

大阪科学・大学記者クラブ 御中
(同時提供先：文部科学記者会、科学記者会)

9 産業と技術革新の
基盤をつくらう



2022年7月6日
大阪公立大学
慶應義塾大学

量子乱流中における量子渦拡散の法則を解明

<ポイント>

- ◇超流動^{*1}状態となった液体ヘリウム4 (^4He) の量子乱流^{*2} 中における量子渦^{*3} の拡散に法則があることを理論および数値計算で解明。
- ◇短い時間スケールでは素早く広がる“超拡散^{*4}”、長い時間スケールでは“常拡散^{*5}”が発生。
- ◇複雑な量子乱流を理解するための新たな一歩となる可能性を示唆。

<概要>

大阪公立大学の坪田 誠教授、湯井 悟志特任助教（大学院理学研究科および南部陽一郎物理学研究所所属）、慶應義塾大学法学部日吉物理学教室の小林 宏充教授らの研究グループは、フロリダ州立大学の Wei Guo (Associate Professor)、Yuan Tang (Postdoctoral Associate) らと共同で、絶対零度 (-273°C) に近い極低温で超流動状態となった液体ヘリウム4 (^4He) における量子乱流中の量子渦の拡散に法則があることを、理論および数値計算で研究し、Guo 准教授らが先行研究で行なった実験結果と比較することで明らかにしました。今回の数値計算では、量子渦は拡散初期においては素早く広がる“超拡散”を起こし、その後の長い時間経過後は、静水中の花粉の動き等でも見られるような“常拡散”を起こします。実験および数値計算で結果が一致したという本研究成果は、複雑な量子乱流を理解するための新たな一歩となる可能性があります。さらに、他の量子系での拡散の研究に繋がることが期待されます。

本研究成果は、2022年7月5日、「Physical Review Letters」にオンライン掲載されました。また、当論文は、特に重要な研究成果として認められ、Editors' Suggestion に選出されました。

<研究者からのコメント>

拡散といえば、ブラウン運動に代表されるように、自然界ではよく見られる現象です。この研究では、極低温の量子流体中で粒子の拡散を調べ、その移動時間に応じて“超拡散”から普通の“常拡散”に移行すること、そして“超拡散”が量子渦のユニークな運動に起因することを明らかにしました。



坪田 誠 教授

<研究の背景>

コーヒーにミルクを注ぎ、スプーンでかき混ぜる（すなわち乱流を発生させる）と、ミルクはあっという間に混ざって広がります。これは、乱流が流体中の粒子を素早く拡散する能力を持っていることを意味します。このように拡散現象は身の回りにありふれていますが、**量子乱流**ではどうなるのでしょうか？量子乱流は、この世界のさまざまなところ（冷却原子気体の超流動、中性子星、ダークマター等）において出現し得る物理現象です。**量子渦**の可視化実験により、量子乱流中の量子渦は短い時間の中では“超拡散”となり、さらに長い時間では“常拡散”に転移することが発見されました。そこで、本研究チームは理論と数値計算によりこの法則を調べ、その背景にある物理を解明したいと考えました。

<研究の内容>

超流動液体ヘリウムの量子乱流をコンピュータでシミュレーションし、量子渦に追従する粒子を入れ、その軌跡を解析しました。

図1では、量子渦が毛玉のように複雑に絡まり、量子乱流が発生している様子を表しています。紫色の球は追従粒子（実際の大きさより拡大して描画している）で、量子渦芯に付着して運ばれます。まず絶対零度の量子乱流を計算し、量子渦が短い時間において確かに“超拡散”に従うことを明らかにしました。また、長い時間においては、量子渦同士がぶつかって**再結合**^{*6}が起こることにより拡散が遅くなり、“常拡散”に転移することを明らかにしました。シミュレーションで得られた“超拡散”の指数は、可視化実験結果と一致しており、さらに、絶対零度から約2K（-271℃）まで幅広い温度において計算したところ、“超拡散”の指数はほとんど変化しないことが分かりました。すなわち、“超拡散”は温度等のパラメータにあまり依存しない頑強な法則であることが分かりました。

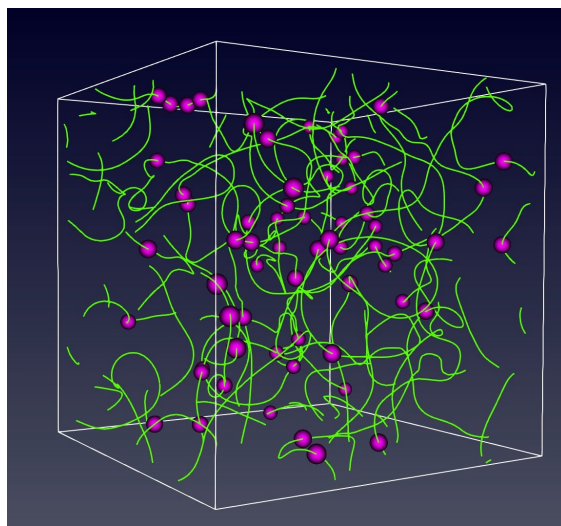


図1:シミュレーションされた量子乱流のスナップショット。緑色の線は量子渦の芯、紫色の球は追従粒子。

<期待される効果・今後の展開>

この研究は、量子乱流の新しい法則として“超拡散”の物理を明らかにしました。この法則は、複雑な量子乱流を理解するための新しい道となる可能性があります。また、超流動の乱流拡散を理解するための基本的な知見を構築しました。得られた知見は、他の量子系における拡散の研究につながることで期待されます。

<資金情報>

本研究は JSPS 特別研究員奨励費(JP19J00967)、JSPS 科研費(JP20H01855, JP22H01403)の助成を受けたものです。

<用語解説>

※1 超流動 … 粘性が消失した流れのこと。絶対零度に近い極低温において量子力学的性質がマクロに現れることで引き起こされる。

※2 量子乱流 … 超流動の乱流のこと。量子乱流中では量子渦が毛玉のように絡まりあっており、それによってつくられる速度場は複雑に乱れている。

- ※3 量子渦 … 超流動中に出現する、渦芯周りの速度循環が量子化された（決まった値しかとれない）渦。超流動ヘリウム4の場合、渦芯の太さは0.1 nm程度（原子の大きさと同程度）と非常に細い。
- ※4 超拡散 … Superdiffusion の訳。常拡散よりすばやい拡散。流体中の粒子の変位を r 、時間を t と書くと、 $\langle r^2 \rangle \approx At^\gamma$ のような法則に従うことがある。A は比例定数、 $\langle \dots \rangle$ は統計平均（複数の粒子の変位を集めて平均をとること）を意味する。 $\gamma=1$ の場合を“常拡散”、 $\gamma>1$ を“超拡散”と呼ぶ。
- ※5 常拡散 … Normal diffusion の訳。ランダムに運動する粒子等の拡散。
- ※6 再結合 … 2本の量子渦芯が接触すると、接触した点でお互いがつなぎ変わる現象。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Physical Review Letters

【論文名】 Universal anomalous diffusion of quantized vortices in ultraquantum turbulence

【著者】 Satoshi Yui, Yuan Tang, Wei Guo, Hiromichi Kobayashi, and Makoto Tsubota

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.025301>

【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

教授：坪田 誠（つばた まこと）

TEL：06-6605-3073

E-mail：tsubota@omu.ac.jp

慶應義塾大学 法学部

教授：小林 宏充（こばやし ひろみち）

TEL：045-566-1323

E-mail：hkobayas@keio.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課

担当：國田（くにだ）

TEL：06-6605-3411

E-mail：koho-list@ml.omu.ac.jp

慶應義塾 広報室

担当：澤野（さわの）

TEL：03-5427-1541

E-mail：m-pr@adst.keio.ac.jp