

氏名・(本籍)	ツォン 仲	ゴ 國	チン 慶
学位の種類	理	学	博 士
学位記番号	理 第	9 7 4	号
学位授与年月日	平成 3 年 6 月 26 日		
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当		
最終学歴	西暦1980年 6 月 淡江大学大学院物理研究所 (修士課程) 物理学専攻修了		
学位論文題目	(p, n)反応による(sd)-殻核におけるアナログ遷移と光学ポテンシャルのアイソベクトル項の研究		
論文審査委員	(主査) 教 授 藤 平 力 教 授 織 原 彦之丞 助 教 授 滝 川 昇		

## 論 文 目 次

第 1 章	序 論
第 2 章	基礎理論
第 3 章	実験装置並びに実験手順
第 4 章	実験結果
第 5 章	解析
第 6 章	結果と議論
第 7 章	結 論
	謝 辞
	参考文献
	付 録

## 論文内容要旨

原子核物理学は、原子核の中で陽子と中性子がどのように組み合わせられているかを知ることがを目的とし、また核内における陽子と中性子の相互作用を知ることが大切であるとされている。これまで、Mayer-Jensen による Shell-Model(殻模型)や、Bohr-Mottelson による集団運動模型による記述が成功しているが、まだ十分に解明されているとは云えない。この理由として、一つには原子核内の核子間の相互作用には、自由度が多すぎて不明な部分が多く、また一つには量子力学を核子多体系である原子核に適用することに未だ十分に成功していないということが挙げられる。従って、原子核物理学において理論・実験の両面から精度をあげたより多くの研究が求められている。

1961年 Anderson 達は[1]、標的 $40 \leq A \leq 140$ の質量領域の原子核を標的とした(p, n)反応を行い、中性子スペクトル上に巾が100keVにも満たない鋭く強いピークを観測した。このピークに対応する残留核の状態の励起エネルギーはクーロン・エネルギーの分だけ増加していることがわかった。この状態は(p, n)反応により陽子と中性子が入れ替わり、残留核は標的核と全く同じ状態が実現したものとされ、アイソバリック・アナログ状態(Isobaric Analog State; IAS)と名づけられた。この研究の直後の1962年、Lane 達はこの反応を説明するための相互作用として、有名な Lane-Potential を導入した[2]。

即ち、このモデルでは核子と核の相互作用(光学ポテンシャル)は、

$$V = V_0 + \frac{(t \cdot T)}{A} V_1$$

と表される。この(t・T)のうち、tは入射粒子、Tは標的核に作用するオペレーターであるが、IASはこの相互作用を通して(p, n)反応によって励起され、その反応の遷移強度は、光学ポテンシャルのアイソベクトル項といわれる  $V_1^2$  に比例する。

(p, n)反応を使ってIASを観測し、先に述べた Lane-Modelのアイソベクトル項を研究し、その質量数依存性やエネルギー依存性を調べることは、Carlson等が系統的に行った[3]。しかし彼等は研究対象として質量数40以上に限っていた。この理由は、 $A \leq 40$ のp-殻核や、(sd)-殻核においては(p, n)反応で、IASと同じ位強く励起される $0^+ \rightarrow 1^+$ 遷移があったり、あるいは標的核の基底状態のスピンの1/2や5/2であって、 $\Delta J = 0$ のIASを励起するFermi型の遷移の他に $\Delta J = 1$ のGamow-Teller型の遷移などが混じって純粋にIASへの遷移のみを取り出すことができなかったからである。

本研究の目的は、(sd)殻核において $^{17,18}\text{O}$ 、 $^{22}\text{Ne}$ 、 $^{25,26}\text{Mg}$ 、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{30}\text{Si}$ 、 $^{34}\text{S}$ 、 $^{38,40}\text{Ar}$ を標的として(p, n)反応の実験的研究を行ない、IAS励起を観測する。ついで、微分断面積を、その角度分布を含めLane-Modelを用いて解析し、Lane-Potentialのアイソベクトル項をパラメータサーチにより求め、ポテンシャルの深さならびにその形状を決める核半径、ぼやけ因子などを決定

し、あわせてこれらのパラメータの質量数依存性を明らかにする。これらの目的を達成するため、標的核が偶-偶核でないところの  $^{17}\text{O}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$  核や、 $1^+$  状態が IAS ( $0^+$ ) 状態に接近しすぎていて分離できない  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  などを標的にした (p, n) 反応に対しては、ミクロスコピックな解析を行い、Gamow-Teller 成分等を除去することにする。

本研究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 サイクロトロンならびに高速中性子飛行時間分析装置〔4〕を使って行った。この研究においては、高速中性子の高分解能エネルギー分析が必要であるが、中性子は電荷を持たないので、その運動エネルギーの精密測定には特別な工夫が要る。本研究のエネルギー領域の高速中性子に関しては、飛行時間測定法(以下 TOF 法と略する)が最も適しているとされている。TOF 法では核反応によって放射される中性子が一定距離  $L$  を飛行するに要する時間を測定することによって運動量分析を行い、エネルギーに変換する。従って、この場合は検出器での中性子のエネルギーを測定する必要はなく、中性子が生成された時間と、検出器に飛び込んできた時間の時間差を精密測定できればよい。

TOF の測定は以下のような方法で行う。

- (1) 中性子 TOF の絶対値の決定は、ビームの衝撃によって発生する  $\gamma$  フラッシュを一緒に測定して、 $\gamma$  線の TOF スペクトル上の位置をもって、時刻の絶対値とする。
- (2) 先のビームパルスで発生した遅い中性子が、後のビームパルスで発生する速い中性子に追い越され、TOF Spectrum 上でそのような(エネルギーが低い)中性子は高エネルギー側にかぶさってくる。それをオーバーラップと呼ぶ。これを防ぐためには、対象とするエネルギー領域の中性子の飛行時間をカバーするに十分なビームパルスの間隔をもたせ、一方で、対象とするエネルギー以下の低エネルギー中性子による event を取り除く。
- (3) 中性子検出のもう一つのポイントは  $n-\gamma$  弁別である。液体有機シンチレータが中性子と  $\gamma$  線にたいし蛍光を発生するが、それぞれ発光特性が異なり、 $\gamma$  線に対しては短い減衰時間(約 3.7nsec)を蛍光を発生し、中性子に対して長い減衰時間(数百 nsec)を持っているという特性を使う。この特性を利用して、TOF スペクトルから  $\gamma$  線宇宙線による event をとり除くことができる。

使用したターゲットについては、表-1 にまとめてある。第1図は TOF 測定によって得られた、陽子エネルギー35MeV によける  $^{30}\text{Si}(p, n)^{30}\text{p}$  反応生成中性子の運動量スペクトルを、残留核の励起エネルギーに変換したものを代表例として掲げる。本論文の研究にかかわる IAS は、励起エネルギー0.677MeV に鋭く、もっとも強いピークとしてみられる。また第2図は、 $^{17}\text{O}(p, n)^{17}\text{F}$  反応の研究で、得られた IAS 遷移に関する反応微分断面積の角度分布を示す。図中の曲線は、以下に説明し、議論する Lane モデルを使った歪曲波ボルン近似による理論計算値である。

(p, n) 反応における入射チャンネルにあたる陽子の光学ポテンシャルについて陽子弾性散乱の実験が数多く行なわれている関係で、よく調べられている。代表的なものは Becchetti

-Greenlees による parameter set である〔5〕。中性子に対しての光学ポテンシャルは、陽子の光学ポテンシャルにおけるアイソスピン項の符号を反転すればよいとして、中性子の光学ポテンシャルを求めた。この方法で  $A \geq 40$  核の核に対し、系統的なポテンシャルを求めた。この Carlson ら〔3〕の自己無矛盾の中性子の光学ポテンシャル parameter set を本研究でも使った。なお、Carlson 等の光学ポテンシャルの適用限界は  $A \geq 40$  であるが、微分断面積について議論する限り質量数が10位の軽い原子核まで拡張して使ってもよいことが、織原グループの梶澤等によって確認されている〔6〕。

微視的DWBA解析は、本研究においては言わば副次的な意味しかもたないが、一方、 $^{17}\text{O}$ 、 $^{25}\text{Mg}$ 、 $^{27}\text{Al}$  等の (p, n) 反応の解析において、 $\Delta J=1$  の Gamow-Teller 成分を微視的 DWBA 解析によって評価し、 $\Delta J=0$  の Fermi 成分 (IAS 成分) を抽出し、これ等のデータをつかって核子-核間相互作用のアイソベクトル成分を明らかにすることも、本研究の主要な目的の一つである。偶-奇(あるいは奇-偶) (sd)-殻核における  $5/2^+ \rightarrow 5/2^+$  遷移において、実験値より  $\Delta J=0, 1, 2, 3, 4, 5$  の寄与する断面積を差し引いて  $\Delta J=0$  の IAS 成分を抽出する場合この微視的解析が必要であったが、 $^{22}\text{Ne}(p, n)^{22}\text{Na}$  の場合にも、IAS に本研究の中性子エネルギー分析では分離できないほど近接して (80keV)、GT-遷移が大きいものと予想される  $1^+$  状態が有るため、同様の手法を使って IAS 遷移強度を出した。また、 $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$  の場合には、IAS に近接して  $3^+$ 、 $0^-$ 、 $5^+$  の状態が有るが、各々の遷移について理論計算を行い、あらかじめ生の微分断面積の実験値より差し引いておき、これらを IAS 遷移の“データ”とし、Lane-モデルによる巨視的解析を行った。(p, n)反応における IAS 遷移が Lane モデルより相互作用  $U_{pn}$  によるものとする、

$$U_{p,n} = \frac{2\sqrt{N-Z}}{A} V_R f_R(r) + i4 W_1 a_1 \frac{d}{dr} f_I(r)$$

$$f_J(r) = [1 + \exp\left(\frac{r-R_J}{a_J}\right)]^{-1}, \quad J = R \text{ or } I$$

となるが、本論文では  $U_{pn}$  に含まれる  $r_R$ 、 $a_R$  は固定し、4 個のパラメータ  $V_R$ 、 $W_1$ 、 $r_I$ 、 $a_I$  をサーチして求める。サーチの方法は各々のパラメータが質量数(A)についての  $A^{1/3}$  に関し1次の依存性をもつとして最小自乗法によって行った。結果は、相互作用ポテンシャルについて、

$$V_1 (\text{MeV}) = 1.772A^{1/3} + 6.81, \quad W_1 (\text{MeV}) = 0.422A^{1/3} + 4.72$$

また、核半径ならびに核半径の“ぼやけ”のパラメータについて、

$$r_1 (\text{fm}) = -0.349A^{1/3} + 2.577, \quad a_1 (\text{fm}) = 0.247A^{1/3} + 0.2786$$

という結果が得られた。

第2図で示されている理論計算は、以上の様にして得られた Lane ポテンシャルのアイソベクトル項によって計算されたものであるが、実験をよく説明し、本研究で求めたパラメータが

妥当なものであることを示している。

本研究においては、高分解能飛行時間分析法によって、(sd)-殻核といわれる  $^{17}\text{O}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Ar}$ , 並びに  $^{40}\text{Ar}$  をターゲットとした (p, n) 反応の実験的研究を行い、始状態のアナログ状態が終状態に実現されるアナログ遷移を観測し、核反応微分断面積の角度分布を測定した。これらの (p, n) 反応を陽子エネルギー35MeVで行ったのは本研究が最初である。ほとんどが (p, n) 反応による観測そのものが始めてのものである。

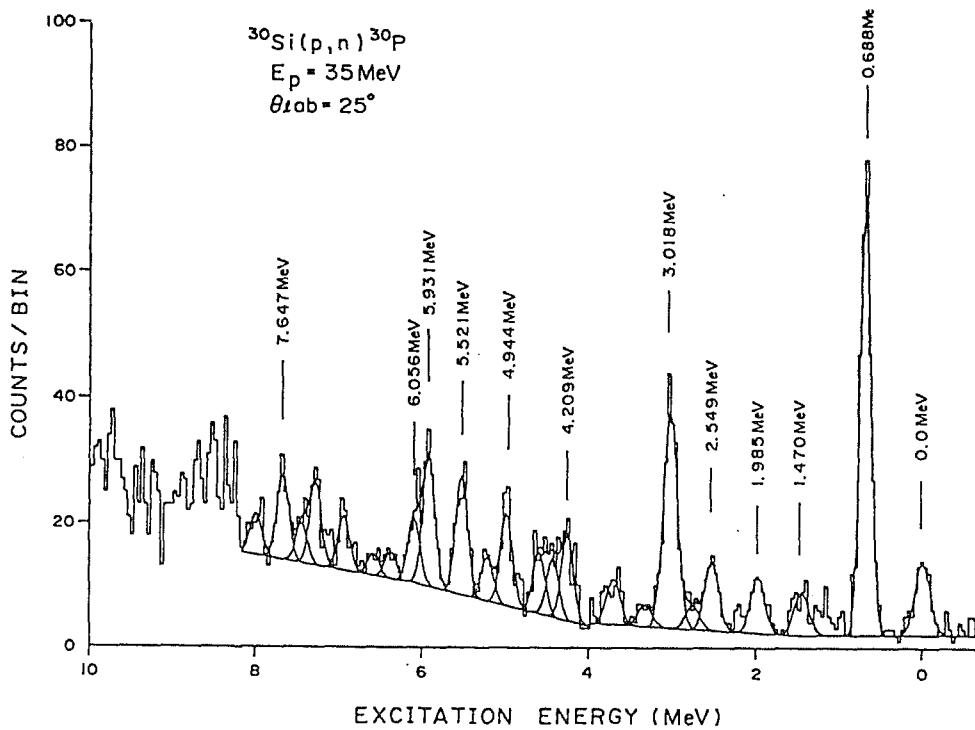
巨視的に見たら、余剰中性子によって (p, n) 反応を引き起こす核子-核相互作用のアイソベクトル項は、これまで中性子余剰の核が多い質量数(A)が40以上の原子核を対象として行われてきたが、本研究において、微視的 DWBA 解析をすることによって  $A \leq 40$  の原子核を対象として、系統的に求められ、またその実ポテンシャル並びに虚部、それらの半径及び広がりパラメータの A-依存性が明らかにされた。

### 参 考 文 献

1. J. D. Anderson and C. Wong, Phys. Rev. Lett. 7(1961)250
2. A. M. Lane, Nucl. Phys. 35(1962)676
3. J. D. Carlson, C. D. Zafiratos, D. A. Lind, Nucl. Phys. A249(1975)29
4. H. Orihara, S. Nishihara, K. Furukawa, M. Kabasawa, T. Kawamura, Y. Takahashi, T. Nakagawa and K. Maeda, Nucl. Instr. and Meth. A257(1987)189
5. F. D. Becchetti and G. W. Greenless, Phys. Rev. 182(1969)1190
6. 梶澤光昭 東北大学修士論文 (1983)

第1表 使用したターゲットは次にまとめて表示する。

ターゲット	厚さ (mg/cm <sup>2</sup> )	Enrichment (%)	コメント
<sup>17</sup> O	400Torr×2cm	84.45	gas
<sup>18</sup> O	400Torr×2cm	98.45	gas
<sup>22</sup> Ne	390Torr×2cm	99.9	gas
<sup>25</sup> Mg	2.4	99.8	metal
<sup>26</sup> Mg	2.33	99.8	metal
<sup>27</sup> Al	3.17	100	metal
<sup>30</sup> Si	0.6	95.2	element
<sup>34</sup> S	2.6	94.4	element
<sup>38</sup> Ar	400Torr×2cm	99.8	gas
<sup>40</sup> Ar	760Torr×2cm	99.4	gas



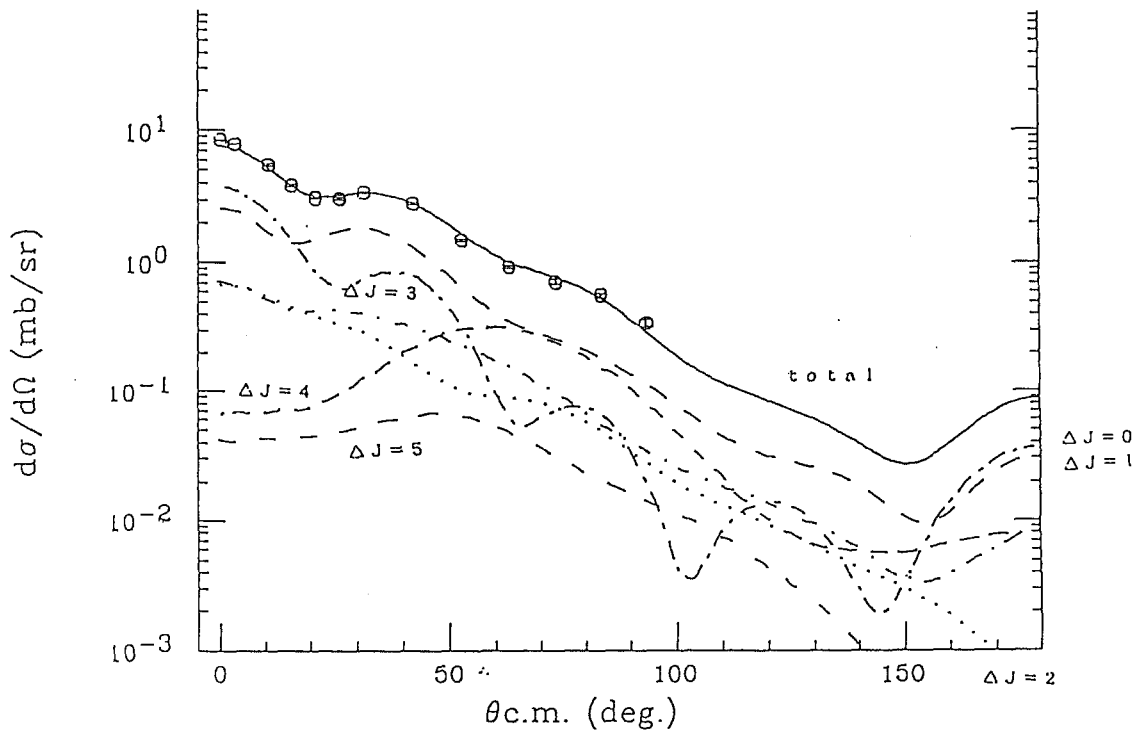
第1図  $^{30}\text{Si}(p, n)^{30}\text{P}$  反応で生成される中性子のエネルギースペクトル。横軸は中性子飛行時間(運動量)をエネルギーに変換し、更に残留核  $^{30}\text{P}$  の励起エネルギーに直してある。測定条件は以下の通り。

入射陽子エネルギー；35MeV

実験室系角度；25度

中性子飛行距離；44meter

エネルギービン間隔；25keV



第2図  $^{17}\text{O}(p, n)^{17}\text{F}$  反応における基底状態間 ( $5/2^+ \rightarrow 5/2^+$ ) 遷移の微分断面積の角度分布。  
 $\Delta J=1, 2, 3, 4, 5$  は, Brown-Wildenthal の波動関数による微視的 DWBA 計算であり,  
 $\Delta J=0$  は, 本論文のパラメータによる計算である。



## 論文審査の結果の要旨

仲國慶提出の論文は(sd)殻核といわれる  $^{17,18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{25,26}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{38,40}\text{Ar}$ を標的として(p, n)反応の実験的研究を行い, アイソバリックアナログ状態への遷移の微分断面積とその角度分布を系統的に測定し, 結果をLane-Modelを用いて解析し, Lane-Potentialのアイソベクトル項をパラメータサーチにより求め, ポテンシャルの深さ, ならびにその形状を決める核半径, “ぼやけ”因子などを決定し, あわせてこれらのパラメータの質量数依存性を明らかにしたものである。これらの目的を達成するため, 標的核が偶-偶核でないところの  $^{17}\text{O}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ 核や,  $1^+$ 状態がIAS( $0^+$ )状態に接近しすぎていて分離できない  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ などを標的にした(p, n)反応に対しては, ミクロスコピックな解析を行い, Gamow-Teller成分等を除去するなど, 最新の理論的な手法を駆使した解析を行った。

10種類もの原子核を標的とした系統的な研究であるため, ターゲットも  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{38}\text{Ar}$ 等のように希少ガスもあり, 実験精度を上げるため特別の工夫をした。また, パラメータサーチにおいても, 微分断面積を計算するコードを改良するなどし, 信頼性の高い結果を導出している。

得られた結果は, 質量数が17から40に至る(sd)殻核における核子-原子核間光学ポテンシャルのアイソベクトル項を, 必要な既知の情報を入力すれば直ちに得られる一般式を提示するものとなっている。これにより, 核子の集団運動によって説明されるような励起アナログ状態へ転移する(p, n)反応の解析はもとより, 光学ポテンシャルの全容が明らかにされたため, 陽子散乱, 中性子散乱などの理解も一段と進むものと期待される。また, 質量数が16以下の原子核や, 40以上の原子核に対しても本研究で得られた結果が役立つものと考えられる。

以上の研究成果は, 本論文の著者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有していることを示している。よって, 仲國慶提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。