

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13803

研究課題名(和文) ジョセフソン接合素子における量子干渉効果を用いた暗黒物質アクシオン検出の基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental Study of Dark Matter Axion Detection using Quantum Interference in the Josephson Device

研究代表者

中 竜大 (Naka, Tatsuhiro)

名古屋大学・現象解析研究センター・特任助教

研究者番号：00608888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、自然科学における最重要課題における暗黒物質アクシオンの新たな検出方法を追求することを目的として、特に、ジョセフソン接合素子における超伝導体を構成するクーパ対とアクシオンとの位相干渉による検出可能性について探求することを目的としたものである。本課題において、Nb/Al/Nbのジョセフソン接合素子の作成とその測定による dV/dI - V 特性を取得でき、ノイズレベルは高いが、アンドレーフ反射と思われる信号検出ができた。この測定をベースに、本格的な測定に向けた課題が明確化され、それに伴い新たな共同研究を進展させた。さらに、物性研究との新たな連携を作ることができ分野開拓を進めることができた。

研究成果の概要(英文)：The motivation of this research is to make new methodology for the dark matter axion, specially to study about the detection method using phase synchronize effect between cooper-pair in a superconducting device and the axion. In this term, we made the Josephson device with Nb/Al/Nb and measured the data of dV/dI - V character. As result, noise level was high, but we could see the signal that is expected as the Andreev reflection. By that, we clarified the subject about future task, and it was progress as new collaboration with some scientists. Also, we started new topics as new collaboration with material scientists beginning of this study.

研究分野：素粒子実験

キーワード：アクシオン 暗黒物質 超伝導 ジョセフソン接合素子

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質は、自然科学における最重要課題の一つであり、その理由の一つとして、宇宙背景放射の精密観測から、この宇宙の約 25% を占め、かつ、通常の物質に対して 5 倍以上の量を占める一方、その性質・正体は未知のままであるが、宇宙の構造形成において主要な役割を担ったと考えられるということが挙げられる。さらに、その存在は、銀河および銀河団の回転速度の測定や重力レンズによる観測など独立の異なる観測からもその存在が確かめられていることから、それ自身の存在は確固たるものとなっている。

一方、素粒子物理学に目を向けたとき、標準模型を超えるさまざまな問題が存在する。その中の一つとして、強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) の理論から示唆される対称性の破れが、実際の実験からは観測されないという問題、いわゆる“強い CP 問題”が存在する。この不一致は 10 桁以上に及ぶものであり、その問題を解決するほぼ唯一の理論である PQ 模型は、QCD 真空における自発対称性の破れによって生じるインスタントンにより対称性の破れの効果を相殺するもので、そこで現れる新たな量子場“アクシオン”の存在が示唆される。非常に興味深いのは、このアクシオンは、上記の暗黒物質の候補となり得ることから、その存在証拠を占めずことは、宇宙物理および素粒子物理学における極めて重要な課題となっている。

暗黒物質アクシオンの探索は、これまでマイクロ波キャビティと強い磁場によるブリマコフ効果を用いたものがほぼ唯一の手法であった。この手法で探索できるアクシオンの質量は、キャビティの技術的制限から数 10 $\mu\text{eV}/c^2$ 以下である。

一方、最近の宇宙論研究からアクシオンの質量に対する制限が精密化してきおり、その質量領域は約 100 $\mu\text{eV}/c^2$ と言われている。この質量領域は、従来のキャビティ実験による

手法では非常に困難であり、新たな方法論の探求が求められている。

その中で、近年、C.Beck によって提案されたジョセフソン接合素子によるアクシオン検出[1]は興味深いものであった。これは、ボーズアインシュタイン凝縮 (BEC) 状態にあるアクシオンと同様の状態にある超伝導体内部にあるクーパ対の BEC 状態の類似性に着目したものであり、アクシオンとクーパ対との位相干渉効果が生じることを主張したものである。さらに、それにより自己誘発的に磁場生成が起き、アクシオンが即座にマイクロ波に変換されるというプロセス、さらにそのマイクロ波がジョセフソン接合素子内でアンドレーフ反射を起こし、その効果が電流-電圧特性の中に共鳴ピークとして表れるというものである。

