

2024年1月12日

大阪公立大学

科学技術振興機構 (JST)

超流動体はレイノルズの相似則に従うか？ 物理学の「常識」を覆す量子粘性を理論提言

<本研究のポイント>

- ◇大気の流れや人体の血流など、あらゆる粘性流体に適用できる理論「レイノルズの相似則」。この法則を非粘性の量子流体として知られる超流（動）体へと拡張し、その検証方法を提案。
- ◇超流体中を落下する物体の終端速度を測定すれば、超流体におけるレイノルズの相似則の成立を検証できることを提示。
- ◇この法則が成立すれば、純粋な超流体にも実効的な粘性「量子粘性」が存在することを提言。

<概要>

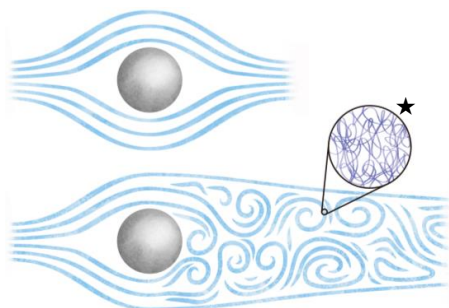


図1：超流体中を一定速度で運動する物体のまわりの流れ（模式図）。
（上）純粋な超流体では流体の抵抗力が働かない流動状態が実現する。
（下）物体の速度を十分大きくすると粘性流体と同様な流れのパターンが後方に形成されることが予想される。
★の挿絵は、流れのパターンが微視的には糸状の量子渦が複雑に絡まった量子乱流から構成されていることを示している。

空気や水などで物体が移動する際に発生する流れは、エネルギー損失の主要な原因です。この挙動や損失の度合いは、流体の持つ粘性を取り入れた「レイノルズ数」という量によって把握できます。この法則は「レイノルズの相似則」と呼ばれており、地球の大気から人体の血液まで、さまざまな流体に普遍的に適用できる強力な経験則として知られています。粘性が消失する量子流体である超流体は、この法則が適用できない明らかな例外と考えられていました[図1]。

大阪公立大学大学院理学研究科 竹内 宏光講師は、超流体における（量子）乱流を理解する上での理論的な課題に焦点を当て、超流体中を落下する物体の終端速度を測定すれば、超流体におけるレイノルズの相似則の成立を検証できることを示しました。また同時に、これが成立すれば純粋な超流体にも実効的な粘性（量子粘性）が存在することを提言しています。

本研究成果は、2024年1月12日（金）に国際学術誌「Physical Review B」の速報としてオンライン掲載されます。

量子粘性の概念は半世紀を優に超える長い歴史を持つ超流動理論の「常識」を覆すものです。この概念が実証されれば業界に衝撃が走ることでしょう。この分野には長く携わってきたため、かくいう私も半分くらい自分の提案を疑っています。本研究はそのくらい私にとって挑戦的な提案です。実験で検証されるのが待ち遠しいです。



竹内 宏光講師

■掲載誌情報

雑誌名： Physical Review B

論文名： Quantum viscosity and the Reynolds similitude of a pure superfluid

著者： Hiromitsu Takeuchi

<研究の背景>

空気や水など私たちの身近にある流体中で物体が激しく運動すると、その運動の後方には複雑な流れ（乱流）が生じ、その反動で物体に抵抗力が働き運動エネルギーを失います。このように乱流の発生は流体中を運動する物体にとってエネルギー損失の主な要因です。乱流の発生やエネルギー損失の度合いは、レイノルズ数という量によって統一的に把握できます。この流体科学の経験則はレイノルズの相似則^{*1}と呼ばれ、地球規模の大気の流れから人体の血流などのさまざまな種類・スケールの粘性流体に適用できる強力な理論として知られています。しかし、自然界には明らかな例外が存在します。それは粘性のない量子流体^{*2}として知られる超流体です。量子効果が顕著なある種の物質は絶対零度（絶対温度の $0\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$ ）近傍の低温下でも固化せず、超流体という特殊な流体に相転移することが知られています。超流体の流れは従来の流体よりも簡潔に記述できるため、流体科学の悲願である乱流理論の構築に有効なモデルの候補として高い注目を集めてきました。ところが、従来の流体が持つ粘性は純粋な超流体では消失するが故に、超流体においては乱流に本来付随するはずのエネルギー損失の機構が十分に解明されておらず、レイノルズの相似則の適用についての検証を困難にしていました。この理論的困難は超流体による乱流モデルを実用レベルで構築する上で、避けては通れない問題です。

