

# 光を用いた量子渦・量子流体研究の新展開

袁 輪 陽 介 (大阪大学大学院基礎工学研究科 minowa.yosuke.es@osaka-u.ac.jp)

液体ヘリウム4を2.17 K以下まで冷却すると現れる超流動ヘリウムは、比較的簡便に $10^{25}$ 個オーダーもの膨大な数の粒子からなるボース-アインシュタイン凝縮体を用意できるという特異な系である。そのため、超流動ヘリウムは、その物性研究だけでなく、大きな体積を長時間保持できるという特徴を活かした量子流体の乱流(量子乱流)の研究の舞台としても使われてきた。

超流動ヘリウムの研究において、光は非常に大きな役割を担う。よじ登り(creeeping)効果などの特異な超流動の振る舞いを「見る」という研究から始まり、不純物原子の導入や精密分光など、光の持つ遠隔性・精密性・高い自由度を活かした研究が行われてきた。

超流動ヘリウム中の**量子渦**の研究にブレークスルーをもたらした2006年の研究も、光を利用して量子渦を可視化するというものである。液体ヘリウムに、外部からヘリウムと水素の混合ガスを注入すると無数の固体水素微粒子をつくることことができる。もしも水素微粒子の近くに量子渦が存在する場合、渦周りの速度分布によって圧力勾配が生じるため、水素微粒子は渦芯へと向かい、渦芯上で安定し、量子渦と一体となって運動する。この状態で、微粒子群からの光散乱を結像することで、量子渦を可視化することができる。この可視化手法は革新的であり、量子渦のダイナミクスの研究に大きく貢献した。しかし、一方で、この手法において、水素微粒子は単なる散乱体でしかなく、光との相互作用も弱い。

量子渦上に安定化する微粒子の材料を、もっと光との相互作用の強い材料に変えることができれば、光散乱の効率をあげるだ

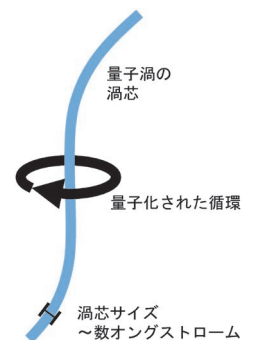
けでなく、発光過程の利用や光の運動量の利用など、多彩な研究展開が期待できる。そこで我々は、ガスの注入とは全く異なる発想で多様な材料を利用できる手法として**レーザーアブレーション**による微粒子作製に着目した。実際に、超流動ヘリウム中に設置された金属や半導体のレーザーアブレーションによって、様々な性質を持つ微粒子をその場で作製し、大量に散布することに成功した。さらに、これらの作製された微粒子は、確かに量子渦の渦芯上に安定化し、その振る舞いが可視化されることも実験的に確認された。

量子渦のような一次元位相欠陥に普遍的な現象として、再結合が知られている。2本の位相欠陥が交差した瞬間に互いの部分を交換し、つなぎかえが起こる現象である。我々の実験でも、量子渦の再結合現象が観測され、そのダイナミクスは次元解析から予想される通り、べき乗則に従うことが示された。

光との相互作用が強い微粒子を積極的に利用する研究の一例として**光トラップ**が挙げられる。通常、光トラップは常温の水溶液中で行われることがほとんどであるが、もしも超流動ヘリウム中でも光トラップが利用可能になれば、微粒子を通じた量子渦のダイナミクスの精密測定や、量子渦の光操作、摂動印加など、これまでと質的に異なる研究の可能性が広がる。最近の我々の研究で、実際に超流動ヘリウム中での単一微粒子の光トラップが可能であることがはじめて実証された。この光トラップを利用して、どんな研究が切り拓かれていくのか。光を積極利用した量子渦・量子流体研究が、今まさに大きく展開しつつある。

## 用語解説

**量子渦：**循環の量子化のために、量子流体中の渦は量子渦と呼ばれる。



量子渦の厳密な中心では、ボース-アインシュタイン凝縮体の密度は0になり、一次元位相欠陥を形成する。凝縮体の密度が0からバルクの値へと近づく領域を量子渦の渦芯と呼ぶ。量子渦は、臨界速度など系の重要な性質と密接に関連する。そのため量子渦のダイナミクスの理解は量子流体研究の最重要課題の一つである。

**レーザーアブレーション：**高強度レーザー光を固体に照射することで、固体表面の急激な溶融・蒸発・クラスター化が生じ、材料が表面から放出される。結果として、固体材料の切削や、放出した材料を利用した薄膜形成や微粒子作製が可能となる。この過程をレーザーアブレーションと呼ぶ。

**光トラップ：**光の運動量を物質に移行することで、急峻に収束した光の焦点に微粒子や原子などを捕捉することができる。これを光トラップあるいは光ピンセットと呼ぶ。この技術の創始者であるアシュキン(A. Ashkin)に2018年のノーベル物理学賞が贈られた。