

新たな種類のエニオンを系統的に作る方法を発見

—量子コンピュータへの新たな応用の可能性—

概要

液体・固体・気体など物質は状況に応じて異なる状態(相)を持つことがあり、相を理解することは物理学で重要な課題です。現代的な相の分類においては、エニオンと呼ばれる分数電荷を持つ準粒子が重要であり、量子コンピュータへの応用の観点からも研究されています。

京都大学 基礎物理学研究所(基研)の戒弘実 研究員・理化学研究所数理創造プログラムの本多正純 上級研究員・基研の中西泰一 博士後期課程学生(理研大学院生リサーチ・アソシエイト兼任)の共同研究グループは、動き方に制限がかかる新しい種類のエニオンを系統的に記述する理論的枠組みを発見しました。図のように層に沿って量子もつれを導入し、ゲージ化と呼ばれる操作により新奇な物質の相を構成しました。この相ではエニオンが対を形成する双極子の構造が存在し、動き方に制限が見られるなどの新奇な性質があることが分かりました。この結果はフラクトン・トポロジカル相と呼ばれる新しい物性の解明や、量子情報の保存などの量子コンピュータへの応用の問題にも貢献していくことが考えられます。本研究成果は 2024 年 5 月 13 日にアメリカ合衆国の国際学術誌「Physical Review Research」にオンライン掲載されました。

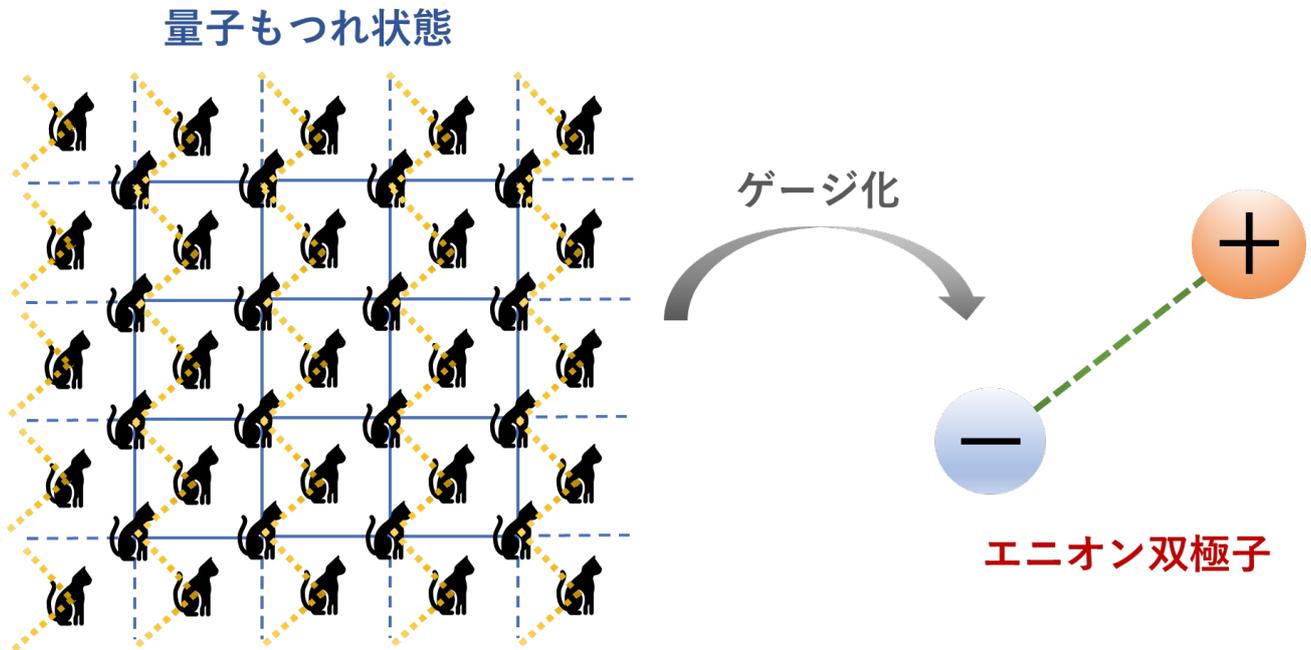


図 量子もつれの状態を導入し(左)ゲージ化を考えることで、双極子を持つエニオンの存在(右)を明らかにしました。

1. 背景

普段の生活で実感しているように、水は常温では液体ですが温度をある程度下げると凍って氷になり、上げると沸騰して水蒸気になります。このようにして、物質は状況の変化に応じて定性的な特徴の異なる状態に変化することがあります。物理学では、物質の状態はしばしば相と呼ばれるもので分類されます。上記の水の例では、普段の液体の状態は液相、氷・水蒸気の状態はそれぞれ固相・気相に対応します。他にも様々な相が知られており、例えば私たちの身の回りにある金属・ガラス・絶縁体なども相の例として知られています。このように相は物質の理解に密接に関わっており、特にどのような相が存在するのか(相の分類)及びそれぞれの相はどのようにして実現されるのかを理解することは、物理学における重要な課題として知られています。

現代的な相の分類においては、エニオンと呼ばれる粒子の存在が非常に重要であることが知られています。エニオンは70年代に理論的に提案された分数電荷を持つ準粒子で、その存在は実験で確かめられました。このエニオンの存在は相を分類する際に革新的な意義を持ち、従来の相分類の枠組みにない**トポロジカル秩序**^{注1)}と呼ばれる新奇な相の導入の先駆的な役割を担ってきました。従来の相分類では局所的な秩序を調べることで相を特徴づけているのに対し、エニオンが存在するトポロジカル秩序では局所的な秩序が存在せず、トポロジーと呼ばれる新しい数学的概念により相を調べる必要があります。またエニオンは**量子コンピュータ**^{注2)}の実現において重要な役割を担っていると考えられており、エニオンのより良い理解が物理学における重要な課題の1つになっています。

近年、**フラクトン・トポロジカル相**^{注3)}と呼ばれる新奇なトポロジカル秩序が理論的に提案されました。この相ではエニオンが存在しますが、そのエニオンの動き方に制限がかかる等、今まで見られなかった特徴があり、これまで知られているトポロジーの理論を使って説明できないことから現在注目を集めています。そこで、本研究では動き方に制限がかかる新しい種類のエニオンを系統的に記述する理論的枠組みを作ることを目標に研究を行いました。

2. 研究手法・成果

本研究では、物性理論と素粒子理論の分野で使われる手法を組み合わせることで研究を遂行しました。具体的には、図のように層に沿って適切な量子もつれを導入し、ゲージ化と呼ばれる大域的対称性を局所的なものへ変換するプロセスを考えることで新奇な物質の相を構成しました。このような物理系におけるエニオンの統計性を調べることで、導入した量子もつれによってエニオンが対を形成する双極子の構造が存在することを証明しました。得られたエニオン双極子は、ある方向にしか動けないといった、動き方に制限がかかることが分かり、これを元に新しいフラクトン・トポロジカル相が作られることを示しました。ここで得られた成果はフラクトン・トポロジカル相の理解に新たな知見を与えるとともに、量子情報の保存などの量子コンピュータへの応用の問題などにも貢献していくといった意義を持つと考えられます。

3. 波及効果、今後の予定

エニオンやトポロジカル秩序の研究は、ここ最近5年間で物性物理・素粒子理論・量子情報など幅広い分野において研究が盛んに行われてきています。今後もエニオンを研究することで分野の枠組みを超えた新しい物理的知見が得られる可能性があります。また、今回の研究対象であったエニオン双極子が現れる物理系を量子情報の観点からも詳しく調べることで、量子コンピュータのより有効的な設計の探索にも貢献することが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究プロジェクトは以下の助成金による支援を受けて行われました。

・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」

(研究代表者: 本多正純, 課題番号: JPMJPR2117)

- ・ 科研費学術変革領域研究(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」
(研究代表者: 西岡辰磨, 課題番号: 21H05190)
- ・ 科研費基盤研究(B)「高次元ホモトピー群とトポロジカル物質」
(研究代表者: 塩崎謙, 課題番号: 23H01097)
- ・ 科研費基盤研究(B)「テンソルネットワーク法が解き明かす場と時空のダイナミクス」
(研究代表者: 加堂大輔, 課題番号: 22H01222)
- ・ JST SPRING (課題番号: JPMJSP2110)
- ・ RIKEN Junior Research Associate Program
- ・ 光・量子飛躍フラッグシッププログラム「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)トポロジカル秩序 例物理学では液体・気体・金属・絶縁体といった様々な相を分類し研究しますが、これらの相は系の局所的な秩序を見ることで特徴づけられます。トポロジカル秩序は局所的な秩序で特徴づけられない新しい相で、トポロジーと呼ばれる数学で記述されます。トポロジーとは大域的な特徴で形を分類する学問の1つで、例えばコーヒーカップとドーナッツを同一のものとみなします。トポロジカル秩序は系の大域的な形状によって分類され、一般にエニオンはこの相に存在することが知られています。

注 2)量子コンピュータ 量子論的な法則に基づいて設計されたコンピュータで、うまく実現できれば従来のコンピュータに比べ、より少ない労力で演算を行うことが期待されています。特にエニオンを用いた量子コンピュータは、理論的に外乱に対し安定することが期待されているため、実用面の観点から実現が望まれています。

注 3)フラクトン・トポロジカル相 通常エニオンは系のどこへでも動くことが知られていますが、近年フラクトン・トポロジカル相と呼ばれる、従来のトポロジカル秩序の枠組みでは記述できない新しい相が提案されました。この相ではエニオンの動き方に制限がかかり、相を記述するのにトポロジーでは不十分なことが知られており、解明が課題となっています。またこの相では従来のトポロジカル秩序に比べ量子情報を多く蓄えることができるという特性が示され、新しい量子コンピュータへの応用も期待されています。

<研究者のコメント>

私たちの共同研究グループは、元々は別分野(物性理論・素粒子理論)の出身にも関わらず、エニオンの研究という共通の研究目的があり共同研究を行いました。今後もエニオンやトポロジカル秩序の研究はますます分野を超えた新しい広がりを見せていくと思われれます。

<論文タイトルと著者>

タイトル: Multipole and fracton topological order via gauging foliated SPT phases (葉層構造の SPT 相のゲージ化による多重極子、フラクトン・トポロジカル相)

著者: 戎 弘実, 本多 正純, 中西 泰一

掲載誌: Physical Review Research

DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.023166