

氏名・（本籍）	てら 寺	かわ 川	あつ 貴	き 樹
学位の種類	博 士（理 学）			
学位記番号	理 博 第 1 2 9 8 号			
学位授与年月日	平 成 5 年 3 月 25 日			
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当			
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 （博士課程）原子核理学専攻			
学位論文題目	Proton shell structure of the 2s1d shell, Ca, Ni and Pb nuclei studied with the (d, n) reaction （(d, n) 反応による 2s1d 殻, Ca, Ni 及び Pb 原子核の陽子殻構造の研究）			
論文審査委員	（主査） 教 授 藤 平 力 教 授 織 原 彦之丞 教 授 菅 原 真 澄			

論 文 目 次

1	Introduction
2	Experiment
3	Theory
4	Analysis
5	Spectroscopic results and discussions
6	Occupation probability and single-particle energy
7	Conclusions
	Acknowledgments
	References

論文内容要旨

原子核内の核子の運動は独立粒子模型でかなりよく記述される。この模型では核子核子間の二体の相互作用が一体の平均場ポテンシャルによって置き換えられる。したがって、この平均場中の核子は他の核子とは無関係な独立粒子運動を行う。一体ポテンシャルとして現実的な形の Woods-Saxon 型のものを用い、さらにスピン-軌道結合を考慮すると、固有状態（一粒子軌道）は閉核と呼ばれる特別な安定性を持った原子核を説明することができる。閉核の基底状態においてフェルミ準位までの一粒子軌道は核子で完全に占有されるため、軌道占有確率のエネルギー分布はフェルミ準位まで 1、その上では 0 という矩形の分布となる。

しかしながら、実際には一体ポテンシャルでは覆いきれない核子間の残留相互作用が存在するため、核内核子の運動は独立粒子運動からずれ、核子間の運動には相関が生ずる。この独立粒子模型の描像からのずれは核子核子相関と呼ばれる。核子核子相関の研究は核内における有効核力の研究につながる。

核子核子相関は、基礎となっている核子間の二体の相互作用の中心力部分とテンソル部分による影響で区別され、中心力型の長距離及び短距離相関、そしてテンソル型のテンソル相関に分類される。残留相互作用は原子核の状態に配位混合をもたらし、基底状態の波動関数に多粒子多空孔配位の励起成分を発生させる。このため閉核における占有確率分布は矩形分布からずれ、フェルミ準位より上の軌道に核子が存在し、下の軌道の占有確率は 1 より小さくなる。相関効果のうち、長距離相関は核子の運動の低運動量成分で寄与すると考えられ、さながらフェルミ準位近傍の占有確率に影響を与えると期待される。一方、短距離相関は非常に強い短距離斥力によって、テンソル相関同様、核内に高運動量成分を発生させると考えられ、深く束縛された核子を高いエネルギー状態へ遷移させると期待される。そのため相関の強さによってはフェルミ準位下の劇的な占有確率の減少が可能となり興味を持たれている。

短距離相関を直接観測するために核内高運動量成分の測定などの実験的努力がなされているが、一般にこの種の実験は困難であり、短距離相関の理解はいまだ確立されていない。したがって、核子核子相関の指標の 1 つである軌道占有確率を実験的に評価することが重要である。

占有確率の研究には一核子移行反応が有力な手段である。この反応は標的核基底状態に対して一核子を生成または消滅させることに対応する。したがって、観測される一粒子強度の総和が標的核における軌道占有確率を与える。一核子移行反応のうち、pickup 反応は主にフェルミ準位より下の占有確率を、stripping 反応は主に上の占有確率をそれぞれ決定する。最近では陽子 pickup 反応と同じ情報を引き出す (e,e'p) 準弾性陽子 knockout 反応が正確な分光学的手段として注目を集めている。一方、相補的な陽子 stripping 反応では (d,n) 反応が反応機構の点で他の反応よりも理論的取扱いが容易であり、より正確な核構造の情報を引き出すと期待される。さらに pickup 反応のように対応する電磁気的プローブがないため (d,n) 反応の役割は重要である。

最近では占有確率への詳細な理論的アプローチも行われている。Wildenthal ら [1] は $2s_{1/2}$

殻核に対して大規模な殻模型計算から核構造の研究を行っている。陽子閉核の Ca 核に対しても乱雑位相近似 (RPA) [2], 核物質の理論 [3], または核子-核弾性散乱の分散関係を用いた平均場解析 [4] などから占有確率の研究がなされており, 核子核子相関の重要性が指摘されている。

本研究は, 核構造の研究手段として有力な (d,n) 反応をもとに, $2s1d$ 殻, Ca, Ni 核の基底状態陽子占有確率を実験的に評価し, 上述の理論値との比較検証を通じて核内核子核子相関に対する理解を得ることを目的とする。このような広範囲の原子核領域にわたる同一実験及び解析条件による研究は, 原子核の性質を正確に評価するためには本来不可欠である。しかしそのような例は残念ながらあまり報告されていない。したがって, 本研究によって原子核の一粒子的性質の理解に大きな進展が得られると期待される。

実験は東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープ・センターの AVF サイクロトロンより得られる 25MeV の重陽子ビームを用いて行われた。反応で放出された中性子は 44m の飛行距離を持つ飛行時間測定装置 [5] でエネルギー分析された。図 1 に $^{32}\text{S}(d,n)^{33}\text{Cl}$ 反応の中性子スペクトルを示す。微分断面積の角度分布はビームスウィンガーシステムを用いて主に実験室系 $0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で測定された。また, (d,n) 反応の解析に必要な光学ポテンシャルを得るために, 本研究で扱ったいくつかの原子核に対して 12.5MeV の偏極陽子弾性散乱の実験を行った。この実験は東京大学原子核研究所の SF サイクロトロン施設で行われた。

原子核反応を通じて核構造の情報を引き出すには, 用いた反応を十分に理解していることが不可欠である。25MeV の (d,n) 反応の反応機構に対して理解を深めるため, 今回得られたデータに対して, 通常の歪曲波ボルン近似 (DWBA) 解析だけでなく, 重陽子の核力の場合での解離の効果を考慮にいった重陽子断熱近似 (ADBA) 解析を行った。DWBA では Deahnick ら [6] のグローバルな重陽子ポテンシャルを用いた。ADBA では核子ポテンシャルとして上述の陽子ポテンシャル, または Becchetti and Greenlees [7] のグローバルな陽子ポテンシャルが, 一方 Martin [8] または Garlson ら [9] のグローバルな中性子ポテンシャルが用いられた。計算は DWBA コード DWUCK4 [10] を用いて行った。

解析の結果, $2s1d$ 殻から Ni 領域の原子核に対して微分断面積の角度分布は, 一般に DWBA 解析よりも ADBA 解析によって良く再現されることがわかった。図 2 に ADBA 解析による $^{32}\text{S}(d,n)^{33}\text{Cl}$ 反応に対する断面積の角度分布の再現性を示す。また, ^{208}Pb に対する (d,n) 反応の解析においても ADBA 解析の再現性が優れていた。解析から評価される一粒子強度は両解析で 5~20% の違いがみられた。したがって, 本研究では, 広い原子核領域で微分断面積の角度分布を良く再現する ADBA 解析の結果を採用した。

一粒子強度の測定は励起エネルギー 15MeV まで行った。このエネルギー範囲は $1\hbar\omega$ 程度に相当するので valence 強度はほぼ観測していると期待される。図 3 は $2s1d$ 殻核において得られた一粒子強度分布と Wildenthal ら [1] の殻模型による理論値との比較の例を示す。全 $2s1d$ 殻領域で比較を行った結果, 殻の中央領域で強度分布は良く再現される一方, 周辺部で不一致がみ

られ、殻模型計算におけるモデル空間拡張の必要性が指摘される。

得られた一粒子強度から標的核の陽子軌道占有確率の評価を試みた。一核子移行反応の総和則から占有確率を評価する場合、歪曲及び束縛ポテンシャルの不確かさによる強度の絶対値の曖昧さ、及び高励起領域に分布すると考えられる観測されていない強度が問題となる。これらの問題をできるだけモデルに依存しないように回避するため、CASP (Combined Analysis of Stripping and Pickup data on the same target nucleus) 和則 [11] と、CERES (Combined Evaluation of Relative Spectroscopic factors and Electron Scattering) 和則 [12] が提唱されている。これらの和則は一粒子強度の相対値を用いる。その理由は、強度の絶対値は反応、エネルギーによって異なるが、相対的にはしばしば良く一致するので、相対値の曖昧さが少ないと考えられるからである。CASP 和則は、同一標的、同種核子 stripping 及び pickup 反応の強度の軌道 nlj に関する総和は、必ず $2j+1$ になるという一般に成り立つ関係を基に、強度を規格化する手法である。これによって上述の問題がある程度回避できると仮定する。一方 CERES 和則は、一核子移行反応の相対強度と、相互作用が良くわかっている電磁気的プローブで評価された絶対値の情報を結びつけ、占有確率を評価する方法である。この和則は上述の問題をより明確に回避できるとされており、より信頼できる占有確率が期待できる。しかし電磁気的プローブからのデータが必要であり、一般に適用できる原子核は限られている。本研究はこれらの新しい和則を用いて陽子軌道の占有確率の実験的評価を行った。

まず、取り扱ったすべての原子核に対して CASP 和則を適用し陽子軌道占有確率を評価した。必要な陽子 pickup 反応のデータは過去に報告されている ($d, {}^3\text{He}$) 反応のものを用いた。図 4 は評価された陽子占有確率のエネルギー分布を示し、これによって原子核の陽子フェルミ面の形状が明らかにされる。なお、図中の実線は対相関の BCS 関数をデータにフィットした結果でフェルミ面の形状をわかりやすくするためのものであり、決して対相関のみを重視しているわけではない。閉殻と呼ばれる原子核のフェルミ面の形状は、一般に $2s1d$ 殻のものより鋭く、良い閉殻特性がみられるが、独立粒子模型の分布とはずれており、核子核子相関の影響が明らかに現れている。図 5 は、質量 $A=16\sim 40$ の原子核において $2s1d$ 軌道が陽子で充填されていく様子を示す。実験結果は殻模型 [1] によって良く再現されている。陽子閉核の Ca 同位体では、二重閉核である ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{48}\text{Ca}$ で最も閉殻特性が良く、valence 中性子が存在する ${}^{44}\text{Ca}$, ${}^{46}\text{Ca}$ ではフェルミ準位より下でかなりの占有確率の減少が観測され、相関効果の同位体による違いが認められる。短距離斥力からくる相関は近傍核では大きな変化がないと予想されており、Ca 同位体での占有確率の振る舞いは、valence 中性子が原因の長距離相関を通した陽子配位混合の違いと考えられる。一方、中性子殻が開いている陽子閉核 Ni 同位体ではフェルミ面の形状には余り違いがなく、同位体間で同程度の相関効果が見いだされた。

Ca 同位体の $1d_{3/2}$ 陽子軌道占有確率をより正確に評価するため CERES 和則を適用した。この軌道は、言うまでもなく独立粒子模型では完全に占有される軌道であり、正確な占有確率の評価は核子核子相関の理解に重要な役割を演ずる。必要なデータとして一核子移行反応で

は、 $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$ 反応の $^{40}\text{Ca}(d,n)^{41}\text{Sc}$ 反応に対する相対 $1d_{3/2}$ 強度が使われた。電磁気的プローブからのデータとしては、Ca 同位体の電荷平均自乗半径の解析 [13] から評価された、 ^{40}Ca に対する ^{42}Ca から ^{46}Ca のそれぞれの $1d_{3/2}$ 軌道の相対陽子空孔数が使われた。その結果 ^{40}Ca では $1d_{3/2}$ 陽子占有確率 0.86(12)を得た。また同時に他の同位体についても占有確率が決定できる。結果を理論値とともに図 6 に示す。 ^{42}Ca , ^{44}Ca では 60%程度の占有確率と評価され、閉核としては異常に小さな値といえる。本研究で評価された ^{40}Ca にかける $1d_{3/2}$ 陽子占有確率は、RPA [2] や、 p - ^{40}Ca 系の平均場に対する分散解析 [4] の予測と良く一致し、核内核子核子相関に対するこれらの理論的予測を支持する。

