

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 4 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02883

研究課題名(和文) フォトニック結晶技術を用いた、暗黒物質アクシオン探索のための共振空洞の開発・研究

研究課題名(英文) R&amp;D of a resonant cavity for dark matter axion search with photonics crystal technique

研究代表者

岸本 康宏 (Kishimoto, Yasuhiro)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授

研究者番号：30374911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フォトニック結晶技術を用いて、基本モード(TM010)で共振する大型共振空洞を研究・開発した。フォトニック結晶は周期的に金属または高誘電体を配置した構造で、その周期によって共振周波数が決まり、空洞を大型化することが可能であり、従って、高周波における暗黒物質アクシオン探索の最も大きな障害を克服することが可能である。

本研究では、TM010で共振する、大型フォトニック結晶空洞(20cm×20cm×2cm×2段の空洞(5.7GHz))が実現した。これは単純な円筒空洞の約28倍であり、即ち、アクシオン探索において信号成分だけを28倍増幅する可能性を示した、画期的成果と言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この宇宙には、我々の知る物質の約5倍の未知の物質「暗黒物質」が存在する。この暗黒物質の正体解明は、現代物理学・天文学における最大の課題である。暗黒物質の最有力候補の1つがアクシオンであり、この他にも、暗黒光子等数多くの候補が存在する。これらアクシオン、暗黒光子の検出では、非常に微弱なマイクロ波を共振空洞を利用して検出する必要がある。しかし、高周波領域では空洞サイズが小さくなり、感度向上が困難であった。本研究では、従来の約30倍の巨大空洞の開発に成功した。これは暗黒物質信号を約30倍することに相当し、マイクロ波を用いた暗黒物質探索において画期的な感度向上を実現する手法の開発に成功したと言える。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed a large RF resonant cavity which resonates in the fundamental mode (TM010) with photonic crystal technology. A photonic crystal is a structure where metals or high dielectrics are periodically arranged, and the resonance frequency is determined by the spacing. This means that it is possible to enlarge a cavity size and, therefore, make sensitivity of dark matter axion extremely higher, especially at higher RF regime, such as 5-10 GHz region.

In this research, a large photonic crystal cavity (20cm x 20cm x 2cm x 2 cavities) that resonates at 5.7 GHz with TM010 was realized. The size is about 28 times of a simple cylindrical cavity. With this cavity, signal-to-noise ratio in axion search would be increased with factor 28. It could be an epoch-making result for future experiments with RF resonant cavities.

研究分野：天体素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 アクシオン マイクロ波空洞 フォトニック結晶

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現代の宇宙・素粒子物理学には4つの大きな謎が存在する。即ち、「なぜ宇宙に反物質が無いのか」「なぜニュートリノは非常に軽いのか」「暗黒物質は何か」「宇宙暗黒エネルギーは何か」の4つである。これらのテーマは、現代の宇宙物理学、素粒子物理学が解決すべき難問である。

本研究では、暗黒物質の謎を解明すべく、開発・研究を遂行する。

暗黒物質は、未知の素粒子と考えられており、中でも、「弱く相互作用する重粒子 (WIMPs)」と「アクシオン」と呼ばれる素粒子が、その最有力候補として考えられている。

WIMPs に比べ、アクシオンの研究の進捗は芳しいものとは言えなかった。その理由は、アクシオン探索では、マイクロ波共振空洞の基本モード (TM<sub>010</sub> モード) を利用した探索が最も高感度と考えられるが、理論的に予測されるアクシオン質量の領域では、マイクロ波空洞のサイズが制限されていた。即ち、マイクロ波の波長 $\lambda$ として、TM<sub>010</sub> モードの空洞体積は典型的には、 $V \sim \lambda^3$  であった。従って、空洞内のアクシオン数が減少し、探索感度が著しく低下してしまう事があった。

このような状況の下、本研究では、フォトニック結晶構造を用いる事で、高周波のマイクロ波 (5~7 GHz) の領域で、波長に比べて、非常に大型な空洞を実現する事で、将来のアクシオン探索で感度が飛躍的に向上することを目的に研究に着手した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで全く探索不可能であった暗黒物質アクシオンのパラメータ領域での探索を可能とするために、全く新たなアイデアで、一見実現不可能な共振空洞を開発・研究する。即ち、フォトニック結晶の原理を用い、波長に比べて大型であるにも関わらず TM<sub>010</sub> モードで共振する空洞を開発・研究する。このような共振空洞を用いると、その大きな体積内の全てのアクシオンが信号として寄与するため、著しい信号強度の増加が見込まれ、非常に高感度な検出が広範囲で可能となる。本研究では、共振空洞を現実のものとし、将来の高感度アクシオン探索へ礎を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

アクシオン探索では、アクシオン質量が 10~数 100  $\mu$ eV の領域が注目されている。この領域は、周波数では 2.5~25 GHz、波長では、12.0~1.2 cm であり、この範囲であれば、フォトニック結晶構造によって、波長に比して、大型であるにも関わらず基本モードである、M<sub>010</sub> モードで共振する空洞を実現することが出来ると考えられた。

特に、フォトニック結晶の1つである、マルチポストアレイは、金属製の柱で周期  $a$  の周期構造を2次的に構成することで、理論的には、波長  $\lambda \sim 2a$  の共振が得られることが知られていた。

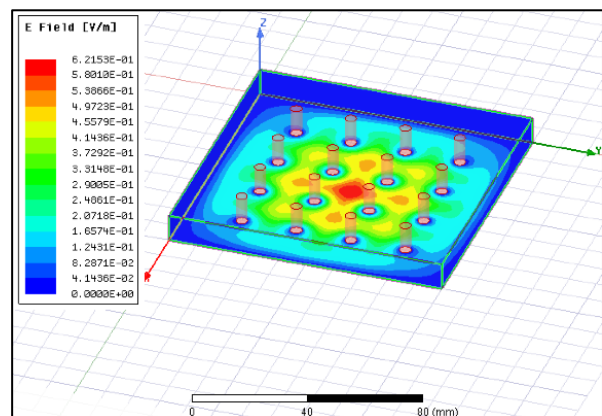
本研究では、このマルチポストアレイ空洞について、まず、シミュレーションによる開発・研究を実施し、その結果に基づいて、実際の空洞を作成する。この研究・開発に当たっては、0) 実際のマイクロ波空洞の原理を実証することが最も重要な一歩となる。このための要素としては、1) 精密な周期構造の実現が必要であり、これが実現した後、2) その空洞のQ値を向上し、3) そして、共振周波数を広い周波数領域において、精密に掃引する。(3) が要求される理由は、アクシオンの質量が不明であるため、アクシオン探索領域が広範囲に亘るためである。)

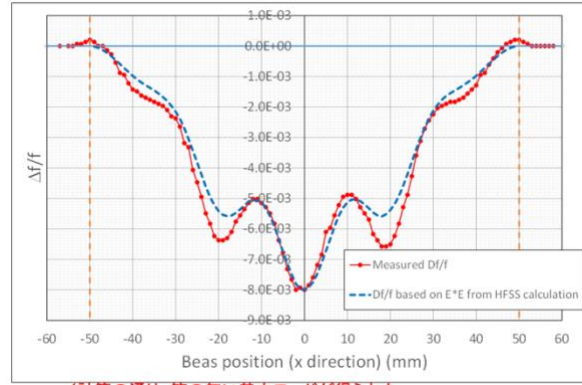
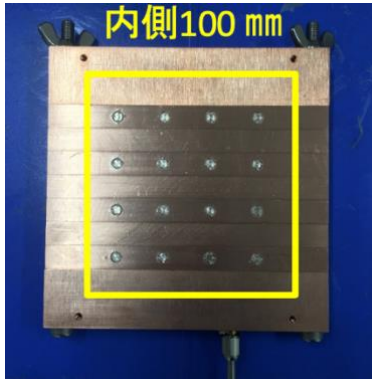
### 4. 研究成果

本研究では、2次元のシミュレーションツール (SuperFish) により、xy 平面内にマルチポストアレイを展開した場合 (z 軸方向には無限遠の場合に相当)、z 軸方向に回転対称である場合、等について、調べた。この結果を元に、本研究で新たに導入した3次元のシミュレーションツール (Ansys HFSS) により、実際に作成する空洞のシミュレーションを行った。計算結果の1例として、サイズは縦・横 10 cm、高さ 1 cm の矩形型空洞の場合の電場強度の分布を図に示した。図から、TM<sub>010</sub> モードのように「節の無い」共振モードとなっていることが分かる。これが、本研究で研究・開発している空洞に他ならない。

この空洞を実際に作成したものが、次ページ左の写真の空洞である。

この空洞内で、確かに TM<sub>010</sub> の様な電場分布となっているかを、ビーズプル法によって確認した。ビーズプル法とは、空洞内に小さな摂動 (この場合、金属小球) を導入し、その摂動による共振周波数の変化、 $\Delta f$  が、摂動の位置での電場の2乗に比例 (つまり、 $\Delta f \propto E^2$ ) していることを利用した手法である。測定の結果、確かに、TM<sub>010</sub> のモードであることが分かった (次ページ右のグラフ)。



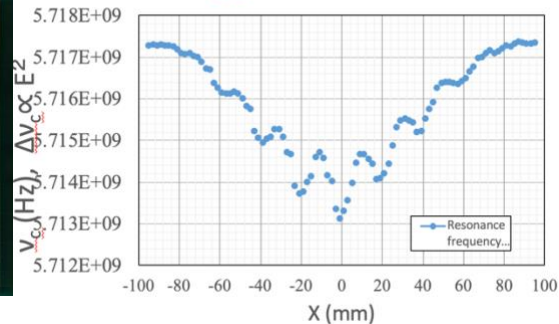


本研究では、更に大型化を推進した。大型化を推進する過程で、次の点が判明した。1) xy 方向への拡大においては、周期構造にバラツキがあっても、共振モードへの影響は小さい。2) その結果、xy 方向への拡大に原理的な問題はない。その一方で、3) z 軸方向への拡張に際しては、 $L_z \sim \lambda/2$  程度を越えると、 $TM_{010}$  モードと競合するモード (TEM モード) によって、 $TM_{010}$  モードでの発振に著しい悪影響を及ぼす事が分かった。従って、4) z 軸方向への拡張は、パンケーキ型の空洞を多段に重ねることが必要であると分かった。3) の事実の発見は、研究開始当初に予測しなかった点であり、ある意味では成果と言える。この多段化に関しては、5) 多段化においてビーズプル法による実機の測定では、8 段まで多段化した場合でも、節の無い  $TM_{010}$  のモードが観測されている。しかし、その一方で、6) 3 段を越えると、各段の電場強度が一様で無く、大きな偏りが生じており、この大きな偏りの実用レベルにまで削減することが求められる。この原因をしては、各段での機械製作の精度の問題が考えられる。また、多段化した場合、3 次元シミュレーションの解が不安定、つまりメッシュの切り方などに対して敏感な振る舞いが見られており、この点も課題と言える。

本研究では、最も大きいもので、縦・横それぞれ 20 cm、高さ 2 cm の空洞を 2 段重ねたもので、5.7GHz の発振を確認している。以下に、この空洞の内部の様子とビーズプル法による電場強度の様子を示す。



200mm × 200mm × 20mm 空洞でも  $TM_{010}$  モードが確認された



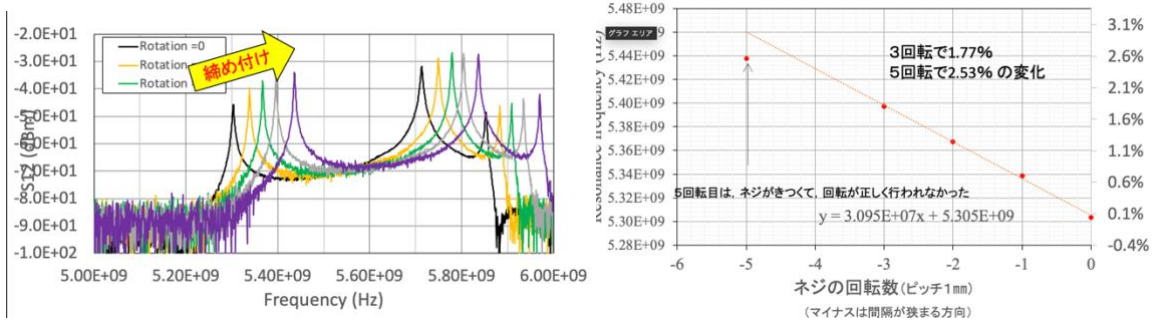
この空洞の体積は、1.6L であり、通常の円筒空洞でこの周波数で共振するものは、直径 4 cm、長さ 4 cm、長くとも 12 cm 程度であり、約 30 倍 (少なくとも 10 倍) の体積となる。従って、本研究によって、フォトニック結晶技術を用いた、 $TM_{010}$  のモードを持つ大型空洞が確立した。

さらに、本研究では、縦・横 10 cm、高さ 2 cm の空洞を用いて、周波数掃引の開発・研究を実施した。本研究では、研究では、周波数掃引の手法として、1) メタルポストアレイの周期構造の間に、誘電体をやはり周期的に導入し、その誘電体を移動する手法、2) 液体、あるいは粒状の誘電体を空洞の x 軸、あるいは y 軸に導入する手法、3) メタルポストアレイの周期構造そのものを移動する手法を、シミュレーションと実際の空洞で検証した。

1) の誘電体を用いる方法では、シミュレーションの結果、周波数の掃引範囲を大きくとると、電場が xy 平面内の一部に集中してしまう事が分かった。これは、折角の大型空洞の一部しか、アクション探索に有効で無い事を意味する。また、機械的要素が多く、構造・組み立てが複雑となり、作成が容易では無い。2) の液体あるいは粒状の誘電体を導入する場合、機械的要素が無いが、やはり 1) と同様、一部に電場が収集してしまう点が問題であると分かった。2) の手法を用いる場合は、誘電率が非常に小さい物質の場合に有効であると結論づけられる。具体的には、液体ヘリウムを用いて、極低温下での周波数の微調整に利用することが考えられる。他にも、温度に応じて、希ガス液体も有効であり、用途によっては、高純度の液体窒素も利用の可能性があると推測される。

