

令和 7 年度 (2025) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：ジルコニウム 96 を用いた 2 つのニュートリノを放出する二重ベータ崩壊事象の観測

英文：Observation of two neutrino emission double beta decay using Zirconium-96 nuclei

研究代表者 宮城教育大学・教授・福田 善之

参加研究者 東京大学 宇宙線研究所・教授・森山 茂栄

研究成果概要

ニュートリノ質量階層が逆階層の場合、ニュートリノの有効質量の下限値0.01eVまで感度を持つためには、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)の半減期は 10^{27} 年以上の半減期を観測しなければいけない。応募者は、逆階層解が予言するニュートリノ質量の最下点である0.01eVまで探索するため、 $0\nu\beta\beta$ のQ値が3.35 MeVと標的原子核の中では3番目に高い ^{96}Zr 900kgを液体シンチレータに溶解させるZICOS実験を計画している

本研究は $0\nu\beta\beta$ の観測を目指すZICOS実験の実証実験として、直径16cmの高純度石英ガラスGE214を用いた特注丸底フラスコの周囲に、XMASSで使用した浜松ホトニクス社の低放射性光電子増倍管R10789 20本を配置した2v-ZICOS検出器を用いて、神岡地下観測施設に設置する鉛遮蔽体による低放射線環境下で検出するU/Th由来背景事象をチェレンコフ光の平均角により効率的に除去し、 ^{96}Zr のニュートリノを放出する二重ベータ崩壊($2\nu\beta\beta$)事象を観測して、半減期を求めることを目的としている。フラスコ内にはETFEフィルム製の1辺が9cmの正方形バッグを格納し、バック内には約720mLのZICOS用液体シンチレータ(LS)を充填するとともに、バッグ外にはLSの溶媒であるアニソールを充填した。

2025年度は、神岡地下観測施設内のLAB-Aに簡易クリーンブースに設置し、クリーンルーム内に厚さが15cmの鉛と厚さ3mmの高純度アルミニウムA1050からなる遮蔽体を構築し(図2参照)、この遮蔽体内に2v-ZICOS検出器を設置し、11月22日から26日の期間で観測を実施した。まず、鉛遮蔽体の前面を取り外した状態で環境のガンマ線を観測したとこと、図3の赤線のようなエネルギースペクトルを観測し、明確に

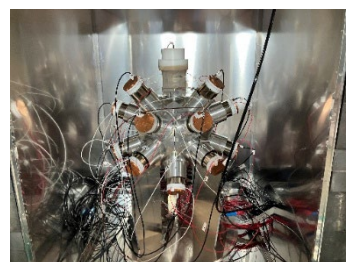


図 1 2v-ZICOS 検出器



図 2 簡易クリーンブース内に設置した鉛遮蔽体

^{40}K と ^{208}Tl からのガンマ線を確認されたが、地上で観測した量に比べ100倍程度多いことがわかった。次に、鉛遮蔽体で完全に覆い、50時間の観測を行った結果、 $2\nu\beta\beta$ が観測されると期待される事象数(10^{-7} events/sec/50keV)の 10^4 倍以上多い背景事象を観測した(図3参照)。観測された背景事象について事象の時間差を調べたところ、1ミリ秒以内に ^{214}Po の半減期である $1.643\mu\text{s}$ と一致する ^{214}Bi - ^{214}Po の連続崩壊が観測された(図4参照)。これらの事象のエネルギースペクトルは、500keV付近に観測されているピーク事象が ^{214}Po の崩壊アルファ線と考えられ、1MeV以上のエネルギースペクトルは ^{214}Bi のシミュレーションと一致していた。また、事象数は $2\nu\beta\beta$ 事象の期待値の 10^3 倍程度であった(図5参照)。

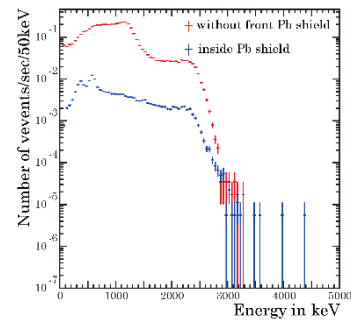


図 3 観測した背景事象のエネルギースペクトル

これらの事象の発生頻度は、観測開始から一定の割合で減少しており、4mBq相当がLS中に存在する ^{226}Ra 起源と仮定すると、それらの減少の割合は ^{222}Rn の半減期3.82日と一致することがわかった。このことから、約半数の ^{214}Bi - ^{214}Po 事象は簡易クリーンブース内で検出器内にLSを注入する際に ^{222}Rn が混入したと考えられる。一方、4mBqに相当する ^{226}Ra はLS中のU/Th量をGe検出器で計測した結果と一致しており、またエネルギースペクトルはシミュレーションと一致していた。また、4MeV以上の事象が観測されるはずのTh系列の ^{208}Tl の β 崩壊の事象は、今回の観測では明確に観測されず、Ge検出器の測定でも上限値の結果とも一致していた。更に、GE214の石英ガラス中の含まれるU/Thから予測されるガンマ線をシミュレーションしたところ、 $2\nu\beta\beta$ の期待値の 10^3 倍程度であることもわかった。

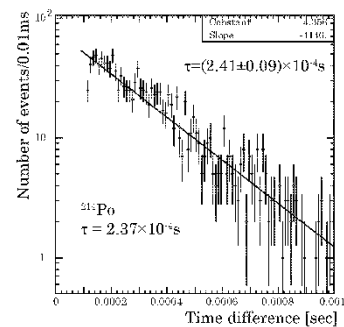


図 4 時間差が1ミリ秒以上の時間差分布

今回の観測結果から、 ^{96}Zr の $2\nu\beta\beta$ 事象を観測するためには、U/Th量が1ppb以下の超高純度石英ガラスを用いたフラスコの製作と、LSの溶媒であるアニソールの蒸留ならびにテトラキス(アセト酢酸イソプロピル)ジルコニウム($\text{Zr}(\text{iPrac})_4$)の合成時にU/Thが混入しないための手法や低放射能の器具の使用、および光電子増倍管R10789を設置する治具をアルミ材から無酸素銅に交換する必要がある。特に、神岡地下観測施設内で観測した環境のガンマ線量が地上の100倍程度多いことから、鉛遮蔽体の厚さは15cmでは不足することがわかったため、更に5cmの厚みを加える計画である。

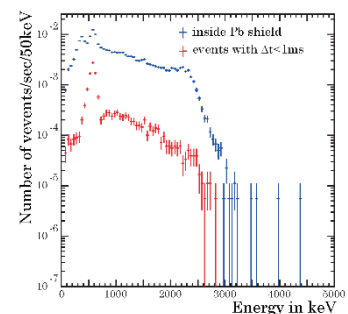


図 5 時間差が1ミリ秒以上のエネルギースペクトル