

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540388

研究課題名(和文) ボース凝縮体の磁気相転移におけるキップル・ズレック機構

研究課題名(英文) Kibble-Zurek mechanism in magnetic phase transition of Bose-Einstein condensates

研究代表者

齋藤 弘樹 (SAITO HIROKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：60334497

研究成果の概要(和文)：

本研究は超流動体における量子渦と磁性という二つの観点から広い範囲に展開し、豊富な結果を得ることができた。外部磁場を振動させることで新しいタイプのキップル・ズレック機構が現れることを明らかにした。量子流体における様々な流体不安定性を調べ、量子渦が重要な役割を果たすことを明らかにした。超流動性と磁性という二つの特徴を持った磁性超流動体という新しい系において様々な現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

Bose-Einstein condensates have been studied from the points of view of quantized vortices and magnetism. A novel type of Kibble-Zurek mechanism was found to appear due to oscillating magnetic field. In quantum hydrodynamics, quantized vortices were found to play crucial role in various fluid phenomena. Novel phenomena originating from quantized vortices and magnetism are found in magnetic superfluids.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス、ボース・アインシュタイン凝縮、量子渦、キップル・ズレック機構

## 1. 研究開始当初の背景

キップル・ズレック機構とは本来、宇宙創成期において真空の相転移が起こる際、位相欠陥(磁気モノポール、コズミックストリング等)が自発的に生ずる機構として1976年にキップルによって提唱された。基本的なアイデアは単純である。一般に相転移が起こる際には、空間的に一様に相が変化するので

はなく、互いに独立な複数のドメインが成長を始める。これらドメインは、相転移に伴う対称性の破れによって互いにランダムな位相を持つため、トポロジカルな配置を取る場合が確率的にありうる。結果として、相転移完了後に位相欠陥が残される。これがキップル・ズレック機構による位相欠陥の自発的生成である。

気体のBECは、超低温で気体が巨視的物質波として振る舞う系であり、2001年にノーベル物理学賞の対象となってからも盛んに研究されてきたが、特に研究開始の前年である2007年にはBECの磁性に関する研究で大きな進展があった。パークレーの実験グループは磁性相転移を制御下で発生させ、スピノールBECが磁化する様子をリアルタイムで観測することに成功した。その際、発生した磁化の空間パターンの中に位相欠陥（スピン渦）が自発的に生成されているのが発見されたのである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、このBECの磁気相転移現象にキップル・ズレック機構の考え方を適用するという点にある。宇宙相転移における真空の「位相」は、この場合「磁化の向き」に相当する。最初にBECを非磁性相に準備し、磁性相に相転移させると空間の至る所で複数の磁区が独立に成長する。その磁化の方向はランダムであるため、それらがたまたまトポロジカルな配置を取ると、相転移完了後にトポロジカルな欠陥であるスピン渦が残される。このスピン渦生成の物理は、キップルによって提唱された本来のキップル・ズレック機構の物理と同一である。これが本研究で提案する、スピノールBECにおけるキップル・ズレック機構である。

原子気体BECの最大の特徴は制御性の高さにあり、フェッシュバハ共鳴による原子間相互作用の制御をはじめとして、多くのパラメータを非常に高い精度でダイナミックに制御することができる。この高い制御性をキップル・ズレック機構の理論に応用し、新しいタイプのキップル・ズレック機構を見出すことが本研究の目的の一つである。

## 3. 研究の方法

本研究は主に計算機を用いた数値的な手法を用いた。具体的な数値計算法は問題に応じて次の3つの方法を用いた。

(1) 系のダイナミクスを調べる場合、一成分もしくは多成分の時間に依存する非線形シュレディンガー方程式を解く必要がある。これを数値的に解く方法の一つとしてクラック・ニコルソン法を用いた。この方法は陰的解法であるため、本研究資金によって導入した対称型マルチプロセッサ（SMP）型並列計算機によって効率的に、計算の高速化を図ることができた。

(2) 時間に依存する非線形シュレディンガー方程式を解くもう一つの有効な方法は擬スペクトル法である。この方法は自動的に周期的境界条件が課されるため、一様無限系、

すなわち理想系の計算により適している。この方法では高速フーリエ変換を多用するが、本研究資金によって導入した計算機は高効率な高速フーリエ変換のライブラリを有しており非常に効率的に計算を行うことができた。

(3) 非線形シュレディンガー方程式の定常状態の安定性を調べるためにポゴリウボフ解析を行う。これは非線形方程式を線形化した上で、対角化を行うというもので、固有値スペクトルから状態の安定性について様々な情報を得ることができる。

