

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800130

研究課題名(和文)ベータガンマ核分光による二重魔法核 ^{78}Ni 近傍の殻進化の研究研究課題名(英文)Shell evolution towards doubly-magic ^{78}Ni studied by the beta-gamma spectroscopy

研究代表者

新倉 潤 (Niikura, Megumi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50644720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、現在知られている最も中性子過剰核な二重魔法数核ニッケル-78(^{78}Ni)における中性子一粒子軌道エネルギーの決定のため、近傍の亜鉛(Zn)同位体の核分光測定を行った。理化学研究所の不安定核生成施設RIビームファクトリー(RIBF)における「ベータガンマ核分光」と「インビーム核分光」の2つの分光手法を用いて、 Zn -79, 80, 81核の励起準位測定に成功し、またその崩壊・反応の選択則による一粒子的な性質の同定から中性子過剰核における殻構造の進化について議論した。

研究成果の概要(英文)：Spectroscopic studies were carried out on neutron-rich Zn isotopes to explore the single-particle structure of the most neutron-rich doubly-magic nucleus, ^{78}Ni . The experiment was performed at RI Beam Factory (RIBF) in RIKEN using two different method: beta-gamma spectroscopy and in-beam gamma-ray spectroscopy. Excited level schemes of Zn -79,80,81 were constructed for the first time. From the different selectivity of the decay/reaction, single-particle states are identified and the shell-evolution of this neutron-rich nuclei were discussed.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：実験原子核物理 原子核構造 ベータ崩壊 ガンマ線核分光

1. 研究開始当初の背景

天然に存在する原子核(安定核)を構成する陽子と中性子(核子)はほぼ同じ数を持つが、その数のバランスが極端に異なる核はアルファ崩壊やベータ崩壊に対して不安定であり、数百ミリ秒から数秒で崩壊する。80年代に開発されたこの不安定核の生成分離技術により安定核から離れた原子核の構造研究が始まって以来、中性子ハロー・スキニング現象の発見、2陽子・2中性子崩壊といった新たな崩壊モードの出現等、不安定核にはエキゾチックな現象があることが知られ、不安定核構造研究は現代の原子核物理の中心課題の一つとなっている。

原子核は多数の核子によって構成される量子多体系であり、一般的にその性質は非常に複雑である。しかし、陽子数・中性子数のいずれかもしくはそれぞれが特定の数(魔法数)を持つ核は、硬い「芯」を形成し複雑な多体系に一定の秩序をもたらすことが知られている。この魔法数の存在は原子核が殻構造を持つことによって説明され、閉殻構造(核子がフェルミエネルギー以下の軌道をすべて占有する状態)をとるときの核子数が魔法数となる。安定核では2, 8, 20, 28, 50, 82, 126が魔法数となることが知られているが、近年の研究で陽子数に比べて中性子数が大きな中性子過剰核では魔法数の消失や新魔法数の出現が報告され、魔法数は必ずしも普遍的な数ではないことが明らかになってきた。

陽子数28、中性子数50とともに魔法数となるニッケル-78(^{78}Ni)は、現在知られている最も中性子過剰な二重魔法数核の候補である。この ^{78}Ni においても安定核で知られている魔法数は保存し、 ^{78}Ni は良い芯となるのか、という疑問は不安定核の構造研究において長年の研究対象となっていた。安定核から遠く離れ生成率が非常に小さい ^{78}Ni は詳細な核分光を行うことが困難であったため、これまでは様々な観点からその性質を外挿によって調べる試みがなされてきた。その多くは偶偶核(陽子・中性子数ともに偶数である核)での集団運動性の系統性を議論したもので、質量測定による殻ギャップ導出、第一 2^+ 励起準位の励起エネルギー測定、および遷移確率測定が ^{78}Ni 直近核までなされている。これら周辺核の系統的な研究から、 ^{78}Ni もまた二重魔法数的な性質を保存することが示唆されている。

