

Czy warto badać neutrina?

Jan Kisiel, Instytut Fizyki im. A. Chełkowskiego, Uniwersytet Śląski

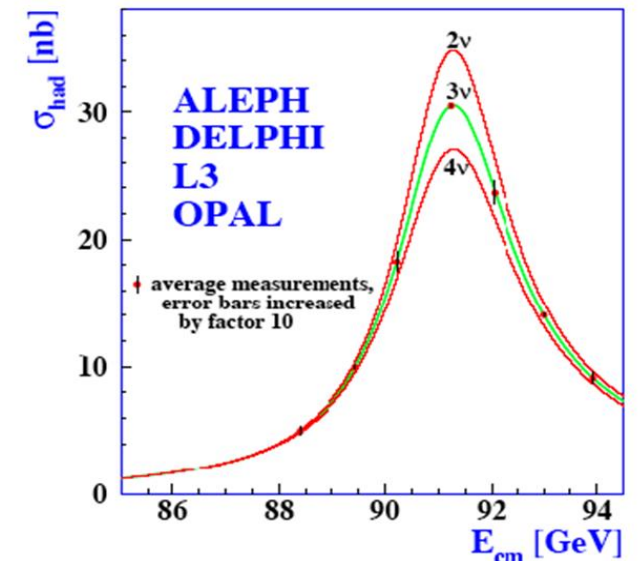
(Zespół badawczy: Fizyka jądrowa w badaniach oddziaływań i jej zastosowania)

(wykorzystano m.in. materiały eksperymentów T2K, Hyper-Kamiokande, oraz moje wykłady i referaty konferencyjne, głównie ICNFP 2019, Colymbari)

Własności neutrin

- Ładunek = 0
- Spin = 1/2
- Oddziałują: tylko słabo (i grawitacyjnie)
- 3 zapachy (elektron, mion, tau) – wynik z CERN/LEP; neutрино sterylne?
- Cząstka Diraca: $\nu \neq \text{anti-}\nu$ lub Majorany: $\nu = \text{anti-}\nu$
- (podwójny bezneutrinowy rozpad $\beta - 0\nu\beta\beta$)
- Masa niezerowa: z eksperymentów oscylacyjnych.
 - masa $\nu_e < 2 \text{ eV}$ (rozpad β trytu)
 - masa $\nu_\mu < 170 \text{ keV}$ (z rozpadu pionów)
 - masa $\nu_\tau < 18 \text{ MeV}$ (z rozpadów leptonu tau)

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
			I II III
			The Generations of Matter



Neutrino wokół nas: wszędzie i bardzo dużo

Naturalne źródła neutrin:

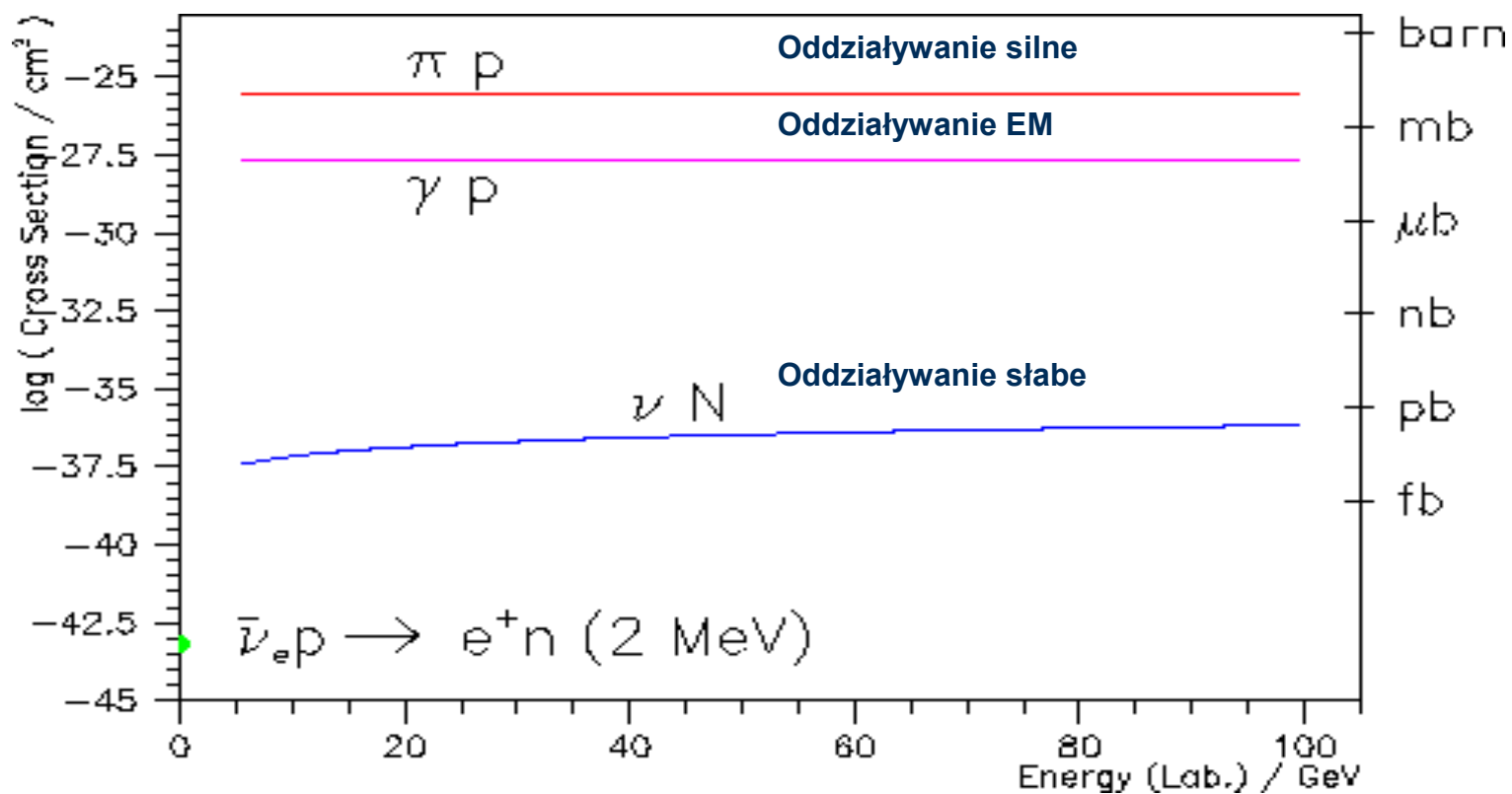
- Neutrino ze Słońca (**neutrino słoneczne**), ok. $10^{11}/\text{cm}^2/\text{s}$ na Ziemi, czyli ponad $10^{14}/\text{cm}^2$ w czasie tego wykładu.
- Neutrino z atmosfery (neutrino atmosferyczne),
- Neutrino z wnętrza Ziemi (**geo-neutrino**),
- **Neutrino z wybuchu Supernowej**, Supernova 1987A wyemitowała w ciągu 20s 100 razy więcej neutrin niż Słońce wyprodukuje w ciągu całego swojego życia,
- Neutrino jako pozostałość po Wielkim Wybuchu (neutrino reliktowe), ok. 300 w cm^3 .
- Wszystko (także my) co zawiera potas ^{40}K , który rozpada się z emisją neutrin. (Przeciętny człowiek zawiera w sobie ok. 16 miligramów ^{40}K , zatem każdy z nas emituje ok. 350 milionów neutrin w ciągu dnia).

Sztuczne źródła neutrin:

- Neutrino z elektrowni atomowych (neutrino reaktorowe), ok. $10^{20}/\text{s}$ dla „typowego” reaktora (1MW).
- **Neutrino z wiązki neutrin**: np. wiązka z JPARC do Kamioka (Japonia, eksperyment T2K).

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

Neutrino b. niechętnie oddziałują z materią



Przekrój czynny, czyli miara prawdopodobieństwa oddziaływania różnych cząstek z materią

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

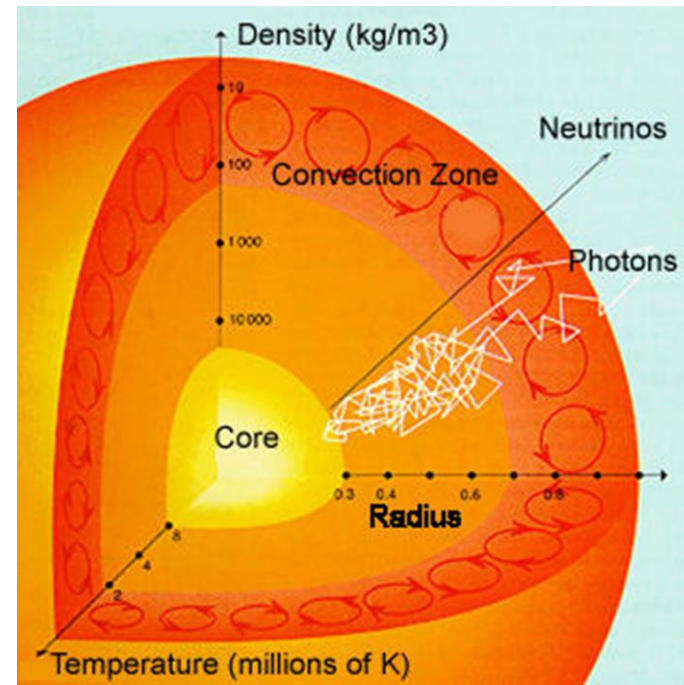
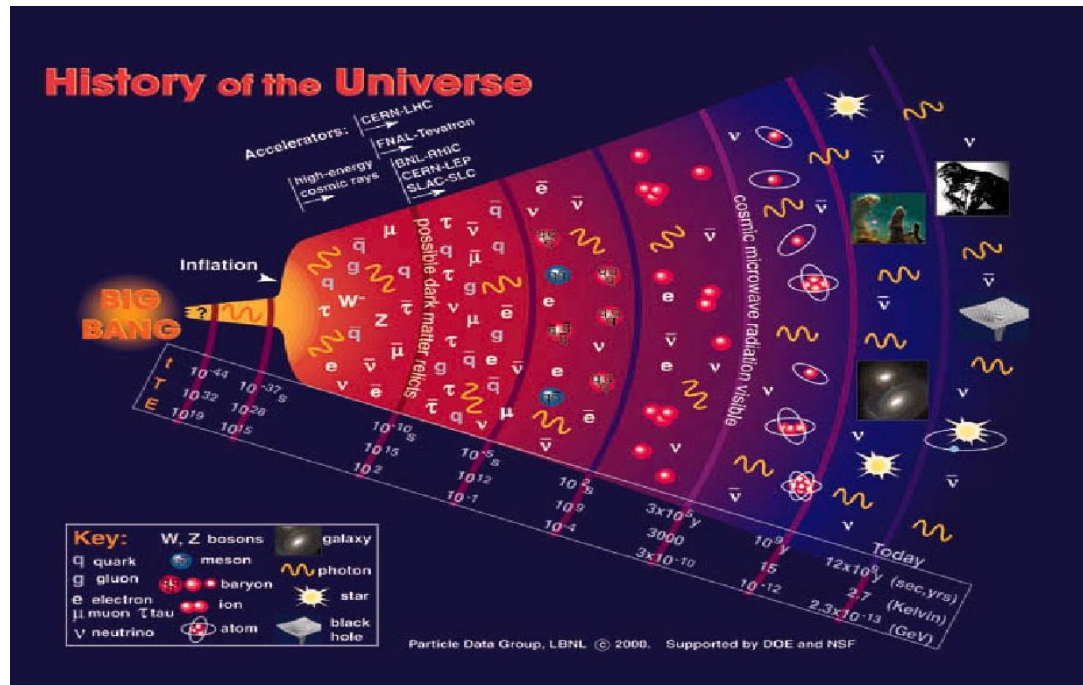
Co trzeba zrobić aby jednak “złapać” neutrino?

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

ale ... czy warto tak się trudzić, aby złapać coś czego jest co prawda bardzo dużo i wszędzie, ale tak naprawdę ... „nic nie robi”?

Tak, warto badać neutrino ponieważ ...

- Neutrino są we Wszechświecie i jest ich bardzo dużo.
- Niosą „niezakłóconą” informację o Wielkim Wybuchu.
- Niosą bezpośrednią informację o wnętrzu gwiazd (Słońca), o Supernowych.
- Pozwalają na weryfikację modeli oddziaływań elementarnych.
- Nie znamy ich wszystkich właściwości.
- Może kiedyś znajdą zastosowanie, jak np. odkrycie indukcji elektromagnetycznej, M.Faraday, 1831.



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

Warunki bariogenezy Sakharova: wyjaśnienie przewagi materii nad antymaterią we Wszechświecie

- 1) Liczba barionowa nie jest zachowana: można to stwierdzić np. obserwując rozpad protonu
- 2) Musi istnieć oddziaływanie łamiące symetrię CP: można to badać np. w eksperymentach neutrinowych
- 3) Procesy łamiące zachowanie liczby barionowej muszą być nierównowagowe

VIOLATION OF CP INVARIANCE, C ASYMMETRY, AND BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE

A. D. Sakharov

Submitted 23 September 1966

ZhETF Pis'ma 5, No. 1, 32-35, 1 January 1967

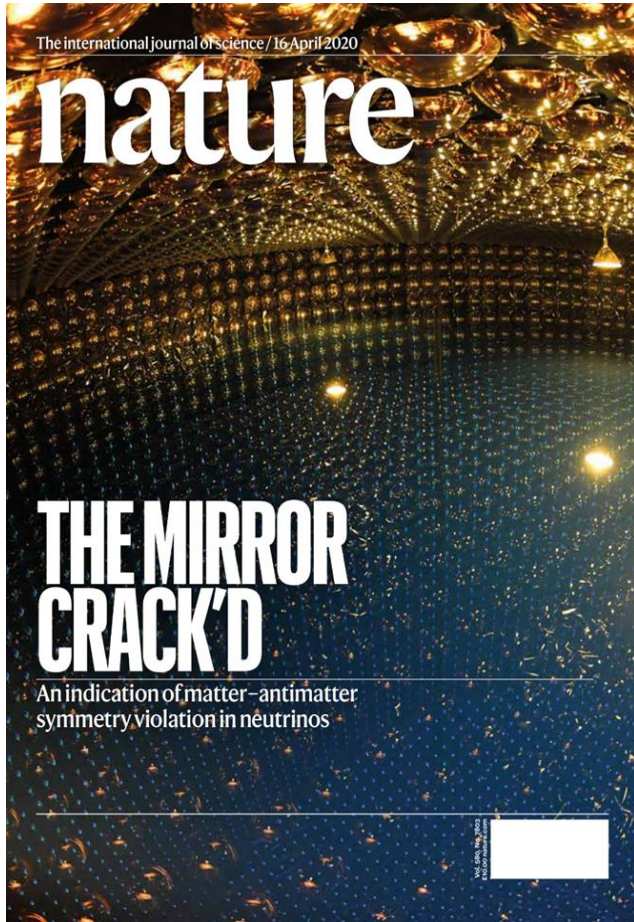
The theory of the expanding Universe, which presupposes a superdense initial state of matter, apparently excludes the possibility of macroscopic separation of matter from anti-matter; it must therefore be assumed that there are no antimatter bodies in nature, i.e., the Universe is asymmetrical with respect to the number of particles and antiparticles (C asymmetry). In particular, the absence of antibaryons and the proposed absence of baryonic neutrinos implies a non-zero baryon charge (baryonic asymmetry). We wish to point out a possible explanation of C asymmetry in the hot model of the expanding Universe (see [1]) by making use of effects of CP invariance violation (see [2]). To explain baryon asymmetry, we propose in addition an approximate character for the baryon conservation law.



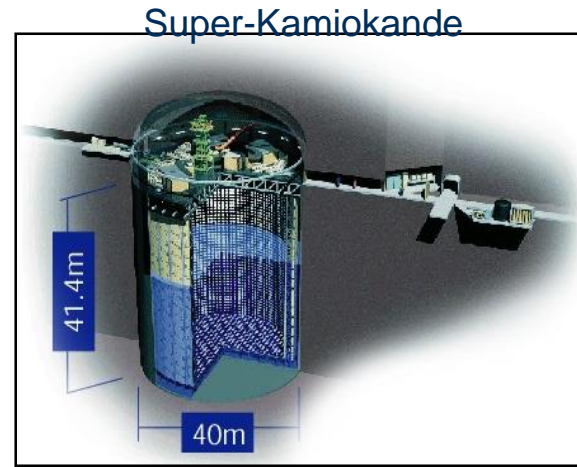
Warunki 1) i 2) są obecnie badane m.in. w eksperymentach T2K i Super-Kamiokande, a z dużo większą precyzją będą badane m.in. w eksperymencie Hyper-Kamiokande

T2K (Tokai-to-Kamioka): eksperyment neutrinowy w Japonii, do roku 2027

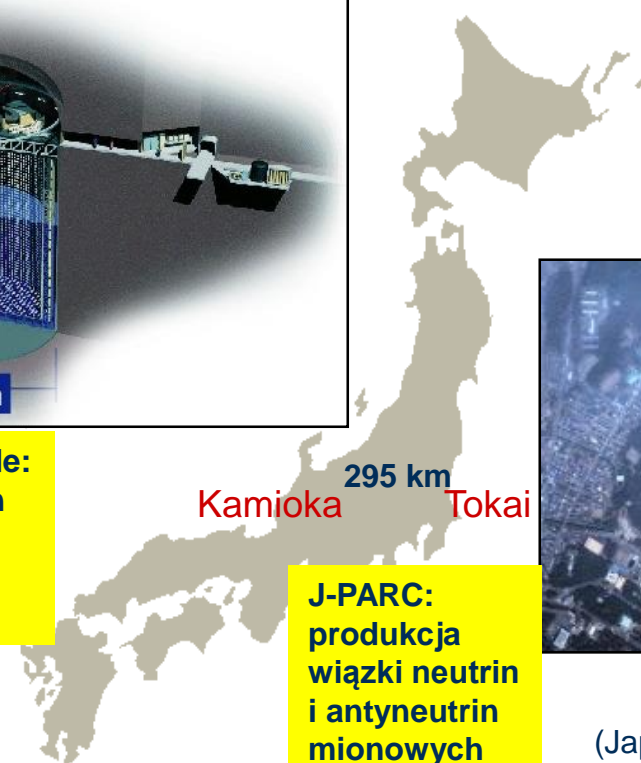
Jeden z wyników T2K: wskazanie za możliwość łamania symetrii CP dla sektora leptonów – różnica pomiędzy oscylacjami neutrin i antyneutrin: neutrino mionowe chętniej oscyluje w neutrino elektronowe niż antineutrino mionowe w antyneutrno elektronowe.



Detektor Super-Kamiokande:
- 50000 ton wody,
- ponad 11000 fotopowielaczy rejestrujących promieniowanie Czerenkowa



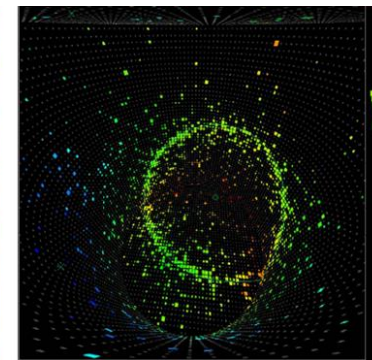
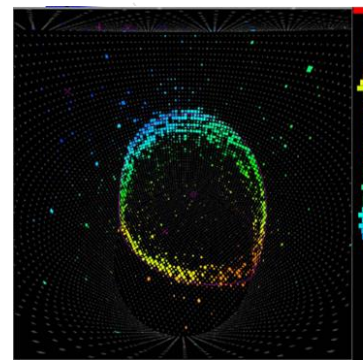
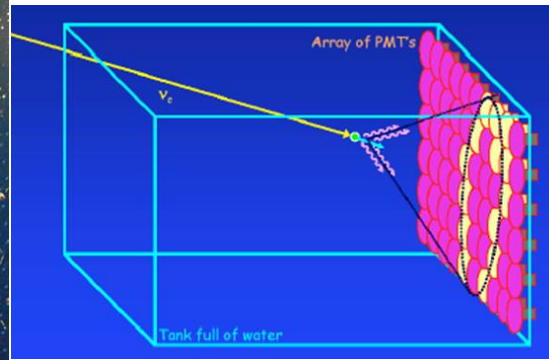
Super-Kamiokande: rejestracja neutrin i antyneutrin elektronowych (po oscylacji)



J-PARC: produkcja wiązki neutrin i antyneutrin mionowych



J-PARC
(Japan Proton Accelerator Research Complex)

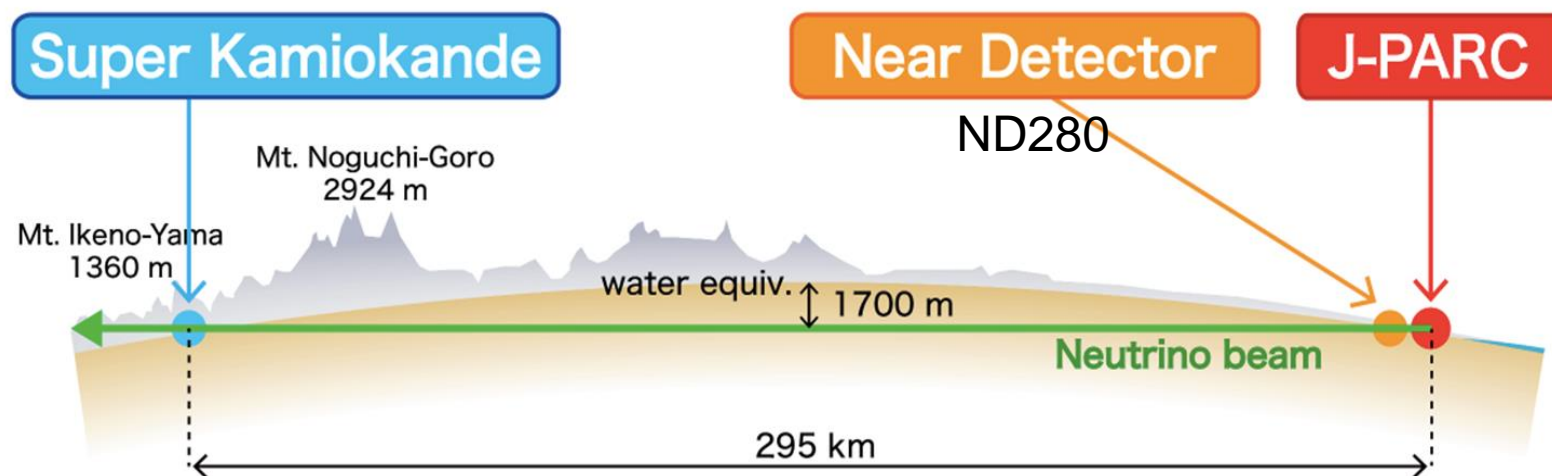
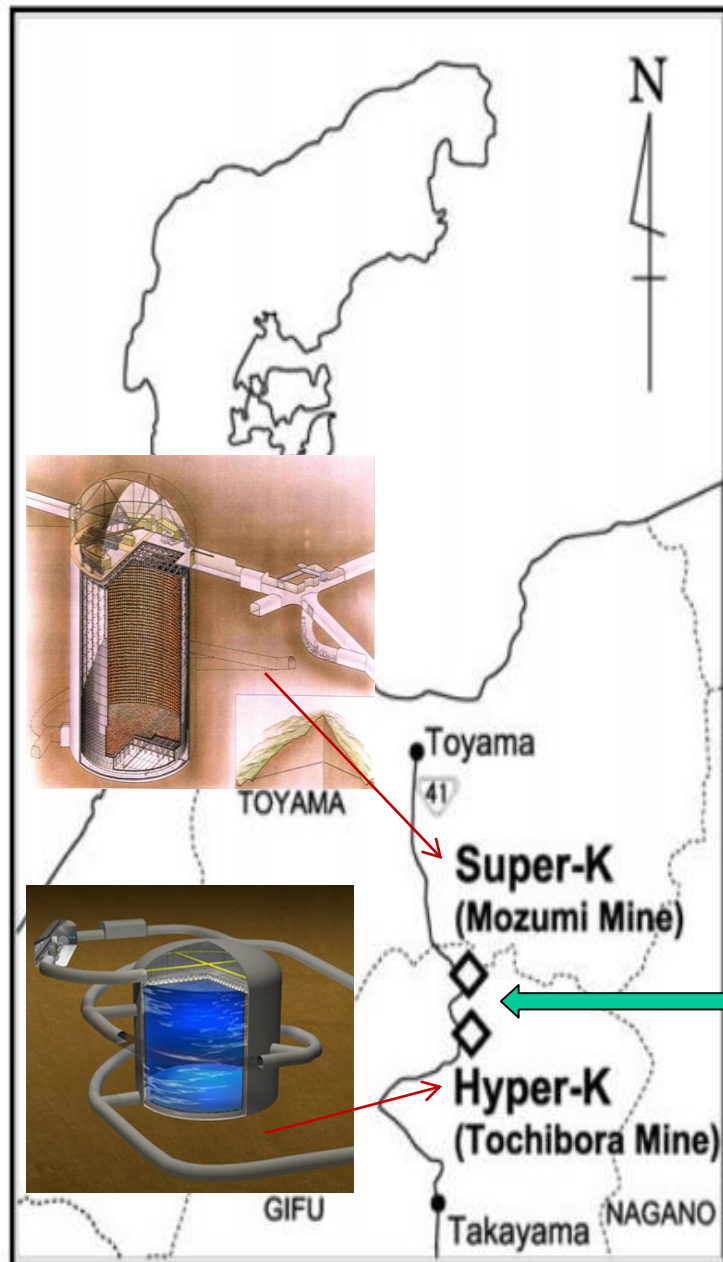


T2K z udziałem polskich grup z Krakowa, Warszawy, Wrocławia i UŚ/IF

Eksperyment Hyper-Kamiokande: od 2027

- Nowy detektor daleki: ponad 250 000 ton wody, 295 km od miejsca produkcji neutrin
- Nowy pośredni wodny detektor: ok. 2 km od miejsca produkcji neutrin
- Zmodernizowany detektor bliski ND280
- Bardziej intensywna wiązka neutrin w J-PARC
- Możliwość efektywnego testowania łamania symetrii CP oraz poszukiwanie rozpadu protonu.

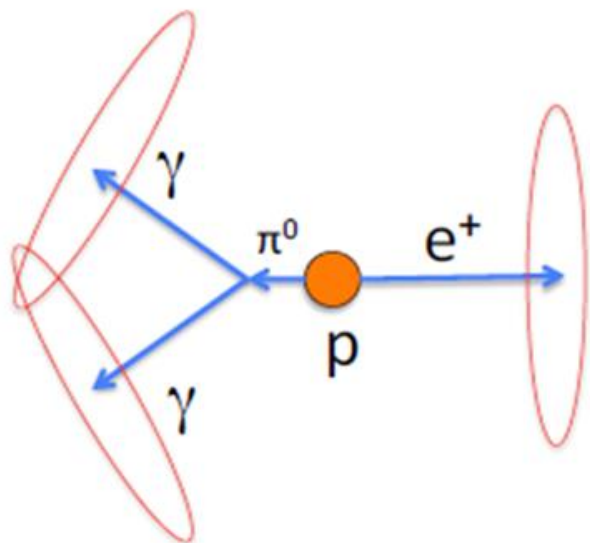
Eksperyment T2K (działający obecnie)



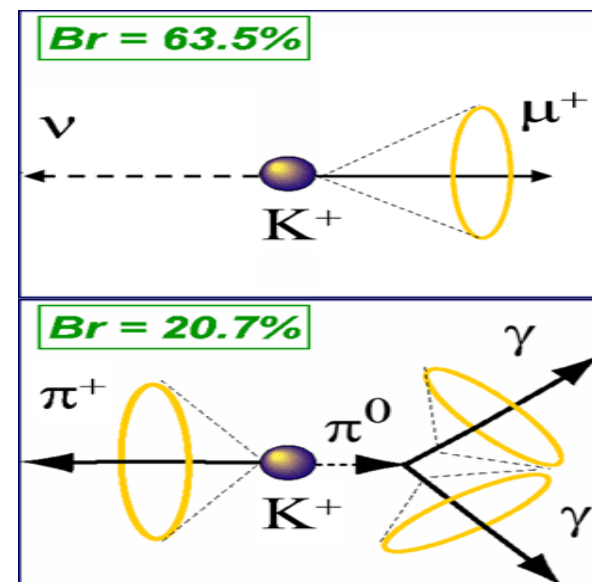
Fizycy z IF UŚ od 2020 roku biorą udział w przygotowaniu eksperymentu Hyper-Kamiokande, w tym w Water Cerenkov Test Experiment (WCTE) w CERN-ie.

Hyper-Kamiokande: rozpad protonu

$$p \rightarrow e^+ \pi^0$$



$$p \rightarrow \nu K^+$$



- 3 pierścienie Czerenkowa (back-to-back)
- Zgodność z tzw. masą niezmienniczą protonu
- Tło “praktycznie” równe zero

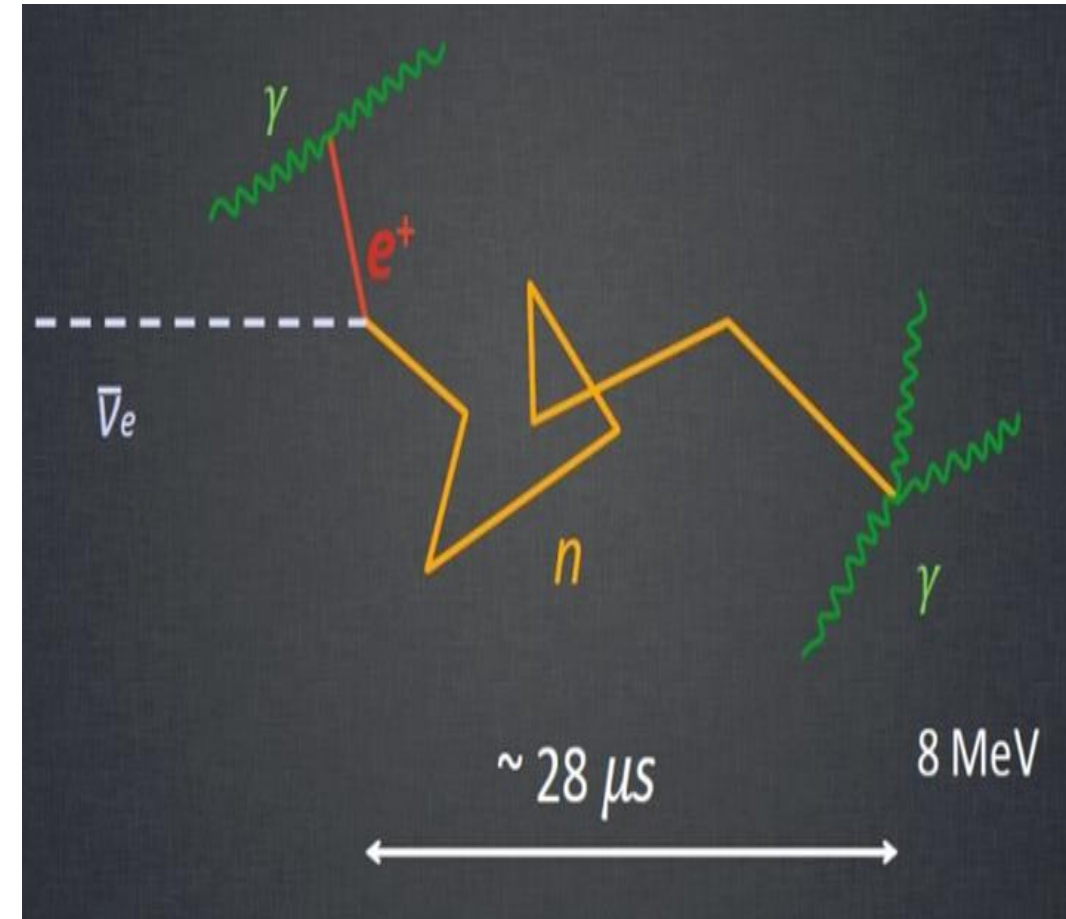
- K^+ poniżej progu na produkcję światła Czerenkowa
- Identyfikacja K^+ przez produkty jego rozpadu

Wyznaczenie nowych limitów na czas życia protonu $\sim 10^{35}$ lat
(rozpad protonu nie został do tej pory zaobserwowany)

Pomysły na praktyczne wykorzystanie neutrin: (1)

- **Monitorowanie pracy reaktorów jądrowych:**

W procesie rozszczepienia 1 jądra ^{235}U (^{239}Pu) powstają średnio ok. 2 antyneutrino elektronowe o energii większej niż 1.8 MeV. Detektor ciekłoscyntylacyjny (1m^3 z domieszką gadolinu), umieszczony 25m od reaktora (elektrownia o mocy 3.5 GWh) rejestruje dziennie ok. 450 przypadków oddziaływań neutrin (uwzględniona wydajność detekcji) w reakcji odwrotnego rozpadu beta: $\text{anti-}\nu_e + \text{p} \rightarrow \text{e}^+ + \text{n}$ (rejestracja w koincydencji szybkiego sygnału z anihilacji e^+ oraz wolnego sygnału z wychwytu neutron przez jądro Gd).

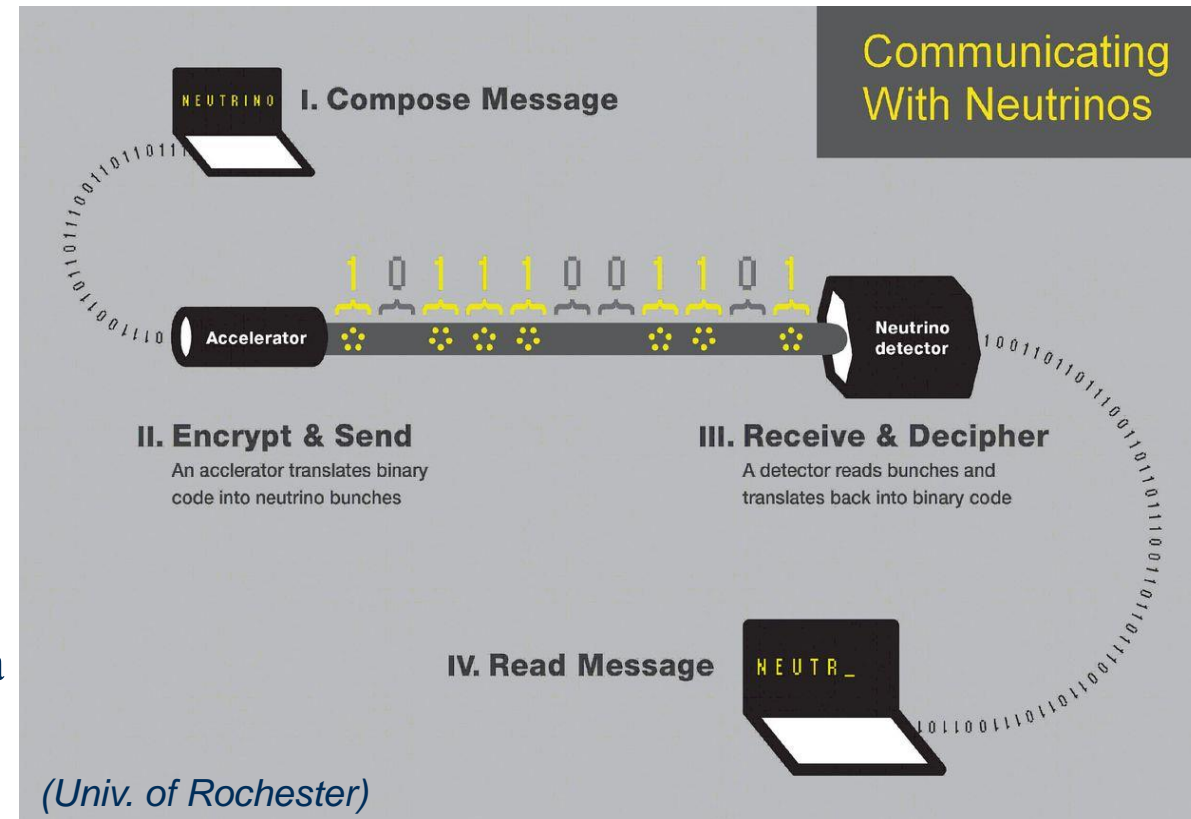


Pomysły na praktyczne wykorzystanie neutrin: (2)

Przesyłanie informacji (telegraf → radio → światłowód → ... → wiązka neutrin?):

W roku 2012 przesłano binarnie informację (słowo NEUTRINO) na odległość 1km, z wykorzystaniem intensywnej wiązki neutrin z FermiLab (USA) i 170 ton detektora MINERvA:

- wykorzystanie wiązki protonów o energii 120 GeV do produkcji wiązki neutrin mionowych,
- Wiązka pulsacyjna: “1” – wiązka włączona i rejestracja mionu z oddziaływania neutrina mionowego, “0” – wiązka wyłączona brak oddziaływania.
- Rejestracja średnio 0.81 oddziaływania neutrin mionowych na 1 puls wiązki protonów.



- **Szybkość przesyłania: 0.1 bit/s.**
- **Transmisja słowa NEUTRINO trwała ponad 6 minut.**

(arXiv:1203.2847v2)

Zamiast podsumowania

„It is clear that neutrino physics and astrophysics will play fundamental roles to our better understanding of particles and the Universe.” *(T.Kajita, Neutrino 2018, Experimental outlook)*

Takaaki Kajita, Uniwersytet Tokijski, laureat nagrody Nobla z fizyki w roku 2015 (wspólnie z A. B. McDonaldem za odkrycie zjawiska oscylacji neutrin, które świadczy o tym, że neutrina mają masę), pracuje m.in w eksperymencie T2K

Czyli warto badać neutrina jeżeli chcemy się dowiedzieć więcej o otaczającym nas Wszechświecie, ... a może kiedyś znajdą zastosowanie praktyczne.