

*Prof. dr Grzegorz BIAŁKOWSKI*

Bez przerwy, niemal codziennie, fizycy — jak zresztą także przedstawiciele innych nauk przyrodniczych — odkrywają nowe fakty, wykonują nowe doświadczenia, ustalają nowe zależności. Niektóre z tych odkryć stanowią „tylko” potwierdzenie pewnych ogólnych przewidywań teoretycznych, inne nie mają wprawdzie żadnej podbudowy teoretycznej, ale jakoś tam zgadzają się z naszą intuicją; są jednak także i takie, które spadają na nas zupełnie nieoczekiwanie, które do niczego nie pasują i w żadnym schemacie się nie mieszczą. W innym artykule zamieszczonym w tym numerze «Delfy» jest mowa o odkryciu nowej cząstki, a właściwie nowych cząstek elementarnych, oraz o sensacji, którą to odkrycie wzbudziło w świecie fizyków. Właściwie dlaczego? — mógłby ktoś zapytać. W końcu jest to tylko jedna czy dwie cząstki więcej. Ma ona co prawda pewne niezwykle właściwości, a mianowicie wyjątkowo długi czas życia (inne cząstki o tej samej masie żyją około 10 000 razy krócej), ale ostatecznie nie wiadomo, czy warto robić z tego powodu tyle szumu. Nikt wprawdzie dobrze nie wie, co za tym odkryciem się chowa, warto jednak zdać sobie sprawę, że być może jesteśmy świadkami pewnego radykalnego przełomu w fizyce, o rozmiarach, które obecnie trudno ocenić, ale zapewne takiego „raz na kilkadziesiąt lat”.

Mówiłem przed chwilą, że nowych faktów przybywa nam ciągle bardzo wiele. Gdybyśmy chcieli fakty te opanować pamięciowo w oderwaniu jeden od drugiego, to oczywiście w ciągu całego życia zdołalibyśmy zapoznać się tylko z bardzo drobną ich częścią. Celem i sensem istnienia nauki takiej jak fizyka jest uwolnienie nas od pojedynczych faktów przez zastąpienie ich pewną koncepcją porządkującą. Mówiąc krótko — przez ich zrozumienie w pewien jednolity sposób. Ucząc się dziś o prawie ciężenia powszechnego zapominamy o tym, że kiedyś wcale nie było oczywiste, iż ruch Ziemi wokół Słońca i spadanie jabłek z drzewa podporządkowane są tej samej regularności. Przeciwnie, przez setki lat sądzono, że prawa fizyki „ziemskiej” i „kosmicznej” są zupełnie inne. Dopiero w czasach odrodzenia, dzięki odkryciom Kopernika, Keplera, Newtona, połączono te dwa rodzaje zjawisk w ramach klasycznej teorii grawitacji. Dzięki temu zamiast pamiętać o każdym spadającym jabłku i o każdej komecie wystarczy z westchnieniem ulgi przypomnieć sobie prawo Newtona.

Weźmy inny przykład. Rozważmy szereg oderwanych (pozornie) faktów. Pocierany bursztyn przyciąga skrawki papieru. W pewnych warunkach na niebie pojawia się tęcza. Igła kompasu stale wskazuje kierunek ku północy. Przedmioty nieprzezroczyste rzucają cień. Udka żabie umieszczone tak, że pozostają w kontakcie z pewnymi metalami, zaczynają drgać. Od uderzenia pioruna można się zabezpieczyć budując odpowiedni piorunochron. I tak dalej, i tak dalej. Przedstawione tu w skrócie obserwacje były znane (czasem już od wielu wieków) na przełomie XVIII i XIX stulecia. Dziś dobrze wiemy, że stanowiły one punkt wyjścia rozwoju współczesnej teorii elektromagnetyzmu, streszczającej się obecnie w kilku równaniach Maxwella. Droga ku tym równaniom była jednak bardzo trudna.

