

令和元年6月5日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04028

研究課題名（和文）多価イオンにおける超長寿命準安定状態のポピュレーションキネティクス

研究課題名（英文）Population kinetics of long-lived metastable states in multiply charged ions

研究代表者

中村 信行（Nakamura, Nobuyuki）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：50361837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：熱核融合プラズマ診断に有用であるとされながら30年来同定がなされなかった共鳴線の謎を、ポピュレーション（占有密度、プラズマ中粒子の状態分布）の時間発展を実験・理論の両面から研究することで解明した。新しい原子時計の候補とされる4f開殻多価イオンの有用な可視発光線の同定を行った。これまで観測されたことのない自発的な電気八重極遷移の観測に成功し、その特殊な発光機構をポピュレーションキネティクスにより解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽コロナや熱核融合実験炉などの高温プラズマの研究では、その状態を発光スペクトルから探る分光診断が重要である。本研究は、その発光スペクトルの理解の鍵となるポピュレーション（占有密度、プラズマ中粒子の状態分布）のキネティクス（速度論、時間発展）に関して新たな知見を与えた。また、新しい原子時計により物理定数の時間的変動を高感度に調べるといった挑戦的な課題が提案されているが、そのために有用とされている多価イオンの発光スペクトルを調べ、将来の原子時計構築に有用な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：The mechanism of the “lost resonance lines” in promethiumlike ions, which have been three-decades-old question, has been clarified by studying time evolution of the population of a long-lived metastable state both experimentally and theoretically. Visible transitions in open-4f-shell multiply charged ions that are proposed to be used in a new type of atomic clock have been observed and identified. Spontaneous electric octupole transitions have been observed for the first time, and the emission mechanism has been clarified through population kinetics analysis.

研究分野：原子物理、プラズマ物理

キーワード：多価イオン ポピュレーションキネティクス 準安定状態 原子時計

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) プロメチウム様重元素イオンの共鳴線は、熱核融合プラズマ診断に有用である(Curtis and Ellis, Phys. Rev. Lett. 45, 2099, 1980)とされながら 30 年来同定がなされることはなかった。その謎を解く鍵が、超長寿命準安定状態へのポピュレーショントラッピングにあることが本研究代表者の先行研究で示唆されていたが(Kobayashi et al., Phys. Rev. A 89, 010501R, 2014) その機構については明らかになっていなかった。

(2) クェーサーからの発光の観測結果から、超微細構造定数 α の変動が示唆されていた(Webb et al., Phys. Rev. Lett. 107, 191101, 2011) これを地上実験で高精度に検証するため、多価イオンの長寿命遷移を利用した新しい原子時計の構築が提案された(Dzuba et al, Phys. Rev. A 91, 022119, 2015)。しかしながら、提案された多価イオンは 4f に複数の電子を持つ複雑な構造であり、その遷移線の波長や発光機構は未知であった。

2. 研究の目的

本研究は、電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap: EBIT) と呼ばれる装置を用いた実験的研究と、衝突輻射モデルによる理論的研究により、以下を明らかにすることが目的である。

(1) プロメチウム様重元素イオンに代表される超長寿命準安定状態の高温プラズマ中でのポピュレーションキネティクスを、EBIT 内にトラップしたイオンからの発光の時間発展を調べることにより明らかにする。

(2) 新しい原子時計に有用として提案されている 4f 開殻イオンの原子構造および発光機構を EBIT による分光研究により明らかにする。それにより、未来の新しい原子時計構築のために必要な知見を集める。

