



Neutrino

– cząstki zmieniające swoją tożsamość

AGNIESZKA ZALEWSKA

Nagrodę Nobla z fizyki w 2015 roku otrzymali Takaaki Kajita z Japonii i Arthur B. McDonald z Kanady „za odkrycie oscylacji neutrin, które pokazuje, że neutrino mają masę”. W wydanym z tej okazji komunikacie prasowym czytamy: „Odkrycie to pogłębiło zrozumienie budowy materii i może się okazać zasadnicze dla zrozumienia struktury Wszechświata.” Należy dodać, że to już druga w tym stuleciu Nagroda Nobla za prace badawcze związane z neutrinami; w 2002 roku Raymond Davis i Masatoshi Koshiba nagrodzeni zostali za „pionierski wkład do astrofizyki, a zwłaszcza za odkrycie neutrin kosmicznych”.



Takaaki Kajita



Arthur B. McDonald

Historia neutrin sięga odkrycia radioaktywnych rozpadów β - jąder atomowych, w których emitowany jest elektron. Kiedy w 1914 roku James Chadwick po raz pierwszy zmierzył energię elektronu z rozpadu β , ze zdumieniem stwierdził, że otrzymuje ciągłe widmo, choć poza nowym jądrem i elektronem nie widać innej cząstki powstałej w rozpadzie, a więc elektron powinien mieć jedną, określoną wartość energii. W 1930 roku Wolfgang Pauli postawił hipotezę, że w rozpadach β powstaje trzecia cząstka, ale jest ona neutralna i bardzo słabo oddziałuje z materią. Niedługo potem Enrico Fermi nazwał tę cząstkę neutrinem i sformułował teorię rozpadu β , która pokazywała,

że prawdopodobieństwo oddziaływania neutrina jest znikomo małe. Hipoteza Pauliego została zweryfikowana doświadczalnie dopiero 25 lat później, kiedy Frederick Reines i Clyde Cowan dokonali pierwszej obserwacji oddziaływań neutrin, a ściślej antyneutrin, prowadząc eksperyment przy nowo zbudowanym i potężnym jak na owe czasy (750 MW mocy) reaktorze w Savannah River, South Carolina. Wykorzystali oni fakt, że procesom rozszczepienia jąder, zachodzących w reaktorach jądrowych, towarzyszy emisja ogromnego strumienia neutrin, co pozwalało na skompensowanie bardzo słabego oddziaływania neutrin z materią. W 1995 roku sam Reines (Cowan już nie żył) otrzymał za to odkrycie połowę Nagrody Nobla przyznanej za „pionierskie przyczynki eksperymentalne do fizyki leptonów”. Fakt, że w granicach błędów, pomiary widma elektronów z rozpadów β były zgodne z zerową wartością masy neutrin w połączeniu z faktem, że pomiar tzw. skrętności neutrin dawał wartość sto procent, utrwaliło przekonanie, że neutrino mają masę równą zero. Do czasu odkrycia oscylacji neutrin...

Model Standardowy, czyli obecnie obowiązująca teoria elementarnych cząstek materii i ich oddziaływań, klasyfikuje neutrino jako elementarne leptony neutralne. Elementarne cegiełki materii zgrupowane są w trzy rodziny, co wynika z pomiarów, ale nie jest wyjaśnione teoretycznie. 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^1), lepton naładowany (elektron e^- , mion μ^- i taon τ^-) oraz odpowiadający mu lepton neutralny – neutrin (elektronowe ν_e , mionowe ν_μ i taonowe ν_τ). Każda z tych cząstek posiada swoją antycząstkę, co w przypadku neutrin oznacza antyneutrino elektronowe, mionowe i taonowe. 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 elektro-słabych. Silnie oddziałują tylko kwarki, elektromagnetycznie – cząstki naładowane, a neutrino mogą oddziaływać wyłącznie słabo. W Modelu Standardowym neutrino są w naturalny sposób cząstkami o zerowej masie. ▶

¹ Nazwy: górny, powabny, szczytowy, dolny, dziwny, piękny są polskimi odpowiednikami przyjętych nazw (po angielsku) rodzajów kwarków.

► Neutrino są – po fotonach – najczęściej występującymi cząstkami we Wszechświecie. Szacuje się, że w każdym centymetrze sześciennym przestrzeni kosmicznej jest około 300 neutrino reliktowych, czyli świadków Wielkiego Wybuchu. Pośród wyżej energetycznych neutrino, których oddziaływania potrafimy już bezpośrednio rejestrować, najwięcej dociera do Ziemi neutrino ze Słońca, bo około siedemdziesięciu miliardów w każdej sekundzie na każdy centymetr kwadratowy powierzchni. Kolejne ważne źródło neutrino stanowią neutrino atmosferyczne pochodzące z rozpadów cząstek powstałych w wyniku oddziaływań promieni kosmicznych z jądrami z górnej warstwy atmosfery ziemskiej. Neutrino najwyższych energii mogą pochodzić z galaktycznych i pozagalaktycznych źródeł. Oczekuje się, że ich badanie pomoże ustalić, skąd biorą się, docierające do Ziemi, cząstki najwyższych energii, czyli gdzie we Wszechświecie znajdują się naturalne, potężne akceleratory cząstek. Innym ciekawym źródłem neutrino dla badań astrofizycznych są, niestety rzadkie, wybuchy gwiazd Supernowych, w których aż 99% uwolnionej energii unoszone jest przez neutrino. Najważniejszym ziemskim źródłem neutrino (częściej antyneutrino) są procesy rozszczepienia i rozpadów jąder naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. Są nimi też urządzenia zbudowane przez człowieka: wspomniane już reaktory jądrowe oraz akceleratory, z których przyspieszone protony w zderzeniach z protonami tarczy służą do wytwarzania wiązek neutrino na tej samej zasadzie co powstawanie neutrino atmosferycznych. Zaletą tych sztucznie wytworzonych neutrino jest stosunkowo dobra kontrola ich energii, składu i kierunku.

Neutrino słoneczne, powstające w procesach termojądrowej syntezy jąder lekkich pierwiastków oraz w rozpadach β^+ , zachodzących w centrum Słońca, były pierwszymi zarejestrowanymi na Ziemi neutrino z pozaziemskiego źródła. Ogromny, jak na lata 1960., detektor, zbudowany przez R. Davisa, umieszczony był na głębokości około 1500 m pod ziemią w kopalni złota Homestake w Południowej Dakocie. Wynik pomiarów, po raz pierwszy ogłoszony w 1968 roku w oparciu o 150 dni zbierania danych, a następnie przez ponad trzydzieści lat stale poprawiany, był zaskakujący. Obserwowany strumień neutrino był około trzy razy mniejszy niż wynikało to z przewidywań Standardowego Modelu Słońca. Niedobór potwierdzony został przez cztery inne eksperymenty, przy czym był różny w zależności od badanego przez nie zakresu energii neutrino słonecznych. Ta niezgodność pomiarów i przewidywań teoretycznych nazywana była „zagadką neutrino słonecznych”.

Badania oddziaływań neutrino atmosferycznych prowadzone były od początku lat 1980., gdyż te właśnie neutrino stanowiły największe tło w eksperymentach poszukujących rozpadu protonu, przewidywanego przez model Wielkiej Unifikacji oddziaływań cząstek. W szczególności dla niżej energetycznych neutrino atmosferycznych oczekiwano dwukrotnie większej liczby neutrino mionowych niż neutrino elektronowych. Tymczasem w eksperymencie Kamiokande w Japonii i w dwóch innych eksperymentach zaobserwowano, że stosunek liczby oddziaływań neutrino mionowych do elektronowych jest bliski jedynce, czyli że brakuje neutrino mionowych. Niedobór neutrino mionowych nazwano „anomalią neutrino atmosferycznych”.

Wyjaśnienie obu tych tajemniczych niedoborów neutrino nastąpiło na przełomie XX i XXI wieku dzięki pomiarom

w eksperymentach: SuperKamiokande (następca eksperymentu Kamiokande, wiodący udział T. Kajity) dla neutrino atmosferycznych i w Sudbury Neutrino Observatory (SNO, w północnym Ontario, Kanada, z kluczowym udziałem A.B. McDonalda) dla neutrino słonecznych. Pomiary w obu eksperymentach pokazały, że neutrino oscylują.

Kwantowo-mechaniczny efekt oscylacji może zająć dla cząstek swobodnych różniący się masą. Obserwacja oscylacji neutrino oznacza, że dla trzech rodzin stany kwantowe neutrino ν_e, ν_μ, ν_τ , 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 stanami ν_e, ν_μ, ν_τ , czyli neutrino zmieniają swoją tożsamość.

W przypadku odkrycia oscylacji neutrino atmosferycznych w eksperymencie SuperKamiokande, bardzo ważny był pomiar liczby oddziaływań ν_μ i ν_e w funkcji tzw. kąta zenitalnego, 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 (około 13 000 km). Okazało się, że wielkość mierzonego niedoboru strumienia ν_μ zależy od energii neutrino i długości drogi do detektora i można bezpośrednio pokazać oscylacyjne zachowanie liczby oddziaływań ν_μ w funkcji stosunku energii neutrino do długości przebytej drogi.

Eksperyment SNO, przełomowy dla wyjaśnienia niedoboru elektronowych neutrino słonecznych, badał oddziaływanie neutrino w detektorze wypełnionym tysiącem ton ciężkiej wody D_2O i umieszczonym na głębokości 2 km. Użycie ciężkiej wody pozwalało na równoczesny pomiar trzech różnych procesów oddziaływań neutrino słonecznych, co z kolei pozwoliło ustalić, że niedobór elektronowych neutrino słonecznych wiąże się z zachodzącymi wewnątrz Słońca oscylacjami $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu,\tau}$, podczas gdy całkowity strumień trzech rodzajów neutrino jest zgodny z przewidywaniami Standardowego Modelu Słońca.

Oscylacje neutrino zostały następnie potwierdzone i znacznie lepiej zmierzone w szeregu innych eksperymentów, w szczególności z wykorzystaniem neutrino reaktorowych i akceleratorowych. Obserwacja oscylacji oznacza, że neutrino 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 Model Standardowy wymaga przebudowy.

Obecne i planowane eksperymenty oscylacyjne powinny jeszcze odpowiedzieć na pytania o nie do końca znane uporządkowanie stanów masowych neutrino, udział neutrino w obserwowanej asymetrii między materią i antymaterią we Wszechświecie oraz, czy – poza neutrino – przynależnymi do trzech rodzin cząstek elementarnych – nie ma jeszcze tak zwanych neutrino sterylnych. Eksperymenty oscylacyjne nie mogą dostarczyć informacji o bezwzględnych wartościach masy neutrino. Z różnego rodzaju pomiarów na razie znamy tylko górne granice masy i wiemy, że są one zaskakująco małe w porównaniu z masami leptonów naładowanych i kwarków. Stanowi to przedmiotem bardzo ciekawych hipotez teoretycznych. Fizycy, zajmujący się badaniami neutrino, mają więc co robić, aby pokazać, że odkrycie oscylacji neutrino „może okazać się zasadnicze dla zrozumienia struktury Wszechświata”.

AGNIESZKA ZALEWSKA