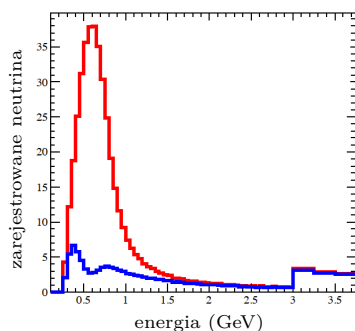


Polując na neutrino, czyli z pamiętnika fizyka

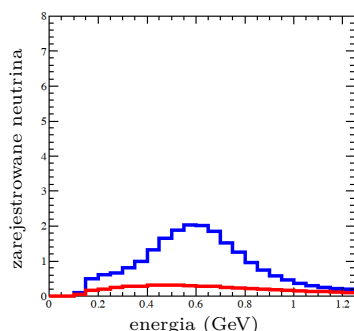
Dzień trzeci

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

Pierwsza i druga część pamiętnika zostały
opublikowane w Δ_{25}^3 oraz Δ_{25}^6



Rys. 1. Mod znikania. Rozkład energii neutrin mionowych. Na czerwono zaznaczono rozkład neutrin mionowych, jakiego spodziewalibyśmy się, gdyby nie było oscylacji neutrin. Na niebiesko przedstawiony jest zaobserwowany rozkład neutrin mionowych – część z nich uległa oscylacji i zmieniła się w neutrino innego typu



Rys. 2. Mod pojawiania się. Rozkład energii neutrin elektronowych. Na czerwono zaznaczono rozkład neutrin, jakiego spodziewalibyśmy się, gdyby nie było oscylacji neutrin. Na niebiesko przedstawiony jest zaobserwowany rozkład neutrin – w drodze pomiędzy detektorami część neutrin mionowych zmieniła się w neutrino elektronowe

O oscylacjach neutrin pisał Wiktor
Matyszkiewicz w Δ_{24}^{10} .

Joanna ZALIPSKA*

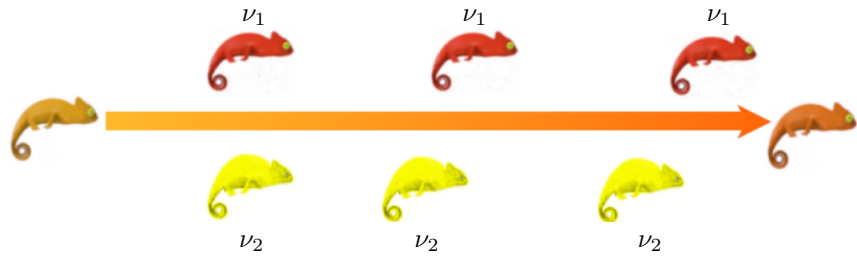
Dzisiaj ważny dzień, zaczynamy kolejny *run* z wiązką neutrin z eksperymentu T2K (runem fizycy nazywają kolejny etap zbierania danych). Po drugiej stronie wyspy w laboratorium J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), w Tokai uruchamiają akcelerator i dostrajają wiązkę. Najpierw uruchomiony zostanie główny pierścień akceleratora, gdzie przyspiesza się protony. Będą one krążyć w pierścieniu, aż osiągną energię 30 GeV. Protony przyspieszane są w polu elektrycznym, natomiast pole magnetyczne zakrzywia ich tor lotu. Protony wielokrotnie okrążają pierścień akceleratora i przy każdym obiegu są przyspieszane, uzyskując coraz większy pęd. Następnie wiązka protonów wyprowadzana jest z akceleratora i kierowana na węglową tarczę. Protony, zderzając się z atomami tarczy, produkują naładowane dodatnio i ujemnie piony oraz kaony. Odpowiedni znak ładunku pionów (dodatni albo ujemny) można wybrać, sterując polem magnetycznym. Jeśli wybierzemy piony dodatnie, to ostatecznie po odbiciu od tarczy dostaniemy wiązkę neutrin mionowych pochodzących z rozpadu pionu, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Natomiast jeśli zostaną wybrane piony ujemne, to powstanie wiązka antyneutrin mionowych, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

Jakieś 280 metrów od wspomnianej tarczy węglowej znajdują się tzw. bliskie detektory. W ostatnich dniach panowała tam „gorąca atmosfera” w związku ze zbliżającym się rozpoczęciem zbierania danych. Wszystkie podzespoły detektorów musiały zostać uruchomione i przejść kalibrację. Zadaniem bliskich detektorów jest mierzenie strumienia neutrin mionowych (lub antyneutrin mionowych) blisko miejsca produkcji, zanim jeszcze zdążą zmienić swoją tożsamość. Dostarczają one ważnych informacji o rodzajach/typach oddziaływań neutrin mionowych z materią i pozwalają je dobrze opisać przez modele teoretyczne.

Ja z kolei czekam na przybywającą wiązkę neutrin w odległym o jakieś 294 km od J-PARC detektorze Super-Kamiokande, który odgrywa rolę tzw. dalekiego detektora. W czasie podróży neutrin mionowych ubywa z wiązki, a za to pojawiają się w niej neutrino taonowe i elektronowe. Gdy już uzyskamy dane z obu detektorów, porównamy je i sprawdzimy dwie rzeczy. Po pierwsze, ile neutrin mionowych z oryginalnej wiązki zniknęło po drodze (to jest tzw. mod znikania, rys. 1). Sprawdzamy, czy neutrino mionowe znikają z równym prawdopodobieństwem co antyneutrino mionowe. Ta obserwacja pozwala nam na badanie tzw. symetrii CPT (*charge-parity-time*, ładunek-parzystość-czas). Cóż to jest? Wyobraźmy sobie, że klonujemy nasz Wszechświat i możemy na jego klonie dokonywać pewnych operacji i sprawdzać, jak wpływają one na wyniki eksperymentów. Operacja C to zamiana wszystkich cząstek na ich antycząstki. Przekształcenie P oznacza odbicie lustrzane przestrzeni (które zamienia np. śrubę prawoskrętną na lewoskrętną). Natomiast T odwraca kierunek upływu czasu – zamienia przeszłość z przyszłością. Mówimy, że operacja jest symetrią, jeżeli nie wpływa na wyniki eksperymentów. Wiadomo, że operacje C, P i T w ogólności nie są symetriami. Jednak złożenie tych trzech operacji, czyli CPT, według naszej współczesnej wiedzy powinno już być symetrią. Oznacza to, że jeżeli w klonie naszego Wszechświata jednocześnie zamienimy wszystkie cząstki na antycząstki, dokonamy odbicia lustrzanego przestrzeni i zmienimy kierunek upływu czasu na przeciwny, to wyniki wszystkich możliwych eksperymentów powinny być takie same jak w naszym Wszechświecie. Badając neutrino i antyneutrino mionowe, stwierdziliśmy, że w eksperymentach takiego typu jak nasz symetria CPT jest zachowana.

Po drugie, sprawdzamy, ile nowych neutrin elektronowych pojawiło się w drodze od bliskiego do dalekiego detektora, czyli badamy oscylacje neutrin (to jest tzw. mod pojawiania się, rys. 2). Okazuje się bowiem, że znaczna część neutrin mionowych zmieniła swoją tożsamość na neutrino taonowe, a część na neutrino elektronowe.

Ale jak to się dzieje? Oscylacje neutrin są konsekwencją tego, że stany własne zapachu neutrin nie są tożsame z ich stanami masy. Trochę to pogmatwane, więc żeby to wytłumaczyć, posłużę się... kameleonami.



Wyobraźmy sobie jasnopomarańczowego kameleona. Reprezentuje on neutrino mionowe. Dla uproszczenia założmy, że zbudowany jest z dwóch neutrin o różnych masach, ν_1 i ν_2 (tak naprawdę mamy 3 stany masy: ν_1 , ν_2 i ν_3), reprezentowanych przez czerwonego i żółtego kameleona. Wszystkie kameleony mają do pokonania pewną drogę długości L . Ponieważ kameleony czerwone i żółte mają inne masy, kameleony czerwone idą szybciej, a kameleony żółte idą wolniej. Po pewnym czasie do celu dotrze więcej kameleonów czerwonych niż żółtych. W rezultacie da nam to ciemnopomarańczowego kameleona reprezentującego neutrino elektronowe.

To zjawisko (oscylacji neutrin, a nie kameleonów) pozwala nam badać symetrię CP, czyli odpowiedzieć na pytanie, czy prawdopodobieństwo przemiany dla neutrin i anty-neutrin jest takie samo ($P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$). Pytanie to obecnie nurtuje fizyków cząstek, poszukujemy procesów, które są inne dla cząstek i anty-cząstek. Pierwsze dane z eksperymentu T2K wskazują na łamanie symetrii CP, jakkolwiek statystyka zebranych danych jest zbyt niska, żeby wyciągnąć ostateczny wniosek. Sytuacja nie jest taka prosta, ponieważ nie wiemy również, czy trzecie neutrino jest lżejsze, czy też cięższe od pozostałych (tzw. problem hierarchii mas). W zależności od tego, z którym scenariuszem mamy do czynienia, będzie to nam modyfikowało oscylacje neutrin i antyneutrin. Na podstawie wyników tylko z T2K trudno jest rozwikłać tę zagadkę. W rozwiązaniu problemu może pomóc inny eksperyment: Nova, prowadzony w Stanach Zjednoczonych, który wysyła neutrina na dalszą odległość (aż 810 km). Tutaj oddziaływanie z materią, przez którą podróżują neutrina, może prowadzić do rozwikłania problemu degeneracji hierarchii mas i łamania CP.

Hierarchia mas neutrin odnosi się do kolejności trzech stanów mas neutrin (ν_1 , ν_2 i ν_3). Istnieją dwie możliwe hierarchie: hierarchia normalna (NH, $m_1^2 < m_2^2 < m_3^2$), w której ν_3 jest najcięższe, oraz hierarchia odwrotna (IH, $m_3^2 < m_1^2 < m_2^2$), w której ν_3 jest najlżejsze. Obecnie nie wiemy, ile waży neutrino, natomiast w eksperymentach oscylacyjnych wyznaczamy kwadraty różnicy mas. Problem hierarchii mas do dzisiaj nie jest rozwiązany. Wiemy jedynie tyle, że $m_1^2 < m_2^2$.

Już po mojej szychcie. Kolejna osoba przejęła dyżur przy eksperymencie T2K. Teraz monitorowanie danych odbywa się zdalnie z Europy. W międzyczasie kilkakrotnie włączano i wyłączano wiązkę podczas jej dostrajania. Ale ruszyło. Lecą do nas neutrina.

Dzień czwarty

Kolejny dzień: Zbieramy dane z wiązki T2K wysyłanej z odległego o 294 km laboratorium. Na każdą wysłaną z akceleratora J-PARC paczkę cząstek czeka detektor Super-Kamiokande. Jeśli neutrino zaiskrzy w detektorze, to taki przypadek się odnotowuje. Ale oczywiście w międzyczasie nie przestajemy prowadzić normalnych obserwacji. Systemy wyzwalania dla rejestracji zarówno neutrin atmosferycznych, jak i tych pochodzących ze Słońca wciąż działają. W każdej chwili detektor jest więc gotowy na zarejestrowanie neutrin z niespodziewanego wybuchu supernowej, gdyby takie miało miejsce.

Zbliża się konferencja Neutrino 2024 – najważniejsza konferencja dla fizyków neutrin. Dzisiaj wieczorem wysłuchamy próbnej prezentacji najnowszych wyników T2K i ich analizy.

Chcąc odpowiedzieć na palące pytania fizyki neutrin – takie jak symetria CP i hierarchia mas neutrin – łączymy siły i przeprowadzamy zbiorcze analizy danych z dwóch eksperymentów akceleratorowych, T2K i Nova, i jednocześnie analizujemy dane T2K i neutrin atmosferycznych w Super-Kamiokande. Każdy



z tych eksperymentów jest czuły na inne efekty. Na przykład nasz eksperyment T2K jest lepszy w mierzeniu symetrii CP. Eksperyment Nova przesyła wiązkę neutrin na zdecydowanie większą odległość i w związku z tym jest w stanie lepiej badać wpływ materii (dosłownie Ziemi) na neutrino – a to daje nam większą szansę na uzyskanie odpowiedzi, z którą hierarchią mas mamy do czynienia. Ale nawet Nova nie może się równać z badaniami neutrin atmosferycznych, które mogą przenikać do detektora z drugiej strony kuli ziemskiej po przejściu przez planetę (12 742 km). Warto też podkreślić fakt, że połączenie sił eksperymentów T2K i Nova zwiększa dwukrotnie statystykę zebranych danych, których nie mamy tak dużo, ponieważ neutrino bardzo rzadko oddziałują z materią.

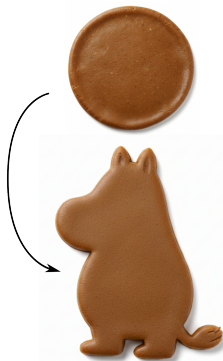
Dotychczasowe ustalenia nie dają jednak ostatecznych odpowiedzi. Pierwsze dwa eksperymenty T2K i Nova sugerują złamaną symetrię CP i odwróconą hierarchię mas. Badania neutrin atmosferycznych z kolei sugerują normalną hierarchię mas. Jakkolwiek statystyczna istotność tych wyników jest jeszcze niska. Potrzeba więcej danych, czyli więcej zarejestrowanych przypadków neutrin w dalekim detektorze.

Eksperymenty T2K, Nova, Super-Kamiokande nadal zbierają dane, więc możemy oczekiwać nowych wyników w niedalekiej przyszłości. Ponadto budowane są nowe eksperymenty: DUNE w Stanach Zjednoczonych oraz Hyper-Kamiokande w Japonii. Wierzmy, że pozwolą nam na rozwikłanie opisanych tu zagadek.

O dyfeomorficznym lepieniu pierniczków

Zofia GROCHULSKA*

* Uniwersytet w Jyväskylä



Wyobraźmy sobie, że bierzemy do ręki naszą ulubioną foremkę w kształcie Muminka i wycinamy nią pierniczek. Muminek, jak wiemy, ma dość obłe kształty (podobno ich autorka, Tove Jansson, podczas tworzenia rysunków tych postaci inspirowała się kształtem zasp śnieżnych; fińskie lasy zimą zdają się roić od Muminków). Gdybyśmy nie mieli odpowiednich foremek, a bardzo chcieli mieć pierniczek w kształcie Muminka, moglibyśmy wyciąć szklanką kółko i zdeformować je do kształtu tego sympatycznego bohatera dziecięcych opowieści. Innymi słowy, znaleźlibyśmy funkcję f , która przekształca koło (dwuwymiarową kulę) na pewien obszar (dwuwymiarowego Muminka). Możemy wykonać to przekształcenie na wiele sposobów, ale na potrzeby naszej opowieści lepiej będzie zamienić koło w Muminka w sposób *dyfeomorficzny*.

Dyfeomorfizm to przekształcenie o wielu cechach pożądanых z punktu widzenia analizy matematycznej: jest odwracalne (czyli istnieje przekształcenie odwrotne) oraz zarówno ono samo, jak i jego odwrotność są różniczkowalne. Przegryźmy tę definicję powoli, jakby to był ostatni pierniczek w tym roku. Żeby przekształcenie było odwracalne, każde dwa różne punkty ciasta muszą zostać przekształcone na dwa różne punkty (muminkowego) ciasta. Innymi słowy, nie wolno nam sklejać ze sobą kawałków ciasta. Wówczas będziemy mogli, po uformowaniu Muminka, wykonać ruchy odwrotne do wcześniejszych i wrócić do pierwotnego kształtu koła. Różniczkowalność to trochę trudniejsze słowo, znane licealistom przygotowującym się do matury rozszerzonej. Nie będziemy tu przytaczać definicji, spróbujemy natomiast opisać, jak wygląda takie przekształcenie, które jest różniczkowalne (i którego odwrotność również taka jest). Otóż takie przekształcenie wygląda trochę jak Muminek – jest

obłe, pełne krągłości, nie przyczynia się do powstawania kantów ani szpiczastych elementów (zaokrągla, choćby delikatnie, nawet muminkowe uszy!). Biorąc to wszystko pod uwagę, możemy stwierdzić, że jeśli uformujemy Muminka z kółka poprzez rozciąganie ciasta w odpowiednich miejscach, to deformacja koła w Muminka będzie dyfeomorfizmem. Co więcej, w podobny sposób możemy przekształcić koło na kształt płaskiej Małej Mi lub płaskiego Ryjka.

Musimy uściślić jeszcze pewną cechę dyfeomorfizmów. Dyfeomorfizmy możemy podzielić na zachowujące orientację i odwracające orientację. Wyobraźmy sobie, że nasze ciastowe kółko z wierzchu pomalowane jest na różowo, a od spodu na niebiesko. Jeśli przekształcimy kółko dyfeomorficznie w Muminka tak, że przód Muminka będzie różowy, to będzie to dyfeomorfizm zachowujący orientację. Jeśli natomiast nasz dyfeomorfizm wypłyje Muminka, którego przód jest niebieski, oznacza to, że