
Faszination Supraleitung

Florian Gebhard



ARBEITSGRUPPE VIELTEILCHENTHEORIE
FACHBEREICH PHYSIK
PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee

1962

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990
- Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
 - Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
 - Von Wasserburg nach München 1981
 - Von München nach Aachen 1987
 - Von Aachen nach Karlsruhe 1990
 - Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990
 - Von New Jersey nach Marburg 1992
- halbjähriger Forschungsaufenthalt in Grenoble 1993/1994

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990
- Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990
- Von New Jersey nach Marburg 1992
halbjähriger Forschungsaufenthalt in Grenoble 1993/1994
- Von Marburg nach Grenoble, Frankreich 1995

Von Wasserburg nach Marburg

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990
- Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990
- Von New Jersey nach Marburg 1992
halbjähriger Forschungsaufenthalt in Grenoble 1993/1994
- Von Marburg nach Grenoble, Frankreich 1995
- Von Grenoble nach Marburg 1998
Professur für Theoretische Physik

Gliederung

Gliederung

I. Grundlegende Experimente

Gliederung

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern

Gliederung

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien

Gliederung

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker

Gliederung

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden

Gliederung

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden
- VI. Stürmische Fortschritte

Gliederung

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden
- VI. Stürmische Fortschritte
- VII. Zusammenfassung

Gliederung

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden
- VI. Stürmische Fortschritte
- VII. Zusammenfassung
- VIII. Philosophisches

I Grundlegende Experimente

I Grundlegende Experimente

1. Die Entdeckung der Supraleitung

I Grundlegende Experimente

1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert

I Grundlegende Experimente

1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert
- Die Verflüssigung von H und He gelang Heike Kammerlingh-Onnes 1911 (Nobel-Preis 1913)

I Grundlegende Experimente

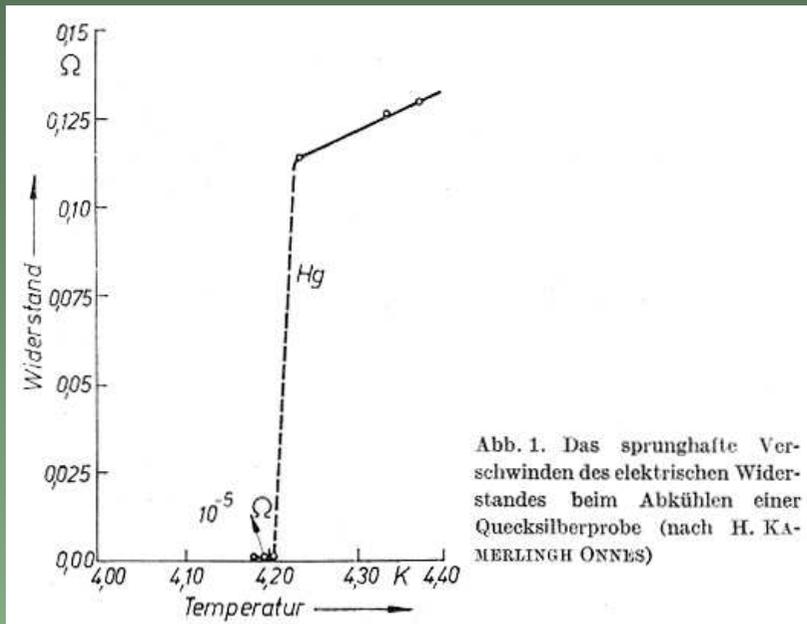
1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert
- Die Verflüssigung von H und He gelang Heike Kammerlingh-Onnes 1911 (Nobel-Preis 1913)
- Überraschung: der elektrische Widerstand von Quecksilber verschwindet völlig unterhalb von $4 \text{ K} = -269^\circ\text{C}$

I Grundlegende Experimente

1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert
- Die Verflüssigung von H und He gelang Heike Kammerlingh-Onnes 1911 (Nobel-Preis 1913)
- Überraschung: der elektrische Widerstand von Quecksilber verschwindet völlig unterhalb von $4\text{ K} = -269^\circ\text{C}$



I Grundlegende Experimente

I Grundlegende Experimente

2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus

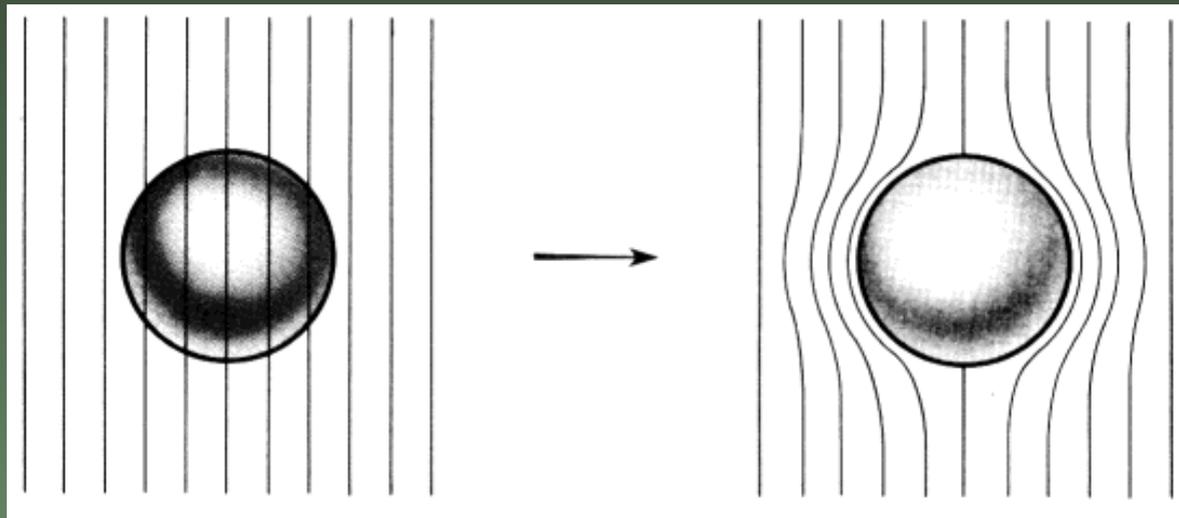
I Grundlegende Experimente

2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus
 - Ein Magnetfeld wird aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt

I Grundlegende Experimente

2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus

- Ein Magnetfeld wird aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt

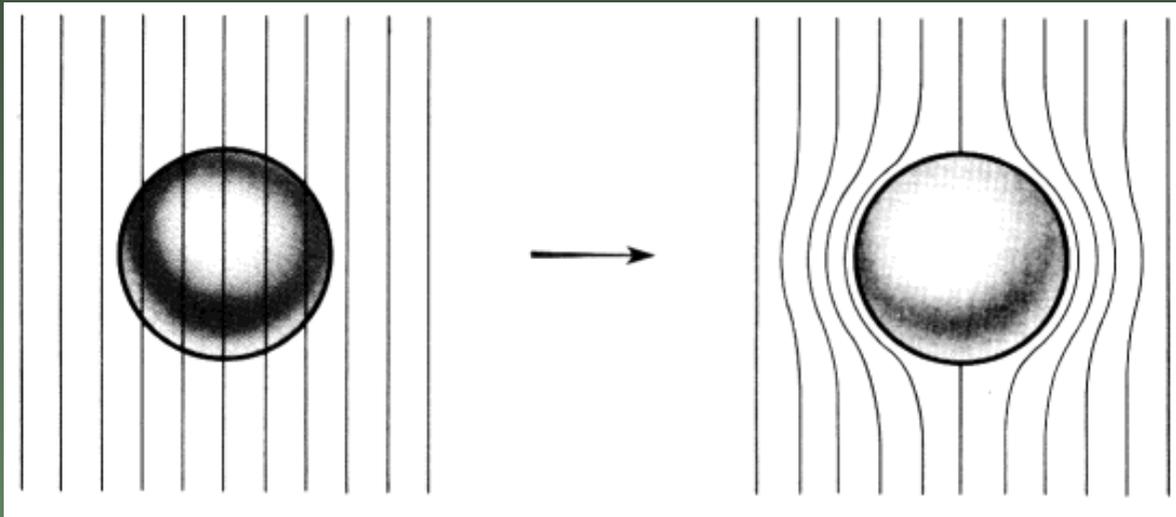


- **Abb. 2.** Meissner Effekt einer supraleitenden Kugel im Magnetfeld

I Grundlegende Experimente

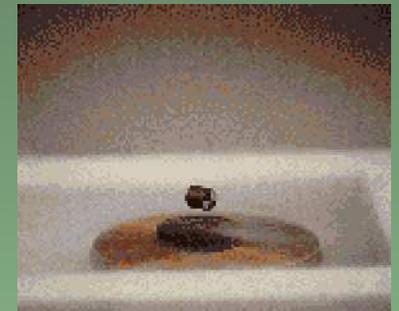
2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus

- Ein Magnetfeld wird aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt



- **Abb. 2.** Meissner Effekt einer supraleitenden Kugel im Magnetfeld

- Schwebender Magnet (Meissner Effekt)



I Grundlegende Experimente

I Grundlegende Experimente

Mein besonderer Dank gilt

Privatdozent Dr. Rudi Hackl
Walter-Meissner-Institut (WMI) der
Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Garching

für die experimentelle Ausrüstung!

I Grundlegende Experimente

Mein besonderer Dank gilt

Privatdozent Dr. Rudi Hackl
Walter-Meissner-Institut (WMI) der
Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Garching

für die experimentelle Ausrüstung!

Am WMI kann jedermann noch weitere interessante Experimente zu
Supraleitung und Suprafluidität besichtigen.

I Grundlegende Experimente

Mein besonderer Dank gilt

Privatdozent Dr. Rudi Hackl
Walter-Meissner-Institut (WMI) der
Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Garching

für die experimentelle Ausrüstung!

Am WMI kann jedermann noch weitere interessante Experimente zu Supraleitung und Suprafluidität besichtigen.

Ich danke auch Dipl.-Chem. Martin Paech für sein Seiten-Layout und seine Unterstützung bei der Erstellung der Folien.

II Typen von Supraleitern

II Typen von Supraleitern

1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter

II Typen von Supraleitern

1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter
 - Ein zu starkes Magnetfeld zerstört die Supraleitung

II Typen von Supraleitern

1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter

- Ein zu starkes Magnetfeld zerstört die Supraleitung

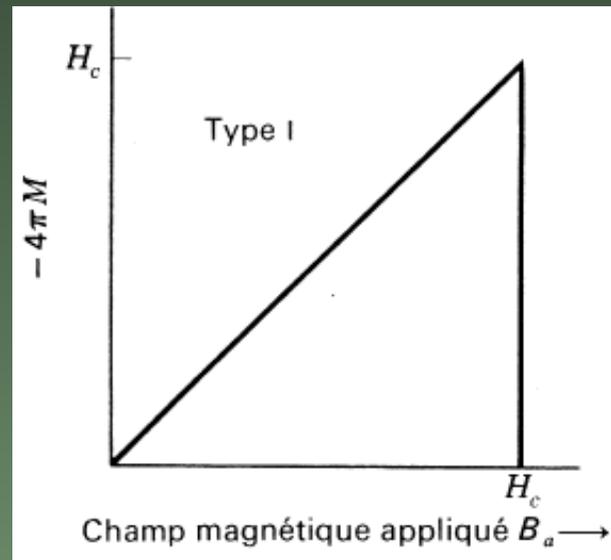


Abb. 4. Magnetisierung als Funktion des angelegten Magnetfelds in einem massiven Supraleiter vom Type I.
Oberhalb des kritischen Feldes ist die Probe normalleitend.

II Typen von Supraleitern

1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter

- Ein zu starkes Magnetfeld zerstört die Supraleitung

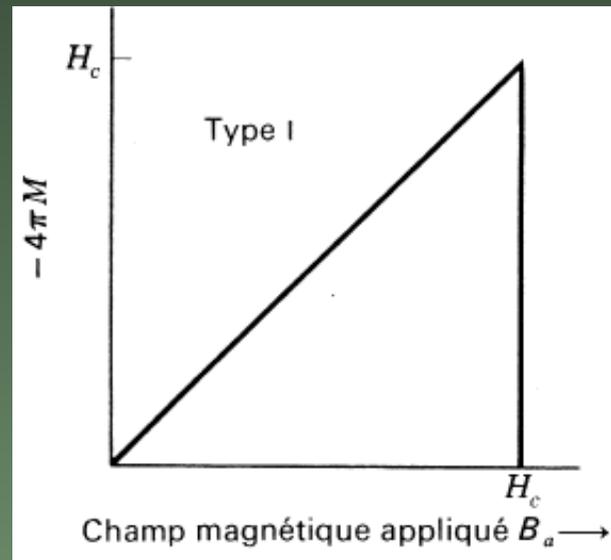


Abb. 4. Magnetisierung als Funktion des angelegten Magnetfelds in einem massiven Supraleiter vom Type I.
Oberhalb des kritischen Feldes ist die Probe normalleitend.

- Kritische Felder H_c sind uninteressant klein, um daraus supraleitende Magnete oder elektrische Kabel zu bauen

II Typen von Supraleitern

II Typen von Supraleitern

2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

II Typen von Supraleitern

2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

- Der Klügere gibt nach: oberhalb eines kritischen Magnetfelds $H_{c,1}$ dringt dieses teilweise ein, ohne die Supraleitung zu zerstören.

II Typen von Supraleitern

2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

- Der Klügere gibt nach: oberhalb eines kritischen Magnetfelds $H_{c,1}$ dringt dieses teilweise ein, ohne die Supraleitung zu zerstören.
- Dies geschieht erst bei $H_{c,2}$.

II Typen von Supraleitern

2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

- Der Klügere gibt nach: oberhalb eines kritischen Magnetfelds $H_{c,1}$ dringt dieses teilweise ein, ohne die Supraleitung zu zerstören.
- Dies geschieht erst bei $H_{c,2}$.

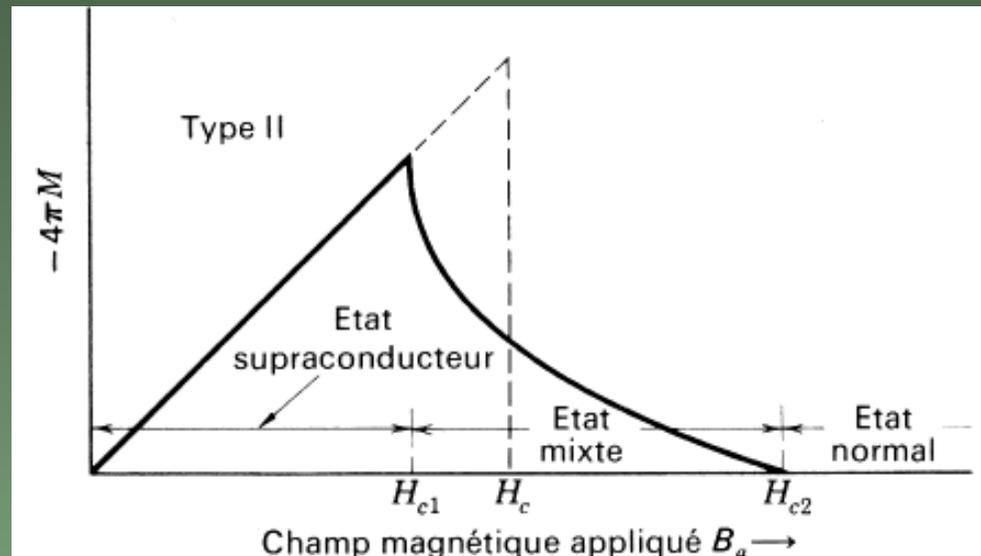


Abb. 5. Magnetisierung als Funktion des angelegten Magnetfelds in einem massiven Supraleiter vom Type II.

- Zwischen H_{c1} und H_{c2} dringt das Magnetfeld ein [Schubnikov-Phase].

II Typen von Supraleitern

II Typen von Supraleitern

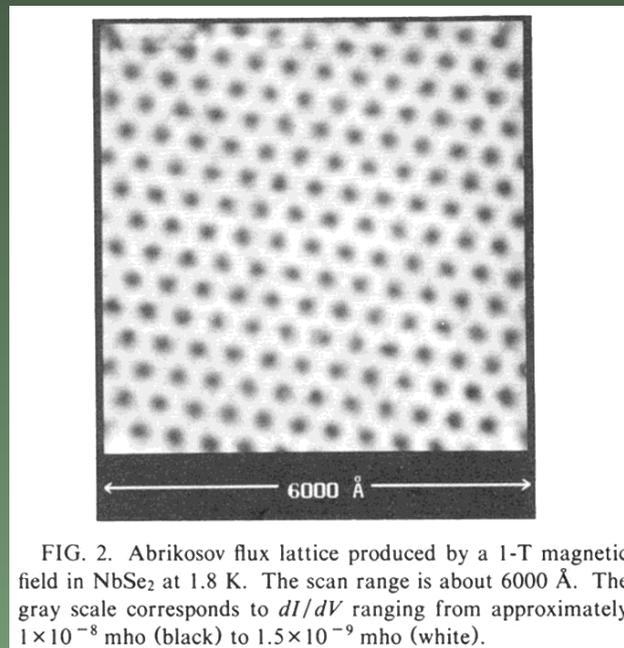
- In Type-II Supraleitern dringt das Magnetfeld in Form von Flußschläuchen ein

II Typen von Supraleitern

- In Type-II Supraleitern dringt das Magnetfeld in Form von Flußschläuchen ein
- Für die theoretische Erklärung erhält Abrikosov den Nobel-Preis 2003

II Typen von Supraleitern

- In Type-II Supraleitern dringt das Magnetfeld in Form von Flußschläuchen ein
- Für die theoretische Erklärung erhält Abrikosov den Nobel-Preis 2003



- Abrikosov Flußliniengitter in NbSn₂ bei 1.8 K nahe der oberen kritischen Feldstärke von einem Tesla

II Typen von Supraleitern

II Typen von Supraleitern

3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

II Typen von Supraleitern

3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms \vec{j} wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

II Typen von Supraleitern

3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms \vec{j} wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

- Diese Kraft läßt die Flußschläuche wandern, dabei verbrauchen sie Energie, verursachen also Reibung: Widerstand Null – ade!

II Typen von Supraleitern

3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms \vec{j} wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

- Diese Kraft läßt die Flußschläuche wandern, dabei verbrauchen sie Energie, verursachen also Reibung: Widerstand Null – ade!
- Lösung: Flußschläuche müssen festgenagelt werden ('pinning')

II Typen von Supraleitern

3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms \vec{j} wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

- Diese Kraft läßt die Flußschläuche wandern, dabei verbrauchen sie Energie, verursachen also Reibung: Widerstand Null – ade!
- Lösung: Flußschläuche müssen festgenagelt werden ('pinning')
- Kommerzielle supraleitende Magnete im Tesla-Bereich werden bei Beschleunigerringen eingesetzt (CERN, Genf) und bei der Plasmafusion (Tokamak)

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

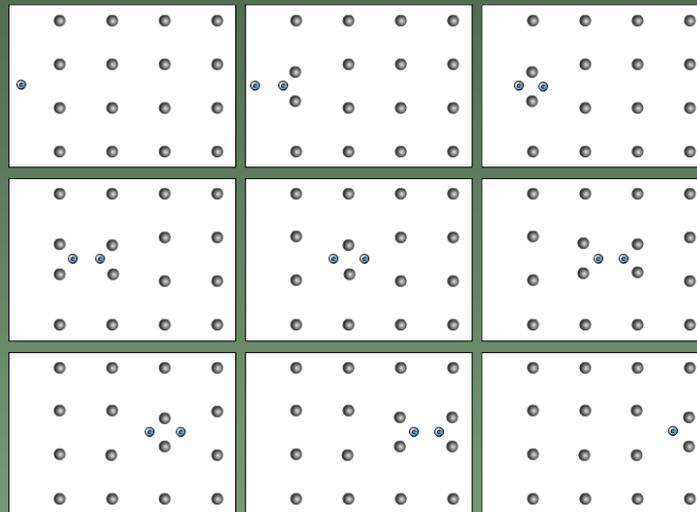
1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar
 - Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar
 - Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie
 - Ein *zweites* Elektron kann im Verzerrungskanal des *ersten* Elektron leichter vorankommen und Energie sparen

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

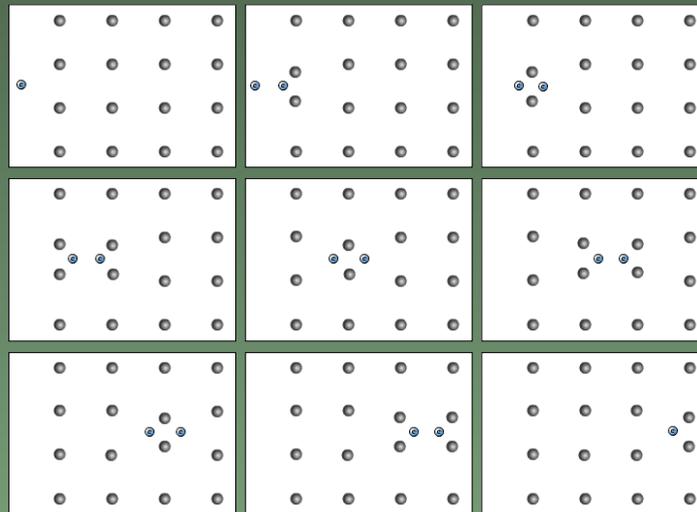
1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar
 - Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie
 - Ein *zweites* Elektron kann im Verzerrungskanal des *ersten* Elektron leichter vorankommen und Energie sparen



III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar

- Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie
- Ein *zweites* Elektron kann im Verzerrungskanal des *ersten* Elektron leichter vorankommen und Energie sparen



- Die Abbildung zeigt schematisch, wie man zu zweit leichter durch's Leben kommt ...

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat
 - Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten die geniale Idee (Nobel-Preis 1972):
alle Elektronen paaren sich (Temperatur $T = 0$)

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat
- Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten die geniale Idee (Nobel-Preis 1972):
alle Elektronen paaren sich (Temperatur $T = 0$)
 - Resultat: ein supraleitendes Kondensat entsteht, das durch eine Welle beschrieben werden kann,

$$\Psi(\vec{r}) = \sqrt{n_s(\vec{r})} \cos[\phi(\vec{r})]$$

Die Amplitude $n_s(\vec{r})$ beschreibt die Dichte der Cooper-Paare, $\phi(\vec{r})$ ist die Phase der Welle.

III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat

- Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten die geniale Idee (Nobel-Preis 1972):

alle Elektronen paaren sich (Temperatur $T = 0$)

- Resultat: ein supraleitendes Kondensat entsteht, das durch eine Welle beschrieben werden kann,

$$\Psi(\vec{r}) = \sqrt{n_s(\vec{r})} \cos[\phi(\vec{r})]$$

Die Amplitude $n_s(\vec{r})$ beschreibt die Dichte der Cooper-Paare, $\phi(\vec{r})$ ist die Phase der Welle.

