



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Chimiche

Tesi di Laurea in Scienza dei Materiali

Effetto Tunneling Quantistico Nei Materiali Superconduttori

Studente:

Samuele Santamaura

Matricola:2042854

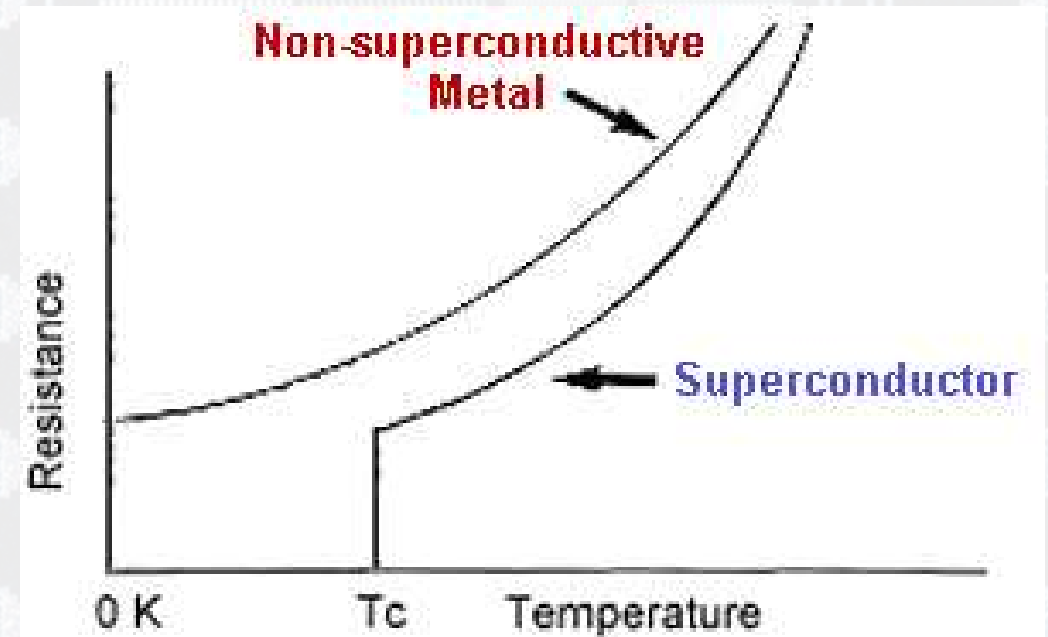
Relatore:

Prof. Luca Salasnich



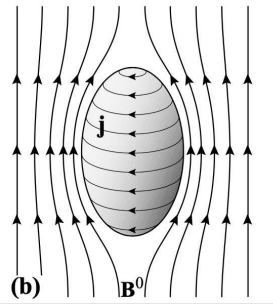


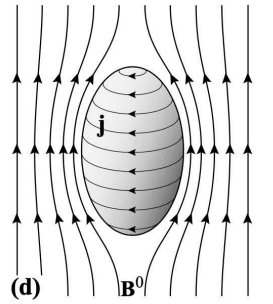
Anno accademico 2023-2024

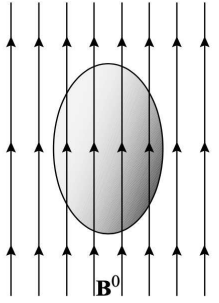
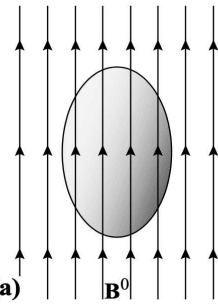
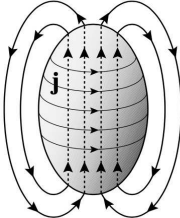
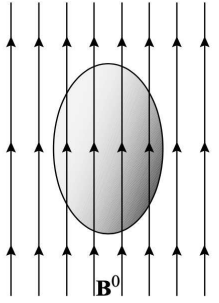
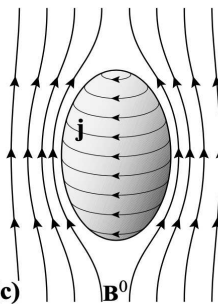

La Superconduttività

La superconduttività è stata scoperta nel 1911 da Heike Kamerlingh Onnes. Onnes osservò che nel mercurio (Hg) al di sotto di $T_c = 4.16$ Kelvin **la resistenza elettrica diventa nulla** (Nobel 1913).



Effetto Meissner

	$B^0 = 0$ $T > T_c$	$B^0 = 0$ $T < T_c$	$B^0 \neq 0$ $T < T_c$
normal/perfect conductor transition		(a) 	(b) 
normal/superconductor transition		(c) 	(d) 

	$B^0 \neq 0$ $T > T_c$	$B^0 \neq 0$ $T < T_c$	$B^0 = 0$ $T < T_c$
normal/perfect conductor transition		(a) 	(b) 
normal/superconductor transition		(c) 	(d) 



Le Equazioni Di London

$$\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} = \frac{n_s e^2}{m} \mathbf{E} = \frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \mathbf{E}$$

1° equazione di London

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}}$$

Distanza di penetrazione

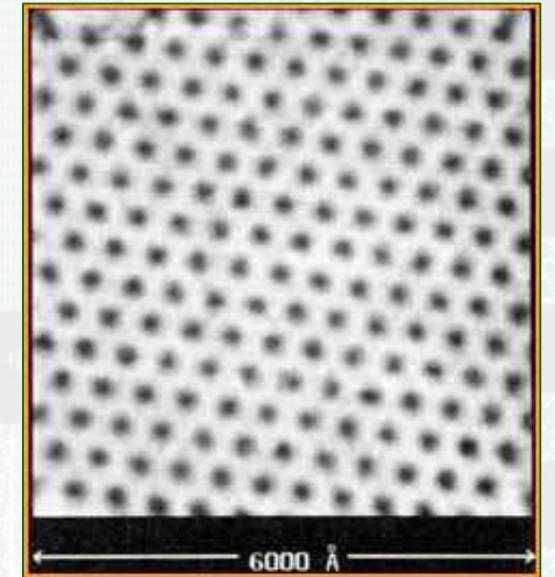
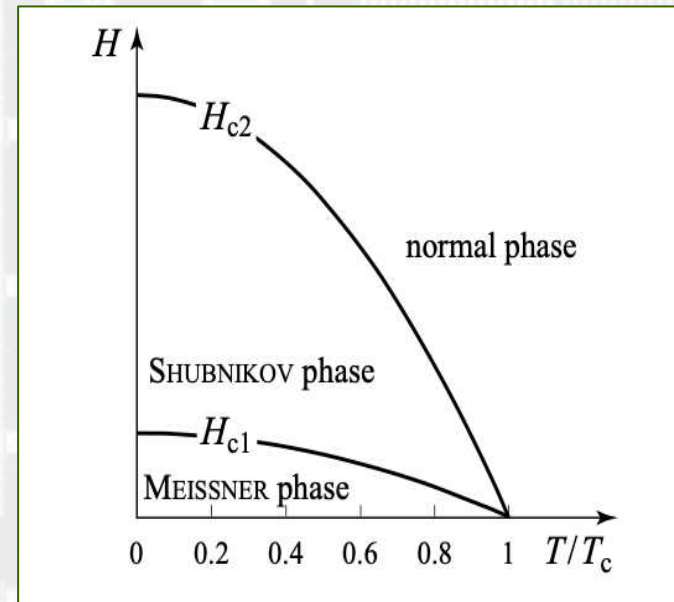
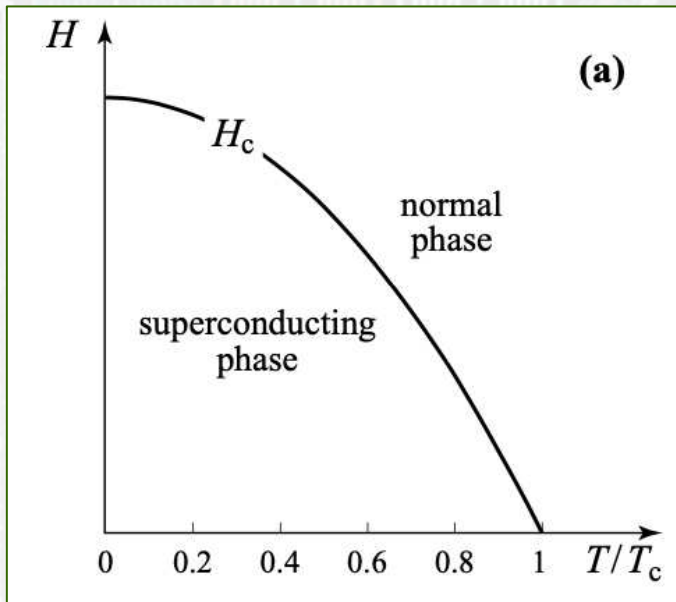
$$\mu_0 \nabla \times \mathbf{j} = -\frac{1}{\lambda_L^2} \mathbf{B}$$

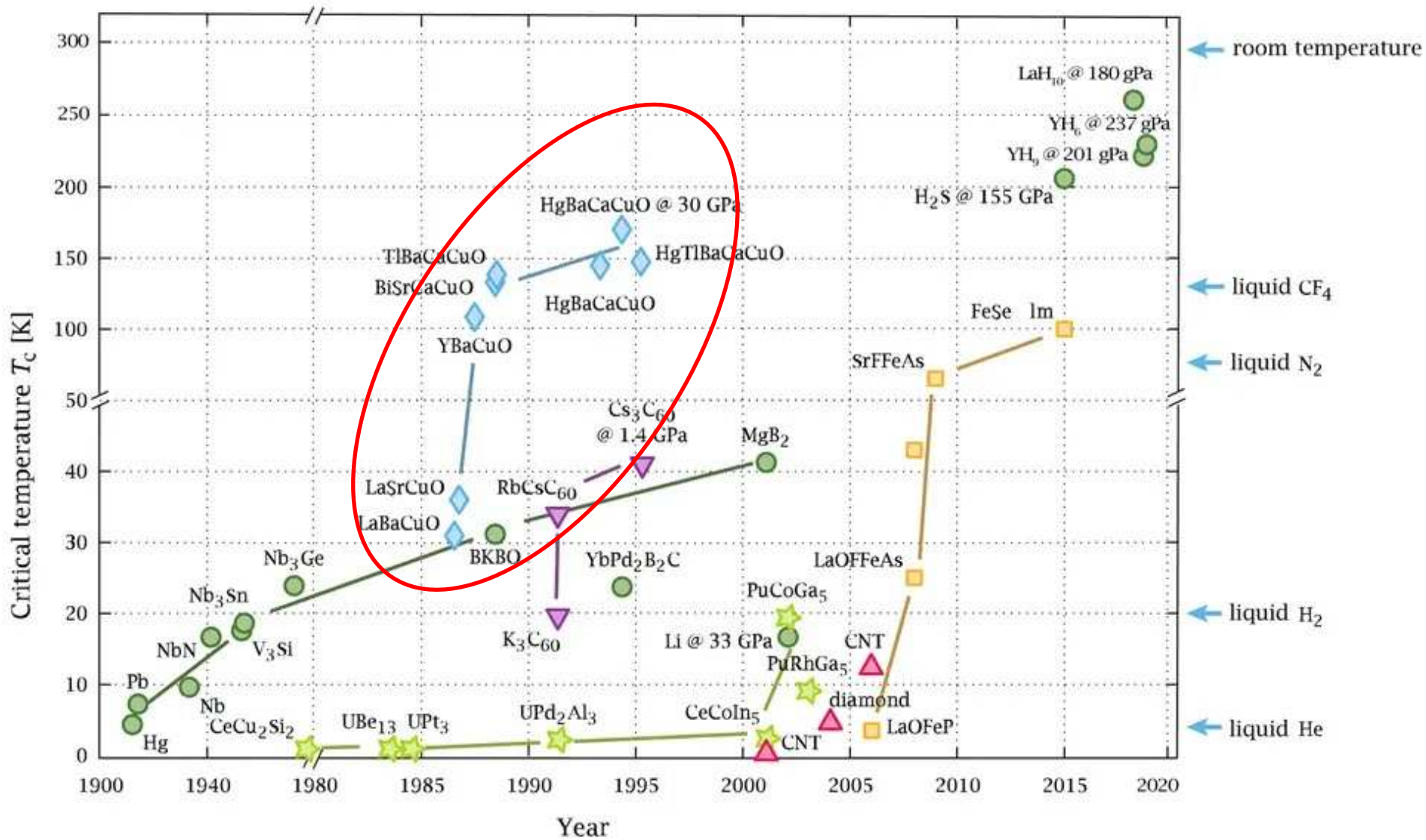
2° equazione di London

$$B_z = B_0 e^{-\frac{u}{\lambda_L}}$$

$$J_y = \frac{B_0}{\mu_0 \lambda_L} e^{-\frac{u}{\lambda_L}}$$

Superconduttori di Tipo I e Tipo II







Teoria BCS

La teoria prende il nome da tre fisici **John Bardeen, Leonard Cooper e Robert Schrieffer** formulata nel 1957 ed è basata sulla **meccanica quantistica**.

In un superconduttore gli elettroni condensano in uno stato quantistico di **energia minima** e si muovono collettivamente e coerentemente senza incontrare resistenza in coppie (**coppie di Cooper**)

Trova un riscontro sperimentale su diverse anomalie:

- **Band gap** dei superconduttori
- **Effetto dell'isotopo** nella temperatura critica
- Incremento esponenziale nella **capacità termica**



Coppie di Cooper

Gli elettroni sono delle particelle **fermioniche** che possiedono uno spin semi-intero ($s = \pm \frac{1}{2}$).

Per il **principio di esclusione di Pauli** due fermioni non possono occupare lo stesso stato quantico, a meno che non abbiano spin inverso. Oltretutto, le interazioni coulombiane tra lo stesso segno negativo creano repulsioni.

Come riescono ad accoppiarsi?

Gli elettroni si accoppiano tramite vibrazioni del reticolo cristallino: **i fononi**

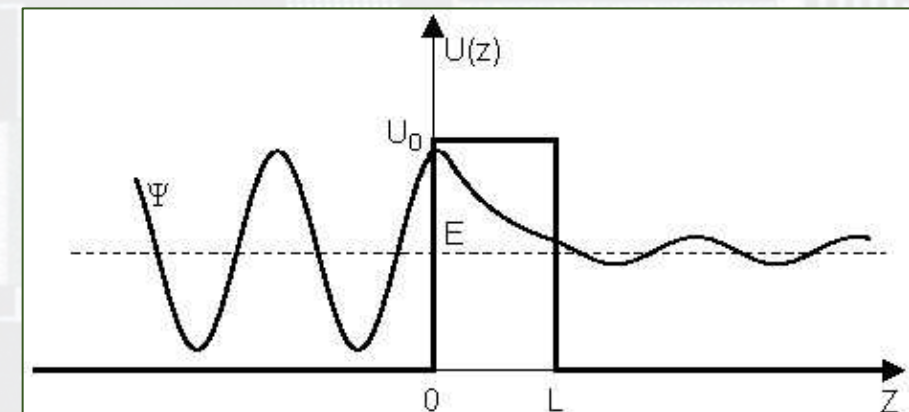
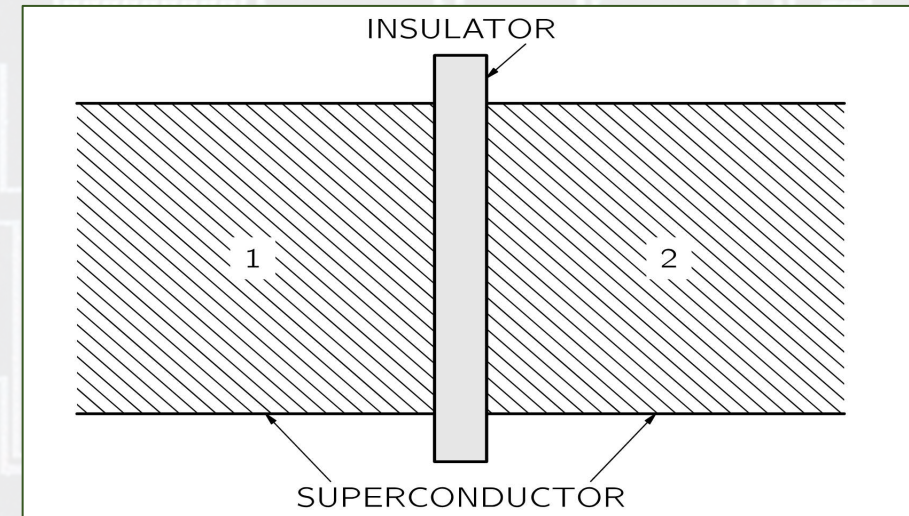
Un elettrone in moto in un conduttore attrae le cariche positive circostanti del reticolo cristallino. Questa deformazione causa il moto di un altro elettrone, di spin opposto, nella regione in cui vi è una maggiore densità di cariche positive. Di conseguenza i due elettroni sono correlati.

$$\phi_p(\mathbf{r}, t) = \sqrt{n_p(\mathbf{r}, t)} e^{i\theta(\mathbf{r}, t)}$$

Giunzione di Josephson

Le giunzioni Josephson sono elementi di un circuito quantomeccanico, realizzati interponendo tra due elettrodi superconduttori uno strato di materiale non superconduttore (Es.: metallo, isolante, etc.).

Le coppie di Cooper si muovono nei superconduttori 1 e 2. Lo strato di materiale non superconduttore costituisce una barriera che si oppone al passaggio delle particelle (Barriera di potenziale).



Effetto Josephson

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

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

$$i\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = +\frac{qV}{2} \psi_1 + K \psi_2$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = -\frac{qV}{2} \psi_2 + K \psi_1$$

$$\psi_1 = \sqrt{\rho_1} e^{i\theta_1}$$

$$\psi_2 = \sqrt{\rho_2} e^{i\theta_2}$$

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \cos \delta - \frac{qV}{2\hbar}$$

$$\dot{\theta}_2 = -\frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \cos \delta + \frac{qV}{2\hbar}$$

$$\dot{\rho}_1 = +\frac{2}{\hbar} K \sqrt{\rho_2 \rho_1} \sin \delta$$

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

$$\delta(t) = \delta_0 + \frac{q}{\hbar} \int V(t) dt$$

$$J = J_0 \sin \delta$$



$$\delta(t) = \delta_0 + \frac{q}{\hbar} \int_0^t V(t) dt$$

Effetto D.C.

$$V(t) = 0$$

**La corrente è
costante**

$$J = J_0 \sin(\delta)$$



Effetto A.C.

Potenziale costante
 $V(t) = V_0$

$$J = J_0 \sin\left(\delta_0 + \frac{q}{\hbar} V_0 t\right)$$

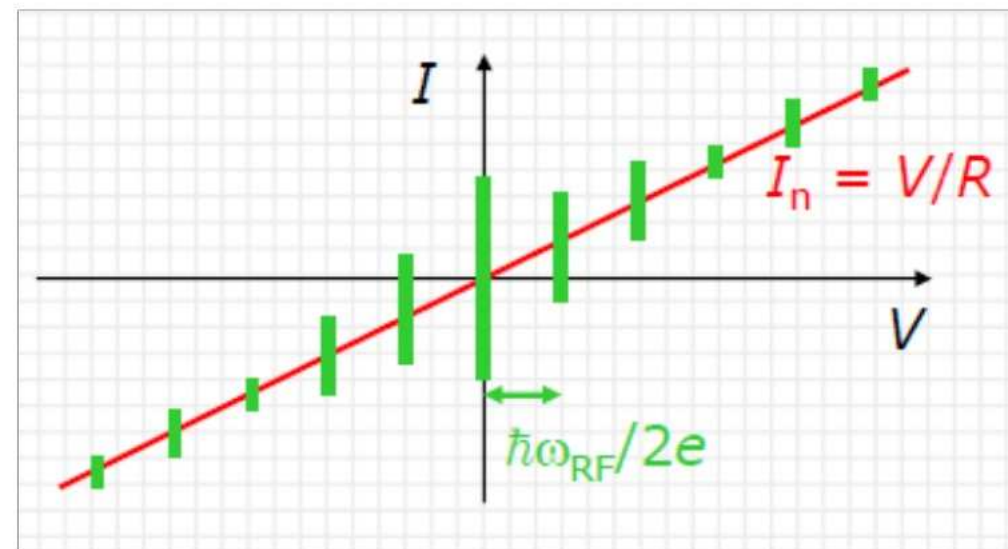
Il comportamento di una giunzione Josephson è totalmente anomala rispetto ai normali conduttori ohmici dove in assenza di potenziale applicato non si ha movimento di elettroni e se si applica un potenziale costante segue la formula di Ohm $V_0 = R \cdot J$ dove R è la resistenza elettrica

Effetto di risonanza

$$V = V_0 + v \cos \omega t$$

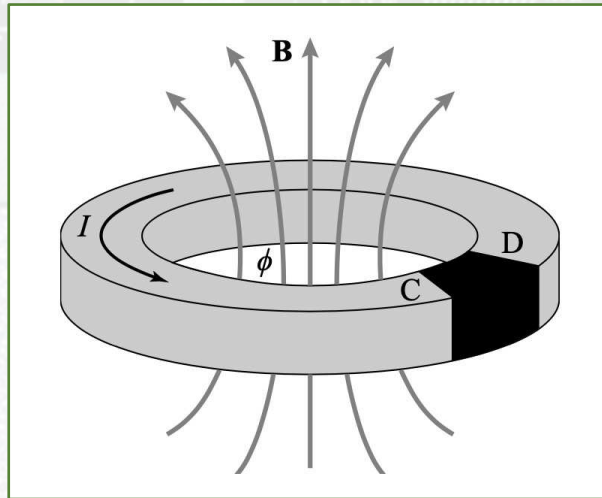
$$I = I_s + \frac{V_0}{R} = I_c \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k J_k \left(\frac{2eV_1}{\hbar\omega} \right) \sin(\phi_0 + \frac{2e}{\hbar} V_0 t - k\omega t) + \frac{V_0}{R}$$

$$V_0 = \frac{k\hbar\omega}{2e}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Applicazioni

SQUID



$$I = I_c \sin(2\pi s - \Theta^{mag})$$

Potenti Elettromagneti





Grazie mille per l'attenzione

E un grazie particolare al prof. Luca Salasnich



INDICE BIBLIOGRAFICO

- *The Schrödinger Equation in a Classical Context: A Seminar on Superconductivity, Feynmann*
- *Superconductivity An introduction, Philippe Mangin Rémi Kahn*
- *JOSEPHSON CURRENTS IN SUPERCONDUCTING TUNNELING: THE EFFECT OF MICROWAVES AND OTHER OBSERVATIONS Sidney Shapiro Arthur D. Little, Inc. , Cambridge, Massachusetts {Received 13 June 1963}*