

Nagroda Nobla dla neutrin i co dalej

Joanna Zalipska

Zakład Fizyki Wielkich Energii,
Departament Badań Podstawowych,
Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Warszawa

W 2015 roku Szwedzka Akademia Nauk uhonorowała dwóch naukowców prof. Takaaki Kajitę i prof. Artura B. McDonalda za odkrycie fascynującej własności neutrin – oscylacji i w rezultacie wykazanie, że cząstki te mają niezerową masę. Nie jest to pierwszy raz, kiedy ta prestiżowa nagroda przypadła neutrinom. Za zarejestrowanie owych elementarnych cząstek po raz pierwszy tę nagrodę dostał Frederic Reines w 1995 roku. Jak na ironię 7 lat wcześniej przyznano Nagrodę Nobla za odkrycie neutrina typu mionowego, które miało miejsce 6 lat po eksperymencie Reinesa. W końcu w 2002 roku Komitet Noblowski uznał, że wkład w astrofizykę i zarejestrowanie neutrin kosmicznych warte są nagrodzenia kolejną Nagrodą Nobla prof. Raymonda Davisa i prof. Masatoshi Koshibę. Od odkrycia neutrin w 1956 roku jest to dynamicznie rozwijająca się dziedzina fizyki cząstek elementarnych. Przeprowadzane liczne eksperymenty pozwoliły już wyjaśnić niektóre zagadki związane z neutrinami. Ale zanim stanie się jasne rozwiązanie, których zagadek warte było tegorocznej Nagrody Nobla, zaczniemy od przybliżenia, co to są neutrina, skąd się biorą, co to są oscylacje neutrin i dlaczego prowadzi to do wniosku, że neutrina mają masę, oraz powiemy, jakie eksperymenty należało przeprowadzić, żeby te efekty zmierzyć doświadczalnie.

Neutrina są to najlżejsze cząstki elementarne o zerowym ładunku elektrycznym oddziałujące tylko *ślabo* i *gravitacyjnie*, przez co bardzo trudno jest je zarejestrować. W rezultacie zasługują na miano *cząstek duchów*. W Modelu Standardowym cząstek elementarnych każde neutrimo ma swojego naładowanego partnera, który definiuje jego zapach. W związku z tym, tak jak mamy trzy naładowane leptony – elektron, mion i taon (e , μ , τ) – mamy również ich trzy neutralne odpowiedniki: neutrimo elektronowe, neutrimo mionowe i neutrimo taonowe (ν_e , ν_μ , ν_τ). Nikomu nie udało się jeszcze wyznaczyć masy któregoś z neutrin, ale różne doświadczenia pozwoliły na wyznaczenie granicy ich wartości. I tak wiadomo, że masa ν_e jest mniejsza niż 2,05 eV, natomiast granica sumy mas wszystkich neutrin jest $\sum_j m_j < 0,66$ eV. To wskazuje, że masy neutrin są bardzo małe, 10^6 razy mniejsze niż skala mas naładowanych leptonów czy też kwarków. Dla porównania masa elektronu to 511×10^3 eV, a protonu składającego się z trzech kwarków to 938×10^6 eV. W poznawaniu mas neutrin przychodzi nam z pomocą zjawisko oscylacji. Wiąże się ono z mieszaniem neutrin, które zostało zapostulowane na początku lat 60. XX wieku przez trzech fizyków Z. Makiego, M. Nakagawę i S. Sakatę. Wiąże się to z faktem, że ob-

serwowane przez nas w doświadczeniach neutrino ν_e , ν_μ , ν_τ nie są stanami o zdefiniowanej masie. Istnieją inne stany neutrino ν_1 , ν_2 i ν_3 , które mają odpowiednio masy m_1 , m_2 , m_3 . W rezultacie neutrino ν_e , ν_μ czy ν_τ składają się z mieszanki neutrino ν_1 , ν_2 i ν_3 . W konsekwencji prowadzi to do zjawiska samoczynnej zmiany typu neutrino w czasie jego propagowania się w czasie i przestrzeni. W ten sposób neutrino mionowe może się samoczynnie przemienić w neutrino elektronowe albo taonowe. Mamy wtedy do czynienia z oscylacjami odpowiednio $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oraz $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (patrz ramka). Szansa na przemianę neutrino zależy od parametrów opisujących ten proces oraz od kwadratu różnicy mas neutrino. Okazuje się, że proces oscylacji nie mógłby zachodzić, gdyby neutrino były bezmasowe.

Formalizm oscylacji neutrino

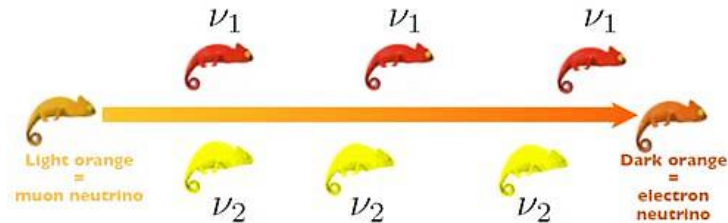
Teoria oscylacji mówi, że obserwowane doświadczalnie neutrino o określonym zapachu, czyli ν_e , ν_μ i ν_τ , nie są tożsame ze stanami własnymi mas neutrino (ν_1 , ν_2 , ν_3), natomiast można je przedstawić jako superpozycję tych stanów masy:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1)$$

Macierz U jest to macierz mieszania neutrino, α jest indeksem oznaczającym rodzaj neutrino e , μ , τ , a indeks i oznacza stan własny neutrino 1, 2, 3. Na razie skoncentrujemy się na tym, co dzieje się z neutrino, kiedy propagują się w czasie i przestrzeni. Stany własne masy neutrino propagują się zgodnie z równaniem Schrödingera. W rezultacie zachowanie się neutrino o określonym zapachu można porównać do zachowania kameleona. Neutrino propagując się w czasie i przestrzeni zmieniają swój rodzaj, tak jak kameleon zmienia kolor. Obrazuje to rys. 1 gdzie na początku mamy neutrino mionowe, czyli jasnopomarańczowego kameleona¹, który składa się z dwóch składników: kameleona w kolorze czerwonym ν_1 oraz kameleona w kolorze żółtym ν_2 . W czasie przemieszczania się neutrino mionowego jego składniki propagują się inaczej ze względu na to, że mają różne masy m_1 i m_2 . Na rys. 1 widać, że czerwony i żółty kameleon po pewnym czasie przesuwają się w fazie. W rezultacie na końcu drogi ich mieszanka odpowiada ciemnopomarańczowemu kameleonowi, reprezentującemu neutrino elektronowe. Podsumujmy, co się stało: wyprodukowane neutrino mionowe zamieniło się w neutrino elektronowe, czyli neutrino zmieniło swój zapach – tożsamość, bez żadnej ingerencji z zewnątrz. Mówimy, że neutrino przeoscyloowało. Jeśli czytelnik nadal ma wątpliwości, co to są neutrino i jak oscylują, polecam filmik, na którym sześćioletnia Samantha wyjaśnia, na czym polegają oscylacje neutrino używając do tego analogii lodów o różnych smakach,

<https://www.youtube.com/watch?v=sjN0E08aaFw&feature=youtu.be>

¹ W kolorze w wersji internetowej.



