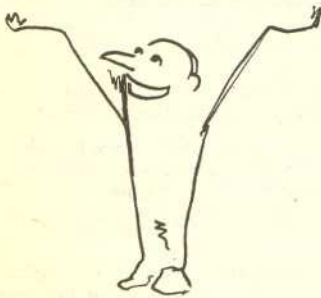


Podobno fizyka to jest to, czym fizycy zajmują się w chwilach wolnych od innych zajęć. Wynikałoby stąd, że zajmowanie się fizyką jest rodzajem rozrywki wymagającej tylko pewnego przygotowania. Opowiem tutaj o kilku problemach fizycznych, które są mi szczególnie bliskie i których rozwiązanie współczesne nie wydaje mi się ostateczne. Rzecz będzie dotyczyła próżni i jej własności. Można by się zapytać: czy próżnia może mieć własności? Przecież każdy wie, co to jest próżnia. Chodzi nam jednak o próżnię absolutną i powszechną. Jest to oczywiście taki stan Wszechświata, w którym nie ma nic — ani materii, ani promieniowania. Naukowo należałoby powiedzieć, że jest to stan o możliwie najniższej energii. Nie jest jednak wcale oczywiste, czy taki stan byłby pozbawiony materii. Innymi słowy, mogłoby się okazać, że prawa fizyki opisujące Wszechświat dopuszczają jedynie stany zawierające materię. Wtedy Wszechświat nie mógłby istnieć bez materii, a stan o najniższej energii, stan próżni, byłby na przykład stanem takiego Wszechświata, w którym materia byłaby rozłożona wszędzie gęsto i jednorodnie. Warto tu powiedzieć, że równania ogólnej teorii względności, w których zaniedbane są wszystkie zjawiska rządzące mikroświatem, dopuszczają rozwiązanie bez materii. Te uwagi wstępne ilustrują ważną własność fizyki polegającą na tym, że definicje wszystkich wielkości fizycznych, a więc i wyniki wszystkich doświadczeń zależą od struktury obowiązującej teorii fizycznej. Dotyczy to również pojęcia próżni. Przeniesiemy się teraz ze Wszechświata do laboratorium fizycznego i zajmiemy się próżnią w świecie cząstek elementarnych. Zaniedbamy przy tym bardzo słabe oddziaływania grawitacyjne między cząstkami, a więc zjawiska opisywane przez ogólną teorię względności. Czy powiedzenie, że próżnia to stan, w którym nie ma żadnych cząstek, wyczerpuje zagadnienie? Zobaczmy, że nie. Dla ilustracji przytoczę dwa przykłady, w których własności próżni grają podstawową rolę.

*Był przybiera takie różne formy*



*a niebytu po prostu nie ma*



## Zakaz Pauliego

Prawdopodobieństwo znalezienia dwóch elektronów w tym samym stanie jest równe zeru. „W tym samym stanie”, to znaczy w tym samym miejscu, ale niekoniecznie, bo na przykład elektron w atomie nie ma określonego położenia i stan jego określają inne wielkości, jak np. moment pędu. Zakaz Pauliego jest konieczny po to, żeby wszystkie elektrony w każdym atomie nie zajęły najdogodniejszej energetycznie pozycji — poziomu podstawowego, tylko grupowały się na coraz wyższych poziomach energetycznych. Gdyby tak nie było, to wszystkie atomy wyglądałyby praktycznie tak samo, nie byłoby elektronów walencyjnych, wiązań chemicznych, życia... Jest to, być może, najważniejsze prawo obowiązujące wśród elektronów (i wszystkich innych cząstek o spinach połówkowych). A przy tym jakże proste jest to prawo. Niestety dowód (wyprowadzenie) zakazu Pauliego na podstawie zasad teorii kwantowej jest bardzo złożony i pośredni. Nie wydaje się więc, żebyśmy rozumieli wszystko w tej teorii.

A oto szkic tego dowodu. Rozważmy pole elektrostatyczne wytworzone przez ciężką naładowaną cząstkę, np. przez jądro atomowe. W przestrzeni otaczającej tę cząstkę mamy próżnię, gdyż statyczne pole elektryczne nie wywołuje promieniowania i nie zawiera fotonów. Wybraliśmy ciężką cząstkę po to, żeby ruch elektronu w jej polu nie zaburzał statyczności tego pola. Zastanówmy się teraz, jaka jest ta nasza próżnia. Okazuje się, że nie jest ona całkiem pusta. Po to, żeby to stwierdzić, posłużmy się zasadą nieoznaczoności. Jedną z jej wersji mówi, że czas trwania dowolnego układu fizycznego i nieokreśloność jego energii są związane nierównościami

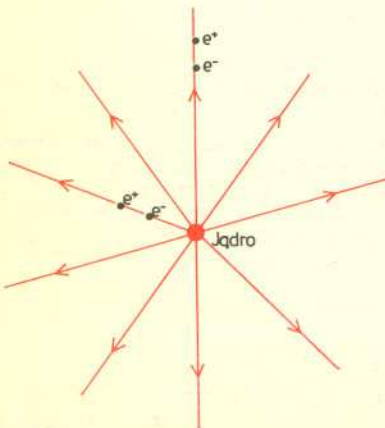
$$\tau \cdot \Delta E \geq \frac{1}{2} \hbar.$$

Czym krótszy czas życia, tym większa nieokreśloność energii układu. W związku z tym nieruchomy ładunek jądra może poprzez swoje pole elektrostatyczne stworzyć na bardzo krótki czas parę elektron-pozyton bez pogwałcenia zasady zachowania energii. Para ta powstaje w dowolnym miejscu pustej przestrzeni i znika po chwili. Oczywiście w polu jądra może powstawać dowolna ilość takich par (patrz rysunek). Tworzą one coś w rodzaju krótkożyjących dipoli elektrycznych. Tak więc cała próżnia zachowuje się jak dielektryk i polaryzuje się w polu jądra. Pojawia się stała dielektryczna i efektywny ładunek jądra zmienia się zgodnie z prawem Coulomba. Warto wspomnieć, że zjawiska tego samego typu wywołują zaobserwowany w doświadczeniu efekt słabego przyciągania się nienaładowanych okładek kondensatora. Prawdopodobieństwo tego, że w próżni (polu elektrostatycznym) wokół jądra zdarzy się cokolwiek, jest równe jedności. Na prawdopodobieństwo to składa się prawdopodobieństwo, że nic nie będzie się działo ( $P_0$ ), prawdopodobieństwo tego niczego razy prawdopodobieństwo kreacji jednej pary elektron-pozyton ( $P_1$ ) itd.

$$1 = P_0[1 + P_1 + P_2 + \dots].$$

Wpuśćmy teraz w okolicę jądra elektron. Prawdopodobieństwo tego, że po rozproszeniu na polu jądra elektron ten znajdzie się gdziekolwiek, jest znowu równe jeden

$$1 = P_e[1 + P_1 + P_2 + \dots],$$





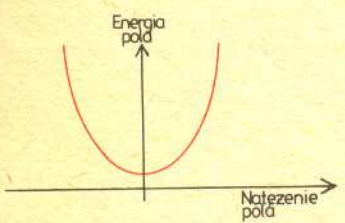
Rozwiązanie zadania M 148. Niech szukaną liczbą będzie  $N = (a_{n-1} \dots a_1 a_0)_{10}$ ,  $a_n \neq 0$ . Jest wówczas:  $1978 = a_n + a_{n-1} + \dots + a_1 + a_0 \leq (n+1)9$ , skąd  $9n \geq 1969$ ,  $n \geq 219$ . Ponieważ liczba  $N$  jest najmniejszą liczbą naturalną o danej własności, to  $n$  przyjmuje najmniejszą możliwą wartość:  $n = 219$ . Wówczas  $1978 = a_{219} + a_{218} + \dots + a_1 + a_0$  jest możliwie najmniejsza. Będzie tak, gdy suma  $a_{218} + \dots + a_1 + a_0$  będzie możliwie największa, tzn. gdy wszystkie jej składniki będą równe 9. Wtedy  $a_{219} = 7$  i szukaną liczbą jest liczba zapisana za pomocą jednej siódemki (na pierwszym miejscu) i 219 dziewiątek.

gdzie  $P_e$  jest prawdopodobieństwem przejścia elektronu gdziekolwiek przy braku kreacji par elektron-pozyton. Stąd musi być  $P_e = P_0$ . Stosunek  $P_e/P_0$  można obliczyć, choć już nie tak prosto. Okazuje się on być większy od jedności. Dochodzimy do sprzeczności — całkowite prawdopodobieństwo jest większe od jedności. Całe to rozumowanie przeprowadziliśmy przy założeniu, że przejście elektronu i kreacja par są zdarzeniami niezależnymi. Tak nie jest, jeśli obowiązuje zakaz Pauliego. Wtedy elektron nie może przejść przez punkt, w którym znajduje się już drugi elektron z powstałej pary i prawdopodobieństwo przejścia ulega pożądanemu zmniejszeniu. I tak poznaliśmy zawikłany dowód prostego i pięknego zakazu obowiązującego wśród elektronów, a przy okazji zobaczyliśmy, jak złożona może być struktura próżni. W rozpatrywanym przykładzie okazała się ona być dielektrykiem.

### Skąd biorą się masy cząstek

Oczywiście z oddziaływań. Na przykład oddziaływania jądrowe wywołują słynny niedobór masy polegający na tym, że masy jąder atomowych są mniejsze niż suma mas ich składników. Jest tak dlatego, że od czasów Einsteina  $E = mc^2$  i całkowitą energię wszystkich oddziaływań wewnątrz dowolnego ciała możemy zmierzyć, nic o tym ciele nie wiedząc, przez proste ważenie. Tak więc naturalne wydaje się twierdzenie, że masa protonu pochodzi z oddziaływań silnych (jądrowych), a masa elektronu z oddziaływań elektromagnetycznych. Te ostatnie są znacznie słabsze, więc i masa mniejsza. Niestety w ramach współczesnej teorii nie można efektywnie obliczać mas podstawowych cząstek elementarnych, jaką jest np. elektron. Jest jednak oczywiste, że dwie cząstki mające te same oddziaływania powinny mieć takie same masy. I tu natrafiamy na sprzeczność. Dwie cząstki: mion  $\mu^-$  i elektron mają identyczne zarówno oddziaływania elektromagnetyczne, jak i słabe (odpowiedzialne np. za rozpad mionu), a jednak masa mionu jest około 200 razy większa od masy elektronu. Obie cząstki nie oddziałują silnie, a innych rodzajów oddziaływań nie znamy. Jeżeli nawet musimy wprowadzić jakieś dodatkowe oddziaływania, to muszą być one bardzo słabe. W przeciwnym wypadku dawno byśmy je odkryli. A przecież bardzo słabe oddziaływania nie mogą, jak powiedzieliśmy, tworzyć tak dużych mas, jak np. masa mionu, a nawet elektronu. Czy rzeczywiście nie mogą? Wyobraźmy sobie pewne nowe cząstki elementarne oddziałujące bardzo słabo zarówno ze sobą, jak i ze wszystkimi innymi cząstkami. Te nowe cząstki powinny poza tym mieć tak duże masy, że na razie nie mogliśmy wytworzyć ich w laboratorium. Oddziaływania między wszystkimi cząstkami dają oczywiście wkład do całkowitej energii układu cząstek. Energia ta zależy od intensywności (natężenia) pól opisujących cząstki, czyli mówiąc niezbyt precyzyjnie — od ilości cząstek. Wkład do energii pochodzącej od każdego typu oddziaływania ma oczywiście minimum (próżnię) i w pobliżu tego minimum jego kształt jest taki, jak na rysunku obok. Minimum odpowiada zerowemu natężeniu pola, czyli nieobecności cząstek. Taki właśnie kształt mają wszystkie znane dotąd oddziaływania i próżnia w tym wypadku nie zawiera żadnych znanych cząstek. Niech energia wprowadzonego nowego oddziaływania między nowymi cząstkami ma zależność inną, taką jak na rysunku obok. Stan, w którym nie ma nowych cząstek, odpowiada teraz lokalnemu maksimum energii i nie jest próżnią. Pod wpływem dowolnie małego zaburzenia stan ten przechodzi do jednego z dwóch minimum, gdzie natężenie pola nowych cząstek nie jest zero i może być dowolnie duże w zależności od kształtu krzywej energii. Mamy więc dwie równoważne próżnie wcale nie puste. Otóż jeżeli natężenie pola nowych cząstek w próżni jest wystarczająco duże, to nawet bardzo słabe ich oddziaływanie ze znanymi cząstkami może produkować duże masy. A mion jest cięższy od elektronu po prostu dlatego, że oddziałuje silniej. Mamy więc nową próżnię, w której wszędzie gęsto i jednorodnie rozłożone jest pole nowych cząstek. Tak naprawdę do samych cząstek tam nie ma, bo przecież dopiero odstępstwa od próżni mogą być zaobserwowane np. jako nowe cząstki. Mimo to słabe oddziaływania z tą wypełnioną próżnią mogą być źródłem mas wszystkich znanych cząstek. Nasuwa się pytanie, czy takie pole próżniowe musi być rozłożone jednorodnie. Na pierwszy rzut oka musi. W przeciwnym bowiem razie cząstki miałyby różne masy w różnych miejscach. Mogą być jednak wyjątki. Należy do nich gęsto upakowana materia jądrowa. Okazuje się, że jeżeli masy nukleonów pochodzą z opisanego wyżej mechanizmu, to głębokość minimum energii zależy od własności materii jądrowej. W pewnych warunkach dwa minima zlewają się w jedno, natężenie pola nowych cząstek w tej wewnątrzjądrowej próżni znika i nukleony przestają mieć masę. Znaczący to, że wewnątrz jądra nukleony mogą mieć zerowe masy, niedobór masy jest bardzo duży i jądra są bardzo trwałe. Zachodzi to prawdopodobnie dla jąder złożonych z 400 i więcej nukleonów. Jądra takie mogłyby powstać przy bombardowaniu jąder uranu wysokoenergetyczną wiązką jąder uranu. Na razie nie umiemy wytwarzać takich wiązek, a więc nie możemy sprawdzić przewidywania, że powyżej  $A \approx 400$  rozciąga się nowy świat trwałych pierwiastków.

I to wszystko, co chciałem powiedzieć na tak wydawałoby się pusty temat, jakim jest próżnia.



Cząstki tzw. wirtualne, których pary wprowadzaliśmy w poprzednim fragmencie artykułu, pomijamy. Ich udział daje jedynie przesunięcie początku skali liczenia energii.

