

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03974

研究課題名(和文) 単一光子検出法による0.1meV領域の宇宙由来アクシオンの探索

研究課題名(英文) Saerch for dark matter axion

研究代表者

小川 泉 (OGAWA, Izumi)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：20294142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：現代宇宙物理学における重要な未解決問題の一つである暗黒物質。その正体を未発見の素粒子アクシオンであると考え、発見(又は可能性の排除)を目指すべく探索実験装置CARRACKの開発を行った。アクシオンは質量が未知であり、またその信号は非常に微弱であると考えられるため、探索質量を変えながら1)ノイズの非常に少ない、2)長期間にわたって安定的な探索実験を行う必要がある。1)の実現を目指し、レーザー冷却・加速技術を用いたバンチ化原子ビーム発生装置の開発を行い、2)の実現を目指して、フィールドイオン化検出装置の改良を行った。いくつかの問題点も残っているが、解決のうえ探索事件を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「質量」としての存在は確認されているが、その正体は未だに解明されていない暗黒物質。宇宙・素粒子物理学から、その候補として本研究のターゲットであるアクシオンの他に、暗黒光子やウィンブなどが挙げられている。この問題の決着にはいずれかの候補粒子の「発見」が必要である。本研究において探索までには至らなかったが、十分な感度を持ち長期間安定的に動作可能なアクシオン探索装置の開発に道筋をつけることができた。今後この開発を続け、近い将来の探索実験により発見又は可能性の排除を行うことを目指す。

研究成果の概要(英文)：Dark matter is one of the most important unsolved problems in modern astrophysics. Assuming that the true nature of the dark matter is undiscovered elementary particle axions, we have developed a CARRACK system to search for. Since the mass of the axion is unknown and its signal is considered to be very weak, it is necessary to realize low noise and stable experiments over a long period of time while changing the mass of interest. In order to reduce the noise level, we developed a bunching atomic beam generator using laser cooling and acceleration technology. The field ionization detection system has been improved to achieve a stable operation for a long time. After fixing some problems, we will start to search for the dark matter axions.

研究分野：原子核・素粒子物理学

キーワード：ダークマター アクシオン リドベルグ原子 レーザー冷却 レーザー加速 フィールドイオン化

1. 研究開始当初の背景

現代宇宙物理学における重要な未解決問題の一つとして暗黒物質 (dark matter: DM) をあげることができる。これまでの様々な実験・観測に基づく議論によって、DM は未発見の素粒子から構成されている可能性が高いと考えられている。よって DM の探索実験は宇宙・素粒子物理学双方で非常に重要な課題である。その有力候補の一つはウィンプ (WIMPs) であり、もう一つがアクシオン (axion) である。前者は超対称性理論等によって予言されている軽い超対称性粒子他 (LSP, LKP 等) の総称で、国内も含めて全世界で数十の探索実験が計画ないしは稼働している。加えて加速器実験 (LHC 他) も探索の一翼を担っているが、現時点では未発見である。一方後者は、強い相互作用における CP の破れの問題 (Strong CP Problem) を解決するために理論的に存在を予言された粒子である。研究開始時点で DM axion を探索する建設・稼働中の実験は、本申請のほかに世界で 2 件 (ADMX, ADMX-HF) しかなかったが、WIMPs 探索実験の現状から近年再び注目を集め、現在は様々な実験手法が提案されて競争は激しくなっている。

2. 研究の目的

DM axion 探索実験は、Sikivie によって提案された強磁場中でのプリマコフ効果を利用し、マイクロ波光子に転換し検出することによって行われる。この種の実験の雑音源は、共振空洞の物理的温度による黒体輻射光子とマイクロ波検出器由来のものである。前者については希釈冷凍機による共振空洞の冷却 (数 10 mK 程度) によって低減することが可能であるが、後者は通常の増幅器が本質的に持つ標準量子限界 (SQL) によって制約を受けてしまう。我々は本研究開始前までに、DM axion 探索実験 (CARRACK) において、SQL の制約を受けないリドベルグ (Rydberg) 原子を用いたマイクロ波単一光子検出法を開発することによって低減することに成功した。CARRACK 実験では、強磁場中に設置された共振空洞内の axion 転換マイクロ波光子を、高励起リドベルグ原子を用いて単一光子検出する。マイクロ波空洞内にリドベルグ原子ビームを導入し、axion 転換光子を吸収・励起させて、励起した原子のみをフィールドイオン化の方法により選択的に検出する。また axion の質量 (m_a) は未知であるため、(axion 質量に比例する) マイクロ波光子の周波数をスキャンして探索する必要があるが、これらの機構についても開発を終え、要求通りの動作を確認している。

残された課題は、空洞内に存在する非一様な残留電場の影響で、フィールドイオン化の準位選択性が乱されることによる雑音 (Yamada *et al.*, Phys. Rev. **A72** (2005) 033414) の排除である。本研究では、それまでの研究成果を基にして現有装置 CARRACK を改良し、DM axion として最新の宇宙観測結果から最も可能性が高いと考えられる質量領域において、DFSZ (相互作用が特に弱い理論モデル) axion まで感度を持つ探索実験を行い、DM axion の存在の検証をすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、現有の DM axion 探索装置 CARRACK を改良する。CARRACK の概要は以下のとおりである (図 1)。

- [1] 原子ビーム発生装置：アルカリ原子ビームを発生させる。
- [2] 転換用空洞：超伝導電磁石中に設置されている。我々の銀河系のハローを構成していると考えられる axion (a) が磁場の 2 乗に比例する確率でマイクロ波光子 (γ) に転換する。axion の質量と空洞の共振周波数が一致するときに得られる最大の転換効率を達成するため、共振周波数の調整機構を備える。
- [3] 検出用空洞：[2] と結合している。この空洞中をリドベルグ原子ビームが通過し、axion 転換マイクロ波光子 (γ) を吸収する。[2] と同様の共振周波数調整機構を備えると同時に、リドベルグ原子の吸収波長を Stark 電場 (又は Zeeman 磁場) で調整する機構も備える。
- [4] フィールドイオン化検出部：検出用空洞を出たリドベルグ原子のうち、マイクロ波光子を吸収したものだけを選択的にイオン化し、電子検出器で検出する。

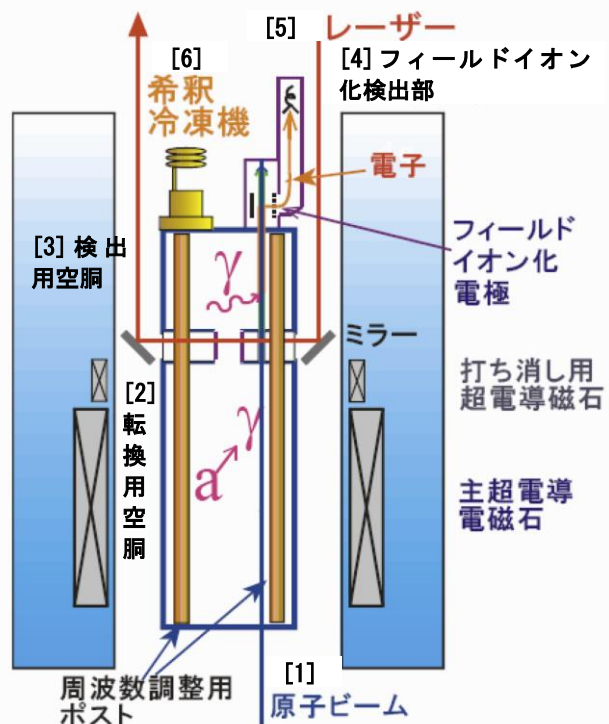


図 1 CARRACK の概略図

[5] レーザー系：[1]で生成した原子ビームは[2]を通過し[3]に入る直前で2段階レーザー励起によりリドベルグ状態になる。特定の主量子数を持つリドベルグ状態のみを生成するため、2本のレーザーの波長及び線幅を制御・安定化する必要がある。

[6] 希釈冷凍機部：実験の最大のバックグラウンドである黒体輻射光子を低減するため、[2]および[3]の空洞は希釈冷凍機によって、数10 mK程度まで冷却する必要がある。

本装置は、本研究開始までに基本的な部分について開発が済んでいる。本研究期間前半で取り組むべき残された課題は[3]（検出用空洞）中の残留電場である。この影響によるS/Nの低下を防ぐため、リドベルグ状態において外場の影響を受けにくい原子種を選択し、残留電場を動的に制御する手法の開発を行う。これらの手法は単独でも有効であるが、双方の開発によって目標であるS/N（～10）を得ることができ、研究期間内でのターゲット質量領域の探索が可能となる。

4. 研究成果

申請時に使用を予定していた実験室が事情により使用できなくなった等の理由により、当初の目的であった探索実験には残念ながら到達できなかった。一方で、実験装置の高感度化については着実に改良を進めた。具体的には、検出用空洞中の残留電場の影響を受けにくい原子種として、いくつかの観点から検討を行った結果、最終的にルビジウム原子の置き換えとしてカリウム原子に決定した。続いて残留電場を動的に制御すべく、検出用空洞内のパルス電場及びフィールドイオン化用パルス電場双方に同期してバンチ化した原子ビームを生成する装置の開発を行った。さらに希釈冷凍機動作温度化での安定動作に難のあったフィールドイオン化部の電子検出器部の改良を行った。

(1) バンチ化原子ビーム発生装置の開発

バンチ化されたリドベルグ原子ビームに対する要請としては次のとおりである。1) リドベルグ状態の寿命から原子ビームの速度（～300 m/sec）。2) アクシオン転換光子の吸収効率から1バンチ当たりの原子数（>200 atoms/bunch）。3) 装置のジオメトリから縦・横方向の速度広がり（～1 m/s）。以上を達成するため、原子ビームをレーザー冷却・加速の技術を適用して高輝度化したうえで、回転ディスク型の速度選別機でバンチ化する手法を用いることとした（バンチ化原子ビーム発生装置）。バンチ化された原子ビームは、検出用空洞入射直前に2本のレーザー光によりリドベルグ状態に励起される。

以上の議論から本装置は次のような構成（図2）とした。すなわち、原子ビーム発生部・第一圧縮部・加速部・第二圧縮部・速度選別部・ビームモニター部からなる。原子ビーム発生部で、金属カリウムを加熱（～100°C）して連続的にビーム状に出射し、第一圧縮部では、後段の加速に備えて横方向の運動量広がり（～1 m/s）を圧縮する。加速部では、速度の遅い原子ビームを所定の速度まで加速し、その後、第二圧縮部で高輝度化を図り、速度選別機に入射する。ビームモニター部では、位置及び運動量のモニタリングを行う。この構成に基づいて、熱速度分布を持ったカリウム原子ビームを初期状態として、レーザーによる冷却・加速を行うシミュレーションを行い、所定の性能を得られることを確認した（図3）。

以上の検討を基に、装置の設計・製作を行った。速度選別機を除き組み立てられた装置の写真を図4に示す。原子ビーム発生部はPID制御による温度コントロールを行い、±0.9°Cでの制御ができていることを確認した。原子ビームの圧縮及び加速は、磁場とレーザー光の組み合わせにより行う。磁場について、必要な空間分布と強度の

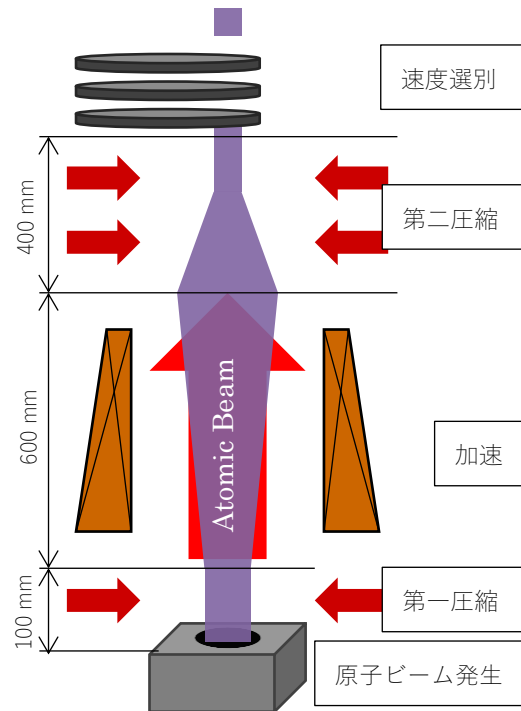


図2 バンチ化原子ビーム発生装置概略

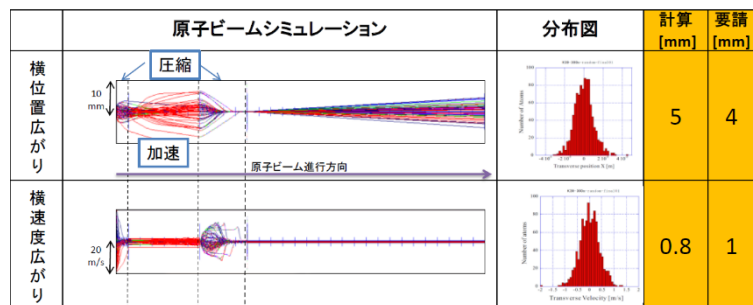


図3 シミュレーション結果

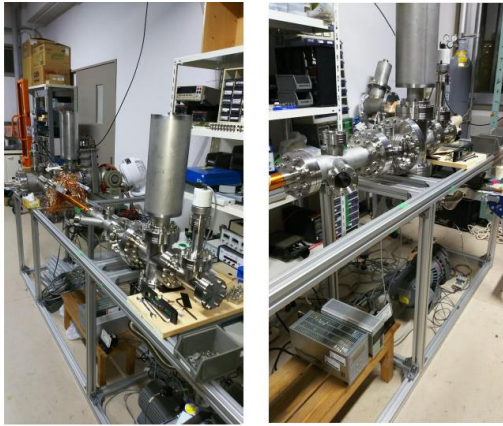


図4 バンチ化原子ビーム発生装置写真

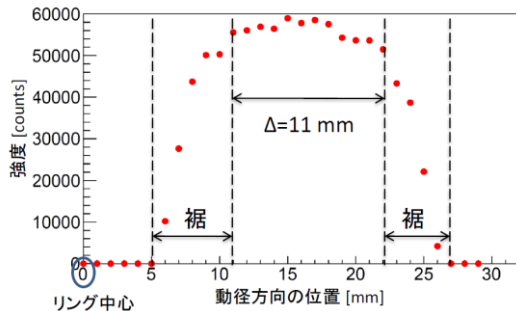


図5 加速用レーザー照射位置での空間分布

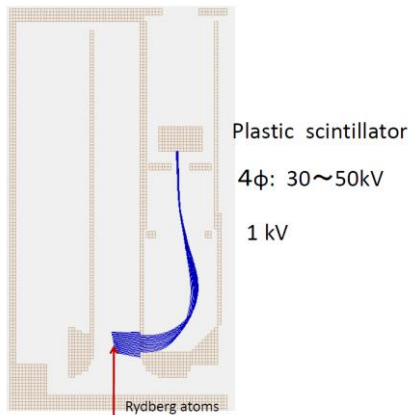


図6 設計した電子検出器での電子の飛跡シミュレーション

要請からシミュレーションも利用して、圧縮部は永久磁石、加速部は電磁石により発生させることとした。ビーム軸方向及び垂直方向に沿った磁場分布測定により、要請される磁場が実現できていることを確認した。レーザーについて、第一・二圧縮・加速用に加えてモニタリング用の合計4台が必要となるため、コスト面を考慮してECDLを採用し、長期間の安定発振のために、カリウムセルを用いたDAVLL法による波長制御を行うことにした。加速及びビームモニターでは発振波長を若干ずらす必要があるため、制御中心を変化させることが可能なフィードバック系の開発を行った。また、それぞれのレーザーから原子ビームまでの光学系路の設計を行い、発生装置とは独立に組み立て及び試験を行い、必要な強度・空間分布を持っていることを確認した。加速用レーザーの照射位置での空間分布を図5に示す。ビームモニター部は前述のレーザーと、原子ビームからの蛍光を測定するCMOSセンサー及び付随する光学系からなる。レーザー光の照射位置により空間分布を、波長変化によるドップラーシフトの測定により位相空間分を測定する。テストの各段階で測定が可能なように、図2の5つの構成要素それぞれの後段に挿入できるような構造とした。

(2) フィールドイオン化検出装置の改良

フィールドイオン化検出部は、アクシオン転換光子を吸収したリドベルグ原子の電離用電極と、電離した電子を検出する電子検出器からなる。後者について、研究開始前の予備実験では、希釈冷凍機の1K potプレートに設置された電子増倍管(チャンネルトロン)を使用してきた。短時間の予備実験の段階においては十分にその役割を果たしていたが、一方で長時間の測定においては、動作が不安定になるという問題点があった。更に最近になって経年変化により、冷却後の安定動作時間が短くなってきていた。そのため、より長時間安定動作可能な電子検出器に代替すべく開発を行った。具体的には、低温部(検出用空洞直後)にはイオン化用電極と加速用電極、プラスチックシンチレータを設置し、ここで電離電子を光信号に変えたのち、ファイバーによって装置の真空チャンバー外まで導いたうえで、光電子増倍管またはMCPにより電気信号として検出するものである。光電子増倍管は熱雑音

低減のため、 $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ 程度まで冷却される。

まず必要な加速電圧の確認テストを行った。比較的単純な構造の電極からなる装置を作成し、テスト用真空チャンバー内で、加熱したタングステンフィルムからの熱電子を加速・検出したところ、 $30\sim 50\text{ kV}$ 程度の加速電圧で十分な信号を得られることを確認した。またピエゾ素子を利用したPMT冷却装置を構築し、十分に冷却能力が達成されていることを確認した。この結果を受けて実機に搭載するフィールドイオン化検出装置の設計を行った。設計時に考慮すべき点は以下のとおりである。1) 加速用電場がイオン化電場に影響を及ぼさない。2) 電離電子を効率よく加速・収束してシンチレータに導ける形状とする。3) 環境放射線によるバックグラウンドを極力抑えるため、シンチレータ部分は $30\sim 50\text{ keV}$ の電子を検出するに十分な程度で極力小さいサイズにする。4) シンチレーション光を効率的にファイバーに入射させる。設計はシミュレーションを活用して行った。図6に荷電粒子飛跡シミュレータによる結果の一例を示す。この設計に基づいて装置の製作を行い、テスト用真空チャンバー内に設置して動作チェックを行ったところ、加速電極部分に放電現象が確認された。この点については、経験を持つ研究者の協力を仰ぎつつ、その原因を探るとともに再設計を進めている。

以上まとめると、実験室確保が困難になったことから、DM axion探索実験を行うという当初の目的を達成することはできなかったが、実験装置の高感度化については着実に進めることができた。今後は、いくつか残る問題点を解決したうえで、十分な広さと高さを持つ実験室を確保し、CARRACKの装置全体を組み立てて質量 $100\ \mu\text{eV}$ 付近でのDM axion探索実験を行う。これにより、この質量でのDM axionの発見又は排除を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小川泉
2. 発表標題 Non-WMPs dark matter
3. 学会等名 宇宙線研タウンミーティング（招待講演）
4. 発表年 2017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 ~CARRACK実験~
3. 学会等名 ダークマターの懇談会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 灰塚惇、小川泉、松木征史、時安敦史
2. 発表標題 暗黒物質アクシオン探索実験における原子ビームバンチ化用 レーザーの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Tokiyasu
2. 発表標題 AXION experiments in Japan
3. 学会等名 International Symposium on 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 小川泉
2. 発表標題 AXION実験
3. 学会等名 ダークマター懇談会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 時安敦史
2. 発表標題 宇宙暗黒物質アクシオンの探索
3. 学会等名 若手アンサンブルワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 時安敦史
2. 発表標題 アクシオン探索実験のための極低温下で動作する電子検出器の開発
3. 学会等名 ELPH シンポジウム
4. 発表年 2020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	時安 敦史 (Takiyasu Atsushi) (40739471)	東北大学・電子光物理学研究センター・助教 (11301)	

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	松木 征史 (Matsuki Seishi) (50037941)	大阪大学・核物理研究センター・協同研究員 (14401)	
研究 分担者	舟橋 春彦 (Funahashi Haruhiko) (00283581)	京都大学・国際高等教育院・教授 (14301)	
研究 分担者	松原 明 (Matsubara Akira) (00229519)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	
研究 分担者	中島 恭平 (Nakajima Kyohei) (30722540)	福井大学・学術研究院工学系部門・講師 (13401)	
研究 分担者	玉川 洋一 (Tamagawa Yoichi) (40236732)	福井大学・学術研究院工学系部門・教授 (13401)	