

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540464

研究課題名(和文) ボース凝縮体におけるカルマン渦列生成機構の解明

研究課題名(英文) Mechanism of vortex street generation in a Bose-Einstein condensate

研究代表者

斎藤 弘樹 (Saito, Hiroki)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：60334497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：流れる水の中に棒を立てると、下流にカルマン渦列と呼ばれる規則的な渦列が発生することが古くから知られている。最近、粘性のない超流動体でもカルマン渦列に類似した現象が起こることが我々の研究で見されたが、その生成機構については未解明であった。本研究を行った結果、超流動体における量子カルマン渦列の生成機構を解明することに成功した。また、量子渦ダイナミクスに関連する様々な新しい知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：When a cylinder is moved in the water, vortices are generated periodically behind the cylinder, which is called the Karman vortex street. Recently, we found that such a vortex street is also generated in a superfluid. However, the mechanism had not been understood. In the present study, the mechanism of the quantized vortex street generation has been clarified. Moreover, a variety of novel phenomena in the vortex dynamics have been elucidated.

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：ボース・アインシュタイン凝縮 量子渦 超流動

1. 研究開始当初の背景

カルマン渦列とは、流れる流体中に障害物を置いたとき、その下流に生成される規則的な渦の連なりである。この現象は古くからよく知られており、流体の粘性が渦列の生成に重要な役割を果たすことが分かっている。

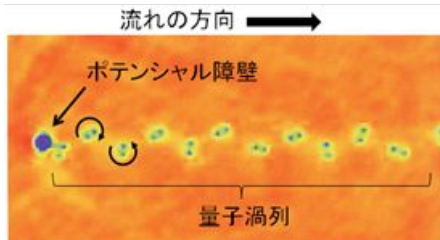


図1: ボース凝縮体に生成された量子カルマン渦列 (文献[1]より転載)

これに対して 2010 年に、粘性を持たない超流動体においてカルマン渦列に酷似した構造が形成されることが、本研究代表者のグループが行った数値シミュレーションによって発見された[1]。これは物理系として原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体(以下、ボース凝縮体と呼ぶ)を想定しており、流れているボース凝縮体中に円柱状のポテンシャル障壁を加えて、下流の様子を調べるといふシミュレーションである。すると、ポテンシャル障壁の下流に図1のような量子渦のパターンが出現した。図中で凝縮体は左から右へと流れており、明るい部分は原子密度が高く、暗い部分は原子密度が低いことを表す。左の大きな暗い円はポテンシャル障壁によって原子が排除された部分に相当し、その下流側(右側)に存在する多数の点状部分が生成された量子渦を表す。同方向に回転する二つの量子渦がペアとなって規則的に下流に放出されている様子がわかる。古典流体におけるカルマン渦列と比較すると、渦が量子化されている点とペアになっている点があるものの、それらの配置は非常に似ている。実際、図1の渦列はカルマンによって求められた安定な渦配置(左右の渦間隔 / 上下の渦列間隔 = 0.281) にほぼ一致する。

[1] K. Sasaki, N. Suzuki, and H. Saito, Phys. Rev. Lett. 104, 150404 (2010).

2. 研究の目的

本研究の目的は、図1のような量子カルマン渦列の物理的な生成機構を明らかにすることである。古典流体におけるカルマン渦列の生成機構は、粘性が関与した流体不安定性(Hopf分岐)であることが1980~90年代に明らかにされた。他方、図1の量子カルマン渦列生成に関しては、文献[1]で数値的に現象が示されたのみであり、その生成機構につい

てはまったくわかっていない。ボース凝縮体には粘性がなく、さらに渦が量子化されていることを考慮すると、量子渦列の生成機構は古典流体とは本質的に異なることが期待される。

本研究を通じて、量子流体における新しい流体現象を見出し、量子流体に対する理解を深めることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

