

Stanisław Mrówczyński

Trzy pokolenia leptonów

Nagrodę Nobla z fizyki w roku 1995 przyznano badaczom cząstek elementarnych, które należą do grupy leptonów. Uhonorowani zostali: Frederick Reines za obserwację nieuchwytnego neutrina oraz Martin L. Perl za odkrycie cząstki tau.

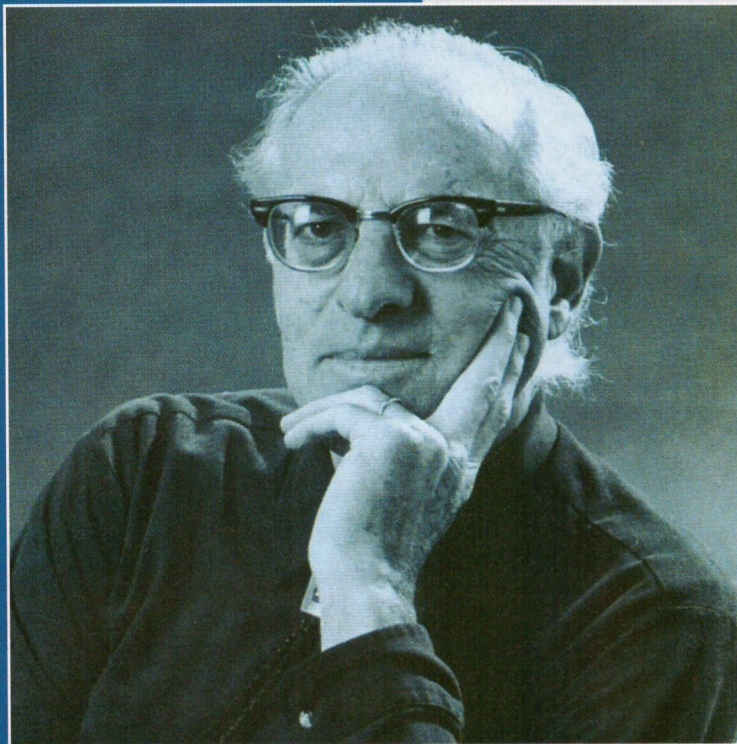
Gdy w kwietniu 1994 roku zaobserwowano przewidziany niemal 20 lat wcześniej szósty kwark, Model Standardowy, wyrażający najpełniej naszą wiedzę o elementarnych składnikach materii, znalazł wspianiałe potwierdzenie. Znaleziono ostatni klocek skomplikowanej układanki, którą z mozołem budowano przez dziesięciolecia. Jest ona teraz kompletna – wszystkie klocki idealnie do siebie pasują, żadnego nie można usunąć ani dodać. Ubiegłoroczni nobliści Frederick Reines i Martin L. Perl walnie przyczynili się do tego sukcesu, dostarczając kolejne klocki. Ich odkrycia sprzed lat – neutri-no zaobserwowano w roku 1956, a cząstkę tau w 1974 – jaśnieją teraz pełnym blaskiem.

Dzieje i charakter odkryć Reinesa i Perla są całkiem odmienne, choć dotyczą tej samej grupy cząstek elementarnych zwanych leptonami. Rejestracja neutrina, którego istnienie przewidziano teoretycznie dwie dekady wcześniej, była wydarzeniem długo wyczekiwanym. Wierzono, że wcześniej czy później uda się pojmać tę cząstkę – widmo. Należało jednak znaleźć metodę i pokonać ogromne trudności techniczne. Odkrycie leptonu tau było zaś zupełnym zaskoczeniem. Nie potrzebowano wszak jeszcze jednego okazu do i tak już licznej menażerii cząstek elementarnych.

Zacznijmy od neutrina, gdyż poznanie jego własności towarzyszyło procesowi kształtowania się współczesnego obrazu struktury materii niemal od początku, dokładniej od roku 1930. Już wtedy wiadano, że atomy tworzą elektrony krążące wokół jądra atomowego, a protony, będące jądrami atomu wodoru, są składnikami cięższych jąder. Obserwowano zjawisko promieniotwórczości naturalnej, w którym spontanicznie następowała transmutacja pierwiastków, dzięki przemianie jednego jądra w drugie.

NIEWIDZIALNA CZĄSTKA

Szczególnie wiele uwagi poświęcono badaniu tzw. rozpadu beta (Patrz: *Zdumiewający rozpad beta*, „WiZ”, nr 6/1995), w którym jądro o ładunku Z , gdzie e jest ładunkiem elementarnym, emituje elektron i zamienia się w jądro niosące ładunek $(Z+1)e$. Wieloletnie badania tego procesu, zdawały się wskazywać, że łączna energia produktów rozpadu jest mniejsza niż energia początkowa. Znaczyłoby to, że jedno z najbardziej fundamentalnych praw fizyki – zasada zachowania energii – jest gwałcone w reakcjach jądrowych. Energia wszak może zmieniać swoją formę, przekształcać się np. z kinetycznej w potencjalną lub z cieplnej w elektryczną, nie może jednak ani zniknąć, ani rodzić się z niczego.



Fot. The Royal Swedish Academy of Sciences

Frederick Reines

Urodził się w roku 1918 w Paterson w New Jersey. Jego rodzice pochodzili z Białego-stoku. Doktorat uzyskał w roku 1944 na Uniwersytecie Nowojorskim. Później pracował w Los Alamos, a obecnie jest profesorem na Uniwersytecie Kalifornijskim w Irvine. Jest członkiem amerykańskiej i rosyjskiej Akademii Nauk. Do jego bliskich współpracowników należy od lat Danuta Kielczewska z Uniwersytetu Warszawskiego. Profesor Reines myślał w młodości o karierze śpiewaka – występował nawet w operze w Cleveland. Jest również utalentowany literacko. Ma żonę i dwoje dzieci.

Gdy dopuszczano już myśl, że zasada ta rzeczywistości nie stosuje się do procesów jądrowych, Wolfgang Pauli znalazł cudownie proste rozwiązanie „energetycznego kryzysu”. Doszedł mianowicie do wniosku, że brakującą energię unosi nieobserwowana cząstka. Nazwał ją neutronem. Swoją myśl sformułował w grudniu 1930 roku w liście do zebranych w Tybindze fizyków; Pauli zaczął ów list słowami: *Drodzy Radioaktywni Panie i Panowie*, a zakończył wyjaśnieniem, że do Tybingi przyjechać nie może, ze względu na tańce, odbywające się w Zurichu.

Nazwę *neutron* nadano ostatecznie odkrytemu w 1932 roku drugiemu, obok protonu, składnikowi jądra ato-

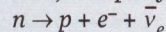
mowego. Cząstkę, o której myślał Pauli, ochrzczono jako *neutrino*, co jest włoskim zdrobnieniem neutronu. Ojcem chrzestnym był wielki Włoch Enrico Fermi, który już 1934 roku zaproponował teorię oddziaływań neutrin. Ciekawe, że redakcja prestiżowego czasopisma „Nature” odrzuciła pierwszą pracę poświęconą tej, poprawnej jak dzisiaj wiemy, teorii jako zawierającą „spekulacje zbyt dalekie od rzeczywistości”.

ODDZIAŁYWANIA SŁABE

W świecie nas otaczającym ujawniają się tylko siły grawitacyjne i elektromagnetyczne. Obiektami najmniejszymi we Wszechświecie rządzą zaś jeszcze dwa inne oddziaływania, tzw. *silne*, które, w szczególności, wiążą neutrony i protony w jądra atomowe oraz, tzw. *słabe*, odpowiedzialne między innymi za rozpad beta. Fermi sformułował teorię właśnie sił słabych, które w przeciwieństwie do silnych są, istotnie, bardzo mało intensywne. W teorii Fermiego neutrino – dzisiaj powiedzielibyśmy neutrino elektronowe – występuje jako partner elektronu. Rzeczywiście, cząstki te mają pewne cechy wspólne. Neutrino, podobnie jak elektron, zachowu-

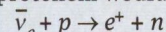
je się niby wirujący bąk, tzn. obdarzone jest spinem. Okazuje się również, że zarówno elektrycznie naładowany elektron, jak i elektrycznie neutralne neutrino niosą specyficzny ładunek – zwany współcześnie leptonowym, który podobnie jak ładunek elektryczny jest zachowywany. Pozyton, czyli antycząstka elektronu, oraz antyneutrino, będące antycząstką neutrina, niosą ładunki leptonowe przeciwne niż, odpowiednio, elektron i neutrino.

W rozpadzie beta neutron n zamienia się na proton p , elektron e^- oraz antyneutrino elektronowe, co zapisujemy jako



Ładunek elektryczny jest oczywiście zachowany w tym procesie, gdyż neutron jest elektrycznie obojętny, a ładunki dodatnio naładowanego protonu i niosącego ujemny ładunek elektronu znoszą się. Ładunek leptonowy jest również zachowany, gdyż neutron i proton mają zerowe ładunki leptonowe zaś elektron i antyneutrino elektonowe ładunki sobie przeciwne.

Teoria Fermiego jasno pokazuje, że obecność rozpadu beta gwarantuje również zachodzenie tzw. odwrotnego procesu beta, czyli oddziaływania antyneutrina z protonem według schematu:



W stanie końcowym tej reakcji mamy pozyton i neutron. Proces mógłby być wykorzystany do rejestracji neutrin pochodzących z rozpadu beta. Jednak z teorii Fermiego wynika, że prawdopodobieństwo oddziaływania antyneutrina z protonem jest wyjątkowo małe, a co za tym idzie, odwrotny proces beta jest bardzo rzadki. Materia więc, choć pełna protonów, jest dla neutrin niemal przezroczysta. Dzięki swej niezwykle przenikalności neutrino zyskało miano cząstki – widma.

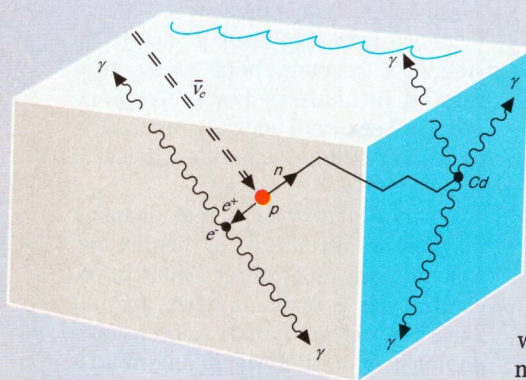
Chociaż samego neutrina zarejestrować się nie udało, uważna obserwacja elektronów pochodzących z rozpadu beta pozwoliła określić jego własności. Już w 1933 roku ustalono doświadczalnie, że neutrino ma bardzo małą lub, jak fotony, zerową masę i porusza się z prędkością światła. Podobne pomiary wykonywane są do dziś. Dzięki nim wyznaczono niezwykle wysrubowaną górną granicę masy neutrina jako jedną stutysięczną masy elektronu, który jest najbliższą znaną cząstką masywną.

POLOWANIE NA NEUTRINO

W reakcjach rozszczepienia jąder atomowych, jakie zachodzą w reaktorach, powstają liczne jądra niestabilne,

które ulegają rozpadowi beta. Prowadzi to do obfitej produkcji neutrin. Wyliczono, że w ciągu sekundy rodzi się w reaktorze liczba neutrin tak wielka, jak jedynka z dwudziestoma zerami. Mając tak potężne źródła – pierwsze reaktory zbudowano w latach II wojny światowej – można było wreszcie zaobserwować neutrino.

Frederick Reines i Clyde Cowan, pracujący w Los Alamos – miejscu powstania amerykańskiej bomby atomowej – przeprowadzili eksperyment, a właściwie dwa kolejne, w których zaobserwowali neutrino dzięki odwrotnemu rozpadowi beta. Doświadczenie (patrz ryc.) przebiegało następująco: w każdej sekundzie miliardy antyneutrin z reaktora trafiały do zbiornika z wodą. Tutaj, w ciągu godziny, kilka z nich oddziaływało z protonami, powodując powstawanie pozytonów i neutronów. Gdy pozyton trafił na swoją antycząstkę, tzn. elektron, następowała anihilacja obu czą-



Antyneutrino, oddziałując z jądrem wodoru, czyli protonem (p), inicjuje ciąg reakcji pokazany na rysunku

stek, czyli ich przemiana w dwa fotony tj. kwanty światła (γ). Neutrony zaś były absorbowane przez jądra kadmu (występujące w wodzie jako domieszka), co również prowadziło do emisji fotonów. A zatem, obserwacja neutrin polegała w istocie na rejestracji wspomnianych fotonów, czyli błysków światła. Pomiar prowadzono zarówno przy włączonym, jak i wyłączonym reaktorze. Chodziło o określenie, ile rejestrowanych fotonów pochodzi nie od neutrin, lecz od promieni kosmicznych i innych zaburzających eksperyment procesów – określanych łącznie jako tło, których nigdy nie udaje się zupełnie wyeliminować.

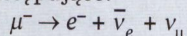
Pierwszy eksperyment z 1953 roku wykonany przy niedużym reaktorze nie przyniósł rozstrzygających rezultatów. Sygnał pochodzący, jak przypuszczano, od neutrin ginął w tle. W trzy lata póź-

niej wielki detektor ustawiony przy reaktorze w Savannah River dał w końcu jednoznacznie pozytywny wynik. Obserwowana liczba neutrin zgadzała się z teoretycznymi przewidywaniami.

Z radością informujemy Pana, że zarejestrowaliśmy neutrino pochodzące z produktów rozszczepienia jąder, obserwując odwrotny rozpad beta (...) – telegrafowali do Pauliego Frederick Reines i Clyde Cowan 15 czerwca 1956 roku. *Wszystko może zdarzyć się temu, kto potrafi czekać* – odpowiedział Pauli. Od napisania słynnego listu do Tybingi upłynęło ponad ćwierć wieku. Frederick Reines czekał na swój dzień jeszcze dłużej – prawie cztery dekady, a Clyde Cowan zmarł, nie otrzymawszy nagrody.

DRUGIE NEUTRINO

Ziemia jest nieustannie bombardowana przez strumienie rozpadzonych cząstek, wspomnianych już, promieni kosmicznych. Badania produktów zderzeń tych cząstek z jądrami atomowymi doprowadziły do licznych odkryć. W 1932 roku znaleziono antycząstkę elektronu, czyli wspomniany już pozyton, zaś w 1947 roku cząstkę nazwaną mionem i oznaczaną grecką literą μ . Mion ma cechy zbliżone do elektronu, lecz jest około 200 razy cięższy. Jest również, w przeciwieństwie do elektronu, nietrwały. Rozpada się na elektron i jeszcze dwie cząstki nie rejestrowane w eksperymencie. Przypuszczano, że są nimi neutrino. Teoretycy sugerowali, że mion, podobnie jak elektron, ma swoje własne neutrino, czyli neutrino mionowe. Schemat rozpadu wyglądałby więc następująco:

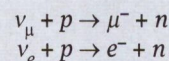


Przed eksperymentatorami stało zadanie wykazania, że neutrino elektronowe i mionowe to różne cząstki. W początku lat sześćdziesiątych wykonano doświadczenie, w którym rzeczywiście podjęto to wyzwanie. Eksperyment był możliwy dzięki ogromnemu postępowi, jaki dokonał się w fizyce cząstek elementarnych.

Najważniejszą metodą badawczą w tej dziedzinie jest obserwacja produktów zderzeń rozpędzonych cząstek. Początkowo jedynie promienie kosmiczne dostarczały cząstek o dostatecznie dużych energiach. Jednak z czasem akceleratory – urządzenia, w których cząstki są przyśpieszane za pomocą pola elektromagnetycznego, zaczęły przejmować tę rolę. Pierwsze, z przełomu lat dwudziestych i trzydzie-

stych, były zaledwie kilkumetrowej wielkości. Następne wymagały już wielkich hal. Aby osiągać jeszcze większe energie zderzeń, budowano coraz potężniejsze urządzenia, które osiągnęły w końcu kilometrowe rozmiary. Każda kolejna generacja akceleratorów umożliwiała nowe odkrycia. W latach pięćdziesiątych dysponowano już akceleratorem, wybudowanym na Long Island w okolicach Nowego Jorku, dzięki któremu otrzymano intensywny strumień mionów. Można więc było wykazać odmiennosc neutrin elektronowych i mionowych.

Neutrino mionowe, oddziaływując z protonem, daje neutron oraz mion, natomiast neutrino elektronowe neutron i elektron. Mogą zatem zachodzić reakcje:



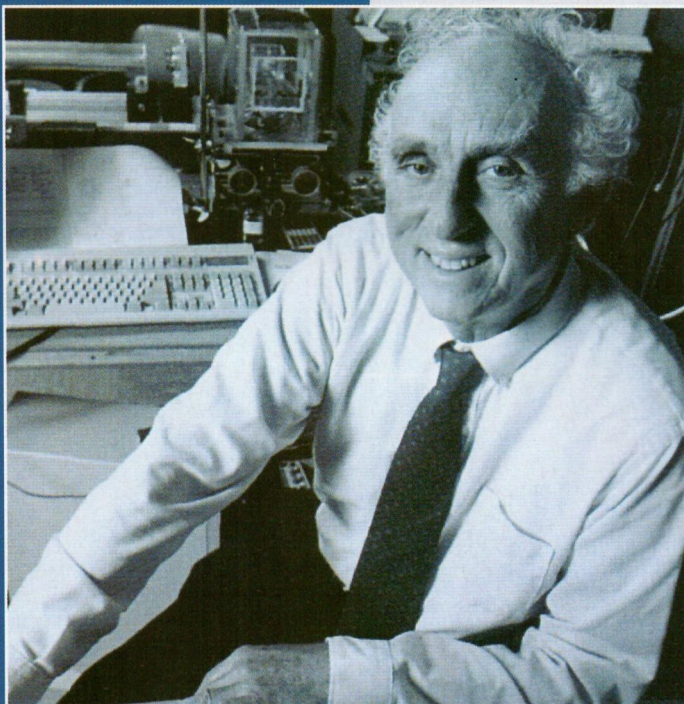
Jeśli oba neutrino mionowe i elektronowe nie różnią się od siebie, to neutrino (nie antyneutrino) pochodzące z rozpadu mionu będzie inicjować obie reakcje. Jeśli natomiast neutrino mionowe to odmienna od elektronowego cząstka, będziemy obserwować tylko miony.

Ponieważ prawdopodobieństwo oddziaływania neutrina jest – jak już pisałem – niezwykle małe, głównym problemem w przeprowadzeniu doświadczenia było odizolowanie detektora od promieniowania kosmicznego i wszelkich innych zaburzeń zewnętrznych. Jako osłony wykorzystano, w tym największym eksperymencie owych czasów, setki ton stali pochodzące z pociętego na kawałki amerykańskiego okrętu *Missouri*. W rezultacie ośmiomiesięcznych pomiarów przeprowadzonych w 1961 roku zarejestrowano 29 mionów i żadnego elektronu. Wykazano zatem istnienie dwóch odmiennych typów neutrina, a co za tym idzie, dwóch typów zachowywanego ładunku leptonowego.

Za przeprowadzenie tego eksperymentu przyznano w 1988 roku Nagrodę Nobla L.M. Ledermanowi, M. Schwartzowi i J. Steinbergerowi. Pierwsza obserwacja neutrina pozostawała zaś nadal nie nagrodzona.

DRUGIE I TRZECIE POKOLENIE

Wspomniałem już, że światem cząstek elementarnych rządzą siły – elektromagnetyczne, słabe i silne. Obiekty elementarne podzielono na dwie grupy, wedle oddziaływań, jakim podlegają. Pierwszą stanowią oddziaływujące słabo leptony, do których należą pary:



Fot. The Royal Swedish Academy of Sciences

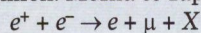
Martin L. Perl

Urodził się w roku 1927 w Nowym Jorku. Doktorat uzyskał na Uniwersytecie Kolumbijskim w roku 1955. Jest członkiem amerykańskiej Akademii Nauk. Pracuje na Uniwersytecie w Stanford, w Kalifornii.

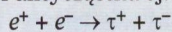
elektron z neutrinem elektronowym i mion z neutrinem mionowym. Elektron oraz mion, jak i wszystkie cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym, podlegają również siłom elektromagnetycznym. Druga grupa to kwarki, które oddziałują słabo i elektromagnetycznie, a także silnie. To ostatnie oddziaływanie sprawia, że kwarki wiążą się w protony i neutrony; stanowi również o ich szczególnej roli w strukturze mikroświata. Początkowo znano tylko trzy typy kwarków oznaczane literami u , d i s . Kiedy w roku 1974 odkryto czwarty kwark c , ujawniła się głęboka symetria między kwarkami a leptonami. Okazało się mianowicie, że kwarki, podobnie jak leptony, występują parami (u, d) oraz (c, s). Co więcej, każdej parze leptonów odpowiada para kwarków i razem stanowią pokolenie. Do pierwszego pokolenia należą kwarki (u, d) i leptony (e, ν_e), do drugiego zaś (c, s) i (μ, ν_μ). Opisana symetria zapewnia matematyczną spójność teoretycznego modelu opisującego zjawiska mikroświata, który

przyjęto nazywać Modelem Standardowym. (Więcej informacji o kwarkach i Modele Standardowym znajdzie Czytelnik w artykule *Szósty kwark*, „WiŻ”, nr 7/1994).

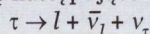
W tym samym mniej więcej czasie, gdy odkryto czwarty kwark i porządkował się obraz mikroświata, w Stanford w Kalifornii rozpoczął pracę nowy akcelerator, w którym uzyskano rekordową energię zderzeń elektronów i pozytonów. Wśród przebadanych tysięcy takich zderzeń znaleziono 24 przypadki, w których zarejestrowano jako produkty reakcji elektron i antymion albo pozyton i mion. Można to zapisać jako



gdzie X oznacza co najmniej dwie neutralne cząstki, które nie zostawiły żadnych śladów w detektorze. Szczegółowa analiza tych przypadków wykazała, że w zderzeniach elektronów i pozytonów produkowana była nowa cząstka, nazwana leptonem *tau* i oznaczana grecką literą τ . Dokładniej, powstawała para: cząstka i antycząstka tj.



Lepton tau, należy do tej samej grupy co elektron i mion, ma więc jako partnera odpowiednie neutрино (ν_τ) i rozpada się następująco



gdzie l oznacza elektron lub mion. Schemencja procesu produkcji i rozpadu

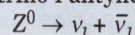
cząstek tau dawała wspomniane dwadzieścia cztery przypadki (ryc. poniżej).

Odkrycie leptonu tau, aż 3500 razy cięższego od elektronu, dokonał liczny zespół fizyków kierowany przez ubiegłorocznego noblistę – Martina L. Perla. Cząstka ta, nazwana od pierwszej litery greckiego słowa *triton* – trzeci, zwiastowała istnienie trzeciego pokolenia kwarków. Rzeczywiście, już w roku 1975 odkryto piąty kwark oznaczany literą b . Natomiast kwark szósty t pozostawał nieuchwytny przez prawie lat 20. Został zaobserwowany dopiero w 1994 roku. W ten sposób znaleziono wszystkich przedstawicieli trzeciego pokolenia.

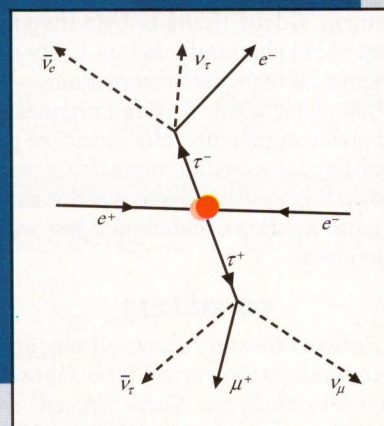
CZY TO JUŻ WSZYSTKO?

Model Standardowy jest tak skonstruowany, że kwarki i leptony muszą występować parami, a liczby par kwarków i leptonów powinny być sobie równe. Model natomiast nie ogranicza liczby pokoleń. Doświadczalnie jednak wykazano, że w przyrodzie są tylko trzy pokolenia.

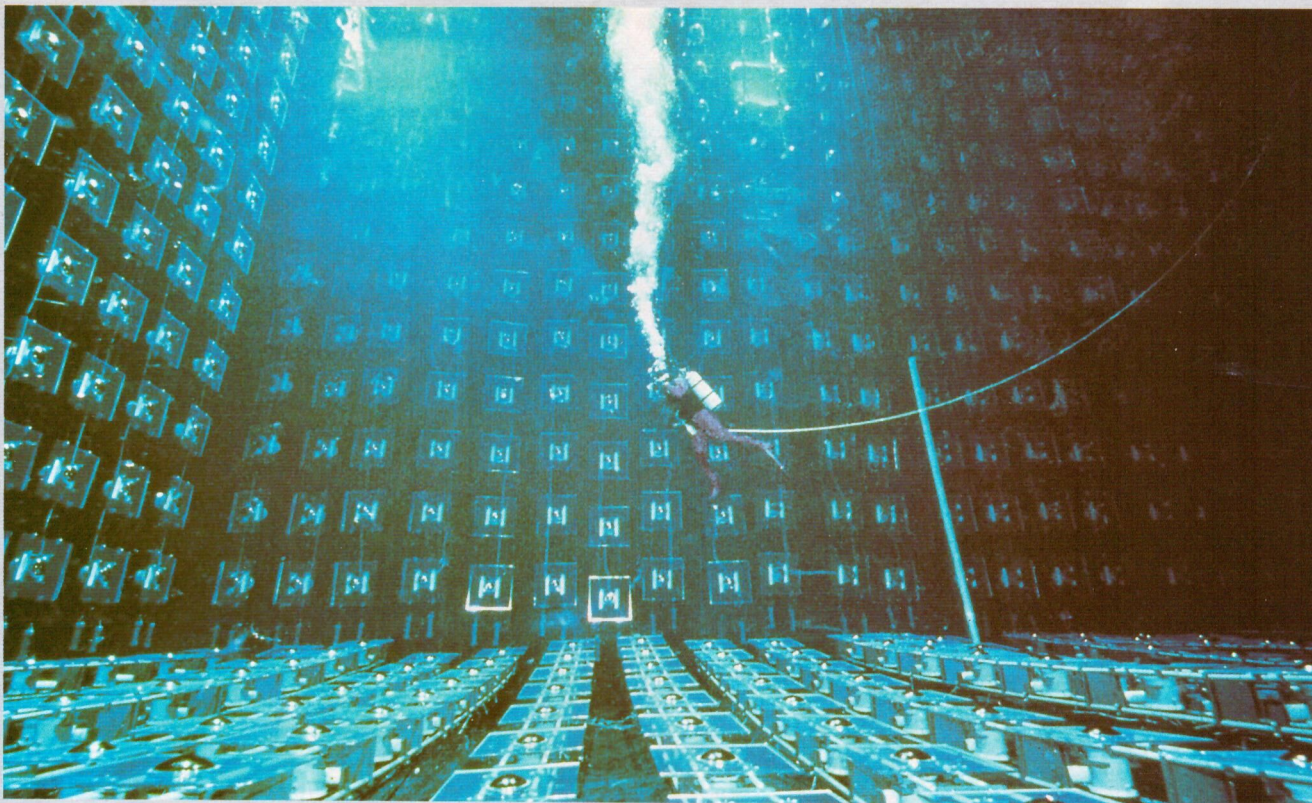
W Europejskim Laboratorium Cząstek Elementarnych (CERN) pod Genewą badano na początku lat dziewięćdziesiątych rozpady neutralnej cząstki znanej jako Z^0 . Może ona rozpaść się na parę: neutрино i antyneutрино, tzn.



gdzie l oznacza dowolny lepton. Im większa jest liczba neutrin, których nie udaje się rejestrować, tym więcej możliwych kanałów rozpadu, a zatem krótszy czas życia cząstki Z^0 . Liczbę typów neutrin określono zmierzyszy właśnie ten czas życia. Pomiar przypomina więc dociekania nad liczbą dziur w wiadrze, z którego ucieka woda.



W zderzeniu elektronu z pozytonem przy dostatecznie dużej energii może powstać para leptonów tau, które następnie się rozpadają



Płetwonurek w detektorze IMB z eksperymentu, którym kierował Frederick Reines. (Skrót IMB pochodzi od Irvine, Michigan, Brookhaven – miejscowości, z jakich pochodzą główni twórcy urządzenia). Detektor jest zbiornikiem wypełnionym 8000 ton doskonale czystej wody, umieszczonym 600 m pod jeziorem Erie, w kopalni soli, w okolicach Cleveland w USA. Widoczne urządzenia rejestrują błyski wywołane przez ewentualny rozpad protonu bądź neutrina docierające z kosmosu

(Wiadro z wodą odpowiada cząstce Z^0 , zaś dziury neutronom.) Jeśli znamy średnicę otworu, to możemy ocenić, ile wody przezeń wypływa w jednostce czasu. Mierząc więc czas, w jakim woda wycieknie z wiadra, możemy wyznaczyć liczbę dziur.

Okazuje się, że astrofizyczne rozważania również sugerują istnienie trzech pokoleń kwarków i leptonów. Procesy nukleosyntezy, czyli powstawania cięższych jąder z wodoru wypełniającego Wszechświat, są czułe na liczbę typów neutron. Gdyby liczba ta była inna niż trzy, skład chemiczny świata byłby odmienny od tego, jaki obserwujemy.

Jak widać mamy ważne i niezależne od siebie argumenty, aby sądzić, że poznaliśmy już wszystkie istniejące w przyrodzie najprostsze cząstki materii. Leptonowo-kwarkowa układanka jest więc kompletna.

CO DALEJ?

Reines i Cowan rozpoczęli następująco doniesienie sprzed lat o zaobserwowaniu neutrina: *Każde fizyczne odkrycie poszerza naszą wiedzę i pogłębia rozumienie świata. Bywają jednak odkrycia, które prowadzą do nowych pytań, bardziej fundamentalnych niż te, na*

które zdołaliśmy odpowiedzieć. Słowa te doskonale pasują do poszukiwań, które zaowocowały sformułowaniem Modelu Standardowego, będącego najpełniejszym wyrazem naszej wiedzy o najprostszych strukturach materii. Wszak wiemy, że Wszechświat tworzą trzy pokolenia kwarków i leptonów, nie mamy jednak pojęcia dlaczego właśnie trzy. Na to i podobne pytania może kiedyś odpowie teoria zwana Wielką Unifikacją, która wchłonie Model Standardowy. Fizycy próbują stworzyć taką teorię; istnieje już kilka jej wariantów. Jednak wybór właściwego kierunku poszukiwań wymaga wskazówek doświadczalnych.

Zgodnie z Modelem Standardowym proton jest cząstką stabilną, czyli ma nieskończony czas życia, nie rozpada się. Natomiast różne wersje Wielkiej Unifikacji sugerują, że czas życia protonu, choć bardzo długi, jest jednak skończony. Frederick Reines przez wiele lat prowadził pionierskie badania zmierzające do wyznaczenia tej wielkości.

Doświadczenie polegało na obserwowaniu, czy w zbiorniku zawierającym tysiące ton doskonale czystej wody nie nastąpi błysk wywołany rozpadnięciem się protonu – jednego z bilionów two-

rzących wodę. Tak jak i w przypadku eksperymentów neutronowych, główny problem polegał na wyeliminowaniu tła od promieniowania kosmicznego. Z tego powodu zbiornik z wodą umieszczono głęboko pod ziemią w kopalni soli. Docierały tutaj niemal wyłącznie kosmiczne neutrina. (Dzięki temu zaobserwowano neutrina pochodzące z wybuchu supernowej w Wielkim Obłoku Magellana, jaki zdarzył się w roku 1987.) Eksperyment nie stwierdził ani jednego przypadku rozpadu protonu. Wyznaczono jedynie dolną granicę jego długości życia. Proton żyje co najmniej 10^{30} lat. Eliminuje to niemal wszystkie znane warianty Wielkiej Unifikacji, które sugerowały krótsze czasy. Być może następny eksperyment, zdolny rejestrować jeszcze rzadsze procesy, udowodni, że proton jednak się rozpada. Teoretycy otrzymają wtedy drogocenną wskazówkę na drodze ku wymarzonej Ogólnej Teorii Wszystkiego, która wskaże jedno prazródło wszystkich typów oddziaływań, czasu i przestrzeni.

STANISŁAW MRÓWCZYŃSKI

Dr hab. STANISŁAW MRÓWCZYŃSKI pracuje w Instytucie Problemów Jądrowych im. Andrzeja Soltana w Warszawie.