

論文内容の要旨

論文題目 Proton Shell Structure in Neutron-rich Nucleus ^{23}F (中性子過剰核 ^{23}F の陽子殻構造)

氏名 道正 新一郎

本論文では、 ^{22}O 核ビームへの陽子移行反応による ^{23}F の陽子殻構造の実験的研究について述べる。

1930年代に発見された安定核における魔法数の存在は、原子核の最も基本的な性質であると同時に、原子核が独立粒子模型で示される実験的根拠である。近年では、安定核からより遠くはなれた原子核を対象とした実験的核構造研究が盛んに行われるようになり、安定核およびその近傍で構築された魔法数とは異なった不安定核の構造的特徴が明らかになってきている。とくに、軽質量の中性子過剰核領域では、魔法数 $N=8,20$ の消滅、魔法数 $N=16$ の出現など、安定核では見られない多くの現象が発見され、新たな原子核構造研究の対象として盛んに研究が進められている。

現在、魔法数の生成・消滅に関する実験的研究は、中性子過剰度にもなって弱く束縛された中性子の殻構造を調べることを中心に進められている。一方で、中性子過剰核における陽子殻構造はほとんど調べられていない。しかし、中性子過剰核の陽子は安定核に比べて強く束縛されており、中性子過剰核における核構造の新たな一面を発見する可能性がある。

本研究の目的は、不安定核 ^{22}O への陽子ストリップ反応の測定を行い、sd 殻領域の中性子過剰核における陽子殻構造を明らかにすることである。原子核における殻構造を調べるうえで、陽子あるいは中性子ストリップ反応は極めて有効なプローブであるが、現在まで不安定核ビームに対して核子ストリップ反応を用いた研究はあまり行われていない。その

主な理由は、不安定核が主にビームとして得られるため、逆運動学において (d,n) (d,p) 反応の測定が技術的に難しかったことにあると思われる。また、それらの反応の適合エネルギー範囲 (< 10 MeV/u) や反応断面積の大きさ (典型的に~10mb) も強度のない不安定核への適用が難しかった理由である。これらの困難を克服するために、われわれは逆運動学インビーム γ 線分光法を陽子ストリップ反応(α,t)に適用した。(α,t)反応の特徴は、核子移行チャンネルの適合エネルギーが(d,n)反応に比べて高い領域に広がっていることである。このことは、不安定核ビーム生成法として非常に強力な中間エネルギー入射核破砕反応で生成されたビームに対しての陽子ストリップ反応を可能にする。また、励起状態同定にインビーム γ 線核分光法を適用することで厚い二次標的が使用できる。このことにより、本実験において、毎秒2000個という弱い不安定核ビームでも十分な統計を得ることができ、中性子過剰核における陽子殻構造の情報を得ることができた。

本研究の対象となる ^{23}F 核の基底状態の核構造は、 ^{22}O 核と1つの陽子という描像がよくあてはまると考えられる。 ^{22}O 核は、陽子数が魔法数 $Z=8$ 、中性子数が準閉殻 $N=14$ をもった硬いコアであるため、 ^{23}F の陽子一粒子状態は比較的大きな核分光因子をもち、陽子殻構造を調べるのに適した原子核であると考えられる。 ^{23}F の一粒子状態の励起エネルギーから、 ^{17}F における一粒子状態の励起エネルギーと比較することにより、 $d_{5/2}$ 中性子軌道の占有度の違いによる陽子殻構造の変化を明らかにすることができる。特に、 ^{23}F の陽子 $d_{3/2}$ 軌道に寄与した一粒子状態の励起エネルギーからは、基底状態が陽子 $d_{5/2}$ 軌道の一粒子状態であることから、不安定核のスピン軌道相互作用の大きさを知ることができる。

実験は、理化学研究所加速器施設、不安定核ビームライン RIPS において行なった。 ^{22}O 二次ビームは、エネルギー63 MeV/u の ^{40}Ar 一次ビームの ^9Be 標的との入射核破砕反応により生成した。 ^{22}O ビームを 100mg/cm² 厚の液体ヘリウム標的に照射し、陽子ストリップ反応を測定した。また、二次ビームには、 ^{23}F , ^{24}F , ^{25}Ne などの ^{23}F 近傍の原子核も含まれていたため、 ^{23}F の α 非弾性散乱、 ^{24}F の中性子ノックアウト反応、および ^{25}Ne の二核子ノックアウト反応も同時に測定した。二次ビームエネルギーは、核子あたり約 40 MeV であった。反応チャンネルの同定は、入射粒子、散乱粒子の同時測定で行なった。また、生成された励起状態は、散乱粒子からの脱励起ガンマ線のエネルギーにより同定した。とくに、複数の γ 線カスケードによって崩壊する励起状態に対しては、 $\gamma-\gamma$ 同時測定によりカスケードを同定し、励起エネルギーを得た。本論文では、高エネルギーガンマ線に対する新しい解析手法として「検出器のクラスター解析」を紹介する。これは、コンプトン散乱や電子対生成過程でエネルギーの一部が検出器外に逃げてしまうガンマ線の事象に対して、近接の検出器を一つの検出器と見立ててガンマ線のエネルギーを決定する手法であり、ドップラーシフト補正のためセグメント化され、密集して配置されているインビームガンマ線分光用の検出器アレイに対しては効果的な方法である。また、移行角運動量の同定のため、二次標的前後に3台の位置感応型ガス検出器を設置し、反応の散乱角度分布を測定した。

測定の結果、4種類の直接反応から15本の ^{23}F の励起状態を、2268(L=0), 2920[L=2], 3378(L=2,3), 3833, 3858, 3964, 4059(L=2), 4618, 4732(L=2,3), 4923, 5444, 5564, 6365, 6629, 6905 keVに同定した。これらの励起状態のうち、下線で示した9本の状態は本実験において新たに発見された状態であり、その他の状態に関しても、過去の研究によって報告されている中性子分離エネルギー以下の励起状態と誤差の範囲内で一致した。()内は陽子ストリップ反応の、また、[]内は α 非弾性散乱の散乱角度分布から得られた軌道角運動量をそれぞれ示している。

本実験で測定した直接反応は、励起する状態に対して強い選択性を持っていると考えられるので、それらを利用することで励起状態の性質を同定することができる。特に、陽子一粒子状態に関しては、陽子ストリップ反応で強く励起され、中性子ノックアウト反応ではほとんど励起されないはずである。このような性質から、基底状態、2268keVと4059keVの励起状態が陽子一粒子状態であると考えられる。さらに、角運動量の同定から基底状態が $d_{5/2}$ 、2268keVが $s_{1/2}$ 、4059keVが $d_{3/2}$ 軌道の陽子一粒子状態であるとわかった。陽子ストリップ反応から得られた2268, 4059 keVの励起状態への分光学的因子 $(2J+1)C^2S$ は、基底状態の分光学的因子をある理論的期待値である4.82に較正した時、それぞれ $0.5^{+0.2}_{-0.3}$, $0.9^{+0.3}_{-0.4}$ であった。

議論として、測定で得られた ^{23}F の励起状態のエネルギーを殻模型計算と比較をした。この有効相互作用は、安定核近傍のsd殻領域核の励起状態をよく再現するように調整された相互作用である。 ^{23}F に関しては、中性子の励起が主に寄与している励起状態では150 keV以内でよく再現しているのに対して、測定された $s_{1/2}$, $d_{3/2}$ 陽子一粒子状態のエネルギーはともに予想より500 keV以上高かった。このような系統的な予想のずれを改善するために、本論文では、陽子一粒子軌道間のエネルギー差を調整することを試みた。この量は、陽子一粒子状態の励起エネルギーに強く影響を及ぼすが、中性子の集団励起状態にはほとんど影響しない。調整の結果、陽子d軌道のスピン軌道相互作用によるスプリットを標準の値より1.3 MeV広くする($d_{5/2}$ 軌道を0.52 MeV下げ、 $d_{3/2}$ 軌道を0.78MeV上げる)ことによって、 ^{23}F の中性子集団励起状態のエネルギーをほとんど変えることなく、陽子一粒子状態を100 keV以内で再現することができた。有効相互作用の陽子一粒子軌道間のエネルギーは、 ^{17}F のデータから決められているので、このことは ^{23}F でのd軌道のスピン軌道相互作用によるエネルギー分裂が ^{17}F に比べて大きいことを示唆していると考えられる。

スピン軌道相互作用の強さは、原子核の一体ポテンシャルと最外殻の陽子の波動関数の重なりで決まるので、この示唆は、 ^{23}F と ^{17}F との間の一体ポテンシャルの違いが原因であると考えられる。フッ素同位体における中性子数とスピン軌道ポテンシャルの関係をみるために、有効相互作用Sly4を用いて平均場計算を行なった。計算の結果、 ^{23}F の中性子のd軌道のエネルギー間隔は ^{17}F とほとんど変わらないにもかかわらず、陽子では ^{17}F よりも1.2 MeV大きいことがわかった。この分離の傾向と大きさは、殻模型計算に基づく予想とよく一致していた。また、陽子におけるエネルギー間隔は最外殻陽子の束縛エネ

ルギーと強い相関があることも明らかになった。

以上の考察から、 ^{17}F に比べて増加した 6 個の $d_{5/2}$ 中性子により ^{23}F の最外殻陽子が強く束縛され、その結果、陽子 d 軌道のエネルギー間隔が ^{17}F に比べて大きくなっていると考えられる。