

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14394

研究課題名（和文）環境と結合した強相関多体系における光誘起時空間階層構造の理論

研究課題名（英文）Spatio-temporal hierarchy in light-irradiated open many-body systems

研究代表者

小野 淳 (Ono, Atsushi)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：40845848

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、強相関多体系において光照射によって生じる時間的・空間的ダイナミクス、特に微視的量子状態から巨視的秩序状態が形成されるプロセスに注目して理論的研究を行った。空間反転対称性を持つ磁性体においては遍歴電子を光電場で駆動することで非熱的な状態が実現し、平衡系において従来知られていたものとは異なる機構によってスピンスカラーカイラル状態や120度ネール状態などの様々な磁気秩序状態が誘起されることが見出された。また、同様に電子を光電場で駆動することで、反強磁性体の交替磁化方向の制御や、強相関系を含めた準粒子バンド構造の分光が可能であることも明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、レーザーなどの光照射によって生じる非平衡状態において、平衡状態の性質からは予想されない新奇な現象が生じることを具体的に示しており、非平衡系の豊かな物理の一端を明らかにしたものである。この知見は、非平衡物理学や光物性物理学における新たな研究の方向性を与えるだけでなく、将来的には従来の限界を超えた新たなデバイスの基礎原理にも繋がる可能性があるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we conducted a theoretical study focusing on the temporal and spatial dynamics induced by light irradiation in strongly correlated many-body systems, particularly the transient processes in which macroscopic ordered states are formed from microscopic quantum states. In magnetic materials with spatial inversion symmetry, we found that non-thermal states of electrons driven by optical fields stabilize various magnetic ordered states, such as spin scalar chiral states and 120-degree Neel states, through mechanisms different from those known in equilibrium systems. Additionally, we revealed that such optical driving of electrons enables the control of staggered magnetization directions in antiferromagnetic materials and allows for the spectroscopy of quasiparticle band structures even in strongly correlated systems.

研究分野：非平衡量子物性

キーワード：光物性 光誘起相転移 光電場駆動 実時間ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

近年のレーザー光源や高速時間分解測定法の著しい発展を背景として、光照射による固体物性の制御に関する研究が大きな進展を見せている。これまで、理論研究においてはハバード模型やハイゼンベルグ模型などの微視的模型の解析や、磁気モーメントや格子変位を古典的に取り扱い散逸を現象論的に取り入れた半巨視的スケールの解析が行われていた。一方で、本質的に量子的な効果を取り入れつつ光照射効果による巨視的秩序の形成を議論する研究はほとんど行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では、光照射により実現する非平衡量子状態と、それが巨視的な変化や秩序を生み出す過渡ダイナミクスを明らかにすること、ならびにこれによって新たな高速物性制御の可能性を探索することを目的とした。

3. 研究の方法

主に遍歴電子と局在スピンの結合した格子模型を考え、その実時間発展や非平衡応答関数を数值的に解析した。局在スピンを古典的に取り扱うことで、散逸を取り入れた巨視的な秩序形成のダイナミクスを解析することが可能となった。

4. 研究成果

主な成果を以下に記す。

(1) スピンスカラーカイラリティの光制御[1]

スピンスカラーカイラル状態や磁気スキルミオン状態などの非共面的磁気構造は、主に空間反転対称性が破れた系において反対称相互作用によって安定化することが知られている。一方、空間反転対称性を持つ磁性体においても、幾何学的フラストレーションや遍歴電子により媒介される多重スピン相互作用によって安定化することが理論的に予言され、実験的にも報告がなされている。しかしながら、光照射によって実現する非平衡状態においてもそのような非共面的磁気構造が実現するかは明らかになっていなかった。そこで本研究では、空間反転対称性を持つ三角格子上の強磁性近藤格子模型を考え、遍歴的な電子が古典的な局在スピンと結合したダイナミクスを数值的に調べた。その結果、強磁性金属状態からスピンスカラーカイラル状態や120度ネール状態と呼ばれる非共面的・非共線的磁気構造が誘起されることが明らかになった。円偏光とスカラーカイラリティの結合は従来から知られていたが、本研究では直線偏光の印加によっても誘起されることから、新たな機構による光誘起磁気相転移であることが明らかになった。また、円偏光照射によってカイラリティのスイッチングが可能であること、パルス照射後に過渡的に磁気スキルミオンが生成されることも見出された (図1)。

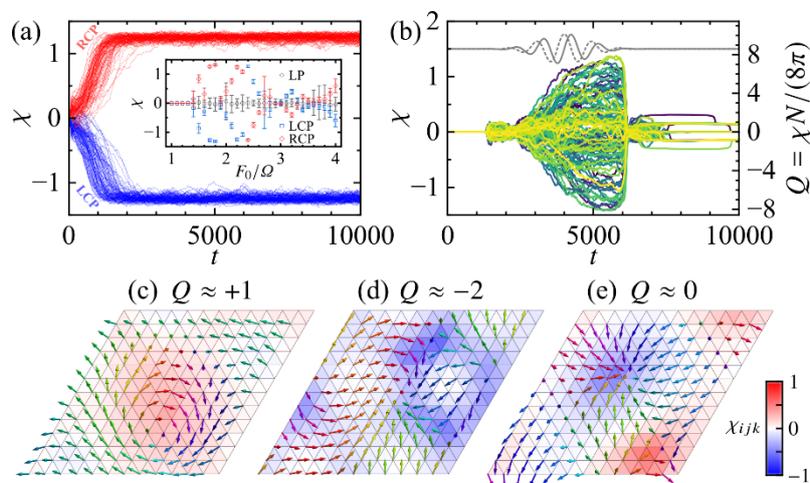


図1. (a) 円偏光を照射した場合のスカラーカイラリティの時間変化。赤色は右円偏光，青色は左円偏光に対応する。内挿図は定常状態におけるスカラーカイラリティの電場振幅依存性。(b) パルス照射の場合のスカラーカイラリティ。(c)-(e) パルス照射後の局在スピンのスナップショット。 Q はスキルミオン数を表す。文献[1]より引用。

(2) 反強磁性ディラック半金属における高速ダイナミクス[2]

スピントロニクス分野において、ある種の反強磁性体への電流印加により生じる交替的なスピントロニクストルク（ネールスピン軌道トルク）を用いた交替磁化方向のスイッチングが提案・報告され、注目を集めている。光パルス列の照射によって同様のスイッチングが可能であることも報告されているが、単一のパルスが照射された場合の磁気ダイナミクスについては明らかになっていなかった。本研究では、反強磁性ディラック半金属を対象として理論モデルを構築し、電子構造と磁気構造が結合したダイナミクスの解析を行った。その結果、光電場により誘起される反強磁性電流によってネールスピン軌道トルクが生じ、これと磁気異方性により生じるトルクの協調によって、単一の光パルス照射によっても交替磁化方向の制御が可能であることが明らかになった。また、この回転に伴ってディラック点のエネルギギャップも同時に変調されること、ならびに磁気光学効果によって交替磁化方向の実時間観測が可能であることも見出された。

(3) 結晶固体における光電場駆動ダイナミクスの解明[3,4]

近年、非摂動非線形光学現象の一つである高次高調波発生が盛んに研究されている。その素過程は電子の励起（またはイオン化）、加速、再衝突の三過程から成るものと考えられているが、量子性や多体効果まで精密に取り入れた理論は確立していない。本研究では、まず電子相関の弱い半導体を記述する格子模型において、共鳴的に励起された電子・正孔対が光電場によって駆動される際のダイナミクスを数値的・解析的に調べた[3]。これにより、電子・正孔の波束が実空間で再衝突する際に生じるバンド間電流について、そのパルス波形が励起光パルスを時間反転した波形（エコー）になること、ならびにそのスペクトルは電子・正孔対のエネルギを反映することが明らかになった。さらには、駆動パルスの振幅を変化させることで、光学的に電子・正孔対のエネルギバンド構造（分散関係）を再構成できることも見出された（図2）。詳細な解析を進めたところ、このエコー現象は電子相関の強い強相関電子系においても確認され、これを用いて多体準粒子の分散関係をも再現できることが示された。また、これらの知見を元にさらなる研究を展開し、再衝突時の電子・正孔の波束の幅を最小化するような適切な光電場波形の設計法の確立と、それによる固体からのアト秒パルス発生法を提案した[4]。

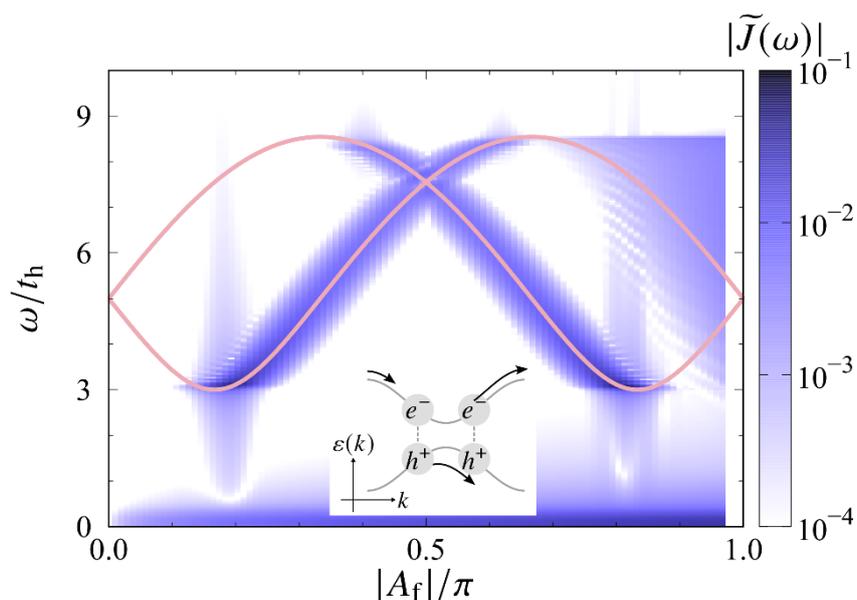


図2. バンド絶縁体におけるエコーパルスのフーリエスペクトル。横軸は駆動光振幅、縦軸は振動数であり、色は強度に対応する。明瞭なピーク構造が現れており、その中心周波数は赤色実線で示された厳密な電子・正孔対の分散関係と良く一致する。文献[3]より引用。

