

電荷が反対の粒子間に斥力が働く状況を実現

—量子アルゴリズムの新たな応用—

概要

通常電荷の正負が同じ粒子の間には斥力（反発し合う力）、正負が反対の粒子の間には引力（引っ張り合う力）が働くことが知られています。ところが最近、このような「電荷の正負が反対の粒子間には引力が働く」という”常識”が、特殊な状況下では必ずしも成り立たないということが指摘されていました。

京都大学基礎物理学研究所（基研）本多正純 助教、理化学研究所仁科加速器科学研究センター 伊藤悦子 協力研究員、ブルックヘブン国立研究所 菊池勇太 研究員(研究当時、現：Cambridge Quantum Computing Japan 研究員)、基研 谷崎佑弥 助教らの国際共同研究グループは、シュウィンガー模型と呼ばれる1次元量子系において、電荷が反対の粒子間に斥力が働く状況を、数値シミュレーションにより実現することに成功しました。これは量子計算機で用いられるアルゴリズム（量子アルゴリズム）の新たな応用であり、通常の方法では解析が困難だった初期宇宙の時間発展、有限密度領域における初期宇宙の相構造などの重要な問題の理解に貢献していくことが期待されます。

本成果は、2022年3月1日に日本の国際学術誌「Progress of Theoretical and Experimental Physics」に最終校閲版がオンライン掲載されます。（2022年1月14日に受理版原稿がオンライン掲載されています。）

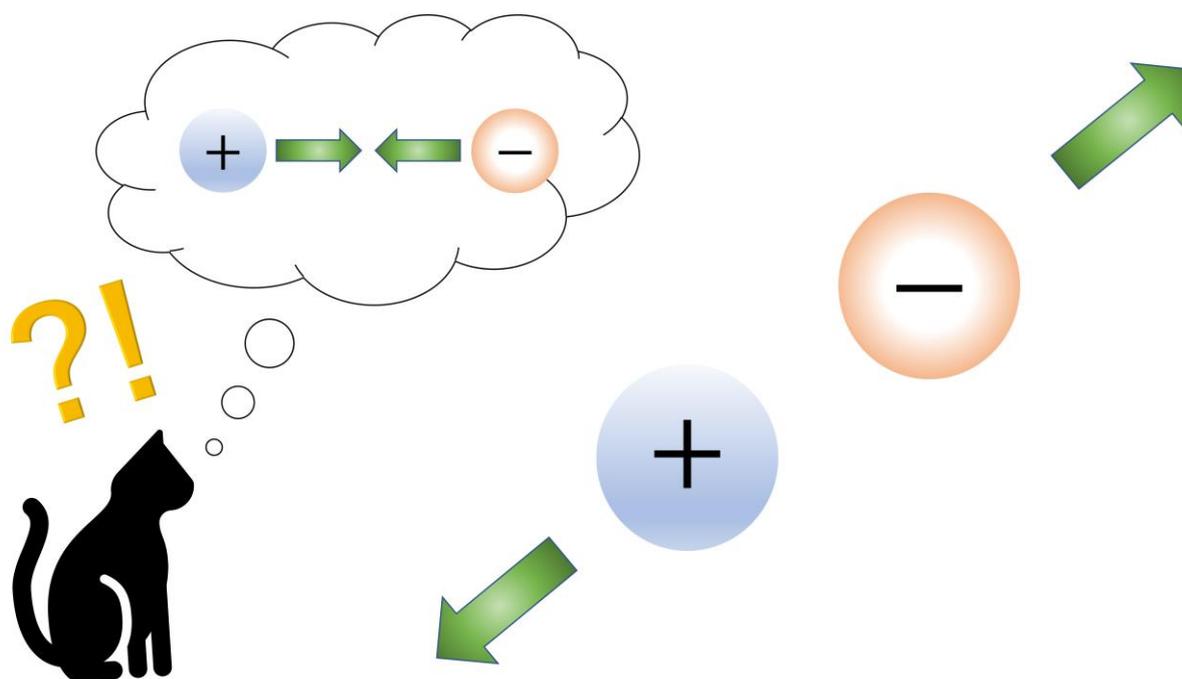


図 通常では電荷の正負が反対の粒子には引力が働くが（左）、逆に斥力が働く状況が起こりうる（右）

1. 背景

自然界にはさまざまな力がありますが、中でも電磁気力は私たちの日々の生活に身近であると同時に、ミクロな素粒子の世界でも直接的に見られる基本的な力です。電磁気力には電氣的なもの（電荷）と磁氣的なもの（磁気モーメント）がありますが、電氣的な力は電荷を持った粒子の間に働きます。電荷は粒子の種類に応じて値が割り当てられており、通常正負が同じ粒子の間には斥力、正負が反対の粒子の間には引力が働くことが知られています。例えば電子の電荷は -1 、陽子の電荷は $+1$ であるため、電子と陽子の間には電氣的な引力が働き、これは私たちの身の回りの原子・分子の世界をつくる上で重要な役割を担っています。ところが最近、このような「電荷の正負が反対の粒子間には引力が働く」という「常識」が、特殊な状況下では必ずしも成り立たないということが理論的に予言されていました。

このような特殊な状況は、私たちになじみの深い3次元空間の世界ではなく、空間が1次元の低次元系において起こり得ることが議論されていました。具体的には**シュウイングー模型**^{注1)}と呼ばれる、基本的な粒子として光子と電荷を持つ粒子が結合した1次元量子系を考えます。この模型において、互いに反対の電荷を持つ二つの重い粒子（プローブ電荷）の間に働く力を考えると、その定性的な振る舞いが模型のパラメータの値に依存して次の三つのパターンに分かれることが指摘されていました。

(1) 引力が働くが、あまり強くなくお互いに遠くへ離れることができる。

(2) ひもでつながれているかのような強い引力が働き、お互い遠くへ離れることができない。

(3) 斥力が働く。特に、勝手に伸びるようなひも（負の張力を持つ）でつながれているかのような力が働く。

(1)と(2)はさまざまな状況で起きることが知られている現象であるのに対して、(3)は通常では起こらないとても特殊な現象であり、まだほとんど研究がされていない状況でした。また、(3)の現象が起こると予言されていた模型のパラメータ領域は、これまでの素粒子理論分野における標準的な数値計算の手法（**マルコフ連鎖モンテカルロ法**^{注2)}）では調べるのが非常に難しいとされている領域でした。

2. 研究手法・成果

上記の斥力が働くと指摘されている状況をモンテカルロ法で調べようとする、**符号問題**^{注3)}と呼ばれる問題により、必要な計算量が莫大になり、数値シミュレーションが困難になることが知られていました。そこで本研究グループの4人は、モンテカルロ法ではない別の手法を用いることにしました。この手法は**ゲート型量子計算機**^{注4)}を使用する際に用いられるアルゴリズム（**量子アルゴリズム**）の一種で、**断熱的状态準備法**^{注5)}と呼ばれるものです。具体的な手順としては、まずシュウイングー模型が置かれている1次元の連続的な空間を格子に切り、数学的に等価なスピン系に変換することで、模型を量子アルゴリズムが直接適用できる形に置き換えました。そこに断熱的状态準備法を適用し、プローブ電荷が置かれている状況での模型の様子を調べました。これらの工夫により、プローブ電荷の間に斥力が働くと指摘されている状況を数値シミュレーションで直接調べることができるようになりました。そしてIBMの量子計算機用の古典シミュレータを用いてプローブ電荷間の力を計算したところ、あるパラメータ領域においては実際に斥力が働くことが分かりました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、通常の方法では解析が難しい状況において、量子アルゴリズムによる新たな手法を用いて新奇な現象を直接調べることができたことに意義があります。今後は同じく符号問題により通常の方法では数値シミュレーションが難しいと言われている重要な問題（初期宇宙の時間発展、有限密度領域における初期宇宙の相構造など）が、今回のような量子アルゴリズムを用いたアプローチで明らかになっていくことが期待されます。

また、量子アルゴリズムの新たな応用を開拓していくことで、量子情報分野の発展を刺激していくことも期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は下記の助成金による支援を受けて行われました。

- (1) 学術変革領域研究 (A) 「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)
D01 班: 「場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ」JP21H05190 (研究代表者：西岡辰磨)
- (2) 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」(領域代表者：中村隆司) D01 班
「第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構」JP18H05407 (研究代表者：肥山詠美子)
- (3) JST さきがけ「初期宇宙解明に向けた量子アルゴリズム開発基盤の創成」JPMJPR2117 (研究代表者：本多正純)
- (4) JST さきがけ「符号問題が生じる場の理論の古典量子計算法の開発」JPMJPR2113 (研究代表者：伊藤悦子)
- (5) 科研費基盤研究(C) 「低温高密度領域における2カラーQCDの相図と超流動性の解明」19K03875
(研究代表者：伊藤悦子)
- (6) U.S. Department of Energy, Office of Science, National Quantum Information Science Research Centers, Co-design Center for Quantum Advantage DE-SC0012704
- (7) 科研費スタートアップ「量子アノマリーに基づいたゲージ理論の相構造の解明」20K22350
(研究代表者：谷崎佑弥)
- (8) 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 「知的量子設計による量子ソフトウェア研究開発と応用」(プログラム代表者：藤井啓祐)

<用語解説>

注1) シュウィンガー模型：空間が1次元の量子電磁気学の模型で、基本的自由度として電荷を持ったフェルミ粒子と光子が結合した系。模型のパラメータは、相互作用の強さ、フェルミ粒子の電荷・質量、およびシータ角と呼ばれる空間反転対称性を破る効果を与えるものの三つ。本研究で考えている問題では、この三つに加えてプローブ電荷が持つ電荷の値も数値シミュレーションで調整するパラメータとなる。

注2) マルコフ連鎖モンテカルロ法：多重積分や多重和を数値的に計算する際にしばしば用いられるアルゴリズム。素粒子理論分野における標準的な数値シミュレーションでは、多重積分で表した物理量に、マルコフ連鎖モンテカルロ法を適用することで、積分の効率的なサンプリングを行う。

注3) 符号問題：マルコフ連鎖モンテカルロ法において、被積分関数の性質により、効率的なサンプリングが困難になる問題。シュウィンガー模型ではシータ角が大きいときに起こる問題で、ちょうどプローブ電荷の間に斥力が働くと考えられているパラメータ領域が、その領域にあたる。

注4) ゲート型量子計算機：量子ゲート方式による汎用(デジタル)量子計算機。通常(古典)の計算機においてビットに論理演算が作用して計算が行われるのに対応して、ゲート型量子計算機では量子ビットに量子ゲートが作用して計算が行われる。

注5) 断熱的状态準備法：量子系におけるエネルギーの低い状態を構成する方法の一つ。量子系を簡単に解くことができる状況から解こうとしている複雑な状況へ非常にゆっくりと変化させることにより、求める状態を

構成するアルゴリズム。

<研究者のコメント>

この研究では、変わった現象が起こりそうな状況がちょうど通常的手法では調べるのが難しそうなところで、それが今話題の量子アルゴリズムによるアプローチで克服される流れが痛快でした。この記事を読んでいる方の中には、この研究成果により私たちの原子分子の世界が壊れるのではとご心配になる方もいらっしゃるかもしれませんが、これは空間が3次元のわれわれ世界の話ではないのでご安心ください。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Negative string tension of higher-charge Schwinger model via digital quantum simulation（量子計算でみる負のストリングテンションの出現）

著者：Masazumi Honda, Etsuko Itou, Yuta Kikuchi, Yuya Tanizaki（アルファベット順）

掲載誌：Progress of Theoretical and Experimental Physics

DOI：https://doi.org/10.1093/ptep/ptac007