

	研究代表者	理化学研究所・量子コンピュータ研究センター（RQC）・理研白眉研究チームリーダー	
		桑原 知剛（くわはら ともたか）	研究者番号：70757773
	研究課題情報	課題番号：26B203	研究期間：2026年度～2028年度
		キーワード：量子多体系、量子情報、量子もつれ、量子熱力学、計算物理	

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

量子の世界では、多数の粒子が互いに影響し合うことで、一つ一つの粒子だけを見ても分からない複雑な性質が現れる。このような「量子多体系」は、量子コンピュータ、量子材料、量子熱機関などの基礎となる一方で、その内部にどのような情報の秩序が隠れているのかは、まだ十分に理解されていない。

本研究領域では、量子多体系を単なる粒子の集まりとしてではなく、情報が量子状態に刻まれ、空間に広がり、別の状態へ変換され、制御される場として捉える。特に、量子もつれ、熱、計算の難しさ、情報の伝わる速さ、制御に必要なコストなどに注目し、量子多体系の奥に潜む「情報構造」を明らかにする。

本領域は、量子状態の情報構造（A01）、量子変換の情報構造（A02）、量子制御の情報構造（A03）、情報構造を調べる計算物理（A04）、という4つの方向から研究を進める。

総括班*：桑原知剛、白石直人、Tan Van Vu、杉本高大

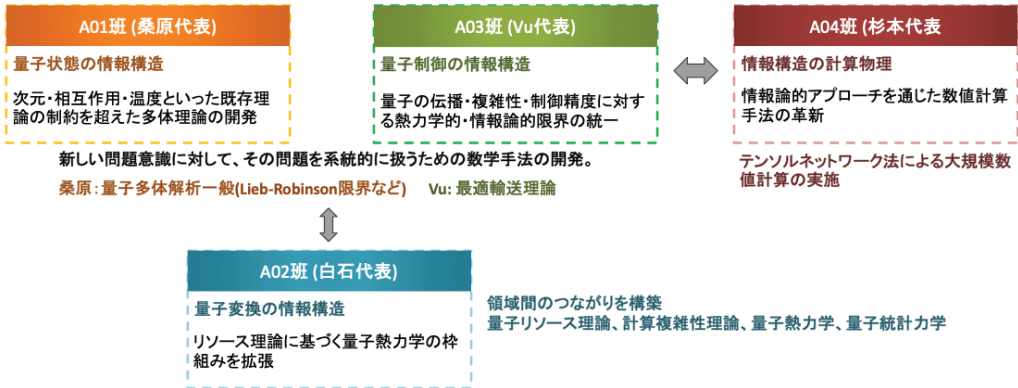


図1 領域全体のイメージ図

●既存理論の限界を超える新しい量子多体理論へ

従来の量子多体系の理論は、一次元系、高温領域、単純な相互作用など、扱いやすい設定を中心に発展してきた。しかし、現実の量子材料や将来の量子技術では、高次元・低温・強相関・非平衡といった、より複雑な状況の理解が求められる。本研究領域では、量子情報、量子熱力学、最適輸送理論、計算物理を融合し、既存理論の制約を超えて、複雑な量子多体系に共通する情報構造を明らかにする。

最終的には、「量子系の振る舞いはどこまで計算できるのか」「量子状態を変えるにはどれだけの情報やエネルギーが必要なのか」「量子情報はどのように広がり、どこで制御の限界が現れるのか」を統一的に理解し、量子科学の新しい基盤を作ることを目指す。

●それぞれの計画研究の研究目標

- A01**：高次元・低温・強相関の量子多体系を対象に、量子もつれや情報伝播の普遍的構造を明らかにする。特に、もつれの量だけでなく、その細かな分布である「もつれスペクトル」に注目し、複雑な量子状態の中に隠れた秩序を読み解く。
- A02**：量子状態を別の状態へ変換する際に、どのような操作が可能で、どのような操作が原理的に制限されるのかを明らかにする。量子熱力学、リソース理論、計算複雑性を結び付け、熱・情報・計算を統一的に扱う新しい理論を構築する。
- A03**：量子状態を制御する際の速度、精度、エネルギーコストの間にある普遍的な制約を解明する。最適輸送理論や情報理論を用いて、量子情報の伝播や制御の限界を定式化し、量子技術の原理的な限界を明らかにする。
- A04**：テンソルネットワークなどの大規模数値計算を用いて、有限温度・外場・無秩序環境下の量子多体系を解析する。理論で予想される情報構造を具体的な物理系で検証し、理論と実験をつなぐ計算基盤を構築する。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●異分野融合による未解決問題の突破

- 本領域では、各計画研究が持つ理論・数値手法を組み合わせ、単独の分野では解決が難しかった未解決問題に挑む。特に、情報伝搬、熱力学的コスト、局在現象、計算複雑性を横断的に扱うことで、量子多体系に共通する情報構造を明らかにする。
- 1. Lieb-Robinson限界を超えた情報伝搬理論の確立**：従来のLieb-Robinson限界は、量子情報の影響が広がる最大速度を与えるが、「どれだけの量子情報を送れるか」という情報量そのものを直接扱うものではなかった。本研究では、量子情報量を明示的に含む“Post Lieb-Robinson型”の新しい速度限界を構築する。これにより、量子系における情報伝搬を「届くかどうか」ではなく、「どれだけの量の情報が、どの距離・どの時間スケールで伝わるか」として捉え直す。さらに、時間依存する量子ダイナミクスでは、情報伝搬や量子もつれの詳細な分布に、時間非依存系とは本質的に異なる構造が現れることを明らかにする。
- 2. 量子計算の熱力学理論の構築**：量子計算の大規模化に伴い、冷却や制御に必要なエネルギーコストが本質的な問題となる。本研究では、量子熱力学とリソース理論を融合し、量子情報操作に必要なエネルギー、精度、速度の限界を明らかにする。
- 3. 多体Wannier-Stark局在の情報論的理解**：強い外場のもとで、量子情報やエネルギーの広がりがどのように抑えられるのかを、理論と数値計算の両面から調べる。通常の量子多体局在との共通点と相違点を明確にし、外場下の量子多体系における局在現象の新しい理論を構築する。
- 4. エラー空間の量子回路複雑性の理論**：量子状態や量子ダイナミクスを近似する際、誤差を小さくするためにどれだけの計算コストが不可避免なのかを明らかにする。これにより、量子多体系のシミュレーションにおいて、効率的に計算できる領域と原理的に困難な領域を判定する理論基盤を作る。

●将来的な波及効果

情報論的手法は、量子物理を超えてAI、複雑系科学、計算科学、産業界にも広がっている。本領域では、量子多体系の情報構造を基礎から解明し、量子コンピュータや量子材料研究の基盤を強化するとともに、新しい量子科学・情報理論の潮流を創出する。