

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。さらに、物理学と人工知能との融合を目指した研究も行っている。

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、孤立系がいかにか熱平衡状態に至るかという熱・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。

【非平衡・非エルミート・量子開放系】

近年、量子開放系における非平衡ダイナミクスおよび量子多体問題が注目を集めている。量子系のダイナミクスはシュレディンガー方程式によるユニタリなものや測定による非ユニタリなものに大別される。冷却原子気体においては量子気体顕微鏡を用いて多体波動関数を1原子のレベルで精密に測定することが可能であり、さらにコントロールされた散逸を導入することで非平衡開放系を研究することができる。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。さらに、非エルミート系の数理解をより一般の開放系へと適用することで、非平衡

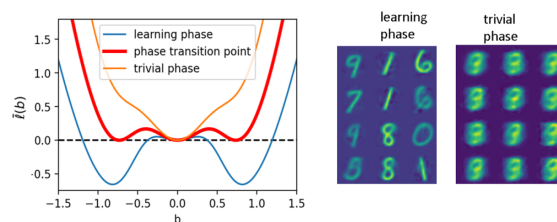
量子開放系の基礎理論の確立を目指している。最近の研究例としては、散逸によって誘起される量子磁性・開放系における超流動理論・開放量子多体系の基礎方程式のリーブ-ロビンソン限界による導出などがある。また、非平衡開放系の新たなプラットフォームとして、量子測定とフィードバック制御が重要な役割を果たす浮揚ナノ粒子の系に注目し、研究を展開している。

【量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合】

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下での熱力学第二法則や揺らぎの定理の一般化は情報熱力学と呼ばれる分野を生み出した。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ものと期待される。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連がある(下図)。私たちは物理学の視点から機械学習の理解を深化させ、物理学と人工知能の融合を通じた新しい学問領域の創出を目指している。最近の研究では、グラフ上の進化ゲーム理論における非平衡ダイナミクスの研究や、開放量子多体系の定常状態の機械学習による探索などに取り組んでいる。

3 今後の展開

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



図：深層ニューラルネットワークの損失関数のランドスケープ。私たちは深層学習において統計力学の1次・2次相転移とのアナロジーを見出した。Phys. Rev. Research **5**, 043243 (2023) より転載。