

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05857・19K21042

研究課題名(和文)冷却原子系における高次元物理現象の理論研究

研究課題名(英文) Theoretical study of high dimensional physical phenomena in ultracold atomic gases

研究代表者

小澤 知己 (Ozawa, Tomoki)

国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・客員研究員

研究者番号：80825993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：新しい人工次元の提案を行った。この提案では、ナノマグネットと結合したメソスコピックリングにおいて、リング中の電子の運動の自由度とナノマグネットのスピン自由度を用いて二次元の磁場中の荷電粒子と同等の状況を作れることを示し、トポロジカルエッジ状態が永久電流として観測可能であることを示した。また、冷却原子系において多体系や不純物系でトポロジーや幾何学的構造を測定する方法も提案し、多体の幾何学的構造が局在と関連していることも指摘した。他にも、人工次元についての総説も執筆した。また、実験家と協力し、励起子ポラリトンやダイヤモンドNV中心におけるトポロジー・幾何学的構造の観測も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低次元系で高次元物性を調べる人工次元の方法は、凝縮系物理の適用範囲を格段に広げ、凝縮系物理が今後切り拓くべき新たな地平を与える。本研究では、冷却原子を中心に研究されてきた人工次元をメソスコピック系という電子系に適用範囲を広げること成功している。電子系という凝縮系物理のメインテーマに人工次元を導入することで、今後より多くの研究者が人工次元に参入する下地を与えることができたのではないかと考えている。また、人工次元に関する初めての包括的総説を書いたが、これによってより多くの研究者が人工次元研究に参入する障壁を低くすることに貢献できたのではないかと考えている。

研究成果の概要(英文)：I proposed a new method to realize synthetic dimensions. In this proposal, I showed that electrons in a mesoscopic ring coupled to a nanomagnet are equivalent to charged particles in a two dimensional plane with a magnetic field. I also showed that related topological edge states can be observable as a persistent current through the ring. I also proposed, in ultracold atomic setups, a method to measure topological and geometrical properties in many-body and disordered systems. I also pointed out that many-body geometric structure is related to localization of quantum states. I also wrote a review on synthetic dimensions. Finally, I also had collaborations with experimentalists, in which we measured topological and geometrical properties of quantum states in exciton-polaritons and diamond NV centers.

研究分野：凝縮系理論

キーワード：冷却原子系 人工次元 人工量子系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

冷却原子系とは極低温の気体状態の原子をレーザーを用いて真空中にトラップした系であり、外部から照射するレーザーや磁場を調節することによって様々なハミルトニアンを実現して多体物理の研究をすることができる。この冷却原子系で近年盛んに研究されているのが「人工次元 (synthetic dimension)」である。これは、原子の内部自由度、例えばスピンを有効的に空間次元として用いて高次元の模型を低次元の物理系でシミュレートする方法である。内部自由度を次元としてみなすためには、原子がその方向に動けるようにしなければならない。これはスピンの場合ではスピン量子数が一定確率で変化するということである。このような内部自由度が変化するプロセスが許される状況では、内部自由度方向があたかも格子状の(離散的な)空間次元のように振る舞うため、高い次元のハミルトニアンをシミュレートできる。人工次元方向へのカップリングを自在に調節できることから、人工次元は特にトポロジカルな格子模型をシミュレートすることに有効であり、トポロジカル物性を研究する新たなプラットフォームを与えている。人工次元研究は現在急速に進展しており、様々な系での人工次元の方法の提案や、人工次元に特徴的なトポロジカル物性の探究などが精力的に行われてきた。しかし、従来の人工次元の方法は相互作用の扱いが難しかったり、人工次元の長さがしばしば短かったりといった難点もあった。また、人工次元を用いた高次元物性へのアプローチはまだ始まったばかりだというのが研究開始における背景である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、冷却原子系をメインテーマに人工次元を用いて高次元の物理現象を研究することである。本研究は大きく分けて二つの目標を持つ。一つ目は、新しい人工次元の方法を提案することである。従来の人工次元の方法の難点を克服できる方法や、また、今までの人工次元にはなかった新しい特徴を持つ人工次元の方法を提案することで高次元物性研究に新たなツールを与えたい。二つ目の目標は、人工次元に特徴的な高次元物理現象を調べることである。これは、4次元模型など通常3次元空間でシミュレートすることが難しい現象を調べるだけでなく、3次元以下の模型であっても人工次元を通じて実現することで通常の次元の下では見えないものを見ることも射程に入れている。

### 3. 研究の方法

本研究は理論的研究を主軸に据えている。特に、解析的に新しい人工次元の方法を提案したり、新奇な物理現象を調べることに並行して、人工次元を用いた状況をモデル化したハミルトニアンの厳密対角化など数値的手法も用いて研究を進めていく。

また、実験家との共同研究も積極的に行い、人工次元や冷却原子系のトポロジカル現象の実験の実現に理論的観点から貢献する。

### 4. 研究成果

(1) メゾスコピック系での人工次元の提案[Price, Ozawa, and Schomerus, arXiv:1907.04231]

メゾスコピックリング中の電子がリング中央に置かれたナノマグネットと相互作用する状況において、ナノマグネットのスピンを人工次元とみなせる提案を行った。本研究課題のメインテーマは冷却原子系であり、当初は冷却原子系で実現するための人工次元の方法を探っていた。しかし、メゾスコピック系において人工次元をより自然に実現できることに気づき、メゾスコピック系の研究としてまとめることになった。本研究について以下少し詳しく述べる。

ナノマグネットを囲むようにメゾスコピックリングが存在する状況を考える。リング中の電子はナノマグネットの作る磁場を感じるという形で両者は相互作用をする。電子間相互作用を無視すれば系のハミルトニアンは

$$H = \frac{1}{2M\rho^2} (-i\nabla_\varphi - \gamma S_z)^2 + \alpha S_x^2 + \beta S_y$$

という形をとる。ここで、 $M$ は電子の質量、 $\rho$ はリングの半径で、 $\nabla_\varphi$ はリングの角度方向への微分演算子である。 $S_i$ はナノマグネットに関する*i*方向のスピン演算子である。リングがxy平面内にあるとき、ナノマグネットの作る磁場はリング中の電子の軌道運動量とminimal couplingする形で上記のようにハミルトニアンに入る。ここで、ナノマグネットのスピンを人工次元とみなすと、電子の軌道運動量とナノマグネットの作る磁場が結合した上記のハミルトニアンは、人工次元方向の位置に比例したベクトルポテンシャルが存在しているように見える。これはすなわち、ランダウゲージで2次元磁場中のハミルトニアンを表示していることと等価である。一方、ハミルトニアンの最後の二項は人工次元方向へのホッピングと捉えることができる。以上のように、電子自体は一次元リング上を動き、ナノマグネット自体は空間的には(回転の自由度を除き)ピン留めされているにもかかわらず、ナノマグネットのスピンを人工次元とみなすことで2次元磁場中の粒子のハミルトニアンが実現されていることになる。この人工次元の方法のユニークな点は、リング方向には連続的な空間次元が存在する一方、人工次元方向には離散的な点である。同様の人工次元を用いた連続・離散ハイブリッド空間でのトポロジカルな模型については私自身の光共振器での2017年の先行研究が存在する。

本論文では、この模型が実際にトポロジカルに非自明であることを2次元のトポロジカル数

である Chern 数を具体的に計算することで示している。Chern 数は、低エネルギーバンドについては全て 1 である。実空間の次元についてはリングであるためエッジは存在しない。しかし、人工次元はスピンであるため、ナノマグネットのスピンの下限と上限が自然なエッジとして存在する。この人工次元方向のエッジに局在したトポロジカルエッジ状態が存在し、Bulk-edge correspondence からわかるように低エネルギーバンドについては一つのバンドについて一つのエッジ状態が存在する。また、本論文ではナノマグネットとは独立に別の外部磁場を系に印加した場合、トポロジカルエッジモードが系の基底状態となってリング上に永久電流となって流れ得ることを示した。

また、本提案を多体系に拡張すると、電子間相互作用が相対位置にのみ依存するような（通常の）状況下では電子の重心位置が上述の一粒子のハミルトニアンと本質的に同じもので記述され、重心に着目する限り永久電流やエッジモードの存在は変更を受けないことも証明している。

本提案は人工次元を用いることでトポロジカルエッジモードと永久電流の存在を結びつける新しい試みである。一次元リング上の粒子や、そこでの永久電流状態は冷却原子系でも観測されており、本提案を今後は冷却原子系に適用していくことも視野に入れている。

(2) 冷却原子系でトポロジー・幾何学的構造を調べるための新しい方法の提案 [Ozawa and Goldman, Phys. Rev. Research 1, 032019(R) (2019)]

人工次元を用いて高次元トポロジカル模型を実現した場合、それをどのように観測するのか、というのは重要な問題である。本論文では、冷却原子系の文脈で、多体系や不純物系でトポロジーと幾何学的構造を観測する方法の理論的な提案を行った。本論文では、系に時間周期的摂動を加えたときの、系が初期状態から変化する確率がまさに多体のトポロジー・幾何学的構造を反映しているということを示した。ここで、幾何学的構造とは、系に（理論的に導入された）ひねり境界条件をパラメータ空間とし、そこでの量子状態の変化を調べたものである。特に、量子計量と呼ばれる幾何学的構造は系の局在と関係していることも示した。具体例として、冷却原子系で実現可能な 3 つの例（一次元 Anderson 模型、Su-Schrieffer-Heeger 模型、調和振動子型ポテンシャル中の相互作用する二粒子）を考え、これらの系の数値シミュレーションを行い、量子計量の測定から系の局在に関する情報を引き出すことができることを確認した。

(3) 人工次元を用いたトポロジカル模型に関する総説 [Ozawa and Price, Nature Reviews Physics 1, 349-357 (2019)]

人工次元を用いたトポロジカル物性の研究に関する総説を書いた。これは、私の知る限り人工次元に関する包括的な総説としては初めてのものである。この総説では、冷却原子系を始めとする様々な人工量子系における人工次元の実現方法の説明から始め、人工次元特有の多体現象や、高次元トポロジカル現象観測の可能性についてまで幅広い話題をカバーしている。本総説は今後の人工次元研究の一つの視点を与えるものになると期待している。

(4) 実験家との共同研究（励起子ポラリトン） [Milićević, *et al.*, Phys. Rev. X 9, 031010 (2019); Jamadi *et al.*, arXiv:2001.10395; Real *et al.*, arXiv:2004.03478]

フランスのリール大学および CNRS の実験家と共に、励起子ポラリトンのトポロジーに関する実験にいくつか参加した。励起子ポラリトンを蜂の巣格子の上に作って様々な物性を考えることで、蜂の巣格子由来のグラフェンに似た各種現象が観測できる。特に、蜂の巣格子の格子間隔を一方だけ変えることで蜂の巣格子由来のディラック分散を変化させて一方にはフラットな分散が生まれるタイプ III ディラック分散というトポロジカルな分散を作り、その観測に成功した。このような異方性のあるディラック分散に従う粒子に特有の異方的な輸送現象の観測にも成功している。また、格子間隔を一方に徐々に大きくさせると、ディラック分散の付近で磁場がかかるのと似た効果（擬磁場）が現れ、それに対応するランダウ準位を観測することにも成功した。

(5) 実験家との共同研究（ダイヤモンド NV 中心） [Yu *et al.*, National Science Review 7, 254-260 (2020); Liu *et al.*, arXiv:2003.08373]

ダイヤモンド NV (Nitrogen-Vacancy) 中心とは、ダイヤモンド内に炭素が一つ欠乏 (vacancy) し、その隣の炭素が窒素 (nitrogen) に置き換わっているような場所のことである。このような欠陥はダイヤモンド内で安定に存在することができ、また、そこにトラップされた電子が非常に性質の良い量子ビットとして使えることから様々な研究が行われている。私は、中国の華南科技大学の実験グループやベルギーの理論家とともに、ダイヤモンド NV 中心にトラップされた量子ビットのプロット球上でのトポロジーや幾何学的構造の測定の実験に参加した。特に、量子計量という幾何学的構造は、純粋状態の量子フィッシャー情報量と密接に関係しており、量子推定における推定の不確定性に関する不等式であるクラメール・ラオ限界に顔を出す。本実験ではクラメール・ラオ限界の実験的確認にも成功している。

以上の (4) と (5) の実験は冷却原子ではないが、人工量子系として似た部分が多い。これらの系での知見をもとに、冷却原子系の人工次元とトポロジーの研究のさらなる発展に資したいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ozawa Tomoki, Price Hannah M.	4. 巻 1
2. 論文標題 Topological quantum matter in synthetic dimensions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Reviews Physics	6. 最初と最後の頁 349 ~ 357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1038/s42254-019-0045-3">https://doi.org/10.1038/s42254-019-0045-3</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Milicevic M., Montambaux G., Ozawa T., Jamadi O., Real B., Sagnes I., Lemaitre A., Le Gratiet L., Harouri A., Bloch J., Amo A.	4. 巻 9
2. 論文標題 Type-III and Tilted Dirac Cones Emerging from Flat Bands in Photonic Orbital Graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 31010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.031010">https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.031010</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ozawa Tomoki, Goldman Nathan	4. 巻 1
2. 論文標題 Probing localization and quantum geometry by spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 032019(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.1.032019">https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.1.032019</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Yu Min, Yang Pengcheng, Gong Musang, Cao Qingyun, Lu Qiuyu, Liu Haibin, Zhang Shaoliang, Plenio Martin B., Jelezko Fedor, Ozawa Tomoki, Goldman Nathan, Cai Jianming	4. 巻 7
2. 論文標題 Experimental measurement of the quantum geometric tensor using coupled qubits in diamond	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 National Science Review	6. 最初と最後の頁 254 ~ 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/nsr/nwz193">https://doi.org/10.1093/nsr/nwz193</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Ota Yasutomo, Takata Kenta, Ozawa Tomoki, Amo Alberto, Jia Zhetao, Kante Boubacar, Notomi Masaya, Arakawa Yasuhiko, Iwamoto Satoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Active topological photonics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 547 ~ 567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0376">https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0376</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Topological photonics with synthetic dimensions
3. 学会等名 Recent Advances in Topological Photonics, PCS IBS, Daejeon, South Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Topological and geometrical effects in the bulk Hall response of driven-dissipative photonic lattices
3. 学会等名 2019 Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO / Europe-EQEC), Munich, Germany (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 (Revisiting) ultracold Bose gases with Rashba spin-orbit coupling
3. 学会等名 Workshop on Quantum Mixtures and celebration of the 70th anniversary of Sandro Stringari, Trento, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Theory and experiment of multi-orbital photonic graphene
3. 学会等名 Workshop on Topological Photonics and Beyond 2019, Tianjin, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Probing quantum geometry and localization through periodic driving
3. 学会等名 Bose-Einstein Condensation 2019, Sant Feliu de Guixols, Spain (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Probing topology and geometry through periodic shaking in ultracold atomic gases and beyond
3. 学会等名 The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Probing topology, geometry, and localization through fluctuation-dissipation theorem in ultracold atomic gases and beyond
3. 学会等名 East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2019, Chinese Academy of Science, Institute of Physics, Beijing, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Non-Hermitian topology in active nematics
3. 学会等名 Topological phenomena in non-Hermitian and non-equilibrium systems, Tohoku University, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa, Nathan Goldman
2. 発表標題 冷却原子系における時間周期的変調を用いた局在および多体の量子幾何テンソルの理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Theory and experiment of multi-orbital photonic graphene
3. 学会等名 Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts [ BEC2018X ], University of Tsukuba Tokyo Campus, Tokyo, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Topology and Chiral Physics in Atomic, Molecular, and Optical Systems
3. 学会等名 Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology, National Taiwan University, Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 トポロジカル・フォトニクスとトポロジカル・レーザー
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 シンポジウム講演（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 トポロジカル・レーザーの進展
3. 学会等名 非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象、京都大学基礎物理学研究所（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考