

This is a repository copy of 〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇 78 〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇.

White Rose Research Online URL for this paper:

<https://eprints.whiterose.ac.uk/168012/>

Version: Accepted Version

---

**Article:**

Taniuchi, Ryo [orcid.org/0000-0002-8057-7074](https://orcid.org/0000-0002-8057-7074), Doornenbal, P and Sakurai, H. (2020) 〇〇〇〇  
〇〇〇〇〇〇〇〇 78 〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇. *Butsuri / 〇〇〇〇〇〇〇*. pp. 690-695. ISSN 0029-0181

[https://doi.org/10.11316/butsuri.75.11\\_690](https://doi.org/10.11316/butsuri.75.11_690)

---

**Reuse**

Items deposited in White Rose Research Online are protected by copyright, with all rights reserved unless indicated otherwise. They may be downloaded and/or printed for private study, or other acts as permitted by national copyright laws. The publisher or other rights holders may allow further reproduction and re-use of the full text version. This is indicated by the licence information on the White Rose Research Online record for the item.

**Takedown**

If you consider content in White Rose Research Online to be in breach of UK law, please notify us by emailing [eprints@whiterose.ac.uk](mailto:eprints@whiterose.ac.uk) including the URL of the record and the reason for the withdrawal request.

# 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物理学専攻, 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持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(≈堅くなる)。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 $^{78}\text{Ni}$ の二重閉殻性が強く保存されているかは長年の疑問であった。

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モデル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 $^{78}\text{Ni}$ 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 $^{78}\text{Ni}$ 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、世界で最高強度の原子核(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唯一無二の加速器施設、RIビームファクトリー(RIBF)においてインビームガンマ線( $\gamma$ 線)核分光の手法を用いて $^{78}\text{Ni}$ の励起状態を世界で初めて観測した。高強度の $^{238}\text{U}$ ビームから飛行核分裂反応により $^{79}\text{Cu}$ と $^{80}\text{Zn}$ といった $^{78}\text{Ni}$ よりも陽子を余分にもつ不安定原子核を相対論的速度で生成した。これら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、 $^{78}\text{Ni}$ の励起状態を生成し、脱励起 $\gamma$ 線のエネルギーを測定した。 $^{79}\text{Cu}$ 由来の反応により観測された高い $\gamma$ 線のエネルギーは中性子過剰領域においても $^{78}\text{Ni}$ の二重魔法性が健在である強い証拠となった。

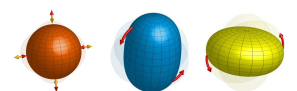
一方で、 $^{80}\text{Zn}$ から二陽子を脱離する反応において、前出のものと同程度ながら異なるエネルギーのガンマ線遷移が強く観測された。このような励起状態の存在は予想外であり、「京」をはじめとした大型計算機による最先端の大規模理論計算が複数動員された。このうち2つの計算で実験結果と合意し、これらの解釈を統合すると、 $^{78}\text{Ni}$ 原子核が二重魔法数核に典型的に現れる「堅い球形」の状態に加えて「柔らかいラグビーボール形状」の励起状態との変形共存原子核の性質を持ち、しかも $^{78}\text{Ni}$ よりもさらに中性子過剰な原子核において急速に魔法数が破れ、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

—Keywords—

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、脱励起の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持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持つ。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持ち、簡単に励起される。一方で球形な(≈魔法数である)原子核はこのような励起モードを持たない。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持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 coexistence)原子核と呼ぶ。



## 1. はじめに

本研究<sup>1)</sup>は陽子数 28 のニッケル同位体の中でも極めて中性子が過剰（中性子数 50）である  $^{78}\text{Ni}$  原子核における二重閉殻性（魔法性）の実験的な直接検証を日仏の研究機関を中心とした国際実験コラボレーションによって実現させたものである。実験的に励起準位を生成し、そこからの脱励起  $\gamma$  線のエネルギーを測定することで  $^{78}\text{Ni}$  原子核における“堅さ”を検証した。一般に原子核中の核子である陽子、中性子が閉殻となるときの周囲の原子核よりも第一  $2^+$  準位の励起エネルギーが高くなり、とりわけ二重閉殻のときに顕著となる。図 1 は現在知られている原子核の励起エネルギーを中性子数、陽子数に応じてプロットしたものである。励起エネルギーの系統性を眺めると、重たい原子核領域（図右側）では核子数に応じた閉殻性が見られる一方で、軽い原子核領域（図左側）では必ずしも成り立たないことがみて取れる。近年の実験技術の向上により中性子数が通常の安定原子核よりも多い領域を探索できるようになって以来、魔法数が消失、かたや新しい魔法数の出現といった異常性が見られる事象が多く報告されていることに対応する。 $^{78}\text{Ni}$  は極めて中性子が過剰な、かつ教科書的には典型的な二重魔法数核であるが、上述の質量領域において中間に位置し、魔法性が維持されているかどうかを実験的に決定づけることが重要であった。

