

報道解禁日時 平成30年9月14日午前0時（日本時間）

平成30年9月12日

報道機関 各位

国立大学法人 電気通信大学
慶應義塾大学

量子操作の原理的境界を与えるトレードオフ関係を導出 ——量子操作の不確定性関係——

研究成果のポイント

- ❖ 量子力学が必要となるような非常に小さな対象を操作する際の操作精度について、これまで知られていなかった原理的境界が存在することが分かった。
- ❖ 操作精度を向上させるためには、「操作を行う装置」のエネルギーがその分だけ激しくゆらいでいないといけない、というトレードオフの不等式が導かれた。
- ❖ 近年盛んに研究されている、量子コンピュータなどで用いられる量子デバイスの設計やナノテクノロジーの開発を考える上で、今回の結果は役立つと考えられる。

概要

電気通信大学情報理工学研究科の田島裕康日本学術振興会特別研究員、慶應義塾大学理工学部白石直人訪問研究員、齊藤圭司教授の研究グループは、量子操作の原理的境界を示すトレードオフ関係式を導出しました。量子力学の効果が顕著になるような非常に小さな対象を精度よく操作しようとする状況において、「操作の精度を高くすること」と「操作を行う装置のエネルギーのゆらぎを小さく押さえること」とは両立せず、操作を高精度で行おうと思うと、操作を行う装置では激しいエネルギーゆらぎが生じてしまうことを、厳密な不等式の形で示しました。この不等式は、量子力学の本質の一つである「不確定性関係」が、量子系の操作に対しても存在しており、それが操作の原理境界を与えることを意味しています。この導出では、最新の量子情報理論の知見が活用されています。今回得られた結果は、一般的な量子力学的操作に対して成立するので、幅広い応用が期待できます。特に量子コンピュータ中の量子デバイスやナノテクノロジーの設計・開発方針を考える上で、今回の結果は役立つと考えられます。

この研究成果は9月14日発行の米物理学会誌「Physical Review Letters（電子版）」に掲載される予定です。

●研究の背景

ものを正確に制御・操作することは、現代の科学技術においては必要不可欠

です。特にマイクロなスケールにおける正確な操作・制御技術は、電子機器から材料の微細加工まで、我々の身近な生活になくてはならないものとなっています。あまりにも我々の日常生活に溶け込んでいるので普段は意識しないことですが、テレビやパソコンなどの「操作・制御を行う装置」の動作はすべて物理現象であり、どのような操作が可能かは物理法則によって決まります。それでは、微小な世界で制御をしようとする、どんな物理現象が重要になるのでしょうか？

近年、ナノスケールで動く精巧なデバイスやマシンの研究が活発に行われています。こうした非常に小さな世界では、我々の日常的な直観とは異なる「量子力学」の効果が顕著に表れてきます。例えば、真ん中に仕切りのある箱にボールを入れた場合、日常の世界では「右にボールが入っている」か「左にボールが入っている」かのどちらか一方だけが実現し、両方が実現するということはありません（図1：左）。また一旦箱にボールを入れてしまえば、どちらの状態であるかはその時点で決まってしまう。ところが量子力学の世界では、『ボールが右に入っている状態』と『左に入っている状態』が重ね合わさっている状態」という奇妙な状態が実現可能です（図1：右）。こうした「量子重ね合わせ状態」と呼ばれる状態では、ボールがどちらに入っているかは観測するまで決まっていない、という非常に直観に反することが起こることも知られています。

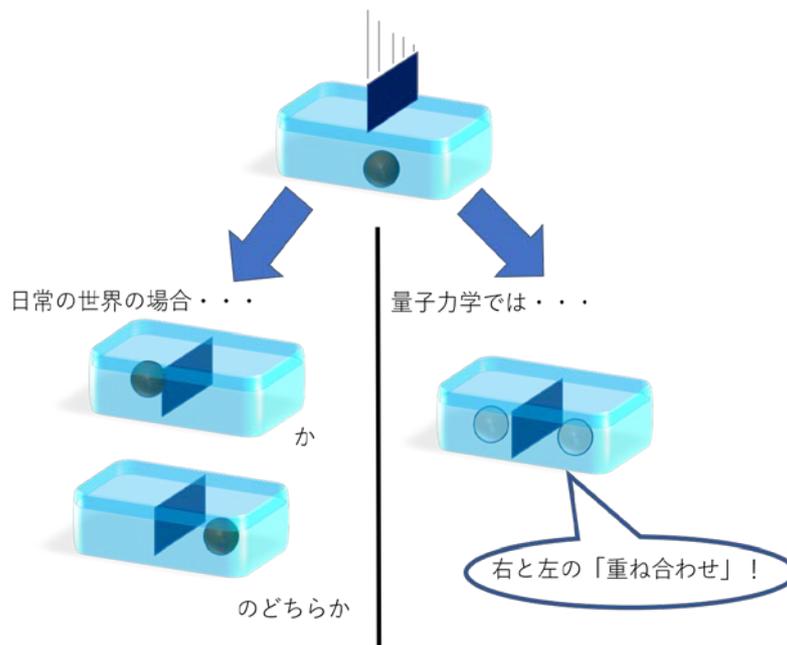


図1：左右に仕切りのある箱にボールを入れた状況。（左）日常的な理解。左右のどちらかにボールが入っていて、それはボールを入れた時点で決まる。（右）量子力学の場合。左にボールがある状態と右にボールがある状態の重ね合わせ状態となっており、どちらにボールがあるかは箱を開けるまで定まらない。

量子力学の世界はこのように奇妙な性質がありますが、ナノスケールのデバイスやマシンの研究においては、この「量子力学の奇妙さ」を全面的に利用して、従来の方法では実現しえなかったような全く新しい性能を持つ量子デバイ

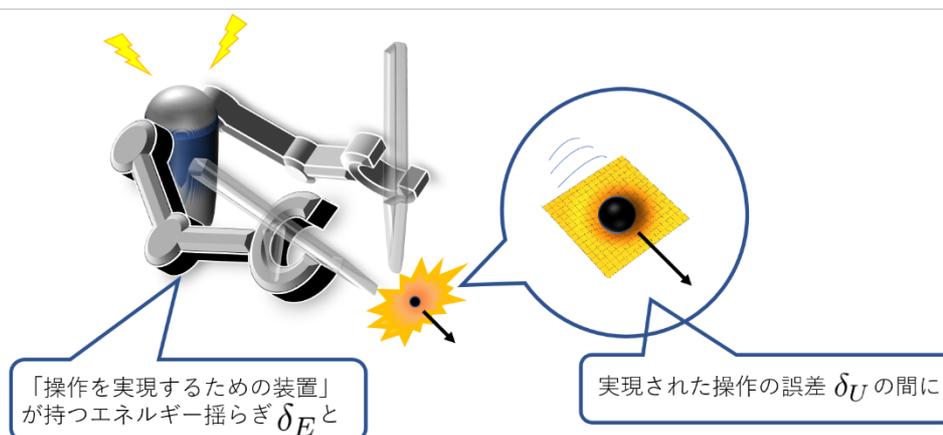
スや量子機械を作ろうとしています。量子デバイスや量子機械において、量子性は欠くことのできない性質です。

こうしたナノスケールのデバイスや機械を実現させるには、微小な対象を、量子重ね合わせを維持したまま高精度で操作・制御する必要があります(注 1)。しかしこれまで、「そうした操作ができたとして、それを使って何ができるのか?」ということに関しては多くの研究がなされてきましたが、「どのような装置であれば、そうした操作を行うことができるか?」ということについてはあまり深く考察されていませんでした。微小な対象を制御することは、それ自体が量子力学的な現象なので、そこには量子力学特有の「なんらかの限界」が存在しているはずですが、それはこれまであまり解析されてこなかったのです。

●今回の研究内容

本研究グループは、操作対象のみならず装置まで含めて全体を量子力学で取り扱い、量子重ね合わせを維持する操作を高精度で実現させようとする際に、どのような条件を装置が満たさなければいけないのか、ということについて定量的に解析しました。その結果、そうした操作を高精度で実現するためには、装置の側のエネルギーが激しくゆらいでいなければならない、ということが分かりました(図 2)。より具体的には、意図していた操作と実際に実現した操作との間の「誤差」の大きさと、操作を実現させる装置における「エネルギーのゆらぎ」の大きさととの間に、片方を小さくするともう片方が大きくならなければならないという二律背反な関係(トレードオフという)が存在し、両者を同時に小さくすることはできないということを不等式の形で厳密に証明しました。

得られた不等式は、「もしエネルギーゆらぎの小さな装置を用いた場合には、ある水準以上の精度で意図した操作を実現させることはできない」ことを意味しています。エネルギーゆらぎの小さな装置を用いると、操作対象の量子重ね合わせを維持するような操作を実現させることができず、対象の量子性が大きく損なわれてしまうのです。こうした量子性の損なわれた操作では、量子デバイスは期待される性能を出すことができません。今回の結果は、操作対象や装置にほとんど何の条件も課すことなく導かれた結果なので、極めて幅広い量子デバイスやナノテクノロジーにおいて、このような原理的限界が存在することを示しています。



どんな操作を、どんな装置で行うかに関係なく

$$\Delta U \Delta E \geq (\text{操作によって決まる定数}) \text{ が成立する}$$

図 2: 得られた結果の概念図。量子重ね合わせを保つ操作を精度よく行おうとすると、行いたい操作と実際に行われる操作の間の誤差 δ_U と、その操作を実現させるための制御装置のエネルギーゆらぎ δ_E の間に、上記の不等式が成立する。この不等式は、「 δ_U と δ_E のどちらかを小さくしようとする、それに応じてもう片方が大きくなる」という関係を表している(注3)。

●本研究の応用先

本研究は、近年盛んに研究されている様々な量子デバイスの設計やナノテクノロジーの実現方法を考える上で、有益な示唆を与えるものだと考えられます。これまでは、「どのような装置を使えば意図した操作が実現できるか」という問題は個別の事例ごとに考えられており、特定の状況に対してはうまくいく／いかない方法が知られている場合もありましたが、一般的な指針は知られていませんでした。今回の結果は、極めて一般的な形で高精度の量子操作に対する原理限界を明らかにしており、個別の状況に依らない形で操作方法に対する指針を与えることができます。例えば、もし用いている装置のエネルギーゆらぎがあまり大きくないのであれば、それは量子操作の精度向上を妨げている原因かもしれない、と考えることができます。

●今後の期待

今回得られた関係式は、操作精度とエネルギーゆらぎの間のトレードオフの存在を初めて一般的に証明するものです。今後は、この不等式をさらに緻密化したり、新たな類似の関係を見つけること、また、具体的な制御装置への応用などが重要になると思われます。

【注釈】

注 1: 不確定性関係

量子力学では、位置や運動量(速度と質量の積)をはじめとした多くの物理量の組の間に、「同時に値のゆらぎを小さくできない」性質がある。こうした性質を不確定性と呼ぶ。例えば、ある粒子の位置を正確に特定すればするほど、運動量のゆらぎが大きくなり、逆に運動量を正確に特定すればするほど、位置のゆらぎが大きくなる。今回の結果は物理量の間ではなく、「操作の精度」と「装置のエネルギーゆらぎ」の間に不確定性と極めて類似した関係があることを明らかにしている。

注 2: ユニタリー操作のこと。量子力学では状態を行列の形で記述する。この記述の下で、時間発展が行列の変換として与えられる。この変換がユニタリー行列 U を用いて $\rho \rightarrow U\rho U^\dagger$ の形で書けるとき、ユニタリー操作と呼ぶ(\dagger は複素共役)。一般に、ある物体の時間発展は、それが任意の初期状態に対して量子重ね合わせの比率を変えない時、ユニタリー操作として記述される。

注 3 : この式は、正確には以下のように書かれる :

$$\delta_U \delta_E \geq \frac{\| [U_S, H_S] \|}{40}$$

ここで式の右辺 $\| [U_S, H_S] \|$ は、 H_S と U_S の交換関係 $[U_S, H_S] := U_S H_S - H_S U_S$ のオペレーターノルム。ここで U_S は「実行したい操作」のユニタリー行列、 H_S は操作対象 (図 2 では粒子) の時間発展を定める演算子 (ハミルトニアン)。この量 $\| [U_S, H_S] \|$ は、「操作対象の操作によるエネルギー変化の最大値」という意味を持つ。

【論文情報】

Hiroyasu Tajima, Naoto Shiraishi, and Keiji Saito ,
“Uncertainty relations in implementation of unitary operations”
Physical Review Letters 121,110403 (2018)
DOI : 10.1103/PhysRevLett.121.110403

【問い合わせ先】

<研究関係>

国立大学法人 電気通信大学 情報理工学研究科
日本学術振興会 特別研究員(PD) 田島裕康 (たじまひろやす)
TEL : 042-443-5628, 080-5121-1785
E-mail : tajima@quest.is.uec.ac.jp

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

<報道関係>

国立大学法人 電気通信大学
総務課広報係 (担当:金子、渡辺)
電話 : 042-443-5019
E-mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp

慶應義塾広報室 (担当:村上)
電話 : 03-5427-1541
E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp