


Josephsonovi efekti; SQUID

Strujno-naponski
senzor magnetskog
toka



Uvod

- Uz bok najpreciznijih fizikalnih metoda, kakav je na primjer Mossbauerov efekt, svrstala se i metoda poznata kao SQUID.

- Ime je akronim naziva *Superconducting Quantum Interference Device*.

To je zapravo strujno/naponski senzor magnetskog toka.

- granice preciznosti različitih metoda za mjerenje magnetskog toka:
 - pri mjerenju polja indukcijskom zavojnicom s pripadnom elektronikom to je 10^{-5} T.
 - Mjereći, pak, uz pomoć probe s nuklearnom magnetskom rezonancijom, očekujemo preciznost reda veličine 10^{-7} T.
 - Kod SQUID-a ta se granica pomiče ispod 10^{-9} T.

Uvod

- Varijanta metode SQUID s istosmjernim naponom radi na sljedećem principu:

u Josephsonovu spoju pojavljuje se tunel-efekt za prolaz kolektivne supervodičke struje. Spajanjem dvaju takvih izvora supervodičke struje u paralelu, otvara se mogućnost generiranja strujnih interferentnih efekata na makroskopskom nivou. Prikladnom se geometrijom supervodičkog materijala relativna razlika faza dvaju struja može načiniti ovisnom o magnetskom polju koje među strujama prolazi. Dakle, magnetski tok će određivati jačinu interferencijskih efekata dviju makroskopskih struja. To je bit SQUID-a.

- Rezolucija takvoga strujno/naponskog senzora može biti linija od veličine kvanta magnetskog toka što ga ostvaruje samo jedan par sparenih elektrona - *Cooperov par*.

Tunel efekt

Ako se unutar potencijalne barijere, opisane funkcijom potencijala nalazi čestica kinetičke energije manje od visine barijere, prema klasičnoj mehanici ta će čestica zauvijek ostati zarobljena. Međutim, kvantna fizika predviđa mogućnost i da ta čestica izađe izvan potencijalne barijere.

Za tanku, usku barijeru vjerojatnost prolaska čestice mjeri se transmisijskim koeficijentom oblika e^{-Kx} .

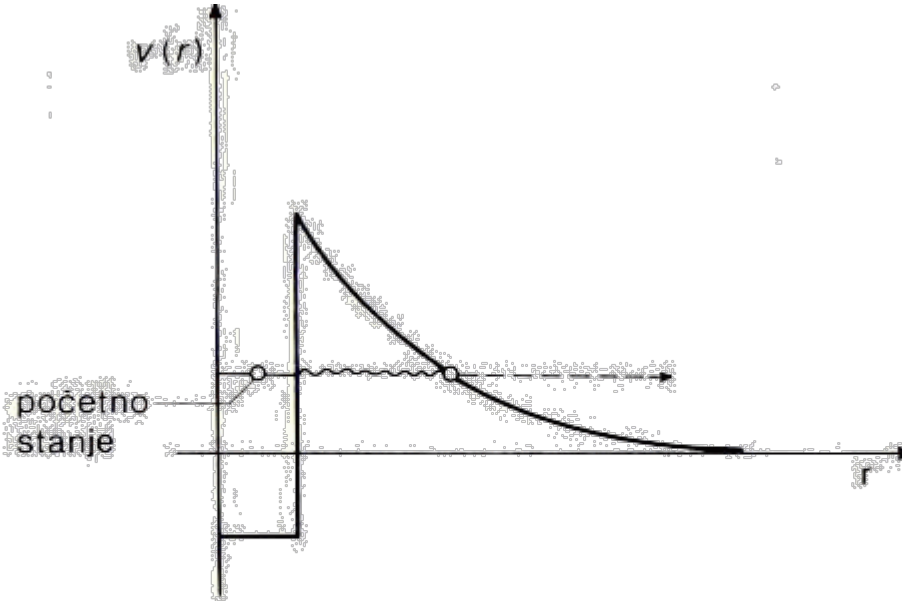
Ovdje je x debljina barijere, a K je funkcija razlike visine barijere i kinetičke energije čestice. Naravno, što više kinetičke energije nedostaje čestici do vrha barijere, njezin prolaz manje je vjerojatan.

Eksperimentalno je potvrđeno da je u kvantnoj mehanici ispravno predviđena mogućnost tuneliranja.

Pojednostavljeno, iz nekih atomskih jezgara pokušavaju izaći α -čestice. Njihove kinetičke energije a i visina potencijala koja ih zarobljava mogu se procijeniti. U α raspadima takvih jezgara koje se doista ostvare, one, dakle, ipak uspijevaju pobjeći.

Zanimljivo je da se jezgre nekih izotopa, formirane u vrijeme stvaranja Zemlje, još uvijek raspadaju tunel-efektom.

Tunel efekt



Slika 14.1. Tunel–efekt. U polje potencijala prikazanog oblika smještena je čestica s energijom većom od visine potencijalne barijere. Kvantna mehanika dopušta čestici da svlada barijeru i pojavi se sa suprotne strane.

Supervodljivo stanje

- Čestice s cjelobrojnim spinom - bozoni - nastoje bili u međusobno identičnom stanju. Takav su primjer fotoni u laserskom snopu. No, za elektrone, dakle, fermione, takva se stanja kolektivne koherencije nisu očekivala.
- No za čvrsto stanje poznata je, međutim, pojava sparenih elektrona ili *Cooperovih parova* čiji je ukupni spin nula. Zbog loga se ti parovi mogu ponašati kao bozoni, dakle mogu tvoriti koherentno kolektivno stanje!

Josephsonov spoj

- Uzmimo da je supravodljivo slanje u područjima 1 i 2 presječeno izolacijskim materijalom. Na slici je predočena i potencijalna barijera. Neka su ψ_1 i ψ_2 amplitude vjerojatnosti nalaženja koherentnog slanja na jednoj i drugoj strani područja.
- Tada su Schrodingerove jednačbe:

$$i\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = U_1 \psi_1 + K \psi_2$$

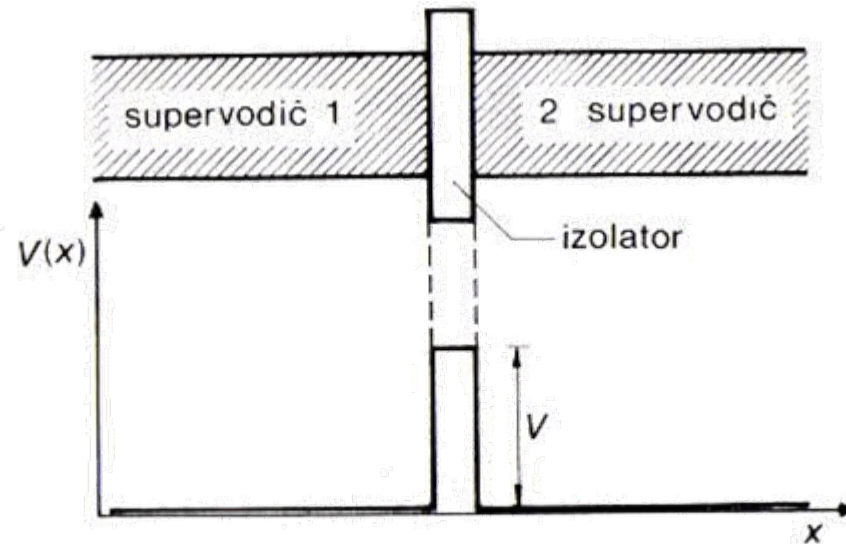
$$i\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = U_2 \psi_2 + K \psi_1$$

Cooperovi parovi

- Za dva elektrona u metalu posredstvom interakcije s rešetkom metala može se pojaviti slabašno privlačenje. Za par elektrona s impulsima k i $-k$, koji se privlače, ponavljanje tih interakcija s rešetkom metala smanjuje ukupnu energiju elektronskog para.
- Stanje takvog para spušta se u energijskoj ljestvici i time se izdvaja od ostalih stanja. Kako je ukupni spin para zapravo spin bozona, u isto stanje ulazi sve veći broj parova. Tako se stvara kolektivno stanje. Ako se na takvo stanje primijeni relativno slabo električno polje, koherencija parova isključit će i međusobne sudare parova i takvo će kolektivno stanje formirati kolektivnu struju. U takvim uvjetima nema omskog otpora.

Josephsonov spoj

- član $K\psi_1$ ($K\psi_2$) predstavlja prodor supervodiča iz područja 1(2) pomnoženog s penetracijskim koeficijentom K .



