

Doc. dr hab. Stefan POKORSKI



Pytanie, jak zbudowana jest materia, należy chyba do najstarszych pytań stawianych sobie przez człowieka. Szukanie podstawowych składników materii i rządzących nimi praw należy do podstawowych, najbardziej intrygujących problemów nauki. Historia nauki zna już wiele prób odpowiedzi na to fundamentalne pytanie. Odpowiedzi te, jak dotychczas, zawsze okazywały się niepełne. Niepełne to nie znaczy, podkreślić to trzeba, nieprawdziwe. W miarę dalszego rozwoju techniki badań doświadczalnych odkrywano po prostu, że cząstki materii, uważane za jej elementarne cegiełki, są jednak bardzo złożone. Mimo to każdy następny krok po szczeblach struktury materii miał oczywiście ogromne znaczenie ogólnopoznawcze. Odkrycia te, początkowo o charakterze czysto poznawczym, prowadziły do głębokich konsekwencji techniczno-praktycznych. Poszukiwaniem kolejnej odpowiedzi na postawione wyżej pytanie zajmuje się dziś fizyka cząstek elementarnych. Geneza tej jednej z najmłodszych dziedzin fizyki wiąże się z odkryciem struktury jądra atomowego, które okazało się obiektem złożonym z „cząstek elementarnych”: protonów i neutronów. Za datę tego odkrycia należy chyba przyjąć rok 1932, w którym stwierdzono doświadczalnie istnienie neutronu. Dopiero jednak po odkryciu mezonu  $\pi$  w roku 1947 można mówić o powstaniu nowej, odrębnej od fizyki jądrowej, dyscypliny naukowej: fizyki cząstek elementarnych. Od tego czasu aż do chwili obecnej obserwuje się niezwykle burzliwy rozwój tej dziedziny fizyki.

Czytelnik domyśli się łatwo w tym miejscu, że artykuł ten ma być poświęcony badaniom teoretycznym w fizyce cząstek elementarnych. Jasne jest również, że skoro (jak to wynika z tytułu) brak na razie teorii cząstek elementarnych, to celem tych badań jest właśnie jej sformułowanie. Spróbujmy teraz omówić to wszystko nieco dokładniej.

Przede wszystkim musimy zdać sobie sprawę z faktu, że nazwa „cząstki elementarne” może okazać się zbyt optymistyczna. Obecnie wiemy jedynie, że są to składniki materii bardziej elementarne niż jądro atomowe. Ale czy są to rzeczywiście najbardziej elementarne cząstki materii? Odpowiedzi na to pytanie może udzielić dopiero właśnie fizyka cząstek elementarnych.

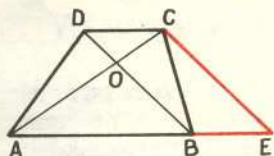
Chciałbym omówić przede wszystkim dwa zasadnicze aspekty świata „cząstek elementarnych”. Pierwsza sprawa to istnienie trzech wyraźnie różnych typów oddziaływania między cząstkami. Najlepiej poznano oddziaływanie elektromagnetyczne, które odpowiedzialne jest za takie zjawiska, jak np. rozpraszanie elektronów na elektronach. Przypuśćmy teraz, że obserwujemy dwa oddziałujące ze sobą protony. Protony są również obdarzone ładunkiem elektrycznym (dodatnim), spodziewamy się wobec tego, że będą one oddziaływać elektromagnetycznie. Okazuje się, że rzeczywiście oddziaływanie dwóch protonów jest z grubsza biorąc podobne do oddziaływania dwóch elektronów, o ile tylko odległość między protonami jest dostatecznie duża. Sytuacja zmienia się jednak drastycznie, gdy protony znajdują się bardzo blisko siebie. Jak pokazuje doświadczenie, dochodzą wtedy do głosu siły o wiele potężniejsze od sił elektromagnetycznych i przekrój czynny na oddziaływanie dwóch protonów rośnie o wiele rzędów wielkości w porównaniu z oddziaływaniem elektromagnetycznym. Oddziaływanie takie (nazywa się je po prostu oddziaływaniem „silnym”) prowadzi w większości przypadków do procesów nieelastycznych, to znaczy procesów, w których następuje produkcja nowych cząstek elementarnych, głównie mezonów  $\pi$  (oczywiście o ile pozwala na to energia zderzających się protonów). Trzeci rodzaj oddziaływania to oddziaływanie zwane „słabym”. Jest ono rzeczywiście najsłabsze z wymienionych typów oddziaływania, a przy tym ma niezwykle krótki zasięg. Przykładem procesów zachodzących pod wpływem oddziaływania słabego jest rozpad neutronu na proton, elektron i antyneutrino. Z przytoczonych przykładów widać już, że cząstki oddziałujące silnie (hadrony) uczestniczą również w oddziaływaniach elektromagnetycznych i słabych. Istnieją także cząstki nie oddziałujące silnie, lecz słabo (leptony). Są to elektron, mion i neutrino; neutrino oddziałuje wyłącznie słabo, zaś elektron i mion również elektromagnetycznie (listę tę zamyka oczywiście foton, oddziałujący tylko elektromagnetycznie).

Drugi istotny aspekt świata cząstek elementarnych to duża liczba odkrytych hadronów. Poza protonem, neutronem i mezonem  $\pi$  zaobserwowano już kilkadziesiąt innych obiektów, których własności zmuszają nas do zaliczenia ich do cząstek elementarnych. Ta różnorodność hadronów budzić może pewne

(Znane nam oddziaływanie grawitacyjne jest  $10^{39}$  razy słabsze od oddziaływania silnego i w fizyce cząstek elementarnych prawdopodobnie nie odgrywa zauważalnej roli).



Rozwiązanie zadania M33.



Niech  $b < a$ . Poprowadźmy przez punkt  $C$  prostą  $k$  równoległą do  $BD$  i niech  $E$  będzie punktem przecięcia prostej  $AB$  z  $k$ . Mamy oczywiście  $BE = CD$  i  $AE = AB + BE = a + b$ . Zauważmy, że pole trójkąta  $ACE$

$$\text{jest równe } \frac{1}{2} AE \cdot h = \frac{1}{2} (a+b) \cdot h = S,$$

gdzie  $h$  jest wysokością trapezu. Trójkąty  $AOB$  i  $ACE$  są podobne, więc stosunek ich pól równy jest stosunkowi kwadratów odpowiednich boków. Oznaczając przez  $S_1$  pole trójkąta  $AOB$  mamy

$$\frac{S_1}{S} = \left(\frac{AB}{AE}\right)^2 = \left(\frac{a}{a+b}\right)^2,$$

skąd

$$S_1 = \left(\frac{a}{a+b}\right)^2 S.$$

refleksje na temat elementarności cząstek elementarnych. Czy różnorodność ta nie jest konsekwencją ich złożoności? W każdym razie obraz materii na poziomie cząstek elementarnych okazał się daleki od elementarnej prostoty.

Sądzę, że teraz możemy już przejść do dyskusji badań teoretycznych w fizyce cząstek elementarnych. Jedynie w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych można mówić obecnie o istnieniu teorii: elektrodynamiki kwantowej. Oznacza to, że w oparciu o stosunkowo niewielką liczbę podstawowych założeń i poprzez rozbudowany formalizm matematyczny uzyskać można dowolne przewidywania dotyczące oddziaływań elektromagnetycznych. Dotychczas wszystkie przewidywania elektrodynamiki kwantowej zgadzają się z bardzo dużą dokładnością z wynikami doświadczeń. U podstaw tej teorii leży klasyczny obraz oddziaływania, np. dwóch elektronów. Polega ono na tym, że każdy z elektronów wytwarza wokół siebie pewne pole elektromagnetyczne, które oddziałuje z drugim elektronem. Innymi słowy prąd elektryczny (poruszający się elektron) oddziałuje z polem elektromagnetycznym, którego źródłem jest inny prąd (drugi elektron). W teorii kwantowej elektron i pole elektromagnetyczne traktowane są w sposób bardziej symetryczny. Z jednej strony mówimy o fotonach — kwantach pola elektromagnetycznego — z drugiej zaś traktujemy elektrony jako kwanty pewnego pola elektronowego. Dochodzimy w ten sposób do pojęcia sprzężenia dwóch pól; zakładamy, że sprzężenie to jest punktowe (mówimy o oddziaływaniu ładunku punktowego z polem elektromagnetycznym). W języku cząstek oddziaływanie dwóch elektronów polega na emisji i pochłanianiu fotonów. Teorię taką będziemy nazywać „lokalną kwantową teorią pola”. Lokalność (punktowość) oddziaływania oraz warunek, że oddziaływanie nie może propagować się z prędkością większą niż prędkość światła (przyczynowość), stanowią podstawowe założenia fizyczne teorii. Nasza obecna wiedza doświadczalna niemal z całą pewnością potwierdza prawdziwość obu tych założeń, nawet dla odległości tak małych, jak  $10^{-15}$  cm. Elektrodynamika kwantowa jest pewną konkretną realizacją kwantowej teorii pola, wynikającą z określonego wyboru reguł oddziaływania między polami, opartego na analogii z fizyką klasyczną. Założenia leżące u podstaw kwantowej teorii pola są jednak na tyle ogólne, zaś dostarczany nam przez tę teorię obraz oddziaływania na tyle przekonujący, że chcielibyśmy, aby w jej ramach dało się również opisać oddziaływania silne i słabe. W obu jednak wypadkach natrafiono, wprawdzie z odmiennych powodów, na zasadnicze trudności. W przypadku oddziaływań słabych okazało się, że postać sprzężenia pól leptonowych, sugerowana przez istnienie określonych procesów, prowadzi do pojawienia się w teorii nieprzewidywanych trudności.

Z oddziaływaniami silnymi sytuacja jest, można powiedzieć, jeszcze gorsza. Duża liczba odkrytych hadronów i złożoność procesów zachodzących pod wpływem oddziaływań silnych utrudniają wybór takiego sprzężenia między polami, które opisywałoby w sposób realistyczny oddziaływanie silne. Inna trudność polega na tym, że sprzężenie jest silne. Wykluczone jest przez to stosowanie rozwiniętego w elektrodynamice kwantowej aparatu rachunkowego opartego na metodzie kolejnych przybliżeń. W rezultacie formalizm kwantowej teorii pola okazał się na razie niemal całkowicie bezużyteczny przy opisie oddziaływań silnych. Z drugiej jednak strony można chyba śmiało powiedzieć, że obecnie w całej fizyce cząstek elementarnych stosuje się aparat pojęciowy kwantowej teorii pola. Mówimy o cząstkach jako o kwantach pewnych pól, oddziaływanie między np. dwoma nukleonami wyobrażamy sobie jako wymianę mezonów, nie ma również na razie żadnych podstaw doświadczalnych, by kwestionować założenia o lokalności i przyczynowości dla oddziaływań słabych i silnych.

Tabela przedstawia porównanie trzech typów oddziaływań. Podane są w niej czasy życia cząstki, której rozpad następuje poprzez odpowiednie oddziaływanie, przekrój czynny na oddziaływanie, średnia droga lotu cząstki rozpadającej się i średnia droga swobodna na oddziaływanie z materią. Na przykład neutrino oddziałuje słabo, jest cząstką trwałą — z tabeli widać, że może przenikać bez trudu ogromne warstwy materii.

	Stała charakteryzująca siłę oddziaływania	Czas życia (s)		Przekrój czynny	Średnia droga lotu do rozpadu	Średnia droga swobodna w materii
		od	do			
Oddziaływania silne	1	$10^{-21}$	$10^{-23}$	$10^{-23}$ cm <sup>2</sup> = 10 milibarnów	$3 \cdot 10^{-15}$ m = 3 fermi	1 m
Oddziaływania elektromagnetyczne	1/137	$10^{-15}$	$10^{-20}$	$10^{-30}$ cm <sup>2</sup> = 1 mikrobarn	$3 \cdot 10^{-10}$ m = 3Å	10 km
Oddziaływania słabe	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-11}$	$10^{-38}$ cm <sup>2</sup>	3 m	1 miliard km