2. 研究の目的

本研究では、二重魔法数としての性質を持つことが示唆されている ^{78}Ni とその周辺核の分光測定により、 ^{78}Ni の二重魔法数構造を実験的に決定する。さらに、その魔法数的な性質を定量的に評価するため、閉殻に核子または空孔を一つ加えた奇核(陽子数または中性子数のいずれかが奇数となる核)に特徴的に現れる一粒子励起準位の系統性により、

^{78}Ni における殻構造とその進化を明らかにする。具体的には、中性子過剰な亜鉛(Zn)同位体における励起準位測定により ^{78}Ni における中性子一粒子軌道エネルギーを決定する。Zn同位体の励起準位は、銅(Cu)同位体のベータ崩壊および、Zn同位体の一中性子ノックアウト反応によって生成し、励起エネルギーはガンマ線測定によって決定する。

3. 研究の方法

実験は理化学研究所のRIビームファクトリー(RIBF)において行った。RIBFでは、おもに大強度ウランビームの飛行分裂反応によって生成する不安定核を、不安定核分離装置BigRIPSによって分離および粒子同定し、二次ビームとして不安定核を得る。得られた不安定核ビームを用いて、目的となるZn同位体の励起準位を「ベータガンマ核分光」と「インビーム核分光」という2通りの手法により生成し、崩壊・反応の選択則から励起準位の一粒子的な性質を決定する。

(1) ベータガンマ核分光法による励起準位エネルギーの高精度測定

不安定核はその定義からいって、必ずベータ崩壊によって安定核へと変化する。ベータ崩壊はその機構がよく理解されているため、崩壊の始状態・終状態の核構造を知るための優れた手法である。そのため、ベータ崩壊を用いた核分光は、すべての不安定核研究に適応できる汎用性をもち、かつ2次反応を用いた核分光法に比べきわめて効率のよい実験手段である。本研究ではこのベータ崩壊に伴うベータ線とガンマ線の同時計測により、娘核の励起準位の同定を行った(ベータガンマ核分光法)。

実験は2012年12月と2013年5月にEURICA(Euroball RIKEN Cluster Array)国際共同研究プロジェクトの一環として行った。本プロジェクトは、RIBFがもつ大強度不安定核生成施設、我々のグループで開発した位置感応型シリコンストリップ半導体検出器WAS3ABi(Wide-range Active Silicon Strip Stopper Array for beta and Ion)、および欧州ガンマ線検出器委員会が管理するガンマ線検出器アレイEUROBALLの組み合わせにより、広範囲の原子核において、そのベータ崩壊特性の研究を可能にした国際共同研究プロジェクトである。本プロジェクトで用いた実験セットアップ図を図1に示す。

本実験では、BigRIPSで分離・同定された不安定核をWAS3ABiに停止させベータ崩壊を待つ。WAS3ABiは8枚の両電極読み出しストリップシリコン検出器で構成され、目的となる不安定核をすべて停止させるために十分な厚さを持つ。停止した不安定核のベータ崩壊時の崩壊電子をWAS3ABiによって、同時に放出されるベータ遅発ガンマ線をEUROBALLによって同時計測した。

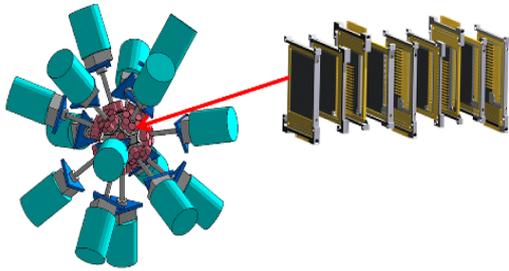


図 1: EURICA 実験におけるベータガンマ測定装置。12 台のゲルマニウム検出器 EUROBALL の中心にシリコン検出器 WAS3ABi が配置されている。

EUROBALL は、7 個の高純度ゲルマニウム結晶からなるクラスター検出器を球状装置に 12 台、合計 84 結晶配置した、世界最高レベルのエネルギー分解能と検出効率を併せ持つガンマ線検出器アレイである。

