

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13480

研究課題名（和文）光超格子中の冷却原子系を用いた相互作用誘起トポロジカル相転移の研究

研究課題名（英文）Interaction-induced topological phase transition of ultracold atoms in an optical superlattice

研究代表者

中島 秀太（Nakajima, Shuta）

京都大学・白眉センター・特定准教授

研究者番号：70625160

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、1). 相互作用可変な極低温リチウム(Li)原子系の構築、及び2). Thouless量子ポンプ(TQP)に対する相互作用の効果の検証の2つを目標とした。

1)については超高真空系の構築及びLi原子の2次元磁気光学トラップが完了し、冷却Li原子実験の舞台が整った。2)については光格子中のイッテルビウム原子を用いたTQP系において相互作用の効果进行研究し、相互作用に由来すると思われる小さなポンプ量の変化を観測した。さらに近年「乱れ」により誘起される非自明なトポロジカル相が注目されており、我々の系においてもそのような研究を行ない、「乱れ」により誘起される非自明なポンプ系を実験的に見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相互作用がない場合のトポロジカル量子現象については近年その分類や解明が進んだが、強い乱れや相互作用により誘起されるトポロジカル量子現象の研究はまだ発展途上である。我々は光格子中の冷却原子系を用いたトポロジカル量子ポンプ系において、「乱れ」により誘起される非自明なポンプ系を実現したが、これは乱れ誘起トポロジカル量子現象を実験的に構築する手法を見出したという点で学術的意義がある。また一般にトポロジカル量子現象は摂動に対して堅牢で、量子ホール抵抗のような量子標準技術への応用があるが、新しいクラスのトポロジカル量子現象の実現は、そうした新しいタイプの量子デバイスの開発にもつながりうると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we aimed to (1). construct a system of ultracold lithium (Li) atoms with tunable interactions and (2). verify interaction effects on the Thouless quantum pumping (TQP).

For (1), we constructed an ultra-high vacuum chamber setup and realized the two-dimensional magneto-optical trapping of Li atoms. Thus, we have finished the construction of the platform for the future ultracold Li atom experiments. For (2), we studied the interaction effect on a TQP system with ytterbium atoms in an optical lattice and observed a small change in the pumping amount due to the interaction. In addition, the non-trivial topological phase induced by disorder has attracted much attention recently. Therefore, we have investigated such a study in our setup and experimentally found a disorder-induced non-trivial pumping sequence.

研究分野：冷却原子実験

キーワード：冷却原子 光格子 光超格子 トポロジカル量子系 フェッシュバツハ共鳴 量子相転移 乱れ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、物性物理において、量子ホール効果を代表例として、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超流動など「トポロジー」の概念がますます重要になってきている。この10年で、相互作用や乱れが無視できる系における「トポロジカル量子現象」についてはその分類や解明が進んだ一方で、強い相互作用や乱れが本質的な寄与をするトポロジカル量子現象の研究は、分数量子ホール効果や、最近のトポロジカル Anderson 絶縁体の研究など個々に進展はあるものの、その分類や包括的な理解に向けた研究は理論・実験ともに発展途上である。

こうしたトポロジカル量子現象の研究対象としては、これまで固体電子系での研究が主流であったが、最近その高い制御性から冷却原子系（レーザー冷却技術により量子縮退領域まで冷却された希薄な原子気体）が新たな研究対象として注目されるようになってきた。特に2010年代には、電気的に中性である冷却原子系に対しても、「人工ゲージ場」を導入するなどにより、整数量子ホール効果と同様なトポロジカル量子現象が観測されるようになった。そうした中で我々は、光格子（レーザーの定在波で構築された冷却原子系に対する周期ポテンシャル）中の冷却イッテルビウム（Yb）原子系を用いて「Thouless 量子ポンプ」の実現・観測に世界で初めて成功した（S. Nakajima *et al.*, Nat. Phys. (2016)）。ここで「Thouless 量子ポンプ（以下、TQP）」は、D. J. Thouless が1983年に考案した1次元周期ポテンシャルの断熱的周期駆動により実現される量子輸送系であり、この系において「ポンプサイクル1周期あたりに輸送される原子の量（=ポンプ量）」はこの系のバンドのトポロジカル不変量（Chern 数）で与えられ量子化される。つまり、整数量子ホール効果が空間2次元の周期系において Chern 数で記述されるトポロジカル量子現象であるのに対して、TQP はその「空間1次元+時間1次元（(1+1)次元）」での対応物となっており、この系は、冷却原子系を用いたトポロジカル量子現象の新しい研究対象として注目を集めている。

### 2. 研究の目的

背景で述べたように、強い乱れや相互作用が本質的な寄与をするトポロジカル量子現象の研究は、数値計算も難しく発展途上である。しかしこの TQP 系は空間的には1次元であり、DMRG など相互作用を含む数値計算もある程度可能であることから、理論的な研究対象として注目を集めている。また我々が光格子中の冷却 Yb 原子系で実現した TQP 系は、相互作用がない場合は「Rice-Mele 模型」と呼ばれるトポロジカル量子系の研究ではよく知られるモデルに対応させることができるため、理論との比較も行ないやすい。特に、この Rice-Mele 模型と関連もある Ionic Hubbard 模型では、図1に示したように光超格子の副格子間のエネルギーオフセット $\Delta$ に対して、異種スピン間のオンサイトの斥力相互作用 $U$ が十分強い領域では「分極」がトポロジカルに転移するという計算がある。この「分極」は、我々の実験系におけるポンプ量である「重心移動量」と対応することから、我々の系においてポンプ量の測定を通じてこのトポロジカルな転移を検出できる可能性がある。そこで、本研究課題ではこの TQP 系を対象として、冷却原子系の高度な制御性、特に冷却原子系の大きな利点である「Feshbach 共鳴」による相互作用制御を利用して、「相互作用により誘起されるトポロジカル相転移」を観測することを目指し研究を開始した。具体的には1). 相互作用可変な極低温リチウム（Li）原子系を新規に構築し、2). 光格子中の冷却原子系を用いた TQP 系に対する相互作用の効果を検証することの2つを目標とした。

また「乱れ」を含むトポロジカル量子系では並進対称性が破れており、相互作用のある系とは別の理由で数値計算が困難であるが、近年「トポロジカル Anderson 絶縁体」など「乱れにより誘起される」トポロジカル量子相の研究が行なわれるようになってきた。冷却原子系では乱れを制御して導入することも可能であるため、研究の後半には、相互作用だけではなく「乱れ」により誘起されるトポロジカル量子現象の探索も目標の一つとした。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、まず(1) 相互作用可変な冷却 Li 原子系の新規構築を進め、並行して従来の冷却 Yb 原子系を用いた TQP 系において、この系における(2) 相互作用、および(3) 乱れの効果を検証した。各方法の詳細は以下の通りである。

#### (1) 冷却 Li 原子系の新規構築

これまで我々の研究で用いてきた Yb 原子はアルカリ土類様原子であるため、基底状態には電子スピンのなく磁場 Feshbach 共鳴を利用できない。そのため、相互作用の強さ $U$ は同位体を変えることで不連続に変更するしかない。そこで、将来的には相互作用の影響を引力から斥力まで連続的かつ系統的に調べることを目標に、磁場 Feshbach 共鳴により相互作用（散乱長）を制御できるアルカリ原子系である Li 原子をレーザー冷却するための実験装置の開発を行なった。

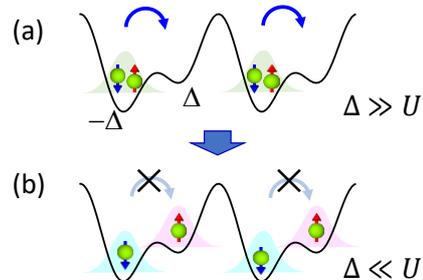


図1: TQP 系で想定される相互作用誘起トポロジカル相転移. (a) オンサイト斥力相互作用 $U$ がオフセット $\Delta$ より十分小さい場合. (b) 斥力相互作用 $U$ がオフセット $\Delta$ よりも十分大きい場合.

## (2) 光格子中の冷却 Yb 原子系を用いた TQP 系における相互作用の影響の研究

Yb 原子系では相互作用の強さ  $U$  を連続的に変えることは難しい。しかし、図 1 に示したような「相互作用による転移」では、相互作用  $U$  の大きさそのものではなく、副格子間のエネルギーオフセット  $\Delta$  と  $U$  との相対的な大きさの比が重要なパラメータであると推測される。そこで、連続的な調整が難しい  $U$  ではなく、光格子の深さで連続的に制御可能な  $\Delta$  を変化させ、相対的に相互作用を強くすることで、相互作用が TQP 系に与える影響を調べた。

## (3) 光格子中の冷却 Yb 原子系を用いた TQP 系における乱れの効果の研究

固体電子系において「乱れ」を制御することは難しいが、光格子中の冷却原子系においては、incommensurate な光格子や、光スペckルパターンを用いることで、この系に対する「乱れポテンシャル」を制御して導入することが可能である。我々は従来の冷却 Yb 原子 TQP 系の光超格子系（格子定数  $d = 532 \text{ nm}$ ）に対して、波長  $798 \text{ nm}$  のレーザーの定在波からなる光格子を  $45^\circ$  の角度で重ねることで、incommensurate な格子定数  $d_D \approx 3\sqrt{2}d/4$  を持つ準周期的な乱れポテンシャルを用意して、この準周期乱れが TQP 系に与える影響を調べた。さらに「トポロジカル Anderson 絶縁体」のような「乱れ」により誘起される「非自明な」トポロジカル相が TQP 系を実現する方法についても研究を行なった。

## 4. 研究成果

### (1) 冷却 Li 原子系の構築

Feshbach 共鳴による相互作用制御を行なうためには、Li 原子を量子縮退領域まで冷却する必要がある。Li 原子のレーザー冷却を実現するために必要な超高真空チャンバー系（図 2）を構築し、十分なベーク作業の後で、 $1.2 \times 10^{-11} \text{ Torr}$  という今後の実験の遂行に十分な超高真空環境を実現した。

また、別プロジェクトのために用意した Li 原子冷却用のレーザー光源の周波数を、modulation transfer 分光法により Li 分光セルに安定化した。さらに Li 原子リパンプ用のレーザー光源の周波数を、ビートロック法によりこの冷却用光源に対して安定化することで、磁気光学トラップ (MOT) に必要な 2 種類の光源を用意した。これにより真空チャンバーおよびレーザー光源の両方が準備できたため、実際に  $^6\text{Li}$  原子のレーザー冷却のテストを行なった。将来的な実験では、十分な冷却 Li 原子数を確保するため、2 次元磁気光学トラップ (2D-MOT)  $\rightarrow$  3 次元磁気光学トラップ (3D-MOT) と 2 段階のレーザー冷却が必要となるが、本研究課題の期間中はまず 2D-MOT の実現を目指した。2D-MOT に必要な四重極磁場は、従来のコイルを用いる方法ではなく、近年使用例が増えてきている永久磁石を組み合わせる方法で導入し、磁場・偏光・レーザー周波数を適切に設定することで 2D-MOT による  $^6\text{Li}$  原子のレーザー冷却および捕捉に成功し、冷却  $^6\text{Li}$  原子集団からの蛍光を確認することに成功した（図 3）。

また、Li 原子系において磁場 Feshbach 共鳴による相互作用制御を行なうためには、 $900 \text{ G}$  程度の強磁場の制御が必要になるが、それを可能にする大電流での使用が可能な水冷大型コイル、およびコンピュータによる実験シーケンスの制御システム（ハードウェアおよびソフトウェア）の構築も並行して準備した。

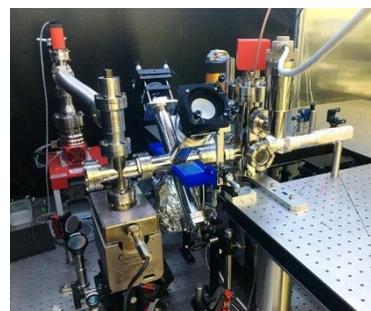


図 2：新規構築中の冷却 Li 原子実験用超高真空チャンバー。



図 3：Li 原子の 2D-MOT. 点線円内の赤い輝点が冷却 Li 原子集団からの蛍光。

## (2) 光格子中の冷却 Yb 原子系を用いた TQP 系における相互作用の効果の検証

研究方法に記述したように、相互作用  $U$  そのものではなく、光格子の深さで連続的に制御可能な  $\Delta$  を変化させることで相対的に相互作用を強くし、さらに Yb 原子の同位体のうち、原子間の相互作用がほぼ無視できる  $^{171}\text{Yb}$  原子と、原子間の相互作用が斥力である  $^{173}\text{Yb}$  原子の場合とを比較することで冷却 Yb 原子 TQP 系における相互作用の効果を検証した。その結果、斥力相互作用がある  $^{173}\text{Yb}$  原子の TQP 系では、相互作用がない  $^{171}\text{Yb}$  原子の TQP 系の場合と比較してポンプ量が減少する領域があることが確認された（図 4）。これは、斥力相互作用によるトポロジカル転移点の近傍ではエネルギーギャップが小さくなり、それに由来する非断熱遷移が生じてポンプが減少し始めたためと考えられる。ただし、グラフから分かるように相互作用をほぼ無視できるはずの  $^{171}\text{Yb}$  原子系の方においても、副格子間の最大エネルギーオフセット  $\Delta$  が小さい、すなわちポンプを構成する光格子の深さが浅い場合にはポンプ量が減少している。これは、光格子

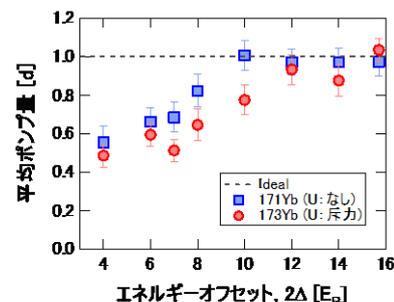


図 4：エネルギーオフセットを変化させた場合の平均ポンプ量の変化に対して相互作用の有無が与える影響。

が浅い領域では、有限温度による熱励起の効果が $\Delta$ に対して相対的に大きくなり、それによる非断熱性の影響が出始めているものと考えられる。図4の測定結果、特に相互作用の有無の違いが現れる“転移点”の位置などもこの有限温度の効果の影響を受けていると考えられるので、将来的には有限温度効果が無視できる大きな $\Delta$ の領域で、当初研究計画通り、Feshbach共鳴によって直接 $U$ そのものの大きさの値を変えた系統的研究を行なうことが望まれる。この成果については国際会議において報告を行なった。

### (3) TQP系における乱れの効果の研究および乱れにより誘起されるポンプの実現

研究方法のところで述べた「準周期的乱れポテンシャル」を冷却Yb原子TQP系に重ねて、TQP系に対する「準周期乱れ」の効果を検証した。その結果、局在転移点や最小エネルギーギャップ程度の乱れポテンシャルに対してはポンプが堅牢に保たれる一方で、乱れの強さ $V_D$ が、ポンプサイクル中の最大副格子間エネルギーオフセット $2\Delta$ と同程度になるとポンプが減少することを見出した(図5左軸)。これについては、共同研究者により準周期乱れを含む拡張されたRice-Mele模型を用いた数値計算でも確認された。また、バンドマッピングの手法により、このポンプ量が減少する近傍では、ポンプ終了後の第2バンドへの励起が増えていることを観測し、このポンプが減少する“転移点”の近傍においてギャップが閉じていることを確認した(図5右軸)。

さらに、Rice-Mele型のTQP系においては、 $V_D \sim 2\Delta$ でポンプが転移するという上記の知見を元に、異なるRice-Meleパラメータ $\Delta$ を持つ二つのRice-Mele型ポンプを組み合わせることで、乱れにより「有限の」ポンプが誘起されるTQP系を構築した(図6)。これは、ごく最近実験が出始めた「トポロジカルAnderson絶縁体」と同種の「乱れ」により誘起される「非自明な」トポロジカル量子現象の一つと考えられる。さらに、我々の方法は、「乱れにより誘起されるトポロジカル量子現象」を(発見的にではなく)系統的に構成する方法を提示しており、今後のこの分野の発展に寄与するものと考えられる。この成果については、国際会議および日本物理学会で報告を行ない、また現在、論文を投稿中である[1]。

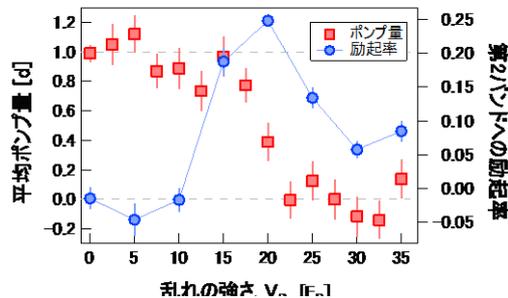


図5: TQP系に対する乱れの影響. 乱れに対する平均ポンプ量の変化(赤四角)とポンプ終了後の第2バンドへの励起率(青丸).

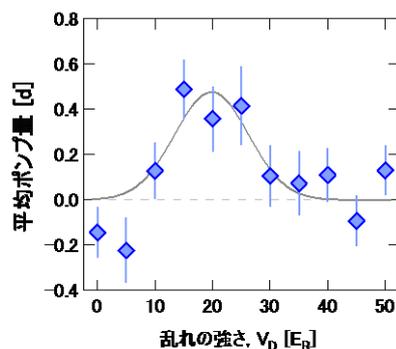


図6: 乱れにより誘起される「非自明な」Thouless量子ポンプ.

[1] S. Nakajima, N. Takei, K. Sakuma, Y. Kuno, P. Marra, and Y. Takahashi, “Disorder-induced Thouless pumping of ultracold atoms in an optical lattice.” (under submission)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中島秀太, 武井宣幸, 佐久間啓太, 久野義人, 高橋義朗
2. 発表標題 乱れにより誘起されるサウレス量子ポンプ
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 中島秀太
2. 発表標題 冷却原子系を用いた量子シミュレーション
3. 学会等名 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島秀太
2. 発表標題 冷却原子系を用いた量子シミュレーション
3. 学会等名 物性研短期研究会 量子情報・物性の新潮流 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuta Nakajima
2. 発表標題 Topological Thouless Pumping in a One-Dimensional Optical Superlattice
3. 学会等名 The 2nd TMS-PKU Alliance Workshop on Topological Materials and Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----