

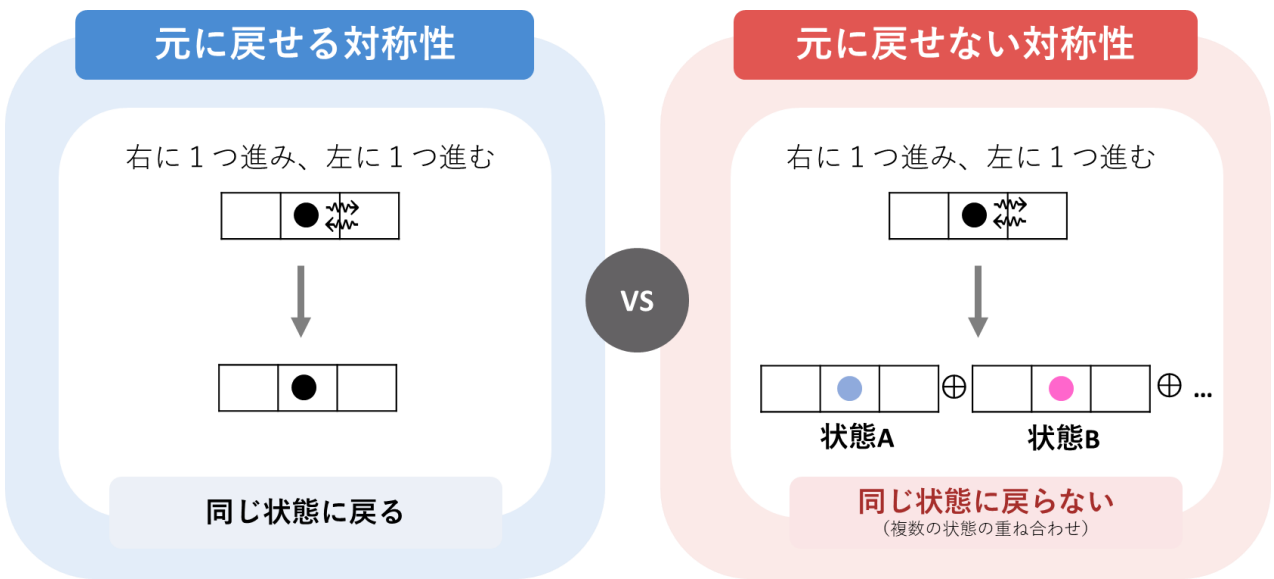
並進対称性が“元に戻せなくなる”新現象を発見

概要

物理学における対称性とは、ある操作を行っても系の性質が変わらないことを指します。例えば、同じものが一直線に並んでいる場合、全体を1つ横にずらしても同じ状態になります。このような性質を「並進対称性」と呼びます。京都大学基礎物理学研究所の大石翼、齊藤巧磨博士後期課程学生、理化学研究所の戎弘実研究員らの研究グループは、内部対称性と並進対称性の組み合わせによって生じる Lieb-Schultz-Mattis (LSM) 制約を持つ任意の次元の系において、ゲージ化と呼ばれる大域的な対称性を局所的なものへ変換する操作を行うと、並進対称性そのものが非可逆な対称性へと変化することを明らかにしました。

通常、対称性の操作には「元に戻す操作（逆操作）」を持ちます。例えば、右に1マスずらした操作は、左に1マス戻すことで元に戻ります。しかし本研究で見出された非可逆対称性では、単純な逆操作が存在せず、操作を重ねると複数の状態が混ざるという性質を持つことが分かりました。本研究は、対称性の概念そのものを拡張し、量子情報における新奇な対称性構造の理解に貢献することが期待されます。

本研究成果は2026年5月21日にアメリカ合衆国の国際学術誌「*Physical Review B*」にオンライン掲載されました。



図：通常の対称性（左）では操作は逆操作によって元に戻る。一方、本研究で見出された非可逆対称性（右）では逆操作が単純には存在せず、状態が複数に分かれる。

作成：戎弘実

1. 背景

物理学において、対称性は物質の性質を理解するための基本原理の一つです。例えば、格子上のスピン系では、スピンの回転対称性（内部対称性）と並進対称性が同時に存在すると、系は単純な絶縁体のような状態を取ることができない場合があります。このような制約は、Lieb-Schultz-Mattis (LSM) 定理として知られています。近年この LSM 制約は**アノマリー**^{注1)}と呼ばれる量子論的な不整合として理解されるようになり、対称性とトポロジーの関係を記述する重要な概念となっています。他方、空間全体に作用する大域的な対称性を局所的なものにするゲージ化という操作を行うことで、現実世界をうまく記述できることが知られています。しかしアノマリーがあるとゲージ化の操作に支障が出ることが知られていました。

2. 研究手法・成果

本研究では、LSM アノマリーを持つ量子格子模型に対して、数式による理論解析を行い、内部対称性をすべてゲージ化した場合に並進対称性がどのように変化するかを調べました。格子模型上で対称性操作を厳密に構成し、その合成則を解析した結果、従来は通常対称性として理解されていた格子並進操作が、**非可逆な対称性**^{注2)}へと変化することを明らかにしました。具体的には、ゲージ化後の並進操作は単独では対称性として定義できず、非可逆な操作と組み合わせることで初めて整合的な対称性となります。このとき、並進対称性は「逆方向に並進する」操作との合成で何もしない操作に戻らず、内部対称性の欠陥と結びついた非可逆構造を持つことが分かりました。さらに、この格子系における結果は連続体の上でのトポロジカル場の理論における**アノマリー流入**^{注3)}と完全に一致し、格子模型と連続体理論の対応が明確に示されました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、通常は可逆と考えられていた格子並進対称性が、条件によっては非可逆対称性へと変化するを示したものです。この結果は、量子多体系における物質の状態の分類を再考する契機となるだけでなく、トポロジカル量子計算や量子誤り訂正など、量子情報分野への応用にもつながる可能性があります。特に、非可逆対称性は情報の保存や操作において従来とは異なる誤り耐性を持つ可能性があり、今後の研究の進展が期待されます。

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 CREST (Grant No. JPMJCR24I3)
- ・ JST SPRING (Grant No. JPMJSP2110)

<用語解説>

注 1) **アノマリー** 古典的な系における対称性は通常、量子論においても保たれると考えられますが、古典的には存在する対称性が量子化によって破れてしまう場合があります。このような量子論特有の不整合を「アノマリー」と呼びます。本研究で扱う LSM 制約は、このアノマリーとして理解することができます。

注 2) **非可逆な対称性** 通常対称性では、ある操作を行った後に逆方向の操作を行うことで必ず元の状態に戻ります。しかし非可逆対称性では、そのような逆操作が単独では存在せず、複数の操作の和としてのみ元に戻るといった特徴があります。この性質は近年、量子場理論や量子多体系における新しい対称性構造として注目されています。

注 3) **アノマリー流入** アノマリーがある理論は、より高次元のアノマリーがない理論の境界における理論と

して書き直せます。例えば空間 2 次元のアノマリーがある系は空間 3 次元のアノマリーがない理論に端を作ったとき生じる境界として理解されます。本研究の結果は、このアノマリー流入の考え方と一致しています。

<研究者のコメント>

本研究では、並進対称性という最も基本的な対称性が、条件によっては「元に戻せない」性質を持つことを示しました。これは対称性に対する従来の理解を拡張する結果であり、量子多体系の新しい見方につながると期待されます。

<論文タイトルと著者>

タイトル： Non-invertible translation from Lieb–Schultz–Mattis anomaly (Lieb–Schultz–Mattis アノマリーからの非可逆並進)

著者：大石翼、齊藤巧磨、戎弘実

掲載誌： *Physical Review B* DOI : <https://doi.org/10.1103/qmcw-dbrs>