

Aneks 2

Agnieszka ZALEWSKA

Neutrino – cząstka, która nie miała być nigdy odkryta

Neutrino – hipotetyczna cząstka Pauliego

Historia neutrino sięga odkrycia radioaktywnych rozpadów β^- jąder atomowych, w których to rozpadach emitowany jest elektron. Kiedy w 1914 r. James Chadwick zmierzył widmo energetyczne elektronów pochodzących z takiego rozpadu, ze zdumieniem stwierdził, że nie odpowiada ono jednej, określonej wartości energii, jak w przypadku promieniotwórczych rozpadów α i γ , lecz jest ciągłe. Zakładając, że w wyniku rozpadu powstaje tylko nowe jądro atomowe i elektron, oznaczałoby to złamanie zasady zachowania energii. Rozwiązanie tej trudności zaproponował Wolfgang Pauli w słynnym liście z grudnia 1930, adresowanym do „Drogich Radioaktywnych Pań i Panów” zebranych na spotkaniu w Tybindze. Pisał w nim: „Wpadłem na desperacki pomysł uratowania twierdzenia o statystykach oraz prawa zachowania energii, a mianowicie istnienia w jądrach cząstek elektrycznie obojętnych...” Nie wchodząc w sprawę ratowania „twierdzenia o statystykach”, trzeba stwierdzić, że postulowana cząstka rozwiązywała problem zachowania energii w rozpadzie β^- . Była ona emitowana z jądra razem z elektronem, wobec czego widmo energetyczne elektronów musiało być ciągłe. Pauli zaproponował nazwanie jej neutronem, ale w 1932 r. Chadwick odkrył inną cząstkę, dla której przyjęła się nazwa neutron, i Enrico Fermi zmienił nazwę hipotetycznej cząstki Pauliego na neutrino (po włosku mały neutron). Stworzona przez Fermiego teoria rozpadu β (pierwsza teoria słabych oddziaływań) przewidywała, że neutrino oddziałują tak słabo z materią, iż neutrino o typowej dla rozpadów jądrowych energii 2.5 MeV miało przed oddziaływaniem przelecieć średnio 2.5×10^{20} cm wody. Warto sobie uświadomić, że jest to odległość porównywalna z grubością dysku Galaktyki. Wobec tego wielu fizyków uważało, że nigdy nie uda się zaobserwować oddziaływań neutrin, a Pauli wręcz założył się o skrzynkę szampana, że nikt nigdy tego

nie dokona. „Zrobiłem straszną rzecz. Zaproponowałem cząstkę, która nie może być wykryta”. Według takiego czarnego scenariusza, neutrino miało więc na zawsze pozostać hipotetyczną cząstką.

Pierwsze obserwacje

Pierwszej obserwacji oddziaływań neutrin dokonali Frederick Reines i Clyde Cowan po upływie ponad 25 lat od momentu postawienia przez Pauliego jego słynnej hipotezy. Ich strategia opierała się na założeniu, że skoro potrzeba warstwy wody o grubości 10^{20} cm, aby oddziałało pojedyncze neutrino, to 10^{20} neutrin wystarczy, aby doszło do oddziaływania jednego z nich w warstwie wody o grubości 1 cm. Procesom rozszczepienia jąder, zachodzącym w reaktorach jądrowych, towarzyszy emisja ogromnego strumienia neutrin, a ściślej antyneutrin. Reines i Cowan wykonali więc swój eksperyment przy nowo zbudowanym i potężnym jak na owe czasy (750 megawatów mocy) reaktorze w Savannah River. Detektor zawierał około 400 litrów wody z rozpuszczonym w niej chlorkiem kadmu i umieszczony był 12 metrów pod ziemią w odległości 11 metrów od reaktora. Neutrony i pozytony, powstałe w wyniku oddziaływania antyneutrin z protonami, same następnie oddziaływały i charakterystyczny przebieg tych oddziaływań pozwalał odróżnić poszukiwany proces oddziaływania antyneutrina od innych procesów zachodzących w detektorze. Dnia 14 czerwca 1956 Reines i Cowan wysłali do Pauliego telegram z informacją, że zaobserwowali neutrino. Skrzynki szampana, którą Pauli obiecał odkrywcom oddziaływania neutrin, podobno jednak nie dostali. W 1995 r. sam Reines, bo Cowan już nie żył, otrzymał natomiast za to odkrycie połowę Nagrody Nobla, przyznanej za „pionierskie przyczynki eksperymentalne do fizyki leptonów”. Inny fundamentalny fakt „z życia neutrin” dotyczył pomiaru, dokonanego w 1958 r., wielkości nazywanej skrętnością. W granicach błędu dawał on stuprocentową ujemną skrętność neutrina, co, łącznie z faktem, że w granicach błędu pomiary widma elektronów z rozpadów β były zgodne z zerową wartością masy neutrin, utrwaliło przekonanie, że neutrina mają masę równą zeru. Do czasu odkrycia oscylacji neutrin w 1998 r....

Neutrina w Modelu Standardowym

Model Standardowy to obecnie obowiązująca teoria elementarnych cząstek materii i ich oddziaływań. Według tego opisu, elementarne cegiełki materii zgrupowane są w rodziny, a inne fundamentalne cząstki pośredniczą w ich oddziaływaniach. Jak w latach 90. pokazały pomiary w eksperymentach przy zderzaczu LEP w CERN-ie, w przyrodzie występują trzy rodziny.

Dlaczego akurat trzy, nie wiadomo. Każda rodzina zawiera kwark o ładunku $+2/3$ (odpowiednio górny u, powabny c i szczytowy t), odpowiadający mu kwark o ładunku $-1/3$ (dolny d, dziwny s i piękny b), lepton naładowany (elektron e^- , mion μ^- i taon τ^-) oraz odpowiadający mu lepton neutralny – neutrino (elektronowe ν_e , mionowe ν_μ i taonowe ν_τ). Każda z tych cząstek posiada swoją antycząstkę. Dodatkowo każdy z kwarków występuje w trzech kolorach. W Modelu Standardowym są trzy rodzaje oddziaływań między cząstkami: oddziaływania silne, elektromagnetyczne i słabe, przy czym oddziaływania elektromagnetyczne i słabe łączy ogólniejsza teoria oddziaływań elektrosłabych. Silnie oddziałują tylko kwarki, a cząstkami pośredniczącymi w tych oddziaływaniach są gluony (g), które występują w ośmiu kolorach. Oddziaływania elektromagnetyczne zachodzą za pośrednictwem fotonu (γ) i podlegają im wszystkie cząstki niosące ładunek elektryczny, a więc zarówno leptony naładowane, jak i kwarki. Oddziaływania słabe, zachodzące za pośrednictwem bardzo ciężkich bozonów W^+ , W^- i Z^0 , obejmują wszystkie cząstki, przy czym neutrina mogą oddziaływać wyłącznie słabo. No i jest jeszcze, dopiero niedawno zaobserwowany, bozon Higgsa, potrzebny do wytłumaczenia faktu, że inne cząstki i on sam posiadają masę. W Modelu Standardowym neutrina są w naturalny sposób cząstkami o zerowej masie. To, w połączeniu z faktem, że nie udało się eksperymentalnie stwierdzić niezerowej masy neutrin, rodziło przekonanie, iż oddzielnie dla każdej z trzech rodzin zachowywana jest liczba leptonowa, czyli liczba leptonów pomniejszona o liczbę antyleptonów. Znów do czasu zaobserwowania oscylacji neutrin...

Źródła neutrin

Należy zdać sobie sprawę z faktu, że neutrina są, po fotonach, najczęściej występującymi cząstkami we Wszechświecie. Rozrzut energii neutrin docierających do Ziemi z kosmosu sięga ponad dwudziestu rzędów wielkości. Najmniej energetyczne (rzędu $10^{-4}eV^*$) są tak zwane neutrina reliktowe, czyli te powstałe podczas Wielkiego Wybuchu. Szacuje się, że w każdym centymetrze sześciennym przestrzeni kosmicznej jest ich rzędu 300, ale na razie nie potrafimy ich mierzyć. Pośród wyżej energetycznych neutrin, których oddziaływania potrafimy rejestrować, najwięcej dociera do Ziemi neutrin ze Słońca, bo rzędu 7×10^{10} w każdej sekundzie na każdy centymetr kwadratowy powierzchni. Na szczęście neutrina oddziałują bardzo słabo, bo

* Elektronowolt (eV) to energia, jaką uzyskuje cząstka o ładunku równym ładunkowi elektronu po przejściu różnicy potencjałów 1V.

1 TeV = 10^3 GeV = 10^6 MeV = 10^9 keV = 10^{12} eV.

w przeciwnym razie przy takim „prześwietleniu” mielibyśmy się z pyszna... Bardzo ciekawym źródłem neutrin o energiach typowo (10–20) MeV jest (rzadki) proces grawitacyjnego zapadania się ciężkiej gwiazdy, prowadzący do powstania gwiazdy zwanej Supernową, z której w końcu pozostaje gwiazda neutronowa (lub czarna dziura w przypadku zapadania się bardzo ciężkich gwiazd). Warto wiedzieć, że w tym procesie aż 99% uwolnionej energii unoszone jest przez neutrina o gigantycznym strumieniu 10^{57} . Szerokie spektrum energii, bo rozciągające się przez kilka rzędów wielkości począwszy od MeV, posiadają neutrina atmosferyczne. Docierające do Ziemi promienie kosmiczne oddziałują w górnej warstwie atmosfery, w wyniku czego powstają mezony π i rzadziej K, których rozpady są źródłem leptonów naładowanych i neutrin. Neutrina najwyższych energii (powyżej TeV) mogą pochodzić z galaktycznych i pozagalaktycznych punktowych źródeł. Oczekuje się, że ich badanie pomoże znaleźć odpowiedź na jedno z bardzo ważnych pytań współczesnej astrofizyki, skąd biorą się docierające do Ziemi cząstki najwyższych energii, czyli gdzie we Wszechświecie znajdują się naturalne potężne akceleratory cząstek.

Najważniejszym ziemskim źródłem neutrin (ściśle rzecz biorąc, częściej antyneutrin) są procesy rozszczepienia i rozpadów jąder naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. Wśród ziemskich źródeł neutrin są też urządzenia zbudowane przez człowieka, a mianowicie reaktory jądrowe i akceleratory. Typowa duża siłownia jądrowa ma moc 3 GW i wytwarza 6×10^{20} antyneutrin na sekundę. Tak więc, tuż przy reaktorze strumień antyneutrin jest o blisko dziesięć rzędów wielkości większy niż strumień neutrin słonecznych. Przyspieszane w akceleratorach protony w zderzeniach z protonami tarczy mogą służyć do wytwarzania wiązek neutrin na tej samej zasadzie, co powstawanie neutrin atmosferycznych w wyniku oddziaływania promieni kosmicznych z jądrami atmosfery. Zaletą tych sztucznie wytworzonych wiązek jest to, że potrafimy znacznie lepiej kontrolować energię, skład i kierunek neutrin.

Tu za mało i tam za mało...

Neutrina słoneczne były pierwszymi zarejestrowanymi na Ziemi neutrinami z pozaziemskiego źródła. Powstają one w procesach termojądrowej syntezy jąder lekkich pierwiastków oraz w rozpadach β^+ , zachodzących w centrum Słońca. Im niższa energia neutrin słonecznych, tym wyższe tło, np. od niskoenergetycznych neutronów w materiale detektora, a zatem trudniejszy pomiar. Dominują neutrina o energiach poniżej 0.42 MeV, powstające podczas syntezy jąder deuteru z dwu protonów (neutrina pp). Najwyższą energię mają neutrina *borowe* z rozpadu β^+ jąder ${}^8\text{B}$ i neutrina *hep* z syntezy

^4He , bo sięgającą odpowiednio 14 MeV i 20 MeV. Pośrodku skali energetycznej znajdują się tzw. neutrina *berylowe*, powstałe w procesie wychwytu elektronu przez jądro ^7Be i posiadające dokładnie określone energie 386 keV i 863 keV, oraz neutrina *pep* o energii 1.445 MeV z syntezy jąder deuteru z dwu protonów i elektronu. Wszystkie te przewidywania pochodzą z tzw. Standardowego Modelu Słońca, którego głównym twórcą był John N. Bahcall. Prace nad modelem sięgają 1962 r., kiedy Bahcall został o nie poproszony przez Davisa, pracującego nad historycznie pierwszym eksperymentem, mającym na celu rejestrację oddziaływań neutrin słonecznych. Detektor, który jak na tamte czasy był ogromny, umieszczony był na głębokości około 1500 m pod ziemią w kopalni złota Homestake w Południowej Dakocie. Był to bardzo trudny eksperyment radiochemiczny, w którym powstające w wyniku oddziaływania neutrin promieniotwórcze jądra ^{37}Ar były odfiltrowywane (średnio kilkanaście sztuk na dwa miesiące) i ich rozpady promieniotwórcze analizowane w zewnętrznym laboratorium. Detektor Davisa zbierał dane przez ponad 30 lat. Wynik pomiarów, po raz pierwszy ogłoszony w 1968 r. w oparciu o 150 dni zbierania danych, a następnie stale poprawiany, był zaskakujący. Obserwowany strumień neutrin był około trzy razy mniejszy niż wynikało to z przewidywań teoretycznych. Za mały, w stosunku do przewidywań Modelu Słońca, strumień neutrin słonecznych potwierdzony został przez dwa inne eksperymenty radiochemiczne SAGE i Gallex/GNO oraz eksperymenty Kamiokande i SuperKamiokande. Obserwowany niedobór był jednak różny w różnych eksperymentach, co wskazywało na związek z badanym zakresem energii neutrin.

Eksperyment Kamiokande prowadzony był w latach 1983–1995, a eksperyment SuperKamiokande jest jego następcą i od poprzednika różni się tym, że ma dwudziestokrotnie większy detektor. Można powiedzieć, że to jest największy garnek z wodą na świecie, bo o średnicy i wysokości rzędu 40 metrów oraz zawartości 50 kton bardzo czystej wody. Proces oddziaływania neutrina jest identyfikowany w chwili zajścia w detektorze, czyli, jak mówią fizycy, w czasie rzeczywistym. Do detekcji wykorzystuje się zjawisko promieniowania Czerenkowa, polegające na koherentnej emisji fotonów wzdłuż toru cząstki naładowanej, jeśli porusza się ona w materiale detektora prężej niż wynosi prędkość światła w tym ośrodku. (Nie jest to oczywiście możliwe w próżni.) Promieniowanie Czerenkowa rejestrowane jest przez fotopowielacze i jego analiza pozwala na lokalizację toru cząstki naładowanej, pomiar jej energii i rozróżnienie elektronu od cięższych cząstek naładowanych, w szczególności mionu. Pierwotny program naukowy eksperymentu Kamiokande dotyczył poszukiwań rozpadu protonu, przewidywanego przez modele Wielkiej Unifikacji oddziaływań cząstek. Szybko jednak został uzupełniony o badania neutrin atmosferycznych, które stanowiły największe tło

w tych poszukiwaniach. Dla pojedynczego rozpadu mezonu π o energii na tyle niskiej, że pochodzący z niego lepton μ również rozpada się w atmosferze, oczekujemy dwu neutrin mionowych i jednego neutrina elektronowego. Tymczasem w eksperymencie Kamiokande i dwu innych zaobserwowano, że stosunek liczby oddziaływań neutrin mionowych do elektronowych jest bliski jedynce, czyli że brakuje neutrin mionowych. Niedobór neutrin mionowych nazwano anomalią neutrin atmosferycznych.

Tak więc, w połowie lat 90. zarówno mierzony strumień neutrin słonecznych, jak i atmosferycznych neutrin mionowych były dużo mniejsze niż przewidywane teoretycznie.

Oscylacje neutrin

Milowym krokiem nie tylko w badaniach neutrin, ale wręcz w fizyce cząstek elementarnych, było ogłoszenie w 1998 r. obserwacji oscylacji neutrin atmosferycznych przez eksperyment SuperKamiokande.

Kwantowo-mechaniczny efekt oscylacji może zajść dla cząstek swobodnych różniących się masą. Obserwacja oscylacji neutrin oznacza, że stany kwantowe neutrin ν_e , ν_μ , ν_τ (tzw. stany zapachowe) są kombinacjami liniowymi stanów masowych (powiedzmy ν_1 , ν_2 , ν_3 , ...). Ponieważ ewolucja w czasie poszczególnych stanów masowych jest różna, dochodzi do przejść między poszczególnymi rodzajami neutrin, czyli neutrina się mieszają. Wobec tego neutrina mają masę różną od zera, a leptonowe liczby kwantowe, charakterystyczne dla każdego rodzaju neutrin, nie są zachowane – w sprzeczności z tym, co zakładano przez dziesiątki lat. Konsekwencje tego faktu nie są jeszcze do końca zrozumiane, ale nie ulega wątpliwości, że Model Standardowy wymaga przebudowy.

Załóżmy dla przykładu, że mamy wiązkę ν_α o średniej energii E i że możliwe są tylko przejścia neutrin ν_α w neutrina ν_β . Prawdopodobieństwo $P_{\alpha\beta}$ takiej przemiany po przejściu drogi L zależy w tym najprostszym przypadku tylko od dwu parametrów teoretycznych, mianowicie różnicy kwadratów mas dwu stanów masowych Δm^2 (w eV^2) i kąta mieszania θ między nimi, oraz od dwu parametrów eksperymentalnych, którymi są długość drogi L (w km) i energia neutrin E (w GeV-ach). Najlepszą dokładność pomiaru Δm^2 uzyskuje się przy takim doborze L i E , że $E/L \approx \Delta m^2$. Bierze się to pod uwagę przy projektowaniu eksperymentów do badań oscylacji neutrin z wykorzystaniem reaktorów czy akceleratorów. Ta prosta zależność prawdopodobieństwa oscylacji od E/L dotyczy tak zwanych oscylacji próżniowych. Opis robi się znacznie bardziej skomplikowany, gdy neutrina przechodzą przez materię, np. z wnętrza do powierzchni Słońca. Prawdopodobieństwo, że ν_α po przejściu drogi L pozostanie sobą, wynosi $P_{\alpha\alpha} = 1 - P_{\alpha\beta}$. Oba praw-

dopodobieństwa wykazują charakter oscylacyjny, stąd mowa o oscylacjach neutrin.

W przypadku opisu oscylacji dla trzech stanów zapachowych i trzech stanów masowych jest sześć parametrów teoretycznych: dwie różnice kwadratów mas, trzy kąty mieszania i faza, która związana jest z zachowaniem lub łamaniem tzw. symetrii przestrzenno-ładunkowej CP, stanowiącej złożenie odbicia zwierciadlanego i zamiany cząstki w antycząstkę. Aby wyznaczyć wszystkie parametry, potrzeba różnych, coraz dokładniejszych eksperymentów. Doświadczalna fizyka neutrin przeżywa w związku z tym okres bardzo dynamicznego rozwoju.

Oscylacje neutrin – co już wiadomo, a co czeka na zmierzenie

Uproszczony model z odpowiednio wybranymi dwoma stanami zapachowymi i dwoma stanami masowymi neutrin zupełnie dobrze opisywał dane, zebrane przez wczesne eksperymenty oscylacyjne z końca lat 90. i pierwszych lat obecnego stulecia.

W przypadku przełomowej publikacji z eksperymentu SuperKamionkande z 1998 r. bardzo ważny był pomiar liczby oddziaływań ν_μ i ν_e w funkcji tzw. kąta zenitalnego, będącego miarą długości drogi neutrina od miejsca powstania do detektora. Najkrótszą drogę przebywają neutrina wytworzone w atmosferze nad detektorem (kilkanaście km), a najdłuższą – powstałe w atmosferze po przeciwnej stronie kuli ziemskiej (około 13 000 km). Okazało się, że im dłuższa była droga ν_μ do detektora, tym większy był ich niedobór, podczas gdy liczba oddziaływań ν_e była w granicach błędu zgodna z oczekiwaniami dla braku oscylacji. Wszystkie pomiary porównywane były z symulacjami komputerowymi przy założeniu braku oscylacji i wskazywały na przejścia $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ dla różnicy kwadratów mas $2-3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ i kąta θ odpowiadającego maksymalnemu mieszanemu neutrin. Dalsze lata zbierania danych w eksperymencie SuperKamionkande przyniosły istotne zwiększenie dokładności pomiarów, pozwalając na bezpośrednie pokazanie oscylacyjnego zachowania dla liczby oddziaływań ν_μ w funkcji E/L . Tym samym wyjaśniona została anomalia atmosferyczna jako wynik oscylacji neutrin.

Przełomowy dla wyjaśnienia niedoboru elektronowych neutrin słonecznych był z kolei eksperyment SNO, który w latach 1999–2006 badał oddziaływanie neutrin detektorze wypełnionym tysiącem ton ciężkiej wody D_2O . Detektor znajdował się na głębokości 2 km w podziemnym laboratorium w Sudbury w Kanadzie. Użycie ciężkiej wody pozwalało na równoczesny pomiar trzech różnych procesów oddziaływań neutrin słonecznych, co z kolei pozwoliło ustalić, że niedobór elektronowych neutrin sło-

necznych wiąże się z oscylacjami $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu,\tau}$, podczas gdy całkowity strumień trzech rodzajów neutrin jest zgodny z przewidywaniami Standardowego Modelu Słońca. W ten sposób rozwiązana została zagadka neutrin słonecznych i można było wreszcie zacząć realizować pierwotny plan Davisa, czyli użyć neutrin do badań procesów zachodzących w Słońcu. W chwili obecnej najlepszym eksperymentem realizującym ten program naukowy jest eksperyment Borexino, prowadzony w laboratorium Gran Sasso we Włoszech. Udało się w nim, dzięki bezprecedensowo niskiemu tłu od radioaktywnych domieszek w materiałach detektora, zmierzyć prawdopodobieństwa oscylacji dla poszczególnych rodzajów neutrin słonecznych, potwierdzając przewidywania teoretyczne, dotyczące wartości tych prawdopodobieństw w zależności od energii neutrin.

Jak już pisałam, badania neutrin atmosferycznych i słonecznych można uzupełnić lub wręcz zastąpić eksperymentami z użyciem odpowiednio neutrin akceleratorowych i reaktorowych, dla których znacznie lepiej kontroluje się rozmaite efekty systematyczne.

Typowy neutrinowy eksperyment akceleratorowy składa się z intensywnej wiązki neutrin mionowych i dwu detektorów: bliskiego, w którym rejestruje się oddziaływania neutrin przed zajęciem oscylacji, i dalekiego, w którym mierzy się osłabienie pierwotnej wiązki i/lub szuka się neutrin o innym zapachu niż zapach neutrin z wiązki. Typowe energie neutrin akceleratorowych są w zakresie od kilkuset MeV do kilku GeV, a odległości między bliskim i dalekim detektorem w zakresie 250–1300 km. Pierwszym eksperymentem akceleratorowym z długą bazą pomiarową był eksperyment K2K w Japonii, w którym wiązka neutrin wytwarzanych w ośrodku KEK wysyłana była do detektora SuperKamiokande. Eksperyment zbierał dane w latach 1999–2001 i uzyskał wyniki mniej dokładne, ale zgodne z pomiarami neutrin atmosferycznych w eksperymencie SuperKamiokande. Kolejne programy badań akceleratorowych z długą bazą pomiarową rozpoczęły się już w tym stuleciu. W 2005 r. ruszył amerykański program NuMi, gdzie wiązka ν_{μ} , wytwarzana w laboratorium FNAL pod Chicago, wysyłana była na odległość 730 km do podziemnego detektora eksperymentu MINOS w kopalni Soudan, w którym mierzone było jej osłabienie na skutek oscylacji. Europejski program CNGS, realizowany w latach 2006–2012, działał w oparciu o wysokoenergetyczną wiązkę ν_{μ} , wytwarzaną w CERN-ie i posyланą na odległość 730 km do podziemnego laboratorium w Gran Sasso we Włoszech. Program naukowy CNGS był realizowany przez dwa eksperymenty: OPERA i ICARUS, i miał na celu bezpośrednią obserwację oddziaływań neutrin ν_{τ} z oscylacji $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$.

Pierwszym eksperymentem, który dostarczył informacje o oscylacjach neutrin w oparciu o antyneutrina reaktorowe, był KamLAND w Japonii.

Rozpoczął on zbieranie danych w 2002 r. z detektorem o masie około tysiąca ton ciekłego scyntyлятора. KamLAND rejestrował antyneutrino elektronowe z ponad 30 siłowni jądrowych w Japonii i w Korei, przy czym około 80% strumienia neutrin pochodziło z siłowni położonych w odległościach od 138 do 214 km. Wobec typowej energii neutrin antyneutrin reaktorowych rzędu pojedynczych MeV, taki wybór drogi L od reaktorów do detektora oznaczał, że ten eksperyment działał w zakresie parametrów odpowiadającym oscylacjom elektronowych neutrin słonecznych. Zmierzone wartości parametrów były zgodne z wynikami dla neutrin słonecznych, a rozkład liczby zarejestrowanych oddziaływań w funkcji E/L wykazywał oscylacyjny przebieg.

Powyższe eksperymenty dostarczyły pomiarów czterech spośród sześciu parametrów teoretycznych dla oscylacji trzech stanów zapachowych neutrin: dwu różnic kwadratów mas (rzędu $2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ dla przejść $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ i $7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ dla przejść $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu,\tau}$) oraz dwu kątów mieszania, których duże wartości oznaczają silne mieszanie się neutrin. Trzeci spośród kątów mieszania jest mniejszy, dzięki czemu przy mniej precyzyjnych pomiarach dobrze pracował uproszczony model z dwoma stanami zapachowymi neutrin. Ten kąt został zmierzony dopiero w ostatnich latach w precyzyjnych eksperymentach reaktorowych nowej generacji, z których najlepsze wyniki dał DayaBay w Chinach, oraz w dedykowanym eksperymencie akceleratorowym T2K w Japonii. Eksperyment T2K rozpoczął się w 2010 r., działa w oparciu o intensywną wiązkę neutrin, wytwarzaną w nowo powstałym ośrodku akceleratorowym JPARC, ambitny bliski detektor i detektor SuperKamio-kande w charakterze dalekiego detektora. Pozwolił on na bezpośrednią obserwację oscylacji $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ w obszarze parametrów charakterystycznych dla neutrin atmosferycznych.

W chwili obecnej w neutrinowych eksperymentach oscylacyjnych pozostaje jeszcze do zmierzenia faza δ_{CP} oraz ustalenie uporządkowania stanów masowych dla większej z dwu różnic kwadratów mas. Z mniejszą precyzją da się te pomiary wykonać w oparciu o już działające eksperymenty, czyli T2K oraz eksperyment NOvA na wiązce NuMI, który przed rokiem rozpoczął zbieranie danych. Daleki detektor tego eksperymentu znajduje się w odległości 810 km od Fermilabu, tuż przy granicy z Kanadą. Precyzyjne pomiary wymagają jednak będą przyszłych dedykowanych eksperymentów z ogromnymi detektorami. Jako pierwszy powinien wystartować reaktorowy eksperyment JUNO w Chinach. Mocno zaawansowany jest amerykański program akceleratorowy z nową intensywną wiązką neutrin, wysyłaną z Fermilabu na odległość 1300 km do dalekiego detektora (docelowo 40 kton ciekłego argonu) w podziemnym laboratorium w Południowej Dakocie. Poza tym, wysoko na liście przyszłych priorytetów japońskiej nauki

jest detektor HyperKamiokande o całkowitej masie rzędu miliona ton wody. Ten niebagatelny wysiłek wiąże się z rosnącym przekonaniem, że zmierzenie fazy δ_{CP} dla neutrin może dostarczyć odpowiedzi na fundamentalne pytanie, dlaczego wkrótce po Wielkim Wybuchu wytworzyła się niewielka asymetria między materią i antymaterią, konieczna do tego, aby Wszechświat wyewoluował do obecnej postaci.

Kłopot z nadmiarem oscylacji

Opisane powyżej badania doprowadziły do całkiem spójnego obrazu oscylacji neutrin przy założeniu trzech rodzajów stanów zapachowych i masowych. Kłopot w tym, że istnieją dane z amerykańskiego eksperymentu LSND, wskazujące na przechodzenie antyneutrin mionowych w antyneutrina elektronowe z różnicą kwadratów mas rzędu 1 eV^2 i dla bardzo małego kąta mieszania. Trzy różnice mas wymagają istnienia czwartego neutrina, a pomiary z akceleratora LEP wskazują na tylko trzy neutrina biorące udział w oddziaływaniach słabych. Wobec tego, to czwarte neutrinum nie może oddziaływać i dlatego nazwane zostało neutrinem sterylnym. Wyniki eksperymentu LSND były weryfikowane przez akceleratorowy eksperyment MiniBoone w laboratorium Fermilab, ale jego pomiary raczej zwiększyły zamieszanie, niż przyniosły wyjaśnienie. Obecnie przygotowywany jest w Fermilabie dedykowany program z trzema precyzyjnymi detektorami ciekło-argonowymi, który powinien ostatecznie rozstrzygnąć sprawę „efektu LSND”. Równoległe prowadzone są innego typu eksperymenty, np. przy reaktorach lub z silnymi źródłami radioaktywnymi, które służą wyjaśnieniu innych anomalii przypisywanych neutrinom sterylnym.

Ile ważą i czym są neutrina?

Fakt, że neutrina oscylują, oznacza, iż mają masę różną od zera. Oscylacje dostarczają informacji o różnicy kwadratów mas, ale nie bezpośrednio o masach. Dotychczasowe bezpośrednie pomiary mas neutrin bazowały na analizie kinematycznej naładowanych cząstek ze słabych rozpadów z udziałem neutrin, przy czym dostarczały one tylko górnych ograniczeń. Najlepiej wyznaczona jest masa ν_e , której górna granica w oparciu o rozpad β^- jądra trytu wynosi 2.2 eV , a za kilka lat eksperyment KATRIN powinien obniżyć ją do 0.2 eV . Oszacowania sumy mas trzech rodzajów neutrin poniżej 1 eV pochodzą z obserwacji astrofizycznych, ale wielu fizyków podchodzi do nich z rezerwą, ze względu na silne założenia modelowe w tego typu pomiarach.

Zmierzenie znacznie niższych wartości masy neutrina, bo rzędu kilkadziesiąt meV, byłoby możliwe, gdyby neutrinum było cząstką Majorany, co

oznacza, że byłoby identyczne ze swoją antycząstką, czyli antyneutrinem. Ponieważ po raz pierwszy neutrino identyczne z antyneutrinem wprowadził Majorana, więc w formalizmie spoza Modelu Standardowego, zwanym „mechanizmem huśtawki”, który wyjaśnia, dlaczego masa neutrin jest tak mała, mówi się o cząstkach i masach Majorany.

Dowodem doświadczalnym na to, że neutrino jest cząstką Majorany, byłaby obserwacja bezneutrinowego podwójnego rozpadu β . Istnieją jądra o dużym nadmiarze neutronów nad protonami, w których prawdopodobieństwo jednoczesnego rozpadu β^- dwu neutronów przy kinematycznie zabronionym pojedynczym rozpadzie β^- jest na tyle duże, że prowadzi do mierzalnych efektów. Większość takich rozpadów następuje z emisją dwu elektronów i dwu antyneutrin. Jeśli jednak neutrino jest cząstką Majorany, to może się zdarzyć, że antyneutrino powstałe w rozpadzie jednego neutronu zostanie zaabsorbowane jako neutrino przez drugi neutron i w rezultacie w stanie końcowym powinny być tylko dwa elektrony o wartości energii odpowiadającej rozpadowi dwuciałowemu. Poszukiwania takich rozpadów prowadzone są w kilku już działających lub przygotowywanych eksperymentach. Najbardziej zaawansowany jest eksperyment GERDA, który wykorzystuje jądra ^{76}Ge .

Zamiast podsumowania

Na szczęście nie spełniła się prognoza Pauliego, że oddziaływań neutrin nie uda się nigdy zaobserwować. Choć bardzo trudne w badaniu ze względu na niezwykle słabe oddziaływanie z materią, neutrina dostarczyły już kilku wyników z fizyki cząstek i z astrofizyki, uhonorowanych Nagrodami Nobla. Obserwacja łamania przestrzenno-ładunkowej symetrii CP czy bezneutrinowego podwójnego rozpadu beta należałyby też do tej kategorii wyników. Najwspanialsze w badaniach naukowych są jednak niespodzianki, jak na przykład odkrycie oscylacji neutrin w eksperymencie nastawionym na poszukiwanie rozpadu protonu. Ciekawe, jaką jeszcze niespodziankę szykuje nam ta „nieśmiała” cząstka, która nigdy nie miała być odkryta.

*

W dniu dzisiejszym (6.10.2015) przyszła wiadomość, że przedstawione w wykładzie odkrycie oscylacji neutrin uhonorowane zostało Nagrodą Nobla z fizyki. W uzasadnieniu Komitetu Noblowskiego czytamy: „Nagrodę Nobla z fizyki w 2015 roku otrzymują Takaaki Kajita z Japonii i Arthur B. McDonald z Kanady za kluczowy wkład do eksperymentów, które pokazały, że neutrina zmieniają swoją tożsamość. Taka przemiana oznacza, że neutrina mają masę. Odkrycie to pogłębiło zrozumienie budowy materii i może się okazać zasadnicze dla zrozumienia struktury Wszechświata”.