

平成 21年 4月 30日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18340109

研究課題名（和文） 量子流体力学の構築

研究課題名（英文） Construction 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：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、量子流体力学の構築を行った。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、量子乱流と古典乱流の対比、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、量子乱流の生成方法を提示し、スピノール BEC の磁気共鳴などを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2007年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・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ブランチ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

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構築を試みんとした。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、量子流体力学、特に量子乱流に関して現在重要な問題に取り組み、今後 10 年を視野に入れた量子流体力学研究の礎を築く事が目的である。そしてそれは、さらに、(古典)乱流の解明に資する事を狙っている。

3. 研究の方法

研究代表者および連携研究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

主な成果を列举する。これらは、レビュー論文⑦および⑩にまとめられている。これらの研究は、基盤研究(B)「量子流体力学の展開」(2009-2011)(代表:坪田誠)に引き継がれる。(1)ヘルシンキ工科大学との共同研究により、超流動 $^3\text{He-B}$ において、回転容器中に注入された量子渦が不安定を起こし、かつ、Twisted Vortex State と呼ばれる美しい状態を経て、全容器を覆い量子渦格子を形成することを、理論、シミュレーション、および NMR 実験により明らかにした(以下、[雑誌論文]の⑰、⑱)。この成果は、Phys. Rev. Lett の表紙に取り上げられた(図1)。



図1 Twisted Vortex State

(2)大阪市立大学の超低温実験グループとの共同研究により、振動物体を作る量子乱流遷移を明かにした(⑥)。特に振動する球に渦輪を照射したときの乱流遷移を調べ、球による渦の引き延ばし効果が乱流遷移に強く関与していることを明らかにした(図2)。

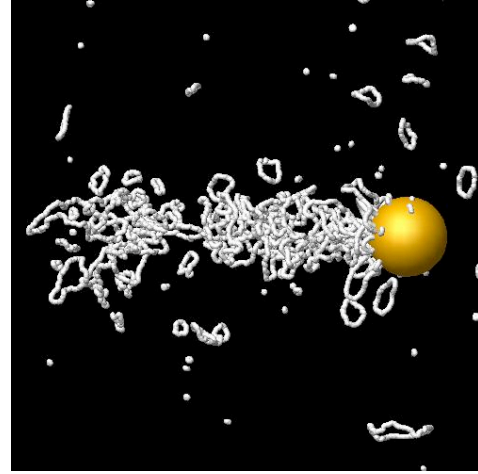


図2 振動する球を作る量子乱流

(3)原子気体 BEC に、2 軸歳差回転を加える事で量子乱流を作れる事を示し、またそのエネルギー Spektral がコルモゴロフ則を満たす事を示した(⑧)。

(4)量子渦糸の数値シミュレーションにより、容器中に残る渦が、振動流を受けたとき、ケルビン波の励起、再結合による渦輪の放出を経て乱流状態に至る過程を明かにした。これは振動物体が誘起する乱流遷移の標準的な

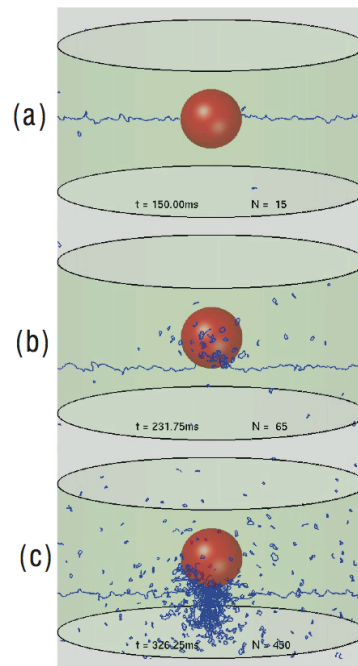


図3 残余渦が振動流を受けて乱流に遷移する様子。

メカニズムと考えられている(⑨)(図3)。
 (4)スピノール BEC における磁気共鳴現象を調べた。特に、磁気共鳴分野で良く知られたスピンエコーがこの系でも起こる事、および気の系特有の成分の相分離が磁気共鳴に関与する事を明らかにした(⑤)(図4)。

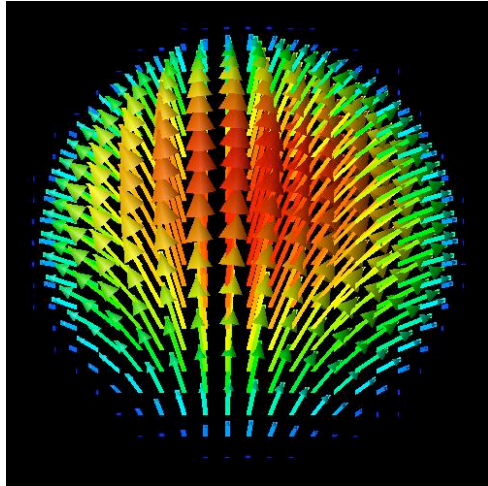


図4 スピノール BEC の磁気共鳴。

(5)回転する2成分 BEC の渦シート構造を明らかにした。この系では成分間の相互作用の強さに依存して、三角格子、四角格子など特異な渦構造が現れることが知られている。特に成分間相互作用が強い場合に、図5のような渦シート構造が現れる事を示した(②)。

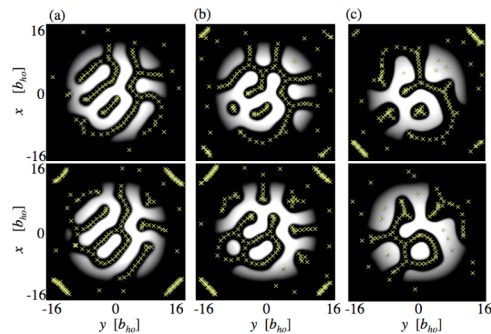


図5 回転する2成分 BEC における渦シート構造。

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 20 件) (全て査読有り)

① Y. Kurita, M. Kobayashi, T. Morinari, M. Tsubota, H. Ishihara, Phys. Rev. A79, 043616(1-8) (2009), Spacetime analog of Bose-Einstein condensates: Bogoliubov-de Gennes formulation

② K. Kasamatsu and M. Tsubota, Phys. Rev. A 79, 023606(1-7) (2009), Vortex sheet in rotating two-component Bose-Einstein condensates

③ H. Takeuchi, K. Kasamatsu and M. Tsubota, Phys. Rev. A 79, 033619(1-5) (2009), Spontaneous radiation and amplification of Kelvin waves on quantized vortices in Bose-Einstein condensates

④ S. Fujiyama and M. Tsubota, Phys. Rev. B 79, 094513(1-7) (2009), Drag force on an oscillating object in quantum turbulence

⑤ M. Yasunaga and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. 101, 220401(1-4) (2008), Spin echo in spinor dipolar Bose-Einstein condensates

⑥ R. Goto, S. Fujiyama, H. Yano, Y. Nago, N. Hashimoto, K. Obara, O. Ishikawa, M. Tsubota, T. Hata, Phys. Rev. Lett. 100, 045301(1-4) (2008), Turbulence in Boundary Flow of Superfluid 4He Triggered by Free Vortex Rings

⑦ M. Tsubota, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 111006(1-12), 2008, Quantum turbulence

⑧ M. Kobayashi and M. Tsubota, Phys. Rev. A 76, 045603(1-4) (2007), Quantum turbulence in a trapped Bose-Einstein condensate

⑨ R. Hanninen, M. Tsubota and W. F. Vinen, Phys. Rev. B 75, 064502 (1-12) (2007), Generation of turbulence by oscillating structures in superfluid helium at very low temperatures

