

Lublin, 7 VI 2006

Nadciekłość w układach ultrazimnych atomów

T. Domański

Instytut Fizyki UMCS

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

Tematem tego Sympozjum są różne zjawiska fizyczne,
które mają miejsce w skali **nano**metra.

Tematem tego Sympozjum są różne zjawiska fizyczne, które mają miejsce w skali **nano**metra.

W obecnym referacie opiszę Państwu zagadnienie zjawiska *nadciekłości* atomów w pułapkach:

Tematem tego Sympozjum są różne zjawiska fizyczne, które mają miejsce w skali **nano**metra.

W obecnym referacie opiszę Państwu zagadnienie zjawiska *nadciekłości* atomów w pułapkach:

których rozmiary przestrzenne są rzędu nanometrów

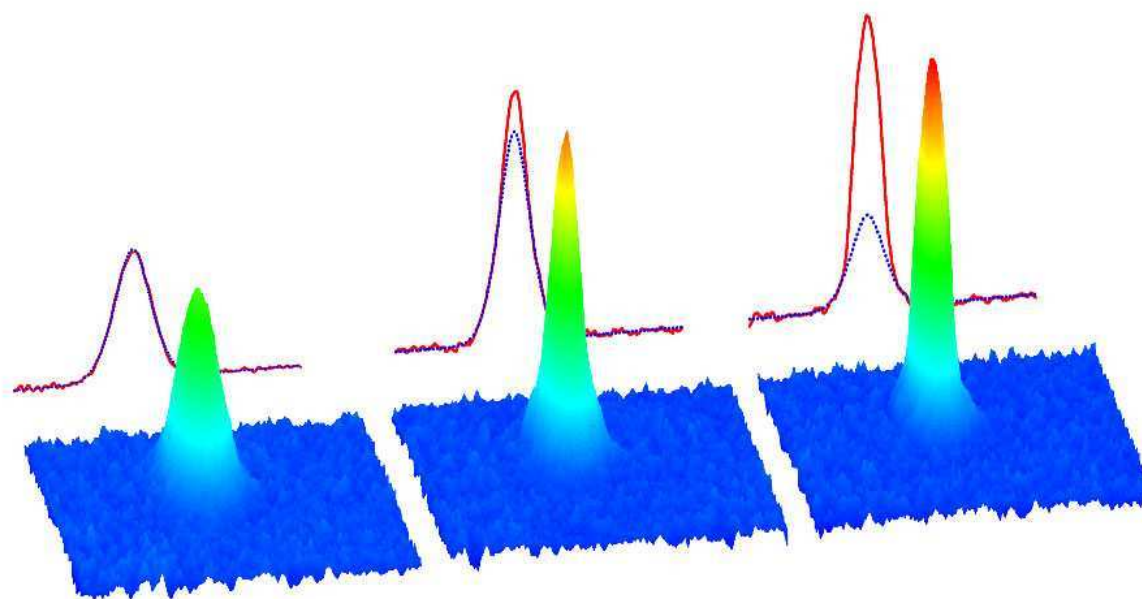
Tematem tego Sympozjum są różne zjawiska fizyczne, które mają miejsce w skali **nano**metra.

W obecnym referacie opiszę Państwu zagadnienie zjawiska *nadciekłości* atomów w pułapkach:

których rozmiary przestrzenne są rzędu nanometrów

po ochłodzeniu do ultraniskich temperatur kilkudziesięciu nanokelwinów.

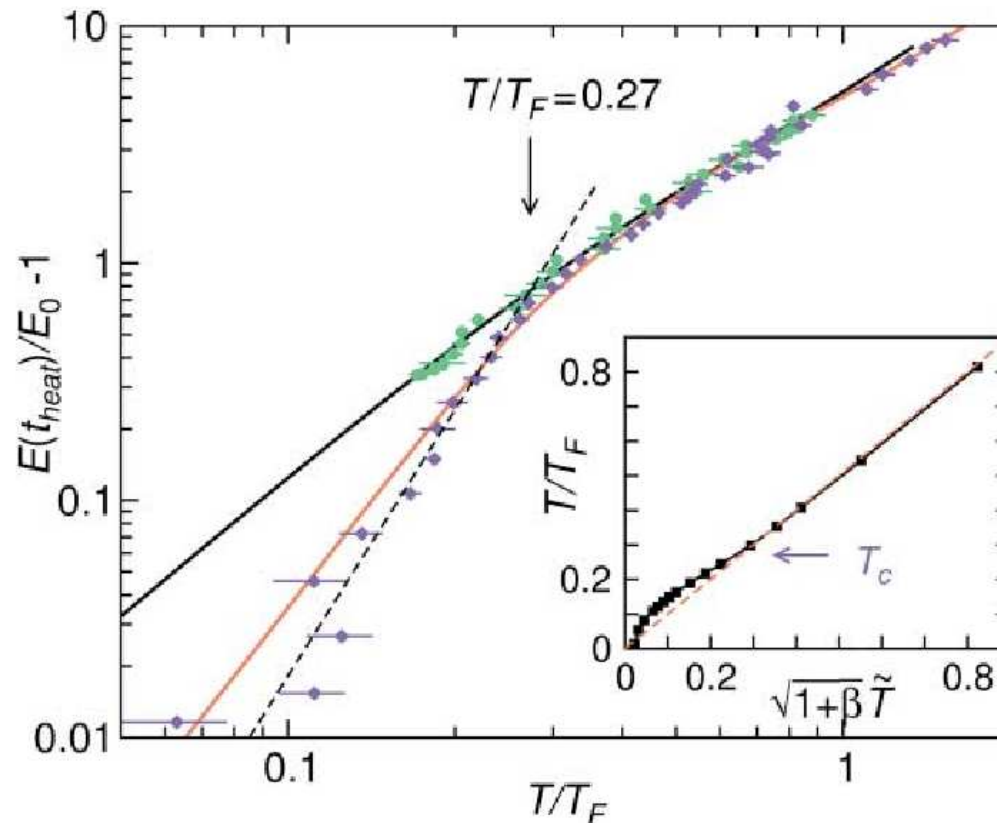
Dzięki rozwojowi technik pułapkowania i chłodzenia atomów do ultraniskich temperatur rzędu nK udało się wytworzyć kondensaty BE atomów typu bozonowego. W ostatnich 3 latach dokonano również kondensacji BE par atomów fermionowych.



$$T_c \simeq 0,2 T_F \quad (\sim 100 \text{ nK})$$

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

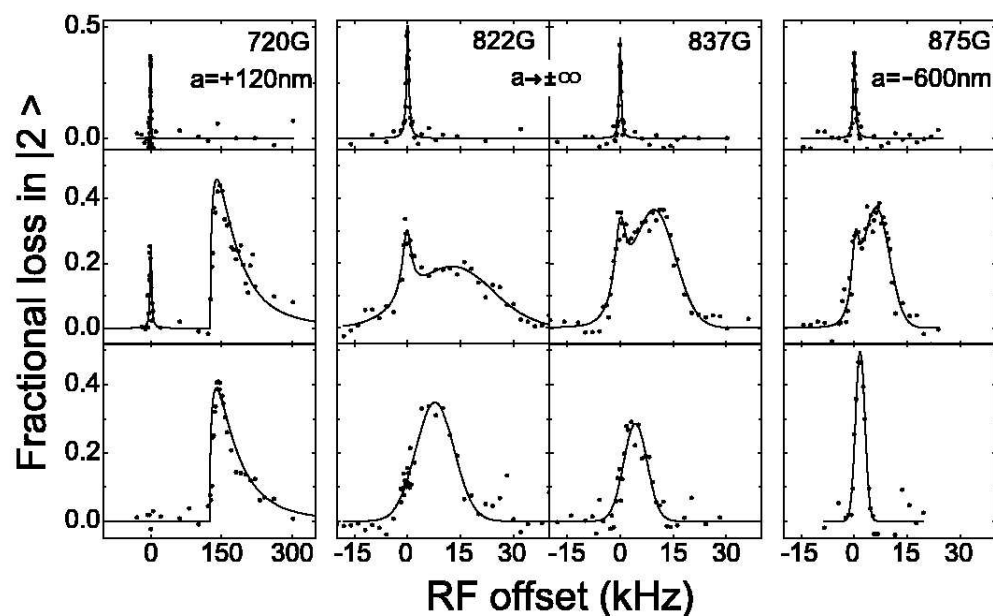
Pomiar ciepła właściwego pokazuje (pośrednio), że poniżej temperatury krytycznej T_c widmo wzbudzeń charakteryzuje się zależnością typową dla fazy nadciekłej.



Przejście do stanu nadciekłego

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

*Pomiar przerwy energetycznej w widmie wzbudzeń
jednocząstkowych za pomocą spektroskopii RF*



Pomiar przerwy energetycznej

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

Jednoznacznym dowodem potwierdzającym występowanie stanu nadciekłego było stwierdzenie istnienia wirów (rotonów), które układają się w strukturę sieci Abrikosova.

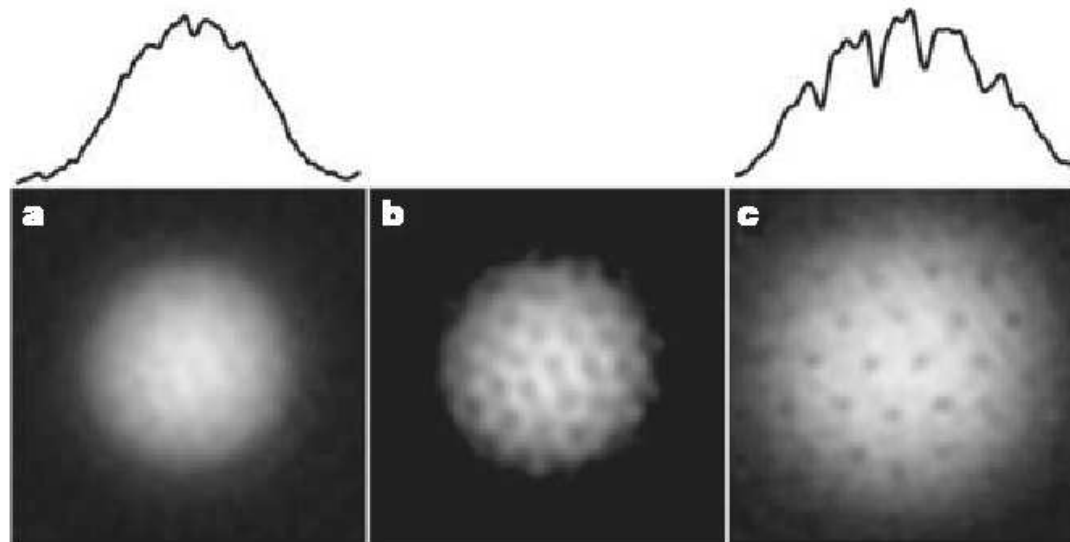


Figure 1 | Observation of a vortex lattice in a molecular condensate.

Rozkład przestrzenny wirów

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

Podstawowe informacje:

Podstawowe informacje:

Kondensacja Bosego-Einsteina polega na bardzo licznych zajmowaniu jednego stanu kwantowego przez wiele obiektów.

Podstawowe informacje:

Kondensacja Bosego-Einsteina polega na bardzo licznych zajmowaniu jednego stanu kwantowego przez wiele obiektów.

Kondensat BE jest podobny do *lasera*, czyli strumienia identycznych fotonów.

Podstawowe informacje:

Kondensacja Bosego-Einsteina polega na bardzo licznych zajmowaniu jednego stanu kwantowego przez wiele obiektów.

Kondensat BE jest podobny do *lasera*, czyli strumienia identycznych fotonów.

Jedynym kondensatem BE naturalnie występującym w przyrodzie jest *nadciekły hel ^4He* poniżej temperatury $T_c=4,2\text{ K}$.

Podstawowe informacje:

Kondensacja Bosego-Einsteina polega na bardzo licznych zajmowaniu jednego stanu kwantowego przez wiele obiektów.

Kondensat BE jest podobny do *lasera*, czyli strumienia identycznych fotonów.

Jedynym kondensatem BE naturalnie występującym w przyrodzie jest *nadciekły hel ^4He* poniżej temperatury $T_c=4,2\text{ K}$.

Silne oddziaływania sprawiają, że kondensacji BE ulega tam mniej niż *10 %* atomów.

Podstawowe informacje:

Kondensacja Bosego-Einsteina polega na bardzo liczny
zajmowaniu jednego stanu kwantowego przez wiele obiektów.

Kondensat BE jest podobny do *lasera*, czyli strumienia
identycznych fotonów.

Jedynym kondensatem BE naturalnie występującym w przyrodzie
jest *nadciekły hel ^4He* poniżej temperatury $T_c=4,2\text{ K}$.

Silne oddziaływania sprawiają, że kondensacji BE ulega tam
mniej niż *10 %* atomów.

Oddziaływania są jednak konieczne aby z kondensatu BE uzyskać
stan *nadciekły*.

Podstawowe informacje:

Kondensacja Bosego-Einsteina polega na bardzo liczny
zajmowaniu jednego stanu kwantowego przez wiele obiektów.

Kondensat BE jest podobny do *lasera*, czyli strumienia
identycznych fotonów.

Jedynym kondensatem BE naturalnie występującym w przyrodzie
jest *nadciekły hel* ^4He poniżej temperatury $T_c=4,2\text{ K}$.

Silne oddziaływania sprawiają, że kondensacji BE ulega tam
mniej niż *10 %* atomów.

Oddziaływania są jednak konieczne aby z kondensatu BE uzyskać
stan *nadciekły*.

Przez wiele lat poszukiwano kondensatów BE innych niż ^4He .

Podstawowe informacje:

Kondensacja Bosego-Einsteina polega na bardzo licznym zajmowaniu jednego stanu kwantowego przez wiele obiektów.

Kondensat BE jest podobny do *lasera*, czyli strumienia identycznych fotonów.

Jedynym kondensatem BE naturalnie występującym w przyrodzie jest *nadciekły hel* ^4He poniżej temperatury $T_c=4,2\text{ K}$.

Silne oddziaływania sprawiają, że kondensacji BE ulega tam mniej niż *10 %* atomów.

Oddziaływania są jednak konieczne aby z kondensatu BE uzyskać stan *nadciekły*.

Przez wiele lat poszukiwano kondensatów BE innych niż ^4He .

Osiągnięto to dopiero w 1995 r. dla atomów w pułapkach po odpowiednim ochłodzeniu do bardzo niskich temperatur.

Temperatura T_c , poniżej której dochodzi do kondensacji jest odwrotnie proporcjonalna do masy obiektu.

Kondensaty BE próbowano uzyskać z najlżejszych atomów takimi jak różne izotopy **metali alkalicznych**, gdzie:

Z – liczba nieparzysta

Z obiektami typu fermionowego mamy do czynienia wówczas, gdy liczba $Z + A$ jest nieparzysta. Dla alkaliów zachodzi to gdy:

A – liczba parzysta

Przykłady

⁶Li

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

⁴⁰K

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:

Typowe wartości liczbowe:

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

Typowe wartości liczbowe:

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

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

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

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 $10 - 100 \text{ nK}$

Typowe wartości liczbowe:

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

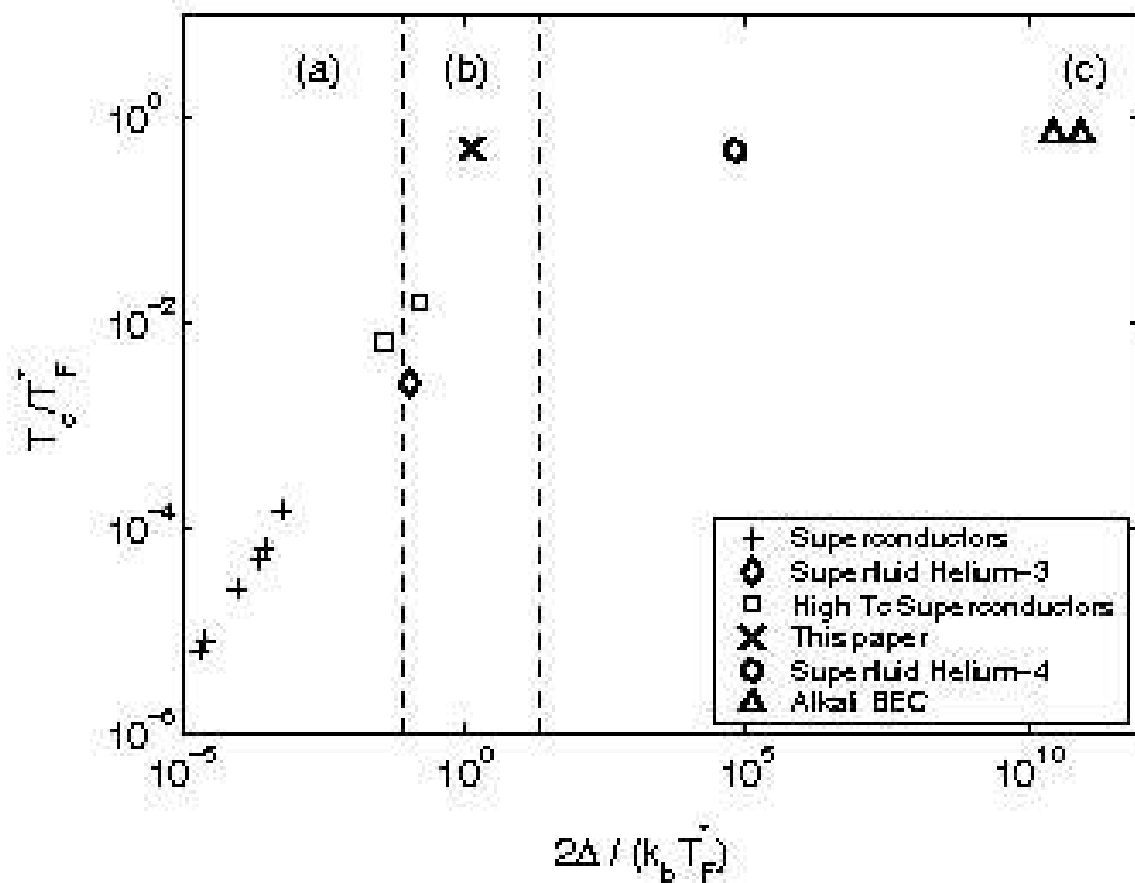
koncentracje spulapkowanych atomów
wynoszą 10^{13} cm^{-3}

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



[5] M. Holland *et al*, Phys. Rev. Lett. **87**, 120406 (2001).

*Kluczowe znaczenie dla powstania
stanu nadciekłego mają:*

*Kluczowe znaczenie dla powstania
stanu nadciekłego mają:*



rezonans Feshbacha

/oddziaływania indukowane polem magnetycznym/

*Kluczowe znaczenie dla powstania
stanu nadciekłego mają:*



rezonans Feshbacha

/oddziaływania indukowane polem magnetycznym/



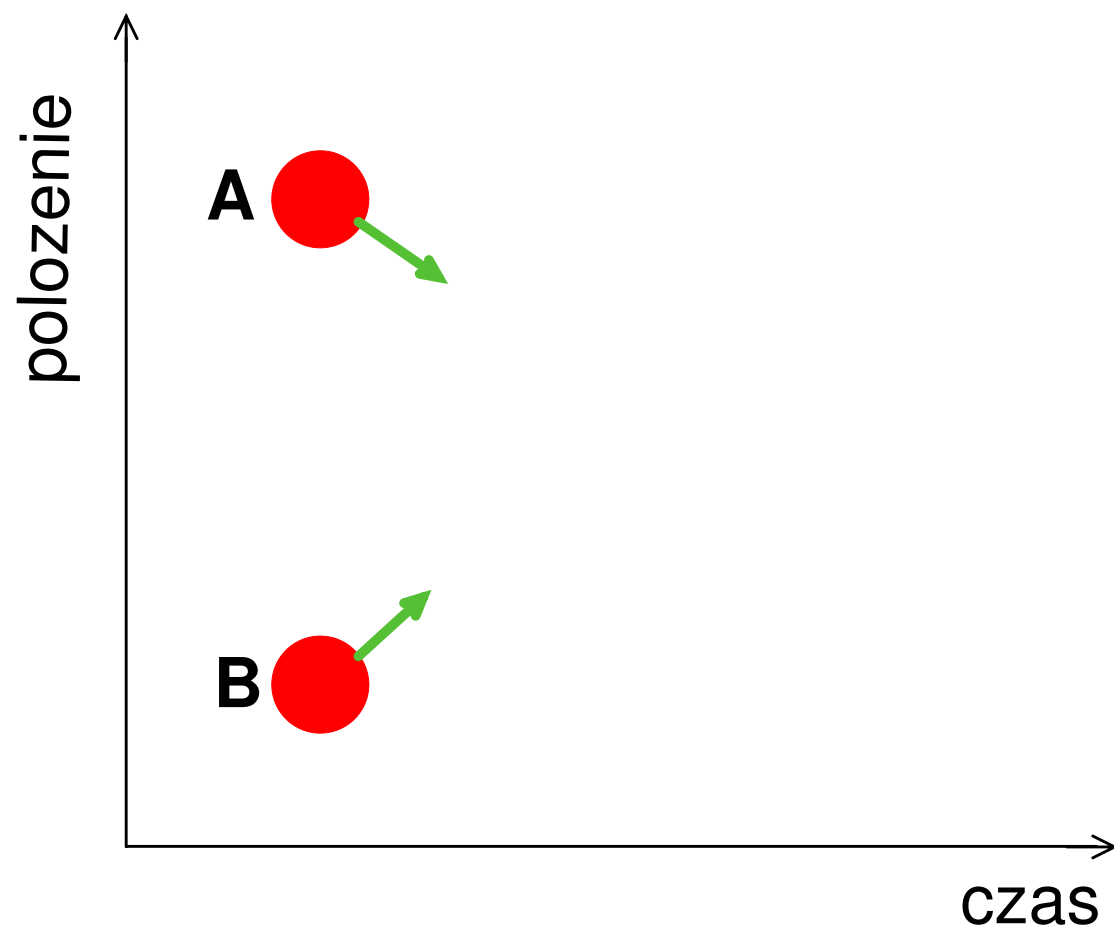
przejście od granicy BCS do BEC

/kontrolowalna realizacja koncepcji Leggett'a/

Idea rezonansowego oddziaływania

Idea rezonansowego oddziaływania

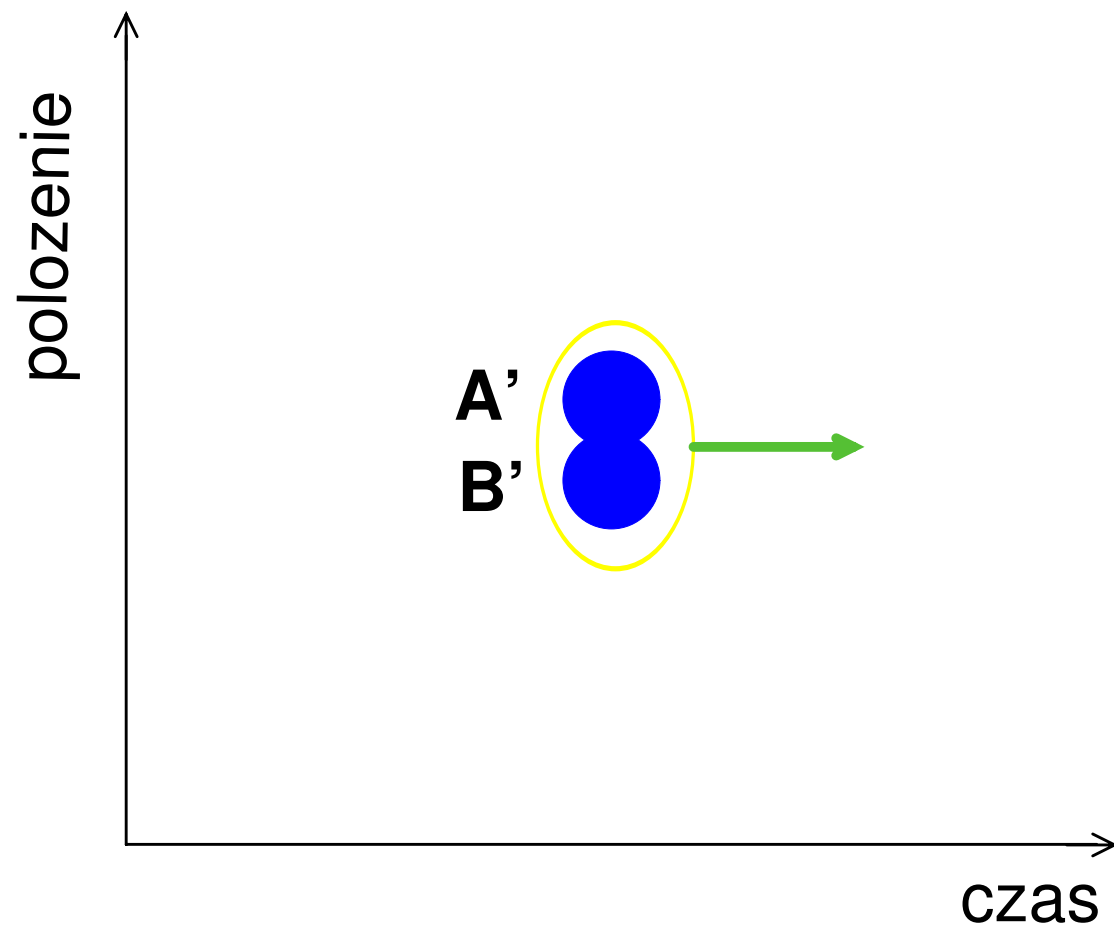
Wyobraźmy sobie dwa zderzające się ze sobą atomy ...



tzw. open channel

Idea rezonansowego oddziaływania

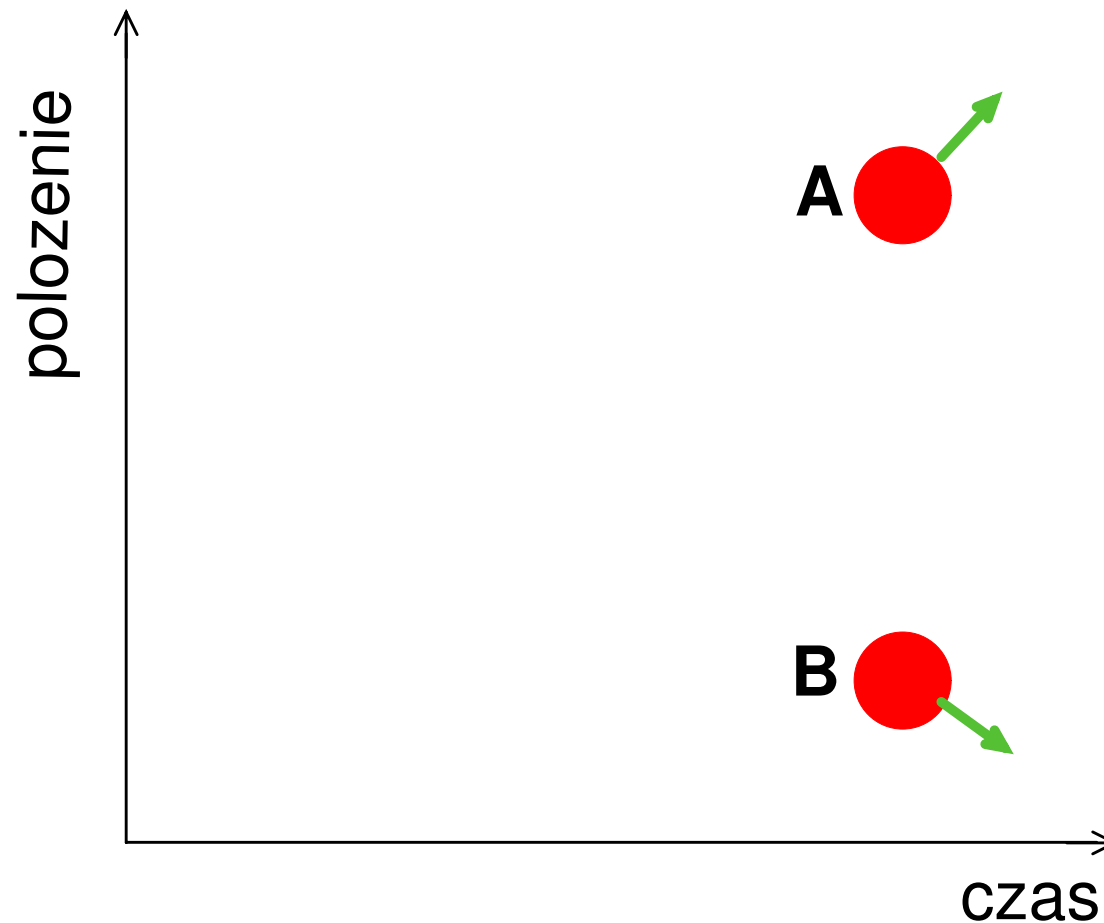
... które przez krótki czas wiążą się w bi-molekułę ...



tzw. closed channel

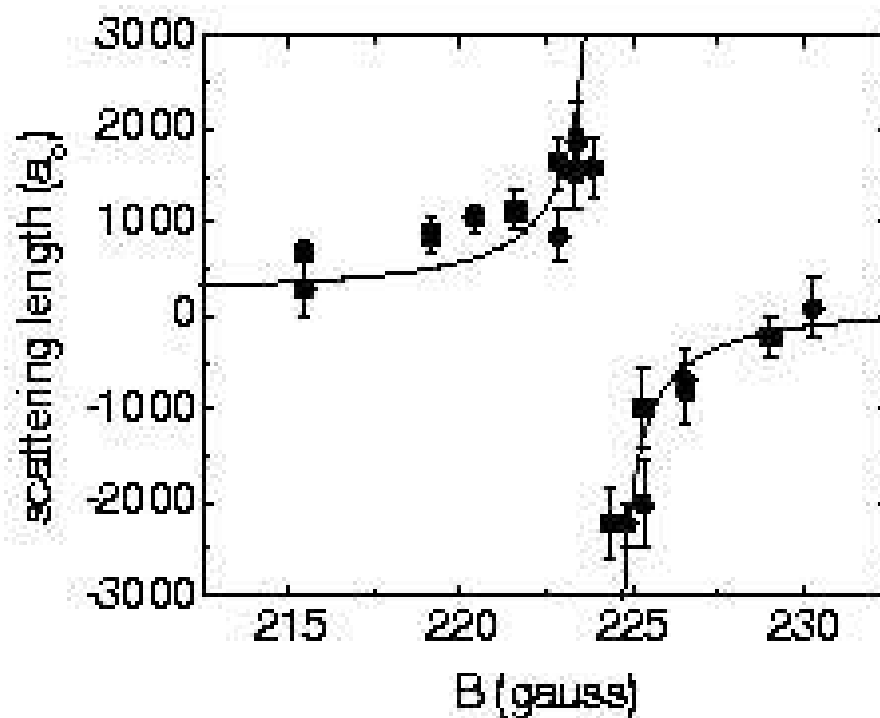
Idea rezonansowego oddziaływania

a następnie znów rozpadają się na wyjściowe składniki.

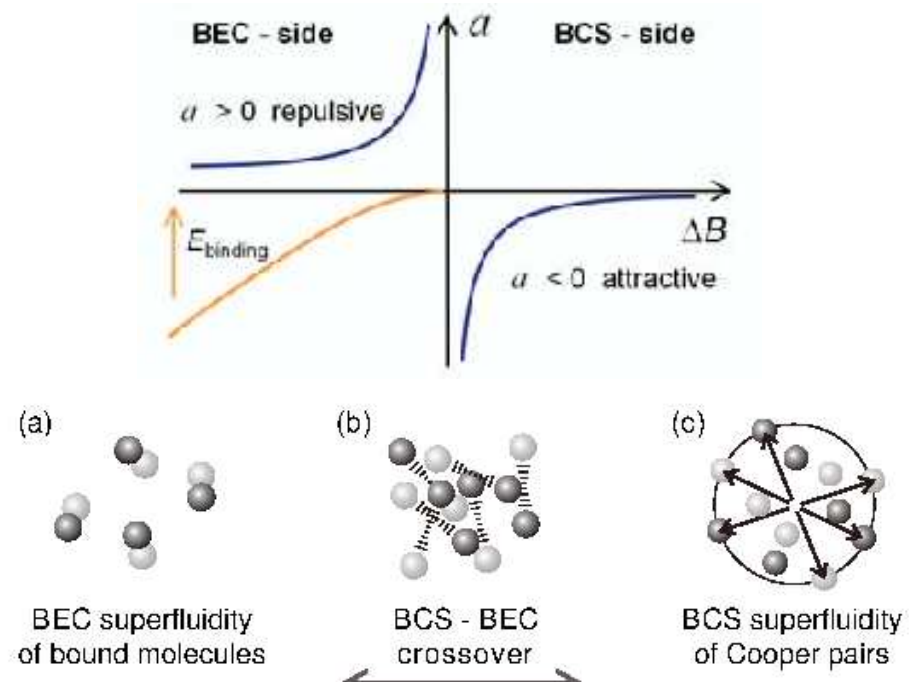


tzw. open channel

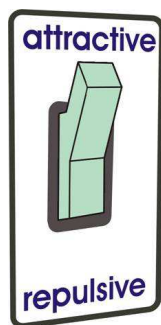
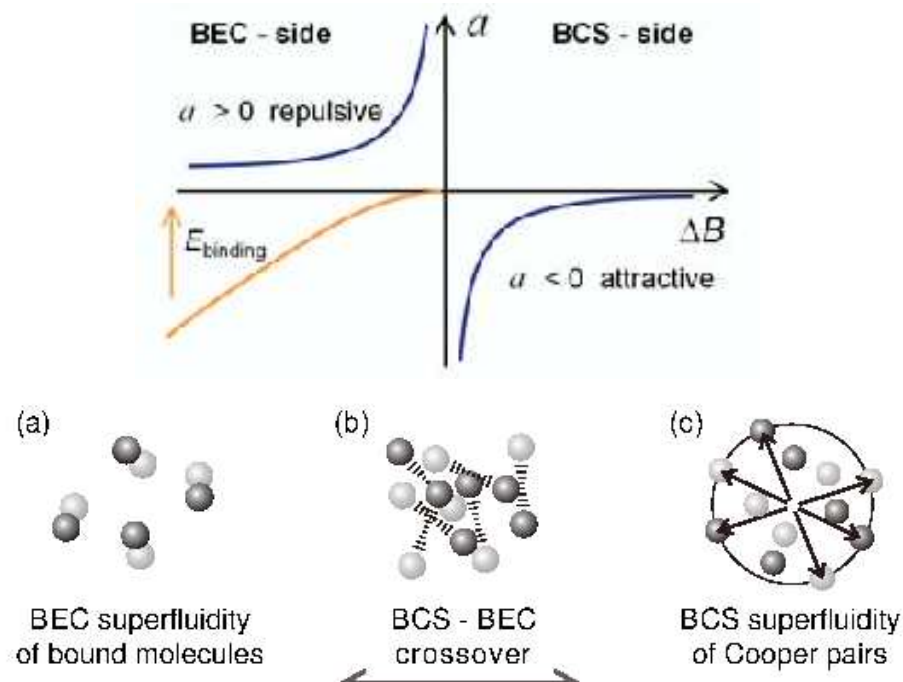
Jeżeli suma energii zderzających się atomów jest bliska energii wiązania bi-molekuły, to efektywny potencjał rozpraszania ma charakter rozbieżny.



Zmieniając pole magnetyczne realizowane są przypadki:



Zmieniając pole magnetyczne realizowane są przypadki:



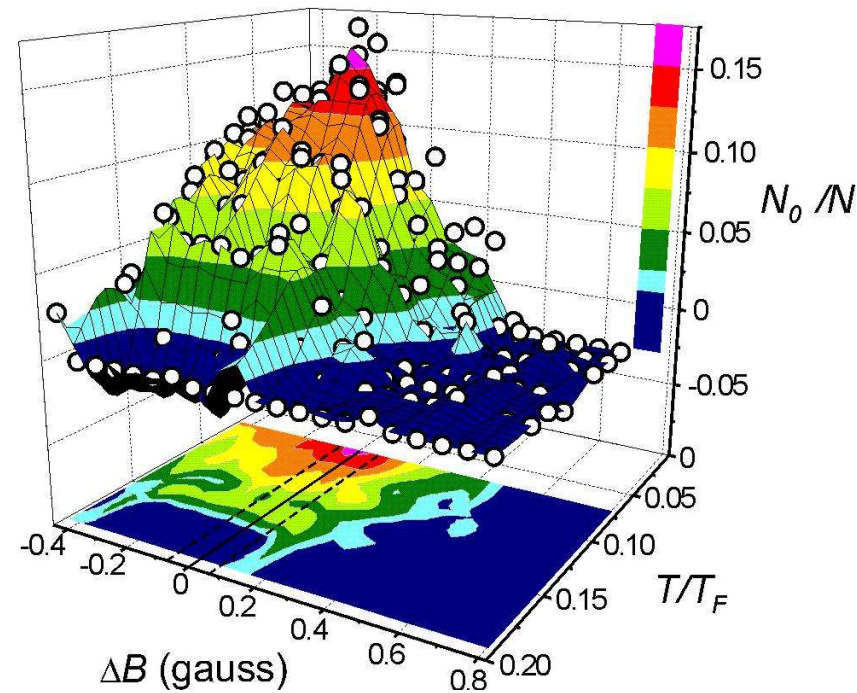
W kontrolowany sposób takie „przełączanie” jest obecnie wykonywane w kilku laboratoriach:

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

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

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

Kondensat BE par fermionowych



Frakcja skondensowanych par atomów typu fermionowego
mierzona względem $\Delta B = B - B_0$ i temperatury T/T_F .

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

Pod względem teoretycznym *rezonansowe oddziaływanie* można opisać modelem bozonowo-fermionowym [7]

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

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

a_{bg} — słabe oddziaływanie tła

g — oddziaływanie molekuł z atomami

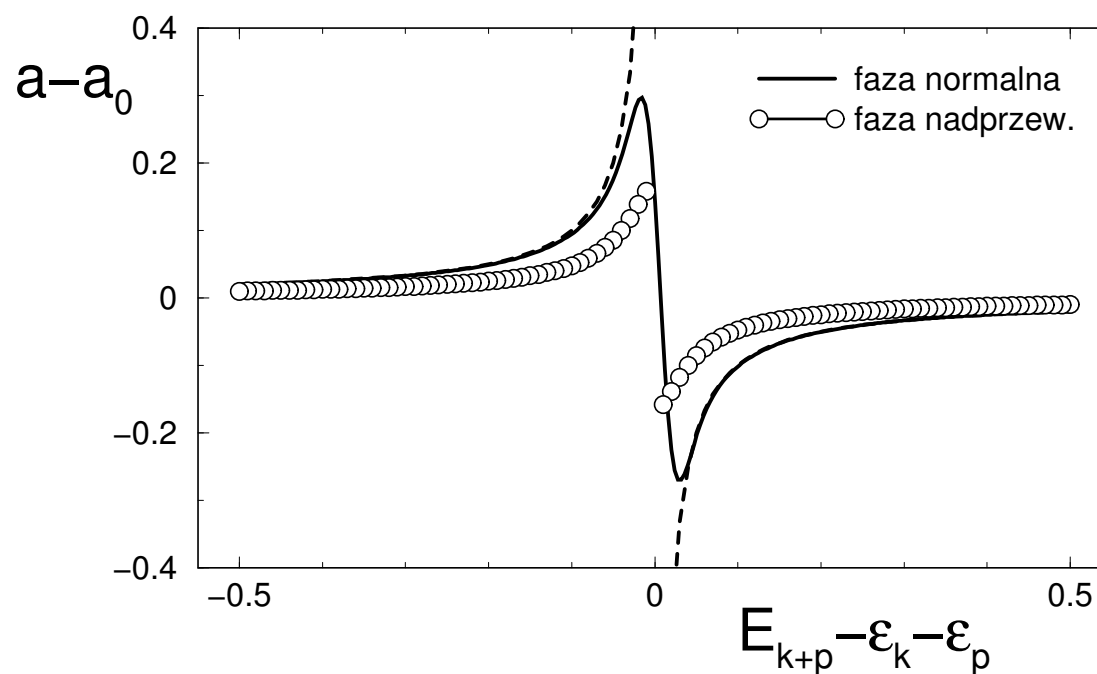
δ — odległość od rezonansu

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

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

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

Wyniki samouzgodnionych obliczeń przy użyciu metody ciągłej transformacji kanonicznej.

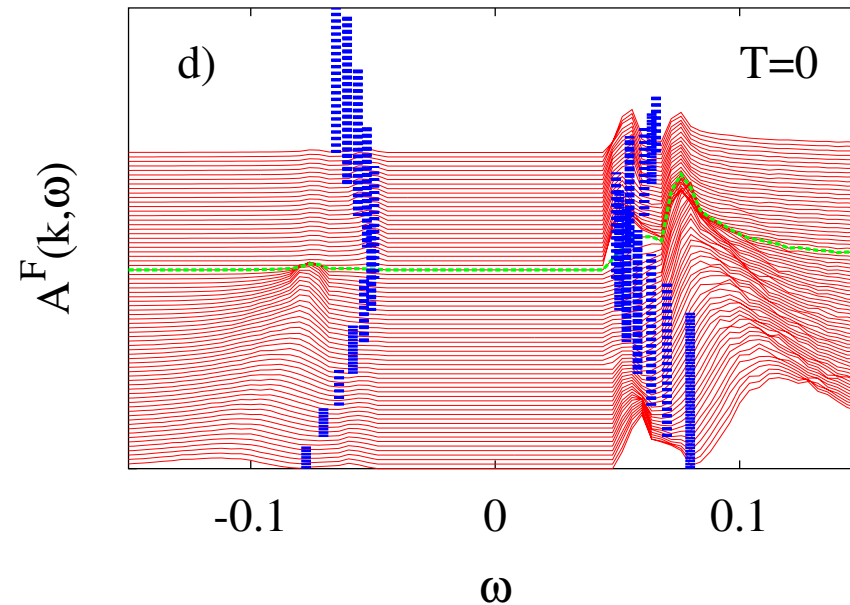


Wyniki: część 1

/nadciekłość w pobliżu rezonansu Feshbacha/

Wzbudzenia typu Bogoliubowa

$$T < T_c$$

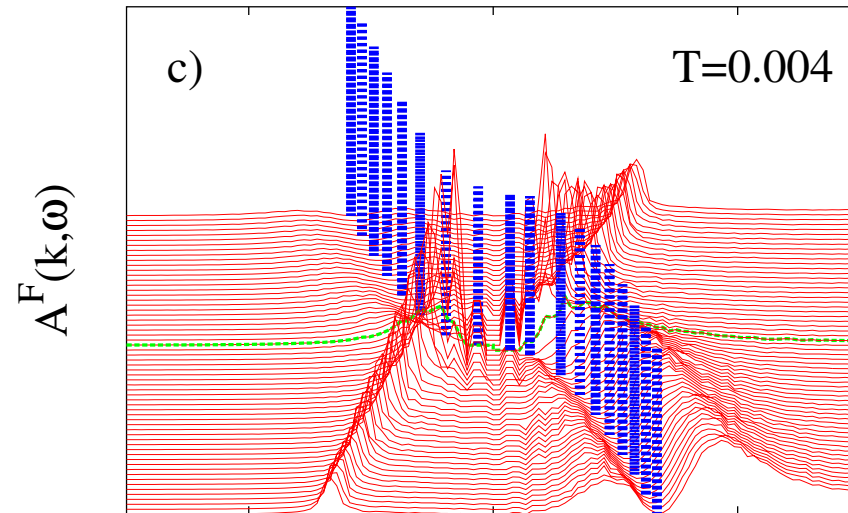


W fazie nadciekłej widmo wzbudzeń składa się z dwóch gałęzi Bogoliubowa oddzielonych od siebie przerwą energetyczną. Stany w przerwie są zabronione.

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

Wzbudzenia typu Bogoliubowa

$$T < T^*$$

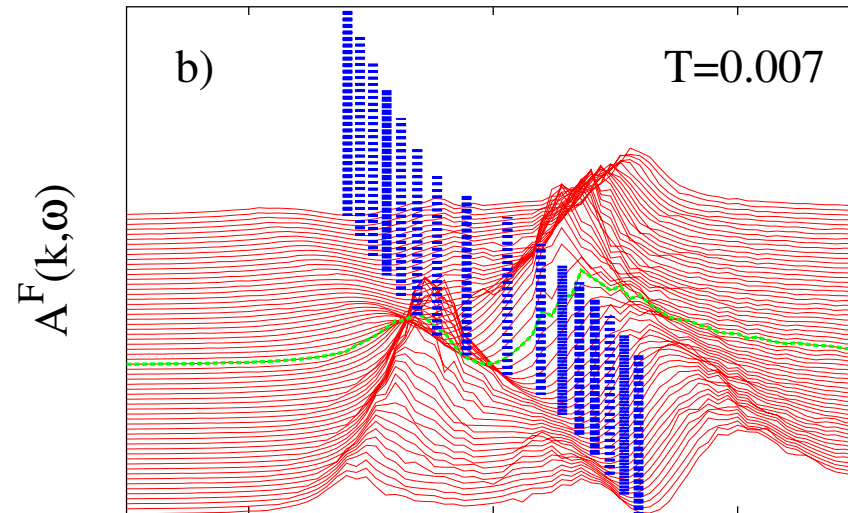


Powyżej temperatury krytycznej T_c wzbudzenia typu Bogoliubowa są nadal widoczne, chociaż jedna gałąź (tzw. cień Bogoliubowa) staje się rozmyta.

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

Wzbudzenia typu Bogoliubowa

$$T < T^*$$

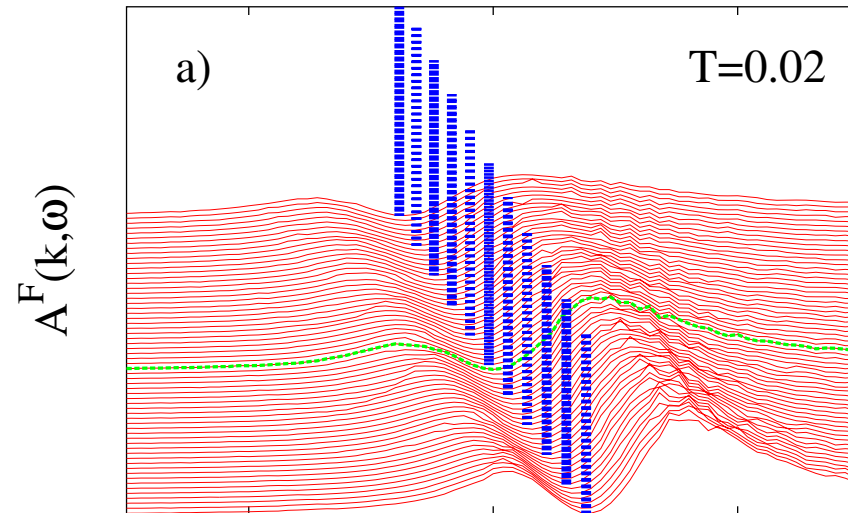


Powyżej temperatury krytycznej T_c wzbudzenia typu Bogoliubowa są nadal widoczne, chociaż jedna gałąź (tzw. cień Bogoliubowa) staje się rozmyta.

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

Wzbudzenia typu Bogoliubowa

$$T > T^*$$



Wzbudzenia typu Bogoliubowa zanikają dopiero powyżej temperatury T^* , która znacznie przewyższa T_c .

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

Wnioski dotyczące części 1:

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

Nawet powyżej temperatury krytycznej istnieje przerwa energetyczna w jednocząstkowym widmie wzbudzeń

O ewentualnym istnieniu fazy nadciekłej mogą jednoznacznie świadczyć jedynie kolektywne efekty takie jak: "pierwszy dźwięk", sieć skwantowanych wirów, itp.

Wyniki: część 2

/efekty dynamiczne w pobliżu rezonansu Feshbacha/

W pobliżu rezonansu Feshbacha:

- można pominąć oddziaływanie tła a_{bg} ,
- oraz zaniedbać stany molekularne poza kondensatem BE.

Stosując tzw. *single mode approach* otrzymujemy Hamiltonian w postaci biliniowej [12,13]

$$H = \sum_{\mathbf{k}, \sigma} \xi_{\mathbf{k}} c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger} c_{\mathbf{k}\sigma} + E_0(t) b_0^{\dagger} b_0 + g \sum_{\mathbf{k}} \left(b_0^{\dagger} c_{-\mathbf{k}\downarrow} c_{\mathbf{k}\uparrow} + h.c. \right)$$

gdzie $\xi_{\mathbf{k}} = \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m} - \mu$ oraz $E_{\mathbf{q}}(t) = \frac{\hbar^2 \mathbf{q}^2}{2m} + \delta(t) - 2\mu$.

[12] A.V. Andreev, V. Gurarie, L. Radzihovsky, Phys. Rev. Lett. **93**, 130402 (2004).

[13] R.A. Barankov and L.S. Levitov, Phys. Rev. Lett. **93**, 130403 (2004).

Wprowadzając notację (pseudospinów) Andersona [14]

$$\sigma_{\mathbf{k}}^+ \equiv c_{-\mathbf{k}\downarrow} c_{\mathbf{k}\uparrow}$$

$$\sigma_{\mathbf{k}}^- \equiv c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger$$

$$\sigma_{\mathbf{k}}^z \equiv 1 - c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{\mathbf{k}\uparrow} - c_{\mathbf{k}\downarrow}^\dagger c_{\mathbf{k}\downarrow}$$

możemy przedstawić Hamiltonian jako

$$H = - \sum_{\mathbf{k}} \xi_{\mathbf{k}} \sigma_{\mathbf{k}}^z + g \sum_{\mathbf{k}} (b_0 \sigma_{\mathbf{k}}^- + b_0^\dagger \sigma_{\mathbf{k}}^+) + E_0 b_0^\dagger b_0$$

Otrzymujemy równania Heisenberga w postaci [12,13]

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \sigma_{\mathbf{k}}^+}{\partial t} &= 2\xi_{\mathbf{k}} \sigma_{\mathbf{k}}^+ + g b_0 \sigma_{\mathbf{k}}^z \\ i\hbar \frac{\partial \sigma_{\mathbf{k}}^z}{\partial t} &= 2g (b_0^\dagger \sigma_{\mathbf{k}}^+ - b_0 \sigma_{\mathbf{k}}^-) \\ i\hbar \frac{\partial b_0}{\partial t} &= E_0 b_0 + g \sum_{\mathbf{k}} \sigma_{\mathbf{k}}^+ \end{aligned}$$

[14] P.W. Anderson, Phys. Rev. **112**, 1900 (1958).

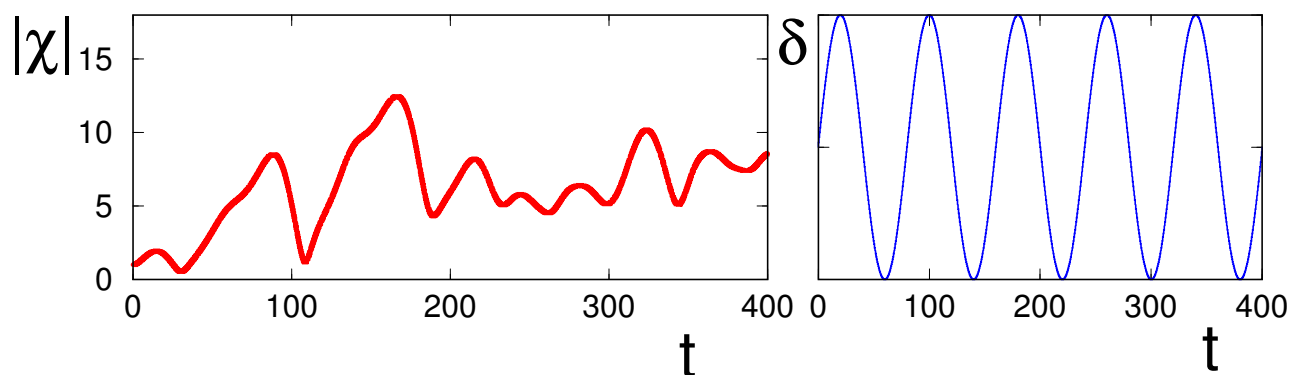
Równania Heisenberga rozwiązaliśmy numerycznie,
w szczególności obliczając parametr porządku

$$b(t) = \langle b_0 \rangle$$
$$\chi(t) = \sum_{\mathbf{k}} \langle c_{-\mathbf{k}\downarrow} c_{\mathbf{k}\uparrow} \rangle$$

Obliczenia wykonaliśmy dla przypadku modulowanego przemiatania
przez rezonans Feshbacha:

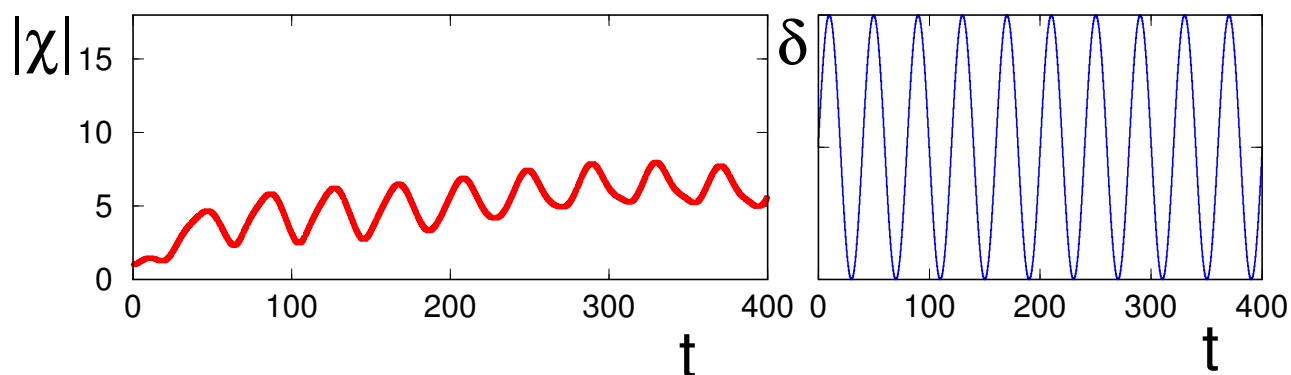
$$\delta = \delta_0 \sin \omega t$$

wyniki numeryczne



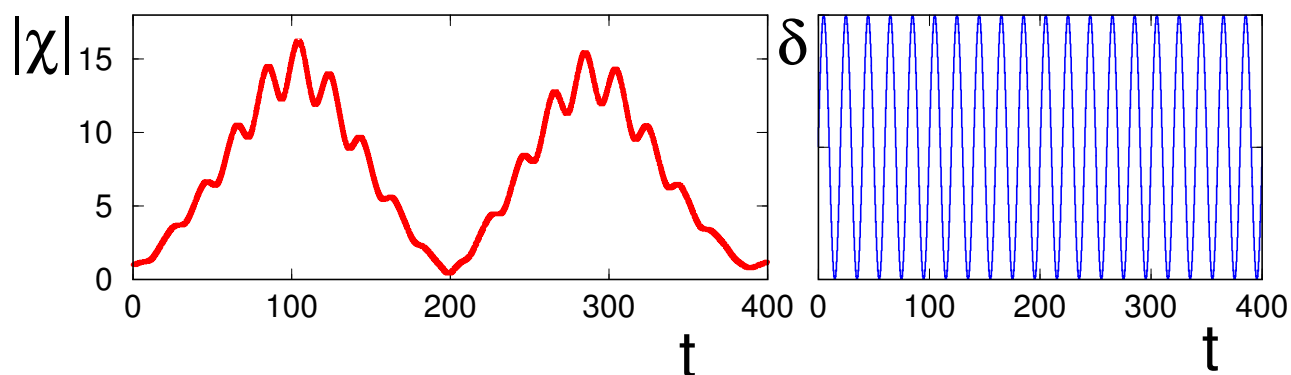
Czasowa zależność modułu parametru porządku $|\chi(t)|$ w przypadku modulowanego przemiatańia $\delta(t) = \delta_0 \sin \omega t$ wokół rezonansu Feshbacha.

wyniki numeryczne



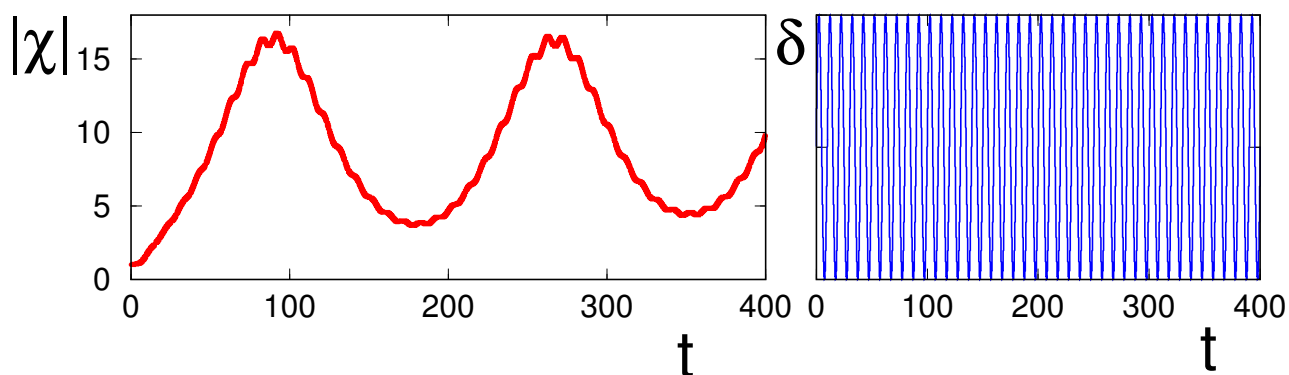
Czasowa zależność modułu parametru porządku $|\chi(t)|$ w przypadku modulowanego przemiatańa $\delta(t) = \delta_0 \sin \omega t$ wokół rezonansu Feshbacha.

wyniki numeryczne



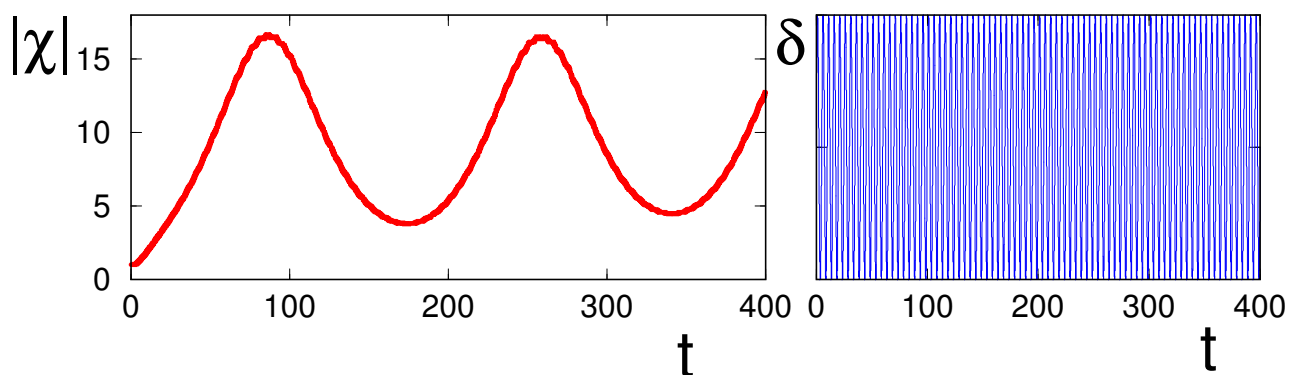
Czasowa zależność modułu parametru porządku $|\chi(t)|$ w przypadku modulowanego przemiatańia $\delta(t) = \delta_0 \sin \omega t$ wokół rezonansu Feshbacha.

wyniki numeryczne



Czasowa zależność modułu parametru porządku $|\chi(t)|$ w przypadku modulowanego przemiatańa $\delta(t) = \delta_0 \sin \omega t$ wokół rezonansu Feshbacha.

wyniki numeryczne



Czasowa zależność modułu parametru porządku $|\chi(t)|$ w przypadku modulowanego przemiatańia $\delta(t) = \delta_0 \sin \omega t$ wokół rezonansu Feshbacha.

Wnioski dotyczące części 2:

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

Dla wolnozmiennego przemiatańa przez rezonans Feshbacha ewolucja czasowa jest nieregularna.

W przypadku szybkozmiennego przemiatańa ($\omega \geq 2\Delta$) parametr porządku wykazuje oscylacyjny charakter.

PODSUMOWANIE

⇒ **Oddziaływania między atomami w pułapkach można sterować w sposób kontrolowalny.**

- W ultraniskich temperaturach pojawiają się takie zjawiska kwantowe jak kondensacja BE i nadciekłość.
- Oddziaływania oraz nanoskopowe rozmiary układów prowadzą do bardzo silnych efektów fluktuacyjnych.
- W ultrazimnych gazach atomowych realizują się wielociałowe zjawiska kolektywne znane w fizyce ciała stałego, astrofizyce i innych dziedzinach nauki.

PODSUMOWANIE

- Oddziaływania między atomami w pułapkach można sterować w sposób kontrolowany.
- ⇒ **W ultraniskich temperaturach pojawiają się takie zjawiska kwantowe jak kondensacja BE i nadciekłość.**
- Oddziaływania oraz nanoskopowe rozmiary układów prowadzą do bardzo silnych efektów fluktuacyjnych.
 - W ultrazimnych gazach atomowych realizują się wielociałowe zjawiska kolektywne znane w fizyce ciała stałego, astrofizyce i innych dziedzinach nauki.

PODSUMOWANIE

- Oddziaływania między atomami w pułapkach można sterować w sposób kontrolowalny.
 - W ultraniskich temperaturach pojawiają się takie zjawiska kwantowe jak kondensacja BE i nadciekłość.
- ⇒ **Oddziaływania oraz nanoskopowe rozmiary układów prowadzą do bardzo silnych efektów fluktuacyjnych.**
- W ultrazimnych gazach atomowych realizują się wielociałowe zjawiska kolektywne znane w fizyce ciała stałego, astrofizyce i innych dziedzinach nauki.

PODSUMOWANIE

- Oddziaływania między atomami w pułapkach można sterować w sposób kontrolowalny.
 - W ultraniskich temperaturach pojawiają się takie zjawiska kwantowe jak kondensacja BE i nadciekłość.
 - Oddziaływania oraz nanoskopowe rozmiary układów prowadzą do bardzo silnych efektów fluktuacyjnych.
- ⇒ **W ultrazimnych gazach atomowych realizują się wielociałowe zjawiska kolektywne znane w fizyce ciała stałego, astrofizyce i innych dziedzinach nauki.**

PODSUMOWANIE

- Oddziaływania między atomami w pułapkach można sterować w sposób kontrolowalny.
- W ultraniskich temperaturach pojawiają się takie zjawiska kwantowe jak kondensacja BE i nadciekłość.
- Oddziaływania oraz nanoskopowe rozmiary układów prowadzą do bardzo silnych efektów fluktuacyjnych.
- W ultrazimnych gazach atomowych realizują się wielociałowe zjawiska kolektywne znane w fizyce ciała stałego, astrofizyce i innych dziedzinach nauki.

Dziękuję za uwagę.

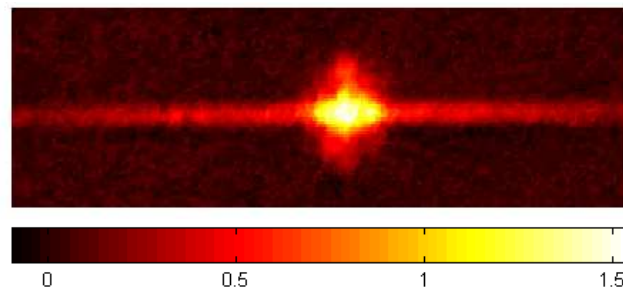
Inne zastosowania rezonansów Feshbacha

Przykład nr 1:

- ★ atomy typu bozonowego są pułapkowane i chłodzone do ultraniskich temperatur, rzędu kilku $\sim$ nK
- ★ część atomów przechodzi w stan kondensacji Bosego-Einsteina
- ★ włączając zewnętrzne pole magnetyczne zmienia się oddziaływanie z odpychającego na przyciągające
- ★ rozpoczyna się proces zapadania (ang. collapse)
- ★ w dalszej kolejności pojawiają się zjawiska podobne do wybuchu Supernowej

Laboratoryjne wybuchy materii

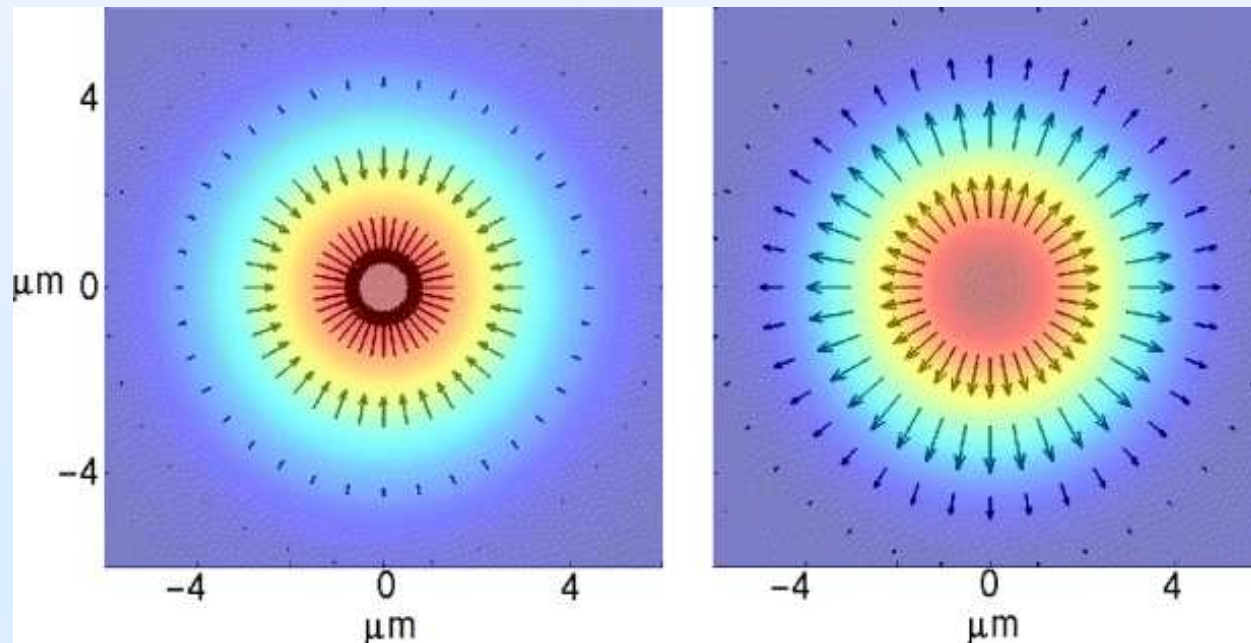
/ Bosenova /



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

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

Mapa prędkości w chwili wybuchu *bosenovej*.



Lewa strona:

Atomy z kondensatu Bosego-Einsteina zapadają się.

Prawa strona:

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

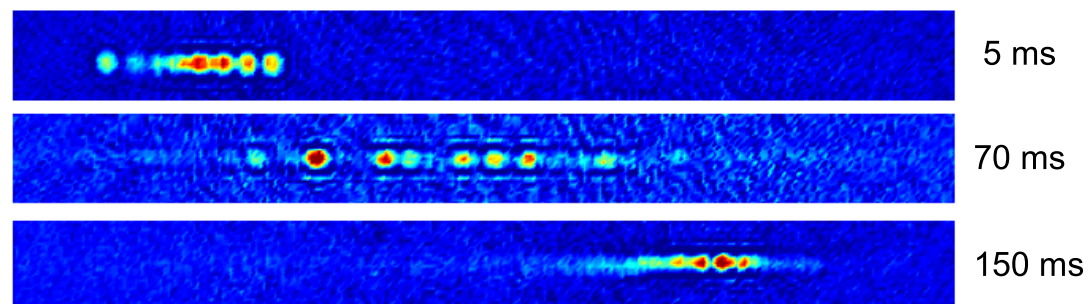
J.N. Milstein et al, New Journ. Phys. 5, 52 (2003).

Inne zastosowania rezonansów Feshbacha

Przykład nr 2:

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

Fluktuacje kwantowe w $\text{dim}=1$



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

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

Atomy ^7Li po "przełączeniu oddziaływań" na przyciągające formują się w grupę kilku solitonów (ang. *soliton train*).

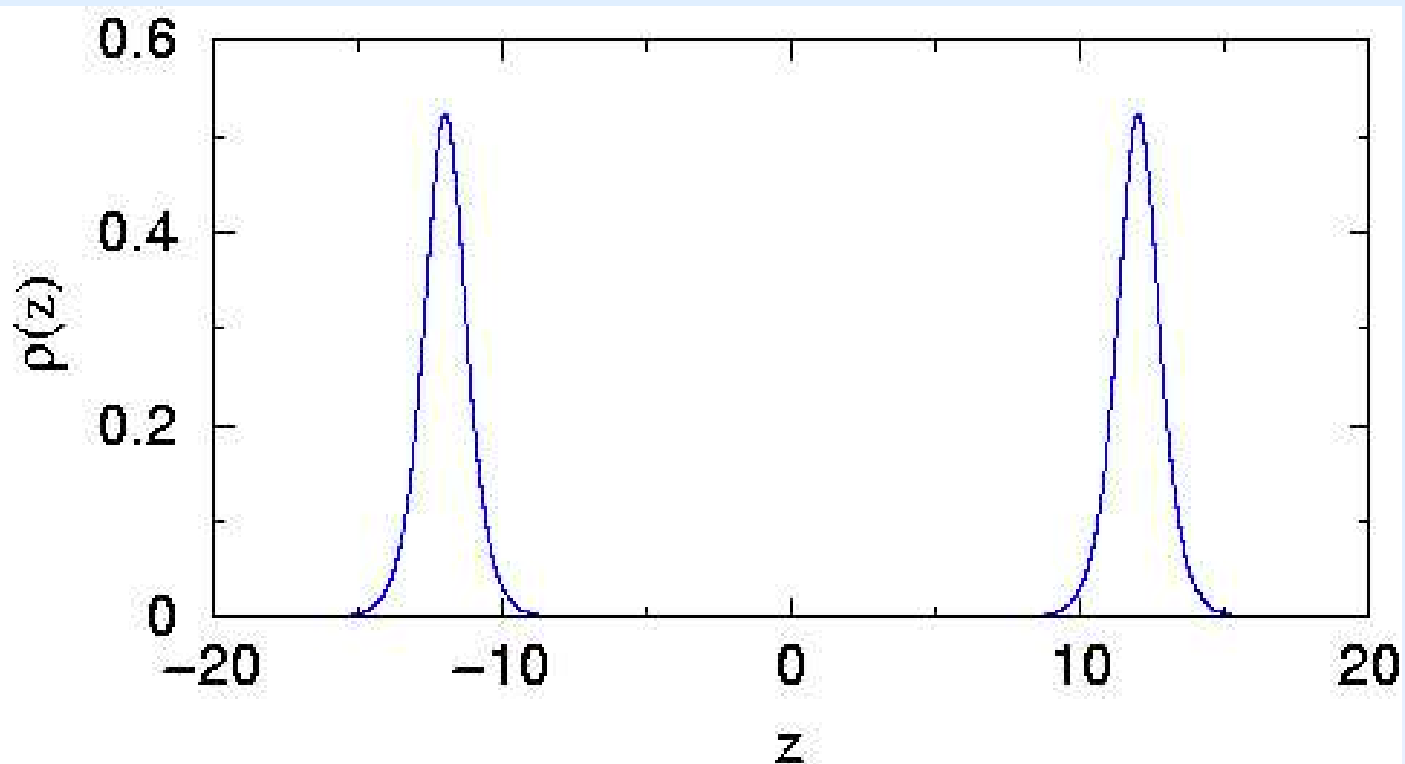
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

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

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony

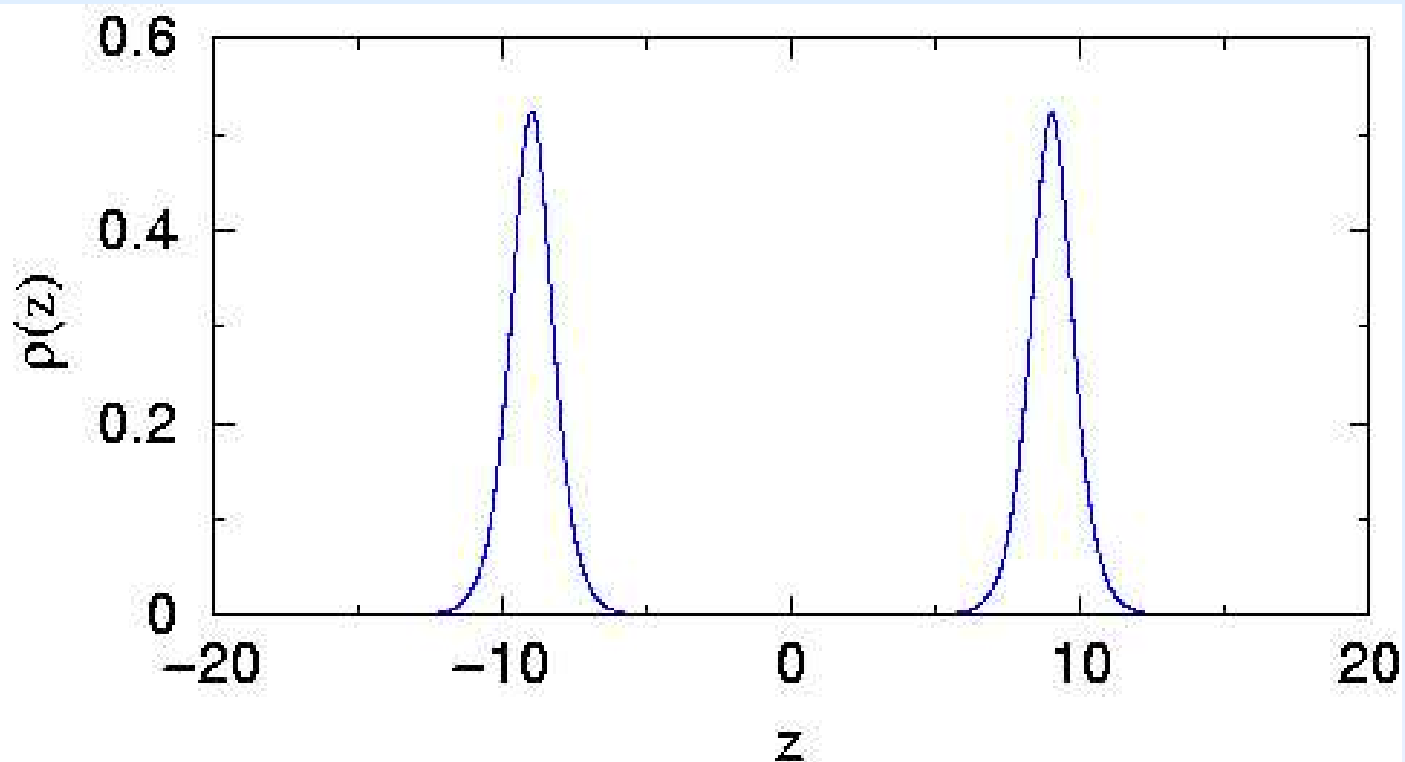
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



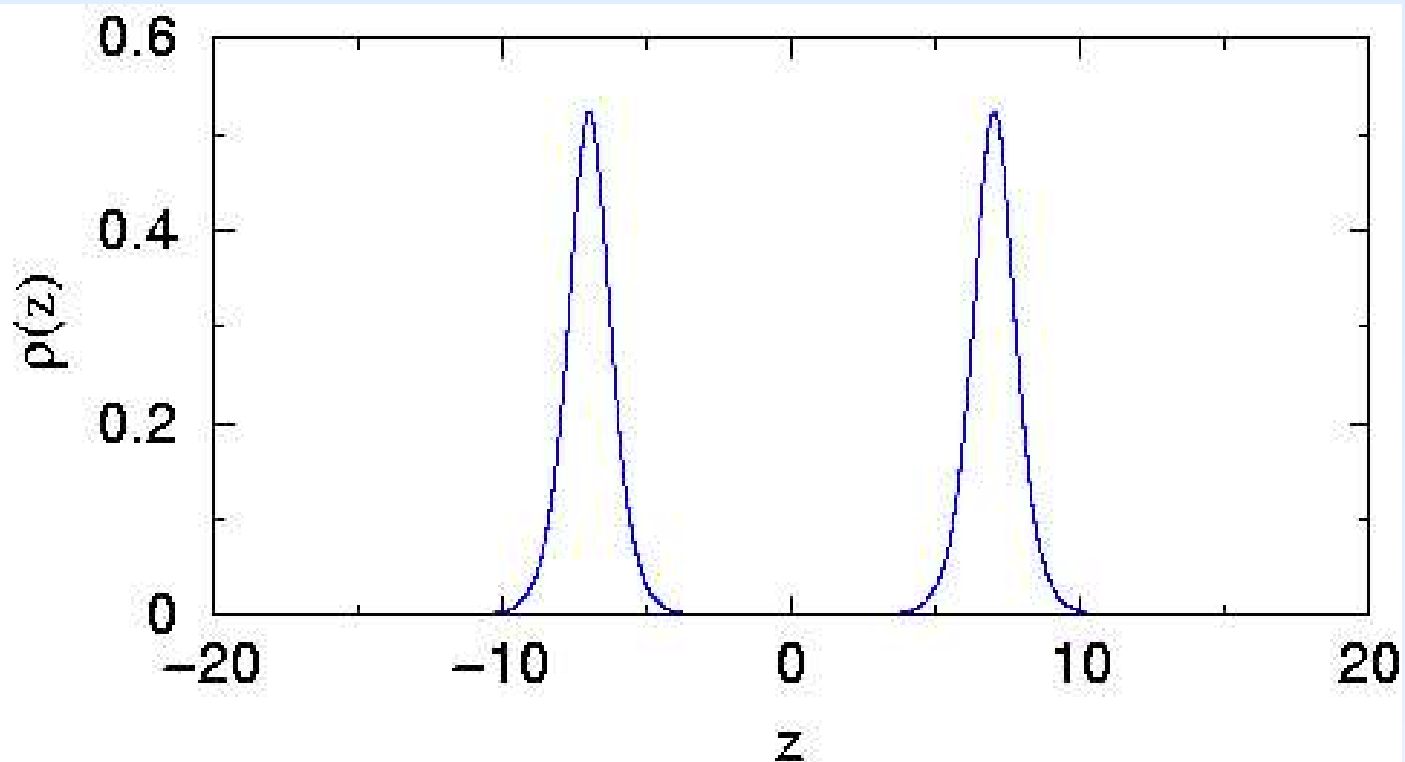
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



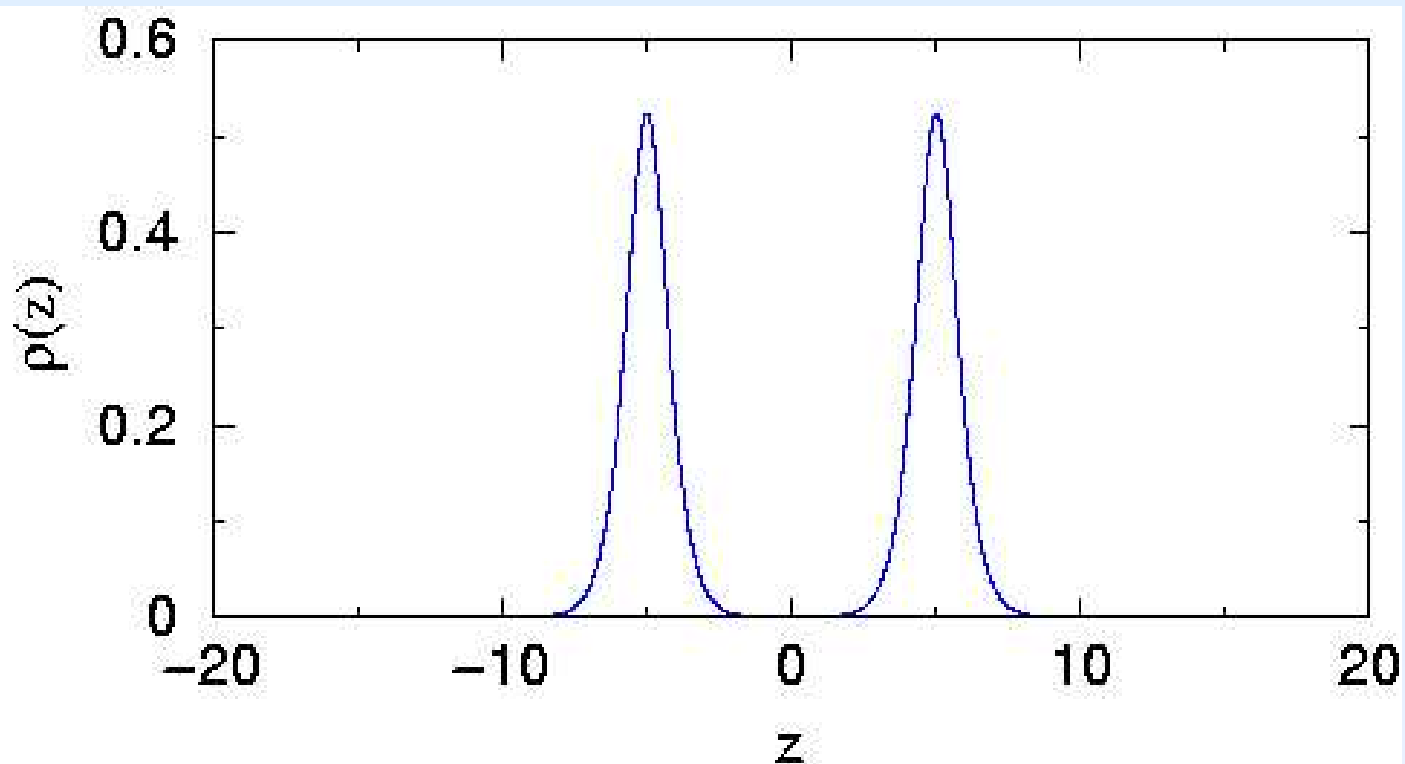
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



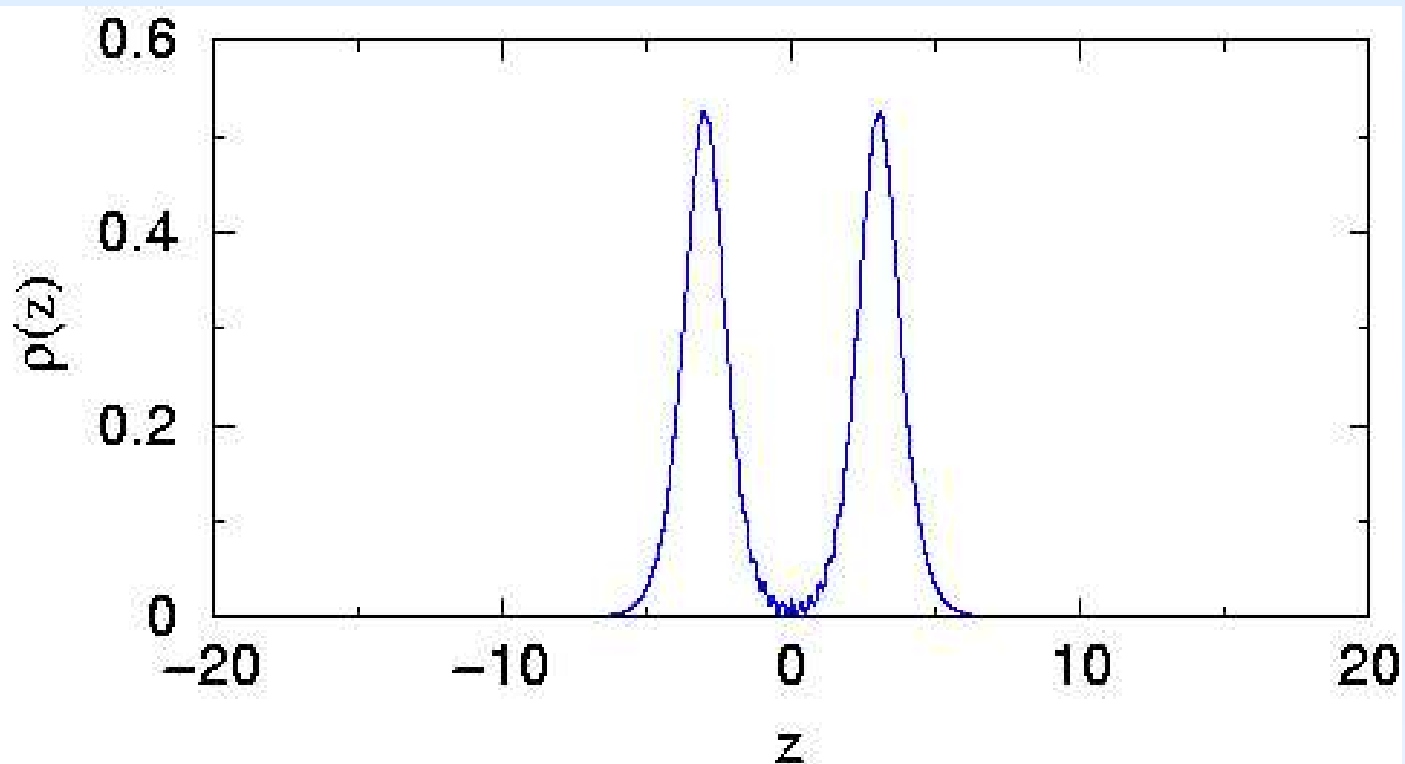
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



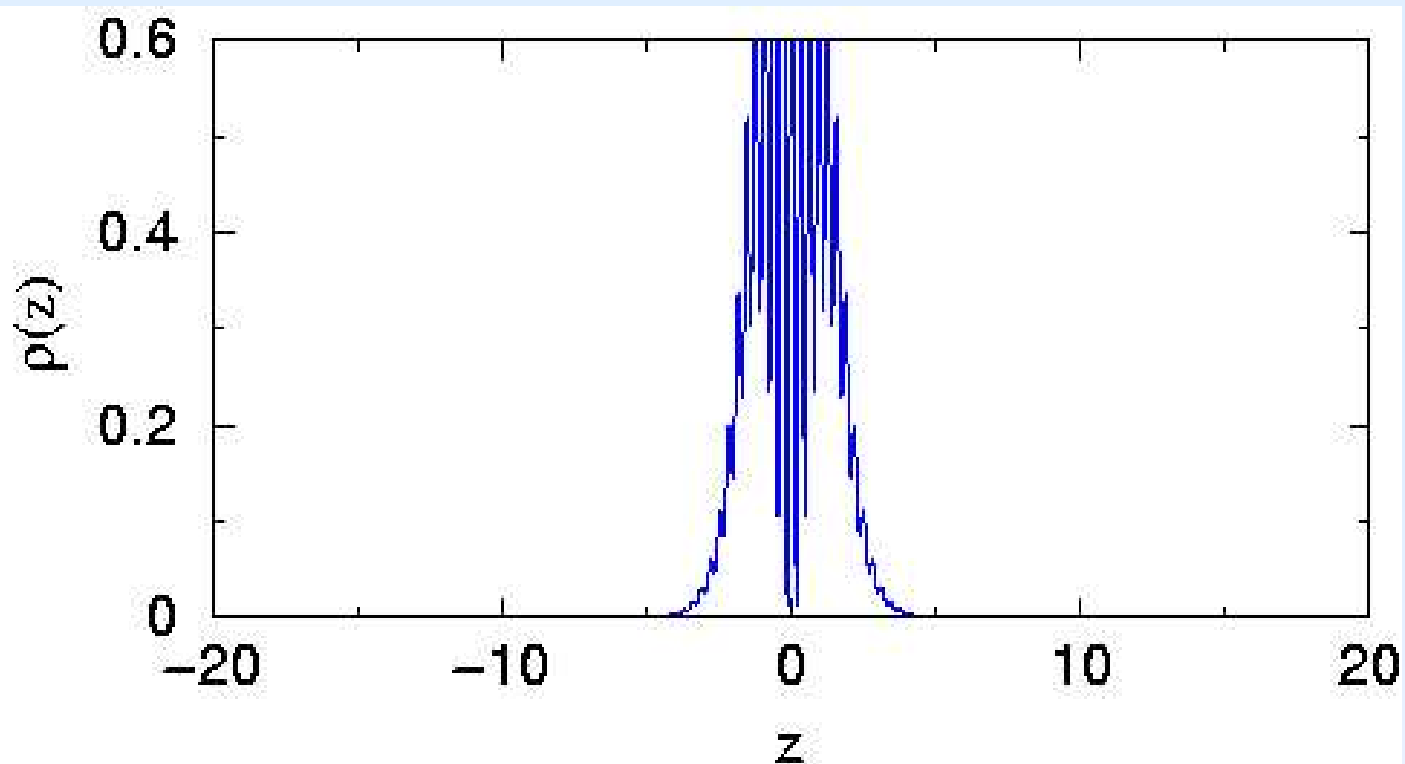
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



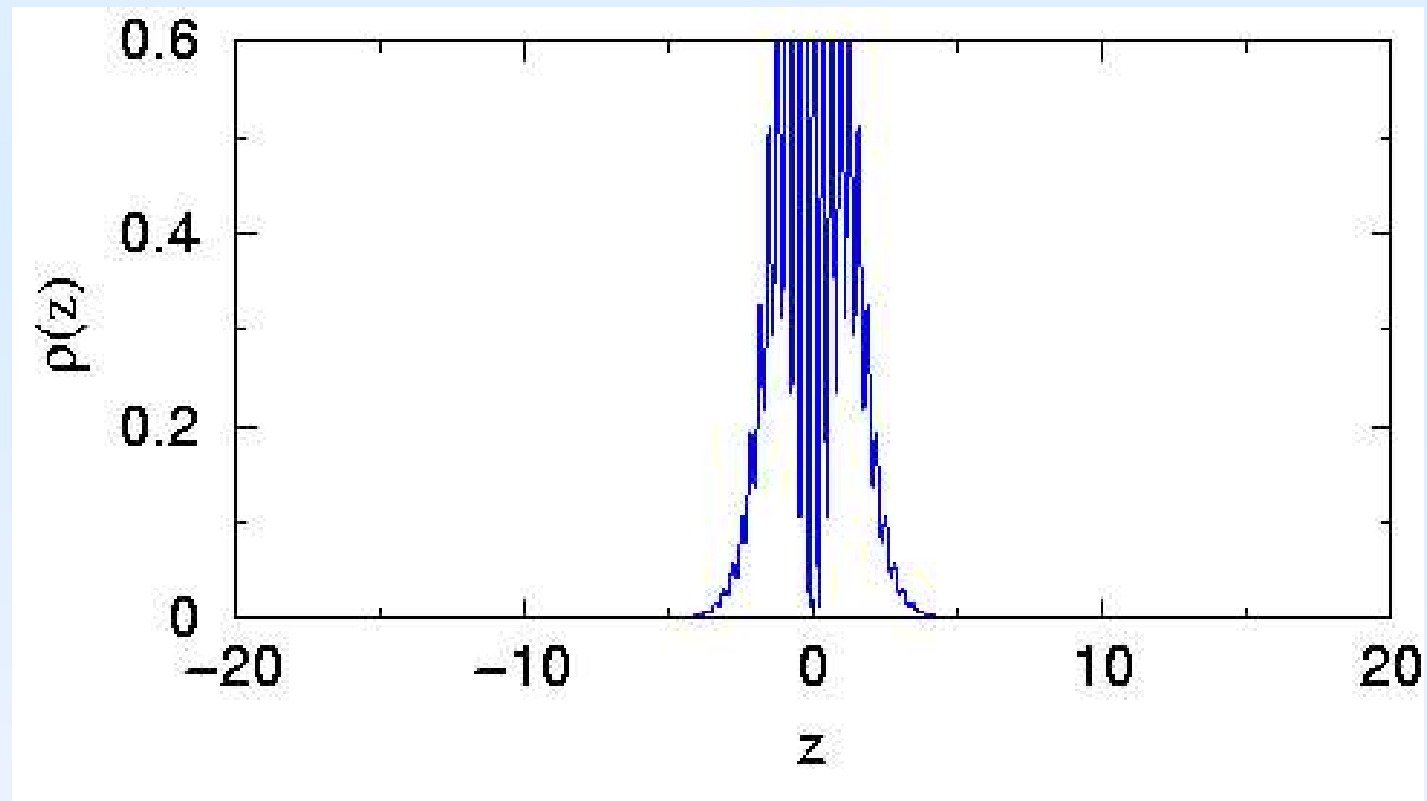
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



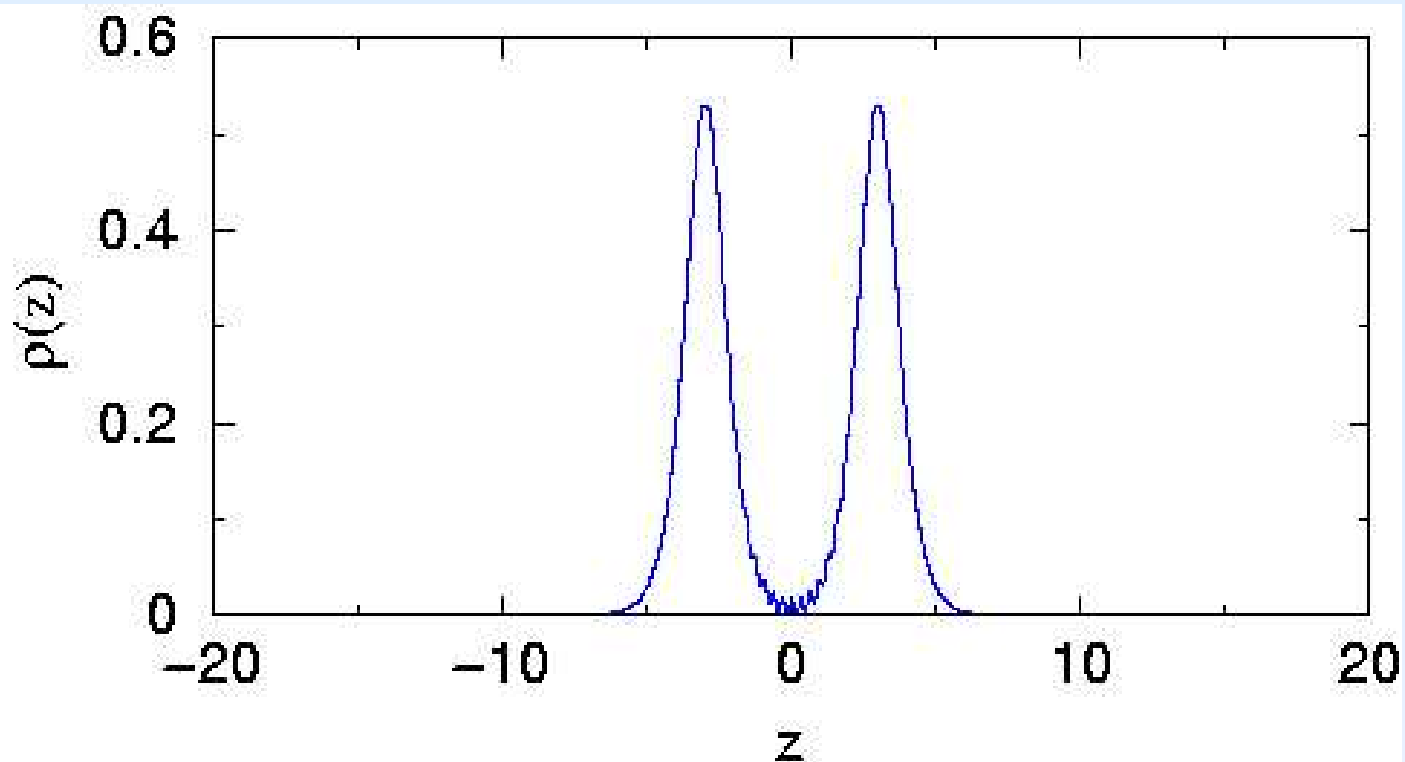
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



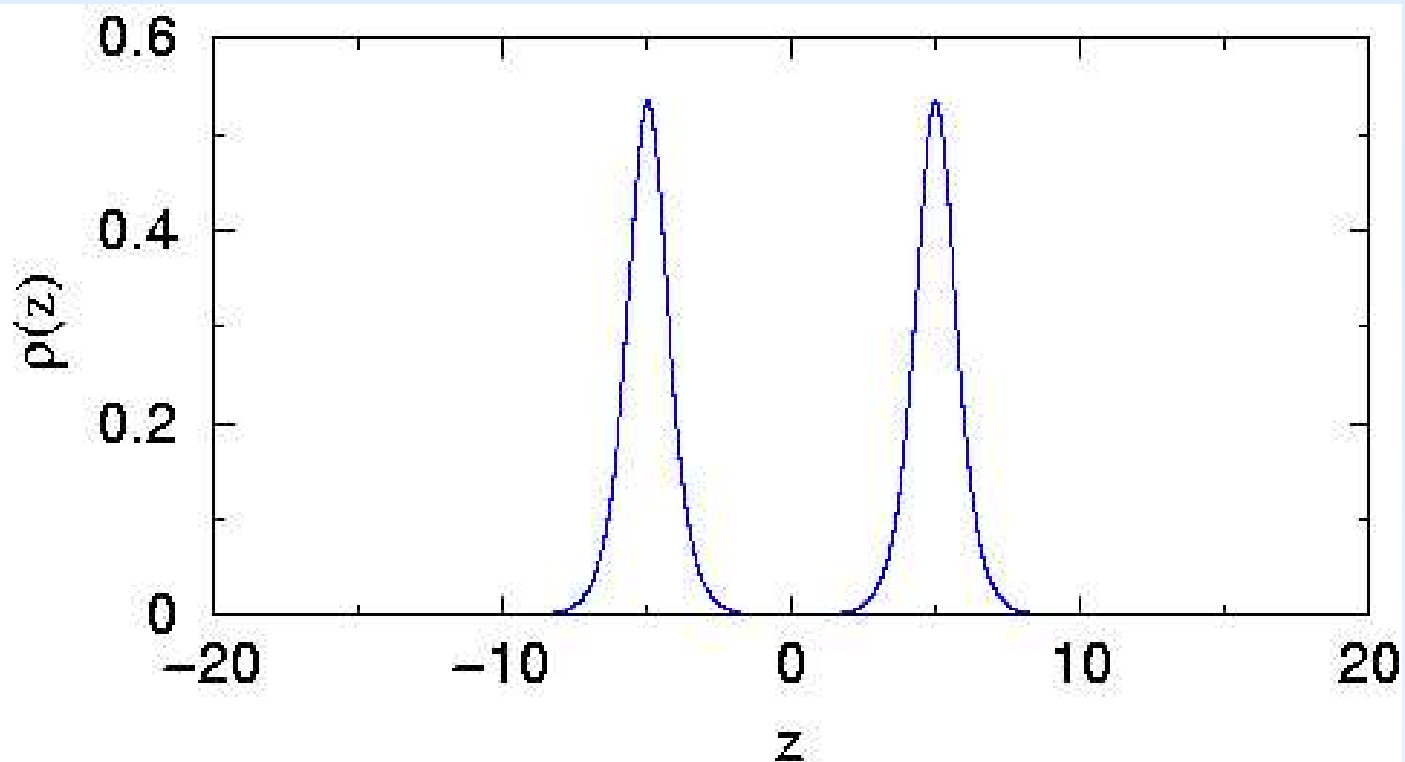
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



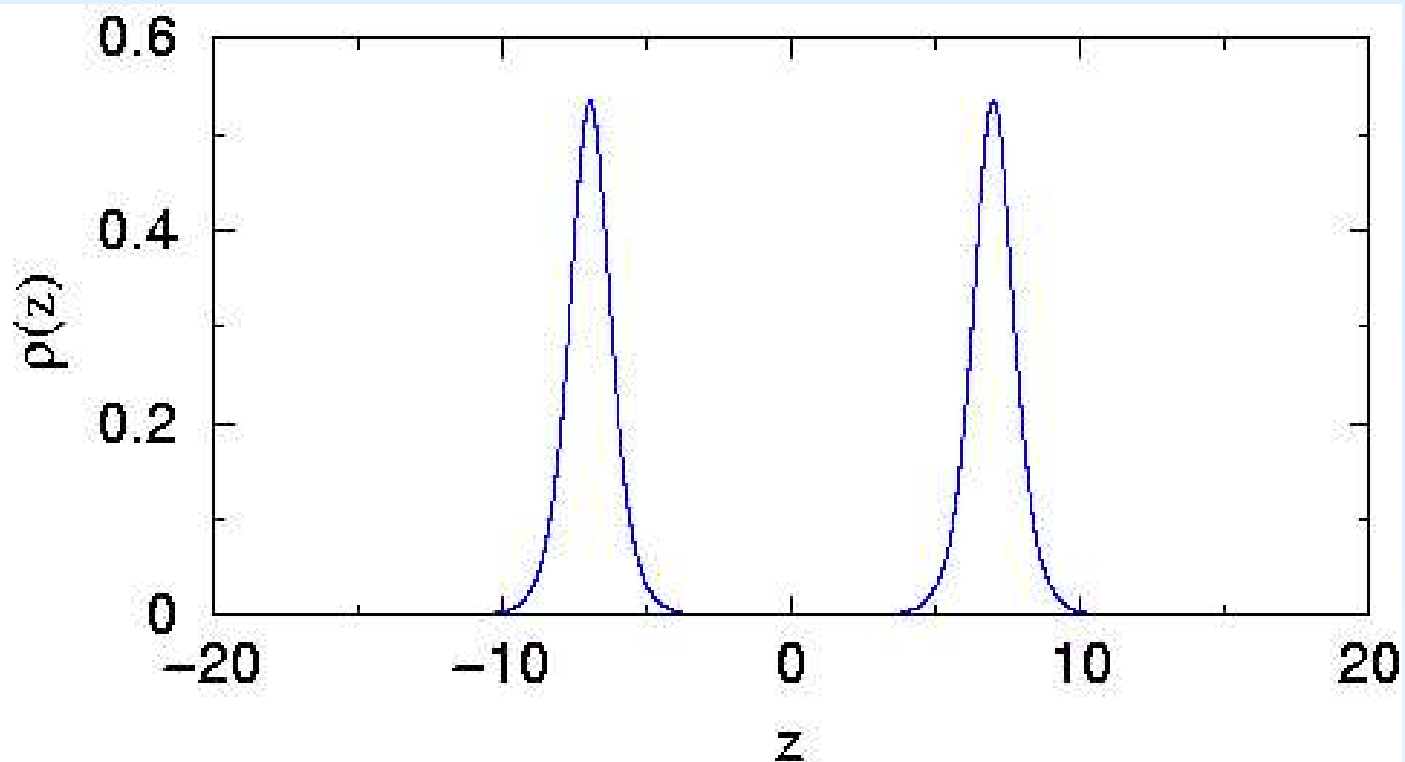
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



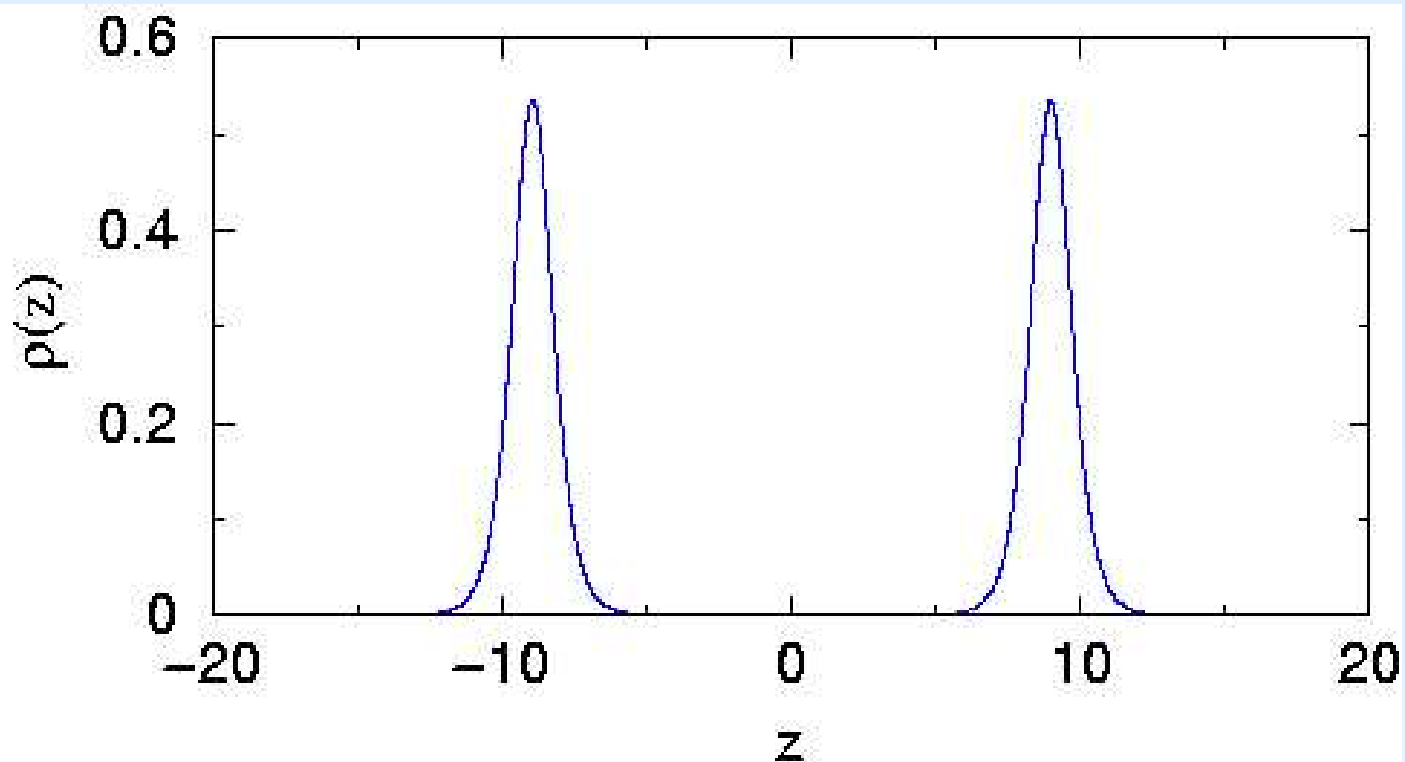
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



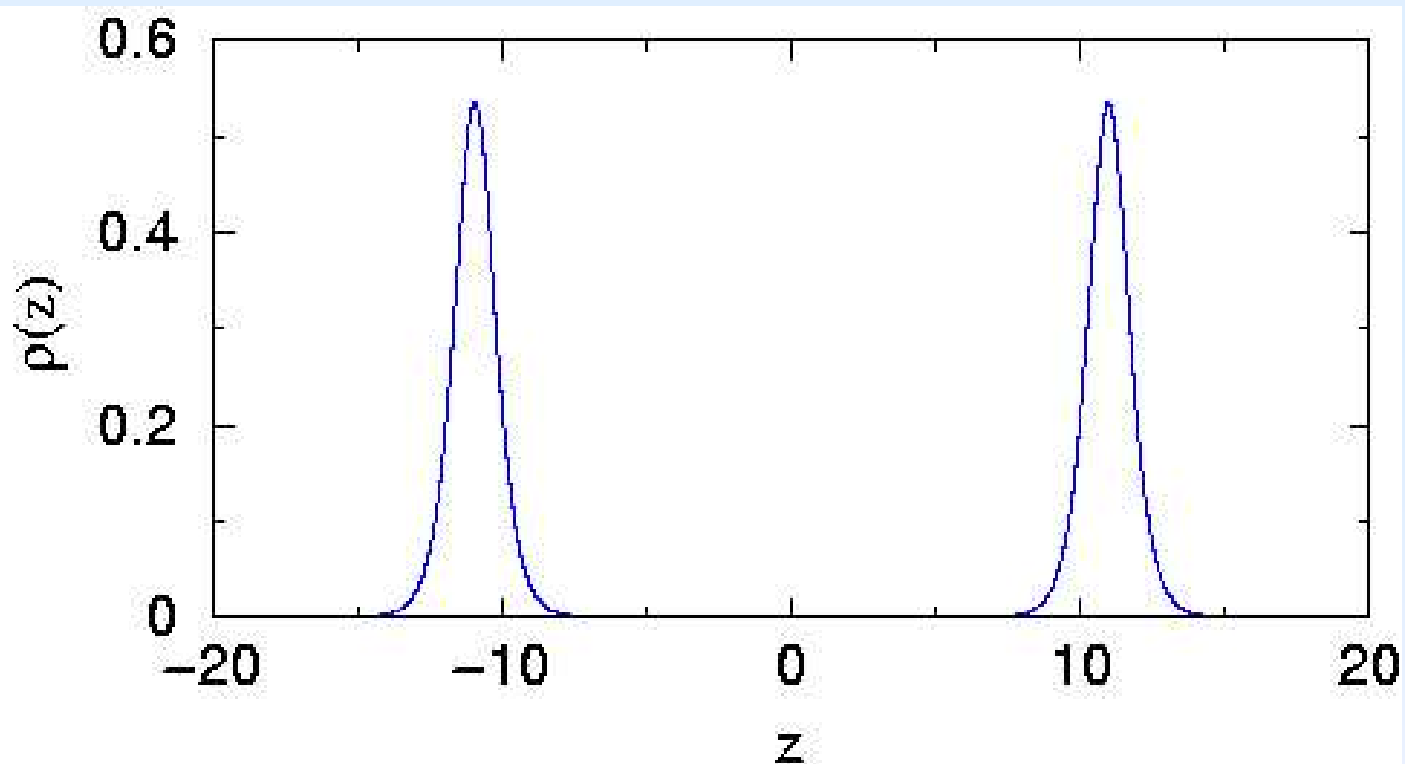
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



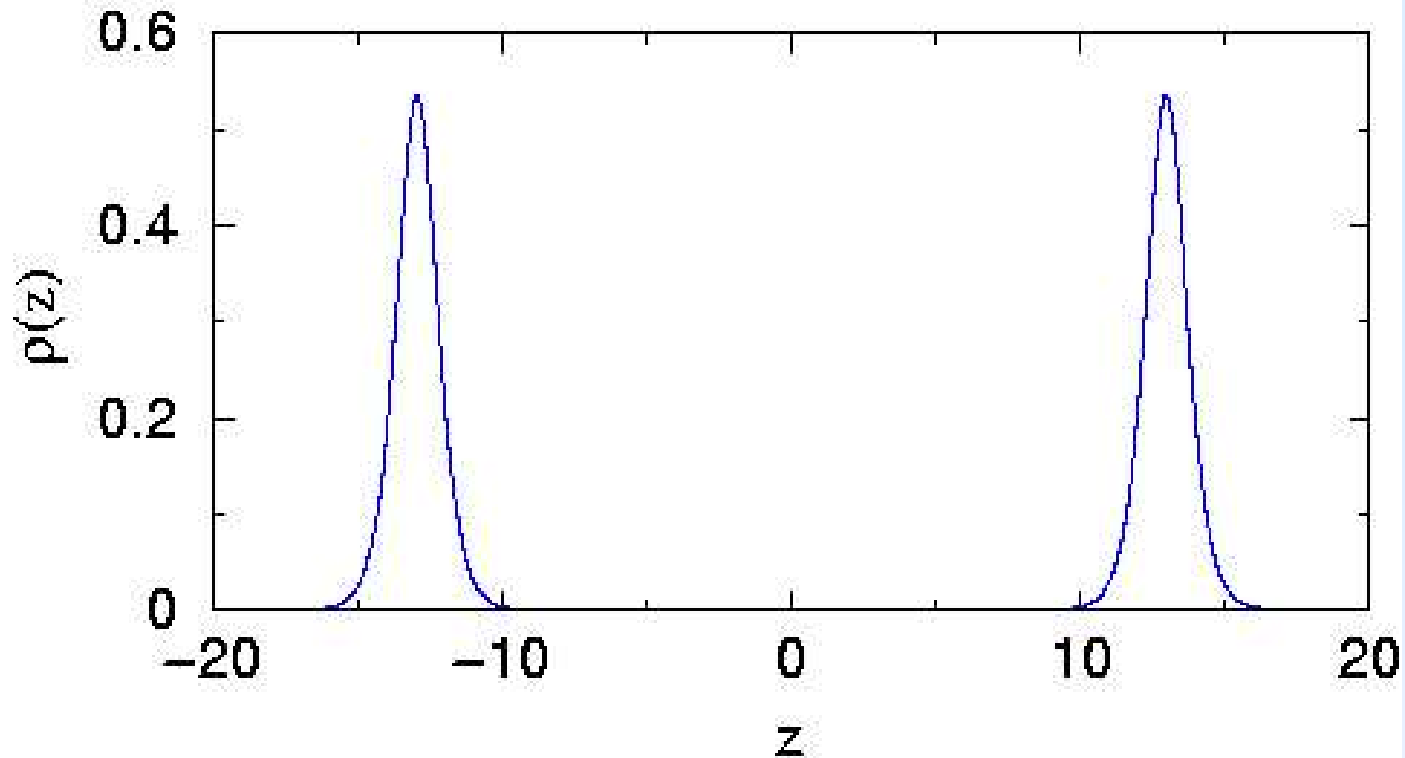
soliton jest to paczka falowa , która rozchodzi się
bez zmiany kształtu i dyssypacji energii

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



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

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony



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

Ilustracja: dwa przeciwbieżne solitony

