上田研究室

上田正仁教授　古川俊輔助教

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。

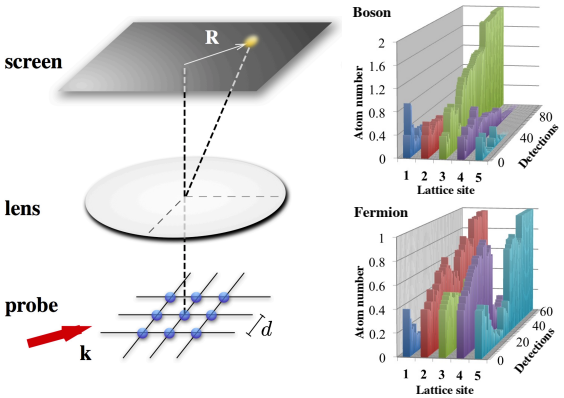
最近の研究では、相互作用が強い極限（いわゆるユニタリティ極限）における原子系の普遍的な性質の解明に取り組んでいる。ユニタリティ極限のフェルミ気体には原子種に依らない普遍的熱力学が観測され、高温超伝導や中性子星との類似性からも興味深い問題を提供している。ユニタリティ極限近傍では自己相似性を持った三体束縛状態であるエフィモフ状態も観測され、くりこみ群の流れが周期性を持ったリミット・サイクルのユニークな具体例としてその普遍性を研究している。また、系の大局的性質を捉えるトポロジーの概念を応用して、凝縮相における渦や単極子の性質の解明や、人工ゲージ場のもとでの量子ホール状態の研究にも取り組んでいる。今後は、様々な対称性を持った超流動や、超低温における化学反応、非可換統計の具現化など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。

【量子論および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。最近、私たちは、量子測定理論を応用することで、光格子中の冷却原子の位置を高精度に測定する方法を提案した（右下図参照）。弱いプローブ光で得た像であっても、原子位置のベイズ推定を行うことで回折限界を超えた分解能が達成されることを示した。また、測定やフィードバック制御を伴うもとでの揺らぎの定理や熱力学第二法則の一般化、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も取り組んでいる。これらの研究は、量子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、熱力学におけるエントロピー増大則も系の乱雑さの単調増加性として情報論的に捉えられると期待される。私たちは最近、情報論的エントロピーを応用して、エントロピー増大則の統計力学からの基礎づけに取り組んでいる。

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。



左図: 光格子にトラップされた冷却原子の撮像。プローブ光が原子により散乱された後、レンズにより集光されスクリーンに像を結ぶ。得られた像から原子位置が推定される。右図: 量子測定理論により追跡した多原子の波束の実時間収縮過程。パウリの排他律により、ボソン（右上）よりもフェルミオン（右下）の方が波束の収縮が速く起こる。このような解析を応用する事で、原子位置の測定が回折限界を超えた分解能で行える。Physical Review Letters **115**, 095301 (2015) より転載。