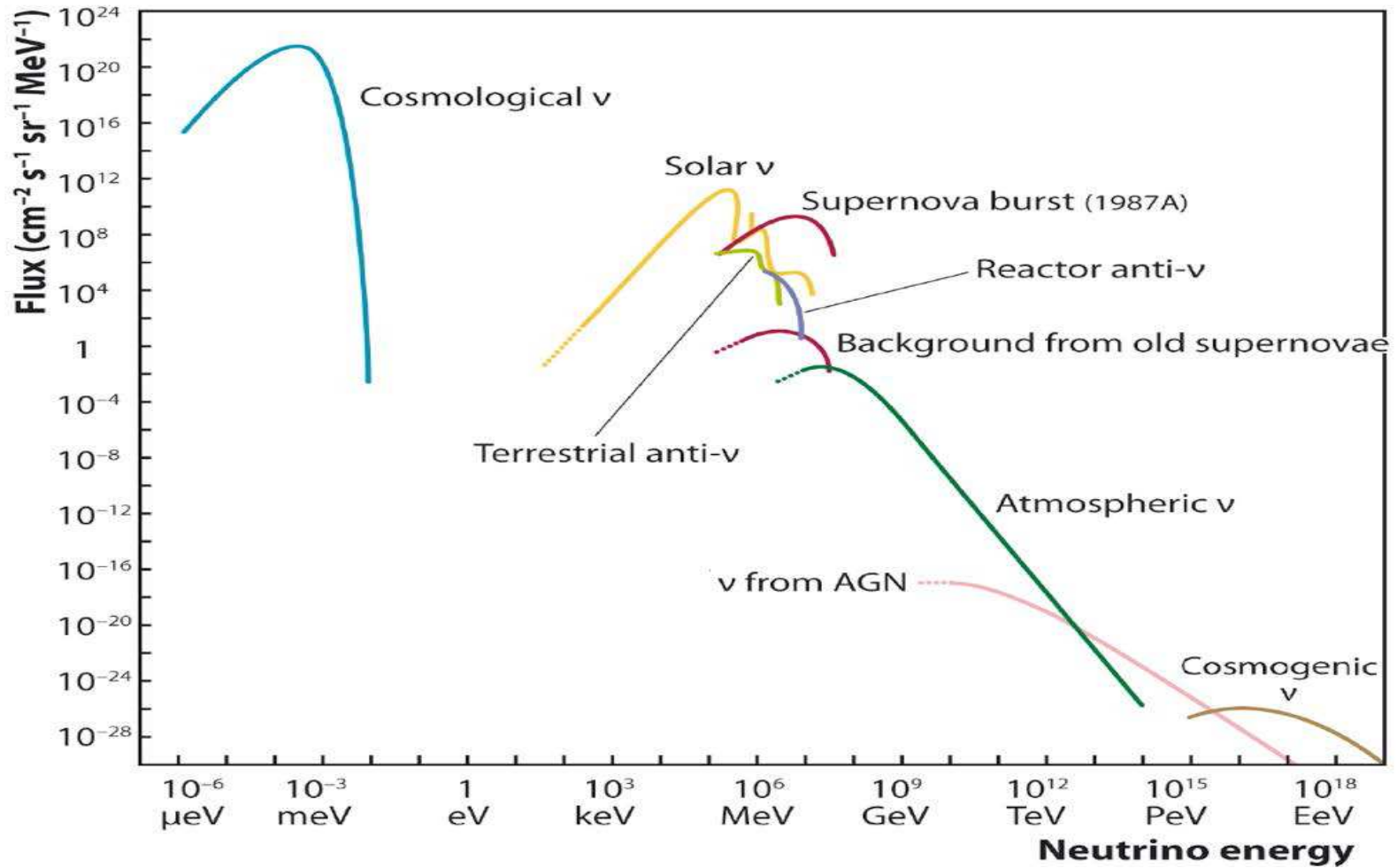
## Źródła

Typ	Zapach	Energie	Strumień
Słoneczne	$\nu_e$	$\leq 15 \text{ MeV}$	$6 \cdot 10^{10} \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (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  
Dokładne poznanie ich własności kluczowe dla obserwacji astrofizycznych...

# Neutrino

## Źródła



# Super-Kamiokande

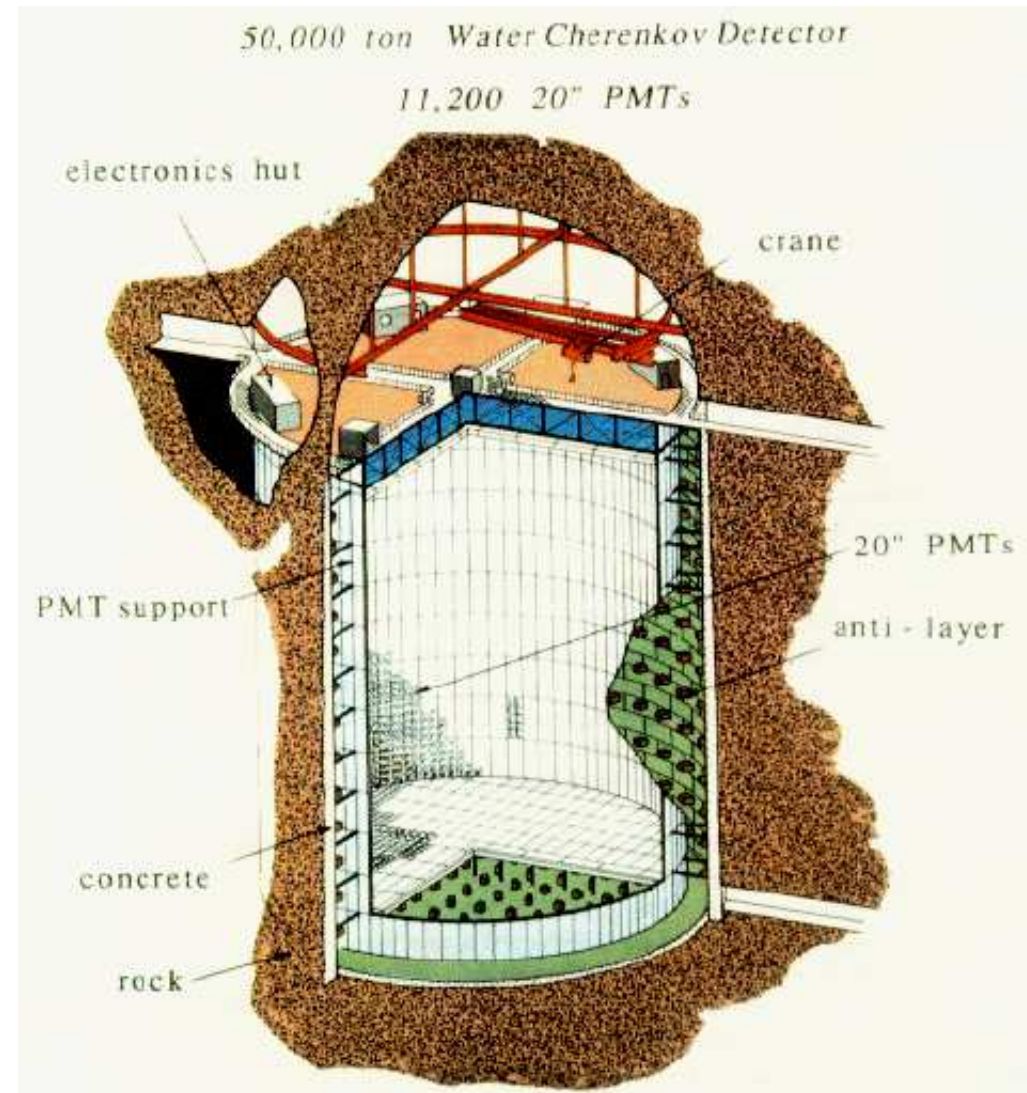
## Eksperyment

**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

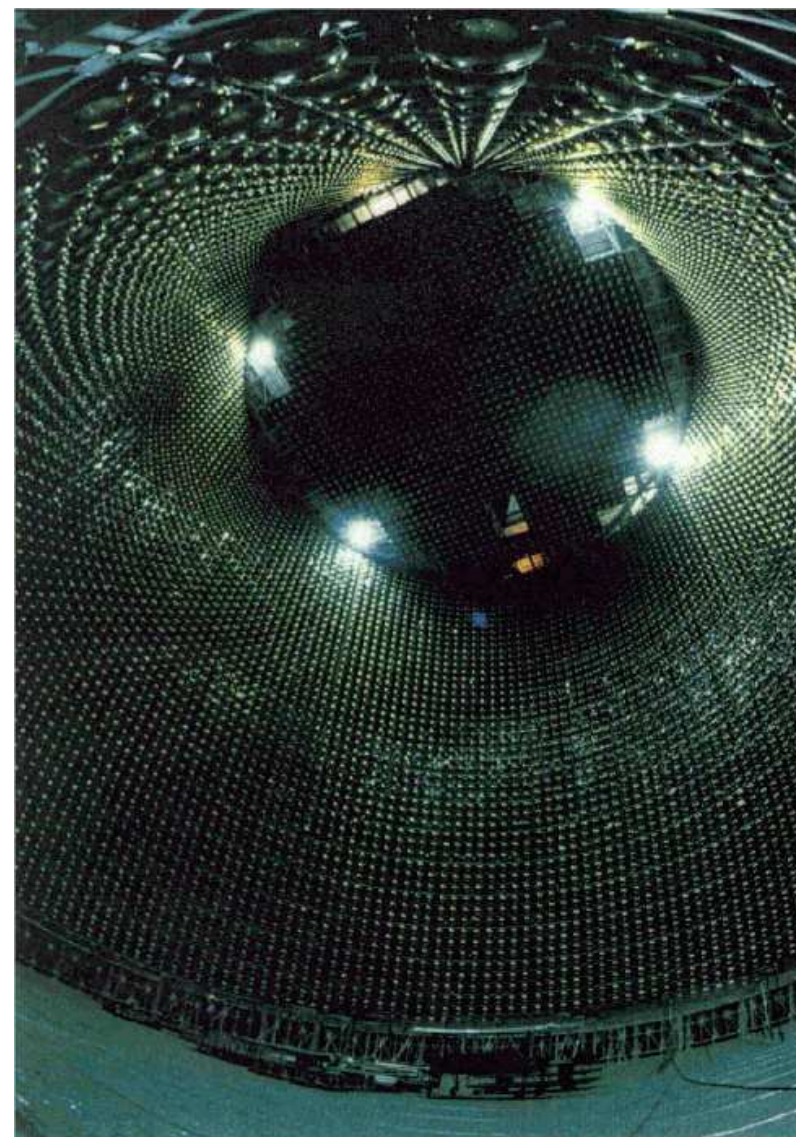
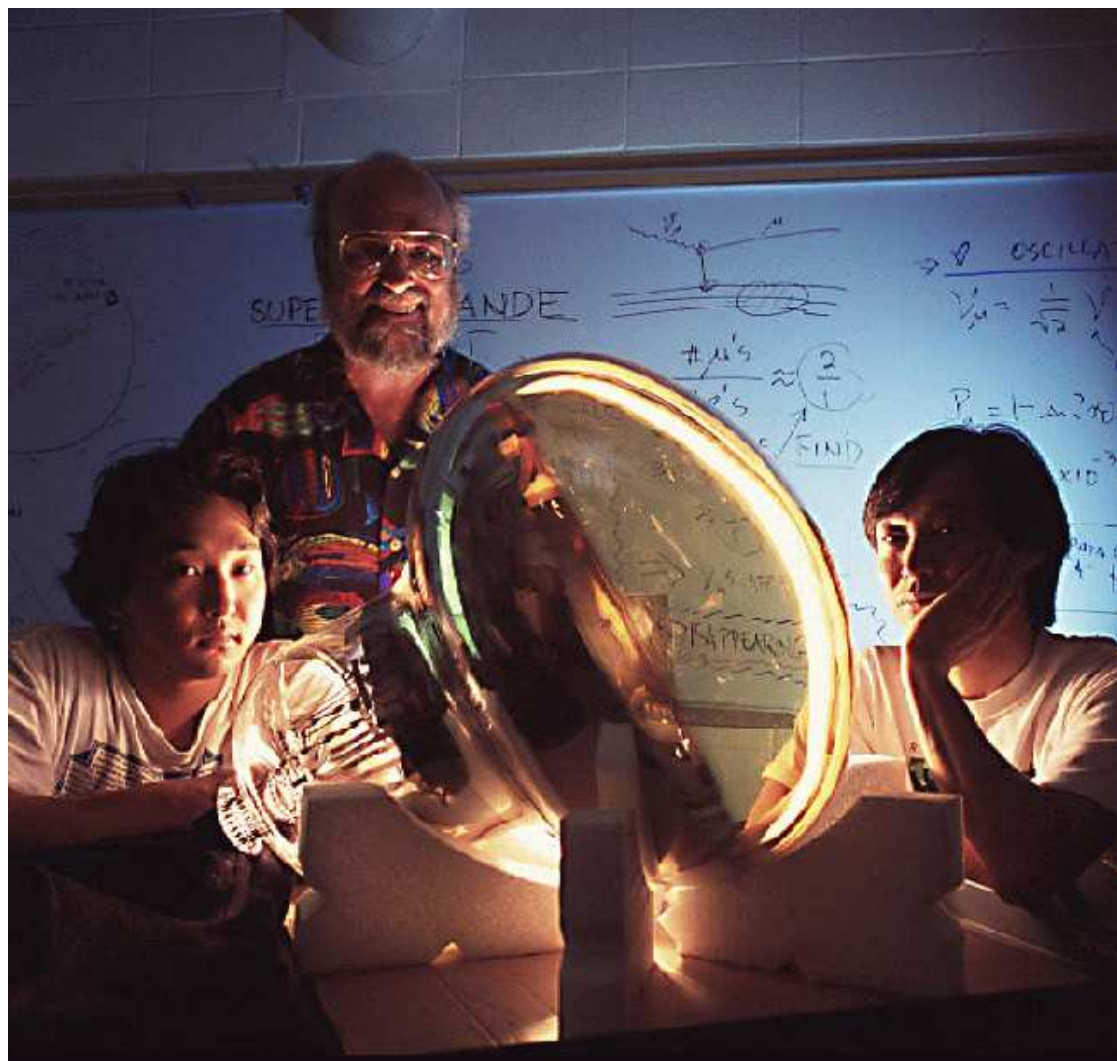
rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**

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





# Super-Kamiokande



## Napełnianie



# Super-Kamiokande

## Tło

Oczekiwane 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)

Precyzyjna **kalibracja detektora**: rozpady zatrzymujących się mionów, własny akcelerator  $e^-$  5-16 MeV, generator DT (źródło neutronów).

# Super-Kamiokande

## Wyzwalanie

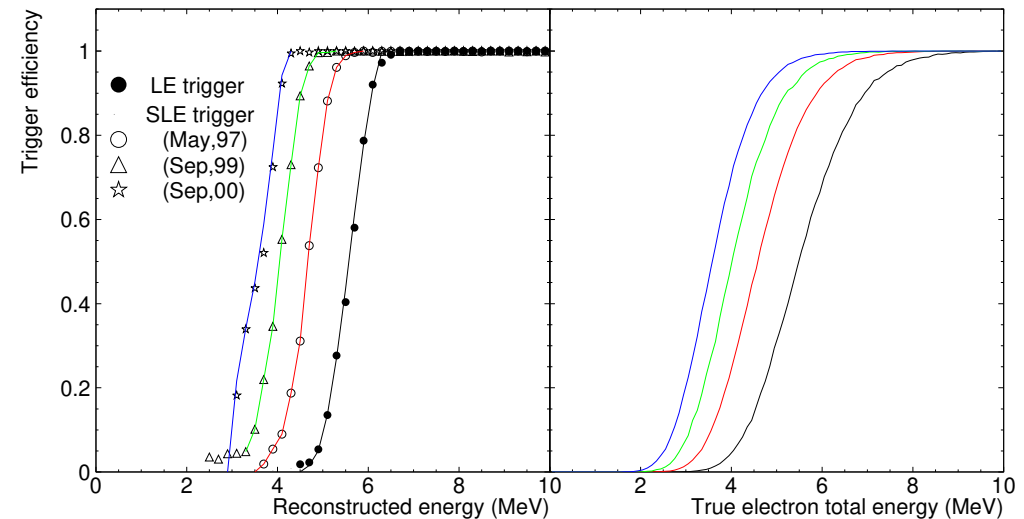
Średni poziom sygnału z pojedynczego fotopowielacza: 3.5 kHz.

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.

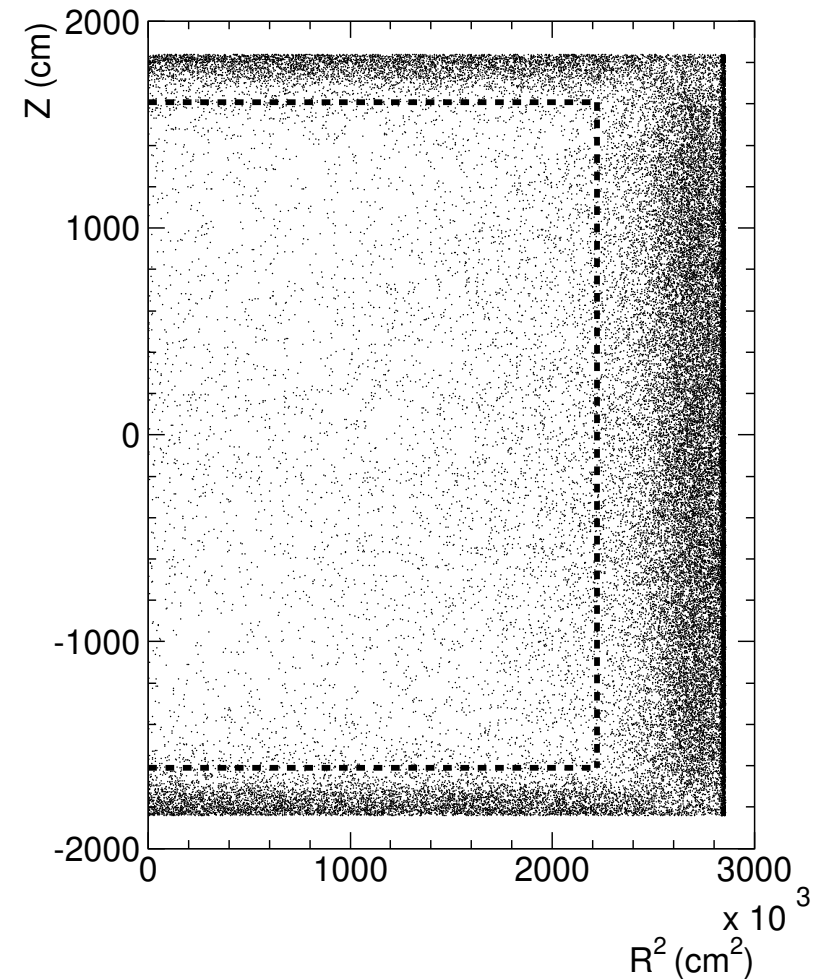
# Super-Kamiokande

## Wyzwalanie

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

Wyraźny wkład **naturalnej promieniotwórczości** ścian komory.

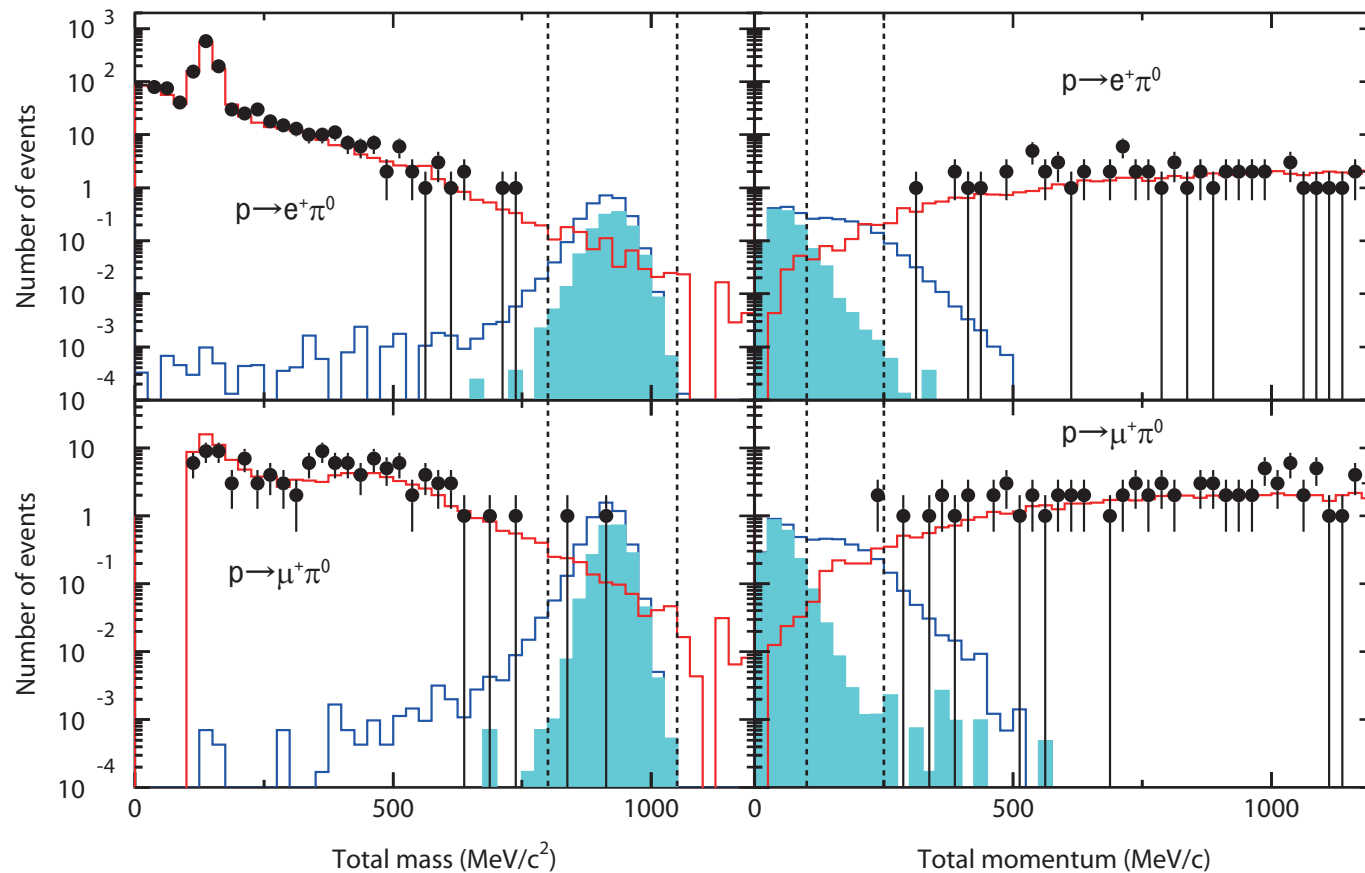
Przerywana linia: “fiducial volume”  
obszar z którego wybieramy przypadki do dalszej analizy.



# Super-Kamiokande

## Poszukiwanie rozpadu protonu

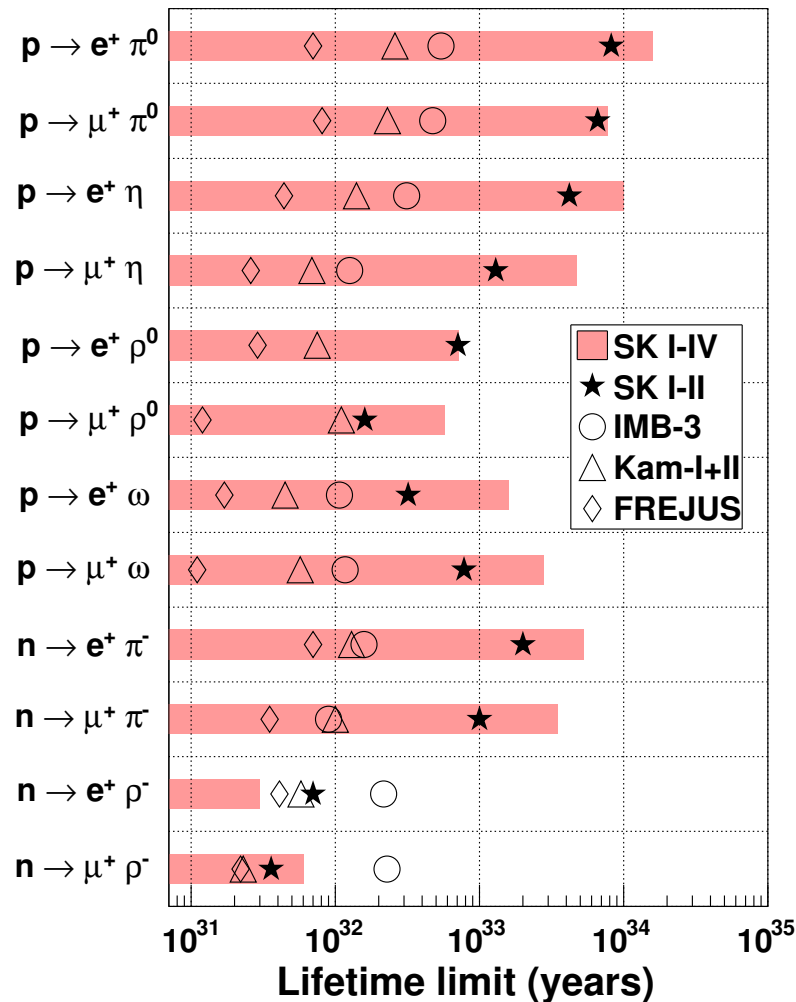
Jedna z możliwych sygnatur:  $p \rightarrow e^+ \pi^0 \rightarrow e^+ \gamma \gamma$  lub  $p \rightarrow \mu^+ \pi^0 \rightarrow \mu^+ \gamma \gamma$



Prównanie rozkładów całkowitej masy niezmienniczej i pędu dla **sygnału** i **tła**

# Super-Kamiokande

## Poszukiwanie rozpadu protonu



Najsilniejsze ograniczenie

$$\tau / BR(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1.6 \times 10^{34} \text{ y}$$

Przewidywania SU(5) GUT

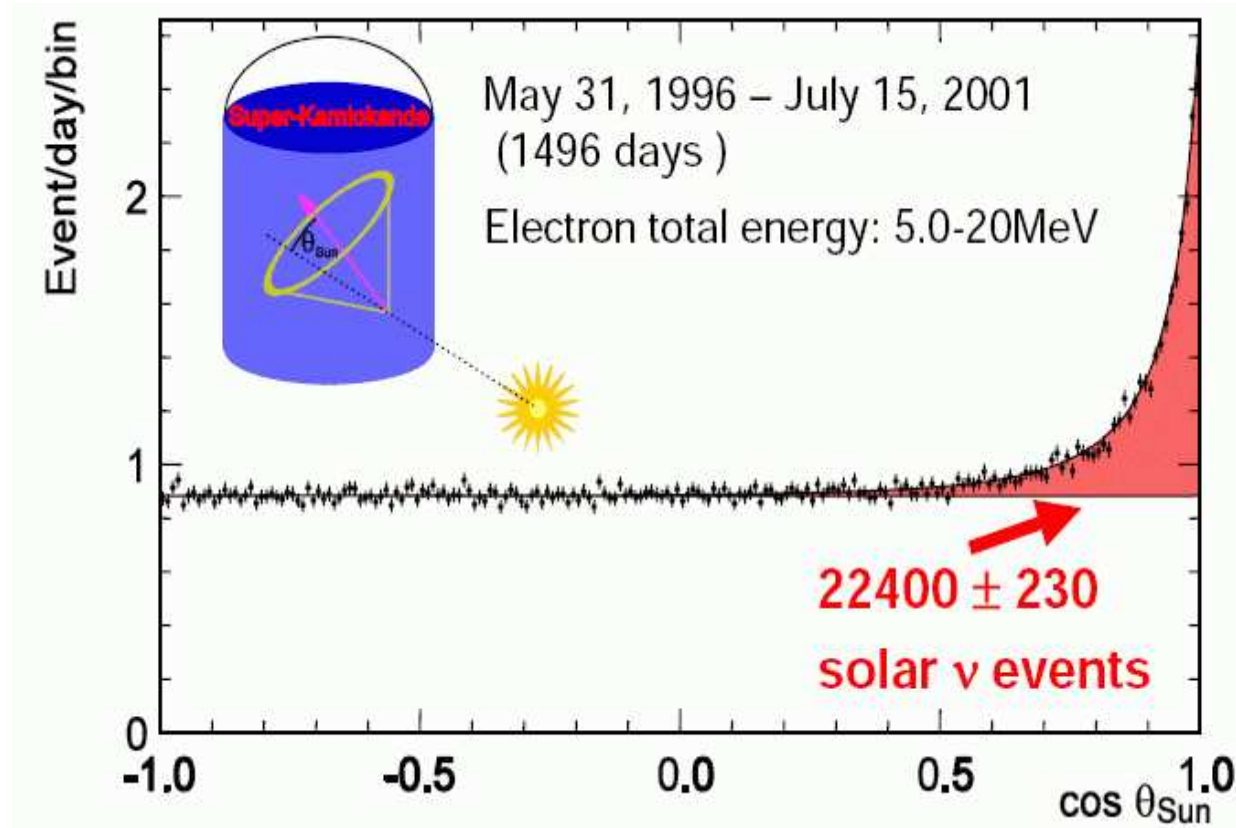
$$\tau \sim 10^{31 \pm 1} \text{ y}$$

ale inne modele dają wyższe przewidywania...

# 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. !

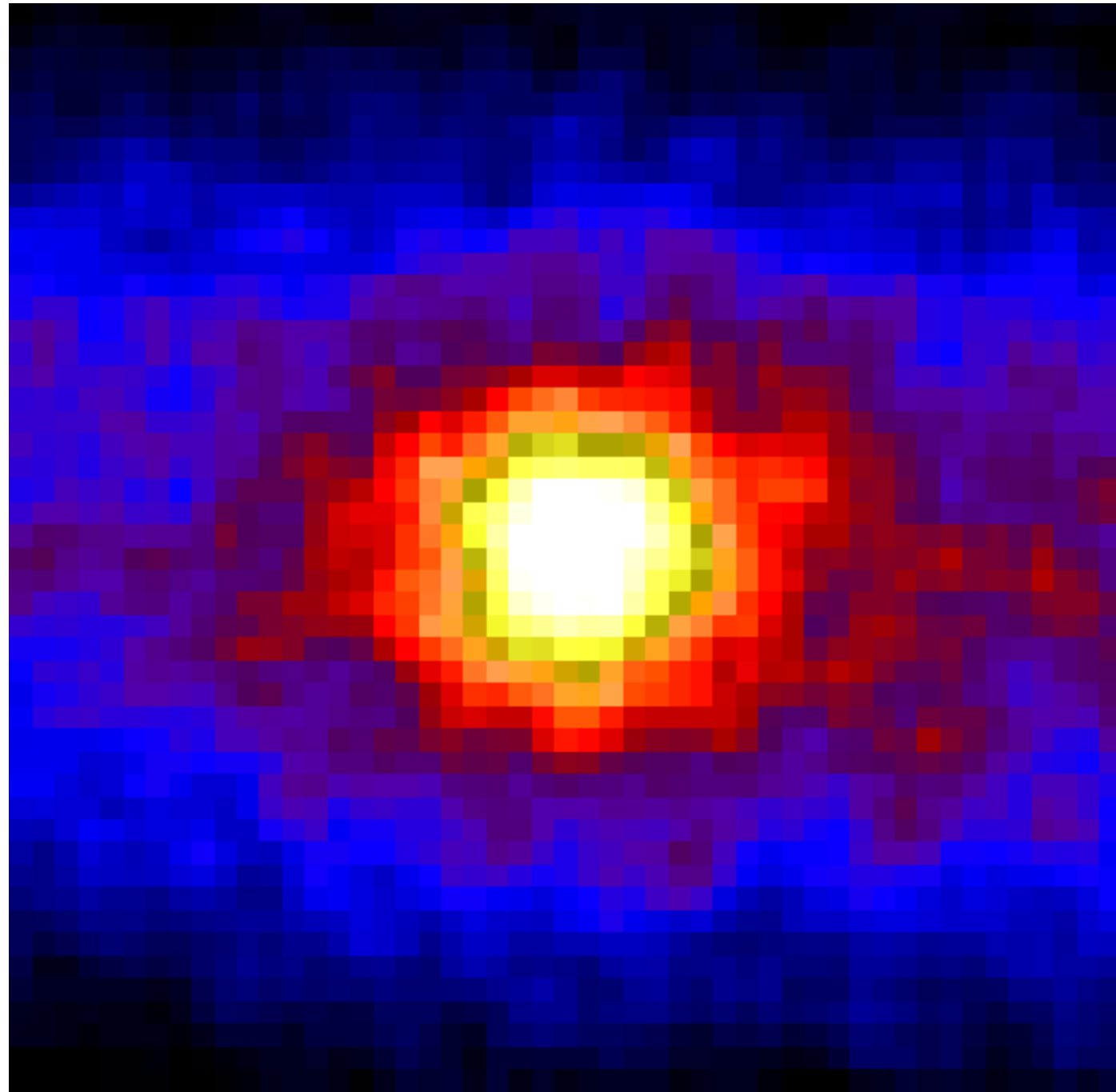
**Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.**



## Super-Kamiokande

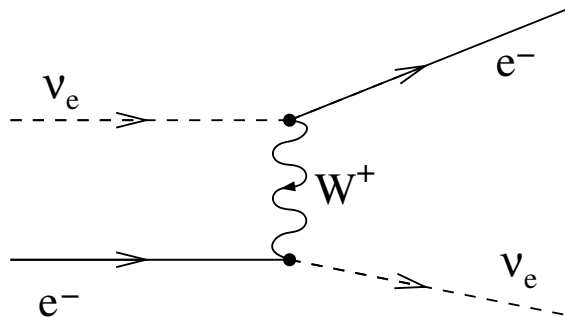
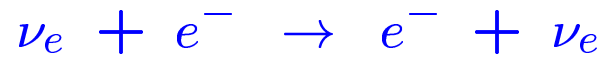
“Zdjęcie” Słońca  
w “świele” neutrin

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

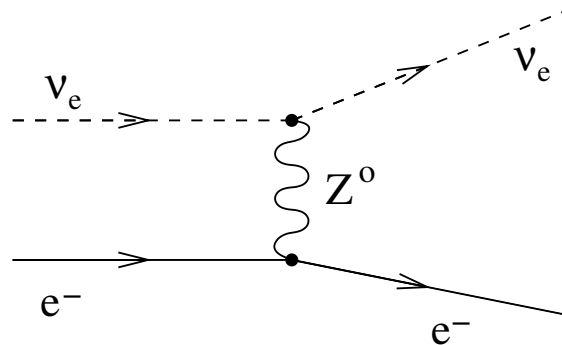
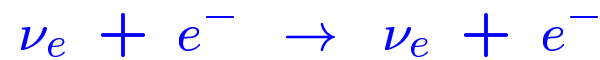


# Super-Kamiokande

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

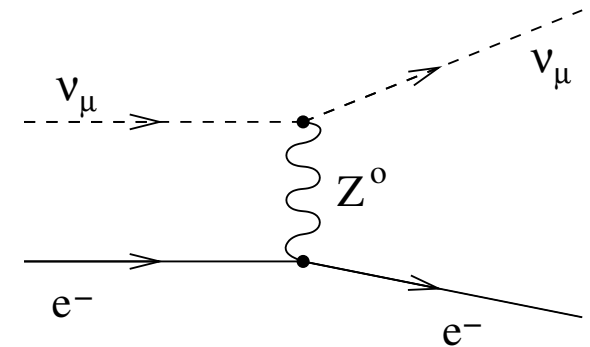


Możliwa jest też detekcja  $\nu_e$  poprzez proces typu **NC**:



przekrój czynny  $\sim 5$  razy mniejszy...

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



(także dla  $\nu_\tau$ )

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

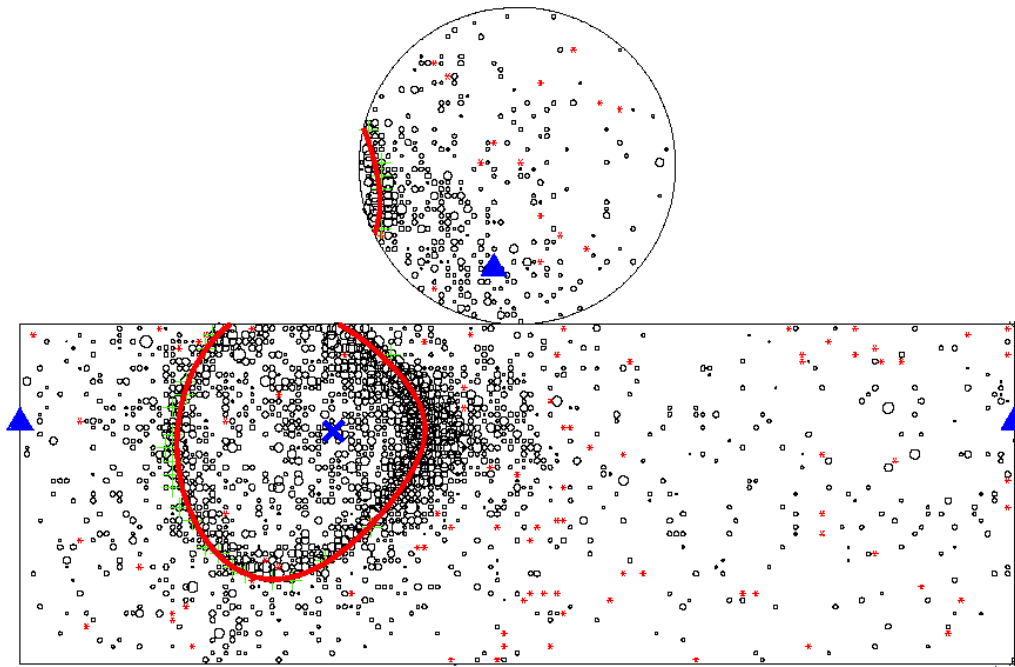
# Super-Kamiokande

Dla wyższych energii potrafimy odróżnić neutrino:

## Neutrino elektronowe

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

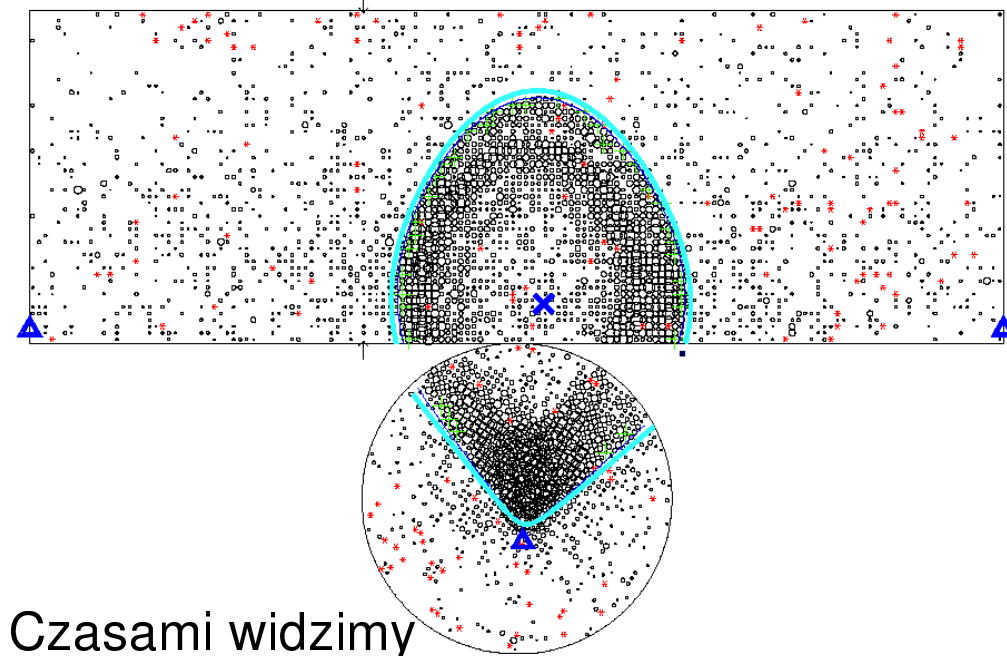
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



## Neutrino mionowe

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

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



Czasami widzimy  
też opóźniony **sygnał**  $e^-$  z rozpadu  $\mu^-$ .

# Super-Kamiokande

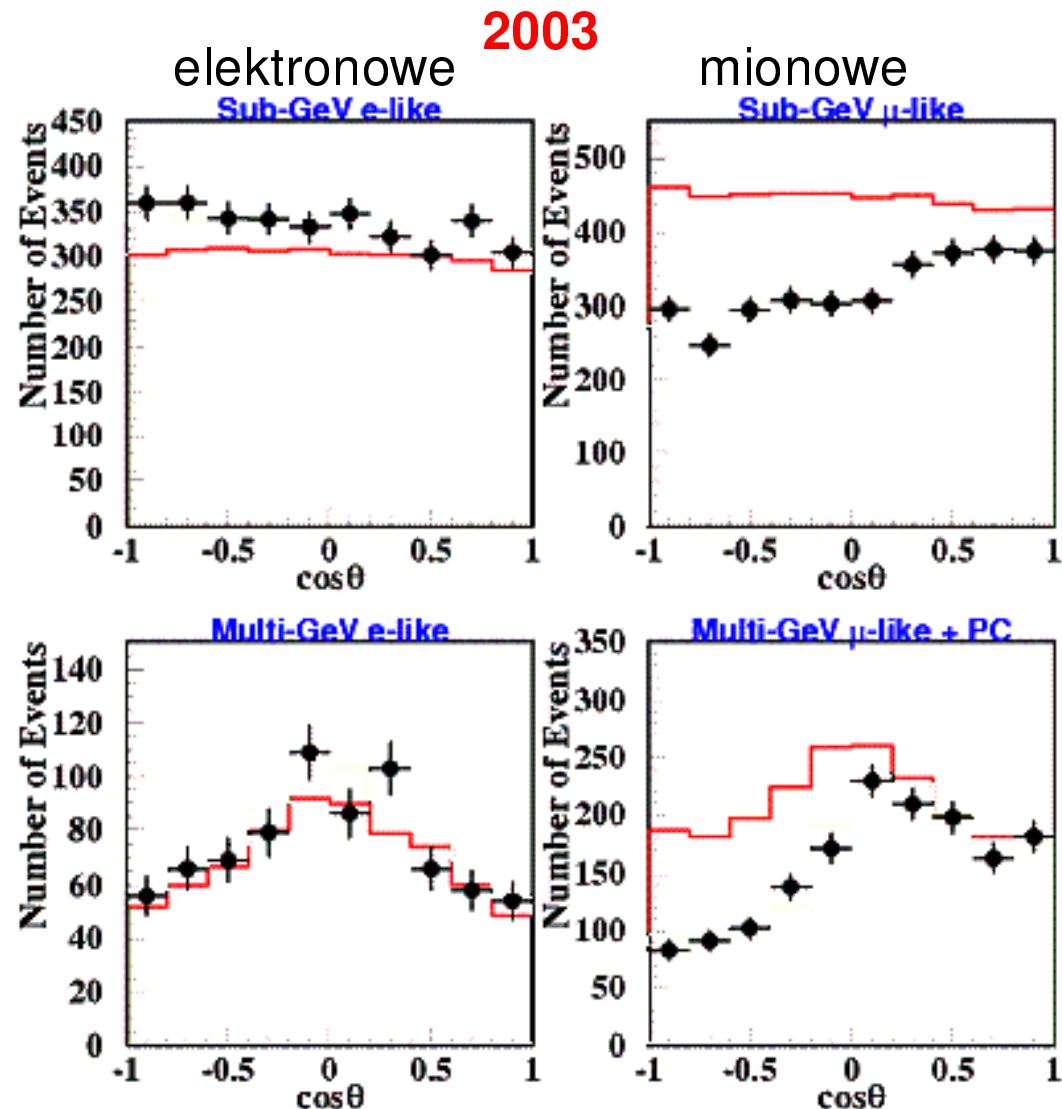
## Neutrina atmosferyczne

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**  $\nu_\mu$  lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?



# Super-Kamiokande

## Neutrina atmosferyczne

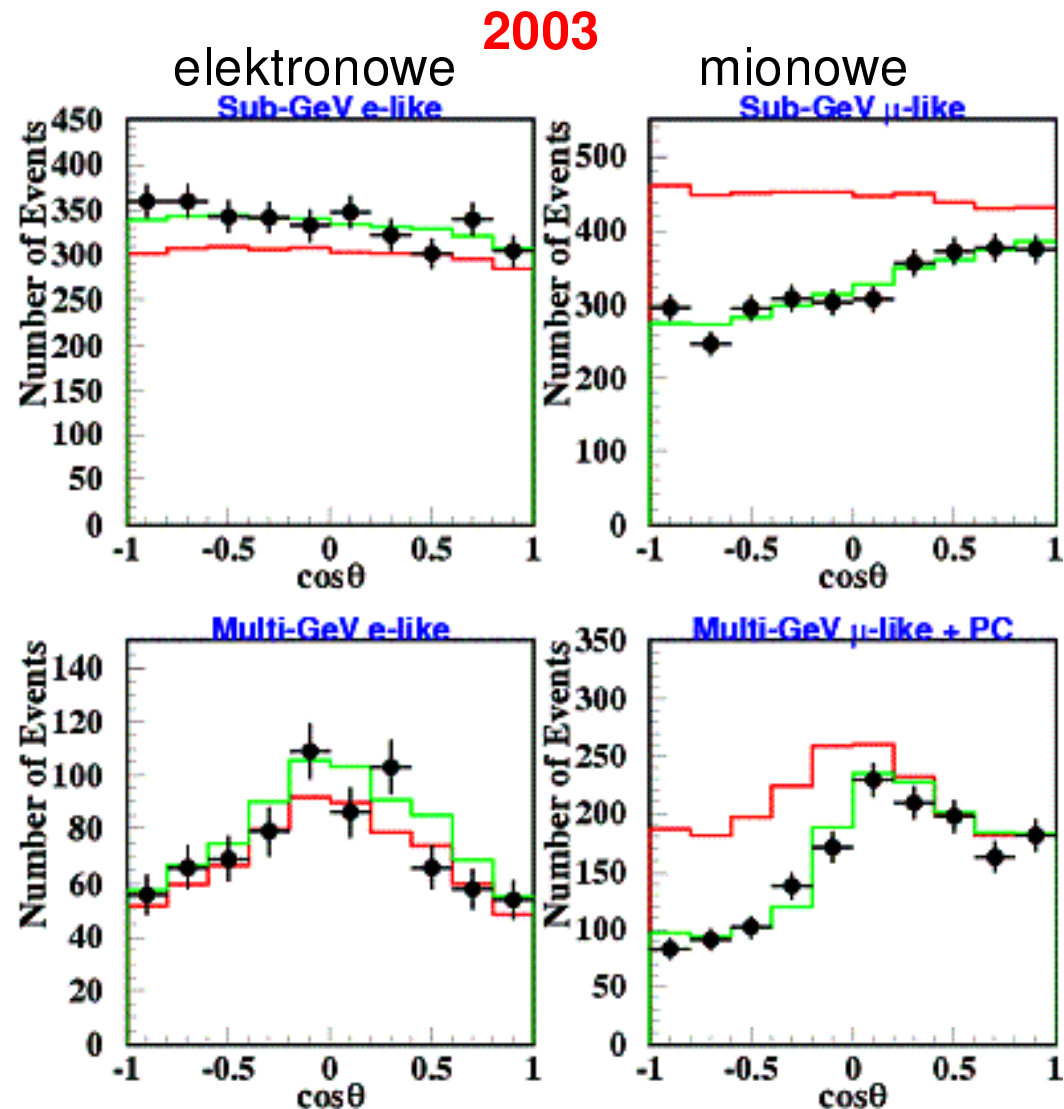
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ( $\cos \theta = 1$  gdy lecą do dołu,  $-1$  gdy do góry)  $\Rightarrow$

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

Wyraźnie **mniej**  $\nu_\mu$  lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

Musimy przyjąć, że neutrina oscylują...

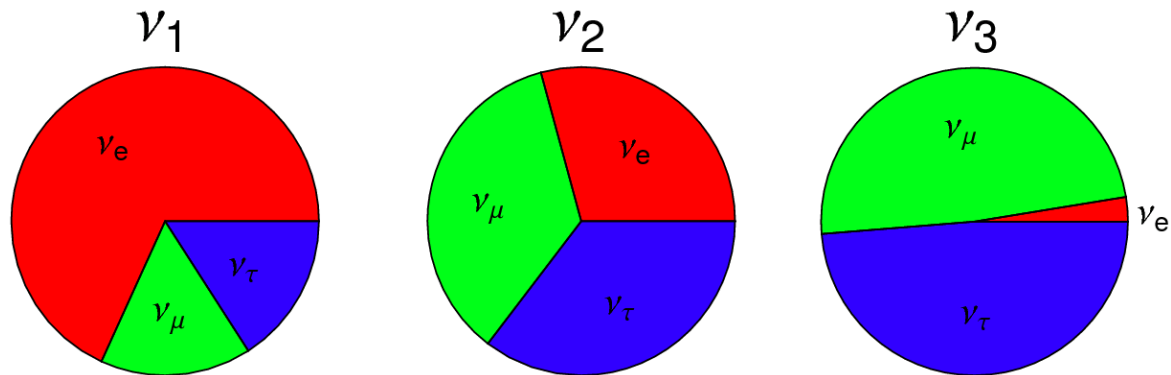


# Neutrino

## 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  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  i  $\nu_3$

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 trzech generacji

Stany zapachowe są superpozycją stanów masowych:

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

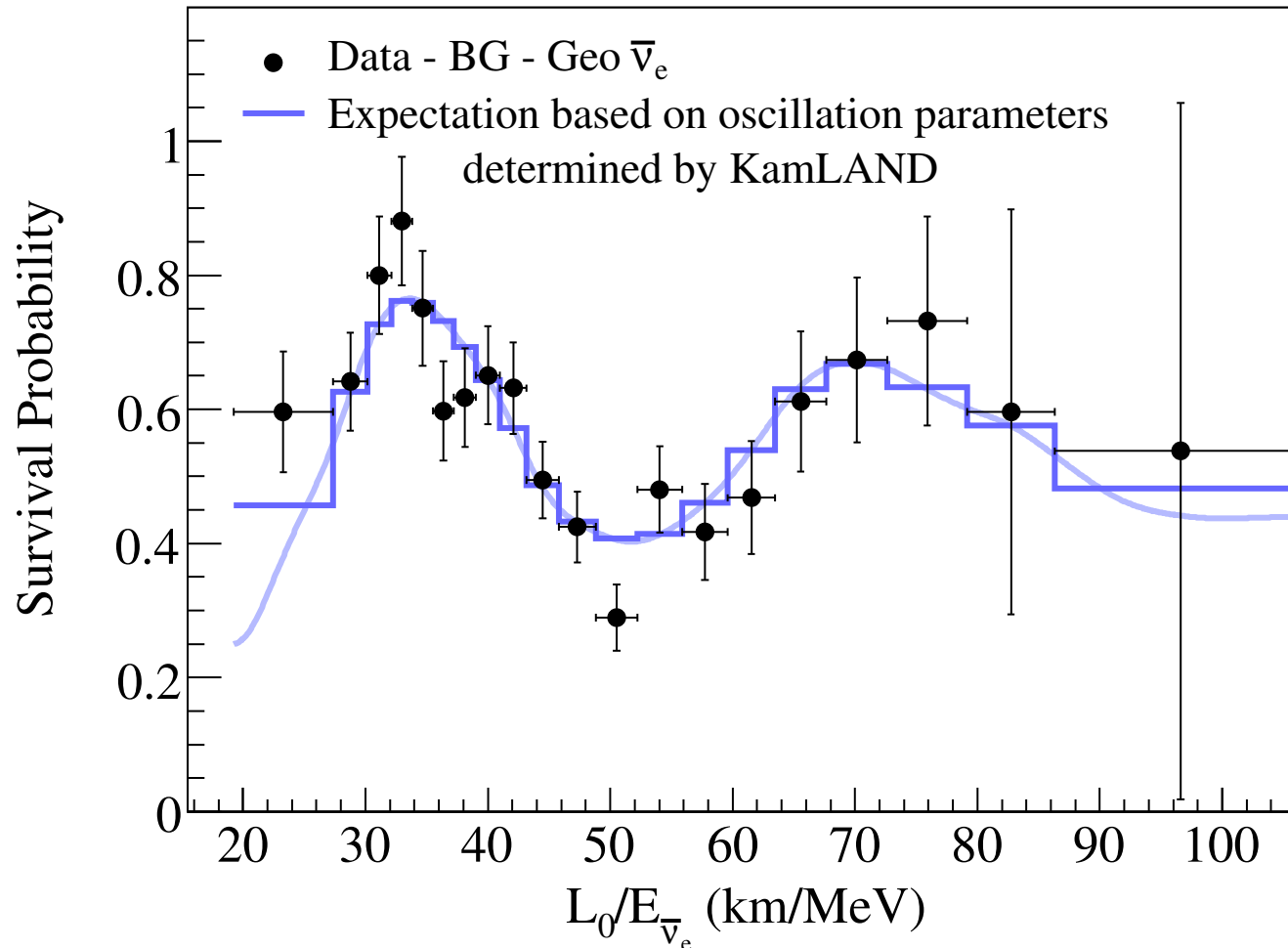
**PMNS** - macieź Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata  
odpowiada macieży CKM mieszania kwarków

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

# Neutrina

## Wyniki KamLAND      neutrina reaktorowe

Pierwszy bezpośredni pomiar oscylacji (znikanie i pojawianie się)

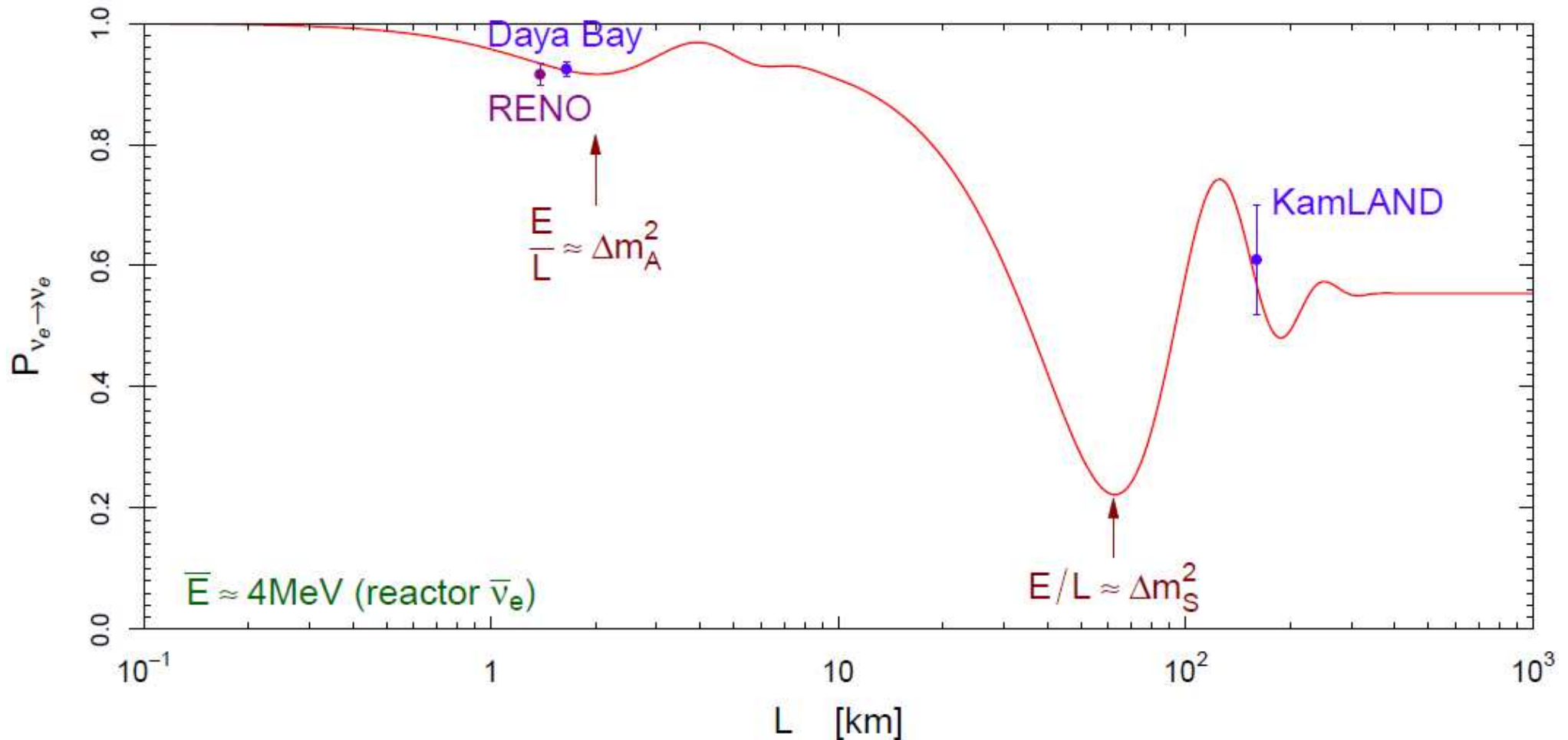




# Neutrina

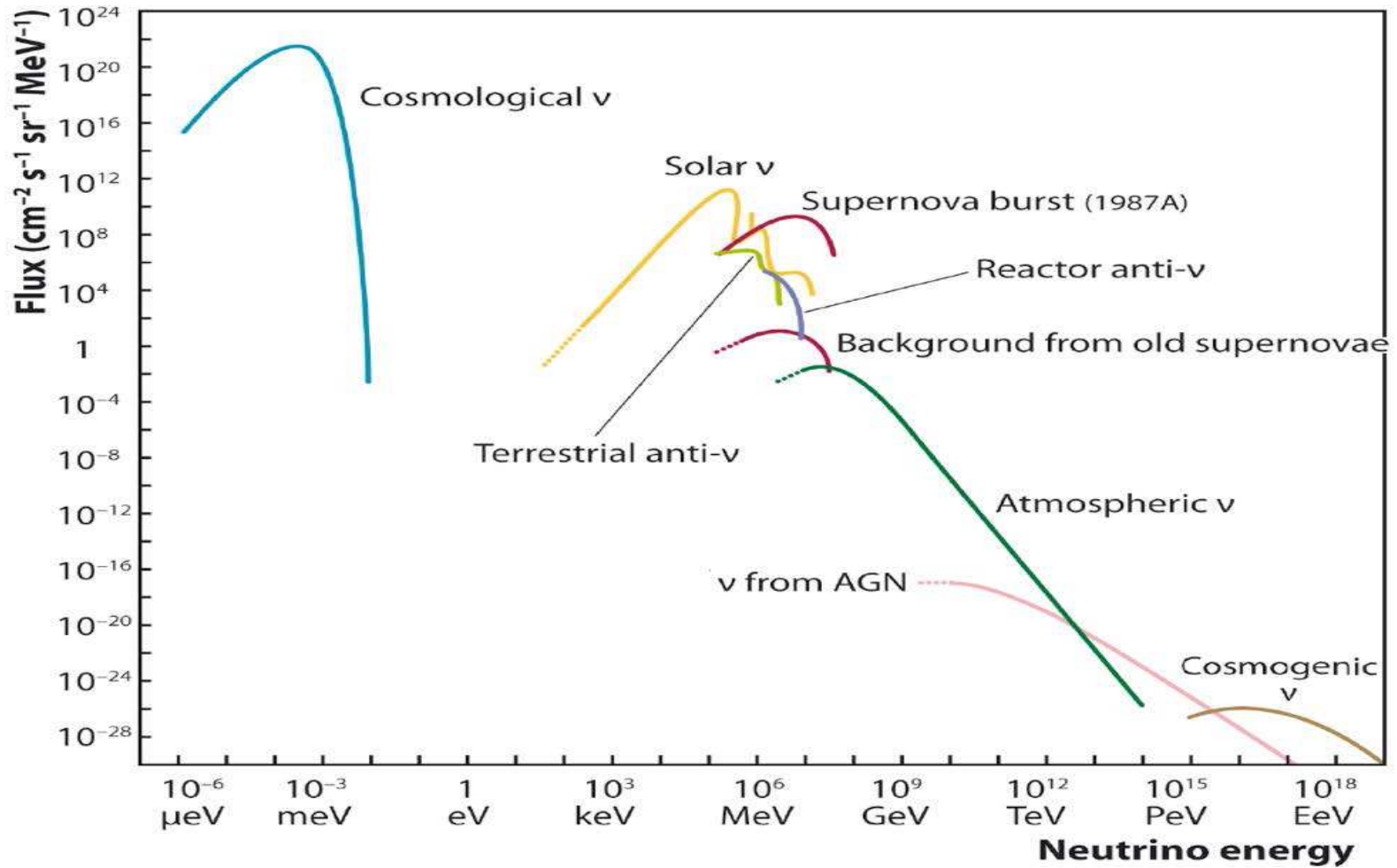
## Neutrina reaktorowe

Widoczny wkład trzeciego kąta mieszania na odległościach rzędu km.



# Neutrino

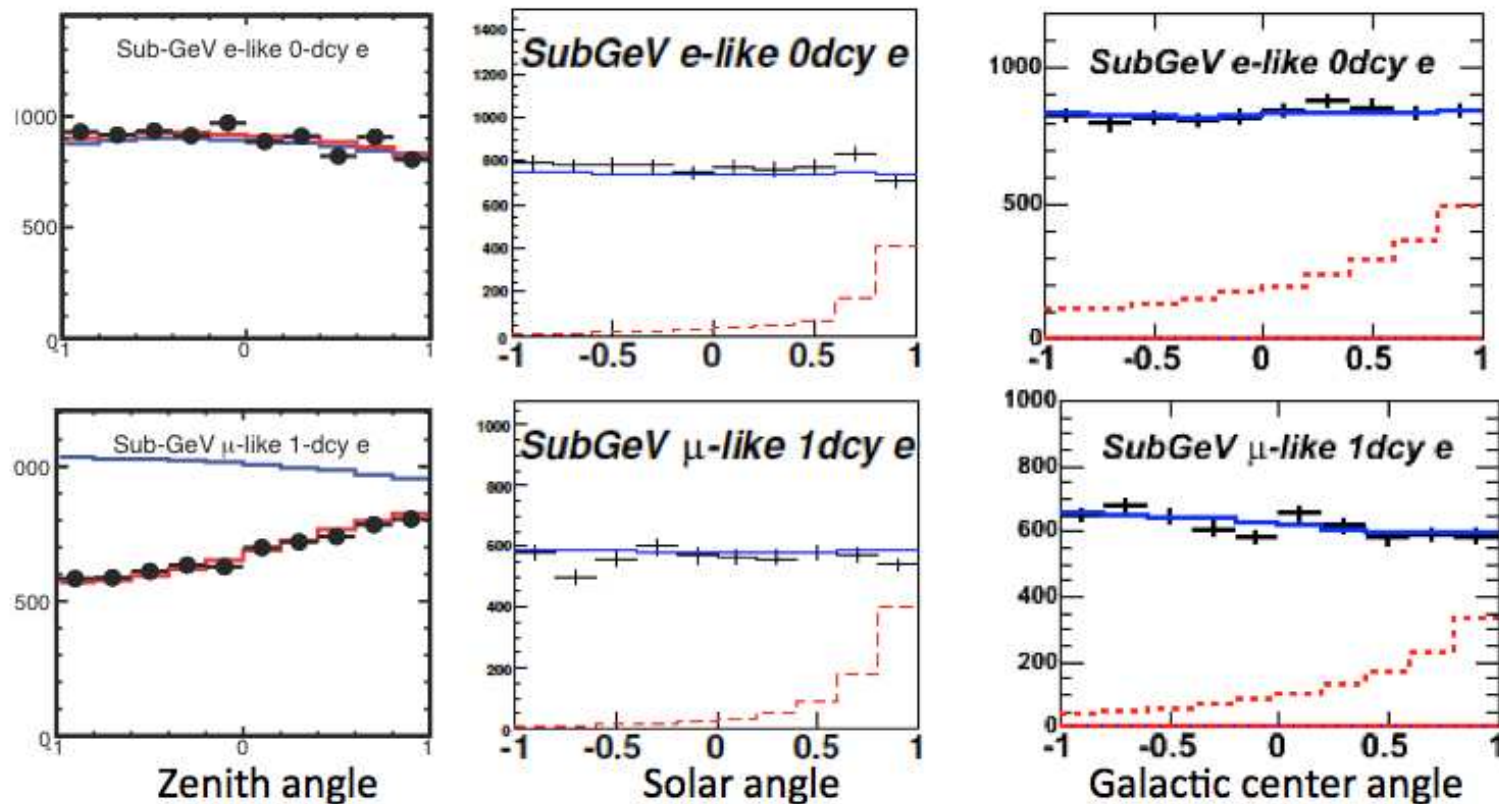
## Źródła



# 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.

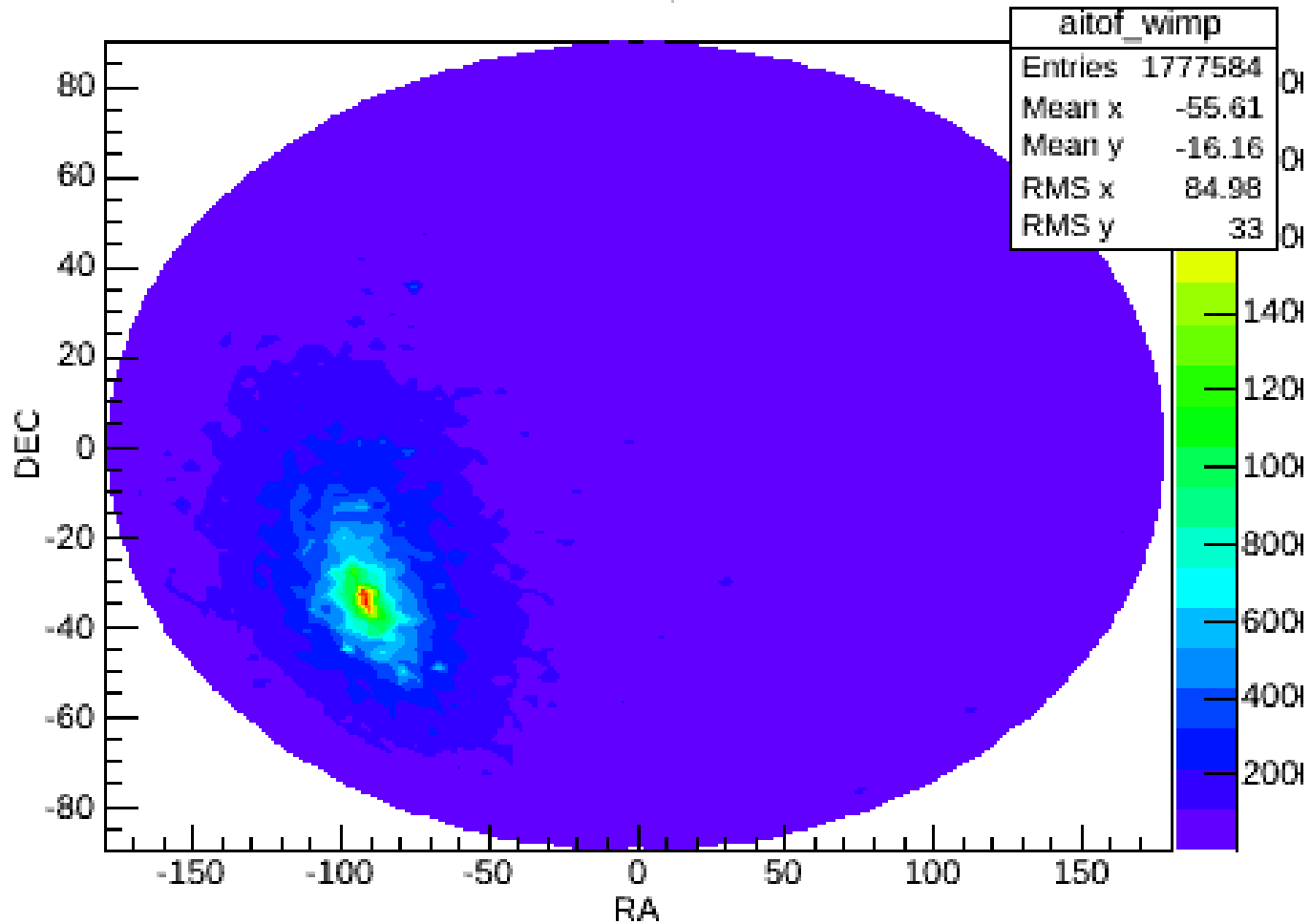


Porównanie rozkładów kątowych z **symulacją tła** oraz **anihilacją DM** w  $b\bar{b}$  ( $M=5$  GeV)

# Super-Kamiokande

## Wyniki

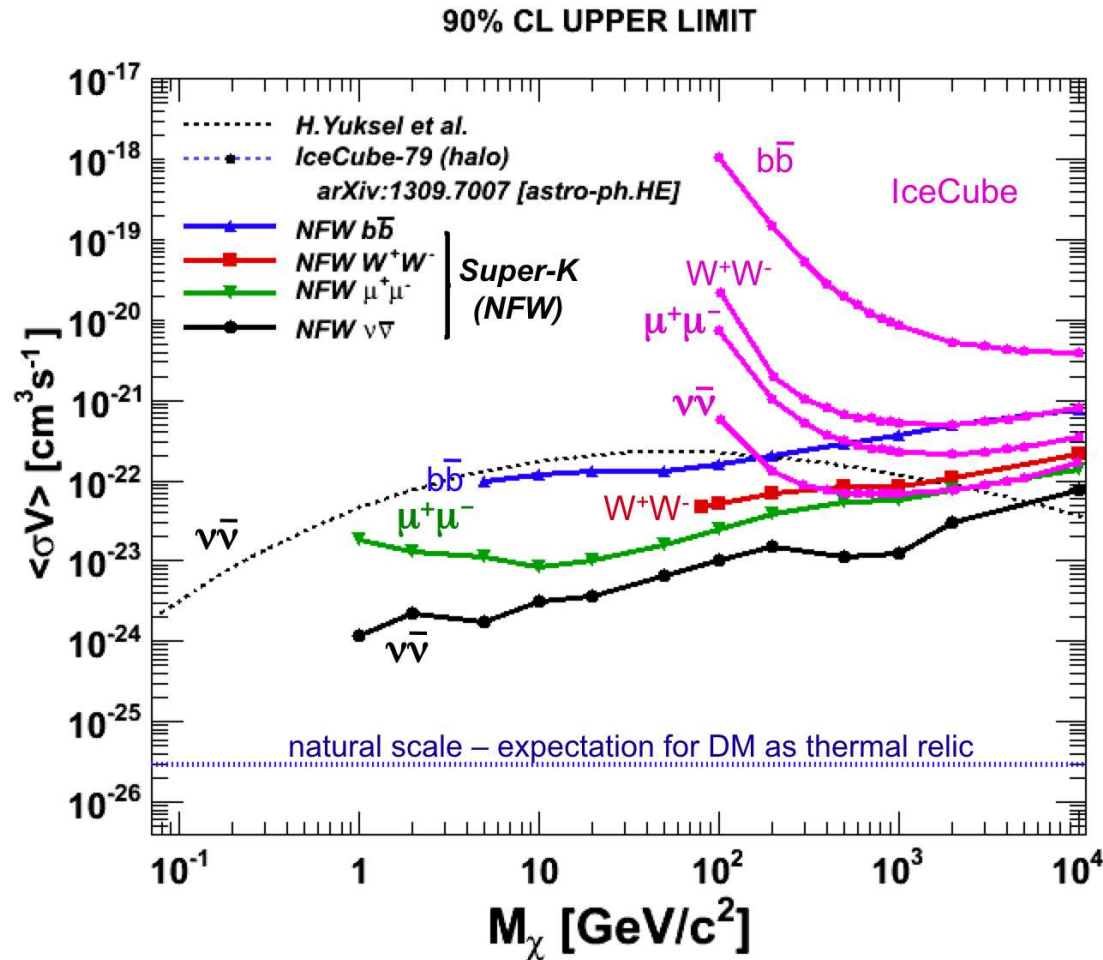
Oczekiwany rozkład (we współrzędnych galaktycznych) dla sygnału anihilacji DM



# Super-Kamiokande

## Wyniki

Ograniczenia z poszukiwania anihilacji DM w centrum Galaktyki



# AMANDA

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**)

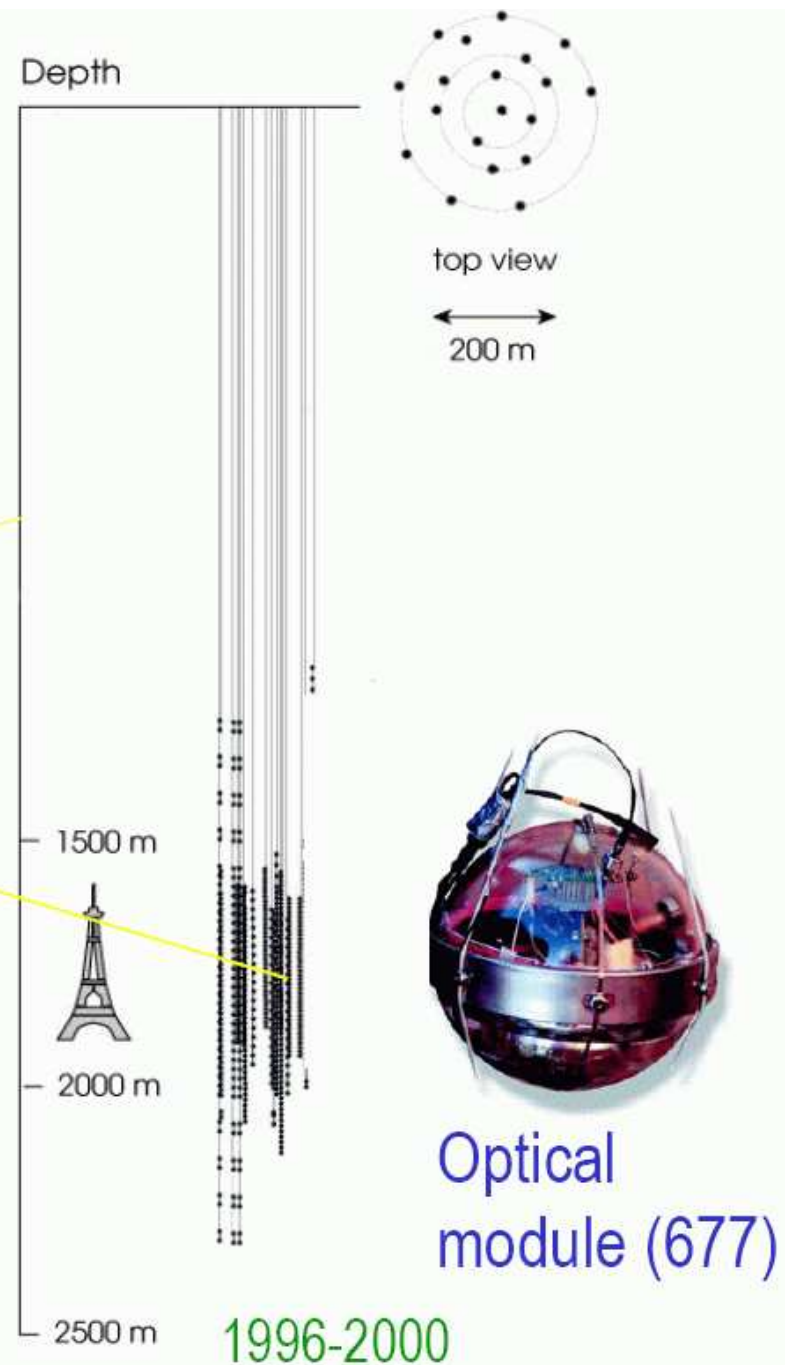
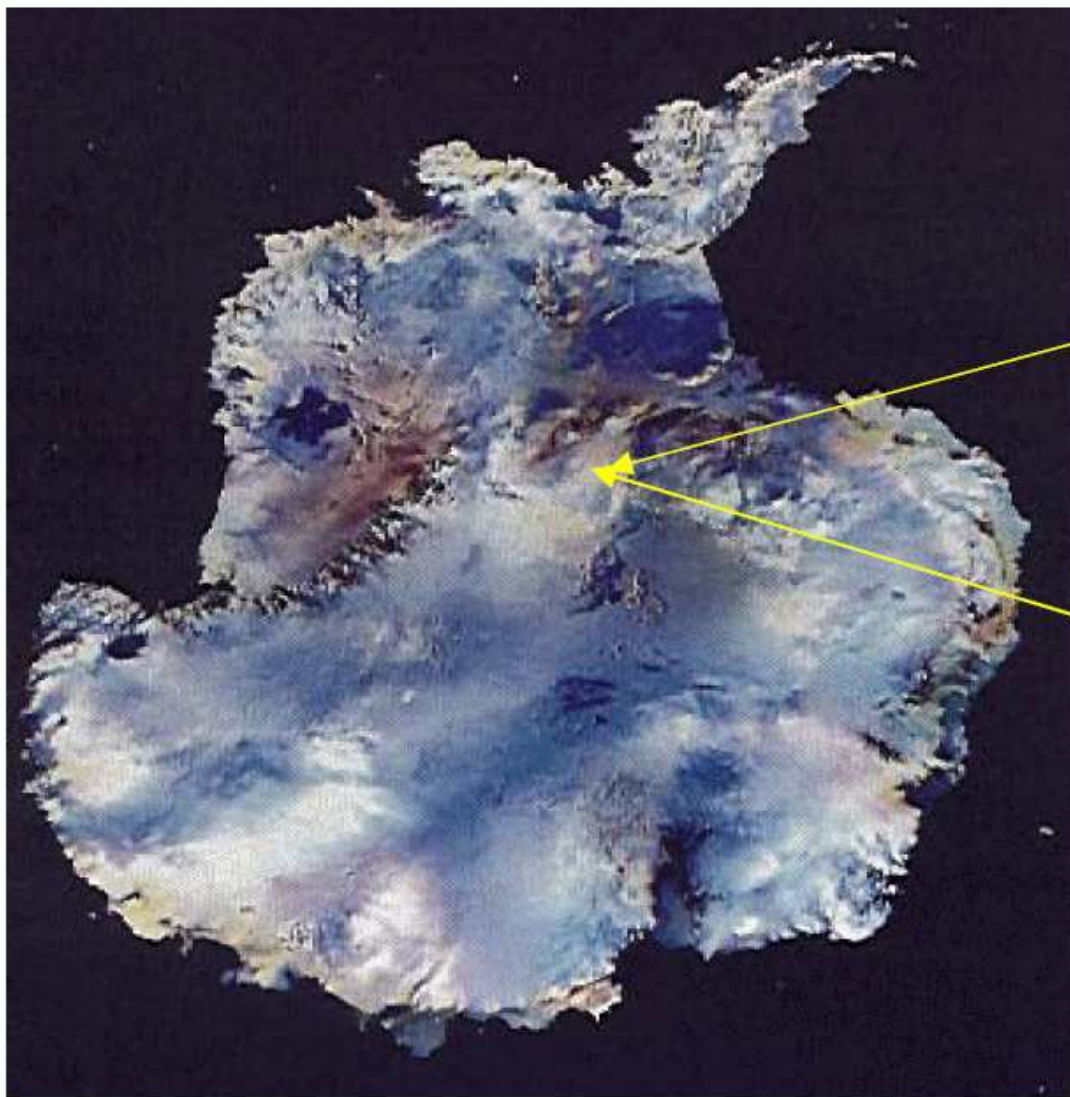
**promieniowanie Czerenkowa** mierzone przez skierowane do dołu fotopowielacze

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

Rejestracja **mionów** o energiach  $\geq 50$  GeV.



# Eksperyment AMANDA w Amundsen-Scott Station South Pole



# AMANDA

## Wyniki

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

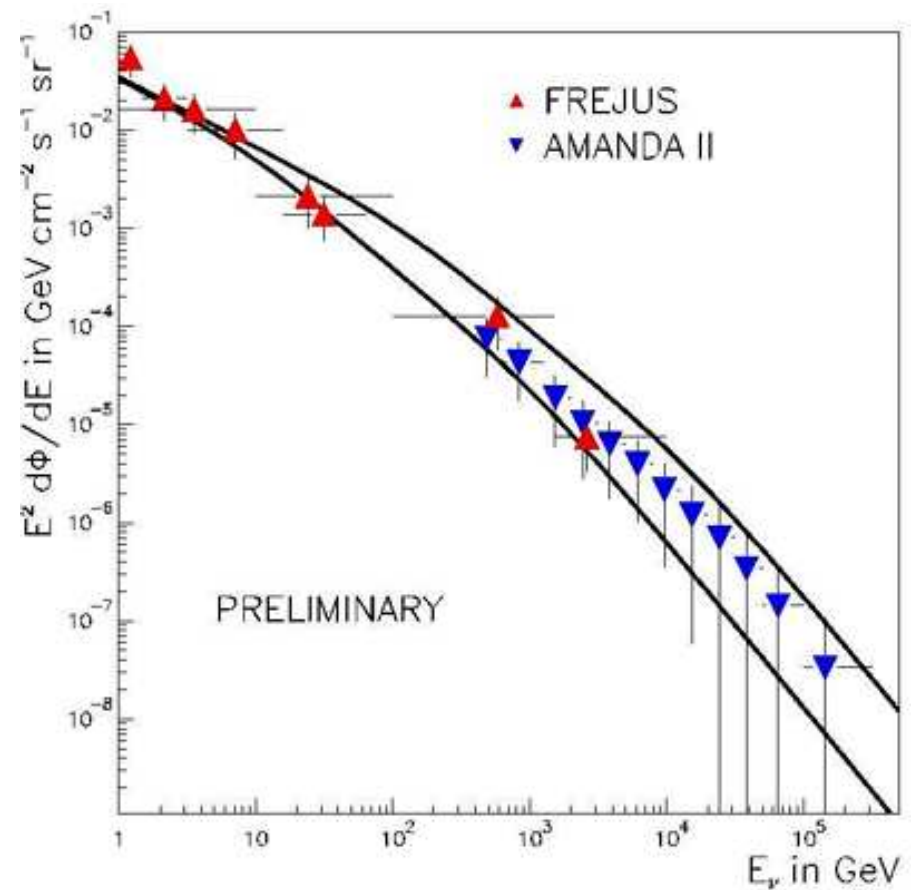
Jednocześnie jednak duża objętość umożliwia pomiar małych strumieni.

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

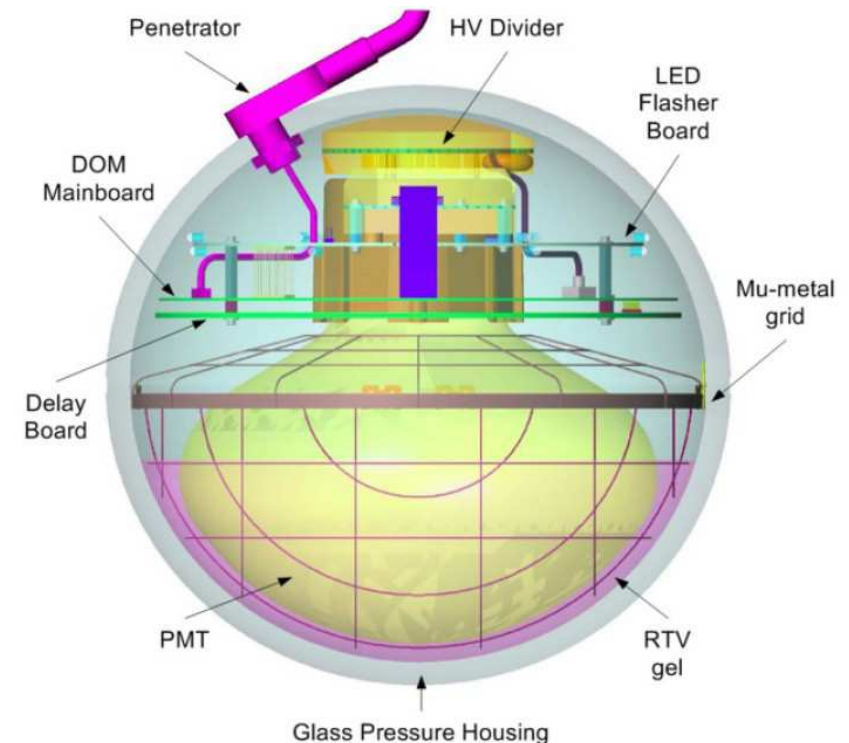
## Detektor

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

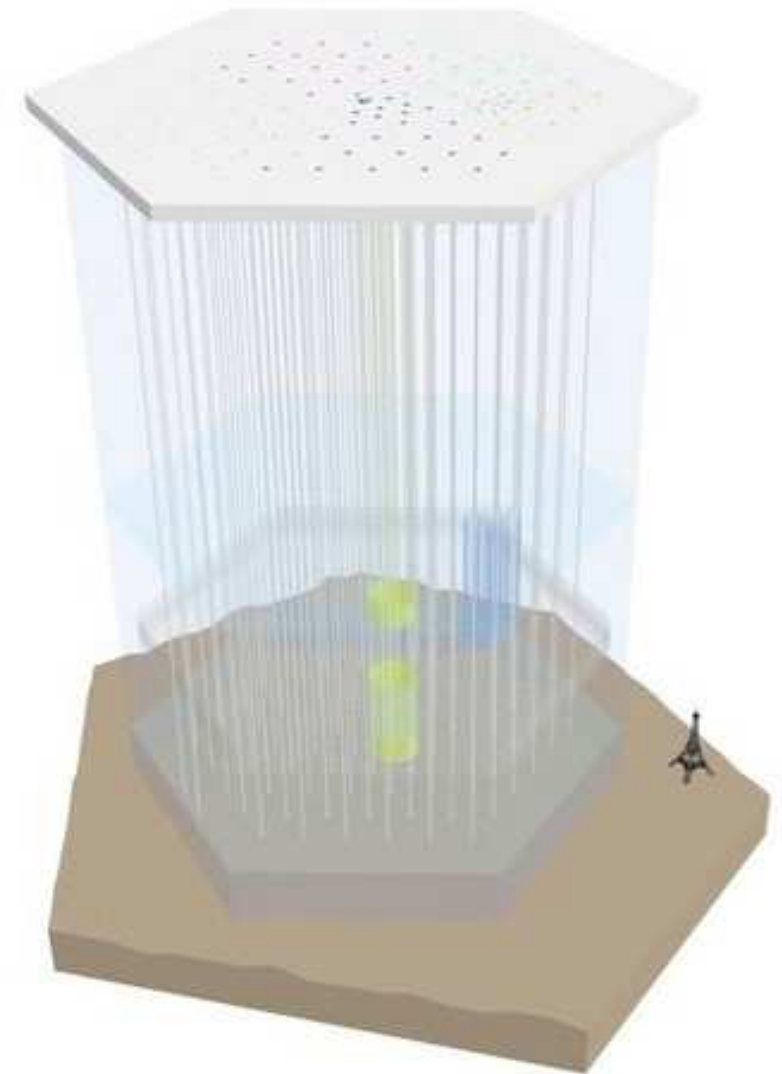
⇒ pomiar neutrin od 50 GeV  
dokładność kierunku ok.  $1^\circ$

## DeepCore

6 lin z mniejszymi odstępami (75m/7m), aby móc mierzyć od ok. 10 GeV

## IceTop

80 stacji powierzchniowych



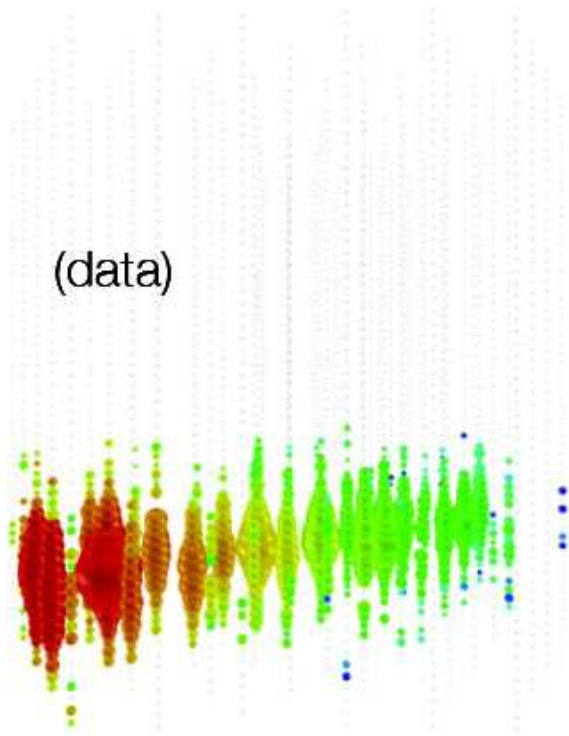
# Ice Cube

## Przypadki

Przypadki oddziaływań neutrin rekonstruowane w detektorze

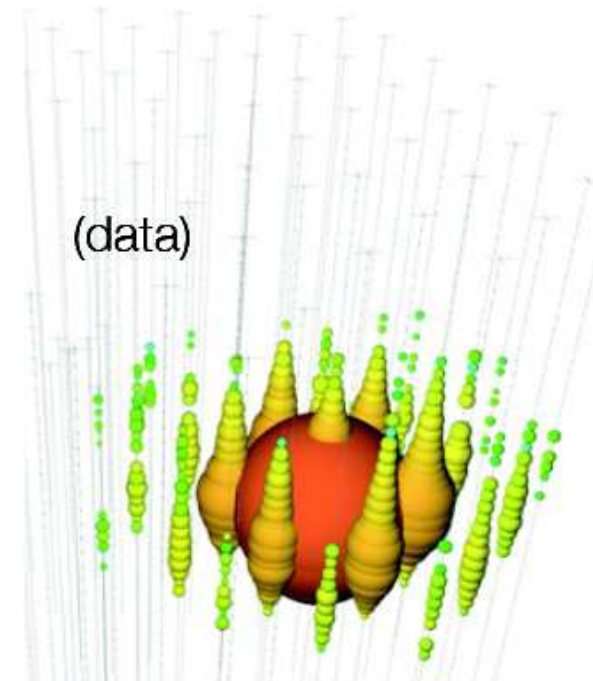
Tor

⇒  $\nu_\mu$  (CC)



Kaskada

⇒  $\nu_e$  (CC) lub  $\nu_\tau$  (CC) lub NC



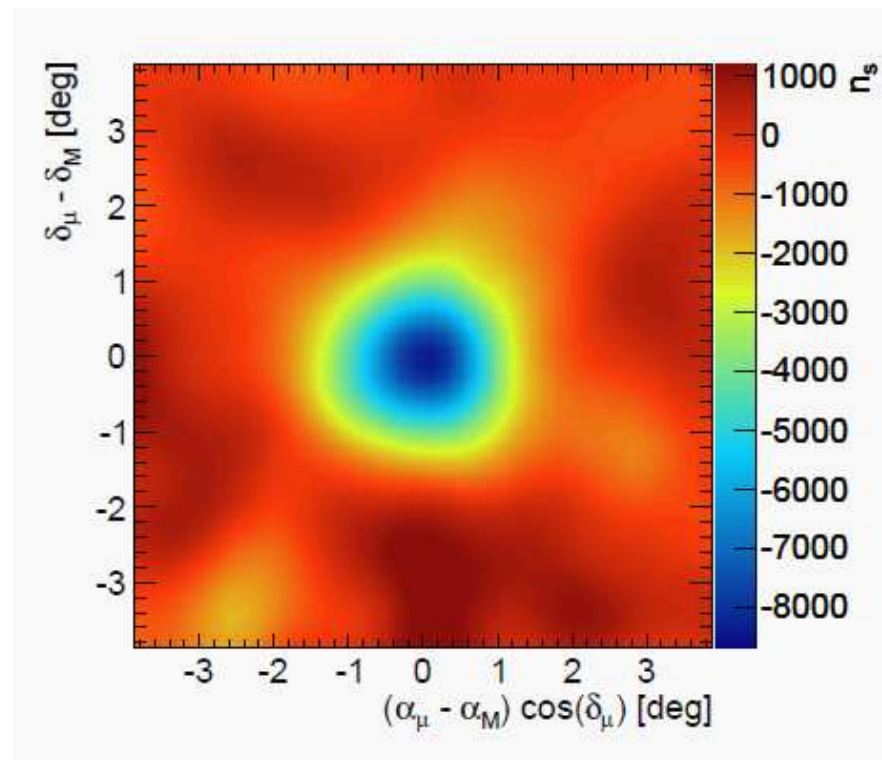
Rozmiar: energia, kolor: czas

# Ice Cube

## Kalibracja

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

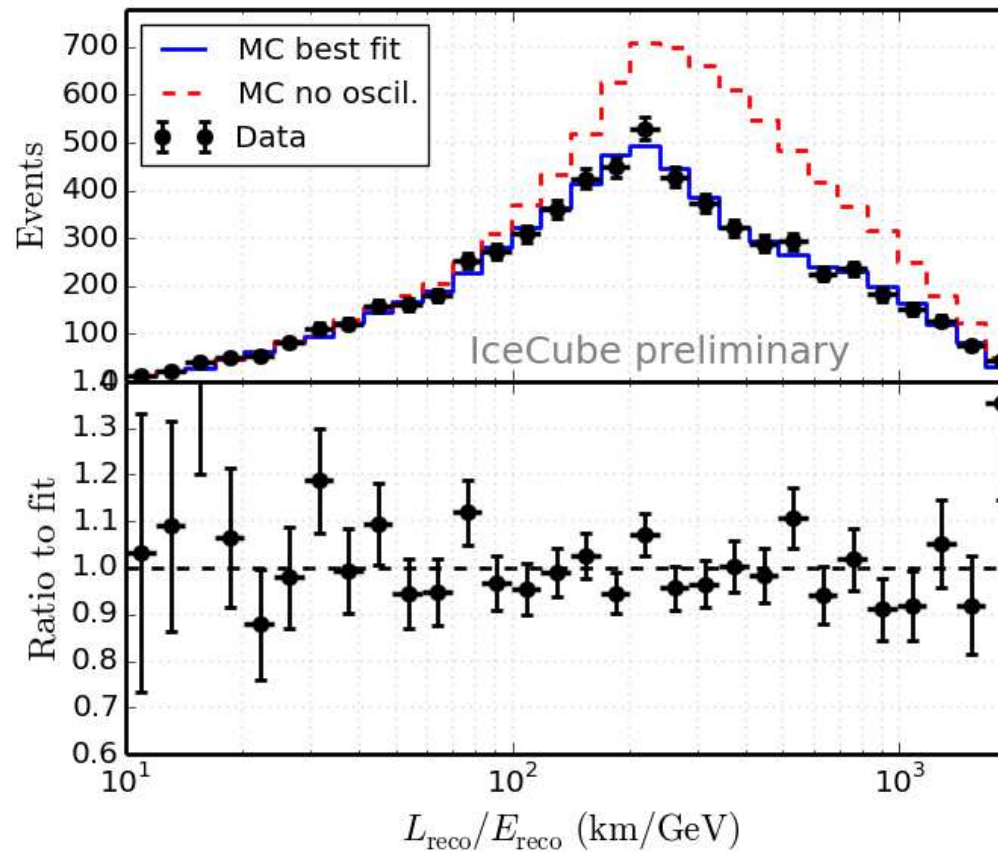
“Cień Księżyca” w mionach kosmicznych



# Ice Cube

## Wyniki

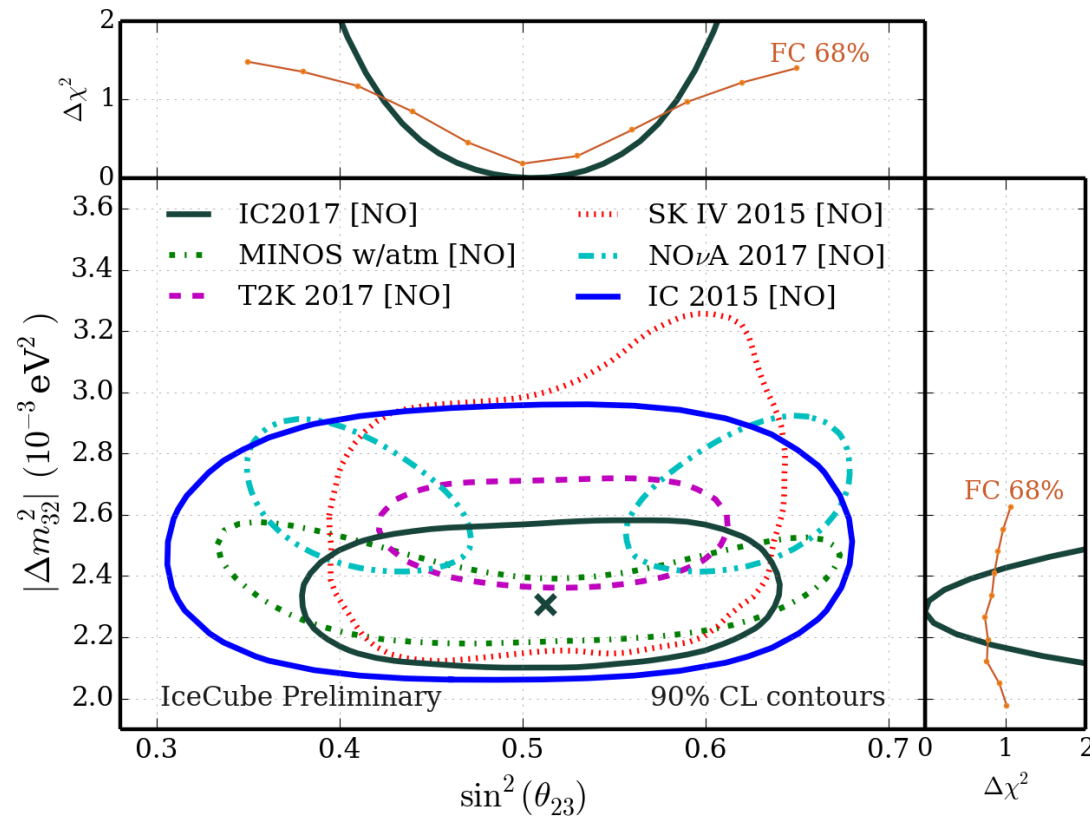
Badanie neutrin “niskiej energii” (10-300 GeV) - dominują neutrina atmosferyczne.



# Ice Cube

## Wyniki

Badanie neutrin “niskiej energii” (10-300 GeV) - dominują neutrina atmosferyczne.

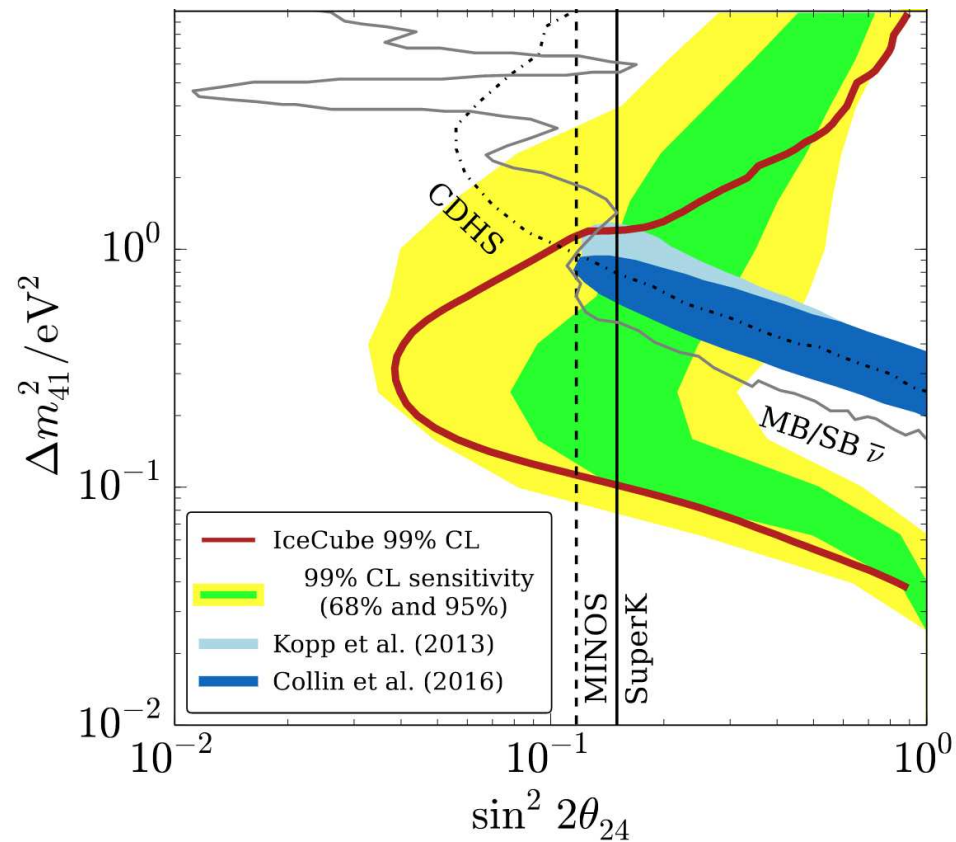


Czułość na parametry oscylacji podobna do eksperymentów przy niższych energiach!

# Ice Cube

## Wyniki

Badanie neutrin “niskiej energii” (10-300 GeV) - dominują neutrina atmosferyczne.

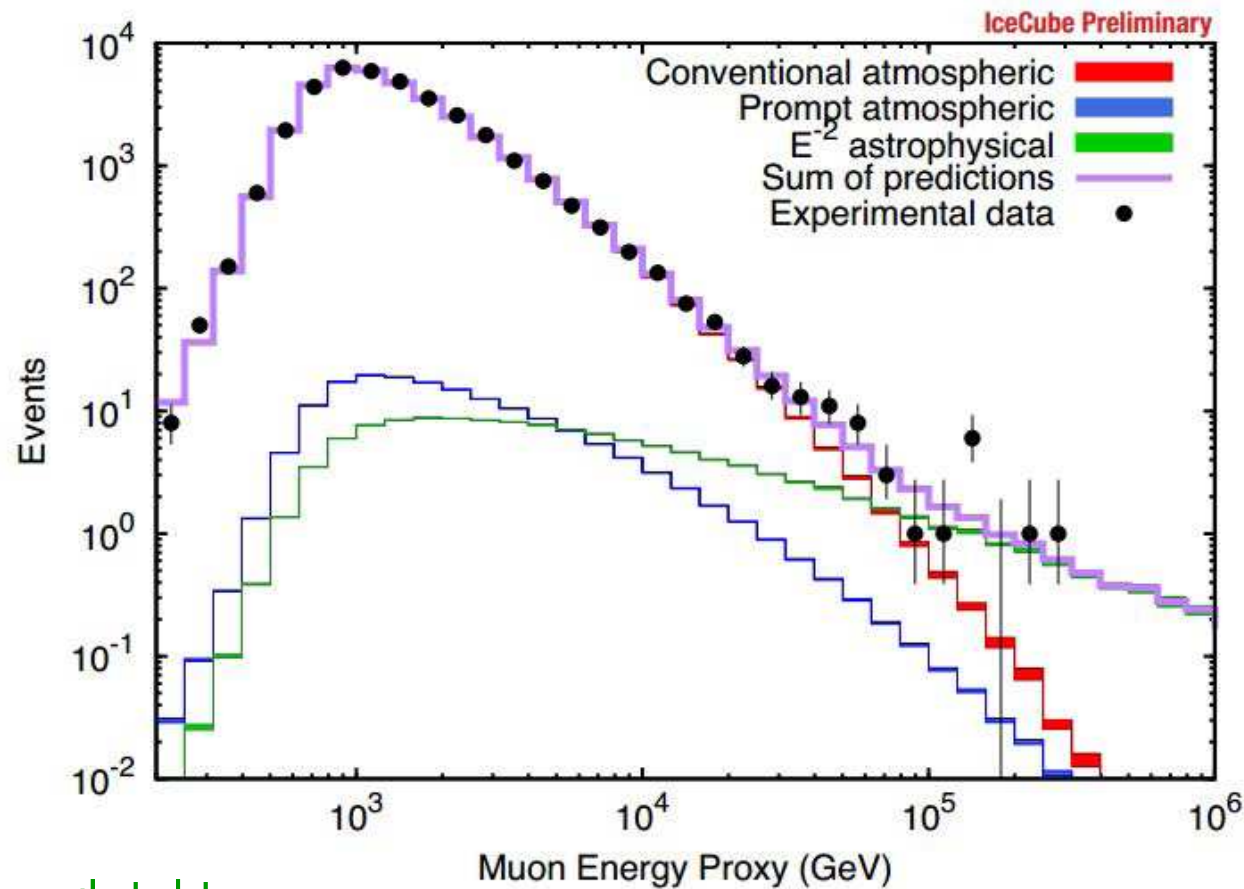


Ograniczenia na oscylacje w neutrina sterylne konkurencyjne do innych eksperymentów!

# 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

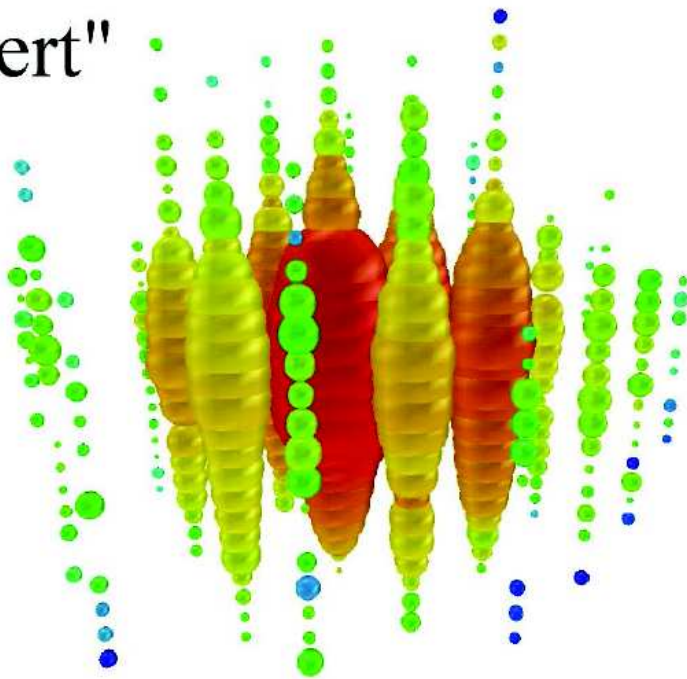


# Ice Cube

## Wyniki

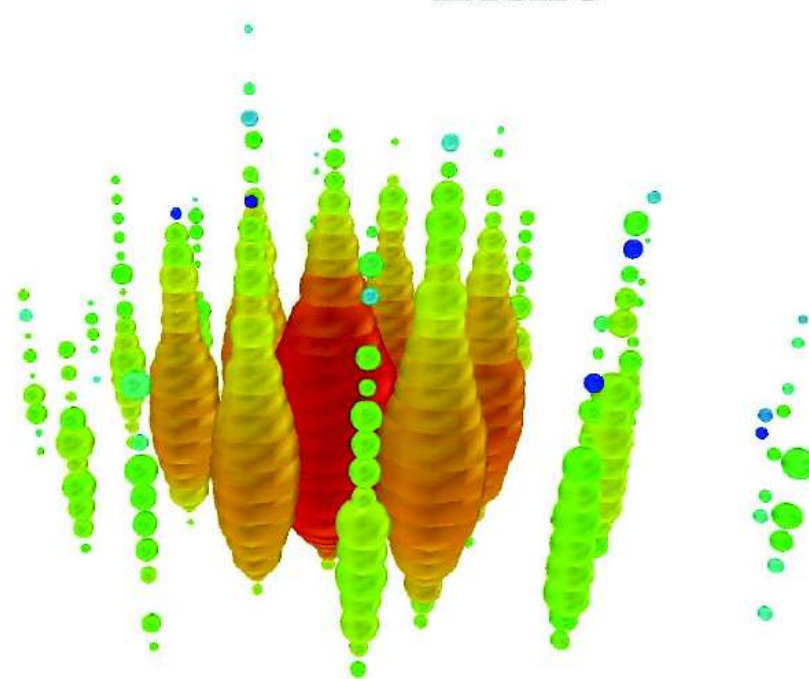
Pierwsze przypadki neutrin o energii powyżej 1 PeV (!)

"Bert"



August 9, 2011: 1.04 PeV

"Ernie"



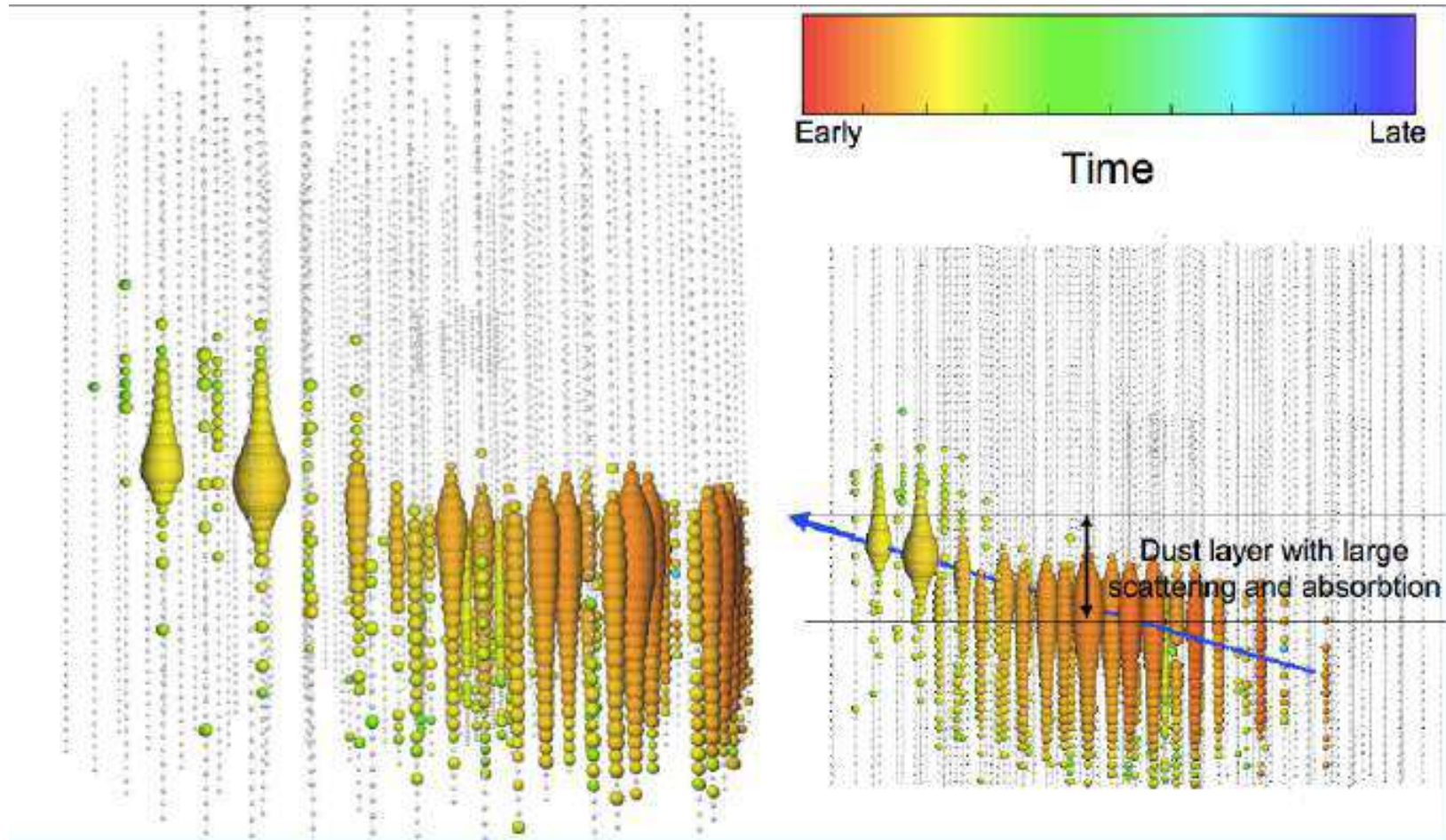
January 3, 2012: 1.14 PeV

Przypadki typu "kaskada"

# Ice Cube

## Wyniki

Przypadek o najwyższej **zdeponowanej** energii:  $2.6 \pm 0.3$  PeV (11 czerwca 2014)

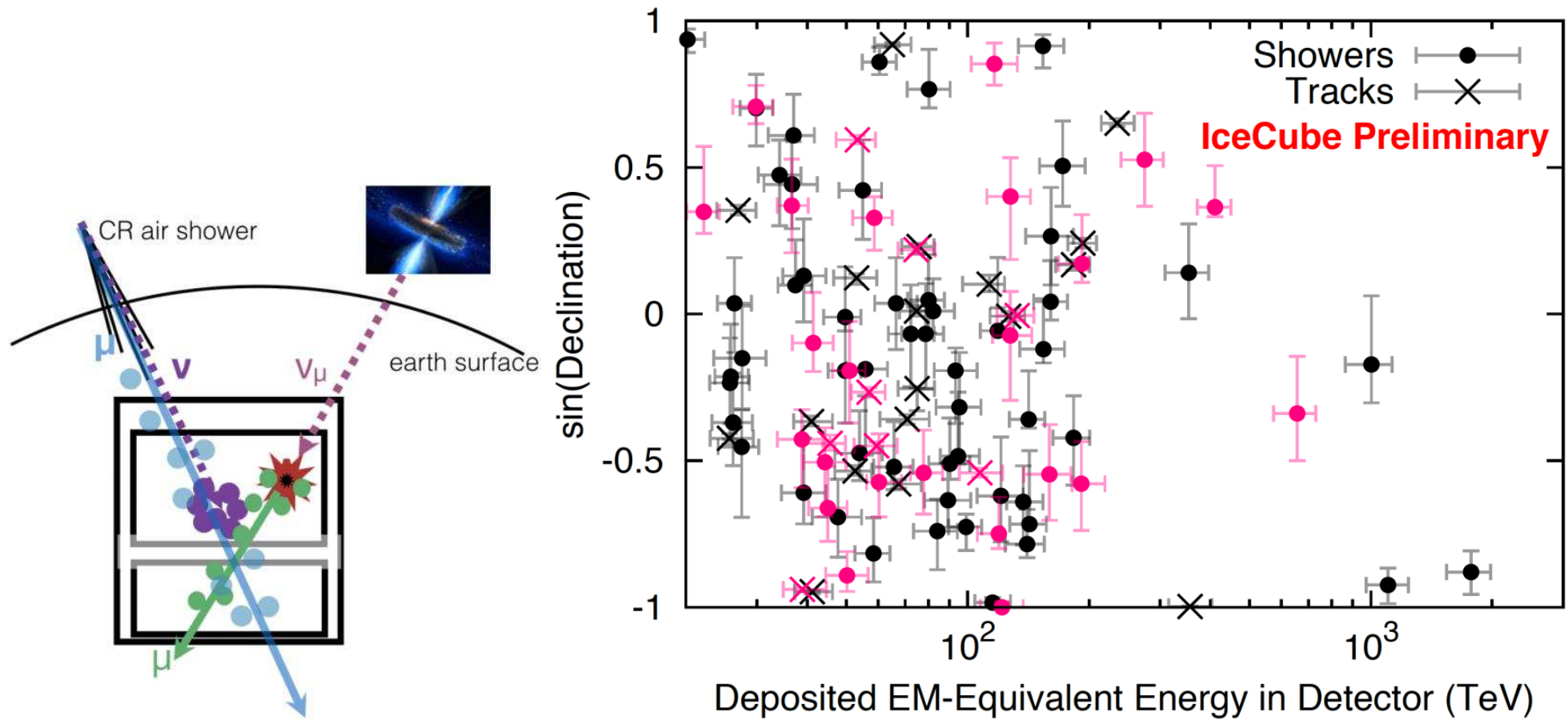


Przypadek typu “tor”  $\Rightarrow$  energia neutrino była prawdopodobnie dużo wyższa...

# Ice Cube

## Wyniki

Rekonstruowana energia i kierunek kaskad zaczynających się w detektorze (7.5y)

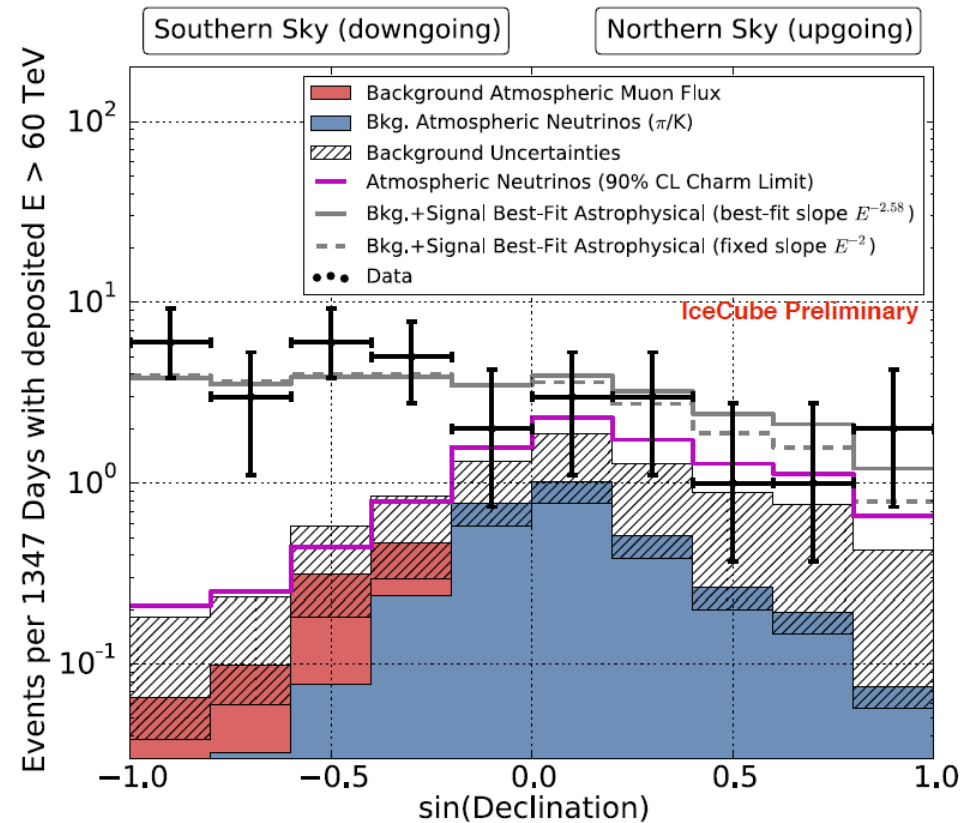
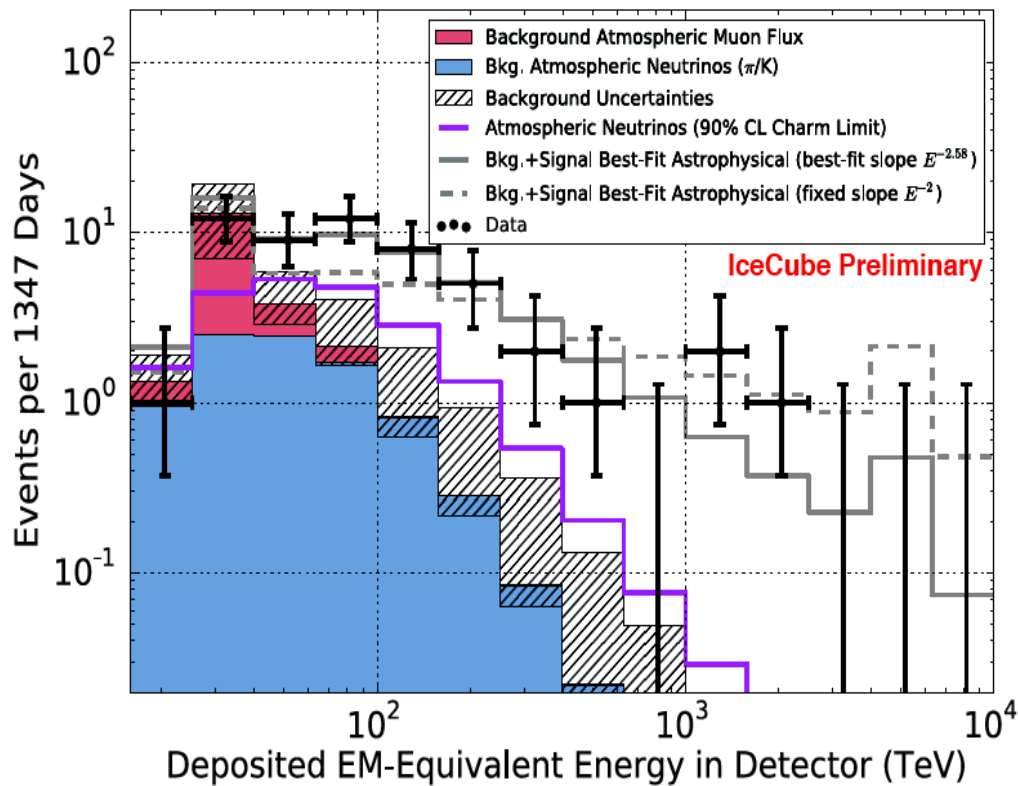


# Ice Cube

## Wyniki

Rekonstruowana energia dla kaskad zaczynających się w detektorze

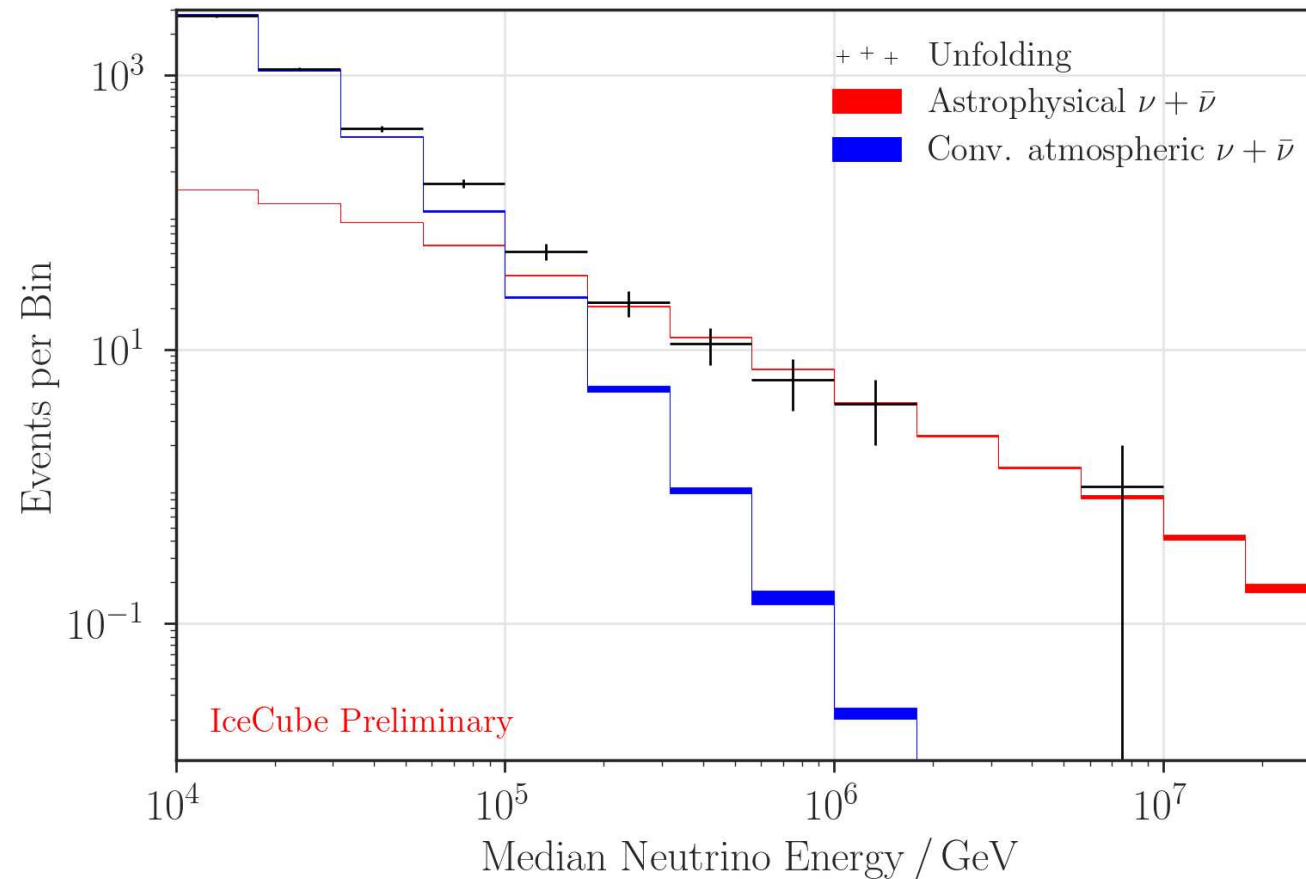
Wyraźnie widoczna nadwyżka, konsystentna z rozkładem płaskim



# Ice Cube

## Wyniki

Rekonstruowane (najbardziej prawdopodobne) energie mionów lecących od dołu.



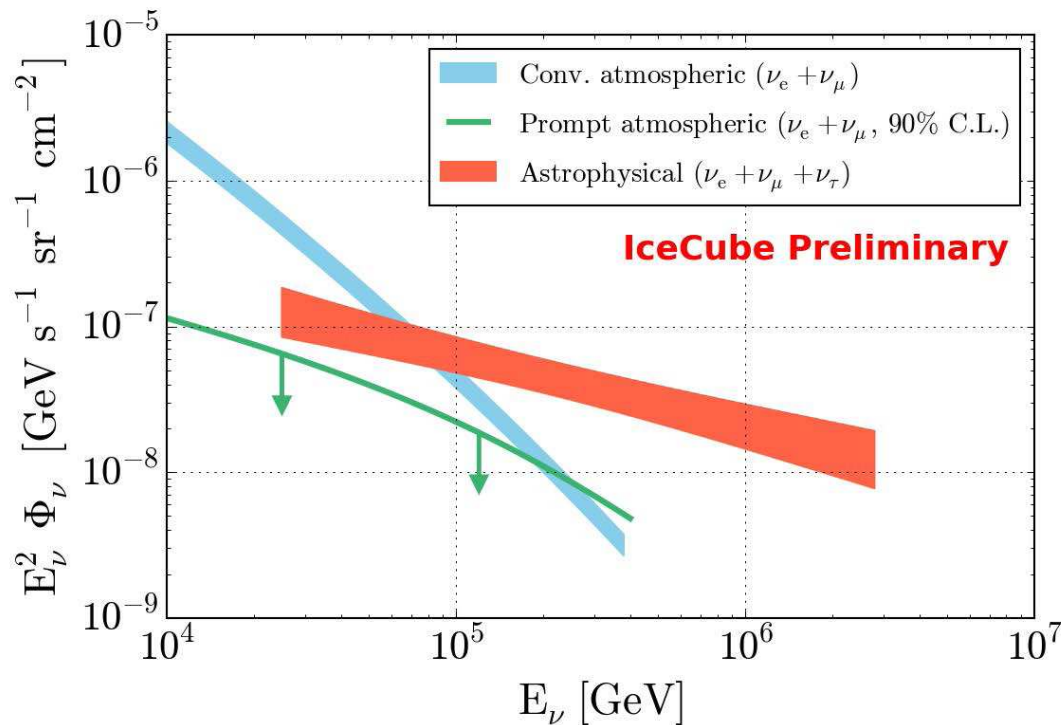
Wyniki z 7 lat pracy detektora: ponad 100 neutrino o energii pomiędzy 100 TeV i 10 PeV, wyraźna nadwyżka przypadków ponad tło atmosferyczne

# Ice Cube

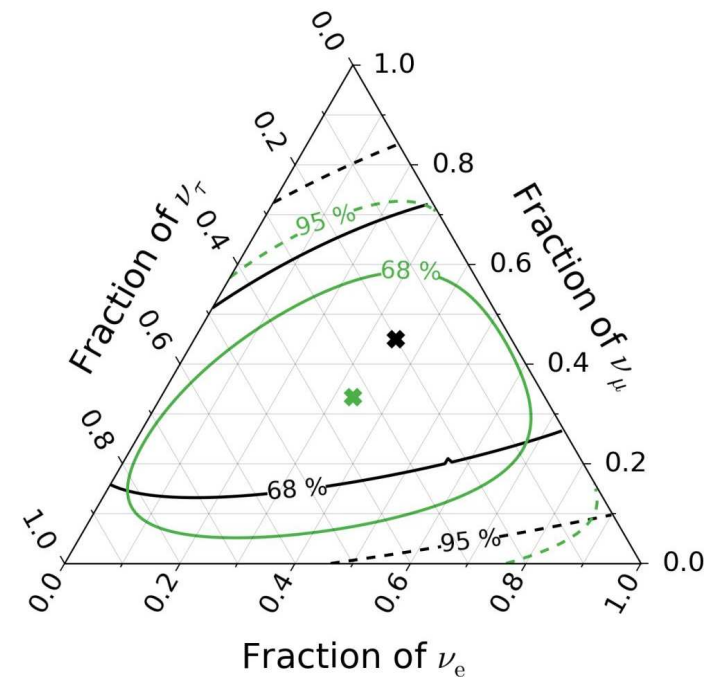
## Wyniki

Dopasowane widmo neutrin kosmicznych:  $\gamma = 2.19 \pm 0.10$

Dopasowany skład na powierzchni Ziemi:  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1.05 : 1.35 : 0.60$   
(zgodny w granicach błędów z oczekiwanym 1 : 1 : 1)



WORK IN PROGRESS



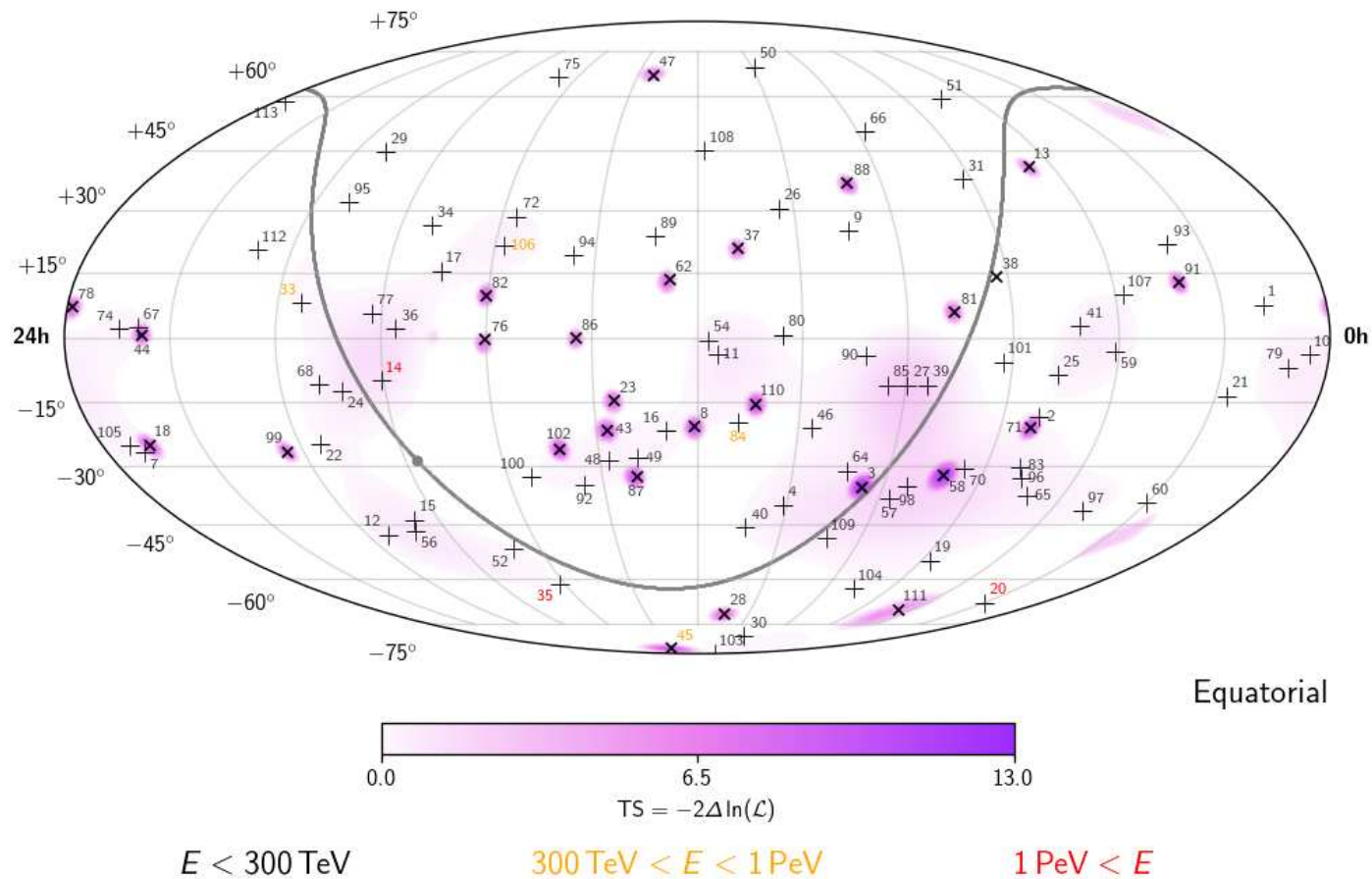
Oczekiwane nachylenie widma neutrin atmosferycznych:  $\gamma = 2.7 - 3.1$

# Ice Cube

## Wyniki

Rozkład pozycji przypadków HESE zgodny z rozkładem izotropowym

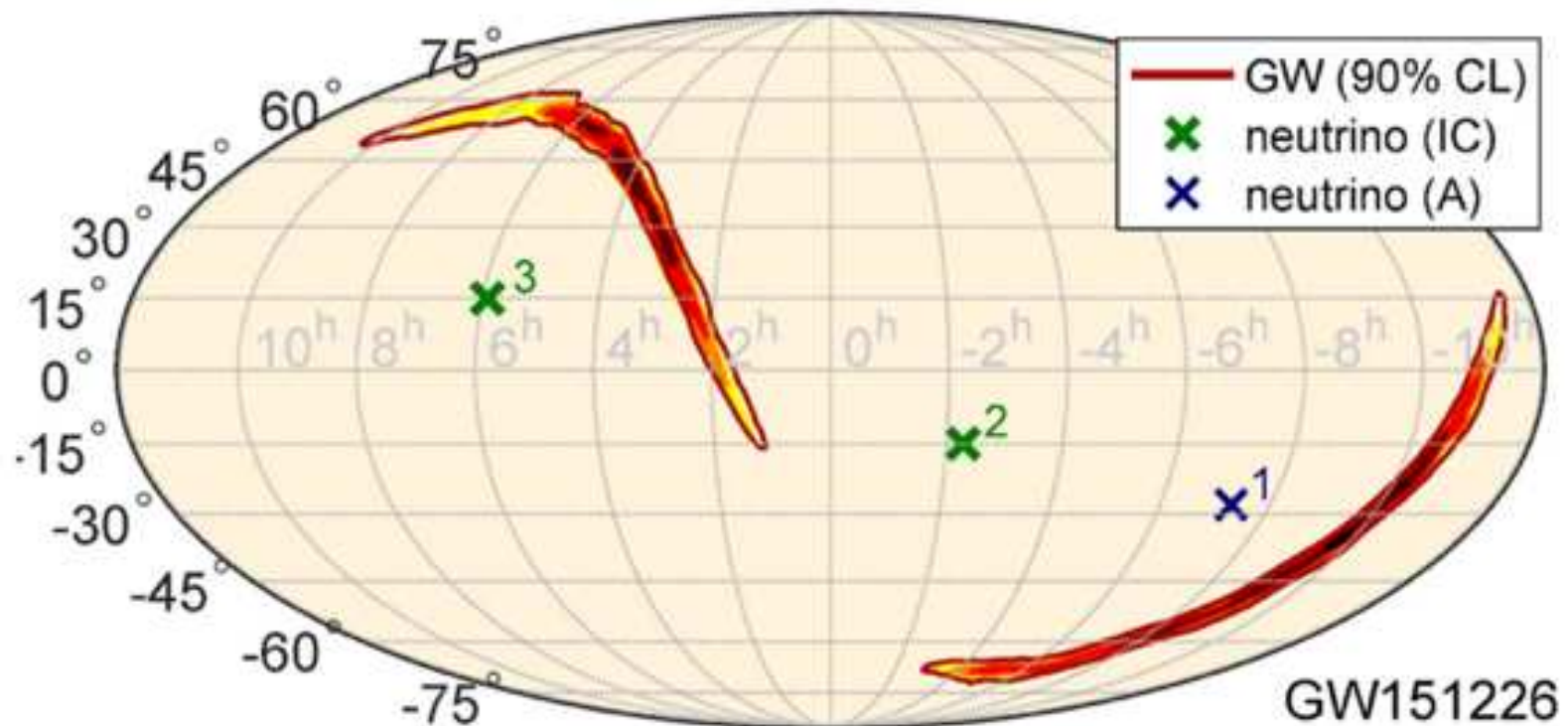
Fluktuacje oczekiwane przy tak małej liczbie przypadków.



# Ice Cube

Wyniki 2015

Poszukiwanie koincydencji ze źródłami fal grawitacyjnych

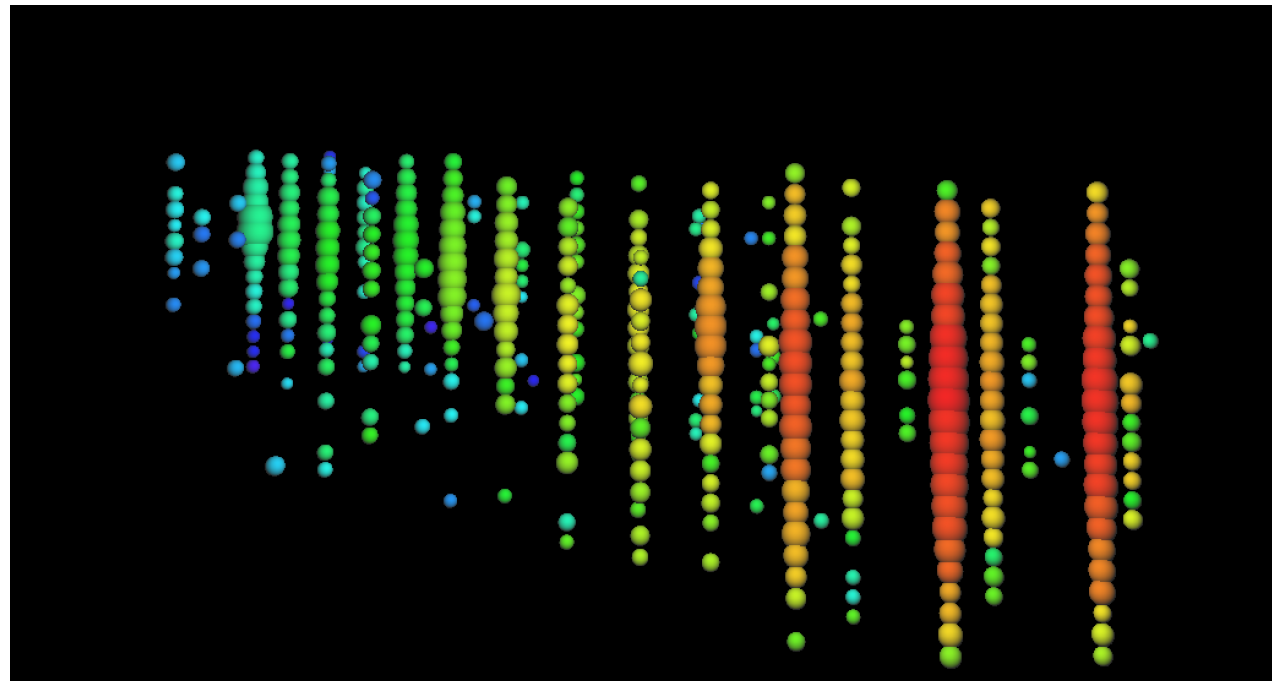
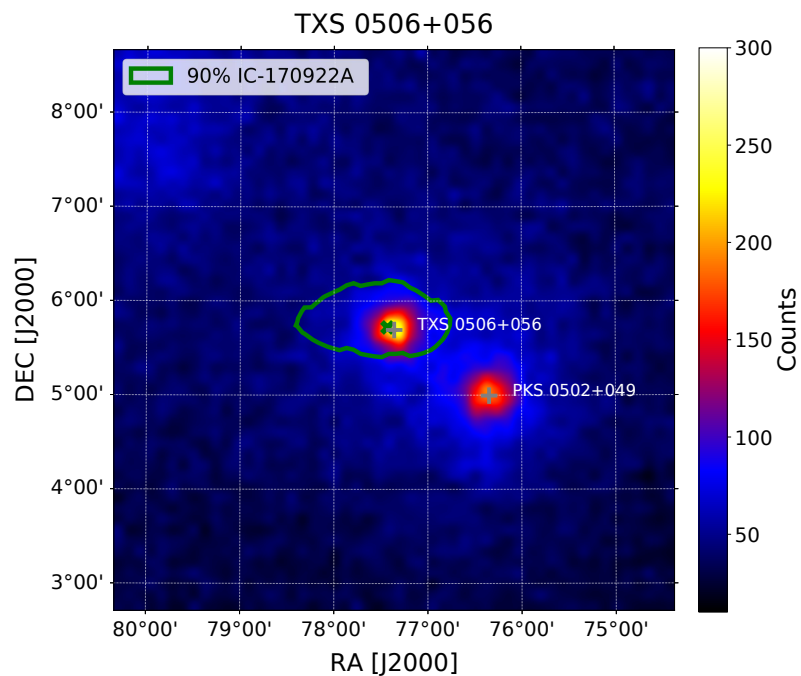




# Ice Cube

## Wyniki 2017

We wrześniu 2017 zaobserwowana została koincydencja neutrina mionowego 300 TeV z rozbłyskiem blazara TXS0506+06 obserwowanego w promieniowaniu gamma przez satelitę Fermi-LAT



Poprzednio obserwowano już neutrina z tego kierunku w latach 2014-2015.

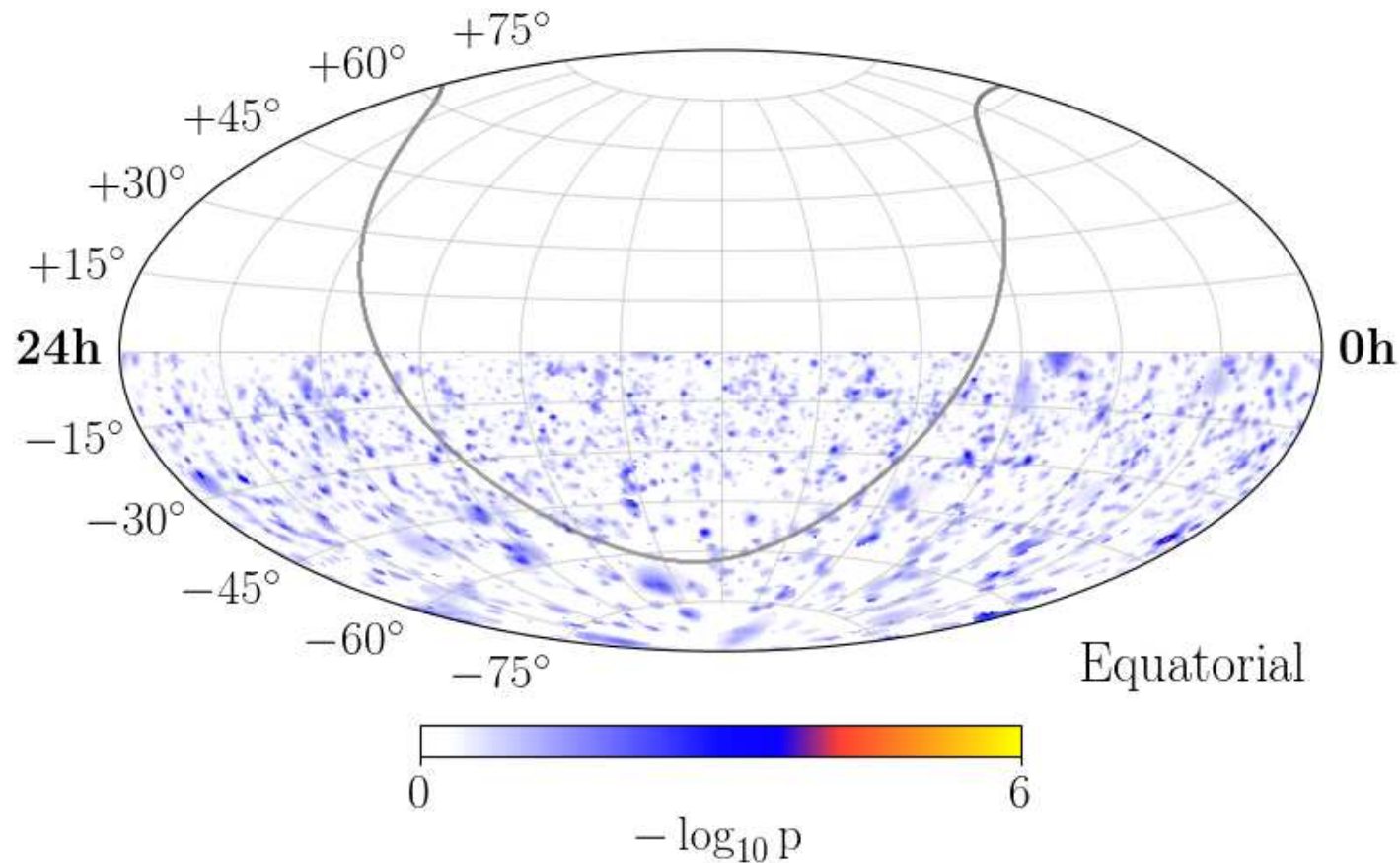
Ale wciąż jest to konsyistentne z przypadkową korelacją...

# Ice Cube

Wyniki 2019

Rozkład pozycji przypadków typu “tor” zgodny z rozkładem izotropowym

Prawdopodobieństwo obserwowanej fluktuacji w liczbie przypadków:

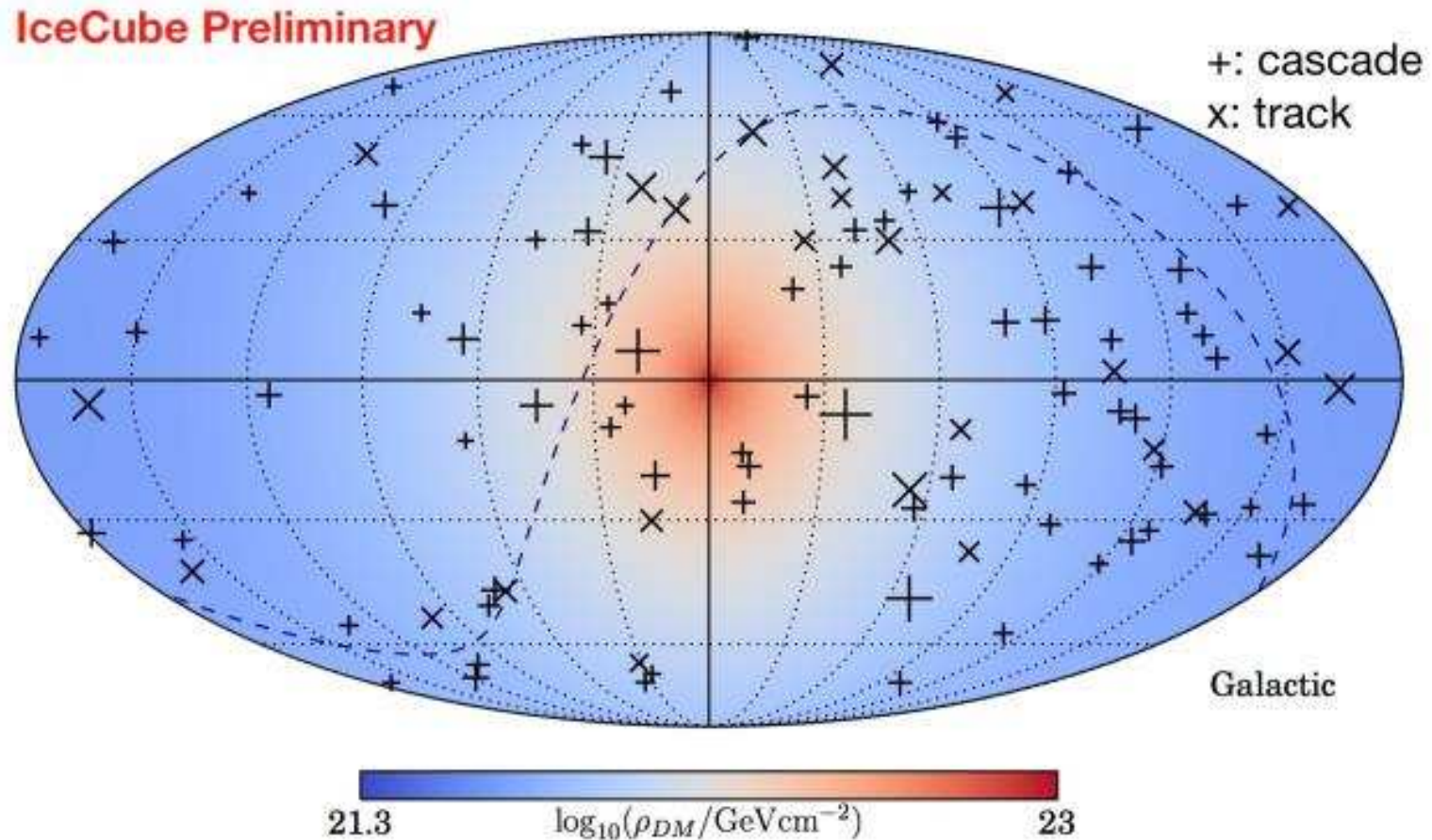


Zgodność z rozkładem izotropowym na poziomie 30%

# Ice Cube

## Wyniki

Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w Galaktyce

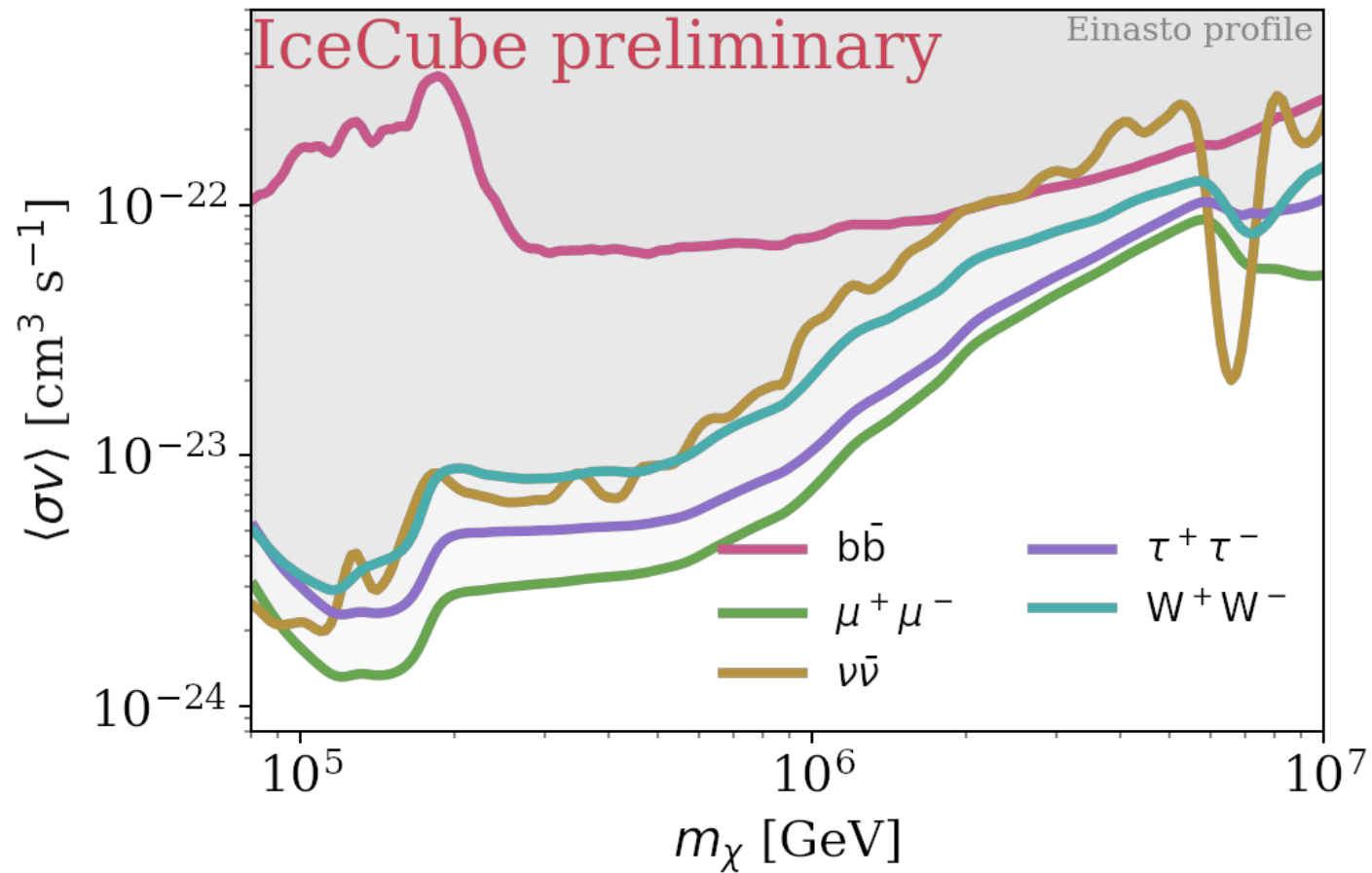


Oczekiwany rozkład we współrzędnych galaktycznych

# Ice Cube

## Wyniki

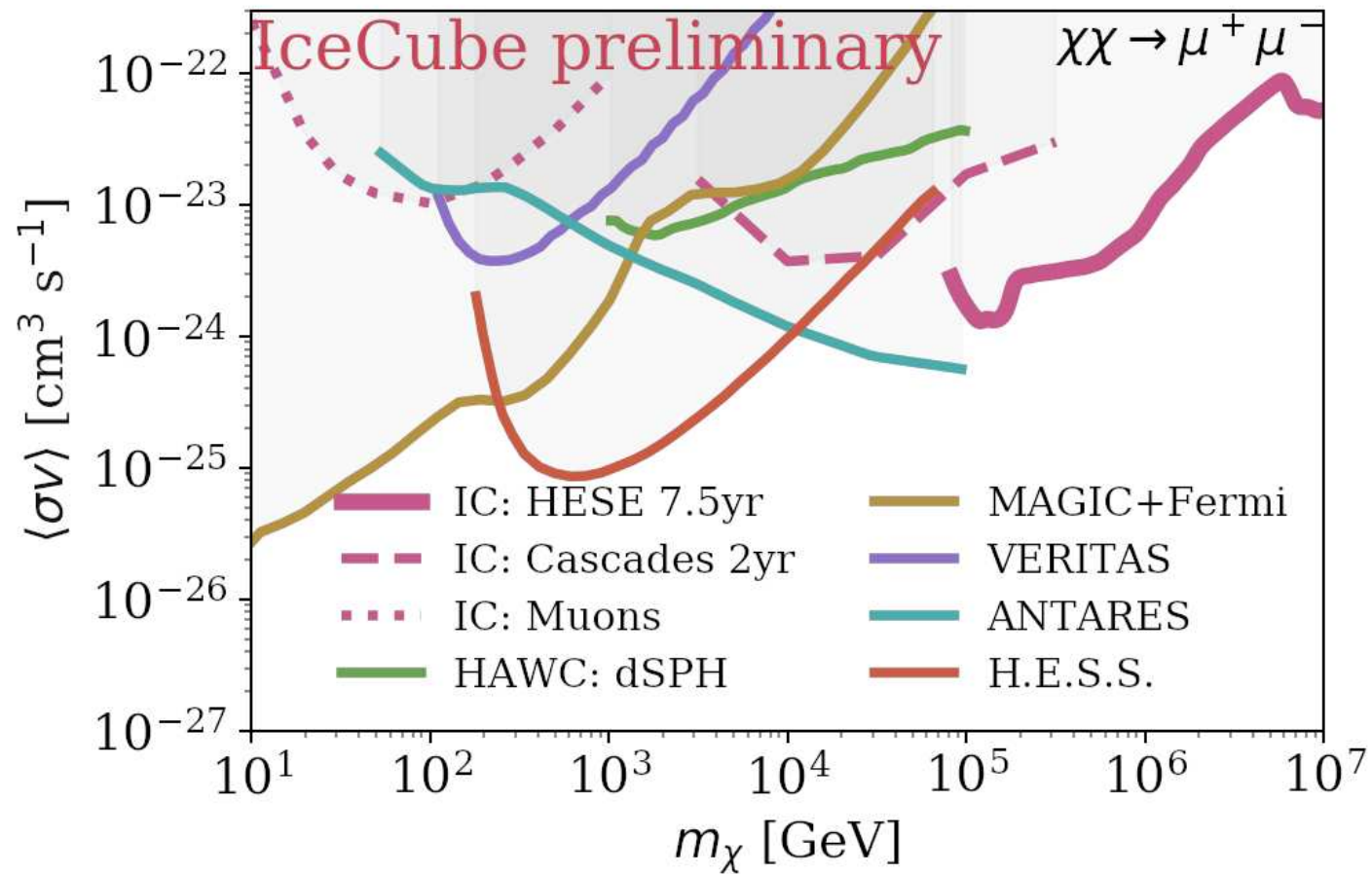
Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w centrum Galaktyki



# Ice Cube

## Wyniki

Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w centrum Galaktyki



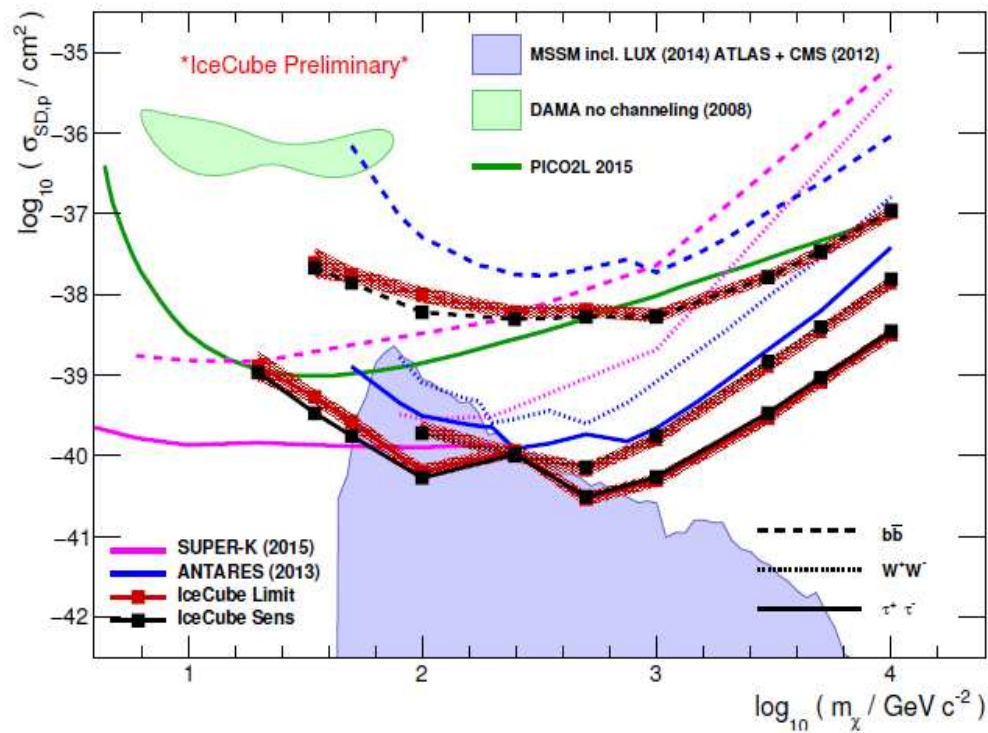
Konkurencyjne wyniki dla najwyższych mas DM

# Ice Cube

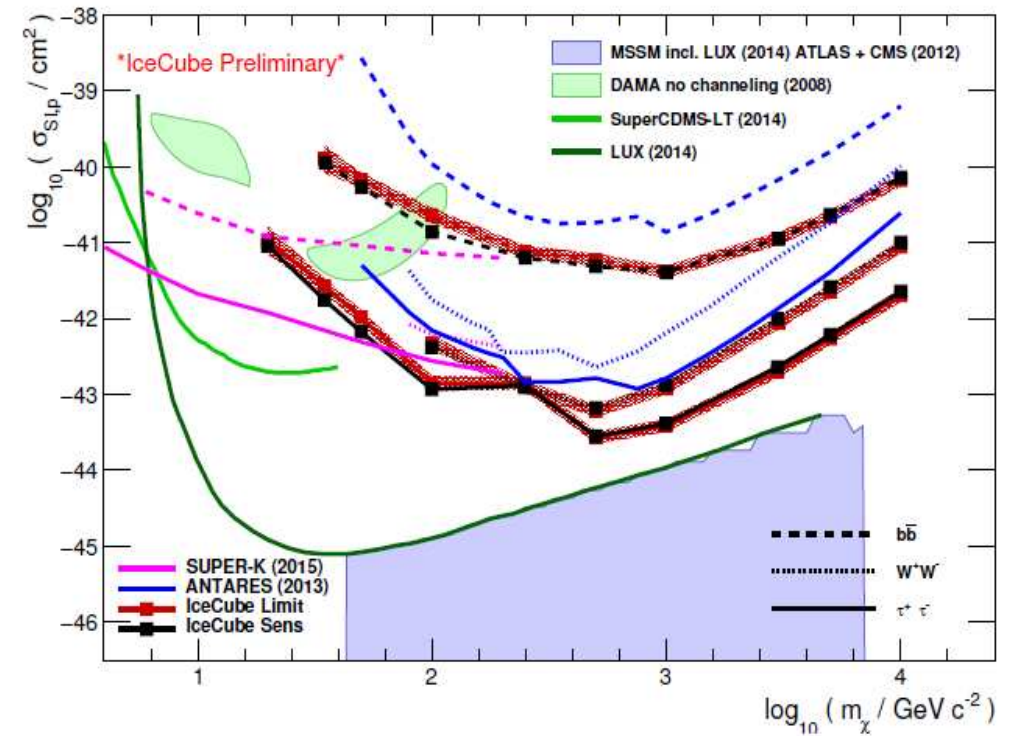
## Wyniki

Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w Słońcu

Spin dependent



Spin independent

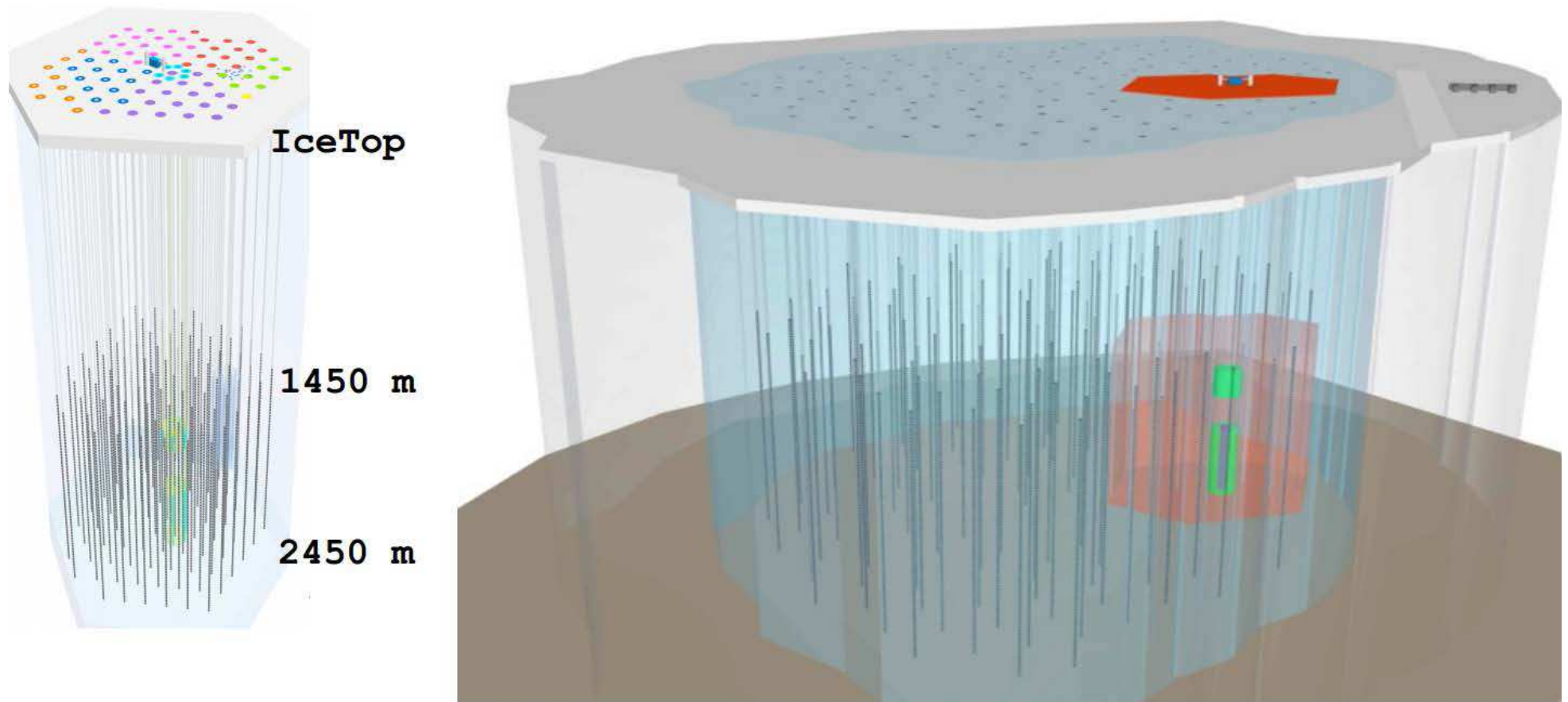


# Ice Cube

## Plany na przyszłość

Znaczne powiększenie detektora z większymi odstępami (większa objętość)

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



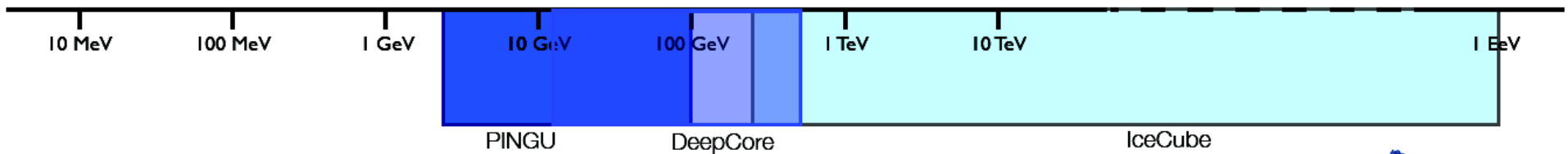
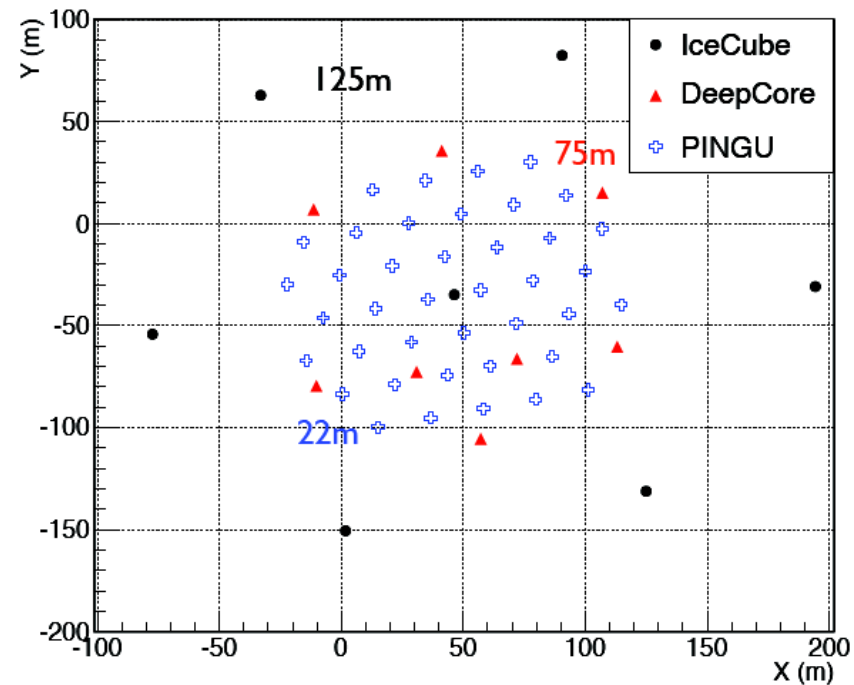
# Ice Cube

## Plany na przyszłość

Znaczne powiększenie detektora z większymi odstępami (większa objętość)

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

- 78 Strings
- 125m string spacing
- 17m DOM spacing
- Add 8 strings
- 75m string spacing
- 7m DOM spacing
- Add 40 strings
- 22m string spacing
- 3m DOM spacing

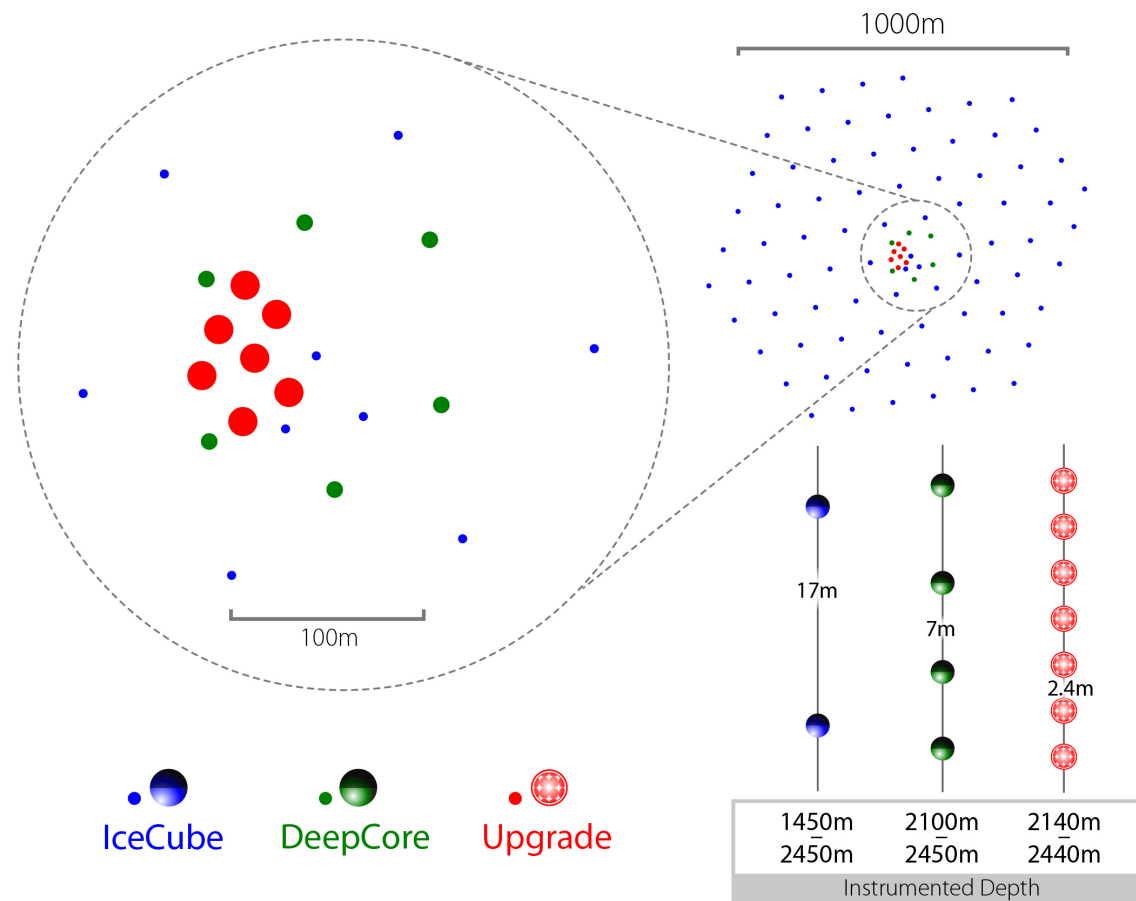




# Ice Cube

## Plany na przyszłość

Pierwszy krok: nowych 7 strun z dużo gęstszym upakowaniem detektorów

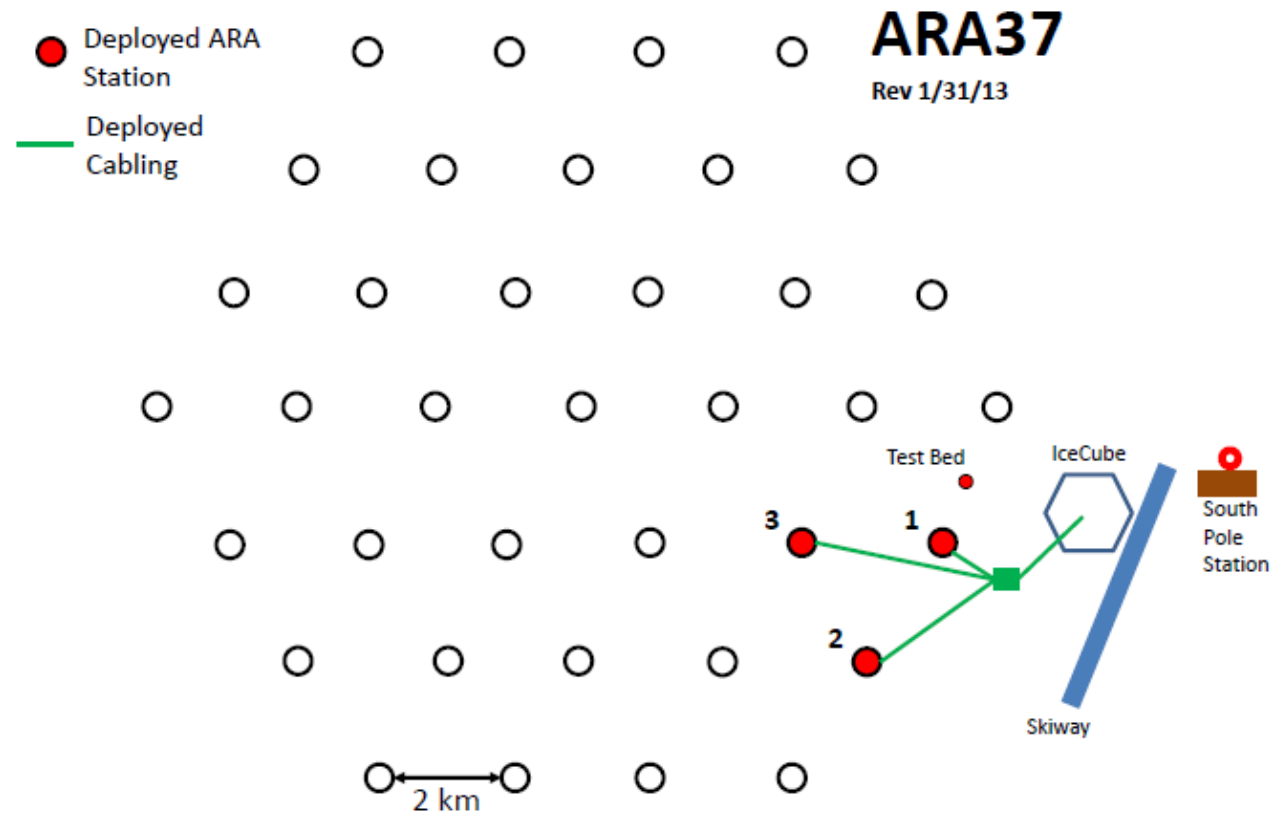


# Ice Cube

## Plany na przyszłość

Znaczne zwiększenie “aktywnej objętości” detektora możliwe dla detekcji radiowej.

### ARA - Askaryan Radio Array

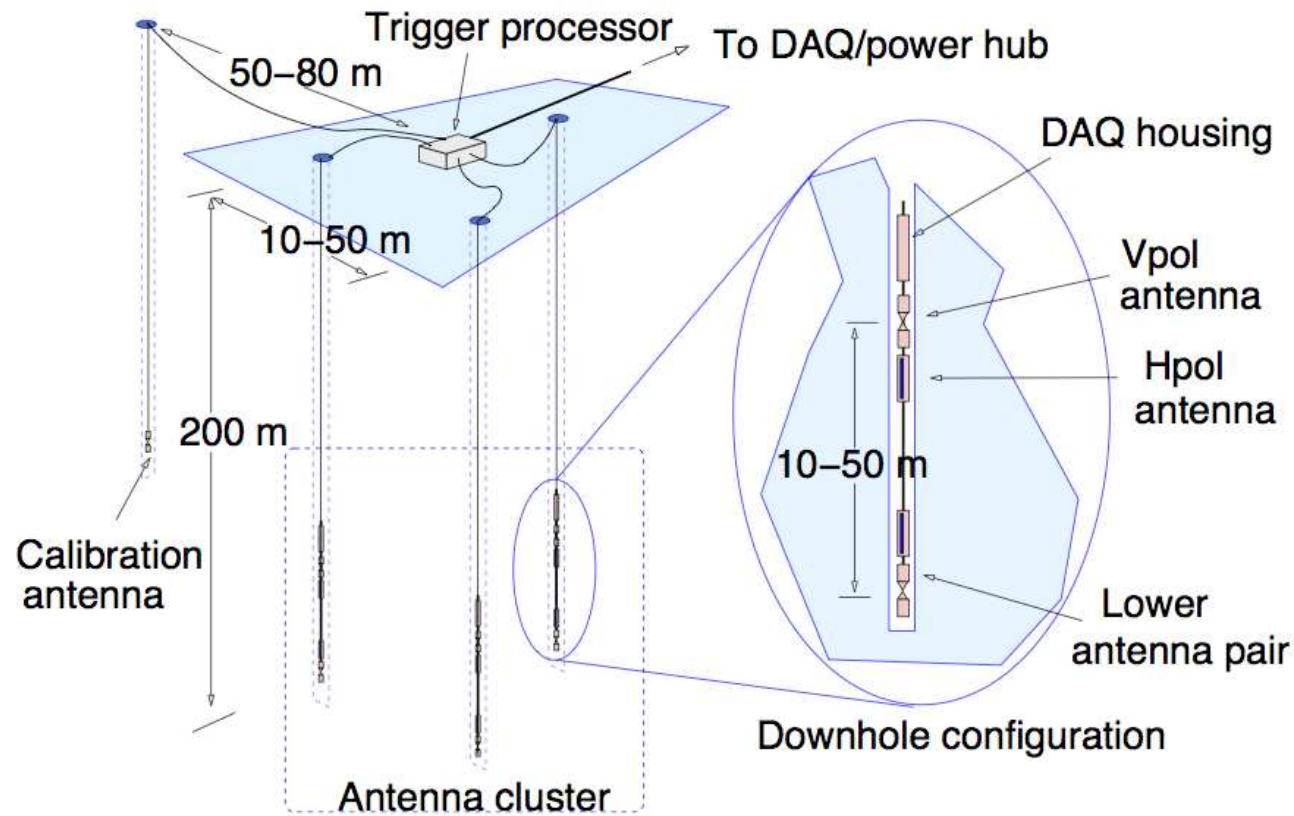


# Ice Cube

## Plany na przyszłość

Znaczne zwiększenie “aktywnej objętości” detektora możliwe dla detekcji radiowej.

### ARA - Askaryan Radio Array

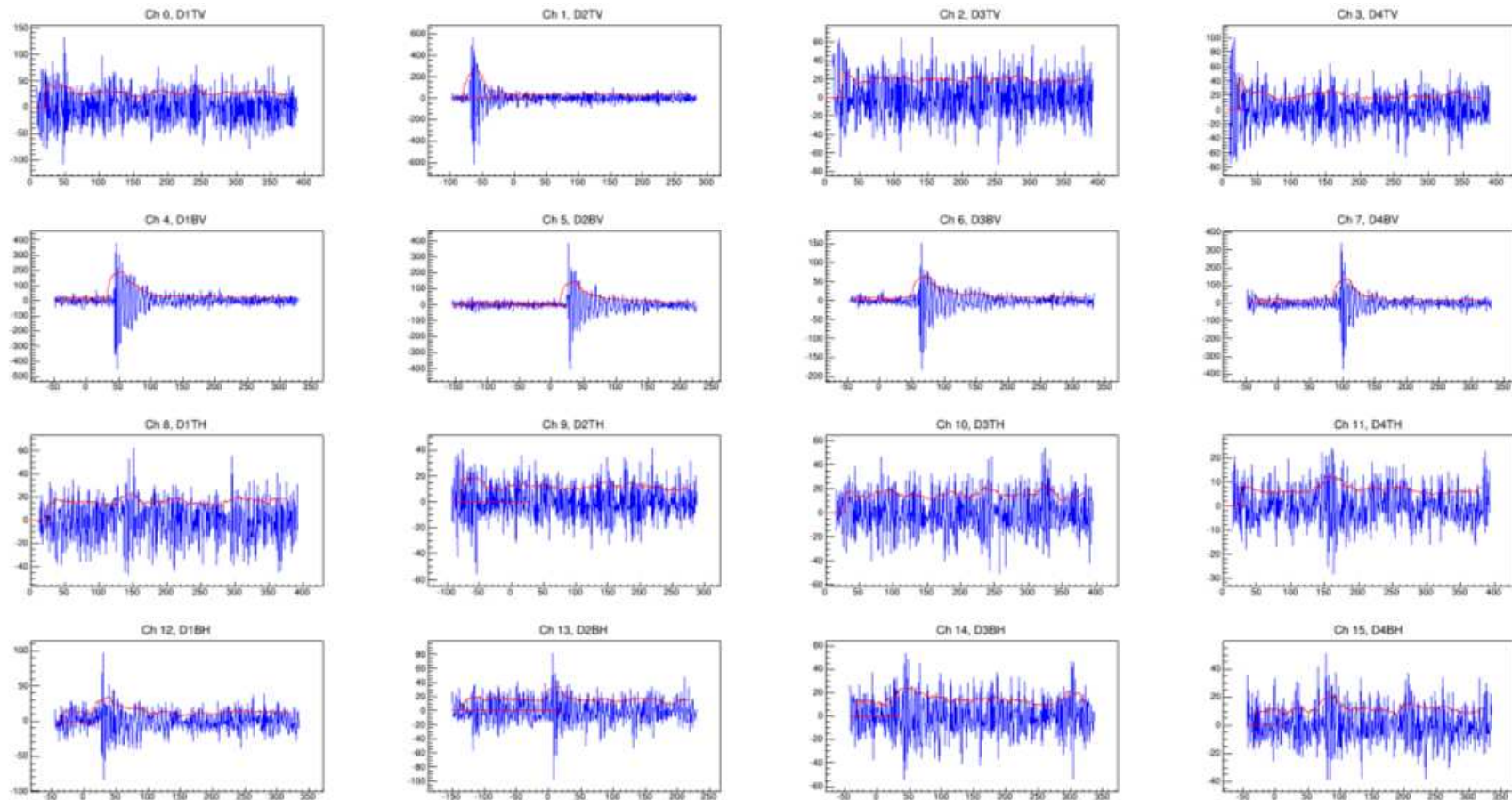


# Ice Cube

## Plany na przyszłość

### ARA - Askaryan Radio Array

Pierwsze trzy detektory prototypowe dostarczają już danych, dwa kolejne w 2017-18

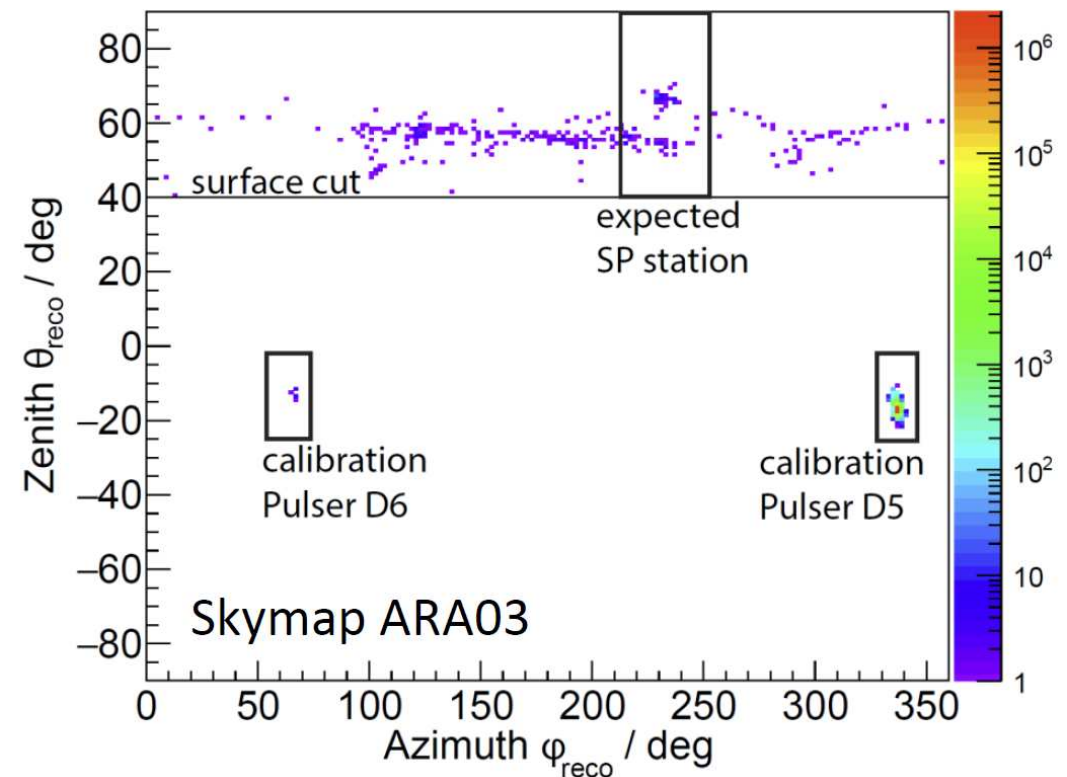
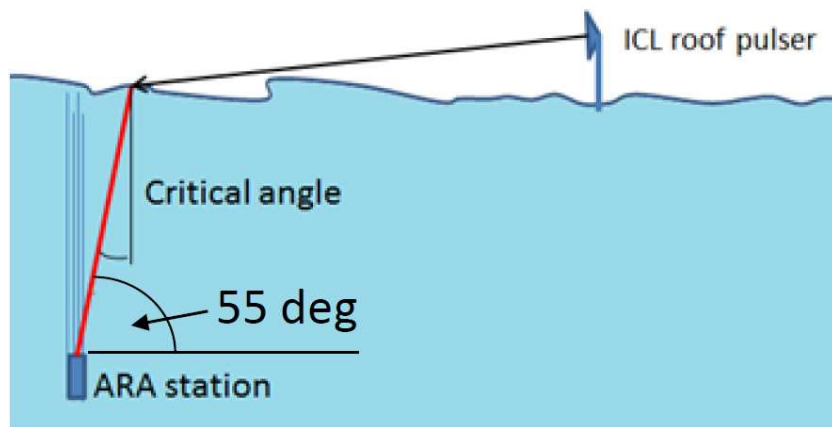


# Ice Cube

## Plany na przyszłość

### ARA - Askaryan Radio Array

Pomiar czasów detekcji impulsu umożliwia rekonstrukcję kierunku  $\Rightarrow$  odrzucanie tła



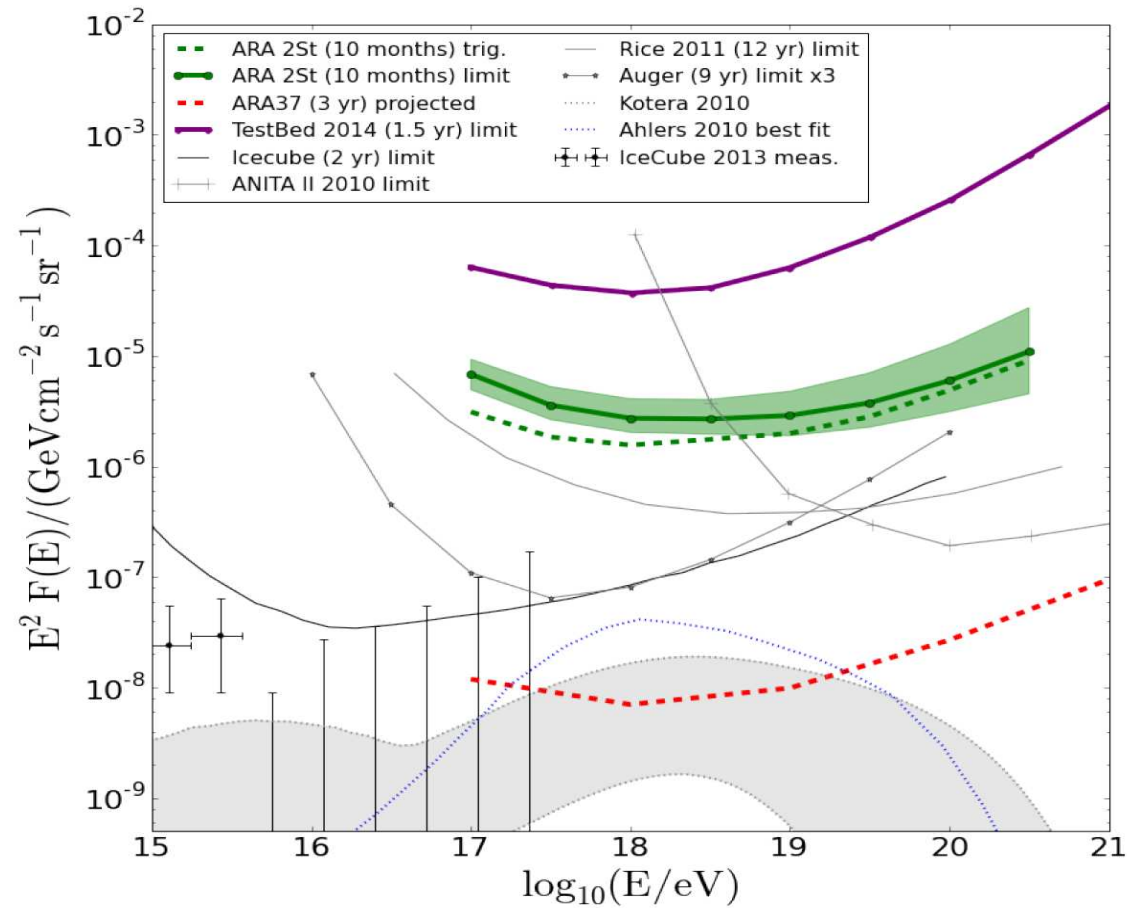
Dotychczas nie zaobserwowano przypadku, który pochodziłby z pod powierzchni lodu...

# Ice Cube

## Plany na przyszłość

### ARA - Askaryan Radio Array

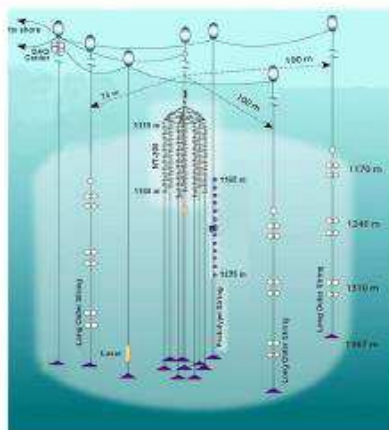
Pierwsze wyniki z analizy danych detektorów prototypowych



## Inne eksperymenty

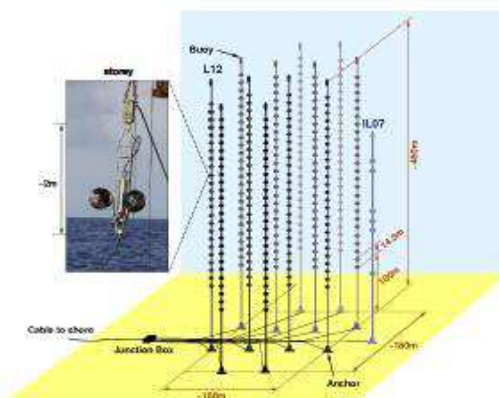
Alternatywą dla lodu jest woda - w przeszłości były już budowane detektory mierzące promieniowanie Czerenkowa w dużych zbiornikach wodnych

NT-200+



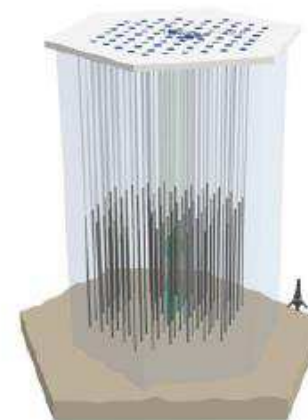
- Lake Baikal
- $1/2000 \text{ km}^3$
- 228 PMTs

ANTARES



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

IceCube



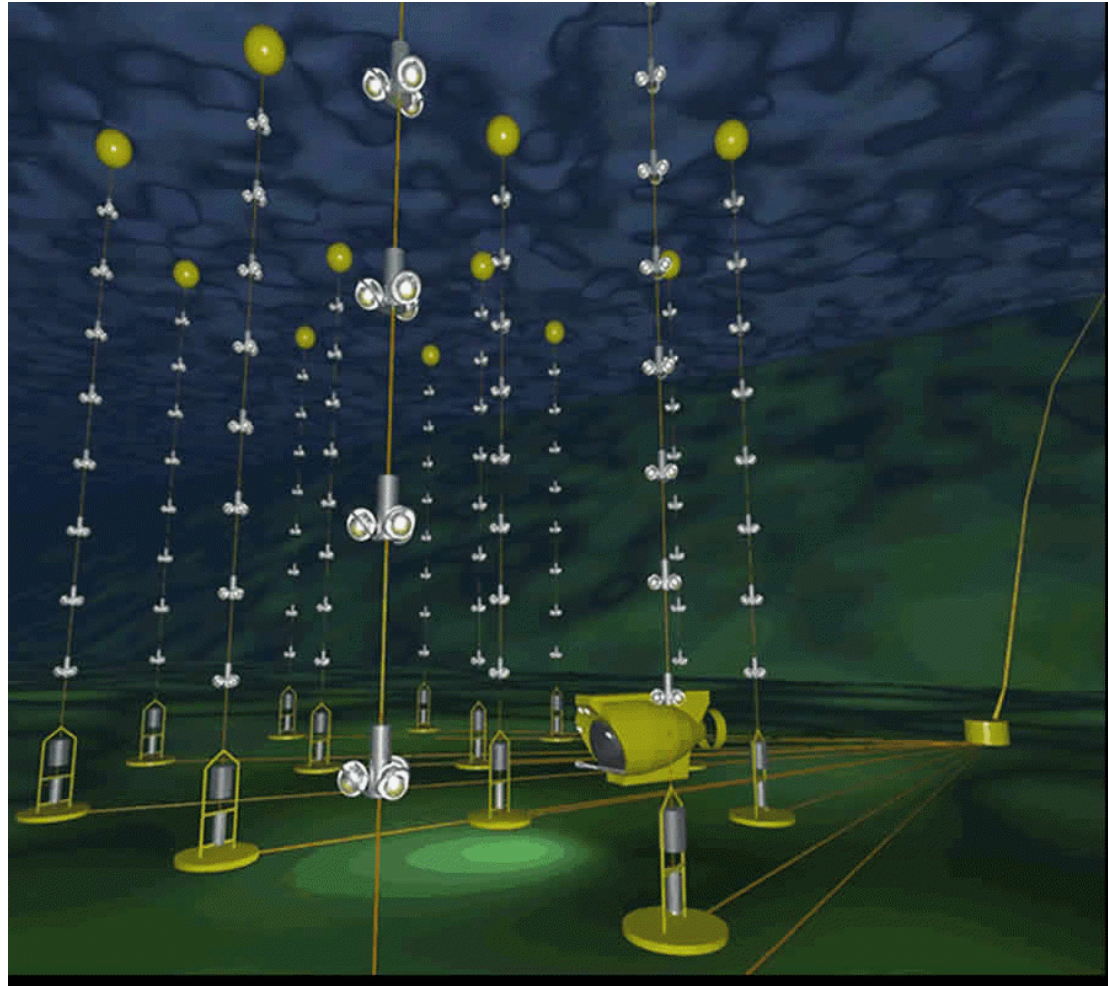
- South Pole glacier
- $1 \text{ km}^3$
- 5160 PMTs

Larger, sparser → higher energies

## Inne eksperymenty

### Antares

Uruchomiony 2007. 885 PM na głębokości 2.5 km

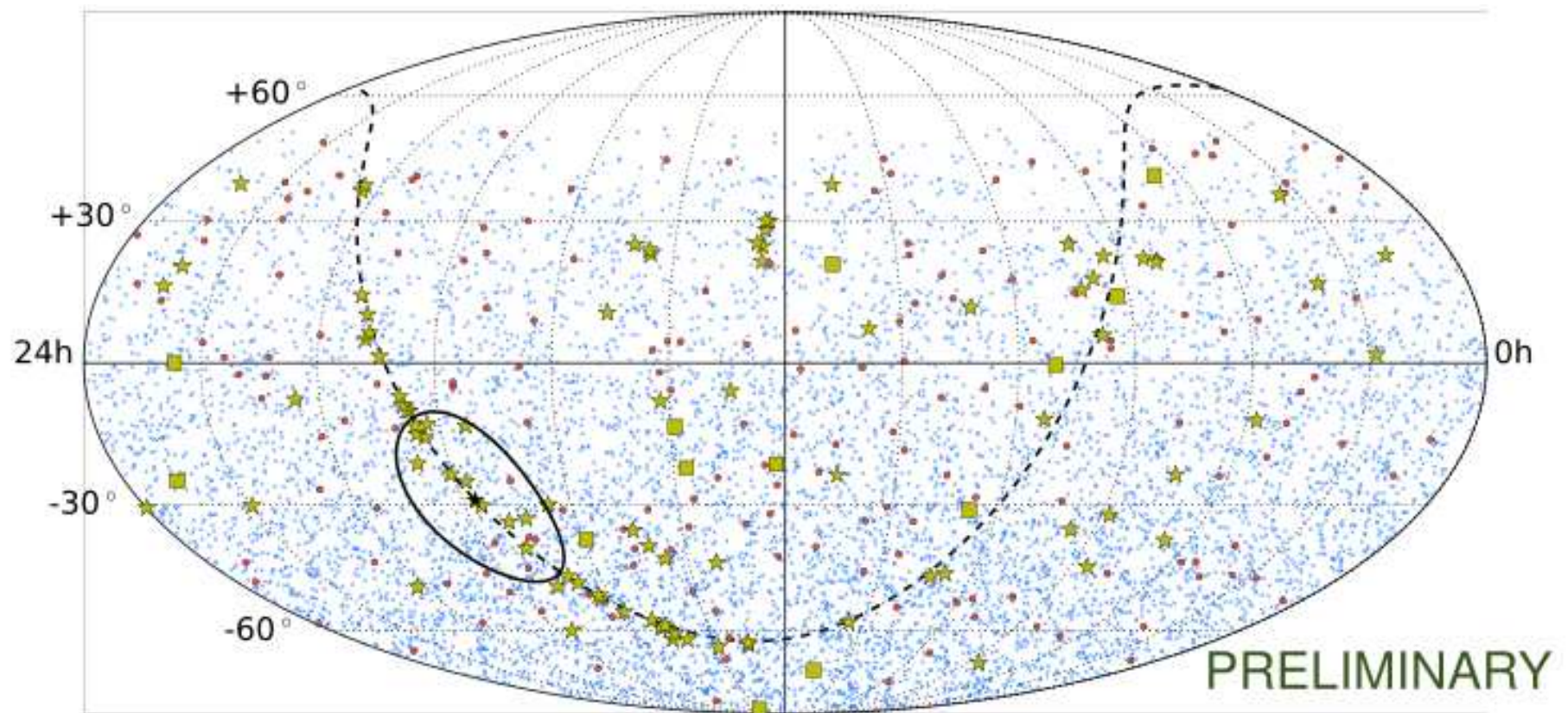




## Inne eksperymenty

### Antares

2007-2015: 7622 tory (●) i 180 kaskad (●)...

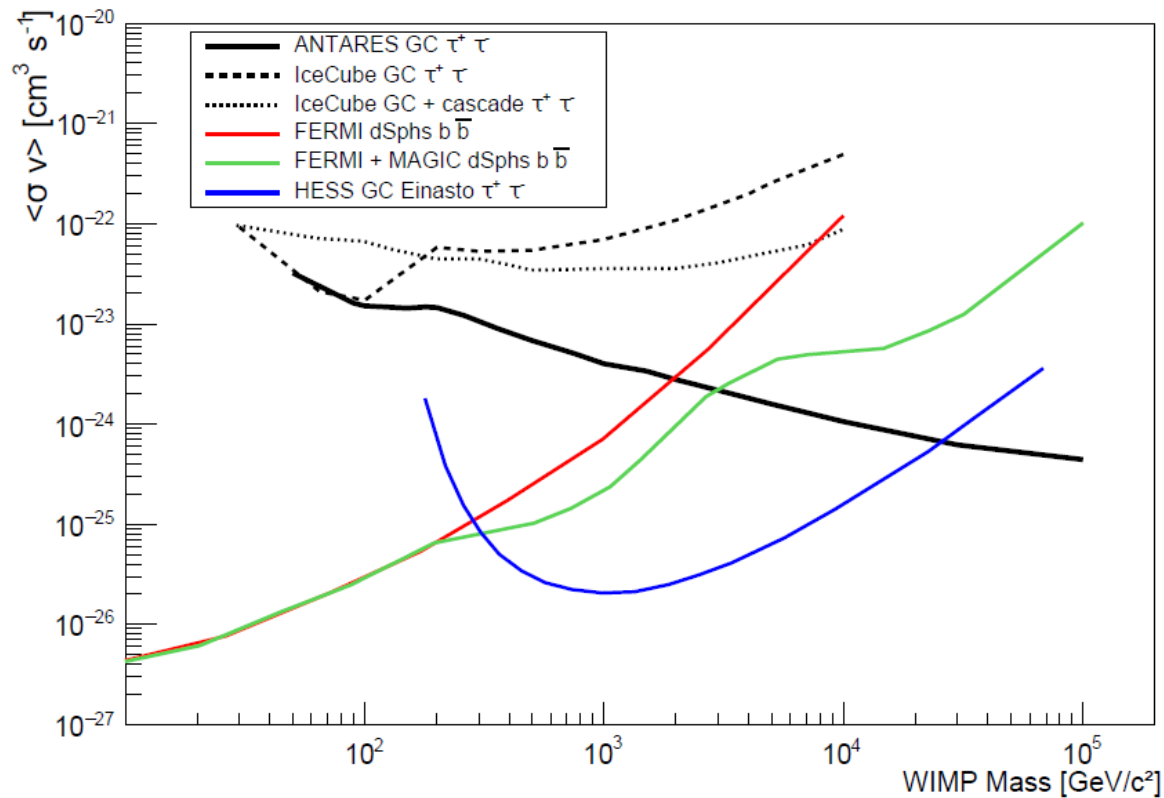


⇒ brak korelacji z położeniem znanych obiektów (GC, SNRs, pulsary...)

# Inne eksperymenty

## Antares

Ograniczenia na anihilację ciemnej materii w centrum galaktyki



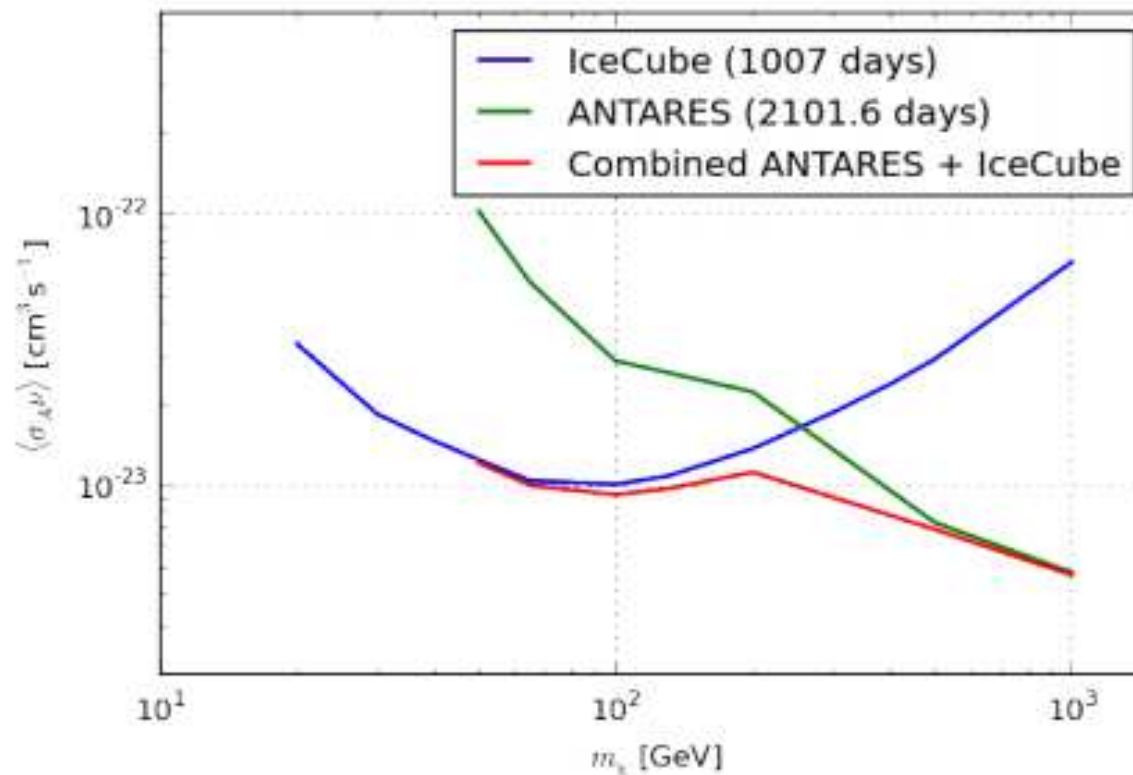
⇒ konkurencyjne z uwagi na niski próg detekcji i dobrą rozdzielczość kątową...

$$\langle E_\nu \rangle \sim M_{WIMP}/3$$

## Inne eksperymenty

### Antares+IceCube

Ograniczenia na anihilację ciemnej materii w centrum galaktyki

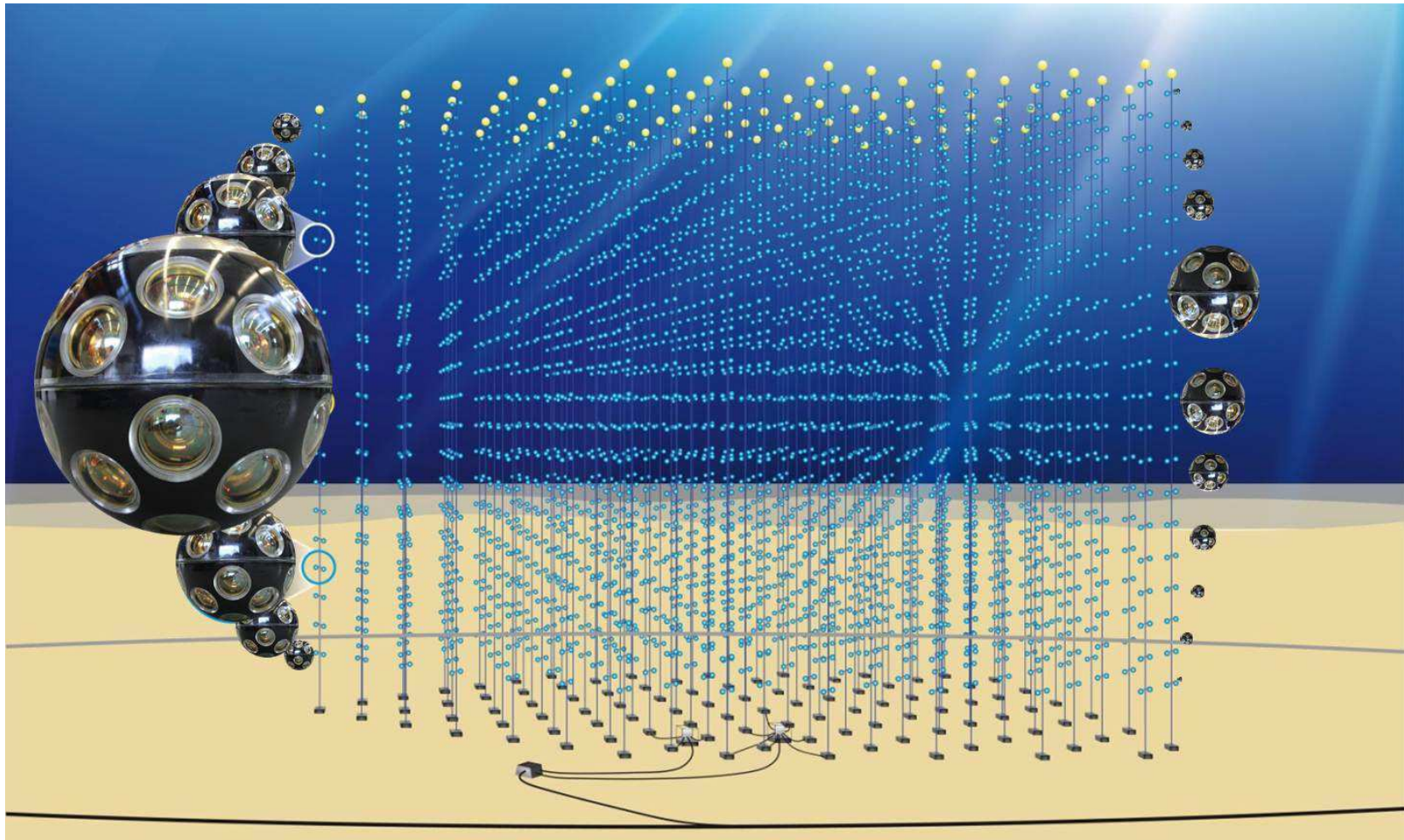


W IceCube centrum galaktyki jest nad horyzontem: tylko przypadki typu HESE

# Inne eksperymenty

KM3NeT

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



# Inne eksperymenty

KM3NeT

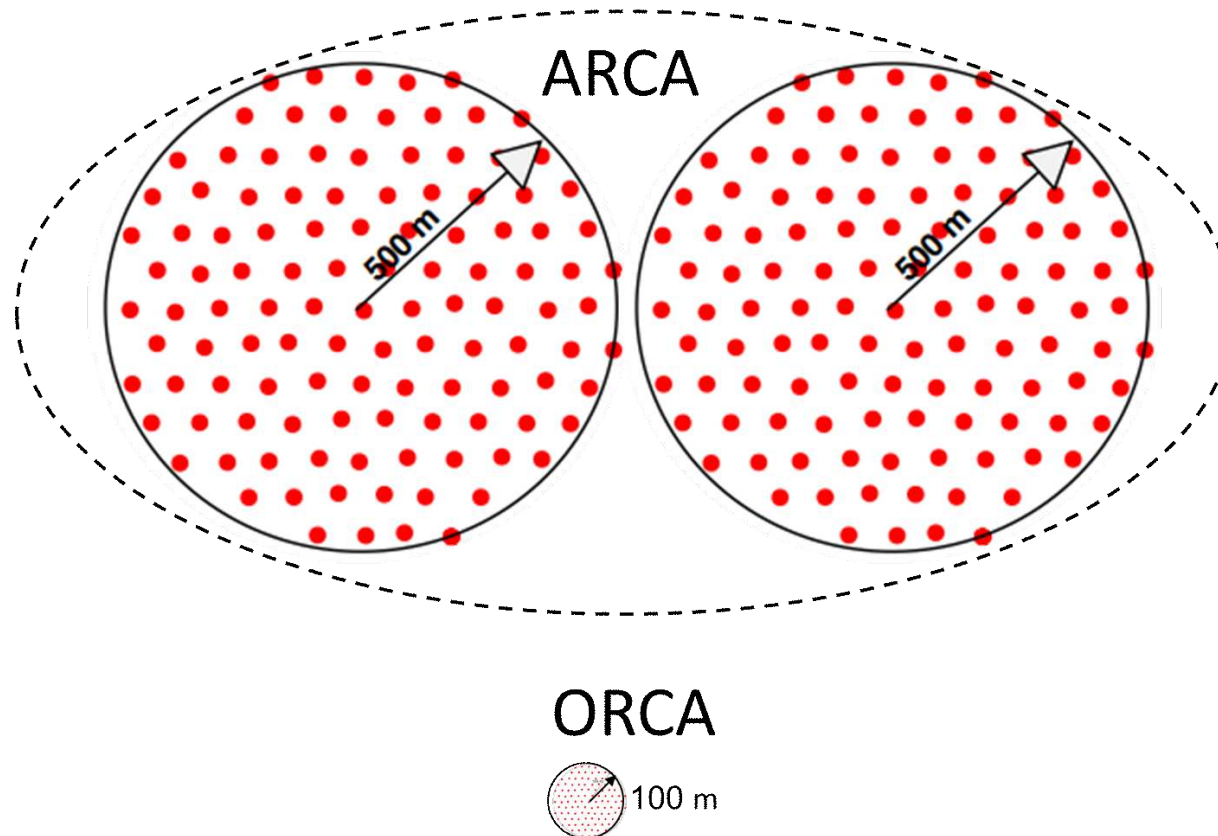
Pierwsze moduły “zatopione” na jesieni 2017...



## Inne eksperymenty

KM3NeT

Dwa typy układów detekcyjnych



ARCA: duża powierzchnia  $\Rightarrow$  najwyższej energii neutrina kosmiczne

ORCA: duża gęstość  $\Rightarrow$  neutrina atmosferyczne (“zwykła” fizyka neutrin)

# Inne eksperymenty

## Podsumowanie ICRC'2015

Przygotowywanych jest wiele nowych projektów, także w oparciu o nowe technologie

