

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14300

研究課題名(和文) 超流動ヘリウムを利用した中性子過剰In同位体の核電磁モーメント探索

研究課題名(英文) Search for the nuclear electro-magnetic moment of neutron rich Indium isotopes using superfluid helium

研究代表者

今村 慧 (IMAMURA, Kei)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・特別研究員

研究者番号：70783158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：自然界に存在しない不安定原子核において原子核の安定性を象徴する魔法数の消失・出現は非常に興味を持たれる現象の1つである。

当該研究は、中性子過剰二重魔法核であるSn(陽子数 $Z=50$ 、中性子数 $N=82$ )の近傍に位置するIn同位体( $Z=49$ 、 $N=80, 82$ )に着目し、高エネルギーイオンビームとして生成される不安定核種の停止媒質として超流動ヘリウムを利用するレーザー分光法を適用し核電磁モーメント探索を行うものである。この手法適用へ向けて、レーザー光源の開発を始めとし、レーザー・マイクロ波二重共鳴法を用いた測定手法や、イオンビームを利用した装置試験などの要素開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当該研究は原子核の安定性にかかわる魔法数について知見を得るために展開された研究である。自然界に存在する安定核種の魔法数は、原子核の殻モデルと知られる理論により説明可能であり、普遍のものであると信じられてきたが、近年の研究により自然界に存在しない不安定核種において消失・出現することが明らかになってきた。このような原子核の安定性に大きくかかわる性質を明らかにすることは、原子核を統一的に理解するうえで学術的な貢献は大きく、ひいては現代社会が必要とする原子核工学への貢献も期待できる。当該研究の成果は手法適用にこそ至らなかったものの、適用へ向けた各要素開発を大きく進展させることができた。

研究成果の概要(英文)：In nuclear physics, appearance or dis-appearance of magic number of atomic nucleus in the region of far from stability is one of attracting phenomena in past few decades. This research subject has aimed at searching the nuclear electro-magnetic moment of neutron rich In isotopes whose proton number  $Z$  equals 49, and whose neutron numbers  $N$  are 80, and 82. Indium isotopes are located at around the double magic number nucleus of Sn ( $Z=50$ ,  $N=82$ ). In order to deduce nuclear electro-magnetic moment of such isotopes, we are developing a laser spectroscopy technique utilizing superfluid helium as an effective stopper for highly energetic ion beam. In this research subject, we performed R&D studies as listed below: (i)Construction of pulsed laser source, (ii)Development of the measurement method using laser-microwave double resonance method, and (iii)Evaluating the stopping efficiency of ion beam in superfluid helium using beam energy of 350 MeV per nucleon.

研究分野：数物系科学

キーワード：超流動ヘリウム レーザー分光 核モーメント

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

加速技術の進展は自然界に存在する安定領域から遠く離れた不安定核の生成を可能にしてきた。このことにより、安定核種を基盤として構築された原子核理論では説明できない現象が数多く確認されている。特に、殻モデルを用いて説明される、原子核の安定性を表す魔法数の消失・出現は非常に興味を持たれる現象である。

当該研究では、我々がこれまで開発を行ってきた超流動ヘリウムを高エネルギーイオンビームの停止媒質として利用したレーザー分光法を中性子過剰二重魔法核である Sn(陽子数  $Z=50$ , 中性子数  $N=82$ )の近傍に位置する In 同位体に適用することを目論むものである。このために、必要となるレーザー光源を始めとした装置開発を行う。超流動ヘリウム環境中に不安定 In 同位体を導入し、スピン偏極生成及び超微細構造間隔測定から核電磁モーメント導出することで、この質量領域における原子核の魔法性についての議論を目指す。

### 2. 研究の目的

当該研究では、中性子過剰である In 不安定同位体の核電磁モーメントを決定することで、この領域における原子核の魔法性を検証すべく、超流動ヘリウム環境を利用したレーザー分光法の適用を目指すものである。安定領域から遠く離れた原子核は通常、核反応を利用し高エネルギーのイオンビームとして生成される。これを高効率で減速・中性化・停止させる媒質として我々は高密度媒質の超流動ヘリウムに着目し、レーザー分光法を利用した核構造研究手法の開発を行ってきた。

