

氏名・（本籍）	かわむらと 河村亨
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 1004 号
学位授与年月日	昭 和 62 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 5 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	入射エネルギー25MeVの(d, n)反応による1p殻原子核の分光学的研究
論文審査委員	（主査） 教 授 石 松 敏 之      教 授 織 原 彦 之 丞 教 授 藤 平              力

## 論 文 目 次

- 1 序 論
- 2 実 験
- 3 実験条件と実験結果
- 4 解 析
- 5 解析方法に関する議論
- 6 解析結果及び議論
- 7 結 論

謝 辞

参考文献

## 論文内容要旨

1 核子移行反応では直接過程の結果、放出される粒子の微分断面積の角度分布の形状が移行する核子の軌道角運動量  $\ell$  に強く依存する。従って、残留核のスピン・パリティについての情報をこの  $\ell$  の同定から得ることができる。また、直接過程では反応が非常に短時間内 ( $\sim 10^{-22}$  秒) に終了することから、例えばストリッピング反応であれば残留核の状態の中から、標的核は基底状態のまま移行した核子が 1 粒子状態を占める状態で表わせる配位の振幅の大きな終状態が選択的に励起される。従って、散乱断面積の大きさは始状態と終状態の重なり具合に強く左右されることになり、その目安を与えるものがスペクトロスコピック因子となる。このように、1 核子移行反応は原子核の 1 粒子状態を研究するための有力な手段となることから、現在まで盛んにその研究が行われてきた。特に、反応機構及び散乱断面積の理論計算値の規格化の問題が充分検討されてきた (d, p), (p, d) 反応研究の歴史は古く、一方放出粒子が非荷電粒子となる (d, n) 反応の研究は実験的困難さのために研究例は可成少なく、その歴史も浅い。

初期の (d, n) 反応の実験ではバンデグラフ型加速器によって重陽子ビームを得ていたのでエネルギーは約 6 MeV 以下と低く、直接過程に加えて複合核過程からの寄与の考慮が必要とされ、信頼度の高いスペクトロスコピック因子の絶対値の導出までには至らず、その相対値の比較及び微分断面積の角度分布における前方での直接過程の形状から  $\ell$  の同定が行われた。タンデム・バンデグラフ型加速器によって 12 MeV 程度のエネルギーの重陽子ビームが得られるようになると、ほぼ反応過程が直接過程になると考えられることから、DWBA 解析によってスペクトロスコピック因子の絶対値の導出が行われた。しかし、重陽子エネルギーが 12 MeV 程度を越えると、(d, n) 反応に限らず重陽子の関与する (d, p), (p, d) 反応においても、特に 1p 殻原子核への DWBA 解析の適用がしばしば困難であるとする報告がなされた。いずれの解析においても、DWBA 計算による散乱断面積の角度分布の再現性が非常に悪く、その改善のためには断面積の計算の際に、ほぼ核半径と同程度の内部打ち切りが必要とされ、しかもその打ち切りパラメーターの設定に断面積の計算値の大きさが強く左右されることから、導出されるスペクトロスコピック因子の値も曖昧さを多く含んだものとなった。このような DWBA 法の欠点の原因に、自身の束縛状態が緩い重陽子の原子核の核力の場による解離 (Breakup) の移行反応への影響が指摘され、Johnson と Soper<sup>1)</sup> はこの重陽子の解離の効果を近似的に従来の DWBA 法に取り入れた断熱近似 (Adiabatic approximation) 法を提唱した。この解析手法を用いて実験データの再解析が試みられ、1p 殻核の (p, d) 反応で成果が収められた。<sup>2)</sup> etc. その後、1p 殻核に限らずさらに重い核に対しても断熱近似法の有効性が幾つか報告された。

一方、AVF サイクロトロンによって比較的エネルギーの高い 44 MeV 程度での ( $^3\text{He}$ , d) 反応の実験も行なわれ、実験的に困難な (d, n) 反応に代わって、1 陽子ストリッピング反応による 1p 殻核のスペクトロスコピック因子の信頼度の高い値が幾つか得られ、Cohen と Kurath<sup>3)</sup> 等の理論値との一致も報告されている。

東北大学サイクロトロン・RIセンターのAVFサイクロトロンは最大25MeVの入射エネルギーを持つ重陽子の加速が可能である。また、同センターではビームチョッパー、ビームスウィンガー、中性子飛行管室、大型中性子検出器及び飛行時間測定回路系、データ収集及び処理系が開発、整備され過去(p, n)反応の実験を中心に高速中性子の高分解能での測定に実績を上げてきている。そこで、25 MeV 重陽子ビームを用いて1p殻核を標的に(d, n)反応の実験を行なった。過去の12 MeV以下で行なわれた(d, n)反応に比べ、複雑な反応過程からの寄与はより少なくなると考えられる一方、既に述べたように特に1p殻核の場合には重陽子の解離の影響も大きくなると予想される。本研究の目的は、より励起エネルギーの高い状態への遷移も含めて精度の良い散乱微分断面積のデータを得、DWBA解析及び断熱近似解析の1p殻核を標的とする25 MeV(d, n)反応への有効性の検討を行ない、そして最終的には信頼度の高いスペクトロスコピック因子を導出し、比較的高いエネルギーの $(^3\text{He}, d)$ 反応またCohenとKurath等の理論値と系統的な比較検討を行なうことである。

実験に使用した標的は1p殻原子核として $^{11}\text{B}$ 、 $^{12,13,14}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}$ 及び $^{16}\text{O}$ である。飛行距離は分解能を上げるため、最長の44mとした。散乱角度は0度から90度付近まで測定し、散乱微分断面積の角度分布を求めた。図1に得られたスペクトルの例として $^{11}\text{B}(d, n)^{12}\text{C}$ 反応によるスペクトルを示す。 $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ 及び $^{15}\text{N}(d, n)^{16}\text{O}$ 反応によって観測された $\ell = 0, 1, 2$ での典型的な遷移の微分断面積の角度分布を図2-a及び図2-bに示す。後述するように、図の断面積の大きさは実験値そのものではない。

まず、図2の6本の遷移に対してDWBA法と断熱近似法を用いて解析を行ない、その有効性の検討を行なった。計算コードには、従来のDWUCK4からComfortによって拡張されたNDWUCK<sup>4)</sup>を用いた。このコードではVincentとFortune<sup>5)</sup>の方法によって非束縛状態の解析を行なうことができる。計算結果を図2-a及び図2-bに示す。図の理論計算値は計算コードからの出力そのものをプロットしたもので、実験値はスペクトロスコピック因子の理論値で割り計算値と直接比較できるようにプロットされている。DWBA解析での光学ポテンシャルは、中性子にはWatson等<sup>6)</sup>による1p殻核( $^6\text{Li} \sim ^{16}\text{O}$ )用のポテンシャル(WSSと略記)を、重陽子には本実験に適用できる系統的ポテンシャルがないため、 $^{12}\text{C}$ にはPerrin等<sup>7)</sup>による $^{12}\text{C}$ の25.2MeVでの(PERと略記)、 $^{15}\text{N}$ にはCooper等<sup>8)</sup>による $^{16}\text{O}$ の25.4 MeVでの(COOと略記)それぞれ弾性散乱のポテンシャルを使用した。断熱近似解析では2通りのポテンシャル・セットを用いた。まず、“重陽子”にはWatson等による陽子、中性子ポテンシャルから導いたもの(ADI1)と、BecchettiとGreenlees<sup>9)</sup>の陽子、Carlson等<sup>10)</sup>の中性子ポテンシャルから導いたもの(ADI2)を用い、一貫性から中性子にはADI1に対してはWatson等の、ADI2に対してはCarlson等(CARと略記)のポテンシャルを使用した。いずれの計算も零レンジ(ZR)、局所ポテンシャル(LO)で行なっている。図2から明らかにDWBA計算の角度分布の再現性が最も劣り、特に $\ell = 0$ の場合には0度での理論計算値が実験値より可成小さくなっている。ADI1-WSSセットによる断熱近似計算の角度分布の再現性はDWBA計算に比べると格段に良く、かつ実験値の大きさも

良好に再現していることから、得られるスペクトロスコピック因子は理論値に非常に近い値になることが分かる。同じ断熱近似計算でも ADI 2-CAR セットの計算では、角度分布の再現性では ADI 1-WSS セット計算と殆ど変わらないものの、実験値の大きさを再現できていない。従って、原子核の質量数は40以上、の適用条件を持つ Becchetti と Greenlees, Carlson 等のポテンシャルは 1p 殻原子核の (d,n) 反応の断熱近似解析にはやはり不適當であることが分かる。

以上のように、Watson 等のポテンシャルを用いた断熱近似解析が図2の典型的な6本の遷移に成果を収めたので、同様の解析手法により本実験で観測された約70本の遷移すべてに対して計算を行ない、スペクトロスコピック因子の導出を行なった。図3は得られたスペクトロスコピック因子の中から、1p 軌道移行に関するものをヒストグラムにしたもので、Cohen と Kurath の理論値と全体的な一致が得られていることが分かる。また、43.6 MeV での  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  ( $^3\text{He}, d$ ) 反応 (11), (12) の結果ともほぼ一致が得られた。

入射エネルギーを25MeV に選んだことによって直接過程以外のより複雑な反応過程からの寄与は軽減したものの、重陽子の解離の影響が深刻化した。しかし、その効果も厳密に取り扱うのではなく、比較的エネルギーの低い  $^3\text{S}$  状態の重陽子の散乱状態のみを考慮し、しかもその内部運動へのエネルギー移行を無視する断熱近似による、従来の DWBA 法において“重陽子”のポテンシャルの取り扱いについてだけ変化した Johnson と Soper 流の簡便な手法を用いることで、1p 殻原子核に対する 25 MeV での (d,n) 反応の系統的な実験データの解析を行なうことができた。

## 参 考 文 献

- 1) R. C. Johnson and P. J. R. Soper, Phys. Rev. C 1 976 (1970)
- 2) G. M. McAllen, W. T. Pinkston and G. R. Satchler, Particles and Nuclei 1 412 (1971)
- 3) S. Cohen and D. Kurath, Nucl. Phys. A 101 1 (1967)
- 4) J. R. Comfort, extended version of the program DWUCK 4, unpublished.
- 5) C. M. Vincent and H. T. Fortune, Phys. Rev. C 2 782 (1970)
- 6) B. A. Watson, P. P. Singh and R. E. Segel, Phys. Rev. 182 977 (1969)
- 7) G. Perrin, Nguyen van sen, J. Arvieux, R. Darves-blanc, J. L. Durand, A. Fiore, J. C. Gondrand, F. Merchez and C. Perrin, Nucl. Phys. A 282 221 (1977)
- 8) M. D. Cooper, W. F. Hornyak and P. G. Roos, Nucl. Phys. A 218 249 (1974)
- 9) F. D. Becchetti, Jr. and G. W. Greenlees, Phys. Rev. 182 1190 (1969)
- 10) J. D. Carlson, C. D. Zafiratos and D. A. Lind, Nucl. Phys. A 249 29 (1975)
- 11) R. J. Peterson and J. J. Hamill, Phys. Rev. C 22 2282 (1980)
- 12) R. J. Peterson and J. J. Hamill, Nucl. Phys. A 362 163 (1981)

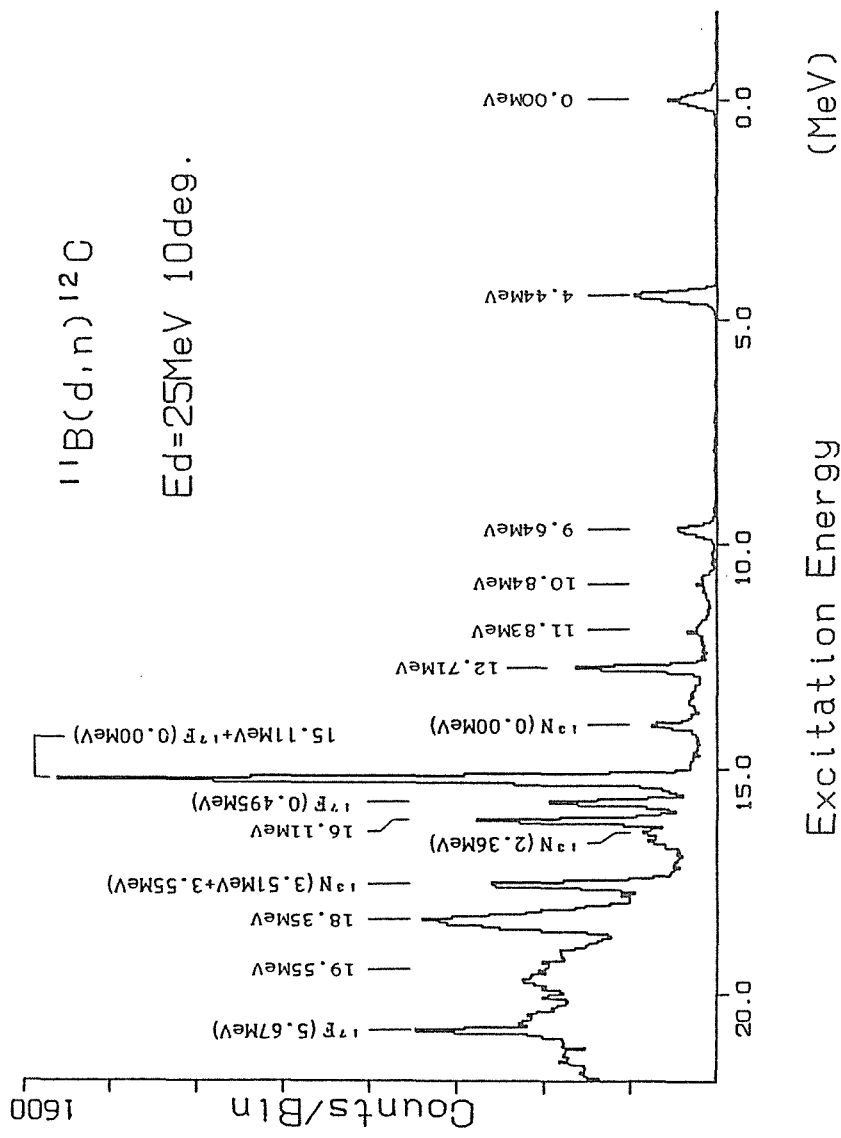


Fig.1

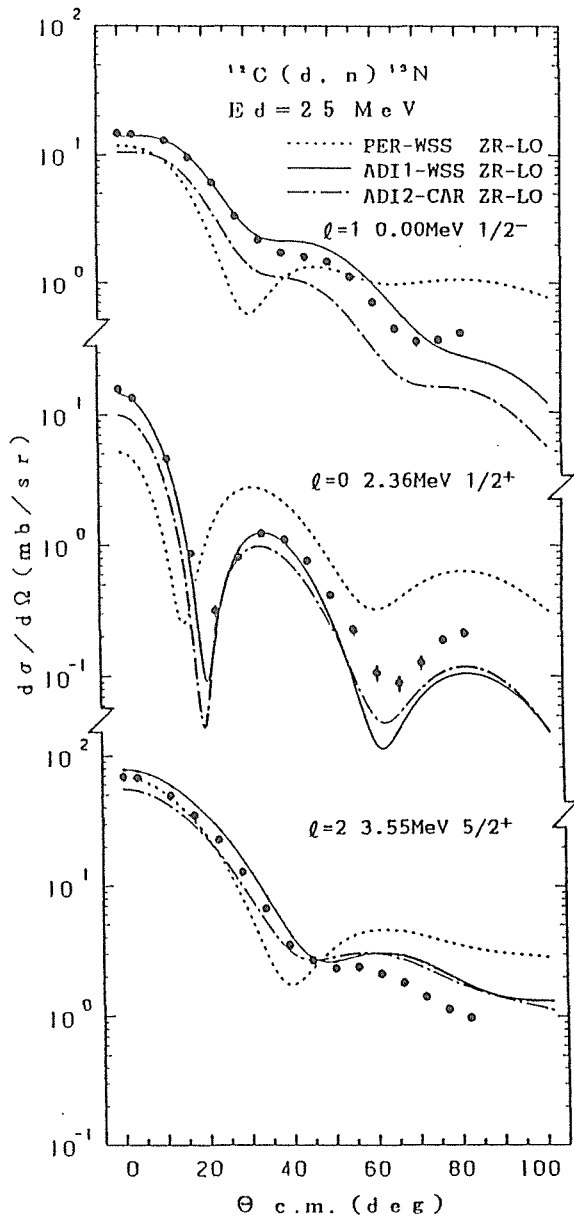


Fig.2-a

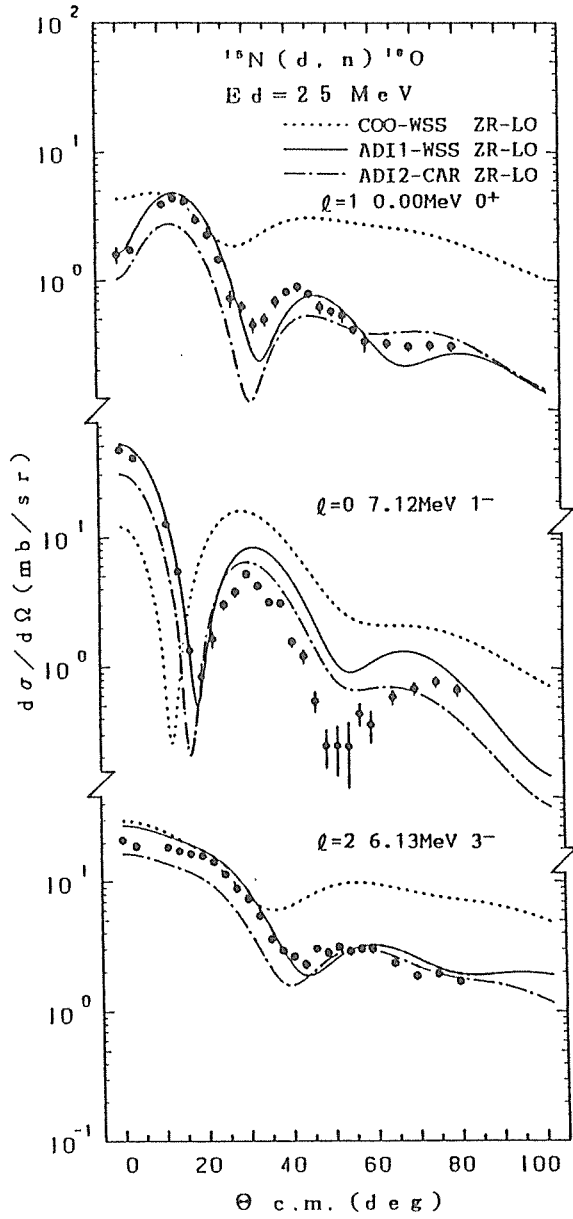


Fig.2-b



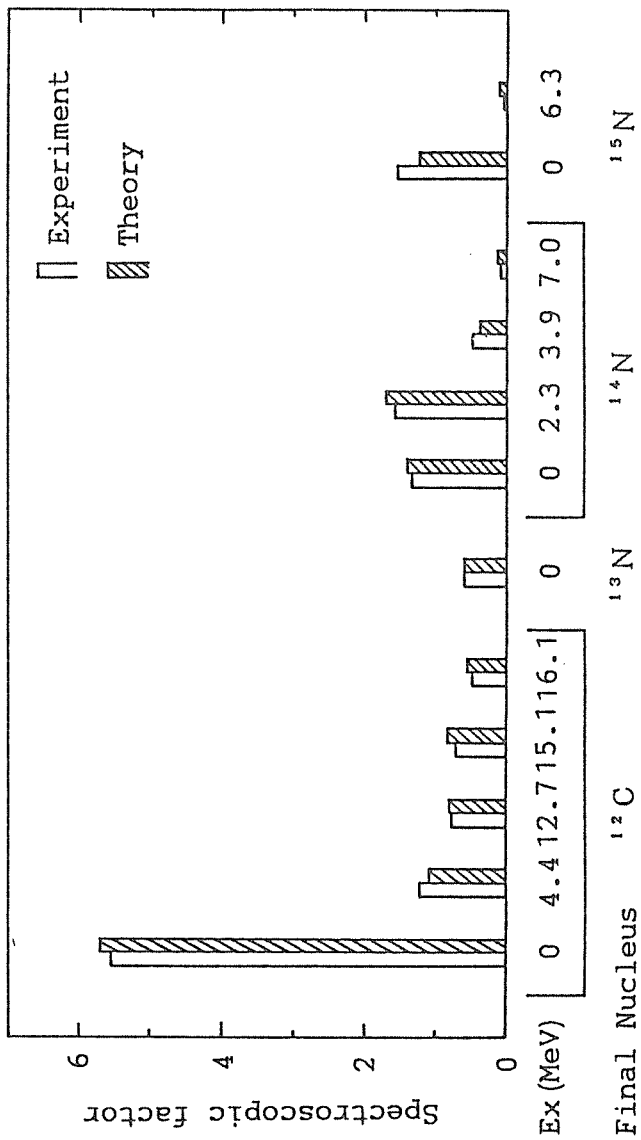


Fig.3

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、25 MeVの重陽子ビームと中性子飛行時間分析装置を利用して、1p殻領域の6種の原子核について(d,n)反応の実験を行い、その結果を歪曲波ボルン近似(DWBA)による理論計算と比較することにより、実験データを系統的に良く再現する重陽子光学ポテンシャルを発見し、更に、反応生成核の多数の準位について陽子分光学的因子を導出し、それらがCohenとKurathの核模型計算による理論値と良い一致を示すことから、一方でCohen-Kurath波動関数の妥当性を、他方でDWBA分析法の信頼性を確立したものである。

重陽子結合エネルギーが小さいため、比較的低い重陽子エネルギーにおいても、(d,n)反応は良い近似で直接反応、すなわち、陽子ストリッピング反応として記述でき、実験データのDWBA分析から個々の核準位について陽子分光学的因子を精度よく導出できることが期待される。しかしながら、(d,n)反応は中性子の高分解能測定が容易でないため実験データが少なく、又、限られた実験データの解析結果は、(d,n)反応に対するDWBAの適用性に疑問を提している。著者は、 $^{11}\text{B}$ 、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}$ 及び $^{16}\text{O}$ 核を標的核に選び、25 MeV重陽子による(d,n)反応の実験を行って、総計約70本の生成核準位について反応微分断面積の角分布を測定し、その結果のDWBA分析を行った。この分析において、重陽子ポテンシャルとして重陽子弾性散乱の分析によるものを使用すると、実験データをよく再現できないことが判明した。これは、重陽子の結合が弱いため、ストリッピング反応の起る以前に重陽子が陽子と中性子に解離する効果が無視できないことを示唆しており、この効果を取り入れた解析が必要と考えられる。このため著者は、JohnsonとSoperによって提唱された断熱近似解析法、すなわち、陽子と中性子の確立された光学ポテンシャルに基づいて重陽子の有効光学ポテンシャルを組み立て、これを使用してDWBA解析を行う方法を採用して解析を行った所、実験データをすべて良く再現できることが明らかになり、この解析から導出された分光学的因子はCohen-Kurathの理論値と良い一致を示した。このように本論文は、Johnson-Soperの重陽子断熱ポテンシャルの有効性を立証し、(d,n)反応の信頼できる解析方法を確立して、この方面の研究の進展に大きく寄与している。これは、本論文の著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、河村亨提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。