

Title	Non-invertible symmetry in 4-dimensional Z_2 lattice gauge theory
Author(s)	小出, 真嵩
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96383
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (小出 真嵩)

論文題名

Non-invertible symmetry in 4-dimensional Z_2 lattice gauge theory
(4次元 Z_2 格子ゲージ理論の非可逆対称性)

論文内容の要旨

場の量子論は、高エネルギー物理学や量子多体系を記述するための基本的な枠組みであり、その解析において対称性は重要なツールの一つである。この10年間はそのような対称性の概念を拡張した、一般化対称性が盛んに研究されてきた。一般化対称性では、値を変えないまま連続的に変形を行うことのできるトポロジカルな欠陥を対称性とみなす。それにより、従来の対称性では解析ができない様々な現象に説明を与えることができた。対称性の一般化の一つに、群構造を持たないトポロジカル欠陥によって記述される非可逆対称性がある。2次元の理論では数多くの非可逆対称性が見つかっており、そのため様々な応用が考えられていた。一方で、私たちが研究を始めた当時、3次元以上の理論において非可逆対称性の具体例は少なく、2次元に比べて理解が進んでいなかった。特に4次元の理論において、3次元のトポロジカル欠陥によって記述される非可逆対称性は発見されていなかった。我々は、4次元の Z_2 格子ゲージ理論上で3次元の非可逆トポロジカル欠陥を構成し、新しい非可逆対称性を発見した。この理論は1形式 Z_2 大域対称性とKramers-Wannier-Wegner (KWW) 双対性を持っており、我々の構成した非可逆トポロジカル欠陥は、このKWW双対性に対応する。我々は、格子上的2次元イジング模型の双対性から非可逆トポロジカル欠陥を構成するAasen-Mong-Fendley (AMF) アプローチを4次元格子ゲージ理論に応用することで3次元の非可逆トポロジカル欠陥を構成した。また我々は、1形式 Z_2 大域対称性に対応する2次元のトポロジカル欠陥と、非可逆対称性の欠陥と1形式 Z_2 大域対称性の欠陥を接続するトポロジカルなジャンクションを構成した。そして異なるトポロジーを持つ欠陥の間に成り立つ関係式を求め、非可逆トポロジカル欠陥の期待値をいくつかのトポロジーで求めた。また我々は理論が境界を持ち、その境界に非可逆対称性の欠陥の端が接続されることを考えた。そして我々は境界上を滑らかに動かすことのできる非可逆トポロジカル欠陥の端を構成し、それらを用いて境界条件の異なる分配関数間の比を求めた。4次元の理論では、半球分配関数は繰り込み群の流れに沿って単調増加するため、この結果は繰り込み群の流れに制限を与える。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (小 出 真 嵩)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 大野木 哲也
	副 査	教授 西岡 辰磨
	副 査	准教授 山口 哲
	副 査	准教授 湯川 論
	副 査	助教 深谷 英則

論文審査の結果の要旨

博士論文「Non-invertible symmetry in 4-dimensional Z_2 lattice gauge theory」の論文審査結果の要旨は次のとおりである。

小出氏の研究は、近年大きく発展している「非可逆対称性」に関するものである。場の理論において、対称性は概念上も実用上も非常に重要な役割を果たしている。近年、対称性のある種のトポロジカル欠陥と見ることにより、対称性の概念が拡張され「一般化対称性」と呼ばれて研究されてきた。一般化対称性のうちで群構造を持たないものが「非可逆対称性」である。

従来、非可逆対称性は主に2次元で研究され、興味深い結果をたくさん出してきた。しかし、素粒子論で興味がある4次元の場の理論では非可逆対称性はほとんど研究されていなかった。特に4次元の中で3次元のトポロジカル欠陥で表される非可逆対称性が存在するかどうかは、重要な未解決問題であった。

小出氏の研究では、4次元の場の理論で非可逆対称性を表す3次元のトポロジカル欠陥の例を初めて作り、上の未解決問題を解き、さらにはこの対称性の代数構造を明らかにするなど、4次元での非可逆対称性の研究を大きく進めたものである。この研究は、2次元の格子 Ising 模型で Aasen, Mong, Fendley によって開発されたものと同様の手法を、4次元の Z_2 格子ゲージ理論に適用したものである。この研究は世界中の多くの研究者に大きな影響を与え、ここから高次元の非可逆対称性の研究が大きく発展することにつながった。

小出氏のもう一つの研究は、4次元で新しく発見した非可逆対称性の応用の一つである。半球上の場の理論の分配関数は g 関数と呼ばれ、繰り込み群の流れの方向を示す重要な量の一つになっている。この研究では、非可逆対称性を用いることにより、 g 関数の比が厳密に求まることを示した。これは、繰り込み群の流れの可能性の一部を排除する。この研究成果も、今後の非可逆対称性の応用において重要な役割を果たす結果である。

小出氏のこれらの研究は、高次元の非可逆対称性の可能性を切り開く革新的な研究であり、世界中の研究者に大きな影響を与えた。よって、博士(理学)の学位論文として十分価値のあるものと認める。