

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13574

研究課題名（和文）中性子過剰核における新奇手法を用いた構造解明

研究課題名（英文）New method to study structure of neutron-rich 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）：本研究は中性子が極端に多い(中性子過剰)原子核の構造を詳細に調べることを目的としている。近年加速器技術の発展で中性子過剰原子核が大強度で生成可能となった一方で、構造の議論に不可欠な励起状態のスピンを決定する有効手法が限られたままであった。本研究では、スピンがある方向に揃った(スピン偏極した)原子核から放出されるベータ線放出の空間的異方性を用いる手法によりこの問題にアプローチする。その第一段階として、中性子過剰原子核のスピン偏極を生成する新手法の提案・その実証実験を行い、その有効性を確かめた。以上より、スピン偏極核を用いた中性子過剰核研究の準備が整った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は安定核から遠く離れた中性子が極端に多い原子核を研究することを目的としている。中性子過剰核の構造は、原子核の構造自体の興味以外にも宇宙における爆発的要素合成過程の研究においても重要である。この構造解明のために、スピン偏極した原子核のベータ崩壊を用いるという独自な方法でアプローチしている。その第一段階として、中性子過剰核の新たなスピン偏極生成法の開発を行い、実証実験においてその有効性が確かめられた。本手法の確立によって、中性子過剰核研究の発展が期待できる。加えて、スピン偏極原子核は核磁気共鳴法に利用できるため、他研究分野への応用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：The present work aims at investigating structure of neutron-rich nuclei located far from the stability line. Thanks to the progress of accelerators, the neutron-rich nuclei are accessible; however there are few way to determine spins of their excited states, which are essential to clarify their structure. To overcome such difficulties, we take advantage of spatial asymmetry of beta rays from spin-polarized nuclei. As the first step of this study, we proposed a new method to produce the polarization of neutron-rich nuclei and successfully demonstrated the method. Now, we are ready to apply our method to neutron-rich nuclei.

研究分野：原子核物理学

キーワード：不安定原子核

1. 研究開始当初の背景

安定核に比べて中性子数が極端に多い(または少ない)原子核において、安定核と比べてその構造がどのように変化し、安定核で得られた知見がどこまで通用するか、ということは近年の原子核物理学の重要課題の一つとなっている。原子核は、陽子・中性子で構成されるフェルミ有限量子多体系であり、魔法数と呼ばれるある特定の陽子・中性子数で比較的安定となる殻構造、軸対称に大きく歪んだ集団運動など多様な構造が出現する。しかし、このような描像は安定核や安定核付近の核の構造研究により得られたものであり、安定核から離れた原子核にどこまで通用するかということは必ずしも明らかになっていない。

近年加速器技術の進展により、生成が困難であった安定核から遠く離れた原子核の生成が可能になり、中性子過剰原子核の研究が進みつつある。例えば、中性子数が魔法数 20 付近の中性子過剰な Ne, Na, Mg 同位体の“逆転の島”と呼ばれる質量領域である。陽子や中性子が魔法数の原子核では基底状態で球形であることが予測されるが、この原子核領域では、軸対称に変形した状態が基底状態に現れるという球形と変形状態の逆転現象が起きており、現在注目を集めている。このような原子核の詳細な構造研究は、理論モデルの検証や核力のアイソスピン依存性などを引き出す良いプローブとなっている。しかし、長年の研究にもかかわらず、多くの中性子過剰原子核において原子核構造を議論する上で重要な電磁気モーメントやスピン・パリティなどの情報は限られている。

そのような状況を打破するために、我々はスピン偏極した原子核から放出されるベータ線の空間的に非対称な放出角度分布とガンマ線・中性子を同時測定することにより、その娘核のスピン・パリティを決定するという独自の手法(偏極核 β 線核分光)を開発してきた。この手法はカナダの TRIUMF 研究所で生成されるスピン偏極した不安定 Na 原子核を用いた中性子過剰な Mg 核の研究などで成功を収めている[1]。

この手法を適用するには、親核をスピン偏極させる必要がある。例えば、TRIUMF 研究所では、レーザーを用いたオプティカルポンピング法によりスピン偏極を生成しているが、現在のところその利用はアルカリ原子に限られている。他にも、理化学研究所などでは、核破砕反応の反応メカニズムを用いてスピン偏極生成が行われていたが、ビームとして利用できる安定核から離れた原子核については偏極生成が困難である。したがって、中性子過剰核の広い領域で上記の偏極核 β 線核分光などを適用するためには、新たな核スピン生成法の開発が必要である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第一の目的は、我々が開発してきた偏極核 β 線核分光を様々な原子核に適用するために、新たなスピン偏極法を開発することである。そこで、本研究では理化学研究所 RI ビームファクトリー(RIBF)において大強度で生成されるスピンがある軸に揃った(スピン整列した)原子核ビームに注目した。RIBF の最新の RI 生成分離装置を用いて、2 回ビームを標的と反応させる手法により非常に高効率でスピンが揃った(スピン整列した)ビームの生成に成功しており、この高スピン整列ビームを用いることで、スピン偏極生成が可能であると考えた。

(2) 現在 TRIUMF 研究所で用いているオプティカルポンピング法での偏極生成はアルカリ元素に限られていた。この方法を他の核種に適用するために技術開発を行うことも、本研究の目的の一つである。

(3) 今後より中性子過剰な原子核を対象とするため、低収量なスピン偏極ビームを取り扱うことが予測される。そのためのデータ収集系の効率化や偏極核 β 線核分光についての解析手法の開発も併せて行う。

3. 研究の方法

<スピン整列からスピン偏極を生成する新手法>

本研究では、RIBF により生成が可能となった不安定核スピン整列ビームに注目し、その中性子過剰領域でも最大 30%という非常に大きい整列度のビームを用いて、そのスピン分布をベータ線検出型核磁気共鳴方(ベータ NMR)の手法を用いて操りスピン偏極を生成する新たな手法を考案した。本手法は、化学的性質・電子配置によらずほぼすべての原子核に適用できるという点において、非常に有用である。この手法について以下に具体的に説明する。

ここでは、スピン 3/2 の原子核の場合を例にとって説明する。まずスピン整列した原子核を外部磁場中の電場勾配を持つ結晶中に打ち込む。すると、それぞれ原子核の磁気双極子 (μ)・電気四重極 (Q) モーメントと磁場・電場による相互作用により、原子核の核スピン準位が図 1(a) のようにスピンに応じた数にゼーマン分離する。スピン整列した場合の m の分布は図 1(b) の左図のような分布となっているが、高速断熱通過 (AFP) による高周波振動磁場 (RF) 掃引を行いその周波数が例えば $m = +3/2$ と $m = +1/2$ のエネルギー差を通過していた場合、それらの分布は右図のように逆転し、スピン偏極させることができる。この手法では、整列度 30% のビームから 20% という非常に大きなスピン偏極度を得ることができ、これは偏極核 β 線核分光法に十分な偏極度である。以上に加えて、分離のエネルギー差はそれぞれ μ モーメントによる項 (ν_L) と Q モーメントによる項 (ν_Q) により記述できるため、偏極を生成すると同時に電磁気モーメントも測定でき、かつ共鳴の数からスピンも直接測定することができる。

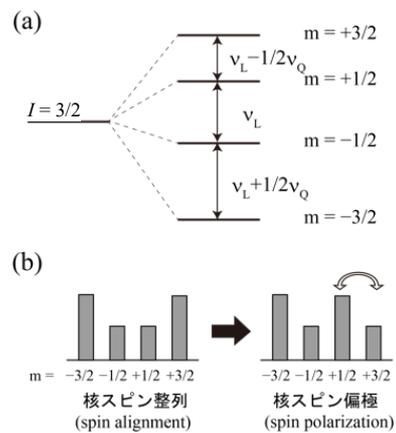


図 1 (a) 原子核のゼーマン分離の模式図、(b) 核スピン整列と偏極。

<偏極核 β 線核分光>

本研究では、スピン偏極 Ne 核のベータ崩壊を用いて Na 核の励起状態の準位構造を調べる。通常のベータ・ガンマ核分光では、ベータ線とガンマ線を同時に測定することで、娘核の固有状態の励起エネルギーのベータ線とガンマ線強度を測定する。しかし、これだけではスピン・パリティは決定することができない。そこで、我々はスピン偏極した原子核のベータ崩壊を用いる。スピン偏極した原子核からのベータ線は、ベータ崩壊でパリティが保存しないことを反映して、 $W(\theta) = AP \cos(\theta)$ という非等方な放出分布を持つ。 θ は偏極からのベータ線の角度、 P は偏極度、 A は非対称度パラメータである。 A 値は親核のスピン (I_i) と娘核の状態のスピン (I_f) に依存する定数で、例えば $I_i = 3/2$ の場合、それぞれ $A = +0.6$ ($I_f = 5/2$)、 -0.4 ($I_f = 3/2$)、 -1.0 ($I_f = 1/2$) となる。ここで重要な点は、 I_f に応じて A 値が非常に離散的な値をとるという点である。つまり、 A 値を実験的に決定することができれば娘核の励起状態のスピン・パリティを明確に決定できる。

