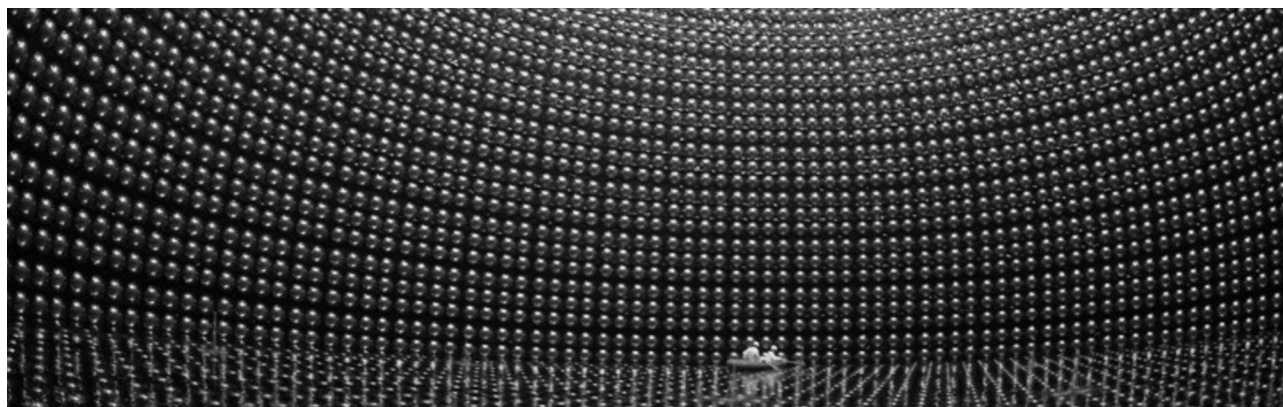
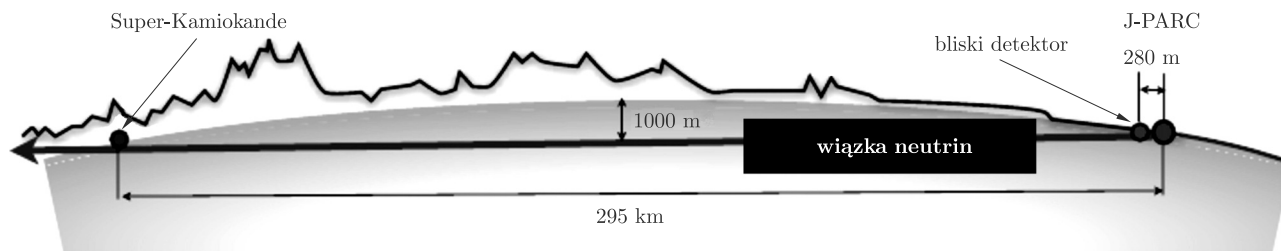


Paweł PRZEWŁOCKI



Czujniki światła (fotopowielacze) w detektorze Super-Kamiokande. Zdjęcie zostało wykonane podczas dokonywanego z pokładu małej łódki przeglądu aparatury w przerwie między doświadczeniami.

Wewnątrz jest całkowicie ciemno. Wydrążony w skale olbrzymi zbiornik, zawierający 50 tysięcy ton ultraczystej wody, komunikuje się z otoczeniem tylko za pomocą impulsów elektrycznych wysyłanych przez tysiące czujników światła, zamontowanych na jego ścianach. Dostęp do tego wyjątkowego urządzenia badawczego jest skomplikowany – wszystko znajduje się kilometr pod ziemią, wewnątrz góry Ike w kopalni na zachodzie Japonii. Naukowcy nadzorujący pracę detektora czujnie obserwują monitory w pokoju kontrolnym – widać na nich błyski światła, od czasu do czasu pojawiające się w detektorze. Ich rejestracja jest sygnałem, że za pomocą naszego zbiornika złapaliśmy jedną z najbardziej nieuchwytnych cząstek elementarnych – neutrin.



Rys. 1. Ogólny schemat eksperymentu T2K.

Trzysta kilometrów dalej na wschód, w nadmorskiej miejscowości Tokai, inna grupa badaczy śledczy nad aparaturą kontrolującą akcelerator protonów (przypominający trochę Wielki Zderzacz Hadronów

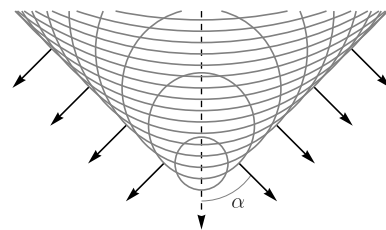
działający w CERN-ie). Od ich efektywnej pracy zależy działanie pobliskiej „fabryki”, produkującej seryjnie wielkie ilości neutrin. Ich wiązka jest wysyłana pod ziemią w kierunku detektora Super-Kamiokande, podziemnego zbiornika opisanego przed chwilą. Jeśli chcielibyśmy przejechać tę trasę samochodem, potrzebowalibyśmy kilku godzin – neutrinom ich podziemna podróż zajmuje zaledwie około milisekundy.

Po co to wszystko? Co tak interesującego dzieje się pomiędzy Tokai a Super-Kamiokande, że kosztem miliardów dolarów zbudowaliśmy eksperyment, w którym tworzymy neutrina – tylko po to, żeby je później łapać? Okazuje się, że w ten sposób jesteśmy w stanie badać niezwykle ciekawe zjawisko oscylacji. Zanim jednak o nim, opowiedzmy więcej o samych neutrinach, bo ciekawe z nich bestie.

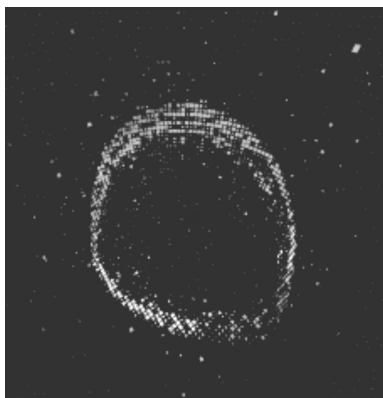
Neutrina są wszędzie. W jednej sekundzie przez ciało człowieka przelatują ich biliony, nie robią nam jednak krzywdy – jako nienaładowane i prawie bezmasowe cząstki oddziałują z materią niezwykle słabo, jedynie bardzo niewielka ich część rozprasza się na jądrach atomowych pierwiastków, z których zbudowany jest otaczający nas świat. To jednocześnie powoduje, że bardzo trudno je badać, bo tylko przez obserwowalne produkty ich reakcji z materią możemy coś powiedzieć o ich własnościach. A są one interesujące, choćby ze względu na to, że neutrina, które do nas dolatują, pochodzą z wielu źródeł: Ziemi, Słońca, atmosfery ziemskiej, reaktorów jądrowych, gwiazd supernowych i innych dalekich obiektów kosmicznych. Badanie tych neutrin może nam wiele powiedzieć o naturze procesów, w których zostały wyprodukowane.

Jak oddziałują neutrina, jeśli już do reakcji dojdzie? Podlegają tylko dwóm z czterech fundamentalnych typów oddziaływań: oddziaływaniom słabym i grawitacyjnym (pozostawiając oddziaływania elektromagnetyczne i silne innym cząstkom). Przykładową reakcją słabą jest promieniotwórczy rozpad beta. W jego wyniku powstaje m.in. neutrina elektronowe – neutrina bowiem występują w trzech rodzajach (zapachach): elektronowym, mionowym i taonowym, i razem ze swoimi naładowanymi braćmi (elektronem, mionem i taonem) tworzą sektor leptonowy na liście cząstek elementarnych. Naładowane leptony rodzą się w oddziaływaniach odpowiadających im neutrin. Łatwo je zaobserwować i w ten sposób dowiedzieć się czegoś o bohaterach tego artykułu, których śladów w detektorach nie możemy zobaczyć. Błyski światła w Super-Kamiokande pochodzą głównie właśnie od mionów i elektronów.

Z neutrinami związane było pytanie, które wisiało nad fizyką cząstek elementarnych przez drugą połowę XX wieku. W wielu eksperymentach, poczynając od lat sześćdziesiątych, obserwowano neutrina pochodzące ze Słońca, jednak liczba zaobserwowanych oddziaływań z ich udziałem była dużo mniejsza od spodziewanej. Teoretycy mieli gotowe rozwiązanie wyjaśniające ten deficyt – neutrina miały podczas swojego lotu oscylować, czyli cyklicznie zmieniać zapach. Ponieważ eksperymenty, o których była mowa, rejestrowały głównie oddziaływania jednego zapachu neutrin (elektronowego), część neutrin



Rys. 2. Zjawisko Czerenkowa. Linia przerywaną zaznaczono tor cząstki naładowanej o prędkości  $v_{cz}$  większej niż prędkość  $v_{św}$  rozchodzenia się światła w ośrodku materialnym. Cząstka ta pobudza ośrodek do świecenia. Okręgi (w trzech wymiarach – sfery) oznaczają możliwe położenia tych fotonów, wyemitowanych w chwili, gdy cząstka naładowana przechodzi przez środek każdego z okręgów. Obwódka tych okręgów, gdzie występuje szczególnie duża koncentracja fotonów, jest stożkiem o kącie rozwarcia  $\arcsin(v_{św}/v_{cz})$ . Fotony Czerenkowa są więc emitowane pod kątem  $\alpha = \arccos(v_{św}/v_{cz})$  do kierunku ruchu cząstki naładowanej.



Rys. 3. Zarejestrowany w detektorze Super-Kamiokande obraz czerenkowskiego stożka światła emitowanego przez poruszający się w wodzie mion. Obraz elektronu wygląda podobnie, ma tylko bardziej postrzępione brzegi, gdyż jest efektem emisji światła przez większą liczbę elektronów kaskady elektromagnetycznej rozwijającej się w wyniku oddziaływania neutrina.

Przepis na wiązkę neutrino mionowych jest prosty. Weź sporo protonów oraz tarczę, np. grafitową. Protony rozpędź i uderz nimi w tarczę. Powstałe w wyniku zderzenia pionu o odpowiednim ładunku uformuj polem magnetycznym w podłużną wiązkę (to samo pole rozproszy piony o nieodpowiednim ładunku) i wprowadź do rury rozpadowej. Oczekaj, aż piony rozpadną się na (anty)miony, te na (anty)neutrino mionowe oraz (anty)elektrony i neutrino (antyneutrino) elektronowe. Inne niż neutrino cząstki zatrzymaj w bloku betonowym na końcu rury.

„uciekała” i nie była w ogóle zauważana. Przyjęcie tego rozwiązania oznaczałoby jednak, iż neutrino mają masę (tylko wtedy bowiem zjawisko oscylacji może zachodzić), a tego nie przewidywał Model Standardowy – obowiązujący w dziedzinie cząstek elementarnych model teoretyczny. Pojawiały się więc również inne hipotezy wyjaśniające problemy z obserwacjami. Niektórzy sądzili, na przykład, iż zrozumienie procesów jądrowych zachodzących w Słońcu jest niewystarczające (w związku z czym nasze przewidywania strumienia neutrino są niewiarygodne). Kilkanaście lat temu okazało się jednak, że pomiary eksperymentów Super-Kamiokande i SNO ostatecznie dowodzą istnienia cyklicznych zmian zapachu zarówno dla neutrino pochodzących z ziemskiej atmosfery, jak i słonecznych. Naukowcom pozostało więc pogodzić się z niedoskonałością dotychczasowej teorii i wyruszyć na ekscytujące badania niezbadanych obszarów Nowej Fizyki.

Teoria zakłada, że oscylacje zachodzą, gdy stany o określonych *zapachach* – tj. te obserwowalne, jak neutrino mionowe czy elektronowe – nie są tożsame ze stanami o określonych masach. Relacja między jednym a drugim zestawem stanów określana jest przez współczynniki, które wygodnie zebrać w tablicę  $3 \times 3$  – nazywa się ją macierzą mieszania Pontecorvo–Maki–Nakagawy–Sakaty. Parametry tej macierzy (uczenie nazywane kątami mieszania i fazą naruszającą symetrię CP) oraz różnice kwadratów mas stanów o określonych masach to stałe natury, których poszukujemy podczas studiowania oscylacji. W ciągu ostatnich 15 lat badań poznaliśmy wartości większości tych parametrów – a więc dowiedzieliśmy się wiele o szczegółach dotyczących oscylacji. Wiemy, że w przypadku neutrino atmosferycznych neutrino mionowe (o energiach rzędu GeV) oscylują głównie w neutrino taonowe; w przypadku neutrino słonecznych produkowane w Słońcu neutrino elektronowe (ich energia jest rzędu MeV) podlegają przemianie w mionowe i taonowe. Podobna transformacja zachodzi dla antyneutrino elektronowych produkowanych w reaktorach jądrowych. Jednak do niedawna jeden parametr, nazywany kątem  $\theta_{13}$ , wymykał się obserwacjom, gdyż oscylacje neutrino, pozwalające na jego zbadanie, są bardzo mało prawdopodobne. Parametr ten pełni ważną rolę – jeśli jest większy od zera (czyli związane z nim oscylacje zachodzą), możliwe jest badanie za pomocą eksperymentów oscylacyjnych różnic w oscylacjach neutrino i ich antycząstek – antyneutrino. Odkrycie takiego zjawiska (mówimy tu o przyszłych eksperymentach, bo żaden istniejący nie jest w tej chwili w stanie dokonać odpowiedniego pomiaru) miałoby duże znaczenie dla wielu teorii kosmologicznych, m.in. pomogłoby wyjaśnić asymetrię między materią i antymaterią we Wszechświecie.

Aby wreszcie przyspilić ten oporny fragment fizycznej rzeczywistości, fizycy potrzebują dwóch rzeczy. Pierwszą jest sztuczna wiązkę neutrino mionowych o energiach trochę poniżej 1 GeV. Przy kilkusetkilometrowym dystansie między źródłem a detektorem energia taka zapewnia maksymalną liczbę wynikających z naszego trudno mierzalnego parametru  $\theta_{13}$  oscylacji neutrino mionowych w neutrino elektronowe. Druga rzecz to czuły i dobrze sprawdzony detektor pozwa-

lający wykryć te ostatnie, na przykład... tak, właśnie wspomniany na początku tego artykułu Super-Kamiokande, przeżywający właśnie swą drugą naukową młodość. Cały schemat doświadczalny nazywa się mało poetycko T2K (skrót od *Tokai To Kamioka*, co jest po prostu opisem drogi przebywanej przez neutrina) i bierze w nim udział kilkadziesiąt fizyczek i fizyków z wielu krajów, w tym z Polski (również autor tego tekstu). Jest to jeden z nielicznych eksperymentów, w których mamy kontrolę nad mierzonymi neutrinami w miejscu ich produkcji – a więc możemy wytwarzać neutrina o pożądanych właściwościach, jak również mierzyć te właściwości, zanim jeszcze proces oscylacji będzie miał miejsce. Pomiar przed oscylacjami (przy źródle wiązki, za pomocą tzw. detektora bliskiego) i po ich zajściu (za pomocą Super-Kamiokande, czyli detektora dalekiego) pozwala na precyzyjne pomiary nawet niewielkich efektów oscylacyjnych.

Eksperyment T2K zaczął działać w roku 2010, a już półtora roku później ogłosił (pomimo przerwy w zbieraniu danych spowodowanej wielkim trzęsieniem ziemi w 2011 roku), że istnieją poważne przesłanki, iż zachodzą oscylacje neutrin mionowych w elektronowe, a więc że parametr  $\theta_{13}$  jest niezerowy. Po dwóch kolejnych latach możemy już mówić o pewności tej obserwacji: zaobserwowaliśmy dotąd aż 28 neutrin elektronowych w Super-Kamiokande, a gdyby oscylacje nie zachodziły, powinniśmy ich widzieć mniej niż 5! Efekt jest więc wyraźny i jednoznaczny. Jest to wielki sukces eksperymentu i jego międzynarodowej ekipy.

W świecie nauki istnieje ostra konkurencja – tak było i tym razem. Gdy w Japonii obserwowaliśmy kolejne błyski światła pochodzące od oddziaływań neutrin elektronowych, 3000 km dalej, w południowych Chinach, inna ambitna ekipa naukowa przeprowadzała eksperyment, który również miał na celu pomiar parametru  $\theta_{13}$ , ale w zupełnie inny sposób – poprzez pomiar oscylacyjnego zanikania antyneutrin elektronowych z reaktorów jądrowych elektrowni Daya Bay. Ten pomiar również zakończył się sukcesem (pomiar o dużej pewności pojawił się nawet wcześniej niż w przypadku T2K).

O eksperymencie Daya Bay pisze na następnej stronie Piotr Zalewski.

Co dalej? O oscylacjach wiemy już sporo, ale nie wszystko! Teraz czas na doświadczalne badanie różnic między oscylacjami neutrin i antyneutrin – planowane są nowe, większe eksperymenty, mogące mierzyć się z tak trudnym wyzwaniem. A to tylko część możliwości, które daje nam fizyka neutrin. Niedawno eksperyment IceCube, umieszczony w antarktycznej czapie lodowej na biegunie południowym, poinformował o pierwszej w historii obserwacji wysokoenergetycznych neutrin pochodzących z kosmosu, rozpoczynając w ten sposób erę neutrinowych obserwacji astrofizycznych. Przyszłość rysuje się więc wielce interesująco.