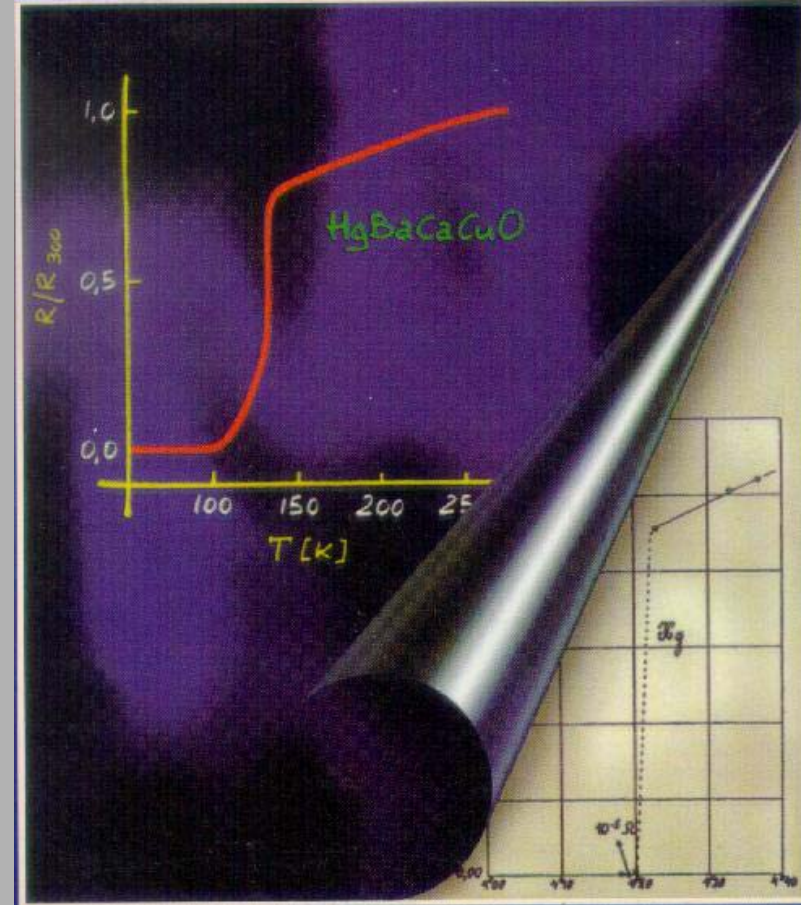
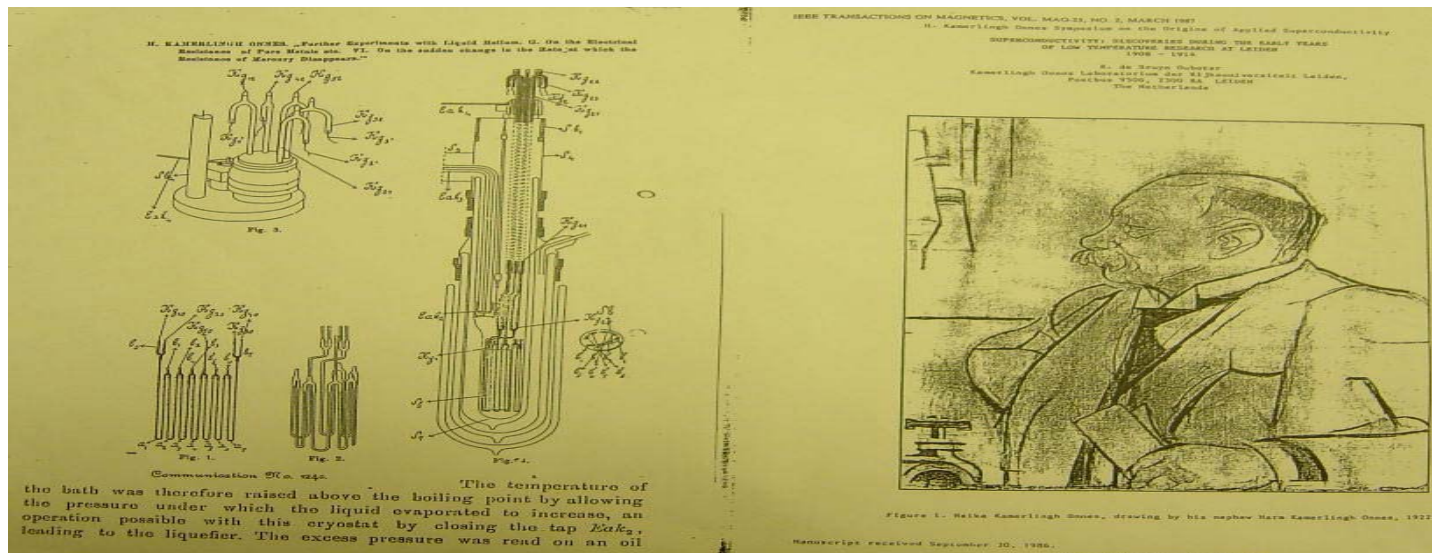
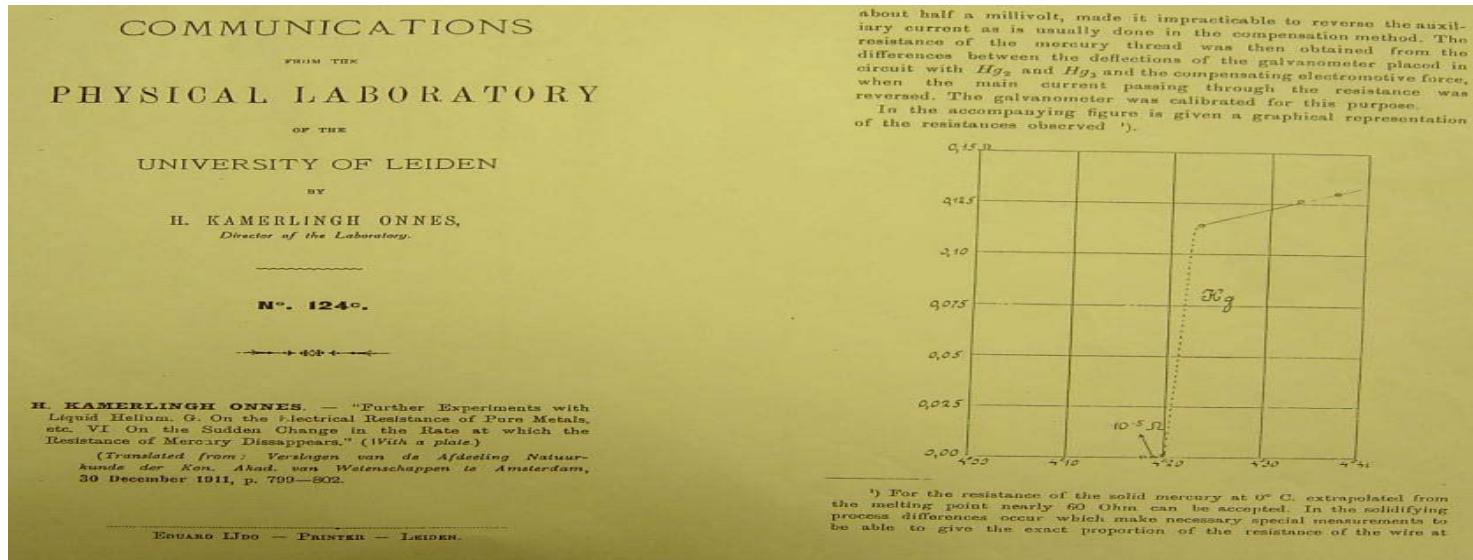


Nadprzewodniki wysokotemperatu rowe.



I nie tylko.

Odkrycie nadprzewodnictwa: H. Kamerlingh Onnes (1911)



Pierwiastki

H 1																	He 2																												
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10																												
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18																												
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36																												
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54																												
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86																												
Fr 87	Ra 88	Ac 89	Ru 104	Ha 105	Unh 106	Uns 107	Uno 108	Une 109																																					
<table><tr><td>Ce 58</td><td>Pr 59</td><td>Nd 60</td><td>Pm 61</td><td>Sm 62</td><td>Eu 63</td><td>Gd 64</td><td>Tb 65</td><td>Dy 66</td><td>Ho 67</td><td>Er 68</td><td>Tm 69</td><td>Yb 70</td><td>Lu 71</td></tr><tr><td>Th 90</td><td>Pa 91</td><td>U 92</td><td>Np 93</td><td>Pu 94</td><td>Am 95</td><td>Cm 96</td><td>Bk 97</td><td>Cf 98</td><td>Es 99</td><td>Fm 100</td><td>Md 101</td><td>No 102</td><td>Lr 103</td></tr></table>																		Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71																																
Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103																																

Figure 1 Superconductors under pressure. The colour code of this periodic table (adapted from ref. 13) shows elements that superconduct under normal, atmospheric pressure conditions (purple) and those that superconduct when subjected to high pressure (orange). Shimizu *et al.*¹ confirm the superconductivity of lithium at high pressure, bringing the number of such elements to 23. Under normal pressure conditions, 29 elements are superconductors.

Li: pierwiastek o najwyższej T_c

Superconductivity in compressed lithium at 20 K

Katsuya Shimizu^{*,†}, Hiroto Ishikawa^{*}, Daigoroh Takao^{*}, Takehiko Yagi[‡] & Kiichi Amaya^{*,†}

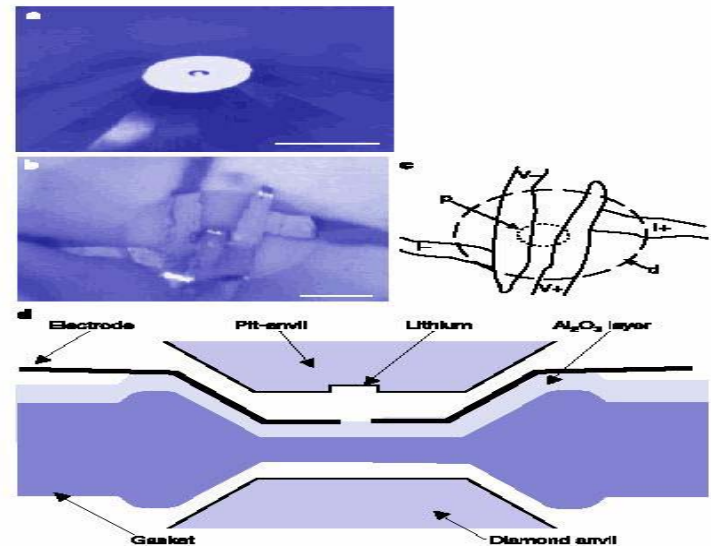
^{*} Department of Physical Science, Graduate School of Engineering Science; and
[†] Research Center for Materials Science at Extreme Conditions, Osaka University,
Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

[‡] The Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, Kashiwa-shi,
chiba 277-8581, Japan

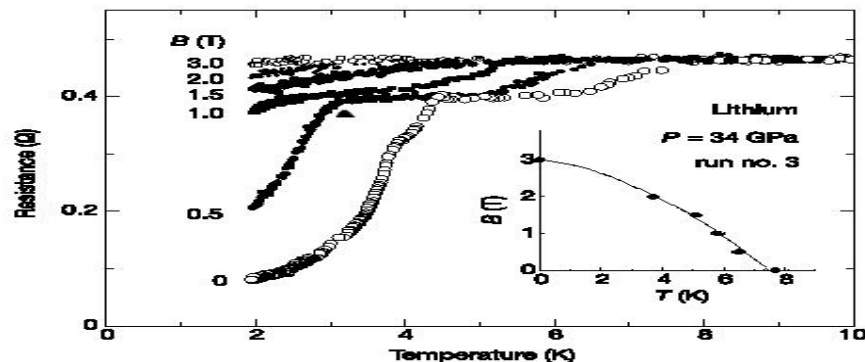
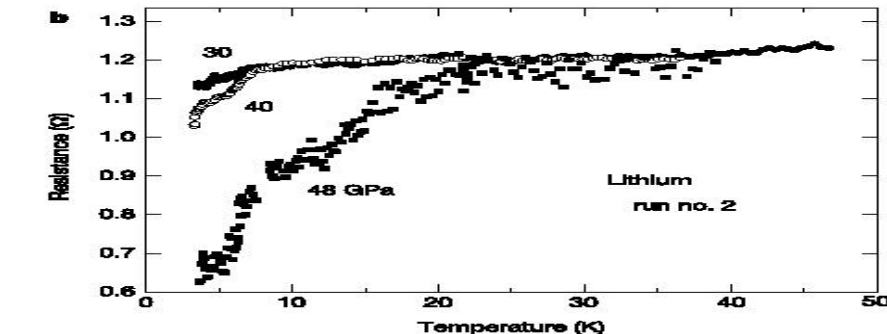
Superconductivity at high temperatures is expected in elements with low atomic numbers, based in part on conventional BCS (Bardeen–Cooper–Schrieffer) theory¹. For example, it has been predicted that when hydrogen is compressed to its dense metallic phase (at pressures exceeding 400 GPa), it will become superconducting with a transition temperature above room tempera-

NATURE | VOL 419 | 10 OCTOBER 2002 | www.nature.com/nature

© 2002 Nature Pu



K. Shimizu et al., Nature
419, 597 (2002).



“News and Views” by Ashcroft, Nature
419, 571 (2002).

“the behaviour of dynamical ele-ele
interaction and in particular of the
Coulomb pseudopotential”

Želazo

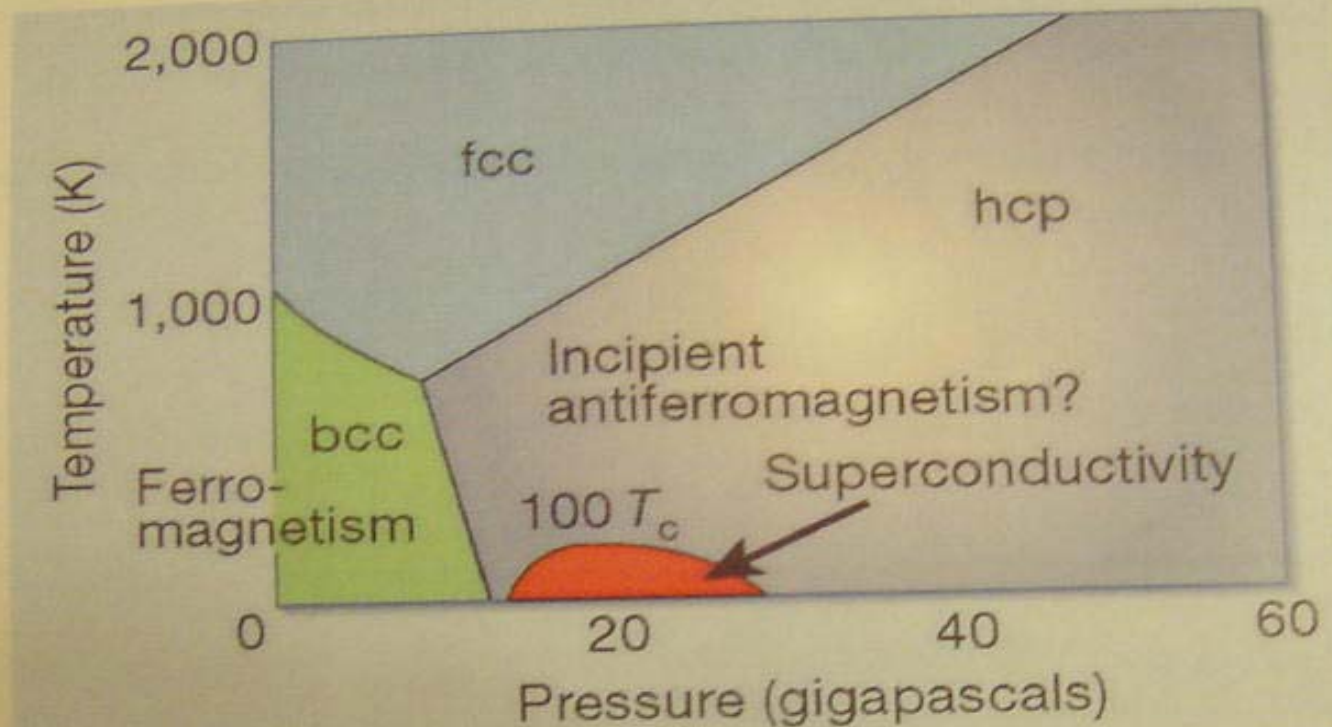


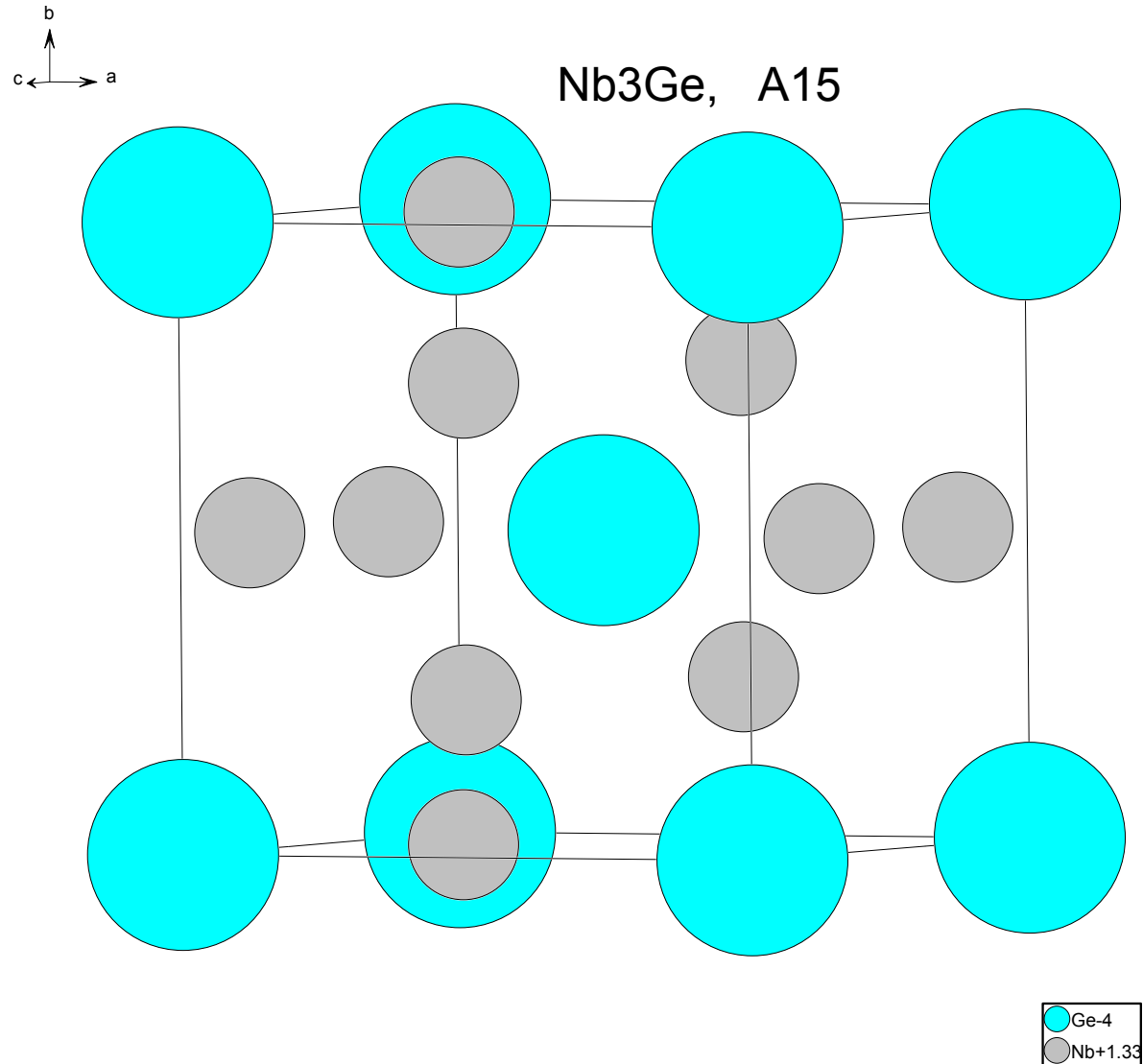
Figure 1 The temperature–pressure phase diagram of iron. The low–pressure and low–temperature phase of iron has a body–centred cubic (bcc) structure and is strongly ferromagnetic. The higher–pressure phase has a hexagonal close–packed (hcp) structure and might be weakly or nearly antiferromagnetic at low temperatures. Shimizu *et al.*³ show that below 2 K and at pressures above 10 GPa the hcp phase of iron becomes superconducting. (Here the superconducting transition temperature, T_c , has been magnified by a factor of about 100.) The shape of the phase diagram at low temperatures in the border region between the ferromagnetic bcc and the superconducting hcp phases has still not been established experimentally. The third structural form of iron shown here is fcc (face–centred cubic).

Shimizu *et al.*, Nature 412, 316 (2001).

Materiały nadprzewodzące

Classification	Materials	T_c (K)	Remarks
Związki międzymetaliczne i stopy związki zawierające tzw. ciężkie fermiony	Nb _{1-x} Ti _x alloy	10	used for sc magnets up to 11 T
	Nb ₃ Sn	18.0	A-15, used for magnets up to 22 T
	ErRh ₄ B ₄	< 23	Chevrel-phase borocarbides
	HoMo ₆ S ₈		
	RNi ₂ B ₂ C		
	CeCu ₂ Si ₂	0.65	d-wave
	UPt ₃	0.54	p- or f-wave
	CeCoIn ₅	2.3	coexistence of FM and SC
	UGe ₂	0.8	

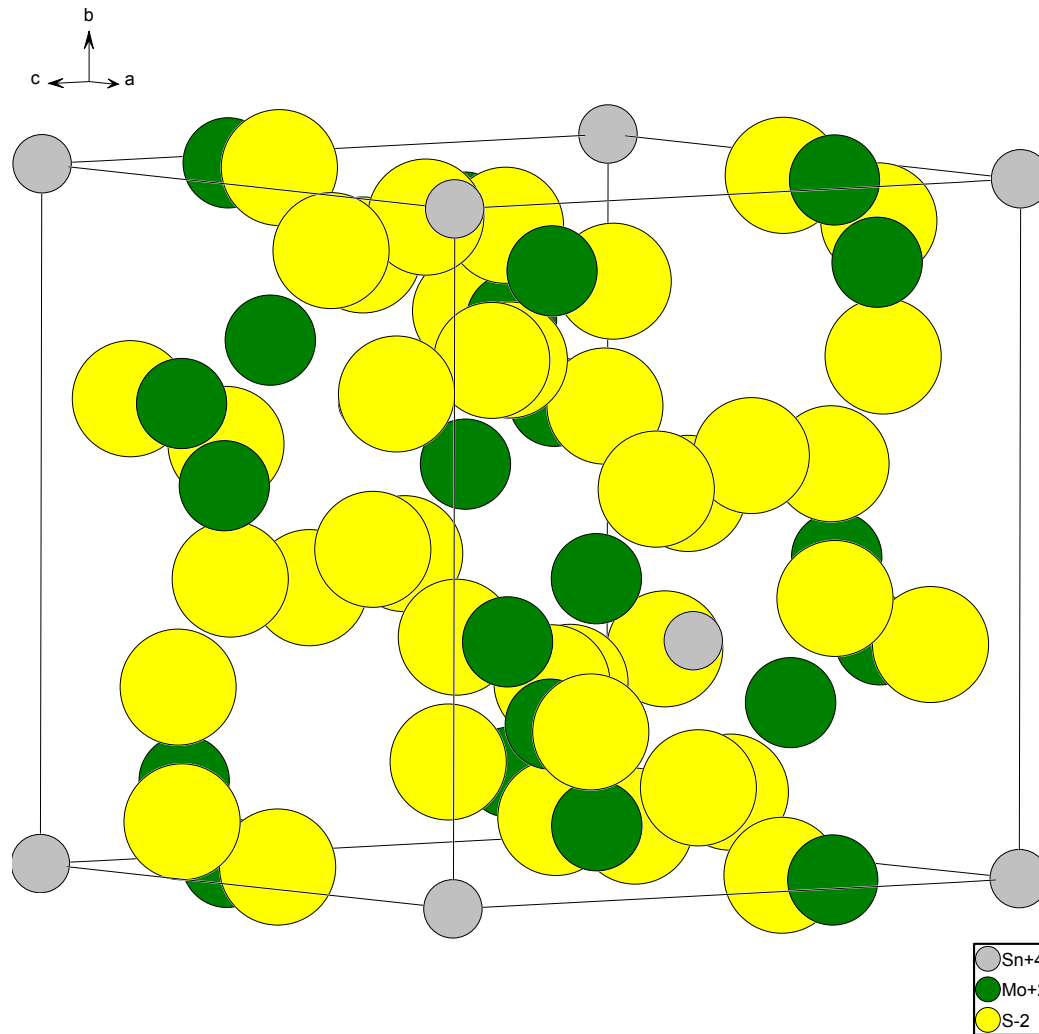
Związki typu A15:



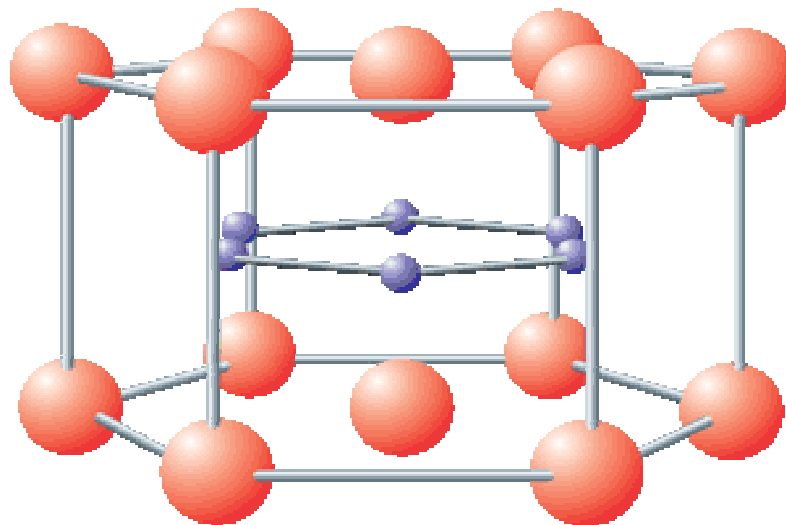
Fazy Chevrela:

Np. ErRh_4B_4

HoMo_6S_8



Stłynny MgB_2

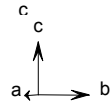


Materiały nadprzewodzące

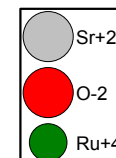
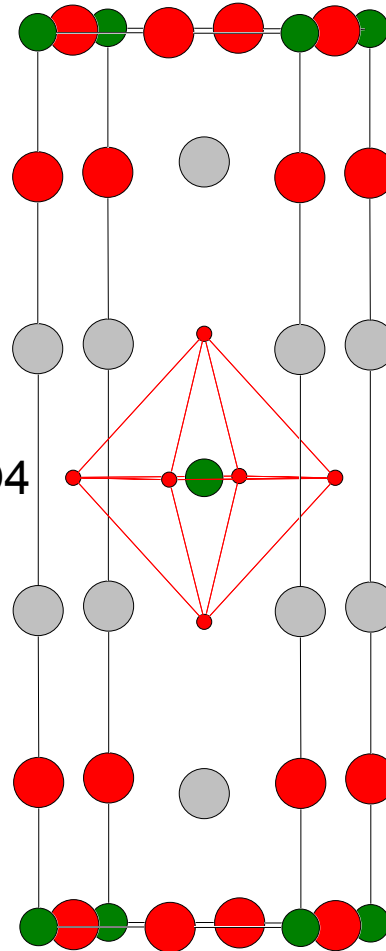
Classification	Materials	T_c (K)	Remarks
Tlenki HTC Cuprates	$\text{SrTiO}_{3-\delta}$	0.3	perovskite, low carrier density
	Ba(Pb, Bi)O_3	13	
	LiTi_2O_4	13	
	Sr_2RuO_4	1.5	
	$(\text{La, Ba})_2\text{CuO}_4$	30	layered perovskite, p-wave
	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	92	d-wave
	HgBaCuO	135	

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

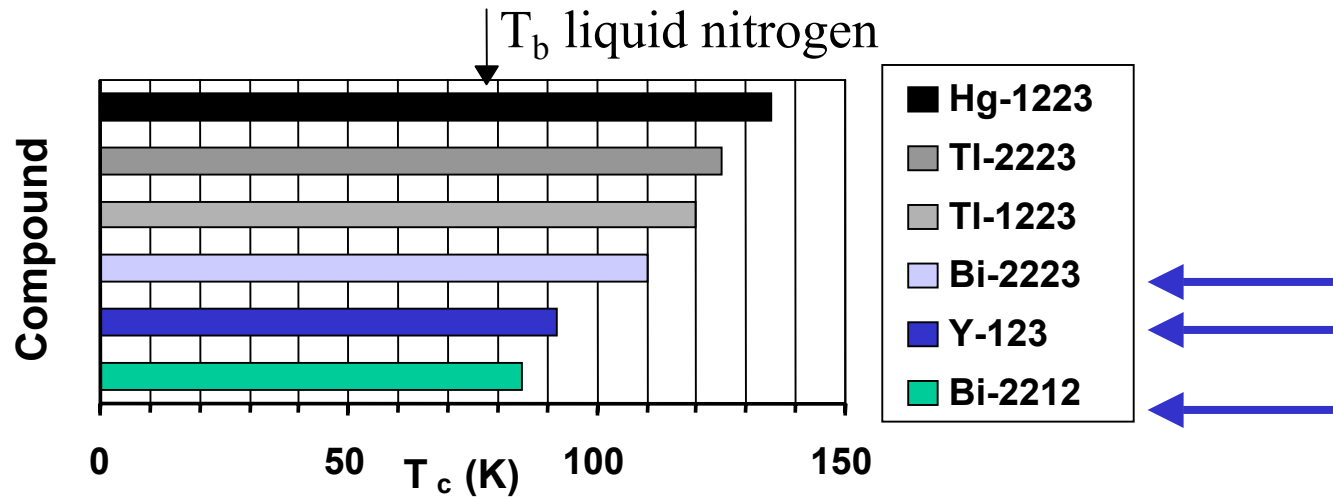
Tlenki o niskiej i wysokiej temperaturze krytycznej:



Sr₂RuO₄



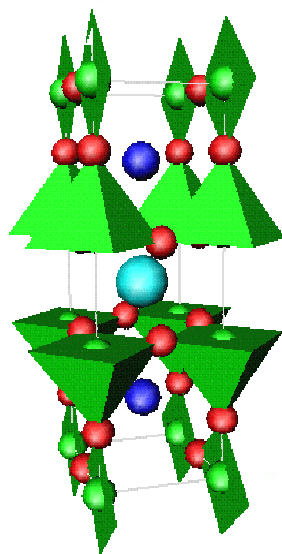
Główne nadprzewodniki wysokotemperaturowe i ich T_c



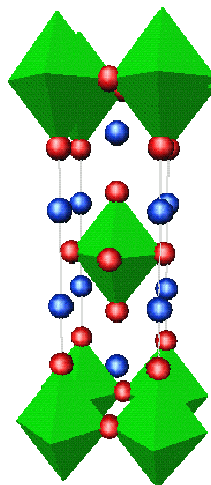
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	(Y-123)
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$	(Bi-2212)
$(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$	(Bi-2223)
$\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{9+x}$	(Tl-1223)
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$	(Tl-2223)
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$	(Hg-1223)

Courtesy of S.
Zannella,
Edison - Milano

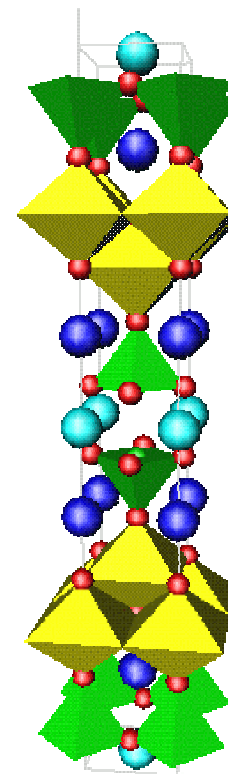
Główne nadprzewodniki wysokotemperaturowe i ich struktura krystaliczna



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



$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

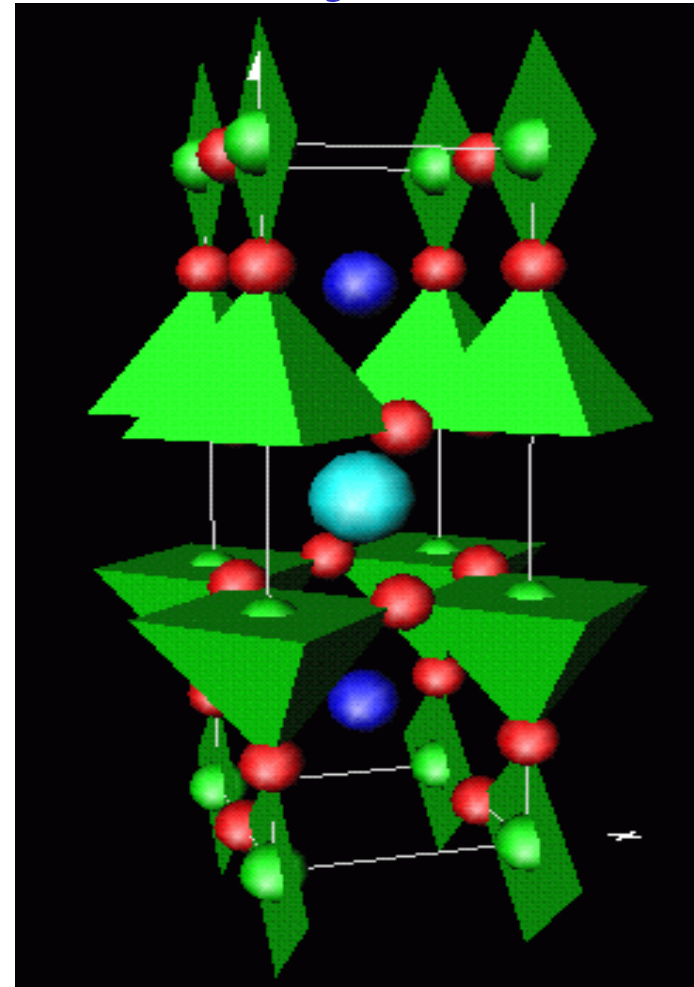


$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$

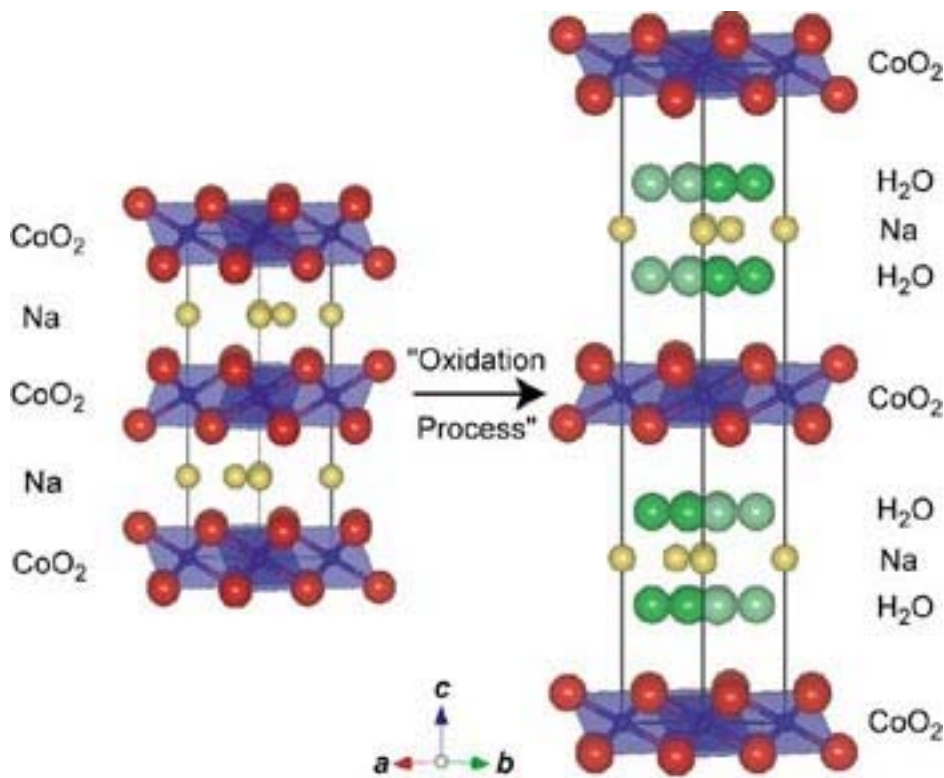
Pierwszy naprawdę „wysokotemperaturowy” nadprzewodnik. Najlepiej zbadany i znany.

**1987 Maw-Kuen
Wu, Paul Chu**
Houston i
Alabama , USA

YBa₂Cu₃O₇ (YBCO)
 $T_K = 92K$



Tlenek kobaltu dołącza do grona nadprzewodników:

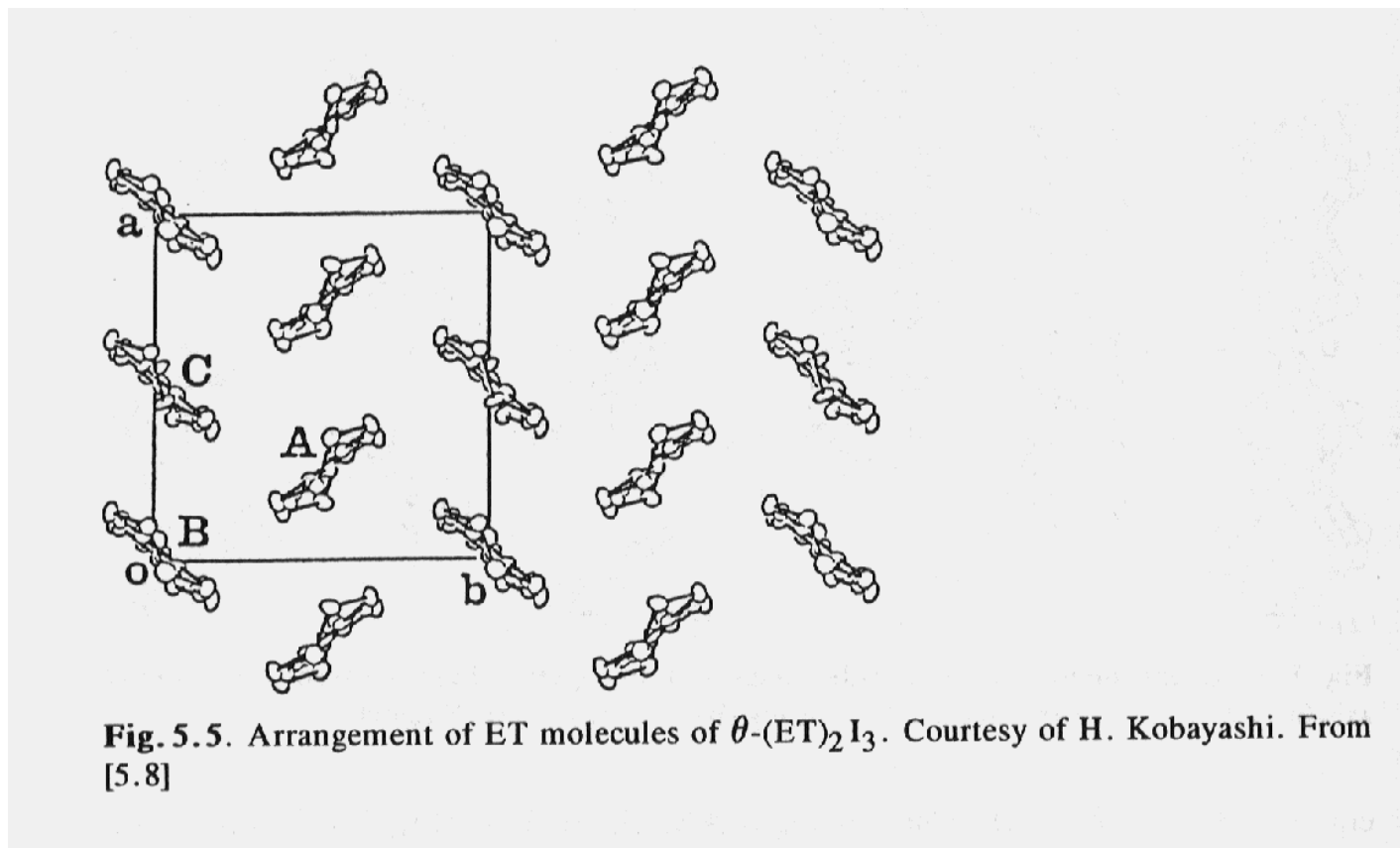


- 2D warstwy CoO_2 oddzielone od siebie grubymi, izolującymi warstwami jonów Na^+ i molekuł H_2O .

Materialy nadprzewodzące

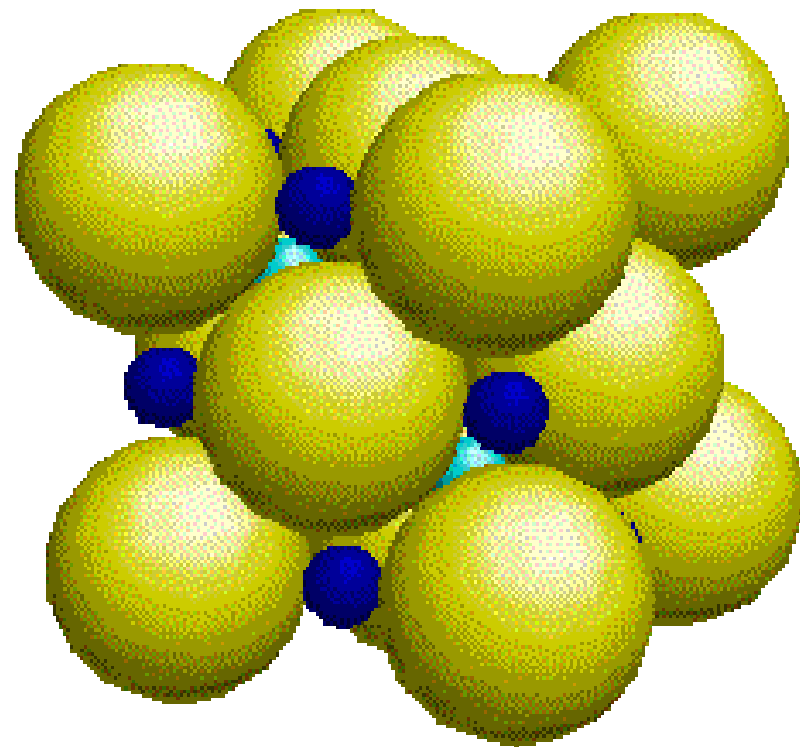
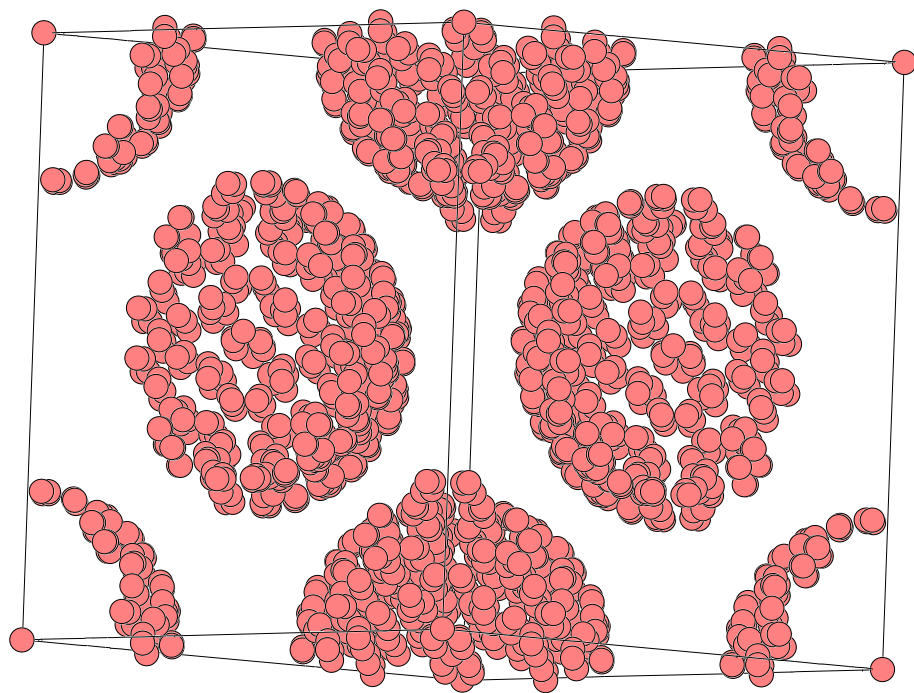
Classification	Materials	T_c (K)	Remarks
Organics and others	$(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$	1.2	Q1D
	$(\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$	11.4	Q2D, d-wave
	Rb_3C_{60}	28	Fullerane, s-wave
	$(\text{Na}_2\text{Ba}_6)\text{Si}_{46}$		Si-clathrates, s-wave

Istnieje mnóstwo nadprzewodników organicznych.