- Dies entspricht dem phänomenologischen Ansatz von Landau und Ginzburg (Nobel-Preise 1962 und 2003)

IV Quantenverstärker

IV Quantenverstärker

Kondensat = 10^{22} Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

IV Quantenverstärker

Kondensat = 10^{22} Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

1. *Makroskopisches Objekt:*

Streuungen an Verunreinigungen können ihm nichts mehr anhaben: der Suprastrom fließt verlustfrei

IV Quantenverstärker

Kondensat = 10^{22} Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

1. *Makroskopisches Objekt:*

Streuungen an Verunreinigungen können ihm nichts mehr anhaben: der Suprastrom fließt verlustfrei

2. *Makroskopisches Objekt:*

Magnetfelder werden aus ihm verdrängt: idealer Diamagnetismus

IV Quantenverstärker

Kondensat = 10^{22} Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

1. *Makroskopisches Objekt:*

Streuungen an Verunreinigungen können ihm nichts mehr anhaben: der Suprastrom fließt verlustfrei

2. *Makroskopisches Objekt:*

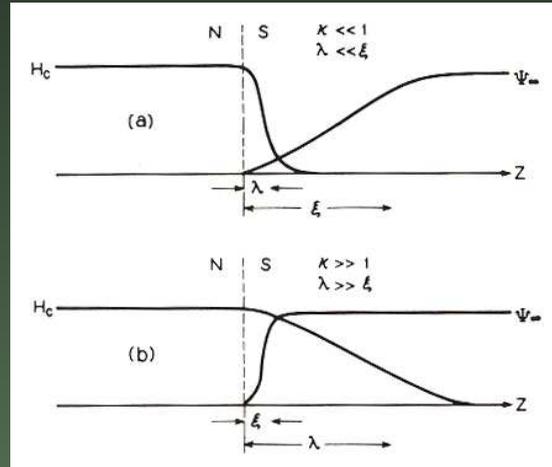
Magnetfelder werden aus ihm verdrängt: idealer Diamagnetismus

3. *Makroskopisches Objekt:*

Am Rande des Supraleiters bauen sich das Kondensat und die Supraströme auf einer Skala ξ auf, das Magnetfeld wird auf einer Skala λ abgeschwächt (ξ , λ sind auf der Mikrometer-Skala).

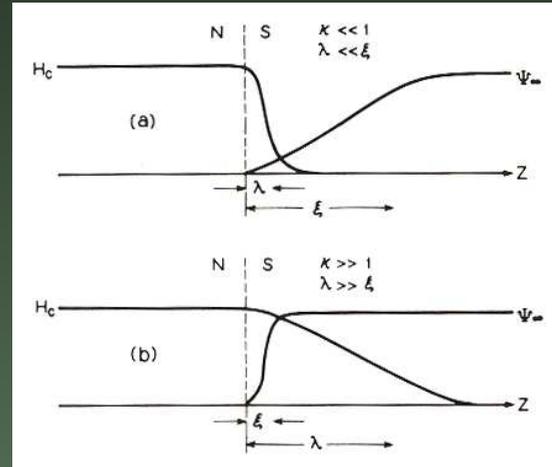
IV Quantenverstärker

IV Quantenverstärker



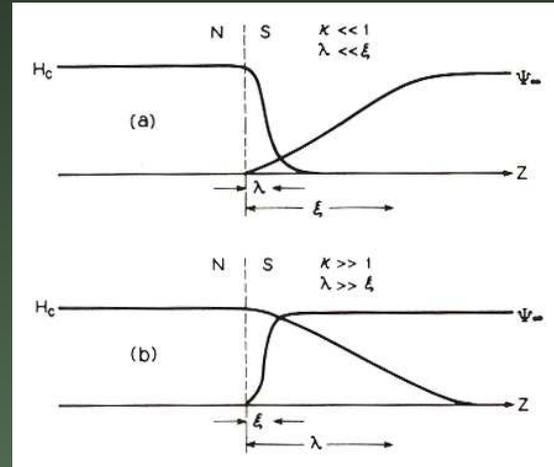
-
- Dichte der Paare und Magnetfeld nahe einer Grenzschicht

IV Quantenverstärker



-
- Dichte der Paare und Magnetfeld nahe einer Grenzschicht
- Typ I Supraleiter ($\xi \gg \lambda$): eine Grenzfläche kostet viel Kondensationsenergie, bringt aber wenig Magnetfeldenergie; das Magnetfeld wird verdrängt, bis die Supraleitung zusammenbricht

IV Quantenverstärker



-
- Dichte der Paare und Magnetfeld nahe einer Grenzschicht
- Typ I Supraleiter ($\xi \gg \lambda$): eine Grenzfläche kostet viel Kondensationsenergie, bringt aber wenig Magnetfeldenergie; das Magnetfeld wird verdrängt, bis die Supraleitung zusammenbricht
- Typ II Supraleiter ($\xi \ll \lambda$): Eine Grenzfläche bringt viel Magnetfeldenergie, kostet aber wenig Kondensationsenergie; das Magnetfeld dringt oberhalb von $H_{c,1}$ in Flußschläuchen ein, die Supraleitung bleibt bis $H_{c,2}$

IV Quantenverstärker

IV Quantenverstärker

Das Kondensat ist zugleich ein *Mikroskopisches Objekt!*

IV Quantenverstärker

Das Kondensat ist zugleich ein *Mikroskopisches Objekt!*

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron:

IV Quantenverstärker

Das Kondensat ist zugleich ein *Mikroskopisches Objekt!*

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron:
umkreist ein Elektron ein Magnetfeld der Stärke B , dann ist das
Produkt $\Phi = B\pi r^2$ ein ganzzahliges Vielfaches von $\Phi_0 = hc/e$,

$$\Phi = n \frac{hc}{e} = n\Phi_0 \quad \text{für Elektronen}$$

Φ_0 : doppeltes Flußquantum

h : Planck'sches Wirkungsquantum

c : Lichtgeschwindigkeit

e : Elementarladung

IV Quantenverstärker

1. *Mikroskopisches Objekt:* Flußquantisierung

Für den Fluß durch einen supraleitenden Ring gilt dasselbe:

IV Quantenverstärker

1. *Mikroskopisches Objekt*: Flußquantisierung

Für den Fluß durch einen supraleitenden Ring gilt dasselbe:

$$\Phi = n \frac{hc}{2e} = n \frac{\Phi_0}{2} \quad \text{für Cooper-Paare}$$

Achtung: $2e$ statt e !

