

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340104

研究課題名（和文）量子流体力学の展開

研究課題名（英文）Research Developments of Quantum Hydrodynamics

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

研究成果の概要（和文）：超流動ヘリウム、中性原子気体ボース凝縮系(BEC)といった低温の量子凝縮系を対象に、量子流体力学の展開を行った。これらの系の流体力学は量子力学に支配され、その最小の構成要素としての量子渦が出現する。超流動ヘリウムでは、熱カウンター量子乱流の統計的定常状態の構築と速度分布則、振動物体が引き起こす量子乱流遷移などを明らかにした。原子気体 BEC では、2成分 BEC の対向流によって作られる量子乱流、スピノール BEC の量子乱流とエネルギースペクトル、2成分 BEC のケルビン・ヘルムホルツ不安定性などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We studied theoretically quantum hydrodynamics in superfluid helium and atomic Bose-Einstein condensates(BECs). Hydrodynamics in these systems is dominated by quantum mechanical effects, and a quantized vortex appears as an element of vorticity. In superfluid helium, we succeeded for the first time in making statistically steady states in thermal counterflow and the characteristic velocity distribution. In atomic BECs, we revealed quantum turbulence and Kelvin-Helmholtz instability in two-component BECs, and spin turbulence in spinor BECs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2011 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物性 II

キーワード：超流動・ボース凝縮・量子乱流・量子渦・量子流体

1. 研究開始当初の背景

低温の量子凝縮相を対象とした量子流体力学の研究は、現在、低温物理学における最も重要なテーマの一つとなっている。その中でも、特に量子渦が作る量子乱流は、1990年代後半より注目を集め、世界的にも活発な研

究が行われている。そもそも乱流は、約500年前にレオナルド・ダ・ヴィンチが水の乱流のスケッチを描いて以来、数学・物理学などの基礎科学から、流体工学・航空工学などの応用科学にまで渡る難問である。量子乱流は、その構成要素が量子渦という安

定で明確な対象であるが故に、その研究が500年にわたる難問「乱流」の理解にブレイクスルーを生むかもしれないと期待されている。また1995年に実現した中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)は、物性物理学の世界に新風を吹き込んだ。この系でも超流動性の発現に関連して、量子渦と量子流体力学が注目を集めるようになった。

このような背景の中で、研究代表者は、古典乱流の最も重要な等計測であるコルモゴロフ則を初めて量子乱流で確認し(Phys. Rev. Lett. 89, 145301(2002); Phys. Rev. Lett. 94, 065302(2005))、速度ではなく温度変化によって起こる乱流遷移を発見し(Nature 424, 1022(2003))、回転する BEC における量子渦格子形成にダイナミクスを初めて明らかにするなど(Phys. Rev. A65, 023603(2002))、世界をリードする成果を生み出してきた。このような実績を基に、本科研費では量子流体力学の展開を試みんとした。

2. 研究の目的

超流動ヘリウム、冷却原子気体を対象に、これらを統括的に扱い、量子流体力学の展開を目指す。これらの系の流体力学では、その最小の構成要素としての量子渦が出現し、その物性や流体力学的性質に根本的役割を担う。超流動ヘリウムでは、古典流体と量子流体の対応(共通点および相違点)を明らかにする。それにより、量子乱流を、古典乱流よりも簡単な乱流の雛形を位置づけ、乱流研究のブレイクスルーに結びつける。また冷却原子気体では、この系がもつ高い操作性・制御性を利用して新現象を解明し、量子流体力学に新しい知見を構築する。具体的には、捕獲ボース凝縮体(BEC)における量子乱流、多成分 BEC における量子流体不安定生と量子乱流、スピノール BEC の量子乱流などの研究を行う。

3. 研究の方法

研究代表者および研究分担者による理論的および数値的手法により研究を行う。量子渦のダイナミクスについては、渦糸モデルか、BEC の巨視的波動関数に対する Gross-Pitaevskii(GP)方程式の解析を行う。この過程で、国内外の様々な実験および理論グループとの共同研究も進める。

4. 研究成果

(1) スピノール BEC のスピン乱流: スピン1スピノール BEC において、対向流によりスピンの乱流状態を作る得ること、およびその乱流状態でスピンの依存したエネルギーのスペクトルは、 $-7/3$ という特徴的なべき則を有することを示した(以下の[雑誌論文]の①)。

(2) 量子乱流のエネルギースペクトル: 我々は以前、GP モデルの数値計算で量子乱流を作り、そのエネルギースペクトルが乱流の最も重要な統計則であるコルモゴロフ則を示すことを明らかにした。今回はより大規模な数値計算を行い、より広い波数領域に渡って、やはりコルモゴロフ則が成立することを示した(②)。

(3) 捕獲原子気体 BEC の量子乱流: 捕獲原子気体 BEC において、捕獲ポテンシャルの振動により、量子乱流を作れることを、ブラジルの実験グループとの共同研究により示した。実験に対応した数値計算を GP モデルで行い、定性的に良い一致を得た(③)。

(4) 2成分 BEC の量子乱流: 2成分 BEC を対向させて流すことにより、不安定性を経て量子乱流が作られることを GP モデルの数値計算で示した。特に量子渦の成長・発展にともない、二つの超流体(BEC)が運動量を交換し、相対運動が減衰することを示した(⑤、⑫)(図1)。

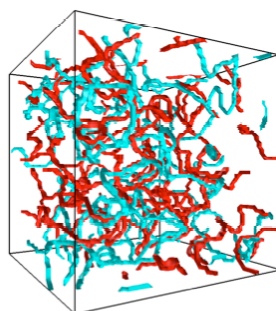


図1 2成分 BEC の量子乱流

(5) 捕獲 BEC 中で振動ポテンシャルが誘起する量子渦とソリトンの複合ダイナミクス: 捕獲原子気体 BEC 中で斥力ポテンシャルを振動させることにより、量子渦とソリトンの複合ダイナミクスが誘起されることを GP モデルの数値計算により示した。量子渦生成の臨界速度を議論した(⑥、⑬)(図2)。

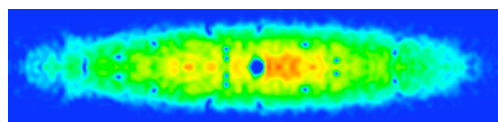


図2 捕獲 BEC 中で振動ポテンシャルが誘起する量子渦とソリトン

(6) 熱カウンター量子乱流: 渦糸モデルにおいて量子渦間の相互作用を完全に取り入れるることにより、周期境界条件の下、熱カウンター量子乱流において統計的定常状態を作ること初めて成功した。また、この状態の超流動速度分布を求め、低速度領域が示す古典的なガウス型分布から、高速度領域が示す量子的なべき分布への遷移が起こることを示した(⑦、⑱)。

(7) 2成分 BEC の流体力学的不安定性：相分離した2成分 BEC を、相対速度を持たせて流すことにより、その相分離面でケルビン・ヘルムホルツ不安定性が起こることを、GP モデルの数値計算により示した。これは古典流体で知られているものとは異なり、相分離面からの量子渦の放出と運動を伴う、量子流体特有の現象であることを明らかにした (⑩、⑪)。

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 27 件) (全て査読有り)

- ① K. Fujimoto and M. Tsubota, Phys. Rev. A 85, 033642 (2012), Counterflow instability and turbulence in a spin-1 spinor Bose-Einstein condensate.
- ② N. Sasa, T. Kano, M. Machida, V. S. L'vov, O. Rudenko, and M. Tsubota, Phys. Rev. B 84, 054525 (2011), Energy spectra of quantum turbulence: Large-scale simulation and modeling.
- ③ J. A. Seman, E. A. L. Henn, R. F. Shiozaki, G. Roati, F. J. Poveda-Cuevas, K. M. F. Magalhães, V. I. Yukalov, M. Tsubota, M. Kobayashi, K. Kasamatsu, and V. S. Bagnato, Laser Phys. Lett. 8, 691-696 (2011), Route to turbulence in a trapped Bose-Einstein condensate.
- ④ M. Eto, K. Kasamatsu, M. Nitta, H. Takeuchi, and M. Tsubota, Phys. Rev. A 83, 063603 (2011), Interaction of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates.
- ⑤ S. Ishino, M. Tsubota, and H. Takeuchi, Phys. Rev. A 83, 063602 (2011), Countersuperflow instability in miscible two-component Bose-Einstein condensates.
- ⑥ K. Fujimoto and M. Tsubota, Phys. Rev. A 83, 053609 (2011), Nonlinear Dynamics in a Trapped Atomic Bose-Einstein Condensate Induced by an Oscillating Gaussian Potential .
- ⑦ H. Adachi and M. Tsubota, Phys. Rev. B 83, 132503 (2011), Numerical study of velocity statistics in steady counterflow quantum turbulence.
- ⑧ H. Kuroyanagi, M. Tsukamoto and M. Tsubota, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 034603 (2011), Study of Kosterlitz-Thouless

Transition of Bose Systems Governed by a Random Potential Using Quantum Monte Carlo Simulations.

⑨ M. Yasunaga and M. Tsubota, Phys. Rev. A 83, 013618 (2011), Ferromagnetic resonance in spinor dipolar Bose-Einstein condensates.

⑩ Y. Kurita, M. Kobayashi, H. Ishihara and M. Tsubota, Phys. Rev. A 82, 053602 (2010), Particle creation in Bose-Einstein condensates: Theoretical formulation based on conserving gapless mean-field theory.

⑪ N. Suzuki, H. Takeuchi, K. Kasamatsu, M. Tsubota and H. Saito, Phys. Rev. A 82, 063604 (2010), Crossover between Kelvin-Helmholtz and counter-superflow instabilities in two-component Bose-Einstein condensates.

⑫ H. Takeuchi, S. Ishino and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. 105, 205301 (2010), Binary quantum turbulence arising from counter-superflow instability in two-component Bose-Einstein condensates.

⑬ K. Fujimoto and M. Tsubota, Phys. Rev. A 82, 043611 (2010), Synergy Dynamics of Vortices and Solitons in an Atomic Bose-Einstein Condensate Excited by an Oscillating Potential.

⑭ R. Numasato, M. Tsubota and V. S. L'vov, Phys. Rev. A 81, 063630 (2010), Direct Energy Cascade in Two-Dimensional Compressible Quantum Turbulence.

⑮ S. Fujiyama, A. Mitani, M. Tsubota, D. I. Bradley, S. N. Fisher, A. M. Guenault, R. P. Haley, G. R. Pickett, and V. Tsepelin, Phys. Rev. B 81, 180512 (2010), The Generation, Evolution and Decay of Pure Quantum Turbulence: A Full Biot-Savart Simulation.

⑯ H. Takeuchi, N. Suzuki, K. Kasamatsu, H. Saito, and M. Tsubota, Phys. Rev. B 81, 094517 (2010), Quantum Kelvin-Helmholtz Instability in phase-separated two-component Bose-Einstein condensates.

⑰ 栗田泰生、小林未知数、森成隆夫、坪田誠、石原秀樹、日本物理学会誌 65 No. 3, 187-190 (2010), ボース・アインシュタイン凝縮体に

おける粒子生成一曲った時空とのアナロジー
ー.

⑱H. Adachi, S. Fujiyama, and M. Tsubota,
Steady State of Counterflow Quantum
Turbulence: Vortex filament Simulation
with the Full Biot-Savart Law Phys. Rev. B
81, 104511 (2010), .

⑲K. Kasamatsu, H. Takeuchi, M. Nitta and
M. Tsubota, JHEP11(2010)068. Analogues of
D-branes in Bose-Einstein condensates.

⑳M. Yasunaga and M. Tsubota, Phys. Rev.
A 81, 023624 (2010), Internal Josephson
Effects in Spinor Dipolar Bose-Einstein
Condensates.

㉑坪田 誠、パリティ(丸善) 25 No.03,
14-21 (2010), 量子乱流の不思議.

㉒ M. Tsubota, International Journal of
Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences
1, 229-253 (2010), Quantum Turbulence.

㉓ M. Tsubota, Contemporary Physics 50,
463-475 (2009), Quantum turbulence: from
superfluid helium to atomic Bose-Einstein
condensates.

㉔Y. Kurita, M. Kobayashi, T. Morinari, M.
Tsubota and H. Ishihara, Phys. Rev. A. 79,
043616 (2009), Spacetime analogue of
Bose-Einstein condensates: Bogoliubov-de
Gennes formulation.

㉕H. Takeuchi, K. Kasamatsu and M. Tsubota,
Phys. Rev. A 79, 033619 (2009),
Spontaneous radiation and amplification
of Kelvin waves on quantized vortices in
Bose-Einstein condensates.

㉖ S. Fujiyama and M. Tsubota, Phys. Rev.
B 79, 094513 (2009), Drag force on an
oscillating object in quantum turbulence.

㉗ K. Kasamatsu and M. Tsubota, Phys. Rev.
A 79, 023606 (2009), Vortex sheet in
rotating two-component Bose-Einstein
condensates.

[学会発表] (計 8件)

①M. Tsubota, Quantum hydrodynamics and
turbulence(Invited), GCOE symposium,
Kyoto University, Kyoto, 2.13-15. 2011.

②M. Tsubota, Quantum Turbulence in Atomic
Bose-Einstein Condensates (Invited),
Maths-Physics Meeting around Bose
Einstein condensates, France, 11.30-12.2.

2011.

③M. Tsubota, Simulations of quantum
turbulence: achievements and prospects
(Invited), Workshop on Classical and
Quantum Turbulence, Abu Dhabi, United Arab
Emirates, 2-5. 5. 2011.

④M. Tsubota, Quantum turbulence -from
superfluid helium to atomic BECs
(Invited), São Paulo School of Advance
Science, the Instituto de Física of São
Carlos, São Carlos, Brasil, 2011. 4. 4-14.

⑤M. Tsubota, Some current topics on
quantum hydrodynamics
(Invited), Korea-Japan Solid Helium
Workshop, KAIST, Daejeon, Korea, 2010. 12.
20-21.

⑥M. Tsubota, Quantum turbulence and
nonlinear instability in quantum
fluids(Invited), Nonlinear Waves Theory
and Applications, Tsinghua University,
Beijing, China, 2010.6.26-29

⑦M. Tsubota, Numerical studies of quantum
turbulence(Invited), Symposia on
superfluids under rotation -Vortices,
Superfluid dynamics, and quantum
turbulence-, Helsinki,
Finland, 2010. 4.10-17

⑧M. Tsubota, Dynamics of Charged
Quantized Vortices (Invited), QFS2009:
International Symposium on Quantum Fluids
and Solids, Northwestern University,
Evanston, Illinois, USA, 2009.8.5-11.

[その他]

ホームページ等

[http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/eep/
top-j.html](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

笠松 健一 (KASAMATSU KENICHI)

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号: 70413763

(3) 連携研究者

無し