

Title	Study of Beta Decay of ^{48}Ca
Author(s)	王, 偉
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/72174
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (Wei WANG)

論文題名

Study of Beta Decay of ^{48}Ca (^{48}Ca のベータ崩壊の研究)

論文内容の要旨

It is well known that lepton number non-conservation can be verified in neutrino-less double decay ($0\nu\beta\beta$). CANDLES (CALcium fluoride for studies of Neutrino and Dark matters by Low Energy Spectrometer) collaborators are carrying out an experiment to search for the $0\nu\beta\beta$ of ^{48}Ca (Q value of 4.27MeV) by CaF_2 scintillating crystals. Two-neutrino double beta decay ($2\nu\beta\beta$), however, is the intrinsic background for $0\nu\beta\beta$ research. Thus we also need to know $2\nu\beta\beta$ lifetime to estimate the background contribution to $0\nu\beta\beta$.

It is even special for ^{48}Ca that it also has β decay which is energetically forbidden for most of other double beta nucleus. For CANDLES, the β decay could give substantial contribution to $2\nu\beta\beta$ spectrum since it uses $(10\text{cm})^3$ CaF_2 crystals. Therefore, precise studies about lifetime of the β decay are necessary.

However, it is almost impossible to direct measure the β decay of ^{48}Ca because of the extremely low Q value (278keV). Thus the principle of this experiment was based on coincidence measurement of 3 gamma rays from concentrated ^{48}Sc that is the β decay product of ^{48}Ca with half-life time 43.7 hours. We used 30 CsI(Tl) scintillators to cover (4π solid angle) the sample space with 13^3 cm^3 . In order to increase the amount of ^{48}Ca , we enriched the ^{48}Sc from CaCl_2 solution using the chelate resin called NOBIAS-CHELATE-PA1 that could capture the Sc ion with efficiency over 94%. We made 634.7L CaCl_2 solution with 255.1Kg CaCl_2 powder (^{48}Ca natural abundance). The CaCl_2 solution passed through 138.5g chelate resin with circulation rate of 2.0L/min. The total detection efficiency for this experiment was 8.4% for triple coincidence measurement.

We measured the concentrated ^{48}Sc sample for live-time of 70.7 days. The half-life time of β decay of ^{48}Ca we got was $T_{1/2(\beta)} = (2.2 \pm 1.6_{\text{[statistic]}} \pm 0.2_{\text{[systematics]}}) \times 10^{21}$ y with 95% C. L. The half-life time we measured is the longest for all known β -transition. Corresponding to the new measured half lifetime is the $\log ft = 26.7(5)$ which is greater than that for any observed β decay.

For CANDLES experiment, the background contribution from β decay for $2\nu\beta\beta$ above 3MeV spectrum is less than 1.9(8)% and has no contribution for $0\nu\beta\beta$ research.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (Wei WANG)	
論文審査担当者	(職) 氏 名
	主 査 教授 能町 正治
	副 査 教授 久野 良孝
	副 査 教授 保坂 淳
	副 査 特任教授 岸本 忠史
	副 査 准教授 嶋 達志
	副 査 准教授 吉田 齊
副 査 助教 飯田 崇史 (筑波大学)	

論文審査の結果の要旨

近年のニュートリノ研究から、ニュートリノの素粒子の性質が解明されつつあるが、質量の絶対値やその起源、およびニュートリノだけがなぜ微小な質量を持つのかなど未解明な基本的性質が多く残されている。ニュートリノレス二重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊探索は、それらの謎に迫ることができ、ニュートリノの基本性質を解明するうえで極めて重要な研究と位置づけられている。

