

Przyroda jednak lubi próżnię

Doc. dr Michał ŚWIĘCKI

W artykule, tym posługuję się językiem fizyki klasycznej. Do opisu wnętrza atomu, jądra i protonu właściwy jest język fizyki kwantowej, w którym pojęcie ruchu nie jest dobrze określone, gdyż nie ma sensu pojęcie toru cząstki. Zamiast o ruchu należałoby raczej mówić o rozkładzie prędkości.



Często w związku z opisywanymi doświadczeniami mówi się o głębokim rozpraszaniu nieelastycznym (w żargonie polsko-angielskim rozpraszanie jest głębokonieelastyczne). Słowo „głębokie” wiąże się oczywiście z faktem, iż elektrony rozpraszają się na głębokich warstwach protonu. A nieelastyczne? Otóż, w wyniku takiego głębokiego rozpraszania proton zostaje mocno odrzucony i zamienia się na grupę wielu różnych cząstek. Tylko nieliczne elektrony wywołują reakcję elastyczną, w której ta grupa sprowadza się do pojedynczego protonu. W opisywanym doświadczeniu nie chcemy narzucać żadnych ograniczeń na dalsze losy odbitego protonu, gdyż ograniczenia takie wpływają na rozkład kierunków rozpraszonych elektronów. Badamy więc ten rozkład zupełnie nie licząc się z tym, co stało się z protonem.

Zdążyliśmy przyzwyczać się do faktu, że atom nie jest cząstką niepodzielną, że ma nietrywialną strukturę wewnętrzną. Wiedziano o tym w zasadzie już w połowie XIX wieku, kiedy to okazało się, że atomy każdego pierwiastka wysyłają i pochłaniają charakterystyczne dla siebie barwy światła. Łatwo wyobrazić sobie, że w trakcie takich procesów atomy muszą zmieniać się w ściśle określony sposób — muszą więc mieć pewną określoną strukturę, której szczegóły należy jakoś zbadać. Udało się to osiągnąć dopiero wiele lat później. W 1911 roku Rutherford wpadł na pomysł rewelacyjnej w tych czasach interpretacji danych doświadczalnych uzyskanych przy rozpraszaniu cząstek alfa na cienkiej blaszce ze złota. Warto wspomnieć, że dobrze już znano wtedy własności cząstek alfa i wiedziano, że ich masa jest czterokrotnie większa od masy atomu wodoru, zaś ładunek elektryczny jest dodatni i dwukrotnie większy od ładunku elektronu.

Przechodzące przez złotą blaszkę cząstki alfa rozbiegały się w różnych kierunkach w taki sposób jakby nie natrafiały w blaszkę na żadną materię, a jedynie zmieniały swój lot w wyniku działania pewnej siły przypominającej siłę elektrostatyczną. Zakładając, że siła ta to nic innego jak znana dobrze siła Coulomba, Rutherford był w stanie wyznaczyć z wyników doświadczenia wartość ładunku elektrycznego centrum rozpraszającego cząstki alfa. W ten sposób zostały położone fundamenty współczesnego modelu atomu, sprawdzone wielokrotnie w różnych niezależnych doświadczeniach. Jak wiemy, atom w tym modelu jest praktycznie całkowicie pusty. W wypełnionej polami elektrycznymi próżni wewnątrzatomowej poruszają się bardzo lekkie pozbawione struktury wewnętrznej elektrony, które łatwo można oderwać od atomu. W samym środku znajduje się bardzo ciężkie jądro o średnicy 100 000 razy mniejszej od średnicy atomu.

Fakt, że jądro atomowe ma, w przeciwieństwie do elektronu pewną własną strukturę, został wkrótce udowodniony przez rozbicie jądra na kawałki. Zmiany tej struktury związane z wysyłaniem i pochłanianiem charakterystycznego promieniowania (promienie γ) zostały szczegółowo zbadane później.

Składnikami jąder atomowych są protony i neutrony związane ze sobą potężnymi siłami wewnątrzjądrowymi. Strukturę tych cząstek zaczęto badać poważnie dopiero po II wojnie światowej.

Na pierwszy rzut oka wydaje się, że protony i neutrony muszą mieć bardzo bogatą strukturę. Przecież ogromne energie związane z działaniem sił jądrowych powinny wystarczyć, by same pola tych sił produkowały różne cząstki i tym samym tworzyły pewną wewnętrzną konstrukcję. Fakt ten należało jednak jakoś uzasadnić doświadczalnie. I tu właśnie zaczęły się mnożyć niepokonalne przez długi czas kłopoty. Okazało się bowiem, że w wyniku reakcji rozpraszania protonów na jądrach atomowych powstaje ogromna liczba zupełnie nowych cząstek. Żadna z nich nie mogła być uznana za składnik protonu i żadna też nie dawała się bezspornie zaliczyć do grona jego, oczekiwanych przez fizyków, stanów wzbudzonych. Co więcej, nie było nawet jasne, które z cząstek można by uznać za promieniowanie wewnątrzprotonowe. W tej sytuacji postanowiono wrócić do idei dawno już zapomnianego doświadczenia Rutherforda. Innymi słowy, zdecydowano się na zawieszenie badań wewnątrzprotonowych pól jądrowych, których najmniejsze zakłócenie wprowadza tak ogromny chaos. Zaczęto badać wewnątrzprotonowe pola elektromagnetyczne. Cząstką sondującą te właśnie pola mógł być elektron, który nie bierze udziału w reakcjach jądrowych i nie powinien podlegać działaniu żadnych pól wewnątrzprotonowych, z wyjątkiem elektromagnetycznego. Założono więc, że elektron oddziałuje jedynie z ładunkami elektrycznymi rozmieszczonymi w protonie i to według schematu znanego od czasów Maxwella. Wtedy szybko już okazało się (Hofstadter, 1956 rok), że od dawna oczekiwana struktura istnieje. Dopiero jednak budowa nowych, wysokoenergetycznych akceleratorów elektronów umożliwiła po roku 1969 dokładne jej badania.

Przy małych energiach przekazywanych protonowi przez uderzający elektron (rozpraszanie prawie bez zmiany kierunku lotu elektronu), gdy elektron zaledwie muska powierzchnię protonu, wyniki były zgodne z oczekiwaniami. O polach elektromagnetycznych nie dało się w tym przypadku powiedzieć nic ciekawszego niż to, że zostały wytworzone przez duże ilości naładowanych cząstek wyprodukowanych przez potężne pole jądrowe. Gdy jednak zaczęto sondować głębsze warstwy protonu, rejestrując elektrony, które utraciły podczas zderzenia dosyć dużą energię (rzędu masy protonu i więcej), obrazek wnętrza nieoczekiwanie zmienił się. Wnętrze to znów, podobnie jak prawie cały atom, okazało się być wypełnione jedynie polem elektromagnetycznym, którego źródłem musiały być jakieś cząstki wewnętrzne o rozmiarach zbyt małych na to, by elektron był w stanie uderzyć w nie bezpośrednio. Warto przypomnieć, że elektrodynamika Maxwella wyklucza możliwość, by źródłem pola wewnątrz protonu były (odkryte uprzednio) ładunki rozmieszczone na powierzchni (prawo Gaussa).

Niestety, odkryta w ten sposób prawie opróżniona struktura wnętrza protonu nie mogła być podobna do struktury atomu. Dane doświadczalne wykluczały możliwość, by w środku tkwiło jakieś ciężkie jądro protonowe. Małeńkie składniki protonu musiały szybko poruszać się, co dowodziło, że są dosyć lekkie (może nawet tak lekkie, jak elektron).



Trzeba było jeszcze skorzystać z wyników rozpraszania elektronów i neutrin na neutronach oraz założyć, że siły jądrowe działają na wszystkie kwarki tak samo.



Rozwiązanie zadania F 176. W czasie rozprężania gazu do wysokości x (zakładamy, że jest to proces powolny) jego ciśnienie p_x musi być równe sumie ciśnień wywieranych przez rtęć i atmosferę.

W tym przypadku:

$$p_x = L\varrho g + (2L - x)\varrho g = (3L - x)\varrho g,$$

gdzie ϱ jest gęstością rtęci, a g przyspieszeniem pola grawitacyjnego Ziemi. Z równania stanu gazu wynika, że temperatura gazu T musi spełniać zależność:

$$\frac{p_x \cdot x}{T} = \text{const.}$$

Warunek równowagi ma więc postać

$$T = \frac{T_0}{2L^2} (3L - x)x.$$

Temperatura jako funkcja x ma maksimum dla $x_m = 1,5L$. Odpowiadająca x_m

temperatura $T_m = \frac{9}{8}T_0$ jest maksymalną

temperaturą, przy której gaz i pozostała w górnej części rurki rtęć mogą być w równowadze; dla każdej wyższej temperatury rtęć musi zostać wyparta. Gaz należy więc ogrzać co najmniej do temperatury

$$T_m = \frac{9}{8}T_0.$$

Paradoks

Kartami szczególnie pożądanymi przez grających w remika są jokery — dwa czerwone i dwa czarne, przy czym ich kolor w grze nie odgrywa roli. Często po rozdaniu kart gracz chwali się:

„A ja mam jokera”, czasem nawet pokazuje go; a potem dodaje

„A może mam i drugiego”. Zaskakujące jest, iż nawet jeśli

byliśmy pewni, że nie blefował i rzeczywiście miał pierwszego

jokera, to po pokazaniu go prawdopodobieństwo posiadania

drugiego zwiększyło się. Cóż to za czary? Otóż po zobaczeniu

jokera znamy jego kolor i ta dodatkowa informacja zmienia

prawdopodobieństwo.

Fakt ten wprowadził następną dowolność. Nie wiadomo było, ile jest tych cząstek i jak rozdzielony jest między nimi całkowity ładunek protonu (całkowity ładunek skórki protonowej wynosi zero). Z wyników rozpraszania elektronów nie można już było nic więcej wydusić. Wtedy sięgnięto po inną sondę — po neutrina i antyneutrina.

Neutrina, znane już od lat trzydziestych naszego wieku, również nie oddziałują z wewnątrzprotonowymi polami jądrowymi, a ponieważ są elektrycznie neutralne, także z polami elektromagnetycznymi. Wyjątkowo słabe oddziaływania neutrina z materią (nie bez powodu zwane oddziaływaniami słabymi) mają pewną istotną cechę uniwersalności. Biorą w nich udział wszystkie cząstki z wyjątkiem fotonu. Wszystkie też działają na neutrina taką samą siłą. Oznacza to, że odpowiedzialny za tę siłę słaby ładunek jest dla wszystkich cząstek jednakowy.

Łatwo teraz domyślić się, jak analizowano strukturę protonu za pomocą neutrin. Założono mianowicie, że ładunki słabe składników protonu są takie same, jak odpowiednie ładunki wszystkich innych cząstek. Przy tym założeniu szybko odtworzono obrazek znany uprzednio z wyników rozpraszania elektronów.

Co więcej, uniwersalność ładunków słabych pozwoliła wyznaczyć parametry ruchu składników protonu, a to wraz z odpowiednimi danymi z oddziaływania antyneutrin pozwoliło na pełne rozszyfrowanie struktury. Okazało się wtedy (choć podejrzewano to wcześniej), że proton składa się z kwarków, hipotetycznych poprzednio cząstek, które fizycy wprowadzili do swych teorii po to, by wyjaśnić pewne cechy symetrii obserwowane w świecie cząstek elementarnych (Gell-Mann i Zweig, rok 1964). Teraz (był to rok 1973) istnienie kwarków zostało udowodnione.

Potwierdzono, że w protonie znajdują się trzy kwarki o ładunkach równych $\frac{2}{3}$, $\frac{2}{3}$ i $-\frac{1}{3}$ ładunku

elementarnego, oraz że kwarki mają spin taki jak elektron ($\frac{1}{2}\hbar$). Co więcej, przy okazji

stwierdzono, że wewnątrz protonu (i neutronu też, a zapewne i innych cząstek zbudowanych z kwarków) jest pusta dziura, w której kwarki poruszają się prawie swobodnie (oddziaływania elektromagnetyczne i słabe są znacznie słabsze od jądrowych, a te okazały się silne tylko w protonowej skorupie). Odkrycie to dało impuls do budowy nowych teorii, w których wszystkie rodzaje oddziaływań są w pewnych warunkach słabe i takie same.

Na zakończenie warto podkreślić, że przy założeniu ścisłego obowiązywania wewnątrz protonu praw odkrytych poprzednio poza protonem, istnienie kwarków zostało udowodnione ponad wszelką wątpliwość. Nie ma tu żadnej różnicy z odkryciem jądra atomowego przez Rutherforda. A to, że niektórym nie podoba się owa skórka przepuszczająca swobodnie elektrony i neutrina, a nie wypuszczająca na zewnątrz kwarków? Według Galileusza odkrywanie prawdy polega na próbach wyjaśnienia nowych faktów za pomocą znanych już praw. Dopiero gdy jesteśmy pewni, że jest to niemożliwe, stajemy w obliczu konieczności zmian fundamentów naszych teorii. Nie jest też prawdą, że obowiązująca obecnie teoria pól kwantowych nie może być obalona przez żaden fakt doświadczalny. Po umieszczeniu w ramach tej teorii kwarkowej struktury protonu i innych cząstek obraz świata złożonego z cząstek i pól kwantowych stał się prawie kompletny. Nie ma w nim już prawie miejsca na możliwe dowolności, co z pewnością przybliży dzień odkrycia faktów, które zmuszą nas do jego całkowitej przebudowy. Należy sądzić, że w nowym obrazie świata nie ostaną się takie twory, jak kwarki, elektrony, neutrina i fotony, ani też współczesne wyobrażenia o czasie i przestrzeni. Potrzeba takiej rewolucji wydaje się wcale istotna. Trzeba bowiem przyznać, że domknięcie kwantowego obrazu świata, jakim było rozszyfrowanie struktury cząstek, nie stało się żadnym istotnym osiągnięciem cywilizacyjnym. Ani w sferze ducha, ani materii (nie ma jak skorzystać z energii rozszczepienia protonu, bo nie można go rozbić na kwarki).

Wyjaśnijmy to na prostym przykładzie. Z talii złożonej z czterech kart: jokera czarnego (jc), jokera czerwonego (jez), asa pik (ap) i asa kier (ak), wyciągnięto dwie karty. Jest to więc jeden z układów: $\{jc, jez\}$, $\{jc, ap\}$, $\{jc, ak\}$, $\{jez, ap\}$, $\{jez, ak\}$, $\{ap, ak\}$. Informacja, że jedną z dwóch wyciągniętych kart jest joker, wyklucza ostatni układ. Prawdopodobieństwo, iż wyciągnięto dwa jokery, jest więc równe $\frac{1}{5}$. Natomiast informacja, że jedną z kart jest joker czarny, wyklucza ostatnie trzy układy. Prawdopodobieństwo wyciągnięcia układu dwóch jokerów jest więc wtedy równe $\frac{1}{3}$.