



# klasyczne pole o małym zasięgu

*Doc. dr Michał ŚWIECKI*

Największym osiągnięciem fizyki XIX wieku było wprowadzenie koncepcji pola fizycznego i stworzenie polowej teorii oddziaływań pomiędzy ładunkami elektrycznymi. Ukoronowaniem tego kierunku stała się ogólna teoria względności Einsteina — połowa teorii oddziaływań grawitacyjnych. Najistotniejszym zaś wkładem naszego stulecia jest rozdrobnienie zarówno materii, jak i pola na możliwie najmniejsze kawałki — cząstki elementarne. I tak materię

podzielono na cząstki o spinie (wewnętrznym momencie pędu) równym  $\frac{1}{2}$ : elektrony, protony i neutrony, których zachowanie ograniczono zakazem Pauliego nie zezwalającym na to, by w określonym stanie fizycznym znajdowała się więcej niż jedna cząstka każdego rodzaju. W ten sposób udało się wyjaśnić podstawową własność materii, a mianowicie istnienie ciał stałych i cieczy o określonej objętości. Zakaz Pauliego nie obowiązuje składników pola. Dlatego właśnie ogromna liczba fotonów może zajmować ten sam stan tworząc w ten sposób makroskopowe klasyczne pole elektromagnetyczne.

Cząstek elementarnych odkryto znacznie więcej od tych wyżej wymienionych. Znalaziono też nowe rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych — oddziaływania silne wraz z odpowiednim polem składającym się z mezonów oraz oddziaływania słabe z polem, którego składniki nie zostały dotychczas odkryte. Z cząstek tworzących pola silne i słabe można również budować pola klasyczne. Zupełnie tak samo, jak z fotonów pole elektromagnetyczne. Wystarczy zgromadzić około  $10^{20}$  odpowiednich cząstek w każdym mniej więcej miejscu zajmowanym przez pole. Niestety, operacja taka jest praktycznie niewykonalna. Cząstki przenoszące oddziaływania silne i słabe są obdarzone dość dużą masą i wyprodukowanie tak dużej ich ilości napotyka nieprzezwyciężalne trudności energetyczne. Powszechna obecność w naszym życiu codziennym klasycznych pól elektromagnetycznych wiąże się w teorii cząstek elementarnych z zerową wartością masy odpowiedniego składnika — fotonu.

Wartość masy nośnika oddziaływania wiąże się z jeszcze jedną cechą uniemożliwiającą makroskopowe obserwacje pól silnych i słabych. Zasięg działania pól statycznych wytworzonych przez nieruchome ładunki jest mianowicie odwrotnie proporcjonalny do masy odpowiedniej cząstki — składnika pola. Dla fotonu o masie zero zasięg jest nieskończony, czemu odpowiada potencjał pola elektrostatycznego

$$V \sim \frac{1}{r}$$

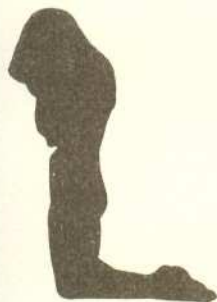
i siła odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości (prawo Coulomba). W prawie powszechnego ciążenia siła jest również odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości i ewentualny nośnik oddziaływań grawitacyjnych powinien mieć także zerową masę. Jednak oddziaływania grawitacyjne wciąż pozostają ostatnim bastionem teorii pola nie zdobytym przez teorię cząstek elementarnych. Zupełnie odwrotnie przedstawia się sprawa w przypadku oddziaływań silnych i słabych. Masy cząstek przenoszących te oddziaływania są duże, zasięg działania pól statycznych bardzo mały i efektów tego działania nie można zaobserwować w warunkach makroskopowych. Dlatego skazani jesteśmy tu na badanie mikroskopowych oddziaływań zachodzących pomiędzy pojedynczymi cząstkami elementarnymi. Ponieważ fizyka cząstek elementarnych oparta jest w całości na teoriach kwantowych, więc i występujące w niej obiekty mają własności kwantowe, określone jedynie statystycznie. Łatwo zrozumieć, że budowanie zwartej teorii fizycznej w oparciu o wysoce niekompletne, bo trudne do uzyskania, dane oraz słabo przemawiające do wyobraźni koncepcje statystyczne nie jest wcale proste. Dlatego też postęp na tym polu jest bardzo powolny. Sądzę, że z postępu tego korzyść mogą odnieść nie tylko liczni zwolennicy kwantowej teorii pola, ale także wymierający powoli miłośnicy klasycznej teorii pola fizycznego. Jest tak dlatego, że każda teoria kwantowa ma swój odpowiednik klasyczny. Wystarczy wyobrazić sobie  $10^{20}$  cząstek w jednym mniej więcej miejscu...

Tak więc każda nowa zwarta teoria pola może być przedstawiona w postaci pewnego modelu pola klasycznego. Ostatnio powstała właśnie tego typu teoria. Jest nią jednolita teoria oddziaływań elektromagnetycznych i słabych S. Glashowa, A. Salama i S. Weinberga (Nobel 79). Zgodnie z głoszonym tu poglądem, tę wybitnie kwantową teorię należy przedstawić w dość zrozumiałym intuicyjnie języku pojęć klasycznej teorii pola. Należy jednak przy tym pamiętać, że wszystkie własności oddziaływań słabych zostały wymyślone i odkryte jedynie w trudno dostępnym świecie cząstek elementarnych.

## Gdy byłem rybą

W dalekim kraju, za siedmioma rzekami, poważni ludzie wierzą w ścisłe prawa rozwoju kultury. Na przykład wierzą w to, że wszystkie religie świata rozwijają się dokładnie według tego samego schematu. Wobec tego, powiadają, wystarczy pojechać do Australii, gdzie rodowici mieszkańcy żyją na poziomie epoki kamiennej, przestudiować ich religię — i już będziemy wiedzieli, jak wyglądała nasza religia przed 10 000 lat. Ponieważ ów daleki kraj jest bardzo postępowy i religia w nim spontanicznie wyginęła, używa się niektórych dawnych świątyń jako muzeów historii religii i ateizmu, które prezentują opisany tu śmiały pogląd.

Metoda ta nasunęła mi pewien pomysł. Podobno zarodek ludzki powtarza w swoim rozwoju kolejne etapy ewolucji najwyżej rozwiniętych organizmów żywych. Byłem więc kiedyś rybą. To dopiero musiało być fajne... Postanowiłem napisać pamiętnik z tego okresu swojego życia. Tylko, psiakość, nic nie pamiętam. Na razie więc kupiłem sobie rybę, wpuściłem do wanny i pilnie obserwuję. Może coś mi się skojarzy.



Zajmiemy się na razie jedynie fragmentem teorii, a mianowicie konstrukcją pola klasycznego o bardzo małym zasięgu działania. Zaczniemy od własności pola elektromagnetycznego. Źródłem tego pola są poruszające się lub nieruchome ładunki elektryczne. Niech więc w pewnym układzie odniesienia spoczywa idealny punktowy ładunek elektryczny. Ładunek ten jest źródłem wypełniającego całą przestrzeń pola elektrostatycznego, którego natężenie (siła działająca na jednostkowy ładunek umieszczony w polu) jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od ładunku oraz wprost proporcjonalne do wartości samego ładunku. Natężenie to jest skierowane od lub do ładunku źródłowego, co zapewnia sferyczną symetrię układu. Ponieważ pole powierzchni kuli o środku w punkcie zajęтым przez ładunek rośnie tak jak kwadrat odległości tej powierzchni od ładunku, zaś natężenie pola maleje jak odwrotność tego kwadratu, więc całkowity strumień pola (iloczyn powierzchni oraz normalnej do niej składowej natężenia) przez każdą taką powierzchnię jest taki sam i równa się ładunkowi umieszczonemu w środku. Można pokazać, że własność ta, zwana prawem Gaussa, nie zależy od kształtu rozpatrywanej powierzchni zamkniętej ani od punktowości samego ładunku (patrz Delta 8/79). W szczególności strumień przez powierzchnię otaczającą obszar elektrycznie obojętny wynosi zero. Ta szczególna własność pola elektrycznego umożliwia posługiwanie się pojęciem linii pola, które zaczynają się na ładunkach elektrycznych. Im większy ładunek, tym większa gęstość linii z niego wybiegających. Oczywiście, każda linia pola musi po wejściu do zamkniętej powierzchni gdzie ją opuścić. Chyba, że napotka w środku jakiś nie zajęty w całości przez inne linie ładunek. Wszystko to jest całkowicie równoważne sformułowanemu poprzednio prawu Gaussa. Jak widzieliśmy prawo to jest spełnione jedynie dla sił odwrotnie proporcjonalnych do kwadratu odległości.

Prawo Gaussa jest spełnione również dla pola magnetycznego. Tyle tylko, że nie są znane pojedyncze źródła tego pola — ładunki magnetyczne — i strumień pola magnetycznego przez każdą powierzchnię zamkniętą wynosi zero. Każdy magnes czy też mała pętla z prądem zachowuje się jak układ dwóch nierozdzielnych ładunków przeciwnego znaku, z których każdy działa siłą odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości. Tak więc linie sił pola magnetycznego nie rozbiegają się do nieskończoności. Zaczynają się one na jednym, a kończą na drugim biegunie magnesu. W przypadku przewodnika z prądem obiegają go po zamkniętych pętlach.

Prawo Coulomba i wynikające z niego prawo Gaussa przypisują ładunkowi elektrycznemu rolę decydującą o sile oddziaływań elektrycznych, im większy bowiem ładunek tym większe natężenie wytworzonego pola. Nie mniej istotna jest inna własność ładunku, a mianowicie prawo jego zachowania spełnione ściśle w każdym elemencie przestrzeni. Głosi ono, że z każdego obszaru tyle samo ładunku wypływa przez powierzchnię, ile go ginie w środku. Prawo to łatwo zrozumieć poprzez koncepcję niezniszczalnych, kończących się tylko na ładunkach, linii pola. Jeżeli bowiem w pewnym obszarze zginął ładunek elektryczny, to albo musiał on wypłynąć wraz ze swymi liniami pola na zewnątrz, albo odpowiednie linie musiały urwać się nagle. W tym drugim przypadku musiałyby one zniknąć równocześnie w całej przestrzeni, a to jest niemożliwe ze względu na ograniczoną prędkość rozchodzenia się wszelkiej informacji w przyrodzie.

Zupełnie podobnie możemy zacząć opisywać inne rodzaje oddziaływań. Wydaje się, że wystarczy wprowadzić nowe rodzaje ładunków i nowe pola wraz z ich liniami. Niestety, napotykamy od razu poważne trudności. Można bowiem wprowadzić pojęcie słabego ładunku materii będącego źródłem pola słabego, ale, jak wiemy, pole to ma wyjątkowo krótki zasięg działania.

Doświadczalnie zasięg oddziaływań słabych jest mniejszy od  $10^{-17}$  cm. W związku z tym siła oddziaływania słabego nie maleje tak, jak odwrotność kwadratu odległości, ale znacznie szybciej. Strumień pola słabego przez powierzchnię sferyczną nie jest więc stały, ale szybko maleje wraz ze wzrostem promienia sfery. Prawo Gaussa przestaje być słuszne i pojęcie linii pola traci sens. Można wprawdzie wprowadzić linie zaczynające się na ładunkach słabych, ale musiałyby one urywać się w próżni w miarę oddalania się od ładunku.

Łatwo stąd widać, że ładunek słaby nie może być wielkością zachowaną.

Sytuacja jest jednak tylko pozornie beznadziejna. Wreszcie ładunek słaby nie musi spełniać prawa zachowania i problem polega na tym, jak wprowadzić linie pola, które kończąc się tylko na ładunkach równocześnie urywałyby się w próżni. Już widać co trzeba zrobić. Należy po prostu wprowadzić ładunki słabe do samej próżni. Taka próżnia wypełniona ładunkiem o odpowiedniej gęstości wychwytyje linie pola słabego, w wyniku czego zasięg oddziaływania staje się dowolnie mały. Samej próżni ani jej ładunku nie możemy oczywiście obserwować. Przynajmniej na razie. W konsekwencji ładunek słaby jest wielkością zachowaną jedynie teoretycznie, nie umiemy bowiem na przykład zaobserwować ruchów ładunków próżniowych.

W ten sposób załatwiliśmy kwestię małego zasięgu oddziaływań słabych. Wprowadzenie takiego zasięgu odpowiada w teorii kwantowej nadaniu cząstkom pola nie równej zeru masy. Cząstki te poprzez oddziaływanie z próżnią uzyskują masę. Podobnie masy wszystkich innych cząstek mogą pochodzić z odpowiedniego ich oddziaływania z wprowadzoną „materiałną” próżnią. Tak się zresztą obecnie uważa.