

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740219

研究課題名(和文)新しい量子乱流研究の開拓と構築

研究課題名(英文)Pioneering and construction of new research field for quantum turbulence

研究代表者

小林 未知数(Kobayashi, Michikazu)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50433313

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：超流動液体ヘリウムや冷却原子気体のようないわゆる量子流体中の渦は、大きさが全てそろった量子渦となり、その量子渦が複雑に絡み合った状態として量子乱流が実現される。量子渦はトポロジカル欠陥とも呼ばれ、宇宙の急速な冷却によって多数生じたと言われる宇宙ひもや、乱れた液晶中の転傾と呼ばれる線状の欠陥のような他のトポロジカルとよく似た構造を持っている。本研究では、このような様々な種類のトポロジカル欠陥による様々な種類の量子乱流状態を、ローレンツ対称性をキーワードに大きく2つのタイプに分類することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In quantum fluid such as superfluid liquid helium and ultracold atomic gas, vortices are quantized, i.e., strength of vortices are same for all vortices, and quantum turbulence can be realized as highly tangled state of quantized vortices. Quantized vortices are topological defects and have quite similar structure to other topological defects such as cosmic strings that are predicted to arise just after rapid cooling of universe and linear defects called disclinations in disturbed liquid crystal. In my work, I have succeeded to classify various kinds of quantum turbulence constructed by various kinds of topological defects to just two types of quantum turbulence with the Lorentz symmetry.

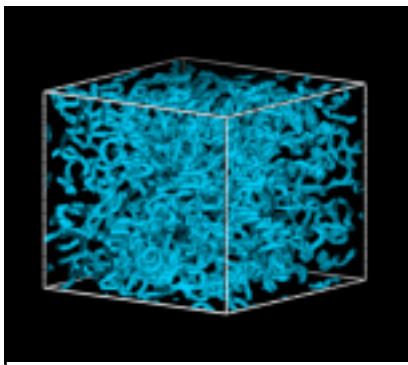
研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物性II

キーワード：量子渦 量子流体 乱流 トポロジー

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウムや冷却原子気体ボース・アインシュタイン凝縮などの量子流体によって実現される量子乱流において、20世紀最後から21世紀初頭に、実験において粘性流体乱流（古典乱流）との統計的な類似性が発見された。また数値シミュレーションにおいても同様の統計的類似性が発見され、量子乱流研究は低温物理学研究の枠を超え、流体力学・量子力学・非線形非平衡物理学をまたがった幅広い分野において興味を持たれるテーマとなった。この統計的類似性の起源がどこにあるのかを明らかにする、という大きな疑問を解決するという大きな目標がこの分野の根幹に根付くと共に、古典乱流にはない量子乱流特有の性質を探索する、つまり新しい量子乱流研究を構築するという大きな流れが構成されつつある。



2. 研究の目的

量子乱流を研究する重要な意義は以下の4点にある。

- (i) 乱流は渦の複雑な運動と深く関係があることが指摘されており、その理解が重要である。古典乱流の渦に関しては「どこからが渦なのか」という渦の明確な意義がない一方で、量子乱流を構成する量子渦は一定の循環と非常に細い芯を持っており、乱流中において渦の存在を明確に定義することができる(上図を参照)。したがって量子乱流と古典乱流の統計的類似性は、**量子乱流は乱流を要素還元的にとらえ、理解するための理想的な系**であることを意味し、量子乱流の理解が量子乱流にとどまらず乱流全体を理解する鍵となることを意味している。
- (ii) 量子乱流の性質は、構成される量子渦の性質に強く影響を受けると考えられる。量子渦は量子流体中のトポロジカル欠陥として存在し、故にその性質は量子流体のトポロジーによって大きく変化する。このような概念は古典流体にはない。このように**量子流体のトポロジーを変化させることにより、新奇で多彩な性質を持った量子乱流状態を実現することができる**。
- (iii) 量子乱流はいわゆる巨視的量子状態における典型的な非平衡状態である。非平衡状態の統計力学の理論構築は徐々に進みつつあるが、実験で観測される量子乱流現象の幾つかは非平衡統計力学の典型的なモデルを用いて理解される。これは量子乱流が古典力学的非平衡状態よりも量子渦という比較的単純なメカニズムによって支配されているであろうことに起因しており、量子乱流が**非平衡統計力学の理論を検証するための格好の系**であることを示している。
- (iv) 量子乱流は超流動ヘリウム等、ボース・アインシュタイン凝縮を起こしている系

で実現する、しかし量子乱流のように、非平衡状態にあり、かつ長距離秩序が乱されたボース・アインシュタイン凝縮の理論的概念はまだ確立されていない。ボース・アインシュタイン凝縮は系の位相シフト対称性の破れによって引き起こされることが理論的に明らかになっているが、量子乱流において、おそらく我々が想像もしなかったような対称性の破れが期待できるであろう。このように**量子乱流は今までになかった動的なボース・アインシュタイン凝縮の概念を新たに定義するきっかけを与えるほぼ唯一の系**である。

3. 研究の方法

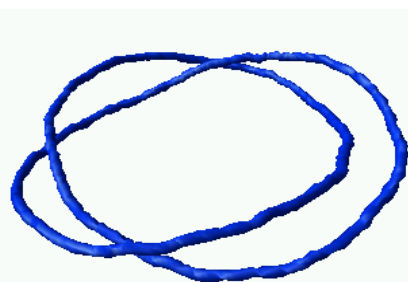
本研究では新しい量子乱流研究として、上記の研究目的、特に(i)と(ii)に着目して、以下の点を取り上げる。

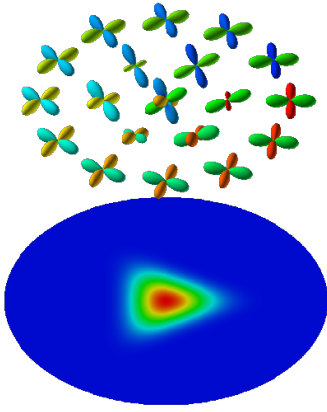
- (i) 量子乱流を構成する量子渦の、特に量子乱流に関連する基本的な性質を明らかにする。
- (ii) 量子流体のトポロジーを変えることで量子乱流がどこまで制御可能であるか：今まで量子乱流は最も単純なスカラー・ボース・アインシュタイン凝縮においてのみ考えられてきた。しかしボース・アインシュタイン凝縮が、例えばスピノル・ボース・アインシュタイン凝縮のようにスピン自由度を持つと、量子渦は性質は全く異なる性質を持つようになる。量子渦をトポロジーによって制御し、量子乱流がどれくらい影響を受けるのかを明らかにすれば、量子乱流と量子渦の関係がより明らかになるであろう。

具体的な研究方法としては量子渦および量子乱流のダイナミクスを記述する基礎方程式であるグロス・ピタエフスキー方程式および関連する方程式の理論解析および、数値解析である。

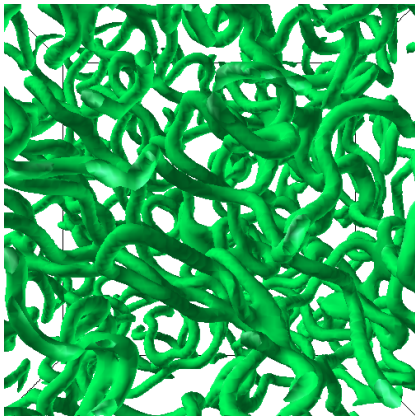
4. 研究成果

2010年度にはスピノル・ボース・アインシュタイン凝縮において、トポロジカル欠陥が非可換な代数で記述される非可換量子渦が現れることを明らかにし、その性質が劇的に変わることを明らかにした。具体的には渦の非可換性によって渦同士が通り抜けられなくなり、系の中に非自明な結び目や絡み目ができることを示した(下図1番目)。また渦の外側と内側で波動関数が異なる離散対称性を持つときに、両者を連続的にかつ整合的につなぐという渦タイリング問題が生じることが明らかになった。また、この渦タイリング問題によって、渦輪子と呼ばれる新しいトポロジカル励起が可能となり、乱流に大きく影響を及ぼす可能性のあることが明らかとなった(下図2番目)。



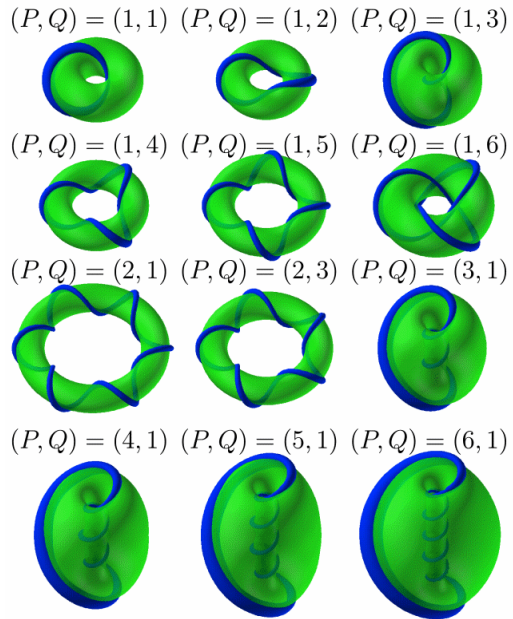


2011年度には量子渦および量子乱流の舞台となる量子流体における秩序化ダイナミクスの研究を行った。秩序化ダイナミクス(下図)とは、系を量子渦が存在しない無秩序相から量子渦が存在できる秩序相へ、相を特徴付けるコントロールパラメータを急激に変化させることで、無秩序相から秩序相へ劇的に変化させるときに見られるダイナミクスである。このダイナミクスを大きく支配するのが量子渦であるという点において秩序化ダイナミクスと量子乱流は非常に類似している。量子乱流と秩序化ダイナミクスを比較すると、秩序化ダイナミクスのほうが理解が進んでおり、量子流体のトポロジー変化に対して期待できる多種多様なダイナミクスは、秩序化ダイナミクスのほうが理解しやすいと思われる。研究では、有限サイズスケリングの手法が秩序化ダイナミクスで可能であること、またこの手法が量子乱流の解析に有効なことを明らかにした。また、同様のスケリングの手法を用いることで、コントロールパラメータをゆっくりと変化させたときのダイナミクスを理解することもでき、超流動ヘリウムにおける秩序化ダイナミクスのより深い理解につながるであろうことも明らかにした。



2012年度および2013年度には、系のトポロジーの、量子渦への影響をより詳しく調べべく、量子流体とは少し異なり、Faddeev-Skyrmeモデルと呼ばれる系の解析を行った。この系は様々なトポロジーおよびそれに伴う量子渦の存在を可能にし、また量子渦に流れが伴わない。この系においてどのような量子渦の安定構造が可能なのかを調べた。Faddeev-Skyrmeモデルにおけるトポロジカル欠陥はHopf数と呼ばれる量子数で特徴

づけることができることが分かっているが、模型の形によってはさらに複雑な量子数の構造を有することができる。例えばIsing外場と呼ばれる外場を付け加えることで、トポロジカル欠陥はHopf数ではなく (P, Q) という2つの量子数で特徴付けられる。トポロジカル欠陥はトーラス結び目の構造を持ち(下図)、 (P, Q) はトーラス結び目の結び目数と全く同じものとなることが分かった。Faddeev-Skyrmeモデルは古典Heisenbergモデルと非常によく似ており、磁性体でスピンの乱流が可能になるのであれば、このような新奇なトポロジカル欠陥が見えるようになることが期待できる。ただし、乱流状態に関するものはまだあまり行われておらず、より詳しい研究が必要になる。



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)

- ① Michikazu Kobayashi and Muneto Nitta, Torus knots as Hopfions, Phys. Lett. B, 査読有, 728, 2014, 314-318
- ② Michikazu Kobayashi and Muneto Nitta, Vortex polygons and their stabilities in Bose-Einstein condensates and field theory, J. Low. Temp. Phys., 査読有, 175, 2014, 208-215
- ③ Michikazu Kobayashi and Muneto Nitta, Kelvin modes as Nambu-Goldstone modes along superfluid vortices and relativistic strings: finite volume size effects, Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有, 021B01, 2014, 1-6
- ④ Michikazu Kobayashi and Muneto Nitta, Winding Hopfion on $R^2 \times S^1$, Nucl. Phys. B, 査読有, 876, 2013, 605-618
- ⑤ Michikazu Kobayashi and Muneto Nitta, Fractional vortex molecules and vortex polygons in a baby Skyrme model, Phys. Rev. D, 査読有, 87, 2013, 125013-1-10
- ⑥ Michikazu Kobayashi and Muneto

Nitta, Sine-Gordon kins on a domain wall ring, Phys. Rev. D, 査読有, 87, 2013, 085003-1-6

⑦ Makoto Tsubota, Michikazu Kobayashi, and Hiromitsu Takeuchi, Quantum hydrodynamics, Phys. Rep. 査読有, 522, 2013, 191-238

⑧ Katsuhiko Nakamura, Doniyor Babajanov, Davron Matrasulov, and Michikazu Kobayashi, Dynamics of inertial vortices in multicomponent Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A, 査読有, 86, 2012, 053613-1-8

⑨ Shingo Kobayashi, Michikazu Kobayashi, Yuki Kawaguchi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda, Abe homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices, Nucl. Phys. B, 査読有, 856, 2012, 577-606

⑩ Jorge A. Seman, Emanuel A. L. Henn, Rodrigo Figueiredo Shiozaki, Giacomo Roati, Freddy Jackson Poveda-Cuevas, Kilvia M. F. Magalhaes, Vyacheslav I. Yukakolov, Makoto Tsubota, Michikazu Kobayashi, Kenichi Kasamatsu, and Vanderlei Salvador Bagnato, Laser Phys. Lett. 査読有, 8, 2011, 691-696

⑪ Michikazu Kobayashi, Physics of non-Abelian vortices in Bose-Einstein condensates, J. Phys. Conf. Ser., 査読有, 297, 2011, 012013-1-17

⑫ Michikazu Kobayashi, Yuki Kawaguchi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda, Collision Dynamics of Non-Abelian Vortices in Spinor Bose-Einstein Condensates, J. Low Temp. Phys., 査読有, 162, 2011, 299-306

⑬ Yuki Kawaguchi, Michikazu Kobayashi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda, Topological Excitations in Spinor Bose-Einstein Condensates, Prog. Theor. Phys. Suppl., 査読有, 186, 2010, 455-462

⑭ Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda, Quasi-Nambu-Goldstone Modes in Bose-Einstein Condensates, Phys. Rev. Lett., 査読有, 105, 2010, 230406-1-4

⑮ Yasunari Kurita, Michikazu Kobayashi, Hideki Ishihara, and Makoto Tsubota, Particle creation in Bose-Einstein condensates: Theoretical formulation based on conserving gapless mean-field theory, Phys. Rev. A, 査読有, 82, 2010, 053602-1-8

⑯ Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, and Masahito Ueda, Bogoliubov theory and Lee-Huang-Yang corrections in spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates in the presence of the quadratic Zeeman effect, Phys. Rev. A, 査読有, 81, 2010, 063632-1-29

⑰ 小林 未知数, 川口由紀, 新田宗土, 上田正仁, スピノル・ボース・アインシュタイン凝縮で実現する非可換量子渦と、その衝突ダイナミクス、日本物理学会誌「最近の研究から」、査読有、65 (8月号)、2010、625-627

⑱ 小林 未知数, 非可換量子渦の衝突ダイナミクスとラング渦形成のダイナミクス、物性研究、査読有、94、2010、53-83

〔学会発表〕 (計 15 件)

① Michikazu Kobayashi, Topological excitations and dynamical behavior in Bose-Einstein condensates and other systems, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013, Culture Resort Festone, Japan, 2013. 10. 22-26

② Michikazu Kobayashi, Non-Abelian Vortices and Their Non-equilibrium Dynamics in Bose-Einstein Condensates with Spins, Quarks and Hadrons under Extreme Conditions - Lattice QCD, Holography, Topology, and Physics at RHIC/LHC, Keio University, Japan, 2011. 11. 17-18

③ Michikazu Kobayashi, Physics of topological excitations in Bose-Einstein condensates, Statphys-Kolkata VII, Kolkata, India, 2010. 11. 26-30

④ Michikazu Kobayashi, Yuki Kawaguchi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda, Non-abelian vortices in spinor Bose-Einstein condensates, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Grenoble, France, 2010. 8. 1-7

⑤ Michikazu Kobayashi, Yuki Kawaguchi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda, Collision Dynamics of Non-Abelian Vortices in Spin-2 Spinor Bose-Einstein Condensates, 19th International Laser Physics Workshop, Foz do Iguazu, Brazil, 2010. 7. 5-9

⑥ 小林未知数, 新田宗土、イジング型O(3)非線形シグマ模型におけるドメイン壁に局在した南部・ゴールドストーンモード、日本物理学会第69回年次大会、東海大学、2013. 3. 27-30

⑦ 小林未知数, 新田宗土、②成分ボース凝縮体における渦多角形の安定性、日本物理学会2013年秋季大会、徳島大学、2013. 9. 25-28

⑧ 小林未知数, 新田宗土、Faddeev-Skyrme模型の新しいソリトン解：XY型の場合、日本物理学会2013年秋季大会、高知大学、2013. 9. 20-23

⑨ 小林未知数, 小林伸吾、新田宗土、川口由紀、上田正仁、量子渦の渦心における内部自由度の幾何学的決定法およびスピノル・ボース凝縮への応用、日本物理学会2012年秋大会、横浜国立大学、2012. 3. 18-21

⑩ 小林未知数, Leticia F. Cugliandolo, 3次元O(2)模型の相秩序化ダイナミクスにおける臨界緩和、動的緩和および有限サイズスケールリング、日本物理学会第67回年次大会、関西学院大学、2012. 9. 24-27

⑪ 小林未知数, BECにおける量子渦および量子乱流、日本物理学会第67回年次大会、関西学院大学、2012. 9. 24-27

⑫ 小林未知数, トポロジカル欠陥に支配される非平衡物理、非平衡系の物理-ミクロとマクロの架け橋、京都大学基礎物理学研究所、2011. 8. 18-20

⑬ 小林未知数, 川口由紀、新田宗土、上田正仁、非可換量子乱流、日本物理学会2010年秋季大会、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、2010. 9. 23-26

⑭ Michikazu Kobayashi and Muneto Nitta, Vortex polygons and their stabilities in Bose-Einstein condensates and field

theory, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Kunibiki Messe, Matue, Japan, 2013. 8. 1-6

⑮ Michikazu Kobayashi, Vortex Tiling in Spin-2 Spinor Bose-Einstein Condensates, Quantized Flux in Tightly Knotted and Linked Systems, Issac Newton Institute for Mathematical Science, United Kingdom, 2012. 12. 3-7

〔図書〕（計 1 件）

① Makoto Tsubota, Kenichi Kasamatu, and Michikazu Kobayashi, Oxford University Press, Quantized vortices in superfluid helium and atomic Bose-Einstein condensates, Novel Superfluids, 2013, 1, 156-252

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 未知数 (KOBAYASHI MICHIKAZU)

研究者番号：22740219

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：