

レーザー光と固体中の電子状態が共に創り上げる新たな対称性を発見 — 極端に強い光と物質の相互作用に関する理解が大きく進展 —

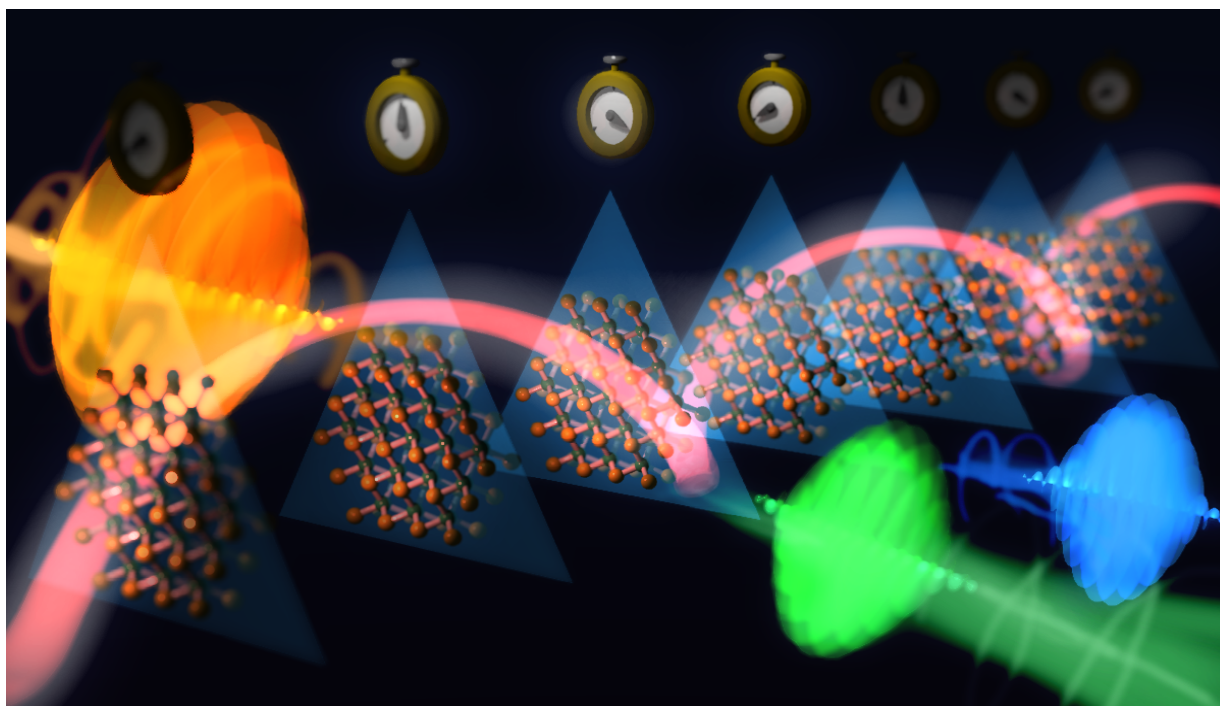
概要

京都大学大学院理学研究科 永井恒平（博士課程学生）、田中耕一郎 教授らの研究グループは、東京都立大学大学院理学研究科 宮田耕充 准教授らとの共同研究において、高強度レーザー光を固体に照射すると、光と固体中の電子状態が一体となった状態が形成され、新たな対称性である「動的対称性」が創出されることを実証しました。

レーザー光は物性を調べるための道具として科学の幅広い分野において認識され、物質との相互作用が長年研究されてきましたが、近年は物質の性質を大きく変えてしまうほど強いレーザー光を用いた物性研究が注目を集めています。強いレーザー光は光と物質が一体となった状態を作り出すことが期待されることから、それを用いて新たな機能を創出しようとする物質制御法が模索されています。この制御において重要なキーワードが「対称性」です。その中でも「動的対称性」と呼ばれる新たな概念がレーザー光によって作られた状態を一般的に記述できることが近年理論的に提案されていましたが、固体における実験的検証はほとんどありませんでした。

本研究グループは、赤外域の高強度レーザー光を物質に照射し、その状態における対称性を光散乱過程の系統的な研究により検証しました。光散乱における入射光と散乱光の偏光の関係が動的対称性を用いた理論によって包括的に説明できることから、高強度レーザー光が照射されている固体では、光と電子状態が一体となった動的対称性が実現されている状態が確かに形成されていることを明らかにしました。この成果は、高強度レーザー光による「動的対称性」を用いた量子情報処理や、光散乱過程を用いた光源開発、光通信技術などへの展開が期待されます。

本成果は、2020年8月11日に英国の国際学術誌「Communications Physics」にオンライン掲載されました。



本研究のイメージ

1. 背景

強いレーザー光が固体中の電子と相互作用すると物質のエネルギー状態は大きく変更をうけます。レーザー光が時間周期的に振動する電場をもつことに起因して、強いレーザー光と電子系が相互作用した系はそれらが一体となった状態である「フロケ状態」という新たな状態を形成することが期待されています。このとき、レーザー光のもつ周期電場の形を自由自在に変えてやることで物性をコントロールする試みが理論的に提案されており、「フロケエンジニアリング」と呼ばれています。

しかし、フロケ状態は理論的に提案された概念であり、実験的な検証が乏しいのが現状です。固体においては赤外域の高強度光を用いてフロケ状態を実現したという報告がありますが、エネルギー準位の分裂に着目したものがほとんどです。理論的には、「動的対称性」と呼ばれるフロケ状態に特有のクラスが対称性を一般的に記述できると指摘されていました。しかし、固体においてフロケ状態の「動的対称性」を検証した実験的研究はありませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究では、光散乱過程を用いることでフロケ状態の動的対称性を検証できるというアイデアを提案し、それを実験で実証しました。図1aは光散乱実験の模式図および典型的な散乱光のスペクトルです。まずフロケ状態を作るために赤外域の高強度レーザー光（MIR）を固体に照射し、固体中の電子を光の持つ電場によって駆動します。さらに光散乱過程を起こすために、近赤外域の弱いレーザー光を同時に照射しました。こうすることで、弱いレーザー光の周波数周りにサイドバンドと呼ばれる散乱光がMIRの周波数間隔で現れます。これはフロケ状態が実際に生成されていることを表しています。また、実験的に電子系の微視的な対称性を観測するためには、伝搬効果と呼ばれる固体の巨視的な形状によって引き起こされる効果を取り除く必要がありました。本研究グループは原子層1層しかない2次元の半導体である単層の二硫化モリブデンを実験対象として選ぶことで、その困難を克服しました。

図1bに示したように、入射光の偏光を直線偏光（X, Y）や円偏光（ σ^+ , σ^- ）に制御し、散乱光のスペクトルを偏光ごとに分解して固体の結晶軸との相関を丁寧に観測すると、入射光と散乱光の間に偏光の関係、すなわち偏光選択則が存在することがわかりました。図1c-fはMIRと近赤外光の偏光状態の組み合わせを4通り変えた際に観測された散乱光の円偏光分解スペクトルです。入射光の偏光状態に応じて σ^+ (赤), σ^- (青)円

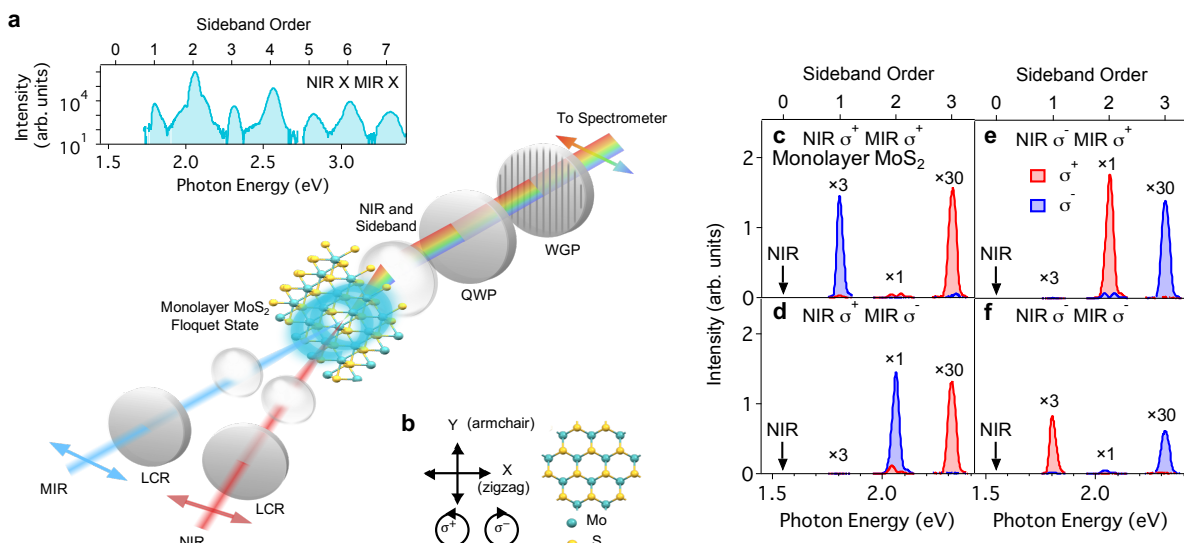


図1 光駆動された固体の対称性によって異なった偏光で散乱光が現れる様子。

偏光の光が各周波数において選択的に現れていることがわかります。また入射光を直線偏光に定め、散乱光を直線偏光に分解することによって直線偏光に対する偏光選択則も系統的に明らかにしました。

本研究グループは、これらの偏光選択則が、「動的対称性」を仮定するとフロケ状態からのラマン散乱によって理解できることを明らかにしました。ラマン散乱は固体の格子振動や分子振動のモードの同定に一般的に利用されている現象です。通常のラマン散乱では物質の対称性にしたがって、入射光と散乱光の偏光関係が記述されます。本研究においては、フロケ状態の動的対称性が入射光と散乱光の偏光関係を包括的に記述できることを明らかにしました。この理論から得られた結果が実験と完全に一致したことから、固体のフロケ状態において動的対称性の系統的な立証に成功しました。

3. 波及効果、今後の予定

固体におけるフロケ状態の基本的な性質である対称性についての初めての系統的な実験的検証を行ったことから、フロケエンジニアリングのアイデアを用いた量子情報技術への理解が進むことが期待されます。また、光散乱過程の基礎的な性質である選択則の一般的理解を与えたことから、今後この過程を利用した広帯域は光源や高速な光通信技術の開発にもつながることが期待されます。本成果は、近年研究が進む高強度光下での複雑な光学現象を理解するための重要な指針となることが期待され、新しい光科学技術の発展が期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本成果は以下のプロジェクトによる支援を受けて行われました。

- ・日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(S)「テラヘルツ高強度場物理を基盤とした非線形フォトエレクトロニクスの新展開」(田中耕一郎、17H06124)
- ・日本学術振興会科学研究費補助金・特別研究員奨励費「磁性体における高強度光を用いたスピン制御法の開拓」(永井恒平、JP20J14428)
- ・日本学術振興会科学研究費補助金・若手研究「金属相および相転移点近傍における高次高調波を用いた非平衡電子状態の研究」(内田健人、19K14632)
- ・日本学術振興会科学研究費補助金・特別研究員奨励費「テラヘルツ光を用いた単層2次元半導体におけるバレー分極の制御」(吉川尚孝、16J10537)
- ・科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「原子層ヘテロ構造の完全制御成長と超低消費電力・3次元集積デバイスの創出」(宮田 耕充、JPMJCR16F3)
- ・日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)「一次元ヘテロエピタキシーによる原子細線の創成」(宮田 耕充、JP18H01832)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Dynamical symmetry of strongly light-driven electronic system in crystalline solids

(結晶固体における強く光駆動された電子系の動的対称性)

著者：K. Nagai, K. Uchida, N. Yoshikawa, T. Endo, Y. Miyata, and K. Tanaka

掲載誌：Communications Physics

DOI：10.1038/s42005-020-00399-x