

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月11日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540313

研究課題名（和文）陽子ドリップライン近傍核の電磁気モーメント

研究課題名（英文）Electromagnetic Moments of Unstable Nuclei around Vicinity of Proton-Drip Line

研究代表者

松多 健策（MATSUTA KENSAKU）

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50181722

研究成果の概要（和文）：原子核構造、特にスピン期待値やハロー構造の解明を目的として、原子核の電磁気モーメントの実験的研究を行った。 $^{31}\text{Cl}$ 、 $^{24\text{m}}\text{Al}$ 、 $^{28}\text{P}$  など特に陽子過剰の原子核のモーメントを観測し、その構造が明らかになりつつ有る。加えて、重イオン反応を用いた核スピン偏極の生成に関する知見が大きく進んだ。

研究成果の概要（英文）：For the elucidation of the nuclear structure, especially spin expectation value and the halo structure, we performed experimental research on the nuclear electromagnetic moments. We observed moments of proton-rich nuclei  $^{31}\text{Cl}$ ,  $^{24\text{m}}\text{Al}$ ,  $^{28}\text{P}$  etc., and the nuclear structure of these nuclei is being made clear. Additionally, our knowledge on the polarization creation through the heavy ion reaction is greatly progressed.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2011年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2012年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

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：磁気モーメント、陽子ドリップライン、核構造、核スピン偏極機構

不安定核ビーム、核磁気共鳴、ベータ NMR、荷電交換過程

## 1. 研究開始当初の背景

約15年前、極端に陽子過剰なCの同位体 $^{9}\text{C}$ の磁気モーメントの測定に始めて成功し（Nucl. Phys. A 588 (1995)153c）、 $^{9}\text{C}$ - $^{9}\text{Li}$  対のモーメントの和に相当する、アイソスカラーモーメントからスピン期待値を導出した。得られたスピン期待値1.4は、図1のMass=9に示す様に、ナイーブな理論限界値1.0を大きく超える異常値を取った。これは、それま

で知られていた安定線の近傍（アイソスピンの1/2）のどの原子核にも見られない異常な現象で、通常のシェルモデル計算などでは再現不能な、安定線から遠く離れ（アイソスピンが3/2）極めて浅くバウンドされた原子核に特有の未知の構造を反映していると思われた。

有馬朗人ら（Nucl. Phys. A 704 (2002)1c）は、シェルモデルに比べ比較的近いスピン期待値

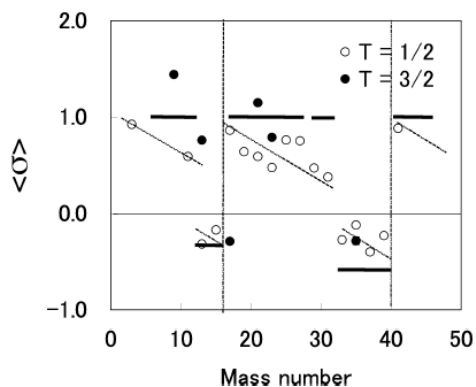


図1 核スピン期待値

を再現する鈴木等のクラスターモデル(Phys. Rev. C 52 (1995) 3013)や堀内等の反対称化分子動力学モデル(Phys. Rev. C 52 (1996) R468)等の理論計算との比較検討などから、スピン期待値自身には異常は見られない事を見だし、見かけ上アイソスカラーモーメントに異常が出現するのは、極端に不安定な鏡映核のペアで核構造がもはや対称ではなくなり、主に軌道角運動量に非対称が生じるためであることを見いだした。これまでこのような現象はあらわには観測された事は無く、既存の原子核構造理論の修正を迫る事となった。

最近、この方向でのシェルモデル計算が宇都野等によって行われ一応の成功を収めた(Phys. Rev. C 70 (2004) 011303(R))。すなわち、 ${}^9\text{C}$ - ${}^9\text{Li}$  ペアについては、主にはクーロンエネルギーの違いによる動径波動関数の非対称(トーマス・エールマン偏移として知られている)に起因して、軌道の配位自身がアイソスピン非対称となり、観測にかかるほどのモーメントの非対称を引き起こす事が明らかとなった。陽子/中性子比が大きく平衡から外れた不安定核においては、陽子と中性子の軌道間テンソル相互作用のため軌道上の有効エネルギーが変化し、シェルギャップが伸縮するため、クーロンエネルギーを通じてアイソスピン対称性にも影響すると考えてまず間違いはなさそうである。しかしながら、いまだ定量的な予言には至っておらず、系統的な研究による徹底した解明が必要である。そこで本提案では、2つの方向に研究を展開する。一つは、アイソスピンが 3/2 の別の異常スピン期待値の探索であり、もう一つは、動径波動関数の精密化である。前者は磁気モーメント、後者は電気四重極モーメントの測定を意味している。

## 2. 研究の目的

ドリップライン上の  ${}^9\text{C}$  で発見された異常スピン期待値の原因を明らかにし、不安定核構造におけるアイソスピン対称性の適応限界を解明し、もって、不安定核構造の統一的理解に一步近づくために、質量数 40 までの比較的軽い領域に位置するベータ放射性原子核のうち、極端に陽子過剰でドリップライン近傍にあり、陽子崩壊に対してやっとならびに四重極モーメントの精密測定を行う。

これらの陽子ドリップライン近傍核はアイソスピンが 3/2 と大きく、陽子/中性子比が安定核から大きく外れた極限状況下にある。このような極限状態では過剰核子の密度分布が外側に押し出されて、いわゆるハロー構造をとり、異種核子間の強い核力を反映して一つ上のシェルとのギャップが狭まって、上位シェルへの励起を起しやすくなるため、励起構造やモーメントなどに特異な現象が起きる。 ${}^9\text{C}$  の異常スピン期待値もその一つである。しかし、現在の発達した核モデルを持ってしてもこれらの影響を精密に予言できるまでには至っていない。加えて、電磁相互作用が原子核構造に及ぼす影響の詳細も明らかになっているとは言いがたく、アイソスピン対称性のわずかな破れ、すなわち陽子過剰側と中性子過剰側での核構造の差異についてこれまで十分な注意が払われてこなかった。そこで、本実験計画では、これらの現象を正しく理解するため、外側のシェルへの配位構造に特に敏感で、 $10^{-4}$  という極めて精密な測定ができる核磁気モーメント、ならびにハロー構造に関する動径波動関数に敏感な電気四重極モーメントの測定を通して、これらの問題を明らかにする。

## 3. 研究の方法

陽子ドリップライン近傍の不安定核  ${}^{25}\text{Si}$  と  ${}^{31}\text{Cl}$  その他の磁気モーメント及び電気四重極モーメントの測定、ならびに  ${}^9\text{C}$  の電気四重極モーメント測定を理研及び阪大核物理研究センターのリングサイクロロンや放射線医学総合研究所の重イオンシンクロロン HIMAC で行う。

サイクロロンで加速された中間エネルギー重イオンビーム ( ${}^{28}\text{Si}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ) を用いて生成した不安定核を、セパレーターで分離し、比較的純度の高い核スピン偏極した不安定核のビームを生成する。得られた偏極不安定核を磁場中の薄い半導体結晶やイオン結晶中に植え込み、放出されるベータ線の非対称から核スピン偏極の方向を検出する。これに

核磁気共鳴を起こすと核スピンの反転にもなって非対称度が変化し、これからNMRの信号が得られ、電磁気モーメントが決定出来る。(β-NMR/NQR)。

静磁場内の核スピンの歳差運動の周波数を磁気共鳴法で測定すると核磁気モーメントが測定出来る。また、結晶内部に電場勾配があるものを用いると、核の四重極モーメントとの相互作用で共鳴ピークが分裂し、分裂幅から四重極モーメントが測定できる。効率を上げるため、多重に高周波磁場を印可する核四重極共鳴法(β-NQR)を開発済みであり、これを使用する。

これまでの理研や放医研並びに TRIUMF との共同研究で、核スピン偏極法、スピン制御法を含めβ-NMR/NQRの実験手法を確立しており、偏極保持サンプルに関しても、Si 同位体に対して Si や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 単結晶の実績がある。本格的な実験のためにはβ線検出器系、高速スピン制御のためのNMR系、高速データ収集系等の改良が不可欠である。また、本提案では、重イオン衝突におけるピックアッププロセスを使った偏極不安定核の生成を行う事で、効率よく実験を行う事をも狙っている。

#### 4. 研究成果

##### (1) <sup>31</sup>Clの磁気モーメント測定

理化学研究所にて、<sup>31</sup>Clの磁気モーメント測定の実験課題が採択されており、ビームタイムが24年に決定された。22年度より、この磁気モーメント精密測定の実行に向けて、精密NMR実験のためのシステム構築を行い、必要な準備研究を、後述するように、放射線医学総合研究所にて行った。真空槽、β線検出器系、NMR系(電磁石、高周波)、高速データ収集系などの準備を整え、理化学研究所にて実験を行った。<sup>31</sup>Clの測定に先立ち、<sup>33</sup>Clの磁気モーメントの測定実験を行い、図2のNMRスペクトルが得られた。これから得られた磁気モーメント  $\mu(^{33}\text{Cl}) = 0.75(3) \mu_N$  は、以前我々が求めた  $0.752(2) \mu_N$  を再確認した。

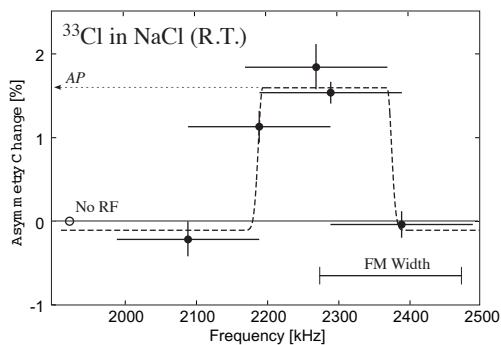


図2 <sup>33</sup>ClのNMRスペクトル

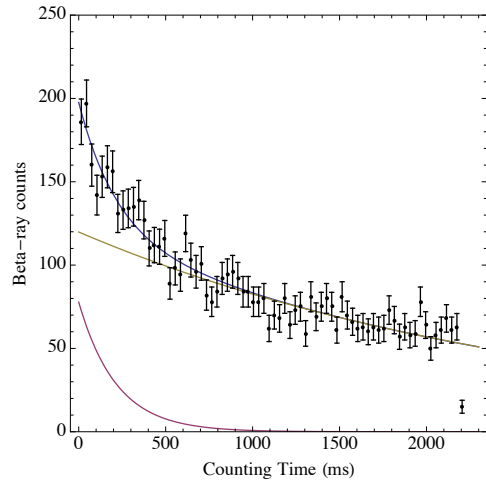


図3 <sup>31</sup>Clのベータ線時間スペクトル

これらの技術的基盤を基にして、極端に陽子過剰で、ドリップライン近傍にある<sup>31</sup>Clの磁気モーメント測定を行った。理研のリングサイクロトロンと破砕片分離装置にて、<sup>32</sup>Sビームから荷電交換反応を利用して、<sup>31</sup>Clを生成、分離し、最終焦点において、NaCl単結晶に埋め込んだ。図3のベータ線時間スペクトルに示すように、S/N比が2弱の較的好条件にて<sup>31</sup>Clを生成することに成功した。

ベータ線非対称度の観測を行い、周波数スキャンを行った結果、図4のNMRスペクトルが得られた。中心周波数から<sup>31</sup>Clの磁気モーメントが  $\mu(^{31}\text{Cl}) = 0.94(3) \mu_N$  と求まるが、有意性は十分ではない。この値はシェルモデル計算に一致し、スピン期待値に大きな異常はないように見えるが、鏡映対をなす、<sup>31</sup>Siの磁気モーメントはまだ決まっておらず、精密な議論は時期尚早である。このように、観測技術を確認したので、精密な磁気モーメントの決定は、将来の発展に期待する。

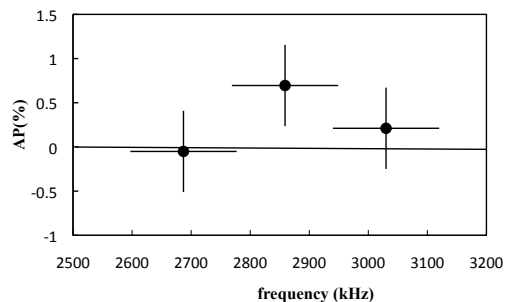


図4 <sup>31</sup>ClのNMRスペクトル(6 kG)

##### (2) <sup>24</sup>Alの磁気モーメント測定

放医研にて、100 AMeVの<sup>24</sup>Mgビームから荷電交換過程にて陽子過剰の<sup>24</sup>Alを生成し、Si中に打ち込んで、磁気モーメントを測定した。

ベータ線の観測に工夫を凝らしてS/Nを向上させ、NMRスペクトルが、図5のように得られた。これから得られた磁気モーメント  $\mu$  ( $^{24}\text{Al}$ ) = 2.98(4)  $\mu_N$  はこれまでの最高精度である。この磁気モーメントはシェルモデル計算値とほぼ一致し、異常は起こっていない。

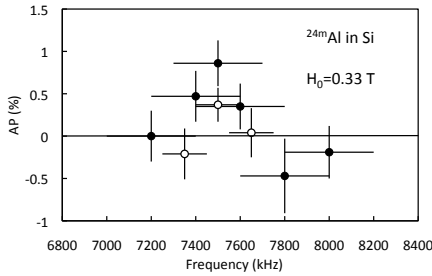


図5  $^{24}\text{mAl}$  の NMR スペクトル

今後結果を発表して行くが、並行して電気四重極モーメントの観測に期待がかかる。

### (3) $^{28}\text{P}$ の電気四重極モーメント

陽子過剰の  $^{28}\text{P}$  を  $^{28}\text{Si}$  ビームの荷電交換過程で生成し、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  単結晶に植え込んで、結晶中の電場勾配と電気四重極モーメントとの、結合定数の観測を行った。

これまでPのアイソトープのうち安定核種ではスピンの1以上のものがなく、四重極モーメントの研究は全く進んでいなかった。加えて、 $^{28}\text{P}$  は陽子過剰核で、陽子ハロー構造を持つ可能性が指摘されて来ており、その検出に有効な四重極モーメントの実験値が待たれていた。

電気四重極スペクトルは、図6のように観測出来た。200kHz付近にピークが見えるが、有意性は十分でないため、さらに研究を続行している。しかしこのピークを共鳴とすれば電気四重極モーメントが  $Q(^{28}\text{P}) = 120(14)$  mb となる。ただし、電場勾配の実験値はなく、バンド構造の第一原理計算を用いた。この値はシェルモデル計算とほぼ一致し、陽子ハロー効果は大きくない可能性が高い。

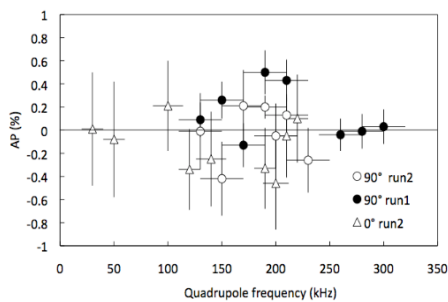


図6  $^{28}\text{P}$  の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中での四重極スペクトル

### (4) スピン偏極不安定原子核の生成

(1-3) で述べた核モーメント測定のための基礎研究として、スピン偏極した不安定核の生成技術の確立を目指し、核スピン偏極の観測などを多数行った。核スピン偏極生成は、これまでは、主に入射角破碎過程で行って来たが、近年、粒子のピックアップを含む反応過程で、効率よく生成できる事が分かって来たため、 $^{31}\text{Cl}$  の磁気モーメント測定などにこのテクニックを応用する予定にしていた。しかし、単純な粒子のピックアップではなく、粒子のはぎ取りも含む複合過程になるため、生成機構の詳細は未知であった。そこで、 $^{22}\text{Ne}$  ビームを用い、荷電交換過程で生成される  $^{22}\text{Na}$  の運動量分布の観測を行った。図7に示すように、荷電交換を含む過程では、ターゲットの中の中性子が入射核の中の陽子を単一ステップでロックアウトする過程と、粒子の移行が連続して起こる過程で、出射運動量分布に中心のシフトと幅の両方につき違いがあり、これらの区別が可能である事が初めて明らかになった。

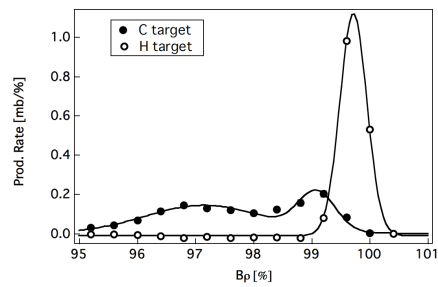


図7  $^{22}\text{Ne}$  から荷電交換過程で生成される  $^{22}\text{Na}$  の運動量分布

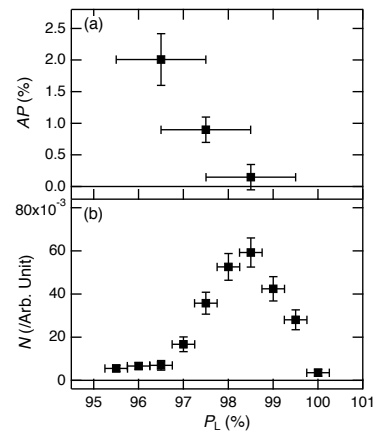


図8 荷電交換過程で生成される  $^{28}\text{P}$  の核スピン偏極の運動量依存性

また、 $^{28}\text{Si}$  ビームから、荷電交換過程で生成される、 $^{28}\text{P}$  の核スピン偏極を観測し、図8の結果を得た。これから、ロックアウトプロセスからの核偏極は大きくはなく、ピックアップ過程で主に偏極する事が明らかになった。

このように、不安定原子核ビームの生成に関し、極めて有益な実験データが得られ、中間エネルギー領域での核反応機構の理解が進むと同時に、核モーメント測定のための技術的な基盤が確立された。特に、中間エネルギー領域における、荷電交換反応の反応機構が明らかになった。この結果を基にして、ベータNMRを行い、 $^{28}\text{P}$  を始め、核モーメントの測定を成功させ、核構造を明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

① K. Matsuta, M. Mihara, M. Fukuda 他30名、Nuclear moments as a probe of electronic structure in material, exotic nuclear structure and fundamental symmetry

Hyperfine Interactions **220** (2013) 21-28.

② T. Nagatomo, H. Ueno, M. Mihara, K. Matsuta, M. Fukuda, 他15名、Precise Nuclear Moments of Extremely Proton-Rich Nuclides  $^{23}\text{Al}$ , Hyperfine Interactions **198** (2010) 103-137.

③ K. Matsuta, M. Mihara, M. Fukuda, 他33名、Polarization Creation in Proton-Rich  $^{28}\text{P}$  via Charge Exchange Reactions and Measurement of Its Electric Quadrupole Moment, Hyperfine Interactions **198** (2010) 147-151.

④ M. Mihara, K. Matsuta 他26名  
Electromagnetic moment of  $^{22}\text{F}$   
Nuclear Physics **A834**(2010)75c-77c.

⑤ K. Matsuta 他33名  
Nuclear structure and fundamental symmetry studied through nuclear moments.  
Nuclear Physics **A834**(2010) 424c-427c.

⑥ M. Mihara, K. Matsuta 他31名  
Nuclear Spin-Lattice Relaxation of Light Impurities in Platinum Studied by Using Polarized Unstable Nuclear Beams  
Nuclear Physics **A834** (2010) 777c-779c.

[学会発表] (計5件)

① K. Matsuta, Nuclear Moments as a Probe of Electronic Structure in Material, Exotic Nuclear Structure and Fundamental Symmetry, 4th Joint Meeting of the Int. Conf. on Hyperfine Interactions and the Int. Symp. on Nuclear Quadrupole Interactions (HFI/NQI 2012) (招待講演)、2012年09月10日～2012年09月14日、Beijing, China

② T. Minamisono, K. Matusta 他、Quadrupole Interaction of Proton-Rich  $^{28}\text{P}$  in  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  and Its Quadrupole Moment, 4th Joint Meeting of the Int. Conf. on Hyperfine Interactions and the Int. Symp. on Nuclear Quadrupole Interactions (HFI/NQI 2012) 2012年09月10日～2012年09月14日、Beijing, China

③ K. Matsuta, Polarization Creation in Proton-Rich  $^{28}\text{P}$  via Charge Exchange Reactions and Measurement of Its Electric Quadrupole Moment, 3rd Joint Int. Conf. on Hyperfine, Interactions and Int. Symp. on Nuclear Quadrupole Interactions (HFI2010)、2010年9月12-17日、CERN, Geneva(スイス)

④ 松多健策  $^{22}\text{F}$  の電気四重極モーメント、不安定原子核の理工学と物性応用研究、2011年12月22日、京大原子炉研(熊取)

⑤ 南園忠則, 松多健策 他、短寿命  $\beta$  放射核  $^{28}\text{P}$  の電気四重極モーメント、2011年12月21日、京大原子炉研(熊取)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

松多 健策 (MATSUTA KENSAKU)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：50181722

### (2)研究分担者

福田 光順 (FUKUDA MITSUNORI)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：50218939  
三原 基嗣 (MIHARA MOTOTSUGU)  
大阪大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：60294154