3. 研究の方法

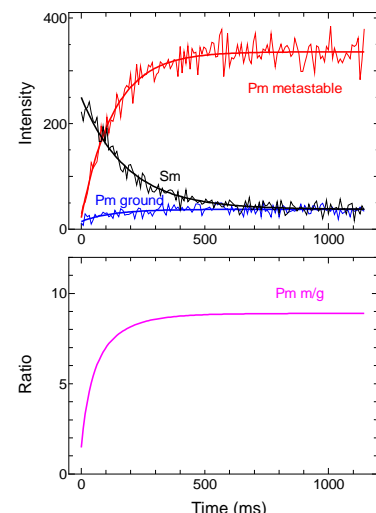
本研究は電気通信大学の EBIT を用いて行った。EBIT は主に、電子銃、イオントラップ、電子コレクタ、超伝導コイルから成り、イオントラップは 3 つに分割された円筒型電極(DT1-3) から成る。イオントラップ部では、軸方向には円筒型電極に印加された井戸型ポテンシャルにより、動径方向には超伝導コイルの強磁場で圧縮された電子ビームの空間電荷ポテンシャルによりイオンがトラップされ、高密度電子ビームによる逐次電離を受け多価イオンが生成される。多価イオンからの軟 X 線領域の発光は、イオントラップ中央に設けられたスリットを介して平面結像不等間隔溝凹面回折格子により分光測定する。一方、可視領域の発光は、レンズによりツェルニーター型分光器に入射することで分光測定する。

(1) プロメチウム様重元素イオンに対する時間発展計測では、その生成のために必要なエネルギー(1 つ手前の価数のサマリウム様イオンの電離エネルギー) より少し低い値に電子ビームエネルギーを保つ。サマリウム様イオンが十分生成され平衡状態となった後、電子ビームエネルギーを瞬時に電離エネルギー以上とし、目的とするプロメチウム様イオンを生成する。その直後においては全てのプロメチウム様イオンが基底状態にあるため、基底状態への共鳴線が優勢であるスペクトルが得られるはずであるが、その後、ポピュレーションが基底状態から準安定状態へ移行することによりスペクトルが変化する。この時間発展を調べる。

(2) 4f 開殻イオンの分光測定においては、過去に報告例の無い発光線の観測を行うため、電子ビームエネルギー依存性を調べることにより、その発光を示すイオンの価数を特定する。複雑な原子構造を持つイオンの遷移を同定するのは困難であるため、原子番号依存性や 4f 電子数に対する依存性などを系統的に調べる。

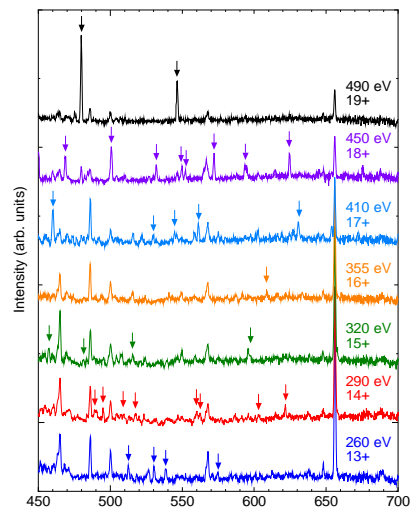
4. 研究成果

(1) 右図はプロメチウム様金イオンに対して得られた時間発展計測の結果である。横軸は電子ビームエネルギーをサマリウム様イオンの電離エネルギーより高い値に設定した時点からの時間を示す。図から分かるように、サマリウム様イオンの発光強度が減少するとともに、プロメチウム様イオンの発光強度が増加しているが、プロメチウム様のうち基底状態の発光線と準安定状態の発光線の強度比を見ると、準安定状態が時間とともに増加していることが確認できる。これは、基底状態から準安定状態へとポピュレーションが移行する様子を実験で初めて確認したものである。これを時間発展衝突輻射モデルにより計算したところ、実験結果を定性的に良く再現することが確認できた。研究開始前に予想したように、プロメチウム様イオンの共鳴線の移行、およびその結果として生じるポピュレーショントラッピングに起因していることが明らかになった。金のみではなくビスマスイオンについても同様の測定を行い、原子番号に対する依存性も確認した。



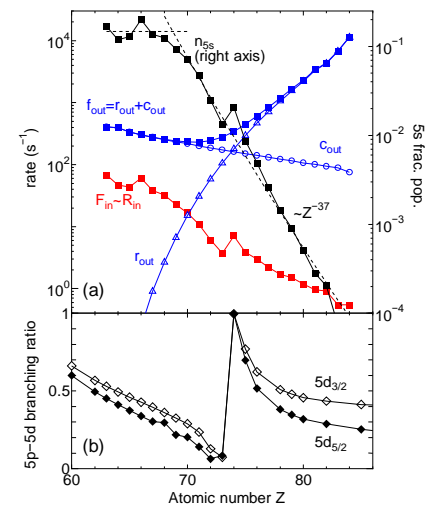
(上) 発光線強度の時間発展。赤と青は Pm 様イオンで前者は準安定、後者は基底状態。黒は Sm 様を示す。(下) Pm 様の準安定状態と基底状態の強度比。

(2) 右図は本研究において得られたホルミウムイオンの可視領域のスペクトルである。図の右に示された3桁の数値はスペクトルが得られた電子ビームエネルギーを示す。多くの発光線が観測されているが、いずれの発光線も過去に報告例が無く、本研究で初めて観測されたものである。発光線を示すイオンの価数はエネルギー依存性から特定できる。特定された発光線を矢印で示し、その価数が各スペクトルの電子エネルギー値の下に示されている。このうち、14+の発光線は、原子時計としての利用が期待されているものであるが、 $4f^6$ という複雑な構造であるため、その遷移同定が困難を極めた。そのため、原子番号に対する依存性を調べる他、より簡単な構造を持つ銀様イオン(電子配置 $4f$)、カドミウム様イオン(同 $4f^2$) から理論計算との比較によるスペクトルの解析を進め、より複雑な構造を持つインジウム様イオン(同 $4f^3$)、錫様イオン(同 $4f^4$) へと観測の対象を広げた。これらの成果は近未来における新しい原子時計構築において必要となる原子データとして重要である。



ホルミウム多価イオンの可視域発光スペクトル。

(3) 当初の予定にはなかったが、本研究において、自発的な磁気八重極子遷移の観測に世界で初めて成功した。観測した遷移は銀様タングステン(原子番号74)イオンの $5s-4f$ 遷移であるが、原子番号依存性を調べるため、同遷移をイッテルビウム(同70)イオンや金(同79)イオンに対して観測を試みたところ、いずれもタングステンと原子番号が近いにも関わらず、観測することができなかった。この不思議な現象を詳細な衝突輻射モデルを用いて理論的に調べた。右図はその結果である。下図は $5d$ 準位から $5p$ 準位への放射崩壊分岐比であるが、原子番号74のタングステンにおいて異常な振る舞いを示していることが分かる。この異常の結果、 $5p$ 準位からのカスケードにより磁気八重極子遷移の上準位である $5s$ 準位のポピュレーションが増加することで、特異的に強い発光強度を示すことが明らかになった。上図黒で示したのは、その $5s$ 準位のポピュレーションである。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Shunichi Murata, Takayuki Nakajima, Marianna S. Safronova, Ulyana I. Safronova, and Nobuyuki Nakamura, “Visible transitions in Ag-like and Cd-like lanthanide ions”, *Phys. Rev. A* 96 (2017) 062506. (査読有)

Momoe Mita, Hiroyuki A. Sakaue, Daiji Kato, Izumi Murakami and Nobuyuki Nakamura, “Direct Observation of the M1 Transition between the Ground Term Fine Structure Levels of W VIII”, *Atoms* 5 (2017) 13. (査読有)

Momoe Mita, Hiroyuki A. Sakaue, Daiji Kato, Izumi Murakami and Nobuyuki Nakamura, “Extreme ultraviolet spectra of multiply charged tungsten ions”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 876 (2017) 012019. (査読有)

Daiji Kato, Hiroyuki A. Sakaue, Izumi Murakami, Nobuyuki Nakamura, “Population trapping: The mechanism for the lost resonance lines in Pm-like ions”, *Nucl. Instrum. and Methods B* 408 (2017) 16. (査読有)

Takayuki Nakajima, Kunihiro Okada, Michiharu Wada, Vladimir A. Dzuba, Marianna S. Safronova, Ulyana I. Safronova, Noriaki Ohmae, Hidetoshi Katori, Nobuyuki Nakamura, “Visible spectra of highly charged holmium ions observed with a compact electron beam ion trap”, *Nucl. Instrum. and Methods B* 408 (2017) 118. (査読有)

[学会発表](計19件)

加藤太治, 坂上裕之, 村上泉, 大橋隼人, 中村信行, “銀様多価イオンの電気八重極遷移発光線強度の原子番号依存性”, 日本物理学会第74回年次大会 2018/3/15

坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 大橋隼人, 中村信行, “EBITを用いた銀様多価イオンからの電子八重極子遷移の観測”, 日本物理学会第74回年次大会 2018/3/15

坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 大橋隼人, 中村信行, “4f-5s 電気八重極子遷移(E3)の観測とそ

の強い Z 依存性”, 原子衝突学会第 43 回年会 2018/10/13
Shunichi Murata, Takayuki Nakajima, Marianna S. Safronova, Ulyana I. Safronova, and Nobuyuki Nakamura, “Visible spectra of heavy ions with an open 4f shell”, 19th International Conference Physics of Highly Charged Ions (HCI2018) 2018/9/4
H. A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, H. Ohashi and N. Nakamura, “Observation of electric octupole (E3) transitions in the EUV spectra of tungsten ions”, 19th International Conference Physics of Highly Charged Ions (HCI2018) 2018/9/4
NAKAMURA Nobuyuki, “Visible spectra of multiply charged heavy ions obtained with a compact electron beam ion trap”, The 7th China- Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (AMPP2018) 2018/7/26
物部将士, 加藤太治, 中村信行, “プロメチウム様イオン発光スペクトルの時間発展計測”, 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017/9/21
部将士, 加藤太治, 中村信行, “準安定状態へのポピュレーショントラップの時間発展計測”, 原子衝突学会第 42 回年会 2017/9/9
村田隼一, 中島貴之, Marianna S. Safronova, Ulyana I. Safronova, 中村信行, “4f 開殻重元素イオンの可視域発光スペクトルの観測”, 原子衝突学会第 42 回年会 2017/9/9
三田百恵, 村上泉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行, “タングステンイオン W VII-XIV の可視・EUV 領域発光スペクトルの観測”, 原子衝突学会第 42 回年会 2017/9/9
Masashi Monobe, Daiji Kato, Nobuyuki Nakamura, “Measurements of time-resolved EUV spectra for studying the population kinetics in an electron beam ion trap plasma”, 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX) 2017/7/28
Shunichi Murata, Takayuki Nakajima, Marianna Safronova, Ulyana Safronova and Nobuyuki Nakamura, “Visible M1 transitions in 4f open shell heavy ions observed with an electron beam ion trap”, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX) 2017/7/28
Daiji Kato, Hiroyuki A. Sakaue, Izumi Murakami, and Nobuyuki Nakamura, “Collisional-radiative model for EUV spectra of Pm-like ions in EBIT”, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX) 2017/7/28
Momoe Mita, Hiroyuki A. Sakaue, Daiji Kato, Izumi Murakami and Nobuyuki Nakamura, “Extreme ultraviolet spectra of multiply charged tungsten ions”, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX) 2017/7/28
村田隼一, 中島貴之, 中村信行, “4f 開殻重元素イオンの可視域発光スペクトルの観測”, 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017/3/19
三田百恵, 村上泉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行, “タングステンイオン W VII-XIV の可視・EUV 領域発光スペクトルの観測”, 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017/3/19
Takayuki Nakajima, Kunihiro Okada, Michiharu Wada, Vladimir A. Dzuba, Marianna S. Safronova, Ulyana I. Safronova, Noriaki Ohmae, Hidetoshi Katori, and Nobuyuki Nakamura, “Visible spectroscopy of highly charged holmium ions observed with a compact electron beam ion trap”, 18th International Conferences on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2016) 2016/9/13
Daiji Kato and Nobuyuki Nakamura, “Population trapping: the mechanism for the lost resonance lines in pm-like ions”, 18th International Conferences on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2016) 2016/9/13
中島貴之, 岡田邦宏, 和田道治, 大前宣昭, 香取秀俊, 中村信行, “ホルミウム多価イオンの可視領域発光線測定”, 日本物理学会 第 71 回年次大会 2016/3/21

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：加藤 太治

ローマ字氏名：KATO Daiji

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁): 60370136

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。