



**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  $\lambda$ )  $\rightarrow$  **Spin-Wellen**
  - **dipolare Moden:**  $q > 0, \lambda < \infty$  (dipolare Kopplung dominiert bei größeren  $\lambda$ )

## • 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  $\mathbf{B}_{\text{eff}}$ :  
Drehmoment  $\mathbf{T} = V\mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = -\frac{V}{\gamma} \frac{d\mathbf{M}}{dt}$  ( $\gamma$  = 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)

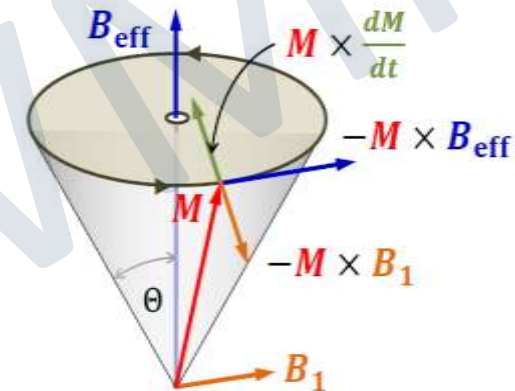
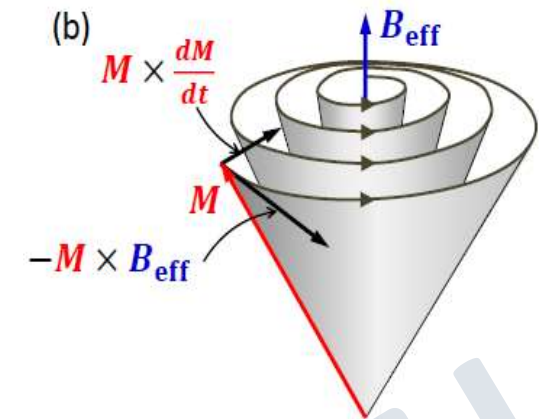
- verbesserte Bewegungsgleichung durch Einführung von Dissipationsterm  $\rightarrow \frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}_{\text{eff}} + \alpha \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}$

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

## • Ferromagnetische Resonanz (FMR)

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

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  $\mathbf{S}_i$

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

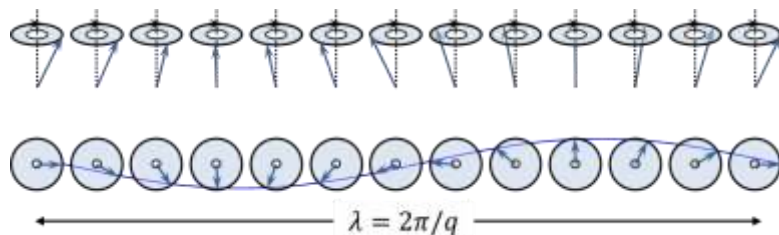
$$\mathbf{B}_{\text{eff},i} = \mathbf{B}_{\text{ext}} + \mathbf{B}_{A,i} = \mathbf{B}_{\text{ext}} - \frac{J_A}{g_s \mu_B \hbar} (\mathbf{S}_{i-1} + \mathbf{S}_{i+1})$$

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  $T = 0$ :  $NS/\hbar$   
 $T > 0$ :  $NS/\hbar - \sum_q n_q$

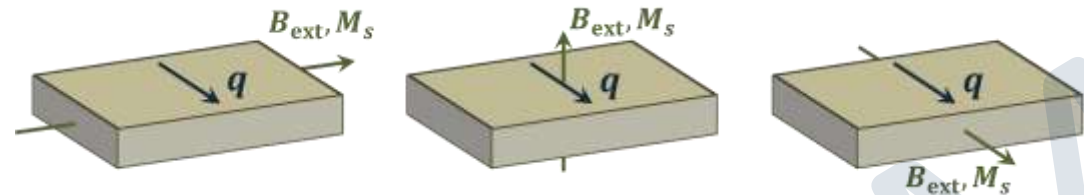
$$\frac{M_s(0) - M_s(T)}{M_s(0)} = \frac{\Delta M_s}{M_s(0)} = \frac{\sum_q \langle n_q \rangle}{NS/\hbar}$$

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

**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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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

- Tiefemperaturtechnik in Deutschland: Carl von Linde

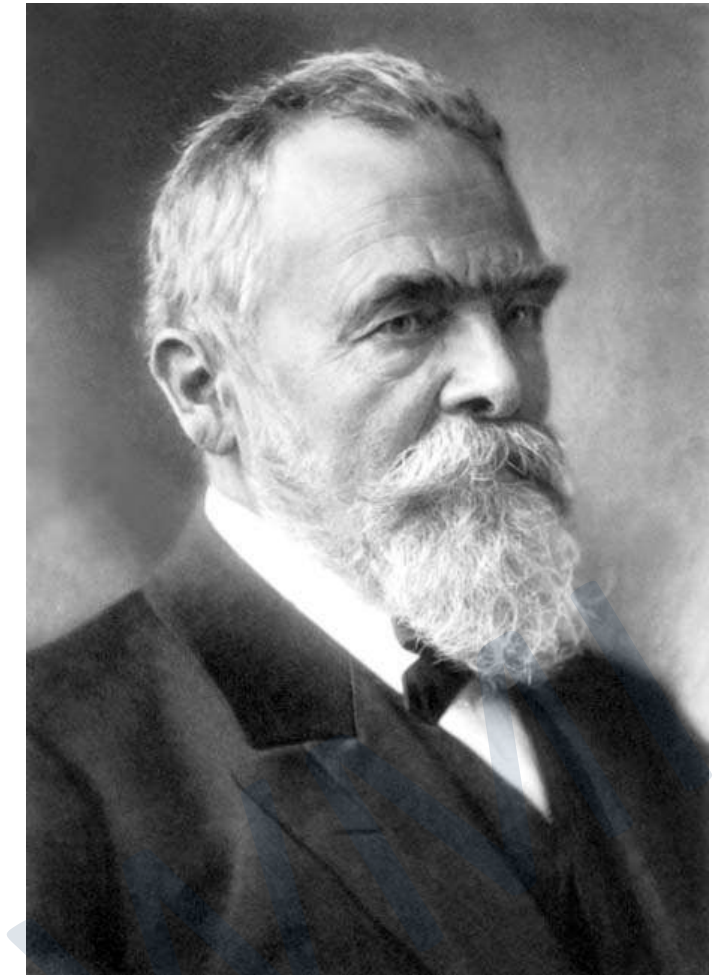
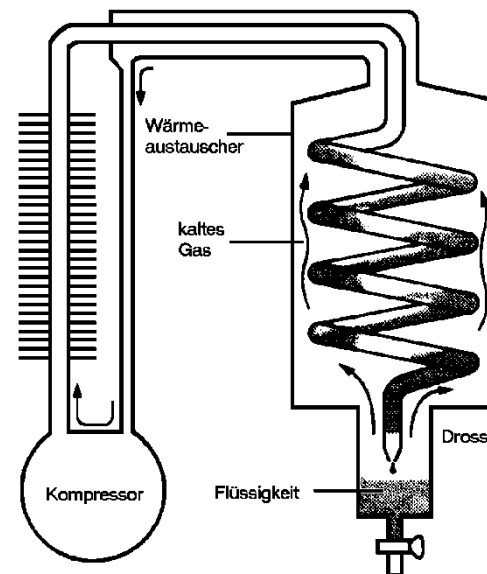
**1868** Ruf an die Polytechnische Schule München

**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 Gegenstromverfahren*, 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)

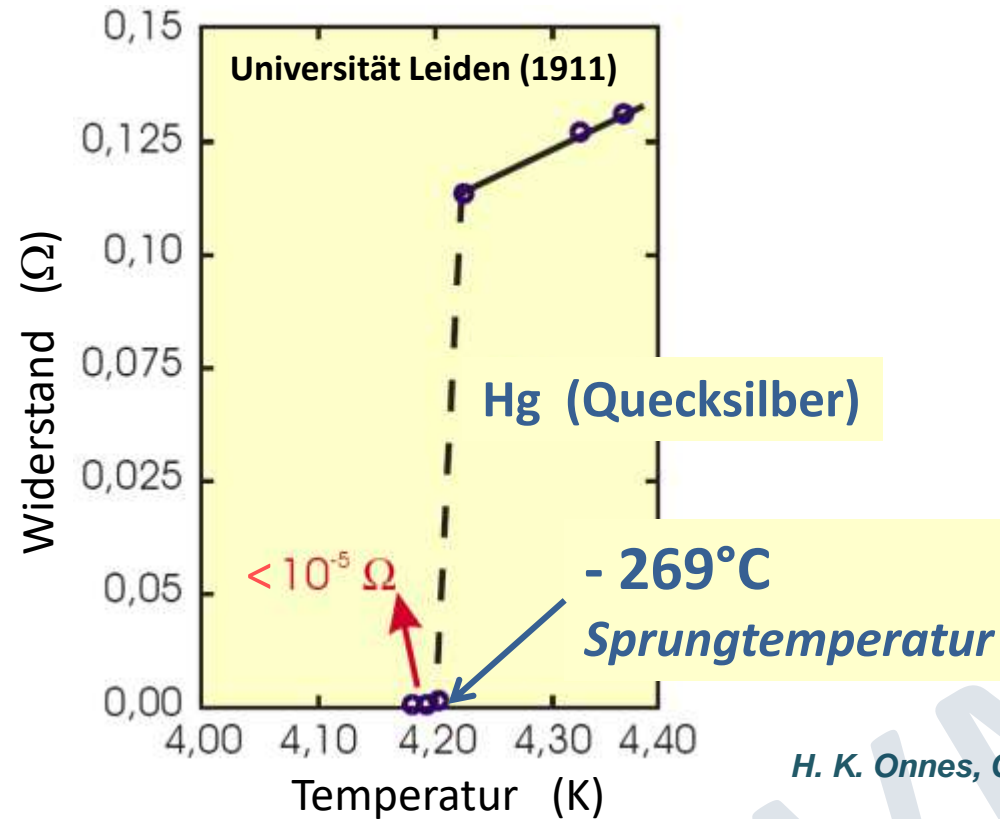
Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926)



