

論文内容の要旨

論文題目 A new spectroscopic tool
by the radioactive-isotope-beam induced
exothermic charge-exchange reaction

(不安定核ビームに誘起される発熱型荷電交換反応を用いた
新しいスピン・アイソスピン核分光学的手法)

氏名 野地 俊平

1 序

原子核反応のうち、直接過程は、その観測量が反応に関与する原子核の構造と密接に関係することから、核反応の研究の中心課題の一つであり続けている。直接過程には、非弾性散乱、荷電交換反応、核子移行反応などが含まれる。これらの直接過程を用いた、原子核の低励起ないし高励起状態の分光は、加速器・検出器技術の発展とともに、精力的に進められてきた。

これらのうちで、荷電交換反応は、主として、原子核の基本的な励起モードの一つであるスピン・アイソスピンモードの研究のために用いられてきた。この荷電交換反応の種類としては、 (p, n) , (n, p) 反応という核子荷電交換反応、 $(d, {}^2\text{He})$ 反応などの軽イオン荷電交換反応、 $({}^{12}\text{C}, {}^{12}\text{B})$ 反応などの重イオン荷電交換反応、等がある。

本研究では、不安定核に誘起される荷電交換反応である $({}^{12}\text{N}, {}^{12}\text{C})$ 反応を、 ${}^{90}\text{Zr}$ 標的に対して適用し、 ${}^{90}\text{Nb}$ 核の分光を行った。従来の荷電交換反応は、標的核の基底状態近傍では無反跳条件 (運動量移行 $q \sim 0$) を近似的に実現し得るものの、高励起状態に対しては必然的に運動量反跳が大きくなり、標的核を効率的に励起することができなかったのに対し、不安定核に誘起されるこの $({}^{12}\text{N}, {}^{12}\text{C})$ 反応は、入射核の持つ大きな内部エネルギーを標的核に注入することが可能で、このために高励起状態に対しても $q \sim 0$ の条件を満たすことができ、高励起状態の強力なプローブになり得る。さらに、この反応では、出射核 ${}^{12}\text{C}$ の状態を選ぶことによって、Gamow-Teller 型巨大共鳴 (GTGR) などの $\Delta S = 1$, $\Delta T = 1$ というモードの他、アイソバリックアナログ状態 (IAS) などの $\Delta S = 0$, $\Delta T = 1$ というモードをも選択

的に励起することができるという優れた特徴がある。これに加えて、この反応では、プローブが標的核に強く吸収されることから、特に、アイソベクトル型スピン単極子共鳴 (IVSMR) に対して強い感度があることが期待される。この研究の目的は、 ^{90}Zr 核から ^{90}Nb への遷移に対して GTGR, IAS, IVSMR を観測し、これを通してこの (^{12}N , ^{12}C) 反応の有用性を実証することにある。

この目的のために、我々は、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) 施設において、高分解能磁気分析器 SHARAQ を新たに建設し、これを用いて、核子当り入射エネルギー 175 MeV における $^{90}\text{Zr}(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})^{90}\text{Nb}$ 反応の 2 階微分断面積の測定を行った。この実験は、RIBF で供給される大強度の中間エネルギー重イオンビームと、高エネルギー・角度分解能の原子核分光が可能な SHARAQ スペクトロメーターの 2 つが揃って初めて可能となった新しい実験であると言える。

2 発熱型荷電交換反応

発熱型荷電交換反応 (^{12}N , ^{12}C) には以下のような優れた利点がある：

- 入射角 ^{12}N と出射核 ^{12}C の 16.83 MeV という大きな質量差を利用し、運動量移行を小さく抑えながら、大きなエネルギーを移行することができ、 $\Delta L = 0$ の状態を選択的に励起することが出来る。
- γ 線の測定によって出射核 ^{12}C の状態 ($J^\pi = 0^+$; $T = 0$ の基底状態, $J^\pi = 1^+$; $T = 1$ の 15.1 MeV の励起状態) を選ぶことにより (図 1), スピン・アイソスピン移行が $(\Delta S, \Delta T) = (1, 1), (0, 1)$ という励起モードを選択できる。
- 重イオン反応ゆえ、原子核表面付近で強い吸収性を示し、特に IVSMR を強く励起することができる。

