Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe

*Andrzej WINIEWSKI**

* Instytut Fizyki PAN

Nadprzewodnictwo, jedno z najbardziej interesujcych zjawisk fizycznych, zostao odkryte stosunkowo dawno – w roku 1911. Cigle jednak fascynuje wielu fizyków, zarówno eksperymentatorów, jak i teoretyków. Jego istot jest to, e w nadprzewodniku poniej pewnej temperatury, nazywanej temperatur krytyczn (T_c), opór elektryczny oraz indukcja magnetyczna spadaj do zera. Nawet w najlepszych przewodnikach (metalach) przepywowi prdu towarzyszy opór elektryczny, a wic i straty energii. Elektrony – noniki prdu – s rozpraszane, na skutek zderze zmieniaj prdko lub kierunek ruchu. Dlaczego tak si dzieje? Metal moemy sobie wyobrazi jako sie krystaliczn dodatnio naadowanych jonów, pomidzy którymi poruszaj si elektrony. Jony drgaj wokó swoich pooe równowagi. Zderzenia elektronów z drgajcymi jonami s podstawow przyczyn rozpraszania elektronów. Amplituda drga jonów maleje ze spadkiem temperatury. Opór elektryczny maleje, gdy maleje temperatura, jednak moe on osign zerow warto dopiero w najniszej moliwej w przyrodzie temperaturze: 0 K. Jednak zerowy opór w nadprzewodnikach stwierdza si nawet w tak „wysokich” temperaturach jak 135 K. W tej temperaturze na pewno drgania sieci jonów maj du amplitud i elektrony musz znale jaki „chytry” sposób, eby unikn rozpraszania.

Stwierdzenie, na czym polega ten „chytry” sposób, zajo fizykom ponad 40 lat. Dopiero w poowie lat pidziesitych XX w. zostaa opracowana, przez trzech fizyków amerykaskich: Bardeena, Coopera i Schriffera, teoria wyjaniajca mechanizm nadprzewodnictwa (otrzymali za to w 1973 r. Nagrod Nobla). Nazywa si j w skrócie teori BCS, od pierwszych liter nazwisk jej twórców.

Podstaw teorii BCS jest zaskakujcy pomys, e w nadprzewodniku elektrony cz si w pary. Pomys ten jest zaskakujcy dlatego, e elektrony maj taki sam ujemny adunek – powinny si wic odpycha, a nie czy w pary. Elektrony odpychaj si, oczywicie, na skutek oddziaywania kulombowskiego, ale w krysztale istnieje pomidzy nimi dodatkowe oddziaywanie przycigajce. Jest ono zwizane z oddziaywaniem elektronów z sieci krystaliczn. Mona to sobie wyobrazi w ten sposób, e w trakcie swojego ruchu elektron poprzez oddziaywanie przycigajce deformuje rozkad adunków dodatnio naadowanych jonów tworzcych sie krystaliczn. Elektron, który znajdzie si w pobliu, odczuwa to zaburzenie sieci i jest przez nie przycigany. W ten sposób, za porednictwem sieci, dwa elektrony bd si przyciga. To oddziaywanie moe by silniejsze ni oddziaywanie odpychajce. Poniewa drgania sieci krystalicznej nazywamy fononami – taki mechanizm czenia elektronów w pary nazywamy fononowym.

Zjawisko nadprzewodnictwa wystpuje w wielu materiaach. W wikszoci przypadków T_c s niskie, czsto bliskie temperatury 0 K (0 K = −273,15°C). Jakie materiay wykazuj nadprzewodnictwo? Wykazuje je wikszo metali, jednake dopiero poniej temperatury rzdu kilku kelwinów. Najwysz temperatur krytyczn wród metali, $T_c = 9{,}2$ K, ma niob (Nb). Nadprzewodnictwo wykazuje wiele stopów, najwysz T_c ma stop Nb_3Ge – wynosi ona 23,3 K. Przez wiele lat bya to najwysza temperatura krytyczna. W roku 1986 odkryto now klas materiaów wykazujcych nadprzewodnictwo. Nazwano te materiay nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi, okrelenie to naley traktowa z pewn rezerw. Nazywamy tak materiay, których temperatura krytyczna jest znacznie wysza od temperatury „starych”, konwencjonalnych, nadprzewodników. Cigle s to jednak, z punktu widzenia ycia codziennego, temperatury niskie. Jak stwierdzono w 1993 roku, najwysza znana obecnie T_c nadprzewodnika wysokotemperaturowego $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ wynosi 135 K czyli −138°C (pod cinieniem atmosferycznym), pod wysokim cinieniem T_c tego zwizku wzrasta do 164 K. Od roku 1993 nie znaleziono materiau, który pod cinieniem normalnym wykazywaby wysz T_c.

Za przeomowe dla nadprzewodników wysokotemperaturowych mona uzna dwa odkrycia – pierwsze, dokonane w 1986 roku przez Szwajcarów, Alexa Mullera i Georga Bednorza (Nagroda Nobla w 1987 r.). Stwierdzili oni wystpowanie nadprzewodnictwa w ceramicznym materiale tlenkowym zawierajcym lantan, bar, mied i tlen – $(La,Ba)_2CuO_{4-x}$. Temperatura krytyczna wynosia 35 K, bya wic istotnie wiksza ni poprzedni „rekord”. Znaczenie ich odkrycia polegao jednak przede wszystkim na tym, e zwrócono uwag na now grup materiaów, zupenie nie

Rozwizanie zadania M 1585.
Odpowied: Na $(n!)^2$ sposobów.

Wiersze i kolumny szachownicy nazwijmy *rzdami*, a zbiór n pól szachownicy po jednym w kadym rzdzie – *rozsypem*. Rozsyp mona wybra na dokadnie $n!$ sposobów (np. w i-tym wierszu wybieramy na $n+1-i$ sposobów kolumn, do której naley pole).

Zauwamy, e ukad kamieni speniajcy warunki zadania ma w kadym rzdzie albo dokadnie jedno pole z trzema kamieniami, albo dokadnie dwa pola, na których le odpowiednio jeden i dwa kamienie. Co wicej, zarówno zbiór pól zawierajcych 1 lub 3 kamienie, jak i zbiór pól zawierajcych 2 lub 3 kamienie, jest rozsypem. To oznacza, e z kadym rozoeniem kamieni mona zwiza (uporzdkowan) par rozsypów.

Z drugiej strony, majc par rozsypów, moemy na polach pierwszego z nich ustawi po jednym kamieniu, a na polach drugiego – dooy po dwa kamienie. Uzyskany w ten sposób ukad bdzie spenia warunki zadania. Ostatecznie wic takich ukadów jest tyle co par rozsypów, czyli $(n!)^2$.

Rozwizanie zadania M 1587.
Niech m bdzie tak dodatni liczb cakowit, e $m^2 = n^2 + np + p^2$, czyli

$$(m-n)(m+n) = p(n+p).$$

Z nierównoci

$$m^2 = n^2 + np + p^2 < (n+p)^2$$

uzyskujemy $m < n+p$, czyli $m - n < p$. W szczególnoci liczba $m-n$ nie jest podzielna przez p, skd wobec podzielnoci iloczynu $(m-n)(m+n)$ przez p uzyskujemy $p|m+n$. Ponadto skoro $n < p$, to

$$p < m < m+n < 2n+p < 3p,$$

skd $m + n = 2p$, czyli $m = 2p - n$. Zatem

$$(2p-n)^2 = n^2 + np + p^2,$$

co po uproszczeniu przybiera posta $5n = 3p$ i wobec pierwszoci liczby p prowadzi do wniosku, e $(n,p) = (3,5)$. Jest to jedyna para o zadanych wasnociach.

Rozwizanie zadania M 1586.
Niech A_i bdzie wierzchokiem kostki, odlegym od stou o i. Oznaczmy dugo krawdzi kostki przez x. atwo zauway, e odcinki A_0A_1, A_0A_2 oraz A_0A_4 musz by krawdziami szecianu (wynika to z faktu, e jeli krawdziami s A_0A_i i A_0A_j, to $A_0A_iA_{i+j}A_j$ jest cian). Niech x bdzie dugoci krawdzi szecianu. Dobierzmy ukad wspórzdnych tak, by $A_1 = (x, 0, 0)$, $A_2 = (0, x, 0)$ i $A_4 = (0, 0, x)$. Oznaczmy przez A_i' rzut prostoktny punktu A_i na prost prostopad do stou, przechodzc przez A_0; wówczas $|A_0A_i'| = i$. Przyjmijmy $A_1' = (a, b, c)$, wtedy $A_2' = (2a, 2b, 2c)$ i $A_4' = (4a, 4b, 4c)$. Korzystajc z twierdzenia Pitagorasa dla trójktów prostoktnych $A_0A_i'A_i$ dla $i = 1, 2, 3$ dostajemy

$$\begin{cases} (a-x)^2 + b^2 + c^2 + 1 = x^2 \\ 4a^2 + (2b-x)^2 + 4c^2 + 4 = x^2 \\ 16a^2 + 16b^2 + (4c-x)^2 + 16 = x^2. \end{cases}$$

Wykorzystujc powysze równoci oraz $a^2 + b^2 + c^2 = 1$, dostajemy $ax = 1$, $bx = 2$ i $cx = 4$. Po podniesieniu ostatnich trzech równoci do kwadratu i zsumowaniu, otrzymamy $x^2 = 1^2 + 2^2 + 4^2$, zatem $x = \sqrt{21}$.

„podejrzewan” o to, e moe wykazywa nadprzewodnictwo. W krótkim czasie, na pocztku roku 1987, Amerykanin Paul Chu odkry nadprzewodnictwo w zwizku $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. W tym przypadku kluczowa jest warto $T_c = 92$ K. Z punktu widzenia zastosowa jest to odkrycie przeomowe. Jest to bowiem temperatura wysza od temperatury ciekego azotu, która wynosi 77 K. Aby wykorzysta w praktyce nadprzewodnik (na przykad do przesyania prdu bez strat), konieczne jest utrzymywanie go przez cay czas w temperaturze niszej od T_c. Oznacza to, e nadprzewodnik konwencjonalny musi by zanurzony w ciekym helu, natomiast nadprzewodnik $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ moe by zanurzony w ciekym azocie. Jest to rónica zasadnicza. Cieky hel jest duo droszy i duo mniej dostpny od ciekego azotu, jego wytwarzanie, przechowywanie, przelewanie do zbiorników jest duo bardziej skomplikowane ni w przypadku azotu.

Zostay przebadane róne materiay wykazujce nadprzewodnictwo w temperaturach wyszych od temperatury ciekego azotu. Wiemy o tych materiaach ju dosy duo. Cigle jednak nie znamy odpowiedzi na dwa podstawowe, zwizane zreszt ze sob, pytania. Jaki jest mechanizm nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego? Wiadomo, e nonikami prdu s pary elektronów, nie jest jednak jasne, jaki jest mechanizm czenia si elektronów w pary. Teoria BCS, która tumaczya to dobrze w przypadku nadprzewodników klasycznych, nie wystarcza. Drugie pytanie: jaka jest moliwa najwysza temperatura krytyczna w tej grupie materiaów, czy moliwe jest nadprzewodnictwo w temperaturze pokojowej? Te na razie pozostaje bez odpowiedzi. A odpowiedzi na te pytania s na wag Nagrody Nobla.

Eksperyment przeprowadzony w 2015 r. pokaza jednak, e rekordow obecnie temperatur krytyczn, $T_c = 203$ K, wykazuje… siarkowodór (H_2S). Tyle e stan nadprzewodzcy obserwuje si tylko pod ogromnymi cinieniami okoo 150 GPa (cinienie w jdrze Ziemi wynosi okoo 360 GPa). Co ciekawe, za nadprzewodnictwo w tak wysokiej temperaturze odpowiedzialny jest klasyczny – fononowy mechanizm czenia si elektronów w pary Coopera.

Kocowa uwaga: zjawisko nadprzewodnictwa moemy traktowa jak co egzotycznego – niskie temperatury, wysokie cinienia… Jednak tak naprawd, to temperatury i cinienia, do których przyzwyczailimy si na Ziemi, s wyjtkowo egzotyczne. Stan nadprzewodzcy moe by wic duo bardziej fundamentalnym stanem materii, ni si nam wydaje.

Protokó posiedzenia Jury XL Konkursu Uczniowskich Prac z Matematyki im. Pawa Domaskiego

Jury Konkursu Uczniowskich Prac z Matematyki w skadzie: Andrzej Komisarki – przewodniczcy jury, Bartomiej Bzdga, Adam Dzedzej, Andrzej Grzesik, Kamila yczek, Zdzisaw Pogoda po wysuchaniu w dniu 27 wrzenia 2018 roku prezentacji prac dopuszczonych do finau, biorc pod uwag dobór tematów, tre prac i sposób ich przedstawienia, postanowio, co nastpuje:

• Zoty medal i nagrod w wysokoci 1500 z otrzymuje Stanisaw Hauke *Czworokty bliniacze* (XIV LO im. Stanisawa Staszica w Warszawie, opiekun Waldemar Pompe).

• Srebrny medal i nagrody w wysokoci 1000 z otrzymuj Filip Rkawek *O trójktach kappa i ich wasnociach* (Katolickie Liceum Ogólnoksztacce im. C. K. Norwida w Garwolinie, opiekun Micha Szurek) oraz Mariusz Trela *Kolorowanie prostych w* $\mathbb{F}_{p^2}$ (V LO w Krakowie, opiekun Dominik Burek).

• Brzowy medal i nagrod w wysokoci 500 z otrzymuje Pawe Sawicki *Hexapawn wyduony* (III LO w Gdyni im. Marynarki Wojennej RP, opiekun Wojciech Tomalczyk).

Finalista: Jakub Szulc *O wielomianach symetrycznych* (Zespó Szkó Uniwersytetu Mikoaja Kopernika Gimnazjum i Liceum Akademickie w Toruniu, opiekun Daniel Strzelecki).

Finalici i opiekunowie prac otrzymuj równie nagrody rzeczowe ufundowane przez: Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Wydawnictwo PWN, Wydawnictwo Szkolne Omega, Wydawnictwo Aksjomat.

Prace nadsyane na Konkurs powinny by samodzielnie przygotowanymi przez uczniów opracowaniami, zawierajcymi nowe wyniki lub nowe twórcze ujcie tematu. Szczegóowy regulamin Konkursu znajduje si na stronie `deltami.edu.pl`. Termin nadsyania prac w kolejnej edycji konkursu to 30 kwietnia 2019 roku.