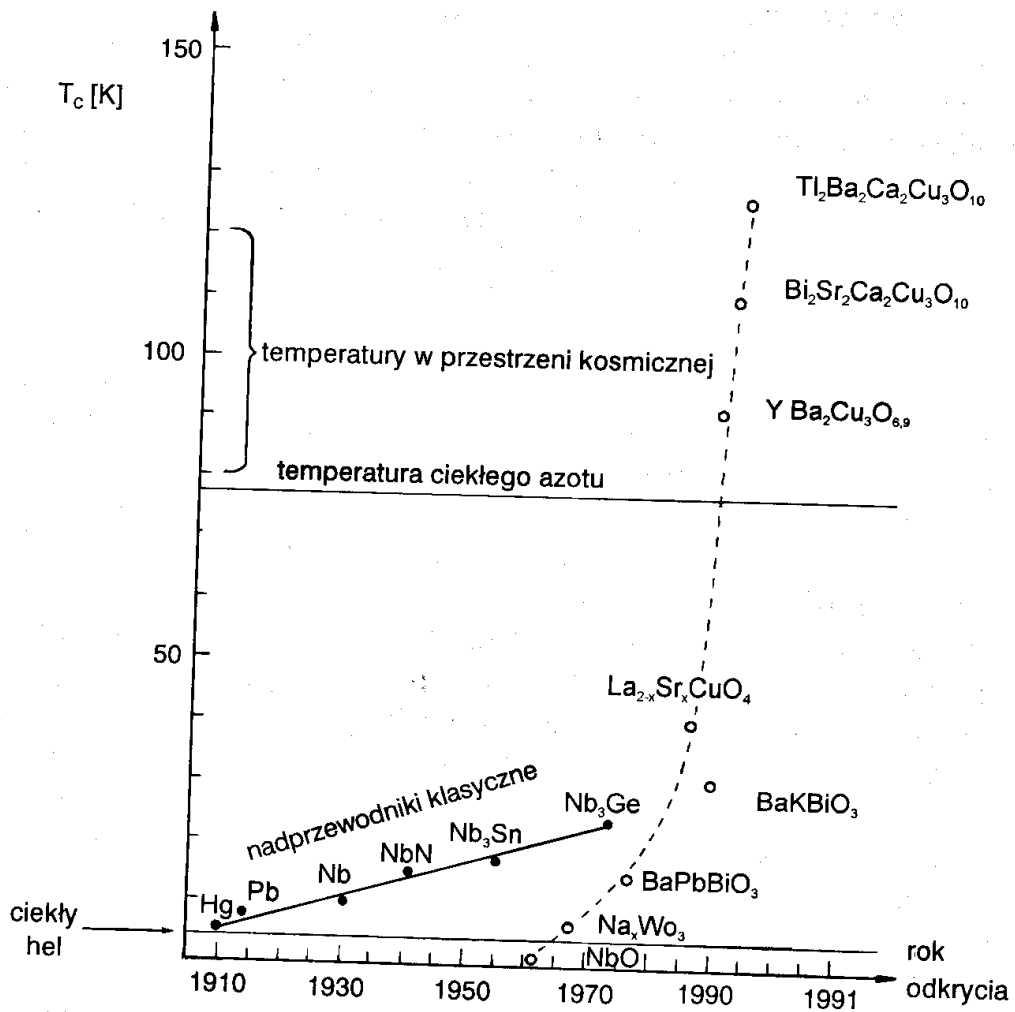
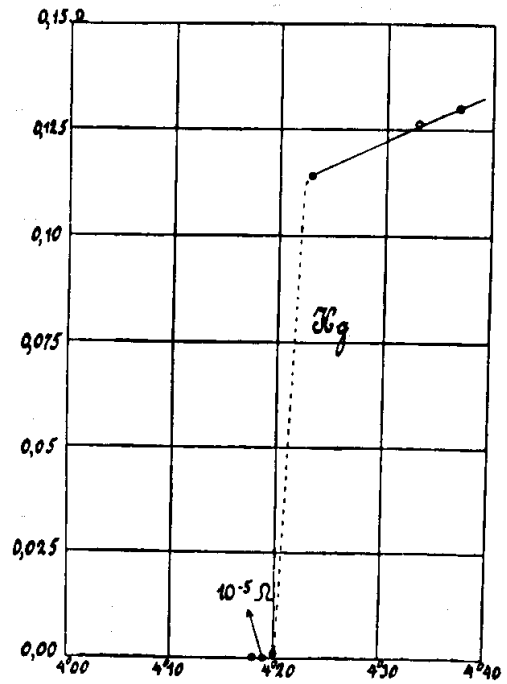


## ☞ Nadprzewodnictwo.

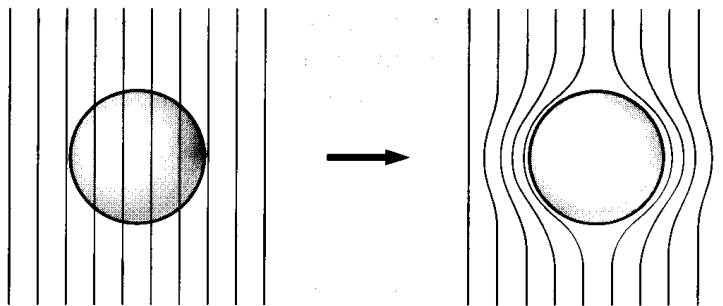
C. Kittel, "Wstęp do fizyki ciała stałego"

C. Cyrot, D. Pavuna, "Wstęp do nadprzewodnictwa"

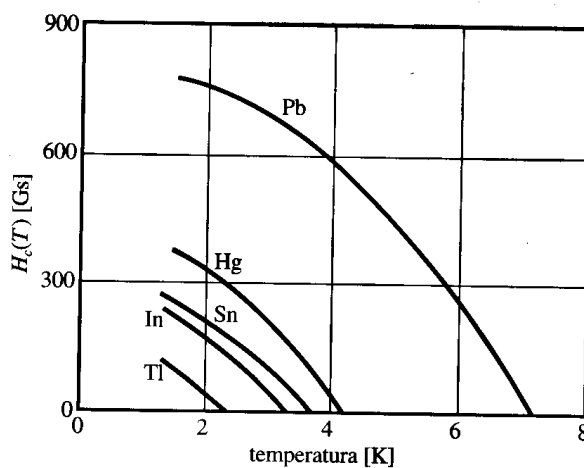
Rys. 1. Opór próbki rtęci jako funkcja temperatury bezwzględnej. Ten wykres zrobiony przez Kamerlingha Onnesa dokumentował odkrycie zjawiska nadprzewodnictwa



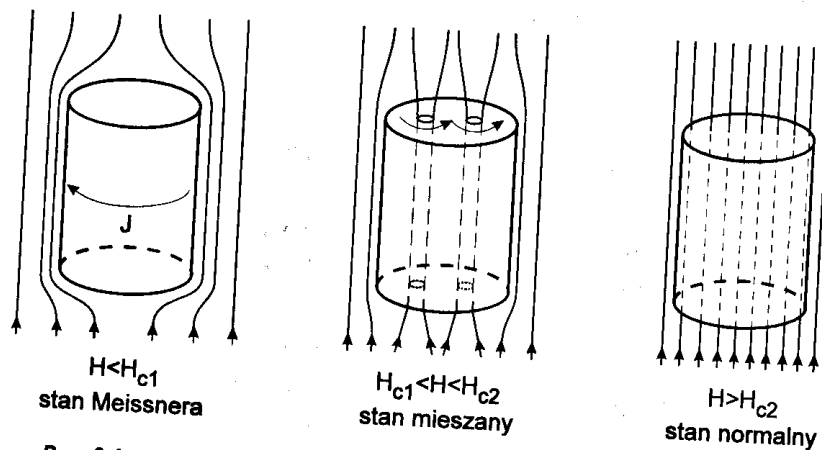
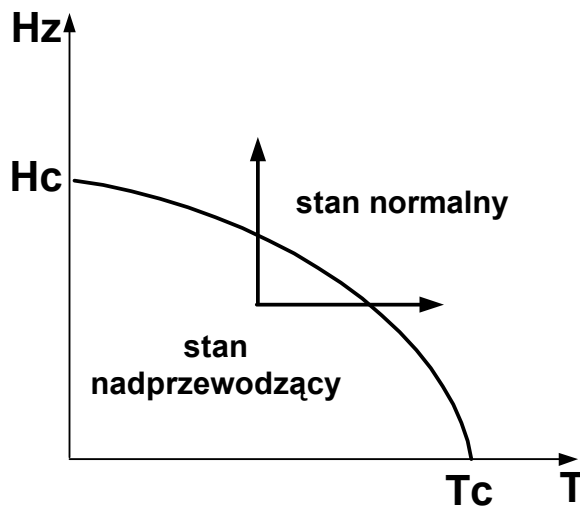
Rys. 1.3. Zmiany temperatury krytycznej od czasu odkrycia zjawiska nadprzewodnictwa



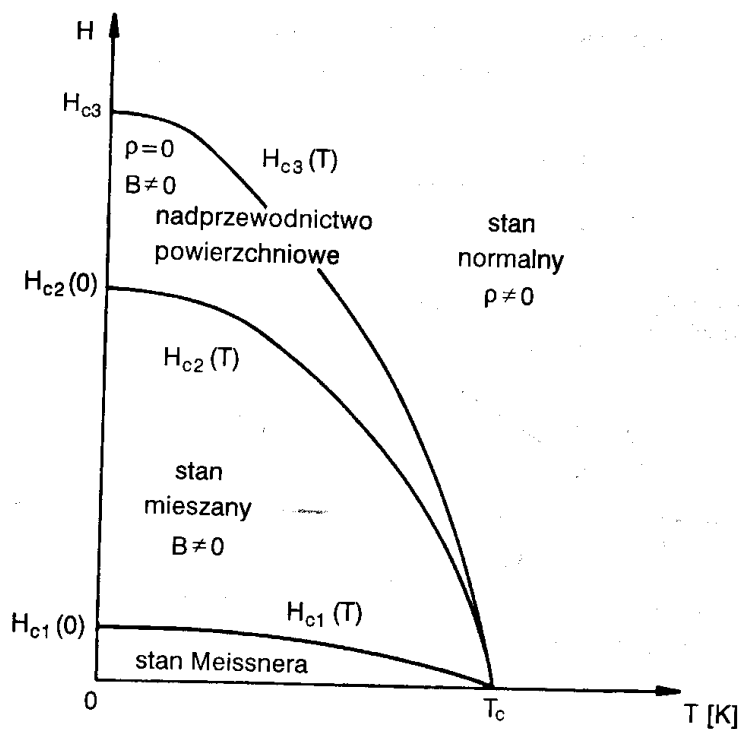
Rys. 2. Efekt Meissnera dla nadprzewodzącej kuli schładzanej w stałym zewnętrznym polu magnetycznym; w momencie przejścia przez temperaturę krytyczną linie indukcji magnetycznej  $B$  zostają wypchnięte z kuli



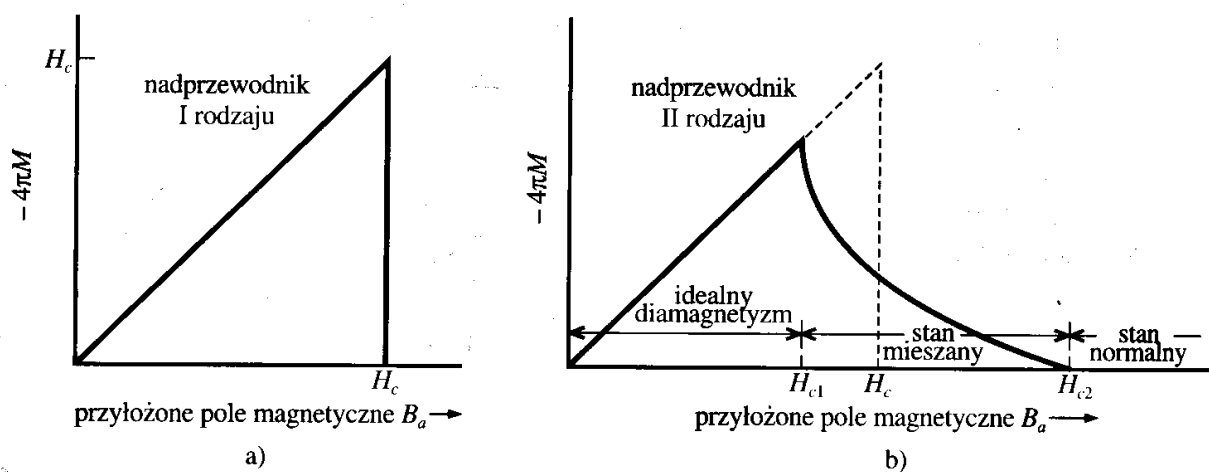
Rys. 3. Krzywe pokazujące wyznaczoną doświadczalnie zależność pola krytycznego  $H_c(T)$  od temperatury dla kilku nadprzewodników. Próbki są nadprzewodzące poniżej odpowiednich krzywych, w stanie normalnym zaś są powyżej

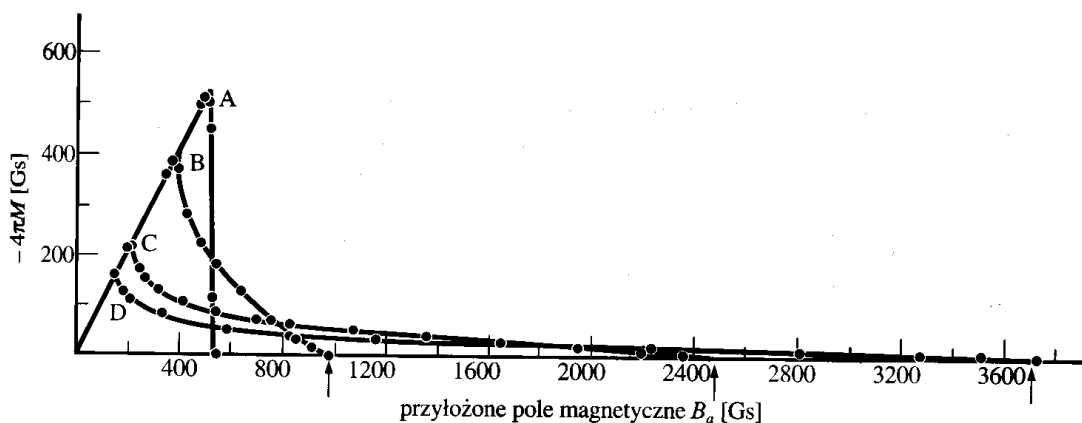


Rys. 2.4. Wnikanie strumienia w stanie mieszanym (wg Decroux i Fischer 1989)



Rys. 3.4. Temperaturowa zależność pól krytycznych nadprzewodnika II rodzaju

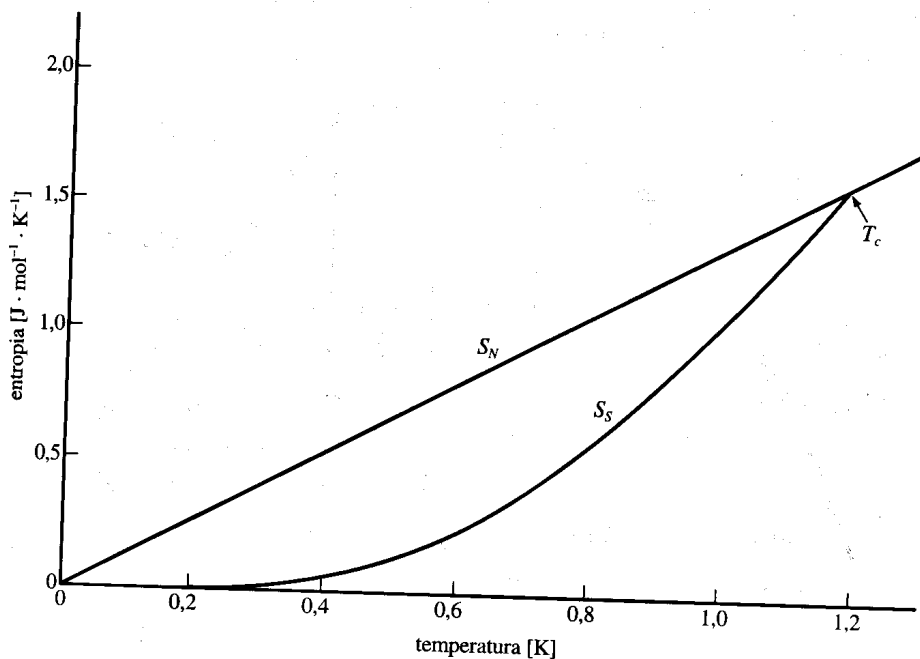




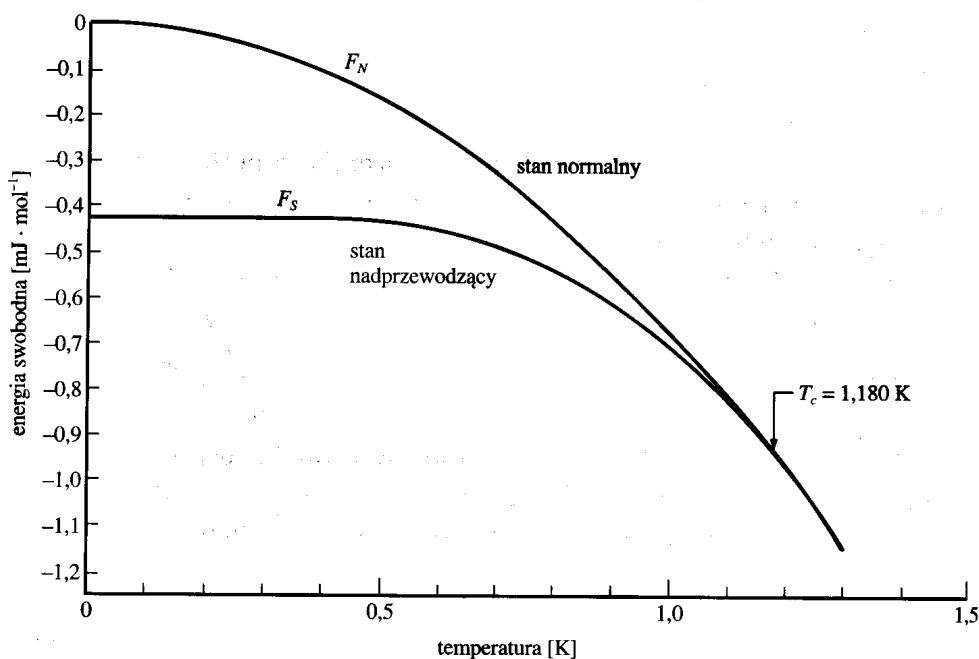
Rys. 5a. Krzywe namagnesowania nadprzewodzących próbek wyżarzanego polikrystalicznego ołowiu i stopów ołowiu z indem, zmierzone w temperaturze 4,2 K. (A) ołów; (B) ołów zawierający 2,08% wag. indu; (C) ołów zawierający 8,23% wag. indu; (D) ołów zawierający 20,4 % wag. indu (wg Livingstona)

Tabela 1.2. Temperatury krytyczne  $T_c$  i krytyczne pola magnetyczne  $H^*$  wybranych nadprzewodników

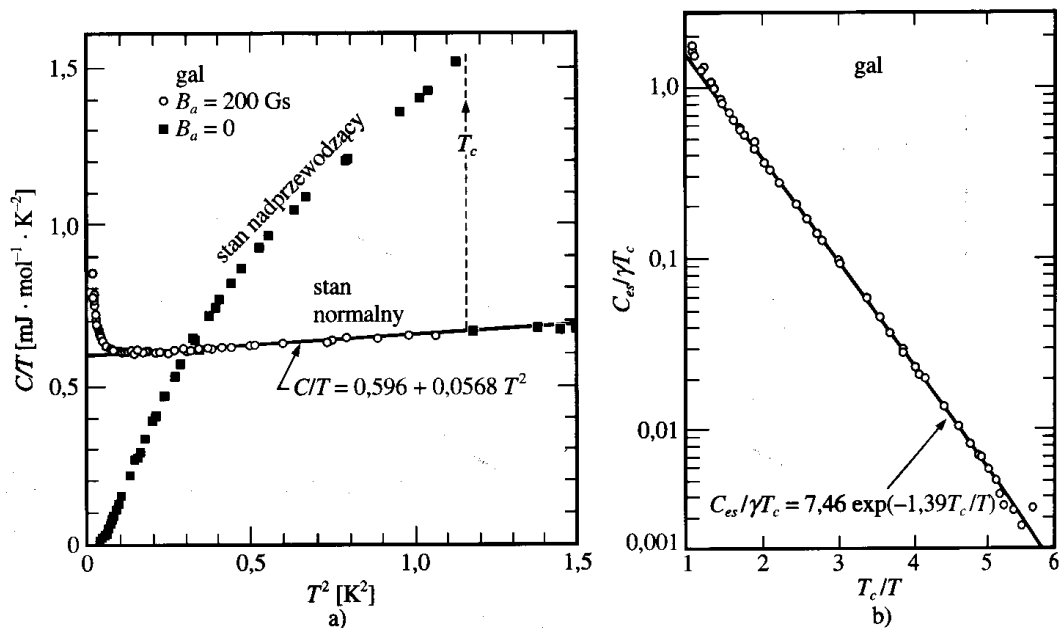
Nadprzewodniki klasyczne	$T_c$ [K]	$\mu_0 H^*$ [T]
pierwiastki metaliczne		
Al	1	0,01
Pb	7	0,08
Nb	9	0,2
stopy dwuskładnikowe		
Nb-Ti	9	14
związki dwuskładnikowe		
Nb <sub>3</sub> Sn	18	24
Nb <sub>3</sub> Ge	23	38
związki organiczne		
$\kappa$ -(BEDT-TTF) <sub>2</sub> Cu(NCS) <sub>2</sub>	12	20
fazy Chevrela		
PbMo <sub>6</sub> S <sub>8</sub>	15	60
nadprzewodniki wysokotemperaturowe		
La <sub>2-x</sub> Sr <sub>x</sub> CuO <sub>4</sub>	38	40
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	92	> 100
Bi <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	110	> 120
Tl <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	125	> 130



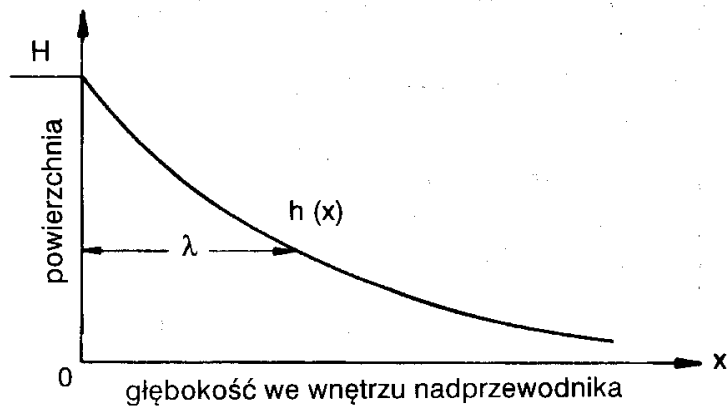
**Rys. 6.** Entropia glinu jako funkcja temperatury w stanie normalnym i w stanie nadprzewodzącym. Entropia w stanie nadprzewodzącym jest mniejsza niż w stanie normalnym, ponieważ elektrony w stanie nadprzewodzącym są bardziej uporządkowane. W każdej temperaturze poniżej  $T_c$  próbka może być przeprowadzona w stan normalny przez przyłożenie pola magnetycznego silniejszego niż pole krytyczne



**Rys. 7.** Wartości energii swobodnej jako funkcja temperatury, wyznaczone doświadczalnie dla glinu w stanach normalnym i nadprzewodzącym. Poniżej temperatury krytycznej  $T_c = 1,180 \text{ K}$  wartości energii swobodnej w stanie nadprzewodzącym są niższe niż w stanie normalnym. Dwie krzywe zbiegają się w temperaturze przejścia, co wskazuje na przejście II rodzaju (brak ciepła przemiany w temperaturze  $T_c$ ). Krzywą  $F_S$  uzyskano w zerowym polu magnetycznym, krzywą  $F_N$  zaś zmierzono w polu magnetycznym dostatecznie dużym, aby próbka była w stanie normalnym. (Dzięki uprzejmości N. E. Phillipsa)



**Rys. 8.** a) Ciepło właściwe galu w stanie normalnym i w stanie nadprzewodzącym. Ciepło właściwe galu w stanie normalnym (zmierzone w zewnętrznym polu magnetycznym  $B_a = 200 \text{ Gs}$ ) składa się z udziału elektronowego, sieciowego i (w niskich temperaturach) jądrowego kwadrupolowego. b) Logarytm części elektronowej  $C_{es}$  ciepła właściwego w stanie nadprzewodzącym, wykreślony jako funkcja  $T_c/T$ . Widoczna jest wyraźnie wykładnicza zależność od  $1/T$ . Współczynnik elektronowego ciepła właściwego wynosi  $\gamma = 0.60 \text{ mJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$  (wg N. E. Phillipsa)



**Rys. 2.9.** Wnikanie pola magnetycznego do wnętrza nadprzewodnika

**Tabela 2.2.** Temperatury krytyczne  $T_c$ , górne pola krytyczne  $H_{c2}$ , głębokości wnikania pola magnetycznego i długości koherencji dla wybranych nadprzewodników

	$T_c$ [K]	$\mu_0 H_{c2}$ [T]	$\lambda$ [Å]	$\xi$ [Å]
Al	1,1	0,02*	500	16000
Nb	9,2	0,2	400	380
Nb-Ti	9,5	14	600	450
Nb <sub>3</sub> Sn	18,3	24	800	35
Rb <sub>3</sub> C <sub>60</sub>	29,3	~ 50	1600	~ 20
La <sub>1-x</sub> Sr <sub>x</sub> CuO <sub>4</sub>	38	~ 65	2500	~ 15
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	92	~ 120	4000	~ 10

\* Al jest nadprzewodnikiem I rodzaju, podano więc wartość termodynamicznego pola  $H_c$ .

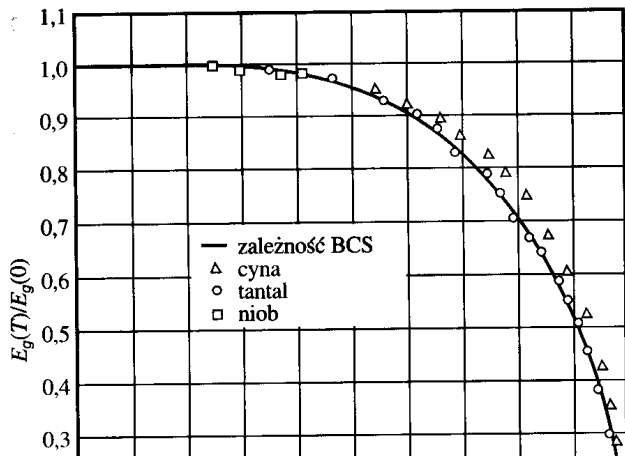
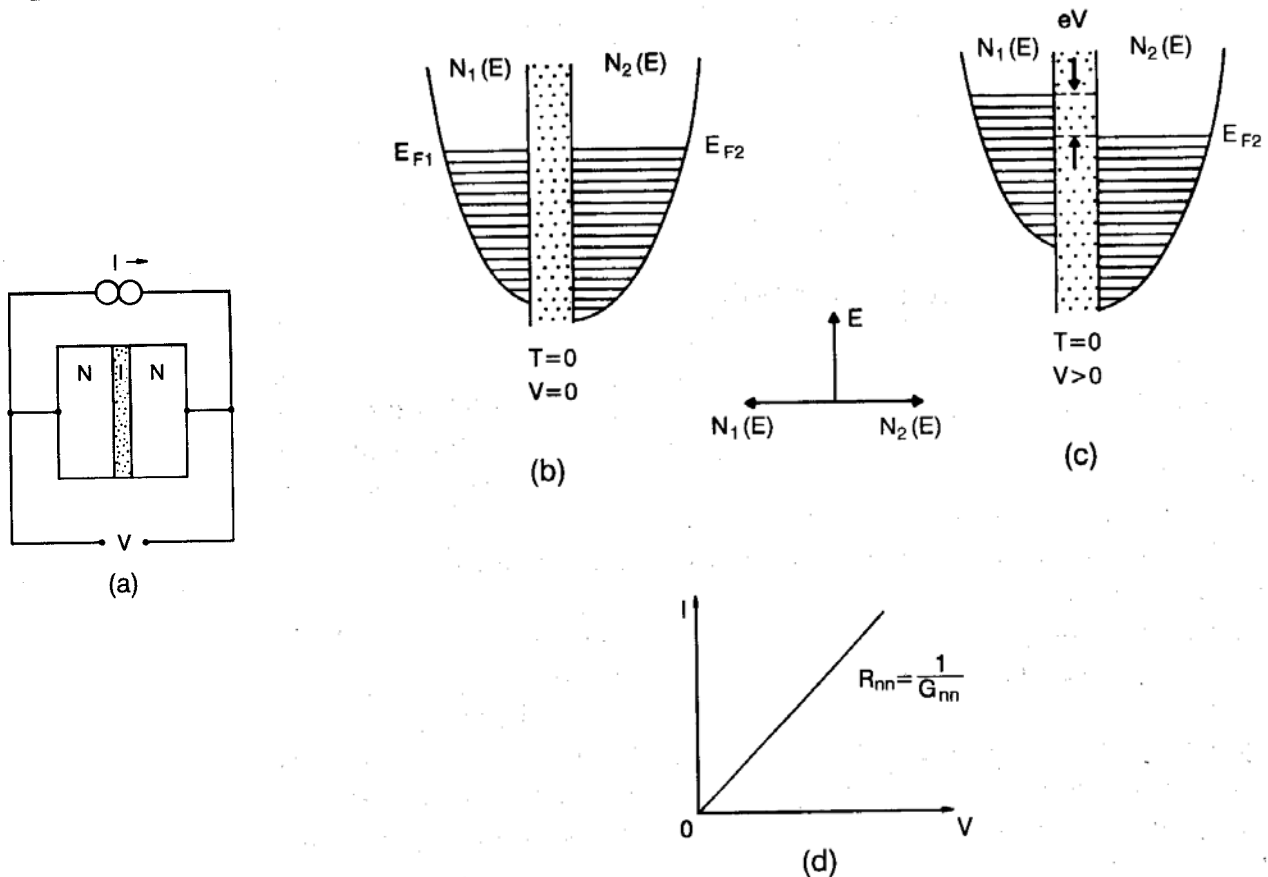
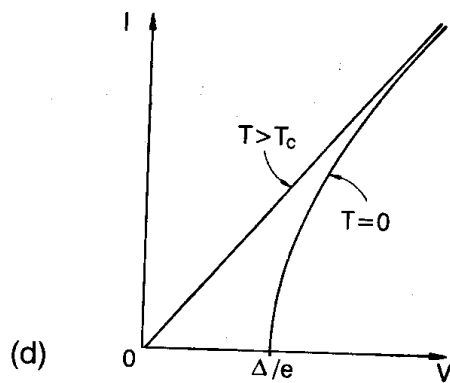
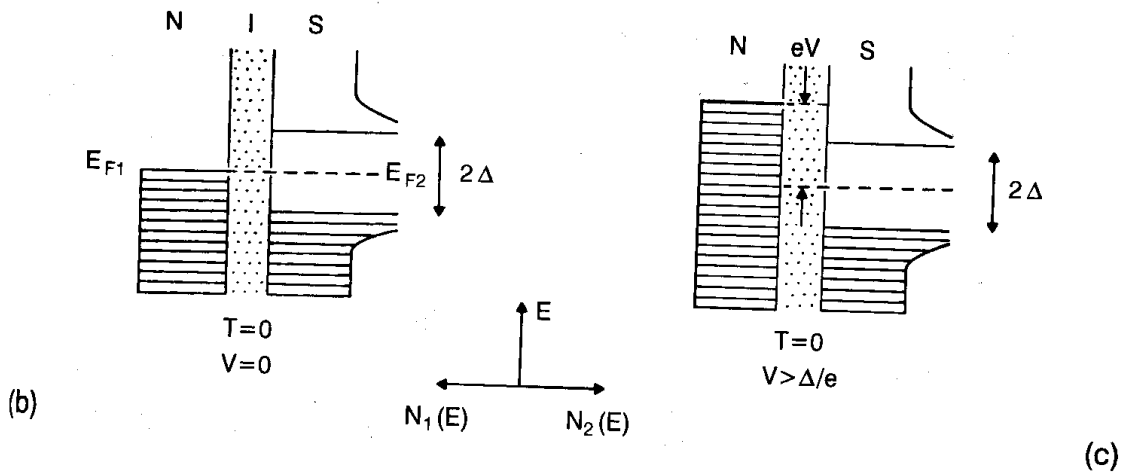


Tabela 3. Przerwy energetyczne nadprzewodników w temperaturze  $T = 0$

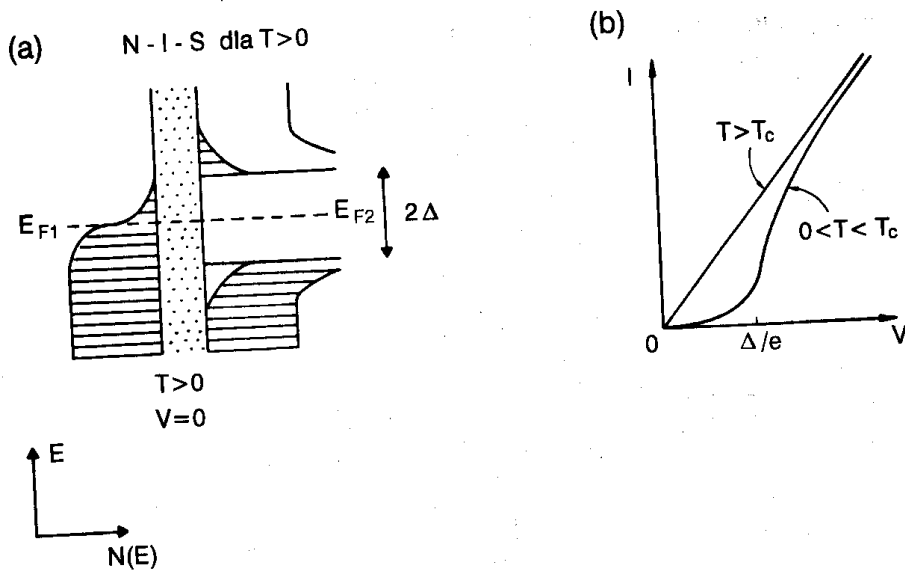
											Al	Si
											$E_g(0)$ [ $10^{-4}$ eV]	
											$E_g(0)/k_B T_c$	
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	
		16 3,4							2,4 3,2	3,3 3,5		
Y*	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn <sup>(w)</sup>	
		30,5 3,80	2,7 3,4						1,5 3,2	10,5 3,6	11,5 3,5	
La <sup>fcc</sup>	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg <sup>(α)</sup>	Tl	Pb	
19 3,7		14 3,60							16,5 4,6	7,35 3,57	27,3 4,38	



Rys. 6.1. Złącze NIN: a) schemat złącza; b) położenie pasm elektronowych złącza w równowadze, dla  $T=0$ ; c) położenie pasm elektronowych w złączu spolaryzowanym napięciem  $V$ : elektrony mogą tunelować z lewej strony na prawą; d) charakterystyka  $I$ - $V$  złącza NIN

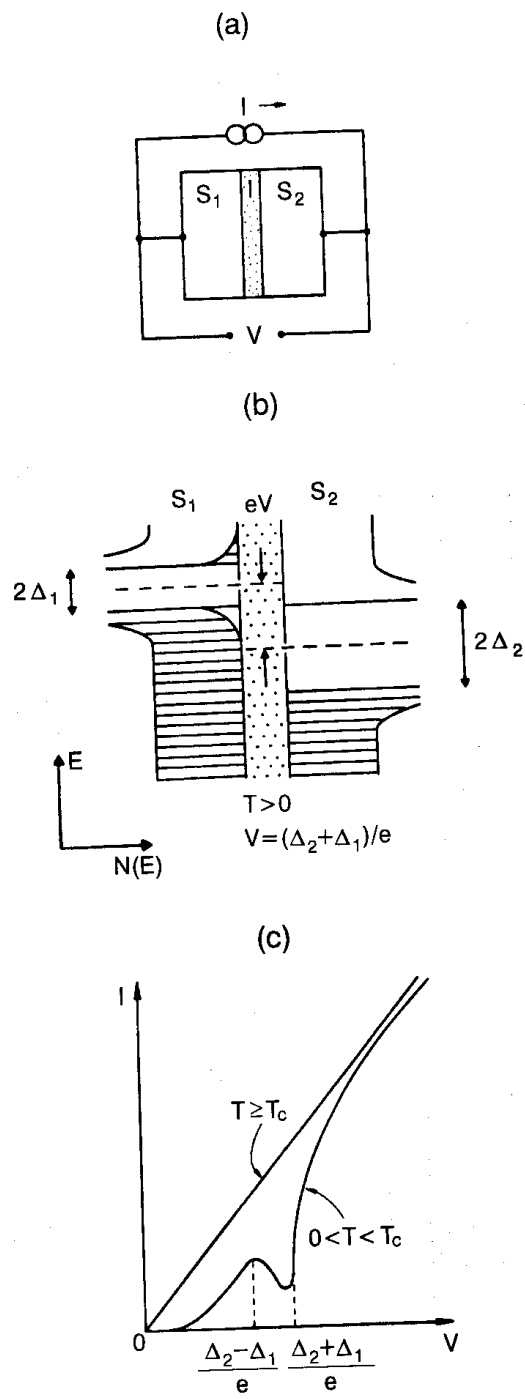


Rys. 6.2. Złącze NIS: a) schemat złącza; b) położenie pasm elektronowych złącza w równowadze, dla  $T=0$ ; c) położenie pasm elektronowych w złączu spolaryzowanym napięciem  $V$ : elektrony mogą tunelować gdy  $V > \Delta/e$ ; d) charakterystyka  $I$ - $V$  złącza NIS

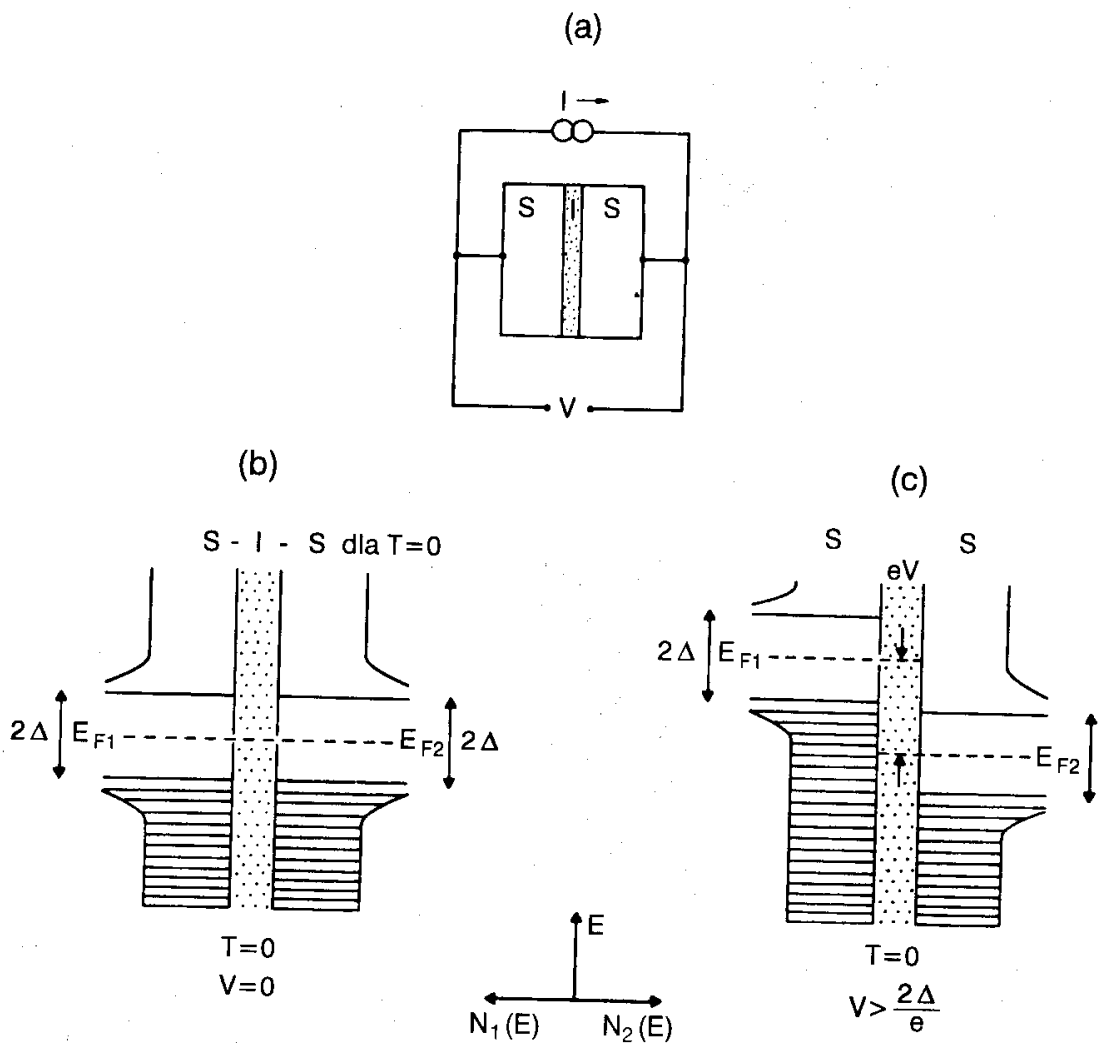


Rys. 6.3. a) Położenie pasm elektronowych złącza NIS w równowadze, dla  $T > 0$ . b) Charakterystyki  $I$ - $V$  złącza dla  $0 < T < T_c$  i dla  $T > T_c$ .

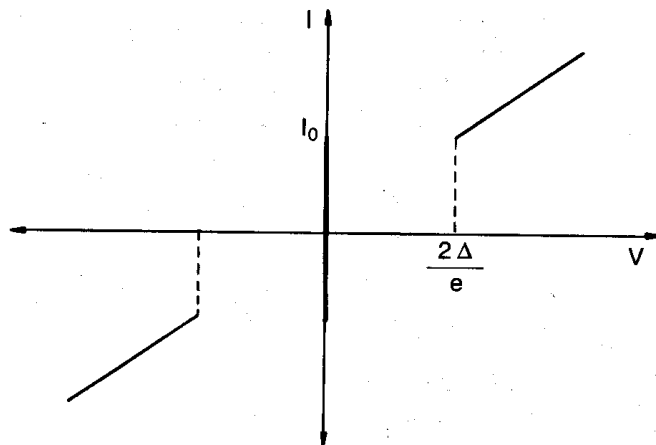




Rys. 6.5. Złącze SIS dwóch różnych nadprzewodników, w skończonej temperaturze: a) schemat złącza; b) położenie pasm elektronowych w złączu spolaryzowanym napięciem; c) charakterystyki  $I$ - $V$  złącza dla  $T \geq T_c$  i dla  $0 < T < T_c$



Rys. 6.4. Złącze SIS: a  
c) Położenie pasm elektror



vadze, dla  $T=0$ .  
V złącza dla  $T=0$

Rys. 6.6. Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza Josephsona dla  $T=0$