



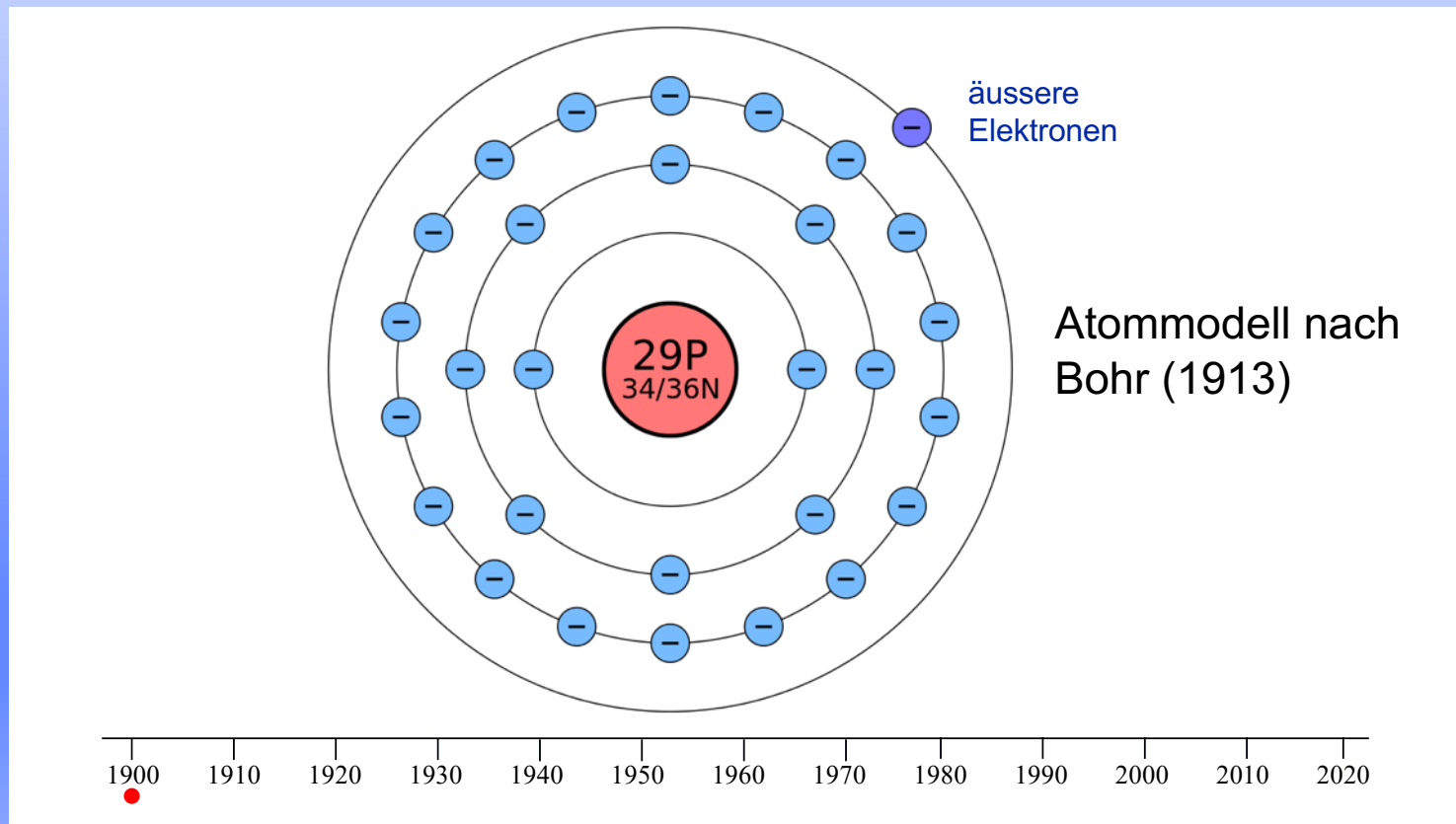
Universität
Zürich^{UZH}

Supraleitung

Supraleitung



Elektrischer Widerstand... Vorstellung um ca. 1900





Elektrischer Widerstand... Vorstellung um ca. 1900

Stossprozesse:
Drude-Theorie (um 1900)

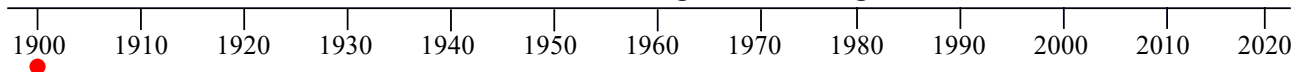
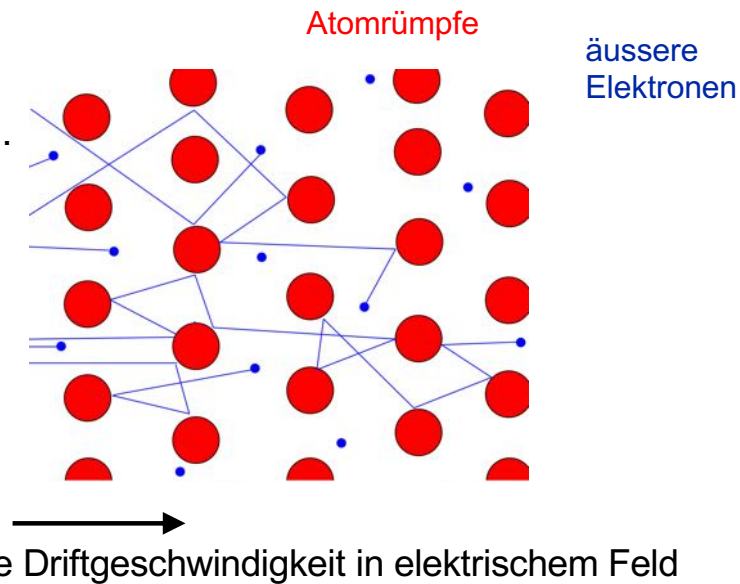
Metall

Äussere Elektronen sind beweglich
und nicht an feste Plätze gebunden.

Durch Stossprozesse ergibt sich
eine Art „viskose“ Reibung:

Die Elektronen können sich nur
fortbewegen, wenn ständig eine
Kraft auf sie wirkt.

=> **Elektrischer Widerstand**





Elektrischer Widerstand... Vorstellung um ca. 1900

Metall

*Verhalten „nahe“ dem
Temperaturnullpunkt?*

Dewar (1904): Widerstand geht stetig **gegen null**

Matthiesen (1884): Widerstand hat **Grenzwert**

Kelvin (1902): Widerstand **nimmt** wegen
Lokalisierung der Elektronen **stark zu**

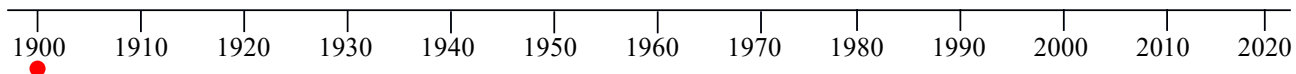
Verhalten beim absoluten Temperaturnullpunkt?

Walter Nernst 3. Hauptsatz (1906):

absoluter Stillstand: **Isolator**

Max Planck „2. Quantentheorie“ (1911):

Nullpunktsbewegung **Leitend**





Elektrischer Widerstand... Vorstellung um ca. 1900

Metall

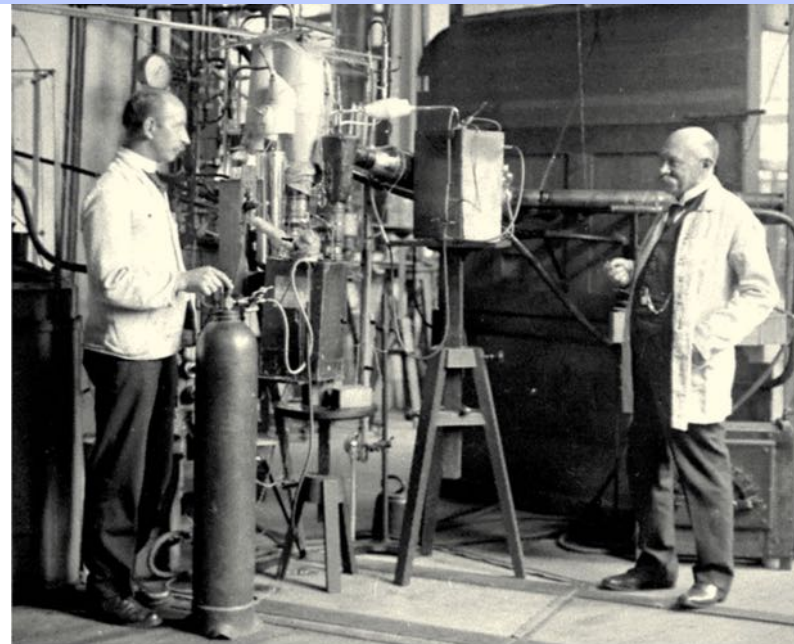


1913

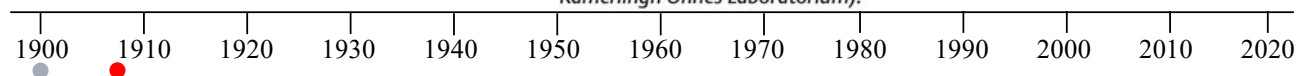
*Verhalten „nahe“ dem
Temperaturnullpunkt?*

**Joule Thomson Effekt nach
Vorkühlung unter 40 K:**

**Verflüssigung von Helium
durch Team von Heike
Kammerlingh Onnes (1908)**



Heike Kamerlingh Onnes (rechts) zusammen mit seinem Techniker Gerrit J. Flim neben dem zweiten in Leiden gebauten Heliumverflüssiger (Foto: Collection Kamerlingh Onnes Laboratorium).



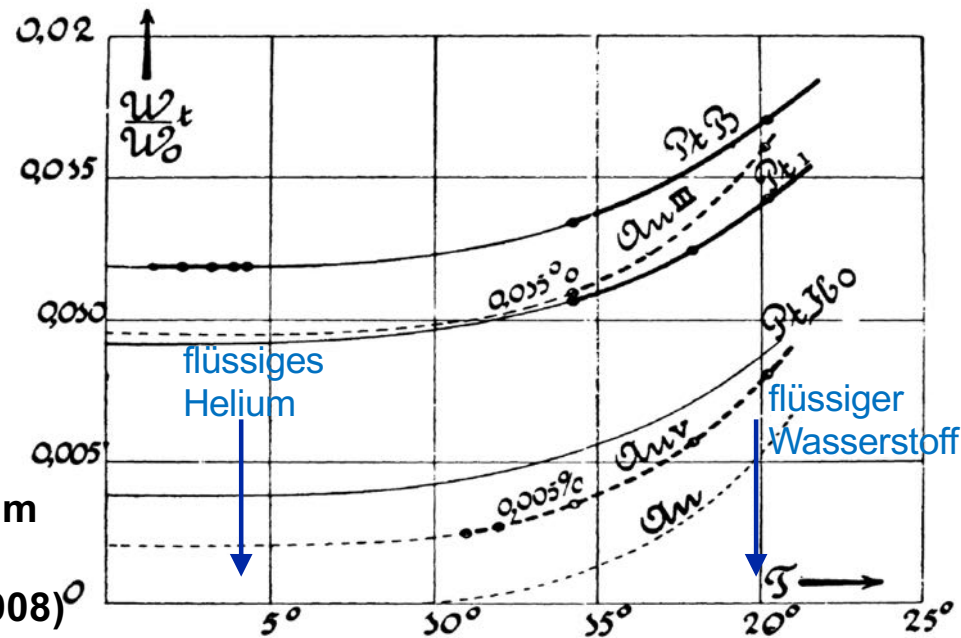


Elektrischer Widerstand... Vorstellung um ca. 1900

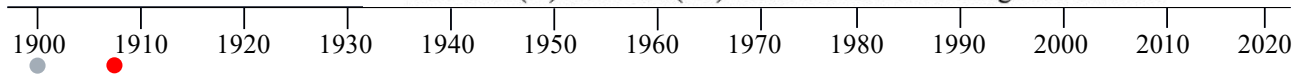
Metall

Verhalten „nahe“ dem
Temperaturnullpunkt?

