



**Physik der
Kondensierten Materie 2**

Rudolf Gross

SS 2021

Teil 24

Vorlesungsstunde: 18.05.2021-2

• Magnetisierungsdynamik und Spin-Wellen

- Unterscheidung zwischen:
- **homogene Mode:** $q = 0, \lambda = \infty$ (starr gekoppelte Spin können mit \mathbf{M} -Vektor beschreiben werden \rightarrow **M-Dynamik**)
 - **Austauschmoden:** $q > 0, \lambda < \infty$ (Austauschkopplung dominiert bei kleinen λ) \rightarrow **Spin-Wellen**
 - **dipolare Moden:** $q > 0, \lambda < \infty$ (dipolare Kopplung dominiert bei größeren λ)

• homogene Mode

- \mathbf{M} zeigt in Richtung von effektivem Feld $\mathbf{B}_{\text{eff}} = \mathbf{B}_{0,\text{ext}} + \mathbf{B}_{1,\text{ext}}(t) + \mathbf{B}_{\text{ani}} + \mathbf{B}_N + \cancel{\mathbf{B}_A}$
- Auslenkung von \mathbf{M} aus Gleichgewichtslage führt zu Präzessionsbewegung um \mathbf{B}_{eff} :
Drehmoment $\mathbf{T} = V\mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = -\frac{V}{\gamma} \frac{d\mathbf{M}}{dt}$ (γ = gyromagnetisches Verhältnis)

- Bewegungsgleichung:
$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}} + \underbrace{\lambda \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}})}_{\text{phänomenologischer Dämpfungsterm}}$$
 (Landau & Lifshitz)

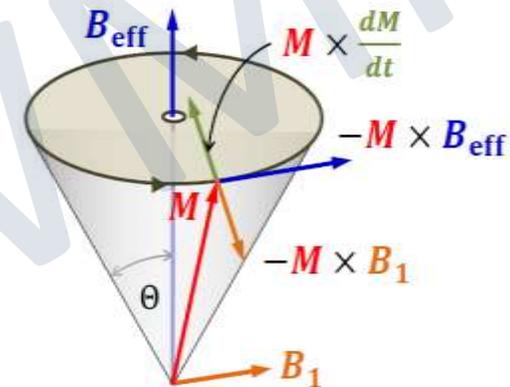
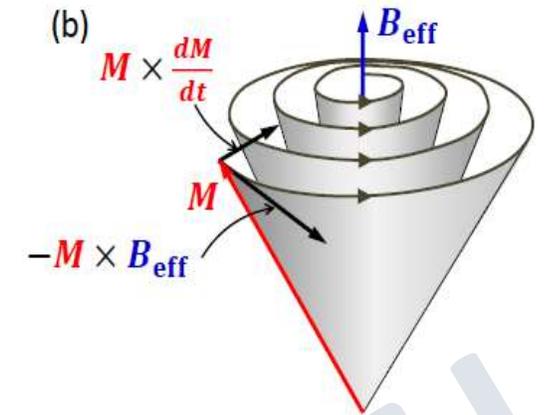
- verbesserte Bewegungsgleichung durch Einführung von Dissipationsterm $\rightarrow \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}} + \alpha \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}$

$$\rightarrow \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2 M^2} \mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}} + \frac{\alpha \gamma}{1 + \alpha^2 M^2} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}}) \quad (\text{Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) Gleichung})$$

• Ferromagnetische Resonanz (FMR)

- resonante Anregung der Präzessionsbewegung durch äußeres Wechselfeld $\mathbf{B}_1(t) = \mathbf{B}_1 \exp(i\omega_1 t)$ senkrecht zu \mathbf{B}_{eff}

Resonanzbedingung: $\omega_1 = \omega_{\text{Präzession}} = \gamma B_{\text{eff}}$



• Änderung der Magnetisierung eines Ferromagneten

- **Umklappen eines Spins** in Spin-Kette: große Anregungsenergie $\sim 4J_A S^2 / \hbar^2$, reduziert Gesamtdrehimpuls um \hbar
- **Anregung von Spin-Wellen:** geringere Anregungsenergie $< 4J_A S^2 / \hbar^2$
kollektive Anregung des Spin-Systems, reduziert Gesamtdrehimpuls um \hbar

• Ferromagnetische Spin-Wellen: Austauschmoden

- **Spin-Wellen:** Oszillationen der Orientierung von magnetischen Momenten auf Spin-Gitter
- Magnonen:** Quanten der Spin-Wellen \rightarrow Bosonen, gehorchen BE-Statistik
- klassische Beschreibung von Spin-Wellen: Spins = „Vektoren“ der Länge $|\mathbf{S}| = S$
- Bewegungsgleichung: Vereinfachungen \rightarrow 1D Spin-Kette, nur NN-WW

am Spin \mathbf{S}_i angreifendes Drehmoment = Zeitableitung des Drehimpulses \mathbf{S}_i

$$\frac{d\mathbf{S}_i}{dt} = \boldsymbol{\mu}_i \times \mathbf{B}_{\text{eff},i} = \frac{g_s \mu_B}{\hbar} (\mathbf{S}_i \times \mathbf{B}_{\text{eff},i}) = -\gamma (\mathbf{S}_i \times \mathbf{B}_{\text{eff},i})$$

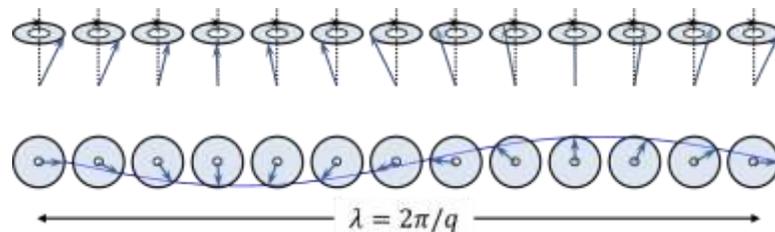
$$\mathbf{B}_{\text{eff},i} = \mathbf{B}_{\text{ext}} + \mathbf{B}_{A,i} = \mathbf{B}_{\text{ext}} - \frac{J_A}{g_s \mu_B \hbar} (\mathbf{S}_{i-1} + \mathbf{S}_{i+1})$$

Lösungsansatz: $S_{i,x} = S_x e^{i(qia - \omega t)}$ $S_{i,y} = S_y e^{i(qia - \omega t)}$

$$\omega = \frac{g_s \mu_B B_z}{\hbar} + \frac{2J_A S}{\hbar^2} (1 - \cos qa)$$

für $qa \ll 1$ und $B = 0 \rightarrow \omega \approx \frac{J_A S a^2}{\hbar^2} q^2 = A q^2$

$A = \text{Spin-Steifigkeit}$



• T-Abhängigkeit von M_s

➤ Gesamtzahl der Magnonen $\sum_q \langle n_q \rangle = \int d\omega D(\omega) \langle n(\omega) \rangle$

$$\sum_q \langle n_q \rangle = 0.0587 \frac{V}{a^3} \left(\frac{k_B T}{J_A S / \hbar} \right)^{3/2}$$

➤ Spin-Quantenzahl bei $T = 0$: NS/\hbar
 $T > 0$: $NS/\hbar - \sum_q n_q$

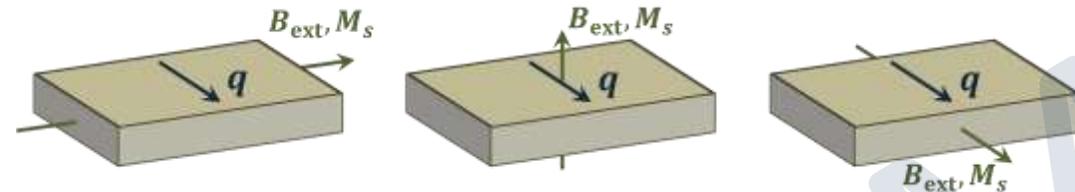
$$\frac{M_s(0) - M_s(T)}{M_s(0)} = \frac{\Delta M_s}{M_s(0)} = \frac{\sum_q \langle n_q \rangle}{NS/\hbar}$$

$$\frac{\Delta M_s}{M_s(0)} = 0.0587 \frac{V}{Na^3 S} \hbar \left(\frac{k_B T}{J_A S / \hbar} \right)^{3/2}$$

Bloch'sches $T^{3/2}$ -Gesetz

• Ferromagnetische Spin-Wellen: dipolare Moden

- (a) Damon-Eshbach-Moden, (b) Vorwärts-Volumenmode
 (c) Rückwärts-Volumenmode



• Antiferromagnetische Spin-Wellen

$$\omega = \frac{2|J_A|S}{\hbar^2} |\sin qa|$$

lineare Dispersion für kleine q

Kapitel 13

Supraleitung



www



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung der Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen

- ➔ 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- ➔ 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Tieftemperaturtechnik in Deutschland: Carl von Linde

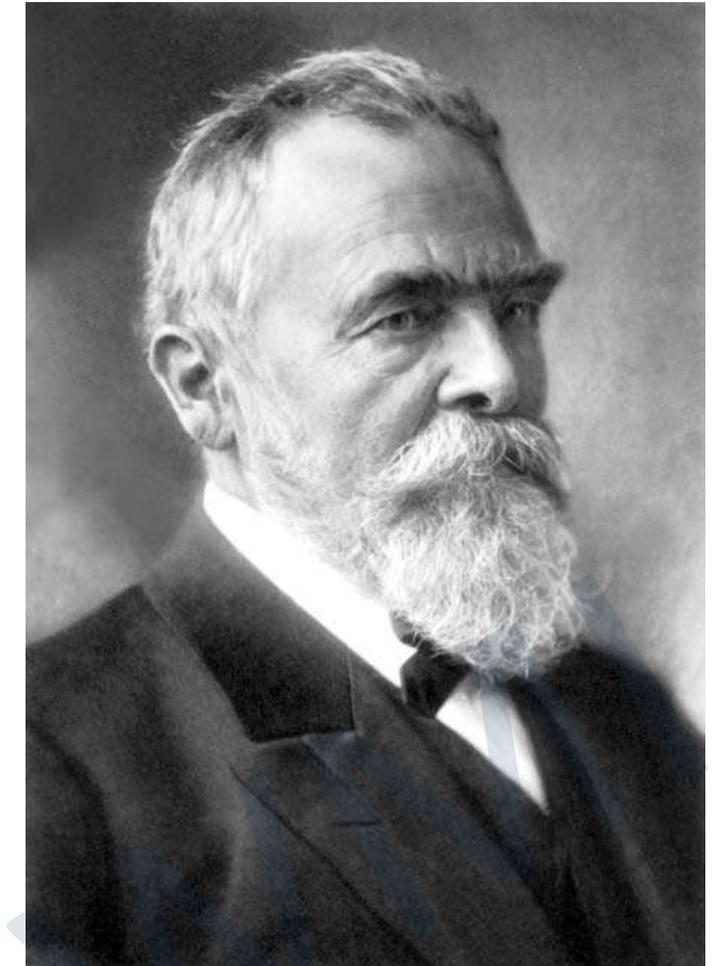
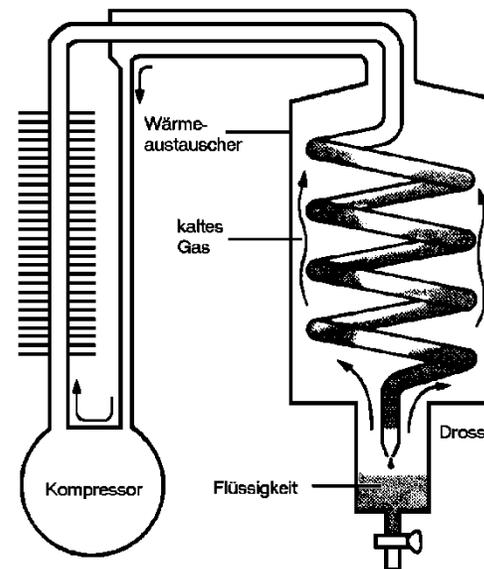
1868 Ruf an die Polytechnische Schule München