Slika 14.2. Josephsonov spoj. Crtež je shematski prikaz supervodiča prekinutog izolatorom. Donji crtež je odgovarajuća slika potencijala.

K-penetracijski koeficijent

$$(14.1) i\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = U_1 \psi_1 + K \psi_2$$

$$(14.2) i\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = U_2 \psi_2 + K \psi_1$$

$$U_1 - U_2 = eV \quad \ll \text{razlika potencijala}$$

$$(14.3) \hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = e \frac{V}{2} \psi_1 + K \psi_2$$

$$(14.3) i\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = -e \frac{V}{2} \psi_2 + K \psi_1$$

substitucija

$$(14.5) \psi_1 = \sqrt{\rho} e^{i\theta_1}$$

$$(14.6) \psi_2 = \sqrt{\rho} e^{i\theta_2}$$

Deriviranjem dobijamo sljedeće:

ρ_i modul
 θ_i faza
valne funkcije

$$(14.7) i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \left[\sqrt{\rho_i} e^{i\theta_i} \right] = i\hbar \left[\frac{1}{\sqrt{\rho_i}} (\cos \theta_i + i \sin \theta_i) \frac{\dot{\rho}_i}{2} + \sqrt{\rho_i} (-\sin \theta_i + i \cos \theta_i) \dot{\theta}_i \right]$$

Uvrštanaje i separacija realnih i imaginarnih dijelova:

$$(14.8) \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\rho_1}} \cos \theta_1 \dot{\rho}_1 - \sqrt{\rho_1} \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 = \frac{eV}{2\hbar} \sqrt{\rho_1} \sin \theta_1 + \frac{K}{\hbar} \sqrt{\rho_2} \sin \theta_2$$

$$(14.9) \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\rho_2}} \cos \theta_2 \dot{\rho}_2 - \sqrt{\rho_2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 = \frac{-eV}{2\hbar} \sqrt{\rho_2} \sin \theta_2 + \frac{K}{\hbar} \sqrt{\rho_1} \sin \theta_1$$

$$(14.10) \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\rho_1}} \sin \theta_1 \dot{\rho}_1 + \sqrt{\rho_1} \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 = \frac{-eV}{2\hbar} \sqrt{\rho_1} \cos \theta_1 - \frac{K}{\hbar} \sqrt{\rho_2} \cos \theta_2$$

$$(14.11) \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\rho_2}} \sin \theta_2 \dot{\rho}_2 + \sqrt{\rho_2} \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 = \frac{eV}{2\hbar} \sqrt{\rho_2} \cos \theta_2 - \frac{K}{\hbar} \sqrt{\rho_1} \cos \theta_1$$

Preuređivanje daje:

$$(14.8) \otimes 2\sqrt{\rho_1} \cos \theta_1 \oplus (14.10) \otimes 2\sqrt{\rho_1} \sin \theta_1$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\rho_1}} \cos \theta_1 \dot{\rho}_1 - \sqrt{\rho_1} \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 = \frac{eV}{2\hbar} \sqrt{\rho_1} \cos \theta_1 + \frac{K}{\hbar} \sqrt{\rho_2} \sin \theta_2 \otimes 2\sqrt{\rho_1} \cos \theta_1$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\rho_1}} \sin \theta_1 \dot{\rho}_1 + \sqrt{\rho_1} \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 = \frac{-eV}{2\hbar} \sqrt{\rho_1} \cos \theta_1 - \frac{K}{\hbar} \sqrt{\rho_2} \sin \theta_2 \otimes 2\sqrt{\rho_1} \sin \theta_1$$

$$(14.12) \dot{\rho}_1 = -\dot{\rho}_2 = \frac{2}{\hbar} K \sqrt{\rho_1 \rho_2} \sin \delta$$

$$\vartheta_2 - \vartheta_1 = \delta$$

<gdje je

Slično

$$(14.12) \dot{\rho}_1 = -\dot{\rho}_2 = \frac{2}{\hbar} K \sqrt{\rho_1 \rho_2} \sin \delta$$

$$\theta_2 - \theta_1 = \delta$$

$$(14.13) \dot{\theta}_1 = \frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \cos \delta - \frac{eV}{2\hbar}$$

$$(14.14) \dot{\theta}_2 = \frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \cos \delta + \frac{eV}{2\hbar}$$

Struja je:

$$\dot{\rho}_1 = -\dot{\rho}_2 = J$$

$$(14.15) J = \frac{2}{\hbar} K \sqrt{\rho_1 \rho_2} \sin \delta$$

$$(14.16) J_0 = \frac{2}{\hbar} K \sqrt{\rho_1 \rho_2}$$

$$(14.17) \dot{\delta} = \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1 = \frac{eV}{\hbar}$$

$$(14.13i) 14.14 > 14.18) \delta(t) = \delta_0 + \frac{e}{\hbar} \int_0^t V(\tau) d\tau$$

Fizikalna interpretacija

- Za fizikalnu interpretaciju najpogodnije su relacije (14.15) i (14.18) Josephsonovim spojem teče kolektivna struja sparenih elektrona kao posljedica nastalih kolektivnih stanja elektronskih parova s obje strane barijere (moduli ρ_1 i ρ_2 su različiti od nule) i zbog razlika faza δ među njima.

Iz relacije (14.18) vidimo da postoje dva načina uspostave razlike faza.

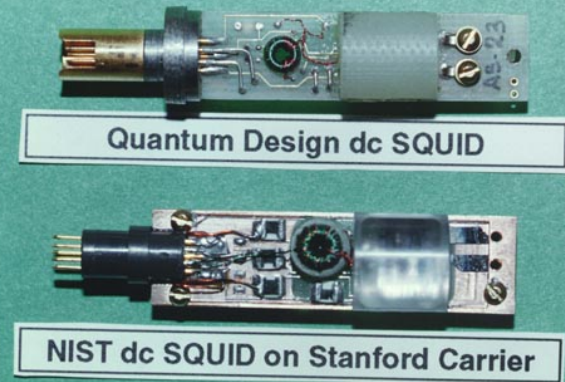
Ako na Josephsonov spoj nije priključen napon, postoji početna faza δ_0 koja daje struju. To je tzv. **istosmjerni Josephsonov efekt**, koji ćemo kasnije primijeniti. Ako bi $V(t)$ bio samo konstantni potencijal, nastalo bi sinusno titranje vrlo visoke frekvencije:

$$\nu = 2eV/h$$

koja se u praksi teško registrira.

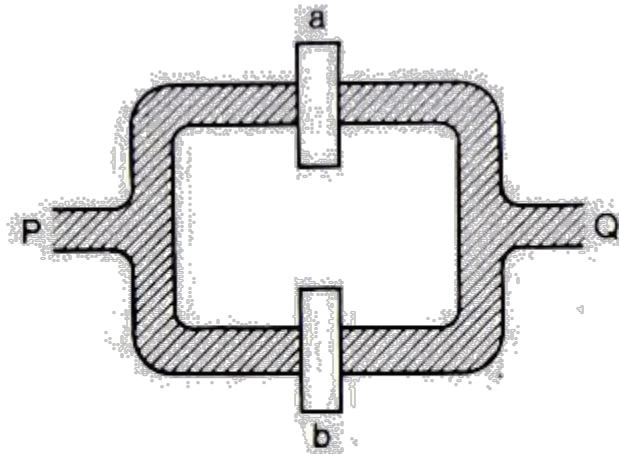
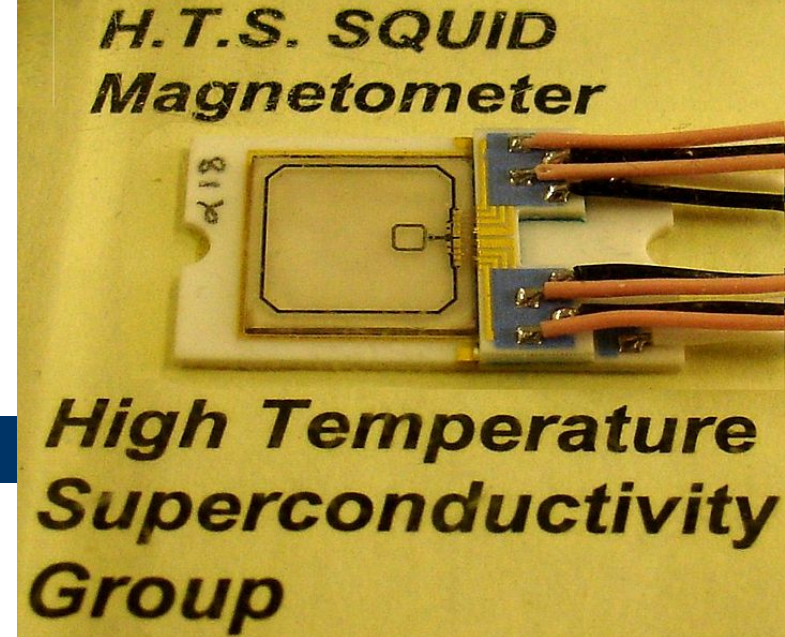
Ako se izmjenična supervodljiva struja frekventno modulira vanjskim radiofrekventnim poljem, nastaju skokovite promjene u struji. To je tzv. **izmjenični Josephsonov efekt**.

Dva Josephsonova spoja u paraleli, SQUID



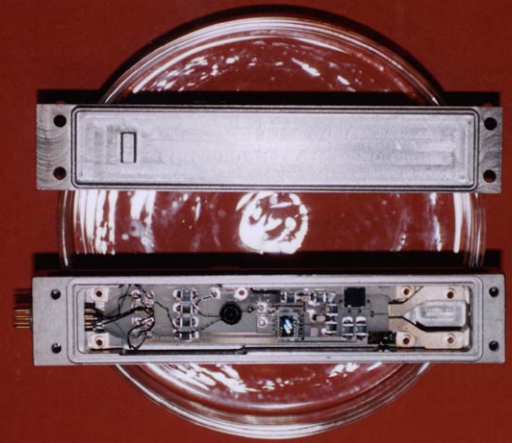
- **Ideja:** Ako imamo dva Josephsonova spoja istosmjernog tipa u paraleli, imamo dva makroskopska kvantnomehanička izvora koji mogu interferirati. Pronađeno je rješenje da se relativna faza može kontrolirati promjenama magnetskog toka kroz petlju na kojoj su ta dva Josephsonova spoja. Očito će se jakost magnetskog polja moći mjeriti na temelju tog interferentnog fenomena. Ukupna struja formira se kao zbroj struja kroz dio sa spojem **a** i spojem **b**

Ideja SQUID-a



Slika 14.3. Ideja SQUID-a. Dva su Josephsonova spoja u paraleli. Za struju od P prema Q relativna faza dvaju spojeva upravljana je magnetskim tokom kroz petlju unutar supervodica.

History and design



- The DC SQUID was invented in 1964 by Arnold Silver, Robert Jaklevic, John Lambe, and James Mercereau of Ford Research Labs after B. D. Josephson postulated the Josephson effect in 1962 and the first Josephson Junction was made by John Rowell and Philip Anderson at Bell Labs in 1963. The RF SQUID was invented in 1965 by James Edward Zimmerman and Arnold Silver at Ford.
- There are two main types of SQUID: DC and RF. RF SQUIDs can work with only one Josephson junction, which might make them cheaper to produce, but are less sensitive.
- The traditional superconducting materials for SQUIDs are pure niobium or a lead alloy with 10% gold or indium, as pure lead is unstable when its temperature is repeatedly changed. To maintain superconductivity, the entire device needs to operate within a few degrees of absolute zero, cooled with liquid helium.
- "High temperature" SQUID sensors are more recent; they are made of high temperature superconductors, particularly YBCO, and are cooled by liquid nitrogen which is cheaper and more easily handled than liquid helium. They are less sensitive than conventional "low temperature" SQUIDs but good enough for many applications.

SQUID: Fazna razlika

$$(14.19) \Delta_{P \rightarrow Q}^{\text{gornji}} = \delta_a + \frac{2e}{\hbar} \int_{\text{gornja}} \vec{A} d\vec{s}$$

$$(14.20) \Delta_{P \rightarrow Q}^{\text{donji}} = \delta_b + \frac{2e}{\hbar} \int_{\text{donja}} \vec{A} d\vec{s}$$

$$(14.21) \delta_b - \delta_a = \frac{2e}{\hbar} \oint \vec{A} d\vec{s} = \frac{2e}{\hbar} \Phi$$

