

論文の内容の要旨

論文題目 発熱型荷電交換反応 (${}^8\text{He}, {}^8\text{Li}^*(1^+)$) による
 ${}^4\text{He}$ 核のスピン双極子応答
(Spin-dipole response of ${}^4\text{He}$
by exothermic charge exchange reaction (${}^8\text{He}, {}^8\text{Li}^*(1^+)$))
氏 名 宮 裕 之

1. イントロダクション

原子核は、スピンとアイソスピンの特徴的な量子数をもつ有限量子多体系である。原子核のスピンとアイソスピンスピンを各々 1 つ変化させることによって生じるスピンアイソスピンスピン応答は、原子核の基本的な励起モードの 1 つである。この励起モードには、スピン単極子遷移、ガモフテラー遷移、スピン双極子遷移、スピン四重極子遷移などが挙げられる。スピン双極子遷移応答は原子核の核力の一部であるテンソル力と関連しており、スピン双極子遷移強度にクエンチが生じる。スピンアイソスピンスピン応答の研究において、これまで荷電交換反応が用いられてきた。荷電交換反応は目的の原子核を選択的に励起させることが可能であることから、強力なプローブとなっている。

本研究では、 ${}^4\text{He}$ 核のアイソベクトル型スピン双極子応答について調べた。 ${}^4\text{He}$ 核を構成する陽子と中性子は、 $1S_{1/2}$ 軌道を占有したシンプルな核構造を持っており、スピン双極子応答を観測する上で最適な標的となる。 ${}^4\text{He}$ のスピン双極子応答については、これまでの安定核を用いた荷電交換反応(${}^7\text{Li}, {}^7\text{Be}^*(7/2^-)$)や($d, {}^2\text{He}$)を用いた実験が行われた。これまでの先行実験は、運動量移行が小さく、ビームの運動エネルギーが低いため、スピン双極子の観測には不定性がある。先行実験に対する不定性を小さくするため、本研究では高い内部エネルギーを持つ不安定核 ${}^8\text{He}$ を用いて、発熱型荷電交換反応(${}^8\text{He}, {}^8\text{Li}^*(1^+)$)を測定した。この内部エネルギーを標的核に注入することによって、標的の励起状態を小さな運動量移行で生成することが可能となる。先行実験に比べて少ない運動量移行でスピン双極子応答で観測

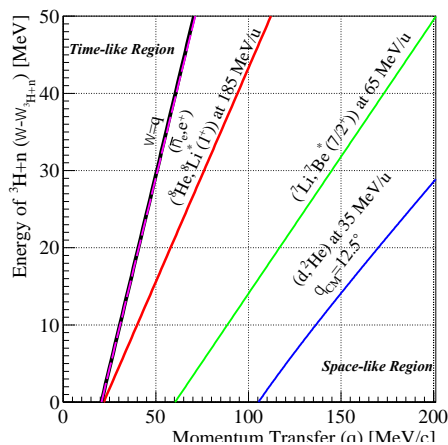


図 1 エネルギー移行-運動量平面における反応運動学

することが可能となり、ニュートリノ原子核反応の運動学領域近傍に到達する。また、スピンアイソスピン応答の感度が高いビームエネルギーで測定を行うため、核子当たり 200 MeV 前後のビームエネルギーを選択する。また、反応は、 ${}^8\text{Li}$ の第 1 励起状態 (1^+ : 0.98 MeV)の終状態を同定することによって、スピン反転遷移を選択することができる。

目的を達成するため、理化学研究所仁科加速器研究センターの RI ビームファクトリー (RIBF)に設置された超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS、高分解能ビームライン、高分解能スペクトロメーターSHARAQを用いた。この反応測定は、世界最大強度で供給される不安定核の 2 次ビームラインと、中間エネルギー領域の重イオンビームの運動量を高分解能で測定するために建設された SHARAQ を組み合わせた核分光実験である。

2. 実験

発熱型荷電交換反応(${}^8\text{He}, {}^8\text{Li}^*(1^+)$)測定を、理化学研究所仁科加速器研究センターRIBFにて行った。反応測定に用いる ${}^8\text{He}$ ビームは、超伝導リングサイクロトロン加速器によって核子当たり 230 MeV まで加速した安定核 ${}^{18}\text{O}$ の 1 次ビームと、F0 焦点面に設置した 1 次標的 ${}^9\text{Be}$ との入射核破碎反応によって、核子あたりのエネルギー185 MeV にて生成した。そして、 ${}^8\text{He}$ ビームを、BigRIPS と高分解能ビームラインを経由し、SHARAQ の S0 焦点面に設置した 2 次標的である液体 ${}^4\text{He}$ 標的に平均 1.8 MHz のビーム強度で照射した。ビームラインの光学系は、SHARAQ とビームラインの標準的なビーム輸送モードの 1 つである高分解能アクロマティック輸送モードを適用した。そして、液体 ${}^4\text{He}$ 標的と ${}^8\text{He}$ ビームとの発熱型荷電交換反応にて生成された ${}^8\text{Li}$ を、SHARAQ にて運動量分析した後、S2 焦点面まで輸送した。反応にて ${}^4\text{He}$ から生成された反跳粒子 ${}^4\text{H}$ の励起エネルギーを質量欠損法から決定した。励起エネルギーを導出するため、飛跡検出器である低圧動作型多芯線ドリフトチェンバー (LP-MWDC)とカソード読み出し型ドリフトチェンバー(CRDC)をビームラインと SHARAQ の焦点面に設置し、ビームの運動量を測定した。また、 ${}^8\text{Li}$ の第 1 励起状態から基底状態 (2^+)へ脱励起したときに放出される γ 線 (0.98 MeV) の同時測定からスピン反転遷移を同定するため、2 次標的周辺に NaI (TI) 検出器アレイ DALI2 を設置した。

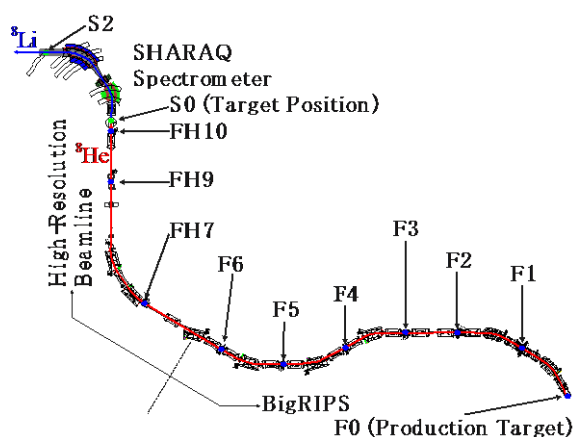


図 2 BigRIPS、高分解能ビームラインおよび SHARAQ スペクトロメーターの概略図

3. データ解析

測定データから ^4He のスピン双極子応答を導出するため、データ解析を行った。まず、取得した検出器のタイミング情報から、大強度の ^8He ビームが通過したビームラインにおけるタイミングと、標的での反応後に低い強度で到達する SHARAQ S2 焦点面に ^8Li ビームが到達したタイミングを選択した。これは、データ収集系に用いた Multi-Hit TDC (V1190/V1290)の取得したすべての時間情報を取り出し、多くのデータから最適なタイミングを見つけ出した。ビームラインと SHARAQ の焦点面に設置した飛跡検出器の位置較正を行い、位置分解能と検出効率について評価した。次に、液体 ^4He 標的における ($^8\text{He}, ^8\text{Li}^*(1^+)$) 反応を同定するため、標的前後で ^8He と ^8Li の識別を行った。 ^8He と ^8Li の運動量および標的での散乱角度を求めるため、ビームラインと SHARAQ のビームイオン光学系について解析を行った。そして、それぞれのビームラインと SHARAQ のビーム輸送行列の行列要素を導出した。ビームの運動量を求める際、行列要素について 2 次までの高次項まで考慮した。導出した輸送行列を用いて、本測定の質量欠損エネルギー分解能と散乱角度分解能の評価を行い、要求した分解能に到達していることを確認した。そして、液体 ^4He 標的にて ^8Li から放出された脱励起 γ 線のエネルギースペクトルをドップラーシフト補正することによって求め、0.98 MeV の γ 線を確認した。本測定におけるビームのアクセプタンスを評価して、 ^4He 核に対する発熱型荷電交換反応($^8\text{He}, ^8\text{Li}^*(1^+)$)の質量欠損エネルギースペクトルを導出した。測定データには、標的直前に含まれるプラスチックシンチレーターでの反応によりバックグラウンドデータが含まれていた。このバックグラウンドイベントをプラスチックシンチレーターと液体 ^4He 標的の間に設置した LP-MWDC から出力された信号にて弁別することに成功した。

4. 結果と考察

データ解析によって、 $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Li}^*(1^+))$ 反応測定にて得られた結果を示し、議論を行った。まずは、 $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Li}^*(1^+))$ 反応測定の 2 重微分断面積を導出し、質量欠損エネルギースペクトラムを示した。次に、この励起エネルギースペクトラムが ^8He の基底状態 (0^+) から ^8Li の第 1 励起状態 (1^+) への遷移によって構成されていることを確認するため、脱励起 γ 線のエネルギースペクトルについて調べた。目的となる 0.98 MeV の γ 線について、シミュレーションを用いて、反応にて ^8Li から放出された γ 線の本数を定量的に評価した。そして、励起エネルギースペクトルに含まれる $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Li})$ 反応の数と比較し、本測定の 91%が ^8He の基底状態 (0^+) から ^8Li の第 1 励起状態 (1^+) への遷移していることを確認した。そのため、得られた励起エネルギースペクトルを $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Li}^*(1^+))$ 反応として取り扱うこととした。スピン双極子応答であることを調べるため、反応の断面積の角度分布を導出し、歪曲波 Born 近似 (DWBA) 計算と比較した。反応計算では、生成される ^4H の状態に対して移

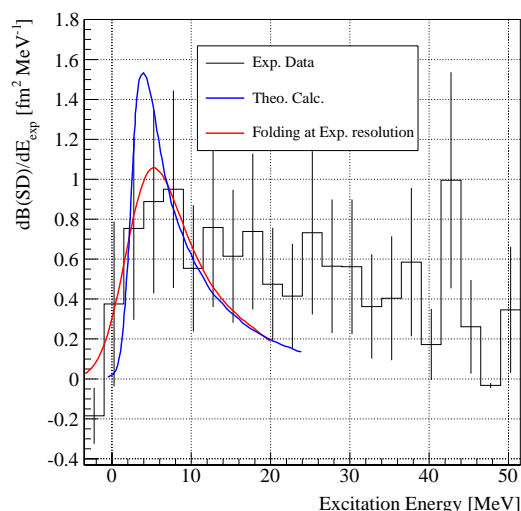


図 3 発熱型荷電交換反応 (${}^8\text{He}, {}^8\text{Li}^*(1^+)$) による ${}^4\text{He}$ のスピン双極子強度分布

行角運動量毎に角度分布を求めた。反応計算によるスピン双極子の角度分布が実験データの角度分布を再現していることから、 ${}^4\text{He}$ 核のスピン双極子応答を確認した。そして、 ${}^4\text{He}$ 核のアイソベクトル型スピン双極子遷移強度分布を、DWBA 計算から運動学補正項を求めて、実験的に求めた。得られたスピン双極子遷移強度に対して、現実的核力を用いた第一原理計算による ${}^4\text{He}$ のスピン双極子遷移強度を比較した。励起エネルギーが 0 MeV から 20 MeV までのスピン双極子遷移強度を積分したとき、実験値は $14.7 \text{ fm}^2 \pm 2.9 \text{ fm}^2$ で、計算値は 12.4 fm^2 であり、エラーの範囲で一致した。そのため、理論計算は、本研究で得られたスピン双極子遷移強度を再現した。

5. まとめ

本研究では、発熱型荷電交換反応 (${}^8\text{He}, {}^8\text{Li}^*(1^+)$) による ${}^4\text{He}$ 核のアイソベクトル型スピン双極子応答を観測した。反応測定では、理化学研究所 RIBF 施設の BigRIPS、高分解能ビームライン、および SHARAQ スペクトロメーターにおいて、質量欠損核分光を行った。データ解析から ${}^4\text{He}$ 核のアイソベクトル型スピン双極子遷移強度を求めた。テンソル力を含んだ現実的核力を用いた第一原理計算による ${}^4\text{He}$ のスピン双極子遷移強度と、本研究によるスピン双極子遷移強度を比較し、理論計算は、実験を再現した。現実的核力を含んだ第一原理による ${}^4\text{He}$ の核構造計算が可能になったことを示している。今後、直接測定することができないニュートリノ反応による断面積の情報が引き出されることを期待される。