

Title	High-resolution study of Gamow-Teller transitions in pf-shell nuclei
Author(s)	足立, 竜也
Citation	大阪大学, 2007, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/47685
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	あ だ ち た つ や 足 立 竜 也
博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)
学位記番号	第 20854 号
学位授与年月日	平成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	High-resolution study of Gamow-Teller transitions in pf-shell nuclei (pf 殻核のガモフ・テラー遷移の高分解能研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 永井 泰樹 (副査) 助教授 藤田 佳孝 教 授 下田 正 教 授 土岐 博 助教授 民井 淳

論 文 内 容 の 要 旨

ガモフ・テラー (GT) 遷移は、スピン及び荷電スピンのみを変化させる ($\Delta L=0$, $\Delta S=1$, $\Delta T=1$) 遷移で、弱い相互作用でおこる原子核反応が絡む宇宙の様々な現象の説明において鍵となる。その遷移強度 B (GT) 値を高励起状態まで測定するには、核子当りの入射エネルギー 100 MeV (100 MeV/u) 以上、散乱角度 0 度の荷電交換反応を使うことができる。散乱断面積と B (GT) 値の間に比例関係が成立するからである。ある遷移の B (GT) 値が分かれば、比例定数である単位散乱断面積が求まり、他の遷移の B (GT) 値を導出することが可能である。

詳細な B (GT) 値の測定を目標にして、140 MeV/u、0 度の (^3He , t) 実験を核物理研究センターで進めた。ビーム輸送系と磁気分析器間の分散整合の実現に成功し、エネルギー及び散乱角度の高分解能を達成している。質量数 $A=26$ 、27 の同重核間の荷電スピン対称構造を仮定し、(^3He , t) 実験で求まる散乱断面積と β 崩壊で測定される荷電類似遷移の B (GT) 値の比較により、両者間の比例性が証明された。

(^3He , t) 反応を用いて、さらに重い pf 殻核を対象にした B (GT) 値の測定を行った。超新星爆発の前段階で星の中心にある pf 殻核で構成される芯が崩壊するとき、 GT_- 遷移の β 崩壊及び GT_+ 遷移の電子捕獲反応が崩壊の速度を加速させる。爆発の模擬には、これらの反応の反応率を求めるために pf 殻核からの B (GT) 値が必要である。本論文では $T=1$ 、 $T_z=+1$ の基底状態を持つ ^{42}Ca 、 ^{46}Ti 、 ^{50}Cr 、 ^{54}Fe を標的核とし、それぞれ $T_z=0$ の娘核、 ^{42}Sc 、 ^{46}V 、 ^{50}Mn 、 ^{54}Co への GT 遷移の B (GT) 値について研究した。それぞれのスペクトルを分解能、60、33、29、21 keV で測定し、 ^{42}Sc の GT 状態は 8 MeV まで、 ^{46}V 、 ^{50}Mn 、 ^{54}Co は 12 MeV までの個々の状態、すなわち微細構造が明らかになった。

これら質量数 A の系において、 β 崩壊からは基準となる $T_z=-1 \rightarrow 0$ の荷電類似遷移の B (GT) 値が正確に測定されていない。そこで、これらの (^3He , t) 反応での GT 遷移とフェルミ遷移 ($\Delta L=0$, $\Delta S=0$, $\Delta T=1$) の単位散乱断面積の比で定義される R^2 値を用いて B (GT) 値を導出することを考えた。 β 崩壊実験により正確に B (GT) 値が知られている質量数 A の系に対し、 R^2 値を導出した所、 R^2 値は A と共に緩やかに大きくなっていくことが分かった。内挿により $A=46$ と 54 に対する R^2 値が求まり、 ^{46}Ti と ^{54}Fe 核からの遷移における B (GT) 値を導出した。 $A=42$ と 50 については、互いに荷電スピン対称な (^3He , t) と β 崩壊の測定を融合する解析を使った。 $T_z=+1$

$\rightarrow 0$ の強度が (${}^3\text{He}$, t) 実験における散乱断面積で求められ、これに荷電類似遷移の $T_z = -1 \rightarrow 0$ の β 崩壊における位相因子を掛けることにより、 β 崩壊実験で予想される相対的な強度を見積もった。その強度を β 崩壊の実験で測定された全半減期で規格化し、 ${}^{42}\text{Ca}$ と ${}^{50}\text{Cr}$ 核からの遷移における B (GT) 値を導出した。

これら 4 つの核に対する B (GT) 値を比較すると、質量数 A が増えるに従い B (GT) の強度分布が高励起状態へ移動する現象が見られた。実験値の B (GT) 強度分布を殻模型計算の B (GT) 強度分布と比較した所、実験で見られた微細構造が必ずしも再現されていない。このことから、これらの原子核の微細構造は、現在の殻模型計算で考えられているよりもはるかに複雑であること、また特に高励起状態での B (GT) 値の再現が難しいことが分かった。

GT₊ 遷移の電子捕獲反応でおこる $T_z = +2$ の原子核への遷移強度 B (GT₊) 値は、(${}^3\text{He}$, t) で観測される $T_z = 0$ の原子核の T=2 の状態への類似遷移の B (GT) 値から求められる。(${}^3\text{He}$, t) で観測される状態は T=0, 1, 2 であり、T の値の同定が必要である。同定は $T_z = +1$ の原子核を標的核にした (p, p') 実験で観測される荷電類似な T=1, 2 の M1 状態への遷移強度との比較により可能である。 $E_x = 8-12$ MeV の範囲で ${}^{54}\text{Fe}$ (${}^3\text{He}$, t) ${}^{54}\text{Co}$ と ${}^{54}\text{Fe}$ (p, p') ${}^{54}\text{Fe}$ のスペクトルを比較し、GT と M1 の類似状態の組を見つけた。これら類似状態の遷移強度を比較し、T の値を同定した。特に一部の T=2 の状態は、 ${}^{54}\text{Fe}$ (t, ${}^3\text{He}$) ${}^{54}\text{Mn}$ で T=2 と同定された 1^+ 状態とも類似な関係にあることも分かり、上記の解析の正しさが示された。

このように、今まで未知であった pf 殻核の GT 遷移強度 B (GT) 値とその強度分布に関する多くの知見が得られた。またこれらの結果は、GT 遷移が絡む宇宙現象の説明への応用にも期待がかかる。

論文審査の結果の要旨

ガモフ・テラー (GT) 遷移は、原子核のスピンのアイソスピン型の遷移であり、弱い相互作用で起こる β 崩壊や、超新星爆発時のニュートリノ励起反応において、フェルミ遷移と共に重要な役割を果たす。しかし地上で出来る弱い相互作用を直接使う精密実験は、その弱さゆえに限られる。また β 崩壊測定では、エネルギー的に許容される終状態が低エネルギー領域に制限される。それに対する突破口が、強い相互作用を使う (p, n) 荷電交換反応によって拓かれた。荷電交換反応でも、1) 散乱角度 0 度で測定する、2) 核子当たりの入射エネルギー 100 MeV 以上で反応を起こさせる、という条件下ではスピンのアイソスピン型遷移を起こす相互作用の寄与が非常に大きく、GT 遷移をいわば模擬できることがわかった。しかし γ 崩壊や β 崩壊測定に比べエネルギー分解能が低く、個別の遷移毎の強度比較は困難であった。

分解能の壁は、(${}^3\text{He}$, t) 荷電交換反応により打ち破られた。申請者は、分解能向上のための開発を行い、また分散整合技術を応用し、従来の (p, n) 反応に比べ桁高い分解能を得る事に成功した。また pf 殻核測定に当たっては、高分子 PVA を“ノリ”として使う新しい標的の製作を行った。その結果アイソスピンが 1 である ${}^{42}\text{Ca}$ 、 ${}^{46}\text{Ti}$ 、 ${}^{50}\text{Cr}$ 及び ${}^{54}\text{Fe}$ 原子核から始まる GT 遷移が、30 keV の世界最高エネルギー分解能で測定できた。

測定分解能の向上により、1) 高い励起状態、いわゆる巨大 GT 共鳴領域までの個別 GT 遷移の分布の様子が明らかになった。2) β 崩壊測定の結果との比較を通して、GT 遷移の強度を決めることが可能となった。特に GT 遷移強度の絶対値導出には、アイソスピン (荷電スピン) 対称の考えの下、荷電交換 (${}^3\text{He}$, t) 反応と β 崩壊測定の結果を融合する解析を行い、従来に比べより精度の高い遷移強度が、10 MeV を超える高励起状態まで得られた。また得られた強度分布を殻模型による理論計算とも比較し、高励起状態での分布の食い違いを指摘した。さらに 3) 陽子非弾性散乱実験との比較により、GT 状態のアイソスピン値の同定を行った。それぞれのアイソスピンを持つ GT 状態への遷移強度の分布は、超新星爆発における理論計算において、重要な情報となる。

このように原子核物理の面だけでなく、宇宙物理の観点からも重要な結果が得られた。以上により、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分に価値のあるものと認める。