Rys. 1. Diagram obrazujący analogię między oscylacjami neutrin a zmianą koloru u kameleona. Początkowe neutrino mionowe reprezentowane przez jasnopomarańczowego kameleona zmienia się w ciemnopomarańczowego kameleona – neutrino elektronowe, wskutek różnej propagacji jego składowych, ν_1 i ν_2 , czyli kameleonów czerwonego i żółtego

Żeby jednak zrozumieć, jak powiązane są masy neutrin z oscylacjami, trzeba bliżej przyjrzeć się wzorom opisującym ten proces. Zaczniemy od tego, że propagację neutrina o określonym zapachu w czasie i przestrzeni można zapisać jako

$$|v_\alpha, t\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-iEt} |v_i\rangle. \quad (2)$$

Poniższy wzór opisuje prawdopodobieństwo oscylacji, a więc szansę na to, że wyprodukowane neutrino v_α przemieni się w neutrino innego typu v_β :

$$P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* \exp(-im_i^2 L/2E) \right|^2, \quad (3)$$

gdzie L oznacza odległość, na jakiej mierzy się oscylacje, a E to energia badanych neutrin.

Dla zrozumienia idei oscylacji ograniczymy się do przypadku dwóch neutrin v_α , v_β , dla których mieszanie się stanów masowych ν_1 i ν_2 można zapisać jako:

$$\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Tutaj macierz mieszania U została sparametryzowana za pomocą jednego kąta mieszania θ . Korzystając z tego zapisu prawdopodobieństwo na oscylację $v_\alpha \rightarrow v_\beta$ wyraża się jako:

$$P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m_{21}^2 L/4E), \quad (5)$$

gdzie $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ to różnica kwadratów mas neutrin ν_1 i ν_2 .

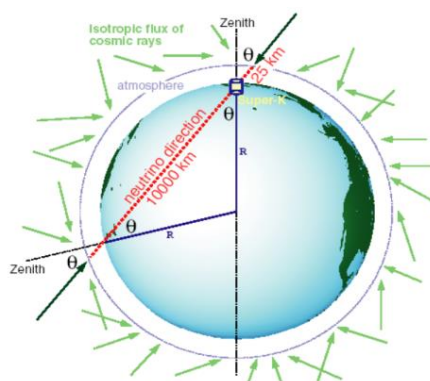
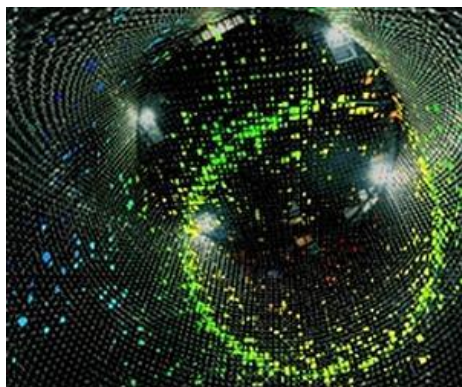
Z tego wzoru jednoznacznie wynika, że oscylacja neutrin zajdzie wtedy, gdy spełnione zostaną dwa warunki. Prawdopodobieństwo na oscylację będzie różne od zera tylko wtedy, gdy stany mas neutrin się mieszają, czyli parametr θ jest różny od zera. Z drugiej strony konieczne jest, aby Δm_{21}^2 było różne od zera, w przeciwnym razie sinus masowy zależny od tej wielkości będzie równy zero, czyli oscylacja neutrin ponownie nie będzie zachodzić. Wymaganie Δm_{21}^2 różnego od zera implikuje, że przynajmniej jedna z mas neutrin m_1 albo m_2 musi być większa od zera. Stąd jasno wynika,

że jeśli udałoby się zaobserwować oscylację neutrin, to dowodziłoby to, że neutrina mają masę. Warto jeszcze zwrócić uwagę na fakt, że prawdopodobieństwo zajścia transformacji neutrin zależy również od energii badanych neutrin E oraz odległości, na których mierzy się oscylacje L .

Sytuacja trochę się komplikuje, gdy weźmiemy pod uwagę, że neutrina mamy trzy, a nie dwa. Wtedy macierz mieszania neutrin U można sparametryzować przy użyciu nie jednego, a trzech kątów mieszania: θ_{12} , θ_{13} i θ_{23} . Wtedy też mamy trzy mieszające się stany własne masy neutrin ν_1 , ν_2 i ν_3 , co daje dwa niezależne kwadraty różnicy mas neutrin, Δm_{12}^2 i Δm_{23}^2 . Ale i z tym można sobie poradzić. Dla zainteresowanych poznanie formalizmu oscylacji trzech neutrin autorka poleca zapoznanie się z opisem mieszania się neutrin z Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2014-rev-neutrino-mixing.pdf>.

Kiedy przebrnęliśmy już przez opis fenomenologii neutrin, czas na przedstawienie eksperymentów, które pozwoliły potwierdzić opisaną wyżej teorię oscylacji. I tu do głosu dochodzą nasi dwaj laureaci tegorocznej Nagrody Nobla, którym udało się istnienie oscylacji potwierdzić doświadczalnie. Pierwszy z nich prof. Kajita zajął się badaniem neutrin atmosferycznych, podczas gdy prof. McDonald mierzył oddziaływania neutrin pochodzących ze Słońca.

Neutrina atmosferyczne są neutrinami produkowanymi w sposób naturalny. Cząstki promieniowania kosmicznego, takie jak np. protony, oddziałując z atomami ziemskiej atmosfery na wysokościach do 30 km nad powierzchnią Ziemi produkują neutrina mionowe i elektronowe, przy czym strumień neutrin mionowych powstający w ten sposób jest dwukrotnie większy niż strumień neutrin elektronowych. Trzeba sobie zdać sprawę również z tego, że neutrina powstają w atmosferze wokół całej kuli ziemskiej, a więc tak samo nad Japonią, nad Biegunem Południowym czy też nad Atlantykiem (rys. 2 po prawej).



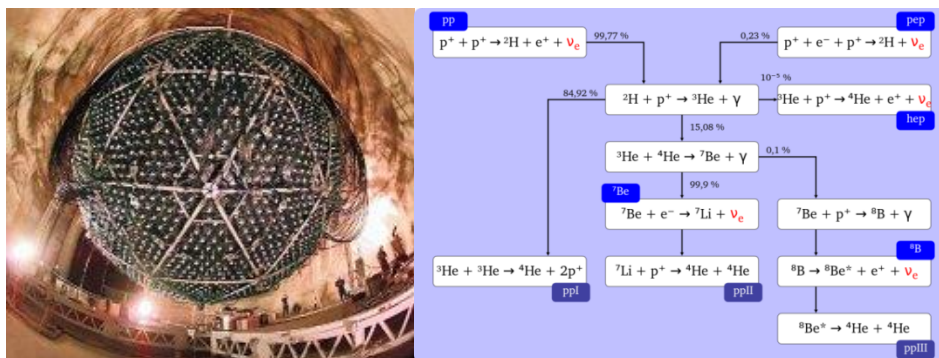
Rys. 2. Zdjęcie po lewej przedstawia wnętrze detektora Super-Kamiokande z pierścieniem światła powstałym w wyniku przejścia elektronu przez wodę. Rysunek po prawej obrazuje neutrina atmosferyczne docierające do detektora Super-Kamiokande z wszystkich kierunków z atmosfery wokół Ziemi

Grupa fizyków z Japonii we współpracy z naukowcami ze Stanów Zjednoczonych oraz z Polski postanowiła zbadać zachowanie się neutrin atmosferycznych i w Alpach Japońskich wybudowała pułapkę na neutrina – detektor Super-Kamiokande (rys. 2 po lewej). Jak już wcześniej wspomniano, neutrina oddziałują tylko słabo, w związku z tym bardzo trudno jest je złapać. Żeby zatrzymać jedno neutrina potrzeba by bloku ołowiu o długości trzech lat świetlnych, czyli 200 tys. razy więcej niż odległość z Ziemi do Słońca. W związku z tym pułapki na neutrina muszą być duże i masywne, żeby w ogóle zaistniała szansa na ich zarejestrowanie. Dlatego też wybudowano detektor Super-Kamiokande będący walcem o wysokości i średnicy 40 m wypełnionym 50 tys. ton ultraczystej wody. Umieszczono go kilometr pod powierzchnią Ziemi w kopalni we wnętrzu góry Ikenoyama, żeby zminimalizować wpływ promieniowania kosmicznego, składającego się głównie z mionów. Znaczna część mionów kosmicznych grzęźnie w skałach nad detektorem, przez co tło do poszukiwanych oddziaływań neutrin jest znacząco zredukowane. Oddziaływania neutrin obserwowane są za pomocą dziesiątków tysięcy fotoczuJNIKÓW (fotopowielaczy) rejestrujących rozbłyski światła powstałe w wyniku oddziaływania neutrin z atomami wody. W tym celu wykorzystuje się tzw. zjawisko promieniowania Czerenkowa. Neutrina mionowe i elektronowe z atmosfery zderzając się z atomami wody produkują odpowiednio leptony naładowane: mion i elektron. Jeśli te naładowane cząstki poruszają się w wodzie z prędkością większą niż prędkość światła w tym ośrodku, to emitują one fotony promieniowania Czerenkowa. Emitowane są one w stożku, w związku z czym tworzą pierścienie światła na ściankach detektora. Badając kształt tych pierścieni można rozróżnić czy fotony zostały wyemitowane przez mion czy też elektron, a w związku z tym można zidentyfikować zapach oddziałującego neutrina, ν_μ albo ν_e . Detektor ten dostarcza również informacji o kierunku, z którego przyszło zarejestrowane neutrina. Trzeba uświadomić sobie, że detektor Super-Kamiokande rejestruje zarówno neutrina powstałe w atmosferze nad detektorem, jak i te powstałe w atmosferze po drugiej stronie kuli ziemskiej. Ziemia jest dla nich przezroczysta i mogą przejść one przez całą średnicę kuli ziemskiej zanim niektóre z nich wejdą w oddziaływanie wewnątrz detektora. Tak więc zaczęto zliczać oddziaływania neutrin przychodzących z różnych kierunków. Okazało się, że zaobserwowano znacznie mniej neutrin mionowych, powstałych po drugiej stronie globu, niż się tego spodziewano z przewidywań strumienia powstałych neutrin atmosferycznych. Jednocześnie ilość neutrin przychodzących z atmosfery nad detektorem była zgodna z przewidywaniami. Oznacza to, że neutrina mionowe przechodząc przez Ziemię znikają. Wyniki te zostały zaprezentowane przez prof. Takaaki Kajitę na konferencji w Takayamie w 1998 roku, gdzie jako wytłumaczenie znikania neutrin mionowych pochodzących z atmosfery podał on oscylacje neutrin. Uzyskane wyniki daje się wytłumaczyć w ramach teorii oscylacji jako transformację neutrin mionowych w neutrina taonowe, czyli oscylację $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

Używając naszej analogii między neutrino a kameleonami można powiedzieć, że jasnopomarańczowy kameleon zzieleniał. Uważny czytelnik zacznie tu wątpić, skąd wiadomo, że neutrino mionowe nie zamieniło się w neutrino elektronowe. Wiąże się to z tym, że nasz detektor rejestrował również oddziaływania neutrino elektronowych powstałych w atmosferze po różnych stronach Ziemi. Strumień ν_e , który zarejestrowano zarówno dla neutrino przychodzących z góry jak i z dołu detektora był zgodny z przewidywaniami modelu opisującego produkcję neutrino atmosferycznych. W związku z tym wykluczona została możliwość zamiany neutrino mionowych w elektronowe, ponieważ wtedy obserwowano by nadwyżkę ν_e przychodzących z dołu detektora. Przeprowadzona analiza oscylacji danych detektora Super-Kamiokande, prowadzona przez prof. Kajitę pozwoliła na wyznaczenie parametrów oscylacji neutrino występujących we wzorze (5). Zmierzony parametr opisujący mieszanie się neutrino to kąt $\theta_{23} \sim 45^\circ$, oraz kwadrat różnicy mas $\Delta m_{23}^2 \sim 2,5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$. Pomiar ten dostarczył dowodu na mieszanie się neutrino i jako jedyny pozwolił na wykazanie, że neutrino mają masę. Wynik ten zapoczątkował serię eksperymentów dedykowanych pomiarom oscylacji neutrino. Ale zanim do tego przejdziemy uwagę należy poświęcić neutrino słonecznym, za których badanie przypadła druga część tegorocznej Nagrody Nobla dla prof. McDonalda.

Prof. Artur B. McDonald postawił sobie za cel pomiar neutrino słonecznych i przeprowadził eksperymentowi SNO (Sudbury Neutrino Observatory) w Kanadzie. Eksperyment ten zajął się rozwikłaniem zagadki neutrino słonecznych, która nurtowała fizyków cząstek od lat 60. zeszłego wieku.

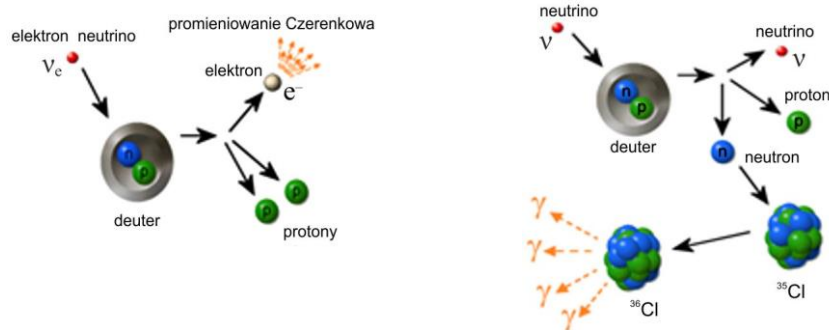
Jak wiadomo, w Słońcu zachodzą reakcje termojądrowe (rys. 3 po prawej), w wyniku których uwalniana jest energia słoneczna. Reakcje te są również źródłem neutrino elektronowych ν_e . W ciągu jednej sekundy na 1 cm^2 dociera na Ziemię 7×10^{10} neutrino pochodzących ze Słońca. Niejeden eksperyment mierzył ν_e pochodzące ze Słońca, ale wynik był zawsze taki, że w zarejestrowanym strumieniu neutrino brakuje od 40 do 65% ν_e w porównaniu do tego, co przewiduje Standardowy Model Słońca. Podejrzewano, że ν_e powstałe w Słońcu oscylują w inne typy neutrino, ale nie było na to żadnego dowodu. Potrzebny był eksperyment czuły na oddziaływania wszystkich rodzajów neutrino. I tak powstał detektor SNO (rys. 3 po lewej). Był on również wodnym detektorem Czerenkowa jak Super-Kamiokande, ale zamiast zwykłej wody używał wody ciężkiej D_2O . W związku z tym był czuły na taki typ oddziaływania ν_e , którego żaden inny detektor przed nim nie mógł zarejestrować.



Rys. 3. Zdjęcie po lewej przedstawia detektor SNO (Kanada) wypełniony ciężką wodą. Diagram po prawej obrazuje reakcje termojądrowe zachodzące w Słońcu i będące źródłem antyneutrino elektronowych, $\bar{\nu}_e$