Verflüssigung von Helium
durch Team von Heike
Kammerlingh Onnes (1908)^o



Messungen von Kamerling Onnes, Cornelis Dorsman & Gilles Holst an mehreren Proben von Platin (Pt) und Gold (Au) verschiedenen Reinheitsgrades ca.1910

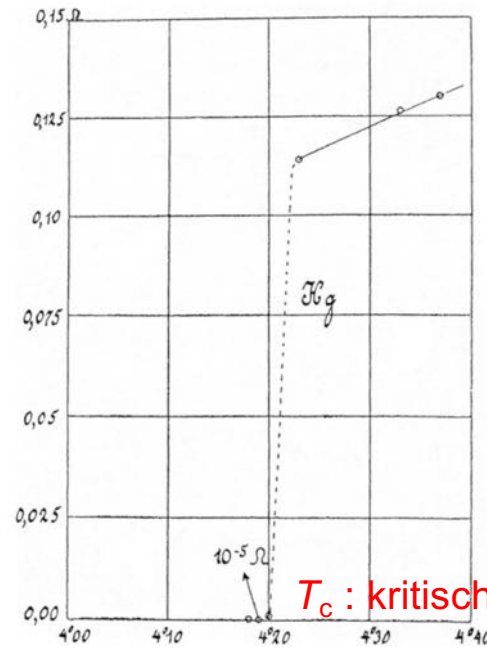




Entdeckung der Supraleitung

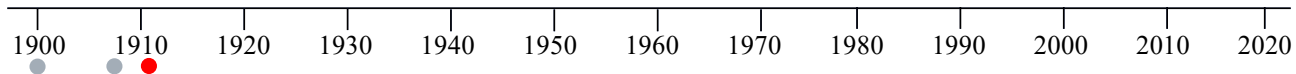
Entdeckung der Supraleitung in Quecksilber

Kammerlingh Onnes (1911)



T_c : kritische Temperatur

Abb. 1.1 Entdeckung der Supraleitung. Elektrischer Widerstand in Ohm einer Quecksilber-Probe, aufgetragen in Abhängigkeit von der Temperatur in Kelvin. (H. Kamerlingh Onnes)





Verhalten im Magnetfeld

Supraleitung wird durch hohe Magnetfelder zerstört (kritisches Feld B_c)

Kritische Stromdichte j_c

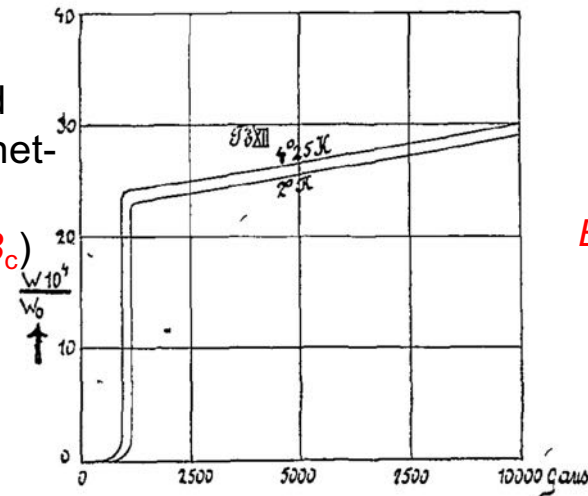
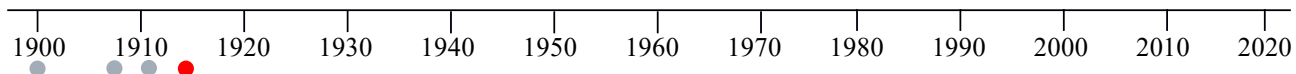
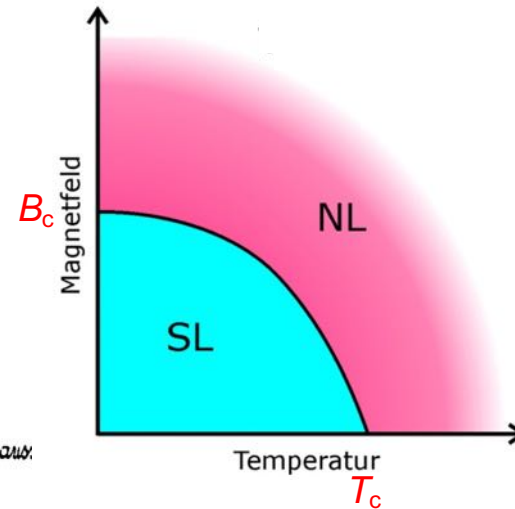


Fig. 1.

Kammerlingh Onnes (1914)

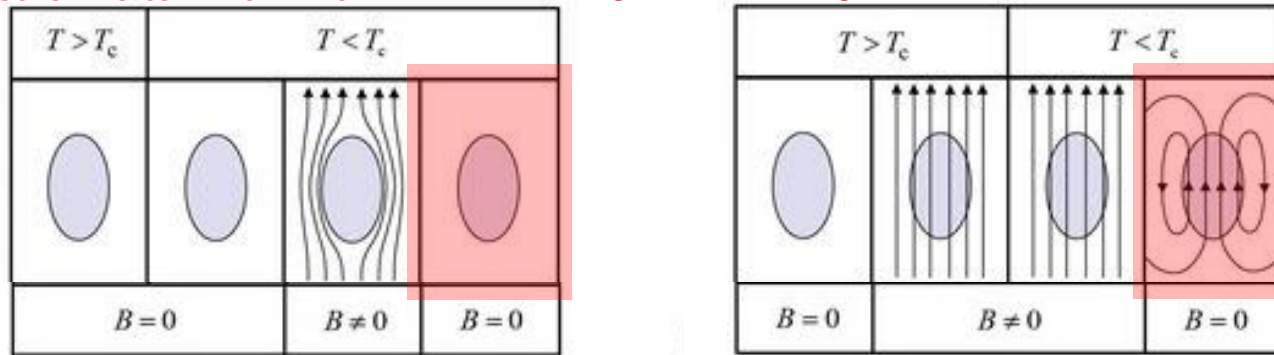
Faustregel: Je höher T_c , desto „robuster die Supraleitung“ (hohe Werte für B_c und j_c)



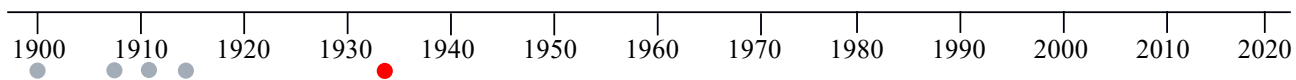


Verhalten im Magnetfeld: Meissner Ochsenfeld-Effekt (1933)

Idealer Leiter mit $R = 0$ Lenz'sche Regel: Abschirmung induzierte Ströme



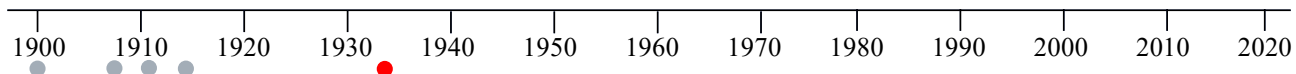
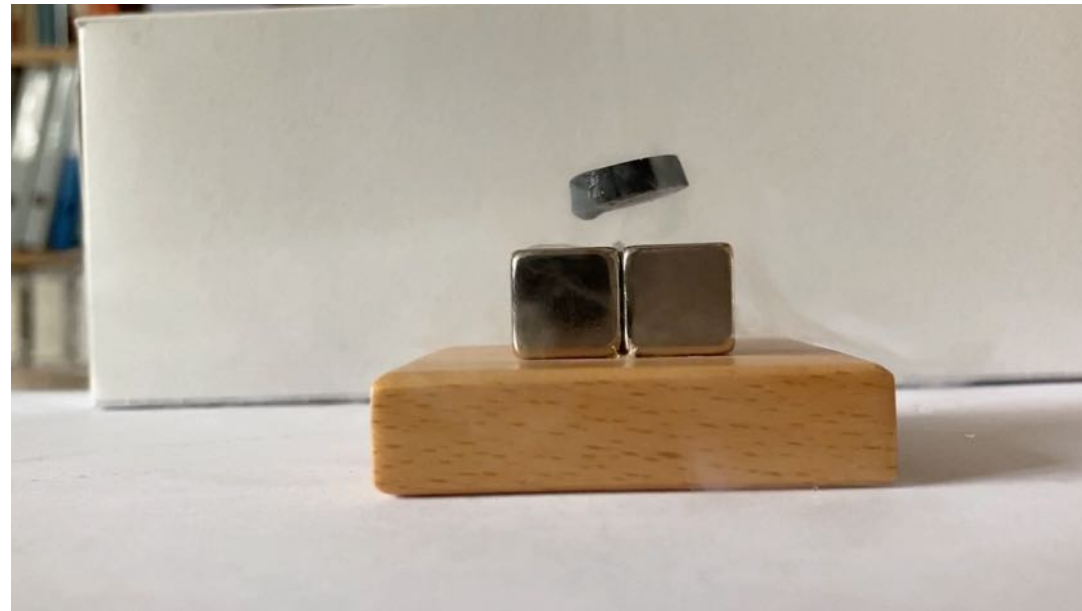
Supraleiter: Meissner-Ochsenfeld Effekt (1933)





Verhalten im Magnetfeld: Meissner Ochsenfeld-Effekt (1933)

**Supraleiter:
ideale Diamagneten**





Erklärung des Meissner Ochsenfeld-Effektes: London Gleichungen (1934)

Anstelle des Ohm'schen Gesetzes ($I = U/R$),

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$
$$= -e n \vec{v}$$

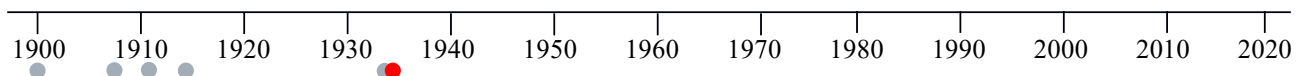
E : Elektronenladung
 n : Ladungsträgerdichte
 v : Driftgeschwindigkeit

2. Newtonsches Gesetz: $F = ma$ ohne Reibungseffekte:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{m}{e n} \frac{d\vec{j}}{dt}$$
$$-e\vec{E} \quad (\text{Coulombkraft})$$

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = \frac{ne^2}{m} \vec{E}$$

1. London Gleichung





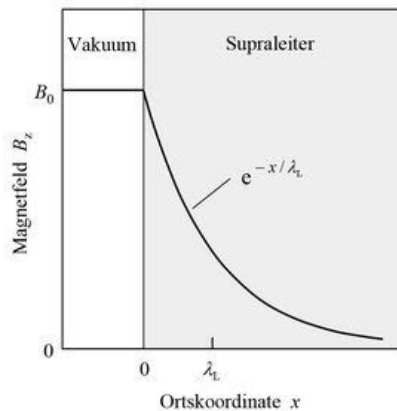
Erklärung des Meissner Ochsenfeld-Effektes: London Gleichungen (1934)

$$(1 \text{ dim:}) \frac{d^2}{(dx)^2} B_z = \frac{\mu_0 n q^2 B_z}{m} = \frac{B_z}{\lambda_L^2}$$

2. London Gleichung

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n q^2}}$$

London'sche Eindringtiefe



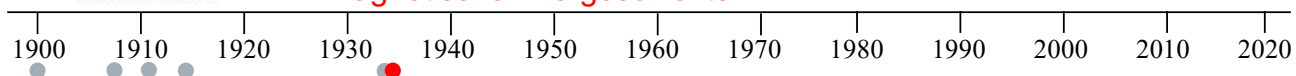
$$B_z(x) = B_0 e^{-x/\lambda_L}$$

....unabhängig von der
magnetischen Vorgeschichte

Maxwell-Gleichungen

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = \frac{ne^2}{m} \vec{E}$$

1. London Gleichung





Supraleitung: «Zustand» im Sinne der Thermodynamik

Wärmekapazität
zeigt eine
Diskontinuität
(2. Ordnungs-
Phasenübergang)

Keesom and Kok (1932)

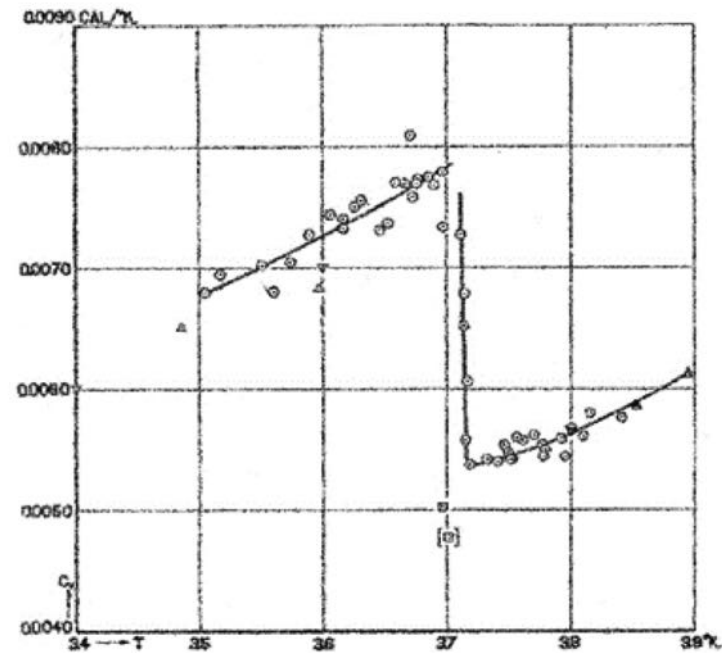
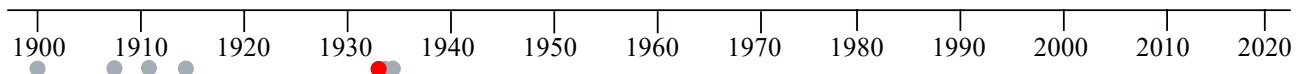


Fig. 3. A discontinuous change in specific heat at T_c for tin – Keesom and Kok [10].





Supraleitung: «Zustand» im Sinne der Thermodynamik

2. Ordnungs-Phasenübergang

THEORY OF PHASE TRANSITIONS



90 YEARS

ON THE THEORY OF PHASE TRANSITIONS

Translated and reprinted from Landau L.D. "Collected Papers" (Nauka, Moscow, 1969),
Vol. 1, pp. 234–252. Originally published in Zh. Eksp. Teor. Fiz. 7, pp. 19–32 (1937)

L. LANDAU

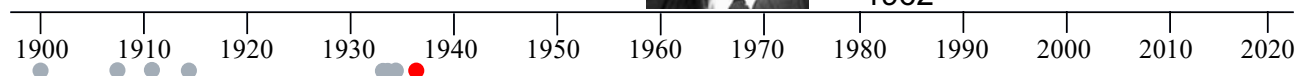
Ukrainian Physico-Technical Institute, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR
(Kharkov, Ukraine)

Konzept des „Ordnungsparameters“

Lew Landau (1937)



1962





Ginzburg-Landau Theorie (1950)

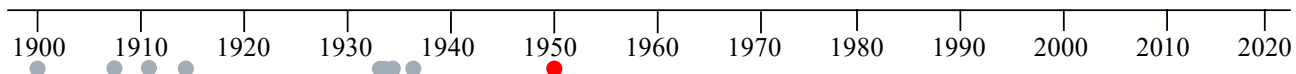
$$\alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi + \frac{1}{2m^*} \left(-i\hbar\vec{\nabla} + 2e\vec{A} \right)^2 \psi = 0 \text{ und}$$

$$\vec{j} = -\frac{2e}{m^*} \text{Re} \left\{ \psi^* \left(-i\hbar\vec{\nabla} + 2e\vec{A} \right) \psi \right\}.$$

„Ordnungsparameter“: Makroskopische Wellenfunktion im Sinne Schrödingers

Ginzburg-Landau Theorie der Supraleitung (1950)

Entwicklung um kritische Temperatur: $\alpha(T) = \alpha_0 (T - T_c)/T_c$





Ginzburg-Landau Theorie (1950)

$$\alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi$$

$$|\psi|^2 = -\alpha/\beta$$

Dichte der supraleitenden
Ladungsträger

Zwei Längenskalen:

$$\lambda = \sqrt{\frac{m\beta}{\mu_0\alpha q^2}} = \lambda_L$$

$$\xi = \frac{\hbar}{\sqrt{2m|\alpha|}}$$

„Kohärenzlänge“



Valeri Ginzburg

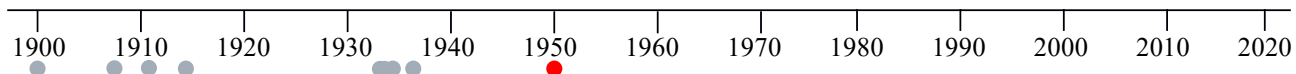


2003

„Ordnungsparameter“: Makroskopische Wellenfunktion im Sinne Schrödingers

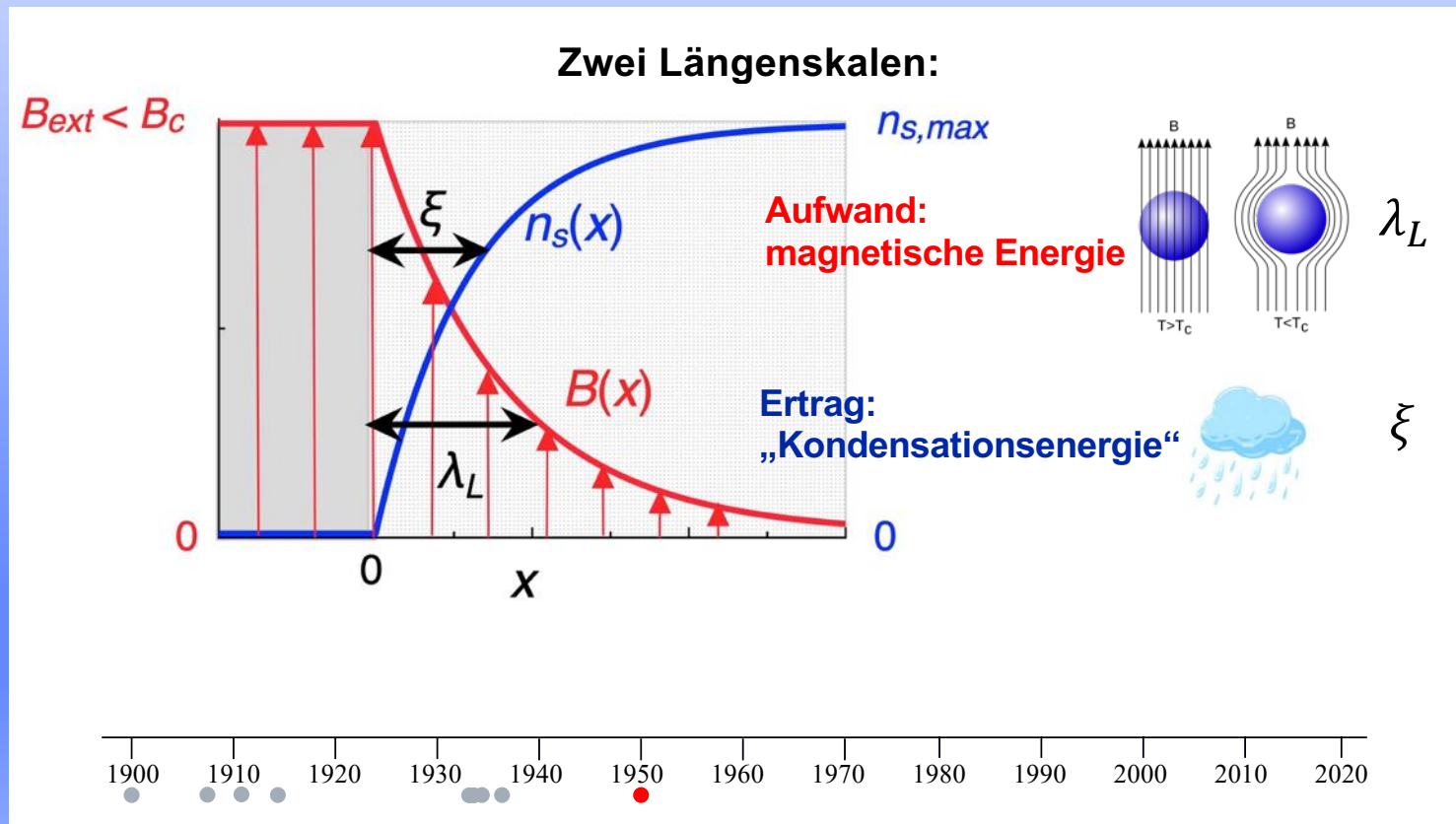
Ginzburg-Landau Theorie der Supraleitung (1950)

Entwicklung um kritische Temperatur: $\alpha(T) = \alpha_0 (T - T_c)/T_c$





Ginzburg-Landau Theorie (1950)



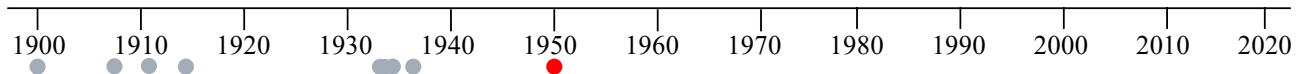
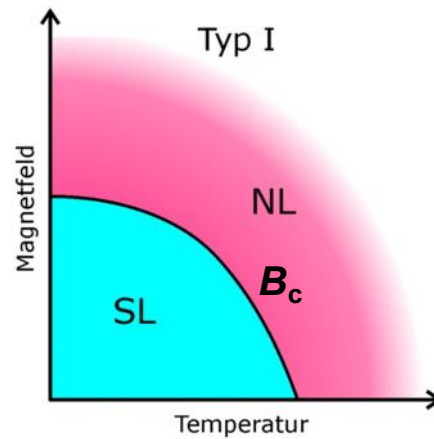


Ginzburg-Landau Theorie (1950)

Zwei Längenskalen:

$\xi \gtrsim \lambda_L$: Grenzfläche kostet viel Kondensationsenergie, gewinnt wenig Magnetfeldenergie: **Typ-I**

Magnetfeld wird für $B < B_c$ (ausser an der Oberfläche) vollständig verdrängt





Abrikosov: Vortextgitter (1957)

Zwei Längenskalen:

$\xi \ll \lambda_L$: Grenzfläche kostet wenig **Kondensationsenergie**, gewinnt viel **Magnetfeldenergie**: **Typ-II**

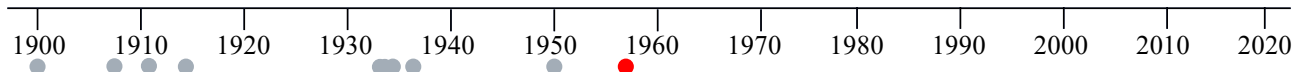
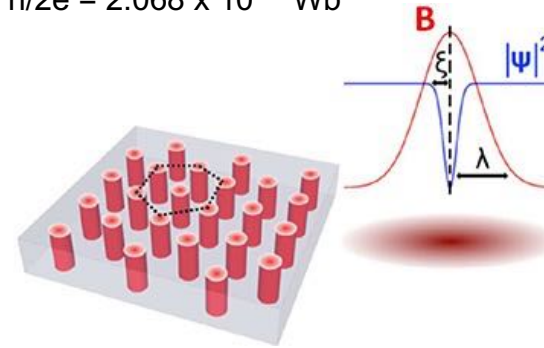
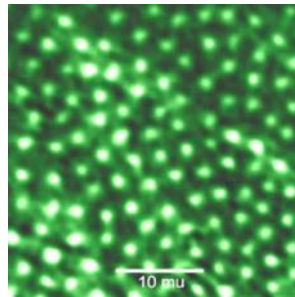
Vergößerung der Grenzfläche für $B_{c1} < B < B_c$ durch Bildung von "Flussschläuchen" (Vortices)

Magnetisches Flussquantum: $\Phi = h/2e = 2.068 \times 10^{-15} \text{ Wb}$



2003

Alexei Abrikosov





Abrikosov: Vortextgitter (1957)

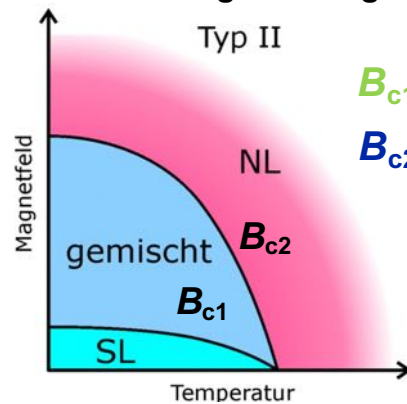
Typ-II Supraleiter: Zwei “kritische Felder”, B_{c1} und B_{c2}

$B < B_{c1}$: Meissner Effekt

$B > B_{c2}$: normalleitend

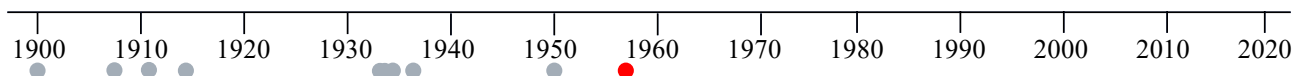
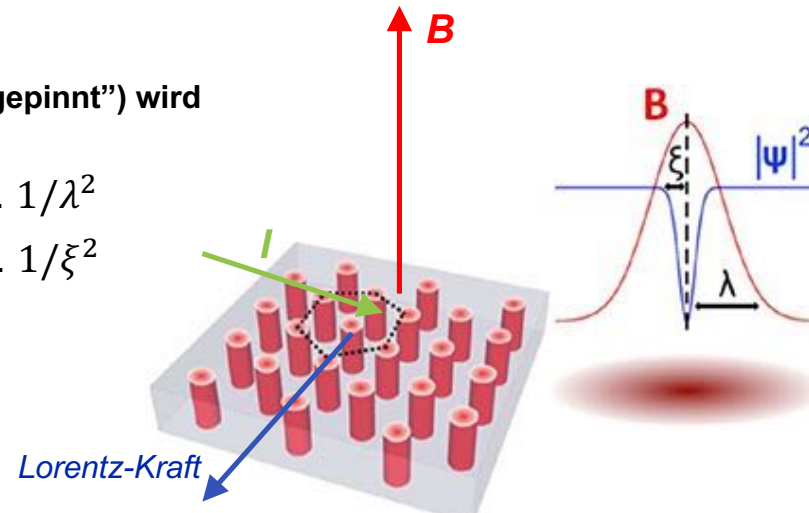
$B_{c1} < B < B_{c2}$: gemischter Zustand mit Flussschläuchen

Dort: hohe technische **Stromdichten**
sobald das Vortextgitter festgehalten (“gepinnt”) wird



B_{c1} : prop. $1/\lambda^2$

B_{c2} : prop. $1/\xi^2$





Thomson Koeffizient – Hinweis auf eine Energielücke (1945)

**Supraleitender Strom transportiert keine Wärme:
«Thomson Koeffizient» = 0 im supraleitenden Zustand**

Wiedemann-Franz Gesetz gilt hier nicht!

An experiment on the mechanism of superconductivity

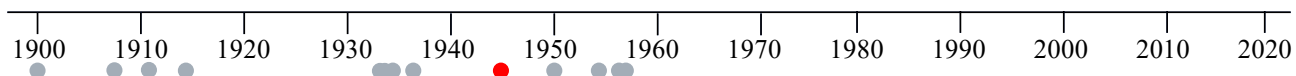
By J. G. DAUNT AND K. MENDELSSOHN, *Clarendon Laboratory, Oxford*

(Communicated by F. E. Simon, F.R.S.—Received 3 January 1945)

The Thomson coefficient of superconductive lead has been determined by a direct experiment and found to be zero ($< 4 \times 10^{-9}$ V/deg.). It has been concluded from this result that the electrons engaged in a superconductive current remain energetically at absolute zero. The apparent electronic specific heat of a superconductor is assumed to be due to an excitation of electrons from the lowest state. The magnetic data suggest that this apparent specific heat is proportional to T^3 .

A purely empirical model of the electronic term system for a superconductor has been suggested in which a small energy gap ($\sim 10^{-4}$ eV) separates the upper limit of the Fermi distribution at absolute zero from a continuum of higher states. The frictionless transport of electrons is supposed to be due to metastable states within the gap in which energy cannot be dissipated. In such a model the number of superconductive electrons at absolute zero has been calculated to be of the order of 10^{-3} of the number of atoms.

Attention has been drawn to a peculiar similarity between the frictionless transport in superconductors and that in liquid helium II. It has been concluded that the cause for both phenomena may be essentially the same—an aggregation of freely mobile particles of zero thermal energy which follows similar rules irrespective of the nature of the particles involved.





Wärmekapazität – Hinweis auf eine Energielücke (1954)

Zweiflüssigkeitsmodell (Gorter, Casimir, 1934):

$$\frac{C_{el,s}(T)}{C_{el,n}(T_c)} = 3 \left(\frac{T}{T_c} \right)^3$$

Corak et al, (1954):

$$\frac{C_{el,s}(T)}{C_{el,n}(T_c)} = a e^{-b \left(\frac{T_c}{T} \right)}$$

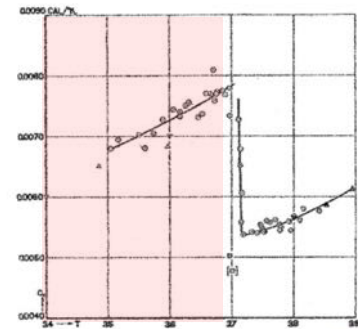


Fig. 3. A discontinuous change in specific heat at T_c for tin – Keesom and Kok [10].

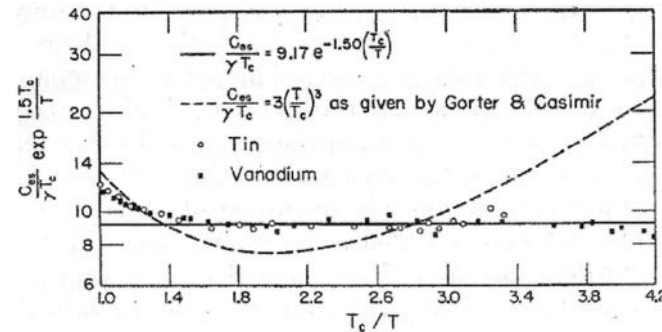
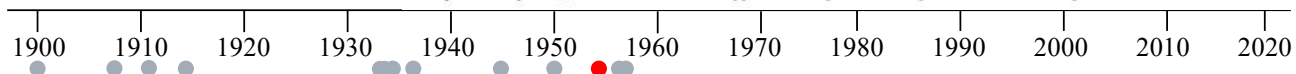


Fig. 7. Fits to C_{es} of vanadium and tin supported an exponential temperature- over a T_c^{-3} -dependence – Corak and Satterthwaite [17].





BCS Theorie (1957): Detaillierte mikroskopische Theorie



John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer

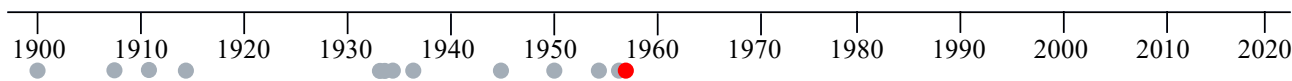
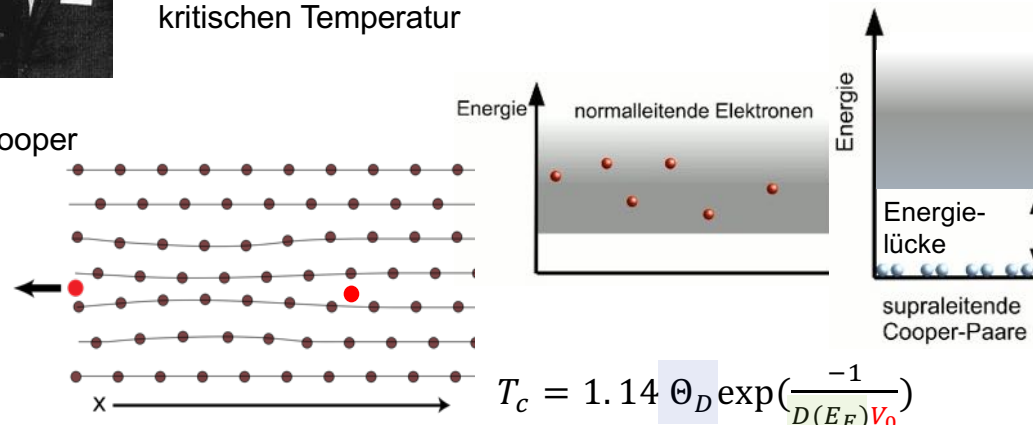


1972

Jede anziehende Wechselwirkung (« V_0 ») zwischen Elektronen Führt zur Bildung von sog. Cooper-Paaren

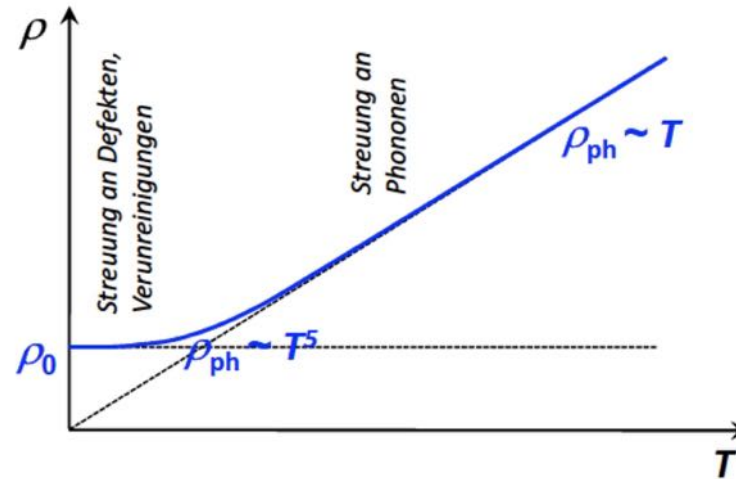
Diese Anziehung erfolgt in konventionellen Supraleitern via Schwingungen des Kristallgitters («Phononen»)

Erklärung von Energielücke, Isotopeneffekt und Grösse der kritischen Temperatur





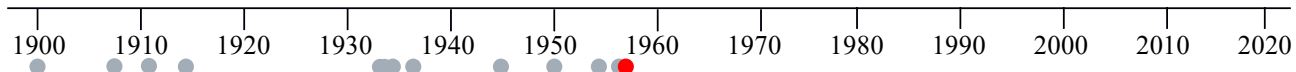
BCS Theorie (1957): Detaillierte mikroskopische Theorie



$$\rho(T) = \rho_0 + \lambda \frac{\pi k_B \Theta_D m_e}{8e^2 \hbar n_e} \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^5 \int_0^{\Theta_D/T} \frac{x^5}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} dx \quad (\text{Bloch - Grüneisen})$$

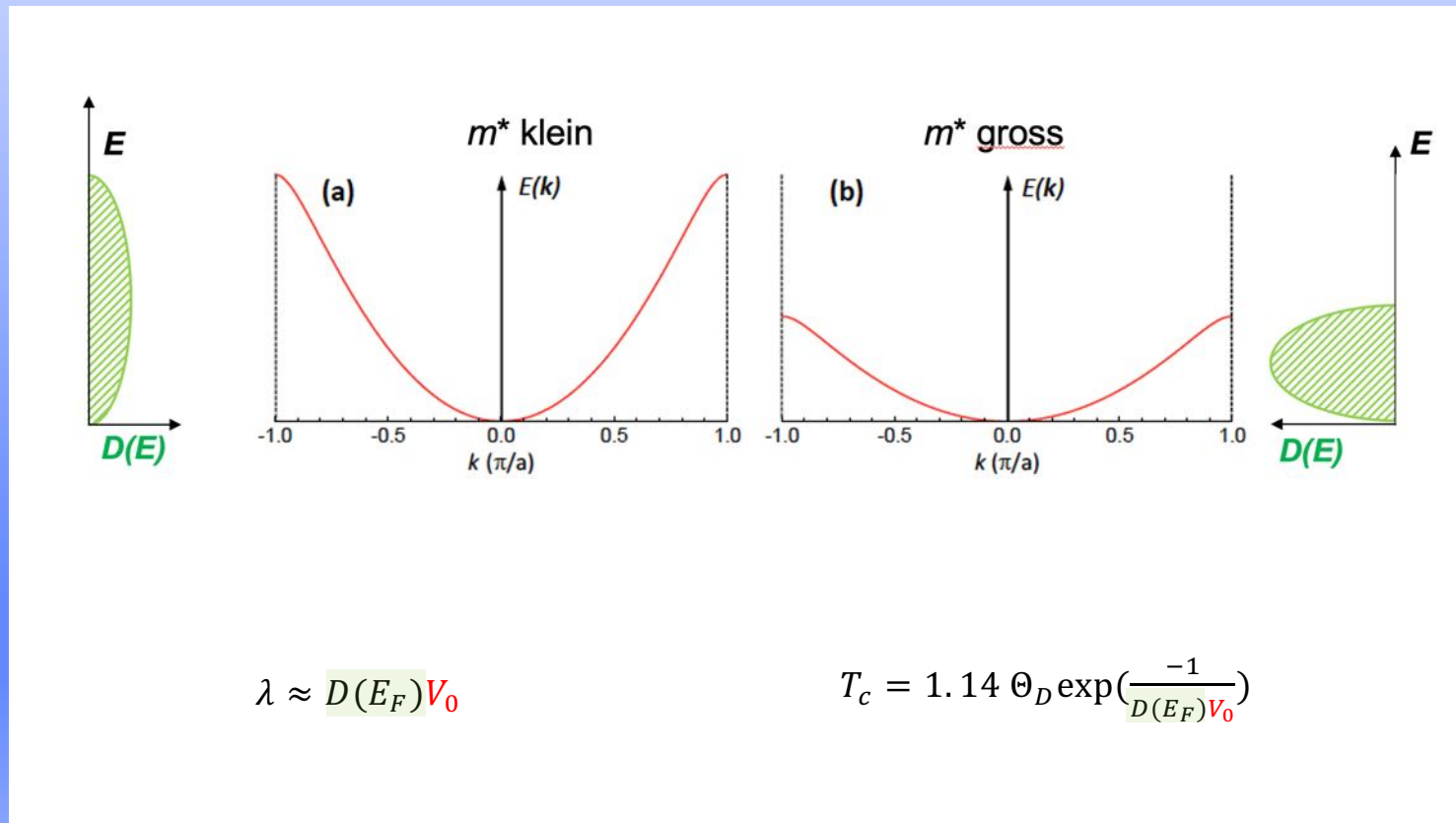
λ Mass für die Stärke der Elektron - Phonon Wechselwirkung

$$\lambda \approx D(E_F) V_0 \quad T_c = 1.14 \Theta_D \exp\left(\frac{-1}{D(E_F) V_0}\right)$$





Flache Energiebänder, hohe elektronische Zustandsdichte bei E_F

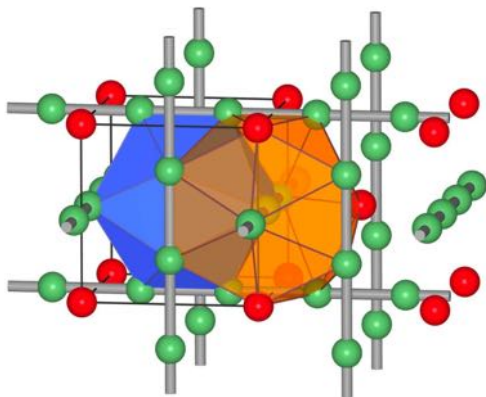




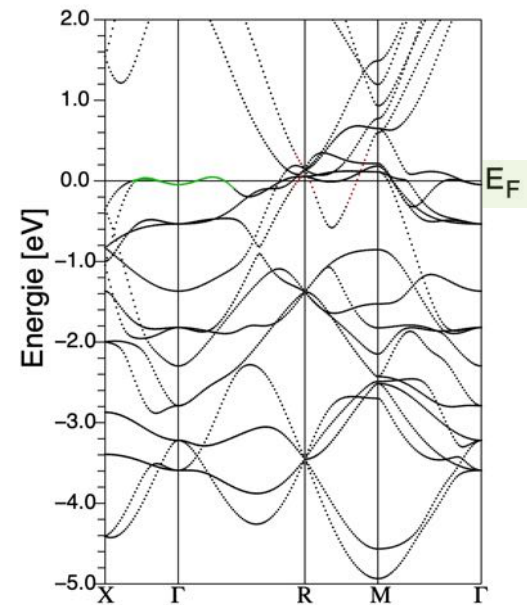
Flache Energiebänder, hohe elektronische Zustandsdichte bei E_F

Nb_3Sn

$T_c \approx 18.3 \text{ K}$



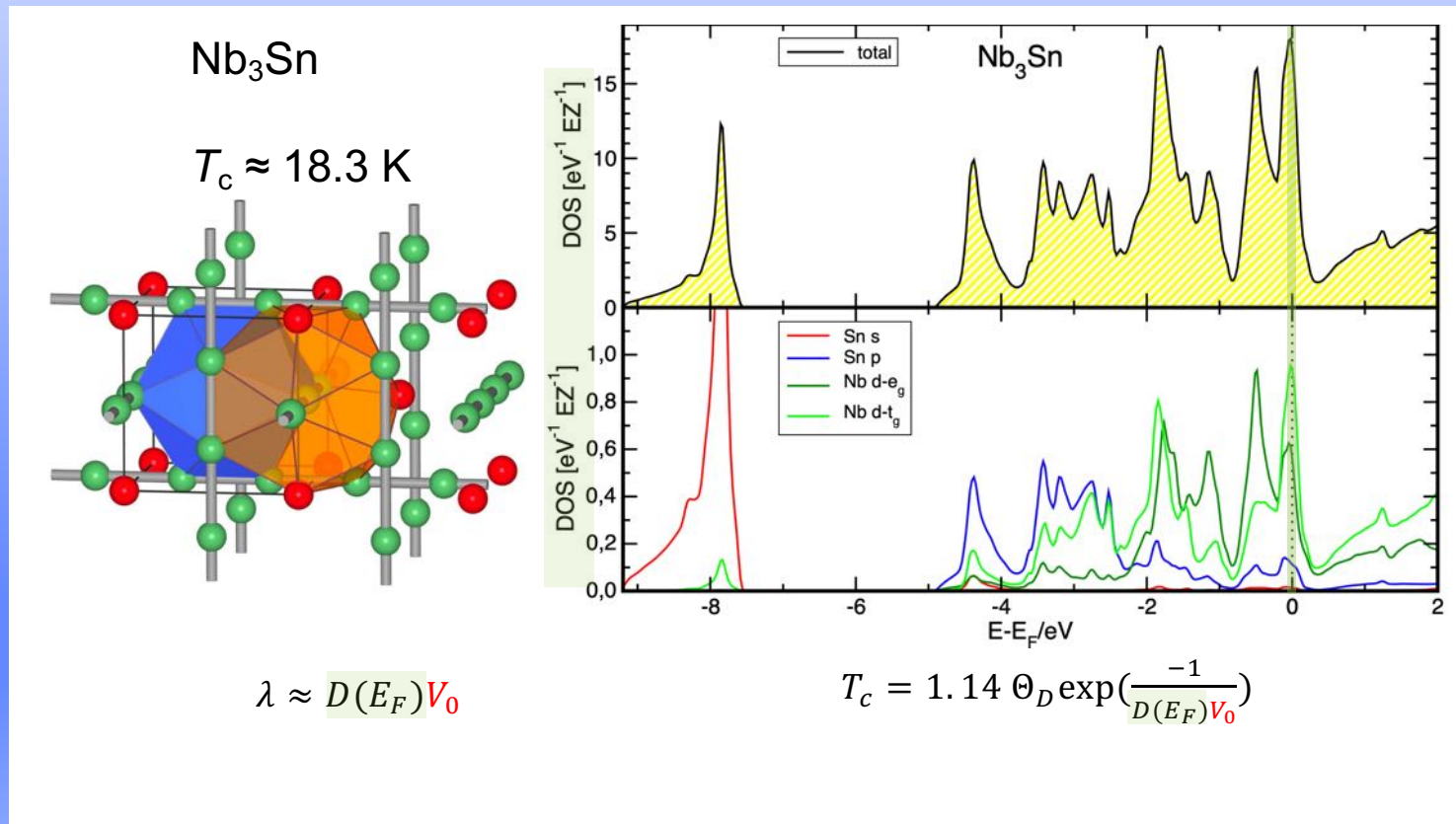
$$\lambda \approx D(E_F)V_0$$



$$T_c = 1.14 \Theta_D \exp\left(\frac{-1}{D(E_F)V_0}\right)$$

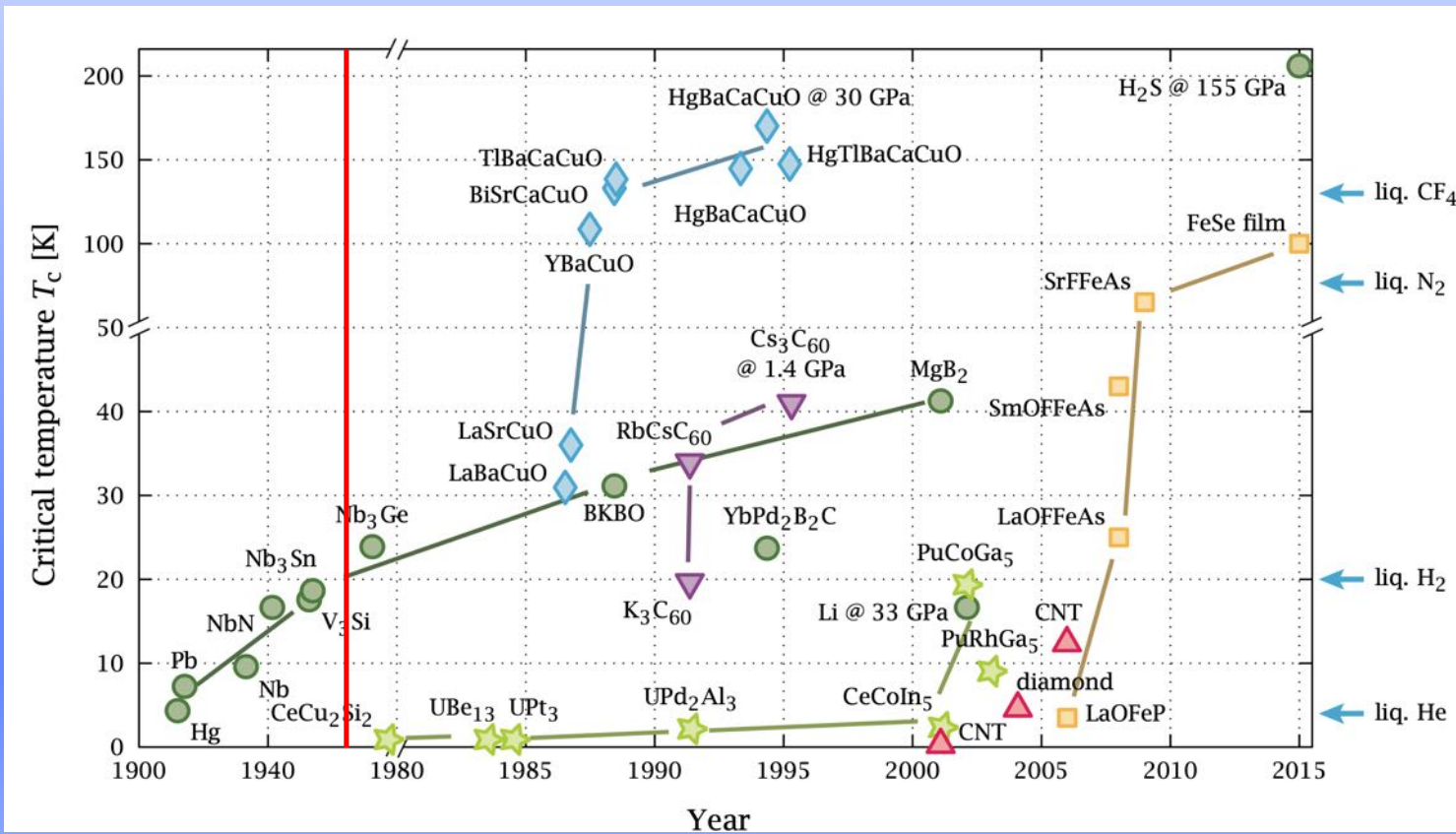


Flache Energiebänder, hohe elektronische Zustandsdichte bei E_F





Kritische Temperatur vs. Zeit (bis 2015)





Wie neue Supraleiter finden? Matthias Regeln....

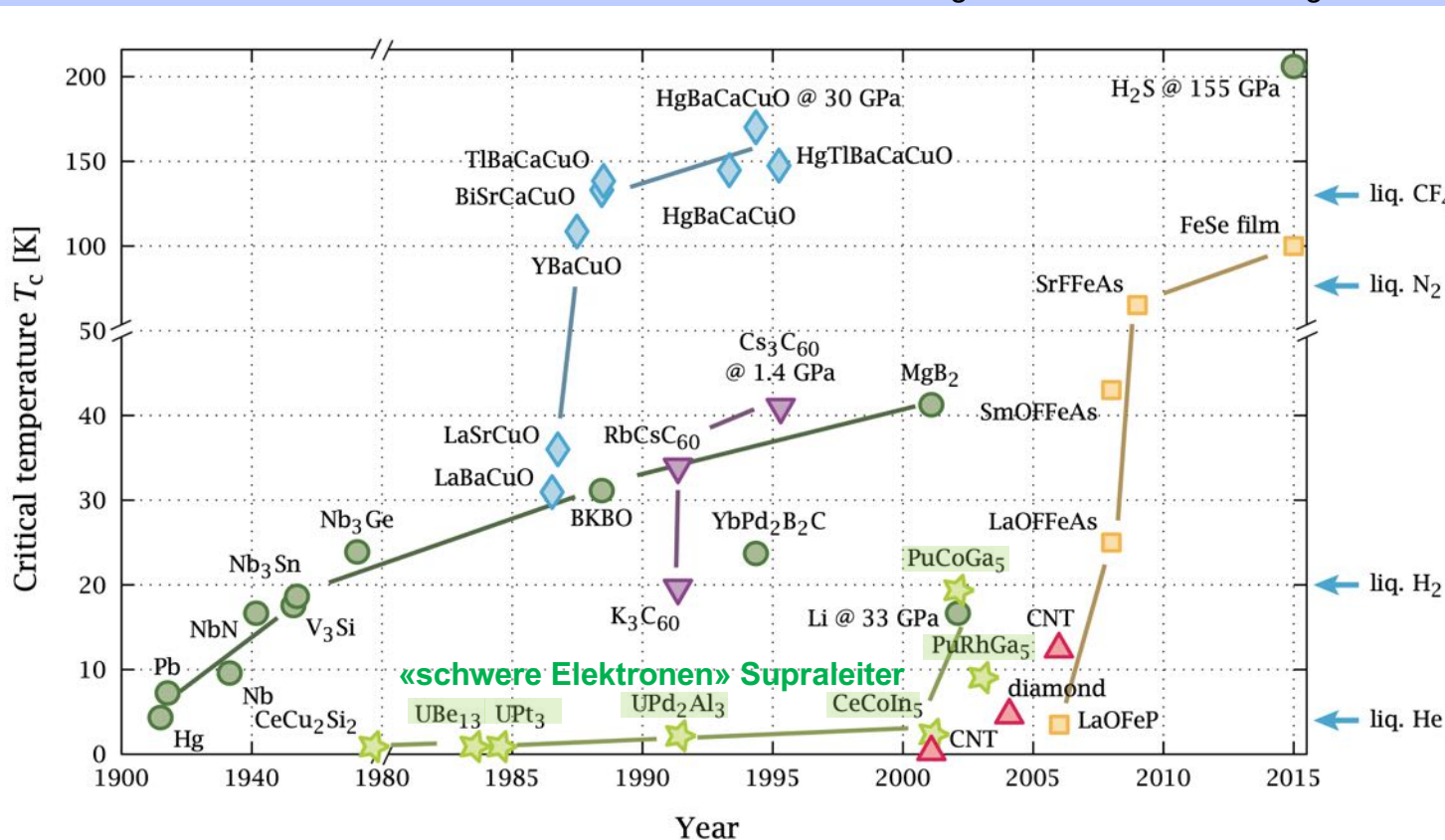
The screenshot shows the Wikipedia page for 'Matthias rules'. The page title is 'Matthias rules' and it is categorized as an 'Article'. The main content is a list of six guidelines for finding superconductors, which are highlighted in a light blue box:

1. High **symmetry** is good, **cubic symmetry** is the best.
2. High density of electronic states is good.
3. Stay away from **oxygen**.
4. Stay away from **magnetism**
5. Stay away from **insulators**.
6. Stay away from **theorists!**



«schwere Elektronen» Supraleiter

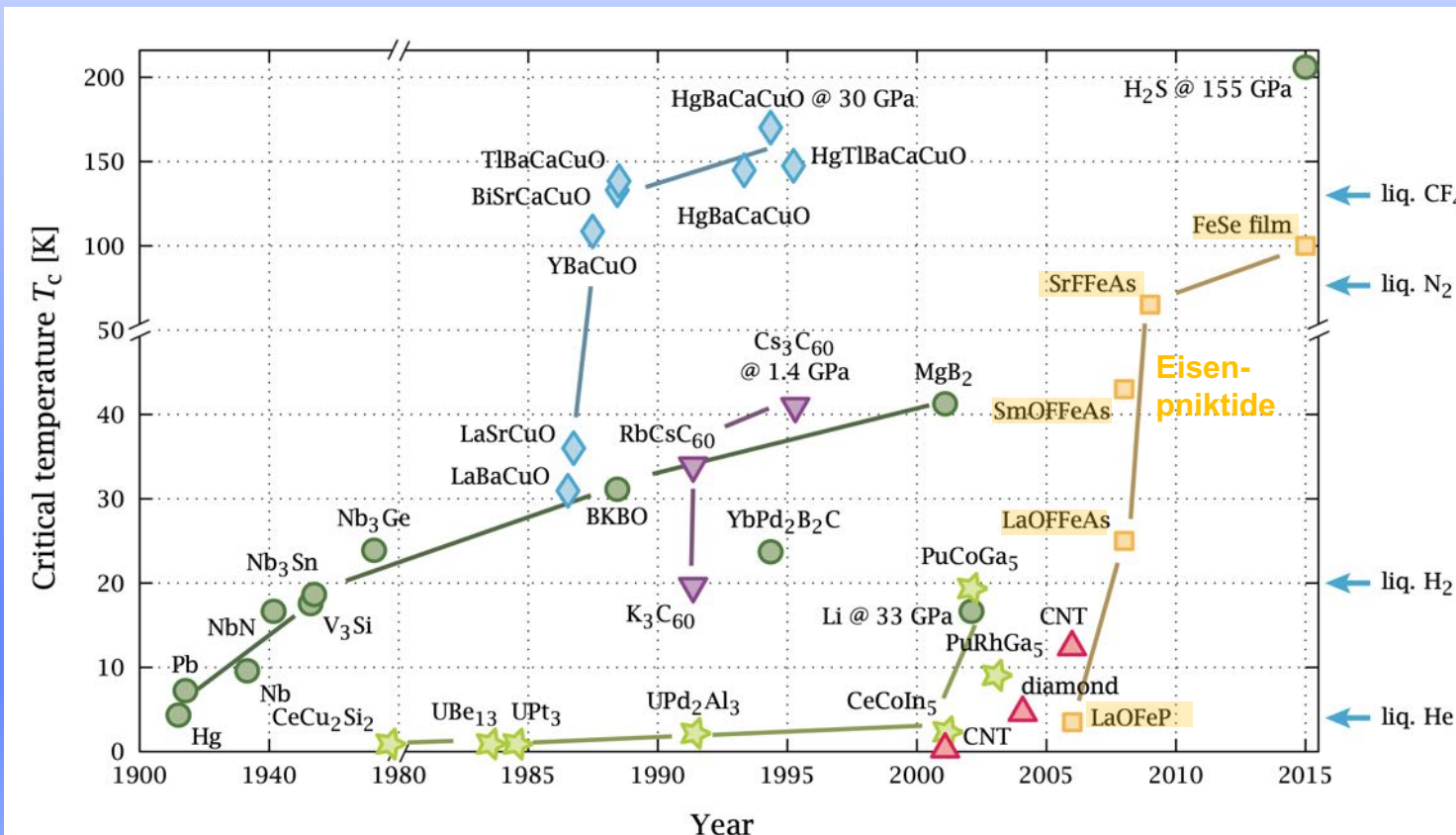
- Intermetallische Verbindungen mit Cer, Uran oder Plutonium
- Fast delokalisierte "f-Elektronen", **hohe effektive Masse m^***
- magnetische Wechselwirkung mit den Leitungselektronen





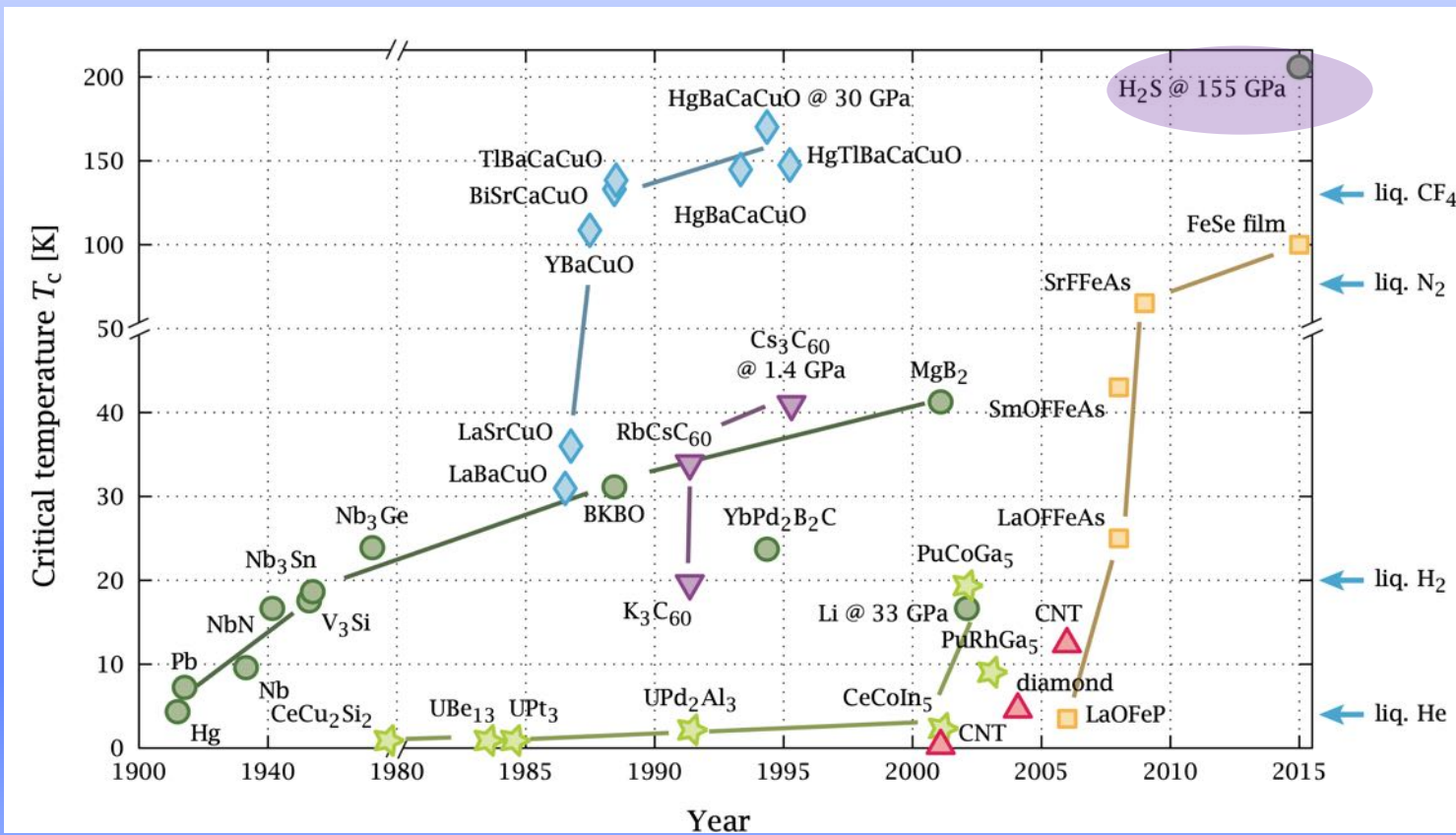
Eisenpniktide

- Meist geschichtete Eisen-Arsen oder Phosphor-Verbindungen
- Mechanismus: ??



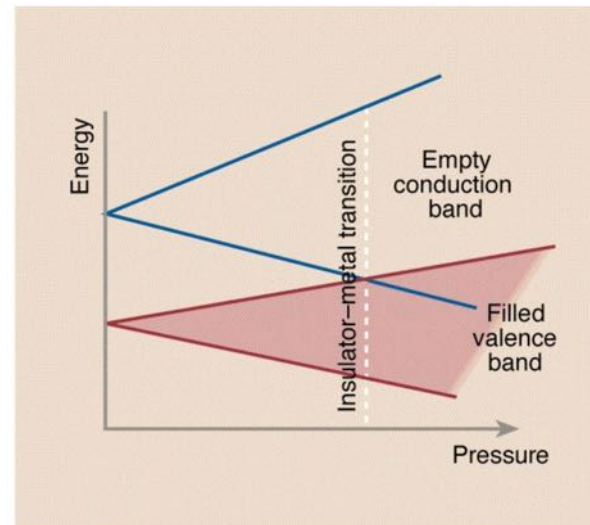
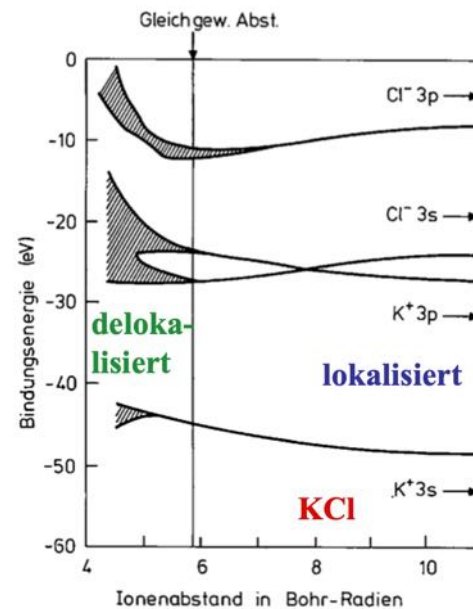


Wasserstoffverbindungen unter extremem Druck





Wasserstoffverbindungen unter extremem Druck



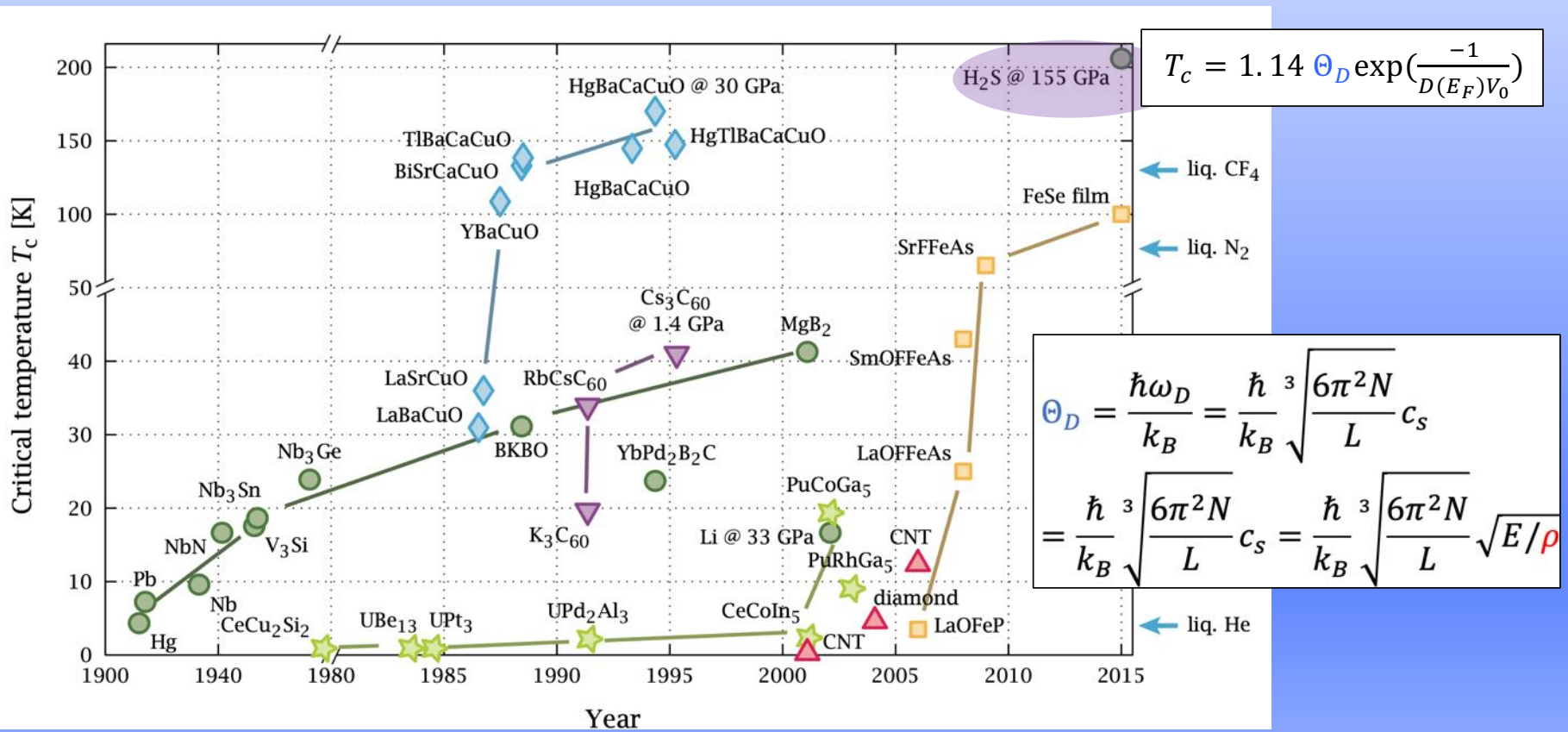
Metalle:

Wasserstoff-"Metall":

Übergang vom Isolator zum Metall erwartet, sobald Gitterkonstante $a \leq 4.5r_{\text{Bohr}}$,
= Mott'scher Metall-Isolator Übergang.

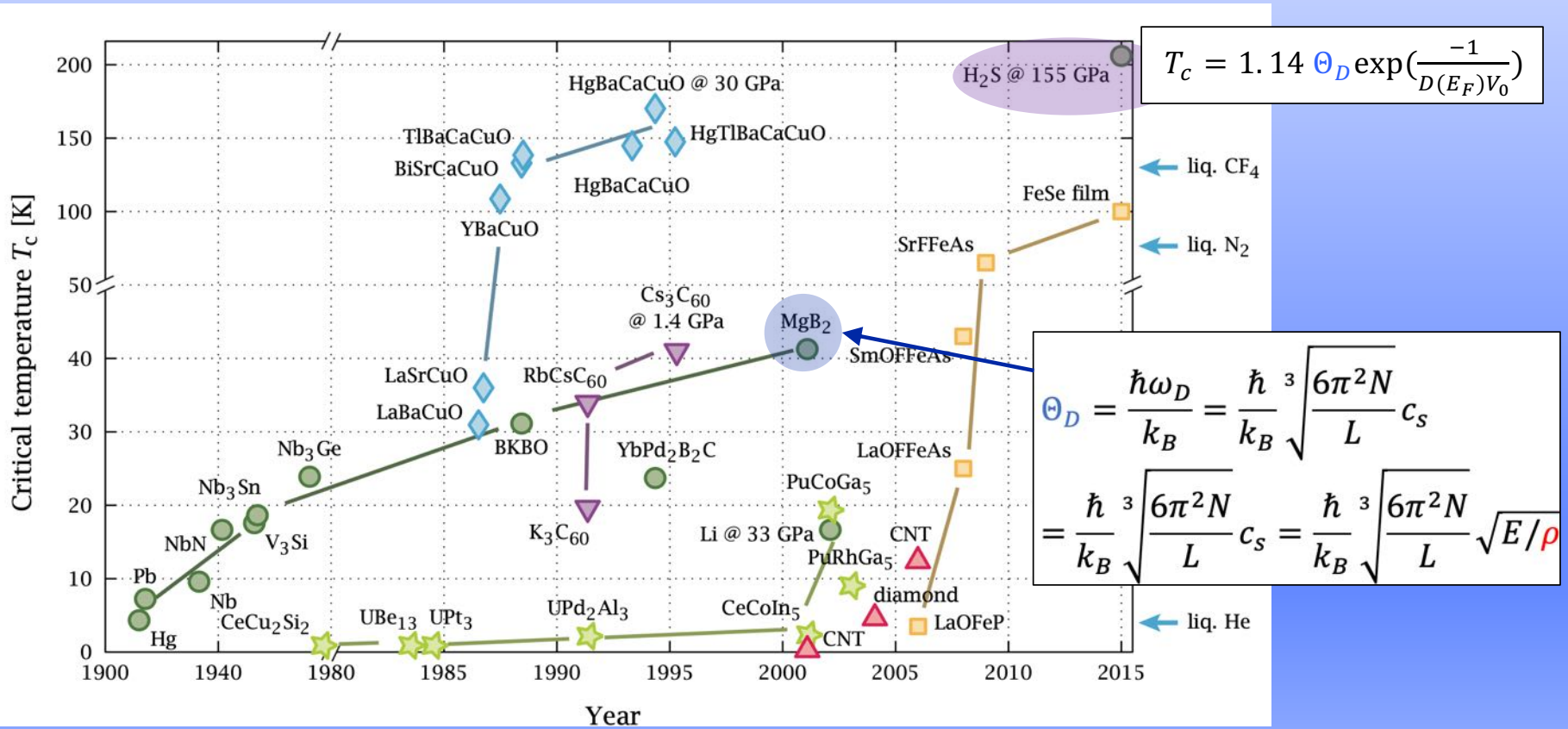


Wasserstoffverbindungen unter extremem Druck





... harte Materialien mit leichten Elementen



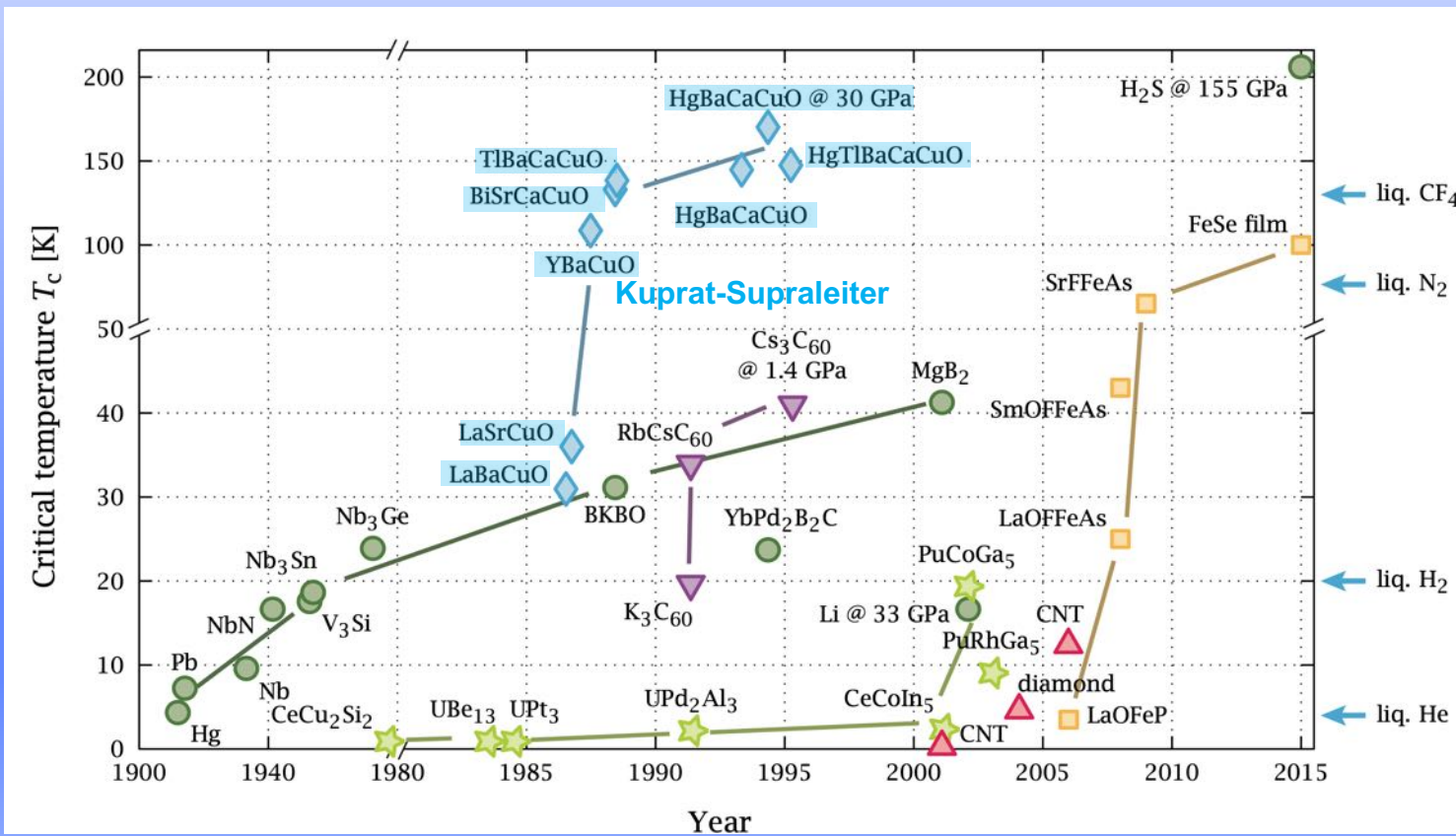
$$T_c = 1.14 \Theta_D \exp\left(\frac{-1}{D(E_F)V_0}\right)$$

$$\Theta_D = \frac{\hbar\omega_D}{k_B} = \frac{\hbar}{k_B} \sqrt{\frac{6\pi^2 N}{L}} c_s$$

$$= \frac{\hbar}{k_B} \sqrt{\frac{6\pi^2 N}{L}} c_s = \frac{\hbar}{k_B} \sqrt{\frac{6\pi^2 N}{L}} \sqrt{E/\rho}$$



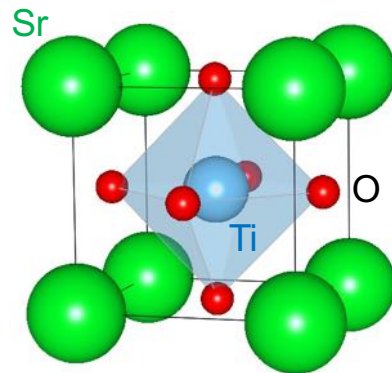
Kuprat-Supraleiter





Keramische Oxid-Supraleiter

«Perovskite» SrTiO_3



(1964)

Metallische Leitfähigkeit erst durch «Dotierung» → gemischte Valenzen

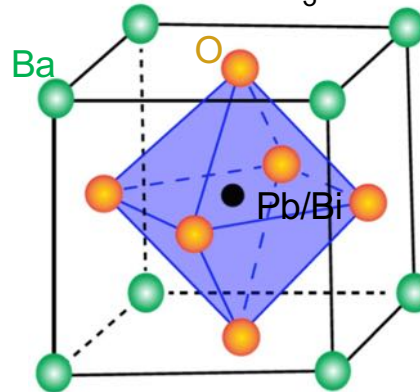
.....z.B. mit Nb

$$T_c \approx 0.5 \text{ K}$$

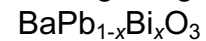
Ladungsträgerkonzentration

$$\approx 10^{26} / \text{m}^3 \text{ (} 6 \times 10^{-3} \text{ pro Ti Atom!)}$$

BaPbO_3

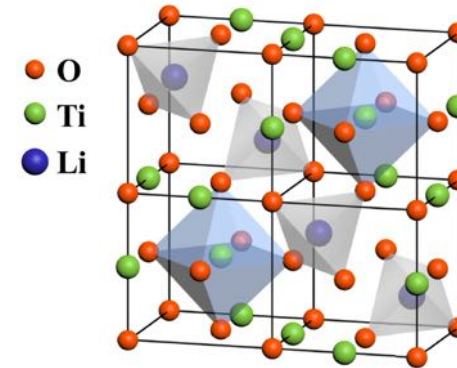


(1975)



$$T_c \approx 10 \text{ K}$$

«Spinel» LiTi_2O_4



(1973)

$$T_c \approx 12 \text{ K}$$

$$\approx 2 \times 10^{27} / \text{m}^3$$

Zum Vergleich: Kupfer $8 \times 10^{28} / \text{m}^3$, Blei $1.3 \times 10^{29} / \text{m}^3$



Kuprate: Hochtemperatur-Supraleiter

Isolator-Metall Übergang durch Dotierung in Übergangs-Metall-basierten Perovskiten

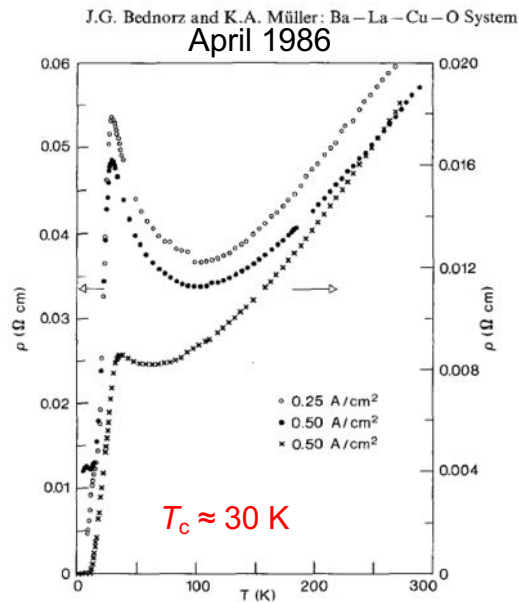
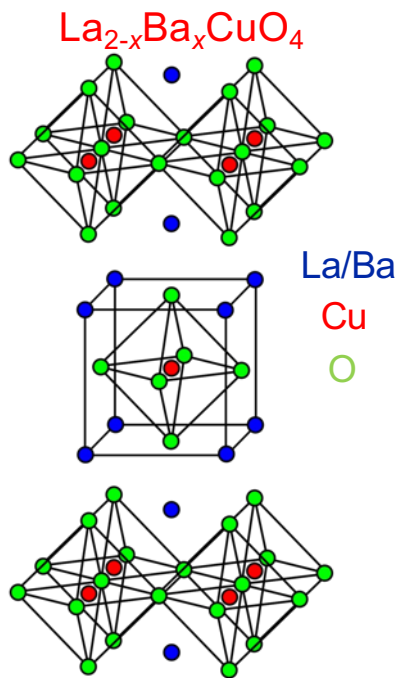
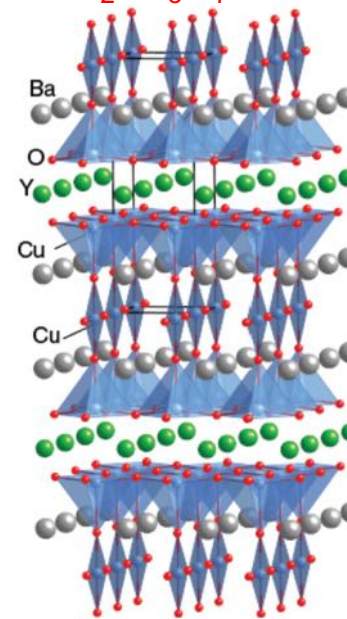


Fig. 1. Temperature dependence of resistivity in $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_2\text{O}_{5(3-y)}$ for samples with $x(\text{Ba})=1$ (upper curves, left scale) and $x(\text{Ba})=0.75$ (lower curve, right scale). The first two cases also show the influence of current density

Z. Phys. B: Cond. Matter 64 (1986) 189

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ März 1987

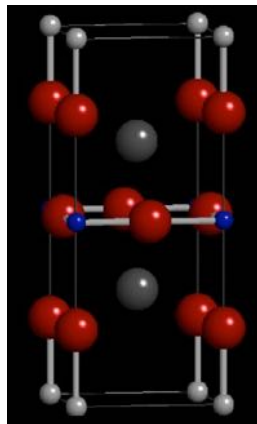
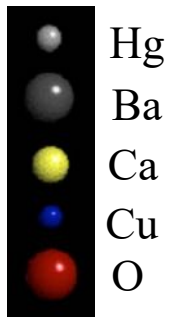
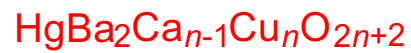


$T_c \approx 93 \text{ K}$

Wu et al., Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 908

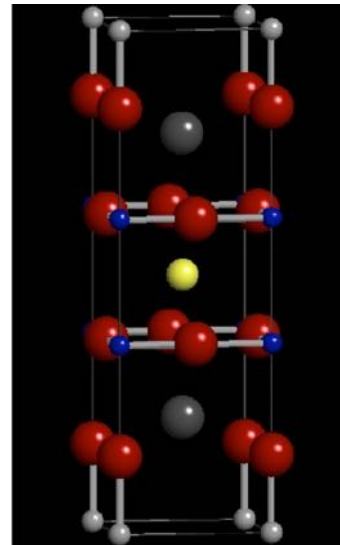


Kuprate: Hochtemperatur-Supraleiter



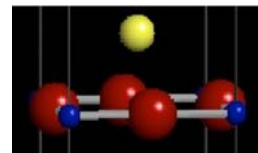
$n = 1, T_c = 96 \text{ K}$

S.N. Putilin et al.,
Nature 362 (1993) 226

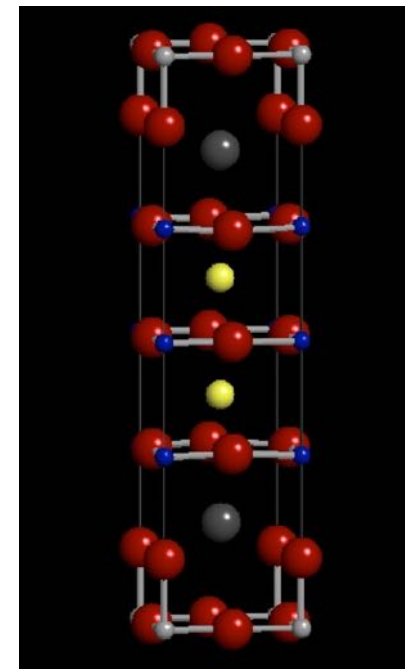


$n = 2, T_c = 127 \text{ K}$

+



+ "CaCuO₂"



$n = 3, T_c = 134 \text{ K}$

A. Schilling et al.,
Nature 363 (1993) 56

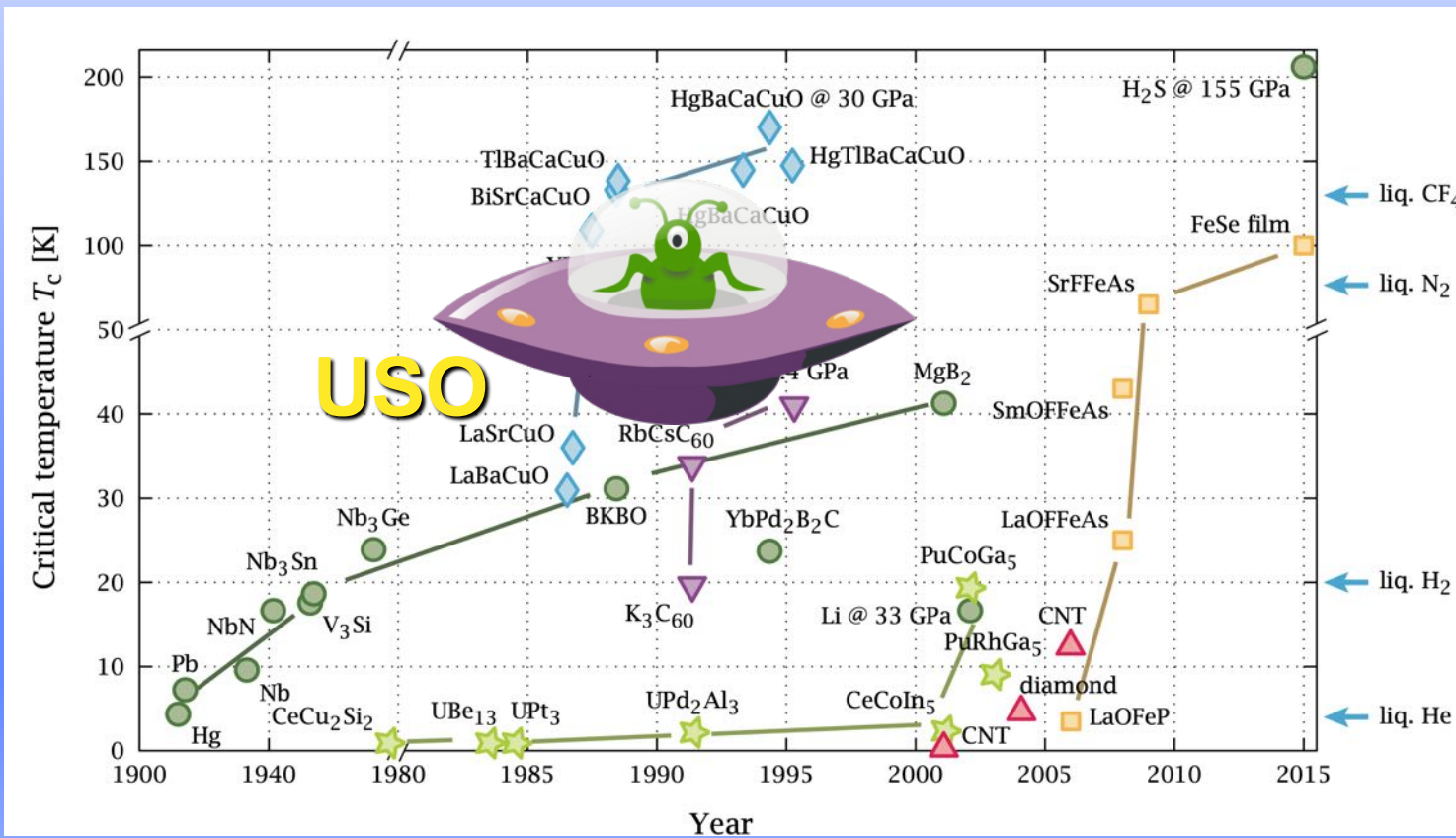


Kuprate: Hochtemperatur-Supraleiter

Speziell bei Kuprat-Supraleitern:

- Kritische Temperatur bei Normaldruck oberhalb 77 K (-196 °C)
- Extrem Typ-II: Deshalb sehr hohe kritische Magnetfelder B_{c2} möglich (> 100 Tesla)
- Sehr hohe kritische Stromdichten bei tiefen Temperaturen ($\approx 10^7$ A/cm²)
- Sehr anisotrop auf Grund der Schichtstruktur: «Vortex-Pinning» geht nahe T_c verloren
- Spröde (Oxid-Keramik): schwierige Metallurgie (Drähte, Spulen etc.)







Kritische Temperatur vs. Zeit (bis 2015)

LK-99 Is No Radical Superconductor After All, Scientists Confirm

PHYSICS 30 November 2023 By CLARE WATSON



(Rokas91/Getty Images)

