

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 2 月 1 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340054

研究課題名（和文） リュードベリ原子を用いたダークマターアクシオンの探索

研究課題名（英文） Search for dark matter axion with Rydberg atoms

研究代表者

今井 憲一（IMAI KENICHI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：70025493

研究成果の概要（和文）：アクシオンは宇宙の暗黒物質の有力な候補となる未発見の素粒子である。このアクシオンの検出をめざして Rydberg 原子をつかった高感度マイクロ波検出装置をたちあげた。超電導磁石、希釈冷凍機、高性能レーザーを用いてアクシオンからの転換光子を Rydberg 原子を使って検出するものである。Rydberg 原子として用いるカリウムの Rydberg 状態を生成しそのエネルギーを測定し、アクシオン検出の準備を整えた。さらにレーザー冷却されたパルス Rydberg 原子ビームを用いることで、これまでに比べて大幅にアクシオン検出の S/N を改善することができることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Axion is an unknown particle and a candidate of the dark matter in the universe. We have constructed a high sensitivity micro-wave detector with use of Rydberg atoms for the detection of a dark matter axion. It consists of a superconducting magnet, a dilution refrigerator and high-precision laser system to detect a micro-wave photon converted from an axion. We have measured energy levels of Rydberg states for K atoms, and made the whole detector system ready for the search of dark matter axion. We have also found a new method to greatly improve S/N of axion search which utilize a cooled and bunched beam of Rydberg atoms.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 20 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
平成 21 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
平成 22 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ダークマター、アクシオン

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の暗黒物質の謎は、銀河の星の回転速度から、われわれには見えない物質が見える物質の十倍ちかくあるとして、その存在がルービンにより予言されて以来、現代科学の最も大きな謎といってよいだろう。最近の

WMAP による宇宙背景放射のゆらぎの精密測定から、その暗黒物質の質量はバリオン物質の 6 倍と精密に決定され、かつ宇宙初期から存在していたことから、バリオン物質ではなく未知の素粒子であると考えられる。この素粒子の候補としては重い超対称性粒子か

軽いアクシオンが有力な候補である。

超対称性は標準理論を越える最も有力な理論であり、期待も高く、超対称性粒子の探索はこれまでも高エネルギー加速器で常に探索され、当時建設中の世界最大の加速器LHCの最重要の研究テーマでもある。宇宙暗黒物質としてのこの重い粒子の探索は、世界各地の地下実験室ですでに大規模にはじまっていた。

アクシオンは強い相互作用におけるCP保存を説明するためにPeccei, Quinnによって1977年に導入された素粒子である。その後筆者も含めて数多くの加速器実験で探索されてきたがkeVを超える質量領域ではみつからず、この質量領域のアクシオンの存在はほぼ否定された。その後太陽からのアクシオンも探索されているが暗黒物質として存在する可能性のある質量領域には感度が大幅に不足している。

一方宇宙論や超新星爆発の観測からアクシオン質量が $\mu\text{eV}$ から $\text{meV}$ の範囲であれば暗黒物質である可能性があると考えられている。実験的には、このような軽いアクシオンの検出は極めて困難である。世界ではわれわれ京都のグループと米国リバモアの研究グループの実験が存在するのみである。

このような軽いアクシオンを検出するには強い磁場中でプリマコフ効果でアクシオンを光子に転換して観測する以外ない。この光子の波長はマイクロ波領域になる。したがって低雑音高感度のマイクロ波検出をすればいい。米国のグループは極低雑音のマイクロ波増幅回路で検出を試みたが、雑音のため十分な検出感度が得られていなかった。暗黒物質としてのアクシオンの意味のある検出実験のためには、検出方法についてのブレークスルーが必要であると考えられていた。そこで松木によってRydberg原子を超高感度のマイクロ波検出器として用いてアクシオンを検出することが提案された。電子回路での測定では位相と振幅をともに測定するため量子雑音限界を超えられない。一方この方法は原理的に単一光子を測定することが可能である。

京都大学化学研究所(宇治)において、このアイデアに基づく初期の実験装置(CARRACK)が建設され、予備的な実験が行われ、原理実証のための多くの成果をあげた。しかしながら実験室の閉鎖などの外的条件により中断していた。

## 2. 研究の目的

この研究の目的は、暗黒物質としてのアクシオンの検出のため磁場中で転換された光子をRydberg原子をマイクロ波の超高感度検出器として用いて検出するという新しい原理に基づいて、この原理実証を行いアクシ

オン検出実験を現実のものとするところである。

そのためにこれまで宇治の京都大学化学研究所で行われてきた予備実験を引き継ぎ、北白川キャンパスにある京都大学低温物質科学センターに新しく建設された実験室に、実験装置を移設し、完成させることが必要となる。また十分な感度を得るためには、これまでの予備実験で問題となってきたRydberg原子の選択的電離のさいのレベル混合によるS/Nの劣化をふせぐ方法を確立することが必要となる。

これらの課題を解決して、アクシオンが暗黒物質であれば、その検出に十分な感度を持つ実験の原理実証がこの研究の目的である。

## 3. 研究の方法

Rydberg原子を用いたアクシオン探索装置の模式図を図1に示す。本研究における基本的実験方法は、1) 強磁場中の共振空洞(図1の空洞の下部: 転換空洞と呼ぶ)内でアクシオンをPrimakov効果によりマイクロ波光子に転換する、2) 転換された光子を共振空洞上部(図1の空洞の上部: 検出空洞と呼ぶ)に導き、レーザーにより励起されたビーム状のRydberg原子に吸収させる、3) 光子を吸収したRydberg原子のみを選択的にフィールドイオン化の方法(弱い電場中でトンネル効果によりイオン化すること)でイオン化し、イオン検出器で検出する、4) 共振空洞の共振周波数、Rydberg原子の共鳴遷移周波数、を変化させて上記の実験を繰り返し、アクシオンの広い質量領域を探索する、である。

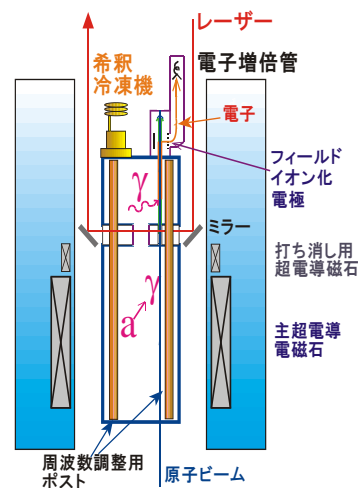


図1 アクシオン検出装置

図1はこの基本的実験方法を示す。

アクシオンを光子に転換する為の強磁場は、超伝導電磁石を用いる。中心での磁束密度は7 Tである。共振空洞系は希釈冷凍機に

より約 10 mK まで冷却して、空洞壁からの黒体輻射雑音を低減させる。Rydberg 原子ビームは検出空洞の直前で、レーザーによる多段階励起により基底状態にあるアルカリ原子ビームから生成される。アキシオン転換光子を最も効率よく検出する条件は、共振空洞の減衰定数（共振周波数と Q 値により決まる）と、Rydberg 原子と空洞の共振モードとの結合の強さ、及び Rydberg 原子ビームの空洞通過時間により決まる。アキシオン-光子-Rydberg 原子系の原理を図 2 にしめす。（構造は図 1 を参照）

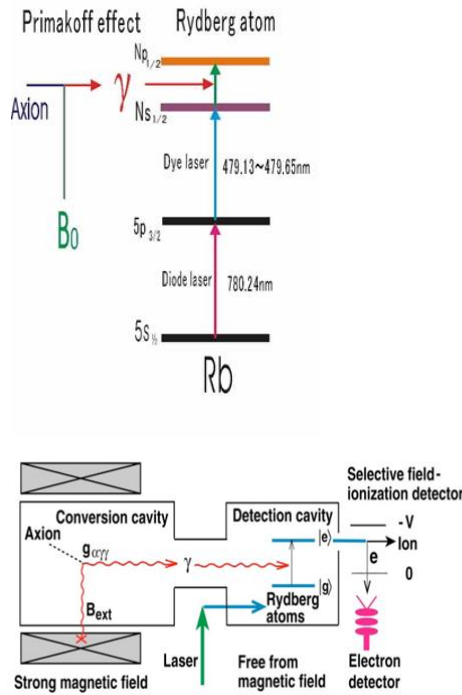


図 2 Primakoff 効果によりアキシオンを強磁場内の空洞でマイクロ波に転換し、検出空洞で Rydberg 原子にこのマイクロ波を吸収させ、この原子を電離してアキシオンを検出する。

我々は、アキシオン-光子-Rydberg 原子系の相互作用を量子論的に解き、最も効率の良い実験条件を数値解析により求めて、最適なビーム速度を決定した。検出用の共振空洞と転換用空洞とは統合しているが、検出空洞を磁場ゼロにして、Rydberg 原子のエネルギー準位が強磁場中で複雑に分岐するのを避ける。Rydberg 原子を空洞の共振周波数とほぼ一致する 2 準位系とみなせる状態に設定することが、実験設定を最も単純にし、後の実験解析を容易にする。検出空洞内の磁場をゼロにする為に、空洞を超伝導体のニオブで覆い、消去用コイルを用いて外部磁場をその臨界磁場値よりも小さくしている。共振空洞の周波数の設定は、銅の棒（ポストと称している）を空洞中に挿入し、動径方向に移動さ

せることで行う。また、Rydberg 原子の遷移周波数の調整は、大きくは準位を変えて（主量子数  $n$  を変える）行い、微細には空洞中に挿入した電極に電圧をかけ、シュタルクシフトを生じさせて実現する。

用いる Rydberg 原子のマイクロ波吸収による遷移は、 $s_{1/2}$  状態から  $p_{1/2}$  状態への遷移である。独自の形状のパルス電場を用いることで  $p_{1/2}$  状態のみ分離してイオン化することでアキシオンを検出する。これを選択的電離と呼ぶ。

用いる準位の主量子数  $n$  は 70 から 150 の範囲である。最初に  $ns_{1/2}$  Rydberg 状態に原子をレーザーで励起し、光子を吸収して、 $mp_{1/2}$  状態に励起されるように空洞の共振周波数および原子準位間のエネルギー差を合わせる。各準位は、パルス電場中でエネルギー準位を移動し、最終的にイオン化されるが、その軌跡はパルス電場の形状によって、大きく異なるように操作される。結果として、イオン化電場の値は  $s$  と  $p$  状態で大きく異なり、準位識別が可能となる。（M. Tada et al., Phys. Lett. A303 (2002) 285.）

以上がわれわれのアキシオン検出の基本的な原理と方法である。これまでの予備的研究で空洞内の浮遊電場によって Rb 原子の Rydberg 状態の状態混合がおこることが S/N の劣化をまねいていることがわかっている。一方アルカリ原子の Rydberg 状態の Stark 効果は原子によってちがう。最近長谷山等が計算したところ、K 原子の Rydberg 状態はシュタルク効果が Rb 原子に比べてきわめて小さいことを見出した。図 3 に Rb 原子と K 原子の Stark 効果の計算値を示す。mV/cm のオーダーの浮遊電場の制御は容易ではない。シュタルク効果が小さいと外部電場に対して敏感ではないので、上記の浮遊電場の影響を受けにくいという大きな利点がある。

従来用いていた Rb 原子の代わりに K 原子を用いたい。そこでこの研究では K 原子の Rydberg 状態の分光を行い、そのエネルギー順位を調べることから始める。

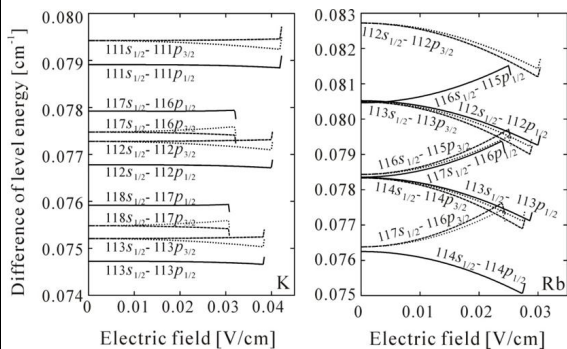


図 3 K と Rb の Rydberg 原子のシュタルク効果の電場依存性。K 原子のほうが電場依存性が小さいことがわかる。

#### 4. 研究成果

まず宇治の化学研究所に設置してあった実験装置を京都大学北白川キャンパスの低温物質科学研究センターの実験室に移設し、アクシオン検出のための実験装置を組み立てた(New CARRACK)。(参照1) さらに希釈冷凍機を運転して数 10mK まで冷却できることを確かめた。

K 原子ビームを生成して2種類のレーザーによる2段階励起によって Rydberg 状態を生成した。励起スペクトルを Fabry-Perot 干渉計による周波数測定とともに、その例を図4にしめす。主量子数が 101 から 103 までの Rydberg 状態が励起されているのがわかる。さらに数 10mV/cm の印加電場を変えて同様のスペクトルを測定した。このような測定を行い K 原子の Rydberg 状態のエネルギー(レーザー周波数)を確認した。またこの際第二段励起用の色素レーザーの安定性が十分でないことから、これを最近開発されたダイオードレーザーのシステムに変更した。

これらのことにより、K 原子の Rydberg 状態を用いたアクシオン探索実験の準備を整えた。

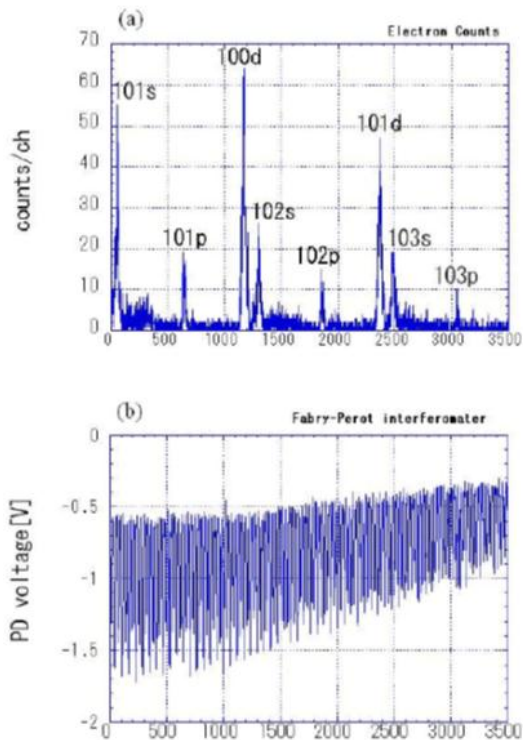


図4 カリウム原子の Rydberg 状態への励起スペクトル (a)、Fabry-Perot 干渉計による周波数測定 (b)

より S/N をよくする方法として、原子ビームをパルス化する方法について検討した。Rydberg 原子がアクシオンからの転換光子を吸収して生成した p 状態を選択的に電離す

るためにパルス電圧を加えこれと同期する信号を見る方法をとっている。このためももとのビームがパルス化されているほうが都合がよい。さらに冷却することで小さなビームを作り、空間の位置に依存する浮遊電場の影響を小さくすることができる。これらはいずれも状態混合を大幅に減らしアクシオン検出の S/N を改善する有力な方法であることを simulation 計算で明らかにした。

#### 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 2 件)

- 1) A High Sensitivity Microwave Single-Photon Detector with Rydberg Atoms at Low Temperature  
T. Haseyama, T. Arai, A. Fukuda, H. Funahashi, S. Ikeda, K. Imai, Y. Isozumi, T. Kato, Y. Kido, A. Matsubara, S. Matsuki, T. Mizusaki, T. Nishimura, D. Ohsawa, A. Sawada, Y. Takahashi, M. Tosaki, K. Yamamoto  
Journal of Low Temperature Physics, 150 (2008) 549-554.

- 2) Practical Design for Improving the Sensitivity to Search for Dark Matter Axions with Rydberg Atoms  
M. Shibata, T. Arai, A. Fukuda, H. Funahashi, K. Imai, Y. Isozumi, T. Kato, Y. Kido, A. Matsubara, S. Matsuki, T. Mizusaki, T. Nishimura, D. Ohsawa, A. Sawada, Y. Takahashi, M. Tosaki, K. Yamamoto  
Journal of Low Temperature Physics, 151 (2008) 1043-1048.

[学会発表] (計 11 件)

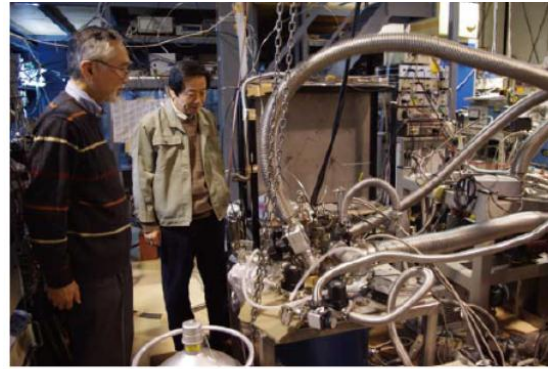
- 1) M. Saeed  
“A bunched atomic-beam scheme with laser compression to improve the detection sensitivity in a Rydberg-atom dark-matter axion detector.”  
Symposium on Low Temperature Physics and Materials Sciences, Kyoto University, Kyoto, 2011年3月14日
- 2) M. Saeed  
“A bunched atomic-beam scheme with laser compression to improve the detection sensitivity in a Rydberg-atom dark-matter axion detector.”  
GCOE symposium, Kyoto university: February 21-23 (2011)

- 3) M. Saeed  
 “Improving the Detection Sensitivity of Dark-Matter Axion Search with a Rydberg-Atom Single-Photon Detector”  
 4<sup>th</sup> International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010. (Osaka University) August 7-9, 2010. Proceedings Published in 2010: p 69-73.
- 4) Haruhiko Funahashi  
 “Present Status of Dark Matter Axion Search “CARRACK”  
 Symposium on Low Temperature Physics and Materials Sciences, Kyoto University, Kyoto, 2010年3月15日
- 5) Kenichi Imai  
 “Search for dark Matter Axion with Rydberg Atoms”  
 US-Japan joint meeting of physical society on nuclear physics, Hawaii, 2009.10.16.
- 6) S. Matsuki  
 “Improving detection sensitivity in the Rydberg-atom single-photon detector for the dark matter axion search”  
 Symposium on Low Temperature Physics and Materials Sciences, Kyoto University, Kyoto, 2009年3月
- 7) Kenichi Imai  
 Search for dark matter axion with Rydberg atoms  
 International Conference on Particle and Nuclear Physics, (PANIC08) Eilat, Israel, 2008.11.10.
- 8) 中西玲於奈 (Reona Nakanishi)  
 “リドベルグ原子を用いたアクシオン探索実験”  
 研究会: "2<sup>nd</sup> Fundamental Physics using Atoms" 東北大学(仙台) 2008年8月18日
- 9) Takao Mizusaki  
 “Improving Detection Sensitivity in the Microwave Single-Photon Detection for the Dark Matter Axion Search”  
 International Conference on Low Temperature Physics (LT-25), Leiden Institute for Physics, Leiden University, Netherland 2008年8月6-13日
- 10) 中西玲於奈 (Reona Nakanishi)  
 “Measurement of <sup>39</sup>K Stark effect for the axion search”  
 Workshop on Low Temperature Physics Japan-France Joint Project on the development of dark matter detectors by applying state-of-art ultra low temperature instrumentation. Kyoto, 2008年4月12日

- 11) 池田真也 (Shinya Ikeda)  
 Potassiumリドベルグ原子によるマイクロ波単一光子検出とダークマターアクシオン探索  
 Symposium on Low Temperature Physics and Materials Sciences, Kyoto University, Kyoto, 2008年3月15日

[その他]

“総力戦で初期宇宙に取り組み” 日経サイエンス 2010年6月号 p. 76-91 (参照1) や京都新聞のインタビュー記事 2010年2月20日での紹介がある。



京都の街中で探すアクシオン 総力戦にほど近い京大キャンパスの一画、「ダークマター実験棟」という看板が掲げられた建物に「ニューカラク」がある。今井(左)、松木(右)の両京都大学名誉教授が取り組む。

参照1 日経サイエンスの記事から

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今井 憲一 (IMAI KENICHI)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員

研究者番号: 70025493

### (2) 研究分担者

松原 明 (MATSUBARA AKIRA)

京都大学・低温科学研究センター・准教授

研究者番号: 00229519

### (3) 連携研究者

松木 征史 (MATSUKI SEISI)

立命館大学・総合理工学研究機構・研究員

研究者番号: 50037941

澤田 安樹 (SAWADA ANJU)

京都大学・低温科学研究センター・教授

研究者番号: 90115577

舟橋 春彦 (FUNAHASHI HARUHIKO)

京都大学・人間環境学研究科・教授

研究者番号: 00283581

山本 克治 (YAMAMOTO KATSUJI)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 90191395