

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03659

研究課題名(和文) “逆転の島” の中心核の構造解明：異分野共同による挑戦

研究課題名(英文) Study of neutron-rich nuclei in "island of inversion" by nuclear physics and atomic physics

研究代表者

小田原 厚子 (Odahara, Atsuko)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30264013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：「逆転の島」と呼ばれる魔法数20近傍の中性子過剰核は、魔法数の性質を失い、変形しているという報告以来、様々なグループによって研究が行われてきた。我々はスピン偏極した原子核の崩壊の非等方性から娘核のスピン・パリティを決定できるという独自の手法で構造解明を進めてきた。しかし、その中心核である $^{32}\text{Na}$ は生成が難しいことから、基底状態の超微細構造でさえいまだ決定できていない。本研究では、毎秒100個以下という非常に少ない生成量の不安定核でも超微細構造を測定可能な新奇レーザー分光法の開発を行った。この手法の確立により、中性子過剰核の測定限界を安定核からさらに遠くへと広げることができる。

研究成果の概要(英文)：The neutron-rich nuclei in "island of inversion" around  $N=20$  have exotic structure, which is the disappearance of magic number 20 with deformed shape. We have systematically studied nuclear structure of these nuclei by our unique method which can exactly determine the spin-parity by the beta decay of spin-polarized nucleus. In order to produce high polarization, information of hyperfine structure is needed. We developed new laser spectroscopy method to determine hyperfine structure of atoms of neutron-rich nuclei with beam intensity of  $< 100$  particles per second. By using this new method, not only hyperfine structure but also the nuclear structure of the ground state can be investigated. After developing the spin-polarized beam, we can study nuclear structure of the excited states in neutron-rich nuclei far from beta-stability line.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：スピン偏極ビーム 超微細構造 新奇レーザー分光法の開発 中性子過剰核  $^{32}\text{Na}$   $^{32}\text{Mg}$  魔法数20の消失 スピン・パリティの決定

1. 研究開始当初の背景

中性子の数が魔法数 20 に近く、陽子が非常に少ない中性子過剰核は、「魔法数近傍の原子核は球形である」という素朴な予測に反して大きく変形していることが発見されてから久しい。“逆転の島 (island of inversion)” と名付けられたこの領域の不安定核の構造の解明は、原子核物理学における重要な課題と位置づけられてきた。さらに、この質量領域の原子核は、宇宙における元素合成の道筋に位置し、その構造解明は天体核物理学においても重要なテーマの 1 つである。

殻模型的にはこの現象を中性子数に対する単一粒子軌道の変化として説明されてきた。すなわち、中性子数 20 閉殻の上に位置する fp 軌道のエネルギーが、中性子数を増やすにつれて下がる。よって、sd 軌道にいる (normal 状態) はずの中性子の fp 軌道を占めている状態 (粒子・空孔状態、intruder 状態とも言う) の存在確率が大きくなり、また、その状態は残留相互作用によってエネルギーが下がる。従って、基底状態およびその近傍の状態では、このような配位の混合が多く生じている。集団運動的には、基底状態が大きく変形すると説明できる。さらに、励起状態においては様々な多粒子・多空孔状態が出現する可能性が高く、つまり、様々な変形状態、振動モード、回転状態が出現 (変形共存) することが期待できる。

そこで、我々のグループでは、“逆転の島” に位置する原子核のこのような現象を明らかにし、発生機構を解明するために、スピン偏極した (スピンの向きが偏った) 原子核のベータ崩壊の非等方性 (パリティ非保存による: 図 1) を利用し、娘核の状態のスピン・パリティを一義的に決定するという我々独自の高感度な手法で研究を進めてきた。

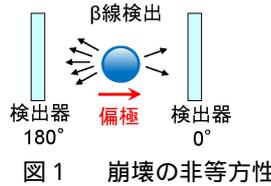


図 1 崩壊の非等方性

カナダの TRIUMF でレーザー光ポンピング法を用いて世界最高偏極度の偏極ビームの生成に 2000 年代はじめに成功した。図 2 に Na 原子の場合の超微細構造とレーザー光ポンピングの概念図を示す。我々は、2 つに分離した基底状態の両方を 2 本の異なる波長のレーザーでポンピングすることで、高偏極度を達成することができた。その後、約 10

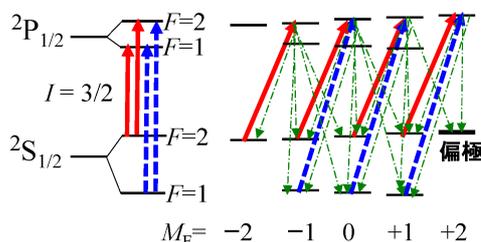


図 2 Na 原子 (核スピン 3/2 : D1) の超微細構造 (左) とレーザー光ポンピングの概念図 (右)

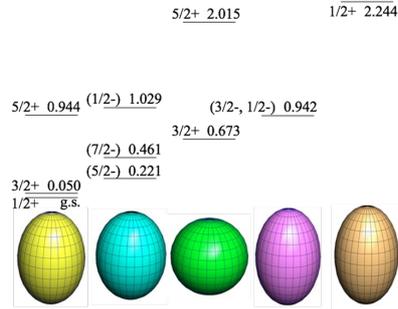


図 3 <sup>31</sup>Mg で観測された変形共存

年前から、偏極 <sup>28</sup>Na、<sup>29</sup>Na、<sup>30</sup>Na、<sup>31</sup>Na 核の崩壊後の娘核 <sup>28</sup>Mg (N=16)、<sup>29</sup>Mg (N=17)、<sup>30</sup>Mg (N=18)、<sup>31</sup>Mg (N=19) 核の構造の系統的な研究を進めてきた。中性子数が増えるに従って、基底状態は変形し、また、<sup>31</sup>Mg の励起状態では、ほぼ同じ励起エネルギー領域で同じスピン・パリティをもちながら、異なる構造を示す変形共存状態の出現が明らかとなった (図 3)。

次はいよいよ、“逆転の島” の中心原子核である <sup>32</sup>Na と <sup>32</sup>Mg の原子核構造の解明である。2014 年の段階で、TRIUMF ではおよそ毎秒 100 個の <sup>32</sup>Na ビームの生成に成功した。<sup>32</sup>Na 核では、基本的な物理量である基底状態のスピンも核磁気モーメントも未知であることから推察されるように、世界のどこも手を出せていない。ビーム強度の壁はそれほど高い。

2. 研究の目的

いよいよ“逆転の島” の中心に位置する <sup>32</sup>Na と <sup>32</sup>Mg の構造を明らかにするためには、高偏極度の <sup>32</sup>Na ビームが必要である。図 2 に示すように、2 本の異なる波長のレーザーを用いて、レーザー光ポンピング法で高偏極度を達成するには、超微細構造の情報が必要不可欠である。通常のレーザー分光法で超微細構造を測定する場合、毎秒 10<sup>3</sup> 個以上のビーム量が必要である。しかし、<sup>32</sup>Na ビームの場合、毎秒 100 個のビーム供給が TRIUMF でやっと可能になったばかりである。そこで、収量が極めて少ない (毎秒 100 個以下) の不安定核原子でも超微細構造を測定可能な新奇レーザー分光法を開発することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

毎秒 100 個以下という非常にビーム量の少ない不安定原子核原子の超微細構造を測定するためには、高感度、かつ、低バックグラウンドの新奇レーザー分光法を開発しなければならない。そこで、今回、以下の我々独自の方法で開発を進めた。

- ( ) 高感度光検出器システムの開発
- ( ) 高感度レーザー分光法の開発

散乱レーザー光によるバックグラウンドを除去するため、検出する蛍光の波長と異なる入射レーザー光を用いた。

- ( ) レーザー共鳴イオン化法

不安定核原子を2種類の異なる波長のレーザーを用いてイオン化し、このイオンを測定することで、散乱レーザー光は影響しない低バックグラウンド測定を目指した。

まず、はじめに、偏極ビームラインと共鳴ピークの探し方について説明し、その後、本研究で行った上記3つの開発について詳しく解説する。

(1) 偏極ビームラインと共鳴ピークの探査

図4に TRIUMF の偏極ビームラインの概略図を示す。Na 原子の場合、40 keV のビームエネルギーの1価のイオンとしてこの偏極ビームラインに輸送されてくる。そこで、Na 原子を中性化するために、図中の Rb ガスを充填した中性化セルを通過させる。中性化した Na に対して、前方からレーザーが照射されるため、ドップラーシフトを受ける。Rb セルには0から -1kV まで電圧を変化させ、Na イオンの速度を変化させることができる。Na イオンから放出される蛍光は、Rb セルの後方0.4 m 下流に設置された高感度光検出器システムで測定する。よって、レーザーの波長は固定であるが、Na イオンの速度を変化させることで、ドップラーシフトの効果により、入射光の波長を変化させながら Na イオンから放出される蛍光を測定し、共鳴ピークを探す(スキャンする)ことができる。中性 Na 原子ビームはさらに下流の He ガスセルを通過し、再びイオン化する。イオン化した Na ビームはディフレクターによって大阪ビームラインの方向に曲げられ、ディフレクター後方に設置されたチャンネルトロンで検出される。

チャンネルトロン(Na イオン検出)と高感度光検出器システム(蛍光検出)の同時測定を行うことで、散乱レーザー光を劇的に減らすことが可能となる。

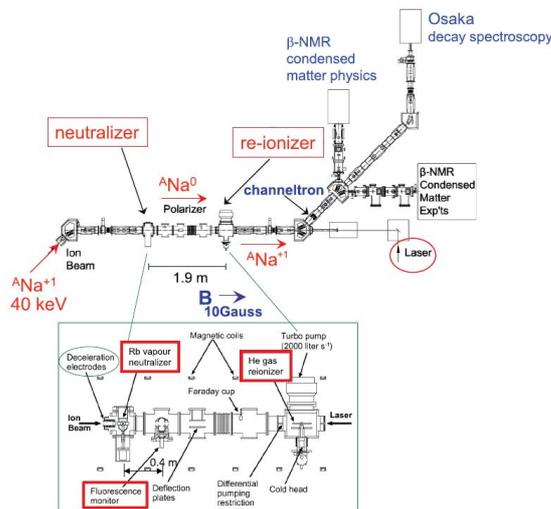


図4 TRIUMF 偏極ビームライン

(2) 高感度光検出器システムの開発

ビーム量が少ないため、高感度で低バックグラウンドの検出器システムが必要である。そこで、光の収集効率をあげるために球面ミ

ラーを組み込んだ。光検出器として、小型でかつ量子効率の高い光電子増倍管(PMT)を使用することにした。球面ミラーからレンズを通して PMT まで最大の集光率が得られるよう、シミュレーションを行って最適化した。その結果、従来は大型の球面ミラーが使用されてきたが、小型の方が効率が良いことが分かった。PMT はノイズを減らすために冷却機構が必要であり、それを組み込んだシステムを設計し、製作した。図5に新たに製作した検出器システムの概略図を示す。

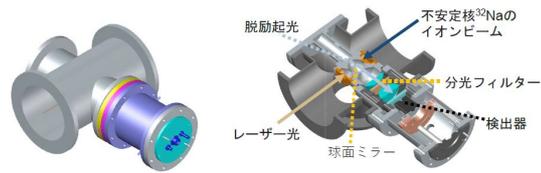


図5 新たに製作した高感度光検出器システム

(3) 高感度レーザー分光法の開発

バックグラウンドの主な原因は入射レーザーの散乱光である。散乱光を除去するために、不安定核原子を励起させる入射レーザー光の波長と脱励起光(蛍光)の波長が異なるものを選ぶという方法を採用した。次の2つの方法で試みた。

330 nm レーザー光、589 nm 脱励起光検出

図6に簡単な Na 原子のエネルギー準位を示す。図6(a)は、330 nm のレーザー光を用いて、Na 原子を  $3s_{1/2}$  の基底状態から  $4p_{1/2,3/2}$  の状態に励起し、その後、いくつかのパスを通った後、最終的に 589 nm の蛍光を放出して  $3p_{1/2,3/2}$  状態から基底状態に脱励起する。このように大きく波長が異なるため、589 nm の蛍光を検出すれば、330 nm の散乱光を大幅に減らすことができる。

