

*Warszawa, 13 września 2005 r.*

## **Nadprzewodniki – nowe fakty i teorie**

T. DOMAŃSKI

Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej w Lublinie

<http://kft.umcs.lublin.pl/doman/lectures>

*Schemat referatu:*

*Schemat referatu:*



**Wstęp**

*/ nadprzewodniki klasyczne /*

*Schemat referatu:*



## **Wstęp**

*/ nadprzewodniki klasyczne /*



## **Nadprzewodniki wysokotemperaturowe**

*/ przegląd faktów i koncepcji teoretycznych/*

*Schemat referatu:*



## **Wstęp**

*/ nadprzewodniki klasyczne /*



## **Nadprzewodniki wysokotemperaturowe**

*/ przegląd faktów i koncepcji teoretycznych/*



## **Nowe odkrycia**

*/ doniesienia nt. egzotycznych nadprzewodników /*

## *Schemat referatu:*



### **Wstęp**

*/ nadprzewodniki klasyczne /*



### **Nadprzewodniki wysokotemperaturowe**

*/ przegląd faktów i koncepcji teoretycznych/*



### **Nowe odkrycia**

*/ doniesienia nt. egzotycznych nadprzewodników /*



### **Ultrazimne gazy**

*/ nowe perspektywy nadprzewodnictwa /*

**Wstep**

# Istota nadprzewodnictwa

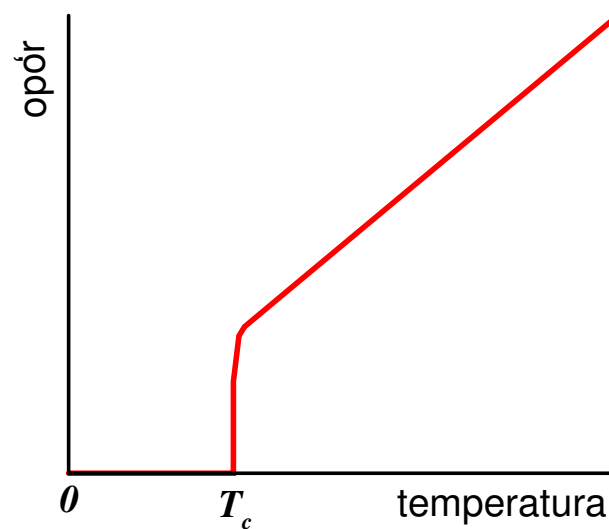


# Istota nadprzewodnictwa



**całkowity zanik oporu**

/stałoprądowego/

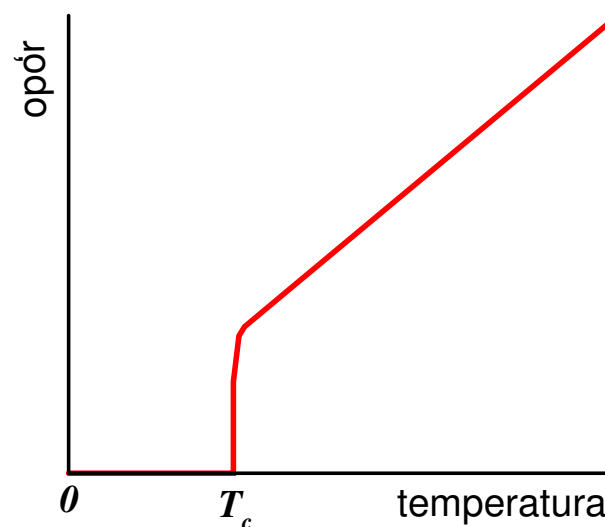


# Istota nadprzewodnictwa



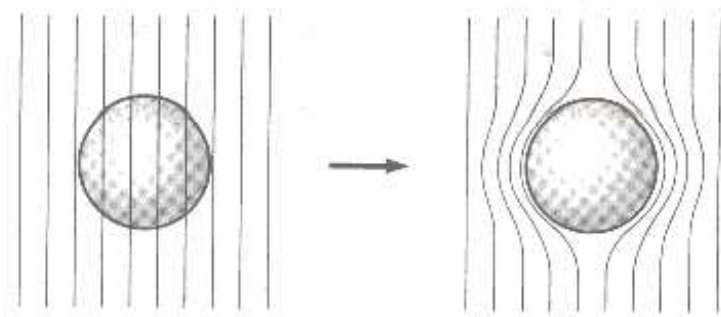
**całkowity zanik oporu**

/stałoprądowego/



**idealny diamagnetyzm**

/wypychanie pola magnetycznego/



$$T > T_c$$

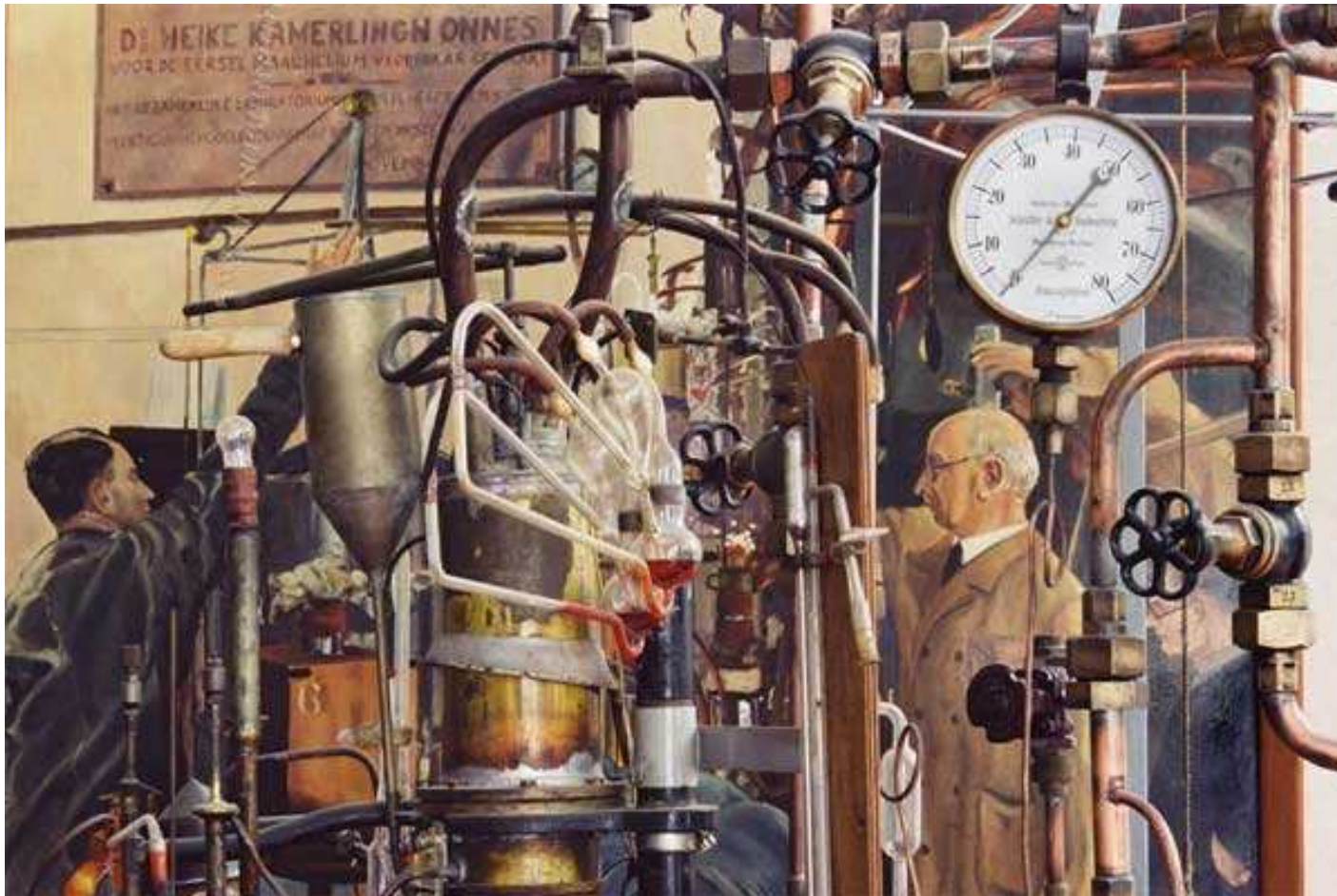
$$T < T_c$$

# Pierwsze odkrycie

*Najwcześniej odkrytym (przypadkowo) nadprzewodnikiem była rtęć z temperaturą krytyczną  $T_c = 4,2 \text{ K}$ .*

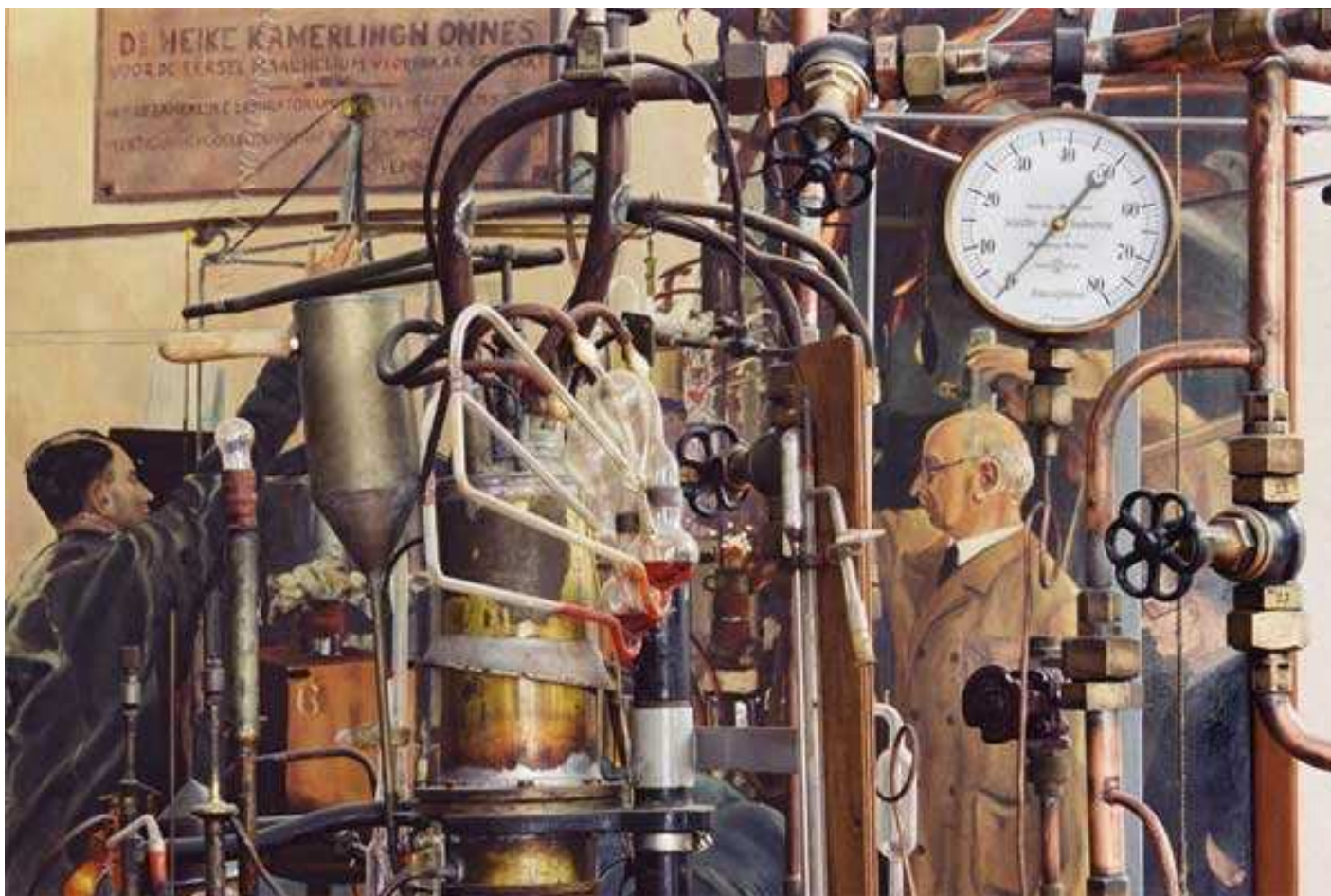
# Pierwsze odkrycie

*Najwcześniej odkrytym (przypadkowo) nadprzewodnikiem była rtęć z temperaturą krytyczną  $T_c = 4,2\text{ K}$ .*



