

上野核分光研究室

主任研究員 上野 秀樹 (D.Sci.)



(0) 研究分野

分科会: 物理

キーワード: 実験核物理、加速器科学、RIビーム、放射線計測、核スピン偏極

(1) 研究背景と研究目標

当研究室では RI ビームを物質へ停止、或いは原子物理過程が支配的となるエネルギー領域まで低速化し、RI から放出される β 線・ γ 線などの放射線や RI 原子から放出される蛍光の分光を行うことで RI の特異な性質を調べる核物理学研究を行っている。この際、特に RI 核スピンの向きを揃える（偏極・整列）独自の技術を開発・応用することで特徴のある研究を展開している。また、こうして開発される様々な RI 核スピン操作技術を原子物理・物質科学研究・基礎物理へ応用する境界領域の研究も実施している。具体的な中心課題は核反応による核スピン偏極 RI ビーム生成技術を利用した核物理ビーム実験であり、並行し、この手法の弱点を克服するための、将来に向けたレーザー核分光に関する研究開発や新規 RI 核スピン操作技術の開発にも取り組んでいる。後者二課題は中期計画の期間内での装置完成と機能実証を目指している。

(2) 2021年度成果と今後の研究計画

2021 年度は、新規核スピン操作技術に関する RI 原子線共鳴装置の開発、異なる二つのアプローチによるレーザー核分光研究の活動を中心に研究開発を行った。項目ごとの具体的内容は下記の通り。

新規 RI 核スピン操作技術の開発—RI 原子線共鳴装置 R&D：核反応を用いた偏極生成手法は、元素に依らないという特長があり多くの成果を取めてきた一方、生成できる偏極度が高々数%と小さく、希少 RI への研究拡張や物質科学・基礎物理研究への応用が困難という問題がある。ここで取り組んでいる原子線共鳴法とは、不均一磁場（シュテルンゲルラッハ磁石）を用いた原子スピンの選別に超微細構造間隔の共鳴を組み合わせた方法である。核・原子スピンのみに依存するため、汎用性が極めて高い点が特長であり、上記手法の弱点を抜本的に克服することができるが、このスピン選択磁石系へ RI を低速中性原子として導入するまでが開発の鍵となっている。低速中性原子生成のスキームは次の通りである：RIBF の低速 RI ビーム生成装置 SLOWRI から供給される RI をイオントラップ→線形 Paul トラップによりイオンを前後に振動させる→レーザー冷却法により冷却された共存イオンとの共同冷却により目的 RI イオンを冷却→中性化ガスの導入により中性原子として射出する。現在 Rb を用いたオフライン開発を行っており、ここまでイオン源、イオン検出器、イオントラップシステムの導入、ガス導入によるイオン中性化制御を実施した。2021 年度は、線形 Paul トラップの導入と、これを用いた動的電場制御とイオンの挙動に関する基礎データの取得を行った。さらに、レーザー冷却による共同冷却の共存イオンとする Sr イオン源の導入、冷却用レーザーの整備も行い、また、下流側に設置するスピン選択磁石系の整備も行った。2022 年度にはレーザー冷却を用いた Rb イオンの共同冷却、及び冷却イオンの中性化による中性原子ビームの前方射出の達成を目指す。

レーザー核分光研究：二つの頃なるアプローチにより、レーザー核分光研究に関する R&D を行っている。一つは SLOWRI の高度利用による RI のコリニア・レーザー分光に向けた装置開発で、もう一つは超流動 He を高エネルギー RI ビームの停止媒体とする新たなレーザー核分光法の開発である。前者は、化学的性質・RI 寿命の制約から、レーザー分光が盛んな ISOL 施設で手つかずとなっている RI のレーザー分光を、RI ビーム生成方式の異なる RIBF で実現しようとするものである。前年度までに装置の基本構成を完成させ、Ba 天然同位体を用いた機能実証に成功している。2021 年度はいよいよ目的とする Zr 同位体でのオフライン開発に着手し

た。イオン源・分光レーザーの整備などを行い、遷移強度が大きい $4d^2(^3F)5p\ z\ ^4G_{5/2} - 4d^2(^3F)5s\ a\ ^4F_{3/2}$ の 357 nm を選んで実験を行った結果、質量数 $A = 90-92$ & 94 の Zr 天然同位体に対してレーザー誘起蛍光スペクトルを取得し、正確な超微細構造定数を観測することができた。さらに、次の一手として進めている長寿命 RI である ^{83}Zr のレーザー分光測定に向けて RIBF の AVF サイクロトロンを用い、 ^{83}Zr 試料生成のためのビーム実験を実施した。現在、分光実験に向けた装置の改良を進めており、次年度測定を行う予定である。