^{*1} この法則は飛行機や鉄道車両、自動車などの輸送機器の風洞試験など、工業面にも広く応用されていることで知られている。

^{*2} 量子力学的な効果（量子効果）がその物性に顕著にあらわれた流体。

<研究の内容>

本研究では、この問題の解決に向けて、絶対零度の純粋な超流体で実効的に作用する量子粘性という概念を導入し、その検証方法を定量的に提示しました。具体的に想定する超流体は、 1.5K 以下に冷却した液体ヘリウム4 (^4He) です。1930年代に液体 ^4He の粘性が約 2K 以下で異常に低下することが観測され、1940年代にかけて超流体の理論的基礎（超流動理論）が確立しました。この**超流動**と呼ばれる粘性に異常をきたす現象の物理原理は、リニアモーターカーなどにも応用されている超伝導と本質的に同じです。超伝導は抵抗のない荷電粒子の流れとしてよく知られていますが、それと対応付けて超流動は摩擦あるいは粘性のない中性粒子の流れと表現されます[図2(a)]。超流動理論は超伝導の本質を理解する上でも重要な役割を果たしてきました。

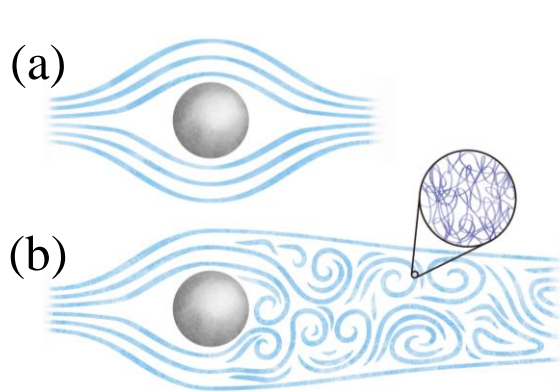


図 2：超流体中を一定速度で運動する物体のまわりの流れ（模式図）。(a) 純粋な超流体では流体の抵抗力が働かない流動状態が実現する。(b) 物体の速度を十分大きくすると粘性流体と同様な流れのパターンが後方に形成されることが予想される。右上の丸で囲まれた挿絵は、流れのパターンが微視的には糸状の量子渦が複雑に絡まった量子乱流から構成されていることを示している。

超流体は粘性のない流れと便宜上表現しましたが、厳密な意味では熱揺らぎに起因した粘性が存在します。超流体の粘性の温度依存性は、二流体模型によってよく理解されています。この模型によると、超流体には量子効果に由来する粘性を持たない成分（超流動成分）と、通常の流体のように粘性を持つ熱揺らぎからなる成分（常流動成分）の2つの流動成分を持ち、この2成分が均一に混ざり合った混合流体のように振舞います。約 2K 以下から超流動成分が徐々に増加し、熱揺らぎが消失する絶対零度（0K）では超流動成分のみが存在する**純粋な超流体**となります。

従来の流体科学では、レイノルズ数は $R = ud/\nu$ で定義されます。ここで、 u と d はそれぞれ流れを特徴づける速度と長さスケールです。動粘度 ν は流体の粘性の大きさを表す指標ですから、非粘性である純粋な超流体の場合、 $\nu = 0$ となり、レイノルズ数が無限大に発散するという理論的な困難に直面します。興味深いことに、20 年以上前に超流体の乱流に関する理論研究の文脈で超流動レイノルズ数 R_s という量が提案されました。これはレイノルズ数の分母にある動粘度 ν を超流体中の渦の循環^{*3}である循環量子 κ で置き換えたもの ($R_s = ud/\kappa$) です。この提案は純粋な超流体にも有効的に粘性が働き、その動粘度 ν_s 値が循環量子 κ であることを示唆しています。この仮説は理論的な根拠に乏しいこともあり、あまり注目されませんでした。その後しばらくして、 R_s の速度 u から補正 u_c を差し引いたものに置換すべきという修正理論が提案され脚光を浴びました。ところが、この補正 u_c は想定している流体系の設定に大きく依存するため、従来のレイノルズの相似則のような普遍的な記述を妨げる要素でしかありませんでした。

