

論文内容の要旨

論文題目

Study of intermediate states of the two neutrino double beta decay *via* the (p, n) and (n, p) reactions at 300 MeV

(300 MeVにおける (p, n) 、 (n, p) 反応を用いた2ニュートリノ2重ベータ崩壊の中間状態の研究)

氏名 笹野 匡紀

2重ベータ ($\beta\beta$) 崩壊は今まで観測された中でもっとも希少な現象の一つである。この崩壊は、弱い相互作用の二次の過程であり、親核 (A, Z) と娘核 ($A, Z+2$) の間の核 ($A, Z+1$) (中間核) の質量が親核より重く、親核から中間核へのベータ崩壊が禁止される時におこる。この崩壊には二つのモードが考えられる。一つは2個のニュートリノを伴うモード、2ニュートリノ2重ベータ ($2\nu\beta\beta$) 崩壊で、もう一つはニュートリノを伴わないモード、ニュートリノレス2重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊である。後者のモードはレプトン数の保存を破ることから標準理論を検証する目的で探索がなされているが、いまだ明確な証拠が確認されていない。一方で前者のモードは10個ほどの核種に対してすでに半減期が測定されており、もつ

とも短い半減期は 10^{19} 年のオーダーである。

$2\nu\beta\beta$ 崩壊は原子核を媒体としておこるため、その寿命は核構造に強く依存する。半減期 $T_{1/2}^{2\nu}$ は、核構造の情報を含む量である核行列 $M^{2\nu}$ と、関係式

$$\left[T_{1/2}^{2\nu}\right]^{-1} = G^{2\nu} \left|M^{2\nu}\right|^2 \quad (1)$$

でつながっている。ここで $G^{2\nu}$ は位相空間と弱い相互作用の強さに依存する項で、正確に計算が可能である。測定された半減期を説明するために、殻模型や準粒子乱雑位相近似 (QRPA) などを用いた核行列の計算がなされてきた。しかし、測定された半減期の精度は、10–30%程度に達しているのと対照的に、計算された崩壊寿命は、計算により2桁から5桁程度異なる状況で、モデルの不定性が大きい。

$\beta\beta$ 崩壊は原子核の中で、親核 (A, Z) の基底状態と娘核 ($A, Z+2$) の基底状態との間におこる中間核 ($A, Z+1$) の状態 (中間状態) を経由する2回の連続するベータ崩壊と考えられる。したがって、中間状態を理解することでより詳細にこの崩壊の原子核側の情報をおさえることができる。

中間状態は親核もしくは娘核とガモフテラー (GT) 遷移でつながっていると考えることができる。ここで GT 遷移は、励起演算子は σt_{\pm} の遷移で、角運動量移行量 $\Delta L = 0$ 、スピン移行量 $\Delta S = 0$ 、アイソスピン移行量 $\Delta T = 0$ 、で特徴づけられる。ここで、 σ はパウリのスピン行列で、 t_{\pm} はアイソスピンの昇降演算子である。したがって、核行列を理解する上で、親核の基底状態から中間状態、また、娘核の基底状態から中間状態への GT 遷移強度 $B(\text{GT})$ が重要な観測量である。

この研究の目的は、入射エネルギー 300 MeV における (p, n) 、 (n, p) 反応をプローブに用いて、もっとも代表的な $\beta\beta$ 崩壊核種の一つである ^{116}Cd において、親核 ^{116}Cd および娘核 ^{116}Sn の基底状態から、中間核 ^{116}In への $B(\text{GT})$ 分布を高い励起エネルギーまで導出することである。本研究の特長は、幅広い励起エネルギー領域 (50 MeV 程度まで) で $B(\text{GT})$ 分布を導出する方法が確立された唯一のプローブである 300 MeV における (p, n) 、 (n, p) 反応を用いることにある。

実験は大阪大学核物理研究センターでなされた。ビームの入射エネルギーは 300 MeV であった。 (p, n) 反応測定は、中性子飛行時間測定施設 (NTOF) と中性子検出器 NPOL3 を用いて行われ、 $^{116}\text{Cd}(p, n)^{116}\text{In}$ 反応の二階微分散乱断面積を、散乱角度 $0^{\circ} - 14^{\circ}$ の間で得た。NPOL3 は高時間分解能 230 ps を有す。到達したエネルギー分解能は 450 keV で、この入射エネルギーで世界最高水準である。 (n, p) 反応測定は、 (n, p) 測定施設を用いて行われ、 $^{116}\text{Sn}(n, p)^{116}\text{In}$ 反応の二階微分散乱断面積を $0^{\circ} - 12^{\circ}$ の間で得た。この施設では、 $^7\text{Li}(p, n)$ 反応により生成される、ほぼ単色エネルギーの中性子ビームを用いることができる。

得られた二階微分散乱断面積から、多重極展開法を用いて、GT遷移の成分を導出した。この手法では、断面積の角度分布の形の ΔL 依存性に基づき、 $\Delta L = 0$ (GT遷移)の成分を $\Delta L \geq 1$ の成分より分離する。図1は多重極展開の結果を示す。分離された $\Delta L = 0, 1, 2, 3$ の成分が、それぞれ赤、緑、青、黄色の領域で示されている。鉛直の波線は、多重局展開法の適応限界を示しており、 $\Delta L = 0$ の角度分布と $\Delta L \geq 1$ を詳細に比較し設定した。 (p, n) 、 (n, p) スペクトルでそれぞれ50 MeV、30 MeVである。

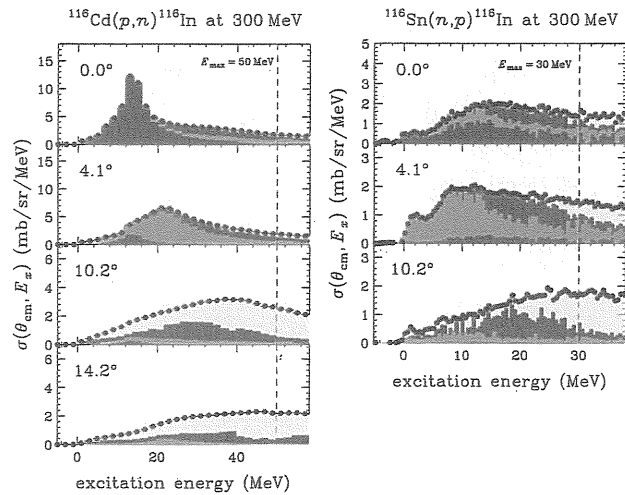


図1: $^{116}\text{Cd}(p, n)$ 反応スペクトル (左) および $^{116}\text{Sn}(n, p)$ 反応スペクトル (右) の多重極展開の結果。分離された $\Delta L = 0, 1, 2, 3$ の成分が、それぞれ赤、緑、青、黄色の領域で示されている。各ウィンドウ中の数字は散乱角度を示す。

GT遷移強度分布は、 $GT(\Delta L = 0)$ 成分の断面積と $B(GT)$ との間の比例式

$$\sigma(q, \omega) = \hat{\sigma}_{GT} F(q, \omega) B(GT) \quad (2)$$

を用いて導出された。ここで、 $F(q, \omega)$ は運動学的補正項で歪曲波衝撃近似により導出された。また、 $\hat{\sigma}_{GT}$ はGT単位断面積とよばれる量で $B(GT)$ の規格化定数であり、Sasano *et al.*による近傍核種の実験値を質量数に関し内挿し得た。

図2に、導出された遷移強度分布を、Álvarez-Rodríguez *et al.*による準粒子乱雑位相近似(QRPA)を用いた理論予測と共に示した。ここで、実験結果のGT+遷移強度分布からは18 MeVを中心として存在が予測されているアイソベクタ・スピン・モノポール(IVSM)の寄与がひかれている。ここで、IVSMの強度はノーマル・モードに基づき計算され、分布は半値全幅10 MeVのガウシアンを仮定した。

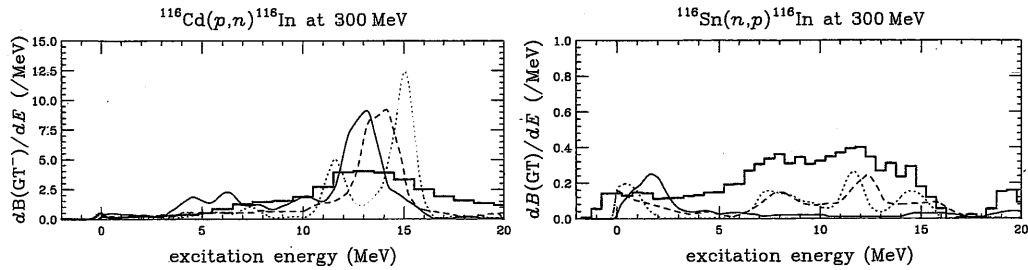


図 2: ^{116}In 中の励起エネルギーの関数としての $^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{In}$ の GT^- 遷移 (左) 及び $^{116}\text{Sn} \rightarrow ^{116}\text{In}$ の GT^+ 遷移 (右) の強度分布 (実線のヒストグラム)。曲線は *Álvarez-Rodríguez et al.* による理論予測を示す。

予測された GT 遷移強度分布は実験結果を再現しないことがわかった。特に、巨大共鳴領域に対応する 5-15 MeV の励起エネルギーにおいて、予測された GT^+ 遷移強度は、実験的に発見された遷移強度を半分程度しか説明しない。このことは、理論予測が巨大共鳴領域を経由する遷移の寄与を核行列を過少評価していることを示唆する。

原理的には $2\nu\beta\beta$ 崩壊の核行列は、中間状態ごとの寄与を始状態と中間状態、中間状態と終状態の GT 遷移行列から導出し、それらの和をとることで導出が可能である。実際には、中間状態ごとの寄与を位相も含めて実験によって導出することができない。このため、本研究で得られた GT 遷移強度の各励起エネルギービン毎の遷移強度の平方根を GT 遷移行列のかわりに用いることで実験的な核行列を導出した。全ての中間状態の寄与をたすことで 0.32 ± 0.05 という値が得られた。この値は崩壊寿命測定によって得られた値 0.064 ± 0.007 より 5 倍おおいもので、この食い違いは中間状態毎の寄与の位相の違いによる打ち消しを無視したことによる。5-20 MeV の巨大共鳴領域のみの寄与は、 0.202 ± 0.005 で全体の 60% 程度をしめることが判った。このことは、巨大共鳴領域を経由する遷移が $2\nu\beta\beta$ 崩壊の核行列に大きく寄与することを示唆している。