

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17071008

研究課題名（和文） 量子渦の物理と新しい超流動乱流の研究

研究課題名（英文） Physics of quantized vortices and “new” superfluid 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

研究成果の概要（和文）：低温における量子凝縮相、特に超流動ヘリウムと中性原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を対象に、量子流体力学の理論的および実験的研究を行った。超流動ヘリウムを舞台にした研究では、主に量子乱流を対象とし、乱流における最も重要な統計則であるコルモゴロフ則が量子乱流でも成り立つことを数値的に示した。また、超流動 ^4He 中で超伝導細線を振動させる実験により、残余渦が存在しない条件での乱流遷移を明らかにし、数値計算とも良い一致を得た。原子気体 BEC の研究では、位相欠陥（量子渦）が引き起こす種々の量子流体特有の不安定性を明らかにするとともに、この系においても 2 軸歳差回転を行うことで量子乱流を生成できることを示した。これらはいずれも世界の量子流体研究の最先端を切り拓くものとして国際的に高い評価を得ている。

研究成果の概要（英文）：We study theoretically and experimentally quantum hydrodynamics in quantum condensed phases at low temperature, namely superfluid helium and atomic Bose-Einstein condensates (BECs). Quantum turbulence (QT) is a main topic in the studies of superfluid helium, in which the energy spectrum is shown numerically to obey the Kolmogorov law that is the most important statistical law in turbulence. The experiments using vibrating wires reveal the transition to QT free from remnant vortices, which was consistent with the numerical simulation using the vortex filament model. For atomic BECs, we study theoretically and numerically various kinds of hydrodynamic instability caused by topological defects (quantized vortices). Using two combined precessions, we show that QT can be created in this system too.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	19,400,000	0	19,400,000
2006年度	12,100,000	0	12,100,000
2007年度	13,000,000	0	13,000,000
2008年度	8,300,000	0	8,300,000
2009年度	8,300,000	0	8,300,000
総計	61,100,000	0	61,100,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物性 II

キーワード：超流動ヘリウム、ボース・アインシュタイン凝縮、量子乱流、量子渦、位相欠陥

1. 研究開始当初の背景

(1) 低温物理学における最も重要なテーマの一つに量子流体力学がある。超流動ヘリウムの量子流体力学研究の歴史は古く、約 50 年前に始まった。しかし、1990 年代の後半から、量子流体力学の研究は新しい段階に入った。

(2) その第 1 の理由は、古典乱流と量子乱流の比較が大きな動機として注目されてきたことである。乱流研究は、少なくとも約 500 年前のレオナルド・ダ・ヴィンチの時代にまで遡ることができる。ダ・ヴィンチは排水溝から流出する水の乱流を観察し、それが大小様々な渦からなることを示す有名なスケッチを残した。乱流は自然科学における大問題の一つで、理学から工学に至るまで幅広い分野で研究が行われてきたが、十分な解明がなされたとは言えない。それは、乱流が強い非線形性をもつ動的現象だからである。ダ・ヴィンチの「乱流は渦から成る」という洞察が重要な鍵になれば良いのだが、普通の古典粘性流体では渦は不安定で生成消滅を繰り返す、その流体中の同定でさえ容易でない。こうした流れとは独立に、低温物理学の分野では超流動液体ヘリウムの研究が進められて来た。液体 ^4He の超流動転移は、 ^4He 原子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)によって生じ、巨視的波動関数(秩序変数)を形成する。巨視的波動関数が空間座標の一価関数であるという要請から、超流動流れ場の循環が量子化された、量子渦が出現する。量子渦は安定な位相欠陥であり、流体中での同定も一意的である。そして量子渦が 3 次元的に絡み合っただけで渦タングルを作り、超流動流れ場が乱流となったものを量子乱流と言う。量子渦と量子乱流は 1950 年代に超流動 ^4He で発見されその流体力学が研究されたが、古典乱流との対比は認識されなかった。古典乱流と量子乱流を比較した場合、量子乱流は明確で安定な量子渦から成るため、500 年前のダ・ヴィンチの洞察は、古典乱流よりもむしろ量子乱流に具現化していると言って良い。1990 年代半ばに超流動 ^4He の乱流で、乱流の最も重要な統計則であるエネルギースペクトルのコルモゴロフ則が観測されたのを契機に、量子乱流と古典乱流の比較を動機として、量子乱流研究は新段階に入った。そして現在、低温物理学国際会議(LT)や量子液体・固体に関する国際シンポジウム(QFS)などでも、ほぼ丸 1 日は量子乱流のセッションが設けられるなど、量子乱流は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。

(3) 第 2 の理由は、1995 年の中性原子気体 BEC の実現である。この系は、従来の超流動や超伝導などの低温量子凝縮系と異なる際

立った特徴を持っている。第 1 に、最先端の光学技術を用いて、凝縮体の制御および可視化が可能であることである。例えば、BEC に回転を加えることにより、量子渦が凝縮体に侵入し、渦格子を形成するダイナミクスが直接観測された。第 2 に、相互作用パラメータを、フェッシュバッハ共鳴を用いて変調できることである。この系は物性物理学全体に大きなインパクトを与えたが、量子流体力学に関しても然りである。量子渦のダイナミクス、多成分 BEC の量子渦、そして今や量子乱流までもが標的となっている。

2. 研究の目的

(1) 量子乱流の統計力学的性質、散逸機構
古典乱流との対比を考える上で、量子乱流がどのような統計的性質を示すかを理論的および数値的に調べる。また、常流体が存在しない極低温領域における散逸機構について調べる。

(2) 振動物体を作る量子乱流

近年、球、格子、細線などを超流動 ^4He または ^3He 中で振動させ、量子乱流を生成する実験が行われている。振動物体の形状や大きさなどに依存しない、普遍的な物理が観測されている。この現象に関する理論的理解を試みる。

(3) 量子乱流遷移

超流動 ^4He と ^3He の量子乱流について、振動物体が引き起こす乱流遷移を実験的に調べ、量子乱流遷移の起源となる普遍的な物理を明らかにする。

(4) 多成分 BEC における位相欠陥と流体力学的不安定性

多成分 BEC では特異な量子渦構造が現れることが知られている。その位相欠陥と、流体力学的不安定性について明らかにする。

(5) 低温量子凝縮系と宇宙論との対応

超流動ヘリウムや原子気体 BEC を用いて、宇宙論における様々な概念(ビッグバン後における宇宙ひもの形成や、ブラックホールのホーキング輻射など)を検証する試みが研究されている。この観点からも新たな提案を試みる。

(6) 原子気体 BEC における量子乱流

原子気体 BEC で量子乱流が実現すれば、量子渦が可視化でき、様々なパラメータが制御可能となり、超流動ヘリウムをも凌駕する興味深い系となることは疑いない。捕獲原子気体 BEC で量子乱流を作る方法を提案し、その性質を調べる。

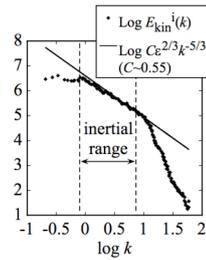
3. 研究の方法

(1) 数値的研究 量子渦のダイナミクスは、通常、量子渦糸モデル、または巨視的波動関数が従う Gross-Pitaevskii(GP)モデルにより記述される。ここでは、問題に応じてこれらのモデルを使い分け、数値計算を行う。

(2) 実験的研究 超流動中の振動物体には粘性摩擦がないが、量子乱流の生成に伴ってエネルギーが消費され、遷移が観測される。ここでは振動細線を利用し、外的条件と量子乱流遷移との関係を調べる。

4. 研究成果

(1) GP 方程式により量子乱流を作り、エネルギースペクトルがコルモゴロフ則に従うことを示した(右図)。また、GP 方程式と、素励起に対する Bogoliubov-de Gennes 方程式を連立されることにより、低温における量子乱流の散逸がコヒーレンス長以下の微視的スケールでのみ有効に働くことを示した。



(2) 有限温度での超流動 ^4He の熱カウンター流において、渦間相互作用を取り入れた渦糸モデルの数値計算により、初めて乱流の統計的定常状態を得ることに成功した。典型的な実験結果との定量的一致も良い。80年代までに行われた数値計算では渦間相互作用が取り入れられておらず、そのため非常にトリッキーな方法を用いないと統計的定常状態が得られなかったが、その困難を解決したことになる。

(3) 絶対零度近傍の回転する超流動 $^3\text{He-B}$ において、量子渦格子形成に至る不安定性と、Twisted Vortex State と呼ばれる特異な渦構造を、ヘルシンキ工科大学との共同研究で見いだした。

(4) 多成分 BEC の特異な渦構造、流体力学的不安定性について調べた。具体的には、ブージャムと呼ばれる界面特有の位相欠陥が2成分 BEC で現れること、回転する光格子が作る動的渦構造、スピノール・ダイポール BEC におけるスピンエコーと内部ジョセフソン効果、回転する2成分 BEC における渦シート構造、相分離した2成分 BEC の界面で生じる量子ケルビン・ヘルムホルツ不安定性について明らかにした。

(5) 宇宙論との対応に関連して、宇宙論研究者との共同研究により、BEC の時空対応に

ついて調べた。巨視的波動関数が記述する場が宇宙論の真空に対応し、その上の素励起が、宇宙論の粒子に対応する。この問題の定式化を行った。また、数値計算により、捕獲原子気体 BEC が振動することにより、素励起(粒子)が自発的に生成することを示した。これはビッグバン後の宇宙膨張過程における粒子生成に対応し、このシナリオ、BEC を用いて実験室で検証できる可能性を示した。

(6) 振動物体を作る量子乱流に関連して、物体に付着した残余渦が振動を受けることで量子乱流に発展することを渦糸モデルの数値計算により示した。また、このとき、球に働く抗力を求め、古典乱流の場合と同様、抵抗係数が1のオーダーとなることを示した。

(7) 振動細線に付着する残留渦の状態を実験的に調べ、付着残留渦が量子乱流遷移の起源になることを示した。残留渦のない振動細線では、外部から供給する渦リングによって乱流遷移することを実験的に見だし、これが渦糸モデルによる数値計算と一致することを示し、また乱流遷移過程の渦糸の運動を詳細に示した。

(8) 捕獲原子気体 BEC で量子乱流を作る方法を提案した。捕獲ポテンシャルを2軸歳差回転させることにより、乱流が作れること、そのエネルギースペクトルがコルモゴロフ則に従うことを、GP 方程式の数値計算から示した。

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 35 件) 以下は全て査読有

① M. Yasunaga and M. Tsubota, Internal Josephson effects in spinor dipolar Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A81, 2010, 023624(1-8).

② H. Adachi, S. Fujiyama and M. Tsubota, Steady-state counterflow quantum turbulence: A vortex filament simulation using the full Biot-Savart law, Phys. Rev. B81, 2010, 104511(1-7)

③ H. Takeuchi, N. Suzuki, K. Kasamatsu, H. Saito and M. Tsubota, Quantum Kelvin-Helmholtz instability in phase-separated two-component Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. B81, 2010, 094517(1-5).

④ 坪田誠、量子乱流の不思議、パリティ、第25巻、2010、pp. 14-21.

⑤ 栗田泰生、小林未知数、森成隆夫、坪田誠、石原秀樹、ボース・アインシュタイン凝縮体における粒子生成-曲がった時空とのアナロジー、日本物理学会誌、65巻、2010、pp. 187-190.

⑥ S. Fujiyama and M. Tsubota, Drag force on an oscillating object in quantum turbulence, Phys. Rev. B 79, 2009, 094513(1-7).

- ⑦ H. Takeuchi, K. Kasamatsu and M. Tsubota, Spontaneous radiation and amplification of Kelvin waves on quantized vortices in Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 79, 2009, 033619(1-5)
- ⑧ K. Kasamatsu and M. Tsubota, Vortex sheet in rotating two-component Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 79, 2009, 023606(1-7).
- ⑨ Y. Kurita, M. Kobayashi, T. Morinari, M. Tsubota, H. Ishihara, Spacetime analog of Bose-Einstein condensates: Bogoliubov-de Gennes formulation, Phys. Rev. A 79, 2009, 043616(1-8)
- ⑩ M. Tsubota, Quantum Turbulence: from superfluid helium to atomic Bose-Einstein condensates, Contemporary Physics 50, 2009, pp.463-475. (Invited review article)
- ⑪ R. Goto, S. Fujiyama, H. Yano, Y. Nago, N. Hashimoto, K. Obara, O. Ishikawa, M. Tsubota, T. Hata, Turbulence in Boundary Flow of Superfluid 4He Triggered by Free Vortex Rings Phys. Rev. Lett. 100, 2008, 045301(1-4).
- ⑫ M. Yasunaga and M. Tsubota, Spin echo in spinor dipolar Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. Lett. 101, 2008, 220401(1-4).
- ⑬ M. Tsubota and M. Kobayashi, Energy spectra in quantum turbulence, Prog. Low Temp. Phys., ed. W. P. Halperin and M. Tsubota (Elsevier, Amsterdam), 2008, Vol. 16, pp.1-43. (Invited review article)
- ⑭ K. Kasamatsu and M. Tsubota, Quantized vortices in atomic Bose-Einstein condensates, Prog. Low Temp. Phys., ed. W. P. Halperin and M. Tsubota (Elsevier, Amsterdam), 2008, Vol. 16, pp. 349-401. (Invited review article)
- ⑮ M. Tsubota, Quantum turbulence, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 2008, 111006(1-12). (Invited review article).
- ⑯ R. Hanninen, M. Tsubota and W. F. Vinen, Generation of turbulence by oscillating structures in superfluid helium at very low temperatures Phys. Rev. B 75, 2007, 064502 (1-12).
- ⑰ M. Kobayashi and M. Tsubota, Quantum turbulence in a trapped Bose-Einstein condensate Phys. Rev. A 76, 2007, 045603(1-4).
- ⑱ H. Yano, N. Hashimoto, A. Handa, M. Nakagawa, K. Obara, O. Ishikawa and T. Hata, Motion of quantized vortices attached to a boundary in alternating currents of superfluid 4He, Phys. Rev. B 75, 2007, 012502(1-4).
- ⑲ N. Hashimoto, R. Goto, H. Yano, K. Obara, O. Ishikawa and T. Hata, Control of turbulence in boundary layers of superfluid 4He by filtering out remnant vortices, Phys. Rev. B 76, 2007, 020504(1-4).
- ⑳ 坪田誠, 小林未知数, 量子乱流研究の最近の発展、日本物理学会誌。 6 2 巻, 2007, 15-23.
- ㉑ A. P. Finne, V. B. Eltsov, G. Eska, R. Hanninen, J. Kopu, M. Krusius, E. V. Thuneberg and M. Tsubota, Vortex Multiplication in Applied Flow: A Precursor to Superfluid Turbulence, Phys. Rev. Lett. 96, 2006, 085301(1-4).
- ㉒ R. Kanamoto and M. Tsubota, Phase separation of a fast rotating Boson-Fermion mixture in the lowest-Landau-level regime, Phys. Rev. Lett. 96, 2006, 200405(1-4).
- ㉓ V. B. Eltsov, A. P. Finne, R. Hanninen, J. Kopu, M. Krusius, M. Tsubota and E. V. Thuneberg, Twisted Vortex State, Phys. Rev. Lett. 96, 2006, 215302(1-4).
- ㉔ H. Takeuchi and M. Tsubota, Boojums in Rotating Two-component Bose-Einstein Condensates, J. Phys. Soc. Jpn. 75, 2006 063601(1-4).
- ㉕ K. Kasamatsu and M. Tsubota, Modulation instability and solitary wave formation in two-component Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 74, 2006, 013617 (1-14).
- ㉖ A. Mitani and M. Tsubota, Self-organization of vortex-length distribution in quantum turbulence : an approach based on the Barabasi-Albert model, Phys. Rev. B 74, 2006, 024526(1-4).
- ㉗ M. Kobayashi and M. Tsubota, Thermal dissipation in quantum turbulence, Phys. Rev. Lett. 97, 2006, 145301(1-4).
- ㉘ C. F. Barenghi, R. Hanninen and M. Tsubota, Anomalous translational velocity of vortex ring with finite-amplitude Kelvin waves, Phys. Rev. E 74, 2006, 046303(1-5).
- ㉙ K. Kasamatsu and M. Tsubota, Dynamical vortex phases in a Bose-Einstein condensate driven by a rotating optical lattice, Phys. Rev. Lett. 97, 2006, 240404(1-4).
- ㉚ A. P. Finne, V. B. Eltsov, R. Hanninen, N. B. Kopnin, J. Kopu, M. Krusius, M. Tsubota and G. E. Volovik, Dynamics of vortices and interfaces in superfluid 3He, Rep. Prog. Phys. 69 2006, pp. 3157-3230. (Invited review article)
- ㉛ M. Kobayashi and M. Tsubota, Kolmogorov spectrum of superfluid turbulence: Numerical analysis of the Gross-Pitaevskii equation with a small-scale dissipation, Phys. Rev. Lett. 94, 2005, 065302(1-4).
- ㉜ K. Kasamatsu, M. Tsubota and M. Ueda, Spin textures in rotating two-component Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 71, 2005, 043611 (1-14).
- ㉝ K. Kasamatsu, M. Machida, N. Sasa and M. Tsubota, Three-dimensional dynamics of vortex-lattice formation in Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 71, 2005, 063616(1-5).
- ㉞ M. Kobayashi and M. Tsubota, Kolmogorov Spectrum of Quantum Turbulence, J. Phys. Soc. Jpn. 74, 2005, pp.3248-3258.
- ㉟ K. Kasamatsu, M. Tsubota and M. Ueda, Vortices in Multicomponent Bose-Einstein Condensates, Int. J. Mod. Phys. B 19, 2005, pp. 1835-1904. (Invited review article)
- [学会発表] (計 4 件)
- ① 矢野英雄, 超流動 ⁴He における量子乱流遷移、日本物理学会 (立教大学)、2009、招待講演。
- ② 矢野英雄, 超流動ヘリウムにおける量子乱流遷移、日本物理学会 (熊本大学)、2009、招待講演。
- ③ M. Tsubota, Quantum turbulence -from superfluid helium to Bose-Einstein condensates-, 25th International conference on Low Temperature Physics (LT25) (Netherlands) 2008. Half-plenary

talk.

④坪田誠、量子乱流-超流動ヘリウムから原子気体ボース・ボースアインシュタイン凝縮体まで-、日本物理学会(北海道大学)、2007、招待講演。

[図書] (計2件)

①坪田誠/西森拓、培風館、量子渦のダイナミクス/砂丘と風紋の動力学、2008、3-110。

②W. P. Halperin and M. Tsubota、Elsevier、Progress in Low Temperature Physics、Vol.16、2008。

[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

畑 徹 (HATA TORU)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10156333

矢野 英雄 (YANO HIDEO)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70231652

(3) 連携研究者

なし

: