

Koniec zagadki neutrino słonecznych

Smażąc się na słońcu nie zdajemy sobie sprawy, że światło do nas docierające wzięło swój początek w reakcji termojądrowej, która zaszła we wnętrzu Słońca jakieś... milion lat temu. Tak długo trwa proces przekazywania energii z wnętrza naszej gwiazdy. Dociera do nas jednak strumień informacji o aktualnym stanie słonecznego pieca. Choć jest on bardzo intensywny, to niezwykle trudny do wykrycia. Stanowią go tworzone w trakcie reakcji termojądrowych neutrino elektronowe. Od prawie 40 lat strumień ten jest mierzony za pomocą niezwykle pomysłowych i wyrafinowanych sposobów. Pierwszy z nich wymagał odnalezienia pojedynczych atomów, których jądra uległy reakcji z neutrinami, w zbiorniku o objętości wielu metrów sześciennych.

Od początku pomiary te wykazywały deficyt neutrino. Biorąc pod uwagę komplikację eksperymentów z jednej, a konieczność posłużenia się modelem tak samego Słońca, jak i skomplikowanego łańcucha reakcji w nim zachodzących z drugiej strony, o deficyt obwiniano albo pomiar, albo model. Istniała jednak inna możliwość – wyjaśnieniem mogło być zachowanie samych neutrino. Gdyby miały one choćby niewielką masę, to mogłyby oscylować, tzn. zmieniać tzw. zapach, czyli rodzaj. Zjawisko to jest dozwolone na mocy „prawa amerykańskiego”: oscylacje dla masywnych neutrino są dozwolone, bo nie są zabronione. Przemieniając się z neutrino elektronowych w neutrino mionowe lub taonowe, stawałyby się niewykrywalne, gdyż warunkiem ich wykrycia w dotychczasowych eksperymentach było wytworzenie odpowiedniego leptonu w wyniku oddziaływania z materią detektora. Nie jest to jednak możliwe, gdyż neutrino słoneczne mają za małą energię, by w zderzeniu z materią wytworzyć cząstkę tak masywną jak dwustukrotnie cięższy od elektronu mion, nie mówiąc już o jeszcze siedemnastokrotnie bardziej masywnym taonie.

Przyszedł wreszcie moment, w którym utrzymujące się stwierdzenie deficytu przestało fizykom wystarczać. Kolejna generacja genialnych eksperymentów jest już wrażliwa na dotąd niewykrywalne, pochodzące ze Słońca neutrino mionowe i taonowe. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu dwóch dodatkowych reakcji. Oprócz opisanego wyżej oddziaływania przez prąd naładowany (*charge current* CC), tzn. oddziaływania z materią za pomocą naładowanego bozonu pośredniczącego W^+ lub W^- , w wyniku którego neutrino staje się naładowanym leptonem, możliwe jest oddziaływanie przez prąd neutralny (*neutral current* NC), czyli za pomocą neutralnego bozonu pośredniczącego Z^0 . W wyniku tego oddziaływania neutrino pozostaje niewykrywalnym neutrinem, ale do rejestracji pozostaje to, z czym neutrino oddziało. Tylko że rejestracja ta jest bardzo trudna. Do niedawna udawało się jedynie rejestrować tzw. elastyczne rozpraszanie neutrino na elektronach (*elastic scattering* ES), które jest tylko w części tak efektywne dla neutrino mionowych i taonowych, jak dla elektronowych. W połowie kwietnia jednak pojawiło się długo oczekiwane doniesienie z SNO [1] dotyczące w pełni egalitarnej reakcji typu NC neutrino z jądrami.

SNO (Sudbury Neutrino Observatory) znajduje się dwa kilometry pod ziemią w kopalni INCO, Ltd. Creighton niedaleko Sudbury w Ontario. Detektor wykorzystuje okrągły zbiornik o średnicy 12 metrów napełniony ultraczystą ciężką wodą D_2O . Zbiornik ten jest obłożony 9456 fotopowielaczami zamontowanymi na stalowym rusztowaniu o średnicy 17,8 metra, a całość jest zanurzona w ultraczystej zwykłej wodzie H_2O . Fotopowielacze rejestrują promieniowanie Czerenkowa generowane przez poruszające się z prędkością większą od prędkości światła w wodzie cząstki naładowane. Wykorzystanie wypożyczonego przez Kanadę deuteru pozwala na rejestrację reakcji $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$, inicjowanej przez neutrino słoneczne pochodzące z przejścia ${}^8B \rightarrow {}^8Be + e^+ + \nu_e$. Uwolniony w wyniku oddziaływania neutrino z deuterem neutron może być następnie wylapany przez inne jądro deuteru, powodując emisję kwantu gamma o energii 6,25 GeV, inicjującą z kolei kaskadę elektromagnetyczną, której rozwój wywołuje promieniowanie Czerenkowa wykrywalne przez fotopowielacze.

Podkreślana przez zespół eksperymentu SNO czystość użytych materiałów ma olbrzymie znaczenie, gdyż pozwala na redukcję tła pochodzącego od śladowych ilości pierwiastków promieniotwórczych. Natomiast przed tłem związanym z promieniowaniem kosmicznym eksperyment chroniony jest przez umieszczenie głęboko pod ziemią.

SNO mierzy oczywiście i dwie pozostałe reakcje CC i ES. Pozwala to na jednoczesne wyznaczenie strumienia neutrino słonecznych docierających w postaci neutrino elektronowych ϕ_e oraz strumienia docierającego w postaci neutrino nieelektronowych, ale oddziałujących za pomocą prądu neutralnego z materią $\phi_{\mu\tau}$. Okazuje się, że strumień $\phi_{\mu\tau}$ jest dwa razy większy niż ϕ_e .

Oznacza to, że tylko jedna trzecia neutrino słonecznych dociera do Ziemi w oryginalnej postaci neutrino elektronowych. Całkowity strumień neutrino słonecznych zgadza się bardzo dobrze z przewidywaniami standardowego modelu Słońca. Wygląda na to, że rozumiemy, jak działa Słońce, a neutrino mają masę i podlegają oscylacjom. Tak więc najbardziej ekscytujące rozwiązanie problemu neutrino słonecznych okazało się prawdziwe.

Tego samego dnia zespół eksperymentu SNO opublikował doniesienie [2] dotyczące asymetrii dzień-noc strumienia neutrino elektronowych. Wynik jest pozytywny, choć jeszcze umiarkowanie istotny statystycznie. Preferuje on modele, w których oscylacje neutrino są wzmacniane przez oddziaływanie z materią.

Piotr ZALEWSKI

[1] SNO Collaboration, *Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory*, 19 kwietnia 2002

[2] SNO Collaboration, *Measurement of Day Night Neutrino Energy Spectra at SNO and Constraints on Neutrino Mixing Parameters*, 19 kwietnia 2002