

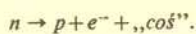
# Czy cechy neutrin wpływają na własności Wszechświata?

Dr Michał JAROSZYŃSKI

Pytanie postawione w tytule może się wydać dziwne. Przyzwyczajeni do własnej bezsilności wobec ogromu Kosmosu nie jesteśmy skłonni przypisać jakiegokolwiek roli w określeniu jego własności żadnym innym istotom, a cóż dopiero szczególnemu rodzajowi cząstek elementarnych. Jeśli jednak zastanowić się dłużej, dochodzimy do wniosku, że zarówno najogólniejsze cechy Wszechświata jak i własności cząstek elementarnych powinny wynikać z podstawowych praw fizyki. Te prawa są wspólne dla wszystkich badanych przez fizykę obiektów — od tych najmniejszych (cząstek) aż po największy obiekt — Wszechświat. Przy takim postawieniu problemu związku między własnościami na pozór zupełnie nieporównywalnych obiektów stają się naturalne. Nasza znajomość fizyki jest ciągle jeszcze niepełna i daleko nam do zrozumienia wszystkich związków opisywanego typu. Również omówiony dalej przykład opiera się na przesłankach teoretycznych i nie potwierdzonych ostatecznie wynikach eksperymentów.

## Neutrino — cząstki trudne do badania

Istnienie neutrin jest konieczne do zrozumienia rozpadu neutronu. W rozpadzie tym powstaje proton, elektron i, jak się przekonamy, coś jeszcze:



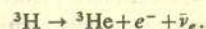
Dwa produkty reakcji, proton i elektron, są bardzo łatwe do rejestracji i możemy wyznaczyć ich energię kinetyczną z dużą dokładnością. Sumując te energie i dodając do nich energie spoczynkowe protonu i elektronu stwierdzimy, że suma jest ciągle mniejsza od energii neutronu (tzn. od  $m_n c^2$ ). Wnioskujemy stąd, że reszta energii unosi ze sobą jakaś trzecia cząstka, owo „coś”. Konieczność istnienia tej cząstki wynika także z zasady zachowania momentu pędu. Spin neutronu (czyli „wewnętrzny” moment pędu) ma wartość  $1/2$  w pewnych jednostkach. Tę samą wartość mają spiny protonu i elektronu. Reguły dodawania spinów określone przez mechanikę kwantową mówią, że moment pędu układu proton-elektron może mieć tylko wartość całkowitą. Dopiero przypisanie trzeciej cząstce spinu  $1/2$  rozwiązuje problem. Przyjęto cząstkę tę nazywać neutrinem. (Ścisłej: „coś” w zapisanej powyżej reakcji jest, zgodnie z panującymi konwencjami, antyneutrinem elektronowym,  $\bar{\nu}_e$ ). Oddziaływanie, w którym mogą uczestniczyć neutrina nazwano słabym. Nazwa ta dobrze je charakteryzuje — trzeba bardzo korzystnego wzajemnego położenia dwóch cząstek, aby mogły wejść ze sobą w takie oddziaływanie. Dlatego bardzo trudno byłoby bezpośrednio wyznaczyć jakieś cechy neutrin. Pozostają drogi pośrednie. Prześledzimy jedną z nich mającą na celu wyznaczenie masy spoczynkowej neutrina.

Energia wyzwalająca się w rozpadzie neutronu:

$$E_0 = m_n c^2 - m_p c^2 - m_e c^2$$

dzieli się między neutriną i pozostałe cząstki. Jeśli neutriną jest cząstką o różnej od zera masie spoczynkowej  $m_\nu$ , to maksymalna energia kinetyczna obserwowanych produktów rozpadu wynosi  $E_0 - m_\nu c^2$ . W przypadku, gdy  $m_\nu = 0$ , wartość

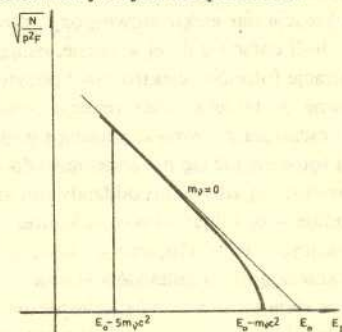
ta może sięgać  $E_0$ . Gdyby energia spoczynkowa neutrina była znacząca w porównaniu z energią rozpadu, już dawno byłaby zmierzona. Wiemy, że ten przypadek nie zachodzi. Rozstrzygnięcie, czy masa spoczynkowa neutrina wynosi tylko  $1/10000$  masy elektronu, czy po prostu „zero” okazuje się niezwykle trudne, ponieważ, zgodnie z prawami statystyki, tylko w nielicznych przypadkach energia kinetyczna elektronu i protonu będzie zbliżona do  $E_0$ , a tylko takie przypadki mogą być przydatne dla określenia energii maksymalnej. W dokonanym dwa lata temu eksperymencie badano rozpad trytu, który jest izotopem wodoru. Jego jądro atomowe składa się z protonu i dwóch neutronów. Rozpad jednego z neutronów prowadzi do otrzymania jądra składającego się z dwóch protonów i neutronu, a więc będącego izotopem helu:



Ponieważ rozpadowi neutronu towarzyszy w tym przypadku „przebudowa” jądra atomowego, energia tego rozpadu jest mniejsza i wynosi  $E_0 \approx 18$  keV. To stwarza dogodniejsze warunki dla pomiaru masy neutrina niż rozpad jakiegokolwiek innego izotopu, gdyż stosunkowo częściej mierzona energia kinetyczna znajdzie się w interesującym przedziale. Opracowanie danych w tak subtelnym eksperymencie jest bardzo trudne. Wstępne wyniki wskazują, że masa neutrina elektronowego jest różna od zera i prawdopodobnie zawarta w granicach

$$14 \text{ eV} < m_\nu c^2 < 46 \text{ eV}$$

Neutrino są więc około 20 tysięcy razy lżejsze od elektronów około 40 milionów razy lżejsze od protonów.



Wykres Curie dla rozpadu  $\beta$  przedstawia względną ilość emitowanych elektronów jako funkcję ich energii. Współrzędne są tak dobrane, że w przypadku  $m_\nu = 0$  wykres byłby prostą. Jeśli  $m_\nu \neq 0$ , wykres odkształca się w swej wysokoenergetycznej części.

## Ile neutrin jest we Wszechświecie?

Na to pytanie potrafimy odpowiedzieć nie wykonując żadnych pomiarów, o ile przyjmemy, że słuszny jest tak zwany standardowy model gorącego Wszechświata. W modelu tym przyjmuje się, że ewolucja rozpoczyna się od stanu osobliwego, w którym materia ma nieskończoną gęstość. Ciągła ekspansja przez kilkanaście miliardów lat doprowadza do obecnego stanu niezwykle niskiej gęstości. Z obserwacji wynika, że gdyby wszystkie atomy wchodzące w skład obiektów astronomicznych rozprościć równomiernie po całej przestrzeni, to na każdy z nich przypadłaby objętość większa od  $1 \text{ m}^3$ . Jednocześnie obserwujemy we Wszechświecie wielką ilość fotonów niskiej energii, tworzących tzw. promieniowanie tła. Ich widmo jest takie, jakby wysyłało je ciało o temperaturze 3 K. Są one rozłożone bardzo równomiernie w przestrzeni i docierają do nas z tą samą intensywnością ze wszystkich kierunków. W każdym metrze sześciennym jest ich 540 milionów. Inne fotony obserwujemy tylko dlatego, że znajdujemy się bardzo blisko Słońca i dość blisko gwiazd, ale we Wszechświecie stanowią one rzadkość.



Niska średnia gęstość materii w przestrzeni powoduje, że każdy z fotonów ma bardzo małą szansę napotkania jakiegokolwiek atomu. Skrótowo mówimy, że Wszechświat jest obecnie przezroczysty. (Właśnie dzięki temu możemy obserwować odległe obiekty) Cofnijmy się jednak wstecz w czasie do stanu, gdy odległość między dwoma dowolnymi punktami we Wszechświecie była 1500 razy mniejsza niż obecnie. Oznacza to, że koncentracja wszystkich cząstek była  $(1500)^3$  razy większa niż obecnie. Widmo promieniowania tła odpowiadało temperaturze 4500 K. W tych warunkach możliwe były częste zderzenia między fotonami i atomami i możliwa była wymiana energii. Ze względu na wielką przewagę liczebną fotonów znikoma ich część wystarczyła do zjonizowania wszystkich atomów. Materia składała się więc z fotonów, elektronów i jąder atomowych. Częste zderzenia tych cząstek zapewniały podtrzymywanie równowagi termodynamicznej. Fakt istnienia równowagi termodynamicznej we wczesnym Wszechświecie ma dla nas dwie ważne konsekwencje. Po pierwsze wyjaśnia, dlaczego promieniowanie tła ma widmo promieniowania cieplnego — jest to właśnie pozostałość po równowadze termodynamicznej we wczesnym okresie. Po drugie pozwala określić skład i własności materii jako funkcję jej gęstości.

Dokonajmy teraz drugiej podróży w czasie, tym razem do stanu, gdy gęstość była (miliard)<sup>3</sup> razy wyższa, a temperatura wynosiła ok. 3 miliardów stopni. Przy tej temperaturze energia termiczna cząstek jest rzędu energii spoczynkowej elektronu  $m_e c^2$ . Możliwa staje się kreacja par elektronowo-pozytonowych kosztem fotonów. Jeśli cofać się dalej w czasie, osiągniemy stan, w którym koncentracje fotonów, elektronów i pozytonów są w przybliżeniu równe. W takiej sytuacji reakcje kreacji i anihilacji par  $e^\pm$  zachodzą z równą częstością i względne koncentracje par i fotonów już się nie zmieniają. Zarówno elektrony jak i pozytony są zdolne do oddziaływań słabych. Kreacja par powoduje więc olbrzymi wzrost koncentracji cząstek oddziaływujących słabo. Dopiero jednak przy temperaturze przekraczającej 30 miliardów stopni oddziaływania słabe stają się częste. W nieelastycznych zderzeniach mogą być kreowane pary neutrino-antyneutrino. Zderzenia pomiędzy neutrinami i elektronami umożliwiają wymianę energii i pozwalają doprowadzić mieszaninę fotonów-nukleonów-elektronów-pozytonów-neutrino do równowagi termodynamicznej. Jak się domyślamy, w stanie równowagi koncentracje neutrino, elektronów i fotonów stają się w przybliżeniu równe, co zapewnia zachodzenie kreacji i anihilacji z równą częstością zarówno dla par  $e^\pm$  jak i par  $\nu_e, \bar{\nu}_e$ . Jeśli więc temperatura Wszechświata przekraczała kiedyś 30 miliardów stopni, to zawierał on wtedy mniej więcej tyle samo fotonów co neutrino i antyneutrino. Przy spadku temperatury i przy ekspansji materii neutrino tracą możliwość zderzenia się z innymi cząstkami. Niemożliwa staje się ich anihilacja. Również ich rozpad jest niemożliwy. Są zbyt mało masywne, aby rozpaść się na jakieś inne cząstki. Nieuchronnym wnioskiem z tych rozważań jest stwierdzenie, że we Wszechświecie istnieją reliktywne neutrino.

Powróćmy na chwilę do fotonów cofając się w czasie. Tym razem „zaobserwujemy” anihilację par  $e^\pm$  i powstanie w tym procesie fotonów. Ilość fotonów zwiększa się mniej więcej 3-krotnie; neutrino w ogóle nie wiedzą o zachodzących anihilacjach i ich koncentracja się nie zmienia. Powinno być obecnie ich w przybliżeniu 3-krotnie mniej niż fotonów. Dokładniejsze rozważania dają 150 milionów neutrino i antyneutrino elektronowych w metrze sześciennym.



*A. Maillol, akt kobiecy.*

## Konsekwencje

Prosty rachunek pokazuje, że masa spoczynkowa neutrino zawartych w jakimś obszarze jest większa od masy zawartych w nim atomów, jeśli jedno i drugie rozproszone są równomiernie w całej przestrzeni. Okazuje się więc, że to neutrino są obecnie głównym źródłem pola grawitacyjnego określającego dynamikę Wszechświata jako całości, a średnia gęstość materii jest większa niż poprzednio sądzono. Taki „gęściejszy” Wszechświat szybciej spowalnia swą ekspansję na skutek większego przyciągania grawitacyjnego. Określony na podstawie pomiarów obecnego tempa ekspansji i równań dynamiki wiek Wszechświata ma mniejszą wartość. Przy założeniu dostatecznie dużej masy spoczynkowej neutrino potrafimy przewidzieć, że rozszerzanie się Wszechświata zostanie zastąpione kurczeniem.

Ciekawa jest próba wyjaśnienia za pomocą masywnych neutrino problemu tzw. „ukrytej masy”. Pomiar prędkości gwiazd w galaktykach pozwalają ocenić wielkość sił grawitacji, które utrzymują te gwiazdy na ich orbitach. To pozwala z kolei wyznaczyć masę rozpatrywanej galaktyki. Analogicznie ocenić można masę gromady galaktyk. Tu natrafiamy na niespodziankę: masy gromad okazują się parokrotnie większe od sumy mas wchodzących w ich skład galaktyki. Wynika stąd, że gromady zawierają w jakiejś formie materię, która nie należy jednocześnie do poszczególnych galaktyk. Bezpośrednimi pomiarami nie udało się jak dotąd „ukrytej masy” wykryć. Możliwość wyjaśnienia problemu dają neutrino o energii spoczynkowej rzędu kilkunastu eV. Neutrino tej masy, jeśli są rozproszone równomiernie w przestrzeni, miałyby prędkości rzędu 3 km/s — jeszcze jedna pozostałość po wcześniejszej równowadze termodynamicznej i energii termicznej. Jeśli neutrino te spróbujemy „zamknąć” w gromadach galaktyk, co wymaga ich znacznego zagęszczenia czy, jak kto woli, „sprężenia”, ich typowa prędkość wzrośnie. Nie przekroczy jednak prędkości ucieczki z gromady galaktyki. Kolejna próba — „zamknięcia” neutrino w galaktykach — już się nie powiedzie. Dalsze „sprężenie” i wzrost prędkości chaotycznych ruchów powoduje, że potencjał grawitacyjny galaktyki jest za słaby dla utrzymania w niej neutrino. Ale o to nam właśnie chodziło — wprowadzając neutrino do gromad galaktyk znacznie zwiększamy masę gromad nie zmieniając jednocześnie masy galaktyk.

Trzeba tu zauważyć, że dla wyjaśnienia problemu „ukrytej masy” trzeba się posłużyć neutrino o dość dobrze określonej masie — kilka, kilkanaście elektronowoltów. Neutrino dwukrotnie masywniejsze dałyby się związać również w galaktykach.