- Heliumverflüssigung: 1908
- Entdeckung der Supraleitung: 1911

**Nobelpreis für Physik 1913**

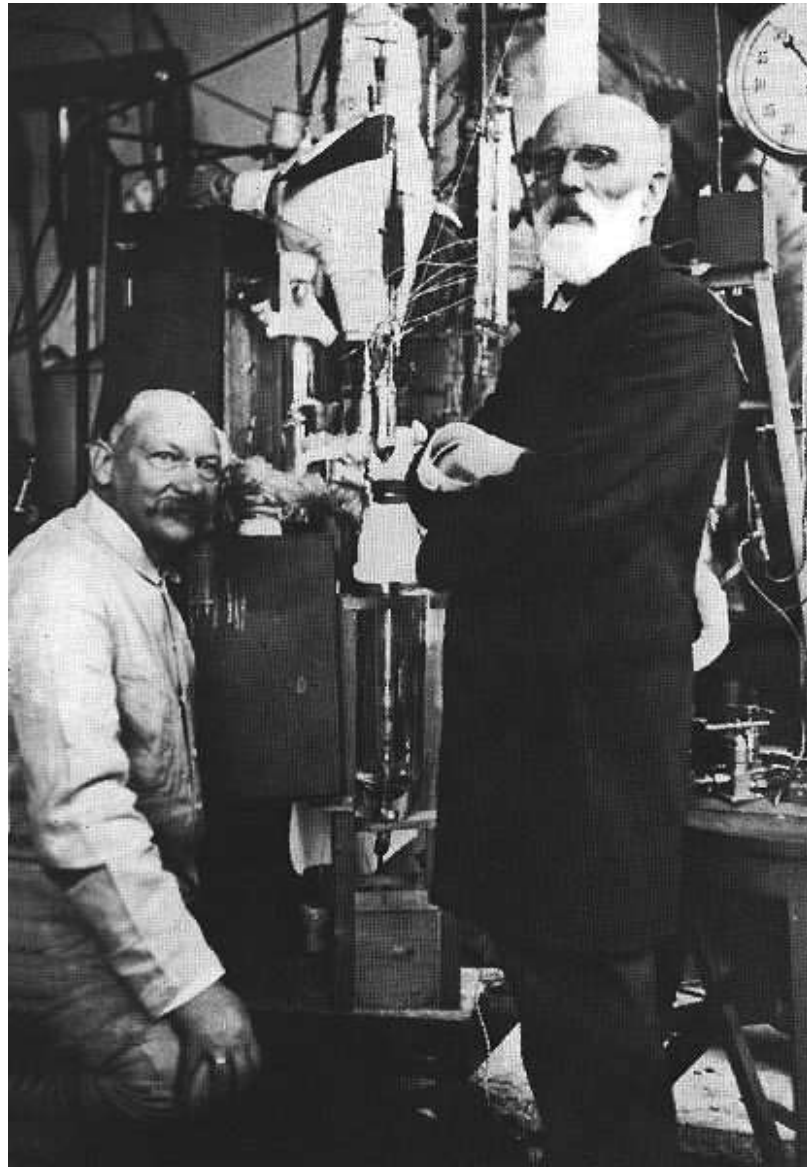
Namensgebung: *unendlich hohe Leitfähigkeit* → **Supraleitung**



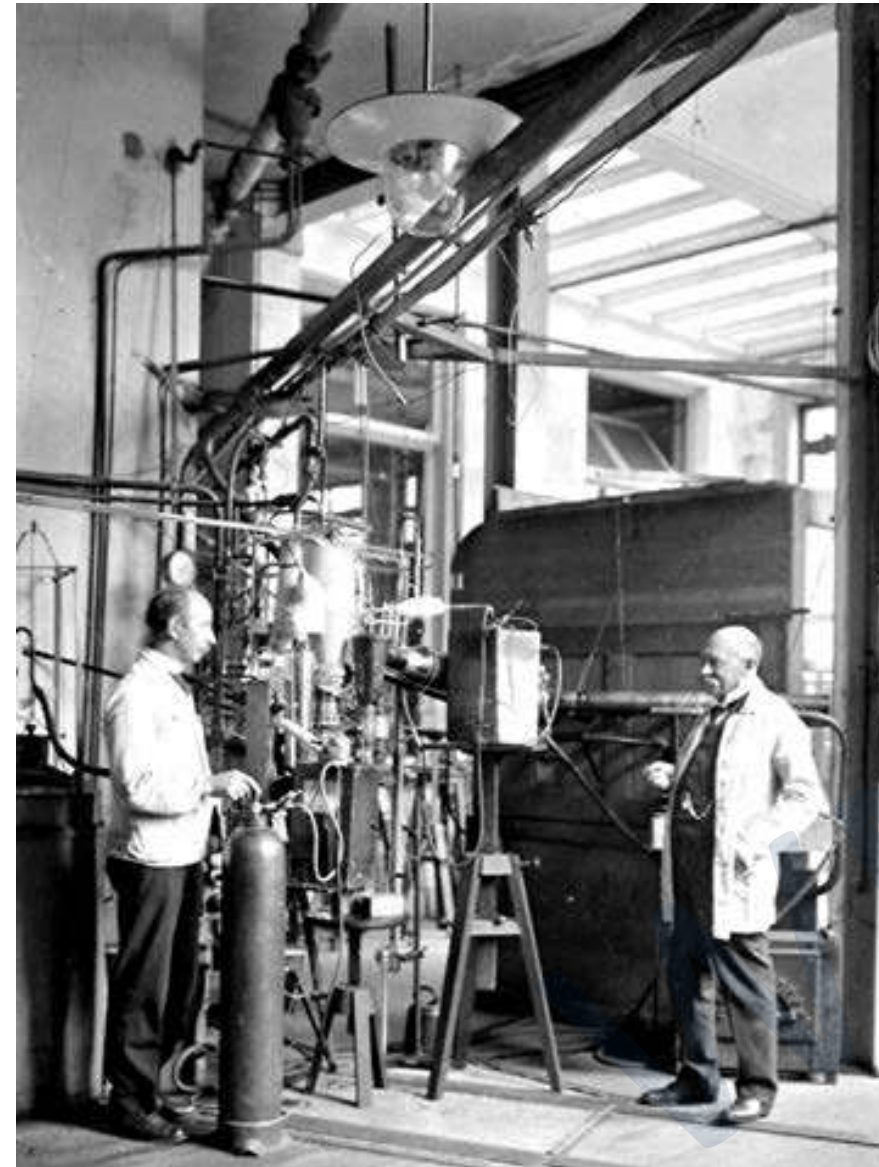
H. K. Onnes, Comm. Leiden 120b (1911)

„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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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

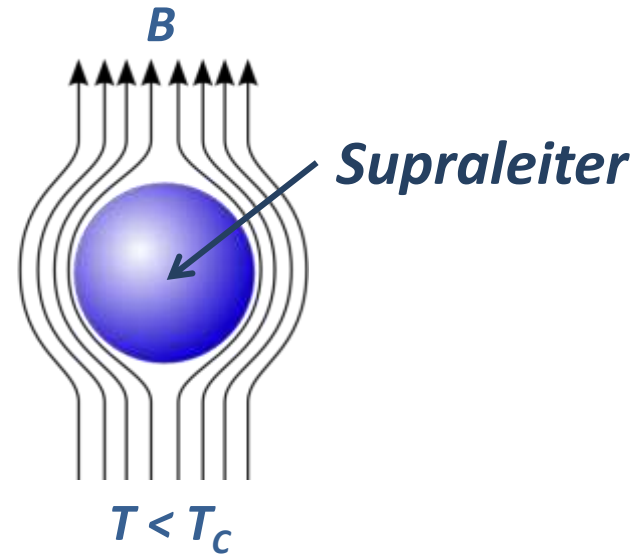
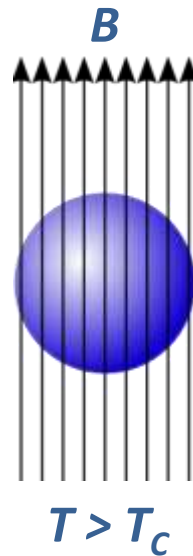
- Entdeckung des Meißner-Ochsenfeld-Effekts (perfekter Diamagnetismus) in Sn und Pb (1933)



