

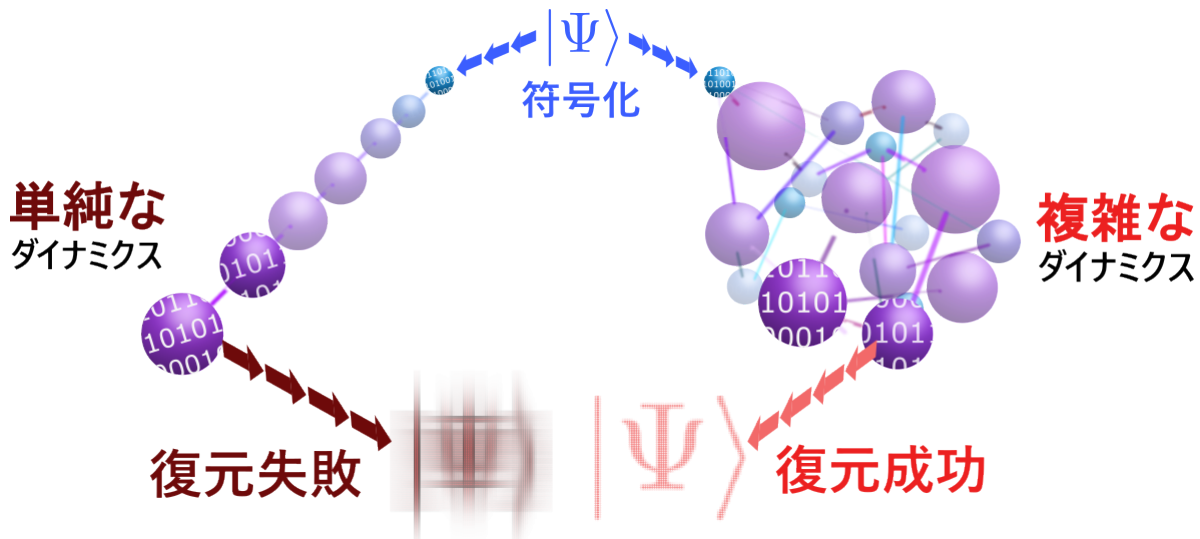
量子カオスとスクランブリングの非同一性の発見

—複雑な量子多体ダイナミクスの量子情報の理解—

概要

京都大学基礎物理学研究所 中田芳史 特定准教授、同大学理学研究科 手塚真樹 助教は、様々な量子多体系のダイナミクスによって量子情報がどのように符号化されるかを詳細に解析し、量子カオスが引き起こす量子誤り訂正の性質を明らかにしました。複雑に相互作用する量子多体系において創発する物理現象の理解は現代物理学の最先端の研究テーマで、近年、量子情報の手法を用いた研究が精力的に推し進められています。その中で、スクランブリングと呼ばれる複雑な量子多体系に特有の時間発展ダイナミクスが量子誤り訂正という量子情報技術に関連する可能性が指摘され、スクランブリングが引き起こす情報と物理の共創現象が大きな注目を集めています。本研究では、スクランブリングを操作論的に特徴づける Hayden(ヘイデン)-Preskill(プレスキル)の思考実験を様々な量子多体系で数値的に検証し、量子カオスのダイナミクスが必ずしもスクランブリングではないこと、および、スクランブリングで特徴づけられる量子系のクロスオーバーを発見しました。本研究は、複雑な量子多体系における非平衡ダイナミクスを量子情報の観点から特徴づけ、スクランブリングの物理を通じて、量子カオスやブラックホール等の複雑な量子系を普遍的に理解する突破口になると期待されます。

本成果は、2024年4月25日（現地時刻）に米国の国際学術誌「Physical Review Research (Letter)」にオンライン掲載されました。



量子多体系における Hayden-Preskill の思考実験の概念図：多くの粒子から構成される量子多体系の一部部分系に量子情報を書き込み、十分長い時間発展後に、他の部分系からその量子情報の復元を試みる。単純な系ではうまく復元できないが、複雑な系であれば高精度で復元できる。

1. 背景

量子力学の性質に従う多数の粒子が相互作用しあう系を、量子多体系と呼びます。「多は異なり」という言葉があるように、一つ一つの粒子の性質が明らかでも、量子多体系で発現する共同現象を理解することは容易ではありません。特に、複雑に相互作用する量子多体系を理解することは、理論物理学における長年の目標です。この目標に向けた新たなアプローチが、量子コンピュータ等の量子技術で注目を集める量子情報科学の考え方に基づく研究です。情報という概念が持つ高い普遍性のおかげで量子情報科学の解析手法は物理にも適用でき、量子多体系を情報という新視点から理解できると期待されています。中でも近年、量子多体系の非平衡ダイナミクスと量子誤り訂正の関連がクローズアップされており、特に、複雑な量子多体系のダイナミクスが系の情報をうまく符号化している可能性が理論的に指摘され、注目されています。

この可能性を具体的に議論したのが、Hayden-Preskill の思考実験です。まず、量子多体系のごく一部の部分系に何らかの情報を書き込む状況を考えます。その情報は、量子多体系のダイナミクスによって全系へと広がることで熱平衡状態へと緩和してしまい、一定時間後にはどのような情報を書き込んだかは部分系だけでは判別できない状況になると予想されます。ところが、量子多体系のダイナミクスが十分複雑で既知の場合には、この予想に反して、一定時間後には任意の小さな部分系から、初めに書き込んだ情報をほぼ 100%の精度で復元できるようになります。この結論は驚くべきものであり、複雑な量子多体系を舞台とした量子誤り訂正の可能性を切り拓くものです。Hayden-Preskill の思考実験の鍵となるのはダイナミクスが「十分に複雑」であることですが、提唱された思考実験では量子多体系のダイナミクスを劇的に理想化しているため、実際の物理との関連は不明でした。そのため、その思考実験の提唱以来、何らかの意味で複雑な量子多体系ダイナミクスを「スクランブリング」と総称し、スクランブリングの物理を解明することが大きな研究テーマとなっています。スクランブリングは、非時間順序相関や三体相互情報量などの定量化を通じて多面的な研究が進んでおり、量子カオスやブラックホールとの関連など、スクランブリングが引き起こす情報と物理の共創現象が注目を集めています。しかし、その発展の中で「スクランブリング」という言葉は異なる意味で用いられており、スクランブリングの物理を開拓するきっかけとなった Hayden-Preskill の思考実験とスクランブリングの種々の定量化、量子カオス等の関係については、混迷の様相を呈していました。

2. 研究手法・成果

我々は、操作論的な観点からスクランブリングを理解するために、様々な量子カオス多体系において Hayden-Preskill の思考実験を数値的にシミュレートしました。本研究では、Hayden-Preskill の思考実験の考え方にに基づき、初期に一部の部分系に書き込まれた量子情報を長時間後に任意の小さな部分系からほぼ 100%の精度で復元できる場合に、その系のダイナミクスをスクランブリングと呼んでいます。この定義に基づいて様々な量子カオス系で Hayden-Preskill の思考実験を検証し、スクランブリングの種々の定量化との違いや、量子カオスのダイナミクスとの関係、さらには、スクランブリングに関連した新たな量子系のクロスオーバーの探索を行いました。

より具体的には、まず、量子カオス模型として最もよく知られている斜め磁場中の一次元 Ising 模型とランダム磁場中の Heisenberg 模型を用いて Hayden-Preskill の思考実験を考えました。これらの模型は、適切なパラメータ領域では量子カオス的な性質を示し、さらに、非時間順序相関等の意味ではスクランブリングの性質を持つことが分かっていました。しかし、我々の研究の結果、長時間のダイナミクスの後に書き込まれた情報を系の一部の部分系から復元しようとする、復元の精度が著しく低くなることが分かりました。つまり、これらの模型は量子カオスであるものの、Hayden-Preskill の思考実験の意味ではスクランブリングにはなっ

ていません。次に、我々はブラックホールのホログラフィ双対模型として知られている Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型での Hayden-Preskill の思考実験を考えました。SYK 模型はマヨラナ・フェルミオンがランダム相互作用する模型で、量子カオス的な性質を強く有しており、また、様々な定量化でもスクランブリングの性質を有することが知られています。我々は、その模型では思考実験の予言とほぼ一致する結果が得られ、さらに、SYK を劇的に簡略化した模型でも同様の結果が得られることを示しました。

これらの結果を合わせると、Hayden-Preskill の思考実験を実現するダイナミクスという意味でのスクランブリングと量子カオスとは別の概念であり、「量子カオスのダイナミクスはスクランブリング」という通説が一般には正しくないこと、しかし「スクランブリングの性質を持つ量子カオスも存在すること」が明らかになりました。また、SYK 簡略化模型は量子計算機での実装が比較的容易なため、我々の結果は、「量子カオスカつスクランブリング」の量子多体系を実験的に実現する一つの可能性を提示するものでもあります。

我々はさらに、 SYK_{4+2} と呼ばれる模型において Hayden-Preskill の思考実験を考え、これまで予想されていた量子クロスオーバーの存在を情報の復元精度によってうまく特徴づけることができることを示しました。この結果は、量子情報的な考え方に基づいてその量子クロスオーバーを直感的にうまく理解できることを示唆しており、量子多体系の情報的な性質の変化によって顕在化する量子多体現象が存在することを意味しています。スクランブリングに関連した情報と物理の共創現象の開拓に貢献する結果といえます。

3. 波及効果、今後の予定

量子情報の知見を用いて量子カオスとスクランブリングの（非）同一性を検証し、具体例をもって通説が必ずしも正しくないことを明確に示した本結果は、スクランブリングの物理の更なる発展に資するものです。特に、Hayden-Preskill の思考実験が量子誤り訂正と関連することから、我々の成果は複雑な量子多体系におけるダイナミクスと量子誤り訂正の関係を解明する第一歩になっています。また、Hayden-Preskill の思考実験は、ブラックホールを量子多体系でエミュレートしてホログラフィ双対の理解を深めるためにも重要ですが、どのような物理系を用いればそれが達成できるか/できないかを明らかにしたという点でも、将来の実験研究への波及効果が見込まれます。今後の予定としては、スクランブリングと量子誤り訂正の関係をより正確に理解するために、各種模型のダイナミクスによって実現する量子誤り訂正の性能評価を行うつもりです。このことにより、スクランブリングの物理を超えて、スクランブリングを活用した量子情報処理への応用につながると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、文部科学省・日本学術振興会 科学研究費助成事業 学術変革領域研究（A）「極限宇宙の物理法則を創る－量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」（領域代表者：高柳匡、課題番号：21H05182、21H05183、21H05185）、基盤研究（C）「複雑な量子ダイナミクスに基づく新規量子情報技術と新奇物理現象の開拓」（研究代表者：中田芳史、課題番号：22K03464）、新学術領域研究 公募研究「非エルミート・ハイパーマテリアルの理論」（研究代表者：手塚真樹、課題番号：20H05270）、基盤研究（C）「量子多体系におけるスクランブリングとカオスのダイナミクス」（研究代表者：手塚真樹、課題番号：20K03787）、科学技術振興機構（JST）戦略的想像研究推進事業さきがけ（PRESTO）「持続可能な高度量子技術開発に向けた量子疑似ランダムネスの発展と応用」（研究代表者：中田芳史、課題番号：JPMJPR1865）の支援を受けて行われました。

<用語解説>

- [1] 量子情報科学：量子力学を活用した情報科学のことを指します。量子力学に特有な非直観的な現象をうまく情報処理に応用することで、既存の情報処理技術では達成できないことを実現できると期待されています。
- [2] 量子誤り訂正：符号化と復号という手法を組み合わせることで量子系にかかるノイズを実効的にキャンセルする手法のことです。大規模量子情報処理に不可欠な技術であるだけでなく、理論物理の新たな解析手法としても着目されています。
- [3] 量子カオス：カオスは、決定論的な運動法則に従う有界で非周期な時間発展が初期値鋭敏性を示す現象で、典型的には非線形な微分方程式に従う古典力学系にみられます。ところが、初期状態について線形な微分方程式に従う量子力学系でも、古典系のカオスのようなふるまいがみられ、それらを量子カオスと総称しています。
- [4] 非時間順序積相関：量子系における演算子間の(反)交換関係の時間差に伴う破れ方を表すもので、量子カオスの特徴付ける一つの量として知られています。特に、量子カオスの初期値鋭敏性を示すリアプノフ指数との関係が深いことが分かっています。
- [5] Ising 模型：各格子点に置かれたスピン間に、隣接するスピンの特定の成分の積に比例する相互作用が働く模型のことです。
- [6] Heisenberg 模型：各格子点に置かれたスピン間に、隣接するスピンの内積に比例する相互作用が働く模型のことです。
- [7] ホログラフィ双対：重力の理論が、重力を考慮しない量子物質の理論と同一であると考えられる原理です。前者は後者より1次元高い時空となっており、平面から立体像が浮かび上がる光学のホログラムに見かけが類似しているためにホログラフィと呼ばれます。
- [8] SYK 模型：多数のフェルミオンから構成され、そのうちの4個についてもランダムな相互作用を持つ模型のことです。

<研究者のコメント>

ここ数年、量子多体系の複雑なダイナミクスと量子情報との関係が盛り上がりを見せつつあります。本研究での誤り訂正以外にも、量子系のベンチマーキングに用いられる等、様々な応用が模索されています。その中心にあるのが、カオスという概念。カオスと聞くと一定時間後に全てがごちゃ混ぜになる印象を持ちますが、近年、その複雑性を制御できればとても役立つことが分かってきたのです。複雑さは力なり。今後の研究発展にご期待ください。(中田芳史)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Hayden-Preskill recovery in Hamiltonian systems (ハミルトニアン系における Hayden-Preskill 復元)
著者：Yoshifumi NAKATA (中田 芳史), Masaki TEZUKA (手塚 真樹)
掲載誌：Physical Review Research DOI : 10.1103/PhysRevResearch.6.L022021