

UW

# Neutrino – najbardziej tajemnicze cząstki we Wszechświecie

Katarzyna Grzelak i Magdalena Posiadała-Zezula

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Wydział Fizyki UW

Kampus Ochota 18.06.2016

UW<sup>2</sup>

## Wstęp

- Część 1 – Od odkrycia neutrin do Nagrody Nobla 2015 (K.Grzelak)
- Część 2 – Fizyka neutrin dzisiaj i jutro (M.Posiadała-Zezula)

Wykład poświęcony

**prof. dr hab. Danucie Kiełczewskiej**  
**(21.08.1945-22.02.2016)**



wieloletniemu pracownikowi UW,  
wybitnemu fizykowi zajmującemu się fizyką neutrin,  
twórczyni doświadczalnej fizyki neutrin w Polsce.



UW

## Co to są neutrina ?

Cząstki elementarne, jedne z najbardziej rozpowszechnionych w przyrodzie:

- ▶  Słońce emituje :  $2 \times 10^{38}$  neutrin/sekundę
- ▶  Na Ziemię przybywa:  
 $> 6 \times 10^{10}$  neutrin/s/cm<sup>2</sup>

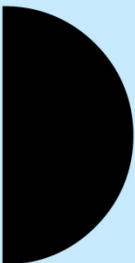
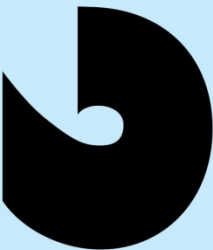
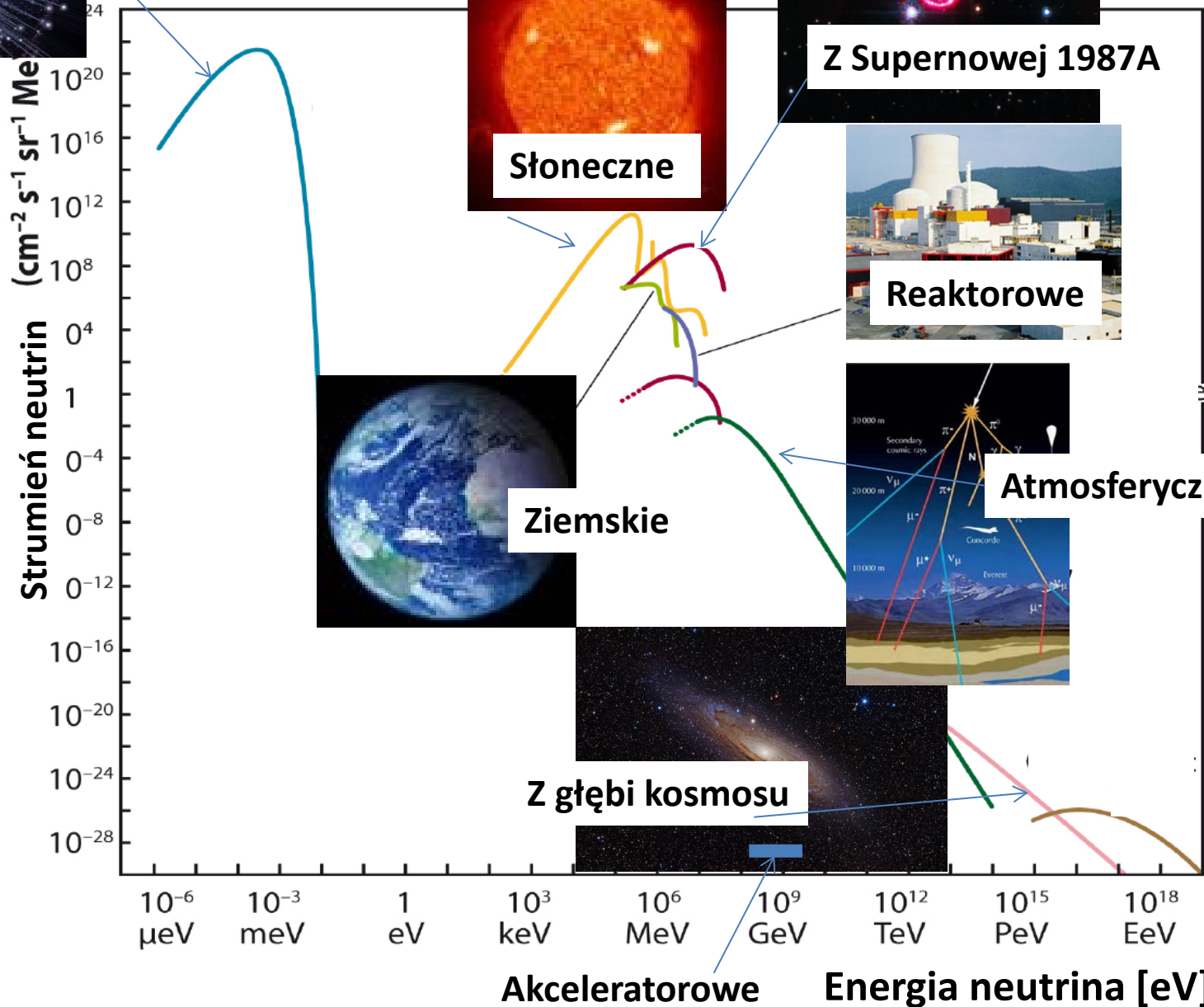
Poza Słońcem są jeszcze inne źródła neutrin !

- ▶  We Wszechświecie: 330 neutrin/cm<sup>3</sup>

# Źródła neutrin



Reliktowe  
po  
Wielkim  
Wybuchu



UW<sup>200</sup>

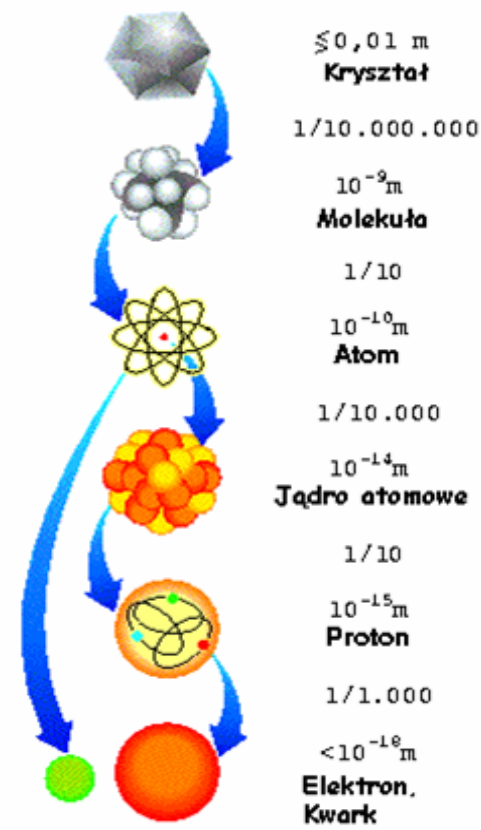
# Miejsce neutrin w rodzinie cząstek elementarnych

# Rodzina cząstek elementarnych

**UWAGA:**

Cała otaczająca nas materia zbudowana jest z cząstek należących do I rodziny

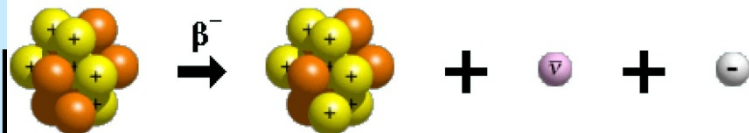
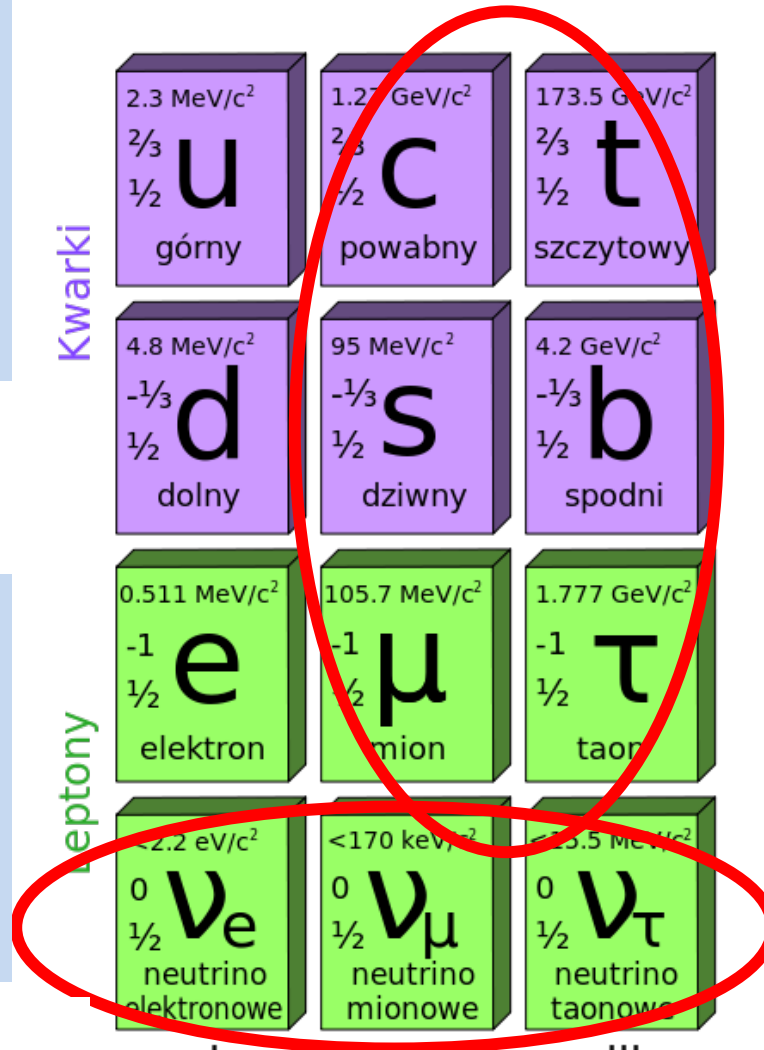
Leptony	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b>e</b> elektron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b><math>\mu</math></b> mion	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b><math>\tau</math></b> taon
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$ <b><math>\nu_e</math></b> neutrino elektronowe	$<170 \text{ keV}/c^2$ $0$ $1/2$ <b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino mionowe	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $1/2$ <b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino taonowe
	I	II	III
Kwarki	$2.3 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>u</b> górny	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>c</b> powabny	$173.5 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>t</b> szczytowy
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>d</b> dolny	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>s</b> dziwny	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>b</b> spodni
	I	II	III



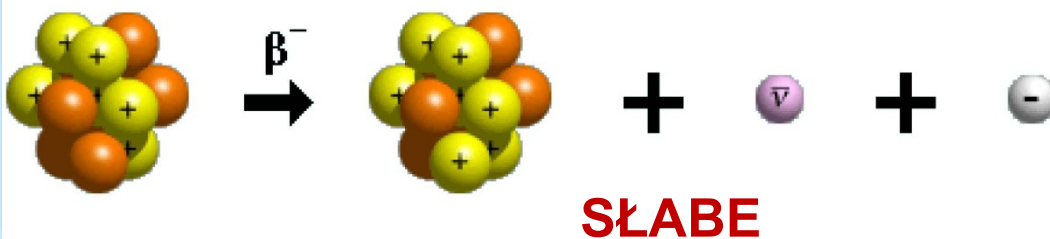
# Rodzina cząstek elementarnych

Pozostałe cząstki są produkowane w oddziaływaniach promieniowania kosmicznego i w laboratoriach ...

$\nu_e$  powstają także w rozpadach beta jąder atomowych (reaktory, promieniotwórczość naturalna ...)



# Cztery rodzaje oddziaływań



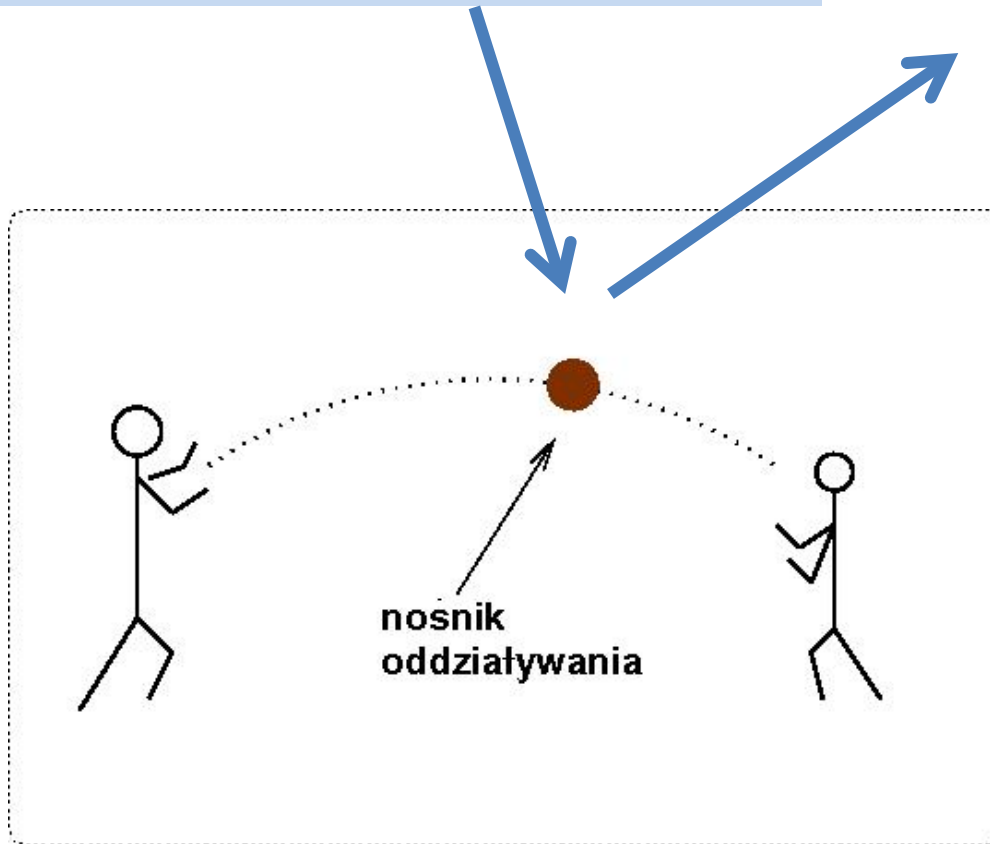
Neutrino oddziałują tylko słabo  
(... i grawitacyjnie)



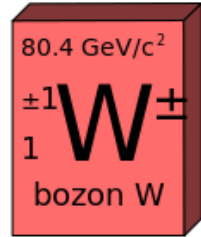
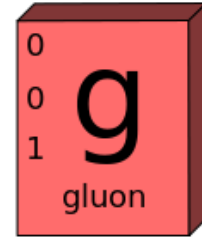
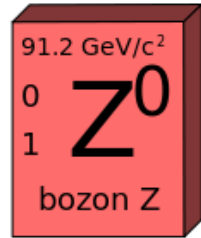
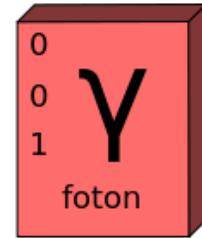


# Rodzina cząstek elementarnych

Na poziomie elementarnym, cząstki materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę cząstek przenoszących oddziaływanie.

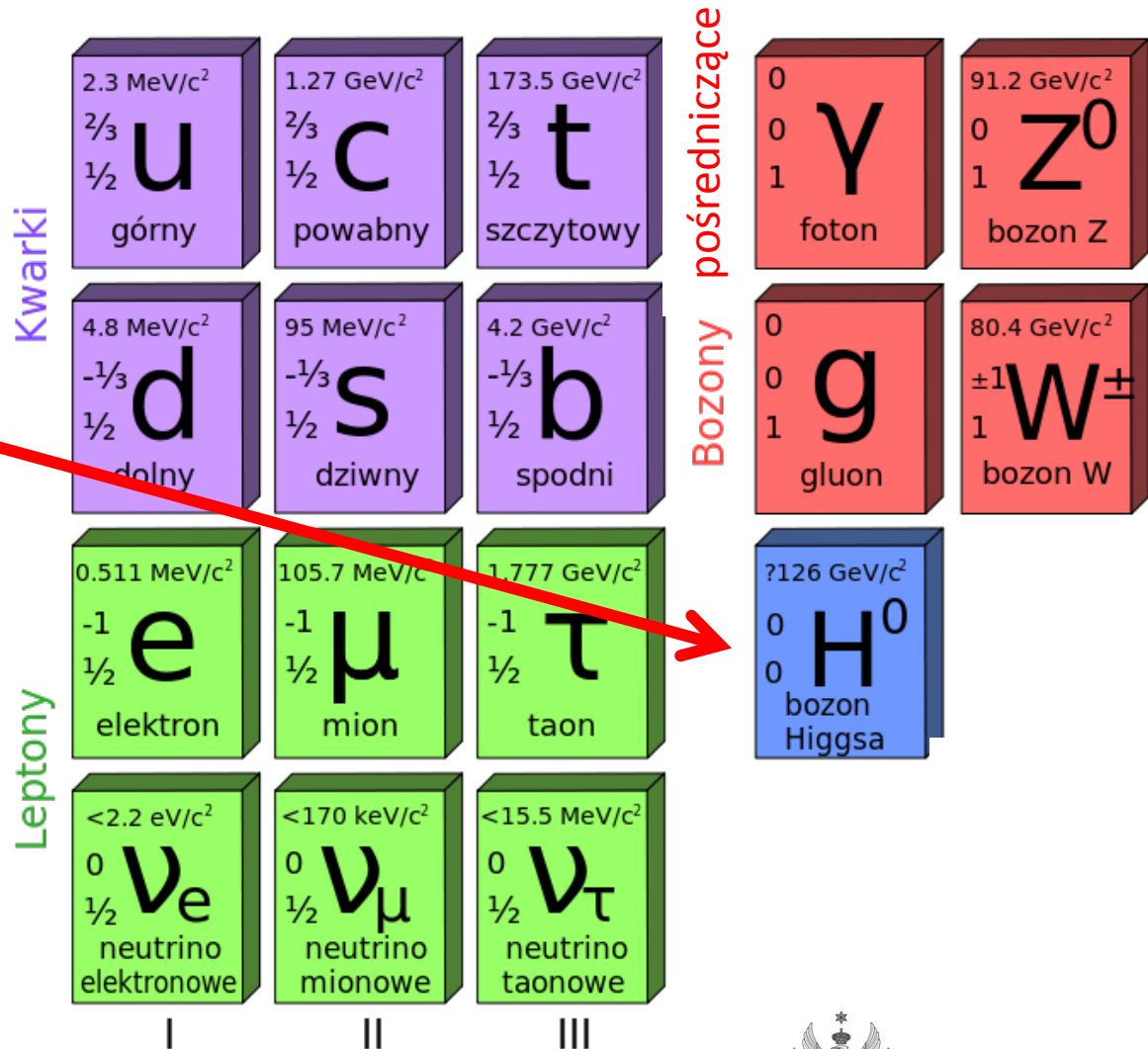


Bozony pośredniczące



# Rodzina cząstek elementarnych

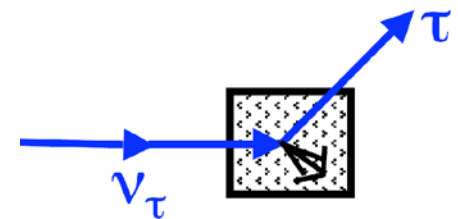
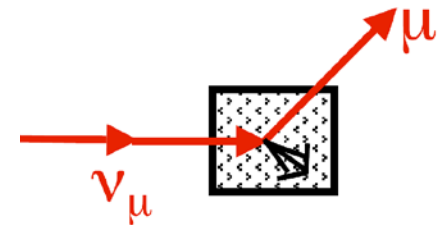
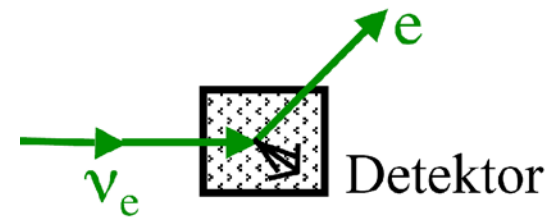
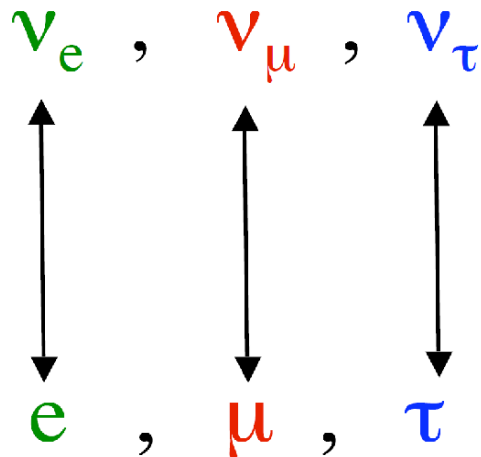
Komplet cząstek elementarnych razem z bozonem Higgs'a odpowiedzialnym za nadawanie masy.



# TRZY RODZAJE NEUTRIN

Trzy rodzaje (zapachy) neutrin odpowiadają trzem naładowanym leptonom.

Co oznacza ta odpowiedniość ?

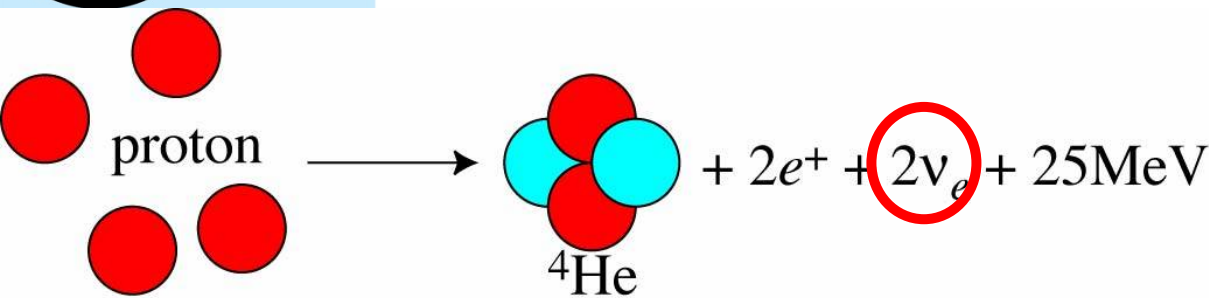
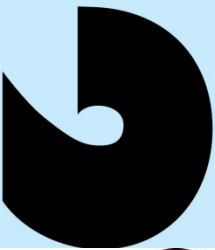


UW<sup>200</sup>

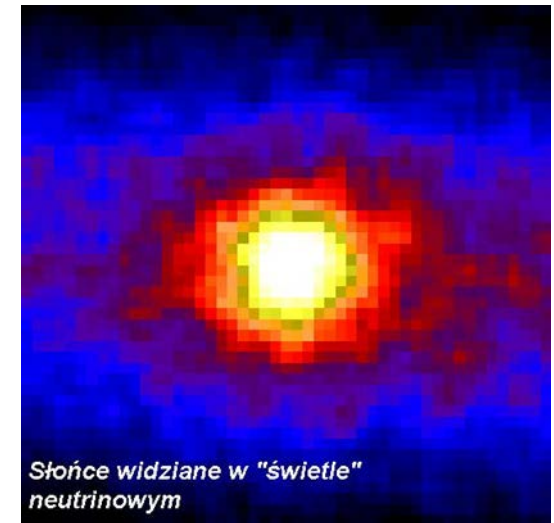
# W stronę Nobla: zagadka neutrin słonecznych

# Neutrina ze Słońca

Energia słoneczna jest głównie wynikiem przemiany jąder wodoru w jądra helu :



SOHO – Słońce widziane w dalekim ultrafiolecie



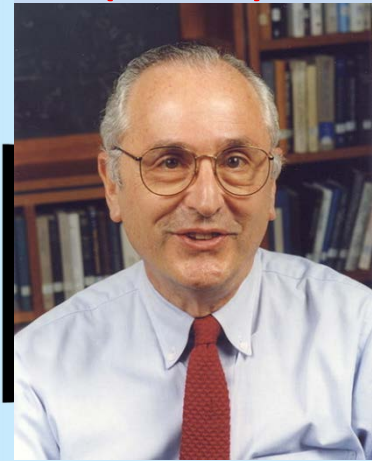
Super-Kamiokande

# Deficyt neutrin ze Słońca

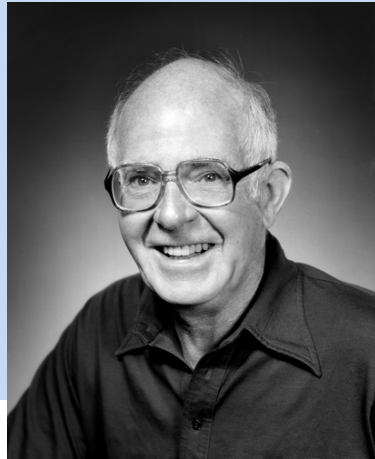
Od 1967 roku obserwowano (eksperyment R.Davis'a !) mniej neutrin słonecznych (produkowanych w reakcjach termojądrowych w Słońcu) niż przewidywał to Standardowy Model Słońca (SSM) - J.Bahcall)

Teoria  
(SSM)

Eksperyment

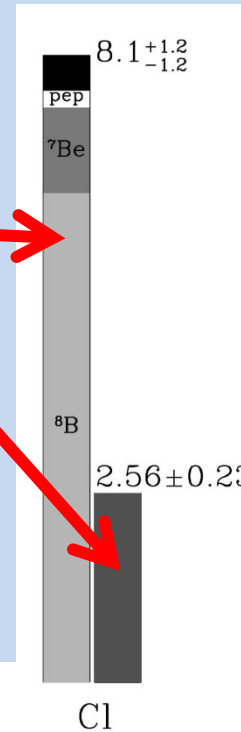


J. Bahcall



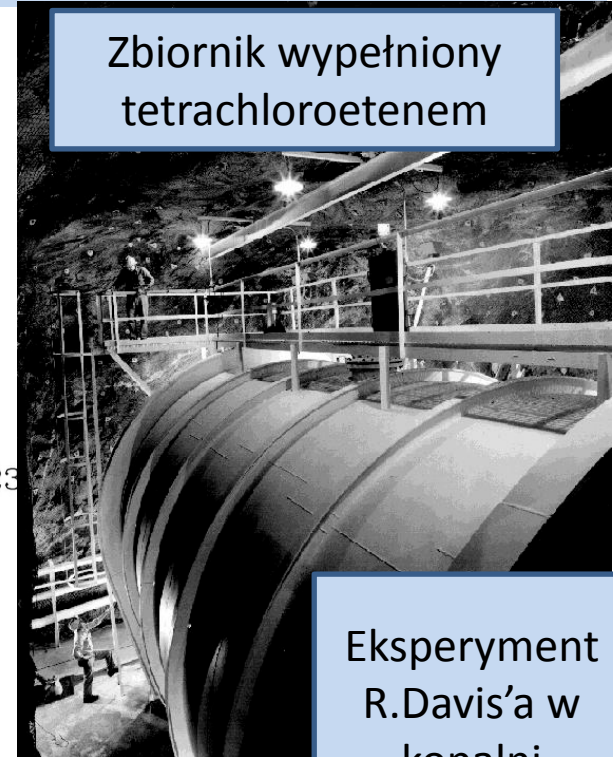
R. Davis

Nagroda Nobla 2002



Theory

■  $^7\text{Be}$  □ p-p, pep  
■  $^8\text{B}$  ■ CNO



Zbiornik wypełniony tetrachloroetenem

Eksperyment R. Davis'a w kopalni Homestake.

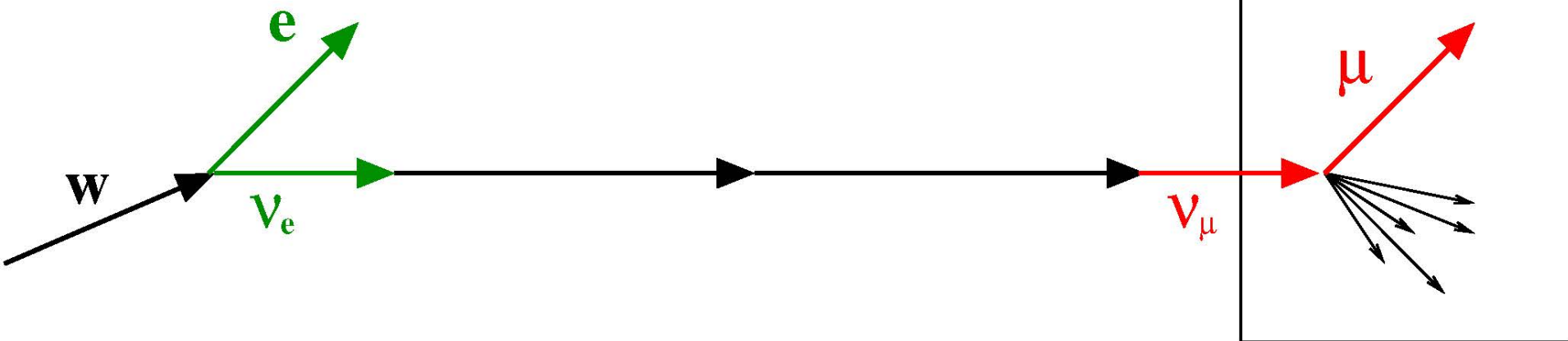
# Zagadka neutrin słonecznych

1968 rok: model oscylacji neutrin B.Pontecorvo

Obserwuje się mniej neutrin elektronowych, ponieważ zamieniają się w neutrina mionowe lub taonowe .



B.Pontecorvo



# Oscylacje neutrin

**Oscylacje neutrin:** neutrina w czasie lotu w przestrzeni mogą się zmieniać w neutrina innego rodzaju i z powrotem (!)

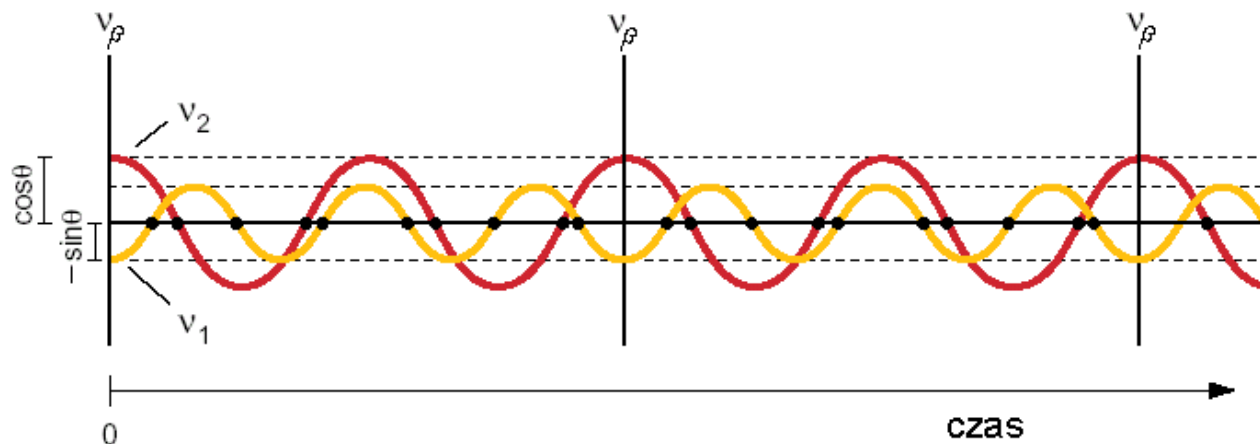
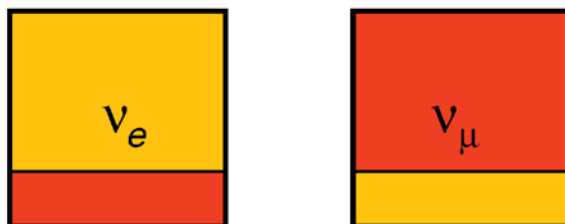




## Oscylacje neutrin

► Przykład dla dwóch rodzajów neutrin:

$\nu_e$  i  $\nu_\mu$ . Neutrino o określonym zapachu, są kombinacją dwóch stanów o określonej masie



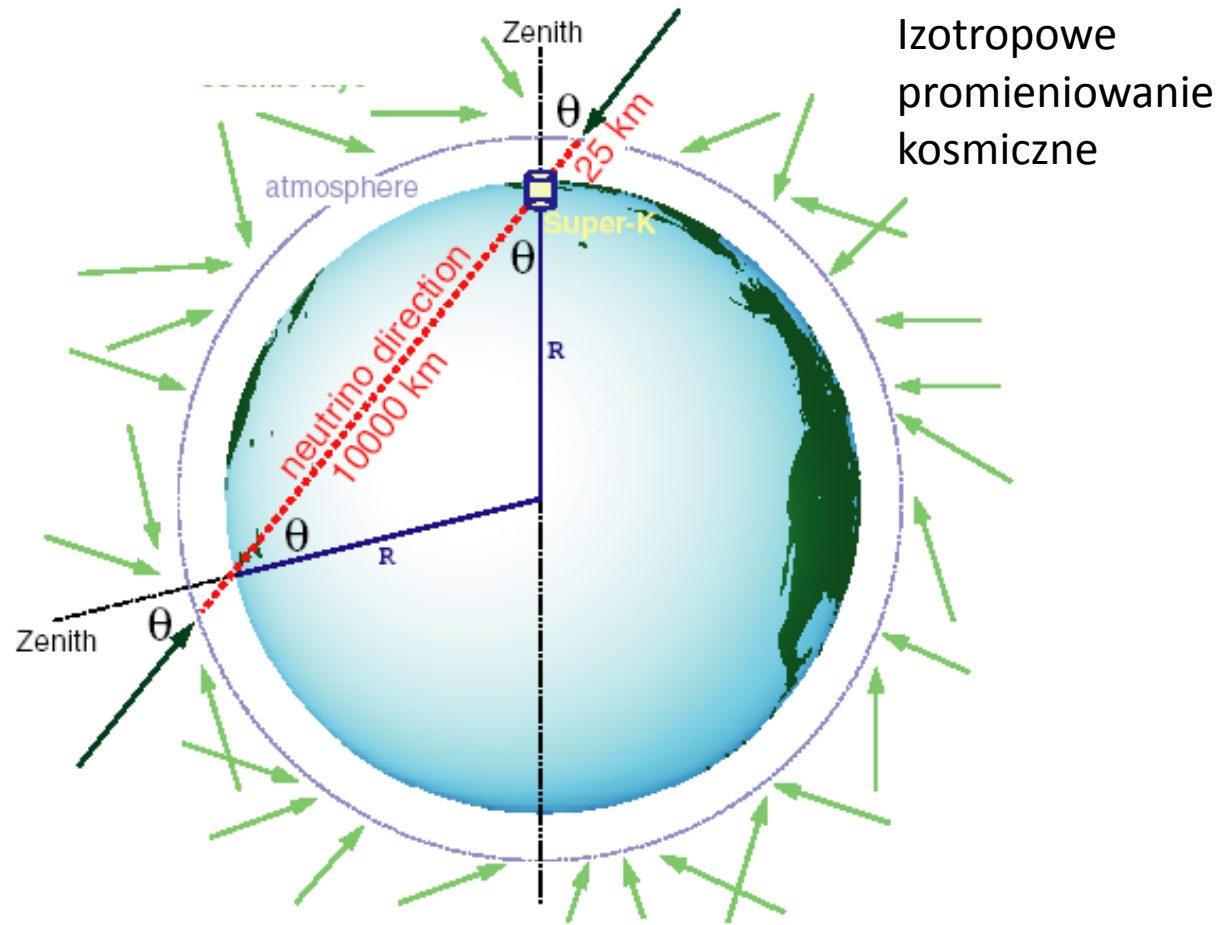
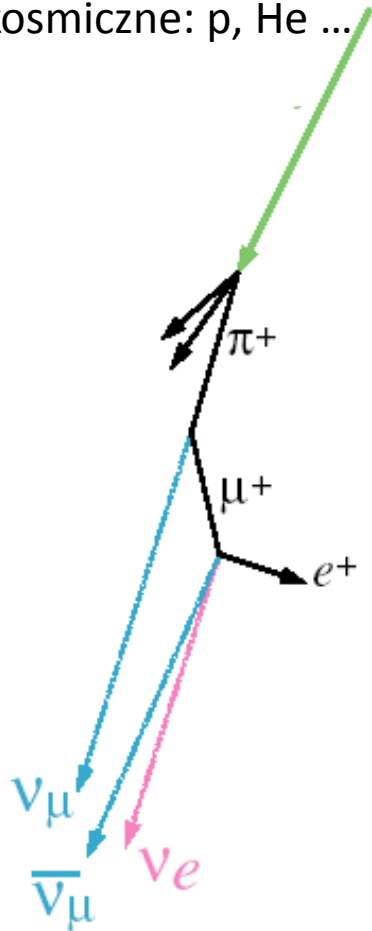
Neutrino można opisywać jako cząstkę lub falę (cecha obiektów kwantowych)

UW<sup>200</sup>

# W stronę Nobla: zagadka neutrin atmosferycznych

# Zagadka neutrin atmosferycznych

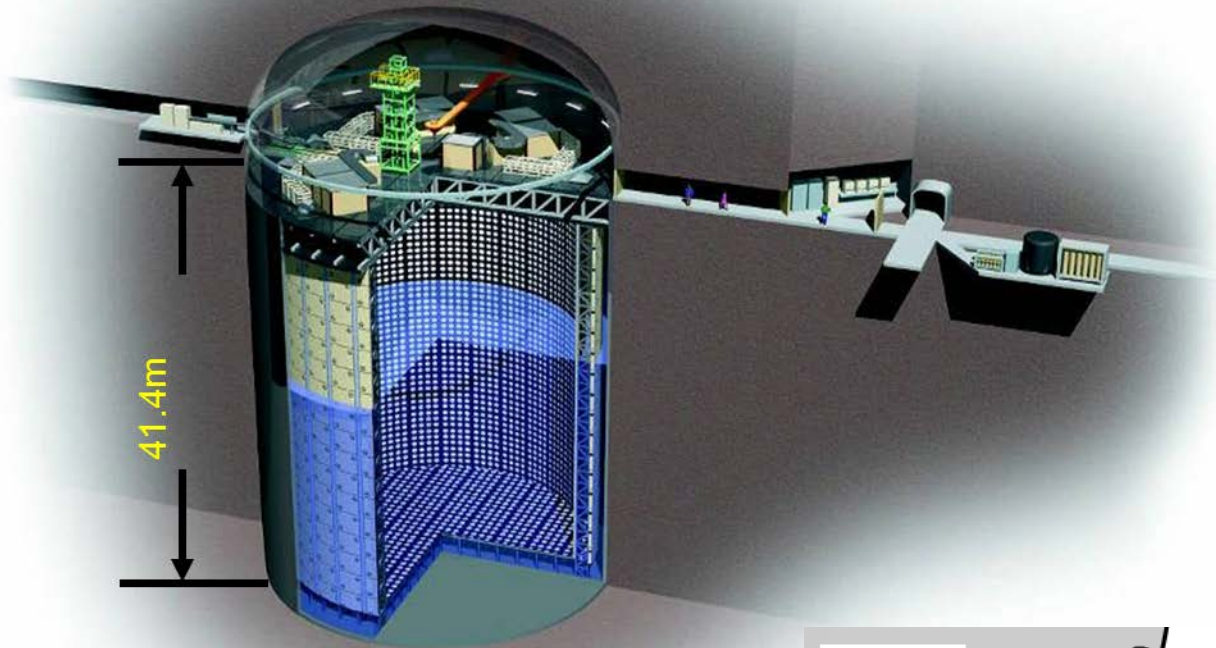
Pierwotne promieniowanie  
kosmiczne:  $p$ , He ...



Izotropowe  
promieniowanie  
kosmiczne

Neutrino atmosferyczne produkowane są w wyniku oddziaływania pierwotnego promieniowania kosmicznego z atmosferą ziemską.

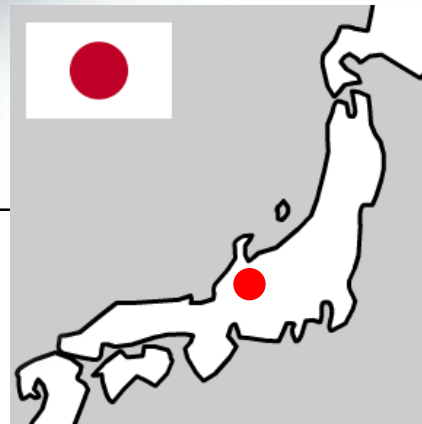
# Detektor Super-Kamiokande



41.4m

- ▶ Zbiornik z nierdzewnej stali wypełniony 50000 ton bardzo czystej wody

- ▶ 1 km pod ziemią, w kopalni Kamioka



UW



# Fala uderzeniowa przy przekraczaniu prędkości dźwięku



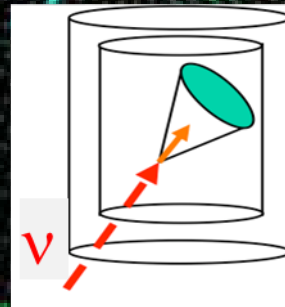
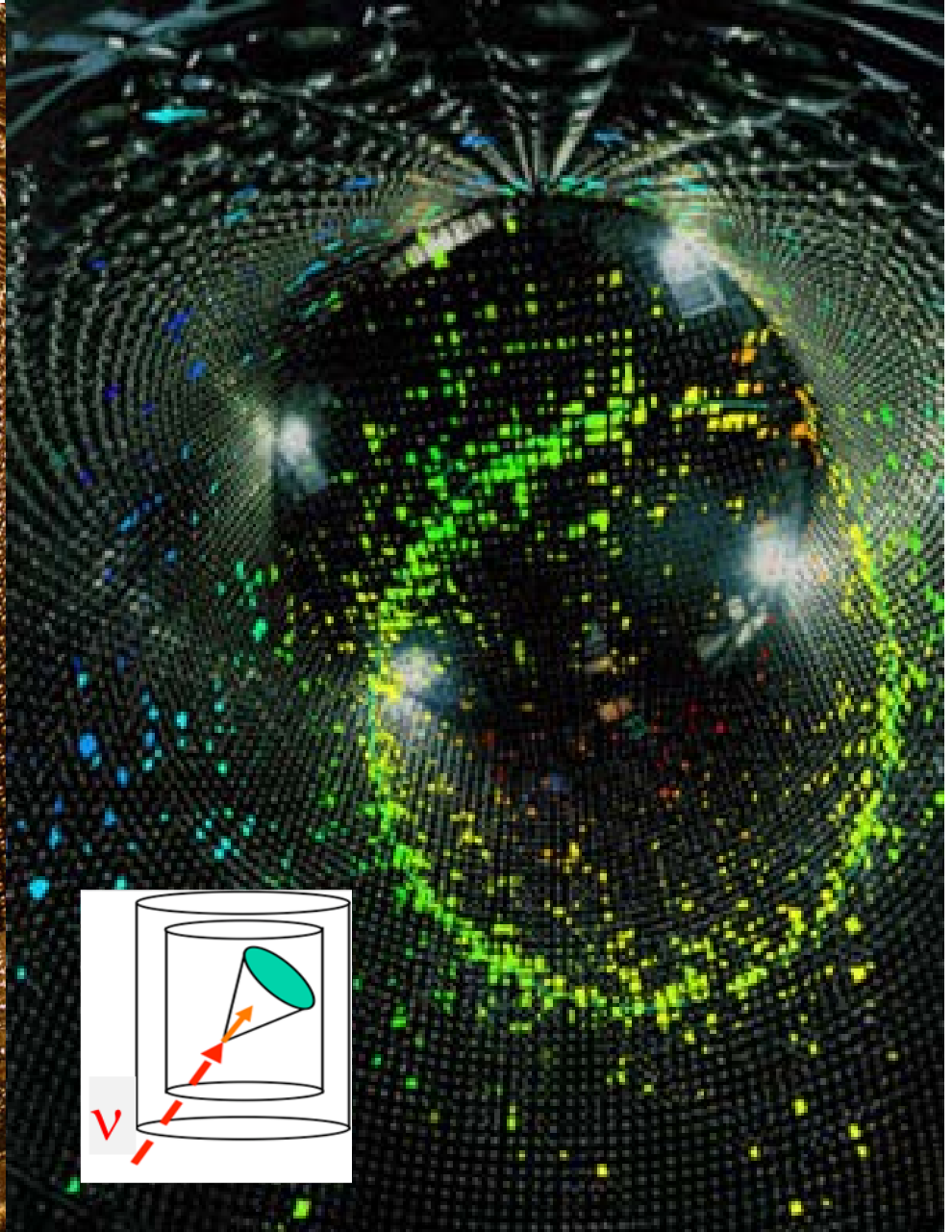
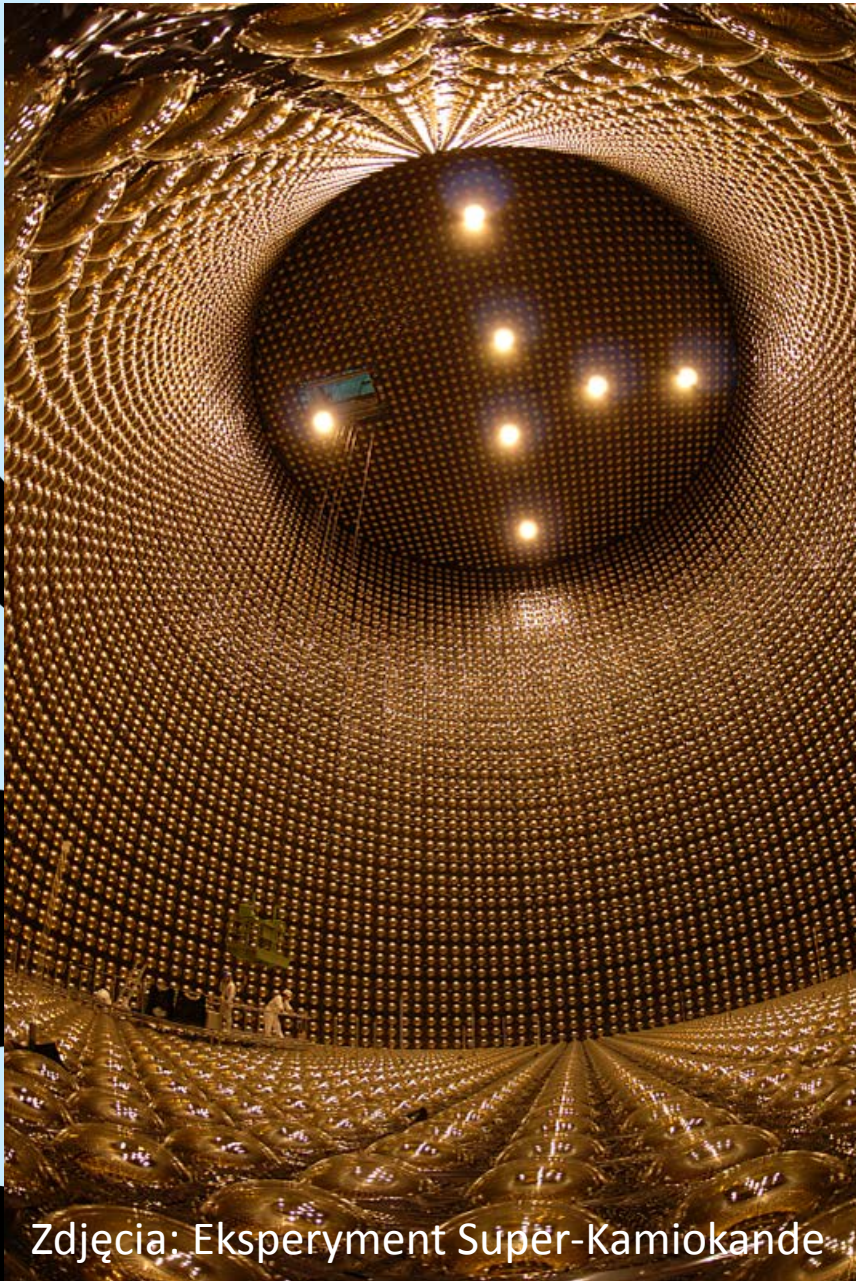
COPYRIGHT ANDREAS ZEITLER - FLYING-WINGS

AIRLINERS.NET



UNIWERSYTET  
WARSZAWSKI

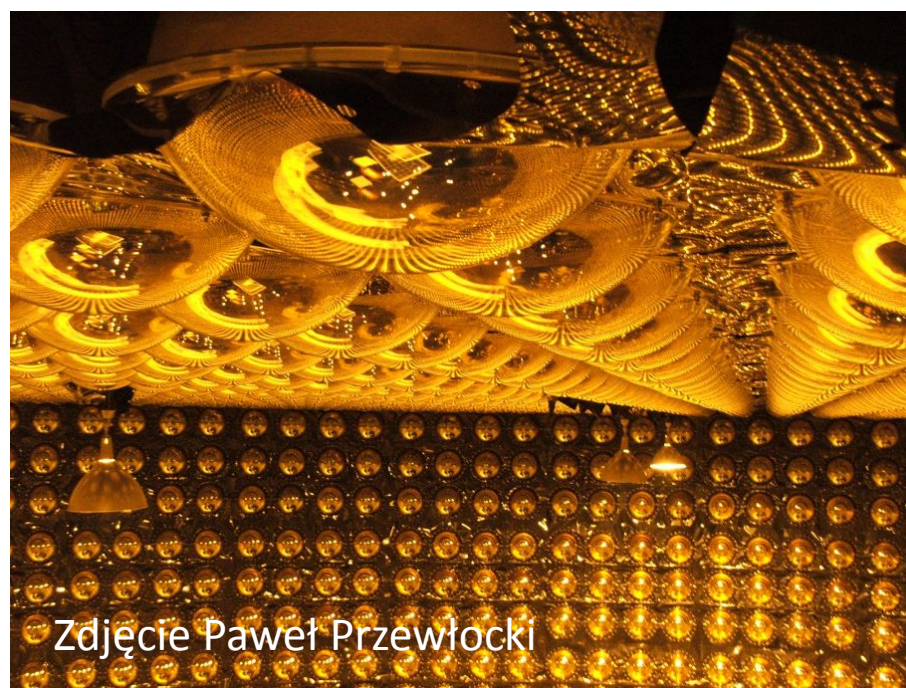
# Pierścienie promieniowania Czerenkowa



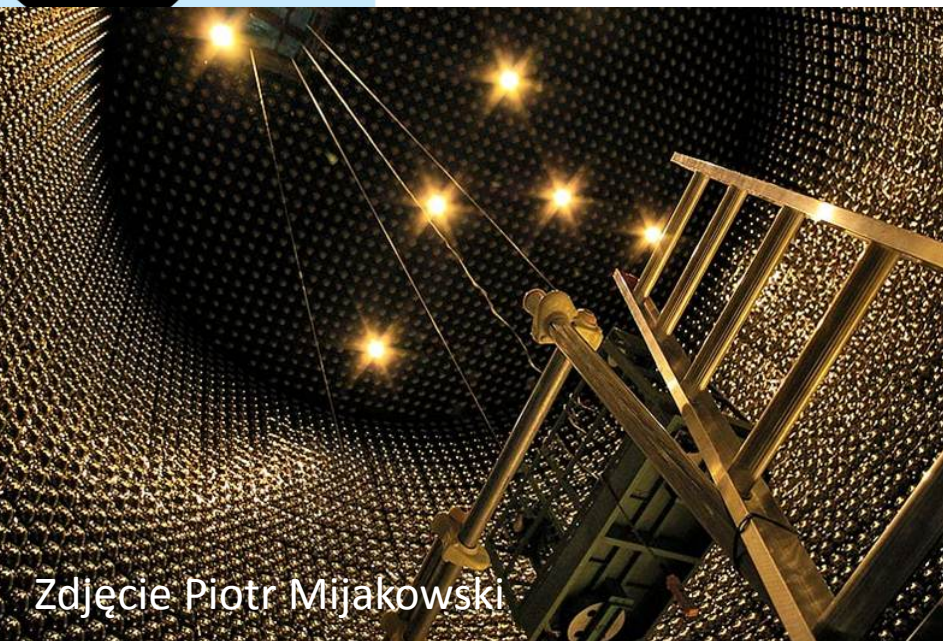
Zdjęcia: Eksperyment Super-Kamiokande



Zdjęcie Eksperyment Super-Kamiokande



Zdjęcie Paweł Przewłocki



Zdjęcie Piotr Mijakowski

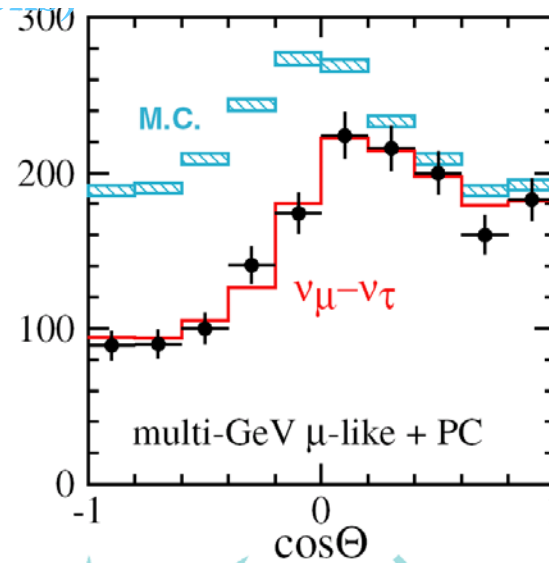
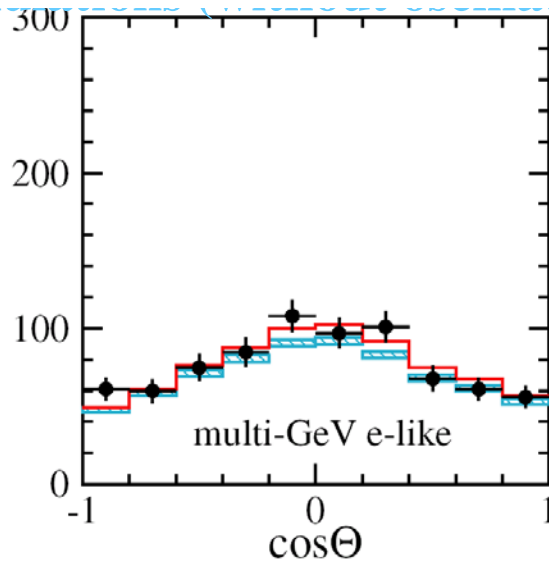


Zdjęcie Piotr Mijakowski



# Neutrino oscylują !

- Punkty → wynik pomiaru
- Niebieska linia (M.C.) → tyle neutrino powinno być rejestrowanych
- Czerwona linia → przewidywania modelu oscylacji



1489 day  
Super-K  
preliminary

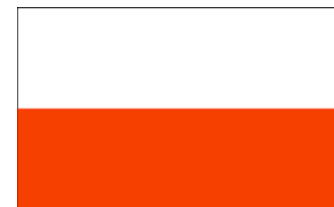
Neutrino travel distance: 12800 6200 700 40 15 km

- 1998 rok – wyniki potwierdzające teorię oscylacji ! Neutrino mionowych, pokonujących dłuższą drogę jest mniej.
- 2015 rok – Nagroda Nobla z Fizyki (T.Kajita, A.B.McDonald)



UW<sup>200</sup>

# Polski udział w badaniach neutrin



- ▶ W Super-Kamiokande od początku uczestniczyła
- ▶ **prof. dr hab. Danuta Kielczewska**
- ▶ z Wydziału Fizyki UW, zm. w lutym 2016 roku.

# Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos

## The Super-Kamiokande Collaboration

Y.Fukuda<sup>a</sup>, T.Hayakawa<sup>a</sup>, E.Ichihara<sup>a</sup>, K.Inoue<sup>a</sup>, K.Ishihara<sup>a</sup>, H.Ishino<sup>a</sup>, Y.Itow<sup>a</sup>, T.Kajita<sup>a</sup>,  
 J.Kameda<sup>a</sup>, S.Kasuga<sup>a</sup>, K.Kobayashi<sup>a</sup>, Y.Kobayashi<sup>a</sup>, Y.Koshio<sup>a</sup>, M.Miura<sup>a</sup>, M.Nakahata<sup>a</sup>,  
 S.Nakayama<sup>a</sup>, A.Okada<sup>a</sup>, K.Okumura<sup>a</sup>, N.Sakurai<sup>a</sup>, M.Shiozawa<sup>a</sup>, Y.Suzuki<sup>a</sup>, Y.Takeuchi<sup>a</sup>, Y.Totsuka<sup>a</sup>,  
 S.Yamada<sup>a</sup>, M.Earl<sup>b</sup>, A.Habig<sup>b</sup>, E.Kearns<sup>b</sup>, M.D.Messier<sup>b</sup>, K.Scholberg<sup>b</sup>, J.L.Stone<sup>b</sup>, L.R.Sulak<sup>b</sup>,  
 C.W.Walter<sup>b</sup>, M.Goldhaber<sup>c</sup>, T.Barszczak<sup>d</sup>, D.Casper<sup>d</sup>, W.Gajewski<sup>d</sup>, P.G.Halverson<sup>d,\*</sup>, J.Hsu<sup>d</sup>,  
 W.R.Kropp<sup>d</sup>, L.R. Price<sup>d</sup>, F.Reines<sup>d</sup>, M.Smy<sup>d</sup>, H.W.Sobel<sup>d</sup>, M.R.Vagins<sup>d</sup>, K.S.Ganezer<sup>e</sup>, W.E.Keig<sup>e</sup>,  
 R.W.Ellsworth<sup>f</sup>, S.Tasaka<sup>g</sup>, J.W.Flanagan<sup>h,†</sup>, A.Kibayashi<sup>h</sup>, J.G.Learned<sup>h</sup>, S.Matsuno<sup>h</sup>, V.J.Stenger<sup>h</sup>,  
 D.Takemori<sup>h</sup>, T.Ishii<sup>i</sup>, J.Kanzaki<sup>i</sup>, T.Kobayashi<sup>i</sup>, S.Mine<sup>i</sup>, K.Nakamura<sup>i</sup>, K.Nishikawa<sup>i</sup>, Y.Oyama<sup>i</sup>,  
 A.Sakai<sup>i</sup>, M.Sakuda<sup>i</sup>, O.Sasaki<sup>i</sup>, S.Echigo<sup>j</sup>, M.Kohama<sup>j</sup>, A.T.Suzuki<sup>j</sup>, T.J.Haines<sup>k,d</sup>, E.Blaufuss<sup>l</sup>,  
 B.K.Kim<sup>l</sup>, R.Sanford<sup>l</sup>, R.Svoboda<sup>l</sup>, M.L.Chen<sup>m</sup>, Z.Conner<sup>m,‡</sup>, J.A.Goodman<sup>m</sup>, G.W.Sullivan<sup>m</sup>, J.Hill<sup>n</sup>,  
 C.K.Jung<sup>n</sup>, K.Martens<sup>n</sup>, C.Mauger<sup>n</sup>, C.McGrew<sup>n</sup>, E.Sharkey<sup>n</sup>, B.Viren<sup>n</sup>, C.Yanagisawa<sup>n</sup>, W.Doki<sup>o</sup>,  
 K.Miyano<sup>o</sup>, H.Okazawa<sup>o</sup>, C.Saji<sup>o</sup>, M.Takahata<sup>o</sup>, Y.Nagashima<sup>p</sup>, M.Takita<sup>p</sup>, T.Yamaguchi<sup>p</sup>,  
 M.Yoshida<sup>p</sup>, S.B.Kim<sup>q</sup>, M.Etoh<sup>r</sup>, K.Fujita<sup>r</sup>, A.Hasegawa<sup>r</sup>, T.Hasegawa<sup>r</sup>, S.Hatakeyama<sup>r</sup>, T.Iwamoto<sup>r</sup>,  
 M.Koga<sup>r</sup>, T.Maruyama<sup>r</sup>, H.Ogawa<sup>r</sup>, J.Shirai<sup>r</sup>, A.Suzuki<sup>r</sup>, F.Tsushima<sup>r</sup>, M.Koshiba<sup>s</sup>, M.Nemoto<sup>t</sup>,  
 K.Nishijima<sup>t</sup>, T.Futagami<sup>u</sup>, Y.Hayato<sup>u,§</sup>, Y.Kanaya<sup>u</sup>, K.Kaneyuki<sup>u</sup>, Y.Watanabe<sup>u</sup>, D.Kielczewska<sup>v,d</sup>,  
 R.A.Doyle<sup>w</sup>, J.S.George<sup>w</sup>, A.L.Stachyra<sup>w</sup>, L.L.Wai<sup>w,\*\*</sup>, R.J.Wilkes<sup>w</sup>, K.K.Young<sup>w</sup>

<sup>v</sup> *Institute of Experimental Physics, Warsaw University, 00-681 Warsaw, Poland*

UW



## ● Prof. dr hab. Danuta Kiełczewska

W 2006 roku założyła wraz z prof. Ewą Rondio (NCBJ) **Warszawską Grupę Neutrinową** (<http://neutrino.fuw.edu.pl>) która skupia pracowników z Wydziału Fizyki UW, Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) oraz Politechniki Warszawskiej



Prof. Danuta Kiełczewska **stworzyła doświadczalną fizykę neutrin w Polsce.**

Brała udział w najważniejszych i najbardziej prestiżowych eksperymentach neutrinowych: **IMB, Super-Kamiokande, K2K i T2K.**

**Współuczestniczyła w największych odkryciach związanych z neutrinami**, m.in. w odkryciu oscylacji neutrin przez eksperyment Super-Kamiokande w 1998 roku.

**Współpracowała z najwybitniejszymi naukowcami w swej dziedzinie.**

# UW <sup>2</sup> Warszawa Grupa Neutrinowa

<http://neutrino.fuw.edu.pl>

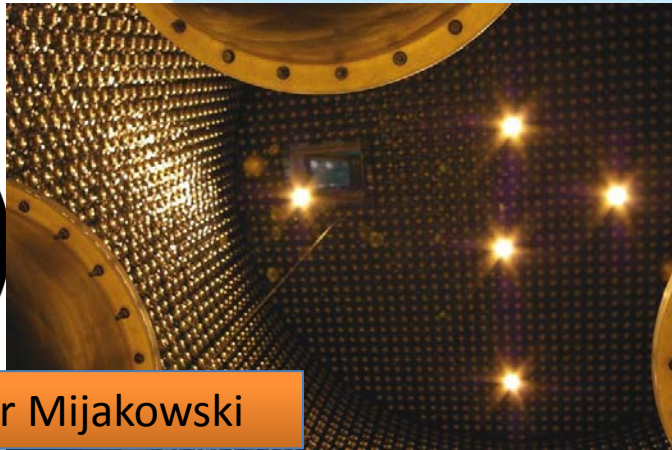
Nasza grupa uczestniczy w eksperymentach z dziedziny fizyki oscylacji neutrin:

Super-Kamiokande,  
T2K- Tokai-2-Kamioka

Icarus



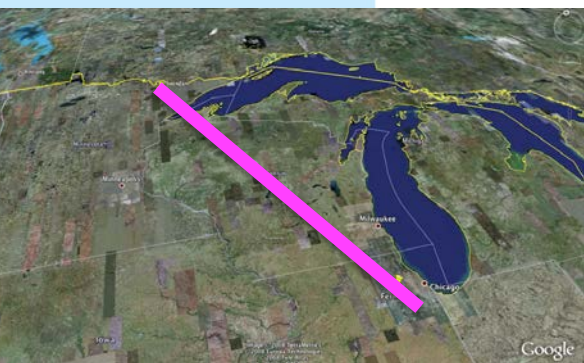
Minos, Minos+



fot. Piotr Mijakowski



# Akceleratorowe eksperymenty ze sztuczną wiązką neutrinową



MINOS, USA

Krzywizna Ziemi

Źródło  $\nu_\mu$

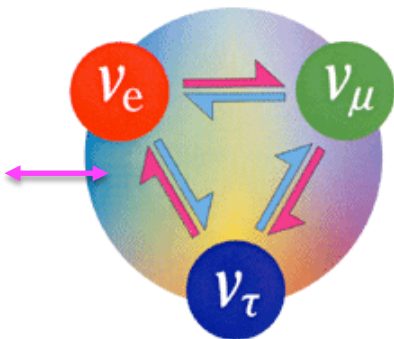
Odległość kilkaset km

Bliski detektor

Oscylacje  $\nu_\mu$ !!!

Daleki detektor

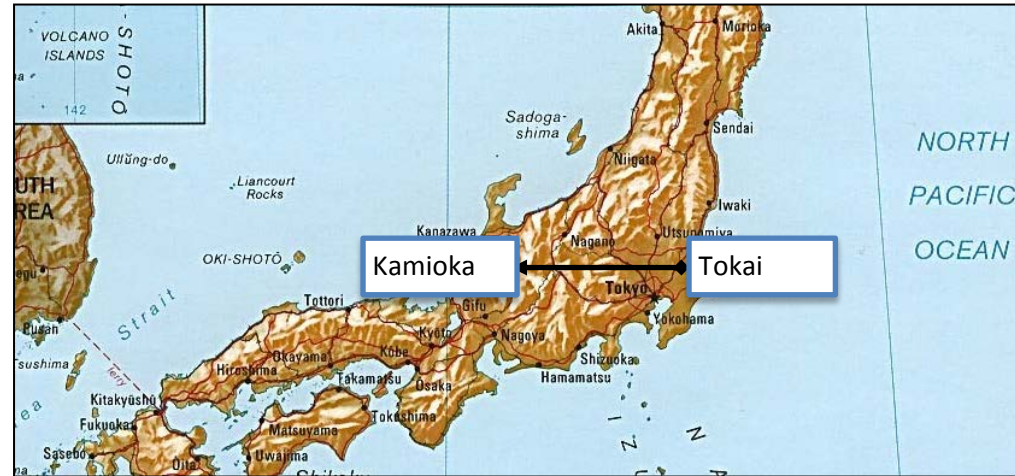
**W dalekim detektorze badamy:**  
1. pojawianie się innych neutrin niż  $\nu_\mu$   
2. znikanie neutrin  $\nu_\mu$



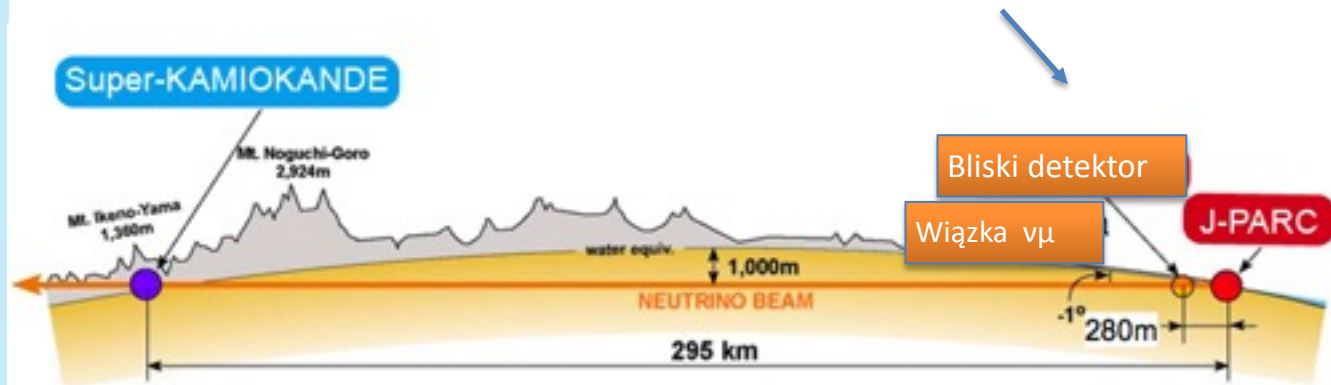
# Eksperyment T2K

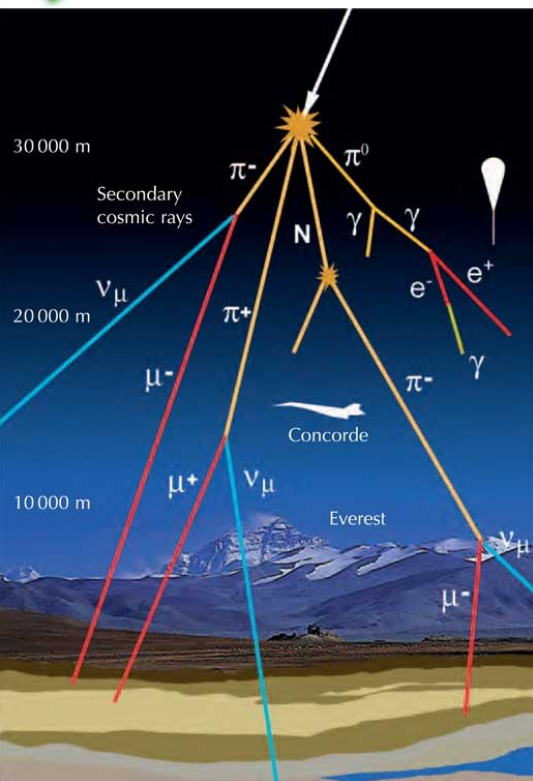
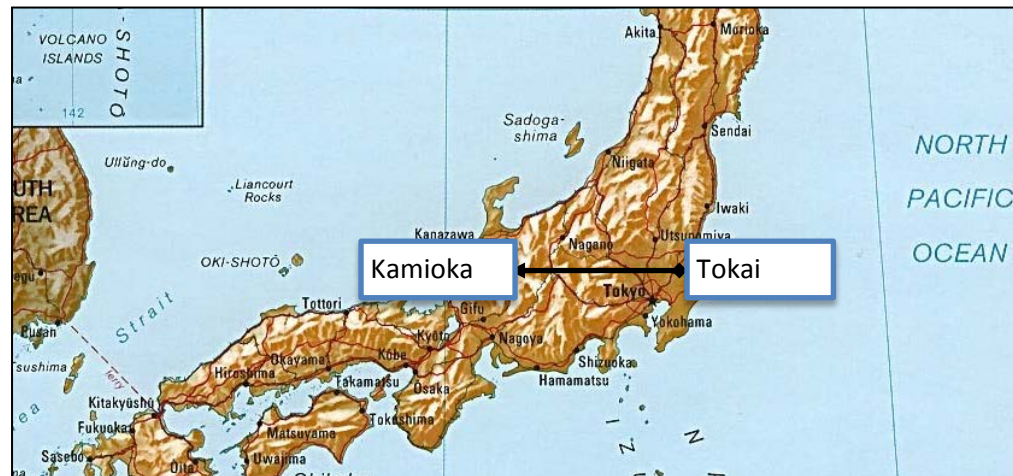
# UW

- Tokai-2-Kamioka T2K: eksperyment drugiej generacji

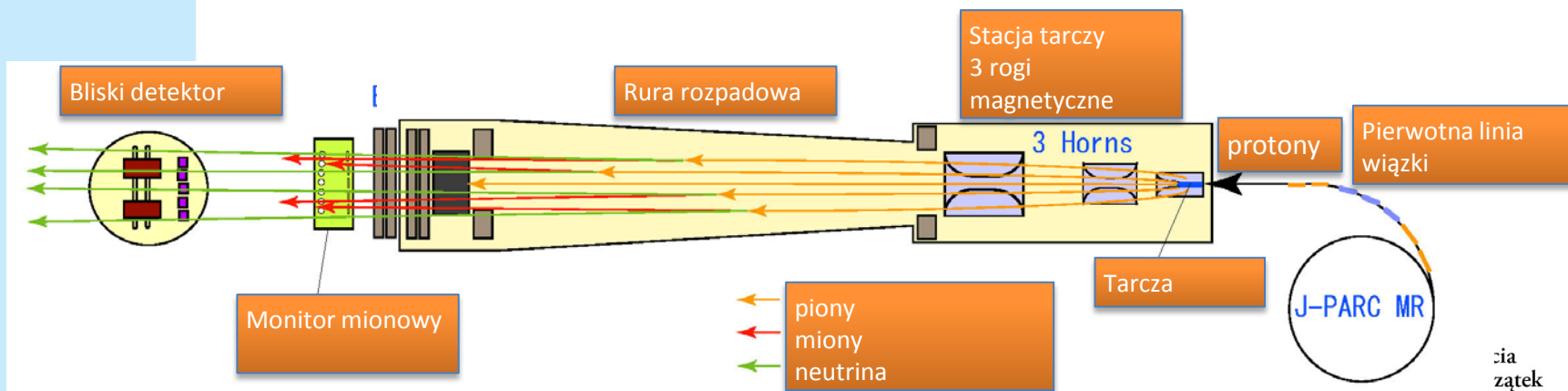


- Bliski detektor ND280 - 280m od punktu umieszczenia tarczy grafitowej





► Sztuczna produkcja neutrin w akceleratorach to analog do produkcji neutrin atmosferycznych !!!

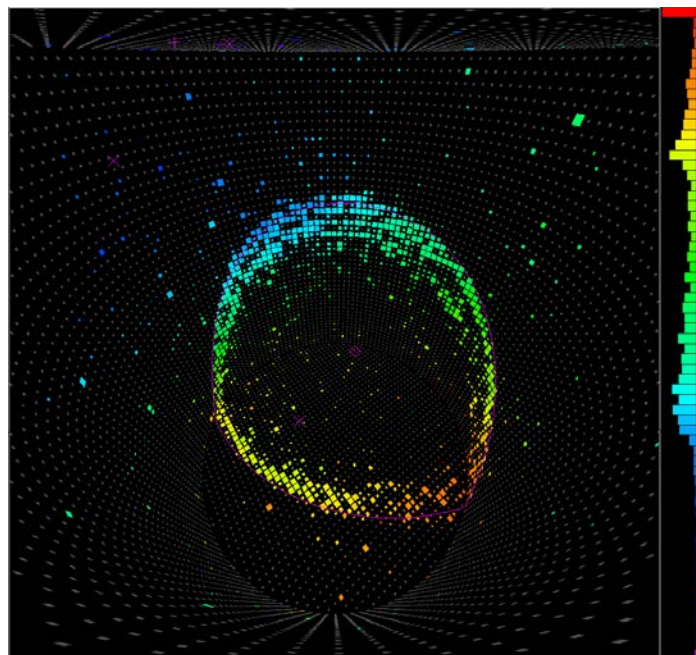


# Daleki detektor Super-Kamiokande

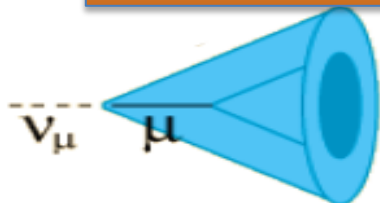
UW

200

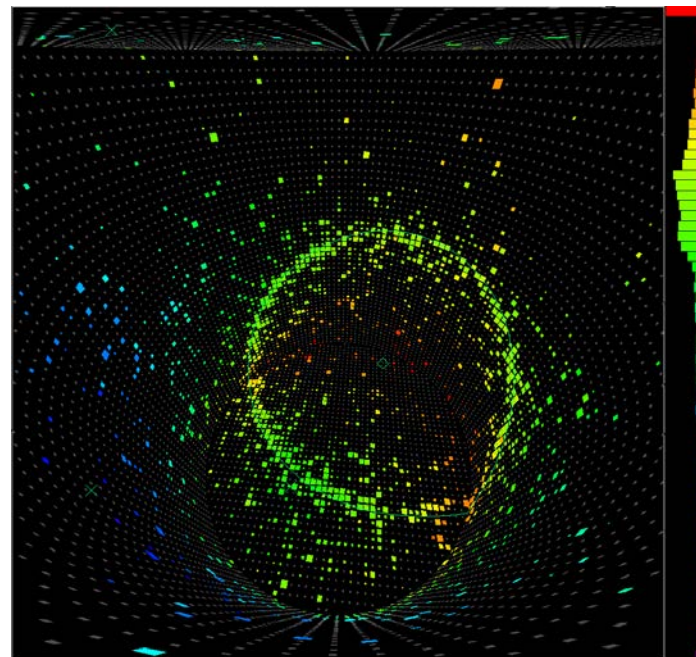
Oddziaływanie  
 $\nu_\mu$ : ostry pierścień



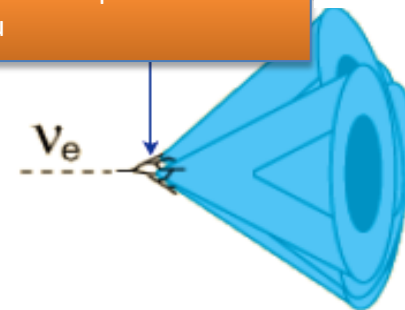
Stożek promieniowania  
Czerenkowa



Oddziaływanie  
 $\nu_e$ : rozmyty pierścień



Wielokrotne rozpraszanie  
elektronu



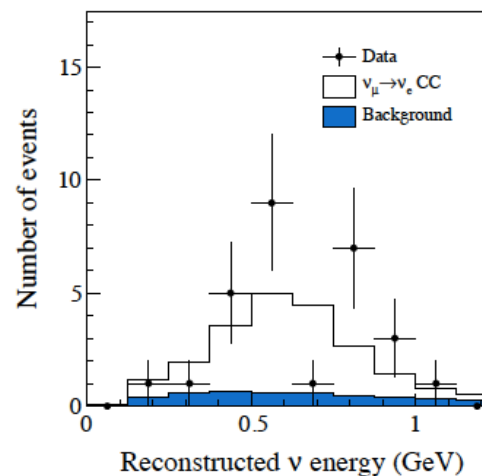
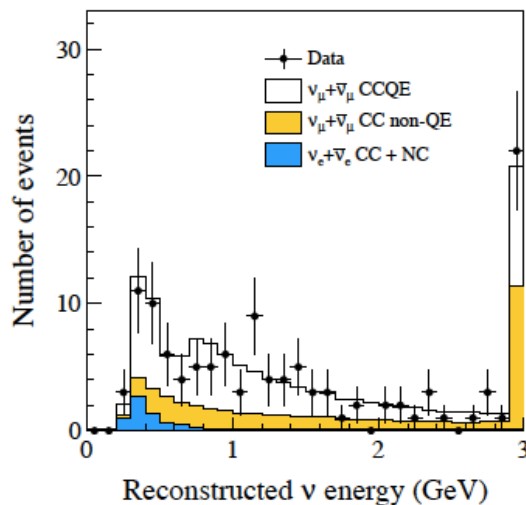


Zanik  $\nu_\mu$  z wiązki  $\nu_\mu$

Pojawianie się  $\nu_e$   
oscylacje typu  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

120 przypadków z  $\nu_\mu$

28 przypadków z  $\nu_e$

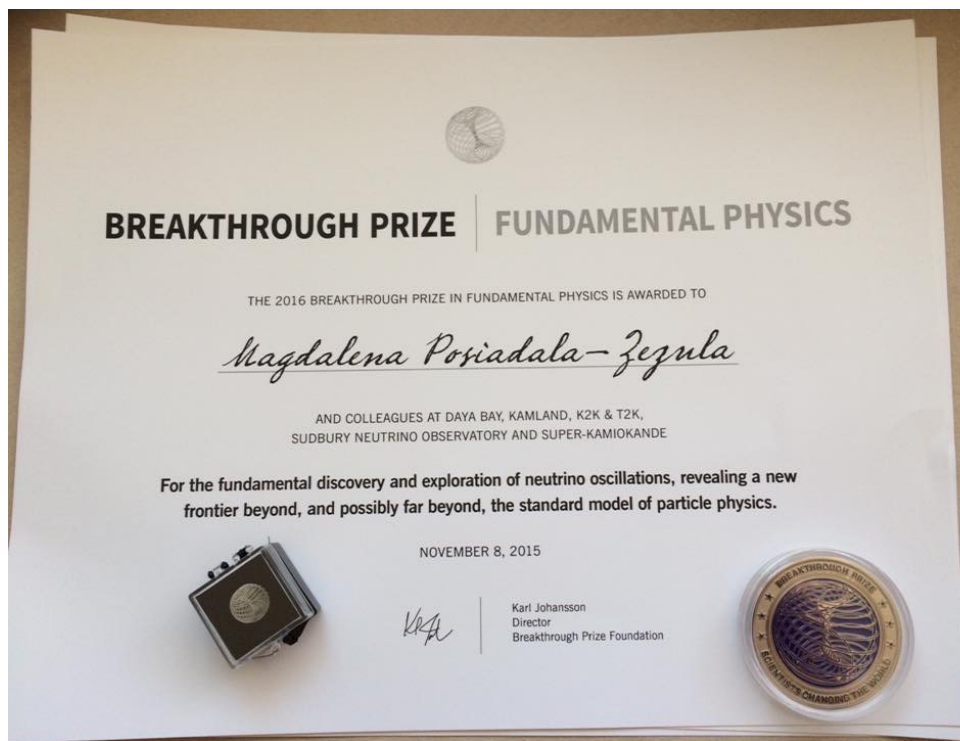


Oscylacje typu  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  po raz 1  
zaobserwowane doświadczalnie właśnie w T2K!!!

# UW<sup>3</sup>

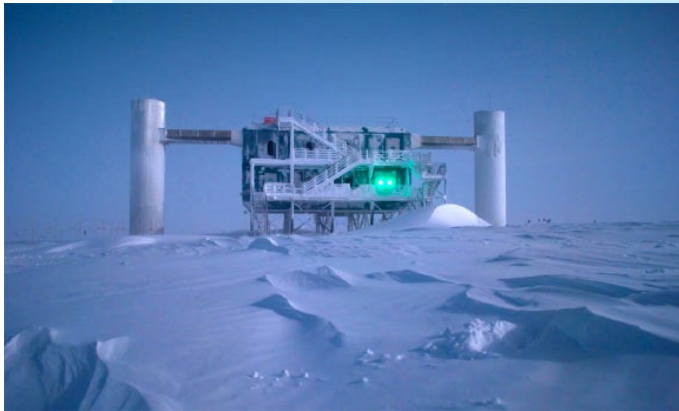
# Nagroda Breakthrough Prize 2016

1. Breakthrough Prize to nagroda finansowa ufundowana m.in. przez założyciela Facebook'a Marka Zuckerberga i jego żonę, współtwórcę GOOGLE Sergey'a Brin'a czy rosyjskiego miliardera Yuri Milner'a.
2. Nagrodę w dziedzinie badań podstawowych otrzymali naukowcy z eksperymentów neutrinowych: **Super-Kamiokande, SNO, KamLAND, Daya-Bay oraz K2K/T2K.**
3. Nagroda to kwota 3mln \$ do podziału na ok. 1370 osób będących autorami najważniejszych publikacji dotyczących oscylacji neutrin:)



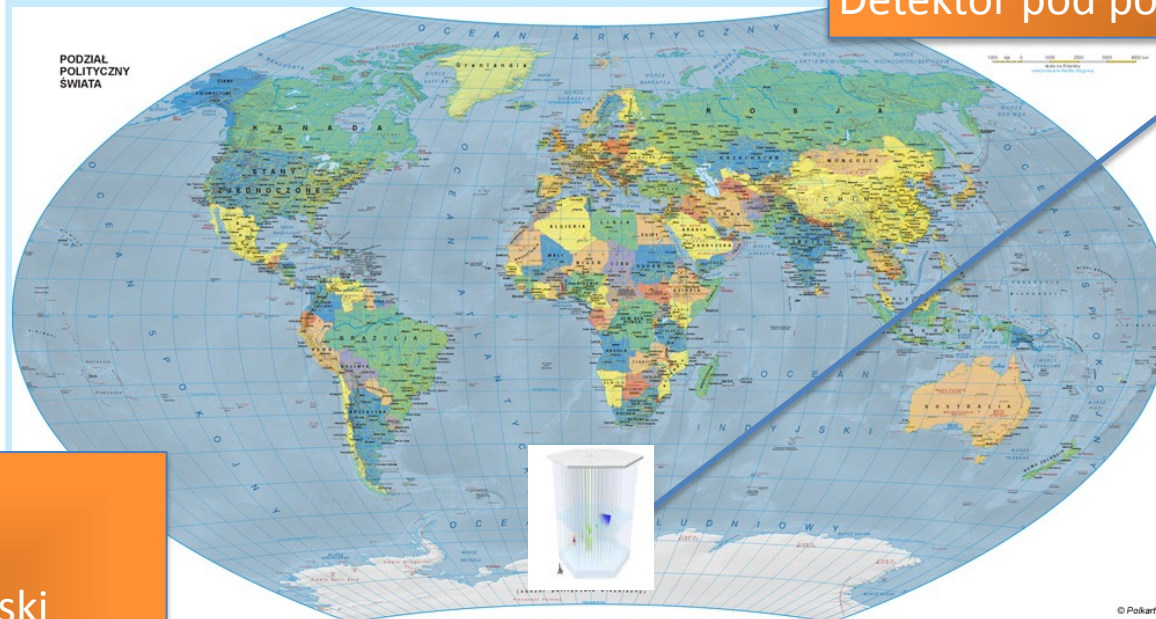
# Inne eksperymenty neutrinowe z udziałem absolwentów Wydziału Fizyki UW

UW



ICECUBE:  
Laboratorium na powierzchni lodu

ICECUBE:  
Detektor pod powierzchnią lodu

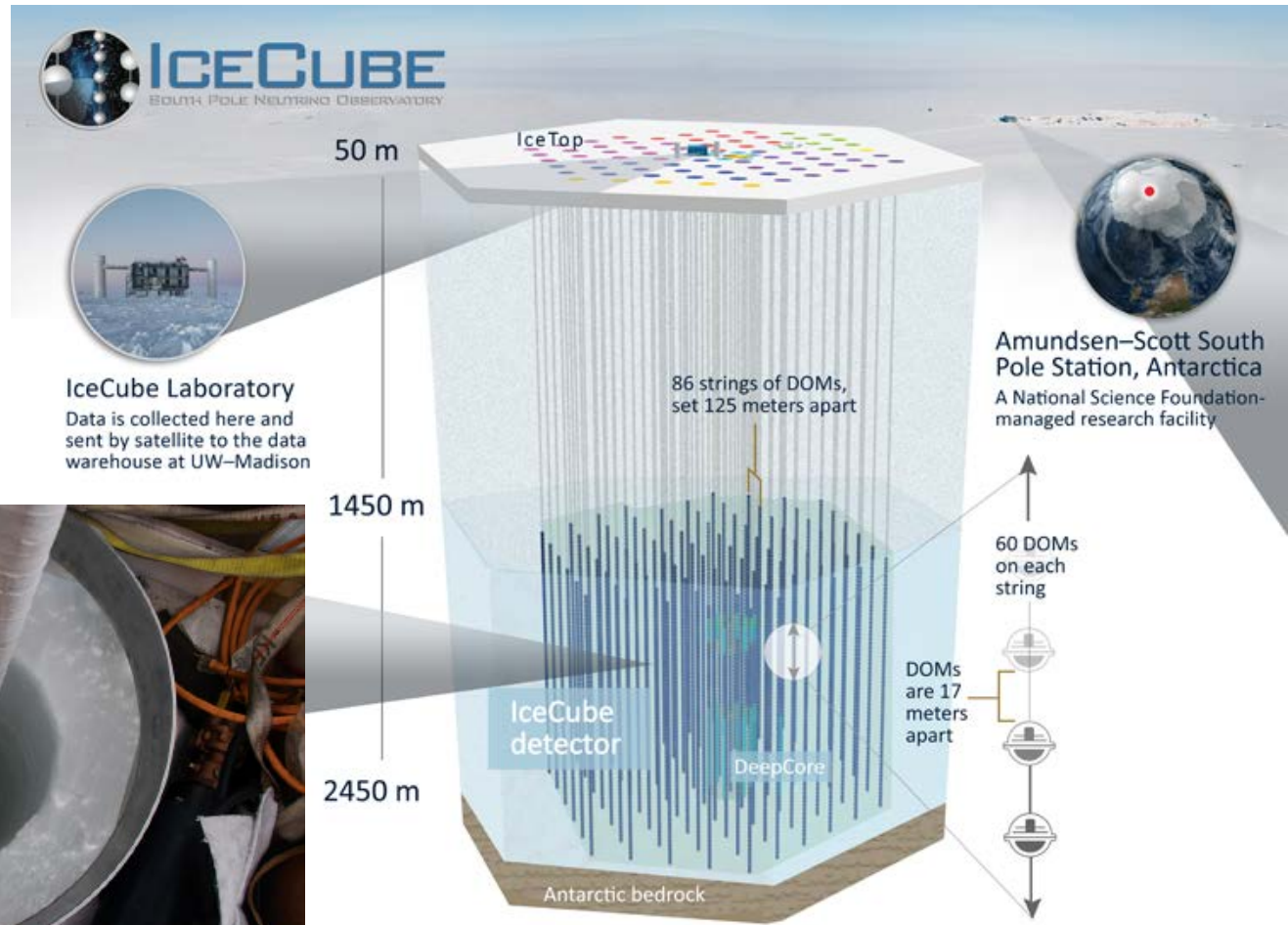


ICECUBE:  
dr Joanna Kiryluk  
dr Tomasz Palczewski

# Eksperyment IceCUBE

UW

2002



fot. Joanna Kiryluk

UW

# Bardzo wysoko energetyczne neutrino pochodzenia pozagalaktycznego

Kaskada w detektorze IceCube

Czas przylotu światła:

czzerwony-wczesny

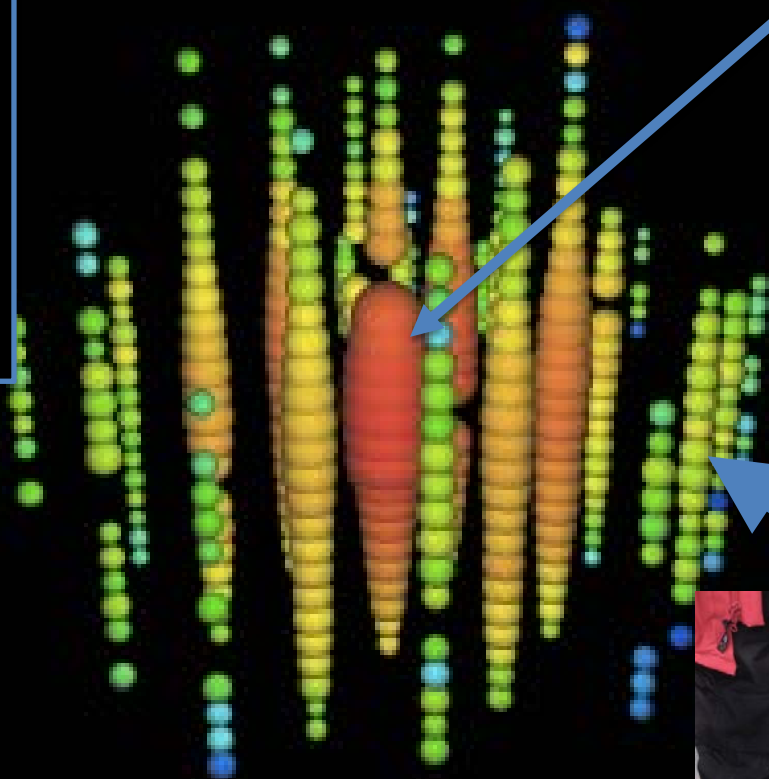
żółty

pomarańczowy

zielony

niebieski-późny

oddziaływanie  
neutrino

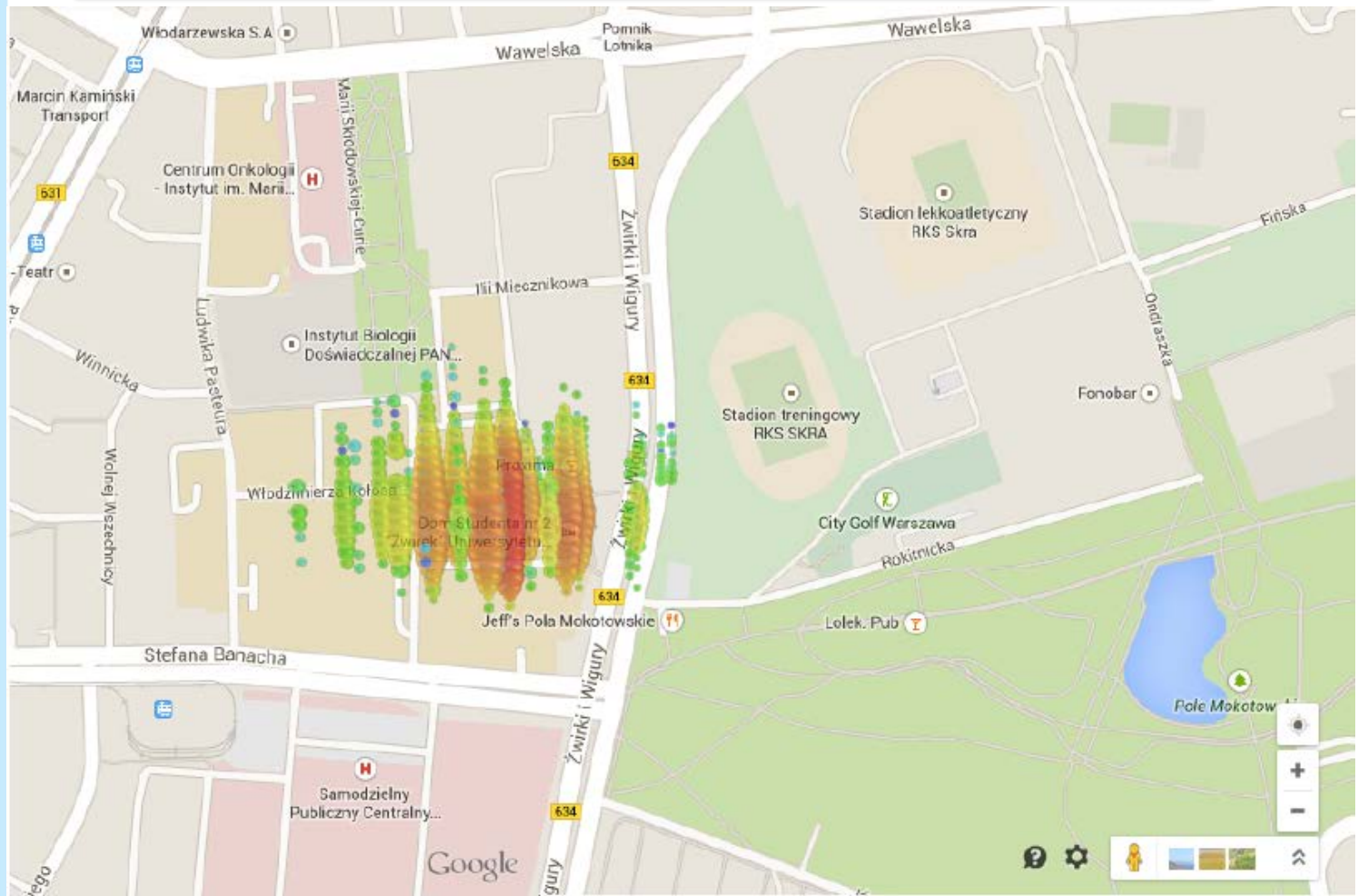


Rozmieszczenie nici 125 m  
Odległość między fotodetektorami 17 m

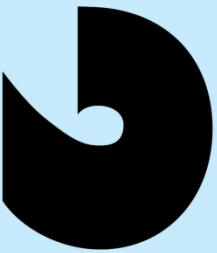


# Eksperyment IceCUBE

Mapa Kampusu Ochota UW wraz z naniesionym przypadkiem oddziaływania neutrina w ICECUBE o bardzo duzej energii

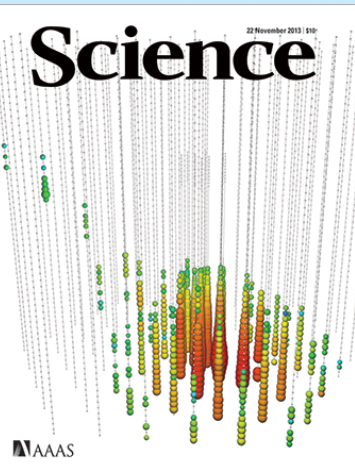


UW



Science

22 November 2013 | 910



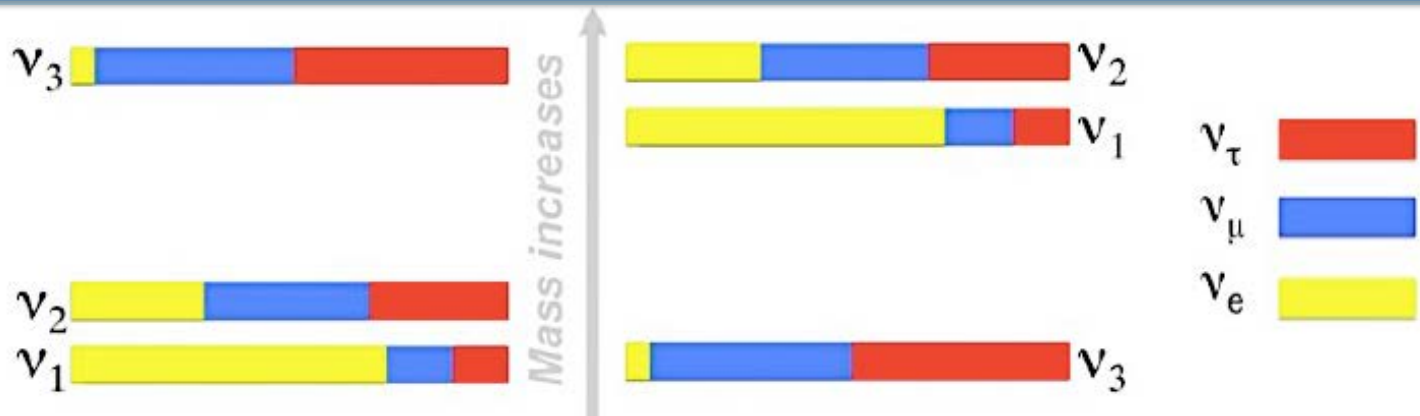
MAAS

# Oscylacje neutrin. Czego jeszcze nie wiemy ?

UW

W modelu z 3 stanami zapachowymi mamy 6 parametrów teoretycznych  
Zmierzonych z nich jest 5.

Obecnie nie znamy w pełni uporządkowania mas neutrin: dwa warianty  
hierachia normalna i odwrócona.



6 parametr, tzw.  $\delta_{CP}$  związany jest z zachowaniem/łamaniem  
symetri ładunkowo-przestrzennej CP neutrin. Może znając  $\delta_{CP}$   
będziemy mogli wyjaśnić obecną symetrię między materią i  
antymaterią we Wszechświecie?

UW<sup>200</sup>

Przyszłe projekty badające  
oscylacje neutrin z udziałem  
naukowców  
z Wydziału Fizyki UW.

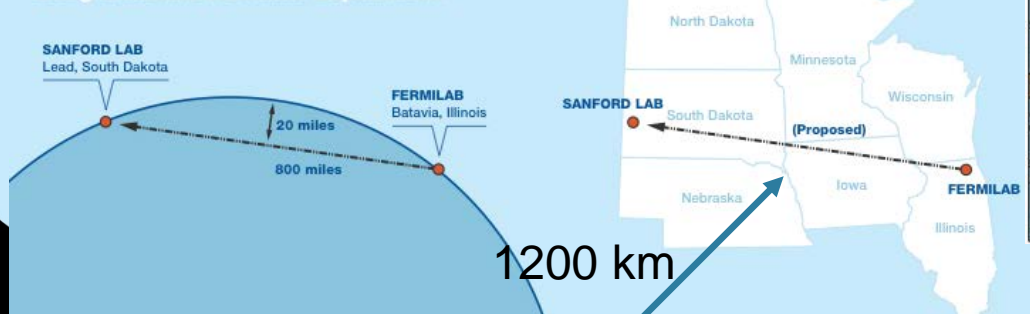


# Przyszłe eksperymenty neutrinowe

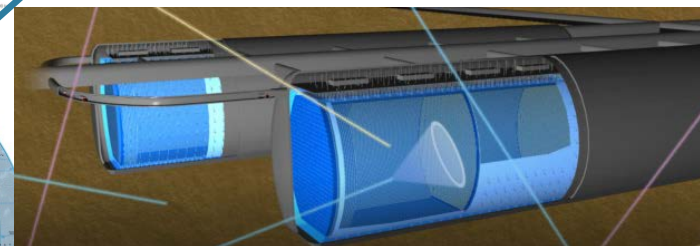
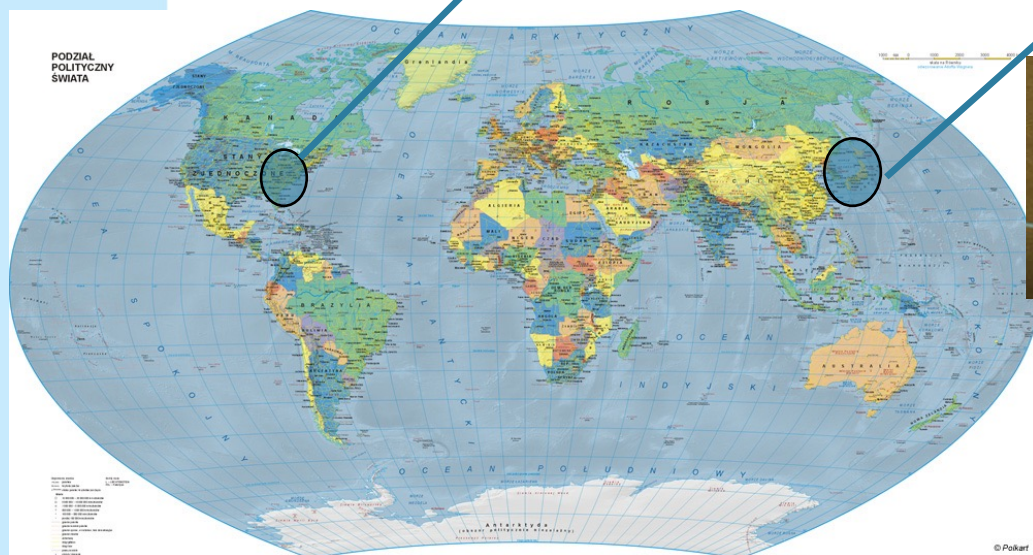
# UW<sup>2</sup>

DUNE, USA

Long-Baseline Neutrino Experiment



T2HyperK, Japonia



25 x Super-Kamiokande

Skala czasowa: start ok.2025 roku

# Naukowiec neutrin w pracy

SK tour Oct. 11, 2014  
Name: Magdalena  
Posiadala-Zezula  
(University of Warsaw)  
Lunch Reservation: Yes  
Bus from Toyama to Mozumi: C  
Bus in the mine: C  
Group in the mine: 2



Dziękujemy za uwagę  
i zapraszamy zainteresowanych na stronę **Warszawskiej  
Grupy Neutrinowej**: <https://neutrino.fuw.edu.pl>

**dr Katarzyna Grzelak (Wydział Fizyki UW)**  
**dr Magdalena Posiadała-Żezula (Wydział Fizyki UW)**

