

令和 2 年 4 月 24 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05548

研究課題名（和文）超流体・常流体の完全結合ダイナミクス

研究課題名（英文）Fully coupled dynamics of superfluid and normal fluid

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）：量子流体力学および量子乱流の研究を行った。[超流動ヘリウム] 1941年にランダウが提案した2流体モデルは超流動現象を記述する強力な現象論的モデルだが、両者の運動方程式を連立させて解かれたことはほとんどない。本研究では、超流体のダイナミクスを量子渦糸モデルで、常流体をナビエ・ストークス方程式で記述し、両者は相互摩擦で結合、連立させて解き、史上初めて、超流体と常流体の結合ダイナミクスを明らかにすることができた。[原子気体BEC]箱形ポテンシャルに閉じ込められたBECに対し振動でエネルギーを注入し、ポテンシャルの高さを変えて、乱流のエネルギーカスケードの観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流は基礎科学から応用科学まで、広い分野で研究されて来たが、未だ十分な解明には至っていない。超流動ヘリウムや原子気体BECなどの低温の量子凝縮系では、量子渦の出現に象徴されるように、通常の乱流よりも簡単な「乱流の雛形」が提供されると期待されている。本研究で得られた、超流動ヘリウムの2流体モデルにおける乱流、および原子気体BECの乱流で得られた知見は、普通の乱流の理解にも資する。

研究成果の概要（英文）：We study numerically quantum hydrodynamics and quantum turbulence. In superfluid helium, our main result is to reveal the fully coupled dynamics of the two-fluid (superfluid and normal-fluid) model. The superfluid is described by the vortex filament mode and the normal fluid is described by the Navier-Stokes equation, and they interact through the mutual friction. Considering the thermal counterflow, we succeeded in obtaining the anomalous fluctuation of the normal fluid velocity caused by the vortex tangle; the results are qualitatively consistent with the recent visualization experiments. Another important result is observing the energy cascade of turbulence in a Bose-Einstein condensate trapped by a box potential.

研究分野：低温物理学

キーワード：量子流体力学 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 乱流

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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)などの量子凝縮系における量子流体力学及び量子乱流は、低温物理学の重要な分野として活発な研究が行われている。この分野半世紀以上の歴史を持つ一方で、世界的に見て、可視化に代表される優れた実験研究が進み、従来は不明だった物理が明らかにされつつある。研究代表者はこれまでこの分野を世界的に牽引して来たが、本研究ではこれまでの実績を総動員して、量子流体力学および量子乱流に関して、最新の研究を行った。

2. 研究の目的

ここ数年明らかになってきた量子流体力学および量子乱流の重要課題は以下である。

- (1) 超流動ヘリウム：1941年にランダウが提案した2流体モデルが、その流体力学の基礎にある。量子凝縮の結果として量子渦の出現が予言・観測された1950年代以降、超流動の回転を表す量子渦の物理が、長く量子流体力学の主要テーマであった。1970年代にSchwarzに始まる量子渦系モデルの数値計算は、2010年の坪田達の計算により、熱対向流のバルク状態に関してはおおそ解決を見た(と思われた)。ここまでのほとんど全ての数値計算は、常流体を固定し、そこからの相互摩擦は考慮して渦系の運動を調べる、言わば一方向のものであった。しかし、2000年代半ばから、量子渦、および常流動速度場の可視化実験が現れ、状況はさらに進んだ。最も驚くべき結果は、Guo達によって行われた、熱対向流中の励起ヘリウム分子を用いた可視化実験で、流速を上げたときの常流動速度場の非一様分布の可視化である。この問題は、それ以前には理論および数値計算でほとんど考慮されていなかった二つの効果を考える必要性を提示した。一つは、バルクではなく、流体が流れる管壁の効果である。もう一つは、量子渦系と常流体の運動を連立して解く双方向の計算である。本研究の大きな主題はこの双方向の計算である。
- (2) 原子気体BEC：原子気体BECは1995年に実現した後、当初、主な量子流体力学の研究は、捕獲ポテンシャル内の比較的少数の量子渦の運動に限られていた。坪田達は2007年に捕獲BECにおける量子乱流とコルモゴロフ則実現の可能性を示したが、それに触発されたブラジルの実験グループが2010年に3次元量子乱流と量子渦の可視化を実現し、新時代に突入した。その後、複数の実験グループが2次元量子乱流の実現にも成功した。しかし、これらの研究ではいずれも捕獲有限系の影響を受けて、量子渦の本数は少なく、これが乱流と呼べるのかという批判を免れ得なかった。これらが乱流であると主張するためにはコルモゴロフ則に象徴されるような統計則の観測が必要だが、そのような研究は無かったのである。しかし、2016年にケンブリッジの実験グループが箱形ポテンシャル中のBECを振動させて乱流を作り、捕獲ポテンシャルを切った後のTime of Flightで運動量分布のべき則を観測し、大きなブレイクスルーを行った(N. Navon et al., Nature 539, 72 (2016))。本基盤研究(C)が始まる直前の2016年3月、Navonから坪田に共同研究の申し入れがあり、捕獲原子気体BECの乱流に関し、共同研究を行うこととなった。

