

|         |   |
|---------|---|
| 氏名・（本籍） | ふる　　かわ　　かず　　ろう<br>古　川　和　朗   |
| 学位の種類   | 理　学　博　士   |
| 学位記番号   | 理博第　960　号   |
| 学位授与年月日 | 昭和61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<br>（博士課程）原子核理学専攻   |
| 学位論文題目  | s - d 殻の $N = Z + 2$ 原子核を標的核とする (p, n)<br>反応断面積と Gamow - Teller 転移強度の比較 |
| 論文審査委員  | （主査）<br>教　授　石　松　敏　之　　教　授　織　原　彦　之　丞<br>助教授　林　部　昭　吾                       |

## 論　文　目　次

|     |     |
|-----|-----|
| 第一章 | 序　論 |
| 第二章 | 理　論 |
| 第三章 | 実　験 |
| 第四章 | 結　果 |
| 第五章 | 解　析 |
| 第六章 | 考　察 |
| 第七章 | 結　論 |

## 論文内容要旨

原子核の実験的研究には崩壊様式の観察による方法と、原子核反応実験による方法とがあるが、後者は観測できる転移の数が飛躍的に増大し、また反応チャンネルや観測条件を変えることにより転移様式を選択できるという点で有利となる。その中で  $(p, n)$  反応は入射陽子エネルギーがある程度高いときには荷電交換核子原子核散乱と考えられ、従って一粒子一空孔励起の描像がよく成立する。さらに、荷電スピンの移行を伴う ( $\Delta T = 1$ ) という選択性があるので、同じ選択性を持つベータ崩壊と比較されることが多い。特にスピンの移行を伴う転移 ( $\Delta T = 1, \Delta S = 1$ ) は、スピン・アイソスピン励起と呼ばれ、最も軽い中間子  $\pi$  ( $J^P = 0^-, T = 1$ ) や最初の核子の励起状態 ( $J^P = 3/2^+, T = 3/2$ ) を中間状態に含む可能性があるために、原子核内の核子以外の自由度を見るよいプローブとなると思われる。

一方、同じ選択性を持つベータ崩壊の Gamow-Teller 転移 ( $\Delta T = 1, \Delta S = 1, \Delta J = 1$ ) について考えてみると、その転移強度と Gamow-Teller 型の  $(p, n)$  反応断面積が直接比較できる場合がある。その条件は、軌道角運動量移行の各成分 ( $\Delta L = 0, 1, 2$ ) のうち主成分が  $\Delta L = 0$  であること、反応系の反対称化の結果現われる直接項とノックオン交換項のうちノックオン交換項の寄与が小さいこと、及び核子間相互作用の中で中心力に比べてテンソル力とスピン軌道力の寄与が小さいこと、である。これらの条件はよい波動関数があれば評価することが可能である。この  $(p, n)$  反応とベータ崩壊の比較について、系統的な研究を重ねれば、 $(p, n)$  反応断面積とベータ崩壊強度の関連づけができ、エネルギー的に転移できないベータ崩壊転移強度を  $(p, n)$  反応の結果から予想できるようになり、例えば天体核物理学に貴重な情報をもたらすということも考えられる。

ベータ崩壊の Gamow-Teller 転移については、転移強度の実験値が殻模型の計算値に比べて一般的に小さくなっていて (quenching)、その比が70%程度であることが知られている。 $(p, n)$  反応でも、Gamow-Teller 型転移が相対的に強くなる中間エネルギーで、Gamow-Teller 型巨大共鳴の強度が総和則の50%しか観測されていない。しかし、分解能が悪く、スペクトル上で巨大共鳴状態下にあるバック・グラウンドの解釈にもあいまいさが残っている。

ところで、 $s-d$  殻の原子核に対しては Wildenthal が残留相互作用行列要素に質量依存性を導入して、結合エネルギー・エネルギー準位をよく再現する、よい殻模型波動関数を求めている。また、強いベータ崩壊の Gamow-Teller 転移も数多く知られており、これらは励起エネルギーの低い孤立した状態間の転移であるため、対応する  $(p, n)$  反応転移の測定を行えば、バック・グラウンドに妨げられることなくベータ崩壊と比較するための情報を得ることができる。

そこで、まず高エネルギー分解能・大効率の  $(p, n)$  反応測定系を、検出器・データ収集・データ処理に工夫を加えることにより開発し、 $s-d$  殻の個々の Gamow-Teller 型転移について  $(p, n)$  反応断面積とベータ崩壊強度を比較することにした。 $(p, n)$  反応標の核としては  $N = Z + 2$  原子核 ( $T_z = 1$ ) を選び、 $T_z = 1 \rightarrow T_z = 0$  の  $(p, n)$  反応と  $T_z = -1 \rightarrow$

$T_z = 0$  のベータ崩壊を荷電対称性を利用して比較できるようにした。

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サイクロトロンと中性子飛行時間分析(TOF)コース、及び本研究の過程で開発された大立体角中性子検出器系・高速データ収集系・多重パラメータ実時間データ処理系を用いて行われた。二段階過程が小さくなるように35 MeVを選んでサイクロトロンで加速された陽子は、異なるビーム・バーストから中性子の重なり合いを防ぐためにビーム・チョッパーで間引かれ、検出器を動かさずに角度分布を測定するためにビーム・スウィンガーを通過し、標的に入射する。標的核には、s-d核の $N = Z + 2$ 原子核から $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{34}\text{S}$ を選んだ。エネルギー分解能を得るために中性子の飛行距離44mとし、測定効率を上げるために12台の検出器を同時に用いた。回路系で検出器の信号から中性子の飛行時間・発光量・ガンマン線分離の各情報が効率よく抽出され、CAMAC規格で統一されたデータ収集系で複雑な情報の収集・前処理・圧縮が行われた後、全体として毎秒400kバイトの高速で検出器からの中性子の情報が計算機に送られる。計算機上には多重処理を基本としたソフトウェアでデータ処理系を構成し、検出器ごとに異なる2000を超えるパラメータと50を超えるスペクトルを管理させ、ガンマ線・宇宙線・低エネルギー中性子の分離、情報の変換などの処理を行われた上で、実験中に残留核の励起エネルギー・スペクトルと個々の状態への転移の微分断面積まで得ることができるようにした。

測定系全体として時間分解能に注意しながら中性子の飛行距離を長くとることによってエネルギー分解能を得て、検出器の数を増やすことによって効率を上げ、データ収集系・データ処理系でそれを実現することに成功した。

実験の結果、励起エネルギー・スペクトルからそれまで知られていたエネルギー単位図との対応が確認でき、一つの標的核あたり2から5のGamow-Teller型転移を含めて、(p, n)反応微分断面積の角度分布をそれぞれの標的核の個々の状態について精度よく測定することができた。エネルギー分解能は注目していたエネルギー領域で150 keV、系統誤差は15%以下であった。

解析は微視的歪曲波ボルン近似(DWBA)によって行った。原子核の始状態・終状態を記述する殻模型波動関数は、Wildenthalが $A^{-0.3}$ という質量依存性を導入し、s-d殻のよく知られた640の状態に合うように調整して求めた有効相互作用行列要素とBrownらの“OXBASH”と呼ばれる殻模型計算コードを用いて求めた。入射粒子・陽子と放出粒子・中性子を記述する波動関数には、弾性散乱をよく再現する系統的な光学ポテンシャルから求めた歪曲波波動関数を用いた。入射粒子と核内核子の相互作用には、自由核子の相互作用からGマトリクスの方法によって原子核の一体ポテンシャルとパウリの排他律の効果を取り込んで求めた核内核子間有効相互作用の中で、特に実績のあるM3Y有効相互作用を用いた。DWBA計算はSchaefferらの“DWBA74”コード五十嵐の“TWO FNR”, “TENSOR”コードを用いて行った。

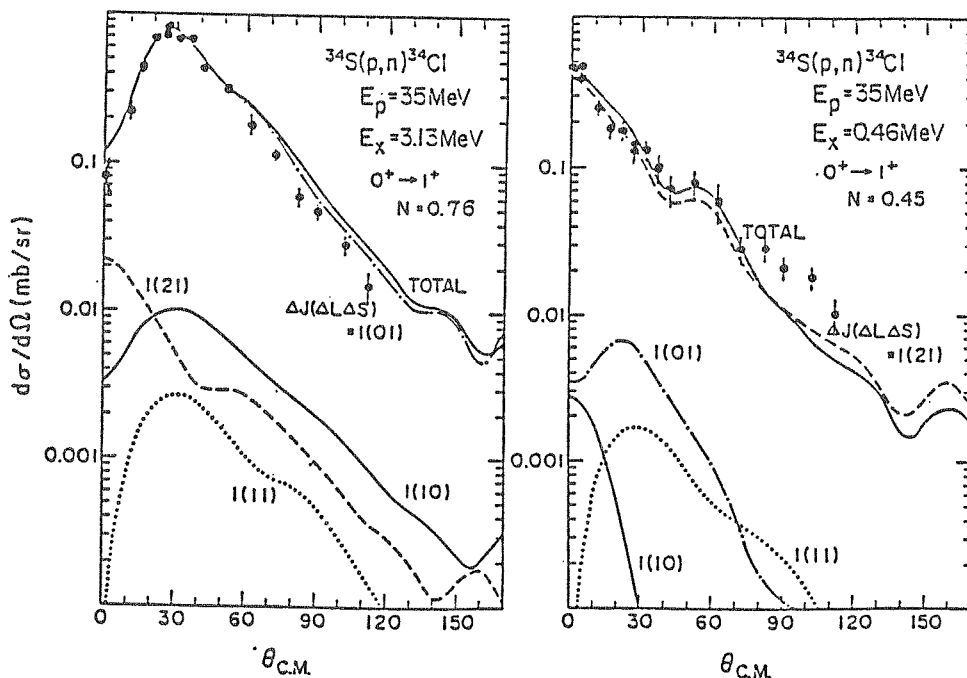
DWBAによる解析の結果は、(p, n)反応微分断面積の角度分布をよく再現し、絶対値もGamow-Teller型転移以外については実験値をよく再現しており、Wildenthalの有効相互作用

用行列要素がエネルギー準位だけでなく  $(p, n)$  反応の微分断面積もよく説明する殻模型波動関数を生成することがわかった。

Gamow-Teller 型転移では、微分断面積の角度分布は大変よく再現されたが、絶対値については Gamow-Teller 型ベータ崩壊や巨大共鳴への  $(p, n)$  反応と同様に quenching が見られた。各軌道角運動量移行 ( $\Delta L = 0, 1, 2$ ) の寄与、直接項・ロックオン交換項の寄与、中心力・テンソル力・スピン軌道力の寄与を個々の Gamow-Teller 型転移について DWBA 解析によって検討した結果、ロックオン交換項の寄与とテンソル力・スピン軌道力の寄与は小さいので、軌道角運動量移行が主として 0 である転移においては  $(p, n)$  反応はベータ崩壊と直接比較が可能であり、そのような Gamow-Teller 型転移が数多く観測されていることがわかった。

このようなベータ崩壊と比較が可能な個々の Gamow-Teller 型の  $(p, n)$  反応転移の quenching の大きさについては 45% から 80% の値が得られたが、総和則に対する巨大共鳴の quenching が 50% であったことを考えると、バック・グラウンドのない測定を行ったことによって  $(p, n)$  反応の quenching の大きさがベータ崩壊に近いものであることがわかったことになる。

さらに、このような個々の Gamow-Teller 型転移について  $(p, n)$  反応と既知のベータ崩壊の quenching の大きさを比較してみると、その間には相関があることがわかった。このことは、 $(p, n)$  反応とベータ崩壊の quenching の原因が同じ所にあることを意味していると思われる。即ち、最近のベータ崩壊に対する計算結果と同様に 2nd-order configuration mixing と  $\Delta$ -isobar の効果が大きいものと予想される。この結果に対する理論的考察が待たれるところである。



微分断面積の軌道角遷移 ( $\Delta L$ ) の分離の例。左は  $^{34}\text{Cl}$  の 4番目の  $1^+$  への転移で  $\Delta L = 0$  が主成分であるためベータ崩壊との比較が可能。右は 1番目の  $1^+$  への転移で  $\Delta L = 2$  が主成分でありベータ崩壊との比較はできない。

### ベータ崩壊と (p,n) 反応の quenching factor

| Mass | Final State                | B(GT) theory | Quenching Factor |       |
|------|----------------------------|--------------|------------------|-------|
|      |                            |              | Beta-decay       | (p,n) |
| 18   | $^{18}\text{F}$ (0.0MeV)   | 2.63         | 0.62             | 0.47  |
| 22   | $^{22}\text{Na}$ (0.58MeV) | 2.96         | 0.47             | 0.40  |
| 22   | $^{22}\text{Na}$ (1.94MeV) | 2.67         | 0.86             | 0.80  |
| 26   | $^{26}\text{Al}$ (1.06MeV) | 2.99         | 0.61             | 0.61  |
| 26   | $^{26}\text{Al}$ (1.85MeV) | 1.36         | 0.70             | 0.53  |
| 30   | $^{30}\text{P}$ (3.02MeV)  | 2.30         | 0.85             | 0.78  |
| 34   | $^{34}\text{Cl}$ (3.13MeV) | 2.12         | 1.00             | 0.76  |

## 論文審査の結果の要旨

古川和朗提出の論文は、原子核のスピン・アイソスピン型励起のうち、特に Gamow-Teller (GT) 型転移と云われる  $\Delta S = 1$  ( $\Delta J = 1$ ,  $\Delta L = 0$ ),  $\Delta T = 1$  転移を (p, n) 反応を使って実験的に研究し、その反応微分断面積を、同一終状態に導く GT 型  $\beta$  崩壊の転移強度と比較して検討を行ったものである。最近のスピン・アイソスピン型励起の研究の結果、GT 型 (p, n) 反応を支配する核内核子間相互作用の詳細が次第に明らかになり、このため GT 型 (p, n) 反応断面積と GT 型  $\beta$  崩壊転移強度との比較を有効に行う可能性が生じてきた。著者は、GT 型 (p, n) 反応の微分断面積を波動関数のよく知られている s-d 殻原子核において系統的に精度よく測定し、同一終状態に導く GT 型  $\beta$  崩壊の転移強度の既存データとの比較から、両者の間に明確な相関が存在することを指摘し、その意味について考察している。

第一章と第二章においては本研究の意義と理論的背景が述べられている。第三章においては、本論文の実験に不可欠であった高速中性子飛行時間分析装置について、特に著者自身の開発した大立体角中性子検出器群と、これらにより得られた情報を収集・処理・解析する実時間データ処理システムについて述べられている。

第四章以下に  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{34}\text{S}$  の原子核を標的核として入射陽子エネルギー 35 MeV において GT 型 (p, n) 反応の微分断面積角分布を測定した結果、及びその歪曲波近似による解析と新たに得られた知見が述べられている。特に代表例である  $^{34}\text{S}(p, n)^{34}\text{Cl}$  反応においては、 $\Delta J^\pi = 1^+$  転移の外に、 $\Delta J^\pi = 0^+$ ,  $2^+$  等の  $\Delta S = 0$  転移についても解析を行い、波動関数と核内核子間有効相互作用の妥当性の検討を行い、又、 $\Delta J^\pi = 1^+$  転移における  $\Delta L = 2$  成分ならびに二段階過程の寄与について詳細な検討を行っている。GT 型 (p, n) 反応断面積の実験値対理論値の比は、従来大略 50% と報告され、1 より大きなずれが問題となっていたが本実験においてはこの比が概して従来より大きくなり、いくつかの場合で約 80% に達し、更に、対応する GT 型  $\beta$  崩壊転移強度の実験値対理論値の比との間に強い相関が存在することが判明した。

以上の諸結果は原子核のスピン・アイソスピン励起に多くの新知見を加えたものであり、原子核物理の研究に重要な寄与をしたものと言える。これらの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の研究能力と学識を有することを示している。よって、古川和朗提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。