⑩ 坪田誠, 小林未知数, 日本物理学会誌. 第62巻(2007), 15-23 頁. 量子乱流研究の最近の発展

⑪ K. Kasamatsu and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. 97, 240404(1-4) (2006), Dynamical vortex phases in a Bose-Einstein condensate driven by a rotating optical lattice

⑫ C. F. Barenghi, R. Hanninen and M. Tsubota, Phys. Rev. E 74, 046303(1-5) (2006), Anomalous translational velocity of vortex ring with finite-amplitude Kelvin waves

⑬ M. Kobayashi and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. 97, 145301 (2006), Thermal dissipation in quantum turbulence

⑭ A. Mitani and M. Tsubota, Phys. Rev. B 74, 024526(1-4), 2006., Self organization of vortex-length distribution in quantum turbulence: an approach based on the Barabasi-Albert model

⑮ K. Kasamatsu and M. Tsubota, Phys. Rev. A 74, 013617 (1-14), 2006., Modulation

instability and solitary wave formation in two-component Bose-Einstein condensates

⑯H. Takeuchi and M. Tsubota, J. Phys. Soc. Jpn. 75, 063601(1-4), 2006. Boojums in Rotating Two-component Bose-Einstein Condensates

⑰V. B. Eltsov, A. P. Finne, R. Hanninen, J. Kopu, M. Krusius, M. Tsubota and E. V. Thuneberg, Phys. Rev. Lett. 96, 215302(1-4), 2006, Twisted vortex state

⑱R. Kanamoto and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. 96, 200405(1-4), 2006. Phase separation of a fast rotating Boson-Fermion mixture in the lowest-Landau-level regime

⑲A. P. Finne, V. B. Eltsov, G. Eska, R. Hanninen, J. Kopu, M. Krusius, E. V. Thuneberg and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. 96, 085301(1-4), 2006. Vortex Multiplication in Applied Flow: A Precursor to Superfluid Turbulence

⑳A. P. Finne, V. B. Eltsov, R. Hanninen, N. B. Kopnin, J. Kopu, M. Krusius, M. Tsubota and G. E. Volovik, Rep. Prog. Phys. 69 (2006), pp. 3157-3230.

Dynamics of vortices and interfaces in superfluid ^3He

[学会発表] (計 7 件)

① M. Tsubota, Quantum Turbulence (Invited), International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, Nagoya, Japan, 2008. 11. 27-29.

② M. Tsubota Quantum Turbulence -from Superfluid Helium to Atomic Bose-Einstein Condensates- (invited) Workshop "Inertial-Range Dynamics and Mixing", Cambridge, UK, 2008. 9. 29 - 10. 3.

③ M. Tsubota, Quantum Turbulence -from Superfluid Helium to Atomic Bose-Einstein Condensates- (half-plenary talk) 25th international conference on Low Temperature Physics, Amsterdam, Netherlands, 2008. 8. 6 - 13.

④ M. Tsubota Quantum turbulence in atomic Bose-Einstein condensates (Invited), Nonlinear phenomena in degenerate quantum gases, Toledo, Spain, 2008. 4. 1 - 4.

⑤ 坪田誠、量子乱流 - 超流動ヘリウムから原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体まで - (招待講演) 日本物理学会第 62 回年次大会、北海道大学、2007. 9. 21-24

⑥ M. Tsubota, Quantum Turbulence in Trapped Atomic Bose-Einstein Condensates International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Kazan, Russia, 2007. 8. 1-6.

⑦ M. Tsubota, Numerical analysis of

quantum turbulence (Invited) 2006 59th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Tampa, USA, 2006. 11. 19-21

[図書] (計 2 件)

①非線形科学シリーズ 1 量子渦のダイナミクス/砂丘と風紋の動力学、坪田誠/西森拓、培風館、2008、3-105 頁

②Progress in Low Temperature Physics, ed. W. P. Halperin and M. Tsubota (Elsevier, Amsterdam, 2008) Vol. 16, pp.1-414.

[その他]

ホームページ

<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

笠松 健一 (KASAMATSU KENICHI)

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：70413763