

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01243

研究課題名（和文）超伝導接合による暗黒物質アキシオンの検出のための基盤技術開発

研究課題名（英文）Search for dark matter axions using superconducting junctions

研究代表者

柏谷 聡 (Kashiwaya, Satoshi)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40356770

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：ジョセフソン素子とアキシオンの相互作用の基礎を確立し、実験室系の装置を用いることでアキシオンを探索する手法を構築することを目指す。当初はジョセフソン素子のコンダクタンスからアキシオンに関する信号を検出することを目指して実験を進めたが、アキシオン由来の構造は観測されなかった。そのため独自の手法として、rf電流からの共振磁場の観測を目指し、理論解析と実験を進めた。発生磁場はrf周波数とアキシオンの周波数を一致させることにより共鳴的に増加し、SQUID等の高感度磁場検出により測定が可能であることが示された。現在SQUIDとジョセフソン素子を組み合わせた独自の構造の素子を開発し、測定を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アキシオン検出は世界的に多くの研究がおこなわれているが、従来行われてきた巨大施設を用いた検出方法とは異なる事件室系の装置のみを用いた、共鳴効果に基づく新しい検出方法を提案し、実際にジョセフソン素子とSQUIDを用いた観測を進めている。現状ではまだ観測には至っていないが、今後研究を進めることで、実験室系の装置のみでのアキシオン検出を実現することを目指している。アキシオンが実際に観測できれば、素粒子宇宙物理分野に多大な波及効果のある有意義な研究となる。

研究成果の概要（英文）：We aim to establish the basic concept of the interaction between Josephson junctions and axion, and to establish a method for searching for axion by using only laboratory-based devices. Initially, the experiment was carried out by detecting the signal related to the axion from the conductance of the Josephson junctions, but the structure originated by the axion was not observed. Therefore, we proceeded with theoretical analysis and experiments based on the resonantly generated magnetic field from the rf current. It was shown that the generated magnetic field resonantly increases by matching the rf frequency and the axion frequency, and can be measured by high-sensitivity magnetic field detection such as SQUID. Currently, we are developing a device with a unique structure that combines SQUID and Josephson junctions, and are now proceeding with measurements.

研究分野：低温物理

キーワード：暗黒物質アキシオン ジョセフソン接合 トポロジカル量子現象

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の観測技術の進歩によって、重力レンズ効果や WMAP および Planck 衛星による宇宙背景放射の温度揺らぎの精密観測によって、この宇宙の 95%は未知のエネルギーで構成されており、その中で通常物質と重力相互作用をする暗黒物質は 27%を占めていることが明らかになった。この暗黒物質の正体を探ることは、自然科学における最重要課題の一つとなっている。暗黒物質の候補には、重力効果として観測されていることから質量があり、光では観測されないことから電荷を持っておらず、宇宙年齢に比べて長い寿命を持つことが要求される。一方、理論的には、超対称性理論などの素粒子標準模型を超える理論の中から、さまざまな暗黒物質の候補が予言されている。特に標準模型自身には「強い相互作用における CP 破れの問題」という深刻な理論的問題が含まれており、それを自然に解決する Peccei-Quinn 機構(Phys. Rev. Lett. 38, 1440(1977))は標準模型の拡張として有力視されている。これは、アクシオンと呼ばれる新しい粒子の存在を予言しており、現在の暗黒物質の最有力候補の一つとなっている。暗黒物質としてのアクシオンの探索は、天体現象(1987A 超新星や白色矮星からの電磁波観測)によって制限がつけられ、数 meV 以上の質量領域はほぼ排除されている。近年は、アメリカの ADMX 実験がキャビティと強磁場によるプリマコフ効果(後術)を用いたアクシオン探索を勢力的に行っており、10  $\mu\text{eV}/c^2$  以下の領域を排除することに成功した。一方、対称性の破れに伴う位相欠陥形成などを考慮したアクシオン宇宙論シナリオが、最近の数値シミュレーションによって詳しく調べられており、これに基づくとアクシオンが暗黒物質の主成分を担う場合、その質量は 100  $\mu\text{eV}/c^2$  程度であることが予言されている。しかしながら、理論的に非常に興味深いこの領域を探索できる実験技術は従来皆無であった。

これに対して、近年 C. Beck (Phys. Rev. Lett. 111,231801 (2013))は、超伝導体を用いたジョセフソン素子による新しい検出手法を提案した。アクシオンという暗黒物質は、一様にコヒーレント振動しているスカラー場でポーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)状態にあり、一方の超伝導も金属中電子がクーパー対形成により BEC 状態あるため、アクシオンとクーパー対の間に位相干渉現象が起こると考えられる。この条件を課すと、位相干渉したアクシオンはジョセフソン接合素子内において、実効的に非常に大きな磁場を生成した状態になり、アクシオンはフォトン(マイクロ波帯)に崩壊することになる(プリマコフ効果)。一方 S/N/S ジョセフソン接合中の超伝導/常伝導(S/N)界面には、N 層中の伝導電子が超伝導中のクーパーペアと強く結びついた、アンドレーエフ反射という伝導プロセスが存在する。上記プロセスにて発生したフォトンアンドレーエフ反射による電流と相互作用し、フォトンアシストトンネルと類似のプロセスによる電流増加に寄与する。つまり、アクシオンの検出はプリマコフ効果を介して、実質的に S/N/S ジョセフソン接合におけるコンダクタンス増加の観測に置き換えられる。現在までに、アクシオンに期待されるエネルギーに、コンダクタンスピークを有する実験データが存在するとの指摘は存在するが、実際に観測されている信号がアクシオン由来であることを結論付けるためには、接合の材料、形状、測定環境依存性に加えて、大深度地下で百個単位の素子に関する日、年単位での周期性の観測など、相当量のデータの蓄積を必要とすると考えられる。

## 2. 研究の目的

本提案の目的は、S/N/S ジョセフソン接合が、暗黒物質アクシオン検出のセンサーとして有効に機能するかを、実験的に確定させることである。本提案の斬新さは、ともに BEC 状態にあるアクシオンと超伝導体の間に発生する位相干渉効果を利用することにより、S/N/S 型ジョセフソン接合の輸送特性(図 3 を参照)という簡便に観測できる物理量を通して、アクシオンを探索する点である。そのさい、 $2\text{eV} = \text{mac}^2$  ( $m$  はアクシオン質量)を満たすところでプリマコフ効果による電流増加を観測できるので、例えば、100  $\mu\text{eV}/c^2$  のアクシオンであれば  $V = 50 \mu\text{eV}$  におけるコンダクタンスが増加を示すことが期待される。アクシオンが異なる質量であっても同様に探索可能であり、10 mK の温度領域で超伝導体 Nb を用いれば、熱エネルギーおよび超伝導ギャップを考慮すると、最終的にはおよそ 10-1000  $\mu\text{eV}/c^2$  のエネルギー領域の探索が可能と見積もられる。本提案では Beck のアイデアに加えて、独自アイデアとして、N 層にグラフェン、トポロジカル絶縁体などの新材料も使い、さらに素子自体にアンテナを組み込み、アクシオン由来の信号がより強く検出できる独自の S/N/S 型ジョセフソン接合素子を開発し、測定に用いる。

## 3. 研究の方法

### ジョセフソン素子の作製と評価

S/N/S 構造ジョセフソン接合素子の開発を行う。S 層としては Nb, Al を用いる。N 層としては、金属(Au, Cu)に加えて、伝導電子の移動度が高いために、バリスティック効果であるアンドレーエフ反射がより観察しやすい、グラフェンや 2 次元電子ガス、および、トポロジカルな起源により、電子散乱が本質的に抑制されており、かつ磁場と電場の結合が強く生じるトポロジカル絶縁体を用いる。さらに、アクシオンの振動周波数  $\text{mac}^2 = hf$  ( $f$ :周波数)に対応する周波数のループアンテナを組み込み、アクシオン由来のフォトンと超伝導の結合を強める構造を作りこむ、

という工夫により独自素子の開発を行う。これに独自に開発を行った低ノイズ測定システムを用い、詳細なコンダクタンスの測定を行う。

#### rf 電流による共鳴効果モデルの構築と実測

コンダクタンス測定とは異なる測定方法の検討を行う。特に重点的に今回進めたのは Josephson 接合を用いた、より現実的なアクシオン検出手法の確立に向けた、精密化した現象論構築と検証実験に関するモデルの提案であり、これらの提案に基づき、実際に SQUID (超伝導磁束干渉素子) による精密測定を行うことにより、アクシオンの検出をめざす。

#### 超伝導におけるマクロコヒーレンスな相互作用

超伝導はマクロな量子物体であり、マクロ量子効果とアクシオンとの相互作用メカニズムについては、現象論の構築が必要である。この点は、原理的にはクーパ対のコヒーレントな多体系で構成されたマクロ量子状態とアクシオンとのコヒーレントな相互作用が存在すれば、クーパ対数の 2 乗での相互作用の実行的な増大が期待できる。まずは理論的検討から定量的な感度推定を進めることが必要である。また、新たなアクシオンの検出法については、上記のマクロなコヒーレント状態との相互作用との類似性で、プラズモンとの相互作用も検討課題である。例えば、金属ナノ粒子の局在表面プラズモン効果は、電磁波との共鳴的な相互作用による吸収および散乱断面積の増強が起こる効果であり、同様の現象をアクシオンによって生じる可能性がある。これは、すでに axion-plasmon mixing という形で共鳴波長シフトが起こり得るという提案もあるため、新たな可能性を検討することが必要である。また、axion(-like) particle (必ずしもアクシオンとは限らない) が物質中でプラズモンを誘起する可能性も検討されており、誘起されたプラズモンによる発光現象の検出についての検討を進めている。

#### アクシオンの素粒子宇宙論的側面の検討

特にアクシオンの地上での検出実験を行う際、宇宙においてアクシオン暗黒物質がどのような形態で存在しているかを明らかにする必要がある。最も単純な仮定はアクシオンが一様にコヒーレント振動しているとするのだが、宇宙初期のアクシオンの生成過程によっては、アクシオンが空間的に局在したミニクラスターを形成する可能性もある。これを明らかにするためには宇宙初期におけるアクシオンの進化の過程を正確に追う必要がある。分担者の北嶋は、地上でのアクシオン検出実験に向け、アクシオン暗黒物質がどのように分布しているかを明らかにすべく、数値シミュレーションを用いてアクシオンのダイナミクスを解析する。特にアクシオンが初期にコヒーレント振動として生成された場合においてもその後の進化の過程でミニクラスターを形成する可能性があるかどうか、あるいはアクシオンがゲージ場と相互作用している場合、アクシオン振動開始直後のゲージ場生成を通じて、アクシオンの非一様性が促進されるかどうかを、3次元格子シミュレーションという解析手法を用いて定量的に考察する。

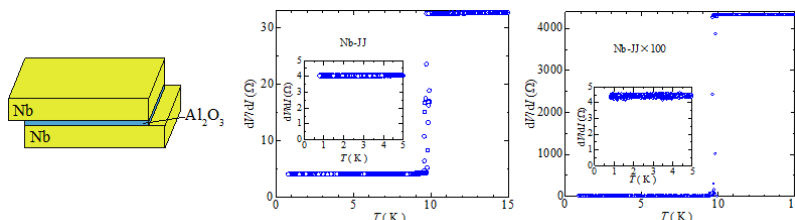


図 1 (a) Nb/Al/Nb 接合の構造、(b) 単一接合のコンダクタンス特性、(c) 100 個の直接背等により得られたコンダクタンス特性

## 4. 研究成果

### ジョセフソン素子の作製と評価

Nb/Al/Nb 接合: アクシオン由来のコンダクタンスの変化を観測するために、SNS 構造の作製を進めると同時に、ヘリウム 3 冷凍機を用いた低ノイズ観測装置の開発を進め、十分な SN 感度を持つ計測が可能になった。実際に開発された測定装置を用いて、産総研との共同研究により作製した Nb/Al/Nb 接合を観測した特性を図 1 に示す。Nb/Al/Nb 接合は、単一の接合、および測定感度を上げるための 100 個接合を並列に接続した接合の 2 種に関しての測定を行った。いずれにしても図に示すように、コンダクタンスには明瞭なアクシオン由来の構造を観測できず、本素子におけるコンダクタンス測定からはアクシオン由来の信号の観測を行うことはできなかった。ジョセフソン電流に基づく信号由来の影響を回避するために、ジョセフソン電流を十分抑制できる大きさの磁場を印加する測定も行ったが、結果は変わらなかった。

