

氏名	志賀 慶明
学位の種類	博士 (理学)
報告番号	乙第330号
学位授与年月日	2017年3月31日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日 文部省令第9号) 第4条4項該当
学位論文題目	Investigating Nuclear Structure in the Vicinity of ^{78}Ni via the In-beam γ -ray Spectroscopy Method (インビームガンマ線核分光法を用いた ^{78}Ni 近傍の原子核 構造の研究)
審査委員	(主査) 栗田 和好 家城 和夫 田中 秀和

2018年11月1日修正版

修正箇所 上記枠内「学位授与の要件」2行目

誤 第4条2項該当

正 第4条4項該当

I. 論文の内容の要旨

(1) 論文の構成

この論文は ^{78}Ni 近傍の原子核の構造を論じている。第1章「序章」ではテーマの背景と着想にいたった経緯について述べ、第2章「実験」では実験に用いられた装置や実験条件が詳述されている。第3章「データ解析」ではデータ処理の技術的な側面およびデータの校正に関する説明がなされている。第4章「実験結果」では得られた未知の原子核励起状態が記述され、第5章「議論」では理論計算との比較により考察を行っている。第6章「結論」では、その解釈が原子核理解の現状にもつ意味が結論付けられた。

(2) 論文の内容要旨

有限量子多体系である原子核が殻模型によって記述できることはよく知られている。しかし、近年、陽子と中性子の比が大きく異なる原子核では、質量数50までの原子核について、安定原子核の殻構造で知られているような閉殻構造による魔法数が消滅したり、新たに現れたりする現象が発見され、精力的に調べられている。本論文は、さらに重い質量数80近傍の原子核での殻構造の振る舞いの検証を目指し、特に元素合成過程にも関連する中性子過剰な二重魔法数核 ^{78}Ni 近傍の原子核について、低励起状態の観測により原子核の構造を研究したものである。

^{78}Ni は陽子と中性子が共に魔法数となる二重魔法数を持つ原子核であり、中性子過剰核でもある希少な原子核である。この原子核構造を明らかにすることは原子核構造の統一的理解を目指すために極めて重要である。また、鉄より重い元素の合成過程として知られる早い中性子捕獲過程 (r -プロセス) では、中性子数50の魔法数をもつ原子核が第一待機点であると考えられているが、中性子過剰な原子核では中性子数50の魔法性が実証されていない点は問題となっている。本研究の目的は、 ^{78}Ni の魔法数保持による二重閉殻性やこの領域の中性子過剰核における殻構造進化のメカニズムを明らかにし、魔法数がこの領域でも保持されていることを実証することである。

魔法数の性質は、原子核の低励起状態を観測し、そのエネルギーを求めることで調べることができる。本研究に採用したインビームガンマ線核分光法は、生成率の低い原子核に対しても非常に有効な手段であり、この手法を用いて、低励起状態の 2^+ と 4^+ のエネルギーを系統的に決定した。本実験は、理化学研究所の大強度加速器と粒子分離・識別装置を使用して行われた。核子あたり 345 MeV に加速された ^{238}U をベリリウム生成標的に照射し、飛行核分裂反応により ^{78}Ni 近傍原子核を含む二次 RI (Radioactive Isotope) ビームを生成した。この RI ビームは BigRIPS セパレータを用いて分離され、二次標的に照射して核破砕反応による反応残留核を ZeroDegree スペクトロメータにより識別するとともに励起状態からの脱励起ガンマ

線をDALI2検出器で測定した。186個のNaI(Tl)結晶で構成されたDALI2検出器を用いることにより、わずかな収量の原子核から放出される脱励起ガンマ線の測定に成功した。

データ解析では、ToF-B ρ - Δ E法によって選別された原子核から放出されるガンマ線のエネルギースペクトルを求めた。反応後の残留核は光速の60%もの速度で運動するため、ガンマ線の放出角度と残留核の速度を測定してドップラー効果を補正した。物理シミュレーションコードGEANT4を使用して、DALI2検出器でのガンマ線エネルギースペクトルの応答関数を求めてガンマ線のエネルギーを決めた。カスケード崩壊で放出されたガンマ線は γ - γ 同時計測解析により同定した。寿命が比較的長い励起状態からの脱励起の場合は、ガンマ線の放出位置は反応標的の位置からずれるので、放出角度を用いたドップラー効果の補正によるエネルギーがシフトする。この効果を考慮した物理シミュレーションと比較することにより ^{80}Zn の 4^+ 状態の寿命を決定した。これは励起状態の寿命の測定のための新たな解析手法である。これらにより ^{80}Zn 及び ^{82}Zn の励起状態を世界で初めて観測した。

偶偶核のZn同位体について第一励起状態の 2^+ のエネルギーや 2^+ と 4^+ のエネルギーの比($R_{4/2}$)を系統的に調べた。中性子数50のときに他のZn同位体よりも 2^+ の第一励起状態のエネルギーが高くなっていることと、 4^+ の 2^+ に対するエネルギー比 $R_{4/2}$ が非常に低くなっていることがわかった。これらは、魔法数である中性子数50が中性子過剰核でも魔法性を保持していることを示唆している。 ^{78}Ni に陽子が2個加わった ^{80}Zn では、他のZn同位体に比べて $R_{4/2}$ が 1.32 ± 0.03 と集団運動による振動励起で期待される値(2.00)よりも小さくなった。このことから、 ^{80}Zn は、 ^{78}Ni を不活性のコアとして、二陽子配位によるセニョリティ $\nu=2$ の励起をしていると考えられる。また、 $2^+ \rightarrow 0^+$ 遷移に対する $4^+ \rightarrow 2^+$ 遷移の換算遷移確率の比は $1.12_{-0.60}^{+0.80}$ となり、集団運動による励起(1.44)より小さく、セニョリティの励起(1.00)

と矛盾しない結果となった。これは ^{78}Ni の二重閉殻性を示す重要な結果である。安定なZn同位体の基底状態の配位は $(\pi p_{3/2})^2$ であるが、中性子過剰核である ^{80}Zn では、このセニョリティによる励起で 4^+ 状態がつくられることから $(\pi f_{5/2})^2$ の配位が含まれていることを示している。 $\pi p_{3/2}$ と $\pi f_{5/2}$ の陽子一粒子準位エネルギーが中性子過剰な領域で逆転することは、テンソル力による効果を組み込んだ理論により予言されており、Niに陽子を1つ加えたCuの同位体では中性子数が44と46のときに1陽子による基底状態の $(\pi p_{3/2})^1$ と $(\pi f_{5/2})^1$ 配位が逆転していることが、実験的に検証されていた。 ^{80}Zn での基底状態の $(\pi p_{3/2})^2$ と $(\pi f_{5/2})^2$ 配位の逆転は、この領域での中性子過剰な原子核で研究されている殻構造進化のメカニズムと同様であり、Cu同位体と同様にZn同位体でも $\pi p_{3/2}$ と $\pi f_{5/2}$ の陽子一粒子準位エネルギーが逆転していることを示している。

II. 論文審査の結果の要旨

(1) 論文の特徴

原子核の構造の研究は、核力のつくる平均場内での単一粒子が殻構造を持つことを基盤として進められてきた。しかし、近年の不安定核ビーム技術の進展に伴い、軽い不安定核領域ではこのような描像からの乖離がいくつも報告されている。現在更に注目を集めているのは ^{78}Ni 近傍の領域である。この核は陽子数、中性子数が共に殻構造的には安定な魔法数となっているが、一方で中性子過剰の安定線の限界に近いという特異な性格をもつ。そのため、この領域で魔法数が保たれているかどうかは核構造の面でも、また、宇宙における元素合成過程 (r -過程) の研究においても大きな注目を浴びてきている。本論文は、ウランの核分裂反応を利用した中性子過剰核ビームとその入射核破砕反応を利用して ^{78}Ni 近傍の原子核を励起状態で生成し、 γ 線の測定により低励起状態のエネルギーや遷移確率を求めるという手法で、 ^{78}Ni 核構造のもつ魔法性に迫ったものである。

(2) 論文の評価

魔法数等の殻構造の特徴は低励起状態のエネルギー準位や遷移確率に顕著に表れる。特に陽子数、中性子数がともに偶数の偶偶核では基底状態、第一励起状態のスピン・パリティがそれぞれ 0^+ 、 2^+ であり、 4^+ 状態も低励起の状態に現れるのでこれらの状態のエネルギーや状態間遷移を系統的に調べることにより核構造の変化をみることができる。申請者が採用した、不安定核ビームの核破砕反応により励起核を生成する方法はこのような研究に適したものであり優れた着眼点をもつものである。

しかし、この方法では多種類の不安定核ビームが同時に破砕反応を起こし、入射核、生成核を共に精度良く弁別する必要がある。そのために申請者はビームライン上にプラスチックシンチレータ、PPAC、イオンチェンバーを設置しこれらと BigRIPS と呼ばれる不安定核生成分離装置や ZeroDegree スペクトロメータの磁気剛性、飛行時間を組み合わせることにより十分な精度での粒子識別を達成することができた。この過程では多くのバックグラウンド事象、電荷交換事象を各検出器間の相関等を利用して除去するなどの粘り強く、かつ慎重なデータ解析作業が必要であり、これを成し遂げた申請者の努力は大であると言える。

186 個の NaI(Tl) シンチレータからなる DALI2 検出器を用いて行われた γ 線の測定では励起核は光速の 60% 程度の速度で γ 線を放出するためにエネルギーがドップラー偏移を受ける。これを補正するために γ 線検出器は慎重に較正が行われ、また、GEANT4 などのシミュレーションと組み合わせて応答関数が求められた。得られた γ 線スペクトルから $\gamma\gamma$ 同時計測法等を用いた解析により $^{76,78,80}\text{Zn}$ 核のレベルスキームを組み立てられた。特に ^{80}Zn 核

については γ 線多重度によりエネルギーのピーク位置がずれることが見いだされたが、これは 4^+ 状態が比較的長い寿命を持つことにより標的から離れた位置で γ 線が放出されたことに起因していることが明らかとなった。申請者はこの結果から逆に波形解析を用いた新たな解析方法により 4^+ 状態の寿命を136psと求めた。これらの点で申請者の研究者としての技量は満足すべきものであると認められる。

申請者はこの実験で初めて得られた ^{80}Zn の励起状態のエネルギーや遷移確率を近傍の核と系統的に比較し、中性子数が50のときに 2^+ の第一励起状態のエネルギーが高く、また、 4^+ 状態のエネルギーの 2^+ 状態に対する比が低くなっていることを見出した。この結果は $N=50$ の魔法数が保持されていることを示唆しており、 ^{80}Zn を ^{78}Ni のコアに $(\pi 1f_{5/2})^2$ の二陽子配位による励起と考えることによりこのエネルギー比や換算遷移確率比がよく説明できることを示した。この結果は ^{78}Ni の二重閉殻性の保持を示していると同時に陽子の一粒子軌道が $1p_{3/2}$ と $1f_{5/2}$ で逆転していることを示唆している。同様のことはCu同位体についても報告されており、また、テンソル力を考慮した殻模型計算でも予想がなされていることは興味深い。以上の結果は ^{78}Ni 領域での核構造進化に新たな知見を加えるものであって、本論文の学問的価値は高いと評価できる。

2017年1月12日17:00より18:00まで、本論文に関する公聴会が開かれた。申請者は、論文の内容を明解に説明し、質問に関する応答も満足すべきものであった。