



Czy oddziaływania słabe są słabsze od elektromagnetycznych?

Doc. dr Michał ŚWIĘCKI

Patrz także «Delta» 6/1975.

Będziemy dzisiaj mówić o pewnej pięknej teorii cząstek elementarnych, która została stworzona w ostatnich latach. Ponieważ teoria ta prawdopodobnie stanowi syntezę na miarę dokonanej w XIX wieku przez J. C. Maxwella, więc zaczniemy od zamierzchłej przeszłości. A przy okazji nauczymy się kilku ciekawych i przydatnych dalej rzeczy.

Do końca XVIII w. nauki o magnetyzmie i elektryczności istniały zupełnie niezależnie od siebie i nikt nie podejrzewał, że może być między nimi jakikolwiek związek. Dopiero na początku XIX w. zauważono, że przewodnik z prądem wytwarza pole magnetyczne, a następnie M. Faraday odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Maxwell zebrał wszystkie znane prawa elektromagnetyzmu i sformułował swoje słynne równania pola elektromagnetycznego, do dziś stanowiące jedno z najpiękniejszych osiągnięć fizyki teoretycznej. Równania Maxwella bezbłędnie opisują wszelkie makroskopowe oddziaływania między ładunkami, magnesami, obwodami z prądem, a także rozchodzenie się fal elektromagnetycznych. Po raz pierwszy zostało wprowadzone do fizyki pojęcie rozchodzącego się ze skończoną prędkością pola, jako źródła oddziaływań. Do tego prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych musi być stała, niezależna od układu odniesienia i równa prędkości światła, co jest niezbędne na to, żeby równania Maxwella liczbowo zgadzały się ze znanymi dawno prawami magnetyzmu i elektryczności. Stałość prędkości światła, a było już przecież jasne, że światło musi stanowić

rodzaj fali elektromagnetycznej, była, jak wiemy, podstawą teorii względności stworzonej przez A. Einsteina. Następnie przyszła teoria kwantów i światło okazało się złożone z cząstek — fotonów o energii $E = h\nu$. Masa fotonu zmierzona z fenomenalną dokładnością jest równa zero. Przechodząc od historii do czasów współczesnych spróbujmy w sposób przybliżony przedstawić, jak wygląda kwantowa teoria oddziaływań elektromagnetycznych, teoria, która uwzględni kwantową naturę światła, tak ważną przy opisie zjawisk zachodzących w mikroświecie. A właśnie mikroświatem, światem cząstek elementarnych będziemy się dalej zajmować. W teorii kwantowej oddziaływanie między ładunkami (np. elektronami) lub magnesami opisywane jest przez wymianę fotonów. Na rysunku obok narysowany jest tzw. diagram Feynmana, będący graficznym przedstawieniem wszystkich innych praw elektromagnetyzmu. Wymieniany między elektronami foton nie jest jednak taki sam jak zwykły foton wysyłany przez żarówkę w pokoju. Po prostu reakcja elektron → elektron + foton nie może zajść w rzeczywistości, gdyż zabraniają tego zasady zachowania energii i pędu. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy fotonowi przypiszemy masę nie równą zero, taką jaką obserwujemy w doświadczeniach, ale masę urojoną, której kwadrat jest ujemny. Coż to za foton, którego masa nie jest masą fotonu, zapytacie? I do tego urojona. Otóż w tej relatywistycznej teorii cząstek elementarnych takie dziwne cząstki mogą się pojawić. I nie są wcale takie dziwne. Wyobraźmy sobie atom wodoru. Elektron i proton są w stanie związanym, który możemy rozbić dostarczając im energii jonizacji $E_{\text{jon}} = 13,6 \text{ eV}$. To znaczy, że energia swobodnych, nie związanych cząstek: elektronu i protonu jest o 13,6 eV większa od energii atomu wodoru. Ale energia jest równoważna masie ($E = mc^2$). Tak więc masa atomu wodoru

jest mniejsza (o $13,6 \frac{\text{eV}}{c^2}$) od sumy mas elektronu i protonu. Masy elektronu i protonu

wewnątrz atomu są więc mniejsze niż masy cząstek swobodnych. Ogólnie mamy zasadę, że w teorii fizycznej mogą występować cząstki o dowolnych (nawet urojonych) masach, ale tylko w obszarach, gdzie nie znika oddziaływanie. W doświadczeniach obserwujemy natomiast cząstki praktycznie swobodne o ściśle określonych masach. Cząstki o masach nie równych masom zmierzonym w laboratorium nazywamy cząstkami wirtualnymi (możliwymi) albo poza powłoką masy. Narysowany wyżej diagram Feynmana przedstawia więc wymianę wirtualnego fotonu między elektronami. Same elektrony są, poza chwilą wysyłania i pochłaniania fotonu, zupełnie swobodne i mają „normalne” masy ($0,51 \frac{\text{MeV}}{c^2}$). Jest jednak pewna szczególna sytuacja, w której może

być wymieniany foton realny. Odpowiada ona tzw. rozpraszaniu elektronów do przodu, czyli bez zmiany pędu. Może być wtedy w zgodzie z zasadami zachowania wysłany foton o masie zerowej i pędzie zero (choć stale poruszający się z prędkością światła), a więc o nieskończonej

długości fali ($p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$). A jeżeli może być wysłany, to na pewno będzie, gdy dostatecznie

długo poczekamy. Wyciągamy stąd wniosek, że np. nieruchome ładunki będą ze sobą oddziaływać na dowolnie dużych odległościach. Umożliwia to zerowa masa fotonu realnego.

Mówiąc o masie cząstki zawsze będziemy mieć na myśli tę masę, którą miałaby cząstka o pędzie równym zero. Dla wszystkich cząstek z wyjątkiem fotonu i neutrina jest to, masa cząstki spoczywającej.

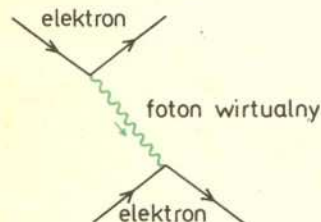


Diagram Feynmana — prawo Coulomba w kwantowej teorii elektromagnetyzmu.

Różnica między sumą mas elektronu i protonu swobodnych, a sumą mas, jakie mają te cząstki wewnątrz atomu wodoru, jest większa niż

$13,6 \frac{\text{eV}}{c^2}$, gdyż składniki atomu poruszają się.

Z tego to właśnie powodu potencjał pola elektrostatycznego tak wolno maleje z odległością od ładunku $e \left(V(r) = \frac{e}{r} \right)$. Mówimy, że oddziaływania elektromagnetyczne mają zasięg nieskończony. Z tego powodu oddziaływania te są obserwowane w makroświecie i jako pierwsze zostały zastosowane w technice. Wszystkie inne rodzaje oddziaływań (z wyjątkiem grawitacyjnych) mają bardzo krótki zasięg. Jest to związane z tym, że odpowiednie cząstki mają niezerowe masy i mogą być wymieniane tylko jako cząstki wirtualne. Obowiązuje tu przybliżona zasada, że wymiana cząstki wirtualnej, której masa w stanie swobodnym wynosi m prowadzi do potencjału $V(r) \sim \frac{e^{-mr}}{r}$. Zasięg oddziaływania jest odwrotnie proporcjonalny do masy m

i np. wymiana mezonu π o masie $140 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ daje zasięg sił jądrowych ok. 10^{-13} cm, równy zmierzonemu w doświadczeniach promieniowi jądra wodoru (protonu).