この手法は超流動ヘリウムが有する高いビーム停止能と、同環境における原子が示す特異な振る舞いを利用することで高効率かつ低バックグラウンドの測定環境が実現可能であり、特に生成量が少ない原子核種への適用が期待されている。当該研究ではこの手法を実際に不安定 In 同位体に適用すべく、高い効率で In 原子の励起を行うためのパルスレーザー光源を始めとする要素開発を行い核電磁モーメント探索に着手する。

### 3. 研究の方法

#### (1)スピン偏極と超微細構造間隔の測定

核モーメントの導出は原子核と原子の軌道電子が電磁的に相互作用することで生じる微細なエネルギー差である超微細構造間隔を測定することで行う。そのために、レーザーを利用し原子のスピン偏極状態を生成し、超微細構造間隔に相当する周波数を持つマイクロ波で遷移を起こすレーザー・マイクロ波二重共鳴法を利用する。

この手法では、まず初めに円偏光のレーザーを原子に照射し原子のスピン状態が偏った偏極状態を生成する。スピン偏極していない原子は、レーザーで励起され脱励起の際に蛍光を放出するが、スピン偏極原子は選択則によりレーザーでの励起が禁止されるため、スピン偏極状態が生成されると蛍光が消失する。そこに、マイクロ波を照射すると超微細構造間のエネルギー差に相当する周波数で共鳴が起こり、スピン偏極状態が崩壊し蛍光が観測されるようになる。

以上のように、スピン偏極原子に対しマイクロ波を周波数掃引しつつ照射することで、蛍光強度の変化から超微細構造間隔を測定することが可能となる。

#### (2)超流動ヘリウム中への高エネルギーイオンビーム入射

3-(1)の手法を用いて原子エネルギー準位に現れる超微細構造間隔の測定から核電磁モーメント探索を行うのであるが、当該研究で測定対象となる不安定 In 同位体は高エネルギーイオンビームとして生成されることに加え、生成量が秒間 10 個程度であるため、これを高効率でレーザー分光環境内に導入することが必要となる。そのために、我々は低温液体である超流動ヘリウムをイオンビームの減速・中性化・停止媒質として利用する。

超流動ヘリウムを保持するクライオスタット内に、二重共鳴法を適用するために必要な偏極保持用静磁場コイル、MW 照射用アンテナを設置し、そこにイオンビームを打ち込む。入射イオンビームのエネルギーは、クライオスタット前段に厚さ可変の Al エネルギー減衰板を設置することで、レーザー照射位置にビームが停止するように調整を行う。

#### 4. 研究成果

当該研究で得られた成果は(1)In 用パルス励起光源開発, (2)超流動ヘリウム環境を利用した超微細構造間隔測定手法開発, (3)高エネルギーイオンビームの停止分布の推定, の3つの要素に分かれている. 各要素について得られた成果を以下に記述する.

##### (1)励起光源開発

超流動ヘリウム環境を利用したレーザー分光法の不安定 In 同位体への適用に向けて, 同環境下でスピン偏極生成を行うためのレーザー光源が必要となる. 超流動ヘリウム中に原子を導入すると, 導入原子の軌道電子が周囲の He 原子と相互作用することにより, 励起波長が真空中の値からシフトする. これは, 導入原子と He との間に原子バブルと呼ばれる空乏領域が形成されるためである. 原子の励起・脱励起の際に生じる波動関数の変化に応じてバブルは変形するため, 励起の際の吸収波長と脱励起の際の吸収波長ではシフト量が異なり, これを利用することで低バックグラウンドの蛍光検出を行うことができる. 超流動ヘリウム中での In 原子の励起波長は 370 nm と真空中に比べ 41 nm 波長がシフトし, 線幅が半値全幅で 14 nm もあることが知られている. 紫外領域にける線幅の広い遷移を効率よく励起させるために, 瞬間的に高強度のレーザー出力を得られるパルスレーザー(図 1)を開発した.

開発光源ではレーザー利得媒質として Ti:Sa 結晶を用いた. Ti:Sa 結晶は Z 字型の共振器に組み込まれ, kHz 繰り返しの Nd:YLF レーザー(波長:527 nm, パルス時間幅:200 ns)で結晶を励起することで近赤外の 760 nm のレーザーパルスを得ることができる. この 760 nm の光を基本波として, LBO 結晶を用いた第二高調波発生を利用することで目的の 370 nm の光を発生させる. 開発光源では, 高調波発生用の LBO 結晶も Z 字型の共振器内に組み込まれた, 内部共振器型を採用しており最終的に~100 mW 程度(ピーク強度:~10kW/cm<sup>2</sup>)の出力が得られることを確認した. また, この光源を用いて In の励起実験を行い, 脱励起光の観測にも成功している.

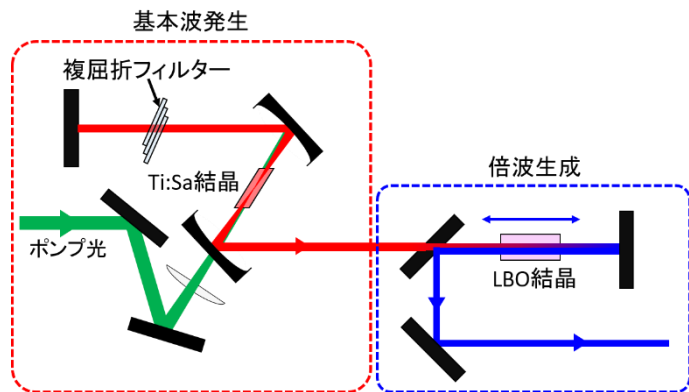


図 1. 開発したパルスレーザー光源の概略図. 初段の Ti:Sa 結晶で近赤外の光を発生させ, 次段の LBO 結晶で第二高調波発生を利用し, 目的の 370 nm の光を得る.

##### (2)超流動ヘリウム中の超微細構造間隔測定手法開発

当該研究では核電磁モーメントを導出するために, 上述の光源で In のスピン偏極状態を生成し, マイクロ波を照射することで超微細構造間隔の測定を行う必要がある. 超微細構造間隔の測定時には蛍光強度の変化を観測して行うが, この時, 蛍光強度は観測領域内に存在する原子数に依存する, 原子数がほとんど変化しない定常状態あるいは, 多量の原子が存在する様な環境であれば, 原子数依存の信号強度の変化は統計を稼ぐことで無視できるようになるが, 当該研究で扱う様な収量の限られた環境ではこの依存性を補正する必要が生じてくる. そこで, 我々は観測領域内の原子数を補正しつつ, 二重共鳴法を行う手法開発を行った.

3-(1)の測定法で述べたように二重共鳴法を適用する際には, 原子スピンの偏極状態を生成する必要があるため, 円偏光のレーザーを照射する. この時, 偏極した原子は蛍光を放出せず, マイクロ波で共鳴が起こると蛍光が復活する. 一方, 原子に直線偏光のレーザーを照射した場合を考えると, スピン偏極状態は生成されないため常に観測領域にいる全ての原子が蛍光を放出することになる. そのため, 直線偏光を用いることで観測領域内の原子数にのみ依存した信号を得ることができる.

このレーザーの偏光状態により, 得られる信号強度の依存性の違いを利用し, 原子数の補正を偏光切り替えで行うシステムを導入し検証を行った.

システム検証にはこれまで超流動ヘリウム中での超微細構造間隔の測定例が報告されている Rb を用いた. ヘリウム中への Rb 導入は, 固体の RbCl 試料をレーザーアブレーション法でスパッタ

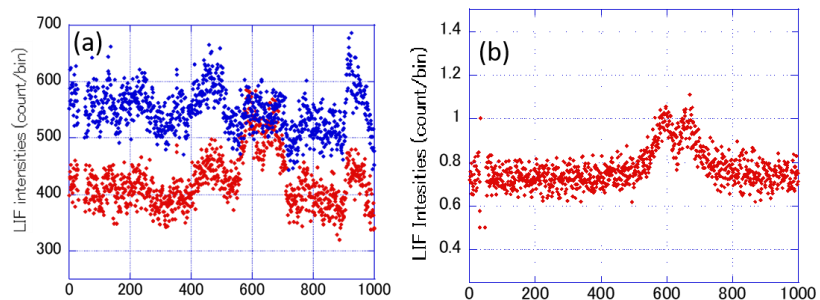


図 2. 原子数補正システムの検証結果. (a)上段青プロットが直線偏光照射時の信号変化, 下段赤プロットが円偏光照射時の信号変化をそれぞれ表す. (b)補正後のスペクトル. 原子数変化に由来するベースラインの揺らぎが消え, スペクトルの判別が容易になることが確認できる

リングし行った。レーザーの偏光の切り替えは電気光学変調器を用いており、1ms ごとに円/直線偏光を切り替えてスペクトルを観測した。この測定法を利用することによって、アブレーション法で導入される原子の供給数に由来する信号強度変化を補正可能であることが確認され、その有効性を実証した(図 2)。

また、上記と並行して紫外領域のパルスレーザーを用いた超微細構造間隔測定精度の検証を目的とし、エネルギー準位が In に比べ簡便で高いスピン偏極を得やすい Ag 原子を用いた実験も実施し、二種の安定同位体の超微細構造間隔を測定することに成功している。

### (3)高エネルギーイオンビームの停止分布の推定

超流動ヘリウム中へイオンビームを打ち込み停止させる手法は、これまで核子当たりのエネルギーが 50 MeV 程度の領域では実績があり、特に、我々がこれまで行った核子当たり 66 MeV に加速された Rb ビームを利用した結果は打ち込み深さ 1 mm 程度の領域にすべてのイオンを停止可能であることが確認されている。しかしながら、今回測定対象とする In 不安定同位体は核子当たり 300 MeV 以上のエネルギーで生成されるため、このエネルギー領域におけるビームの停止効率を推定するための実験を行った。

実験は放射線医学総合研究所が所有する HIMAC 施設を使用した。1 次ビームとして、kr(核子当たり 350 MeV)ビームを用い、これを 12 mm 厚の Be 標的へ照射し、核破砕反応で生成される Rb で実験を行った。なおこの実験は同施設における安全管理の都合により、液体ヘリウムは使用せず、超流動ヘリウム環境を保持するクライオスタットを予備冷却する際に使用している液体窒素を停止媒質として実験を行った。液体窒素中での停止効率の測定とシミュレーション結果を比較することで、超流動ヘリウム環境を用いた場合の停止効率を見積もった。

停止効率の測定は前述のクライオスタット中心部にプラスチックシンチレーターを、クライオスタット前段に Al エネルギー減衰板を設置し行った。Al 減衰板の厚さを変化させることで、クライオスタット内に入射するビームエネルギーを調整し、プラスチックシンチレーターに到達するイオン数を光強度として観測した。解析の結果、このエネルギー領域ではビームの打ち込み深さは、超流動ヘリウム中において 6 mm 程度まで広がることが判明した。さらに、クライオスタットに入射するビームの横モードの推定と合わせて、おおよそ 10%程度の効率でビームを観測領域内に停止させることが可能だと結論付けた。