<引用文献>

- [1] A. Ono and Y. Akagi, *Physical Review B* **108**, L100407 (2023).
- [2] A. Ono and S. Ishihara, *npj Computational Materials* **7**, 171 (2021).
- [3] S. Imai, A. Ono, and S. Ishihara, *Physical Review Research* **4**, 043155 (2022).
- [4] S. Imai and A. Ono, *Physical Review B* **109**, L041303 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Atsushi Ono and Yutaka Akagi	4. 巻 108
2. 論文標題 Photocontrol of spin scalar chirality in centrosymmetric itinerant magnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L100407
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.L100407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chihiro Harada, Atsushi Ono, and Joji Nasu	4. 巻 108
2. 論文標題 Field-driven spatiotemporal manipulation of Majorana zero modes in a Kitaev spin liquid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L241118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.L241118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shohei Imai and Atsushi Ono	4. 巻 109
2. 論文標題 Theory for Fourier-limited attosecond pulse generation in solids	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L041303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.109.L041303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, and Sumio Ishihara	4. 巻 4
2. 論文標題 Energy-band echoes: Time-reversed light emission from optically driven quasiparticle wave packets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43155
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.043155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Ono and Sumio Ishihara	4. 巻 7
2. 論文標題 Ultrafast reorientation of the Neel vector in antiferromagnetic Dirac semimetals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Computational Materials	6. 最初と最後の頁 171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41524-021-00641-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Ono and Sumio Ishihara	4. 巻 89
2. 論文標題 Electric-Field-Induced Antiferromagnetic Insulating State in a Metallic Ferromagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 095001 ~ 095001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.095001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, and Sumio Ishihara	4. 巻 124
2. 論文標題 High Harmonic Generation in a Correlated Electron System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 157404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.157404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計28件(うち招待講演 2件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 小野淳, 奥村駿, 今井渉平, 赤城裕
2. 発表標題 スピンスカラーカイラル状態における高次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原田千宏, 小野淳, 那須謙治
2. 発表標題 キタエフスピン液体におけるエネルギー緩和がもたらすバイゾン制御の安定化
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小野淳
2. 発表標題 光電場駆動による高速ダイナミクスと磁性制御
3. 学会等名 研究会「非平衡固体物性の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野淳
2. 発表標題 光キャリア注入されたマルチフェロイクスにおける実時間ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田千宏, 小野淳, 那須謙治
2. 発表標題 キタエフ量子スピン液体におけるマヨラナゼロモードの時空間制御
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田久保耕, 上野俊輔, Samiran Banu, 于洪武, 石川忠彦, 沖本洋一, 腰原伸也, 小野淳, 西森亮太, 羽田真毅, 桑原真人, 浅香透, 小野大樹, 小澤慶太, 伊藤拓真, 重松圭, 東正樹
2. 発表標題 スピン偏極パルス電子回折によるBiFeO ₃ /SrTiO ₃ (111)薄膜の磁気構造観測と光誘起ダイナミクス測定
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi Ono, Yutaka Akagi
2. 発表標題 Photocontrol of spin scalar chirality in centrosymmetric itinerant magnets
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 All-optical momentum-resolved spectroscopy in correlated insulators
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティと円偏光自由度の非線形結合
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳
2. 発表標題 光駆動電子のスピンダイナミクスと高次高調波の偏光自由度との関係
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Ono, Yutaka Akagi
2. 発表標題 Optically controlled spin scalar chirality in centrosymmetric magnetic metals
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 Momentum-resolved spectroscopy based on time-reversed light pulses emitted from optically driven quasiparticles
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳
2. 発表標題 駆動電場パルスの波形整形によるトンネル励起電子正孔対の波束制御
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田千宏, 小野淳, 那須謙治
2. 発表標題 キタエフ量子スピン液体におけるバイゾン励起の実時間ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田久保耕, 上野俊輔, 金子水咲, 于洪武, 石川忠彦, 沖本洋一, 腰原伸也, 小野淳, 西森亮太, 矢嶋渉, 羽田真毅, 桑原真人, 浅香透, 小澤慶太, 伊藤拓真, 重松圭, 東正樹
2. 発表標題 フェムト秒電子線回折によるBiFeO ₃ /SrTiO ₃ (111)薄膜の光誘起構造ダイナミクス測定
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi Ono
2. 発表標題 Ultrafast reorientation of the Neel vector in antiferromagnetic Dirac semimetals
3. 学会等名 Electronic Properties of Two-Dimensional Systems / Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-24/MSS-20) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 Photocontrol of magnetic and electronic structures in antiferromagnetic Dirac semimetals
3. 学会等名 Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT7) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティの円偏光制御
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳
2. 発表標題 トンネル励起された電子波束による高次高調波の時間波形
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野淳
2. 発表標題 テラヘルツパルスによる強誘電体における第二高調波発生の実時間変調
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳
2. 発表標題 光駆動電子の時間反転現象を通じた高次高調波発生 of 解析
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 High harmonic generation in spontaneously symmetry broken systems
3. 学会等名 Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT7) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Imai, Atsushi Ono, Sumio Ishihara
2. 発表標題 Optical momentum-resolved spectroscopy based on time-reversal dynamics in correlated insulators
3. 学会等名 New Generation in Strongly Correlated Electron Systems (NGSCES-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Ono and Sumio Ishihara
2. 発表標題 Ultrafast reorientation of the Neel vector in antiferromagnetic Dirac semimetals
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 三角格子遍歴磁性体における光誘起スピンスカラーカイラル状態
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 相関絶縁体における光励起キャリアのエネルギー分散測定法の提案
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 反強磁性ディラック半金属における磁性・伝導性の光制御の理論II
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井渉平, 小野淳, 石原純夫
2. 発表標題 中性イオン性転移系の高次高調波発生と強結合相関効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>物質中で生じる新たな量子エコー現象を理論的に発見 https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2022/12/press20221201-03-echoes.html Predicting New Quantum Echoes https://www.tohoku.ac.jp/en/press/predicting_new_quantum_echoes.html 高強度超短光パルスによる光高調波発生の新しい仕組みを解明 http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/04/press20200420-01-kocho.html</p>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------