590 nm レーザー光、589 nm 脱励起光検出

330 nm の光で励起するよりも、図6(b)に示すように、レーザーで基底状態から  $3p_{1/2,3/2}$  状態に励起し、その状態から脱励起する 589 nm の光を検出する方が脱励起光の光収集効率が良いことが期待できる。この方法を次に実施した。入射レーザー光は、脱励起光と同じ 589 nm が必要であるが、Na イオンはレーザー光の方向に動いているためドップラーシフトを受け、実際には 590 nm 固定波長の入射レーザー光を使用できる。しかし、入射レーザー光と脱励起光の波長の差はわずか 1 nm である。そこで、589 nm を中心にして幅

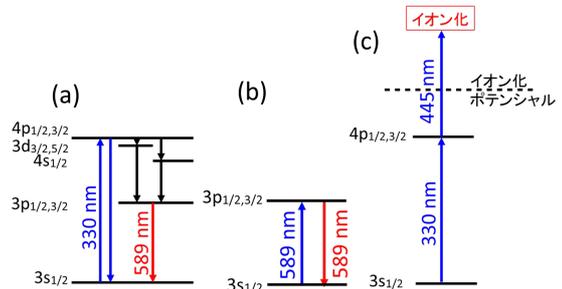


図6 新奇レーザー分光法

1 nm の光のみを通過させる光フィルターを PMT の前に設置した。

#### (4) レーザー共鳴イオン化法

図 6(c) に示すように、1 本目の 330 nm のレーザー光で基底状態から  $4p_{1/2,3/2}$  の状態に励起し、さらに、2 本目の大強度 445 nm レーザー光でイオン化ポテンシャルよりも上の状態に励起させる。つまり、Na 原子はイオン化する。光ではなく、イオンを検出するので、散乱レーザー光のバックグラウンドは問題ない測定法である。

### 4. 研究成果

新奇レーザー分光法の開発実験は、TRIUMF で、安定核  $^{23}\text{Na}$  原子ビームを用いて行った。2016 年 4 月に新しい高感度光検出器システムの性能テスト実験を行った結果、TRIUMF の旧システムと比べて、約 3.4 倍も大きな相対検出効率を得ることができた。超高感度レーザー分光法の開発を 2017 年 7 月に 330 nm レーザーと 590 nm レーザーで実施した。さらに、11 月にレーザー共鳴イオン化法の開発実験を実施した。

以下にその結果を示す。

#### (1) 高感度レーザー分光法

330 nm レーザー光、589 nm 脱励起光検出  
図 6(a) に示すように、330 nm のレーザーで、今回は  $3sS_{1/2}$   $4pP_{3/2}$  (D2) で励起し、589 nm の脱励起光  $3pP_{3/2,1/2}$   $3sS_{1/2}$  を測定した。レーザーと脱励起光の波長は大きく異なるにもかかわらず、散乱レーザー光のバックグラウンドは多かった。そこで、イオンと光を同時計測することで、バックグラウンドを劇的に減らすことに成功した (この 590 nm レーザーの場合にその効果を示す)。その結果、毎秒 1000 個程度のビーム量で測定可能であることが分かった。しかし、あと 20 倍の発光量が必要であるため、次の 590 nm レーザー光の開発実験を行った。

590 nm レーザー光、589 nm 脱励起光検出  
ドップラーシフトによる 1 nm の波長の違いを利用した方法である。Rb ガスセルの位置にある電圧を変化させながら (Na イオンに対するレーザーの波長を変更させることに対応：バイアス・スキャン)、高感度光検出器システムで Na から放出された蛍光を測定し、2 本の共鳴ピークを探することで、基底状態が 2 本に分離した超微細構造のエネルギー差 (波長の差) を測定することができる。図 7 は横軸に電圧、縦軸はその電圧のときに測定された蛍光の数をプロットしたものである。安定核  $^{23}\text{Na}$  ビームの量は毎秒 5000 個であり、レーザー強度は 1.5 mW、3 時間の測定である。図 7(a) は PMT に入ってきた光をすべてプロットしたものであり、散乱レーザー光が多いため、共鳴ピークを観測出来なかった。そこで、バックグラウンドを減らすために、