結局、本研究では、3) のメタルポストアレイの周期を変動する方法によって、2.5% の周波数変動を確認した (次ページグラフ)。本研究期間内では、ばね定数や可動部分の力学的特性を最適化する事が出来なかったため、周波数の掃引範囲は、研究開始当初の目標値 ~ 15% に到達する前に、ネジ部分のスリップなどの機械的な問題により、大きな可動範囲を実現することが出来ず、今後の課題となった。その一方で、この手法では、共振の周波数の Q 値は、アンテナによる損失を含めて、 $Q=2.4 \times 10^3$  を得ており。当初の目標、 $Q=2,000$  を達成した。更に、この手法では、





周期構造そのものを稼働するため、上手のように、 $TM_{010}$  のモードは高次のモードとは、ほぼ同じ大ききで移動する。従って、アキシオン探索で問題となる、モードクロッシングの問題、即ち、高次のモードと  $TM_{010}$  のモードが交差し、その場所で探索が不可能となる問題を回避できることが分かった。これは当初予想しなかった成果であり、フォトニック結晶空洞のメリットとして、今後有効に活用されるものと期待される。

以上、本研究の成果をまとめると、フォトニック結晶技術を用いた、マイクロ波空洞の原理実証、即ち、 $TM_{010}$  モードでの共振を実証し、更に、その大型化においては、従来の空洞に比して、1桁を越える大型化に成功し、当初の研究目的を達成した。周波数掃引機構においては、実際に掃引出来た範囲は2.5%に止まり、当初の目標(15%程度)へ向けての課題となった。しかし、これは原理的困難によるものではなく、機械設計の問題と考えられ、適切なばね定数などの設定により、目標達成は可能と考えている。また、この周波数掃引機構を採用した場合、Q値は2,400程度と、当初目標を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岸本康宏, 山下雅樹, 小川泉, 森勇太, 西村大輝
2. 発表標題 暗黒物質アクシオン, 暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究 - テスト空洞の電場プロファイル測定 -
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋の分科会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本康宏, 山下雅樹, 小川泉, 森勇太, 西村大輝
2. 発表標題 暗黒物質アクシオン, 暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究 - テスト空洞の電場プロファイル測定 -
3. 学会等名 日本物理学会 2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村大輝, 森勇太, 岸本康宏, 山下雅樹, 小川泉
2. 発表標題 ダークマターアクシオン探索用大体積共振空洞の開発 ( 1 )
3. 学会等名 2018年度 日本物理学会北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森勇太, 西村大輝, 岸本康宏, 山下雅樹, 小川泉
2. 発表標題 ダークマターアクシオン探索用大体積共振空洞の開発 ( 2 )
3. 学会等名 2018年度 日本物理学会北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本康宏, 山下雅樹, 小川泉, 森勇太
2. 発表標題 フォトリソグラフィ技術を用いた, 暗黒物質アクシオン, 暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究
3. 学会等名 日本物理学会 年会 (2018年3月)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本康宏, 山下雅樹, 小川泉, 森勇太
2. 発表標題 フォトリソグラフィ技術を用いた, 暗黒物質アクシオン, 暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究 - 周波数変調機構 -
3. 学会等名 日本物理学会 年会 (2019年 3月)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本康宏, 鈴木裕也, 山下雅樹, 小川泉
2. 発表標題 フォトリソグラフィ技術を用いた, 暗黒物質アクシオン, 暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究 - 多段化による大型化 -
3. 学会等名 日本物理学会 春の分科会 (2020年3月)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸本康宏
2. 発表標題 暗黒物質アクシオン検出に超伝導技術を使うなら
3. 学会等名 簡単・便利な超伝導 (TIAかけはし) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本康宏
2. 発表標題 暗黒物質アクシオン探索のための、高磁場環境下でのHigh-Qマイクロ波空洞の開発・研究
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」領域研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本康宏
2. 発表標題 大型空洞を使った暗黒物質アクシオン探索
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 L. ローゼンバーグ（岸本康宏 監訳）	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日経サイエンス	5. 総ページ数 6
3. 書名 ダークホース 新粒子「アクシオン」	

〔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	小川 泉  (Ogawa Izumi)  (20294142)	福井大学・学術研究院工学系部門・准教授   (13401)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	山下 雅樹  (Masaki Yamashita)  (10504574)	東京大学・宇宙線研究所・特任准教授     (12601)	