

論文内容の要旨

論文題目 Precise determination of the Gamow-Teller quenching factor
via the $^{90}\text{Zr}(n, p)$ reaction at 293 MeV

(293 MeV における $^{90}\text{Zr}(n, p)$ 反応測定による
ガモフ・テラー抑制係数の精密決定)

氏名 矢向 謙太郎

1 序

原子核のスピン空間での集団運動は、最近の原子核物理の主要なテーマの1つであり、そのなかでも、空間成分は変化せず(角運動量移行 $\Delta L = 0$)、スピン・アイソスピン空間成分が反転した(スピン移行 $\Delta S = 1$ 、アイソスピン移行 $\Delta T = 1$)ガモフ・テラー(GT)型巨大共鳴は最も重要なものである。このGT遷移にはGT型 β 崩壊と同様、 β^- -GT遷移と β^+ -GT遷移とがあるが、それぞれの遷移強度和、 S_{β^-} と S_{β^+} には

$$S_{\beta^-} - S_{\beta^+} = 3(N - Z) \quad (1)$$

なる関係が成り立ち、池田の和則と呼ばれる。 S_{β^-} は (p, n) 反応(β^- 型)、 S_{β^+} は (n, p) 反応(β^+ 型)からそれぞれ実験的に求められるが、GT巨大共鳴の領域までに和則値の約50%しか認められない。この問題はGT遷移強度の抑制問題とよばれており、その機構として、

- クォークスピンの反転状態である Δ 粒子を考慮し、1粒子-1空孔($1p1h$)状態と 1Δ 粒子-1空孔(ΔN^{-1})状態の結合により、GT遷移強度が励起エネルギー300 MeVの Δ 励起領域に移動している。
- $1p1h$ 状態のGT状態が、 $2p2h$ 状態のような複雑な状態と配位混合し、GT遷移強度がGT巨大共鳴より高い励起エネルギー(20-50 MeV)に分散・分布している。

の2つのモデルが提唱されている。これらの抑制機構について、理論・実験両面から精力的に研究が行われてきたが、最終的な結論は未だ得られていない。抑制の度合を表す指標にガモフテラー抑制定数 Q があり、 β^- 側反応の遷移強度と β^+ 側反応の遷移強度の差($S_{\beta^-} - S_{\beta^+}$)を和則値で割ったものとして定義される。GT遷移強度を励起エネルギー ~ 50 MeVまでに渡って精度良く求めることでこのガモフテラー抑制定数を実験的に決定し、核内におけるデルタ粒子の関与を定量的に明らかにすることが本研究の目的である。

抑制係数 Q への Δ 粒子の寄与は、ランダウ・ミグダル相互作用を用いて記述できる。ランダウ・ミグダル相互作用は3つの係数 g'_{NN} 、 $g'_{N\Delta}$ 、 $g'_{\Delta\Delta}$ を持ち、それぞれ、 $1p1h$ 状態間、 $1p1h$ 状態- ΔN^{-1} 状態間、 ΔN^{-1} 状態間の相互作用の強さを表し、特に、 $g'_{N\Delta}$ は抑制係数 Q の値に密接に関係する。これらの係数はパイオン相関の振る舞いを決める鍵となる係数であるが、 $g'_{N\Delta}$ 、 $g'_{\Delta\Delta}$ が実験的に未決定なため、理論計算においてはuniversality ansatzと呼ばれる関係、 $g'_{NN} = g'_{N\Delta} = g'_{\Delta\Delta} (\equiv g')$ がしばしば仮定され、 $Q \sim 0.5$ を良く説明する $g' = 0.6 \sim 0.8$ が用いられてきた。今回、抑制係数 Q が実験的に求められれば、 $g'_{N\Delta}$ の値に対して制限を与えることができる。

本研究では、未発見のGT遷移強度を高励起の連続状態において正確に同定しなくてはならない。種々の ΔL をもつ高励起状態から実験的にGT遷移($\Delta L = 0$)を抽出するには多重極展開の手

法が有効である。歪曲波インパルス近似 (DWIA) の計算によると、微分散乱断面積は ΔL に特徴的な角度分布を持つ。異なる ΔL をもつ遷移の微分散乱断面積が 1 次独立であることを利用して、測定で得られた断面積を種々の ΔL をもつ成分の 1 次結合で分解するのが多重極展開である。この手法の適用には、

1. 歪曲波の影響を最小にし、反応機構の不確定さを小さくする。
2. スピン反転励起の GT 励起を最も強く引き出すエネルギーを選択する。
3. 散乱過程が 1 回散乱が支配的であるエネルギーを選択する。

などを考慮する必要があるが、300 MeV では、上記 3 つの条件が同時に満たされる。

最近、若狭らは 300 MeV における $^{90}\text{Zr}(p, n)$ 反応の 2 階微分散乱断面積を 0° から 12° に渡って測定し、多重極展開の手法で解析を行った。その結果、GT 遷移強度の分布が励起エネルギー 50 MeV の連続状態にまで分散していることが明らかになった。得られた $\Delta L = 0$ の成分には、GT 遷移強度の寄与以外に、GT 遷移と同じスピン・パリティを持ち、演算子 $r^2\sigma t_-$ で励起される、アイソベクトル型スピン単極子 (IVSM) 励起の寄与が含まれる。そこで、断面積の $\Delta L = 0$ の成分 ($\sigma_{\Delta L=0}$) から IVSM の寄与を DWIA 計算で見積もって差し引き、式、

$$\sigma_{\Delta L=0} = \hat{\sigma}_{\text{GT}} F(q, \omega) B(\text{GT})$$

により、GT 遷移強度 $B(\text{GT})$ を求めた。ここで、 $\hat{\sigma}_{\text{GT}}$ は GT 単位断面積であり、 $F(q, \omega)$ は運動量移行 q とエネルギー移行 ω に依存する補正項である。その結果、娘核 ^{90}Nb 励起エネルギー 50 MeV までに、総遷移強度 $S_{\beta^-} = 28.0 \pm 1.6 \pm 5.4$ が得られた。ここで、示した誤差は順に、多重極展開による不定性と GT 単位断面積に起因する不定性である。一方、 S_{β^+} は、200 MeV における $^{90}\text{Zr}(n, p)$ 反応測定の結果を多重極展開の方法で解析することにより、 $S_{\beta^+} = 1.0 \pm 0.3$ と得られている。従って、GT 抑制係数は、 $Q = 0.90$ と求まる。これは従来の値 $Q \sim 0.5$ と比べて非常に大きく、核内での Δ 粒子の寄与が 10% 程度と小さいことを示している。

しかしながら、200 MeV の $^{90}\text{Zr}(n, p)$ 反応データの解析は GT 遷移強度が励起エネルギー 7.8 MeV までしか考慮されていないなどの点で上記 (p, n) 反応データの扱いと異なるため、GT 抑制係数を正確に求めたとは言えない。高精度で GT 抑制係数を決定するには高励起連続状態に渡って精密な (n, p) 反応の二階微分散乱断面積を求めなければならない。そこで、我々は大阪大学核物理研究センターに新しく (n, p) 実験施設を建設し、大アクセプタンス (立体角 11 msr、運動量アクセプタンス 35%) を得た。この施設を用い、293 MeV において $^{90}\text{Zr}(n, p)$ 反応の測定を行った。

2 (n, p) 実験施設

図 1 は、 (n, p) 実験施設の概略図である。ほぼエネルギーの揃った偏極中性子ビームを $^7\text{Li}(\vec{p}, n)$ 反応によって生成する。1 次陽子ビームは、 ^7Li 標的を通過したあと、クリアリング磁石の磁場によって曲げられ、ビームダンプへと移送される。一方、 ^7Li 標的上で生成した中性子ビームは 95 cm 下流の (n, p) 標的に入射される。標的は、多線式ドリフトチェンバー (MWDC) 箱内に設置されている。標的中の出射陽子のエネルギー損失によるエネルギー分解能の悪化を防ぐため、標的は 4 層に分けられ、各層は MWDC 面で隔てられている。どの MWDC 面が荷電粒子を検出したか調べることにより (n, p) 反応がどの標的層で起きたかを決定できる。出射陽子は標的直下流にある 6 面の MWDC を通過し、更に 25 cm 下流の MWDC2 を通過する。これら 2 つの MWDC の情報から (n, p)

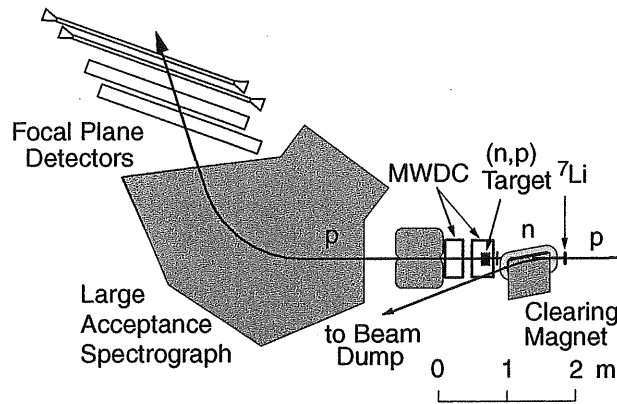


図 1: (n,p) 実験施設の概略図

反応の反応位置と散乱角を求める。さらに、陽子は大口径スペクトログラフ (LAS) と焦点面検出器とで運動量解析される。ターゲット MWDC の外で生じた荷電粒子に起因するイベントは、上流に設置された 1 mm 厚のプラスチックシンチレータからの信号により排除される。中性子-陽子散乱を用いたテスト実験により、この (n,p) 実験施設は、 $3^W \times 2^H$ (cm²) の標的について、運動量アクセプタンス $\pm 7\%$ 、立体角 11 msr をもつことが確かめられた。

$^{90}\text{Zr}(n,p)$ 測定では強度 300–450 nA の偏極陽子ビームを 300 mg/cm² 厚の ^7Li 標的に入射し、(n,p) 標的に每秒 2×10^6 個の中性子を入射させた。中性子ビームの偏極度は 0.2 であった。標的は、上流側 3 枚に 200–400 mg/cm² の ^{90}Zr 板を、最下流標的に 50 mg/cm² のポリエチレン (CH₂) を用い、CH₂ 標的起源の中性子-陽子散乱イベントを Zr 標的起源のデータと同時に取得した。既に良く知られている中性子-陽子散乱の微分散乱断面積を用いて、ポリエチレン標的起源の中性子-陽子散乱イベント数から Zr 標的に入射した中性子ビームの量を求めた。また、MWDC ガスや (n,p) 標的系に起因するバックグラウンドイベントを差し引くために上流側 3 枚の標的を除いた状態での測定も行った。

角度範囲 0° から 12° において、70 MeV の励起エネルギーに渡って二回微分散乱断面積と偏極分解能のスペクトルを取得した。1°–2° のスペクトル中、励起エネルギー 20 MeV における統計精度は二回微分散乱断面積が 0.5 MeV ビンあたり $\pm 3.4\%$ である。偏極分解能は 3°、5 MeV ビンで解析を行い、統計精度 ± 0.2 を得た。

3 解析

得られた二回微分散乱断面積データを多重極展開の手法で解析した。結果を図 2 に示す。娘核 ^{90}Y の励起エネルギー 35 MeV の連続状態まで $\Delta L = 0$ が分布していることが明らかになった。(p,n) 反応の解析から求めた S_{β^-} の値と比べるには、GT 遷移強度の積分領域を対応させる必要がある。(p,n)、(n,p) 両チャンネルについて、 $T = 6$ の GT 遷移の励起エネルギー差を考慮し、励起エネルギー 31.4 MeV までを積分する。その結果、 $\Delta L = 0$ の成分から GT 遷移強度を求めると、その和は 5.4 ± 0.3 (誤差は多重極展開の誤差) が得られた。

次に IVSM の寄与を見積もるため、全ての IVSM 遷移強度が励起エネルギー 31.4 MeV 以下に存在すると仮定して DWIA 計算を行った。IVSM の寄与は光学ポテンシャルの選び方に強く依存し、 2.3 ± 0.8 であった。この値を多重極展開で得られた値から引き去り、 $S_{\beta^+} = 3.0 \pm 0.3 \pm 0.8 \pm 0.5$ (多重極展開の誤差、IVSM の見積もり誤差、単位断面積の誤差の順) を得た。すでに得られている S_{β^-} と合わせて、抑制係数は $Q = 0.83 \pm 0.06$ (多重極展開の誤差) と求まった。

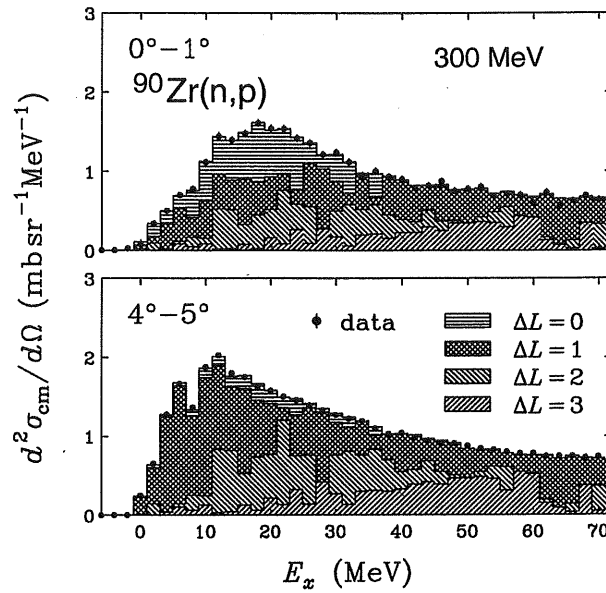


図 2: 多重極展開の手法による解析結果

4 考察

得られた β^+ 遷移強度と 200 MeV における先行データとの比較を行うため、8 MeV までの遷移強度を求めると $S_{\beta^+} = 0.5 \pm 0.2$ と 200 MeV 測定で得られた遷移強度の半分であった。200 MeV では 300 MeV より歪曲波の影響が大きいため、 0° における $\Delta L \geq 1$ の成分の寄与が大きく、 $\Delta L = 0$ の成分の抽出に困難を生じている可能性がある。

次に理論計算との比較を行った。Bloom らの殻模型計算と Kuz'min らの乱雑位相近似 (RPA) 計算結果と比べて、得られた S_{β^+} の値は約 2 倍程度大きい、Rijsdijk らによる着物を着た乱雑位相近似 (DRPA) 結果とは一致する。

また、 ^{90}Zr 核の β^+ -GT 遷移は独立粒子運動模型ではパウリ律により禁止されるため、芯偏極の効果と関連づけられる。 $(e, e'p)$ 反応データの解析から得た芯偏極から $1g_{9/2}$ 陽子の軌道の占有確率を見積もり、GT 遷移強度に直すと $S_{\beta^+} = 2.0 \pm 0.4$ と実験値より小さな値が得られるが、この差は、 $2\hbar\omega$ 励起に含まれる GT 遷移強度で説明される。

最後に抑制係数 Q を用いてランダウ・ミグダル変数 g'_{NN} 、 $g'_{\text{N}\Delta}$ を求めた。チュー-ロー模型において、 $g'_{\Delta\Delta} = 0.6$ と仮定すると、 $Q = 0.83 \pm 0.06$ から $g'_{\text{NN}} \approx 0.6$ 、 $0.16 < g'_{\text{N}\Delta} < 0.35$ と求まり、 g' の universality ansatz が成り立っていないことが明らかになった。

今後の展望としては、次のものが挙げられる。まず、上記のデータ解析においては、IVSM 遷移と GT 遷移がインコヒーレントに扱われているため、最終的な結論を導くには、より現実的な波動関数を用いた理論的な解析が必要である。実験的には、300 MeV における精確な (p, n) データがすでに存在する ^{27}Al 、 ^{208}Pb 標的についても (n, p) 測定を行い、同様の結論が導かれるかどうかは興味深い。

5 まとめ

我々は、GT 抑制係数を精確に求めるために $^{90}\text{Zr}(n, p)$ 反応を 293 MeV にて測定し、終状態 ^{90}Y の励起エネルギー 31.4 MeV までに $S_{\beta^+} = 3.0 \pm 0.3 \pm 0.8 \pm 0.5$ を得た。これより、抑制係数は $Q = 0.83 \pm 0.06$ と求まり、従来の値 $Q \sim 0.5$ と比べて非常に大きく、核内での Δ 粒子の寄与が高々 20% 程度と小さいことがわかった。また、 $g'_{\text{N}\Delta}$ は 0.6 よりも有意に小さく、ランダウ・ミグダル変数に関する universality ansatz が成り立たないことが明らかになった。