

Swoboda kolorowych kwarków

Idee fizyczne bywają tak samo piękne jak obrazy Caravaggia czy muzyka Mozarta, dowodził noblista Frank Wilczek podczas publicznego wykładu wygłoszonego w ramach konferencji poświęconej fizyce cząstek elementarnych, jaką we wrześniu tego roku zorganizował w Kielcach Instytut Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego. Estetyczna doskonałość fizycznych teorii jest jednak znacznie trudniej uchwytana.



Prof. Frank Wilczek (fot. Piotr Jędrzejewicz)

Swoją popularny wykład *Kwantowe piękno* Frank Wilczek – amerykański fizyk o polskich korzeniach – zaczął od pojęć najprostszych, znanych powszechnie ze szkoły. Kazał słuchaczom zadumać się nad twierdzeniem Pitagorasa, aby uchwycić tyleż prosty co głęboki geometryczny sens tego twierdzenia. Później sprawy poczęły się komplikować, materia wykładu zagęszczać. Pod koniec Wilczek mówił o kwestiach fizyki całkiem współczesnej, wspominał mimochodem o zjawisku, którego objaśnienie było powodem przyznania mu nagrody Nobla w 2004 roku.

Swego największego odkrycia Wilczek dokonał przeszło trzydzieści lat wcześniej, gdy mając lat niewiele ponad dwadzieścia był doktorantem w Princeton. Aby choć naszkicować na czym owo odkrycie polegało, ukazać jego znaczenie, powiedzieć, co w nim było pięknego, wprowadzenia pewnego potrzeba w świat cząstek elementarnych i sił nim rządzących.

Współczesny obraz najprostszych struktur Wszechświata kształtował przez kilka ostatnich dziesięcioleci. W latach 30-tych XX wieku wydawał się kompletny i zdumiewająco prosty. Jądra atomowe zbudowane są, jak wtedy ustalono, jedynie z dwóch typów cząstek - *protonów* i świeżo odkrytych *neutronów*. *Elektrony* zaś krążąc wokół jąder atomowych niby planety wokół Słońca tworzą atomy. Całe bogactwo przyrody zawdzięczamy, zdawało się, zaledwie trzem elementom - protonom, neutronom i elektronom. O takiej prostocie nawet Demokryt nie marzył.

Zapętlone hadrony

Dalszy rozwój fizyki mocno ten obraz skomplikował. Badając oddziaływania z materią rozpadzionych jąder atomowych, pochodzących z promieniowania kosmicznego lub przyspieszanych w ziemskich laboratoriach, obserwowano powstawanie coraz to nowych, wcześniej nieznanymi typów cząstek elementarnych. Grupa pewnych cząstek zwanych *hadronami*, do której należą w szczególności składniki jąder atomowych, rozrastała się niebywale i obecnie liczy kilka tysięcy. Wszystkie te cząstki są równie elementarne jak proton czy neutron, więc pogląd, że świat zbudowany jest z kilku zaledwie prostych składników zdawał się leżeć w gruzach.

Wyjaśnianie bogactwa form poprzez składanie prostych elementów wydaje się być naczelną na przestrzeni wieków myślą europejskiego przyrodoznawstwa. Owe proste składniki bywały bardzo różne: cztery żywioły - woda, powietrze, ogień i ziemia, atomy Demokryta, czy pierwiastki Mendelejewa, ale zasada tworzenia skomplikowanych struktur jednaka – łączymy ze sobą elementarne składniki. Ogromna mnogość hadronów, których lista zdawała się nie mieć końca doprowadziła niektórych fizyków do radykalnej konkluzji, że nastąpił zmierzch atomizmu. Zwrócono uwagę na kultury Wschodu, gdzie bogactwo struktur tłumaczy się raczej prostą zasadą porządkującą, niż prostotą składników. Sformułowano nawet taką zasadę, mającą wyjaśnić złożoność świata hadronów, która brzmiała: *hadrony zbudowane są z hadronów, które zbudowane są z hadronów, które zbudowane są*

z hadronów, które itd. Wypełniona matematyczną treścią owa zasada pętli doprowadziła do pewnych sukcesów, lecz ostatecznie całe podejście załamało się.

Dzięki Joyce'owi

Równoległe poszukiwano wciąż prostych elementów, co doprowadziło do narodzin koncepcji *kwarków*. Murray Gell-Mann i George Zweig niezależnie od siebie pokazali w 1964 roku, że wszystkie znane wtedy hadrony można przedstawić jako zbudowane z zaledwie trzech typów elementarnych składników, które Gell-Mann nazwał kwarkami. Zainspirowało go zdanie z (niedawno przetłumaczonej na polski) powieści Joyce'a *Finnegonów tren* brzmiące po angielsku: *Three quarks for Muster Mark*. Zgodnie ze słownikiem Webstera, *quark* jest słowotworem Joyce'a, choć sprawę może komplikować fakt, że w niemieckim *quark* funkcjonuje w kilku znaczeniach (np. jako drobnostka, głupstwo) i być może o to chodziło.

Kwarki, których początkowo znano jedynie trzy typy, a teraz sześć (i mamy dobre powody, aby sądzić, że lista jest kompletna), niosą zależnie od rodzaju ładunek elektryczny równy $1/3$ bądź $-2/3$ ładunku elektronu. Ponieważ pomiary zapoczątkowane słynnym eksperymentem Millikana z roku 1909 niezmiennie pokazywały, że w przyrodzie występują jedynie ładunki będące całkowitą wielokrotnością ładunku elektronu, więc ułamkowy ładunek kwarków czynił hipotezę ich istnienia nader ekstrawagancką. Jeszcze bardziej ekstrawaganckie okazało się jednak zachowanie sił wiążących kwarki w hadrony.

Ustalono, że kwarki obdarzone są pewnymi ładunkami innymi niż elektryczne, które nazwano kolorami. Trzy bowiem komplementarne ładunki kolorowe, tak jak trzy kolory podstawowe, neutralizują się wzajemnie – dają kolor biały. Zwykle ładunki elektryczne wykazują skłonność do tworzenia neutralnych elektrycznie atomów czy molekuł. W przypadku ładunków kolorowych mamy do czynienia nie ze skłonnością, lecz raczej ze ścisłą regułą, która pozwala występować tym ładunkom jedynie w białych konfiguracjach. Kwarki są zatem permanentnie uwięzione w kolorowo-neutralnych układach, takich jako proton czy neutron. Nie występują nigdy jako obiekty wydzielone, są składnikami doskonałymi – zawsze są częścią większej całości, nigdy bytem samodzielny.

Dwie ekstrawaganckie idee – o ułamkowym ładunku elektrycznym i uwięzieniu koloru – prowadzą do konkluzji zgodnej z wynikami doświadczeń: ułamkowe ładunki elektryczne nie są obserwowane, bo nie występują wydzielone kwarki, tylko ich większe układy o całkowitym ładunku elektrycznym. Konkluzja Millikana więc wciąż obowiązuje – w przyrodzie występują jedynie ładunki będące całkowitą wielokrotnością ładunku elektronu. Uwięzienie kwarków pozostaje niestety problem słabo zrozumiałym i setki fizyków nadal się nad nim głowią. Udało się natomiast pojąć inną nie mniej paradoksalną cechę sił kolorowych.

Plus czy minus?

Gdy zderzamy, powiedzmy, elektrony z protonami, we wnętrzach tych drugich grzechoczą kwarki. Nie sposób z protonów ich wyrwać, można jednak badać jak kwarki na siebie wzajemnie oddziałują. Eksperymenty wykonane jeszcze w latach 60-tych XX wieku sugerowały, że siła między kwarkami jest tym mniejsza im bliżej się siebie znajdują. Wynik ten zwany *asymptotyczną swobodą* nie tylko przeczył zdrowemu rozsądkowi, lecz i żadna znana w owym czasie fizyczna teoria jej nie przewidywała. No właśnie, czy żadna? Pytanie to wielce zajmowało Dawida Grossa - młodego profesora z Uniwersytetu w Princeton. Jego uwagę szczególnie zaprzętała teoria określona dzisiaj jako *chromodynamika kwantowa* i do jej analizy Gross włączył świeżo upieczony doktorant Franka Wilczka.

Należało wykonać długi i żmudny rachunek wielkości zwanej funkcją beta. Jeśli ta jest ujemna, to mamy do czynienia z asymptotyczną swobodą, jeśli zaś dodatnia, czego Gross oczekiwał, to jest jak zwykle – siła maleje, gdy rośnie odległość. Jednak określenie znaku plus lub minus to prawdziwa zmora fizyków teoretyków. Iloczyn dwóch minusów daje plus, więc jeśli mylimy znak parzystą liczbę razy, to wynik nie ulega zmianie. Innymi słowy, wyliczony znak jest często wątpliwy. Zwykle jednak możemy

stwierdzić czy dana wielkość fizyczna jest dodatnia czy ujemna bez wykonywania obliczeń, odwołując się natomiast do praw ogólnej natury. Gross i Wilczek nie mieli jednak takiej możliwości i musieli zaufać swoim rachunkom. Po kilku miesiącach wyteźonej pracy, kilkukrotnym zmianom minusa na plus i odwrotnie, doszli w końcu do wniosku, że chromodynamika kwantowa wykazuje wbrew zdrowemu rozsądkowi asymptotyczną swobodę. Oznacza to, że kolorowe kwarki słoczone w małej objętości przestają się jakby zauważać, stają się swobodne. To dokonane na papierze zdumiewające odkrycie wskazało chromodynamikę kwantową jako właściwą, bo zgodną z eksperymentem, teorię opisującą świat kwarków. Nagrodę Nobla Dawid Gross i Frank Wilczek podzielili trzydzieści lat później z Dawidem Politzerem - innym ówczesnym doktorantem z Harvardu, który pracował nad tym samym zagadnieniem.

Przecież zachwyca ...

Kilka lat temu słuchałem wykładu Franka Wilczka na uniwersytecie w Santa Barbara. Opowiadał o asymptotycznej swobodzie, wśród słuchaczy był Dawid Gross. Wilczek zakończył zabarwionym melancholią stwierdzeniem, że nigdy już później nie pracował nad tak świetnie postawionym pięknym problemem. – Nigdy potem nie miałem tak dobrego studenta, rzucił z sali Gross.

Wspaniały film Milosa Formana *Amadeusz* upowszechnił pogląd, że Antonio Salieri był miernotą. A przecież film mówi w istocie coś innego. Wszak, niezależnie od kapryśnych gustów publiczności, Salieri pierwszy miał rozpoznać geniusz Mozarta, co byłoby zasługą kardynalną. Dzięki bowiem takim Salierim muzyka Wolfganga Amadeusza zachwyca teraz ludzi na całym świecie, nawet tych słabo muzycznie wyedukowanych. Z nauką jest jednak inaczej. Prawdziwy postęp odbywa się, co oczywiste, dzięki geniuszom. Ci tylko trochę mniej zdolni pierwsi potrafią uchwycić piękno nowych koncepcji, upowszechnić je, rozwinąć, zastosować. Jeśli nowoodkryte idee trafiają nawet do podręczników, co jest wielką, jeśli nie największą nobilitacją, grono zdolnych się nimi zachwycić jest wciąż nader wąskie. Asymptotyczna swoboda nigdy nie będzie podziwiana jak aria Królowej Nocy. A czyż na to nie zasługuje?

Stanisław Mrówczyński

Autor jest fizykiem, pracuje w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach oraz w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Warszawie. Zajmuje się fizyką jąder atomowych i cząstek elementarnych.