

報道機関 各位

国立大学法人電気通信大学

「熱い方が先に凍る」現象の量子版、その機構を解明 — スピンの量子ゆらぎが磁気秩序を“ぼかし”、対称性の回復を加速する —

【ポイント】

- * 最近のイオントラップ実験で観測された量子ムペンバ効果 (QME) の微視的起源を解明
- * 磁化の量子ゆらぎが磁気秩序を溶かし、対称性の回復 (秩序の喪失) を駆動
- * 長距離相互作用スピン系では QME が広い条件で起こることを示し、その原因も解明

【概要】

「より対称性を破った状態の方が、なぜか先に対称性を回復してしまう」—量子多体系で起きる非平衡現象 量子ムペンバ効果 (Quantum Mpemba Effect: QME) は、近年、量子シミュレータ実験 (※1) で実際に観測され、大きな注目を集めています。しかしその一方で、この現象の微視的メカニズムは明確になっていませんでした。電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻の山鹿汐音助教と、SISSA (イタリア) の Filiberto Ares 氏は、長距離相互作用スピン系における QME を理論的に解析し、実験で観測された QME の微視的メカニズムを解決しました。

本研究成果は物理学の専門誌 Physical Review Letters に 2026 年 3 月 5 日に公開されました。

【背景】

「平衡状態から遠い初期状態ほど、平衡へ戻るのに時間がかかる」という考え方は、非平衡過程の素朴な直感として広く受け入れられています。一方で、現実の系ではこの直感と異なる振る舞いが報告されてきました。その代表例が、「熱い水の方が早く凍る」ムペンバ効果です。この直感に反する現象は、古くはアリストテレスの記述にも見られますが、1960 年代のタンザニアの高校生 E. Mpemba による再発見以来、ムペンバ効果として現代物理学の文脈で盛んに研究されています。

近年、この種の“緩和の逆転”が孤立量子多体系でも起こり得ることが実験的に示され、量子ムペンバ効果 (Quantum Mpemba Effect: QME) として注目されています。特に、長距離相互作用をもつスピン系を模擬するイオントラップ量子シミュレータ等では、対称性を破った初期状態からの緩和過程において、初期状態の「対称性の破れ」が大きいにもかかわらず、対称性の回復がより速く進む場合が報告されています。しかし、その微視的メカニズムは解明されていませんでした。

【手法】

本研究では、長距離相互作用をもつ量子スピン系を理論モデルとして採用し、量子クエンチ (※2) 後の非平衡ダイナミクスを解析しました。初期状態として、実験で用いられる状況に対応する傾斜強磁性状態を考え、傾き角 (=対称性の破れの大きさ) を連続的に変えて、z 軸周りの対称性回復の時間スケールが初期条件にどう依存するかを比較しました。解析には、長距離相互作用系で有効な近似手法である時間依存スピン波理論を用いました。巨視的磁化の運動 (平均場的な歳差運動)

と、その周りに生じるスピン波＝準粒子励起（量子ゆらぎ（※3））を分離して扱い、どのモードが対称性回復を支配するかを追跡しました。

【成果】

時間依存スピン波理論を用いた解析によって、対称性回復は古典的な緩和像ではなく、磁化の量子ゆらぎが成長して初期の強磁性秩序が溶ける過程として理解できること、またこの機構が量子ムペンバ効果（QME）の原因になることを示しました。さらに、相互作用の範囲を変えた比較を通じて、QME が長距離相互作用系では広い条件で現れ得る一方、短距離系では現れない場合があることも示しました。

【今後の期待】

本研究でメカニズムが明らかとなった量子ムペンバ効果は、目的の量子状態をより早く準備する手法として、量子コンピュータや量子シミュレーションの分野への応用が注目されています。

（論文情報）

タイトル：Quantum Mpemba effect in long-range spin systems

著者：Shion Yamashika, Filiberto Ares

掲載誌：Physical Review Letters

DOI：https://doi.org/10.1103/52y5-8kl2

（外部資金情報）

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業 研究活動スタート支援 「長距離相互作用スピン鎖における量子ムペンバ効果の理論研究」（25K23355）の支援を受けたものです。

（用語説明）

※1：量子シミュレータ実験

冷却原子・イオントラップ・超伝導量子ビットなどの高度に制御可能な量子系を用いて、理論的には解析が困難な量子多体系の振る舞いを人工的に再現・観測する実験手法

※2：量子クエンチ

外場を急激に変化させることで、量子系の非平衡ダイナミクスを誘起する手法

※3：量子ゆらぎ

量子力学の不確定性原理により、絶対零度でも物理量が完全には静止せずに揺らいでいる現象

【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻

【職名】助教

【氏名】山鹿 汐音

Tel：042-443-5453

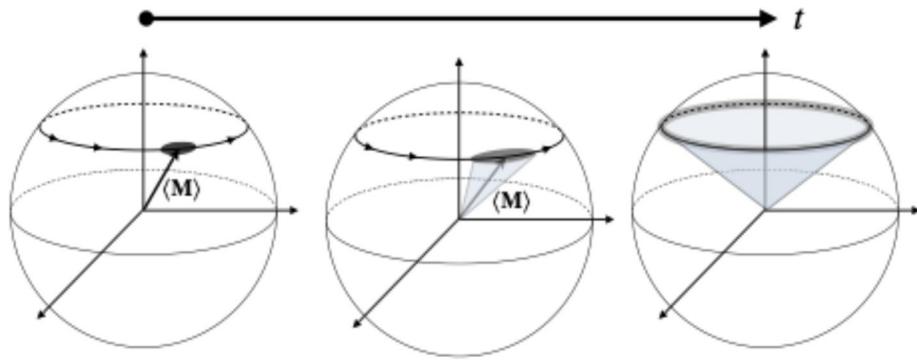
E-Mail：shion.yamashika@uec.ac.jp

<報道に関すること>

電気通信大学総務部総務企画課広報係

Tel：042-443-5019 Fax：042-443-5887

E-Mail：kouhou-k@office.uec.ac.jp



量子ゆらぎによる対称性の回復の模式図。量子スピンの不確定性原理により、磁化の方向が曖昧になり、最終的に z 軸周りの回転対称性が回復する