

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740215

研究課題名（和文） 中性子20の異常核構造領域での単一粒子軌道変化の研究

研究課題名（英文） Study of the change of single-particle states around the exotic nucleus with N=20

研究代表者

今井 伸明 (IMAI NOBUAKI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：80373273

研究成果の概要（和文）：

「反転の島」のエキゾチックな核構造の原因解明を目指し、中性子過剰核  $^{31}\text{Mg}$  での単一粒子軌道を  $^{30}\text{Mg}$  の陽子共鳴弾性散乱で調べた。実験は欧州原子核研究機構 CERN の短寿命核再加速実験施設 ISOLDE で行った。実験の結果、基底状態と第一励起状態の分光学的因子が非常に抑制されていることを発見した。この結果は「反転の島」の境界が  $^{30}\text{Mg}$  と  $^{31}\text{Mg}$  の間にあることを示す初めての証拠である。

研究成果の概要（英文）：

Single particle structure of the neutron-rich nucleus  $^{31}\text{Mg}$  was studied by proton resonance elastic scattering on  $^{30}\text{Mg}$  to understand the mechanism of the exotic nuclear structure in the “island of inversion”. The experiment was successfully performed at ISOLDE facility at CERN. The spectroscopic factors deduced for the first two bound states were found to be strongly suppressed. The present experiment reveals the border of the “island of inversion” for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：短寿命核、反転の島、単一粒子軌道、陽子共鳴弾性散乱、分光学的因子

## 1. 研究開始当初の背景

質量数32のマグネシウム同位体  $^{32}\text{Mg}$  は、従来の核構造の常識から考えると、中性子魔法数20を持つために、球形に近い構造を持ち、励起しにくいと考えられていた。しかし、短寿命核ビーム生成技術の発展に伴って、 $^{32}\text{Mg}$  近傍偶偶核の四重極集団運動測定が行われ、核構造が劇的に変化していることが判明し、この領域は「反転の島」と呼ばれている。この核構造の変化の原因として、殻模型では核力のテンソル成分が従来考えられて

いたよりも大きかったために、各中性子単一軌道のエネルギー固有値が中性子数に伴って大きく変化したと考えられている。各軌道の変容をみるには、陽子数が偶数でかつ中性子数が奇数の偶奇核の束縛状態の励起エネルギーの系統的变化を調べるのが良い。

中性子単一粒子軌道を調べる最も直接的な方法は、研究対象が安定核から遠く離れた短寿命核の場合、逆運動学条件下での1核子移行反応、例えば(d,p)反応測定が上げられる。(d,p)反応では、終状態のスピン・パリティに

敏感な物理量は、重心系で0度近傍の断面積角度分布である。しかし、逆運動学条件下での重心系0度散乱は、実験室系で180度散乱に相当し、反跳陽子のエネルギーが100 keV以下になる。また、終状態間のエネルギー差も重心系の1/3になるため、陽子のエネルギーを測定するだけでは、終状態は分けられない。このために、この領域の原子核において、殆どの束縛状態のスピンのパリティが決定されていない状態であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、 $^{32}\text{Mg}$  近傍核の  $^{31}\text{Mg}$  の低励起状態のスピンのパリティと共に、各状態と  $^{30}\text{Mg}$  基底状態波動関数との重なり度合いを示す分光学的因子を、新しい実験手法を用いて決定することを目指した。

## 3. 研究の方法

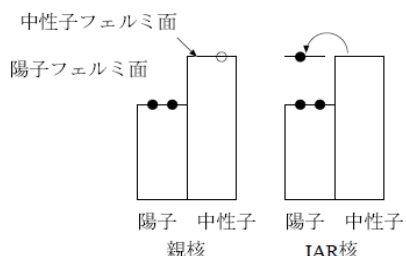


図1. 親状態とアナログ状態の関係

研究代表者が提案してきた新しい方法を用いる。実験では  $^{31}\text{Mg}$  の束縛状態を直接調べるのではなく、その価中性子を陽子に変化させたアナログ状態(IAR)を調べる(図1参照)。核力は電荷に因らないとことが今までの観測から分かっており、中性子を陽子に変えても同じ配位構造を持つ状態が存在することが知られており、アナログ状態と呼ばれる。そのアナログ状態は陽子共鳴弾性散乱のエネルギー関数を測定し、アナログ状態のエネルギーと、弾性散乱のエネルギーが一致すると共鳴として観測される。

実験は欧州原子核研究機構 CERN にある短寿命核再加速実験施設 ISOLDE で行った。CERN の PS ブースターから供給される 1.4 GeV の陽子ビームを炭化ウランに照射し生成される  $^{30}\text{Mg}$  原子を3種類のレーザー光で、1 価のイオンとしてレーザー共鳴イオン化した後に、核子当たり 2.92 MeV にまで加速、 $5.6 \text{ mg/cm}^2$  厚のポリエチレン標的に照射し、実験室系で0度近傍散乱陽子を測定する。

実験のセットアップを図2に示す。実験では、0度に設置した2層のシリコン検出器で陽子のエネルギーを測定する。この内第1層は、本科研費で購入した両面ストリップ型のシリコン検出器で、陽子の散乱角度を位置情



図2. 実験のセットアップ。左方向から  $^{30}\text{Mg}$  ビームが入射し、真中にある標的に照射される。反跳陽子のエネルギーを右に置いたシリコン検出器群で測定する。

報から求めることができ、散乱角度によるエネルギー広がり補正できる様にした。実験室系での0度散乱は、重心系で180度散乱に相当し、クーロン散乱の影響が最も少なく共鳴を観測できる。また、逆運動学のために、反跳陽子のエネルギーは、反応時の重心エネルギーの約4倍にまで達するため、終状態間のエネルギー差も重心系のそれに比べて4倍になり、容易に峻別が可能となる。つまり、(d, p) 反応測定での問題が無く、実験が可能になる。

標的の厚さ  $5.6 \text{ mg/cm}^2$  は、 $^{30}\text{Mg}$  ビームが標的内に止まるのに十分だが、その時の反跳陽子のエネルギーは最大約 12 MeV となり数 10 keV のエネルギー損失のみで殆どエネルギー損失せずに標的から飛び出す。したがって、陽子のエネルギーを測定するだけで、弾性散乱が生じた時のエネルギーを導出でき、 $^{30}\text{Mg}$  のビームエネルギーを変えずに単一の入射エネルギーで、弾性散乱断面積のエネルギー関数を測定できる。

## 4. 研究成果

エネルギー関数の中で3つの共鳴を観測することに成功した(図3参照)。共鳴のエネルギーと予想値とを比較することで、各々、 $^{31}\text{Mg}$  の基底状態と、最初の二つの励起状態のアナログ状態に相当することが分かった。

また、共鳴の形状とおよび各共鳴間の干渉を、R 行列を用いた解析を行った結果、各状態のスピンのパリティを決定することができた。この時、共鳴の幅は分光学的因子に相当する。

この結果、基底状態と第一励起状態の分光学的因子は、同じ中性子数を持つ、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{37}\text{Ar}$  の同じスピンのパリティを持つ状態が0.5程度の大きさを持つものに対して、 $^{31}\text{Mg}$  では0.05と非常に抑制されていることが分かった。これは、 $^{30}\text{Mg}$  と  $^{31}\text{Mg}$  の間で劇的に核構造が変わったことを示しており、世界で初めて「反転の島」の境界を直接示したことになる。

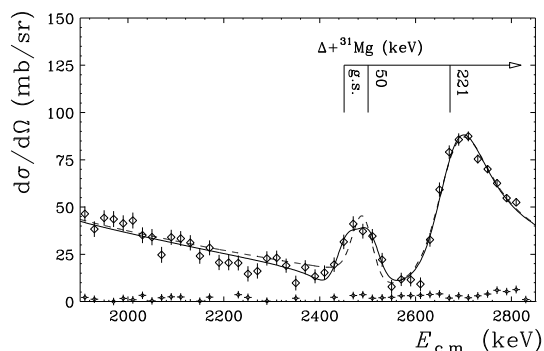


図 3. 弾性散乱断面積のエネルギー関数。実線は、共鳴が三つと仮定した時の R 行列曲線。点線は二つを仮定した時のもの。

現在、データ解析は終了して、論文を執筆中であり、近日中に投稿する予定。更に、殻模型計算等を行い、理論で予想される分光学的因子と比較することで、核構造理論の予想能力を上げていく。

実験では、隣の偶奇核  $^{33}\text{Mg}$  に対しても同様な実験を行う。 $^{33}\text{Mg}$  は基底状態のスピン・パリティが幾つかの実験で互いに相矛盾する値を報告しており、他の独立な実験が不可欠であり、本手法を用いた実験が唯一の可能性を持つ。

#### 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 6 件)

1. T. Sonoda, M. Wada, H. Tomita, C. Sakamoto, T. Takatsuka, T. Noto, Y. Matsuo, H. Iimura, T. Shinozuka, T. Wakui, T. Kubo, P. Schury, Y. Ito, S. Naimi, S. Nakamura, H. Mita, T. Furukawa, H. Miyatake, S. Jeong, H. Ishiyama, N. Imai, Y. Watanabe, Y. Hirayama  
“Development of a resonant laser ionization gas cell for high-energy, short-lived nuclei”  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 295 (2013) 1-10.  
(査読有)
2. S. C. Jeong, M. Oyaizu, N. Imai, Y. Hirayama, H. Ishiyama, H. Miyatake, K. Niki, M. Okada, Y. X. Watanabe, Y. Otokawa, A. Osa, S. Ichikawa  
“Wall-loss distribution of charge breeding ions in an electron cyclotron resonance ion source”  
Rev. Sci. Instrum. 83, 02A910 (2012).  
(査読有)
3. K. Kura, K. Tajiri, T. Shimoda, A.

Odahara, T. Hori, M. Kazato, T. Masue, M. Suga, A. Takashima, T. Suzuki, T. Fukuchi, Y. Hirayama, N. Imai, H. Miyatake, M. Pearson, C. D. P. Levy, and K. P. Jackson

“Structure of  $^{28}\text{Mg}$  studied by b-decay spectroscopy of spin-polarized  $^{28}\text{Na}$ : The first step of systematic studies on neutron-rich Mg isotopes”  
Phys. Rev. C5, 034310(2012).

(査読有)

4. N. Imai, Y. Hirayama, Y. X. Watanabe, T. Teranishi, T. Hashimoto, S. Hayakawa, Y. Ichikawa, H. Ishiyama, S. C. Jeong, D. Kahl, S. Kubono, H. Miyatake, H. Ueno, H. Yamaguchi, K. Yoneda, A. Yoshimi  
“Isobaric analog resonances of the N=21 nucleus  $^{35}\text{Si}$ ”  
Phys. Rev. C85, 034313 (2012).

(査読有)

5. M. Okada, K. Niki, Y. Hirayama, N. Imai, H. Ishiyama, S. C. Jeong, I. Katayama, H. Miyatake\*, M. Oyaizu, Y. X. Watanabe, S. Arai, H. Makii and Y. Wakabayashi,

“Low-background prebunching system for heavy-ion beams at the Tokai radioactive ion accelerator complex”

Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 030101 (2012).

(査読有)

6. Y. Hirayama, M. Mihara, Y. X. Watanabe, S. C. Jeong, N. Imai, K. Matsuta, H. Miyatake, T. Hashimoto, H. Ishiyama, S. Ichikawa, T. Ishii, T. Izumikawa, I. Katayama, H. Kawakami, H. Kawamura, I. Nishinaka, K. Nishio, H. Makii, S. Mitsuoka, S. Momota, A. Osa, Y. Otokawa, T. K. Sato, Y. Wakabayashi  
Eur. Phys. J. 48, 54(2012).

(査読有)

[学会発表] (計 3 件)

1. “Proton resonance elastic scattering on  $^{30}\text{Mg}$ ”, Nobuaki Imai *et al.*, ISOLDE workshop and Users meeting 2012, Dec./17-19/2012, Geneva, Switzerland.
2. “Nuclear Structure around  $^{32}\text{Mg}$  via proton resonance elastic scattering”, N. Imai (招待講演)  
The 8<sup>th</sup> China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Oct/15-19/2012, Beijing, China,
3. “A single shot experiment: Proton

resonance elastic scattering for  
single particle structure of a  
neutron-rich nucleus”, N. Imai (招  
待講演),  
RIBF Users Meeting 2012, Jun/20, 21,  
2012, Wako, Japan

[その他]

ホームページ

<http://kekrgb.kek.jp/>

共鳴散乱の項参照

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今井 伸明 (IMAI NOBUAKI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・助教

研究者番号：80373273

### (2) 研究分担者

該当無し

### (3) 連携研究者

該当無し

### (4) 研究協力者

寺西 高 (TERANISHI TAKASHI)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10323495