

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13793

研究課題名（和文）超伝導素子を用いた宇宙暗黒物質探索

研究課題名（英文）Search for dark matter with superconducting device

研究代表者

時安 敦史 (Tokiyasu, Atsushi)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教

研究者番号：40739471

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、アクシオン検出用超伝導接合素子を開発し、アクシオン探索実験を遂行する。ギャップ間隔、転移温度などを調整したジョセフソン接合素子中で、アクシオンは光子に転換すると理論的予測があり、その予測に基づくと、素子の電流-微分コンダクタンス特性でアクシオンの質量に応じたピーク構造が形成される。本研究では、実際に素子を作成し、極低温下での電流-微分コンダクタンス特性の測定を行った。その結果、目的とするピーク構造は発見されなかった。原因は測定装置のノイズや、素子作成のパラメータ調整などの理由が考えられる。また、元となる論文の論理構造の検証を複数の研究グループと共に検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、超伝導素子を用いて宇宙暗黒物質を探索するというものであり、物性物理学分野、素粒子実験物理学分野の協奏の下に研究を行った。暗黒物質探索は通常、数百人規模の大規模実験で大型装置を用いて行うが、数人から構成される比較的小さな研究グループで大グループに比肩する研究が行えることを示した点で重要である。また、このような複数分野の知識、技術を横断した研究は、学際的に大きな意義がある。今後さらなる共同研究の可能性が開拓されたといえる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to perform the search for the missing particle, axion. Axion is one of the candidate of the cosmic dark matter. An axion is believed to be converted to one photon under a strong magnetic field. There is a theoretical approach that a strong magnetic field exists inside SNS-type superconducting devices. In the current and conductance curve of such device, a peak structure corresponding axion signal may appear. Based on this idea, we constructed a SNS-type superconducting device, and measured the current-conductance curve. Due to the large noise, we were not able to observe axion signal in the spectrum. We also clarified the controversial points of the theoretical prediction in the discussion with some other groups.

研究分野：experimental hadron physics

キーワード：暗黒物質 アクシオン 超伝導素子

1. 研究開始当初の背景

現代物理学の大問題とされている宇宙暗黒物質の正体、その候補とされているのが、超対称性粒子と本研究の主題であるアクシオンである。アクシオンは元々、量子色力学 (QCD) において、粒子・反粒子対称性 (CP 対称性) が保存する理由を説明するために提案された粒子である。具体的には QCD ラグランジアンに Peccei-Quinn 対称性を導入し、その対称性が自発的に破れることにより CP 対称性を保証する。

その際に南部・ゴールドボソン粒子として生じるのがアクシオンである。アクシオンは未発見の粒子であるが、宇宙観測、加速器実験による制限からその質量が数 μeV -数 meV 程度の領域であると考えられている。アクシオンは、通常物質との相互作用が非常に小さいが質量を持つと予想されているため、有力な暗黒物質候補とされている。近年、CERN の大型陽子加速器 Large Hadron Collider (LHC) により、超対称性粒子の存在に否定的な探索結果が報告され、もう一つの暗黒物質候補であるアクシオンへの関心が急激に高まってきている。このような状況の中、2013 年に Beck により興味深い研究結果が報告された [PRL111, 221801]。Beck はアクシオン場の運動方程式と超伝導接合 (ジョセフソン接合) に関する方程式の類似性に注目した。アクシオンは強磁場により光子に転換すると理論的に予測されているが、ジョセフソン接合中で強磁場が仮想的に生じると指摘した。Beck はジョセフソン接合のコンダクタンス ($G=dI/dV$)、電圧 (V) の関係図 (G-V カーブ) を測定した先行実験

[PRB70, 180503(R)] において確認されたピーク構造 (図2) が、質量 $110\mu\text{eV}$ のアクシオン起因である可能性を指摘した。原理は図1に示す通り、超電導、常伝導接合部でアクシオンが転換した光子によって生成される電子ホール対を電気信号としてとらえるというものである。しかしながら、Beck の参照している論文は古く、またこの理論的に裏付けに対する反論もあり [NJP16]、最新実験装置による検証実験が待たれている。

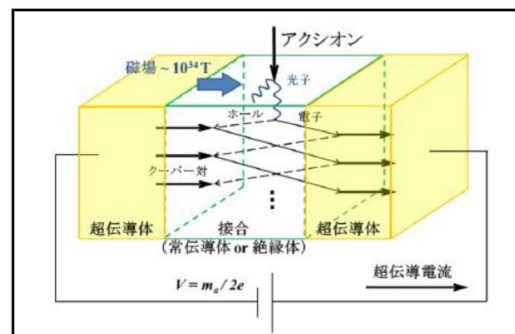


図1 超伝導素子によるアクシオン探索原理

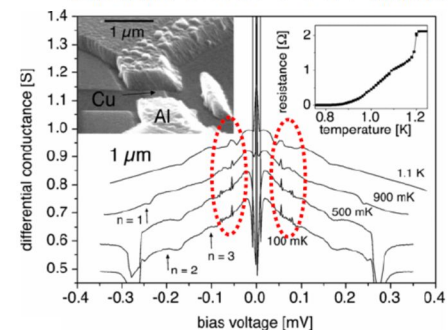


図2 G-V カーブ中のアクシオン検出信号 (Ref. Phys. Rev. B 70, 180503(R) (2004).)

2. 研究の目的

本研究の目的は、アクシオン検出用超伝導接合素子を開発し、アクシオン探索実験を遂行することである。まずは先行実験で報告されたアクシオン質量が $110\mu\text{eV}$ の信号の検出を試みる (図2)。信号が検出された場合には年間を通した測定を行い、信号強度の季節変動を見る。この変動は銀河八口ーに対する地球速度の関係から、検出器に入射するアクシオンの速度が季節によって約 10% 変化することに起因しており、信号が宇宙に存在する暗黒物質起源であることを裏付ける重要な証拠となる。信号が見えなかった場合には超伝導の材質や接合部のデザインを変更し、アクシオン質量に対する系統的な検証を行い、Beck により提唱された検出方法の有効性について検証する。

3. 研究の方法

まずは、理論的に不正確であると指摘されている部分(ジョセフソン接合の方程式と、アクション運動方程式の類似性、およびアクションが光子に転換するメカニズム)の検証を行う。そのために実際に素子を作成し、低温下での測定を行う。素子は、先行実験のものと全く同じ条件で作成するのではなく、Beck の論文で述べられているアクションの検出条件を満たしたパラメータを用いる。具体的には Nb-Al を構成要素に持つ素子を作成する。また、本研究で電流、電圧を測定する領域は非常に雑音が大きいと予想されるため、磁気シールドや電気的なノイズ対策や測定手法の工夫を行う。また安定して探索実験が行える実験室環境を整える。

4. 研究成果

複数の研究グループによる理論の検証チームを組織し、本研究の元となっている論文の検証を行った。そのうえで、不正確である部分を明らかにした。具体的にはアクションでクーパーペアが生じるという点、他論文を探索し、コンシステントな結果が得られているかどうかについて検証を行った。また、実際に Nb/Al/Nb からなるジョセフソン接合素子を製作した。この際、アクション探索条件を考慮し、Al の厚さを 120nm になるようにパラメータ調整を行った。なお、製作の簡易性を考慮して今回は積層型で素子を作成した。積層型であるため、当初予定よりインピーダンスが非常に低く、電流の微小電流の変化の測定が難しくなるということが判明した。作成した素子の電流 電圧特性、及び電流 微分コンダクタンス特性の測定結果を右図に示す。

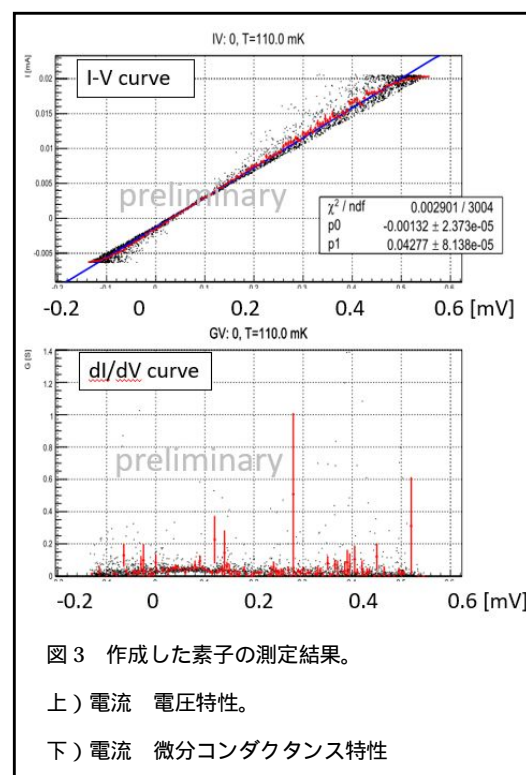


図3 作成した素子の測定結果。

上) 電流 電圧特性。

下) 電流 微分コンダクタンス特性

そのため、電流測定装置を再考し、SQUIDを用いた測定装置の設計を行った。なお、所属機関において低温実験環境の一部構築を行った。これは長期間にわたる測定を今後予定しており、安定した実験環境を準備する必要があるためである。また数式計算ソフトを用いて本研究の元になる理論模型の確認を行い、アクション探索のためのパラメータの導出を行った。

また先行実験と似た条件で作成した素子を他研究グループから借用し、電流、電圧カーブの探索を行った。その結果、該当するピークを確認することはできなかった。これは素子の老朽化や、十分な低温状態になっていないなどの測定環境の不備が考えられたため、引き続き測定を行う予定である。また、同様のメカニズムによってアクションが光子ではなく、電子に転換する可能性がある。この予測に従って、極低温で稼働する電子検出器(電子を高電場で加速して、シンチレータによる光信号に転換する装置)の設計を行った。こちらに関しては現在設計が完了しており、大阪大学において真空装置を借用し開発を行った。放電耐性の強化が課題であると判明し、今後、新たな検出器を製作予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 時安敦史
2. 発表標題 原子・原子核・核子を用いた素粒子標準理論を超える物理への挑戦
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A.O. Tokiyasu
2. 発表標題 AXION in Japan
3. 学会等名 Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Tokiyasu
2. 発表標題 Axion search experiment by using Josephson-Junction device
3. 学会等名 17th international workshop on low temperature detectors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 時安 敦史
2. 発表標題 超伝導素子を用いたアクシオン探索について
3. 学会等名 TIAかけし事業「簡単・便利な超伝導計測」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 時安 敦史
2. 発表標題 超伝導素子を用いたアクシオン探索について
3. 学会等名 名大KMI分野横断セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 時安敦史
2. 発表標題 アクシオン探索実験について
3. 学会等名 ダークマターの懇談会
4. 発表年 2017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
連携研究者	美馬 覚 (Mima Satoru) (50721578)	国立研究開発法人理化学研究所・基幹研究所・研究員 (82401)	
連携研究者	中村 克朗 (Nakamura Katsuro) (60714425)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・助教 (82118)	