

Thouless ポンプにおける乱れの効果を検証

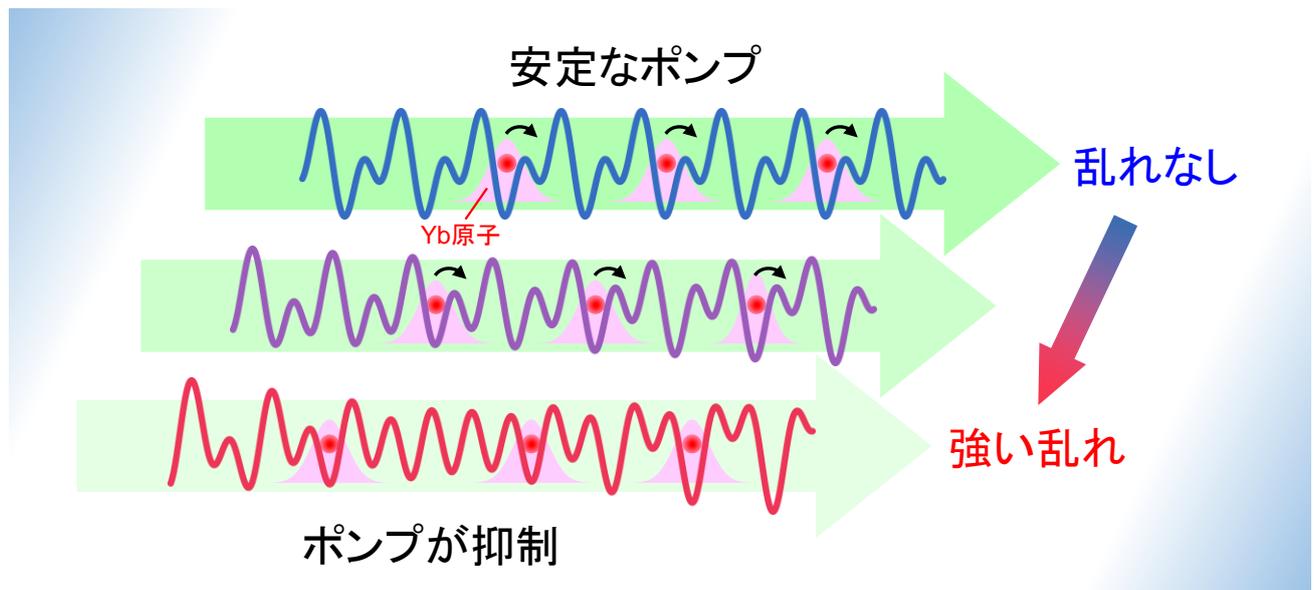
—トポロジカル量子現象と乱れの競合と協奏—

概要

京都大学白眉センター 中島秀太 特定准教授、同大学大学院理学研究科 武井宣幸 特定准教授（研究当時、現：東京工業大学 科学技術創成研究院 特任准教授）、高橋義朗 教授らのグループは、筑波大学大学院数理物質科学研究群 久野義人 助教、東京大学大学院数理科学研究科 Pasquale Marra 特任研究員らと共同で、Thouless ポンプと呼ばれるトポロジカル量子現象における「乱れ」の効果について明らかにしました。

トポロジカル量子現象は、乱れのような摂動に対して堅牢であることが知られていますが、乱れが非常に大きい場合にどのようなことが起きるかは自明ではありません。本研究では光格子中の冷却原子系を用いて Thouless ポンプ系を構築し、そこに制御可能な準周期的な乱れを加えることで、この系の安定性に関して乱れの影響を検証し、Anderson 局在転移点を超える大きな乱れまでこの系が安定であることを確認しました。さらに条件を選ぶことで、むしろ乱れが存在することで初めて生じるポンプを観測しました。高度な制御性をもつ冷却原子系は、今後、乱れが関与するトポロジカル量子現象研究の新しいツールになると期待されます。

本研究成果は、2021年4月30日0時（日本時間）に英国の国際学術誌「Nature Physics」にオンライン掲載されました。



光格子ポテンシャルが周期的に時間変化するとポテンシャル中の冷却イッテルビウム原子は上図で左から右へ輸送（ポンプ）される（Thouless ポンプ）。この時、乱れがある程度の大きさまではポンプ量は一定の値を取り安定なままであるが、閾値を超えるとポンプが抑制される。

1. 背景

近年、物理学分野では、量子ホール効果やトポロジカル絶縁体に代表されるような「トポロジカル量子現象」が注目を集めています。トポロジカル量子現象の大きな特徴の一つは、この現象が乱れや相互作用といった摂動に対して堅牢であることです。実際 1984 年には、Q. Niu と D. J. Thouless が、「Thouless ポンプ^{*1}」というトポロジカル量子現象を例に、ギャップ^{*2}が閉じない限りは乱れや相互作用が存在しても「トポロジカル不変量^{*3}」を変わず考えることができる、ということを数学的に証明しています。一方で、ギャップが閉じるほどの摂動を加えた場合に、トポロジカル量子現象がどのように変化するかは自明ではありません。

本研究グループはトポロジカル量子現象が「乱れ」によりどのように変化するかを調べる舞台として、Niu と Thouless が最初に考えた Thouless ポンプの系に注目しました。これまでに本研究グループでは、光格子中^{*4}の極低温イッテルビウム原子^{*5,*6}を用いて Thouless の量子ポンプを世界に先駆けて実現しており[S. Nakajima *et al.*, Nature Physics (2016)]、本研究では、この系に「準周期的な乱れ」を導入しその乱れの強さを系統的に変えることで、この系の堅牢さが乱れに対してどのような影響を受けるかを検証しました。

2. 研究手法・成果

本研究ではまず、先行研究と同様に波長 532 nm のレーザー光線が作る 2 種類の光格子（格子間隔 266 nm の動かない光格子および格子間隔 532 nm のスライドする光格子）を組み合わせることで、Thouless ポンプの理論モデルの一つ、Rice-Mele モデルに対応する系を実現する一次元の光超格子系を構築しました。この光超格子が周期的に時間変化すると、この光超格子に導入された極低温のイッテルビウム原子集団が 1 周期毎に決まった量だけ移動（ポンプ）します。この移動量が「トポロジカル不変量」と直接関係しており、我々の先行研究では、この移動量がパラメータの変化に対して堅牢であることを確認していました。今回は、この光超格子に対して、違う空間周期をもつ光格子ポテンシャル（準周期乱れ光格子）を重ねることで、この系に「準周期的な乱れ」を導入しました（図 1）。この準周期的な乱れは、準周期乱れ光格子に使用するレーザーのパワーを調整することで、その強さを自在に制御することが可能で、本研究ではまず Thouless ポンプがどの程度の乱れまで堅牢であるかを調べました。通常、Thouless ポンプのような 1 次元の系では、小さな乱れでも「Anderson 局在^{*7}」という輸送を妨げる現象が生じますが、本研究で我々は、Anderson 局在が起こるとされる乱れの強さよりもずっと大きな乱れまでこの系が安定であることを確認しました。さらにある値よりも乱れが大きくなると、Niu と Thouless が指摘していたようにギャップが閉じてからポンプがゼロになる（輸送しなくなる）ことを実験的に確認しました（図 2）。またこの結果をもとに、「乱れがないときにはポンプがゼロで、ある乱れの範囲では有限のポンプが生じる」という「乱れ誘起」のポンプを観測しました（図 3）。乱れが存在することで初めて生じるトポロジカル量子現象としてはトポロジカル Anderson 絶縁体^{*8}がありますが、本研究はその類似物を Thouless ポンプの系で構築する道筋を示したものとと言えます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究で用いられた光格子中の冷却原子系は、これまでにない自由度と制御性で実験条件を設定可能な人工量子“物質”で、本研究のように乱れも制御して導入することが可能です。この系は従来の物質系では実現・観測が不可能であった物理過程について、その本質を抽出して研究する「量子シミュレータ^{*9}」として機能すると期待されており、今後、より多様な「乱れ」が関与するトポロジカル量子現象の研究に利用できると考えられます。特に、トポロジカル Anderson 絶縁体の実験は、フォトニック結晶などでの先行研究がありますが、冷却原子系は原子間の相互作用を制御できるという特長があり、今後は、相互作用と乱れが両方存在することで生じるとされる局在現象（多体局在）と関連したトポロジカル量子現象の研究なども期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業「基盤研究(S)(25220711、17H06138、18H05228)」「基盤研究(A)(26247064)」「新学術領域研究：トポ物質科学(16H00990)、ハイブリッド量子(16H01053)、クラスター階層(18H05405)」「若手研究(18K13480)」、内閣府革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST(No. JPMJCR1673) および、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP、No. JPMXS0118069021) の助成によって行われました。

<用語解説>

※1 **Thouless ポンプ**：ノーベル賞物理学者 D. J. Thouless により考案された電子を輸送するシステム。空間的に周期的な 1 次元ポテンシャルを時間的にも周期的に変化させることで、1 周期あたり決まった数の電子を輸送（ポンプ）することが出来る。この場合は輸送される電子の数が「トポロジカル不変量」で記述される。

※2 **ギャップ**：粒子の状態が取り得ないエネルギー領域のこと。乱れない周期的なポテンシャルの場合はバンド理論からそのようなエネルギー領域がわかり、絶縁体状態と金属的状态を区別する。

※3 **トポロジカル不変量**：物理系の連続変形に関して値を変えないことから数学における「トポロジー」の概念を用いて理解される（一般には整数値の）量で、トポロジカル量子系の状態を規定する。例えば、コーヒーカップは“穴の数”を変えないまま連続的にドーナツに変形することができるため、この 2 つは同じトポロジカル不変量（穴の数）で規定されている。Thouless ポンプの系ではギャップを閉じない物理系の変形において不変な量であり、「Thouless-甲元-Nightingale-den Nijs (TKNN) 数」や「チャーン数」とも呼ばれる。

※4 **光格子**：レーザー光で作成された周期的な構造をもつ人工結晶。原子を光格子の中に閉じ込めることで、あたかも電子が物質の中を動きまわるような状況を仮想的に作る事ができる。2 つ以上の異なる周期(波長)のレーザーを組み合わせた光格子の場合は「光超格子」と呼ぶ。

※5 **極低温原子気体**：レーザー冷却、蒸発冷却などの技術を用いることで、真空槽内の気体を絶対温度でナノケルビン（ナノは 10 億分の 1）の温度にまで冷却することが可能になっている。このような温度をここでは極低温と呼ぶ。

※6 **イッテルビウム**：原子番号 70 の元素であり、希土類元素に属する。元素記号は Yb。7 種類の安定な同位体が存在する。

※7 **Anderson 局在**：量子力学的な粒子の波動関数がポテンシャルの乱れによる散乱とそれらの干渉効果によって空間的に波束が局在した状態になることをいう。特に、一般的な 1 次元空間でこの効果を考えると無限小の大きさの乱れでさえ波動関数の局在が起きると理論的に予想されている。

※8 **トポロジカル Anderson 絶縁体**：トポロジカル絶縁体が発現しない物理パラメータにセットされた物理系が乱れを導入することでトポロジカル絶縁体的な傾向を持つようになった状態のこと。クリーンな物理系のもつギャップと競合するような大きさの乱れを導入することで発現することがいくつかの物理系で示唆されている。

※9 **量子シミュレータ**：物質などで起きる複雑な量子力学的な多粒子系の現象を、人為的に作成した単純で制御しやすい別の量子系を使ってシミュレートすることを「量子シミュレーション」と呼び、この制御しやすい別のシステムを「量子シミュレータ」とよぶ。

<研究者のコメント>

本研究で用いられた光格子中の冷却原子系は、これまでにない自由度と制御性で実験条件を設定可能な人工量子“物質”（量子シミュレータ）です。今後もこの系の制御性を生かし、従来の物質系では実現・観測が不可

能であった量子現象に対して、その本質を抽出した普遍的かつユニークな研究を進めたいと考えています。

<論文タイトルと著者>

タイトル： Competition and interplay between topology and quasi-periodic disorder in Thouless pumping of ultracold atoms (冷却原子系の Thouless ポンプにおけるトポロジーと準周期的乱れの競合と協奏)

著者： S. Nakajima†, N. Takeji†, K. Sakuma, Y. Kuno, P. Marra, and Y. Takahashi

(†: These authors are contributed equally to this work.)

掲載誌： Nature Physics

DOI： 10.1038/s41567-021-01229-9

<参考図表>

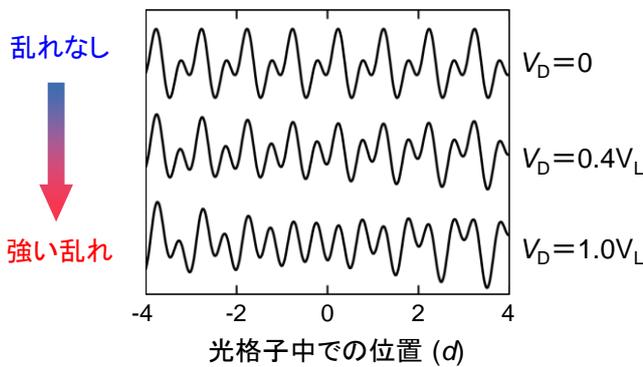


図 1：準周期乱れ光格子の深さ V_D を強くすると、光超格子に対して準周期的な乱れが生じる。横軸の単位 d は光超格子の空間的周期、 V_L はスライドする光格子の深さ。

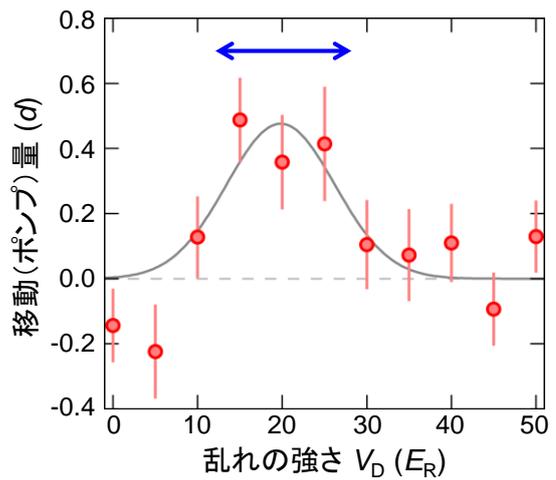
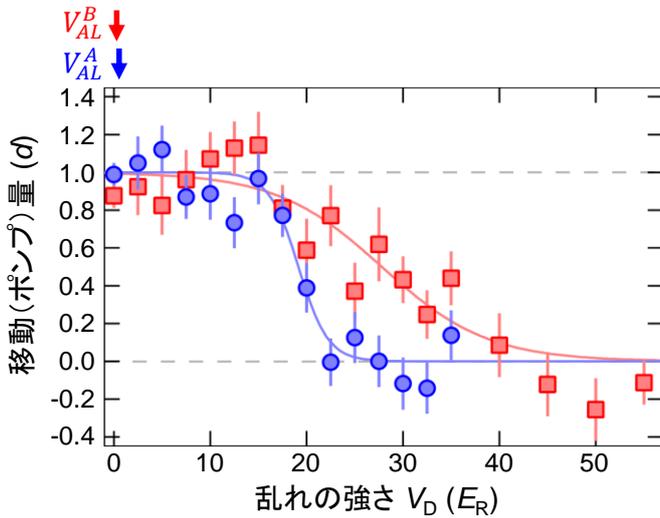


図 2 (上左)：乱れの強さ V_D に対する Thouless ポンプの変化。Anderson 局在が起こると想定される乱れの強さ (図中の矢印) よりも大きな乱れの強さまでポンプが維持される (色の違いは実験条件の違い)。横軸の単位 E_R は反跳エネルギーと呼ばれる値。

図 3 (上右)：乱れにより誘起されるポンプ。乱れない時 ($V_D=0$) にはポンプはほぼゼロであるが、ある一定の乱れの強さの領域 (矢印の範囲) で有限のポンプが生じている。