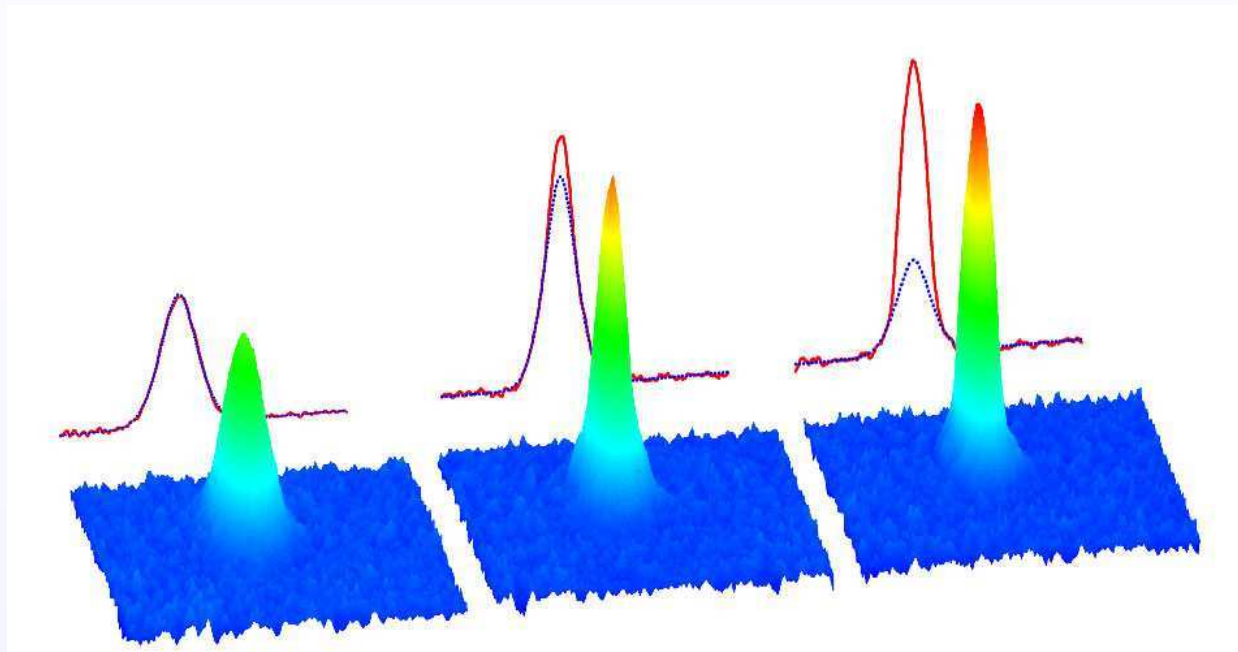


Część 5:

Nowa era - II etap

Nowoczesne techniki pułapkowania i chłodzenia atomów do ultraniskich temperatur rzędu nK umożliwiły również dokonanie kondensacji BE par atomów typu fermionowego.



$$T_c \simeq 0,2 T_F \quad (\sim 50 \text{ nK})$$

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

Kondensaty BE par fermionowych uzyskiwano dotychczas głównie z izotopów **metali alkalicznych**, gdzie

Z – liczba nieparzysta

Z obiektami typu fermionowego mamy do czynienia wówczas, gdy $Z + A$ jest liczbą nieparzystą, czyli

A – liczba parzysta

Konkretne przykłady

⁶**Li** mieszanina dwóch stanów nadsubtelnych
 $|\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\rangle$ i $|\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle$ współistniejąca
z dwuatomowymi cząsteczkami (⁶Li)₂

⁴⁰**K** mieszanina dwóch stanów nadsubtelnych
 $|\frac{9}{2}, \frac{-9}{2}\rangle$, i $|\frac{9}{2}, \frac{-7}{2}\rangle$ współistniejąca
z dwuatomowymi cząsteczkami (⁴⁰K)₂.

Typowe wartości liczbowe:

obecnie udaje się pułapkować od około
 10^5 do 10^7 atomów

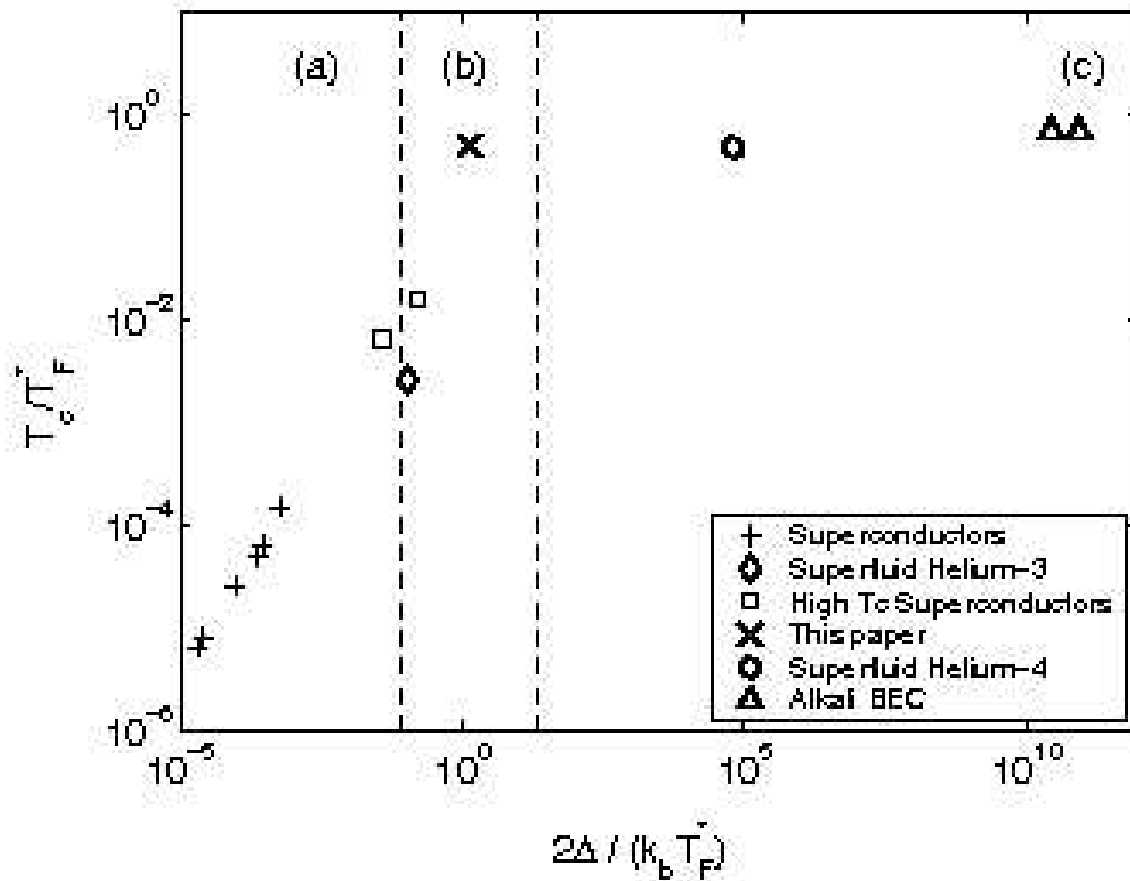
koncentracje spułapkowanych atomów
wynoszą 10^{13} cm^{-3}

temperatura Fermiego jest rzędu 10^{-8} K

przejście w stan nadciekłości powinno
zachodzić w temperaturach rzędu $10 - 100 \text{ nK}$

Czy takie temperatury są niskie czy wysokie ?

Porównanie względnej skali temperatur krytycznych



/ M. Holland et al, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 120406 (2001) /

*Kluczowe znaczenie dla powstania
stanu nadciekłego mają:*



rezonans Feshbacha

/oddziaływania indukowane polem magnetycznym/

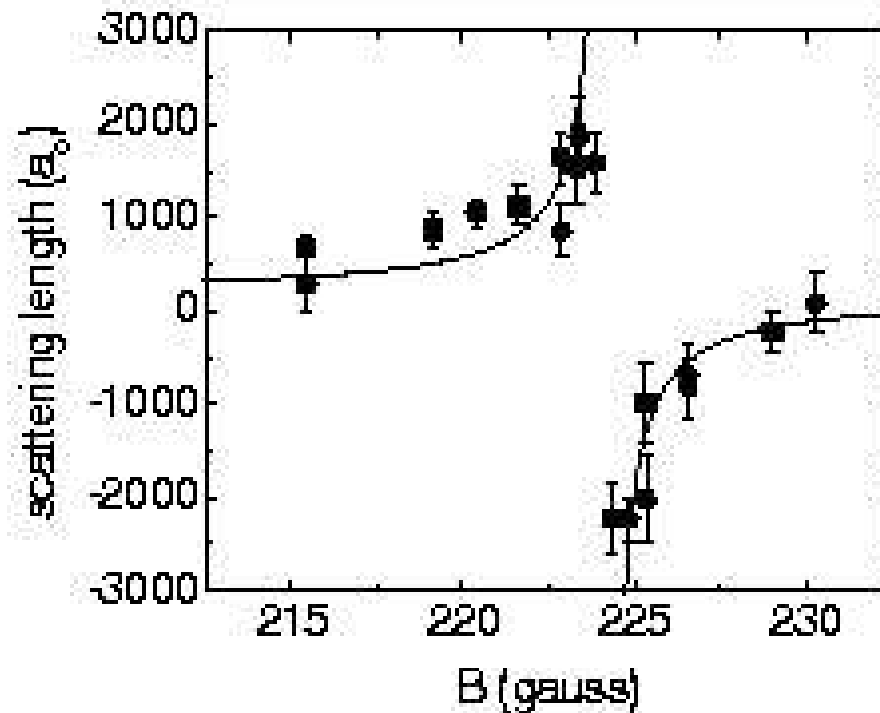


przejście od granicy BCS do BEC

/kontrolowalna realizacja koncepcji Leggett'a/

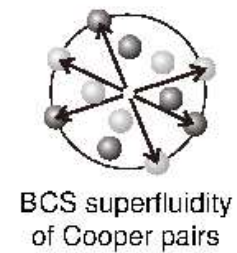
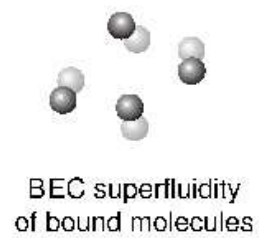
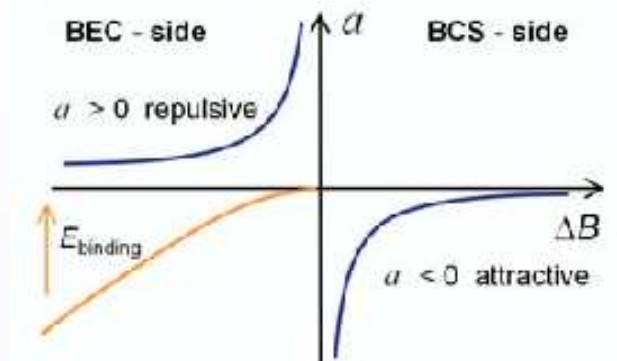
Rezonans Feshbacha

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

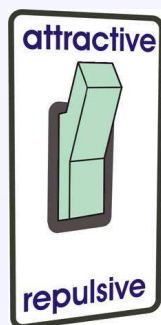
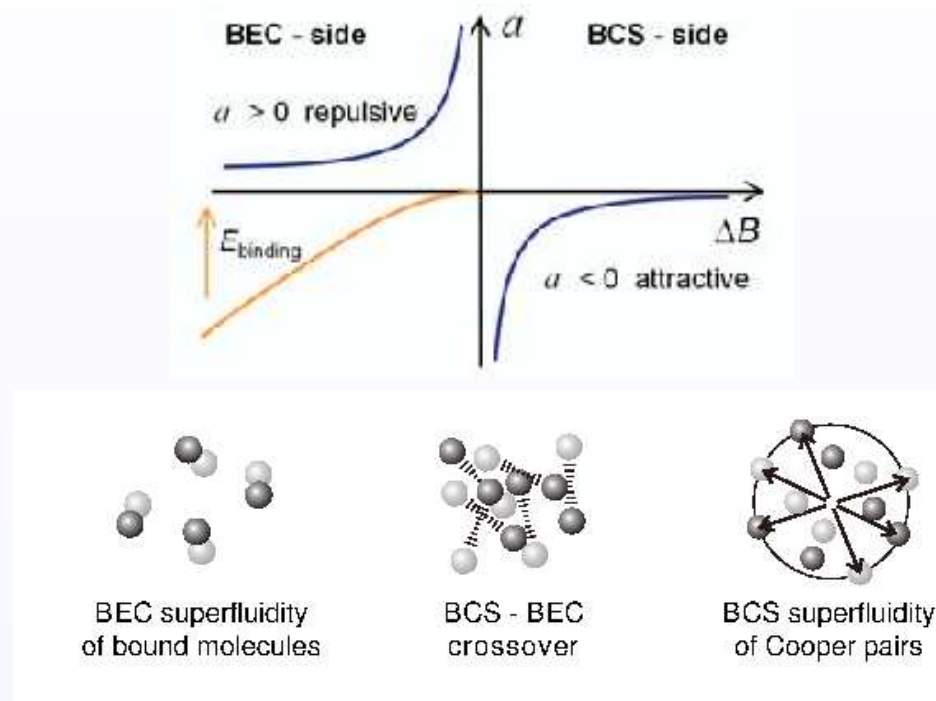


/ C.A. Regal and D.S. Jin, Phys. Rev. Lett. **90**, 230404 (2003) /

Zmieniając pole magnetyczne realizowane są przypadki:



Zmieniając pole magnetyczne realizowane są przypadki:



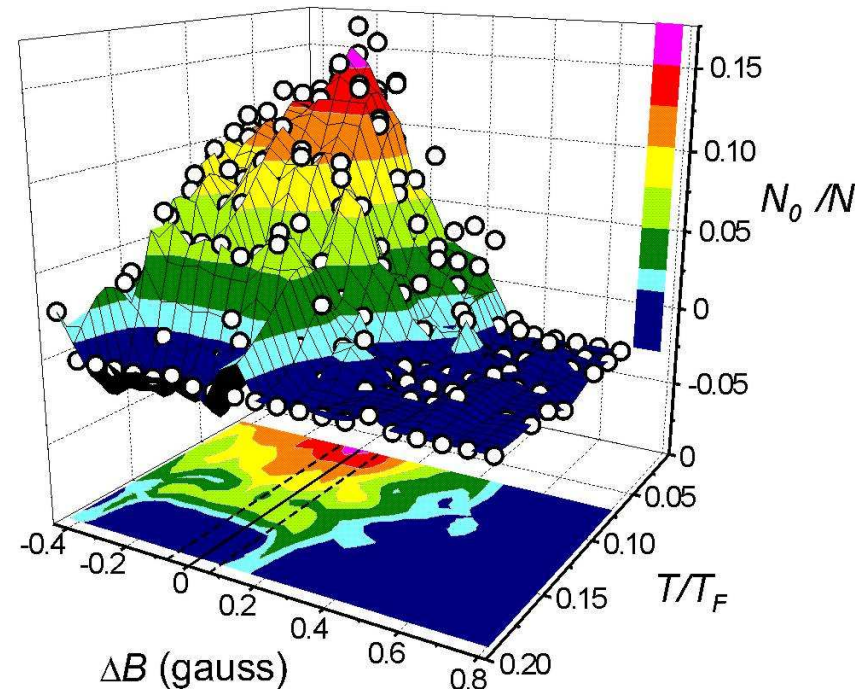
*W kontrolowany sposób takie **przełączanie** jest już obecnie wykonywane w wielu laboratoriach:*

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

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

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

Kondensat BE par fermionowych

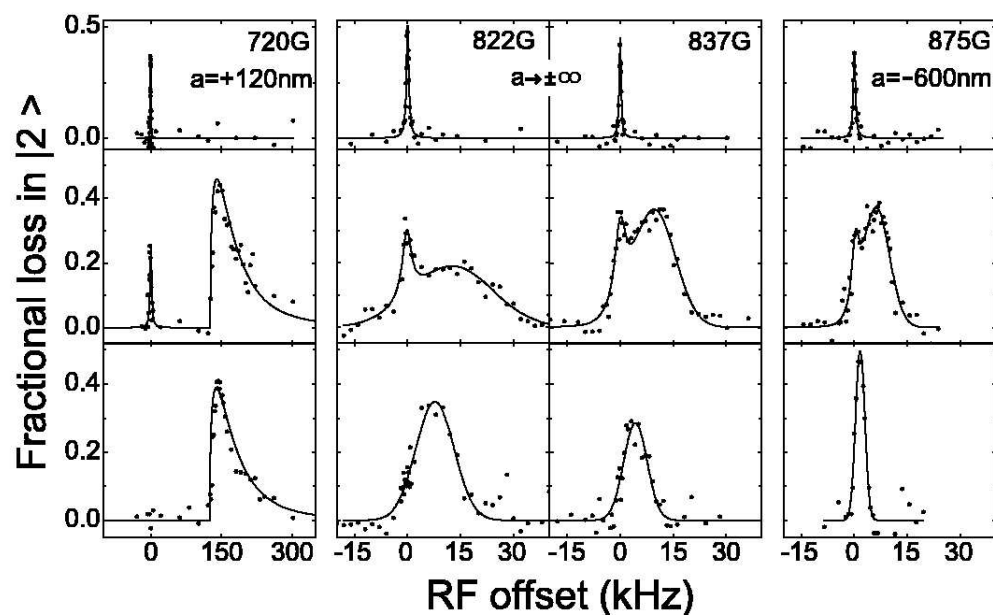


Jedna z pierwszych doświadczalnych obserwacji kondensatu BE par atomów typu fermionowego zmierzona względem $\Delta B = B - B_0$ i temperatury T/T_F .

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

Jak sprawdzić czy kondensat BE jest nadciekły ?

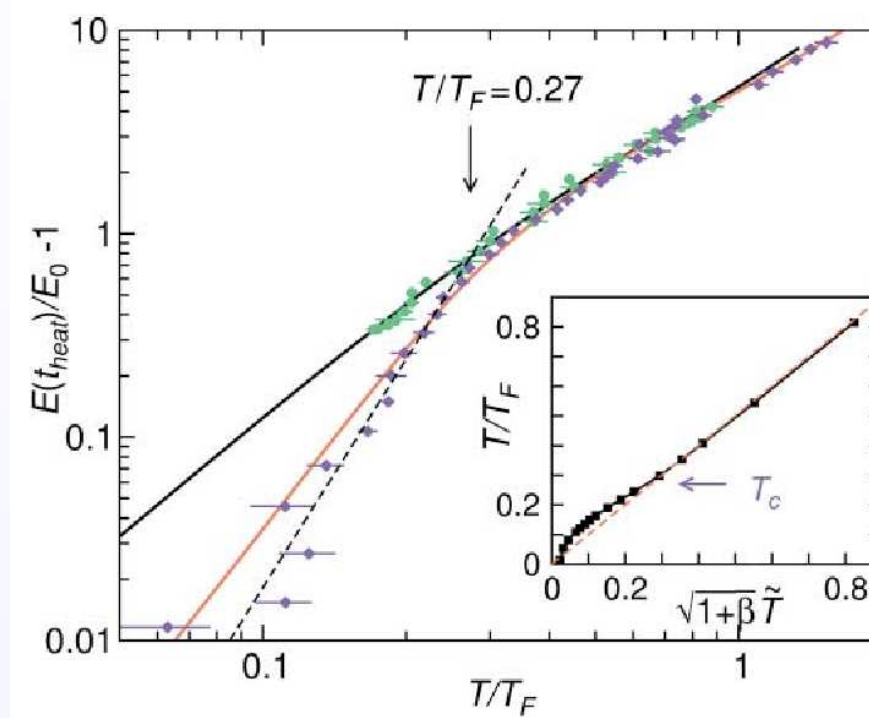
1. Pomiar przerwy energetycznej



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

Wykorzystując spektroskopię RF wykazano, że w widmie wzbudzeń pojawia się przerwa energetyczna

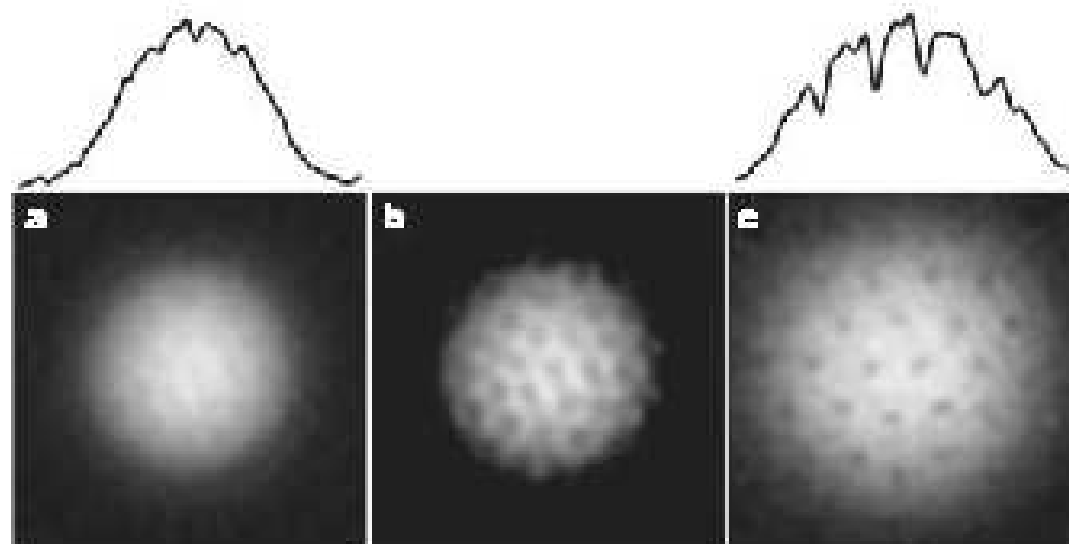
2. Pomiar ciepła właściwego



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

Ciepło właściwe wykazuje temperaturową zależność typową dla fazy nadciekłej poniżej T_c .

3. Wiry kwantowe



Observation of a vortex lattice in a molecular condensate.

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

Jednoznacznym dowodem potwierdzającym występowanie stanu nadciekłego była obserwacja pojawienia się wirów (rotonów), które układają się w strukturę sieci Abrikosova.

Opis teoretyczny

Pod względem teoretycznym *rezonansowe oddziaływanie* opisuje się modelem bozonowo-fermionowym

$$H = \sum_{\mathbf{k}, \sigma} \left(\frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m} - \mu \right) c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\sigma} + \frac{4\pi\hbar^2 a_{bg}}{m} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}, \mathbf{q}} c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{\mathbf{q}-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger c_{\mathbf{q}-\mathbf{p}\downarrow} c_{\mathbf{p}\uparrow} \\ + g \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{q}} (b_{\mathbf{q}}^\dagger c_{\mathbf{k},\downarrow} c_{\mathbf{q}-\mathbf{k},\uparrow} + h.c.) + \sum_{\mathbf{q}} \left(\frac{\hbar^2 \mathbf{q}^2}{4m} + \delta - 2\mu \right) b_{\mathbf{q}}^\dagger b_{\mathbf{q}}$$

$c_{\mathbf{k}\sigma}^{(\dagger)}$ — operatory atomów fermionowych w stanach $\sigma = \uparrow$ i $\sigma = \downarrow$

a_{bg} — słabe oddziaływanie tła

g — oddziaływanie molekuł z atomami

δ — odległość od rezonansu

$b_{\mathbf{q}}^{(\dagger)}$ — operatory molekuł dwuatomowych

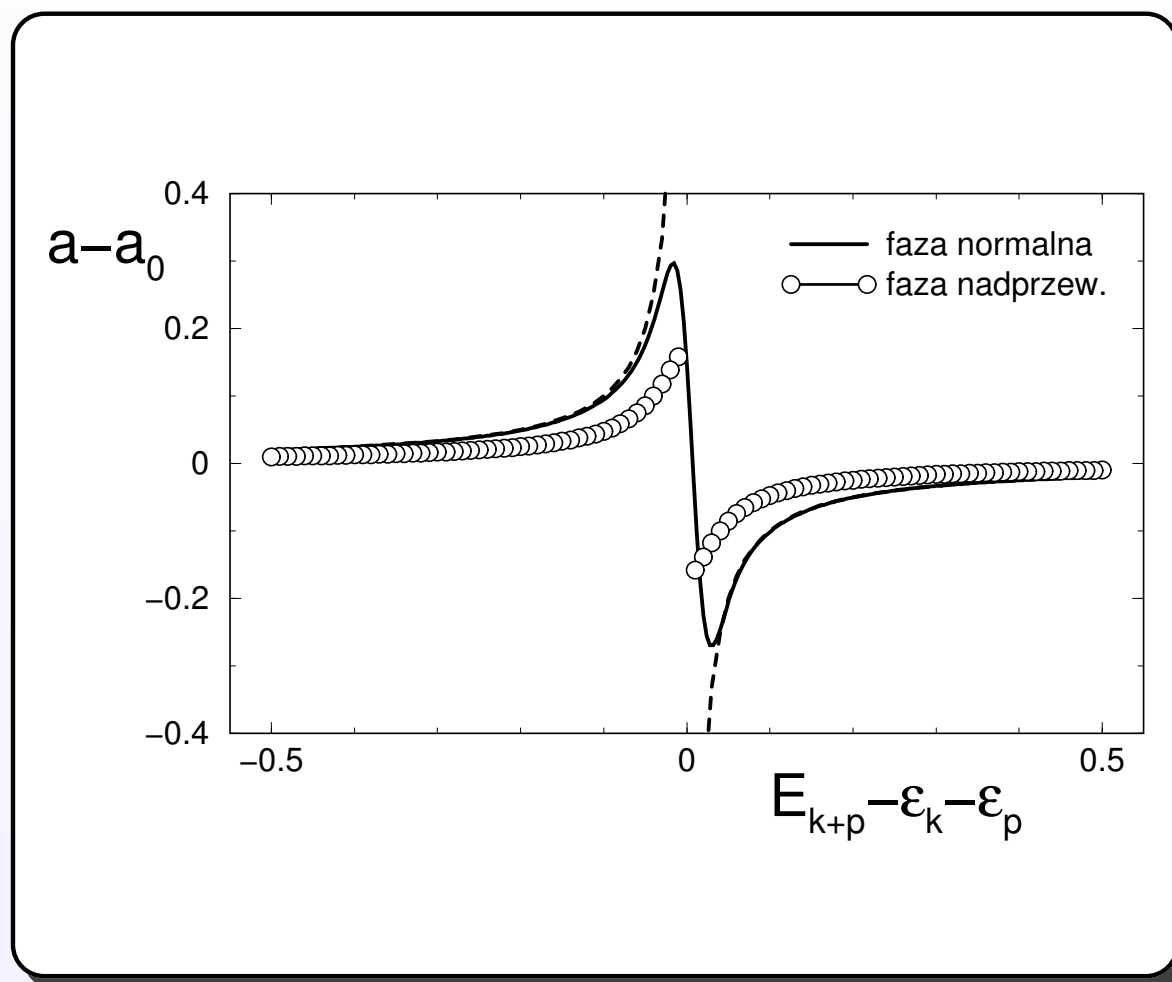
E. Timmermans *et al*, Phys. Rep. **315**, 199 (1999);

R.A. Duine and H.T.C. Stoof, Phys. Rep. **396**, 115 (2004).

Taki bozonowo-fermionowy model został zaproponowany ponad 20 lat temu w Poznaniu. Był on rozpatrywany w kontekście nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego.

*J. Ranninger, S. Robaszkiewicz, **Physica B** **135**, 468 (1985);
S. Robaszkiewicz, R. Micnas, J. Ranninger, **Phys. Rev. B** **36**,
180 (1987); **Rev. Mod. Phys.** **62**, 113 (1990).*

W modelu BF efektywny potencjał oddziaływania między fermionami ma faktycznie charakter rezonansowy.



/ T. Domański, *Phys. Rev. A* **68**, 013603 (2003) /

Istotne aspekty teoertyczne:

Istotne aspekty teoretyczne:

Silny wpływ fluktuacji kwantowych sprawia, że przejście w stan nadciekłości jest nietypowe.

Istotne aspekty teoretyczne:

Silny wpływ fluktuacji kwantowych sprawia, że przejście w stan nadciekłości jest nietypowe.

Nawet powyżej temperatury krytycznej może pojawić się przerwa energetyczna w jednocząstkowym widmie wzbudzeń.

Istotne aspekty teoretyczne:

Silny wpływ fluktuacji kwantowych sprawia, że przejście w stan nadciekłości jest nietypowe.

Nawet powyżej temperatury krytycznej może pojawić się przerwa energetyczna w jednocząstkowym widmie wzbudzeń.

O istnieniu nadciekłości świadczyć mogą jednoznacznie takie efekty kolektywne jak np. sieć skwantowanych wirów.

Dalsze uwagi:

Dalsze uwagi:

Parametr porządku, a tym samym również istnienie nadciekłości, zależą od czasu.

Dalsze uwagi:

Parametr porządku, a tym samym również istnienie nadciekłości, zależą od czasu.

Przy przechodzeniu przez rezonans Feshbacha parametr porządku i liczba poszczególnych cząstek zmieniają się.

Dalsze uwagi:

Parametr porządku, a tym samym również istnienie nadciekłości, zależą od czasu.

Przy przechodzeniu przez rezonans Feshbacha parametr porządku i liczba poszczególnych cząstek zmieniają się.

Dynamika ma nietrywialny charakter i dla naukowców stanowi obecnie jeden z ważniejszych tematów badawczych.

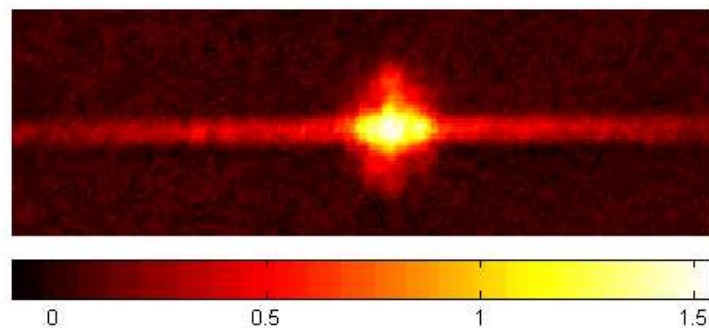
Część 6:

Perspektywa innych zastosowań

Przykład nr 1:

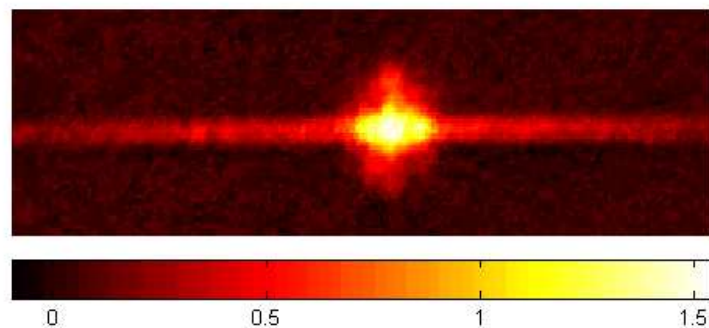
Przykład nr 1:

Laboratoryjne wybuchy materii



Przykład nr 1:

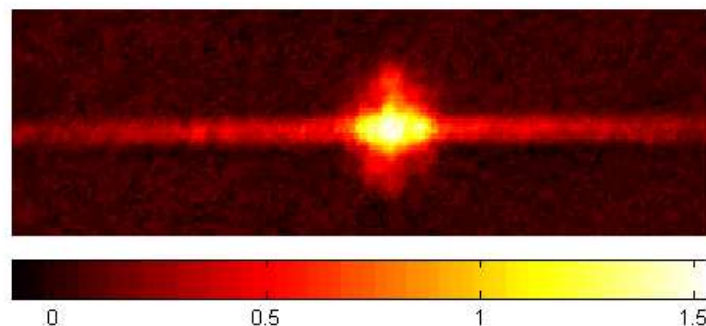
Laboratoryjne wybuchy materii



/ Bosenova /

Przykład nr 1:

Laboratoryjne wybuchy materii



/ Bosenova /

Atomy ^{85}Rb eksplodujące po ”przełączeniu oddziaływań”
na przyciągające za pomocą rezonansu Feshbacha.

E. Donley et al, Nature 417, 529 (2001).

Objaśnienie eksperymentu:

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ pułapkowaniu i chłodzeniu poddane są atomy typu bozonowego

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ pułapkowaniu i chłodzeniu poddane są atomy typu bozonowego
- ★ atomy oddziałują na siebie siłami odpychającymi

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ pułapkowaniu i chłodzeniu poddane są atomy typu bozonowego
- ★ atomy oddziałują na siebie siłami odpychającymi
- ★ część (większość) atomów przechodzi w stan kondensacji Bosego-Einsteina

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ pułapkowaniu i chłodzeniu poddane są atomy typu bozonowego
- ★ atomy oddziałują na siebie siłami odpychającymi
- ★ część (większość) atomów przechodzi w stan kondensacji Bosego-Einsteina
- ★ przełączając zewnętrzne pole magnetyczne oddziaływania zmieniają się z odpychających na przyciągające

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ pułapkowaniu i chłodzeniu poddane są atomy typu bozonowego
- ★ atomy oddziałują na siebie siłami odpychającymi
- ★ część (większość) atomów przechodzi w stan kondensacji Bosego-Einsteina
- ★ przełączając zewnętrzne pole magnetyczne oddziaływania zmieniają się z odpychających na przyciągające
- ★ siła przyciągania prowadzi do implozji (zapadania się)

Objaśnienie eksperymentu:

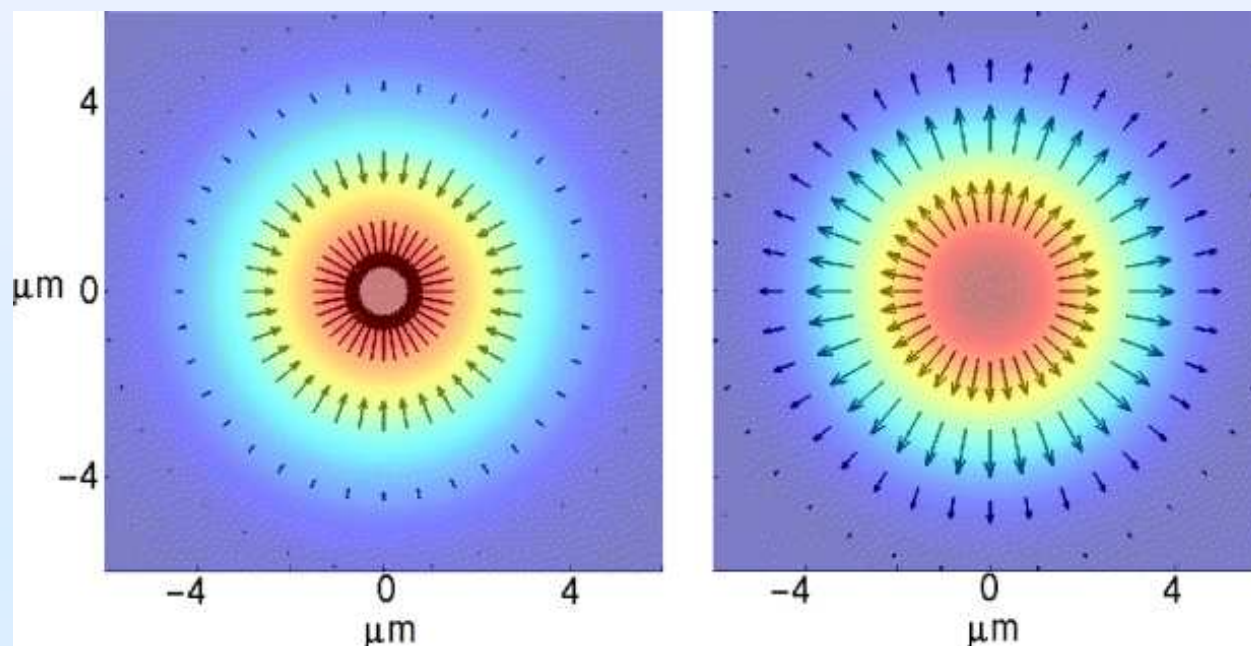
- ★ pułapkowaniu i chłodzeniu poddane są atomy typu bozonowego
- ★ atomy oddziałują na siebie siłami odpychającymi
- ★ część (większość) atomów przechodzi w stan kondensacji Bosego-Einsteina
- ★ przełączając zewnętrzne pole magnetyczne oddziaływania zmieniają się z odpychających na przyciągające
- ★ siła przyciągania prowadzi do implozji (zapadania się)
- ★ w konsekwencji powstaje zjawisko analogiczne do wybuchu Supernowej

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ pułapkowaniu i chłodzeniu poddane są atomy typu bozonowego
- ★ atomy oddziałują na siebie siłami odpychającymi
- ★ część (większość) atomów przechodzi w stan kondensacji Bosego-Einsteina
- ★ przełączając zewnętrzne pole magnetyczne oddziaływania zmieniają się z odpychających na przyciągające
- ★ siła przyciągania prowadzi do implozji (zapadania się)
- ★ w konsekwencji powstaje zjawisko analogiczne do wybuchu Supernowej

Zjawisko to Wieman nazwał żartobliwie Bosenową.

Mapa prędkości w chwili wybuchu



Lewa strona:

Atomy z kondensatu Bosego-Einsteina zapadają się.

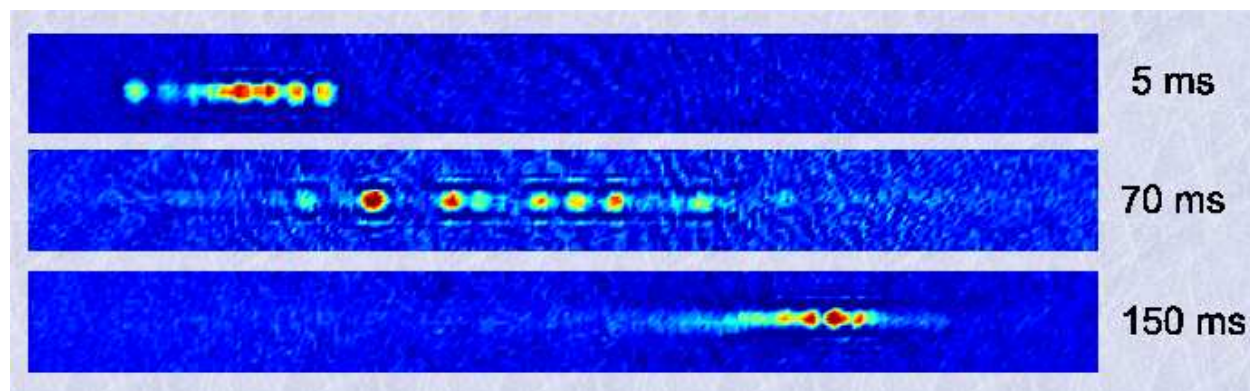
Prawa strona:

Pozostałe atomy ulegają wyrzuceniu (ang. *burst*).

J.N. Milstein et al, New Journ. Phys. 5, 52 (2003).

Przykład nr 2:

Fale solitonowe



Atomy ^7Li po ”przełączeniu oddziaływań” na przyciągające wytwarzają układ solitonów (ang. *soliton train*).

K.S. Strecker et al, Nature **417**, 150 (2002).

/ Grupa z Uniwersytetu Rice’a w Houston, USA /

Objaśnienie eksperymentu:

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ podobnie jak w przykładzie nr 1 atomy typu bozonowego są pułapkowane, oziębiane i przeprowadzane w stan kondensacji

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ podobnie jak w przykładzie nr 1 atomy typu bozonowego są pułapkowane, oziębiane i przeprowadzane w stan kondensacji
- ★ pułapka ma charakter jednowymiarowy

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ podobnie jak w przykładzie nr 1 atomy typu bozonowego są pułapkowane, oziębiane i przeprowadzane w stan kondensacji
- ★ pułapka ma charakter jednowymiarowy
- ★ stosując rezonans Fesbacha oddziaływania ”przełączone” są z odpychających na przyciągające

Objaśnienie eksperymentu:

- ★ podobnie jak w przykładzie nr 1 atomy typu bozonowego są pułapkowane, oziębiane i przeprowadzane w stan kondensacji
- ★ pułapka ma charakter jednowymiarowy
- ★ stosując rezonans Fesbacha oddziaływania ”przełączone” są z odpychających na przyciągające
- ★ zamiast wybuchu Bosenovej powstaje grupa kilku solitonów

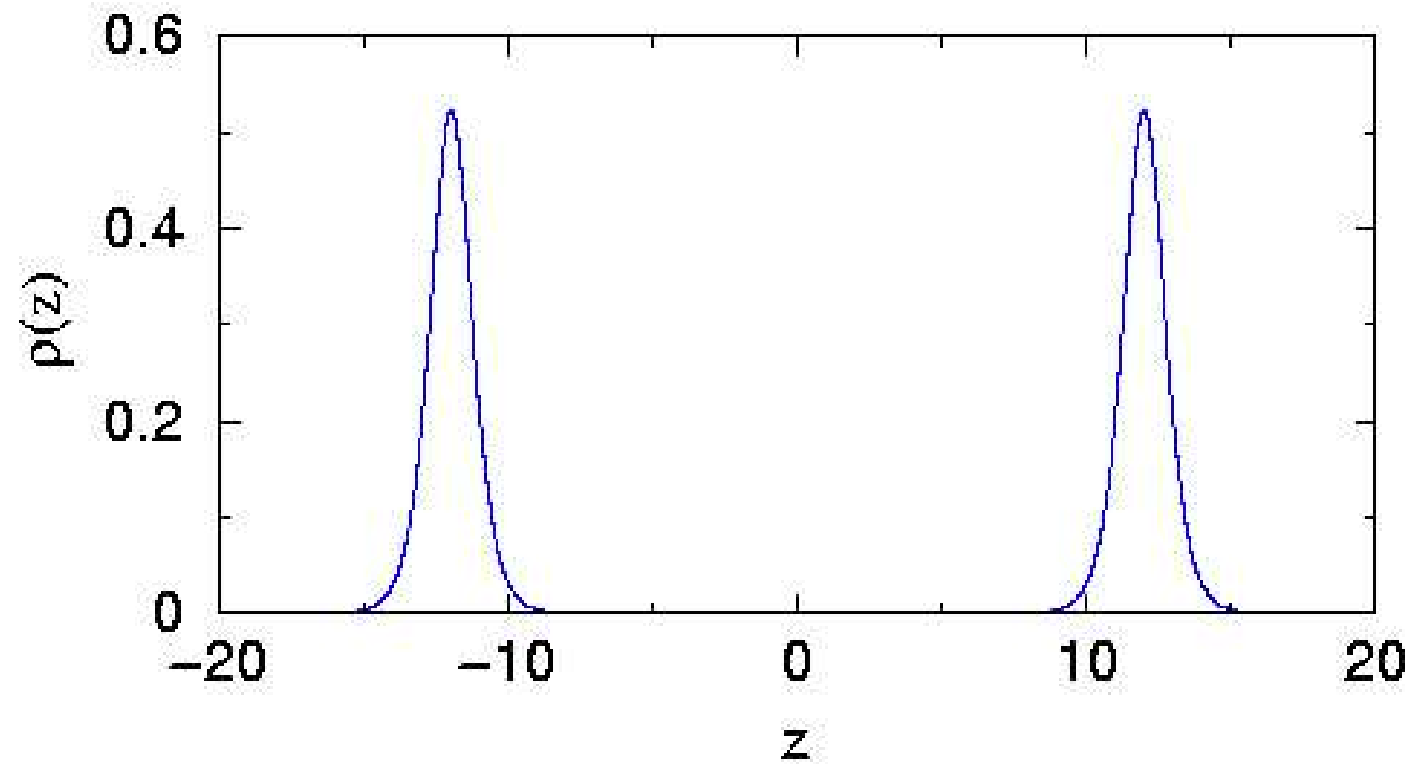
Objaśnienie eksperymentu:

- ★ podobnie jak w przykładzie nr 1 atomy typu bozonowego są pułapkowane, oziębiane i przeprowadzane w stan kondensacji
- ★ pułapka ma charakter jednowymiarowy
- ★ stosując rezonans Fesbacha oddziaływania ”przełączone” są z odpychających na przyciągające
- ★ zamiast wybuchu Bosenovej powstaje grupa kilku solitonów

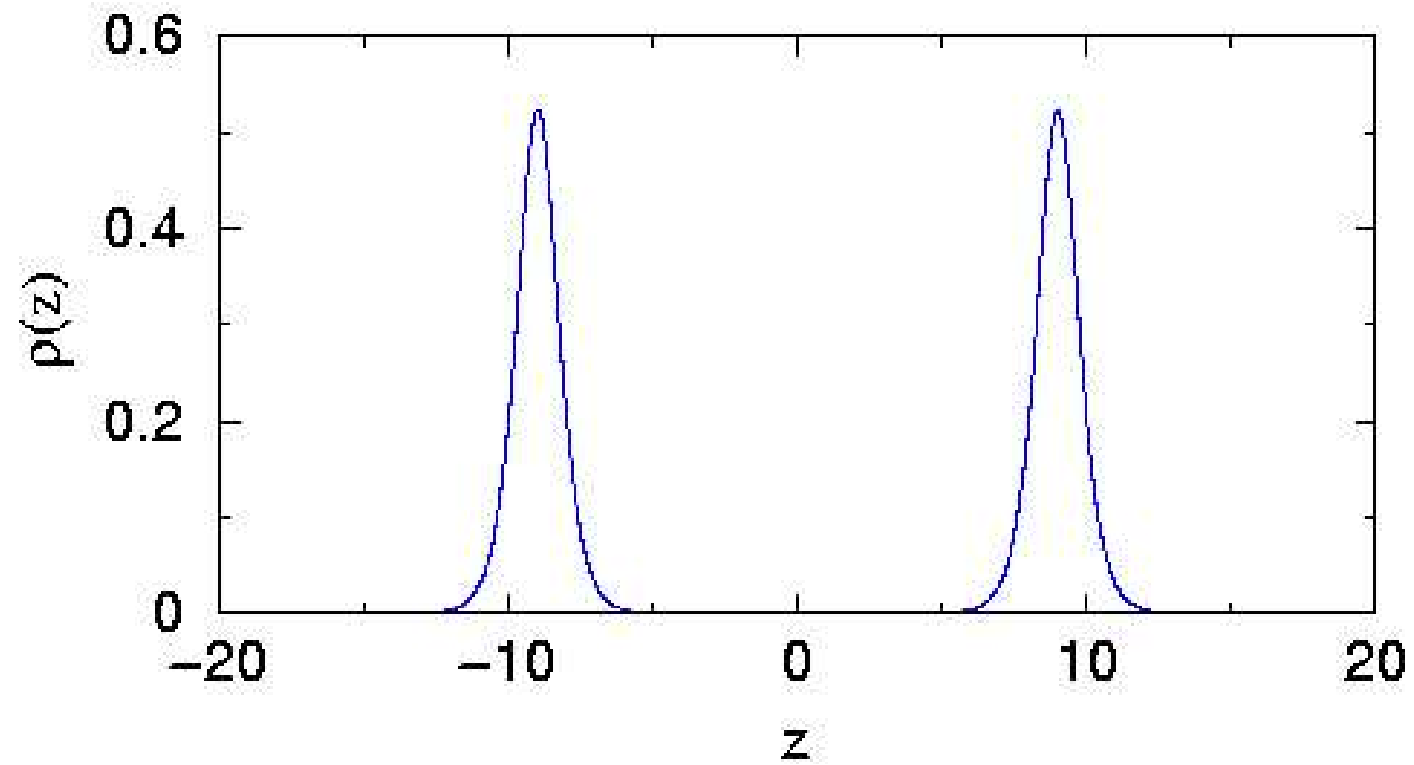
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: **dwa przeciwbieżne solitony**

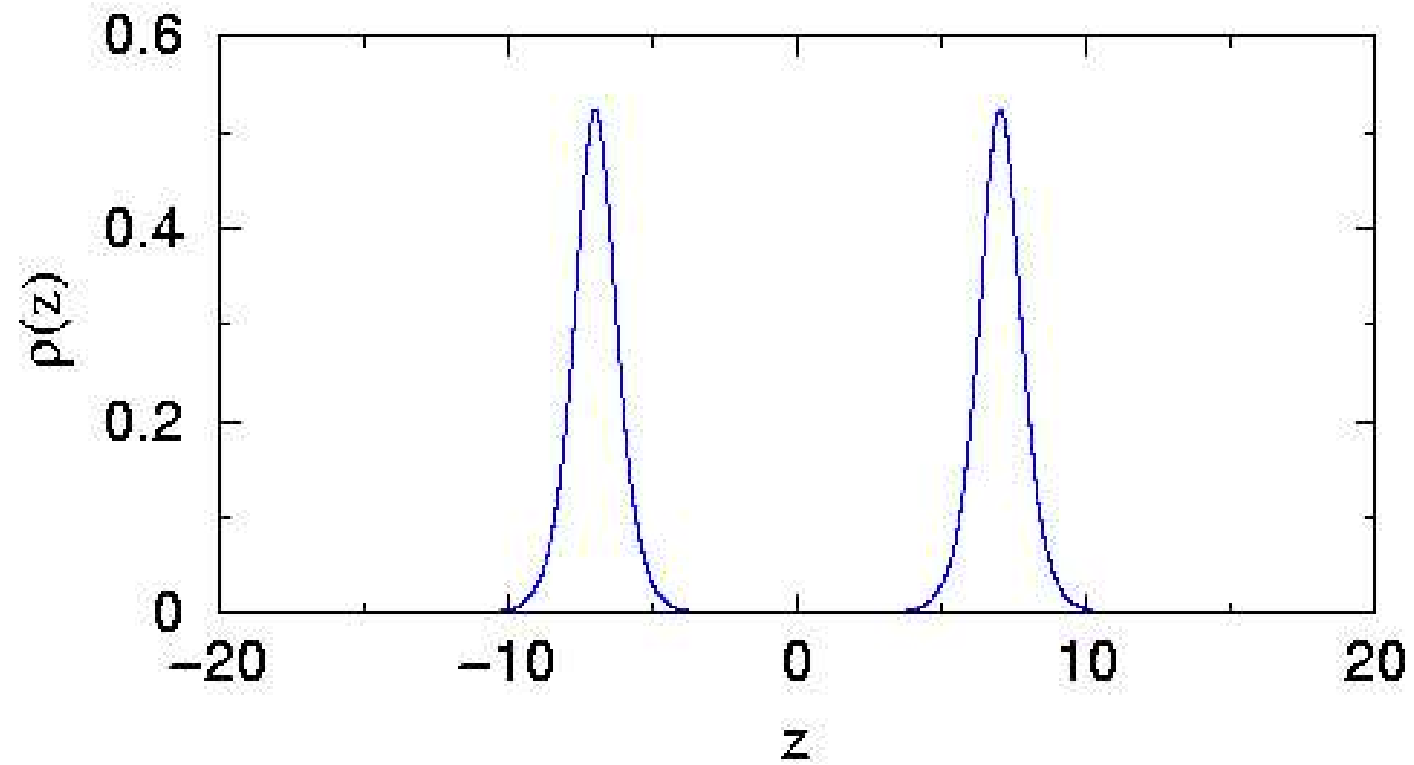
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



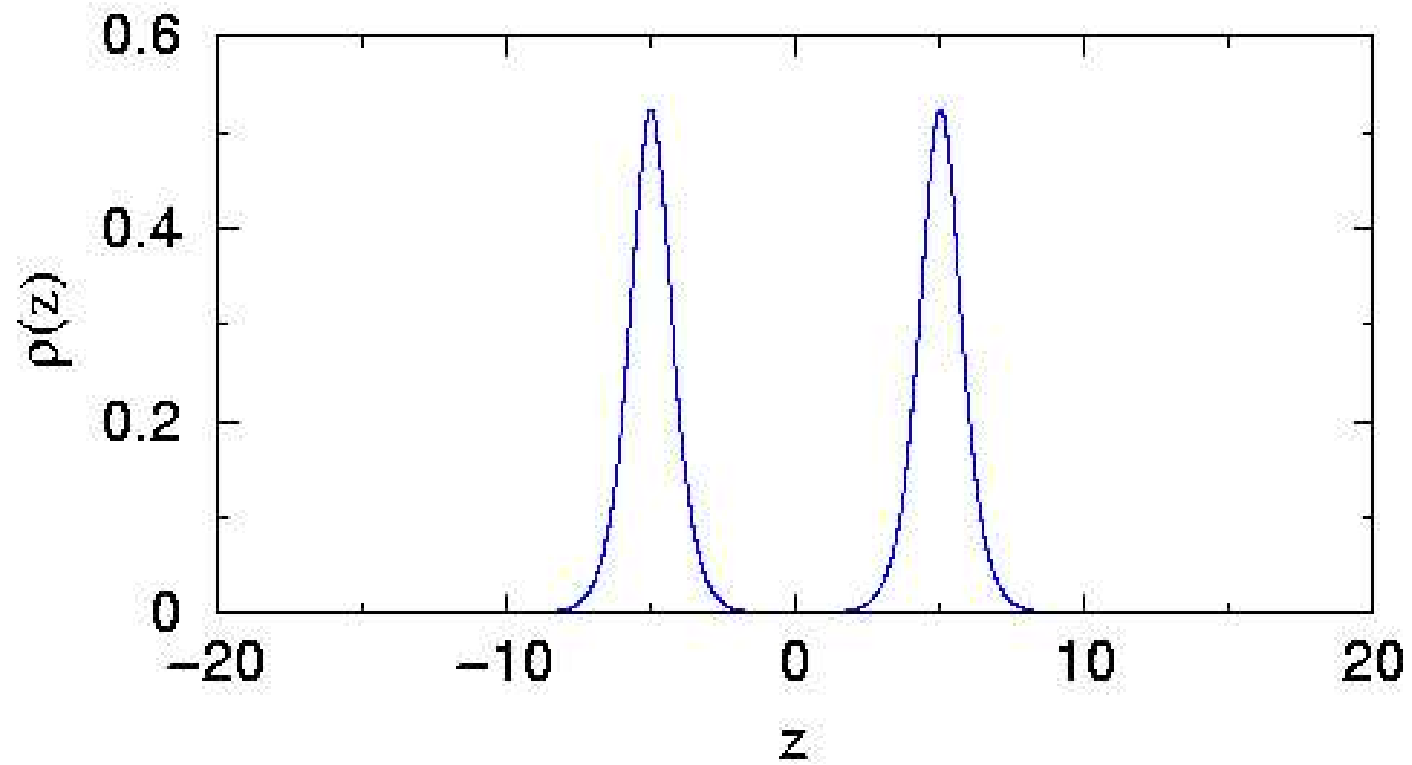
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



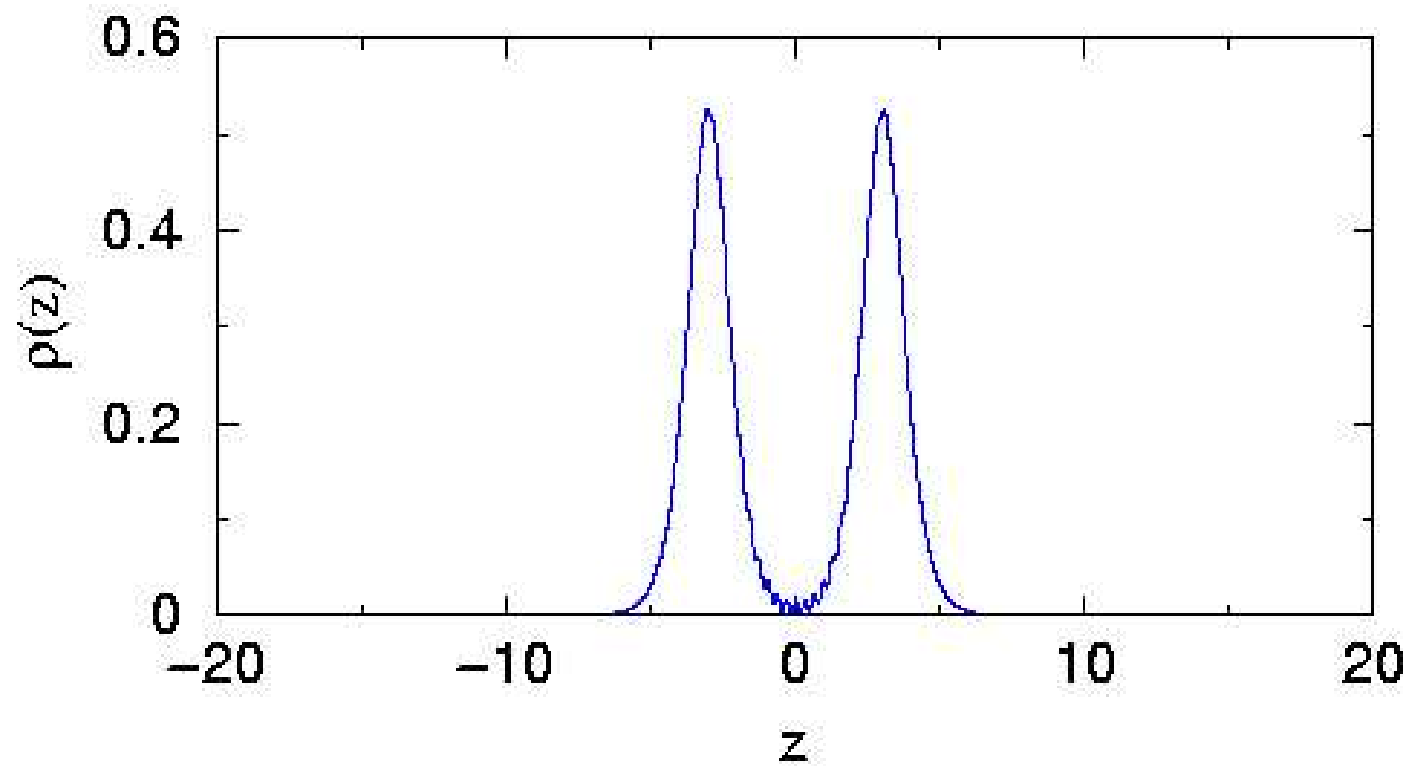
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



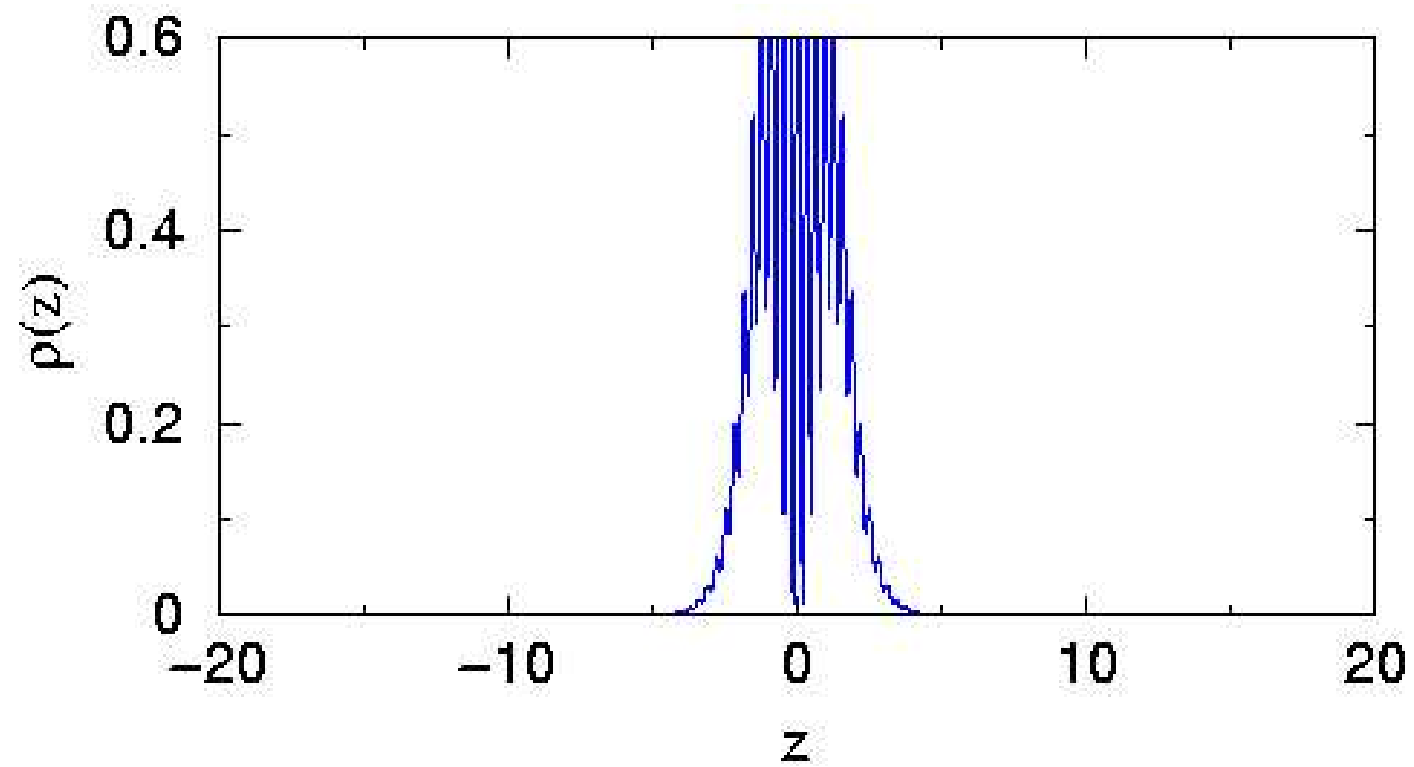
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



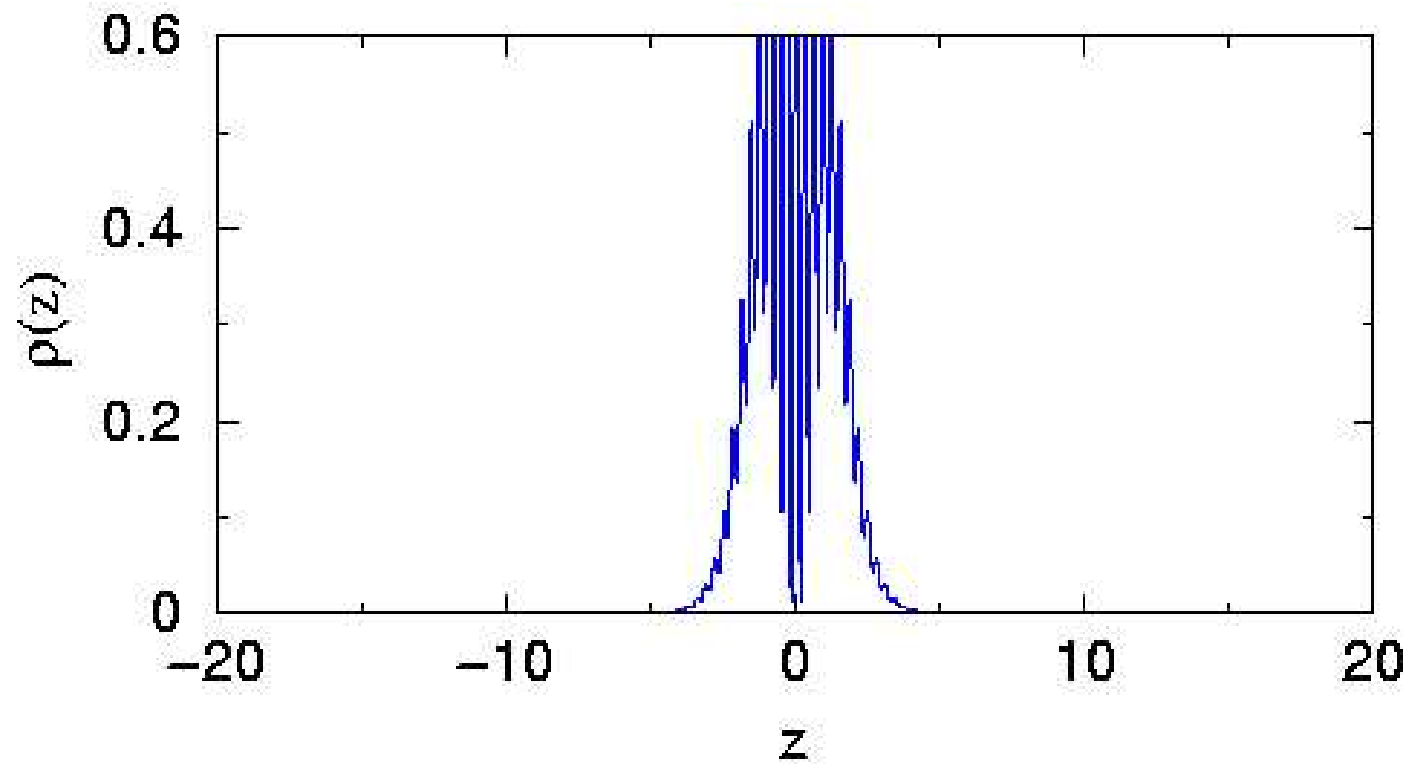
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



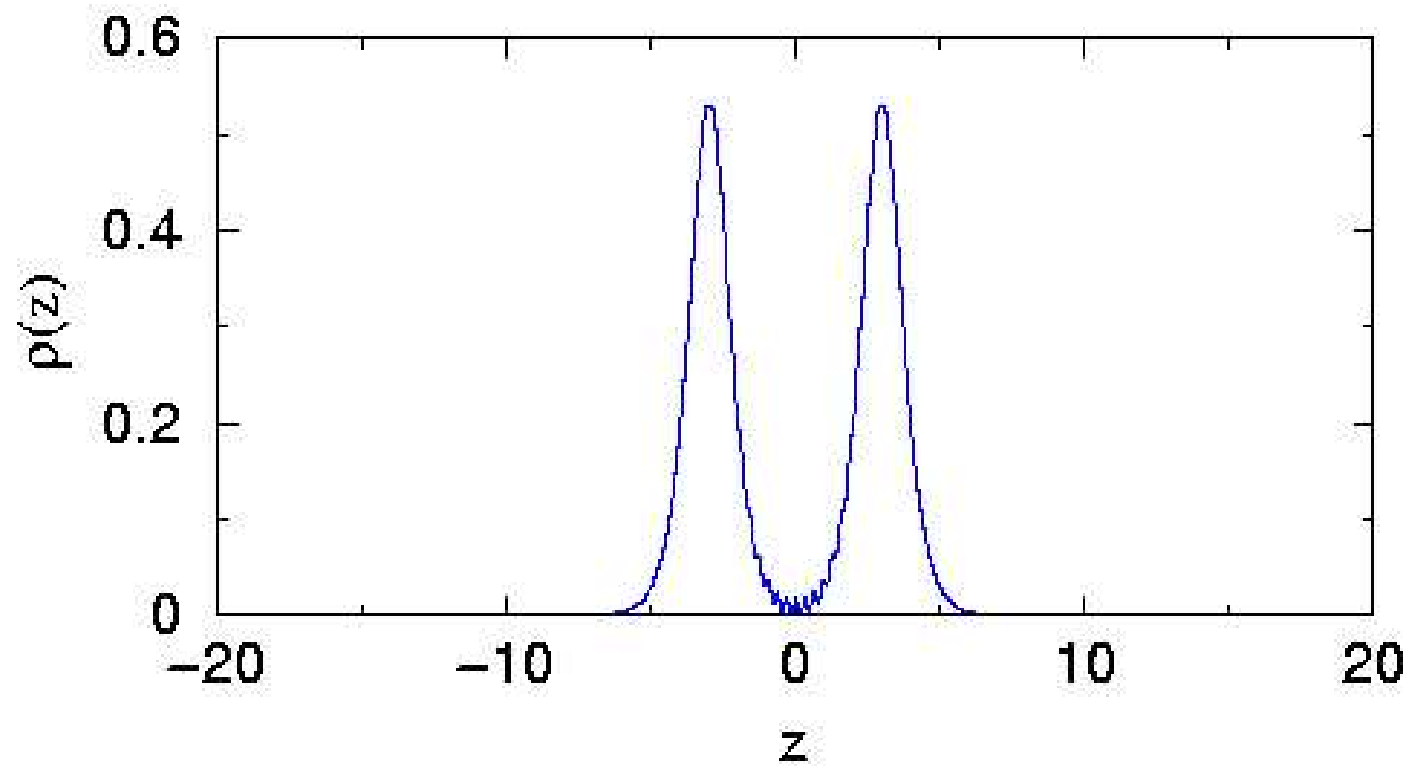
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



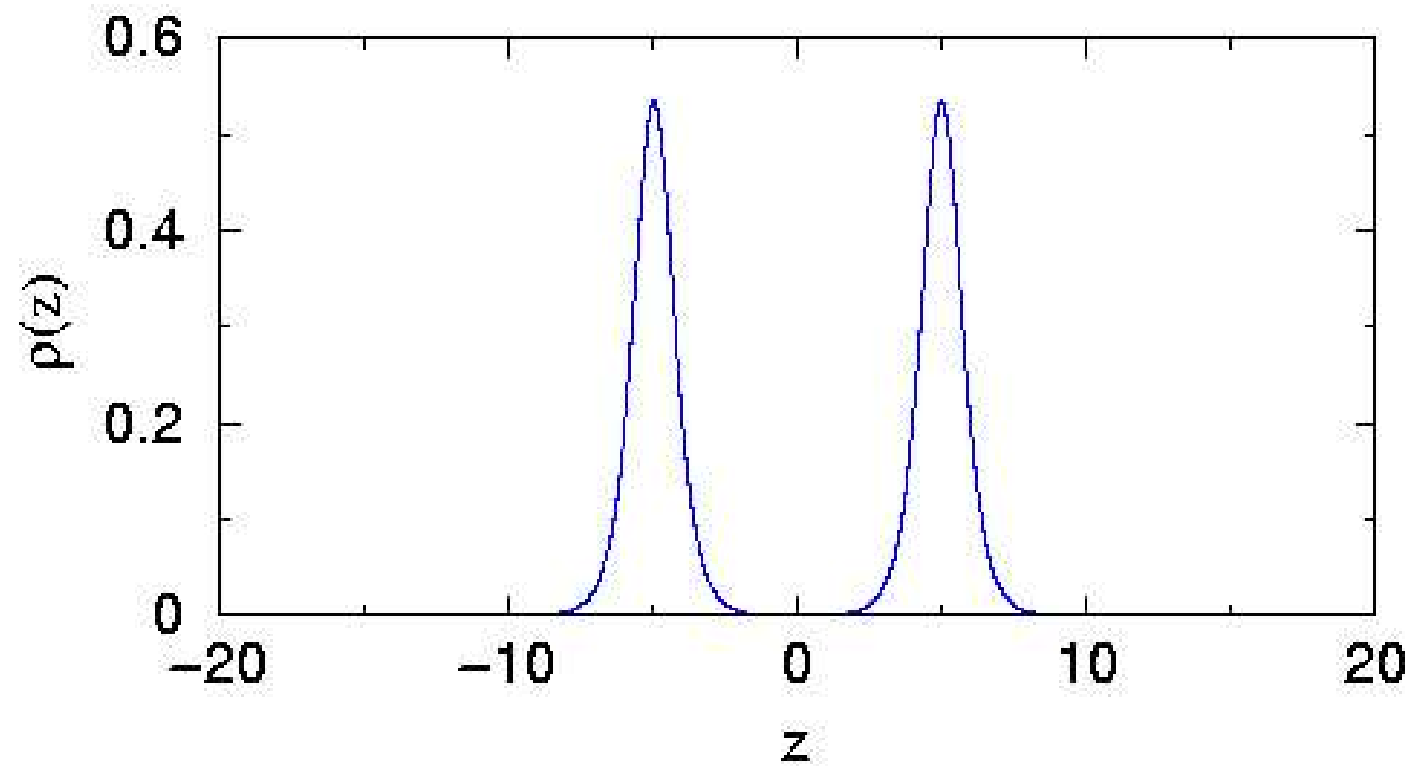
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



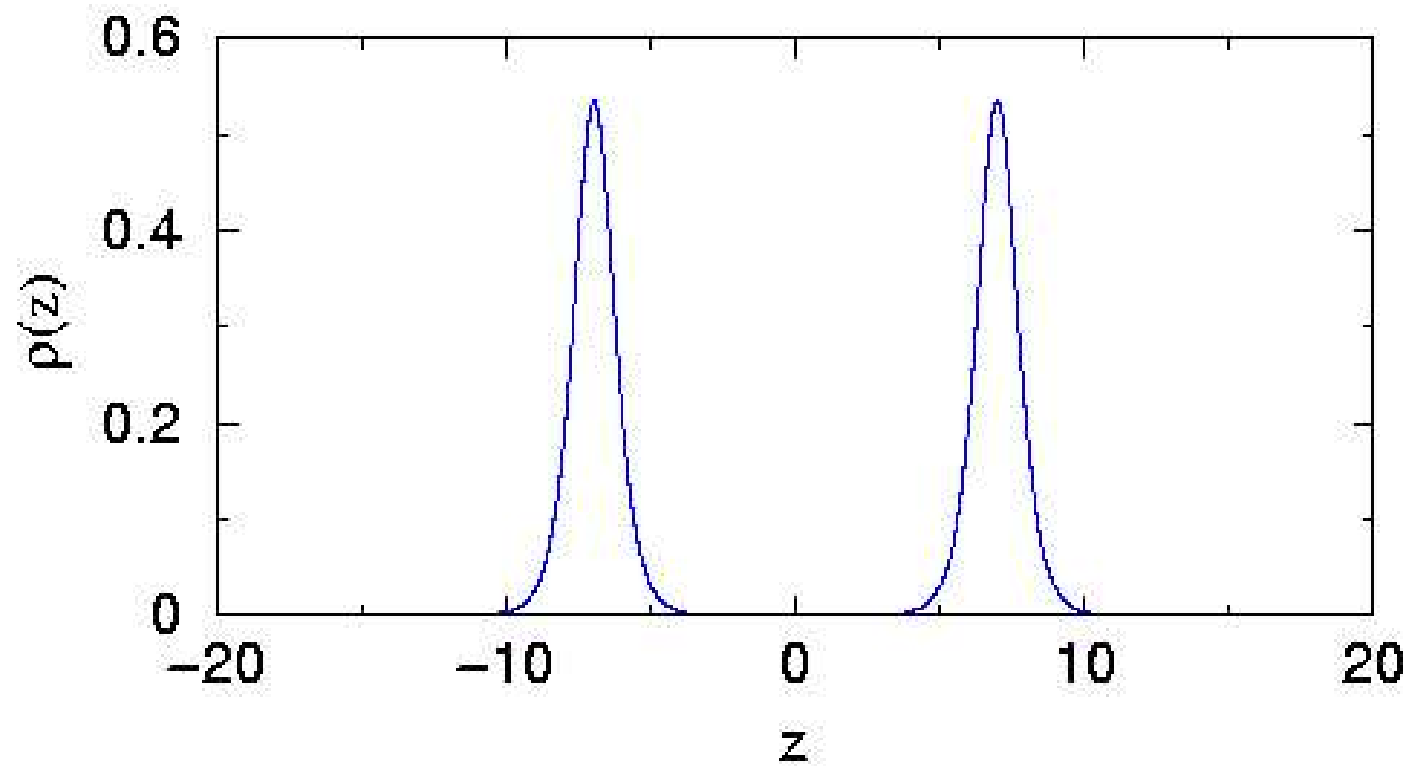
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



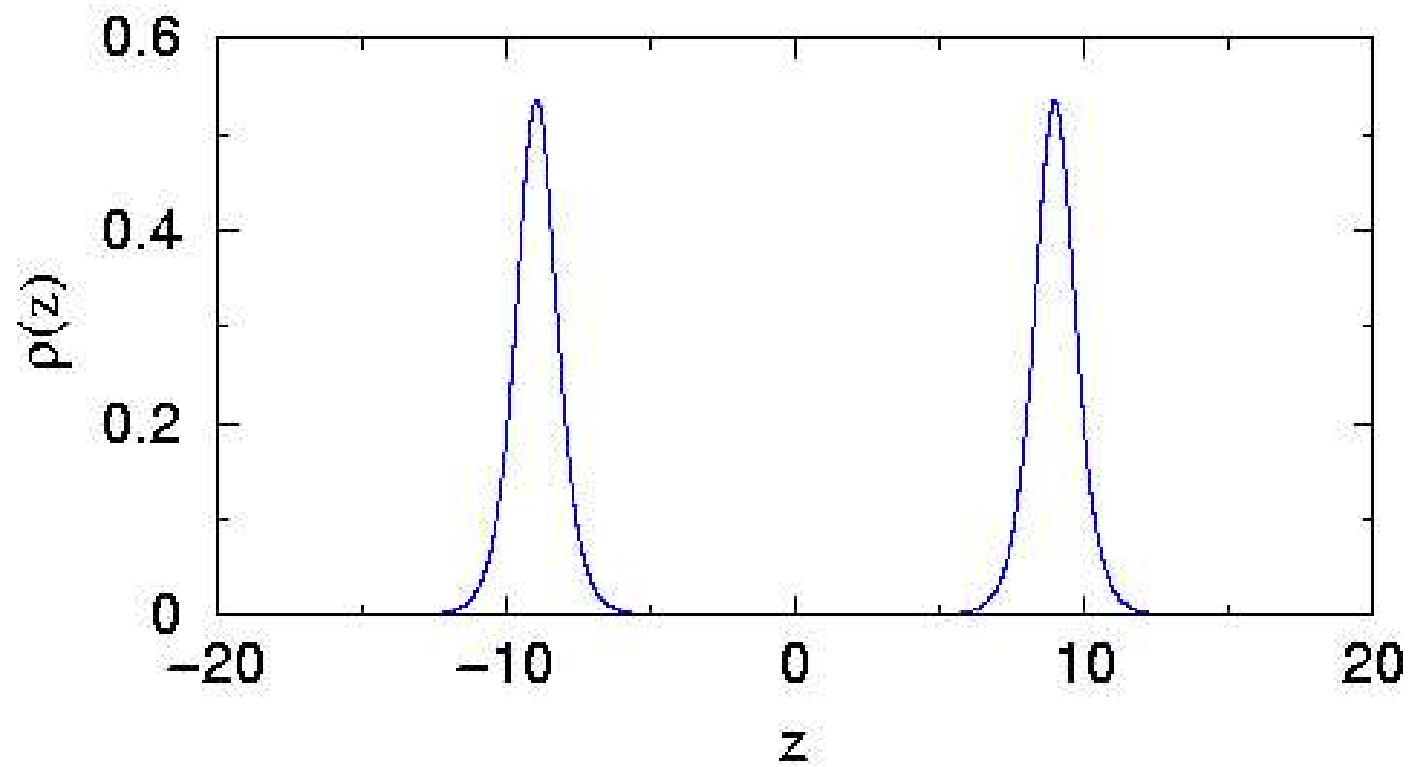
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



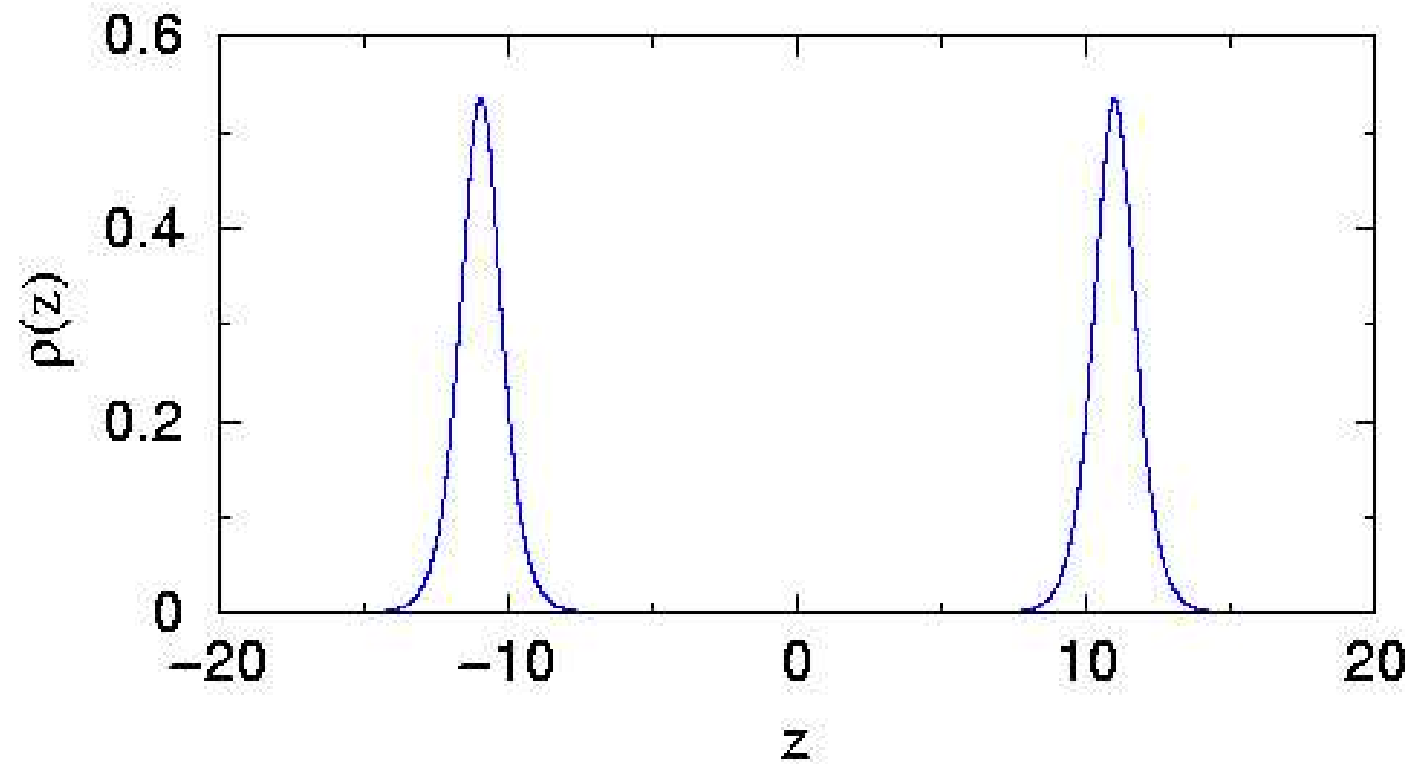
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



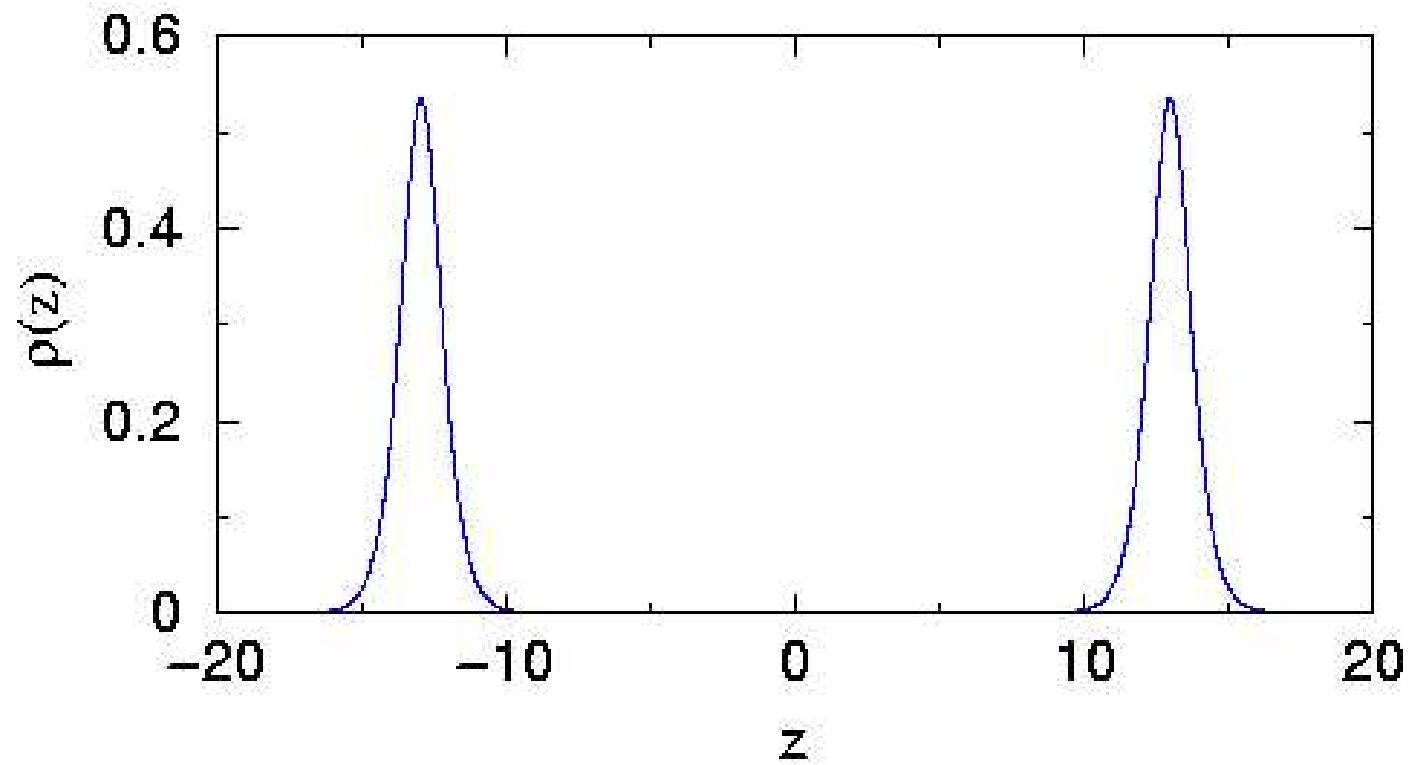
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



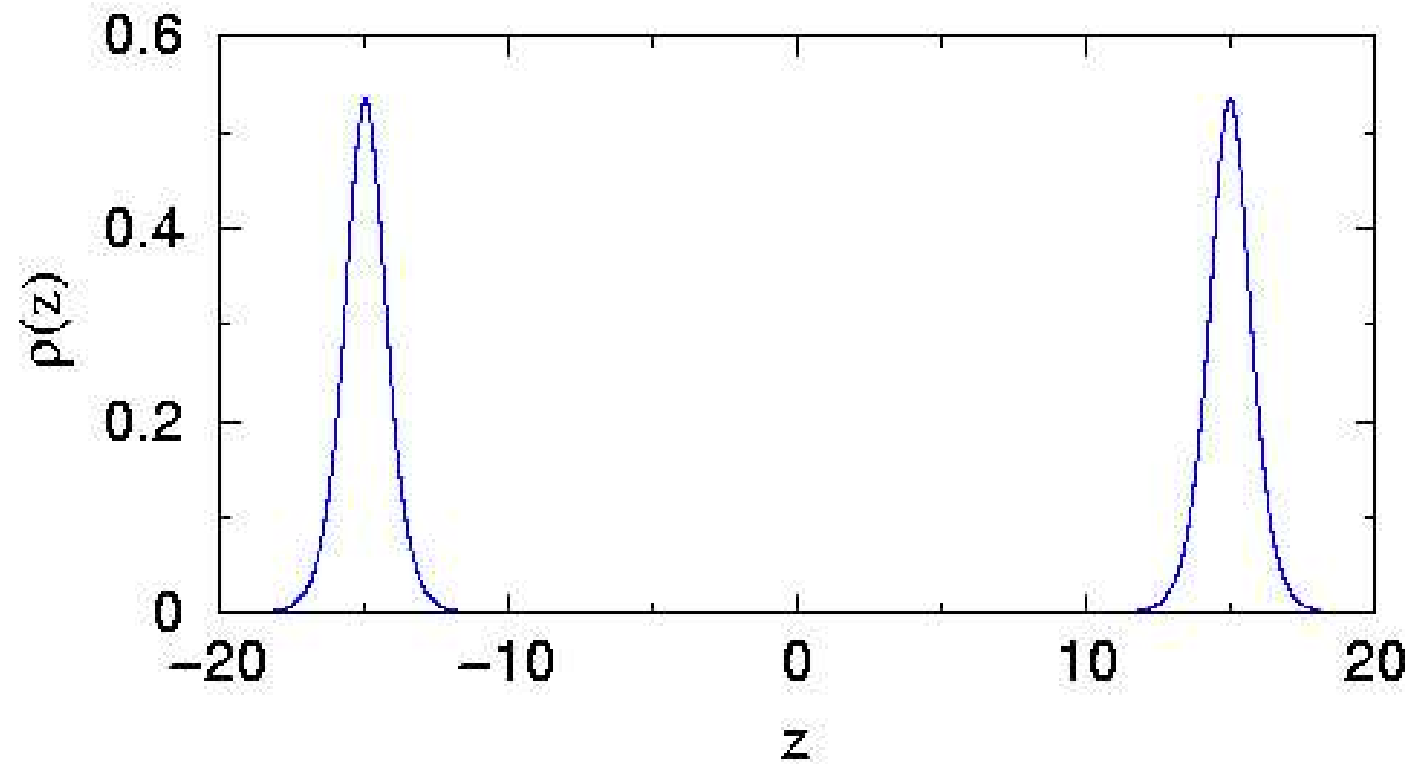
Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



Przykład nr 3:

Przykład nr 3:

Spowolnienie światła

Przykład nr 3:

Spowolnienie światła

W optycznie zmodyfikowanym ultrazimnym gazie atomowym spowolniono prędkość światła do **17 m/s**.
Dla porównania, w próżni $c = 300\,000\text{ km/s}$!

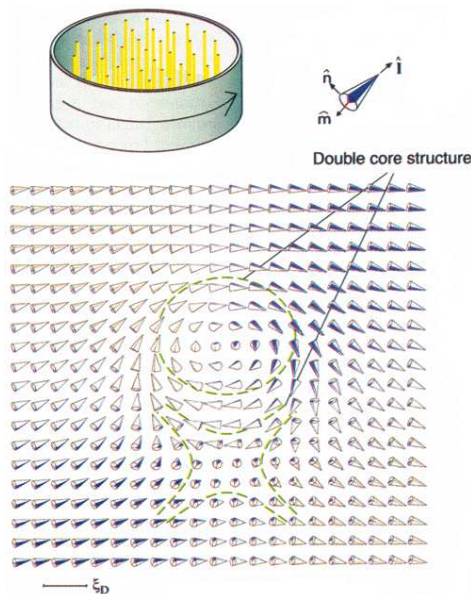
/ Lene Vestergard Hau, Cambridge (USA) /

Przykład nr 3:

Spowolnienie światła

W optycznie zmodyfikowanym ultrazimnym gazie atomowym spowolniono prędkość światła do **17 m/s**.
Dla porównania, w próżni $c = 300\,000\text{ km/s}$!

/ Lene Vestergard Hau, Cambridge (USA) /



Przypuszcza się, że za spowolnienie światła odpowiedzialne są wiry, podobnie jak w przypadku obracającej się czarnej dziury.

Przykład nr 4:

Przykład nr 4:

Zastępcze "czarne dziury"

Przykład nr 4:

Zastępcze "czarne dziury"

Istnieją próby zbudowania akustycznego modelu czarnej dziury, która może wybuchać emitując fonony. Proces wybuchu przypomina parowanie grawitacyjne czarnych dziur w wyniku promieniowania Hawkinga.

/ P. Zoller, I. Cirac i wsp., Uniwersytet w Innsbrucku (Austria) /

Przykład nr 4:

Zastępcze "czarne dziury"

Istnieją próby zbudowania akustycznego modelu czarnej dziury, która może wybuchać emitując fonony. Proces wybuchu przypomina parowanie grawitacyjne czarnych dziur w wyniku promieniowania Hawkinga.

/ P. Zoller, I. Cirac i wsp., Uniwersytet w Innsbrucku (Austria) /

Pojawiły się nawet spekulacje, że niewidzialna ciemna materia, która stanowi aż 90 % Wszechświata, może istnieć w formie kondensatu Bosego-Einsteina cząstek o bardzo małej masie wypełniających przestrzeń.

/ W. Hu i wsp., Princeton University (USA) /

Przykład nr 5:

Przykład nr 5:

Lasery atomowe

Przykład nr 5:

Lasery atomowe

Jest to spójny i swobodnie poruszający się fragment kondensatu Bosego-Einsteina. Niestety, wymagana jest do tego celu próżnia.

/ Th. Hänsch i wsp., Uniwersytet w Monachium (Niemcy) /

Przykład nr 5:

Lasery atomowe

Jest to spójny i swobodnie poruszający się fragment kondensatu Bosego-Einsteina. Niestety, wymagana jest do tego celu próżnia.

/ Th. Hänsch i wsp., Uniwersytet w Monachium (Niemcy) /

Przykład nr 6:

Przykład nr 5:

Lasery atomowe

Jest to spójny i swobodnie poruszający się fragment kondensatu Bosego-Einsteina. Niestety, wymagana jest do tego celu próżnia.

/ Th. Hänsch i wsp., Uniwersytet w Monachium (Niemcy) /

Przykład nr 6:

Atomtronika

Przykład nr 5:

Lasery atomowe

Jest to spójny i swobodnie poruszający się fragment kondensatu Bosego-Einsteina. Niestety, wymagana jest do tego celu próżnia.

/ Th. Hänsch i wsp., Uniwersytet w Monachium (Niemcy) /

Przykład nr 6:

Atomtronika

Za pomocą odpowiedniego łączenia kondensatów BE w układach ultrazimnych atomów można wytworzyć odpowiedniki odpowiedniki urządzeń elektronicznych

/ B.T. Seaman et al, University of Colorado, Boulder (USA) /

Dziękuję za uwagę.

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