一般的に、二重ベータ ($\beta\beta$) 崩壊をする原子核は、 β 崩壊がエネルギー的に禁止されているため $\beta\beta$ 崩壊をする。が、 ^{48}Ca はスピン遷移則により β 崩壊が強く抑制されているため $\beta\beta$ 崩壊が起こる。理論的には、半減期 $T_{1/2}(\beta)=1.1\pm 0.8\times 10^{21}$ 年が予測されており、ニュートリノを放出する二重ベータ ($2\nu\beta\beta$) 崩壊の崩壊率 (半減期 $T_{1/2}(\beta\beta)=4.2^{+3.3}_{-1.3}\times 10^{19}$ 年) と競合する。実験的には、 1.1×10^{20} 年が下限値として与えられている。 ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を探索する CANDLES 実験計画では、Q 値付近の $2\nu\beta\beta$ 崩壊事象のしみ込みによるバックグラウンド(BG)量を評価するため、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期を精密に測定する必要がある。一般的には 3.0 MeV 以下は環境放射線 (U 系列核 ^{214}Bi 崩壊など) があるため、3 MeV 付近から Q 値の間でのスペクトルから $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期を評価する必要がある。 ^{48}Sc の β 崩壊が Q 値 (4.0 MeV) が大きいので、CANDLES 実験で使用する結晶では、3 MeV から 4.3 MeV の領域に β 崩壊による事象が現れる。 ^{48}Ca の β 崩壊の半減期を理論予測の 10^{21} 年の感度で測定し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊観測の正しいバックグラウンド評価に繋げることを本研究の目的としている。

^{48}Ca の β 崩壊の崩壊率を、 $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Sc} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ の放射平衡を利用して、 ^{48}Sc の β 崩壊 (半減期 44 時間) によって放出される 3 本の γ 線 (1038 keV, 1312 keV, 979 keV) の同時計測を、30 本の CsI(Tl) 検出器を用いて実現する。半減期を 10^{21} 年以上の感度で測定するためには、100g 程度の ^{48}Ca を必要とする。しかしこの量の濃縮 ^{48}Ca は世界中のどこにも存在しないため、数 10kg を超える天然 Ca 原料が必要となる。これだけの測定試料から放出される γ 線を高効率で測定するためには、巨大な γ 線検出器が必要であり、BG も増加する。この問題を克服するため、 ^{48}Ca の娘核 ^{48}Sc を Ca 原料の中からキレート樹脂 (Ca^{2+} はほぼ吸着せず、 Sc^{3+} に吸着力が強い NOBIAS-CHELATE-PA1) を用いて分離抽出し、濃縮することで測定感度を飛躍的に改善するという画期的な方法を利用している。

測定装置は、Ca 原料液タンク (634L, 255 kg の CaCl_2 が溶解)、CsI(Tl) 検出器 30 本、キレート樹脂 (139g) を封入したカラム、Ca 原料液を循環するためのポンプからなる。Ca 原料液は、原料タンク \rightarrow ポンプ \rightarrow カラム \rightarrow タンクと循環するが、 ^{48}Ca の β 崩壊によって生じた ^{48}Sc イオンはカラムでキレート樹脂に吸着され蓄積される。 ^{48}Sc が崩壊し発生する 3 本の γ 線を CsI 検出器で同時計測することで、放射平衡から ^{48}Ca の β 崩壊の崩壊率が測定できるシステムを構築し、70.7 日間の測定を行った。また、Ca 原料液を循環していない状態での BG 測定も 69.8 日間の測定を行い、結果として β 崩壊事象を有意に 11 事象確認した。測定された β 崩壊の半減期は $T_{1/2}(\beta)=2.2\pm 0.8(\text{stat.})\pm 0.1(\text{sys.})\times 10^{21}$ 年となり、世界で初めて有限の値を測定することに成功した。得られた半減期から予測される ^{48}Ca の $2\nu\beta\beta$ 崩壊率評価への影響は、解析エネルギー領域の事象数にして $3\pm 2\%$ であることを示した。

この結果は ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を研究する上で大きな一歩と言え、これまでに測定された β 崩壊の半減期として世界最長の有限値を得た。本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。