

# ODEJŚCIA I POWROTY NEUTRIN

O tym, czym są neutrino, oraz o eksperymencie Super-Kamiokande i udziale w nim Polaków rozmawiamy z **prof. dr hab. Ewą Rondio** z Narodowego Centrum Badań Jądrowych.

## ACADEMIA: Co to właściwie jest neutrino?

PROF. EWA RONDIO: Jakby dosłownie przetłumaczyć, to „mały neutralny”. To określenie padło, gdy zaproponowano istnienie neutrino, żeby uratować zasadę zachowania energii. Okazało się bowiem, że bez niego nie potrafimy wytłumaczyć, dlaczego w rozpadach  $\beta$  rozkład energii jest ciągły, podczas gdy w rozpadzie dwuciałowym powinna występować jedna stała wartość. Wtedy zresztą uznano ten postulat za bardzo ryzykowny uważając, że takiej cząstki nie uda się zaobserwować. Doświadczalnicy sobie poradzili, acz zajęło to sporo czasu.

Mamy trzy rodzaje neutrino. Pojawiają się one w oddziaływaniu wraz z naładowanymi leptonami i ich nazwy pochodzą od nazw tych leptonów. Neutrino elektronowe towarzyszące elektronowi i neutrino mionowe towarzyszące mionowi znane były od dość dawna. Neutrino taonowe, które towarzyszy ciężkiemu leptonowi tau, odkryto już w obecnym stuleciu.

Dzisiaj używamy już neutrino jako regularnych cząstek. Badamy neutrino z kosmosu, ale budujemy też wiązki neutrino – kontrolowane, sztuczne, wytworzone na Ziemi.

## Czym się różnią neutrino kosmiczne od ziemskich?

Tych docierających z kosmosu jest prawie tak dużo jak fotonów w kosmicznym reliktowym promieniowaniu tła, ale ich energie są tak małe, że nie umiemy ich wykryć. Mimo że ich jest bardzo dużo, są dla nas niewidoczne. Obserwujemy tylko neutrino o wyższych energiach – głównie wysyłane przez Słońce.

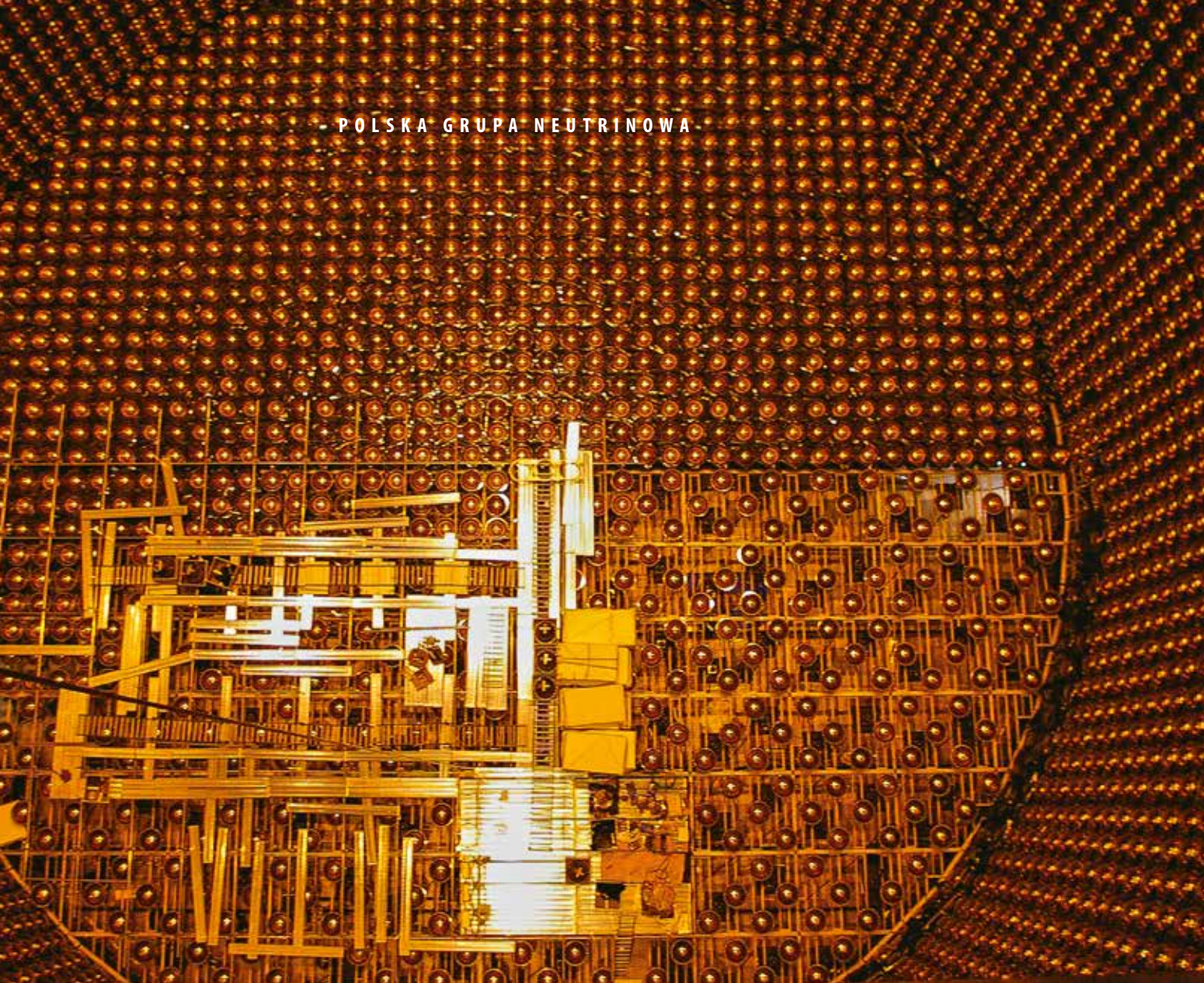
Od wytworzonych na Ziemi na pierwszy rzut oka nie różnią się niczym. Mają jednak trochę inne energie. Z kosmosu przylatuje do nas najwięcej neutrino, a człowiek na Ziemi produkuje najwięcej antyneutrino. Wynika to z faktu, że neutrino słoneczne powstają w wyniku łączenia się lekkich pierwiastków w cięższe, natomiast na Ziemi najwięcej neutrino produkujemy w reaktorach jądrowych, gdzie zachodzą reakcje wywołane przez neutrony, prowadzące do rozszczepienia jąder atomowych. Wydziela się w nich energia i powstają anty-neutrino.

## Czyli w Świerku produkujemy antyneutrino?

Tak, ale nie prowadzimy na nich badań. We wszystkich eksperymentach z neutrino trudność polega na tym, że one niezwykle niechętnie oddziałują. Przelatują przez

PIOTR MIJAKOWSKI





całą Ziemię i większość z nich nawet tego nie zauważa. Gdybyśmy chcieli pomiary z neutronami reaktorowymi prowadzić w Świerku, musielibyśmy strasznie długo czekać na zebranie dostatecznej liczby oddziaływań.

#### **A jaka wiedza o neutronach warta była zeszłorocznej Nagrody Nobla?**

W różnych eksperymentach, zarówno obserwujących neutrona przychodzące do nas ze Słońca, jak i powstające w atmosferze ziemskiej, nie zgadza się bilans neutron. Na podstawie modeli przewidywano, ile Słońce powinno wysyłać neutron elektronowych, a w pomiarach był deficyt. Z kolei w eksperymencie badającym neutrona powstające w atmosferze i przylatujące do detektora z różnych stron stwierdzono, że neutron przylatujących od spodu, które przeleciały przez całą Ziemię, brakuje najwięcej.

Żeby wyjaśnić te deficyty, zaproponowano hipotezę oscylacji. Mówi ona, że neutrono po drodze zmienia swoją tożsamość. Powstaje neutrono pewnego gatunku, później czasami jest tym samym neutronem, a czasami zmienia się w inne. I te zmiany zależą od energii neutrona i od odległości, którą przebyło. Ponieważ jest

to proces cykliczny, czyli neutrona określonego typu znikają, a później znów się pojawiają, nazwano to zjawisko oscylacją. Właśnie za jej odkrycie Nagrodę Nobla w ubiegłym roku otrzymali Takaaki Kajita z eksperymentu Super-Kamiokande, który badał neutrona atmosferyczne, i Arthur B. McDonald z eksperymentu SNO, który badał neutrona słoneczne i pokazał, że nie tylko jeden typ znika, ale też że pojawia się inny. Te eksperymenty pokazały, że suma wszystkich neutron w detektorze jest zgodna z oczekiwaniami, nawet gdy brakuje neutron elektronowych. Jeśli chodzi o neutrona słoneczne, to był przełom; dopóki tylko był deficyt neutron słonecznych, mówiono, że może to model Słońca jest niedokładny. Natomiast pokazanie, że suma się zgadza, tylko neutrona są innego rodzaju, było namacalnym dowodem na oscylacje.

To są prace z przełomu wieku: w 1998 roku eksperyment Super-Kamiokande, gdzie Takaaki Kajita był szefem grupy prowadzącej analizę neutron atmosferycznych, jako pierwszy na konferencji pokazał wyniki ubywania neutron przychodzących od dołu. Eksperyment SNO, w którym Arthur B. McDonald był współautorem pomysłu i jednym z szefów i który pokazał,

Detektor Super-Kamiokande – potężny, wytapetowany fotopowielaczami cylinder umieszczony 1000 m pod ziemią w japońskiej miejscowości Kamioka



że bilans neutrin ze Słońca się zgadza, przeprowadzono we wczesnych latach 2000.

### Gdzie znajdują się te detektory?

Pod ziemią, żeby odciąć się od tła cząstek naładowanych, które przylatują do nas z kosmosu, oddziałują i śmieją nam w detektorze. Super-Kamiokande – znajdujący się w Japonii w miejscowości Kamioka – to cylinder wypełniony bardzo czystą wodą, umieszczony w kopalni, na głębokości ponad 1000 metrów. W jego wnętrzu znajdują się olbrzymie – i niezwykle fotogeniczne – fotopowielacze.

Neutrino znajdujemy w ten sposób, że obserwujemy produkty ich oddziaływania. Te produkty to już są cząstki naładowane, które zostawiają w detektorze ślady, które potrafimy zmierzyć i na podstawie ich pomiarów możemy wyznaczyć energię neutrina, powiedzieć coś o jego właściwościach. Detektor Super-Kamiokande pokazuje nam ślad cząstki naładowanej, która wędruje w detektorze, jeżeli tylko ta cząstka dostatecznie szybko się porusza.

W takich detektorach wykorzystujemy efekt Czerenkowa, w którym cząstka, która się porusza szybciej niż światło w danym ośrodku, świeci. W ośrodku jest to możliwe, bo prędkość cząstki nie przekracza prędkości światła w próżni, która jest największą możliwą prędkością. Detektor eksperymentu SNO też jest detektorem Czerenkowa, tyle że wykorzystywał ciężką wodę, żeby łatwiej było rejestrować oddziaływanie, w którym neutrino pozostaje neutrinem, a tylko na skutek przekazania energii rozbija deuter. Obserwacja produktów takiego rozbitcia pozwoliła pierwszy raz policzyć neutrina mionowe.

Dlatego mówimy o dwóch rodzajach oddziaływań: *charge current*, w których z neutrina powstaje cząstka

naładowana, i *neutral current*, czyli takich, w których neutrino pozostaje neutrinem.

### Jaki udział mają w tych eksperymentach Polacy?

W eksperymencie Super-Kamiokande od samego początku uczestniczyła prof. Danuta Kielczewska. Brała udział również we wcześniejszych eksperymentach czerenkowskich, m.in. w pracach z detektorem IMB, który wspólnie z Super-Kamiokande zaobserwował sygnał neutrin z wybuchu supernowej w 1987 roku. Prof. Kielczewska była tam początkowo jedynym przedstawicielem Polski.

Po powrocie do kraju była współtwórczynią polskiej grupy neutrinowej. I to jest twór, którym chyba możemy się dziś chwalić. Mamy obecnie zespół prawie 30 blisko współpracujących osób.

Grupa powstała w 2000 roku po to, żeby wziąć udział w eksperymentach na wiązce neutrinowej z CERN-u do Włoch, do laboratorium w Gran Sasso, gdzie budowano wielki detektor ICARUS, w którym ślady cząstek naładowanych obserwuje się nie w wodzie, ale w ciekłym argonie.

Później tematyka się poszerzyła, bo eksperyment w Gran Sasso opóźnił się o ładnych kilka lat. Mając zespół gotowy do pracy, podjęliśmy decyzję, że włączymy się w przygotowywany wtedy w Japonii eksperyment T2K, czyli Tokai to Kamioka, który ruszył w 2009 roku, a w 2010 zaobserwował pierwsze neutrina z wiązki. Tokai to miejscowość w Japonii, w której znajduje się akcelerator, który wiązkę neutrin nam przygotowuje. Wysyłamy ją przez całą wyspę Honsiu do Kamioki, gdzie znajduje się podziemny detektor Super-Kamiokande. Ten sam, który pracował wcześniej dla neutrin atmosferycznych.

W eksperymencie T2K polskie grupy brały udział w budowie części detektora rejestrującego oddziaływanie blisko punktu tworzenia wiązki, aktywnie pracują w analizie danych oraz poprawiają modele opisujące oddziaływania neutrin.

Wiązki neutrin są produkowane według recepty, której dostarcza nam przyroda: tak jak neutrina są produkowane w atmosferze. Rozpędzony proton albo jądro uderza w jądro tarczy. W atmosferze szybkie cząstki promieniowania kosmicznego uderzają w jądra azotu i tlenu – w rezultacie powstają mezony, które w swoim rozpadzie produkują neutrina. W sztucznych wiązkach rozpędzamy proton czy jądro, które uderza w tarczę, produkuje mezony, a my staramy się je za pomocą pola magnetycznego zebrać tak, żeby wszystkie leciały w tę samą stronę. A potem czekamy, aż się rozpadną, i wiązka neutrin leci dalej. Ponieważ neutrina nie mają ładunku, nie potrafimy sterować neutrinem po jego powstaniu. Możemy tylko sterować cząstką, z której neutrino powstanie.

### Jak ważny jest udział polskich badaczy w tych eksperymentach?

## Polscy badacze „małych neutralnych”

Historia polskiego udziału w eksperymentach neutrinowych wyznaczających parametry oscylacji neutrin zaczęła się od udziału prof. Danuty Kielczewskiej w eksperymencie IMB, zbudowanym do poszukiwania rozpadu protonu, w którym oddziaływania neutrin były najważniejszym tłem. IMB zaobserwował m.in. neutrina z supernowej 1987A. W tym eksperymencie prof. Kielczewska pracowała na Uniwersytecie w Irvine w grupie prof. Frederica Reinesa. Potem Uniwersytet Warszawski był oficjalnym partnerem od początku projektu Super Kamiokande. Polska grupa neutrinowa powstała w 2000 roku, wykorzystując doświadczenie prof. Kielczewskiej w tej dziedzinie. W pracach grupy od początku uczestniczą zespoły z sześciu instytucji z całej Polski. W większości są to grupy eksperymentalne: w Warszawie z NCBJ, Uniwersytetu Warszawskiego i Politechniki Warszawskiej; w Krakowie z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, której szefem jest prof. Agnieszka Zalewska, w Katowicach z Uniwersytetu Śląskiego, którą kieruje prof. Jan Kisiel. Tylko na Uniwersytecie Wrocławskim mamy grupę teoretyków, którzy zajmują się modelowaniem oddziaływań neutrin – jej szefem jest prof. Jan Sobczyk. Są bardzo cenieni we współpracy T2K, gdzie pracują nad poprawą sposobu opisywania oddziaływań.

## POLSKA GRUPA NEUTRINOWA

Miarą rozwoju i zaangażowania grupy jest to, że w zeszłym roku oprócz Nagrody Nobla za neutrino została też przyznana tak zwana nagroda Breakthrough Prize. To jest nagroda przyznawana zespołom eksperymentalnym i tę nagrodę dostały całe zespoły kilku eksperymentów neutrinowych. Z Polski tę nagrodę dostały 24 osoby! To pokazuje, że grupa jest aktywna. Kryterium przyznania nagrody było współautorstwo publikacji, które uznano za przełomowe.

**Co było w tych publikacjach?**

W tej, za którą nas nagrodzono – pomiar brakującego kąta mieszania, czyli parametru opisującego, jak neutrino zamieniają się jedne w drugie. Dwa kąty były już znane, o tym trzecim wiadomo było, że jest mniejszy niż pozostałe. Eksperyment T2K zmierzył ten kąt w 2011 roku.

**Jakie są plany polskiej grupy na przyszłość?**

Na bliską przyszłość są dwa kierunki. Jeden to kontynuacja T2K. Planowane modyfikacje detektorów pozwolą na zwiększenie dokładności pomiarów i próbę zmierzenia fazy łamania symetrii CP. To bardzo trudny eksperyment, bo opiera się na porównywaniu oddziaływań neutrin i antyneutrin i wyciąganiu wniosków z ewentualnych różnic, które są małe. Drugi kierunek to eksperymenty „z krótką bazą”, w Fermilabie, poszukujące czwartego rodzaju neutrin zwanych sterylnymi. Są sygnały, nie do końca jednoznaczne, że być może coś takiego występuje w przyrodzie. Te neutrino, jeśli w ogóle istnieją, oddziałują jeszcze mniej chętnie niż pozostałe. Ich odkrycie byłoby przełomem, bo oznaczałoby wyjście poza model standardowy, a więc rewolucję w naszym rozumieniu fizyki. W przygotowywanym eksperymencie detektory z ciekłym argonem będą ustawione w różnych, ale stosunkowo małych, odległościach do 2 km od źródła neutrin.

A długoterminowe, co w fizyce neutrin znaczy po roku 2025, są dwa projekty eksperymentów z długą bazą. Jeden w Japonii – podobny do T2K, ale ze znacznie większym detektorem Czerenkowa, drugi w Ameryce, z dużym detektorem z ciekłego argonu. Będą badały klasyczną oscylację trzech rodzajów neutrin, ale bardzo precyzyjnie.

**Dlaczego z naszego punktu widzenia opłaca się w takich eksperymentach uczestniczyć?**

Dla osób bezpośrednio zaangażowanych w badania motorem jest na pewno ciekawość naukowa. Ale udział w tych eksperymentach daje nam też szansę poznawania i ściągania do polskich firm technologii na najwyższym światowym poziomie. To są na przykład technologie rejestracji światła – nie tylko te wielkie fotopowielacze, ale na przykład małe krzemowe detektory, które znajdują coraz więcej zastosowań. Poznajemy te technologie i możemy je sprowadzać do naszego przemysłu w postaci zamówień. Jeżeli w danym eksperymencie jest silna grupa

z jakiegoś kraju, to ma szansę przekonać pozostałych uczestników, żeby właśnie w jej kraju zamówić produkcję. Przemysł nie tylko zarabia pieniądze, ale też zyskuje dostęp do tej technologii. A to daje z kolei preferencje w przyszłych przetargach.

Jest jeszcze jeden aspekt, o którym często się nie myśli. Taka współpraca międzynarodowa to szkoła współpracy, działania w dużym zespole, podporządkowania się, a równocześnie przebicia się ze swoją ideą, ze swoim pomysłem. Coś, co jest nam szalenie potrzeb-

**prof. dr hab. Ewa Rondio**

jest fizykiem, dyrektorem naukowym NCBJ, szefową warszawskiej grupy neutrinowej. Była członkiem Biura Dyrekcji Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN).  
Ewa.Rondio@ncbj.gov.pl



JAKUB OSTALOWSKI

**Neutrino po drodze na Ziemię zmienia**

**swoją tożsamość.** Powstaje neutrino pewnego gatunku, później czasami jest tym samym neutrinem, a czasami zmienia się w inne

ne, a czego nie da się zmierzyć, policzyć ani sprawozdać. Nasze zespoły to grupy kilkuset, a niekiedy kilku tysięcy ludzi, którzy wspólnie coś robią bez żadnych narzędzi administracyjnego nacisku. Szef kolaboracji tak naprawdę nikomu nic nie może nakazać. Może poprosić grupę, żeby coś zrobiła. I to działa! Myślę, że to dużo wnosi do ogólnej kultury kontaktów międzynarodowych i jest absolutnie nie do przecenienia.

Z PROF. DR HAB. EWĄ RONDIO ROZMAWIAŁY  
ANNA ZAWADZKA I AGNIESZKA POLLO