

Nowości neutrinowe: skąd pochodzą neutrino i jak je rejestrować?

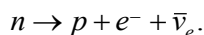
Krzysztof Fiałkowski
Instytut Fizyki UJ

1. Skąd pochodzą neutrino?

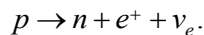
Już wielokrotnie *Foton* zamieszczał artykuły poświęcone badaniom neutrin. Przypomnijmy w skrócie ich historię: zaproponowane w 1930 roku przez Wolfganga Pauliego jako „niewidzialni” partnerzy elektronów w rozpadach β , zostały zarejestrowane ćwierć wieku później przez Fredericka Reinesa (Nobel 1995) i Clyde’a Cowana i od ponad półwiecza są intensywnie badane przez fizyków całego świata. Są to cząstki wszechobecne: samo Słońce wysyła strumień neutrin tak potężny, że w każdej sekundzie przez każdy centymetr kwadratowy powierzchni Ziemi (a więc i naszych ciał) przechodzi kilkadziesiąt miliardów tych cząstek!

Dlaczego więc tak późno odkryto neutrino? Przyczyna jest prosta: neutrino oddziałują z materią tak słabo, że ani kula ziemska, ani nawet Słońce nie są dla nich przeszkodą. Dopiero dla warstwy materii o grubości rzędu roku świetlnego prawdopodobieństwo oddziaływania neutrin o energii typowej dla „słonecznych” jest porównywalne do prawdopodobieństwa przejścia bez oddziaływania. Do wynikających stąd wniosków dla strategii detekcji neutrin wrócimy później.

Strumienie neutrin jeszcze intensywniejsze od „słonecznego” możemy obserwować w pobliżu reaktorów, gdzie są one produktem rozpadu β^- swobodnych neutronów i jąder o nadmiarze neutronów według schematu



Kreska nad ostatnim symbolem oznacza, że jest to *antyneutrino*, czyli antycząstka neutrina $\bar{\nu}_e$, które pojawia się obok antycząstki elektronu – *pozytonu* e^+ przy rozpadach β^+ jąder o nadmiarze protonów zgodnie ze schematem



Przypomnijmy, że procesy te mogą zajść tylko wtedy, gdy pozwala na nie prawo zachowania energii. Suma mas produktów rozpadu musi być mniejsza od masy cząstki rozpadającej się, więc dla pojedynczych cząstek możliwy jest pierwszy z wymienionych rozpadów (masa neutronu jest większa od masy protonu o około trzy masy elektronu, a masa neutrina jest pomijalnie mała), zaś niemożliwy drugi rozpad – proton jest stabilny. Masa jądra M nie jest jednak sumą mas Z protonów i N neutronów (określanych wspólną nazwą nukleonów), które wchodzi w jego skład, lecz jest od niej mniejsza o tzw. deficyt masy ΔM :

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M.$$

Wielkość stosunku tego deficytu do liczby nukleonów w jądrze decyduje o stabilności jądra. Z reguły dla określonego pierwiastka, którego atomy mają ustaloną liczbę protonów Z w jądrze istnieje jeden izotop stabilny (lub dwa), zwykle o N równym Z lub nieco większym. Jądra atomów izotopów stabilnych mają masę M mniejszą niż te, które otrzymalibyśmy „wymieniając” jeden z protonów na neutron, albo odwrotnie. Zwiększenie albo zmniejszenie N zmniejsza deficyt masy i powoduje, że jeden z wymienionych powyżej procesów rozpadu jest możliwy. Dla $M(N,Z) > M(N-1,Z+1) + M_e$ możliwy jest rozpad β^- , a dla $M(N,Z) > M(N+1,Z-1) + M_e$ rozpad β^+ (M_e – masa elektronu).

Oprócz występujących w opisanych wyżej procesach neutrin *elektronowych* znamy neutrina *mionowe* ν_μ , towarzyszące mionom μ np. w rozpadach mezonów π („pionów”): $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, oraz neutrina *taonowe* ν_τ , związane z trzecim obok elektronu i mionu naładowanym *leptonem* (nazwą tą określamy elementarne cząstki, które nie oddziałują silnie): taonem τ . Taon został odkryty dopiero 30 lat temu (za co jego odkrywca Martin Perl otrzymał nagrodę Nobla), bo ze względu na jego dużą masę powstaje tylko w zderzeniach przy bardzo wysokich energiach, a towarzyszące mu neutrinu zarejestrowano dopiero w ostatniej dekadzie.

Miony są niestabilne podobnie jak piony (choć żyją około stu razy dłużej, średnio około 2 μ s) i rozpadają się na elektrony i dwa neutrina:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Taony żyją ponad milion razy krócej i wśród produktów ich (bardzo różnorodnych) rozpadów jest zawsze neutrinu taonowe.

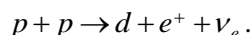
Jak widać, źródłem neutrin są najczęściej rozpady nietrwałych jąder lub cząstek. Neutrina elektronowe zwykle pojawiają się w rozpadach „trzycałowych”, czyli w towarzystwie dwu innych cząstek. Prawo zachowania energii nie wyznacza więc jednoznacznie ich energii nawet wtedy, gdy rozpadające się jądro spoczywa; podobnie jak dla elektronów z rozpadów β ustalona jest tylko maksymalna możliwa energia. Znamy jednak także proces, w którym w stanie końcowym są tylko dwie cząstki: tzw. „wychwyt K”, w którym jądro pochłania jeden z elektronów (z najbliższej jądra powłoki), i w wyniku tego jeden z protonów jądra zmienia się w neutron z emisją neutrina:

$$e^- + p \rightarrow \nu_e + n.$$

Dla ustalonych jąder przed i po wychwycie energia neutrina jest ściśle określona.

Neutrina „słoneczne”, zarejestrowane w sławnym eksperymencie Raymonda Davisa (Nobel 2002) nieco później niż „reaktorowe”, pochodzą nie z rozpadów,

ale z zachodzących w Słońcu reakcji jądrowych. Najważniejsza z nich to reakcja łączenia protonów, w której powstaje układ p - n , czyli *deuteron* d – jądro ciężkiego izotopu wodoru, deuteru:



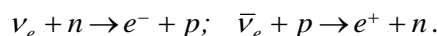
Reakcja ta inauguruje „cykl protonowy” reakcji, który jest głównym źródłem energii Słońca.

Inny jest schemat produkcji neutrin podczas wybuchów *supernowych*, czyli niewiarygodnie potężnych wybuchów ciężkich gwiazd. Gdy w takich gwiazdach reakcje jądrowe „wypalą” większość wodoru, ciśnienie panujące wewnątrz gwiazdy rozgrzewanej energią reakcji jądrowych przestaje równoważyć siły grawitacji i gwiazda „zapada się”. Atomy materii są zgniatane, a ich elektrony łączą się z protonami jąder w procesie analogicznym do omówionego powyżej „wychwytu K”. W wyniku tego powstaje „gwiazda neutronowa” i emitowana jest olbrzymia liczba neutrin. Wytwarzany wówczas strumień neutrin jest tak potężny, że w 1987 roku udało się zarejestrować neutrina z wybuchu supernowej w Obłoku Magellana, z odległości około 180 tysięcy lat świetlnych od Ziemi (a więc ponad dziesięć miliardów razy większej niż odległość Ziemi od Słońca!).

Wreszcie źródłem neutrin o energiach znacznie większych niż energie uzyskiwane w wymienionych powyżej procesach jest promieniowanie kosmiczne. Ściśle mówiąc, głównym źródłem są tu rozpady pionów powstających w atmosferze w wyniku oddziaływań nadlatujących z Kosmosu protonów o wielkich energiach, a także rozpady mionów powstających w rozpadach pionów. Neutrina te określa się zwykle nazwą „neutrina atmosferyczne”. Neutrina o podobnych energiach możemy oczywiście wytwarzać także w laboratorium na Ziemi, wykorzystując piony powstające w zderzeniach z materią protonów przyspieszanych w akceleratorach. Takie badania dowiodły, że ν_e i ν_μ to dwie różne cząstki, za co w 1988 roku nagrodę Nobla otrzymali Leon Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger.

2. Jak rejestrować neutrina?

Trudność rejestracji neutrin wynika z niezwykle małego prawdopodobieństwa ich oddziaływania z materią. Prawdopodobieństwo to rośnie z energią neutrin, ale nawet dla najwyższych energii jest znikomo małe. Dla (anty)neutrin z rozpadów β o energii rzędu kilku lub kilkudziesięciu energii spoczynkowych elektronu dominującym procesem oddziaływania jest przemiana w elektron (lub pozyton) przy równoczesnej przemianie jednego z neutronów jądra w proton (lub protonu w neutron):



Ta ostatnia reakcja posłużyła Reinesowi i Cowanowi do pierwszej rejestracji oddziaływań neutrin, bo pozytonów nie ma w „zwykłej” materii i oddziałują one w bardzo charakterystyczny sposób, anihilując z napotkanym elektronem na parę fotonów (kwantów gamma) o łącznej energii równej w przybliżeniu podwójnej energii spoczynkowej elektronu. Znacznie trudniejsza jest rejestracja neutrin przez detekcję elektronów, bo trudno je odróżnić od elektronów pochodzących z innych procesów. Dlatego Davis nie zliczał elektronów, tylko (co parę tygodni!) atomy radioaktywnego izotopu argonu, w które zmieniały się w jego eksperymencie jądra atomów chloru w wyniku przemiany jednego z neutronów w proton.

W zderzeniach neutrin o wysokich energiach (rzędu energii spoczynkowych protonu lub wyższych) z jądrami atomów materii powstaje z reguły więcej cząstek, ale zwykle zachodzi podobna zamiana neutrina w elektron, pozyton (jak wyżej) lub w mion

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p; \quad \bar{\nu}_{\mu} + p \rightarrow \mu^{+} + n$$

(taony żyją zbyt krótko, aby je rejestrować prostymi metodami). Rejestracja tych cząstek naładowanych może następować w tej samej materii, której użyto jako „tarczy”, jeśli jest ona przezroczysta dla światła. Wykorzystuje się w tym celu tzw. efekt Czerenkowa, polegający na emisji światła przez cząstki naładowane przy ich przelocie z szybkością większą od szybkości światła w danym ośrodku. Najlepszymi, stosunkowo tanimi detektorami są więc ogromne zbiorniki wodne osłonięte od wszelkich innych źródeł promieniowania i otoczone „fotopowielaczami”, rejestrującymi błyski światła. Za badania przy użyciu takiego detektora o nazwie Superkamiokande część nagrody Nobla w 2002 roku otrzymał Masatoshi Kosiba. Badania te dowiodły m.in., że zachodzą tzw. oscylacje neutrin: neutrina elektronowe, mionowe i taonowe mogą przechodzić w siebie wzajemnie! Z teorii wynika wtedy, że neutrina muszą mieć niezerową masę, choć jest ona zbyt mała (miliony razy mniejsza od masy elektronu), aby można ją obecnie wyznaczyć doświadczalnie.

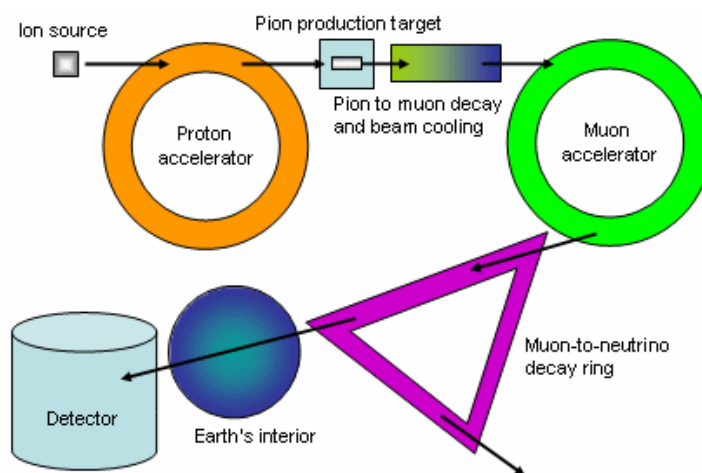
Jednak nawet dla potężnego strumienia neutrin i ogromnej tarczy liczba oddziaływań w jednostce czasu jest niewielka: przez ciało stałe o typowej gęstości pojedyncze neutrin przeleciałoby średnio przed oddziaływaniem odległość rzędu roku świetlnego, a nawet przy strumieniu rzędu miliardów neutrin na sekundę na cm^2 i objętości tarczy rzędu m^3 w czasie rzędu dni zarejestrujemy zwykle tylko pojedyncze oddziaływania.

