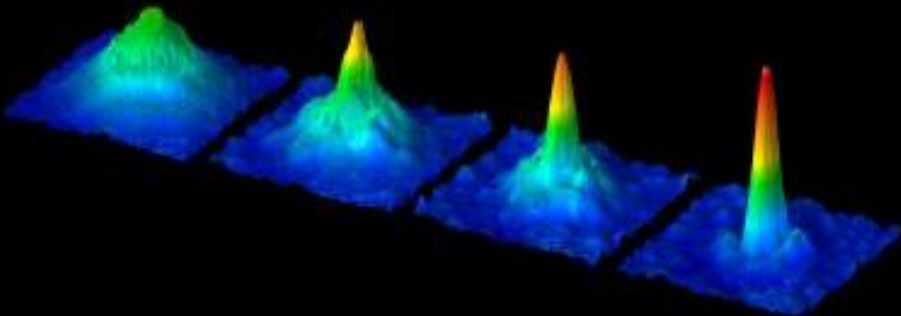


kondensat Bosego-Einsteina

Jacek Matulewski [Karolina Słowik](#) Jarosław Zaremba Jacek Jurkowski

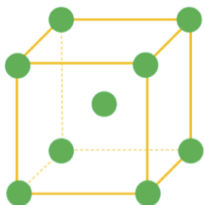
MECHANIKA KWANTOWA DLA NIEFIZYKÓW



Podziękowania dla Dr. M. Zawady (Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej: KL FAMO) za pomoc w przygotowaniu tego wykładu.

Stany skupienia

Stany skupienia



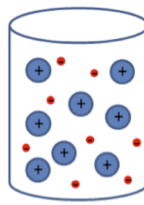
ciało stałe



ciecz



gaz



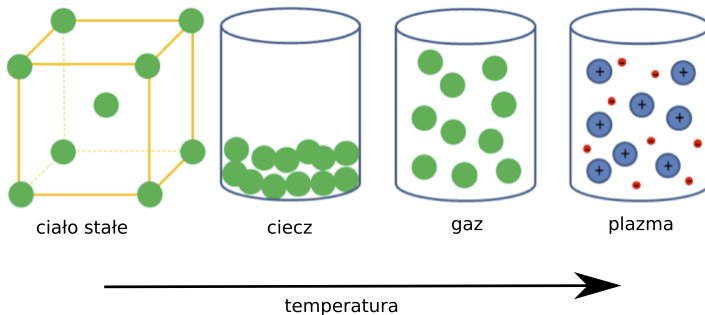
plazma

Stany skupienia



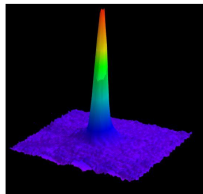
Dodanie energii powoduje zmianę stanu skupienia.

Stany skupienia

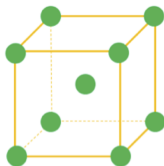


Dodanie energii powoduje zmianę stanu skupienia.

Stany skupienia



kondensat
Bosego Einsteina



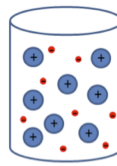
ciało stałe



ciecz

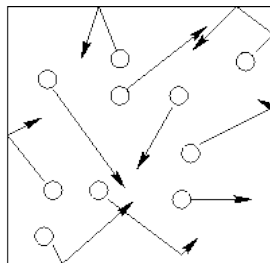
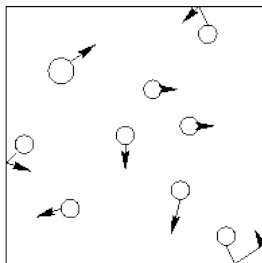


gaz



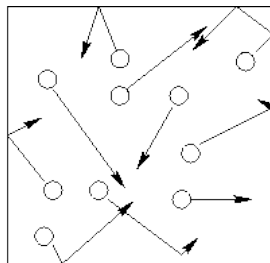
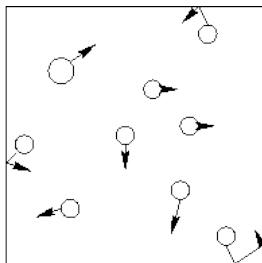
plazma

Temperatura gazu jest związana z ruchem atomów



Temperatura miarą średniej energii kinetycznej
ruchu cząsteczek gazu: $T \sim E = \frac{mv^2}{2}$

Temperatura gazu jest związana z ruchem atomów



Temperatura miarą średniej energii kinetycznej
ruchu cząsteczek gazu: $T \sim E = \frac{mv^2}{2}$

film: temperatura

Temperatura kondensatu Bosego-Einsteina



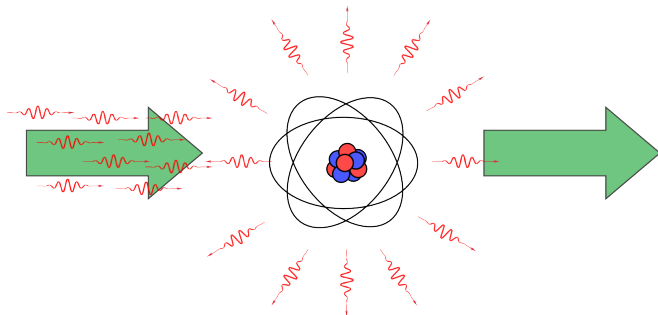
Temperatura kondensatu Bosego-Einsteina



Aby otrzymać kondensat,
należy schłodzić = spowolnić atomy

film2: chłodzenie laserowe

Aby otrzymać kondensat,
należy schłodzić = spowolnić atomy



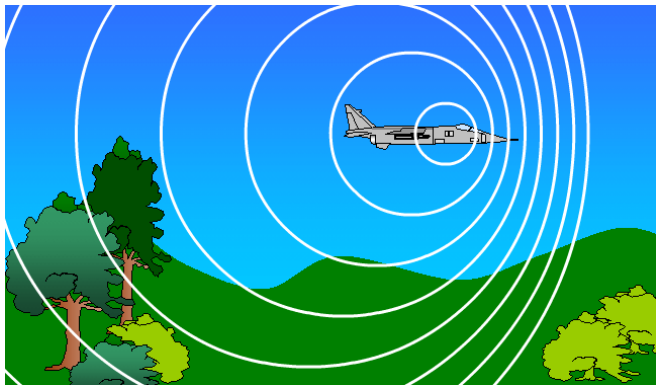
- ▶ absorpcja fotonów o pędzie $\hbar k$ w kierunku poziomym
- ▶ emisja spontaniczna fotonów symetryczna w przestrzeni
- ▶ średni przekazany atomowi pęd: $\hbar k$ na foton w kierunku wiązki laserowej

Aby otrzymać kondensat,
należy schłodzić = spowolnić atomy

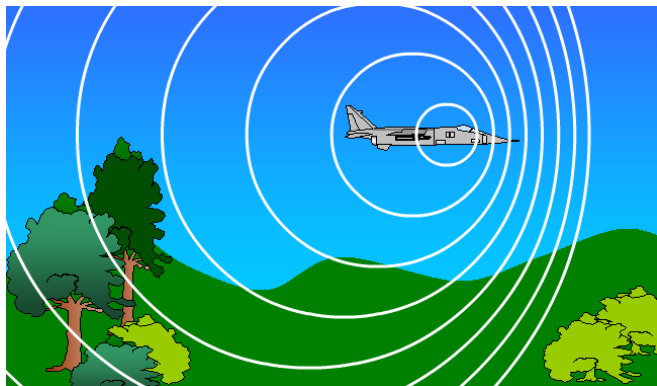
Chłodzenie laserowe

- ▶ wykorzystujemy pęd fotonu by obniżyć prędkość atomów
- ▶ kwantyzacja energii elektronu na orbitach: tylko fotony o wybranych energiach są absorbowane

Dygresja: Efekt Dopplera



Dygresja: Efekt Dopplera



- ▶ akustyczny
- ▶ optyczny

Dzięki efektowi Dopplera można spowalniać (chłodzić) tylko atomy o wybranych prędkościach (temperaturach)

- ▶ absorpcja lub emisja fotonu przez atom zachodzi gdy energia fotonu $h\nu$ jest równa energii przejścia E

Dzięki efektowi Dopplera można spowalniać (chłodzić) tylko atomy o wybranych prędkościach (temperaturach)

- ▶ absorpcja lub emisja fotonu przez atom zachodzi gdy energia fotonu $h\nu$ jest równa energii przejścia E
- ▶ poruszający się atom "odczuwa" zmienioną dopplerowsko częstotliwość fotonu ν'

Dzięki efektowi Dopplera można spowalniać (chłodzić) tylko atomy o wybranych prędkościach (temperaturach)

- ▶ absorpcja lub emisja fotonu przez atom zachodzi gdy energia fotonu $h\nu$ jest równa energii przejścia E
- ▶ poruszający się atom "odczuwa" zmienioną dopplerowsko częstotliwość fotonu ν'
- ▶ obserwator widzi to tak, jakby energia przejścia w atomie zmieniła się zależnie od prędkości atomu

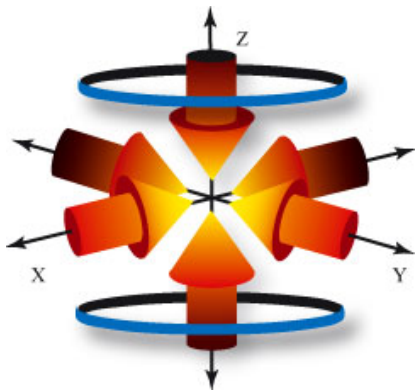
Dzięki efektowi Dopplera można spowalniać (chłodzić) tylko atomy o wybranych prędkościach (temperaturach)

- ▶ absorpcja lub emisja fotonu przez atom zachodzi gdy energia fotonu $h\nu$ jest równa energii przejścia E
- ▶ poruszający się atom "odczuwa" zmienioną dopplerowsko częstotliwość fotonu ν'
- ▶ obserwator widzi to tak, jakby energia przejścia w atomie zmieniła się zależnie od prędkości atomu
- ▶ częstotliwość lasera dostraja się do "szybkich" atomów - laser spowalnia szybkie, ale jest odstrojony od powolnych

Dzięki efektowi Dopplera można spowalniać (chłodzić) tylko atomy o wybranych prędkościach (temperaturach)

- ▶ absorpcja lub emisja fotonu przez atom zachodzi gdy energia fotonu $h\nu$ jest równa energii przejścia E
- ▶ poruszający się atom "odczuwa" zmienioną dopplerowsko częstotliwość fotonu ν'
- ▶ obserwator widzi to tak, jakby energia przejścia w atomie zmieniła się zależnie od prędkości atomu
- ▶ częstotliwość lasera dostraja się do "szybkich" atomów - **laser spowalnia szybkie, ale jest odstrojony od powolnych**
- ▶ używa się 6 wiązek laserowych żeby spowalniać ruch atomów w każdym kierunku

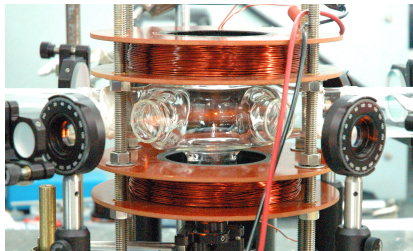
Pułapka atomowa zbiera zimne atomy w małej objętości



Pułapka magnetoptyczna

- ▶ 6 wiązek laserowych spowalnia ruch atomów w każdym kierunku
- ▶ pole magnetyczne utrzymuje spowolnione atomy w centrum pułapki

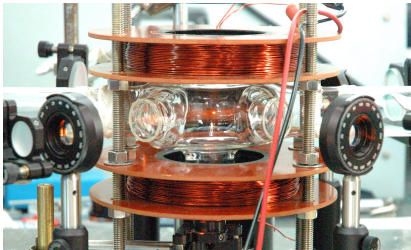
Pułapka atomowa zbiera zimne atomy w małej objętości



Pułapka magnetooptryczna

- ▶ 6 wiązek laserowych spowalnia ruch atomów w każdym kierunku
- ▶ pole magnetyczne utrzymuje spowolnione atomy w centrum pułapki

Pułapka atomowa zbiera zimne atomy w małej objętości

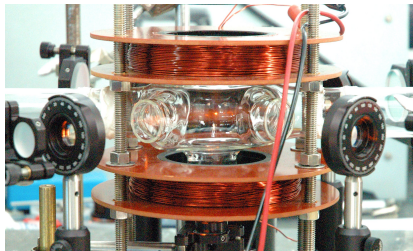


Pułapka magnetooptryczna

- ▶ 6 wiązek laserowych spowalnia ruch atomów w każdym kierunku
- ▶ pole magnetyczne utrzymuje spowolnione atomy w centrum pułapki

film: pułapka magnetooptryczna

Pułapka atomowa zbiera zimne atomy w małej objętości



Pułapka magnetoptyczna

- ▶ 6 wiązek laserowych spowalnia ruch atomów w każdym kierunku
- ▶ pole magnetyczne utrzymuje spowolnione atomy w centrum pułapki

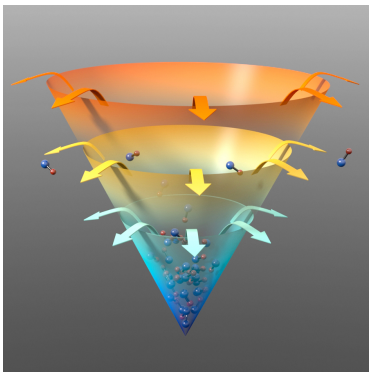
film: pułapka magnetoptyczna

W pułapce magnetoptycznej osiąga się temperatury

$$1 \text{ mK} = 0.001 \text{ K.}$$

To wciąż zbyt ciepło dla kondensatu.

Chłodzenie przez odparowanie



phys.org

Dalsze chłodzenie osiąga się poprzez odparowanie z pułapki (najszybszych) najgorętszych atomów.

Chłodzenie przez odparowanie



twinings.com

Dalsze chłodzenie osiąga się poprzez odparowanie z pułapki (najszybszych) najgorętszych atomów.

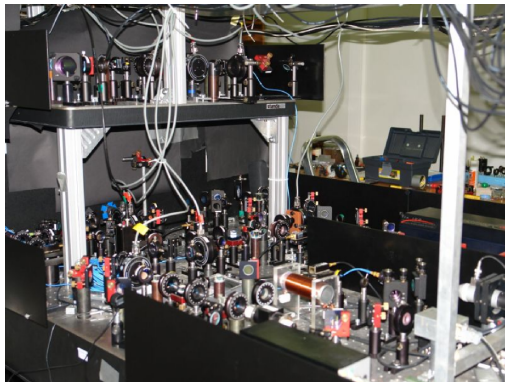
Chłodzenie przez odparowanie

film: chłodzenie przez odparowanie

W wyniku chłodzenia powstaje kondensat Bosego - Einsteina (BEC)

- ▶ Stan materii przewidziany przez S. Bosego i A. Einsteina w 1924 r.
- ▶ Na stworzenie trzeba było czekać > 70 lat.
- ▶ Twórcy pierwszego na świecie kondensatu:
W. Ketterle, C. Wieman i E. Cornell.
- ▶ Nagroda Nobla z fizyki w 2001 r.

Kondensat Bosego-Einsteina w Toruniu

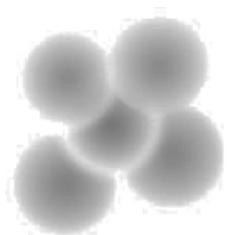


W Krajowym Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (KL FAMO) stworzono pierwszy w Europie Środkowej kondensat Bosego-Einsteina.

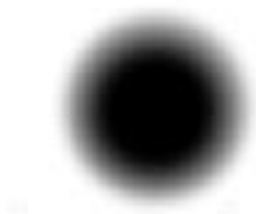
Z czego powstają kondensaty Bosego Einsteina?

- ▶ Ketterle, Wieman i Cornell 1995r.: atomy rubidu Rb
- ▶ Grupa Ketterle 2003r.: cząsteczki Li_2
- ▶ Grupa F. Schrecka 2009r.: atomy strontu Sr i cząsteczki RbSr
- ▶ m.in. laboratoria w Hannoverze i w Paryżu: swobodny spadek kondensatów → makroskopowe obiekty kwantowe

Zimne atomy a kondensat

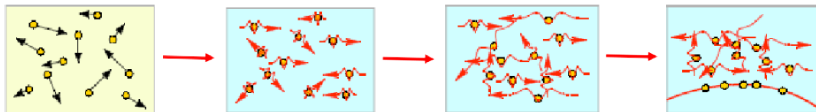


Zimne atomy są podobne do powolnych kulek.



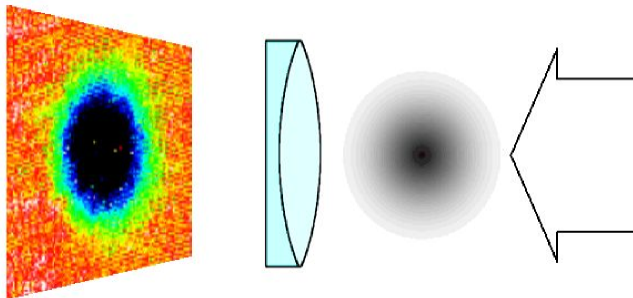
W kondensacie atomy przenikają się wzajemnie, tworząc jeden superatom. Wszystkie zajmują to samo położenie.

Kondensat jako superatom



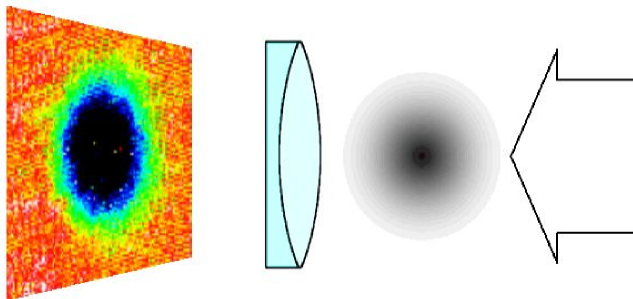
- ▶ Atomom odpowiadają funkcje falowe.
- ▶ Fala jest tym dłuższa im atom lżejszy i wolniejszy: $\lambda = \frac{h}{mv}$.
- ▶ Przy temperaturze $T = 0.2\mu\text{K}$ funkcje falowe poszczególnych atomów nakrywają się. Atomy stają się nierozróżnialne. Tworzy się jedna funkcja falowa kondensatu.

Detekcja kondensatu



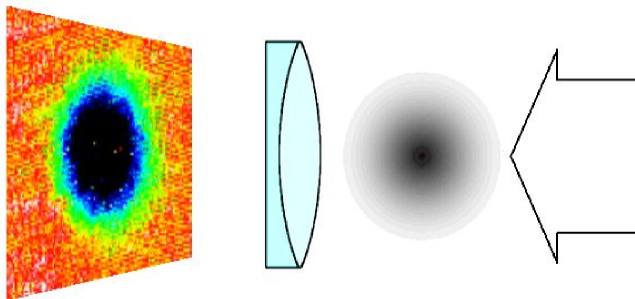
Kondensat obserwujemy naświetlając go światłem laserowym o częstotliwości rezonansowej.

Detekcja kondensatu



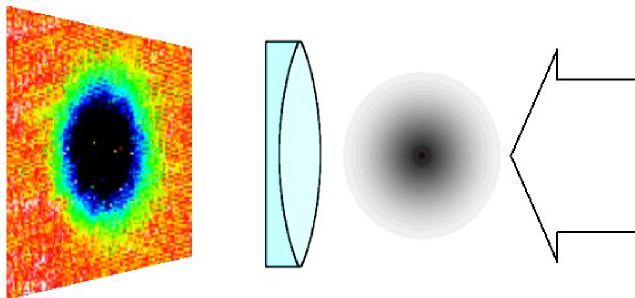
Atomy kondensatu pochłaniają fotony
i w efekcie otrzymujemy cień kondensatu.

Detekcja kondensatu

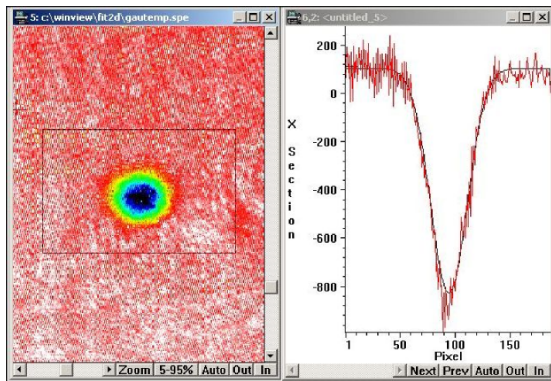


Wszystkie informacje dotyczące kondensatu otrzymujemy badając zdjęcie jego cienia.

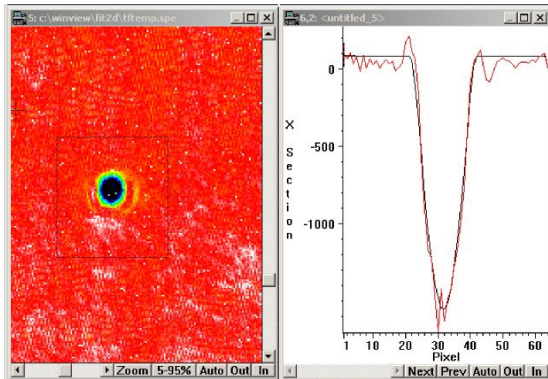
Detekcja kondensatu



W czasie naświetlania kondensat jest niszczony.



Zdjęcie cienia chmury zimnych atomów tuż przed kondensacją.

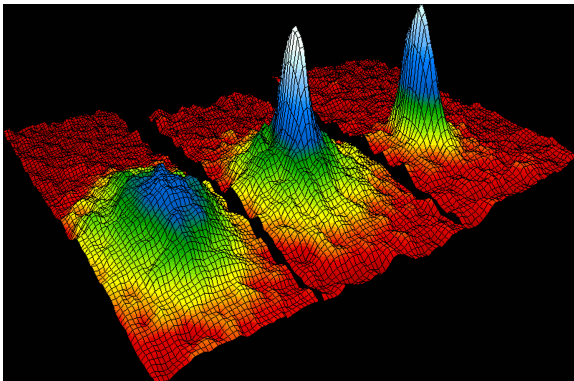


Zdjęcie kondensatu Bosego-Einsteina.

Przejście fazowe gaz \rightarrow kondensat

film: przejście fazowe

Film jest efektem złożenia wielu zdjęć kondensatu wykonanych na kolejnych etapach chłodzenia atomów.

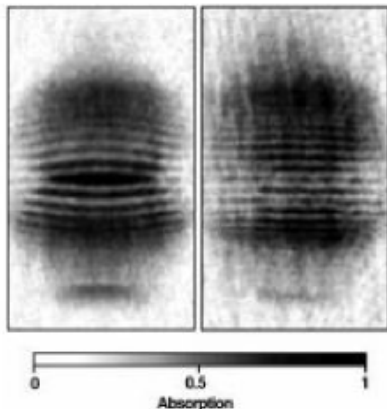


źródło: wikipedia

Wizualizacje rozkładu prędkości:
chmura zimnych atomów → kondensat.

Właściwości falowe BEC

2 kondensaty podczas zderzenia podlegają interferencji, jak fale na wodzie.



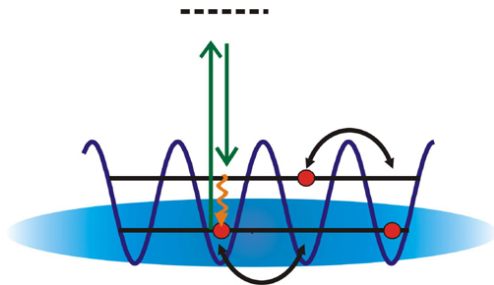
Laser atomowy

film 6: laser atomowy

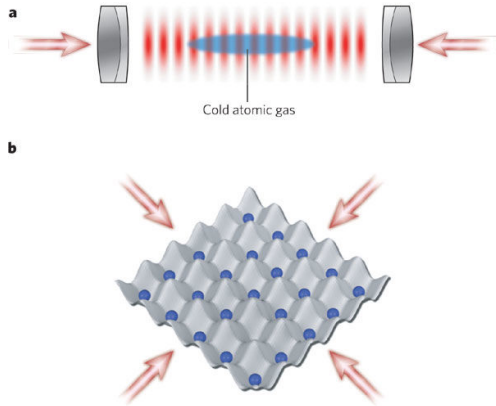
Wypuszczając w kontrolowany sposób część atomów z kondensatu, możemy otrzymać laser atomowy.

Laser taki „świeci” falami materii: spójna, zdolna do interferencji materia, a nie zbiór atomowych "kulek".

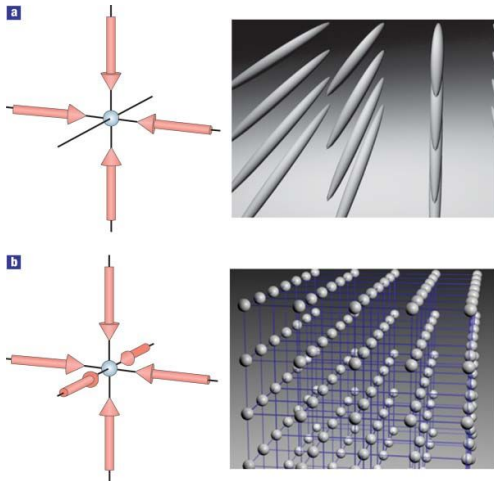
Sieć optyczna



Sieć optyczna



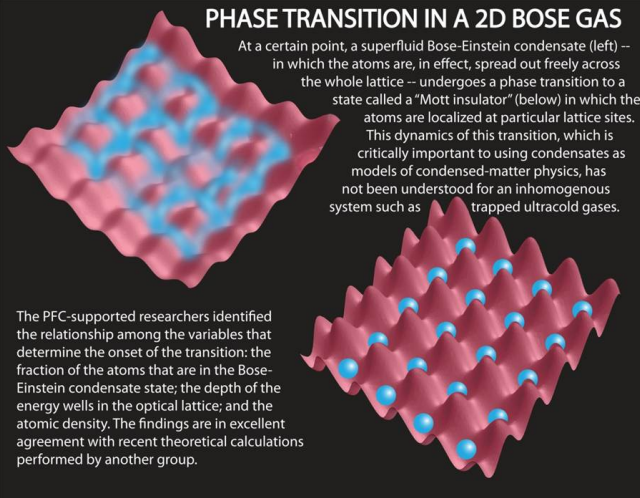
Sieć optyczna



I. Bloch, Nature (2008)

Sieć optyczna

PHASE TRANSITION IN A 2D BOSE GAS



At a certain point, a superfluid Bose-Einstein condensate (left) -- in which the atoms are, in effect, spread out freely across the whole lattice -- undergoes a phase transition to a state called a "Mott insulator" (below) in which the atoms are localized at particular lattice sites.

This dynamics of this transition, which is critically important to using condensates as models of condensed-matter physics, has not been understood for an inhomogeneous system such as trapped ultracold gases.

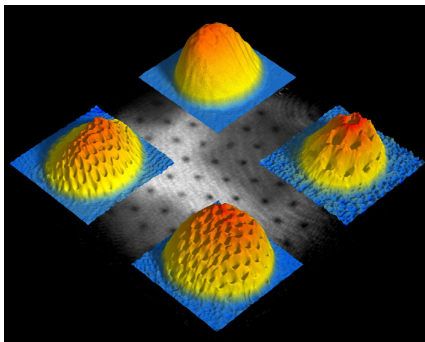
The PFC-supported researchers identified the relationship among the variables that determine the onset of the transition: the fraction of the atoms that are in the Bose-Einstein condensate state; the depth of the energy wells in the optical lattice; and the atomic density. The findings are in excellent agreement with recent theoretical calculations performed by another group.

Kondensaty sieci optycznej

film 7: sieć optyczna

Umieszczając kondensat w sieci optycznej otrzymujemy układ podobny w budowie do ciała stałego. Atomy w kondensacie modelują zachowanie elektronów w ciele stałym. Manipulując natężeniem (wysokość bariery) i długością fali lasera (szerokość dołka potencjału) możemy zmieniać strukturę sieci i badać fizykę ciała stałego, np. przejścia między fazą przewodzącą a izolującą.

Nadciekłość i nadprzewodnictwo



- ▶ Kondensat jest substancją nadciekłą:
wprawiony w ruch obrotowy kręci się bez oporów.
- ▶ Kwantyzacja momentu pędu: struktura drobnych wirów.
- ▶ Nadciekłość naładowanych cząstek = nadprzewodnictwo.

Dlaczego atomy nie zamarzają zanim staną się kondensatem?

Dlaczego atomy nie zamarzają zanim staną się kondensatem?

- ▶ Stworzenie BEC wymaga bardzo niskich temperatur.
- ▶ Czy atomy nie powinny stworzyć cieczy / ciała stałego zamiast kondensatu? Dlaczego możliwe jest tak silne schłodzenie gazu?
- ▶ Żeby stworzyć ciecz czy ciało stałe potrzeba większej liczby (agregatu) atomów. Silne rozrzedzenie gazu pozwala na oddziaływania między parami, ale nie trójkami - zapobiega zmianie fazy na ciekłą i stałą.

Kondensat Bosego-Einsteina: podsumowanie



- ▶ Zbiór ultrazimnych atomów lub cząsteczek (temperatury μK).
- ▶ **Nowy stan materii**: atomy opisane tą samą funkcją falową, są **nierozróżnialne** (tworzą kondensat = superatom).
- ▶ Makroskopowe układy kwantowe: można "sfotografować ich funkcję falową" (ściślej: rozkład przestrzenny prędkości).
- ▶ Kondensaty mogą dryfować, opadać, interferować między sobą, być wzbudzone, zyskać strukturę (np. wiry), ...

Zastosowania kondensatu BE

- ▶ Badania podstawowe: zmiana stanu naszej wiedzy o mikroświecie.
- ▶ Symulacje fizyki ciała stałego: sterowalne kryształy w sieciach optycznych.
- ▶ Medium dla zjawisk nadciekłości i nadprzewodnictwa.
- ▶ Metrologia: precyzyjne pomiary (np. badanie pola grawitacyjnego).
- ▶ Informacja kwantowa odporna na błędy (kodowana w makroskopowej liczbie cząstek).
- ▶ Spowolnienie i zatrzymanie światła: pamięć kwantowa.

Jakie wyniki daje doświadczenie Younga, gdy przez szczeliny przypuszczamy:

- ▶ fale (wodne, elektromagnetyczne)
- ▶ cząstki: ziarna piasku lub soli
- ▶ fotony, elektrony

Jaki wniosek można stąd wyciągnąć?

Które z powyższych wyników zmienią się, gdy za szczelinami znajdzie się obserwator?

Czy oddziaływanie z układem pomiarowym
może zmienić stan cząstki kwantowej?

Co to jest kolaps funkcji falowej?
W jakiej sytuacji może zajść?

Jakie wyniki i z jakimi prawdopodobieństwami może dać pomiar polaryzacji fotonu w stanie

$$|/\rangle = \frac{|+\rangle + |-\rangle}{\sqrt{2}}$$

w bazie $+$, a jakie w bazie \times ?

Jakie wyniki i z jakimi prawdopodobieństwami może dać pomiar polaryzacji fotonu w stanie

$$|/\rangle = \frac{|+\rangle + |-\rangle}{\sqrt{2}}$$

w bazie $+$, a jakie w bazie \times ?

Ile wynosi amplituda prawdopodobieństwa otrzymania w pomiarze wyniku $|-\rangle$?

*Czy można rozróżnić stany polaryzacji $|/\rangle = \frac{|0\rangle + |- \rangle}{\sqrt{2}}$ i $|\backslash\rangle = \frac{|0\rangle - |- \rangle}{\sqrt{2}}$ za pomocą pomiarów w bazie +?

Czy wszystkie wielkości fizyczne można zmierzyć jednocześnie?

Czy wszystkie wielkości fizyczne można zmierzyć jednocześnie?

Jakich wielkości fizycznych nie można zmierzyć jednocześnie?

Czy wszystkie wielkości fizyczne można zmierzyć jednocześnie?

Jakich wielkości fizycznych nie można zmierzyć jednocześnie?

*Co można powiedzieć o funkcjach własnych wielkości, które można lub nie można zmierzyć jednocześnie?

Co to znaczy, że dwie wielkości fizyczne komutują?

Czy w dwóch kolejnych, następujących bezpośrednio po sobie pomiarach tej samej wielkości fizycznej, możemy otrzymać różne wyniki?

Na czym polega paradoks kota Schrödingera?

Jaką nazwę nosi zjawisko utraty spójności przez układ kwantowy?

Jaką nazwę nosi zjawisko utraty spójności przez układ kwantowy?
Jaki jest jego związek z paradoksem kota Schrödingera?

Czy w mechanice kwantowej można stworzyć kopię znanego stanu kwantowego?

Czy w mechanice kwantowej można stworzyć kopię znanego stanu kwantowego?

Czy można sklonować nieznaną stan?

Czy w mechanice kwantowej można stworzyć kopię znanego stanu kwantowego?

Czy można sklonować nieznaną stan?

Czy do stworzenia kopii nieznanego stanu wystarczy jedna kopia oryginału?

Podaj przykłady rodzajów promieniowania elektromagnetycznego.

Jaki jest związek między energią fotonu a częstotliwością jego drgań?

Co to jest polaryzacja światła?

Jakie są przykładowe źródła niespolaryzowanego/spolaryzowanego światła?

Jak można polaryzować niespolaryzowane światło?

Wymień przykłady zastosowań zjawiska polaryzacji.

Czym różni się światło kwantowe od klasycznego?

Czym różni się światło kwantowe od klasycznego?
Jak nazywa się źródło światła klasycznego o najmniejszych
fluktuacjach natężenia?

Wymień przykłady źródeł pojedynczych fotonów.

Na czym polega zjawisko spontanicznego parametrycznego dzielenia częstotliwości?

Na czym polega zjawisko spontanicznego parametrycznego dzielenia częstości?

Jak nazywają się stany, które powstają w tym zjawisku?

Podaj przykład.

Na czym polega paradoks EPR?

Na czym polega paradoks EPR?
Jakie dwa wyjaśnienia paradoksu
proponowali Einstein, Podolski i Rosen?

Co miały na celu eksperymentalne testy nierówności Bella?

Ile informacji w stosunku do klasycznego bitu zawiera bit kwantowy?

- ▶ mniej niż klasyczny
- ▶ tyle samo co klasyczny
- ▶ więcej niż klasyczny

Ilu liczb rzeczywistych potrzeba by opisać stan kubitów?

Podaj przykłady układów fizycznych,
w których można zakodować kubit.

Czym są kwantowe bramki logiczne?

Czym różnią się bramki jedno- od dwukubitowych?

Co ulega teleportacji w protokole omawianym na wykładzie?

*Omów poznany protokół teleportacji.

Wybierz właściwą odpowiedź:

Do przeprowadzenia teleportacji potrzebna jest

- ▶ para dowolnych cząstek kwantowych
- ▶ jedna cząstka w superpozycji położeń
($|\text{laboratorium Alicji}\rangle + |\text{laboratorium Boba}\rangle) / \sqrt{2}$
- ▶ splątana para cząstek, dzielona przez Alicję i Boba

Czy na końcu protokołu teleportacji Alicja i Bob oboje mają po swojej kopii teleportowanego stanu?

Co to jest i do czego służy klucz kryptograficzny?

Co to jest i do czego służy klucz kryptograficzny?
Czy dowolnego ciągu bitów można użyć jako klucza kryptograficznego?

Czy klucz kryptograficzny może być ogłoszony publicznie?

*Omów protokół BB84 dystrybucji klucza kryptograficznego.

O jakie zjawisko oparta jest kwantowa dystrybucja klucza w protokole BB84?

- ▶ superpozycji
- ▶ klonowania
- ▶ splątania

Co to znaczy, że kwantowe metody dystrybucji klucza są bezpieczne?

Jakie zjawisko jest podstawą szybkości algorytmów kwantowych?

- ▶ superpozycji
- ▶ klonowania
- ▶ splątania

Wymień 5 stanów skupienia materii.

Jaki jest związek między temperaturą gazu a predkością atomów/cząsteczek, które go tworzą?

Kondensat Bosego - Einsteina może powstać:

- ▶ w ultraniskich temperaturach
- ▶ w temperaturze ciekłego azotu ~ 1.6 K
- ▶ w temperaturze pokojowej
- ▶ w ultrawysokich temperaturach (np. na powierzchni Słońca)

Na czym polega chłodzenie laserowe?

Na czym polega chłodzenie laserowe?
Co to jest efekt Dopplera?

Na czym polega chłodzenie laserowe?

Co to jest efekt Dopplera?

Jak efekt Dopplera pomaga w chłodzeniu laserowym?

Po włączeniu pułapki magnetoptycznej:

- ▶ z czasem zwiększa się liczba spułapkowanych atomów
- ▶ z czasem zmniejsza się liczba spułapkowanych atomów

W zjawisku chłodzenia przez odparowanie

- ▶ zwiększa się liczba spułapkowanych atomów
- ▶ zmniejsza się liczba spułapkowanych atomów

Czym charakteryzuje się funkcja falowa atomów w kondensacie?

Na czym polega detekcja (wykonanie zdjęć) kondensatu Bosego - Einsteina?

Na czym polega detekcja (wykonanie zdjęć) kondensatu Bosego - Einsteina?

Czy pomiar kondensatu jest destrukcyjny? Dlaczego?

Podaj przykład zjawiska, w którym kondensaty wykazują zachowanie o charakterze falowym.