この一方で、この反応では、 ^{12}N ビームが飛行中に β 崩壊 (半減期 11.000 msec) をして ^{12}C となり、荷電交換反応によって生成された ^{12}C と区別できないバックグラウンド事象となり得る。このために、本研究では反応標的の直上流・直下流において粒子を識別することで、標的で ^{12}N が ^{12}C に変化する事象を選び出すことにした。

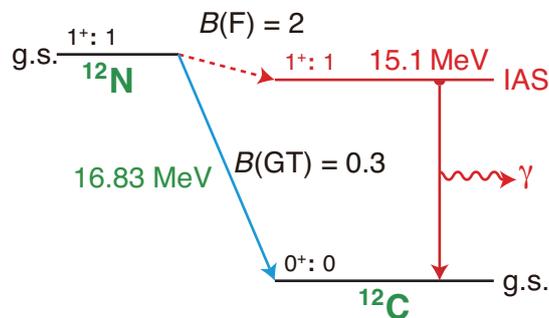


図 1: 入射粒子 ^{12}N の始状態と出射粒子 ^{12}C の終状態。

3 実験

実験は理化学研究所 RIBF 施設において行った. 超伝導リングサイクロトロンによって $250 \text{ MeV}/u$ に加速された 1 次ビーム ^{14}N を Be 板に照射し, 入射核破碎反応によって生成された 2 次ビーム ^{12}N を核破碎片分離装置 BigRIPS によって選び出した. 強度 $\lesssim 400 \text{ pnA}$ の 1 次ビームから, エネルギー約 $175 \text{ MeV}/u$, 強度 $\lesssim 1.8 \text{ Mcps}$, 純度 92% の 2 次ビームを得た. このビームを, 分散整合法を用いて反応標的まで輸送した. 反応標的としては, 厚さ $154 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 同位体純度 99.4% の ^{90}Zr 板を用いた. 反応を引き起こして生成された ^{12}C の運動量を SHARAQ スペクトロメーターで分析することにより, ^{90}Nb の励起エネルギースペクトルを取得した. 標的へ入射するビーム粒子の飛跡を低圧動作型多線式ドリフト検出器 (LP-MWDC) で, 焦点面での反応粒子の飛跡をカソード読み出し型ドリフト検出器 (CRDC) で測定した. NaI(Tl) 検出器アレイ DALI2 により脱励起 γ 線を測定して, 出射核 ^{12}C の状態を識別した. 標的の上下流 8 mm, 真空中に設置した 1 mm 厚の 2 枚 1 組のプラスチックシンチレーターによって入射粒子と出射粒子の識別をし, ^{12}N ビームの β 崩壊によるバックグラウンド事象を取り除いた. 図 2 に標的周辺のセットアップを示した.

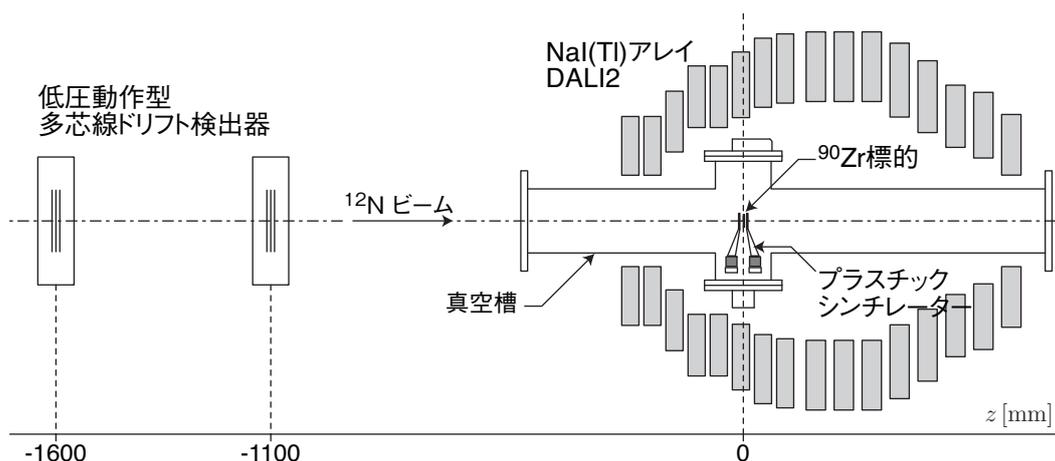


図 2: 標的周辺のセットアップ.

4 結果と考察

$^{90}\text{Zr}(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})^{12}\text{Nb}$ 反応の 2 階微分断面積を散乱角 $0\text{--}3$ 度, 励起エネルギー $0\text{--}70 \text{ MeV}$ の領域にわたって取得した (図 3).

$\Delta S = 1, \Delta T = 1$ モードのスペクトルには, GTGR のピークが励起エネルギー 10 MeV に見られた. さらに, 30 MeV 近傍に前方ピーク成分が見られた. これが IVSMR と考えられる. $\Delta S = 0, \Delta T = 1$ モードのスペクトルには, IAS のピークが励起エネルギー 5 MeV に見られた. これらの断面積の角度分布は, 各々の集団励起状態に対する歪曲波 Born 近似 (DWBA) 計算とよい一致を示した. また, IVSMR

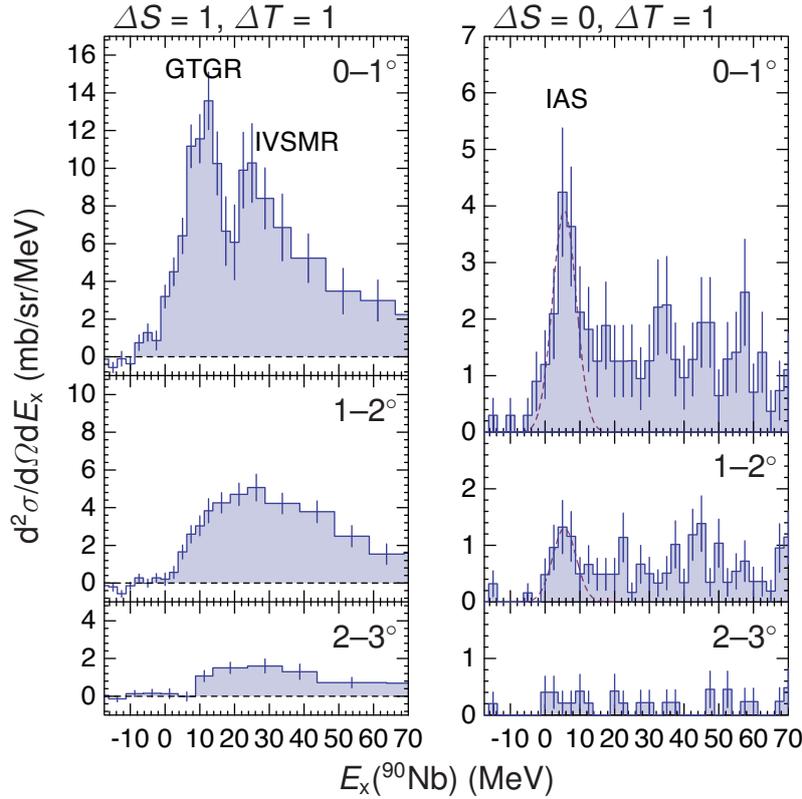


図 3: 本実験で得られた 2 階微分断面積スペクトル.

成分のスペクトル形状は、過去に行われた 795 MeV における (p, n) 反応のスペクトル, Tamm-Dancoff 近似による強度分布の理論計算に近いものであった. GTGR, IAS の断面積から, Gamow-Teller, Fermi 遷移の単位断面積, 即ち, 遷移強度当りの断面積の比を求めてみると $\hat{\sigma}_{GT}^*/\hat{\sigma}_F^* \approx 18$ となり, (p, n) 反応のそれよりも大きな値を示した. これは, この反応において Gamow-Teller 遷移が Fermi 遷移に対して強調されている, ということの意味している.

5 まとめ

本研究では, 不安定核ビームに誘起される発熱型荷電交換反応 ($^{12}\text{N}, ^{12}\text{C}$) を ^{90}Zr 標的に対して適用し, ^{90}Nb 核の spin・アイソ spin 核分光を行い, GTGR, IVSMR, IAS を観測した. Gamow-Teller, Fermi 遷移の, 遷移強度当りの断面積の比は, (p, n) 反応よりも大きな値を示した.

これまでの原子核分光において, 不安定核は専らそのものが研究の対象であった. 本研究は, 不安定核を道具として原子核の未解明の状態を研究するという新たな展開を提示するものである. この意味において, 本研究が新しい原子核分光の端緒となることが期待される.