

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740123
 研究課題名 (和文) カルシウム 48 の二重ベータ崩壊過程

研究課題名 (英文) Double beta decay process of Calcium 48

研究代表者
 矢向 謙太郎 (YAKO KENTARO)
 東京大学・大学院理学系研究科・助教
 研究者番号：50361572

研究成果の概要：二重ベータ崩壊核カルシウム 48 の 2 ニュートリノ二重ベータ崩壊過程の理解を目的に、その核遷移行列を決めているガモフ・テラー遷移強度分布を測定した。娘核チタン 48 から中間核スカンジウム 48 へのガモフ・テラー遷移強度は、従来の殻模型計算の予言と比べ、より高い励起領域にまで分散・分岐している、という結果を得た。このことは、現在の殻模型では二重ベータ崩壊過程の核行列を十分に理解できないことを示している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	500,000	0	500,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,000,000	150,000	1,150,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：二重ベータ崩壊、荷電交換反応、中性子ビーム、多重極展開、ガモフ・テラー遷移

1. 研究開始当初の背景

(1) 2 ニュートリノ二重ベータ (2β) 崩壊は自然界で確認されている現象のうち最も稀なものである点で興味深い。図 1 に示すように、 2β 崩壊は、一次のベータ崩壊がエネルギー的に禁止された偶々核が 2 個のニュートリノと 2 個の電子を放出して、電荷数が 2 だけ異なる娘核へと崩壊する現象である。この遷移は弱い相互作用による二次の遷移と位置づけられ、その遷移確率は、弱相互作用の結合定数、位相空間係数、原子核側の遷

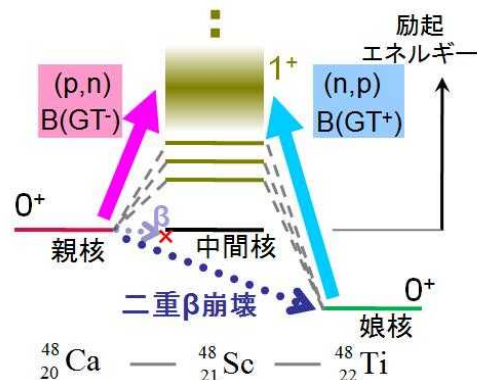


図 1 : ^{48}Ca の二重ベータ崩壊概略。

移行列(核行列)で決まる。そのうち、核行列は親核と中間核の間のカモフ・テラー(GT)型の遷移行列、娘核と中間核との間のGT型遷移行列から導出できる。ここで、GT型は、原子核の波動関数の空間成分が変化せず、(角運動量移行 $L=0$)、スピン・アイソスピン空間成分が反転($S=T=1$)する励起モードである。

2 2 崩壊核のうち、最も質量数が小さい ^{48}Ca は中間核 ^{48}Sc を経て娘核 ^{48}Ti に崩壊するが、核構造に不定性が少ないため、最もよく研究されてきた。しかしながら、その寿命は原子核の波動関数の細部に敏感で、理論的にはよく理解されていない。そこで、次項に例をあげるように、(p,n)、(n,p)反応といった荷電交換反応を用いてGT型遷移を実験的に調べ、理論計算に拘束条件を与えるという研究が試みられてきた。本研究では、娘核 ^{48}Ti を標的とした(n,p)型反応に注目する。

(2) 1990年、2 2 過程の実験的理解を目的に、カナダTRIUMF研究所で $^{48}\text{Ti}(n,p)$ 測定が試みられたが、標的が ^{48}Ti 酸化物であったため、酸素の影響が現れる励起エネルギー6 MeV以上の連続状態については詳細な議論ができなかった。

2004年、オランダKVI研究所にて高分解能 $^{48}\text{Ti}(d,^2\text{He})$ 測定が行われ、高エネルギー分解能スペクトルからGT遷移の終状態エネルギーが数十keVの精度で決定された。低励起エネルギー領域の遷移行列について理解が進み、娘核の低励起状態の寄与が大きいことが提唱されている。また、2008年には、大阪大学核物理研究センターで高分解能 $^{48}\text{Ca}(^3\text{He},t)$ 測定の結果が出版された。しかしながら、(p,n)測定結果との比較から、($^3\text{He},t$)測定で得られた遷移強度は数十%の不定性をもつ可能性が指摘されていること、($^3\text{He},t$)、($d,^2\text{He}$)反応においてはテンソル相互作用の影響が強いことから、高信頼度のGT遷移強度分布を導出することが困難であることが示唆されている。

(3) 2 2 崩壊と類似した現象に、標準理論を破る0 2 崩壊があり、探索実験が世界各地で行われている。この現象が発見されると、ニュートリノがマヨラナ粒子であることがわかり、その質量が0 2 崩壊寿命データから求められる。寿命を質量に換算する際に、核行列が必要である。0 2 崩壊の核行列は実験では決められないため、理論計算に頼らざるを得ないが、その理論計算を検証・校正するためにも2 2 崩壊の核行列を理解することが重要である。

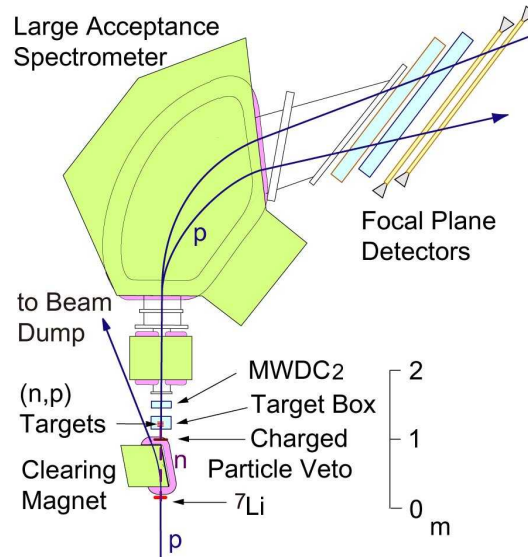


図2 : (n,p)実験施設。

2. 研究の目的

本研究では、300 MeVにて $^{48}\text{Ti}(n,p)$ 反応の高精度測定を行う。既に取得済みの $^{48}\text{Ca}(p,n)$ 反応データとともに断面積の角度分布を用いて多重極展開を行い、GT遷移強度を励起エネルギー0 - 30 MeVの領域に渡って求める。両測定から得たGT遷移強度をあわせて考察することにより ^{48}Ca 核の2 2崩壊過程の遷移行列要素を見積もる。

3. 研究の方法

(1) 阪大RCNPにおいて、 $^{48}\text{Ti}(n,p)$ 測定を行った。(n,p)実験施設では、300 MeVにおける $^7\text{Li}(p,n)$ 反応を用いてほぼ単色な中性子ビームを生成する。中性子ビームは収束できず、(n,p)散乱標的上で広がりをもつため、反応点の特定が必要である。そのため、(n,p)標的は(n,p)標的箱内の多芯線比例計数管(MWDC)チェンバーガス($\text{Ar}+\text{CO}_2$, 1気圧)中に、MWDCの2面に挟まれる形で設置した。(n,p)実験施設の概略を図1に示す。

(2) 中性子ビームは2次ビームであるため、(n,p)測定には、1次ビームを用いた測定と比べて多くの標的物質が必要である。測定に必要な ^{48}Ti 単体の量は5g程度であるが、そのような標的を所持している研究所は存在しない。このため、過去の(n,p)測定では、酸化チタンが用いられ、酸素起源のバックグラウンドイベントの影響が大きかった。そこで、本研究では、既に所持していた酸化物

$^{48}\text{TiO}_2$ 粉末を還元した。還元により得られた粉末 ^{48}Ti を常温で加圧し、標的を作成した。

(3) 断面積の多重極展開の手法を用いて $^{48}\text{Ti}(n,p)$, $^{48}\text{Ca}(p,n)$ 両スペクトルの解析を行った。歪曲波インパルス近似(DWIA)の計算によると、微分散乱断面積は角運動量移行 L に特徴的な角度分布をもつ。この性質を利用して、実験で得た微分散乱断面積を種々の L を持つ成分の一次結合に分解するのが多重極展開である。散乱角 0° おける GT 型遷移断面積を求め、われわれがすでに質量数依存性を得た GT 単位断面積を用いて GT 遷移強度を求めた。

4. 研究成果

(1) 5 g 相当の酸化チタン($^{48}\text{TiO}_2$)を熱カルシウム還元法により、70%の歩留まりで金属チタンに還元することに成功した。これを加圧することで純度 98%、厚さ 0.4 mm のチタン 48 標的を 3 枚作成することに成功した。標的の写真を図 2 に示す。大きさは $2 \times 3 \text{ cm}^2$ である。

還元手法の開発は、東京大学生産技術研究所の岡部教授の協力による。

(2) $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 反応スペクトルを励起エネルギー 30 MeV にまで渡って取得した。統計精度は 2-MeV ビンあたり 2%、散乱角度範囲は $0^\circ - 12^\circ$ と多重極展開を行うのに十分なデータであった。

(3) 断面積データを多重極展開の手法で解析し、励起エネルギー 30 MeV までに、GT 遷移強度 2.8 ± 0.3 を見出した。また、低励起状態に限れば、先行($d, ^3\text{He}$)の結果と一致することを確認した。図 4 に $B(\text{GT})$ スペクトルを示す。上側パネルは今回得たデータ、下側パネルは $^{48}\text{Ca}(p,n)$ 反応データを多重極展開し

