

# 上田研究室

上田正仁教授 中川大也助教

## 1 研究の背景

近年のナノサイエンスの発展により、原子や分子、光子を量子1個のレベルで精密に測定し、制御することが可能になってきた。当研究室では、このような高い制御性を有する系での量子多体問題の解明と、その基礎となるナノスケールの熱力学・統計力学の構築を目指して理論研究を行っている。

## 2 最近の研究テーマ

### 【冷却原子気体】

真空中にトラップされた極低温の原子気体は、原子間相互作用の強さを含むほとんどすべての物質パラメーターを自在に変化させることができる究極の人工量子物質であり、様々な物理現象に共通する普遍的な法則の探究が可能である。例えば、極低温で実現される巨視的量子現象であるボース・アインシュタイン凝縮のダイナミクスには、超新星爆発や宇宙初期の相転移とも類似した現象が現れる。また、原子気体の時間発展を正確に追うことで、孤立系がいかに熱平衡状態に至るかという統計力学の基本的問題を研究することもできる。私たちは冷却原子気体を題材に、様々な量子多体物理の解明を目指して研究に取り組んでいる。

最近の研究では、環境への散逸や量子測定の反作用の影響下にある原子系の非平衡ダイナミクスおよび量子多体問題の解明に取り組んでいる。近年実現された実験技術である量子気体顕微鏡は、多体波動関数を1原子のレベルで測定することを可能にした。また、原子系にはコントロールされた散逸が導入できるため、冷却原子気体は非平衡開放系を研究する格好のプラットフォームとなっている。このような系において量子測定の反作用が引き起こす非ユニタリーダイナミクスが従来の多体物理をいかに変更するかという基本的な問題のみならず、より広い意味での非平衡開放系における普遍性や相構造を研究している。最近私たちは、非平衡開放系の重要なクラスの一つである非エルミート系で実現するトポロジカル相の分類を行った。非エルミート系ではエネルギー固有値が複素数値を取るため、エルミート系には存在しない新たなギャップ構造とトポロジーが現れる(右下図)。また、系の大局的性質を捉えるトポロジーの概念を応用して、凝縮相における渦や単極子の性質の

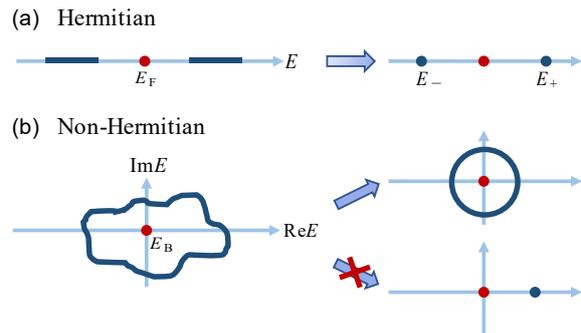
解明や、人工ゲージ場のもとでの量子ホール状態の研究にも取り組んでいる。今後は、冷却原子気体は非平衡量子開放系や人工ゲージ場の原理を検証する舞台として、様々な分野にまたがる学際的な研究に発展していくものと期待される。

### 【量子論・統計力学と情報理論の融合】

私たちは情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎づけとなる研究を行い、さらに情報理論と量子論・統計力学を融合することで新たな学問分野の構築を目指している。例えば、測定やフィードバック制御を伴うもとの熱力学第二法則や揺らぎの定理の一般化、量子力学固有の相関である量子もつれを用いた熱機関、ハイゼンベルグの不確定性関係の情報論的定式化、量子測定における情報の流れなどの研究に取り組んでいる。これらの研究は、量子・熱揺らぎや測定の反作用が無視できない微小非平衡系の研究の基礎を与えると期待される。他方で、機械学習や深層学習における情報処理のプロセスは物理学や統計力学の概念と密接な関わりがあると期待される。私たちは最近、物理学の視点からAIや機械学習の理解に取り組んでいる。

## 3 今後の展開

情報(認識)・数学・生命を含む広い視点から、物理現象の基礎的理解とその普遍性を探究する。



非エルミート系において現れる新たなトポロジカル相。エルミート系ではハミルトニアン固有値は実数であるため絶縁体は実軸上のバンドギャップによって特徴づけられるが [(a)], 非エルミート系においてはエネルギー固有値が複素数になるためバンド構造がある点  $E_B$  の周りに巻き付く新たなトポロジカル構造が可能となる [(b)]. Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018) より転載。Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019) も参照されたい。