

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707012

研究課題名(和文) 超流動ヘリウム中レーザー核分光で探る陽子過剰核g軌道最外殻核子の配位状態

研究課題名(英文) Configuration study of g-orbital valence nucleons in neutron-deficient nuclei with nuclear laser spectroscopy in superfluid helium

研究代表者

古川 武 (FURUKAWA, Takeshi)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：30435680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで測定が困難であった収量の少ない短寿命不安定核の持つ核スピンや電磁気モーメントといった原子核構造研究に有用な物理量を、申請者らが開発を進める超流動ヘリウム環境を利用した新しいレーザー分光法によって測定可能とする。低収量の不安定核に対する測定を可能とすべく、これまでの開発で問題となっていたレーザー散乱光による光検出器のバックグラウンド信号を、ダブルグレーティング分光器を用いた新しい集光検出器系によって1/10000まで低減することに成功した。さらに、実際の不安定核と同じ高速 $^{85}\text{Rb}$ ビームに対して上記の集光検出器系を用いたテスト実験を行い、低収量RIに対する有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：We aim to measure nuclear spins and electromagnetic moments of low-yield radioactive isotopes (RIs) with our new laser spectroscopy technique using superfluid helium as an effective stopper of energetic RI beam. In the previous experiments, large background signals caused by stray laser light prevented the measurement with low-yield RIs. Our new-developed photodetection system including double-grating monochromators enabled us to reduce the background signals to approximately 1/10000. Using this new photodetection system, we performed a laser spectroscopy experiment with energetic  $^{85}\text{Rb}$  beam injected into superfluid helium. We observed double resonance signals with improving the signal-to-noise ratio to two orders of magnitude.

研究分野：実験核物理

キーワード：レーザー核分光 核スピン・モーメント 超流動ヘリウム

## 1. 研究開始当初の背景

近年の加速器技術の向上によって安定核から遠く離れた短寿命な不安定原子核(RI)の生成量が飛躍的に増大し、従来の原子核モデルでは説明が困難な、安定核とは異なる特異な核構造が次々と発見された。これら異常な原子核の構造を包括して記述可能な『究極の原子核モデル』の構築は原子核物理学における主要なテーマの1つと言える。特に原子核が持つ静的電磁特性である電磁気モーメントや核スピンは、核内核子の持つ一粒子軌道状態や核の変形状態、準位構造などを直接反映した物理量であることから、詳細な核構造を議論する際に重要な意義をもつ。これまで特に Z=30 近傍までの軽い短寿命核を中心として核スピン・モーメント測定による短寿命核の構造研究は進められており、現在はその対象を Z=50 近傍の中重核領域に伸ばそうとしている。

しかし、安定核から遠く離れたドリッパイン近傍の中重核は現代の加速器技術をもってしても生成収量が典型的に毎秒 100 個以下と少なく、既存の手法では核スピン・モーメント測定が困難であった。そこで申請者は、超流動ヘリウム環境下の原子分光技術に着目、これを応用した高効率で汎用性の高い測定法『超流動ヘリウム中における RI 原子の二重共鳴法』を考案し、開発を進めている。本手法では、1) 加速器施設などで生成される高速の RI ビームを超流動ヘリウム中に打ち込んで停止・中性化した後、2) 超流動ヘリウム中に漂う RI 原子に対してレーザー光ポンピング法によりスピン偏極を生成、3) 二重共鳴法を用いて RI 原子のゼーマン準位間隔や超微細構造準位間隔を精密測定することで、未知の核スピン・モーメントを系統的に決定する。本手法では、ガスに比べて密度が高いヘリウム液体を利用することで高速の RI ビームを瞬時に停止し、逃さず測定に利用可能である。さらに、レーザー光ポンピング法を用いることで既存の核反応を利用した手法に比べて桁違いに大きな偏極度(典型的に 90%以上)が得られる。水など他の液体中では一般的に植え込まれた原子と周囲の液体原子・分子との相互作用が大きいため原子のスピン偏極が保持されず光ポンピングやレーザー核分光は困難であるとされるが、超流動ヘリウム中では相互作用が小さいため真空中と同様に二重共鳴法を用いた核分光が可能である。さらに、超流動ヘリウム中では周囲のヘリウムから受ける圧力のために原子の光吸収スペクトルが放出(蛍光)スペクトルに比べて短波長側にシフトすることが分かっており、吸収・放出波長の違いを利用して光ポンピング用レーザーの散乱光に起因したバックグラウンド信号を除去することが可能である。

これまでに申請者らは本手法の原理実証・装置開発を進め、実際に核子当たり 60 MeV 程度の高速<sup>84-87</sup>Rb ビームを超流動ヘ

リウム中に打ち込んで二重共鳴法による核スピン導出に成功している。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでに申請者らが開発を進めてきた『超流動ヘリウム中における RI 原子の二重共鳴法』を用いた N=Z=50 二重魔法数近傍の陽子過剰 Ag 同位体、特に<sup>94</sup>Ag の  $I^{\pi}=21^{+}$ 長寿命励起準位における核スピン・モーメント測定を目標とする。測定に向けては、これまでの開発で課題となっていた測定効率の向上、具体的には光検出におけるバックグラウンド信号の低減などを行い、収量の少ない RI に対する有用性の実証を行う。

## 3. 研究の方法

研究背景で述べた通り、これまでに申請者らは核子当たり 60 MeV 程度の高速な不安定核ビーム<sup>84-87</sup>Rb を超流動ヘリウム中に打ち込んで停止させ、前述の二重共鳴法を行って共鳴信号の観測に成功している。しかし、これまでの実験では光ポンピング用レーザーの散乱光に起因する光検出器のバックグラウンド信号が二重共鳴信号に比べて大きいため十分な測定効率が得られず、依然として収量が毎秒 10<sup>4</sup> 個程度の核種への適用が限界であった。散乱光バックグラウンドが大きい原因は使用した集光検出器系においてレーザー散乱光と原子からの放出光を選別するために用いた干渉フィルターの性能が十分でなかったことにある。目標とする Ag をはじめとした毎秒 100 個以下の低収量不安定 RI への適用を可能とするには、新たな集光系の開発と、二重共鳴スペクトル観測の条件最適化が必要であった。

そこで、本研究ではより高い波長選別能力を有するダブルグレーティング分光器を用いた新しい光波長分離システムを開発する。既存の実験システムと組み合わせる事でレーザー散乱光によるバックグラウンドを除去した高い S/N 比での測定が可能となる。

以上の点に着目し集光検出器系の開発研究を行った。新集光系がどの程度の収量までのビームを用いて信号検出が可能であるかは、オフラインでの定量的な評価を経て、最終的には理研 RIBF 加速器施設の RIPS 装置を用いたオンライン実験で、ビームエネルギー核子当たり 66 MeV の<sup>85</sup>Rb ビームを用いて検証した。

## 4. 研究成果

上述の通り、本研究ではまず、放出された脱励起光の高効率検出に必要な、高い検出効率と散乱光除去を両立した集光検出器系の開発を行った。単に光検出の立体角を大きくしただけではレーザー散乱光のバックグラウンドも同じく増加し、測定に支障が生じる。そこで従来の干渉フィルターを用いた光波長分離の代わりに、バンドルファイバーとダブルグレーティング分光器による光波長

選別を利用した新しい光検出器系（図1）を導入した。これにより脱励起光の検出効率を保ちつつレーザー散乱光バックグラウンド除去を実現する。開発の結果、バンドルファイバーと分光器を組み合わせ、分光器のスリット幅をファイバー径まで狭めることで、これまで問題となっていたレーザー散乱光のバックグラウンドを当初見積もりのさらに1/10、従来システムの1/10000以下へと大幅に低減することに成功した。これにより、本実験で主要な問題となるレーザー散乱光をほぼゼロに低減することが可能となるだけでなく、励起レーザー強度を上げてもお散乱光は十分に少ないため、大強度レーザーにより効率よく原子を励起することで脱励起光検出の絶対量向上も可能となった。

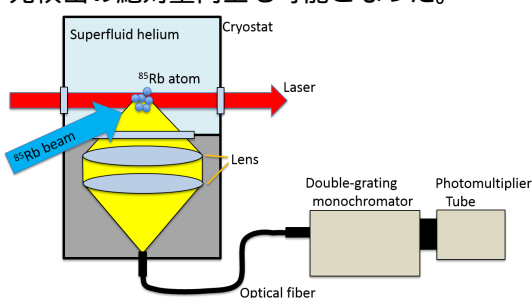


図1：開発した集光検出器系の概略図。原子が放出する蛍光は光学窓を通じてクライオスタットの外に設置した2枚のレンズで集光されて光ファイバーに入り、分光器で波長選別された後に光電子増倍管で検出される。

加えて、低収量ビームの実験を円滑に進めるため、超流動ヘリウム環境を安定に長時間維持できるようクライオスタット部の開発も並行して行った。実験槽とは別に液体ヘリウム貯蔵を設け実験槽へ液体ヘリウムを恒常的に供給し蒸発による液面低下などの影響を取り除く機構を取り入れるなどの工夫を施し、本研究で目標とする低収量・短寿命RIで必要とされた20時間以上のmKオーダーの温度調節・保持が可能となった。

以上のオフライン開発における成果を得た後、開発した集光検出器系・クライオスタットを用いて実際に高速の $^{85}\text{Rb}$ イオンビームによる実験を行った。超流動ヘリウム中に打ち込んだ後に停止・中性化した $^{85}\text{Rb}$ 原子に対して二重共鳴法を行い、既存の蛍光検出器系に比べて約100倍という高いS/N比でのレーザー誘起蛍光測定を実現した。超流動ヘリウム中に入射するイオンビーム数を計数しながら蛍光観測した結果から、毎秒300個という非常に低いビーム強度においても蛍光検出に成功した。

実際に稀少Agの測定を行うには信号強度自体を上げる必要があるが、RF/MWパワーの増強により信号強度が6倍と十分な強度になると見積もられており、上述の研究成果により測定に向けた原理検証はほぼ完了した。

## 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 5 件)

1) T. Fujita, K. Imamura, D. Tominaga, T. Kawaguchi, T. Egami, T. Nishizaka, T. Kobayashi, A. Takamine, T. Furukawa, H. Ueno, T. Shimoda, and Y. Matsuo, Development of magnetic field coils for laser spectroscopy of atoms in He II, RIKEN Accel. Prog. Rep. 49, 191, 査読有 (2016)

2) K. Imamura, T. Furukawa, T. Wakui, T. Fujita, M. Hayasaka, M. Matsumoto, T. Egami, D. Tominaga, H. Odashima, H. Ueno, and Y. Matsuo, Intensity evaluation of laser-RF double resonance signal of Rb atoms in superfluid helium cryostat, RIKEN Accel. Prog. Rep. 49, 192, 査読有 (2016)

3) T. Fujita, T. Furukawa, K. Imamura, X. F. Yang, A. Hatakeyama, T. Kobayashi, H. Ueno, K. Asahi, T. Shimoda, Y. Matsuo, OROCHI Collaboration: Laser spectroscopy of atoms in superfluid helium for the measurement of nuclear spins and electromagnetic moments of radioisotope atoms, Hyperfine Interactions 236, 95, 査読有 (2015)

4) K. Imamura, T. Furukawa, T. Wakui, X. F. Yang, Y. Mitsuya, T. Fujita, Y. Ebara, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, H. Shirai, T. Suzuki, T. Sato, Y. Ohtomo, S. Kojima, K. Asahi, A. Hatakeyama, H. Odashima, T. Kobayashi, H. Ueno, and Y. Matsuo: Measurement of hyperfine splitting of alkali atoms in superfluid helium for laser spectroscopy of atoms with unstable nuclei, JPS Conf. Proc. 6, 030115, 査読有 (2015)

5) K. Imamura, T. Furukawa, X. F. Yang, Y. Mitsuya, T. Fujita, M. Hayasaka, T. Kobayashi, A. Hatakeyama, H. Ueno, H. Odashima, and Y. Matsuo, Hyperfine structure measurement of  $^{133}\text{Cs}$  atoms in superfluid helium, RIKEN Accel. Prog. Rep. 48, 251, 査読有 (2015)

6) X. F. Yang, T. Furukawa, T. Wakui, K. Imamura, T. Fujita, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, T. Suzuki, Y. Ebara, A. Hatakeyama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, T. Kobayashi, S. Nishimura, M. Kurata-Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, H. Ueno, T. Shinozuka,

T. Shimoda, K. Asahi, and Y. Matsuo, laser-RF double resonance spectroscopy of  $^{84-87}\text{Rb}$  isotopes trapped in superfluid helium, RIKEN Accel. Prog. Rep. 48, 8, 査読有 (2015)

7) X. F. Yang, T. Furukawa, T. Wakui, T. Fujita, K. Imamura, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, H. Shirai, T. Suzuki, Y. Ebara, A. Hatakeyama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, T. Kobayashi, S. Nishimura, M. Kurata-Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, S. Kubono, Y. Ohshiro, H. Ueno, T. Shinozuka, T. Shimoda, K. Asahi, and Y. Matsuo, laser-radio-frequency double-resonance spectroscopy of  $^{84-87}\text{Rb}$  isotopes trapped in superfluid helium, Phys. Rev. A 90, 052516, 査読有 (2014)

〔学会発表〕(計 22 件)

1) 江上魁, 今村慧, 高峰愛子, 小林航, 藤田朋美, 富永大樹, 三條真, 中村祐太郎, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中に打ち込まれた低収量核原子の超微細構造間隔測定に向けた光学クライオスタットの開発, 日本物理学会 2017 年年次大会, 2017 年 3 月 17-20 日, 大阪大学

2) 小林航, 今村慧, 江上魁, 西坂太志, 高峰愛子, 藤田朋美, 富永大樹, 三條真, 中村祐太郎, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究に向けた超流動ヘリウム中原子のレーザー誘起蛍光検出系の高度化, 日本物理学会 2017 年年次大会, 2017 年 3 月 17-20 日, 大阪大学

3) 三條真, 今村慧, 高峰愛子, 藤田朋美, 江上魁, 富永大樹, 小林航, 中村祐太郎, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究に向けた超流動ヘリウム中原子のレーザー誘起蛍光検出系の高度化, 日本物理学会 2017 年年次大会, 2017 年 3 月 17-20 日, 大阪大学

4) 今村慧, 早坂美希, 藤田朋美, 小林徹, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: パルス Ti:Sa レーザーによる超流動ヘリウム環境中原子のスピン偏極生成, 第 13 回 AMO 討論会, 2016 年 6 月 3-4 日, 理化学研究所(和光)

5) 江上魁, 今村慧, 藤田朋美, 西坂太志, 富永大樹, 川口高史, 高峰愛子, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究へむけた超流動ヘリウム環境におけるレーザー核分光法の開発, 第 13 回 AMO 討論会, 2016 年 6 月 3-4 日, 理化学研究所(和光)

6) K. Imamura, T. Fujita, T. Egami, T. Nishizaka, A. Takamine, D. Tominaga, T. Kawaguchi, W. Kobayashi, M. Sanjo, T. Furukawa, Y. Ichikawa, T. Wakui, H. Odashima, H. Ueno, Y. Matsuo: Development of laser spectroscopic method using superfluid helium for the study of low-yield nuclei, 26th International nuclear physics conference (INPC2016), 11-16 September, 2016, Adelaide, Australia

7) 早坂美希, 今村慧, 富田英生, 高松峻英, 山口康広, 藤田朋美, 小林徹, 植松晴子, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: パルス Ti:S レーザーによる超流動ヘリウム中原子のスピン偏極生成, 日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学

8) 藤田朋美, 今村慧, 富永大樹, 川口高史, 江上魁, 西坂太志, 小林徹, 高峰愛子, 古川武, 上野秀樹, 下田正, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム環境下における 11 族原子の超微細構造間遷移, 日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学

9) 江上魁, 今村慧, 西坂太志, 高峰愛子, 藤田朋美, 富永大樹, 川口高史, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究へ向けたレーザー・MW 二重共鳴信号の強度評価, 日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学

10) 西坂太志, 今村慧, 江上魁, 涌井崇志, 松本未来, 藤田朋美, 富永大樹, 川口高史, 高峰愛子, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量不安定核の核構造研究へ向けた超流動ヘリウム中原子のレーザー誘起蛍光検出系の性能評価, 日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学

11) 今村慧, 古川武, 涌井崇志, 藤田朋美, 早坂美希, 松本未来, 江上魁, 富永大樹, 小田島仁司, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究へ向けたレーザー・RF/MW 二重共鳴信号の高強度化, 日本物理学会 2015 年年次大会, 2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学

12) T. Fujita, T. Furukawa, K. Imamura, X. F. Yang, A. Hatakeyama, T. Kobayashi, H. Ueno, K. Asahi, T. Shimoda, Y. Matsuo, OROCHI Collaboration: Laser spectroscopy of atoms in superfluid helium for the measurement of nuclear spins and electromagnetic moments of radioisotope atoms, The sixth international conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2014), 1-5 December, 2014, Takamatsu, Japan

13) T. Furukawa (招待講演): Spin polarization of radioisotope atoms with optical pumping in superfluid helium for the measurement of nuclear spins and electromagnetic moments, The 21st International Symposium on Spin Physics (SPIN2014), 20-24 October, 2014, Beijing, China

14) T. Furukawa (招待講演): OROCHI experiment: Laser spectroscopy of RI atoms in superfluid helium for measurements of nuclear spins and electromagnetic moments, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (HAWAII2014), 7-11 October, 2014, Waikoloa, Hawaii

15) K. Imamura, T. Furukawa, X. F. Yang, T. Fujita, T. Wakui, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, A. Hatakeyama, T. Kobayashi, H. Odashima, H. Ueno, Y. Matsuo: Hyperfine structure measurement of  $^{87}\text{Rb}$  atoms injected into superfluid helium as highly energetic ion beam, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (HAWAII2014), 7-11 October, 2014, Waikoloa, Hawaii

16) T. Fujita, T. Furukawa, K. Imamura, X. F. Yang, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, T. Sagayama, S. Kishi, T. Kobayashi, H. Ueno, T. Shimoda, Y. Matsuo: Sublevel laser spectroscopy of  $^{197}\text{Au}$  atom in superfluid helium, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (HAWAII2014), 7-11 October, 2014, Waikoloa, Hawaii

17) M. Hayasaka, T. Furukawa, H. Tomita, T. Takamatsu, K. Imamura, T. Fujita, T. Kobayashi, H. Uematsu, H. Ueno, Y. Matsuo: Effective production of spin polarization of atoms in superfluid helium using pulsed lasers, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (HAWAII2014), 7-11 October, 2014, Waikoloa, Hawaii

18) K. Imamura, T. Furukawa, X. F. Yang, Y. Mitsuya, T. Fujita, M. Hayasaka, T. Kobayashi, A. Hatakeyama, H. Ueno, H. Odashima, Y. Matsuo: Measurement of hyperfine splitting of  $^{133}\text{Cs}$  atoms in superfluid helium, The 5th Joint International Conference on Hyperfine Interactions and Symposium on Nuclear

Quadrupole Interactions (HFI/NQI 2014), 21-26 September, 2014, Canberra, Australia

19) X. F. Yang, T. Furukawa, K. Imamura, T. Fujita, T. Wakui, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, H. Shirai, T. Suzuki, T. Sato, Y. Otomo, Y. Kojima, Y. Ebara, S. Kishi, T. Sagayama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, T. Kobayashi, S. Nishimura, M. Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, S. Kubono, Y. Ohshiro, A. Hatakeyama, H. Ueno, T. Shinozuka, T. Shimoda, K. Asahi, and Y. Matsuo: A laser spectroscopy method using superfluid helium for measurements of spins and electromagnetic moments in exotic nuclei, 2nd conference on Advanced Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 1-6 June, 2014, University of Tokyo

20) K. Imamura, T. Furukawa, T. Wakui, X. F. Yang, Y. Mitsuya, T. Fujita, Y. Ebara, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, H. Shirai, T. Suzuki, T. Sato, Y. Ohtomo, S. Kojima, A. Hatakeyama, H. Odashima, T. Kobayashi, H. Ueno, K. Asahi, and Y. Matsuo: Measurement of hyperfine splitting of alkali atoms in superfluid helium for a laser spectroscopy of atoms with unstable nuclei, 2nd conference on Advanced Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 1-6 June, 2014, University of Tokyo

21) T. Fujita, T. Furukawa, K. Imamura, X. F. Yang, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, T. Sagayama, S. Kishi, T. Kobayashi, H. Ueno, T. Shimoda, Y. Matsuo: Measurement of hyperfine structure of Au atom in superfluid helium, 2nd conference on Advanced Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 1-6 June, 2014, University of Tokyo

22) 今村慧, 古川武, Xiaofei Yang, 藤田朋美, 三津谷洋助, 早坂美希, 小林徹, 畠山温, 上野秀樹, 小田島仁司, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中に植え込まれた Cs 原子の超微細構造間隔, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7-10 日, 中部大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古川 武 (FURUKAWA, Takeshi)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号: 33435680