

2022年1月6日

報道関係者各位

慶應義塾大学
理化学研究所

量子もつれに劇的な変化をもたらす新たな条件の発見

—量子測定と量子もつれに新たな知見—

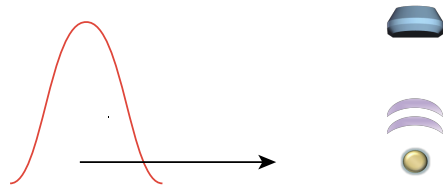
慶應義塾大学大学院理工学研究科の修士2年湊崇晃、同大学理工学部物理学科の杉本高大助教、齊藤圭司教授と理化学研究所（理研）革新知能統合研究センター数理科学チームの桑原知剛研究员らの研究チームは、量子もつれ(※1)と量子測定(※2)の強さの競合によって生じる量子測定誘起相転移(※3)が発現するための新たな条件を発見しました。量子力学的な時間発展を示す多数の粒子系では、一般的に量子もつれが時間的に増大します。一方、量子測定や量子散逸の効果は量子もつれを軽減させます。その結果、量子的な測定頻度を増していくと、量子もつれの増大率に相転移(測定誘起相転移)が起きます。研究チームは、多数の粒子が長距離に渡ってお互いに力を及ぼし合う時、測定誘起相転移が生じるための一般的な条件を導出しました。この発見は、測定誘起相転移に対する新たな知見を与えるのみならず、ノイズのある量子コンピュータにおける量子もつれ生成の頑健性に対しても、有用な知見を与えると期待されます。本研究成果は2022年1月5日〔現地時間〕に米国物理学会誌「Physical Review Letters」のオンライン版で公開されました。また、同誌のEditors' Suggestion に選ばれております。

1. 本研究のポイント

- ・相転移現象は一般に相互作用の種類に依存しますが、測定誘起相転移における長距離力の効果はこれまで議論されてきませんでした。
- ・測定誘起相転移が発現するための、長距離力が満たすべき条件を一般的に明らかにしました。
- ・量子測定は典型的な散逸として捉えることができるため、本研究成果はノイズの大きい量子コンピューティングにおける量子もつれの頑健性に、新たな知見を与えると期待されます。

2. 研究背景

量子力学(※4)の世界では、古典力学(※5)の世界にはない様々な不思議な性質があります。粒子は粒であると同時に、また波でもあります。そして粒子がどこかの場所にいるという事象は、確率的になります。粒子がいることを確認するためには実験装置で「見る」まで分かりません。このように「見る」ことを量子力学では量子測定といいます。今、粒子が波として存在し、ある時この粒子を量子測定したとしましょう。そして、その後ずっと「見続けた」としましょう。この時、この粒子はどうなるのでしょうか？驚くべきことに、見る頻度（強度）を極端に上げると、この粒子はたとえ有限の速さで動いていた状態であっても、止まってしまいます。



量子力学的な波動

量子測定

図1 量子力学における量子測定とゼノン効果の概念図

このように、量子力学の世界での測定は、極端な眼力によって状態を止めてしまうことが原理的に可能なのです。このような効果を、量子ゼノン効果と言います。この効果の名前は、「飛んでいる矢は、各瞬間で止まっている」と言った、古代ギリシアの哲学者ゼノンの言葉にちなんでつけられています。また、眼力によって人を石にしてしまう、ギリシア神話に登場する怪物メデューサを彷彿とさせる異常な効果とも言えます。

量子力学における他の不思議な性質は、「量子もつれ（量子エンタングルメント）」です。例えば、二つの粒子にスピン(※6)という自由度がある場合を考えます。スピンは、上向きと下向きを持つ小さな磁石と見なすこともできます。最初に、2個の粒子のスピンの相関のある状態を作り、一つ目の粒子を地球上に、二つ目の粒子を月面に移動させます。量子力学の世界では、粒子間が遠く離れていても有限の相関を持つ状態が存在し得ます。そのため、地球上の粒子のスピンの上向きを量子測定したとき、月面上の粒子のスピンの向きも必ず上向きになる、あるいは逆に、地球上で下向きを測定したら月面上でも下向きになる、といった古典力学系ではあり得ないような相関を生み出すことができます。近年進歩が目覚ましい量子コンピュータ(※7)を用いた量子計算においては、この量子もつれを上手に使うことが重要です。また、量子計算の計算結果は、量子測定によって与えられます。