今後、これらの要素開発の結果を踏まえ中性子過剰 In 同位体の核電磁モーメント探索や、当該研究中でも測定資料として取り扱った Ag の遠不安定同位体への手法適用などに着手してゆく。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 K. Imamura, Y. Matsuo, W. Kobayashi, T. Egami, M. Sanjo, A. Takamine, T. Fujita, D. Tominaga, Y. Nakamura, T. Furukawa, T. Wakui, Y. Ichikawa, H. Nishibata, T. Sato, A. Gladkov, L. C. Tao, T. Kawaguchi, Y. Baba, M. Iijima, H. Gonda, Y. Takeuchi, R. Nakazato, H. Odashima, H. Ueno	4. 巻 12
2. 論文標題 Absolute optical absorption cross-section measurement of Rb atoms injected into superfluid helium using energetic ion beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 016502-1 - 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.7567/1882-0786/aaf0a9">https://doi.org/10.7567/1882-0786/aaf0a9</a>	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 W. Kobayashi, K. Imamura, M. Sanjo, T. Fujita, A. Takamine, T. Furukawa, H. Ueno, Y. Matsuo	4. 巻 52
2. 論文標題 Introducing silver atoms into superfluid helium for precision laser spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Sanjo, K. Imamura, W. Kobayashi, Y. Takeuchi, A. Takamine, T. Furukawa, H. Ueno, Y. Matsuo	4. 巻 52
2. 論文標題 Baseline correction system of laser-microwave double resonance spectrum for atoms injected into superfluid helium by laser sputtering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 矢田智昭, 今村慧, 富田英生, V. Sonnenschein, 三條真, 藤田朋美, 小林航, 戸塚克, 土井一步, 小林徹, 高峰愛子, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利
2. 発表標題 超流動ヘリウム中In原子の偏極生成に向けたパルスTi:Saレーザーの開発
3. 学会等名 2018年度「物質階層原理研究」と「ヘテロ界面研究」合同春合宿
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢田智昭, 今村慧, 富田英生, V. Sonnenschein, 三條真, 藤田朋美, 小林航, 戸塚克, 土井一步, 小林徹, 高峰愛子, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利
2. 発表標題 超流動ヘリウム中In原子の偏極生成に向けたパルスTi:Sapphireレーザーの開発及び蛍光観測実験
3. 学会等名 第15回原子・分子・光科学(AMO)討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林航, 今村慧, 三條真, 藤田朋美, 高峰愛子, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利
2. 発表標題 超流動ヘリウム中Ag原子に対する二重共鳴分光実験
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三條真, 今村慧, 小林航, 竹内由衣花, 高峰愛子, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利
2. 発表標題 超流動ヘリウム中Rb原子の超微細構造間隔測定のための観測原子数補正システム
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 IMAMURA Kei et al.
2. 発表標題 Development of the high sensitive atomic laser spectroscopy using superfluid helium for the study of nuclear structure of rare-isotopes
3. 学会等名 The third International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 螺良健太, 今村慧, 高峰愛子, 西村昌輝, A. Gladkov. 竹内由衣花, 土居三瑠, 山本匠, 田島美典, 浅川拓光, 佐々木悠輔, 土井一步, 川田敬太, 西畑洗希, 市川雄一, 上野秀樹, 松尾由賀利
2. 発表標題 核モーメント測定法開発のための光学用クライオスタットにおけるRbの収量測定
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村昌輝, 今村慧, 高峰愛子, 螺良健太, Aleksey Gladkov, 竹内由衣花, 土居三瑠, 山本匠, 田島美典, 浅川拓光, 佐々木悠輔, 土井一步, 川田敬太, 西畑洗希, 市川雄一, 上野秀樹, 松尾由賀利
2. 発表標題 液体窒素環境下における高速Rbイオンビームの停止位置制御
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Kobayashi, Kei Imamura Tsuyoshi Egami, Taishi Nishizaka, Aiko Takamine, Tomomi Fujita, Daiki Tominaga, Makoto sanjo, Yutaro Nakamura, Yuichi Ichikawa, Tomoya Sato, Hiroki Nishibata, Alecsay Gradkov, Longchun Tao, Takafumi Kawaguchi, Takeshi Furukawa, Takashi Wakui, Hideki Ueno, Yukari Matsuo.
2. 発表標題 Development of a low-background detection system for the laser-induced fluorescence from the atoms injected into superfluid helium
3. 学会等名 The third International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sanjo, K. Imamura, A. Takamine, T. Fujita, T. Egami, D. Tominaga, W. Kobayashi, Y. Nakamura, T. Wakui, T. Furukawa, H. Ueno, and Y. Matsuo
2. 発表標題 Optimization of the measurement conditions in the laser-microwave double resonance for the atoms injected into superfluid helium
3. 学会等名 The third International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 W. Kobayashi, K. Imamura, T. Egami, T. Nishizaka, M. Sanjo, T. Fujita, D. Tominaga, Y. Nakamura, A. Takamine, Y. Ichikawa, T. Sato, H. Nishibata, A. Gladkov, L. C. Tao2, T. Kawaguchi, T. Wakui, T. Furukawa, H. Ueno, and Y. Matsuo
2. 発表標題 Development of a new fluorescence detection system for a small amount of atoms in superfluid helium
3. 学会等名 24th Congress of the International Commission for optics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sanjo, K. Imamura, A. Takamine, T. Fujita, T. Egami, D. Tominaga, W. Kobayashi, Y. Nakamura, T. Wakui, T. Furukawa, H. Ueno, and Y. Matsuo
2. 発表標題 Searching optimum measurement conditions of the laser-microwave double resonance for the atoms stopped in superfluid helium
3. 学会等名 24th Congress of the International Commission for optics
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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