(2) 一中性子ロックアウト反応を用いたインビームガンマ線核分光

前述のベータガンマ核分光は、核の励起準位構造の高精度かつ高効率な決定が可能であり、これまで励起準位が全く知られていない原子核の分光測定には最適な手法である。一方で、ベータ崩壊は様々な種類の励起準位を生成するため、複雑な励起準位構造から中性子の一粒子準位を実験的に同定することは難しい。そこで、本研究ではベータガンマ核分光で得られた励起準位のなかから中性子一粒子状態を実験的に同定するため、中性子配位を実験的に導出可能な一中性子ロックアウト反応を用いたインビームガンマ線核分光実験を行った。

実験は 2014 年 5 月に SEASTAR (Shell-Evolution And Search for Tow-plus eneries At RIBF) 国際研究プロジェクトの一環として行った。本プロジェクトは、162 個の NaI(Tl)検出器で構成され高い検出効率を持つガンマ線検出器 DALI2 と、フランスサクレー原子核研究所が開発した液体水素標的システム MINOS (MagIc Number Off Stability) を用いることで、高効率な励起準位測定を可能にする国際共同研究プロジェクトである。本プロジェクトで用いた実験セットアップ図を図 2 に示す。

本実験では、BigRIPS で分離・同定された不安定核ビームを MINOS 液体水素標的に照射し中性子ロックアウト反応を引き起こす。反応チャンネルは標的後方の ZeroDegree Spectrometer による粒子同定によって選択し、反応生成核の励起準位エネルギーはガンマ線の測定によって決定する(インビームガンマ線核分光法)。本手法では、測定するガンマ線が光速の約 50%と非常に速く運動する粒子から放出されるため強いドップラシフト効果の影響を受ける。このドップラシフトを精度よく補正するためガンマ線検

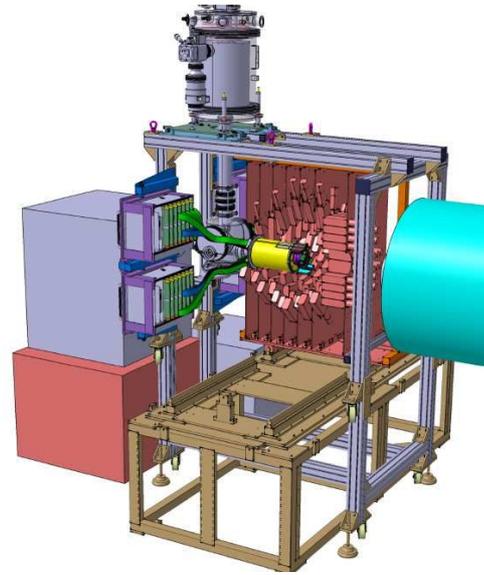


図 2: SEASTAR 実験で用いた標的周りの検出器セットアップ図。液体水素標的および反跳陽子軌跡測定システム MINOS の周りに 162 個の NaI ガンマ線検出器 DALI2 が配置されている。

出器は 162 個に細分化されているほか、標的システム MINOS は核反応を起こした位置を高い精度で測定するための反跳陽子軌跡検出器を持っている。

4. 研究成果

(1) ベータ崩壊半減期の高精度測定

ベータ崩壊の半減期は不安定核の性質を示す基本的な物理量の一つである。本 EURICA プロジェクトによるベータ崩壊半減期測定により、5 個の新たな測定値を含む 10 以上の核種において、従来の 2 から 20 倍と非常に高精度の半減期測定に成功した。この結果により、非常に中性子過剰な ^{78}Ni においてもその二重魔法数的な性質が保存していることが示唆された。本結果は、これまでの外挿による ^{78}Ni の魔法数的な性質の予想を終え、実験的な直接測定による議論を可能にした初の研究と位置づけられる。

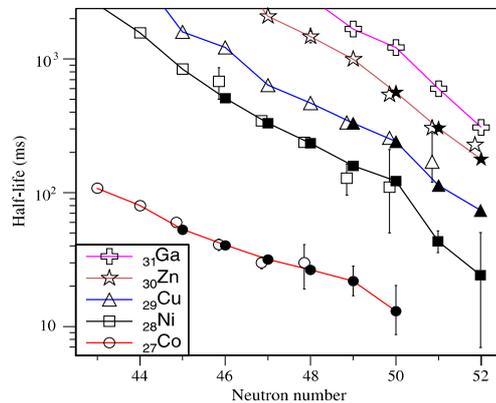


図 3: ^{78}Ni 周辺核の半減期。黒く示した点が本研究で測定した値。Z. Y. Xu et al. PRL 133, 032505 (2014)から引用。

(2) ^{78}Ni の第一励起準位測定

一般的に陽子数・中性子数ともに偶数を持つ偶偶核の第一 2^+ 励起準位エネルギーは原子核の「硬さ」の指標である。魔法数をもつ原子核は硬く第一励起準位エネルギーが高くなるため、その測定は魔法数的な性質を決定する実験的な直接証拠となる。本 SEASTAR プロジェクトによる核分光実験では、一陽子ロックアウト反応により励起した ^{78}Ni の脱励起ガンマ線エネルギーの測定に成功した。この成果は、中性子過剰な二重魔法数核 ^{78}Ni における魔法数は保存するのか消滅するのか、という議論に終止符をうち、今後 ^{78}Ni 核に関連する構造研究は、魔法数を作る閉殻構造を構成する一粒子軌道エネルギーの定量測定とその変化メカニズムの解明へと進むこととなる。

(3) ^{81}Zn の励起準位構造

魔法数 50 よりも中性子数が一つだけ多い中性子数 51 をもつ同中性子体の低励起準位には、価中性子が中性子殻軌道を占める典型的な一粒子軌道準位に現れる。本 EURICA 実験によって、 ^{81}Zn の励起準位からの脱励起ガンマ線をベータガンマ核分光法によって測定することに成功した。測定されたガンマ遷移エネルギーは 130 keV と低く、また数百ナノ秒の比較的長い寿命を持つ励起準位からのガンマ崩壊であることが確認され、測定された励起準位はスピン-パリティが $1/2^+$ を持つ中性子 $3s_{1/2}$ 軌道に由来する一粒子準位であると考えられる。 ^{81}Zn の基底準位はスピン-パリティが $5/2^+$ であり $2d_{5/2}$ 軌道に由来する一粒子準位であることが知られている。本研究の結果は、安定核ではよく知られている $d_{5/2}$ と $s_{1/2}$ の軌道間にある準魔法数 56 が中性子過剰核 ^{78}Ni 近傍では消滅することを示唆している。

(4) ^{79}Zn の励起準位構造

魔法数 50 よりも中性子数が一つだけ少ない中性子数 49 をもつ同中性子体の低励起準位には、一つの空孔準位や、二つの空孔 (2-hole) と一つの粒子 (1-particle) を持つ $2h1p$ 構造といった一粒子軌道エネルギーに関係する励起準位が現れるほか、陽子励起による集団励起と結合した集団励起準位が混在する。

本 EURICA 実験の ^{80}Cu および ^{79}Cu のベータガンマ核分光により、 ^{79}Zn の励起準位からの崩壊ガンマ線を多数測定した。図 4 は得られたガンマ線スペクトルの一例で、 ^{79}Cu のベータ崩壊およびベータ遅延中性子崩壊で励起された ^{79}Zn および ^{78}Zn の脱励起ガンマ線スペクトルである。測定されたガンマ線のガンマガンマ同時計測解析により、 ^{79}Zn および ^{78}Zn の励起準位のガンマ崩壊様式を決定することに成功した。

前述のように、ベータガンマ核分光はガンマ線の崩壊様式を決定するためには非常に

良い手法であるが、得られた励起準位構造から中性子一粒子軌道エネルギーを導出するためには励起準位のなかから一粒子準位を決定する必要がある。そこで、SEASTAR 実験において、 ^{80}Zn の一中性子ロックアウト反応による ^{79}Zn の一孔粒子空状態同定を行った。本研究のインビームガンマ線核分光により、 ^{79}Zn の励起準位のうち 236 keV のガンマ遷移のみが測定された。これは、このガンマ線が中性子 $1p_{1/2}$ 軌道の一空孔状態に対応するスピン-パリティ $1/2^-$ を持つ励起準位からの遷移ガンマ線であることを意味する。また、排他的に他の 440 および 986 keV のガンマ遷移は $2h1p$ 構造を持つ $1/2^+$ および $5/2^+$ 状態からの遷移であると推定できる。

