

論文題目要旨

学位申請者：高山 元

論文題目：中性子過剰 Zr 同位体における核半径の系統的研究と殻構造進化

論文要旨：

Zr 同位体は陽子数 $Z = 40$ を持ち、陽子殻としては pf 殻までが充填されていることから、準魔法数的な性質を示す核種として知られている。一方、中性子数に関しては、中性子過剰側において $N = 56$ で準魔法数的挙動が示唆されている。次に、 $N = 60$ において球形から変形への急激な構造変化を示しており、これまでの研究では ^{110}Zr 近傍まで強い変形が持続すると考えられている。これらの特徴から、Zr 同位体は殻構造進化を研究する上で極めて興味深い同位体である。

これまでに Zr 同位体に対しては、質量測定、ガンマ線分光による励起状態構造の研究、さらには isotope shift 法による荷電半径測定など、さまざまな実験的研究が行われてきた。 $N = 56$ における準魔法数的性質は、(1) 第一励起 2^+ 状態のエネルギーが高いこと、(2) 二中性子分離エネルギー S_{2n} が大きいこと、そして (3) 荷電半径におけるキंक構造の存在などから示唆されている。一方、 $N = 60$ における変形については、(1) 低い 2^+ エネルギー、(2) 大きな $B(E2)$ 値、そして (3) 荷電半径の急激な増大といった実験事実から、その存在が広く受け入れられている。

理論的には、これらの現象はいずれも殻構造進化に起因するものと理解されている。 $N=56$ における準魔法数的挙動は、 $\nu d_{5/2}$ 軌道の充填により準閉殻ギャップが形成されることに対応するが、その閉殻性の強さは陽子数に強く依存し、同一 $N=56$ isotone においても $Z=40$ で最大となり、他の Z では弱まることが知られている。これは、Isotone 方向の殻構造進化を示唆する興味深い現象である。

一方、 $N \geq 60$ における変形については、中性子側の $\nu g_{7/2}$ 軌道への占有が進むにつれて、陽子側での $\pi g_{9/2}$ 軌道への $2p-2h$ 励起が活発化し、これが集団的変形を誘起している可能性が指摘されている。この機構は、いわゆる type-II 殻構造進化として理解されている。また、平均場理論に基づく計算では、中性子過剰側における高角運動量軌道が変形状態を好むため、球形状態から変形状態への遷移が起こるという説明もなされている。

これらの議論をさらに深化させるためには、殻構造進化や変形が核密度分布にどのように反映されているかを直接的に検証するための、より豊富な実験的証拠が必要である。そこで本研究では、質量数 $A = 89$ から 109 にわたる Zr 同位体を対象として、相互作用断面積測定による核物質半径の導出を行い、これらの現象が中性子を含む核物質分布にどのように反映されるかを調べることを目的とした。

実験は理研仁科センター RIBF において二度にわたり実施した。第一回目は BigRIPS のみを用い、 ^{70}Zn ビームから $^{89-101}\text{Zr}$ を生成した。第二回目は BigRIPS

と ZeroDegree 分光器を組み合わせ、 ^{238}U ビームから $^{94-109}\text{Zr}$ を生成した。いずれの実験においても、標的中心エネルギーがおよそ 200–300 MeV/u の条件下で、炭素標的に対する相互作用断面積を測定した。本測定は、相互作用断面積測定としては、過去最大級の質量領域における測定であった。大きな質量数領域においては、隣接する核種間の半径差が小さいことから、同位体依存性を議論するためには断面積を高精度に決定する必要がある。このため、本測定では極めて高い粒子識別精度および計数精度が要求された。そこで、実験および解析の上で新たな工夫を導入することにより、粒子識別、輸送効率、荷電状態成分に由来する系統誤差を低減し、相互作用断面積を高い信頼性で決定した。

得られた相互作用断面積から、光学極限近似を修正したグラウバー計算を用いて核物質半径の導出を行った。得られた核物質半径は、事前の予想とは異なり、 $N = 60$ において変形に起因する明確なジャンプは観測されなかった。さらに、その後 $N = 69$ に至るまで、球形領域とほぼ同一のトレンドが継続するという結果が得られた。

得られた核物質半径を平均場計算の球形解と比較することで中性子も含めた原子核全体の変形度の評価を行ったところ、対応する原子核全体の変形パラメータ β_2 は、主に陽子分布に対して推奨されている値 ($\beta_2 \sim 0.4$) を大きく下回ることが示された。また、既存の荷電半径測定結果と組み合わせることで中性子分布半径を導出し、その変形度を評価したところ、中性子側はこの領域でほぼ球形に近い結果が得られた。これらの結果は、 $N \geq 60$ における変形が主として陽子に起因するものであり、中性子分布は大きく変形していない可能性を示唆している。すなわち、陽子と中性子で変形度が異なる可能性が示された。

また、 $N = 56$ 魔法性については、本研究で得られた物質半径が正のキルクと矛盾しない結果を示しており、荷電半径、2 中性子分離エネルギー、 $2+$ のエネルギーなどの実験結果で見えている $N=56$ における不連続性と合わせると、 $N=56$ の準閉殻構造を示唆すると考えられる。

これらの結果は、殻構造進化に起因する準閉殻や変形の発現に関する従来の理解に対し、新たな制約を与えるものであり、 Zr 同位体における殻構造進化の理解を深める上で重要な知見を提供するものである。