

## NOWOŚCI NAUKOWE

**Stanisław Mrówczyński**

*Instytut Problemów Jądrowych*

*im. A. Sottana*

*Warszawa*

### Jest szósty kwark

#### Discovery of the sixth quark

*Abstract:* The Standard Model which summarizes our knowledge on elementary particles assumes an existence of six quarks. The search for the sixth one lasted for two decades. The recent measurements provide an evidence that the top quark really exists.

Dnia 26 kwietnia 1994 r. doniesiono o doświadczalnej obserwacji kwarka *t* zwanego *prawdziwym* (od ang. *true*) lub *szczytowym* (od *top*). Od kilkunastu lat poszukiwano go, gdyż był istotnym, brakującym elementem tzw. modelu standardowego będącego sumą naszej wiedzy o świecie cząstek elementarnych.

Kwarki wprowadzono pierwotnie, aby uporządkować niezwykle liczne zbiorowisko cząstek elementarnych podlegających oddziaływaniom silnym. *Hadrony*, bo tak nazwano te cząstki, układają się w pewne grupy analogiczne kolumnom i rzędom w tablicy pierwiastków Mendelejewa. Ta obserwacja doprowadziła niezależnie M. Gell-Manna i G. Zweiga w 1964 r. do sugestii, że hadrony zbudowane są z bardziej elementarnych obiektów, które Gell-Mann nazwał kwarkami wykorzystując słowotwór z powieści Joyce'a *Finnegan's Wake*.

Hadrony dzielimy na bariony (do nich należą m.in. neutron i proton) oraz mezony. Bariony wyobrażamy sobie jako zbudowane z trzech kwarków, mezony zaś z kwarka i antykwarka. W r. 1964, gdy model sformułowano, potrzeba było jedynie

trzech typów kwarków, aby opisać wszystkie znane wówczas hadrony. Wprowadzono więc kwark d dolny (*down*) o ładunku elektrycznym równym  $-1/3$  ładunku jednostkowego, kwark u górny (*up*) obdarzony ładunkiem  $+2/3$  oraz kwark s dziwny (*strange*) o ładunku  $-1/3$ . Proton, którego ładunek równy jest jedności, jest kombinacją (u,u,d), zaś elektrycznie obojętny neutron (u,d,d). Bariony dziwne  $\Lambda$ ,  $\Xi$  i  $\Omega$  zawierają odpowiednio jeden, dwa i trzy kwarki s. Najbardziej pospolite mezony – dodatnio i ujemnie naładowane mezony  $\pi$  – to (u, $\bar{d}$ ) i ( $\bar{u}$ ,d), gdzie kreska nad symbolem oznacza odpowiedni antykwark o ładunku przeciwnym niż kwark. Mezony dziwne zawierają oczywiście kwark s. Zauważmy, że z kwarków o ładunkach ułamkowych budujemy cząstki o ładunkach całkowitych.

Nim jeszcze pojawił się model kwarków, stwierdzono badając rozpraszanie elektronów na protonach, że te ostatnie są obiektami rozciągniętymi. Podczas elektromagnetycznego oddziaływania elektronu z protonem następuje wymiana fotonu. Jeśli długość jego fali jest dużo większa od rozmiarów protonu, foton „widzi” proton jako ładunek punktowy. Gdy zaś niesie on dostatecznie duży pęd i długość fali jest dużo mniejsza od średnicy protonu, wówczas może „dostrzec” wewnętrzną strukturę protonu. Ogromną rolę odegrały badania tzw. głęboko nieelastycznego rozpraszania elektronów na protonach, w których następuje duża (rzędu GeV/c) zmiana pędu elektronu. Rozpraszanie takie wykazało istnienie punktowych, słabo ze sobą oddziałujących składników protonu, zwanych partonami.

Powiązanie dynamicznego modelu partonowego ze statycznym kwarkowym doprowadziło ostatecznie do powstania chromodynamiki kwantowej, teorii podobnej nieco do elektrodynamiki kwantowej. W chromodynamice odpowiednikami elektronów i pozytonów są kwarki i antykwarki, fotonów zaś gluony odpowiedzialne w szczególności za wiązanie kwarków w hadrony. Zamiast ładunku elektrycznego mamy ładunek zwany kolorowym (stąd *chromo-*), który jest jednak nie jednego, lecz trzech rodzajów. Obiekt może być kolorowo neutralny, bądź biały, przez złożenie trzech kolorów podstawowych, jak w barionach, lub gdy dodajemy kolor i antykolor, tzn. kolor i kolor doń dopełniający, jak to się dzieje z mezonami. W elektrodynamice fotony nie niosą ładunku, gluony zaś są kolorowo naładowane i, w przeciwieństwie do fotonów, silnie między sobą oddziałują. W odróżnieniu od atomów, hadrony nie mogą być rozłożone na składniki. Jakkolwiek nie udało się tego wykazać w sposób całkiem zadowalający na gruncie teoretycznym, mamy solidne podstawy doświadczalne, aby wierzyć w tzw. hipotezę uwięzienia głoszącą, że w przyrodzie mogą występować jedynie obiekty białe, takie jak hadrony, w których kolorowe kwarki i gluony są uwięzione.

Kwarki niosąc kolor oddziałują silnie, dzięki zaś ładunkom elektrycznym – elektromagnetycznie, oddziałują one również słabo. W latach 60-tych zaproponowano teoretyczny schemat, w którym siły słabe i elektromagnetyczne są przeja-

wem bardziej podstawowego oddziaływania elektroslabego. Istotnie, w r. 1983 udało się doświadczalnie zaobserwować nośniki oddziaływania elektroslabego, tzw. bozony pośredniczące W i Z, przewidziane przez teorię.

Chromodynamika kwantowa wraz z teorią oddziaływań elektroslabych tworzy model standardowy. W modelu tym wyróżniamy dwie grupy obiektów: cząstki materii oraz nośniki oddziaływań. Dodatkowo mamy jeszcze tzw. mezon Higgsa nie należący do żadnej z tych grup. Cząstki materii to występujące parami kwarki i leptony:

$$\begin{aligned} \text{kwarki:} & \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}, \\ \text{leptony:} & \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Kwarki z górnego wiersza mają ładunek elektryczny równy  $2/3$  ładunku jednostkowego, zaś z dolnego ( $-1/3$ ). Leptony z dolnego wiersza – elektron, mion i lepton tau – niosą ładunek równy ( $-1$ ). Towarzyszą im neutrina – elektronowe, mionowe i tau. W odróżnieniu od pozostałych cząstek materii neutrina są bezmasowe i elektrycznie obojętne. Kwarki podlegają oddziaływaniom silnym, elektromagnetycznym i słabym, leptony z dolnego wiersza elektromagnetycznym i słabym, neutrina tylko słabym. Lista cząstek będących nośnikami oddziaływań wygląda następująco:

silne – gluon,  
elektromagnetyczne – foton,  
słabe – W, Z.

Model standardowy z powyższym zbiorem elementarnych składników opisuje całość zjawisk mikroświata.

Kwarki, jak widzimy, występują parami. Gdyby tak nie było, obserwowalibyśmy pewne słabe rozpady cząstek elementarnych, takie jak  $\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , które w istocie są silnie tłumione. Wtedy, gdy znane były jedynie trzy kwarki, przewidziano istnienie kwarka powabnego c (*charm*) jako partnera kwarka dziwnego s (*strange*). Kwark powabny został istotnie znaleziony w r. 1974. Znalezienie w roku następnym kwarka piątego oznaczonego literą b – dennego (*bottom*) lub pięknego (*beauty*) zwiastowało istnienie jeszcze jednego kwarka, prawdziwego właśnie.

W modelu standardowym każdej parze leptonów odpowiada para kwarków. Jeśli ta symetria jest naruszona, pojawiają się tzw. anomalie, które rozsadzają matematyczną poprawność modelu. Sam model natomiast nie ogranicza liczby par, czy, jak niektórzy powiadają, pokoleń kwarków i leptonów. Niedawne pomiary przeprowadzone w CERN-ie wykorzystujące największy akcele-

rator elektronowo-pozytonowy LEP, wykazały istnienie dokładnie trzech pokoleń leptonów, a więc tyle ile znamy. W tej sytuacji kwark prawdziwy był ostatnim brakującym elementem leptonowo-kwarkowej układanki.

Poszukiwania tego kwarka trwały kilkanaście lat. Ze względu na jego znacznie większą masę niż pierwotnie sądzono, dopiero Tevatron – akcelerator przeciwbieżnych wiązek z Laboratorium im. Fermiego w okolicach Chicago, w którym energia zderzeń protonów z antyprotonami osiągnęła rekordową wartość 1.8 TeV – okazał się właściwym narzędziem. Dla rejestracji produkowanych cząstek wybudowano potężne detektory. Po kilku latach prac związanych z doskonaleniem akceleratora i układów pomiarowych, grupa ponad 400 fizyków wykorzystująca detektor CDF (*Collider Detector at Fermilab*) – ogromne urządzenie o masie ok. 5000 ton – zaobserwowała wśród miliardów zderzeń 15 takich, w których zdaje się ujawniać kwark prawdziwy. Jego masę oceniono na ok. 174 GeV/c<sup>2</sup>.

Para kwarków  $t\bar{t}$  produkowana jest w zderzeniach protonów z antyprotonami (przy energii Tevatronu) dzięki oddziaływaniu wysokoenergetycznego kwarka  $u$  lub  $d$  z protonu z antykwarkiem  $\bar{u}$  lub  $\bar{d}$  z antyprotonu również niosącym dostatecznie dużo energii. Dalej następuje słaby rozpad (anty-)kwarka  $t$  na (anty-)kwark  $b$  i bozon  $W$ . Bozony  $W$  następnie rozpadają się na parę kwark i antykwark, bądź lepton i odpowiednie neutrino. Leptony uciekają z obszaru oddziaływania, natomiast kwarki dalej oddziałują prowadząc do powstania pęków hadronów, w których są uwięzione. Leptony i pęki hadronów są rejestrowane przez aparaturę pomiarową, a następnie rekonstruuje się cały proces porównując dane doświadczalne z obliczeniami teoretycznymi. Odkrycie kwarka  $t$  polegało w istocie na stwierdzeniu, że zgodność danych z teorią uzyskuje się dopiero wtedy, gdy w obliczeniach uwzględną się produkcję par kwarków  $t$  i  $\bar{t}$ .

Odkrycie szóstego kwarka, o ile oczywiście prawdziwe, jest wspaniałym potwierdzeniem słuszności modelu standardowego. Na tym jednak nie koniec. Nadal nie udało się zaobserwować najbardziej tajemniczej cząstki w tym modelu, tzw. mezonu Higgsa. W powszechnym przekonaniu sam model jest tworem niedoskonałym wymagającym uzasadnienia na gruncie bardziej fundamentalnej teorii określonej mianem wielkiej unifikacji, w której wszystkie typy oddziaływań znajdują jedno prąźródło, która wyjaśni dlaczego symetria między materią a antymaterią jest naruszana na poziomie makroskopowym, lub inaczej dlaczego Wszechświat zbudowany jest tylko z materii. Już teraz mamy wiele, nawet zbyt wiele, wariantów takiej teorii. Wybór właściwego kierunku badań będzie wymagał doświadczalnych wskazówek. Front poszukiwań wróci zapewne do Europy – w CERN-ie, w Genewie powstaje akcelerator jeszcze większy od Tevatronu zwany LHC (*Large Hadron Collider*), który uruchomiony będzie w pierwszych latach następnego wieku.