

$$\begin{array}{r}
 234 \\
 \times 567 \\
 \hline
 1638 \\
 1404 \\
 1170 \\
 \hline
 132678
 \end{array}$$

Na pewno potrafisz. A czy potrafisz powiedzieć: skąd wynika, że to dobry sposób?

Zjawisko Josephsona

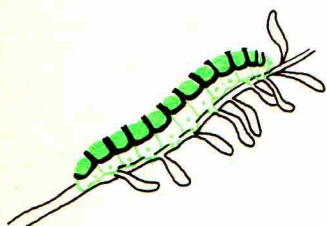
Mgr Wojciech WOJTANOWSKI

Przewidywanie możliwości istnienia efektów kwantowych związanych z układem makroskopowym jest dużym osiągnięciem fizyki ostatnich dziesięcioleci. Odkrycie nadprzewodnictwa czyli stanu materii, w którym następuje zanik oporu elektrycznego, inspirowało wielu fizyków do poszukiwania innych zjawisk, gdzie kolektywne własności elektronów w metalu, oziębionym poniżej temperatury przejścia do stanu nadprzewodzącego, przejawiałyby się w sposób makroskopowy. Jedno z takich zjawisk przewidział w roku 1962 angielski fizyk Brian D. Josephson. Wywnioskował on mianowicie, że w zasadzie można spowodować przepływ prądu nadprzewodzącego, składającego się ze skorelowanych par elektronów, przez przerwę izolującą dwa ciała nadprzewodzące, pod warunkiem, że przerwa ta jest dostatecznie mała.

Wydaje się, że najprościej istotę zjawiska Josephsona można zrozumieć, rozważając makroskopowe procesy związane z przepływem prądu przez nadprzewodnik. Weźmy pręt wykonany z substancji nadprzewodzącej, do którego przykładamy źródło prądu stałego. Do obwodu tego dołączamy również amperomierz i woltomierz. Woltomierz ten wskaże zerowy spadek napięcia, choć wskazówka amperomierza będzie wychylona. Oznacza to, że pręt nie wykazuje oporu elektrycznego i mówi się wtedy o nim, że jest w stanie nadprzewodzącym. Jeśli teraz pręt rozetniemy na dwie części i odsuniemy je od siebie na kilka centymetrów, to włączony do obwodu amperomierz nie wskaże przepływu prądu. Gdy jednak zmniejszymy odległość pomiędzy dwiema częściami tego nadprzewodzącego pręta do około 10 angstromów, może wystąpić jedno z dwóch zjawisk przewidzianych przez Josephsona. Pierwsze z nich polega na tym, że chociaż woltomierz nie pokazuje spadku napięcia, to przez obwód płynie prąd. Powstaje więc zadziwiające zjawisko przepływu prądu nadprzewodzącego zarówno przez oba kawałki pręta jak i rozdzielającą je przerwę. Nazywa się ono zjawiskiem Josephsona z prądem stałym.

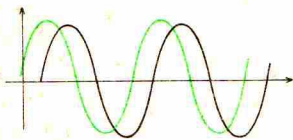
Inna sytuacja, która może mieć miejsce, polega na tym, że przy wychylonych wskazówkach obu mierników przerwa wysyła promieniowanie elektromagnetyczne o bardzo dużej częstotliwości, rzędu megaherców. Świadczy to o tym, że przez szczelinę przepływa prąd zmienny o tejże częstotliwości. Zjawisko to nazywa się zjawiskiem Josephsona z prądem zmiennym.

Badanie tego rodzaju zjawisk przyczyniło się do poznania istoty nadprzewodnictwa, a także stanowiło podstawę do opracowania szeregu przyrządów o praktycznym zastosowaniu. Umożliwiają one pomiary słabego pola magnetycznego z niebywałą wprost dokładnością, a także mogą stanowić bardzo precyzyjne źródła napięcia. Poza tym złącze Josephsona wykorzystuje się często jako tanie źródło spójnego promieniowania elektromagnetycznego o wysokiej częstotliwości (zakres mikrofalowy).



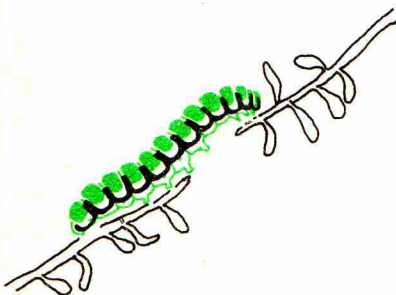
W celu wyjaśnienia zjawisk Josephsona konieczne jest sięgnięcie do istoty stanu nadprzewodzącego. Oddziaływanie elektronów przewodnictwa w metalu za pośrednictwem sieci krystalicznej prowadzi do powiązania ich w tzw. pary Coopera. Pary te dzięki temu, że są bozonami, gromadzą się wszystkie w tym samym stanie kwantowym tj. na przykład środki mas wszystkich par poruszają się z tym samym pędem. Rozpraszanie elektronów na węzłach sieci krystalicznej, odpowiedzialne za opór elektryczny, mogłoby prowadzić bądź do zmiany pędu pary, bądź do jej rozerwania. Pierwszy proces wymaga jednak bardzo dużej energii, ponieważ ze względu na wspomnianą korelację rozpraszanie musiałoby zmienić pęd wszystkich par. Rozerwanie pary następuje natomiast wtedy, gdy przekazana jej w akcie rozpraszania energia jest równa co najmniej energii wiązania. Nie może to nastąpić zanim pęd pary, a więc także gęstość prądu nadprzewodnictwa, nie przekroczy pewnej krytycznej wartości lub energia drgań cieplnych sieci krystalicznej nie stanie się porównywalna z energią wiązania. Tak więc dla niskich temperatur i odpowiednio małych gęstości prądu pary elektronowe w swym ruchu wewnątrz metalu nie napotykają na żaden opór.

W opisie kwantowomechanicznym par musi być uwzględniona ich falowa natura. Para elektronów o pędzie środka masy p może być opisana falą o długości h/p , gdzie h jest stałą Plancka. Stwierdzenie, że pędy środków mas wszystkich par są równe, oznacza, że fale opisujące te pary mają tę samą długość. Jednakże do korelacji w nadprzewodniku potrzebna jest jeszcze równość faz poszczególnych par elektronów.



Rys. 1

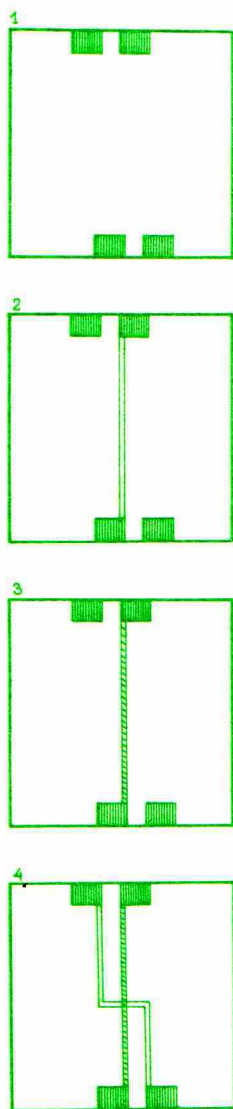
Pojęcie fazy ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia zjawisk Josephsona. Na rys. 1 przedstawione są dwie fale o tej samej długości, a jednak nie identyczne. Staną się one jednakowe, gdy falę czarną przesuniemy o pewną odległość tak, żeby się pokryły. Będziemy mogli wtedy powiedzieć, że fale te mają zgodną fazę. Ta równość faz wszystkich par odpowiadających parom Coopera w nadprzewodniku jest zjawiskiem kwantowomechanicznym zachodzącym w skali makroskopowej. Gwarantuje ona najniższą energię układu. Zdefiniujmy fazę — jest to pomnożona przez 2π liczba cykli, jaką wykonał układ od ustalonego położenia początkowego. Przykładem może być koło rowerowe, w którym jedna szprycha jest kolorowa. Założmy, że początkowo szprycha ta ustawiona jest pionowo w dół. Po wykonaniu przez nią pół obrotu, mówimy, że faza zmieniła się o π . Obrotowi o $3/4$ odpowiada zmiana fazy równa $3\pi/2$. Gdy koło wykona cały obrót faza zmieni się o 2π i otrzymamy wyjściową sytuację. Możemy powiedzieć, że ruch koła zależy od tego jak faza zmienia się w czasie. Czas, w którym faza zmienia się o 2π nazywamy okresem ruchu. W ogólności układ może być okresowy zarówno w czasie jak i w przestrzeni. Długość fali w tym przypadku jest to odległość, na której zachodzi jedno pełne drgnięcie przestrzenne, a faza zmienia się o 2π . Zgodnie z mechaniką kwantową faza związana z parą elektronów w nadprzewodniku ma drgania przestrzenne, których długość określona jest przez pęd środka masy pary oraz drgania czasowe, których okres związany jest z energią pary. Zgodność faz wszystkich par Coopera wyjaśnia doskonale zanik oporu elektrycznego nadprzewodnika. Gdyby bowiem istniało napięcie V pomiędzy końcami pręta nadprzewodzącego, w którym płynie prąd, to energia pary elektronów na jednym końcu pręta byłaby o $2eV$ większa od energii pary na drugim końcu. Powstałaby zatem różnica faz pomiędzy tymi parami. Zamiast przejścia do stanu o wyższej energii, spowodowanego tym naruszeniem równości faz, nadprzewodnik przenosi prąd nie dopuszczając do pojawienia się różnicy potencjałów.



Do wyjaśnienia zjawisk Josephsona potrzeba nam jeszcze zrozumienia innego efektu kwantowomechanicznego nazywanego efektem tunelowania. Tunelowanie polega na tym, że dzięki swojej falowej naturze elektrony mogą przenikać przez bariery, które byłyby dla nich nie do przebycia, gdyby elektrony były tylko i wyłącznie cząstkami.

Wróćmy teraz do zjawiska Josephsona. Rozważmy znowu problem dwóch kawałków nadprzewodzącego pręta. Jeżeli są one rozsunięte dość daleko, to pomiędzy fazami par Coopera w obu częściach nie ma żadnego określonego związku. Kiedy jednak zbliżymy je tak blisko, że zaistnieje możliwość tunelowania par z jednej części do drugiej, to układ będzie starał się zająć stan o najniższej energii, w którym różnica faz w obu częściach będzie jednoznacznie określona. Na tę względną różnicę faz można wpływać polem elektrycznym lub magnetycznym. Jeżeli w jakiś sposób uda się nam wytworzyć określoną różnicę faz pomiędzy parami Coopera z obu części pręta, to popłynie prąd elektryczny.

Jaka będzie postać tego prądu? Otóż, jak łatwo wytłumaczyć, zależność gęstości prądu płynącego przez złącze od różnicy faz ma charakter sinusoidalny. Widać to na przykładzie pracy koła napędowego i tłoka lokomotywy. Od fazy ruchu koła połączonego z tłokiem zależy kierunek przesuwu tłoka. Podobnie jest z prądem w złączu. Przy przemieszczaniu się par w uprzywilejowanym kierunku zmieniają one swoją fazę o tyle, żeby osiągnąć wartość fazy w tej części nadprzewodzącego pręta, do którego właśnie przechodzą. Pary usiłujące przemieszczać się w przeciwnym kierunku będą zmieniać swą fazę o tę samą wartość. Jeżeli w wyniku tego ich faza dopasuje się do fazy w nadprzewodniku, do którego dążą, to przejście takie może nastąpić i wypadkowy prąd będzie równy zeru. Jeżeli jednak takie dopasowanie nie nastąpi, to przejście będzie niemożliwe. W tym przypadku pary przechodzące w kierunku uprzywilejowanym spowodują powstanie stałego prądu elektrycznego. Jest to właśnie zjawisko Josephsona z prądem stałym.



Rys. 2

Przejdźmy teraz do zjawiska Josephsona z prądem zmiennym. Poprzednio różnica faz pomiędzy parami Coopera w obu częściach nadprzewodzącego pręta nie zmieniała się w czasie. Wiemy już jednak, że jeżeli pomiędzy dwoma nadprzewodnikami istnieje różnica napięć, to różnica faz nie będzie stała. W zjawisku Josephsona z prądem stałym będzie zmieniała się dotąd, aż osiągnie wartość odpowiadającą prądowi wytwarzanemu przez źródło. Trwa to przez jedną dziesięciomiliardową część sekundy od włączenia prądu. Potem już różnica faz jest stała. Jeżeli jednak źródło prądu wytwarza prąd przekraczający maksymalny prąd Josephsona, to skompensowanie nie nastąpi i na złączu istnieć będzie pewne napięcie, powodujące zmianę względnej fazy w czasie. Jak już wspominaliśmy wcześniej prąd Josephsona zależy od różnicy faz czyli zaczną płynąć raz w jednym raz w drugim kierunku. Oczywiście prędkość tych zmian będzie od napięcia na złączu. Mamy w tym przypadku do czynienia ze zjawiskiem Josephsona z prądem zmiennym.

Przejdźmy teraz do omówienia możliwości sprawdzenia przewidywań teoretycznych na drodze eksperymentalnej. Otrzymanie układu, w którym dwie części nadprzewodnika rozsunięte są na odległość 10 angstromów nie jest sprawą łatwą. (Jak mała jest to odległość niech nam uzmysłowi fakt, że atom ma rozmiary rzędu angstroma). Tę podstawową trudność pokonano stosując metodę naparowywania w próżni. Metal ogrzewany w próżni paruje i jego pary osadzają się na szklanym podłożu. Złącze Josephsona otrzymuje się w następujący sposób (patrz rys. 2):

1. naparowuje się cztery elektrody,
2. kolejno naparowuje się cienki pasek metalu, który po oziębieniu staje się nadprzewodnikiem,
3. na ten pasek, przez wpuszczenie do komory próżniowej ściśle określonej ilości tlenu, nanosi się cienką warstwę (10 \AA) izolującego tlenku,
4. wreszcie naparowuje się na to, zwykle prostopadle, drugi cienki pasek metalu.

Wystarczy teraz do elektrod podłączyć przewody, oziębic złącze poniżej temperatury przejścia do stanu nadprzewodzącego i układ jest gotowy.

Do tej pory przeprowadzono już tysiące doświadczeń potwierdzających wszelkie teoretyczne przewidywania dotyczące zastosowań złącza Josephsona. Jak już wspominaliśmy, prąd stały płynący w złączu zależy od przyłożonego pola magnetycznego, co jest wynikiem zależności fazy fali odpowiadającej parze Coopera od pola magnetycznego. Powoduje to przestrzenną zależność różnicy faz w dwu nadprzewodnikach, o ile do złącza przyłożymy stałe i jednorodne pole magnetyczne. Można wykazać, że w polu tym następuje zmiana fazy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku pola i jest ona proporcjonalna do wielkości pola. Zmiana fazy powoduje z kolei oscylacje gęstości prądu w przestrzeni. Fakt ten nie oznacza nic innego jak to, że przy dostatecznie silnym polu prąd może zmienić kilkakrotnie swój kierunek. Powoduje to oczywiście periodyczną zależność maksymalnego wypadkowego prądu stałego płynącego przez złącze od natężenia pola magnetycznego. Wykorzystanie powyższych zależności pozwala mierzyć słabe pola magnetyczne z olbrzymią dokładnością.

Rozpatrując zjawisko Josephsona z prądem zmiennym mówiliśmy o proporcjonalności częstości emitowanego promieniowania do napięcia na złączu. Zależność ta ma postać $\nu = 2eV/h$, gdzie ν — częstość oscylacji, V — napięcie na złączu, e — ładunek elektronu. Wykorzystując ten związek można budować wzorce napięcia o bardzo dużej dokładności, czy też znajdować wartość stosunku stałej Plancka h do ładunku elektronu. Widzimy tu wspaniałą sposobność wykorzystania makroskopowego zjawiska kwantowego do wznaczenia podstawowych stałych fizycznych.