

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19340061
 研究課題名 (和文) 非対称核子系における単一粒子軌道の変化と集団運動の発現機構の解明
 研究課題名 (英文) Evolution of shell structure and mechanism of sudden prevalence of collective motions in very asymmetric proton/neutron number systems

研究代表者
 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

研究成果の概要：

陽子数と中性子数が極端に異なる原子核（非対称核子系、短寿命核）では核子数の非対称度とともに殻構造が大きく変化するのではないかとという20年来の問題を解決するために、独自の手法を用いた実験を行った。その結果、 ^{29}Mg の励起エネルギー4 MeV以下の状態のスピンのパリティを全て（9つの状態）決定することに始めて成功した。第2、第3励起状態がマイナス・パリティ状態であるという新しく発見された事実は、非対称度の変化の伴う殻構造の変化を如実に示すものであり、その原因解明の大きな手がかりを与えた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

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：中性子過剰核、単一粒子軌道の変化、intruder configuration、
 スピン偏極、ベータ崩壊、中性子魔法数20、Mgアイソトープ、TRIUMF

1. 研究開始当初の背景

有限個数のフェルミオン（核子）からなる原子核は、核力という複雑な側面をもつ力が支配する、一見複雑な量子多体系でありながら、殻構造やクラスター構造といった秩序立った構造を示したり、核子群が一

体となって集団的な振動や回転を行うといった、多様な構造と運動を示すことが知られてから久しい。しかし、近年、陽子数と中性子数が極端に異なる原子核（非対称核子系、短寿命核）を人工的に生成することが可能になり、その構造や運動が調べられ

るようになると、これまでの理解とは異なった様相を示す原子核が発見され始めた。大きなアイソスピンで特徴づけられるこれら非対称核子系の構造と運動の理解は、核内核子間相互作用のアイソスピン依存性の解明のみならず、宇宙における元素合成の道筋を解明するためにも不可欠であり、原子核物理学における主要なテーマの一つとなっている。

中でも重要かつ緊急なものとして、中性子数 20 の魔法数を持つ中性子過剰核の基底状態が大きく変形していることを示す実験事実がいくつか発見されて以来投げかけられてきた、核子の単一粒子軌道の異常性と集団運動の発現機構の解明という懸案の問題があげられる。世界各地の不安定核ビーム供給施設を用いた様々な実験によって、基底状態のスピン・パリティ、電磁気モーメント、第一励起状態のエネルギー、電磁遷移確率といった基本的物理量が 1990年代より少しずつ蓄積されてきた。しかし、前述の本質的課題の解明には充分とは言えない。理論との比較に決定的な役割を果たす、励起準位のスピンとパリティすらほとんどわかっていない。懸案となっている多くの核ではスピン・パリティが基底状態のみ、あるいは第一励起状態までしか確定していないのが現状である。

私達のグループは、スピン偏極した（スピンの向きが偏った）不安定核の β 崩壊過程では β 線が非等方的に放出されること、その非対称度は親核と娘核のスピンに大きく依存することに着目し、娘核の多くの励起状態のスピン・パリティを一気に測定できるという独自の実験を提案し、その有効性を実証した [文献 1]。この手法を重い Mg 核の研究に適用したのが本研究である。実験は 2007 年 12 月に、最も大きなビーム強度が期待された ^{28}Na および ^{29}Na ビームを用いて行われた。本報告書では、この実験によって明らかになった ^{29}Mg 核の構造を報告する。

2. 研究の目的

本研究は、中性子の数が非常に多い Mg 核の構造が、中性子の数とともにどのように変化するのか、特に、単一粒子軌道のエネルギーが変化することに伴う高位の軌道成分の混じりの効果や、大きな変形状態や回転バンドといった集団運動がどのように発現するのかを、私達独自の実験手法を用い突き止めることを目的としている。

本基盤研究の期間においては、一連の研究の第一段階として、スピン偏極した ^{28}Na および ^{29}Na 核の β 崩壊を利用した ^{28}Mg および ^{29}Mg 核の励起状態のエネルギー、スピン・パリティ、崩壊様式の測定法が有効であることを実証し、得られた実験結果を理論計算と比較することによって、 ^{28}Mg および ^{29}Mg 核構造を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、中性子の数が非常に多い Mg アイソトープにどのような固有状態が存在するかを調べるために Na の β 崩壊を利用する。図1は Na の崩壊の様子を模式的に示したものであるが、安定線から遠く離れているが故に Na と Mg の基底状態の質量には大きな差があり、広いエネルギー範囲にわたる Mg の励起状態を β 崩壊によって生成出来る。私たちの手法は、親核である Na をスピン偏極させることによって、Mg の状態がどのエネルギーに存在し、それらがどのように崩壊するのかという情報に加えて、その状態のスピン・パリティという、核構造を探るうえで不可欠の情報を得ることが出来ることに大きな特徴がある。

