

# Pozytonium

Dr Stanisław MRÓWCZYŃSKI

Najprostszy atom – atom wodoru, będący podstawowym składnikiem Wszechświata, tworzą ujemnie naładowany elektron i obdarzony dodatnim ładunkiem proton. Poznanie budowy atomu wodoru wymagało dokonania w fizyce wielkiego przewrotu, jakim było w latach dwudziestych sformułowanie mechaniki kwantowej rządzącej prawami mikroświata. Można śmiało powiedzieć, że atom wodoru jest obecnie najlepiej poznanym obiektem kwantowym. Obszerny fragment każdego podręcznika mechaniki kwantowej poświęcony jest analizie jego własności, które teoria z fantastyczną wprost dokładnością potrafi opisać.

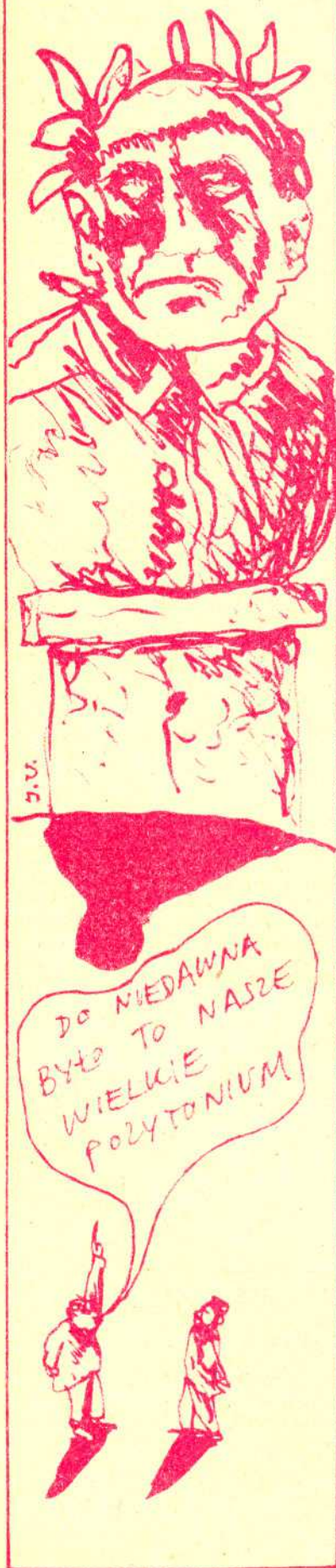
Istnienie atomu wodoru uwarunkowane jest występowaniem elektrostatycznego przyciągania między elektronem i protonem, które, jak pamiętamy, są cząstkami o przeciwnych ładunkach elektrycznych. W związku z tym można zadać naiwne pytanie, czy inne pary cząstek o przeciwnych ładunkach również tworzą atomy. Pytanie takie postawiono jeszcze w latach trzydziestych, wkrótce po odkryciu pozytonu – antycząstki elektronu, tzn. cząstki o masie i innych własnościach elektronu, lecz o przeciwnym ładunku elektrycznym. Wtedy właśnie zasugerowano możliwość istnienia pozytonium – układu związanego elektronu i pozytonu, który w końcu lat czterdziestych rzeczywiście zaobserwowano doświadczalnie.

Czym pozytonium różni się od atomu wodoru? Elektron jest cząstką stabilną, więc i pozyton nie ulega rozpadowi. Pomimo stabilności składników czas życia pozytonium jest bardzo krótki. Dzieje się tak dlatego, że elektron, jak każda cząstka, może anihilować ze swą antycząstką, w tym wypadku z pozytonem. Produktem anihilacji są fotony, czyli kwanty światła, albo ogólniej, kwanty pola elektromagnetycznego. Historię życia pozytonium można by opisać następująco. Elektron i pozyton znalazły się w niewielkiej odległości. Dzięki elektrostatycznemu przyciąganiu wiążą się i krążą wokół środka masy obu cząstek tworząc atom – pozytonium. Jak uczy nas mechanika kwantowa, względne położenie cząstek nie jest ściśle określone, więc elektron i pozyton mogą zbliżyć się na zerową odległość. Wówczas następuje anihilacja i pozytonium zamienia się w fotony. Tak więc, w przeciwieństwie do atomu wodoru, pozytonium jest niestabilne.