Dwie metody detekcji neutrin omówione powyżej: bezpośrednia rejestracja pozytonów, elektronów lub mionów, w które zmieniły się neutrina, albo opóźnione liczenie radioaktywnych jąder powstałych w wyniku oddziaływania, dominowały przez pół wieku, przy czym ta pierwsza metoda dała się zastosować tylko dla znacznej energii neutrin. Dlatego większość neutrin „słonecznych” (o energii rzędu energii spoczynkowej elektronu) rejestrowano tylko metodami

radiochemicznymi. Dopiero niedawno ruszył (z udziałem krakowskich fizyków) eksperyment BOREXINO, w którym oddziaływania neutrin słonecznych z „cyklu protonowego” można rejestrować bezpośrednio. Jest to jednak eksperyment tak skomplikowany, że jego opis wymagałby specjalnego artykułu.

3. Co nowego?

Ostatnie lata przyniosły nowe pomysły na intensywne źródła neutrin. Jeden z nich (tzw. „fabryka neutrin”) polega na wykorzystaniu faktu, że miony żyją dostatecznie długo, aby sformować z nich gęstą wiązkę rozpędzoną do określonej energii. Rozpady takich mionów mogą dać wiązkę neutrin o wiele intensywniejszą i lepiej zogniskowaną niż jakiejkolwiek wiązki otrzymywane dotąd z rozpadów pionów produkowanych w zderzeniach protonów akceleratorowych z materią. Planuje się rozpędzanie mionów po „kanciastym” konturze zamkniętym (np. przybliżającym trójkąt), aby uzyskać wiązki neutrin poruszające się w przybliżeniu w kierunku równoległym do jednego z „boków” tego konturu.



Schemat ideowy fabryki neutrin (nie w skali): Od lewej u góry: źródło jonów, akcelerator protonów, tarcza do produkcji pionów, tunel rozpadu pionów, akcelerator mionów, pierścień rozpadu mionów w neutrina. Pokazano także kierunek wiązki neutrin przez kulę ziemską do odległego detektora

Druga idea (tzw. „wiązki beta”) pozwala na uzyskanie neutrin wysokich energii z rozpadów beta przez rozpędzenie w akceleratorze jonów radioaktywnych izotopów. Przy odpowiednio wysokim stopniu jonizacji pole elektryczne akceleratora może rozpędzić takie jony do bardzo wysokich energii, co także umożliwi lepsze zorientowanie przestrzenne wiązki neutrin pochodzących z rozpadu tych jonów.

Obecnie prowadzone są prace projektowe do konstrukcji urządzeń wykorzystujących te pomysły. Ocenia się, że oba sposoby pozwolą na uzyskanie znacznie intensywniejszych strumieni neutrin, niż używane obecnie, a przy tym możliwe będzie znacznie dokładniejszy dobór energii i kierunku wiązki.

Zupełnie nową ideą, dyskutowaną obecnie, jest możliwość wykorzystania procesu „odwrotnego” do wychwytu K : emisji antyneutrina z równoczesnym wychwytem emitowanego elektronu na jedną z powłok wokół jądra. W takim procesie energia antyneutrina jest ustalona dla spoczywającego jądra. Nie może to oczywiście nastąpić w zwykłym atomie, w którym powłoki bliskie jądra są zapełnione, a zakaz Pauliego nie pozwala na umieszczenie na nich dodatkowego elektronu. Jednak w jonach „odartych” z elektronów, które mają być użyte w „wiązkach beta”, proces ten jest możliwy (i całkiem prawdopodobny) i można w ten sposób otrzymać wiązkę neutrin o jeszcze lepiej określonym pędzie, niż dla „zwykłych” rozpadów β .

