Nierozwiązana zagadka nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego

Krzysztof Byczuk

Instytut Fizyki Teoretycznej

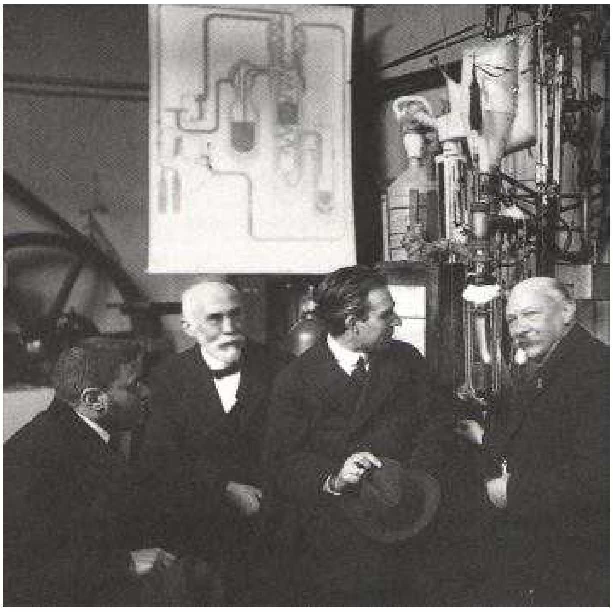
wykład inauguracyjny

1 październik 2002

WYDZIAŁ FIZYKI
UNIWERSYTET WARSZAWSKI

Odkrycie nadprzewodnictwa

1911 - Heike Kamerlingh Onnes (Leida - Holandia)

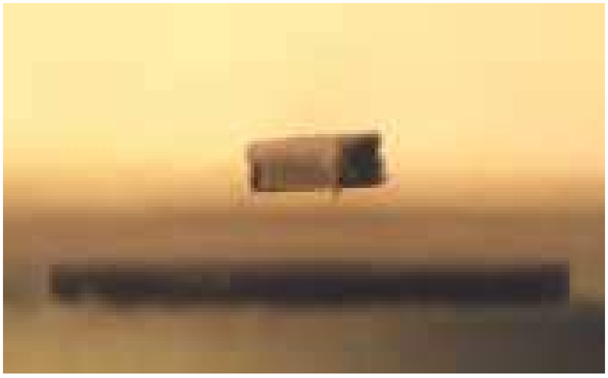
- Poniżej $T_c = 4.15$ K opór rtęci spada do zera
- Inne nadprzewodniki: Al, In, Nb, Pb, ...
- Duży prąd lub zewnętrzne pole magnetyczne (ułamka tesli) niszczą nadprzewodnictwo

Nagroda Nobla - 1913

Efekt Meissnera

1933 - Meissner i Ochsenfeld (Berlin - Niemcy)

Poniżej T_c słabe zewnętrzne pole magnetyczne jest całkowicie wypychane z próbki



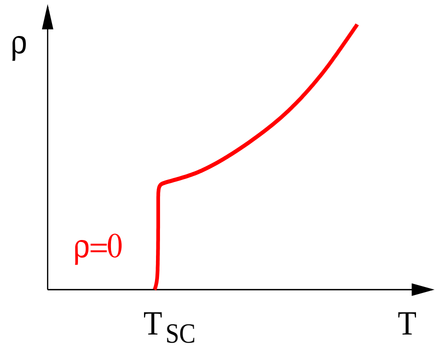
lewitujący nadprzewodnik

lewitujący magnes

Definicja nadprzewodnictwa

nadprzewodnik $\rightarrow$ "*zerowy, nieskończony, doskonały*"

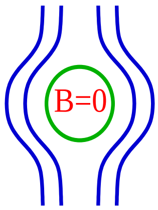
idealny przewodnik



zerowy opór: $\rho = 0$

nieskończone przewodnictwo: $\sigma = \infty$

idealny diamagnetyk



doskonały diamagnetyk: $\chi = -1$

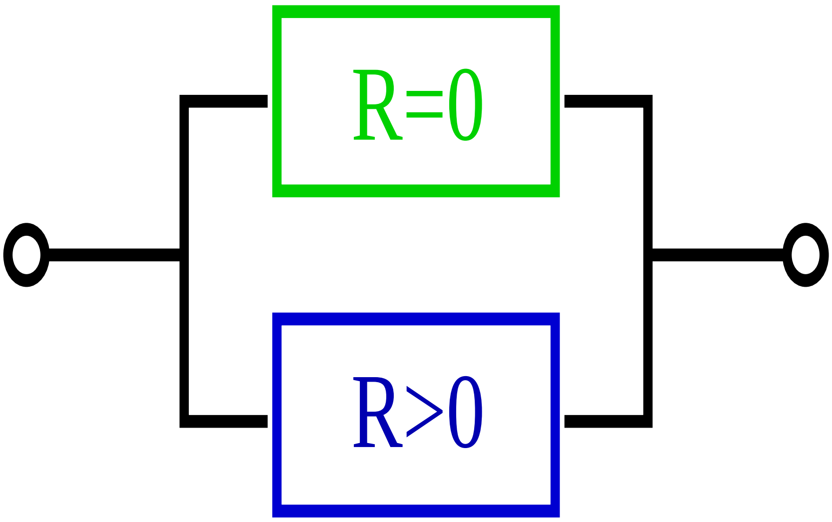
nadprzewodnik

Jeden z niewielu idealnych stanów materii we Wszechświecie

Początki teorii nadprzewodnictwa

1934 - Gorter i Casimer - “model dwucieczowy”

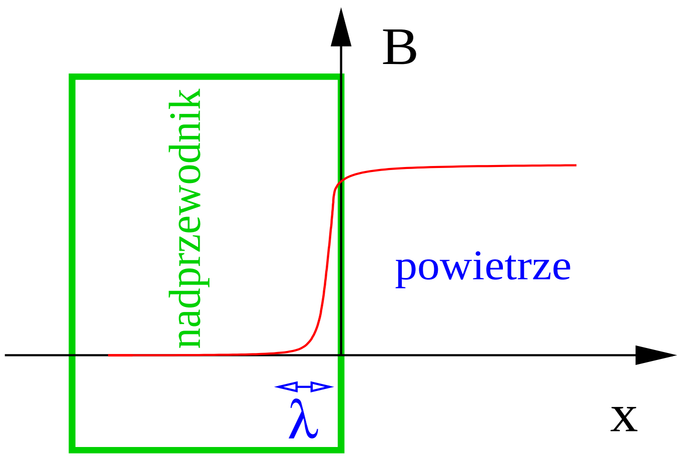
część elektronów jest w stanie normalnym, a część w stanie nadprzewodzącym



$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \infty$$

1934 - Fritz London i Heinz London - “elektrodynamika”

pole magnetyczne wnika przy powierzchni nadprzewodnika na głębokość λ - głębokość wnikania



$$\frac{d^2B(x)}{dx^2} = \frac{B(x)}{\lambda^2}$$

równanie Londonów

Fenomenologiczna teoria nadprzewodnictwa

1950 - V. Gizburg i L.D. Landau - “rówanie Schrödingera” dla nadprzewodnika gdy $T \lesssim T_c$

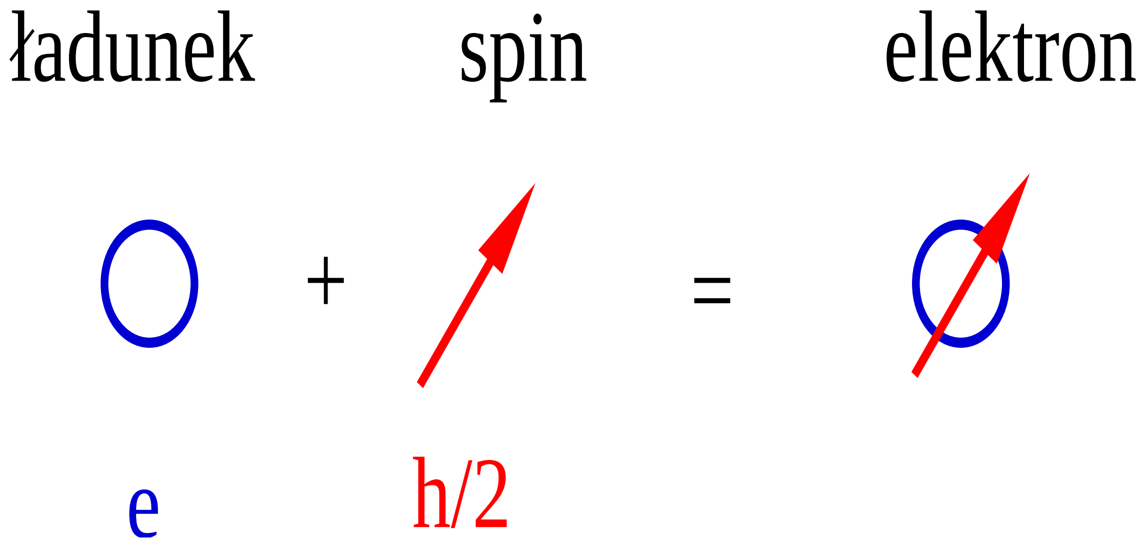
$$\alpha\Psi(\vec{r}) + \beta|\Psi(\vec{r})|^2 + \frac{1}{2m^*}\left(\frac{h}{2\pi i}\vec{\nabla} - \frac{e^*}{c}\vec{A}\right)^2\Psi(\vec{r}) = 0$$

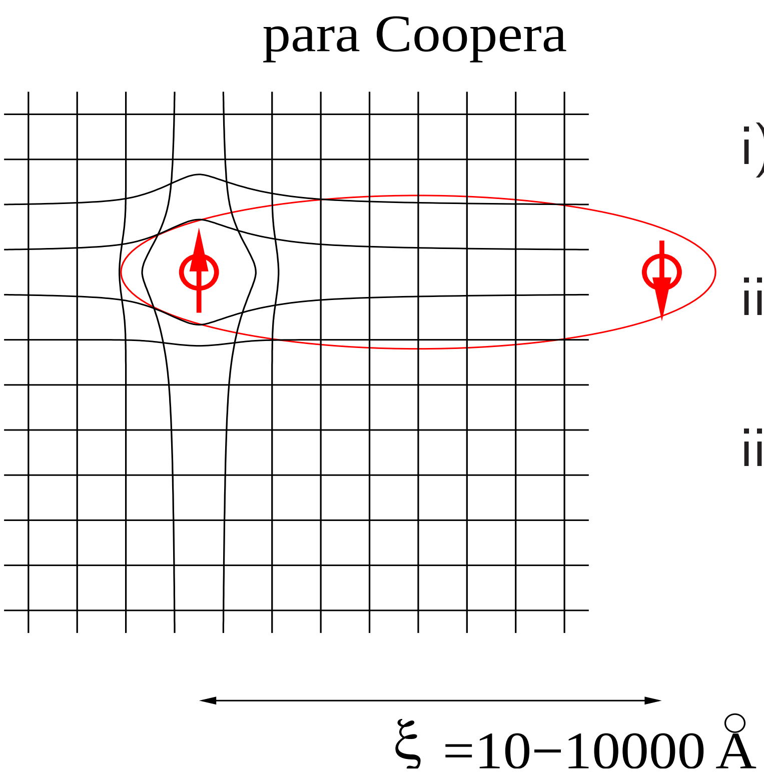
interpretacja:
$|\Psi(\vec{r})|^2$ - prawdopodobieństwo !
$e^* = 2e$ - ładunek dwa razy większy !
$m^* = 2m$ - masa dwa razy większa !

nadprzewodzące elektrony tworzą spójny (koherentny) kondensat kwantowy w skali makroskopowej

Teoria Coopera pojedynczej pary

1956 - L. Cooper





i) deformacja sieci jonów

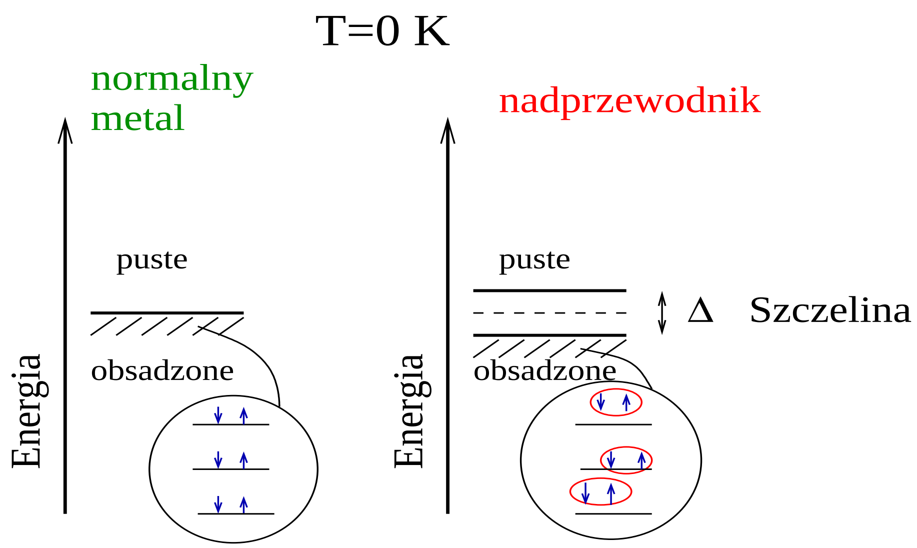
ii) przyciąganie

iii) stabilna para

Teoria BCS nadprzewodnictwa

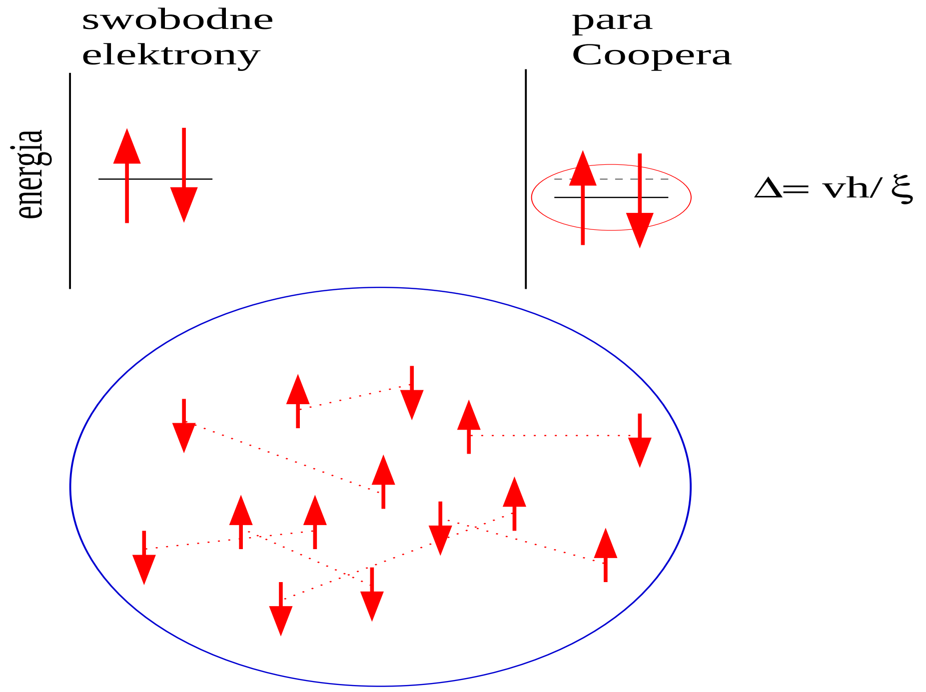
1957 - J. Bardeen, L. Cooper, R. Schrieffer

nadprzewodnictwo polega na niestabilności metalu
pary elektronów kondensują w T_c
powstaje nowy stan termodynamiczny materii w $T \leq T_c$

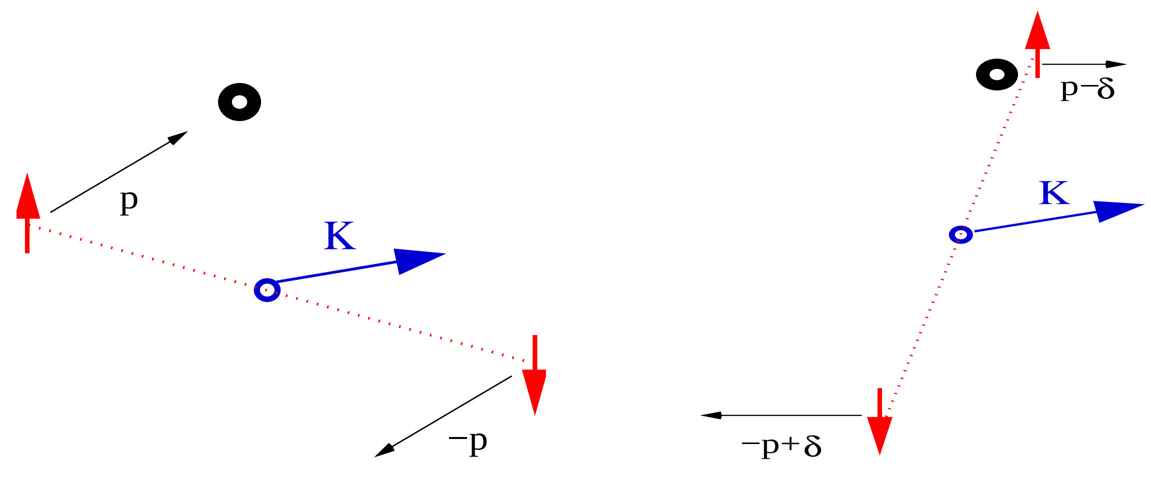


Nagroda Nobla -1972

Dlaczego doskonale przewodzi ?



para Coopera ma przeciwne spiny i przeciwne pędy



Co z tego mają płacący podatki ?

Zastosowania nadprzewodników:

MAGLEV, MLX01

nadprzewodzące elektromagnesy

14 kwietnia 1999 osiąga 617 km/h !

MRI - magnetic resonance imaging

nadprzewodzące elektromagnesy

MEGNETOENCEPHALOGRAPHY

SQUID - superconducting quantum interference device

pomiar 100 miliardów razy słabszego pola magnetycznego niż za pomocą igły w kompasie

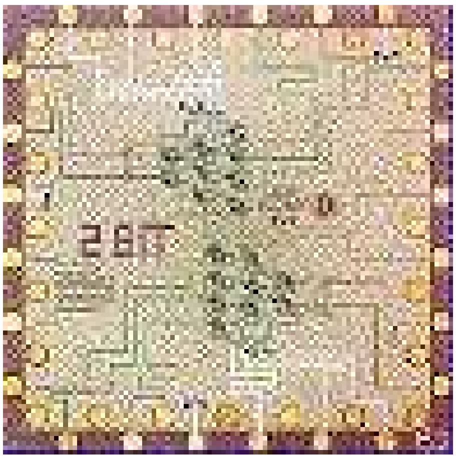
GENERATORY PRĄDU - wydajność 99%

NADPRZEWODZĄCE AKUMULATORY

- prąd w zamkniętych obwodach

NADPRZEWODZĄCE PRZEWODY ELEKTRYCZNE

PETAFLOP-owe KOMPUTERY



WYSKOWYDAJNE FILTRY - telefony komórkowe

SQUID - detektory min i łodzi podwodnych

NADPRZEWODZĄCE SILNIKI ELEKTRYCZNE

ANTENY NISKIEJ CZĘSTOŚCI - łodzie podwodne

“E-BOMBA”

- krótki impuls elektromagnetyczny dużej mocy

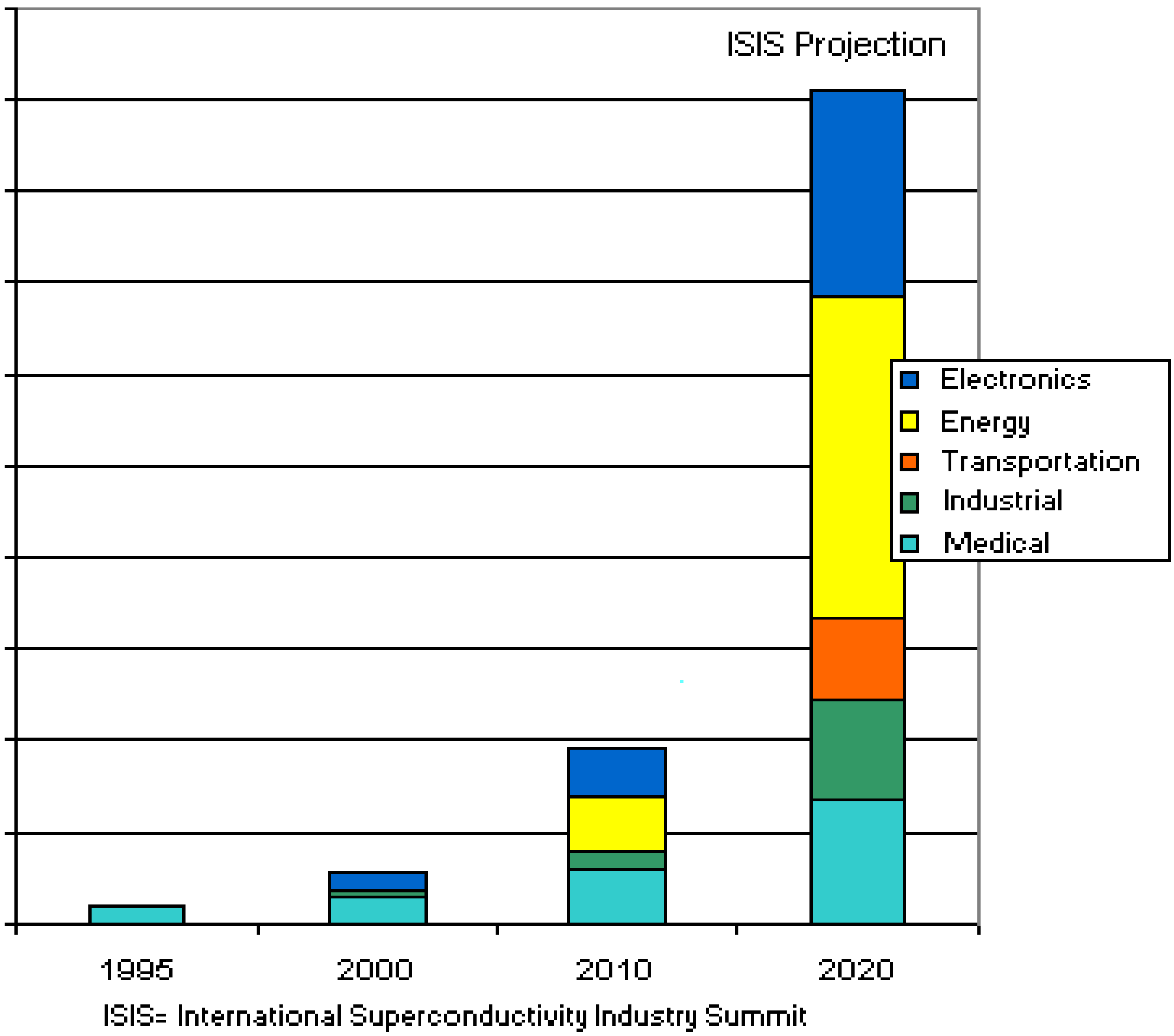
ŻYROSKOP - stabilizacja satelitów

DETEKTORY ŚWIATŁA I PROMIENI X

ROUTER CYFROWY - transmisja danych

Przewidywania ekonomistów

Światowy rynek urządzeń nadprzewodzących wzrośnie w 2010 roku do 5 mld. US$, a w 2020 do 38 mld. US$.



Im wyższe T_c tym lepiej !