1873 Bau einer Kühlmaschine, die beim Bierbrauen die Gärung bei konstanter Temperatur zuließ

21. 6. 1879 Gründung der „*Gesellschaft für Linde's Eismaschinen AG*“ mit zwei Brauern und drei anderen Gründern

1892 - 1910 Wiederaufnahme seiner Professur

12.5.1903
 Patentanmeldung,
*Lindesches Gegenstrom-
 verfahren*,
 Sauerstoffverflüssigung
 ($-182^{\circ}\text{C} = 90\text{ K}$)



Carl Paul Gottfried von Linde

* 11. Juni 1842 in Berndorf, Oberfranken
 † 16. November 1934 in München

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung der Supraleitung (perfekte Leitfähigkeit) in Hg (1911)

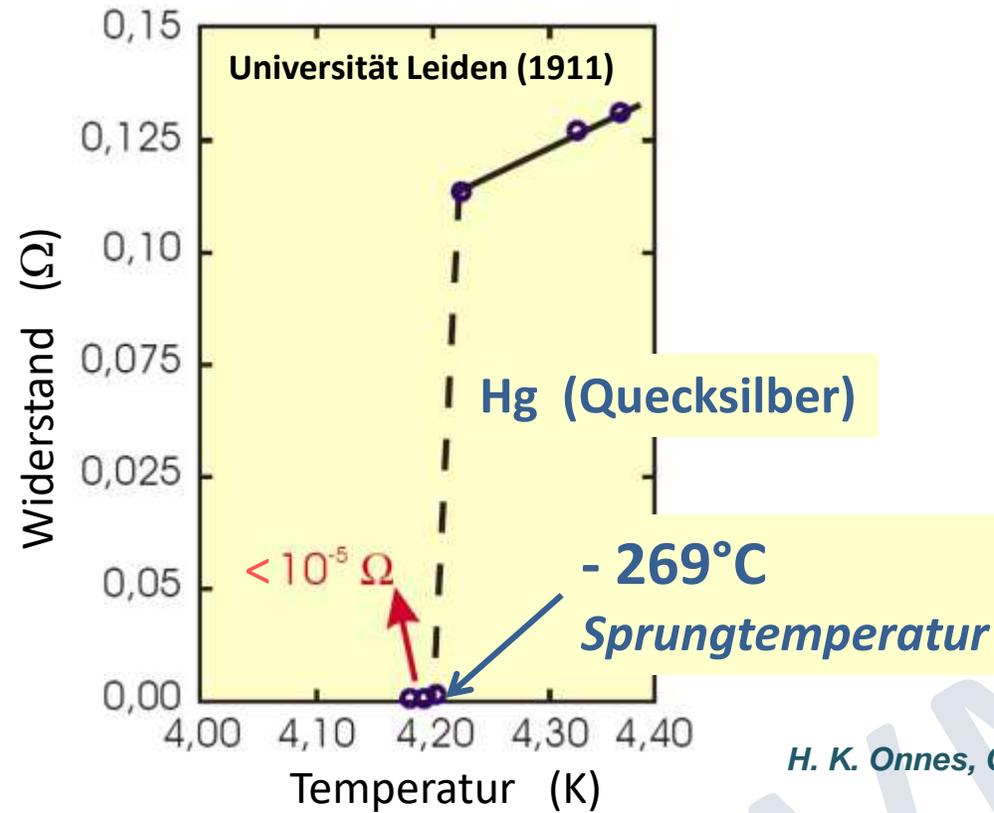
Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926)



- Heliumverflüssigung: 1908
- Entdeckung der Supraleitung: 1911

Nobelpreis für Physik 1913

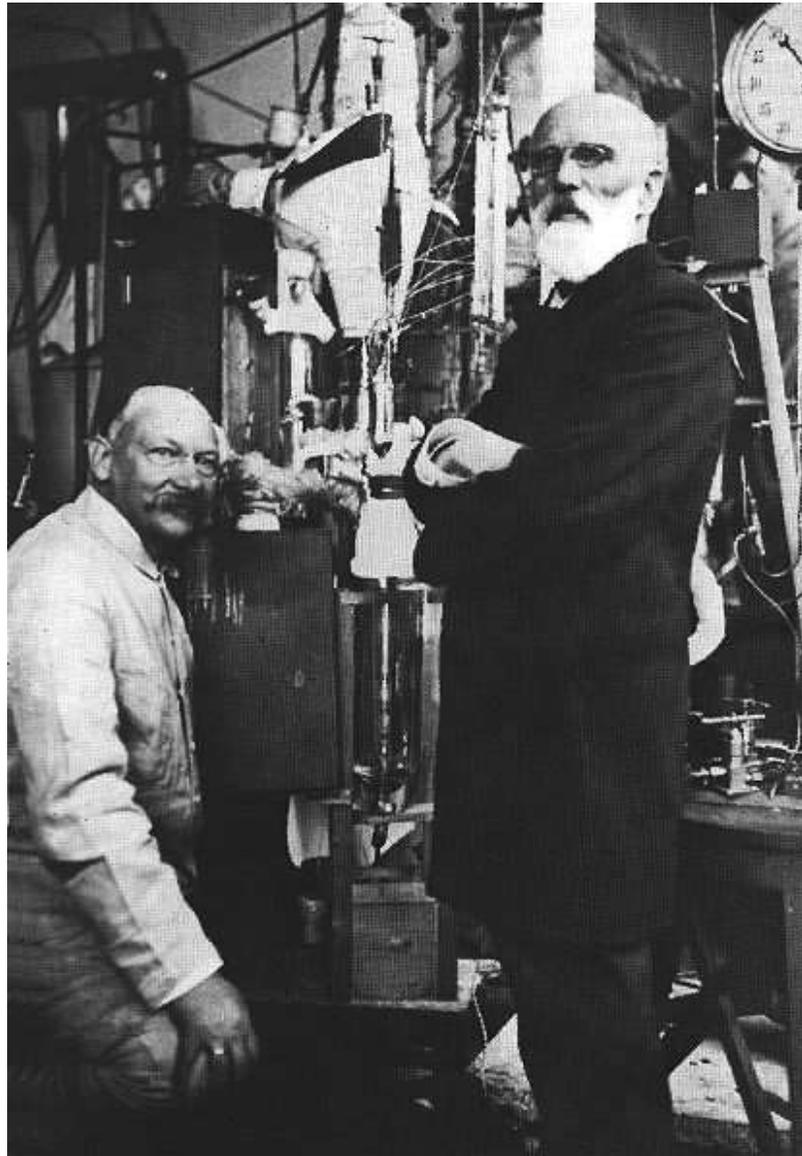
Namensgebung: *unendlich hohe Leitfähigkeit* → **Supraleitung**



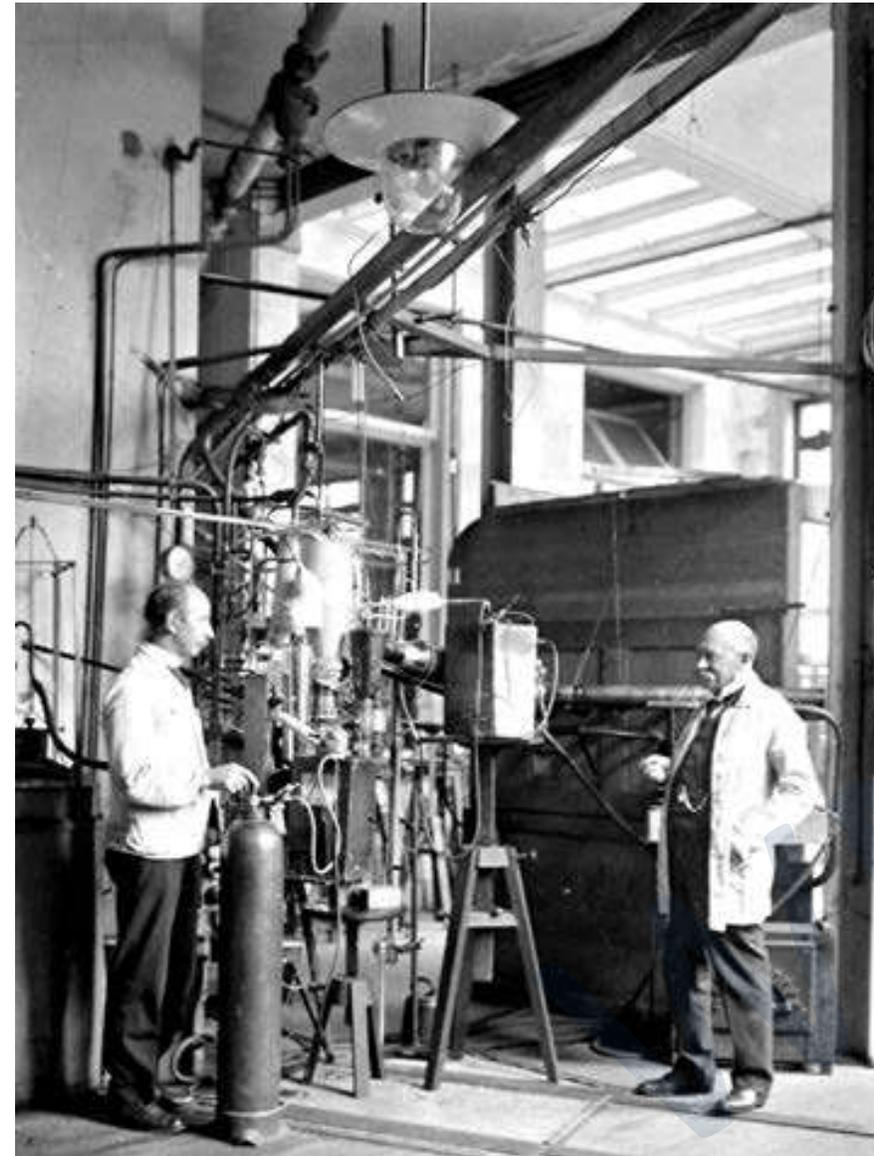
H. K. Onnes, Comm. Leiden 120b (1911)

„aus Anlass seiner Untersuchungen über die Eigenschaften von Körpern bei niedrigen Temperaturen, die unter anderem zur Darstellung von flüssigem Helium führten“

13.1.1 Geschichte der Supraleitung



Kammerlingh Onnes und van der Waals



Kammerlingh Onnes und Techniker Flim

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

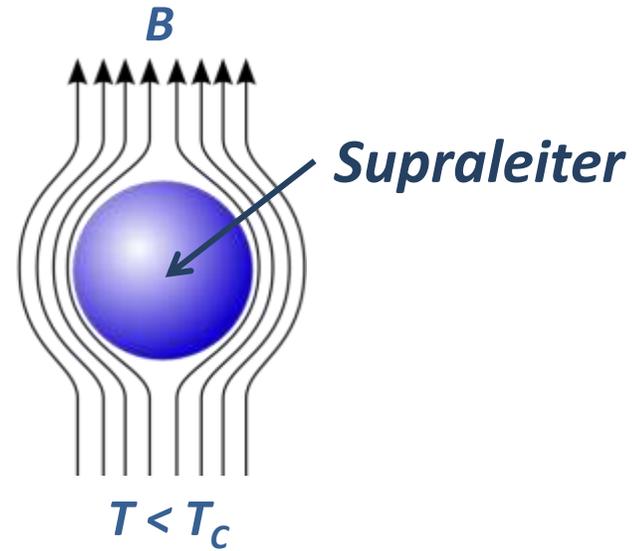
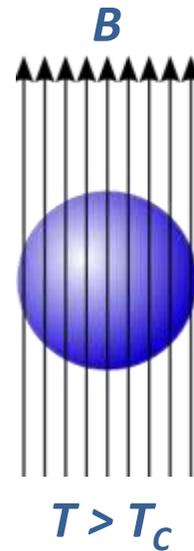
- Entdeckung des Meißner-Ochsenfeld-Effekts (perfekter Diamagnetismus) in Sn und Pb (1933)



Walther Meißner
(1882 – 1974)



Robert Ochsenfeld
(1901 – 1993)



Supraleiter verdrängen das Magnetfeld vollkommen

$$B_{\text{innen}} = (1 + \chi) B_{\text{außen}} = 0 \quad (\chi = \text{magnetische Suszeptibilität})$$

➔ **idealer Diamagnet, $\chi = -1$**

Bezeichnung der vollkommenen Feldverdrängung:

Meißner-Ochsenfeld-Effekt



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung des Meißner-Ochsenfeld-Effekts (perfekter Diamagnetismus) in Sn und Pb (1933)



perfekter Diamagnetismus

Robert Ochsenfeld
(1901 – 1993)



Dr. Walther Meißner
a. Prof. für technische Physik, Präsident 1946–50

Walther Meißner
(1882 – 1974)

*W. Meißner, R. Ochsenfeld,
Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit, Naturwissenschaften 21, 787 (1933).*

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

1913 – 1934

Aufbau und Leiter des Kältelabors an der Physikalisch-Technischen-Reichsanstalt, Wasserstoffverflüssigung (20K)

7.3.1925 erstmalige Verflüssigung von He in Deutschland (4.2 K, 200 ml)
3. Anlage weltweit nach Leiden und Toronto

1933 Entdeckung der perfekten Magnetfeldverdrängung von Supraleitern mit Ochsenfeld
→ **Meißner-Ochsenfeld-Effekt**

1934 Ruf an die Technische Hochschule München

1946 – 1950

Präsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

1946 Gründung der Kommission für Tieftemperaturforschung → **Walther-Meißner-Institut**



Walther Meißner

* 16. Dezember 1882 in Berlin
† 15. November 1974 in München

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



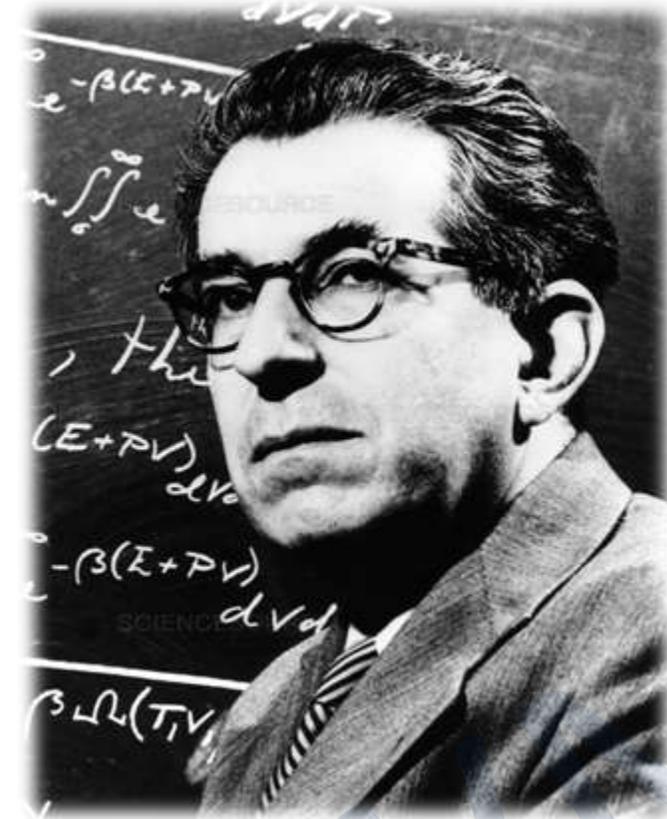
13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- London Theorie der Supraleitung (1935)

1935 Fritz und Heinz London

erste „quantenmechanische“
Theorie der Supraleitung
(rein phänomenologisch)

→ *makroskopische Wellenfunktion*



Fritz London
(1900 – 1954)

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Shubnikov-Phase, Typ-I und Typ-II Supraleitung (1936)

1936 Lev W. Shubnikov

**Entdeckung der
Shubnikov-Phase in
Supraleitern**

→ *Typ-I und Typ-II
Supraleiter*



**Lev Wassiljevitsch Shubnikov
(1901 – 1937)**

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger

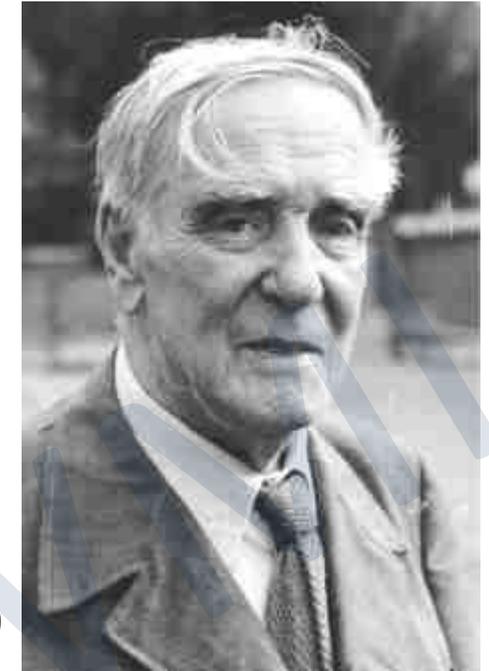


13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung von suprafluidem $^4\text{Helium}$ (1939)



P.L. Kapitza with his assistant S.I. Filimonov carrying out an experiment with superfluid helium. IPP, Moscow, 1940.



**Pyotr Leonidovich Kapitza
(1894-1984)**

Nobelpreis für Physik 1978

„for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics“



J. Allen 1970

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entwicklung der Ginzburg-Landau Theorie (1952)



Lev Landau
(1908 – 1968)



Vitaly Ginzburg
(1916 – 2009)

Lev Davidovich Landau

Nobelpreis für Physik 1962

"for his pioneering theories for condensed matter, especially liquid helium"

Vitaly Ginzburg

Nobelpreis für Physik 2003

"for their pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids"

(together with Alexei Abrikosov and Anthony Leggett)



Tag der Physik
07. 07. 2000



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Abrikosov Theorie der Typ-II Supraleitung (1957)

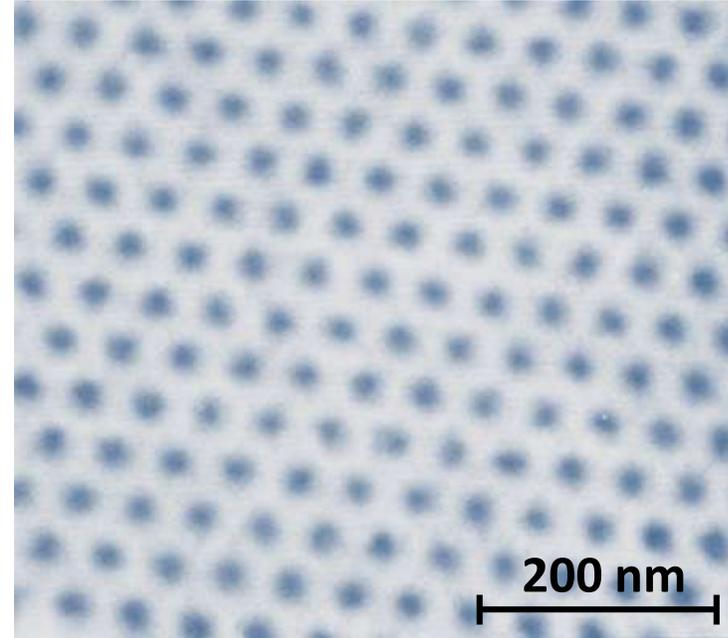


Alexei Abrikosov

Alexei Abrikosov

Nobelpreis für Physik 2003

(together with Vitaly Ginzburg and Anthony Leggett)



“for their pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids”

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Mikroskopische (BCS) Theorie der Supraleitung (1957)



John Bardeen
(1908 – 1991)



Leon Neil Cooper
(geb. 1930)



John Robert Schrieffer
(geb. 1931)

Nobelpreis für Physik 1972

"for their jointly developed theory of superconductivity, usually called the BCS-theory"

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



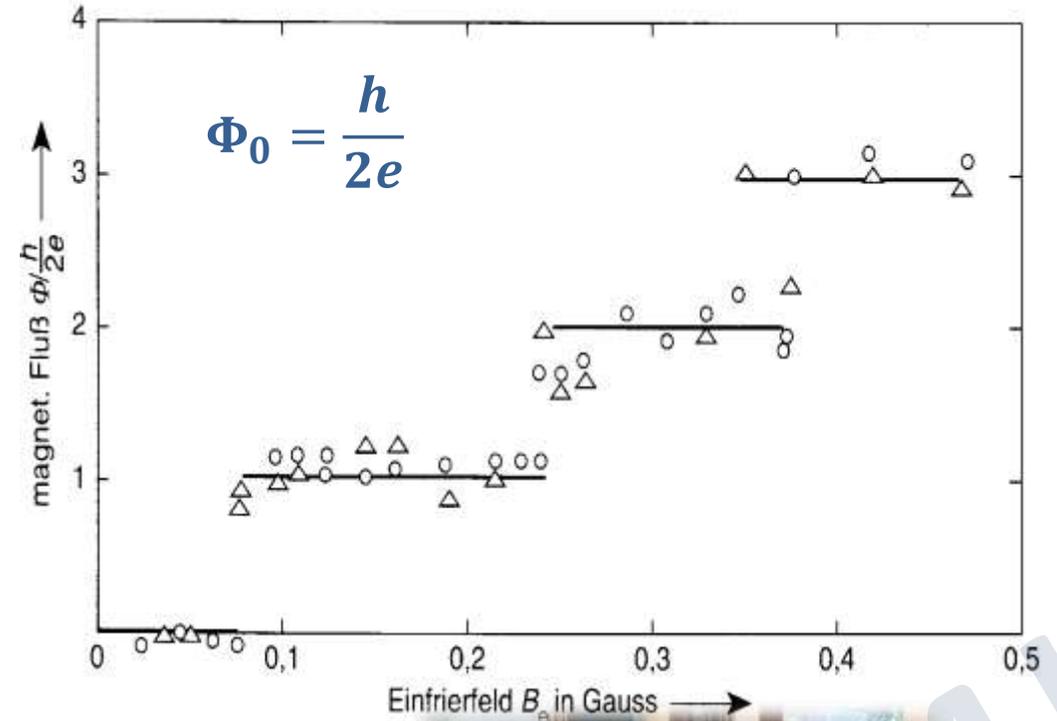
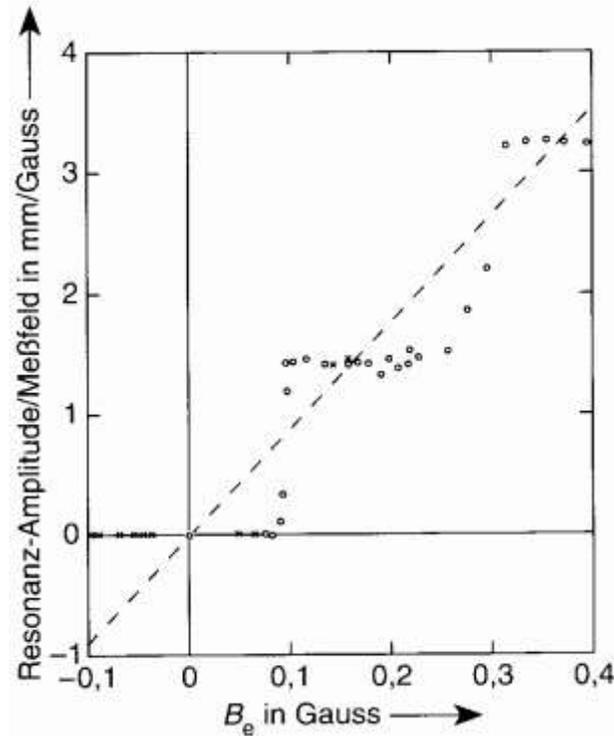
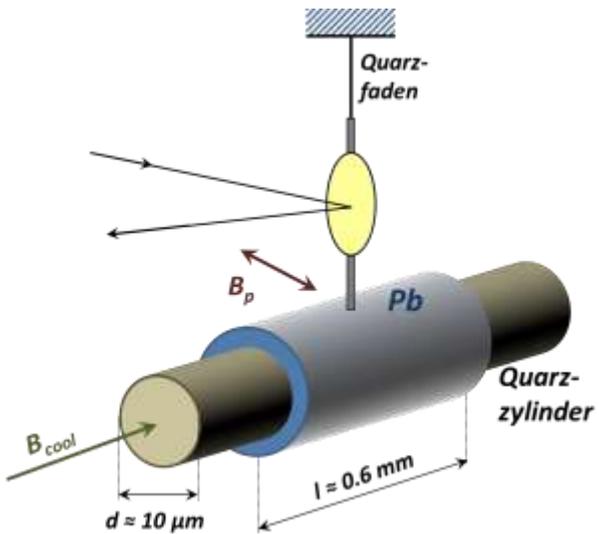
- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung der Flussquantisierung (1961)



Robert Doll and Martin Näbauer, WMI

R. Doll, M. Näbauer, *Phys. Rev. Lett.* 7, 51 (1961).
 B.S. Deaver Jr., W.M. Fairbank, *Phys. Rev. Lett.* 7, 43 (1961).



M. Näbauer



R. Doll

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



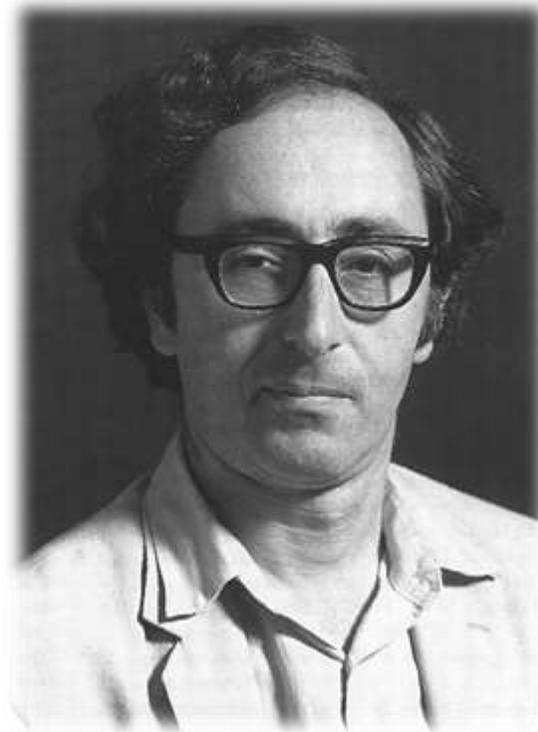
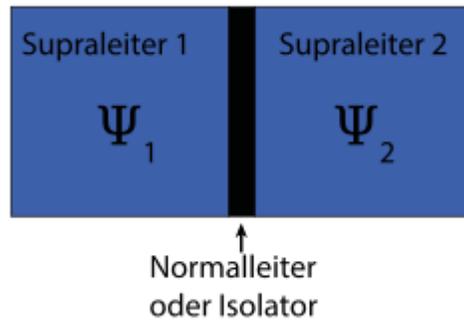
- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Vorhersage des Josephson Effekts (1962)



Brian David Josephson
(geb. 1940)

Nobelpreis für Physik 1973

"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"

(together with Leo Esaki and Ivar Giaever)

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



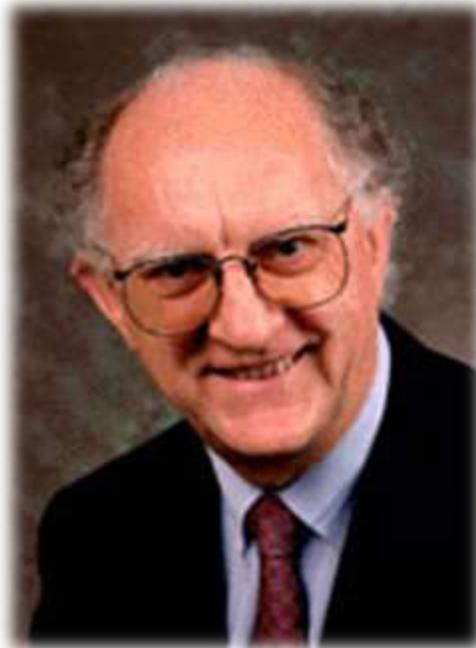
- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger

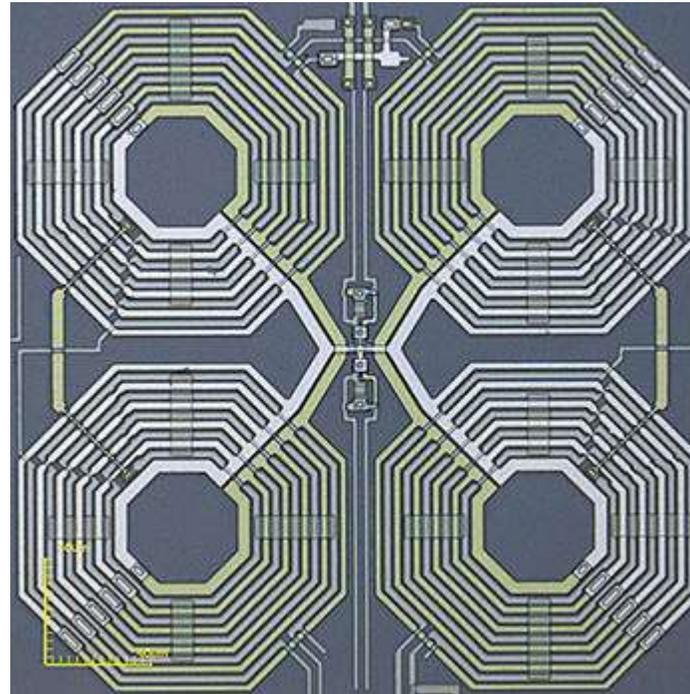


13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entwicklung von Supraleitenden Quanteninterferometern – SQUIDs (1966)



John Clarke
(*10. Februar 1942 in Cambridge)



Superconducting Quantum Interference Devices

SQUIDs

When it comes to SQUIDs, Berkeley physicist John Clarke has been a master for the past three decades. In the background is an image of a high- T_c superconducting coil deposited on a high- T_c SQUID.



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung von suprafluidem ^3He (1971)



Douglas D. Osheroff,
Stanford University,
Stanford, California, USA



David M. Lee,
Cornell University, Ithaca,
New York, USA



Robert C. Richardson,
Cornell University, Ithaca,
New York, USA

Nobelpreis für Physik 1996

"for their discovery of superfluidity in helium-3"

$T_c = 2,6 \text{ mK}$

1966 $^3\text{He}/^4\text{He}$ Mischkühler: Hall, Neganov

2mK 500mK

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Theorie zu suprafluidem $^3\text{Helium}$ (1975)

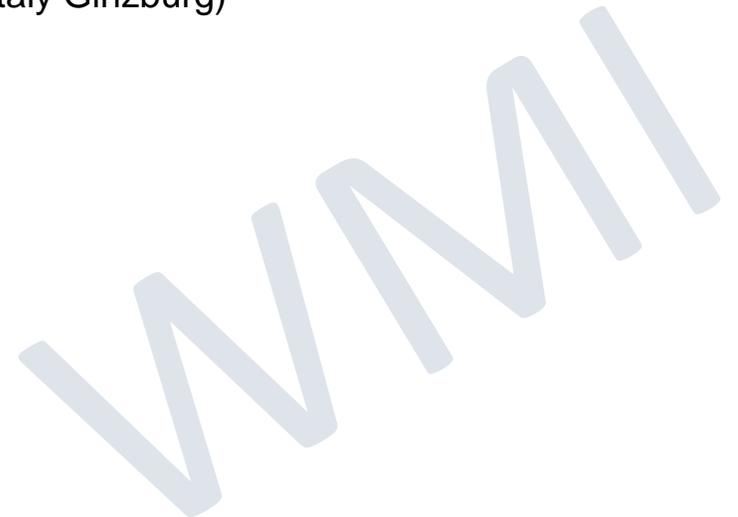


Anthony James Leggett
 (*26. März 1938 in Camberwell,
 Süd-London)

Nobelpreis für Physik 2003

.... for their pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids.

(zusammen mit Alexey A. Abrikosov and Vitaly Ginzburg)



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen



- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (1986)



Karl Alexander Müller
(*20 April 1927, Basel)

J. Georg Bednorz
(*16. Mai 1950 in Neuenkirchen
im Kreis Steinfurt)

Nobelpreis für Physik 1987

"for their important break-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials"

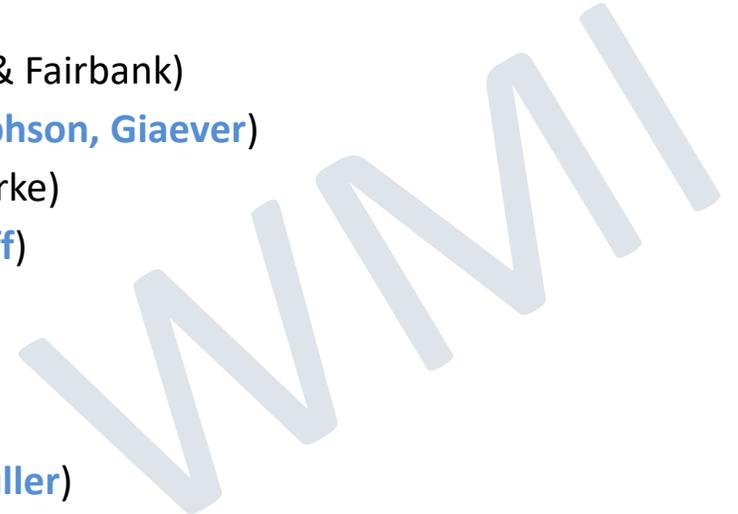
13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- Entdeckung und Erklärung des Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

Wichtige Entwicklungen/Entdeckungen

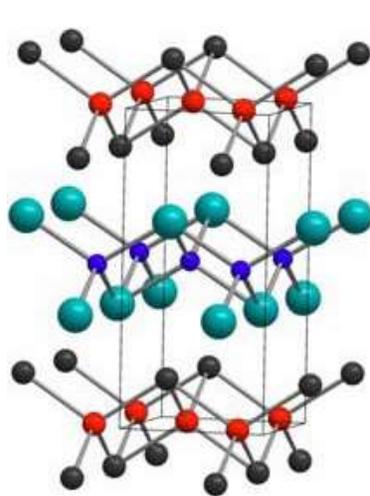
- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg** & **Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen**, **Cooper** & **Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson**, **Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz** & **Müller**)
- ➔ • 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger

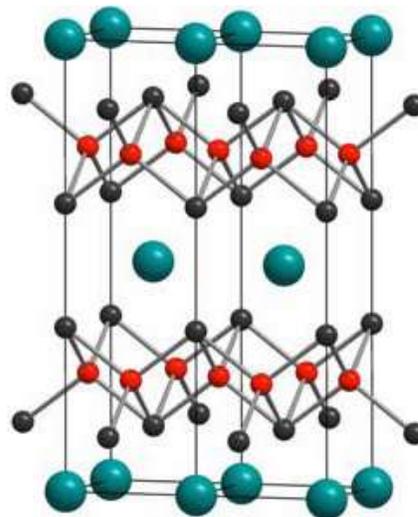


13.1.1 Geschichte der Supraleitung

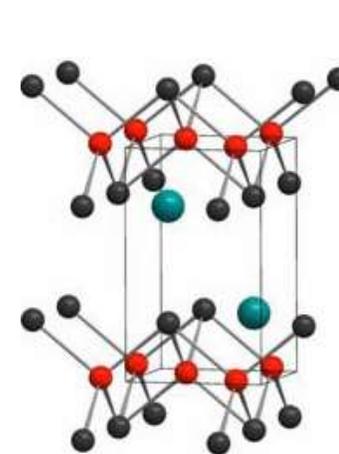
- Entdeckung der Fe-basierten Supraleiter (2006)
 - entdeckt im Jahr 2006 durch **Hideo Hosono** et al. in $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$, $T_c = 26 \text{ K}$
 - bis heute wurden mehrere weitere Verbindungen/Familien gefunden mit T_c bis zu 55 K



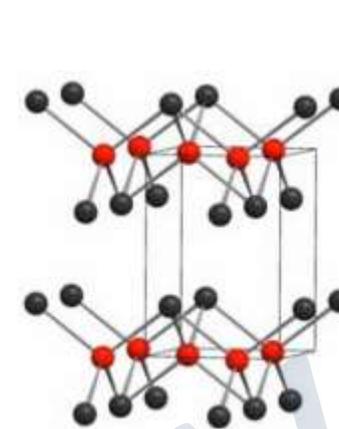
LaFeAsO (1111)



BaFe₂As₂ (122)



LiFeAs (111)



FeSe (11)

Yoichi Kamihara, Hidenori Hiramatsu, Masahiro Hirano, Ryuto Kawamura, Hiroshi Yanagi, Toshio Kamiya, and Hideo Hosono "Iron-Based Layered Superconductor: LaOFeP". *J. Am. Chem. Soc.* **128** (31): 10012–10013 (2006).

13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- **Faszination Tieftemperaturphysik**
 - **große technische Herausforderungen**
→ **Entwicklung neuer Technologien**
 - **interessante physikalische Phänomene**
→ **Quantenphänomene**
→ **kooperative Phänomene**
 - **insgesamt viele Nobelpreisträger (13/14)**

Nächster Nobelpreis ??

- **Quanteninformationsverarbeitung**
- **Raumtemperatur-Supraleitung**
-

WMI

13.1.2 Supraleitende Materialien

- Supraleitung ist kein seltenes Phänomen
- bisher wurden tausende von supraleitenden Verbindungen gefunden

		supraleitend bei $p = 1 \text{ bar}$																					
		supraleitend bei $p \gg 1 \text{ bar}$																					
		nichtsupleitend																					
		magnetisch ordnend																					
¹ H																		² He					
³ Li 20	⁴ Be 0.03																	⁵ B 11	⁶ C 0.6	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne
¹¹ Na	¹² Mg																	¹³ Al 1.19	¹⁴ Si 8.5	¹⁵ P 18	¹⁶ S 17	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar
¹⁹ K	²⁰ Ca 15	²¹ Sc 0.35	²² Ti 0.4	²³ V 5.3	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe 2.0	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn 0.9	³¹ Ga 1.09	³² Ge 5.4	³³ As 2.7	³⁴ Se 5.6	³⁵ Br 1.4	³⁶ Kr						
³⁷ Rb	³⁸ Sr 4.0	³⁹ Y 2.7	⁴⁰ Zr 0.55	⁴¹ Nb 9.2	⁴² Mo 0.923	⁴³ Tc 7.8	⁴⁴ Ru 0.5	⁴⁵ Rh 320 μK	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd 0.55	⁴⁹ In 3.4	⁵⁰ Sn 3.7	⁵¹ Sb 5.6	⁵² Te 7.4	⁵³ I 1.1	⁵⁴ Xe						
⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba 5.1	⁵⁷ La 5.9	⁷² Hf 0.16	⁷³ Ta 4.4	⁷⁴ W 0.01	⁷⁵ Re 1.7	⁷⁶ Os 0.65	⁷⁷ Ir 0.14	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg 4.15	⁸¹ Tl 2.4	⁸² Pb 7.2	⁸³ Bi 8.7	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Pn						
⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac	⁵⁸ Ce 1.7	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu 0.1							
			⁹⁰ Th 1.37	⁹¹ Pa 1.3	⁹² U 0.2	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am 0.8	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lw							

13.1.2 Supraleitende Materialien

- **Supraleitende Elemente**

- Periodensystem → viele supraleitende Elemente, Grundzustand entweder supraleitend oder magnetisch

- höchstes T_c : Nb, $T_c = 9,2$ K, niedrigstes T_c : Rh, $T_c = 0,32$ mK

- viele Elemente werden unter Druck supraleitend,
z.B. Li: T_c fast 20 K @ $p = 0,5$ Mbar, unmagnetische Fe-Hochdruckphase: $T_c = 2$ K

- Problem bei sehr kleinem T_c : kleine Paarungsenergie erfordert sehr reine Materialien

$$k_B T_c = 1,3 \times 10^{-26} \text{ J @ } T_c = 1 \text{ mK} \Rightarrow \tau \simeq 1,3 \times 10^{-26} \text{ J} / \hbar \simeq 10^{-6} \text{ s}$$

- **Legierungen**

- sehr viele supraleitende Legierungen und intermetallische Verbindungen:

- z.B. Nb₃Ge ($T_c = 23.2$ K), Nb₃Sn ($T_c = 18.0$ K) und V₃Si ($T_c = 17$ K), NbTi ($T_c = 10 - 11$ K), NbN ($T_c = 13 - 16$ K)

- unzählige Möglichkeiten, noch nicht alle entdeckt: Beispiel ist das erst 2001 entdeckte MgB₂ mit $T_c = 40$ K

- **Schwere Fermionen Supraleiter**

- Entdeckung 1979 durch Frank Steglich: CeCu₂Si₂ mit $T_c = 0,5$ K

13.1.2 Supraleitende Materialien

- **organische Supraleiter (1981)**
 - Tetramethyl-tetraselenafulvalen (TMTSF), $T_c = 0,9 \text{ K @ } 11 \text{ kbar}$, Entdeckung durch Klaus Bechgaard
 - heute viele Materialfamilien bekannt, höchstes T_c oberhalb von 10 K

- **Fulleride (1991)**
 - Supraleitung entdeckt in K-dotiertem C_{60} , $T_c = 18 \text{ K}$ (A. Hebard et al., Nature. **350**, 600–601 (1991))
 - höchstes $T_c \approx 33 \text{ K}$ in Cs_2RbC_{60}

- **oxidische Supraleiter, Kuprate (1986):**
 - Entdeckung 1986 durch Bednorz und Müller: La-Ba-Cu-O mit $T_c = 25 \text{ K}$
 - $YBa_2Cu_3O_7$ ($T_c = 93 \text{ K}$), $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ ($T_c = 133 \text{ K}$), heute maximales $T_c \approx 165 \text{ K}$ unter Druck

- **Eisenpniktide (2006):**
 - Entdeckung 2006 durch Hideo Hosono et al., $La[O_{1-x}F_x]FeAs$ mit $T_c = 25 \text{ K}$ (J. Am. Chem. Soc. **128**, 10012-13 (2006))
 - heute maximales $T_c = 56 \text{ K}$

13.1.2 Supraleitende Materialien

- Vor kurzem gemachte Entdeckungen

- **2015:**

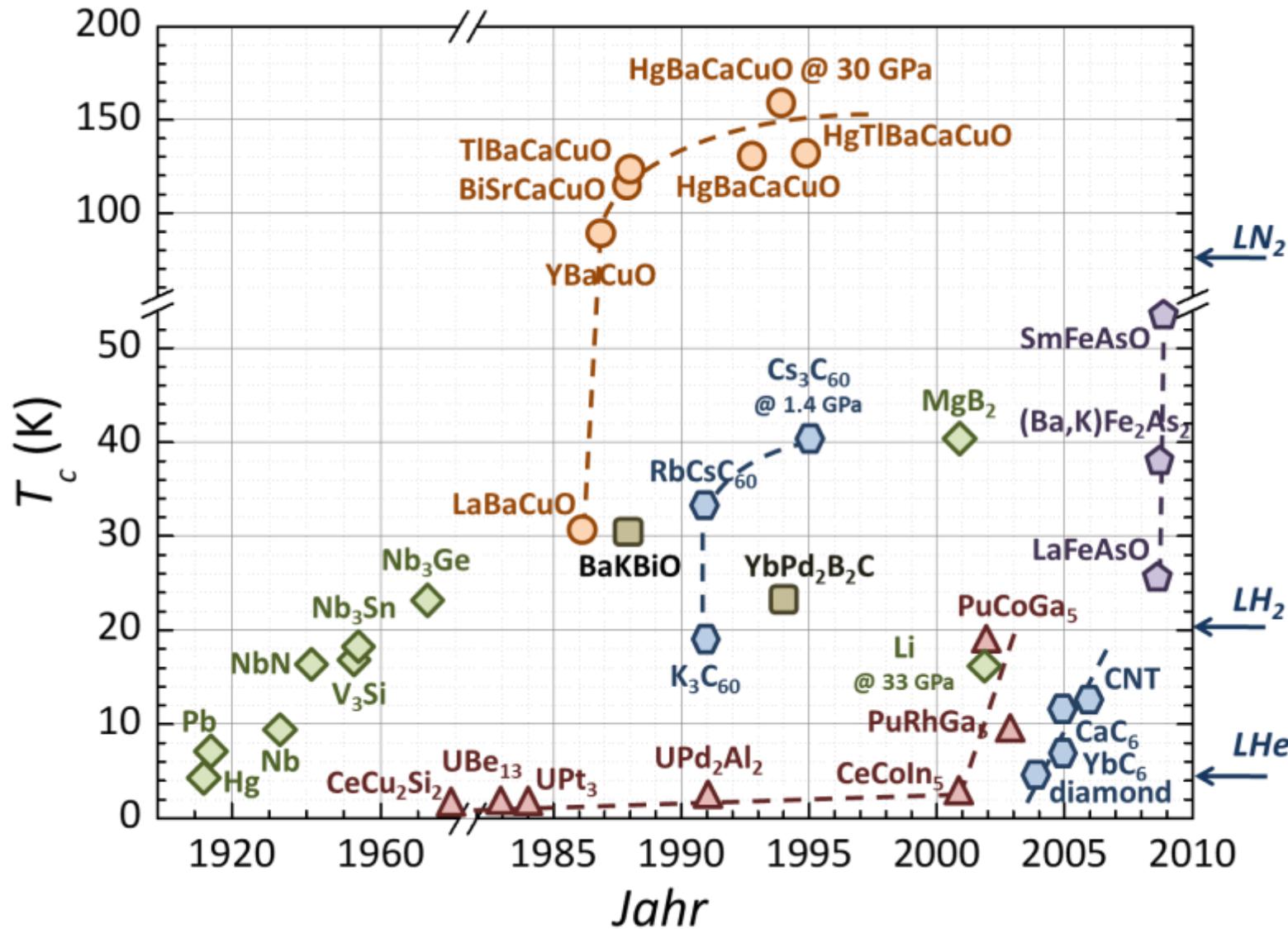
Eremets und Kollegen berichten, dass Schwefelwasserstoff, H_2S , unter hohen Drücken (100–300 GPa) zu einem metallischen Leiter wird, der eine Sprungtemperatur von $T_c = -70^\circ\text{C}$ (203 K) aufweist.