Początkowo rozwijały się prawie niezależnie takie działy fizyki, jak elektrostatyka (oparta na prawie Coulomba), magnetostatyka, fizyka prądów stałych czy też optyka. Wkrótce stwierdzono, że prąd elektryczny polega na przepływie ładunku elektrycznego, tego samego, który pojawia się w prawie Coulomba, a także ustalono, że prąd ten działa pewną siłą na igłę magnetyczną. Następnie genialna obserwacja Faradaya wykazała, że w przyrodzie zachodzi też zjawisko poniekąd odwrotne, a mianowicie, że zmienne pole magnetyczne wywołuje przepływ prądu elektrycznego w przewodniku. Stwierdzono tym samym, że zmienne w czasie pole magnetyczne powoduje powstanie pewnego pola elektrycznego, które jest potrzebne do popchnięcia elektronów w przewodniku. Już wtedy musiało być jasne dla wielu fizyków, że jakaś synteza teorii elektryczności i magnetyzmu wisi w powietrzu. Trzeba się jednak było zdobyć na pewien decydujący krok. Otóż przed Maxwellem nie znano prawa, które by w analogiczny sposób wiązało



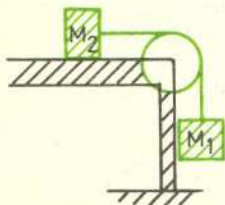




### Rozwiązanie zadania F19.

Zadanie rozwiązujemy na 2 sposoby. Pierwsza metoda jest następująca:

A) Rozważany problem jest analogiczny do znanego większości z Was zadania z dwoma ciężarkami połączonymi nieważką i nierozciągliwą nicią, ślizgającą się po nieważkim blozku (patrz rys. 2).



Rys. 2

Przyspieszenie układu pokazanego na rys. 2 nie zależy od długości nici ani od kształtu ciężarków. Przyspieszenie tego układu względem stołu wynosi:

$$a = \frac{m_1 g}{m_1 + m_2}$$

gdzie  $g$  jest przyspieszeniem ziemskim.

Podobnie, w zadaniu z liną, jeżeli długość zwisającej części liny oznaczmy przez  $z$  i uwzględnimy, że masa liny jest wprost proporcjonalna do jej długości, przyspieszenie wyniesie

$$(1) \quad a = \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{gz}{l}$$

Powyższe równanie określa ruch zwisającego końca liny. Rozwiązanie tego równania, przy przyjętych przez nas warunkach początkowych, jest postaci:

$$(2) \quad z = \frac{l_0}{2} (e^{\sqrt{g/l} t} + e^{-\sqrt{g/l} t}) = l_0 \cosh(\sqrt{g/l} t),$$

gdzie  $e$  jest podstawą logarytmu naturalnego,

a funkcja  $\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$  nazywa się kosinusem hiperbolicznym.

Powyższa metoda nie określa, w jakim przedziale wartości zmiennej  $z$  otrzymane rozwiązanie jest fizycznie słuszne. Dlatego przytoczymy inną metodę rozwiązania, która polega na badaniu ruchu środka naszej liny.

B) Wektor wyznaczający położenie środka masy  $\vec{r}_s$ , spełnia równanie:

$$(3) \quad M \vec{r}_s = \sum \Delta m_i \vec{r}_i$$

gdzie  $\Delta m_i$  i  $\vec{r}_i$  oznaczają masy i wektory

położenia poszczególnych części liny.

Oczywiście  $M = \sum_i \Delta m_i$ . Niech w danej chwili czasu  $t$ , część liny o długości  $x$  znajduje się na poziomym stole, a pozostała część o długości  $z$  (jak poprzednio), zwisa pionowo ze stołu.

d.c. na str. 3

zmienne w czasie pole elektryczne z powstaniem jakiegoś indukowanego pola magnetycznego. Ten brak symetrii między polem elektrycznym i magnetycznym był nie tylko przeszkodą w unifikacji obu typów oddziaływań — elektrycznych i magnetycznych — ale też był niewątpliwie czymś brzydkim. Maxwell zażądał, aby równanie Faradaya uzupełnić innym równaniem, które w analogiczny sposób łączyłoby pole elektryczne z magnetycznym. Trudno wnikać w mechanizm psychologiczny tego odkrycia, ale można przypuszczać, iż jakąś rolę odegrało tu pragnienie, aby piękno przyrody odpowiadało także piękno opisujących je równań. Oczywiście, jak każda, nawet najpiękniejsza teoria, tak i teoria Maxwella musiała być poddana sprawdzeniu eksperymentalnemu. Na szczęście — chciałoby się powiedzieć — test ten wypadł dla niej pomyślnie. Jedną z konsekwencji teorii Maxwella było istnienie fal elektromagnetycznych wykrytych wkrótce przez Hertza. Pozwoliło to na włączenie całej optyki do teorii Maxwella. Tęcza i żabie udka! Związek jedyny w swoim rodzaju (jeśli nie liczyć tego, że i żaby, i tęczę często spotyka się po deszczu).

Od żabich udek do nowej cząstki elementarnej droga jest jeszcze dłuższa. Znowu trzeba streścić w kilkunastu zdaniach kilkadziesiąt lat rozwoju fizyki. Zaczę od przypomnienia, że na przełomie XIX i XX wieku wykryto foton, jak wiemy — kwant oddziaływania elektromagnetycznego. Stwierdzono, że cząstka ta ma masę spoczynkową równą zero, nie ma ładunku elektrycznego, a spin jej wynosi jeden. Współczesny obraz oddziaływania elektromagnetycznego w wielkim uproszczeniu polega na tym, że wyobrażamy sobie to oddziaływanie jako nieustanną wymianę fotonów między cząstkami naładowanymi wchodzącymi w skład badanego układu fizycznego (np. atomu wodoru).

Badania nad cząstkami elementarnymi i ich zespołami, np. jądrami atomowymi, doprowadziły do wniosku, że prócz oddziaływań elektromagnetycznych cząstki te biorą udział także w innych rodzajach oddziaływań, zwanych silnymi i słabymi (oddziaływania grawitacyjne odgrywają tu znacznie mniejszą rolę). Oddziaływania silne „odpowiedzialne” są przede wszystkim za wiązanie się neutronów i protonów w jądra atomowe, a więc — za istnienie tzw. sił jądrowych. Kierując się analogią z fotonem, Yukawa zażądał, aby także siły jądrowe miały swój kwant, swój „foton”. Kwant ten, zwany przez Yukawę mezonem, musiał jednak mieć takie własności, które by tłumaczyły krótki zasięg sił jądrowych (jest on, jak wiadomo, rzędu  $10^{-15}$  m). Okazało się, że zasięg sił jest tym krótszy, im większa jest masa spoczynkowa kwantu tych sił. Podstawowy kwant oddziaływań silnych, mezon  $\pi$ , ma masę około 140 MeV, spin równy jeden i może występować w odmianach naładowanych (dodatniej i ujemnej) oraz nienaładowanej. Pod każdym niemal względem różni się on od fotonu, a jednak spełnia w przyrodzie analogiczną rolę. Doświadczenie potwierdziło genialne przypuszczenie Yukawy i między innymi pozwoliło wyznaczyć masy mezonu  $\pi$  (i innych mezonów). Yukawa na podstawie rozważań teoretycznych był w stanie podać tę masę jedynie w grubym przybliżeniu.

Co zaś dotyczy oddziaływań słabych, to nasza wiedza o nich opiera się do dziś prawie wyłącznie na badaniu powodowanych przez nie procesów rozpadu cząstek. Najdawniej i najlepiej znanym takim procesem jest bez wątpienia rozpad  $\beta$  neutronu, który stanowi podstawowy mechanizm promieniotwórczości  $\beta$ .

Oddziaływania słabe zawsze przysparzały teoretykom wielu zmartwień. Najpierw okazało się, że w rozpadzie  $\beta$  pozornie nie zachowują się ani energia, ani pęd, ani moment pędu. Na szczęście okazało się, że prawa te zachowują swoją wartość, pod warunkiem, że założy się istnienie co najmniej jednej cząstki o masie spoczynkowej równej zero, nienaładowanej i o spinie połówkowym. Cząstkę taką nazywa się neutrino. Istnienie takiej cząstki zostało potwierdzone doświadczalnie w r. 1953. Po kilku latach natrafiono jednak na dalsze trudności — okazało się mianowicie, że w czasie rozpadu  $\beta$  nie zachowuje się parzystość. Jest to fakt zdumiewający i jego odkrywcy otrzymali jedną z najbardziej zasłużonych w historii fizyki nagród Nobla. Fakt ten znaczy bowiem ni mniej ni więcej tylko tyle, że opis zjawisk fizycznych (związanych z oddziaływaniami słabymi) może zależeć od tego, czy dokonujemy go w lewo- czy też w prawoskrętnym układzie odniesienia. Przez jakiś czas sądzono, że symetria obu typów układów da się utrzymać, jeżeli jednocześnie zmieni się wszystkie cząstki na ich antycząstki. Ale i to okazało się nieprawdziwe; był to wynik zupełnie nieoczekiwany i nie przewidziany przez żadną wcześniejszą teorię.

Pomimo tych wszystkich komplikacji powstała pewna teoria oddziaływań słabych,



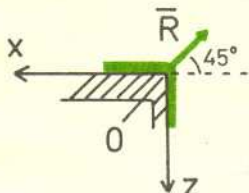
D.c. zad. F 19

Zachodzi związek  $x+z=l$ . Wówczas współrzędne środka masy liny w układzie współrzędnych pokazanym na rys. 1 wynoszą odpowiednio:

$$(4) \quad x_s = \frac{1}{2l} x^2, \quad z_s = \frac{1}{2l} z^2$$

Silami zewnętrznymi działającymi na linę są:

- ciężar zwisającej części liny:  $P = Mg \frac{z}{l}$
- siła  $\vec{R}$  reakcji stołu przyłożona w punkcie 0, skierowana pod kątem 45° (dlaczego?) do poziomu (patrz rys. 3).



Rys. 3

Ciężar części liny znajdującej się na stole jest równoważony przez reakcję stołu. Równania ruchu środka masy w kierunku  $x$  i  $z$  są następujące:

$$(5) \quad \begin{aligned} M \frac{d^2 x_s}{dt^2} &= -R \frac{\sqrt{2}}{2} \\ M \frac{d^2 z_s}{dt^2} &= Mg \frac{z}{l} - R \frac{\sqrt{2}}{2} \end{aligned}$$

Odejmując powyższe równania stronami, oraz uwzględniając równania (4) i zależność  $x = l - z$ , łatwo otrzymamy ponownie równanie (1). Równania (5) umożliwiają dyskusję stosowności otrzymanego rozwiązania. Mianowicie aby linia przylegała do stołu, siła reakcji stołu musi być skierowana tak jak pokazano na rys. 3, czyli wartość  $R$  występująca w równaniu (5) musi być dodatnia. Rozwiązując równanie (5) względem  $R$  otrzymamy:

$$(6) \quad R \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{Mg}{l} (l_0^2 + lz - 2z^2)$$

$R$  równa się zero, gdy  $z = z_1 = \frac{l}{4} \sqrt{l^2 + 8l_0^2}$

Dla  $z < z_1$  wartość  $R$  jest dodatnia. Rozwiązanie zadania, dane równaniem (2), jest słuszne jedynie dla  $z \leq z_1$  ( $z_1 \leq l$ ). Następnie linia oddziela się od krawędzi stołu i przyjmuje inny kształt niż przedstawiono na rysunkach 1 i 3. Pierwsze z równan (5) dla  $R = 0$ , tj. dla  $z = z_1$ , wskazuje, że pęd liny w kierunku  $x$ ,

wynoszący  $M \frac{dx_s}{dt}$ , osiąga maksimum. Ponieważ

jednak stół nie jest w stanie dostarczyć ujemnej reakcji  $R$ , zatem od tej chwili składowa pozioma pędu nie ulega zmianie, a więc pozostała pozioma część liny a wraz z nią również dalsze jej części muszą wybiec poza krawędź stołu. Czytelnikom pozostawiamy sprawdzenie, czy otrzymane przez nas rozwiązanie (równ. (2)) spełnia zasadę zachowania energii.

Dla dociekliwych na str. 5 zamieszczamy jeszcze jedno rozwiązanie zadania. Tym razem do podanej metody rozwiązywania zakradł się błąd.

która dobrze zdawała sprawę z danych doświadczalnych. Miała ona jednak pewną niepokojącą cechę, a mianowicie tę, że oddziaływania słabe w ramach tej teorii nie były przenoszone przez żaden „foton” czy też „mezon”, tak jakby zachodziły one przy zetknięciu się dwu cząstek o spinie połówkowym (np. elektronu i neutrina), a więc tak, jakby zasięg „słabych sił” był nieskończenie mały. Pomijając już to, że fakt ten psuje nam zaobserwowaną w przyrodzie regularność (wszystkie inne oddziaływania przenoszone są przez pewne kwanty pola sił), powoduje on poważne trudności teoretyczne, których tu nie mogę bliżej przedstawić. Trudności te nie mają wprawdzie żadnych konsekwencji praktycznych dziś, przy badanych obecnie wartościach energii cząstek, ale w przyszłości musiałyby z konieczności doprowadzać do zawalenia się całego formalizmu.

Naturalną drogą wyjścia z tej sytuacji było założenie, iż także oddziaływania słabe mają swój kwant, tyle że bardzo ciężki (oszacowania jego masy wahają się od kilku do kilkudziesięciu GeV), a więc dający siły o bardzo małym zasięgu. Cząstka ta (oznaczana zwykle literą  $W$ ) zwana bozonem pośrednim miałaby, podobnie jak foton, spin 1, ale występowałaby w stanach o ładunku  $+e$  i  $-e$ . Niezależnie od tej hipotezy bozonu pośredniego ustalono w wyniku wcześniejszych badań, że oddziaływania słabe, podobnie jak oddziaływania elektromagnetyczne, mają charakter uniwersalny, to znaczy, że ich siła scharakteryzowana jest przez swojego rodzaju „słaby ładunek”, którego wartość jest taka sama dla wszystkich cząstek, podobnie jak wartość ładunku elektrycznego.

Zarysowały się więc pierwsze przesłanki nowej syntezy — oddziaływań elektromagnetycznych i słabych. Sprawa ta była przedmiotem niesłychanie intensywnego wysiłku teoretycznego w ciągu kilku ostatnich lat. Nawet krótki opis przebytej drogi nie jest możliwy w ramach tego artykułu. Podam tylko niektóre wyniki.

Okazało się przede wszystkim, że taka unifikacja jest rzeczywiście możliwa, ale wymaga wprowadzenia pewnych nowych cząstek (oprócz bozonu  $W^+$  i  $W^-$ ). W jednej wersji teorii taką nową cząstką miałyby być nowy, także bardzo ciężki bozon nie naładowany (oznaczany zwykle  $Z^0$ ). W innych wersjach takimi nowymi cząstkami miałyby być bardzo ciężkie leptony (a więc cząstki własnościami swymi zbliżone do elektronów i mionów). Oczywiście można też podać mniej ekonomiczne, a więc i mniej ładne wersje, w których jest i bozon  $Z^0$ , i ciężkie leptony, a może i inne jeszcze cząstki. Przeprowadzone w ciągu ostatnich dwu lat badania doświadczalne wykazały niezbicie, że jeżeli w ogóle hipoteza bozonu pośredniego jest poprawna, to musi obok bozonu  $W$  istnieć także bozon  $Z^0$ . Jest to samo w sobie poważnym argumentem przemawiającym za ideą unifikacji obu rodzajów oddziaływań. Niestety, przy obecnych energiach możemy jeszcze nie być w stanie wykryć bezpośrednio bozonów  $W$  i  $Z^0$ , jeśli rzeczywiście mają one masę kilkudziesięciu GeV.

Na tym jednak nie koniec. Okazało się, że budowa takiej jednolitej teorii jest możliwa wtedy, gdy założy się istnienie w przyrodzie zupełnie nowej liczby kwantowej, którą po angielsku nazywa się *charm*, a co można by spolszczyć jako „powab” (czar, wdzięk). W naturalny sposób taką liczbę kwantową można wprowadzić postulując istnienie czwartego kwarku. W dotychczasowych rozważaniach teoretycznych pojawiały się trzy kwarki — dwa z nich tworzyłyby taką samą parę, jak proton i neutron, a trzeci pozostawałby do nich w takim stosunku, jak hiperon  $\Lambda$  do  $p$  i  $n$ . Czwarty kwark w teorii (!), podczas gdy w doświadczeniu nie ma dotychczas ani jednego! Może to przesada? Gdy się jednak założy istnienie takiego nowego kwarku, wynikają z tego określone konsekwencje, a między innymi musimy dojść do wniosku, że istnieje w przyrodzie nowa rodzina hadronów (mezonów i barionów), które dotąd umykały naszej uwadze. Bardzo niepewne oszacowania mas najlżejszych spośród tych cząstek dawały wynik około 3–4 GeV. Jednocześnie można było przypuszczać, że właśnie te najlżejsze nowe mezony będą miały stosunkowo duże czasy życia. No i chyba są? Może to właśnie te nowo odkryte cząstki  $\psi$  czy też  $J$ ? Wszyscy wiedzieliśmy, że przyroda jest piękna, ale żeby była aż tak powabna?

Jeśli ta interpretacja nowo odkrytej cząstki potwierdzi się, to nie tylko zdobędziemy nowy (choć wciąż pośredni) argument na korzyść jednolitej teorii oddziaływań elektromagnetycznych i słabych, ale także otworzą się przed nami perspektywy włączenia we wspólny schemat także oddziaływań silnych. Wiadomo przecież, że wszystkie cząstki silnie oddziałujące zbudowane są z kwarków (taki pogląd dziś zdecydowanie przeważa wśród fizyków). Przypuśćmy, że mamy czwarty kwark jako podstawową cząstkę oddziaływań silnych. Ale przecież mamy też tylko cztery leptony (elektron, mion i dwa neutrina). Coś tu dzwoni, prawda?