これら、ベータ崩壊およびインビームガンマ線核分光の結果から、 ^{79}Zn の崩壊様式とその励起準位の構造を決定することに成功した。この結果、 $2h1p$ 準位の励起エネルギーから中性子数 56 の新魔法数が、また空孔状態の励起エネルギーからは中性子数 40 にも殻ギャップが形成され準魔法数となることが示唆された。

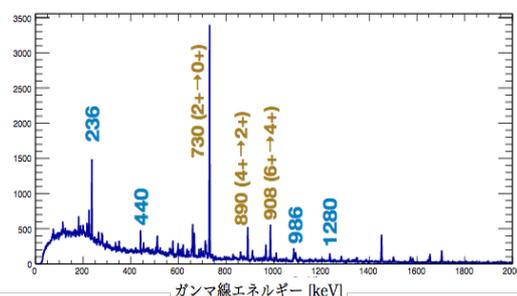


図 4: ^{79}Cu のベータ崩壊に伴うガンマ線のエネルギースペクトル。青色で示したエネルギーはベータ崩壊による ^{79}Zn の脱励起ガンマ線、茶色で示したエネルギーはベータ遅延中性子放出による ^{78}Zn の脱励起ガンマ線を示す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

(1) Z. Y. Xu, M. Niikura et al.: “ β -Decay Half-Lives of $^{76,77}\text{Co}$, $^{79,80}\text{Ni}$ and ^{81}Cu : Experimental Indication of a Doubly Magic ^{78}Ni ”, Phys. Rev. Lett. 133, 032505 (2014), 査読あり。

(2) Z. Y. Xu, M. Niikura et al.: “Systematic study of β -decay half-lives in the vicinity of ^{78}Ni ”, JPS Conf. Proc. 1, 013035 (2014), 査読あり。

〔学会発表〕(計 10 件)

(1) M. Niikura 他, “Structure of neutron-rich Zn isotopes”, APS-JPS Joint meeting (HAW14), October 8, 2014, Hawaii (USA).

(2) M. Niikura 他, “Neutron monopole drift towards ^{78}Ni ”, SUNFLOWER Workshop, September 15, 2014, the University of Tokyo (Tokyo).

(3) M. Niikura 他, “Study on neutron-rich Zn isotopes via β - γ spectroscopy”, 2nd ARIS Conference, June 6, 2014, the University of Tokyo (Tokyo).

(4) M. Niikura 他, “Shell-evolution towards ^{78}Ni ”, EURICA workshop, April 10, 2014, RIKEN Nishina Center (Saitama).

(5) 新倉潤 他, 『Beta-decay spectroscopy at RIBF』, 7th SSRI workshop, 2013年3月3日, 理化学研究所(埼玉).

(6) 新倉潤 他, 『ベータガンマ核分光による中性子過剰 ^{78}Ni 近傍核の構造研究』, 日本物理学会秋季大会, 2013年9月21日, 高知大学(高知).

(7) M. Niikura 他, “ β -decay spectroscopy in the vicinity of ^{78}Ni ”, LIA symposium, October 1, 2013, Paris (France).

(8) M. Niikura 他, “Study of proton shell evolution towards ^{78}Ni ”, SUNFLOWER workshop, September 11, 2013, Darmstadt (Germany).

(9) Z. Y. Xu, M. Niikura 他, “Systematic study of β -decay half-lives in the vicinity of ^{78}Ni ”, Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 16, 2013, Makuhari Messe (Chiba).

(10) Z. Y. Xu, M. Niikura 他, “The β -decay studies of neutron-rich nuclei in the vicinity of ^{78}Ni ”, International Nuclear Physics Conference (INPC2013), June 3, 2013, Firenze (Italy).

6. 研究組織

(1)研究代表者

新倉 潤 (NIIKURA Megumi)

東京大学大学院理学系研究科 助教

研究者番号: 50644720