

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340058

研究課題名(和文)非対称核子系における特異な核構造の系統的変化の実験的解明

研究課題名(英文)Structure of ^{30}Mg Studied by beta-decay spectroscopy of spin-polarized ^{30}Na -- shape coexistence in ^{30}Mg --

研究代表者

下田 正 (Shimoda, Tadashi)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70135656

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：私たちのグループでは、超新星爆発や中性子星同士の衝突などの極限状況で重い元素が合成されると考えられている過程で重要な役割を果たしていると考えられている、陽子の数に比べて中性子の数が極端に多い原子核の構造を突き止めるために、Mg核に中性子をくっつける毎にその構造がどのように変化するのかを系統的に調べている。

本研究は、詳細がほとんど知られていない ^{30}Mg の準位構造を私たち独自の実験手法を用いて明らかにしたものである。その結果、 ^{30}Mg では、球形の基底状態、大きく変形した励起状態、変形状態という3つの異なった形を持った状態が共存していることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We have been studying the structure of Mg isotopes in the region of the N=20 island of inversion, to clarify the structure change as a function of the neutron number. The experiments were performed by our unique method of b-decay spectroscopy taking advantage of highly-spin-polarized radioactive nuclear beams at TRIUMF. The b-decay asymmetry in the Na-isotope decay enables unambiguous spin-parity assignments of the levels in the daughter Mg isotope, and it becomes possible to compare the experimental data and theoretical predictions on a level-by-level basis.

The present work focused on the results of the b-decay of $^{30}\text{Na} \rightarrow ^{30}\text{Mg}$. From the detailed analyses, fourteen g-transitions were newly found and four new levels at 4.683, 4.694, 5.897 and 6.064-MeV were also found in ^{30}Mg . It should be emphasized that the spins and parities of ten levels have been assigned for the first time. Five of them were firmly assigned. An evidence of shape coexistence was proposed.

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 island of inversion ^{30}Mg の核構造 スピン・パリティ ガンマ線 ベータ崩壊の非対称性 スピン編極 レーザー光ポンピング

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、魔法数に特徴づけられる秩序立った殻構造や、一部の核子群が強い相関を示すクラスター構造、あるいは、原子核全体が一体となって振る舞う振動や回転運動といった、多様な構造と運動を示す。しかし、このような理解は、陽子数と中性子数が近い、安定核およびその周辺核（対称核子系、低アイソスピン核）に関する知見をもとに確立したものであり、安定核に非常にたくさんの中性を次々と付け加えたり抜き去ったりしてできる超非対称核子系（高アイソスピン核）の核構造や運動の理解は必ずしも充分ではない。

近年、陽子数と中性子数が極端に異なる非対称核子系の原子核を人工的に生成することが可能になり、これらの核の構造が安定核近傍の原子核とはずいぶん異なっていることが明らかになり始めたが、核内有効核力がアイソスピンの変化に伴ってどう変化するのか、多体系を扱う理論的手法は超非対称核子系にも適用できるのかという、基本的課題の解決には至っていない。これら超非対称核子系の構造と運動の理解は、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。

2. 研究の目的

特に注目されているのが、中性子数 20 の魔法数を持つ中性子過剰核の構造である。魔法数20の核である $^{32}\text{Mg}(N=20, Z=12)$ の基底状態が大きく変形しているという、常識に反する事実を説明するために、殻模型の見方と言うと、単一粒子軌道の変化という解釈がなされている。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、中性子数を増すにつれて下がり、sd 軌道にいるはずの中性が fp 軌道を占めている状態（粒子・空孔状態、intruder状態とも言う）が残留相互作用によってエネルギーを下げ、基底状態およびその近傍の状態では粒子・空孔状態の確率が非常に大きくなり、このような配位混合によって基底状態が大きく変形すると、考えるのである。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い。

しかし、データはとても充分とは言えない。存在が確認された準位の数はまだかなり少ない上に、それらの準位のスピンとパリティはほとんどわかっていない[1]。これでは核構造の議論ができない。

本研究は、私たち独自の実験手法を用いて、 ^{30}Mg 核の励起状態を探索し、それらのスピン・パリティを同定し、 ^{30}Mg 核の構造を詳細に解明することを目的としている。これまでの私たちの研究によって、 ^{28}Mg および ^{29}Mg の核構造が解明されており、系統的な研究によって、中性子を増やす毎に構造がどのように変わるのかを明らかにすることができた[2]。

3. 研究の方法

(1) 測定原理

図1は ^{30}Na 核の β 崩壊の様子を模式的に表したものである。中性子の数が非常に多い核である ^{30}Na と ^{30}Mg の質量差は非常に大きいので、 β 崩壊は ^{30}Mg の励起エネルギーがかなり高い領域まで遷移することが出来る。したがって、 β 線と γ 線を同時に測定すれば、励起状態のエネルギーを同定することができる。私たちの独自性は、 ^{30}Na 核のスピンが偏極していることにある。弱い相互作用においてパリティが保存しないことを反映して、スピン偏極した核からの β 崩壊は次の式で表されるような非等方の角分布を示す。

$$W(\theta) = 1 + AP \cos \theta$$

ここで θ は偏極方向と β 線のなす角度、 P は親核の偏極度、 A は非対称度パラメーター（定数）である。非等方な β 線放出を模式的に表したのが図2である。大きな矢印で表したスピンの向きから見て、 β 線が放出されやすい方向がある。左右の β 線の数の差を測定すると、非対称度パラメーター A を求めることができる。ここで注目すべきは、 A が親核のスピン (I_i) と娘核の状態のスピン (I_f) に大きく依存することである。 $^{30}\text{Na} \rightarrow ^{30}\text{Mg}$ の β 崩壊の場合、 β 崩壊の終状態として許さ

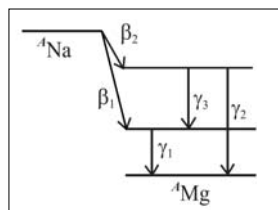


図1 β 崩壊の模式図

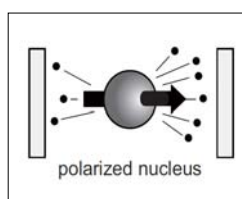


図2 β 崩壊の非等方性

れる娘核 ^{30}Mg の状態のスピンのパリティは3+か2+か1+に限られるが、それぞれに対応したAは+0.67か-0.33か-1.0のいずれかしか取り得ない。したがって、実験的なAの値から娘核の状態のスピンの I_f を一意的に決定することが出来る。

(2) スピン偏極した不安定核の生成

このアイデアを実行するために、大強度不安定核ビーム供給施設である、カナダのTRIUMF 研究所において、レーザーを用いた不安定核ビーム偏極装置の開発を行った。我々の方法は、超微細構造相互作用によって2つに分裂した原子の基底状態の準位差分だけ波長の異なる2本のレーザーを同時に高速不安定核ビームに照射することによって、世界最高の偏極度を持った不安定核ビームを得るものである。2002年には、短寿命核 ^{11}Li を55%に偏極させることに成功し、娘核 ^{11}Be の励起状態のうち、未知の7つの準位のスピンのパリティを初めて決定することができた[3]。この方法を本研究にも適用した。

(3) 測定装置

実験は3つの要素からなる：1. 短寿命核である ^{30}Na を核反応によって生成し、二次ビームとして取り出し、2. ^{30}Na の核スピンを偏極させ、3. β 崩壊の非対称度と γ 線の相関測定を行い、娘核 ^{30}Mg の励起状態の探索とそれらの状態のスピンのパリティを確定する。

図3は測定器系の概念図を示す。円柱状のものはGe検出器で、 γ 線と β 線を測定する。 ^{30}Na ビームは水平面内でビームの進行方向に垂直な方向を向いている。そのビームは真空中に置かれたPtフォイル内で停止し、やがて β 崩壊する。 β 線の非対称度を測定するのが、Left、Rightとラベルされた検出器である。 β 線と多数の γ 線の同時計測関係を調べることによって ^{30}Mg の励起状態の詳細がわかる。

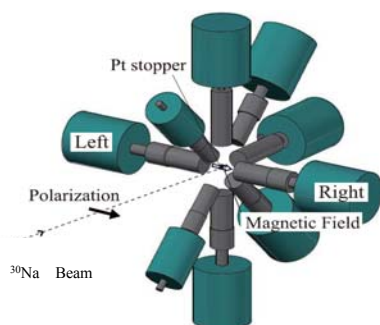


図3 検出器系の模式図

4. 研究成果

図4に本研究によって構築された ^{30}Mg 核の準位構造を示す。赤い色で示された準位や崩壊経路は新たに発見されたものであることを示し、*印のついたものは本研究によって確立した新たな物理量であることを示す。14の γ 遷移、4つの新準位(4.683, 4.694, 5.897, 6.064 MeV)が発見されたこと、10の準位のスピンのパリティが初めて同定されたこと(そのうち4つは完全に確定)に注目していただきたい。一つの実験でこれほど多数の成果が出ることは珍しい。私たちの実験手法の強力を明確に示している。

図4から以下の特徴が見える。

(i) 最大の β 崩壊確率[22.3(8)%]は、本研究で1+状態と初めて同定された4.967 MeVの準位への遷移で観測された。2番目の遷移確率[10.4(4)%]は、同じく2+と同定された5.414 MeVの準位。 ^{30}Na の基底状態が変形しているというこれまでに判明している事実[4]を考えると、上記2つの準位もintruder configurationを持つ変形状態と考えられる。

(ii) 1.788 MeVの 0^+_2 準位への γ 遷移は、上記の2つの準位からのみ観測されている。さらに、この 0^+_2 準位は基底状態に遷移しないという事実に注目されたい。これらのことから、1.788 MeVの 0^+_2 準位は変形状態であると結論できる。

[(iii)] 1.788 MeVの 0^+_2 準位への β 遷移強度が0.9(6)% ($\log ft = 7.1(4)$)と測定されたが、この値は第二禁止遷移の確率としては異常に大きい。 0^+_2 という以前の同定に問題があるのか、この状態の核構造が異常性を持つのか、どちらかの可能性がある。

(iv) 2.466 MeV準位への β 遷移確率は非常に小さい[0.04(57)%]ことが判明した。この準位は1.482 MeVの 2^+_1 準位にしか γ 遷移しないという事実と併せて考えると、2.466 MeV準位は ^{30}Na の基底状態とも ^{30}Mg の基底状態との構造が大きく異なることがわかる。この状態は、最近の理論計算(CHFB+LQRP A)[5]で予測されている γ 変形状態のバンドヘッドである可能性がある。

以上をまとめると、 ^{30}Mg では球形の基底状態、大きく変形した励起状態、 γ 変形状態という3つの異なった形状の状態が共存しているという、きわめて興味深い事実が、本研究によって明らかになった。

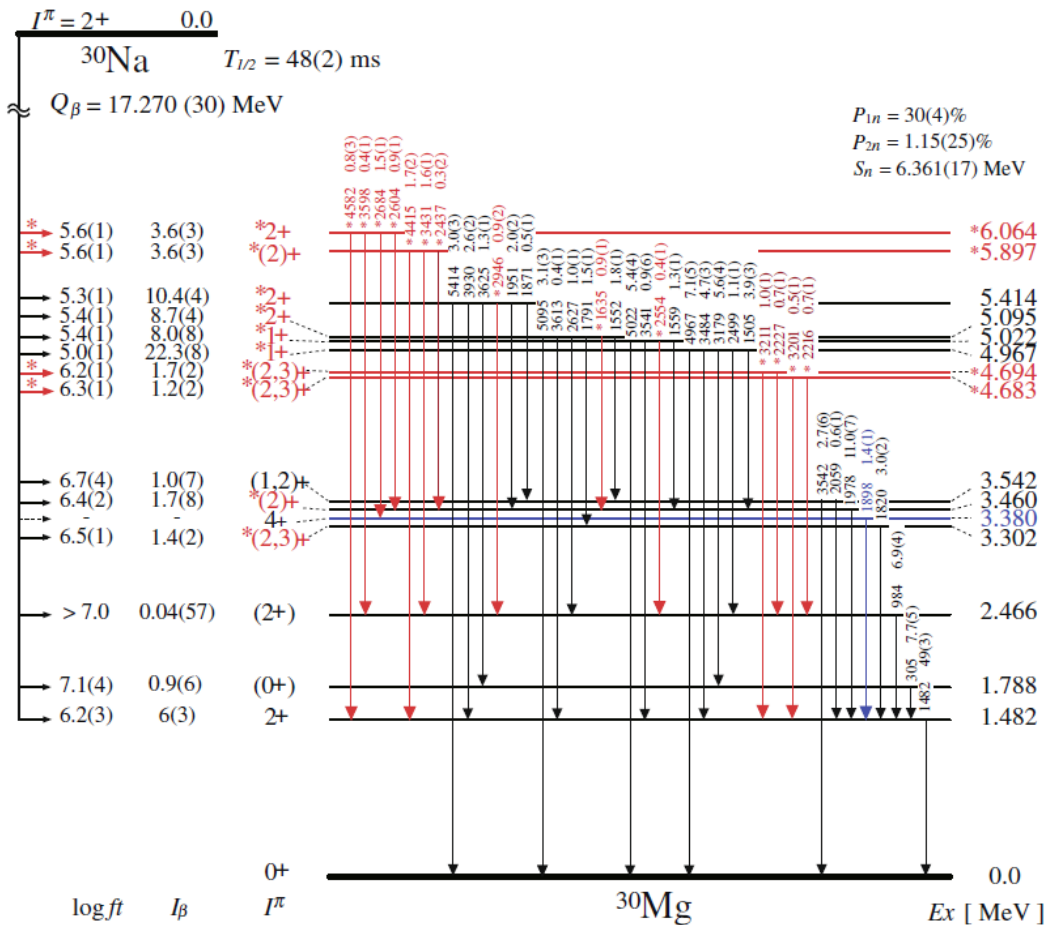


図5 本研究によって明らかとなった ^{30}Na の β 崩壊様式および ^{30}Mg の準位構造。赤色のものは本研究で存在が明らかになったもの。*印がついた物理量は本研究で初めて定量的に導出されたもの。

〔参考文献〕

- [1] O. Sorlin and M.-G. Porquet, Prog. Part. Nucl. Phys. **61** (2008) 602, and B.A. Brown, Physics, **3** (2010) 104.
- [2] K. Kura *et al.*, Phys. Rev. C **85** (2012) 034310.
- [3] Y. Hirayama *et al.*, Physics Letters, **B611** (2005) 239.
- [4] M. Keim, AIP Conference Proceedings **455** (1999), 50, V. Tripathi *et al.*, Phys. Rev. C **76** (2007), 021301(R).
- [5] N. Hinohara *et al.*, Phys. Rev. C **84** (2011), 061302(R).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計3件)

- ① 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}Mg studied by β -decay spectroscopy of spin-polarized ^{28}Na : The first step of systematic studies on neutron-rich Mg isotopes, Physical Review C, 査読有、Vol. 85, 2012, pp.034310-1-9
DOI: 10.1103/PhysRevC.85.034310
- ② Tadashi Shimoda, Kunihiko Tajiri, Atsuko Odahara, Masaki Suga, Noriaki Hamatani, Hiroki

- Nishibata, Jun Takatsu, Rin Yokoyama, Yoshikazu Hirayama, Nobuaki Imai, Hiroari Miyatake, Mathew Pearson, C. D. P. Levy, K. P. Jackson, Romain Leguillon and Costel Petrache, Structure of Mg Isotope Studied by β -Decay Spectroscopy of Spin-Polarized Na Isotopes - Shape Coexistence in ^{30}Mg -, Progress of Theoretical Physics Supplement, 査読有、Vol. 196, 2012, pp.310-315
DOI: 10.1143/PTPS.196.310
- ③ T. Shimoda, K. Tajiri, K. Kura, A. Odahara, M. Suga, Y. Hirayama, N. Imai, H. Miyatake, M. Pearson, C. D. P. Levy, K. P. Jackson, R. Legillon, C. Petrache, T. Fukuchi, N. Hamatani, T. Hori, M. Kazato, Y. Kenmoku, T. Masue, H. Nishibata, T. Suzuki, A. Takashima, R. Yokoyama, Nuclear structure explored by β -delayed decay spectroscopy of spin-polarized radioactive nuclei at TRIUMF ISAC-1 - Intruder configurations in ^{29}Mg and ^{30}Mg , the nuclei in the region of island of inversion -, Hyperfine Interactions, 査読有、

〔学会発表〕（計 9 件）

① T. Shimoda, 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. 4-6, 2010

② K. Tajiri, 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 Frontiers of Researches in Exotic Nuclear Structures –Niigata2010, Niigata, Japan, March 1-4, 2010

③ T. Shimoda, Beta-decay spectroscopy with spin-polarized radioactive nuclei, DESIR (Decay, Excitation and Storage of Radioactive Ions) workshop, May 27–28, 2010, Hogenheuvell College, Leuven, Belgium

④ T. Shimoda, Exploring neutron-rich nuclear structures through beta-delayed decay of spin-polarized isotopes, Halo 2010 Symp., Dec. 6–9, 2010, Kanagawa, Japan

⑤ T. Shimoda, Exploring Mg Isotope Structures through Beta-Delayed Decay of Spin-Polarized Na Isotopes, French Japanese Symp. on Nuclear Structure Problems, Jan. 4–8, 2011, Saitama, Japan

⑥ K. Tajiri, Study of Neutron-Rich Mg Isotopes through beta-Decay of Spin-Polarized Na Isotopes, RIBF ULIC and CNS Symposium on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy (Gamma11), Saitama, 30 June – 2 July, 2011

⑦ T. Shimoda, Structure of Mg isotope studied through beta-delayed decay of spin-polarized Na isotopes, Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011), Kyoto, 11 – 15 Oct. 2011.

⑧ 田尻邦彦、スピン偏極した ^{30}Na の β 遅発崩壊分光による中性子過剰な ^{30}Mg の構造の研究 II、日本物理学会、秋の学会、弘前大学、2011 年、9 月 16-19 日

⑨ A. Odahara, Structure of Mg Isotope Studied by beta-Decay Spectroscopy of Spin-Polarized Na Isotopes - Shape Coexistence in ^{30}Mg -, Nuclear Structure 2012 (NS12), Argonne, USA, Aug. 13-17, 2012

〔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

<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

(3)連携研究者

宮武 宇也 (MIYATAKE, Hiroari)

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