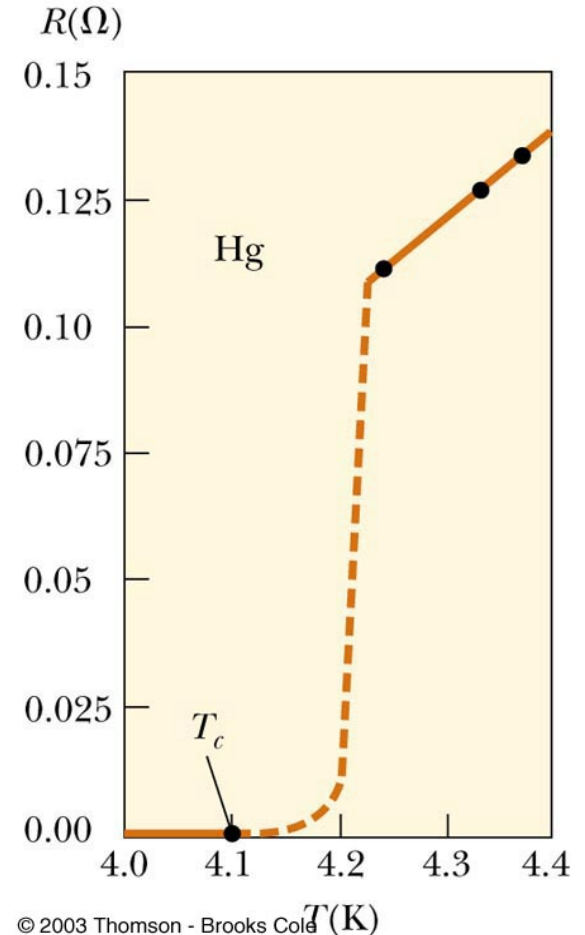


Nadprzewodniki

- Pewna klasa materiałów wykazuje prawie zerową oporność ($R=0$) poniżej pewnej temperatury zwanej temperaturą krytyczną T_c
- Większość przewodników wykazuje nadprzewodnictwo dopiero w temperaturze bliskiej zera absolutnego, T_c jest stosunkowo niska (kilka Kelwinów)

Metal	T_c [K]	T_c [°C]
Al	1,2	-271,95
In	3,4	-269,75
Sn	3,7	-269,45
Hg	4,2	-268,95
Ta	4,5	-268,65
V	5,4	-267,75
Pb	7,2	-265,95
Nb	9,3	-263,85

- Ostatnio odkryto związki chemiczne które mogą być „nadprzewodnikami” w wyższych temperaturach. Takie własności wykazują materiały tlenkowe o charakterze ceramik i będące nadprzewodnikami II rodzaju. Na razie nie ma uniwersalnej teorii wyjaśniającej to zjawisko. Najwyższa temperatura krytyczna wynosi obecnie **138 K** (-135,15°C) dla związku $(\text{Hg}_{0,8}\text{Ti}_{0,2})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$.



© 2003 Thomson - Brooks Cole

- W takich materiałach kiedy nastąpi przepływ prądu może on płynąć nawet bez przyłożonego napięcia przez długi czas!

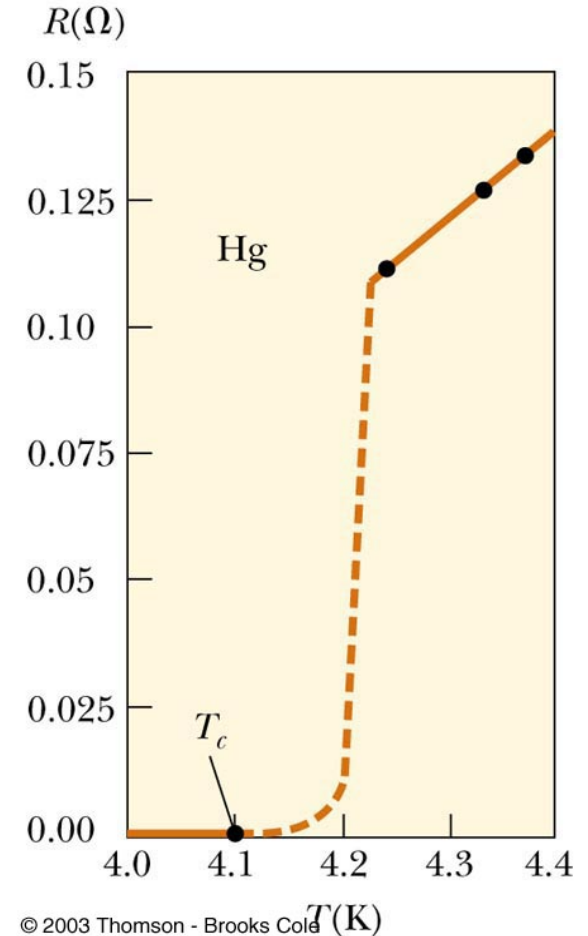
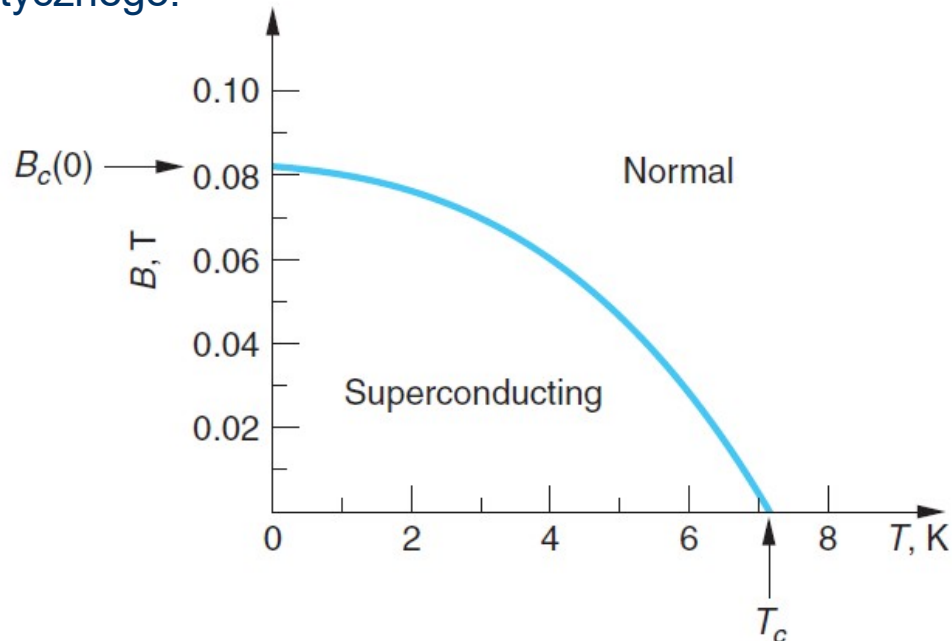
Przykłady temperatur krytycznych „nadprzewodników”

Table 10-6 T_c and B_c values for some type I and type II superconductors

Type I element	T_c (K)	B_c (at 0 K; T)	Type II compound	T_c (K)	B_{c2} (at 0 K; T)
Al	1.175	0.0105	Nb ₃ Sn	18.1	24.5
Cd	0.517	0.0028	Nb ₃ Ge	23.2	34.0
Hg	4.154	0.0411	NbN	16.0	15.3
In	3.408	0.0282	V ₃ Ga	16.5	35.0
Nb	9.25	0.2060	V ₃ Si	17.1	15.6
Os	0.66	0.0070	PbMoS	14.4	6.0
Pb	7.196	0.0803	CNb	8.0	1.7
Sn	3.722	0.0305	MgB ₂	39.0	16
Tl	2.38	0.0178	Rb ₃ C ₆₀	29.0	?
Zn	0.85	0.0054	Cs ₂ RbC ₆₀	33.0	?

