

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00686

研究課題名（和文）量子干渉増幅機構を応用したアクシオン暗黒物質の探索

研究課題名（英文）Dark matter Axion search using quantum-coherence amplification mechanism

研究代表者

笹尾 登（SASAO, Noboru）

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任教授

研究者番号：10115850

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では質量が meV 領域にある比較的軽い暗黒粒子（アクシオンあるいは暗黒フォトン）を、量子干渉性増幅機構と呼ばれる方法を用いて探索する。この目的に沿い、(1)セシウム原子を標的とし選択し、これを磁気光学トラップ技術を用い収集冷却した。(2)セシウム原子集団のコヒーレンスを測定するため、これに必要なパラメータである禁止遷移(8P-6P)の行列要素を実験により確定した。(3)更に希土類がドープされた結晶において周期的な超放射現象を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「暗黒物質の正体は何か？」この疑問に明快な答えを与えることは、宇宙論や素粒子論の将来を切り開く喫緊の課題となっている。本研究は量子干渉性増幅機構と呼ばれる方法を用い、比較的軽い暗黒粒子(meV 質量領域)に対し感度のある探索方法を開発した。また周期的な超放射現象を発見した。この現象は我々の知る限り報告されておらずそれ自体興味深い。それとともに新たなコヒーレント光源に発展する可能性がありその点でも意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we search for relatively light-dark particles (axions or dark photons) whose masses are in the meV region using the method called a quantum coherence amplification mechanism. For this purpose, (1) cesium atoms were selected as a target and collected/cooled using magneto-optical trapping techniques. (2) The forbidden transition (8P-6P) matrix element, a crucial parameter to determine the coherence of the cesium ensemble, was experimentally determined. (3) In addition, we discovered periodic super-radiance in rare-earth doped crystals.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：dark matter axion dark photon quantum coherence

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

良く知られているように、宇宙の約四分の一は暗黒物質と呼ばれる未知の粒子で構成されている。暗黒物質は重力相互作用はするものの、光学や電波望遠鏡などの手段では直接観測することは出来ない。暗黒物質は宇宙にあまねく存在し、中性かつ安定で、非相対論的な運動をしている粒子と考えられている。暗黒物質は我々の周り(太陽系)にも存在し、その質量密度は $\rho_{dm} = 0.3 \sim 0.45 \text{ GeV/cm}^3$ 程度と評価されている。暗黒物質の質量を理論的に予言することは残念ながら難しい。「暗黒物質の正体は何か？」この疑問に明快な答えを与えることは、宇宙論や素粒子論の将来を切り開く喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

現在までに暗黒物質は2-3の候補粒子に絞られつつある。その一つはWIMP(Weakly interacting massive particle)と呼ばれる未発見粒子で、その質量は一般に重い($\gg \text{ GeV}$)。他の一つは、本研究が対象とするアクシオンや暗黒フォトンと呼ばれる未発見粒子であり、質量が軽い($\ll \text{ eV}$)のが特徴である。アクシオンは元来、強い相互作用に於ける理論と実験の矛盾(“Strong CP”問題)を解決するために導入された粒子である。暗黒物質としての性質も兼ね備えているため「一石二鳥」の説得力のあるシナリオとなっている。一方の暗黒フォトン、標準理論を超える多くの模型が予言する $U(1)$ 対称性から生まれる光に類似した仮想的粒子である。有限の質量を有し、通常の光と“Kinetic Mixing”と呼ばれる機構で混合するとされている。

本研究では特に $\sim \text{ meV}$ の質量を持ったアクシオン・暗黒フォトンを探索する。このために、既に実験的に証明された「巨視的な量子干渉性による増幅機構」を、原子分子を標的とするアクシオン・暗黒フォトン吸収過程に適用し、探索する。もし発見出来れば、質量と共に速度分散等の物理量も測定する。また発見されないときは、質量領域の拡大と高感度化のための技術開発を行う。