- **2019:**

Eremets et al. messen bei dem Lanthanhydrid LaH_{10} unter hohem Druck (170 GPa) eine Sprungtemperatur von $T_c \simeq 250\text{ K}$ ($\approx -23^\circ\text{C}$) → Material mit der bis heute höchsten Sprungtemperatur

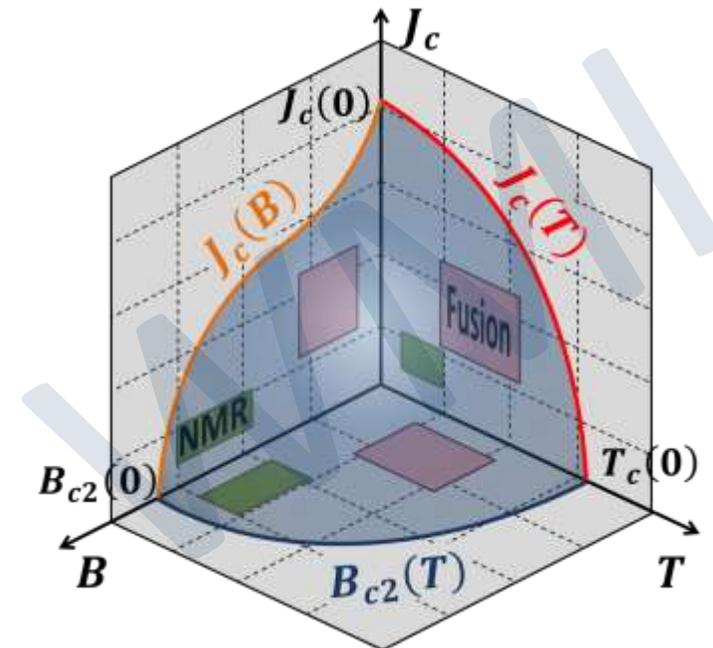
WMI

13.1.3 Sprungtemperaturen



für technische Anwendungen sind drei Materialparameter wichtig:

- hohe Sprungtemperaturen T_c
- hohe kritische Stromdichten J_c
- hohe kritische Magnetfelder B_c



13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

- **Supraleitende Materialsysteme zeigen folgende grundlegenden Phänomene**
 - I. perfekte Leitfähigkeit („Supraleitung“)**
 - II. perfekte Feldverdrängung/idealer Diamagnetismus („Meißner-Ochsenfeld-Effekt“)**
 - III. kritisches Magnetfeld**
 - IV. Typ-I und Typ-II Supraleitung**
 - V. Fluxoid- bzw. Fluss-Quantisierung**
 - VI. Josephson-Effekt**

WMI

I. Perfekte Leitfähigkeit

- Historischer Zusammenhang:
 - um 1900 großes Interesse an T -Abhängigkeit des elektrischem Widerstands bei tiefen Temperaturen
 - Vorhersagen:

James Dewar:	$R \rightarrow \mathbf{0}$	für $T \rightarrow 0$
Augustus Matthiesen:	$R \rightarrow \mathit{const.}$	für $T \rightarrow 0$
William Thomson (Lord Kelvin):	$R \rightarrow \infty$	für $T \rightarrow 0$

- Experiment von **Kamerlingh Onnes** mit Hg ergibt: $R \rightarrow \mathbf{0}$ für $T \leq T_c$
 - Widerstand nimmt für $T \leq T_c$ plötzlich stark ab → Bezeichnung „*Sprungtemperatur*“
 - immer endliche „*Übergangsbreite*“

$$\Delta T_c = T(R = 0.9 R_n) - T(R = 0.1 R_n)$$



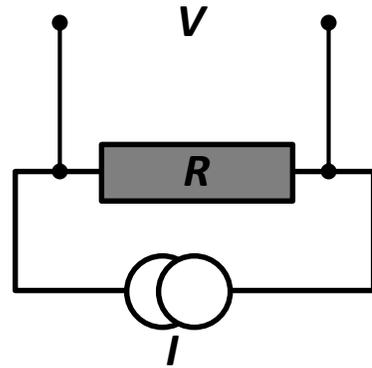
13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

I. Perfekte Leitfähigkeit: Können wir $R = 0$ messen?

Nein!!

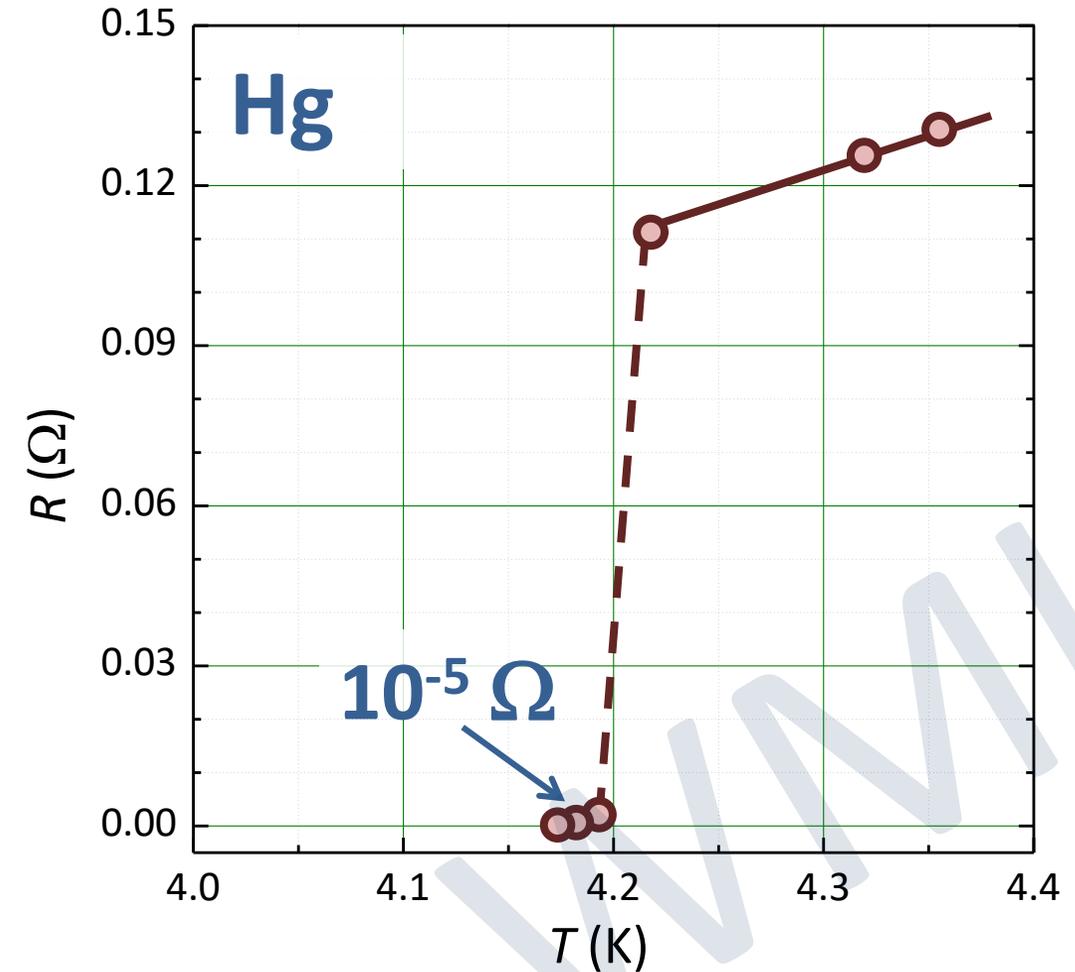
Im Experiment können wir nur untere Schranke für R bestimmen

Auflösungsgrenze bei Spannungsmessung



$$\Delta R = \frac{\Delta V}{I} \approx 10^{-8} \Omega$$

@ $\Delta V = 10 \text{ nV}, I = 1 \text{ A}$



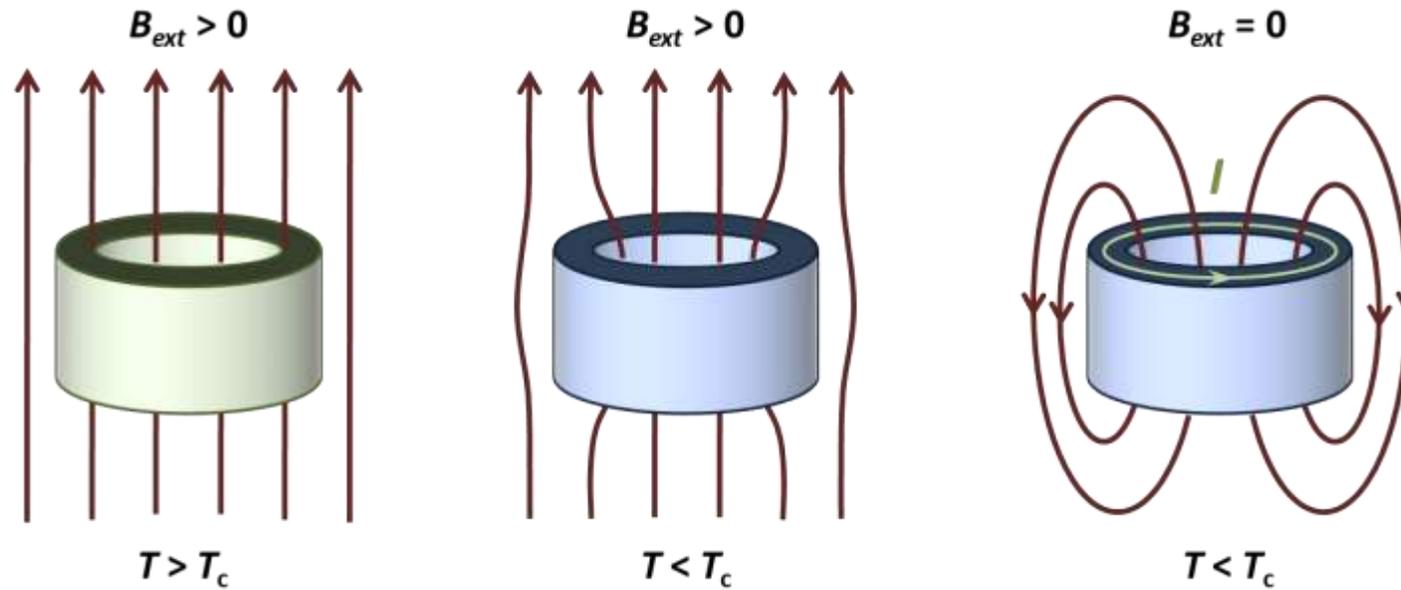
H. K. Onnes:

Widerstand fällt um etwa 4 Größenordnungen (spätere Experimente: um 14 GO)

13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

I. Perfekte Leitfähigkeit: Können wir $R = 0$ messen?

- Messung des Abklingens eines Dauerstroms in einem supraleitenden Zylinder



„Einfrieren“ von magnetischem Fluss in supraleitendem Zylinder

- Integration von Faradayschem Induktionsgesetz: $-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E}$

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_A \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS = \int_A (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS = \oint_{\Gamma} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = 0$$

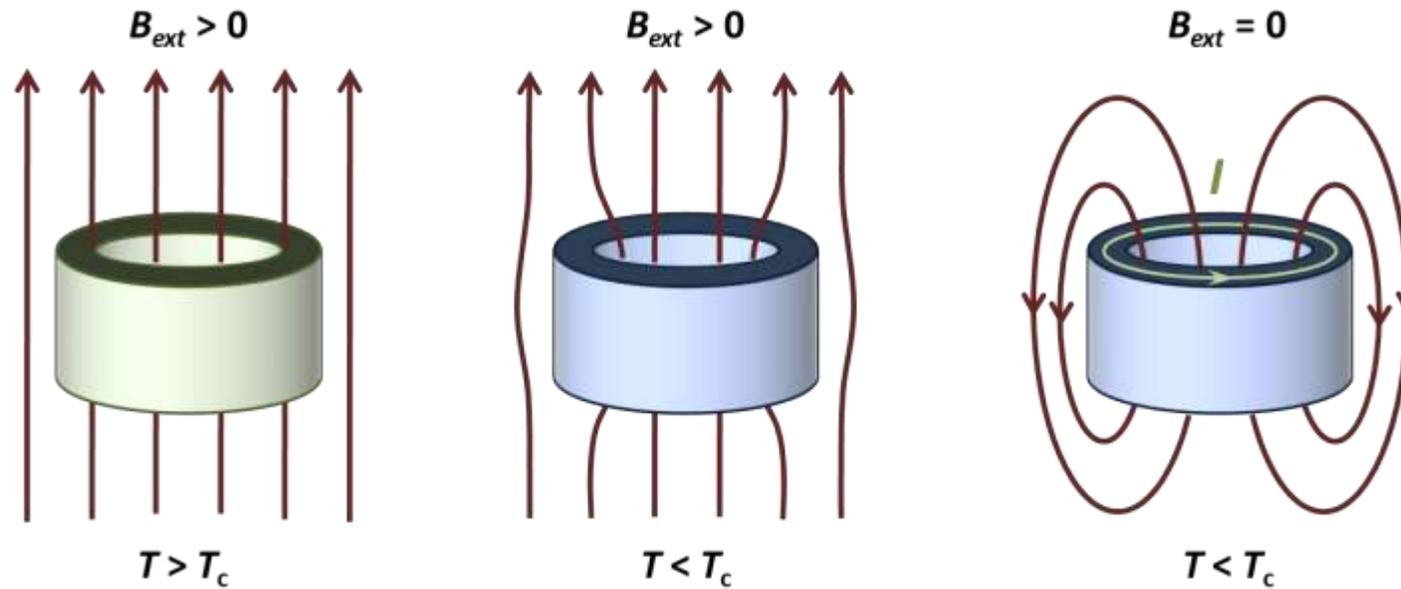
in SL gilt $\mathbf{E} = 0$ wegen $\sigma \rightarrow \infty$: $-\frac{\partial}{\partial t} \int_A \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS = -\frac{\partial}{\partial t} \Phi = 0$

→ Fluss in Zylinder bleibt konstant!!



13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

I. Perfekte Leitfähigkeit: Messung von R durch Messung des Abklingens von Dauerstrom



Experiment: Messung der zeitlichen Änderung des magnetischen Moments aufgrund des eingefrorenen Dauerstroms

$$I(t) = I(0) \exp\left(-\frac{\Delta R}{L} t\right)$$

Beispiel: 10% Abnahme in 1 Jahr
 @ $L = 1 \text{ nH} \rightarrow R < 10^{-17} \Omega$

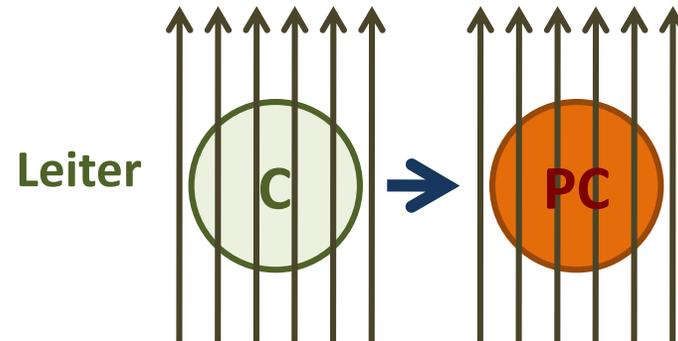
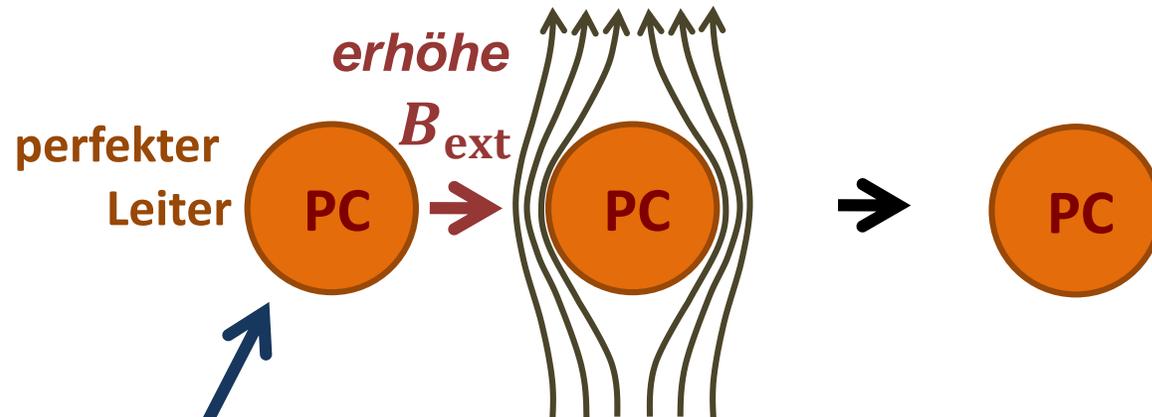
genaueste Messungen: Abklingzeit $> 10^5$ Jahre

13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

II. Perfekter Diamagnetismus: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (1933)

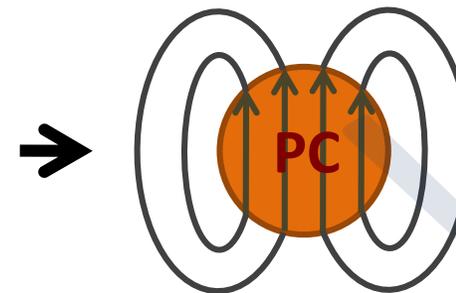
Gedankenexperiment:

Perfekter Leiter
in Magnetfeld



schalte B_{ext} aus

Weg-abhängiger
Endzustand des
perfekten Leiters

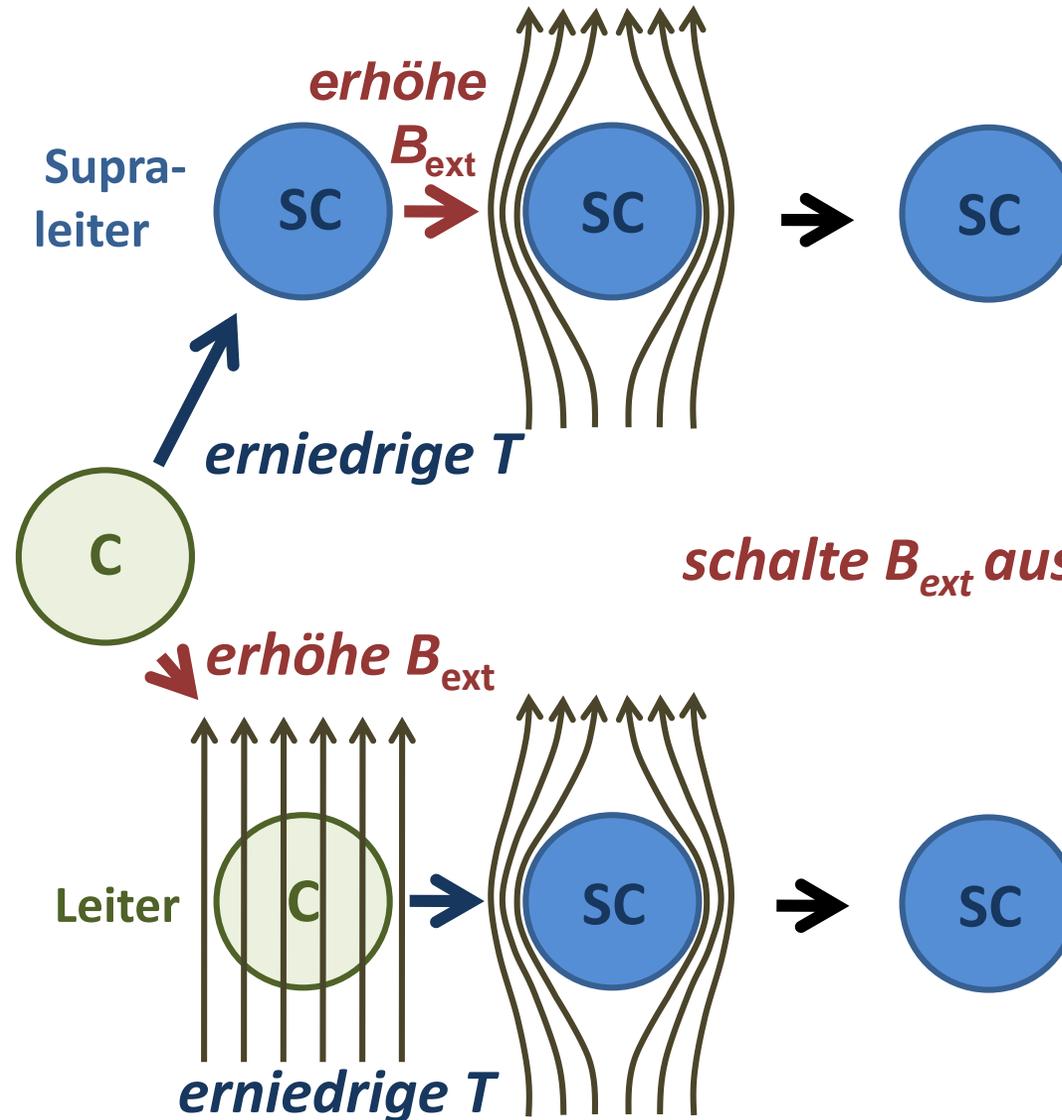


13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

II. Perfekter Diamagnetismus: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (1933)

Experiment:

Supraleiter
in Magnetfeld



Weg-**unabhängiger**
Endzustand des
Supraleiters



supraleitender Zustand ist eine
thermodynamische Phase

*Meißner-Ochsenfeld-
Effekt*
oder
perfekter Diamagnetismus

13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

III. Kritisches Magnetfeld

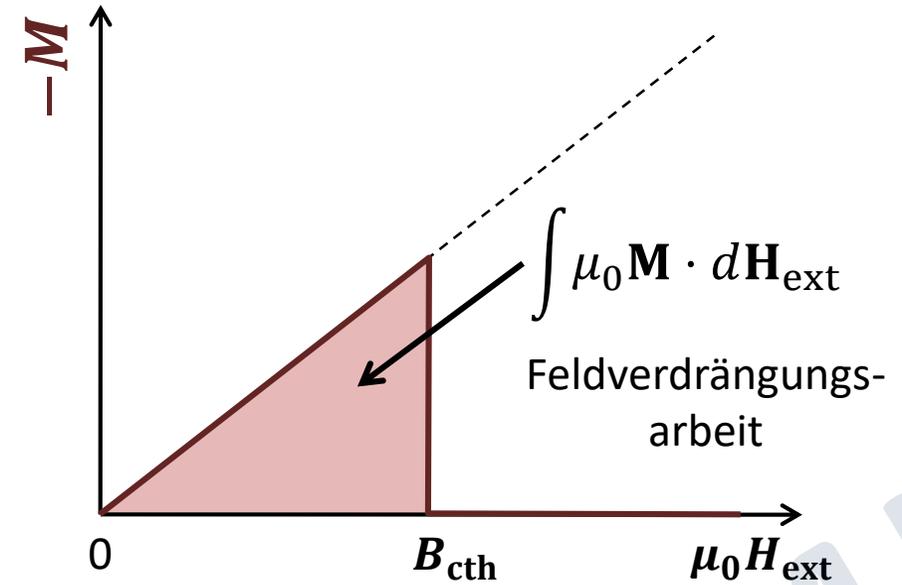
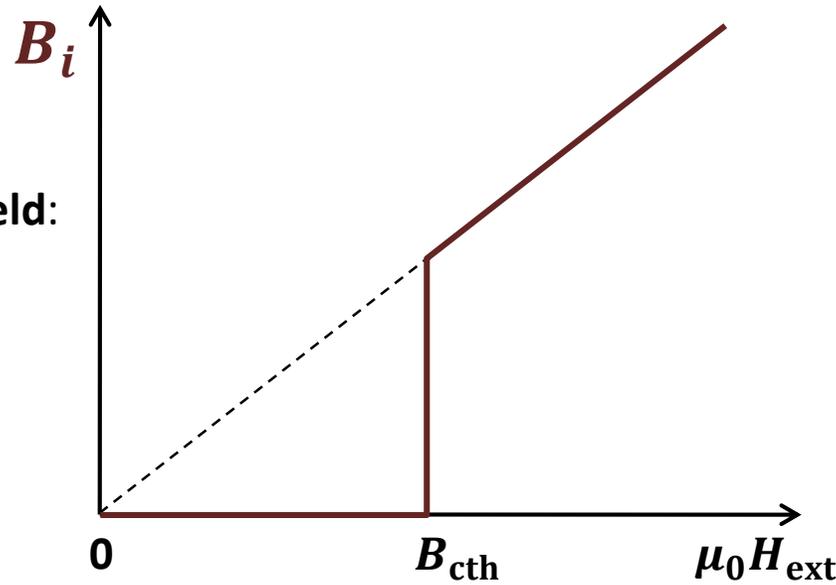
Beobachtung:

perfekter Diamagnetismus nur bis zu T -abhängigem kritischem Magnetfeld $B_{cth}(T)$

Meißner & Ochsenfeld:

$$B_i = 0$$

$$\mathbf{M} = -\mathbf{H}_{ext}$$



$$B_i = \mu_0(\mathbf{H}_{ext} + \mathbf{M}) = 0 \quad \chi = -1$$

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}_{ext}$$

$$\mathbf{M} = \frac{B_i}{\mu_0} - \mathbf{H}_{ext}$$

perfekter Diamagnetismus existiert nur bis zu T -abhängigem kritischem Feld $B_{cth}(T)$

- ➔ Feldverdrängungsarbeit kann nicht größer als Energiegewinn beim Übergang in supraleitenden Zustand werden
- ➔ Kondensationsenergie (genaue Diskussion später)

13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

III. Kritisches Magnetfeld

Interpretation von B_{cth} :

Supraleiter hat nur endliche Energie für Feldverdrängung zur Verfügung

$$\underbrace{\frac{B_{\text{cth}}^2(T)}{2\mu_0}}_{\text{Kondensationsenergie}} = \underbrace{g_n(T) - g_s(T)}_{\text{Differenz der freie Enthalpiedichten von N- und S-Zustand}}$$

Kondensationsenergie

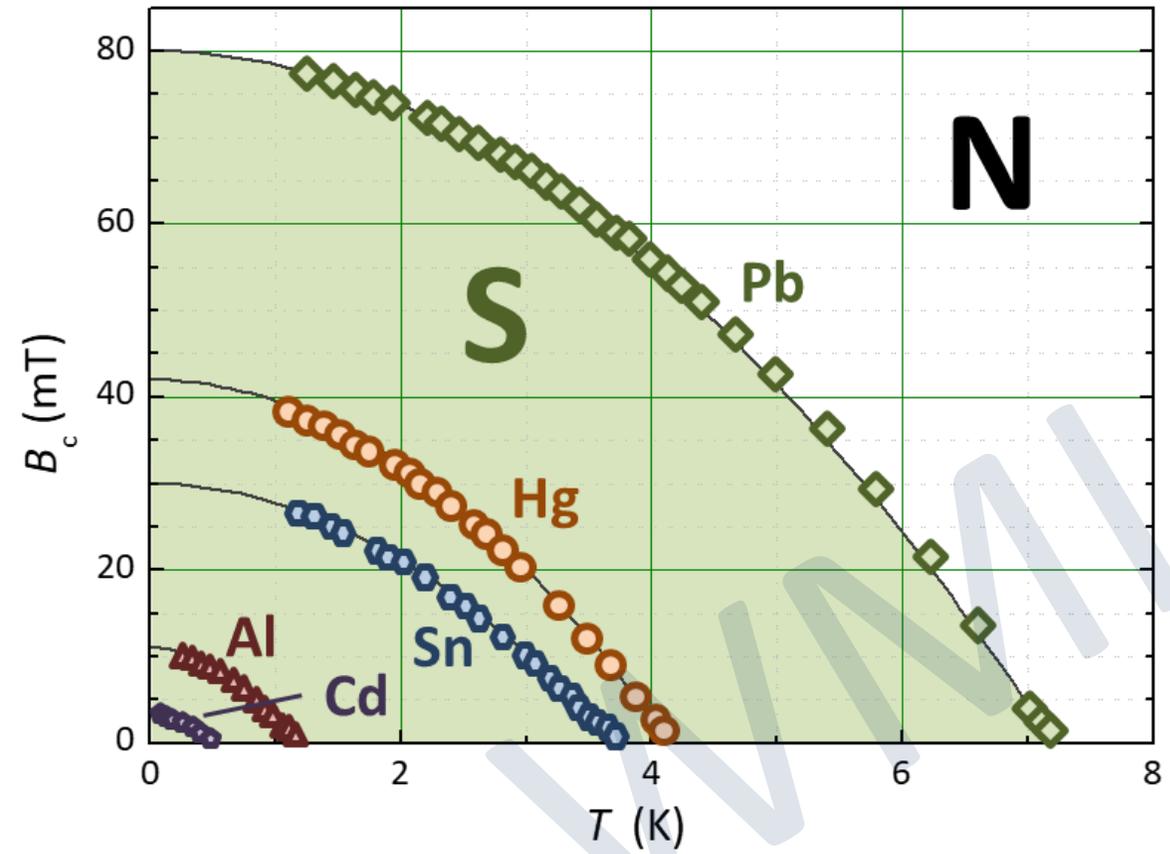
Differenz der freie Enthalpiedichten von N- und S-Zustand

Temperaturabhängigkeit von B_{cth} :

$$B_{\text{cth}}(T) = B_{\text{cth}}(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

(empirische Beziehung, Berechnung im Rahmen der BCS-Theorie)

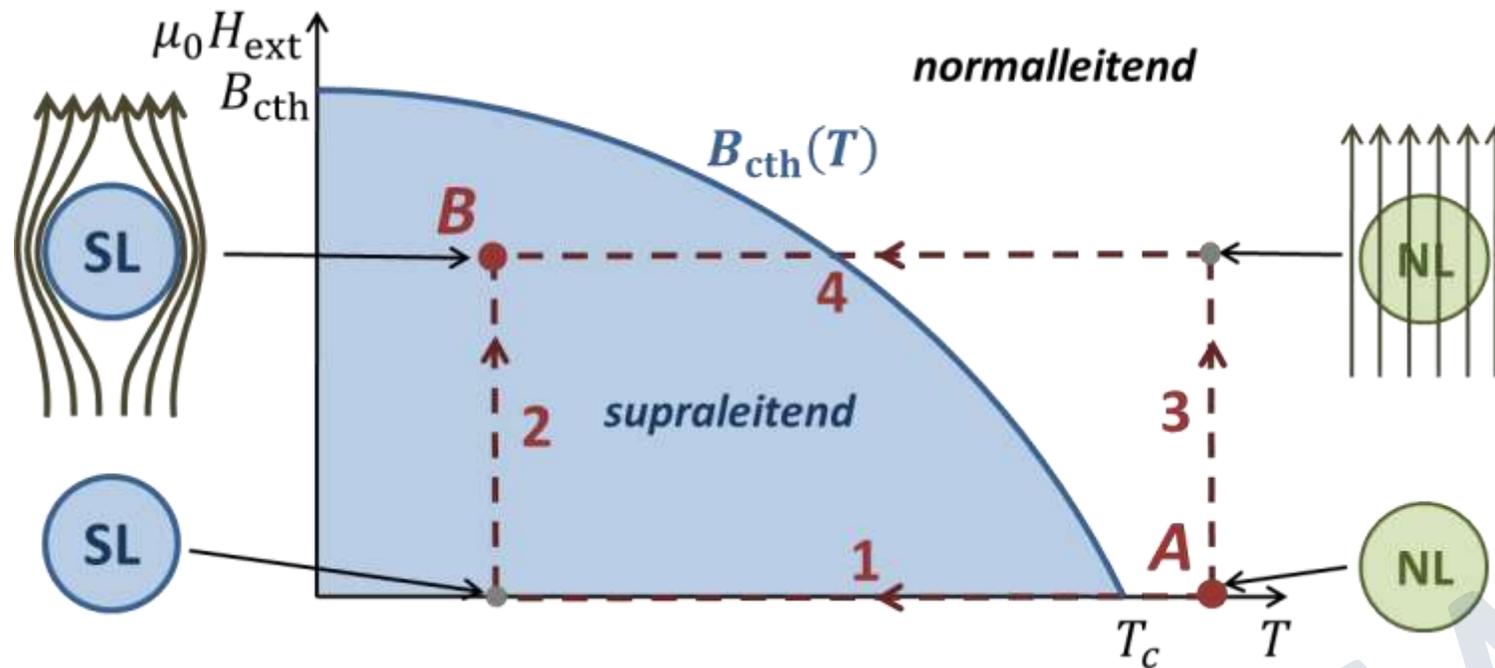
Phasendiagramm



13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

III. Kritisches Magnetfeld

- Supraleiter: $B_i = 0$ unabhängig von Weg zu Punkt **B**



➔ supraleitender Zustand ist *thermodynamische Phase*

• *Supraleitung & Suprafluidität: wichtige Entdeckungen/Entwicklungen*

- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- 1952: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg & Landau**)
- 1957: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- 1957: BCS Theorie (**Bardeen, Cooper & Schrieffer**)
- 1961: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- 1962: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson, Giaever**)
- 1966: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- 1971: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee, Richardson & Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- 1979: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- 1981: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- 1986: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz & Müller**)
- 2006: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

Blau:
Nobelpreisträger



• *Supraleitende Materialien und Sprungtemperaturen*

- tausende von supraleitenden Materialien bekannt

Elemente, Legierungen, Schwere-Fermionen-SL, organische Supraleiter, supraleitende Oxide, Eisen-Pniktide,

- höchste Sprungtemperatur: $T_c = 135$ K (HgTlBaCaCuO), $T_c = 165$ K (HgBaCaCuO @ 30 GPa)

$$T_c = 201 \text{ K (H}_2\text{S @ } p = 155 \text{ GPa),}$$

$$T_c = 250 \text{ K (Lanthanhydrid @ } p = 170 \text{ GPa),}$$

• *Grundlegende Eigenschaften*

a. *perfekte Leitfähigkeit* (Supraleitfähigkeit):

$$\rightarrow \sigma \rightarrow \infty, \rho \rightarrow 0$$

b. *perfekter Diamagnetismus* (Feldverdrängung, Meißner-Ochsenfeld-Effekt)

→ perfekter Diamagnetismus:

$$\chi \rightarrow -1, \quad M = -H_{\text{ext}}, \quad B_i = \mu_0(H_{\text{ext}} + M) = \mu_0 H_{\text{ext}}(1 + \chi) \rightarrow 0$$

c. *kritisches Magnetfeld* B_{cth}

→ perfekte Feldverdrängung nur bis zu kritischem Magnetfeld B_{cth}

→ geleistete Verdrängungsarbeit $W/V = \int_0^{B_{\text{cth}}} \mu_0 M dH_{\text{ext}} = \frac{B_{\text{cth}}^2}{2\mu_0} = \text{Kondensationsenergie}$

→ empirische Temperaturabhängigkeit $B_{\text{cth}}(T) = B_{\text{cth}}(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$