*3 渦の強度を表す指標。超流体中の渦の循環は、量子効果のために循環量子 κ の整数倍の値のみを取る（循環の量子化）。そのため、超流体中の渦は量子渦と呼ばれる。

本研究では超流体中を落下する物体の終端速度を測定することで、純粋な超流体にもこのような実効的な粘性が存在するかを確かめる方法を理論的に提案しました。空気抵抗などで知られているように、流体中を落下する物体には重力に加えて浮力や抵抗力といった流体の存在に起因した力が加わります。これらの力が釣り合ったとき、物体の落下速度は終端速度に達し一定となります。純粋な超流体が得られる絶対零度を実現することは実験では困難なため、常流動成分による寄与も考慮に入れ

る必要があります。終端速度の観測値から抵抗力に係る超流動成分の寄与のみをうまく抽出すれば、純粋な超流体による抵抗力[図 2(b)], ひいては、有効的な動粘度 ν_s を測定することができます。この熱揺らぎに依らない粘性を量子粘性と呼びます。量子粘性という用語をわざわざ導入した理由は、測定される実効的な動粘度 ν_s の値が、上述の循環量子 κ と等しいかどうかは現時点では非自明だからです。レイノルズ数の相似則によると、流体による抵抗力はレイノルズ数を通じてのみ動粘度に依存します。したがって、レイノルズ数の相似則が適用されるためには、量子粘性が系の詳細に依らず超流体の流体としての本来の性質にのみ依存する物理量によって決まらなければなりません。実際、このような候補としてあげられるのは、動粘度と同じ次元を持つ物理量であり、超流体中の安定な渦がとり得る唯一の循環である循環量子 κ のみになります。

本研究では循環量子を量子粘性として採用したときの終端速度と熱揺らぎによる補正を幅広い温度領域で算出することに成功しました。具体的な理論計算によると、1mm 程度以上の大きさの鉄製の物体を実験試料として採用すれば、上述の速度補正 u_c などの熱揺らぎ以外の補正を無視できるパラメータ領域に到達することができます。当初、熱揺らぎに起因する常流動成分の寄与を算出することは非常に困難であると考えられていましたが、2つの流動成分間の相互作用が無視できる温度領域で検証できること、さらに常流動成分の流れに対するレイノルズ数が超流動レイノルズ数に比べて十分小さい値をとることが具体的な見積もりで明らかになり、理論計算の実行が可能だと判明しました。また、常流動成分の流体を構成する擬似粒子である準粒子が希薄になる低温域 [図 3(b)] では、流体としての描像が成り立つ高温域 [図 3(a)] とは理論的に全く別の取り扱いが必要になるという困難に遭遇します。幸運にも、過去の研究でこのような特殊な状況で抵抗力を見積もる手法を本研究者は身に付けていたため、全温度領域で熱揺らぎによる補正を算出することができました (図 4)。

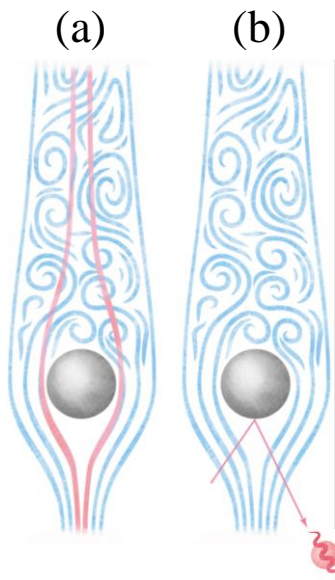


図 3: 超流体中を落下する物体のまわりの超流動成分と常流動成分の流れの様子 (模式図)。(a) 熱揺らぎに起因して現れる常流動成分 (赤) は高温側で粘性流体のような低速度流を形成する。(b) 低温側では常流動成分を構成する準粒子が希薄になり、流体力学的描像が破綻する。

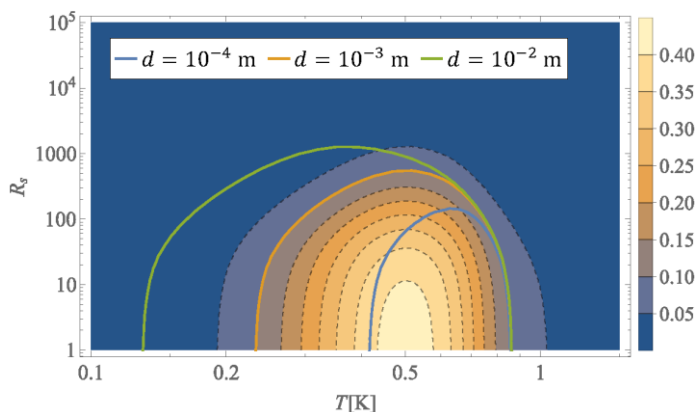


図 4: 理論的に見積もられた熱揺らぎによる補正。直径 $d = 1 \text{ mm}$ の鉄球に対する結果を表す。補正の量子粘性に対する割合は右の背景の色で表されており、割合と色の対応は右の凡例の通りである。太線は $d = 0.1, 1, 10 \text{ mm}$ の鉄球に対する補正が 0.1 の等値線を表す。横軸は温度 (T : 単位はケルビン) と縦軸は超流動レイノルズ数 (R_s) を表す。

<今後の展開>

粘性が消失する超流動という非常識な流動現象は、1937年の発見から長年認知されている低温物理学における「常識」です。もし本研究の量子粘性という業界の「非常識」な提案が実験的に確かめられれば、“非常識の「非常識」＝常識”となり、ある条件下では超流体が常識的（粘性流体と同様）に振舞うことを意味します。長い研究史を持つ低温物理学で培われた「常識」が量子流体力学と従来の流体科学（“古典”流体力学）の間に精神的な“溝”を作ってきたことで、量子粘性を検証するという提案がこれまでされてこなかったといっても過言ではないでしょう。量子粘性という概念によりこの“溝”が埋められることで、量子流体力学を包括する流体科学の新しい枠組みが創成されることが期待されます。レイノルズの相似則のような流体科学の強力な経験則が、これまで踏み込めなかった超流体の複雑な流動状態の問題に取り組む大きな足掛かりとなることでしょう。これにより超流体の乱流についての理解がさらに進み、逆に流体科学へのフィードバックがもたらされるかもしれません。そのフィードバックが何なのかは現時点では具体的に想像できませんが、物理学の未解決問題として有名な課題である乱流モデルを超流体の系で実現する上で、量子粘性が重要なキーワードとなることが予想されます。

<資金情報>

本研究は主に、JST さきがけ「複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学（研究総括：後藤 晋）」における研究課題「量子粘性の検証と複雑な量子流動現象の解明（研究代表者：竹内宏光、JPMJPR23O5）」の支援を受けて行われたものです。本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18KK0391、JP20H01842 および「大阪市のふるさと寄付金（市立大学振興）」を財源とした「グローバル人材育成事業（研究支援）」による支援を受けて行われたものです。

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院理学研究科
担当：竹内 宏光（たけうち ひろみつ）
E-mail : takeuchi[at]omu.ac.jp

【JST 事業に関する問い合わせ先】

科学技術振興機構戦略研究推進部
グリーンイノベーショングループ
担当：安藤 裕輔（あんどう ゆうすけ）
TEL : 03-3512-3526
E-mail : presto[at]jst.go.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学広報課
担当：上嶋 健太（かみしま けんた）
TEL : 06-6605-3411
E-mail : koho-list[at]ml.omu.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

科学技術振興機構広報課
TEL : 03-5214-8404
E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp