

論文内容の要旨

論文題目 : Study of the isovector spin monopole resonance
via the $(t, {}^3\text{He})$ reactions at 300 MeV/u

(300 MeV/uにおける $(t, {}^3\text{He})$ 反応を用いた
荷電ベクトル型スピン単極共鳴状態の研究)

氏名 三木 謙二郎

原子核の集団運動は、原子核の巨視的な性質を理解する上で非常に重要である。中でも原子核の巨大共鳴は、原子核物質の性質と結びつけられ、原子核物理研究における中心的トピックである。巨大共鳴は原子核が外界から与えられた角運動量 ΔL 、スピン ΔS 、荷電スピン ΔT によって分類される。その中でも、 $\Delta L = \Delta S = \Delta T = 0$ で表される荷電スカラー型単極共鳴状態は、陽子と中性子が同位相で等方的に密度振動する状態であり、原子核物質の圧縮率を決定する有効な手段として実験理論双方からの研究が進められてきた。その一方で、陽子と中性子が逆位相で運動する荷電ベクトル型の密度振動状態については殆んど研究が進んでおらず、今後の研究を通して原子核物質の研究に新たな局面が切り拓かれることが期待される。

そこで本研究では、原子核が荷電反転スピン反転を伴いながら等方的に密度振動する、荷電ベクトル型スピン単極共鳴状態 (IsoVector Spin Monopole Resonance; 以下 IVSMR と略す) を対象に選んだ。IVSM 遷移演算子は $O_{1\mu}^{\pm} = \sum_i t_{\pm}(i)\sigma_{\mu}(i)r(i)^2$ で表され、量子数 $\Delta L = 0, \Delta S = \Delta T = 1$ に対応する。これらの量子数はこれまで精力的に研究がなされてきたガモフテラー (GT) 遷移と同じであるが、GT が主量子数 (動径量子数) の変わらない $0\hbar\omega$ 励起であるのに対して、IVSM は主量子数が 1 単位変化する $2\hbar\omega$ 励起であり密度振動を伴うという点が異なる。IVSMR を研究することは、原子核構造理論計算に用いられる核内有効相互作用に新たな知見を与えるという観点から非常に重要である。また、過去のスピンアイソスピン応答研究においては、GT 遷移強度のクエンチングがデルタ励起と関連づけられて盛んに議論されてきたが、新たに荷電密度振動を伴う IVSM に対してエンチングが存在するか否かは興味深い問題と考えられる。

IVSMR 研究における最大の問題は、これまで実験的に検証された例が乏しいという点にあった。IVSMR は核内の中性子が陽子に転換する β^- 型、及びその逆の β^+ 型の二種類に分けられ、理論的にはそれら双方に対して予測がなされている。しかしながら、 β^- 型について数例の兆候が報告されているものの、 β^+ 型に関しては明確な実験的証拠が全く得られていないという状況であった。特に、共に単極型のスピンアイソスピン応答である GT と IVSM を区別することは非常に難しく、両者を実験的に区別した例は β^- 型、 β^+ 型いずれの場合についても存在しなかった。

上記の状況を踏まえて、本研究では「IVSMR(β^+) の同定」を研究目的に設定し、その方法として入射エネルギー 300 MeV/u における $^{208}\text{Pb}, ^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ 反応測定を行った。この反応を選んだ最大の理由は、 $(t, ^3\text{He})$ 反応では核子を使った反応 ((n, p) 反応) と比較して、原子核表面に感度が高く IVSMR のような表面振動を強く励起するという点である。そのため、 $^{208}\text{Pb}, ^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ スペクトルと $^{208}\text{Pb}, ^{90}\text{Zr}(n, p)$ スペクトルに含まれる単極成分を比較すれば、それらの差として IVSMR が同定できると考えられる。 $^{208}\text{Pb}, ^{90}\text{Zr}(n, p)$ スペクトルについては過去に測定結果が公表されているため、今回新たに $^{208}\text{Pb}, ^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ 測定を行い、両者を組み合わせることで初めて IVSMR の実験的確立が可能となった。