後者は、液体 He 中に置かれた不純物原子の同一原子準位間の吸収・発光の遷移波長が互いに大きく異なる性質を示すことを利用した研究で、二つの課題を設定している。1 つは遷移波長の動的変化の観察で、もう一つは高エネルギービーム ($E/A \sim 345$ MeV) を対象とする超低バックグラウンドレーザー核分光測定を実現するのが目的である（法政大学および田原分子分光研との共同研究）。2021 年度は量研機構 HIMAC 加速器施設を用いて実験を行った。 $E/A = 350$ MeV の RIBF と近い高エネルギー領域の ^{84}Rb 安定核ビームを超流動 He 層に停止させて分光観測を実施した結果、794 nm のレーザー誘起蛍光を観測することができ、当該装置を同じエネルギー領域の RI ビームにも適用可能であることが確認された。引き続き装置開発を進め、レーザーマイクロ波二重共鳴測定による精密分光の機能実証を行い、RIBF での希少 RI 実験を目指す。遷移波長の動的変化の観察についても引き続き研究を進める。

これらに加え、RIBF や QST HIMAC 加速器施設にて行った核破砕反応により生成した核スピン偏極・整列 RI ビームに関する実験のデータ解析を行った。また、RI・重イオンビームを用いた物質科学への応用研究も実施中である。

(3) 研究室メンバー

(2021年度)

(主任研究員)

上野秀樹

(専任研究員)

山崎展樹

(研究員)

高峰愛子、郷慎太郎

(特別研究員)

今村慧、田島美典

(4) 発表論文等

1. “Quantum sensing of the electron electric dipole moment using ultracold entangled Fr atoms,” T. Aoki, R. Sreekantham, B. K. Sahoo, Bindiya Arora, A. Kastberg, T. Sato, H. Ikeda, N. Okamoto, Y. Torii, T. Hayamizu, K. Nakamura, S. Nagase, M. Ohtsuka, H. Nagahama, N. Ozawa, M. Sato, T. Nakashita, K. Yamane, K. S. Tanaka, K. Harada, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, A. Hatakeyama, A. Takamine, H. Ueno, Y. Ichikawa, Y. Matsuda, H. Haba, Y. Sakemi, *Quantum Sci. Technol.* **6**, 044008-1–17 (2021).
2. “First high-precision direct determination of the atomic mass of a superheavy nuclide,” P. Schury, T. Niwase, M. Wada, P. Brionnet, S. Chen, T. Hashimoto, H. Haba, Y. Hirayama, D. S. Hou, S. Iimura, H. Ishiyama, S. Ishizawa, Y. Ito, D. Kaji, S. Kimura, H. Koura, J. J. Liu, H. Miyatake, J. -Y. Moon, K. Morimoto, K. Morita, D. Nagae, M. Rosenbusch, A. Takamine, Y. X. Watanabe, H. Wollnik, W. Xian, S. X. Yan, *Phys. Rev. C* **104**, L021304-1–7 (2021).
3. “ α -Decay-correlated mass measurement of $^{206,207g,m}\text{Ra}$ using an α -TOF detector equipped multireflection time-of-flight mass spectrograph system,” T. Niwase, M. Wada, P. Schury, P. Brionnet, S. D. Chen, T. Hashimoto, H. Haba, Y. Hirayama, D. S. Hou, S. Iimura, H. Ishiyama, S. Ishizawa, Y. Ito, D. Kaji, S. Kimura, J. Liu, H. Miyatake, J. Y. Moon, K. Morimoto, K. Morita, D. Nagae, M. Rosenbusch, A. Takamine, T. Tanaka, Y. X. Watanabe, H. Wollnik, W. Xian, S. X. Yan, *Phys. Rev. C* **103**, 054312-1–8 (2021).
4. “Production of the most neutron-deficient Zn isotopes by projectile fragmentation of ^{78}Kr ,” A. Kubiela, H. Suzuki, O. B. Tarasov, M. Pfützner, D. -S. Ahn, H. Baba, A. Bezbakh, A. A. Ciemny, W. Dominik, N. Fukuda, A. Giska, R. Grzywacz, Y. Ichikawa, Z. Janas, Ł. Janiak, G. Kamiński, K. Kawata, T. Kubo, M. Madurga, C. Mazzocchi, H. Nishibata, M. Pomorski, Y. Shimizu, N. Sokołowska, D. Suzuki, P. Szymkiewicz, A. Świercz, M. Tajima, A. Takamine, H. Takeda, Y. Takeuchi, C. R. Thornsberry, H. Ueno, H. Yamazaki, R. Yokoyama, K. Yoshida, *Phys. Rev. C* **104**, 064610-1–7 (2021).
5. “Measurement of the principal quantum number distribution in a beam of antihydrogen atoms,” B. Kolbinger, C. Amsler, S. Arguedas Cuendis, H. Breuker, A. Capon, G. Costantini, P. Dupré, M. Fleck, A. Gligorova, H. Higaki, Y. Kanai, V. Kletzl, N. Kuroda, A. Lanz, M. Leali, V. Mäckel, C. Malbrunot, V. Mascagna, O. Massiczek, Y. Matsuda, D. J. Murtagh, Y. Nagata, A. Nanda, L. Nowak, B. Radics, C. Sauerzopf, M. C. Simon, M. Tajima, H. A. Torii, U. Uggerhøj, S. Ulmer, L. Venturelli, A. Weiser, M. Wiesinger, E. Widmann, T. Wolz, Y. Yamazaki, J. Zmeskal, *Eur. Phys. J. D* **75**, 91-1–14 (2021).

Laboratory Homepage

https://www.riken.jp/research/labs/chief/nucl_spectro/index.html