

# Supraleiter zeigen ...

1.  $\rho(T < T_c) = 0$

2. Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Normally bulk carbon (amorphous, diamond, graphite, white) will not superconduct at any temperature. However, a  $T_c$  of 15 K has been reported for elemental carbon when the atoms are configured as highly-aligned, single-walled nanotubes. And non-aligned, multi-walled nanotubes have shown superconductivity near 12 K.

# SUPERFLUIDITY

first observed in  $\text{He}^4$  at  $T < 2.17 \text{ K}$

also:  $\text{He}^3$  at  $T < 0.003 \text{ K}$   
 $\text{Li}^6$

frictionless flow so long as  $v < v_c \approx 20 \text{ cm/s}$

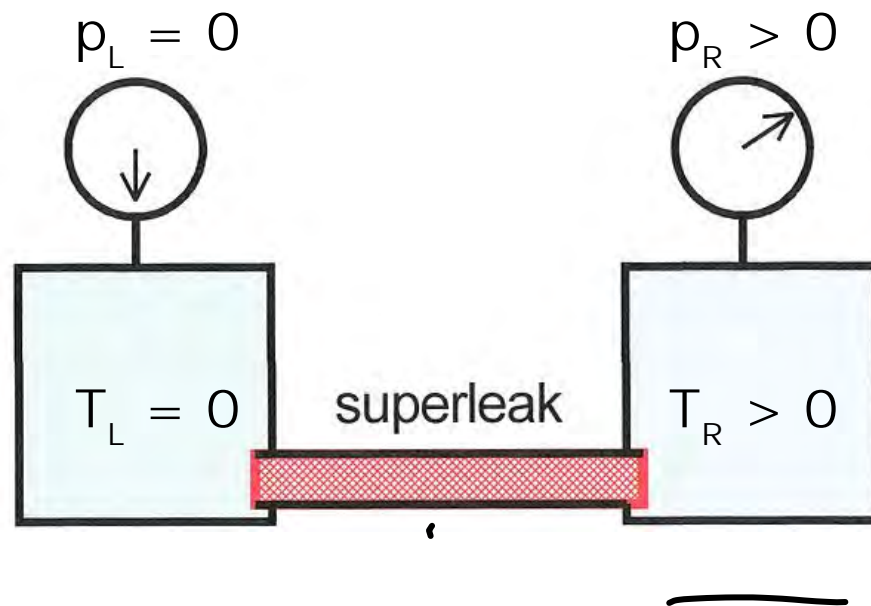
persistent circular motion

perfect heat conduction

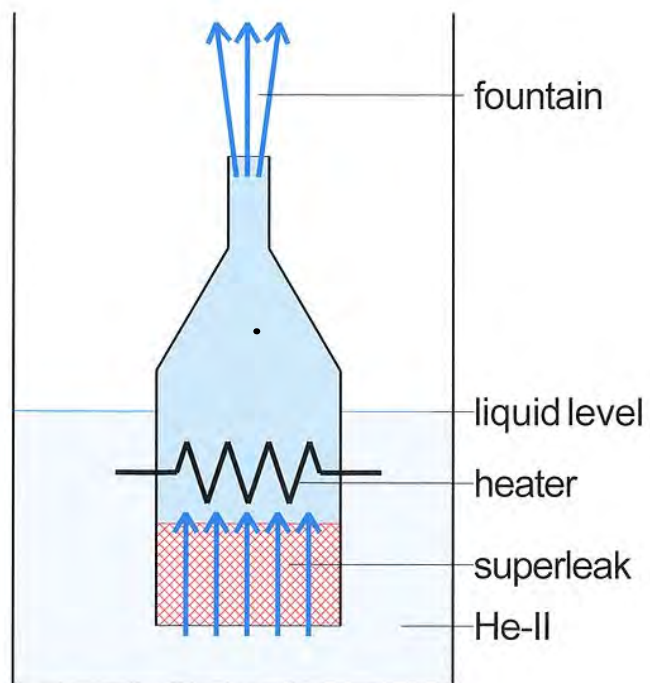
flows up walls

model: superfluid + normal fluid

# "Osmotischer Druck"

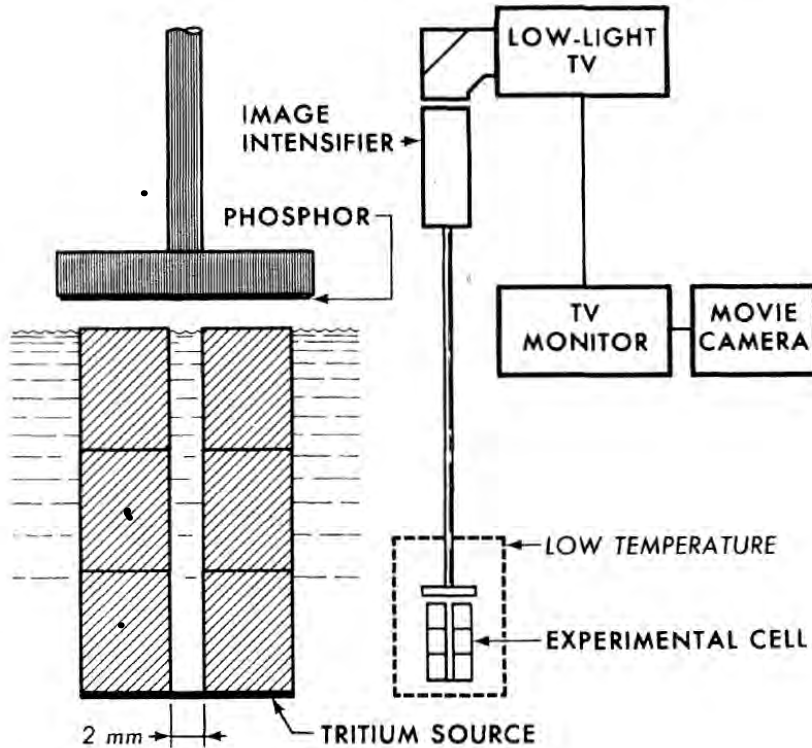
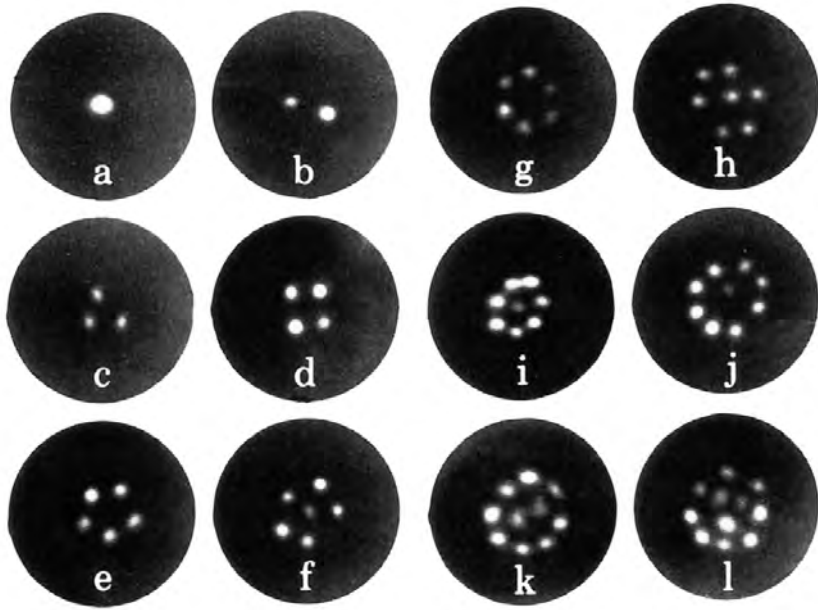


# Fountain effect



Application:  
drive  $^3\text{He}$   
circulation in  
dilution  
refrigerators

# Quantisierte Wirbel



# Schall

1. Schall: gew. Schall

$$c_1^2 = \frac{K}{\rho}$$

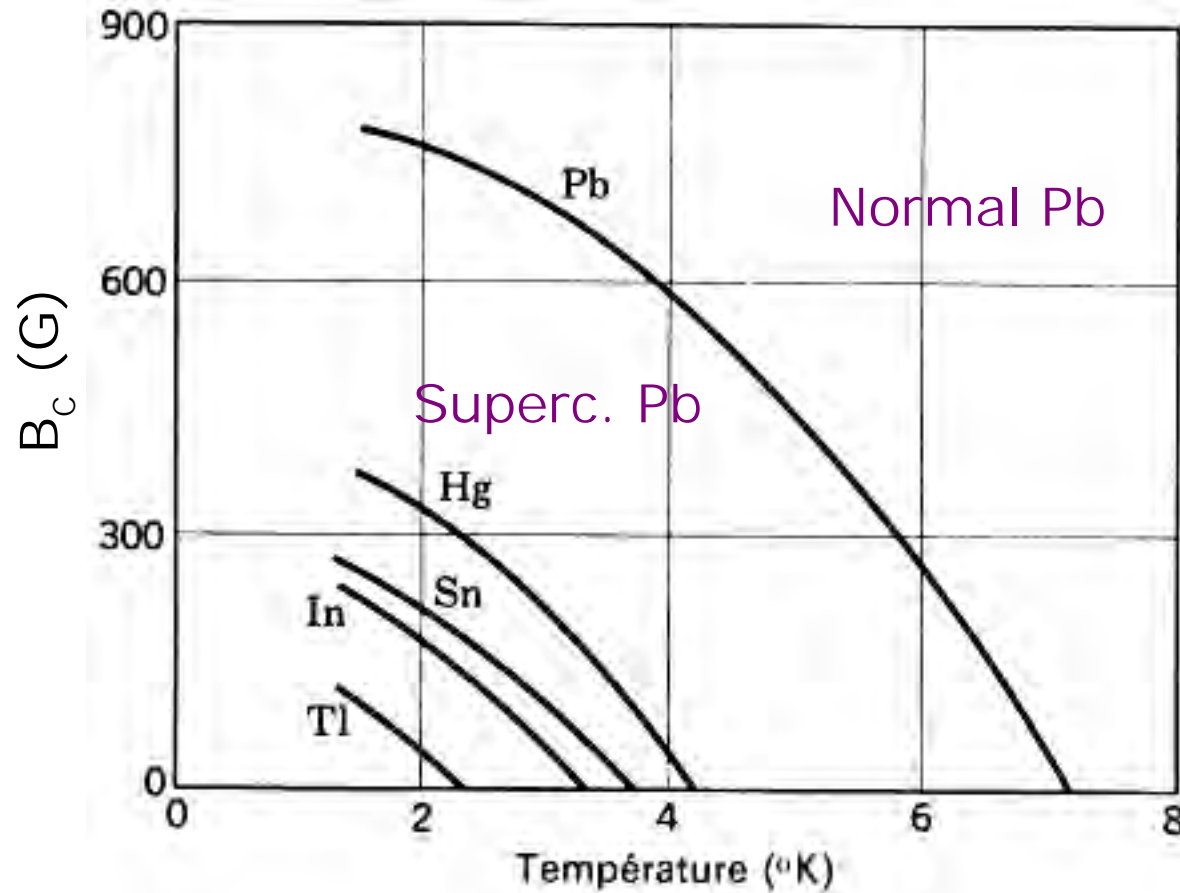
2. Schall: Temperaturwellen

$$c_2^2 = \frac{\rho_s}{\rho_n} \cdot \frac{s^2 T}{c_p}$$

3. ....

**Abb. 5.24** Wirbelanordnungen in einem rotierenden HeII-Behälter. Durchmesser 2 mm, Winkelgeschwindigkeit 0.3–1 rad/s, Temperatur 100 mK. Zur Abbildung werden in den Wirbelkernen angesammelte Elektronen parallel zur Rotationsachse beschleunigt und auf einem fluoreszierenden Schirm aufgefangen. Die Signale werden dann über einen Lichtleiter einem Bildverstärkungssystem zugeführt (nach Yarmchuk et al. [15]. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Prof. Packard).

# The Critical Field $B_c(T)$

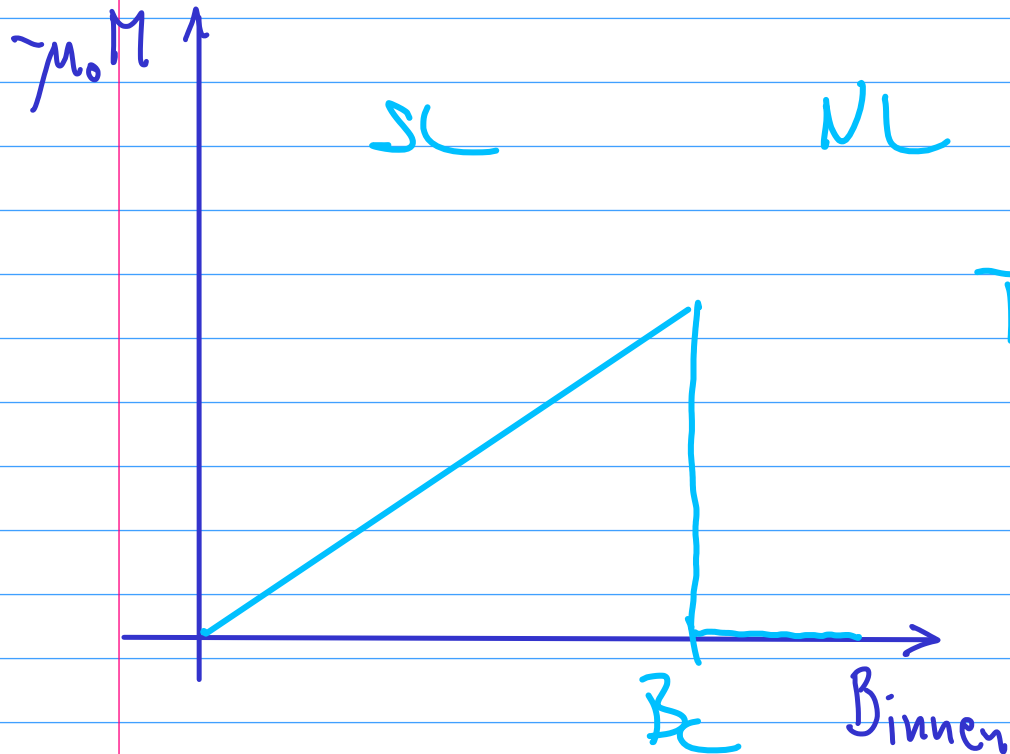


$$B_c = B_0 [1 - (T/T_c)^2]$$

# Starke $\vec{B}$ zerstören Supraleitung

2 Wege vom SL zum NL

①



$$B_c(\text{OK}) \sim 0,01 \text{ T}$$
$$0,1 \text{ T}$$

# Alloying Pb: Two critical fields - Type 2 SC

②

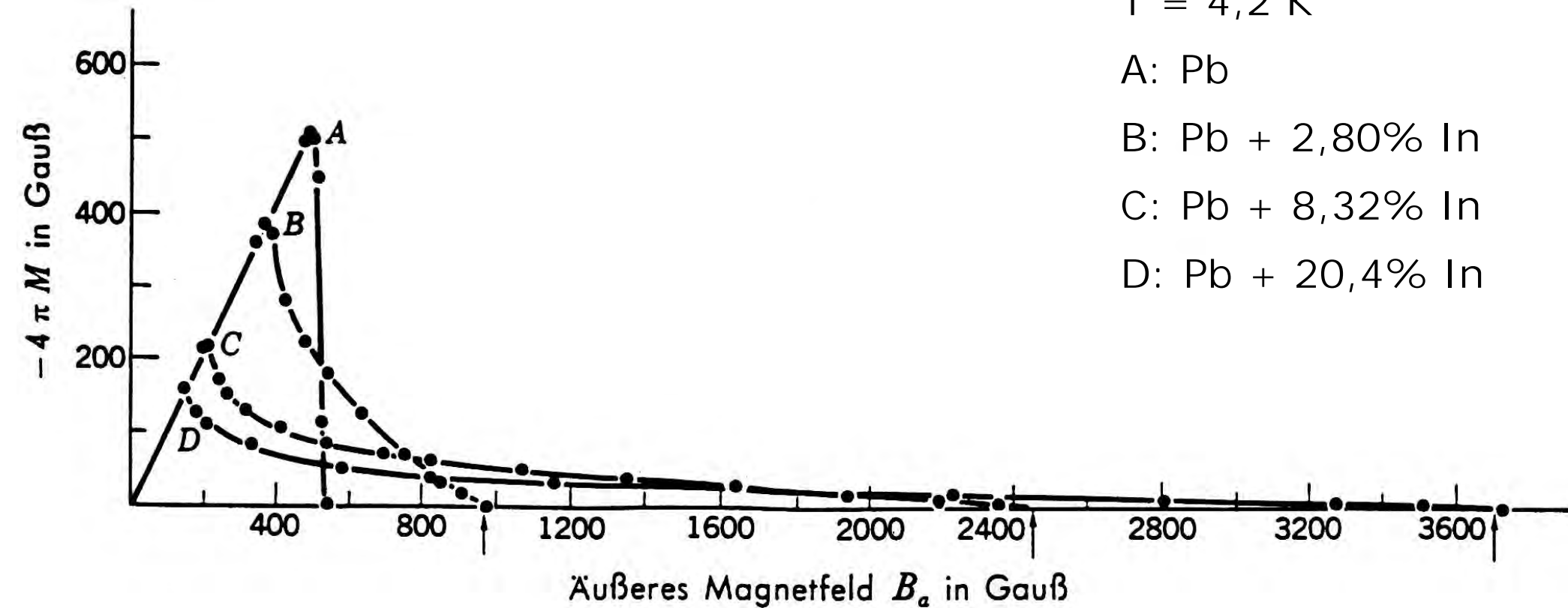
$T = 4,2 \text{ K}$

A: Pb

B: Pb + 2,80% In

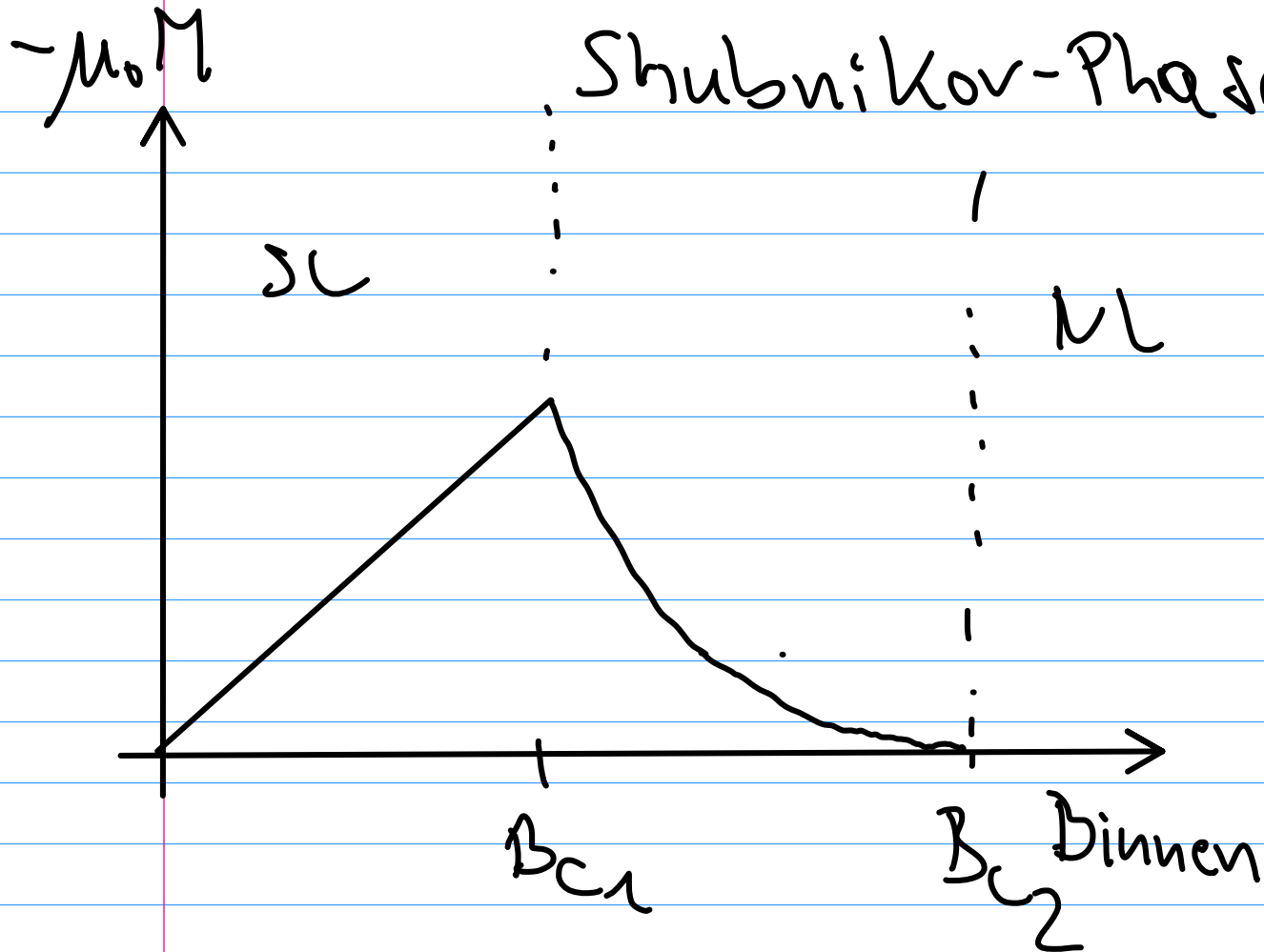
C: Pb + 8,32% In

D: Pb + 20,4% In



Mischzustand  
Shubnikov-Phase

Typ II



$$B_{c1} \sim 0,01 T$$

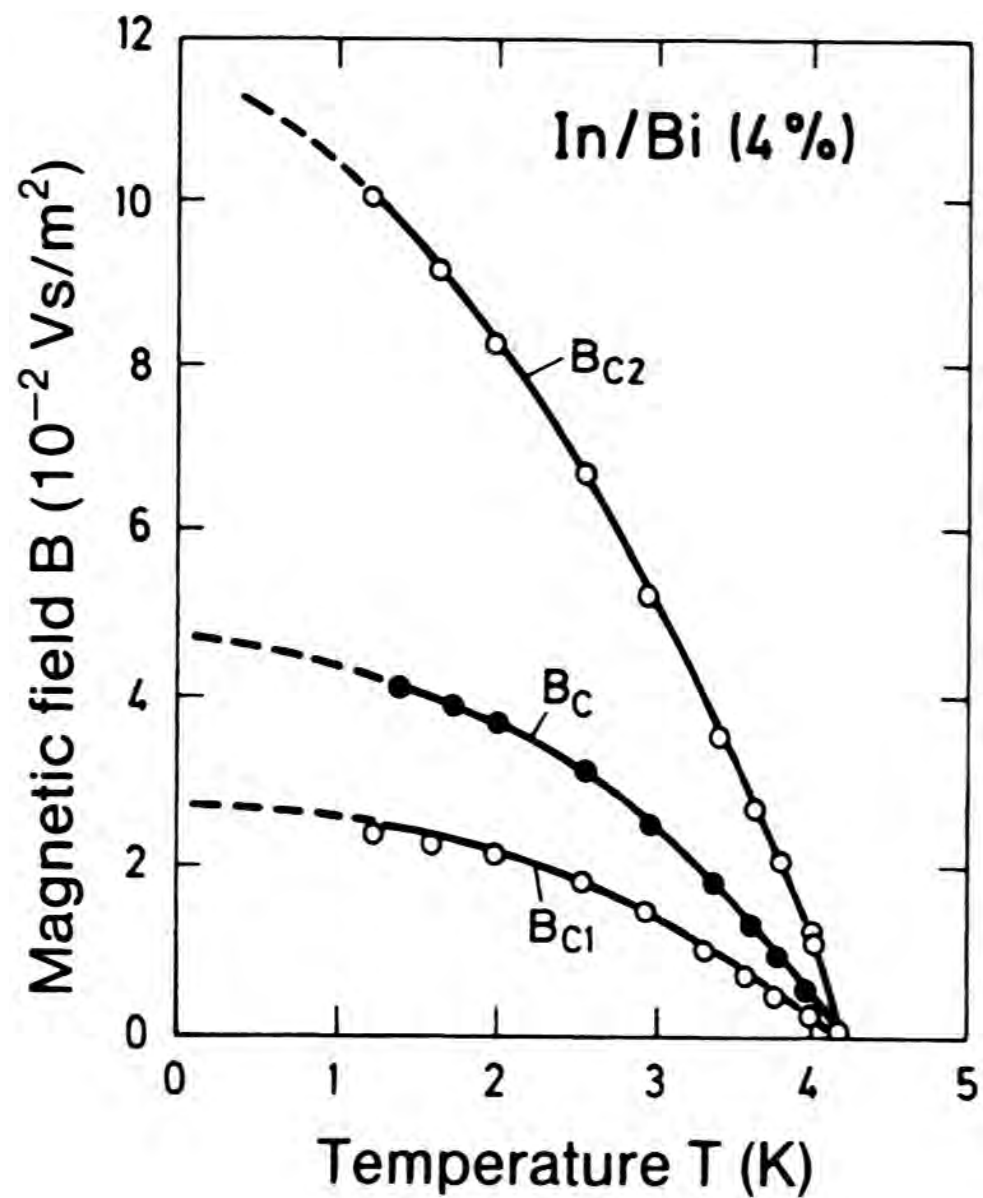
$$B_{c2} \sim 10 T$$

$$B_{c1} \ll B_{c2}$$

Max:  $PbMo_6S_8$ : 54 T



$B_{C1}(T)$  and  $B_{C2}(T)$



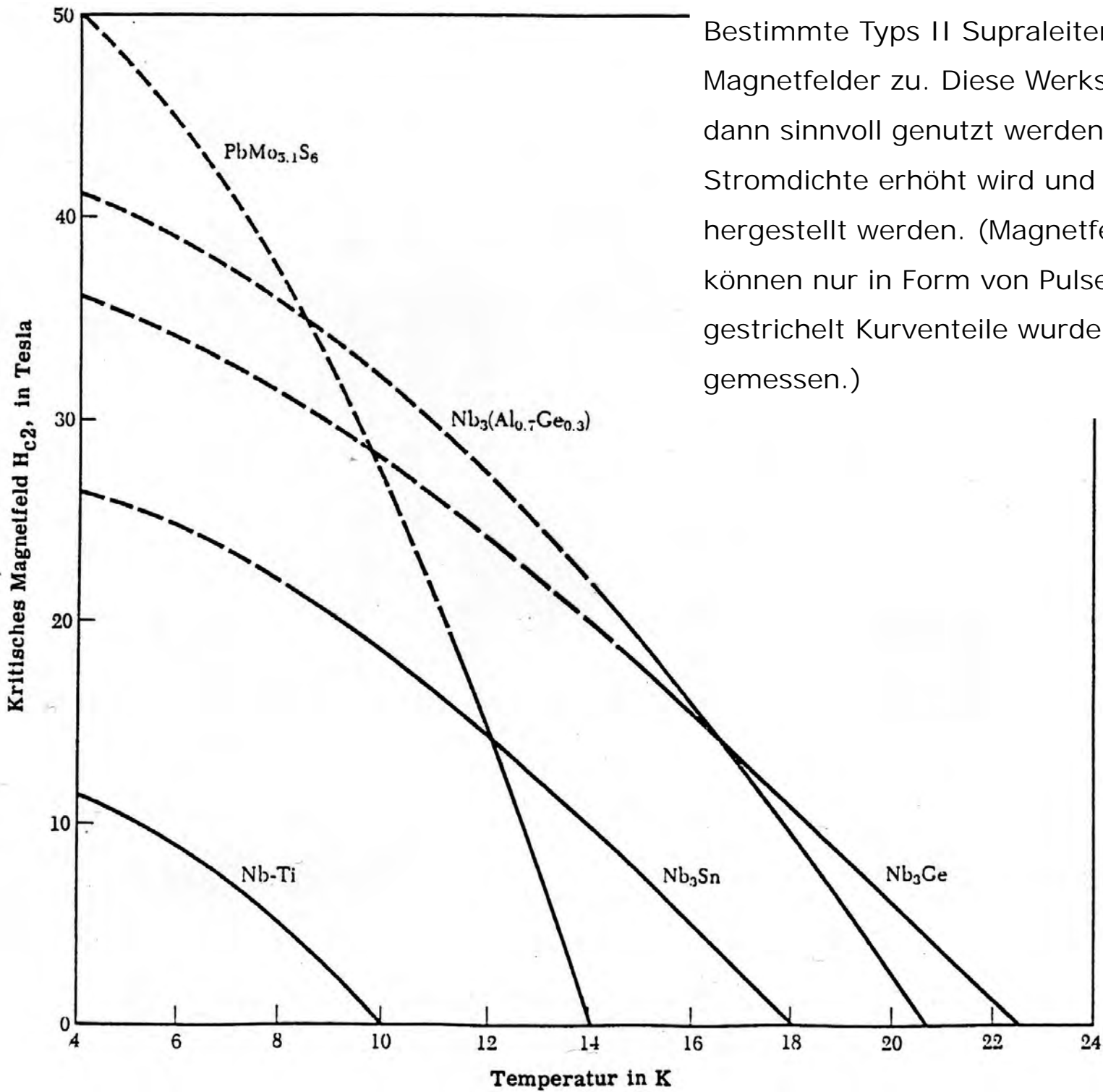
# Some Type 2 Superconductors

## Ruthenates

$K_3C_{60}$	18 K
$Nb_3Ge$	23.2 K
$Nb_3Sn$	18.1 K
$V_3Si$	17.1 K
$V_3Ga$	16.8 K
$V_3In$	13.9 K
$Nb_{0.6}Ti_{0.4}$	9.8 K
Tc	7.80 K

## Cuprates

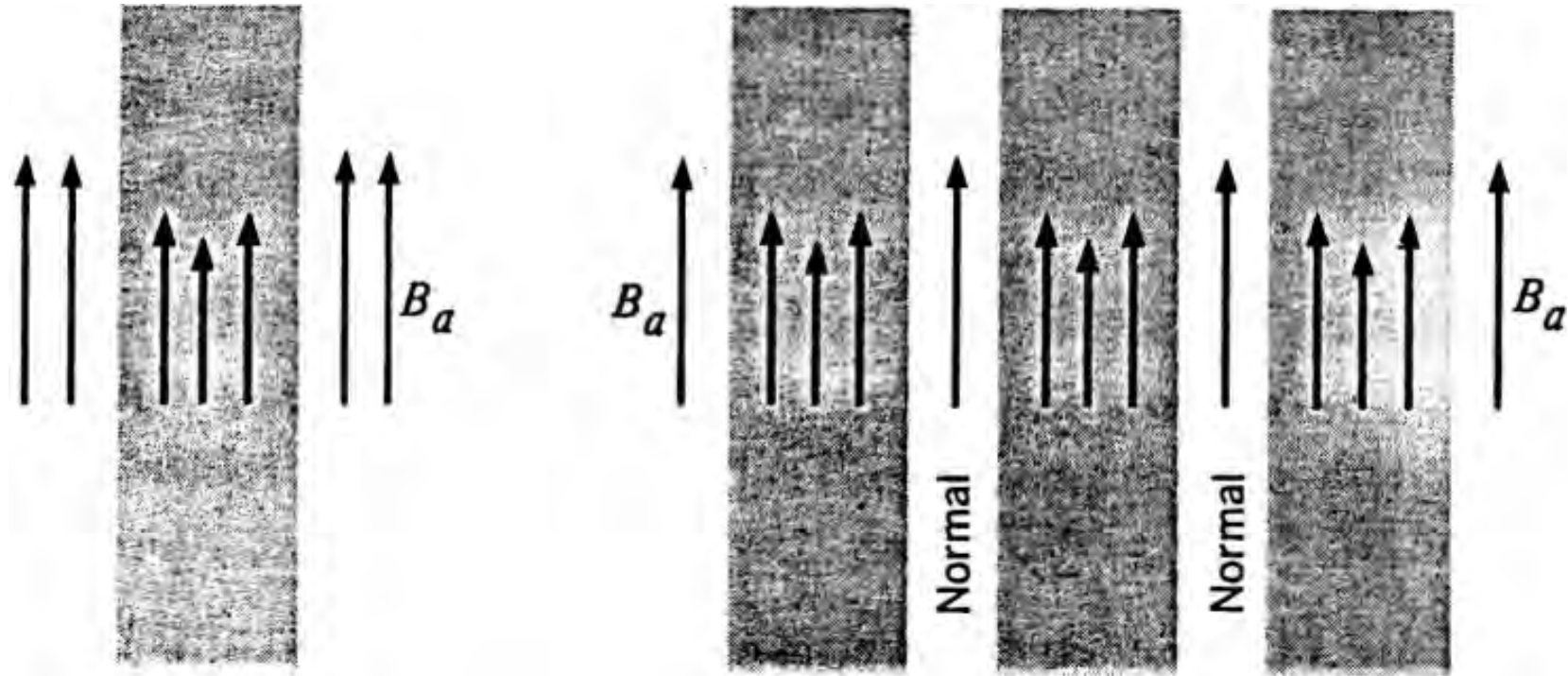
$MgB_2$	39 K
$Nb_3Si$	19 K
$Nb_3Al$	18 K
$Ta_3Pb$	17 K
$Nb_3Ga$	14.5 K
NbN	16.1 K
Nb	9.25 K
V	5.40 K



Bestimmte Typs II Supraleiter lassen unerwartet starke Magnetfelder zu. Diese Werkstoffe können jedoch erst dann sinnvoll genutzt werden, wenn ihre kritische Stromdichte erhöht wird und sie als gut getrennte Leiter hergestellt werden. (Magnetfelder von mehr als ca. 20 T können nur in Form von Pulsen erzeugt werden; gestrichelt Kurventeile wurden auf diese Weise gemessen.)

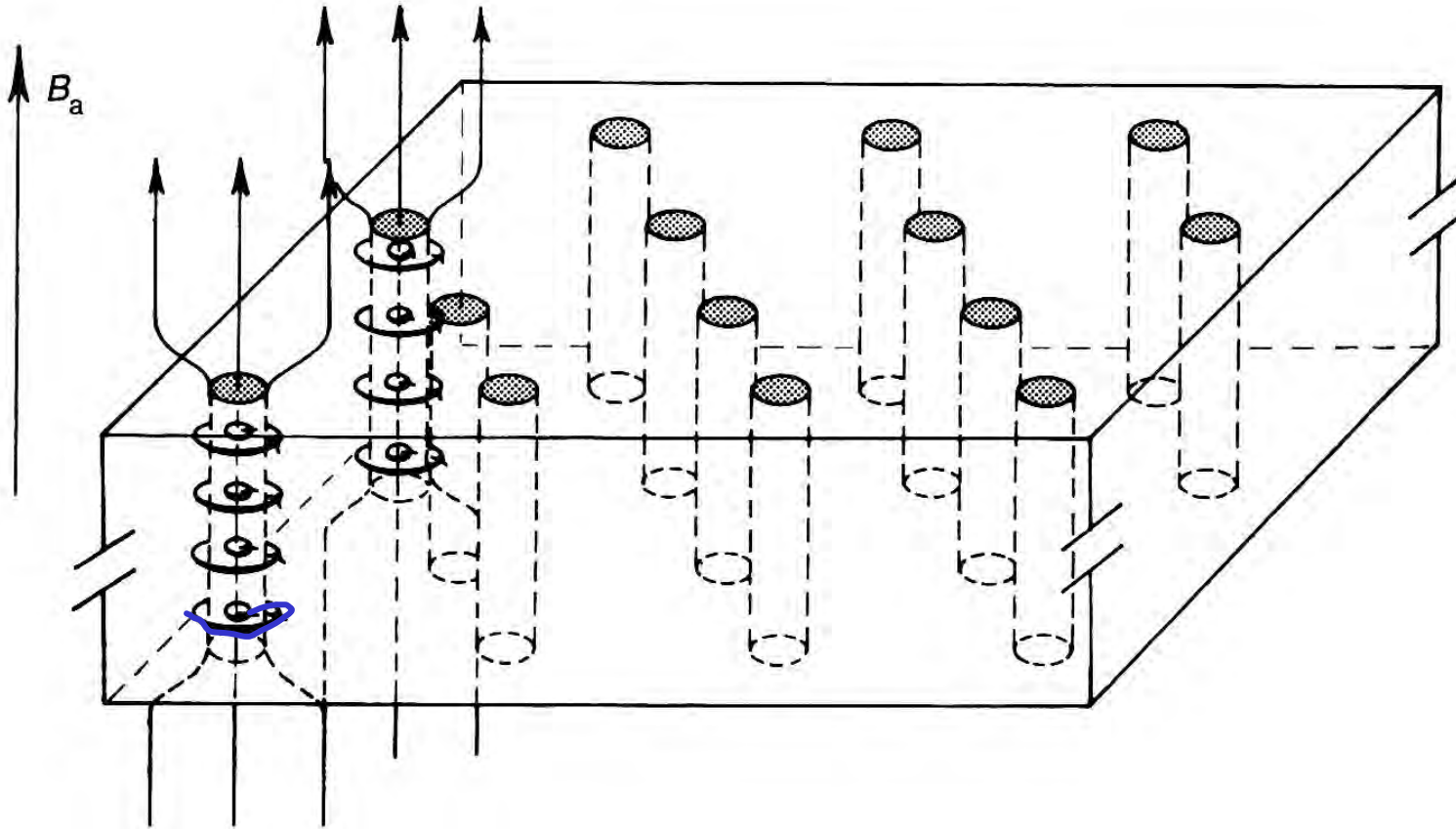
# Eindringen eines Magnetfeldes in Supraleiter

Film, dessen Dicke ungefähr der  
Londonschen Eindringtiefe  $\lambda$  entspricht.  
Die Pfeillänge deutet die Magnetfeldstärke an.



Homogene kompakte Probe im Mischzustand, bei dem sich normalleitende und supraleitende Bereiche abwechseln. Die supraleitenden Bereiche sind dünn im Vergleich zu  $\lambda$ . (Die N-Gebiete des Wirbelzustandes sind nicht exakt normal.)

# The mixed state: Shubnikov phase



Flusschleuch Vortex, Vortexpitter

(Schematic. Magnetic field and supercurrents are indicated for two flux vortices)

## Mischzustand $B_{c1} < B < B_{c2}$

Der magnetische Fluss in den NL-Bereichen

- ist von Dauerstrom im SL umgeben

- ist quantisiert

$$\Phi = n \cdot \Phi_0$$

$$n \in \mathbb{N}$$

Flussquantum

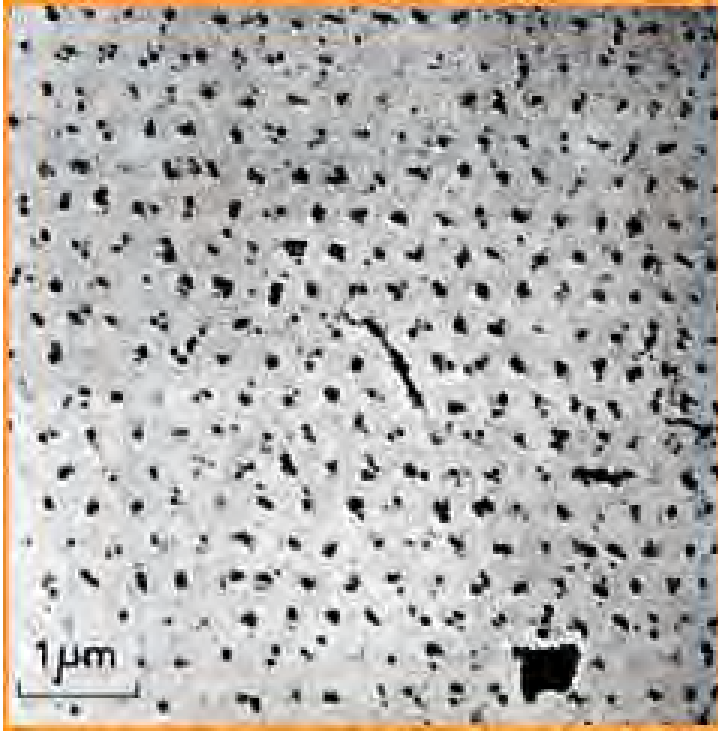
$$\Phi_0 \approx \frac{h}{2e}$$

$$\approx 2,0678 \cdot 10^{-15} \text{ Tm}^2$$

# Vortex Lattice Images

1957: Theoretical Prediction of Vortices in Type-II Superconductors

A. A. Abrikosov Soviet Physics JETP 5, 1174 (1957) Nobel prize 2003



First image of Vortex lattice

Bitter Decoration, 1967

Pb-4at%In rod, 1.1 K, 195 G

U. Essmann, H. Trauble,

Phys. Lett. 24A, 526 (1967)



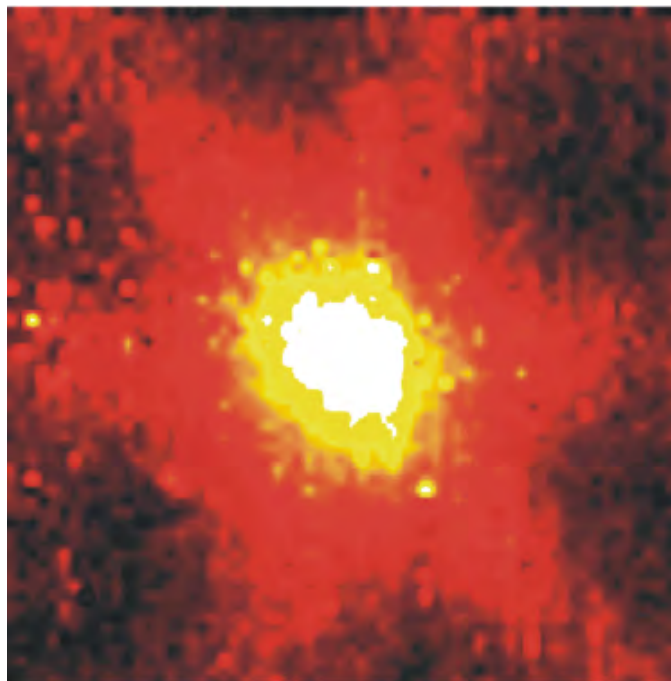
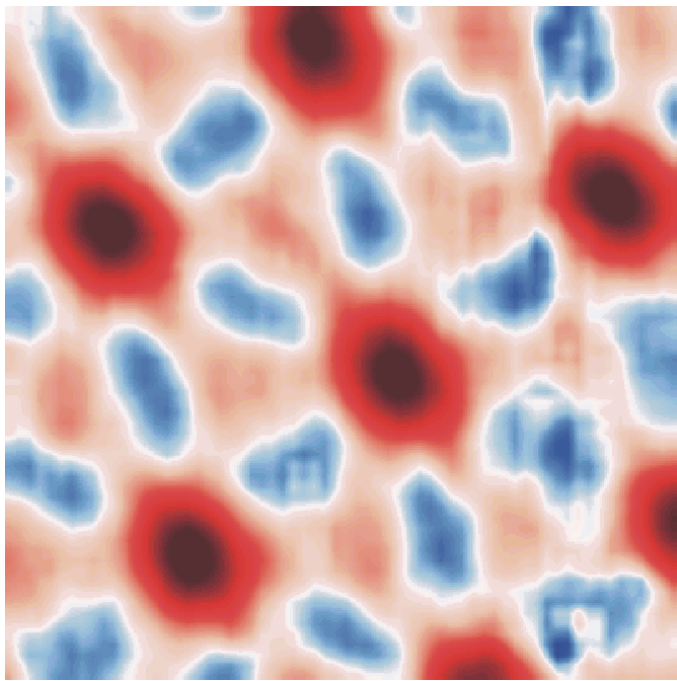
STM, 1989

NbSe<sub>2</sub>, 1 T, 1.8 K

H. F. Hess et al.,

Phys. Rev. Lett. 62, 214 (1989)





STM

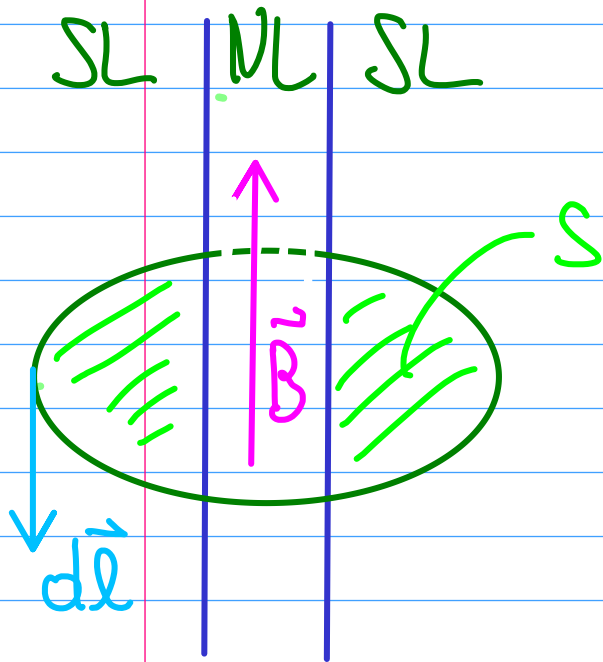
Kouwenhoven et al.,  
TU Delft



Electron  
Phase  
Imaging  
(Tonomura)



# Flussquantisierung



kanon. Impuls

$$\vec{p} = m\vec{v} + q\vec{A}$$

$$\text{rot}\vec{A} = \vec{B}$$

$$\vec{j} = nq\vec{v}$$

$$\vec{p} = \frac{m}{nq}\vec{j} + q\vec{A}$$

$$\oint \vec{p} d\vec{l} \stackrel{!}{=} N h = \underbrace{\frac{m}{nq} \oint \vec{j} d\vec{l}}_{=0} + q \oint \vec{A} d\vec{l}$$

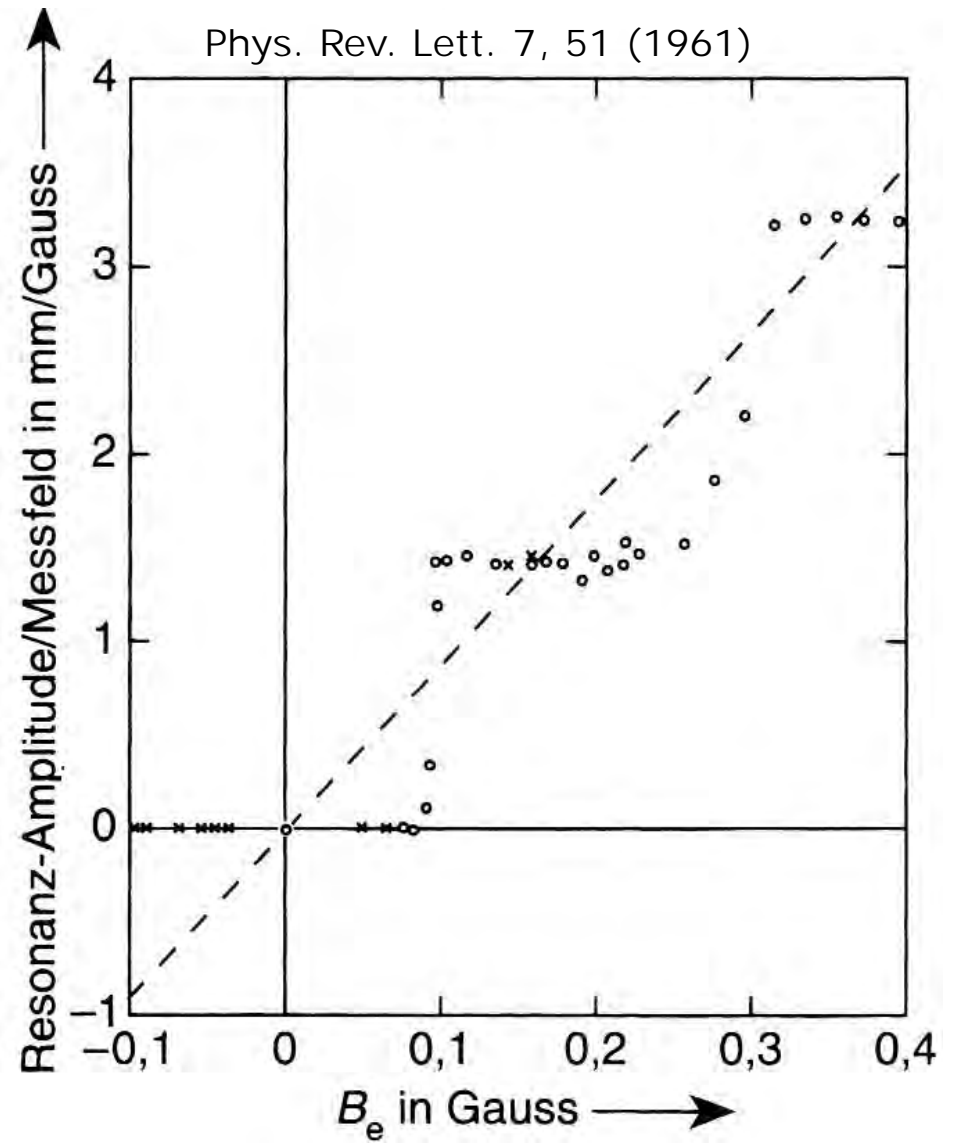
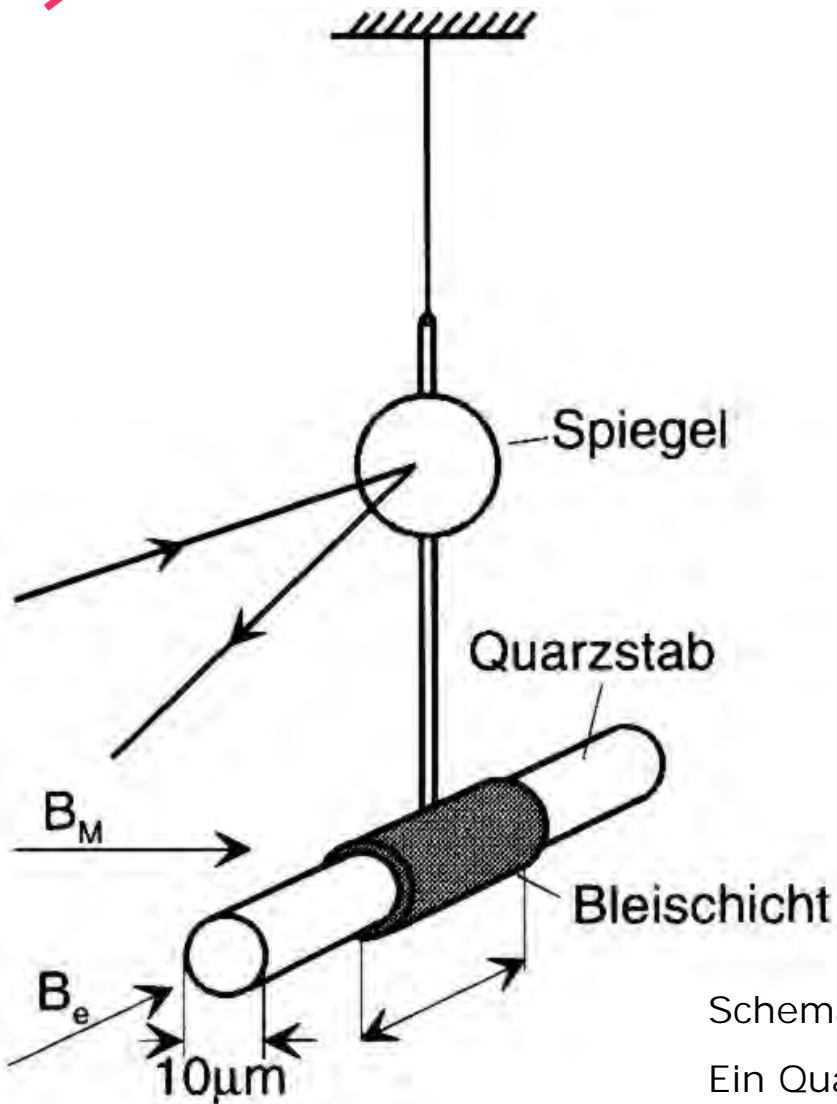
$$2\pi \frac{h}{q} = \int \text{rot} \vec{A} d\vec{\sigma} = \int \vec{B} d\vec{\sigma} = \Phi$$

$$\Phi = N \cdot \frac{h}{q} ; N \in \mathbb{N}$$

$$\text{Exp.} \Rightarrow q = 2e$$

# Fluxons

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}$$

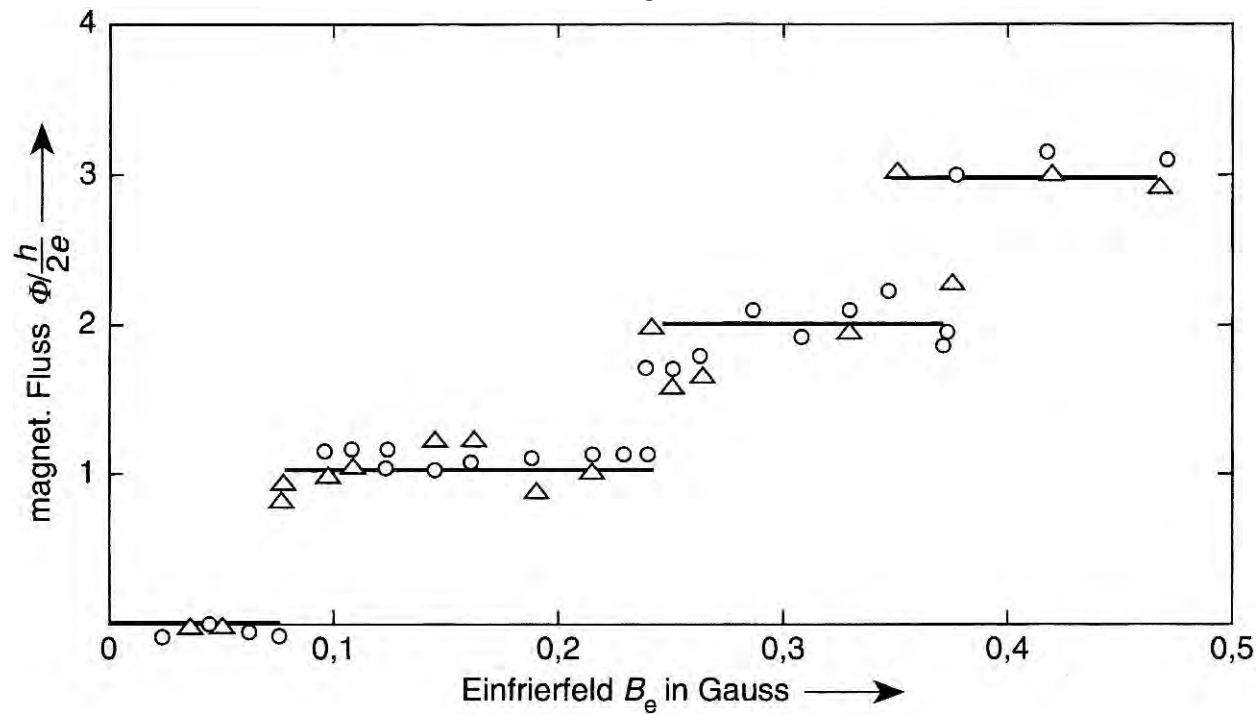


Schema des Messaufbaus von Doll und Näbauer.  
Ein Quarzstäbchen mit einer aufgedampften  
Bleischicht schwingt in flüssigem Helium.

# Fluxons - 2. Methode

Oszillierender Zylinder mit Spulen an Enden -  
Induktionsspannung messen

Deaver and Fairbank, Phys. Rev. Lett. 7, 43 (1961)



Typische Abstände von Vortices?

$$\Phi_0 = 2,0678 \cdot 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

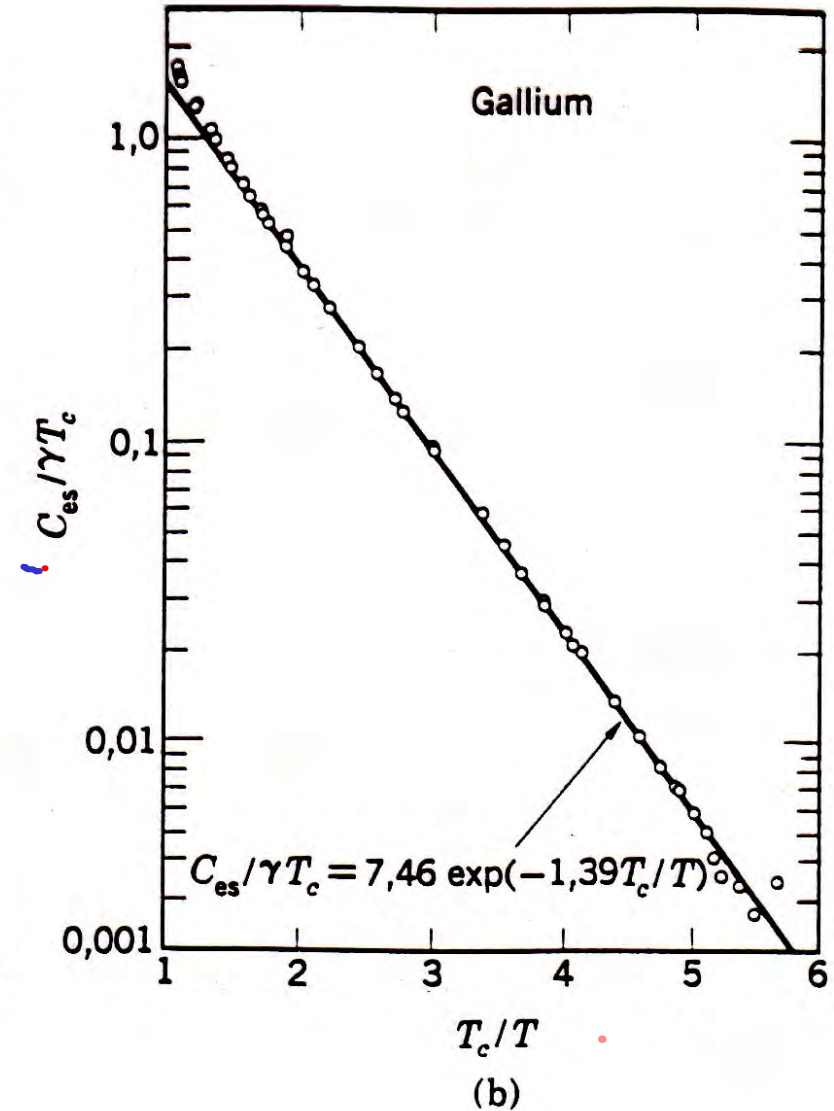
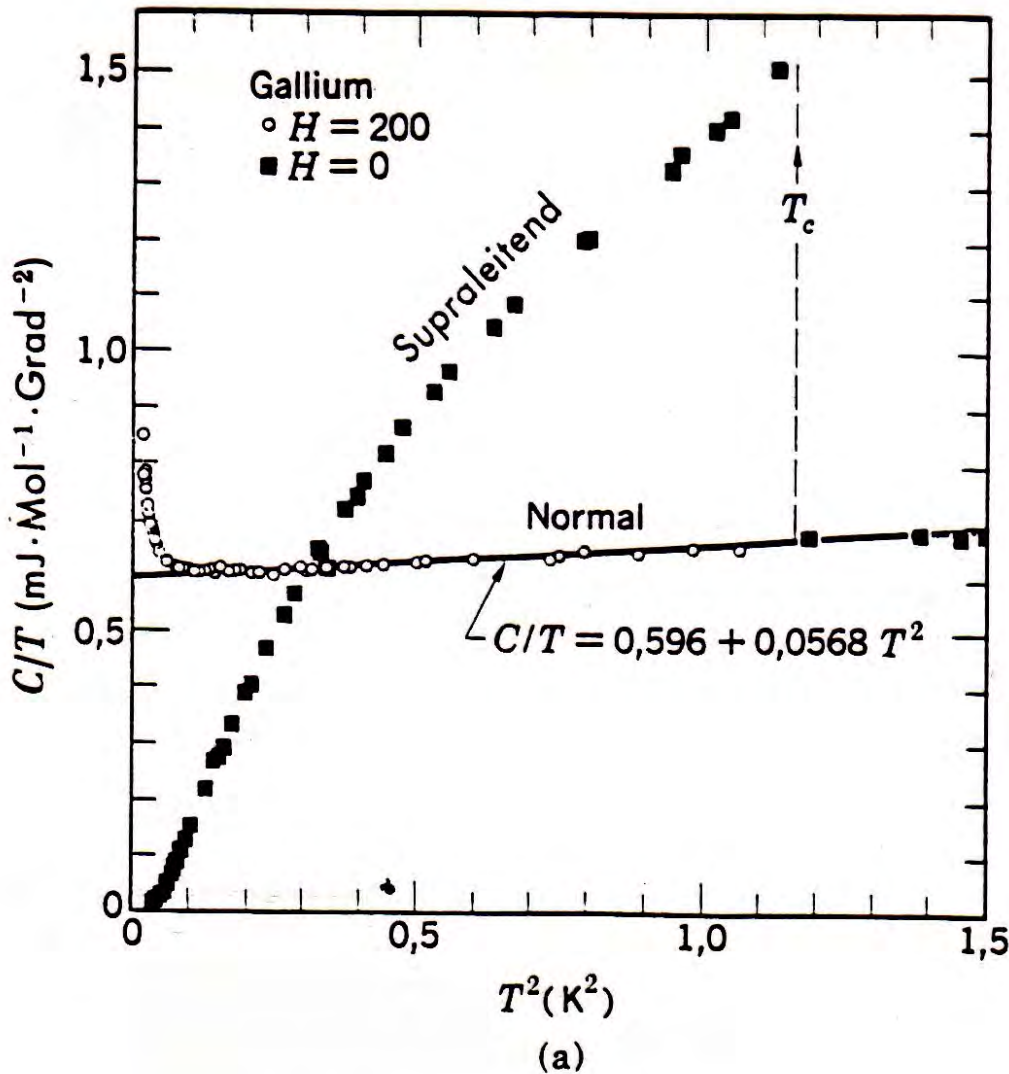
$$\Rightarrow \frac{1 \Phi_0}{(1 \text{ nm})^2} = 2 \text{ mT}$$

oder auch:

$$1 \text{ T} \cong (45 \text{ nm})^2 \text{ pro } \Phi_0$$

# Specific heat

(a) Molwärme von Gallium im normalen und im supraleitenden Zustand. Im Normalzustand (der bei einer Feldstärke von 200 G wiederhergestellt wird) liefern Elektronen, Gitter und (bei tiefen Temperaturen) Kernquadrupole Beiträge. In (b) ist der elektronische Beitrag  $C_{es}$  zur spezifischen Wärme des supraleitenden Zustandes im logarithmischen Maßstab über  $T_c/T$  aufgetragen; die exponentielle Abhängigkeit von  $1/T$  ist offensichtlich. Hier ist:  $\gamma = 0,60 \text{ mJ Mol}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-2}$ . [Nach N. E. Phillips].



Exponential c(T) – Any ideas?

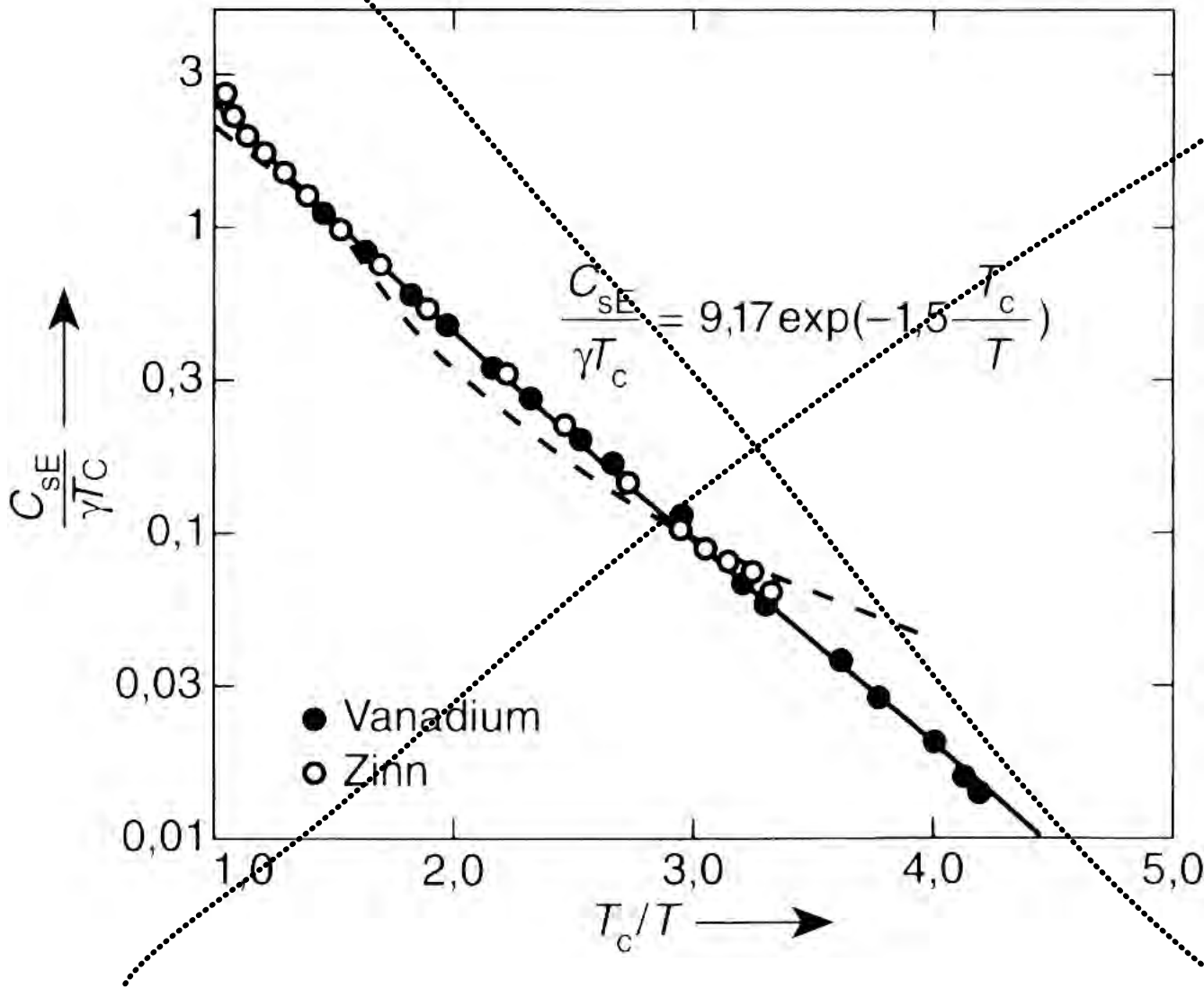
$$C_v = \underbrace{\gamma T}_{e^-} + \underbrace{AT^3}_{\text{Phononen}} \quad (B > B_c)$$

Ex:  $C_v \approx 0,6T + 0,06T^3$  ;  $T < 1 \text{ (K)}$  } NL

SL  $\left\{ C_{SL} \approx \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right) \quad (\text{bei } T \rightarrow 0) \right.$

Elektronischer Anteil der spezifischen Wärme  
von supraleitendem Sn und V

Bei nächsten Mal  
weglassen.



Gerade: exponentielle Abhängigkeit  
wie in BCS-Theorie  
gestrichelt:  $T^3$ -Gesetz

aus Buckel



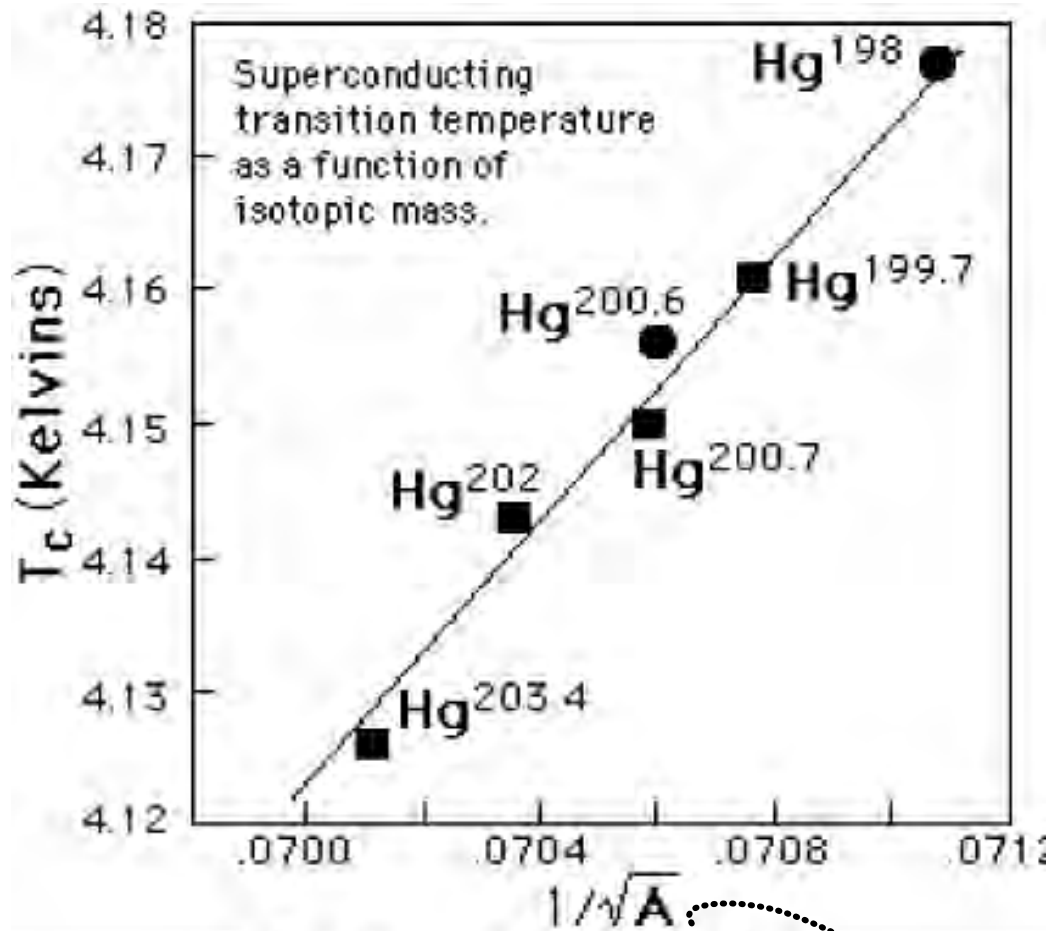
Bei  $T < T_c$  gilt:

$$C_{SL} \ll C_{NL}$$

⇒ nur ein (kleiner) Teil der  $e^-$   
trägt die Supraleitung

$$\frac{n_{SL}}{n_{NL}} \sim 10^{-4}$$

# Isotope effect



- E. Maxwell, Phys. Rev. 78, 477 (1950)
- C. A. Reynolds, et al., Phys. Rev. 78, 487 (1950)

$$\approx \frac{1}{\sqrt{M}}$$

# Experimentelle Werte von $\alpha$ in $M^\alpha T_c = \text{const.}$

Substanz	$\alpha$
Zn	$0,45 \pm 0,05$
Cd	$0,32 \pm 0,07$
Sn	$0,47 \pm 0,02$
Hg	$0,50 \pm 0,03$
Pb	$0,49 \pm 0,02$

Substanz	$\alpha$
Ru	$0,00 \pm 0,05$
Os	$0,15 \pm 0,05$
Mo	$0,33$
Nb <sub>3</sub> Sn	$0,08 \pm 0,02$
Zr	$0,00 \pm 0,05$

- Phonons are involved
- e-ph interaction matters

Lacking isotope shift:  
band structure involved