

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740166

研究課題名（和文）電子電気双極子能率探索のための中性フランシウム原子線生成装置の開発

研究課題名（英文）Production of a neutral francium atomic beam for search for the electric dipole moment of the electron

研究代表者

川村 広和（KAWAMURA HIROKAZU）

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教

研究者番号：50586047

研究成果の概要（和文）：電子がもつ永久電気双極子能率の探索を通じて、標準模型を超える新しい物理の発見を目指した実験の実現に向けて、核融合反応を利用して生成したフランシウムイオンを中性原子に変換する装置の製作・性能評価を行った。実際にフランシウムを中性原子に変換することに加えて、安定なルビジウムイオンについては中性化して磁気光学トラップに捕獲することまで達成し、フランシウムを捕獲するのに必要な技術を確認することができたと言える。

研究成果の概要（英文）：The existence of the electron-electric dipole moment means the evidence of new physics beyond the standard model. To achieve an experiment performing a search for the electric dipole moment, a device that can convert from francium (Fr) ions produced via the nuclear fusion reaction to neutral atoms has been developed. We achieved actually neutralizing the Fr ions and trapping stable rubidium atoms converted from positive ions. It can be said that techniques required for trapping radioactive Fr atoms was established.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

科研費の分科・細目：原子核（実験）

キーワード：中性化・電気双極子能率・フランシウム・ルビジウム・レーザー冷却

1. 研究開始当初の背景

電子のような基本粒子の永久電気双極子能率（EDM）は、時間反転対称性の破れの機構を探る上で重要な観測量である。クォークが関与する CP 非保存の標準模型からの電子 EDM への寄与は高次効果のみのため無視できる程小さく、従って電子 EDM は標準模型を超える現象探索における高感度の観測量となる。本研究は、最大のアルカリ原子である Fr において大きく増幅される電子 EDM を世界最高精度で探索することにより、時間反転対称性、ひいては標準模型の検証を目指している。最高精度を達成するためには Fr

の大量生成が不可欠である。Fr を利用した実験は海外で進められてきたが、十分な数の Fr を用意するには高度な技術が要求され、高精度測定を困難としていた。

2. 研究の目的

本課題は、EDM 探索において鍵となる大強度かつ低速の中性 Fr 原子線を生成することを目的とする。

核融合反応によって生成された Fr の EDM 測定をするために、Fr イオンを引き出し、中性原子に変換し、これをレーザー冷却・トラップ技術を用いて捕獲することを計画して

いる。同様の実験はこれまで海外でも進められているが、核反応で生成した高温の不安定核を高品質の中性原子線に変換する効率が極めて低く、高精度 EDM 探索の実現を困難としてきた。本課題によって、中性化効率・捕獲効率を改善することを狙う。

3. 研究の方法

Fr は不安定原子であり実験に利用するには大型の加速器を運転しなければならない。装置の開発を円滑にするために、Fr と化学的性質がよく似た Rb を用いて基礎開発を行った。

まず中性原子に変換するための Rb イオンビーム生成装置の開発を行った。これと並行して、中性化装置の設計を進めた。この装置は表面中性化現象を利用して中性原子を得るものである。Fr や Rb のイオンを、仕事関数が小さな標的（イットリウム）に入射し、標的を加熱することでイオンが脱離するときに電子を受け取って中性化するというものである。脱離する中性原子にできるだけ指向性をもたせるため orthotropic source の原理を利用した（図 1）。中性 Rb はイオン追い返し電極を装備した再イオン化検出器によって観測する。電気的に中性な原子であればイオンを追い返すような電場の存在に反応を示さないの、これによって再イオン化検出器で観測しているものが正しく中性の成分であると言える。

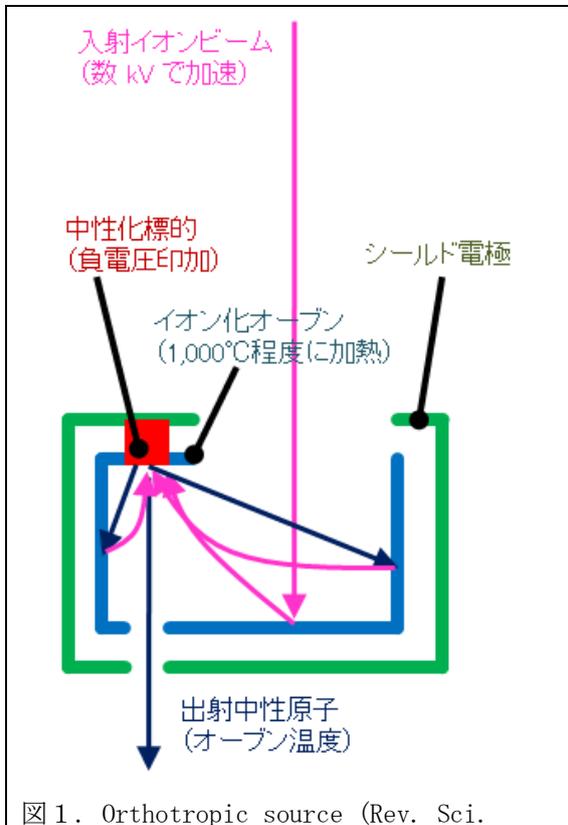


図 1. Orthotropic source (Rev. Sci.

Instrum. 67 (1996) 752) の原理に基づいて設計した中性化装置。装置は、仕事関数が大きいために入射粒子をイオン化することができるプラチナオープンと、仕事関数が小さいために入射粒子を中性化できるイットリウム標的から構成されている。中性化標的の前方に開いた小さな出射口を通った成分だけが中性原子として出力されるが、壁で遮られた成分は再びイオン化して中性化標的に辿り着けるので、最終的に出力されるまでこのサイクルを繰り返す。こうして粒子の損失を抑えつつ、コリメートされた中性原子線を得ることが可能となる。

製作したイオンビーム生成装置と中性化装置によって、イオンを中性原子に変換できることを確認した後、変換された中性原子をトラップ装置によって捕獲する。この一連の流れにより、中性化効率と捕獲効率を評価することができる。

4. 研究成果

まず Rb イオンビーム生成装置を開発したことにより、加速器の利用を最小限に抑えて装置開発を効率よく進めることが可能となった。また、製作した中性化装置を用いてイオンビーム生成装置から出力される Rb イオンを中性原子に変換できることを確認した。

さらにトラップ装置を利用してレーザー冷却・トラップすることにも成功した（図 2）。これらの実験によって、中性化装置から出力される中性成分は装置の温度を上げることにより上昇することが確認された。これは標的表面での拡散・脱離過程が促進されるために生じると解釈され、原理上予想される振る舞いと言える。その他、中性化装置内部のイオンを閉じ込める電場やイオンを引きつける電場などに依存している様子が確認でき、現状でトラップ原子数を最も多くする条件を見出した（図 3）。

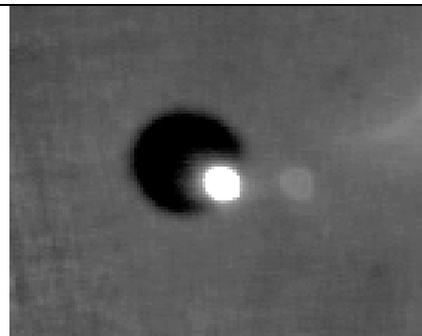


図 2. 実際に磁気光学トラップによって捕獲された原子の写真。原子はレーザー光による励起と脱励起を繰り返して捕獲されるが、図中央の白く光る丸い箇所が、捕獲された原子が放つ脱励起光である。

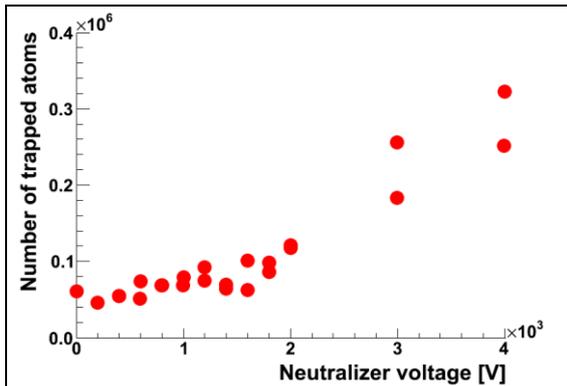


図3. 捕獲された原子個数の中性化装置電圧依存性. 横軸は負電圧を示す. 中性化標的に印加する電圧を高くするほど捕獲原子の個数が増加している様子が確認できる. これは中性化装置からの出力が増大していることに由来すると考えられるが, 電圧を高めるとイオンを引きつける能力が高まる結果によるものである. この振る舞いは今回開発した中性化装置独自の特徴であり, 想定通りの振る舞いをしていることが確認できる.

最終的に, 中性化装置を Fr 生成ビームラインにインストールし, 核反応で生成した Fr イオンをも中性原子に変換できることを初めて確認した. ここではイオン追い返し電極を装備した半導体検出器により, Fr が崩壊して放出するアルファ線を観測した (図4). さらに Rb 実験で得られたのと同様に, 出力中性原子個数の温度依存性や電圧依存性も確認され, 不安定原子にも適用できることが分かった (図5). また, この実験から中性化効率を見積もり, トラップの実現性について議論した.

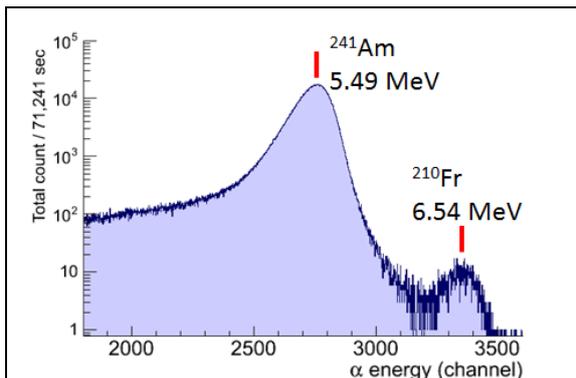


図4. イオン追い返し電極を装備した半導体検出器で得られたアルファ線スペクトル. 図中央の大きなピークはエネルギー較正用のチェックソースによるものである. 図右の小さなピークがフランシウム由来のアルファ線を示す.

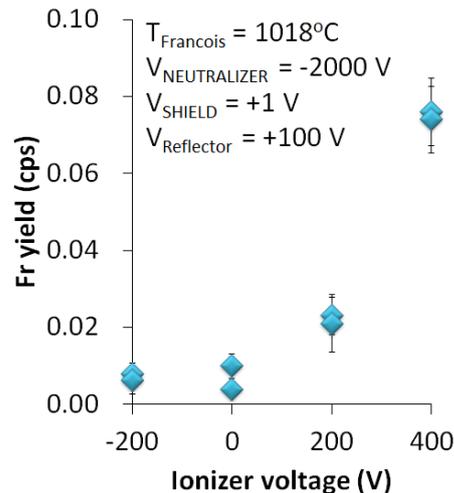


図5. 中性 Fr 原子個数のイオン化オープンへの印加電圧依存性. イオン化オープンに正電圧を印加することで出力が増加する傾向があることが確認できた. 事前に行った荷電粒子軌道シミュレーションによればこのような振る舞いが生じることは確認できなかったが, 計算する際に省略していた現実の詳細な箇所のために電場が複雑化してこのような結果が得られたものと考えられる. ここに限らず原子個数の電圧依存性は, 装置に入射してきたイオンを完全に引きつけることができた時点で飽和するはずだが, ほとんどのケースで確認できていない. 装置構成要素の材質や形状を見直して, 耐電圧を改善することによってさらなる出力の増加が望める.

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6件)

- ① T. Inoue et al. (全21名中9番目 H. Kawamura), Search for electron EDM with laser cooled radioactive atom, 査読有, AIP Conf. Proc. 1533 (2013) 134-139
doi: 10.1063/1.4806789
- ② Hirokazu Kawamura et al., Search for permanent EDM using laser cooled Fr atoms, 査読有, Hyperfine Interactions, 214 (2013) 133-139
doi: 10.1007/s10751-013-0788-7
- ③ H. Kawamura et al., Development of a Neutralizer for the Search of an Electron EDM, CYRIC Annual Report, 査読無, 2010-2011 (2012) 10-13
- ④ H. Kawamura et al., Search for permanent EDM using laser cooled Fr atom, 査読無, Proceedings of 5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms

- 2011, (2011) 74-78.
- ⑤ Y. Sakemi et al. (全 19 名中 ABC 順 5 番
目 H. Kawamura), Search for a
permanent EDM using laser cooled
radioactive atom, 査読有, J. Phys.:
Conf. Ser., 302 (2011) 012051
doi:10.1088/1742-6596/302/1/012051
- ⑥ J. Murata et al. (全 21 名中 8 番目 H.
Kawamura), Test of Time Reversal
Symmetry using polarized ^8Li at
TRIUMF-ISAC, 査読有, J. Phys.: Conf.
Ser., 312 (2011) 102011
doi:10.1088/1742-6596/312/10/102011

[学会発表] (計 8 件)

- ① H. Kawamura et al., Search for a
permanent EDM using laser cooled
radioactive atom (Poster), INPC2013,
6/2/2013 – 6/7/2013, Firenze, Italy
- ② H. Kawamura et al., Search for electric
dipole moment of the electron with
laser-cooled radioactive atoms (Poster),
the 5th Scienceweb GCOE
International Symposium, 3/4/2013 –
3/6/2013, Sendai, Japan
- ③ H. Kawamura et al., Laser-cooled
radioactive francium factory at CYRIC
(Poster), EMIS2012, 12/2/2012 –
12/7/2012, Matsue, Japan
- ④ H. Kawamura et al., Development of
ion-to-atom beam converter for
Fr-EDM experiment (Poster),
FPUA2012, 9/28/2012 – 9/30/2012,
Sendai, Japan
- ⑤ H. Kawamura et al., Search for
electron EDM in laser-cooled francium
factory, SSP2012, 6/18/2012 –
6/22/2012, Groningen, the Netherlands
- ⑥ 川村広和, 冷却不安定原子を用いた対称
性検証実験, 『核スピン研究とその応用』
研究会, 2011 年 11 月 19 日, 東京都目黒
区
- ⑦ H. Kawamura et al., Search for
permanent EDM using laser cooled Fr
atom, FPUA2011, 10/8/2011 –
10/10/2011, Okayama, Japan
- ⑧ 川村広和, 電子 EDM 探索のための中
性アルカリ原子生成装置の開発, 日本物
理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 16
日 – 19 日, 青森県弘前市

[その他]

ホームページ等

川村広和

<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/~kawam>

ura/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 広和 (KAWAMURA HIROKAZU)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソ

トープセンター・助教

研究者番号 : 50586047

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし