

Odolanów, 10 lipca 2008 r.

Najzimniejsze atomy

Tadeusz Domański

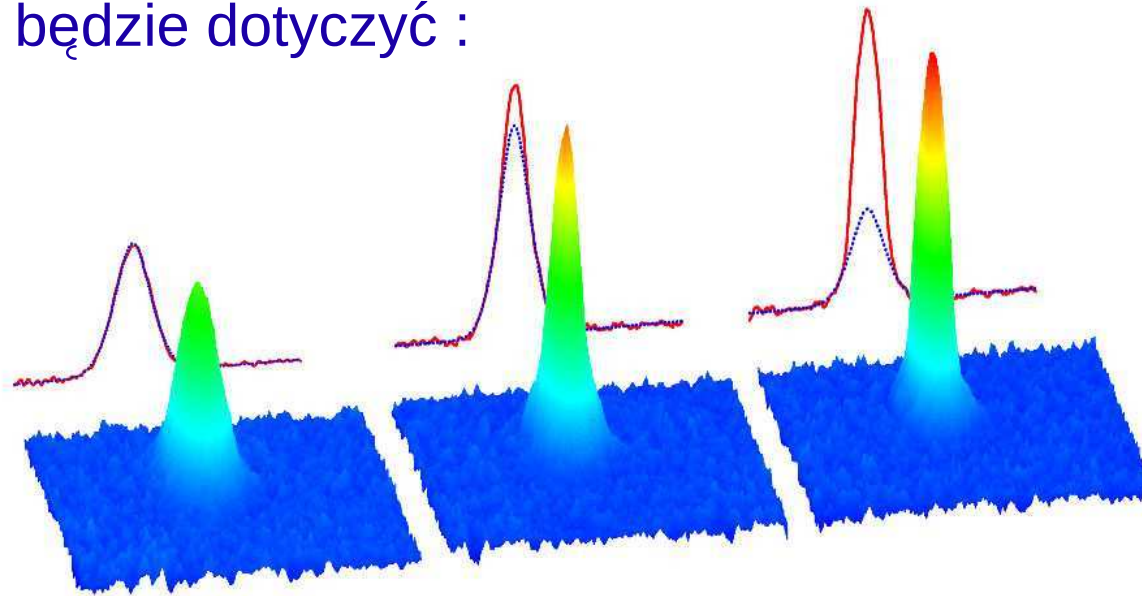
Instytut Fizyki,

Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej

w Lublinie

[**http://kft.umcs.lublin.pl/doman**](http://kft.umcs.lublin.pl/doman)

Referat będzie dotyczyć :



kondensacji i nadciekłości ultrazimnych atomów

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

-
- [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).

W ostatnich latach udało się wytworzyć laboratoryjnie kondensaty BE atomów spułapkowanych i ochłodzonych do ultraniskich temperatur, rzędu 100 nK (czyli 10^{-7} K).

Schemat:

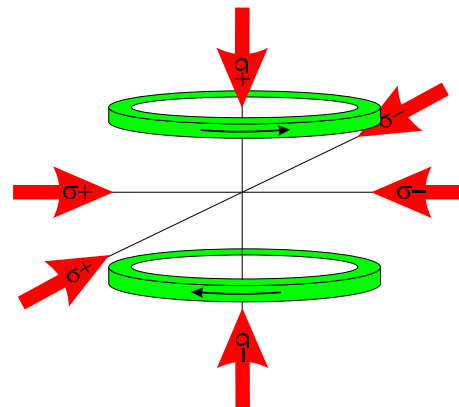
- wychwyt $N \simeq 10^{10}$ atomów z gazu o temp. pokojowej,
- przeniesienie chmury do pułapki magnetoptycznej,
- chłodzenie metodą doplerowską ($N \simeq 10^9$, $T \simeq 100 \mu\text{K}$),
- dalsze chłodzenie przez parowanie ($N \simeq 10^7$, $T \simeq 100 \text{ nK}$).

Proces chłodzenia

1) Pułapka *magneto optyczna*

Za pomocą promieni laserowych atomy są ochładzane poprzez metodę dopplerowskiego spowalniania.

Dolna granica uzyskiwanych taką metodą temperatur wynosi $T \simeq 100 \mu\text{K}$.



Proces chłodzenia (c.d.)

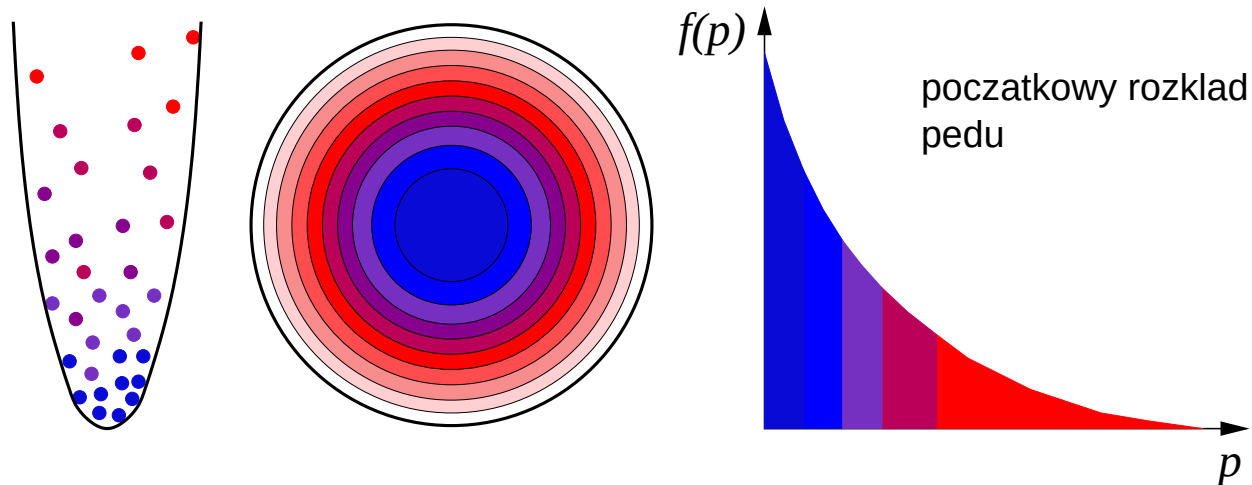
2) Pułapka *magnetyczna*

Dalsze chłodzenie odbywa się poprzez odparowanie atomów o dużej energii (ang. *evaporative cooling*.)

Proces chłodzenia (c.d.)

2) Pułapka magnetyczna

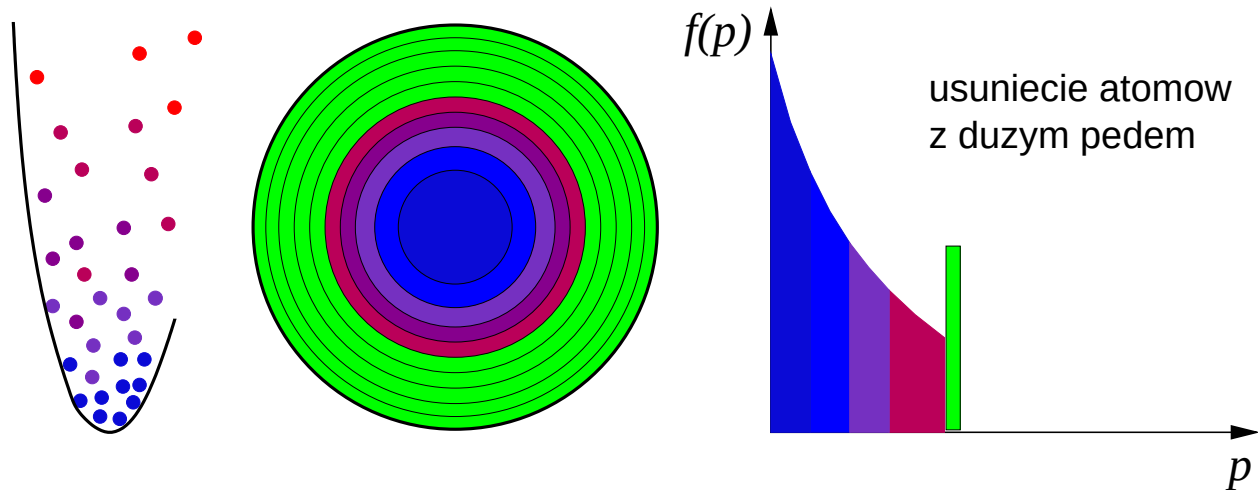
Dalsze chłodzenie odbywa się poprzez odparowanie atomów o dużej energii (ang. *evaporative cooling*.)



Proces chłodzenia (c.d.)

2) Pułapka *magnetyczna*

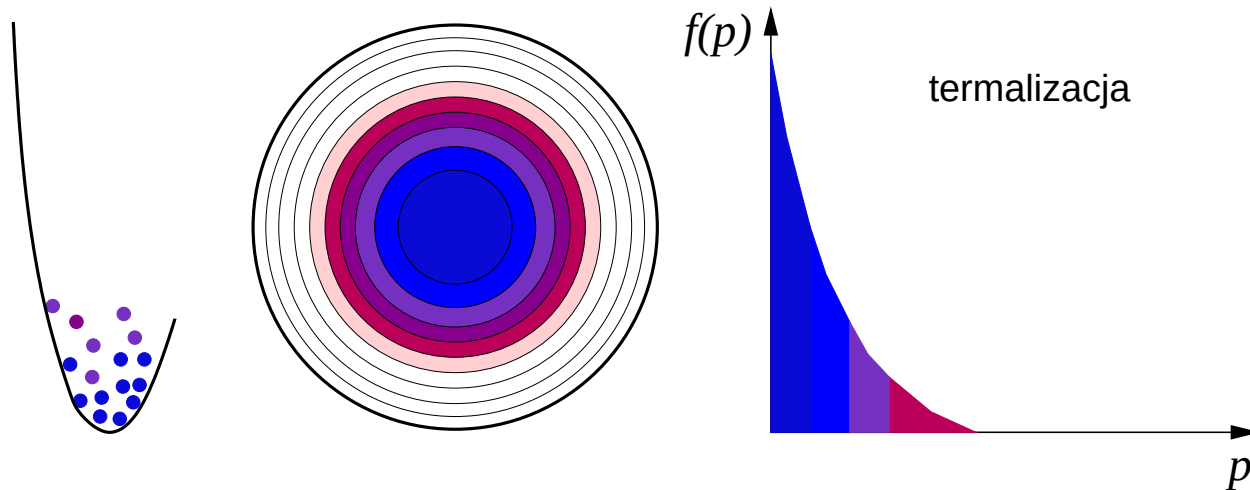
Dalsze chłodzenie odbywa się poprzez odparowanie atomów o dużej energii (ang. *evaporative cooling*.)



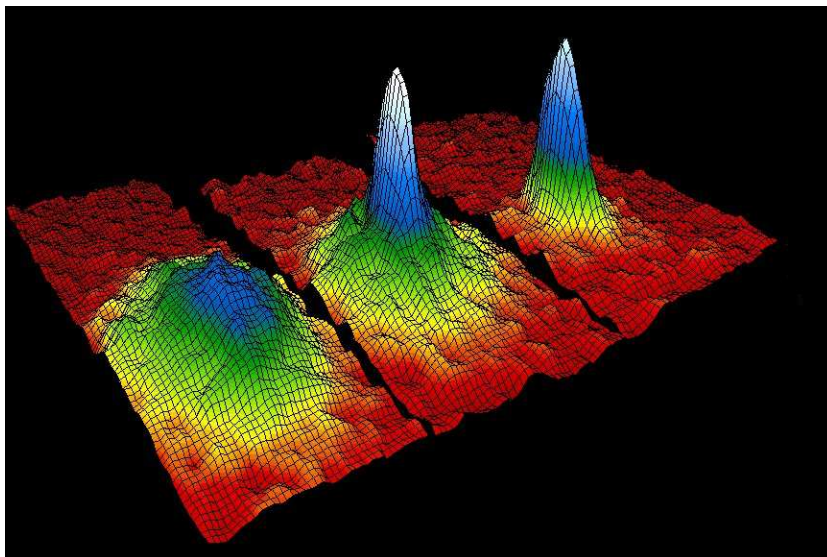
Proces chłodzenia (c.d.)

2) Pułapka *magnetyczna*

Dalsze chłodzenie odbywa się poprzez odparowanie atomów o dużej energii (ang. *evaporative cooling*.)



Kondensacja Bosego-Einsteina



^{87}Rb

JILA 1995

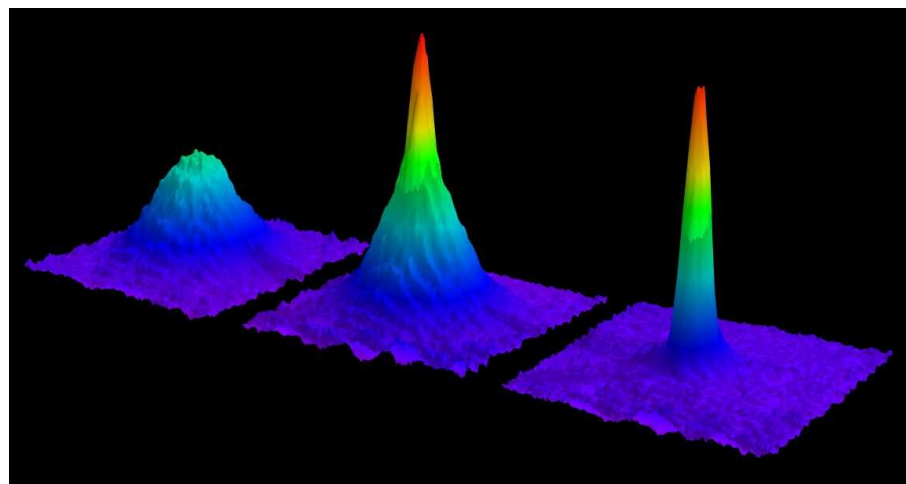
(E. Cornell i wsp.)

^{23}Na

MIT 1995

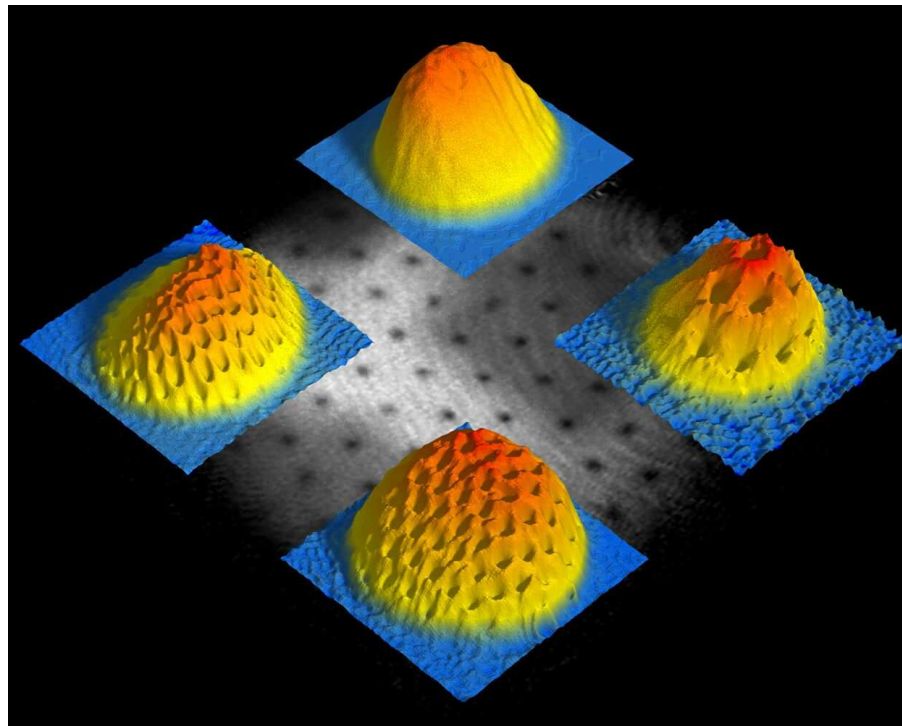
(W. Ketterle

i wsp.)



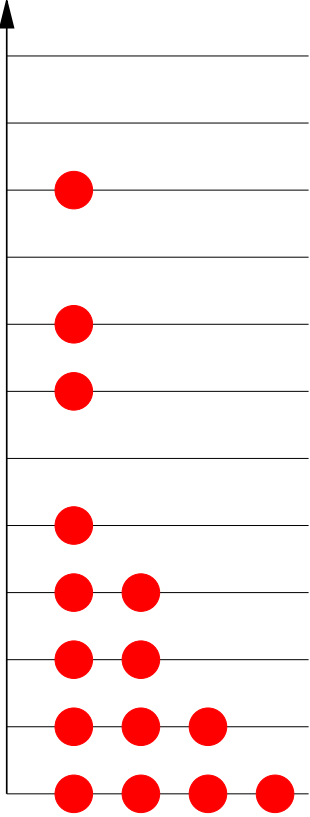
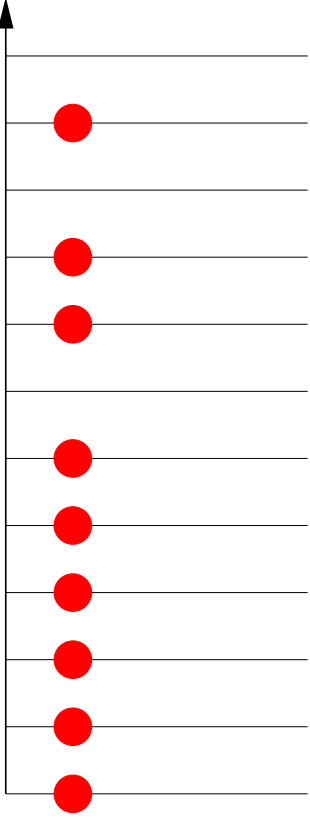
Są to kondensaty atomów typu bozonowego.

Wiry Abrikosova



Obecność wirów kwantowych świadczy o nadciekłości.

Klasyfikacja cząstek

BOZONY	FERMIONY
$\mathcal{P}_{ij} \Psi\rangle = + \Psi\rangle$ spin całkowity statystyka Bosego–Einsteina 	$\mathcal{P}_{ij} \Psi\rangle = - \Psi\rangle$ spin połówkowy statystyka Fermiego–Diraca 

Dobór rodzaju atomów

Możliwość kondensacji Bosego-Einsteina konkretnych atomów zależy od tego czy są one bozonami czy fermionami.

Dobór rodzaju atomów

Możliwość kondensacji Bosego-Einsteina konkretnych atomów zależy od tego czy są one bozonami czy fermionami.

O charakterze atomu decyduje sumaryczna ilość elektronów i nukleonów, czyli liczba

$$Z + A.$$

Dobór rodzaju atomów

Możliwość kondensacji Bosego-Einsteina konkretnych atomów zależy od tego czy są one bozonami czy fermionami.

O charakterze atomu decyduje sumaryczna ilość elektronów i nukleonów, czyli liczba

$$Z + A.$$

Przykład:

Dla metali alkalicznych Z jest nieparzysta, zatem

<i>liczba A</i>	<i>rodzaj atomu</i>	<i>przykłady</i>
nieparzysta	boson	⁸⁵ Rb , ⁷ Li , ²³ Na
parzysta	fermion	⁴⁰ K , ⁶ Li

Przykładowe wartości liczbowe

Przykładowe wartości liczbowe

W najlepszych laboratoriach udaje się obecnie pułapkować nawet około **10 mln** atomów.

Przykładowe wartości liczbowe

W najlepszych laboratoriach udaje się obecnie pułapkować nawet około **10 mln** atomów.

Typowe koncentracje atomów są **10^{13} cm^{-3}** .

Przykładowe wartości liczbowe

W najlepszych laboratoriach udaje się obecnie pułapkować nawet około **10 mln** atomów.

Typowe koncentracje atomów są **10^{13} cm^{-3}** .

Temperatury Fermiego wynoszą ok. **10^{-8} K** .

Przykładowe wartości liczbowe

W najlepszych laboratoriach udaje się obecnie pułapkować nawet około **10 mln** atomów.

Typowe koncentracje atomów są **10^{13} cm^{-3}** .

Temperatury Fermiego wynoszą ok. **10^{-8} K** .

Wartość temperatur krytycznych **10 – 100 nK**.

Przykładowe wartości liczbowe

W najlepszych laboratoriach udaje się obecnie pułapkować nawet około **10 mln** atomów.

Typowe koncentracje atomów są **10^{13} cm^{-3}** .

Temperatury Fermiego wynoszą ok. **10^{-8} K** .

Wartość temperatur krytycznych **10 – 100 nK**.

Czy to niskie czy wysokie temperatury ?

Względna skala temperatur

⇒ metaliczny lit pod ciśnieniem

$$T_c = 0.4 \text{ mK}, \quad T_F = 55000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-8}$$

Względna skala temperatur

a) metaliczny lit pod ciśnieniem

$$T_c = 0.4 \text{ mK}, \quad T_F = 55000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-8}$$

⇒ klasyczne nadprzewodniki

$$T_c \sim 1 - 10 \text{ K}, \quad T_F = 100000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-4}$$

Względna skala temperatur

a) metaliczny lit pod ciśnieniem

$$T_c = 0.4 \text{ mK}, \quad T_F = 55000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-8}$$

b) klasyczne nadprzewodniki

$$T_c \sim 1 - 10 \text{ K}, \quad T_F = 100000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-4}$$

$\Rightarrow$ ^3He

$$T_c = 2.6 \text{ mK}, \quad T_F = 5 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 5 \times 10^{-4}$$

Względna skala temperatur

a) metaliczny lit pod ciśnieniem

$$T_c = 0.4 \text{ mK}, \quad T_F = 55000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-8}$$

b) klasyczne nadprzewodniki

$$T_c \sim 1 - 10 \text{ K}, \quad T_F = 100000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-4}$$

c) ^3He

$$T_c = 2.6 \text{ mK}, \quad T_F = 5 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 5 \times 10^{-4}$$

$\Rightarrow \text{MgB}_2$

$$T_c = 39 \text{ K}, \quad T_F = 6000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-2}$$

Względna skala temperatur

a) metaliczny lit pod ciśnieniem

$$T_c = 0.4 \text{ mK}, \quad T_F = 55000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-8}$$

b) klasyczne nadprzewodniki

$$T_c \sim 1 - 10 \text{ K}, \quad T_F = 100000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-4}$$

c) ^3He

$$T_c = 2.6 \text{ mK}, \quad T_F = 5 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 5 \times 10^{-4}$$

d) MgB_2

$$T_c = 39 \text{ K}, \quad T_F = 6000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-2}$$

⇒ nadprzew. wysokotemperaturowe

$$T_c = 35 - 140 \text{ K}, \quad T_F = 5000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 5 \times 10^{-2}$$

Względna skala temperatur

a) metaliczny lit pod ciśnieniem

$$T_c = 0.4 \text{ mK}, \quad T_F = 55000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-8}$$

b) klasyczne nadprzewodniki

$$T_c \sim 1 - 10 \text{ K}, \quad T_F = 100000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-4}$$

c) ^3He

$$T_c = 2.6 \text{ mK}, \quad T_F = 5 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 5 \times 10^{-4}$$

d) MgB_2

$$T_c = 39 \text{ K}, \quad T_F = 6000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 10^{-2}$$

e) nadprzew. wysokotemperaturowe

$$T_c = 35 - 140 \text{ K}, \quad T_F = 5000 \text{ K}, \quad T_c/T_F = 5 \times 10^{-2}$$

$\Rightarrow$ ultrazimne atomy

$$T_c = 200 \text{ nK}, \quad T_F = 1 \text{ } \mu\text{K}, \quad T_c/T_F = 0.2$$

Istotne problemy:

Istotne problemy:



Rezonanse Feshbacha

/doświadczalnie sterowane oddziaływania/

Istotne problemy:



Rezonanse Feshbacha

/doświadczalnie sterowane oddziaływania/



Przejście między BCS i BEC

/praktyczna realizacja koncepcji Leggetta/

Istotne problemy:



Rezonanse Feshbacha

/doświadczalnie sterowane oddziaływania/



Przejście między BCS i BEC

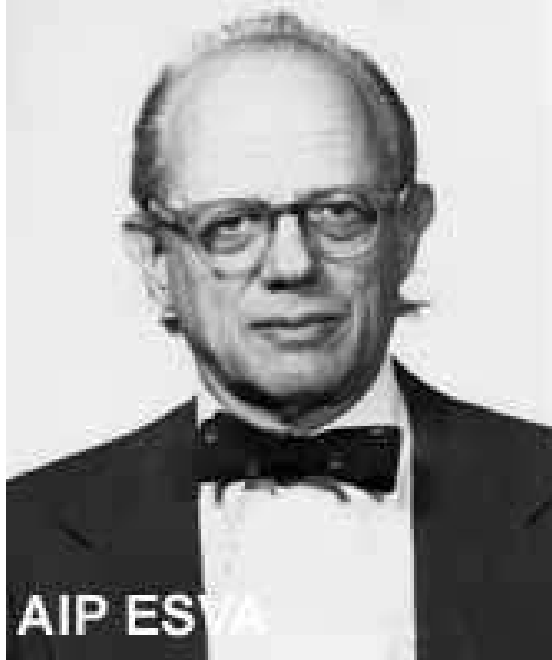
/praktyczna realizacja koncepcji Leggetta/



Identyfikacja przejścia fazowego

/problem doświadczalnego określenia nadciekłości/

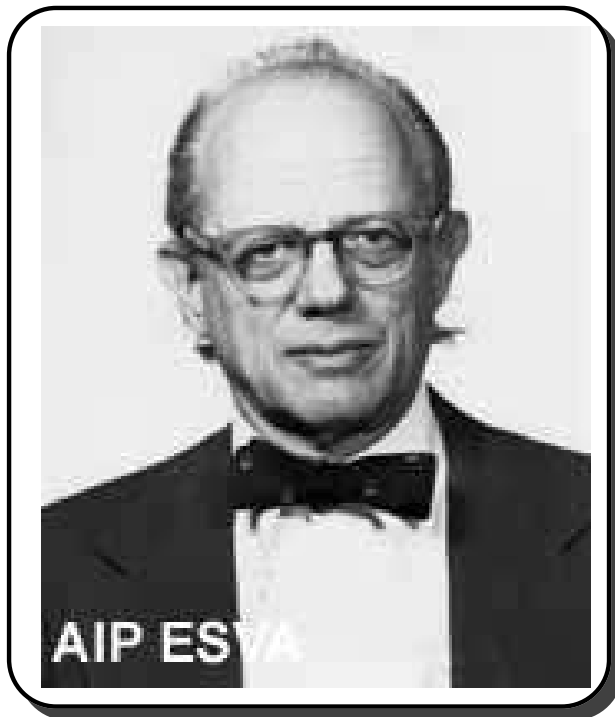
1. Rezonans Feshbacha



Herman Feshbach

MIT (USA)

/ 1917 – 2000 /

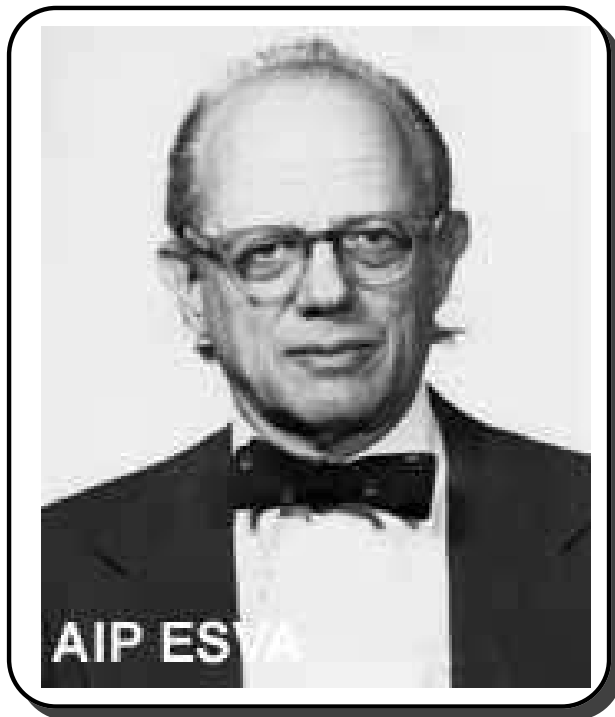


Herman Feshbach

MIT (USA)

/ 1917 – 2000 /

Jeden z wiodących teoretyków fizyki jądrowej XX wieku, który sformułował m.in. opis nieelastycznego rozpraszania neutronów na jądrach atomowych wprowadzając koncepcję kilkuetapowych reakcji. Formalizm ten jest obecnie powszechnie stosowany w fizyce jądrowej oraz w kontekście pułapkownia atomów.



Herman Feshbach

MIT (USA)

/ 1917 – 2000 /

Jeden z wiodących teoretyków fizyki jądrowej XX wieku, który sformułował m.in. opis nieelastycznego rozpraszania neutronów na jądrach atomowych wprowadzając koncepcję kilkuetapowych reakcji. Formalizm ten jest obecnie powszechnie stosowany w fizyce jądrowej oraz w kontekście pułapkownia atomów.

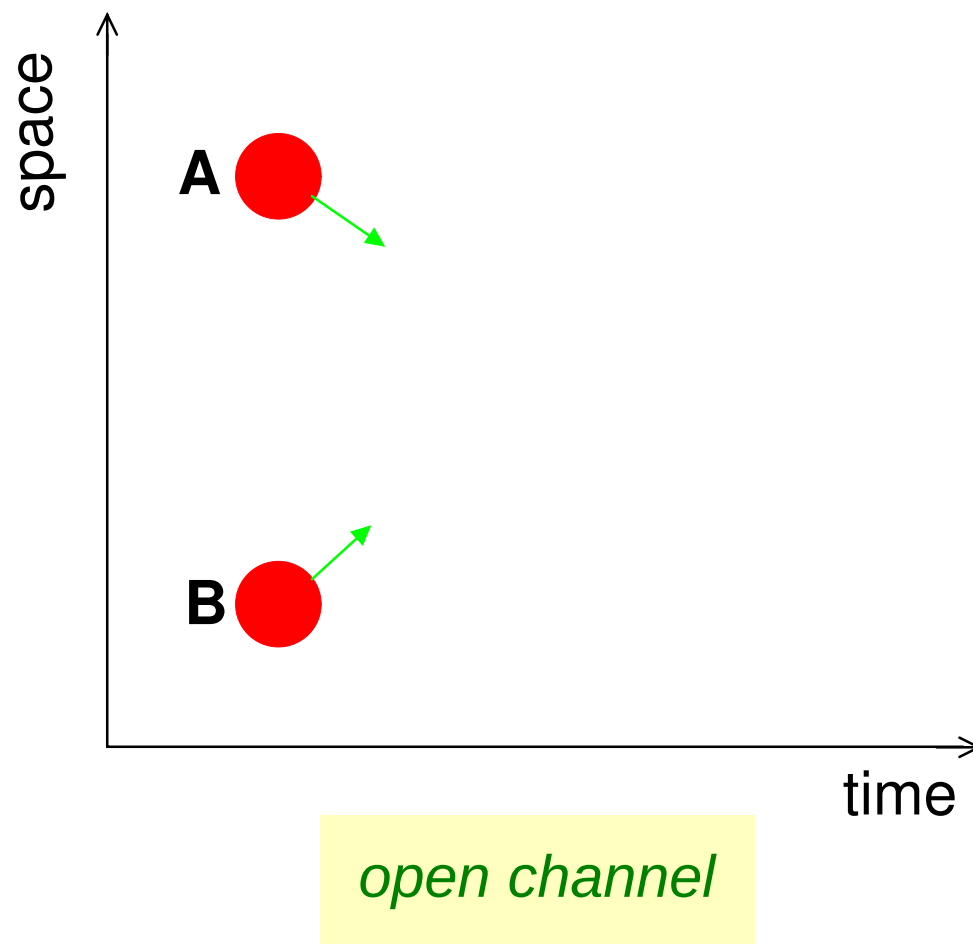
Jako "Feshbach professor" jest w MIT zatrudniony Frank Wilczek.

Schemat ogólny:

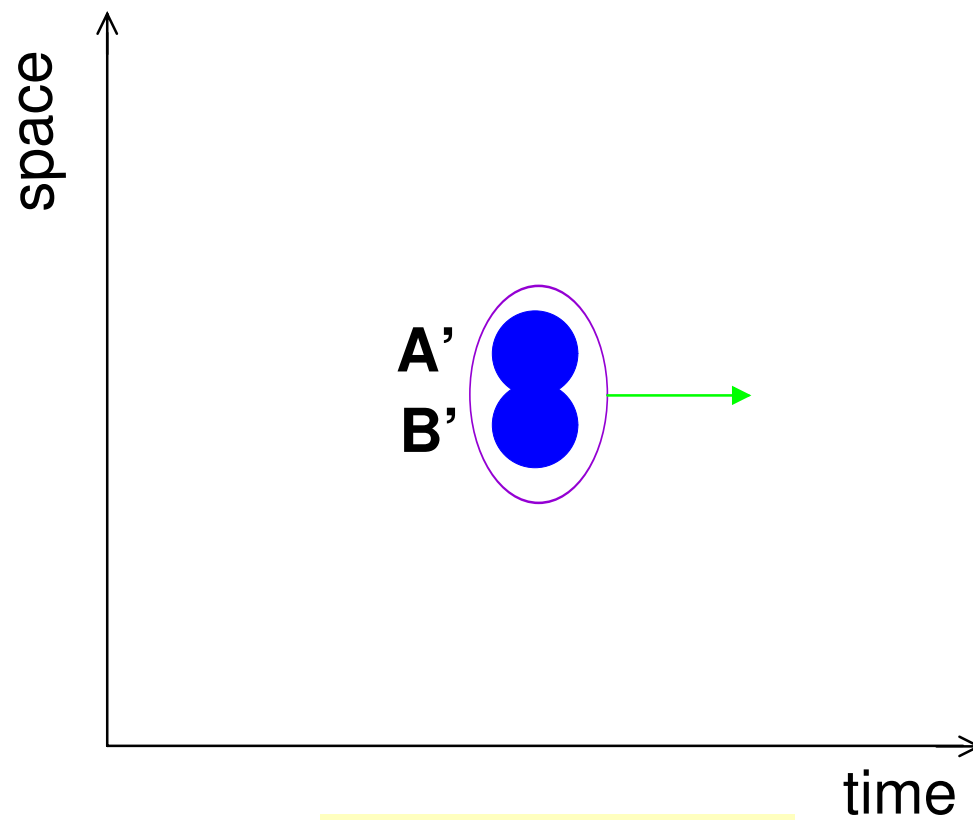
Dwie cząstki */open channel/* przez pewien czas łączą się w stan związany */closed channel /*, po czym ponownie rozpadają się .

Resonansowe rozpraszanie ma miejsce wówczas, gdy całkowita energia padających cząstek jest równa energii stanu związanego.

Rozważmy dwa atomy typu fermionowego:

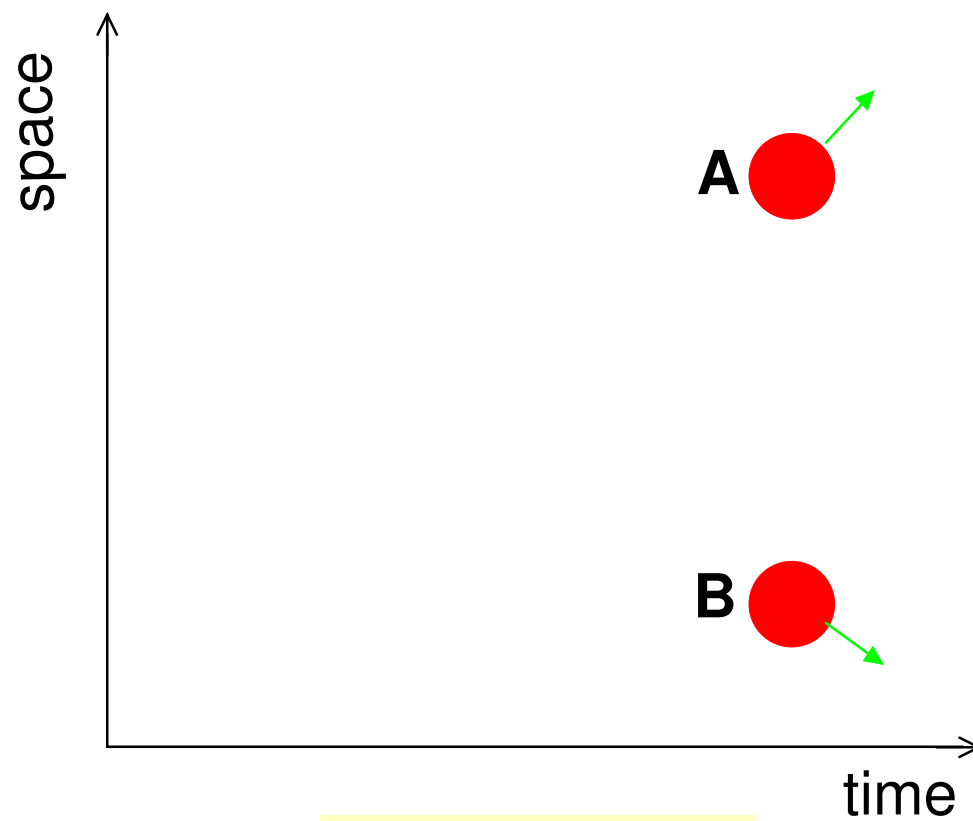


Rozważmy dwa atomy typu fermionowego:

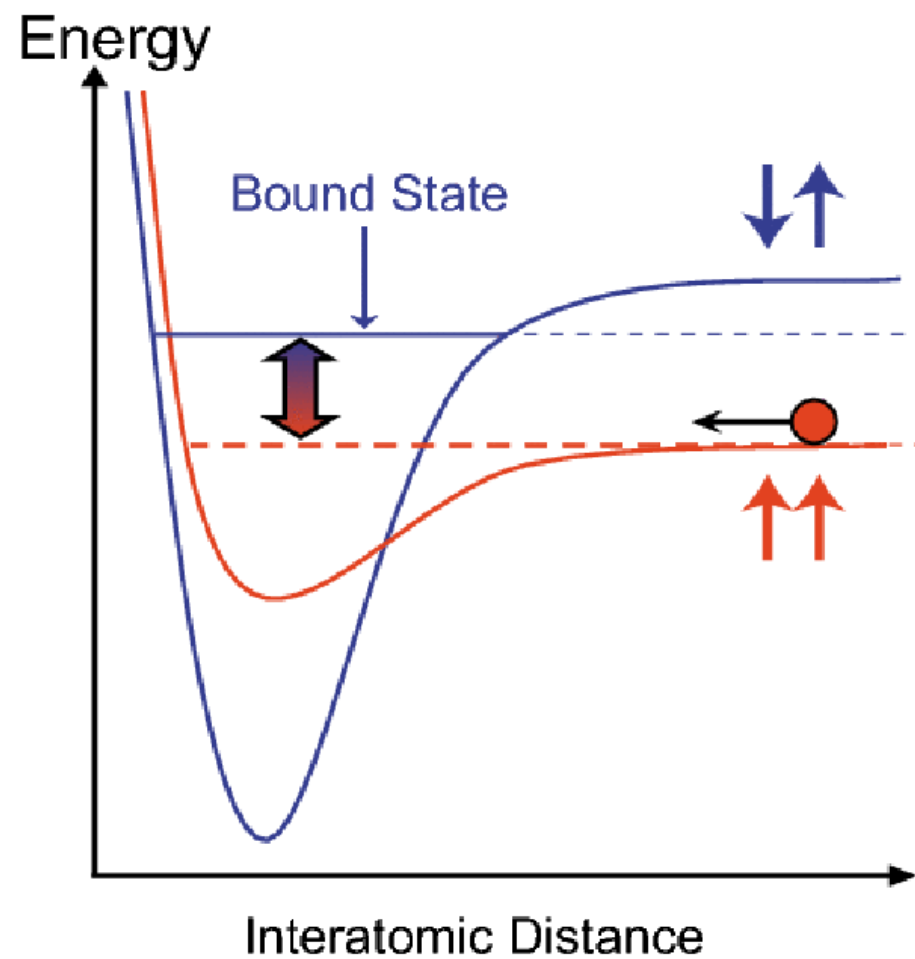


closed channel

Rozważmy dwa atomy typu fermionowego:



open channel



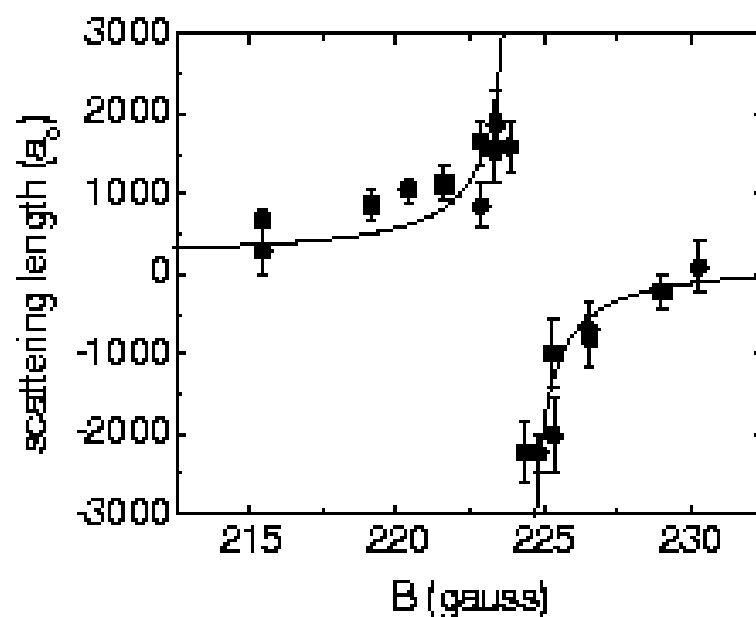
Schemat warunków rezonansowego rozpraszania

Przykłady 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.

Efektywny potencjał rozpraszania w tym procesie może być *rezonansowy* zależnie od zewnętrznego pola magnetycznego.

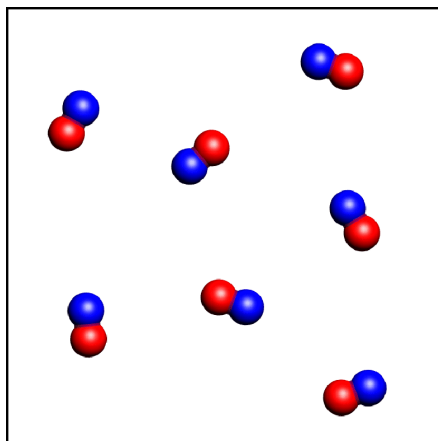


Ilustracja:

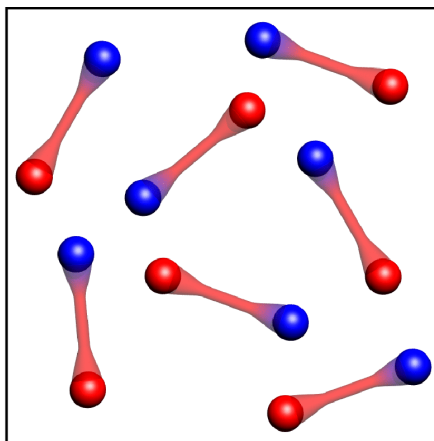
Rezonans Feshbacha zaobserwowany doświadczalnie [6] dla mieszaniny atomów ^{40}K w dwóch stanów zeemanowskich $|\frac{9}{2}, -\frac{9}{2}\rangle$ oraz $|\frac{9}{2}, -\frac{7}{2}\rangle$.

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

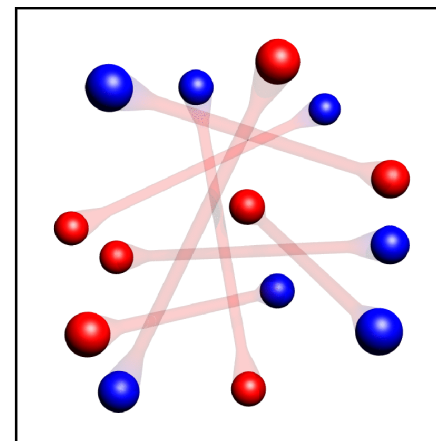
2. Przejście z BEC do BCS



BEC of Molecules

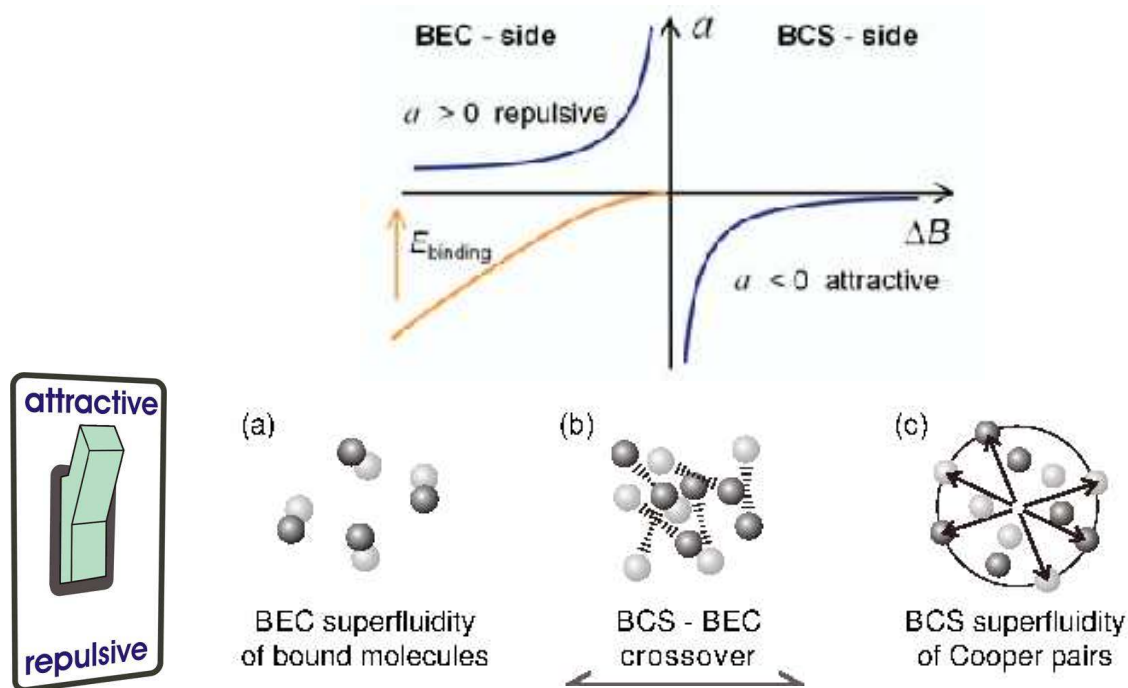


Crossover Superfluid



BCS state

Zmieniając wartość pola magnetycznego można *przełączać* pomiędzy jakościowo odmiennymi granicami:

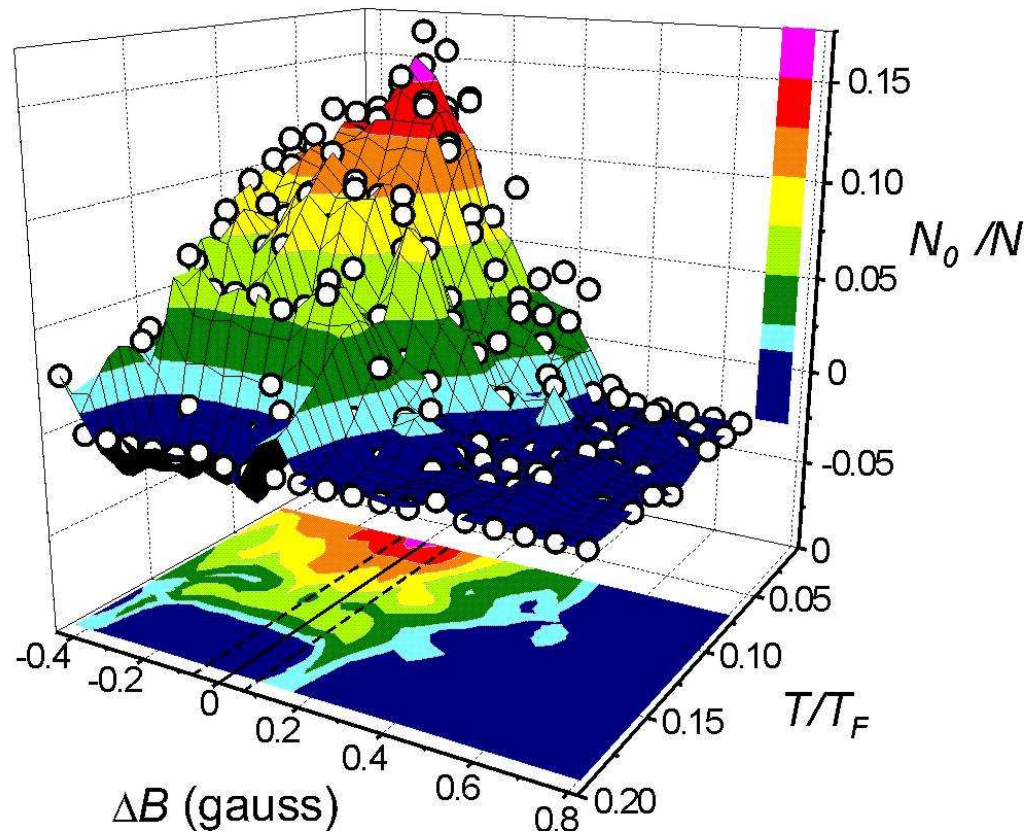


Takie przejście z BCS do BEC [10] i vice versa [11] zostało po raz pierwszy doświadczalnie zrealizowane w 2003 r.

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

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

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



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

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

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

- **1969: David Eagles**
/BEC par fermionowych dla ekstremalnych koncentracji/
- **1980: Tony Legett**
/ sformułowanie problemu dla $T = 0$ /
- **1985: Phillip Nozières & Stefan Smitt-Rink**
/uogólnienie formalizmu dla niezerowych temperatur/
- **1993: Mohit Randeria et al**
/sformułowanie w języku całek po trajektoriach/
- **1995: Roman Micnas et al**
/podejście macierzy T & symulacje Monte Carlo/

...

Teoretyczne prace mogą być teraz poddane weryfikacji !

3. Nadciekłość atomów

Po czym można rozpoznać nadciężkość ?

Po czym można rozpoznać nadciężkość ?

Sposoby tradycyjne:

Po czym można rozpoznać nadciekłość ?

Sposoby tradycyjne:

1) zanik lepkości (oporności),

Po czym można rozpoznać nadciekłość ?

Sposoby tradycyjne:

- 1) zanik lepkości (oporności),
- 2) charakterystyczne widmo energetyczne,

Po czym można rozpoznać nadciekłość ?

Sposoby tradycyjne:

- 1) zanik lepkości (oporności),
- 2) charakterystyczne widmo energetyczne,
- 3) sieć Abrikosova wirów kwantowych.

Po czym można rozpoznać nadciekłość ?

Sposoby tradycyjne:

- 1) zanik lepkości (oporności),
- 2) charakterystyczne widmo energetyczne,
- 3) sieć Abrikosova wirów kwantowych.

Ograniczenia w przypadku atomów:

Po czym można rozpoznać nadciekłość ?

Sposoby tradycyjne:

- 1) zanik lepkości (oporności),
- 2) charakterystyczne widmo energetyczne,
- 3) sieć Abrikosova wirów kwantowych.

Ograniczenia w przypadku atomów:

1-sposób: niemożliwy,

Po czym można rozpoznać nadciekłość ?

Sposoby tradycyjne:

- 1) zanik lepkości (oporności),
- 2) charakterystyczne widmo energetyczne,
- 3) sieć Abrikosova wirów kwantowych.

Ograniczenia w przypadku atomów:

1-sposób: niemożliwy,

2-sposób: niejednoznaczny,

Po czym można rozpoznać nadciekłość ?

Sposoby tradycyjne:

- 1) zanik lepkości (oporności),
- 2) charakterystyczne widmo energetyczne,
- 3) sieć Abrikosova wirów kwantowych.

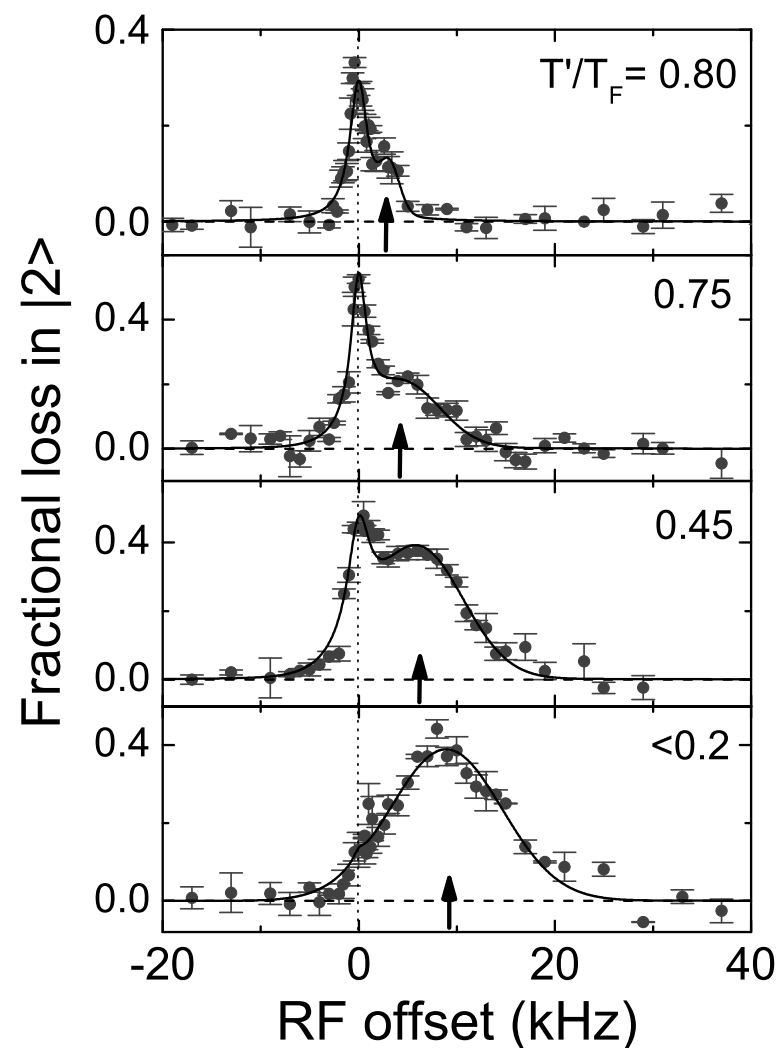
Ograniczenia w przypadku atomów:

1-sposób: niemożliwy,

2-sposób: niejednoznaczny,

3-sposób: wykonywalny.

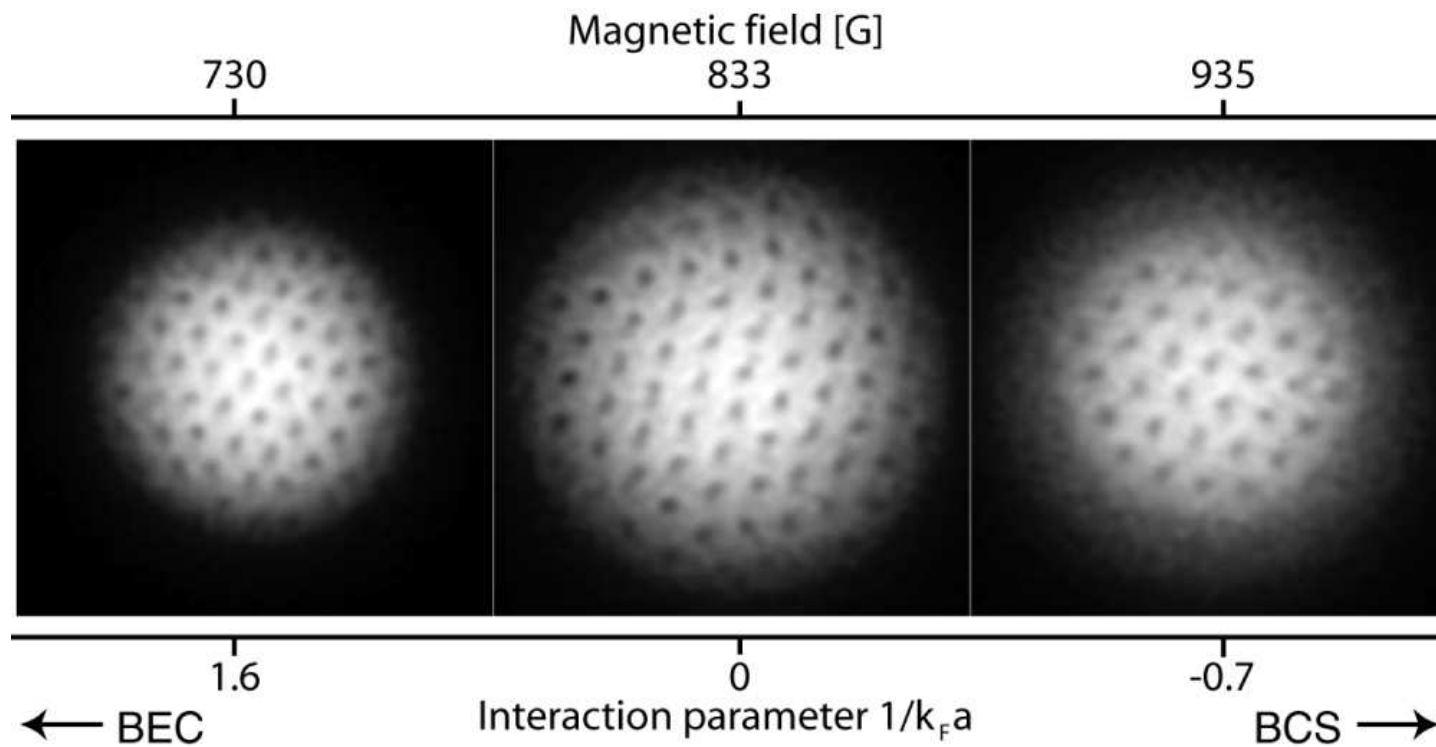
Innsbruck (Austria): 2004 r.



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

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

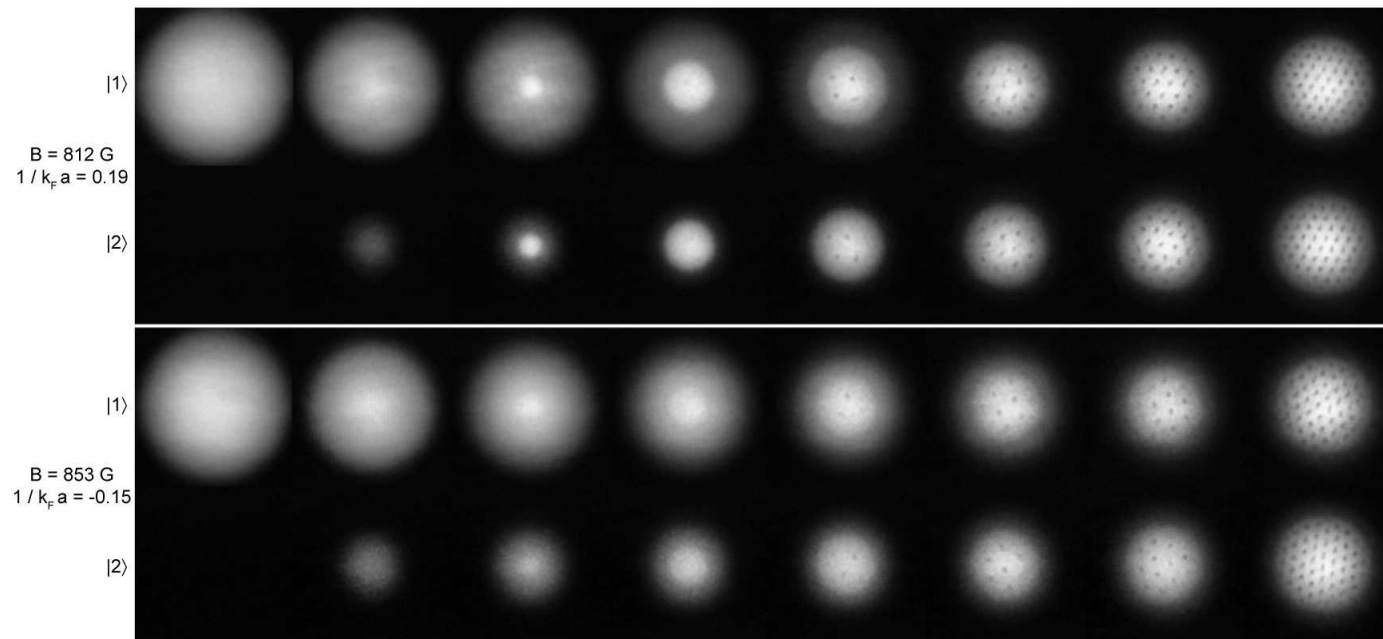
MIT (USA): 2005 r.



Sieć wirów Abrikosova dla par atomów typu fermionowego.

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

MIT (USA): 2006 r.



Obserwacja wirów Abrikosova w układzie o nierównej liczebności 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).

Inne osiągnięcia

Inne osiągnięcia

Nadciekłość w sieciach optycznych

/ J. Chin et al, *Nature* **443**, 961 (2006) /

Inne osiągnięcia

Nadciekłość w sieciach optycznych

/ J. Chin et al, *Nature* **443**, 961 (2006) /

Wyznaczenie prędkości dźwięku

/ J. Joseph et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 170401 (2007) /

Inne osiągnięcia

Nadciekłość w sieciach optycznych

/ J. Chin et al, *Nature* **443**, 961 (2006) /

Wyznaczenie prędkości dźwięku

/ J. Joseph et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 170401 (2007) /

Pomiar krytycznej prędkości

/ D.E. Miller et al, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 070402 (2007) /

Inne osiągnięcia

Nadciekłość w sieciach optycznych

/ J. Chin et al, *Nature* **443**, 961 (2006) /

Wyznaczenie prędkości dźwięku

/ J. Joseph et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 170401 (2007) /

Pomiar krytycznej prędkości

/ D.E. Miller et al, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 070402 (2007) /

Uzyskanie i kondensacja cząstek typu p -wave

/ J.P. Gaebler et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 200403 (2007) /

Inne osiągnięcia

Nadciekłość w sieciach optycznych

/ J. Chin et al, *Nature* **443**, 961 (2006) /

Wyznaczenie prędkości dźwięku

/ J. Joseph et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 170401 (2007) /

Pomiar krytycznej prędkości

/ D.E. Miller et al, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 070402 (2007) /

Uzyskanie i kondensacja cząstek typu p -wave

/ J.P. Gaebler et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 200403 (2007) /

c.d.n.