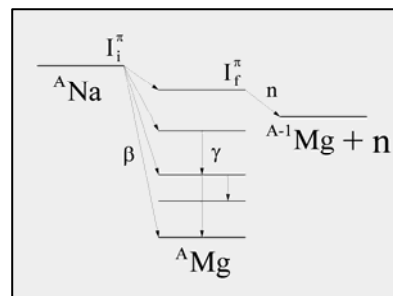


図 1 β 崩壊の模式図

^{29}Mg の核構造の詳細(各状態がどのような配位を持つのか)を明らかにするために、shell model 計算を行った [文献2]。実験がほとんどすべての状態のスピンのパリティを決めているおかげで、どの状態が計算で予測されるどの状態に対応するかという対応関係が一目瞭然である。ベータ遷移確率についても、非常に良く実験データが説明された。

この理論計算では、バレンス核子の配位は sd 軌道のみに限っている。したがって、パリティが正の状態のみ予言出来る。一つの核子が pf 軌道を占める状態、すなわち intruder configuration を持つ状態は負パリティとなるはずである。そこで注目したいのが、我々が行った理論計算で予言されない、1.430MeV と 1.095MeV にある2つの状態である。pf 軌道まで配位を許した理論的予測が Monte Carlo Shell Model の手法を用いて宇都野氏によってなされたが [文献3]、確かに 1 MeV 付近にマイナス・パリティ状態が二つ予言されている。以上のこのことから、1.430MeV 状態と 1.095MeV 状態はマイナス・パリティ状態と断定出来る。

こうして、マイナス・パリティ状態が核子数の非対称度を変化させるとどう変化するかという、系統性を調べることが可能になる。図4に示すのがその Mg アイソトープにおけるマイナス・パリティ状態の励起エネルギーの系統性である。 ^{29}Mg の二つの状態が本研究の成果である。 ^{31}Mg については木村氏による AMD 計算の予測 [文献4] である。同じスピンのパリティの状態を赤線で結んでいる。 ^{25}Mg 、 ^{27}Mg 、 ^{29}Mg 、 ^{31}Mg と中性子数を増加させるにしたがって、急速に励起エネルギーが下がることがわかる。これこそ pf shell の単一粒子軌道が急速に下がっていることを示している。この変化を再現出来るような核力を探し出すことが次の課題となる。

本研究は、中性子の数が非常に多い原子核 ^{29}Mg (自然界に最も多く存在するのは ^{24}Mg なので中性子が5個過剰である) の励起状態のスピンのパリティを調べ尽くし、マイナス・パリティ状態の存在とその励起エネルギー

を決定したことに大きな特徴がある。その結果、単一粒子軌道が中性子数の増加に伴ってどのように変化するか(殻構造の進化と呼ばれる)を明らかにした。この成果は殻構造の進化のメカニズムの解明に大きく貢献した。

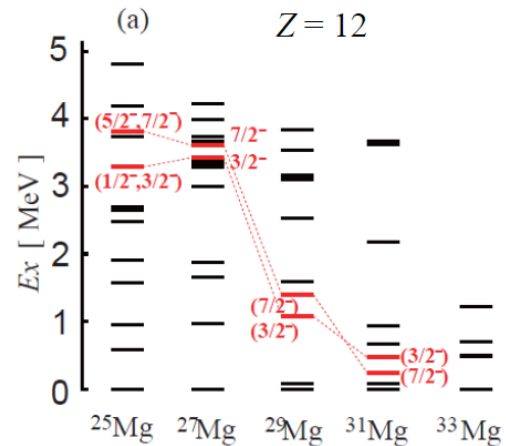


図4 Mg アイソトープにおけるマイナス・パリティ状態の系統的变化。 ^{29}Mg のデータは本研究によって初めて明らかとなったもの。 ^{31}Mg の準位は木村氏による AMD 計算予測 [文献4]。励起エネルギーの急速な低下は単一粒子軌道エネルギーの変化を反映している。

参考文献

- [1] Y. Hirayama *et al.*, Physics Letters, B611 (2005) 239.
- [2] B.A. Brown *et al.*, Phys. Rev. C74, 034315 (2006).
- [3] Y. Utsuno, private communications.
- [4] M. Kimura, private communication

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)

- ① T. Shimoda, Y. Hirayama, H. Izumi, A. Hatakeyama, K.P. Jackson, C.D.P. Levy, H. Miyatake, M. Yagi, H. Yano, A. Odahara, T. Fukuchi, K. Tajiri, K. Kura, T. Hori, T. Masue, Nuclear structure studies through β -delayed decay spectroscopy of polarized radioactive nuclei, Nuclear Physics, 査読無, A805, 299–301 (2008).

- ② 下田 正、原子核の研究の新展開——レーザーを利用してスピンの向きを制御する——、査読無、生産と技術、69 巻、第 2 号、62-68 (2007)

[学会発表] (計 11 件)

- ① K. Tajiri, T. Shimoda et al., Structure of Neutron-Rich $^{28,29}\text{Mg}$ Studied through β -decay of Spin Polarized $^{28,29}\text{Na}$ Beams at TRIUMF, Int. Symp. on Forefronts of Researches in Exotic Nuclear Structures-Niigata2010, Niigata, Japan, March 4, 2010
- ② T. Shimoda et al., Structure of Mg isotopes explored by beta-decay of spin-polarize Na isotopes, EFES-NSCL workshop on Perspectives on the modern shell model and related experimental topics, Michigan, USA, Feb. 4, 2010
- ③ K. Tajiri, T. Shimoda et al., The Structure of Neutron-Rich $^{28,29}\text{Mg}$ Studied through β -Decay of Spin-Polarized $^{28,29}\text{Na}$ Beams at TRIUMF, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, Hawaii, USA, October 17, 2009
- ④ 田尻邦彦、下田 正 他、TRIUMFにおける偏極した ^{29}Na の β 崩壊による ^{29}Mg の構造の研究、日本物理学会、秋季大会、山形大学、2008 年 9 月 21 日
- ⑤ 倉健一朗、下田 正 他、TRIUMFにおける偏極した ^{28}Na の β 崩壊による ^{28}Mg の構造の研究、日本物理学会、秋季大会、山形大学、2008 年 9 月 21 日
- ⑥ T. Shimoda et al., Structure of nuclei studied with polarized radioactive nuclear beams at TRIUMF, Workshop on "Advance in Physics with ISOL-based/Fragmentation-based RI Beams", Tokyo, Japan, Feb. 2, 2008.
- ⑦ T. Shimoda et al., Nuclear structure studies through β -delayed decay spectroscopy of polarized radioactive nuclei, Int. Nuclear Physics Conf. (INPC2007), Tokyo, Japan, June 5, 2007
- ⑧ T. Shimoda et al., Structure of neutron-rich Mg isotopes through β -delayed of spin-polarized Na isotopes, CNS-RIKEN Joint Int. Symp. on Frontier of gamma-ray spectroscopy and Perspectives for Nuclear Structure Studies (gamma08), Wako, Saitama, Japan, April 5, 2008
- ⑨ T. Shimoda et al., Structure of Exotic Nuclei Probed by Spin-Polarized Radioactive Beams, Int. Workshop, Halo08, Vancouver, Canada, March 17,

2008

- ⑩ 田尻邦彦、下田 正他、TRIUMFにおける偏極したNaアイソトープの β 崩壊による中性子過剰なMgの構造の研究2、日本物理学会 第63回年次大会 近畿大学 2008年3月24日
- ⑪ 倉健一朗、下田 正他、TRIUMFにおける偏極したNaアイソトープの β 崩壊による中性子過剰なMgの構造の研究1、日本物理学会 第63回年次大会 近畿大学、2008年3月24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

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

(2) 研究分担者

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

福地 知則 (FUKUCHI TOMONORI)
大阪大学・大学院理学研究科・特任研究員
研究者番号：40376546
平成20年度は研究分担者から削除及び
所属・職：独立行政法人理化学研究所メタロ
ミクス研究ユニット・協力研究員に変更

鈴木 智和 (SUZUKI TOMOKAZU)
大阪大学・核物理研究センター・特任研究員
研究者番号：80506395
平成20年度は連携研究者に変更

宮武 宇也 (MIYATAKE HIRONARI)
高エネルギー加速器研究機構・
素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：50190799
平成20年度は連携研究者に変更

平山 賀一 (HIRAYAMA YOSHIKAZU)
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：30391733
平成20年度は連携研究者に変更