

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610112

研究課題名(和文)世界初の不安定原子の光格子トラップ実現

研究課題名(英文) Toward the first trap of radioactive atoms in an optical lattice

研究代表者

川村 広和 (Kawamura, Hirokazu)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：50586047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：フランシウムをはじめとする放射性元素や放射性同位体を、レーザー光の干渉によって作られるいわゆる光格子に捕獲することを目的とした研究である。フランシウムは、核反応による生成、イオンビーム輸送、中性原子への変換、磁気光学トラップというステップを踏んで初めて光格子トラップに掛けることが可能となる。研究期間中に、フランシウムのトラップ実験シーケンスに同期した信号を得ることができた。これを、より確固としたものにするため、要素毎の開発を行い、それぞれについて大幅な性能向上が達成された。

研究成果の概要(英文)：This work aimed at the trap of radioactive atoms such as francium in an optical lattice formed by the interference of laser beams. Francium will be produced via the nuclear fusion reaction, ionized by the surface ionization, transported as an ion beam, converted to neutral atoms, and cooled in a magneto-optical trap. Finally the cooled francium will be trapped in the optical lattice. In this work, a signal in synchronization with a sequence of the francium-trap experiment was achieved. In order to make sure this signal, experimental components have been developed individually. As a result, their abilities and performances have been improved.

研究分野：原子核物理

キーワード：フランシウム ルビジウム 光格子 磁気光学トラップ 表面電離 熱的表面中性化

1. 研究開始当初の背景

超高真空中に、レーザー光の干渉を利用して形作る「光格子」に原子を捕獲することは、光格子時計に代表されるように、極めて精密な測定環境を用意することができる実験技術である。これまでに光格子へ捕獲することに成功された原子種は安定同位体に限られている。

一方で、放射性元素や放射性同位体を場の擾乱が無いような真空中に、局所的に捕獲する技術が求められていた。例えば放射性元素であるフランシウムは、粒子反粒子非対称性の解明に繋がる電子の電気双極子能率に対して高い感度をもっており、それを測定するためには光格子に捕獲して実験することが有利であると考えられていた。また、放射性同位体の崩壊、特にベータ崩壊は、それを精密に観測することで粒子反粒子非対称性の解明や、未発見新粒子の探索などが行えるとされており、光格子がそれを実現できる可能性がある。しかし、安定同位体に比べ圧倒的に個数の劣る放射性同位体では、光格子への捕獲は挑戦されたこともなかった。

2. 研究の目的

本研究課題は、将来的にフランシウムの電気双極子能率の探索やベータ崩壊の精密観測を実施することを目指し、放射性元素や放射性同位体を光格子に捕獲することを目的としたものである。

3. 研究の方法

放射性元素の中でも比較的、レーザー冷却・トラップが容易なアルカリ金属であるフランシウムに注目した。

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターでは、フランシウムを利用した実験研究を推進している。ここで、フランシウムは、100 MeV に加速された酸素 18 ビームと金標的との核融合反応によって生成される。標的内で生成されたフランシウムは、1000 程度まで加熱されることで標的を拡散・脱離し、このとき表面電離してイオンとなる。静電場によってイオンを抽出し、10メートル程度の距離を輸送する。核融合反応では中性子線やガンマ線といった放射線が生じるため、これの影響が少ない別室まで送るためである。輸送されたイオンは、熱的表面中性化過程によって中性原子へと変換される。変換された原子は、磁気光学トラップによって捕獲・冷却される。この磁気光学トラップ中の原子を、光格子へと移行することで捕獲が完了する。

本研究課題以前に、フランシウムの生成、輸送、中性化までは達成されていた。そこで、達成済みの要素のさらなる能率改善を行いながら、磁気光学トラップ、さらに光格子の実現を目指した。

4. 研究成果

研究期間の初期に、フランシウムを捕獲する実験を行ったところ、実験シーケンスに由来する信号を得ることができた(図1)。しかし、これが捕獲されたフランシウム原子に由来するものであることは特定できなかった。その原因は、フランシウム原子の個数が非常に少なかったためだと考えられたので、個数を増強すべく、実験要素それぞれを独立して開発あるいは調査した。

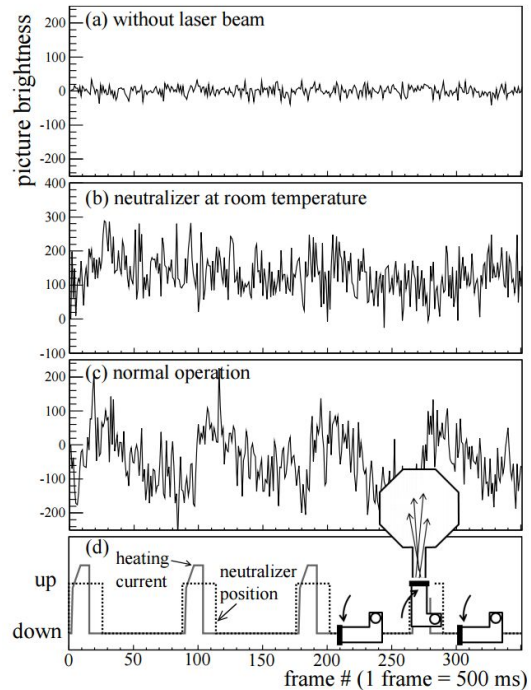


図1. トラップ実験シーケンスと同期した信号(雑誌論文より)。

まず、フランシウムを生成・イオン化する表面電離型イオン源については新規開発を行った。生成したイオンを効率よく抽出しビームにするためには抽出電場の形状が重要だが、従来使用していたものは諸事情により最適化されたものではなかった。そこで綿密な電場シミュレーションを行い、新しいものを設計した(図2)。電場の最適化だけでなく、構造も非常に単純なものとなり、装置の安定性を高めることに繋がった。製作された実機の動作試験・性能評価を実施したところ、概ね良好な結果が得られており、フランシウムイオンの個数増強に繋がる。

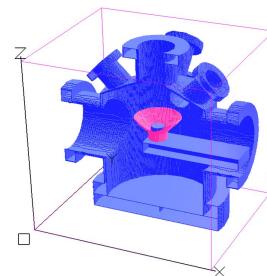


図2. シミュレーションソフトウェア SIMION によって設計した表面電離型イオン源。

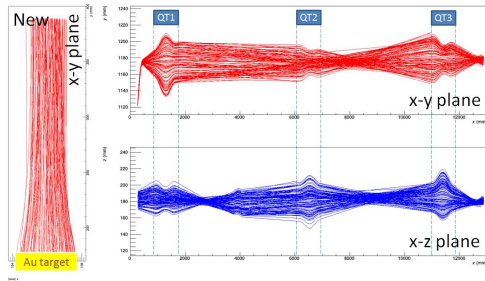
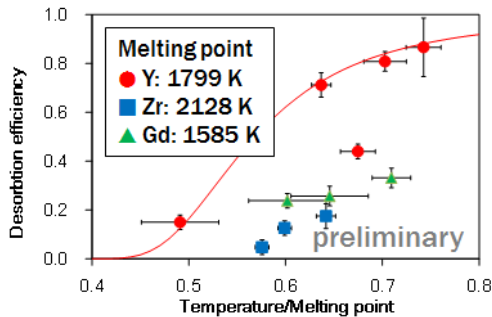


図 3. SIMION で計算したフランシウムイオンの軌道 .

イオンを中性原子へと変換する熱的表面中性化過程の調査を行った．この過程の実験的研究は前例が限られており，これによる変換効率を世界でも初めて測定した．その結果，イットリウムを標的に用いることで 80%以上という非常に高い効率を得られることが判明した（図 4）一方，些細な実験条件によって効率が大きく変動することも分かった（図 5）．また，磁気光学トラップとも組み合わせ，総合的にトラップ原子個数を最大化する条件を見出した（図 6）．

標的に蓄積したFrの内，放出された全Frの割合



放出された全Frの内，中性原子の割合

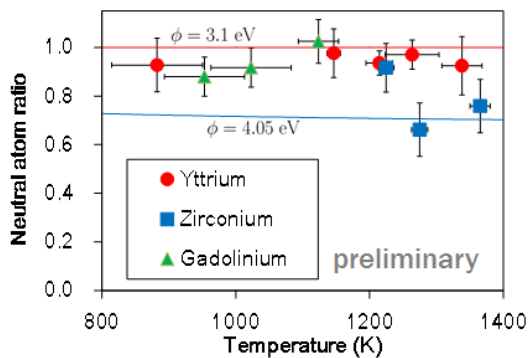


図 4.（上段）縦軸は，標的に加熱することで放出されたフランシウムの個数を，標的に照射することで蓄積したフランシウムビームの数で規格化したもの．横軸は標的加熱温度を材質の融点で規格化したもの．（下段）放出されたフランシウムの内，中性原子が占める割合を標的の温度の関数として示したもの．総合して，イットリウムは非常に高い効率を有するのが分かる．

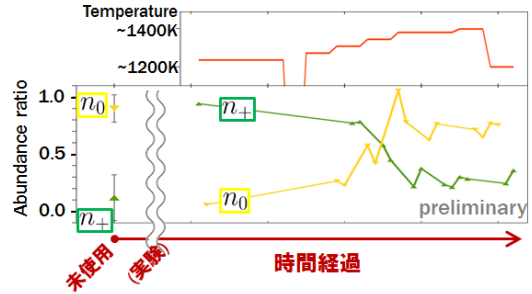


図 5. 中性原子変換効率が変動する様子．当初は 100% 近かった効率が，実験を繰り返すうちに大きく上下している．加熱温度も変えているが，図 4 下段から明らかなように，この範囲では本来は温度依存性はもたないはずである．

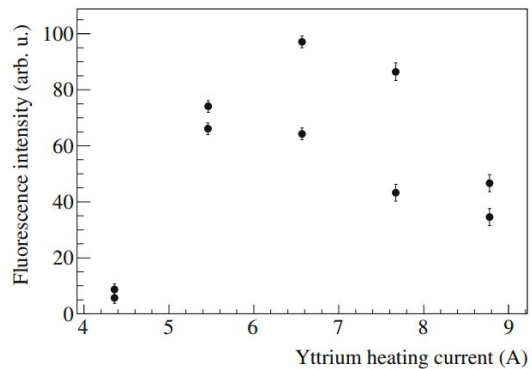


図 6. トラップされた原子個数を，イットリウム標的を加熱する電流値の関数として示したもの．この図からおおよそ 700 のときに最大化されることが分かった（雑誌論文より）

磁気光学トラップについては，トラップセルの形状，レーザービーム径などについて見直した結果，ルビジウムの安定同位体を使ったテスト実験ではトラップ原子個数を増強することに成功している．また，光トラップに用いるレーザーについては新しい光源を導入することができたため，捕獲領域を拡大することができ，これによって磁気光学トラップからの移行効率が改善されることが期待される．

研究期間内では，以上のように，実験要素それぞれを改善することに留まった．近日中に，改善された実験要素を組み合わせ，フランシウムの個数を増強し，磁気光学トラップ及び光格子トラップを達成する計画である．

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 13 件)

Laser frequency locking with 46 GHz offset using an electro-optic modulator for magneto-optical trapping of francium atoms. Applied Optics 55 (2016) 1164-1169, K. Harada et al. (全 25 名中 6 番目), 査読有, doi: 10.1364/AO.55.001164

Transportation of a radioactive ion beam for precise laser-trapping experiments. Rev. Sci. Instrum 87 (2015) 02B921-1-3, Hirokazu Kawamura et al. (全 14 名中 1 番目), 査読有, doi: 10.1063/1.4935013

Towards the Measurement of the Electric-Dipole Moment of Radioactive Francium using Laser-Cooling and Trapping Techniques. JPS Conf. Proc. 6 (2015) 030068-1-4, Hirokazu Kawamura et al. (全 24 名中 1 番目), 査読有, doi: 10.7566/JPSCP.6.030068

Magneto-optical trapping of radioactive atoms for test of the fundamental symmetries. Hyperfine Interactions 236 (2015) 53-58, Hirokazu Kawamura et al. (全 15 名中 1 番目), 査読有, doi: 10.1007/s10751-015-1193-1

Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom. EPJ Web of Conferences 66 (2014) 05009-1-4, Hirokazu Kawamura et al. (全 25 名中 1 番目), 査読有, doi: 10.1051/epjconf/20146605009

Laser-cooled radioactive francium factory at CYRIC. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B 317 (2013) 582-585, Hirokazu Kawamura et al. (全 21 名中 1 番目), 査読有, doi:10.1016/j.nimb.2013.07.038

[学会発表](計 15 件)

川村広和, フランシウムを用いた電子 EDM 探索に向けたイオン・中性原子変換過程の調査, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)

伊藤沙希, 電子 EDM 探索のための表面電離型フランシウムイオン源の新規開発, 日本物理学会, 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)

H. Kawamura, Magneto-optical trapping of radioactive atoms for test of the fundamental symmetries, The 6th international conference on Trapped

Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2014), Nov. 28-Dec.5 2014, Takamatsu Symbol Tower (Kagawa)

H. Kawamura, Towards the measurement of the electron EDM with laser cooled francium atoms, 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Oct. 7-11 2014, Waikoloa, Hawaii (USA)

川村広和, フランシウムを用いた電子 EDM 探索のためのレーザー冷却不安定原子生成工場, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 20-23 日, 高知大学(高知県高知市)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等
<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/~kawamura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 広和 (KAWAMURA, Hirokazu)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号: 5 0 5 8 6 0 4 7

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: