

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540311

研究課題名(和文) オンライン・ガスセルを用いたタングステン不安定核のレーザー核分光

研究課題名(英文) Laser spectroscopy of unstable tungsten isotopes by using an on-line gas cell

研究代表者

飯村 秀紀 (IIMURA, HIDEKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号：10343906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：タングステンの放射性同位体の原子スペクトルを精密に測定することにより、これらの同位体間での原子核半径の変化を知ることができる。そこで、加速器で生成されたこれらの核種をガスセル中で捕獲し、オンラインでレーザー分光する手法を開発した。また、青色半導体レーザーを用いることなどにより、測定感度の改善を行った。今後、開発した手法を用いてタングステン放射性同位体のレーザー分光を行い、核半径の変化を明らかにする。

研究成果の概要(英文)：Precise measurement of the atomic spectrum of radioactive tungsten isotopes has been awaited to clarify the change of charge radii between these nuclei. In order to do laser spectroscopy for these nuclei, we have developed a gas cell connected on-line to an accelerator. A violet diode-laser system was used to improve sensitivity. With this setup, we plan to measure the isotope shifts in atomic spectra of radioactive tungsten isotopes.

研究分野：物理

キーワード：レーザー分光 ガスセル タングステン 不安定核 核半径

1. 研究開始当初の背景

W($Z=74$)や Os($Z=76$)の質量数 180 近傍の不安定核では、原子核の非軸対称変形が理論的に予測されている。しかし、それらは、実験的には未だはっきり確認されていない。これらの核種は線分光の手法により調べられつつあるが、原子核の基底状態の変形を明らかにする上で決定的な情報はレーザー分光により得られる。すなわち、原子スペクトルの同位体シフトや超微細構造を、レーザーを用いて精密に測定することにより、原子核の荷電半径の変化や電磁気モーメントなど、原子核の変形を直接反映する物理量が得られる。

我々のグループはこれまで、非軸対称変形が予測されているもう一つの領域である La($Z=57$)の質量数 130 近傍の不安定核種を、原子力機構や TRIUMF の加速器施設で、コリニア・レーザー分光の手法で調べてきた。これにより、 ^{131}La や ^{135}La の電気四重極モーメントが、理論計算から予測される非軸対称変形で説明できることを示した[1,2]。本研究は、これまで行った La 領域の不安定核のレーザー分光を、W 領域に発展させるものである。

W や Os のレーザー分光は、世界的にこれまで、安定核しか行われていない。理由は、不安定核のレーザー分光に通常用いられるコリニア・レーザー分光などの手法は、測定試料を気体状態(原子状態)にする必要があるが、高融点元素である W や Os では、それが困難であるためである。

文献

- [1] H. Iimura et al., Phys. Rev. C68, 054328 (2003).
- [2] H. Iimura et al., Abstract 2nd Conf. on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 2014.

2. 研究の目的

本研究の目的は、加速器で生成された W 不安定核をガスセル中で捕獲して、オンラインでレーザー分光する手法を新たに開発することである。この分光手法の利点は、加速器からの重イオンビームで生成され、ターゲットから飛び出した W 不安定核を、原子状態のままレーザー分光できることである。一方、共鳴線はドップラー効果により広がるので、分解能はコリニア・レーザー分光より悪くなるが、荷電半径の変化量を決定するのに必要な分解能は得られると予想される。むしろ課題は、加速器で生成される不安定核は極微量であるので、いかに高い測定感度を実現し、少ない原子を観測するかということにある。

3. 研究の方法

最初に、原子力機構のタンデム加速器に設置したガスセル分光装置の測定感度の改善を行う。図 1 に装置の概念図を示す。セルは

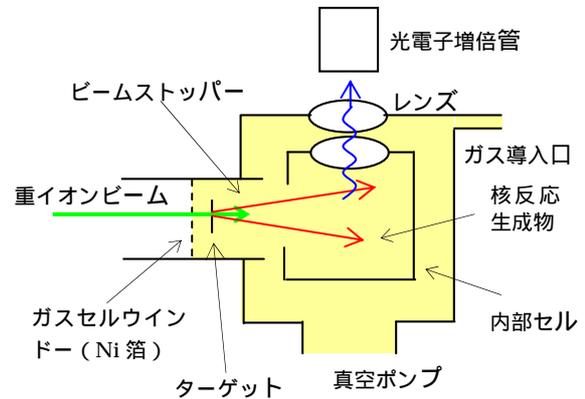


図1 タンデム加速器に設置されたオンライン・ガスセル分光装置の概念図。レーザービームはの点を紙面に垂直に通過する。

Ni 箔で加速器のイオンビームラインの真空と分離されている。セルには高純度の Ar ガスが入る。加速器からの重イオンビームはターゲットを照射して、ストッパーで止まる。ターゲットから反跳で飛び出した核反応生成物は、ガス中で減速され、セルの中心付近で止まる。これに波長可変レーザーを照射し、共鳴蛍光をレンズで集光して光電子増倍管で観測する。

測定感度を試験する実験では、タンデム加速器のイオンビームとして W 安定同位体を用い、ターゲットとストッパーを取り外して、W イオンを直接ガスセル中に打ち込む。イオンビームの加速エネルギーは、核反応で生成される W 不安定核を模擬するように設定する。

ガスセルを用いた実験と平行して、W 原子をレーザーで励起するのに最適な遷移を探すことを行う。これは、W 安定同位体の試料をレーザーアブレーションで原子化し、生成した W 原子に波長可変レーザーを照射することにより行う。装置の概略を図 2 に示す。アブレーションには、Nd:YAG レーザーのパルス光を用いる。共鳴蛍光以外に、波長可変レーザーの吸収も観測する。

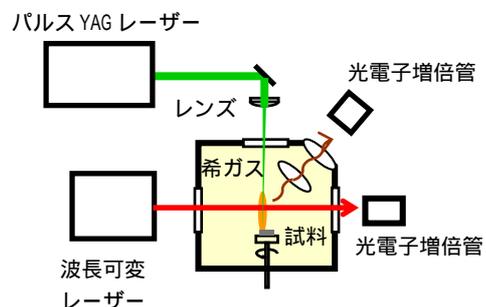


図2 アブレーション分光装置

これらの結果を基に、ガスセル分光装置で、W 不安定核のオンライン・レーザー分光を行う。W 不安定核は、タンデム加速器の 0($Z=8$)

ビームで Dy(Z=66) ターゲットを照射して生成する。

4. 研究成果

(1) ガスセル分光装置の測定感度

最初に、図1のオンライン・ガスセル分光装置について、測定のバックグラウンドを調べた。タンDEM加速器のWイオンビームをガスセルに入射したところ、イオンビームとガスとの衝突による光が、蛍光測定の大きな妨害となることが分かった。そこで、イオンビームをパルス化し、イオンビームOFFの時に蛍光を観測する工夫をした。ガス中で捕獲されたW原子は、セルの内面に付着するまでに0.1秒程度はガス中に留まると予想される。ビームラインに設置したデフレクタでイオンビームを10HzでON/OFFし、OFF時のみ測定したところ、直流ビームの場合に比べてバックグラウンドは約1/50になった。

次に、W原子にレーザー光を照射して共鳴蛍光を観測することを行った。実験のパラメータは次のとおりである。安定同位体の¹⁸⁰Wのイオンビームのエネルギーは、核反応生成物を模擬して、100MeVに設定した。これをパルス化してガスセルに入射した。W原子をセル中心付近に止めるため、ガス圧は19hPaとした。レーザーはリング色素レーザーを用いた。レーザー励起に用いた遷移を図3に示す。3325cm⁻¹にある準安定状態から551.5nmのレーザーで励起し、基底状態への466.0nmの

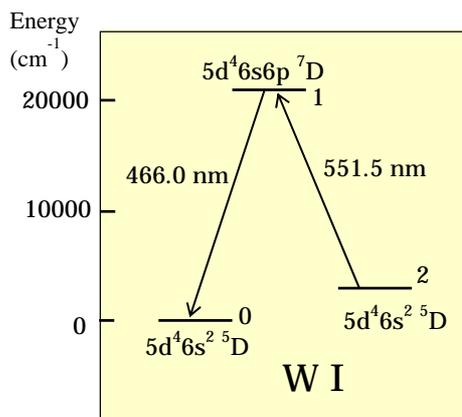


図3 W原子の部分的な準位図式

蛍光を観測した。レーザーの散乱を抑制するため、光電子増倍管の前に光学フィルターを挿入した。実験の結果、¹⁸⁰Wのイオンビーム強度をタンDEM加速器での最大の毎秒約10⁹個にしたところ、弱い共鳴蛍光が観測された。不安定核の生成量は、毎秒10⁴-10⁵個と予想されるので、測定感度が不足していることが判明した。

(2) 短波長レーザーでの励起

感度が低い理由として、W原子の準安定状態からレーザー励起していることが考えられる。準安定状態にある原子数は、基底状態

にあるものより少ないので、蛍光強度が小さくなる。そこで、図3の466.0nm遷移などで、基底状態からレーザー励起することを試みる。しかし、基底状態から励起する場合、遷移波長が短くなるので、これまで用いていたリング色素レーザーでは、必要なレーザー光を発生することが困難である。そこで、市販の青色半導体レーザー素子を用いて、基底状態から励起するのに必要な短波長レーザー装置を製作した。

製作したレーザー装置の試験は、図2のアプリケーション分光装置を用いて行った。試料は、分光学的特性のよく分かっているGd(Z=64)の安定同位体(同位体比は天然組成)を用いた。図4は、製作したレーザー装置で

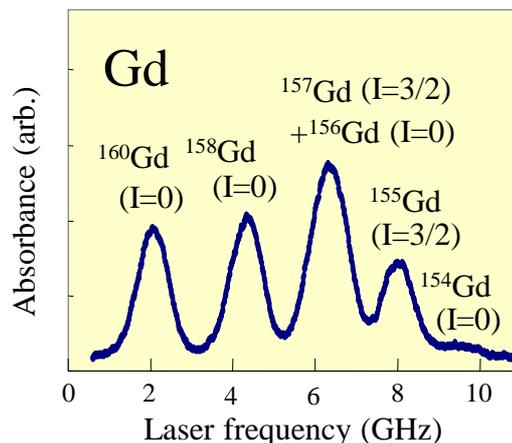


図4 Gd安定同位体の吸収スペクトル

取得したGd原子の394.3nm遷移の吸収スペクトルである。Gdの安定同位体の同位体シフトが観測された。¹⁵⁸Gdと¹⁶⁰Gdには超微細構造が無いので、それらの共鳴線から線幅は約0.9GHzと評価された。これは、Wのような原子番号の大きな元素については、同位体シフトを測定するのに十分な分解能である。

(3) 今後の展開

製作した短波長レーザーを用いて、W安定同位体を基底状態からレーザー励起し、オンライン・ガスセル分光装置の測定感度を試験する。レーザー励起する遷移として、466.0nm遷移以外にも幾つか候補があるので、どの遷移を励起すると蛍光強度が大きいか比較する。基底状態からレーザー励起した場合、上準位の分岐比から、励起した遷移と同じ遷移の蛍光を観測する必要があることが多い。その場合、レーザーの散乱を抑制するのに、光学フィルターを用いることができない。そこで、レーザーをパルス化し、レーザーOFF時に蛍光を観測することを試みる。

また、ガスセルの内部セルを冷却してガス中の不純物を除き、W原子がこれらと化学反応して失われてしまうのを防ぐ。これらの方法により測定条件の最適化を行って、不安定核のレーザー分光に必要な感度を達成し、それらの荷電半径の変化を測定する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

H. Iimura, P. Moller, T. Ichikawa, H. Sagawa, A. Iwamoto, "Charge radii in macroscopic-microscopic mass models", JPS Conference Proceedings 6 (2015) 査読有

<http://journals.jps.jp/action/showBookSeries?pubCode=jpsc&>

H. Iimura, T. Sonoda, M. Wada, "Transport of laser beams for PALIS", RIKEN Accelerator Progress Report 2013, 47 (2014) 209, 査読有

http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/index_e.html

M. Miyabe, M. Oba, H. Iimura, K. Akaoka, Y. Maruyama, H. Ohba, M. Tampo, I. Wakaida, "Laser ablation absorption spectroscopy for remote analysis of uranium", Hyperfine Interact. 216 (2013) 71-77, 査読有

DOI: 10.1007/s10751-013-0845-2

T. Sonoda, M. Wada, H. Tomita, C. Sakamoto, T. Takatsuka, T. Furukawa, H. Iimura, Y. Ito, T. Kubo, Y. Matsuo et al., "Development of resonance ionization gas cell for high-energy, short-lived nuclei", Nucl. Instr. Meth. B 295 (2013) 1-10, 査読有

DOI: 10.1016/j.nimb.2012.10.009

M. Miyabe, M. Oba, H. Iimura, K. Akaoka, Y. Maruyama, H. Ohba, M. Tampo, I. Wakaida, "Doppler-shifted optical absorption characterization of plume-lateral expansion in laser ablation of a cerium target", J. Appl. Phys. 112 (2012) 123303 1-10, 査読有
DOI: 10.1063/1.4771879

〔学会発表〕(計5件)

H. Iimura, F. Buchinger, J.E. Crawford, S. Gulick, T.E. Cocolios, A. Kolomenski, M. Fahes, H.A. Schuessler, "Laser spectroscopy of the neutron deficient La isotopes", 2nd Conf. on Advances in Radioactive Isotope Science, Jun. 3, 2014, Univ. Tokyo (Tokyo)

飯村秀紀, 「SLOWRI でのコリニア・レーザー分光」, 第7回低速・停止RIビームを用いた核分光研究会, 2014年3月3日, 理化学研究所(和光市)

H. Iimura, "Nuclear charge radii by laser spectroscopy", Workshop on Systematic Study of Nuclear Radii: Theory and Experiment, Dec. 28, 2012, RIKEN (Wako)

H. Iimura, "Proposal of laser

spectroscopy at SLOWRI", Workshop on Low-Energy Radioactive Isotope Beam Production by In-Gas Ionization, Dec. 10, 2012, RIKEN (Wako)

飯村秀紀, 大場正規, 小泉光生, 宮部昌文, 若井田育夫, 「高融点元素の核荷電半径測定のためのレーザーアブレーション共鳴分光法の開発」, 日本物理学会, 2012年9月13日, 京都産業大学(京都市)

〔その他〕

ホームページ

http://www.ndc.jaea.go.jp/Labo/Laser_JP.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯村 秀紀 (IIMURA HIDEKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号: 10343906

(2) 連携研究者

小泉 光生 (KOIZUMI MITSUO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核不拡散・核セキュリティ総合支援センター・研究主幹

研究者番号: 30354814

宮部 昌文 (MIYABE MASABUMI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号: 20354863

大場 正規 (OBA MASAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター・研究副主幹

研究者番号: 60414588

和田 道治 (WADA MICHIHARU)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・チームリーダー

研究者番号: 50240560

園田 哲 (SONODA TETSU)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・仁科センター研究員

研究者番号: 60525583

平山 賀一 (HIRAYAMA YOSHIKAZU)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号: 30391733