



TITLE:

Nonequilibrium quantum phenomena and topological superconductivity in atomic layer materials(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Chono, Hiroomi

CITATION:

Chono, Hiroomi. Nonequilibrium quantum phenomena and topological superconductivity in atomic layer materials. 京都大学, 2021, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2021-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22988>

RIGHT:

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	蝶野 弘臣
論文題目	Nonequilibrium quantum phenomena and topological superconductivity in atomic layer materials (原子層物質における非平衡量子現象とトポロジカル超伝導)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年、レーザー実験技術の飛躍的進歩に動機付けられて、テラヘルツ波と強力な短パルスレーザーによる物質の物理的特性の制御が注目されてきた。強いレーザー光を照射することによって誘起される特異な電子状態や巨視的性質 (例えば、光学的性質、電気伝導特性、磁性など) が大きな注目を集めている。また、電子相関やスピン間相互作用による巨視的量子相が光照射下で変化する現象、すなわち光誘起相転移も非常に興味深い問題である。さらなる発展として、量子力学的な波動関数のトポロジーが光によって変化する光誘起トポロジカル相転移が集中的に研究されている。</p> <p>フロケ理論はそのような非平衡定常状態を理論的に記述するための簡便かつ妥当な方法であり、フロケ理論を用いた物質制御の試みはフロケエンジニアリングと呼ばれている。物質のトポロジカル相 (トポロジカル絶縁体・超伝導体など) の中には平衡状態で安定化することが難しいものも多くあり、それらを実現するための戦略の一つとしても、フロケエンジニアリングは注目を集めている。その先駆的な研究として、グラフェンの光誘起量子ホール効果が理論的に提案され、実験的に確認されている。</p> <p>レーザー光によって引き起こされるこのような非平衡定常状態および緩和プロセスは、平衡状態では実現できない様々な物理的特性を実現する可能性を秘めている。このような観点からの研究が盛んに行われているが、超伝導状態の制御に向けた研究は萌芽的な段階にある。</p> <p>一方、最近のナノテクノロジーや原子層材料の研究の進展により、原子と同程度の厚さを持つ様々な二次元超伝導体が発見された。それらの二次元超伝導体には、超伝導特性を人工的に制御できるというメリットがある。絶縁体や半導体を超伝導にするためには高密度の電子キャリアを注入することが必要だが、イオン液体とゲート電圧を使用する電気二重層トランジスタを使用することによって可能となっている。この方法により、二次元電子系を電界誘起によって超伝導相に移行させることができる。これまでの実験的成果により、MoS_2 や NbSe_2 などの遷移金属ダイカルコゲナイドや遷移金属酸化物ヘテロ構造において二次元超伝導が実現している。</p> <p>これらの状況に動機付けられて、本研究では光誘起による非平衡二次元超伝導状態を理論的に研究した。特に、二層遷移金属ダイカルコゲナイドに円偏光レーザー光を照射することによりトポロジカル超伝導を実現することが可能であることを提案している。そこでは、遷移金属ダイカルコゲナイドの伝導バンドを再現する強束縛モデルをフロケ理論の高周波展開 (フロケ-マグナス展開) によって解析し、非平衡状態を記述する有効モデルを導出した。有効モデルのトポロジカルな性質を数値的に調べることにより、それがチャーン数 4 を有するトポロジカル超伝導状態であることを示した。</p> <p>博士論文では、1章において概要を述べたのちに、2章でフロケエンジニアリングについて、3章で二次元超伝導体の発展について解説している。主たる研究成果が4章に示されており、そこでは遷移金属ダイカルコゲナイドの特異な電子構造と高い制御性を活用してトポロジカル超伝導を実現するメカニズムが解説されている。最後に全体のまとめが5章で述べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年、レーザー技術の飛躍的進歩に動機付けられて、レーザー光による物質相の制御が進められてきた。特に、強いレーザー光を照射することによって誘起される特異な電子状態や巨視的性質（例えば、光学的性質、電気伝導特性、磁性など）が大きな注目を集めている。また、電子相関やスピン間相互作用による巨視的量子相が光照射下で変化する現象、すなわち光誘起相転移も非常に興味深い問題である。

一方、近年の物性物理学では量子力学的な波動関数をトポロジーによって特徴づける試みが大きな成功をおさめ、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体、ワイル半金属、ディラック半金属などの研究が大きく進展した。これらを総称して、物質のトポロジカル相と呼ぶ。しかし、物質のトポロジカル相の中には平衡状態で安定化することが難しいものが多くあり、それらを実現するための新しいアイデアが求められている。レーザー光によって引き起こされる非平衡定常状態や緩和プロセスは、平衡状態では実現困難な物質のトポロジカル相を実現するための戦略としても注目されている。

レーザー照射下の非平衡定常状態を理論的に記述するための簡便かつ妥当な方法としてフロケ理論が知られている。フロケ理論を用いた物質制御の試みはフロケエンジニアリングと呼ばれ、現在活発な研究が行われている。その先駆的な研究として、グラフェンの光誘起量子ホール効果が理論的に提案され、実験的に確認された。フロケエンジニアリングは平衡状態では実現できない物理的特性を実現する可能性を秘めているが、超伝導状態の制御に向けた研究は少ない。

一方、最近のナノテクノロジーや原子層材料の研究の進展により、原子と同程度の厚さを持つ様々な二次元超伝導が発見された。それらの二次元超伝導体には、超伝導特性をゲート電圧や積層構造により人工的に制御できるというメリットがある。これまでの実験的成果により、 MoS_2 や NbSe_2 などの遷移金属ダイカルコゲナイドやチタン酸化物や銅酸化物などの遷移金属酸化物ヘテロ構造において二次元超伝導が実現している。

これらの状況に動機付けられて、蝶野氏はフロケエンジニアリングにより非平衡トポロジカル超伝導を実現する方法を提案した。特に、二次元超伝導体の高い制御性に着目し、二層遷移金属ダイカルコゲナイドに円偏光レーザー光を照射することによりトポロジカル超伝導を実現することが可能であることを示している。計算はフロケ理論の高周波展開（フロケーマグナス展開）に基づいており、導出された有効モデルの数値解析によりトポロジカル超伝導を実現するためのさまざまな条件を明確化している。

トポロジカル超伝導体は、量子コンピューティング技術において演算素子（キュービット）として使用されることが期待されているマヨラナフェルミ粒子を生み出すことができるという点で、物性物理学の枠を超えた広範な研究トピックとなっている。しかし、トポロジカル超伝導体の実現は未だ確立されておらず、その発展が待たれている。本研究成果は光誘起の非平衡状態を用いて従来型の超伝導をトポロジカル超伝導に変換するというユニークなアイデアに基づいている。トポロジカル超伝導の実現に向けた新たな道筋を示しており、高く評価することができる。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3年1月14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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降