References

- 1 B. H. Wildenthal, Prog. Part. Nucl. Phys., 11 (1984) 5
- 2 S. Drożdż et al., Phys. Rep., 197 (1990) 1
- 3 V. R. Pandharipande et al., Phys. Rev. Lett., 53 (1984) 1133
- 4 C. Mahaux and R. Sartor, Nucl. Phys., A528 (1991) 253
- 5 H. Orihara et al., Nucl. Instr. and Meth., A257 (1987) 189
- 6 W. W. Daehnick et al., Phys. Rev. C21 (1980) 2253
- 7 F. D. Becchetti and G. W. Greenlees, Phys. Rev., 182 (1969) 1190
- 8 Ph. Martin, Nucl. Phys., A466 (1987) 119
- 9 J. D. Carlson et al., Nucl. Phys. A249 (1975) 29
- 10 P. D. Kunz, unpublished.
- 11 A. Pfeiffer et al., Nucl. Phys. A455 (1986) 381
- 12 G. J. Wagner, Prog. Part. Nucl. Phys., 24 (1990) 17
- 13 B. A. Brown et al., J. Phys., G5 (1979) 1655

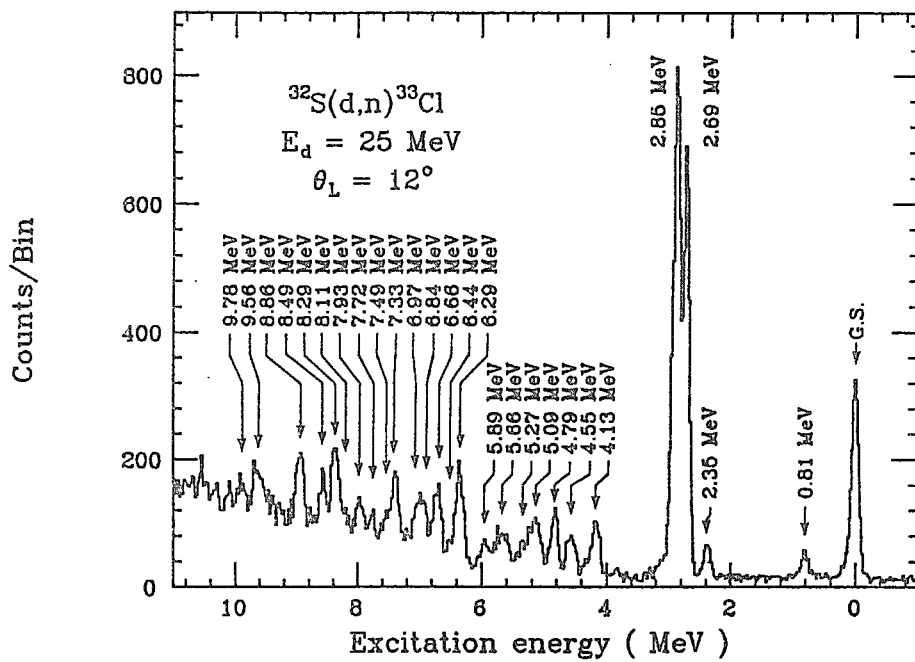


Fig. 1. $^{32}\text{S}(d,n)^{33}\text{Cl}$ 反応のスペクトル。

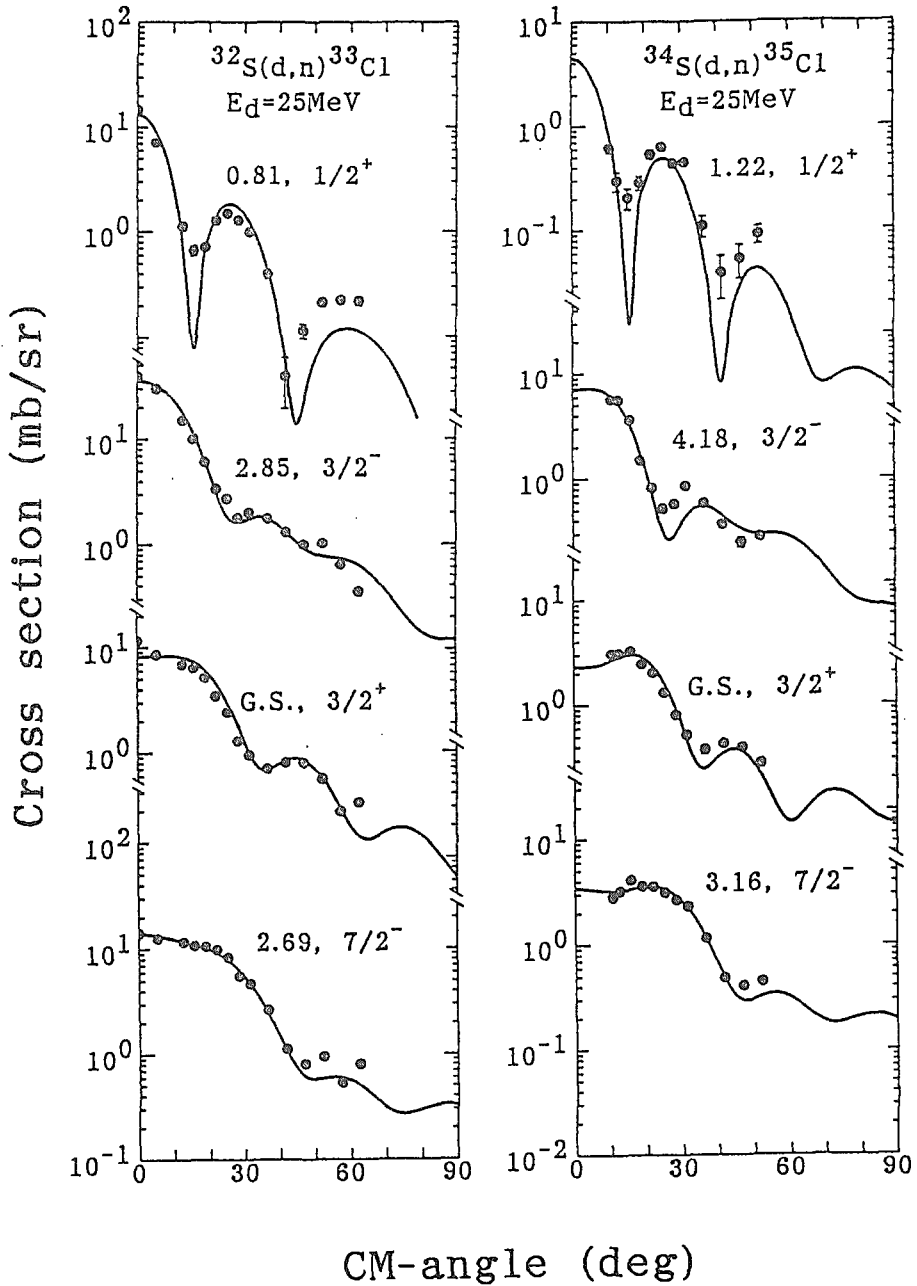


Fig. 2. $^{32,34}\text{S}(d,n)^{33,35}\text{Cl}$ 反応の各 l の典型的な断面積の角度分布。実線は ADBA 解析の結果を示す。

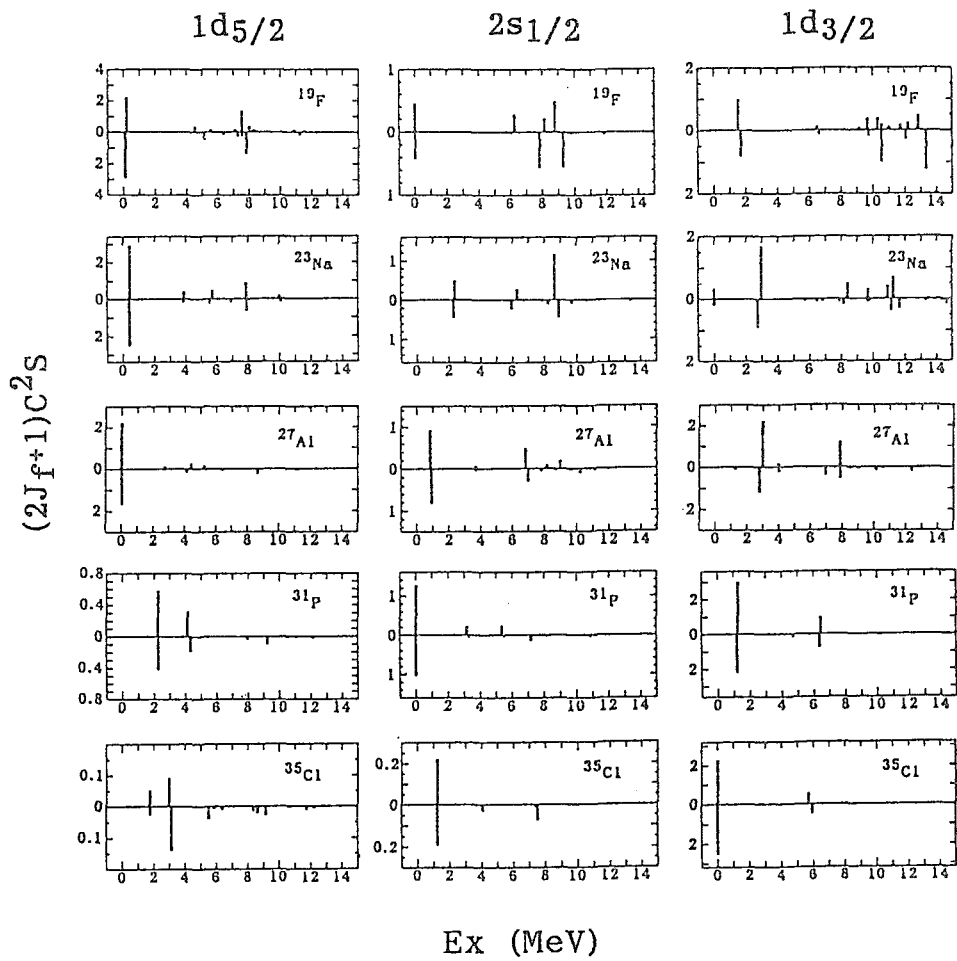


Fig. 3. 得られた一陽子強度分布と殻模型の理論値。

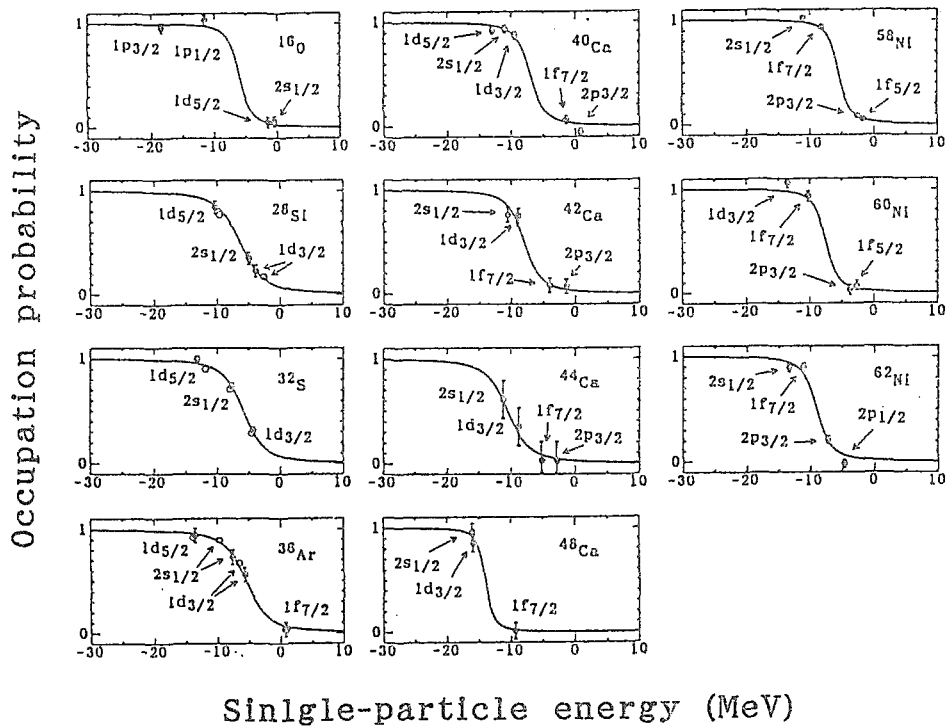


Fig. 4. CASP 和則による軌道占有確率分布。黒丸及び白丸は、それぞれ実験結果、殻模型の理論値を示す。

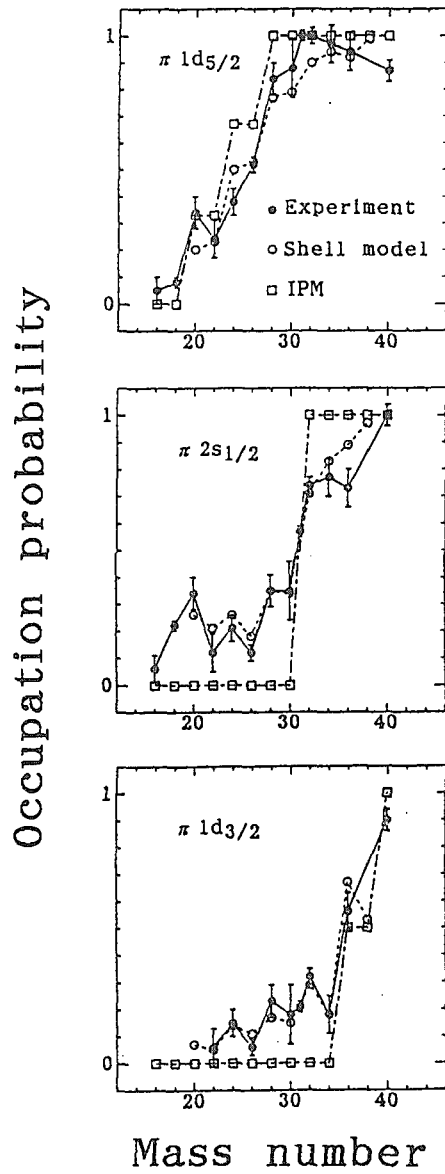


Fig. 5. CASP 和則による $2s1d$ 殻領域における $2s1d$ 軌道の陽子占有確率と、独立粒子模型 (IPM) 及び殻模型 (Shell model) の理論値。

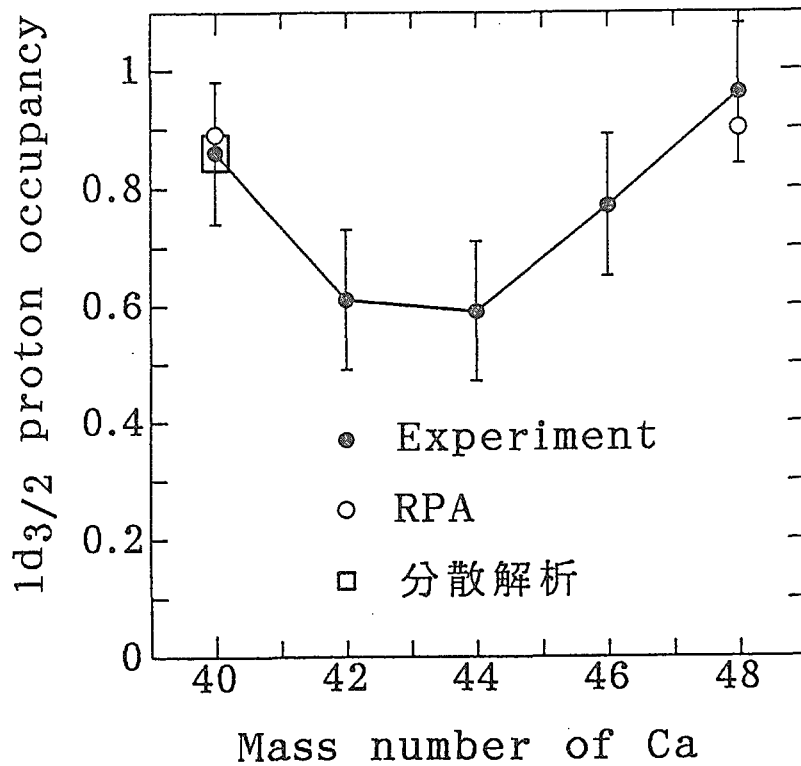


Fig. 6. CERES 和則による Ca 偶偶核における $1d_{3/2}$ 陽子軌道占有確率と, RPA 及び分散解析の理論値。

論文審査の結果の要旨

原子核実験手段の精密化と計算の大型化にともない、原子核内部の状態をより詳細に研究出来る様になった。特に原子核の基底状態における核子占有確率、一粒子エネルギー等を実験的に求め、核内核子-核子相関に関する情報を得るのが本研究の目的である。残留相互作用により原子核の基底状態には配位混合が起こり、その励起成分により閉殻での核子占有確率分布は矩形型のフェルミ分布からはずれ、しみ出して来る。この相関効果には、長距離相関と短距離相関があり、占有確率に対する効果はまだ必ずしも明確ではない。

この実験は東北大 AVF サイクロトロンよりの 25MeV 重陽子を用いて行われた。一核子移行 (d, n) 反応により放出された放出中性子のエネルギーは飛行時間測定装置によって測定された。使われた標的核は、2s1d 殻核、Ca 及び Ni の同位体、それに ^{208}Pb の原子核である。解析は通常の歪曲波ボルン近似と重陽子断熱近似を用い、種々の核子ポテンシャルを用いて両方の解析を行った。本研究では広い原子核領域で微分断面積の角分布をよく再現する重陽子断熱近似解析結果を採用した。

一粒子強度分布の測定は励起エネルギー 15MeV まで行っているのだから、 9ω 程度の強度分布はほぼ観測されていると期待される。2s1d 殻核で実験から得られた粒子強度分布と殻模型による理論値の比較の結果、殻の中央部分の強度分布はよく再現されるが、周辺部では不一致が見られ、理論計算におけるモデル空間拡張の必要があると指摘している。得られた一粒子強度から標的核の基底状態の陽子占有確率を求めた。一核子移行反応の総和則から占有確率を評価する場合、歪曲波及び束縛ポテンシャルの不確かさによる強度の絶対値の問題、高励起領域に分布する観測されない強度の問題がある。これらを出来るだけモデルに依存しないように、CASP 和則と CERES 和則を用いた。この和則はいづれも一粒子強度の相対値で比較出来る利点があり、これらを用いて陽子状態の占有確率の実験的評価を行った。この結果、閉核原子核のフェルミ面の形状は 2S 1d 殻のものより鋭く、良い閉殻特性が見られるが、独立粒子模型の分布とは明らかにずれており、核子-核子相関の影響が現れている。2s1d 状態の陽子占有確率は殻模型でよく再現される。又 Ca の二重閉殻の ^{40}Ca で閉殻特性がよく、 ^{42}Ca ではフェルミ準位より下でかなり占有確率の減少が見られ、相関効果の同意体による違いが認められた。一方中性子殻が開いている陽子閉核 Ni 同位体では、フェルミ面の形状にちがいがなく、同程度の相関効果が見られた。1d_{3/2} 状態の陽子占有確率は ^{40}Ca で 0.86 と得られたに対して、 ^{42}Ca では 60% 程度の占有確率と評価され、閉殻として異常に小さな値となっている。本研究で得られた ^{40}Ca の 1d_{3/2} 陽子占有確率は RPA 解析、分散解析からの予測ともよい一致を示しており、核内核子-核子相関に対するこれらの理論的予測を支持している。

以上見て来た様に、これらの研究結果は、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示しており、よって寺川貴樹提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。