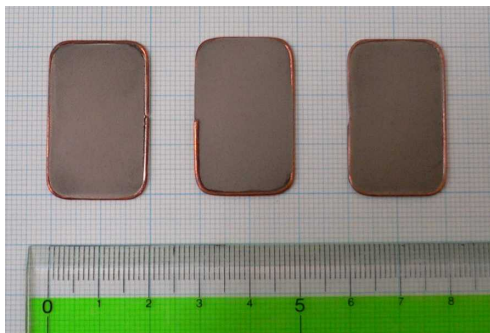


図 3 : チタン 48 標的。

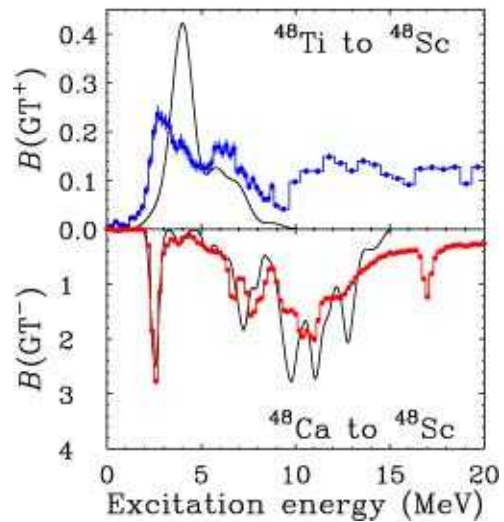


図 4 : GT 遷移強度分布。上側パネルが今回の $^{48}\text{Ti}(n,p)$ 測定から得られたもの、下側パネルは $^{48}\text{Ca}(p,n)$ 測定から得られたものである。実線は Horoi らによる殻模型計算の予言[Horoi et al., Physical Review C75, 034303 (2007)]である。

て得たスペクトルである。

(4) 図 4 実線は Horoi らによる殻模型計算の予言である。ここでは、模型空間を pf 殻に限定し、核内有効相互作用 GXPFI1A を用いている。また、模型空間外の寄与で遷移強度が分散・分岐する効果を取り入れるため、予言値には、抑制係数 0.6 が掛けている。この比較から、 $B(\text{GT}^-)$ 側については、殻模型が実験値を励起エネルギー 15 MeV の巨大共鳴領域までよく再現するのに対し、 $B(\text{GT}^+)$ については、8 MeV までしか説明しない、ということが明らかになった。高励起状態の寄与も含めて核行列への寄与を見積もると、最大で殻模型の予言の 2 倍相当になり、高励起状態が核行列に有意に寄与する可能性が示された。

現在の殻模型計算では有効相互作用を置き換えても高励起状態に遷移強度を作ることができず、従って GT 遷移を完全には記述できない。以上から、 ^{48}Ca 核の二重ベータ崩壊を殻模型から正しく理解するには模型空間として pf 殻のみでなく、さらに高励起の殻に起因する配位も考慮に入れる必要があることが示された。

これらの結果をまとめた論文を Physical Review Letters 誌に投稿した。

(5) 本研究を通じて、(n,p) 実験施設の整備が完了した。これを論文にまとめた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

K. Yako, H. Sakai, M.B. Greenfield, K. Hatanaka, M. Hatano, J. Kamiya, Y. Maeda, K. Nagayama, H. Okamura, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, K. Suda, A. Tamii, and T. Wakasa, "RCNP (n,p) facility", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 592, 88 - 99 (2008), 査読あり

[学会発表](計7件)

矢向謙太郎、「(p,n)/(n,p)反応による2重ベータ崩壊の核行列要素」日本物理学会2008年秋季大会、9月22日、山形大学

K. Yako, "Study of nuclear matrix elements of two-neutrino double beta-decay by (p,n) and (n,p) reactions", ICHO-EFES international symposium on new facet of spin-isospin responses, October 30, 2008, Nishina Center, RIKEN

K. Yako, "Intermediate states of double beta decay nuclei studied by (p,n) and (n,p) reactions", Japan-German workshop on nuclear structure and astrophysics, October 1, 2007, Chiemsee, Germany

K. Yako, "Study of the 2-neutrino double-beta-decay process of ^{48}Ca and ^{116}Cd by (p,n) (n,p) reactions", Annual meeting of European network of theoretical astroparticle physics on physics of massive neutrinos, 2008, May 22, Milos Island, Greece

三木謙二郎、酒井英行、笹野匡紀、野地俊平、矢向謙太郎、「 $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 反応による ^{48}Ca 二重崩壊過程の研究」、日本物理学会第63回年回2008年3月30日、近畿大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢向 謙太郎 (YAKO KENTARO)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号:50361572

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし