

Budowa i działanie czujnika SQUID

Przypomnij sobie zanim zaczniesz:

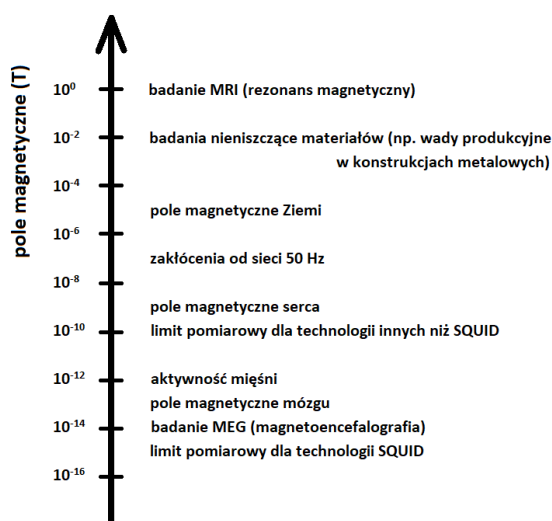
- Czym jest zasada nieoznaczoności Heisenberga;
- regułę prawej dłoni do wyznaczanie pola magnetycznego pętli z prądem;
- jak przeprowadzić eksperyment z interferencją fal na dwóch szczelinach.

Tego się dowiesz:

- Czym jest nadprzewodnictwo elektryczne;
- dlaczego złącze Josephsona można nazwać pożyteczną wadą nadprzewodnika;
- jak działa czujnik pola magnetycznego SQUID.

Czujniki SQUID to niezwykle ciekawe, zaawansowane technologicznie, a jednocześnie proste w budowie urządzenia. Pomimo tej prostoty trudno jest zrozumieć ich działanie, co wynika z faktu, że są to miniaturowe elementy elektroniczne, w których kluczowe znaczenie mają zjawiska kwantowe. W tym artykule skupimy się na uchwyceniu idei działania tych niezwykłych czujników, jednocześnie przybliżając w możliwie obrazowy sposób najważniejsze pojęcia mechaniki kwantowej. Wszakże i tak skomplikowane obiekty jak funkcje falowe można zobrazować w postaci fal sinusoidalnych. Na koniec przekonamy się, że działanie czujnika SQUID niewiele różni się od interferencji fal świetlnych na dwóch szczelinach.

Czujniki SQUID są obecnie uznawane za jedne z najdokładniejszych. Wykorzystywane są głównie jako precyzyjne mierniki pola magnetycznego (z dokładnością pomiaru rzędu 10^{-15} T[1]) choć można je wykorzystać również do pomiarów napięcia elektrycznego. Dzięki nim możliwe jest badanie pola magnetycznego ciała człowieka (np. w magnetoencefalografii - badanie MEG) czy obiektów w głębi ziemi (geofizyka) lub oceanu (namierzanie łodzi podwodnych). Wysoka precyzja pomiaru tych czujników osiągnięta jest dzięki wykorzystaniu nadprzewodnictwa elektrycznego.

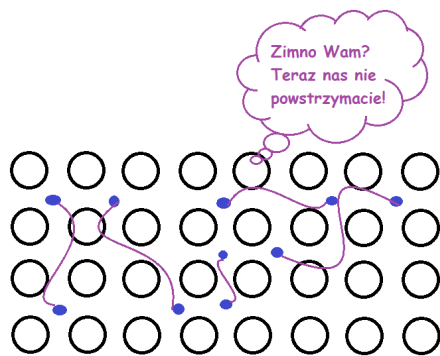


Rysunek 1: Poziomy pól magnetycznych dla różnych zjawisk i urządzeń. Czujnik SQUID jest w stanie mierzyć pole magnetyczne na poziomie femtotesli, co umożliwia wykorzystanie ich w badaniach MEG [1][2].

Zjawisko nadprzewodnictwa

Czujniki typu SQUID działają jedynie, gdy są zbudowane z odpowiednich materiałów, będących w stanie nadprzewodzącym. **Nadprzewodnictwo oznacza, że nośniki ładunku elektrycznego przemieszczają się bez oporu w przewodniku**, czyli natężenie prądu $I > 0$, gdy $R = 0$ (ruch ładunków nie jest wymuszany przez zewnętrzne napięcie, a więc $U = 0$).

Nośnikami prądu w takim przypadku nie są pojedyncze elektrony, lecz **pary Coopera** – dwa związane ze sobą elektrony o przeciwnych spinach. Pary Coopera wyróżniają się tą znakomitą własnością, że nie oddziałują z siecią krystaliczną przewodnika, a właśnie takie oddziaływanie jest powodem występowania oporu elektrycznego. Niestety, pary Coopera są rozrywane, gdy zwiększają się drgania sieci krystalicznej ośrodka. Oznacza to, że nadprzewodnictwo występuje jedynie w bardzo niskich temperaturach, które osiąga się poprzez chłodzenie materiału ciekłym helem (w temp. 4K) lub ciekłym azotem (w temp. 77K).



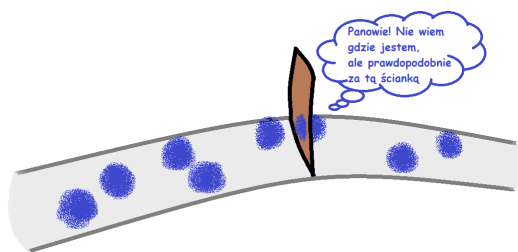
Rysunek 2: Dwa elektrony o przeciwnych spinach łączą się tworząc pary Coopera. Z powodu niskiej temperatury, drgania sieci krystalicznej nie są w stanie tych połączeń rozerwać.

Jednym z wyzwań współczesnej fizyki jest poszukiwanie materiałów, które wykazują własność nadprzewodnictwa w jak najwyższej temperaturze. Obecnie prym wiedzie związek o skomplikowanym symbolu $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$, dla którego temperatura graniczna w ciśnieniu atmosferycznym to 135K[3]. Jest wiele związków chemicznych wykazujących nadprzewodnictwo w znacznie wyższych temperaturach, jednak pod olbrzymim ciśnieniem. Można wyobrazić sobie, jak wielką rewolucją byłoby odkrycie materiału nadprzewodzącego w temperaturze pokojowej. Możliwe stałoby się przesyłanie prądu bez straty energii, a dzięki zjawisku wypychania pola magnetycznego z nadprzewodnika (o czym później), zapewne skonstruowano by też pierwsze lewitujące pojazdy!

Nadprzewodnictwo w złączu Josephsona

Budowa złącza Josephsona jest bardzo prosta – są to **dwa nadprzewodzące „przewody”, połączone bardzo cienką warstwą izolatora lub zwykłego przewodnika**. Okazuje się, że przy odpowiednio cienkiej warstwie izolatora (rzędu wielkości atomów), złącze zachowuje się w całości jak nadprzewodnik. Zachowanie takie jest możliwe dzięki zjawisku **tunelowania elektronów – pary Coopera przenikają przez izolator pomimo obecności fizycznej (dokładnie – energetycznej) bariery**.

Pojawia się więc pytanie, jaką rolę pełni warstwa izolatora, skoro całe złącze zachowuje swoje właściwości nadprzewodzące? Prąd nadprzewodzący nie może mieć nieograniczonego natężenia. Nawet ciągły nadprzewodnik traci swoje właściwości przy odpowiednio dużej gęstości poruszających się par Coopera. Tym bardziej zjawisko to uwidoczni się w przypadku złącza Josephsona - niezerowy opór elektryczny R pojawi się przy jeszcze mniejszym natężeniu prądu I . Ta „wada” złącza jest wykorzystywana do budowy czujników typu SQUID.



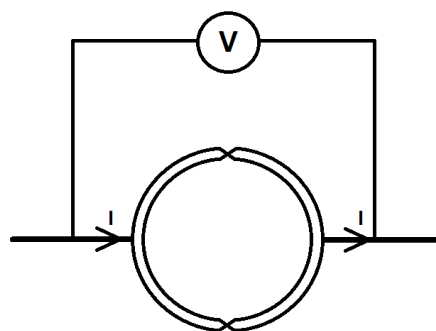
Rysunek 3: Złącze Josephsona. Tunelowanie jest możliwe, gdy bariera jest odpowiednio cienka – skoro położenie elektronu nie jest ściśle określone, co wynika z zasady nieoznaczoności Heisenberga, to z pewnym prawdopodobieństwem znajduje się on również za barierą.

Budowa czujnika SQUID

Budowa czujnika SQUID została przedstawiona na rysunku 4. Jak widać, przewód w którym płynie prąd I , dzieli się na dwie gałęzie – w obu z nich znajduje się złącze Josephsona. Ponieważ obie drogi są identyczne, płynie w nich prąd o natężeniu $I/2$, który następnie łączy się na wyjściu czujnika do wartości I .

Wyobraźmy sobie, że czujnik taki chłodzimy ciekłym helem do uzyskania stanu nadprzewodnictwa, a na jego wyjściach podłączamy woltomierz (jak na rysunku 4.). Pary Coopera nie oddziałują z siecią krystaliczną, więc opór R wynosi 0. Woltomierz również pokazuje zerowe napięcie, ponieważ $U = R \cdot I^*$

Teraz stopniowo wymuszamy coraz większy prąd w czujniku. W pewnym momencie woltomierz pokaże



Rysunek 4: Czujnik SQUID z podłączonym woltomierzem. Dopóki natężenie prądu na złączach Josephsona nie przekroczy wartości granicznej, prąd płynie bez oporu – woltomierz wskazuje 0 V.

niezerową wartość – jest to moment, w którym przekroczony został prąd graniczny dla pojedynczego złącza Josephsona, a więc:

$$\frac{I}{2} > I_{gr}$$

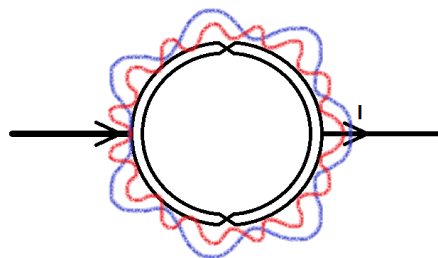
Od tego momentu zwiększanie natężenia prądu powodować będzie pojawianie się większego oporu i napięcia elektrycznego – czujnik SQUID traci swoje nadprzewodzące właściwości.

**Prawo Ohma nie obowiązuje dla nadprzewodników. Chodzi jedynie o ukazanie intuicji - U zależy od R*

Funkcja falowa par Coopera

Teraz gdy wiemy już, jak zbudowany jest czujnik SQUID, zastanówmy się nad kwantowym opisem ruchu elektronów. Jak wiemy fizyka kwantowa podważa klasyczny opis mechaniki ruchu – **dla bardzo małych obiektów (cząstek elementarnych) nie jest możliwe podanie dokładnego położenia i prędkości**. Dokładność określenia tych wielkości jest ograniczona poprzez stałą Plancka, o czym mówi zasada nieoznaczoności Heisenberga. Mechanika kwantowa przypisuje jednak cząstkom funkcje falowe, a matematyczne obliczenia pozwalają na ich podstawie przewidywać położenie i prędkość cząstek z określonym prawdopodobieństwem.

Parom Coopera poruszającym się w czujniku SQUID również możemy przypisać funkcje falowe – można je sobie wyobrazić jako sinusoidy rozmieszczone wzdłuż pętli czujnika SQUID, w których „grzbiety” określają wysokie, a „doliny” – niskie prawdopodobieństwo obecności danej cząstki – rys. 5. Taka funkcja falowa musi „domykać się” na pełnej pętli czujnika - w naszym przykładzie powiemy, że długość pętli czujnika jest wielokrotnością długości fali. Z tą wiedzą pozostaje zastanowić się, co stanie się z funkcją falową, gdy czujnik umieścimy w polu magnetycznym.



Rysunek 5: Parom Coopera poruszającym się w czujniku SQUID możemy przypisać funkcję falową, która opisuje ich ruch. Budowa czujnika w postaci pętli wymusza domykanie się funkcji falowych.

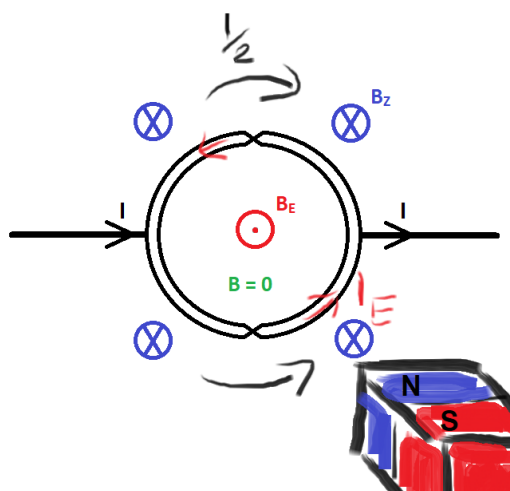
Pole magnetyczne w czujniku SQUID

Wyobraźmy sobie, że czujnik SQUID znajduje się w pobliżu magnesu. **Pole magnetyczne oddziałuje na cząstki naładowane, a więc również na pary Coopera**. W opisie kwantowym oddziaływanie to będzie widoczne w modyfikacji funkcji falowych. Te jednak nie mogą zmienić się dowolnie – funkcje falowe muszą domykać się na pętli czujnika SQUID!

Z powodu tego kwantowego ograniczenia, w pętli SQUID pojawia się **dotodkowy prąd ekranujący o niewielkim natężeniu I_E** . Jest on źródłem dodatkowego pola magnetycznego, przeciwstawiającego się polu zewnętrznemu – rys. 6. **Jest to zjawisko wypychania pola magnetycznego z nadprzewodnika**.

Dotodkowy prąd ekranujący krąży w pętli czujnika, w jednej gałęzi zwiększając, a w drugiej zmniejszając całkowite natężenie prądu.

Dopiero, gdy zewnętrzne pole magnetyczne jest na tyle duże, że rozciągnięte (zciśnięte) funkcje falowe par Coopera domkną się na pętli, prąd ekranujący zanika.



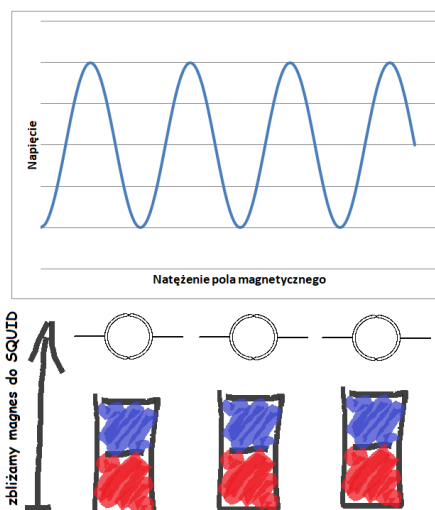
Rysunek 6: SQUID w zewnętrznym polu magnetycznym B_Z - w pętli nadprzewodnika zaczyna krążyć prąd ekranujący I_E - jest to zjawisko wypychania pola magnetycznego z nadprzewodnika.

Działanie czujnika SQUID

Po przybliżeniu tak wielu zjawisk i własności mechaniki kwantowej, przejdźmy do najważniejszego celu tego artykułu – **działania czujnika SQUID**. Wyobraźmy sobie, że **przez czujnik przepuszczamy prąd o natężeniu nieznacznie przekraczającym prąd graniczny dla złącza Josephsona**. Podłączony woltomierz wskaże niewielką wartość napięcia. W tym momencie do czujnika zbliżamy materiał posiadający własne pole magnetyczne (w praktyce do pomiarów używa się specjalnych cewek elektrycznych, transformujących pole próbki. Nie mierzy się bezpośrednio badanego obiektu – więcej w literaturze[1][4]).

Pole to rozchodzi się w przestrzeni, chcąc wniknąć do pętli SQUID. W konsekwencji **pojawia się niewielki prąd ekranujący, zwiększający w jednej z gałęzi całkowite natężenie prądu, a co za tym idzie również opór elektryczny złącza Josephsona oraz mierzone napięcie na woltomierzu**. Gdy jednak obiekt magnetyczny będzie odpowiednio blisko, funkcje falowe par Coopera ulegną modyfikacji, prąd ekranujący zaniknie, a napięcie spadnie do wartości wyjściowej. Dalsze zbliżanie ciała spowoduje ponowne pojawienie się i zanik prądu ekranującego. Odczytując więc wskazania miernika, **zaobserwujemy kolejne maksima i minima napięcia elektrycznego!** Można powiedzieć, że jest to **obraz interferencji dwóch funkcji falowych**. Ponadto możemy stwierdzić, że **im ciało wytwarza większe pole magnetyczne, tym szybciej przy zbliżaniu do czujnika kolejne maksima i minima będą się pojawiać**.

Zjawisko interferencji światła na dwóch szczelinach pozwala na obliczenie długości fali świetlnej na podstawie odległości między kolejnymi prążkami obrazu interferencyjnego. **Podobnie w czujniku SQUID, obserwując częstość pojawiania się kolejnym maksimów napięcia (i robiąc odpowiednie obliczenia) możemy określić natężenie pola magnetycznego wytwarzanego przez badany obiekt**. Jak widzimy, w fizyce stale mamy do czynienia z podobieństwami. Fala świetlna czy funkcja falowa, choć pozornie kompletnie różne, dają się opisać podobnym matematycznie językiem.



Rysunek 7: Zwiększając natężenie pola magnetycznego otaczającego SQUID, powodujemy oscylacje napięcia mierzonego na woltomierzu. Jest to zjawisko podobne do interferencji światła na dwóch szczelinach.

Tvoja kolej

Zwróć uwagę, że czułość mierników pola magnetycznego zbudowanego z czujników SQUID jest znacznie lepsza, niż powszechne zakłócenia od pola ziemskiego oraz sieci 50 Hz – rysunek 1. Zastanów się, jak odgrodzić się od tych zakłóceń? Wskazówkę możesz znaleźć w pozycji 1. ze spisu literaturowego.

Literatura

- [1] Rams M., *Coś niecoś o SQUID-ach*, <https://foton.if.uj.edu.pl/documents/12579485/e462c02f-4346-4089-befa-8a9852845e07>, dostęp: 09.02.2024
- [2] *Superconducting Quantum Interference Devices (SQUIDs)*, https://web.physics.indiana.edu/courses/p451/experiments/SQUID_expt.pdf, dostęp: 16.02.2024
- [3] Peng-Jen Chen, Horng-Tay Jeng, *Ambient-pressure high-temperature superconductivity in stoichiometric hydrogen-free covalent compound BSiC₂*, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ab76ad>, dostęp: 09.02.2024
- [4] Clarke J., *SQUIDS*, <https://www.jstor.org/stable/24942801>, dostęp: 06.02.2024