Nb/TI (トポロジカル絶縁体) /Nb 接合:N 部にトポロジカル絶縁体を用いた弱結合素子を作成し、同様のコンダクタンス測定を進めた。図 2 に素子の構造と測定データを示す。類似の系では、2 年前の測定においてアクシオンと疑われる信号の存在を観測しているため、過去に測定したレンジ (50  $\mu$ eV) 付近を中心に詳しい測定を進めた。しかし詳細な解析を進めることにより、50  $\mu$ eV 付近に現れるコンダクタンスの構造は測定ノイズと思われる解析結果が得られ、結局アクシオン由来の信号観測には至らなかった。

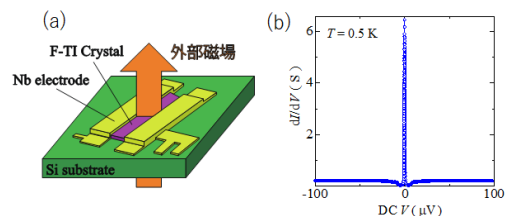


図 2 (a) Nb/トポロジカル絶縁体/Nb 接合の構造、(b) 得られたコンダクタンス特性

-1 rf 電流による共鳴効果の理論的解析 1

アクシオン場  $a = f_a \theta$  を考慮した場合の Maxwell 方程式は

$$\nabla \times B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} E + \mu_0 j + \frac{g_r \alpha}{\pi c} (E \times \nabla \theta - B \dot{\theta})$$

出与えられるが、ADMX 等他のアクシオン検出では直流磁場 B を印加することにより発生する AC の電磁場の計測が進められている。一方我々はこれとは異なる着眼点に基づき研究を行い、AC 電流源とアクシオン場との共振による信号に着目した。第一の解析では homogenous axion field ( $\nabla a = 0$ ) を想定して変形した結果得られる式に着眼する、

$$\left( \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) B = -\frac{g_r \alpha}{\pi c} \mu_0 \dot{\theta} j + o(\partial_t \theta)^2$$

式右辺は電場と電流が axion field の時間変化と結合し、磁場を発生させる効果に対応し、実際に磁場としては

$$B_x(t, x = 0) = B_1 \sin(\omega_a t) + \frac{\omega_a^2}{(\omega_a - \omega_j)^2} B_0 \cos[(\omega_a - \omega_j)t] + \frac{\omega_a^2}{(\omega_a + \omega_j)^2} B_0 \cos[(\omega_a + \omega_j)t]$$

が電流と同じ向き (X 方向と仮定) に発せられる。特に注目すべきはアクシオン周波数  $\omega_a$  と rf 電流の周波数  $\omega_j$  が一致する場合であり、この時には上式の第一項に基づき、2 次の共鳴磁場が発生することを示している。実際にこの項から発生する磁場をジョセフソン接合を電流源として有限要素法により現実的な形状モデルで計算した結果を図 3 に示す。確かに和と差の周波数に対応する磁場の発生が確認できる。この発生磁場は図 4 に示す SQUID により測定する場合

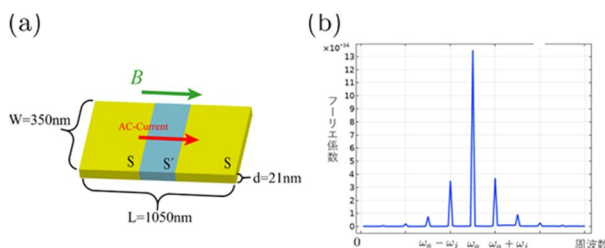


図 3 (a)ジョセフソン接合から発生する共鳴磁場のモデル、(b)発生磁場の周波数成分分解

には、 $\Phi_0$  を磁束量子、 $\omega_a = \omega_j$  として、SQUID に鎖交する磁場  $\Phi_{signal}$  は

$$\Phi_{signal} \sim 10^{-33} \left( \frac{\omega_a}{\Delta\omega} \right)^2 = 10^{-18} \left( \frac{\omega_a}{\Delta\omega} \right)^2 \Phi_0$$

で与えられる。この測定で期待される感度は  $\Phi_{signal}$  がどの精度で調整できるかにも依存するが、 $\Phi_{signal}$  として典型的な SQUID 測定の値として  $10^{-5} \Phi_0$  程度を想定するならば、 $\omega_a / \Delta\omega$  を  $10^9$  程度の精度で合わせこむことにより、十分アクシオン由来の磁場が可能であることが示唆されている。またその時には発生磁場は差周波に対応する周波数を有することになり、10kHz 程度の帯域の測定を行えば観測が可能ということになる。これは従来手法が極めて高周波の測定を要求されることに対して、大きなアドバンテージである。

