

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340071

研究課題名(和文)中性子数28近傍核の核電磁モーメント測定

研究課題名(英文)Electromagnetic nuclear moments around neutron magic number 20 and 28

研究代表者

上野 秀樹 (Ueno, Hideki)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員

研究者番号：50281118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：当研究では閉殻異常が報告されている中性子魔法数20と28の領域で核電磁モーメントを行いその発現の有無や機構の解明を目指すという目的のもと、中性子過剰核 $^{33}\text{Al}$ の基底状態と $^{43}\text{S}$ の準安定励起状態の電気四重極モーメントの測定に成功し、得られたデータからこれらの核で閉殻異常が生じていることを突き止めた。また、実験技術上非常に大きな成果として、新たな核スピン整列RIビームを生成技術である分散整合二回散乱法の開発に成功した。これにより様々なRIの核スピンを制御することが可能となり、核電磁モーメント測定のみならず、核スピン整列したRIをプローブとする物質科学研究など様々なRIビーム利用展開への道が拓けた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate the structure of far neutron-rich nuclei around neutron magic number  $N = 20$  and  $28$  through the measurement of electromagnetic nuclear moments. In the nuclear region of  $N = 20$ , a ground-state electric quadrupole (Q) moment of  $^{33}\text{Al}$  was measured at GANIL, France. The obtained Q shows a large outward discrepancy from a single particle value and shell model calculations within the conventional sd model space, suggesting the erosion of  $N = 20$  shell closure. For the  $N = 28$  region, the Q moment of the isomeric state of  $^{43}\text{S}$  at 320 keV was measured at the RIKEN RIBF facility. The data shows that the  $^{43}\text{S}$  deformation is modest in spite of the level inversion, suggesting a strong deformation of the ground state and a shape coexistence in the low-lying states. In this study, a noble method to produce spin-aligned RI beams utilizing two-step fragmentation reaction combined with momentum dispersion-matching of the ion optics technique has been developed.

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：核電磁モーメント 核スピン偏極 -NMR法 線摂動角分布法 殻構造 RIビーム 魔法数 中性子過剰核

1. 研究開始当初の背景

近年の  $\gamma$  線核分光・核子移行反応・質量測定などの実験的研究から、従来知られていた中性子魔法数  $N = 20$  に加え、中性子魔法数  $N = 28$  でもエネルギーが安定化しない閉殻構造の異常が生じている可能性が指摘されている。この現象は  $\beta$  安定線から遠く離れた原子核で中性子数と陽子数のアンバランスにより初めて顕在化した現象であり、原子核構造の統一的な理解のためには、現在の核構造の理解に重大な変更が必要な事を示唆している。このメカニズムの解明には、異常構造が充分発達した原子核だけでなく、核構造の変容が中間状態にある原子核の情報などが不可欠である。しかし微小な変化は上記観測量には現れにくいことがあるため、核内の粒子占拠準位の異常性に起因する閉殻異常を顕著に反映する核電磁モーメントなどの微視的観測量が必要とされる。核電磁モーメントは上記観測量と比べ技術的理由により測定が困難であり、当該核図表領域では測定例がほぼ皆無である。そこで新たな手法に基づく開拓的な実験研究が必要とされている。

2. 研究の目的

当研究では、測定の困難さからこれまで殆んど報告の無い核モーメント測定という新たな視点から、中性子魔法数  $N = 20$  及び  $28$  閉殻異常の有無・その発現機構の解明にアプローチする。 $N = 20$  領域では  $^{33}\text{Al}$  の電気四重極モーメントの測定を行う。 $^{33}\text{Al}$  は中性子数が  $20$  となる中性子過剰核であるが、近傍核である  $\text{Ne}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Mg}$  と異なり質量測定では閉殻異常は報告されていない。閉殻異常が生ずると核変形などの集団的性質が発達するため、この現象に感度の高い四重極モーメントが測定できれば、異常性の有無をより精密に議論することができる。得られたデータをこれまで測定を行ってきた  $^{30-32}\text{Al}$  のデータと比較することで、 $N = 20$  に近づくにつれて核構造がどのように変化するかを感度よくプローブする。 $N = 28$  領域については、中性子魔法数  $28$  の近傍核であり  $N = 27$  を持つ  $^{43}\text{S}$  の測定を行う。 $^{43}\text{S}$  は  $N = 28$  に至る直前の核としてどのように核構造が変化しているか非常に興味深く、また核反応ベースの他の観測量から核構造異常が生じている可能性が示唆されている。この核は  $320\text{ keV}$  に寿命  $450\text{ ns}$  程度の準安定励起準位を持つことが知られており、当研究ではこの準位の電気四重極モーメントを測定する。

3. 研究の方法

不安定核の核電磁モーメントの測定には、核スピンの向きが揃った状態の生成が不可欠である。これには、レーザーを用いた手法が有効であるが、原子物理学的・化学的制約のため、系統的測定はほぼアルカリ(土類)元素に限られている。このため当研究で対象とする  $\text{Al}$  や  $\text{S}$  の同位体にはこの手法は適用できない。そこで当研究では、独自に開発を進めてきた入射核破碎反応と呼ばれる核反応を用いた手法により、核スピンの揃った状態(核スピン偏極・整列)を実現する。核反応を用いるため、原理的には元素の制約を受けない利点がある。この手法に基づき核スピン偏極・整列状態を生成した後、対象核が  $\beta$  崩壊・ $\gamma$  崩壊する際放出する放射線を指標とする核分光法により核電磁モーメントを決定した。基底状態( $^{33}\text{Al}$ )は、 $\beta$  線を指標とする  $\text{RI}$  に特化した超高感度  $\beta$ -NMR 法である  $\beta$ -NMR 法を、励起状態( $^{43}\text{S}$ )は磁場印加下でラーモア歳差運動に従い放出確率が時間変化する  $\gamma$  線を測定する TDPAD 法を組み合わせ、核電磁モーメントをオンライン測定した。

これらと並行し、核電磁モーメントの測定可能領域を飛躍的に広げるため、新たな核スピン整列  $\text{RI}$  ビームの生成法の開発も行った。

4. 研究成果

(1)  $N = 20$  領域では、フランスの国立重イオン加速器研究所(GANIL)で行った実験により、中性子過剰核  $^{33}\text{Al}$  の基底状態の電気四重極モーメントの測定に成功した。得られたデータから、この核で閉殻異常が生じていることを突き止めた。従来知られていた  $\text{Ne}$ ,  $\text{Na}$ , 及び  $\text{Mg}$  以外の  $\text{Al}$  で初めてこの現象が観測されたこと、消失の影響が中間的であり核構造

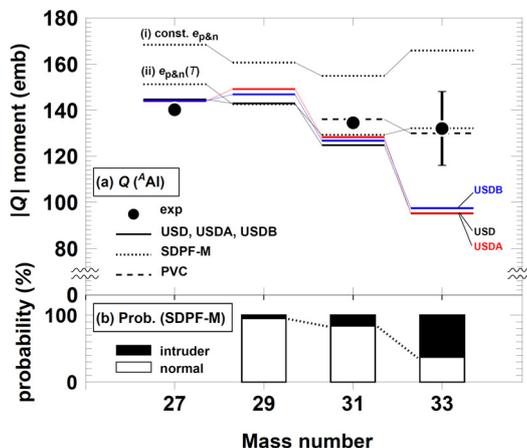


図1. 奇質量  $\text{Al}$  中性子過剰核の電気四重極モーメントの (a) 実験値と理論値及び (b) 大規模殻模型計算による波動関数の侵入配位の割合(文献⑤)。

変化の途上にある核であることが判明した。これは、従前この核に対して得られた観測量に比べ、核モーメントが核配位に先鋭であり、特にここで得られた核電気四重極モーメントは四重極変形などの集団的性質に高感度であることから得られた成果である。核構造変化の機構を解明する上でも重要な知見であり、学術的価値は高い。

(2)  $N = 28$  領域については、理研 RIBF 施設の超伝導 RI セパレータ BigRIPS を用い、中性子過剰核  $^{43}\text{S}$  の 320 keV にある励起状態の四重極モーメントの測定に成功した。得られたデータから、この励起状態のスピンのパリティが、通常の原子核なら基底状態となるべき  $I^\pi = 7/2^-$  状態であることが確定し、且つその変形の程度はあまり大きくないことが判明した。準位逆転が生じていることから基底状態が大きく変形していることが示唆され、 $^{43}\text{S}$  では低励起状態において異なる核変形状態が共存する特異な核であると考えられる。

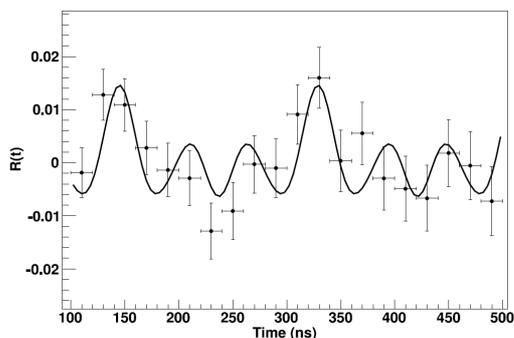


図 2.  $^{43}\text{S}$  核の 320 keV 準安定励起準位からの脱励起  $\gamma$  線について観測された摂動角分布 (TDPAD) スペクトル。実線で示す  $\chi^2$  フィッティングにより四重極モーメントを決定した (文献⑥)。

(3) 実験技術の観点では、新たな核スピン整列 RI ビームの生成法の開発に成功したことが重要な成果として挙げられる。励起状態の核モーメントを測定するためには、核スピンの向きが揃った核スピン整列 RI ビームを生成することが決定的に重要となる。核破碎反応に付随する核スピン配向現象を RI ビームに適用することにより、放出される放射線の異方性の変化を指標とする特徴的な NMR 等の超高感度核分光測定が可能である。しかし、RI ビーム生成に用いる一次ビームとして用いることのできる核種は限定的であり、多核子が削り取られる反応では反応の特性からスピン整列を得ることができなかった。新たに手法では、二段階の破碎反応によって RI ビームを生成することにより、核種に依らずスピン整列度を最大化することができ、さらに二段階目の反応を運動量分散焦点面で起こし分散整合条件をとることによる運動量

分散の再集約により、二段の核破碎反応における収量をも最大化することができるという独自のアイデアに基づく画期的手法である。実験は理研 RIBF 施設の BigRIPS を用いて行った。一次ビーム  $^{48}\text{Ca}$  から  $^{33}\text{Al}$  を經由することで、最終的に 8(1)% のスピン整列度を持つ  $^{32}\text{Al}$  ビームを生成することに成功した。この手法の有用性が実験的に検証されたことにより、広範な質量領域での核モーメント測定を通じた核構造研究が飛躍的に進展することが期待できるのみならず、物性分野においてもプローブとしての RI ビームの可能性を大きく切り拓くものであると言える。

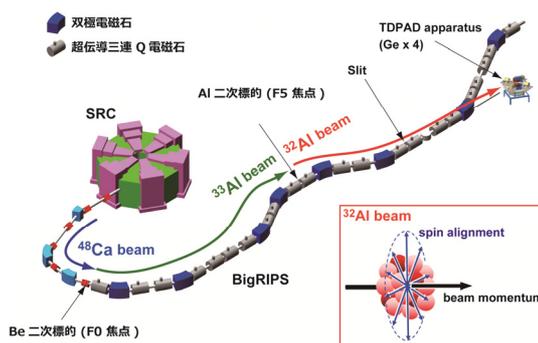


図 3. 新手法分散整合二回散乱法を適用した理研 RIBF 施設 BigRIPS RI セパレータの配置 (文献④)。

## 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 14 件)

- ① N. Yoshida, H. Ueno, A. Yoshimi, Y. Ichikawa, K. Asahi 他, “Development of a new device control system for  $\beta$ -NMR experiments”, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B317, 705–709 (2013), DOI: 10.1016/j.nimb.2013.08.057 [査読有].
- ② Y. Ishibashi, H. Ueno, A. Yoshimi, Y. Ichikawa, K. Asahi 他, “Development of an adiabatic field rotation system to measure spin polarization of unstable nuclei”, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B317, 714–716 (2013), DOI: 10.1016/j.nimb.2013.08.059 [査読有].
- ③ 市川雄一, 上野秀樹, “多種多様な RI ビームのスピンを操る”, 日本物理学会誌 62, 823–827 (2013) [査読有].
- ④ Y. Ichikawa, H. Ueno, K. Asahi, A. Yoshimi 他, “Production of spin-controlled rare isotope beams”, Nature Phys. 8, 918–922 (2012), DOI: 10.1016/j.physletb.2012.07.030 [査読有].
- ⑤ K. Shimada, H. Ueno, K. Asahi, Y. Ichikawa, A. Yoshimi 他, “Erosion of

$N = 20$  shell in  $^{33}\text{Al}$  investigated through the ground-state electric quadrupole moment”, Phys. Lett. B 714, 246-250 (2012), DOI: 10.1016/j.physletb.2012.07.030 [査読有].

- ⑥ R. Chevrier, Y. Ichikawa, H. Ueno, K. Asahi, A. Yoshimi 他, “Is the  $7/2^-$  isomer state of  $^{43}\text{S}$  spherical?”, Phys. Rev. Lett. 108 16250 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.162501 [査読有].
- ⑦ H. Ueno, K. Asahi 他, “Beta-delayed neutron and gamma-ray spectroscopy of  $^{17}\text{C}$  utilizing spin-polarized  $^{17}\text{B}$ ”, Phys. Rev. C 87, 34316 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevC.87.034316 [査読有].

[学会発表] (計 40 件)

- ① 市川雄一, “スピン操作した RI ビームの生成” (招待講演), 第 69 回日本物理学会年次大会, 2014 年 3 月 27 日, 神奈川県平塚市
- ② H. Ueno, “Present status of nuclear moment measurements at RIBF” (依頼公演), French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, September 30-October 3, 2013, Paris, France.
- ③ H. Ueno, “Researches with stopped radioisotopes at the RIKEN RIBF facility” (招待講演), The 5th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry 13 (APSORC13), September 22-27, 2013, Kanazawa, Japan.
- ④ 上野秀樹, “RI ビームファクトリー施設と利用研究” (招待講演), 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 分科企画シンポジウム「イオン加速器に関する先端技術の現状」, 2013 年 9 月 17 日, 京都府田辺市
- ⑤ Y. Ichikawa, “Novel method for the production of spin-aligned RI beams in projectile fragmentation with the dispersion matching technique”, The 4th Joint Meeting of the 16th International Conference on Hyperfine Interactions and the 20th International Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions (HFI/NQI 2012), September 11-14, 2012, Beijing, China.
- ⑥ Y. Ichikawa, “Spin manipulation of RI beams from two-stage projectile fragmentation reaction”, Advanced Studies Institute on Symmetries and Spin (Spin-Praha-2012), July 1-8, Prague, Czech Republic.
- ⑦ H. Ueno, “Spin-aligned radioactive-isotope beams through the two-step fragmentation and nuclear moments of

aluminum isotopes” (招待講演), Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011), October 14, 2011, Kyoto, Japan

- ⑧ H. Ueno, “Nuclear-moment measurements around  $N = 20$  neutron-rich nuclei” (依頼講演), Colloque GANIL 2011, September 27, 2011, Corsica, France.
- ⑨ Y. Ichikawa, “Production of spin-aligned RI beam via two-step fragmentation with dispersion matching”, Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS 2011), May 31, 2011, Leuven, Belgium
- ⑩ H. Ueno, “Spin polarization phenomena of unstable exotic beam experiment” (招待講演), The 11th Asia Pacific Physics Conference (APPC11), November 16, 2010, Shanghai, China.
- ⑪ H. Ueno, “Spin-oriented radioactive-isotope beams at RIBF” (招待講演), 19th International Spin Physics Symposium (SPIN 2010), September 29, 2010, Juelich, Germany

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

多種多様な RI ビームのスピンを操作する新手法を開発 -2 段階の RI 生成反応であらゆる RI ビームに対してのスピン操作と大強度化を実現-

<http://www.riken.jp/pr/press/2012/20121022/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

上野 秀樹 (Ueno Hideki)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員  
研究者番号: 50281118

### (2) 研究分担者

旭 耕一郎 (Asahi Koichiro)

東京工業大学・大学院理工学研究科 (理学系)・教授  
研究者番号: 80114354

### (3) 連携研究者

市川 雄一 (Ichikawa Yuichi)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・研究員  
研究者番号: 20532089

吉見 彰洋 (Yoshimi Akihiro)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研  
究センター・客員研究員  
研究者番号：40333314