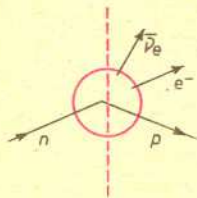


Odkrycie „ciężkiego światła”

Dr Barbara BADELEK

Czy wiecie, ile waży światło? Światło to strumień fotonów — obiektów, które nigdy nie spoczywają, a (w próżni) poruszają się najszybciej we Wszechświecie. Przenoszą one wiadomości o wzajemnym istnieniu (oddziaływaniu) ciał mających ładunek elektryczny i znajdujących się nawet nieskończenie daleko. Ładunki elektryczne nieruchome są źródłem oddziaływań elektrostatycznych, a poruszające się (czyli prądy) — magnetycznych. Długi łańcuch odkryć doświadczalnych i przemyśleń teoretycznych doprowadził w XIX wieku do zrozumienia, że magnetyzm i elektryczność to dwa różne sposoby objawiania się tego samego oddziaływania. Nazwano je elektromagnetycznym. Na przełomie XIX i XX wieku wydawało się, że siły elektromagnetyczne i grawitacyjne są jedynymi fundamentalnymi siłami przyrody. Zbadanie struktury jądra atomu zmieniło ten pogląd narzucając potrzebę wprowadzenia nowego oddziaływania wiążącego nukleony. Zostało ono nazwane oddziaływaniem silnym. Zauważona wkrótce potem nietrwałość jąder atomowych (tzw. przemiana β) kazała obraz ten uzupełnić wprowadzeniem tzw. oddziaływania słabego. Odpowiednie siły, poza tym, że są bardzo słabe w porównaniu z np. elektromagnetycznymi, są również niezwykle krótkozasięgowe (zasięg jest rzędu 10^{-16} cm, czyli 0,001 średnicy protonu). Te dwie własności powodują, że nie mogą one wiązać cząstek w układy podobne do atomów czy jąder atomowych.

Oddziaływania słabe są trudne do badania, bo najczęściej maskują je wielokrotnie silniejsze oddziaływania elektromagnetyczne i silne (te ostatnie są około 10^{17} razy silniejsze!). Do niedawna najłatwiejszym sposobem obserwacji oddziaływań słabych było badanie rozpadów jąder atomowych i cząstek elementarnych. Typowym przykładem jest rozpad β jądra, podczas którego neutron przekształca się na proton, elektron i antyneutrino elektronowe:



Rys. 1. Za pomocą takiego diagramu można zobrazować rozpad nukleonu. Po lewej stronie kreski przerywanej przedstawiona jest sytuacja przed rozpadem, a po prawej — po rozpadzie.

Zgodnie z tak zwaną zasadą krzyżowania mówiącą, że identycznie powinny być opisywane procesy, w których dowolną cząstkę przenosimy na drugą stronę równania reakcji i jednocześnie zamieniamy ją na antycząstkę, z procesem (1) związana jest reakcja



będąca również procesem słabym.

Doświadczalne badanie reakcji (2) stało się niedawno możliwe dzięki wytworzeniu wiązek neutrin. Neutrino są jedynymi

cząstkami elementarnymi, które oddziałują tylko siłami słabymi. Jak dotąd obserwuje się trzy rodzaje neutrin: ν_e , ν_μ , ν_τ . Są one spokrewnione odpowiednio z elektronem (e), mionem (μ) i tauonem (τ) — cząstkami oddziałującymi tylko słabo i elektromagnetycznie (siły grawitacyjne między cząstkami można zawsze pomijać). Wymienione cząstki, noszące wspólną nazwę leptonów (od greckiego słowa leptos — drobny, lekki), są z doskonałą dokładnością punktowe — np. promień elektronu jest mniejszy niż 10^{-16} cm. Cząstki oddziałujące silnie (hadrony) różnią się od leptonów tym, że posiadają strukturę — są zbudowane z niewielkiej liczby tzw. kwarków. Słabe rozpady tych cząstek — to słabe rozpady kwarków, np. reakcję (1) można zapisać



albo



(q oznacza kwark, \bar{q} — antykwark).

Już na początku lat trzydziestych Enrico Fermi rozważał możliwość unifikacji, czyli jednolitego opisu sił słabych i elektromagnetycznych. Zgodnie ze sformułowaną wcześniej teorią oddziaływanie elektromagnetyczne między dwiema cząstkami naładowanymi polega na wysłaniu przez jedną z cząstek fotonu, który następnie pochłaniany jest przez drugą cząstkę. W ten sposób foton może przenosić między cząstkami energię i pęd.

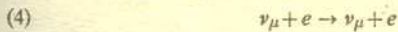
Z punktu widzenia fizyki klasycznej swobodna cząstka nie może wyemitować lub pochłoniąć innej cząstki, ponieważ w takim procesie naruszona byłaby albo zasada zachowania energii, albo zasada zachowania pędu. W mechanice kwantowej sytuacja jest odmienna. Zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga w ciągu krótkiego czasu Δt energia może nie być zachowana, a minimalny rozrzut dopuszczalnych jej wartości spełnia równość $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$, gdzie \hbar jest stałą Plancka.

Na przykład swobodny elektron może wysłać foton (tzw. foton wirtualny) naruszając zasadę zachowania energii pod warunkiem, że w czasie krótszym niż $\hbar/\Delta E$ zostanie on z powrotem pochłonięty przez ten sam elektron albo inną cząstkę naładowaną. Niezachowanie energii ΔE może być dowolnie małe, bo foton ma zerową masę. Wirtualne fotony o bardzo małej energii mogą więc żyć dowolnie długo, a co za tym idzie mogą być zaabsorbowane nawet bardzo daleko od miejsca emisji; zasięg oddziaływań elektromagnetycznych jest nieskończony.

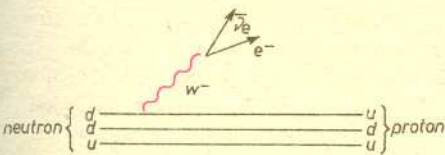
W podobny sposób próbowano opisywać oddziaływanie słabe. Załóżmy, że polega ono na wymianie między cząstkami naładowanymi „słabym ładunkiem” odpowiednika fotonu. Jeśli taki „słaby foton” jest cząstką o niezerowej masie M , to minimalna wartość niezachowania energii $\Delta E \approx Mc^2$. Z zasady nieoznaczoności wynika, że taka wirtualna cząstka musi zostać pochłonięta po czasie nie dłuższym niż $\frac{\hbar}{Mc^2}$, a więc zasięg

oddziaływania może być bardzo mały, jeśli tylko masa „słabego fotonu” jest odpowiednio duża. Ponadto powinny istnieć „słabe fotony” naładowane elektrycznie, aby mogły (np. w reakcji (2)) przekazać ładunek elektryczny od protonu do elektronu. Tak więc, już w latach trzydziestych wiadomo było, że jednolity opis oddziaływań słabych i elektromagnetycznych wymaga istnienia obok fotonu także cząstki naładowanej, około 100 razy cięższej od protonu. Eksperymentatorzy nie dysponowali jednak w owych czasach odpowiednio dużymi akceleratorami, aby taką cząstkę wyprodukować. Trudności mieli również teoretycy, bo teoria z „ciężkim fotonem” dawała czasami wyniki niesensowne (np. nieskończoną wartość energii).

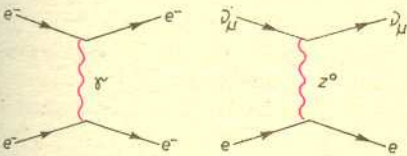
Problem odżył w pracach teoretycznych lat sześćdziesiątych i na początku siedemdziesiątych. W 1979 roku Nagrodę Nobla z fizyki otrzymali teoretycy: Sheldon Glashow, Abdus Salam i Steven Weinberg za sformułowanie (w 1971 roku) teorii oddziaływań elektrosłabych. W teorii tej kwarki są równie elementarne jak leptony, chociaż te pierwsze obserwuje się tylko wewnątrz hadronów, a wszystkie procesy słabe opisuje się zakładając istnienie trzech cząstek ciężkich (mających różną od zera masę spoczynkową) odpowiedzialnych za przenoszenie oddziaływań słabych. Obiekty te (oznaczono je W^+ , W^- , Z^0) miały być bozonami o spinie 1, przy czym bozon neutralny elektrycznie byłby również „słabo”. Opis teoretyczny oddziaływań przenoszonych za pomocą fotonu i cząstek W^+ , W^- , Z^0 jest w tym modelu identyczny. Model przewidywał także istnienie nowego kwarku i jeszcze jednej ciężkiej cząstki, tzw. cząstki Higgsa oraz istnienie takich procesów słabych, w których nie zmienia się natura oddziałujących cząstek. Cząstki Higgsa dotychczas nie znaleziono, a jeśli chodzi o pozostałe przewidywania, to rok 1973 przyniósł pierwszą obserwację procesu



zachodzącego poprzez wymianę bozonu Z^0 , a rok 1974 — odkrycie nowego kwarku nazwanego powabnym (Burt Richter i San Ting — Nagroda Nobla w 1976 r.). Ciężkie światło, czyli bozony W^+ , W^- i Z^0 wymykały się jednak doświadczeniu.



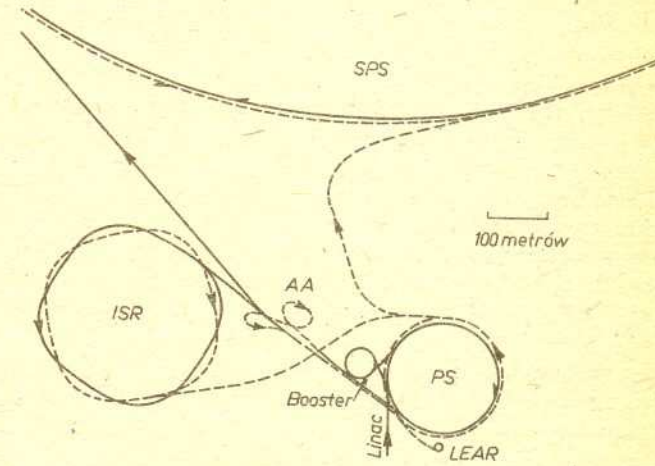
Rys. 2. Ten sam proces co na rys. 1 z uwzględnieniem bozonu pośredniego i struktury kwarkowej protonu i neutronu.



Rys. 3. Słabe oddziaływanie przez wymianę bozonu Z^0 i podobny proces elektromagnetyczny.

Przeszkody były natury technicznej. Przewidywano bowiem, że poszukiwane bozony są mniej więcej sto razy cięższe od protonu, a tak wielkiej masy nie daje się wyprodukować przy użyciu żadnego z istniejących akceleratorów konwencjonalnych (tzn. takich, w których wiązka rozprędzonych cząstek uderza w nieruchomą tarczę). Zauważmy, że jeśli W istnieje, to prawdopodobieństwo zajścia reakcji (3b) powinno osiągnąć maksimum przy energii w układzie środka masy zderzających się q i \bar{q} odpowiadającej masie cząstki W . Wobec niemożliwości skonstruowania tarczy z mezonów π najobfitszym źródłem oddziaływań kwark-antykwarik są zderzenia proton-antyproton. Jednak pęd kwarku to zaledwie 1/6 pędu protonu — energia w układzie środka masy $p\bar{p}$ powinna więc być równa około $6m_W \approx 600$ GeV. Oznaczałoby to konieczność przyspieszenia wiązki antyprotonów do energii 200 000 GeV, podczas gdy najwyższa energia osiągnięta dziś przez wiązki antyprotonów wynosi około 400 GeV. Rozwiązaniem tej trudności jest zastosowanie zderzających się czołowo wiązek protonów i antyprotonów. Energia w układzie środka masy jest wtedy sumą

laboratoryjnych energii p i \bar{p} . Powstaje jednak nowy problem: jak uzyskać dużą świetlną wiązkę, czyli odpowiednio wysoką liczbę zderzeń na jednostkę czasu i jednostkę przekroju wiązki (pamiętajmy, że proton ma promień 10^{-13} cm, takie same są rozmiary antyprotonu — jak tu wcelować jednym w drugi?). Trudność tę udało się pokonać dzięki wynalezionej w 1968 r. w CERNie metodzie stochastycznego „chłodzenia” wiązki, tzn. redukcji przypadkowego ruchu cząstek w wiązce tak, że koncentrują się one w wymaganym miejscu przestrzeni i wokół wymaganej wartości pędu.



Rys. 4. Schemat systemu połączeń tuneli, którymi biegają wiązki cząstek w CERNie. Wiązki protonów zaznaczone są linią ciągłą, a antyprotonów — przerywaną. Linac i Booster są urządzeniami nadającymi początkową energię protonom przed wpuszczeniem ich do PS. ISR jest akceleratorem zderzających się wiązek pp lub $p\bar{p}$ o energii 31 GeV każda, LEAR — pierścieniem akumulującym antyprotony o energii do 3,5 GeV. A oto objaśnienie skrótów

- PS — Proton Synchrotron,
- AA — Antiproton Accumulator,
- SPS — Super Proton Synchrotron,
- ISR — Intersecting Storage Rings,
- LEAR — Low Energy Antiproton Ring.

W 1978 r. zatwierdzono w CERNie program badań nad oddziaływaniami $p\bar{p}$ wielkiej energii, którego głównym celem było znalezienie bozonów przenoszących słabe oddziaływanie. W ramach tego programu opracowano następującą metodę otrzymywania wiązek przeciwbieżnych $p\bar{p}$. Protony o energii 28 GeV z Synchrotronu Protonowego (PS) w zderzeniach ze spoczywającą tarczą produkują antyprotony, które następnie przesyłane są do specjalnie w tym celu zbudowanego Akumulatora Antyprotonów (AA). Podlegają tam „chłodzeniu” i kumulowaniu tak długo, aż wiązka osiągnie żadaną gęstość. Wtedy przechodzą powtórnie do PS i po przyspieszeniu do energii 26 GeV przesyłane są do SPS, w którym krążą w kierunku przeciwnym do protonów i są, podobnie jak protony, przyspieszane do energii 270 GeV. Wiązki p i \bar{p} przecinają się następnie w dwóch miejscach pozwalając badać zderzenia $p\bar{p}$ przy całkowitej energii w układzie środka masy równej 540 GeV (odpowiada to wiązce antyprotonów o energii 155 000 GeV padającej na nieruchomą tarczę protonową!).

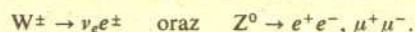
Sercem całego projektu jest AA. Wiazka antyprotonów wyprodukowana w nim zawiera około 10^{12} cząstek — dziesiątki tysięcy razy więcej niż jakakolwiek wiązka \bar{p} otrzymana przedtem. „Cykl produkcyjny” trwa 120 godzin i wymaga wstrzyknięcia 180 000 porcji antyprotonów do komory, w której panuje próżnia — ciśnienie wynosi 10^{-10} tora!

Używane urządzenia pomiarowe są niezwykle skomplikowane. Dla przykładu, jeden z detektorów waży ponad 2000 ton i zawiera aparaturę (m.in. komory dryftowe o całkowitej powierzchni 0,5 ha) służącą do identyfikacji oraz pomiaru kierunków pędów i energii cząstek powstających w zderzeniach. Architektami przedsięwzięcia byli Simon van der Meer (odkrycie metody „chłodzenia” wiązki i budowa AA) oraz Carlo Rubbia (przystosowanie SPSu do pracy w układzie zderzających się wiązek i budowa największego detektora). Oczywiście praca setek ludzi złożyła się na to, że gigantyczny projekt zadziałał sprawnie. Na przykład przy jednym z eksperymentów pracuje 135 fizyków i 12 laboratoriów Europy i USA.

Pierwsze zderzenia $p\bar{p}$ zaobserwowano w SPS w lipcu 1981 r., a w dniach 20 i 21 stycznia 1983 r. na seminariach w CERNie ogłoszono zaobserwowanie zdarzeń zgodnych z założeniem powstania i rozpadu naładowanych bozonów W. Podobna wiadomość dotycząca Z^0 podana została 27 maja 1983 r.

Zarejestrowano wiele setek tysięcy oddziaływań $p\bar{p}$ wybierając „na gorąco” tylko takie, które spełniały narzucone z góry warunki konieczne dla powstania W i Z. Aparatura rejestrowała średnio 4 przypadki na sekundę, a stanowiło to zaledwie promil wszystkich oddziaływań. Świetność wiązek osiągnęła $1,6 \cdot 10^{29} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, co oznacza, że tyleż zderzeń $p\bar{p}$ miało miejsce w sekundzie w 1cm^2 przekroju zderzających się wiązek. Informacja o pojedynczym zdarzeniu, zebrana przez wszystkie

detektory, mogłaby wypełnić pokaźnej grubości książkę! Gigantyczna i niezwykle trudna analiza oddziaływań, prowadzona przy użyciu wielkich maszyn cyfrowych, pozwoliła wyłowić 87 zdarzeń, w których wyprodukował się bozon W^\pm oraz 16 zdarzeń produkcji bozonu Z^0 (stan w sierpniu 1983 r.). Obie cząstki zidentyfikowano przez ich rozpady



W przypadku W^\pm były to takie zdarzenia, w których wśród wielu dziesiątek cząstek — produktów rozpraszania $p\bar{p}$ znajdował się też elektron o dużym pędzie poprzecznym (w stosunku do kierunku lotu $p\bar{p}$). Jednocześnie w zdarzeniu występował duży deficyt pędu (tzn. pęd wypadkowy wszystkich produktów reakcji znacznie różnił się od zera) o kierunku pokrywającym się z kierunkiem lotu elektronu i o przeciwnym zwrocie. Ten brakujący pęd był oczywiście wizytówką neutrino — por. reakcja (3b).

Zmierzone masy rozpadających się obiektów wynosiły:

$$m_W \approx 81 \text{ GeV}/c^2 \quad \text{i} \quad m_Z \approx 93 \text{ GeV}/c^2.$$

Błędy statystyczne są rzędu 2%, a systematyczne — 3%. Analiza jest jeszcze w toku.

Wszystkie własności odkrytych cząstek są zgodne z przewidywaniami teorii oddziaływań elektroslabych dla bozonów pośrednich. Istnienie „ciężkiego światła” zostało potwierdzone. Wagę tego odkrycia trudno przecenić. Równa się ono rangą największym osiągnięciom w historii nauki.



Dość prosto doradzić Heraklesowi zwycięski sposób walki (tzn. pokazać, że istnieje wygrywająca strategia). Powinien on walczyć rozważnie, ale i odważnie. Rozważnie — czyli najpierw powinien ścinać głowy najdalsze od tułowia, odważnie rzucać się w gęszcz głów — wśród najdalszych wybierać te, których najwięcej wyrasta z jednego węzła. Przypuśćmy, że hydra ma wysokość n , największa liczba głów wyrastających z jednego węzła na wysokości $n-1$ równa jest m i takich węzłów jest k . Po odcięciu po jednej głowie z każdego takiego maksymalnego węzła zmniejszamy maksymalną liczbę głów wyrastających z jednego węzła na wysokości $n-1$ o 1. Kontynuując to postępowanie m -krotnie (za każdym razem obcinamy po jednej głowie z węzłów maksymalnych na wysokości $n-1$) zmniejszymy wysokość hydry o 1. Widać, że po skończonym czasie hydra zniknie.

Zwróćmy uwagę, że udowodnione zdanie: dla każdej hydry istnieje strategia wygrywająca, wynika z aksjomatów Peano — oczywiście po odpowiednim zakodowaniu hydr jako liczb naturalnych. Dowód zdania: dla każdej hydry każda strategia jest wygrywająca — niezależnego od aksjomatów Peano — jest oczywiście bardziej skomplikowany.