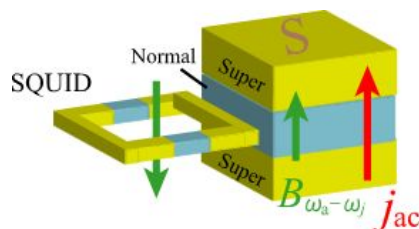


図 4 発生磁場を SQUID で検出するためのモデル

-2 共振モデル実測のための素子作製

上記の結果に基づき、産総研山森氏との共同研究により、産総研の超伝導ファブ Cravity を用いた素子作製を開始した。実際に作成した素子の写真を図 5 に示す。この素子は、ノイズ耐性を持つようにねじれたインプットコイルを有し、ループ内に磁場の発生源となるジョセフソン接合を配置し、それらに対するマイクロ波入力アンテナ構造を有している (図 5)。時間との関係で実

際の測定には至らなかったが、今後ジョセフソン素子をマイクロ波駆動し、シャピロステップを観測するとともに、発振周波数をスイープすることにより、共鳴発生磁場の探索を進めていく予定である。これらの測定は極めて長い時間を有すると予想されるが、素子の作製までは順調に完了しており、継続的な実験を行うことにより、今後アクシオン起源の磁場が実際に測定可能であると期待される。

超伝導におけるマクロコヒーレンスな相互作用原理的な考え方としては問題がないが、ドブロイ波長の影響をどう組み込むかというのが課題として挙がっている。これは継続的な議論を進める予定であるが、近年、分子を用いた同様の原理での低質量暗黒物質の検出検討が成されており、現象論的メカニズムとして参考にできる部分があり、検討を引き続き進める。プラズモンによる影響について、実際に暗黒物質のような電子のフェルミ速度程度以下の粒子がプラズモン誘起を起こすかの検証を要素技術の検討の一環で進めた。低速の粒子生成は、低速イオン注入装置を神奈川大学の協力を得て利用し、金属ナノ粒子へ低速イオンを照射し、プラズモン発光が生じるかの検討を進めた。そのための測定系も整備し、光ファイバーから分光器を通しながら光電子増倍管を用いて精密スペクトル解析を行うシステムを構築し測定を行い、実際に低速粒子においてもプラズモン発光と思われる発光現象を観測することができた。これがプラズモンによる発光かどうかについてはさらなる検証が必要であるが、低速粒子によるプラズモン発光現象の知見はほとんどないため、今後のアクシオンのような未知粒子における新たな検出法の実証につながる可能性を示すことができた。

#### アクシオンの素粒子宇宙論的側面の検討

3次元格子シミュレーションを用いて、宇宙初期におけるアクシオン暗黒物質のダイナミクスを解析した。特に、アクシオンの自己相互作用による共鳴現象を数値シミュレーションを用いて解析した。結果として、オシロンと呼ばれる小スケールの構造が形成されること、それに伴い、重力波が生成されることを明らかにした。また、アクシオンと  $U(1)$ ゲージ場が相互作用しているモデルにおいて、宇宙初期のアクシオンの振動によるゲージ場の共鳴的生成現象を数値解析し、このシナリオにおけるアクシオンの運動量分布を明らかにした。また、同時にパルサータイミング観測で検出可能な重力波が生成されることも指摘した。

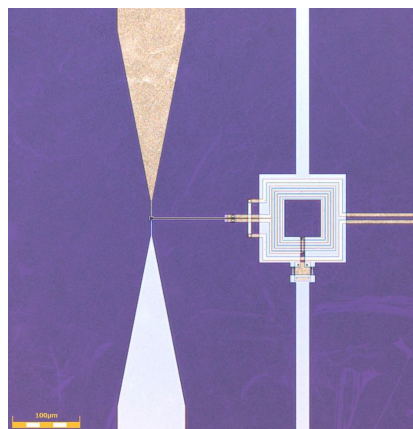


図5 アクシオンによる共鳴磁場を測定するために作成したSQUIDの光学写真

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Prateek Agrawal, Naoya Kitajima, Matthew Reece, Toyokazu Sekiguchi, Fuminobu Takahashi,	4. 巻 801
2. 論文標題 Relic Abundance of Dark Photon Dark Matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letter B	6. 最初と最後の頁 135136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135136	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 該当する
1. 著者名 Rikizo Yano, Andrei Kudriashov, Hishiro T. Hirose, Taiki Tsuda, Hiromi Kashiwaya, Takao Sasagawa, Alexander A. Golubov, Vasily S. Stolyarov, Satoshi Kashiwaya	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic Gap of Fe-Doped BiSbTe <sub>2</sub> Se Bulk Single Crystals Detected by Tunneling Spectroscopy and Gate-Controlled Transports	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 4180-4186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcclett.1c00869	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 該当する
1. 著者名 Naoya Kitajima, Jiro Soda, Yuko Urakawa	4. 巻 126
2. 論文標題 Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys.Rev.Lett.	6. 最初と最後の頁 121301-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.121301	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 Naoya Kitajima and Fuminobu Takahashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Primordial black holes from QCD axion bubbles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 060-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/11/060	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 Hayato Fukunaga, Naoya Kitajima, Yuko Urakawa	4. 巻 2
2. 論文標題 Can axion clumps be formed in a pre-inflationary scenario?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/02/015	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 Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura	4. 巻 10
2. 論文標題 System for the remote control and imaging of MW fields for spin manipulation in NV centers in diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-61669-w	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11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 山本将裕, 矢野力三, 山森弘毅, 廣瀬陽代, 笹川崇男, 北嶋直弥, 中竜大, 田仲由喜夫, 柏谷聡
2. 発表標題 ジョセフソン接合による暗黒物質アクシオン探索(II)
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 山本将裕, 矢野力三, 廣瀬陽代, 小柳正男, 柏谷裕美, 笹川崇男, 田仲由喜夫, 柏谷聡
2. 発表標題 磁性ドーピングしたトポロジカル絶縁体/超伝導接合のジョセフソン電流
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Yamamoto, R. Yano, H. T. Hirose, M. Koyanagi, H. Kashiwaya, T. Sasagawa, S. Kashiwaya
2. 発表標題 Magnetic Field Response of Josephson Junction on Magnetically-Doped Topological Insulator
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高野優之, 馬渡康徳, 矢野力三, 山本將裕, 北嶋直弥, 中竜大, 柏谷聡
2. 発表標題 超伝導体に侵入した量子渦がつくる磁場の数値計算
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Yano, K. Tsumura, H. T. Hirose, M. Yamamoto, M. Koyanagi, H. Kashiwaya, Y. Asano, T. Sasagawa, S. Kashiwaya
2. 発表標題 Transport Properties of Magnetic Topological Insulators and its Superconducting Proximity Effects
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏谷聡
2. 発表標題 トポロジカル超伝導と接合系
3. 学会等名 第6回ポストグラフェン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 北嶋直弥
2. 発表標題 アクシオンの宇宙論と検出実験
3. 学会等名 第8回観測的宇宙論ワークショップ(東北大学)(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北嶋直弥
2. 発表標題 AXION理論
3. 学会等名 ダークマターの懇談会2019(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本將裕、矢野力三、廣瀬陽代、笹川崇男、北嶋直弥、中竜大、田仲由喜夫、柏谷聡
2. 発表標題 ジョセフソン接合を用いた暗黒物質アクシオン探索
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本將裕、矢野力三、廣瀬陽代、笹川崇男、北嶋直弥、中竜大、田仲由喜夫、柏谷聡
2. 発表標題 ジョセフソン接合による暗黒物質アクシオン探索
3. 学会等名 新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」第4回領域研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yamamoto, R. Yano, H. Yamamori, H. T. Hirose, T. Sasagawa, N. Kitajima, T. Naka, Y. Tanaka, S. Kashiwaya
2. 発表標題 Search for Dark Matter Axions by the use of Josephson Junctions
3. 学会等名 The 4th Kobayashi-Maskawa Institute International Symposium (KMI2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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	山森 弘毅 (Yamamori Hirotake)  (00358293)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長  (82626)	
研究分担者	中 竜大 (Naka Tatsuhiko)  (00608888)	東邦大学・理学部・講師  (32661)	
研究分担者	田仲 由喜夫 (Tanaka Yukio)  (40212039)	名古屋大学・工学研究科・教授  (13901)	
研究分担者	北嶋 直弥 (Kitajima Naoya)  (50737955)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教  (11301)	

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