3. 研究の方法

- (1) 超流動ヘリウム：超流体の運動は量子渦系モデルを用い、常流体の運動はNavier-Stokesモデルで扱い、両者を相互摩擦で結合させ、双方向の計算を行う。このとき、量子渦の間隔より常流体の空間メッシュを細かくした。
- (2) 原子気体BEC：巨視的波動関数に対するグロス・ピタエフスキー(GP)方程式を扱う。ただし、ケンブリッジの実験を想定して、円筒箱形ポテンシャルを用い、ポテンシャルの外側には粒子の吸収を表す散逸項を導入する。

4. 研究成果

- (1) 超流動ヘリウム：まず、Guo達の実験で観測された常流動速度場の平坦化を示すことを目標とした。通常の管内粘性流体の層流はポアズイユ型の速度分布を示す。しかし、Guo達は壁近傍の速度場が平坦化を示すことを観測した(A. Marakov et al., Phys. Rev. B 91, 094503(2015))。実験に対応した正方形管内で計算を行うと、確かに、量子渦系タングルが非一様に発達し特に管壁近傍で高密度になることに呼応して、常流動速度場の平坦化が起こることがわかった(S. Yui et al., Phys. Rev. Lett. 120, 155301(2018))。しかし、実験との定量的な一致は必ずしも良くない。その原因の一つは、数値計算上の制限のため、実験ほど高密度の量子渦タングルを作れないためである。そのため、少々人工的では有るが、量子渦から常流動への相互摩擦だけを一方的に強くすると、実験結果に近い常流動速度場の大変形が得られた。

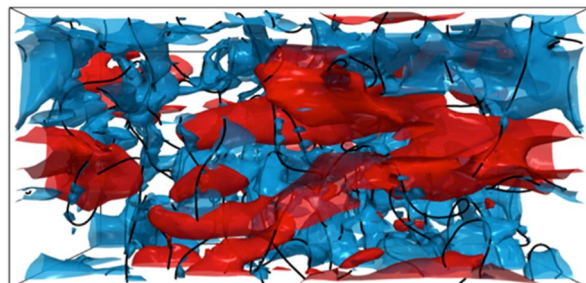


図1 熱対向流中の量子渦と常流体の結合運動。黒い線が量子渦。赤い領域は常流動流が平均速度より速い領域を示し、青い領域は常流動流が遅い領域を示す。

次に、Guo 達は、常流動速度場の異常な異方的ゆらぎ（流れ方向の方が、それに垂直な方向より揺らぎが大きい）を観測しており (B. Mastracci and Guo, Phys. Rev. Fluids 3, 063304(2018)), その再現を目標とした。今回は前の計算より常流体の空間メッシュを細かくし、常流動速度場の細かい揺らぎをとらえるようにした。その結果、図 1 に示すような、常流動速度場の異方的ゆらぎをとらえることに成功した (S. Yui et al., Phys. Rev. Lett. (in press))。これはかなり驚くべき成果である。普通の粘性流体の場合、乱流遷移は壁付近から生じる速度揺らぎが増幅されて乱流に至る。言わば、乱れの源は外から供給される。しかし、この計算は、2 流体モデルの系が、自ら内的な超流動のゆらぎを作り、それが源となって常流動が乱流となるのである。このような新奇な乱流遷移を示したことが非常に大きな成果である。この問題はさらに常流動成分が乱流になることで起こる、いわゆる TI-TII 遷移と呼ばれる半世紀に渡る未解決問題に迫るステップになると期待される。

(2)原子気体 BEC: ケンブリッジグループとの共同研究を行った。大きな特徴は、箱形ポテンシャルの深さを制御することで、エネルギーカスケードの観測に成功したことである (N. Navon et al., Science 366, 382(2019))。この機構を図 2 に基づき説明する。この研究では、振動ポテンシャルにより低波数（大きな空間スケール）にエネルギーを注入する。しかし、粒子はボース・アインシュタイン凝縮を起こし低い運動エネルギーを持っておりこれだけではそれらが箱形ポテンシャルから飛び出ることには無い。しかし、乱流が発達すれば、低波数から高波数にエネルギーが流れる。そしてもし箱形ポテンシャルの高さを超える運動エネルギーを持った粒子が現れれば（換言すれば、エネルギーカスケードの先端が臨界波数に達すれば）、その粒子はポテンシャルを飛び出ることが出来る。実際にそのような粒子の離脱が観測され、それにより、乱流のエネルギーカスケードのフラックスの同定に初めて成功した。そしてそれは GP 方程式の数値計算結果と符合した。

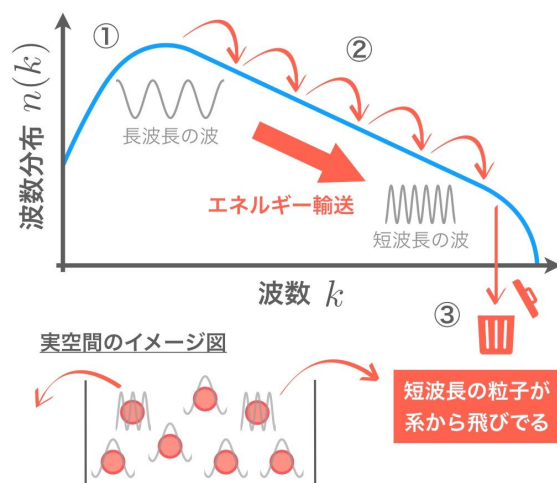


図 2 ポース・アインシュタイン凝縮体中の粒子が箱形ポテンシャルに閉じ込められている。これらの粒子は低い波数を持つ。ポテンシャルを揺さぶると、乱流が発達する。その結果、低い波数から高い波数へと運動エネルギーが輸送される。高い波数の粒子は運動エネルギーが大きい。ポテンシャルの壁を超えることができる高い運動エネルギーを持つ粒子は、ポテンシャルの外に飛び出る。この飛び出る粒子の個数を測定することで、エネルギー輸送を観測できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota, Wei Guo	4. 巻 124
2. 論文標題 Fully Coupled Two-Fluid Dynamics in Superfluid 4He: Anomalous Anisotropic Velocity Fluctuations in Counterflow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 155301(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.155301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Toshiaki Kanai, Wei Guo, Makoto Tsubota, Dafei Jin	4. 巻 124
2. 論文標題 Torque and Angular-Momentum Transfer in Merging Rotating Bose-Einstein Condensates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 105302(1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.105302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nir Navon, Christoph Eigen, Jinyi Zhang, Raphael Lopes, Alexander L. Gaunt, Kazuya Fujimoto, Makoto Tsubota, Robert P. Smith, Zoran Hadzibabic	4. 巻 366
2. 論文標題 Synthetic dissipation and cascade fluxes in a turbulent quantum gas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 382-385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.aau6103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 P. Moroshkin, P. Leiderer, K. Kono, S. Inui, M. Tsubota	4. 巻 122
2. 論文標題 Dynamics of the Vortex-Particle Complexes Bound to the Free Surface of Superfluid Helium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 174502(1-5)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.122.174502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Gao, W. Guo, S. Yui, M. Tsubota, W. F. Vinen	4. 巻 97
2. 論文標題 Dissipation in quantum turbulence in superfluid 4He above 1 K	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184518(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.184518	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Junsik Han, Makoto Tsubota	4. 巻 99
2. 論文標題 Phase separation of quantized vortices in two-component miscible Bose-Einstein condensates in a two-dimensional box potential	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033607(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.033607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 C.-H. Hsueh, Y.-C. Tsai, T.-L. Horng, M. Tsubota, W. C. Wu	4. 巻 8
2. 論文標題 Turbulence in a matter-wave supersolid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Reports	6. 最初と最後の頁 12589(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-30852-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 坪田誠	4. 巻 73
2. 論文標題 量子乱流—量子渦の非線形・非平衡ダイナミクス	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 474-478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yui Satoshi, Tsubota Makoto, Kobayashi Hiromichi	4. 巻 120
2. 論文標題 Three-Dimensional Coupled Dynamics of the Two-Fluid Model in Superfluid He4: Deformed Velocity Profile of Normal Fluid in Thermal Counterflow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 155301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.155301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanai Toshiaki, Guo Wei, Tsubota Makoto	4. 巻 97
2. 論文標題 Flows with fractional quantum circulation in Bose-Einstein condensates induced by nontopological phase defects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 13612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.97.013612	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsubota Makoto, Fujimoto Kazuya, Yui Satoshi	4. 巻 188
2. 論文標題 Numerical Studies of Quantum Turbulence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 119 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-017-1789-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Makoto Tsubota
2. 発表標題 Quantum Turbulence
3. 学会等名 ICFD2019: Internatinal Conference on Flow Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Tsubota
2. 発表標題 Hydrodynamics and turbulence in quantum fluids
3. 学会等名 QFS2019: Internatinal Conference on Quantum Fluids and Solids (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Tsubota
2. 発表標題 Recent topics of quantum hydrodynamics and turbulence
3. 学会等名 Physics of Cold Atom Gases: Ordered and Chaotic Aspects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯井悟志、小林宏充、坪田誠
2. 発表標題 超流動 ^4He における量子渦と常流動の局所結合ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川朋、乾聡介、坪田誠、矢野英雄
2. 発表標題 超流動 ^4He の量子渦タングルから放出される渦輪の統計則
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tsubota
2. 発表標題 Recent topics of quantum hydrodynamics and turbulence
3. 学会等名 Quantum Turbulence: Cold Atoms, Heavy Ions, and Neutron Stars (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Tsubota
2. 発表標題 Numerical Simulation of Quantum Turbulence
3. 学会等名 Workshop, Chasing Tornadoes: Vorticity Above, Below, and in the Lab (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Tsubota
2. 発表標題 Numerical Simulation of Quantum Turbulence
3. 学会等名 DPG Spring Meeting and EPS-CMD27 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Tsubota
2. 発表標題 Hydrodynamics and turbulence in quantum fluids
3. 学会等名 The 4th East Asia Joint Seminars on Statistical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makoto Tsubota
2. 発表標題 Recent topics of quantum turbulence
3. 学会等名 Hybrid Photonics & Materials International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makoto Tsubota, Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi
2. 発表標題 Fully coupled dynamics of two-fluid model in thermal counterflow: deformation of the Poiseuille normal fluid profile
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 坪田 誠、小林 未知数、竹内 宏光、笠松 健一	4. 発行年 2018年
2. 出版社 丸善	5. 総ページ数 338
3. 書名 量子流体力学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小林 宏充 (Kobayashi Hiromitsu)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤本 和也 (Fujimoto Kazuya)		
研究協力者	湯井 悟志 (Yui Satoshi)		
研究協力者	ナボン ニア (Navon Nir)		
研究協力者	グオ ウエイ (Guo Wei)		
研究協力者	ヴァイネン ダブリュー (Vinen W. F.)		