

令和元年6月24日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02102

研究課題名(和文) 光による超伝導コヒーレンスの量子制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on the ultrafast optical control of superconducting coherence

研究代表者

島野 亮 (Ryo, Shimano)

東京大学・低温センター・教授

研究者番号：40262042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は光による超伝導マクロ波動関数の制御、超伝導コヒーレンスの制御を目的として、光パルスあるいはテラヘルツ(THz)波パルスによって励起された超伝導体の非平衡ダイナミクスを解明することを目指した。特に、秩序変数の振幅振動に相当するヒッグスモード、位相の振動に相当するジョセフソンプラズマといった集団励起に注目し、その実時間計測を通して、超伝導秩序変数のダイナミクスを調べた。ヒッグスモードと光との相互作用を明らかにし、ヒッグスモードの非線形光学の基礎学理を築いた。銅酸化物高温超伝導体、マルチバンド超伝導体のヒッグスモードの観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、レーザー科学の進展とともに量子物質を光で自在に制御する研究が世界的に関心を集め、研究が加速している。超伝導体は量子物質の代表であり、光誘起超伝導や量子情報応用など様々な興味を持たれている。本研究はその中でも、超伝導の秩序変数の振動であるヒッグスモードと光との直接的な相互作用の解明を目指した他に例のない研究である。本研究結果により、ヒッグスモードと光との相互作用に関する基礎学理が構築されたといえる。高温超伝導体の光誘起超伝導現象に関して、転移温度以下の光励起効果を解明し、今後の研究にとって重要な進展をもたらした。

研究成果の概要(英文)：We investigated the nonequilibrium dynamics of superconductivity by using the ultrafast coherent light sources ranging from near infrared to terahertz, aiming at the light-control of superconductors. In particular, we studied the dynamics of superconducting order parameter through the observation of the Higgs mode, namely the collective amplitude mode of order parameter and the Josephson plasma resonance for the case of high T_c cuprate superconductors. We succeeded in the observation of Higgs mode high T_c cuprate superconductors through the experimental scheme of pump-probe and third harmonic generation. We also succeeded the observation of Higgs modes in multiband superconductors, such as iron-based superconductors and MgB₂, paving a new pathway to control the order parameter by light. We also revealed the effect of strong photoexcitation in single-layer cuprate superconductors in view of light-induced superconductivity.

研究分野：光物性物理学

キーワード：超伝導 ヒッグスモード 非平衡 超高速現象 テラヘルツ フェムト秒

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初は、量子物質の光制御、動的制御の研究の黎明期にあり、非平衡で初めて現れる新たな物質相の実現可能性に多くの研究者の目が向きだした段階にあった。2013年の研究代表者のグループによる従来型 s 波超伝導体のヒッグスモードの実時間観測、2014年のヒッグスモードの光駆動現象と第三高調波発生 (THG) の発見はこの流れを加速し、多くの理論研究がその後生み出され、同研究分野が勃興する目前にあった。そのような背景のもと、超伝導マクロ量子状態の光による量子操作に照準をあて、当該研究分野を世界的にリードすることを念頭に本研究は開始された。

2. 研究の目的

本研究は、光による超伝導マクロ波動関数の制御、超伝導コヒーレンスの制御を目的として、光パルスあるいはテラヘルツ (THz) 波パルスによって励起された超伝導体の非平衡ダイナミクスを解明することを目指した。特に、光励起後の超伝導秩序変数の過渡変化をフェムト秒の時間分解能で実時間観測を行い、ヒッグスモードと光との相互作用を明らかにし、ヒッグスモードの非線形光学の開拓、超伝導体の光制御の可能性の追求を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、高強度 THz 波パルスを用いた様々な非線形 THz 分光手法 (THz 高次高調波発生、THz ポンプ THz プローブ分光、光ポンプ THz 分光、THz ポンプ光プローブ分光) を駆使して、光・THz 波によって駆動される非平衡超伝導体の秩序変数の時間変化を、フェムト秒の時間分解能で観測し、秩序変数のダイナミクスを調べた。

4. 研究成果

本研究により、超伝導の非平衡ダイナミクス現象に関して実験・理論両面で多くの進展がもたらされ、特に光とヒッグスモードの相互作用についての基礎学理を築かれた。物質系を銅酸化物高温超伝導体、マルチバンド s 波超伝導体 MgB_2 、マルチバンド鉄系超伝導体へと拡張し、それらいずれの系でもヒッグスモードの観測に成功し、現象の普遍性を実証した。ヒッグスモードの観測自身が研究対象となっている状況は依然続いているが、本研究は、ヒッグスモードの観測を、光誘起超伝導などの非平衡超伝導現象の探求に応用する道筋を拓いた。本研究の成果を以下、項目ごとに記載する。

