

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14492

研究課題名（和文）新奇手法による中性子過剰核の構造研究：“逆転の島”境界原子核の完全理解に向けて

研究課題名（英文）Structure study of neutron-rich nuclei by unique method to understand "island of inversion" nuclei

研究代表者

西畑 洸希 (Nishibata, Hiroki)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：00782004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：中性子魔法数20付近の中性子過剰な原子核は、基底状態で変形が予測されるなど魔法数が破れている構造が実験的に示唆され、その出現機構の解明に向けさまざまな実験的研究が行われている。本研究では、スピン偏極したMg-31原子核を用いて、そのベータ崩壊によって娘核であるAl-31について実験を実施した。得られたデータについて、ベータ線の非対称度によりAl-31について7つの励起状態のスピンを含めた詳細な準位構造を初めて明らかにした。得られた準位構造について大規模核模型計算と比較し、Al-31の励起状態において球形や軸対称変形していると考えられる状態などさまざまな構造が共存していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子過剰な魔法数20付近の原子核はその特異な構造が実験的に示唆され、その構造を解き明かすべく1990年代からさまざまな実験が実施されてきた。一方で、さまざまな研究にもかかわらずデータが存在するのは基底状態付近に限られ、特にスピンなどの情報は得られていないのが当時の現状であった。本研究では、Al-31の励起状態のスピンを含めた詳細な励起構造を明らかとし、この原子核領域における精密核分光研究における第一歩となったと考えられる。また、得られた中性子過剰核における知見は、宇宙の元素合成の解明にもつながると期待される。

研究成果の概要（英文）：For neutron-rich nuclei with the neutron number close to the magic number 20, the anomalous structures, such as unexpected ground-state deformation, were suggested by several experiments. Because of such exotic structure, many experimental and theoretical approaches have been made to reveal the mechanism. In the present work, the structure of neutron-rich Al-31 was investigated by our unique method of beta-decay spectroscopy of spin-polarized Mg-31. As a result, the detailed level of Al-31, including newly assigned spins for 7 excited levels, was obtained. By comparing the experimental results with the large-scale shell-model calculations, it was found that various structures, such as spherical and deformed states, coexist in Al-31.

研究分野：原子核物理学

キーワード：不安定原子核

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

原子核は陽子と中性子で構成され量子多体系を形成しており、その構造は陽子数・中性子数やそのバランスによって多様に変化することが知られている。例えば、中性子数または陽子数が魔法数となった時にその構造が安定となる殻構造、原子核全体が一体となり振動・回転運動をする集団運動などである。このような構造に関する描像は主に中性子と陽子数が比較的近い安定核やその周辺原子核の構造研究によって得られたものであり、陽子数に比べて極端に多い(もしくは少ない)原子核においてどこまで通用するかということは必ずしもよくわかっておらず、現代物理学の重要課題の一つとなっている。

近年、加速器技術の発展によって安定核離れた原子核の生成が可能となり、中性子過剰原子核の構造が安定核周辺と比べて異なることが徐々に明らかとなってきた。その中で特に注目を集めているのが、中性子数 20 付近の中性子過剰な原子核領域である。この領域は、中性子数が魔法数 20 付近であるにもかかわらず、基底状態で軸対称に変形しているという魔法数 20 が破れていることが実験的に示唆され、1990 年代からさまざまな実験的・理論的研究が行われている [1]。特にどの原子核の基底状態で変形しているかということにフォーカスして研究が行われており、図 1 に示すように広い範囲で基底状態が変形していることが明らかとなった。近年の理論計算により、これらの構造は、球形となりやすい平均場による効果と変形を引き起こす核子間の相関のせめぎ合いによって起きていると解釈されている [2]。また、それらの競合から励起状態において球形と変形の状態が狭いエネルギー範囲に共存するという特異な構造が予測されている。このような構造を調べるためには、励起状態の詳細な情報が必要であるが、現状では励起状態について実験で得られている情報は限られている。特にスピン・パリティはほぼ未決定であり、詳細な構造の議論は非常に困難であった。

本研究では、スピンを空間的に偏らせた(スピン偏極した)不安定原子核を用いた方法を用いて、励起状態の詳細なデータを得ることを目指す。

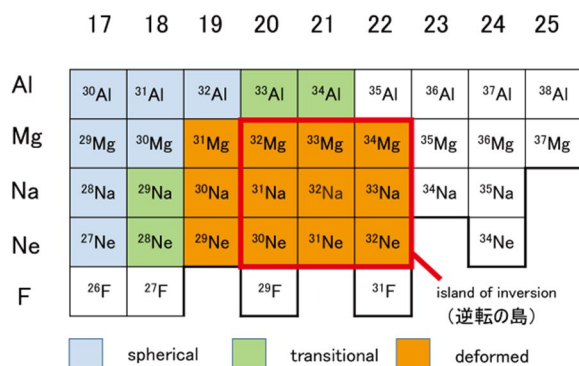


図 1 中性子 20 付近の核図表。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、中性子魔法数 20 付近に位置する中性子過剰な Al 原子核の構造を系統的に調べ、この原子核領域における特異な構造の出現機構を明らかにすることである。そのために本研究では、以下の 2 つを目的とする。

- TRIUMF 研究所におけるより中性子過剰な <sup>33</sup>Al ( $N = 20$ ) の実験に向けた、比較的統計量の多い <sup>31</sup>Mg ビームを用いたアルカリ土類金属ビームのスピン偏極生成テストおよびビームラインの整備。
- スピン偏極 <sup>31</sup>Mg のベータ崩壊を用いた中性子過剰原子核 <sup>31</sup>Al ( $N = 18$ ) の構造解明。

### 3. 研究の方法

不安定原子核の Mg のスピン偏極は TRIUMF 研究所におけるスピン偏極ビームライン [3] にて生成する。その模式図を図 2 に示す。不安定核 Mg<sup>+</sup> ビームは、図の左から右に輸送され灰色に示された領域で、オプティカルポンピング法を用いて、偏極が生成される。さらにその下流に配置された冷却 He ガスセルとの散乱により、Mg<sup>2+</sup> にイオン化され、ベータ線・ガンマ線測定セットアップが配置されているビームライン下流まで輸送される。Mg<sup>2+</sup> にイオン化するのは、環境磁場によ

りスピン偏極の向きが変化してしまうのを防ぐためである。

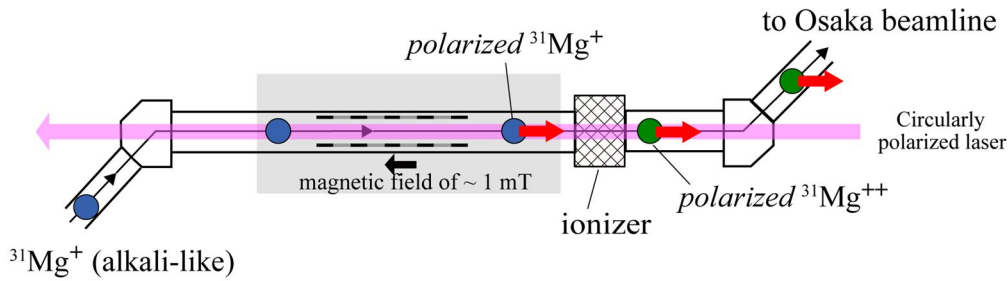


図 2 偏極ビームラインの模式図。

本研究では、スピン偏極した  $^{31}\text{Mg}$  原子核のベータ崩壊を用いて娘核  $^{31}\text{Al}$  の励起状態のスピンを実験的に決定するという独自の核分光研究を用いて、 $^{31}\text{Al}$  の励起状態を詳細に調べる。その手法について以下の通り説明する。図 3 左図のように  $^{31}\text{Mg}$  がベータ崩壊すると  $^{31}\text{Al}$  の励起状態に遷移し、その後ガンマ線を放出する。そのエネルギーと強度を測定することで、励起状態の励起エネルギーや分岐比を決定することができる。本手法ではさらに親核をスピン偏極させる。すると、弱い相互作用がパリティ非保存であることを反映して、放出されるベータ線の放出角度分布は  $W(\theta) \sim 1 + A \cos \theta$  のように非均等になる。ここで、 $A$  は非対称度、 $P$  は親核の偏極度、 $\theta$  は偏極向きを基準としたベータ線の放出角度を示す。この非対称度  $A$  をスピンの決定に用いる。ポイントとなるのは、 $A$  は親核のスピン ( $I_i$ ) と遷移先の娘核の状態のスピン ( $I_f$ ) に大きく依存しているという点である。例えば  $^{31}\text{Mg}$  のベータ崩壊の場合は、親核  $^{31}\text{Mg}$  のスピンは  $I_i = 1/2$  であるので、許容遷移を考えると可能な娘核の遷移先は、 $I_f = 1/2$  or  $3/2$  となる。この時の  $A$  は、それぞれ  $-0.67$  ( $I_f = 1/2$ ) と  $+0.33$  ( $I_f = 3/2$ ) となる。このように  $I_f$  によって大きく値が異なるため、実験的に  $A$  を決定することによって、娘核の励起状態のスピンを決定することができる。また、実施に  $A$  を決定するには、図 3 の右図のようにスピン偏極の向きに対して、 $\theta = 0^\circ$  および  $\theta = 180^\circ$  方向に配置したベータ線検出器のカウント数を調べることで、比較的容易に決定することができる。また、ベータ線とガンマ線を同時測定することにより、ベータ遷移先の  $^{31}\text{Al}$  の状態を特定しながらベータ線の非対称度を測定し、 $^{31}\text{Al}$  の励起状態のスピンを一度に決定することができる。

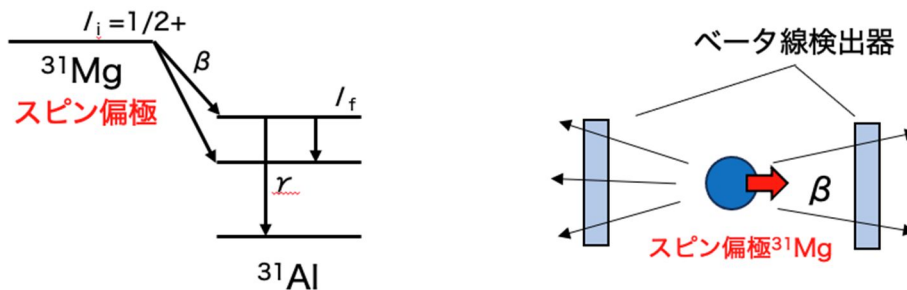


図 3 左図：スピン偏極のベータ崩壊、右図：ベータ線の放出分布測定の様式図。

#### 4. 研究成果

まず、本研究で実施した  $^{31}\text{Mg}$  ビームを用いたスピン偏極生成の結果について報告する。研究方法で示した方法で、実際に  $^{31}\text{Mg}$  のスピン偏極度を測定した結果、得られた  $^{31}\text{Mg}$  の偏極度は、 $P = 2.8\%$  であった。この結果は、アルカリ原子核で得られていた典型的な偏極度  $P \sim 30\%$  [4] に比べて非常に小さな値であった。偏極度の大きさは測定効率に大きく依存するため[4]、より低収量な  $^{31}\text{Mg}$  ビームなどを用いた実験では、偏極度の向上が必須である。実験の解析の結果、 $\text{Mg}^+ \rightarrow \text{Mg}^{2+}$  の過程で大きく減偏極していることが明らかとなった。そこで本研究では、減偏極の原因となるイオン化をさせずにビームライン下流まで郵送するために、ビームラインに沿って磁場を印加するためのコイルを設置することにした。現在、コイルの設置はほぼ完了しており、スピン偏極  $^{31}\text{Mg}$  を用いた  $^{31}\text{Al}$  の構造研究のための実験準備が整った。

次に、スピン偏極  $^{31}\text{Mg}$  を用いた実験の結果について報告する。上記の通り、得られたスピン偏極は予定の  $1/10$  程度であったものの、 $^{31}\text{Mg}$  のビーム量が高収量であったため、ベータ線の非対称度のデータを取得することができた。図 4 は実験的に得られたそれぞれの  $^{31}\text{Al}$  の励起状態における  $A$  値を示している。点線はそれぞれのスピンで予測される  $A$  値の値を示している。この図に見られるように、実験データはどちらかのスピン ( $I_f = 1/2$  または  $3/2$ ) から予測される値と一致している。したがってこの図から、 $^{31}\text{Al}$  における 7 つの励起状態のスピンを決定した。また、

詳細なガンマ線測定の実験結果から、新たに8つの励起状態を発見することができた。

得られた詳細な  $^{31}\text{Al}$  の励起状態について、大規模核模型計算の結果と比較した。得られた準位構造について大規模核模型計算と比較し、 $\text{Al-31}$  の励起状態において球形や軸対称変形していると考えられる状態などさまざまな構造が共存していることを明らかにした。

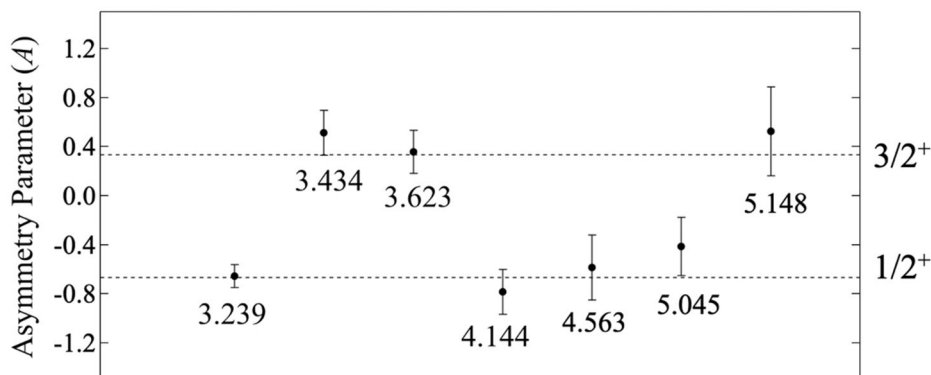


図 4 実験的に得られた各  $^{31}\text{Al}$  の励起状態の  $A$  値。

#### 参考文献

- [1] O. Sorlin and M.-G. Porquet, Prog. Part. Nucl. Phys. **61**, 602 (2008).
- [2] E. Caurier, F. Nowacki and A. Poves, Phys. Rev. C **90**, 014302 (2014).
- [3] C. D. P. Levy, M. R. Pearson, R. F. Kiefl, E. Mane, G. D. Morris, and A. Voss, Hyperfine Interact. **225**, 111 (2014).
- [4] H. Nishibata et al., Phys. Rev. C **99**, 024322 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大上能弘、小田原厚子、西畑洸希、下田正、大谷優里花、飯村俊、Nurhafiza M.Nor.、前島大樹、金谷晋之介、吉岡篤志、浜野友哉、関口直太、浅川寛太、C.D.P. Levy、M.R. Pearson、J. Lassen、R. Li
2. 発表標題 33Mgの崩壊による中性子過剰核33Alの束縛状態と中性子非束縛状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前島大樹、小田原厚子、西畑洸希、下田正、大上能弘、飯村俊、金谷晋之介、大谷優里花、浜野勇哉、関口直太、浅川寛太、C.D.P Levy、M.R.Pearson、J.Lassen、R.Li
2. 発表標題 スピン偏極31Mgビームを用いた31Al核の構造研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大上能弘、小田原厚子、西畑洸希、下田正、大谷優里花、前島大樹、金谷晋之介、飯村俊、吉岡篤志、浜野勇哉、関口直太、浅川寛太、C.D.P Levy、M.R.Pearson、J.Lassen、R.Li
2. 発表標題 33Mgの遅発中性子崩壊による中性子過剰核33Alの中性子非束縛状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------