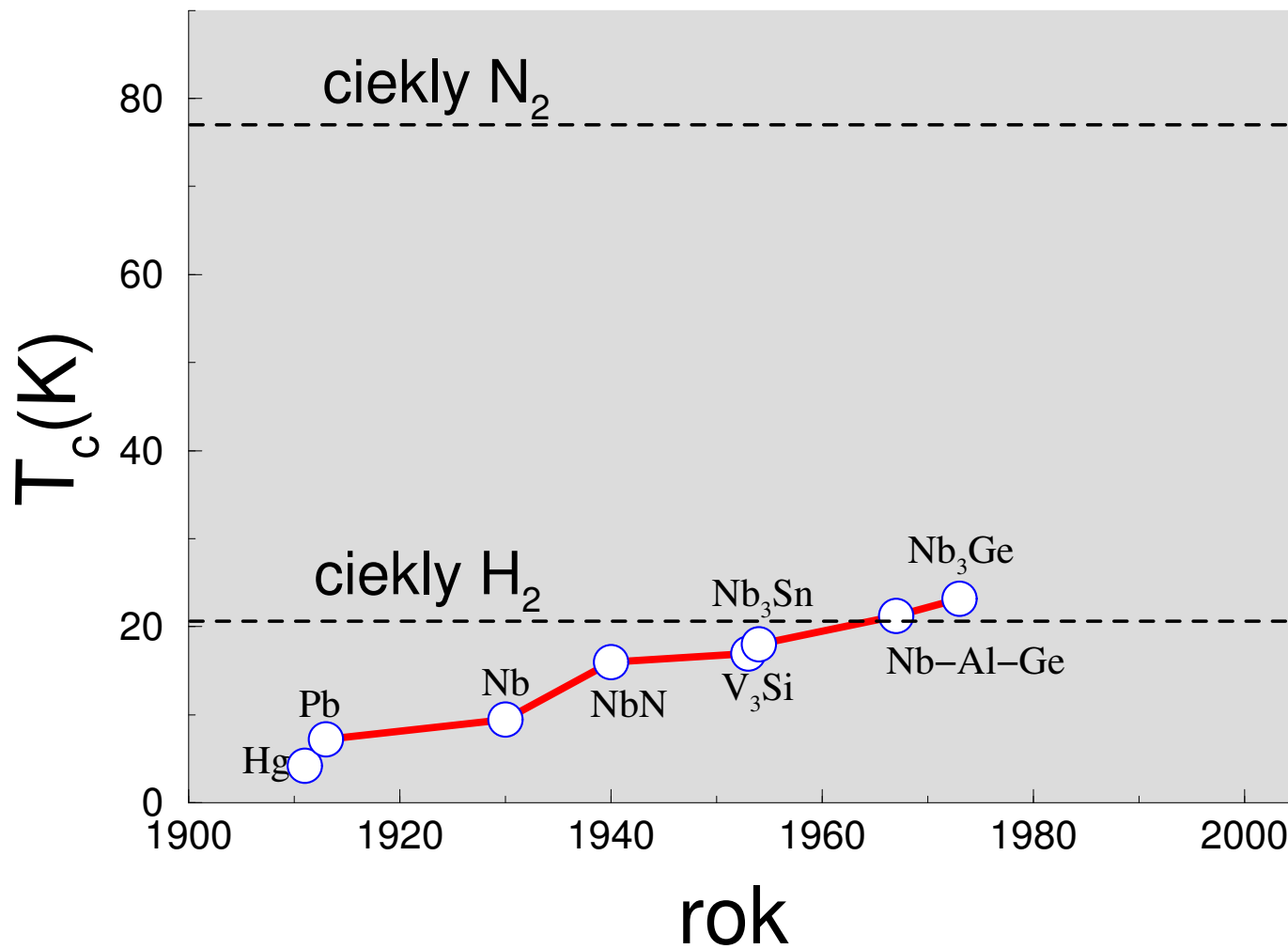
# Pierwsze odkrycie

*Najwcześniej odkrytym (przypadkowo) nadprzewodnikiem była rtęć z temperaturą krytyczną  $T_c = 4,2\text{ K}$ .*



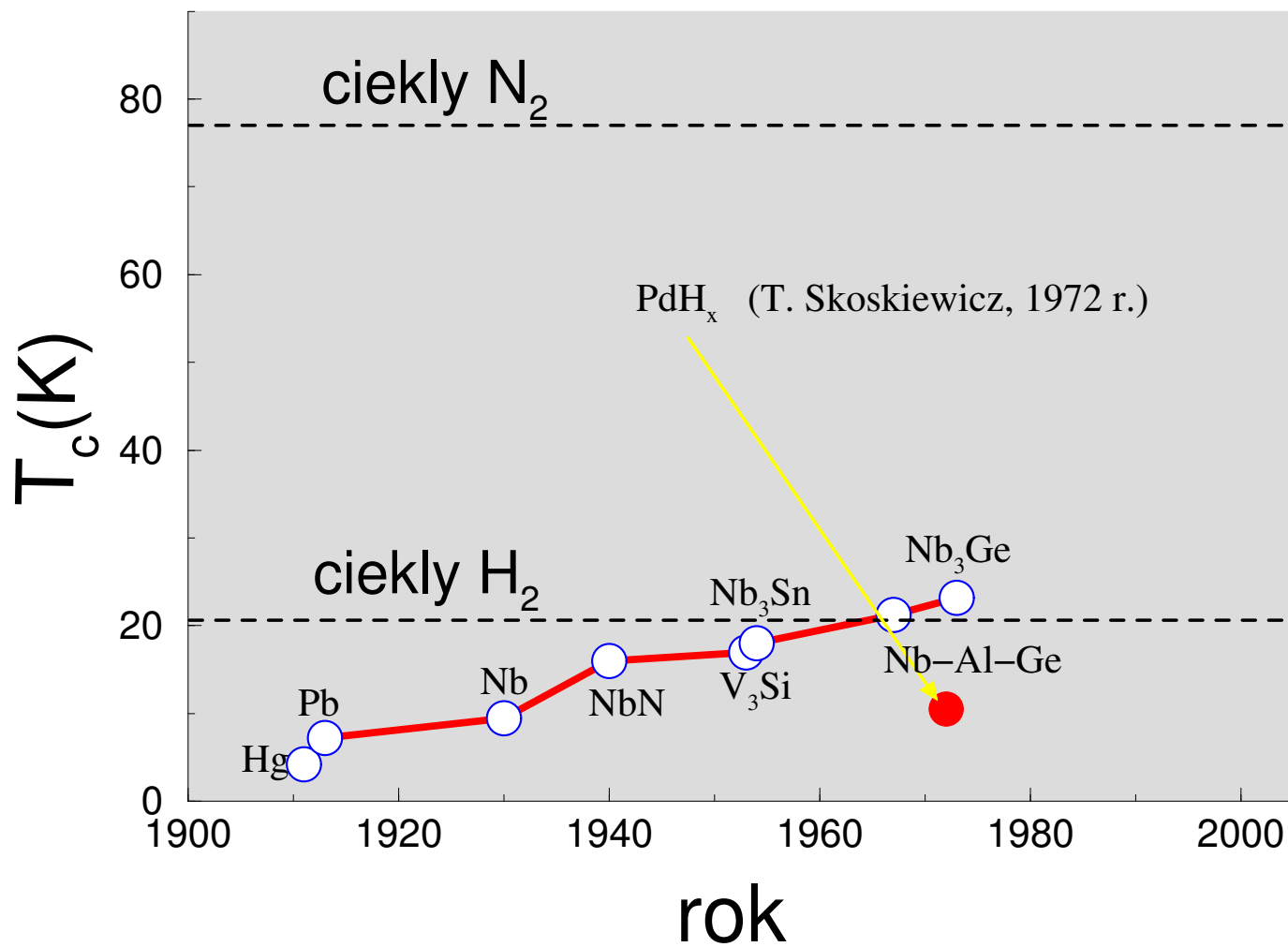
*1911 r., Lejda (Holandia).*

Nadprzewodniki odkrywano później w różnych pierwiastkach oraz stopach. Oto przykłady:





Nadprzewodniki odkrywano później w różnych pierwiastkach oraz stopach. Oto przykłady:



**Nadprzewodniki**

**wysokotemperaturowe**



# Nowa epoka odkryć



A. Müller, G. Bednorz

*/ IBM w Rüschlikon, Szwajcaria /*

w 1986 r. odkryli, że materiał ceramiczny  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ :

# Nowa epoka odkryć



A. Müller, G. Bednorz

*/ IBM w Rüschlikon, Szwajcaria /*

w 1986 r. odkryli, że materiał ceramiczny  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ :

⇒ który bez domieszkowania ( $x=0$ ) jest izolatorem

# Nowa epoka odkryć



A. Müller, G. Bednorz

*/ IBM w Rüschlikon, Szwajcaria /*

w 1986 r. odkryli, że materiał ceramiczny  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ :

który bez domieszkowania ( $x=0$ ) jest izolatorem

⇒ w zakresie  $0,05 < x < 0,25$  staje się nadprzewodzący

# Nowa epoka odkryć



A. Müller, G. Bednorz

*/ IBM w Rüschlikon, Szwajcaria /*

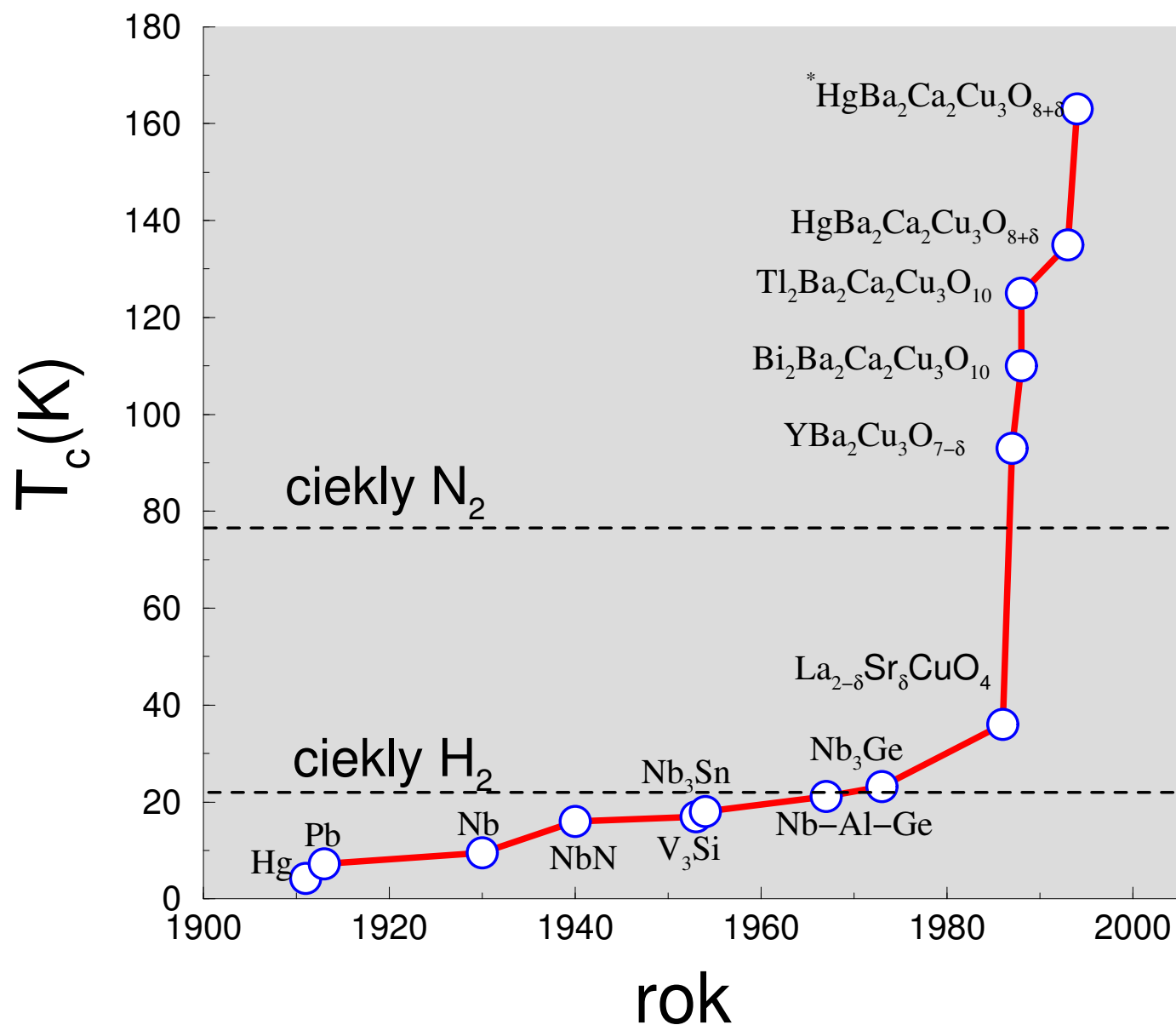
w 1986 r. odkryli, że materiał ceramiczny  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ :

który bez domieszkowania ( $x=0$ ) jest izolatorem

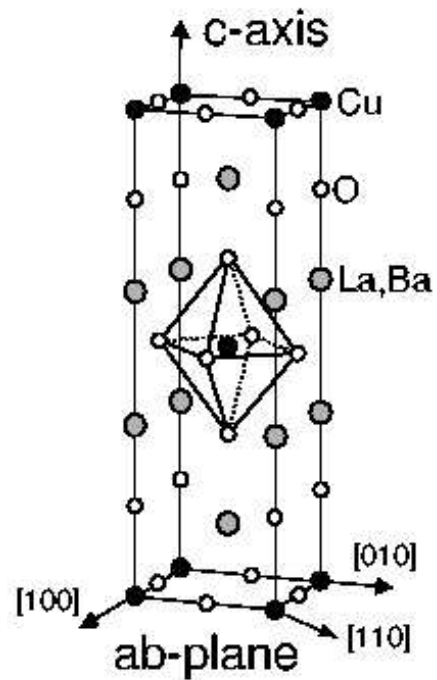
w zakresie  $0,05 < x < 0,25$  staje się nadprzewodzący

⇒ i osiąga maksymalną temperaturę krytyczną  $T_c=36$  K.

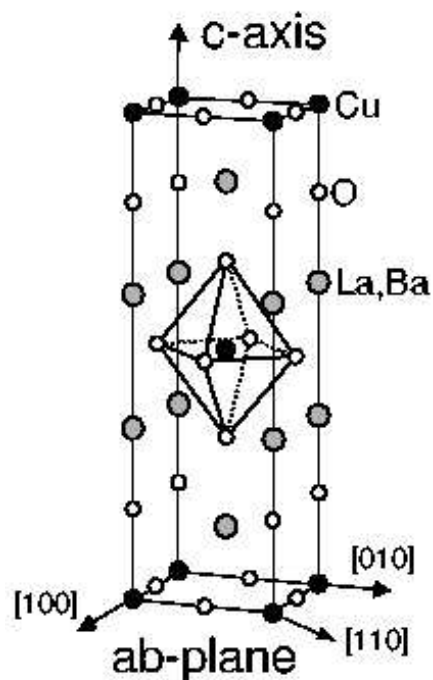
Odkrycie Müllera i Bednorza zapoczątkowało burzliwy okres poszukiwania **nadprzewodników wysokotemperaturowych**.



1. W HTS wyjściowe związki (ang. *parent compounds*) są quasi-dwuwymiarowymi izolatorami typu AF



1. W HTS wyjściowe związki (ang. *parent compounds*) są quasi-dwuwymiarowymi izolatorami typu AF



*Pytanie 1:*

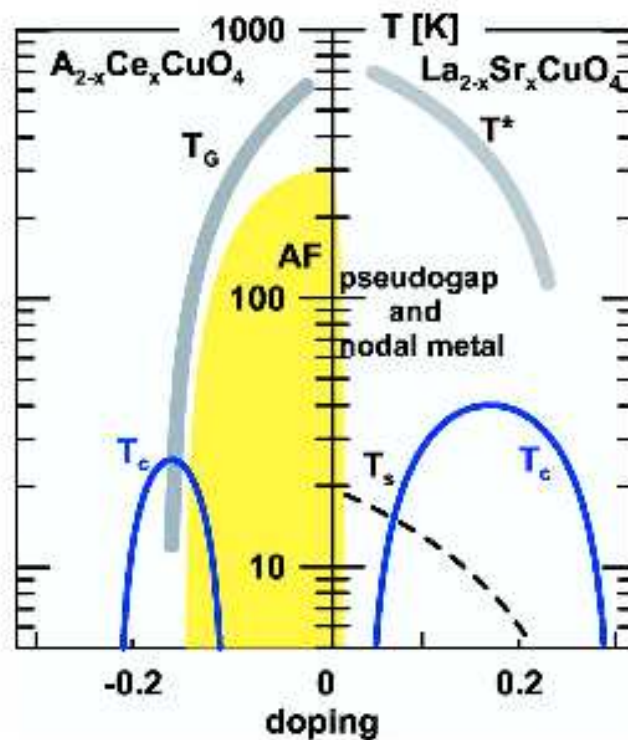
Jaki wpływ ma quasi-dwuwymiarowość i  
jaką rolę odgrywa antyferromagnetyzm ?

2. Stan nadprzewodzący powstaje w wyniku np. podstawień chemicznych poprzez domieszkowanie izolatora:



2. Stan nadprzewodzący powstaje w wyniku np. podstawień chemicznych poprzez domieszkowanie izolatora:

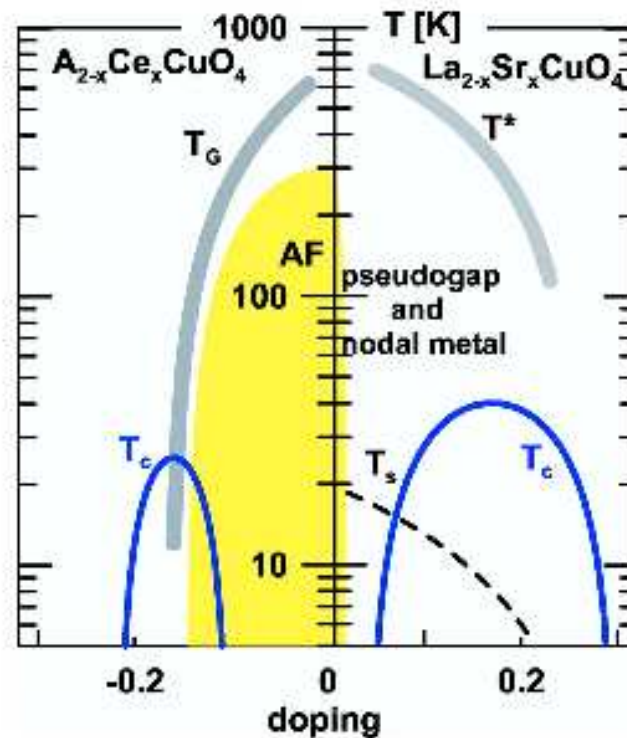
*elektronami* lub *dziurami*



/ D.N. Basov and T. Timusk, Rev. Mod. Phys. **77**, 721 (2005) /

2. Stan nadprzewodzący powstaje w wyniku np. podstawień chemicznych poprzez domieszkowanie izolatora:

*elektronami* lub *dziurami*



/ D.N. Basov and T. Timusk, Rev. Mod. Phys. **77**, 721 (2005) /

Pytanie 2:

**Dlaczego diagram jest asymetryczny ?**

### 3. Domieszkowanie fazy izolatorowej:

### 3. Domieszkowanie fazy izolatorowej:

a) przebiega w sposób wysoce niejednorodny

*/ E. Dagotto, Science **309**, 257 (2005). /*

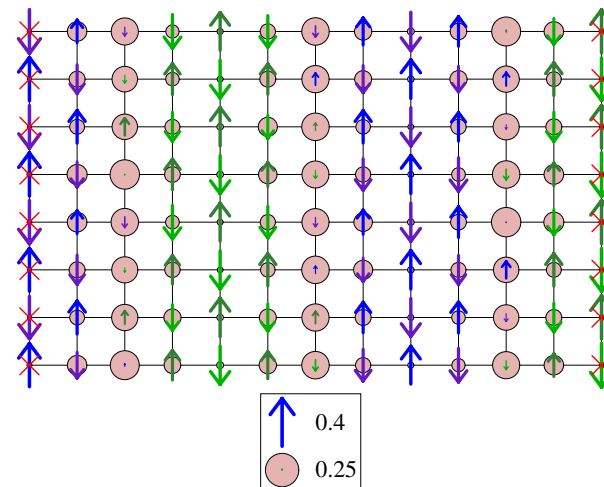
### 3. Domieszkowanie fazy izolatorowej:

a) przebiega w sposób wysoce niejednorodny

/ E. Dagotto, *Science* **309**, 257 (2005). /

b) ładunek i spin gromadzą się oddzielnie wzdłuż jednowymiarowych struktur wstęgowych (ang. *stripes*)

/ J. Tranquada et al,  
*Nature* **429**, 534 (2004). /



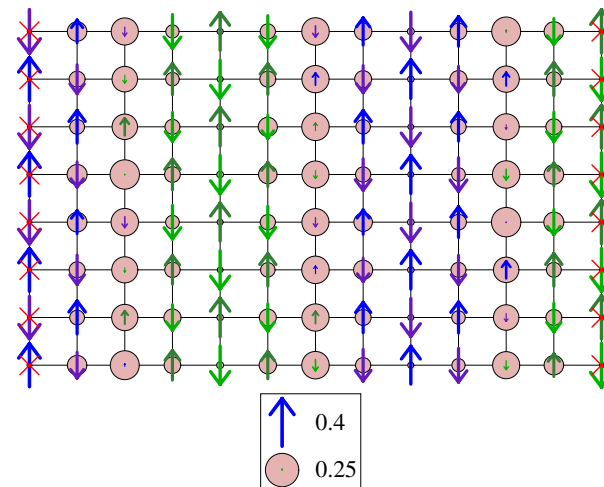
### 3. Domieszkowanie fazy izolatorowej:

a) przebiega w sposób wysoce niejednorodny

/ E. Dagotto, *Science* **309**, 257 (2005). /

b) ładunek i spin gromadzą się oddzielnie wzdłuż jednowymiarowych struktur wstęgowych (ang. *stripes*)

/ J. Tranquada et al,  
*Nature* **429**, 534 (2004). /



c) realne struktury wstęgowe są dynamiczne, tzn. fluktuują w krótkiej skali czasu.

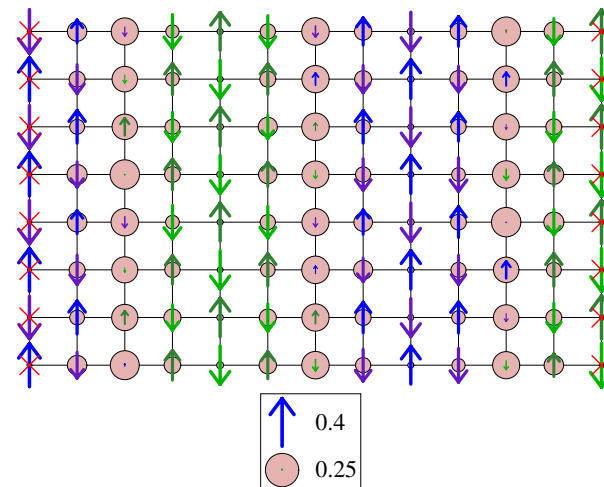
### 3. Domieszkowanie fazy izolatorowej:

a) przebiega w sposób wysoce niejednorodny

/ E. Dagotto, *Science* **309**, 257 (2005). /

b) ładunek i spin gromadzą się oddzielnie wzdłuż jednowymiarowych struktur wstęgowych (ang. *stripes*)

/ J. Tranquada et al,  
*Nature* **429**, 534 (2004). /



c) realne struktury wstęgowe są dynamiczne, tzn. fluktuują w krótkiej skali czasu.

*Pytanie 3:*

**Czy struktury wstęgowe rzeczywiście istnieją i jaki jest ich związek z nadprzewodnictwem ?**

#### 4. Struktura elektronowa



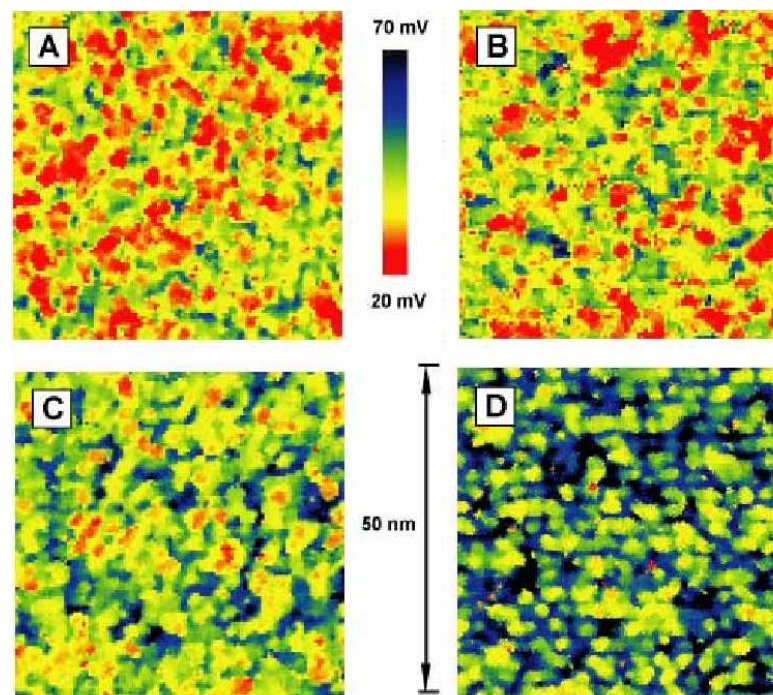
#### 4. Struktura elektronowa

W oparciu o pomiary nowej spektroskopii STM wykazano

**niejednorodność**

przerwy energetycznej w lokalnej gęstości stanów.

/ K. McElroy et al, *Phys. Rev. Lett.*  
**94**, 197005 (2005) /



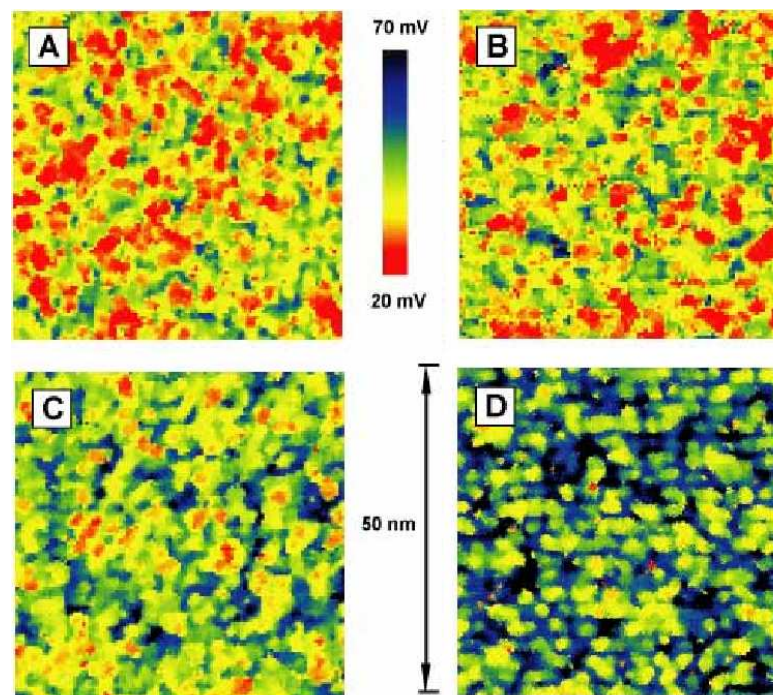
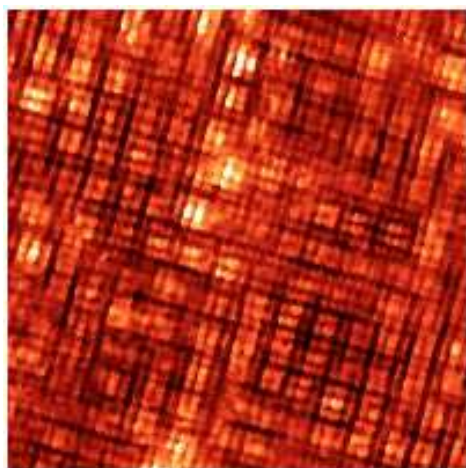
#### 4. Struktura elektronowa

W oparciu o pomiary nowej spektroskopii STM wykazano

**niejednorodność**

przerwy energetycznej w lokalnej gęstości stanów.

