

● 蓑輪 陽介 特定准教授

Yosuke MINOWA (Associate Professor)

研究課題：光で拓く量子流体・量子渦の科学（Photonics Encounters Quantum Hydrodynamics）

専門分野：光物理学、極低温物理学（Photonics, Low temperature physics）

受入先部局：理学研究科（Graduate School of Science）

前職の機関名：大阪大学基礎工学研究科

（Graduate School of Engineering Science, Osaka University）



私は元々、光を用いた物性物理学の実験研究者としてキャリアをスタートしました。実験室に閉じこもって、レーザー機器（と、その他の物を）を、いじくりまわす生活です。何年か研究を進めるうちに、大切な道具、あるいは大事な研究対象として、超流動ヘリウムという一風変わった低温の液体を扱うようになりました。それからは、研究生活もガラリと変わり、今では実験室に閉じこもって、レーザー機器と低温機器（と、その他の物を）を、いじくりまわすようになりました。

超流動ヘリウムは低温でのみ現れる特殊な液体で、量子流体と呼ばれる量子的性質を持つ流体の一つです。非常に低い粘性・高い熱伝導性という特徴を持ち、低温で実験を行うための環境として、盛んに用いられています。一方で、この超流動ヘリウム自身も魅力的な研究対象です。私は、この低温物理学の研究舞台に、光という道具を積極的に持ち込むことで、新たな研究の展開を狙っています。

I started my academic career as an experimental photonics researcher, my research life full of tinkering with laser equipment (and other stuff, of course!) in the laboratory. After a decade, my research began to incorporate superfluid helium, a peculiar low-temperature liquid, as both an important tool and a main research target. Despite proclaiming a "complete transformation" of my research life, it essentially remained the same, now just full of tinkering with laser and low-temperature equipment (and other stuff, of course!) in the laboratory. Superfluid helium is a unique low-temperature liquid, representative of quantum fluids, characterized by its extremely low viscosity and high thermal conductivity. It is widely utilized by scientists to create low-temperature experimental environments. Moreover, superfluid helium itself presents an intriguing subject for research. My current study focuses on incorporating various photonics technologies into low-temperature physics experiments, with the aim of exploring the frontiers of quantum mechanics and photonics interactions.

光と低温の融合

光物理学と低温物理学は、そのどちらもが非常に長い歴史を持ち、多彩な研究成果が挙げられてきました。伝統的に日本が存在感を示してきた研究領域でもあります。一方で、両者の積極的な融合研究の数は（特に現代においては）あまり多くありません。その理由の一つは、光が物質に当たると少なからずそのエネルギーが吸収されて発熱してしまう、という点にあるかもしれません。低温の環境においては、わずかな発熱も温度上昇につながり、大きな問題となるからです。しかし、実は光の使い方に工夫の余地があります。たとえば使う光の波長あるいは照射の仕方、低温機器に用いる材料などを注意深く選ぶことで、発熱の問題は抑えるこ

とができます。対策を施した上で、光を低温環境に導入することで、光技術のもつ精密性・遠隔性・多彩な自由度を生かした研究が可能となります。例えば、超流動ヘリウム中での光ピンセット [1] など、その可能性は大きく広がっています。本稿では、光を用いた量子渦の研究について紹介したいと思います。

量子流体と量子渦

超流動ヘリウムのような量子流体中に存在する渦は、渦の回転的な流れの強さを表す「循環」と呼ばれる量が量子化します。これは、渦の強さあるいは渦の太さが、ある一つの値だけに決まることを意味しています。その結果、超流動ヘリウムには、一種類の量子渦だけ

が存在することになります。さらに、量子化のおかげで量子渦は準安定な状態となり簡単には消えません。現実的な実験スケールでは、安定に存在しつづけるとも言えます。この「単一の太さで安定して存在できる」という特徴は、日常的に接する一般的な流体（古典流体）中に見られる渦（古典渦）とは真逆の性質です。古典渦は大小様々で、その太さは時々刻々と変わっていきます（そもそも、太さの明確な定義も簡単では有りません）。そこで、量子渦は、「渦の性質」を調べるための理想的な対象の一つとして考えられています。

量子渦の可視化

量子渦を研究するためには、そのダイナミクスを観察する手法が必要です。しかし、超流動ヘリウムの屈折率はほぼ1であるため、単に見ただけでは量子渦と周囲の超流動ヘリウムとの区別はつきません。また、量子渦は非常に細く、およそ1オングストロームほど(10^{-10}m)であることがわかっています。そのため、光の屈折や回折・散乱を利用する事もできません。そこで、量子渦を可視化するために固体水素微粒子を利用する手法が開発されました [2]。この手法は素晴らしいのですが、水素微粒子の屈折率はやはり1に近く、光との相互作用が小さいという欠点がありました。また、水素などの限られた材料以外を利用しづらい手法であり、拡張性にも課題が有りました。そこで、私の研究ではレーザーアブレーションという手法を用いた微粒子の作製と利用に取り組みしました [3]。まず、超流動ヘリウム中（図1）にターゲットとなる固体、例えば半導体シリコンなどを設置しておきます。そして、外部から高強度のパルス光を集光し照射することで、対象となる材料を破壊・溶融・蒸発・プラズマ化させます。表面から放出した材料は急激に冷却されるため、大量のナノ・マイクロ微粒子が生じます。微粒子の付近に量子渦が存在すると、量子渦周りの流れの分布によるベルヌーイ圧力によって微粒子が渦芯にひきつけられます。微粒子群は渦芯上で安定し、渦とともに一体となって動きます。この状態でレーザー光を照射し、微粒子群からの散乱光を結像することで、量子渦を可視化する事ができます。

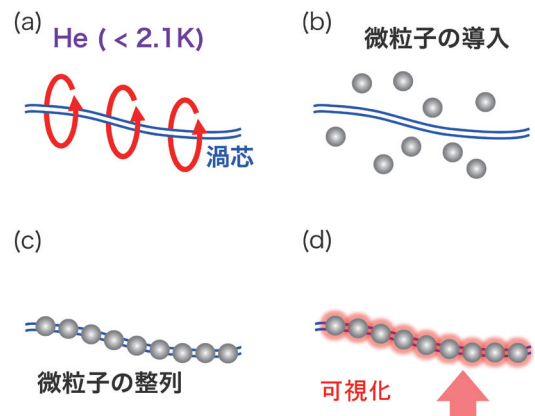


図1 量子渦の可視化。
(a) 量子渦の渦芯。(b) 微粒子が超流動ヘリウム中に導入される。
(c) 微粒子が渦芯上に安定化。
(d) 照射したレーザー光の散乱により量子渦が可視化される。

量子渦の物理

量子渦の関わる重要な現象の例として再結合現象が挙げられます。図2に模式的に示されるように、2本の量子渦が交差したときに、瞬時に繋ぎ変えがおき、互いに急速に離れていく現象です。量子渦に限らず、渦や渦に類似の構造で見られる普遍的現象ですが、特に量子流体中では乱流状態のエネルギー散逸の鍵を握ると考えられています。この量子渦の再結合現象も、微粒子を用いることで可視化することができます [3]。この例で示されるように光を用いた低温物理学の研究は多くの可能性を秘めています。本研究でも光技術あるいは微粒子を巧みに低温物理学に導入することで、新しい研究を展開していきたいと考えています。

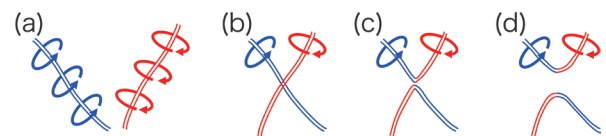


図2 量子渦の再結合。
(a) 2本の量子渦。(b) 量子渦が交差。(c) 量子渦の再結合の瞬間。
(d) 再結合後、量子渦は急速に離れていく。

参考文献

- [1] Y. Minowa, *et al.*, "Optical trapping of nanoparticles in superfluid helium," *Optica*, 9, 139-144 (2022).
- [2] G. B. Bewley, *et al.*, "Visualization of quantized vortices," *Nature*, 441, 588 (2006).
- [3] Y. Minowa, *et al.*, "Visualization of quantized vortex reconnection enabled by laser ablation," *Science Advances*, 8, eabn1143 (2022).