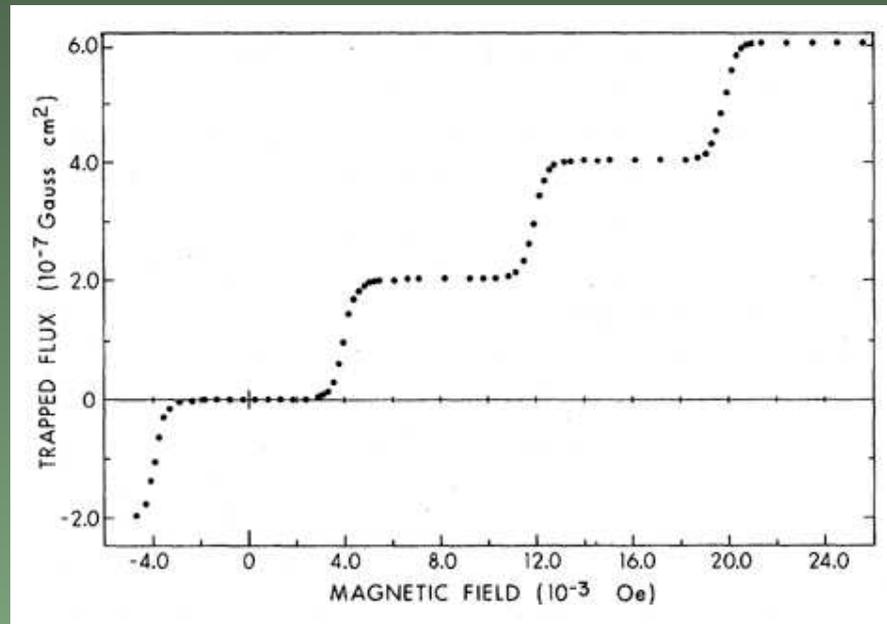
IV Quantenverstärker

1. *Mikroskopisches Objekt*: Flußquantisierung

Für den Fluß durch einen supraleitenden Ring gilt dasselbe:

$$\Phi = n \frac{hc}{2e} = n \frac{\Phi_0}{2} \quad \text{für Cooper-Paare}$$

Achtung: $2e$ statt e !



Magnetischer Fluß in einem dünnen Hohlzylinder aus Zinn.

IV Quantenverstärker

IV Quantenverstärker

2. *Mikroskopisches Objekt:* Josephson-Effekt

IV Quantenverstärker

2. *Mikroskopisches Objekt*: Josephson-Effekt

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron:
ändert sich die Phase der Welle, so resultiert dies in einem *Strom*.

IV Quantenverstärker

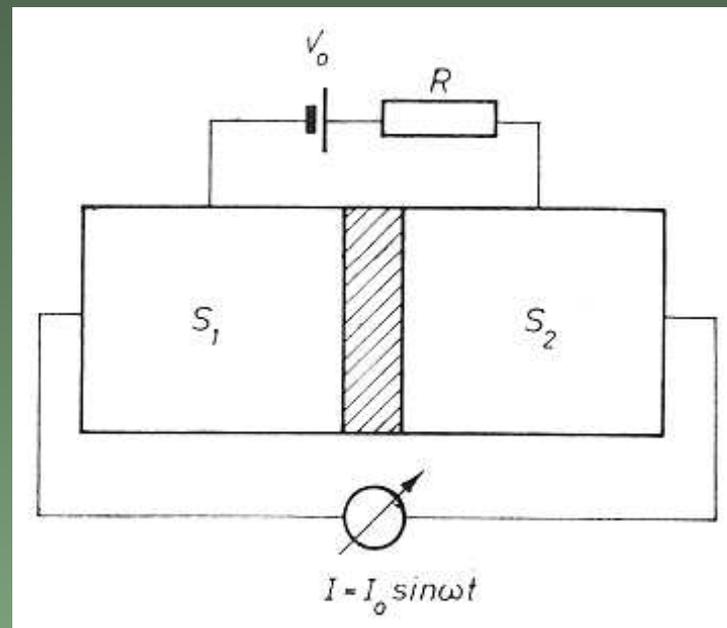
2. *Mikroskopisches Objekt*: Josephson-Effekt

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron: ändert sich die Phase der Welle, so resultiert dies in einem *Strom*. Betrachten wir zwei Supraleiter, die über eine dünne isolierende Barriere hinweg gekoppelt sind:

IV Quantenverstärker

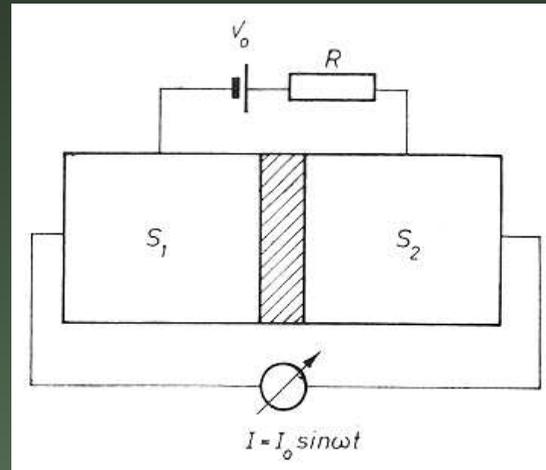
2. *Mikroskopisches Objekt*: Josephson-Effekt

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron: ändert sich die Phase der Welle, so resultiert dies in einem *Strom*. Betrachten wir zwei Supraleiter, die über eine dünne isolierende Barriere hinweg gekoppelt sind:

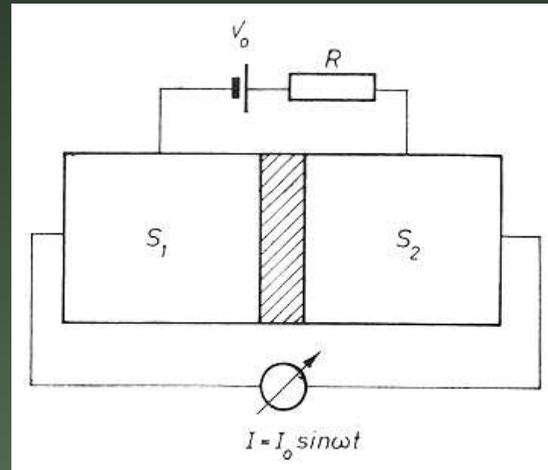


SNS oder Josephson Kontakt

IV Quantenverstärker

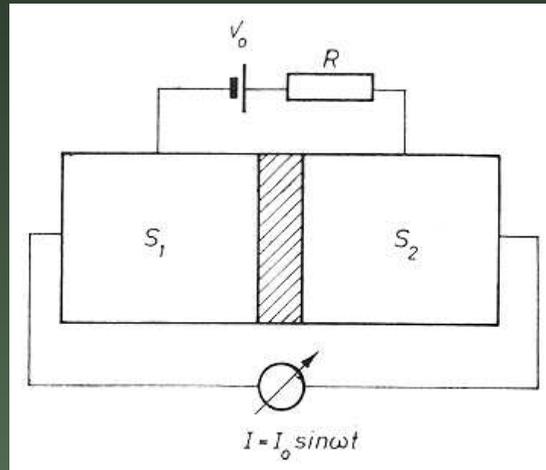


IV Quantenverstärker



Die *Phasen* ϕ_1 und ϕ_2 der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

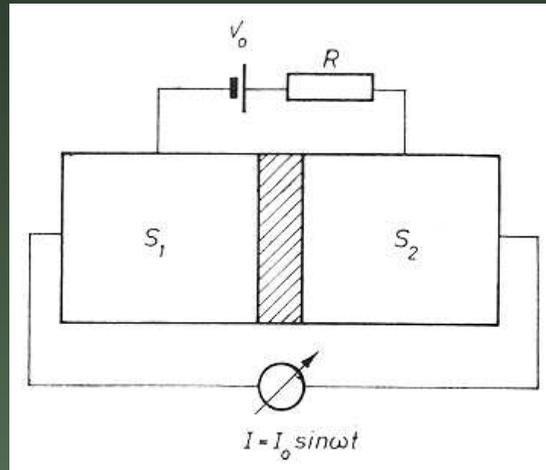
IV Quantenverstärker



Die *Phasen* ϕ_1 und ϕ_2 der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

$$J = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{Gleichstrom Josephson Effekt})$$

IV Quantenverstärker



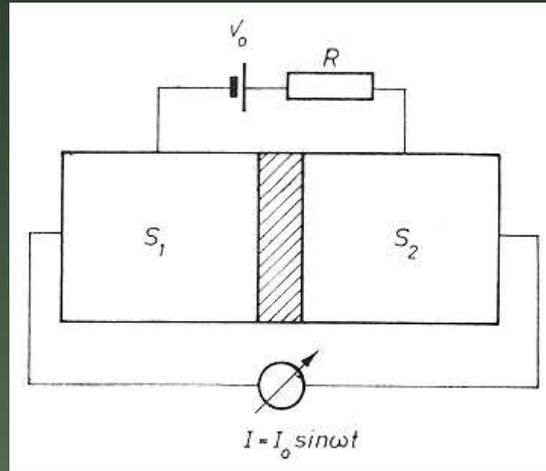
Die *Phasen* ϕ_1 und ϕ_2 der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

$$J = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{Gleichstrom Josephson Effekt})$$

Legt man eine (kleine) Spannung V an die Barriere:

$$J(t) = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2 - 4\pi e V t / h) \quad (\text{Wechselstrom Josephson Effekt})$$

IV Quantenverstärker



Die *Phasen* ϕ_1 und ϕ_2 der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

$$J = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{Gleichstrom Josephson Effekt})$$

Legt man eine (kleine) Spannung V an die Barriere:

$$J(t) = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2 - 4\pi e V t / h) \quad (\text{Wechselstrom Josephson Effekt})$$

Nobel-Preis für Josephson 1973

V Supraleiter anwenden

V Supraleiter anwenden

1. Metrologie: Bestimmung von Naturkonstanten

Durch die enorme Quantenverstärkung kann die Josephson-Konstante $K_J = 2e/h$ mit einer Genauigkeit von 1 in 10 Millionen bestimmt werden:

V Supraleiter anwenden

1. Metrologie: Bestimmung von Naturkonstanten

Durch die enorme Quantenverstärkung kann die Josephson-Konstante $K_J = 2e/h$ mit einer Genauigkeit von 1 in 10 Millionen bestimmt werden:

$$K_J = 483597,879(41)10^9 \frac{1}{Vs}$$

Anwendung: Bestimmung des Spannungsnormals Volt (V)

V Supraleiter anwenden

1. Metrologie: Bestimmung von Naturkonstanten

Durch die enorme Quantenverstärkung kann die Josephson-Konstante $K_J = 2e/h$ mit einer Genauigkeit von 1 in 10 Millionen bestimmt werden:

$$K_J = 483597,879(41)10^9 \frac{1}{V_s}$$

Anwendung: Bestimmung des Spannungsnormals Volt (V)

2. Industrie: Magnetfeldmessung

Durch die enorme Quantenverstärkung können kleinste Änderungen im Magnetfeld detektiert werden.

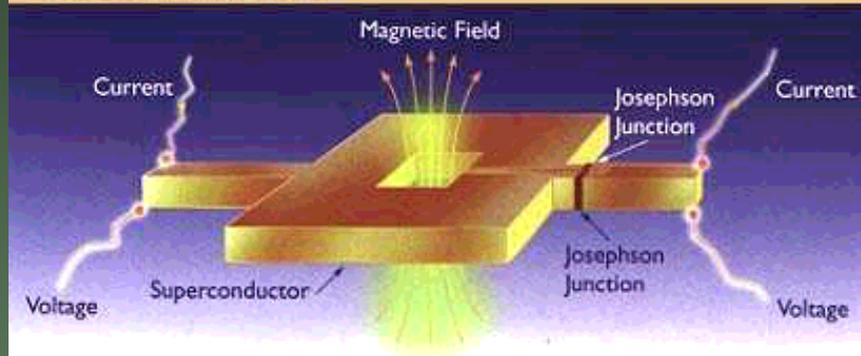
V Supraleiter anwenden

Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)

V Supraleiter anwenden

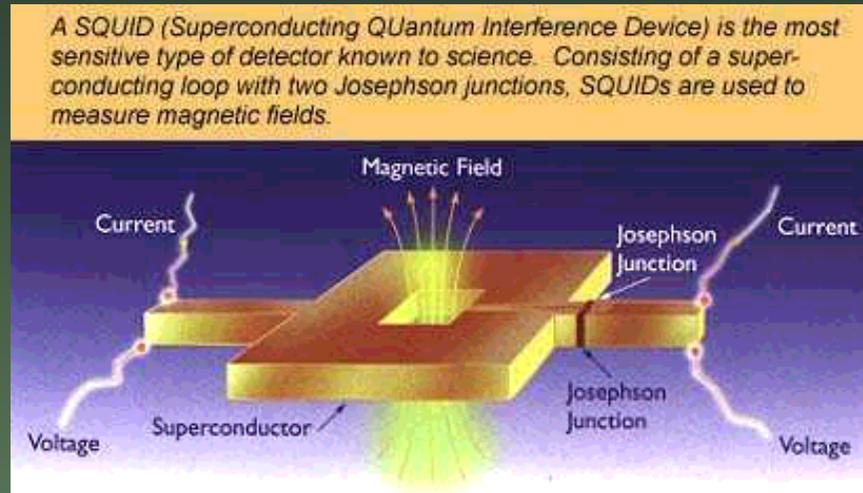
Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)

A SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) is the most sensitive type of detector known to science. Consisting of a superconducting loop with two Josephson junctions, SQUIDs are used to measure magnetic fields.



V Supraleiter anwenden

Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)



Anwendungen:

- Magnetresonanz-Tomographie ('Kernspin')
- Detektion von Fremdkörpern in verpackten (!) Lebensmitteln, Medikamenten, etc.
- Bauwerksinspektion (Brüche von Spannstahl in Brücken)
- und vieles mehr!

VI Stürmische Fortschritte

VI Stürmische Fortschritte

1. Hochtemperatur-Supraleiter

Im Jahr 1986 gelang ein lang ersehnter Durchbruch: Bednorz und Müller fanden supraleitende Kupfer-Oxide (Nobel-Preis 1987).

Die besten Oxide erreichen Sprungtemperaturen

$$T_c \approx 100 \text{ K} = -170^\circ \text{C}.$$

Wichtig: das Material kann mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, der bei 77 K siedet und billig, in Massen herstellbar und ungefährlich ist.

VI Stürmische Fortschritte

1. Hochtemperatur-Supraleiter

Im Jahr 1986 gelang ein lang ersehnter Durchbruch: Bednorz und Müller fanden supraleitende Kupfer-Oxide (Nobel-Preis 1987).

Die besten Oxide erreichen Sprungtemperaturen

$$T_c \approx 100 \text{ K} = -170^\circ \text{C}.$$

Wichtig: das Material kann mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, der bei 77 K siedet und billig, in Massen herstellbar und ungefährlich ist.

2. Industrielle Perspektiven

- Kommerzielle SQUIDs aus Hoch-Tc Material sind im Einsatz
- Stromtransport ist schwierig: die normalleitende Phase ist ein Isolator; Versuchstrassen für 50.000 Haushalte gibt es in Dänemark

VI Stürmische Fortschritte

3. Forschungsperspektiven

VI Stürmische Fortschritte

3. Forschungsperspektiven

Seit 1980 sind viele 'unkonventionelle' Supraleiter entdeckt worden:

1. UPt_3 : Schwere-Fermionen Supraleiter
2. K_3C_{60} : Kalium-dotierte 'bucky balls'
3. MgB_2 : Magnesiumdiborid
4. Sr_2RuO_4 : Ruthenate

VI Stürmische Fortschritte

3. Forschungsperspektiven

Seit 1980 sind viele 'unkonventionelle' Supraleiter entdeckt worden:

1. UPt_3 : Schwere-Fermionen Supraleiter
2. K_3C_{60} : Kalium-dotierte 'bucky balls'
3. MgB_2 : Magnesiumdiborid
4. Sr_2RuO_4 : Ruthenate

Gemeinsamkeit: Kopplungsmechanismus für die Cooper-Paare unbekannt – die Theoretiker stehen vor großen Rätseln!

VII Zusammenfassung

VII Zusammenfassung

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.

VII Zusammenfassung

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.

VII Zusammenfassung

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.

VII Zusammenfassung

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein mikroskopisches Objekt: der magnetische Fluß ist quantisiert, am Josephson-Kontakt treten quantenmechanisch induzierte Ströme auf.

VII Zusammenfassung

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein mikroskopisches Objekt: der magnetische Fluß ist quantisiert, am Josephson-Kontakt treten quantenmechanisch induzierte Ströme auf.
- Industrielle Anwendung: Bestimmung der Spannungseinheit Volt und in SQUID Magnetfeld-Detektoren

VII Zusammenfassung

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein mikroskopisches Objekt: der magnetische Fluß ist quantisiert, am Josephson-Kontakt treten quantenmechanisch induzierte Ströme auf.
- Industrielle Anwendung: Bestimmung der Spannungseinheit Volt und in SQUID Magnetfeld-Detektoren
- Konventionelle Supraleiter sind gut verstanden, die neuen Supraleiter geben den Theoretikern noch große Rätsel auf.

VIII Philosophisches

VIII Philosophisches

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

VIII Philosophisches

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

Freilich muß, wer auf Erkenntnis ausgeht, dies um ihrer selbst Willen tun.

VIII Philosophisches

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

Freilich muß, wer auf Erkenntnis ausgeht, dies um ihrer selbst Willen tun.

...

VIII Philosophisches

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

Freilich muß, wer auf Erkenntnis ausgeht, dies um ihrer selbst Willen tun.

...

Wer es aber verachtet, von der Wissenschaft zu kosten, der bekommt auch von der Freude nichts zu kosten, die sie bereitet.