

論文内容要旨

1. 序論及び研究の目的

β^+ 崩壊によって親核の陽子数と中性子数を互いに入れ替えた娘核に転移することを「鏡映ベータ転移」と呼ぶ。即ち、 $A(Z, Z-1) \xrightarrow{\beta^+} A(Z-1, Z)$ となる転移であり、従って親核は $T_Z (\equiv \frac{N-Z}{2}) = -\frac{1}{2}$ 系列の原子核である。鏡映ベータ転移における親核と娘核の基底状態はスピン、パリティ及びアイソスピンがそれぞれ等しいアイソバリックアナログ状態 (IAS; Isobaric Analog State) の関係にあり、この状態間のベータ転移はフェルミ (Fermi) 型相互作用とガモフ・テラー (Gamow-Teller) 型相互作用による超許容転移であることが知られており、ベータ崩壊の ft 値と2つの相互作用の行列要素は以下の式で表わされる関係を持つ。

$$ft = \frac{C}{|\langle \vec{\tau} \rangle|^2 + \left| \frac{g_A}{g_V} \right|^2 \cdot |\langle \vec{\sigma} \vec{\tau} \rangle|^2}$$

ここでCは結合定数、 $|\langle \vec{\tau} \rangle|$ はフェルミ行列要素、 $|\langle \vec{\sigma} \vec{\tau} \rangle|$ はガモフ・テラー行列要素で、 $|g_A/g_V|$ は両者の結合定数の比である。CはCVC (Conserved Vector Current)理論より、原子核内で不変の量であるとされ、 $|g_A/g_V|$ は自由中性子のベータ崩壊から、 1.251 ± 0.009 と求められている。ベータ崩壊のエネルギーから求められるfと半減期tから、アイソスピンより一意的に求められる $|\langle \tau \rangle|$ を用いて $|\langle \vec{\sigma} \vec{\tau} \rangle|$ を得ることができる。

以前からガモフ・テラー行列要素の実験値は単一粒子から予想される値より小さいことが知られているが、本研究では精度良くベータ崩壊を観測し、ガモフ・テラー行列要素の実験値と殻模型の理論値との比較から $f_{7/2}$ 殻鏡映核の核構造の理解を試みた。

$f_{7/2}$ 殻 $T_Z = -\frac{1}{2}$ 原子核は生成断面積が小さく半減期も0.5秒以下と短いために信頼でき尚且つ高精度のベータ崩壊の実験データが少ない。ベータ安定領域から離れた短寿命核の測定にオンライン同位体分離装置は極めて有力であるが、 $f_{7/2}$ 殻の元素は高融点物質であり、イオン化が難しく質量分離による測定を行えなかったが、イオンガイド式オンライン同位体分離装置 (IGISOL; Ion-Guide Isotope Separator On-Line) の成功によって、全ての鏡映核を質量分離し、低バックグラウンド環境下で精密な測定が可能になった。そこで本研究ではベータ崩壊の半減期に焦点をあて、精度良い実験値を得ることを目的に実験を行った。

2. 実験装置

核反応によって標的から飛び出した多価イオン状態にある反跳核は緩衝用に満たしたヘリウムガス中で電荷を失うが、一部の反跳核が+1価の状態に留まるという事実を利用して、この+1価イオンを電場で引き出し、一定電圧で加速し磁場を用いて質量分離を行う装置がIGISOLである。イオンガイド法では標的外に飛び出し、+1価に残る目的核を質量分離するため収量が少なく、 $f_{7/2}$ 殻 $T_Z = -\frac{1}{2}$ 原子核では $10 \sim 100 \text{ atom}/\mu\text{C}$ である。従って環境からのバックグラウンドを抑制することが重要となり、このためにプラスチックシンチレータを用い

て $\Delta E - E$ テレスコープベータ線検出器を製作した。又、測定では長寿命同重核のバックグラウンドの蓄積を防ぐためにテープ輸送装置を用いた。IGISOLでは質量分離ビームの質量分解能がやや悪い ($M/\Delta M \sim 200$) ため隣接質量の短寿命核が混入するおそれがあることから、ベータ線のエネルギースペクトルと質量スペクトルを測定し、質量分離の状況を確認したが、隣接質量核の混入は無いと判断された。この他、基底状態と同程度の半減期でベータ崩壊すると考えられるアイソマー状態が存在する ^{53}Co については、基底状態のベータ崩壊にともなって放出される γ 線を検出することを試みた。

半減期の測定回路をチェックするために、半減期が良く分かっている ^{46}V 及び ^{54}Co をオンライン実験で測定し、又、異なる2台のMCS (Multi Channel Scalar) を用いて ^{57}Cu の半減期の測定も行った。これによって良好な結果を得ることができ、測定システム全体と解析方法について十分な信頼性があることが確認された。尚解析方法は最小二乗法を用い、ビーム照射後にあらわれる中性子に帰因すると思われる速く崩壊する成分を取り除くため、最小二乗あてはめの始点をずらし、 χ^2 の振舞いを見て半減期を決定する手法を採用した。

3. 実験結果及び解析

測定は ^{55}V , ^{54}Cr , ^{55}Mn , ^{56}Fe , ^{57}Co 及び ^{58}Ni について行い、実験結果の一例 (^{47}Cr) を図-1及び図-2に示す。質量スペクトル及びエネルギースペクトルから、分離が良好に行われたことが分かる。表-1に得られた半減期をまとめて掲載した。○印が本研究で測定したものである。 ^{53}Co を除いて2%以内の誤差で半減期を得ることができた。 ^{53}Co については目的の γ 線の検出に成功したものの統計精度が悪く、誤差の大きい半減期となった。しかしながら、これによって初めて ^{53}Co の基底状態のベータ崩壊をとらえたものであり、その意義は大きいと考える。

ガモフ・テラー行列要素の導出にあたっては、ベータ崩壊のエネルギー及び分岐比については文献値を用いた。尚娘核の励起状態へのベータ崩壊が測定されていない鏡映核については基底状態への分岐比を100%とした。

4. ガモフ・テラー行列要素に対する実験値と理論値の比較

ガモフ・テラー行列要素の理論値を得るために次のような殻模型計算を行った。不活性芯に ^{40}Ca を置き、 $f_{7/2}$ 軌道に活性核子を配した $(f_{7/2})^{A-40}$ 模型と、活性核子のうち1個を $f_{7/2}$ 軌道から $p_{3/2}$, $f_{5/2}$ 又は $p_{1/2}$ 軌道に励起させた配位も含めた $(f_{7/2})^{A-40} + (f_{7/2})^{A-41} \cdot (r)^{-1}$ 模型(ここでは r は $p_{1/2}$, $f_{5/2}$ あるいは $p_{3/2}$ 軌道を示し、1-励起又は1-jump模型と呼称する)の計算を行った。有効相互作用として、KuoとBrownによって計算された相互作用を、PasquiniとZukerによって実験データを再現するように修正されたものを採用した(KB(P-Z)相互作用と呼ぶことにする)。

表-2にガモフ・テラー行列要素の実験値と、殻模型計算による理論値をまとめた。尚、KB

(P-Z) 相互作用の他に McGrory と Wildenthal による修正した KB 相互作用とオリジナルの KB 相互作用を用いた計算も行ったが、ガモフ・テラー行列要素の理論値については、相不作用による大きな差異は見られなかった。

図-3 にこれらをグラフに表わした。1-励起模型は $(f_{7/2})^{A-40}$ -模型に較べ、実験値に近づいていることが分かる。これを基底状態の殻模型波動関数の振幅を見ると(図-4) 次のようなことが見い出せる。1核子の励起した配位が10~20%もあり、これによってガモフ・テラー行列要素が単一粒子の値から小さくなっていることが分かり、その中でも特に $f_{5/2}$ 軌道に核子が励起した配位が強く影響を与えていることがうかがえる。これは2重 $j-j$ 閉殻である ${}^{56}_{28}\text{Ni}_{28}$ が強く閉じていない、所謂芯偏極 (core polarization) 効果を示唆するものである。

ガモフ・テラー行列要素の実験値と1-励起模型の理論値の間に次のような関係

$$|\langle \vec{\sigma} \vec{\tau} \rangle|_{\text{exp}} = q.f. \times |\langle \vec{\sigma} \vec{\tau} \rangle|_{1\text{-jump}}$$

があるとして最小自乗あてはめを行ってみると、 $(q.f.)_{1\text{-jump}} = 0.78 \pm 0.05$ を得た。ここで、 $q.f.$ はガモフ・テラー行列要素の理論値からの減少の割合を示すクエンチング因子 (quenching factor) と呼ばれるものである。 ${}^{40}\text{Ca}$ より軽い $s-d$ 殻原子核については、Wildenthal が全空間 ($d_{5/2}$, $s_{1/2}$ 及び $d_{3/2}$) を取り込んだ殻模型計算を行ない、 $q.f. = 0.77 \pm 0.01$ を得ており、本研究で得たクエンチング因子は極めて良く一致している。この結果から、ガモフ・テラー行列要素は原子核内において一様に一定の割合で小さくなっているのではないかと予想することができる。Wilkinson はこれを再規格化としてとらえることを提唱しているが、本研究で得たクエンチング因子は、殻模型計算について、

- i) 有効2体相互作用の妥当性が十分確められていない。
- ii) 核子の配位を1-励起模型に限定している。

の理由で、一概に Wildenthal の $s-d$ 殻でのクエンチング因子と比較することが出来ない、と言わざるを得ない。しかしながら、更に高次の配位を取り込むなど殻模型計算の改善を計り、クエンチング因子を求めることは興味深いことである。

5. まとめ

$f_{7/2}$ 殻 $T_z = -\frac{1}{2}$ 原子核である ${}^{45}\text{V}$, ${}^{47}\text{Cr}$, ${}^{49}\text{Mn}$, ${}^{51}\text{Fe}$, ${}^{53}\text{Co}$ 及び ${}^{55}\text{Ni}$ を IGISOL を用いて質量分離に成功し、 ${}^{53}\text{Co}$ を除くこれらの鏡映核の半減期を2%以内の誤差で測定した。又、半減期の誤差は大きいものの、ベータ崩壊にともなうガンマ線を検出し、初めて ${}^{53}\text{Co}$ の基底状態の存在を確認した。 $f_{7/2}$ 殻鏡映ベータ転移の ft 値及びガモフ・テラー行列要素について信頼出来る実験値を揃え、殻模型計算との比較を行った。この結果1-励起模型の理論値は実験値に近づくことが分かり、 $f_{7/2}$ 軌道から核子が励起している配位の影響、即ち ${}^{56}\text{Ni}$ の芯偏極効果を定性的に理解することが出来た。クエンチング因子として、

$$(q.f.)_{1-jump} = 0.78 \pm 0.05$$

を得たが、更に詳しい殻模型計算を行ない他の領域のガモフ・テラー行列要素と比較する系統的な研究が期待される。

実験値については、 ^{53}Co の半減期を更に測定を重ね精度の良いデータが望まれる。又分岐比については信頼度、精度ともに不十分なものが多く、今後の実験の課題となるであろう。

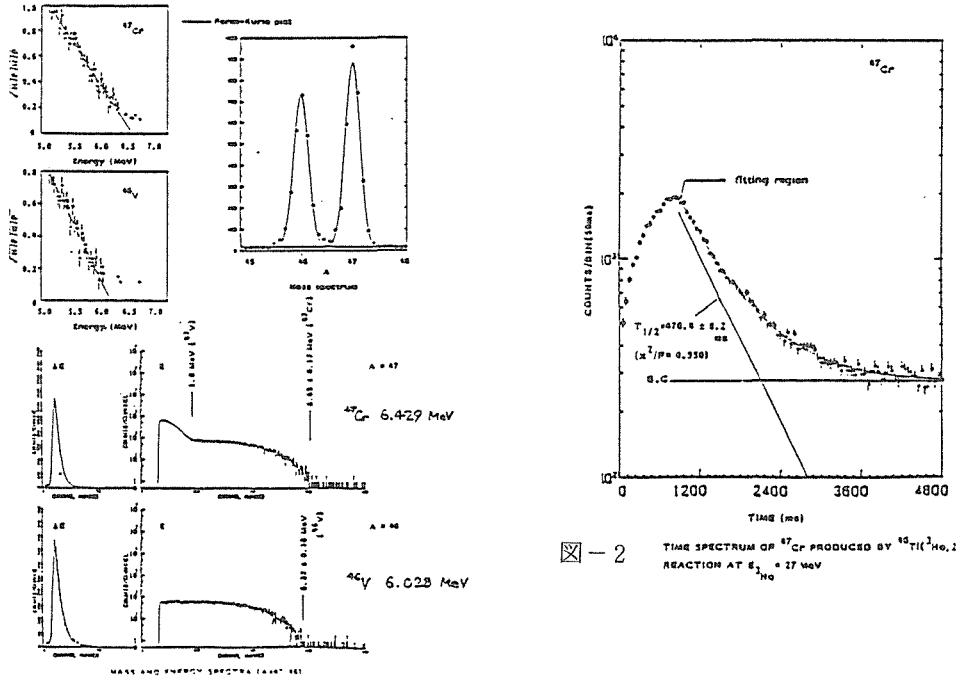


图-1

表-1 SUPERALLOWED MIRROR TRANSITIONS IN THE fp-SHELL REGION

Mirror nuclei ($J_i^- - J_f^-$)	Half-life (ms)	E_{max}^{β} (keV)	Branching ratio (%)
^{41}Sc ($7/2^- - 7/2^-$)	596.3 ± 1.7 ^{a)}	5473.0 ± 1.0 ^{a)}	99.963 ± 0.0013 ^{g)}
^{43}Tl ($7/2^- - 7/2^-$)	513.0 ± 8.0 ^{b)}	5846 ± 7 ^{a)}	{100}
^{45}V ($7/2^- - 7/2^-$)	547.2 ± 5.3	5846 ± 17 ^{a)}	95.7 ± 1.5 ^{h)}
^{47}Cr ($3/2^- - 3/2^-$)	472.0 ± 6.3	6429 ± 14 ^{a)}	96.3 ± 1.2 ⁱ⁾
^{49}Ni ($5/2^- - 5/2^-$)	381.7 ± 7.4	6696 ± 24 ^{a)}	93.6 ± 2.6 ^{j)}
^{51}Fe ($5/2^- - 5/2^-$)	305.0 ± 4.3	7000 ± 15 ^{a)}	95.0 ± 1.3 ^{k)}
^{53}Co ($7/2^- - 7/2^-$)	267 ± 109	7282 ± 18 ^{a)}	{100}
^{55}Ni ($7/2^- - 7/2^-$)	212.1 ± 3.8	7674 ± 11 ^{a)}	{100}

表-2 ガモフ・テラー行列要素

Nucleus	J^{π}	Exp.(error)	Calc. ^{a)}	
			$(f_{7/2})^{A=90}$	1-jump;KB(P-Z)
^{41}Sc	$7/2^-$	0.857(9)	1.1339	1.1339
^{43}Tl	$7/2^-$	0.745(17)	0.8909	0.8882
^{45}V	$7/2^-$	0.497(26)	0.7908	0.3898
^{47}Cr	$3/2^-$	0.434(27)	0.5146	0.4048
^{49}Mn	$5/2^-$	0.443(41)	0.6220	0.4556
^{51}Fe	$5/2^-$	0.485(26)	0.7489	0.6035
^{53}Co	$7/2^-$	0.497(365)	0.8909	0.5706
^{55}Ni	$7/2^-$	0.495(23)	1.1339	0.5518

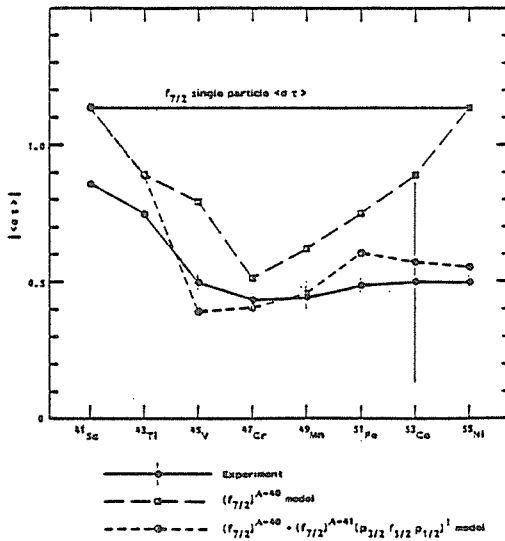


図-3 GAMOW-TELLER MATRIX ELEMENTS OF MIRROR TRANSITION

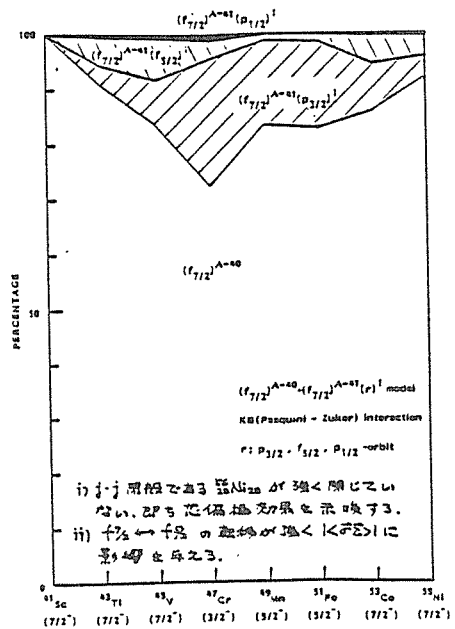


図-4 GROUND STATE WAVE-FUNCTIONS OF MIRROR NUCLEI

論文審査の結果の要旨

本論文は、イオンガイド式オンライン質量分離という新しい手段を用いて $f_{7/2}$ 殻領域の原子核のうち6個の $T_z = -\frac{1}{2}$ 核（鏡映ベータ転移を起こす核）について、その半減期の精密測定をおこなって、これらベータ転移のガモフ・テラー（以下GTと略記）転移強度を導出し、核理論計算を行って、両者を比較検討したものである。

本論文の第一章では、本研究の目的とその内容の概略について述べている。

第二章では、ベータ崩壊におけるGT転移と鏡映転移との関係、これまでの東北大学における研究の経過、並びにイオンガイド式オンライン質量分離器の開発状況について解説している。

第三章では実験装置について、すなわち、イオンガイド式オンライン質量分離器、テレスコープ式ベータ線検出器の作成と改良、Ge（HP）ガンマ線検出器と測定系、およびそれらによる測定法について述べている。

第四章では、測定データを解析して半減期を求める方法について詳述している。すなわち、最小自乗法の適用、不感時間による数え落しの補正、時間軸の較正について、並びに、 ^{46}V および ^{54}Co の半減期を時間の基準とした較正実験の結果について述べている。

第五章では、本論文の中心をなす半減期の測定およびその解析結果を述べている。すなわち、本研究によって、 ^{45}V 、 ^{47}Cr 、 ^{49}Mn 、 ^{51}Fe 、 ^{53}gCo および ^{55}Ni の半減期を2%以下の相対誤差で決定することができた。ただし、似たような半減期のアイソマーを持つ ^{53}gCo だけは特別であり、この場合は計数率の小さいガンマ線を測定しなければならないので、得られた結果は大きな誤差をとまなっているが、 ^{53}Co の基底状態 ^{53}gCo を特定して半減期を測定できたのは本研究が最初であるので意義は大きい。

第六章では、上記の結果に基づいてGT転移強度を導出し、第七章で殻模型に基づいて計算した結果を述べ、第八章で両者を比較検討している。その結果、GT転移行列要素の実験値が 0.78 ± 0.05 の因子だけ理論値よりも抑制されているという重要な結論が得られた。これは、今後この領域の核構造を理解してゆく上で大きな手がかりを与えるものである。

最後の第九章でまとめをおこない、今後の展望について述べている。

核物理学の大きな課題の一つは、より不安定な短寿命核について精密なデータを得ることであるが、本研究によって4個の短寿命核があらたに質量分離され、あわせて6個の $T_z = -\frac{1}{2}$ 核の半減期について信頼度の高い値が得られ、 $f_{7/2}$ 殻領域の鏡映ベータ転移についてGT転移強度の抑制因子が得られ、核物理学に大きな寄与がなされた。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、濱広幸提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。