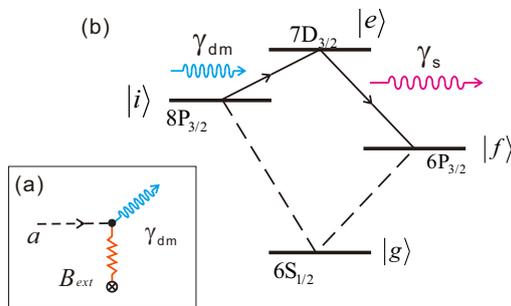


図 1: (a) アクシオンと磁場の散乱 (Primakoff 過程), (b) セシウム原子エネルギー準位図と暗黒フォトン探索過程

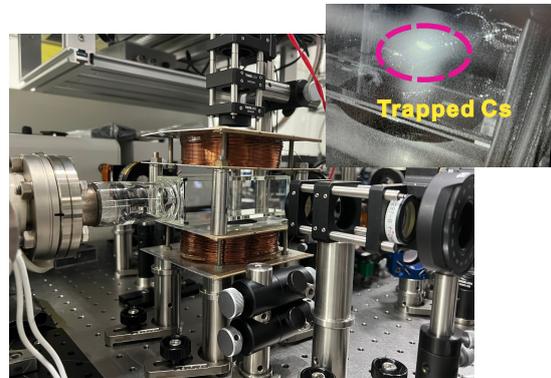


図 2: 磁気光学トラップ (MOT) 装置および MOT に捕獲されたセシウム原子写真

3. 研究の方法

磁場中にアクシオンが侵入すると図 1(a) に示されるように静磁場 (B_{ext}) と散乱し、仮想光子 γ_{dm} に転換する。本研究においては、仮想光子 γ_{dm} の原子による吸収過程

$$|i\rangle + \gamma_{dm} \rightarrow |e\rangle \rightarrow |f\rangle + \gamma_s \tag{1}$$

に注目する。ここで $|i\rangle, |e\rangle, |f\rangle$ は標的の励起あるいは基底状態を表す。実験的には、 $|e\rangle \rightarrow |f\rangle$ の遷移で生まれる光 (信号光 γ_s) を検出する。暗黒フォトン場合は直接的に γ_{dm} を暗黒

フォトン自身と見做せばよい。実験の観点からは磁場の有無を別にすると、アクシオンの場合と同一とみなして良いので、以後は γ_{dm} を暗黒フォトンと記す。通常の条件下では、このような過程の反応確率は極めて小さい。我々は量子干渉効果を用いて上記過程を増幅する。量子干渉増幅過程とは、一言で言うと標的集団のもつ位相を遷移振幅が建設的に干渉するように制御し、その結果として生ずる増幅効果である。量子力学の教えに従うと、多粒子系の反応頻度(レート)は、個々の粒子に対する反応振幅を計算し、その和を二乗することによって得られる。しかし通常は、個々の粒子が持つランダムな位相のため振幅間の干渉項は全て消え去り、このため反応レートは全粒子数 N に比例する。この場合、例えば脱励起レートは“Exponential Law”($\propto N e^{-t/\tau}$)に従う(τ は自然寿命)。ところが原子や分子に対しては、主としてレーザー技術の進展に伴い、その位相を制御し量子干渉性を顕在化させることが可能になってきた。この増幅原理は別実験により検証済みであり、増幅率 $> 10^{18}$ を得ている [1][2]。

4. 研究成果

研究成果は大別すると次の4点にまとめることが出来る。即ち(1) 標的原子の選択と標的製作、(2) コヒーレンスの測定のための禁止過程の測定、(3) 周期的超放射過程の発見と解析、(4) より詳細な理論的考察。以下ではこれらを順次詳述する。

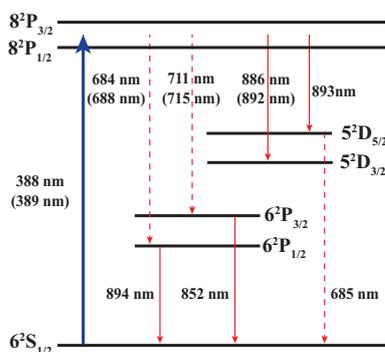


図 3: 禁止遷移測定関連エネルギー準位図

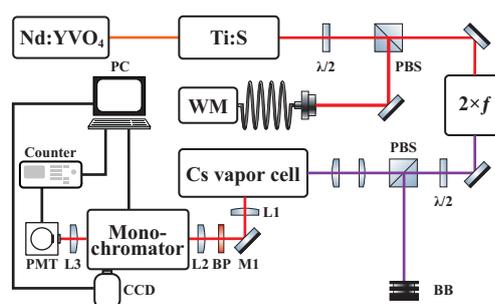


図 4: 禁止遷移測定セットアップ図

(1) 標的原子の選択と標的製作

標的となる原子や分子は、式(1)に示した過程を実現するのに適切なエネルギー準位をもつことに加え、量子干渉増幅を可能にする条件が満たされなければならない。後者についてはレーザー照射でコヒーレンス(量子的重ね合わせ状態)を作ることが肝要となる。標的としては、バックグラウンドとの関連から低温にすることが可能で、数量も多くとれることも重要である。以上の条件および現有設備等を勘案し、セシウム原子が最も適切であると判断した。図1(b)に使用するセシウム原子のエネルギー準位を示す。即ち $|g\rangle = 8P_{3/2}$, $|i\rangle = 8P_{3/2}$ (3.1977 eV), $|e\rangle = 7D_{3/2}$ (3.2295 eV), $|f\rangle = 6P_{3/2}$ (1.4546 eV) である。探索する暗黒フォトンの質量はおおよそ 32 meV となる。 $|g\rangle - |i\rangle$ ($\lambda_{ig} = 388$ nm) 及び $|g\rangle - |f\rangle$ ($\lambda_{fg} = 852$ nm) 間にレーザーを照射し、コヒーレンス ρ_{if} を作り出す。

実際の標的は磁気光学トラップ(MOT)の技術を用い、収集冷却する。MOTについてはCooling/repump用レーザを準備し、予備的な実験を進めた。この結果Cs原子のトラップに成功した。図2はMOT装置とトラップされたセシウム原子の写真である。より詳細な性能試験(トラップ時間やトラップ数)と探索実験を可能にする科学チェンバーの製作を計画している。

(2) 禁止遷移の測定 [3]

コヒーレンス ρ_{if} は本実験にとり極めて重要なパラメータである。これを次のような方法で直

Transition	λ (nm)	Experiment		Theory	
		R (Hz)	Ratio	A (Hz)	Ratio
$8P_{3/2} \rightarrow 6P_{1/2}$	684	$(8.56 \pm 0.54) \times 10^1$	$(7.32 \pm 0.50 \pm 0.98) \times 10^{-5}$	2.27	6.99×10^{-5}
$8P_{3/2} \rightarrow 6P_{3/2}$	711	$(7.17 \pm 0.63) \times 10^1$	$(6.13 \pm 0.56 \pm 0.82) \times 10^{-5}$	2.21	6.83×10^{-5}
$8P_{3/2} \rightarrow 5D_{3/2}$	886	$(1.17 \pm 0.03) \times 10^6$	1	3.20×10^4	1
$8P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$	893	$(9.58 \pm 0.13) \times 10^6$	$8.19 \pm 0.24 \pm 0.60$	3.24×10^5	9.86
$8P_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$	715	$(7.72 \pm 0.75) \times 10^1$	$(9.10 \pm 0.91 \pm 1.22) \times 10^{-6}$	4.55	11.1×10^{-6}
$8P_{1/2} \rightarrow 5D_{3/2}$	892	$(8.51 \pm 0.21) \times 10^6$	1	4.11×10^5	1

表 1: R は効率 (PMT の量子効率や分光器効率等) を補正した計測率、Ratio は許容遷移 $8P_{3/2} \rightarrow 5D_{3/2}$ に正規化後の値を表す。Theory の部は対応する理論計算結果。

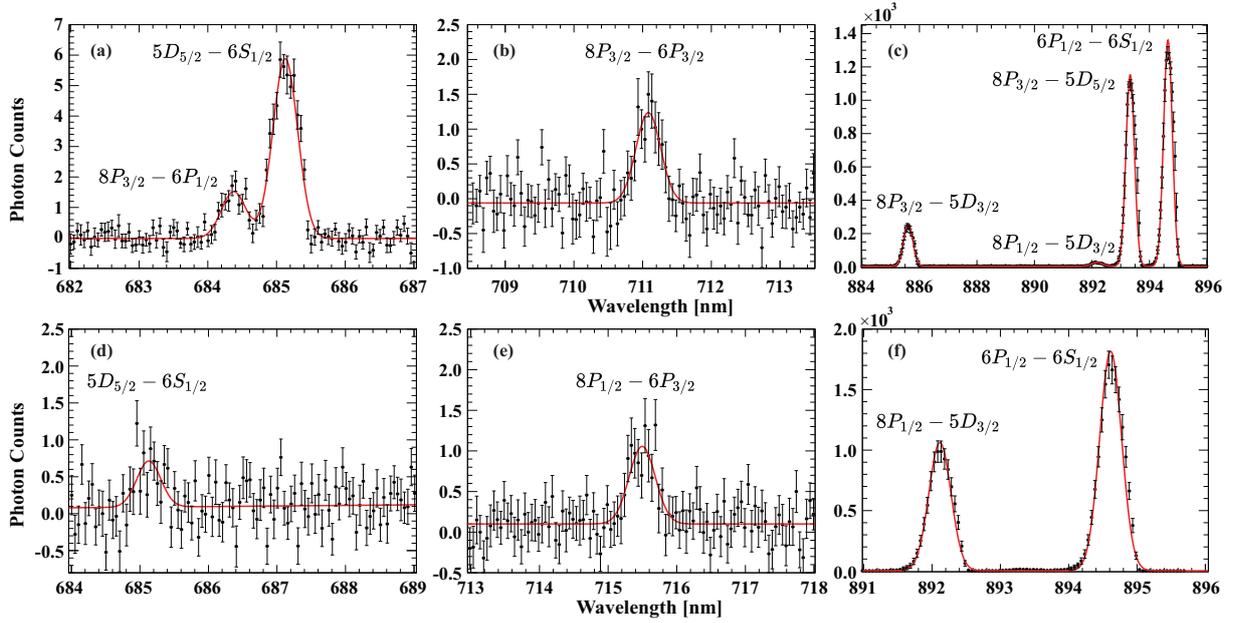


図 5: 蛍光信号スペクトル

接的に測定する。Cs 原子に於いて $|i\rangle = 8P_{3/2}$ から $|f\rangle = 6P_{3/2}$ の遷移は同一パリティをもつため、E1 禁止 E2 許容遷移である。もし $|i\rangle - |f\rangle$ 間の E2 行列要素が分かれば量子干渉性で増幅された反応レートが計算できる。逆に反応レートを実測すれば、唯一の未知パラメータである ρ_{if} が測定できる。実験的にはポンプレーザー ($\lambda_{ig}, \lambda_{fg}$) を同一直線状に入射し、波長 711nm ($\lambda_{ig} - \lambda_{fg}$ に対応) の信号光を観測する。これが実験原理である。但しこの E2 行列要素は残念ながら測定されておらず、また計算値も存在しない。そこで我々は Cs 原子セルにポンプレーザー (λ_{ig}) を入射し、レーザー誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence) を用いて E2 遷移行列を測定することとした。図 3 に禁止遷移測定関連のエネルギー準位を、図 4 に測定セットアップ図を掲げる。主要な実験装置はレーザーシステム (Ti:S+2xf)、セシウム原子ガスセル (Cs vapor cell)、分光器 (Monochromator)、及び光電子増倍管 (PMT) である。レーザー光をセシウム原子ガス標的に入射すると、図 3 に示された様々な遷移に伴う光が生ずるが、これを分光器と光電子増倍管でカウントする。図 5 には蛍光信号スペクトルを掲げた。また得られたデータを統計処理した結果を表 1 に示した。表中 Theory は “CI+MBPT” と呼ばれる手法を用いた理論計算である。実験と理論は精度よく一致していることが判明した [3]。

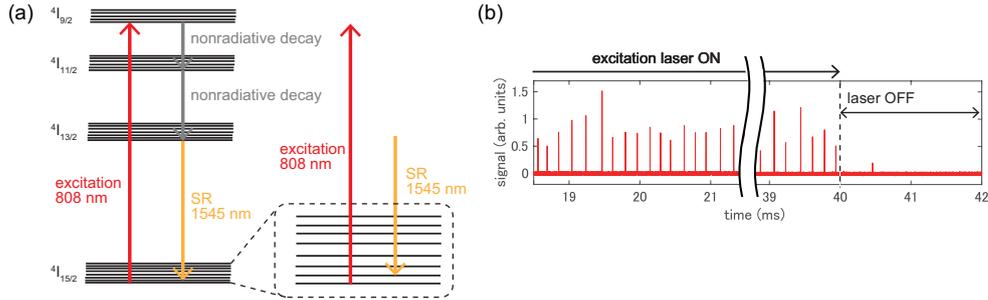


図 6: (a) Er^{3+} イオンエネルギー準位図。(b) 観測された超放射光の波形図例。励起レーザーは時間 [0,40] msec の間照射されている。

(3) 周期的超放射過程 [4]

希土類元素を添加した結晶はレーザー媒体として広く使われている。もしコヒーレンスを発達させることが出来るならば、このような結晶は暗黒物質の探索に使用可能である。そこで $\text{Er}^{3+}:\text{YSO}$ 結晶 (Y_2SiO_5) における超放射観測を目指した。超放射はコヒーレンス発達の結果生まれる現象であること、また Er^{3+} の遷移は $4f$ 電子間の遷移であり、周囲を $5s$ 電子で囲われているため、外場の影響を受けにくいことを考慮した。 Er^{3+} のエネルギー準位を図 6(a) に示す。基底状態 $^4I_{15/2}$ に励起レーザー (808 nm) を照射し $^4I_{9/2}$ 励起すると、主としてフォノン遷移で脱励起し、 $^4I_{13/2}$ (の最下位サブレベル) に蓄積する。ここで自発的にコヒーレンスが発達し、超放射が起きる。実際の実験では周期的な放射を繰り返す超放射現象を発見した。この現象の特徴は以下のとおりである (結晶温度は約 4K)。超放射の周期は平均 $160 \mu\text{s}$ である。但し平均値を中心に $50 \mu\text{s}$ 程度のランダムな変動がある。1つの超放射パルスの時間幅は典型的には 30 ns であり、これも 20 ns 程度の幅で変動する。また超放射パルスは概ね 10^{12} 個程度の光子から成り立つ。超放射はほぼ単色であり (波長 $1.55 \mu\text{m}$)、その線幅は 100 MHz 以下程度である。測定された線幅は、結晶が有すると予想される不均一幅 (1 GHz) に比較して小さい。標的を変化させると閾値 (約 20 K 程度) が確認され、それ以上になると超放射は観測されなくなる。周期的な超放射現象は、知る限り報告されておらず興味深い現象であるといえよう [4]。

