

Eksperymenty neutrinowe

Wstęp

Połowa tegorocznej Nagrody Nobla z fizyki przyznana została Raymondowi Davisowi juniorowi oraz Masatoshi Koshibie za „pionierski wkład do astrofizyki, a zwłaszcza za odkrycie neutrin kosmicznych”. Raymond Davis junior zaproponował i przez ponad trzydzieści lat prowadził eksperyment w kopalni złota Homestake w Stanach Zjednoczonych, w którym po raz pierwszy zaobserwował neutrina pochodzące ze Słońca. Masatoshi Koshiba dokonał pierwszej obserwacji neutrin pochodzących z wybuchu Supernowej. Miało to miejsce w 1987 roku w prowadzonym przez niego eksperymencie Kamiokande w Japonii. Uhonorowanie tych badań Nagrodą Nobla nie było zaskoczeniem, gdyż z perspektywy 2002 roku widać, jak istotny kierunek badań wytyczyły tamte pionierskie prace. Niedawna obserwacja kwantowego zjawiska oscylacji neutrin czyli przechodzenia w siebie różnych rodzajów tych cząstek uchodzi za przełom w fizyce cząstek. Oznacza ona bowiem, że neutrina mają masę różną od zera, w sprzeczności z tym, co zakładano przez dziesiątki lat. Konsekwencje tego faktu nie są jeszcze do końca zrozumiane, ale nie ulega wątpliwości, że dotąd obowiązująca teoria cząstek (Model Standardowy) wymaga przebudowy. W 2001 roku codziennie ukazywało się, średnio, ponad 3.5 prac naukowych z fizyki neutrin. Są to głównie spekulacje teoretyczne, ale podkreślają potrzebę lepszych pomiarów. Doświadczalna fizyka neutrin przeżywa więc okres bardzo dynamicznego rozwoju. Kilka nowych eksperymentów rozpoczęło niedawno zbieranie danych, a w trakcie przygotowań jest jeszcze kilka dalszych. Celem tego artykułu jest przedstawienie najważniejszych wyników eksperymentalnych badań neutrin. Aby łatwiej było je śledzić, zacznę od opowiedzenia o neutrinach w Modelu Standardowym

Neutrino w Modelu Standardowym

Model Standardowy to obecnie obowiązująca teoria elementarnych cząstek materii i ich oddziaływań. Według tego opisu cząstki materii są fermionami zgrupowanymi w trzech rodzinach. Każda rodzina zawiera kwark o ładunku $+2/3$ (odpowiednio u, c, t), odpowiadający mu kwark o ładunku $-1/3$ (d, s, b), lepton naładowany (e^-, μ^-, τ^-) oraz odpowiadający mu lepton neutralny – neutrin (ν_e, ν_μ, ν_τ). Każda z tych cząstek posiada swoją antycząstkę. Dodatkowo każdy z kwarków występuje w trzech kolorach. W Modelu Standardowym występują trzy rodzaje oddziaływań między cząstkami materii: oddziaływania silne, elektromagnetyczne i słabe, przy czym oddziaływania elektromagnetyczne i słabe łączy ogólniejsza teoria oddziaływań elektroślabych. Oddziaływania zachodzą poprzez wymianę cząstek, nazywanych bozonami pośredniczącymi. 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. W Modelu Standardowym neutrina są cząstkami o zerowej masie. Poszczególne rodzaje neutrin nie mogą wzajemnie w siebie przechodzić. Ogólniej, obowiązuje zachowanie liczby leptonowej, to znaczy liczby leptonów pomniejszonej o liczbę antyleptonów, oddzielnie dla każdej z trzech rodzin. Neutrino są wyłącznie lewoskrętne, podczas gdy antyneutrino są wyłącznie prawoskrętne. Oznacza to w szczególności, że obraz neutrina w lustrze, który byłby neutrinem prawoskrętnym, odpowiada cząstce nie występującej w Przyrodzie. Model Standardowy przewiduje istnienie jeszcze jednej cząstki. Jest nią bozon Higgosa – cząstka, której istnieniu inne cząstki zawdzięczają swoją masę. Na razie nie udało się jej zaobserwować doświadczalnie.

Neutrino – hipotetyczna cząstka Pauliego

Historia neutrino sięga odkrycia radioaktywnych rozpadów β^- jąder atomowych czyli takich, w których emitowany jest elektron. Kiedy w 1914 roku 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, za czym opowiedział się nawet wielki Niels Bohr. Rozwiązanie tej trudności zaproponował Wolfgang Pauli w swoim słynnym liście z grudnia 1930 roku, 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, które proponuję nazwać neutronami i które mają spin $\frac{1}{2}$ ”. Nowe cząstki miały być nie cięższe od elektronu i nie oddziaływać silniej niż fotony. Nie wchodząc w sprawę ratowania „twierdzenia o statystykach”, 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. W 1932 roku Chadwick odkrył prawdziwy neutron o masie bliskiej masy protonu i będący brakującą cegiełką do wyjaśnienia budowy jąder. Wkrótce po tym Enrico Fermi zaproponował przezwanie hipotetycznej cząstki Pauliego na neutrino (po włosku mały neutron) i zasugerował, że fundamentalnym procesem odpowiedzialnym za rozpad β^- jest rozpad neutronu na proton, elektron i neutrino. Stworzona przez Fermiego pierwsza teoria słabych oddziaływań pozwoliła na policzenie przekroju czynnego na tak zwany odwrotny proces β czyli rozpraszanie antyneutrino na protonie, w wyniku czego powstawałby neutron i pozyton. Był on tak mały, że neutrino o typowej dla rozpadów jądrowych energii 2.5 MeV^1 miało przelecieć średnio 2.5×10^{20} cm wody zanim by oddziało. 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. Pauli wręcz założył się o skrzynkę szampana, że nikt nigdy tego nie dokona. Według takiego czarnego scenariusza neutrino miało więc na zawsze pozostać hipotetyczną cząstką.

Skąd się biorą neutrino?

Aby łatwiej było śledzić dalsze części, znów uprzedzę fakty i przedstawię współczesny stan wiedzy o pochodzeniu neutrin.

Należy zdać sobie sprawę z faktu, że neutrino są, po fotonach, najczęściej występującymi cząstkami we Wszechświecie. Gdyby więc się okazało, że mają masę rzędu elektronowoltów (eV), to można by im przypisać dużą część tzw. ciemnej materii we Wszechświecie. Rozrzut energii neutrin docierających do Ziemi z kosmosu sięga ponad dwudziestu rzędów wielkości. Najmniej energetyczne są tak zwane neutrino reliktowe czyli te powstałe podczas Wielkiego Wybuchu. Szacuje się, że w każdym centymetrze sześciennym przestrzeni kosmicznej jest ich rzędu 300, a ich energia jest rzędu 10^{-4} eV. Nie ma na razie sposobu na pomiar tych neutrin. Pośród wyżej energetycznych neutrin, których oddziaływania potrafimy już rejestrować, najwięcej dociera do Ziemi neutrin ze Słońca. Standardowy Model Słońca, oparty na solidnych podstawach doświadczalnych, mówi, że strumień neutrin słonecznych czyli liczba neutrin przechodzących w czasie jednej sekundy przez powierzchnię jednego centymetra kwadratowego wynosi na powierzchni Ziemi 7×10^{10} . Bardzo ciekawym źródłem neutrin o energiach typowo 10-20 MeV jest 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). Niestety, jest to zjawisko rzadkie. Szacuje

¹ 1 eV jest jednostką energii powszechnie używaną w fizyce cząstek. Większe jednostki, używane w artykule, to $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV} = 10^6 \text{ MeV} = 10^9 \text{ keV} = 10^{12} \text{ eV}$.

się, że w naszej galaktyce zachodzi ono raz na około 50 lat. 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 μ i ν_μ . Z kolei rozpady leptonów μ są źródłem neutrin ν_μ i ν_e . 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.

Najważniejszym ziemskim źródłem neutrin (ściśle rzecz biorąc najczęściej antyneutrin) są procesy rozszczepienia jąder naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. W pojedynczym takim rozszczepieniu powstaje typowo sześć antyneutrin, z których każde ma średnio energię 2.5 MeV. Oblicza się, że strumień tych antyneutrin wynosi $6 \times 10^9 / \text{cm}^2 \text{sek}$. Warto przy okazji zdać sobie sprawę z faktu, że szacowana całkowita moc generowana przez rozpady jądrowe na Ziemi, wynosi 20000 gigawatów (GW). 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 kilkanaście rzędów wielkości większy niż ten od naturalnej promieniotwórczości Ziemi i o blisko dziesięć rzędów wielkości większy niż strumień neutrin słonecznych. Przyspieszane w akceleratorach protony mogą służyć do wytwarzania wiązek ν_μ . W tym celu wyprowadza się wiązkę protonów z akceleratora i umieszcza na jej drodze tarczę. W zderzeniach protonów wiązki z jądrami tarczy powstają mezony π , których rozpady są źródłem neutrin ν_μ . Zaletą wiązek jest to, że potrafimy nieźle kontrolować energię, skład i kierunek wytworzonych neutrin.

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. Pierwotny pomysł zakładał wykorzystanie silnego strumienia antyneutrin powstałych w wyniku wybuchu bomby atomowej. Szybko go porzucono na rzecz poszukiwania oddziaływań antyneutrin wytwarzanych w reaktorze jądrowym. Po pierwszych próbach z pomiarami w pobliżu reaktora w Hanford, Reines i Cowan ostatecznie wykonali 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, następnie same oddziaływały. Wynikiem anihilacji pozytonu z elektronem jest emisja dwu fotonów, każdy o energii 0.51×10^3 eV, a wynikiem wychwytu neutronu przez jądro kadmu – emisja kilku fotonów o łącznej energii około 9×10^3 eV. Należało jeszcze zmierzyć sygnały fotonów i charakterystyczny czas między fotonami powstałymi w procesach anihilacji i wychwytu, aby odróżnić poszukiwany proces oddziaływania antyneutrina od innych procesów zachodzących w detektorze. Czternastego czerwca 1956 roku Reines i Cowan wysłali do Pauliego telegram z informacją, że zaobserwowali neutrino. W liście, którego kopię Reines otrzymał od studenta Pauliego dopiero 30 lat później, Pauli napisał „Dziękuję za wiadomość. Wszystko przychodzi do tego, kto umie czekać”. Niestety, Cowan nie zdołał w pełni skorzystać z tej rady. Nagroda Nobla, która w 1995 roku przyznana została za „pionierskie przyczynki eksperymentalne do fizyki leptonów”, z których jednym był eksperymentalny dowód na istnienie antyneutrina elektronowego, w połowie przypadła tylko Reinesowi, bo Cowan już nie żył. W

1958 roku objawił się kolejny, bardzo ciekawy fakt „z życia neutrin”, a mianowicie zmierzona została skrętność neutrina. W procesie wychwytu elektronu z orbity K jądro ^{152}Sm o momencie pędu $J=0$ przechodzi w wzbudzone jądro $^{152}\text{Sm}^*$ o $J=1$ i emitowane jest przy tym neutrino. Przejściu wzbudzonego jądra do stanu podstawowego ^{152}Sm o $J=0$ towarzyszy emisja fotonu. Pomiar polaryzacji tego fotonu dostarczał więc informacji o skrętności neutrina. Dawał on stuprocentową ujemną skrętność neutrina, czyli pokazywał, że neutrino są lewoskrętne.

Liczba rodzajów neutrin

W 1947 roku Anderson i Neddermeyer odkryli mion (μ) – cząstkę, która okazała się być około 207 razy cięższą kopią elektronu. Pontecorvo pierwszy postawił hipotezę, że mion, tak jak elektron, oddziałuje słabo. Badania wskazywały, że rozpad μ następuje na elektron i towarzyszące mu dwa neutrina. Powstało pytanie, czy oba neutrina są tego samego rodzaju. Rozstrzygającej odpowiedzi dostarczył w 1962 roku pierwszy w historii badań neutrin eksperyment akceleratorowy, przeprowadzony w Brookhaven. Prawie czysta wiązka antyneutrin, pochodzących, razem z ujemnie naładowanymi leptonami μ , z rozpadów ujemnie naładowanych mezonów π , przechodziła przez detektor. Okazało się, że w wyniku oddziaływań tych antyneutrin w detektorze obserwuje się głównie miony. Oznaczało to, że w rozpadzie mezonu π mionowi towarzyszy inne antyneutrino (nazwane mionowym) niż antyneutrino towarzyszące elektronowi w rozpadzie β (nazwane elektronowym). W 1988 roku Lederman, Schwartz i Steinberger otrzymali za to odkrycie Nagrodę Nobla. W 1975 roku w zderzeniach przeciwbieżnych wiązek e^+e^- w SLAC-u odkryty został trzeci, 17 razy cięższy od mionu, naładowany lepton τ . Naturalne było oczekiwanie, że leptonowi τ również towarzyszy jego neutrino, nazwane neutrinem taonowym ν_τ . Na doświadczalne stwierdzenie oddziaływania ν_τ trzeba było poczekać do 2000 roku, kiedy to eksperyment DONUT ogłosił obserwację czterech przypadków takich oddziaływań. Zasada pomiaru była taka sama jak w eksperymencie dla neutrina mionowego, tyle że teraz w zderzeniach wiązki protonów z tarczą należało wyprodukować bardzo rzadko występujące cząstki, zwane mezonami D_s . Pochodzące z ich rozpadów ν_τ stanowiły zaledwie 5% wszystkich neutrin w wiązce, a wyprodukowany w oddziaływaniach lepton τ żyje tak krótko, że bardzo trudno jest go rozpoznać w detektorze. Eksperyment DONUT stanowi więc kolejny dowód na to, jak trudnym zadaniem eksperymentalnym jest badanie neutrin. W międzyczasie, bo w 1989 roku, stało się jasne, że powielanie leptonów kończy się na trzech rodzinach. W Europejskim Laboratorium Fizyki Cząstek CERN pod Genewą w zderzeniach przeciwbieżnych wiązek e^+e^- produkowany był bozon Z^0 i badano jego rozpady. Obowiązujący już wtedy Model Standardowy dawał bardzo dokładne przewidywania parametrów charakteryzujących tę cząstkę. Dwa z nich: tzw. całkowita szerokość (będąca miarą czasu życia Z^0) i wartość przekroju czynnego odpowiadającego masie Z^0 zależały od liczby rodzajów neutrin, na które rozpadał się ten bozon. Z pomiarów, przeprowadzanych z coraz większą dokładnością, wynikło, że są dokładnie trzy rodzaje lekkich neutrin. Lekkich, to znaczy o masie nie przekraczającej połowy masy Z^0 czyli ogromnej wartości $45 \times 10^9 \text{ eV}$.

Zagadka neutrin słonecznych

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. Dominują neutrina o energiach poniżej 0.42 MeV, powstające podczas syntezy jąder deuteru z dwu protonów (neutrina pp). Ich oddziaływania są prawie niemierzalne ze względu na ogromne tło, np. od oddziaływań niskoenergetycznych neutronów z naturalnych rozpadów promieniotwórczych. Najłatwiej mierzy się neutrina *borowe* z rozpadu β^+ jąder ^8B i neutrina *hep* z syntezy ^4He ,

których energia sięga odpowiednio 14 MeV i 20 MeV. Przy tych energiach tło jest znacznie mniejsze, przekrój czynny na oddziaływanie jest około 300 razy większy, ale strumień neutrin jest sto tysięcy razy mniejszy niż neutrin *pp*. Pośrodku skali energetycznej znajdują się tzw. neutrina *berylowe* powstałe w procesie wychwytu elektronu przez jądro ${}^7\text{Be}$ 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 jest John N. Bahcall. Prace nad modelem sięgają 1962 roku, kiedy Bahcall został o nie poproszony przez Davisa, pracującego nad eksperymentem dla rejestracji oddziaływań neutrin słonecznych. Radiochemiczny eksperyment Davisa rozpoczął zbieranie danych w 1967 roku w kopalni złota Homestake w Południowej Dakocie. Bazował na reakcji wychwytu neutrina przez jądro ${}^{37}\text{Cl}$, w której wyniku powstawało promieniotwórcze jądro ${}^{37}\text{Ar}$ i emitowany był elektron. Próg energetyczny tej reakcji wynosi 814 keV, więc wkład mogły mieć neutrina *borowe*, *berylowe*, *pep* i *hep*. Detektor musiał być bardzo duży. Stanowił go cylindryczny zbiornik o średnicy ponad sześciu metrów i długości blisko 15 metrów, wypełniony 380000 litrami tetrachloroetyleny C_2Cl_4 , nawiasem mówiąc popularnego środka czyszczącego. Detektor umieszczony został prawie 1500 metrów pod ziemią, aby zminimalizować tło od promieni kosmicznych. Davis opracował metody odfiltrowywania pojedynczych atomów promieniotwórczego argonu ${}^{37}\text{Ar}$. Co dwa miesiące wybierał średnio 17 atomów argonu spośród 2×10^{30} atomów chloru. Czas połowicznego zaniku ${}^{37}\text{Ar}$ wynosi 34 dni. Zliczanie rozpadów jąder argonu odbywało się już poza podziemnym detektorem neutrin. Detektor Davisa zbierał dane przez ponad 30 lat. Wynik pomiarów, po raz pierwszy ogłoszony w 1968 roku 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. Pod wpływem obserwacji Davisa, w 1972 roku Pontecorvo napisał „To zaczyna być naprawdę interesujące! Było by miło, gdyby zakończyło się czymś nieoczekiwanym z punktu widzenia fizyki cząstek. Niestety, nielato to będzie wykazać, nawet jeśli tak właśnie jest w przyrodzie”. Z perspektywy 2002 roku widać, że wszystkie trzy zdania okazały się być prawdziwe. Wiele lat później wyniki eksperymentu Davisa sprawdzane były w trzech innych eksperymentach radiochemicznych: Sage, Gallex i GNO. Badana reakcja to wychwyt neutrina przez jądro ${}^{71}\text{Ga}$, prowadzący do powstania radioaktywnego jądra ${}^{71}\text{Ge}$ i emisji elektronu. Czas połowicznego zaniku jądra ${}^{71}\text{Ge}$ wynosi 11,4 dni. Próg energetyczny tej reakcji wynosi 233 keV, więc te trzy eksperymenty obejmowały też część zakresu energetycznego neutrin *pp*. Zmierzone w nich strumień neutrin słonecznych stanowi 56% strumienia przewidywanego przez Model Słońca. Potwierdził się więc niedobór neutrin słonecznych, ale dodatkowo pojawiła się rozbieżność wyników z obu typów eksperymentów radiochemicznych. Interpretuje się ją jako zależność wielkości niedoboru neutrin od ich energii. Pomiar strumienia neutrin słonecznych prowadzony był też w podziemnych eksperymentach Kamiokande i Superkamiokande w Japonii. Ponieważ oba te eksperymenty odegrały szczególną rolę w szeroko pojętych badaniach neutrin, zostaną oddzielnie omówione.

Eksperymenty Kamiokande i Superkamiokande

Eksperyment Kamiokande prowadzony był w latach 1983-1995, przy czym od 1986 roku ze znacznie poprawionym detektorem. Eksperyment SuperKamiokande był jego następcą, rozpoczął się w 1996 roku, a od poprzednika różnił się tym, że miał dziesięciokrotnie większy detektor. Pierwotny program naukowy eksperymentu Kamiokande obejmował tylko poszukiwanie rozpadu protonu, przewidywanego przez modele Wielkiej Unifikacji oddziaływań cząstek. Szybko jednak został uzupełniony o badania neutrin słonecznych. Paradoksem było to, że badania neutrin atmosferycznych, które stały się głównym powodem do chwały eksperymentu Superkamiokande, początkowo prowadzone były tylko ze względu na fakt, że ich oddziaływania

stanowiły największe tło w poszukiwaniach rozpadów protonu. Detektor Kamiokande działał na zupełnie innej zasadzie niż eksperymenty radiochemiczne. Proces oddziaływania neutrina mógł być zidentyfikowany już w chwili zajścia w detektorze (czyli, jak mówią fizycy, w czasie rzeczywistym), a nie, jak w tamtych eksperymentach, po wielu tygodniach od zdarzenia. Do detekcji wykorzystano bowiem zjawisko promieniowania Czerenkowa, polegające na koherentnej emisji fotonów wzdłuż toru cząstki naładowanej, jeśli porusza się ona w materiale detektora prędkiej niż wynosi prędkość światła w tym ośrodku. (Nie jest to oczywiście możliwe w próżni.) Promieniowanie tworzy stożek, którego oś odpowiada kierunkowi cząstki. Jeśli na drodze tego promieniowania umieścimy detektory fotonów (np. fotopowielacze), to zarejestrujemy pierścień od fotonów Czerenkowa. Praktyczną realizację tych zasad detekcji prześledzimy na przykładzie detektora SuperKamiokande, nie wchodząc w szczegóły budowy jego mniejszego poprzednika. Zewnętrzną konstrukcję stanowi walec ze stali nierdzewnej o wysokości 41.4 m i o średnicy 39.3 m, wypełniony 50000 ton ultra czystej wody. Wewnątrz, w odległości 2.5 m. od zewnętrznych ścian znajduje się walec skonstruowany z rur ze stali nierdzewnej i pokryty plastikiem odbijającym światło, który dzieli optycznie całą objętość na detektor wewnętrzny (32000 ton wody) i zewnętrzny (18000 ton wody). Na wszystkich ścianach wewnętrznej części tego środkowego walca zamontowano fotopowielacze (łącznie 11146), każdy o średnicy 50 cm, które „patrzają” do wnętrza detektora. Wewnętrzny detektor służy do badań oddziaływań neutrin. Z kolei 18000 ton wody zewnętrznego detektora służy rejestracji cząstek naładowanych wchodzących i wychodzących z detektora oraz jako obszar buforowy, w którym zachodzi duża część procesów tła od naturalnej promieniotwórczości skał otaczających detektor. Do rejestracji zdarzeń zachodzących w detektorze zewnętrznym służy 1185 fotopowielaczy, każdy o średnicy 20 cm, które są zamocowane na zewnętrznej powierzchni środkowego walca. Taki obszar buforowy jest charakterystyczną częścią większości współczesnych detektorów służących do badań niskoenergetycznych neutrin, gdzie istnieje poważny problem niepożądanego tła. Na każdy centymetr toru cząstki naładowanej w wodzie przypada średnio około 390 fotonów Czerenkowa o długościach fali z zakresu 300-700 nanometrów. Fotopowielacze zastosowane w detektorze SuperKamiokande są czułe nawet na pojedynczy foton Czerenkowa, a elektronika odczytu mierzy nie wielkość sygnału i czas, po którym fotony przychodzą do detektora. Można więc zlokalizować tor cząstki i zmierzyć jej energię. Kierunek promieniowania wyznacza kierunek cząstki. Analiza pierścienia Czerenkowa pozwala też na bardzo dobrą identyfikację elektronów i mionów, powstających odpowiednio w oddziaływaniach neutrin elektronowych i mionowych. Ze względu na to, że lekki elektron ma większe możliwości oddziaływania z materią detektora (zmienia kierunek, emituje fotony) niż ciężki mion, pierścień Czerenkowa dla elektronu jest znacznie bardziej poszarpany niż pierścień dla mionu.

W listopadzie 2001 roku miało miejsce poważne uszkodzenie detektora SuperKamiokande. Zapadł się jeden z fotopowielaczy, a fala uderzeniowa, która przy tym powstała, dała początek lawinowemu zniszczeniu blisko 8000 innych fotopowielaczy. Aktualnie kończy się remont detektora i wkrótce eksperyment wznowi zbieranie danych, choć z mniejszą liczbą fotopowielaczy. Zanim doszło do wypadku, eksperyment SuperKamiokande dostarczył wielu znakomitych wyników. Rozpad protonu wprawdzie nie został znaleziony, ale odkryte zostały oscylacje neutrin atmosferycznych, eksperyment walczył się przyczynił do rozwiązania zagadki neutrin słonecznych, a w eksperymencie Kamiokande zarejestrowano neutrina z wybuchu Supernowej.

Neutrina z Supernowej w eksperymencie Kamiokande

Najoryginalniejszym wynikiem uzyskanym w eksperymencie Kamiokande była obserwacja neutrin z wybuchu Supernowej 1987A w dniu 23 lutego 1987 roku. Wybuch miał miejsce w Wielkim Obłoku Magellana w odległości 170000 lat świetlnych od Ziemi. Ciężka

gwiazda (o masie kilku mas Słońca) kończy życie, gdy jej rdzeń tworzą żelazo i nikiel, będące końcowymi produktami termojądrowej syntezy jąder cięższych pierwiastków z lżejszych jąder. Rdzeń takiej wypalonej gwiazdy zapada się grawitacyjnie w czasie rzędu kilku milisekund. Większość, bo 99% związanej z tym energii grawitacyjnej jest unoszona przez powstały ogromny strumień neutrin i antyneutrino ($\sim 10^{57}$), o średniej energii 10 – 20 MeV. Ze względu na wielką gęstość materii w zapadniętym rdzeniu gwiazdy nawet neutrina są w niej przez moment zatrzymywane, przez co ich czas emisji rozciąga się na około 10 sekund. W eksperymencie Kamiokande zaobserwowano 12 przypadków oddziaływań neutrin z Supernową 1987A w impulsie o długości 12 sekund. Niezależnie amerykański eksperyment IMB zarejestrował 8 takich neutrin.

Opis oscylacji neutrin

Milowym krokiem w fizyce cząstek elementarnych było ogłoszenie przez eksperyment SuperKamiokande oscylacji neutrin atmosferycznych. Publikacja, która ukazała się w 1998 roku, jest już najbardziej cytowaną pracą w dziedzinie eksperymentalnej fizyki cząstek. 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 (a ściślej, co najmniej jeden ich rodzaj) mają masę różną od zera, a leptonowe liczby kwantowe, charakterystyczne dla każdego rodzaju neutrin, nie są zachowane.

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 i kąta mieszania θ między nimi oraz od dwu parametrów eksperymentalnych, którymi są długość drogi L i energia neutrin E . Najlepszą dokładność pomiaru Δm^2 uzyskuje się przy takim doborze L i E , że $E/L \approx \Delta m^2$. Ta prosta zależność prawdopodobieństwa oscylacji od E/L dotyczy tak zwanych oscylacji próżniowych. Może ona ulec nawet bardzo poważnej modyfikacji pod wpływem materii na drodze neutrin, gdyż amplituda rozpraszania ν_e w materii jest inna niż amplituda rozpraszania ν_μ i ν_τ . Opis tego ważnego zagadnienia daje teoria Mikheyeva, Smirnowa i Wolfenstiena (MSW), której nie omawiam. Prawdopodobieństwo, że ν_α po przejściu drogi L pozostanie sobą wynosi $P_{\alpha\alpha} = 1 - P_{\alpha\beta}$. Oba prawdopodobieństwa wykazują charakter oscylacyjny. Istnieją dwa typy eksperymentów: takie, w których mierzy się $P_{\alpha\alpha}$ czyli zanikanie strumienia pierwotnych neutrin ν_α oraz takie, w których mierzy się $P_{\alpha\beta}$ czyli poszukuje powstających neutrin typu ν_β . Liczba parametrów teoretycznych rośnie wraz z liczbą rozważanych stanów zapachowych i masowych neutrin, np. dla trzech rodzajów neutrin i trzech stanów masowych jest ich sześć. Aby wyznaczyć wszystkie parametry, potrzeba kilku różnych eksperymentów, dobranych pod kątem dobrego zmierzenia wybranej podgrupy parametrów.

Oscylacje neutrin atmosferycznych

Publikacja z 1998 roku stanowiła wyjaśnienie tzw. anomalii neutrin atmosferycznych, zaobserwowanej wcześniej w eksperymentach Kamiokande, IMB i Soudan II. Przypomnę, że neutrina atmosferyczne pochodzą głównie z rozpadów mezonów π (jedno neutrinio mionowe na rozpad) oraz z rozpadów leptonów μ (jedno neutrinio mionowe i jedno neutrinio elektronowe na rozpad). (Pominałam tu dokładne dociekanie na temat ładunku rozpadających się cząstek, a co za tym idzie, kiedy powstaje neutrinio, a kiedy antyneutrinio). Wobec tego, dla pojedynczego rozpadu mezonu π o energii na tyle niskiej, że pochodzący z niego lepton μ również rozpadnie

się w atmosferze, oczekujemy dwu neutrino mionowych i jednego neutrino elektronowego. Stosunek liczby neutrino mionowych do neutrino elektronowych powinien być więc równy dwa. Tymczasem w wymienionych wcześniej eksperymentach zaobserwowano, że jest on bliski jedynce czyli że brakuje neutrino mionowych. Niedobór neutrino mionowych nazwano anomalią neutrino atmosferycznych. Dane zebrane w wielkim detektorze eksperymentu SuperKamiokande pozwoliły na dokładne przeanalizowanie tej anomalii. W pierwotnej analizie posługiwano się głównie takimi przypadkami, gdzie w wyniku oddziaływania ν_μ w wodzie powstaje pojedynczy mion, a w wyniku oddziaływania ν_e – pojedynczy elektron. Najdokładniejszej informacji dostarczały te przypadki oddziaływań, gdzie tory mionu i elektronu były całkowicie zawarte w detektorze wewnętrznym, ale inne kategorie przypadków też miały wkład do analizy. Ponieważ detektor SuperKamiokande pozwala zmierzyć energię oraz kierunek mionu i elektronu (bliskich kierunku pierwotnego neutrino), więc w analizie wykorzystano te możliwości. Okazało się, że w granicach dokładności pomiaru i po uwzględnieniu znanych efektów, liczba przypadków oddziaływań neutrino elektronowych ν_e jest zgodna z oczekiwaniami przy założeniu braku oscylacji. Uzyskany wynik jest w zgodzie z reaktorowym eksperymentem Chooz, pracującym w tym samym zakresie E/L, w którym nie stwierdzono zanikania strumienia antyneutrino elektronowych. W pełni się natomiast potwierdził niedobór oddziaływań neutrino mionowych ν_μ . Wszystkie pomiary porównywane były z symulacjami komputerowymi przy założeniu braku oscylacji. Bardzo ważny był pomiar liczby oddziaływań ν_μ w funkcji tzw. kąta azymutalnego, będącego miarą długości drogi neutrino od miejsca powstania do detektora. Najkrótszą drogę przebywają neutrino wytworzone w atmosferze nad detektorem (kilkanaście km), a najdłuższą – powstałe w atmosferze po przeciwnej stronie kuli ziemskiej (12500 km). Okazało się, że im dłuższa była droga ν_μ do detektora, tym większy był ich niedobór. Wszystkie pomiary łącznie wskazywały na przejścia ν_μ w ν_τ .

Dalsze lata zbierania danych przyniosły istotne zwiększenie dokładności pomiarów oscylacji ν_μ - ν_τ w samym eksperymencie SuperKamiokande oraz ich potwierdzenie (choć z dużo mniejszą dokładnością) przez eksperyment MACRO w podziemnym laboratorium w Gran Sasso we Włoszech, eksperyment Soudan II w Stanach Zjednoczonych i eksperyment K2K w Japonii. W eksperymencie SuperKamiokande nie tylko zwiększyła się liczba zarejestrowanych oddziaływań neutrino, ale też włączone zostały do analizy nowe kategorie przypadków, jak te z kilkoma cząstkami naładowanymi w stanie końcowym. Wśród wysokoenergetycznych przypadków tej kategorii znajdują się przypadki oddziaływań ν_τ z oscylacji ν_μ . Najlepszy opis wszystkich danych atmosferycznych otrzymuje się dla różnicy kwadratów mas $2\text{-}3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ i dla kąta odpowiadającego maksymalnemu mieszanemu neutrino.

Ekspertymenty akceleratorowe z długą bazą pomiarową

Ekspertyment K2K zasługuje na oddzielne omówienie jako pierwszy eksperyment akceleratorowy z długą bazą pomiarową. Wiązka neutrino ν_μ o średniej energii 1.3 GeV, wytwarzana jest z wykorzystaniem wiązki protonów z akceleratora w ośrodku KEK i posyłana na odległość 250 kilometrów do detektora SuperKamiokande. Na drodze wiązki, jeszcze na terenie KEK-u, znajduje się układ kilku detektorów, którego zadaniem jest dokładny pomiar strumienia neutrino i charakterystyka wiązki zaraz po jej wytworzeniu, zanim dojdzie do mieszania neutrino. Na podstawie tych pomiarów przewiduje się profil wiązki w SuperKamiokande i ocenia się, ilu oddziaływań ν_μ należy oczekiwać przy braku oscylacji neutrino. Ekspertyment K2K zbierał dane od czerwca 1999 roku do lipca 2001 roku. W tym czasie zaobserwowano 56 przypadków oddziaływań wobec oczekiwanych około 80, w zgodzie z obserwacjami eksperymetu Superkamiokande. To jest bardzo ważny wynik, bo potwierdza wyniki pomiarów dla neutrino atmosferycznych w zupełnie innych warunkach eksperymentalnych. Ekspertyment będzie kontynuowany po naprawieniu detektora Superkamiokande. Dwa dalsze programy badań akceleratorowych z długą bazą pomiarową są w

trakcie przygotowań. Pierwszy ruszy amerykański program NuMi, gdzie wiązka ν_μ o typowej energii 2-4 GeV, wytwarzana w laboratorium FNAL pod Chicago, wysyłana będzie na odległość 730 km do podziemnego detektora eksperymentu MINOS w kopalni Soudan blisko granicy z Kanadą. Eksperyment MINOS skoncentruje się na lepszym niż dotąd wyznaczeniu parametrów oscylacji w obszarze L/E odpowiadającym neutrinom atmosferycznych. Europejski program CNGS z kolei działać będzie w oparciu o wysokoenergetyczną wiązkę ν_μ , wytwarzaną w CERN-ie i posyłaną na odległość 730 km do podziemnego laboratorium w Gran Sasso we Włoszech. Program naukowy CNGS ma być realizowany przez dwa eksperymenty: OPERA i ICARUS i dotyczyć będzie poszukiwania oddziaływań neutrin ν_τ z oscylacji ν_μ .

Neutrino słoneczne też oscylują

W latach 2001-2002 podziemny eksperyment SNO, prowadzony od listopada 1999 roku w pobliżu Sudbury w Kanadzie, ogłosił pierwsze wyniki swoich pomiarów neutrin słonecznych, walnie przyczyniając się do rozwiązania zagadki obserwowanego niedoboru tych neutrin. Istotnym uzupełnieniem tych pomiarów są dane zebrane w ciągu 1496 dni w eksperymencie SuperKamiokande. Oba eksperymenty mierzą słoneczne neutrino *borowe*. W eksperymencie SNO bada się oddziaływanie neutrin w ciężkiej wodzie D₂O, rejestrując promieniowanie Czerenkowa powstałe na drodze cząstek naładowanych. Tysiąc ton ciężkiej wody znajduje się w kulistym akrylowym zbiorniku o promieniu 12 metrów. 9600 fotopowielaczy, rejestrujących fotony, znajduje się na wielokątnej konstrukcji na zewnątrz pojemnika. Wszystko razem zanurzone jest w walcowym zbiorniku o wysokości 30 metrów, wypełnionym zwykłą wodą. Użycie ciężkiej wody pozwala na równoczesny pomiar trzech różnych procesów oddziaływań neutrin słonecznych. Dwa pierwsze polegają na oddziaływaniu neutrin z jądrami deuteru. Jeden zachodzi tylko dla ν_e i jego wynikiem są dwa protony i jeden elektron w stanie końcowym. Drugi zachodzi dla wszystkich trzech rodzajów neutrin i w stanie końcowym są neutron i proton. Trzeci badany proces polega na elastycznym rozpraszaniu neutrin na elektronach atomu i jego wynikiem jest rozproszony elektron. Rozpraszanie elastyczne również zachodzi dla wszystkich trzech rodzajów neutrin, tyle że przekrój czynny na rozpraszanie ν_e jest sześć razy większy niż dla ν_μ czy ν_τ . Pomiar SNO wykazały, że niedobór neutrin dotyczy tylko ν_e , podczas gdy całkowity strumień odpowiadający wszystkim trzem rodzajom neutrin jest zgodny z przewidywaniami Standardowego Modelu Słońca. Jeśli idzie o pomiary w eksperymencie Superkamiokande, to jedynym mierzonym procesem jest rozpraszanie elastyczne neutrin słonecznych na elektronach. Ponieważ detektor SuperKamiokande jest bardzo duży i przez kilka lat zbierał dane, więc dysponuje on wielką liczbą przypadków (ponad 20000) tych oddziaływań. Wobec tego można było zmierzyć wielkość strumienia neutrin w zależności od pory roku oraz sprawdzić, czy jest on taki sam w dzień i w nocy. Po wprowadzeniu znanych poprawek, np. na kształt orbity Ziemi, nie zaobserwowano żadnej znaczącej zależności tego rodzaju. W oparciu o te wszystkie pomiary, niedobór neutrin słonecznych tłumaczy się obecnie oscylacjami między ν_e a $\nu_{\mu,\tau}$, zachodzącymi w materii na drodze ν_e z centrum Słońca do jego powierzchni. Najlepszy łączny opis uzyskuje się dla różnicy kwadratów mas trochę poniżej 10^{-4} eV^2 oraz kąta mieszania bliskiego, ale nie równego, maksymalnemu. Uzyskany ostatnio postęp eksperymentalny najlepiej ilustruje fakt, że jeszcze parę lat temu równie ważne były dwa zupełnie inne rozwiązania dla oscylacji wewnątrz Słońca oraz rozwiązanie próżniowe, zakładające oscylacje neutrin elektronowych na drodze między Słońcem a Ziemią.

Najbliższe lata przyniosą dalszy duży postęp w badaniach neutrin słonecznych. Eksperyment SNO dostarczy dokładniejszych danych, a eksperyment SuperKamiokande wkrótce wznowi zbieranie danych. W styczniu 2002 roku rozpoczął się niezwykle interesujący eksperyment KamLAND w Japonii. Jest to pierwszy eksperyment reaktorowy z bardzo długą bazą pomiarową. Rejestruje on antyneutrino elektronowe z ponad 20 siłowni jądrowych w Japonii i w Korei, przy czym ponad 85% sygnału pochodzi z siłowni położonych w odległości

od 140 do 344 km. Oznacza to, że eksperyment działa w zakresie parametrów charakterystycznych dla oscylacji neutrin słonecznych. Szacuje się, że po trzech latach zbierania danych przyczyni się do znacznego zwiększenia dokładności pomiarów tych parametrów. Ciekawostką jest to, że detektor KamLAND zbudowany został na miejscu detektora Kamiokande. Wewnętrzny detektor stanowi 1000 ton ciekłego scyntylatora, na który "patrzy" około dwu tysięcy fotopowielaczy. Niedługo też rozpocznie zbieranie danych eksperyment Borexino w podziemnym laboratorium Gran Sasso we Włoszech, ukierunkowany na rejestrację słonecznych neutrin *berylowych*.

Kłopot z nadmiarem oscylacji

Badania neutrin atmosferycznych i słonecznych doprowadziły w do całkiem spójnego obrazu oscylacji neutrin przy założeniu trzech rodzajów neutrin. Występują dwie skale dla różnicy kwadratów mas neutrin: jedna dla oscylacji neutrin atmosferycznych $\nu_\mu - \nu_\tau$, a druga dla oscylacji neutrin słonecznych $\nu_e - \nu_{\mu,\tau}$. W pierwszym przypadku mieszanie jest maksymalne, a w drugim bliskie maksymalnego. Tak więc neutrina bardziej się mieszają niż kwarki. 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. Wiemy już jednak, że pomiary z akceleratora LEP wskazują na tylko trzy neutrina (aktywne), biorące udział w oddziaływaniach słabych. Wobec tego to czwarte neutrino nie może oddziaływać i dlatego nazwane zostało neutrinem sterylnym. Dane dla neutrin atmosferycznych i dla neutrin słonecznych nie wskazują na przechodzenie któregoś z trzech neutrin aktywnych w neutrino sterylne. Wyniki eksperymentu LSND wymagają weryfikacji. Służy temu akceleratorowy eksperyment MiniBoone w laboratorium FNAL, który w tym roku rozpoczął zbieranie danych.

Ile ważą neutrina?

Fakt, że neutrina oscylują oznacza, że mają masę różną od zera. Oscylacje dostarczają informacji o różnicy kwadratów mas, ale nie bezpośrednio o masach. Dotychczasowe bezpośrednie pomiary mas neutrin bazują na analizie kinematycznej naładowanych cząstek ze słabych rozpadów z udziałem neutrin, przy czym na razie otrzymuje się tylko górne granice masy. Najlepiej wyznaczona jest masa ν_e , której górna granica w oparciu o rozpad β^- jądra trytu wynosi 2.2 eV . W przypadku ν_μ jest to 190 keV w oparciu o badania rozpadu mezonów π na μ i neutrino. Górna granica masy ν_τ jest wyznaczona w oparciu o wielocząstkowe rozpady leptonu τ i wynosi 18.2 MeV , a więc jest ona najgorzej wyznaczona. Rozważane są projekty przyszłych eksperymentów, które pozwoliłyby zejść z górną granicą masy ν_e poniżej 1 eV .

Cząstka Diraca czy Majorany?

Formalizm matematyczny opisu mas kwarków i naładowanych leptonów w Modelu Standardowym narzuca zerową masę neutrin. Korzysta się w nim z tzw. spinorów Diraca i stąd mowa o masie Diraca m_D lub o cząstkach Diraca w przypadku cząstek opisywanych tym formalizmem. Skoro już wiemy, że neutrina mają niezerową masę, to powstaje pytanie o formalizm matematyczny spoza Modelu Standardowego, który nada masę neutrinom i jednocześnie wyjaśni, dlaczego masa neutrin jest tak mała w porównaniu z masami kwarków i naładowanych leptonów. Najpopularniejszy formalizm nosi nazwę "mechanizmu huśtawki" i został zaproponowany w 1979 roku przez Gell Mana i współpracowników. Polega on na, naturalnym dla niektórych modeli Wielkich Unifikacji założeniu, że neutrino jest własną antycząstką. Prowadzi to (dla każdego z trzech stanów zapachowych neutrin) do dwu stanów masowych: jednego bardzo ciężkiego, bo o masie M z zakresu $(10^{12}-10^{16}) \text{ GeV}$, a drugiego bardzo lekkiego, bo o masie równej m_D^2/M . Wystarczy wstawić wartości masy m_D naładowanych leptonów i mamy wyjaśnienie, dlaczego "nasze" neutrina są aż tak lekkie. A skąd

ta huśtawka w nazwie? Bo im bardziej podnosi się w górę masa jednego stanu, tym bardziej opada w dół masa drugiego. Ponieważ po raz pierwszy neutrino identyczne z antyneutrinem wprowadził Majorana, w przypadku "mechanizmu huśtawki" mówi się o masach i cząstkach Majorany.

Widać, jak ogromne znaczenie dla dalszego rozwoju teorii miałyby eksperymentalne pokazanie, że neutrino jest cząstką Majorany. Dowodem doświadczalnym byłaby obserwacja bezneutrinowego podwójnego rozpadu β . Istnieją jądra o dużym nadmiarze neutronów nad protonami, w których prawdopodobieństwo jednoczesnego rozpadu β^- dwu neutronów 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 eksperymentach. Najbardziej znany jest eksperyment Heidelberg-Moskwa w Gran Sasso, który wykorzystuje jądra ^{76}Ge . Pochodziło z niego tegoroczne sensacyjne ogłoszenie o zaobserwowaniu bezneutrinowego rozpadu β - chyba, niestety, przedwczesne. Proponowanych jest szereg nowych, dokładniejszych eksperymentów na poszukiwanie bezneutrinowego podwójnego rozpadu β .

Wysokoenergetyczne neutrino z Kosmosu

Astrofizycy mają nadzieję, że mapa Nieba sporządzona w oparciu o miony z oddziaływań neutrin wysokiej energii (począwszy od TeV) dostarczy istotnie nowych informacji o Wszechświecie. Strumień tych neutrin jest bardzo mały i symulacje komputerowe pokazują, że dla neutrin o energiach rzędu 1000 TeV dopiero detektor o objętości rzędu 1km^3 dostarczy w ciągu kilku lat dostatecznej ilości danych. Aby zbudować takie detektory, trzeba sięgnąć po naturalne zbiorniki czystej wody czy lodu i umieścić w nich fotopowielacze do rejestracji mionów. Jak zawsze, redukcja tła od mionów z oddziaływań promieni kosmicznych, wymaga grubej warstwy materiału nad detektorem. Pierwszy, choć mały detektor tego rodzaju (od 1998 roku wyposażony w 200 fotopowielaczy), zbudowany został w jeziorze Bajkał na Syberii. Detektor eksperymentu AMANDA z kolei działa w czystym lodzie na biegunie południowym. Od 2000 roku wyposażony jest w 667 fotopowielaczy. Fotopowielacze zamontowane są w kilkudziesięciometrowych odległościach na linach o długości 500 metrów, a każda lina wpuszczona jest pionowo w lód na głębokość typowo 1500-2000 metrów (kilka lin sięga głębokości 2300 metrów). Liny umieszczane są w też w odległościach kilkudziesięciu metrów od siebie i miarę zwiększania ich liczby, rośnie efektywna powierzchnia i objętość (walcowatego) detektora. W 2002 roku eksperyment pokazał pierwszą neutrinową mapę północnego Nieba. (Neutrino z południowego Nieba mają duże tło od kosmicznych mionów.) Następcą AMANDY będzie eksperyment IceCube o objętości około 1km^3 z 1800 fotopowielaczami na 80 linach. W trakcie przygotowań są dwa eksperymenty wodne w Morzu Śródziemnym: ANTARES na głębokości ponad 2000 m w pobliżu Marsylii we Francji i NESTOR na głębokości 4000 m. w pobliżu Pylos w Grecji. Eksperymentalne problemy są na miarę detektorów. W eksperymencie AMANDA jest to utrata światła na skutek rozpraszania na miniaturowych bąbelkach powietrza w lodzie, a w głębinowych eksperymentach wodnych - radioaktywny potas w słonej wodzie morskiej i...bioluminescencja (od bakterii po świecące ryby, nie zapominając o krewetkach). I kto powie, że fizycy nie potrzebują fantazji oraz hartu ducha i ciała.

Przyszłe projekty akceleratorowe

Postęp uczyniony w ostatnich latach w fizyce neutrin jest ogromny, ale wiele pytań wciąż jest otwartych. Czy do opisu wszystkich wyników eksperymentalnych wystarczą trzy aktywne

neutrino czy też potrzeba jeszcze sterylnych? Czy to neutrino, które według wyników pomiarów różni się znacznie masą od dwu pozostałych, jest najcięższe czy najlżejsze? Czy oscylacje $\nu_\mu - \nu_e$ przy energiach neutrin atmosferycznych są małe czy ich nie ma? Czy ma miejsce łamanie ładunkowo - przestrzennej symetrii CP dla neutrin?. Aby odpowiedzieć na te i wiele innych pytań, potrzebne będą większe detektory i lepsze akceleratory. W gronie specjalistów zaczyna się mówić o wodnym detektorze Czerenkowa o wadze 1000000ton. Prowadzone są prace nad super-wiązkami czyli bardzo intensywnymi wiązkami ν_μ z rozpadów mezonów π , wytwarzanymi w oparciu o nowe, wielkiej mocy akceleratory protonów. Trzy programy badawcze dotyczą tak zwanych fabryk neutrin czyli kompleksów akceleratorowych, służących do wytwarzania wiązek neutrin z rozpadów mionów, przyspieszonych do energii kilkudziesięciu GeV. Ponieważ średni czas życia mionów wynosi nieco powyżej dwu mikrosekund, fabryki neutrin są niewątpliwym wyzwaniem technologicznym.

Polacy w badaniach neutrin

Na miano pionierów zasługują dr hab. Danuta Kielczewska z Uniwersytetu Warszawskiego i dr hab. Marian Wójcik z Uniwersytetu Jagiellońskiego, którzy od wielu lat zajmują się fizyką neutrin. Dr hab. Kielczewska od początku brała udział w eksperymentach SuperKamiokande i K2K oraz jest współautorką słynnej pracy o oscylacjach neutrin atmosferycznych. Dr hab. Marian Wójcik brał udział w radiochemicznym eksperymencie GALLEX, a obecnie w przygotowywanym eksperymencie Borexino. Przed ponad dwoma laty przeszło dwudziestoosobowa grupa fizyków z kilku instytucji naukowych w Katowicach, Krakowie, Warszawie i Wrocławiu dołączyła do eksperymentu ICARUS, którego instalacja rozpocznie się w 2003 roku w Gran Sasso. Nowatorski detektor tego eksperymentu pozwoli na szerokie badania neutrin: słonecznych, atmosferycznych i akceleratorowych w oparciu o wiązkę CNGS. Ważne też będzie poszukiwanie rozpadu protonu z mezonem K w stanie końcowym, który jest bardzo trudny do znalezienia nawet w przyszłym gigantycznym wodnym detektorze Czerenkowa.