

国立大学法人 電気通信大学
国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)

量子系から取り出せる量子コヒーレンスの最大量を理論的に解明

【ポイント】

- * 異なるエネルギー状態の間の量子的な重ね合わせであるエネルギーコヒーレンスを、多くの粒子からなる量子系から高純度で取り出す際の最大量を理論的に解明した。
- * 同時に、量子系を望んだ状態に準備するために必要な最小のエネルギーコヒーレンス量も解明した。
- * エネルギーコヒーレンスは量子熱機関、量子時計などの性能向上に用いられる量子的性質である。したがって、得られた結果は将来的にこれらの量子技術の性能向上につながる可能性がある。
- * これらの結果は複雑な相互作用を持つ系にも適用可能な一般的結果であり、エネルギーコヒーレンスの損失を最小にして有効活用するための基礎となる。

【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科の山口幸司特任研究員（前：University of Waterloo、日本学術振興会海外特別研究員）と田島裕康助教（兼任：科学技術振興機構（JST）さきがけ研究者）は、多くの粒子からなる量子系からエネルギーコヒーレンスを取り出す際の限界を理論的に明らかにしました。ここでエネルギーコヒーレンスとは、異なるエネルギー状態の間の量子的な重ね合わせのことを指します。これは量子効果を引き起こす重要な量子的性質のひとつであり、熱機関や量子時計など、様々な量子技術への応用が可能です。しかしこの性質はデリケートで簡単に破壊されてしまうため、量子系から純度の高いエネルギーコヒーレンスを取り出してから利用することが重要となります。本研究成果は多粒子から構成される量子系から取り出すことができる高純度のエネルギーコヒーレンスの最大量を明らかにするものです。これは、将来の量子技術においてエネルギーコヒーレンスを有効活用する際の設計・開発の方針を与える上で重要な役割を果たすと考えられます。

この研究成果は、米国科学雑誌「Physical Review Letters」オンライン版に掲載されました。

【背景】

背景1：エネルギーコヒーレンスとその重要性

量子力学では異なる状態の「重ね合わせ」が可能であり、このことが量子力学特有の様々な物理的性質の起源となっています。このような性質のうち、基礎科学と量子技術の両面から近年着目されているもののひとつがエネルギーコヒーレンスであり、エネルギーが異なる状態の量子重ね合わせのことを指します。量子系がもつエネルギーコヒーレンスは、熱機関の性能向上、量子時計の精

度向上などに利用できます。この意味でエネルギーコヒーレンスは、量子技術において量子効果を活用するために有用なリソースであると言えます（図1）。

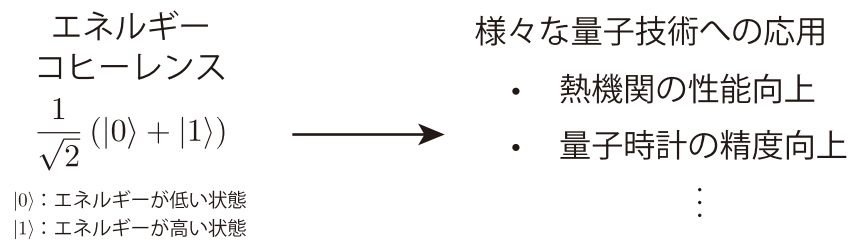


図1：エネルギーコヒーレンスとその応用。

背景2：エネルギーコヒーレンスの抽出と量子フィッシャー情報量

エネルギーコヒーレンスは我々が自由に作り出すことはできない貴重なもの^(注1)であり、また簡単に壊れてしまうことがわかっています。したがってこれを有効活用するには、量子系から高い純度のエネルギーコヒーレンスを取り出す（抽出する）ことが必要となります。そこで、「量子系からどのくらいの量のエネルギーコヒーレンスを抽出することができるか？」という問いが重要となります。

このような「量子的な資源（リソース）」を量子系からどれだけ抽出可能かを求める研究は、近年リソース理論と呼ばれる分野で活発に研究されています。リソース理論はリソースとして扱う対象によっていくつかの分野に分かれており、もっとも有名なものはエンタングルメント（量子もつれ）の理論です。エネルギーコヒーレンスを資源として取り扱う理論はその中で非対称性のリソース理論（Resource theory of asymmetry）^(注2)と呼ばれ、非常に活発に研究されています。

この非対称性のリソース理論において、i. i. d. 設定^(注3)と呼ばれる、同じ状態のコピーが多数並んだ状態からの抽出を考える単純な状況においては、量子系から抽出できる最大のエネルギーコヒーレンス量が「量子フィッシャー情報量」と呼ばれる情報量によって特徴づけられることが先行研究によって解明されています。これは、量子系からエネルギーコヒーレンスを取り出すという抽象的な操作と、系のエネルギーの量子ゆらぎを定量化する量子フィッシャー情報量を結びつける重要な結果です。しかし、この結果は単純化された状況設定である i. i. d. 設定のみに有効であるため、例えば相関を持つような通常の量子状態には適用できません。このように、エネルギーコヒーレンス抽出の包括的理論はこれまで未完成でした。

【成果】

本研究では、多くの粒子からなる量子系の、任意の量子状態から取り出すことのできるエネルギーコヒーレンスの最大量を計算する一般式を確立しました^(注4)。この式を用いると、エネルギーコヒーレンスの供給源としてどのような量子系・状態が、どの程度有用であるかを定量的に解析することができます。

またこの結果に並列なものとして、抽出の逆に相当する過程である状態準備に必要なコストについての一般式も確立しました。一般に、量子系をある状態に準備するためにはエネルギーコヒーレンスを用意する必要がありますが、この際に可能な限り無駄な損失を減らすことが重要です。本研究の結果を用いることで、多くの粒子からなる量子系を望んだ状態に準備するために必要な最小コストを解析することが可能です。

これらの本研究の結果は先行研究の結果を踏まえて一般化したものであり、複雑な相関を持つ量子系に対して適用可能です。より正確には以下のような対応関係があります：先行研究において、i. i. d. 設定におけるエネルギーコヒーレンスの抽出可能量と状態準備コストは量子フィッシャー情報量によって定まることがわかっています。この量子フィッシャー情報量を「情報スペクトル理論」と呼ばれる理論的枠組みによって拡張することにより、本研究のエネルギーコヒーレンスの抽

出可能量と状態準備コストについての一般公式が表されます（図2左）。

本研究の主結果を導く際に用いた「情報スペクトル理論」は、多くの理論において複雑な相関を持ちうる系の解析にしばしば用いられてきた強力な手法です。従来、この手法は主にエントロピーに関係する問題に対して用いられてきました。その重要な例がエンタングルメント理論です。エンタングルメント理論の i. i. d. 設定ではエンタングルメントエントロピーと呼ばれる量が中心的役割を果たし、その情報スペクトル理論的拡張によって一般の多粒子系の量子状態から抽出可能なエンタングルメント量と状態準備コストが表せることが先行研究によりわかっています（図2右）。

このことを踏まえると、本研究の成果はエネルギーコヒーレンスの理論とエンタングルメント理論の間の構造的な類似性も明らかにしたと言えます。すなわち、エネルギーコヒーレンスとエンタングルメントという2つの大きく異なる量子系の性質は、それぞれ量子フィッシャー情報量とエントロピーという物理量を軸として、情報スペクトル理論を用いることで理解できることがわかったと言えます。

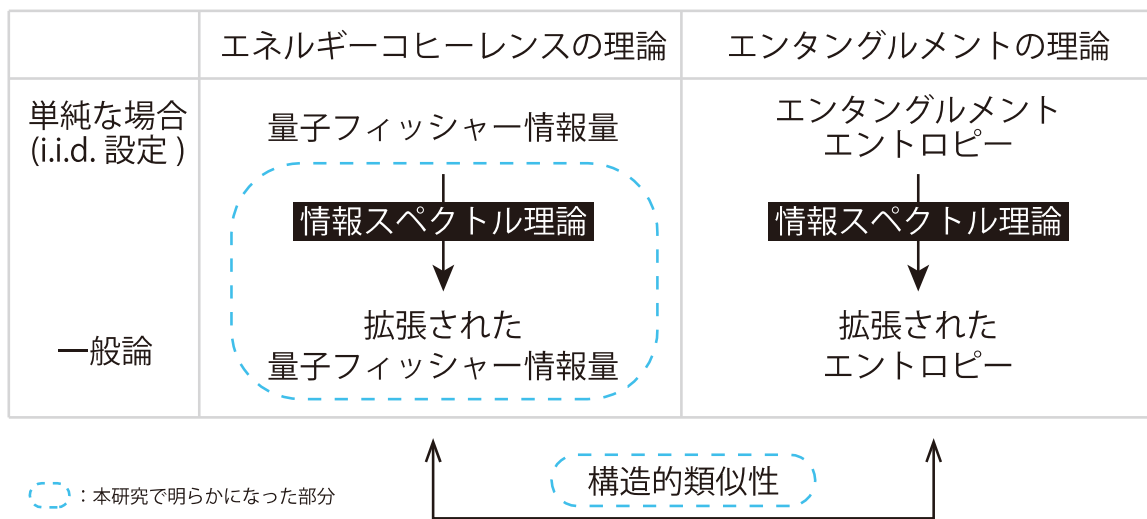


図2：エネルギーコヒーレンスの理論とエンタングルメント理論の対応関係。いずれの場合も i. i. d. 設定の結果を情報スペクトル理論により拡張することで多くの粒子からなる一般の量子系に適用可能な理論が構成できる。

【今後の期待】

本研究の結果は、エネルギーコヒーレンスを活用する際の損失を可能な限り小さくするための指針となる結果です。エネルギーコヒーレンスは熱機関の性能向上、量子時計の精度向上などに必要となる重要な量子リソースのひとつです。なかでも量子時計の精度向上は一般相対論の検証などの基礎物理的側面だけでなく、GPS システムの精度向上などの日常生活に関わる技術への応用へとつながります。エネルギーコヒーレンスの最適な活用方法に関する本研究の結果は、このような将来の量子技術の応用に向けた解析に役立つと期待できます。また本研究は情報スペクトル理論の従来の適用範囲を拡張する試みがある程度の成功をおさめたという側面を持っており、この強力な枠組みを更に拡張・応用することで量子系の様々な性質が明らかになることが期待できます。

今後の課題としては、今回の結果を応用していくこと、また外部と相関を持つような状態（混合状態）の変換においては解析が終わっていない部分があるため、そうした部分の解析を進めていくことなどがあげられます。

（論文情報）

著者名：Koji Yamaguchi and Hiroyasu Tajima

論文名：Beyond i. i. d. in the Resource Theory of Asymmetry: An Information-Spectrum Approach for Quantum Fisher Information

(外部資金情報)

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 海外特別研究員制度 (山口)、JSPS 若手研究 (JP19K14610 (田島))、JSPS 学術変革 A「極限宇宙」(JP22H05250 (田島))、JST さきがけ (JPMJPR2014 (田島))、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2061 (田島)) の助成を受けて実施されました。

(脚注)

注1 : ここで取り扱っているのは、着目系の外部にコヒーレンスを持つような補助系を考えないようなベーシックな問題設定です。一方で、外部に多量のコヒーレンスが存在する場合には、この外部系を触媒として利用することでコヒーレンスを作り出せることが先行研究によってわかっています。

注2 : 正確には、非対称性のリソース理論ではエネルギーだけでなく、任意の保存量を扱うことができます。このような保存量に関するコヒーレンスを扱うことは、対応する対称性がどの程度崩れるかを扱うことと同値なので、「非対称性 (asymmetry)」のリソース理論という名前になっています。非対称性のリソース理論ではこのほか、離散対称性などを扱うこともできますが、ここでは割愛します。

注3 : i. i. d. とは independent and identically distributed (独立同一分布) の略です。これは特定の状態にある系の同一なコピーからなる量子系を考えることを意味します。なお、本稿で説明している i. i. d. の変換についての説明は、全体系が外部の系とは一切相関を持たない状態 (純粋状態) にある場合についてのものです。

注4 : ここでも、純粋状態に限った説明を行っています。混合状態についての結果は完成していません (部分的な成果は得られています)。詳細は論文をご覧ください。

【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 情報・ネットワーク工学専攻

【職名】 助教

【氏名】 田島 裕康

Tel : 042-443-5687 E-Mail : hiroyasu.tajima[at]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[at]office.uec.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-Mail : jstkoho[at]jst.go.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔

Tel : 03-3512-3526 Fax : 03-3222-2066

E-Mail : presto[at]jst.go.jp