(4) 理論の進展

新たに次の 2つの着想を得た。その一つは結晶中の添加元素を用いた暗黒物質探索実験であり、関連するレーザーを全て同一軸に照射できるという特徴がある。この場合ファイバーなども使用可能で新たな実験プラットフォームの可能性を開く。他の一つは周期的超放射の解析模型である。この模型を用いれば周期やそれに伴うフォトン数、コヒーレンスなども予言可能となる。いずれも論文にまとめる計画である。

参考文献

- [1] “原子からニュートリノを引き出せるか”, 田中実・笹尾登・吉村太彦, 物理学会誌 **1**, 1, (2018)
- [2] “Observation of coherent two-photon emission from the first vibrationally-excited state”, Y. Miyamoto, N. Sasao et al., Prog. Theor. Exp. Phys., **2014**, 113C01 (2014)
- [3] “Measurement of cesium $8P_J \rightarrow 6P_J$ electric quadrupole transition probabilities using fluorescence spectroscopy”, J. Wang, Y. Miyamoto, H. Hara, M. Tanaka, M. Tashiro, and N. Sasao, Phys. Rev. A, in press, arXiv:2405.06257v1 [physics.atom-ph]
- [4] “Periodic superradiance in an Er:YSO crystal”, H. Hara, J. Han, Y. Imai, N. Sasao, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, and Y. Miyamoto, Phy. Rev. Res. **6**, 013005 (2024)

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 H. Hara, J. Han, Y. Imai, N. Sasao, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, and Y. Miyamoto	4. 巻 6
2. 論文標題 Periodic superradiance in an Er:YSO crystal	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW RESEARCH	6. 最初と最後の頁 013005-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.6.013005	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 J. Wang, Y. Miyamoto, H. Hara, M. Tanaka, M. Tashiro, and N. Sasao	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement of cesium $8P_{J=1} \rightarrow 6P_{J=1}$ electric quadrupole transition probabilities using fluorescence spectroscopy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Phy. Rev. A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 原秀明, 宮本祐樹, Junseok Han, 笹尾登, 今井康貴, 植竹智, 平木貴宏, 増田孝彦, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦
2. 発表標題 Er:YSO結晶からの超放射の時間的振舞い
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 Wang Jing, 宮本祐樹, 笹尾登, 田中実
2. 発表標題 量子干渉増幅を用いた暗黒物質の探索
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 田中実, Wang Jing, 宮本祐樹, 笹尾登
2. 発表標題 原子コヒーレンスを用いたレート増幅と暗黒物質探索
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 宮本祐樹
2. 発表標題 Er:YSO結晶からの超放射の観測
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 笹尾 登
2. 発表標題 量子干渉性増幅機構を用いたアクシオン暗黒物質の探索
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原秀明, 宮本祐樹, Junseok HanA, 笹尾登, 今井康貴, 植竹智, 平木貴宏, 増田孝彦, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦
2. 発表標題 Er:YSO結晶における周期的超放射の理解に向けて
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 Wang Jing, 宮本祐樹, 原秀明, 笹尾登, 田中実
2. 発表標題 Cs 8P-6P E2 遷移のレーザー誘起蛍光分光法
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 Wang Jing
2. 発表標題 Dark matter search with coherent atoms
3. 学会等名 International Conference on Fundamental Physics Using Atoms (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Wang Jing
2. 発表標題 Dark matter search with coherent atoms
3. 学会等名 International Workshop on Multi-probe approach to wavy dark matters (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wang Jing
2. 発表標題 Dark matter search with coherent atoms
3. 学会等名 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	宮本 祐樹 (Miyamoto Yuki) (00559586)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・研究准教授 (15301)	
研究 分担者	平木 貴宏 (Hiraki Takahiro) (40791223)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任助教 (15301)	
研究 分担者	原 秀明 (Hara Hideaki) (70737311)	岡山大学・異分野基礎科学研究所・特別契約職員(助教) (15301)	

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