1) 光とヒッグスモードとの相互作用

超伝導ギャップ周波数以下の強い THz 波パルスを NbN 超伝導薄膜に入射すると、入射 THz 波の第三高調波 (TH) が発生し、さらに入射周波数の 2 倍の周波数が超伝導ギャップ 2Δ と一致したとき TH 強度が最大になる。この現象はヒッグスモードと電磁波の 2 光子共鳴効果として解釈することができる。この THG 増強の起源として、ヒッグスモードに加えて個別励起である電荷密度揺らぎの寄与があることが理論的に指摘され、BCS 平均場近似の範囲ではむしろ電荷密度揺らぎの寄与の方が大きいことがイタリアのグループにより理論的に示された。しかし、現実の系では電子-格子相互作用の遅延効果や不純物散乱のように平均場近似では取り扱われない機構があり、平均場近似ではヒッグスモードの寄与を何桁も過小評価してしまうことも日本の理論グループから示された。本研究ではこの 2 つの機構の寄与を区別するため、結晶の対称性と THz 波の偏光を用いた実験手法に着目した。電荷密度揺らぎの寄与が支配的であれば、NbN においては THG は入射電場の偏光に大きく依存することが予測されたが、実験では入射 THz 波の偏光によらず THG 強度はほぼ一定であった。この結果から THG には電荷密度揺らぎの寄与は少なく、ヒッグスモードの寄与が支配的であることを明らかにした。

続いて非磁性不純物散乱の効果について理論的考察を進めた。具体的には、不純物散乱の効果光学遷移の行列要素に繰り込む Mattis-Bardeen の方法を採用し、密度行列の運動方程式を解いて系の時間発展を求めた。その結果、不純物散乱の効果はヒッグスモードと光との結合の大幅な増強をもたらすことを明らかにした。同計算手法をマルチバンド超伝導体に適用した。マルチバンド超伝導体では、複数のフェルミ面の存在によって、ヒッグスモードが複数現れるだけでなく、レゲットモードと呼ばれる位相差の固有振動も現れることが予想されていた。非磁性不純物散乱による効果を考慮してマルチバンド超伝導体の応答を調べた結果、超伝導秩序変数の虚部の運動は実部の運動よりも小さいこと、即ち、光によって誘起されるレゲットモードの振幅がヒッグスモードの振幅よりも小さいことを明らかにした。その起源は、不純物散乱が実部の運動を増強するのに対して、虚部の運動には関与しないことにある。三次の非線形応答を調べた結果、個別励起の寄与はヒッグスモードに比べて一桁ほど小さく、レゲットモードの寄与は散乱レートとフェルミエネルギーの比によって決まるが、通常は数桁小さいこと、従って汚れた極限の超伝導体による THG はヒッグスモードに支配されることを明らかにした。

2) 銅酸化物高温超伝導体のヒッグスモード

d 波ペアリング超伝導体である銅酸化物高温超伝導体では、近年、電荷密度波と超伝導との相関・競合が重要課題となっており、さらにそれら多重秩序の光制御の可能性が模索されている。ヒッグスモードの観測は競合秩序の相関を明らかにする新たなプローブとなることが期待される。実際、d 波超伝導体におけるヒッグスモードに関して近年数多くの理論的な研究が報

告されている。そこで本研究では、典型的な d 波超伝導体である銅酸化物高温超伝導体におけるヒッグスモードの観測を目指した。高強度 THz 波パルスを用いて $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (以下 $\text{Bi}2212$) に照射し、誘起された非平衡ダイナミクスを近赤外光パルスの反射率変化を通して測定した。

その結果、反射率変化に s 波超伝導体と同様に入射 THz 電場の 2 乗波形に追従して振動する信号成分 (振動成分) が現れることがわかった。この振動成分は超伝導転移温度以下で急激に発達することから、超伝導秩序の発達に関連する 3 次の非線形光学応答であることがわかった。この超伝導状態において顕著に現れる非線形応答の起源としては、ヒッグスモードの他に個別励起による電荷密度ゆらぎも考えられたが、ポンプ THz 波パルスとプローブ近赤外光パルスの電場の偏光依存性から、ポンプ光とプローブ光の偏光角度に無依存な A_{1g} 成分が正孔ドーパ濃度によらず常に支配的であることがわかった。理論計算との比較から、この A_{1g} 成分はヒッグスモードに由来すると結論した。これは d 波超伝導体のヒッグスモードの初めての観測例である。

続いて、ドイツ・ドレスデンの HZDR 研究所の加速器施設にある超放射 THz 波光源 TELBE において、3 種類の銅酸化物超伝導体 $\text{Bi}2212$ 、 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ 、 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ に対して THz-THG の観測実験を行った。いずれの試料においても超伝導状態で THG の観測に成功した。THG は超伝導転移温度以下で急増し、また入射 THz 波の偏光に依存しないことから、観測された THG はヒッグスモードに起因すると結論づけた。

3) 銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ の超伝導ゆらぎ

ヒッグスモード観測の応用として、銅酸化物高温超伝導体における超伝導ゆらぎを調べた。超伝導ゆらぎは転移温度以上でのクーパ対形成や位相コヒーレンス形成と関連しており、銅酸化物超伝導体においてそれらがどの温度から発達しているかは超伝導発現機構にも関連して重要な問題である。このため、超伝導ゆらぎは THz 帯の光学伝導度やネルンスト効果など様々な実験手法を用いて調べられてきたが、超伝導ゆらぎのオンセット温度は手法ごとに異なり、統一的理解は得られていない。ヒッグスモードは超伝導秩序形成、特に超伝導位相コヒーレンスのオンセット温度を直接決定する手法になると考えられる。そこで様々な正孔濃度の $\text{Bi}2212$ 試料に対してヒッグスモードを近赤外光パルスの反射率変化を通して測定した。その結果、 $\text{Bi}2212$ における超伝導の位相コヒーレンスオンセット温度が全ての正孔濃度の試料において超伝導転移温度よりも 10~30 K 程度高いことを明らかにし、位相コヒーレンスの発達温度に関して重要な示唆を得た。

4) 多バンド超伝導体

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ はブリルアンゾーン Γ 点にホールバンド、M 点に電子バンドを持ち、それぞれのフェルミ面に異なる大きさの超伝導ギャップが開くマルチバンド超伝導体である。そのクーパ対形成にはバンド間相互作用が重要な役割を果たしていると考えられており、ギャップの対称性などが盛んに議論されている。ヒッグスモードにもバンド間相互作用の影響が現れると考えられたため、 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ のヒッグスモードの観測を試みた。試料に THz 波を照射すると、光学伝導度にポンプ THz 波の 2 乗波形に追従した振動が観測された。特に Γ 点の超伝導ギャップエネルギーに相当する低周波数領域では、ギャップ端と超流動密度の振動が明瞭に観測された。詳細な温度依存性測定から、この点のヒッグス振動は強いバンド間結合により M 点を介して駆動されていることを明らかにした。同じくマルチバンド超伝導体である MgB_2 に対しても THz-THG 実験を行った。 MgB_2 はホウ素 sp^2 混成軌道からなる σ バンドと π バンドでフェルミ面が構成されている。 MgB_2 においても THG の観測に成功し、さらに π バンドの超伝導ギャップに THz 波が 2 光子共鳴したときに THG が増強することを明らかにした。

5) 電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化

超伝導秩序変数の振幅の振動モードであるヒッグスモードは、電気・磁気分極を伴わないので、電磁波と線形には結合せず、線形応答としては観測できない。しかし、最近、超伝導体に直流電流を印加すると、電流に平行な電場成分を持つ偏光の電磁波とヒッグスモードが線形に結合し、線形吸収として光学伝導度に現れることが理論的に予測された。そこで、 NbN の薄膜に臨界電流密度に匹敵する直流電流を流しながら弱い THz 波を入射させ、透過した THz 波を時間分解測定することで、直流電流の注入による光学伝導度の変化を求めた。その結果、測定する偏光の方向が電流と平行な配置において、確かに超伝導ギャップ付近に電流密度の 2 乗に比例するピークが現れることを実験により示すことに成功した。電流と偏光が直交する配置ではこのピークは消失することから、これは電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化現象であると結論した。

6) 銅酸化物高温超伝導体の光強励起効果: $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

銅酸化物超伝導体は、超伝導を担う銅酸化物面と絶縁ブロック層とが c 軸方向に積層した構造を有する。超伝導転移を示すと銅酸化物面内のクーパ対がジョセフソン効果により層間をトンネリングできるようになる。この c 軸方向のクーパ対の集団運動はジョセフソンプラズマ共鳴と呼ばれ、THz 帯の c 軸反射率スペクトルに急峻なプラズマエッジとして現れる。ジョセフソンプラズマは c 軸超伝導コヒーレンスの発達を表すことから、近年では光誘起超伝導状態の光学プローブとして用いられている。しかし、観測された光学スペクトルを光誘起超伝導と解釈して良いかどうかは議論が続いており、現段階でも依然結論が得られていない。超伝導転移温度以下の光励起の影響についても整合性のある結果が得られていなかった。そこで本研究では、超伝導転移温度以下での光強励起した際の超伝導状態の振る舞いを明らかにするために、典型的な銅酸化物超伝導体の一つである $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ を対象に、ジョセフソンプラズマ共鳴

の観測をプローブとして調べた。La_{2-x}Sr_xCuO₄の不足ドーブ(x = 0.125)から最適ドーブ(x = 0.15)の試料を用いて、近赤外光を用いて励起した際のc軸方向のTHz応答を調べた結果、いずれのドーブ濃度においても、励起強度を強めることによってジョセフソンプラズマ周波数が低周波側へとシフトしていく様子が見られ、転移温度以下では強い光励起は超伝導破壊をもたらすこと、過渡光学スペクトルは、光励起により生じるサンプルの熱化の影響を考慮したシミュレーションによりよく再現できることを明らかにした。さらに、従来より光誘起超伝導の解析に用いられてきた、近赤外ポンプとTHzプローブのサンプルへの侵入長の違いを考慮するモデルに適用限界があることを明らかにし、銅酸化物高温超伝導体の光強励起現象の理解に貢献した。

5. 主な発表論文等 (計 10 件)

Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano, Nonlinear terahertz spectroscopy of Higgs mode in s-wave superconductors, **Physica Scripta** 査読有 **92**, 2017, 024003/1-8
doi: 10.1088/1402-4896/aa5327

Fumiya Sekiguchi, Toshimitsu Mochizuki, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Ryo Shimano, Anomalous metal phase emergent on the verge of an exciton Mott transition, **Phys. Rev. Lett.** 査読有, **118**, 2017, 067401/1-6
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.067401>

Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano, Higgs mode excitation in superconductors by intense terahertz pulse, **Proceedings SPIE**, 査読無, **9835**, 2016, 83351G-1-7
doi: 10.1117/12.2223010

Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Ryo Shimano, Exciton Mott transition in GaAs studied by terahertz spectroscopy, **Proceedings SPIE**, 査読無, **10102**, 2017, 101020T-1-6, doi: 10.1117/12.2250735

Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Kazumasa Makise, Hirotaka Terai, Hideo Aoki, and Ryo Shimano, Polarization-resolved terahertz third-harmonic generation in a single-crystal superconductor NbN: Dominance of the Higgs mode beyond the BCS approximation, **Phys. Rev. B**, 査読有, **96**, 2017, 020505/1-5
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.020505>

Kota Katsumi, Naoto Tsuji, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Hideo Aoki, Yann Gallais, and Ryo Shimano, Higgs Mode in the d-Wave Superconductor Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} Driven by an Intense Terahertz Pulse, **Phys. Rev. Lett.** 査読有, **120**, 2018, 117001/1-6
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.117001>

Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano, Rate Equation Analysis of the Dynamics of First-order Exciton Mott Transition, **J. Phys. Soc. Jpn.** 査読有, **68**, 2017, 103702/1-5
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.103702>

Yuta Murotani, Masayuki Takayama, Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Ryo Shimano, Terahertz field-induced ionization and perturbed free induction decay of excitons in bulk GaAs, **J. Phys. D: Appl. Phys.** 査読有, **120**, 2018, 114001/1-10, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aaa989/meta>

Yuta Murotani and Ryo Shimano, Nonlinear optical response of collective modes in multiband superconductors assisted by nonmagnetic impurities, **Phys. Rev. B** 査読有, **99**, 2019, 224510/1-15, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.224510>

Sachiko Nakamura, Yudai Iida, Yuta Murotani, Ryusuke Matsunaga, Hirotaka Terai, and Ryo Shimano, Infrared activation of Higgs mode by supercurrent injection in a superconductor NbN, **Phys. Rev. Lett.** in press.
<https://journals.aps.org/prl/accepted/8b07aYdbJb91c55657a954413236f5c139f64d9a7>

[学会発表] (計 43 件)

- (1) Ryo Shimano, Nonlinear THz spectroscopy of collective modes in superconductors, Low Energy Electrodynamics in Solids 2016, 2016 (招待講演)
- (2) Ryo Shimano, Ultrafast Nonlinear Terahertz Spectroscopy of Quantum Condensates in Solids, CLEO:2016, 2016 (招待講演)
- (3) Ryo Shimano, Study of nonequilibrium responses in quantum matter - from QHE to superconductor, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, 2016 (招待講演)
- (4) Ryo Shimano, Ultrafast spectroscopy of Higgs modes in superconductors, International Research School: Electronic States and Phases Induced by Electric or Optical Impacts IMPACT 2016, 2016 (招待講演)
- (5) 濱田裕紀, 富田圭祐, 泊開人, 松永隆佑, 李祈願, 宮坂茂樹, 田島節子, 島野亮,

YBa₂Cu₃O_y 単結晶におけるテラヘルツ波パルス誘起超高速コヒーレント非線形光学応答, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016

- (6) 富田圭祐, 松永隆佑, 川合将敬, 浅見大亮, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮, THz ポンププローブ分光による Fe(Se,Te)薄膜における超伝導ゆらぎの観測, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017
- (7) 泊開人, 濱田裕紀, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮, 高温超伝導体 La_{2-x}Sr_xCuO₄ の光励起非平衡状態におけるジョセフソンプラズマの観測, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017
- (8) 勝見恒太, 濱田裕紀, 松永隆佑, R.D. Zhong, J. Schneeloch, G.D. Gu, Y. Gallais, 島野亮, Bi₂Sr₂CaCuO_{8+x} 単結晶におけるテラヘルツ波励起非平衡ダイナミクス, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017
- (9) Ryo Shimano, Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, 2017 (招待講演)
- (10) Ryo Shimano, THz study of photoexcited dynamics in high Tc superconductors, International Workshop on Non-Linear Effects and Short-Time Dynamics in Novel Superconductors and Correlated Spin-Orbit Coupled Systems, 2017 (招待講演)
- (11) Ryo Shimano, A light-induced metastable phase in superconducting La_{2-x}Sr_xCuO₄, International Workshop on Ultrafast dynamics and metastability, 2017 (招待講演)
- (12) Ryo Shimano, A light-induced nonequilibrium phenomena in high Tc cuprate superconductors, International Workshop on Frontiers of Research in Quantum Materials, Max Planck Institute, 2017 (招待講演)
- (13) Kota Katsumi, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Yann Gallais, and Ryo Shimano, Exploring Thz-induced dynamics of a d-wave superconducting condensate in the cuprate Bi₂Sr₂CaCuO_{8+x}, 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, 2017
- (14) Kota Katsumi, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Yann Gallais, and Ryo Shimano, Terahertz pulse induced non-equilibrium dynamics of a d-wave cuprate superconductor, The International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS 2017, 2017
- (15) 松永隆佑, 辻直人, 牧瀬圭正, 寺井弘高, 青木秀夫, 島野亮, 超伝導体 NbN の偏光分解テラヘルツ第三高調波発生: ヒッグスモードの支配的寄与と BCS 近似の破綻, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017
- (16) 丹羽宏彰, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮, テラヘルツ分光による銅酸化物超伝導体 La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄ の光励起ダイナミクスの観測, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017
- (17) 富田圭祐, 松永隆佑, 川合将敬, 浅見大亮, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮, テラヘルツポンププローブ分光で探る Fe(Se,Te)薄膜の超伝導およびネマティック秩序, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017
- (18) 丹羽宏彰, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮, 銅酸化物超伝導体 La_{2-x}Sr_xCuO₄ における光誘起準安定相の発見, 京大低温センター研究交流会, 2018
- (19) 丹羽宏彰, 吉川尚孝, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮, 銅酸化物超伝導体 La_{2-x}Sr_xCuO₄ のテラヘルツ帯光励起非平衡ダイナミクスの観測, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018
- (20) 島野亮, 高強度テラヘルツ波が拓く固体物性研究の新展開, 日本分光学会年次講演会シンポジウム[テラヘルツ分光技術の最先端応用], 2017 (招待講演)
- (21) 島野亮, 高強度テラヘルツ波が拓く物性研究の新展開, 強光子場科学研究懇談会, 2017 (招待講演)
- (22) 島野亮, 光による物質相制御の現状と展望, 東北大学金属材料研究所ワークショップ「多自由度・多階層性が協奏する物質材料システムの科学」, 2017 (招待講演)
- (23) Ryo Shimano, Nonequilibrium dynamics of superconductors, MPI-UBC-UTokyo Winter School, 2018 (招待講演)
- (24) Ryo Shimano, Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, The International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), 2018 (招待講演)
- (25) Ryo Shimano, Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, Colloquium at The Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), 2018 (招待講演)
- (26) Ryo Shimano, Photo-induced nonequilibrium dynamics in superconductors, ENS-UT Workshop on Physics, 2018 (招待講演)
- (27) Ryo Shimano, Light-induced Nonequilibrium Dynamics in Superconductors, Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials Workshop 2018, 2018 (招待講演)
- (28) Ryo Shimano, Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, The Hamburg Photon Science Colloquium at Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter, Center for Free- Electron Laser Science (CFEL), 2019 (招待講演)
- (29) Kota Katsumi, Naoto Tsuji, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch,

- Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Hideo Aoki, Yann Gallais, and Ryo Shimano, Observation of Higgs mode in the d-wave superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_{8+x}$ by THz pump-optical probe spectroscopy, Low Energy Electrodynamics of Solids(LEES2018), 2018
- (30) S. Nakamura, Y. Iida, R. Matsunaga, H. Terai, and R. Shimano, Infrared-active Higgs mode in an s-wave superconductor NbN under DC current injection, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), 2018
- (31) K. Katsumi, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais and R. Shimano, Observation of superconducting fluctuation in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_{8+x}$ thin films by the intense terahertz pulse-driven Higgs mode, 2018 Workshop Max Plank-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, 2018
- (32) H. Niwa, N. Yoshikawa, D. Song, H. Eisaki, R. Shimano, Photoexcited nonequilibrium state of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ investigated by terahertz spectroscopy, 2018 Workshop Max Plank-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, 2018
- (33) N. Yoshikawa, K. Isoyama, K. Tomita, N. Shikama, T. Ishikawa, F. Nabeshima, A. Maeda, R. Shimano, Ultrafast carrier dynamics of FeSe thin film investigated by time-resolved terahertz spectroscopy, 2018 Workshop Max Plank-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, 2018
- (34) Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano, Terahertz spectroscopy of the cuprate superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ in the photoexcited nonequilibrium state, APS March meeting 2019, 2019
- (35) 丹羽宏彰, 吉川尚孝, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮, $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起非平衡状態における c 軸テラヘルツ応答のドーブ濃度依存性, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018
- (36) 吉川尚孝, 丹羽宏彰, Dongjoon Song, 永崎洋, 玉作賢治, 田中義人, 大沢仁志, 久保田雄也, 山本航平, 山神光平, 平田靖透, 和達大樹, 島野亮, 時間分解 X 線回折による銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起結晶構造ダイナミクス, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018
- (37) 中村祥子, 飯田雄大, 室谷悠太, 松永隆佑, 寺井弘高, 島野亮, 直流電流注入下での s 波超伝導体 NbN の赤外活性ヒッグスモード, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018
- (38) 中村祥子, 富田圭祐, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮, 電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第 2 高調波発生, 第 10 回東京大学低温センター研究交流会, 2019
- (39) 富田圭祐, 磯山和基, 吉川尚孝, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮, マルチバンド超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜におけるヒッグスモード, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019
- (40) 勝見恒太, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais, 島野亮, テラヘルツ波誘起ヒッグスモードを用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_{8+x}$ 薄膜における超伝導ゆらぎの観測, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019
- (41) 室谷悠太, 島野亮, 2 バンド超伝導体における集団励起と非線形光学応答: 非磁性不純物散乱の効果, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019
- (42) 島野亮, 超伝導体のヒッグスモード-光による秩序変数操作に向けて-, 日本物理学会 2018 年秋季大会領域 4、領域 5 合同シンポジウム「光と固体中の電子・スピンの織り成す新奇量子現象」, 2018 (招待講演)
- (43) 島野亮, 非従来型超伝導体のヒッグスモード, KEK 連携コロキウム・研究会エディション, 2019 (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://thz.phys.s.u-tokyo.ac.jp/publications.html>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：松永 隆佑

ローマ字氏名：Matsunaga Ryusuke

研究者番号：50615309

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。