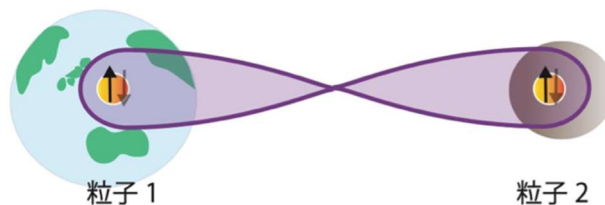


図2 量子もつれの概念図

多数の粒子が相互作用する量子多体系(※8)を考えた場合、最初に量子もつれがない状態から出発して時間発展させると、一般的に量子もつれは時間とともに増大します。そしてやがて、全粒子が複雑にからみ合った量子もつれ状態になります。このように、量子力学的な時間発展には、放っておくと量子もつれを増大させていく性質があります。それでは、量子多体系の各部分を、頻繁に量子測定するとどうなるのでしょうか？量子測定の頻度を増していくと、量子もつれを増大させる量子力学的時間発展の効果と、量子測定によって状態変化を阻害する効果との間に、ある種の競合が生じると期待されます。興味深いことに、量子測定の頻度を増やしていくと、ある頻度で量子もつれの増大率が変化しなくなる相転移現象が生じることが分かります。このような相転移現象は、近年「測定誘起相転移」現象と呼ばれ、活発に議論されています。この相転移現象の主な研究対象は、隣接する相互作用のみを考えた量子回路(※9)を使った系でした。そのため、一般的な系においてこの現象がそもそも発現するのか、そして発現するとしたらその特徴をどう捉えることができるのかなどは、未解決な重要な課題でした。

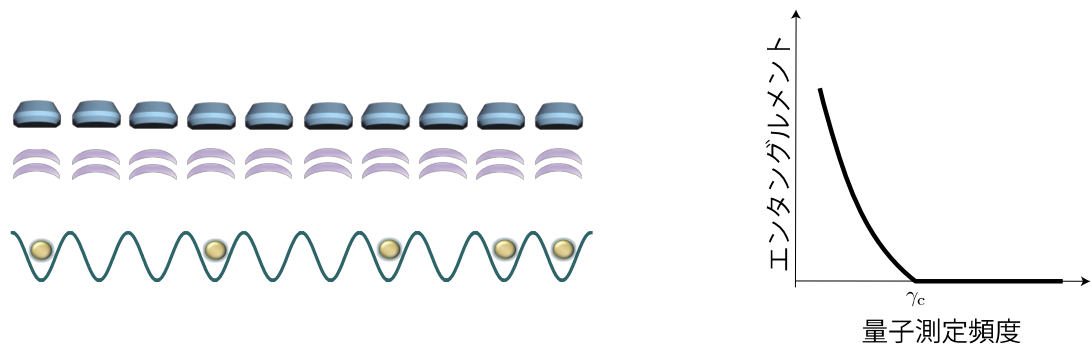


図3 量子多体系に量子測定をする概念図（左）と測定誘起相転移（右）

3. 研究内容・成果

測定誘起相転移がどの程度広範囲な物理系において発現するのか？という問いに答えるために、研究チームは、これまで研究されてきた短距離の相互作用のみがはたらく系を超えて、長距離にもはたらく相互作用系を考えました。自然界には、重力や電子間にはたらくクーロン力をはじめ、水分子のような極性分子の間にはたらく力、またマイクロな磁石の構成分子の間にはたらく力のよう、遠くまで到達する力に満ちあふれています。そのような遠くまで到達することができる力を、長距離力と呼びます。一般に長距離力のポテンシャルは、距離 r の関数として $1/r^\alpha$ で表現されます。近年の冷却原子系(※10)の実験的な進展により、長距離力のパラメータ α を自在に制御することが可能になってきました。長距離力がある系では瞬時に二つの粒子が影響し合うことができるため、量子もつれは短距離相互作用系よりも増大してしまいそうに見えます。

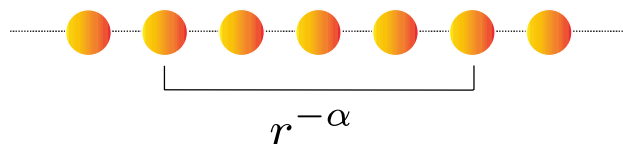


図4 長距離力の概念図

本研究では長距離力をもつ量子多体系において、測定誘起相転移現象が発現する条件を考察しました。 d 次元の長距離相互作用系を考え、量子もつれの成長率を解析することにより、測定誘起相転移現象が発現する十分条件を求めました。系のハミルトニアンが2次形式で表される系では、 $\alpha > d/2 + 1$ が条件となり、それ以外の一般的な系では、 $\alpha > d + 1$ が条件になることを見出しました。またこれらの条件は、1次元系において、大規模な数値計算によって確かめられました。

4. 今後の展開

本研究では、長距離力がはたらく量子多体系において、測定誘起相転移現象が発現する条件を発見しました。高次元系での発現条件を簡潔な式として示した研究は他になく、この条件を高次元系において、数値計算などで確かめることが今後の課題となります。また、本研究での量子測定とは、典型的な量子散逸として捉えることができます。量子コンピューティングにおける、量子もつれへのノイズの効果を理解する上で、本研究は様々な示唆を与えると期待されます。

<原論文情報>

Takaaki Minato, Koudai Sugimoto, Tomotaka Kuwahara and Keiji Saito, Fate of measurement-induced phase transition in long-range interactions, Physical Review Letters, Published online
doi: 10.1103/PhysRevLett.128.010603

<用語説明>

- ※1 量子もつれ：二つ以上の粒子の状態が分離できず、一つの粒子の状態が他の状態に依存する量子力学的な状態。古典力学の世界では存在しない特有の状態であり、量子コンピューティングを動作させるための重要な性質です。
- ※2 量子測定：測定することによって、測定装置が指定する状態に波動関数が収縮します。測定装置が位置を測定している場合、波動関数は位置に収縮します。
- ※3 相転移：水が氷になったり水蒸気になったりするよう、マクロな状態が変化する現象の総称。
- ※4 量子力学系：粒子の位置や速度が確定しておらず、確率的にしか決まらない物理系を言います。例えば電子は粒でありまた波です。電子のいる場所は確率的にしか決まりません。
- ※5 古典力学系：粒子の位置や速度が任意の時刻で確定しており、ニュートンの運動方程式に従う物理系を指します。私たちは古典力学的世界で情報をやりとりしています。
- ※6 スピン：量子力学的な粒子が持つ、内部自由度の一つであり、回転のような自由度です。
- ※7 量子コンピュータ：量子力学の原理を使って、高速に演算処理をするコンピュータのことを指します。
- ※8 量子多体系：量子力学に従う多数の粒子が相互作用し合う系の総称。
- ※9 量子回路：量子コンピュータを動作させるための回路。
- ※10 冷却原子系：レーザーを用いて、多数の原子を冷却・補足した系。制御性に優れ、様々な量子多体系を実験的に実現することができます。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 齊藤 圭司 (さいとうけいじ)

TEL : 045-566-1652 FAX : 045-566-1672 E-mail : saitoh@rk.phys.keio.ac.jp

理化学研究所 革新知能統合研究センター 汎用基盤技術研究グループ 数理科学チーム

研究員 桑原 知剛 (くわはらともたか)

TEL : 045-566-1729 E-mail : tomotaka.kuwahara@riken.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (澤野)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

理化学研究所 広報室 報道担当

E-mail : ex-press@riken.jp