この現象論は、非常にラフな要素を含んでおり、精密さに欠ける部分が多々あるため、それだけを信じるには不十分である一方、位相干渉という発想は、非常に興味深いものである。さらに、一般的なジョセフソン接合素子における周波数は数 10GHz と、まさに上記の 100 $\mu\text{eV}/c^2$ 程度のアクシオンとの干渉において最適な周波数であることから、C.Beck の現象論をきっかけとして、新たなアクシオン探索の方法論を探求することは非常に興味深いものであると考える。

本研究は、そのための実現可能性と実用化に向けたさまざまな要素技術や現象論研究を目的としたものであり、将来の新たな暗黒物質アクシオン研究の開拓につなげるものである。

2. 研究の目的

本研究は、暗黒物質アクシオンの新たな探索法を研究するものであり、特に、近年の宇宙論計算から示唆される約 100 $\mu\text{eV}/c^2$ 領域の暗黒物質アクシオンの探索を主たる目的として、従来の方法にはない新たな探索法を

開拓するものである。特に、超伝導体内のクーパー対の量子効果に着目し、その量子効果に対するアクシオンの相互作用に対する現象論的研究、さらには、それを可能にするジョセフソン接合素子の研究を進めることで、次世代の暗黒物質アクシオンの方法論の開拓を進めるための要素技術と現象論を研究することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の研究方法としては、まず、C. Beck が提唱しているモデルに関する現象をまず実際に追試することが可能な実験体系とデバイスに関する研究を行う。実験体系については、連携研究者の筑波大学の実験施設を借りることで行い、液体ヘリウムを用いた希釈冷凍機を用いて、電流-電圧特性を取得することを目的とした。また、デバイスに関しては、分担者である赤池氏が得意とする Nb/Al/Nb 構造のジョセフソン接合素子を試作し、Al 層の厚みを変化させることで、ジョセフソン電流応答等の違いを観測することを目指したデバイス測定試験を進めた。

一方で、C. Beck が主張するモデルに関して、相互作用モデルや実際の観測における効率についての議論が足りないという問題があるために、新たな現象論モデルの構築を目指した研究も進めた。これは、特に、位相干渉というこれまでのアクシオン探索では議論されてこなかった新たな物理現象は考慮し、アクシオンとクーパー対との相互作用に関する理論的な計算も含めたより信頼性の高い現象論と実験可能性について定量的に評価することを目指したものである。

さらには、ここから波及した新たな研究提案も進めていく。特に、上記手法だけではない新たなアクシオン応答に関する方法論の議論やアクシオンにおける素粒子物理と物性物理のアナロジーに着目した新たな研究展開を行うための基盤構築も行った。これら

は、次世代の新たな融合分野創出において重要な連携となる。

4. 研究成果

試作したジョセフソン接合素子を図.1 に示す。S/N/S 型のジョセフソン接合素子であり、超伝導体として Nb (厚み~130nm)、常伝導体として Al (厚み~11nm)を用いたものであり、N 層の幅を 0.3-0.5 μm でコントロールしたデバイスである。

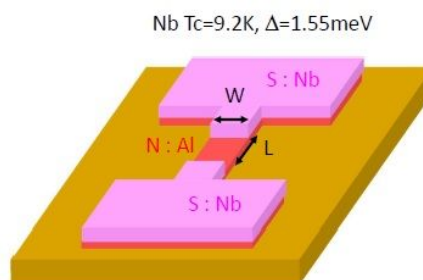


図.1 作成した S/N/S 接合デバイス

測定は、筑波大学の液体 He を用いた希釈冷凍機を用いて行い、差動アンプ回路を用いて測定を行った。測定データの一部を図.2 に示す。dV/dI-V 特性を取得したが、ノイズレベルが高い状態であり、かつサンプリングの分解能も悪いため、当初の目的ある 50 μV の領域を測定するのは困難であり、技術的な課題を見つけることができた。しかし、アンドレーフ反射と思われる信号も観測できているため、デバイスおよび測定系をより高度なものにすることで実際の測定はできるということを理解することができた。

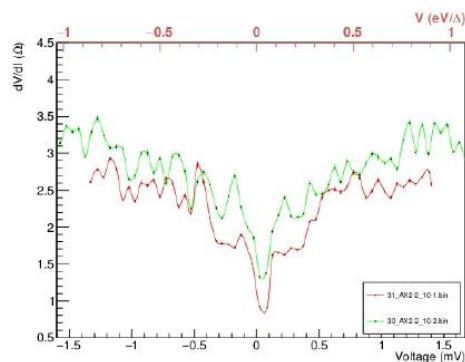


図.2 図.1 のデバイスにおける dV/dI-V 特性

現象論的研究も並行して進めることができ、新しいアイデアとして、コヒーレント状態にあるアクシオンをクーパー対との量子干渉効果をより精密に議論することが可能であることを議論した。図に示すダイアグラムを想定することで、クーパー対とアクシオンとの相互作用をラグランジアンから計算することは可能であるということ、さらに、これらのマクロコヒーレントな干渉効果を考慮することによって、10の20乗以上の相互作用の増幅が期待される可能性があることを提案した。これらの効果が最終的にはジョセフソン効果におけるマクロトンネリング効果や photon assisted tunneling を引き起こす可能性があることを議論することができ、先行研究では精密に議論できていなかったことより精密な現象論モデルを議論できる方向性を見出すことができた。また、デバイスに関しては、トポロジカル絶縁体を用いたS/N/S デバイスが有効である可能性が示唆され、これらは産業総合技術研究所の研究者らとの新たな連携体制を構築することができた。また、新たなアイデアとして、交流電流とアクシオンとの共鳴効果についての検討も行い、数 10GHz 電流を用いることで暗黒物質アクシオンとの共鳴的なブリマコフ効果によるマイクロ波放射を引き起こすことができ、キャビティ増幅が起こることを理論的に予測することができた。計算としては、予備的なものであるが、図.3 にその一例を示した。

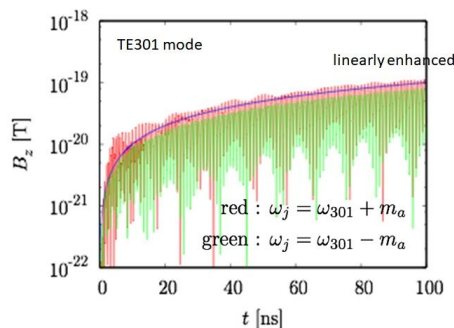


図.3 電流とアクシオンとの相互作用によって生じるマイクロ波の増幅現象の理論計算

新たな研究として、物質内部のアクシオン現象のアナロジー研究も、本研究がきっかけで展開することができた。特に、トポロジカル絶縁体と磁性体との超格子構造デバイスと磁場のスイッチングを行うことで、これまで観測がされていなかった物質場内のアクシオンのダイナミカルな応答が見られるアイデアを提案することができ、理論体系を構築し、論文を投稿できる段階まで発展させることができた。この研究は新たな分野創出という観点からも重要な研究となり得るものである。

参考文献

[1] Christian Beck, Phys. Rev. Lett. 111, 231801 (2013)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

北嶋直弥、中竜大、白石卓也「空洞共振器による暗黒物質アクシオン探索」2017年度日本物理学会年次大会，2018年3月、東京理科大

中 竜大 「ジョセフソン超伝導デバイスにおけるアクシオン応答検出の可能性」TIA かけはし事業「簡単・便利な超伝導計測」研究会，2018 年 1 月、理化学研究所

白石卓也、中竜大 他 「ダークマターアクシオン探索に向けた超伝導体 SNS 接合の開発」，2016 年日本物理学会秋季大会，2016 年 9 月，宮崎大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

中 竜大 (NAKA, Tatsuhiko)

名古屋大学・現象解析研究センター・特任
助教

研究者番号：06008888

(2)研究分担者

赤池 宏之 (AKAIKE, Hiroyuki)

大同大学・電子工学科・教授

研究者番号：20273287

(3)連携研究者

武内 勇司 (Takeuchi, Yuji)

筑波大学・数理物質科学研究科・准教授

研究者番号：00375403

(4)研究協力者

北嶋直弥 (KITAJIMA, Naoya)

白石卓也 (SHIRAIISHI, Takuya)