



Nagroda Nobla z fizyki 2003

Nadprzewodniki w praktyce i nadciekłość jako nadprzewodnictwo

*Józef Spalek
Instytut Fizyki UJ*

Nagrodę Nobla z fizyki otrzymali w tym roku: **Witalij Ginzburg** i **Aleksiej Abrikosow** za wkład do teorii nadprzewodnictwa oraz **Anthony Leggett** za wkład do teorii nadciekłości. Wszyscy trzej laureaci prace, które przyniosły im Nobla, zrobili już dość dawno temu.



Aleksiej A. Abrikosow



Witalij L. Ginzburg



Anthony J. Leggett

Witalij Ginzburg, razem z nieżyjącym już świetnym fizykiem radzieckim Lwem Landauem, zaproponował w roku 1950 prosty opis stanu nadprzewodzącego, który nie wymaga znajomości mikroskopowego mechanizmu kondensacji. Natomiast **Aleksiej Abrikosow** zastosował ten model w 1957 roku do opisu nadprzewodnika w polu magnetycznym i wykazał istnienie tzw. wirów kwantowych (worteksów). Dokładniej, Abrikosow wykazał istnienie nowej klasy nadprzewodników, tzw. II rodzaju, dla której możliwe jest utworzenie stanu z siecią takich wirów. Stan z wirami pozwala nadprzewodnikowi przetrzymać silne prądy, które produkują z kolei silne pola, wykorzystywane w magnesach nadprzewodzących, używanych w metodzie rezonansu magnetycznego, dużych akceleratorach czy lewitujących pociągach. Główne wyniki Abrikosow otrzymał w 1953 roku po wpływie badań doświadczalnych Zawaritskiego, który zauważył niezgodności z oryginalnymi wynikami teoretycznymi Ginzburga i Landaua. Nawiasem mówiąc, Landau przez pewien czas nie dowierzał swojemu uczniowi Abrikosowowi i opóźnił publikację jego pracy o ładnych parę lat.

Z kolei prace **Tony'ego Leggetta** dotyczą nadpłynności, czyli przepływu cieczy takich jak skroplony hel, bez lepkości (według niektórych naukowców stan

taki występuje w zewnętrznej powłoce gwiazdy neutronowej). Leggett zaproponował w 1972 roku, że nadciekłość można obserwować w eksperymentach nad ciekłym helu-3 w bardzo niskich temperaturach. Początkowo inaczej myśleli nawet ci fizycy, którzy to zjawisko zaobserwowali. Stan nadciekły to praktycznie stan nadprzewodzący par atomów helu-3. Różnica polega na tym, że w stanie nadprzewodzącym parują się elektrony z przeciwnymi spinami, natomiast w przypadku helu-3 w pary łączą się całe atomy z równoległymi spinami ich jąder atomowych! Typ parowania w ciekłym helu-3 zaproponowali wcześniej teoretycy (m.in. pionierską pracę napisał fizyk polski Zygmunt Galasiewicz z Wrocławia).

Wszyscy trzej fizycy są teoretykami i przewidzieli nowy typ zachowania materii skondensowanej, tzw. makroskopowe zjawiska kwantowe. Można rzec, że pokazali, jak należy rozumieć te piękne zjawiska, które są zjawiskami kwantowymi w skali makroświata. Obecnie stosuje się teorię nadprzewodnictwa do opisu stanu plazmy kwarkowo-gluonowej w materii subatomowej, mówi się też o efektach parowania nukleonów w jądrach atomowych.

Jak widać, tegoroczni nobliści uświadomili nam, że mieszkamy w świecie kwantowym. Byłoby pięknie, gdyby koncepcje takie dało się przenieść do biologii. Niektórzy (Roger Penrose) uważają zresztą, że mózg wykazuje typ kolektywności, charakterystyczny dla makroskopowych stanów kwantowych, ale to już zupełnie inny temat (bardzo ciekawy!).

Nagroda dla tych uczonych jest dużo spóźniona. W międzyczasie odkryto nadprzewodnictwo par elektronów ze spinami równoległymi, a więc znaleziono analog nadciekłych par helu-3 dla elektronów (w 2000 r.). W najbliższej przyszłości jeszcze wiele usłyszymy na ten temat, nie mówiąc już o nadprzewodnictwie wysokotemperaturowym. Nasz świat kwantowy (w skali makro) stale się rozszerza!

Nadprzewodnictwo

Zjawisko polegające na zaniku oporu elektrycznego metalu poniżej temperatury T_S (dla atomów obojętnych elektrycznie analogiczne zjawisko przyjmuje postać nadciekłości, tj. przepływu bez tarcia wewnętrznego). Charakterystycznym zjawiskiem jest *efekt Meissnera*, polegający na usuwaniu pola magnetycznego z nadprzewodnika, poza cienką warstwą powierzchniową materiału o głębokości λ . Teorią dającą poprawny opis nadprzewodników, takich jak Pb, Sn, In, Hg, jest teoria BCS (Bardeena-Coopera-Schrieffera). Nadprzewodniki dzielą się na I i II rodzaju. Te drugie charakteryzują się tym, że powyżej krytycznego pola magnetycznego (H_{C1}) pole magnetyczne może wnikać do objętości nadprzewodnika w postaci nici (tzw. worteksów), z których każda niesie ze sobą kwant strumienia magnetycznego $\Phi_0 = h/2|e|$. Te nici tworzą *sieć Abrikosowa* w przedziale pól $H_{C1} < H_a < H_{C2}$; powyżej H_{C2} stan nadprzewodzący jest niszczone. Prosty opis stanu nadprzewodzącego, kwantowania strumienia magnetycznego i *zjawisk Josephsona* uzyskuje się za pomocą pojęcia *makroskopowej funkcji falowej*, wprowadzonej przez *Ginzburga* i *Landaua*.

Nadciężkość

Przepływ cieczy kwantowej bozonów (np. ciekłego izotopu ^4He w temperaturze poniżej $T_S = 2,17\text{ K}$) bez lepkości. Uważamy, że wtedy atomy (lub pary atomów dla ciekłego ^3He) znajdują się w stanie skondensowanym. Stany wzbudzone oddzielone są przerwą energetyczną i, jeśli tylko ruch nie jest za gwałtowny (laminarny), układ nie absorbuje energii z zewnątrz ani jej nie oddaje podczas ruchu. Przy ruchu wirowym nadcieczy powyżej pewnej prędkości powstają wiry niosące kwanty krętu h . Stan nadciężki opisujemy przez zjawiska związane z kondensacją par typu BCS (Bardeena-Coopera-Schrieffer) lub kondensacją B-E (Bosego-Einsteina). Pary typu BCS to na przykład pary atomów ciekłego ^3He lub neutronów w gwiazdzie neutronowej (ze spinami równoległymi). Kondensację B-E stosuje się do opisu nadciężkiego ^4He lub bozonowych kondensatów atomowych. Stan nadciężki (nadpłynny) jest *makroskopowym stanem kwantowym*; charakteryzuje się przez *makroskopową funkcję falową*, określoną przez nieliniowe równanie Schrödingera, zwane równaniem Grossa-Pitaiewskiego.

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

Nowe nadprzewodniki, odkryte w ostatnich 16 latach, głównie na bazie związków *miedziowo-tlenowych*. Typowymi przykładami są $\text{La}_{1,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CuO}_4$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ oraz $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ z temperaturą przejścia w stan nadprzewodzący odpowiednio $T_S = 36\text{ K}$, 90 K oraz 110 K . Charakteryzują się one strukturą kwazidwuwymiarową, w której wyróżnia się płaszczyzny miedziowo-tlenowe o nominalnej jednostce strukturalnej CuO_2 , w których przewodnictwo metaliczne ma charakter *dwuwymiarowy*. Uważa się, że elektrony w tych materiałach stanowią *nowy typ cieczy kwantowej*, której charakter nie jest jeszcze dobrze poznany. Niestandardowość tych nadprzewodników wynika chociażby z tego, że powstają one przez domieszkowanie izolatorów magnetycznych (tzw. *izolatorów Motta*). Nie jest też jasny wpływ nieporządku atomowego (domieszkowania) na własności układu ani mechanizm mikroskopowy parowania. Materiały te należą do tzw. układów z *silnie skorelowanymi elektronami*.

Ferromagnetyki nadprzewodzące

Materiały ferromagnetyczne, w których spiny są spontanicznie spolaryzowane poniżej temperatury T_C . Przejście do stanu nadprzewodzącego następuje w temperaturze $T_S \ll T_C$ i zostało po raz pierwszy zaobserwowane w 2000 roku. Tworzące się pary muszą mieć spiny równoległe, bo pole molekularne rzędu $H_{\text{mol}} \sim 160\text{ kOe}$ rozerwałoby pary z przeciwnymi spinami. Są zatem analogonem elektronowym par w ^3He ! Przykładami ferromagnetyka nadprzewodzącego są związki UGe_2 , URhGe czy ZnZr_2 .

Plazma kwarkowo-gluonowa

Stan skondensowanej materii kwarkowej bardzo wysokiej gęstości, przy czym parowanie kwarków następuje pod wpływem wymiany gluonu (w zwykłych nadprzewodnikach jest wymieniony kwant drgań sieci krystalicznej – fonon lub kwant wzbudzeń magnetycznych – magnon). Ponieważ mamy kilka rodzajów kwarków, więc taki kondensat kwarkowo-gluonowy może być rozumiany jako złożony z kilku podukładów nadprzewodzących. Kondensat taki nie został jeszcze jednoznacznie zidentyfikowany doświadczalnie.