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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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



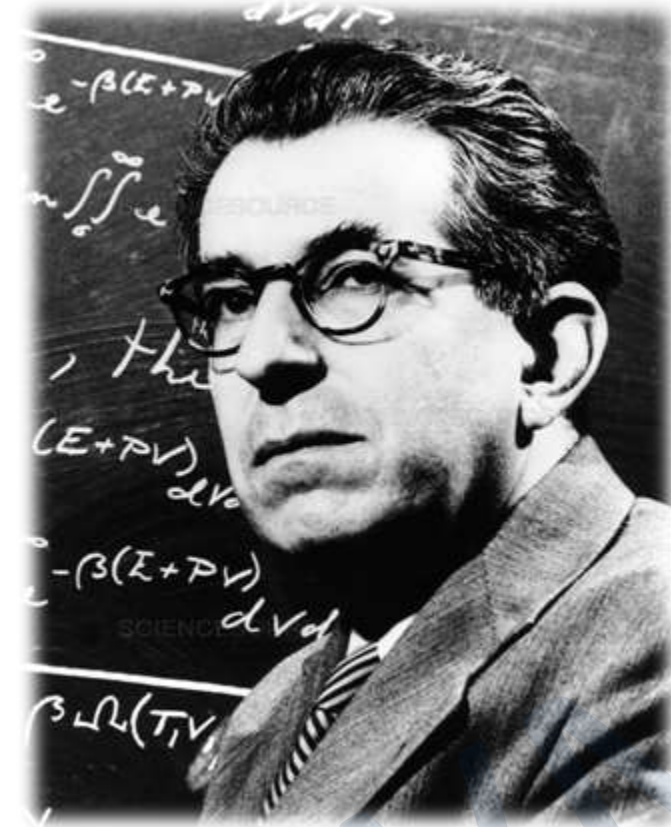
# 13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- 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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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

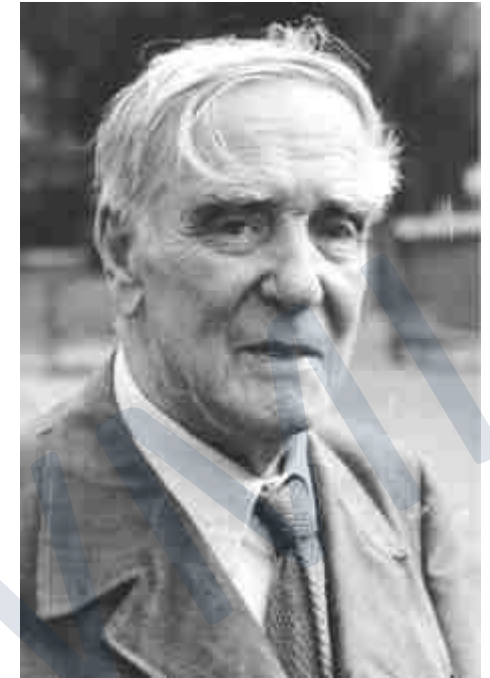


# 13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- 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“*





# 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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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)

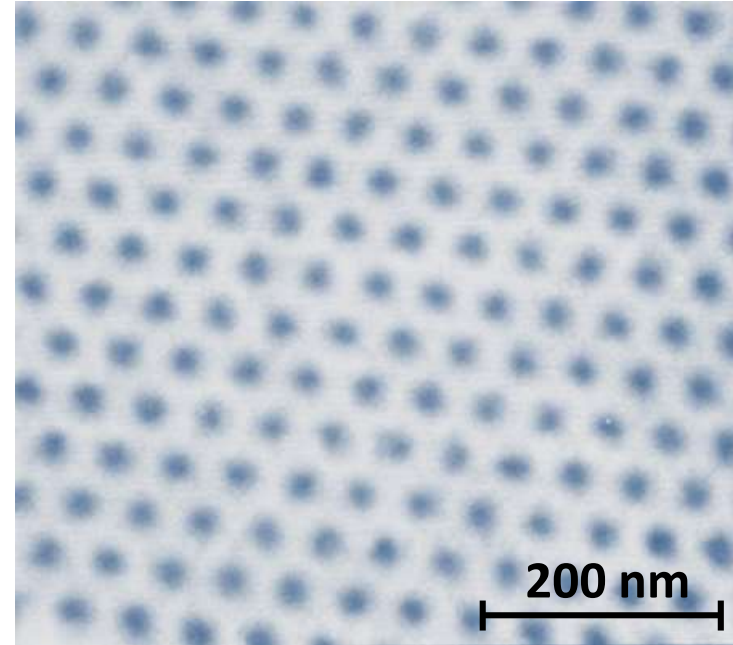


**Alexei Abrikosov**

**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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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)

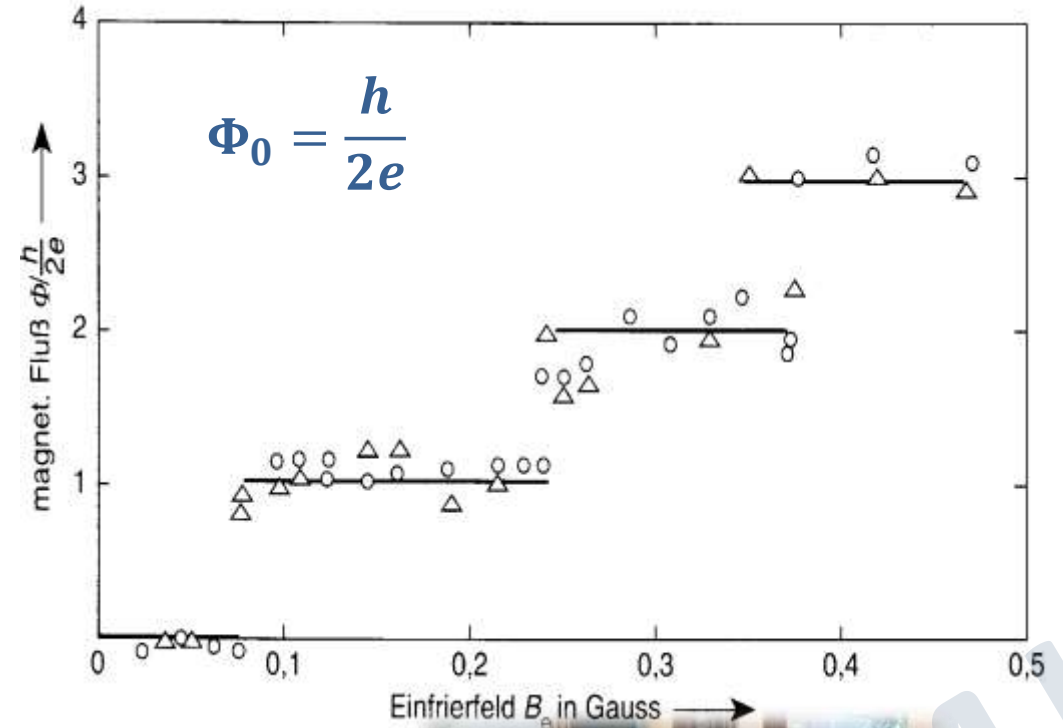
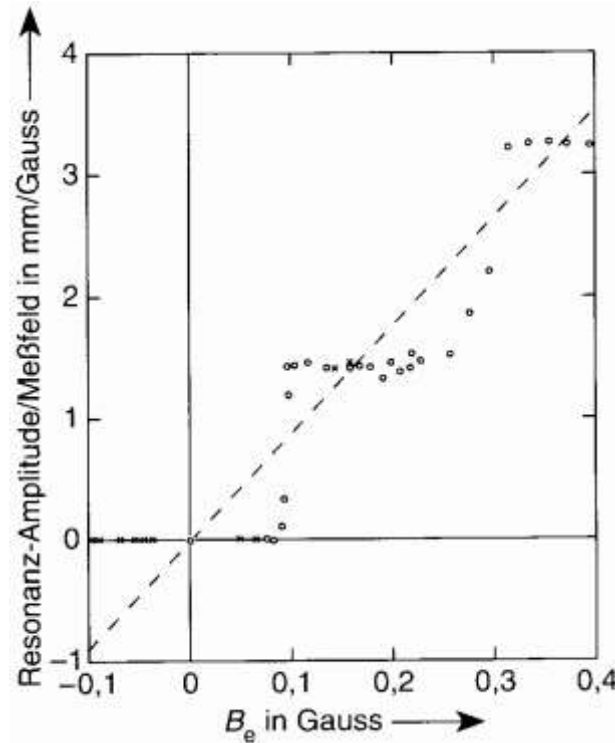
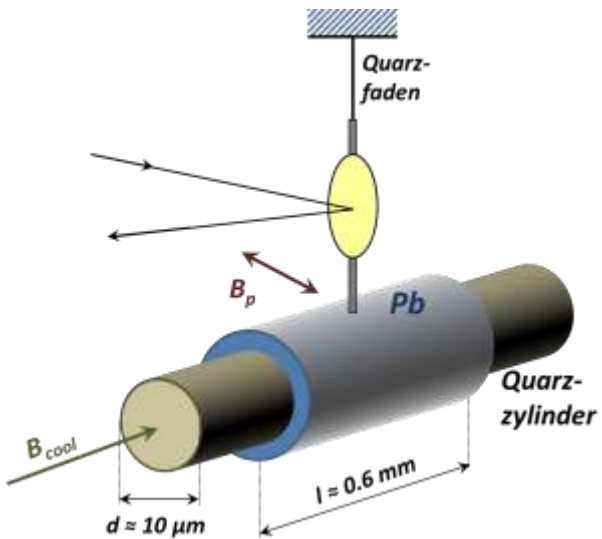
Blau:  
Nobelpreisträger





# 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



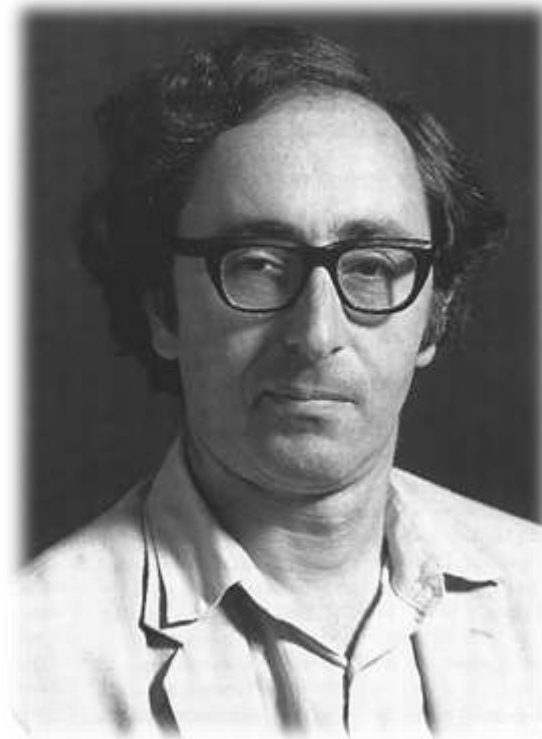
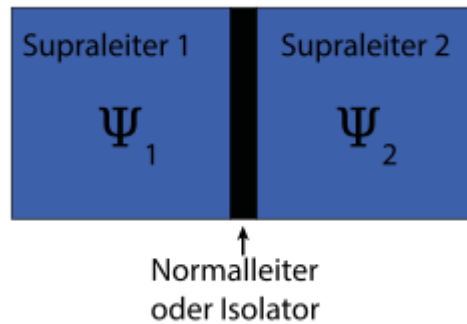
- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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



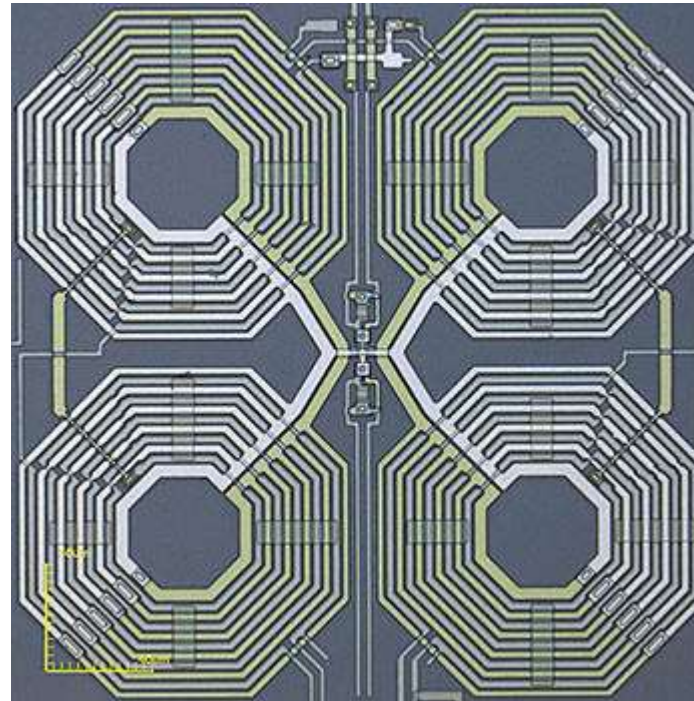


# 13.1.1 Geschichte der Supraleitung

- 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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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

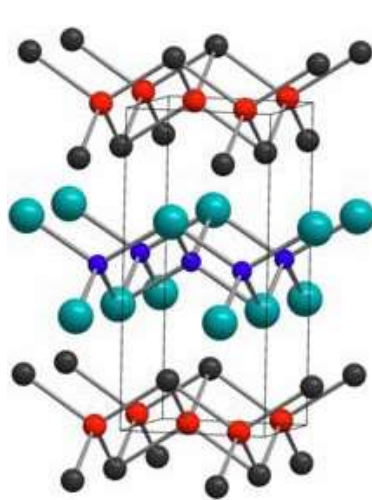
- 1908: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- 1911: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- 1933: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- 1935: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- 1936: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- 1939: Entdeckung von suprafluidem  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee**, **Richardson** & **Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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

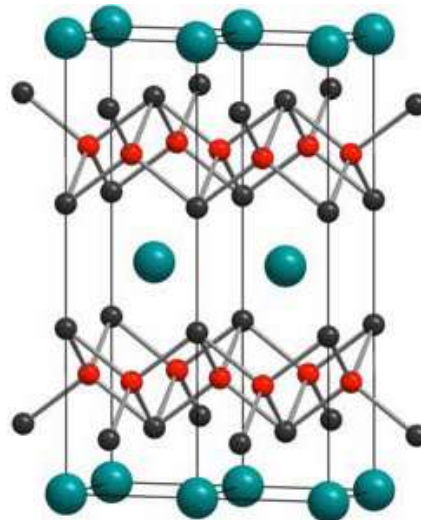


# 13.1.1 Geschichte der Supraleitung

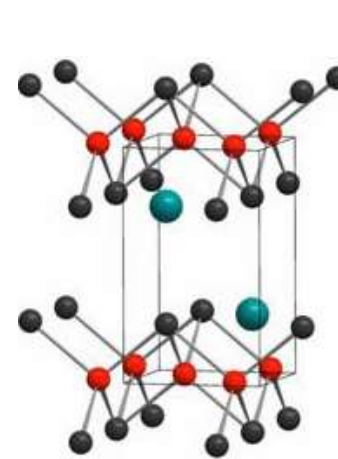
- Entdeckung der Fe-basierten Supraleiter (2006)
  - entdeckt im Jahr 2006 durch **Hideo Hosono** et al. in  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ,  $T_c = 26 \text{ K}$
  - bis heute wurden mehrere weitere Verbindungen/Familien gefunden mit  $T_c$  bis zu 55 K



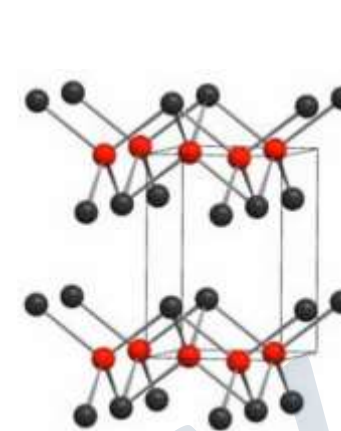
LaFeAsO (1111)



BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (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 $p = 1$ bar																					
		supraleitend bei $p \gg 1$ bar																					
		nichtsupleitend																					
		magnetisch ordnend																					
<sup>1</sup> H																		<sup>2</sup> He					
<sup>3</sup> Li 20	<sup>4</sup> Be 0.03																	<sup>5</sup> B 11	<sup>6</sup> C 0.6	<sup>7</sup> N	<sup>8</sup> O	<sup>9</sup> F	<sup>10</sup> Ne
<sup>11</sup> Na	<sup>12</sup> Mg																	<sup>13</sup> Al 1.19	<sup>14</sup> Si 8.5	<sup>15</sup> P 18	<sup>16</sup> S 17	<sup>17</sup> Cl	<sup>18</sup> Ar
<sup>19</sup> K	<sup>20</sup> Ca 15	<sup>21</sup> Sc 0.35	<sup>22</sup> Ti 0.4	<sup>23</sup> V 5.3	<sup>24</sup> Cr	<sup>25</sup> Mn	<sup>26</sup> Fe 2.0	<sup>27</sup> Co	<sup>28</sup> Ni	<sup>29</sup> Cu	<sup>30</sup> Zn 0.9	<sup>31</sup> Ga 1.09	<sup>32</sup> Ge 5.4	<sup>33</sup> As 2.7	<sup>34</sup> Se 5.6	<sup>35</sup> Br 1.4	<sup>36</sup> Kr						
<sup>37</sup> Rb	<sup>38</sup> Sr 4.0	<sup>39</sup> Y 2.7	<sup>40</sup> Zr 0.55	<sup>41</sup> Nb 9.2	<sup>42</sup> Mo 0.923	<sup>43</sup> Tc 7.8	<sup>44</sup> Ru 0.5	<sup>45</sup> Rh 320 μK	<sup>46</sup> Pd	<sup>47</sup> Ag	<sup>48</sup> Cd 0.55	<sup>49</sup> In 3.4	<sup>50</sup> Sn 3.7	<sup>51</sup> Sb 5.6	<sup>52</sup> Te 7.4	<sup>53</sup> I 1.1	<sup>54</sup> Xe						
<sup>55</sup> Cs	<sup>56</sup> Ba 5.1	<sup>57</sup> La 5.9	<sup>72</sup> Hf 0.16	<sup>73</sup> Ta 4.4	<sup>74</sup> W 0.01	<sup>75</sup> Re 1.7	<sup>76</sup> Os 0.65	<sup>77</sup> Ir 0.14	<sup>78</sup> Pt	<sup>79</sup> Au	<sup>80</sup> Hg 4.15	<sup>81</sup> Tl 2.4	<sup>82</sup> Pb 7.2	<sup>83</sup> Bi 8.7	<sup>84</sup> Po	<sup>85</sup> At	<sup>86</sup> Pn						
<sup>87</sup> Fr	<sup>88</sup> Ra	<sup>89</sup> Ac	<sup>58</sup> Ce 1.7	<sup>59</sup> Pr	<sup>60</sup> Nd	<sup>61</sup> Pm	<sup>62</sup> Sm	<sup>63</sup> Eu	<sup>64</sup> Gd	<sup>65</sup> Tb	<sup>66</sup> Dy	<sup>67</sup> Ho	<sup>68</sup> Er	<sup>69</sup> Tm	<sup>70</sup> Yb	<sup>71</sup> Lu 0.1							
			<sup>90</sup> Th 1.37	<sup>91</sup> Pa 1.3	<sup>92</sup> U 0.2	<sup>93</sup> Np	<sup>94</sup> Pu	<sup>95</sup> Am 0.8	<sup>96</sup> Cm	<sup>97</sup> Bk	<sup>98</sup> Cf	<sup>99</sup> Es	<sup>100</sup> Fm	<sup>101</sup> Md	<sup>102</sup> No	<sup>103</sup> 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. Nb<sub>3</sub>Ge ( $T_c = 23.2$  K), Nb<sub>3</sub>Sn ( $T_c = 18.0$  K) und V<sub>3</sub>Si ( $T_c = 17$  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 MgB<sub>2</sub> mit  $T_c = 40$  K

- **Schwere Fermionen Supraleiter**

- Entdeckung 1979 durch Frank Steglich: CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> 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  $T_c = 56 \text{ K}$

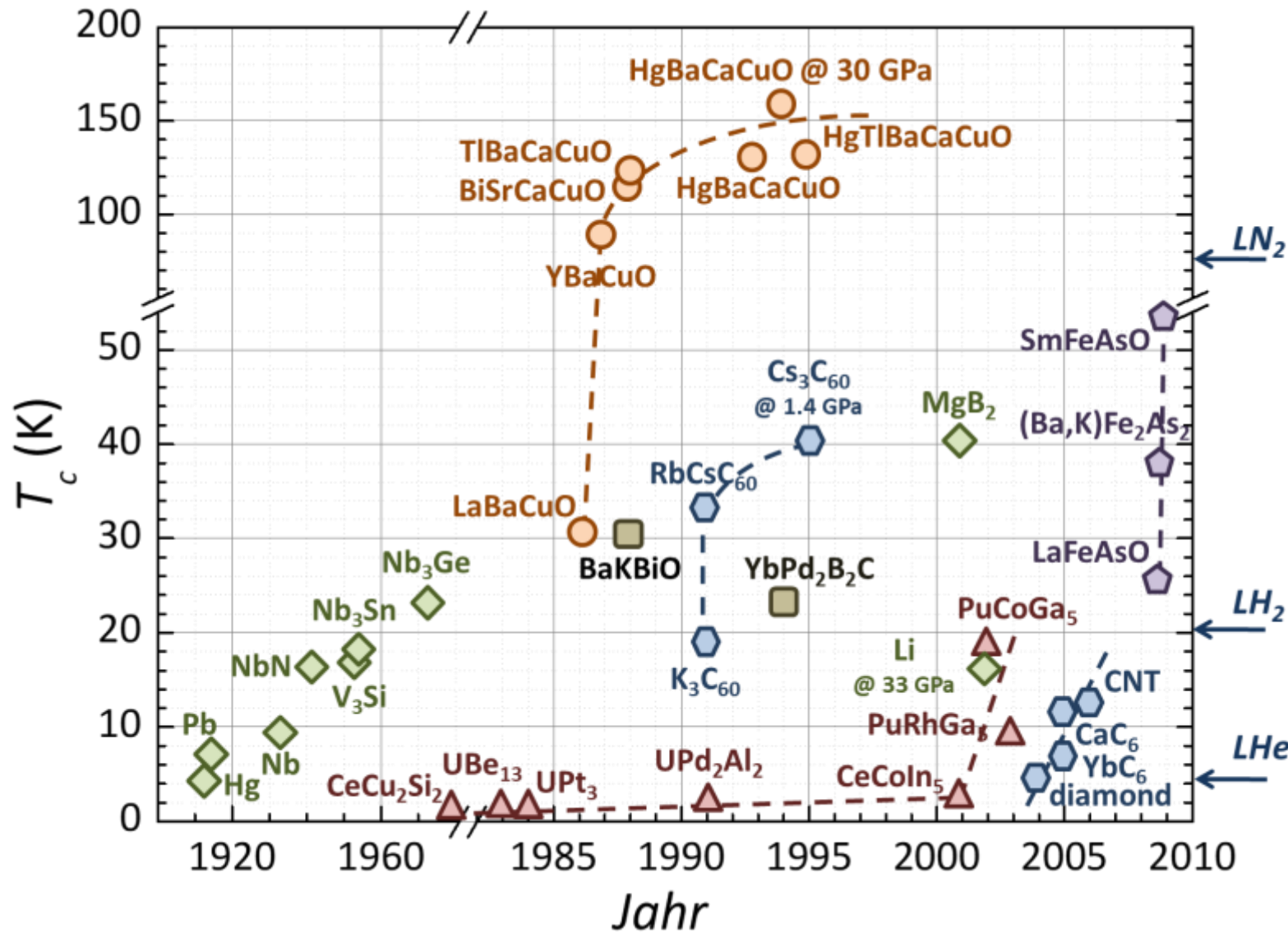


# 13.1.2 Supraleitende Materialien

- Vor kurzem gemachte Entdeckungen
  - **2015:**  
Eremets und Kollegen berichten, dass Schwefelwasserstoff,  $\text{H}_2\text{S}$ , 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  $\text{LaH}_{10}$  unter hohem Druck (170 GPa) eine Sprungtemperatur von  $T_c \simeq 250\text{ K}$  ( $\approx -23^\circ\text{C}$ )  $\rightarrow$  Material mit der bis heute höchsten Sprungtemperatur

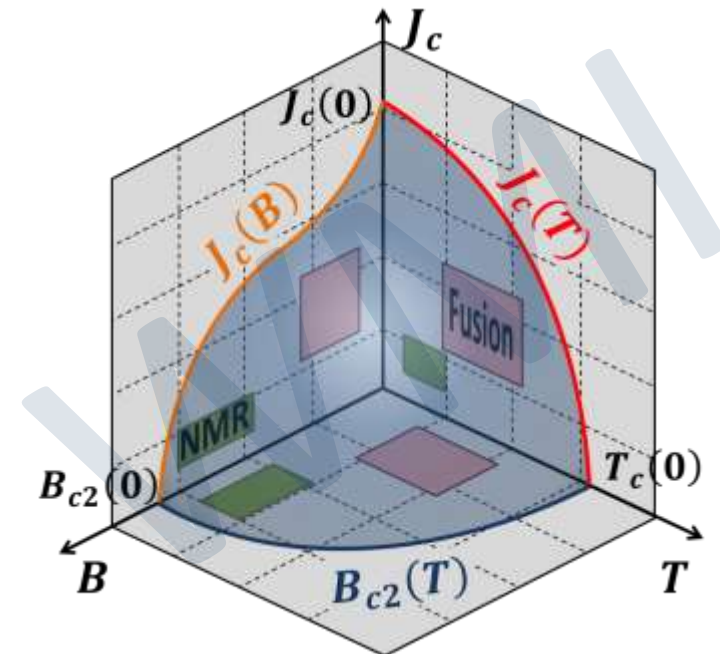
WMI

# 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:
 

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

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





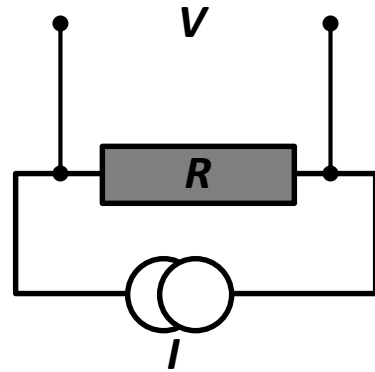
# 13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

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

**Nein!!**

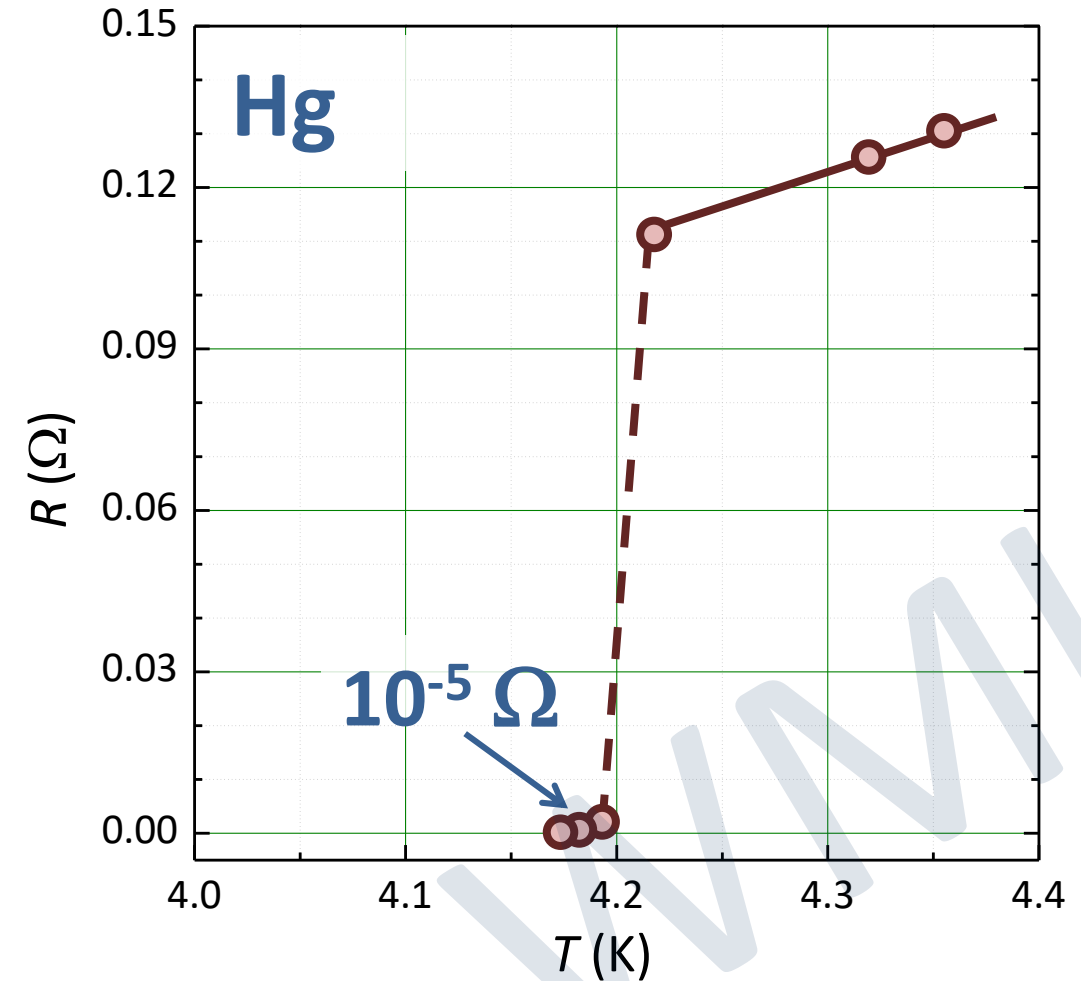
Im Experiment können wir nur untere Schranke für  $R$  bestimmen

Auflösungsgrenze bei Spannungsmessung



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

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



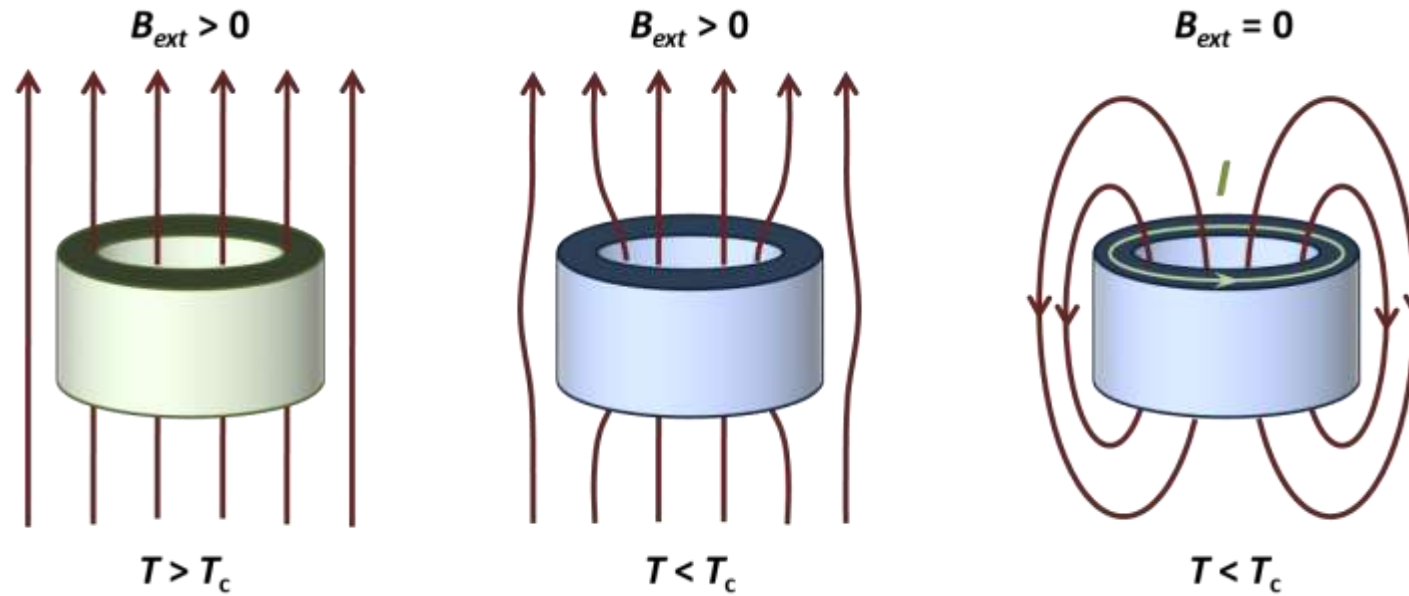
**H. K. Onnes:**

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:  $-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E}$

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

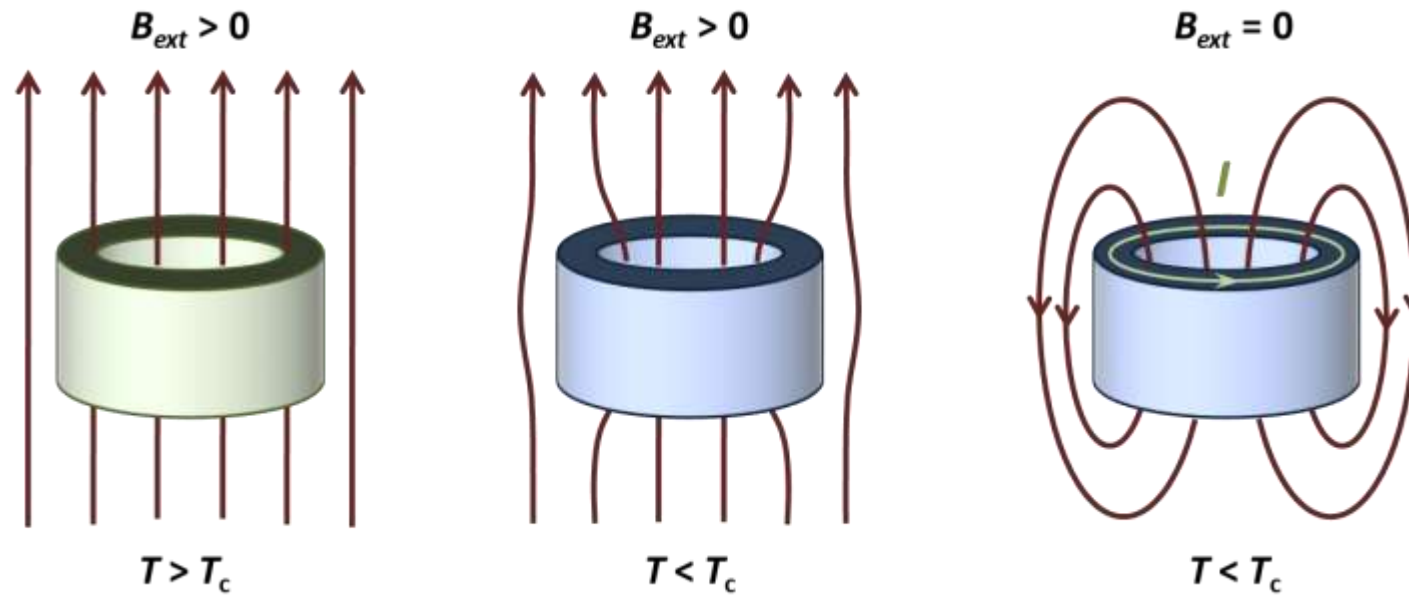
in SL gilt  $\mathbf{E} = 0$  wegen  $\sigma \rightarrow \infty$ :  $-\frac{\partial}{\partial t} \int_A \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS = -\frac{\partial}{\partial t} \Phi = 0$