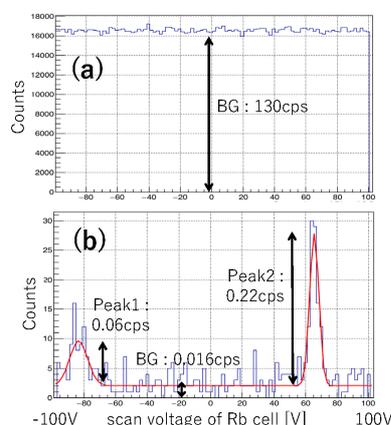


図 7 スキャン電圧に対する蛍光スペクトル。Na イオンとの同時計測(a)なしと(b)あり。

述べたように、下流に設置したチャンネルトリオンで Na イオンを検出し、それと同時に測定された光のみを選び出したスペクトルが図 7(b) である。図から分かるように、我々は毎秒 5000 個という非常に少ないビーム量で共鳴ピークの測定に成功した。バックグラウンドの高さは、毎秒 130 から 0.016 カウントに約  $10^4$  倍も下げることができた。ピークとバックグラウンドの比 (P/BG) は、Peak1 [ $3sS_{1/2}$  ( $F=1$ )  $3pP_{3/2}$  ( $F'=0-2$ )] と Peak2 [ $(F=2)$  ( $F'=1-3$ )] (図 8 左を参照) のそれぞれで、4 と 14 という高い値を得ることができた。

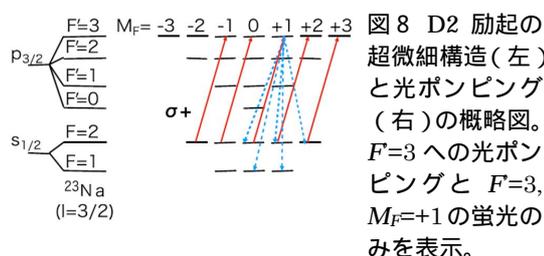


図 8 D2 励起の超微細構造 (左) と光ポンピング (右) の概略図。  $F=3$  への光ポンピングと  $F=3$ ,  $M_F=+1$  の蛍光のみを表示。

より多いピークのカウント数を得るため、次に、レーザー強度を 35mW まで増強した。図 9(a) は毎秒  $2 \times 10^5$  個でバイアス・スキャンを 2 時間行ったスペクトルである。その結果、Peak1 も Peak2 もそれぞれ 2.5 倍、3.3 倍カウント数が多くなった。しかし、P/BG を 1.5 mW の時と比較してみると、Peak1 と Peak2 でそれぞれ 1 と 5 となり、レーザーのパワーが大きくなると逆にバックグラウンドが増加した。

さらに、カウント数を増やし、かつ、S/N 比を改善する方法として、入射レーザーを円偏光させることにした。図 9(b) は、35 mW の円偏光レーザー、ビーム強度  $2 \times 10^5$  個の条件下で 2 時間測定したスペクトルである。Peak1 は観測出来なくなったが、Peak2 はカウント数が円偏光しない場合と比較して約 1.4 倍と多くなり、S/N 比も 5 から 8 へと向上した。この理由は、図 8 右の図が示すように、円偏光レーザーのために光ポンピング現象が生じ、最終的に、( $F=2$ ,  $M_F=+2$ ) ( $F=3$ ,  $M_F=+3$ ) の状態の間で励起と脱励起が繰り返さ

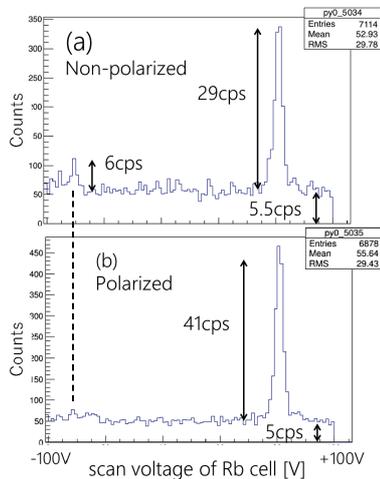


図9 スキャン電圧に対する蛍光スペクトル。  
(a)通常レーザー、(b)円偏光レーザー。

れる。このために Peak2 のみが強調されたピークとして観測された。

### (2) レーザー共鳴イオン化法

今回、330 nm レーザー (4 mW) と大強度 445 nm レーザー (2W) を使用して、安定核 Na のレーザー共鳴イオン化法を試みた。粒子を測定するので、散乱レーザーの影響はない。しかし、実際は、P/BG が Peak1 と Peak2 で、0.003 と 0.005 と蛍光測定よりも高いバックグラウンドレベルとなった。これは、ガスセルを使用しているために、真空度が十分でないために残留ガスをレーザーがイオン化する現象が一因だと思われる。これを解決するために、まず、ビームラインの真空の改善しなければならない。次に、ビームをバンチ化し、また、レーザーもパルス化し、チャンネルトロンでの Na イオンの検出と同期させる。その結果、イオンへのレーザーの照射効率を上げることができ、かつ、バックグラウンドのイオンを劇的に取り除くことが期待できる。今後の TRIUMF の 5 年計画の中の一つとして、この手法を開発していくことになった。

### (3) まとめ

次は、不安定核  $^{32}\text{Na}$  ビームで、実際に今回開発した高感度レーザー分光法を実施する予定である。我々がアサインされている 3 日間のピータイムで、毎秒 100 個の  $^{32}\text{Na}$  の超微細構造を測定するには、今回の結果をもとにして、次の手順で行う。

円偏光 590 nm レーザーを用い、589 nm の蛍光を測定することで、Peak2 の共鳴ピークをバイアス・スキャンして探す。

この条件では、Peak1 の観測は難しいので、より感度の良い偏極核の崩壊の非等方性を利用する。

まず、この情報から、崩壊の非等方性測定で Peak2 を確認し、その後、Peak1 の位置は予測できるのでバイアス・スキャンで探す。

実験は 2018 年冬頃に実施予定である。

## 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 2 件)

H. Nishibata, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, S. Kanaya, A. Yagi, H. Kanaoka, M.R. Pearson, C.D.P. Levy, M. Kimura, Shape coexistence in the  $N = 19$  neutron-rich nucleus  $^{31}\text{Mg}$  explored by  $\beta$ - $\gamma$  spectroscopy of spin-polarized  $^{31}\text{Na}$ , Phys. Lett. B **767** (2017) 81 - 185. (査読あり) <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2017.01.049>

H. Nishibata, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, S. Kanaya, A. Yagi, H. Kanaoka, M.R. Pearson, C.D.P. Levy, M. Kimura, Shape coexistence in the  $N=19$  neutron-rich nucleus  $^{31}\text{Mg}$  explored by  $\beta$ - $\gamma$  spectroscopy of spinpolarized  $^{31}\text{Na}$ , RIKEN Accel. Prog. Rep. **50** (2017) 82.

(査読あり)

<http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/A/PR050/pdf/82.pdf>

[学会発表](計 11 件)

金谷晋之介, 下田正, 小田原厚子, 西畑洗希, 森本翔太, 八木彩祐未, 金岡裕志, 河村嵩之, M. Pearson, C. D. P. Levy, 中性子過剰核  $^{31}\text{Mg}$  の中性子非束縛状態における変形共存探索、日本物理学会、2017 年秋季大会、宇都宮大学、2017 年 9 月 12-15 日

S. Kanaya, T. Shimoda, A. Odahara, H. Nishibata, S. Morimoto, A. Yagi, H. Kanaoka, T. Kawamura, M. Pearson, C.D.P. Levy, Spectroscopy of neutron unbound states in  $^{31}\text{Mg}$  and shape coexistence in low excitation energy region, Ito International Research Center (IIRC) Symposium 'Perspectives of the Physics of Nuclear Structure', July 1-4 (2017) Tokyo, Japan.

H. Nishibata, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, S. Kanaya, A. Yagi, H. Kanaoka, M.R. Pearson, C.D.P. Levy, M. Kimura, Shape coexistence in neutron-rich  $^{31}\text{Mg}$  investigated by beta-gamma spectroscopy of spin-polarized  $^{31}\text{Na}$ , The third International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2017), May 28-June 2 (2017) Colorado, US.

金谷晋之介, 下田正, 小田原厚子, 西畑洗希, 森本翔太, 八木彩祐未, 金岡裕志, 河村嵩之, M. Pearson, C.D.P. Levy, 中性子過剰核の変形共存 中性子非束縛状

態における探索、  
日本物理学会年次大会、大阪大学、2017年  
3月17-20日

H. Nishibata, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, S. Yoshida, A. Yagi, H. Kanaoka, T. Kawamura, A. Nakahashi, T. Fujiwara, T. Yoshizumi,  
Various structures of the neutron-rich nucleus  $^{31}\text{Mg}$  investigated by beta-gamma spectroscopy of spin-polarized  $^{31}\text{Na}$ ,  
The 22nd International Spin Symposium (SPIN2016), Sep. 25-30 (2016) Illinois, US.  
(招待講演)

H. Nishibata, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, S. Yoshida, A. Yagi, H. Kanaoka, T. Kawamura, A. Nakahashi, T. Fujiwara, T. Yoshizumi, M. Pearson, C.D.P. Levy,  
Various Structure In Neutron-rich  $^{31}\text{Mg}$  Studied By Using Spin-polarized  $^{31}\text{Na}$  Beam,  
The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Sep. 11-16 (2016) Adelaide, Australia.

T. Shimoda,  
Structure of neutron-rich Mg isotopes studied in decay spectroscopy of spin-polarized Na isotopes,  
Int. Conf. on HYPERFINE interactions and their applications (HYPERFINE 2016), July 3-8 (2016) Leuven, Belgium.. (招待講演)

A. Odahara,  
Shape evolution and shape coexistence studied with radioactive nuclear beams,  
Int. Symp. on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy (Gamma15), Oct. 1-3 (2015) Osaka, Japan.

H. Nishibata,  
Study of exotic structures in neutron-rich  $^{30}\text{Mg}$  and  $^{31}\text{Mg}$  by spin-polarized radioactive beam,  
Int. Symp. on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy (Gamma15), Oct. 1-3 (2015) Osaka, Japan.

西畑洸希、下田正、小田原厚子、森本翔太、吉田晋之介、八木彩祐未、金岡裕志、河村嵩之、中橋晶、藤原智貴、吉住孝之、M. Pearson, C.D.P. Levy  
偏極不安定核 Na ビームを用いた中性子過剰 Mg 同位体の構造研究  
日本物理学会、2015年大阪市立大学、2015年9月25-28日

森本翔太、下田正、小田原厚子、西畑洸希、吉田晋之介、八木彩祐未、金岡裕志、河村嵩之、中橋晶、藤原智貴、吉住孝之、M. Pearson, C.D.P. Levy

スピン偏極した  $^{31}\text{Na}$  の 遅延中性子崩壊で探る  $^{31}\text{Mg}$  の中性子非束縛状態の研究  
日本物理学会、2015年大阪市立大学、2015年9月25-28日

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://adam.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
小田原 厚子 ( ODAHARA, Atsuko )  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：30264013

(2) 研究分担者  
下田 正 ( SHIMODA, Tadashi )  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：70135656

(3) 連携研究者  
松尾 由賀利 ( MATSUO, Yukari )  
法政大学・理工学部・教授  
研究者番号：50231593

畠山 温 ( HATAKEYAMA, Atsushi )  
東京農工大学・工学部・准教授  
研究者番号：70345073

(4) 研究協力者  
LASSEN Jens ( LASSEN, Jens )  
TRIUMF・Laser Applications・Group Leader

LEVY Phil ( LEVY, Phil )  
TRIUMF・Resonant Ionization Laser Ion Source group・Senior Scientist

PEARSON Matt ( PEARSON, Matt )  
TRIUMF・Laser Spectroscopy group・Senior Scientist