/ K. McElroy et al, *Phys. Rev. Lett.*  
**94**, 197005 (2005) /



Wraz z niejednorodnościami istnieją również fale gęstości ładunku o symetrii typu szachownicy (ang. *checkerboard CDW*).

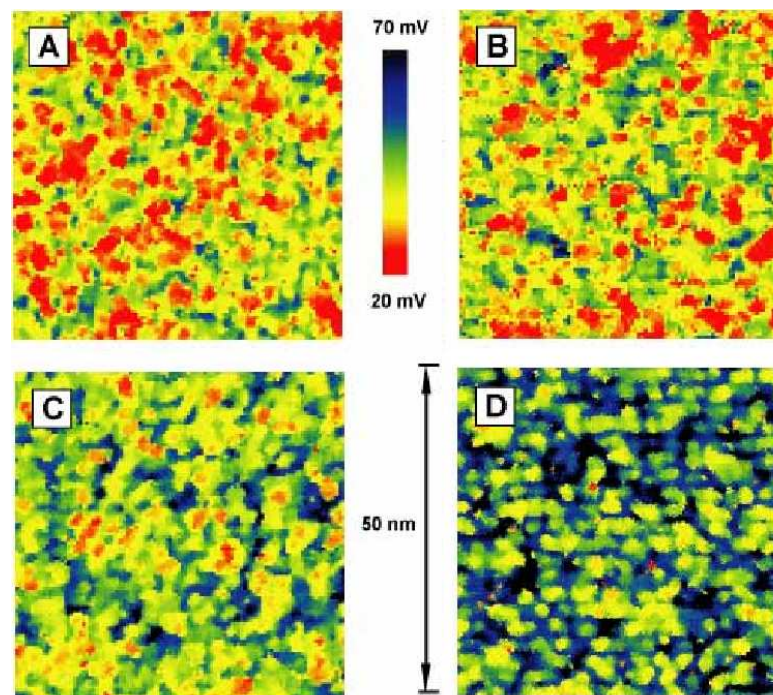
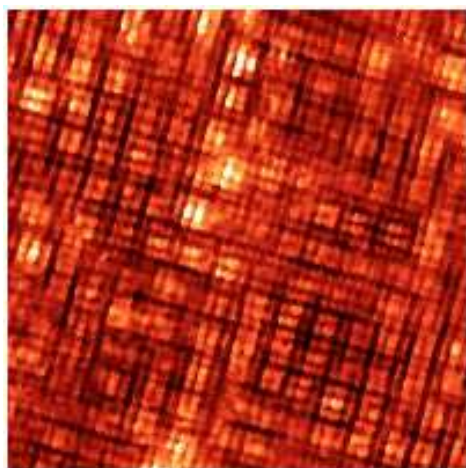
#### 4. Struktura elektronowa

W oparciu o pomiary nowej spektroskopii STM wykazano

**niejednorodność**

przerwy energetycznej w lokalnej gęstości stanów.

/ K. McElroy et al, *Phys. Rev. Lett.*  
**94**, 197005 (2005) /



Wraz z niejednorodnościami istnieją również fale gęstości ładunku o symetrii typu szachownicy (ang. *checkerboard CDW*).

*Pytanie 4:*

**Jaka relacja zachodzi między CDW i nadprzewodnictwem ?**

## 5. Pseudoszczelina

## 5. Pseudoszczelina

W doświadczalnych pomiarach:



## 5. Pseudoszczelina

W doświadczalnych pomiarach:

a) charakterystyk magnetycznych

(czas relaksacji NMR, przesunięcie

Knightsa, rozpraszanie neutronów, ...)

## 5. Pseudoszczelina

W doświadczalnych pomiarach:

a) charakterystyk magnetycznych

(czas relaksacji NMR, przesunięcie  
Knighta, rozpraszanie neutronów, ...)

b) charakterystyk transportowych

(przewodnictwo stało-  
i zmiennie-prądowe, ...)

## 5. Pseudoszczelina

W doświadczalnych pomiarach:

a) charakterystyk magnetycznych

(czas relaksacji NMR, przesunięcie  
Knighta, rozpraszanie neutronów, ...)

b) charakterystyk transportowych

(przewodnictwo stało-  
i zmiennie-prądowe, ...)

c) wielkości jednocząstkowych

(ciepło właściwe, ARPES, STM, ...)



## 5. Pseudoszczelina

W doświadczalnych pomiarach:

a) charakterystyk magnetycznych

(czas relaksacji NMR, przesunięcie Knighta, rozpraszanie neutronów, ...)

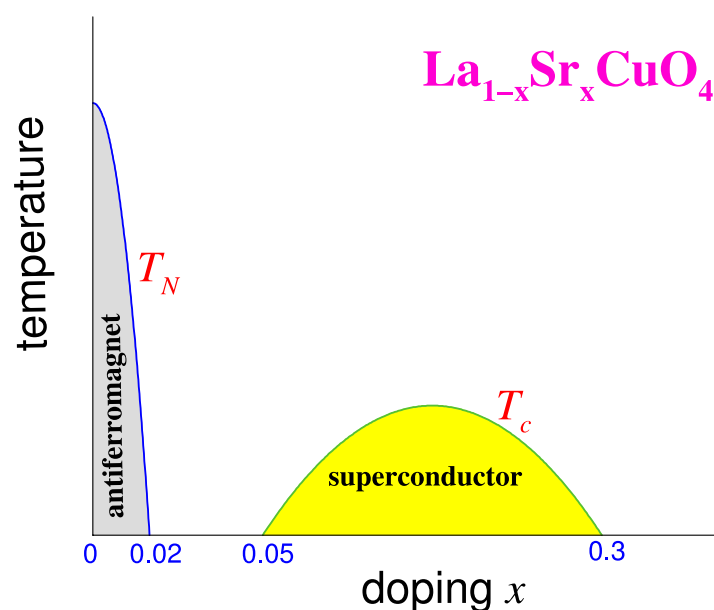
b) charakterystyk transportowych

(przewodnictwo stał-  
i zmiennie-prądowe, ...)

c) wielkości jednocząstkowych

(ciepło właściwe, ARPES, STM, ...)

jednoznacznie stwierdzono ...



## 5. Pseudoszczelina

W doświadczalnych pomiarach:

a) charakterystyk magnetycznych

(czas relaksacji NMR, przesunięcie Knighta, rozpraszanie neutronów, ...)

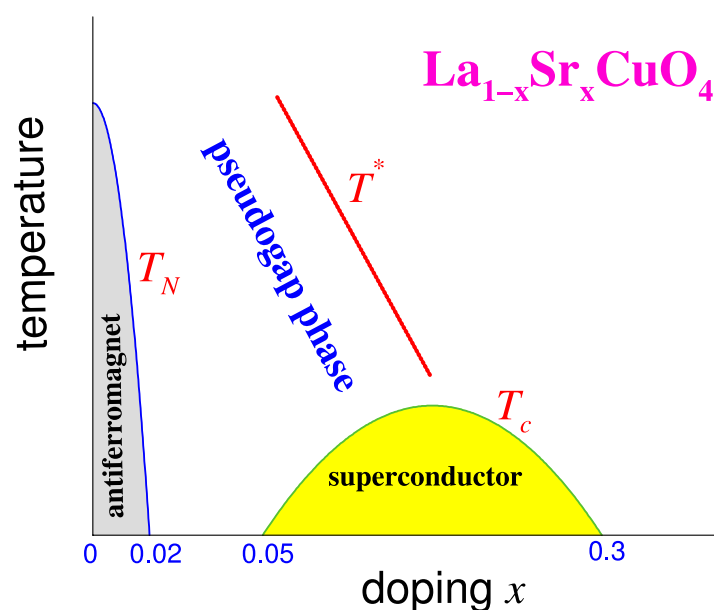
b) charakterystyk transportowych

(przewodnictwo stał-  
i zmiennie-prądowe, ...)

c) wielkości jednocząstkowych

(ciepło właściwe, ARPES, STM, ...)

jednoznacznie stwierdzono



szczelinę energetyczną powyżej temperatury  $T_c$

## 5. Pseudoszczelina

W doświadczalnych pomiarach:

a) charakterystyk magnetycznych

(czas relaksacji NMR, przesunięcie Knighta, rozpraszanie neutronów, ...)

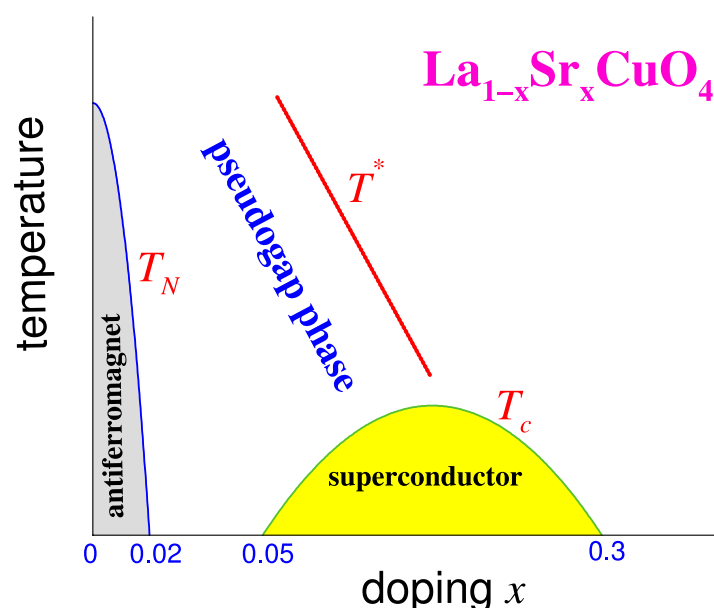
b) charakterystyk transportowych

(przewodnictwo stał-  
i zmienna-prądowe, ...)

c) wielkości jednocząstkowych

(ciepło właściwe, ARPES, STM, ...)

jednoznacznie stwierdzono



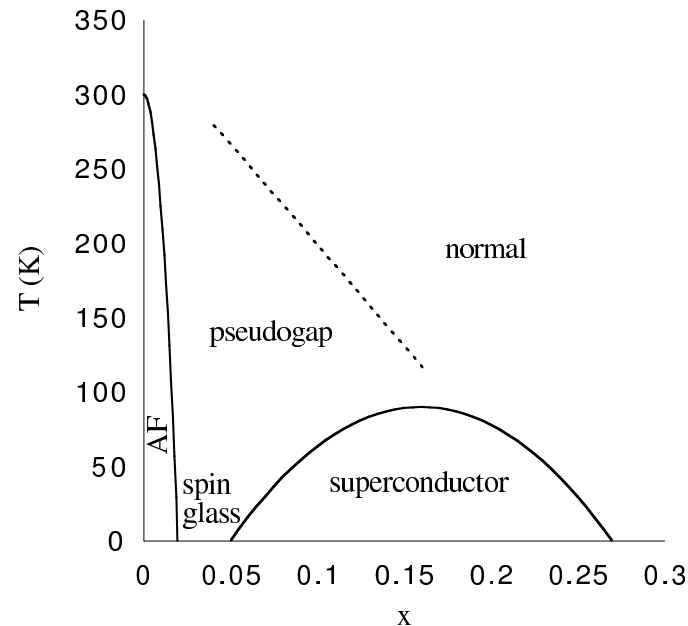
szczelinę energetyczną powyżej temperatury  $T_c$

*Pytanie 5:*

Jakie jest źródło pochodzenia pseudoszczeliny ?