$$(14.22) \delta_a = \delta_o + \frac{e}{\hbar} \Phi$$

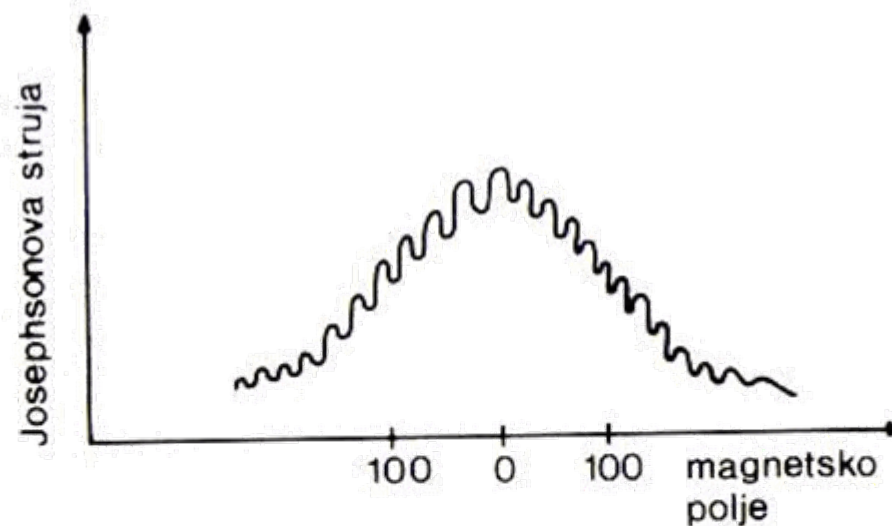
$$(14.22) \delta_b = \delta_o - \frac{e}{\hbar} \Phi$$

$$(14.23) J_{\text{ukupno}} = J_0 \left[\sin \left(\delta_o + \frac{e}{\hbar} \Phi \right) + \sin \left(\delta_o - \frac{e}{\hbar} \Phi \right) \right]$$

$$(14.24) J_{\text{ukupno}} = J_0 \sin \delta_o \cos \frac{e}{\hbar} \Phi$$

- Očito će struja kroz petlju s dva paralelna Josephsonova spoja na interferentni način ovisiti o toku. Red veličine osjetljivosti o toku je h/e .
- Uočljive su brze oscilacije Josephsonove struje kao funkcije magnetskog polja. Oscilacije vode svoje porijeklo iz izraza (14.24) i promjena u toku magnetskog polja. Praćenjem tih oscilacija možemo pratiti bilo jakost magnetskog polja bilo pripadnog toka.

Prvi su rezultati



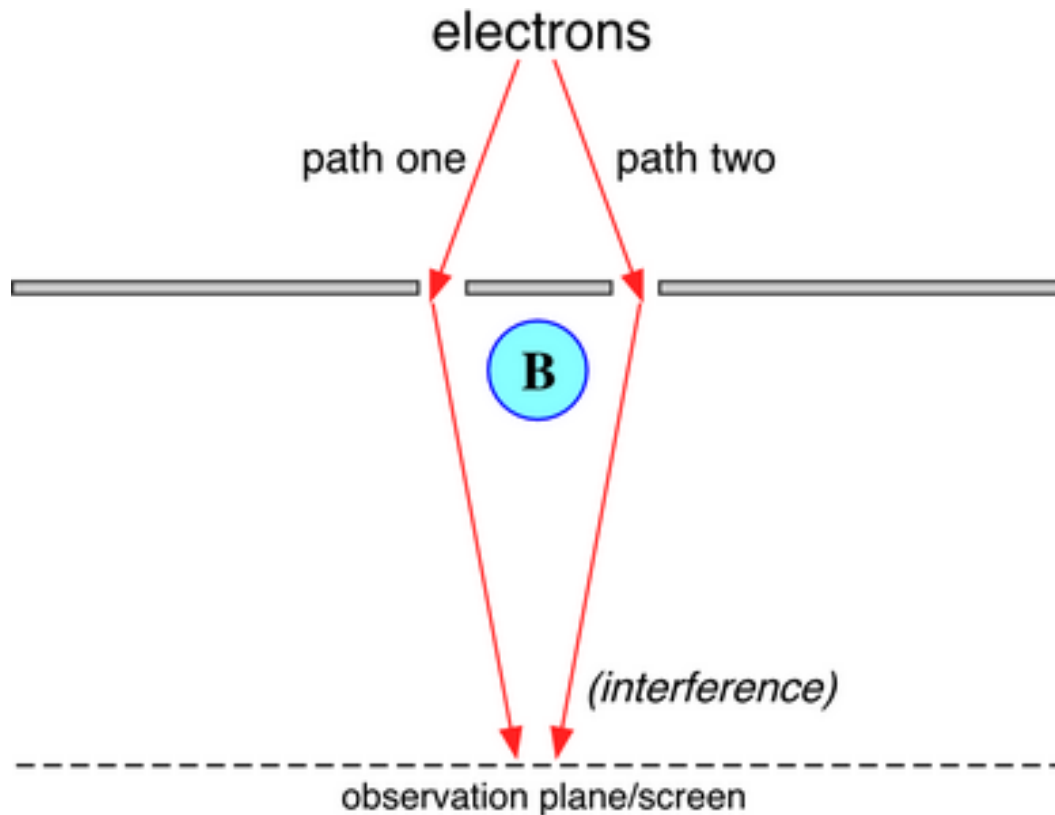
Slika 14.4. Ovisnost struje o magnetskom polju u SQUID–konfiguraciji.

Uočljive su brze oscilacije Josephsonove struje kao funkcije magnetskog polja. Oscilacije vode svoje porijeklo iz izraza (14.24) i promjena u toku magnetskog polja. Praćenjem tih oscilacija možemo pratiti bilo jakost magnetskog polja bilo pripadnog toka.

Primjene

- U elektronici i fizikalnim mjerenjima golemo je područje primjene određivanja magnetskih svojstava. Spomenimo dva specifična primjera jer oni predstavljaju vrlo nestandardnu i neuobičajenu primjenu. U laboratorijima u Los Alamosu obavljaju se mjerenja magnetskih polja i stvaraju se mape polja ljudskog mozga
- Za specijaliste u istraživanju fundamentalnih načela kvantne mehanike SQUID-princip realiziran na mikroskali realizacija je Bohm-Aharonova eksperimenta. U tom se idealnom eksperimentu trebalo pokazati da se promjenama magnetskog toka izvan područja u kojima je elektronska funkcija jaka može mijenjati faza interferirajućih valnih funkcija za elektrone. Pokusi na SQUID principu ponovno su potvrdili vrijednost kvantne mehanike.

Bohm-Aharonov experiment



Applications

- The Josephson effect has found wide usage, for example in the following areas:
- SQUIDs, or superconducting quantum interference devices, are very sensitive magnetometers that operate via the Josephson effect. They are widely used in science and engineering.
- In precision metrology, the Josephson effect provides an exactly reproducible conversion between frequency and voltage. Since the frequency is already defined precisely and practically by the caesium standard, the Josephson effect is used, for most practical purposes, to give the definition of a volt (although, as of July 2007, this is not the official BIPM definition)
- Single-electron transistors are often constructed of superconducting materials, allowing use to be made of the Josephson effect to achieve novel effects. The resulting device is called a "superconducting single-electron transistor".
- Josephson junctions are integral in Superconducting quantum computing as qubits such as in a Flux qubit or others schemes where the phase and charge act as the Conjugate variables.
- Superconducting Tunnel Junction Detectors (STJs) may become a viable replacement for CCDs (charge-coupled devices) for use in astronomy and astrophysics in a few years. These devices are effective across a wide spectrum from ultraviolet to infrared, and also in x-rays. The technology has been tried out on the William Herschel Telescope

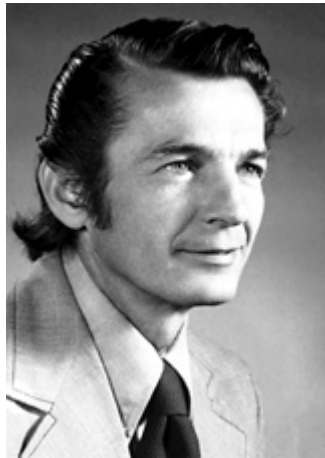
The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki



"for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"

Ivar Giaever



Brian David Josephson



"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects"

Science and religion - Paranormal

- He has participated in science and religion discussions. Regarding conflict, he stated "I don't see a conflict. There are conflicts between the views of many scientists on religion, but I think there need be no ultimate conflict. Science may be capable of extension in a way that is compatible with the tenets of religion."
- Josephson is one of the more well-known scientists who say that parapsychological phenomena may be real, and is also interested in the possibility that Eastern mysticism may have relevance to scientific understanding.[3] He has said that one of his guiding principles has been *nullius in verba* (take nobody's word), saying that "if scientists as a whole denounce an idea, this should not necessarily be taken as proof that the said idea is absurd; rather, one should examine carefully the alleged grounds for such opinions and judge how well these stand up to detailed scrutiny."