Neutrino elektronowe mogą oddziaływać z materią na kilka sposobów, jak pokazuje to rys. 4 (po lewej). Unikatowa dla SNO, była możliwość oddziaływania ν_e z deuterem poprzez tzw. proces przez prądy naładowane, który zilustrowany jest na lewym rys. 4. W wyniku oddziaływania neutrino na neutronie z deuteru powstaje w stanie końcowym proton i naładowany elektron, który poruszając się w wodzie emituje promieniowanie Czerenkowa, tak samo jak to miało miejsce dla detektora Super-Kamiokande. Istotne jest, że tylko ν_e może oddziaływać w ten sposób. Ani ν_μ ani ν_τ nie są w stanie wyprodukować naładowanego mionu bądź taonu, ponieważ energia neutrino słonecznych jest zbyt niska, żeby spowodować powstanie ciężkich leptonów. Mierząc ten typ oddziaływań detektor SNO zarejestrował strumień ν_e odpowiadający 35% strumienia przewidywanego przez Model Słońca. Podobnie jak i we wcześniejszych eksperymentach zaobserwowano niedobór ν_e . Rozwiązanie zagadki przyszło wtedy, gdy w SNO w drugiej fazie eksperymentu domieszkowano ciężką wodę solą, w związku z czym można było wyselekcjonować neutrino oddziałujące w inny sposób – przez tzw. prądy neutralne, jak pokazuje to diagram na rys. 4 (po prawej). W wyniku tego typu oddziaływania neutrino z deuterem w stanie końcowym powstaje również niewidoczne neutrino oraz proton i neutron. Sam neutron też jest niewidoczny w detektorze, dopóki nie zostanie wychwycony przez atom ${}^{35}\text{Cl}$, tworząc izotop ${}^{36}\text{Cl}$. Następnie ${}^{36}\text{Cl}$ emituje fotony gamma, które są rejestrowane przez fotodetektory umieszczone na ściankach sfery detektora SNO. Każde neutrino, niezależnie od rodzaju, ν_e , ν_μ czy ν_τ , może w ten sposób oddziaływać. W eksperymencie SNO zmierzono strumień oddziałujących tak neutrino i stwierdzono, że jest on zgodny z przewidywaniami strumienia neutrino elektronowych produkowanych w Słońcu. Wyznaczony stosunek strumieni neutrino obserwowany za pomocą obu opisanych powyżej reakcji to:

$$\phi(\text{reakcja 1})/\phi(\text{reakcja 2}) = \phi_{\nu_e}/(\phi_{\nu_e} + \phi_{\nu_\mu} + \phi_{\nu_\tau}) = 0,340.$$



Rys. 4. Diagramy prezentujące dwa typy oddziaływania neutrin rejestrowane w detektorze SNO. Po lewej – oddziaływanie $\bar{\nu}_e$ zachodzące przez prądy naładowane, z produkcją elektronu, który emituje promieniowanie Czerenkowa. Po prawej – oddziaływanie przez prądy neutralne, które zachodzi dla wszystkich trzech typów neutrin ν_e, ν_μ, ν_τ . W stanie końcowym otrzymujemy oddziałujące neutrino oraz neutron, który jest wychwytywany przez atom ^{35}Cl . Tak powstały ^{36}Cl wysłał fotony gamma będące źródłem światła obserwowanego w detektorze SNO

W reakcji czulej wyłącznie na neutrino elektronowe obserwuje się tylko 35% przypadków w porównaniu do reakcji, która zachodzi dla wszystkich rodzajów neutrin. Wniosek z tego jest jeden, neutrino elektronowe wyprodukowane w Słońcu przeoscyłowały w inny rodzaj neutrin. Eksperyment SNO kierowany przez McDonalda dowiódł, że neutrino powstałe w Słońcu także oscylują. Okazało się, że ν_e nie oscylują na drodze ze Słońca na Ziemię, ale zmieniają swoją tożsamość wewnątrz Słońca. W tym przypadku wyznaczony kąt mieszania to $\theta_{12} \sim 33^\circ$ oraz $\Delta m_{21}^2 \sim 7,5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$. Dodatkowo efekty związane z przechodzeniem ν_e przez materię słoneczną pozwoliły na stwierdzenie, że to m_2^2 jest cięższe niż m_1^2 .

Dlaczego zatem wyniki wcześniejszych eksperymentów wskazywały różny procentowo strumień rejestrowanych ν_e (od 40 do 65% jak już wcześniej wspomniano). Ten fakt także można wyjaśnić w ramach teorii oscylacji. Emitowane ze Słońca neutrino mają różną energię, a detektory miały różny próg na detekcję ν_e . Jak pokazuje uproszczony wzór (5), prawdopodobieństwo oscylacji zależy od energii neutrin, w związku z tym różny ułamek powstałych w Słońcu neutrin przeoscyłował dla neutrin rejestrowanych w różnych eksperymentach, zatem obserwowany efekt znikania ν_e był inny w zależności od eksperymentu.

W przeprowadzanym obecnie eksperymencie Borexino zlokalizowanym we Włoszech mierzy się bardziej dokładnie spektrum słonecznych ν_e . Zaobserwowano niskoenergetyczne neutrino $50 \times 10^3 \text{ eV}$, podczas gdy SNO było czułe na neutrino o energiach powyżej $15 \times 10^6 \text{ MeV}$. Kilka pomiarów, wykonanych przez eksperyment Borexino i czułych na ν_e powstałe w wyniku różnych proce-

sów zachodzących w Słońcu, potwierdziło teorię oscylacji neutrin wewnątrz Słońca.

Obecnie naukowcy zdecydowali się badać ten typ oscylacji w eksperymentach akceleratorowych. Na przełomie XX i XXI wieku uruchomiono pierwszy eksperyment, w którym sztucznie produkowano neutrina mionowe ν_μ i wysyłano je na odległość 250 km, mierząc ile z nich znika z wiązki. Mówimy tu o japońskim eksperymencie K2K, w którym celowano wiązką ν_μ w ten sam wielki detektor wodny Super-Kamiokande. Okazało się, że neutrina mionowe znikają z wiązki akceleratorowych neutrin w taki sposób, jak się tego spodziewano z pomiarów oscylacyjnych neutrin atmosferycznych. Mając już potwierdzenie oscylacji neutrin, zaczęto budować kolejne eksperymenty produkujące sztuczne wiązki neutrin mionowych w akceleratorach, takie jak MINOS, T2K czy NOvA. Doświadczenia te pozwoliły na precyzyjne wyznaczenie parametrów oscylacji, a więc θ_{23} i Δm_{23}^2 . W eksperymencie T2K wykryto, że ν_μ przeoscylowuje w ν_e , tyle że odpowiedzialny za ten efekt kąt mieszania θ_{13} jest znacznie mniejszy niż dwa pozostałe, bo wynosi około 9° . Najbardziej precyzyjnego pomiaru tego trzeciego kąta mieszania dostarczył eksperyment DayaBay, będący badaniem zupełnie innego rodzaju niż te dotychczas omawiane. A mianowicie DayaBay analizuje znikanie $\bar{\nu}_e$ powstałych w reaktorach jądrowych w Chinach niedaleko Hongkongu.

Obecnie fizycy neutrin są bardzo zainteresowani produkowaniem w akceleratorach wiązek antyneutrin mionowych. Celem jest zbadanie, czy istnieje symetria między oscylacjami neutrin mionowych i antyneutrin mionowych, czy też symetria ta jest łamana, co powinno uwidaczniać się jako inna wartość prawdopodobieństwa oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ i $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$.

W innych badaniach neutrin fizycy skorzystali ponownie ze zjawiska emisji światła Czerenkowa, ale tym razem nie użyli do tego wody, ale lód, budując na Biegunie Południowym eksperyment IceCube. Dzięki temu, że objętość czynna takiego lodowego detektora to więcej niż 1 km^3 , udało się w tym eksperymencie zarejestrować bardzo wysokoenergetyczne neutrina przychodzące z Kosmosu. Może się okazać, że IceCube jest pionierskim eksperymencie, który zapoczątkuje astronomię neutrinową. Wydaje się, że nasze tajemnicze *cząstki duchy* nie powiedziały jeszcze ostatniego słowa i będą nas mogły zadziwić niejednym.