

冷却原子を用いて Thouless の量子ポンプを実現

- 超高精度電流源の基本原理を実証 -

概要

国立大学法人京都大学（以下、京都大学）の中島秀太（なかじましゅうた）理学研究科特定助教と高橋義朗（たかはしよしろう）同教授、スイス連邦工科大学チューリッヒ校（ETH Zurich）の L. Wang 博士らのグループは、レーザー光を組み合わせて作る光超格子※1 と呼ばれる特殊な周期ポテンシャルを実現し、そこに極低温の原子気体※2 を導入した系で、“Thouless の量子ポンプ”を観測することに世界で初めて成功しました。

“Thouless の量子ポンプ”は、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で、空間的に周期的な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）することが出来ます。このシステムの特長は、輸送される電子の数が「トポロジカル不変量」と呼ばれるもので決まることです。トポロジカル不変量とは、ある空間上の「曲面」を連続的に変形しても変化しない量で、例えば、コーヒーカップとドーナツは同じトポロジカル不変量（この場合は「穴の数」）を持つため同じトポロジーを持つと言います（図 1）。コーヒーカップをドーナツに変形しても「穴の数」という量は変わらないように、トポロジカル不変量は物の詳細な形には依存しません。つまり、輸送される電子の数が「トポロジカル不変量」だけで決まるということは、この輸送現象がノイズなどに対して非常に安定であることを意味します。Thouless がこの電子ポンプを考案したのは 1980 年代ですが、これまでの半導体ナノデバイスを用いた電子ポンプの研究では、Thouless の提案したような「空間的にも時間的にも周期的な構造」を実現することが難しく、検証には至っていませんでした。

今回我々は、電子の代わりとしてレーザー冷却された極低温のイッテルビウム原子※3 を、周期ポテンシャルとしてレーザー光線の定在波が作る光格子を用いることで、Thouless の量子ポンプを実現し、実際にこのポンプの輸送する原子の量がパラメータの変化に対して影響されず安定であることを実証しました。今回の成果は、Thouless の提案が正しいことを証明し、実際の電子系でも構造さえ構築できれば超高精度の電流源が出来る可能性を示したと言えます。

本研究で用いられた光格子中の冷却原子系は、非常にシンプルで、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”です。この系は、今回の Thouless ポンプのように、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ー※4 として機能し、現象のより深い理解に寄与することが期待されます。なお、本研究成果は、1 月 18 日付の英国科学雑誌 Nature Physics（ネイチャー・フィジクス）電子版※5 に掲載されました。

1. 背景

最近、物理学分野では、量子ホール効果※6 やトポロジカル絶縁体※7 に代表されるような「トポロジカルな量子現象」が注目を集めています。これまで、こうした現象は、トポロジカルな性質を持つ物質を探索および形成・合成して初めて観測できるものでした。しかし近年、レーザー冷却技術により極低温の希薄原子気体を実現され、さらにレーザー光を組み合わせることで光格子と呼ばれる人工の結晶格子を作る技術が確立したことで、冷却原子を格子状に並べた“物質”を作ることが可能となりました（図 2）。この“人工物質”、光格子中の原子気体は、真空装置の中のごく小さな領域でしか存在できず、直接見たり触れたりできないものですが、様々な物質が低温で示す特異な性質を、より理想化された環境で、しかも幅

広いパラメータ範囲で「シミュレーション」できる格好の舞台となっています。京都大学のグループでは今回、この系をトポロジカル量子現象の観測手段とすることを考え、光格子系の持つ高い制御性を最大限に生かした量子状態制御を行うことで、提案から 30 年以上実現されていなかった Thouless の量子ポンプを世界で初めて実現しました。

2. 研究手法・成果

本研究では波長 532 nm (ナノメートル=10 億分の 1 メートル) 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 ポンプを実現するための、空間的にも時間的にも周期的な一次元の特殊な光格子を実現しました。この光格子にフェルミ縮退領域と呼ばれる非常に低温 (絶対温度で数 10 nK) まで冷却されたイッテルビウム原子を導入し、この原子集団が Thouless の量子ポンプにより移動することを観測しました (図 3)。量子力学の計算に依ると、A のように格子全体がスライドするポテンシャルが作る量子ポンプと、B のように格子の谷の位置は動かず、谷の深さが交互に入れ替わるポテンシャルが作る量子ポンプは同じトポロジーを持ちます。我々は、実験によってこれら二つが同じ量だけ原子を輸送 (ポンプ) することを確認しました。さらに、Thouless ポンプのトポロジー的性質を視覚化するため、このポンプのふるまいをパラメータ空間上の軌跡として表しました (図 4)。この時、ポンプされる原子の量は、この軌跡が原点に対して持つ「巻き付き数」というトポロジカル不変量と関係します。この場合もドーナツとマグカップの例のように、形の詳細は関係なく、中心 (原点) を巻き付く回数と同じであれば全く同じポンプ量を与えます。これは、このポンプが非常に安定で、外からのノイズが原子をポンプする量に影響を与えないことを意味します。我々は図 4 の A と同じ左回りの巻き付き数 ($w=+1$) を持つ場合 (図 4 の C) は、形がゆがんでいても A と同じポンプを示すこと、A と形が同じでも右回りの巻き付き数 ($w=-1$) を持つ場合 (図 4 の B) は原子を逆向きにポンプすること、原点に巻き付いていない ($w=0$) 場合 (図 4 の D) は原子を全くポンプしないことを確認し、この Thouless ポンプのトポロジー的性質を確認しました。

3. 波及効果

現在、電気抵抗の国際標準は「量子ホール効果」と呼ばれる現象を用いて決定されています。これは量子ホール効果に現れる電気抵抗がやはりトポロジカル不変量で与えられるため、非常に高精度に (ノイズなどに影響されず) 決定できるからです。Thouless の量子ポンプが、電流の国際標準に使える高精度な電流源になり得ることは Q. Niu により 1990 年には指摘されていましたが、半導体ナノデバイスでは Thouless の提案に忠実に基づく電子ポンプは実現されていませんでした。今回、我々の研究により Thouless の理論が実証されたことで、電子ナノデバイスにおいても Thouless ポンプの研究が波及し、トポロジーに基づく超高精度電流源の研究が進む可能性があります。また今回、冷却原子系という操作性が良い系で、従来、技術的に難しいと考えられていたデバイスを検証することが可能であることが示されました。今後も冷却原子系という“量子シミュレーター”を用いることで、理論提案のみであった新原理に基づく物理現象やデバイスの検証、実験が不可能であった量子現象の探索などを行うことが出来ると期待されます。

4. 今後の予定

光格子中の冷却原子系は、今回実現された Thouless 量子ポンプのような「トポロジカルな量子現象」を観測するのに適した系です。今後はこの冷却原子系の自由度をさらに生かし、電子の持つスピンという性質を取り入れた「スピンプンプ」などの実証を目指します。

<論文タイトルと著者>

Topological Thouless Pumping of Ultracold Fermions,

by Shuta Nakajima, Takafumi Tomita, Shintaro Taie, Tomohiro Ichinose, Hideki Ozawa, Lei Wang, Matthias Troyer, and Yoshiro Takahashi

(DOI : 10.1038/nphys3622)

極低温フェルミ粒子のトポロジカル Thouless ポンプ

中島秀太, 富田隆文, 田家慎太郎, 一ノ瀬友宏, 小沢秀樹, Lei Wang, Matthias Troyer, 高橋義朗

<用語解説>

※1 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. 図2に示されるように, 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.

※2 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.

※3 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.

※4 量子シミュレーター

物質などで起きる複雑な量子力学的な多体現象を, 人為的に作成した単純で制御しやすい別のシステムを使ってシミュレーション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ーとよぶ.

※5 Nature Physics

Nature誌を発行する英国 Nature Publishing Group (NPG) が毎月発行している純粋物理学と応用物理学の全研究領域をカバーする国際学術誌.

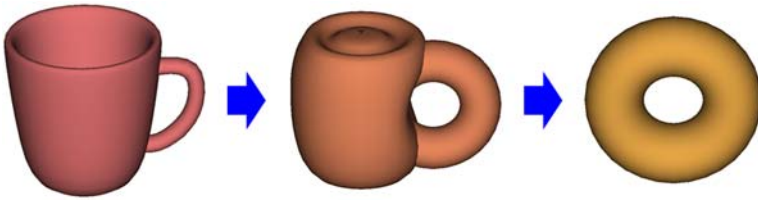
※6 量子ホール効果

二次元の電子系に対して強磁場をかけると, そのホール伝導率 σ_{xy} は e^2/h (e : 素電荷, h : プランク定数)の整数倍に量子化される. これを(整数)量子ホール効果という.

※7 トポロジカル絶縁体

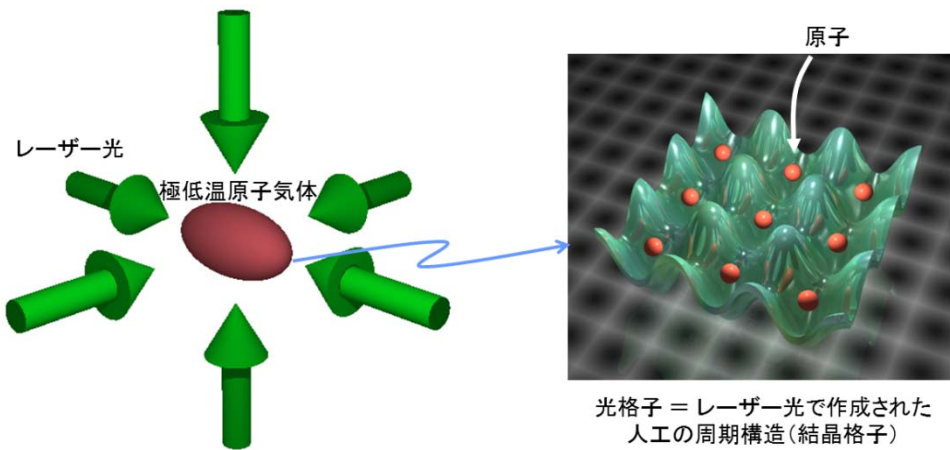
近年発見された新しい種類の絶縁体. 内部は絶縁体でありながら, その表面は不純物などの影響を受けずに電気を通すという性質を持つ.

図1 トポロジーとは？



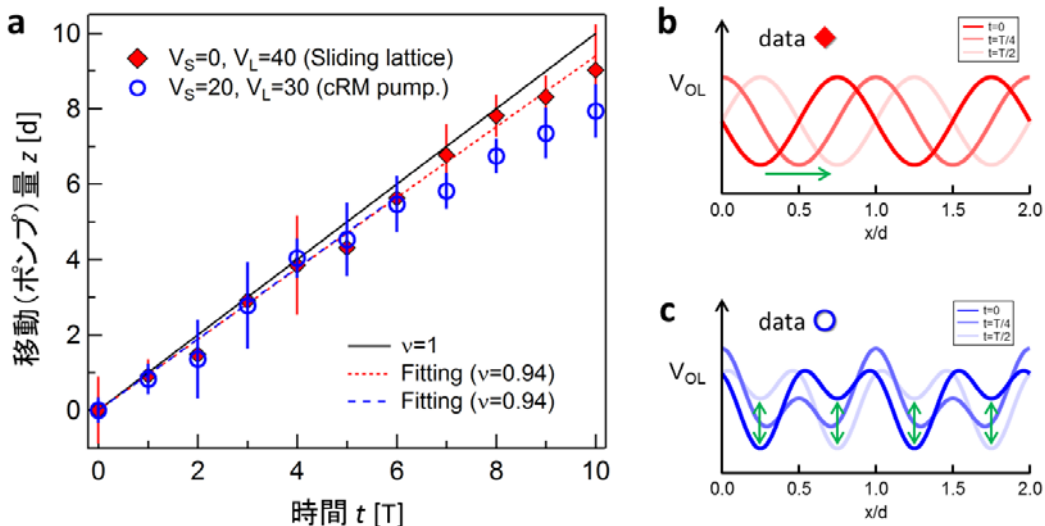
コーヒーカップは「穴の数」を変えないまま連続的にドーナツに変形することができる。このときコーヒーカップとドーナツは同じトポロジーを持つと言う。

図2 光格子とは？



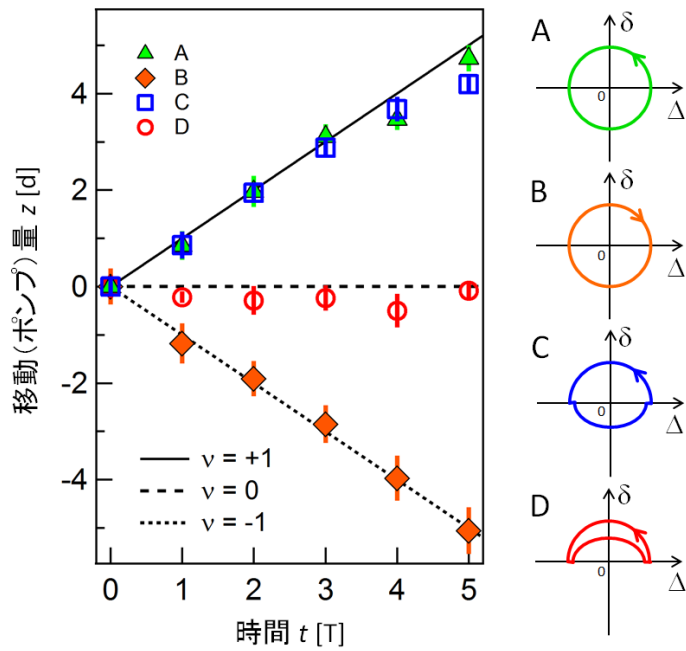
極低温の原子気体に対向的にレーザー光を照射させ、光の干渉により光格子と呼ばれる周期的な構造を作成します。光格子ではレーザー光の強さにより、原子の動きを制御できます。

図3 Thouless ポンプの観測



ポンプが 1 周期 T 回ると光格子中の原子が 1 格子長さ d だけ進む(a). 「光格子ポテンシャル全体がスライドするポンプ(b)」と, 「格子全体はスライドせずポテンシャルの谷が交互に上下するポンプ(c)」はトポロジカルに同じであるため, 同じポンプ量を示す ($t > 6T$ でずれ始めているのは, 原子が逃げ出さないようにするための閉じ込めポテンシャルの影響)

図 4 ポンプのトポロジー



ポンプされる量は, パラメータ空間でポンプサイクルが描く軌跡のトポロジカル不変量 (巻き付き数) で決まる. A と同じ左回りの巻き付き数 ($w=+1$) を持つ C は, 形がゆがんでいても A と同じポンプを示す. A と形が同じでも右回りの巻き付き数 ($w=-1$) を持つ B は逆向きのポンプを示す. 原点に巻き付いていない ($w=0$) D では原子は全くポンプされない.