

Co piszczą w... ciepłe? Słów kilka o fononach

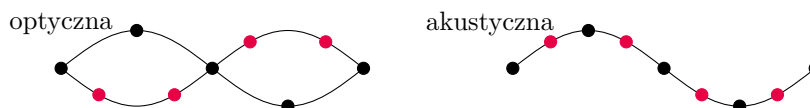
* Wydział Fizyki, Politechnika
Warszawska

Anna ŁAPIŃSKA*

O tym, że świerszcz piszczy w trawie wiedzą wszyscy. O tym, że zimno to brak ciepła, również. Ale czy wszyscy wiedzą, czym tak naprawdę jest ciepło? Co właściwie o nim wiemy? Wiemy, że wyrażamy je poprzez temperaturę, która może być podawana w różnych jednostkach: stopniach Celsjusza, Kelwinach bądź Fahrenheitach. Najniższą możliwą temperaturę nazywamy zerem bezwzględny, wynoszącym $-273,15^{\circ}\text{C}$ lub $-459,67^{\circ}\text{F}$ albo 0 K . W tej temperaturze ciała osiągają energię minimalną i ustają drgania termiczne. Jednak w temperaturach wyższych od zera bezwzględnego w ciałach zachodzi wiele procesów, a więc pojawia się energia cieplna. Ciepło jako zjawisko rozpatrujemy dwojako. Z jednej strony, w niektórych sytuacjach jest ono pożądane, a dobre przewodniki ciepła znajdują zastosowanie w życiu codziennym – w żelazkach, garnkach, kaloryferach, ale także w bardziej zaawansowanej formie – jako radiatory chipów elektronicznych. Z drugiej strony, ciepło może być problematyczne, szczególnie w przypadku nowoczesnych urządzeń elektronicznych. Postępująca miniaturyzacja powoduje, że nie radzą sobie one z efektywnym odprowadzeniem ciepła, co w konsekwencji prowadzi do przegrzewania się podzespołów. Zjawisko to jest makroskopowe, ale by je zrozumieć, musimy przyjrzeć się temu, co dzieje się w dużo mniejszej skali – atomowej. W niej fizyka klasyczna ustępuje miejsca fizyce kwantowej.



Jeśli wyobrazimy sobie materiał, z którego budowane są elementy elektroniczne, np. krzem w skali nanometrowej (nano to 10^{-9}), to naszym oczom ukazuje się gęsto upakowana, powtarzająca się struktura zbudowana z atomów. W tej strukturze atomy połączone są wiązaniami, które dla ułatwienia można sobie wyobrazić jako sprężynki. Gdy dostarczamy energię do takiego układu, atomy połączone sprężynkami zaczynają drgać w ściśle określony sposób. Energia wibracyjna drgających atomów tworzy fonony – kwanty energii. Ważny jest fakt, że fonony powstają nie w sposób ciągły, a konkretnymi porcjami, i taka porcja energii nazywana jest kwantem. Zatem kwanty drgań cieplnych sieci krystalicznej (czyli periodycznej struktury złożonej z atomów) to fonony. W temperaturze powyżej zera bezwzględnego w materiale tworzy się ogromna liczba fononów, które przemieszczając się, zderzają się i tworzą fonony o innych częstotliwościach. Można jednak wyróżnić dwa podstawowe rodzaje fononów – optyczne oraz akustyczne. Jeśli wyobrazimy sobie łańcuch zbudowany z dwóch rodzajów atomów, o odmiennych ładunkach, tak jak na rysunku, to w sytuacji, gdy wszystkie atomy poruszają się zgodnie w jednym kierunku i tworzą falę na kształt klasycznej fali dźwiękowej, to takie fonony nazwiemy akustycznymi.



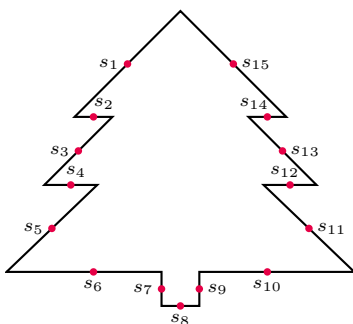
Fonony optyczne z kolei są wynikiem drgań atomów przeciwstawnych, a więc w momencie osiągnięcia przez atom jednego rodzaju maksymalnego wychylenia atom drugiego rodzaju znajduje się w położeniu najniższym. Fonony optyczne, by powstały, potrzebują więcej energii niż akustyczne, a do ich generacji potrzeba światła z zakresu podczerwieni lub widzialnego. Fonony akustyczne z kolei podróżują po materiale z prędkością dźwięku i odpowiadają również za rozchodzenie się dźwięku w ciele stałym. W sytuacji gdy komórka elementarna materiału, a więc najmniejsza możliwa regularnie powtarzająca się struktura, zbudowana jest z więcej niż dwóch atomów, będziemy obserwować coraz więcej fononów o różnych energiach, a relacje między nimi będą coraz bardziej złożone. Oprócz podstawowych rodzajów wyróżniać będzie można dodatkowo fonony akustyczne podłużne, drgające równoległe do płaszczyzny kryształu – LA (*longitudinal acoustic*) oraz poprzeczne, drgające prostopadle do płaszczyzny



kryształu – TA (*transverse acoustic*). Analogicznemu podziałowi podlegają fonony optyczne – podłużne LO oraz poprzeczne TO.

W zależności od rodzaju fonony można obserwować i badać różnymi technikami. Dla przykładu optyczne fonony badamy za pomocą takich technik, jak spektroskopia ramanowska oraz spektroskopia podczerwieni. W spektroskopii ramanowskiej wykorzystuje się wiązkę światła, która oświetla próbkę i jest rozpraszana przez materiał, powodując jednocześnie wzbudzenie drgań sieci i generację fononu. Jako rezultat otrzymuje się widmo – charakterystyczny wykres, na którym w odpowiednich miejscach pojawiają się piki, dzięki którym można zidentyfikować odpowiedni rodzaj fononu. W spektroskopii podczerwieni wykorzystuje się częstotliwości leżące w zakresie 300 GHz – 400 THz. W wyniku oświetlenia próbki wiązką promieniowania o odpowiedniej częstotliwości dostarczana energia zostaje pochłonięta przez sieć krystaliczną, co prowadzi do wzbudzenia drgań atomów i w efekcie do generacji fononów. Obie te techniki uzupełniają się, co oznacza tyle, że fonony, które obserwowane są w spektroskopii ramanowskiej, nie są najczęściej obserwowane w spektroskopii podczerwonej i na odwrót. Badania fononów akustycznych przeprowadza się przy użyciu wiązki neutronów (składnika jądra atomowego). W tym wypadku neutrony oddziałują z materią, która wywołuje zmiany energii padających neutronów. Pomiary wykonuje się przy reaktorze atomowym stanowiącym źródło neutronów. Warto zaznaczyć, że istnieją również inne metody wykorzystujące wiązkę neutronów do badania fononów, ale nie będziemy ich wszystkich tutaj omawiać.

Zajmijmy się teraz inną kwestią. Wiemy już, czym są fonony, znamy ich podstawowe rodzaje oraz wiemy, jak możemy je badać. Zastanówmy się teraz nad ich użytecznością. Ciepło, którego nośnikami są fonony, szczególnie we wspomnianych wcześniej urządzeniach elektronicznych, kojarzy się raczej z czymś niepożądanym, a nawet szkodliwym i ograniczającym funkcjonalność. Ale to samo ciepło można wykorzystać na przykład do przetwarzania informacji. Gałąź nauki, która zajmuje się badaniem i kontrolą fononów, zwie się fononiką. Jest to stosunkowo nowa i jeszcze niezbyt popularna dziedzina nauki. Problematyczne w kontekście kontrolowania fononów, ich przepływu oraz przetwarzania informacji jest to, iż nośniki ciepła nie mają ani masy, ani ładunku, czyli nie są stricte cząstką, tylko wiązką energii. Niemniej jednak od wielu lat naukowcy próbują je okiełznać, tworząc kolejne teorie, materiały czy urządzenia. Sztandarowym osiągnięciem tej gałęzi nauki jest dioda termiczna, której historia sięga lat 30. ubiegłego wieku. Dioda ta przewodzi ciepło tylko w jednym kierunku. Po raz pierwszy ukierunkowany, kontrolowany przepływ ciepła został zaobserwowany na powierzchni styku miedzi oraz tlenku miedzi. Praktycznym zastosowaniem tego typu urządzenia mogłoby być automatyczne kontrolowanie temperatury na przykład wewnątrz budynku, jeśli ten zostałby zbudowany chociaż częściowo z takich termicznych diod. Pozwoliłoby to na zastąpienie tradycyjnej klimatyzacji oraz zdecydowaną oszczędność energii. Innym przykładem urządzenia wykorzystującego fonony jest tranzystor termiczny, odpowiednik elektronicznego tranzystora. W 2018 roku uczeni z Uniwersytetu Stanforda opracowali urządzenie odprowadzające ciepło z elementów elektronicznych, wykorzystując do tego dwuwymiarowy dwusiarczek molibdenu, który wzbogacili jonami litu. W takiej postaci dwusiarczek molibdenu reagował na zmiany temperatury, powodując włączenie lub wyłączenie całego układu, chroniąc jednocześnie elektroniczne elementy przed przegrzaniem i zniszczeniem. Ciągłe trwają intensywne badania nad uzyskaniem układów logicznych pracujących w systemie ON i OFF (włączenia i wyłączenia), sterowanych jedynie temperaturą. Jednakże technologia wykorzystująca zmiany temperatury oraz kontrolę fononów w urządzeniach elektronicznych aktualnie jest na poziomie wiedzy, jaką posiadali uczeni w latach 70. ubiegłego wieku. . . Nie zmienia to faktu, iż naukowcy dokładają wszelkich starań, by stan ten szybko poprawić.



Rozwiązanie zadania z artykułu „Odkryj wielokąt!” (str. 1)