



丸文研究
奨励賞
受賞者

小澤 知己

東北大学 材料科学高等研究所 准教授

人工次元の提案など トポロジカルフォトンクスへの理論的貢献 次元とトポロジーの制御を通じて光を操る

研究の背景

固体電子系における量子ホール効果の発見から、一口にバンド絶縁体といっても波動関数の「トポロジー」が異なるさまざまなものが存在することがわかってきた。ここで波動関数のトポロジーとは、「波動関数が波数空間で何回ねじれているのか」という波動関数の形を数学的に記述したものである。波動関数のトポロジーは非常に抽象的な概念だが、その影響が試料端を通じて観測可能だということがトポロジカル絶縁体の驚くべき性質である。例えば量子ホール効果では、ホール電流はトポロジーに由来する試料の端を流れる電流であり、したがってホール伝導度がトポロジーと関係する。このように波動関数のトポロジーが試料端・表面のモードと関係する現象を「バルク・エッジ対応」と呼ぶ(図1)。

絶縁体の概念は電子系特有のものだが、バルク・エッジ対応、つまり波動関数のトポロジーと試料端を流れるモードの存在の間の関係は古典電磁波などの古典的な波

においても成り立つ。このことを見抜いたのがプリンストン大学のHaldaneとRaghuである[1]。波動関数の「ねじれの回数」などのトポロジーは、物質に多少の不純物・不規則性が入っても変わらない安定な性質で、バルク・エッジ対応や表面モードの存在は表面の詳細には依存せずに現れる。トポロジーに由来する安定な性質を使えば、フォトンクスにおいて面白い現象やデバイスへの応用が見られるのではないかと、ということでトポロジカル・フォトンクスという研究分野が生まれた。

研究の成果

私は2013年頃からトポロジカル・フォトンクスの理論研究を行ってきた。特に、固体電子系では見ることの難しいフォトンクス特有のトポロジカルな現象の探究に努めてきた。以下で、私の研究の中から人工次元を用いたフォニック・バンド構造の制御について詳しく説明し、次にフォトンクス特有のトポロジカル現象で私が見つけたその他のもの

についても簡単に触れる。

1. 人工次元フォトンクス

私たちは3次元空間に生きている(時間を含めて4次元、と言う場合もあるが、ここでは空間次元に限ることとする)。人工次元というのは、空間次元ではない別の自由度(例えば粒子のスピンや角運動量など)を次元のように使ってバンド構造を制御する方法のことである。人工次元はもともと極低温に冷やした原子の集団で原子のスピンを次元として1次元格子にスピン自由度1次元を足して2次元の物理現象を見る方法として2014年に提案された[2]。

私は2016年に光の共振器のモードの自由度を次元として使う方法を提案した[3]。これはフォトンクスにおける人工次元提案の最初期のものである。共振器とは光を安定的に閉じ込めておく構造だが、一般に周波数上おおよそ等間隔に並ぶ複数の固有モードを持つ。共振器の屈折率を固有モード間の周波数間隔と等しい周波数で変調させると、光が一定の確率で一つの固有モードから上下の別の固有モードへと遷移する。この上下のモードへの遷移が、モード方向を次元として光が「動いて」いるように見える。これを使えば空間方向1次元+モード方向1次元の人工的な2次元空間で整数量子ホール効果のような状況を実現できる(図2)。人工次元は実験室で4次元や5次元などの高次元でしか起きない現象を観察する手段も与え、フォトンクスでの基礎・応用科学の研究の可能性を大いに広げることになった。

フォトンクスにおける人工次元の研究はその後理論・実験の両面から急速に進展している[4]。特に、2019年にスタンフォード大学のグループが光のモード自由度を用

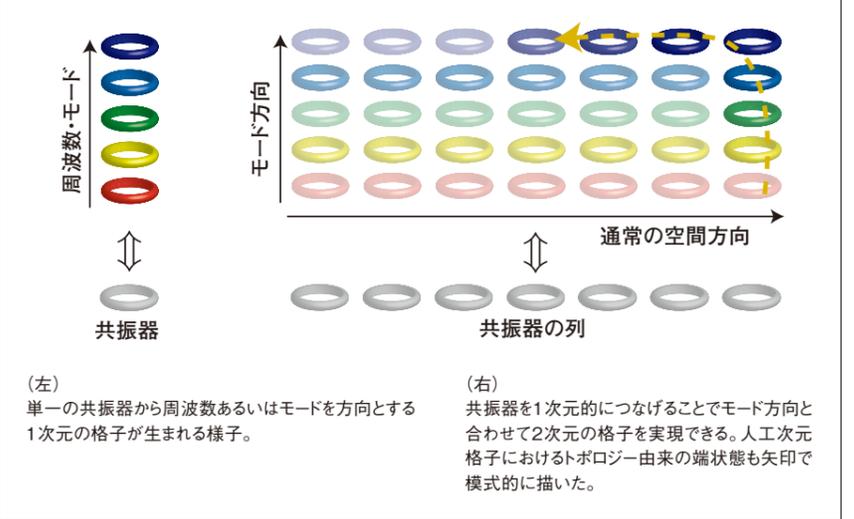
いた人工次元の最初の実験に成功して以来[5]、さまざまな人工次元模型が実現されている。私自身、横浜国立大学・東京大学・慶應大学との共同研究でシリコン・フォトンクスにおいて世界で初めて人工次元を実現する実験にも参加した[6]。もともと人工次元はトポロジカル・フォトンクスとの関連で提唱したものだが、今後はフォニックバンド構造の制御という、より広い観点から研究が進んでいくのではないかと考えている。

2. その他のトポロジカル・フォトンクスの現象

電子系とフォトンクスの大きな違いとしてフォトンクスではしばしば散逸による光子のロスが無視できないことが挙げられる。電子系で初めて見つかったトポロジカルな現象は整数量子ホール効果だが、ホール伝導度の量子化という現象自体は散逸があるとそのままでは見えない。私は、散逸があっても連続的な励起下での定常状態における応答を通じてホール伝導度の量子化に対応する現象が観測可能であることを見つけた[7]。他にも、変調下における応答を見ることでトポロジーと密接に関係した幾何学的効果を実験的に観測可能だということを理論的に示し[8]、実験家との共同研究でそれを確認することにも成功した[9,10]。特に量子計量と呼ばれる幾何学的性質は私の理論提案を用いた実験で初めてその効果が直接確認された。

私自身は理論の研究者だが、上に書いたように実験家との共同研究も多数行ってきた。2017年にはフランスの実験家がトポロジカル・レーザー(トポロジーに由来する表面状態から発振するレーザー)を初めて実現した実験にも参加した[11]。トポロジカル・レーザーはトポロジカルな性質

図2 人工次元の模式図



の安定性を使って単一モードから安定的に発振できる見込みがあり、世界中で研究が進んでいる。

将来の展望

急速に発展しているトポロジカル・フォトンクスの現状を包括的にまとめたレビューがあれば便利だろうということで、2019年にトポロジカル・フォトンクスの研究者総勢11人でレビューを書いた[12]。幸い出版後これまでに非常に多くの方々から引用してもらっており、苦勞して書いた甲斐があったと嬉しく思っている。レビュー発表からもう5年ほど経

つが、その間の研究の進展も目覚ましく、非線形性とトポロジカル・フォトンクスの融合分野や、非エルミート量子力学の進展、高次トポロジカル絶縁体の概念の発展など枚挙にいとまがない。基礎的な研究にとどまらず、トポロジカル・フォトンクスは応用の可能性も積極的に検討されている。トポロジカルな性質を用いた散逸の少ない光導波路や光アイソレータの開発なども実現に向けて着実に研究が進んでおり、また、トポロジカル・レーザーもさまざまな種類のもので実現してきている。今後、トポロジカル・フォトンクスがどのように発展していくのか、非常に楽しみである。

References(参考文献)

- [1] Haldane & Raghu, Phys. Rev. Lett. 100, 013904(2008).
- [2] Celi, Massignan, Ruseckas, Goldman, Spielman, Juzeliūnas, & Lewenstein, Phys. Rev. Lett. 112, 043001(2014).
- [3] Ozawa, Price, Goldman, Zilberberg, & Iacopo Carusotto, Phys. Rev. A 93, 043827(2016).
- [4] Ozawa & Price, Nature Reviews Physics 1, 349-357(2019).
- [5] Dutt, Minkov, Lin, Yuan, Miller, & Fan, Nature Communications 10, 3122(2019).
- [6] Balčytis, Ozawa, Ota, Iwamoto, Maeda, & Baba, Science Advances 8, eabk0468(2022).
- [7] Ozawa & Carusotto, Phys. Rev. Lett. 112, 133902(2014).
- [8] Ozawa & Goldman, Phys. Rev. B 97, 201117(R)(2018).
- [9] Asteria, Tran, Ozawa, Tarnowski, Rem, Fläschner, Sengstock, Goldman, & Weitenberg, Nature Physics 15, 449-454(2019).
- [10] Yu, Yang, Gong, Cao, Lu, Liu, Zhang, Plenio, Jelezko, Ozawa, Goldman, & Cai, National Science Review 7, 254-260(2020).
- [11] St-Jean, Goblot, Galopin, Lemaître, Ozawa, Le Gratiet, Sagnes, Bloch, & Amo, Nature Photonics 11, 651(2017).
- [12] Ozawa, Price, Amo, Goldman, Hafezi, Lu, Rechtsman, Schuster, Simon, Zilberberg, & Carusotto, Rev. Mod. Phys. 91, 015006(2019).

図1 バルク・エッジ対応の模式図