Koncepcje teoretyczne:

**efekt prekursorowy**



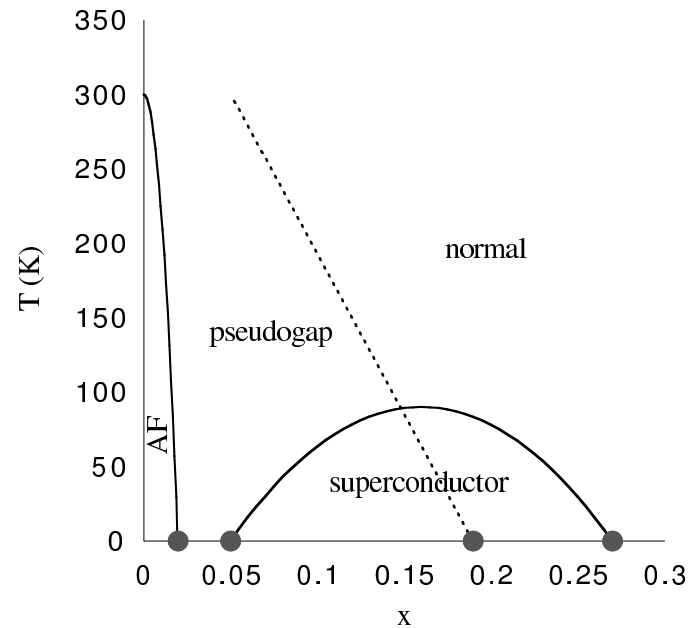
**Pseudoszczelina jest prekursorem parametru porządku.**  
**Dopiero po przejściu do stanu nadprzewodzącego**  
**ustala się porządek daleko-zasięgowy.**

*/ preegzystujące pary, fluktuacje parametru porządku,  
porządek krótko-zasięgowy, ... /*

Argumenty: *dynamiczny efekt Meissnera, efekt Nernsta, ...*

Koncepcje teoretyczne:

**efekt współzawodnictwa**



**Nadprzewodnictwo współzawodniczy z innymi rodzajami uporządkowania (AF, CDW, ...). Pseudoszczelina nie jest związana ze stanem nadprzewodzącym.**

*/ kwantowe punkty krytyczne, współzawodnictwo parametrów porządku, ukryte uporządkowanie (ang. hidden order), ... /*

Argumenty: *wpływ domieszek magnetycznych, CDW, ...*

Badania nadprzewodników wysokotemperaturowych w Polsce:

*doświadczalne*

IF PAN (Warszawa): H. Szymczak, M.Z. Cieplak, ...

INTiBS PAN (Wrocław): J. Klamut, ...

UJ oraz AGH (Kraków): A. Szytuła, A. Kołodziejczyk, ...

IFM PAN oraz UAM (Poznań): J. Stankowski, ...

Pol. Gdańska, Uniw. Śląski, Pol. Poznańska, ...

## Badania nadprzewodników wysokotemperaturowych w Polsce:

### *doświadczalne*

IF PAN (Warszawa): H. Szymczak, M.Z. Cieplak, ...

INTiBS PAN (Wrocław): J. Klamut, ...

UJ oraz AGH (Kraków): A. Szytuła, A. Kołodziejczyk, ...

IFM PAN oraz UAM (Poznań): J. Stankowski, ...

Pol. Gdańska, Uniw. Śląski, Pol. Poznańska, ...

### *teoretyczne*

UAM (Poznań): R. Micnas, S. Robaszkiewicz, ...

UJ (Kraków): J. Spałek, A.M. Oleś, ...

UMCS (Lublin): K.I. Wysokiński, ...

INTiBS PAN (Wrocław): T. Kopeć, P. Wróbel, ...

UŚ (Katowice): M. Mierzejewski, M. Maśka, ...

Pol. Wrocławska: J. Czerwonko, G. Harań, ...

...

**Inne odkrycia**



*Wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ograniczone niską wartością prądów krytycznych  $j_c$ .*

*Wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ograniczone niską wartością prądów krytycznych  $j_c$ .*

Dużo bardziej obiecujący jest pod tym względem:

*Wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ograniczone niską wartością prądów krytycznych  $j_c$ .*

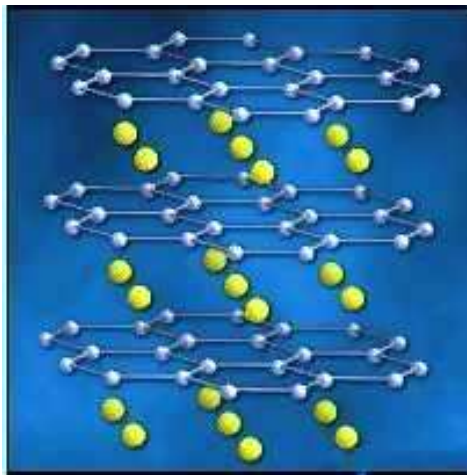
Dużo bardziej obiecujący jest pod tym względem:

**„przeoczony” nadprzewodnik**

*Wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ograniczone niską wartością prądów krytycznych  $j_c$ .*

Dużo bardziej obiecujący jest pod tym względem:

**„przeoczony” nadprzewodnik**

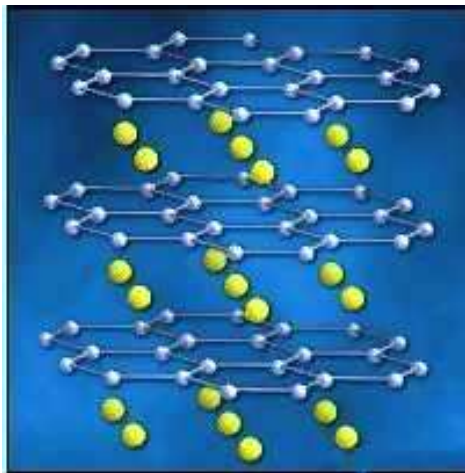


$$T_c = 39 \text{ K}$$

*Wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ograniczone niską wartością prądów krytycznych  $j_c$ .*

Dużo bardziej obiecujący jest pod tym względem:

**„przeoczony” nadprzewodnik**



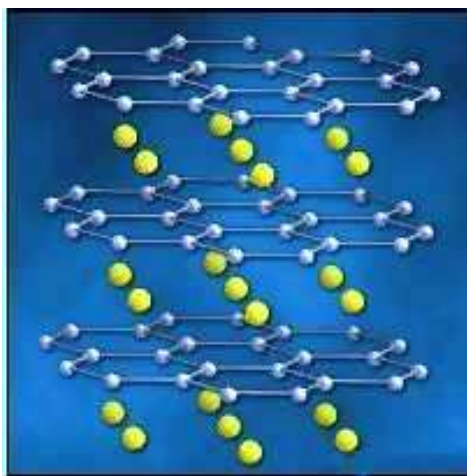
$$T_c = 39 \text{ K}$$

/ J. Nagamatsu et al, Nature **410**, 63 (2001) /

*Wykorzystanie nadprzewodników wysokotemperaturowych jest ograniczone niską wartością prądów krytycznych  $j_c$ .*

Dużo bardziej obiecujący jest pod tym względem:

**„przeoczony” nadprzewodnik**



**MgB<sub>2</sub>**

$T_c = 39$  K

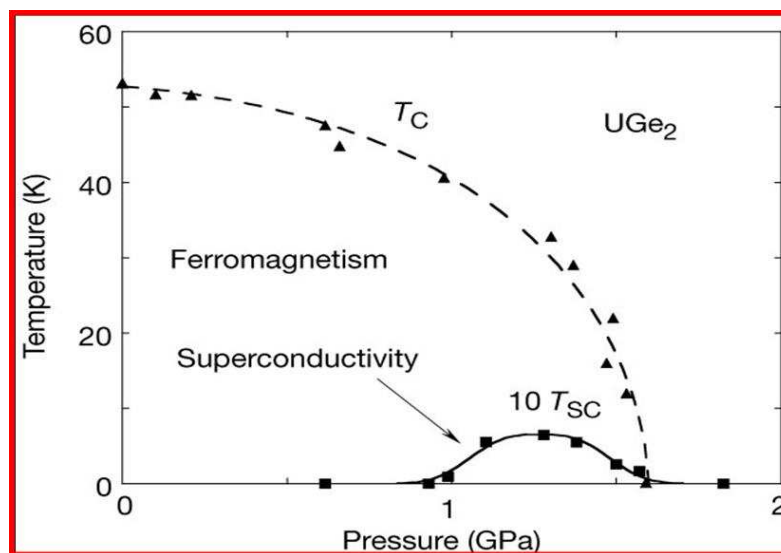
/ J. Nagamatsu et al, Nature **410**, 63 (2001) /

*W Polsce badaniami nadprzewodzącego MgB<sub>2</sub> zajmują się m.in.  
H. Szymczak, R. Puźniak, M.Z. Cieplak, T. Łada (Warszawa),  
Z. Trybuła (Poznań), A. Zaleski (Wrocław), ...*

# Nadprzewodnik i ferromagnetyk

# Nadprzewodnik i ferromagnetyk

Po przyłożeniu ciśnienia do ferromagnetyka  $\text{UGe}_2$  wytwarza się stan nadprzewodzący. Współistnienie !



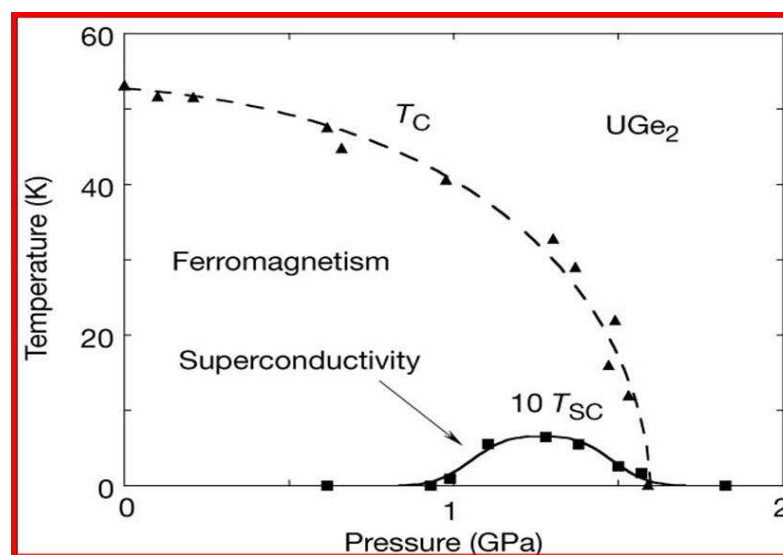
$\text{UGe}_2$

/ S.S. Saxena et al, *Nature* **406**, 587 (2000) /



# Nadprzewodnik i ferromagnetyk

Po przyłożeniu ciśnienia do ferromagnetyka  $\text{UGe}_2$  wytwarza się stan nadprzewodzący. Współistnienie !



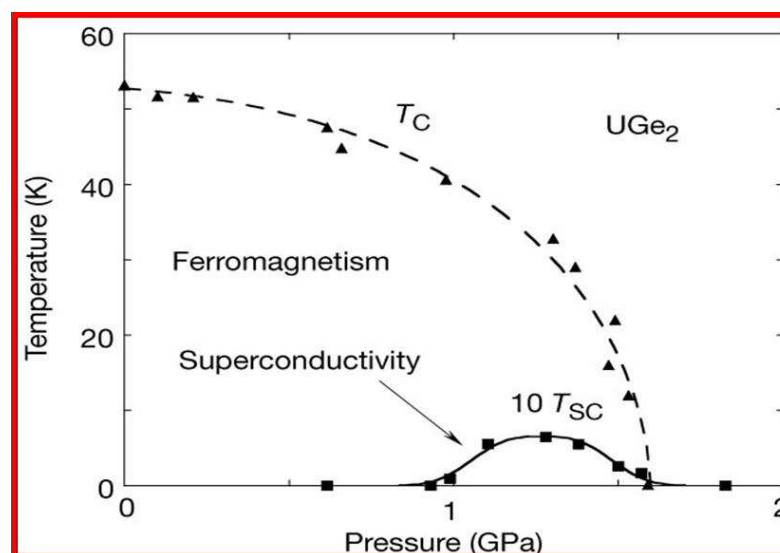
$\text{UGe}_2$

/ S.S. Saxena et al, *Nature* **406**, 587 (2000) /

Współistnienie magnetyzmu i nadprzewodnictwa w związku  $\text{Y}_4\text{Co}_3$  było wcześniej odkryte przez A. Kołodziejczyka [*J. Phys. F* **10**, L333 (1980)].

# Nadprzewodnik i ferromagnetyk

Po przyłożeniu ciśnienia do ferromagnetyka  $\text{UGe}_2$  wytwarza się stan nadprzewodzący. Współistnienie !



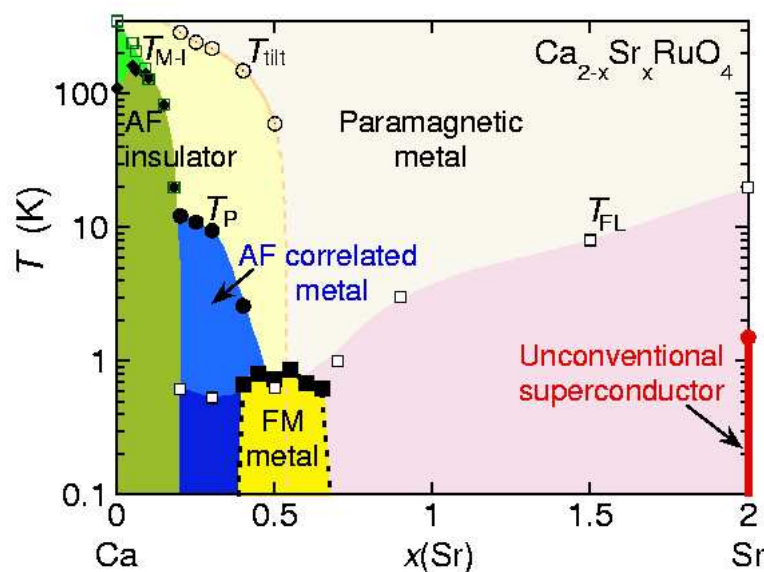
$\text{UGe}_2$

/ S.S. Saxena et al, *Nature* **406**, 587 (2000) /

*Teoretycznymi aspektami nadprzewodnictwa układów tzw. ciężkich fermionów zajmuje się w Polsce prof. Spalek i wsp. (Kraków).*

# Nadprzewodniki rutenowe

Silnie skorelowany tlenek rutenu to nadprzewodnik z parami trypletowymi, tak jak nadciekły  $^3\text{He}$ .

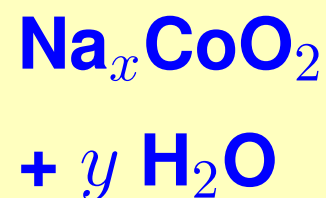
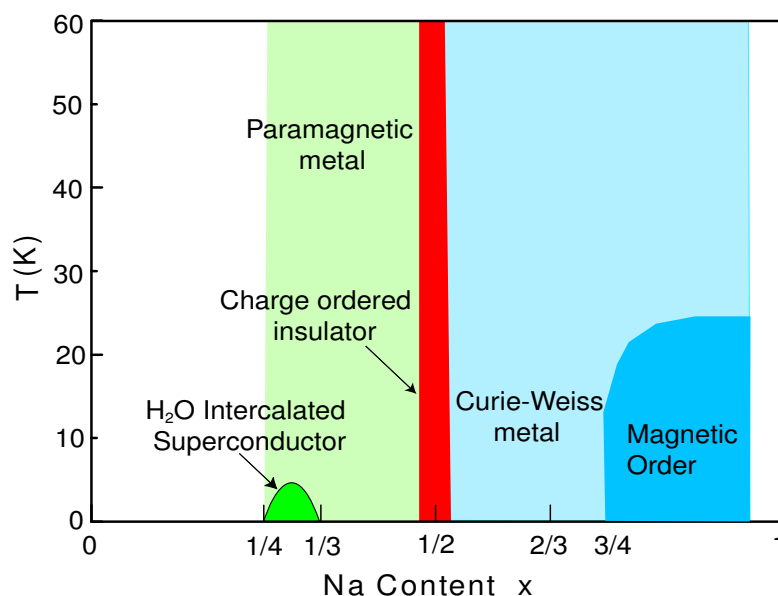


/ S. Nakatsuji et al, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 146401 (2004) /

Badaniem nadprzewodnictwa w związkach rutenowych zajmują się m.in.  
K.I. Wysokiński i G. Litak (Lublin) oraz J. Spalek i wsp. (Kraków).

# „Mokre” nadprzewodniki

Tlenek kobaltu  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  z interkalowaną wodą jest nadprzewodnikiem trypletowo – singletowym.



/ J. Cava et al, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 247001 (2004) /

Badaniem tego nadprzewodnika zajmują się w Polsce: B. Andrzejewski (Poznań), T. Klimczuk (Gdańsk), M. Mierzejewski, M. Maśka (Katowice), ...

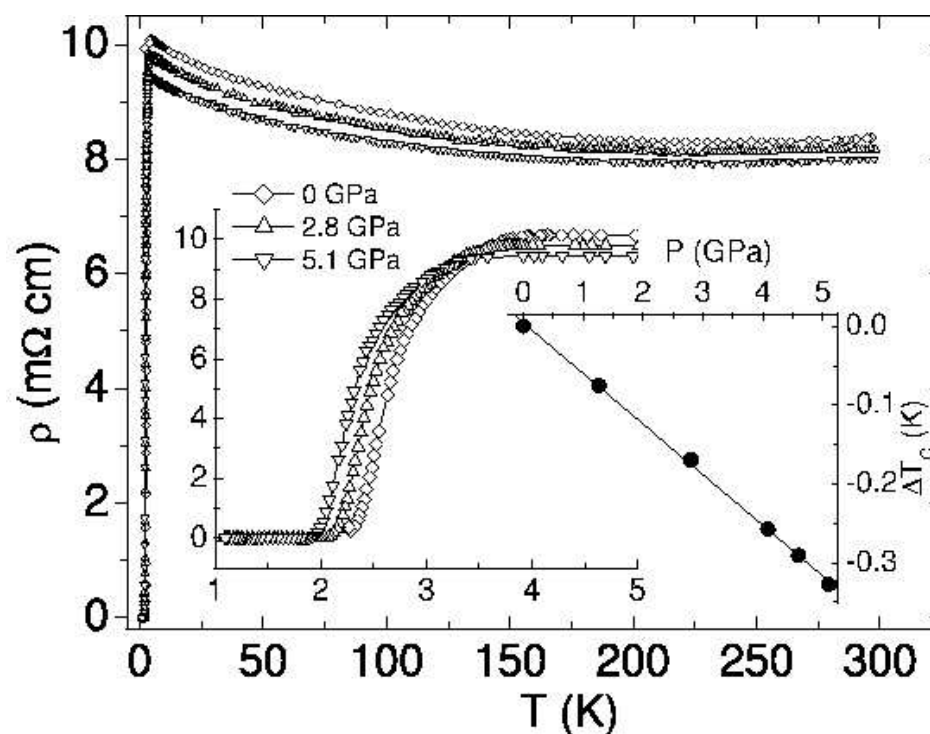
# Najtwardszy nadprzewodnik

# Najtwardszy nadprzewodnik

Diamant domieszkowany borem (synteza pod ciśnieniem 100 tys. atmosfer) staje się nadprzewodnikiem w  $T_c = 4 \text{ K}$ .

# Najtwardszy nadprzewodnik

Diamant domieszkowany borem (synteza pod ciśnieniem 100 tys. atmosfer) staje się nadprzewodnikiem w  $T_c = 4$  K.



/ E.A. Ekimov et al, Nature **428**, 542 (2004) /

# Nadprzewodnik z grafitu

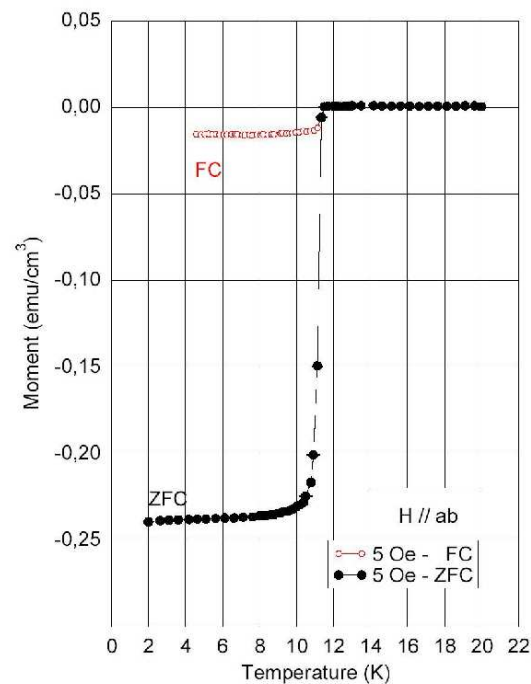
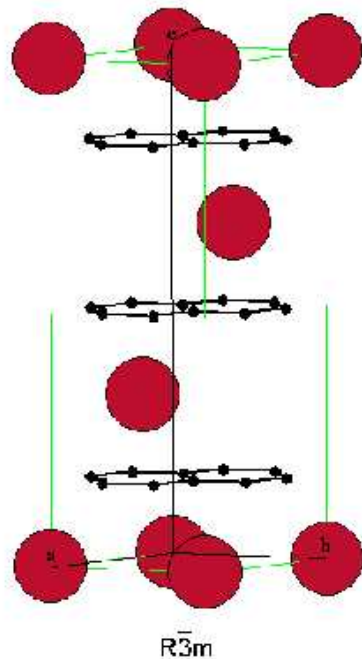


# Nadprzewodnik z grafitu

Wapń wstawiony między płaszczyzny grafitu  
prowadzi do nadprzewodnictwa z  $T_c = 11,5 \text{ K}$ .

# Nadprzewodnik z grafitu

Wapń wstawiony między płaszczyzny grafitu  
prowadzi do nadprzewodnictwa z  $T_c = 11,5$  K.



/ N. Emery et al, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 087003 (2005) /

... a takže

... a także

**silnie radioaktywny PuCoGa<sub>5</sub> (  $T_c = 18,5$  K )**

*Materiał ten jest używany w broni nuklearnej !*

*/ J.L. Sarrao et al, Nature **420**, 297 (2002) /*

... a także

**silnie radioaktywny PuCoGa<sub>5</sub> (  $T_c = 18,5$  K )**

*Materiał ten jest używany w broni nuklearnej !*

*/ J.L. Sarrao et al, Nature **420**, 297 (2002) /*

**Li pod ciśnieniem (  $T_c = 20$  K )**

*Zachowanie bardzo nietypowe dla metalu !*

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

... a także

**silnie radioaktywny  $\text{PuCoGa}_5$  ( $T_c = 18,5 \text{ K}$ )**

*Materiał ten jest używany w broni nuklearnej !*

*/ J.L. Sarrao et al, Nature **420**, 297 (2002) /*

**Li pod ciśnieniem ( $T_c = 20 \text{ K}$ )**

*Zachowanie bardzo nietypowe dla metalu !*

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

**$\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$**

*Najnowsze doniesienie z września 2005 r.*

*/ S. Yonezawa et al, cond-mat/0509018 /*

... a także

**silnie radioaktywny PuCoGa<sub>5</sub> (  $T_c = 18,5$  K )**

*Materiał ten jest używany w broni nuklearnej !*

*/ J.L. Sarrao et al, Nature **420**, 297 (2002) /*

**Li pod ciśnieniem (  $T_c = 20$  K )**

*Zachowanie bardzo nietypowe dla metalu !*

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

**Ag<sub>5</sub>Pb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>**

*Najnowsze doniesienie z września 2005 r.*

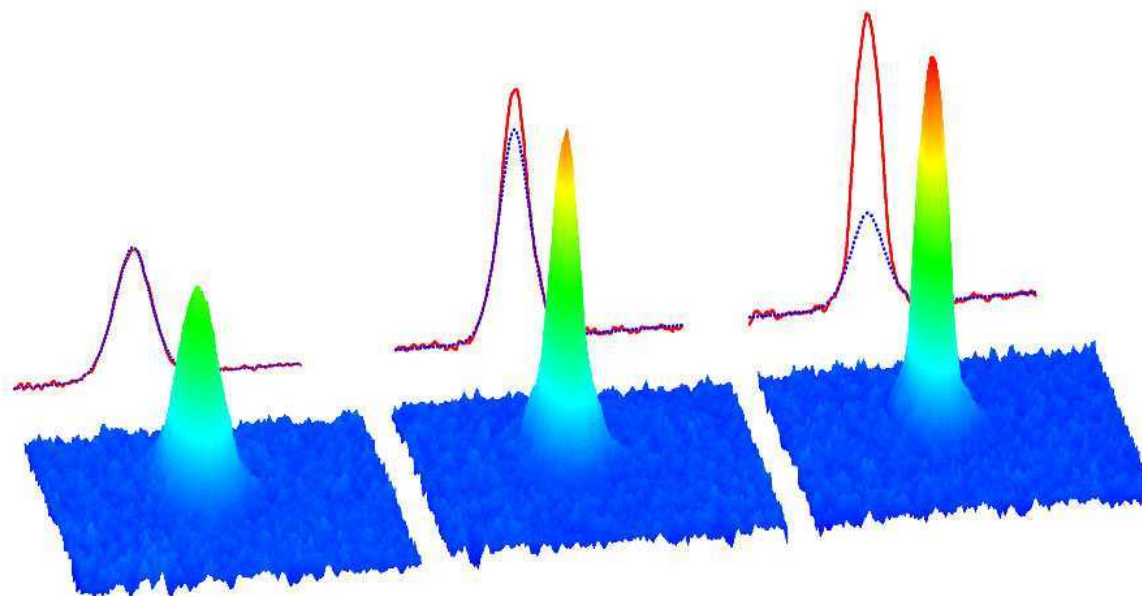
*/ S. Yonezawa et al, cond-mat/0509018 /*

i wiele innych nadprzewodników.

**Ultrazimne gazy**



*Dzięki rozwojowi technik pułapkowania i chłodzenia atomów do ultraniskich temperatur rzędu nK udało się wytworzyć nowy rodzaj nadprzewodnika (a właściwie nadcieczy).*



$$T_c \sim 0,15 T_F \quad ( \sim 10 \text{ nK} )$$

/ M.W. Zwierlein et al, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 120403 (2004) /

*Kluczowe aspekty tego zagadnienia:*

*Kluczowe aspekty tego zagadnienia:*



**atomy typu fermionowego**

*np. atomy alkaliów*  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{40}\text{K}$

*Kluczowe aspekty tego zagadnienia:*

★ **atomy typu fermionowego**

*np. atomy alkaliów  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{40}\text{K}$*

★ **mieszanina dwóch stanów  $|F, m_1\rangle$  oraz  $|F, m_2\rangle$**

*analogicznie do spinów  $\uparrow$  i  $\downarrow$  elektronu*

*w przypadku zwykłych nadprzewodników*

*Kluczowe aspekty tego zagadnienia:*

★ **atomy typu fermionowego**

*np. atomy alkaliów  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{40}\text{K}$*

★ **mieszanina dwóch stanów  $|F, m_1\rangle$  oraz  $|F, m_2\rangle$**

*analogicznie do spinów  $\uparrow$  i  $\downarrow$  elektronu*

*w przypadku zwykłych nadprzewodników*

★ **rezonans Feshbacha**

*oddziaływania indukowane polem magnetycznym*

*Kluczowe aspekty tego zagadnienia:*

★ **atomy typu fermionowego**

*np. atomy alkaliów  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{40}\text{K}$*

★ **mieszanina dwóch stanów  $|F, m_1\rangle$  oraz  $|F, m_2\rangle$**

*analogicznie do spinów  $\uparrow$  i  $\downarrow$  elektronu*

*w przypadku zwykłych nadprzewodników*

★ **rezonans Feshbacha**

*oddziaływania indukowane polem magnetycznym*

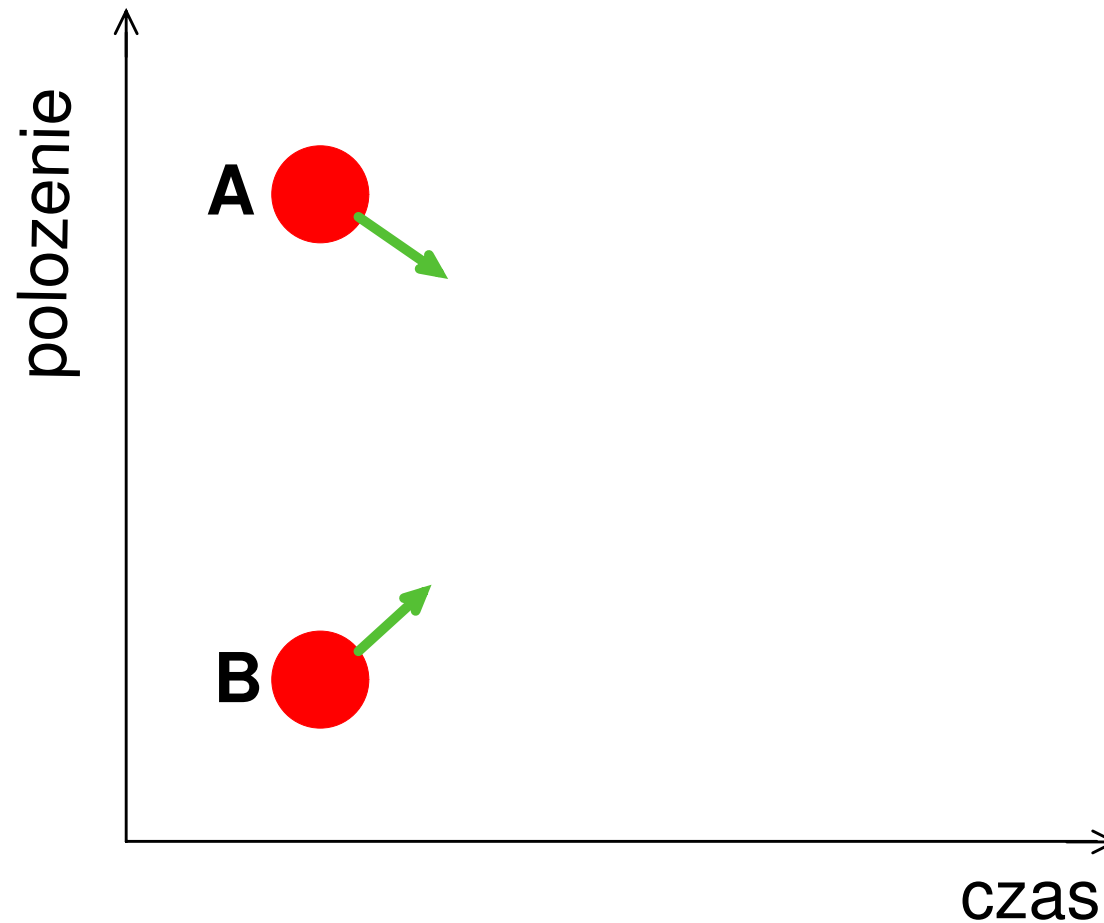
★ **przejście od granicy BCS do BEC**

*kontrolowalna realizacja koncepcji Leggett'a*

# Idea rezonansowego oddziaływania

# Idea rezonansowego oddziaływania

Wyobraźmy sobie dwa zderzające się ze sobą atomy ...

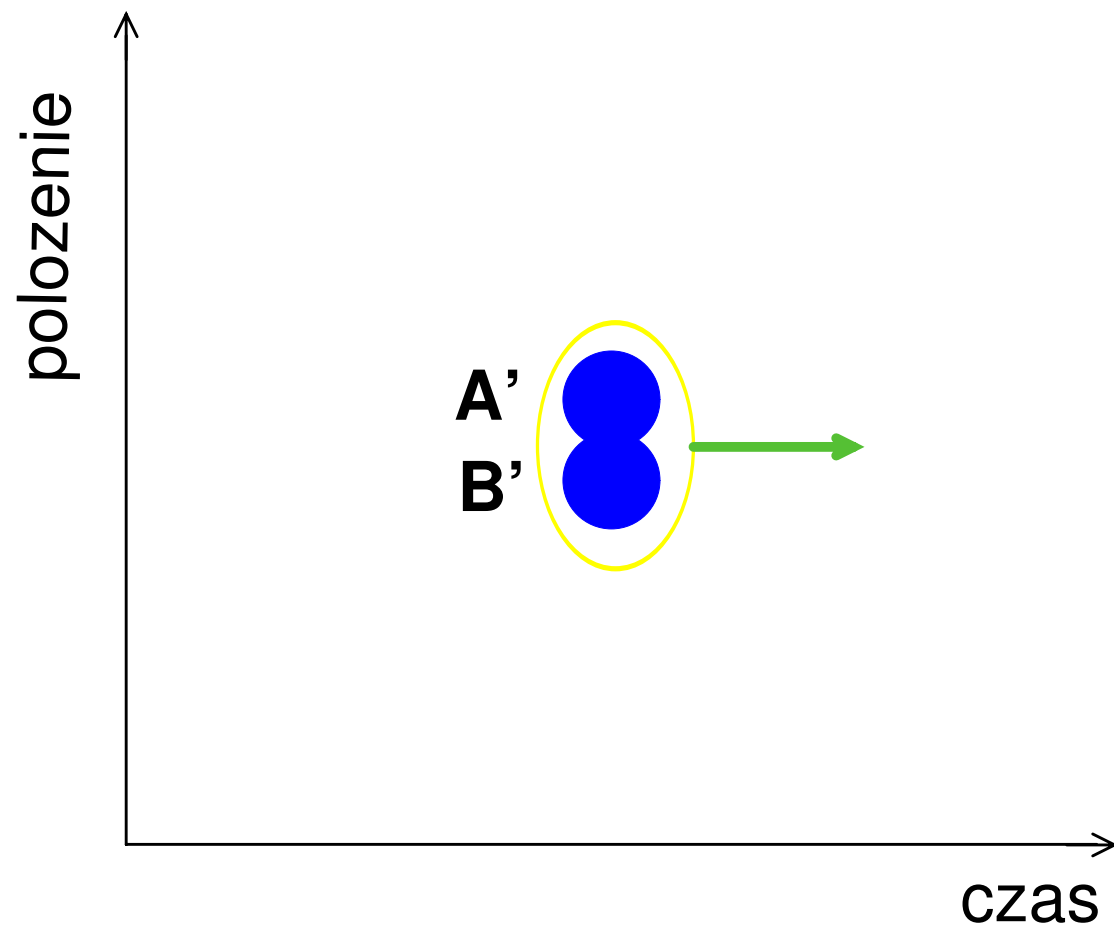


*tzw. open channel*



# Idea rezonansowego oddziaływania

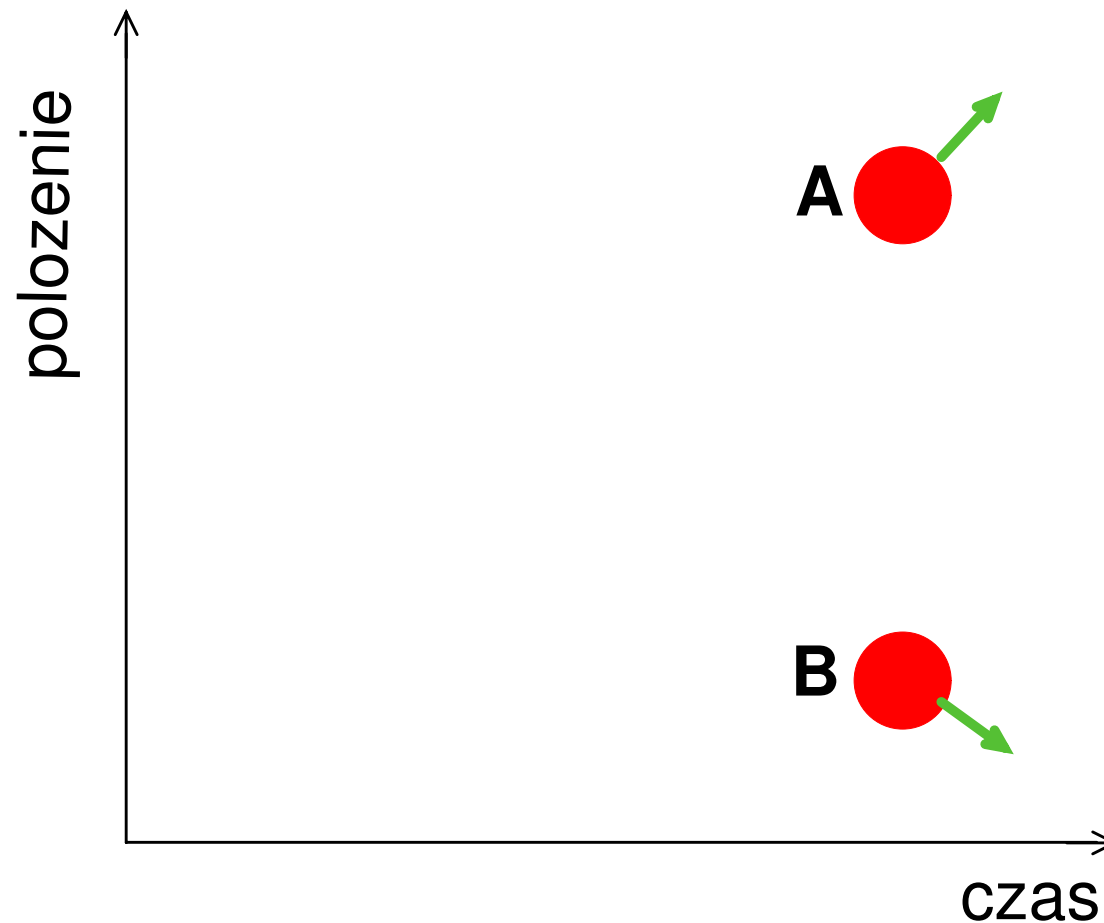
... które przez krótki czas wiążą się w bi-molekułę ...



*tzw. closed channel*

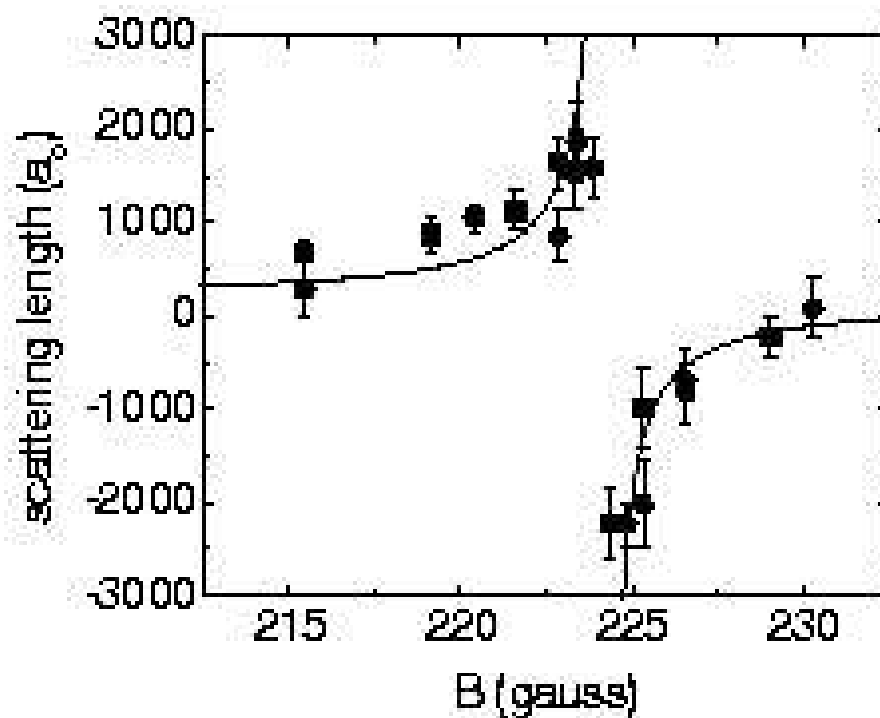
# Idea rezonansowego oddziaływania

a następnie znów rozpadają się na wyjściowe składniki.

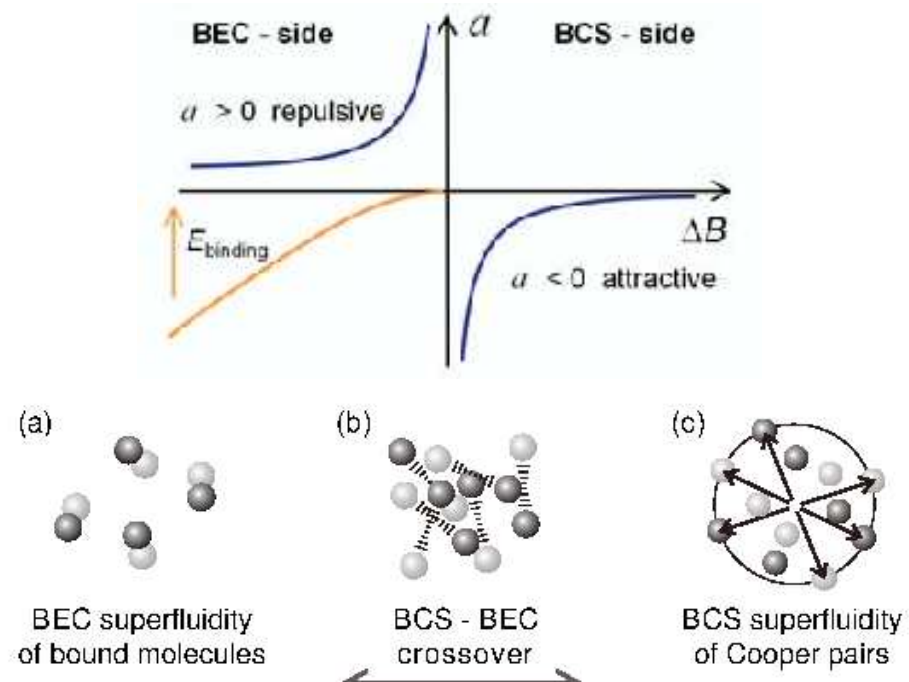


*tzw. open channel*

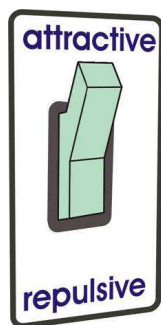
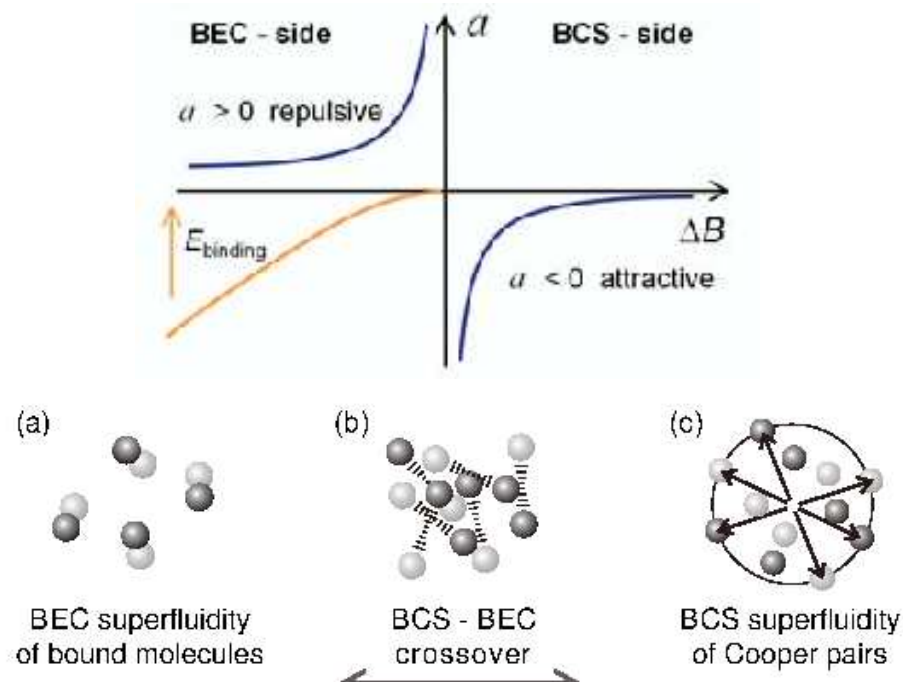
*Jeżeli suma energii zderzających się atomów jest bliska energii wiązania bi-molekuły, to efektywny potencjał rozpraszania ma charakter rozbieżny.*



Zmieniając pole magnetyczne realizowane są przypadki:



Zmieniając pole magnetyczne realizowane są przypadki:



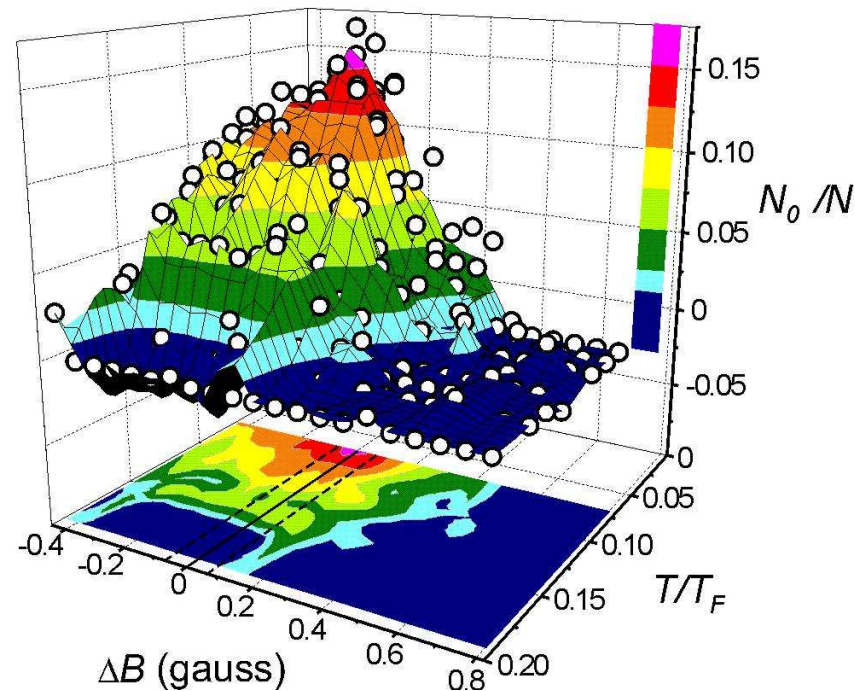
W kontrolowany sposób takie „przełączanie” jest obecnie wykonywane w kilku laboratoriach:

*K.E. Strecker et al, Phys. Rev. Lett. **91**, 080406 (2003);*

*M. Greiner et al, Nature **426**, 537 (2003);*

*M. Bartenstein et al, Phys. Rev. Lett. **92**, 203201 (2004).*

## Obserwacja doświadczalna



Frakcja skondensowanych par atomów fermionowych  
mierzona względem  $\Delta B = B - B_0$  oraz temperatury  $T/T_F$ .

*C.A. Regal et al, Phys. Rev. Lett. 92, 040403 (2004).*

# PODSUMOWANIE

1. **Nadprzewodnik** - jest to stan koherentnych par utworzonych z fermionów (elektronów, dziur, atomów, ...) opisanych są wspólną makroskopową funkcją falową

# PODSUMOWANIE

1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:



# PODSUMOWANIE

1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:  
**fonony**  
*/ nadprzewodniki klasyczne,  $MgB_2$ , diament, ... /*

# PODSUMOWANIE

1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:

**fonony**

*/ nadprzewodniki klasyczne,  $MgB_2$ , diament, ... /*

**magnony**

*/ nadprzewodnictwo układów tzw. ciężkich fermionów, ... /*

# PODSUMOWANIE

1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:

## **fonony**

*/ nadprzewodniki klasyczne,  $MgB_2$ , diament, ... /*

## **magnony**

*/ nadprzewodnictwo układów tzw. ciężkich fermionów, ... /*

## **silne korelacje elektronów na sieci**

*/ nadprzewodniki wysokotemperaturowe, rutenowce, ... /*

# PODSUMOWANIE

1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:

**fonony**

*/ nadprzewodniki klasyczne,  $MgB_2$ , diament, ... /*

**magnony**

*/ nadprzewodnictwo układów tzw. ciężkich fermionów, ... /*

**silne korelacje elektronów na sieci**

*/ nadprzewodniki wysokotemperaturowe, rutenowce, ... /*

**pole magnetyczne**

*/ nadprzewodnictwo atomów /*

# PODSUMOWANIE

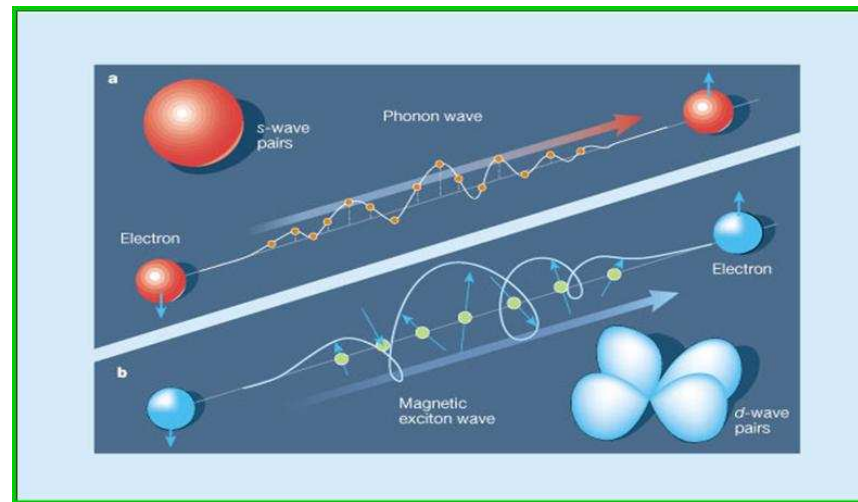
1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:

**fonony**

**magnony**

**silne korelacje**

**pole magnetyczne**



# PODSUMOWANIE

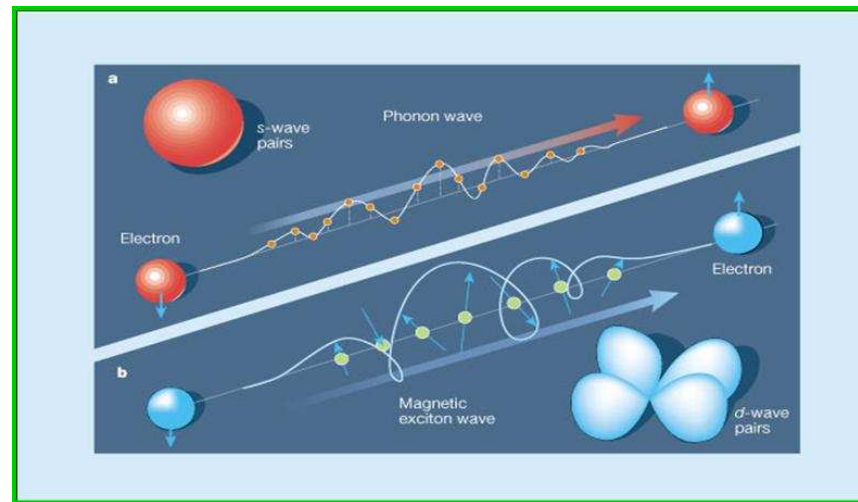
1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:

**fonony**

**magnony**

**silne korelacje**

**pole magnetyczne**



3. Jakościowo podobne efekty mogą występować również z udziałem innych obiektów i w innej skali energetycznej:
  - w fizyce jądrowej / *oddziaływania typu pairing między nukleonami* /
  - w fizyce cząstek elementarnych / *plazma gluonowo-kwarkowa* /

# PODSUMOWANIE

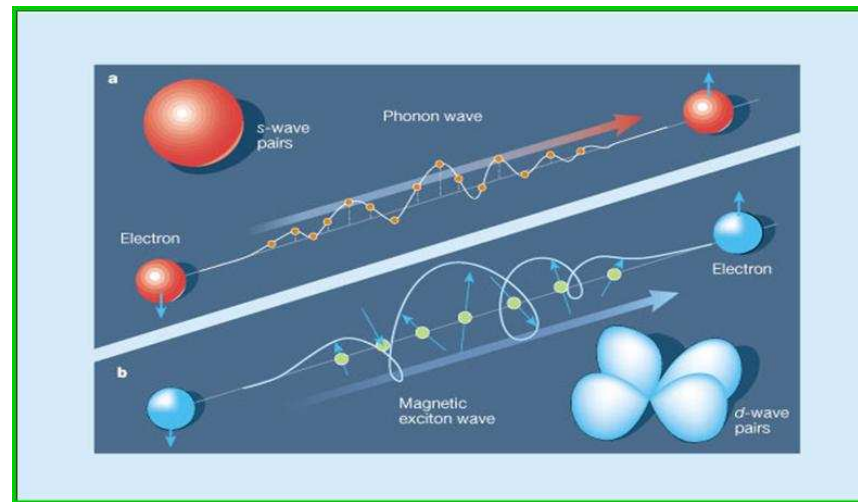
1. **Nadprzewodnik** = stan koherentnych par fermionowych
2. Za tworzenie par mogą być odpowiedzialne różne czynniki:

**fonony**

**magnony**

**silne korelacje**

**pole magnetyczne**



3. Jakościowo podobne efekty mogą występować również z udziałem innych obiektów i w innej skali energetycznej:
  - w fizyce jądrowej / *oddziaływania typu pairing między nukleonami* /
  - w fizyce cząstek elementarnych / *plazma gluonowo-kwarkowa* /

<http://kft.umcs.lublin.pl/doman/lectures>