Rewolucja nadprzewodząca 1986

do 1986:

- związki $A15$ - Nb_3Sn - $T_c = 18.5\ K$, V_3Si - $T_c = 16.9\ K$
- stechiometryczne warstwy - Nb_3Ge - $T_c = 23.1\ K$
- tlenki metali - $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ - $T_c = 13\ K$, $LiTiO_3$ - $T_c = 13\ K$
- sole Bechgaard'a - $(TMTSF)_2X$ ($X = PF_6, ClO_4$, etc.) - $T_c = 1\ K$
- ......

kwiecień 1986 - A. Müller, G. Bednorz z IBM w Zürichu, odkrywają nadprzewodnictwo w $La_{1-x}Ba_xCuO_4$ - $T_c = 30\ K$ dla $x = 0.25$

Z. Phys. B – Condensed Matter 64, 189–193 (1986)

Condensed Matter
Zeitschrift für Physik B

Possible High T_c Superconductivity in the Ba – La – Cu – O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller
IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986

Metallic, oxygen-deficient compounds in the Ba – La – Cu – O system, with the composition $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{5(3-y)}$ have been prepared in polycrystalline form. Samples with $x=1$ and 0.75, $y>0$, annealed below 900 °C under reducing conditions, consist of three phases, one of them a perovskite-like mixed-valent copper compound. Upon cooling, the samples show a linear decrease in resistivity, then an approximately logarithmic increase, interpreted as a beginning of localization. Finally an abrupt decrease by up to three orders of magnitude occurs, reminiscent of the onset of percolative superconductivity. The highest onset temperature is observed in the 30 K range. It is markedly reduced by high current densities. Thus, it results partially from the percolative nature, bute possibly also from $2D$ superconducting fluctuations of double perovskite layers of one of the phases present.

I. Introduction

"At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new materials" [1]. Transition-metal alloy compounds of $A\,15$ (Nb_3Sn) and $B\,1$ (NbN) structure have so far shown the highest superconducting transition temperatures. Among many $A\,15$ compounds, careful optimization of Nb – Ge thin films near the stoichiometric composition of Nb_3Ge by Gavalev et al. and Testardi et al. a decade ago allowed them to reach the highest $T_c=$ 23.3 K reported until now [2, 3]. The heavy Fermion systems with low Fermi energy, newly discovered, are not expected to reach very high T_c's [4].

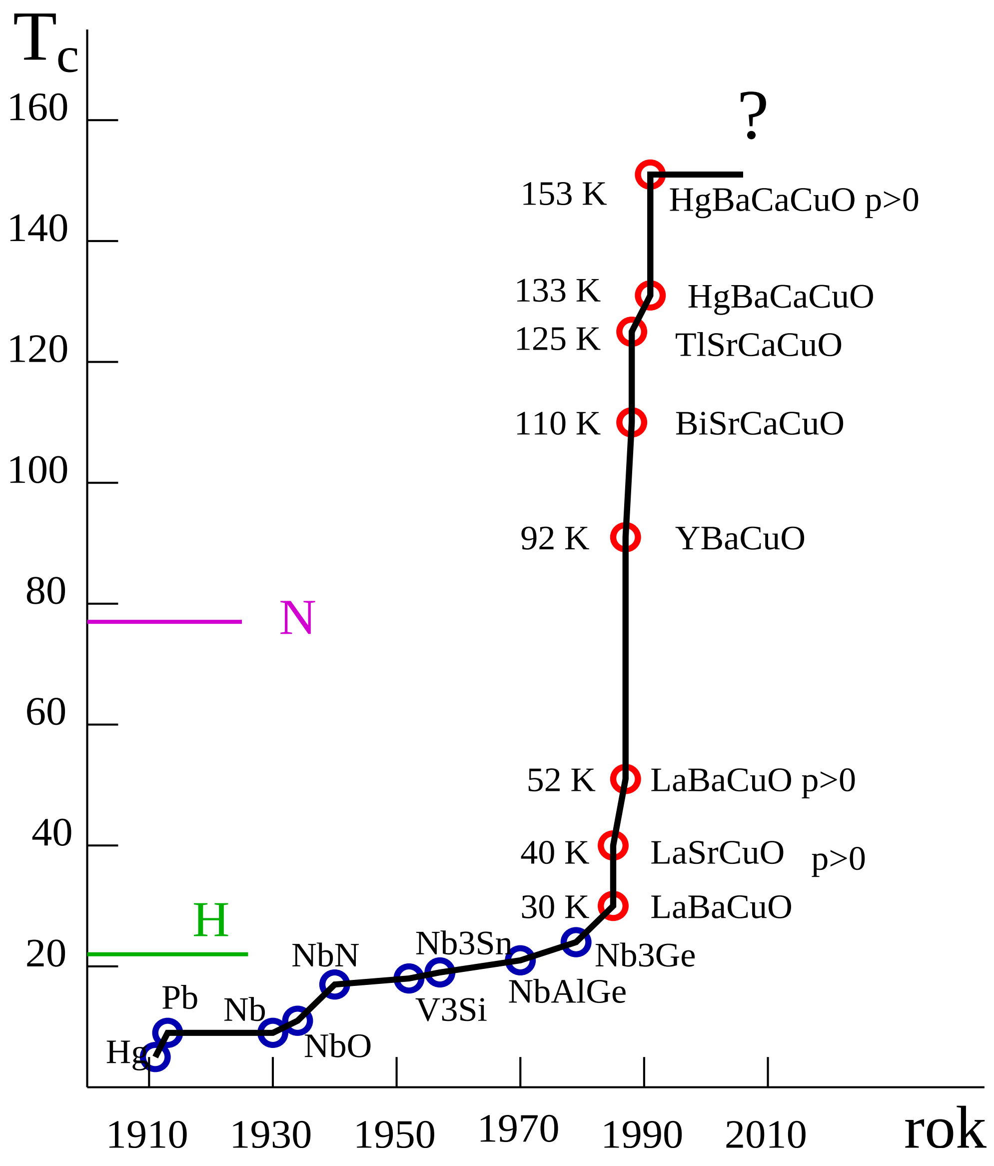
Only a small number of oxides is known to exhibit superconductivity. High-temperature superconductivity in the Li – Ti – O system with onsets as high as 13.7 K was reported by Johnston et al. [5]. Their x-ray analysis revealed the presence of three different crystallographic phases, one of them, with a spinel structure, showing the high T_c [5]. Other oxides like perovskites exhibit superconductivity despite their small carrier concentrations, n. In Nb-doped $SrTiO_3$, with $n=2\times10^{20}$ cm^{-3}, the plasma edge is below the highest optical phonon, which is therefore unshielded [6]. This large electron-phonon coupling allows a T_c of 0.7 K [7] with Cooper pairing. The occurrence of high electron-phonon coupling in another metallic oxide, also a perovskite, became evident with the discovery of superconductivity in the mixed-valent compound $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ by Sleight et al., also a decade ago [8]. The highest T_c in homogeneous oxygen-deficient mixed crystals is 13 K with a comparatively low concentration of carries $n=2$–4×10^{21} cm^{-3} [9]. Flat electronic bands and a strong breathing mode with a phonon feature near 100 cm^{-1}, whose intensity is proportional to T_c, exist [10]. This last example indicates that within the BCS mechanism, one may find still higher T_c's in perovskite-type or related metallic oxides, if the electron-phonon interactions and the carrier densities at the Fermi level can be enhanced further.

Strong electron-phonon interactions in oxides can occur owing to polaron formation as well as in mixed-valent systems. A superconductivity (metallic) to bipolaronic (insulator) transition phase diagram was proposed theoretically by Chakraverty [11]. A mechanism for polaron formation is the Jahn-Teller effect, as studied by Höck et al. [12]. Isolated Fe^{4+}, Ni^{3+} and Cu^{2+} in octahedral oxygen environment

Nagroda Nobla - 1988

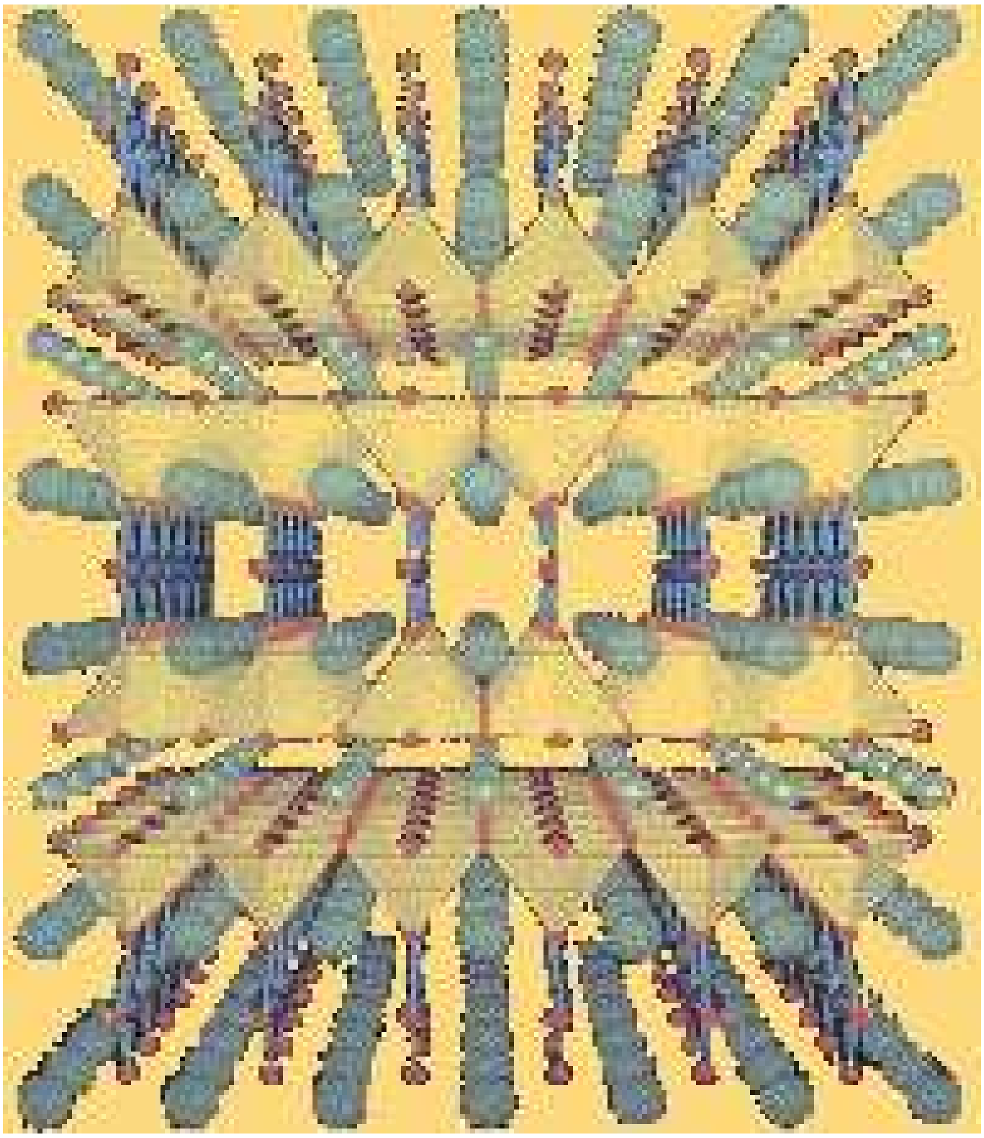
"their work inspired a great number of other scientists to work with related materials"

do 2002 roku ponad 100 000 publikacji na temat HTC !



Dlaczego nie $300\ K$?

Płaszczyzny miedziowo-tlenowe



wspólna cecha wszystkich nadprzewodników wysokotemperaturowych

$$T_c = T_c^0 + T_c' \cos\left(\frac{\pi}{p+1}\right)$$

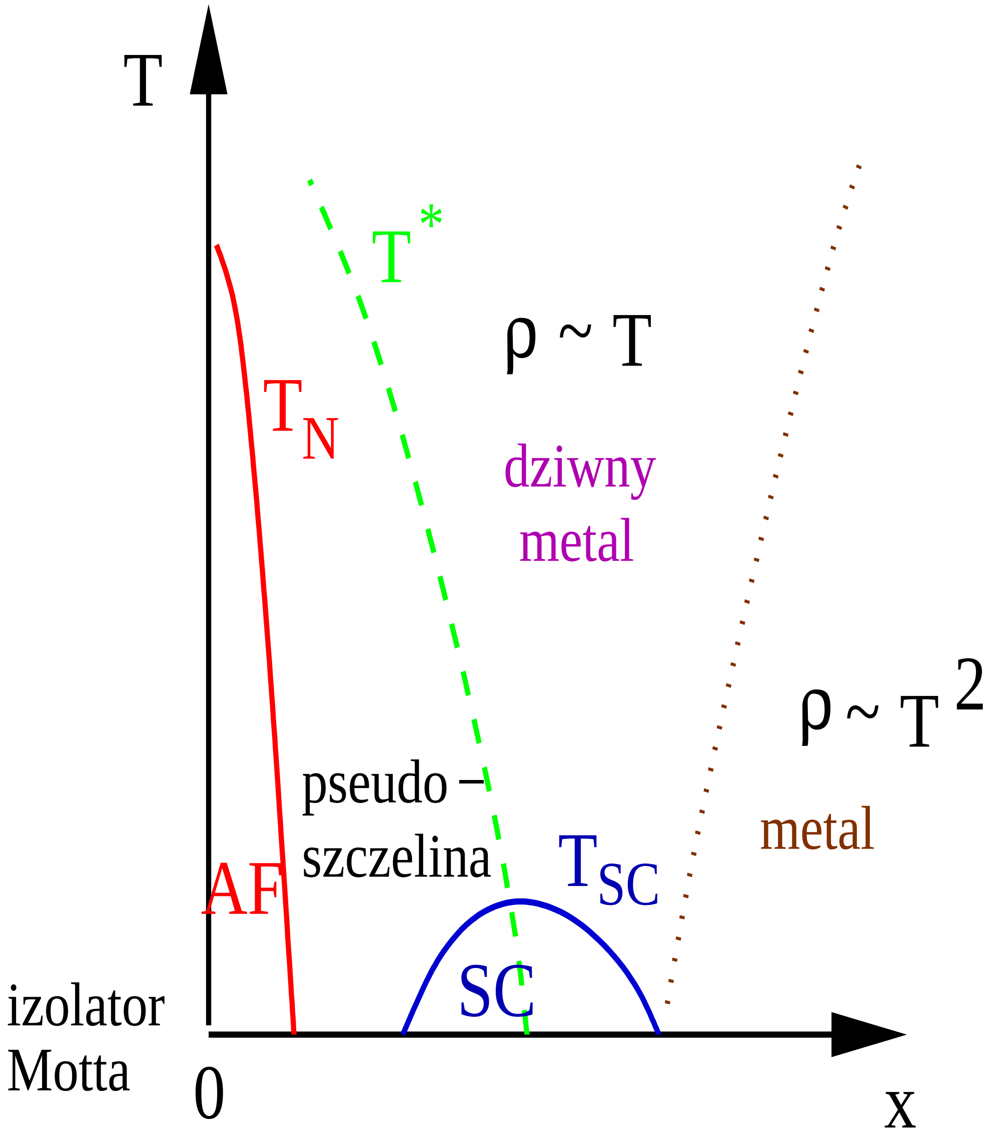
p - liczba sąsiednich płaszczyzn

Table 1: Temperatura krytyczna w zależności od liczby płaszczyzn

materiał	p	$T_c^{\exp}$	T_c^0	$T_c^{'}$	teoria: T_c
$Bi_2Sr_2CuO_6$	1	0-20	10	148	10
$Bi_2Sr_2CaCuO_8$	2	85	10	148	84
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	3	110	10	148	112
—	∞	–	10	148	158
$Tl_2Ba_2CuO_6$	1	0–80	41	126	41
$Tl_2Ba_2CaCuO_8$	2	108	41	126	103
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	3	125	41	126	128
—	∞	–	41	126	167
$Tl_2Ba_2CuO_5$	1	0–50	24	121	24
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_7$	2	80	24	121	84
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_9$	3	110	24	121	107
$Tl_2Ba_2Ca_3Cu_4O_{11}$	4	122	24	121	122
—	∞	–	24	121	145
$HgBa_2CuO_4$	1	94	94	59	94
$HgBa_2Ca_2cu_3O_8$	3	135	94	59	135
—	∞	–	94	59	153

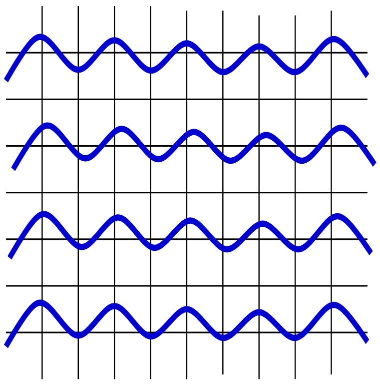
Uniwersalny diagram fazowy

$La_{1-x}Sr_xCuO_4$ - gdzie La^{3+}, Sr^{2+}
zmiana x odpowiada zmianie elektronów przypadających na atom miedzi

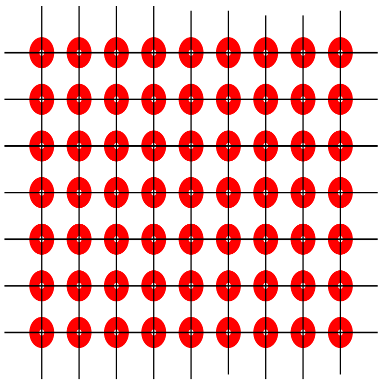


Metal a izolator Motta

Orbitale walencyjne elektronów miedzi typu d^9 mają mały promień, dlatego energia oddziaływania elektronów na tym samym atomie jest duża

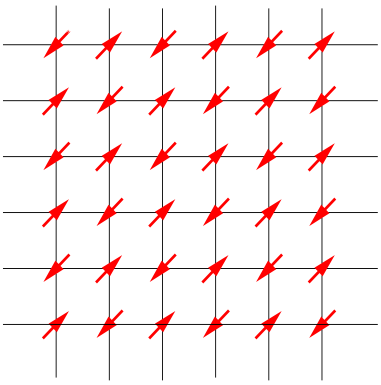


metal



izolator Motta

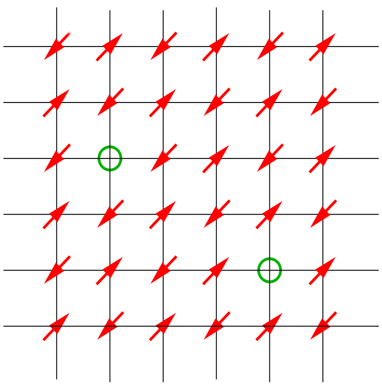
Antyferromagnetyczny izolator Motta



Energia oddziaływania $>$

energia kinetyczna !

Izolator Motta domieszkowany



Teoria nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego

Sir N. Mott: *"Jest tyle teorii nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego ilu jest teoretyków"*

Oczekiwania od teorii - opisać jakościowo (ilościowo) diagram fazowy nadprzewodników miedziowo - tlenowych, wyjaśnić mechanizm nadprzewodnictwa, dlaczego T_c jest tak wysoka/niska, jaką rolę odgrywa dwu-wymiarowość w fizycznym układzie

Czy elektrony w płaszczyznach miedziowo - tlenowych tworzą fundamentalnie nowy stan materii skondensowanej ?

TAK

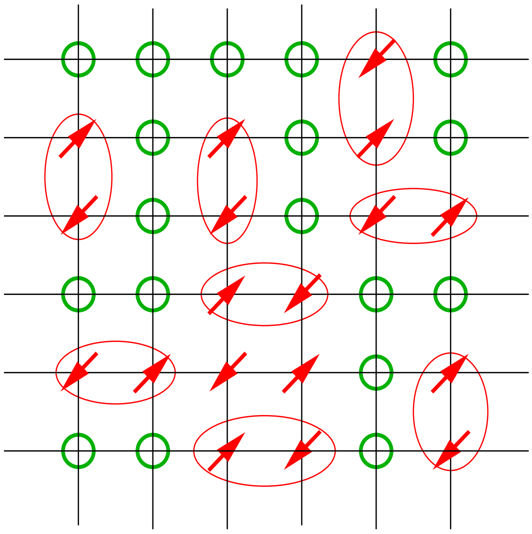
Czy ich nietypowe własności wynikają tylko ze złożonej strukury chemicznej układu ?

NIE

Kilka teorii

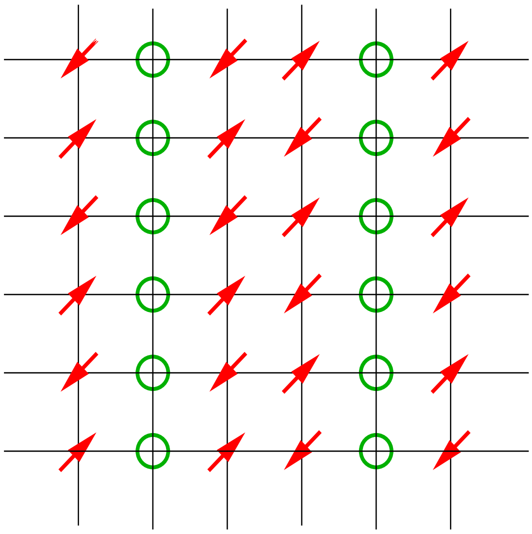
Teoria RVB

rezonujące wiązanie walencyjne

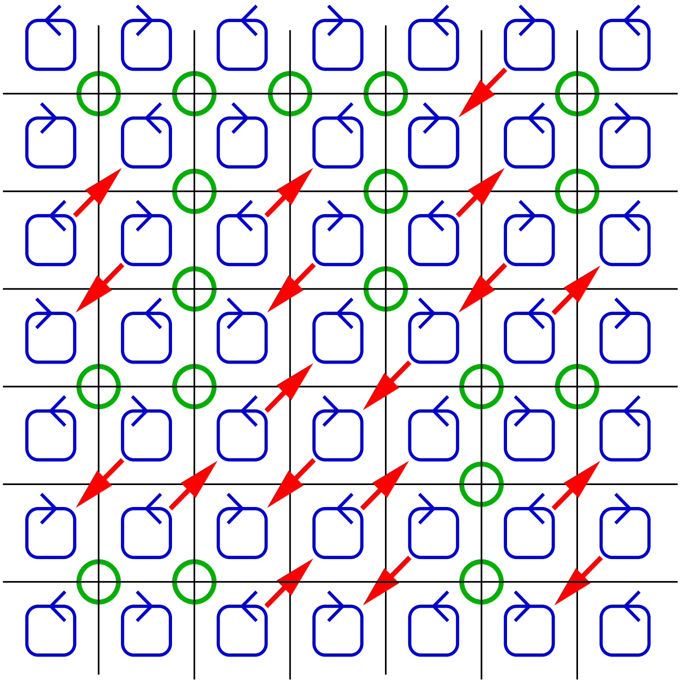


Teoria STRIPE'ÓW

stripe - pasek, tasiemka, wstążka



Teoria PRĄDÓW SPONTANICZNYCH



Teoria ....

Podsumowanie

- Nie rozumiemy nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego dlatego, że nie rozumiemy układów silnie oddziałujących cząstek.
- Poznaliśmy na razie tylko wierzchołek góry lodowej.
- Konieczne więcej doświadczeń, więcej teorii i fundamentalnych koncepcji !

Zapraszamy Państwa do wzięcia udziału w tej intelektualnej przygodzie

Nagroda Nobla - 20??