



TITLE:

TOPOLOGICAL PHASES OF COLD ATOMS IN OPTICAL SUPERLATTICE(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Matsuda, Fuyuki

CITATION:

Matsuda, Fuyuki. TOPOLOGICAL PHASES OF COLD ATOMS IN OPTICAL SUPERLATTICE. 京都大学, 2020, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2020-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22824>

RIGHT:

Ch. 3: Topological Properties of Ultracold Bosons in One-Dimensional Quasiperiodic Optical Lattice. Fuyuki Matsuda, Masaki Tezuka and Norio Kawakami. J. Phys. Soc. Jpn. 83, 083707 (©2014 The Physical Society of Japan) <https://journals.jps.jp/doi/10.7566/JPSJ.83.083707>; [58]より図を引用。[58] Topological Equivalence between the Fibonacci Quasicrystal and the Harper Model. Yaacov E. Kraus and Oded Zeitlinger. Phys. Rev. Lett. 109, 116404 (© 2012 American Physical Society) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.116404>; Ch. 4: Two-Dimensional Thouless Pumping of Ultracold Fermions in Obliquely Introduced Optical Superlattice. Fuyuki Matsuda, Masaki Tezuka, and Norio Kawakami. J. Phys. Soc. Jpn. 89, 114708 (©2020 The Physical Society of Japan)

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	松田 冬樹
論文題目	TOPOLOGICAL PHASES OF COLD ATOMS IN OPTICAL SUPERLATTICE 光格子系中の冷却原子系におけるトポロジカル相		
(論文内容の要旨)			
<p>近年の冷却原子系の実験の目覚ましい発展により、固体系では実現が難しい系のシミュレーションが可能になった。冷却原子系は、セットアップの自由度が高く、系の状態の測定方法も多様であるという特徴がある。このような冷却原子系では多くの興味深い相が実現されており、その一つにトポロジカル相がある。波動関数の幾何学的性質が輸送現象と結びついたトポロジカル相は、近年、理論的にも実験的にも活発に研究されている。このような背景から、本研究では冷却原子系で実現可能な2種類のトポロジカル相の研究を行った。</p> <p>[1]まず、準周期的ポテンシャルを持つ1次元Bose-Hubbardモデルのトポロジカルな性質を解析した。この系は、準周期的ポテンシャルを加えた光格子に相互作用する冷却ボズンを導入することで実現できる。まず、余弦関数で与えられる準周期格子ポテンシャルを持つHarperモデルの解析を行った。その結果、相互作用の大きさUを変えることでトポロジカル相転移が起こり、Uが大きい領域で非自明なトポロジカル数$C=1$を持つ相が実現すること示した。また、Uが十分大きい領域で原子数を変化させると、原子数密度分布に、系の端に局在した構造が現れることを示した。さらに、Harperモデルともう一つの重要な準周期モデルであるFibonacciモデルとの間を連続的に変形できるモデルを考え、Uが大きい場合、両者がトポロジカルに等価であることを示した。さらに、相互作用Uと連続変形パラメータβを変えたときの相図を調べた。その結果、Incommensurate Charge Density Wave (ICDW)相がトポロジカルに非自明な状態であり、ICDW相全体がトポロジカルに等価であることを数値的に確認した。</p> <p>[2]2次元版のThoulessポンプを提案した。具体的には、2次元正方格子に斜めに超格子ポテンシャルを導入したtight-bindingモデルを考え、この系では量子化されたポンプが起こり、そのポンプ量はDiophantos方程式の解として表されることを示した。このトポロジカルな性質は、元の2次元モデルを一様な磁場を持つ3次元立方格子モデルに対応付けることで理解できる。また、斜めに超格子を導入した連続体モデルを提案し、Berry曲率を計算してポンプ量を求めた。このモデルでは、平面波近似を用いて同じDiophantos方程式を導出することができる。さらに、時間依存シュレディンガー方程式を解くことで、調和型トラップの効果を調べた。調和型トラップ下では、超格子ポテンシャルの時間周期Tを変化させると、Tが小さすぎる場合にはポンプが十分に行われず、逆にTが大きすぎる場合には調和型トラップの影響が大きくなりポンプ量の量子化が不明瞭になることを数値シミュレーションによって示した。しかし、Tがその中間領域内にある場合には、ほぼ量子化されたポンプが起こり、ポンプ量のプロットにプラトーが現れることを示した。このポンプ量が前述のDiophantos方程式の解に対応している。また、超格子ポテンシャルの振幅に応じて、Hofstadter領域と整流領域の2つの領域が現れることを見いだした。振幅が大きい整流領域では、ポンプされる方向がx軸方向かy軸方向に限定されていることを見出した。この2つの領域はクロスオーバーで結びついており、これがトラップの効果を特徴づけることを示した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

冷却原子気体の系は、量子物性物理において固体電子系と双璧をなす重要な舞台であり、物性物理で重要なモデルを実験的に解明するための量子シミュレータとしても注目を浴びている。冷却原子系では相互作用の強さや格子の幾何学的構造も調節可能であるため、新奇なセットアップが数多く提案され、実験的にも理論的にも盛んに研究が行われている。松田氏は、近年の冷却原子系におけるトポロジカルポンプ現象の実験的進展を背景に、相互作用の影響と格子の幾何学的構造が生み出す新たな量子現象を実現するための理論的提案を行い、それをもとに冷却原子系におけるトポロジカル相の持つ性質の一端を明らかにした。本論文は、[1]1次元準周期光格子中の冷却ボソンによるトポロジカル相、[2]斜めに導入された光超格子中の冷却フェルミオンによる2次元Thoulessポンプ、の2つの研究に基づいている。以下に各項目に分けて記述する。

[1]では、準周期ポテンシャルを持つ1次元系に着目し、Bose-Hubbard模型に準周期ポテンシャルを加えた場合に現れるトポロジカル相について調べた。厳密対角化および密度行列くりこみ群(DMRG)を用いて数值的に解析を行い、相互作用 U が大きい領域ではトポロジカルに非自明な状態になることや、原子数密度分布において系の端に局在した構造が現れることを示した。また、HarperモデルとFibonacciモデルの2種類の準周期ポテンシャルで記述される系が、ギャップを閉じないで互いに移り変わることが出来ることを示し、そのトポロジカルな等価性を示した。さらに、超流動密度の数値計算を行うことで、相互作用の大きさ U と連続変形パラメータ β の関数として基底状態の相図を明らかにした。

[2]では、2次元正方格子系に対して斜めに超格子ポテンシャルを加えることで2次元サウレスポンプが実現可能な系を提案した。そのトポロジカルな性質は、一様磁場中の3次元立方格子系と対応付けることでより明確に理解出来ることを示した。理論的な解析により、この系におけるポンプ量はあるDiophantos方程式に従うことを明らかにした。格子模型、連続体模型の両方について数値解析を行い、いずれも前述のDiophantos方程式で記述されることを示した。また、調和型トラップ下で時間依存シュレディンガー方程式を解くことで、トラップの影響を解析した。その結果、超格子ポテンシャルを動かす際の時間周期が適切な領域でポンプ量が量子化され、プラトー構造が現れることを明らかにした。さらに、超格子ポテンシャルの振幅に応じて、ポンプされる方向が異なるHofstadter領域と、一方向のみに限定される整流領域の2つの領域が現れ、その間にはクロスオーバーが起きることを示した。

以上の結果は、いずれも冷却原子気体の最新の実験結果に基づき、その可能性をさらに広げるための理論的基礎を与えるものと考えられる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年9月30日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。