Możemy wreszcie przejść do rzeczy. Teoria cząstek elementarnych, o której chcemy opowiedzieć, to jednolita teoria oddziaływań elektromagnetycznych i słabych, wymyślona ostatnio jako rezultat prac wielu fizyków z całego świata, a szczególnie S. Weinberga i A. Salama. Oddziaływania słabe są odpowiedzialne za różne rozpady cząstek, a przede wszystkim za rozpady β pierwiastków promieniotwórczych (np. neutron rozpada się na proton, elektron i antyneutrino). Z odpowiednich czasów życia wnioskujemy że oddziaływania te są o kilka rzędów wielkości słabsze niż oddziaływania elektromagnetyczne. Poza tym mają wyjątkowo krótki zasięg (doświadczalnie $< 10^{-15}$ cm). Przez długi czas uważano nawet, że zasięg słabych sił jest równy zero, co przy obecnie dostępnych energiach nie może być wykluczone doświadczalnie. Jak tu unifikować oddziaływania elektromagnetyczne o nieskończonym zasięgu ze znacznie słabszymi oddziaływaniami o zasięgu wyjątkowo krótkim? Właśnie te jakościowe różnice były powodem, że do ostatnich lat dwie teorie fizyczne żyły sobie zupełnie niezależnym życiem. Jak teorie elektryczności i magnetyzmu w XVIII w.

Zastanówmy się dokładniej, co to znaczy krótki zasięg oddziaływań. Oddziaływania takie na odpowiednio dużych odległościach są bardzo słabe. I tak na przykład oddziaływania silne są na odległościach większych niż 10^{-13} cm słabsze od elektromagnetycznych. Dlatego właśnie istnienie jądra atomowego (a stąd i sił jądrowych) zostało stwierdzone dopiero w 1911 roku. Jeżeli więc przy dostępnych energiach nie jesteśmy w stanie obejrzeć cząstki z odległości mniejszej niż 10^{-15} cm, to może oddziaływania słabe wcale nie są takie słabe, tylko patrzymy na nie ze zbyt dużej odległości. Ta obserwacja leżała u podstaw nowej teorii.

W teorii tej foton jest jednym z członków rodziny (prawdopodobnie czteroosobowej) cząstek elementarnych zwanych bozonami pośrednimi. Wszystkie one oddziałują z innymi cząstkami siłami proporcjonalnymi do ładunku elektrycznego elektronu (nawet gdy bozony pośrednie oddziałują z cząstkami neutralnymi). Natomiast masy bozonów pośrednich są różne: foton ma masę zero, a pozostałe bozony są kilkadziesiąt razy cięższe od protonu. Długozasięgową wymianę fotonów nazywamy oddziaływaniami elektromagnetycznymi, a wymiana ciężkich bozonów daje krótkozasięgowo oddziaływania słabe. Przy bardzo dużych energiach oba rodzaje oddziaływań nie będą się więc różniły tak drastycznie jak obecnie. Ich siła będzie taka sama. W ten sposób powstała nowa teoria. Ma ona wyjątkowo piękną i prostą postać matematyczną. Równocześnie teoria ta usuwa pewne sprzeczności, które istniały w starej teorii oddziaływań słabych, przyjmującej zerowy ich zasięg. Wreszcie, jak przy każdej syntezie, pojawiły się nowe przewidywania. Niektóre z nich zostały już potwierdzone doświadczalnie. Elegancka teoria zawsze zgadza się z doświadczeniem.

Narzuca się pytanie: czy nowa synteza w fizyce będzie miała podobne implikacje techniczne, jak synteza dokonana przeszło 100 lat temu przez Maxwella? Trudno o tym sądzić. W każdym razie nie jest to kwestia najbliższej przyszłości. Na razie piękno nowej teorii musi nam wystarczyć.



Pewne różnice prawdopodobnie pozostaną. Nawet w najwyższych energiach wymiana ciężkich bozonów pośrednich może prowadzić do niezachowania parzystości obserwowanej np. w rozpadach jąder atomowych, podczas gdy oddziaływania elektromagnetyczne zachowują parzystość, co możemy stwierdzić oglądając się w lustrze.



„Korespondencyjne Koło Naukowe”
Drukujemy adresy nowych członków

- 1) Marek Wasik
ul. Wieniawskiego 15/6
80-142 Gdańsk 18
- 2) Andrzej Jakubowski
ul. Zachodnia 89/9
90-402 Łódź
- 3) Tadeusz Koćwin
ul. Słoneczna 23
42-200 Częstochowa
- 4) Anna Pietryka
Bulwary 10/3
85-056 Bydgoszcz