

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13805

研究課題名(和文)リドベルグ原子直接光イオン化によるダークマターアクシオンの広域一括探索

研究課題名(英文)Wide-area collective search for dark matter axions using Rydberg atomic direct photoionization

研究代表者

舟橋 春彦(FUNAHASHI, Haruhiko)

京都大学・国際高等教育院・教授

研究者番号：00283581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙におけるダークマターの正体を解明するために、その有力候補である素粒子アクシオンを探す新たな方法の開発を行った。具体的には、広い範囲の質量を持つアクシオンを一括して同時に探索する方法の中核的実験技術の開発を目指す。特に、(1)高励起原子(リドベルグ原子)に光子を直接吸収させてイオン化する「直接光イオン化過程」を用いた実験手法の詳しい解析、(2)この方法の実現に不可欠な時間的に制御されたバンチ化原子ビーム、および関連する電子検出器の開発、を行った。これらの解析と関連実験装置の開発により、より効率的なダークマターアクシオンの探索が可能であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙のダークマターの正体の解明は、宇宙物理・素粒子物理に渡る最重要な研究課題の一つであり、極めて高い学術的意義がある。有力なダークマター候補素粒子アクシオンの探索は多くの研究グループにより行われているが、アクシオンの質量が理論的に特定できないので、探索が効率的に行われているとは言い難い。本研究は、広域の質量を持つアクシオンを一括して同時に探索して、探すべきアクシオンの質量領域を効率よく限定しようとするもので、ダークマターの正体を解明する新たな探索法として、高い学術的・社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Unveiling the origin of dark matter in the Universe is one of the most critical subjects in astrophysics and particle physics. Among the plausible candidates of dark matter particles, the axion is one of the most important and elegant candidates. In the present research, we propose to apply the direct photoionization process to search for the axion in a wide range of its mass simultaneously, developing experimental techniques which constitute the essential part for the present dark matter axion search. Specifically for this purpose, (1) we first analyzed in detail the photoionization process to apply for axion search and then (2) we developed two experimental apparatus, that is, a bunched Rydberg atomic-beam system and an electron detector for the photoionized electrons. We conclude that the present photoionization method is expected to be quite useful to search for dark matter axions efficiently.

研究分野：素粒子物理

キーワード：ダークマター アクシオン 光イオン化過程 リドベルグ原子 バンチ化原子ビーム 電子検出器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙におけるダークマターの正体の解明は、宇宙物理・素粒子物理に渡る最重要課題の一つである。多くの実験・観測が試みられているが、解決には至っていない。ダークマターの最有力候補の一つである素粒子アクシオンについても同じ状況で、多くの実験と提案が行われているが、その存在に関して明確な証拠は見出されていない。

アクシオンの質量は、理論的には決められない。理論のモデルによって、ある程度の範囲の予想は可能であるが、実験的には広い範囲の質量領域を探ることが求められる。残念ながら、その範囲は3桁の範囲に渡っていて非常に広く、これがアクシオン探索実験の困難さの大きなファクターとなっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、現在までに行われてきたアクシオン探索の探索法に代えて新たな方法を試み、停滞しているアクシオン探索研究に新しい進展をもたらすことを目指すものである。

従来の方法の中で最も有力と考えられている探索方法は、磁場をかけたマイクロ波共振空洞中でアクシオンを光子に転換し、転換されて発生したマイクロ波光子を検出するものである。この方法では、空洞のQ値だけ検出感度が高まるが、一方で微細に共振周波数を変えて数多くの探索を続ける必要があり、アクシオンの質量が不明な状況では、遠く離れた質量領域での探索を無駄に繰り返す可能性が存在する。

このような状況を打破するには、広い範囲の質量領域を、極端には感度を落とすことなく一括して探索し、まずは可能な質量範囲を狭めることが無駄が少なくて良い。本研究の目的は、このような新しい手法を高励起原子であるリドベルグ原子の直接光イオン化法を利用して開発し、実際にその有効性を確かめる事である。

3. 研究の方法

本研究では、共振空洞を用いなくて、ほぼ自由な空間でのリドベルグ原子の直接光イオン化を利用する：具体的には、高磁場中でアクシオンを光子に転換し、その光子を高励起原子であるリドベルグ原子に吸収させて、その結果、原子が直接にイオン化される過程を使う(図1：光イオン化遷移図、過程①、および②が本研究に関係する遷移)。最初に用意する原子の準位と電場の値を選ぶことにより、広い範囲の光子の周波数(アクシオンの質量に相当する)に渡って、同時に検出が可能である。本実験方法の模式図を図2に示す。

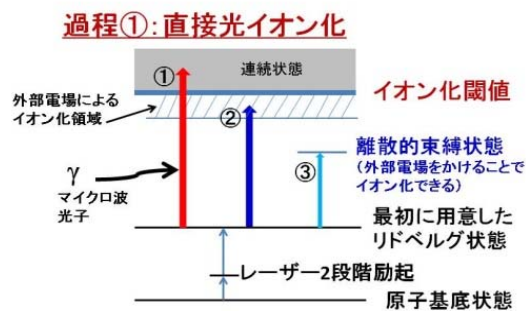


図1. 本研究で用いる光イオン化遷移、遷移①と②を用いる。③は共振空洞を用いる従来の場合の離散準位による遷移

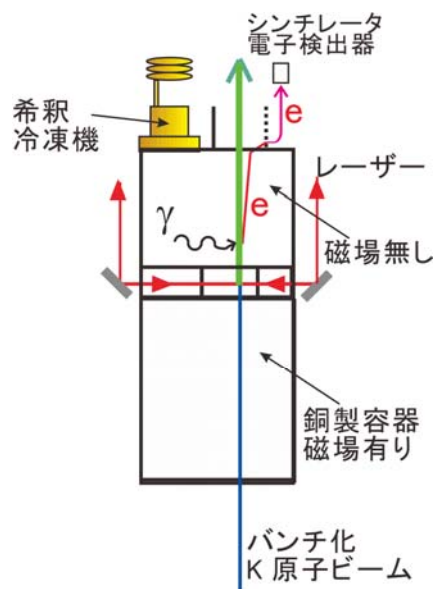


図2. 本研究に用いる光イオン化法の実験原理模式図

この方法では、共振空洞のQ値による感度の向上は期待できないが、一方では空洞共振に関係なく大きな検出容積を利用出来、なをかつ、比較的短時間でアクシオンの質量を概算で求めるられる点で、極めて有効である。

本方法を真に実現するには、検出感度に見合ったバックグラウンドの低減が重要で、このためには、リドベルグ原子をパルス化（バンチ化）し、イオンと電子の同時計測を行ってバックグラウンドを低減すると共に、大きな検出容積を持つ金属容器を低温に冷却した装置系が必要である。本研究の方法を具体化するものとして、このような実験系を設計・製作開発するのも、目的の一つである。

4. 研究成果

(1) 直接光イオン化による本研究方法の全体的検討

本研究の核心をなす直接光イオン化による実験方法を詳細に検討し、検出感度や予想イベント数、実験に必要な日数、必要な装置系、などを明らかにした。探索に用いられる初期設定リドベルグ準位（主量子数 n で表している）と、結合エネルギーの関係を図3に示す。横軸は、最初に下位状態として用意したリドベルグ原子の準位で主量子数 n で表わしている。縦軸は、探索可能な範囲のうちで最低の周波数値を示すもので、高い励起準位を使うほど、低い周波数まで探索可能であることを示す。また、重要なバックグラウンドの一つとして考えられる黒体輻射の割合を図4に示す。装置系を100mKまで冷却すれば、十分に輻射の影響を抑えることが出来ることを示している。

(2) バンチ化リドベルグ原子装置系の製作

本研究では、リドベルグ原子ビームのバンチ化が重要な要素を占める。特に、良く制御した時間系列を持つバンチ化ビームを生成することにより、アクシオン-光子転換用金属容器内に1バンチのみを導入する。この手法により、実験の検出感度を上げることが可能になり、

(1) アクシオン-光子転換用金属容器および電子検出器部での浮遊電場の影響の消去、(2) 電子・イオン同時計測を利用したバックグラウンド低減、という二つの目的が達成される。全体模式図（図5）と、製作したバンチ化装置の外観（図6、7）を示す。

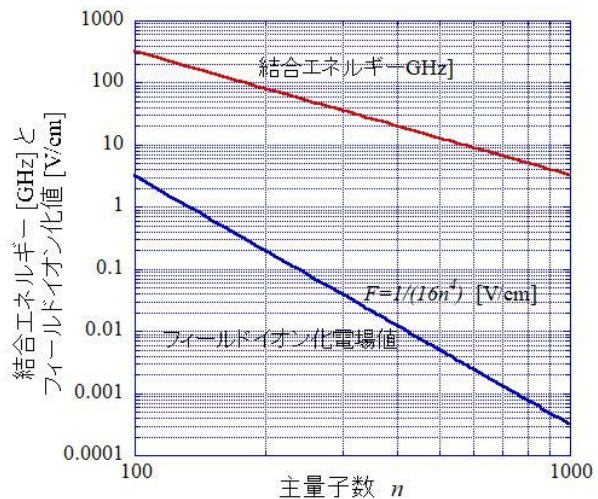


図3. 初期状態として励起した主量子数 n の状態の結合エネルギーと対応するフィールドイオン化電場値

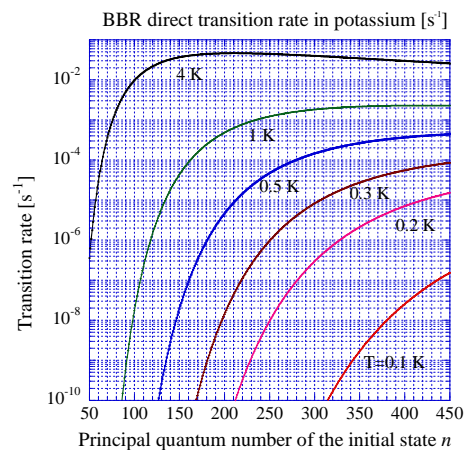


図4. 最初に励起した準位に対応する黒体輻射バックグラウンドの遷移率の温度依存性

本バンチ化装置のビームの性能制御は、半導体レーザーを用いて行う。第一段階でレーザー冷却によるビームの横方向圧縮を行った後に、レーザー加速により縦方向でのビーム圧縮・ビーム強度増強を行う。次に、第二の横方向冷却・圧縮を行って、ビームの拡散を防ぐ。最後に、回転ディスクを用いた速度選別器によりビームのパルス化とその時間系列の制御を行う。

このようなバンチ化装置の制御には複数本の波長の異なる半導体レーザーを使うが、個々に波長制御したレーザー系を製作した上に、全体としてLabVIEWソフト系による制御と計測を行っている。個々の波長制御は、アルカリ原子カリウム (potassium) の吸収セルを用いて、DAVLL法により行っており、十分な安定性を得ている。

(3) 直接光イオン化用電子検出器の開発

従来我々が用いてきたフィールドイオン化電子検出器は、本研究では直接的には使えないので、新たに光イオン化で生成された電子を検出する電子検出器の開発が必要である。この為に、まずは種々のシミュレーション計算を行って、光イオン化に基づく発生電子の検出器を設計した。このデザインを用いて、イオン化で生成された電子の電場による加速 (20keV 程度まで)・移動と、その後のシンチレータによる電子検出器を製作した。

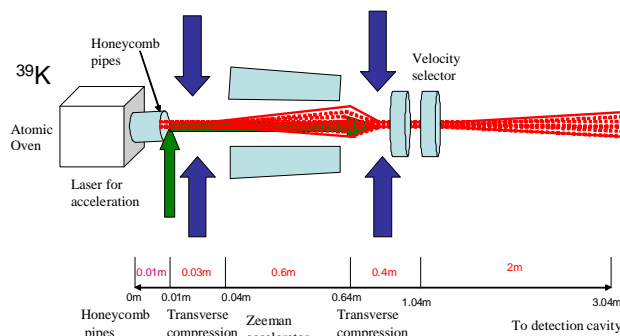


図5. バンチ化ビーム生成装置の原理模式図

この検出器で特に重要な要件は、転換用金属容器内での電場の制御である。光イオン化で生成された電子を上部の電子検出部分に導くために必要な電場をかける必要があるが、一方

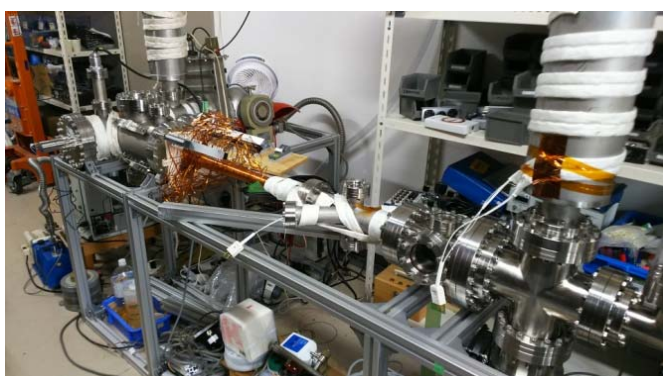


図6. 下流から見たバンチ化装置外観写真。

で光イオン化に大きな影響を与える一様電場も加える必要がある。このような要求を実現するために、詳細なシミュレーション計算を行い、最適な解を見出した。



図7. 上流から見たバンチ化装置の外観写真

(4) 全実験装置系の設計開発

本研究の実施には、黒体放射のバックグラウンドを低減するために極低温クライオスタットが必須である。現有の共振空洞系実験用に製作されたクライオスタットも利用出来るが、液体 He 寒剤を用いる現有の装置では、天井高さが 7 m 以上ある実験室が必要であり、通常の実験室が利用出来るという汎用性に乏しい。そこで、寒剤を一切用いず、天井高さが 3.5m 程度あれば実験が可能な装置系の基本的な設計を行った。全体の外観図を図 8 に示す。

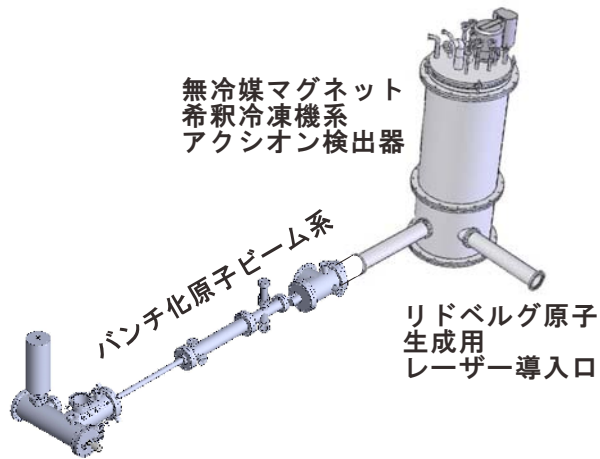


図 8. 寒剤を用いないアクシオン探索実験装置の設計案模式図

5. 主な発表論文等

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 松木 征史

ローマ字氏名： MATSUKI Seishi

研究協力者氏名： 小川 泉

ローマ字氏名： OGAWA Izumi

研究協力者氏名： 松原 明

ローマ字氏名： MATSUBARA Akira