以上の方法を問題に応じて使い分けることによって様々な状況下でのボース凝縮体の振る舞いを調べた。

## 4. 研究成果

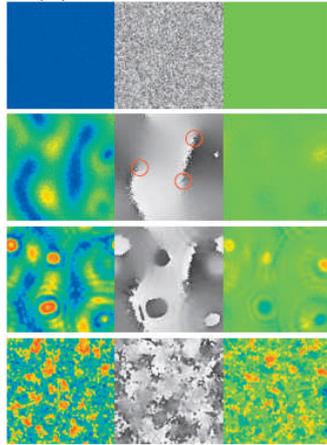
本研究は当初BECの磁気相転移現象におけるキップル・ズレック機構を調べるという目的であったが、それに端を発し、研究対象は当初想像していなかったほど多岐にわたり、期待以上の様々な成果を得ることができた。本研究の広がっていった方向は大きく分けて二つある。一つは磁気相互作用そのものに着目し、磁気相互作用とトポロジカルな欠陥の双方がBECにおいて重要な役割を果たすような現象の研究である。もう一つは、トポロジカルな欠陥の生成そのものに着目し、キップル・ズレック機構に限らず様々な量子流体现象のもとでのトポロジカル欠陥の生成に関する研究である。以下、主な研究成果について述べる。

(1) 動的カシミール効果におけるキップル・ズレック機構

この結果が当初目的としていた「新しいタイプのキップル・ズレック機構の探求」に対する直接的な成果である。

スピン1の原子からなるボース凝縮体を考える。原子間相互作用はポーラー状態が安定であるような場合、例えばナトリウム23を考える。ポーラー状態に磁場をかけてもスピン保存則によりポーラー状態は安定であり続ける。ところが、磁場の強度を適当な振動数で振動させると量子揺らぎが増大し、準粒子が生成されることを示した。これは古典場の理論では決して起こらない、純粋に量子力学的な効果であり、いわゆる動的カシミール効果と同等のメカニズムによって起こる。動的カシミール効果は従来、電磁場すなわち光子生成に関するものしか扱われてこなかったが、本研究では初めてボース・アインシュタイン凝縮体にその考え方を適用し、磁場による励起すなわちマグノンの動的カシミール効果が発生することを示した。

新しいタイプのキップル・ズレック機構は、動的カシミール効果によって生成されたマグノンからマクロな磁化へ成長する際に起こる。右図はその様子を示したものである。最上段は磁化を持たない初期状態であり、2段目は磁化が成長し磁区が至る所で成長してそれら融合した状態である。中央の丸で示した位置にトポロジカルな欠陥（スピン渦）が生成されている。これは量子揺らぎによってランダムな方向を向いた磁化が融合してトポロジカルな欠陥を生成するという意味で、まさにキップル・ズレック機構であると言える。従来のキップル・ズレック機構と異なる点は、振動外部磁場のパラメータを制御することで相関長を制御することができるため、キップル・ズレック機構を制御下で発生させられるという点である。



#### (2) BEC におけるカルマン渦列

これは本研究の柱の一つである、量子渦のダイナミクスに関する研究の中で、最も注目すべき結果である。

「カルマン渦列」とは良く知られた流体现象であり、障害物を通過した流体の後方に渦の列が規則的に生成されるという現象である。これは身近なところでも良く現れる現象で、例えば、細い紐を振り回したときに音が

鳴るといふ現象は、カルマン渦列が規則的に生じることによって起因する。古典流体力学においてこの現象が起こるかどうかはレイノルズ数と呼ばれるパラメータに依存することが知られている。レイノルズ数は粘性を含むため、言い換えれば、古典流体におけるカルマン渦列の生成は流体の粘性に深く関係している。

これに対して、BEC などの超流動体は粘性を持たないため、従来はカルマン渦列の生成は起こらないと考えられてきた。実際、超流動体中で障害物を動かすという問題は実験的にも理論的にも数多く研究されてきたが、カルマン渦列の生成はこれまで報告されていない。本研究で、我々は初めて、BEC 等の超流動体においてカルマン渦列が発生することを示した。

上の図は BEC における障害物後流の様子を示している。左側は従来知られていた互いに逆方向の回転を持つ量子渦対の生成である。これらが規則的に並んだ状態は不安定であり、時間が経つと、渦は不規則になったり周囲に広がっていく。これに対して右側の図では量子渦がカルマン渦に似た配置を取り、障害物の後方に並んでいる。それぞれの渦対が互いに同じ回転方向の渦からなっている点が従来の渦の生成と決定的に異なる。これらの配置はカルマンによって求められた安定な配置を取っている。このカルマン渦列の発生はある限られたパラメータの範囲で起こることが本研究によって明らかになった。

本研究の成果は Physical Review Letters 誌の表紙に採用され世界的に注目された。

#### (3) BEC における様々な流体不安定性

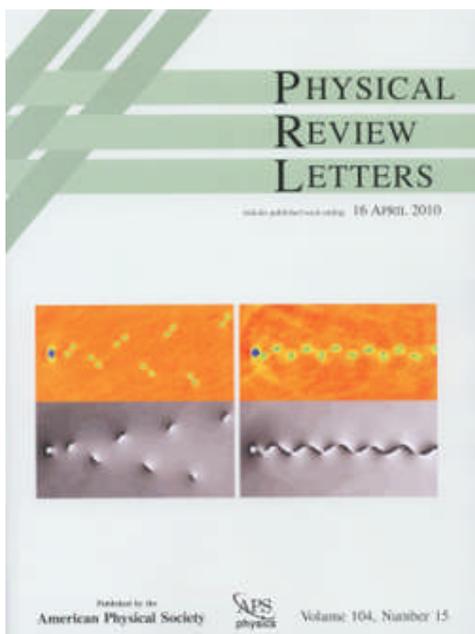
前項の他にも、古典流体力学で知られた様々な流体现象が BEC においてどのように出現するかを研究した (Rayleigh-Taylor 不安定性、Kelvin-Helmholtz 不安定性、Plateau-Rayleigh 不安定性、Rosensweig 不安定性)。これらの研究では、古典流体力学で知られている現象を BEC で再現したというだけにとどまらず、BEC 特有の超流動性や渦の量子化によって古典流体にはない振る舞いを示すことを明らかにした。

例えば、Kelvin-Helmholtz 不安定性の研究 (大阪市立大学との共同研究) では相対速度を持つ二種類の流体の界面で量子渦が規則的な興味深い運動を示すことがわかった。さらに超流動体において知られていた対向超流動不安定性とのクロスオーバーが存在することも明らかにした。

また、上記不安定性の研究の他に、二成分 BEC における泡のダイナミクスに関する研究も行った。

#### (4) ダイポール BEC の崩壊

本研究の目的は BEC の磁性に関連しているが、これをさらに推し進めて、磁性を持つ BEC



の基礎的な性質やダイナミクスを明らかにするという研究が、本研究成果のもう一つの柱となっている。

そのなかで最も注目すべき結果はドイツ・シュトゥットガルトの実験グループおよび東京大学の理論グループとの共同研究である。この研究は、原子間相互作用を制御して磁気相互作用の強いクロム原子の BEC を崩壊させるというものである。磁石の間の力に引力と斥力の両方があるように、原子間の磁気相互作用も角度によって引力斥力両方が働く。通常は原子間の短距離相互作用が斥力であり、それが磁気相互作用の引力を支えているため BEC は安定である。本研究では、短距離相互作用の斥力をフェッシュバハ共鳴を用いてほぼゼロにすることにより、磁気相互作用の引力が打ち勝って系が崩壊する現象を研究した。



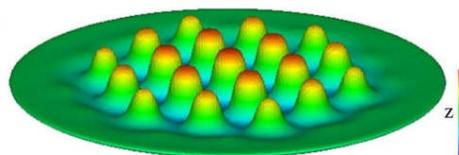
上の図は系が崩壊する様子をとらえた実験結果である。磁気相互作用は、磁石の向きによって力が異なることからわかるように、異方的な性質を持つ。この異方性によって、系の崩壊も異方的に起こり、崩壊後の BEC の形状も磁気相互作用の対称性を反映した異方的なものになっている。従来の実験では、等方的な短距離相互作用による崩壊が研究されてきたが、その場合には系がもともと球対称であれば崩壊後の BEC も球対称である。これに対して、磁気相互作用による崩壊後の BEC の形状は、上の図からもわかるように、四つ葉のクローバー状の形になっている。

この実験と並行して、我々は非線形シュレディンガー方程式に実験条件を反映した効果を取り入れて、数値計算を行い、フィッティングパラメータなしに実験結果を非常に良く再現することに成功した。また、それだけでなく、数値計算結果を解析することにより、崩壊に伴って BEC 中に量子渦輪が形成されることを明らかにした。

(5) ダイポール BEC における様々な現象

前項の研究の他に、ダイポール BEC に関する様々な研究を行った。

そのうちの一つは、磁性流体に関するものである。本来、磁性流体と呼ばれる物質は液体に強磁性微粒子を混ぜ、強磁性的に振る舞うようにした液体である。容器に入った磁性流体に磁場をかけると液面が変形し規則的なとげ状の形になることが知られている。



本研究では、磁気相互作用する二成分ダイポール BEC を磁性流体に見立て、磁性流体に発生するものと同様な変形が二成分界面に現れることを明らかにした（上図）。

本研究は、従来の古典磁性流体現象を再現したというだけではなく、超流体特有の現象も明らかにした。その一つは超固体との関連である。上図のような規則的なとげが並んでいる状態は、周期性と超流動性が共存した超固体とも見なすことができる。さらにこの状態に量子渦を入れて回転させると、とげ状のパターンは静止したままで超流動流だけが流れることがわかった。もう一つの興味深い発見は、量子渦がとげ状のパターンによってトラップされるという現象である。これはパターンの存在によって自発的に超流動永久流が安定化されているということを意味する。

## 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 18 件) (すべて査読あり)

- (1) Kazuki Sasaki, Naoya Suzuki, and Hiroki Saito, “Capillary instability in a two-component Bose-Einstein condensate”, *Physical Review A* 83, 053606(1-6) (2011)
- (2) Kazuki Sasaki, Naoya Suzuki, and Hiroki Saito, “Dynamics of bubbles in a two-component Bose-Einstein condensate”, *Physical Review A* 83, 033602(1-6) (2011)
- (3) Naoya Suzuki, Hiromitsu Takeuchi, Kenichi Kasamatsu, Makoto Tsubota, and Hiroki Saito, “Crossover between Kelvin-Helmholtz and counter-superflow instabilities in two-component Bose-Einstein condensates”, *Physical Review A* 82, 063604(1-9) (2010)
- (4) Takayuki Shimodaira, Tetsuo Kishimoto, and Hiroki Saito, “Connection between

rotation and miscibility in a two-component Bose-Einstein condensate”, *Physical Review A* 82, 013647(1-6) (2010)

(5) Kazuki Sasaki, Naoya Suzuki, and Hiroki Saito, “Bénard-von Kármán vortex street in a Bose-Einstein condensate”, *Physical Review Letters* 104, 150404(1-4) (2010)

(6) Satoshi Tojo, Yoshihisa Taguchi, Yuta Masuyama, Taro Hayashi, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, “Controlling phase separation of binary Bose-Einstein condensates via mixed-spin-channel Feshbach resonance”, *Physical Review A* 82, 033609(1-5) (2010)

(7) Yuki Kawaguchi, Hiroki Saito, Kazuo Kudo, and Masahito Ueda, “Magnetic crystallization of a ferromagnetic Bose-Einstein condensate”, *Physical Review A* 82, 043627(1-17) (2010)

(8) S. Hoshi, H. Saito, “Symmetry-breaking magnetization dynamics of spinor dipolar Bose-Einstein condensates”, *Physical Review A* 81, 013627(1-5) (2010)

(9) H. Takeuchi, N. Suzuki, K. Kasamatsu, H. Saito, M. Tsubota, “Quantum Kelvin-Helmholtz instability in phase-separated two-component Bose-Einstein condensates”, *Physical Review B* 81, 094517(1-5) (2010)

(10) K. Sasaki, N. Suzuki, D. Akamatsu, H. Saito, “Rayleigh-Taylor instability and mushroom-pattern formation in a two-component Bose-Einstein condensate”, *Physical Review A* 80, 063611(1-4) (2009)

(11) S. Tojo, T. Hayashi, T. Tanabe, T. Hirano, Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda, “Spin-dependent inelastic collisions in spin-2 Bose-Einstein condensates”, *Physical Review A* 80, 042704(1-7) (2009)

(12) Hiroki Saito, “Comment on ‘Fragmented metastable states exist in an attractive Bose-Einstein condensate for atom numbers well above the critical number of the Gross-Pitaevskii theory’”, *Physical Review Letters* 103, 018901 (2009)

(13) J. Metz, T. Lahaye, B. Fröhlich, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi, M. Ueda, “Coherent collapses of dipolar Bose-Einstein condensates for different trap geometries”, *New Journal of Physics* 11, 055032(1-11) (2009)

(14) H. Saito, Y. Kawaguchi, M. Ueda, “Ferrofluidity in a Two-Component Dipolar Bose-Einstein Condensate”, *Physical Review Letters* 102, 230403(1-4)

(2009)

(15) Shoichi Hoshi, Hiroki Saito, “Magnetization of a half-quantum vortex in a spinor Bose-Einstein condensate”, *Physical Review A* 78, 053618 (2008)

(16) Hiroki Chiba, Hiroki Saito, “Spin-vortex nucleation in a Bose-Einstein condensate by a spin-dependent rotating trap”, *Physical Review A* 78, 043602(1-5) (2008)

(17) Hiroki Saito, Hiroyuki Hyuga, “Dynamical Casimir effect for magnons in a spinor Bose-Einstein condensate”, *Physical Review A* 78, 033605(1-7) (2008)

(18) T. Lahaye, J. Metz, B. Fröhlich, T. Koch, M. Meister, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi, M. Ueda, “d-wave collapse and explosion of a dipolar Bose-Einstein condensate”, *Physical Review Letters* 101, 080401(1-4) (2008)

[学会発表] (計 20 件)

(1) 鈴木直也、竹内宏光、笠松健一、坪田誠、齋藤弘樹「2成分 BEC におけるケルビン・ヘルムホルツ不安定性と対向流不安定性のクロスオーバー」(日本物理学会, 2011/3/25, 新潟大学)

(2) 下平崇之、岸本哲夫、齋藤弘樹「リング型トラップにおける二成分 BEC の混合性と回転」(日本物理学会, 2011/3/25, 新潟大学)

(3) Kazuki Sasaki, Naoya Suzuki, and Hiroki Saito, “Bénard-von Kármán vortex street in a Bose-Einstein condensate” (Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules, 2011/1/24, Tokyo)

(4) 齋藤弘樹「ボース・アインシュタイン凝縮体における流体不安定性」(理研シンポジウム「量子凝縮系の非線形・非平衡現象」, 2011/1/4, 理化学研究所)

(5) 佐々木一樹、鈴木直也、齋藤弘樹「BEC におけるカルマン渦列」(日本物理学会, 2010/9/25, 大阪府立大学)

(6) Hiroki Saito, “Various instabilities in Bose-Einstein condensates” (Model Equations in Bose-Einstein Condensation, 2010/12/8, 京都大学)

(7) 星翔一、齋藤弘樹「磁気双極子相互作用による BEC の磁化ダイナミクス」(日本物理学会, 2010/3/20, 岡山大学)

(8) H. Saito, Y. Kawaguchi, M. Ueda, “Ferrofluidity in dipolar Bose-Einstein condensates” (International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, 2010/3/9, Yokohama)

(9) N. Suzuki, K. Sasaki, H. Saito, “Interface instabilities in

two-component Bose-Einstein condensates” (International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, 2010/3/9, Yokohama)

(10) 佐々木一樹, 鈴木直也, 赤松大輔, 齋藤弘樹「2成分BECの界面におけるレイリー・テイラー不安定性」(日本物理学会, 2010/3/20, 岡山大学)

(11) 齋藤弘樹, 日向裕幸, 「スピノールBECにおける動的カシミール効果」(日本物理学会, 2009/3/28, 立教大学)

(12) 千葉宏樹, 齋藤弘樹, 「回転トラップ中のBECにおけるスピン渦の生成」(日本物理学会, 2008/9/21, 岩手大学)

(13) 星翔一, 齋藤弘樹, 「スピノールBECにおける half-quantum vortex の磁化ダイナミクス」(日本物理学会, 2008/9/21, 岩手大学)

(14) 川口由紀, 齋藤弘樹, 上田正仁, 「ダイポールBECにおける磁区パターン形成」(日本物理学会, 2009/3/28, 立教大学)

(15) 齋藤弘樹「原子気体BECにおける磁性流体力学」(日本物理学会, 2009/9/27, 熊本大学)

(16) 鈴木直也, 齋藤弘樹「2成分BECにおけるケルビン・ヘルムホルツ不安定性」(日本物理学会, 2009/9/25, 熊本大学)

(17) H. Takeuchi, N. Suzuki, K. Kasamatsu, H. Saito, M. Tsubota, “Shear-flow instability in two-component Bose-Einstein condensates” (International Symposium on Quantum Fluids and Solids, 2009/8/5/, Northwestern Univ., USA)

(18) Hiroki Saito, “Topological defect formation in spinor and dipolar Bose-Einstein condensates”, The 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (2008/11/28, Perth, Australia)

(19) Hiroki Saito, “Kibble-Zurek mechanism in magnetization of a spinor Bose-Einstein condensate”, The 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics (2008/8/27, 日立基礎研究所)

(20) 齋藤弘樹, R. G. Hulet, 上田正仁, 「ラビ振動によるBECドロップレットの安定化」(日本物理学会, 2008/9/21, 岩手大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤弘樹 (Hiroki Saito)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 60334497

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし