

Ostrów Wielkopolski, 14 X 2009 r.

Kondensaty Bosego-Einsteina

/ przegląd współczesnych realizacji /

Tadeusz Domański

Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej

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

Ostrów Wielkopolski, 14 X 2009 r.

Kondensaty Bosego-Einsteina

/ przegląd współczesnych realizacji /

Tadeusz Domański

Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej

w Lublinie



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

Plan wykładu :

Plan wykładu :



Wstęp

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /



Ultrazimne kondensaty BE atomów

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /



Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego ...

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /



Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /



Kilka egzotycznych przykładów BEC

/ magnony, ...

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

⇒ Kilka egzotycznych przykładów BEC

/ magnony, kwarki, ...

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

⇒ Kilka egzotycznych przykładów BEC

/ magnony, kwarki, ekscytyny /

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

★ Kilka egzotycznych przykładów BEC

/ magnony, kwarki, ekscytyny /

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

★ Kilka egzotycznych przykładów BEC

/ magnony, kwarki, ekscytyny /

⇒ Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

★ Kilka egzotycznych przykładów BEC

/ magnony, kwarki, ekscytyny /

⇒ Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

/ problem niekoherenentnych par /

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

★ Kilka egzotycznych przykładów BEC

/ magnony, kwarki, ekscytyny /

★ Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

/ problem niekoherenentnych par /

Plan wykładu :

Wstęp

/ kondensacja BE i relacja z nadciekłością /

★ Ultrazimne kondensaty BE atomów

/ typu bozonowego oraz fermionowego /

★ Kilka egzotycznych przykładów BEC

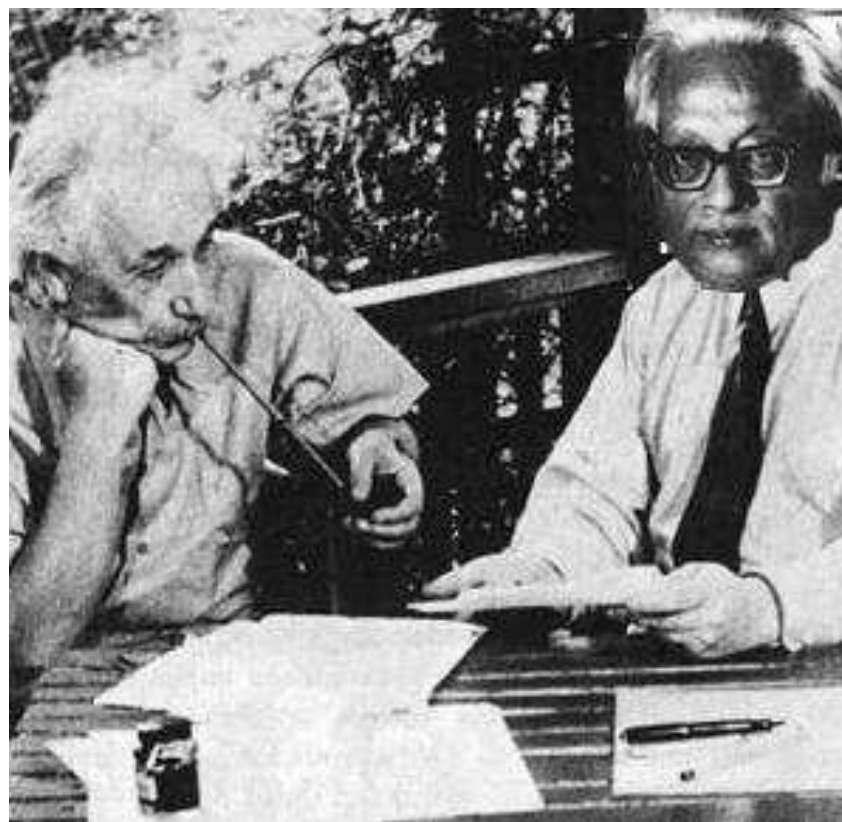
/ magnony, kwarki, ekscytyny /

★ Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

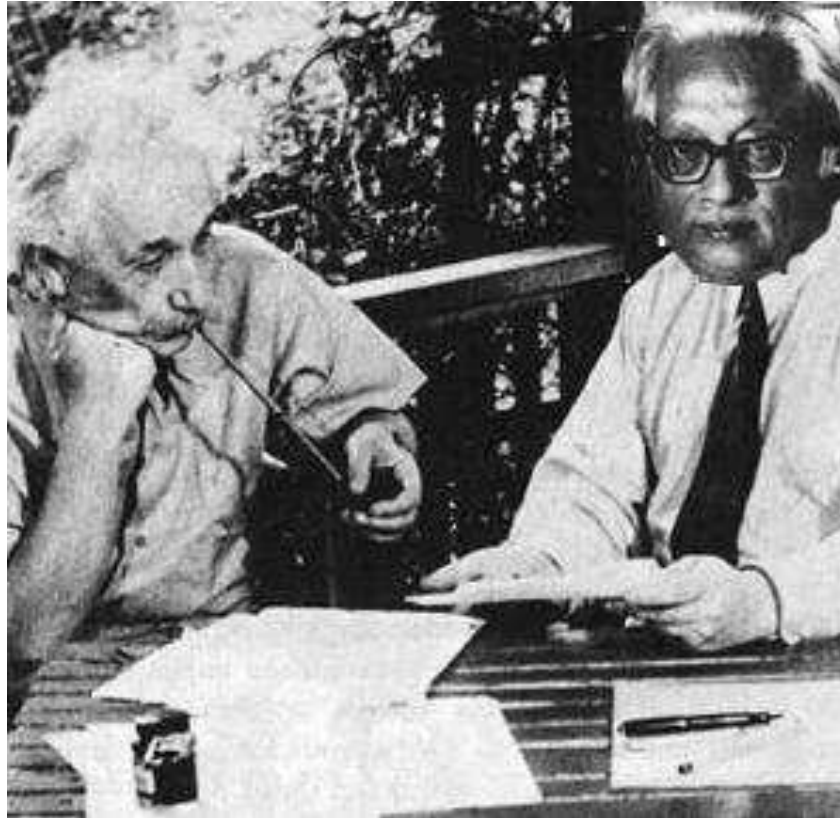
/ problem niekoherenetycznych par /

Podsumowanie

1. Wstep



Kondensacja Bosego-Einsteina (BEC) jak również nadciekłość są to zjawiska kwantowe, które mogą realizować się poniżej temperatury krytycznej T_c w gazach, cieczach, ciałach stałych oraz jądrach atomowych a nawet w gwiazdach neutronowych.



Kondensacja Bosego-Einsteina (BEC) jak również nadciekłość są to zjawiska kwantowe, które mogą realizować się poniżej temperatury krytycznej T_c w gazach, cieczach, ciałach stałych oraz jądrach atomowych a nawet w gwiazdach neutronowych.

W swoim referacie przedstawię kilka konkretnych przykładów.

Idea kondensacji BE

Idea kondensacji BE

Kondensat BE powstaje wtedy, gdy **makroskopowa ilość obiektów obsadza identyczny stan kwantowy o najniższej energii dopuszczalnej w układzie.**

Idea kondensacji BE

Kondensat BE powstaje wtedy, gdy **makroskopowa ilość obiektów obsadza identyczny stan kwantowy o najniższej energii dopuszczalnej w układzie.**

Obiekty są opisane wspólną funkcją falową $\Phi(r, t)$.

Idea kondensacji BE

Kondensat BE powstaje wtedy, gdy **makroskopowa ilość obiektów obsadza identyczny stan kwantowy o najniższej energii dopuszczalnej w układzie.**

Obiekty są opisane wspólną funkcją falową $\Phi(r, t)$.

Ta makroskopowa fala de Broglie'a pełni również rolę **parametru porządku** opisującego nowy stan materii.

Idea kondensacji BE

Kondensat BE powstaje wtedy, gdy **makroskopowa ilość obiektów obsadza identyczny stan kwantowy** o najniższej energii dopuszczalnej w układzie.

Obiekty są opisane wspólną funkcją falową $\Phi(r, t)$.

Ta makroskopowa fala de Broglie'a pełni również rolę **parametru porządku** opisującego nowy stan materii.

Przy użyciu zewnętrznych pól kondensaty BE mogą być wprowadzone w **bezlepkki** ruch, zmieniać kształt, oscylować, tworzyć obrazy interferencyjne itp.

Idea kondensacji BE

Kondensat BE powstaje wtedy, gdy **makroskopowa ilość obiektów obsadza identyczny stan kwantowy** o najniższej energii dopuszczalnej w układzie.

Obiekty są opisane wspólną funkcją falową $\Phi(r, t)$.

Ta makroskopowa fala de Broglie'a pełni również rolę **parametru porządku** opisującego nowy stan materii.

Przy użyciu zewnętrznych pól kondensaty BE mogą być wprowadzone w **bezleпки** ruch, zmieniać kształt, oscylować, tworzyć obrazy interferencyjne itp.

Efekty kwantowe można obserwować **gołym okiem**.

Podejście półklasyczne

schemat poglądowy

Podjęcie półklasyczne

schemat poglądowy

W swej pracy doktorskiej książkę Louis Victor de Broglie przedstawił hipotezę, że obiekty materialne można traktować jak fale

$$m v = \frac{h}{\lambda}.$$

Dla cząstek swobodnych:

$$\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{m T}}.$$

Podejście półklasyczne

schemat poglądowy

W swej pracy doktorskiej książkę Louis Victor de Broglie przedstawił hipotezę, że obiekty materialne można traktować jak fale

$$m v = \frac{h}{\lambda}.$$

Dla cząstek swobodnych:

$$\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{m T}}.$$

Inspiracją hipotezy de Broglie'a były prace Einsteina nt. korpuskularnej natury światła.



/ N. Nobla, 1929 r. /

Podejście półklasyczne

schemat poglądowy

W swej pracy doktorskiej książkę Louis Victor de Broglie przedstawił hipotezę, że obiekty materialne można traktować jak fale

$$m v = \frac{h}{\lambda}.$$

Dla cząstek swobodnych:

$$\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{m T}}.$$

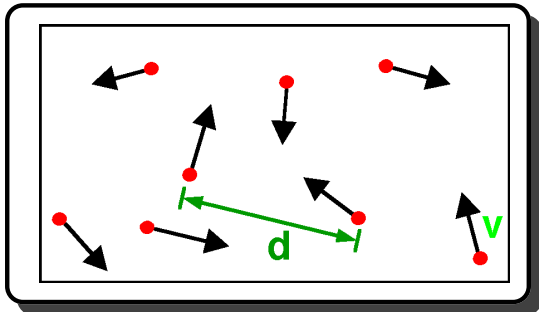
Inspiracją hipotezy de Broglie'a były prace Einsteina nt. korpuskularnej natury światła.

Davisson & Thomson doświadczalnie potwierdzili słuszność hipotezy de Broglie'a, za co również przyznano Nagrodę Nobla w 1937 r.



/ N. Nobla, 1929 r. /

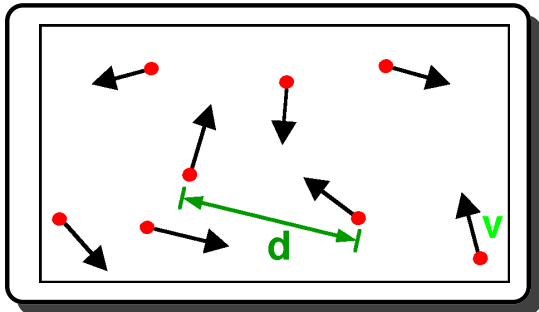
Schemat poglądowy BEC



Wysoka temperatura

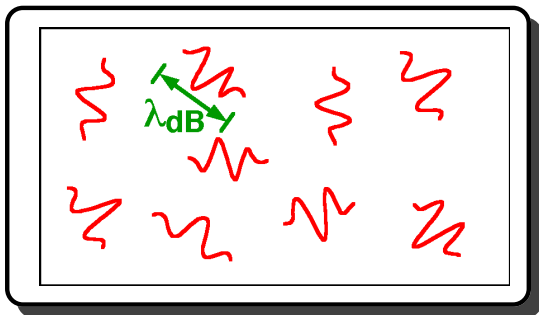
(cząsteczki są jak kule bilardowe)

Schemat poglądowy BEC



Wysoka temperatura

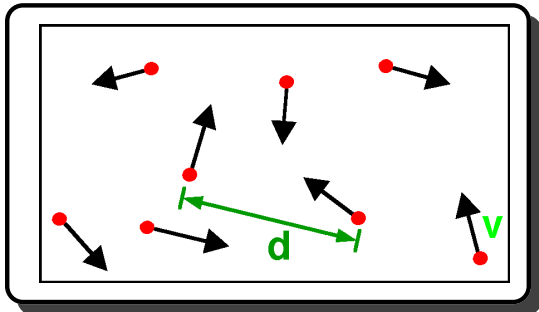
(cząsteczki są jak kule bilardowe)



Niska temperatura

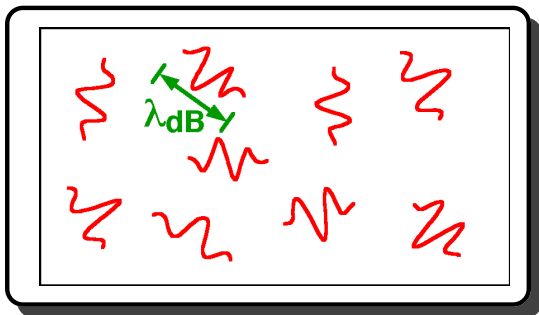
(wzrasta rozmiar długości falowej)

Schemat poglądowy BEC



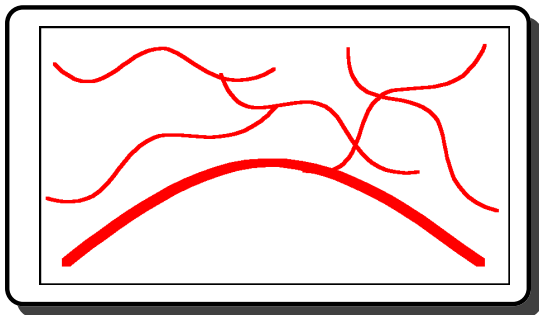
Wysoka temperatura

(cząsteczki są jak kule bilardowe)



Niska temperatura

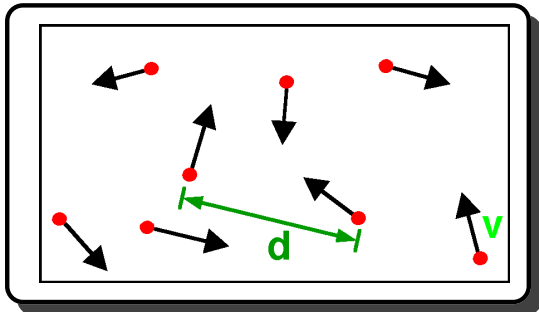
(wzrasta rozmiar długości falowej)



Temperatura krytyczna

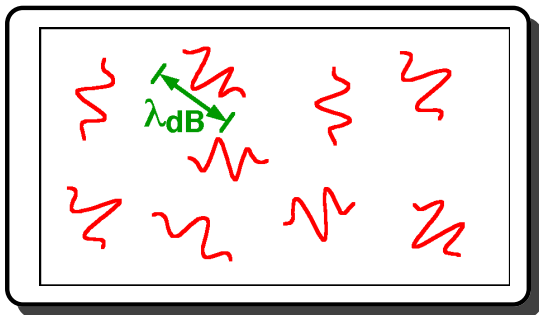
(fale de Broglie'a przekrywają się)

Schemat poglądowy BEC



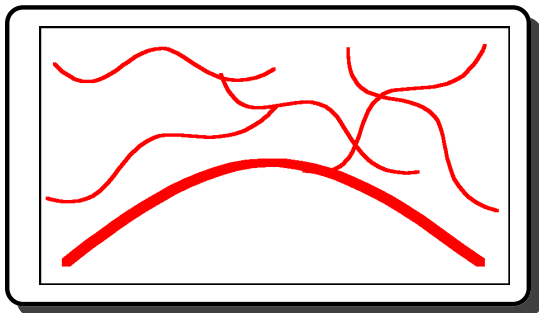
Wysoka temperatura

(cząsteczki są jak kule bilardowe)



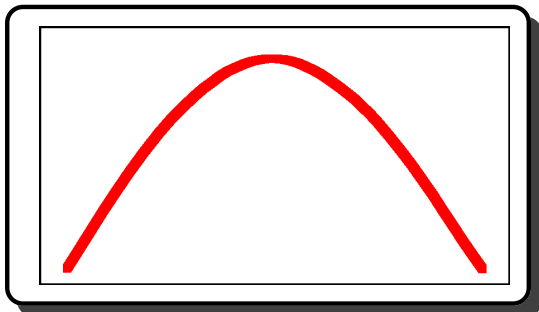
Niska temperatura

(wzrasta rozmiar długości falowej)



Temperatura krytyczna

(fale de Broglie'a przekrywają się)

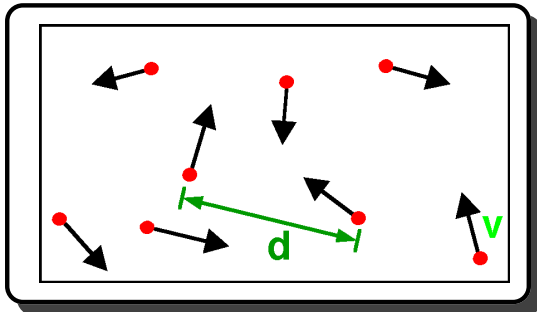


Zerowa temperatura

(makroskopowa funkcja falowa)

Schemat poglądowy BEC

W. Ketterle przedstawił
taką ilustrację królowi
Szwecji przy wręczaniu
Nagrody Nobla w 2001 r.



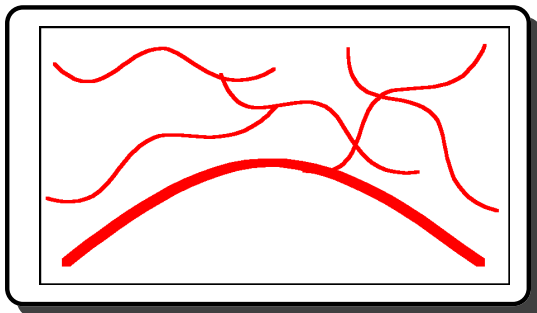
Wysoka temperatura

(cząsteczki są jak kule bilardowe)



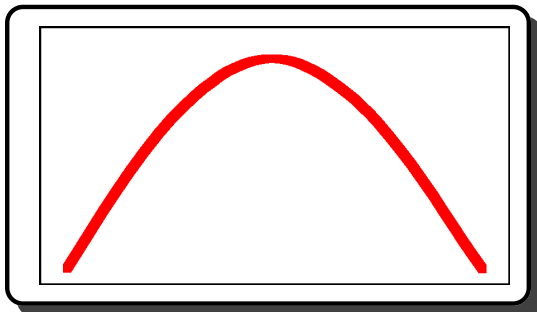
Niska temperatura

(wzrasta rozmiar długości falowej)



Temperatura krytyczna

(fale de Broglie'a przekrywają się)



Zerowa temperatura

(makroskopowa funkcja falowa)

Rola oddziaływań

relacja z nadciekłością

Rola oddziaływań

relacja z nadciekłością

Uwzględnienie kondensatu BE w ujęciu mechaniki kwantowej:

$$\hat{\Psi}(\vec{r}, t) = \Phi(\vec{r}, t) + \delta\hat{\Psi}(\vec{r}, t)$$

Rola oddziaływań

relacja z nadciekłością

Uwzględnienie kondensatu BE w ujęciu mechaniki kwantowej:

$$\hat{\Psi}(\vec{r}, t) = \Phi(\vec{r}, t) + \delta\hat{\Psi}(\vec{r}, t)$$

Zakładając potencjał oddziaływania $V(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = g \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$
funkcja kondensatu spełnia r-nie Grossa-Pitajewskiego

$$i\hbar \frac{\partial \Phi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V_{ext}(r) + gn_c \right) \Phi(\vec{r}, t)$$

Rola oddziaływań

relacja z nadciekłością

Uwzględnienie kondensatu BE w ujęciu mechaniki kwantowej:

$$\hat{\Psi}(\vec{r}, t) = \Phi(\vec{r}, t) + \delta\hat{\Psi}(\vec{r}, t)$$

Zakładając potencjał oddziaływania $V(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = g \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$
funkcja kondensatu spełnia r-nie Grossa-Pitajewskiego

$$i\hbar \frac{\partial \Phi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V_{ext}(r) + gn_c \right) \Phi(\vec{r}, t)$$

gdzie

$$n_c \equiv |\Phi(\vec{r}, t)|^2$$

Sformułowanie hydrodynamiczne

Sformułowanie hydrodynamiczne

Zespoloną funkcję kondensatu $\Phi(\vec{r}, t)$ można opisać poprzez amplitudę $|\Phi(\vec{r}, t)|$ oraz fazę $\theta(\vec{r}, t)$ za pomocą wyrażenia

Sformułowanie hydrodynamiczne

Zespoloną funkcję kondensatu $\Phi(\vec{r}, t)$ można opisać poprzez amplitudę $|\Phi(\vec{r}, t)|$ oraz fazę $\theta(\vec{r}, t)$ za pomocą wyrażenia

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sqrt{n_c(\vec{r}, t)} e^{i\theta(\vec{r}, t)}$$

gdzie $n_c \equiv |\Phi|^2$

Sformułowanie hydrodynamiczne

Zespoloną funkcję kondensatu $\Phi(\vec{r}, t)$ można opisać poprzez amplitudę $|\Phi(\vec{r}, t)|$ oraz fazę $\theta(\vec{r}, t)$ za pomocą wyrażenia

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sqrt{n_c(\vec{r}, t)} e^{i\theta(\vec{r}, t)}$$

gdzie $n_c \equiv |\Phi|^2$

GP rozseparowuje się wówczas na:

Sformułowanie hydrodynamiczne

Zespoloną funkcję kondensatu $\Phi(\vec{r}, t)$ można opisać poprzez amplitudę $|\Phi(\vec{r}, t)|$ oraz fazę $\theta(\vec{r}, t)$ za pomocą wyrażenia

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sqrt{n_c(\vec{r}, t)} e^{i\theta(\vec{r}, t)}$$

gdzie $n_c \equiv |\Phi|^2$

GP rozseparowuje się wówczas na:

a) równanie ciągłości

$$\frac{\partial n_c(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_c(\vec{r}, t) = 0$$

Sformułowanie hydrodynamiczne

Zespoloną funkcję kondensatu $\Phi(\vec{r}, t)$ można opisać poprzez amplitudę $|\Phi(\vec{r}, t)|$ oraz fazę $\theta(\vec{r}, t)$ za pomocą wyrażenia

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sqrt{n_c(\vec{r}, t)} e^{i\theta(\vec{r}, t)}$$

gdzie $n_c \equiv |\Phi|^2$

GP rozseparowuje się wówczas na:

a) równanie ciągłości

$$\frac{\partial n_c(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_c(\vec{r}, t) = 0$$

gdzie gęstość prądu

$$\vec{j}_c \equiv \frac{\hbar}{2i} \left(\Phi^* \vec{\nabla} \Phi - \Phi \vec{\nabla} \Phi^* \right) \implies \vec{v}_c = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} \theta(\vec{r}, t)$$

Sformułowanie hydrodynamiczne

Zespoloną funkcję kondensatu $\Phi(\vec{r}, t)$ można opisać poprzez amplitudę $|\Phi(\vec{r}, t)|$ oraz fazę $\theta(\vec{r}, t)$ za pomocą wyrażenia

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sqrt{n_c(\vec{r}, t)} e^{i\theta(\vec{r}, t)}$$

gdzie $n_c \equiv |\Phi|^2$

GP rozseparowuje się wówczas na:

a) równanie ciągłości

b) równanie Josephsona

$$m \frac{\partial \vec{v}_c}{\partial t} + \vec{\nabla} \left[V_{eff} + g n_c + \frac{1}{2} m v_c^2 \right] = 0$$

Sformułowanie hydrodynamiczne

Zespoloną funkcję kondensatu $\Phi(\vec{r}, t)$ można opisać poprzez amplitudę $|\Phi(\vec{r}, t)|$ oraz fazę $\theta(\vec{r}, t)$ za pomocą wyrażenia

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sqrt{n_c(\vec{r}, t)} e^{i\theta(\vec{r}, t)}$$

gdzie $n_c \equiv |\Phi|^2$

GP rozseparowuje się wówczas na:

a) równanie ciągłości

b) równanie Josephsona

(struktura r-nia Naviera-Stokesa)

$$m \frac{\partial \vec{v}_c}{\partial t} + \vec{\nabla} \left[V_{eff} + g n_c + \frac{1}{2} m v_c^2 \right] = 0$$

gdzie

$$V_{eff} = V_{ext} - \frac{\hbar^2}{2m\sqrt{n_c}} \nabla^2 \sqrt{n_c}$$

Sformułowanie hydrodynamiczne c.d.

Sformułowanie hydrodynamiczne c.d.

Równania ciągłości i Josephsona *przypominają* klasyczną hydrodynamikę dla idealnej cieczy.

Sformułowanie hydrodynamiczne c.d.

Równania ciągłości i Josephsona *przypominają* klasyczną hydrodynamikę dla idealnej cieczy.

Patrz np. rozdział II w książce

Hydrodynamika, L.D. Landau, E.M. Lifszyc, PWN (1994).

Sformułowanie hydrodynamiczne c.d.

Równania ciągłości i Josephsona *przypominają* klasyczną hydrodynamikę dla idealnej cieczy.

Charakterystyczne właściwości:

Sformułowanie hydrodynamiczne c.d.

Równania ciągłości i Josephsona *przypominają* klasyczną hydrodynamikę dla idealnej cieczy.

Charakterystyczne właściwości:

a)

wsp. lepkości = 0

nadciekłość

Sformułowanie hydrodynamiczne c.d.

Równania ciągłości i Josephsona *przypominają* klasyczną hydrodynamikę dla idealnej cieczy.

Charakterystyczne właściwości:

a) **wsp. lepkości = 0**

nadciekłość

b) $\vec{\nabla} \times \vec{v}_c(\vec{r}, t) = 0$

bezwirowość

Sformułowanie hydrodynamiczne c.d.

Równania ciągłości i Josephsona *przypominają* klasyczną hydrodynamikę dla idealnej cieczy.

Charakterystyczne właściwości:

a) **wsp. lepkości = 0**

nadciekłość

b) $\vec{\nabla} \times \vec{v}_c(\vec{r}, t) = 0$

bezwirowość

Uwaga:

Wiry mogą ewentualnie pojawić się w kwantowych defektach topologicznych, gdzie faza $\theta(\vec{r}, t)$ wykazuje osobliwości.

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Nadciekły ^4He

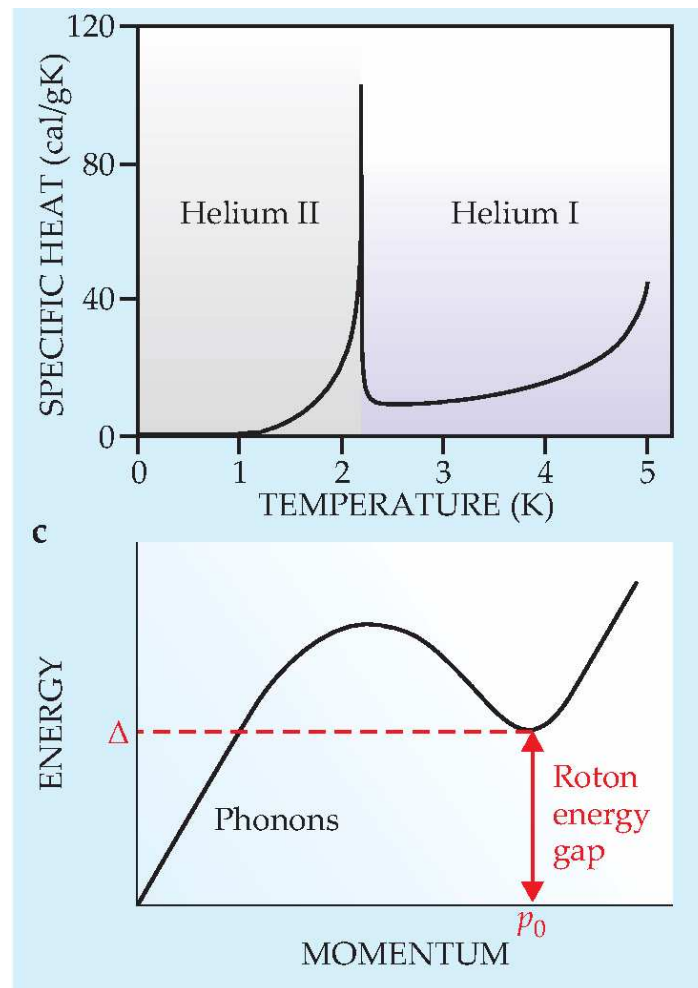
pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat jedynym znanym kondensatem BE był

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat jedynym znanym kondensatem BE był

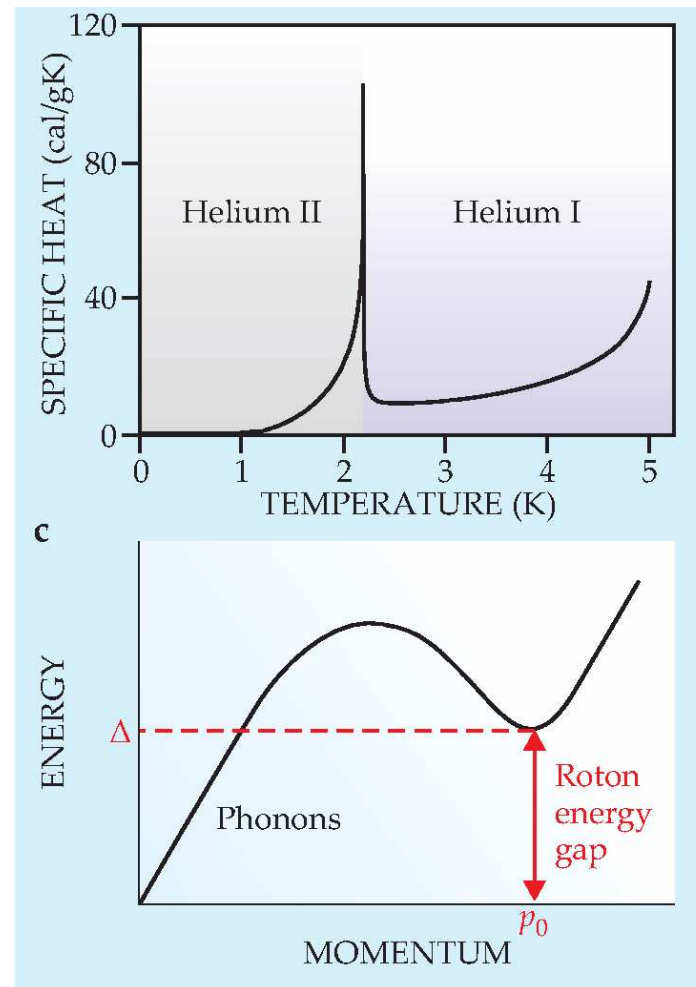


^4He

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat jedynym znanym kondensatem BE był



^4He

mimo, iż Landau nigdy takiego opinii nie podzielał.

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat używano tzw. opisu dwucieczowego Tiszy

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat używano tzw. opisu dwucieczowego Tiszy



Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat używano tzw. opisu dwucieczowego Tiszy

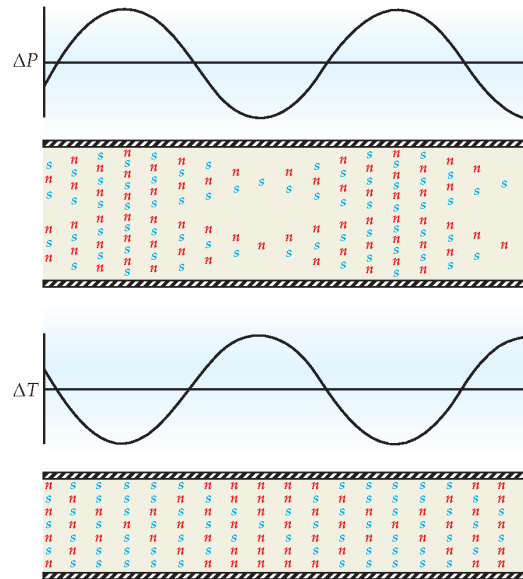


/ Laszlo Tisza zmarł w kwietniu 2009 r. w wieku 102 lat /

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat używano tzw. opisu dwucieczowego Tiszy



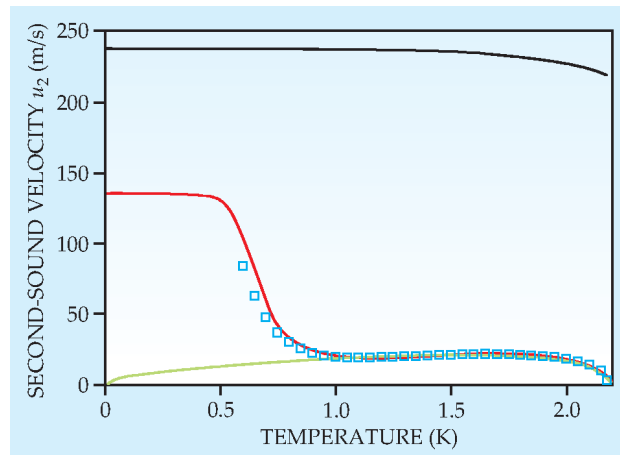
/ László Tisza zmarł w kwietniu 2009 r. w wieku 102 lat /

Model Tiszy przewidywał m.in. istnienie drugiego dźwięku.

Nadciekły ^4He

pierwszy przykład BEC

Przez wiele lat używano tzw. opisu dwucieczowego Tiszy



/ László Tisza zmarł w kwietniu 2009 r. w wieku 102 lat /

Drugi dźwięk faktycznie stwierdzono później doświadczalnie.

2. Ultrazimne kondensaty

Kilka sloganów

– **zamiast motywacji**

Kilka sloganów – zamiast motywacji

★ **hot prospects for cold molecules**

B. Goss-Levi, Physics Today 53, 46 (2000).

Kilka sloganów – zamiast motywacji

★ **hot prospects for cold molecules**

B. Goss-Levi, Physics Today 53, 46 (2000).

★ **dreams of controlling interactions ... come true**

K. Burnett et al, Nature 416, 255 (2002).

Kilka sloganów – zamiast motywacji

★ **hot prospects for cold molecules**

B. Goss-Levi, *Physics Today* 53, 46 (2000).

★ **dreams of controlling interactions ... come true**

K. Burnett et al, *Nature* 416, 255 (2002).

★ **molecules are really cool**

P.S. Julienne, *Nature* 424, 24 (2003).

2.1

Kondensaty BE atomów

typu bozonowego

Warunki konieczne

do uzyskania BEC atomów

Warunki konieczne

do uzyskania BEC atomów

Aby uzyskać BEC spulapkowanych atomów
potrzebne są **ultraniskie** temperatury ($\lambda \sim d$).

Warunki konieczne

do uzyskania BEC atomów

Aby uzyskać BEC spulapkowanych atomów potrzebne są **ultraniskie** temperatury ($\lambda \sim d$).

$$T_{BE} \sim 0,1 \mu K$$

Warunki konieczne

do uzyskania BEC atomów

Aby uzyskać BEC spulapkowanych atomów potrzebne są **ultraniskie** temperatury ($\lambda \sim d$).

Bardzo niska koncentracja sprawia, że atomy oddziałują jedynie poprzez tzw. **kanał -s** teorii rozpraszania.

Warunki konieczne

do uzyskania BEC atomów

Aby uzyskać BEC spulapkowanych atomów potrzebne są **ultraniskie** temperatury ($\lambda \sim d$).

Bardzo niska koncentracja sprawia, że atomy oddziałują jedynie poprzez tzw. **kanał -s** teorii rozpraszania.

Tak rzadkie koncentracje gwarantują, że przez kilka sekund atomy **nie solidyfikują** (tzn. są metastabilne).

Warunki konieczne

do uzyskania BEC atomów

Aby uzyskać BEC spulapkowanych atomów potrzebne są **ultraniskie** temperatury ($\lambda \sim d$).

Bardzo niska koncentracja sprawia, że atomy oddziałują jedynie poprzez tzw. **kanał -s** teorii rozpraszania.

Tak rzadkie koncentracje gwarantują, że przez kilka sekund atomy **nie solidyfikują** (tzn. są metastabilne).

Kilka sekund wystarcza na zrealizowanie BEC !

Warunki konieczne

do uzyskania BEC atomów

Aby uzyskać BEC spulapkowanych atomów potrzebne są **ultraniskie** temperatury ($\lambda \sim d$).

Bardzo niska koncentracja sprawia, że atomy oddziałują jedynie poprzez tzw. **kanał -s** teorii rozpraszania.

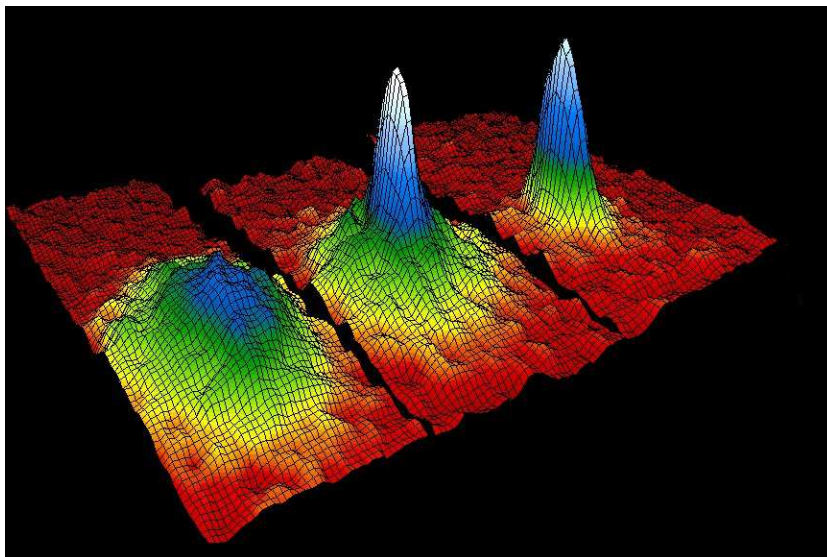
Tak rzadkie koncentracje gwarantują, że przez kilka sekund atomy **nie solidyfikują** (tzn. są metastabilne).

Kilka sekund wystarcza na zrealizowanie BEC !

Pierwsze kondensaty BE atomów uzyskali w 1995 r. E. Cornell, C. Wieman oraz W. Ketterle.

Nagroda Nobla, 2001 r.

Kondensacja Bosego-Einsteina



^{87}Rb

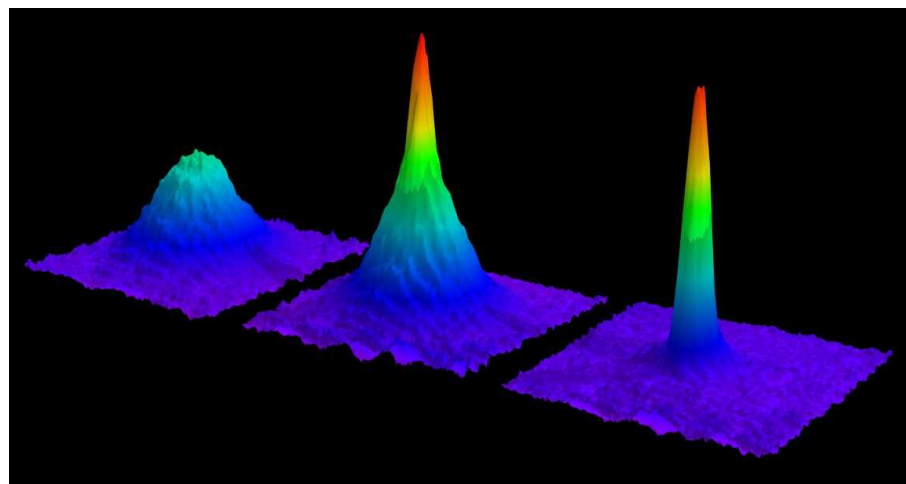
JILA 1995

(E. Cornell i wsp.)

^{23}Na

MIT 1995

(W. Ketterle
i wsp.)



Pierwsze kondensaty BE atomów typu bozonowego.

Jak rozpoznać BEC ?

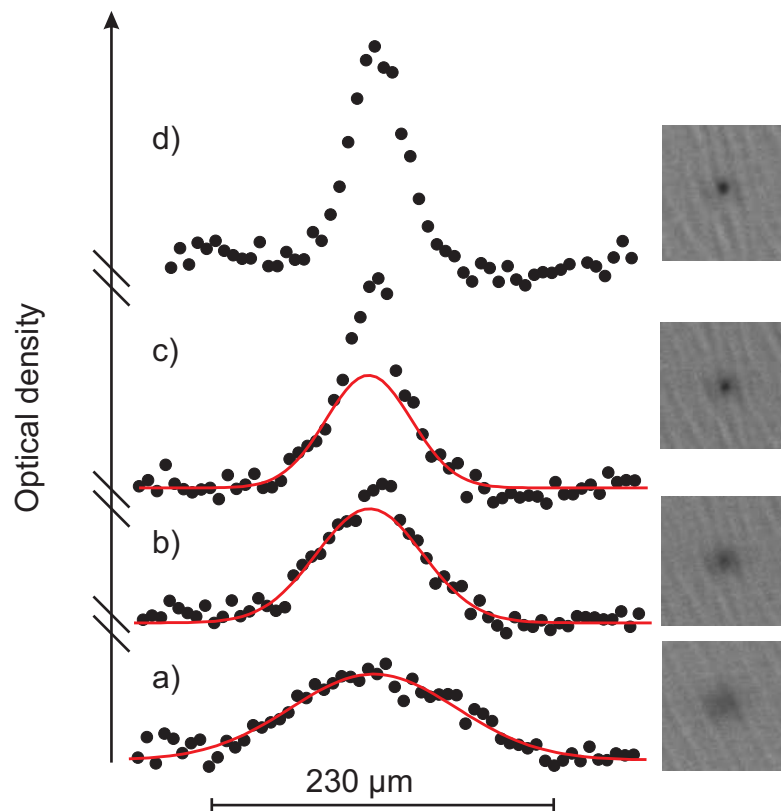
–

na przykładzie ^{40}Ca

Jak rozpoznać BEC ?

– na przykładzie ^{40}Ca

W przypadku atomów w pułapkach kondensat BE gromadzi się na najniżym poziomie oscylatora harmonicznego

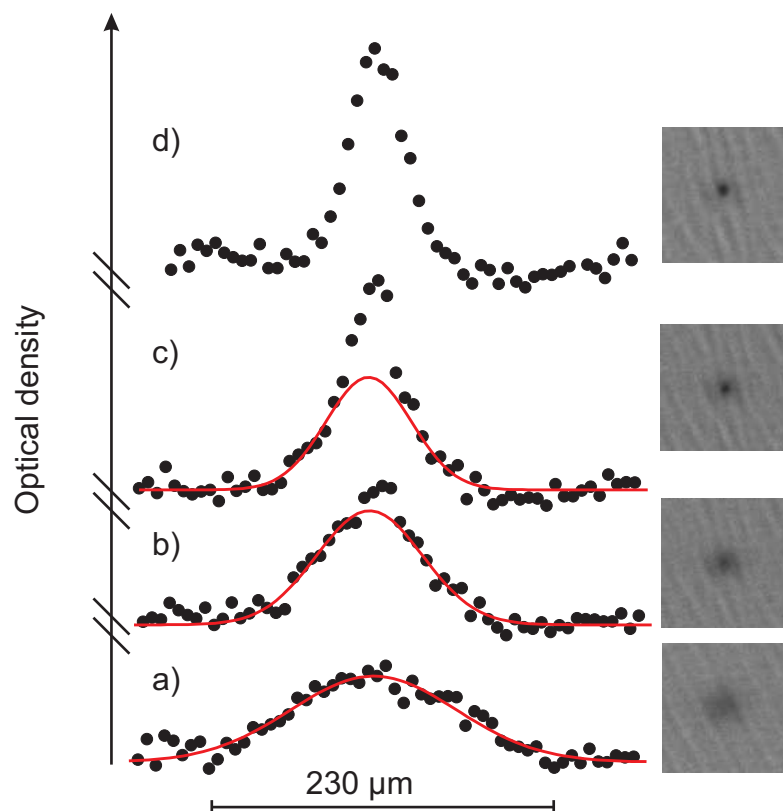


S. Kraft et al, Phys. Rev. Lett. 103, 130401 (2009).

Jak rozpoznać BEC ?

– na przykładzie ^{40}Ca

W przypadku atomów w pułapkach kondensat BE gromadzi się na najniżym poziomie oscylatora harmonicznego



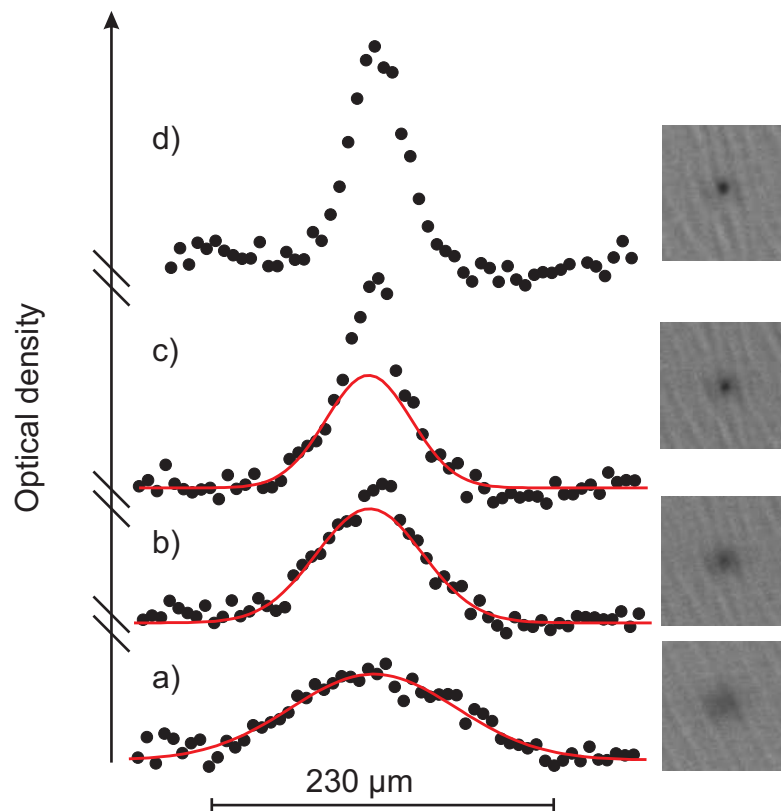
S. Kraft et al, Phys. Rev. Lett. 103, 130401 (2009).

Symptmem BEC jest bimodalny rozkład atomów.

Jak rozpoznać BEC ?

– na przykładzie ^{40}Ca

W przypadku atomów w pułapkach kondensat BE gromadzi się na najniższym poziomie oscylatora harmonicznego



Dla $T \ll T_{BE}$:

$$n(x) \simeq \exp\left(\frac{-m\omega_x x^2}{\hbar}\right)$$

$$T_{BE} \simeq 170\ \text{nK}$$

Dla $T \gg T_{BE}$:

$$n(x) \simeq \exp\left(\frac{-m\omega_x^2 x^2}{2k_B T}\right)$$

S. Kraft et al, Phys. Rev. Lett. 103, 130401 (2009).

Symptmem BEC jest bimodalny rozkład atomów.

Fakty liczbowe

oraz komentarze

Fakty liczbowe

oraz komentarze

★ Obecnie udaje się skondesować nawet do

90 %

atomów zgromadzonych w pułapce.

Fakty liczbowe

oraz komentarze

★ Obecnie udaje się skondensować nawet do

90 %

atomów zgromadzonych w pułapce.

W nadciekłym ^4He kondensuje tylko 8 % atomów !

Fakty liczbowe

oraz komentarze

★ Obecnie udaje się skondensować nawet do

90 %

atomów zgromadzonych w pułapce.

W nadciekłym ^4He kondensuje tylko 8 % atomów !

★ Koncentracje skond. atomów wynoszą około

10^{14} cm^{-3}

(tzn. w centrum pułapki).

Fakty liczbowe

oraz komentarze

★ Obecnie udaje się skondensować nawet do

90 %

atomów zgromadzonych w pułapce.

W nadciekłym ^4He kondensuje tylko 8 % atomów !

★ Koncentracje skond. atomów wynoszą około

10^{14} cm^{-3}

(tzn. w centrum pułapki).

Jest to 100 000 mniej niż gęstość powietrza !

Fakty liczbowe

oraz komentarze

★ Obecnie udaje się skondensować nawet do

90 %

atomów zgromadzonych w pułapce.

W nadciekłym ^4He kondensuje tylko 8 % atomów !

★ Koncentracje skond. atomów wynoszą około

10^{14} cm^{-3}

(tzn. w centrum pułapki).

Jest to 100 000 mniej niż gęstość powietrza !

★ Łatwo zaobserwować kondensację BE atomów,

nadciekłość

jest natomiast trudna do identyfikacji.

Fakty liczbowe

oraz komentarze

★ Obecnie udaje się skondensować nawet do

90 %

atomów zgromadzonych w pułapce.

W nadciekłym ^4He kondensuje tylko 8 % atomów !

★ Koncentracje skond. atomów wynoszą około

10^{14} cm^{-3}

(tzn. w centrum pułapki).

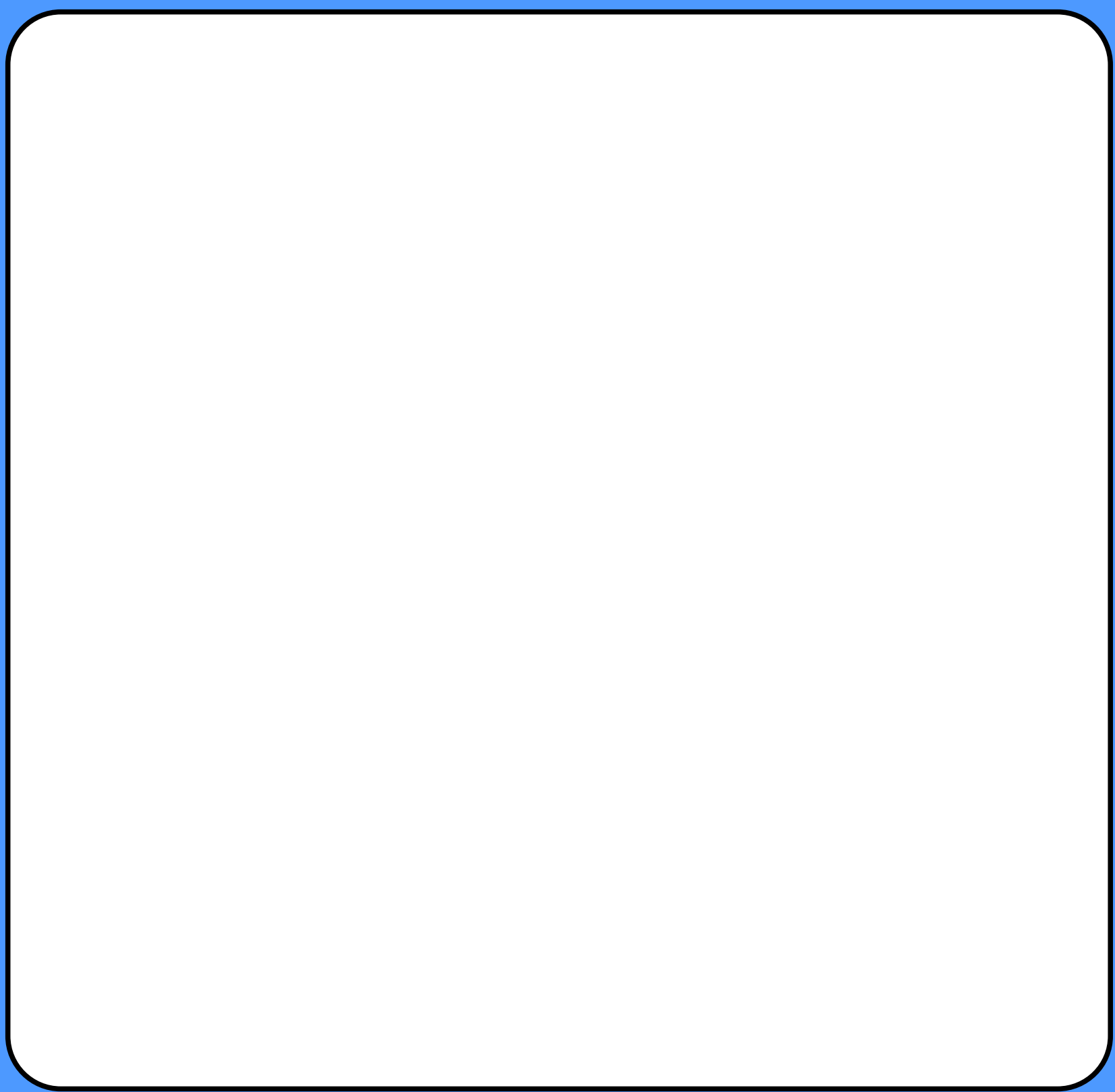
Jest to 100 000 mniej niż gęstość powietrza !

★ Łatwo zaobserwować kondensację BE atomów,

nadciekłość

jest natomiast trudna do identyfikacji.

Odwrotnie niż w przypadku $^4\text{He-II}$!



Nadciekłość

-

sposoby identyfikacji

Nadciekłość

-

sposoby identyfikacji

1) **zanik lepkości**

Nadciekłość

-

sposoby identyfikacji

1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**

Nadciekłość

-

sposoby identyfikacji

- 1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**
- 2) **redukcja m. bezwładności**

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) zanik lepkości **raczej niemożliwe**
- 2) redukcja m. bezwładności **raczej niemożliwe**

Nadciekłość

- **sposoby identyfikacji**

- 1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**
- 2) **redukcja m. bezwładności** **raczej niemożliwe**
- 3) **cechy kolektywne (drugi dźwięk itp)**

Nadciekłość

- **sposoby identyfikacji**

- 1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**
- 2) **redukcja m. bezwładności** **raczej niemożliwe**
- 3) **cechy kolektywne (drugi dźwięk itp)** .. **specyficzne**

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**
- 2) **redukcja m. bezwładności** **raczej niemożliwe**
- 3) **cechy kolektywne (drugi dźwięk itp)** .. **specyficzne**
- 4) **sieć Abrikosova wirów kwantowych**

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**
- 2) **redukcja m. bezwładności** **raczej niemożliwe**
- 3) **cechy kolektywne (drugi dźwięk itp)** .. **specyficzne**
- 4) **sieć Abrikosova wirów kwantowych** **OK**

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**
- 2) **redukcja m. bezwładności** **raczej niemożliwe**
- 3) **cechy kolektywne (drugi dźwięk itp)** .. **specyficzne**
- 4) **sieć Abrikosova wirów kwantowych** **OK**
- 5) **prędkość krytyczna**

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) **zanik lepkości** **raczej niemożliwe**
- 2) **redukcja m. bezwładności** **raczej niemożliwe**
- 3) **cechy kolektywne (drugi dźwięk itp)** .. **specyficzne**
- 4) **sieć Abrikosova wirów kwantowych** **OK**
- 5) **prędkość krytyczna** **OK**

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) zanik lepkości **raczej niemożliwe**
- 2) redukcja m. bezwładności **raczej niemożliwe**
- 3) cechy kolektywne (drugi dźwięk itp) .. **specyficzne**
- 4) sieć Abrikosova wirów kwantowych **OK**
- 5) prędkość krytyczna **OK**
- 6) zjawisko Josephsona

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) zanik lepkości **raczej niemożliwe**
- 2) redukcja m. bezwładności **raczej niemożliwe**
- 3) cechy kolektywne (drugi dźwięk itp) .. **specyficzne**
- 4) sieć Abrikosova wirów kwantowych **OK**
- 5) prędkość krytyczna **OK**
- 6) zjawisko Josephsona **OK**

Nadciekłość

- sposoby identyfikacji

- 1) zanik lepkości **raczej niemożliwe**
- 2) redukcja m. bezwładności **raczej niemożliwe**
- 3) cechy kolektywne (drugi dźwięk itp) .. **specyficzne**
- 4) sieć Abrikosova wirów kwantowych **OK**
- 5) prędkość krytyczna **OK**
- 6) zjawisko Josephsona **OK**

...

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Sieć wirów kwantowych

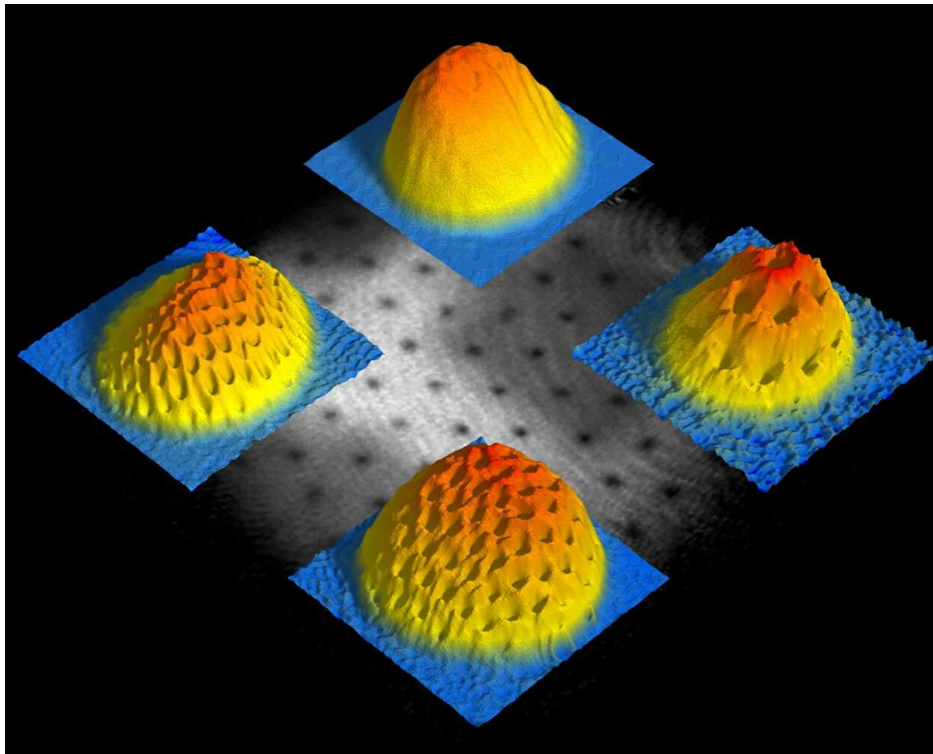
W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

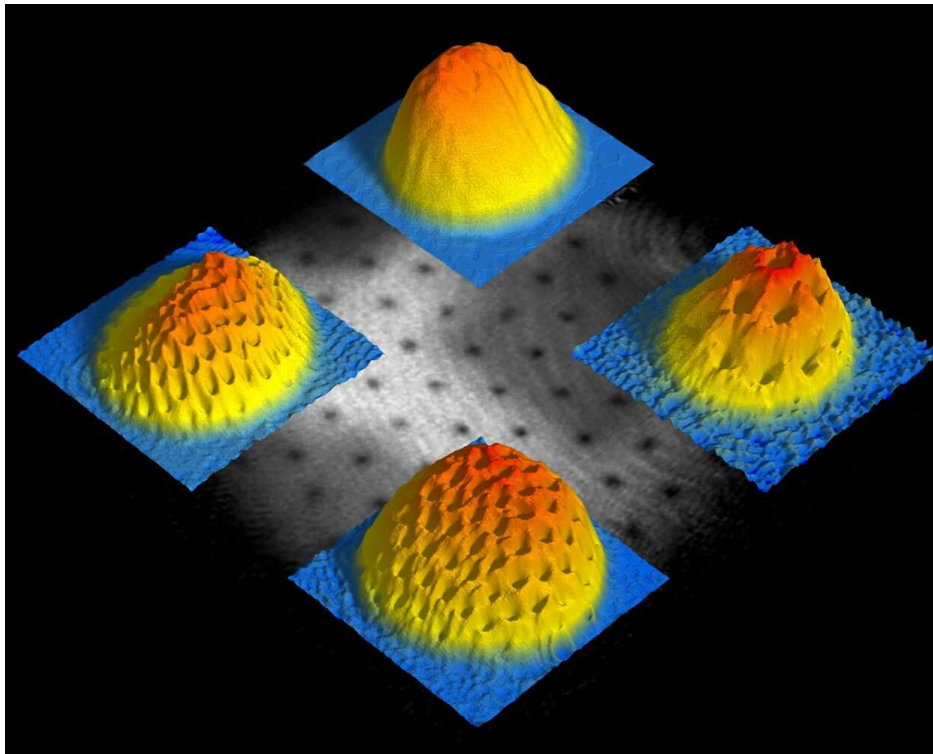
Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych

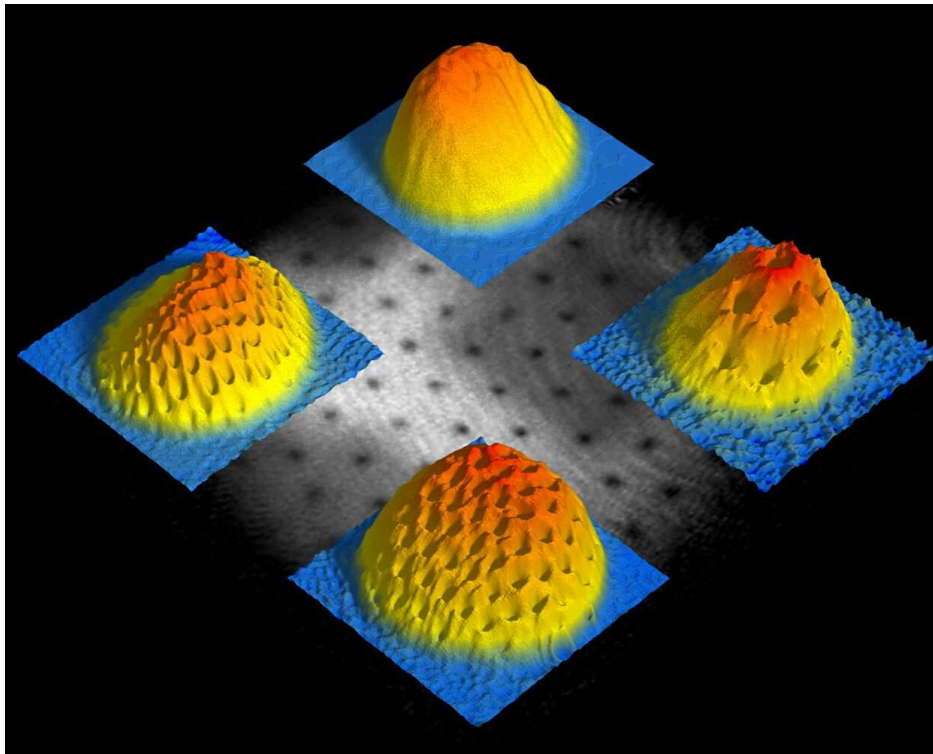


J.R. Abo-Shaer et al, Science **292**, 476 (2001).

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



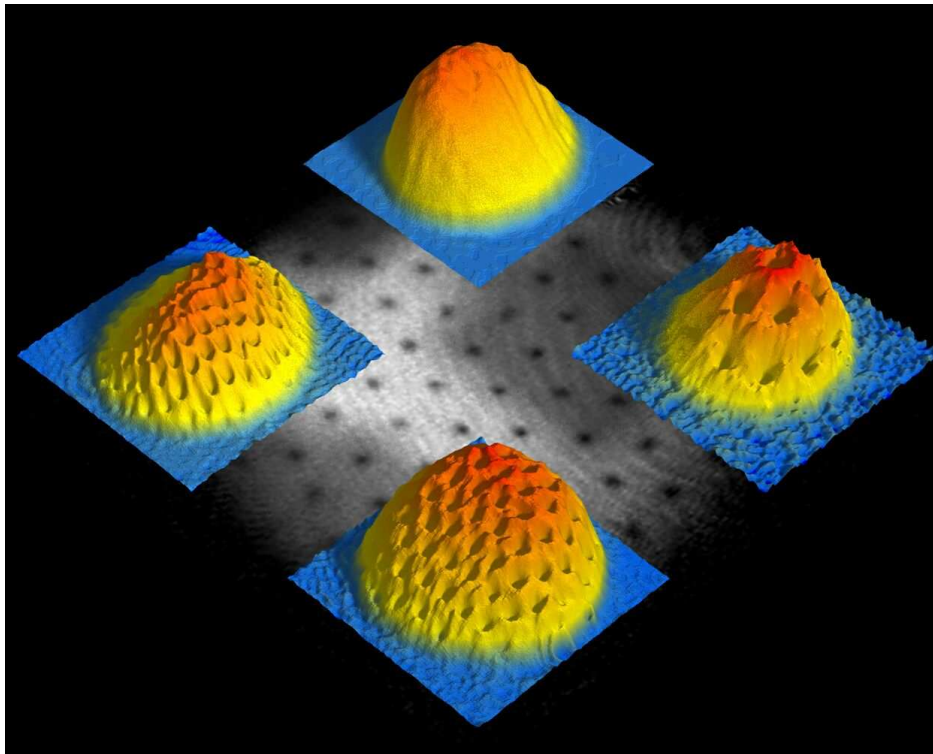
Atomy ^{23}Na

J.R. Abo-Shaer et al, Science **292**, 476 (2001).

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



Atomy ^{23}Na

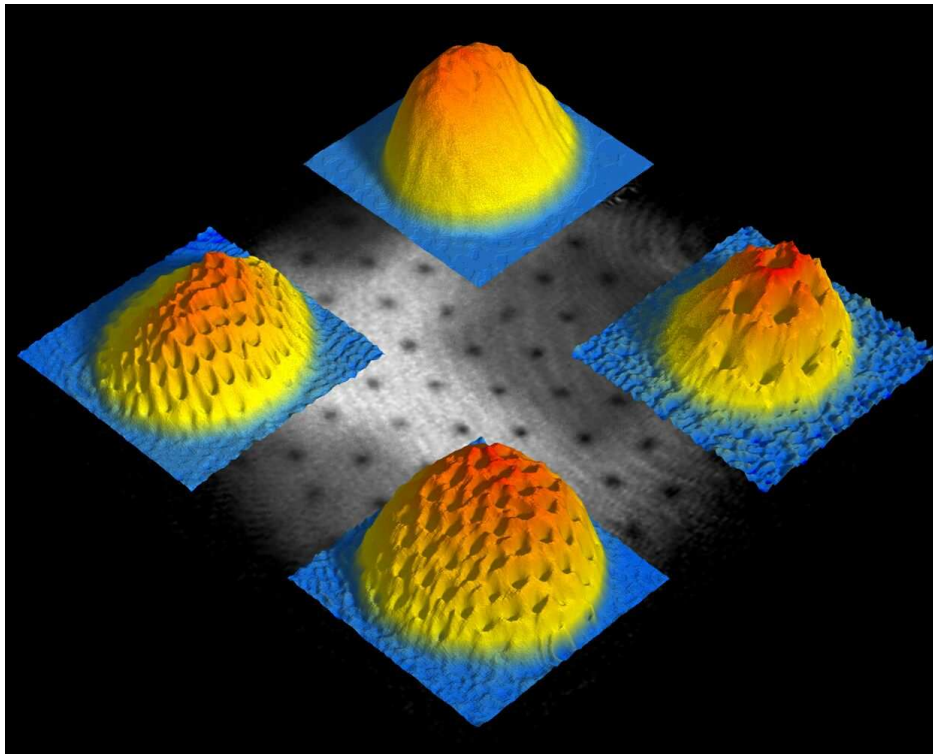
$$N \simeq 5 \times 10^7$$

J.R. Abo-Shaer et al, Science **292**, 476 (2001).

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



Atomy ^{23}Na

$$N \simeq 5 \times 10^7$$

Uzyskano aż

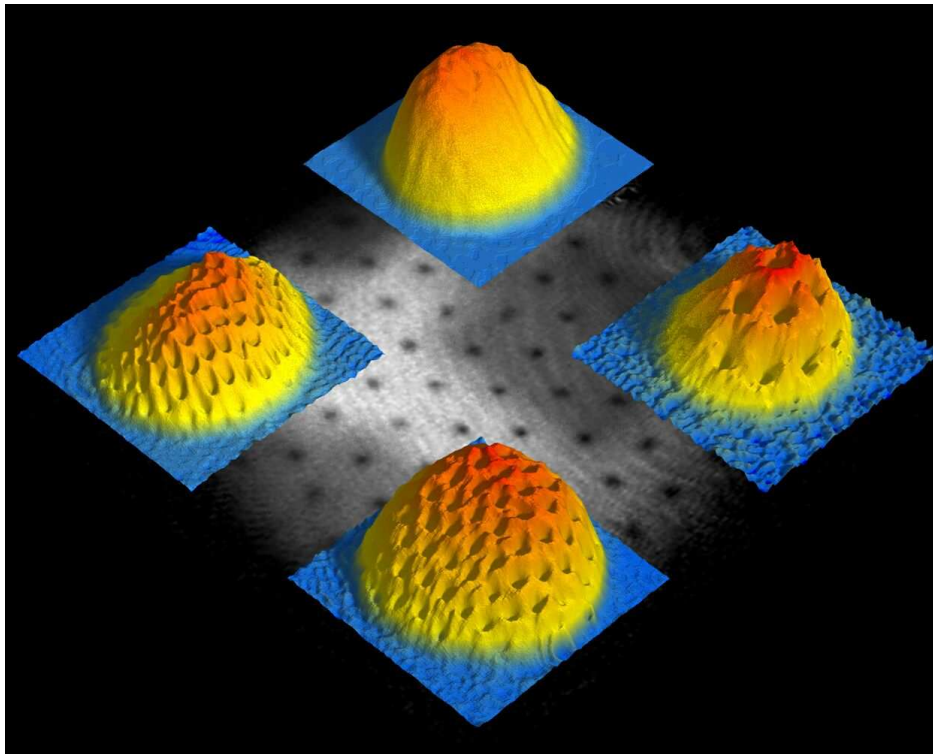
130 wirów

J.R. Abo-Shaer et al, Science **292**, 476 (2001).

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



Atomy ^{23}Na

$$N \simeq 5 \times 10^7$$

Uzyskano aż

130 wirów

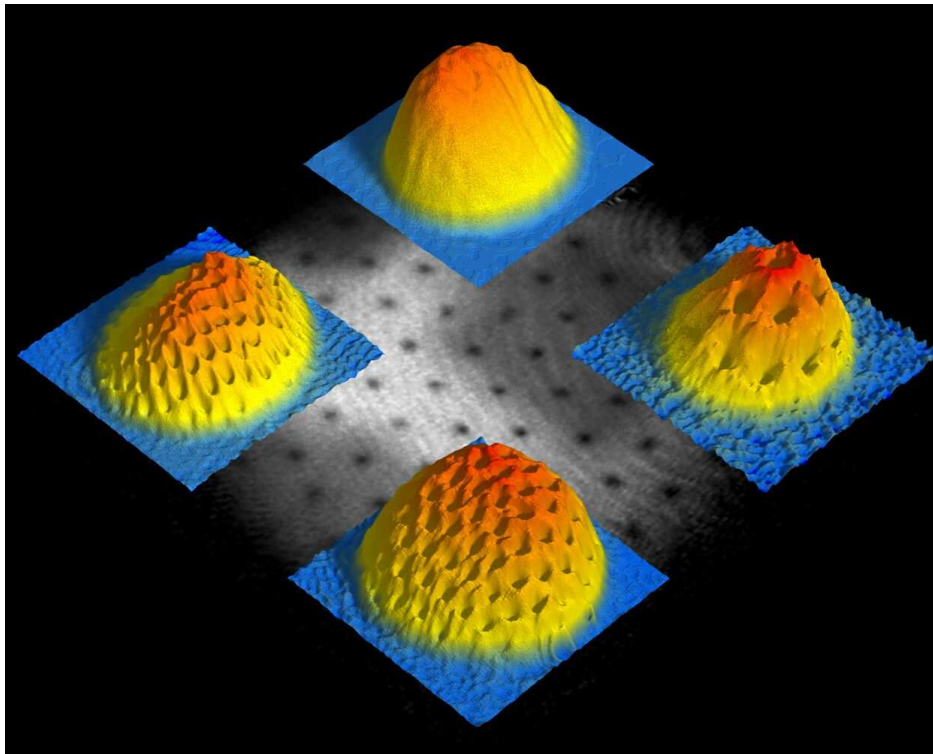
$$\tau \sim 40 \text{ sek}$$

J.R. Abo-Shaer et al, Science **292**, 476 (2001).

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



Atomy ^{23}Na

$$N \simeq 5 \times 10^7$$

Uzyskano aż

130 wirów

$$\tau \sim 40 \text{ sek}$$

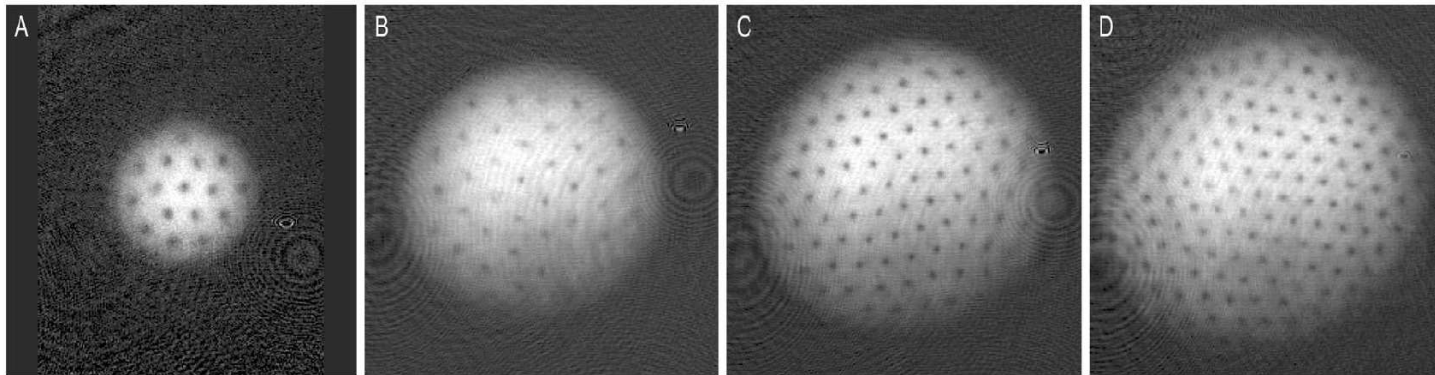
J.R. Abo-Shaer et al, Science **292**, 476 (2001).

Sieć była **regularna** mimo niejednorodności BEC !

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



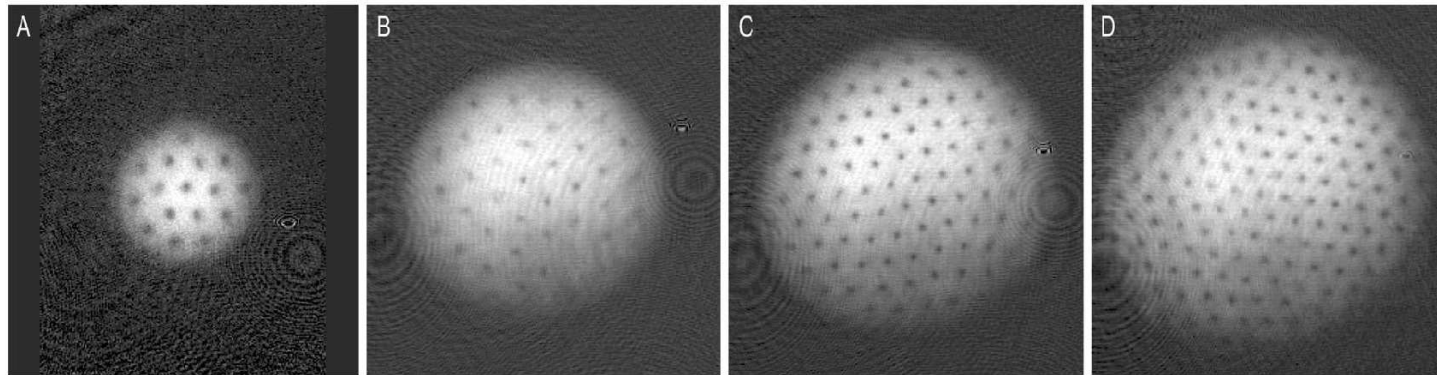
J.R. Abo-Shaer et al, Science 292, 476 (2001).

Uzyskany obraz sieci 16, 32, 80 oraz 130 wirów.

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



J.R. Abo-Shaer et al, Science 292, 476 (2001).

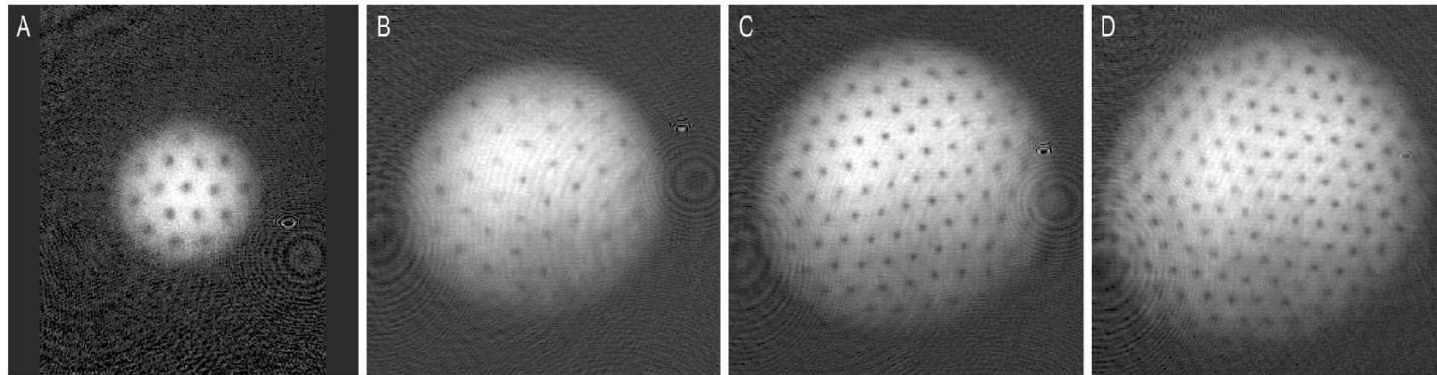
Uzyskany obraz sieci 16, 32, 80 oraz 130 wirów.

Sieć jest regularna aż do brzegów kondensatu !

Sieć wirów kwantowych

W. Ketterle i wsp. (MIT)

Atomowe kondensaty BE wprowadzone w rotację przez lasery wykazały regularną sieć (Abrikosova) wirów kwantowych



J.R. Abo-Shaer et al, Science 292, 476 (2001).

Uzyskany obraz sieci 16, 32, 80 oraz 130 wirów.

Sieć jest regularna aż do brzegów kondensatu !

W nadciekłym ^4He udawało się uzyskać jedynie do 11 wirów !

Efekt Josephsona

atomowych kondensatów BE

Efekt Josephsona

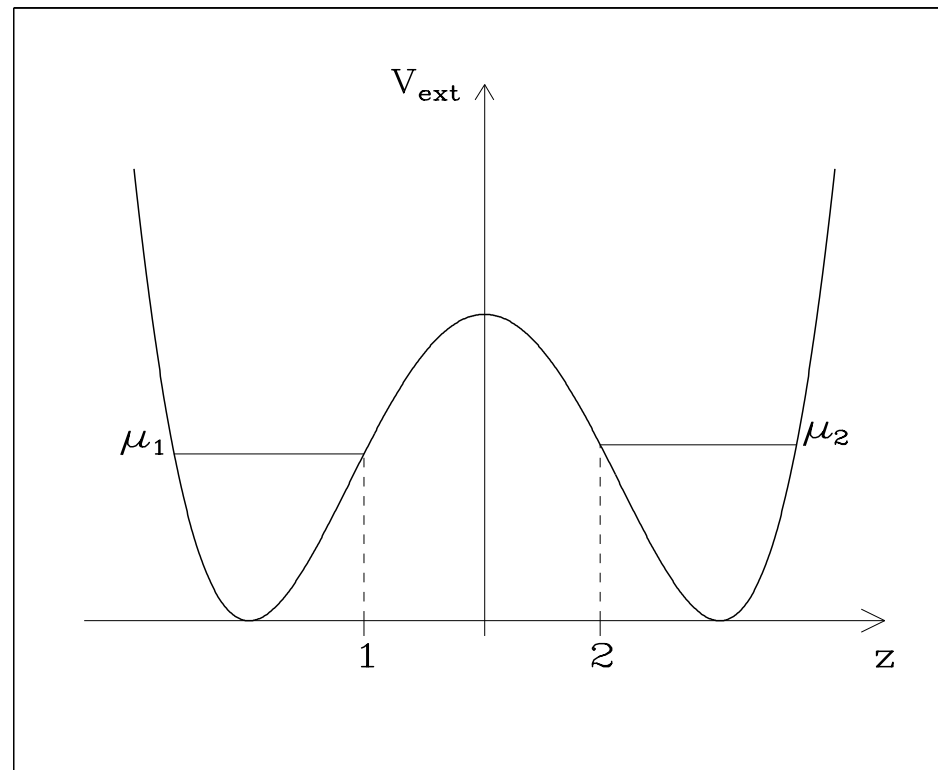
atomowych kondensatów BE

Idea zjawiska Josephsona dla atomowych kondensatów BE

Efekt Josephsona

atomowych kondensatów BE

Idea zjawiska Josephsona dla atomowych kondensatów BE

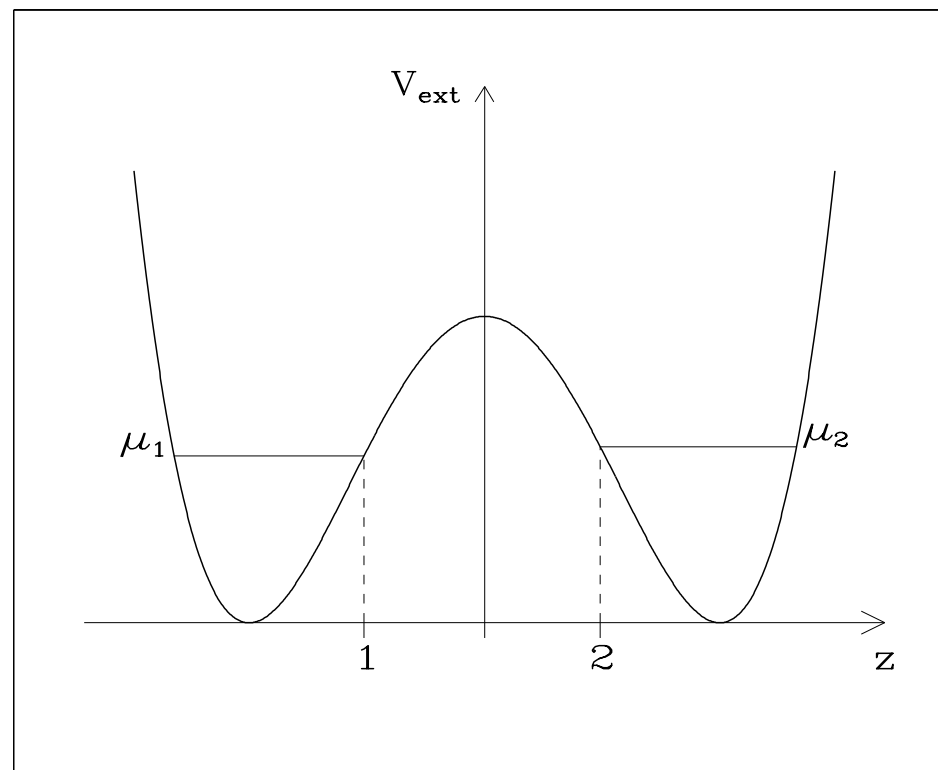


F. Dalfovo, L.P. Pitaevskii, S. Stringari, Rev. Mod. Phys. 71, 463 (1999).

Efekt Josephsona

atomowych kondensatów BE

Idea zjawiska Josephsona dla atomowych kondensatów BE



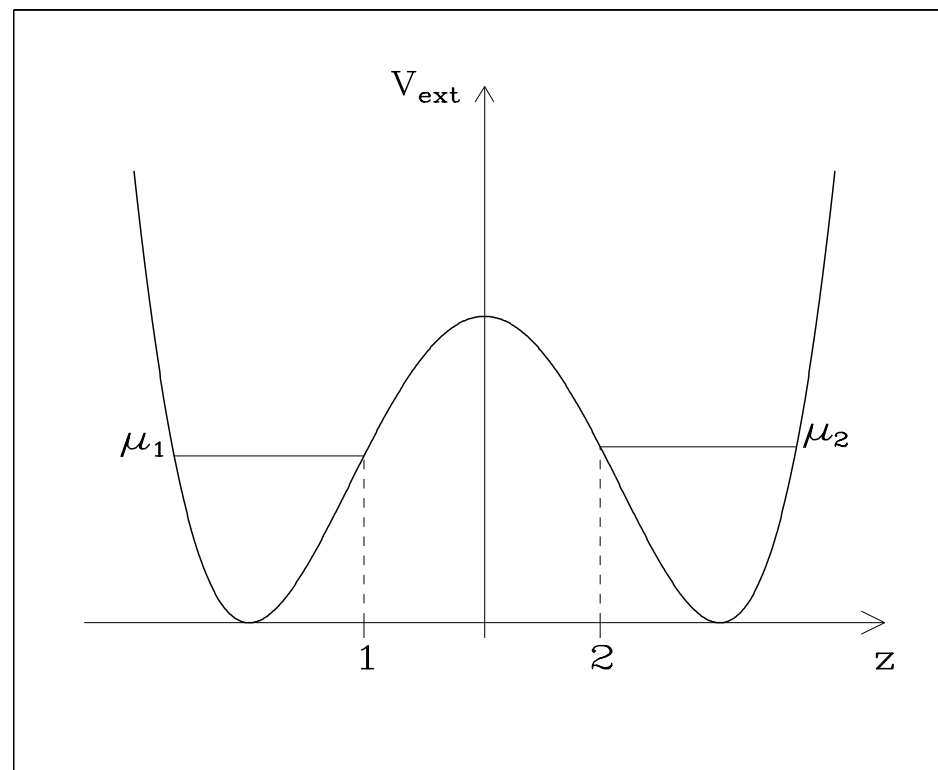
F. Dalfovo, L.P. Pitaevskii, S. Stringari, Rev. Mod. Phys. 71, 463 (1999).