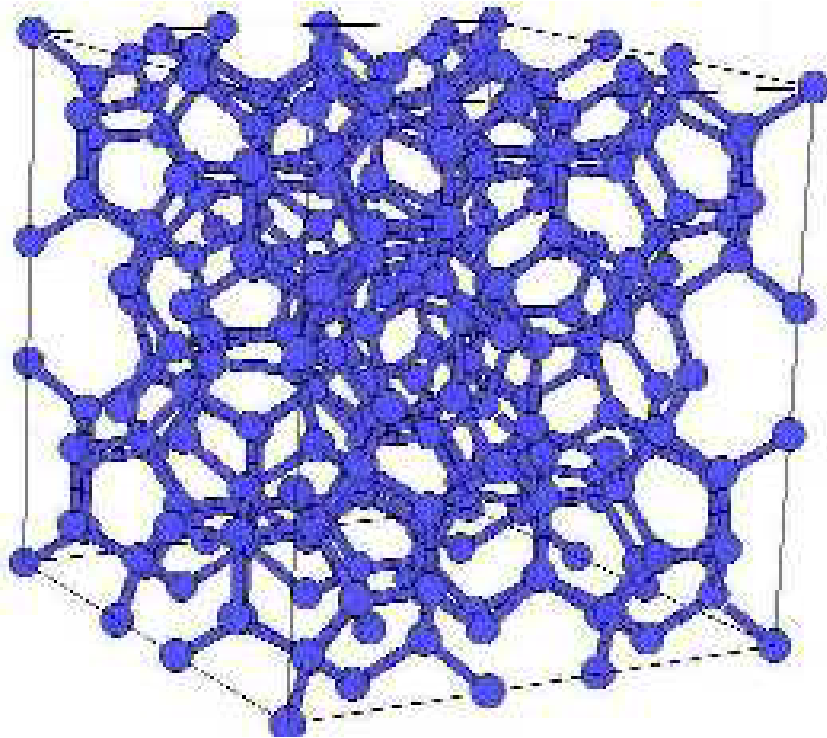
Domieszkowane fullereny

b
a



● C+0

Si-clathrate'y



Skąd się bierze
nadprzewodnictwo?

Twórcami teorii nadprzewodnictwa (konwencjonalnego) są:



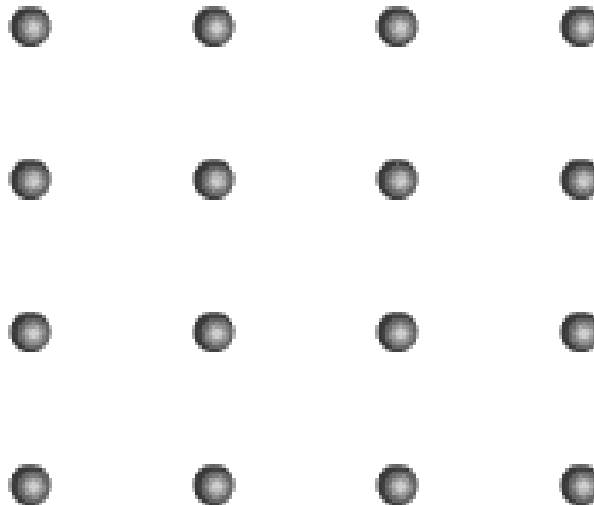
John Bardeen

Leon N. Cooper

John Robert Schrieffer

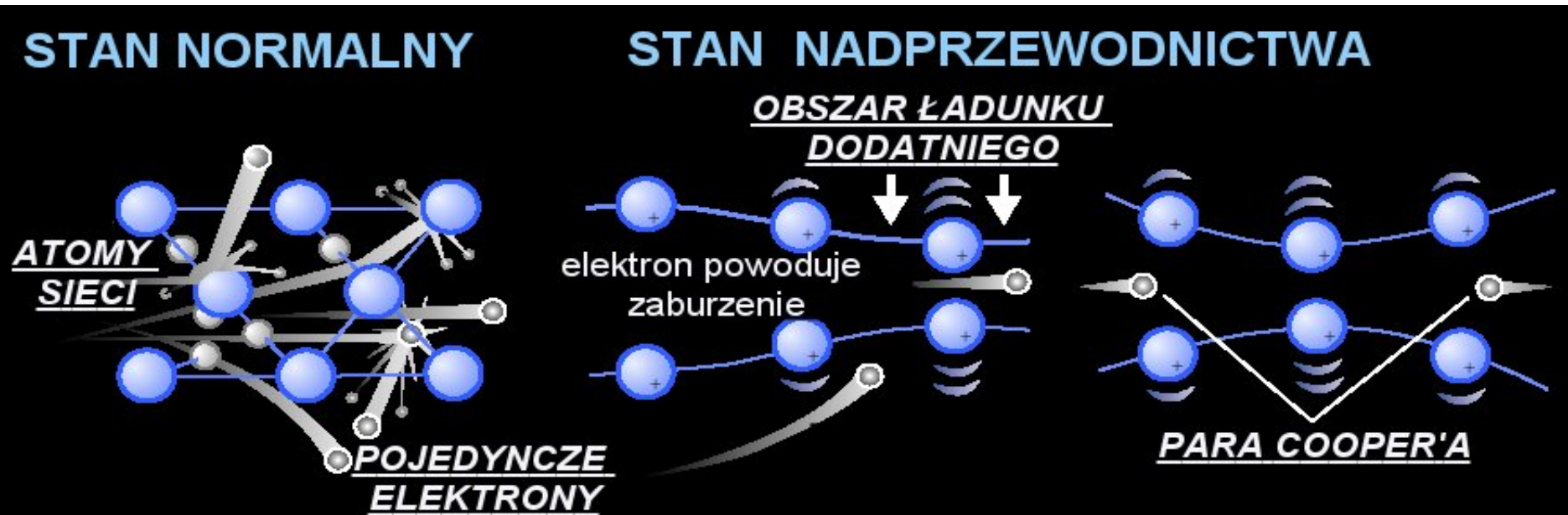
Skąd się bierze nadprzewodnictwo?

- Przyczyną powstania nadprzewodnictwa jest **jakieś** oddziaływanie pomiędzy elektronami, które prowadzi do tego, że **ELEKTRONY SIĘ PRZYCIĄGAJĄ**.



Skąd się bierze nadprzewodnictwo?

W metalach jest to oddziaływanie z siecią krystaliczną (oddziaływanie elektron-fonon).



Skąd się bierze nadprzewodnictwo?

W nadprzewodnikach wysokotemperaturowych:

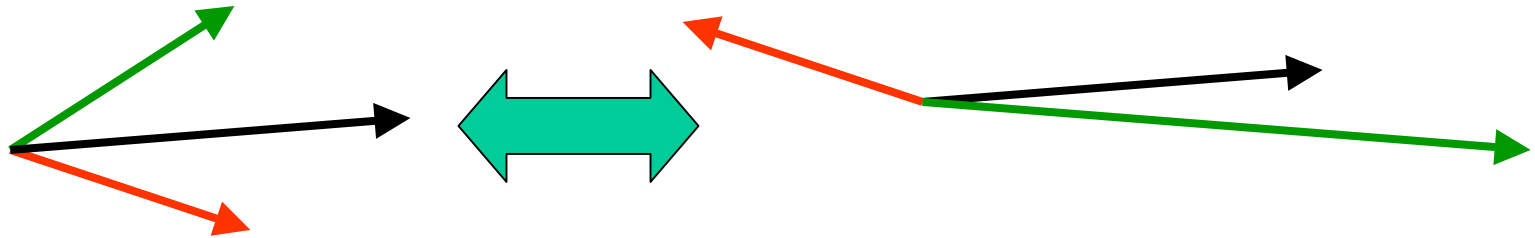
- oddziaływanie magnetyczne ?
- spiny ?
- mimo wszystko oddziaływanie z siecią ?
- jeszcze coś innego ?

Skąd się bierze nadprzewodnictwo?

- W rezultacie, dzięki przyciąganiu, elektrony tworzą pary: **pary Coopera**. Wszystkie pary Coopera w nadprzewodzącym materiale mają taką samą energię. **Para jako całość nie może ani zyskać ani stracić energii.** Parę można tylko rozerwać, a wtedy.. ...
.....Nie będzie już nadprzewodnictwa.

Skąd wynika zerowy opór?

- Wiemy, że opór metali wynika z **oddziaływania elektronów z drganiami sieci krystalicznej** (następuje zmiana kierunku ruchu elektronu, czyli ograniczenie prądu elektrycznego).
- W nadprzewodniku **oddziaływanie elektronu z drganiami sieci** prowadzi do powstania pary Coopera.



**Teraz: elektron zmienia kierunek prędkości,
ale para Coopera nie!!!**

$$R=0$$

- Opór (dla prądu stałego) jest **naprawdę** równy zero.
- Jeżeli w pierścieniu nadprzewodzącym wzbudzimy prąd to będzie on płynął na pewno dłużej niż będziemy w stanie mierzyć.
- Stała czasowa zaniku prądu:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau \cong 10^5 \text{ lat}$$

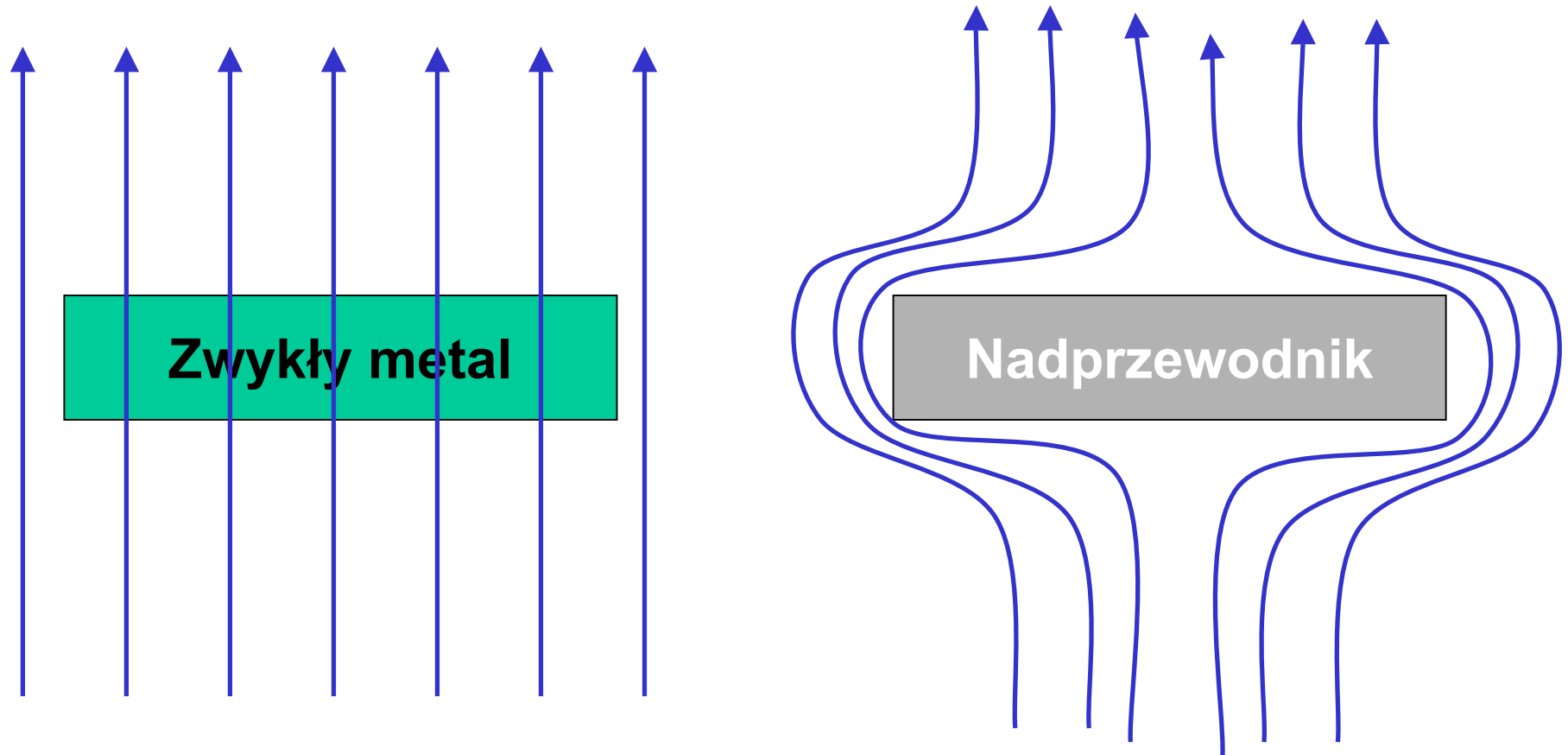
Poniżej temperatury krytycznej
materiał „nadprzewodzi”. To
znaczy, że:

- Jego opór elektryczny jest równy zero, ale...
 - Dotyczy to tylko prądu stałego i zmiennego o małej częstotliwości, mniejszego niż prąd krytyczny i najlepiej bez pola magnetycznego.

Dlaczego prąd może zniszczyć nadprzewodnictwo?

- Elektrony w parze są ze sobą związane. Żeby je od siebie oddzielić potrzebna jest energia: gdy dostarczymy wystarczającą energię nadprzewodnikowi (**ogrzewamy go, przepuścimy za duży prąd, naświetlimy promieniowaniem, itd.**), wówczas rozerwiemy pary Coopera i materiał zacznie zachowywać się zwyczajnie.

Jak nadprzewodnik oddziałuje z polem magnetycznym?



Jak nadprzewodnik oddziałuje z polem magnetycznym?

Nadprzewodnik jest **idealnym diamagnetykiem**: wypycha pole magnetyczne ze swojego wnętrza.

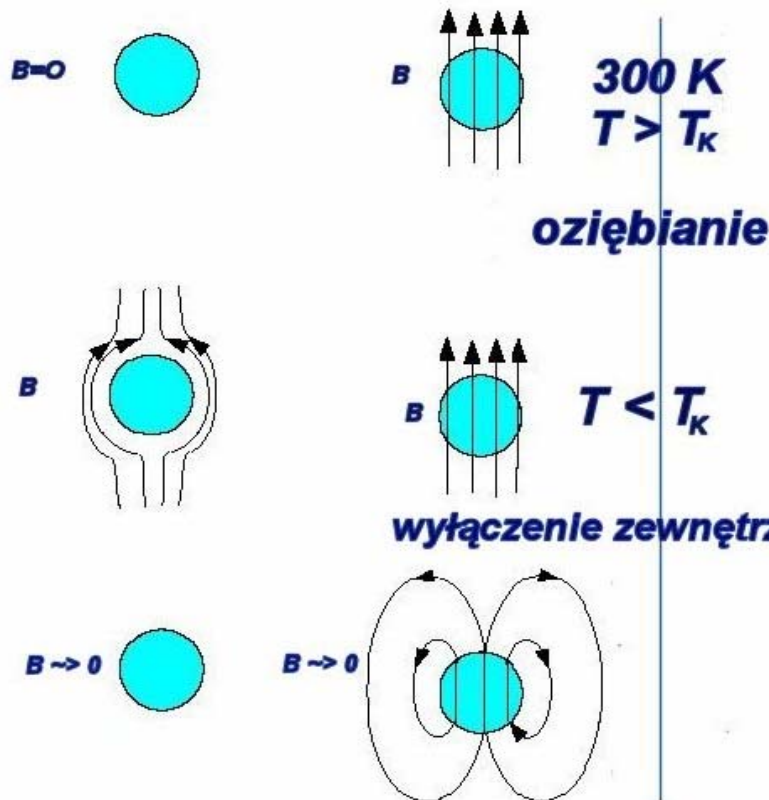


lev.mpeg

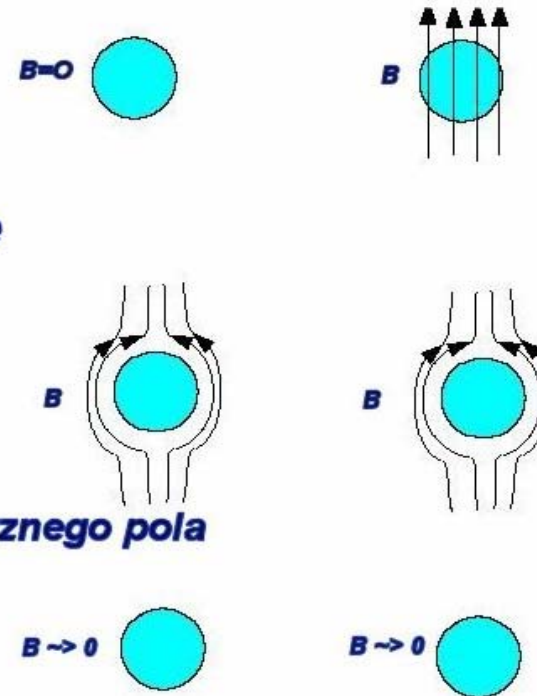
Efekt Meissnera – Ochsenfelda (Walther Meissner i Robert Ochsenfeld, 1933)

Nadprzewodnik to nie jest tylko idealny przewodnik !

IDEALNY PRZEWODNIK $R=0$

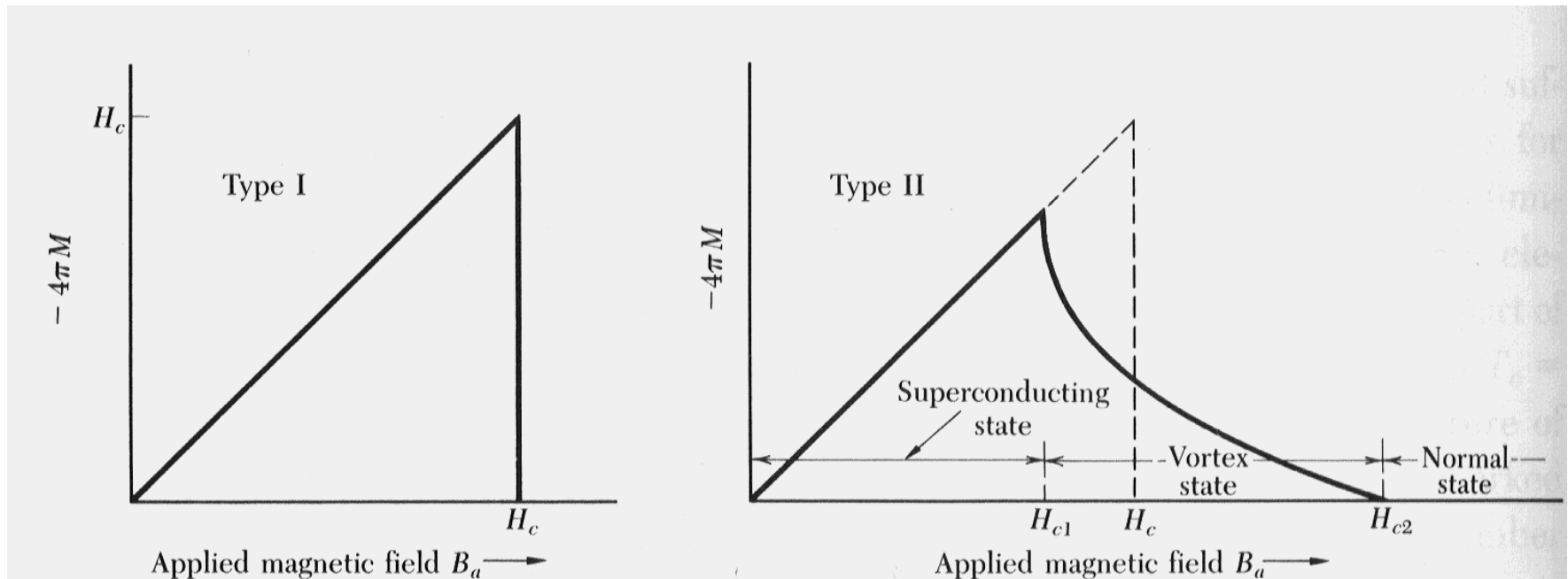


NADPRZEWODNIK

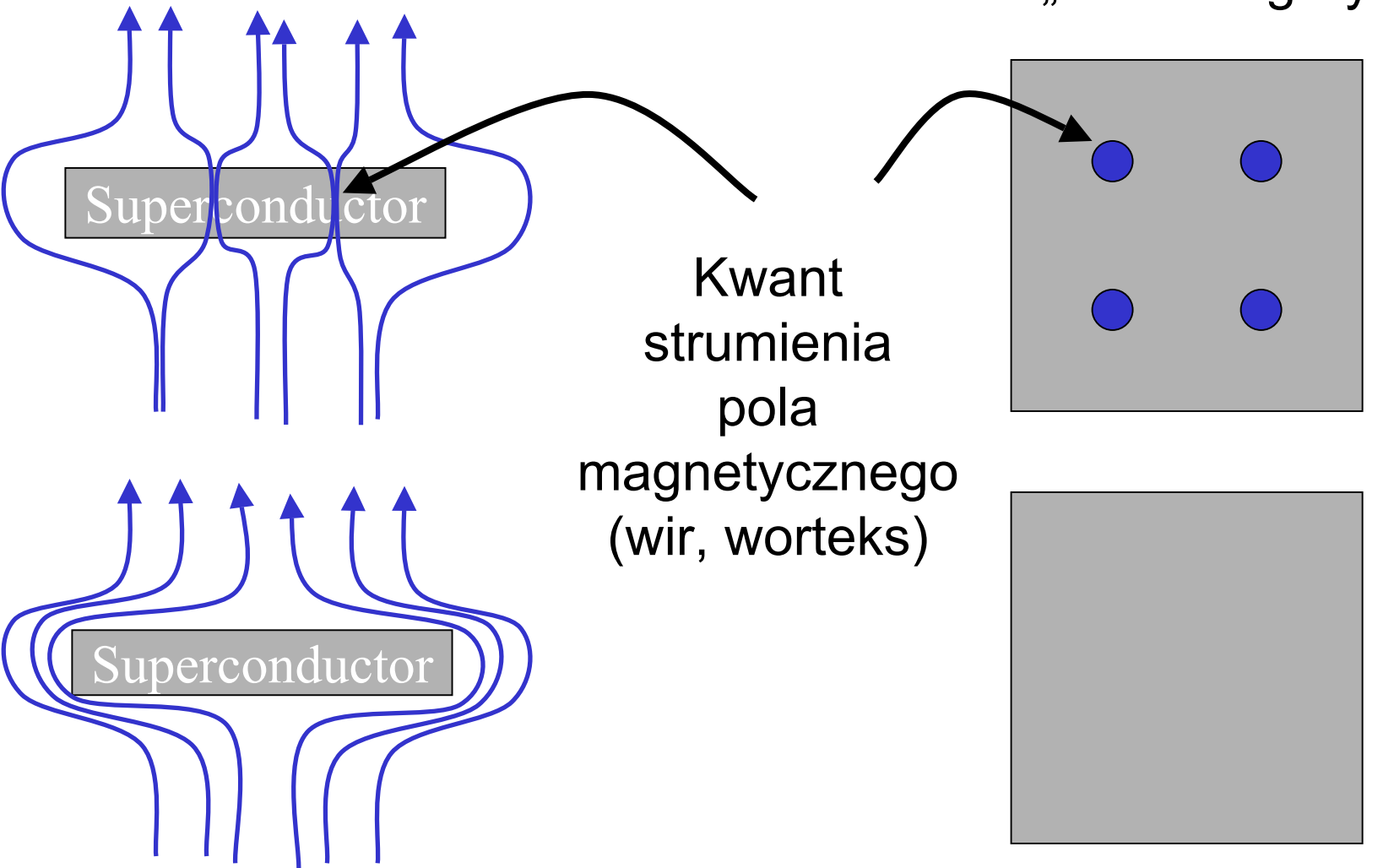


Jak nadprzewodnik oddziałuje z polem magnetycznym?

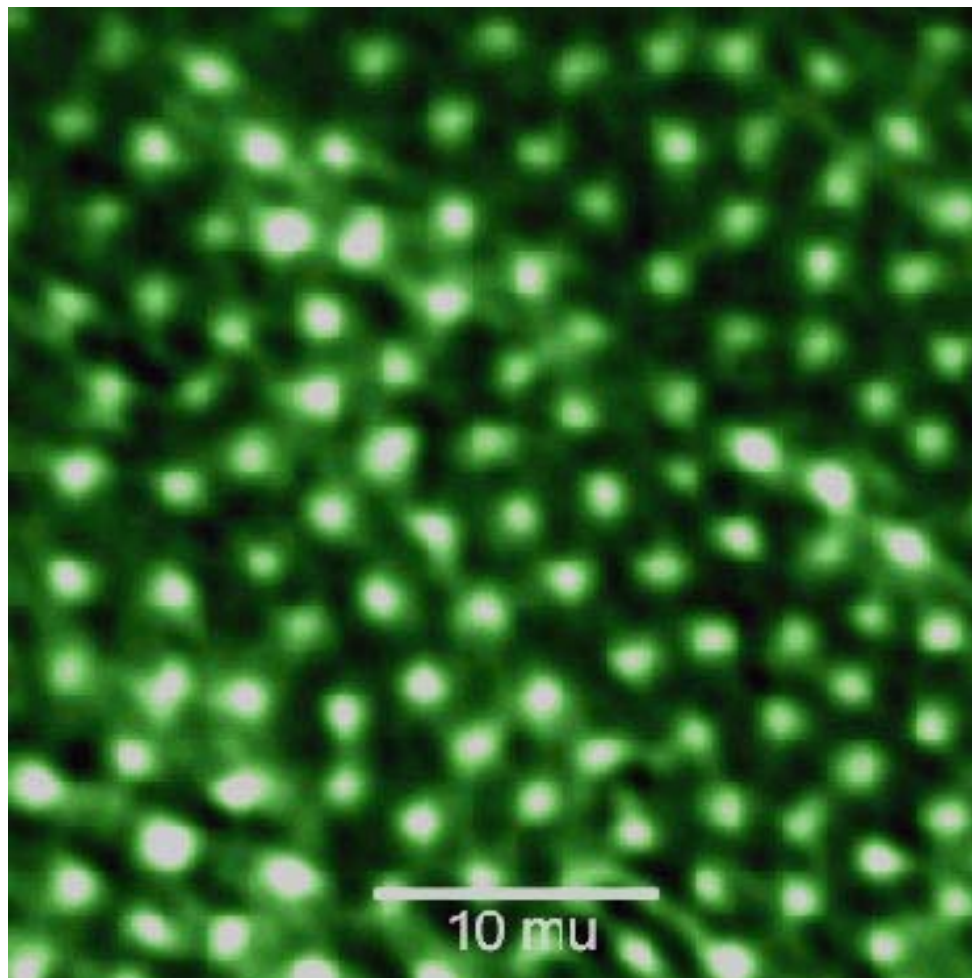
Dwa typy zachowań nadprzewodnika w polu magnetycznym:



Na czym polega częściowe wnikanie pola magnetycznego:

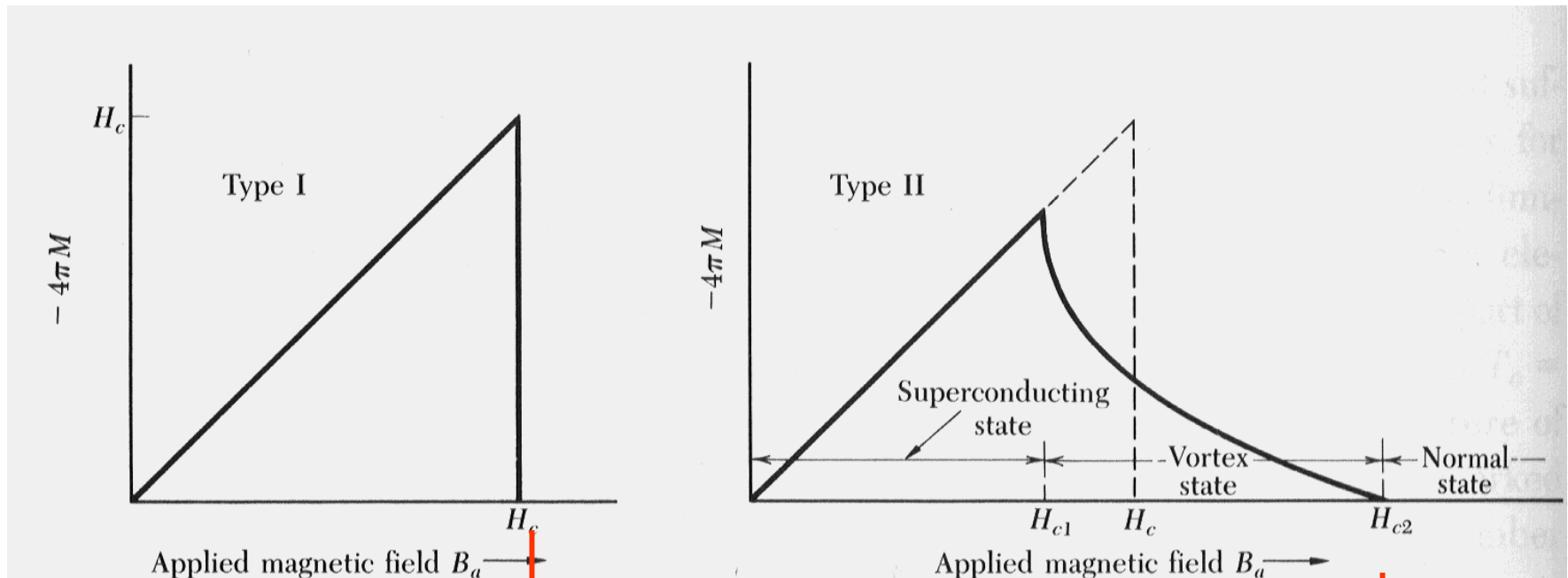


Zdjęcie worteksów:



Jak nadprzewodnik oddziałuje z polem magnetycznym?

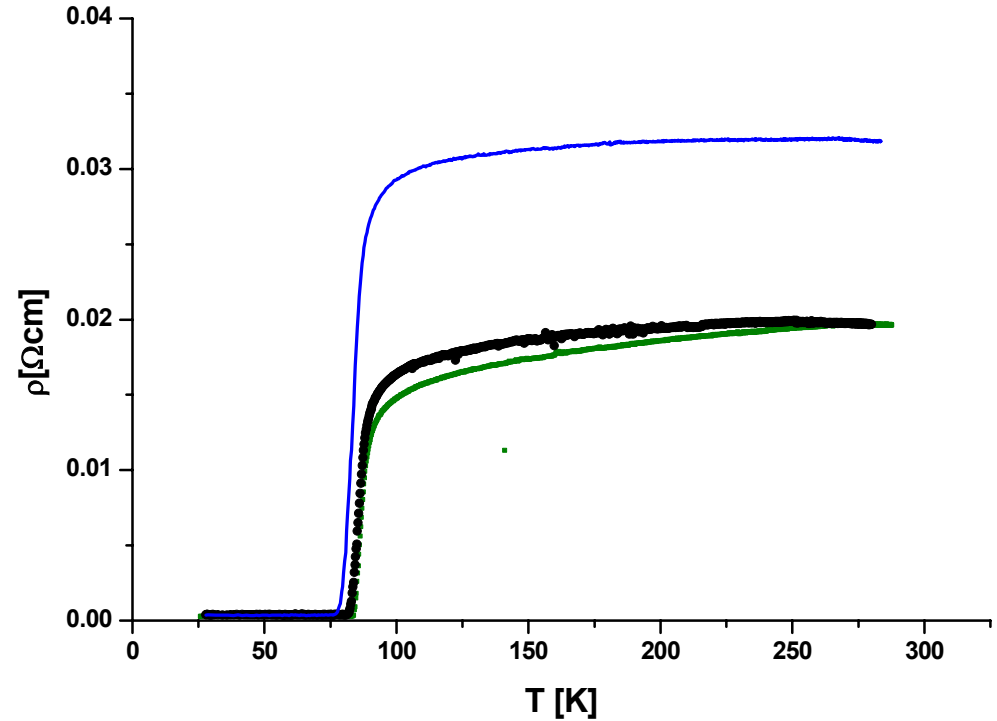
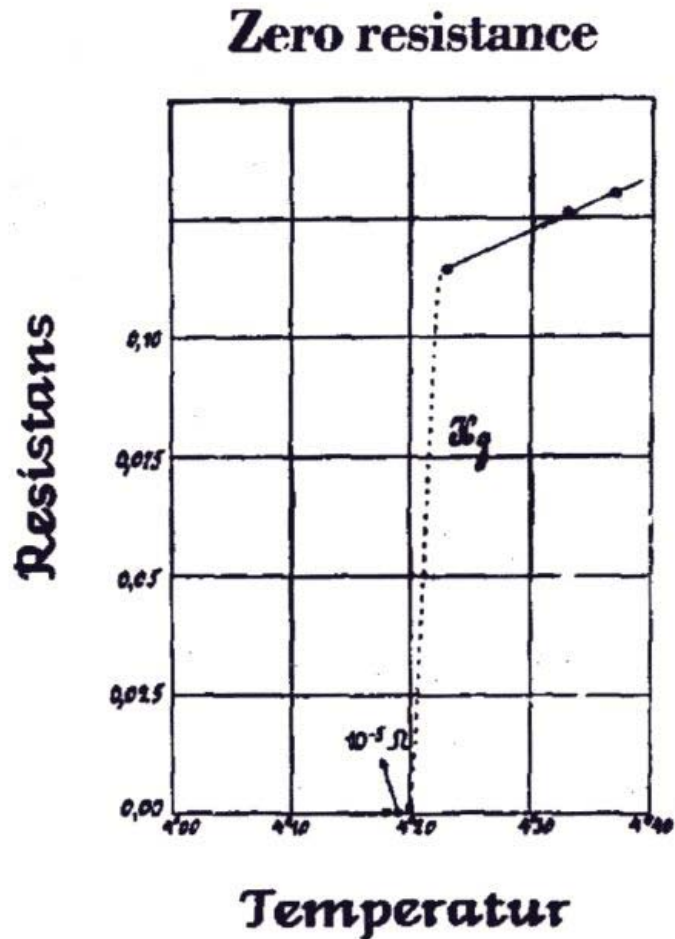
Istnieje pole magnetyczne, które niszczy stan nadprzewodzący: **pole krytyczne**

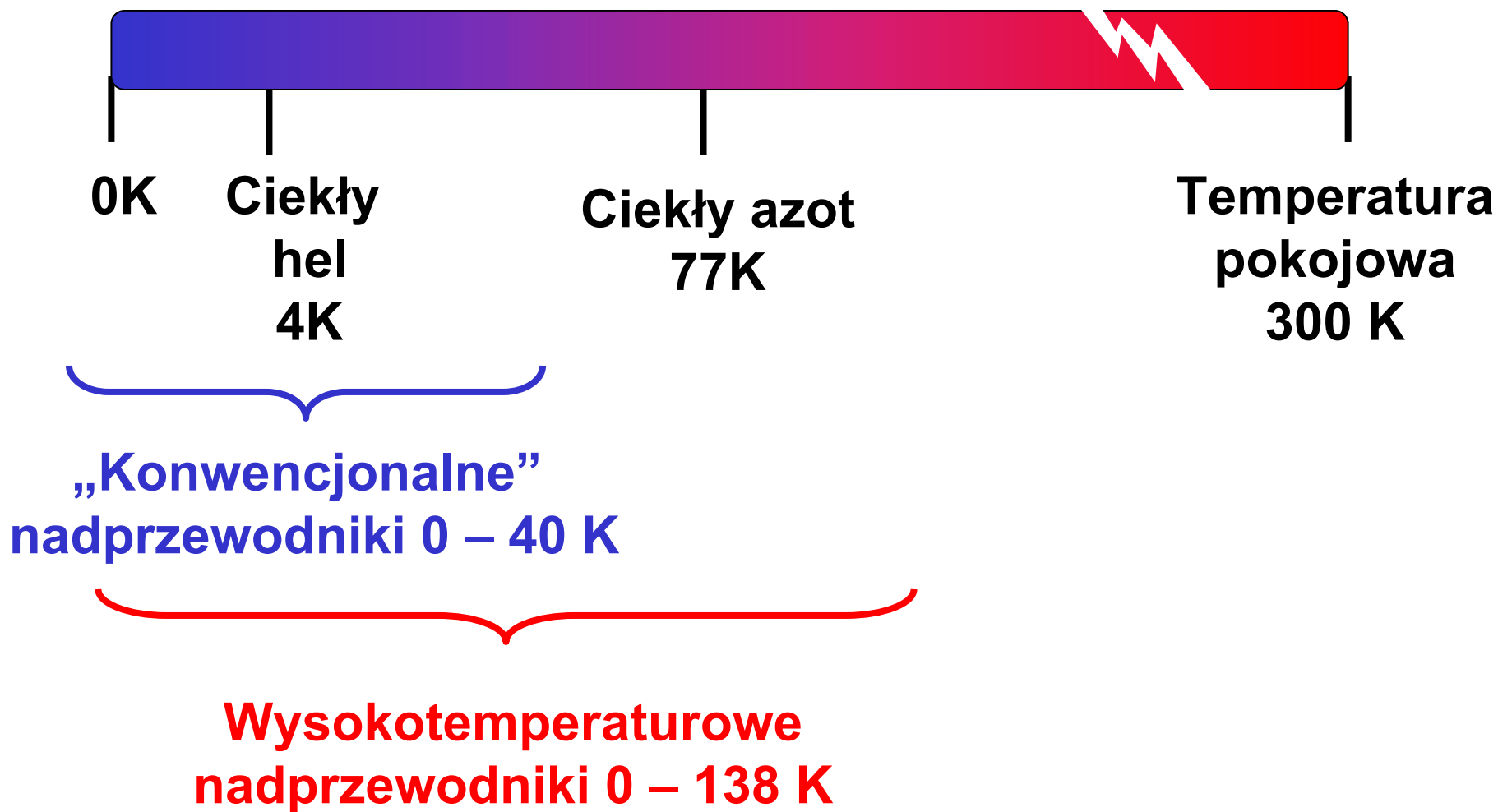


Pole krytyczne

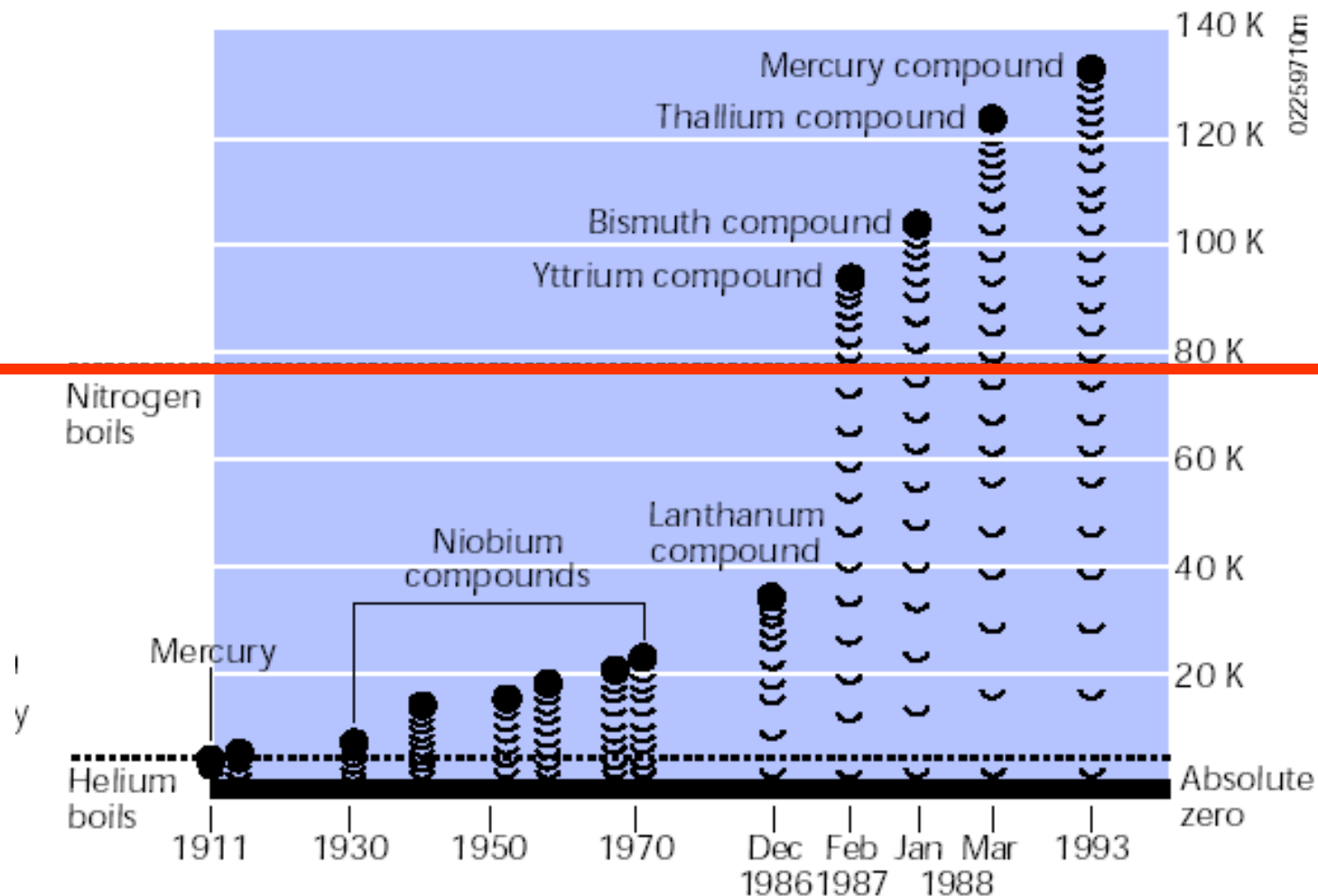
Podsumowanie: główne cechy
nadprzewodników i stanu
nadprzewodzącego.

Temperatura krytyczna: temperatura poniżej której materiał nadprzewodzi.





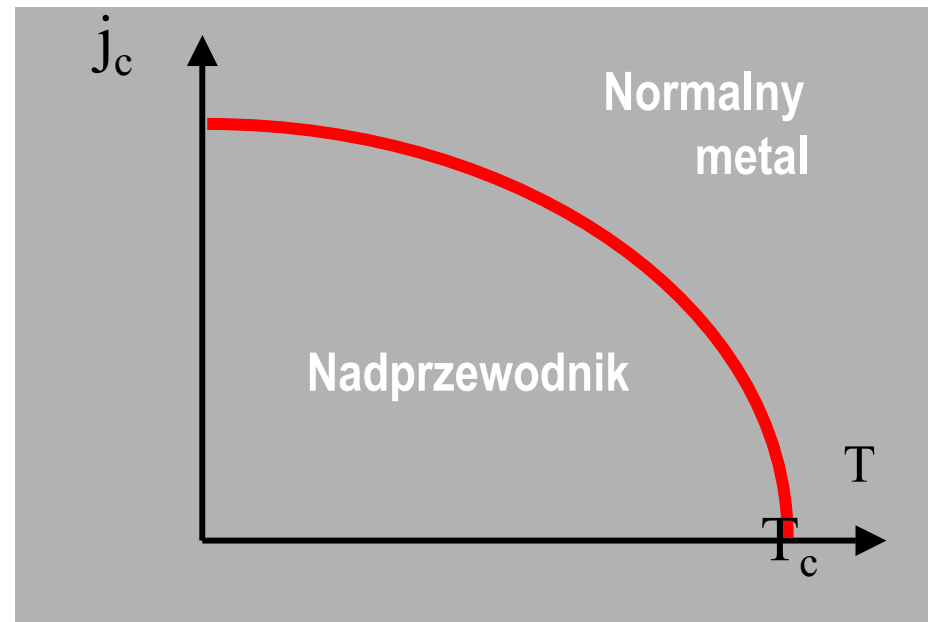
Temperatura krytyczna: temperatura poniżej której materiał nadprzewodzi.



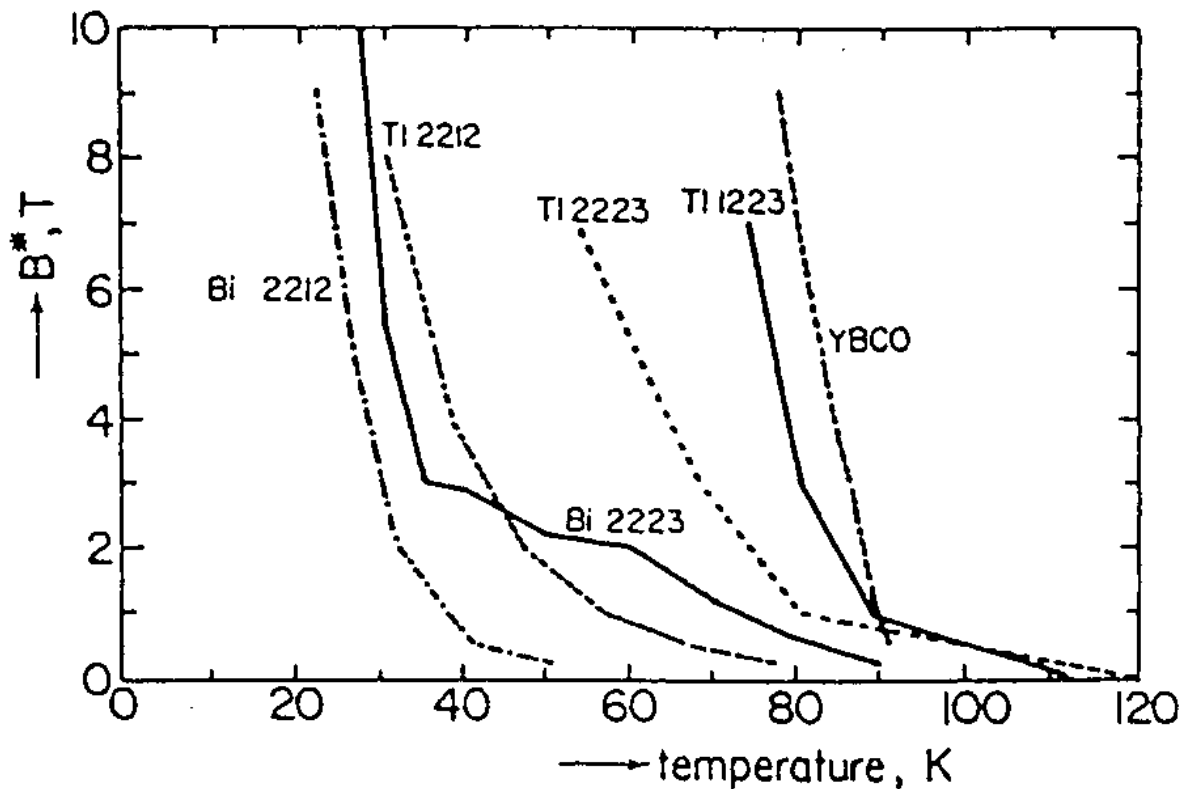
Gęstość prądu krytycznego (j_c): prąd, który niszczy nadprzewodnictwo.

- Uwaga: gęstość prądu jest to natężenie prądu podzielone przez pole przekroju poprzecznego przewodnika.
- Prąd krytyczny zależy od temperatury.

Jest to bardzo ważna, z praktycznego punktu widzenia, cecha nadprzewodnika.

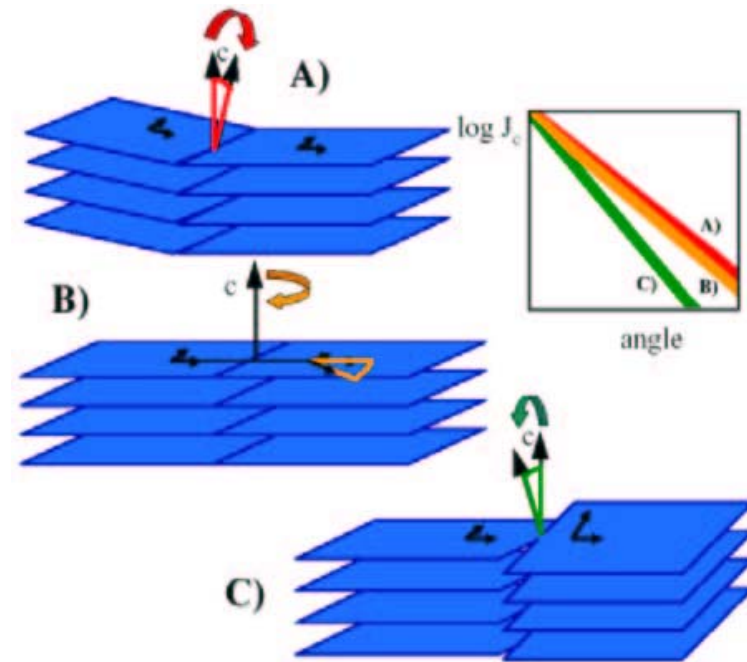
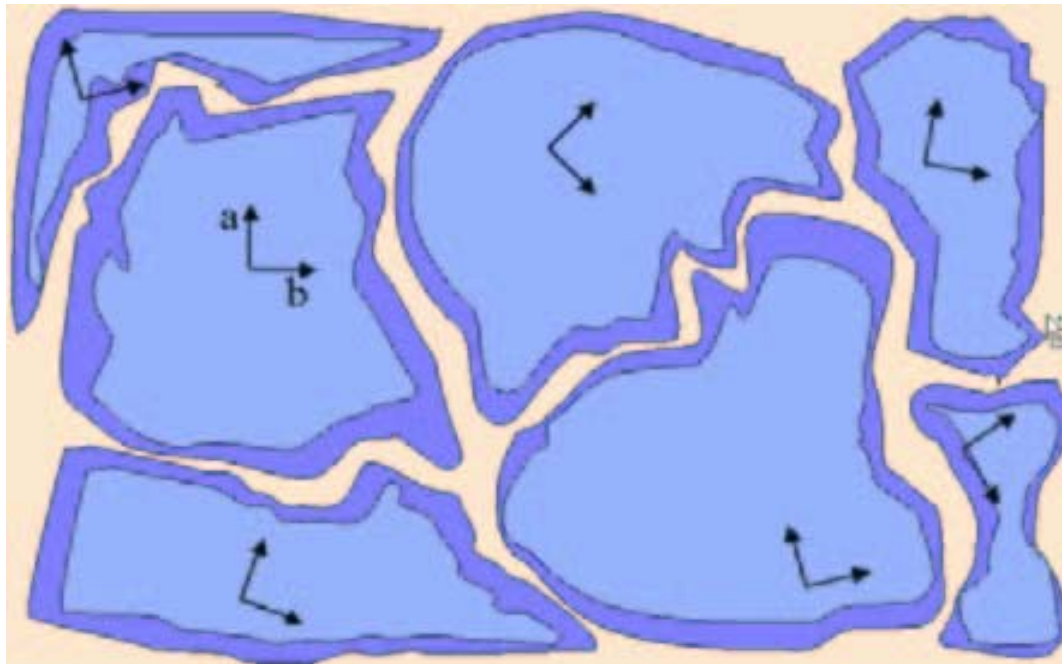


Pola krytyczne niektórych nadprzewodników wysokotemperaturowych:



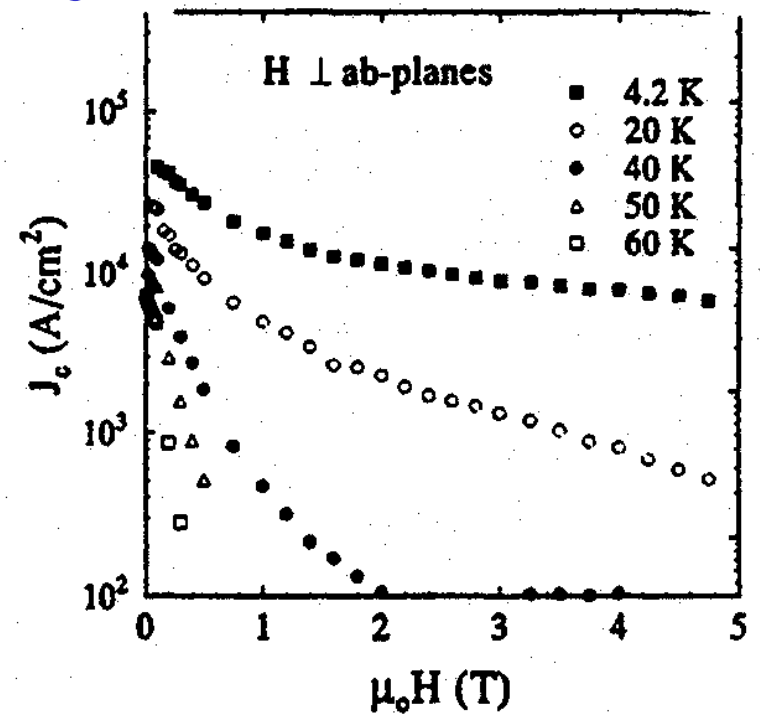
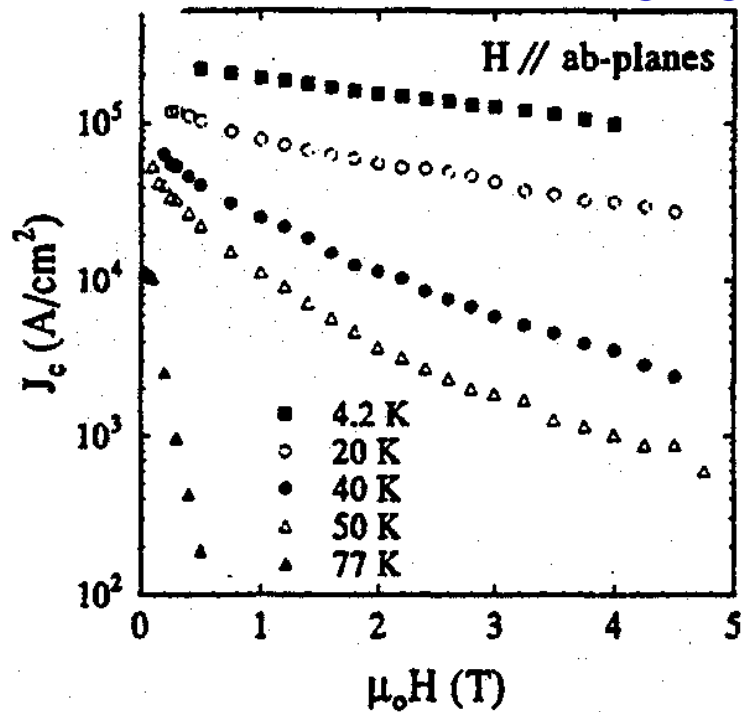
Prąd krytyczny.

- Prąd krytyczny bardzo zależy od mikrostruktury.



Mikrostruktura z kolei zależy od technologii wytwarzania materiału. Zaczniemy, zatem, od technologii.

Prąd krytyczny BSCCO

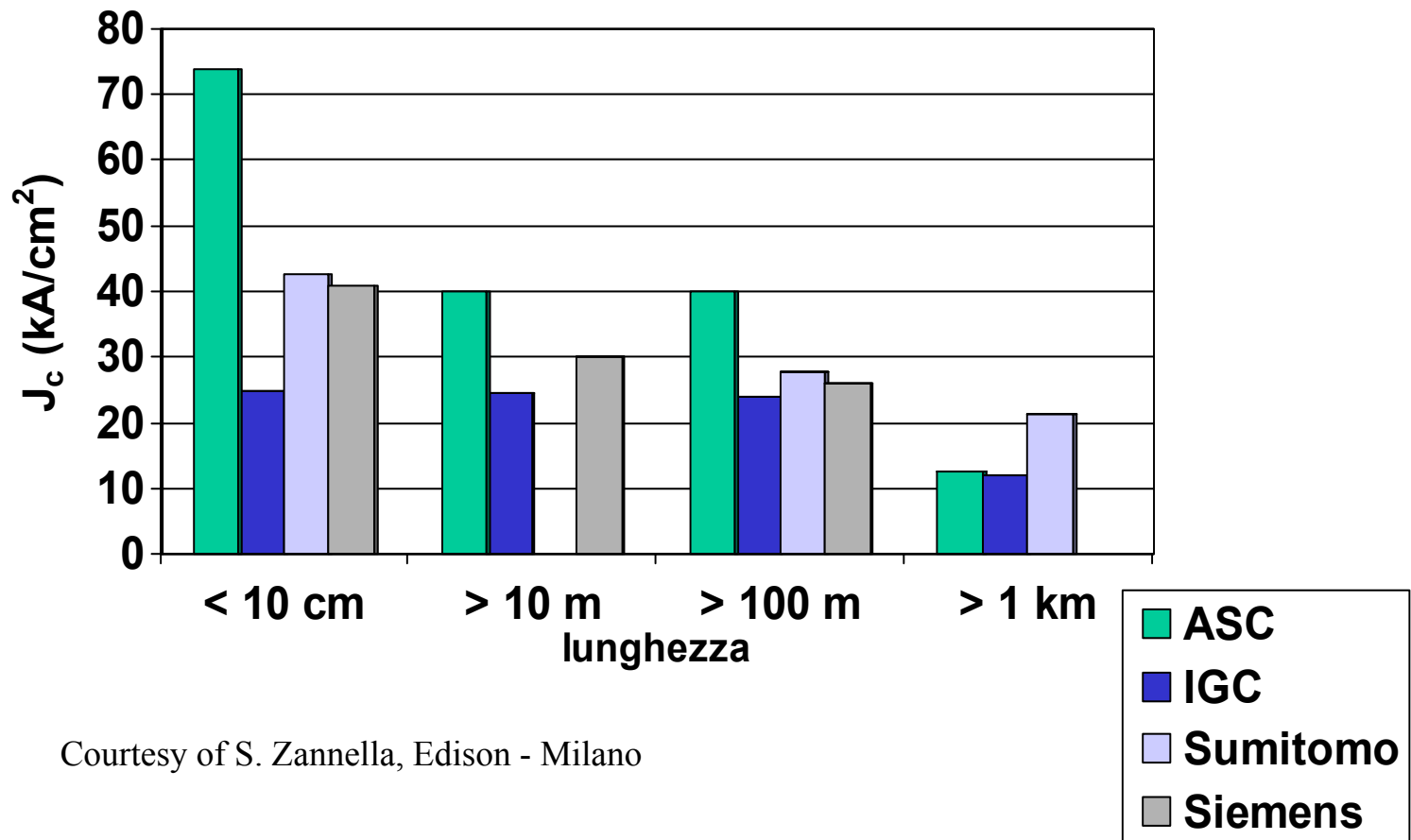


Duża anizotropia - problem

J_c of Bi-2223
tapes from
magnetisation
technique.
Data from L.
Martini, CESI,
Milano