**→ 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  
 @  $L = 1 \text{ nH} \rightarrow R < 10^{-17} \Omega$

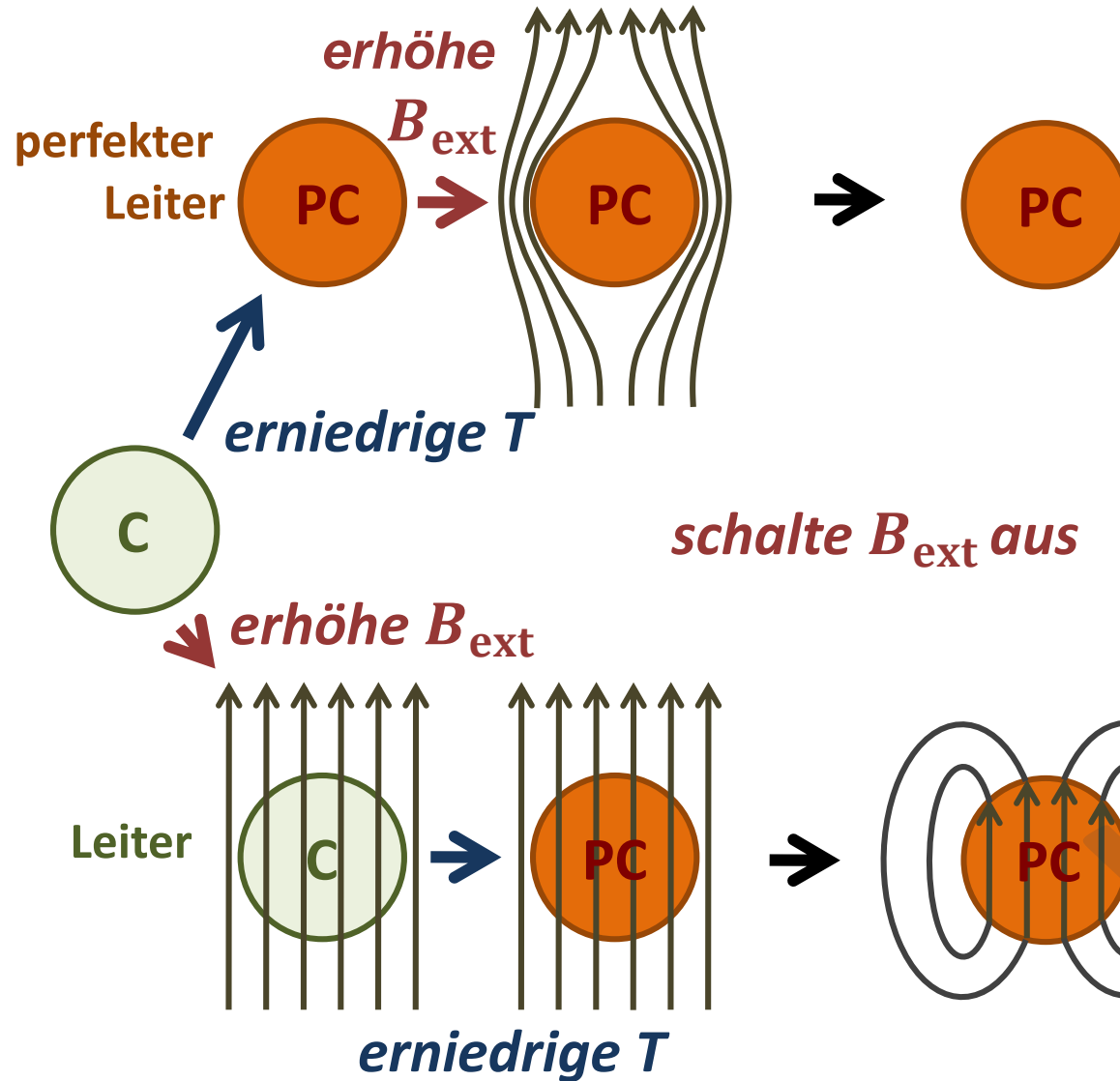
genaueste Messungen: Abklingzeit  $> 10^5$  Jahre

# 13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

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

Gedankenexperiment:

Perfekter Leiter  
in Magnetfeld



Weg-abhängiger  
Endzustand des  
perfekten Leiters

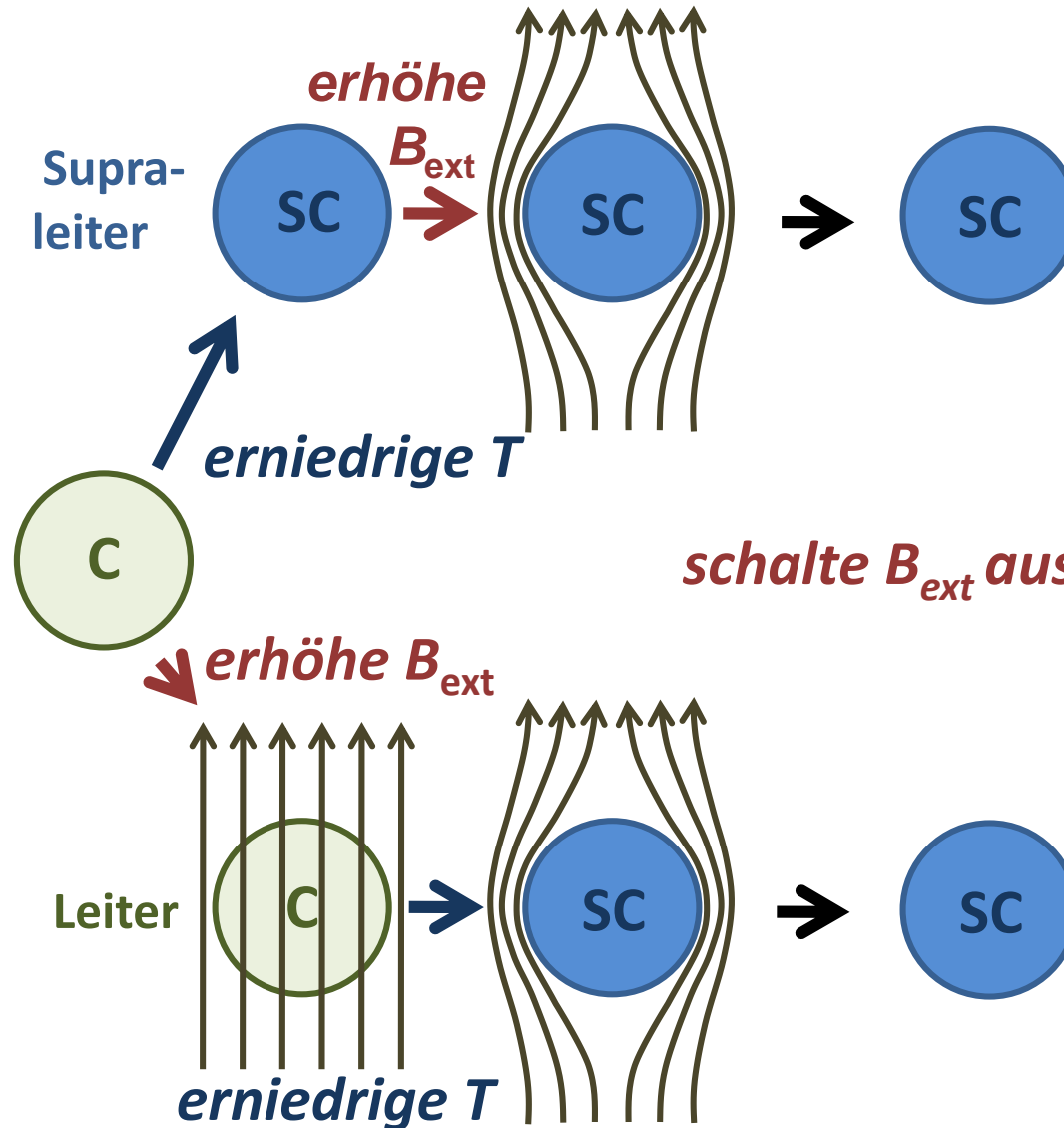


# 13.1.4 Grundlegende Eigenschaften von SL

## 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

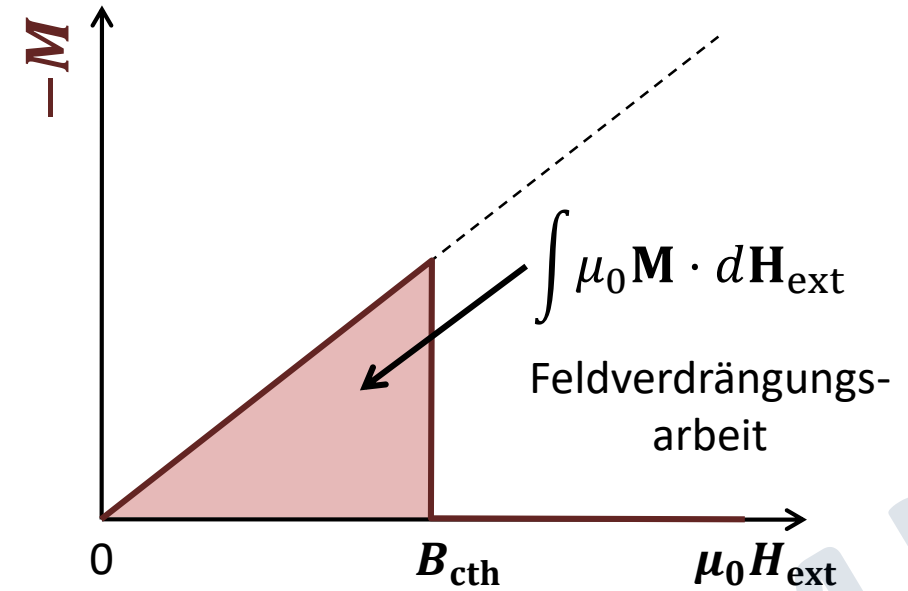
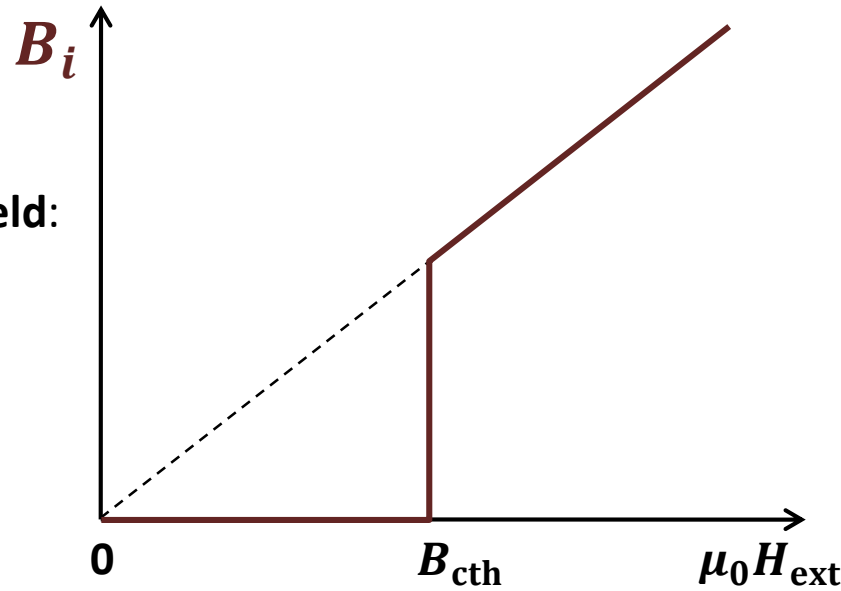
Beobachtung:

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

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

Kondensationsenergie

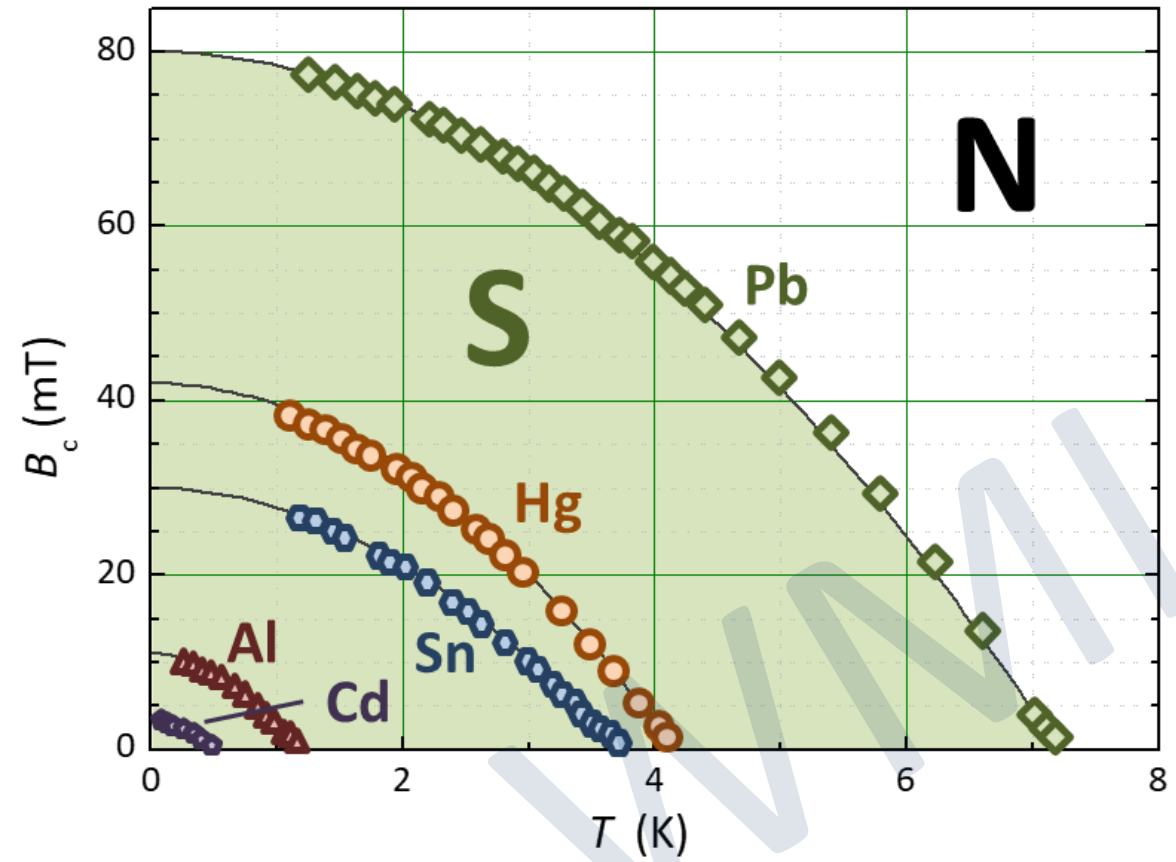
Differenz der freie Enthalpiedichten von N- und S-Zustand

### Temperaturabhängigkeit von $B_{cth}$ :

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

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

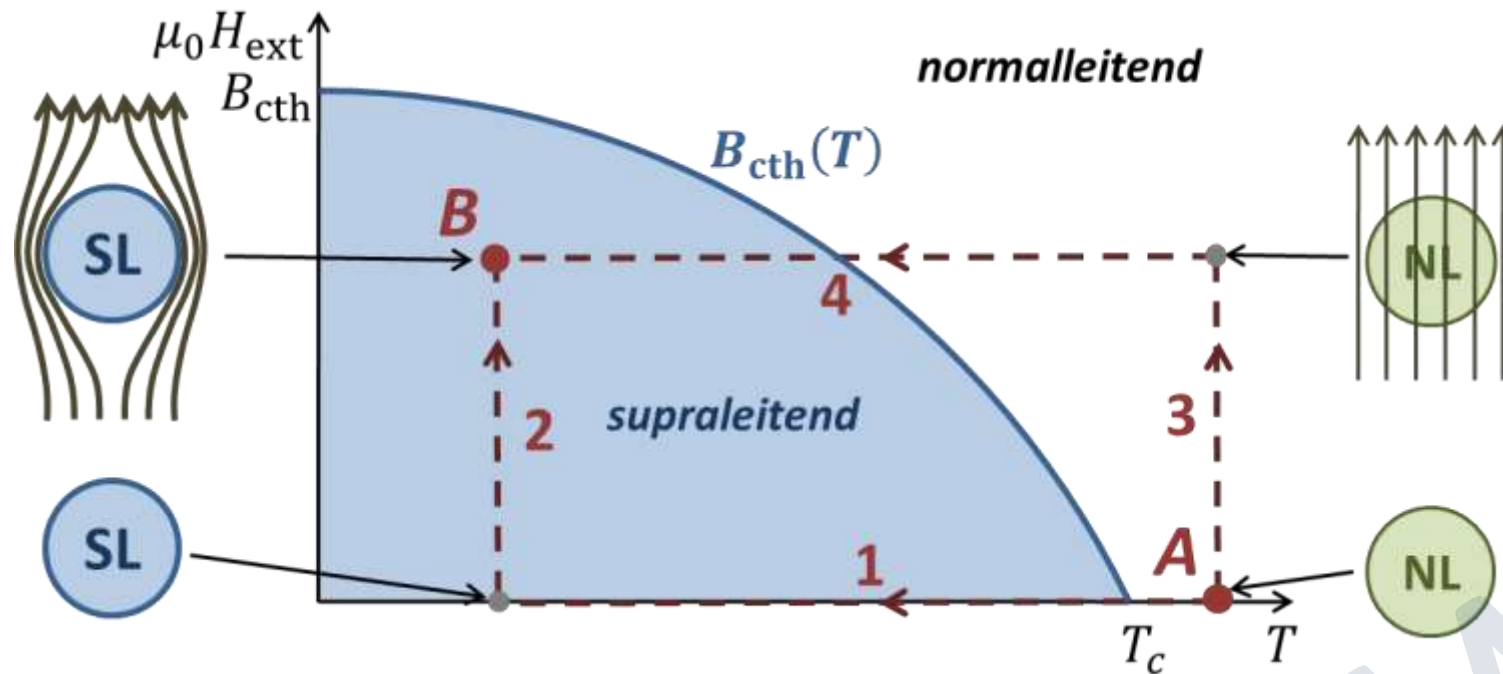
Phasendiagramm



# 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  $^4\text{He}$  (**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  $^3\text{He}$  (**Lee, Richardson & Osheroff**)
- 1975: Theoretische Beschreibung von  $^3\text{He}$  (**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*  $B_{\text{cth}}$

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

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