

## Nieparzystość kombinowana neutrin?

Naruszenie parzystości kombinowanej CP, czyli niezmienniczości procesów przy jednoczesnej zmianie parzystości P (zamiana orientacji układu odniesienia na przeciwną) i sprzężeniu ładunkowym C (od ang. *charge*; zamiana cząstek na ich antycząstki) w rozpadach neutralnych kaonów, odkryte w 1964 roku, było wielkim zaskoczeniem. Trzy lata później, czyli równo pół wieku temu, Andriej Sacharow zauważył, że jest to jeden z koniecznych warunków wygenerowania przewagi materii nad antymaterią w ewolucji Wszechświata (w wyniku tzw. bariogenezy), czyli warunkiem istnienia nas jako bytów materialnych.

Okazało się, że takie naruszenie jest możliwe, o ile istnieją co najmniej trzy generacje cząstek materii, bo wtedy przekształcenia między generacjami muszą być opisywane nie tylko za pomocą trzech tzw. kątów mieszania (oddających to, jak trudne jest przejście między poszczególnymi parami generacji), ale również tzw. zespolonej fazy (wynika to z warunku unitarności macierzy  $3 \times 3$ ). Naruszenie występuje, o ile faza ta nie jest wielokrotnością  $\pi$  (czyli jej część urojona jest niezerowa).

W latach sześćdziesiątych nie wiedzano nawet, że istnieją dwie generacje (np. wiedzano tylko o trzech z sześciu kwarków). Skompletowanie trzech, rozpoczęte w latach siedemdziesiątych, a zakończone tuż przed przełomem tysiącleci, wraz z uzyskaniem dowodu, że nie ma ich więcej (przynajmniej takich, w których neutrina są prawie bezmasowe) jest bardzo ciekawe.

Okazało się jednak, że poziom naruszenia CP w sektorze kwarkowym jest niewystarczający do wyjaśnienia procesu bariogenezy. Dlatego powinno istnieć dodatkowe źródło tego naruszenia w sektorze leptonowym lub w ogóle poza Modelem Standardowym.

Jeżeli chodzi o sektor leptonowy, to faza jest umieszczana w macierzy mieszania neutrin, bo wynika to z historii odkrywania Modelu Standardowego (niektórzy upierają się, że samo mieszanie, możliwe do zdefiniowania dzięki niezerowym i różnym masom neutrin, jest już wyjściem poza Model Standardowy), pojęciowo jest przystępniejsze, rachunkowo prostsze oraz, co chyba najważniejsze, pomiar jest możliwy tylko poprzez precyzyjne badanie oscylacji neutrin.

Najczulszą procedurą doświadczalną jest poszukiwanie neutrin (antyneutrino) elektronowych w wiązce powstającej z produkcji par antymion-neutrino (mion-antyneutrino) w rozpadach dodatnich (ujemnych) pionów i kaonów produkowanych w wyniku bombardowania tzw. tarczy protonami. Wiązki takie początkowo składają się prawie wyłącznie z neutrin (antyneutrino) mionowych, ale zanim doleżą do oddalonego o setki kilometrów detektora, ich skład zmienia się w wyniku oscylacji. Ponieważ tempo oscylacji zależy od parametrów macierzy mieszania

i różnic mas oraz stosunku odległości do energii neutrin, to te ostatnie dwie wielkości można dobrać tak, żeby maksimum interesującej nas oscylacji przypadało w miejscu, gdzie umieszczony jest tzw. daleki detektor. Wtedy zliczanie pojawiających się neutrin (antyneutrino) elektronowych pozwala na wyznaczanie tych parametrów sektora neutrin, od których tempo danej oscylacji zależy.

Jeżeli CP jest naruszone, to prawdopodobieństwa oscylacji dla neutrin i antyneutrino będą się różnić.

W praktyce przeprowadza się dopasowanie do wszystkich dostępnych danych, a fazę naruszenia CP można wyłuskać nawet z oscylacji samych neutrin, których produkuje się więcej (bo protony wiązki i tarczy są z materii, czyli są dodatnie – produkuje się więcej mezonów dodatnich, a w konsekwencji antymionów). Dane jednak zbiera się na zmianę, raz dla neutrin, raz dla antyneutrino.

Obecnie działają dwa takie eksperymenty, T2K w Japonii oraz NOvA w Stanach Zjednoczonych. Pierwszy z nich ogłosił latem [1], że hipotezę o braku naruszenia CP można odrzucić na poziomie istotności statystycznej 0,05. Kolokwialnie mówiąc, oznacza to, że wyniki na tyle niezgodne z taką hipotezą, co te obserwowane, mają szansę pojawić się w wyniku fluktuacji statystycznej nie większą niż raz na dwadzieścia. Dane wskazują jednocześnie na maksymalne naruszenie, co (po potwierdzeniu i przy sprzyjających wiatrach) wystarcza do wyjaśnienia bariogenezy.

Wyniki drugiego z eksperymentów [2] też sugerują, że CP jest w sektorze leptonowym naruszone, choć odnajdywane najbardziej prawdopodobne wartości parametrów nie są takie same. Z wiarygodnego źródła (w eksperymencie T2K bierze udział silna grupa naukowców z Polski) wiem, że przedstawiciele obu eksperymentów właśnie zamierzają rozmawiać o przeprowadzeniu wspólnej statystycznej analizy danych.

Zaplanowane naświetlenia mogą w ciągu kilku lat doprowadzić do polepszenia istotności statystycznej do poziomu  $3\sigma$  (prawdopodobieństwo fluktuacji mniejsze od dwóch na tysiąc), odpowiadającej tzw. ewidencji obserwowania czegoś nowego w fizyce cząstek. Oczywiście przy założeniu, że CP jest rzeczywiście naruszone w sposób maksymalny. Szans na uzyskanie poziomu „odkrycia” ( $5\sigma$ : 3 na 10 milionów) na razie nie ma. A gra toczy się o kolejną, już szóstą Nagrodę Nobla z Fizyki „za neutrina”.

Piotr ZALEWSKI

[1] T2K prezentuje dane wskazujące na możliwość łamania symetrii CP przez neutrina, <http://neutrino.fuw.edu.pl/pl/node/754>

[2] The NOvA Collaboration, *Constraints on Oscillation Parameters from  $\nu_e$  Appearance and  $\nu_\mu$  Disappearance in NOvA*, arXiv:1703.03328v2