

令和 6 年 5 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K13990

研究課題名（和文）無磁場環境下の孤立多価イオンを用いた超微細構造相互作用の実験的検証

研究課題名（英文）Experimental verification of hyperfine interactions using highly charged ions in a low magnetic field

研究代表者

木村 直樹 (Kimura, Naoki)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：80846238

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：超微細相互作用の研究を目的に、理化学研究所の極低温静電型イオン蓄積リング（RIKEN cryogenic electrostatic ion storage ring:RICE）を用いた多価イオンビーム蓄積実験を遂行した。Ne様多価塩素イオンビームを磁場のない極高真空環境下に長時間（～1秒）捕捉することを達成し、ビーム由来の極端紫外光の観測にも成功した。また、関連研究として、低磁場の電子ビームイオントラップを用いた多価イオン分光実験および遷移確率測定実験も推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多価イオンは、相対性理論や量子電磁力学の影響を大きく受ける特異な原子である。その原子構造及びダイナミクスは、基礎物理を研究するための非常に良い題材として広く知られている。また近年、マルチメッセンジャー天文学、核融合プラズマ、短波長光源開発など、多種多様な応用用途が見つかり、その研究需要は尽きる気配が無い。多価イオンを空間捕捉する実験の先行研究を概観すると、多くの実験が磁場中に多価イオンを閉じ込める方式を取っている。多価イオンを磁場のない環境に長時間捕捉することに成功した本研究は、磁場中で観測が困難な準位構造やダイナミクスの研究に繋がり、大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：We performed ion-beam storage experiments using the RIKEN cryogenic electrostatic ion-beam storage ring (RICE) toward experimental verification of the hyperfine interaction of highly charged ions. In the proof-of-principle experiment, we achieved the long-time storage ( $\sim 1$  sec) of the Ne-like Cl<sup>7+</sup> ion beam. We also succeeded in observing extreme ultraviolet emissions from the stored ion beam. In addition, we performed spectroscopic experiments for highly charged ions using a compact electron beam ion trap that can operate in a low magnetic-free field.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：多価イオン 極低温静電型イオン蓄積リング 超微細相互作用 超微細構造 超微細誘起遷移 孤立多価イオン

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

超微細 (構造) 相互作用とは、原子核と束縛電子の間に働く相互作用のうち、クーロン相互作用より高次の相互作用のことを指す。その主成分は、電子が作り出す磁場と核磁気モーメントに起因する磁氣的相互作用であり、『原子』と『原子核』の異なる階層間を繋ぐ独特な研究対象と言える。本相互作用の大きさは非常に小さいが、ときに原子の構造やダイナミクスに有意な影響を与える。たとえば、本相互作用に起因する準位混合は、選択則によって厳しく禁止された準位間にもわずかな遷移強度をもたらすことがある (図1)。これは超微細誘起遷移と呼ばれ、超微細相互作用のユニークなプローブであるとともに、X線レーザー、原子時計、天体プラズマの同位体分析などの、応用研究にも深く関与する。超微細誘起遷移の理論研究はこれまで幅広く行われているが、実験測定の数に限られている。この原因は、その遷移が非常に弱いため、検出が難しいことにある。近年、実験技術の向上に伴い、やや単発的ではあるが、いくつかの超微細誘起遷移に対して遷移確率測定が実現している。しかしながら、複数の実験で理論予測と有意な差が示されており、その原因は完全にはわかっていない。現在、理論検証のための新たな実験データの提供が期待されている状況である。

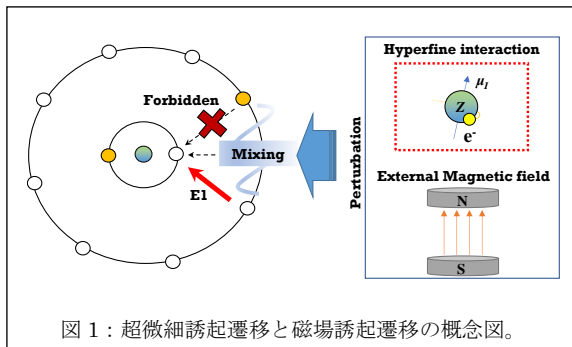


図1: 超微細誘起遷移と磁場誘起遷移の概念図。

2. 研究の目的

超微細相互作用のための理論計算研究のベンチマークを築くことを目標に、超微細誘起遷移の遷移確率測定を目指す。そのための実験環境を整備し、必要な技術検討を推進する。

3. 研究の方法

多価イオンは、電子と原子核の距離が近いため、超微細相互作用が比較的大きい。特に、閉殻系電子配置を基底状態に持つ多価イオンには、遷移確率の高い超微細誘起遷移が存在し、実験測定にとって都合が良い。今回我々は、具体的な実験ターゲットとして Ne 様多価イオンの超微細誘起遷移  $1s^2 2s^2 2p^6 \ ^1S_0 - 1s^2 2s^2 2p^5 3s \ ^3P_0$  を採用した (図2)。本遷移は、多価イオンの超微細誘起遷移の中でも特別高い遷移確率を持つため、超微細相互作用の理論計算の検証に極めて有用である。それにもかかわらず、遷移確率の実験測定はこれまでされた例が無い。その原因は、外部磁場に起因する準位混合も超微細混合と同等かそれ以上に大きく、磁場誘起遷移と超微細誘起遷移の切り分けが困難なことにある (図3)。そこで我々は、理化学研究所の極低温静電型イオン蓄積リング (RIKEN cryogenic electrostatic ion storage ring: RICE) が提供する無磁場の極高真空環境下で、超微細誘起遷移の遷移確率測定を行うことを計画した。

図4に実験の概要を示す。まず、電子サイクロトロン共鳴型イオン源 (Electron cyclotron resonance ion source: ECR ion source) で多価イオンを生成し、高電圧をかけてビームとして引き出す。その後、双極子マグネットを用いて目的の Ne 様多価イオンのみを選別し、ビームラインを介してビームの射出方向を調整しながら RICE 内に導入し、周回軌道にのせて長時間捕捉する。今回の目的の遷移は、ミリ秒オーダーの比較的短い寿命を持つ。よって、その遷移に伴う発光も十分観測可能である。発光強度の蓄積時間依存性を測定し、準安定状態の減衰を観測・解析することで、超微細誘起遷移の遷移確率を導出する。イオン源やビームラインを含む RICE の基礎的なセットアップは既存のものを使用したが、発光観測に用いる極端紫外光検出器は本研究の目的に合ったスペックの製品を新調した。

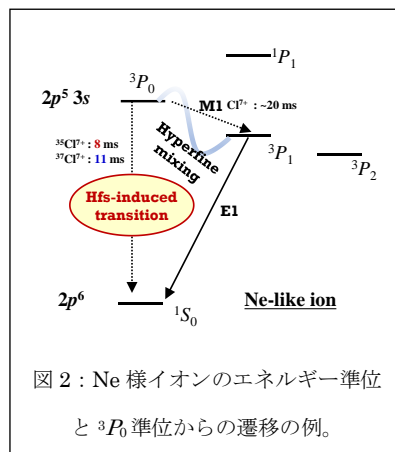


図2: Ne 様イオンのエネルギー準位と  $^3P_0$  準位からの遷移の例。

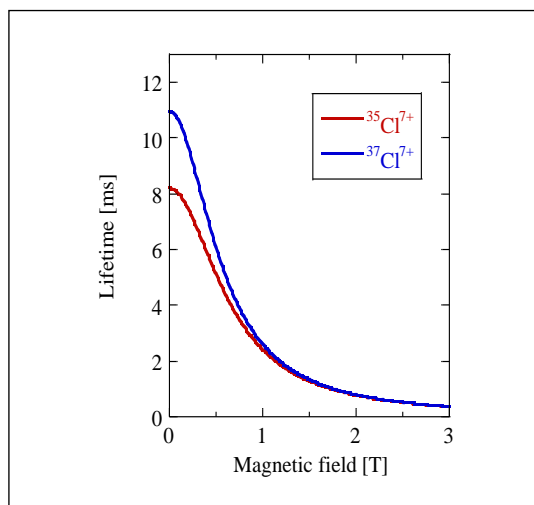
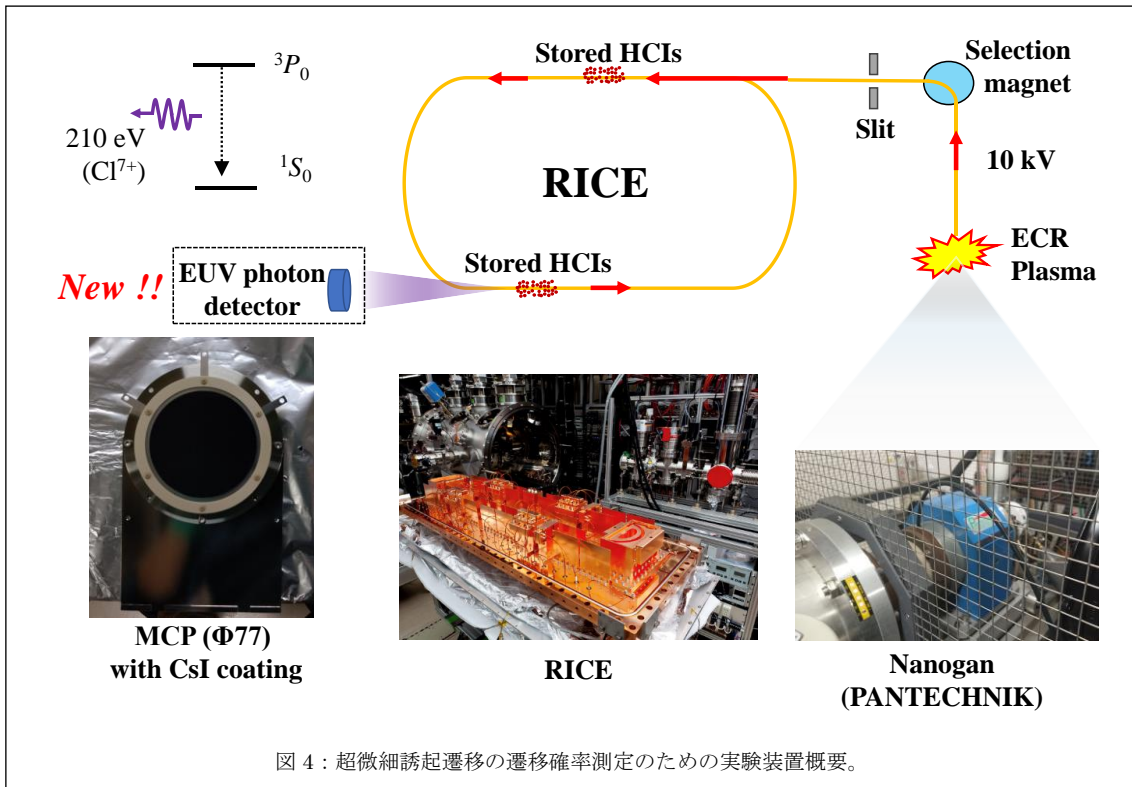


図3: Ne 様イオン  $^{35,37}\text{Cl}^{7+}$  における  $^3P_0$  準位寿命の磁場強度依存性。理論計算論文 [W. Li et al., PRA 96, 052508 (2017)] を参照してプロット。

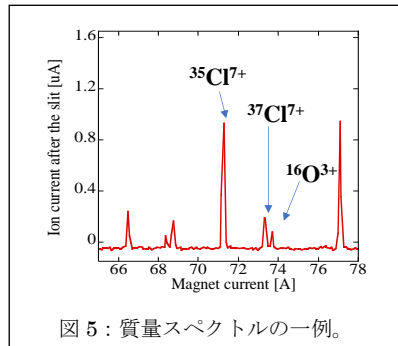


#### 4. 研究成果

上述の実験を実現するために、2022-2023 年度に行った研究活動の成果を以下に記す。

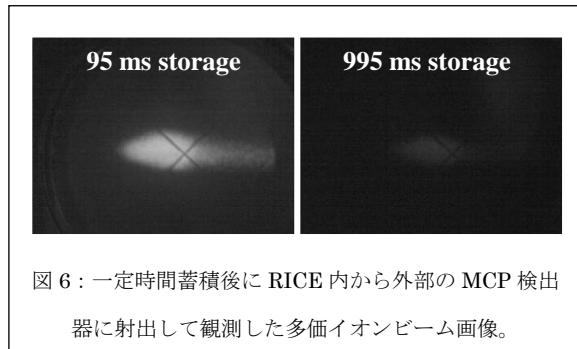
##### (1) 多価イオンビーム生成試験

既存の ECR イオン源(Nanogan : Pantechnik 社製)を用いて、安定的に目的の多価イオンビームを生成するための実験条件を探索した。図 5 に質量選別マグネットの電流値を掃引して取得した塩素多価イオンビームの質量スペクトルを示す。ガスの種類やガス圧、イオン源に導入する高周波の強度や共振器長など、様々な要素を検討・調整した結果、最終的に Ne 様多価イオンの  $^{35,37}\text{Cl}^{7+}$  と  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  を、数 10 keV のビームとして 0.1~1 マイクロアンペア程度取り出すことに成功した。また、本イオンビームの強度や軌道を長時間安定させるため、ガス圧や質量選別マグネットの磁場などを一定に保つよう、実験環境を整備した。これによって、RICE で多価イオン実験を行うための前提条件が整った。



##### (2) 多価イオンビームの長時間蓄積実験

多価イオンビームを RICE に導入し、長時間蓄積実験が可能であることを確認した。多価イオンは、これまでの RICE 実験で扱ってきた  $\text{N}_2\text{O}^+$  や  $\text{C}_2$  などの分子イオンに比べて質量電荷比が小さいため、電圧変化に敏感で、より慎重なパラメータ決定が必要であったが、RICE 内および入射ビームラインの電極の電圧を精密に調整した結果、最大 1 秒の多価イオン蓄積に成功した (図 6)。



##### (3) 多価イオンビームからの発光観測

極端紫外光検出器を用いて、RICE 内に蓄積した Ne 様多価イオン  $^{35,37}\text{Cl}^{7+}$  と  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  からの発光観測をそれぞれのイオンに対して行い、蓄積時間に応じてその発光強度が弱まる様子を観測した。その後、発光強度の減衰プロファイルを丁寧に解析した結果、本測定にはイオンビームが RICE 内の電極に衝突した際に生じる制動放射の寄与も多分に含まれていることが判明した。今後は、目的の超微細誘起遷移の寄与のみを選別して正確に評価する手法の開発に取り組む。

(4) 関連研究：低磁場プラズマ環境を用いた多価イオンの分光・寿命測定実験

当初の予定には無かったが、電気通信大学との共同研究として、比較的低い磁場で運転できる既存の小型電子ビームイオントラップを用いた実験を推進し、多価イオンの分光および準安定状態の寿命測定の研究で、多くの進捗があった。なかでも、「 $^{93}\text{Nb}^{10+}$ の超微細構造分裂の観測に成功したこと」と「 $\text{Ar}^{14+}$ の時間分解レーザー分光を実現して、異重項間遷移の遷移確率を測定したこと」の2点は特筆すべき成果といえる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kimura Naoki, Kiyama Genichi, Ito Daiki, Nakamura Nobuyuki	4. 巻 56
2. 論文標題 Injection of metallic elements into an electron-beam ion trap using an electron impact metal vapor source	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 185001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6455/acf354	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kimura Naoki, Priti, Numadate Naoki, Kodama Ryunosuke, Nakamura Nobuyuki	4. 巻 108
2. 論文標題 Anomalous plasma ionization balance induced by 5s and 4f metastable states	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 32818
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreva.108.032818	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kimura Naoki, Nakamura Nobuyuki	4. 巻 56
2. 論文標題 Simultaneous observation of noble gases and highly charged ions in an electron beam ion trap for accurate wavelength calibration of optical transitions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 225001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6455/ad0400	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 木村 直樹	4. 巻 21
2. 論文標題 （第24回若手奨励賞受賞研究）新しい分光法の開拓を通じた多電子重元素多価イオンの原子構造とダイナミクスの研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 原子衝突学会誌しょうとつ	6. 最初と最後の頁 R002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.50847/collision.21.R002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Iizawa Masatomi, Kuma Susumu, Kimura Naoki, Chartkunchand Kiattichart, Harayama Sakumi, Azuma Toshiyuki, Nakano Yuji	4. 巻 91
2. 論文標題 Photodetachment Spectroscopy of Highly Excited $\text{C}^{2+}$ and Their Temporal Evolution in the Ion Storage Ring RICE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 84302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.084302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Naoki, Priti, Kono Yasutaka, Pipatpakorn Pativate, Soutome Keigo, Numadate Naoki, Kuma Susumu, Azuma Toshiyuki, Nakamura Nobuyuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Hyperfine-structure-resolved laser spectroscopy of many-electron highly charged ions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-023-01127-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Naoki, Priti, Kuma Susumu, Azuma Toshiyuki, Nakamura Nobuyuki	4. 巻 107
2. 論文標題 Electric-quadrupole transition-rate measurement of a highly charged ion in an electron-beam ion trap using pulsed laser excitation from a metastable state	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 22805
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.022805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Priti, Naoki Kimura, Yasutaka Kono, Keigo Soutome, Pipatpakorn Pativate, Naoki Numadate, Susumu Kuma, Toshiyuki Azuma, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Exploring hyperfine structures of many-electron ions using laser spectroscopy
3. 学会等名 The 21st meeting on Atomic Processes in Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Kimura
2. 発表標題 Plasma-assisted laser spectroscopy of highly charged ions: Application of the study on collisional processes in a laboratory plasma
3. 学会等名 28th International Symposium on Ion-Atom Collisions (ISIAC 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Kimura, Sakumi Harayama, Chartkunchand Kiattichar, Susumu Kuma, Yuji Nakano, Toshiyuki Azuma
2. 発表標題 Hyperfine-induced transition in highly charged Ne-like ions studied with the cryogenic electrostatic ion storage ring RICE
3. 学会等名 XXXIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Kimura, Genichi Kiyama, Daiki Ito, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Continuous injection of metallic elements into an electron-beam ion trap using an electron-beam evaporator
3. 学会等名 XXXIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sakumi Harayama, S. Kuma, N. Kimura, K. C. Chartkunchand, Y. Nakano, T. Yamaguchi, T. Azuma
2. 発表標題 Observation of radiative vibrational cooling of N <sub>2</sub> <sup>+</sup> ions using a cryogenic electrostatic ion storage ring: contribution of Fermi resonance
3. 学会等名 XXXIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原山朔弥, 木村直樹, 久間晋, Kiattichart Chartkunchand, 馬場正昭, 山口貴之, 中野祐司, 東俊行
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICEを用いたN20+の輻射振動冷却 VII
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村直樹, 原山朔弥, Kiattichart Chartkunchand, 久間晋, 中野祐司, 東俊行
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICEを用いたNe様多価イオンの超微細誘起遷移の研究
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoki Kimura
2. 発表標題 Hyperfine interaction of highly charged ions studied with magnetic-field-free ion storage devices
3. 学会等名 International Conference on Hyperfine Interactions and their Applications (HYPERFINE2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村直樹
2. 発表標題 新しい分光法の開拓を通じた多電子重元素多価イオンの原子構造とダイナミクスの研究
3. 学会等名 原子衝突学会第48回年会 (招待講演)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 宮由輝, 木村直樹, 伊藤大貴, Priti, 馬場正昭, 久間晋, 東俊行, 中村信行
2. 発表標題 Be様多価イオンAr14+のプラズマアシストレーザー分光
3. 学会等名 原子衝突学会第48回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原山朔弥, 木村直樹, 久間晋, Kiattichart Chartkunchand, 馬場正昭, 山口貴之, 中野祐司, 東 俊行
2. 発表標題 極低温イオン蓄積リングを用いた直線3原子分子イオンN20+のフェルミ共鳴準位を介する輻射振動冷却過程の測定II
3. 学会等名 原子衝突学会第48回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤大貴, 稲留康太, 木村直樹, Priti, 中村 信行
2. 発表標題 真空紫外域におけるタングステン多価イオン発光線の探索
3. 学会等名 原子衝突学会第48回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村直樹, Priti, 沼舘直樹, 児玉龍之介, 中村信行
2. 発表標題 5sおよび4f準安定状態が引き起こす特異なプラズマイオン化平衡
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 木村直樹, 宮由輝, 伊藤大貴, Priti, 加藤太治, 馬場正昭, 久間晋, 東俊行, 中村信行
2. 発表標題 Be様多価イオンAr14+の時間分解レーザー分光
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Naoki Kimura
2. 発表標題 Hyperfine-structure-resolved laser spectroscopy of highly charged ions in a compact EBIT
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Traps (EBIST2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Kimura, Priti, Susumu Kuma, Toshiyuki Azuma, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Lifetime measurement of the microsecond-order electric-quadrupole transition: Application of plasma-assisted laser spectroscopy
3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hyperfine splitting of the clock candidate transition in $93\text{Nb}^{10+}$
2. 発表標題 Naoki Kimura, Genichi Kiyama, Priti, Michiharu Wada, Toshiyuki Azuma, Nobuyuki Nakamura
3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村直樹、Priti、久間晋、東俊行、中村信行
2. 発表標題 多電子多価イオン超微細相互作用の実験研究～どう観るか？なぜ観るか？～
3. 学会等名 原子衝突学会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木山 源一、木村 直樹、伊藤 大貴、池田大和、緒方海都、東俊行、中村 信行
2. 発表標題 電子衝撃加熱蒸着源による電子ビームイオントラップへの金属試料導入
3. 学会等名 原子衝突学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村直樹、木山源一、Priti、和田道治、東俊行、中村信行
2. 発表標題 Nb多価イオンの高分解能可視分光
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村直樹、Priti、久間晋、東俊行、中村信行
2. 発表標題 プラズマアシストレーザー分光を用いた多電子多価イオンの構造研究
3. 学会等名 核融合科学研究所「原子分子過程研究の最先端と先進的プラズマ分光計測」研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村直樹、Priti、久間晋、東俊行、中村信行
2. 発表標題 プラズマアシストレーザー分光を用いた電気四重極遷移の寿命測定
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

多価イオンの新分光法を実証 - 多電子重元素多価イオンの超微細構造を観測 -  
[https://www.riken.jp/press/2023/20230124\\_1/index.html](https://www.riken.jp/press/2023/20230124_1/index.html)

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関