

Neutrino szybsze od światła?

Krzysztof Fiałkowski

Instytut Fizyki UJ

Z końcem września cały świat obiegła sensacyjna wiadomość: wyniki eksperymentu OPERA (*Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus*, czyli *Projekt oscylacyjny z emulsyjnym rejestratorem śladów*) sugerują, że neutrino produkowane w laboratorium CERN pod Genewą zjawiają się w odległym o ponad 700 km detektorze umieszczonym w tunelu pod Gran Sasso wcześniej, niż oczekiwano. Jeśli te wyniki są poprawne, neutrino poruszają się z szybkością większą niż szybkość światła w próżni c , co wydaje się niezgodne z podstawowym założeniem szczególnej teorii względności. Fakt ten został skomentowany „na gorąco” przez Pawła Górę w poprzednim numerze *Fotonu*. Dziś chyba już pora na bardziej szczegółowe omówienie.

Powiedzmy tu od razu, że sensacyjność wyniku nie polega wcale na sugestii, że „Einstein mylił się!”, jak napisano w wielu gazetach. Fizycy wiedzą doskonale, że żadnej teorii nie można uważać za ostateczną i każda jest tylko pewnym przybliżonym opisem rzeczywistości. Nie dziwią ich więc tak bardzo (choć zawsze pasjonują) odkrycia, powodujące konieczność zmian opisu. Jednak w ciągu stu lat, które upłynęły od ogłoszenia teorii względności, wykonano nie tylko tysiące, ale wręcz miliony eksperymentów badających ruch różnych ciał z wielkimi prędkościami, zarówno w mikroświecie, jak i w skali kosmicznej. Nie obserwowano nigdy szybkości większych niż c , a nieliczne wyjątki dały się zawsze wyjaśnić subtelnymi efektami pomiarowymi. Co więcej, wszelkie pomiary zgadzały się zawsze doskonale z obliczeniami wykonanymi przy założeniu, że prędkość nie może mieć większej wartości. Jeśli więc nowy wynik jest prawdziwy, to trudno zrozumieć, dlaczego wcześniej nie zaobserwowano podobnych efektów. Do dyskusji tego faktu jeszcze wrócimy.

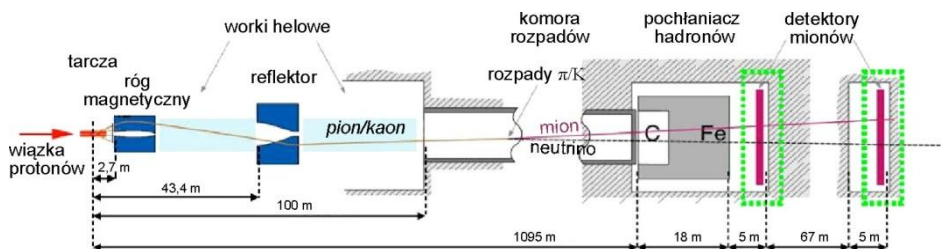
Podstawowe pytania, które trzeba wstępnie zadać, są oczywiste: czy szybkość neutrin zmierzona w eksperymencie OPERA była naprawdę większa niż c i jak dokładny był ten pomiar? Aby na nie odpowiedzieć, trzeba przeanalizować przebieg eksperymentu.

Idea pomiaru jest niezwykle prosta. Należy zmierzyć odległość między punktem, w którym neutrino powstało, a detektorem, w którym je zarejestrowano, a następnie podzielić ją przez czas, który upłynął między chwilami powstania i rejestracji neutrina. Niestety, jak zwykle, „diabeł tkwi w szczegółach”.

Zacznijmy od tego że, ściśle mówiąc, nie potrafimy w żaden sposób wyznaczyć punktu, w którym powstało neutrino. W CERNie wiązka protonów krąży po orbicie i jest z niej co pewien czas „wyrzucana” impulsem pola magnetycznego. Wtedy pada na tarczę, a protony zderzają się z jądrami atomów, produku-

jąc liczne silnie oddziałujące cząstki (hadrony). Odpowiednio ukształtowane pola magnetyczne i przesłony powodują, że najliczniej produkowane, bo najlżejsze z produkowanych cząstek, tzw. mezony π i K , czyli piony i kaony, wpadają do kilometrowej komory próżniowej, w której rozpadają się. Jednym z możliwych stanów końcowych rozpadów jest para mion–neutrino mionowe. Wszystkie inne cząstki lecące w badanym kierunku zostają pochłonięte w grubej warstwie żelaza. Miony, które uniknęły absorpcji, są rejestrowane w specjalnych detektorach.

Przypomnijmy, że miony mają niezerowy ładunek, więc łatwo je rejestrować, ale w materii są pochłaniane o wiele słabiej, niż wszystkie inne znane cząstki naładowane. Natomiast neutrino oddziałują z materią tak słabo, że nawet w wielokilometrowej warstwie żelaza czy ołowiu oddziałuje mniej niż jedno neutrino na bilion. Wiązka neutrin z rozpadów mezonów przelatuje więc przez wszystkie przesłony praktycznie bez strat, a jej kierunek jest zbliżony do ustalonego wcześniej kierunku lotu mezonów, wybranego tak, aby neutrino trafiły do odległego o setki kilometrów podziemnego laboratorium w Gran Sasso, gdzie mieści się detektor. Schemat układu produkcji wiązki neutrin przedstawiono na rys.1.



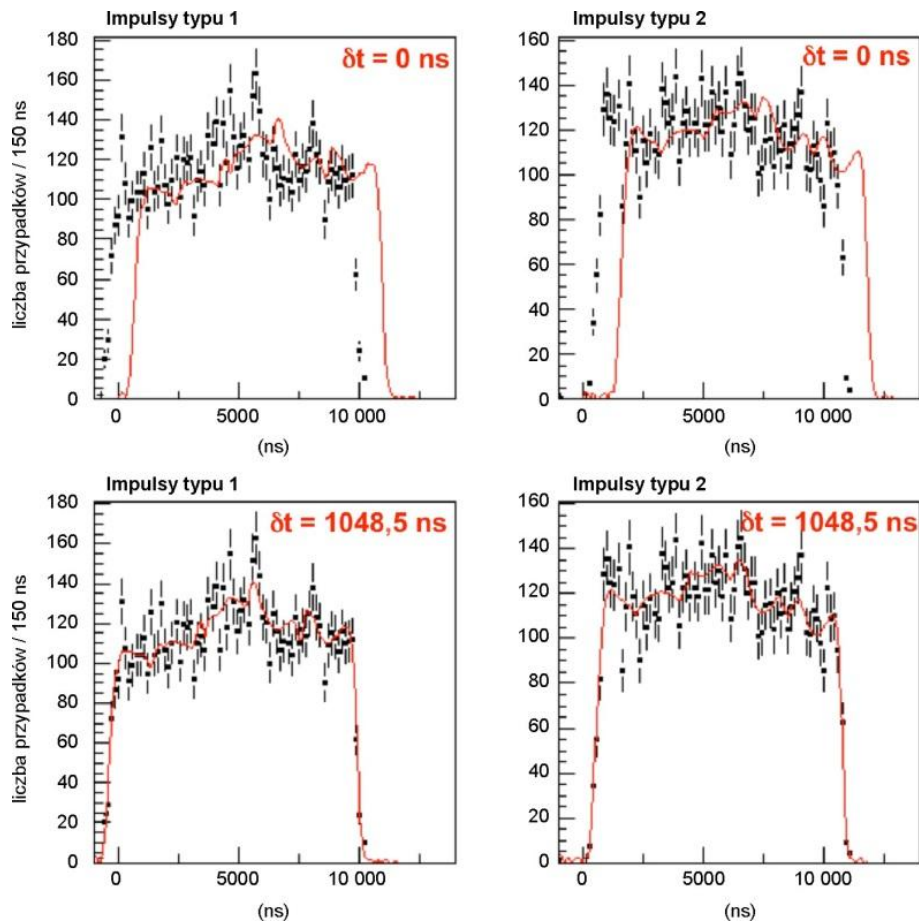
Rys.1. Schemat „linii produkcyjnej” neutrin w CERNie

Proces rozpadu mezonu ma charakter statystyczny. Oznacza to, że nie potrafimy wskazać konkretnego punktu, w którym powstało neutrino zarejestrowane później w detektorze; może się to zdarzyć w dowolnym punkcie kilometrowej komory. Znamy tylko **średni** czas życia mezonu w spoczynku, a znając jego energię możemy obliczyć **średnią** drogę mezonu od tarczy, w której powstał, do punktu rozpadu (czyli punktu, w którym powstało neutrino). Jak więc można obliczyć precyzyjnie drogę i czas przelotu neutrina?

Paradoksalnie, umożliwia to ta sama Szczególna Teoria Względności, z którą niezgodne wydają się ostateczne wyniki. Mezony będące źródłem wiązki neutrin mają energie o dwa rzędy wielkości większe od ich energii spoczynkowych, więc poruszają się z szybkością zaledwie o setne części promila mniejszą od c . Zatem popełnimy bardzo niewielki błąd, zastępując drogę s przebytą przez neutrino drogą s' od tarczy do detektora (którą autorzy eksperymentu wyznaczają z dokładnością do dwudziestu centymetrów!) i równocześnie zastępując czas

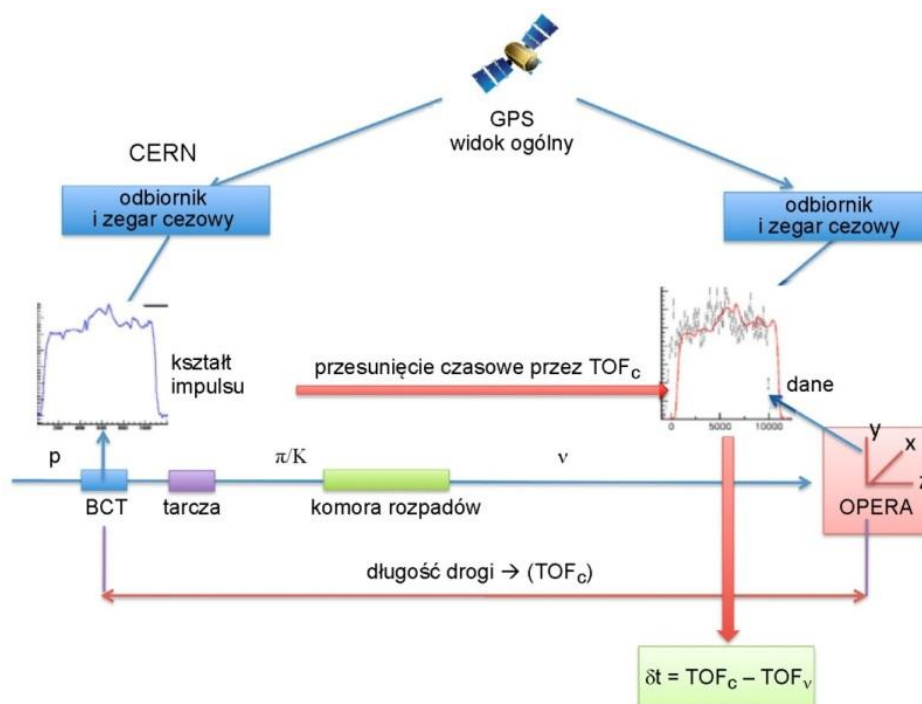
przeletu neutrina t czasem t' , jaki upłynął od uderzenia protonu w tarczę (i powstania mezonu) do rejestracji neutrina. Jeśli neutrina poruszają się z szybkością c , z którą zgodnie z teorią względności powinny się zawsze poruszać cząstki o pomijalnie małej energii spoczynkowej, to między czasem i drogą musi zachodzić z dokładnością lepszą niż jedna milionowa związek $t' = s'/c$.

Oczywiście nie wiemy, który proton wyprodukował mezon, z którego pochodziło dane neutrina zarejestrowane w detektorze. Możemy jednak skorzystać z faktu, że wiązka protonów uderzających w tarczę nie jest „ciągła”, lecz składa się z impulsów, trwających około $10 \mu\text{s}$, których profil czasowy przedstawiono jako ciągłą linię na rys. 2. Rejestrując przelet takiego impulsu można bardzo dokładnie określić początkową i końcową chwilę kolejnych serii zderzeń. Pozwala to na podanie rozkładu wartości czasów, jakie upłynęły od początku każdego impulsu do chwili rejestracji kolejnych neutrin.



Rys. 2. Rozkład czasowy rejestracji neutrin na tle profilu impulsu protonów

Efekty aparaturowe powodują, że nie oczekujemy zgodności tego rozkładu z rozkładem czasowym zderzeń protonów przesuniętym o $t' = s'/c$. Istotnie, dobrą zgodność otrzymujemy przyjmując dodatkowe przesunięcie o 1048,5 ns, jak widzimy na rys. 2. Może ono wynikać z wielu przyczyn, np. poprawek do synchronizacji zegarów przez system GPS i czasów przesłania różnych sygnałów w układzie przedstawionym na rys. 3. Wszystkie te efekty zostały jednak starannie oszacowane i wynikające z nich oczekiwane sumaryczne przesunięcie wynosi 987,8 ns.



Rys. 3. Schemat systemu pomiaru czasu

GPS – *Global Positioning System*, czyli System nawigacji satelitarnej,
 LNGS – *Laboratori Nazionali di Gran Sasso*, czyli Laboratorium Narodowe Gran Sasso,
 UTC – *Universal Time Clock*, czyli Uniwersalny czas koordynowany,
 TOF – *Time of Flight*, czyli Czas przelotu; TOF_c – czas przelotu z prędkością c ,
 BCT – *Beam Change Trigger*, czyli Sygnał zmiany wiązki.

Dane nie są więc zgodne z oczekiwaniami. Jak duża jest rozbieżność? Różnica między zmierzonym i oczekiwanym przesunięciem rozkładów sugeruje, że czas przelotu neutrina jest krótszy od przewidywanego o $(1049,6 - 987,8)$ ns, czyli około 60 ns. Przypomnijmy, że pełny czas przelotu to około $730 \text{ km} / 300\,000 \text{ km/s} \approx 2,4 \text{ ms}$. Zatem różnica to w przybliżeniu 25 milionowych części

przewidywanej wartości. Taką samą względną różnicę otrzymalibyśmy podając czas biegu na czterysta metrów o jedną tysięczną sekundy mniejszy od prawdziwej wartości! Czy ta rozbieżność wyniku z teorią jest znacząca?

Autorzy eksperymentu podają, że ocena łącznej niepewności pomiaru czasu t' i poprawek do niego, wynikających z różnych źródeł, daje zaledwie około 10 ns. Jeśli ta ocena jest poprawna, to prawdopodobieństwo otrzymania sześciokrotnie większej różnicy między wynikiem i przewidywaniami jest niezwykle małe. Ani fluktuacje statystyczne, ani niepewności pomiarów czasów, ani tym bardziej niepewność pomiaru odległości nie mogą wytłumaczyć obserwowanej rozbieżności. Dlatego po kilku miesiącach bezowocnych prób znalezienia możliwego błędu w analizie wyników autorzy zdecydowali się podać je do wiadomości publicznej. Teraz z pewnością fizycy na całym świecie zaczną uważnie analizować warunki eksperymentu i założenia dokonanych obliczeń, a zapewne w niedługim czasie inna grupa spróbuje powtórzyć doświadczenie.

Jednak już obecnie ogłoszone wyniki są kwestionowane w oparciu o wcześniejsze doświadczenia. Jak wspomniano, sto lat badania ruchu obiektów mikro- i makroskopowych nigdy dotąd nie wykazało żadnej niezgodności ze szczególną teorią względności. Badany był jednak zawsze ruch cząstek naładowanych, bo dla nich znacznie łatwiej wyznaczyć drogę i czas przelotu. Nie można więc z góry wykluczyć możliwości, że neutrino to taki szczególny rodzaj cząstek, do których z jakichś przyczyn nie stosuje się bezpośrednio Szczególna Teoria Względności. Pomiaru ruchu neutrin na wielosetkilometrowej drodze, umożliwiające odkrycie tak małej różnicy przewidywanego i mierzonego czasu, odbywają się dopiero od niedawna. Czy musimy więc czekać na wykonanie kolejnego podobnego doświadczenia, aby ocenić prawdopodobieństwo tego, że wyniki eksperymentu OPERA są prawdziwe?

Poważne wątpliwości zgłosiło wielu fizyków. Przykładowo, laureat Nagrody Nobla Sheldon Glashow zauważył, że dla neutrin przekraczających prędkość światła należy oczekiwać promieniowania par elektron-pozyton analogicznego do promieniowania elektromagnetycznego wysyłanego przez cząstki naładowane poruszające się w ośrodku szybciej niż światło (promieniowanie Czerenkowa). Taki efekt powinien zmienić rozkład energii neutrin. Dane z eksperymentu ICARUS, zanalizowane specjalnie w poszukiwaniu takiej zmiany, zgadzają się doskonale z widmem energii oczekiwanym bez dodatkowego efektu. Nie zarejestrowano też obecności dodatkowych par elektron-pozyton. Jednak inne modele „nadświetlnych neutrin” pozwalają na uniknięcie przewidywanej emisji par.

Okazuje się też, że możemy skorzystać z uprzejmości natury. Jak przypominał natychmiast po ogłoszeniu nowych wyników znany teoretyk z CERNu John Ellis, w roku 1987 zarejestrowano wybuch Supernowej w Obłoku Magellana, około 180 000 lat świetlnych od Ziemi. Pracowały już wtedy trzy wielkie podziemne detektory neutrin i zarejestrowały pojedyncze oddziaływania neutrin

pochodzących z (przewidzianego przez teorię) potężnego ich strumienia. Zgodnie z przewidywaniami teorii, neutrina dotarły do nas niemal równocześnie z błyskiem świetlnym. Gdyby ich szybkość była o 25 milionowych większa od c , jak w wynikach eksperymentu OPERA, neutrina dotarłyby do Ziemi o cztery lata wcześniej! Dwa detektory, które działały już wtedy, nie zanotowały w tym czasie żadnej nadwyżki rejestrowanych neutrin.

Oczywiście nie jest to argument rozstrzygający o nieprawdziwości nowego wyniku. Neutrina z Supernowej miały energie ponad tysiąc razy mniejsze od neutrin z CERNu. Jeśli „nadświetlna” szybkość neutrin zależy od ich energii, można wyobrazić sobie, że różnica między nią i c szybko rośnie z energią. Warto jednak zauważyć, że w eksperymencie OPERA nie znaleziono żadnej różnicy między neutrinami o energii mniejszej i większej od średniej. Dokładniejsze pomiary mogą więc wykluczyć taką możliwość.

Najczęstsze zastrzeżenia wobec opublikowanych wyników dotyczyły analizy statystycznej rozkładu czasowego rejestracji neutrin przypisanych do kolejnych impulsów protonowych. Przypomnijmy, że efekt polega na tym, że rozkład szeroki na ponad 10 000 ns jest przesunięty w stosunku do oczekiwanego czasu przelotu o około 1050 ns, a nie o 990 ns, jak oczekiwano na podstawie analizy działania wszystkich elementów układu doświadczalnego. Autorzy twierdzili, że potrafią wyznaczyć przesunięcie z dokładnością do 10 ns, ale było to kwestionowane. Niektóre analizy danych sugerowały, że równie dobry jest ich opis tłumaczący niezgodności z rozkładem przesuniętym o 990 ns wyłącznie przez fluktuacje statystyczne, bez dodatkowego przesunięcia.

Aby usunąć te wątpliwości, autorzy eksperymentu przeprowadzili specjalny test. Przez dwa tygodnie zbierali dane dla wiązki protonów podzielonej na niezwykle krótkie impulsy, trwające po 3 ns i powtarzane co 524 ns. 18 października ogłoszono wyniki tego testu. Zarejestrowano tylko 20 neutrin, ale każde z nich można było przyporządkować jednoznacznie jednemu z impulsów protonowych. Dla każdego z nich wyznaczono więc osobno czas przelotu. Otrzymane wartości są systematycznie krótsze od oczekiwanych. Średnie obserwowane przesunięcie czasu to $(62,1 \pm 3,7)$ ns, co jest zgodne z poprzednim wynikiem. Zatem zmierzony uprzednio efekt nie był spowodowany błędną analizą statystyczną rozkładu czasów rejestracji neutrin.

Wypada podać jeszcze kilka liczb. Opublikowane dane pochodzą z zebranych przez trzy lata około stu trylionów (10^{20}) zderzeń protonów z jądrami atomów tarczy, a liczba zarejestrowanych w tym czasie neutrin to około 16 tysięcy. 20 neutrin zarejestrowanych w ciągu dwóch tygodni dodatkowego testu pochodziło z 40 tysięcy bilionów (4×10^{16}) zderzeń protonów z jądrami tarczy. Ilustruje to niezwykłość eksperymentu: w ogromny detektor OPERA trafia oczywiście tylko niewielki ułamek powstających w CERNie neutrin, bo po przebyciu 700 km wiązka neutrin ma prawie kilometr średnicy. Nadal jednak to tysiące bilionów neutrin, więc w przybliżeniu zaledwie jedno neutrino na bilion

oddziałuje w detektorze! Nie jest zatem łatwo zebrać w krótkim czasie takiej liczby oddziaływań, aby sprawdzić wyniki OPERA.

Jeśli wyniki eksperymentu OPERA zostaną potwierdzone, fizykę czeka okres burzliwych dyskusji nad interpretacją danych. Niekoniecznie muszą one oznaczać modyfikację szczególnej teorii względności. Wśród wielu pomysłów teoretyków wypada wymienić możliwy efekt „dodatkowych wymiarów”, przez które „na skróty” mogą poruszać się neutrina. Inne możliwe tłumaczenie wprowadza nowe pola, z którymi oddziaływanie „spowalnia” wszystkie cząstki oprócz neutrin. Sugeruje się też, że za efekt odpowiedzialne są oscylacje zmieniające „zwykłe” neutrina w ich nową, „sterylną”, czyli nieoddziałującą odmianę, która ma niezwykle własności. Z pewnością możliwe są jeszcze inne tłumaczenia. Opublikowano już ponad sto prac cytujących i interpretujących dane OPERA. Na razie jednak znaczna większość fizyków pozostaje sceptyczna.



Detektor OPERA