

中性子が極めて多いニッケル78原子核のソフトな二重閉殻

谷内 稜 〈Department of Physics, University of York, 理化学研究所仁科加速器科学研究センター ryo.taniuchi@york.ac.uk〉

Doornenbal, Pieter 〈理化学研究所仁科加速器科学研究センター pieter@ribf.riken.jp〉

櫻井博儀 〈東京大学理学系研究科, 理化学研究所仁科加速器科学研究センター sakurai@phys.s.u-tokyo.ac.jp〉

陽子と中性子の二種の粒子で構成される原子核というシステムは、電子軌道と同様に殻構造をもつことが知られている。原子核が閉殻構造となるとき、周辺の同位体原子核よりも安定となる。具体的には、核子の結合エネルギーが大きく、半減期が相対的に長く、また第一励起エネルギーが高くなる。周辺の原子核よりも安定となる同位体の陽子数、または中性子数は歴史的に魔法数 (Magic Number) と呼ばれ、2, 8, 20, 28, 50, 82... であることが知られている。特に陽子・中性子数が共に魔法数となる原子核はその二重閉殻の性質ゆえに励起エネルギーが顕著に高くなることが知られ、二重魔法数核と呼ばれる。

近年の加速器技術の進歩により、中性子過剰で短寿命な原子核を生成し詳しく研究できるようになり、それまで不変だと考えられていた魔法数はむしろ陽子・中性子数比に応じて変化することが知られるようになった。従来の魔法数が失われたり、新たな魔法数が登場したりする現象が次々と発見されるようになると、中性子過剰な⁷⁸Niの二重閉殻性が強く保存されているかどうかを知ることは原子核物理において一つの重要な課題となった。

原子核は核力で束縛された少数量子多体系であるため、理論的に正確な予測をすることが難しく、多くの場合なんらかの仮定に基づき単純化した模型によって性質を予測する。核子数が多く重たい原子核の場合は“凍った”二重魔法数核の外側の軌道に価核子が束縛されているという描像で記述される。中性子過剰な⁷⁸Niの二重閉殻性を実験的に確定することは、さらに中性子比率が高い原子核の性質を予測し理解する上でも極めて重要である。さらには中性子星の合体や、超新星爆発において起こると考

えられている重元素合成過程 (r-プロセス) において⁷⁸Niは開始点に位置するため、中性子過剰な原子核の性質がこれらの天体イベントを理解する上で鍵となる。

われわれは理化学研究所にある、世界最高強度の原子核 (重イオン) ビームにより大量の不安定原子核を生成する能力を有する加速器施設、RIビームファクトリー (RIBF) においてインビームガンマ線 (γ 線) 核分光の手法を用いて⁷⁸Niの励起状態を世界で初めて観測した。実験では高強度の²³⁸Uビームから飛行核分裂反応により光速の60-70%の速度で生成される⁷⁹Cuと⁸⁰Znといった⁷⁸Niよりも陽子を余分にもつ不安定原子核を、新たに開発した厚い液体水素標的システムに照射し、それぞれ一陽子、二陽子を抜き出す反応を起こすことで、⁷⁸Niの励起状態を生成し、脱励起ガンマ線のエネルギーを測定した。⁷⁹Cu由来の反応により観測された高いガンマ線のエネルギーは中性子過剰領域においても⁷⁸Niの二重魔法性が健在である強い証拠となった。

一方で、⁸⁰Znから二陽子を脱離する反応において、前出のものと同程度ながら異なるエネルギーのガンマ線遷移が強く観測された。このような励起状態の存在は予想外であり、「京」をはじめとした大型計算機による最先端の大規模理論計算が複数動員された。このうち2つの計算で実験結果と合致した。これらの解釈を統合すると、⁷⁸Ni原子核が二重魔法数核に典型的に現れる「球形」の状態に加えて「ラグビーボール形状」の励起状態をとる、変形共存の性質 (“柔らかさ”) をもち、しかも⁷⁸Niよりもさらに中性子過剰な原子核において急速に魔法数が破れ、⁷⁸Niが閉殻構造が失われる転換点となる可能性が示唆された。

用語解説

インビームガンマ線核分光：原子核の構造を調べる上で、核子の励起状態から脱励起をする際に放出されるガンマ線のエネルギーを測定 (分光) する手法が広く用いられている。極めて不安定な原子核の励起状態を生成する場合、相対論的速度で飛行する不安定核ビームを標的に照射し反応を起こす手法が取られるため、脱励起ガンマ線はドップラー効果の影響を大きく受ける。本手法ではガンマ線の射出角度に対して分解能をもった検出器を用いることで重心系でのガンマ線エネルギーを再構成している。

変形共存原子核：高々100個程度の核子で構成される原子核は、無限系と異なり表面が存在するため、変形という自由度をもつ。魔法数近傍の原子核は球形 (下図橙色) である一方で、一般に多くの原子核は下図に水色や黄色で示されるようなラグビーボール状やパンケーキ状に四重極変形をすることで安定化されることが知られている。変形した原子核は回転運動や振動運動といった集団運動をする励起モードをもち、簡単に励起される。一方で球形な (\approx 魔法数である) 原子核はこのような励起モードをもたない。しばしば基底状態の形状と異なる変形固有状態を励起状態にもつ原子核が存在することが知られており、これらを変形共存 (Shape co-existence) 原子核と呼ぶ。

