

## 論文内容の要旨

論文題目 In-Beam Gamma Spectroscopy of the Neutron-Rich Nucleus  $^{34}\text{Mg}$   
via Radioactive-Isotope Projectile Fragmentation  
(不安定核の入射核破碎反応を用いた中性子過剰核  $^{34}\text{Mg}$  の  
インビームガンマ線核分光)

氏名 米田 健一郎

近年の重イオン加速技術や不安定核ビームラインの発達により、安定線から遠く離れた不安定核を対象とする研究が盛んに行われるようになった。研究が進むにつれ、安定線近傍核で構築された核構造の枠組みを逸脱する構造を持つ原子核の存在が明らかにされており、非常に興味を持たれている。特に、殻構造の異常性、魔法数の消滅や新魔法数の出現が、原子核構造の新たな側面を示すものとして注目を集めている。

本論文は、インビームガンマ線核分光の手法を中性子過剰核  $^{34}\text{Mg}$  に適用し、励起準位のエネルギー測定を通じてその核構造を調べる研究である。中性子剰領域で見られるような殻構造の変化の効果は偶-偶核の回転、振動といった集団運動の性質に特徴的に現れ、励起準位のバンド構造やそれらの準位間遷移の転移確率  $B(E2)$  の測定により調べることができる。とりわけ、集団運動モードにおける振動、回転、単粒子運動の競合関係を調べるには、バンドを構成する準位のエネルギー ( $E(J^\pi=2^+, 4^+, \dots)$ ) を観測することが有効である。

中性子過剰核の集団運動の性質を調べる実験として、これまでクーロン励起法がよく用いられ、多数の中性子過剰核について  $E(2^+)$  と  $B(E2)$  が測定されてきた。しかし、クーロン励起法では高励起状態への励起断面積が小さく、得られる情報は第一励起状態に限られエネルギー準位の構造を観測することは困難である。本研究ではこの限界を超えてバンド構造の知見を拡大することを狙いとし、入射核破碎反応を用いるインビーム核分光法を中性子過剰核  $^{34}\text{Mg}$  に適用した。入射核破碎反応により励起した  $^{34}\text{Mg}$  を生成し、脱励起ガンマ線を測定する手法であるが、この方法が高励起状態の観測に有効であることは、安定核の

入射核破砕反応を用いるインビーム核分光の実験例から知られている。しかし、安定核の入射核破砕反応で直接励起した不安定核を作る方法は、安定線から非常に離れた不安定核には適用できない。安定線から遠くはなれた、生成断面積の小さい反応チャンネルのガンマ線を測定しようとするときビーム強度、標的厚を大きくする必要があるが、一方で他チャンネル起源のガンマ線量が検出器の限界を超えないようにビーム強度、標的厚を制限する必要がある。この制限により安定線から非常に離れた不安定核への適用には限界があるのである。この制限を超えて核分光情報を得るために、入射核を不安定核とする破砕反応を用いた核分光法を新たに導入した。不安定核二次ビームのビーム強度は安定核と比較して小さいが、一方で狙いとする不安定核に近い核種、例えば  $^{34}\text{Mg}$  の核分光の場合  $^{36}\text{Si}$  を入射核とすることで大きな生成断面積で生成可能になり、また厚い標的も用いることができる。その結果、ビーム量や標的厚を制限する安定核破砕の方法より全体として高効率の測定を行うことが可能となる。

この不安定核の入射核破砕反応を用いたインビームガンマ線核分光法を、中性子超過剰核  $^{34}\text{Mg}$  に適用し、第一励起状態、第二励起状態のエネルギーを測定しその構造を調べた。中性子数  $N=20$ 、陽子数  $Z=12$  近傍の中性子過剰核は、中性子数が魔法数近傍であるにもかかわらず大きく変形していることが実験、理論両面から示唆されている。実験的には、 $N=20$  の  $^{32}\text{Mg}$  に対してクーロン励起法を用いた核分光実験が行われており、基底状態からの励起の  $B(E2)$  として大きな値が得られている。これは、 $N=20$  にあるべきシェルギャップが消滅し、 $^{32}\text{Mg}$  が大きく変形していることに起因すると解釈されている。理論的には、モデル空間を大きくとることができる量子モンテカルロ殻模型の計算で、 $N=20$  近傍の中性子過剰領域では  $N=20$  のシェルギャップが弱くなり粒子-空孔励起が増大し、大きく変形するという結果を与えている。この計算は、 $^{32}\text{Mg}$  よりも  $N=22$  のマグネシウム同位体  $^{34}\text{Mg}$  の方が大きく変形するという計算結果も与えているが、実験的には中性子数が増大することにより核変形がどのように発達、あるいは消滅していくかを明らかにする実験例はなかった。本論文の研究の目的は、 $^{34}\text{Mg}$  の励起状態を観測し、そのエネルギーから変形核領域中で変形度が中性子数の増大とともにどのように発展していくかを明らかにすることである。

実験は理化学研究所の加速器施設にあるリングサイクロトロンと、不安定核ビームライン RIPS を用いて行った。核子あたり  $95\text{MeV}$  まで加速した  $^{40}\text{Ar}$  の一次ビーム（強度約  $60\text{pnA}$  を  $463\text{mg/cm}^2$  の  $^9\text{Be}$  標的に照射した。入射核破砕反応によって生成したさまざまな粒子から、RIPS を用いて不安定核  $^{36}\text{Si}$  の二次ビームを分離、生成した。生成率は毎秒約  $2 \times 10^4$  個、純度は約  $80\%$  であった。ビーム中に混ざっていた主な粒子は  $^{37}\text{P}$  で、その事象は粒子の飛行時間情報を持ちいて排除した。

生成した  $^{36}\text{Si}$  二次ビームを  $385\text{mg/cm}^2$  の  $^9\text{Be}$  二次標的に照射し、再び入射核破砕反応させた。標的の下流に並行平板型なだれ検出器 PPAC とシリコン検出器テレスコープを設置し、反応生成粒子の飛行時間と、 $\Delta E-E$  をそれぞれ測定した。シリコンテレスコープは  $2 \times 2$  のマトリックス状に配列し、それぞれ 4 層のシリコン検出器で構成した。最初の三層はイ

オン注入型シリコン検出器で、厚さは上流から  $350\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$  のものを用いた。最初の三層の検出器へのエネルギー付与から反応生成粒子の  $\Delta E$ - $E$  を測定した。四層目には  $1\text{mm}$  厚のリチウムドリフト型シリコン検出器を用い、軽い粒子がテレスコープを突き抜けた事象を排除するのに用いた。飛行時間と  $\Delta E$  の相関から反応生成粒子の  $Z$  を、 $\Delta E$ - $E$  の相関から反応生成粒子の  $A$  を決定した。 $Z\sim 12$ 、 $A\sim 30$  近傍核に対する  $Z$ 、 $A$  の分解能はそれぞれ陽子数、質量数の単位で  $0.25$ 、 $0.35$  で、 $^{34}\text{Mg}$  を他の反応生成粒子と分離するには十分であった。

二次標的の周囲に  $\text{NaI(Tl)}$ シンチレータを  $66$  個配置し、励起した反応生成粒子が放出する脱励起のガンマ線を検出した。それぞれのシンチレータは  $6\times 6\times 12\text{cm}^3$  の直方体の結晶を持っており、直径  $5.1\text{cm}$  の光電子増倍管が取り付けられていた。標的からのガンマ線放出のビーム軸に対する角度を約  $20^\circ$  の精度で決定できるように配列した。角度の情報は、高速( $v/c\sim 0.27$ )で飛んでいる反応生成粒子からのガンマ線エネルギーのドップラーシフトの補正に用いた。 $1\text{MeV}$  のガンマ線に対する全エネルギーピークの検出効率は約  $18\%$  であった。バックグラウンドガンマ線の影響を低減するために  $5\text{cm}$  厚の鉛シールドで  $\text{NaI(Tl)}$  検出器全体を覆った。

実験後、反応生成粒子とガンマ線の同時性の解析を行った。その結果、反応生成粒子が  $^{34}\text{Mg}$  であった時に同時に検出されたガンマ線のドップラー補正済みエネルギースペクトルに、2本の鋭いピークを観測した。エネルギーは  $660\text{keV}$ 、 $1460\text{keV}$  であった。他の反応生成粒子の中に、励起状態が知られている偶-偶核 ( $^{18,20}\text{O}$ 、 $^{22,24,26}\text{Ne}$ 、 $^{28,30,32}\text{Mg}$ ) があつた。これらの偶-偶核に対して得られたガンマ線のエネルギースペクトルには、ほとんどの場合2本のピークが観測され、最も強いピークは第一励起状態 ( $J^\pi=2^+$ ) から基底状態に遷移する際の脱励起ガンマ線に対応し、次に強いピークは最初の  $4^+$ 状態から第一励起状態への遷移と関連付けることができた。この系統性を  $^{34}\text{Mg}$  のガンマ線エネルギースペクトルのピークに適用し、この実験では  $^{34}\text{Mg}$  の  $2^+$ 状態のエネルギー  $E(2^+)$  を  $660\text{keV}$ 、 $4^+$ 状態のエネルギー  $E(4^+)$  のエネルギーを  $2120\text{keV}$  と決定した。

得られた  $^{34}\text{Mg}$  の  $E(2^+)$  の値  $660\text{keV}$  は、近傍の偶-偶核と比較して低い値であった。変形核である  $^{32}\text{Mg}$  の  $E(2^+)$  ( $886\text{keV}$ ) よりもさらに低く、これは  $^{34}\text{Mg}$  が変形しており、その変形度は  $^{32}\text{Mg}$  よりも大きいことを示唆している。理論計算の結果と比較すると、 $^{34}\text{Mg}$  が大きく変形していると予言していた量子モンテカルロ殻模型の計算の結果 ( $620\text{keV}$ ) が、本実験の結果とよく一致している。 $N=20$  を超える粒子-空孔励起を考慮していない殻模型の計算の結果も報告されており ( $\sim 1200\text{keV}$ )、これは  $^{34}\text{Mg}$  の  $E(2^+)$  の値を再現していない。このことから、 $^{34}\text{Mg}$  において  $N=20$  を超える粒子-空孔励起が重要な役割を果たしており、 $N=20$  のところにあるべきシェルギャップが消滅しているように振舞うことを示している。また  $E(4^+)$  に関しても、 $E(4^+)$  と  $E(2^+)$  の比は  $3.2$  で、変形核で見られる回転バンドの値 ( $10/3$ ) に非常に近い。この結果も、 $^{34}\text{Mg}$  が変形していることを示唆している。