⇒ Potencjały chemiczne $\mu_1 \neq \mu_2$ (czyli $N_1 \neq N_2$)

Efekt Josephsona

atomowych kondensatów BE

Idea zjawiska Josephsona dla atomowych kondensatów BE



F. Dalfovo, L.P. Pitaevskii, S. Stringari, Rev. Mod. Phys. 71, 463 (1999).

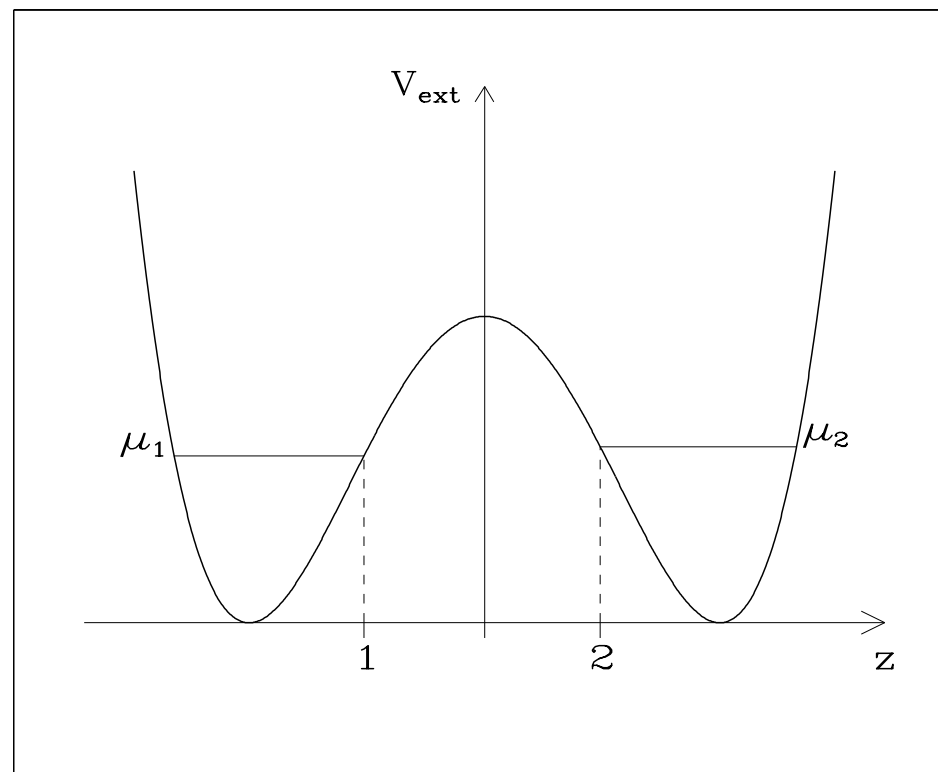
⇒ Potencjały chemiczne $\mu_1 \neq \mu_2$ (czyli $N_1 \neq N_2$)

⇒ prowadzą do różnicy faz kondensatów $\theta_1 \neq \theta_2$

Efekt Josephsona

atomowych kondensatów BE

Idea zjawiska Josephsona dla atomowych kondensatów BE



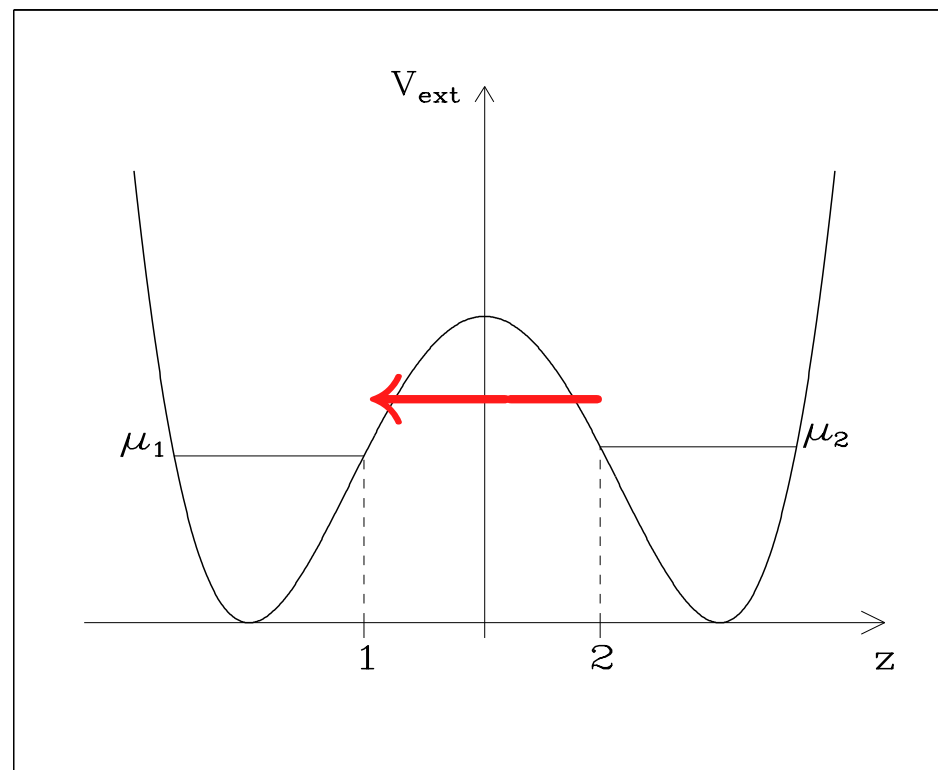
F. Dalfovo, L.P. Pitaevskii, S. Stringari, Rev. Mod. Phys. 71, 463 (1999).

- ⇒ Potencjały chemiczne $\mu_1 \neq \mu_2$ (czyli $N_1 \neq N_2$)
- ⇒ prowadzą do różnicy faz kondensatów $\theta_1 \neq \theta_2$
- ⇒ indukując przepływ atomów między kondensatami.

Efekt Josephsona

atomowych kondensatów BE

Idea zjawiska Josephsona dla atomowych kondensatów BE



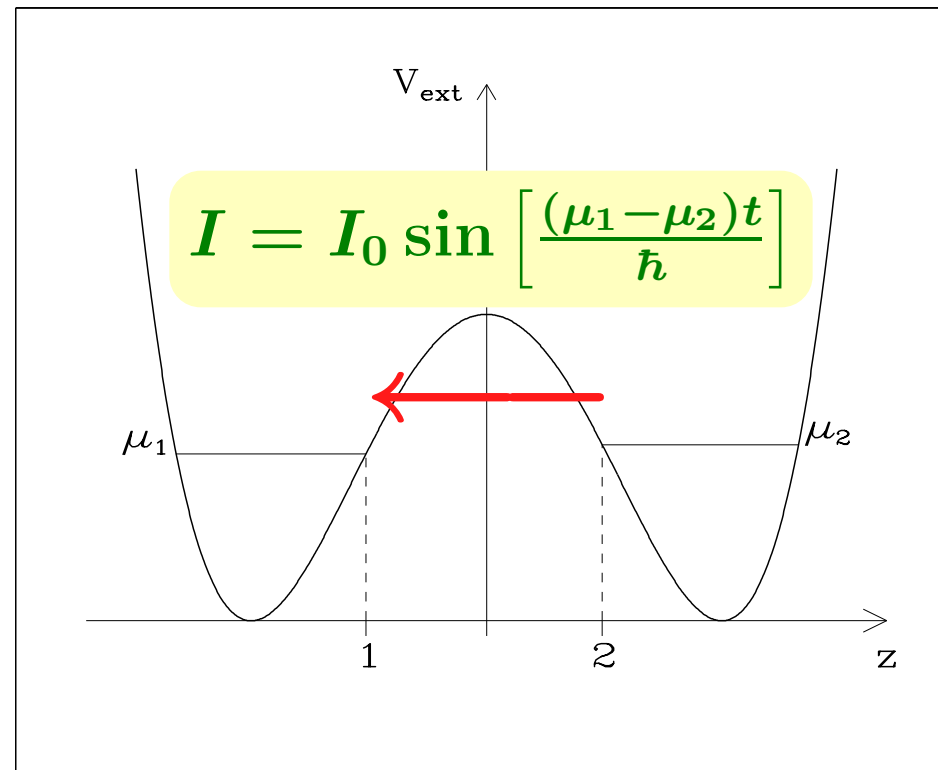
F. Dalfovo, L.P. Pitaevskii, S. Stringari, Rev. Mod. Phys. 71, 463 (1999).

- ⇒ Potencjały chemiczne $\mu_1 \neq \mu_2$ (czyli $N_1 \neq N_2$)
- ⇒ prowadzą do różnicy faz kondensatów $\theta_1 \neq \theta_2$
- ⇒ indukując przepływ atomów między kondensatami.

Efekt Josephsona

atomowych kondensatów BE

Idea zjawiska Josephsona dla atomowych kondensatów BE



F. Dalfovo, L.P. Pitaevskii, S. Stringari, Rev. Mod. Phys. 71, 463 (1999).

- ⇒ Potencjały chemiczne $\mu_1 \neq \mu_2$ (czyli $N_1 \neq N_2$)
- ⇒ prowadzą do różnicy faz kondensatów $\theta_1 \neq \theta_2$
- ⇒ indukując przepływ atomów między kondensatami.

Efekt Josephaona

realizacja zjawiska d.c.

Efekt Josephsona

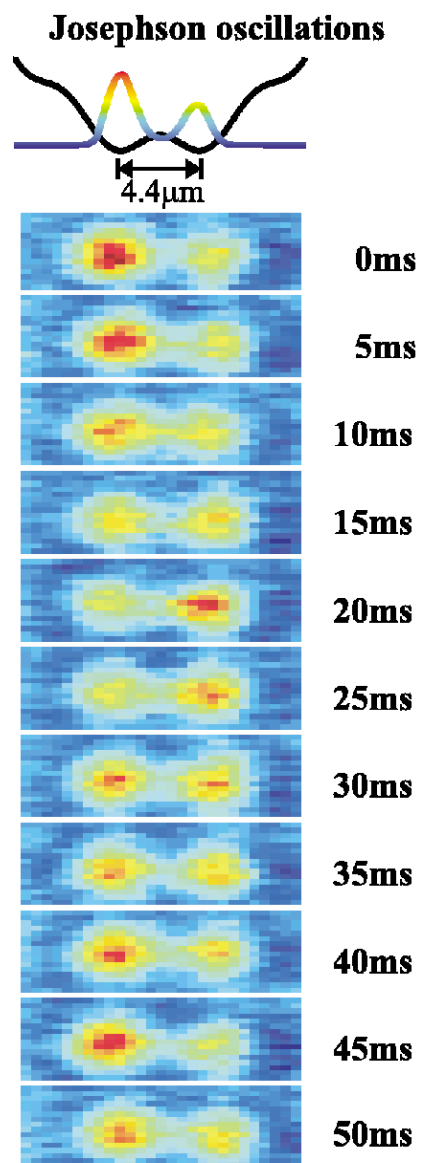
realizacja zjawiska d.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z Heidelberga

Efekt Josephsona

realizacja zjawiska d.c.

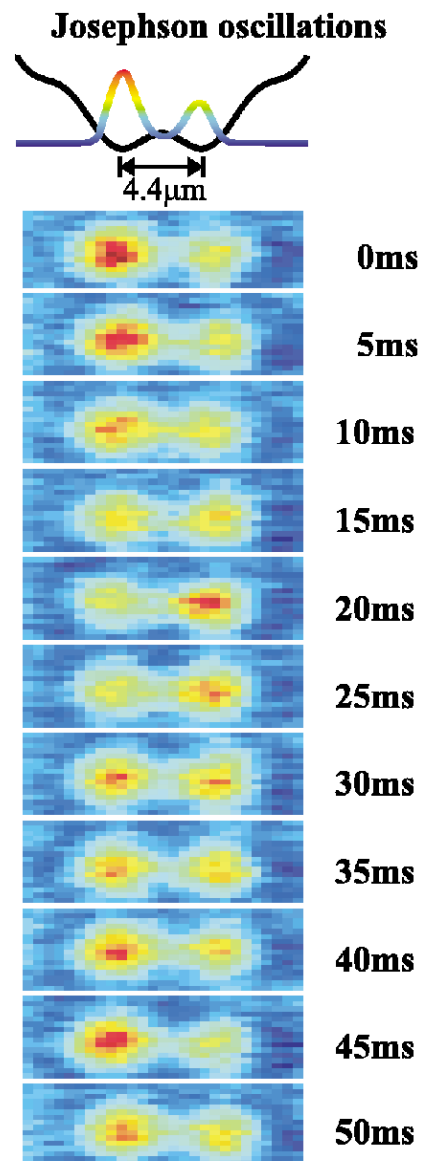
Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z Heidelberga



Efekt Josephsona

realizacja zjawiska d.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z Heidelberga

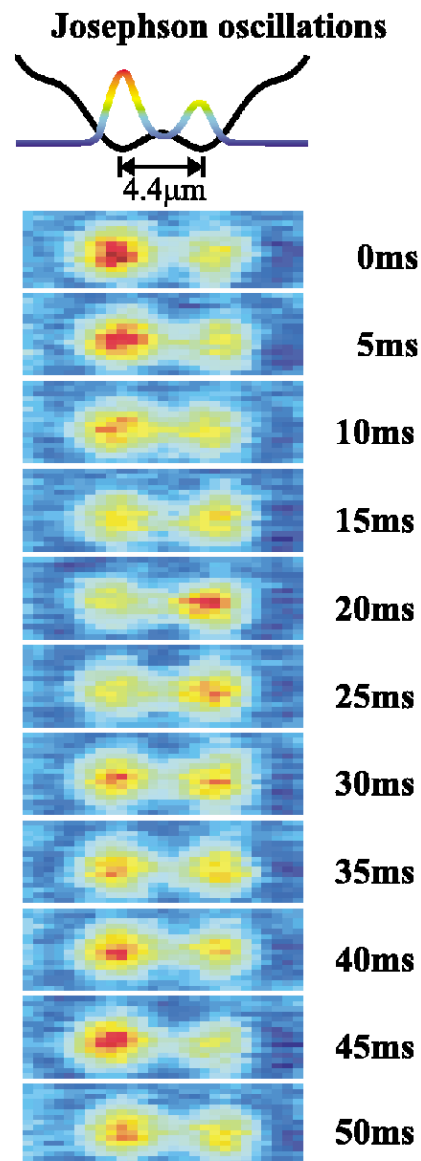


M. Albiez et al, Phys. Rev. Lett. 95, 010402 (2005).

Efekt Josephsona

realizacja zjawiska d.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z Heidelberga



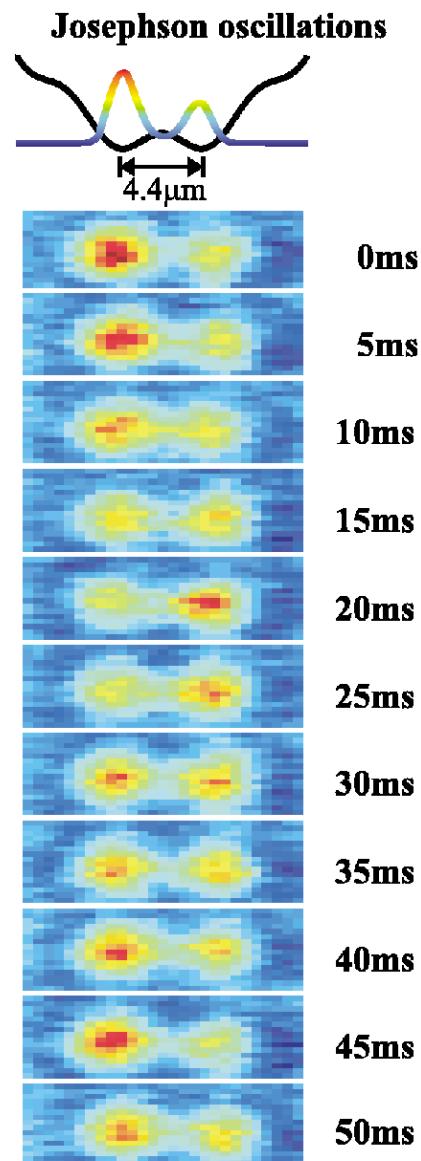
Rodzaj atomów: ^{87}Rb

M. Albiez et al, Phys. Rev. Lett. 95, 010402 (2005).

Efekt Josephsona

realizacja zjawiska d.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z Heidelberga



Rodzaj atomów: ^{87}Rb

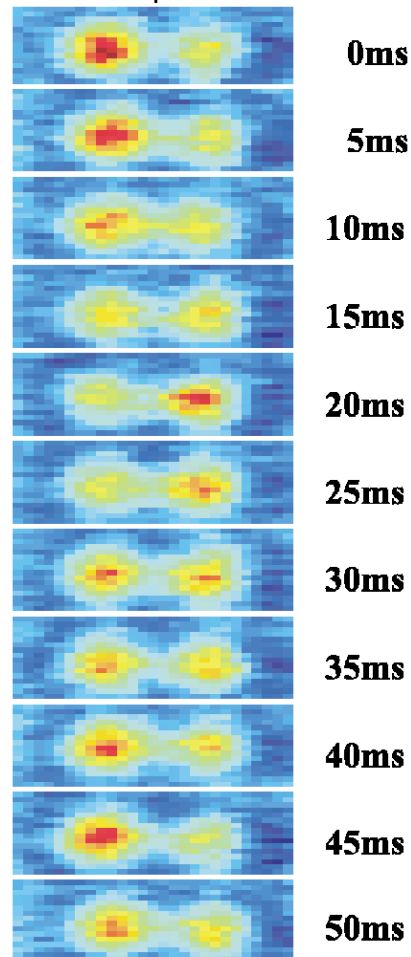
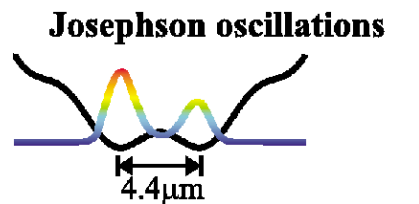
Ilość atomów: 1 200

M. Albiez et al, Phys. Rev. Lett. 95, 010402 (2005).

Efekt Josephsona

realizacja zjawiska d.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z Heidelberga



Rodzaj atomów: ^{87}Rb

Ilość atomów: 1 200

Oscylacje: $\omega \simeq 40 \text{ ms}$

M. Albiez et al, Phys. Rev. Lett. 95, 010402 (2005).

Efekt Josephsona

wersja zjawiska a.c.

Efekt Josephsona

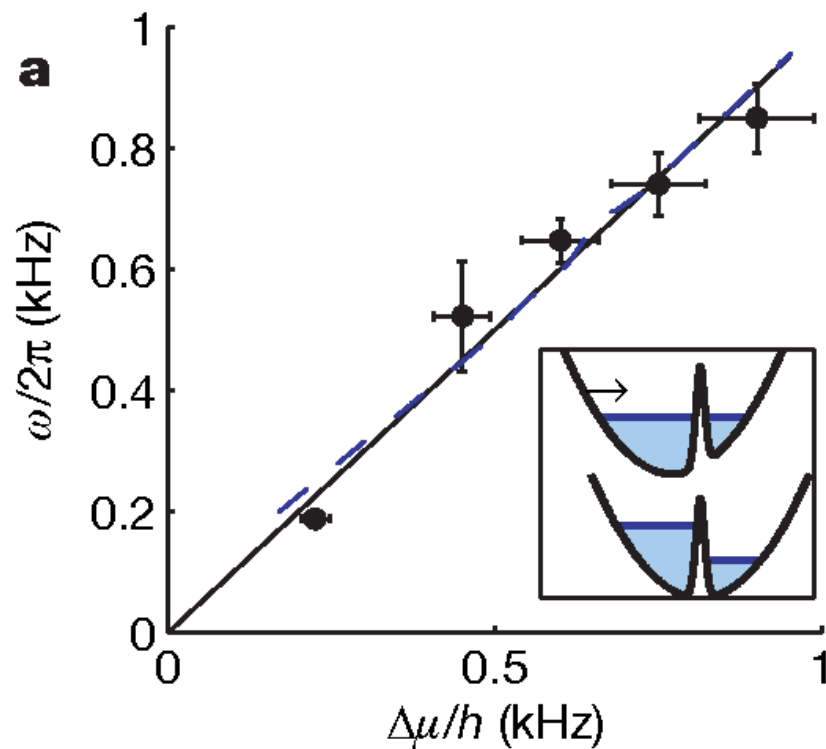
wersja zjawiska a.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z TECHNION-u

Efekt Josephsona

wersja zjawiska a.c.

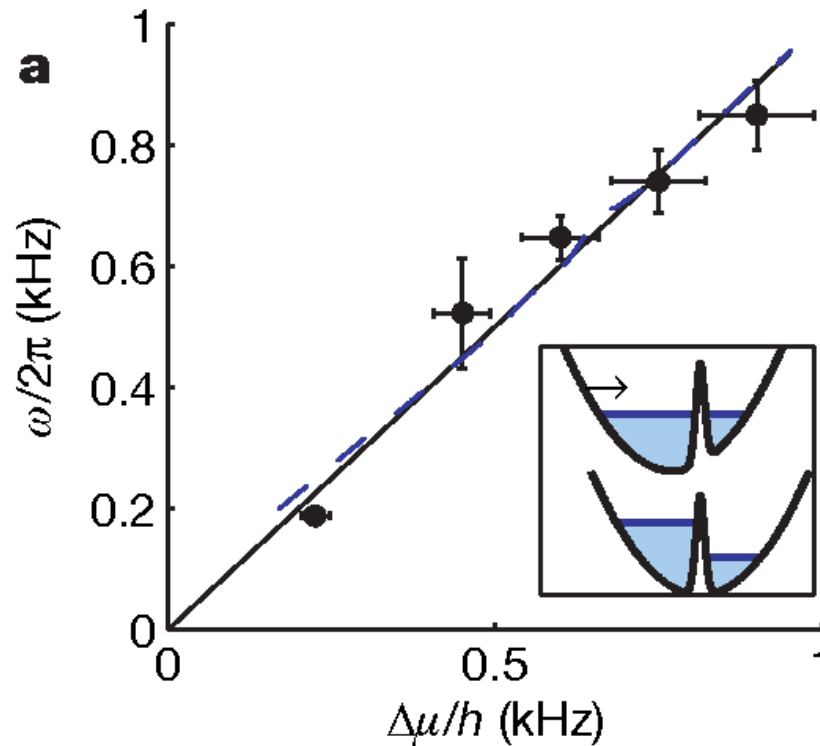
Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z TECHNION-u



Efekt Josephsona

wersja zjawiska a.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z TECHNION-u

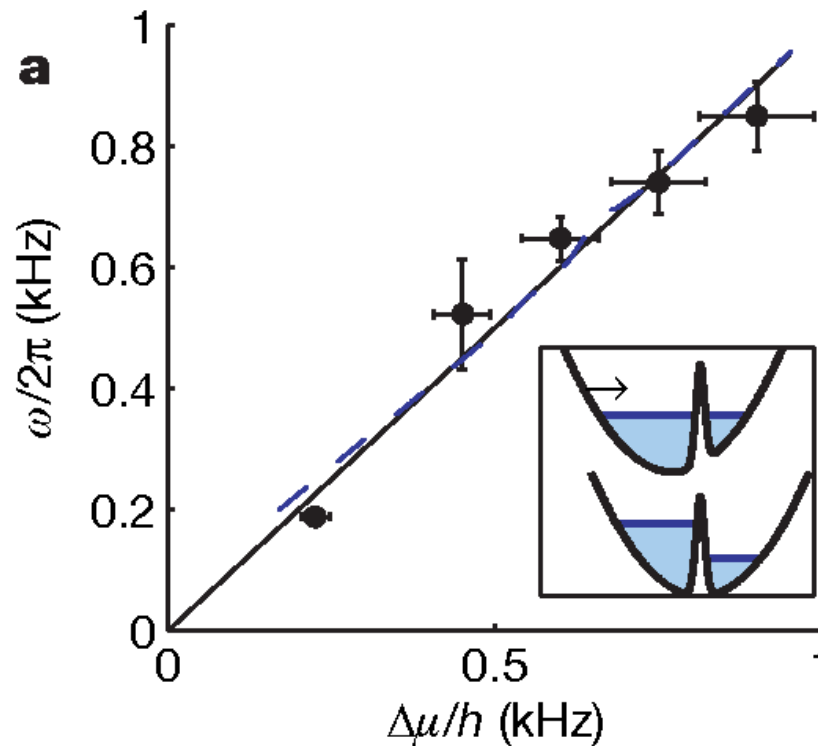


S. Levy et al, Nature **449**, 579 (2007).

Efekt Josephsona

wersja zjawiska a.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z TECHNION-u



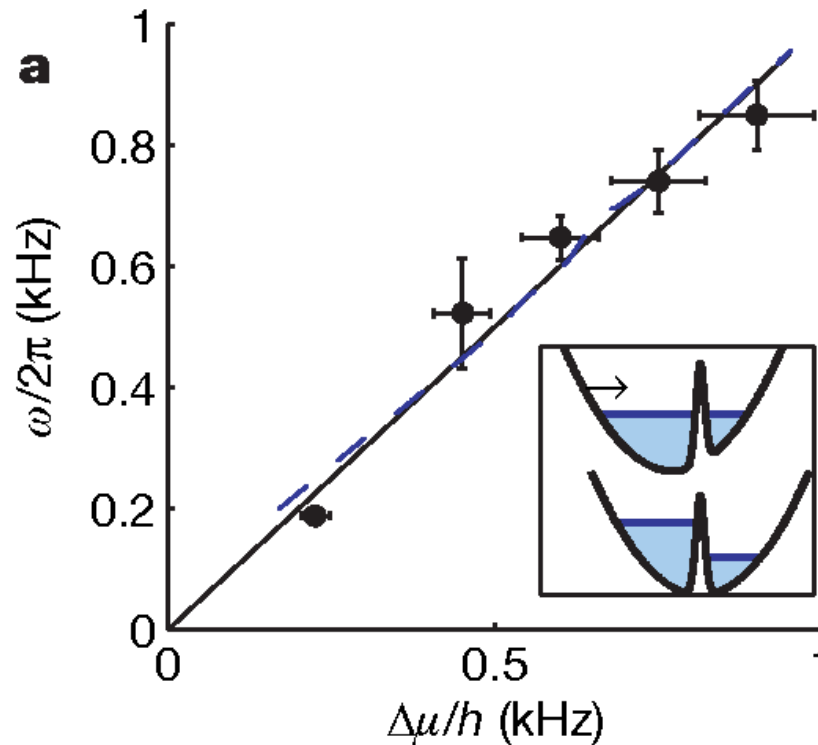
Atomy ⁸⁷Rb

S. Levy et al, Nature **449**, 579 (2007).

Efekt Josephsona

wersja zjawiska a.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z TECHNION-u



Atomy ⁸⁷Rb

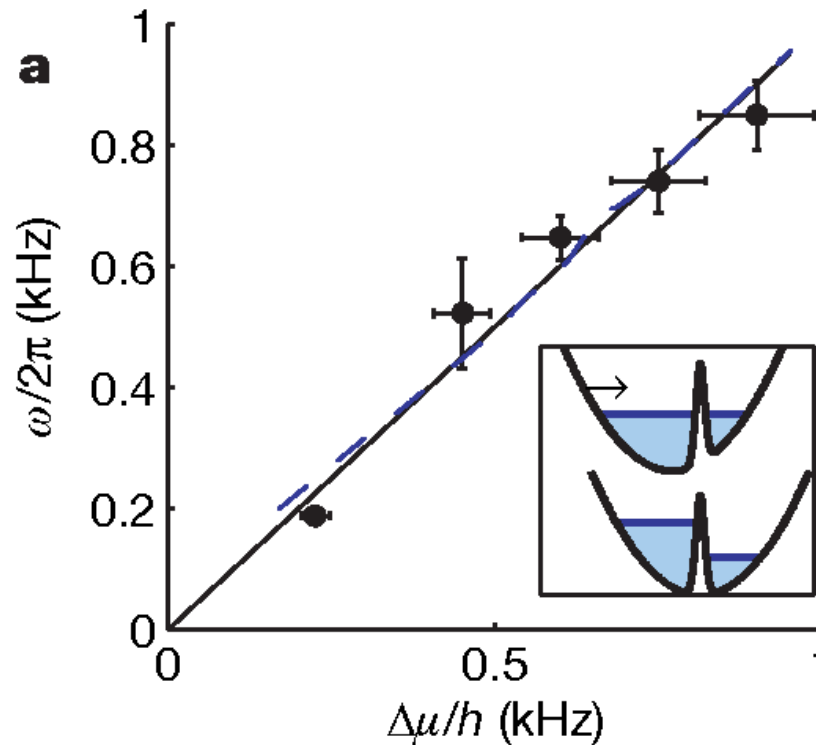
$N \simeq 100\,000$

S. Levy et al, Nature **449**, 579 (2007).

Efekt Josephsona

wersja zjawiska a.c.

Pierwsza doświadczalna realizacja przez grupę z TECHNION-u



Atomy ⁸⁷Rb

$N \simeq 100\,000$

S. Levy et al, Nature **449**, 579 (2007).

Oscylacje fazy odbywają się wg r-nia:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\Delta\mu}{\hbar}$$

2.2

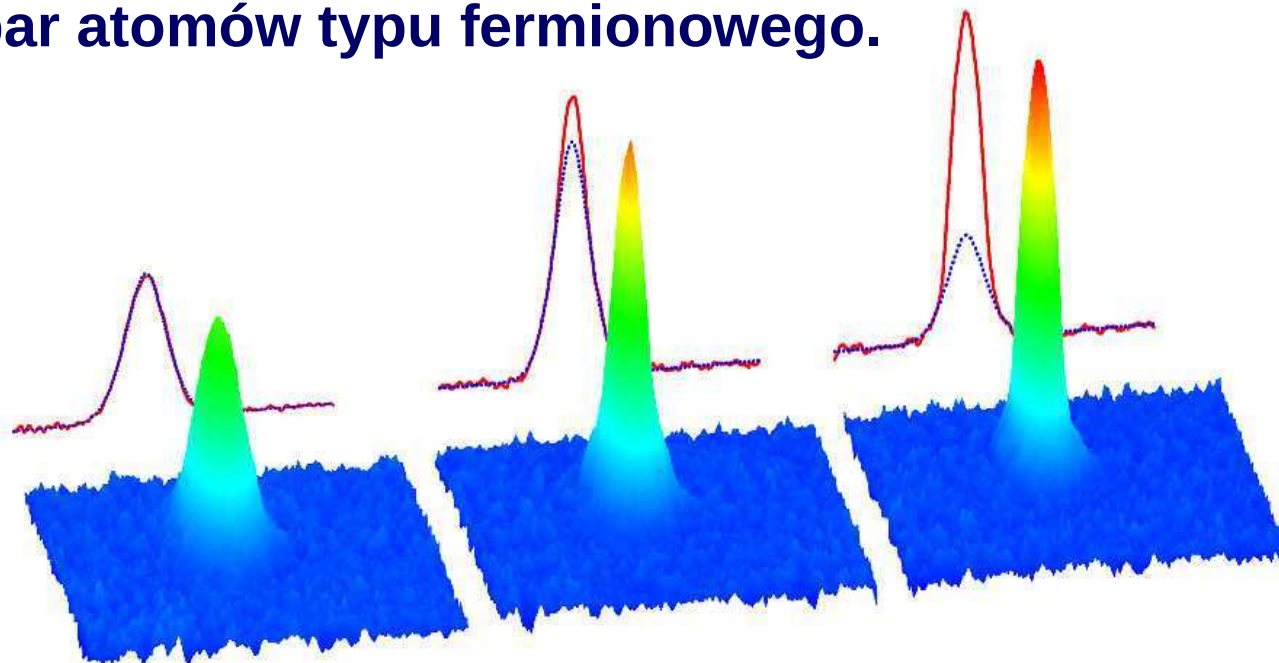
Kondensaty BE atomów

typu fermionowego

Kondensacja par fermionowych

Kondensacja par fermionowych

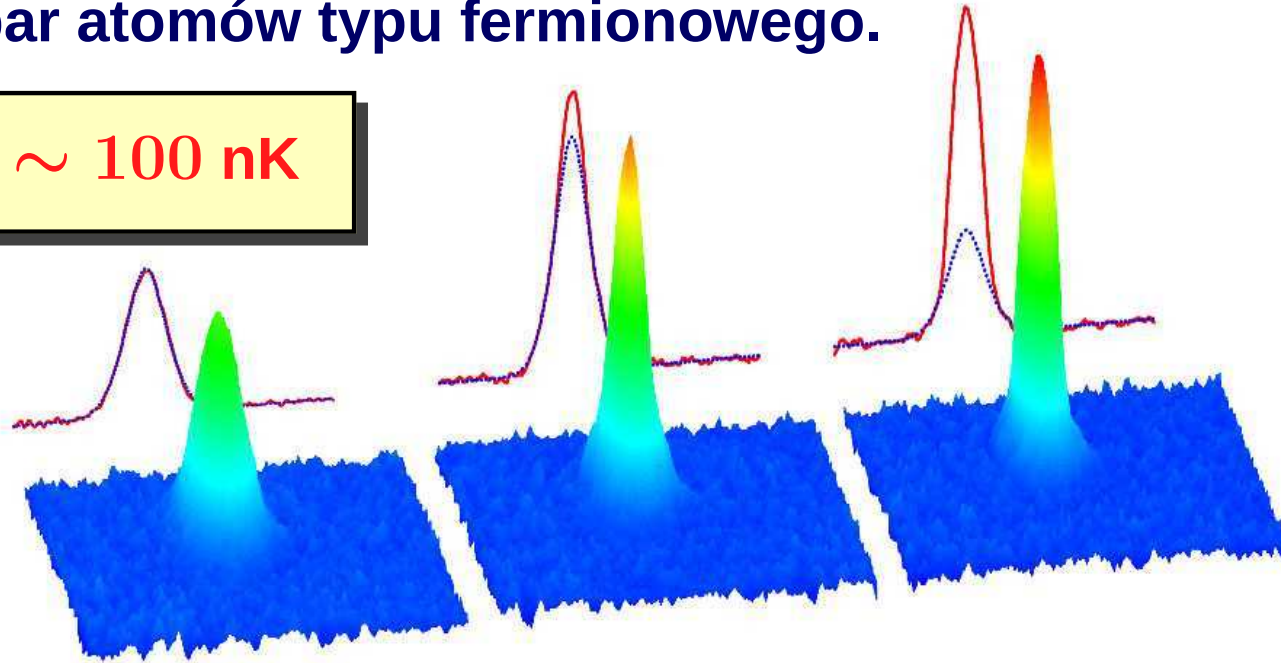
Na przełomie lat 2003 / 2004 uzyskano kondensaty BE par atomów typu fermionowego.



Kondensacja par fermionowych

Na przełomie lat 2003 / 2004 uzyskano kondensaty BE par atomów typu fermionowego.

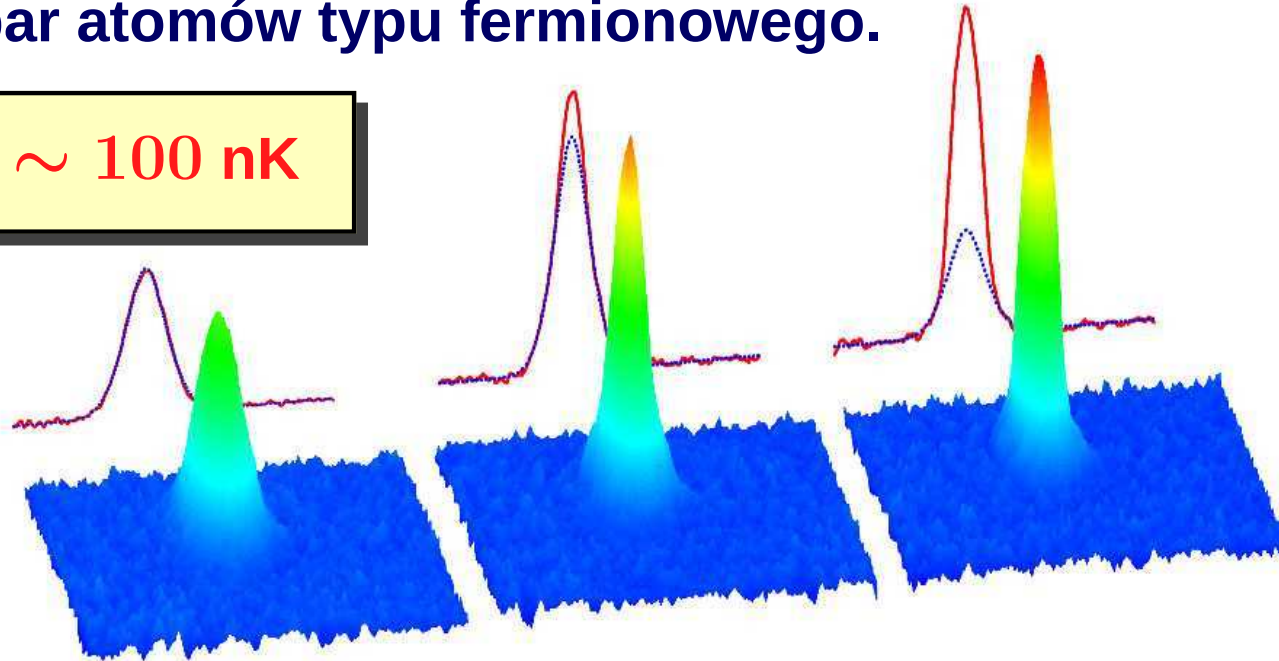
$$T_c \sim 100 \text{ nK}$$



Kondensacja par fermionowych

Na przełomie lat 2003 / 2004 uzyskano kondensaty BE par atomów typu fermionowego.

$$T_c \sim 100 \text{ nK}$$



-
- [1] M.W. Zwierlein *et al*, Phys. Rev. Lett. 92, 120403 (2004).
 - [2] C.A. Regal *et al*, Phys. Rev. Lett. 92, 040403 (2004).
 - [3] J. Kinast *et al*, Phys. Rev. Lett. 92, 150402 (2004).
 - [4] C. Chin *et al*, Science 305, 1128 (2004).

Kwantowa degeneracja

ewidencja dośw.

Kwantowa degeneracja

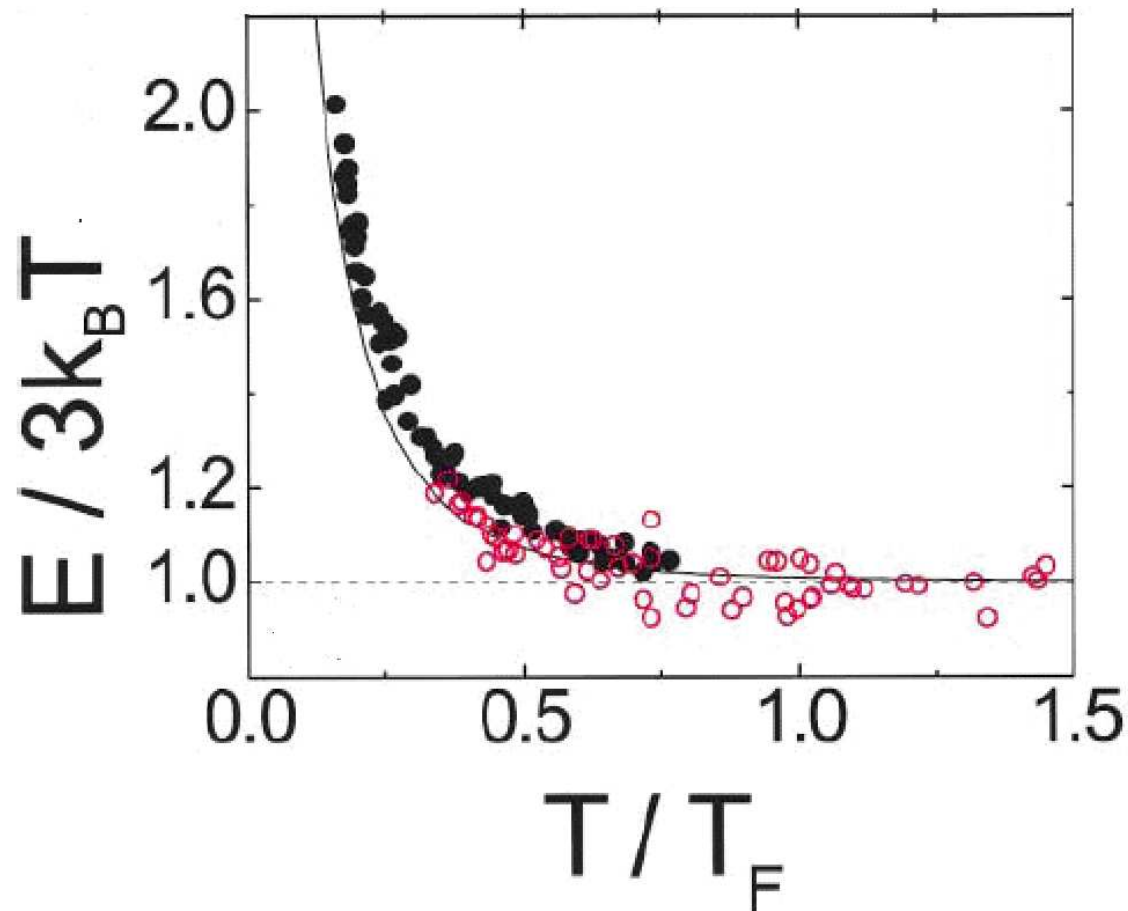
ewidencja dośw.

Zjawiska kwantowe mogą być obserwowalne poniżej T_F .

Kwantowa degeneracja

ewidencja dośw.

Zjawiska kwantowe mogą być obserwowalne poniżej T_F .



B. De Marco et al, Phys. Rev. Lett. bf 86, 5409 (2001).

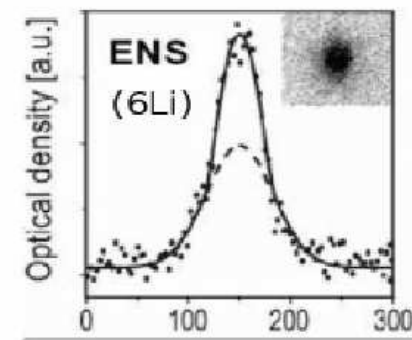
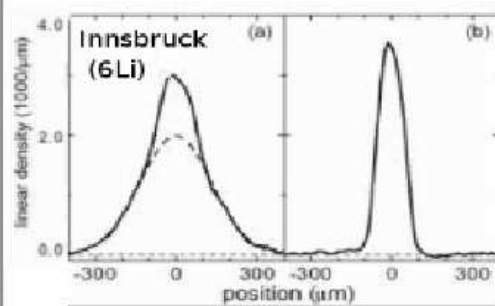
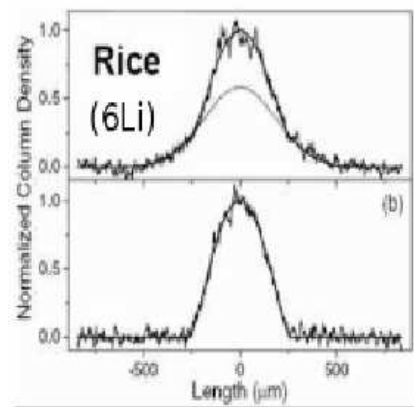
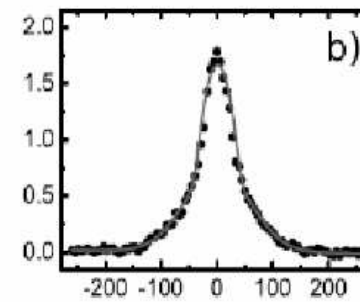
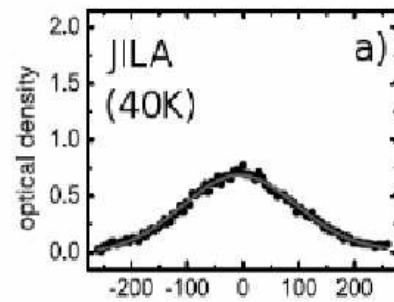
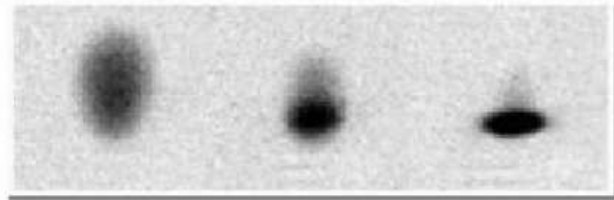
Rodzaje stosowanych atomów

⁶**Li** mieszanina stanów nadsubtelnych
 $|\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\rangle$ oraz $|\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle$ współistniejących
z bi-molekułami (⁶Li)₂

⁴⁰**K** mieszanina stanów nadsubtelnych
 $|\frac{9}{2}, -\frac{9}{2}\rangle$ oraz $|\frac{9}{2}, -\frac{7}{2}\rangle$ współistniejących
z bi-molekułami (⁴⁰K)₂.

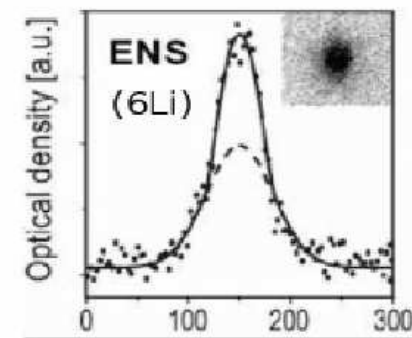
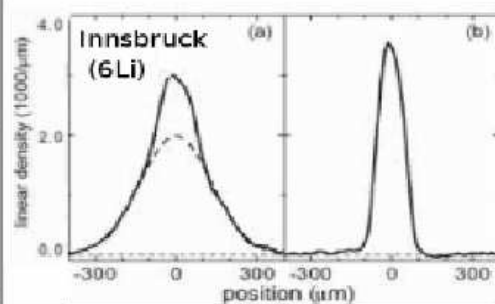
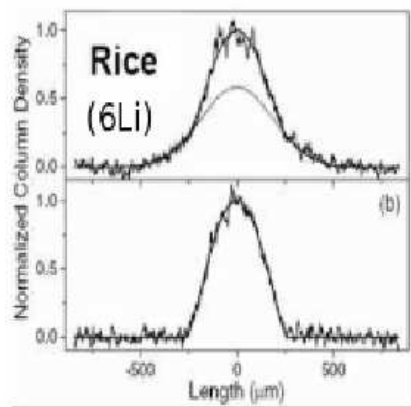
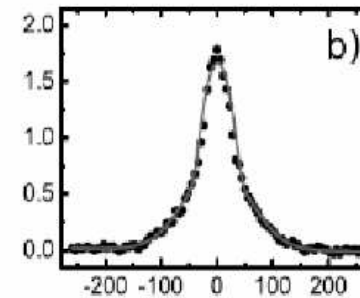
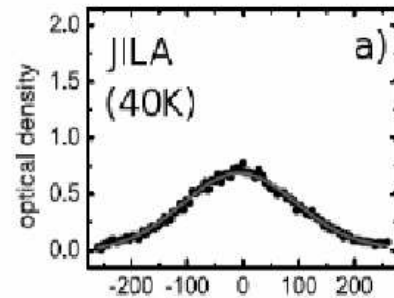
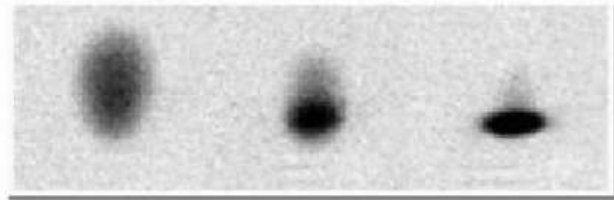
Uczestniczące grupy

MIT (6Li)



Uczestniczące grupy

MIT (^6Li)



^6Li - W. Ketterle (MIT),
R. Grimm (Innsbruck),
R. Hulet (Rice),
Ch. Salomon (ENS).

^{40}K - D. Jin (Boulder).

Rezonans Feshbacha

–

istota mehanizmu

Rezonans Feshbacha – **istota mechanizmu**

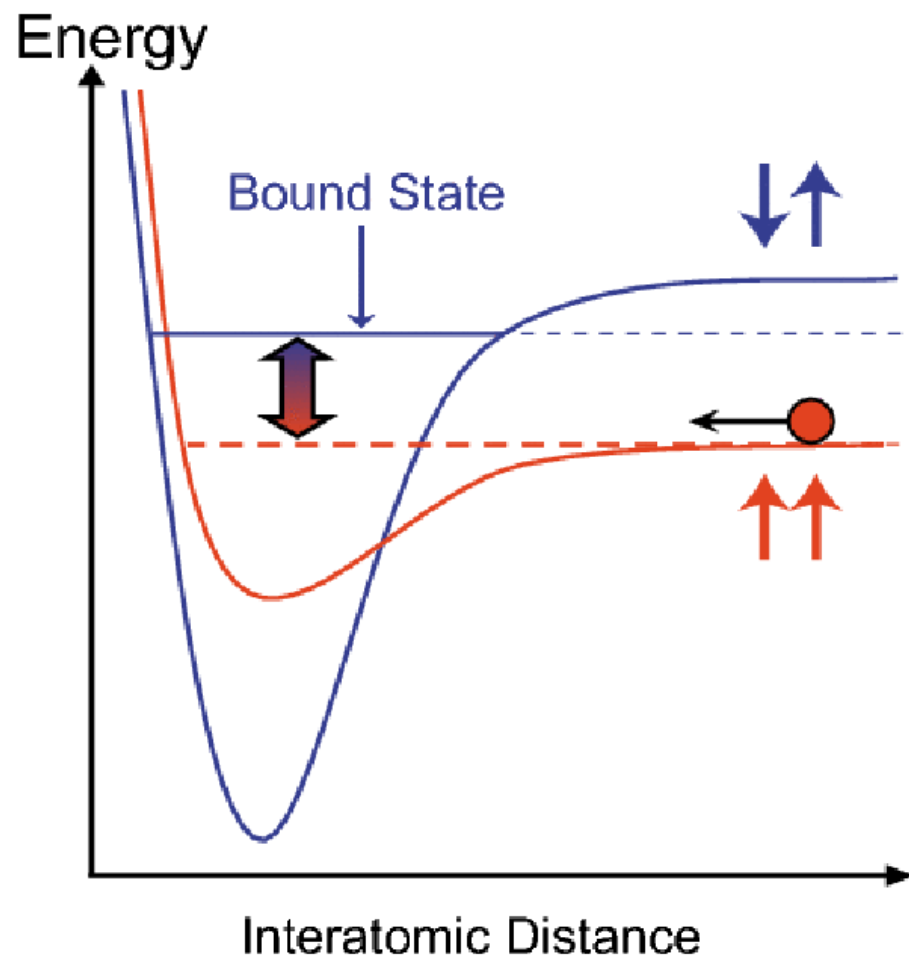
Schemat warunków rozpraszania rezonansowego

Rezonans Feshbacha

–

istota mechanizmu

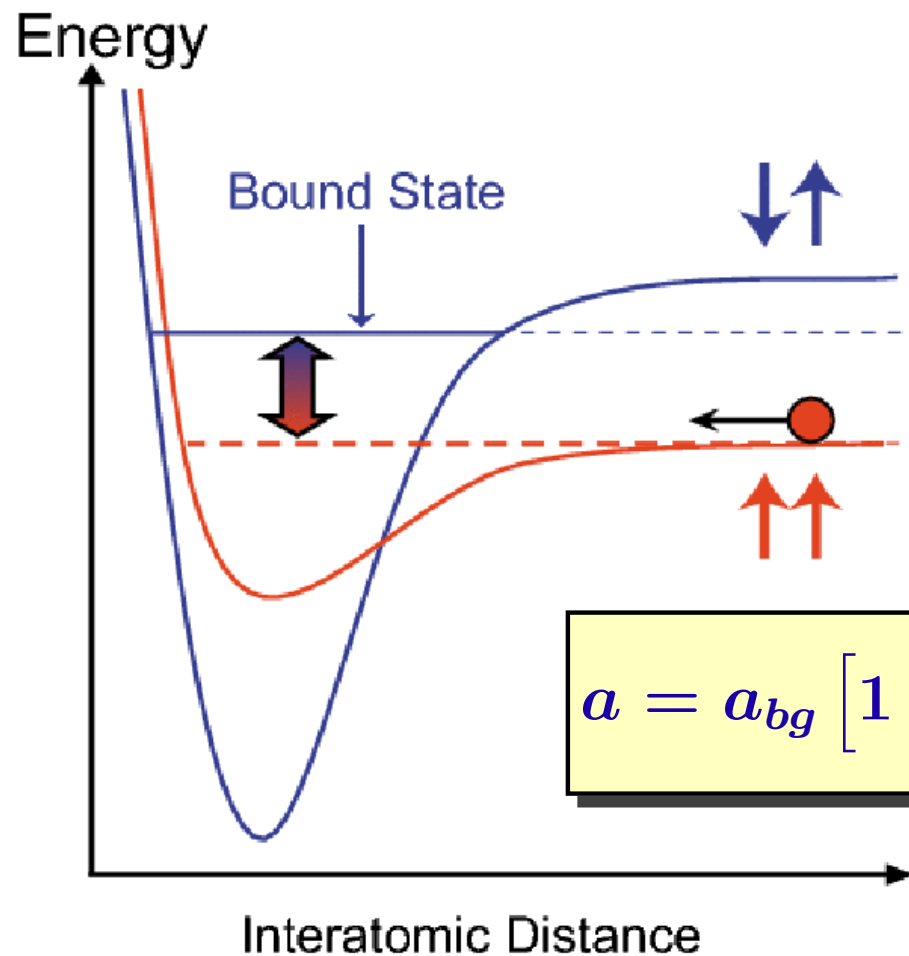
Schemat warunków rozpraszania rezonansowego



Rezonans Feshbacha

– istota mechanizmu

Schemat warunków rozpraszania rezonansowego



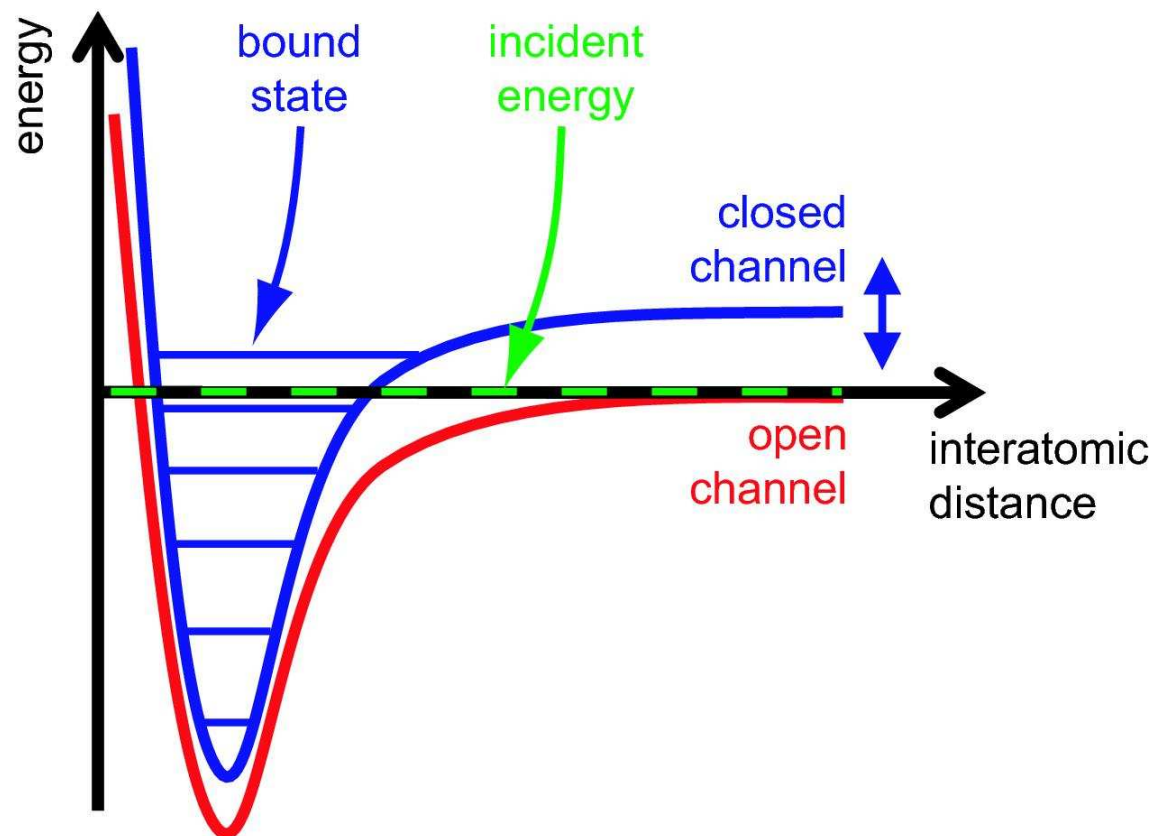
$$a = a_{bg} \left[1 + \frac{w}{B - B_0} \right]$$

Efektywna amplituda rozpraszania a zależy od pola magnetycznego B .

Rezonans Feshbacha

– istota mechanizmu

Schemat warunków rozpraszania rezonansowego

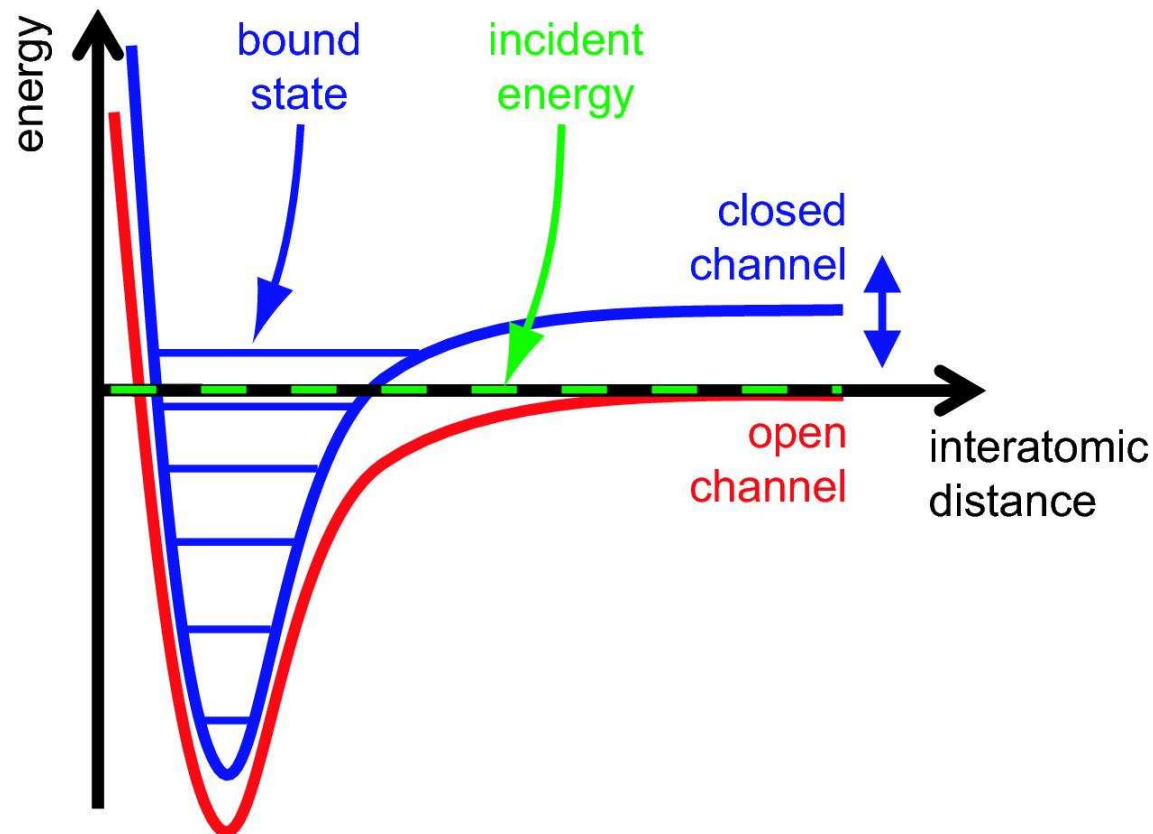


I. Bloch, J. Dalibard, W. Zwerger, Rev. Mod. Phys. bf 80, 885 (2008).

Rezonans Feshbacha

– istota mechanizmu

Schemat warunków rozpraszania rezonansowego



I. Bloch, J. Dalibard, W. Zwerger, Rev. Mod. Phys. bf 80, 885 (2008).

Rezonansów Feshbacha może realizować się kilka.

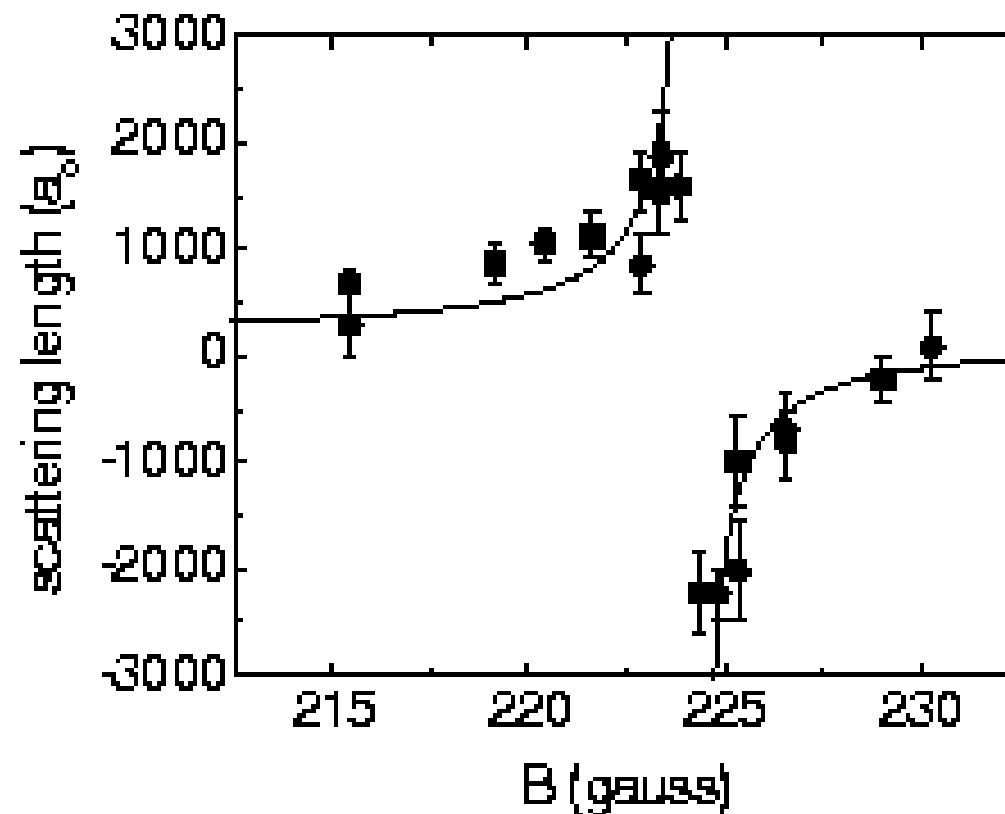
Rezonans Feshbacha

–

realizacja praktyczna

Rezonans Feshbacha

– realizacja praktyczna

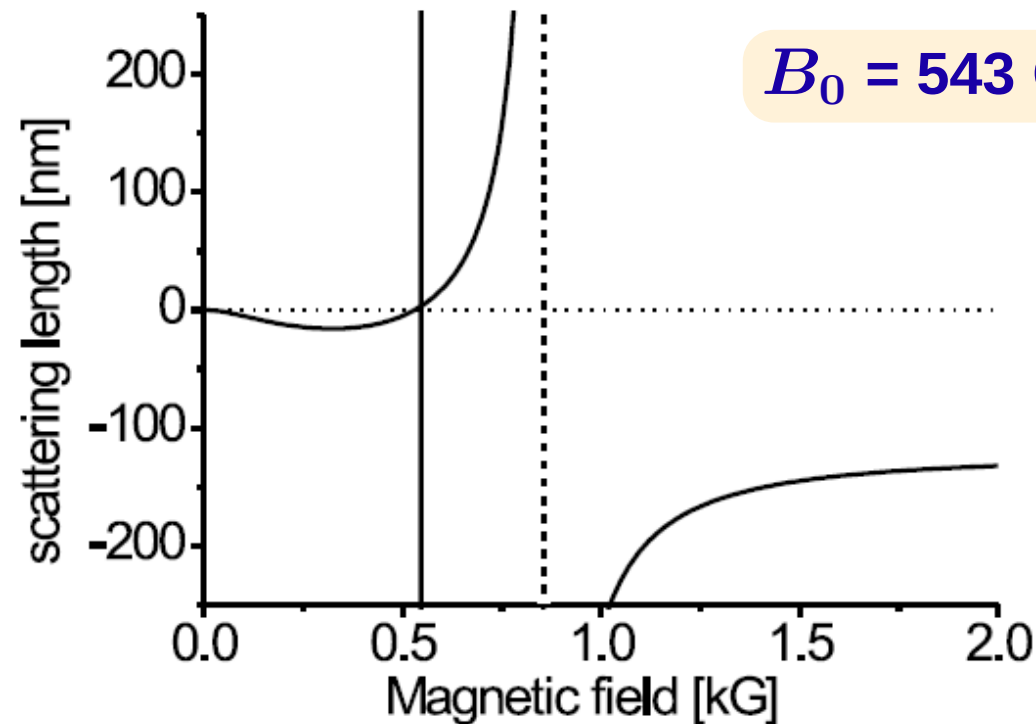


Rezonans Feshbacha uzyskany doświadczalnie dla atomów ^{40}K w stanach zeemanowskich $|\frac{9}{2}, -\frac{9}{2}\rangle$ oraz $|\frac{9}{2}, -\frac{7}{2}\rangle$.

C.A. Regal and D.S. Jin, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 230404 (2003).

Rezonans Feshbacha

– realizacja praktyczna

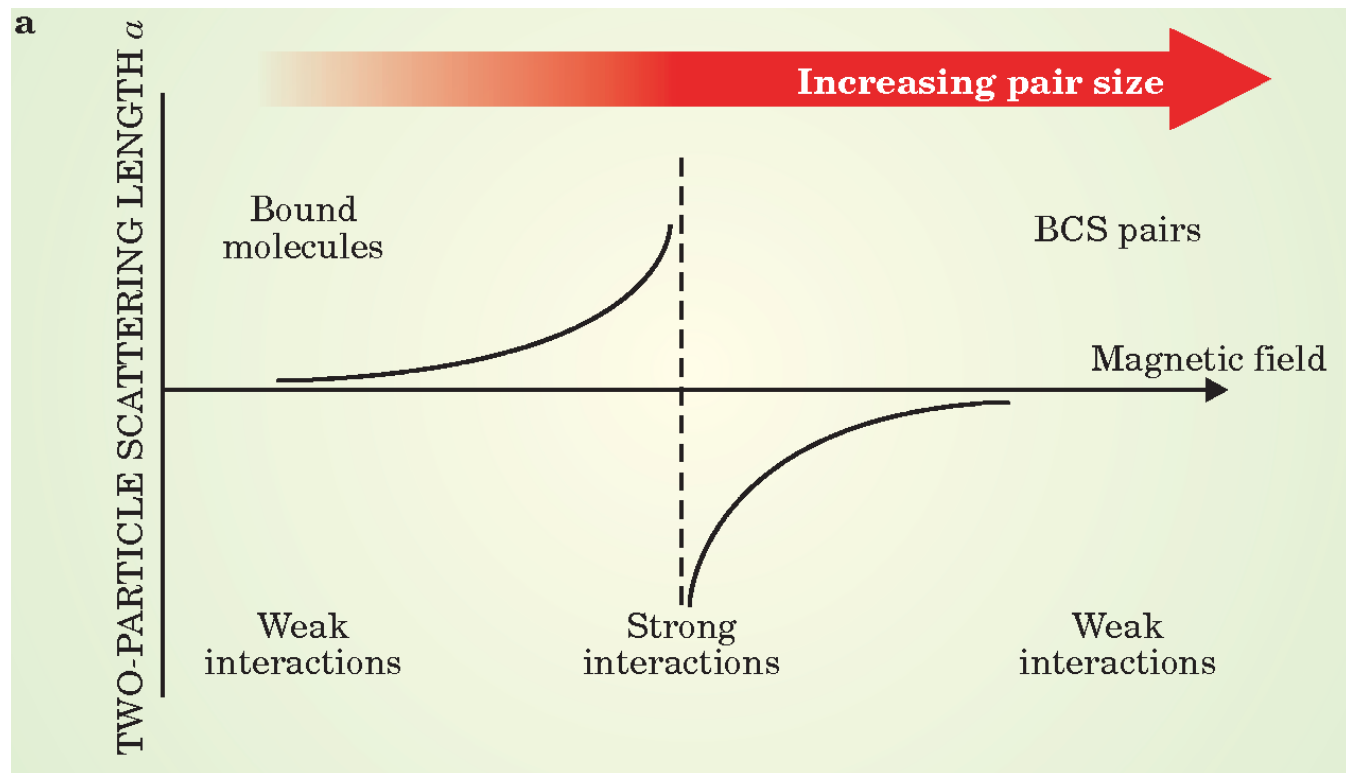


Rezonans Feshbacha uzyskany doświadczalnie dla atomów ${}^6\text{Li}$ w stanach zeemanowskich $|\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle$ oraz $|\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\rangle$.

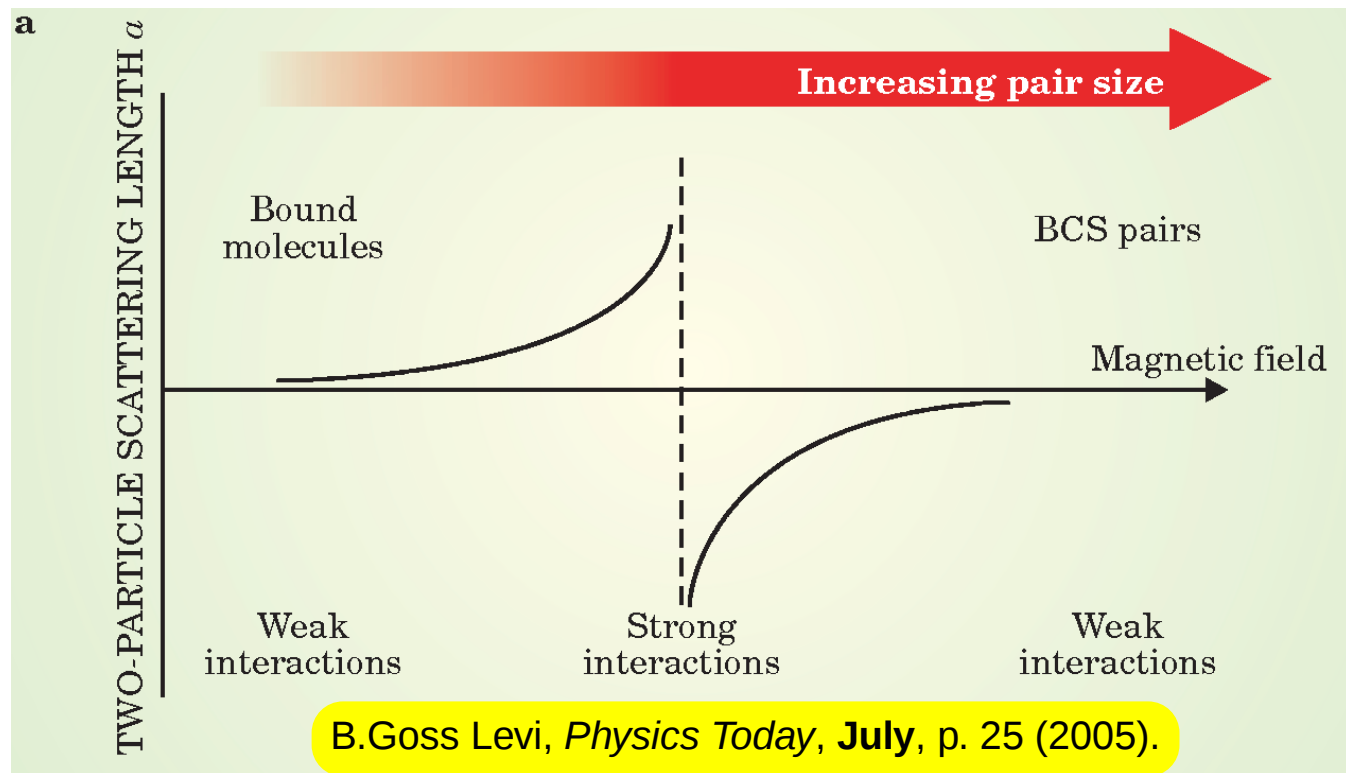
T. Bourdel et al, Phys. Rev. Lett. 91, 020402 (2003).

Przejście z BEC do BCS

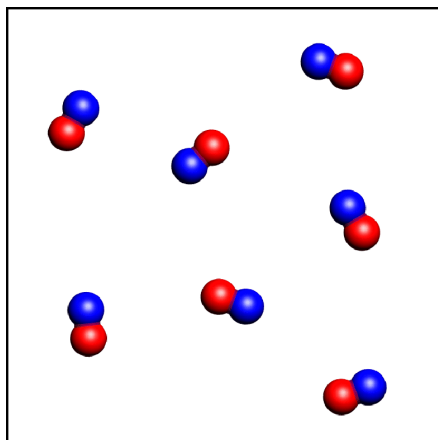
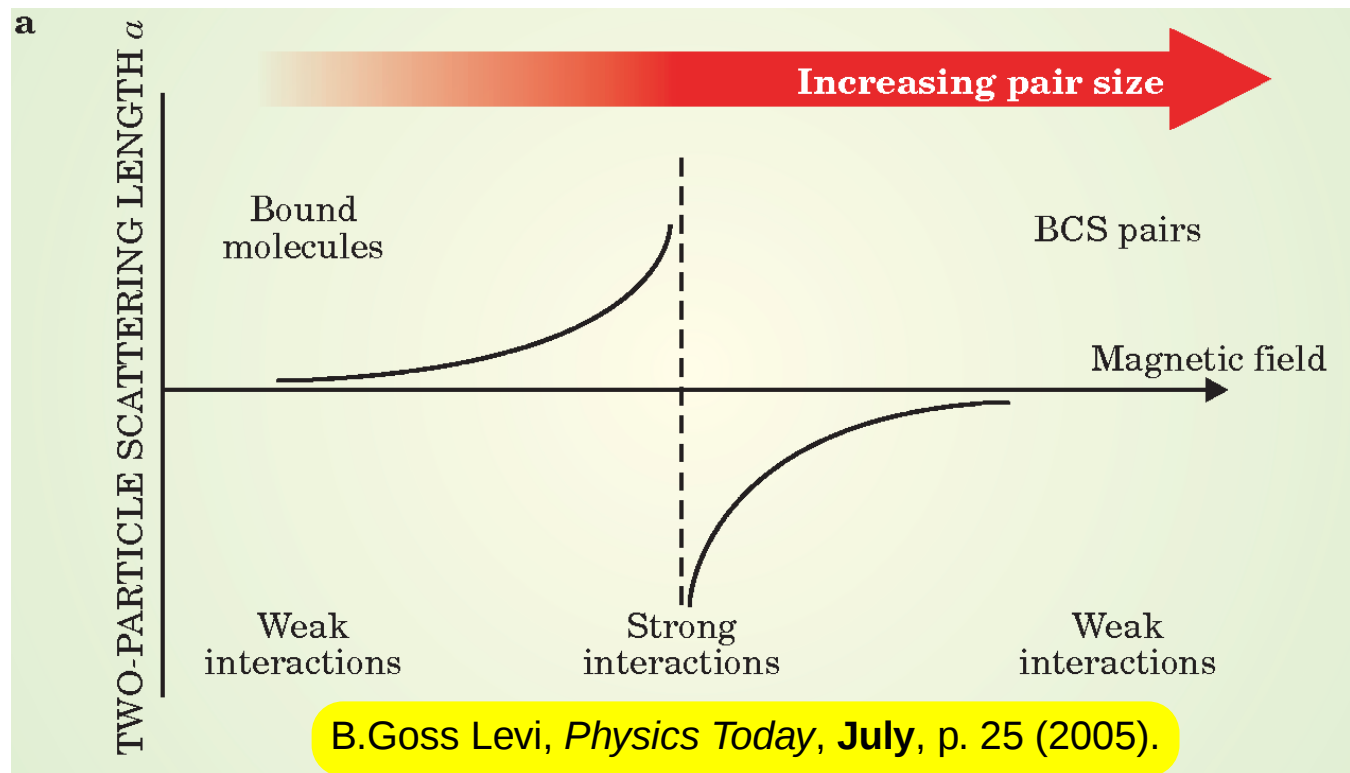
Przejście z BEC do BCS



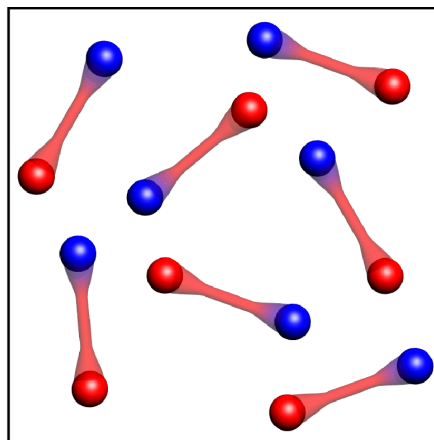
Przejście z BEC do BCS



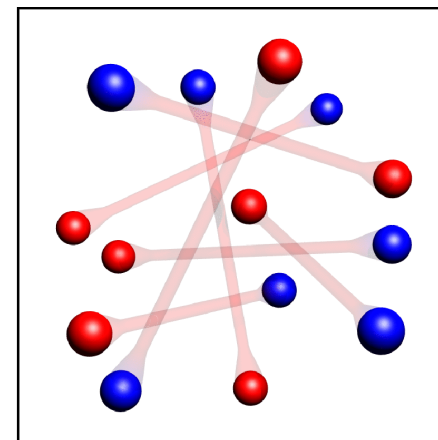
Przejście z BEC do BCS



BEC of Molecules



Crossover Superfluid



BCS state

Przejście z BEC do BCS

Problem ciągłego przejścia od stanu **BCS** do **BEC** należy do fundamentalnych zagadnień fizyki teoretycznej:

- **1969: David Eagles**
/BEC par fermionowych w niskich koncentracjach/
- **1980: Tony Legett**
/ sformułowanie problemu dla $T = 0$ /
- **1985: Phillip Nozières & Stefan Smitt-Rink**
/uogólnienie formalizmu dla niezerowych temperatur/
- **1989: Roman Micnas et al**
/koncepcja niekoherentnych par/
- **1993: Mohit Randeria et al**
/sformułowanie w języku całek po trajektoriach/

...

Przejście z BEC do BCS

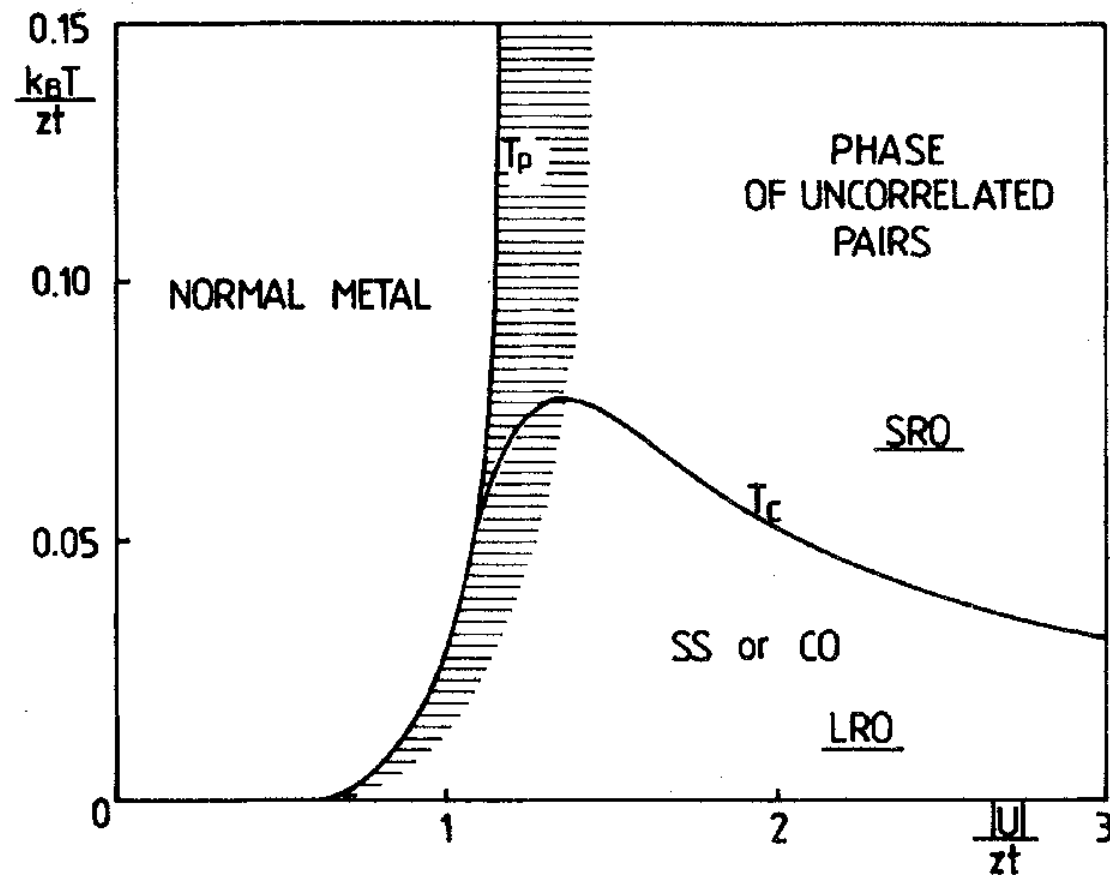
–

uniwersalność

Przejście z BEC do BCS

–

uniwersalność



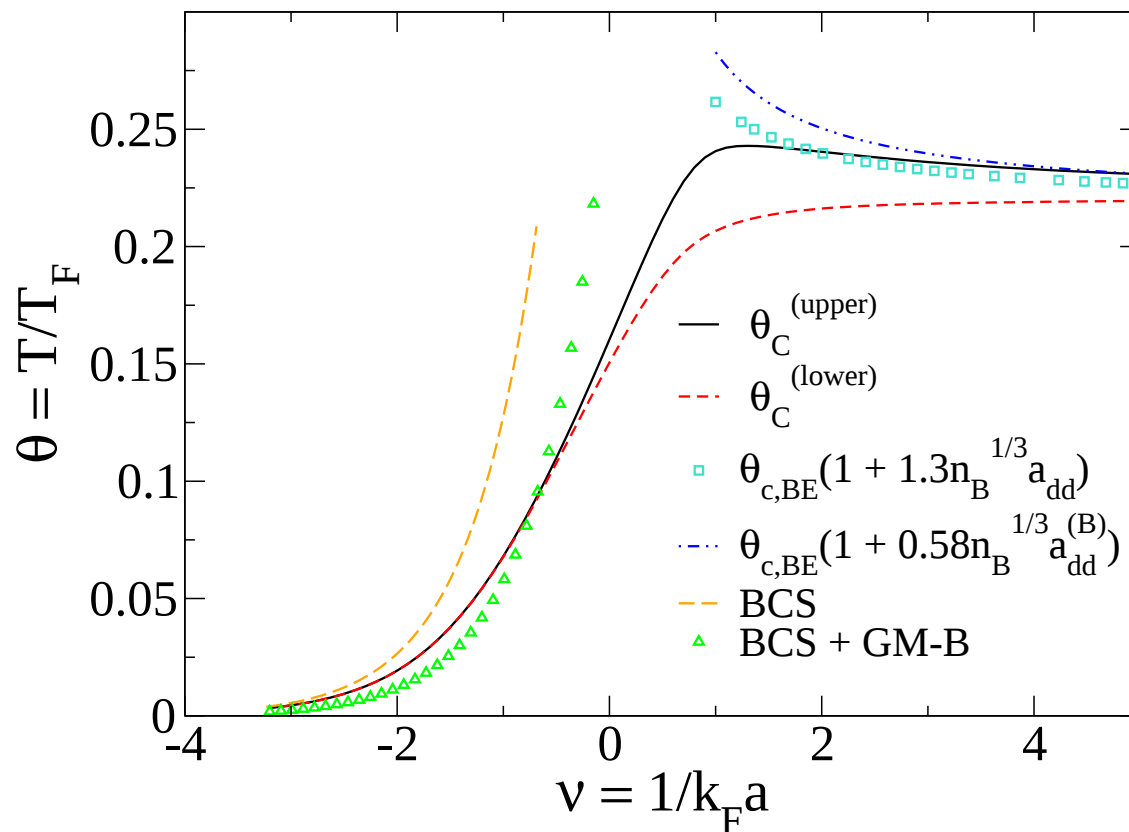
Uniwersalne zachowanie temperatury krytycznej

R. Micnas, J. Ranninger, S. Robaszkiewicz, *Rev. Mod. Phys.* **62**, 113 (1990).

Przejście z BEC do BCS

–

uniwersalność

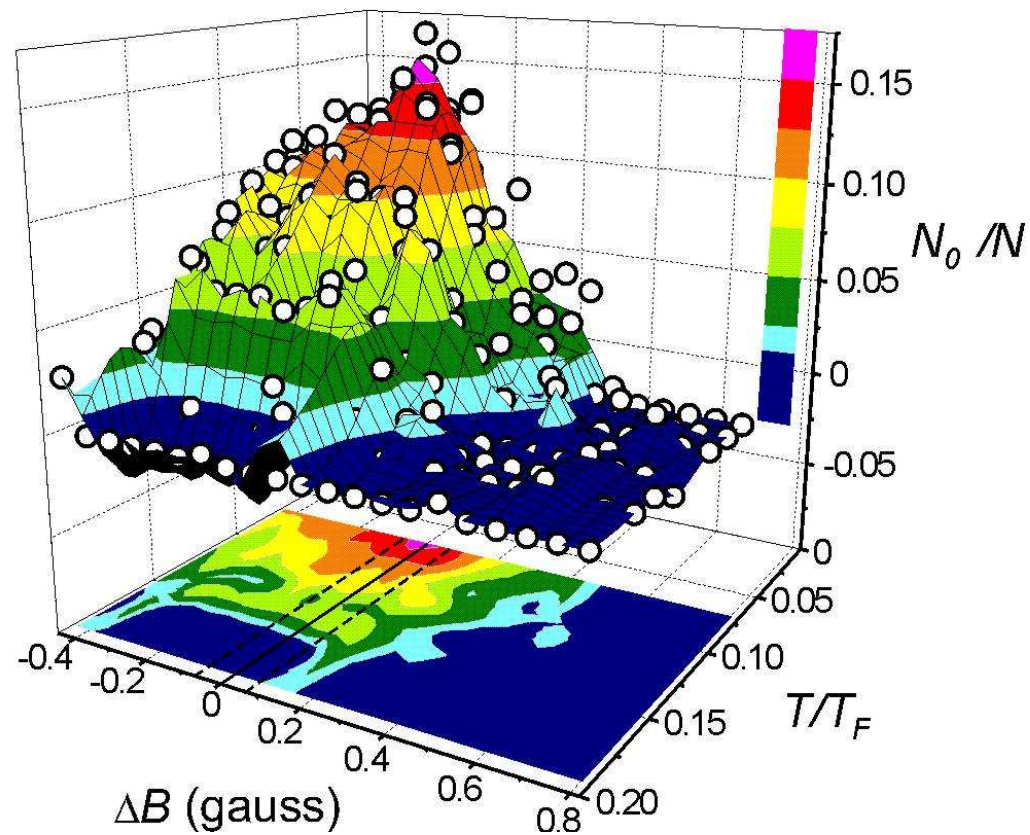


Uniwersalne zachowanie temperatury krytycznej

R. Haussmann et al, Phys. Rev. A 75, 023610 (2007).

Obserwacja BEC

– pierwsze doniesienie



*Kondensat BE par atomów typu fermionowego
w funkcji odległości pola magnetycznego od
rezonansu Feshbacha $\Delta B = B - B_0$.*

Przejście z BEC do BCS

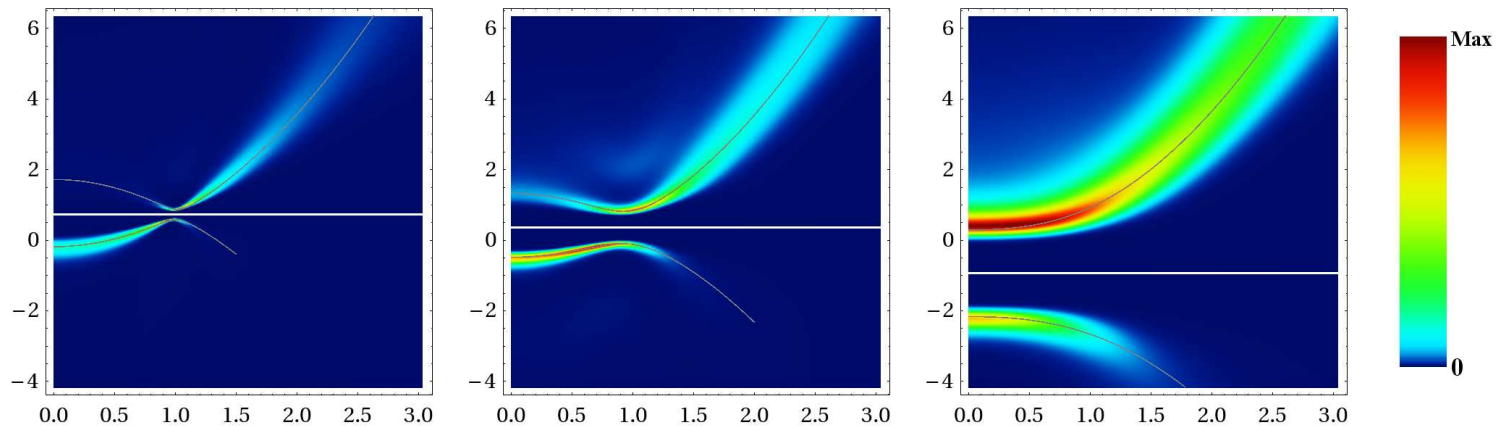
–

ewolucja spektrum

Przejście z BEC do BCS

—

ewolucja spektrum



Przewidywana ewolucja widma wzbudzeń jednocząstkowych

R. Haussmann et al, cond-mat/0909.1333 (2009).

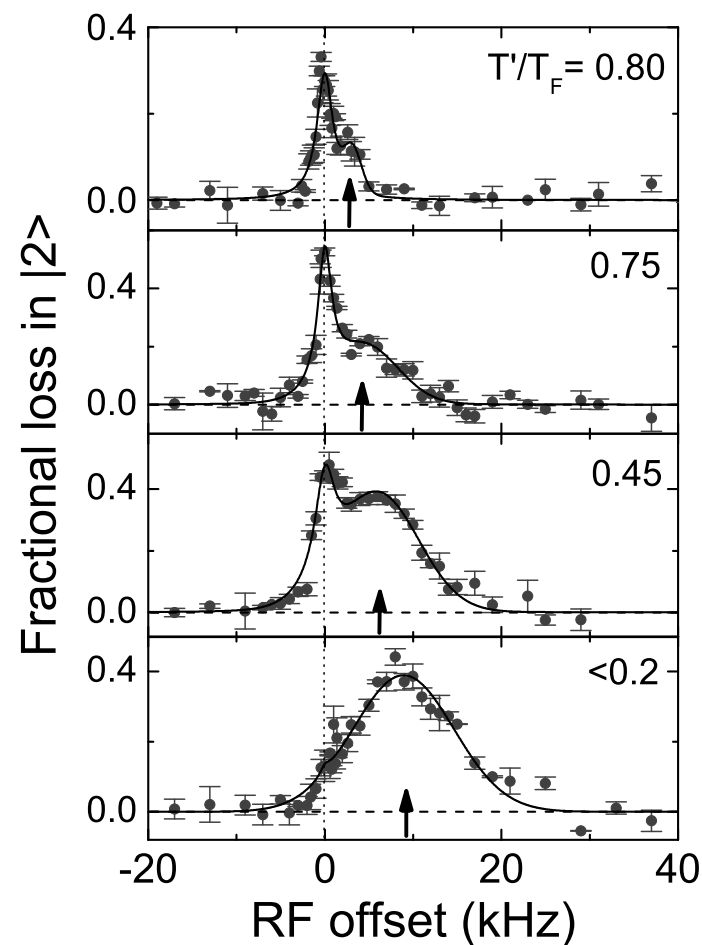
Nadciekłość

–

pomiar (pseudo)szczeliny

Nadciekłość

– pomiar (pseudo)szczeliny



Pomiar widma energetycznego wykonany przez spektroskopię RF dla atomów ^6Li wykazał istnienie **przerwy energetycznej** !

C. Chin et al, Science **305**, 1128 (2004).

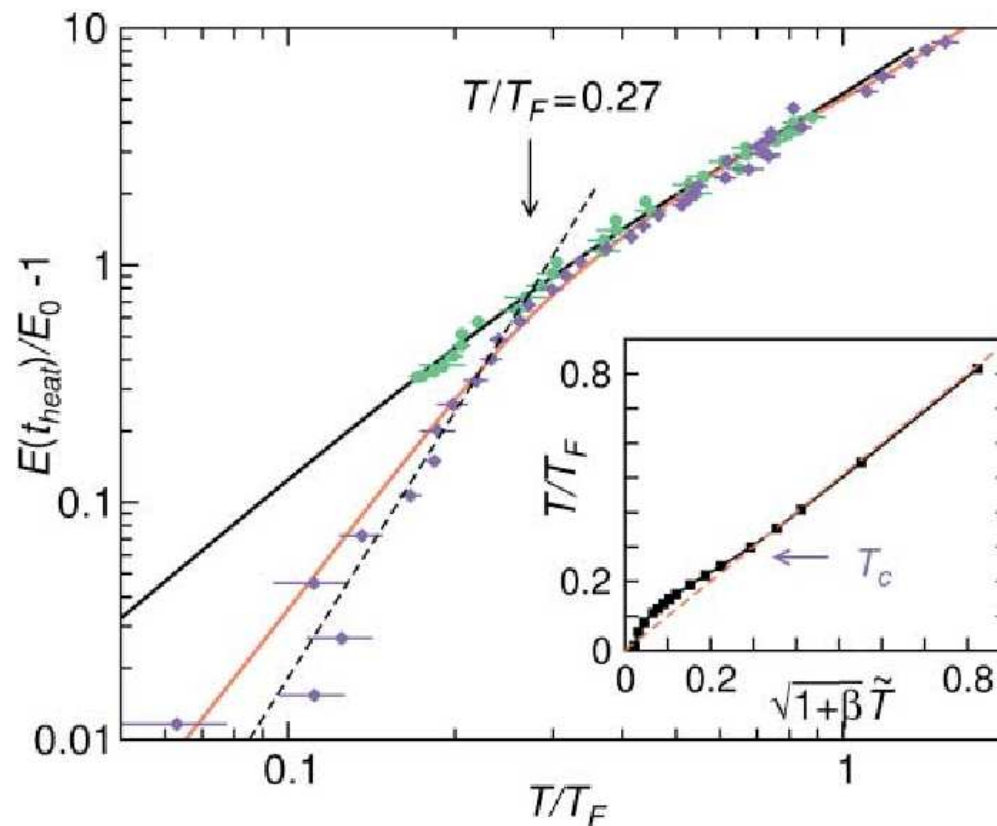
Nadciekłość

–

pomiar ciepła właściwego

Nadciekłość

– pomiar ciepła właściwego



Ciepło właściwe wykazuje wykwoty osobliwość typową dla przejścia do fazy nadciekłej $T_c \simeq 0.27T_F$.

J. Kinast et al, Science **307**, 1296 (2005).

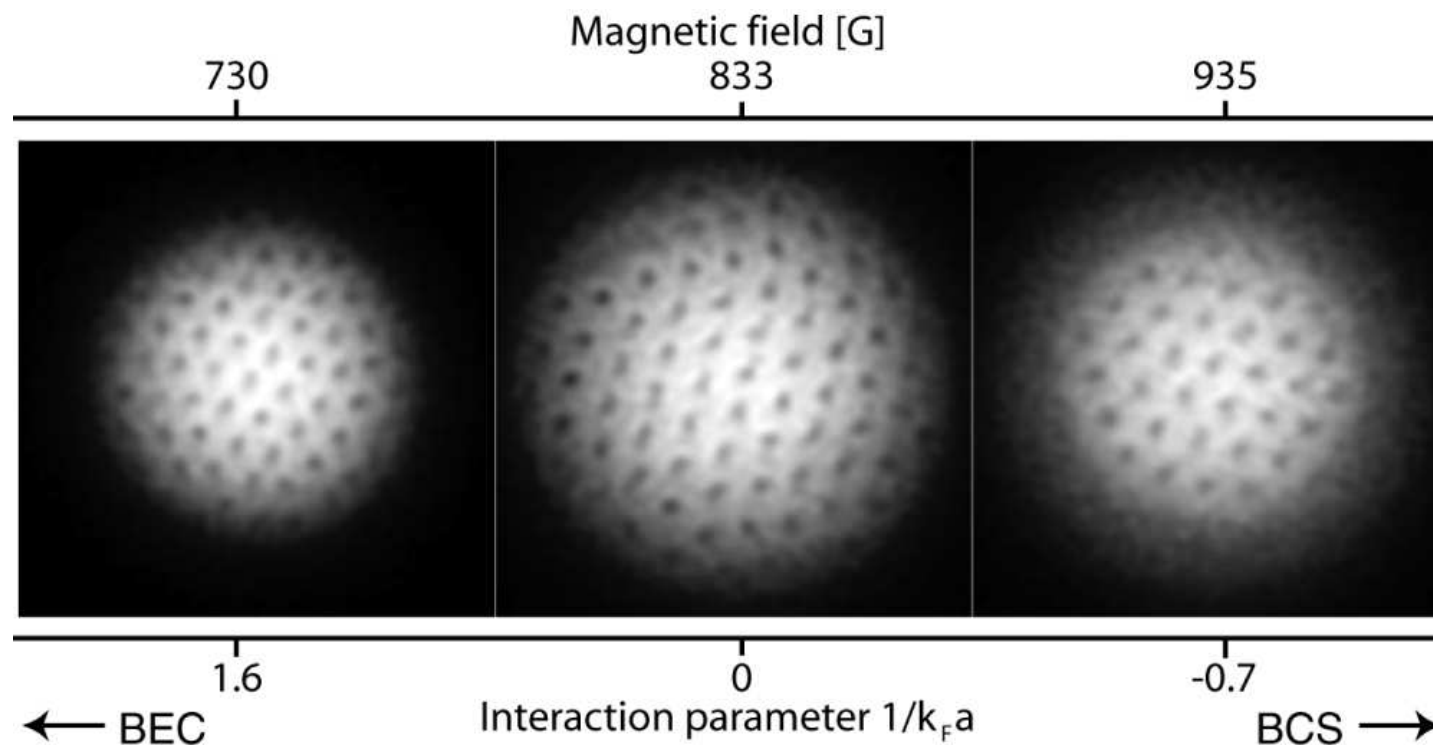
Nadciekłość

–

obserwacja sieci wirów

Nadciekłość

– obserwacja sieci wirów

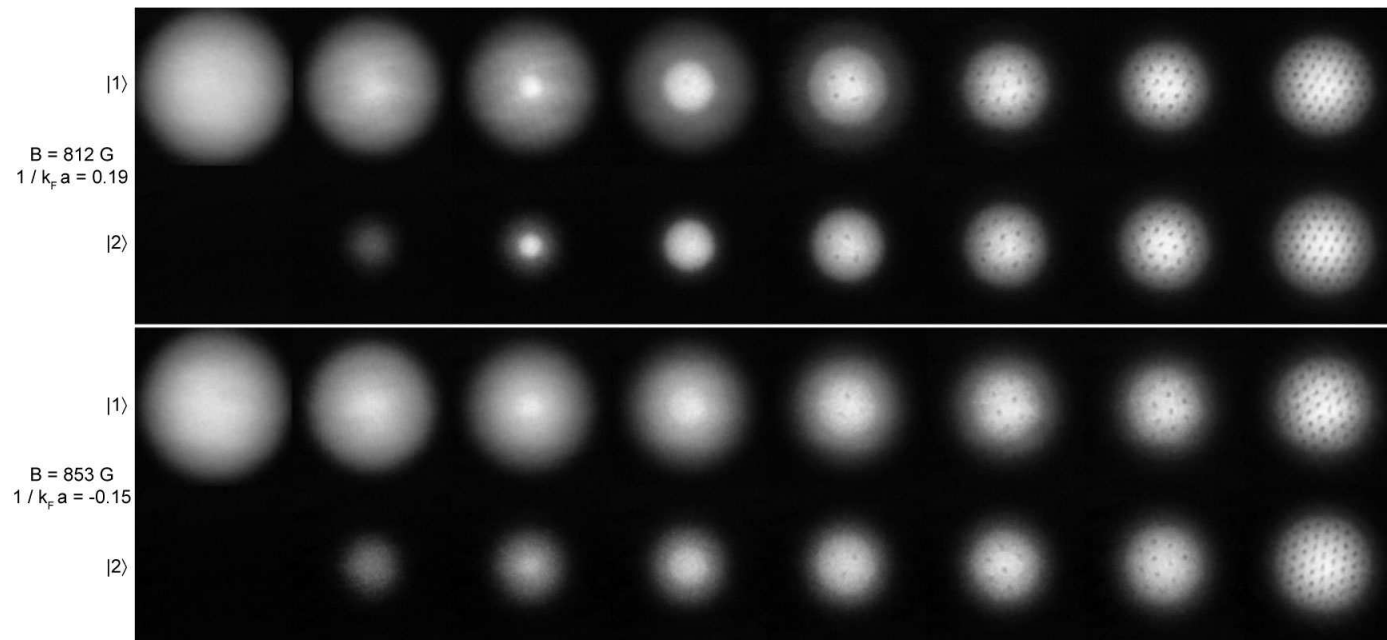


Sieć wirów Abrikosova dla par atomów typu fermionowego.

M.W. Zwierlein et al, Nature 435, 1047 (2005).

Nadciekłość

w przypadku $N_{\downarrow} \neq N_{\uparrow}$



Obserwacja wirów Abrikosova w układzie o nierównej liczbie atomów ${}^6\text{Li}$ w stanach $|\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\rangle$ oraz $|\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle$.

M.W. Zwierlein, A. Schirotzek, C.H. Schnuck & W. Ketterle, *Science* **311**, 492 (2006).

3. Egzotyczne przykłady BEC

1. BEC magnonów – nadciekłość spinowa

1. **BEC magnonów** – nadciekłość spinowa

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

1. **BEC magnonów** – nadciekłość spinowa

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

Odpowiednio długi czas życia tych kwazicząstek umożliwia

koherentną kondensację BE magnonów

1. **BEC magnonów** – nadciekłość spinowa

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

Odpowiednio długi czas życia tych kwazicząstek umożliwia

koherentną kondensację BE magnonów

Zjawisko przejawia się poprzez:

1. **BEC magnonów** – nadciekłość spinowa

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

Odpowiednio długi czas życia tych kwazicząstek umożliwia

koherentną kondensację BE magnonów

Zjawisko przejawia się poprzez:

- a) **spinowy superprąd** – transport magnetyzacji

1. **BEC magnonów** – nadciekłość spinowa

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

Odpowiednio długi czas życia tych kwazicząstek umożliwia

koherentną kondensację BE magnonów

Zjawisko przejawia się poprzez:

- a) **spinowy superprąd** – transport magnetyzacji
- b) **efekt Josephsona** – interferencja kondensatów

1. **BEC magnonów** – nadciekłość spinowa

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

Odpowiednio długi czas życia tych kwazicząstek umożliwia

koherentną kondensację BE magnonów

Zjawisko przejawia się poprzez:

- a) **spinowy superprąd** – transport magnetyzacji
- b) **efekt Josephsona** – interferencja kondensatów
- c) **prąd krytyczny**

1. **BEC magnonów** – **nadciekłość spinowa**

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

Odpowiednio długi czas życia tych kwazicząstek umożliwia

koherentną kondensację BE magnonów

Zjawisko przejawia się poprzez:

- a) **spinowy superprąd** – transport magnetyzacji
- b) **efekt Josephsona** – interferencja kondensatów
- c) **prąd krytyczny**
- d) **wiry kwantowe**

/ wykorzystywane do modelowania strun kosmicznych de Wittena /

1. **BEC magnonów** – **nadciekłość spinowa**

Wzbudzenia elementarne w magnetykach (tzw. magnony) podlegają statystyce bozonowej (z powodu całkowitego spinu).

Odpowiednio długi czas życia tych kwazicząstek umożliwia

koherentną kondensację BE magnonów

Zjawisko przejawia się poprzez:

- a) **spinowy superprąd** – transport magnetyzacji
- b) **efekt Josephsona** – interferencja kondensatów
- c) **prąd krytyczny**
- d) **wiry kwantowe**
/ wykorzystywane do modelowania strun kosmicznych de Wittena /
- e) **mody Goldstona**

1. BEC magnonów – realizacja doświadczalna

1. BEC magnonów – realizacja doświadczalna

Oprócz stałego pola magnetycznego H_z , które generuje duże namagnesowanie $\mathcal{M}_z$ włączono zmienne pole poprzeczne.

1. BEC magnonów – realizacja doświadczalna

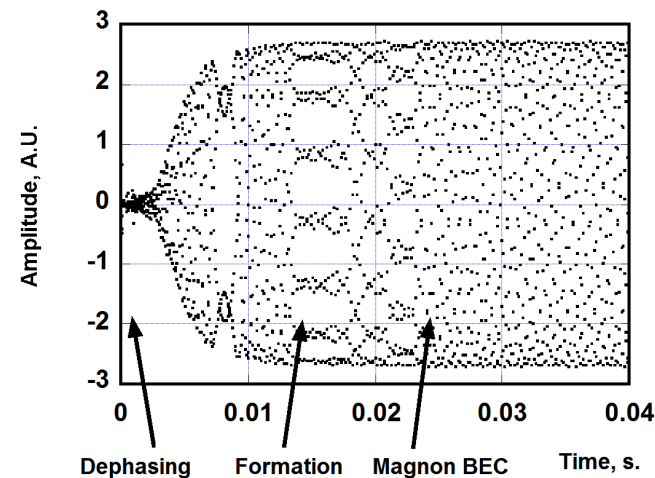
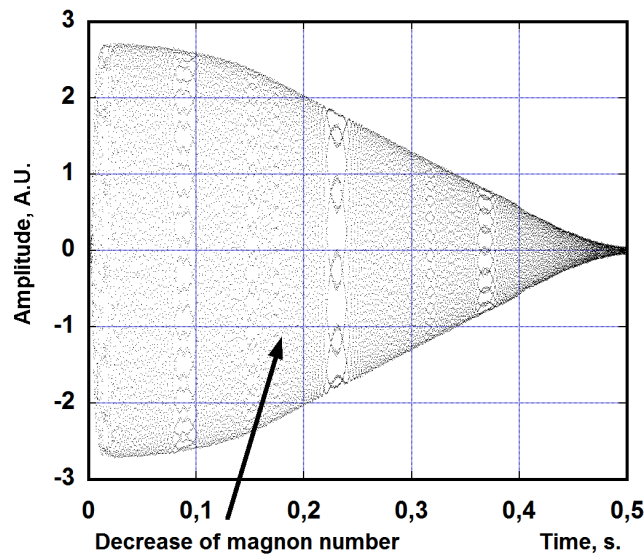
Oprócz stałego pola magnetycznego H_z , które generuje duże namagnesowanie $\mathcal{M}_z$ włączono zmienne pole poprzeczne. Po pewnym czasie spiny przechodzą w stan koherentnej precesji indukując makroskopową magnetyzację

$$\mathcal{M}_x + i\mathcal{M}_y = \mathcal{M}_\perp e^{i\omega t + i\alpha}$$

1. BEC magnonów – realizacja doświadczalna

Oprócz stałego pola magnetycznego H_z , które generuje duże namagnesowanie $\mathcal{M}_z$ włączono zmienne pole poprzeczne. Po pewnym czasie spiny przechodzą w stan koherentnej precesji indukując makroskopową magnetyzację

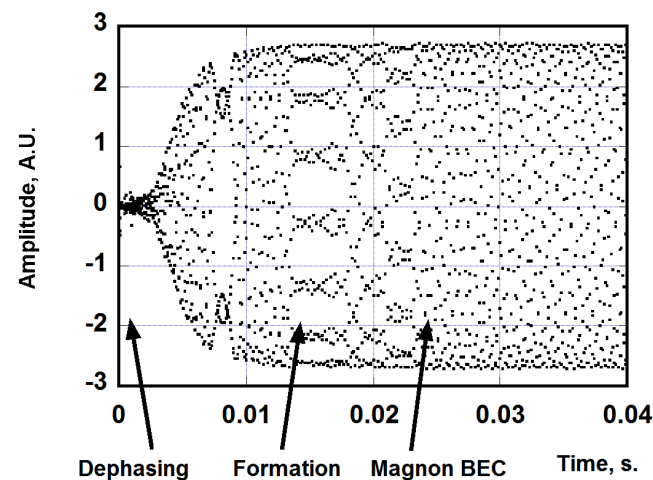
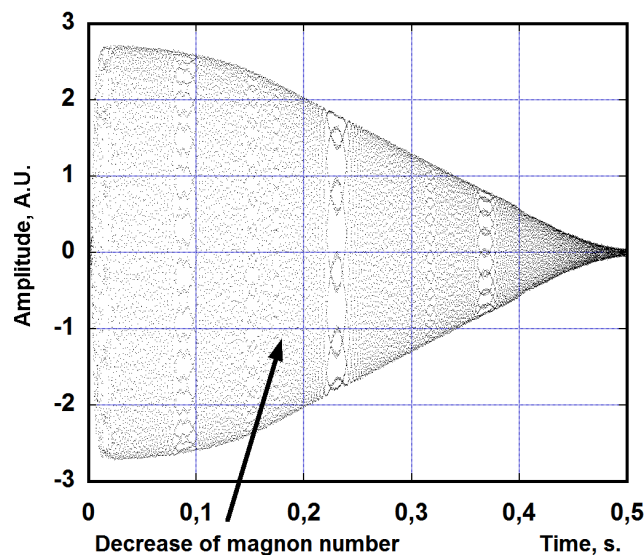
$$\mathcal{M}_x + i\mathcal{M}_y = \mathcal{M}_\perp e^{i\omega t + i\alpha}$$



1. BEC magnonów – realizacja doświadczalna

Oprócz stałego pola magnetycznego H_z , które generuje duże namagnesowanie $\mathcal{M}_z$ włączono zmienne pole poprzeczne. Po pewnym czasie spiny przechodzą w stan koherentnej precesji indukując makroskopową magnetyzację

$$\mathcal{M}_x + i\mathcal{M}_y = \mathcal{M}_\perp e^{i\omega t + i\alpha}$$



Realizacja kondensacji BE magnonów w ^3He

Y.M. Bunkov, G.E. Volovik, cond-mat/0904.3889.

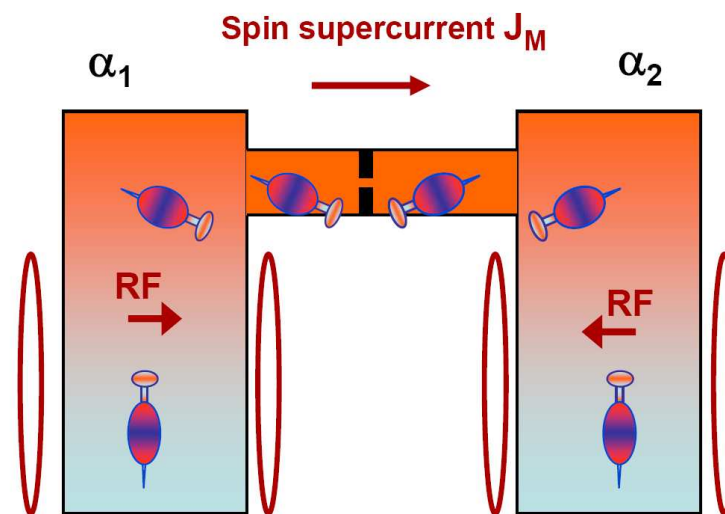
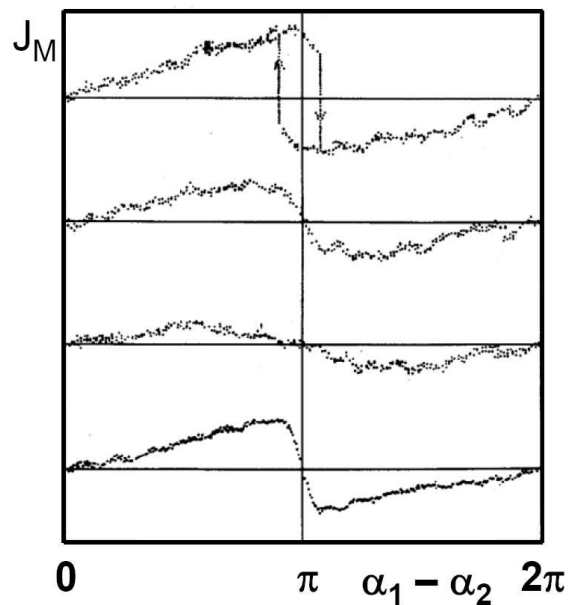
1. Nadciekłość spinowa

1. **Nadciekłość spinowa**

Efektywne oddziaływania pomiędzy magnonami pochodzące ze sprzężenia spin-orbita prowadzą do **nadciekłości magnonów**.

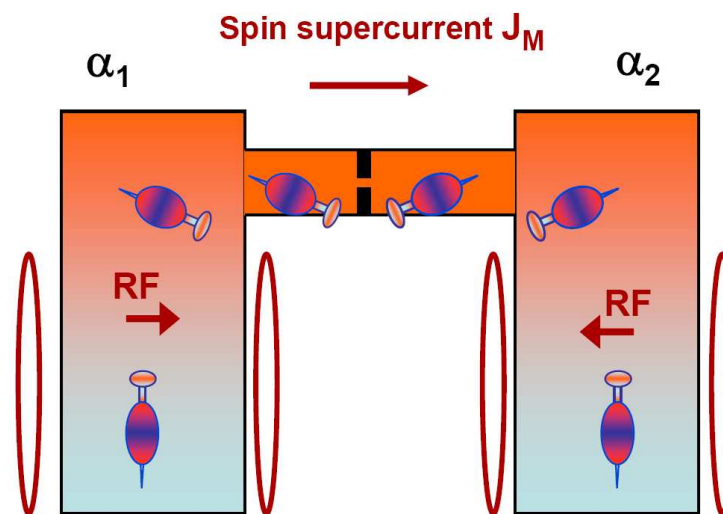
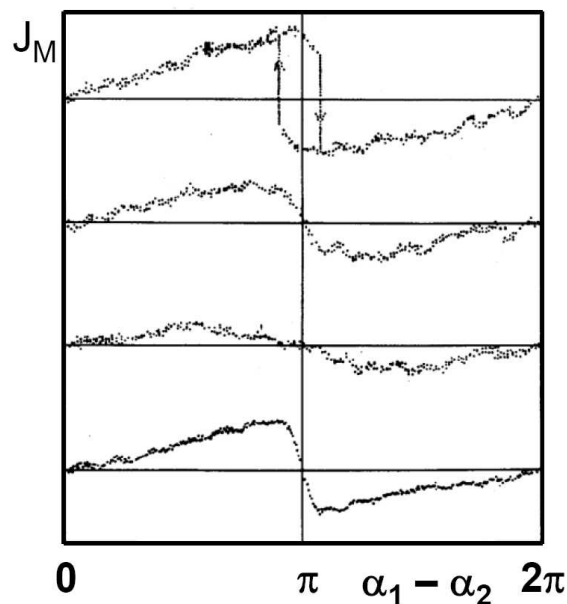
1. Nadciekłość spinowa

Efektywne oddziaływania pomiędzy magnonami pochodzące ze sprzężenia spin-orbita prowadzą do **nadciekłości magnonów**.



1. Nadciekłość spinowa

Efektywne oddziaływania pomiędzy magnonami pochodzące ze sprzężenia spin-orbita prowadzą do **nadciekłości magnonów**.



Efekt Josephaona kondensatów magnonowych w ^3He
/ spontaniczny przepływ magnetyzacji pomiędzy próbkami /

*A.S. Borovik-Romanov et al, Phys. Rev. Lett. **62**, 323 (1989).*

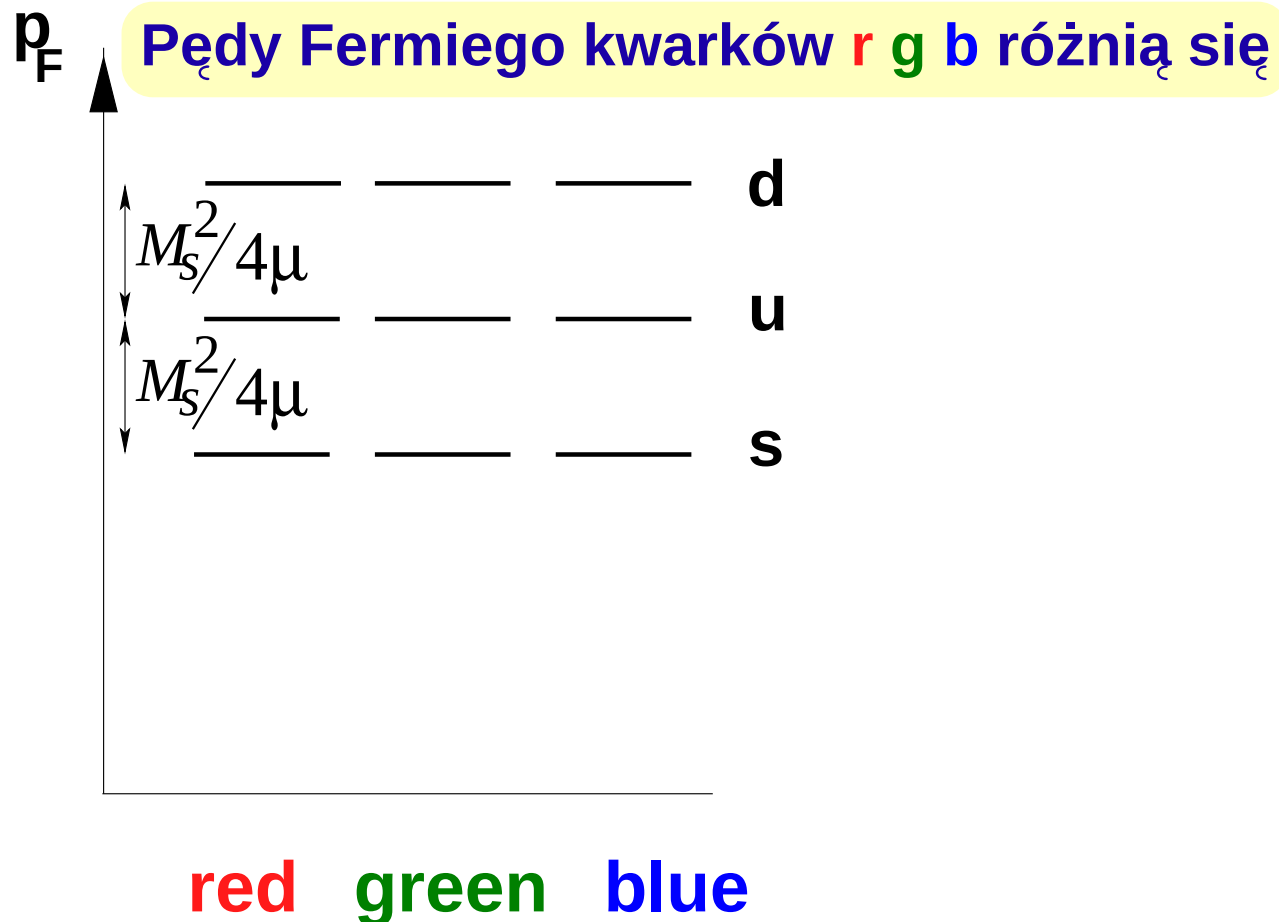
2. **Idea nadciekłości kwarków w QCD**

2. **Idea nadciekłości kwarków w QCD**

Oddziaływania w gęstej materii kwarkowej mają charakter przyciągający.

2. Idea nadciekłości kwarków w QCD

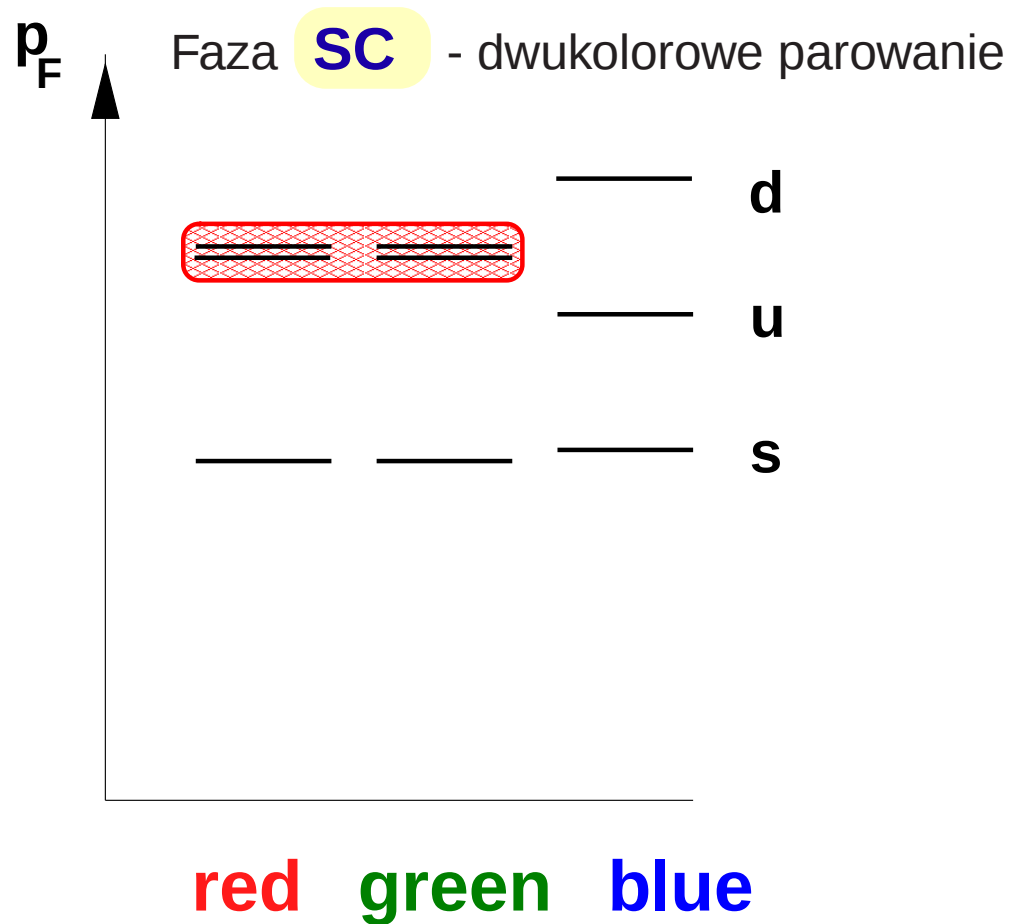
Oddziaływania w gęstej materii kwarkowej mają charakter przyciągający.



M.G. Alford et al, Rev. Mod. Phys. 80, 1455 (2008).

2. Idea nadciekłości kwarków w QCD

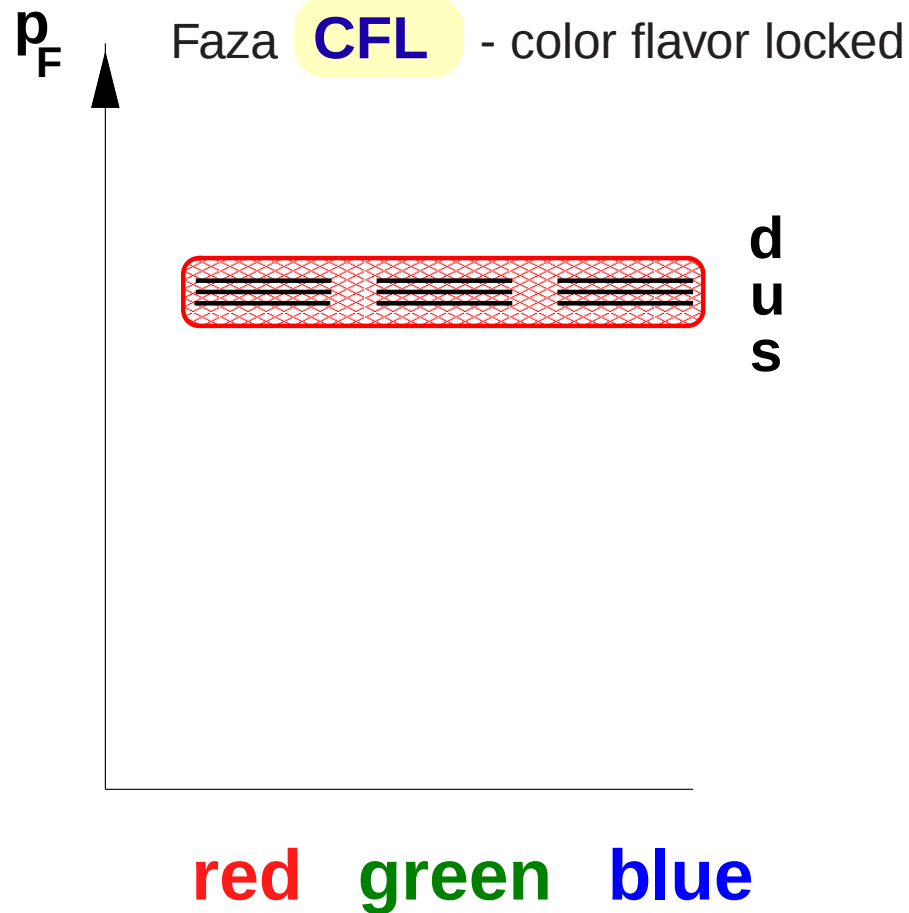
Oddziaływania w gęstej materii kwarkowej mają charakter przyciągający.



M.G. Alford et al, Rev. Mod. Phys. 80, 1455 (2008).

2. Idea nadciekłości kwarków w QCD

Oddziaływania w gęstej materii kwarkowej mają charakter przyciągający.



M.G. Alford et al, Rev. Mod. Phys. 80, 1455 (2008).

2. Faza Wilczka

2. **Faza Wilczka**

breached superfluidity

2. **Faza Wilczka** **breached superfluidity**

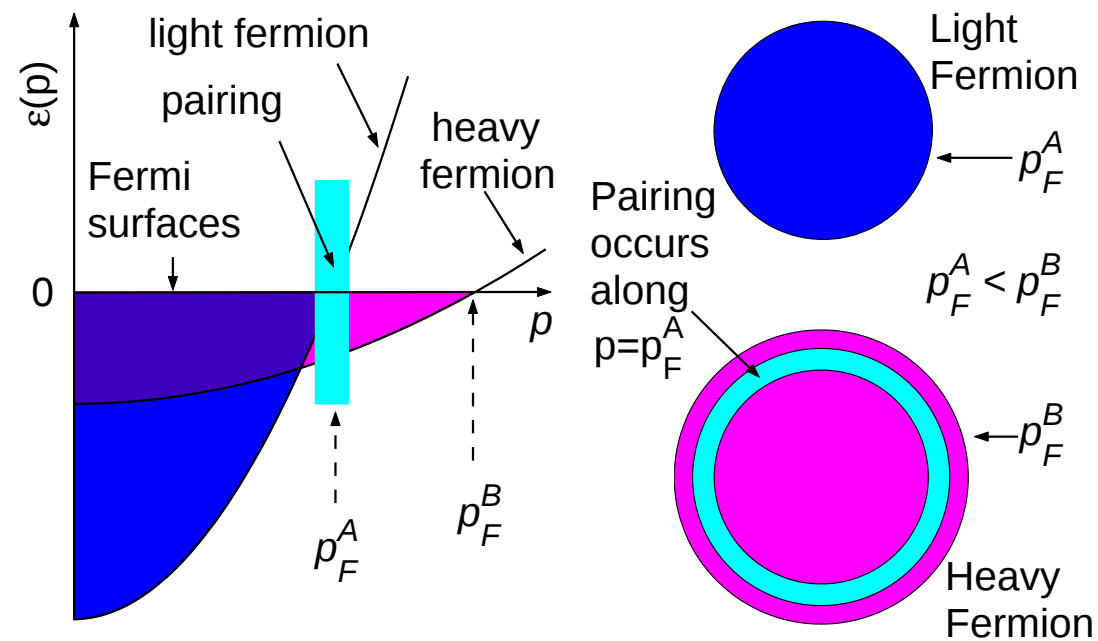
W materii kwarkowej również występują oddziaływania parujące.

2. Faza Wilczka

breached superfluidity

W materii kwarkowej również występują oddziaływania parujące.

Różnica mas kwarków (np. s oraz u)

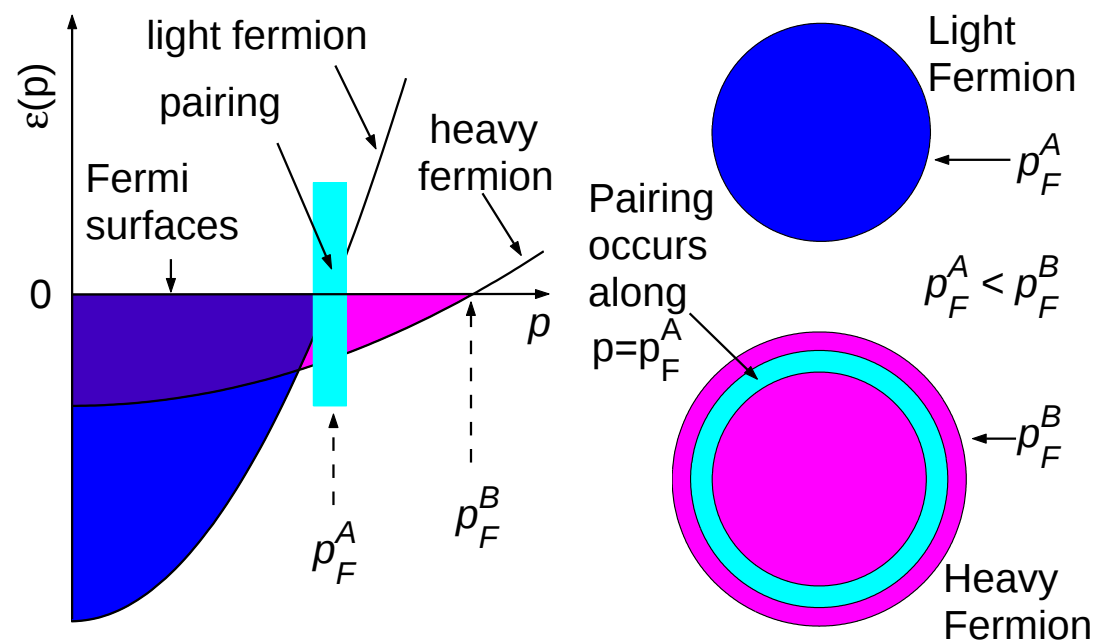


2. Faza Wilczka

breached superfluidity

W materii kwarkowej również występują oddziaływania parujące.

Różnica mas kwarków (np. s oraz u)



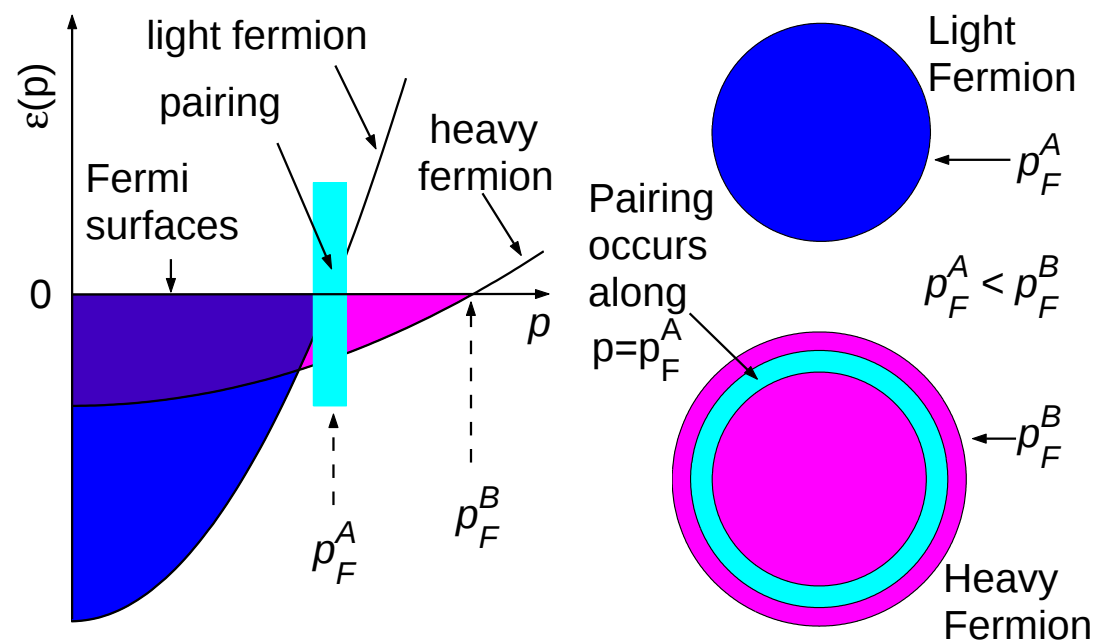
powoduje, że parowanie zachodzić może wśród stanów położonych głęboko po powierzchni Fermiego (tzw. **interior superfluidity**).

2. Faza Wilczka

breached superfluidity

W materii kwarkowej również występują oddziaływania parujące.

Różnica mas kwarków (np. s oraz u)

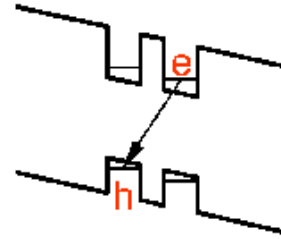


powoduje, że parowanie zachodzić może wśród stanów położonych głęboko po powierzchni Fermiego (tzw. **interior superfluidity**).

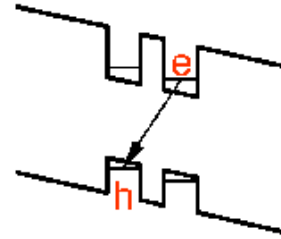
W.V. Liu and F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. 90, 047002 (2003).

3. **Kondensaty ekscytonowe**

3. Kondensaty ekscytonowe

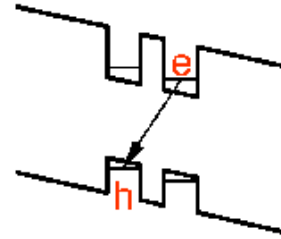


3. Kondensaty ekscytonowe



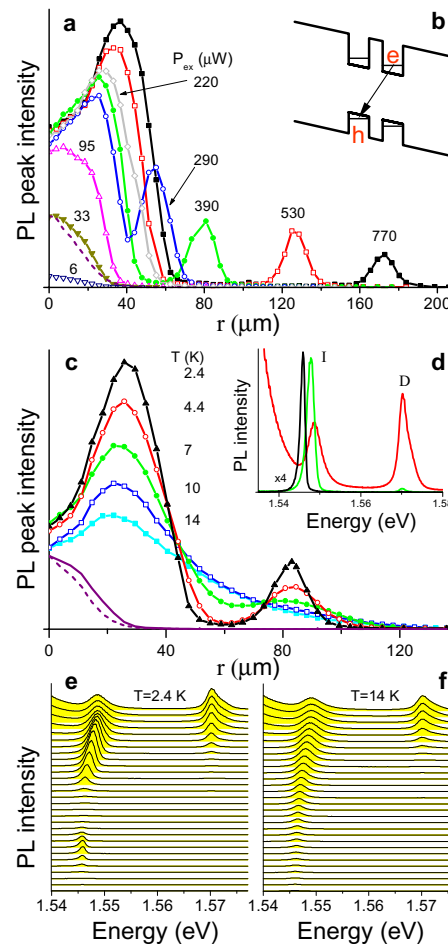
Ekscyton = stan związany elektronu (e) i dziury (h)

3. Kondensaty ekscytonowe

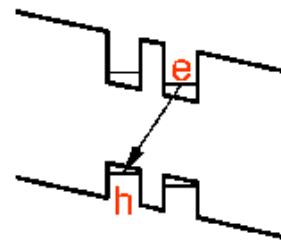


Ekscyton = stan związany elektronu (e) i dziury (h)

Kondensat BE
ekscytonów
uzyskano
w studniach
kwantowych
GaAs / AgAlAs

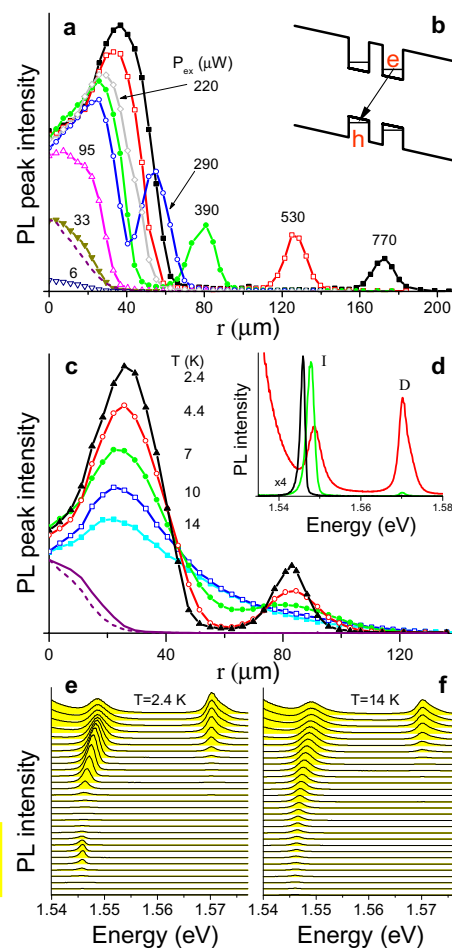


3. Kondensaty ekscytonowe



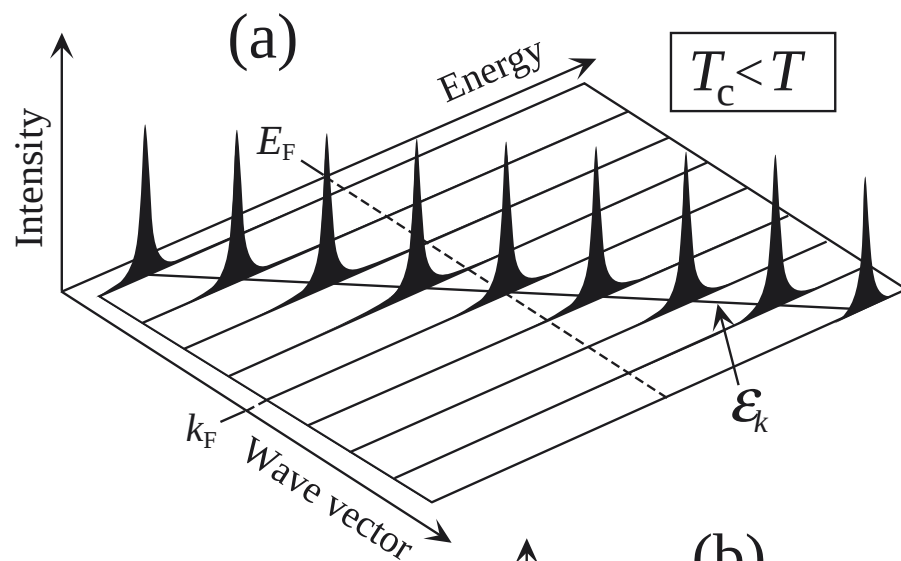
Ekscyton = stan związany elektronu (e) i dziury (h)

Kondensat BE
ekscytonów
uzyskano
w studniach
kwantowych
GaAs / AlGaAs

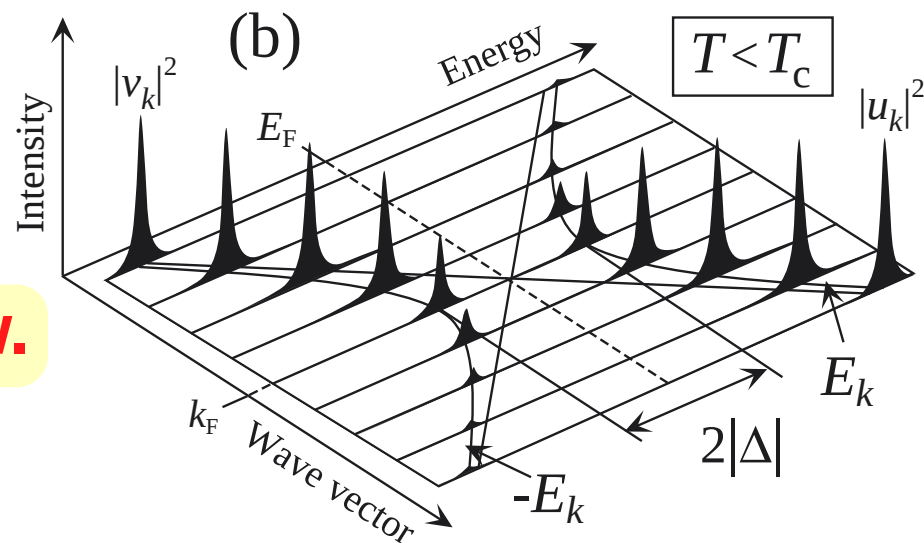


L.V. Butov et al, Nature **418**, 751 (2002).

4 Nadprzewodniki wysokotemp.



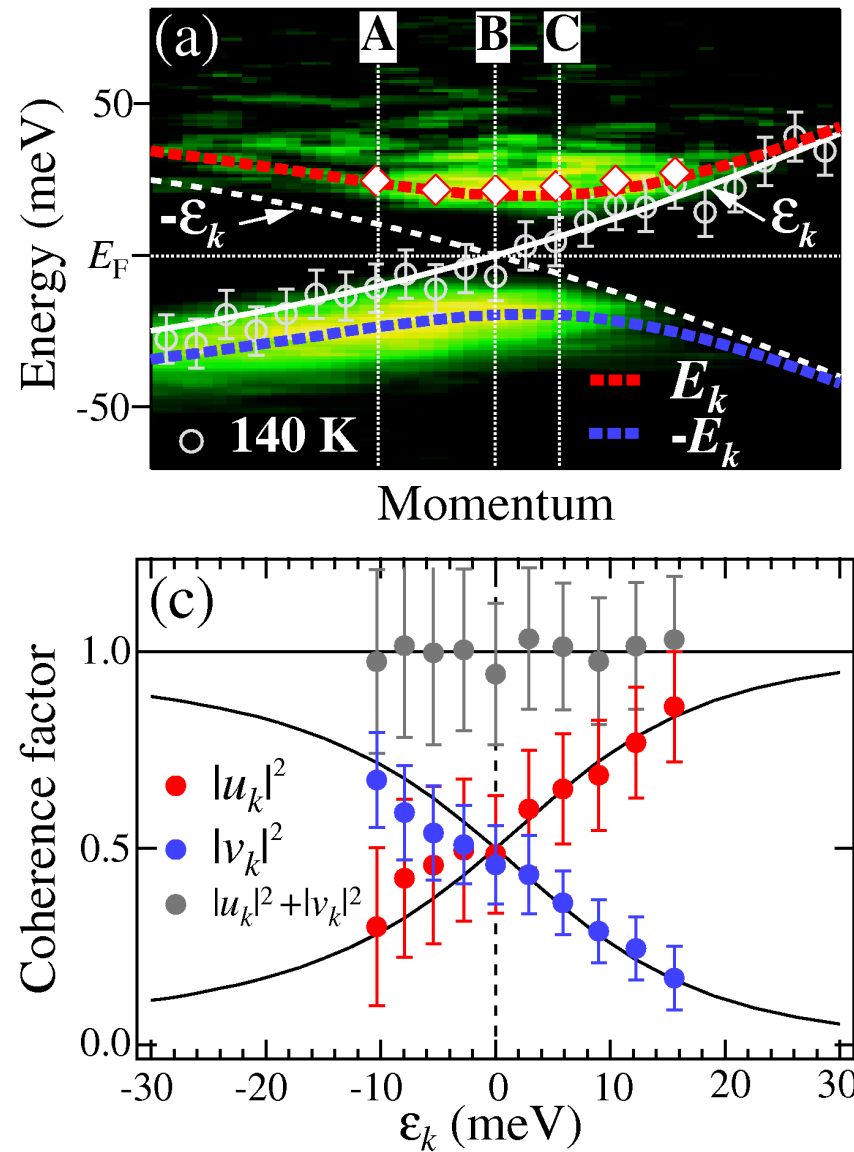
stan normalny



stan nadprzew.

W nadprzewodnikach **konwencjonalnych** widmo wzbudzeń składa się z dwóch gałęzi Bogoliubova oddzielonych przerwą $2\Delta_{sc}$ wokół E_F – efekty fluktuacyjne są pominięte.

Fakty doświadczalne dla $T < T_c$



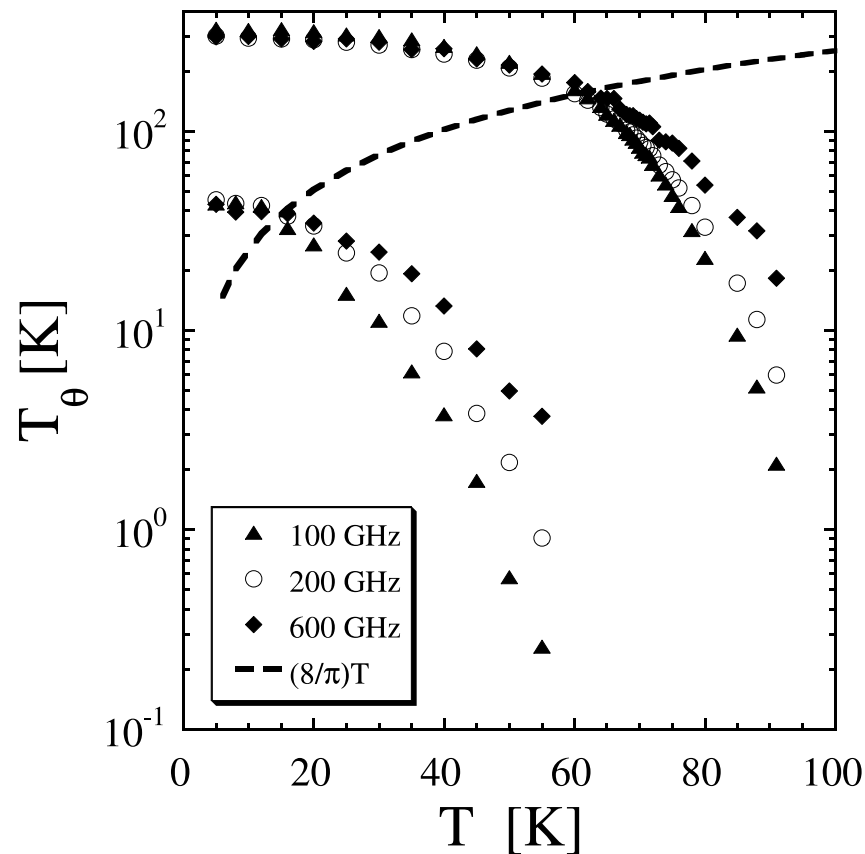
H. Matsui, T. Sato, and T. Takahashi et al, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 217002 (2003).

Niekoherentne pary powyżej T_c

przesłanka # 1

Niekoherentne pary powyżej T_c

przesłanka # 1



Reszkowy efekt Meissnera zaobserwowany przy zastosowaniu ultraszybkich pól magnetycznych.

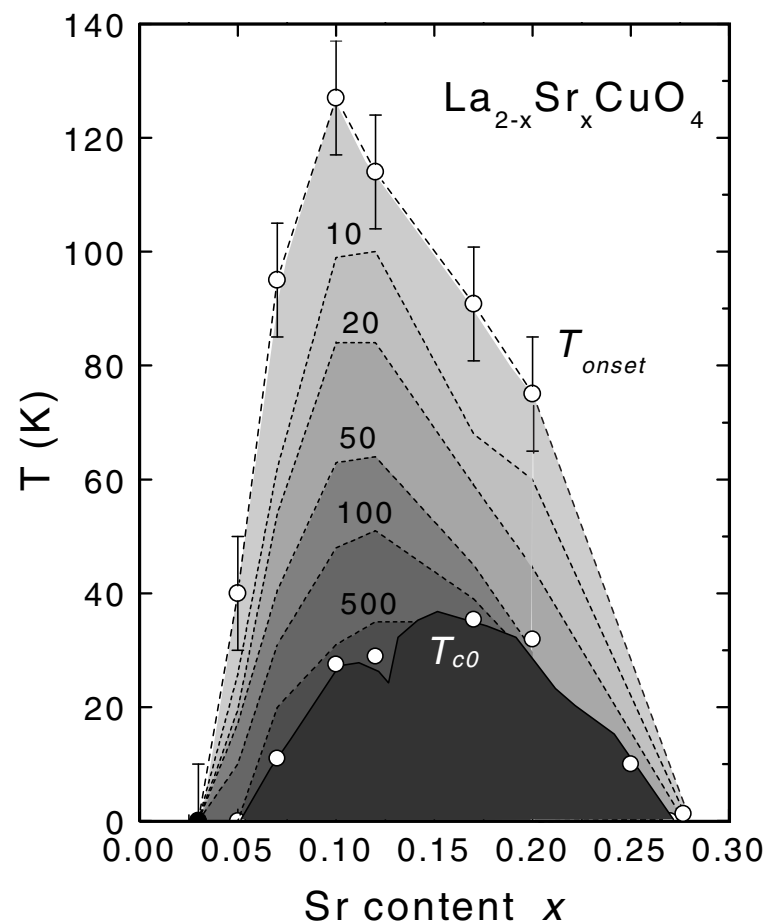
J. Corson et al, Nature **398**, 221 (1999).

Niekoherentne pary powyżej T_c

przesłanka # 2

Niekoherentne pary powyżej T_c

przesłanka # 2



Duży efekt Nernsta obserwowany powyżej fazy **sc.**

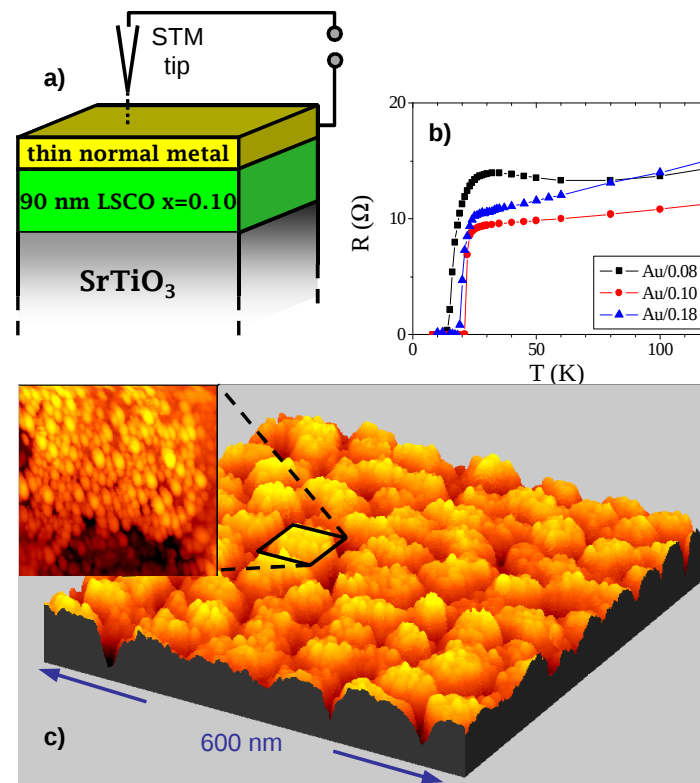
Y. Wang et al, *Science* **299**, 86 (2003).

Niekoherentne pary powyżej T_c

przesłanka # 3

Niekoherentne pary powyżej T_c

przesłanka # 3



O. Yuli et al, *cond-mat/0909.3963* (preprint).

Pseudoszczelinę indukowano w cienkiej warstwie metalicznej na nadprzewodniku $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$.

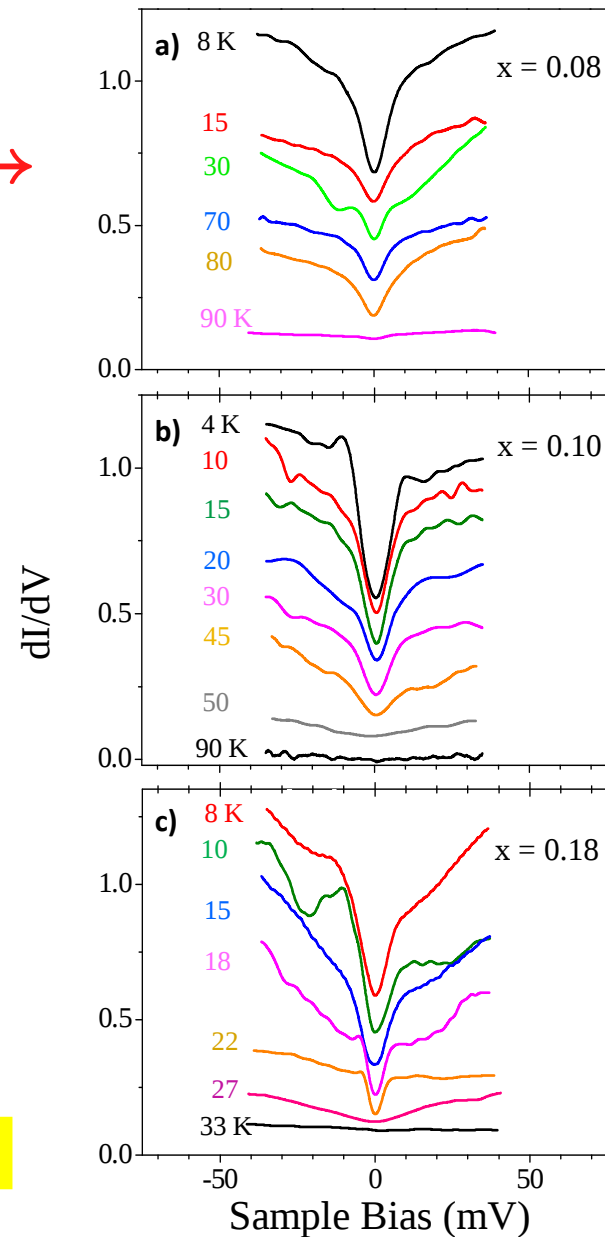
Niekoherentne pary powyżej T_c

przesłanka # 3

Pomiar LDOS →

Indukowaną
pseudoszczelinę
obserwowano
w zakresie
temperatur
aż do $T = T^*$.

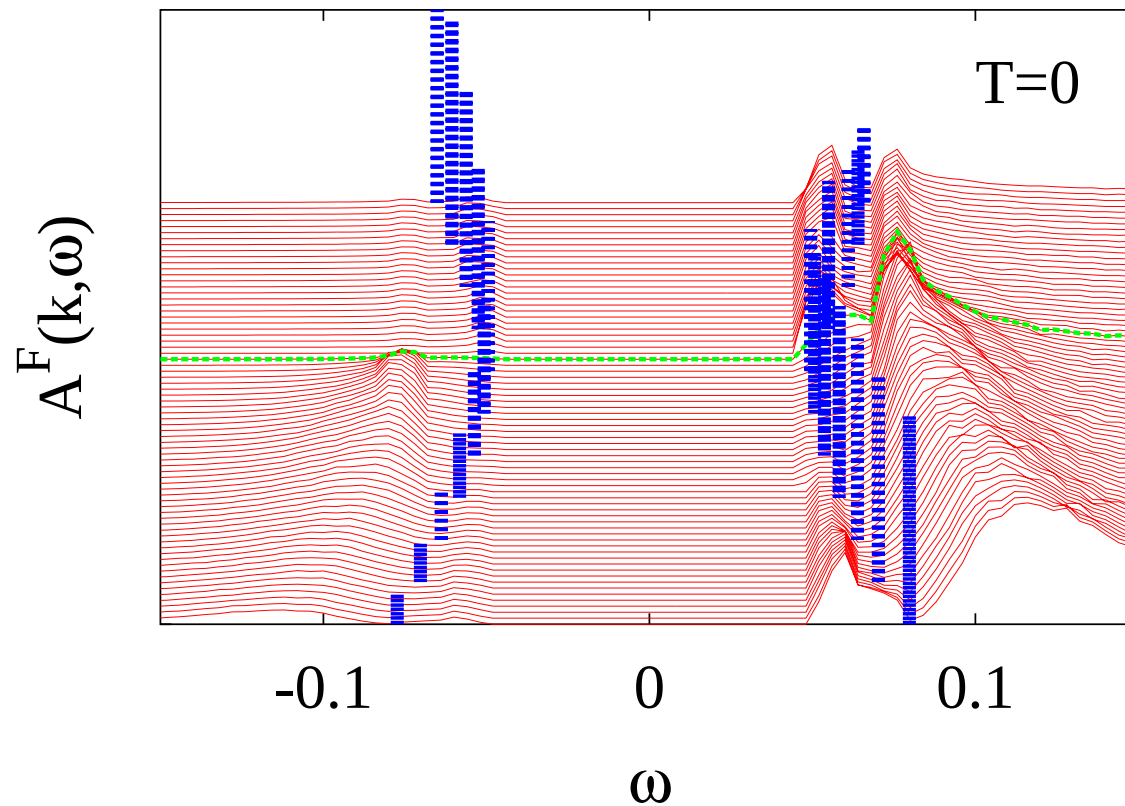
O. Yuli et al, cond-mat/0909.3963



Wpływ preegzystujących par

- scenariusz BF

Przypadek: $T < T_c$

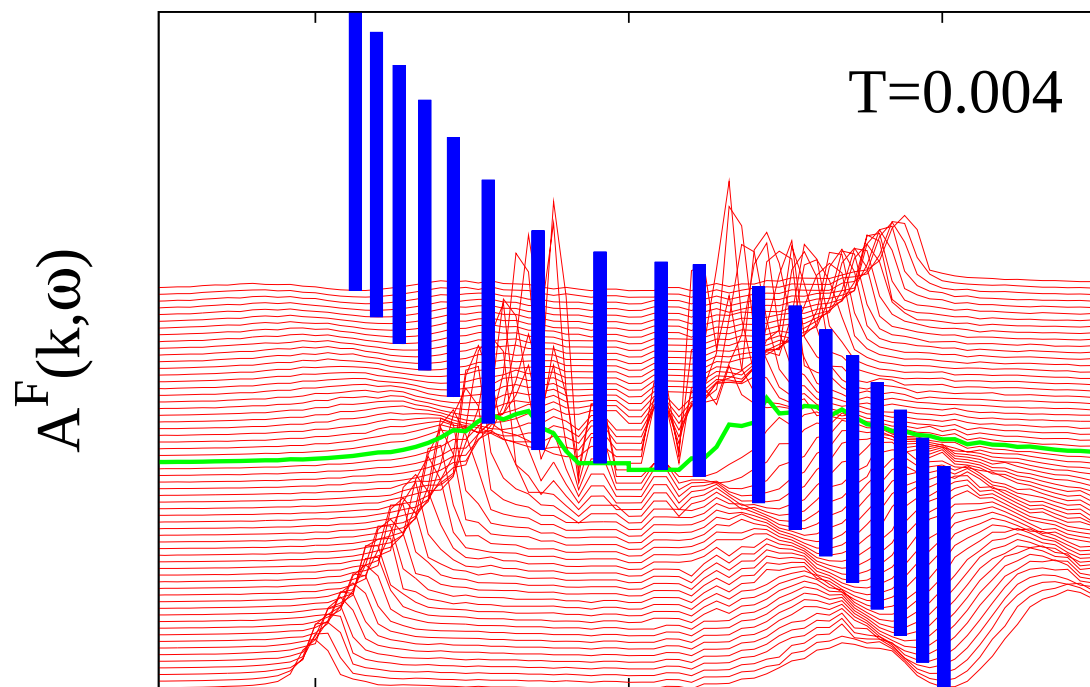


*T. Domański and J. Ranninger, Phys. Rev. Lett. **91**, 255301 (2003).*

Wpływ preegzystujących par

- scenariusz BF

Przypadek: $T_c < T < T^*$

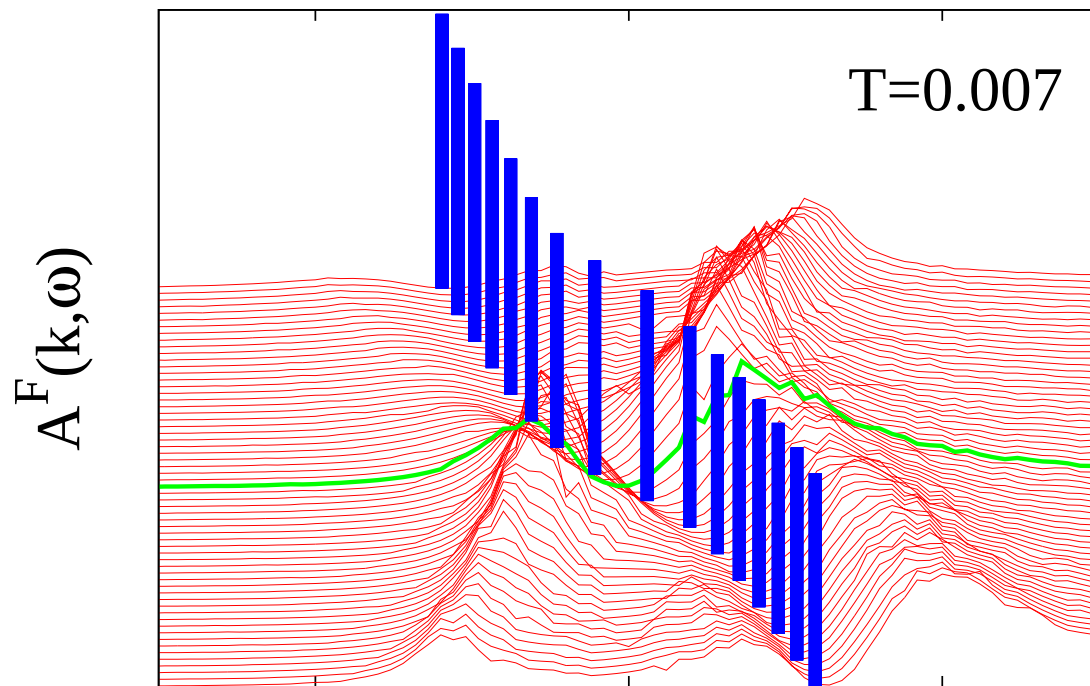


*T. Domański and J. Ranninger, Phys. Rev. Lett. **91**, 255301 (2003).*

Wpływ preegzystujących par

- scenariusz BF

Przypadek: $T_c < T < T^*$

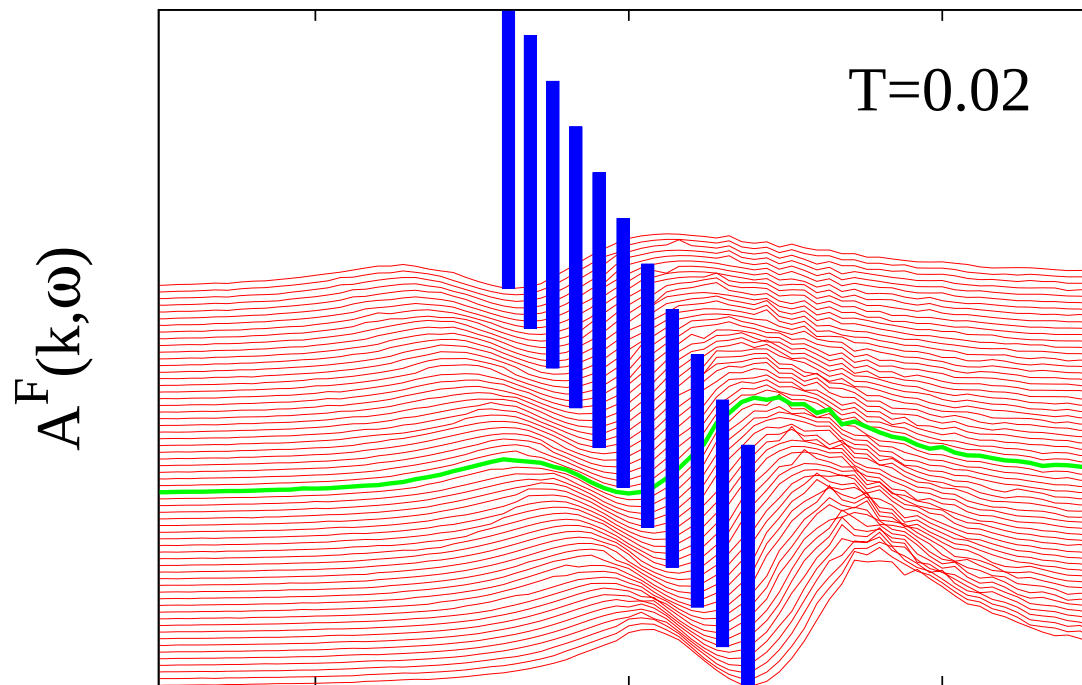


*T. Domański and J. Ranninger, Phys. Rev. Lett. **91**, 255301 (2003).*

Wpływ preegzystujących par

- scenariusz BF

Przypadek: $T > T^*$

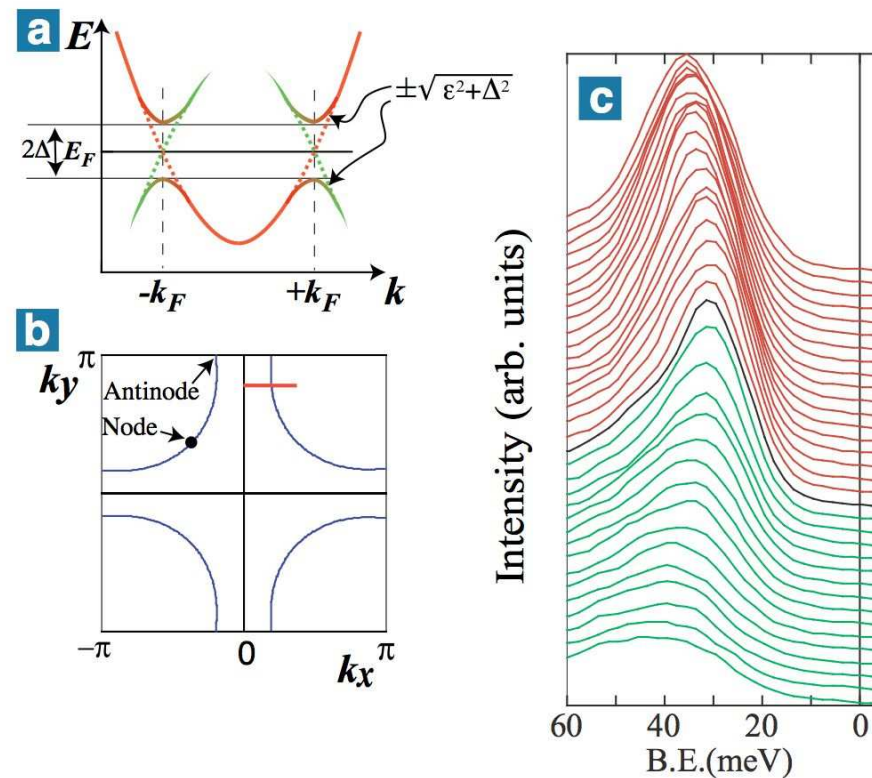


*T. Domański and J. Ranninger, Phys. Rev. Lett. **91**, 255301 (2003).*

Doświadczalne fakty dla $T > T_c$

Doświadczalne fakty dla $T > T_c$

Grupa J. Campuzano (Chicago, USA)

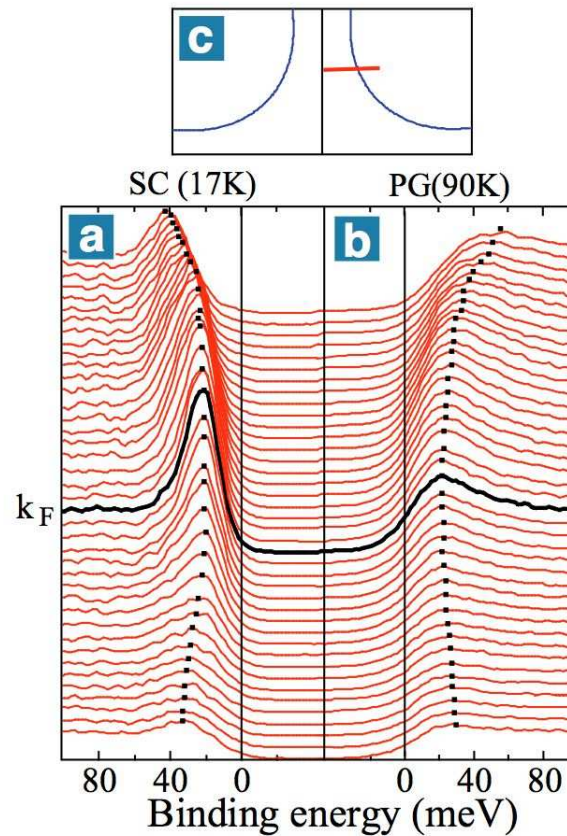


Wyniki dla: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$

A. Kanigel et al, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 137002 (2008).

Doświadczalne fakty dla $T > T_c$

Grupa J. Campuzano (Chicago, USA)

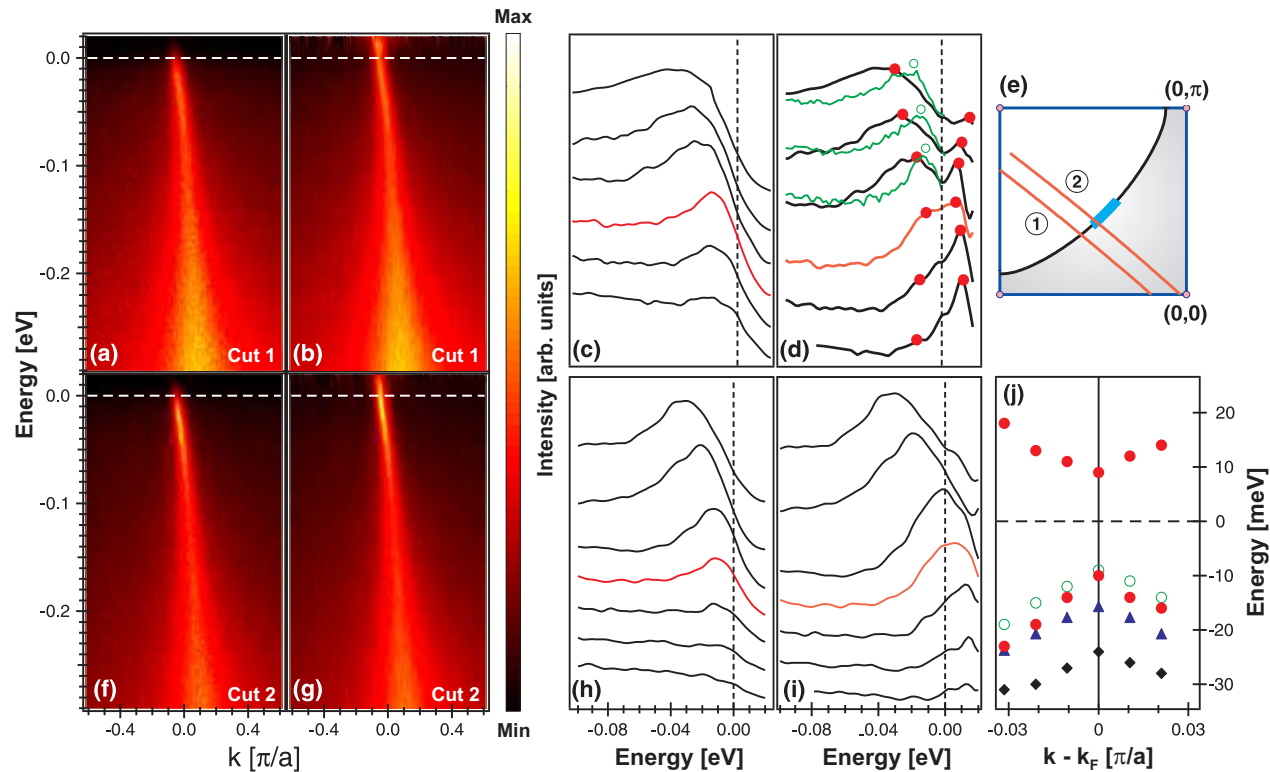


Wyniki: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$

A. Kanigel et al, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 137002 (2008).

Doświadczalne fakty dla $T > T_c$

Grupa PSI (Villigen, Szwajcaria)

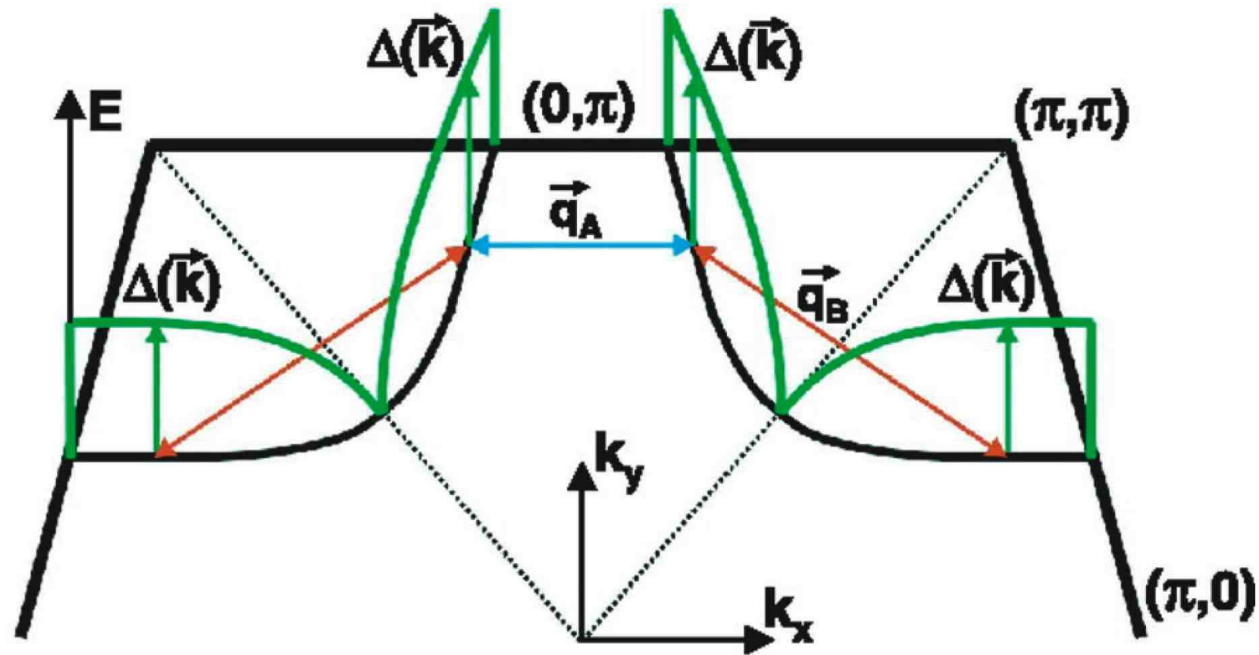


Wyniki dla: $\text{La}_{1.895}\text{Sr}_{0.105}\text{CuO}_4$

M. Shi et al, cond-mat/0810.0292 (preprint).

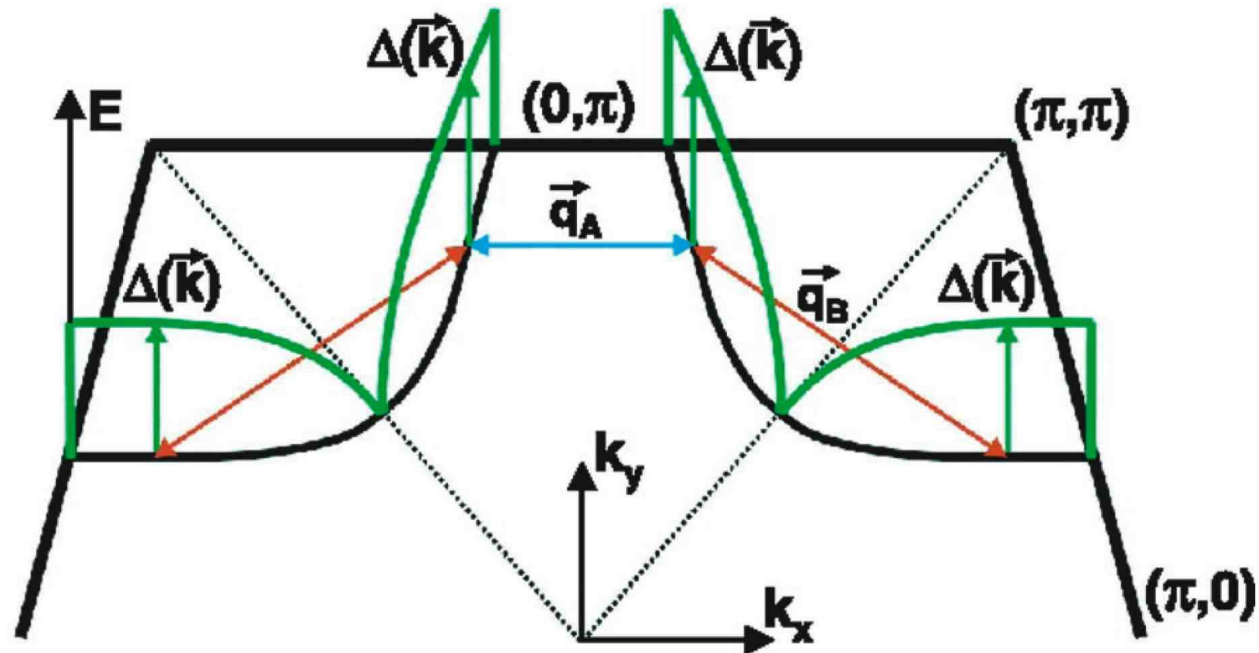
Zależność kątowna $\Delta(\vec{k})$

- przypadek $T < T_c$



J.E. Hoffman et al, Science **297**, 1148 (2002).

Zależność kątowna $\Delta(\vec{k})$ - przypadek $T < T_c$



J.E. Hoffman et al, Science 297, 1148 (2002).

Wiele doświadczeń wskazuje, że poniżej T_c przerwa energetyczna posiada symetrię typu fali d .

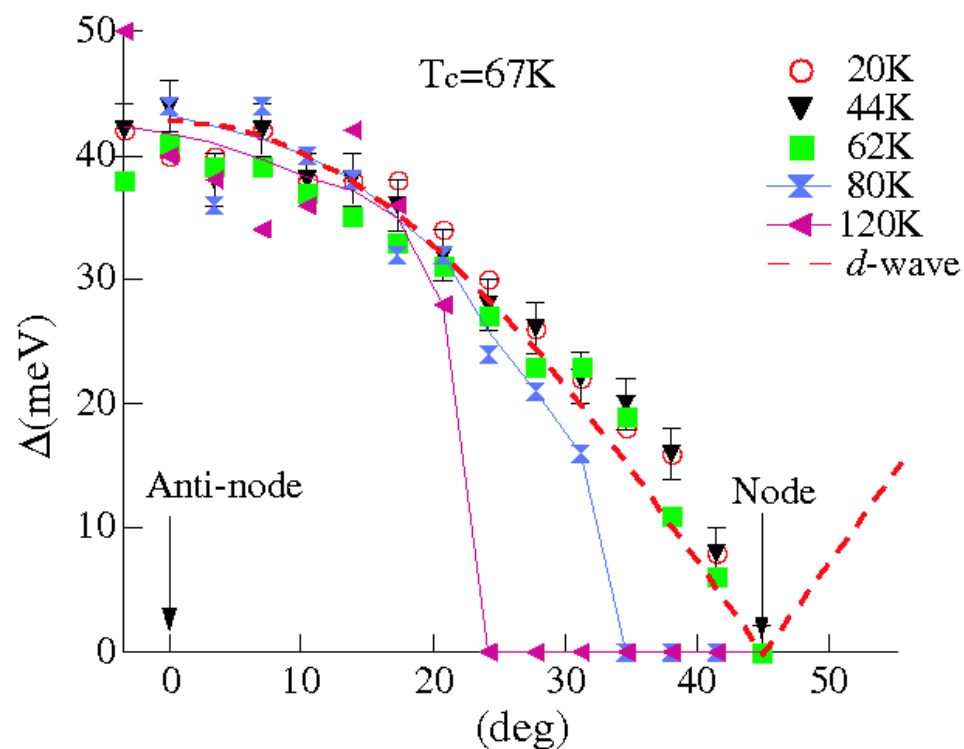
Zależność $\Delta(\vec{k})$ powyżej T_c

Zależność $\Delta(\vec{k})$ powyżej T_c

Powyżej T_c przerwa energetyczna nadal istnieje. Ze wzrostem temperatury zaczyna zanikać począwszy od obszaru nodalnego, gdzie wyłaniają się **łuki Fermiego**.

Zależność $\Delta(\vec{k})$ powyżej T_c

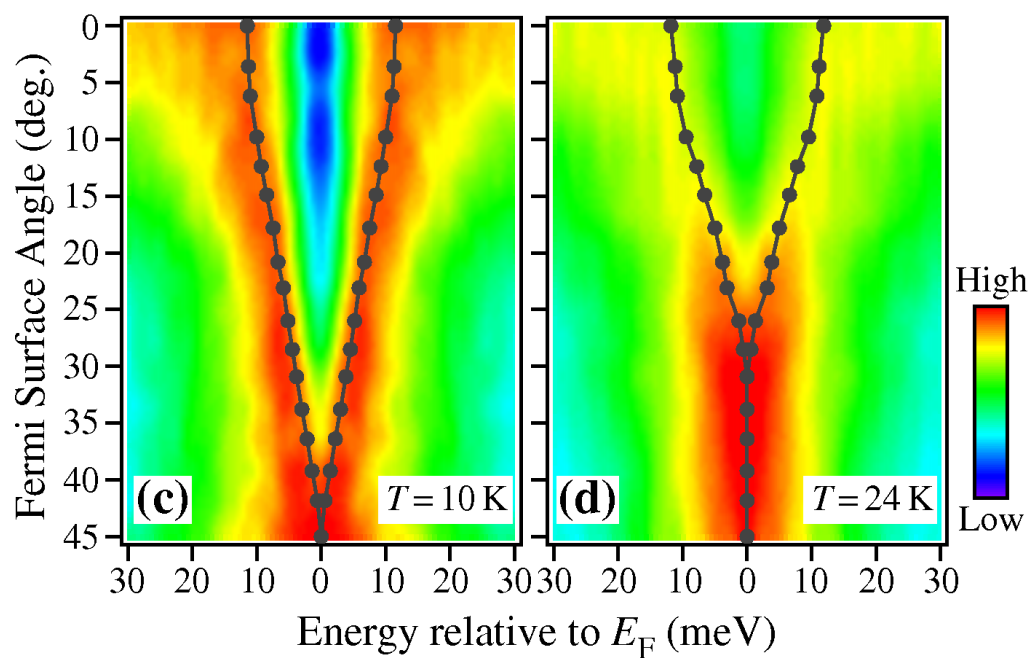
Powyżej T_c przerwa energetyczna nadal istnieje. Ze wzrostem temperatury zaczyna zanikać począwszy od obszaru nodalnego, gdzie wyłaniają się **łuki Fermiego**.



A. Kanigel et al, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 157001 (2007).

Zależność $\Delta(\vec{k})$ powyżej T_c

Powyżej T_c przerwa energetyczna nadal istnieje. Ze wzrostem temperatury zaczyna zanikać począwszy od obszaru nodalnego, gdzie wyłaniają się **łuki Fermiego**.

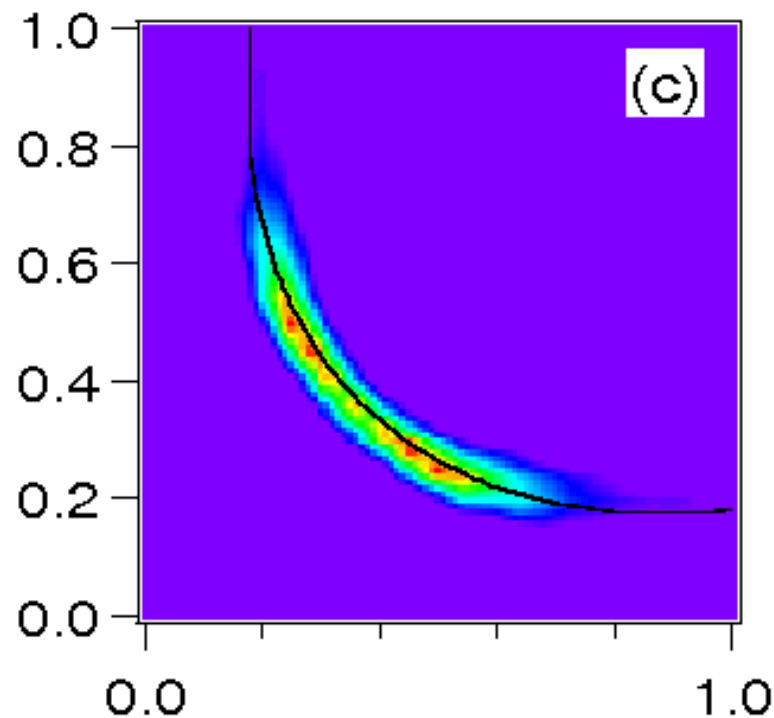


Nadprzewodnik $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ z $T_c = 21 \text{ K}$.

K. Nakayama et al, Phys. Rev. Lett. 102, 227006 (2009).

Zależność $\Delta(\vec{k})$ powyżej T_c

Powyżej T_c przerwa energetyczna nadal istnieje. Ze wzrostem temperatury zaczyna zanikać począwszy od obszaru nodalnego, gdzie wyłaniają się **łuki Fermiego**.



Łuki Fermiego w zakresie temperatur $T_c < T < T^*$.

K. McElroy, Nature Physics 2, 441 (2006) .

Analiza kątowej zależności $\Delta_{pg}(\vec{k})$

Analiza kątowej zależności $\Delta_{pg}(\vec{k})$

Zbadaliśmy wpływ anizotropowej postaci sprzężenia B-F

$g_{\vec{k}} = g [\cos(k_x) - \cos(k_y)]$ dla realistycznej dyspersji

$\epsilon_{\vec{k}} = -2t [\cos(k_x) + \cos(k_y)] - 4t' \cos(k_x) \cos(k_y).$

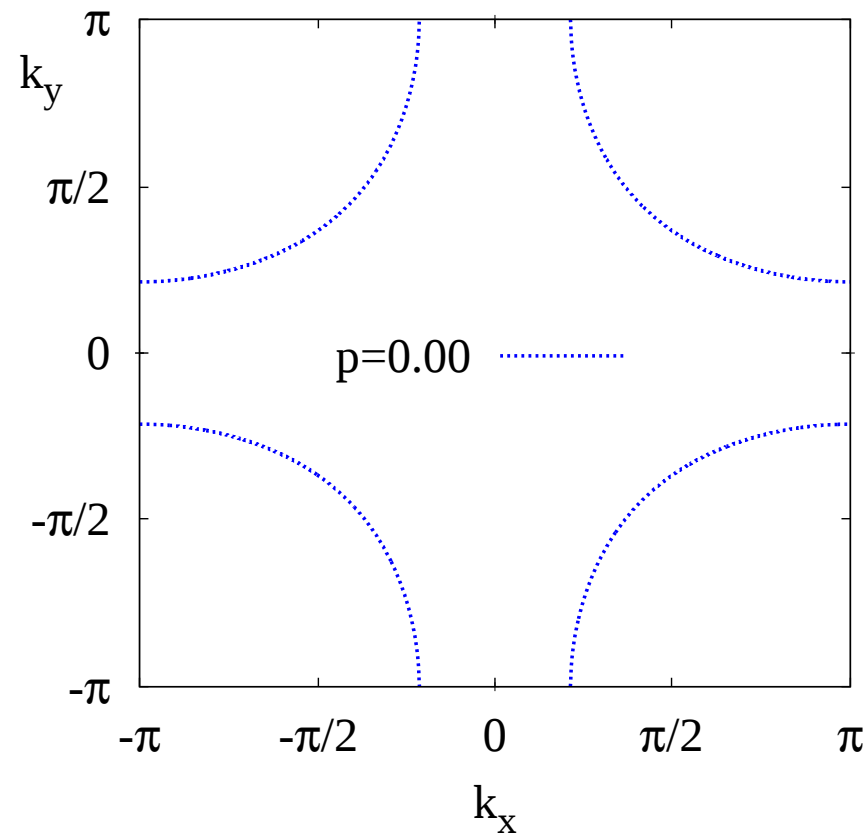
Analiza kątowej zależności $\Delta_{pg}(\vec{k})$

Zbadaliśmy wpływ anizotropowej postaci sprzężenia B-F

$g_{\vec{k}} = g [\cos(k_x) - \cos(k_y)]$ dla realistycznej dyspersji

$\epsilon_{\vec{k}} = -2t [\cos(k_x) + \cos(k_y)] - 4t' \cos(k_x) \cos(k_y)$.

$$t'/t = -0.4$$



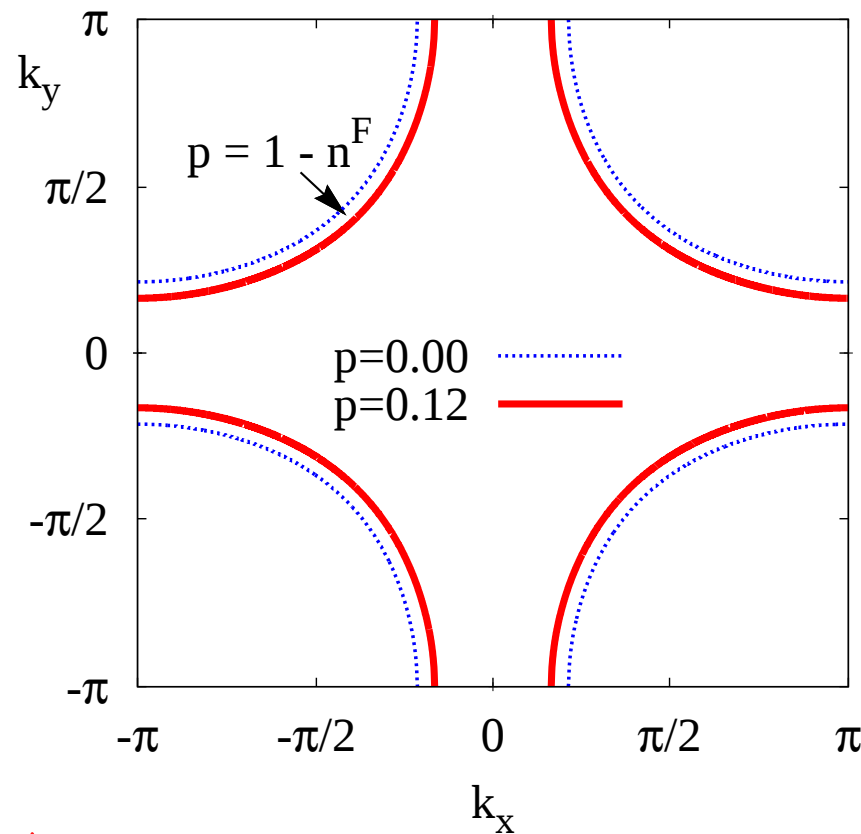
Analiza kątowej zależności $\Delta_{pg}(\vec{k})$

Zbadaliśmy wpływ anizotropowej postaci sprzężenia B-F

$g_{\vec{k}} = g [\cos(k_x) - \cos(k_y)]$ dla realistycznej dyspersji

$\epsilon_{\vec{k}} = -2t [\cos(k_x) + \cos(k_y)] - 4t' \cos(k_x) \cos(k_y)$.

$$t'/t = -0.4$$



Topologia $\vec{k}_F$ dla domieszkowania dziurami $p = 0.12$

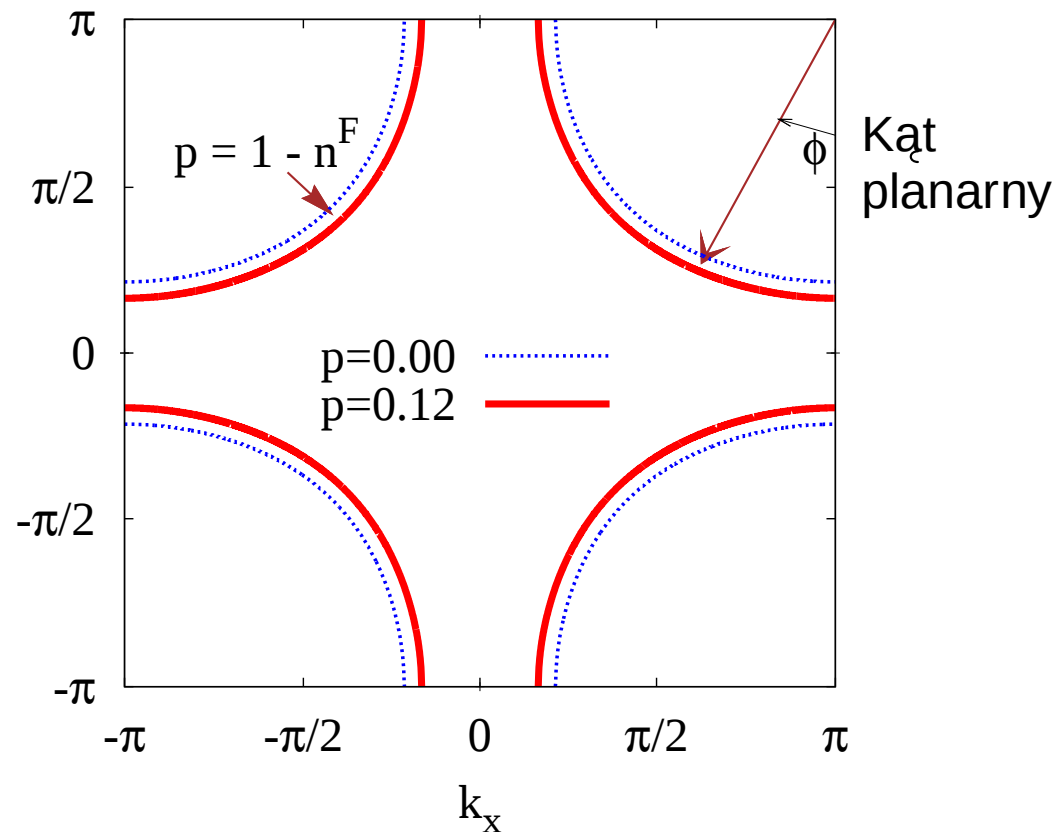
Analiza kątowej zależności $\Delta_{pg}(\vec{k})$

Zbadaliśmy wpływ anizotropowej postaci sprzężenia B-F

$g_{\vec{k}} = g [\cos(k_x) - \cos(k_y)]$ dla realistycznej dyspersji

$\epsilon_{\vec{k}} = -2t [\cos(k_x) + \cos(k_y)] - 4t' \cos(k_x) \cos(k_y)$.

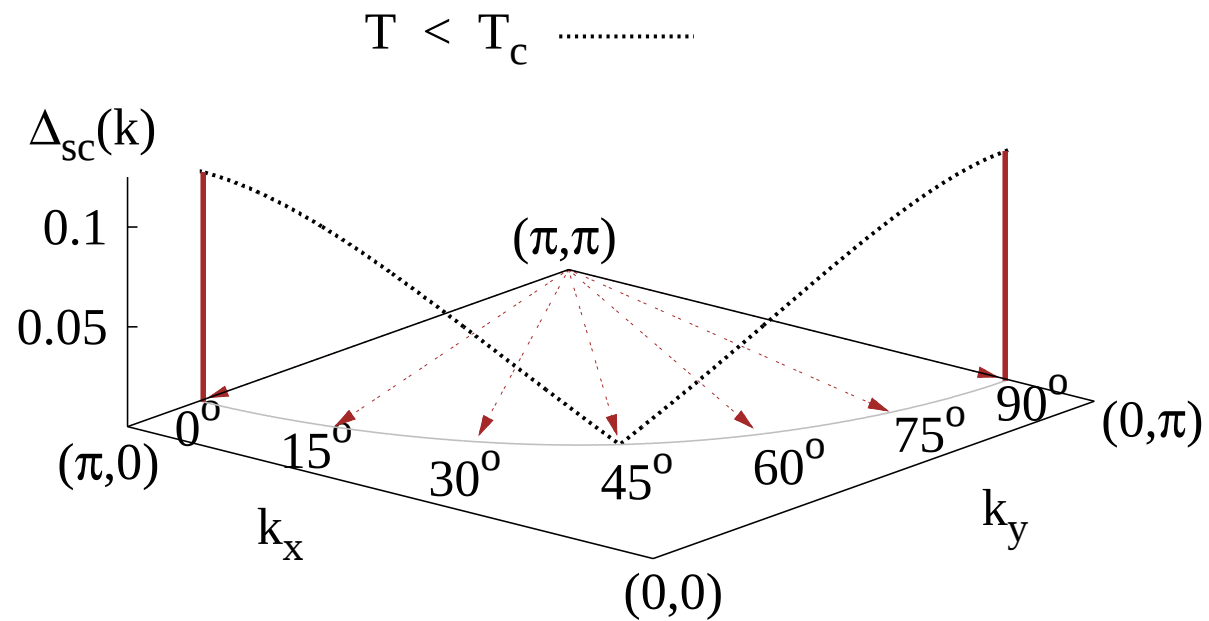
$$t'/t = -0.4$$



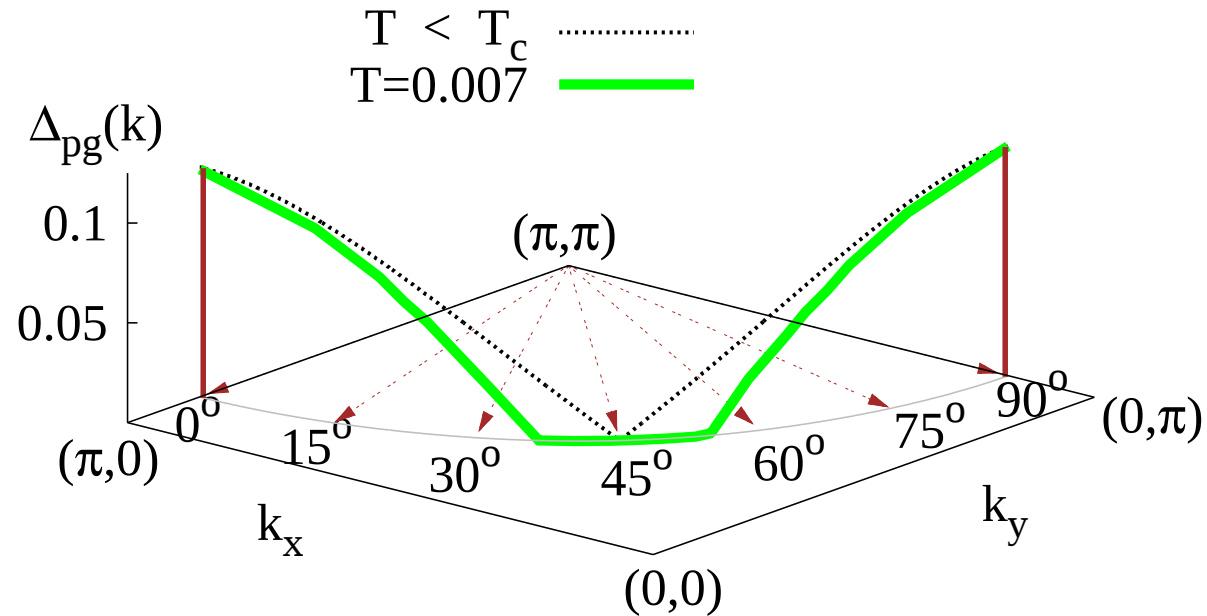
Topologia $\vec{k}_F$ dla domieszkowania dziurami $p = 0.12$

Relacja pseudoszczeliny z łukami Fermiego

Relacja pseudoszczeliny z łukami Fermiego



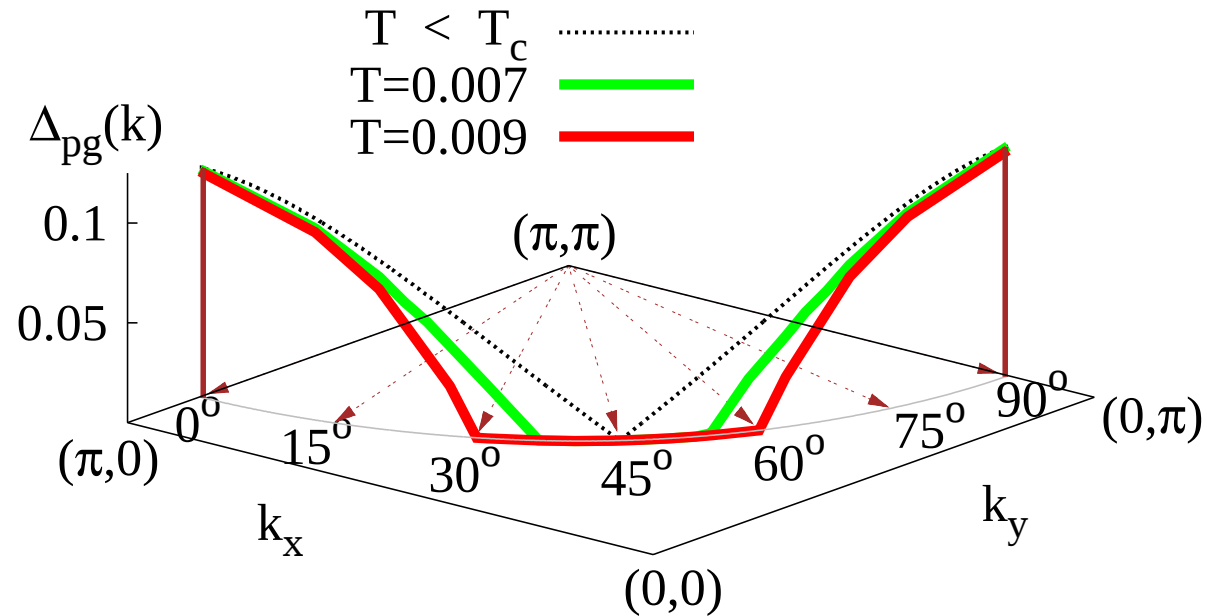
Relacja pseudoszczeliny z łukami Fermiego



Przy wzroście temperatury:

- w obszarze antynodalnym $\Delta_{pg}(\vec{k})$ prawie się nie zmienia,

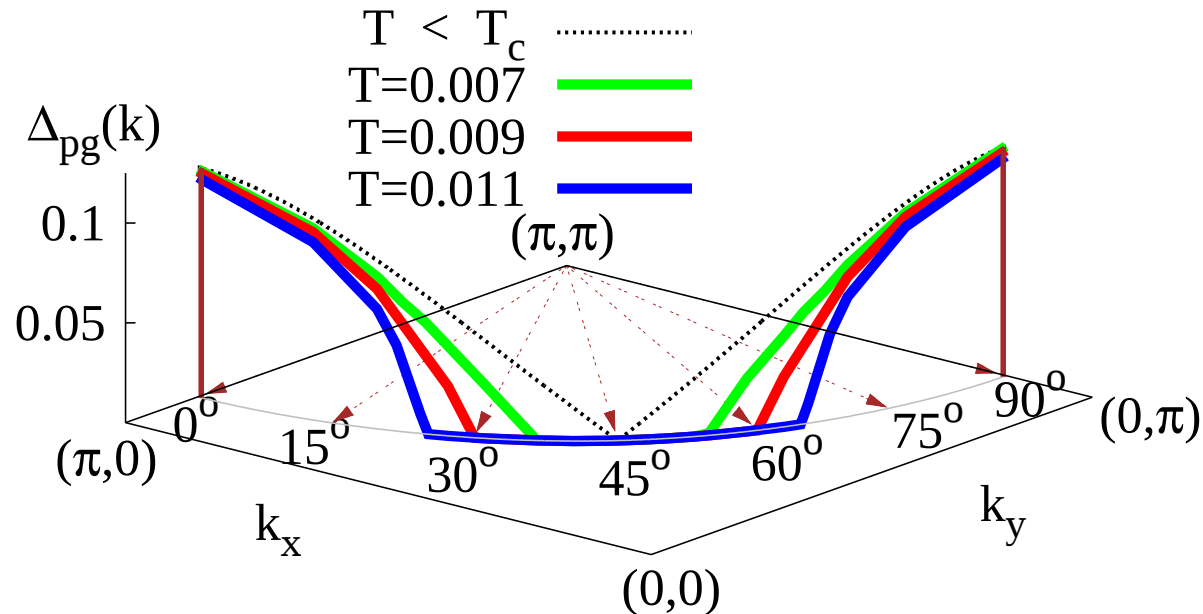
Relacja pseudoszczeliny z łukami Fermiego



Przy wzroście temperatury:

- w obszarze antynodalnym $\Delta_{pg}(\vec{k})$ prawie się nie zmienia,
- pow. Fermiego odbudowuje się w obszarze nodalnym,

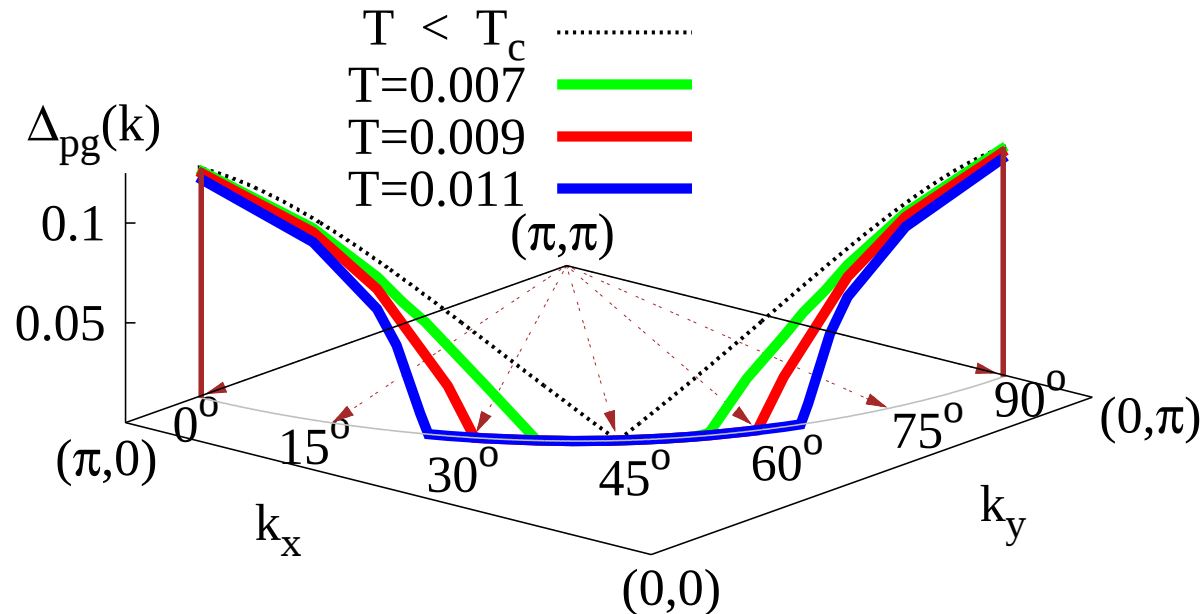
Relacja pseudoszczeliny z łukami Fermiego



Przy wzroście temperatury:

- w obszarze antynodalnym $\Delta_{pg}(\vec{k})$ prawie się nie zmienia,
- pow. Fermiego odbudowuje się w obszarze nodalnym,
- długość łuków Fermi skaluje się liniowo względem T .

Relacja pseudoszczeliny z łukami Fermiego



Przy wzroście temperatury:

- w obszarze antynodalnym $\Delta_{pg}(\vec{k})$ prawie się nie zmienia,
- pow. Fermiego odbudowuje się w obszarze nodalnym,
- długość łuków Fermi skaluje się liniowo względem T .

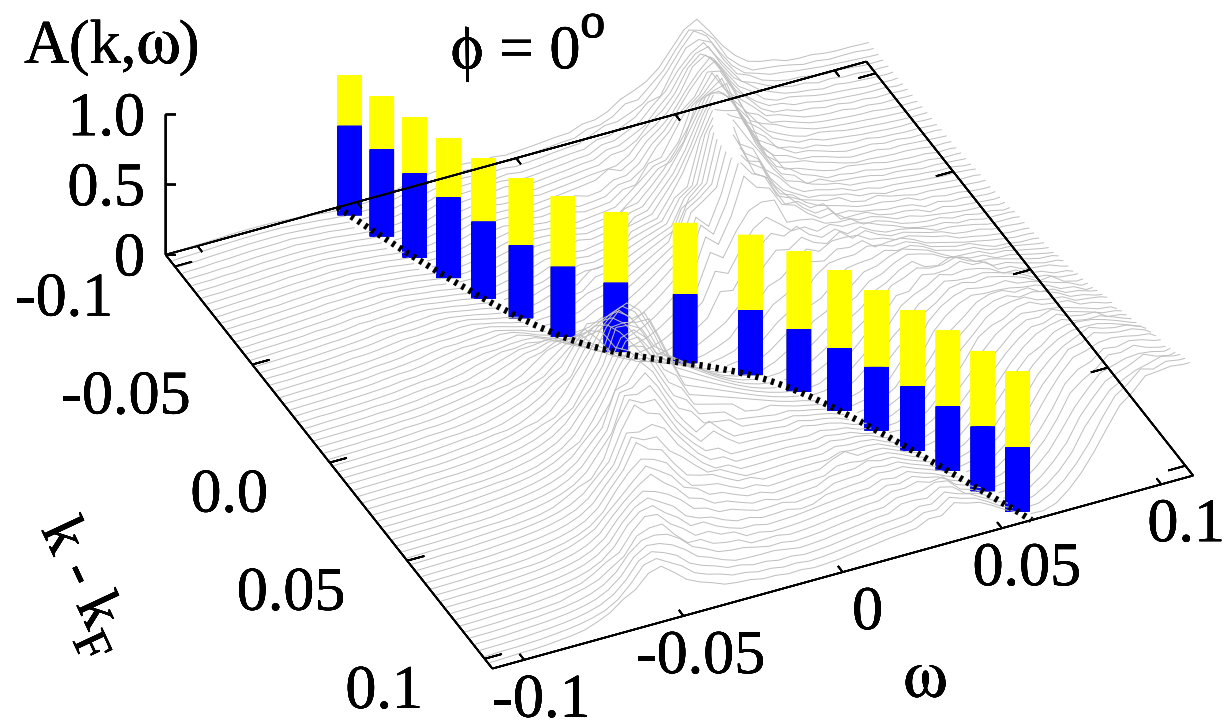
Kwestia ilości biegunów

Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:

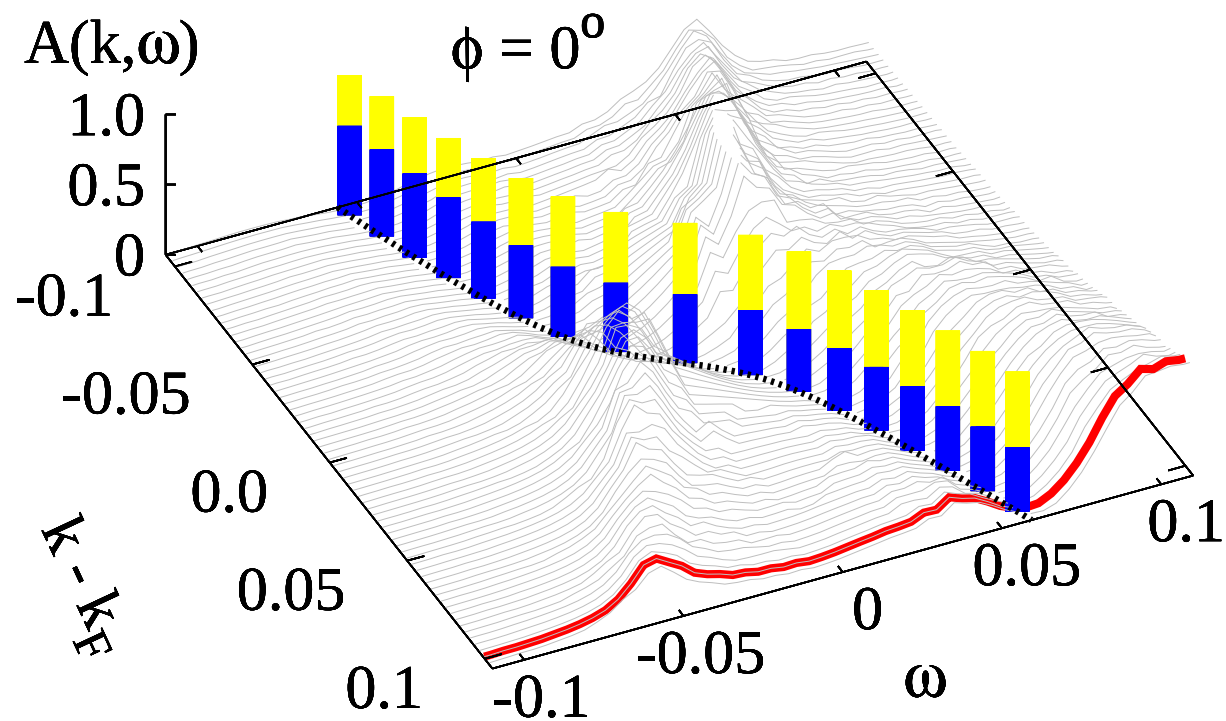
Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:



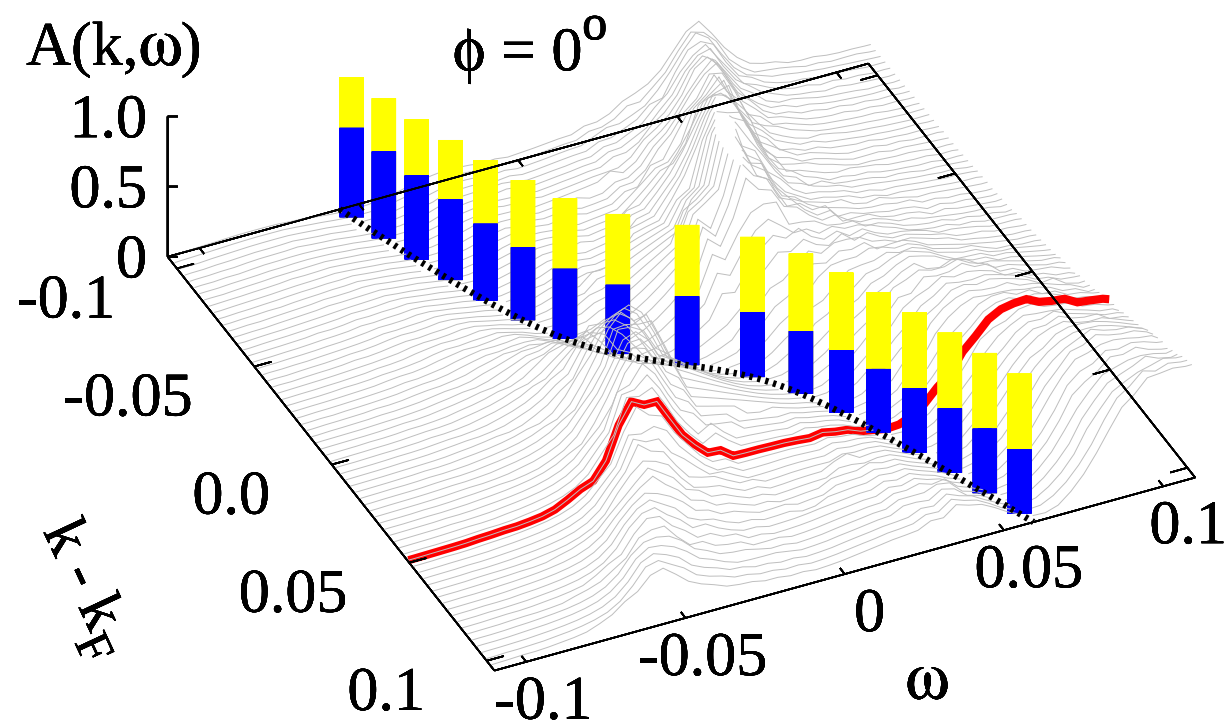
Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:



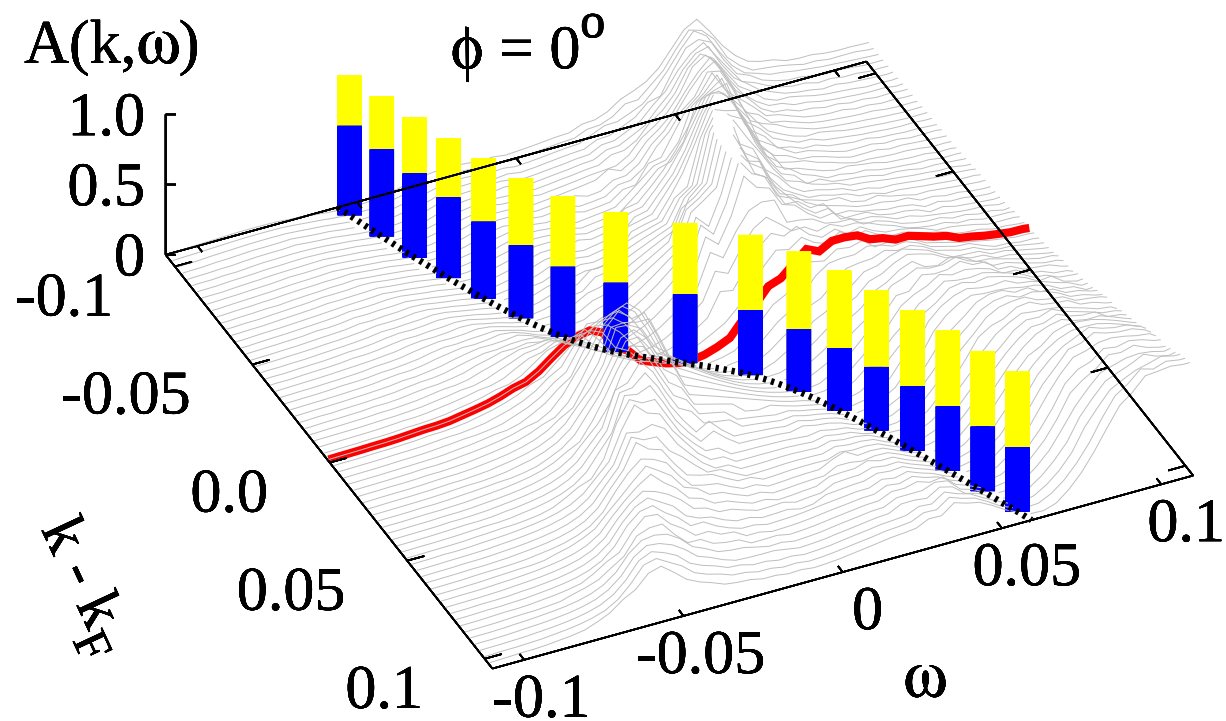
Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:



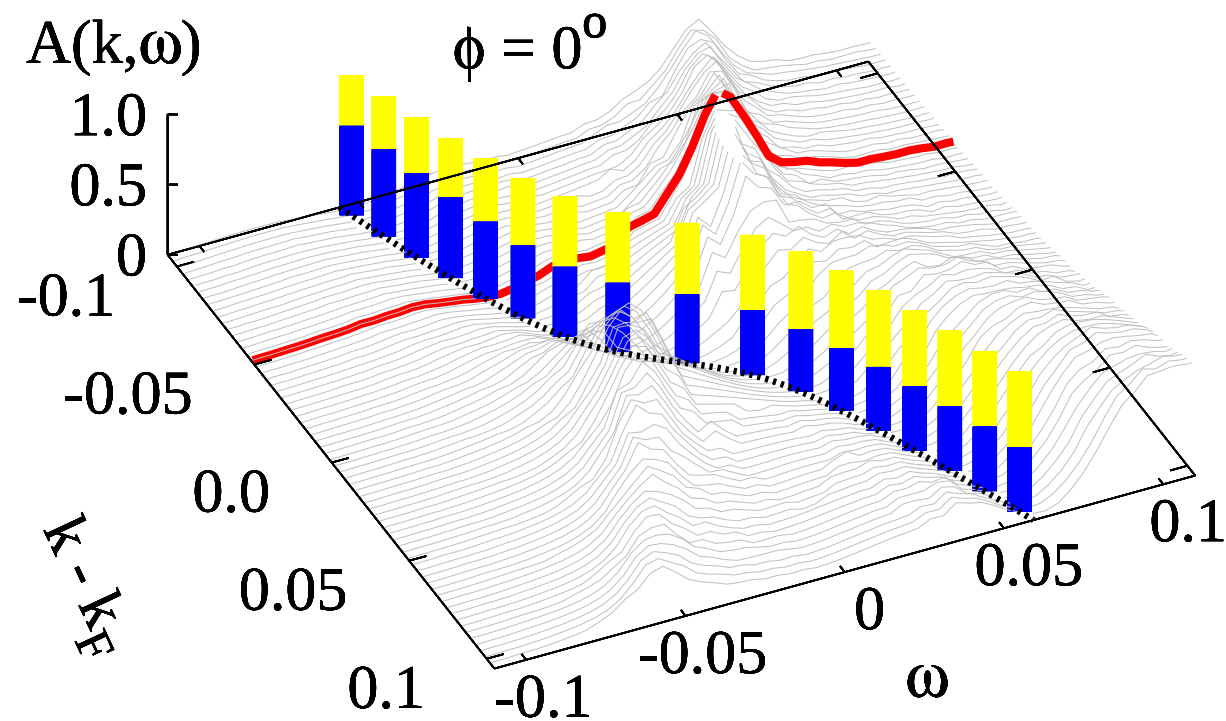
Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:



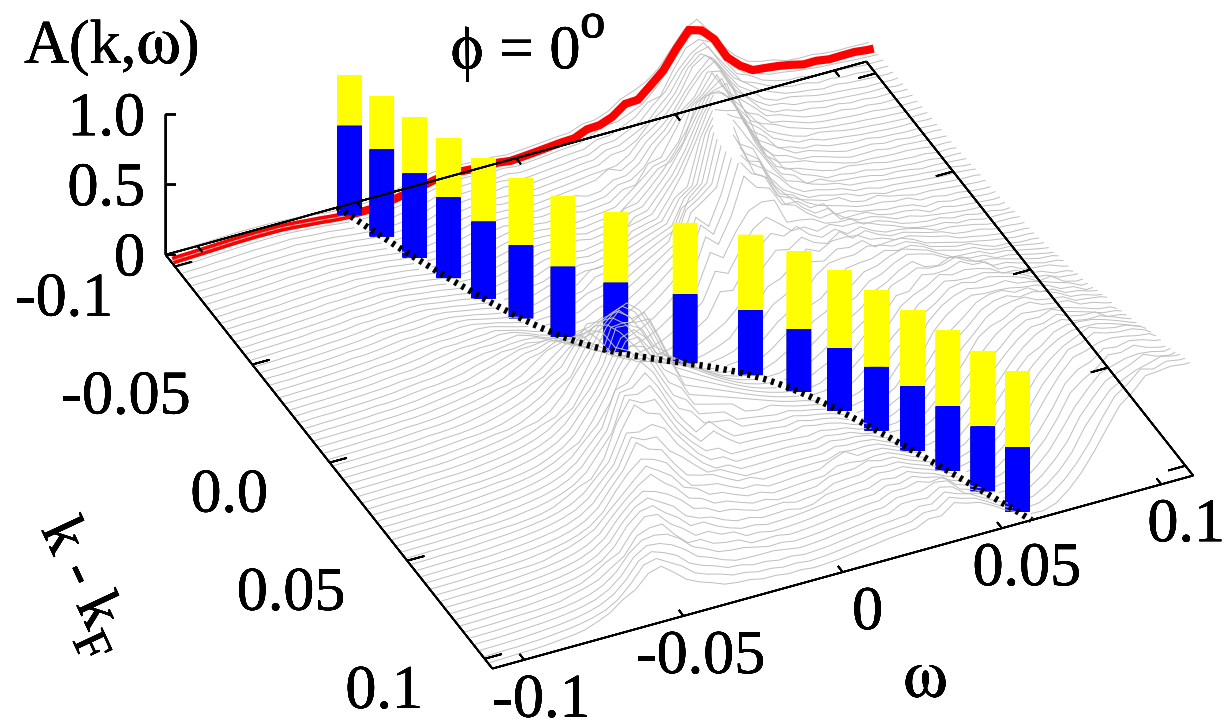
Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:



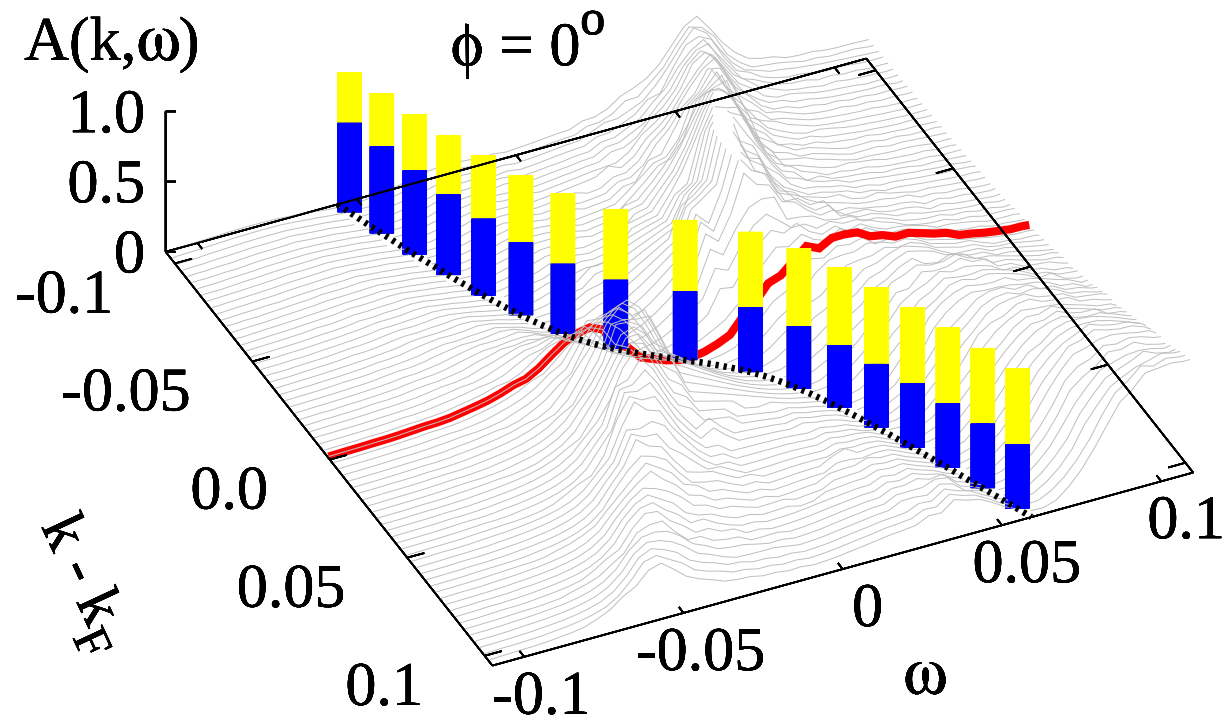
Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:



Kwestia ilości biegunów

Struktura funkcji spectralnej w stanie pseudoszczelinowym:



Blisko k_F występują 3 bieguny:

- 2 bieguny pochodzą od modów Bogoliubova,
- trzeci biegun reprezentuje stan wewnątrzszczelinowy.

Kwestia ilości biegunów

Kwestia ilości biegunów

Podobny jakościowo wynik podkreślono ostatnio w pracy:

Kwestia ilości biegunów

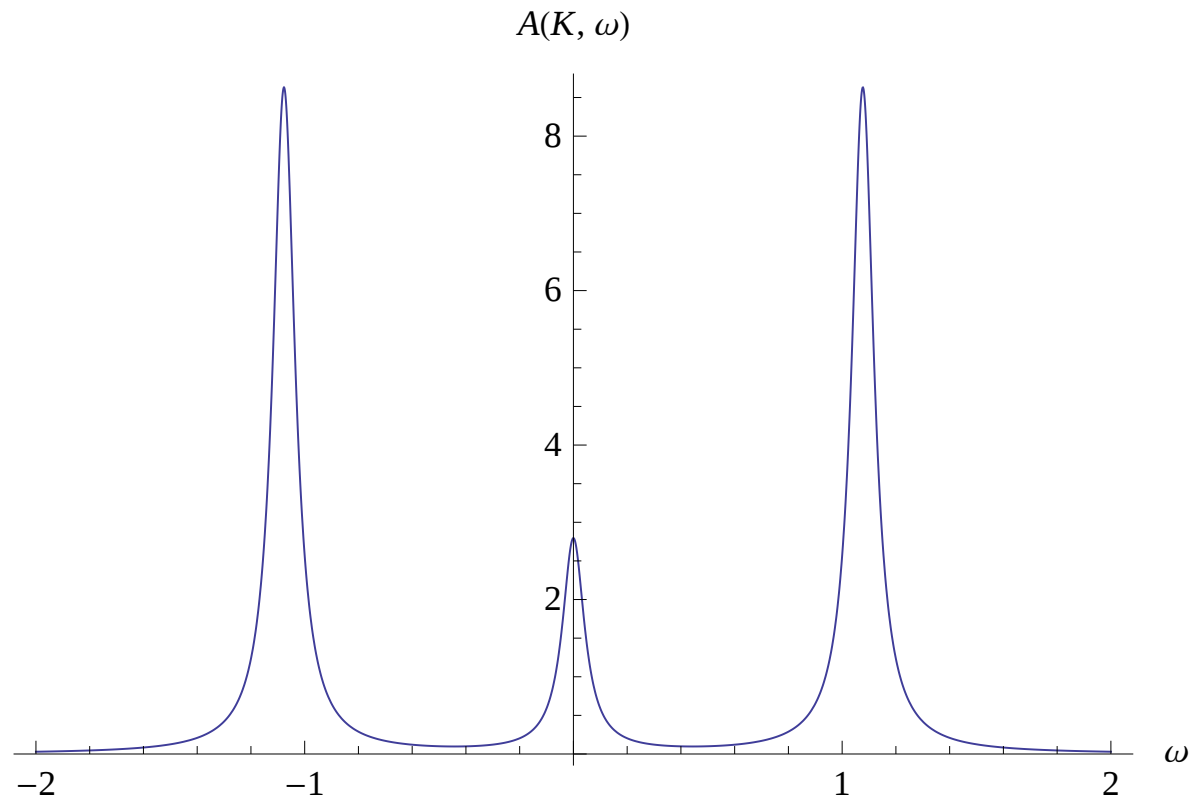
Podobny jakościowo wynik podkreślono ostatnio w pracy:

*T. Senthil and Patrick A. Lee, Phys. Rev. B **79**, 245 (2009).*

Kwestia ilości biegunów

Podobny jakościowo wynik podkreślono ostatnio w pracy:

T. Senthil and Patrick A. Lee, Phys. Rev. B 79, 245 (2009).



Krótko-zasięgowe korelacje par implikują:

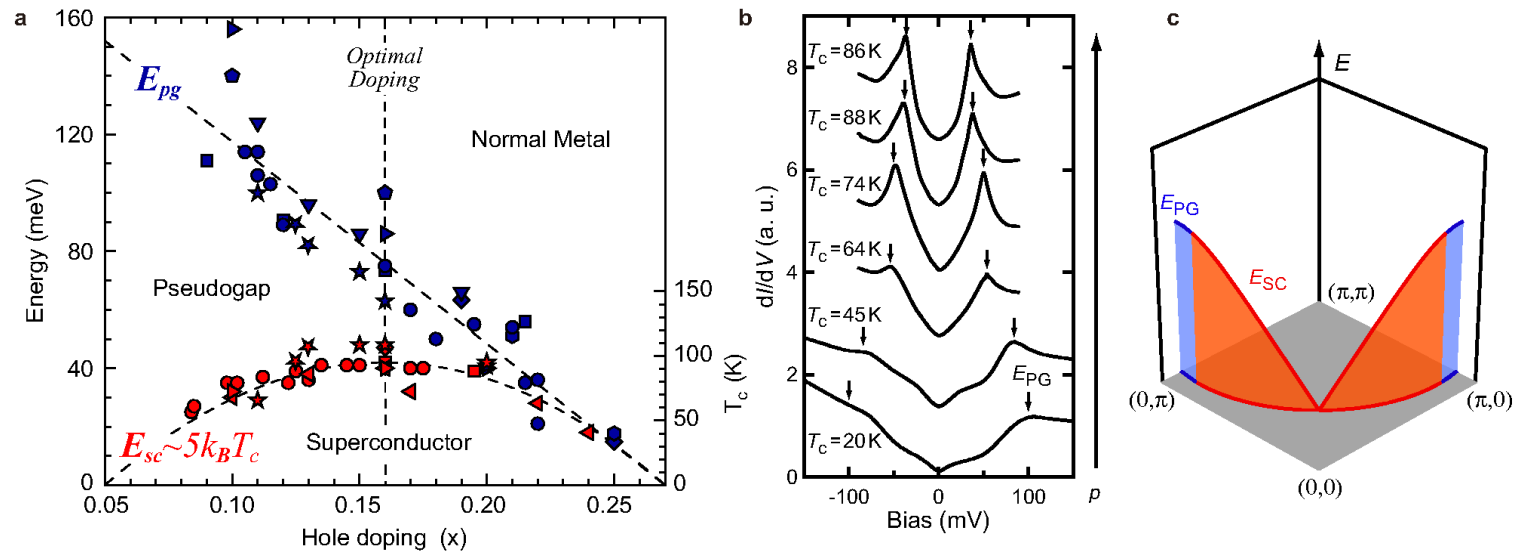
**występowanie 2 pików Bogoliubova oraz stanu *in-gap*,
którego waga wynosi $1/[1 + \frac{1}{\pi}(\Delta_k/\Gamma)^2]$**

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

Dychotomia:

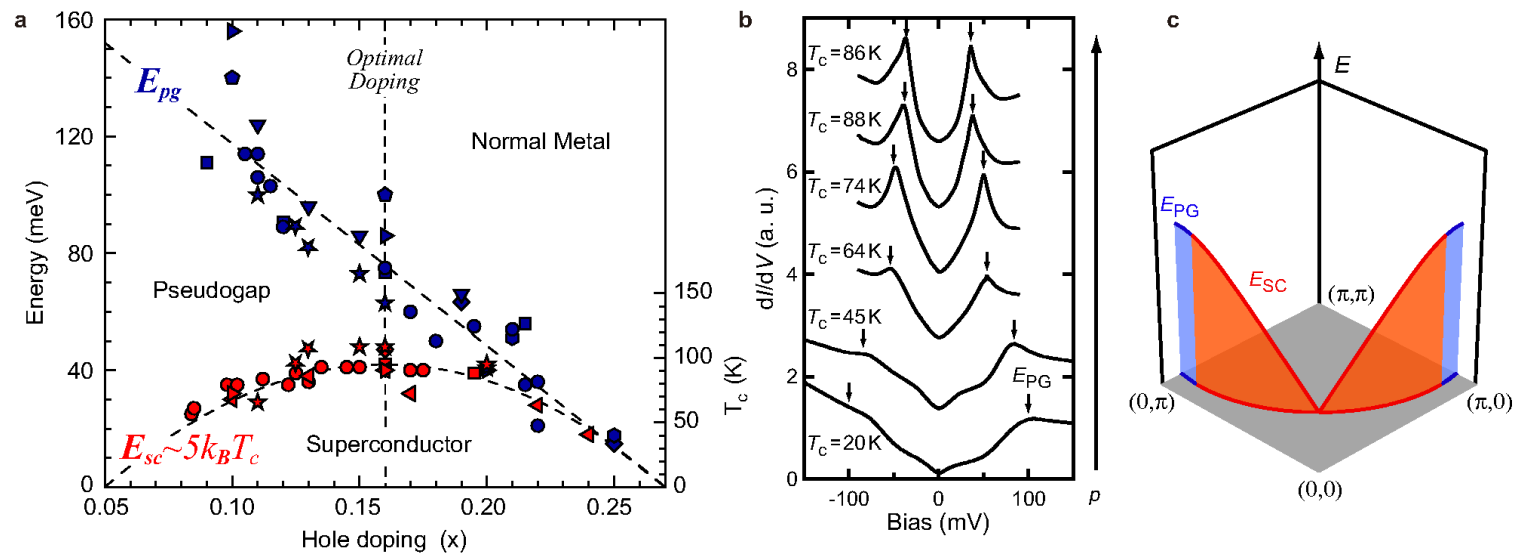
wędowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par



Y. Kohsaka et al, *Nature* **454**, 1072 (2008).

Dychotomia:

wędowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

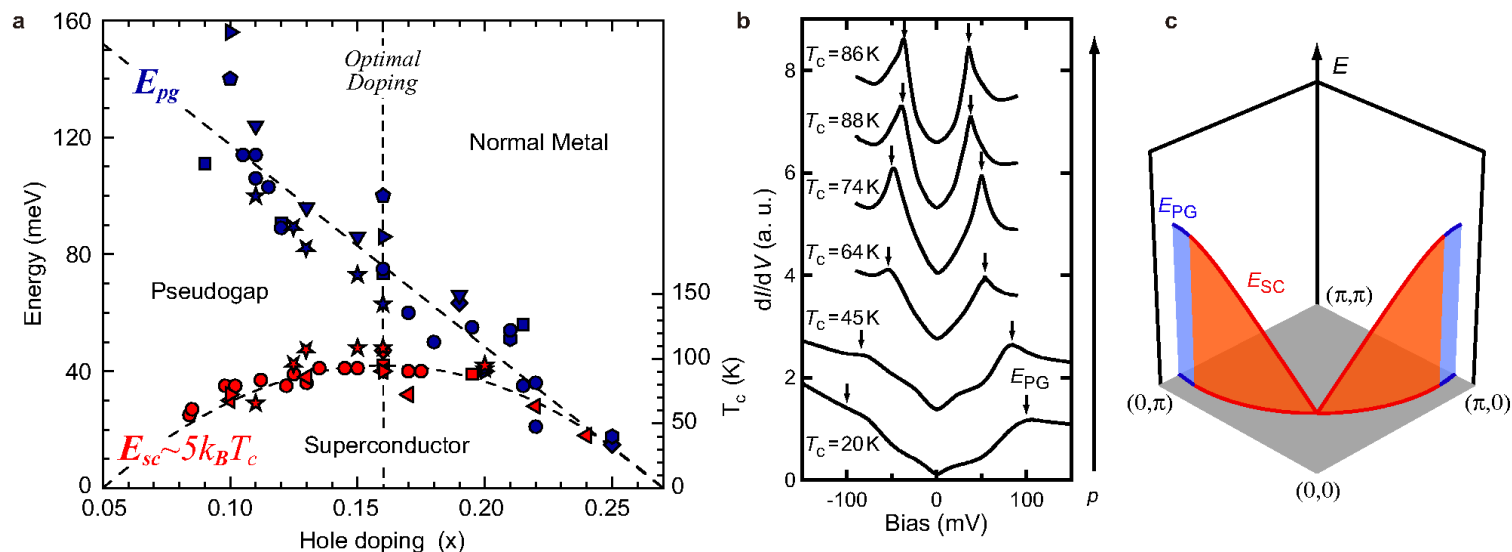


Y. Kohsaka et al, *Nature* **454**, 1072 (2008).

Przy zbliżaniu się do fazy izolatora Motta:

Dychotomia:

wędowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par



Y. Kohsaka et al, *Nature* **454**, 1072 (2008).

Przy zbliżaniu się do fazy izolatora Motta:



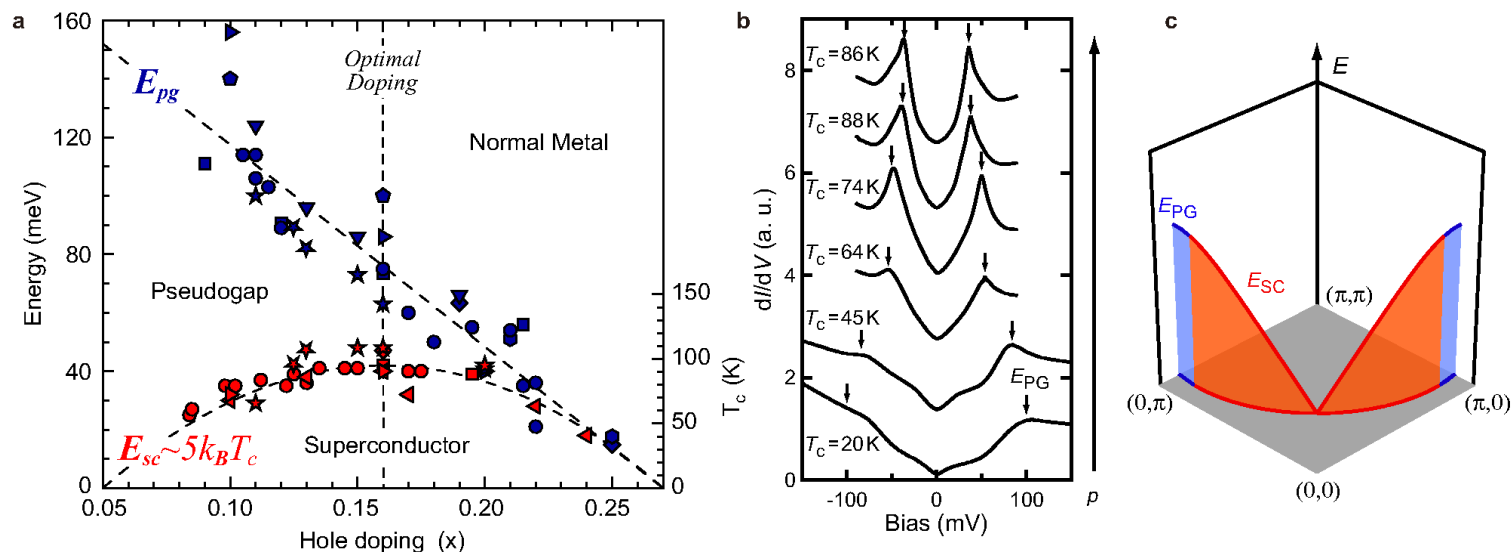
wielkość przerwy energetycznej wzrasta,



coraz bardziej uwydatniają się różnice między dwoma typami par.

Dychotomia:

wędowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par



Y. Kohsaka et al, *Nature* **454**, 1072 (2008).

Przy zbliżaniu się do fazy izolatora Motta:



wielkość przerwy energetycznej wzrasta,



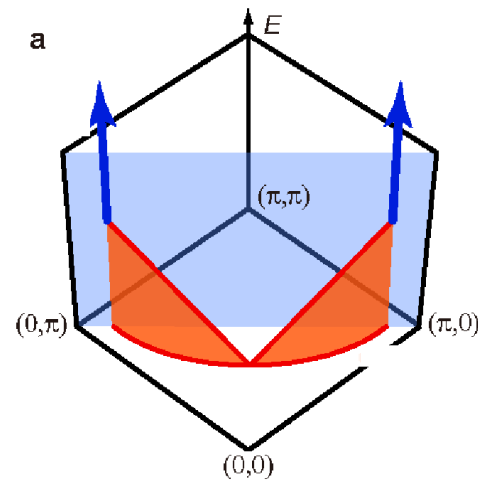
coraz bardziej uwydatniają się różnice między dwoma typami par.

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

Dychotomia:

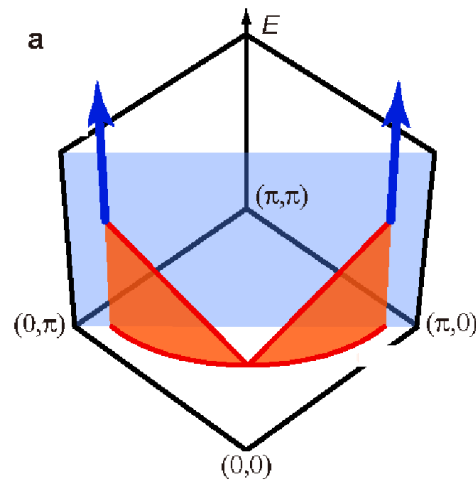
wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par



Y. Kohsaka et al, *Nature* **454**, 1072 (2008).

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

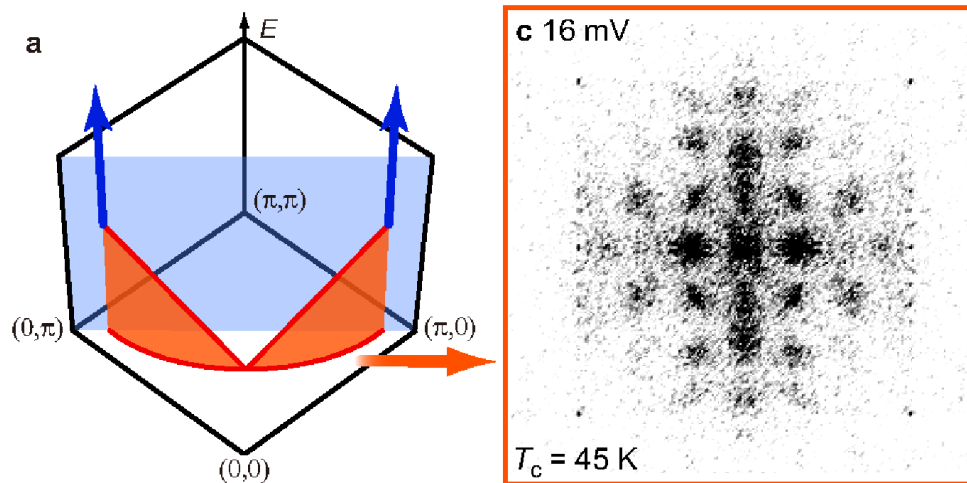


Y. Kohsaka et al, Nature **454**, 1072 (2008).

Zależnie od obszarów strefy Brillouina widoczne są:

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par



Y. Kohsaka et al, Nature **454**, 1072 (2008).

Zależnie od obszarów strefy Brillouina widoczne są:



wędrowne pary Cooper'a

/ the low energy itinerant **sc features /**

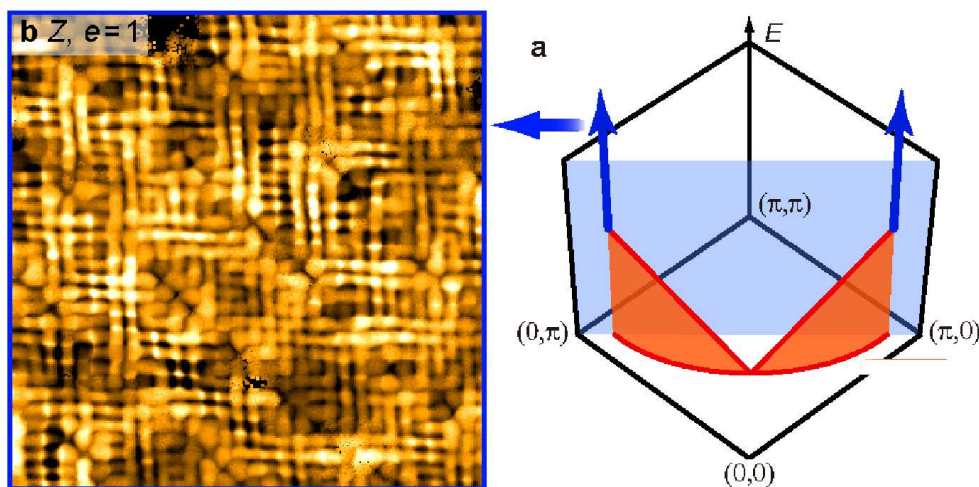


pary zlokalizowane na wiązaniu Cu-O-Cu

/ dispersionless features in $\vec{r}$ -space /

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par



Y. Kohsaka et al, Nature **454**, 1072 (2008).

Zależnie od obszarów strefy Brillouina widoczne są:



wędrowne pary Cooper'a

/ the low energy itinerant sc features /

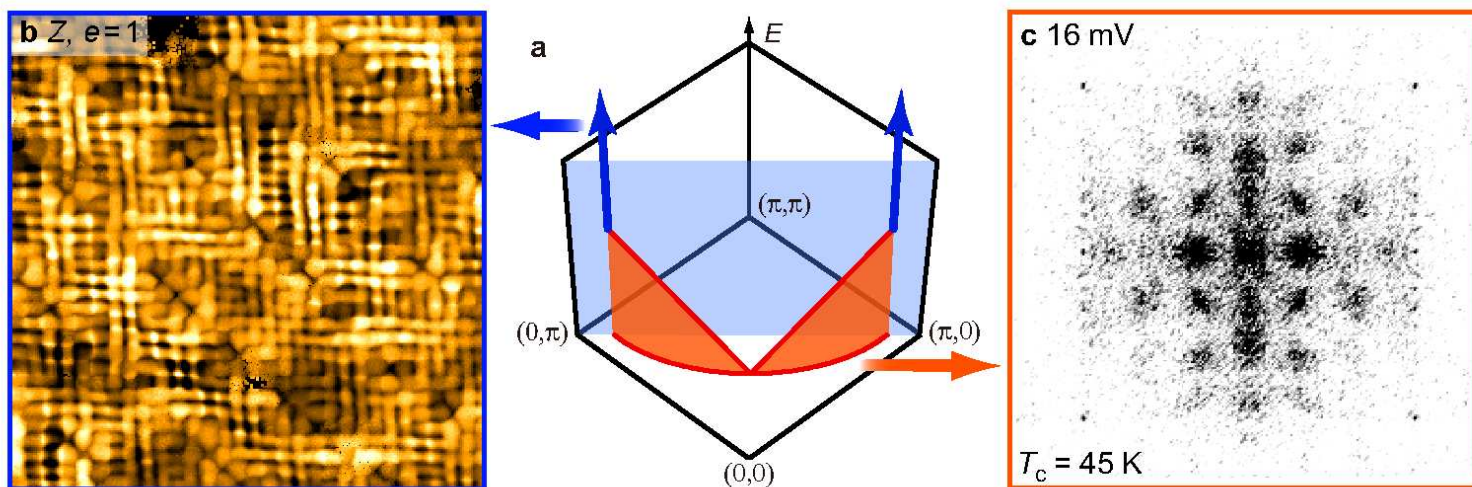


pary zlokalizowane na wiązaniu Cu-O-Cu

/ dispersionless features in $\vec{r}$ -space /

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par



Y. Kohsaka et al, Nature **454**, 1072 (2008).

Zależnie od obszarów strefy Brillouina widoczne są:

- ★ **wędrowne pary Cooper'a**
/ the low energy itinerant **sc** features /
- ★ **pary zlokalizowane na wiązaniu Cu-O-Cu**
/ dispersionless features in $\vec{r}$ -space /

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

Dychotomia:

wędrowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

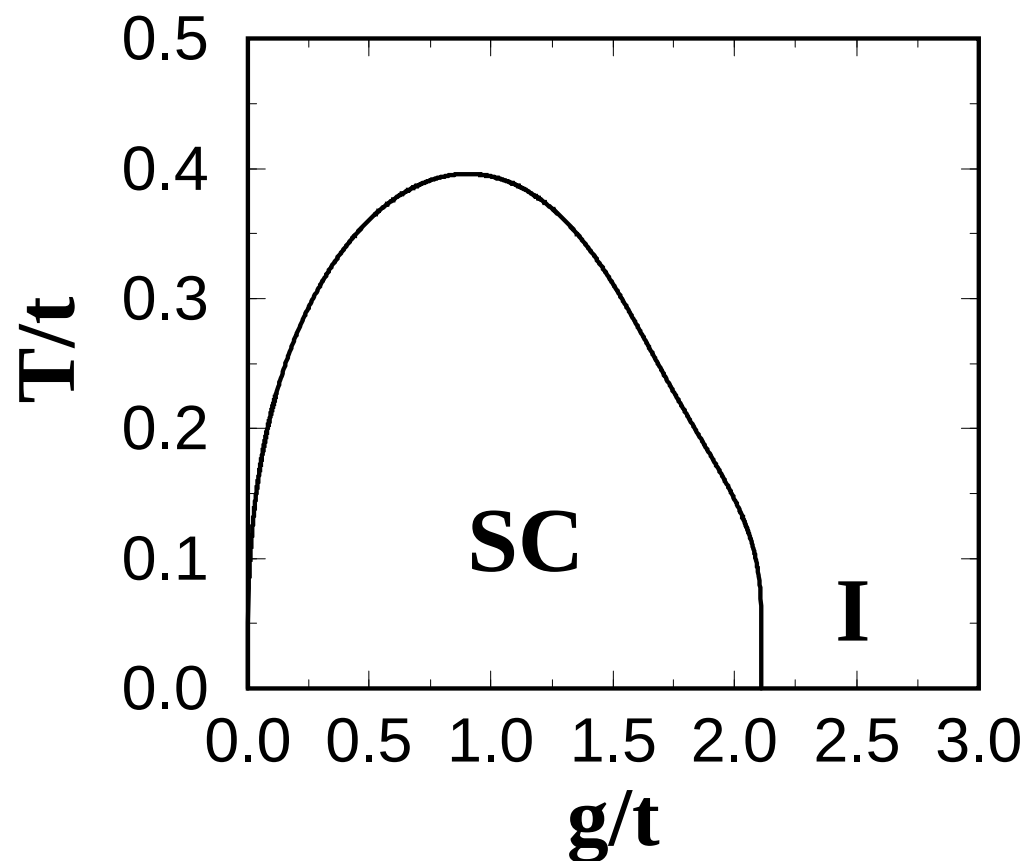
W obszarze antynodalnym pary mogą zostać zlokalizowane

Dychotomia:

wędowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

W obszarze antynodalnym pary mogą zostać zlokalizowane

a) */ path integral study /*



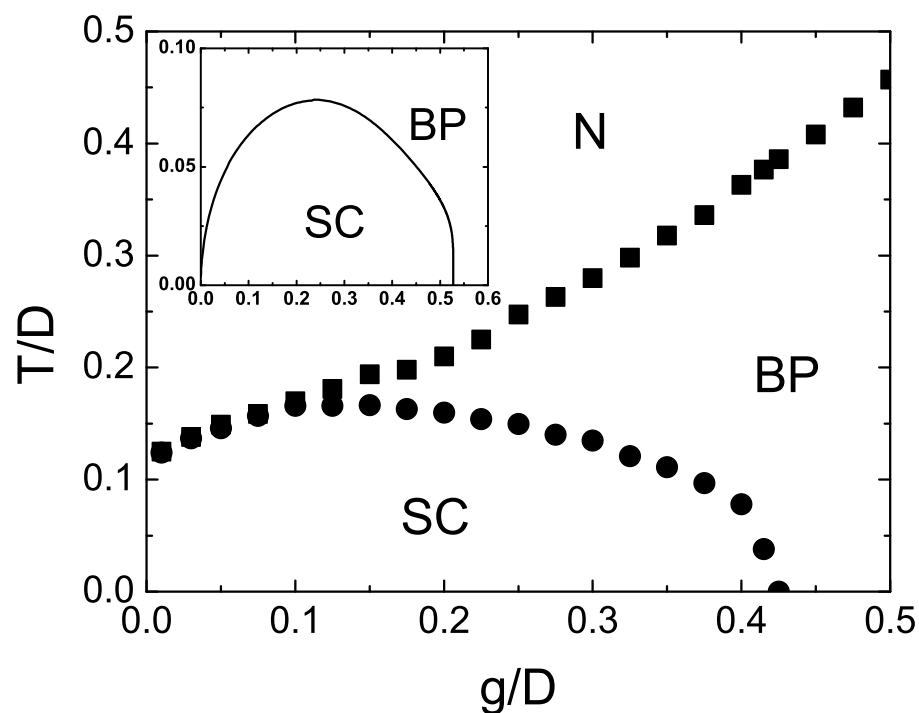
*M. Cuoco and J. Ranninger, Phys. Rev. B **70**, 104509 (2004).*

Dychotomia:

wędowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

W obszarze antynodalnym pary mogą zostać zlokalizowane

b) / *bond operator approach* /



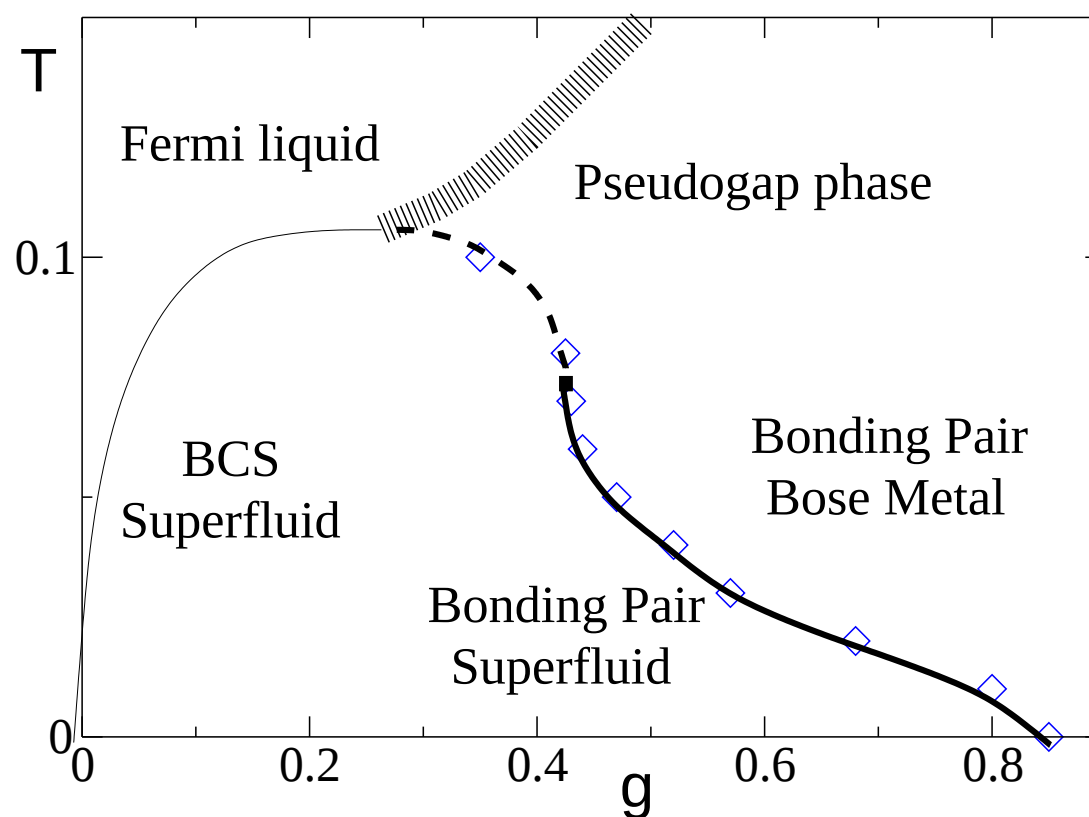
M. Cuoco and J. Ranninger, Phys. Rev. B 74, 094511 (2006).

Dychotomia:

wędowność $\leftrightarrow$ lokalizacja par

W obszarze antynodalnym pary mogą zostać zlokalizowane

c) / flow equation (RG-like) study /



T. Stauber and J. Ranninger, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 045301 (2007).

Wnioski :

Wnioski :

1)

Pozostałości korelacji typu nadprzewodzącego mogą powodować obecność cech Bogolubova powyżej T_c

Wnioski :

1)

Pozostałości korelacji typu nadprzewodzącego mogą powodować obecność cech Bogolubova powyżej T_c

2)

Antynodalne obszary zawierają niekoherentne pary które są niemobline (Bose insulating state)

Wnioski :

- 1) Pozostałości korelacji typu nadprzewodzącego mogą powodować obecność cech Bogolubova powyżej T_c
- 2) Antynodalne obszary zawierają niekoherentne pary które są niemobline (Bose insulating state)
- 3) Łuki Fermiego stopniowo wyłaniają się w takich częściach BZ, w których dysocjują wędrowne pary fermionowe

Wnioski :

1)

Pozostałości korelacji typu nadprzewodzącego mogą powodować obecność cech Bogolubova powyżej T_c

potwierdzone przez ARPES

2)

Antynodalne obszary zawierają niekoherentne pary które są niemobline (Bose insulating state)

potwierdzone przez FT-STM

3)

Łuki Fermiego stopniowo wyłaniają się w takich częściach BZ, w których dysocjują wędrowne pary fermionowe

brak jednoznaczności