

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400366

研究課題名(和文)量子乱流の理論的および数値的研究：乱流遷移の解明と秩序変数の同定

研究課題名(英文)Theoretical and numerical studies of quantum turbulence

研究代表者

坪田 誠 (TSUBOTA, Makoto)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10197759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウムおよび原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の量子乱流に関し、理論的・数値的研究を行った。1.超流動ヘリウム：1-1. 振動物体を作る量子乱流の異方性を明らかにした。1-2. 管内熱対向流における非一様量子乱流を研究した。1-3. 管内非一様乱流で対数型速度分布を見出した。1-4. coflowを調べた。2.原子気体BEC：2-1. スピノールBECでスピンと超流動が結合する乱流を調べた。2-2. ボゴリュウボフ励起を作る波乱流について調べ、弱乱流理論から相関関数のべきを求め数値計算により検証した。2-3. スピノールBECにおいてスピン波を作る波乱流を調べた。

研究成果の概要(英文)：We study analytically and numerically quantum turbulence (QT) in superfluid helium and atomic Bose-Einstein condensates (BECs). 1. Superfluid helium: 1-1. We study QT created by a vibrating sphere and find anisotropy of the vortex tangle. 1-2. We study inhomogeneous QT in thermal counterflow in a square channel. 1-3. We find logarithmic velocity profile of QT in a channel. 1-4. We study coflow where superfluid and normal fluid flow toward the same direction. This system was found to have an attractor into which vortices are attracted by mutual friction. 2. Atomic BEC: 2-1. We study spin-superflow coupled turbulence in spinor BECs. The power law of each energy spectrum is analytically obtained and confirmed numerically. 2-2. Bogoriubov wave turbulence is studied. The power laws of the correlation function are obtained from the weak wave turbulence theory, and confirmed numerically. 2-3. We find direct and inverse cascades of spin wave turbulence in spinor BEC.

研究分野：物性理論

キーワード：量子乱流 量子渦 超流動ヘリウム 原子気体ボース・アインシュタイン凝縮 古典乱流

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウムや原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)などの量子凝縮系は、半世紀以上に渡り低温物理学における重要な研究対象であった。その平衡状態については、かなりの理解が進んだが、非平衡状態についてはほとんど解明が行われていない。一方、世界的に見て、可視化に代表される実験研究が進み、従来は不明だった物理が明らかにされつつある。これらの系の非線形・非平衡物理としての典型的な問題が、量子流体力学および量子乱流である。本研究では、量子流体力学および量子乱流に関して、最新の研究を行う。

2. 研究の目的

ここ数年明らかになりつつある実験結果に対応して、従来の理論的および数値的研究を超える研究を行う。具体的には以下の通り。

- (1) 超流動ヘリウム：伝統的な熱対向流における可視化実験により、量子渦および常流動流れが容器壁の影響を受けて非一様になっていることがわかってきた。この状況を解明すべく、管内非一様量子乱流の特性を明らかにするとともに、超流動-常流動の結合運動方程式を扱う。
- (2) 原子気体 BEC：この系では、ヘリウム系には無い、多彩な量子乱流が実現する。量子渦の作る標準的な量子乱流のみならず、スピノール BEC のスピン乱流、ボゴリュウボフ素励起が作る波乱流などを明らかにする。

3. 研究の方法

数値的および解析的研究を組み合わせる。

- (1) 超流動ヘリウム：これまで培ってきた量子渦モデルに基づく。従来のほとんどの研究は、バルクを想定し三方向周期境界条件を用いていたが、ここでは管内流を想定した境界条件を用いる。常流動成分は固定し、そこから量子渦への相互摩擦を取り入れるが、量子渦から常流動へのキックバックは考慮しない。ただし、それを考慮した計算コードの開発、および数値計算の実行を行っている。
- (2) 原子気体 BEC：巨視的波動関数が従うグロス・ピタエフスキー(GP)方程式を用いる。スピノール BEC の場合は、スピノール GP モデルを用いる。

4. 研究成果

以下、文献番号は、5. の[雑誌論文]の番号を指す。

1. 超流動ヘリウム

1-1. 振動物体が作る量子乱流の実験研究に関連して、振動球が作る量子乱流とそこから放出される量子渦輪の異方性に着目して数値計算を行った(文献 2)。球の振動方向を反映して生成される渦タングルは異方的になる。それによる渦輪の放出も異方的とな

るが、それは渦輪の半径に依存する。比較的小さい渦輪は等方的に放出されるが、大きな渦輪は異方性を示す。これが最近、大阪市大グループの実験により検証された。

1-2. 正方形管内熱対向流における非一様量子渦タングルの挙動を明らかにした(文献 4)(図 1)。近年の可視化実験が正方形管内

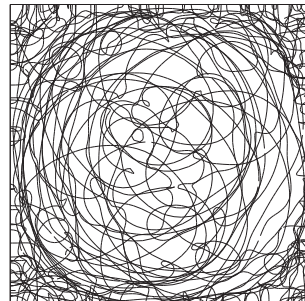


図 1 正方形管内熱対向流中の非一様渦タングル

の常流動速度場の挙動を明らかにした。それは、流速を上げると、ポアズイユ型層流から tail-flattened 型層流、そして乱流へと遷移するという驚くべきものであった。この現象を理解するには、最終的には 2 流体の完全結合ダイナミクスを調べることが必要だが、それは容易でない。そこでまず実験で観測された非一様な常流体の層流を仮定して、そのもとで量子渦タングルの運動を調べた。バルクの一様系に比べて渦密度の時空揺らぎは大きくなるものの、統計的定常状態に達する。それは壁近傍に渦が集積した”超流動境界層”と呼ぶべき構想である。そして、渦密度の温度および流速依存性は、実験結果と符合することがわかった。

1-3. 超流動流れの対数型速度分布を初めて見出した(文献 5)。乱流を特徴付けるにあたり、普遍的な統計則に着目することは重要である。古典乱流の代表的な統計則といえば、バルクのボルモゴロフ則と壁乱流の対数型速度分布である。前者は量子乱流で長年にわたり調べられてきたが、後者を本研究で初めて明らかにした。正方形管内の常流体が静止した状況で非一様渦タングルを作り、その超流動流れ場が対数型速度分布を示すことを明らかにした。これは今後、実験での観測に向けて大きな指針を示すこととなった。

1-4. 熱対向流とは異なり、超流体と常流体が同方向に流れる coflow の数値計算を行った(文献 7)。近年プラハのグループが coflow の実験を行い、熱対向流とは異なる挙動を明らかにした。Coflow の数値計算を行い、常流動速度場と平均超流動速度場が一致する領域が、量子渦に対してアトラクターとして働き、相互摩擦により量子渦が集積するという特異な挙動が明らかになった(図 2)。

2. 原子気体 BEC

2-1. 原子気体 BEC は多様な量子乱流の舞台となりうる。我々はスピノール BEC においてスピンの時間空間的に乱れるスピン乱流を

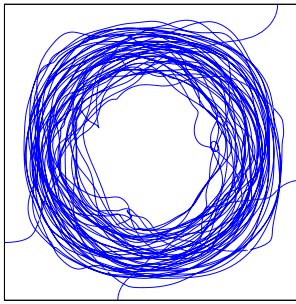


図2 Coflow での量子渦の空間分布

提唱してきたが、ここではさらに超流動速度場も乱れ、超流動-スピンの結合乱流が生じることを明らかにした。スピノール GP 方程式から得られるスピンと超流動の流体力学方程式にスケーリング解析を適用することでスピンのエネルギースペクトルは $-7/3$ 、超流動のエネルギースペクトルは $-5/3$ のべき乗則が生じることを示し、数値計算によりそれを確認した。

2-2. 渦が作る乱流ではなく、BEC におけるボゴリュボフ素励起が作る波乱流を明らかにした(文献3)。GP 方程式に弱波動乱流理論を適用し波動関数の相関関数のべき乗則を求めるとともに、それらを数値計算で確認した。

2-3. スピノール BEC において、スピン波が作る波乱流を研究した(文献6)。横方向スピン相関関数に対して、順方向カスケードでは $-7/3$ 、逆カスケードでは $-5/3$ のべき乗則が出ることを解析的に見出し、GP 方程式の数値計算により確認した(図3)。

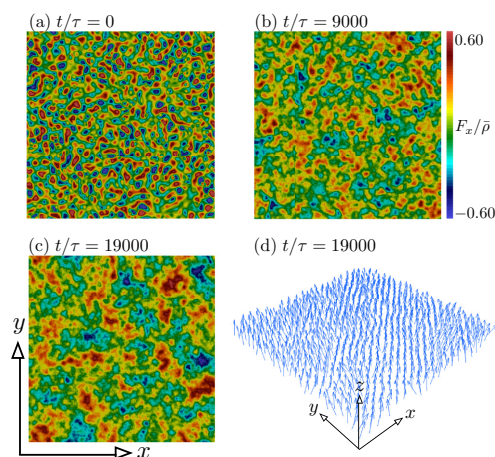


図3 スピノール BEC のスピン波乱流

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計8件)

① Che-hsiu Hsueh, Wen-Chin Wu, Makoto Tsubota, Quantum crystallography of Rydberg-dressed Bose gases on a square

lattice, Phys. Rev. A **95**, 013631(1-5) (2017)

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevA.95.013631

② Shinichi Ikawa, Makoto Tsubota Coflow turbulence of superfluid 4He in a square channel: vortices trapped on a cylindrical attractor, Phys. Rev. B. **93**, 184508(1-8) (2016) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.93.184508

③ Kazuya Fujimoto, Makoto Tsubota Direct and inverse cascades of spin-wave turbulence in spin-1 ferromagnetic spinor Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A **93**, 033620(1-10) (2016) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevA.93.033620

④ Satoshi Yui, Kazuya Fujimoto, and Makoto Tsubota, Logarithmic velocity profile of quantum turbulence of superfluid 4He, Phys. Rev. B **92**, 224513(1-5) (2015) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.92.224513

⑤ Satoshi Yui, Makoto Tsubota Counterflow quantum turbulence of He II in a square channel: Numerical analysis with nonuniform flows of the normal fluid Phys. Rev. B **91**, 184504(1-12) (2015) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.91.184504

⑥ Kazuya Fujimoto, Makoto Tsubota, Bogoliubov wave turbulence in Bose-Einstein condensates Phys. Rev. A **91**, 053620(1-12) (2015) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevA.91.053620

⑦ Ai Nakatsuji, Makoto Tsubota, Hideo Yano, Statistics of vortex loops emitted from quantum turbulence driven by an oscillating sphere, Phys. Rev. B **89**, 174520 (1-7) (2014) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.89.174520

⑧ Kazuya Fujimoto, Makoto Tsubota, Spin-superflow turbulence in spin-1 ferromagnetic spinor Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A **90**, 013629(1-7) (2014) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevA.90.013629

[学会発表] (計17件)

① M. Tsubota, Quantum Turbulence in Bose-Einstein Condensates Topological Effects in Ultra-Cold Atoms, Federal University of Rio Grande do Norte, Brazil, November 14-18 2016.

② M. Tsubota, S. Yui, and S. Ikawa Inhomogeneous quantum turbulence in a channel, QFS2016: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Prague, Czech Republic, August 10-16 2016.

③ M. Tsubota, Inhomogeneous quantum turbulence in a channel, "New Challenges in Mathematical Modelling and Numerical Simulation of Superfluids", Marseille, France, June 27 - July 1, 2016

④ M. Tsubota, Numerical simulation of quantum turbulence in superfluid helium -Inhomogeneous quantum turbulence- "Helicity, Structures and Singularity in Fluid and Plasma Dynamics", Venice, Italy, April 11 - 15, 2016

⑤ M. Tsubota, Numerical simulation of quantum turbulence, APS March Meeting 2016, Baltimore, Maryland, March 14-18 2016

⑥ 坪田誠, 非一様量子乱流, 日本物理学会、第 71 回年次大会、東北学院大学、2016. 3. 19-22

⑦ M. Tsubota, Review of numerical works of thermal counterflow -Route to inhomogeneous quantum turbulence Interpretation of measurements in 4He superfluid turbulence, PALM Workshop, CEA, Saclay, France, September 14-18 2015.

⑧ M. Tsubota, S. Yui, Inhomogeneous Quantum Turbulence in Thermal Counterflow, QFS2015: Internatinal Conference on Quantum Fluids and Solids, Niagara Falls, NY, USA, August 9-15 2015.

⑨ Makoto Tsubota, Quantum hydrodynamics and turbulence in atomic Bose-Einstein condensates, Hybrid Photonics and Materials 2015 Conference, Nomikos Center, Santorini, Greece, May 27-31 2015.

⑩ Makoto Tsubota, Quantum Hydrodynamics and Turbulence in Atomic Bose-Einstein Condensates, 4th International Conference on Current Developments in Atomic, Molecular, Optical and Nano Physics with Applications, Delhi, India, March 11-14 2015.

⑪ Makoto Tsubota, Quantum hydrodynamics and turbulence in atomic Bose-Einstein condensates, Quo vadis BEC, Bad Honnef, Germany, December 16-20 2014.

⑫ Makoto Tsubota, Numerical simulation of thermal counterflow, Workshop on New Perspectives in Quantum Turbulence: experimental visualization and numerical simulatio, Nagoya, Japan, December 11-12 2014.

⑬ Makoto Tsubota, Quantum Hydrodynamics and Turbulence in Atomic Bose-Einstein Condensates, Laser Science 2014, Tucson, America, October 19-23 2014.

⑭ Makoto Tsubota, Quantum Hydrodynamics and Turbulence in Atomic Bose-Einstein Condensates, Qunatum Gases, Fluid and Solids, São Carlos, Brazil,

August 14-17 2014.

⑮ M. Tsubota, K. Fujimoto Spin-superflow Turbulence in spinor Bose-Einstein condensates, 27th International Conference on Low Temperature Physics, Buenos Aires, Argentina, August 6-13 2014.

⑯ Kazuya Fujimoto, Makoto Tsubota Correlation of superfluid velocity in spin-superflow turbulence for ferromagnetic spin-1 spinor Bose-Einstein condensate, 23rd Annual International Laser Physics Workshop, Sofia, Bulgaria, July 14-18 2014.

⑰ Makoto Tsubota, Simulations -Laminar Normal Fluid Quantum Turbulence and Its Visualization, Abu Dhabi, May 5-7 2014.

[その他]

ホームページ等

<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/eep/top-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪田 誠 (TSUBOTA, Makoto)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10197759

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し

(4) 研究協力者

矢野 英雄 (YANO, Hideo)

藤本 和也 (FUJIMOTO, Kazuya)

仲辻 愛 (NAKATSUJI, Ai)

湯井 悟志 (YUI, Satoshi)

井川 真一 (IKAWA, Shinichi)