

論文内容の要旨

論文題目 質量数 100 近傍での中性子過剰核の核異性体探索
(Search for isomeric states in neutron-rich nuclei with mass numbers around 100.)

氏名 中尾 太郎

中性子過剰不安定核の不安定核ビームを用いた研究は、原子番号が 20 程度までの比較的軽い核については、効率的な不安定核ビーム生成手法が知られるようになってから系統的に研究が行われてきた。中性子ハローや魔法数 8,20 の破れの発見などは、その典型であるといえる。しかしながら質量数が 100 にもおよぶ領域においては不安定核ビームの生成の困難も手伝い、あまり行われてこなかった。

質量数が 100 にもおよぶ領域の不安定核の研究は、伝統的に核分裂反応を用いることで行われてきた。核分裂反応は、容易に起こすことが出来る自発核分裂反応や熱中性子捕獲反応を用いた場合には、質量数 99 や質量数 140 程度の中性子過剰核の生成に有利である反面質量数が 120 程度の領域の核種は極端に生成されにくいという難点がある。これは殻効果によるものと考えられており、高い励起状態からの核分裂により克服できることが知られている。高速中性子を打ち込む、高速陽子を打ち込むなど高い励起状態の作り方は多く知られているが、ウランのような重たい核を一次ビームとして用い、標的に入射することで高い励起状態を生成し、幅広い質量数の不安定核を生成する飛行核分裂反応による不安定核ビーム生成が注目を集めた。

本論文では理化学研究所加速器施設内に新たに建設された RI ビームファクトリーをもちいて行われた、質量数 100 近傍の中性子過剰核の核異性体探索実験の結果を報告する。RI ビームファクトリーは理化学研究所に建設が進められている次世代の加速器施設であり、核子あたり 345MeV に加速した ^{238}U の飛行核分裂反応により質量数 60~160 程度という広範な領域の中性子過剰不安定核ビームを効率よく生成分離することが出来る。

本研究が対象とした質量数 100 近傍の中性子過剰領域は、さまざまな特異現象が報告、または予測されている領域である。たとえば当該領域における中性子数 60 の変形魔法数がある。質量数 100 近傍中性子過剰核同位体を中性子数の増加に従い系統的に眺めていくと、原子番号が 38~42 付近で、どの同位体においても中性子数 60 を境に核の基底状態が球形から急激に形状を変化させているように見える。この現象が発見されたのは古く、端緒ともいべき現象の発見に限れば 1965 年までさかのぼる。その後、多くの実験的、理論的研究が進められ、1980 年代初頭には原子番号 38 の Sr 同位体において、 ^{98}Sr および ^{100}Sr の回転励起準位の詳細な構造が報告されるに至った。しかしながら、中性子過剰核生成分離能力の限界などにより、その後の進展は遅かった。本研究以前では、中性子数 60 同位体において、原子番号 37 の ^{97}Rb の励起準位は報告されていない。

他にも当該領域は低エネルギー侵入準位の存在や三軸非対称変形の示唆など、核構造について特徴的な現象が確認、もしくは示唆されている。しかしながら、当該領域における γ 分光のデータは、豊富に得られているとは決して言えない。

本研究の目的は質量数 100 近傍の中性子過剰領域において、核異性体を網羅的に探索することである。探索には遅発 γ 分光の手法を用い、よって同時に核分光のデータを取得出来る。核異性体を用いた遅発 γ 分光の手法は、一次標的で核異性体として生成したビームを実験室まで直接導入し分光を行うため、二次標的を用いる実験にくらべて反応断面積の影響を受けず、ビーム強度の弱い核に対しても分光が可能であるという利点がある。目標とした半減期の領域は 100 ナノ秒程度以上、数十マイクロ秒程度以下までである。マイクロ秒の半減期の核異性体を用いる研究は、 $\beta - \gamma$ 分光などのように崩壊を長時間待つ必要が無いため、広範な領域の核種をふくんだ高いレートのビームを用いて、網羅的に領域についての知見を得ることに適していると期待できる。

核異性体分光は実験的な優位が存在するだけではない。それ自体が変形状態への強い示唆を与える低励起侵入準位は核異性体を作りやすく、パリティの異なる準位が低励起状態に侵入すればまた、E1 などの核異性体を形成しやすい。変形領域の原子核には励起状態の中に周辺の準位と大きく変形度が異なる状態が混入することがあり、変形度の違いはまた核異性体を誘起する。このように核異性体は通常の励起状態とは性質を異にする状態であり、それ自身が核構造への示唆に富む。

実験の結果観測された核異性体は、以下のとおりである。既知の核異性体として、 ^{54}Se 、 ^{59}Ti 、 ^{60}V 、 ^{76}Ni 、 ^{75}Cu 、 ^{78}Zn 、 ^{92}Br 、 ^{95}Kr 、 ^{98}Rb 、 ^{117}Ru 、 ^{121}Pd 、 ^{124}Ag 、 ^{125}Ag 、 ^{128}Cd 、 ^{130}Cd 、 ^{129}In 、 ^{130}In 、 ^{131}In 、 ^{130}Sn 、 ^{131}Sn 、 ^{132}Sn 、 ^{134}Sn 、 ^{136}Sb の 23 種を確認し、加えて新たに ^{92}Se 、 ^{93}Se 、 ^{95}Br 、 ^{94}Br 、 ^{96}Br 、 ^{97}Rb 、 ^{108}Zr 、 ^{108}Nb 、 ^{113}Tc 、 ^{119}Ru 、 ^{120}Rh 、 ^{122}Rh の 12 種の核異性体の存在を確認した。

既知の核異性体の中にも、本研究においてより詳しい情報が得られたものも存在する。 ^{59}Ti は、以前に報告されていた値よりも正確な遷移エネルギーとして 108.5(1)keV を決定した。 ^{98}Rb は、より正確な半減期として 380(18)ns を得た。 ^{92}Br については、88(3)ns と半減期を決定することに初めて成功し、また $\gamma - \gamma$ 相関についての情報を新たに得ることに成功したが、同時に遷移強度の解析から、複雑な構造を持つ可能性が示唆されると指摘した。

^{117}Ru 、 ^{125}Ag については、新たな γ 遷移のピークを確認した。これらの遷移は、それぞれの核の異性体構造の理解の上で、本質的な役割を果たしていると解釈することが出来た。 ^{125}Ag において新たに得られた 102.8(2)keV の遷移は、放出強度の解析から E2 遷移が支配的であるとの結果を得た。

^{117}Ru は、三軸非対称変形が起きていると予測されている領域に含まれる。 ^{117}Ru では、新たに得られた 57.2(2)keV、82.1(1)keV、102.5(1)keV、127.0(2)keV の 4 本の遷移、および $\gamma - \gamma$ 相関の解析から、核異性体状態に関与する励起準位の構造をほぼ決定した。周辺核との系統性、および Nilsson 模型との比較により、E1 遷移による核異性体と仮定した場合の励起準位のスピンパリティを推定した。 ^{117}Ru の周辺では、 ^{119}Ru が新たに核異性体として観測された。 ^{119}Ru における $\gamma - \gamma$ 相関の解析、および放出強度の解析から、 ^{119}Ru が E1 遷移により作られる異性体であると決定し、Nilsson 模型との比較によりスピンパリティを推定した。その結果、 ^{119}Ru の基底状態が

Oblate 変形していると解釈することが自然であるという結果を得た。Ru 同位体は、 ^{117}Ru よりも軽い中性子過剰領域においては、分光データが得られている ^{114}Ru までの範囲では周辺核同様基底状態が Prolate であると考えられているため、本研究における ^{117}Ru および ^{119}Ru の核異性体の解析から、Ru 同位体が中性子過剰領域において、基底状態が Prolate から Oblate に変化する形状相転移が見られている可能性が示唆された。

同様に三軸非対称変形領域と予測される ^{108}Zr についても、新たな核異性体の存在が確認された。 γ - γ 相関、および放出強度の解析などから、回転励起準位と思われる構造を見だし、周辺核との比較を行うことで、 ^{108}Zr の基底状態が、 ^{104}Zr の比べて変形度が小さい可能性を指摘した。 ^{108}Zr は他にも強度の弱いピークが複数本確認されていたが、統計量が足りず構造を決定するには至らなかった。三軸非対称変形をした核は γ バンドの 2^+ 状態のエネルギーを下げる事で知られる。 ^{108}Zr が周辺領域に対する理論予測に従い三軸非対称変形を起こしているのであれば、本研究で観測された統計量の少ないピークの中に、 γ バンドの励起状態に対応するピークが含まれる可能性がある。三軸非対称変形が予測される質量数 110 近傍領域の偶偶核において核異性体が発見されたのは ^{108}Zr が初めてである。このことは ^{108}Zr が周辺核に比べて特異な状態を形成していることを示唆する可能性がある。質量数が 110 近傍の中性子過剰 Zr 同位体には、準粒子励起に伴う Prolate-Oblate 変形共存に由来する核異性体の出現が予測されていた。今回得られた ^{108}Zr がこの理論予測に従うものであるかの確認もふくめ、より統計量の多い実験は、今後の課題である。

中性子数 60 近傍領域においては、中性子数 60 同調体の ^{97}Rb 、 ^{95}Br 、および中性子数が 58 および 59 の ^{92}Se 、 ^{93}Se の核異性体が新たに観測された。 ^{97}Rb および ^{95}Br においては、基底状態が変形しているとする推測に矛盾しないという結論を得た。中性子数が 58 および 59 の Se 同位体である ^{92}Se および ^{93}Se においては、周辺核との系統性から、基底状態が変形していないと考えれば実験データを矛盾無く説明可能であるという結果を得た。これらの結果は少なくとも中性子数 60 以下では Se 同位体の基底状態が変形していないことを意味し、中性子数 60 の変形魔法数が Se 同位体においてもいまだ成り立っている可能性を示唆する。中性子数 60 である ^{94}Se の励起状態の観測により、変形度についての情報を得ることは今後の大きな課題である。

本研究で存在が確認されたにもかかわらず詳細な構造解析には至らなかった核もいくつか存在する。それらについて、統計量などの問題を克服し、核異性体構造の理解につなげることもまた、今後の課題である。