実験は理化学研究所 RI ビームファクトリー施設 (RIBF) に於いて遂行した。超伝導リングサイクロトロンにより 320 MeV/u まで加速された $^4\text{He}^{2+}$ ビームを ^9Be 生成標的に照射し、破砕反応により生成された原子核の中から、300 MeV/u の t 粒子 (三重水素原子核; $^3\text{H}^+$) ビームを破砕片分離装置 BigRIPS を用いて純度 $\sim 100\%$ で選択した。得られたビームを反応標的に照射し、散乱される $^3\text{He}^{2+}$ を磁気スペクトロメータ SHARAQ を用いて運動量分析し、最終焦点面検出器を用いて測定した。本研究は SHARAQ を用いて行われた最初の物理実験である。この実験により、入射エネルギー 300MeV/u における $^{208}\text{Pb}(t, ^3\text{He})$ 反応、 $^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ 反応、それぞれの微分断面積スペクトルを励起エネルギー 0-40 MeV、散乱角 0-4 度の範囲で決定することに成功した。この入射エネルギー領域での $(t, ^3\text{He})$ 測定は世界初である。また統計量を確保するために、大強度 (10^7 pps) の二次ビームを用いた点も本実験の重要な特徴である。このような大強度条件下では検出器を用いてイベント毎にビーム粒子を追跡することが難しく、ビームの広がりや測定全体の分解能を悪化させてしまうという懸念があった。そのため、ビームラインに新たなスリット、コリメータを配置することでビームエミッタンスを制限すると同時に、イオン光学を改良し二次標的でのビームの角度広がりを絞った。これらにより IVSMR の同定に十分な精度である、統計精度 $\sim 3\%$ 、エネルギー分解能 ~ 2.5 MeV、角度分解能 $\sim 0.4^\circ$ を達成することに成功した。

得られた微分断面積スペクトルに対して、二通りの方法を適用し IVSMR 成分の抽出を行った。一つは「差分スペクトルの方法」である。単極成分の断面積角度分布はゼロ度でピークを持つというユニークな特徴があるため、ゼロ度スペクトルと後方角スペクトルとの間で差分をとることで単極成分の抽出が可能である。この方法を用いる利点は、実験データのみを用いて単極成分の存在を確認できることにある。この解析により、 ^{208}Pb および ^{90}Zr についてそれぞれ励起エネルギー 12 MeV および 23 MeV に単極成分を見出すことに成功した。得られたゼロ度断面積は、 $\sigma_{\text{Pb}}^{\text{diff}} = 8.2 \pm 0.8$ (stat.) ± 0.6 (syst.) mb/sr、 $\sigma_{\text{Zr}}^{\text{diff}} = 13.6 \pm 0.8$ (stat.) ± 1.0 (syst.) mb/sr. であった。しかし、これらをノーマルモードを仮定した歪曲波インパルス近似 (DWIA) 計算から得られる断面積予想値と比較したところ、わずか $43 \pm 5\%$ および $32 \pm 3\%$ のみに対応することが判った。なお、これら誤差には DWIA 計算の持つ誤差は含まれていない。DWIA 計算には不定性があるも

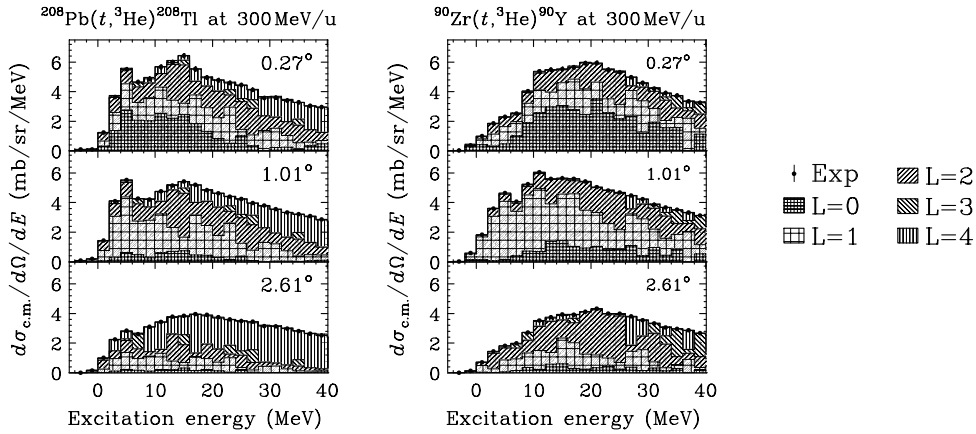


図 1: [左] 得られた $^{208}\text{Pb}(t, ^3\text{He})$ 二階微分断面面積スペクトルおよびその多重極展開結果。[右] 左図と同様。但し $^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ 反応についての結果。

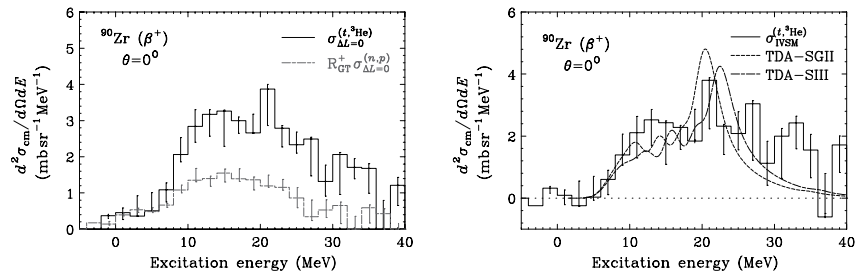


図 2: [左] $^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ および $^{90}\text{Zr}(n, p)$ スペクトルから抽出された単極成分の比較。 $(t, ^3\text{He})$ スペクトルに対して統計上有意味な増分が確認され、これが IVSMR と同定される。[右] 左図の両スペクトルに簡単な演算を施すことで得られた IVSM 断面面積分布。破線および一点鎖線はタムダンコフ近似を用いて計算された IVSM 強度分布を示したものである。

の、差分スペクトルの手法で得られた断面面積が予想より小さい理由としては、差分スペクトルの手法では $\Delta L \geq 1$ 成分の寄与が全く考慮されていないことが挙げられる。

次に、 $\Delta L \geq 1$ 成分の寄与も考慮にいたした「多重極展開の手法」を適用した。多重極展開では、断面面積角度分布が角運動量移行 ΔL で特徴的づけられることを利用し、実験で得られた断面面積角度分布に DWIA 計算を最小自乗フィットすることで断面面積を各々の ΔL 成分に分解する。多重極展開の結果を図 1 に示す。図中左が $^{208}\text{Pb}(t, ^3\text{He})$ スペクトル、右が $^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ スペクトルである。この解析により、 ^{208}Pb 、 ^{90}Zr 双方について差分スペクトルの手法では抽出することのできなかつた大量の単極成分を見出すことができた。得られた単極成分の分布を確認すると、 ^{90}Zr の方が ^{208}Pb に較べてより高励起側に広がっていることが見て取れるが、これは単純にはエネルギー単位 $\hbar\omega$ が質量数 A の $-1/3$ 乗に比例することから理解される。

さらに、 $(t, ^3\text{He})$ スペクトルと (n, p) スペクトルの比較を行うことで GT と IVSM の分離を行った。まず、過去の (n, p) スペクトルに対しても同様に多重極展開解析を行い単極成分を抽出した。そして $(t, ^3\text{He})$ 、 (n, p) それぞれに含まれる単極成分同士を比較した。図 2[左] にその結果を示す。

ここで、 (n, p) スペクトルには GT 断面積比 (R_{GT}^+) が掛けられており、両スペクトルに含まれる GT 成分が共通化されている。この図から、 (n, p) に較べて $(t, {}^3\text{He})$ には統計上有意な増分が確認され、この増分が IVSMR と同定される。両者のスペクトルに簡単な演算を行い、IVSM 断面積のみを抽出したのが図 2[右] のヒストグラムである。図中の破線および一点鎖線は、核内有効相互作用 SGII および SIII を用いたタムダンコフ近似計算による IVSM 強度分布を表している (Phys. Rev. C 62, 024319 (2000) より引用、全体を適宜規格化)。SGII および SIII の何れを用いた場合でも、高励起部において実験データに較べ理論計算が過小評価する傾向が確認された。一つの提案として、有効相互作用をより斥力的に修正する必要があるのではないかと考えられる。 ${}^{208}\text{Pb}$ についても同様の解析を行い、IVSMR を統計上有意に同定することに成功した。また、 ${}^{208}\text{Pb}$ の IVSM 断面積分布については、有効相互作用 SIII を用いた理論計算によって良く再現されることが判った。得られた IVSM 断面積は $\sigma_{\text{Pb}}^{\text{IVSM}} = 31 \pm 4$ (syst.) ± 3 (MD) ± 3 (stat.) mb/sr、 $\sigma_{\text{Zr}}^{\text{IVSM}} = 65 \pm 8$ (syst.) ± 6 (MD) ± 5 (stat.) mb/sr であった。これらは DWIA 計算から予想された断面積の $150 \pm 28\%$ および $140 \pm 24\%$ に対応する。得られた比率はおよそ 100% 以上であり、今回の結果からは IVSM のクエンチングは観測されなかったといえる。近年の GT クエンチングの研究でも、クエンチング効果は高々 15% と実験的に明らかにされており、今回の結果はそれと付合するものと言える。