

二国 徹郎 研究室

理学部第一部 物理学科

にくに てつろう
二国 徹郎 先生



二国研メンバー

原子の不思議な振る舞い 「超流動」をシミュレーションする

水など多くの物質は、温度を下げると原子の運動が弱まり、やがて規則正しく並んで固体になる。ところが、ヘリウムのように冷やしても固体にならない物質や、レーザー冷却された原子気体では、さらに温度を下げていくと、摩擦のない「超流動」という特別な状態が現れる。理論物理学の一分野である物性理論を研究する二国研究室のメインテーマの一つが、この超流動を、シミュレーションを使って理論的に研究することだ。

「理論計算の出発点は、ある現象を説明できる物理モデルを仮定することにある。こうしたモデルの変数などを単純化して解析することで、現象の仕組みを理解しようとする。このような手法を、超流動の研究にも応用している」と、理学部第一部物理学科の二国徹郎先生は語る。

冷却で原子が運動する時の摩擦が消える

リニア新幹線にも利用されている超伝導は、ある物質を十分冷やすと電気抵抗がゼロになるという現象だが、超流動もそれに類した部分がある。

量子力学では、原子や分子など多数の粒子からなる系を量子多体系と呼ぶ。量子多体系では粒子どうしの相互作用や量子統計の効果によって、単独の粒子では現れない複雑な性質を示す。

通常の金属では原子の熱振動や不純物との衝突によって電子が散乱されるため、電気を流すと抵抗が生じる。しかし、温度をある臨界値より下げると、この抵

抗が消失し、電子は対をつくって協調的に運動する。これが超伝導だ。

一方、常温の気体や液体では、原子は熱運動によって絶えず動き回っている。しかし、温度を極限まで下げると、粘性のない流体成分が現れ、抵抗なく流れる「超流動」という特別な状態になる。この状態では、原子が量子力学的に同調して動くことで、容器の壁を這い上るなど、通常の液体では見られない不思議な現象が現れる。系全体が巨大な1つの量子状態を形成するため、量子力学的な性質がマクロなスケールで観測できるのが特徴だ。

つまり、超伝導は電子が電気伝導における抵抗（摩擦）がゼロとなった状態で協調して運動し、超流動は流体としての粘性（摩擦）がゼロとなった状態で原子が協調して運動するといった点で、両者は類似している。違いは対象が電荷を帯びているかどうかにある。

実験と理論の2つのアプローチ

超流動の研究には、実験と理論の2つのアプローチがある。実験では、原子の状態や運動を精密に制御して観測することで、超流動の振る舞いを直接確認することができる。一方、理論ではさまざまな条件や相互作用を数値的にシミュレーションすることで、実験では容易に実現できない状況も含め、現象の仕組みを体系的に理解することができる。

二国研究室では、国内外の実験研究で得られた知見を参照しつつ、理論的解析を通して超流動の本質的な

性質を探索している。二国先生自身は、これまで特に冷却原子気体の研究を多く手掛けてきた。

「冷却原子系では、磁気トラップや光トラップを用いて原子を閉じ込め、リング状の流れなど特殊な状態を実現することができる。理論計算では、こうした条件を数値的に再現し、超流動の性質や安定性を詳しく解析することで、その振る舞いを理解することができる」と、二国先生は説明する。

物性理論の幅広い研究

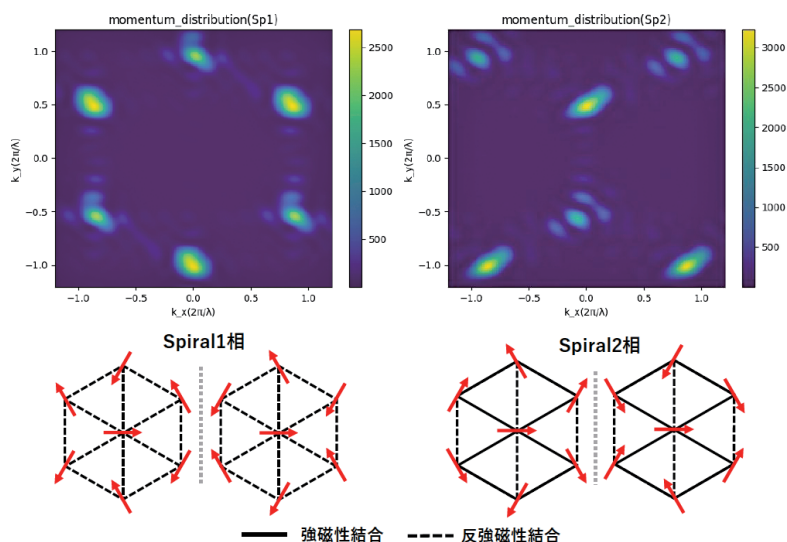
二国研究室では、超流動以外にも物性理論の幅広い研究に取り組んでいる。物性理論とは、量子力学や統計力学などのミクロな原理に基づき、固体や液体などの物質が示す熱的・電氣的・磁氣的・光学的応答などマクロな性質を理論的に解明することを目指す物理学の分野だ。多くの粒子が相互作用する量子多体系において、個々の構成要素とは異なる集団的な現象がどのように現れるのかを理解するために、その解析やシミュレーションの手法の開発にも取り組んでいる。

一方で、研究室では物性理論に限らず、量子情報や神経科学など他分野への応用研究も進めている。例えば、量子アルゴリズムを金融工学におけるポートフォリオ最適化問題に応用する研究や、マウスの行動実験と理論的モデリングを通して神経科学的メカニズムを探る研究など、学生がそれぞれの関心に基づいて多様なテーマに取り組んでいる。

「レーザー光で形成された格子（光格子）の中でボース粒子系やフェルミ粒子系が示す相互作用や運動の特徴を解析する研究や、量子多体系が時間発展の過程で平衡状態へどのように緩和していくかを探る研究、量子シミュレーターの理論的提案、さらに量子アルゴリズムを最適化問題の解析に応用するなど、幅広いテーマに取り組んでいる」（二国先生）

研究の面白さを堪能できる自由な研究室

現在の研究室は二国先生と助教の國見昌哉先生の体制で、2025年度は学部4年生11名、修士1年が7名、修士2年が4名、博士課程4名が在籍する。学生の卒業研究のテーマは事前の面談で方向性を相談して決めるが、物性理論を中心とした理論物理の範囲で



三角光格子中の冷却原子気体における超流動秩序変数の位相を、スピン方向として可視化したもの。結合パラメータの値により、2つの異なる秩序状態が出現する。上段はそれぞれの状態に対応する運動量分布、下段は対応する秩序構造（スピン配列）を示している。

あれば自由度が高く、学生それぞれが興味のある分野を選んで研究を進めている。学部から大学院修士課程に進学する学生が多く、卒業研究のテーマを修士論文まで継続するケースも多い。就職は学部生、修士とも最近ではIT系の企業やデータサイエンス分野などが多いが、修士卒で企業の研究所に進む学生もいる。

修士2年の内田有真さんは理化学研究所の実験グループの研究者を招いたセミナーでの講演をきっかけに、光格子中の冷却原子気体における超流動の実験をシミュレーションによって理論的に解析する研究に取り組んでいる。

修士1年の栗木輝さんは量子力学に強い関心があり、理論的な側面から研究に取り組みたいと考えて二国研究室を選んだ。現在はフェルミ超流動体のダイナミクスを数値シミュレーションによって解析する研究を行なっている。

「今年度から、物理学科で実施している『研究挑戦プログラム』により、学部3年生が希望に応じて研究室に所属できるようになった。授業との両立が必要なため本格的な研究はまだ難しいものの、早い段階から研究活動に触れ、将来に向けた基礎的な準備を進めることができる」（二国先生）

二国研究室では、週1回の全体ミーティング以外には研究室に来るかどうかは各自の自由で、研究の進め方も個々に委ねられている。今後も自由な雰囲気の中で、在籍する学生たちは研究の面白さを満喫していくだろう。

狐塚 淳（インプレス・デジタル・バリューズ）