Ciekawą cechą pozytonium jest szczególna rola, jaką gra spin elektronu i pozytonu. Spin, będący wewnętrznym momentem pędu cząstki, dla elektronu, pozytonu, a również protonu wynosi  $\frac{\hbar}{2}$ , gdzie  $\hbar$  jest tzw. stałą Plancka, będącą jednostką momentu pędu w mikroświecie. Okazuje się, że spin układu dwóch cząstek o spinie  $\frac{\hbar}{2}$  może wynosić 0 bądź  $1\hbar$ , tzn. spiny cząstek albo odejmują się i wówczas spin całości jest zerowy, albo dodają się do wartości  $1\hbar$ . Nie są możliwe stany pośrednie, co jest rezultatem tzw. kwantyzacji momentu pędu. Tak więc pozytonium, jak i atom wodoru, może występować w stanie ze spinem 0 i wówczas mówimy o parapozytonium, bądź ze spinem  $1\hbar$  – jako ortopozytonium. Parawodor niczym prawie nie różni się od ortowodoru, podczas gdy różnica między parapozytonium i ortopozytonium jest zasadnicza. Ortopozytonium rozpada się na trzy fotony i żyje ponad tysiąc razy dłużej niż parapozytonium, które anihiluje w dwa fotony.

Dlaczego tak się dzieje? Problem jest dość skomplikowany, lecz ponieważ rozumowanie prowadzące do jego wyjaśnienia jest charakterystyczne dla całej fizyki cząstek elementarnych, spróbuję je naszkicować.

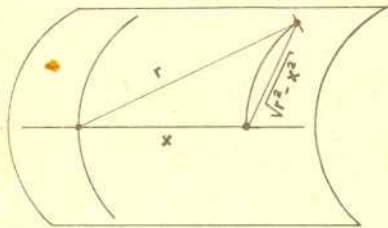
Mówimy, że oddziaływania elektromagnetyczne są niezmiennicze względem transformacji sprzężenia ładunkowego. Sprzężenie ładunkowe to operacja polegająca na zamianie cząstek na antycząstki. Niezmienniczość zaś polega na tym, że opis procesu, np. rozpraszania elektronu na protonie, nie ulegnie zmianie, jeśli wszystkie cząstki zamienimy na antycząstki. W naszym przykładzie mielibyśmy wówczas rozpraszanie pozytonu na antyprotonie. Istnieją jednak cząstki bądź ich układy, zwane istotnie obojętnymi, które pod wpływem transformacji sprzężenia ładunkowego przechodzą w siebie. Przykładem takiego układu jest właśnie pozytonium. Zamieniając elektron na pozyton, a pozyton na elektron znów mamy pozytonium. Foton, który nie niesie żadnego ładunku, jest również cząstką istotnie obojętną, bądź inaczej, foton i antyfoton są tą samą cząstką.







### Rozwiązanie zadania M 535.



Przypuśćmy, że na papierze mamy układ współrzędnych z początkiem w miejscu wbięcia cyrkla i jedną z osi równoległą do osi walca. Niech  $R$  oznacza promień walca, zaś  $r$  – rozwartość cyrkla. Ponieważ łuk okręgu o promieniu  $R$  oparty na cięciwie  $c$

ma długość  $2R \arcsin \frac{c}{2R}$ , punkty na krzywej mają współrzędne postaci  $(x, 2R \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{2R})$ , gdzie  $|x| \leq r$ .

Przypuśćmy teraz, że narysowana krzywa jest elipsą o półosiach  $a$  i  $b$ . Zatem byłoby

$$b^2 x^2 + a^2 \left( \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{2R} \right)^2 = a^2 b^2,$$

czyli

$$a^2 \left( \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{2R} \right)^2 = a^2 b^2 - b^2 x^2.$$

To jest jednak niemożliwe: prawa strona jest wielomianem drugiego stopnia zmiennej  $x$ , a lewa nie – wystarczy np. zauważyć, że pochodna lewej strony nie jest postaci  $cx$ .

W przypadku cząstek i układów istotnie obojętnych można mówić o tzw. parzystości ładunkowej, a niezmienniczość względem transformacji sprzężenia ładunkowego prowadzi do zachowania parzystości ładunkowej w oddziaływaniach elektromagnetycznych. Parzystość ładunkowa jest  $+1$  bądź  $-1$ , a istnienie obu wartości wiąże się z faktem, że nawet cząstki istotnie obojętne zmieniają się w pewnym sensie pod wpływem operacji sprzężenia ładunkowego. Na czym ta zmiana polega? Wyobraźmy sobie, że obserwujemy kulę bezpośrednio i patrząc na jej obraz w lustrze. Jeśli kula spoczywa, to oba obrazy są zupełnie jednakowe i powiedzielibyśmy, że parzystość kuli przy transformacji odbicia w lustrze jest  $+1$ . Jeśli jednak kula wiruje, to obraz w lustrze przedstawia taką samą kulę, lecz wirującą w przeciwną stronę, więc wówczas stwierdzimy, że parzystość wirującej kuli jest  $-1$ . Analogicznie jest z pozytonium, które w stanie podstawowym ma ładunkową parzystość  $+1$  dla spinu 0 (parapozytonium) i  $-1$  dla spinu  $1\hbar$  (ortopozytonium). Parzystość ładunkowa fotonu jest  $-1$ , gdyż znak pola elektromagnetycznego ulega zmianie, jeśli zamienić znaki ładunków wytwarzających to pole na przeciwne (jak to się dzieje przy transformacji sprzężenia ładunkowego). Dla układu  $n$  fotonów parzystość wynosi  $(-1)^n$  i dochodzimy do wniosku, że zachowanie parzystości ładunkowej w procesie anihilacji pozytonium oznacza, że parapozytonium zamienia się w parzystą liczbę fotonów, ortopozytonium zaś w nieparzystą. Należy zaznaczyć, że pozytonium nie może rozpaść się na jeden foton, gdyż to gwałciłoby zasadę zachowania energii i pędu. Najłatwiej to zrozumieć rozpatrując pozytonium znajdujące się w spoczynku. Aby spełnić zasadę zachowania energii, energia fotonu powinna być równa energii pozytonium. Lecz foton o niezerowej energii niesie niezerowy pęd, podczas gdy pęd spoczywającego pozytonium jest zerowy.

Oddziaływania elektromagnetyczne są stosunkowo słabe, co w szczególności oznacza, że intensywność procesu emisji  $n$  fotonów jest zwykle dużo większa od intensywności emisji  $m$  fotonów, jeśli  $m > n$ . Tak więc parapozytonium anihiluje w dwa fotony i żyje dużo krócej niż ortopozytonium, które rozpada się na trzy fotony.

Kiedy pozytonium powstaje i jak je zarejestrować? Warunkiem koniecznym, choć niedostatecznym, jego uformowania jest zbliżenie się składników – elektronu i pozytonu – na odległość rzędu promienia pozytonium, który równy jest  $10^{-8}$  cm, przy względnej prędkości rzędu względnej prędkości elektronu i pozytonu w pozytonium.

Okazuje się, że wytworzenie takiej sytuacji nie jest trudne, należy mieć jednak źródło pozytonów. Pozytony są obficie produkowane w procesach oddziaływania wysokoenergetycznych cząstek – fotonów, elektronów, pionów, protonów itd. – z jądrami atomowymi. Innym możliwym źródłem są pewne radioaktywne jądra atomowe, które podlegają samoistnej przemianie zwanej rozpadem  $\beta^+$ , w rezultacie którego (dodatni) ładunek jądra ulega zmniejszeniu o jeden i następuje emisja pozytonu. Wyprodukowany pozyton trafia w materię, którą, jak pamiętamy, tworzą atomy zbudowane z jąder i elektronów, a znalazłszy odpowiedniego partnera tworzy pozytonium. Jeśli początkowa energia pozytonu, a więc i jego prędkość, jest dużo większa od energii elektronów w materii, to pozyton przed uchwyceniem elektronu musi wytracić ów nadmiar energii. Spowalnianie pozytonu odbywa się przez sam fakt podróżowania przez materię, gdyż pozyton na swej drodze emituje promieniowanie elektromagnetyczne i jonizuje atomy. Żywość pozytonium kończy się rozpadem na dwa lub trzy fotony, które są właśnie rejestrowane.

Pozytonium nie jest jedynym egzotycznym atomem. Doświadczalnie potwierdzono istnienie całego ich szeregu. Dobrze poznano własności stanu związanego mionu i protonu, pionu i protonu oraz wielu innych. Z dużą dozą pewności można powiedzieć, że każde dwie cząstki elementarne o przeciwnych ładunkach elektrycznych, żyjące dostatecznie długo, mogą tworzyć atom, z tym że wykrycie takiego atomu może przedstawiać poważne trudności doświadczalne.

Każda cząstka elementarna należąca do grupy mezonów zbudowana jest z kwarku i antykwarku, więc i tutaj można mówić o specyficznych układach atomowych. W tym przypadku za wiązanie kwarków odpowiedzialne są silne siły jądrowe, nie zaś elektromagnetyczne. Jeśli jednak za rozpad mezonu czy też, ogólniej, atomu egzotycznego, zbudowanego z cząstek elementarnych, odpowiedzialne są oddziaływania elektromagnetyczne, to przedstawione w tym artykule rozumowanie wykorzystujące zasadę zachowania parzystości ładunkowej może być również zastosowane do badania własności tych atomów.



Rozwiązanie zadania M 537. Nie. Na przykład  $f(x) = x + \sin 2\pi x$  spełnia warunek zadania, a nie jest liniowa.