

平成 21 年 4 月 4 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2006 ~ 2008
 課題番号：18740213
 研究課題名 (和文) 多成分ボースアインシュタイン凝縮体におけるソリトンと位相欠陥の物理
 研究課題名 (英文) Solitons and topological defects in multicomponent Bose-Einstein condensates
 研究代表者
 笠松 健一 (KASAMATSU KENICHI)
 近畿大学・理工学部理学科・講師
 研究者番号：70413763

研究成果の概要：本研究ではナノケルビンの超低温まで冷却された中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (以下 BEC と略す) で起こる超流動現象と原子間相互作用の効果によって生じる非線形現象に関しての理論的研究を行った。2 成分の BEC の原子間相互作用によって起こる相分離の不安定性による種々のパターン形成の非線形ダイナミクスを明らかにした。また BEC に存在し、超流動性に深く関与する特異な渦の構造を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,400,000	0	1,400,000
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	210,000	3,310,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：ボースアインシュタイン凝縮, 超流動, 冷却原子, 量子渦, パターン形成

1. 研究開始当初の背景

いくつかの実験グループが内部自由度を持つ BEC に関する新しい結果を報告し、この多成分 BEC に関する興味は急速に高まっていた。多成分 BEC は複数の秩序変数で特徴づけられる超流体を構成し、この研究対象の学際性は極めて広い。多成分 BEC の量子渦は、多成分秩序変数における位相欠陥という観点から、他の様々な物理系 (液体ヘリウム 3 の異方的超流動, UPt_3 や $SrRuO_4$ 等の非 s 波超伝導, 高温超伝導, 2 層量子ホール系, 非線形光学, 原子核物理, 宇宙物理) で議論されている欠陥構造に共通するものであり、その研究的意義は原子気体 BEC 系に限定されず、他

の物理系に普遍的なものである。回転するポテンシャル中の BEC と量子渦は冷却原子の物理分野で最も盛んに議論されている問題の一つであるが、本研究では多成分 BEC における位相欠陥の物理を中心に明らかにしていく事を目的とした。

また BEC を用いた物質波ソリトンの制御に関するトピックは、BEC を応用面に適応するときの最重要課題である。多成分 BEC 間の相互作用を利用したソリトン制御の可能性は、いまだ未開拓の状態であり、独創的なテーマであると言える。昨年、異なる原子種間でフェシュバハ共鳴 (heteronuclear Feshbach resonance) が観測されており、異成分 BEC

の原子間相互作用をも自由に制御可能である事が示された。これらを考慮する事で更なる量子状態操作の可能性が広がり、新現象発見につながると考えた。

2. 研究の目的

(1) ボース凝縮が引き起こす重要な現象の一つに超流動がある。量子渦は量子化された循環を持ち、超流動状態を特徴付ける最も重要な位相欠陥である。古くからは超流動ヘリウムを舞台に膨大な研究がなされているが、原子気体 BEC でも量子渦に関して非常に活発に研究がなされている。

我々はこれまで行ってきている 2 成分 BEC の渦状態の研究を進展させ、本研究ではさらに複数の成分を持つ BEC の渦構造や高速回転領域での渦格子構造の解明、また多成分 BEC における量子渦の運動に着目し、回転 BEC に対する新たな理論的手法の構築と新奇現象を開拓することを目的とする。

(2) BEC は、光のレーザーのように大域的に位相のコヒーレンスがそろった波動としての性質を持つ原子ガスである。凝縮体の静的及び動的振る舞いは Gross-Pitaevskii (GP) 方程式と呼ばれる非線形方程式で記述され、これは光学で知られる非線形シュレディンガー方程式と同類のものである。この方程式が持つ非線形効果により、波形が崩れずに空間を伝搬する孤立波（ソリトン）が励起状態として存在し得る事は古くから知られている。物質波ソリトンの振る舞いの研究は非線形物理学の基本的な興味はさることながら、BEC を用いた集積回路（アトムチップ）での情報伝達的手段として重要視されている。多成分 BEC の場合、異成分によってもたらせる相互作用の効果により、ソリトンの安定性や動的振る舞いが単体の凝縮体の場合と比べて格段に多彩なものとなり問題が全く非自明なものとなる。物質波ソリトンの生成と制御を念頭において、物質波ベクトルソリトンがもつ新しい物理的性質を解明する。

3. 研究の方法

(1) 2 成分 BEC では同成分間の原子間相互作用（2つ）と異成分間の原子間相互作用（1つ）の計 3 つの相互作用パラメータが存在する。それらは用いる原子の種類によって一般的に異なり、フェシュバハ共鳴を用いればその大きさと性質（斥力と引力）を自在に変調する事ができる。

原子間相互作用は BEC におけるソリトン形成に本質的な役割を果たす。例えば一成分 BEC の場合、明るいソリトンは相互作用が引力の場合にのみ存在する。また、ソリトン形

成の動的過程において重要な役割を果たすのが変調不安定性（Modulation instability: 以下 MI と略す）と呼ばれる現象で、言わば小さな微小振動に対する系の安定性である。MI とソリトン形成は系の同じパラメータ領域で発生するなど、お互いに密接に関連している。

2 成分 BEC の場合は上述の 3 つの相互作用が存在するために MI の起こり方が非常に多岐にわたるものとなる。例えば相互作用が全て斥力であっても MI が起こり、それに伴った特徴的なパターン形成の非線形ダイナミクスが起こる。

以前の研究では相互作用が斥力の場合に限って解析し、MI に伴う凝縮体のマルチドメイン形成のダイナミクスを示した。本研究ではまず、相互作用が引力の場合も含めたあらゆる可能性を考慮して MI の起こるパラメータ領域とその性質を分類する。その後、GP 方程式の数値計算によって MI の結果生じる非線形ダイナミクスを調べ、どのような型のベクトルソリトンが動的に生成するのかを調べる。

(2) 回転ポテンシャル中における BEC の量子渦のダイナミクスの研究を始める。注目する事は、回転する周期ポテンシャルを加えたときにどのような動的状態が実現するかである。2 成分系で議論を始める前に、まず 1 成分系でダイナミクスを調べる。回転ポテンシャルと回転周期ポテンシャルの回転振動数が異なる場合に注目して動的状態の相図を完成させる。一様にフラストレーションをもったジョセフソン接合列とのアナロジーに注目し、渦グラス相の可能性や有限サイズ効果などを議論する。

4. 研究成果

原子気体 Bose-Einstein 凝縮体(BEC)における量子渦とソリトンの構造とダイナミクスに関して以下の内容を明らかにした。

(1) 2 次-4 次ポテンシャル中の回転 2 成分 BEC の安定状態を、回転振動数と異成分原子間相互作用をパラメータとして幅広く取って調べ、相図を作成した。凝縮体全体の形は閉じ込めポテンシャルの形が遠心力ポテンシャルの効果で、いわゆる「メキシカンハット」型になり、これと異成分間の相互作用効果により、2 成分特有の渦状態が安定化する事を明らかにした。

(2) 2 成分 BEC の変調不安定な条件とそれにとまなう孤立波形成のダイナミクスを調べた。一様に混ざった 2 成分 BEC は、成分の異なる凝縮体が交互に配置するマルチドメイ

ン構造を形成する (図 1)。これらのドメイン間には波動関数の位相の空間的な飛びが見られ、各ドメインがソリトンの性質を有している事が明らかとなった。また異成分原子間相互作用が引力の場合も調べ、その場合には両成分が完全に重なり合った明るいソリトンが生成する事を明らかにした。

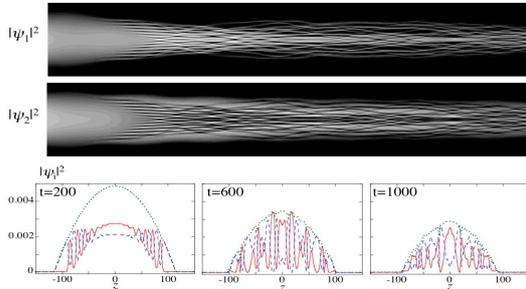


図 1 変調不安定性により 2 成分 BEC の密度 (上段が成分 1、中段が成分 2) がソリトン列を形成する時間発展を表したもの。縦軸が空間次元、横軸が時間を表す。下段はある時刻における密度の断面積のスナップショットを表したもの

(3) 量子渦をもつ BEC の回転振動数とは異なる振動数で回転する光格子が挿入された状況を想定し、駆動されたピンニングに対する量子渦の応答を調べた。BEC と光格子の相対回転振動数とピンニングポテンシャルの強さに対する渦の動的振る舞いに関する相図を調べ、光格子の回転が遅いときは、光格子の周期と整合な渦格子がピンニングされたまま光格子と共に回転する相が実現するのに対し、光格子の方が BEC よりも速くなると、更なる渦の侵入により、非整合な渦との相互作用を介した渦格子の融解が引き起こされる (図 2)。この渦液体状態はエネルギー注入と散逸のつり合いで実現する一種の散逸構造であり、Frenkel-Kontrova モデルなどで調べられている駆動された多粒子系の非平衡ダイナミクスとも密接に関連している。

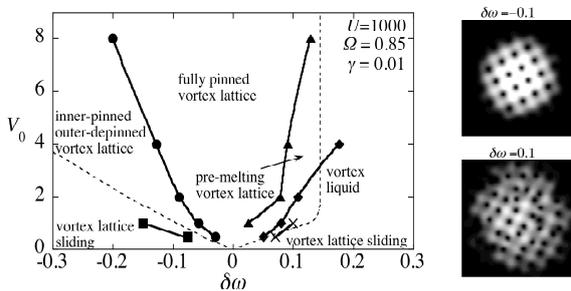


図 2 光格子のポテンシャルの強さ V_0 と相対各振動数 $\delta\omega$ に関する動的な渦状態の相図。右は $V_0=2$ における、ある瞬間の凝縮体密度のスナップショット

(4) 回転する非常に深い 2 次元光格子ポテンシャルに閉じ込められた Bose-Einstein 凝

縮体の振る舞いは、フラストレーションを持つ XY モデルハミルトニアンにマッピングできる事を示し、基底状態の構造を Monte Carlo シミュレーションにより明らかにした (図 3)。

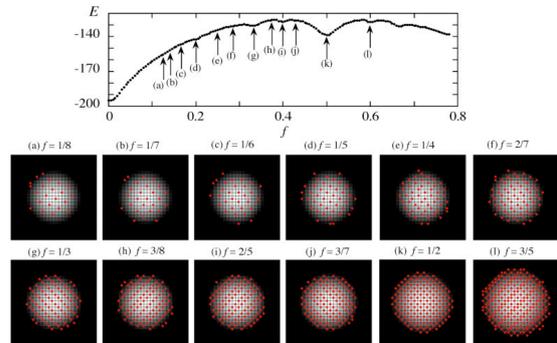


図 3 フラストレーションパラメータ f に対する XY モデルのエネルギー、凝縮体密度および渦構造。メッシュは光格子の周期を表し、マスの角が光格子の極大に対応する。丸印で示した渦はその極大にピンニングされる。

(5) 回転ポテンシャル中の相分離した 2 成分 BEC の安定な渦状態を Gross-Pitaevskii 方程式の数値計算と解析的モデルを用いて議論した。この時の安定状態は 2 成分の境界に量子渦が一次元的に配列した渦シート構造が安定化し (図 4)、特徴的な長さのスケールはドメインの表面張力と渦による運動エネルギーのつり合いで決まることを明らかにした。

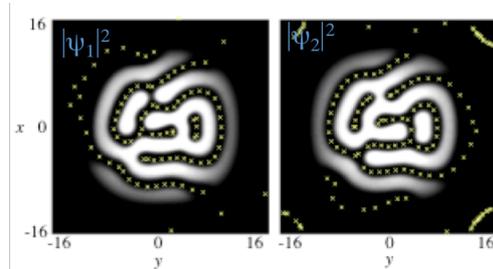


図 4 2 成分 BEC における渦シート構造。左が成分 1、右が成分 2 の凝縮体密度のプロファイルと量子渦の位置を表している。

(6) 原子気体 BEC の量子渦上に励起されるケルビン波の不安定性 (ドネリーグラバーソン不安定性) を微視的視点より議論し、熱力学的ポテンシャルの極小の消失に伴うランダウ不安定性により理解される事を示した。数値計算によりその不安定性を介して渦格子状態は量子乱流状態に発展することを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① K. Kasamatsu, M. Tsubota, Modulation instability and solitary-wave formation in two-component Bose-Einstein condensates, *Physical Review A*, **74**, 013617 (1-), (2006), 査読有
- ② K. Kasamatsu, M. Tsubota, Dynamical Vortex Phases in a Bose-Einstein Condensate Driven by a Rotating Optical Lattice, *Physical Review Letters*, **97**, 240404 (1-4) (2006), 査読有
- ③ K. Kasamatsu, M. Tsubota, Dynamic Properties of Vortices in a Bose-Einstein Condensate in a Rotating Lattice, *Journal of Low Temperature Physics*, **148**, 357-362 (2007), 査読有
- ④ K. Kasamatsu, Vortex Lattices in Rotating Bose-Einstein Condensate in an Optical Lattice: Analogy to Uniformly Frustrated Josephson Junction Arrays, *Journal of Low Temperature Physics*, **150**, 593-598 (2008), 査読有
- ⑤ K. Kasamatsu, M. Tsubota, Static and Dynamic Properties of Multicomponent Bose-Einstein Condensates of Ytterbium Atoms, *Journal of Low Temperature Physics*, **150**, 599-604 (2007), 査読有
- ⑥ K. Kasamatsu, M. Tsubota, Quantized vortices in atomic Bose-Einstein condensates, *Progress in Low Temperature Physics*, **16**, 349-401 (2008), 査読有
- ⑦ K. Kasamatsu, Uniformly frustrated bosonic Josephson junction array, *Physical Review A*, **79**, 021604 (1-4) (2009), 査読有
- ⑧ K. Kasamatsu, M. Tsubota, Vortex sheet in rotating two-component Bose-Einstein condensates, *Physical Review A*, **79**, 023606 (1-7) (2009), 査読有
- ⑨ H. Takeuchi, K. Kasamatsu, and M. Tsubota, Spontaneous radiation and amplification of Kelvin waves on quantized vortices in Bose-Einstein condensates, *Physical Review A*, **79**, 033619 (1-5) (2009) 査読有
- ⑩ K. Kasamatsu, Uniformly frustrated Josephson junction array in trapped Bose-Einstein condensates, a special

issue of *Journal of Physics Condensed Matter*, in press, (2009), 査読有

[学会発表] (計 9 件)

- ① Kenichi Kasamatsu, M. Tsubota, Dynamical Properties of Vortices in a Bose-Einstein Condensate in a Rotating Lattice, International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2006, 1-6 Aug. 2006, Univ. of Kyoto,
- ② Kenichi Kasamatsu, M. Tsubota, Vortex dynamics in Bose-Einstein condensates driven by a rotating optical lattice, International Conference on Quantum Mechanics and Chaos, 19-21 Sep. 2006, Osaka City Univ.
- ③ 笠松健一, 坪田誠, 回転光格子中のボース凝縮体における動的な量子渦相, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 18~21 日, 鹿児島大学
- ④ K. Kasamatsu, Vortex Lattices in Rotating Bose-Einstein Condensate in an Optical Lattice: Analogy to Uniformly Frustrated Josephson Junction Arrays, International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2007, 1-6 Aug. 2007, Kazan State Univ.
- ⑤ K. Kasamatsu, M. Tsubota Static and Dynamic Properties of Multicomponent Bose-Einstein Condensates of Ytterbium Atoms, International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2007, 1-6 Aug. 2007, Kazan State Univ.
- ⑥ K. Kasamatsu, Rotating Bose-Einstein condensates in an optical lattice: Analogy to uniformly frustrated Josephson Junction arrays, BOSE-EINSTEIN CONDENSATION 2007 - Frontiers in Quantum Gases -, 15-20 Sep. 2007, Sant Feliu de Guixols, Spain.
- ⑦ K. Kasamatsu, Uniformly frustrated Josephson junction array in trapped Bose-Einstein condensates, 25th International Conference on Low Temperature Physics, 6-13 Aug. 2008, Leiden, Amsterdam.
- ⑧ 笠松健一, 原子気体 BEC で実現する一様なフラストレーションをもったジョセフソン接合列, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20~23 日, 岩手大学
- ⑨ 笠松健一, 坪田誠, 回転 2 成分ボース凝

縮体における渦シート構造, 日本物理学
会 2008年秋季大会, 2008年9月20～
23日, 岩手大学

[その他]

ホームページ等

[http://qube.phys.kindai.ac.jp/users/ken
ichi/index.html](http://qube.phys.kindai.ac.jp/users/ken
ichi/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠松 健一 (KASAMATSU KENICHI)
近畿大学・理工学部理学科・講師
研究者番号: 70413763

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: