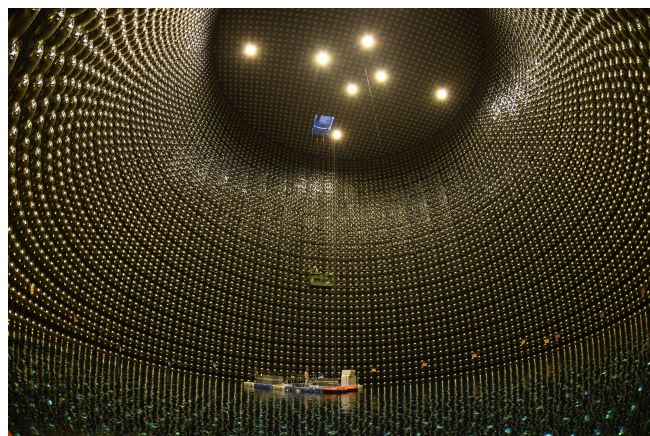


w 2019 roku. Autorzy nawiązują do pomysłów bioinżynierów, aby tworzyć dodatkowe, sztuczne części ciała człowieka i integrować je z układem nerwowym. Praca opisuje osoby obdarzone wyjątkowym wariantem polidaktylii. W materiałach filmowych możemy oglądać testy, którym poddani zostali badani. Dodatkowy palec znajduje się u nich między kciukiem a palcem wskazującym. Ma trzy paliczki, staw zawiasowy łączący z kośćmi śródreżca (taki jak pozostałe palce 2–5), jednak oprócz zwykłych ma także dodatkowy mięsień, którego układ i miejsca przyczepu są takie jak w kciuku. Z drugiej strony, kciuk badanych osób ma (inny niż zwykle) staw kulisty panewkowy, który pozwala na większą jego ruchomość.

Dokładne testy wykazały, że dodatkowe palce mają swoje autonomicznie działające ścięgna, mięśnie i nerwy. Okazało się, że w korze mózgowej istnieje oddzielny obszar będący reprezentacją dodatkowych palców. Sprawność i siła wszystkich palców była wysoka, a w specjalnie stworzonej grze komputerowej sześciopalczaści byli lepsi niż pięciopalczaści. Badani byli też w stanie zawiązać sznurówki u butów jedną ręką i lepiej radzili sobie z manipulacją niewielkimi przedmiotami.

## Polując na neutrino, czyli z pamiętnika fizyka Dzień pierwszy

Joanna ZALIPSKA\*



Rys. 1. Wnętrze detektora Super-Kamiokande częściowo wypełnionego wodą. Na wewnętrznych ściankach detektora widać zamontowane fotopowielacze. Na wodzie znajduje się pływający pomost umożliwiający prace przy fotopowielaczach

Dzwoni budzik. Siódma rano. Budzi się piękny dzień w Alpach Japońskich i zaczynam kolejny dzień pracy jako fizyk neutrin. Punktualnie 7:45 łączymy się z poprzednią szychtą, odprawiamy się w Kenkyu-to (po japońsku to oznacza laboratorium) i jedziemy do kopalni. Przed wjazdem do kopalni sprawdzamy, czy system utrzymujący niski poziom radonu naturalnie występującego w kopalni funkcjonuje poprawnie, i pozostaje tylko wsiąść do samochodu i wjechać do tunelu. Wjeżdżamy do wnętrza góry Ikenoyama. Po około pięciu minutach jazdy lądujemy kilometr pod ziemią i wchodzimy do naszego laboratorium, gdzie znajduje się jedna z największych na świecie pułapek na neutrino.

Pozostając pod wrażeniem tych rewelacji, sięgam do krótkiego filmu BBC, który przedstawia rodzinę Da Silva z Brazylii. Z dwudziestu sześciorga jej członków czternaścioro ma po sześć palców u dłoni. Chłopiec w rękawicach jest bramkarzem i twierdzi, że lepiej chwyta piłkę. Mała dziewczynka gra na pianinie i ma większy zasięg palców na klawiaturze. Wujek z pięcioma palcami biegającymi po gryfie wygrywa gorące rytmy na gitarze. Jedna z dojrzałych kobiet u manicurzystki żartuje, że może nosić więcej pierścionków, i dodaje, że kiedy była w kolejnych ciążach w trakcie USG interesowała ją nie płeć dziecka, ale czy będzie miało 6 palców.

Czemu oglądasz coś takiego? Pyta jedenastoletni Nikodem, wpatrując się z osłupieniem w ekran mojego komputera, kiedy oglądam siedmiopalczaste łapki kangura uchwycone na zdjęciu rtg. Cóż, zastanawiam się. Ten kangur nie uciekł przed myśliwym, ale być może gdzieś jego potomstwo odziedziczyło dar, a nie przekleństwo, siedmiu palców?

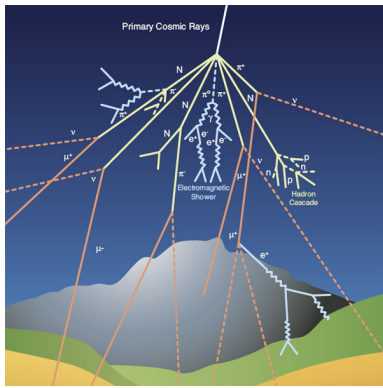
Marta FIKUS-KRYŃSKA

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

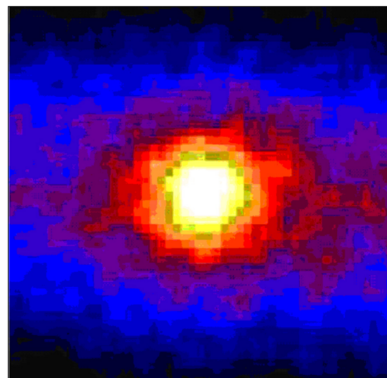
Gigantyczny zbiornik w kształcie walca o średnicy i wysokości 40 metrów mieści 50 kiloton ultra-czystej wody. W tej to wodzie iskrzą neutrino. Promieniowanie Czerenkowa emitowane przez powstałe w oddziaływaniu miony, elektrony i piony rejestrowane jest przez ponad 11 tysięcy detektorów światła – fotopowielaczy umieszczonych na ściankach walca. Ten walec to detektor zwany Super-Kamiokande (rys. 1). O tym, jak Super-Kamiokande rejestruje promieniowanie Czerenkowa, dowiesz się z rozdziału na końcu artykułu.

Jesteśmy w kopalni, żeby monitorować działanie naszego detektora. Robimy dzienny obchód i sprawdzamy, czy system wodny nie przecieka, czy klimatyzacja w pomieszczeniach z elektroniką dobrze działa i czy w elektronice zbierającej sygnały z fotopowielaczy nic się nie popsuło w ciągu nocy. Następnie pozostaje 8 godzin dyżuru i monitorowania pracy detektora zbierającego dane – czyli łapania neutrin.

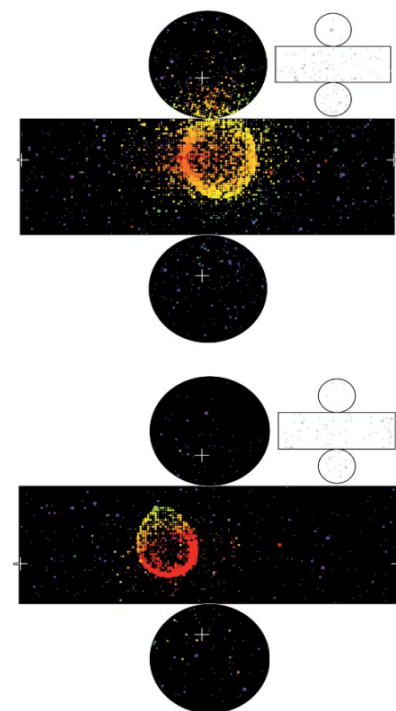
Co to są te neutrino i skąd się biorą? Neutrino jest cząstką elementarną. Mamy ich trzy: neutrino elektronowe, neutrino mionowe i neutrino taonowe ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ). Neutrino elektronowe jest neutralnym, czyli o ładunku elektrycznym równym zero, towarzyszem elektronu w grupie cząstek zwanych leptonami. Do leptonów należy również cięższy brat elektronu – mion ze swoim neutralnym towarzyszem neutrinem mionowym, oraz lepton tau z neutrinem taonowym. Neutrino bardzo licznie występują w otaczającym nas świecie. Produkuje je na przykład Słońce, i każda inna gwiazda, w reakcjach termojądrowych. W wyniku tych reakcji powstają neutrino elektronowe. Są one dość nisko



Rys. 2. Kaskada cząstek powstała po zderzeniu protonu promieniowania kosmicznego z cząstkami w atmosferze Ziemi



Rys. 3. Zdjęcie Słońca wykonane za pomocą detektora neutrin Super-Kamiokande, który je zarejestrował



Rys. 4. Schemat neutrina emitującego promieniowanie Czerenkowa w detektorze Super-Kamiokande, przypadki dla elektronu (na górze) i mionu (na dole). Detektor ma kształt walca, rysunek przedstawia rzut na płaszczyznę

energetyczne, bo mają energię zaledwie od kilku eV do 18 MeV. Neutrino powstają również w procesach zachodzących w kaskadach utworzonych po zderzeniu pierwotnego promieniowania kosmicznego, głównie protonów, z atomami tlenu i azotu w atmosferze ziemskiej (rys. 2). W procesach tych powstają neutrino mionowe i elektronowe w stosunku około  $\nu_\mu:\nu_e = 2:1$ , a ich energia wynosi od MeV do TeV. Podsumowując, neutrino bardzo licznie wypełniają Wszechświat, a naszym zadaniem jest je badać w detektorze Super-Kamiokande.

Przypomnijmy, że siedzę na szczytach w kopalni, na głębokości około jednego kilometra pod górą w Japonii, więc jak te neutrino dostają się tak głęboko? Dla nich to nie problem. Neutrino podlegają tylko oddziaływaniom słabym, dlatego materia jest dla nich praktycznie przezroczysta. Większość neutrin docierających do nas ze Słońca bądź tych wyprodukowanych w atmosferze Ziemi przenika nie tylko przez kilometr góry nad detektorem, ale potrafi przeniknąć przez całą kulę ziemską.

Skoro neutrino przenikają przez Ziemię, to oznacza, że przenikają również przez nas. Cały czas jesteśmy bombardowani zarówno przez neutrino pochodzące ze Słońca, jak i te powstałe w atmosferze ziemskiej (oraz pochodzące z innych źródeł). Szacunkowo w człowieku w ciągu jego życia będzie miało miejsce jedno oddziaływanie neutrina atmosferycznego. Aby je zatrzymać, na ich drodze trzeba by postawić blok ołowiu o grubości 3 lat świetlnych, czyli 200 000 razy więcej niż odległość pomiędzy Ziemią i Słońcem. Neutrino nazywa się czasem cząstką duchem, mówi się też o nich, że są ulotne. Niemiecki fizyk Wolfgang Pauli zapostulował istnienie neutrina w 1930 roku. Przewidywał, że cząstka ta nie ma ładunku, ma zerową masę i w ogóle nie oddziałuje z materią. W liście do towarzystwa fizycznego napisał, że zrobił coś strasznego, przewidując istnienie cząstki, której nikt nigdy nie będzie w stanie zaobserwować. Na całe szczęście mylił się w tej kwestii. W roku 1956 amerykańscy fizycy Frederick Reines i Clyde Cowan zarejestrowali oddziaływanie neutrin, które powstały w reaktorze jądrowym.

Wróćmy do neutrin w naszej kopalni, gdzie Słońca przez 8 godzin dyżuru nie zobaczymy... czy na pewno? Nie mamy wątpliwości, że światło słoneczne do wnętrza góry nie dociera, ale neutrino przecież przenikają przez materię. I jesteśmy je w stanie rejestrować w naszej wodnej pułapce. Zdjęcie Słońca wykonane z wnętrza kopalni poprzez rejestrację neutrin przedstawia nam rysunek 3. A jednak daje się zobaczyć Słońce pod ziemią!

### Jak detektor Super-Kamiokande rejestruje promieniowanie Czerenkowa?

Najprostszym procesem oddziaływania neutrina z wodą jest oddziaływanie dwuciałowe quasielastyczne. Neutrino mionowe oddziałuje z neutronem (n) w jądrze tlenu, w wyniku czego powstają proton (p) oraz mion ( $\mu$ ):  $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu$ . Jeśli mion porusza się z prędkością większą niż prędkość światła w danym ośrodku, u nas: w wodzie, to emituje on promieniowanie Czerenkowa. Minimalny pęd cząstki na emisję światła Czerenkowa zależy od masy cząstki – dla elektronu wynosi on 0,57 MeV/c, a dla mionu 118 MeV/c. Charakterystyczne dla światła Czerenkowa jest to, że promienie tworzą stożek wokół toru poruszającej się w wodzie cząstki. Kąt rozwarcia stożka Czerenkowa,  $\theta_c$ , można wyliczyć, znając współczynnik załamania światła wody,  $n = 1,34$ , oraz prędkość cząstki:  $v = \beta \cdot c$ , i będzie to  $\cos \theta_c = 1/n\beta$ . Dla cząstek relatywistycznych, gdy  $v$  jest bliskie prędkości światła ( $\beta$  jest bliskie 1), kąt rozwarcia stożka  $\theta_c$  wynosi  $42^\circ$ .

Światło od poruszającego się w wodzie mionu tworzy na ścianach detektora pierścienie. Tak samo zachowuje się elektron pochodzący z oddziaływania neutrina elektronowego. Tworzy pierścienie, tyle że ma on inny brzeg, ponieważ elektron wywołuje w detektorze kaskadę. Widać to na rysunku 4. Algorytmy rekonstrukcyjne są w stanie rozróżnić pierścienie pochodzące od mionu i elektronu. Dzięki temu możemy stwierdzić, czy w detektorze oddziaływało neutrino mionowe, czy też elektronowe. Algorytmy rekonstrukcyjne potrafią również odróżnić kierunek, z jakiego zarejestrowano mion/elektron, a co za tym idzie – kierunek, z którego przyszło neutrino. Możemy w ten sposób stwierdzić, czy neutrino przyszło do nas z góry, czy z dołu detektora, albo z dowolnego innego kierunku.