4. 研究成果

(1) スピン偏極法の開発

本研究で新たに提案するスピン整列核を用いた核モーメント測定・スピン偏極生成の原理実証を行うために、基底状態の核モーメント・スピンの既知の短寿命不安定核 ^{13}B を用いて実験を行った。

実験は、放射線医学総合研究所における重粒子線がん治療装置 (HIMAC) を用いて行った。シンクロトロンで核子あたり 100 MeV まで加速された ^{15}N ビームを ^9Be 標的に照射し、2 次ビームライン SB2 で目的の ^{13}B を選び出し、ビームライン最下流に設置してある実験装置まで輸送した。スピン整列は、SB2 ビームラインの第一焦点面 (F1) に配置された運動量スリットを用いて、 ^{13}B の運動量分布の一部を切り出すことによりスピン整列を生成した。

この実験で得られた NMR スペクトルを図 2 に示す。横軸は印加した RF の周波数、縦軸は RF を印加した時としていない時それぞれ整列の向き 0 度と 180 度方向に設置したベータ線検出器のカウント数の比の二重比を取ったものである。共鳴が観測されれば、この二重比が 1 からずれる。実際の実験ではまず RF の掃引周波数幅を広くし、広い周波数で共鳴を探した。その結果 3100 kHz と 3400 kHz 付近に共鳴を観測した。この共鳴周波数付近で得られたスピン偏極度は最大 4% 程度であり、本手法によりスピン整列からスピン偏極を生成可能であるということが初めて確かめられた。

さらに、より高精度で共鳴周波数を決定するために、共鳴が得られた周波数付近を狭い周波数幅を用いてスキャンし、高精度で共鳴を観測することに成功した。このスペクトルから得られる μ モーメントと Q モーメントの相対誤差はそれぞれ $\pm 0.3\%$ と $\pm 5\%$ 程度であり、これは原子核の構造を議論する上で十分な精度である。得られた μ モーメントと Q モーメントはいずれも過去の文献値と誤差の範囲で一致した。

以上の結果より、本研究で提案される手法を実証することができ、理化学研究所で生成される大強度・高整列ビームと組み合わせることで、広い原子核領域で偏極核 β 線核分光による励起状態のスピン・パリティの決定、基底状態の核モーメントの決定する実験の準備ができたと考えられる。

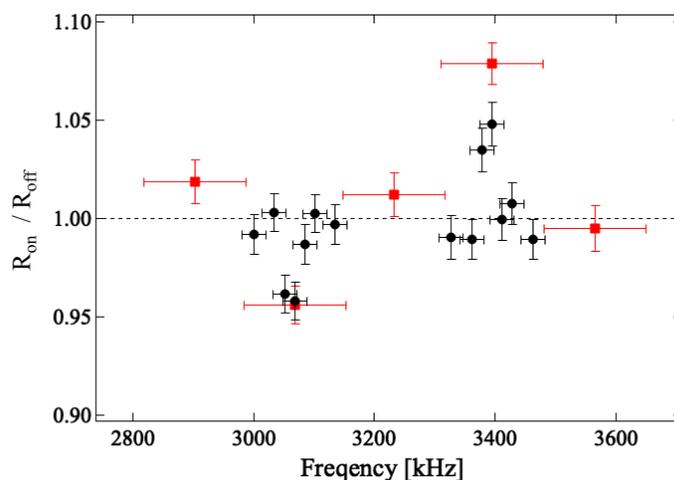


図2 スピン整列 ^{13}B から得られた NMR スペクトル。横軸のエラーバーは掃印周波数幅 ± 84 kHz (■) と ± 20 kHz (●) を示す。縦軸は、0 度と 180 度に配置したベータ線検出器のカウント数の比の RF を印加した場合 (R_{on})、印加しなかった場合 (R_{off}) の二重比を取ったものである。

(2) オプティカルポンピング法のアルカリ土類元素への拡張

カナダの TRIUMF 研究所において、アルカリ土類元素である Mg のスピン偏極を生成する実験を 2019 年 9 月に実施した。その実験では不安定 ^{31}Mg 核を生成し、1 価のイオンとして偏極ビームラインまで輸送する。Mg+ はアルカリと同じ原子配置となるためアルカリと同様にオプティカルポンピング法が適用できる。さらにこの実験では、Mg+ イオンを交互に電圧を増減させた金属チューブを通過させ、Mg+ イオンの加速・減速を繰り返させることで、ドップラー効果によって超微細構造によって分裂した Mg+ の基底状態の両方に対してレーザーを吸収させることができ、より高偏極を生成できるという手法を用いた。その結果、およそ 2.7% のスピン偏極を生成することに成功した。

しかし、得られた偏極度は予想に反して小さい(アルカリ元素に対しては 30% 程度の偏極生成もできている)ため、さらなる研究開発が必要となる。

(3) データ収集系および解析手法の確立

本研究では、データ収集系および解析手法の確立も併せて行った。データ収集系については、CAMAC 規格のモジュールをベースにした収集系を構築し用いていたが、検出器の多チャンネル化によりそれに対応したモジュールが限られていることやデータ収集の不感時間が長いことが問題となっている。そのため、多チャンネルかつアナログ-デジタル変換時間が短い VME 規格を用いたデータ収集系を新たに開発した。

解析手法の確立については、特にベータ遅延中性子に着目し行った。特に中性子過剰原子核においては、中性子が放出される確率が大きくなるため、詳細な励起状態の研究にはその解析が必要となる。過去に取得した ^{31}Na のベータ崩壊データの解析を進めた。GEANT4 を用いたシミュレーションと合わせ、中性子の壁・床による散乱の効果を取り入れることで、過去に取得した中性子のエネルギースペクトルの再現ができることがわかった。今後、シミュレーションと実際のスペクトルを比較しながら解析することで中性子エネルギーをより正確に決定できることが期待できる。

参考文献

- [1] O. Sorlin and M.-G. Porquet, Prog. Part. Nucl. Phys. 61, 602 (2008).
- [2] H. Nishibata et al., Phys. Lett. B 767, 81 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishibata H., Kanaya S., Shimoda T., Odahara A., Morimoto S., Yagi A., Kanaoka H., Pearson M. R., Levy C. D. P., Kimura M., Tsunoda N., Otsuka T.	4. 巻 99
2. 論文標題 Structure of Mg31: Shape coexistence revealed by γ -ray spectroscopy with spin-polarized Na31	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 24322
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.99.024322	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 濱野友哉, 西畑洸希, 小田原厚子, 下田正, 前島大樹, 大上能弘, 大谷優里花, 飯村俊, 金谷 晋之介, 畠山温, 浅川寛太, 関口直太, 平山賀一, 若狭智嗣, C.D.P. Levy, M.R. Pearson, J. Lassen, R. Li
2. 発表標題 スピン偏極Mgビームを用いた中性子過剰Alの構造研究
3. 学会等名 第125回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hamano, H. Nishibata, T. Wakasa, A. Odahara, T. Shimoda, D. Maejima, Y. Okami, Y. Otani, S. Iimura, S. Kanaya, A. Hatakeyama, K. Asakawa, N. Sekiguchi, Y. Hirayama, C.D.P. Levy, M.R. Pearson, J. Lassen, R. Li
2. 発表標題 Structure of neutron-rich Al investigated by spin-polarized Mg
3. 学会等名 the International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西畑洸希, 濱野友哉, 小田原厚子, 下田正, 前島大樹, 大上能弘, 大谷優里花, 金谷晋之介, 飯村俊, 関口直太, 浅川寛太, 畠山温, 平山賀一, 若狭智嗣, C.D.P. Levy, M.R. Pearson, J. Lassen, R. Li
2. 発表標題 スピン偏極Mgのベータ崩壊を用いた中性子過剰なAl同位体の構造研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西畑 洸希
2. 発表標題 偏極Naビームで探る中性子過剰原子核 ^{30}Mg , ^{31}Mg の多様な原子核構造
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Nishibata, Shinnosuke Kanaya, Tadashi Shimoda, Atsuko Odahara, Shota Morimoto, Ayumi Yagi, Hiroshi Kanaoka, Matthew Pearson, Phil Levy, Masaaki Kimura, Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka
2. 発表標題 Structure of neutron-rich ^{31}Mg by β -decay spectroscopy of spin-polarized ^{31}Na
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nishibata, S. Kanaya, T. Shimoda, A. Odahara, S. Morimoto, A. Yagi, H. Kanaoka, M. R. Pearson, C. D. P. Levy, M. Kimura, N. Tsunoda, and T. Otsuka
2. 発表標題 Shape coexistence in ^{31}Mg revealed by β -g and β -g-n spectroscopy with spin-polarized ^{31}Na
3. 学会等名 The IX International Symposium on Exotic Nuclei (EXON2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------