計算機を用いて、量子流体のダイナミクスの詳細な数値解析を行う。ボース凝縮体のダイナミクスはグロス・ピタエフスキー方程式と呼ばれる非線形シュレディンガー方程式によく従うことが知られているため、この方程式を擬スペクトル法という高速フーリエ変換を駆使した方法を用いて数値的に解く。

具体的には、初期状態として基底状態を虚時間発展法で求める。これはグロス・ピタエフスキー方程式の時間変数を虚数として発展させることで基底状態に収束させる方法で、これも擬スペクトル法を用いる。次に、基底状態に微小な数値ノイズを加える。これは数値計算における不自然な対称性を破るためである。このようにして準備した初期状態から出発して、擬スペクトル法で実時間発展させ、ダイナミクスを調べる。

以上の方法によって、量子渦に関連したダイナミクスをあらゆる面から多角的に調べる。

4. 研究成果

本研究で得られた研究成果は大きく分けて3つの種類に分類される。一つ目は、本来の目的である量子カルマン渦列の生成機構の解明に向けて、その周辺の問題からアプローチする過程で得られた成果である。二つ目は、本研究の主題である量子カルマン渦列の生成機構に直接関連した成果である。三つ目はこれらの研究から派生する形で得られた成果で、本研究と直接関係するものではないが、本研究が重要な動機となったものである。以下、これらの成果のうち主要なものについて述べる。

(1) 量子渦のダイナミクスに関する研究

本研究の進め方として、まず量子渦のダイナミクスに関連する研究から着手することにした。これによって量子渦生成に関する知見を深め、本研究の目的を達成することを目指した。

まず、ボース凝縮体中でポテンシャルを移動させ、量子渦対を生成させるダイナミクスを研究した。特に、これまで斥力ポテンシャルの場合のみが研究されていたが、引力ポテンシャルにも拡張した点新しい点である。その結果、ポテンシャルの大きさや動かし方によって、量子渦対の伝搬速度を広い範

困で制御できることが明らかになった。また、発生した量子渦対を加速、減速、方向転換する方法も明らかにした。(論文リスト2)

次に、この量子渦対発生法を利用して、2成分ボース凝縮体における量子渦対のダイナミクスを研究した。相分離した2成分ボース凝縮体の一方の成分中に量子渦対を発生させ2成分間の境界面に向けて進行させる。すると、量子渦対が境界面を通過して他方の成分に透過することが明らかになった。これは自明ではない。なぜなら、量子渦は位相欠陥であるが、成分間の相互作用は位相ではなく密度の形で入っているからである。量子渦対が境界面を透過するかどうかは、伝搬速度や2成分間の相互作用の強さに依存することがわかった。(論文リスト4)

これらの研究は、冷却原子気体のボース凝縮体を物理系として想定していたが、最近、半導体量子井戸中の励起子ポラリトンの系においてもボース凝縮が観測され、超流動性などが確かめられている。そこで、励起子ポラリトン超流動体でも量子カルマン渦列が発生するかどうかを調べた。この系の特徴はポラリトンが絶えず流入、散逸している点である。研究の結果、このような非平衡開放系である励起子ポラリトンの系でも量子カルマン渦列が発生することが明らかになった。(論文リスト5)

また、励起子ポラリトン超流動体の系で、流入、散逸により常にある領域で流れが生じるような状況を想定すると、量子渦があるパターンを形成して静止することが明らかになった。複数の量子渦が存在すると通常は複雑に動き回るのでこの結果は自明ではない。これは量子系における散逸構造と呼ぶこともできる。(論文リスト8)

(2) 量子カルマン渦列生成機構の解明

前項の研究を通じて、量子渦系の運動に対する理解が深まったことにより、ついに量子カルマン渦列の生成機構が明らかになった。

量子渦は点状の位相欠陥であるが、その周囲に速度場を形成する。障害物ポテンシャルから量子渦が生成すると、それは障害物後方に流されていくが、その途中で量子渦が作りだす速度場がポテンシャル周辺に速度場に影響を与える。量子カルマン渦列が生成するような条件のもとでは、障害物後方に流された量子渦が障害物周辺の速度場を増強し、次の量子渦生成を誘発し、周期的に続々と量子渦列が発生していくことがわかった。これが量子カルマン渦列の生成機構である。

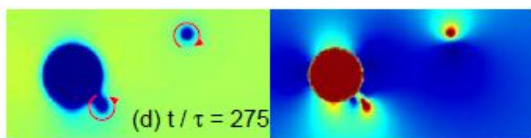


図2: 量子カルマン渦列生成機構(文献

[2]より転載)

図2は量子渦が誘発される瞬間のスナップショットで、左側が原子密度分布、右側が流速の大きさを表す。大きな円が障害物ポテンシャルを表し、小さい点状のものが量子渦である。量子渦の近傍では流速が速くなっている。図2で障害物ポテンシャルの近傍に生成された直後の量子渦が放出されようとしているが、そのすぐ左側のポテンシャルに沿った部分に流速が速くなっている部分が見られる。これは生成された量子渦の周囲の速度場によって流速が増加されていることによる。速度が音速を超えるとランダウ不安定性によって量子渦が生成するため、この部分から次の量子渦が生成される。このようにして、量子渦が連鎖的に次々と誘発され、その結果、周期的なカルマン渦列の構造ができることがわかった。この研究成果については、論文[2]にまとめ、現在投稿中である。

[2] T. Kadokura, J. Yoshida, and H. Saito, "Hysteresis in quantized vortex shedding" 査読中

(3) 本研究を通じて展開された研究

本研究課題と直接は関係ないが、本研究を遂行する途中で、アイデアを得て行った研究がいくつかある。

一つは、励起子ポラリトン超流動体の系で起こるパターン形成に関する研究である。ある条件のもとで、励起子ポラリトン超流動体に三角格子状のパターンが自発的に形成されることがわかった。さらに、時間発展させるとパターンが突然崩壊し、しばらくするとまた三角格子状のパターンが形成される様子が見られた。このように、秩序状態と無秩序状態の間で自発的に振動するような現象は他に例がない。(論文リスト6)

もう一つは、超流動体における流体力学的不安定性の研究である。カルマン渦列の生成も流体力学的不安定性に関連している。レイリー・テイラー不安定性およびプラトー・レイリー不安定性が超流動体でどのように出現するかを調べ、超流動体特有のダイナミクスを見出した。(論文リスト1, 3)

以上のように、本研究課題の当初の目的である超流動体における量子カルマン渦列生成機構の解明に成功したばかりでなく、そこから研究が広く展開し、様々な成果が得られた。

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11件)すべて査読有り

1. Hiroki Saito, "Many-body dynamics of a Bose-Einstein condensate collapsing by quantum tunneling"

Phys. Rev. A 89, 023610 (2014) [6 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.89.023610>

2. Yujiro Eto, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, "Observation of Dipole-Induced Spin Texture in an 87Rb Bose-Einstein Condensate"
Phys. Rev. Lett. 112, 185301 (2014) [5 pages]
DOI:
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.185301>

3. Hiroki Saito, Tomohiko Aioi, and Tsuyoshi Kadokura, "Order-disorder oscillations in exciton-polariton superfluids"
Phys. Rev. Lett. 110, 026401 (2013) [5 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.026401>

4. Hiroki Saito, Yuki Kawaguchi, and Masahito Ueda, "Kibble-Zurek mechanism in a trapped ferromagnetic Bose-Einstein condensate"
J. Phys.: Condens. Matter 25, 404212 (2013) [9 pages]
doi:[10.1088/0953-8984/25/40/404212](https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/40/404212)

5. Tomohiko Aioi, Tsuyoshi Kadokura, and Hiroki Saito, "Dissipative structures of quantized vortices in a coherently pumped polariton superfluid"
Phys. Rev. B 87, 205312 (2013) [7 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.205312>

6. Yujiro Eto, Sawako Sekine, Sho Hasegawa, Mark Sadgrove, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, "Control and detection of the Larmor precession of F=2 87Rb Bose-Einstein condensates by Ramsey interferometry and spin echo"
Appl. Phys. Express 6, 052801 (2013) [4 pages]
doi:[10.7567/APEX.6.052801](https://doi.org/10.7567/APEX.6.052801)

7. Tsuyoshi Kadokura, Tomohiko Aioi, Kazuki Sasaki, Tetsuo Kishimoto, and Hiroki Saito, "Rayleigh-Taylor instability in a two-component Bose-Einstein condensate with rotational symmetry"
Phys. Rev. A 85, 013602 (2012) [4 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.85.013602>

8. Tomohiko Aioi, Tsuyoshi Kadokura, and Hiroki Saito, "Penetration of a vortex

dipole across an interface of Bose-Einstein condensates"

Phys. Rev. A 85, 023618 (2012) [7 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.85.023618>

9. Hiroki Saito, Tomohiko Aioi, and Tsuyoshi Kadokura, "Bénard-von Kármán vortex street in an exciton-polariton superfluid"
Phys. Rev. B 86, 014504 (2012) [5 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.014504>

10. Kazuki Sasaki, Naoya Suzuki, and Hiroki Saito, "Capillary instability in a two-component Bose-Einstein condensate"
Phys. Rev. A 83, 053606 (2011) [6 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.83.053606>

11. Tomohiko Aioi, Tsuyoshi Kadokura, Tetsuo Kishimoto, and Hiroki Saito, "Controlled generation and manipulation of vortex dipoles in a Bose-Einstein condensate"
Phys. Rev. X 1, 021003 (2011) [10 pages]
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.1.021003>

[学会発表](計12件)

1. Hiroki Saito, Tomohiko Aioi, and Tsuyoshi Kadokura, "Order-disorder oscillations in an exciton-polariton superfluid " The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (Hakone, Japan), 2014年4月

2. 相生智彦, 門倉強, 齋藤弘樹「ポラリトン超流動体における量子渦の散逸構造」日本物理学会第69回年次大会(東海大学), 2014年3月

3. 齋藤弘樹, 相生智彦, 門倉強「励起子ポラリトン超流動体におけるパターンの崩壊と復活」日本物理学会第2013年秋季大会(徳島大学), 2013年9月

4. 相生智彦, 門倉強, 齋藤弘樹「励起子ポラリトン超流動体におけるカルマン渦列」日本物理学会第68回年次大会(広島大学),

2013年3月

研究者番号：60334497

5. 相生智彦, 門倉強, 齋藤弘樹 「2成分 BEC 界面における量子渦対の透過」 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学), 2012 年 9 月

6. 齋藤弘樹 「原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体の流体力学的不安定性」 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学), 2012 年 9 月

7. Hiroki Saito, "Hydrodynamic instabilities and vortex streets in superfluids" IUTAM Symposium "Understanding common aspects of extreme events in fluids" (Dublin, Ireland) 2012 年 7 月

8. 佐々木一樹, 鈴木直也, 齋藤弘樹 「2成分 BEC におけるプラトー・レイリー不安定性」 日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大学), 2012 年 3 月

9. 門倉強, 相生智彦, 佐々木一樹, 岸本哲夫, 齋藤弘樹 「2成分 BEC における回転対称性を破るレイリー・テイラー不安定性」 日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大学), 2012 年 3 月

10. 相生智彦, 門倉強, 岸本哲夫, 齋藤弘樹 「レーザー光を用いたボース凝縮体における量子渦対の生成と制御」レーザー学会第 32 回年次大会 (仙台), 2012 年 2 月

11. 佐々木一樹, 鈴木直也, 齋藤弘樹, 「2成分 BEC における泡の運動」 日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学), 2011 年 9 月

12. 相生智彦, 門倉強, 岸本哲夫, 齋藤弘樹 「様々なポテンシャルによる量子渦対の生成と制御」 日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学), 2011 年 9 月

〔その他〕
特になし。

6. 研究組織

(1) 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