

# Tajemnice brakujących neutrin

Danuta KIEŁCZEWSKA

Neutrino nie przestają nas zadziwiać. Obserwacje z kolejnych eksperymentów sugerują, że z neutrinami, które pokonują duże odległości pomiędzy ich źródłem a detektorem, dzieje się coś, czego nie przewiduje Standardowy Model cząstek elementarnych – potrafią zmieniać się jedne w drugie. To tajemnicze zachowanie zauważono najpierw u neutrin przychodzących ze Słońca, a dla znacznie bardziej energetycznych neutrin, które powstają w wyniku bombardowania atmosfery ziemskiej przez promienie kosmiczne, efekt uznano za udowodniony („Aktualności”, *Delta* 9/1998). Również neutrino wyprodukowane w akceleratorze w Los Alamos wydają się przechodzić pewną metamorfozę. Wszystkie te obserwacje coraz bardziej przekonują fizyków, że neutrino nie są cząstkami bezmasowymi, tak jak dotąd sądzono, a Model Standardowy wymaga pewnych korekt.

## Neutrino w Modelu Standardowym

Elementarnymi składnikami materii są kwarki i leptony. Budulcem jąder atomowych są właściwie tylko dwa spośród sześciu kwarków. Mówimy, że tworzą one pierwszą z trzech generacji. W każdej generacji jest para kwarków, które różnią się masą i ładunkiem elektrycznym ( $+\frac{2}{3}e$ ,  $-\frac{1}{3}e$ ).

Leptony, na ogół lżejsze od kwarków, też grupują się w trzech generacjach, w każdej generacji po 2 cząstki. Elektron, mion oraz taon to leptony naładowane (ładunek  $-e$ ) kolejnych generacji. Ich partnerami są obojętne elektrycznie neutrino: elektronowe  $\nu_e$ , mionowe  $\nu_\mu$  i taonowe  $\nu_\tau$ . W Modelu Standardowym przyjmuje się, że ich masy są równe zeru.

Oprócz 6 kwarków i 6 leptonów jest jeszcze 6 antykwarków i 6 antyleptonów. Każda antycząstka ma masę identyczną, jak cząstka, ale przeciwny ładunek.

## Po co ich aż tyle?

Tym bardziej że, skoro  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$  nie mają ani masy, ani ładunku elektrycznego, to właściwie niczym się nie różnią. Różni je wyłącznie przynależność do innych generacji. I tak: tylko neutrino mionowe może w oddziaływaniu z kwarkiem wyprodukować mion, a w wyniku rozpadu taonu musi zawsze powstać neutrino taonowe. Nie znamy odpowiedzi na pytanie, po co w naturze aż tyle pozornie jednakowych cząstek. Być może jednak ich masy nie są takie same, a tylko tak małe, że dotychczas nie udało się ich zmierzyć. Naturalną konsekwencją niedużych różnic mas byłaby, według mechaniki kwantowej, możliwość przemiany neutrin jednego rodzaju w inny.

## Skąd się biorą neutrino?

Wprawdzie otaczająca nas materia składa się tylko z kwarków i elektronów, lecz natura obfituje w źródła neutrin wszelkiej maści i bardzo różnych energii.

Najwięcej neutrin dociera do nas ze Słońca: średnio kilkadziesiąt miliardów neutrin elektronowych pada w każdej sekundzie na każdy  $\text{cm}^2$  powierzchni Ziemi. Ich energie wynoszą kilka MeV (masa protonu to prawie 1000 MeV/ $c^2$ ). Podobne energie mają też neutrino z rozpadów pierwiastków promieniotwórczych, ale jest ich znacznie mniej. Przy energiach większych niż 20 MeV dominują tzw. neutrino atmosferyczne, powstające w wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą ziemską.

Neutrino słoneczne i atmosferyczne towarzyszą nam bezustannie. Natomiast sporadycznie odwiedzają nas w większych ilościach neutrino z odległych źródeł kosmicznych. W 1987 roku przybyły po trwającej ponad 170 tysięcy lat podróży rozpoczętej wybuchem supernowej w Wielkim Obłoku Magellana. Spośród  $6 \times 10^{16}$  neutrin, które trafiły na swej drodze na 3 wielkie detektory, tylko 24 udało się zaobserwować. I nie wynikało to z ułomności detektorów, lecz z bardzo małego prawdopodobieństwa oddziaływania tych cząstek z materią.

## Jak je obserwować?

Aby móc podpatrywać neutrino, musimy umieć obserwować bardzo duże ilości materii. I to w sposób możliwie tani. Najlepiej użyć do tego ogromnych zbiorników wody. Najnowszy detektor o nazwie Super-Kamiokande, zbudowany w kopalni niklu w Japonii, zawiera 50 tysięcy ton wody. Padające neutrino, acz niechętnie, oddziałują czasem z nukleonami lub elektronami w cząsteczkach wody, produkując na ogół cząstki naładowane elektrycznie. Większość z tych cząstek porusza się szybciej niż światło w wodzie i jest w stanie emitować tzw. promieniowanie Czerenkowa. Znaczna część tego promieniowania przypada na światło widzialne, które w bardzo czystej wodzie może przebyć kilkadziesiąt metrów do ścian zbiornika, gdzie jest rejestrowane. Super-Kamiokande ma kształt walca o wysokości i średnicy około 40 metrów. Na ścianach umieszczono prawie 12 tysięcy fotopowielaczy, każdy o średnicy 50 cm (tło okładek tego numeru *Delty*). Promieniowanie Czerenkowa emitowane jest pod stałym kątem  $41^\circ$  względem osi wyznaczonej przez kierunek lotu cząstek. W efekcie pojawia się sygnał w fotopowielaczach, zawartych w pierścieniu o grubości proporcjonalnej do długości fragmentu toru cząstki i promieniu proporcjonalnym do odległości tego fragmentu od ściany fotopowielaczy (rys. 1 na okładce).

## Neutrino słoneczne

Dotychczas zbudowano 5 detektorów do obserwacji neutrin słonecznych. Od ponad 25 lat strumień  $\nu_e$  powyżej 0,81 MeV mierzony jest w kopalni złota Homestake w Colorado w detektorze wypełnionym 610 tonami środka czyszczącego o składzie



chemicznym  $C_2Cl_4$ . Zachodzi w nim reakcja:  
 $^{37}Cl + \nu_e \rightarrow ^{37}Ar + e^-$ . Trzeba podziwiać sprawność eksperymentatorów, którzy są w stanie zliczać pojedyncze atomy argonu, produkowane średnio jeden na dwa dni.

Dwa detektory o nazwie Gallex i Sage oparte są na reakcji:  $^{71}Ga + \nu_e \rightarrow ^{71}Ge + e^-$ . Ten proces jest czuły na neutrino o energii powyżej 0,23 MeV. Zbiorniki galu o masie 60 ton znajdują się w podziemnych laboratoriach Gran Sasso we Włoszech oraz Baksan w Rosji. Co 3 tygodnie udaje się eksperymentatorom wyodrębnić i zliczyć około 10 atomów wyprodukowanego germanu.

Zupełnie inne podejście zastosowano we wspomnianych już wodnych detektorach Czerenkowa. Pierwszy detektor, Kamiokande, o masie 2500 ton, zbudowano w roku 1983 do poszukiwania rozpadu protonu, a od 1986 roku rejestrował on neutrino słoneczne. Jego znacznie większym następcą jest Super-Kamiokande. Neutrino słoneczne wybijają elektrony z cząsteczek wody, przy czym elektrony zachowują kierunek neutrino, dzięki czemu można go zrekonstruować. Gdy po kilku tygodniach pracy detektora zaobserwowano wyraźny nadmiar zdarzeń skorelowanych z kierunkiem od Słońca, nie ulegało wątpliwości, że jest to istotnie sygnał neutrino słonecznych (rys. 2 na okładce).

We wszystkich pięciu eksperymentach zaobserwowano mniej neutrino niż przewiduje się na podstawie obliczeń teoretycznych. Początkowo sądzono, że przyczyna tkwi w przybliżeniach modeli opisujących wnętrze Słońca. Jednak różnorodność danych eksperymentalnych i ich dokładność pozwala na wyciąganie wniosków, które w niewielkim stopniu zależą od założeń astrofizycznych. Stąd wielu fizyków uważa, że przyczyny „zgubionych” neutrino należy szukać w ich losie w czasie podróży do detektora. Wyniki wszystkich eksperymentów stają się zrozumiałe, jeżeli przyjąć, że neutrino elektronowe oscylują w neutrino mionowe lub taonowe. Przy stosunkowo małych energiach, charakterystycznych dla reakcji termojądrowych,  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$  oddziałują jeszcze rzadziej niż elektronowe i dlatego rejestrujemy znacznie mniej zdarzeń, niż się spodziewaliśmy.

Stwierdzenie, że reakcje termojądrowe charakteryzują się małymi energiemi, może wydawać się zaskakujące. Co to za małe energie, które prowadzą do temperatury 15 milionów stopni w samym środku naszej gwiazdy? Jednak faktem jest, że neutrino wyprodukowane w naszej ziemskiej atmosferze mają energie sto albo więcej razy większe.

### Neutrino atmosferyczne

I całe szczęście! Bo neutrino atmosferycznych jest znacznie mniej i tylko dzięki temu, że duże energie zwiększają prawdopodobieństwo oddziaływania, możemy je obserwować.

Pochodzą one z rozpadów lekkich cząstek, zwanych mezonami, wyprodukowanych przez promienie

kosmiczne, głównie protony. Mezony rozpadają się przede wszystkim na miony i mionowe neutrino  $\nu_\mu$  lub antyneutrino  $\bar{\nu}_\mu$ . Z kolei w wyniku rozpadów mionów powstaje po jednym neutrino  $\nu_\mu$  i  $\bar{\nu}_e$  lub  $\bar{\nu}_\mu$  i  $\nu_e$ . W efekcie na każdą parę  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$  przypadają 2 pary  $\nu_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ .

Od ponad 10 lat fizycy próbują policzyć, ile neutrino każdego rodzaju dociera do podziemnych detektorów i okazuje się, że znów coś się nie zgadza, bo obserwujemy mniej więcej tyle  $\nu_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ , ile  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$ . Ponadto w Super-Kamiokande zaobserwowano niedawno, że ten deficyt dotyczy neutrino mionowych przybywających do detektora z antypodów.

Wygląda na to, że znów mamy do czynienia z metamorfozą neutrino, która zachodzi na długiej drodze przez Ziemię. Sądzi się, że neutrino mionowe  $\nu_\mu$  ( $\bar{\nu}_\mu$ ) oscylują w neutrino taonowe  $\nu_\tau$  ( $\bar{\nu}_\tau$ ), które oddziałują znacznie rzadziej i nie są rejestrowane. Sugerowałoby to, że masa  $\nu_\tau$  różni się od masy  $\nu_\mu$ . Deficyt nadlatujących z antypodów neutrino mionowych został zmierzony przez Super-Kamiokande z dokładnością wystarczającą do ogłoszenia w czerwcu 1998 roku odkrycia niezerowej masy neutrino.

### Nadzieja w akceleratorach

Jeżeli różnica mas nie jest zbyt mała, to metamorfoza neutrino może nastąpić w krótkim z konieczności czasie, jaki upływa od produkcji cząstki w akceleratorze do jej detekcji. Wydaje się, że zaobserwowano oscylacje  $\nu_\mu$  i  $\bar{\nu}_\mu$  wyprodukowanych w akceleratorze w Los Alamos w  $\nu_e$  i  $\bar{\nu}_e$ . Weryfikacji tego wyniku może wkrótce dostarczyć grupa fizyków z laboratorium Rutherforda w Anglii.

Planowane są kolejne eksperymenty korzystające z wiązek neutrino akceleratorowych. Aby jednak potwierdzić lub odrzucić efekt obserwowany w neutrino atmosferycznych, trzeba detektor umieścić w odległości kilkuset kilometrów od źródła. Przygotowywane są dwa takie eksperymenty.

W pierwszym detektor Super-Kamiokande będzie rejestrował neutrino wyprodukowane w odległym o 250 km akceleratorze pod Tokio. W drugim neutrino powstałe w akceleratorze pod Chicago będą obserwowane w stanie Minnesota z odległości 730 km.

### ... i nie tylko

Intensywnie analizując bieżące dane eksperymentalne i budując następne detektory, fizycy liczą też na kolejny łut szczęścia: na krótki błysk neutrino z supernowej. Ocenia się, że w naszej Galaktyce takie wybuchy zdarzają się raz na 20–50 lat. Na ogół światło z wybuchu grzęźnie w obłokach międzygwiazdnych. Neutrino one nie przeszkadzają. Na pewno lecą już do nas z różnych zakątków Drogi Mlecznej. Oby tylko dotarły na Ziemię, gdy detektory będą gotowe na ich przyjęcie. Pozwoliłyby jeszcze raz zajrzeć do wnętrza gwiazd oraz być może ujawniłyby, jakim to metamorfozom podlegają w czasie bardzo długich wędrówek.