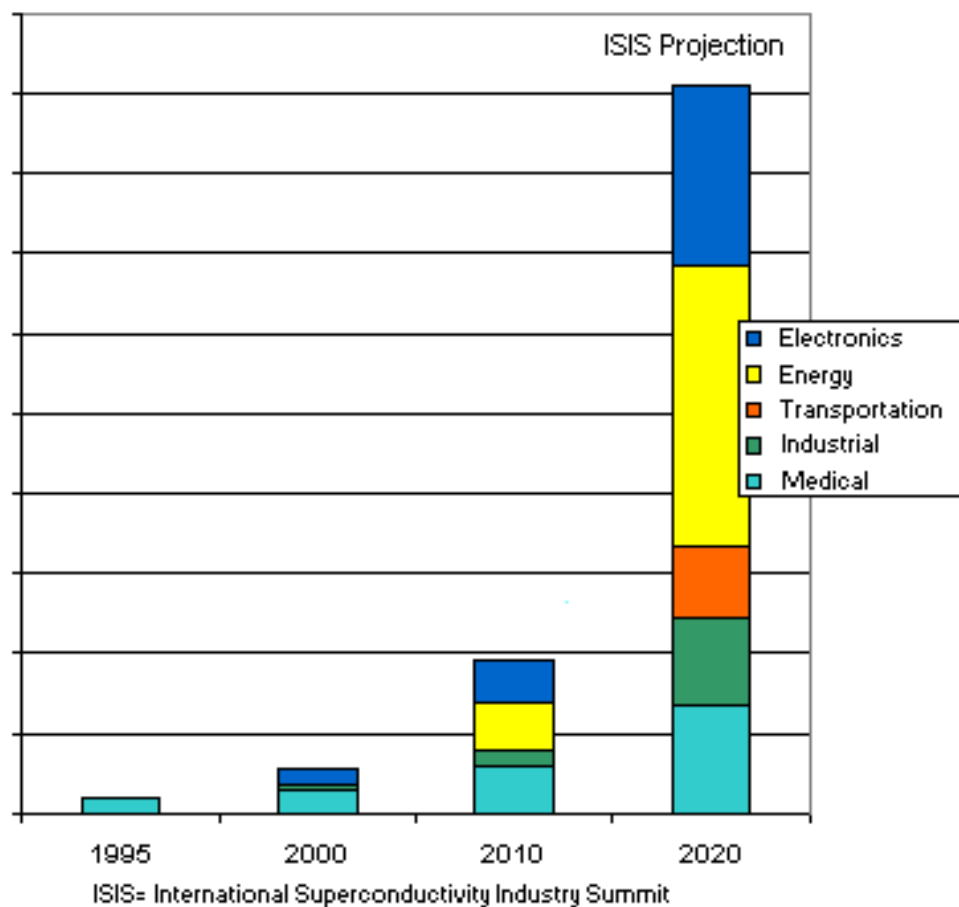
Prąd krytyczny BSCCO: 2223

J_c (77 K, 0 T) di nastri multifilamentari di Bi-2223



Courtesy of S. Zannella, Edison - Milano

ZASTOSOWANIA



Najbardziej już
rozpowszechnione zastosowanie
nadprzewodników (niekoniecznie
wysokotemperaturowych) to
wytwarzanie i pomiar pola
magnetycznego.

Elektromagnesy.

- Aby wytworzyć pole magnetyczne o indukcji 9T potrzebny jest prąd **13000A!**
- W normalnym drucie wydzielili się przy tym olbrzymia ilość ciepła:
 - Chłodzenie;
 - Wielkie straty energii;
 - Wielkie problemy konstrukcyjne.
- JEDYNE ROZWIĄZANIE TO NADPRZEWODNIKI

Elektromagnesy.

- „Stare” nadprzewodniki stosuje się już w tym celu od kilkudziesięciu lat

SC	Indukcja
Nb-Ti	8 [T]
Nb ₃ Sn	17 [T]

Elektromagnesy.

Nowe nadprzewodniki zbyt szybko nie wyprą z rynku starych, ale..



Cryocooled magnet capable of 8 T at 8 K (left) and a series of them, with different size and fields (max 15 T), ready to be shipped.

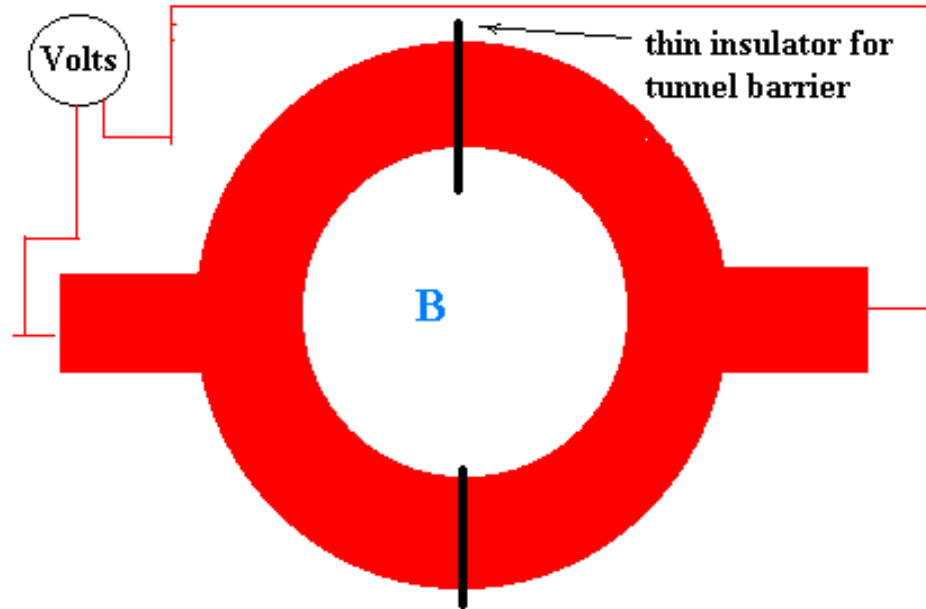
Courtesy of Cryogenic Ltd, London



Precyzyjny pomiar indukcji pola magnetycznego: SQUID

Superconducting Quantum
Interference Device

SQUID



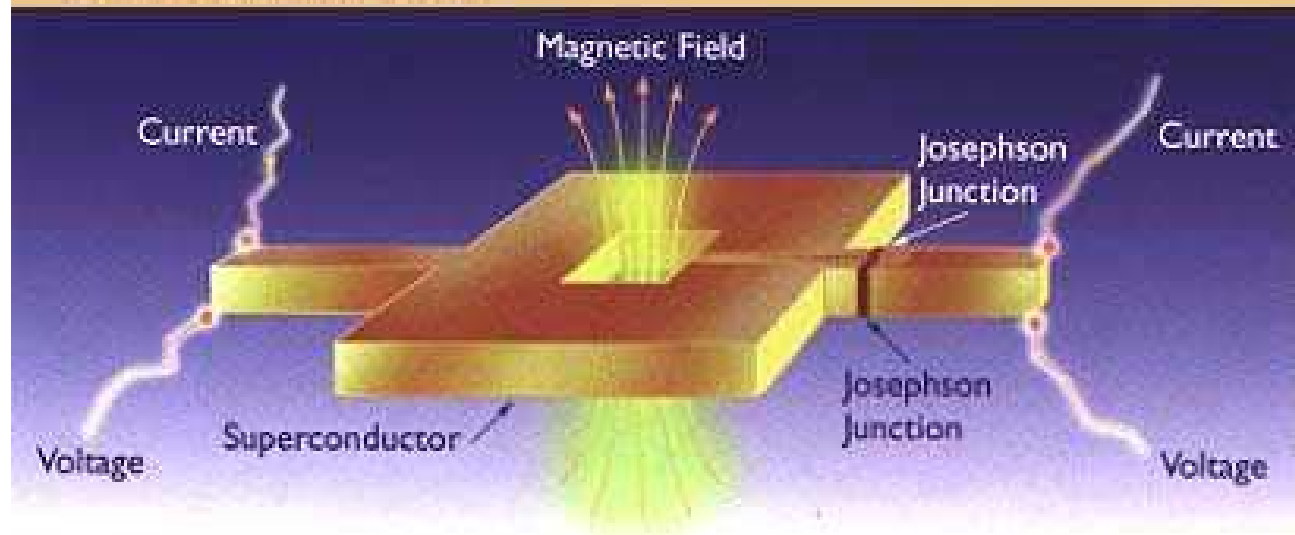
- SQUID jest to pierścień złożony z dwóch nadprzewodników przedzielonych warstwami izolatora. Złącza (warstwy izolatora) są bardzo cienkie i prąd nadprzewodzący może przez nie tunelować.
- Do wnętrza pierścienia może wnikać pole magnetyczne (tylko kwanty strumienia=fluksony).

SQUID

Zmiana pola magnetycznego wewnątrz pierścienia powoduje zmianę płynącego prądu.

Fluksony są baaardzo małe, w związku z tym SQUID jest bardzo czułym miernikiem pola magnetycznego.

A SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) is the most sensitive type of detector known to science. Consisting of a superconducting loop with two Josephson junctions, SQUIDs are used to measure magnetic fields.



Kable przesyłowe

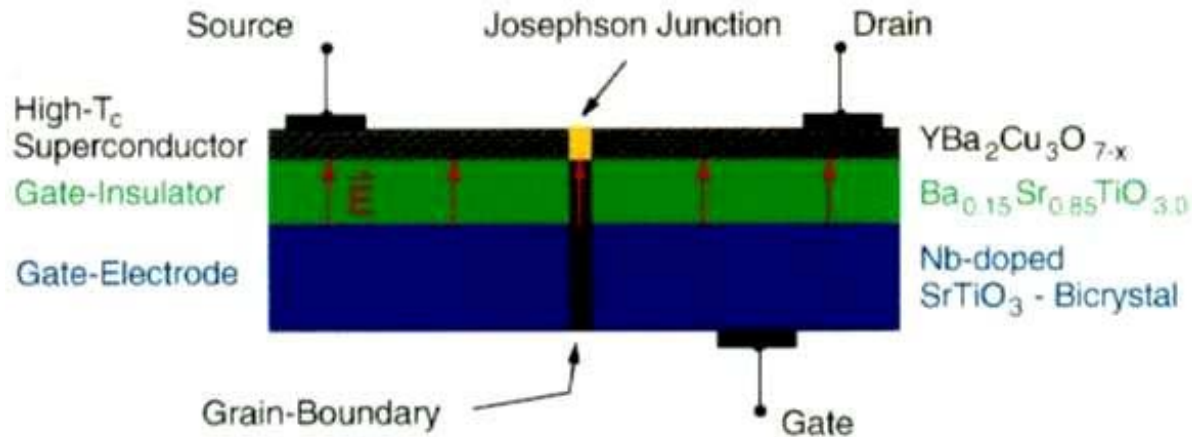
Korzyść z zerowego oporu jest oczywista, ale problemem jest chłodzenie kabla nadprzewodzącego: jest to kosztowne i technicznie trudne.

Mimo to, istnieją już próbne instalacje:

- od 2001 Carrollton, Georgia - 3 instalacje; Kopenhaga- 150000 klientów
- 2002 Tokio – trzeci projekt
Detroit, Michigan –14000 klientów; Paryż, Francja

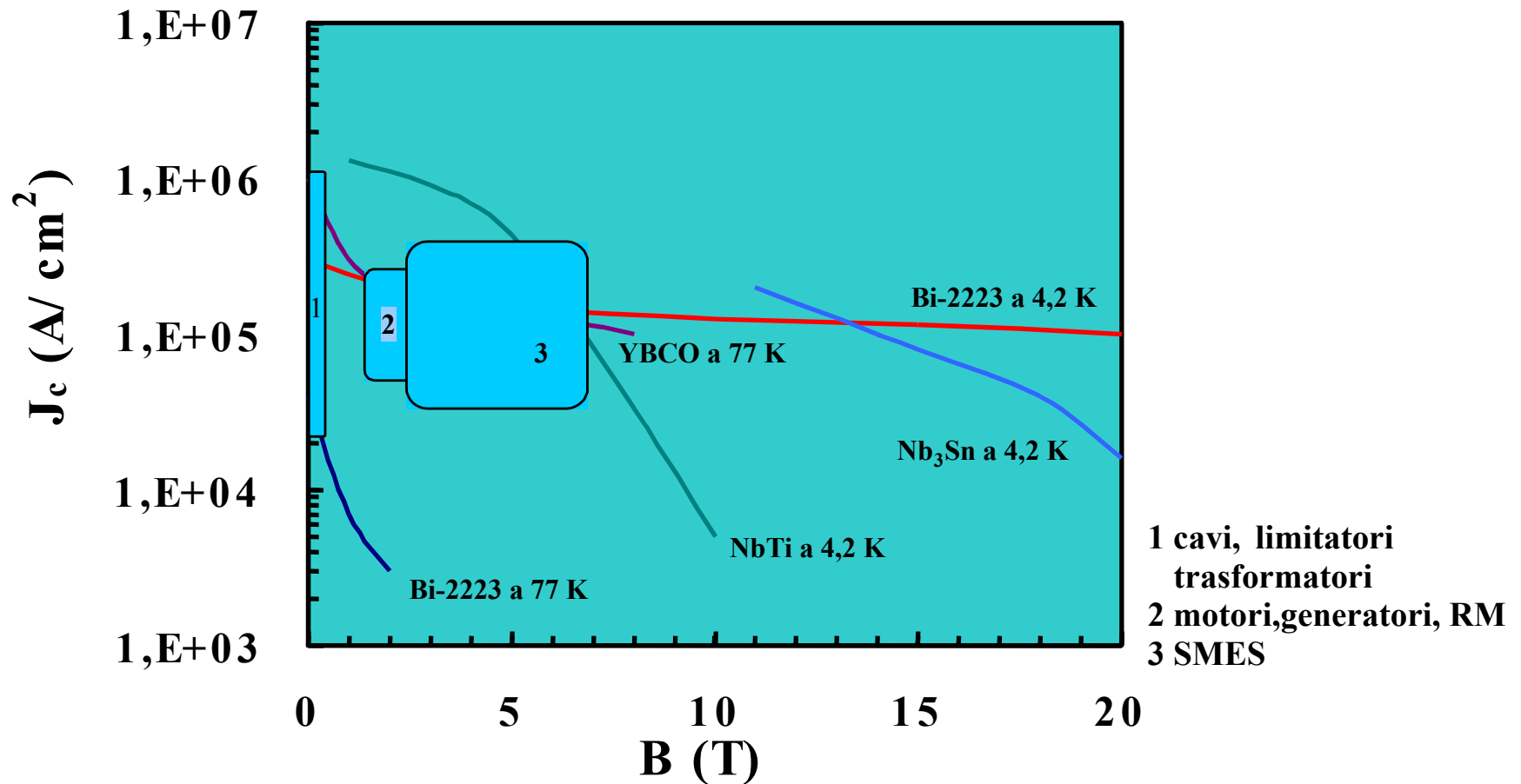


Zastosowania w elektronice.



Tranzystor polowy;
Pamięci;
Różne szybkie przełączniki;

Zastosowania elektrotechniczne



Courtesy of S. Zannella, Edison, Milan.

Silniki



MAGLEV.

