



Neutrino – cząstki XXI wieku?

Krzysztof Fiałkowski

Instytut Fizyki UJ

Można śmiało powiedzieć, że na przełomie XX i XXI wieku jednymi z najintensywniej badanych obiektów fizycznych są neutrino. Na liście Nagród Nobla z fizyki w ostatnim dwudziestolecu aż trzykrotnie znajdujemy prace dotyczące neutrino: w 1988 roku Leon Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger otrzymali nagrodę za wykonany ćwierć wieku wcześniej eksperyment dowodzący istnienia dwu rodzajów neutrino, w 1995 roku po półwieczu nagrodzono „doświadczalnego odkrywcę neutrino” – Fredericka Reinesa, a w 2002 roku Raymonda Davisa i Masatoshi Koshibę badających neutrino, które nadchodzą do nas ze Słońca i innych źródeł „kosmicznych”. W najważniejszym indeksie prac naukowych ISI można sprawdzić, że przed dziesięciu laty publikowano rocznie około pięćset prac poświęconych neutrinom, a w 2005 roku opublikowano ich ponad tysiąc czterysta. Niektóre prace sprzed ośmiu lat zebrały ponad dwa tysiące cytowań. Jak wytłumaczyć tak niezwykle zainteresowanie cząstkami, które nie wchodzi w skład otaczającej nas „zwykłej” materii i oddziałują z nią tak słabo, że wydają się nie mieć na nią żadnego wpływu?

Po pierwsze, wypada przyznać, że historia badań neutrino jest naprawdę niezwykła¹. Jest to chyba jedyna cząstka, której „datę urodzin” znamy z dokładnością do dnia. W dniu 4 grudnia 1930 roku Wolfgang Pauli, wielki fizyk niemiecki (laureat Nagrody Nobla, ale za prace niezwiązane z neutrinami), napisał do kolegów zebranych na posiedzeniu oddziału Towarzystwa Fizycznego sławny list, zaadresowany żartobliwie do „szanownych radioaktywnych pań i panów”. W liście tym zaproponował, aby wytłumaczyć anomalie obserwowane przy badaniu tzw. rozpadów beta istnieniem nieznanego dotąd neutralnej cząstki, która powstaje w tych rozpadach (obok rejestrowanego przez aparaturę elektronu). Cząstkę tę nazwał zresztą „neutronem” i dopiero w parę lat później, po odkryciu przez Chadwicka neutralnego partnera protonu wchodzącego w skład jąder atomowych, wielki fizyk włoski Enrico Fermi zaproponował, aby tej właśnie cząstce nadać nazwę wymyśloną przez Pauliego, a „cząstkę Pauliego” nazwać po włosku zdrobniale „neutrino”, gdyż dane sugerowały, że jej masa była znacznie mniejsza od mas protonu i neutronu.

¹ Obszerniejsze omówienie historii badań neutrino do 1998 roku zamieściłem w książeczce *Opowieści o neutrinach*, ZamKor, Kraków 1998. Nagrody Nobla za prace dotyczące neutrino i inne najważniejsze odkrycia z tej dziedziny były już omawiane w *Fotonie* 60, 66, 69, 74, 79, 82.

Skoro neutrino miało być obojętne elektrycznie, jego detekcja musiała być trudniejsza niż rejestracja elektronu, co tłumaczyło dotychczasową „niewidzialność” neutrino. Pauli dopuszczał możliwość, że prawdopodobieństwo oddziaływania neutrino z materią jest niewiele mniejsze (np. dziesięć razy) niż dla fotonu o podobnej energii. Wkrótce jednak inni wybitni fizycy, Bethe i Peierls, oszacowali to prawdopodobieństwo (na podstawie analizy średnich czasów rozpadu beta) i okazało się, że jest ono o wiele rzędów wielkości mniejsze. Nie tylko cała Ziemia, ale nawet Słońce nie stanowi istotnej przeszkody dla neutrin – prawdopodobieństwo oddziaływania pojedynczego neutrino podczas przejścia przez Słońce jest znacznie mniejsze od $\frac{1}{2}$ (dla neutrin o energiach typowych dla rozpadów beta). Po zapoznaniu się z obliczeniami Bethego i Peierlsa Pauli oświadczył, że stawia skrzynkę szampana każdemu, kto zdoła zarejestrować oddziaływanie neutrin.

Zakład wydawał się całkiem bezpieczny, ale już za życia Pauliego oddziaływanie neutrino z materią zostało jednak zaobserwowane. Wy tłumaczenie tej pomyłki fizyka znanego z niezwyklej wręcz intuicji jest dość proste: Pauli nie wiedział, że jądra atomów ciężkich pierwiastków, takich jak uran lub pluton, ulegają rozszczepieniu po zderzeniu z neutronem. Nie mógł więc przewidzieć, że proces ten może zachodzić w formie reakcji łańcuchowej, w której podczas każdego kolejnego rozszczepienia powstaje kilka nowych neutronów zdolnych do zainicjowania kolejnych rozszczepień. Taki proces zachodzi w bombie atomowej, a w formie kontrolowanej – w reaktorze jądrowym. Powstają przy tym ogromne ilości jąder bogatych w neutrony i swobodnych neutronów, które ulegają rozpadom beta, produkując strumienie neutrin miliony razy silniejsze niż z wszelkich źródeł znanych w 1930 roku. Jeśli nawet prawdopodobieństwo oddziaływania pojedynczego neutrino w aparaturze jest rzędu jednej bilionowej, z pewnością zarejestrujemy przynajmniej kilkadziesiąt oddziaływań, gdy przez aparaturę przeleci kilka dziesiątków bilionów neutrin!

W rzeczywistości doświadczenie takie jest bardzo trudne, bo reaktor jest oczywiście potężnym źródłem wielu innych rodzajów promieniowania i odróżnienie oddziaływań neutrin od pozostałych możliwych procesów wymaga bardzo wyrafinowanych metod eksperymentalnych. Nie będziemy ich tu omawiać; zainteresowany czytelnik może znaleźć szczegóły w licznych podręcznikach i książkach popularnych. Wspomniany już Frederick Reines wraz ze swoim współpracownikiem Clyde'em Cowanem (który nie dożył niestety Nagrody Nobla) prowadzili długo takie badania w latach pięćdziesiątych XX wieku i zmuszeni byli do przeniesienia aparatury z Hanford do innego, potężniejszego reaktora w Savannah River, zanim osiągnęli sukces. Odkrywczy zawiadomili oczywiście Pauliego o swoim triumfie, ale nie dostali nie tylko szampana, ale nawet telegramu z gratulacjami, który Pauli podobno wysłał...

Tymczasem okazało się, że sama natura dostarczyła nam powszechnie dostępnego źródła neutrin, oferującego strumienie tych cząstek porównywalne ze

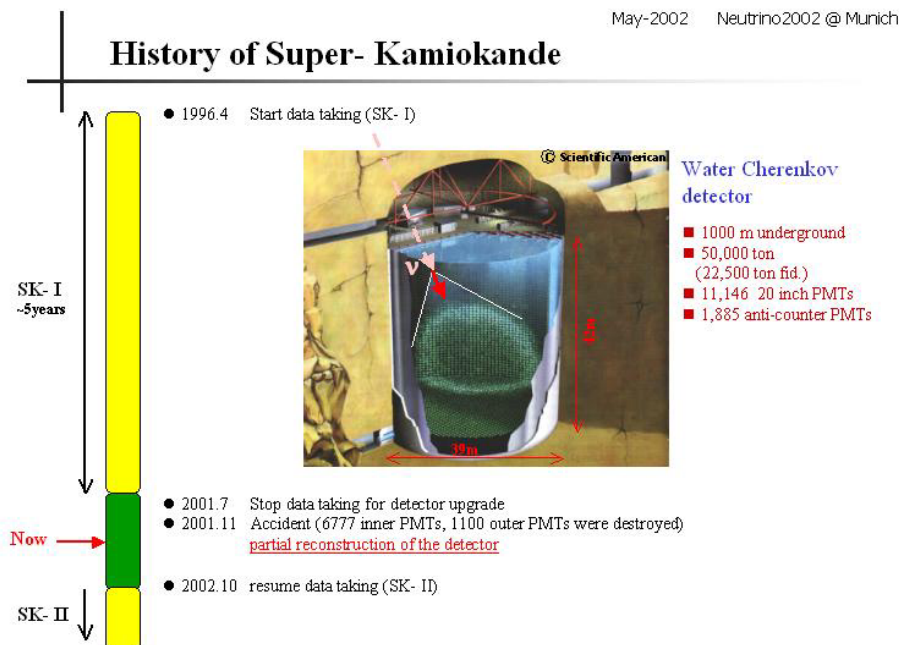
strumieniami neutrin powstających w reaktorach. Źródłem tym jest Słońce, które czerpie energię z reakcji jądrowych zachodzących w jego wnętrzu. Podczas tych reakcji powstają tak ogromne ilości neutrin, że nawet na Ziemi oddalonej o 150 milionów kilometrów powinna być możliwa ich obserwacja. Przez każdy centymetr kwadratowy powierzchni Ziemi (a więc także i naszych ciał) przelatuje w każdej sekundzie ponad 60 miliardów neutrin pochodzących ze Słońca! Na szczęście niewiele z nich oddziałuje w naszym ciele nawet w ciągu całego życia.

Rejestracja neutrin „słonecznych” nie jest jednak łatwa. Wspomniany wyżej Raymond Davis skonstruował także w latach pięćdziesiątych służącą do tego celu aparaturę, której głównym elementem był umieszczony w starej kopalni Homestake wielki zbiornik wypełniony czterochlorkiem węgla (tani środek czyszczący). Neutrino przenikały w głąb Ziemi (pochłaniającej większość innych rodzajów promieniowania), oddziaływały w zbiorniku z jądrami chloru i zmieniały je w jądra radioaktywnego izotopu innego pierwiastka – argonu. Co kilka dni przepłukiwano zbiornik gazem, który „zbierał” argon, a następnie mierzono liczbę rozpadów jąder argonu, oceniając w ten sposób liczbę oddziaływań neutrin. Wynik był zaskakujący – przez niemal pięćdziesiąt lat systematycznie obserwowano o połowę mniej oddziaływań, niż przewidywała teoria! Wydawało się, że są tylko dwa możliwe wyjaśnienia: albo aparatura „gubi” przypadki, albo Słońce wysyła mniej neutrin, niż powinno.

Ostatecznie okazało się jednak, że i analiza eksperymentu, i teoria opisująca Słońce były poprawne. Nie uwzględniono innego efektu: możliwości przemiany neutrin powstających w Słońcu w neutrino innego rodzaju. Istnienie dwu rodzajów neutrin stwierdzono już w latach sześćdziesiątych XX wieku we wspomnianym wyżej eksperymencie Ledermana, Schwartza i Steinbergera, a trzecie neutrino odkryto pośrednio w dziesięć lat później (zarejestrowano zaś już w naszym stuleciu). Neutrino dwu nowych rodzajów nie mogły inicjować reakcji wykorzystywanej w aparaturze Davisa, co tłumaczyło obserwowany deficyt. Kolejne eksperymenty potwierdziły, że neutrino „słoneczne” ulegają w drodze na Ziemię przemianie, a podobny efekt występuje też dla neutrin powstających w atmosferze ziemskiej. Wśród tych eksperymentów kluczowym był zainicjowany przez Masatoshi Koshibę eksperyment Kamiokande, w którym oddziaływania neutrin w podziemnym zbiorniku (zawierającym 50 tysięcy ton czystej wody) obserwowano dzięki rejestracji tzw. promieniowania Czerenkowa, wysyłanego przez cząstki powstające w tych oddziaływaniach (elektrony i miony).

Efekt przemiany, czyli tzw. oscylacji neutrin, jest efektem kwantowym i jego analiza wymaga zaawansowanych metod matematycznych. Z praktycznego punktu widzenia bardzo ważne jest, że może on zachodzić tylko dla cząstek o niezerowej masie. Tymczasem żadne dotychczasowe doświadczenia nie pozwoliły na zmierzenie mas neutrin; dostarczały one jedynie górnej granicy, czyli maksymalnej możliwej wartości masy zgodnej z danymi. Granica ta obniżała się szybko

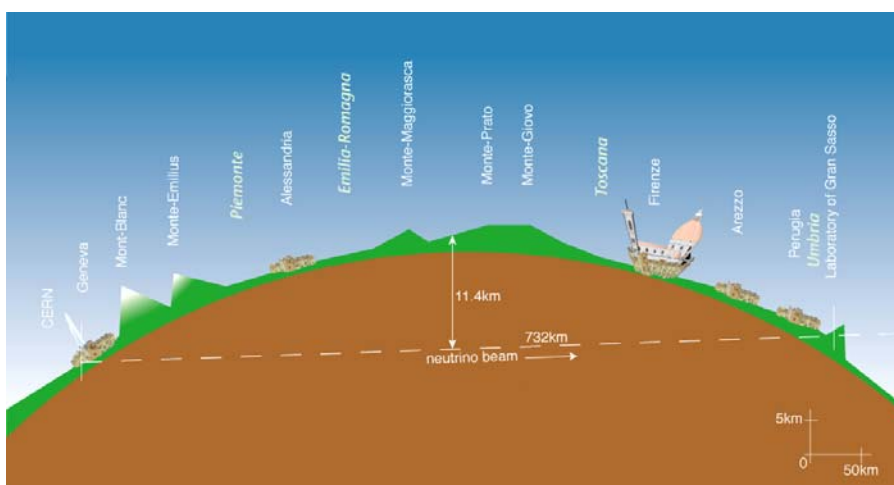
i pod koniec XX wieku wiadomo już było, że neutrino jest setki tysięcy razy „lżejsze” od elektronu, cząstki o najmniejszej zmierzonej dotąd masie. Wydawało się więc naturalne przyjęcie, że neutrino ma masę zerową. Teraz dowiedzieliśmy się, że nie jest to prawda! Wymaga to modyfikacji obowiązującego obecnie w fizyce modelu oddziaływań elementarnych, tzw. modelu standardowego.



Oscylacje neutrin są tak fascynujące, że fizycy postanowili zbadać je na wiązce kontrolowanej lepiej niż neutrino słoneczne i „atmosferyczne”. Wysłano więc do detektora eksperymentu Kamiokande wiązkę neutrin z odległego o paręset kilometrów ośrodka akceleratorowego KEK. Zauważmy, że wiązka taka nie wymaga rury próżniowej ani innej „prowadnicy” – ziemia jest praktycznie całkowicie przezroczysta dla neutrin! Dotychczasowe wstępne wyniki tego eksperymentu zwanego „K2K” potwierdzają dane z wcześniejszych eksperymentów. Mamy nadzieję, że kolejny eksperyment, w którym wiązka neutrin z ośrodka CERN pod Genewą dotrze pod Alpami do odległego o siedemset kilometrów podziemnego laboratorium Gran Sasso we Włoszech, dostarczy dokładniejszych danych o oscylacjach, pomoże wyznaczyć masy neutrin i teoretycznie wyjaśnić ich wartości.

Przedstawione wyżej fakty nie wyczerpują bogatej listy przyczyn atrakcyjności fizyki neutrin. Do badania oscylacji neutrin przeprowadzono w Japonii kolejny

eksperyment, w którym rejestrowano neutrino z wszystkich reaktorów odległych od detektora o mniej niż tysiąc kilometrów. Łatwo można sobie wyobrazić, że po precyzyjnym sprawdzeniu teorii oscylacji podobny eksperyment może służyć do zdalnej kontroli pracy reaktorów. Do stwierdzenia, czy dane państwo przestrzega zasad pokojowego wykorzystania energii jądrowej, nie będzie już potrzebna inspekcja MAEA. W przedstawionym ostatnio projekcie, graniczącym z fantastyką, proponuje się nawet użycie potężnej wiązki neutrin w celu zdalnego niszczenia nielegalnych zapasów broni jądrowej.



Innym zastosowaniem tego samego detektora neutrin był przeprowadzony ostatnio eksperyment, w którym zmierzono radioaktywność wnętrza Ziemi. Wyniki sugerują konieczność modyfikacji obowiązujących obecnie modeli naszej planety; wydaje się, że rozpady jąder ciężkich pierwiastków odegrały w jej ewolucji większą rolę, niż dotąd zakładano. Wielkie nadzieje wiąże się też z nowymi badaniami neutrin „kosmicznych”, które mogą dostarczyć „obrazu tomograficznego” wnętrza Ziemi, przez którą przenikają równie łatwo jak promienie Rentgena przez nasze ciało.

Sądzymy też, że rola badań neutrin dla zrozumienia procesów zachodzących w Słońcu jest dopiero pierwszym krokiem nowej gałęzi wiedzy: astrofizyki neutrinowej. Badanie neutrin słonecznych było tak cenne, bo wytwarzane w centrum Słońca fotony doznają w drodze na powierzchnię tyłu rozproszeń, że wydostają się na powierzchnię Słońca średnio dopiero po setkach tysięcy lat, podczas gdy neutrino przebywają tę drogę w kilka sekund. Nasza wiedza o procesach zachodzących w bardziej egzotycznych obiektach kosmicznych, np. w jądrach galaktyk,

jest oparta wyłącznie na obserwacjach promieniowania elektromagnetycznego, a więc jest bardzo pośrednia i zniekształcona. Jeśli nauczymy się rejestrować neutrino z takich źródeł, z pewnością poznamy wiele nowych faktów i zjawisk.

Wielu fizyków sądzi więc, że wiek XXI będzie „wiekiem neutrino”, w którym cząstki te przestaną być jedynie przedmiotem badań podstawowych, a staną się nowym, cennym narzędziem badań stosowanych i techniki. Wypada tu przypomnieć, że nasz znakomity pisarz Stanisław Lem uczynił fizykę neutrino kanwą aż dwu swoich powieści. W *Głosie Pana* kosmiczni „starsi bracia” właśnie w wiązce neutrino kodują przesłanie, które ludzkość zmuszona stara się odcyfrować, a w *Solaris* myślący ocean umie konstruować z neutrino stabilne układy, które stanowią repliki osób odtwarzanych z analizy myśli ludzi. To pierwsze jest chyba możliwe (choć niekoniecznie w sposób opisany przez pisarza), to drugie raczej sprzeczne ze znaną fizyką – ale któż może przewidzieć przyszłość...



Obrazki z komiksu *Świat cząstek* Briana Southwortha i Georgesa Boixadera, Państwowa Agencja Atomistyki, Departament Szkolenia i Informatyki Społecznej, Warszawa 1996