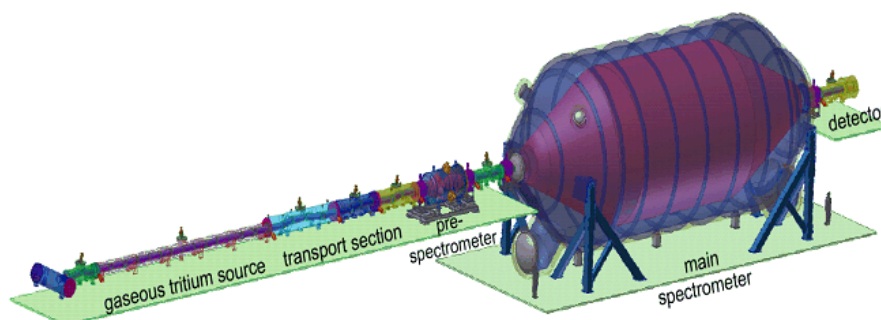
Jeszcze bardziej rewolucyjny pomysł dotyczy możliwości detekcji neutrin ze źródła, o którym dotąd nie wspominaliśmy: tzw. „neutrin tła”, czyli reliktu z ery, w której we Wszechświecie nie było jeszcze jąder, a protony, neutrony, elektrony i neutrina były w „równowadze termodynamicznej”. Oznacza to, że dzięki ogromnej temperaturze i energii kinetycznej elektronów i neutrin w każdej chwili tyle samo neutronów powstawało w zderzeniach i rozpadało się przez rozpad β . Po spadku temperatury poniżej pewnej wartości wszystkie neutrony oprócz tych, które „uwięzły” w jądrach (głównie helu) rozpadły się, a pochodzące z tych rozpadów neutrina wędrowały odtąd swobodnie obniżając swoją energię kinetyczną zgodnie z wzrostem odpowiadającej im długości fali materii. Można oszacować, że w każdym cm^3 Wszechświata jest około 10 neutrin z tego źródła, a ich energia kinetyczna jest poniżej jednej miliardowej energii spoczynkowej elektronu.

Tak mała energia neutrin tła (znacznie mniejsza od ich energii spoczynkowych!) powoduje, że prawdopodobieństwo ich oddziaływania z materią przez zainicjowanie procesu analogicznego do tego, który wykryli Reines i Cowan jest jeszcze o wiele rzędów wielkości mniejsze, niż dla rozważanych dotąd przykładów. Dodajmy, że tarczę należałoby budować ze specjalnie dobranych izotopów, dla których masa jądra po wymianie protonu na neutron zmniejszyłaby się o tyle, aby umożliwić wyprodukowanie pozytonu, bo nie wystarczy do tego pomijalnie mała energia neutrina. Nie jest też możliwa detekcja elastycznego rozproszenia neutrin tła, bo wynikała ze zderzeń takich neutrin zmiana energii cząstek materii byłaby zbyt mała, aby można ją zmierzyć znanymi metodami. Wydawało się więc, że w dającej się przewidzieć przyszłości istnienia neutrin tła nie da się w żaden sposób dowieść.

Tymczasem obecnie rozważa się możliwość rejestracji neutrin tła nie przez ich oddziaływanie, ale przez samo istnienie. Chodzi tu o wykorzystanie zakazu Pauliego, który uniemożliwia umieszczenie neutrina w stanie, który jest już

obsadzony. Neutrino tła „zajmują” stany o bardzo niskiej energii, więc ich obecność uniemożliwia rozpad β , w którym powstałoby neutrino o takiej samej energii. Może to dać zniekształcenie widma elektronów o wartości energii bliskiej maksymalnej: takich elektronów będzie mniej, niż oczekujemy.

Niestety, aktualna dokładność pomiarów tego widma nie pozwala jeszcze na uzyskanie znaczących wyników, ale po raz pierwszy wydaje się, że wykrycie neutrin tła nie jest zasadniczo niemożliwe. Dodajmy, że podobny efekt zmiany kształtu widma elektronów o najwyższej możliwej energii powinien najpierw pozwolić na wyznaczenie mas neutrin, bo ich energię spoczynkową należy oczywiście także uwzględnić w bilansie przy obliczaniu widma energii najszybszych elektronów z rozpadu β . Takiemu wyznaczeniu ma służyć rozpoczynający się właśnie eksperyment KATRIN. Jak wspomnieliśmy, energia kinetyczna neutrin tła jest mniejsza od energii spoczynkowej, więc jeszcze trudniej uwzględnić efekty zaburzenia widma spowodowane przez zakaz Pauliego. Być może jednak następna generacja podobnych eksperymentów naprawdę pozwoli na rejestrację neutrin tła, a przez to na kolejny test modeli historii Wszechświata!



Widok ogólny eksperymentu KATRIN (od lewej: gazowe źródło trytu, sekcja transportu, spektrometr wstępny, spektrometr główny, detektor)

Źródło: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2959>