

4. Festkörper

Prof. David Hunger

Physikalisches Institut, KIT Fakultät für Physik

4.7 Supraleitung

Entdeckung der Supraleitung

Heike Kammerlingh Onnes (1911)

Nobelpreis 1913

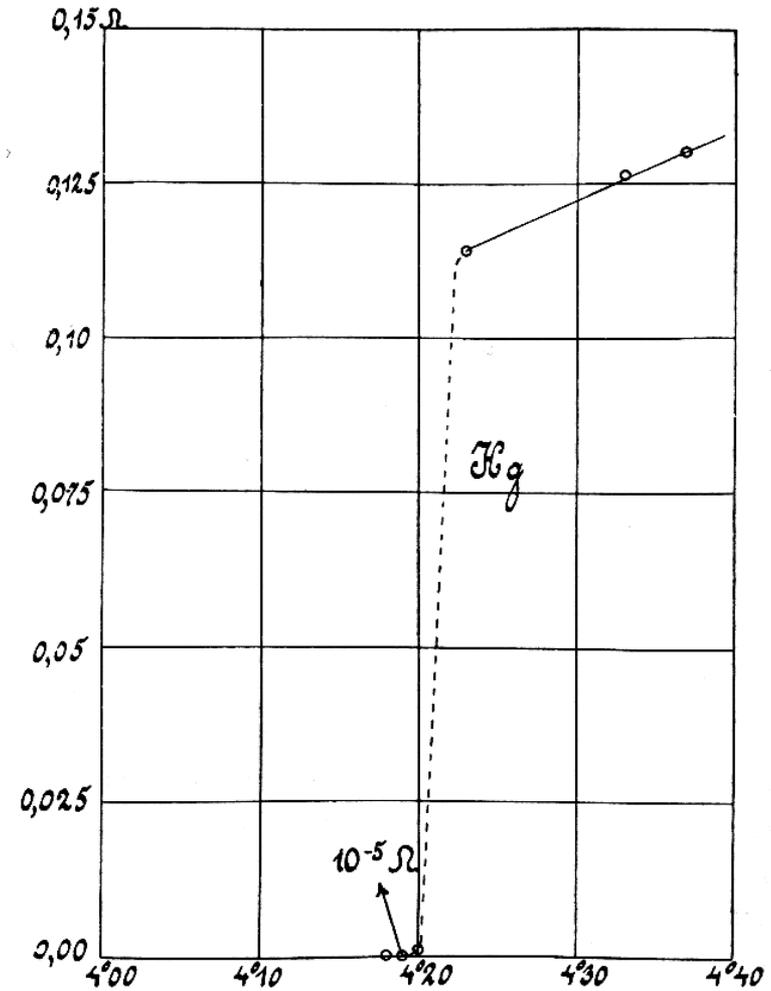
Überraschende experimentelle Entdeckung

Quecksilber verliert unterhalb einer „kritischen Temperatur“ T_c den elektrischen Widerstand



Heike Kamerlingh Onnes

Kreisstrom in supraleitendem Ring > Jahre

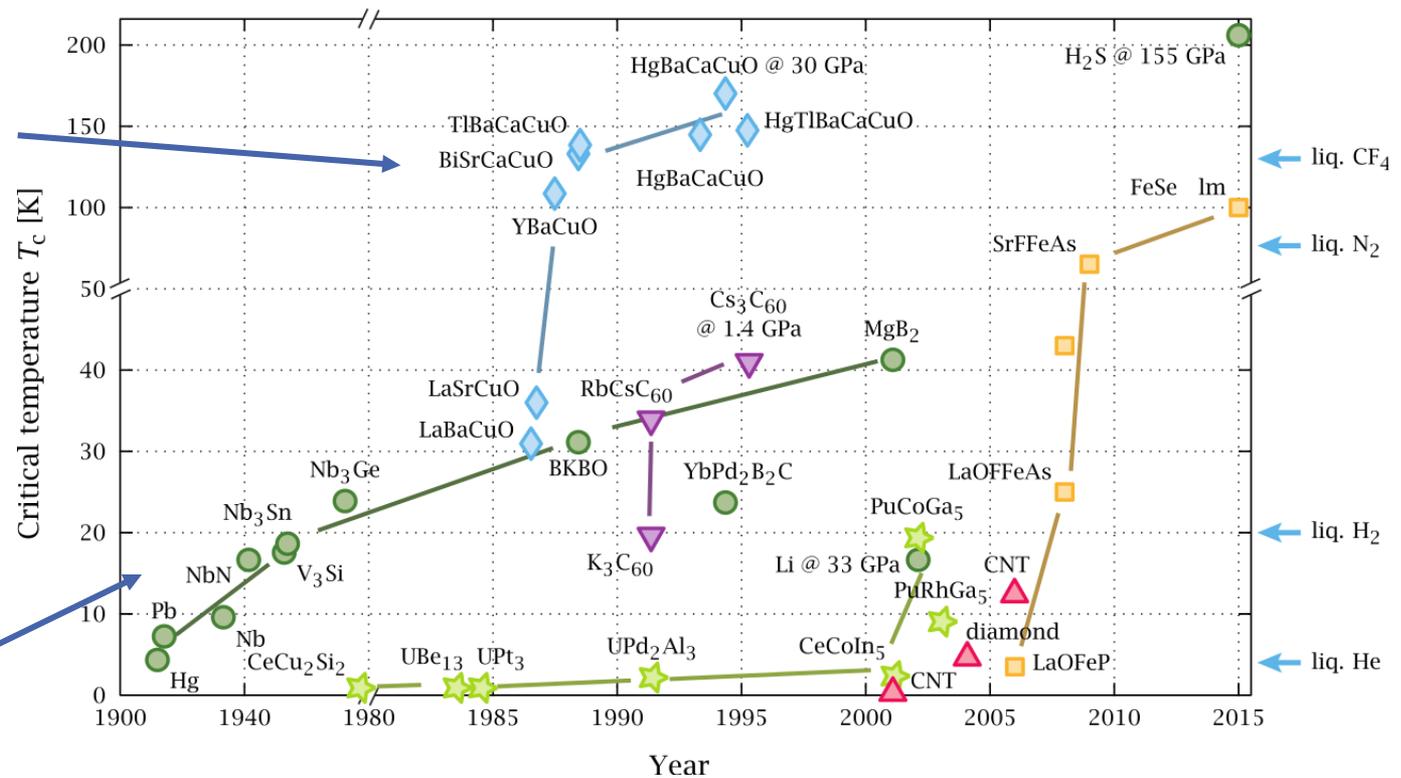


Supraleitung

Mittlerweile bei großer Anzahl Metallen, Legierungen und Verbindungen beobachtet

Hochtemperatur-Supraleiter
 $T_c > 77K$
 (flüssiger Stickstoff)

konventionelle Supraleiter



Meißner-Ochsenfeld Effekt

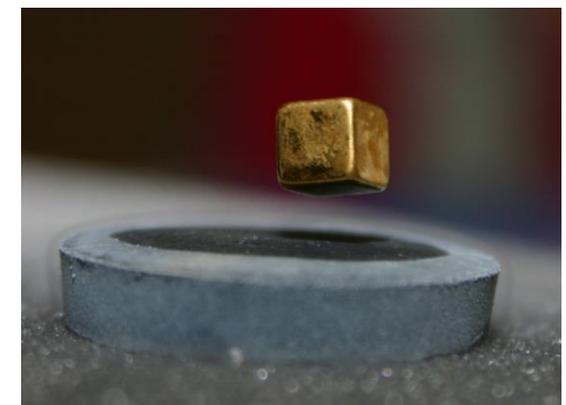
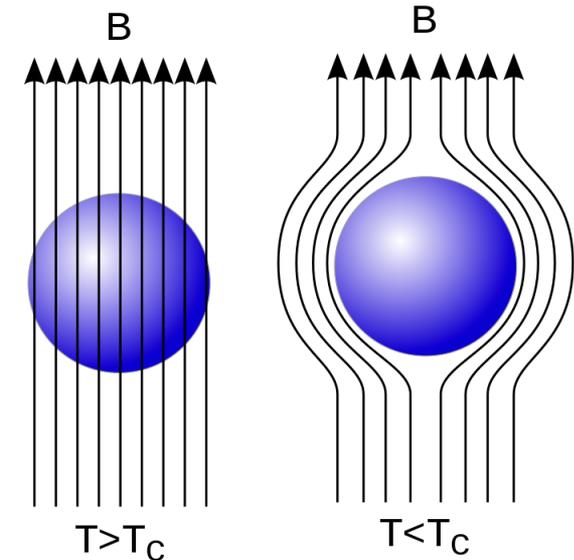
Charakteristisches Merkmal

- Magnetfelder (unterhalb einer kritischen Stärke) werden aus Supraleitern herausgedrängt

→ Inneres von Supraleitern ist magnetfeldfrei

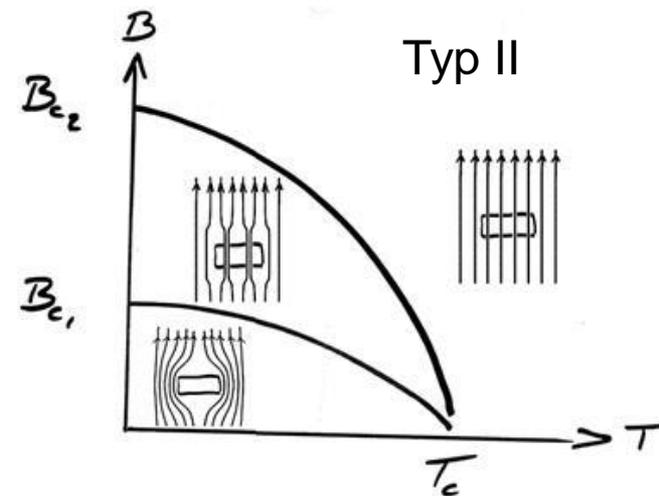
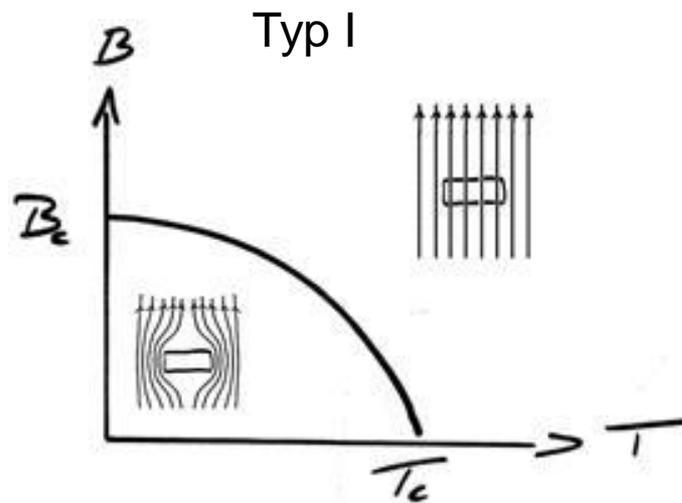
- Lenz'sche Regel: Induzierte Oberflächenströme wirken Magnetfeldänderungen entgegen

→ supraleitende Probe schwebt über Magneten



Supraleitung und Magnetfeld

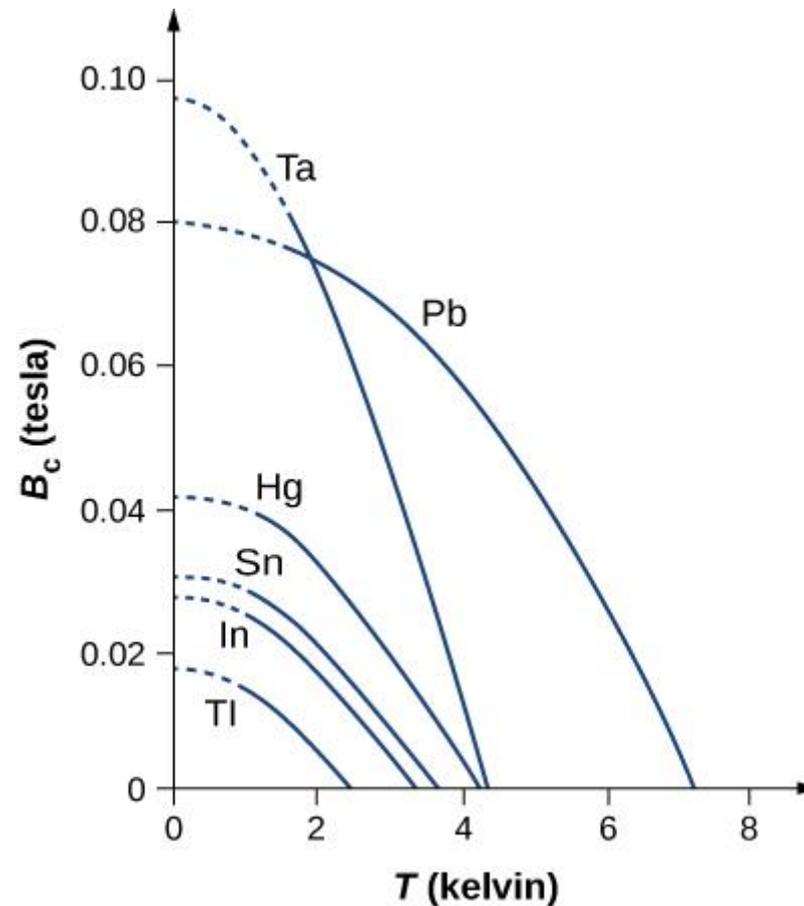
- Sprungtemperatur hängt vom Magnetfeld ab
- Oberhalb kritischer Feldstärke verschwindet Supraleitung



- Typ II Supraleiter: Meißner-Ochsenfeld Effekt nicht vollständig, Magnetfelder im Leiter möglich (→ wichtig für supraleitende Magnete)

Supraleitung und Magnetfeld

Kritische Magnetfeldstärke und Sprungtemperatur für verschiedene Supraleiter



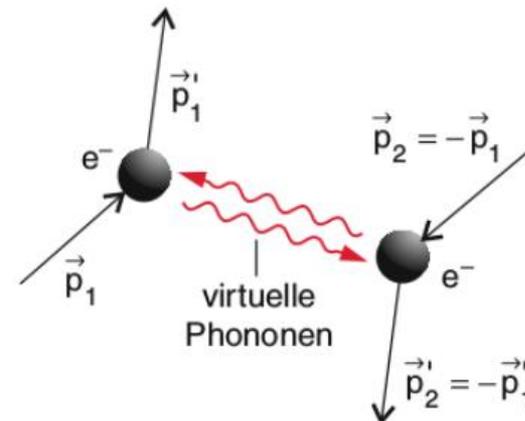
Erklärung: BCS – Theorie

Bardeen, Cooper, Schrieffer (BCS Theorie 1957)

- Wechselwirkung von Phononen mit Elektronen erzeugt schwach gebundene Elektron-Paare

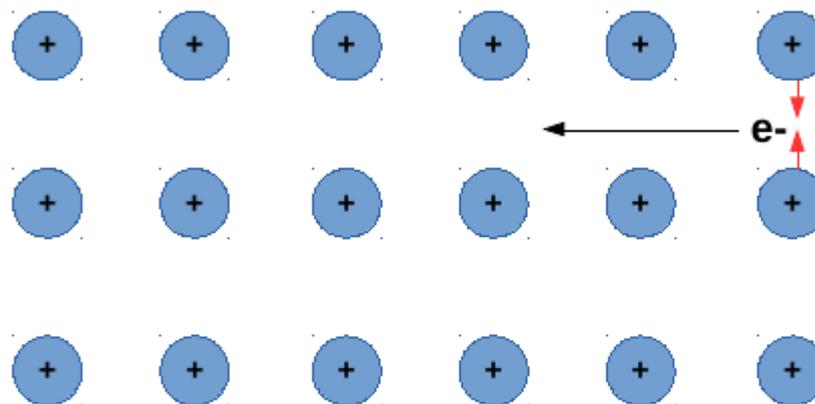
→ Bosonischer Zustand: **Cooper-Paar**

- verringerte Gesamtenergie
- bewegt sich reibungsfrei im Gitter



Elektron – Gitter Wechselwirkung

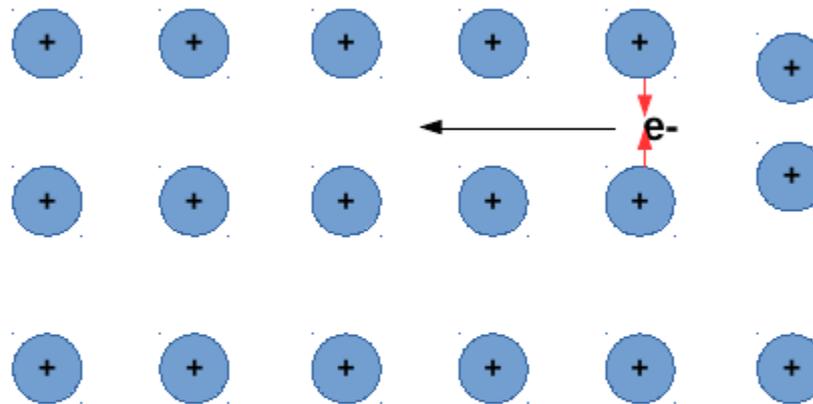
Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?



**Coulombkräfte
zwischen Gitter
und
Elektron**

Elektron – Gitter Wechselwirkung

Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?

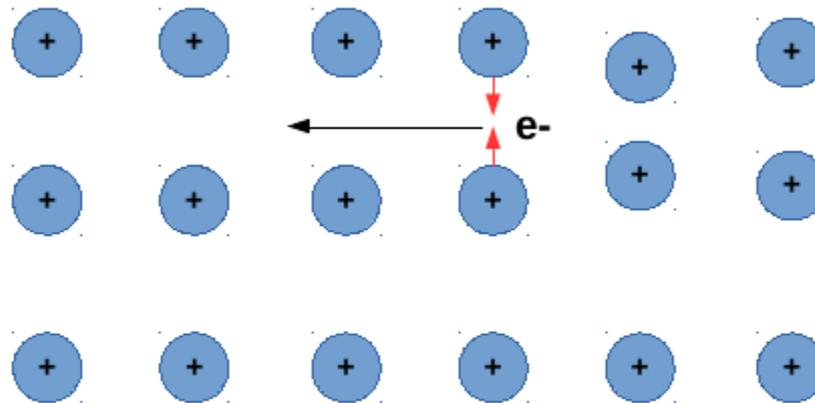


**Coulombkräfte
zwischen Gitter und
Elektron**

→ **Deformation des
Gitters**

Elektron – Gitter Wechselwirkung

Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?



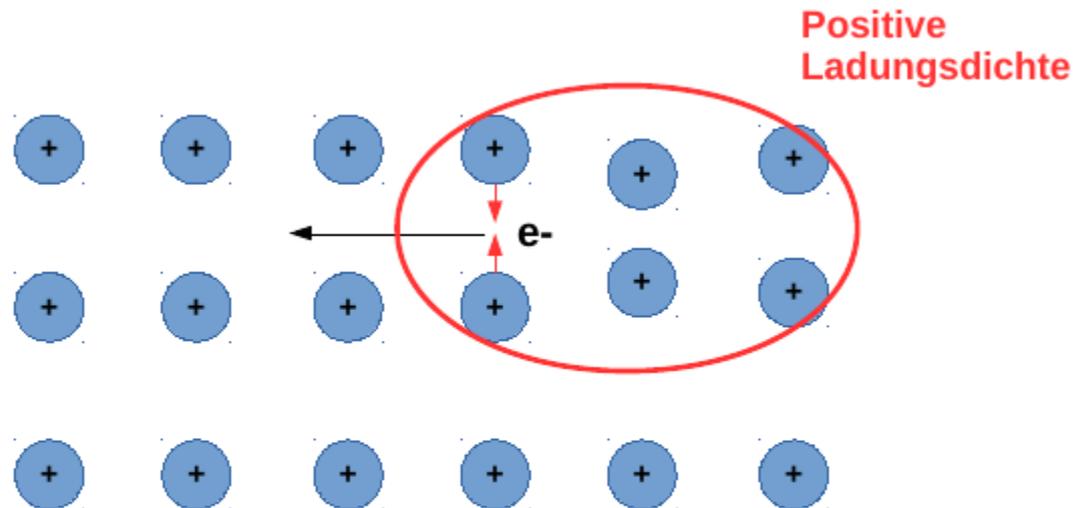
**Coulombkräfte
zwischen Gitter und
Elektron**

→ Deformation des
Gitters

→ Deformation bleibt
nach Durchgang des
e- wegen Trägheit
der Atomrümpfe
bestehen

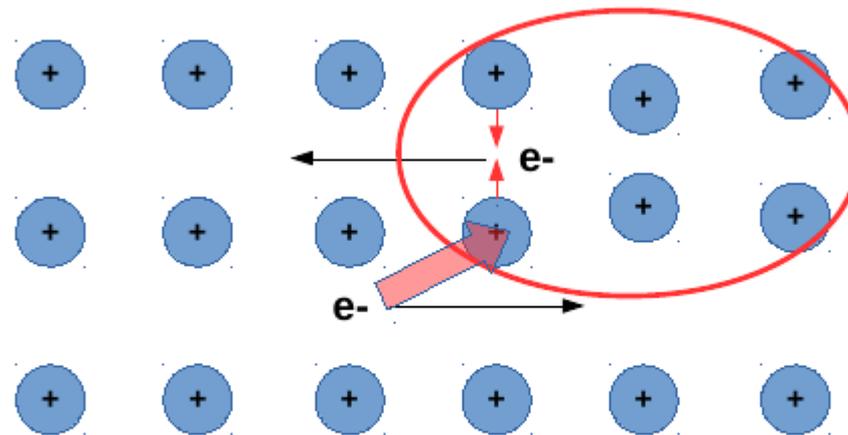
Elektron – Gitter Wechselwirkung

Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?



Elektron – Gitter Wechselwirkung

Was passiert, wenn sich ein Elektron durch das Gitter bewegt?

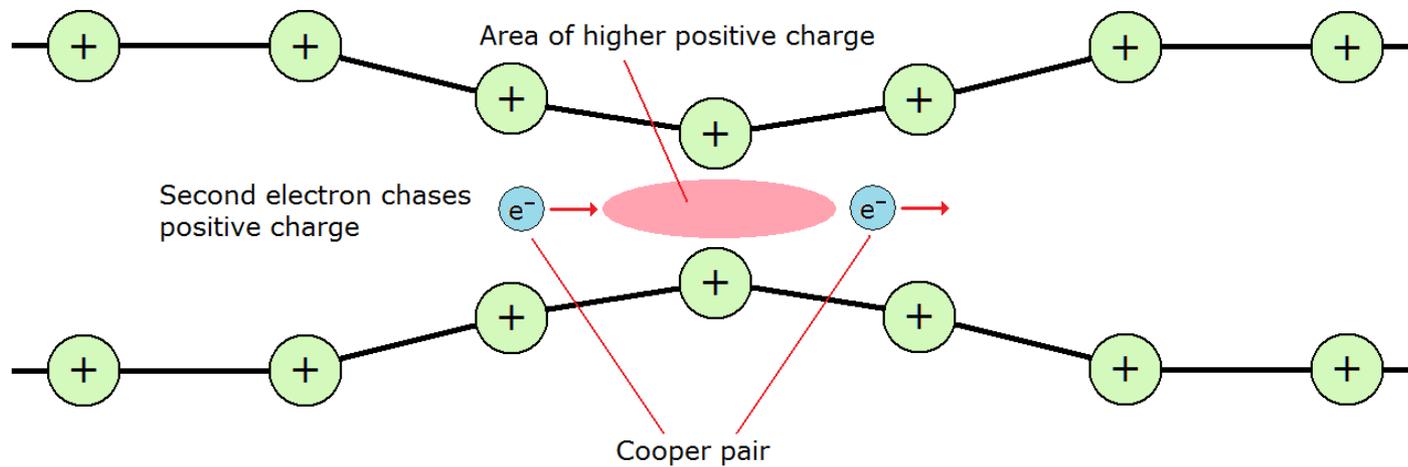


Weiteres e^- wird von positiver Ladungsdichte angezogen. Anziehung und Coulomb-Abstoßung überkompensieren sich, wenn e^- nicht zu nahe kommt.

Genauere Betrachtung: Energieabsenkung kann nur dann größer werden als Coulombabstoßung, wenn sowohl Impuls als auch Spin der beiden Elektronen antiparallel sind.

→ **Bindung zweier Elektronen über (virtuelle) Phononen.**

Entstehung von Cooper Paaren



Bildung von Cooper-Paaren

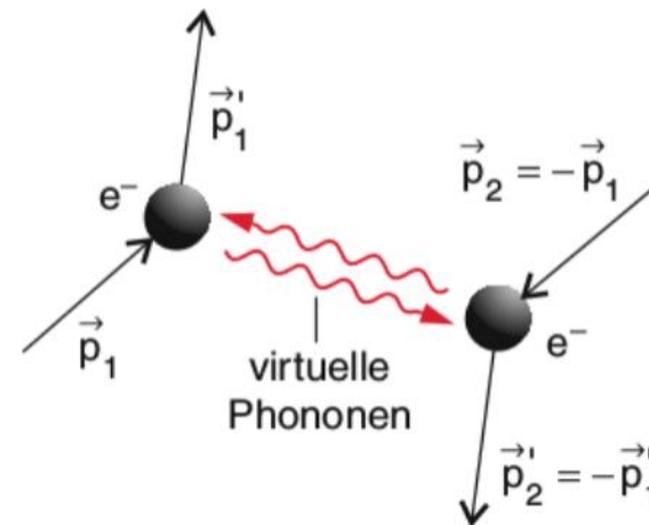
Leon Cooper, 1956

Kurzzeitige Bindung zweier Elektronen über virtuelle Phononen

- Kurze Lebensdauer: dissoziieren, neues Paar formt sich
- Phononen existieren nur kurz → virtuelle Phononen
- Cooper-Paare mit gleicher Gesamtenergie sind ununterscheidbar
- $T = 0$: Alle Teilchen in Superposition aller möglicher Cooper-Paar Zustände → **eine gemeinsame makroskopische Wellenfunktion**

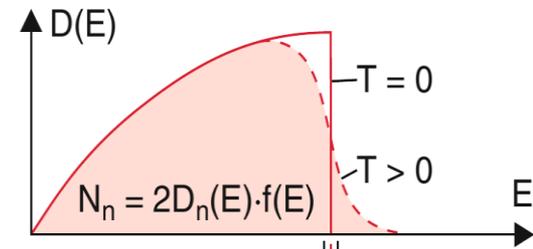
BCS Theorie:

- Beschreibung der Wellenfunktion für Cooper-Paare



Die supraleitende Energielücke

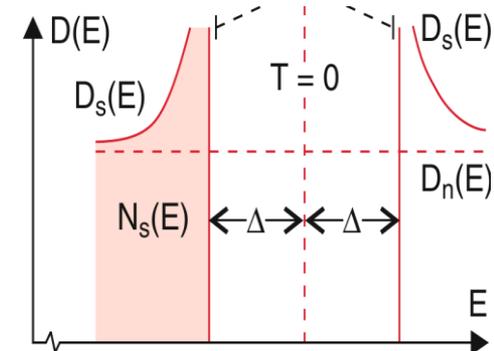
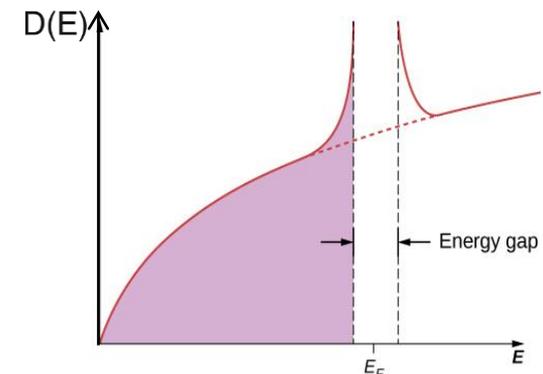
- Zustandsdichte im normalleitenden Zustand



- Zustandsdichte im supraleitenden Zustand

Cooper-Paare an der Fermi-Kante

- Absenkung der Energie um Betrag Δ (Paar-Bindungsenergie)
- Zusätzliche freie Zustände
- verbotener Bereich mit Breite 2Δ
- Cooper-Paare können keine beliebig kleinen Energien aufnehmen
- Niedrige Temperatur: Cooper-Paare können nicht in andere Zustände gestreut werden



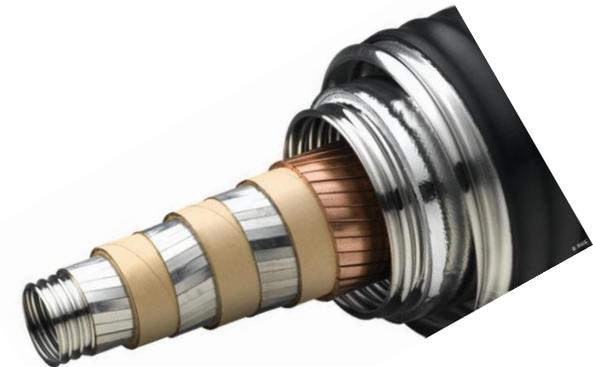
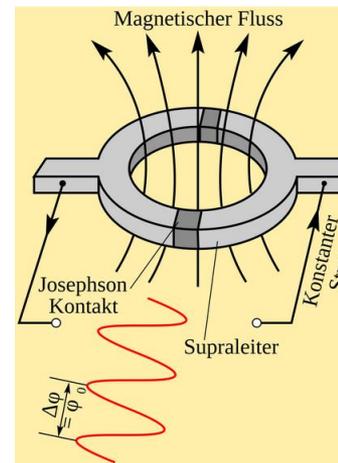
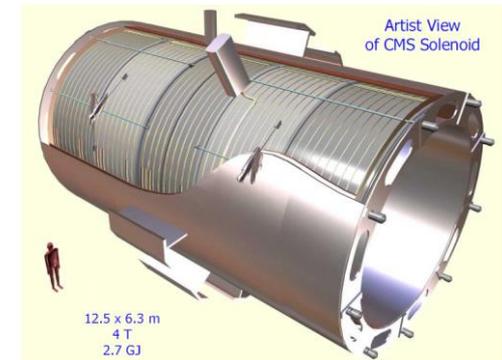
Anwendungen der Supraleitung

- Erzeugung starker Magnetfelder, z.B. für
 - Magnetresonanztomographie (MRT)
 - Teilchenbeschleuniger
 - Grundlagenforschung

- SQUIDS (superconducting quantum interference device) präzise Messung geringer Magnetfeldänderungen

- Verlustfreier Energietransport

- Quantenschaltkreise
→ Quantencomputer



Resümee

Der Bereich „Kondensierte Materie“ ist ein sehr aktives Forschungsgebiet und z.B. die größte Sektion in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Viele weitere Themen nicht behandelt

- Dielektrische und optische Eigenschaften
- Magnetische Eigenschaften
- Oberflächenphysik
- Amorphe Festkörper
- 2D Strukturen
- Nanophysik
- Metamaterialien