Nadprzewodniki – własności

- Nadprzewodnictwo wykazują metale z III i IV grupy układu okresowego - nie obserwuje się tego zjawiska dla metali alkalicznych z V-VII grupy układu okresowego.
- Temperatura krytyczna zależy od zewnętrznego pola magnetycznego:



- Zależność temperatury krytycznej uwidacznia się także dla prądu płynącego w próbce (prąd ten wytwarza pole magnetyczne) – istnieje prąd krytyczny dla którego próbka przechodzi w stan „normalny”

Nadprzewodniki – własności

- Czy oporność rzeczywiście zmniejsza się do 0 w fazie nadprzewodzącej?
- Badanie własności prądów nadprzewodnictwa wzbudzonych w nadprzewodzącym pierścieniu:
 - Umieszczany magnes indukuje prąd wirowy
 - Obniżana jest temperatura – uzyskuje się stan nadprzewodzący
 - Usuwany jest pierścień – prąd nadprzewodnictwa utrzymuje się
- Gdyby materiał pierścienia miał niezerową wartość rezystancji to prąd malałby zgodnie z zależnością:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)$$

gdzie R – oporność, L- indukcyjność, t- czas

- Mierząc spadek wartości prądu nadprzewodnictwa w funkcji czasu można oszacować oporność.
- Przeprowadzono eksperyment, w którym utrzymywano stan nadprzewodzący przez ponad 2,5 roku – nie zauważono zmian prądu w granicach błęd pomiarowego !
Oszacowano w ten sposób, że oporność nadprzewodnika może być rzędu **$10^{-27} \Omega$**
- Tak jest dla prądów stałych, ale dla prądów zmiennych już nie:
Dla wysokich częstotliwości większych od częstotliwości granicznej : $h\nu_g = 3.5k_B T_c$
pojawia się znaczący opór elektryczny.

Zjawisko Meissnera

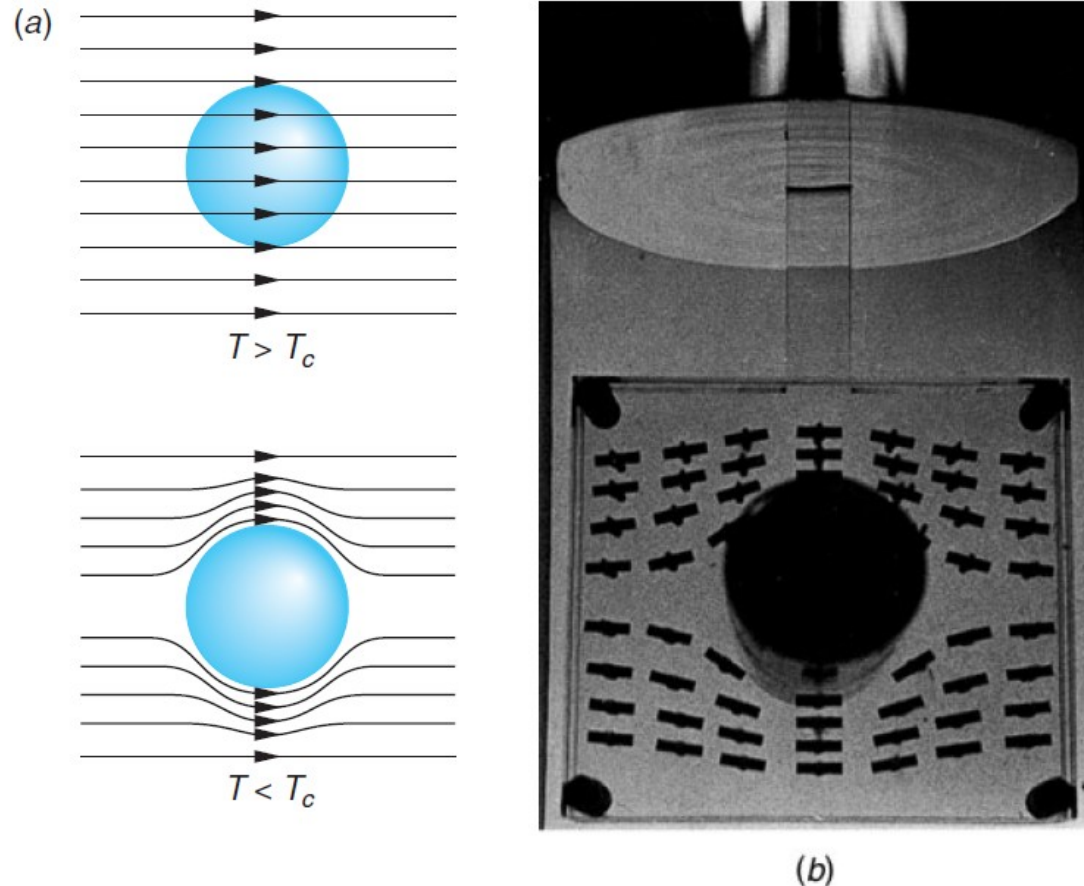


Figure 10-46 (a) The Meissner effect in a superconducting sphere cooled in a constant applied magnetic field. As the temperature drops below the critical temperature T_c , the magnetic field lines are expelled from the sphere. (b) Demonstration of the Meissner effect. A superconducting tin cylinder is situated with its axis perpendicular to a horizontal magnetic field. The directions of the field lines near the cylinder are indicated by weakly magnetized compass needles mounted in a Lucite sandwich so that they are free to turn. [Courtesy of A. Leitner, Rensselaer Polytechnic Institute.]

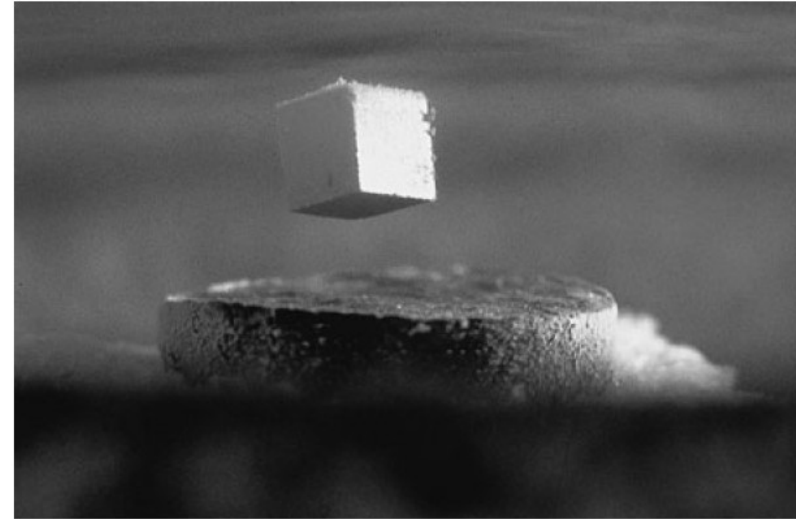
Zjawisko Meissnera

Ponieważ opór jest równy zero, w nadprzewodniku nie może występować siła elektromotoryczna – „klasycznie” pole magnetyczne nie powinno się zmieniać w środku.

Doświadczenie pokazuje, że w nadprzewodniku oziębianym w polu magnetycznym pole magnetyczne jest wypychane na zewnątrz. Oznacza to że pole magnetyczne wewnątrz nadprzewodnika jest równe zero.

Zjawisko wypychania linii pola magnetycznego na zewnątrz nadprzewodnika (kompensowania w jego wnętrzu) jest skutkiem prądów nadprzewodzących indukowanych na powierzchni – są to prądy ekranujące. Nadprzewodnik jest doskonałym diamagnetykiem.

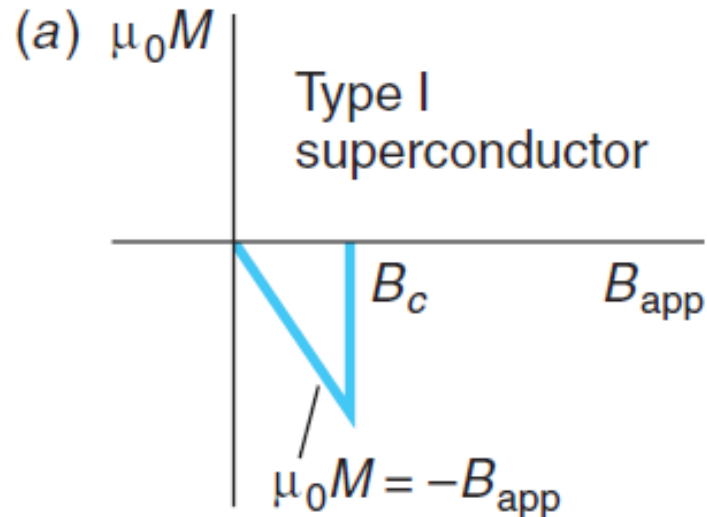
Lewitacja magnetyczna jest skutkiem odpychania między magnesem stałym, który jest źródłem zewnętrznego pola magnetycznego, a polem magnetycznym pochodzącym od prądu indukowanego w nadprzewodniku.



A small, cubicle permanent magnet levitates above a disk of the superconductor yttrium-barium-copper oxide, cooled by liquid nitrogen to 77 K. At temperatures below 92 K, the disk becomes superconducting. The magnetic field of the cube sets up circulating electric supercurrents in the superconducting disk, such that the resultant magnetic field in the superconductor is zero. These currents produce a magnetic field opposite to that of the cube, and thus the cube is repelled. [*Courtesy of IBM Research.*]

Nadprzewodniki I rodzaju

Pełny efekt Meissnera zachodzi dla nadprzewodników I rodzaju – czystych pierwiastków metalicznych

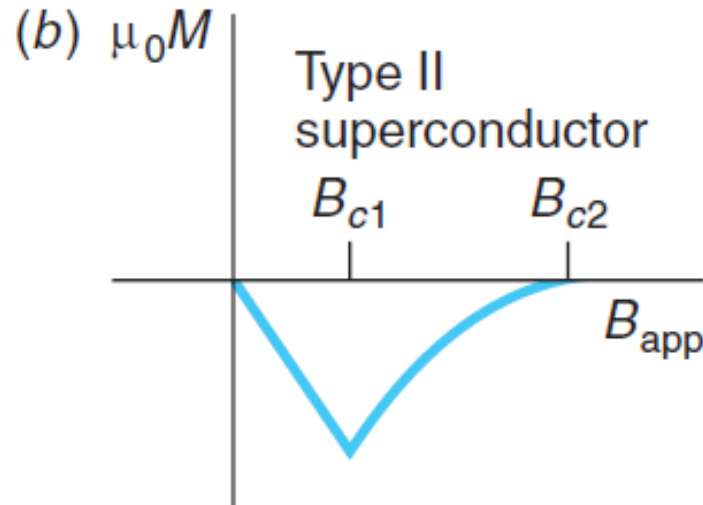


Jeśli pole mag. Jest słabsze od B_c to pole magnetyczne $\mu_0 M$ indukowane ma taką samą wartość, ale przeciwny znak

Zwykle krytyczne pole B_c jest zbyt małe, aby można je użyć do wykonania magnesów nadprzewodzących

Nadprzewodniki II rodzaju

Są nadprzewodniki dla których krzywa namagnesowania wygląda inaczej:



Mamy dwie wartości krytycznego pola magnetycznego B_{c1} i B_{c2}

Dla $B < B_{c1}$ mamy normalny efekt Miessnera

Dla $B_{c1} < B < B_{c2}$ występuje częściowa penetracja materiału – linie pola magnetycznego tworzą włókna zwane *wirami* lub *worteksami*

Nadprzewodniki II rodzaju

- Dla $B_{c1} < B < B_{c2}$ występuje częściowa penetracja materiału – linie pola magnetycznego tworzą włókna zwane *wirami* lub *worteksami*, w których materiał na normalny opór.
- Otaczający wiry materiał jest nadal w stanie nadprzewodzącym
- Każdy wir zawiera kwant strumienia magnetycznego równy jednemu *fluksonowi* $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$

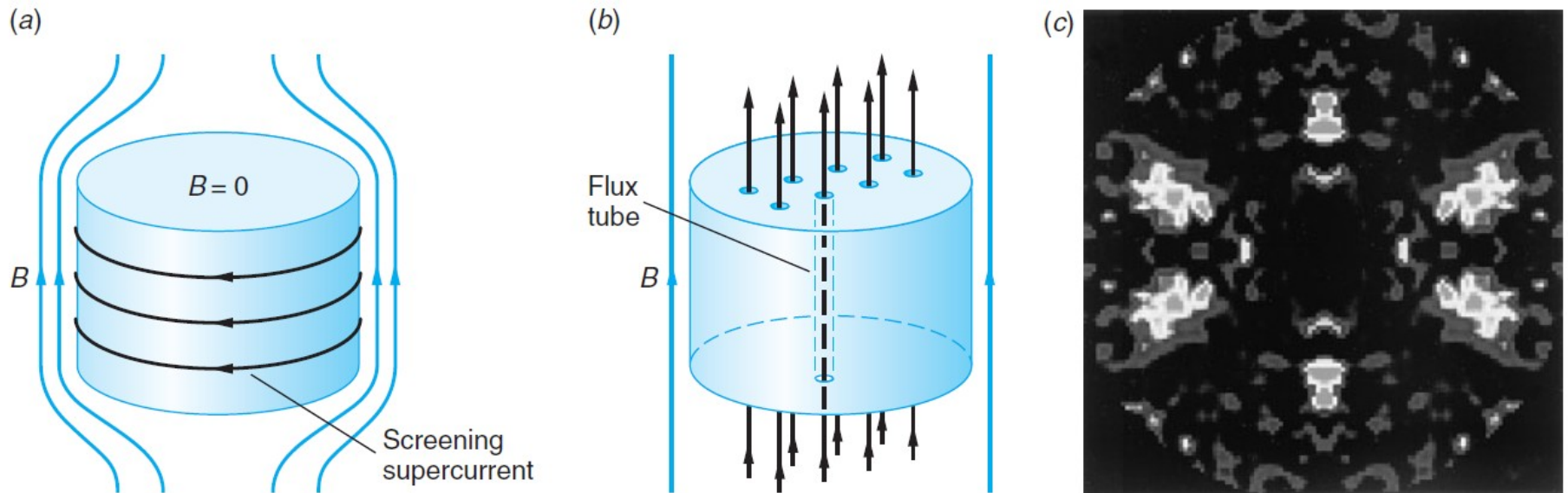


Figure 10-49 (a) Below B_{c1} the type II material shows the Meissner effect. For temperatures below T_c the material is superconducting and $B = 0$ throughout the volume. (b) For $B_{c1} < B < B_{c2}$, magnetic field lines penetrate the material but are confined to flux tubes of normally resistive material that form the so-called vortex lattice. For a given $T < T_c$, as the applied field B approaches B_{c2} , the size of the superconducting region shrinks as more flux tubes occupy the volume. When $B > B_{c2}$, the entire material has normal resistivity. (c) The lattice of magnetic vortices in UPT_3 , a strongly type II superconductor, is shown clearly by neutron diffraction.

Nadprzewodniki I i II rodzaju

Table 10-6 T_c and B_c values for some type I and type II superconductors

Type I element	T_c (K)	B_c (at 0 K; T)	Type II compound	T_c (K)	B_{c2} (at 0 K; T)
Al	1.175	0.0105	Nb ₃ Sn	18.1	24.5
Cd	0.517	0.0028	Nb ₃ Ge	23.2	34.0
Hg	4.154	0.0411	NbN	16.0	15.3
In	3.408	0.0282	V ₃ Ga	16.5	35.0
Nb	9.25	0.2060	V ₃ Si	17.1	15.6
Os	0.66	0.0070	PbMoS	14.4	6.0
Pb	7.196	0.0803	CNb	8.0	1.7
Sn	3.722	0.0305	MgB ₂	39.0	16
Tl	2.38	0.0178	Rb ₃ C ₆₀	29.0	?
Zn	0.85	0.0054	Cs ₂ RbC ₆₀	33.0	?

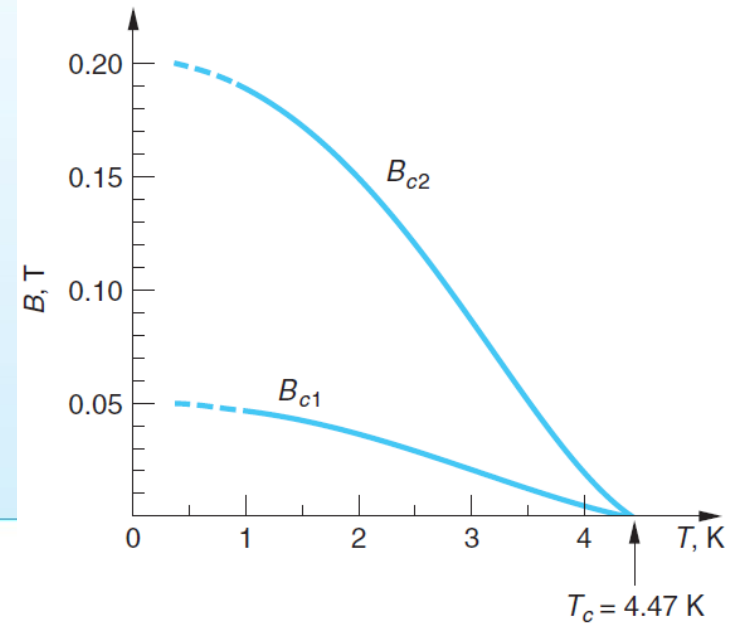


Figure 10-48 Critical magnetic fields B_{c1} and B_{c2} for Ta (99.95 percent) as a function of temperature. Below the B_{c1} curve Ta exhibits the Meissner effect. Between the two curves is a mixed, or vortex, state with filaments of normal Ta penetrating the superconducting state. Above the B_{c2} curve there is complete magnetic field penetration and the entire sample has normal resistivity.

Nadprzewodniki- teoria BCS (J. Barden, L. Cooper, B. Schrieffer, 1957r.)

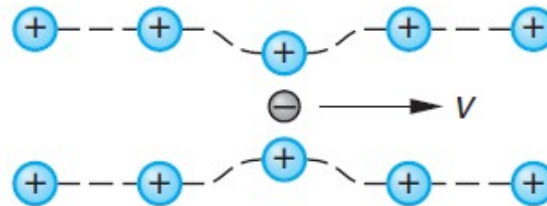
Opisując przewodnictwo w metalach należy uwzględnić oddziaływanie elektronów z drganiami sieci.

Efekt izotopowy : $M^\alpha T_c = const$, gdzie M jest średnią masą izotopową, czynnik α zależy od materiału.

Nadprzewodnictwo jest związane z kolektywnym zachowaniem elektronów przewodnictwa.

W niskiej temp. Elektrony łączą się w pary.

Oddziaływanie między elektronami i siecią krystaliczną – elektron powoduje deformację sieci dodatnich jonów.



Dzięki siłom sprężystym zagęszczenie ładunku przemieszcza się jak fala, powstaje tzw. **fonon**. Elektron „wyemitował” fonon.

Drugi elektron może „zabsorbować” fonon – zostaje przyciągnięty przez zagęszczenie jonów.

W ten sposób dwa elektrony oddziałują ze sobą za pomocą fononu.

Nadprzewodniki- teoria BCS (J. Barden, L. Cooper, B. Schrieffer, 1957r.)

W ten sposób dwa elektrony oddziałują ze sobą za pomocą fononu.

W temperaturze $T < T_c$ oddziaływanie przyciągające elektronów jest większe niż odpychanie elektrostatyczne.

Odległości między elektronami są duże, rzędu 1000 nm

Elektrony tworzą tzw. **parę Coopera**.

Elektrony te mają przeciwne spiny i przeciwne pędy. Spin i pęd pary są więc równe zeru – dlatego całkowity spin pary Coopera jest równy zeru - więc nie podlegają zakazowi Pauliego.

W stanie podstawowym nadprzewodnika $T=0K$ wszystkie elektrony przewodnictwa tworzą pary Coopera.

W stanie nadprzewodzącym wszystkie pary Coopera są korelowane ze sobą i wszystkie zachowują się w ten sam sposób.

Opór elektryczny znika gdyż pary nie uczestniczą w rozpraszaniu na niedoskonałościach sieci krystalicznej