Koncentrat fotonowy

Doc. dr Michał ŚWIĘCKI

Światło składa się z fotonów. Zdanie to, powszechnie znane, zawiera pojęcia odnoszące się do dwóch różnych teorii — klasycznej i kwantowej. Wynikają też z niego ważne konsekwencje dotyczące zjawisk zarówno makro-, jak i mikroskopowych. I tak na przykład falowe własności światła nieuchronnie prowadzą do falowego zachowania pojedynczego fotonu i w rezultacie do osławionego dualizmu falowo-korpuskularnego. Mniej sławne jest natomiast istnienie związków odwrotnych. Okazuje się mianowicie, że pewne kwantowe własności fotonów mają takie, czysto klasyczne, konsekwencje, jakich fizyka klasyczna nie jest w stanie nawet podejrzewać.

Wyobraźmy sobie zbiór atomów jakiegoś pierwiastka wzbudzonych (np. optycznie) do pewnego stanu energetycznego. Każdy z tych atomów może powrócić do stanu podstawowego wysyłając przy tym foton o dobrze określonej energii, a więc i częstości ($E = h\nu$). Foton ten może mieć zupełnie dowolny kierunek lotu i dowolną polaryzację. Jednak dla już wysłanego fotonu zarówno kierunek, jak i polaryzacja są określone. Taki foton znajduje się więc w pewnym określonym stanie fizycznym. Spróbujmy opisać emisję tego fotonu.

Zgodnie z regułami teorii kwantowej musimy posłużyć się pojęciem amplitudy prawdopodobieństwa (funkcji falowej). Jej kwadrat (ściślej moduł do kwadratu, jeśli jest zespolona) to nic innego, jak prawdopodobieństwo wysłania fotonu w określonym stanie. Amplituda prawdopodobieństwa jest podstawowym pojęciem mechaniki kwantowej, zawierającym w sobie całą mądrość dualizmu falowo-korpuskularnego. Z jednej strony ma ona własności typowo falowe (może być dodatnia, ujemna, a nawet zespolona), a z drugiej nie opisuje nic więcej, jak tylko prawdopodobieństwo znalezienia cząstki (fotonu) w określonym stanie. Amplitudą prawdopodobieństwa należy się posługiwać podobnie jak zwykłym prawdopodobieństwem klasycznym. I tak, amplituda prawdopodobieństwa zajścia dwóch zjawisk niezależnych równa się iloczynowi amplitud obu zjawisk oddzielnie. I dalej, amplituda prawdopodobieństwa zajścia zjawiska, które może przebiegać na wiele niezależnych, nierozróżnialnych sposobów, równa się sumie amplitud dla każdego ze sposobów. Ta ostatnia własność decyduje o wszelkiego rodzaju zjawiskach interferencji, tak częstych w mechanice kwantowej. Należy wreszcie pamiętać, że skonstruowaną według powyższych reguł amplitudę podnosimy do kwadratu i dopiero tak otrzymujemy szukane prawdopodobieństwo zajścia danego zjawiska.

Wróćmy teraz do naszego zbioru atomów wzbudzonych, emitujących fotony. Oznaczmy przez a' amplitudę prawdopodobieństwa wysłania fotonu w określonym stanie, zaś przez a'' amplitudę wysłania fotonu w stanie nieco różniącym się od poprzedniego (np. o nieco innym kierunku lotu). Amplitudy te muszą, oczywiście, być odpowiednio unormowane tak, by prawdopodobieństwo wysłania fotonu w dowolnym kierunku i o jakiejkolwiek polaryzacji było równe jedności. Obliczmy teraz amplitudę prawdopodobieństwa rozpadu dwóch atomów wzbudzonych i wysłania dwóch fotonów w nieco różniących się stanach. Zgodnie z podanymi wyżej regułami wynosi ona

$$(*) \qquad A = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[a_1' \cdot a_2'' \text{ (pierwszy foton do stanu prim, drugi do bis)} + a_1'' \cdot a_2' \text{(na odwrót)}\right];$$

suma dwóch amplitud pojawia się z powodu nierozróżnialności obu sytuacji, a czynnik $1/\sqrt{2}$ bierze się z konieczności odpowiedniego unormowania amplitudy i nie będziemy go tu bliżej wyjaśniać. Warto jedynie wspomnieć, że zapobiega on podwójnemu liczeniu kierunków obu fotonów w sytuacji, gdy są one rejestrowane przez pojedynczy licznik. Niech teraz oba fotony znajdują się w tym samym stanie. Wtedy $a_1' = a_1'' = a_2' = a_2'' = a$ i $A = \sqrt{2}\, a^2$. Stąd prawdopodobieństwo wysłania dwóch fotonów w tym samym stanie (kierunku i polaryzacji) wynosi $A^2 = 2\, a^4$ i jest dwa razy większe niż prawdopodobieństwo obliczone według reguł klasycznych.

Podobnie można pokazać, że prawdopodobieństwo wysłania n fotonów w tym samym stanie jest zwiększone $n!$ razy.

Zwróćmy uwagę na fakt, że opisane zjawisko jest wynikiem interferencji nierozróżnialnych sposobów, na jakie można zrealizować stan końcowy. Jeżeli kierunki lotu fotonów zaczną się różnić za bardzo, to interferencja szybko przestanie dawać wzmocnienie (być konstruktywna) i prawdopodobieństwo zmaleje. W ten sposób zbiór atomów tak samo wzbudzonych promieniuje prawie równoległą, spójną wiązkę światła. Nie jest to oczywiście nic innego, jak laser — układ produkujący skrajnie klasyczne światło, klasyczny koncentrat jednakowych kwantowych fotonów.

Rozwiązanie zadania F 144.
Termometr jest ciałem makroskopowym, znajdującym się w kontakcie cieplnym z otoczeniem. Towarzyszy temu wymiana ciepła na drodze przewodzenia, konwekcji i promieniowania. W stanie ustalonym termometr wskazuje temperaturę własną, która może (ale nie musi) być równa temperaturze otaczającego ośrodka.

a) W cieniu termometr wskazuje temperaturę powietrza, gdyż decydującą rolę w wymianie ciepła odgrywa przewodzenie. W Słońcu — promieniowanie. Tym samym wskazania termometru umieszczonego w świetle słonecznym silnie zależą od jego konstrukcji (np. barwy cieczy, wielkości powierzchni poddanej działaniu promieniowania itp.).

b) Podane temperatury są miarą średniej energii kinetycznej cząsteczek. Powietrze na tej wysokości jest jednak tak bardzo rozrzedzone, że wymiana ciepła drogą przewodzenia jest nieistotna — przeważa promieniowanie. Wskazania termometru wystawionego na zewnątrz satelity zdeterminowane są przez promieniowanie Słońca (gdy termometr jest oświetlony) lub samego satelity (gdy termometr znajduje się w cieniu), a nie przez temperaturę atmosfery.

Opisane zjawisko gromadzenia się jednakowych cząstek w jednym stanie fizycznym występuje dla wszystkich cząstek mających spin całkowity (tzw. bozonów od nazwiska fizyka hinduskiego S. N. Bosego). Zjawisko to nosi nazwę kondensacji Bosego-Einsteina i prowadzi do powstawania jednorodnych układów klasycznych złożonych z ogromnej liczby bozonów. Nasuwa się naturalne pytanie: jak zachowują się układy jednakowych cząstek o spinie ułamkowym (fermionów — od nazwiska E. Fermiego). Otóż dla nich we wzorze (*) pojawia się znak minus zamiast plusa, czyli różnica, a nie suma odpowiednich amplitud. W rezultacie prawdopodobieństwo znalezienia dwóch jednakowych fermionów w tym samym stanie jest po prostu równe zeru. Własność ta jest treścią słynnego zakazu Pauliego obowiązującego na przykład dla elektronów oraz składników jądra atomowego — nukleonów. Widać więc, że zakaz Pauliego pojawia się jako wynik interferencji wygaszającej (destruktywnej) amplitud odpowiadających dwóm nierozróżnialnym sposobom realizacji stanu dwu fermionów.

Ktoś może się zapytać: co to wszystko ma wspólnego z niskimi temperaturami, będącymi przecież przewodnim tematem tego numeru *Delty*? Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że opisane wyżej (i wyjaśnione na przykładzie lasera) jednorodne układy wielu bozonów pojawiają się tam, gdzie występuje dobrze określony i odseparowany energetycznie stan pojedynczego bozonu. Układy te są szczególnie ciekawe dla bozonów obdarzonych niezerową masą i zerową wartością spinu (co odpowiada brakowi polaryzacji). Dla takich cząstek ich stan podstawowy jest stanem o zerowej wartości pędu i właśnie obsadzanie tego stanu prowadzi do interesujących zjawisk. Stan podstawowy może być obsadzony jedynie w odpowiednio niskich temperaturach — takich, że ruchy cieplne materii nie mogą doprowadzić do wzbudzeń na jakikolwiek inny stan. Tak właśnie pojawia się kondensacja Bosego-Einsteina cząsteczek nadciekłego helu ^{4}He oraz par dwu elektronów (para fermionów jest bozonem) w nadprzewodnikach. Zbyt małe ruchy cieplne nie są w stanie wzbudzić takiego wielobozonowego stanu na wyższy energetycznie poziom i dlatego nie mogą w żaden sposób zaburzyć ewentualnych niewielkich ruchów tego układu. Stąd znikanie lepkości dla niezbyt szybkiego ruchu cieczy i oporu elektrycznego dla niezbyt silnego prądu. Temperatura musi oczywiście być wystarczająco niska.

Zadania

Redaguje mgr Krzysztof S. NOWIŃSKI

M 349. Sfera o środku O wpisana w czworościan $ABCD$ styka się z jego ścianami w punktach K, L, M, N.
Wykazać, że punkt O leży w czworościanie $KLMN$.
Rozwiązanie na str. 17

M 350. Wykazać, że jeżeli $k \neq n$, to liczby $2^{2^k}+1$ i $2^{2^n}+1$ są względnie pierwsze.
Rozwiązanie na str. 3

M 351. Na jednym z nienarożnych pól brzegowych szachownicy 4×4 zapisano znak $-$ wypełniając pozostałe pola znakami $+$. Jeden ruch polega na zamianie na przeciwne wszystkich znaków w rzędzie poziomym, pionowym lub ukośnym (równoległym do którejś przekątnej). Wykazać, że po dowolnej liczbie ruchów na szachownicy znajdzie się co najmniej jeden znak $-$.
Rozwiązanie na str. 5

Redaguje mgr Tomasz TRATKIEWICZ

F 144. a) W komunikatach o pogodzie można usłyszeć, że:
„Temperatura w cieniu wynosiła 25 stopni, w słońcu 35°C”. Jaki jest sens takiego stwierdzenia?

b) Badania geofizyczne wykazują, iż na wysokości około 1000 km nad powierzchnią Ziemi temperatura atmosfery waha się od 1000 K (nocą) do 2500 K (w dzień). Czyżby były to wskazania termometrów wystawionych na zewnątrz sztucznych satelitów krążących na danej wysokości?
Rozwiązanie na str. 7

F 145. a) Mierząc gorączkę trzymamy termometr pod pachą przez kilka lub nawet kilkanaście minut. Jak to jest możliwe, że termometr daje się „strząsnąć” prawie natychmiast po wyjęciu spod pachy?

b) Jak można by za pomocą termometru lekarskiego zmierzyć temperaturę ciała ludzkiego, gdy temperatura otoczenia wynosi, powiedzmy, 42°C?
Rozwiązanie na str. 11