

2020年4月15日

報道関係者各位

慶應義塾大学  
大阪市立大学

## 超流動中の異常な速度ゆらぎの原因を解明

### ーランダウの2流体モデルにより量子乱流構造の可視化に成功ー

慶應義塾大学自然科学研究教育センター 湯井悟志 訪問研究員（日本学術振興会特別研究員）、法学部日吉物理学教室 小林宏充 教授、大阪市立大学大学院理学研究科 坪田誠 教授、フロリダ州立大学 Wei Guo (Associate Professor) は、極低温で超流動状態になった液体ヘリウム4において、常流体の穏やかな流れ（層流）に現れる異常な速度ゆらぎが、乱流となった超流動成分の量子渦との相互作用で生じることを明らかにしました。これは、1941年にランダウが提唱した低温物理学の標準モデルである“2流体モデル”の二つの成分-超流動と常流動-の運動を分離することに成功した画期的な成果です。

2.17 K以下の極低温で超流動状態になった液体ヘリウム4 ( $^4\text{He}$ ) は、粘性の無い“超流体”と粘性を有する“常流体”の混合状態として記述されます。この2流体モデルは、1941年にランダウが理論的に提案したもので、液体ヘリウムのみならず超伝導でも用いられる標準モデルです。しかし、超流体と常流体の運動を分離して示されたことはこれまでありませんでした。

通常の粘性流体では層流の速度ゆらぎは小さいですが、超流動ヘリウムの流動実験において、常流体は層流状態であるにもかかわらず流れの方向に依存する異常な速度ゆらぎが観測されていました。この論文では、超流体の回転を表す量子渦と常流体の2流体連立数値計算方法を導入して、量子乱流(超流体が乱流になった状態)の数値計算を行いました。解析の結果、層流常流体の流れ方向に依存する異常な速度ゆらぎは、量子渦が作る量子乱流に起因することがわかりました。

この研究成果は、ランダウやファインマンといった著名な物理学者が理論的に提案した2流体モデルの描像を明らかにし、2流体の運動を分離したものです。この2流体連立数値計算は、コヒーレント物質波系（超流動ヘリウム、原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC)、ダークマターBECなど）や多成分流体系（液晶、プラズマ・電磁流体、混相流など）へ大きな影響を与えることが期待できます。

本研究成果は、日本時間2020年4月17日に『Physical Review Letters』オンライン版に掲載されます。

#### 1. 研究のポイント

- ・ランダウが1941年に提唱し、半世紀以上にわたり低温物理学の標準モデルとして用いられてきた2流体モデルを直接連立数値計算で扱い、2成分の運動を分離することに成功。
- ・実験で観測された常流体の異常な速度ゆらぎが量子乱流により起こることを解明

#### 2. 研究の背景

絶対温度2.17 K以下の極低温の液体ヘリウム4は、リニアモーターカーや加速器などで利用

される超伝導磁石の冷却や極低温での観測機器への応用など、その流動現象の解明は非常に重要です。極低温ヘリウムは、粘性の無い超流体と粘性を有する常流体との混合状態にあるとする2流体モデルで理解できます。常流体は、水や空気など身の回りの流体と同様、粘性を持った流体です。一方、超流体は、量子力学効果により現れ、粘性を持たない流体です。超流体中の渦は、渦の強さ（循環）がとびとびの値しか持たない量子渦となります。流れが速くなると量子渦はスパゲッティあるいは毛玉のような状態になり、これを量子乱流と呼びます。

フロリダ州立大学 Wei Guo らのグループは、極低温の液体ヘリウムを用いて量子乱流の流動実験を行いました[1]。結果、通常は速度ゆらぎが小さいはずの穏やかな流れである常流体の層流に大きな速度ゆらぎが観測されました。さらに、流れと垂直方向に比べて流れ方向の速度ゆらぎが大きくなることも観測しました。通常の粘性流体力学の知識では、このような速度ゆらぎを説明できません。このような異常な常流体の速度ゆらぎの原因は何か、実験観測からは明らかになりませんでした。

### 3. 研究の内容

この常流体の速度ゆらぎを検討するため、量子乱流と常流体が結合した2流体連立数値計算を行いました。1 K以上の比較的高温の量子乱流では、超流体と常流体が互いに影響を及ぼしあっています。通常の粘性流体の水面に垂直に枝を刺して動かすと、枝と水の間の粘性により、枝に引きずられた水がゆらぎます。量子渦が常流体中で運動すると、渦と常流体の間に働く相互作用によって常流体が引きずられてゆらぎが起こると予想されます。本研究では、高解像度で**2流体を連立した数値計算**を実行しました。すなわち、量子渦の間隔よりも細かい計算格子を常流体に用いることで、渦が作り出す常流体のゆらぎを詳細に解析しました。流動状況は熱対向流（管の一端が熱せられることによって超流体と常流体が互いに反対方向に流れる対向流）で、この流れにより量子乱流が駆動されます。結果として、流れ方向の速度ゆらぎが垂直方向よりも大きくなるという実験結果が再現できました。図1は、数値計算によって得られた量子乱流および常流体速度ゆらぎです。図中の黒曲線で示される量子渦は、複雑にねじれて絡み合っています。一方、赤い領域は常流体の速度が平均より速い領域を示し、青い領域は遅い領域を示します。それらの領域は流れ方向に長い構造を形成し、速度のゆらぎが方向に依ることがわかります。

通常の1成分の粘性流体では、流動速度が速くなると乱流に遷移しますが、その乱れの種は壁面での強い速度差（せん断力）です。通常の流体では、そのような壁が存在しないと乱流への遷移は起こりません。2成分をもつ極低温液体ヘリウムでは、量子渦との相互作用によって生じる常流体の速度ゆらぎが常流体を乱流化させる可能性があります。

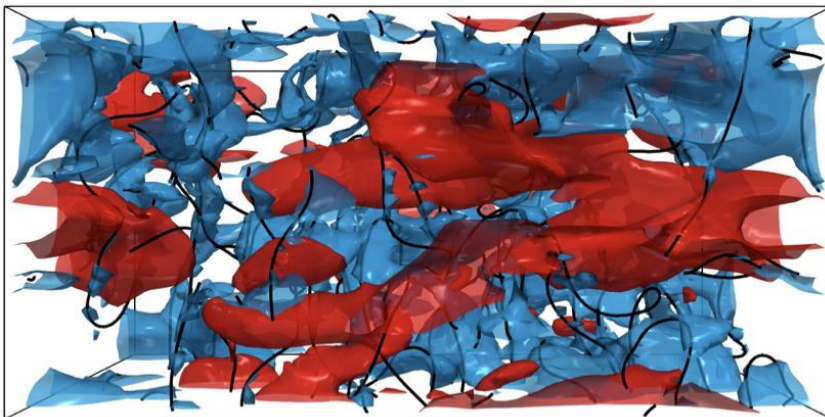


図1: 数値計算によって得られた量子乱流。流動状況は熱対向流であり、超流体と常流体が互いに逆向きに流れている。黒い曲線は渦糸（量子渦の芯）を示し、タングル（量子乱流）を形成している。赤い領域は常流動流が平均速度より速い領域を示し、青い領域は常流動流が遅い領域を示す。

このシナリオは、本研究の手法を用いて流動速度が大きい状況を実現することで、将来直接確認できるかもしれません。そのような乱流遷移の機構は多成分流体に特有のものであり、混相流など他の多流体系の物理との関連や普遍性が期待できます。

### 4. 期待される効果

本研究の結果は、コヒーレント物質波系（超流動ヘリウム、原子気体 BEC、ダークマター BEC など）や多成分流体系（液晶、プラズマ電磁流体、混相流など）の物理学への大きなインパクトが期待できます。

### 5. 今後の展開

本研究の方法を応用することで、「超流体の2段階乱流遷移（T1-T2 遷移）」や「超流体と常流体の同時乱流の統計的性質」など量子流体力学における半世紀にわたる謎の解決が期待できます。

<研究資金>

本研究は、日本学術振興会特別研究員奨励費 JP19J00967、科研費 JP18K03935、17K05548、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 S1511006 の対象研究です。

<原論文情報>

雑誌名：Physical Review Letters (IF=9.227)

論文名：Fully Coupled Two-Fluid Dynamics in Superfluid  $^4\text{He}$ : Anomalous Anisotropic Velocity Fluctuations in Counterflow

著者：Satoshi Yui <sup>1</sup>, Hiromichi Kobayashi <sup>1</sup>, Makoto Tsubota <sup>2</sup>, Wei Guo <sup>3</sup> (<sup>1</sup>Keio University, <sup>2</sup>Osaka City University, <sup>3</sup>Florida State University)

<参考文献>

[1] Mastracci et al., Physical Review Fluids, Vol. 4, 083305 (2019).

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

---

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 法学部日吉物理学教室 教授 小林宏充 (こばやし ひろみち)

TEL : 045-566-1323 FAX : 045-566-1323 E-mail : [hkobayas@keio.jp](mailto:hkobayas@keio.jp)

・本リリースの配信元

大阪市立大学 広報課 (担当：西前・長谷川)

TEL : 06-6605-3411 FAX : 06-6605-3572

Email : [t-koho@ado.osaka-cu.ac.jp](mailto:t-koho@ado.osaka-cu.ac.jp)