すでに図 1 に赤棒で示されている通り、本研究成果は  $^{78}\text{Ni}$  の二重閉殻性が中性子過剰な領域でも維持されていることを強く裏付ける結果となった。しかし実験で得られたエネルギースペクトルは実験を計画した当初の想定を遥かに超えて複雑なものであり、単純な二重閉殻魔法数とは言えないものであった。このためさらなる詳細な解析と複数のモデルにおける大規模理論計算による検証を必要とした。以下の本稿において、実験的な観測内容の紹介を行った後、それらが理論的にどのように解釈されうるかを解説する。

## 2. 中性子過剰な魔法数原子核

原子核の性質は、構成する 2 種類の核子である陽子・中性子が核力（強い相互作用）という 1 fm 程度の距離にのみ働く短距離相互作用に支配されているにも関わらず、各々が平均場中で独立運動をし、離散的な一粒子準位を占めるといふ、電子軌道と同様の近似によりうまく説明されることが知られている。分子軌道を形成せずに単体で存在することができる貴ガス元素において、電子軌道が閉殻構造をとることで化学的な性質が安定化されることと同様に、原子核を構成する核子軌道においても、閉殻構造を持つときに周辺の同位体に比べ安定化される。このような陽子または中性子の軌道が閉殻となるときの核子数 — 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 — は魔法数と呼ばれ、とりわけ陽子数・中性子数ともに閉殻となる場合は二重魔法数原子核と呼ばれている。現在、人工的に生成された同位体元素を含め、約 3,000

種の原子核が知られているが<sup>2)</sup>、このうち二重魔法数となる原子核は十種程度と特異である。これらの核はその堅牢な閉殻構造ゆえに原子核の理論を構成する上で要石となる。

今から 70 年以上前、メイヤー、イェンゼンらは、核力による平均場ポテンシャルに加えて、クーロン力に束縛された電子軌道系と逆符号かつ強いスピン軌道相互作用を導入することにより、それ以前に安定な原子核の系統性より示唆<sup>3)</sup>されていた魔法数を理論的に記述することに成功した<sup>4)</sup>。殻模型の描像は原子核の質量数によらず性質をよく説明できていたため、1970 年代ごろまでは普遍的な概念であると信じられてきた。しかし近年の加速器技術の発達により陽子・中性子数が大きく偏った極めて短寿命な原子核を生成できるようになると、とりわけ軽い中性子過剰な原子核領域において従来の魔法数の概念が成り立たない現象が見られるようになった<sup>5)</sup>。これまで行われてきた複数の実験的研究により、中性子の魔法数 8, 20, 28 はいずれも消失することが知られている。例えば、中性子過剰な  $^{42}\text{Si}$ （陽子数 14, 中性子数 28）は、スピン軌道相互作用が強いと陽子、中性子ともに閉殻構造を持つはずであり、二重魔法性を持つとも予想されていた<sup>6)</sup>。しかし、その第一励起状態の励起エネルギーが測定されると、二重閉殻どころか陽子、中性子ともに完全に閉殻構造が破れていることが明らかになった<sup>7)</sup>。魔法数が消滅する現象が見られる一方で、新たな魔法数の出現も知られるようになった。陽子数が 20 のカルシウム同位体において、中性子数が 32, 34 において二重閉殻性が出現することが知られている<sup>8, 9, 10, 11)</sup>。これらの知見から、中性子過剰核では魔法数是不変ではなく、むしろ変わりゆくものであると認識され、この現象の理解は原子核物理学において長年重要なテーマとなった<sup>1)</sup>。

## 3. 殻進化の実験的検証

さて、ここまで魔法数、閉殻性、という言葉を用いて原子核の性質を表現してきたが、実験的にはどのように決定付ければよいのだろうか？電子系における閉殻の性質から類推してみることにしよう。閉殻である貴ガスの特徴を化学の用語を用いて表現をするならば、粒子数あたりの結合エネルギーが相対的に大きい、第一イオン化エネルギーが極大となる、イオン半径が極小になる等の性質が挙げられる。核子系は電子系と相互作用が異なるが、平均場中における一粒子状態という描像がよい近似で成り立つので、同様の性質が見られると考えられている<sup>2)</sup>。核子の結合エネルギーを決定づけるために“電離”に相当するような核子を離脱させる反応を精密測定ができればよいが、不安定原子核を用いた実験手法は存在しない。その代わりに、系統的な不安定原子核の質量精密測定実験は勢力的に取り組まれて

<sup>1</sup>このように魔法数が組み変わる現象は殻進化と呼ばれる。

<sup>2</sup>しかし近年中性子過剰領域において原子核の半径は魔法数近傍で異常に大きくなるなどの特異的な性質が報告されており<sup>10)</sup>、この謎も原子核物理において解決されるべき課題の一つとなっている。

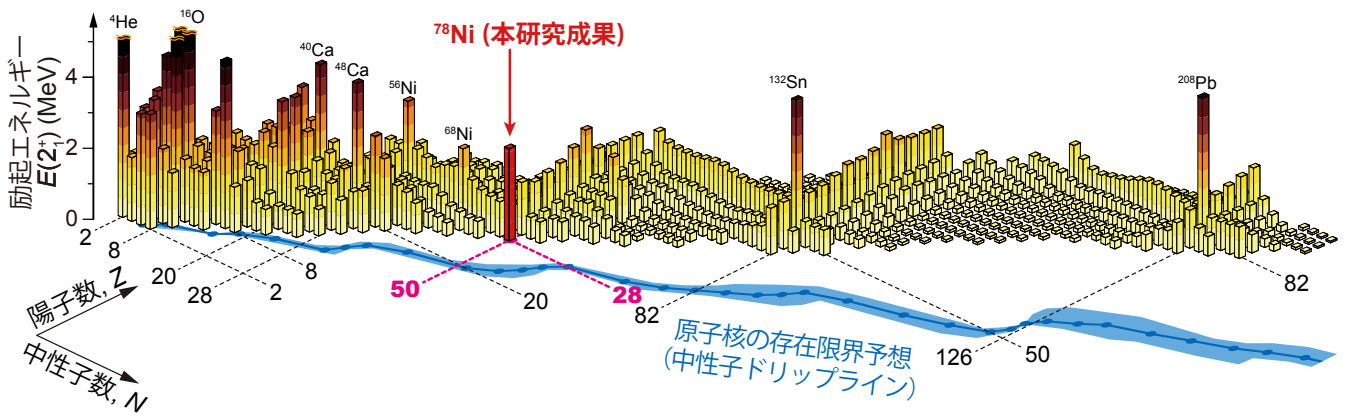


図1 陽子数中性子数共に偶数となる原子核の第一  $2^+$  励起エネルギーは閉殻構造を示す強い証拠となることが知られている。励起するためのエネルギーが必要であるほど“堅い”原子核であり、特に二重魔法数核においてその性質が顕著に現れる。本研究によって  $^{78}\text{Ni}$  は中性子が過剰な、原子核の存在限界に近い領域における二重魔法数核であることが決定づけられた。

いる<sup>3</sup>。原子核質量の精密測定は、その質量差から結合エネルギーが導出できるためである。しかし中性子過剰領域の原子核は生成が難しいだけでなく、半減期が10ミリ秒程度であり、質量の精密測定を実現することは平易ではない。

核子を離脱するなどの核反応を人工的に発生させることで終状態となる原子核の励起状態を生成したり、中性子過剰な原子核を生成し  $\beta$  崩壊先の娘核励起状態を生成することで、そこから脱励起する  $\gamma$  線のエネルギーを測定することは最も容易に中性子過剰な原子核の性質にアプローチできる手法の一つである。偶偶核<sup>4</sup>における第一励起準位（多くの場合で  $2^+$  状態になることが知られている）は、核子が殻間エネルギーを超えて上の軌道に励起する必要があるため励起エネルギーの大きさが閉殻性の指標となる。図1は現在知られている偶偶核における励起エネルギーを陽子数、中性子数に応じてプロットした図である。重い原子核領域においては点線で示された魔法数に対応して励起エネルギーが急激に増加する様子が見られる一方で、カルシウム（陽子数20）よりも軽い領域においては、上述の殻進化により中性子過剰領域（図下方向）へ進むに連れ魔法数が消滅したり、新しい魔法数が発現する現象が見られる。

#### 4. $^{78}\text{Ni}$ ：未開拓な中性子過剰二重魔法数原子核

現在、 $^{42}\text{Si}$ （陽子数14、中性子数28）よりもさらに重たい原子核領域では未だに魔法数の消失減少はみられておらず、次の二重魔法数拠点となる中性子過剰な  $^{78}\text{Ni}$ （陽子数28、中性子数50）の閉殻性を実験的に検証することが長年望まれていた。 $^{78}\text{Ni}$  は安定なニッケル同位体  $^{58,60,61,62,64}\text{Ni}$  よりも更に14個以上も中性子過剰な同位体であり、かつ半減期が122(5) ms と短く生成は難しい。これまでドイツ、アメリカの加速器研究所においても生成されたが、半減期や励起エネルギー、質量測定を行うには到底足りない生成

量であった<sup>12, 13</sup>。

本研究<sup>1)</sup>が行われた理化学研究所仁科加速器科学研究センターが保有するRIビームファクトリー (RIBF)<sup>14)</sup>は、世界においてずばぬけた不安定原子核生成能力を持つ最先端の加速器施設である。RIBFにとって、 $^{78}\text{Ni}$ を大量に生成し実験的に閉殻性を決定づけることは、2006年に運転を開始した当初からの悲願であった。度重なる技術革新により、ビーム強度は年々指数的に増加し続けたものの、十分な統計量で  $^{78}\text{Ni}$ を研究するためにはさらに10年近い歳月が必要であった。

RIBFの高強度ビームにより、 $^{78}\text{Ni}$ を大量に生成できるようになると、まず2012年には本研究に先行して半減期の系統的な測定実験が実施された<sup>15)</sup>。 $^{78}\text{Ni}$ を境界として半減期の急激な変化が見られ、中性子過剰領域にもかかわらず二重魔法性が維持されていることを示唆する結果を得た。原子核の半減期（遷移確率）は初期状態（親核）と終状態（娘核）のエネルギー差に強く依存する一方で、遷移前後の状態間の行列要素にも依存する。このため、本先行研究における半減期の急激な変化が閉殻性の直接的な証拠にはなっていない。

$^{78}\text{Ni}$ そのもののみならず、先行する他の研究では  $^{78}\text{Ni}$ よりも陽子数が多く実験的に生成が容易な  $^{79}\text{Cu}$ 、 $^{80}\text{Zn}$ （ともに中性子数50）の励起準位測定<sup>16, 17, 18)</sup>や殻模型による理論計算<sup>19, 20)</sup>が精力的に実施されてきた。これらは  $^{78}\text{Ni}$ の二重閉殻性を示唆したため、 $^{78}\text{Ni}$ の閉殻性は確実なものになったと考えられるようになった。しかしその後に行われた実験や理論的研究において、 $^{78}\text{Ni}$ より陽子数が少ないCr（陽子数24）、Fe（陽子数26）などの原子核領域において魔法性が失われていることが示唆されるようになり<sup>21, 22)</sup>、さらに近年陽子数が多い  $^{79}\text{Zn}$ に発現する比較的長寿命な励起状態を詳細に探索することで変形共存現象（解説ページのKeywords参照）が見られ<sup>23)</sup>、 $^{78}\text{Ni}$ が単純な二重魔法数原子核ではないことが示唆されるようになった。

<sup>3</sup>例えば  $^{52,54}\text{Ca}$  の場合だと参考文献<sup>8, 11)</sup>が挙げられる

<sup>4</sup>偶偶核：陽子数、中性子数ともに偶数個から構成される核。核子が対をなして軌道を専有することで基底状態が  $0^+$  となり性質が単純になる。



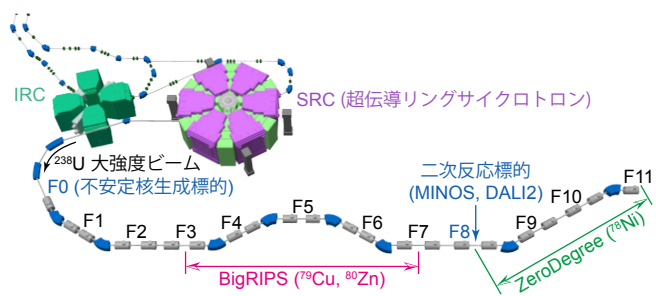


図2 RIBF 加速器施設の概略図。RILAC2 入射器, 4 段のサイクロトロン加速器群 (図に示された IRC, SRC を含む) を協調して運転することで, 大強度の  $^{238}\text{U}$  ビームを下流の磁気スペクトロメーター (BigRIPS, ZeroDegree) へ供給する。

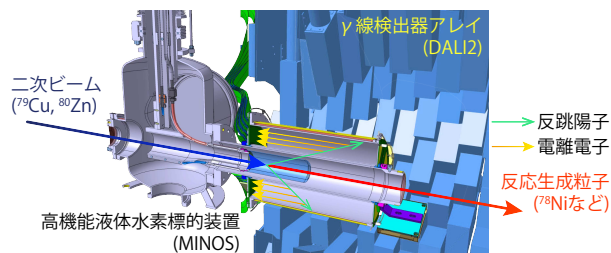


図3 極めて中性子過剰な  $^{78}\text{Ni}$  原子核の励起状態の生成を目指し, 高効率に陽子ノックアウト反応を発生させる標的システムが開発された。標的厚を増やす一方で, ドップラー効果を再構成する精度向上のために, 反跳陽子の飛跡から反応点を再構成する装置が統合されている。

## 5. 新開発の液体水素標的システムによる $^{78}\text{Ni}$ の励起準位探索

本研究<sup>1)</sup>は,  $^{78}\text{Ni}$  の二重魔法性を世界初に直接的な調査を行った実験的研究である。中性子過剰核を生成する上で唯一無二の優れた性能を有する加速器施設, 理化学研究所 RIBF<sup>14)</sup> において新開発の液体水素標的・反応位置再構成システムを用いることで成し遂げられた成果である。

図2は実験施設における,  $^{78}\text{Ni}$  の励起状態を生成するスキームを表したものである。まず加速器によって光速の70%程度まで加速された  $^{238}\text{U}$  ビームを, Be 標的に照射することで飛行核分裂反応を誘発, その下流にある磁気スペクトロメーター BigRIPS<sup>24, 25)</sup> により中性子過剰な  $^{79}\text{Cu}$ ,  $^{80}\text{Zn}$  のビームを生成する。これらのビームは F8 焦点面に設置された二次標的に照射され, 陽子を1個あるいは2個叩き出す反応 (陽子ノックアウト (脱離) 反応) により  $^{78}\text{Ni}$  の励起状態となる。二段階の反応を用いて目的の励起状態を生成する, インビーム  $\gamma$  線核分光の手法<sup>26)</sup> は, 高効率でかつ高い S/N 比での実験を可能とするものである (解説ページの Keywords 参照)。二度目の反応標的により作られる励起準位からの脱励起する  $\gamma$  線を測定するため, 標的を取り囲むように理研が保有する高効率  $\gamma$  線測定装置 DALI2<sup>27)</sup> を用いて測定を行った。従来のインビーム  $\gamma$  線核分光の手法では, 固体標的 (Be, C, ポリエチレン) が主に用いられてきたが, 薄い標的を用いる必要があり反応効率に限界があった。厚い標的を用いてしまうと陽子ノックアウト反応が発生する反応点を測定できず,  $\gamma$  線射出角度や反応時 ( $\approx \gamma$  線射出時)

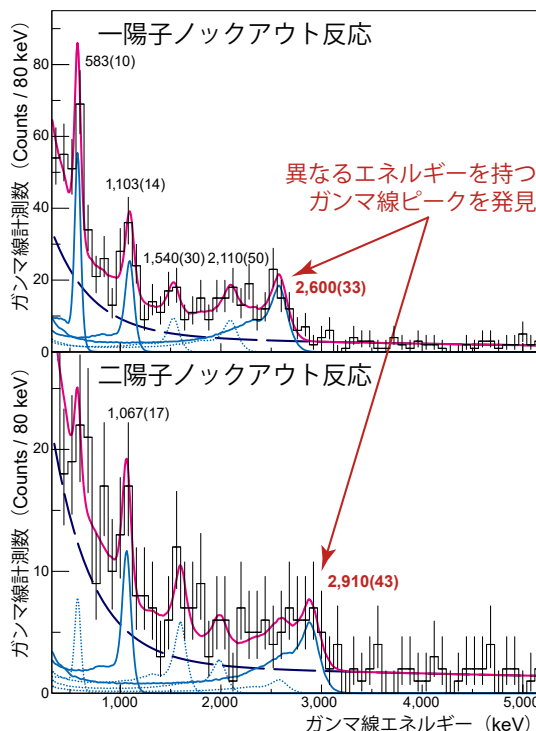


図4 実験により得られた  $\gamma$  線スペクトルとモンテカルロシミュレーション (GEANT4<sup>30)</sup>) により得られた  $\gamma$  線検出器の応答関数。上図, 下図はそれぞれ一陽子, 二陽子ノックアウト反応に対応する。それぞれのスペクトルにおける  $\gamma$  線ピークは最尤法により決定された。検出効率を考慮すると, 一陽子ノックアウト反応において 2600 keV の遷移が最も強く, 第一励起状態であることが決定される一方で, 二陽子ノックアウト反応においてはその  $\gamma$  線遷移を観測することができず, 異なるエネルギーの強い遷移があることが示唆された。

の粒子の速度の不確定性により, ドップラー効果によりシフトした  $\gamma$  線のエネルギーを静止系に換算する際のエネルギー分解能の低下につながるためである。こうした困難を乗り越えるべく, フランスの CEA (代替エネルギー原子力庁) サクレイ研究所と理研の間で新たな液体水素標的システム MINOS<sup>28, 29)</sup> の開発が行われた。MINOS は 10 cm 厚の液体水素を用いた高効率な反応生成標的と, その周囲に陽子ノックアウト反応によって生じる陽子の飛跡を再構成し反応点を導出する TPC (Time Projection Chamber) を組み合わせた装置である。図3に DALI2 と MINOS の構成を示す。BigRIPS により分離生成されたビームを MINOS の水素標的により陽子ノックアウト反応を誘発, 反応後に生成された不安定原子核は下流にある ZeroDegree 磁気スペクトロメーター<sup>24, 25)</sup> で一粒子ごとに粒子識別される。

## 6. 二重魔法性の直接的な証拠

実験により得られた  $\gamma$  線エネルギースペクトルは, 当初想定していたものと比べはるかに示唆に富んだものであった。図4に示されるように,  $^{78}\text{Ni}$  の励起準位より生成されたとみられる  $\gamma$  線スペクトルは反応様式 ( $^{79}\text{Cu}$  からの一陽子ノックアウト, 並びに  $^{80}\text{Zn}$  からの二陽子ノックアウト反応) によって異なるものであった。複数の  $\gamma$  線ピークにより構成されるスペクトルを詳細に解析した結果, 当初予期

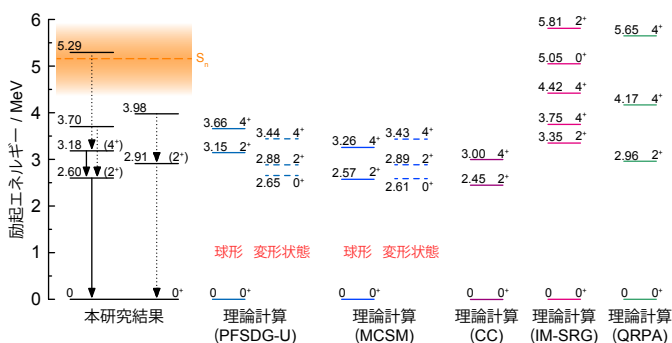


図5  $\gamma$ 線スペクトルの解析により、 $^{78}\text{Ni}$ に関する励起準位を図のように構成した(黒線)。このうち、実線で示された遷移は $5\sigma$ 有意で存在が示されたものである。図4で明らかにされたとおり、それぞれの反応チャンネルごとに観測された $\gamma$ 線遷移が異なり、それぞれ独立に基底状態に遷移すると考察された。複数のモデルに基づく理論計算<sup>1, 22, 31, 32, 33</sup>)を比較したところ、原子核の変形の自由度をもつ2つの大規模殻模型計算(PFSDG-U, MCSM)において、実験で得られた励起順位と同様に複数の励起モードを持つ状態が再現された。これらの計算に基づく $^{78}\text{Ni}$ は球形の状態と変形状態を持つと考えられる。

されなかった新たな物理的知見を得ることとなった(次章に記述)。一方で $^{78}\text{Ni}$ に発現すると予想されていた二重魔法性の保持に関してはの強い証拠を得ることに成功した。 $\gamma$ 線検出器の検出効率は高いエネルギーになるにつれて指数的に低下するため、モンテカルロシミュレーション<sup>30)</sup>における検出器の応答関数を用いて比較すると、2600 keVに見られたピーク構造が最も強度が強い $\gamma$ 線遷移となることが導かれる。この遷移は $^{78}\text{Ni}$ における第一 $2^+$ 励起準位から基底状態への $\gamma$ 壊変に対応していると考えられ、図1における赤棒に対応する。近傍の原子核のエネルギーより突出しており、 $^{78}\text{Ni}$ における二重魔法性が強く保持されている直接的な証拠となった。

## 7. 予期されていなかった変形共存現象

本実験研究で当初目的としていた二重閉殻性の証拠を得ることができた一方で、二陽子ノックアウト反応において観測された $\gamma$ 線遷移は、単純な原子核の一粒子描像を超える新しい原子核の描像を示唆する結果となった。図4で明らかのように、二陽子ノックアウト反応由来の $\gamma$ 線事象数は一陽子ノックアウト反応のものに比べ少なく、統計的に強い有意で観測された結論づけることは難しい。しかし、スペクトルにおける $\gamma$ 線遷移のエネルギーは異なり、新たに2900 keVの $\gamma$ 線遷移の存在が示唆された。

反応様式ごとに異なる励起準位を生成する現象は原子核の励起状態に異なる性質を持った複数の構造が内在することを意味する。今回の実験における観測を理解するために、理化学研究所が保有する「京」コンピューターをはじめとしたスパコンを駆使して得られた複数の理論計算<sup>1, 22, 31, 32, 33</sup>)との比較を行なった。これらの計算の中においてとりわけ、現象論的な相互作用に基づく大規模殻模型計算(PFSDG-U<sup>1, 22</sup>), MCSM<sup>31</sup>)により導かれた結論は、実験的な観測を裏付けるものであった。図5は実験によって決定づけられた

励起準位とその崩壊様式を、複数の理論モデルにより導かれた励起準位と比較したものである。実験的に導かれた2種の独立した励起準位群は、大規模殻模型計算の帰結として球形状態と変形状態(ラグビーボール型)の異なる変形状態に起因するものであると示唆された<sup>5</sup>。上述の2種以外の理論模型<sup>31, 32, 33</sup>)は魔法数近傍の球形構造の原子核の性質を上手に説明することが知られる一方で、その計算のモデルの定式上変形状態を取り込むことができない。このため、これらの計算において実験により得られた励起準位をすべて再現できていないことは、 $^{78}\text{Ni}$ が変形共存核であるという仮説を妨げない。

## 8. $^{78}\text{Ni}$ をこえて

本稿で触れた2種の大規模殻模型計算<sup>1, 22</sup>)による検証によると、今回の研究で観測された変形共存現象は $^{78}\text{Ni}$ を超えてさらに中性子が過剰(陽子が過小)な原子核( $^{80}\text{Ni}$ や $^{76}\text{Fe}$ など)において魔法性が失われ、変形状態が主体的となることも示唆されている。つまり $^{78}\text{Ni}$ それ自身は二重魔法性が保たれていながらも、同時にこの原子核は殻進化の途上であり、魔法数が破れる直前の転換点に位置しているということを意味する。

殻進化により中性子過剰核において魔法数が破れているという知見は宇宙における速い元素合成過程であるr-過程への理解にも影響しうると期待される。鉄より重たい元素の生成は恒星の燃焼では到達できず、超新星爆発や中性子性合体などにより進行するこの元素合成過程が重要な役割を果たす。 $^{78}\text{Ni}$ はこの反応の開始点に位置する。r-過程の反応経路には原子核の魔法性が強く関わるということが知られており、今回 $^{78}\text{Ni}$ よりもさらに中性子が過剰な領域において魔法性が失われ得るという知見は元素合成の歴史を知る上で鍵となる可能性がある。

今回得られた実験データは統計的にも、また $\gamma$ 線のエネルギー分解能的にも改善の余地が残っており、さらなる追試により $^{78}\text{Ni}$ に発現する変形共存現象の実験的な理解や、さらに中性子過剰な原子核の探索などが今後必要であると考えられる。本稿の著者らは、新たな $\gamma$ 線検出器をRIBFに導入することでこれまでよりも数倍エネルギー分解能が良い実験を計画しており、それにより極めて中性子が多い原子核における特有の現象への理解が深まることを期待している。

## 9. 謝辞

最後に、本研究は理化学研究所仁科加速器科学研究センターにおいて実験を遂行するために安定したビーム供給を行ってくださったRIBF加速器、BigRIPSチームの皆様、この研究の共著者の皆様の尽力なしには成し遂げられなかった研究です。本稿執筆にあたって図2の3Dイメージを製作

<sup>5</sup>このような複数の変形状態を内包する原子核を変形共存核と呼ぶ。

してくださった宮内成真氏, ならびに本稿執筆にあたり助言をくださった宇都野穰氏に感謝いたします. また谷内稜は JSPS 特別研究員奨励費 (JP14J08718) ならびに, UK STFC (ST/P003885/1) の助成を受けております. さらに, 本研究を評価していただき第 14 回物理学会若手奨励賞に選んでいただきありがとうございます.

#### 参考文献

- 1) R. Taniuchi et al., *Nature* **569**, 53-58 (2019); Ryo Taniuchi, Ph.D. Thesis, the University of Tokyo.
- 2) M. Thoennessen, *Int. J. Mod. Phys. E* **28**, 1930002 (2019); M. Thoennessen, *Discovery of Nuclides Project*, <https://people.nsl.msui.edu/~thoennessen/isotopes/>
- 3) W. M. Elsassner, *J. Phys. Radium (Sér. 7)* **5**, 635-39 (1934); N. Bohr, *Nature* **137**, 344 (1936); H. A. Bethe, *Phys. Rev.* **50**, 332 (1936); W. M. Elsassner, *Phys. Rev.* **51**, 55 (1937); E. Wigner, *Phys. Rev.* **51**, 947 (1937); Maria G. Mayer, *Phys. Rev.* **74**, 235 (1948).
- 4) M.G. Mayer, *Phys. Rev.* **75**, 19691970 (1949); O. Haxel, J. Jensen, and H. Suess, *Phys. Rev.* **75**, 17661766 (1949).
- 5) O. Sorlin and M.-G. Porquet, *Prog. in Part. and Nucl. Phys.* **61**, 602673 (2008).
- 6) J. Fridmann et al., *Nature* **435**, 922 (2005).
- 7) S. Takeuchi et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 182501 (2012).
- 8) F. Wienholtz et al., *Nature* **498**, 346-349 (2013).
- 9) D. Steppenbeck et al., *Nature* **502**, 207-210 (2013); 武内 聡, ステッペンベック デービッド, 宇都野 穰, *日本物理学会誌* **70**, 535-539 (2015).
- 10) R. F. Garcia Ruiz et al., *Nature Phys.* **12**, 594-598 (2016).
- 11) S. Michimasa et al., *Phys. Rev. Lett.* **121**, 022506 (2018); 道正 新一郎, 小林 幹, *日本物理学会誌* **74**, 850-855 (2019); Motoki Kobayashi, Ph.D. Thesis, the University of Tokyo.
- 12) Ch. Engelmann et al., *Z. Phys. A* **352**, 351-352 (1995).
- 13) P. T. Hosmer et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 112501 (2005).
- 14) H. Okuno, N. Fukunishi, and O. Kamigaito, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2012**, 03C002.
- 15) Z.Y. Xu et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 032505 (2014); Zhengyu Xu, Ph.D. Thesis, the University of Tokyo.
- 16) J. Van de Walle et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 142501 (2007).
- 17) Y. Shiga et al., *Phys. Rev. C* **93**, 024320 (2016).
- 18) L. Olivier et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 192501 (2017).
- 19) Y. Tsunoda et al., *Phys. Rev. C* **89**, 031301(R) (2014).
- 20) S. M. Lenzi, F. Nowacki, A. Poves, and K. Sieja, *Phys. Rev. C* **82**, 054301 (2010).
- 21) C. Santamaria et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 192501 (2015).
- 22) F. Nowacki et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 272501 (2016).
- 23) X.F. Yang et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 182502 (2016).
- 24) T. Kubo et al., *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2012**, 03C003.
- 25) N. Fukuda et al., *Nucl. Instr. Meth. B* **317**, 323332 (2013).
- 26) P. Doornenbal, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2012**, 03C004.
- 27) S. Takeuchi et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **763**, 596603 (2014).
- 28) A. Obertelli et al., *Eur. Phys. J. A* **50**, 8 (2014).
- 29) C. Santamaria et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **905**, 138148 (2018).
- 30) S. Agostinelli et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **506**, 250303 (2003).
- 31) G. Hagen, G. R. Jansen, and T. Papenbrock, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 172501 (2016).
- 32) J. Simonis et al., *Phys. Rev. C* **96**, 014303 (2017).
- 33) S. Péru and M. Martini, *Eur. Phys. J. A* **50**, 88 (2014).

#### 著者紹介または非会員著者の紹介

Pieter Doornenbal 氏: 理化学研究所仁科加速器科学研究センター専任研究員. 2007 年にケルン大学において博士号を取得後, 日本学術振興会特別研究員において来日し, 以降理研 RIBF を拠点とした不安定原子核の構造に関する研究を精力的に遂行している.

(2020 年 4 月 27 日原稿受付)

## Doubly closed shell of Nickel-78

Ryo Taniuchi, Pieter Doornenbal, Hiroyoshi Sakurai

abstract: The doubly magic features of the very unstable nucleus located far from the stability line,  $^{78}\text{Ni}$ , were investigated experimentally. To accomplish the measurement of this short-lived isotope, a new target and detector system was developed to measure the de-excitation gamma rays with a better Doppler reconstruction following proton-knockout reactions. While the high energy of the first excited state of  $^{78}\text{Ni}$  corroborates its closed-shell nature, a second state was found at a similar excitation energy. This observation suggests a possible shape-coexisting nature in this nucleus and questions the nuclear shell robustness for isotopes further away from stability, where the nucleosynthesis is proposed to occur.