

## Neutrino na wagę

Po wielu latach usilnych poszukiwań znaleziono eksperymentalny dowód, że neutrino - najbardziej nieuchwytna cząstka elementarna - nie jest jak światło całkiem pozbawiona masy. Trudno przecenić możliwe konsekwencje tego największego fizycznego odkrycia 1998 r. Wszak mała masa neutrino decyduje o przyszłych losach wszechświata.

### Stanisław Mrówczyński

Dokonania fizyki cząstek elementarnych podczas ostatnich dwudziestu lat układają się w długi ciąg sukcesów Modelu Standardowego, będącego sumą naszej wiedzy o naturze mikroświata. Model ten jest niezwykle finezyjną konstrukcją ściśle powiązanych ze sobą elementów. Jednak większość teoretyków odmawia mu urody i uważa za teorię jedynie prowizoryczną. Model Standardowy nie odpowiada na wiele pytań. Nie wyjaśnia np., dlaczego w przyrodzie obserwujemy sześć, a nie, powiedzmy, dziesięć typów kwarków? Albo dlaczego proton jest dwa tysiące razy cięższy od elektronu? Podobnych pytań jest wiele.

Panuje powszechna wiara, że za Modelem Standardowym kryje się jakaś głębsza teoria, która rozwiąże te i podobne zagadki. Od lat podejmowane są próby sformułowania takiej "ogólnej teorii wszystkiego", która, wśród innych zadań, ma powiązać świat najmniejszych obiektów z grawitacją. Zaproponowano wiele, może nawet zbyt wiele, jej wariantów. Przypuszcza się, że dopiero eksperyment podpowie, w jakim kierunku dążyć. Zaobserwowanie zjawiska niezgodnego z Modelem Standardowym zdaje się być kluczem do fundamentalnej teorii. Już wielokrotnie ogłaszano odkrycie takiego zjawiska, lecz zwykle powtórna, uważniejsza analiza prowadziła do wniosku, że alarm był przedwczesny, że jeszcze nie czas na pogrzeb Modelu Standardowego. Wydaje się, że prawdziwy przełom nastąpił latem 1998 r., gdy doniesiono o zaobserwowaniu procesu mieszania neutrin.

Neutrino jest bez wątpienia najbardziej osobliwym okazem w menażerii cząstek elementarnych. Hipoteza jego istnienia pojawiła się w 1930 r., aby ratować jedno z kardynalnych praw fizyki: zasadę zachowania energii. Systematyczne badania tzw. rozpadu beta jąder atomowych zdawały się wskazywać, że łączna energia produktów rozpadu jest mniejsza niż energia początkowa. Energia może zmieniać swoją formę, nie może jednak ani zanikać, ani rodzić się z niczego. Wolfgang Pauli znalazł w końcu remedium na "energetyczny kryzys". Doszedł mianowicie do wniosku, że brakującą energię unosi nie obserwowana cząstka. Swój pomysł sformułował w słynnym liście do fizyków zebranych w Tybindze, dokąd nie przyjechał "ze względu na odbywające się w Zurichu tańce". Po wielu latach Pauli pisał o neutrinie jako o głupiotkim dziecku kryzysu życia, które i później głupio się zachowywało". Sformułował bowiem hipotezę istnienia tej cząstki w czasie, gdy porzuciła go żona. ("Żeby jeszcze dla pogromcy byków, ale dla zwykłego chemika").

Neutrino bardzo słabo oddziałują z materią, przelatują przez nią nie zostawiając niemal żadnych śladów. Z tego powodu przez ćwierć wieku nie udawało się zarejestrować tej cząstki widma. Dopiero reaktory jądrowe - pierwsze zbudowano w latach II wojny światowej - umożliwiły obserwację neutrin. Reakcjom dzielenia jąder atomowych, jakie zachodzą w reaktorach, towarzyszy niezwykle obfita produkcja neutrin. Wyliczono, że w ciągu sekundy rodzi się w reaktorze ich liczba tak wielka, jak jedynka z 20 zerami. Dysponując tak potężnym źródłem, dwaj fizycy z Los Alamos - Frederick Reines i Clyde Cowan - przeprowadzili w 1956 r. rozstrzygający eksperyment. Ogromny detektor ustawiony przy reaktorze zarejestrował sygnały pochodzące od neutrin. Reines otrzymał Nagrodę Nobla dopiero jesienią 1995 r. - czekał więc na swój dzień prawie cztery dekady; Cowan nie dożył tej chwili.

W gorącym wnętrzu Słońca zachodzą reakcje jądrowe prowadzące do powolnej przemiany wodoru w hel i powstawania cięższych pierwiastków. Reakcjom tym, dzięki którym otrzymujemy życiodajne ciepło, towarzyszy, podobnie jak procesom w ziemskich reaktorach, emisja neutrin. Jednak Słońce jest miliard razy wydajniejszym źródłem. W każdej sekundzie biliony słonecznych neutrin przecinają nasze ciało nie czyniąc nam najmniejszej szkody. W latach 50. zbudowano ogromny detektor, który umieszczono w kopalni złota w Dakocie Południowej na głębokości 1,5 km. Chodziło o odizolowanie się od wszelkich źródeł promieniowania. Detektor stanowiło 15 tys. litrów cieczy zawierającej chlor. Neutrino oddziałując z jądrem chloru powoduje jego przemianę w radioaktywne jądro argonu, które po pewnym czasie znów się rozpada w jądro chloru. Rozpad ten można zarejestrować i tym samym stwierdzić obecność neutrin.

Ze względu na fantastycznie małe prawdopodobieństwo wspomnianego oddziaływania udawało się zaobserwować w wielotonowym detektorze zaledwie jeden atom argonu raz na kilka dni. Teoretyczne obliczenia przewidywały większą liczbę. Początkowo nie bardzo przejmowano się rozbieżnością - eksperyment był niebywale trudny, więc łatwo o pomyłkę. W ciągu 40 lat podobne pomiary wielokrotnie powtarzano we Włoszech, Japonii, na Kaukazie. Rejestrowana liczba neutrin jest wciąż mniejsza niż wynika z teorii.

Początkowo znano tylko jeden typ neutrina. Obecnie rozróżniamy trzy rodzaje: elektronowe, mionowe i tauonowe. Jedno z rozwiązań zagadki słonecznych neutrin zakłada mieszanie się tych rodzajów. Oznacza to, że neutrino np. elektronowe zamienia się z upływem czasu na np. mionowe, które po

pewnym czasie staje się z powrotem elektronowym. Takie dziwaczne zachowanie - zwane właśnie mieszaniem - jest dość rozpowszechnione w świecie rządzone przez mechanikę kwantową. Przypuszcza się, że część neutrin elektronowych emitowanych ze Słońca przekształca się w drodze na Ziemię w neutrina mionowe lub tauonowe, które tutaj nie są już rejestrowane. Jednak próby zaobserwowania tego zjawiska nie udawały się. Należy tutaj podkreślić, że zgodnie z Modelem Standardowym neutrina, tak jak kwanty światła, są całkowicie pozbawione masy, co w konsekwencji wyklucza mieszanie się różnych typów neutrin.

W miejscowości Kamioka na północny zachód od Tokio jest kopalnia rud metali kolorowych. Tutaj, półtora kilometra pod powierzchnią ziemi, wydrążono wielką komorę. Umieszczono w niej zbiornik doskonale czystej wody, szeroki i wysoki na 40 m. Ze ścian tego ogromnego naczynia wpatruje się w wodę ponad 11 tys. wielkich oczu - fotopowielaczy zdolnych zaobserwować pochodzące od neutrin błyski. To całe urządzenie - zbudowany za 100 mln dolarów detektor Super-Kamiokande - obsługuje ponad stu fizyków, wśród których jest Danuta Kielczewska z Uniwersytetu Warszawskiego.

Detektor może rejestrować neutrina przybywające do nas ze Słońca, jak i te powstające w górnych warstwach atmosfery, gdy wdzierają się tam kosmiczne promienie - rozpędzone cząstki, głównie protony, bombardujące naszą planetę ze wszystkich stron. Ziemia nie stanowi dla neutrin niemal żadnej przeszkody, więc można obserwować zarówno te atmosferyczne neutrina, które powstały kilkanaście kilometrów ponad Kamioką, jak i te, które przybyły z antypodów, po przeleceniu 13 tys. km. Szczegółowa analiza każdego neutrinowego błysku, których następuje nie więcej niż kilkanaście w ciągu doby, pozwala stwierdzić, czy mamy do czynienia z neutrinem elektronowym czy mionowym, z jakiego kierunku neutrina przybyło i jaką miało energię.

Dzięki temu stwierdzono, że do detektora dociera niemal dwukrotnie więcej neutrin mionowych z góry niż z dołu. Liczby neutrin elektronowych przybywających z obu kierunków są natomiast takie same. Prowadzi to do wniosku, że część neutrin mionowych lecących wzdłuż średnicy Ziemi zamienia się po drodze w neutrina tauonowe. Ponieważ mieszanie wymaga masy, występowanie tego zjawiska oznacza, że neutrina mają bardzo małą, lecz jednak różną od zera masę.

Wynik eksperymentu Super-Kamiokande jest sprzeczny z Modelem Standardowym, który, jak już pisałem, przyjmuje, że neutrina są ściśle bezmasowe. Nie jest to jednak dla teoretyków powodem do zmartwienia. Przeciwnie, rewelacje z Kamioki przyjęto z entuzjazmem. Od lat budowane są teorie, których celem jest określenie wszelkich sił i form materii, własności przestrzeni i czasu za pomocą jednej zasady, jednej złotej formuły.

Każda teoria wychodząca poza Model Standardowy prowadzi do wniosku, że w pewnych warunkach powinniśmy zaobserwować odstępstwa od przewidywań tego modelu. Mimo wielkiego wysiłku eksperymentatorów odstępstw takich nie udawało się wykryć. Model Standardowy trzymał się nad wyraz krzepko, więc teorie starające się go poprawić zdawały się nie mieć żadnej racji istnienia. Odkrycie mieszania się neutrin zmienia tę sytuację. Wyjście poza Model Standardowy jest koniecznością, a teorie dopuszczające istnienie neutrin obdarzonych masą są właściwymi kandydatami na "ogólną teorię wszystkiego".

Doniesienie z Kamioki ma również kapitalne znaczenie dla kosmologii. Model rozszerzającego się wszechświata dopuszcza trzy możliwe scenariusze ewolucji. Jeśli gęstość materii jest dostatecznie duża, wówczas przyciągające siły grawitacji powstrzymają kiedyś ekspansję i wszechświat zacznie się kurczyć, by w końcu zapaść się do punktu. W przypadku małej gęstości, rozszerzanie będzie odbywało się w nieskończoność. Mamy wreszcie przypadek pośredni - wszechświat będzie się rozszerzał nieskończenie długo, ale prędkość ekspansji spadać będzie do zera. Chociaż sam model ma obecnie bardzo solidne podstawy, nie wiemy, niestety, który ze scenariuszy natura wybrała.

Powodem jest właśnie słaba znajomość gęstości materii we wszechświecie. Obserwacja wielu układów galaktycznych, szczególnie ruchu gwiazd wokół środków ciężkości galaktyk, wskazuje, że poza materią zawartą w gwiazdach istnieją jej inne nieświecące, a więc niewidoczne formy. Taką, ciemną materię mogą tworzyć właśnie obdarzone masą neutrina, które, choć bardzo lekkie, występują w wielkiej, trudno wyobrażalnej liczbie. Wyniki eksperymentu Super-Kamiokande sugerują, że znaczną część masy ogromnego wszechświata niosą właśnie te maleńkie cząstki.

**Autor jest fizykiem, pracuje w Instytucie Problemów Jądrowych w Warszawie i Wyższej Szkole Pedagogicznej w Kielcach.**