

論文内容の要旨

論文題目

Study of the isovector non-spin-flip monopole resonance via the super-allowed Fermi type charge exchange ($^{10}\text{C}, ^{10}\text{B}\gamma$) reaction

(超許容フェルミ型 ($^{10}\text{C}, ^{10}\text{B}\gamma$) 荷電交換反応による非スピン単極共鳴の研究)

氏名 笹本 良子

圧縮率と直接関係する非圧縮率は、陽子と中性子が同位相で振動する荷電スカラ型について、単極共鳴のエネルギーから実験的に導出されてきた。一方、陽子と中性子が逆位相で振動する荷電ベクトル型単極共鳴とそれに対応する荷電ベクトル型非圧縮率については、中性子過剰核物質の性質解明には不可欠であるにも関わらず実験データはきわめて少ない。その主な要因は、実験手法の欠如であった。今までの実験手法の中には、(π^\pm, π^0) だけでなく、($^7\text{Li}, ^7\text{Be}$) や ($^{13}\text{C}, ^{13}\text{N}$) など重イオン荷電交換反応を用いたデータも存在するが、これらの実験データで互いに異なった結果を示している部分もある。

このような状況の中で、RI ビームを用いて初めて可能になる超許容フェルミ型荷電交換反応 ($^{10}\text{C}, ^{10}\text{B}$) 反応を用いると、荷電ベクトル単極共鳴を選択的に励起することができる。荷電ベクトル単極共鳴はアイソスピン $\Delta T = 1$, スピン $\Delta S = 0$ のアイソベクトル非スピン反転型の励起モードであるが、核子あたり 100–400 MeV のエネルギー領域では、 $\Delta T = \Delta S = 1$ であるアイソベクトルスピン型の有効相互作用が非スピン反転型に比べて数倍大きいため、非スピン型を選択的に励起する反応を用いない限りスピン反転型による不定性は排除できない。しかし、($^{10}\text{C}, ^{10}\text{B}$) 反応では、 ^{10}B の励起状態の中の 0^+ 状態を同定することで、スピンパリティ 0^+ の荷電類似状態間の遷移を利用でき、アイソベクトル非スピン反転型を選択的に励起することができる。

この ($^{10}\text{C}, ^{10}\text{B}$) 反応を用いて単極共鳴の性質を知るためには、高分解能スペクトロメータだけでなく、二次ビームとして生成される ^{10}C ビームの運動量広がりによる位置および角度広がりを小さくする必要がある。そこで、理化学研究所 RIBF 施設に新たに建設された高分解能 SHARAQ スペクトロメータとスペクトロメータに接続するビームラインに分散整合技術を適用し、二次ビームを用いた高分解能測定を目指した。

二次ビームは一般的に一次ビームに比べ運動量・角度広がりが大きく、またビーム強度が弱い。そのため、ビーム調整時には、直接検出器でビーム軌道を測定することが可能である。一方、ビーム強度が弱いため、ビーム軌道を測定し、ビーム輸送の状態を判断するまでに時間がかかる。そのような状況下では、できるだけ効率的に短時間で調整を終了させることが重要である。そこで、ビームラインを構成する磁石に対して、精密な磁場測定を行い、その結果をイオン光学計算コードに組み込み、事前に磁石の応答関数を得、数回の磁石強度の変更で調整できるようにした。また、ビーム輸送の状態を判断するには輸送行列を実験的に求めることが有効であるが、SHARAQ スペクトロメータの場合、ビームラインの各焦点面は分散整合を実現するために大きな光学的分散を持ち、二次ビームの持つ大きな運動量広がりのため像がぼやけてしまう。そのため、輸送行列を実験的に求めることすら容易ではない。そこで、ビームの運動量広がりによらない新たな量を導入することで、光学的分散の大きな焦点面でも輸送行列 (focus condition) の調整を可能にした。開発したすべての技術を統合し、効率的なビーム診断・調整方法確立し、最終的には約半日で分散整合調整を可能にした。分散整合を達成することで、要求分解能を満たすことができた。

($^{10}\text{C}, ^{10}\text{B}$) 反応の非スピン反転遷移に対する有効性を検証するために、RIBF 施設にて実験を行った。実験では、核子あたり 200 MeV (純度 95% 以上) の ^{10}C ビームを ^7Li および ^{90}Zr 標的に照射し、荷電交換反応により生成された ^{10}B を SHARAQ スペクトロメータで磁気分析した。ビームラインには分散整合を適用し、開発した調整方法を用いて調整を行った。アイソベクトル非スピン反転型を選択するために、超許容フェルミ遷移の目印となる ^{10}B の 0^+ 状態からの 1022 keV のガンマ線を NaI 検出器アレイ (DALI2) で検出した。この実験では、単極共鳴状態の性質を調べるためにも統計量も重要であったため、大強度の ^{10}C ビーム ($\approx 2 \times 10^6$ pps) をイベント毎にビームライン上に設置された検出器で測定したことも特徴である。

図 1 に、 $^7\text{Li}(^{10}\text{C}, ^{10}\text{B})$ 反応において、ガンマ線検出器 DALI2 で検出された ^{10}B から放出されたガンマ線スペクトルを示す。この図で、アイソベクトル非スピン反転型遷移の指標である 1022 keV のガンマ線がはっきりと観測されていることがわかる。その隣には、アイソベクトルスピン反転型遷移を示す 718 keV のガンマ線も見えている。得られたガンマ線スペクトルにおいて、 ^{10}B の 1740 keV の状態より上の励起状態からの feeding は小さいことがわかった。なぜならば、feeding がある場合には 1022 keV 以上にもガンマ線によるピークが観測されるはずだからである。また、 7 標的の場合には、スピン反転遷移が起こった際には標的から 430 keV

のガンマ線が放出されることが知られている。標的からのガンマ線と ^{10}B からのガンマ線の同時測定の結果、718 keV の周辺にのみ標的からの 430 keV が同時に観測され、718 keV のガンマ線のエネルギー領域でスピン反転遷移が選択できることが示された。

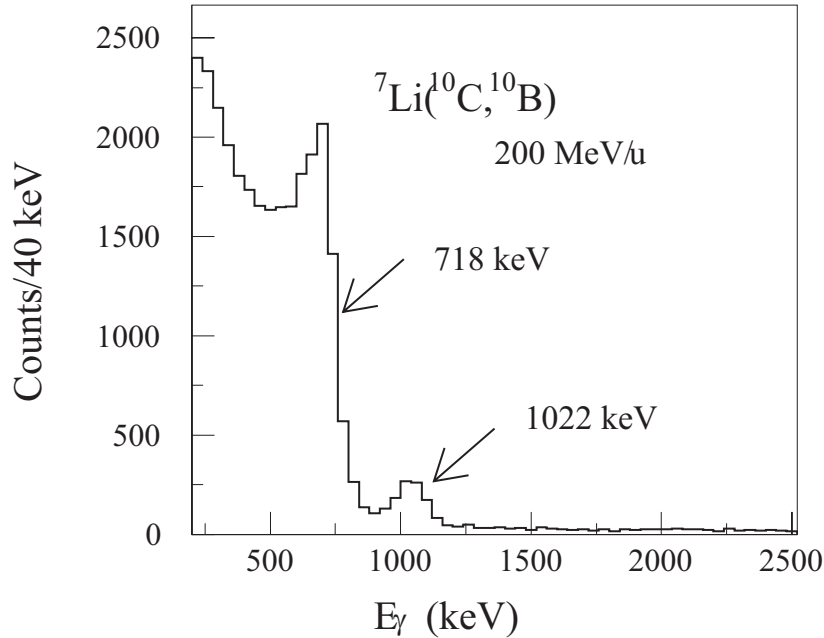


図 1: $^7\text{Li}(^{10}\text{C},^{10}\text{B})$ 反応において、ガンマ線検出器 DALI2 で検出された ^{10}B から放出されたガンマ線スペクトル。

得られたデータからスピン反転、非スピン反転、バックグラウンドの成分を分離するため、シミュレーションで得たガンマ線検出器 DALI2 でのスピン反転 (718 keV) および非スピン反転 (1022 keV) の応答関数を用いて、ガンマ線のスペクトルに対してフィッティングを行った。フィッティングで得られたスピン反転および非スピン反転の個数と、散乱角度の情報を用いて、散乱断面積の角度分布を求めた。得られた角度分布は単極共鳴に特徴的な前方ピークを示し、微視的 DWBA 計算コードを用いて計算した分布と比較すると、絶対値は異なるものの、分布形状は非常に似た結果を得た。また、最前方角度におけるスピン反転と非スピン反転の実験データの比は、核子あたり 200 MeV における Love と Franey による核子核子有効相互作用の比でほぼ理解できることもわかった。

$^{90}\text{Zr}(^{10}\text{C},^{10}\text{B})$ 反応において、DALI2 で検出された ^{10}B から放出されたガンマ線スペクトルを図 2 に示す。 ^{90}Zr 標的の場合には、大きなバックグラウンドの上に 718 keV および 1022 keV のガンマ線が観測された。バックグラウンド源は、標的核が励起され、他の核に崩壊する際に放出される比較的エネルギーの高いガンマ線と、制動放射によるエネルギーの低いガンマ線が考えられる。 ^7Li 標的の場合と同様に、

DALI2 の応答関数を用いてスピン反転、非スピン反転、バックグラウンドの成分を分離し、角度分布を励起エネルギー 10 MeV ごとに作成した。さらに、非スピン反転遷移についてのみ、バックグラウンドを引いた励起エネルギースペクトルを作成した。得られた角度分布は、各励起エネルギーごとに予想される状態の角度分布の組み合わせで理解できる結果だった。しかし、統計が少なかったため、大きなバックグラウンド成分を引く際に大きな誤差が生じ、より詳細かつ決定的な議論を行うためには、より高統計が要求される。

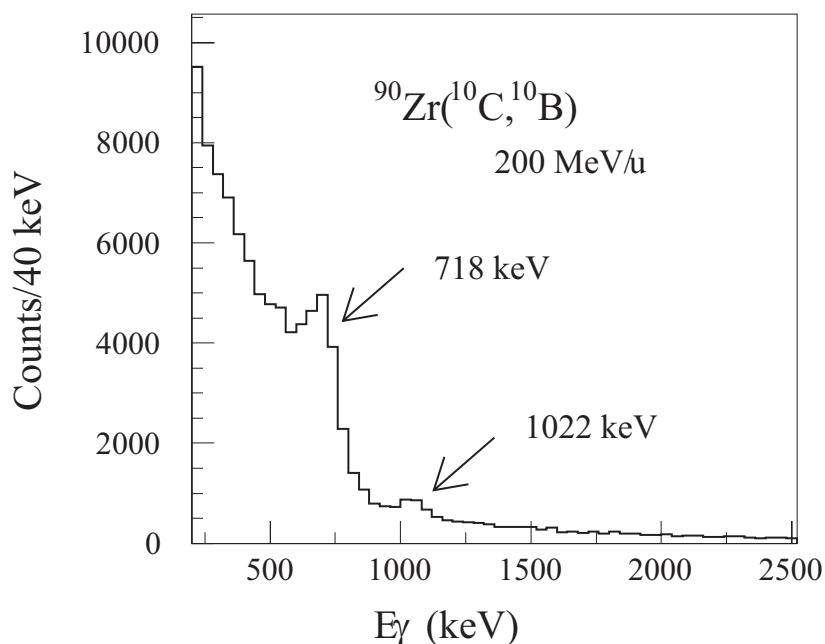


図 2: $^{90}\text{Zr}(^{10}\text{C},^{10}\text{B})$ 反応において、ガンマ線検出器 DALI2 で検出された ^{10}B から放出されたガンマ線スペクトル。

今回の研究により、 $(^{10}\text{C},^{10}\text{B})$ 反応の非スピン反転遷移に対する有効性が検証され、 ^{90}Zr のような比較的質量の重い標的核に対して本反応を適用する際に必要な改良点が定量的に議論できるようになった。重い標的の場合、ガンマ線検出器の信号雑音比の向上および高い検出効率が望まれる。例えば、次世代ゲルマニウム検出器 GRETINA を用いると、今回の測定の約 5 倍のエネルギー分解能を達成することができ、約 5 倍の信号雑音比を得ることができる。その信号雑音比の下では、今回の測定でバックグラウンドを引く際に生じた誤差を約 3 分の 1 にすることができる。また、 LaBr_3 検出器からなる SHOGUN を用いると、今回の測定の約 2 倍の検出効率およびエネルギー分解能が期待される。より高い信号雑音比および検出効率で測定を行うことで、アイソベクトル非スピン反転遷移の成分をより容易にかつバックグラウンドの引き算をより高い信頼度で行うことができると期待される。