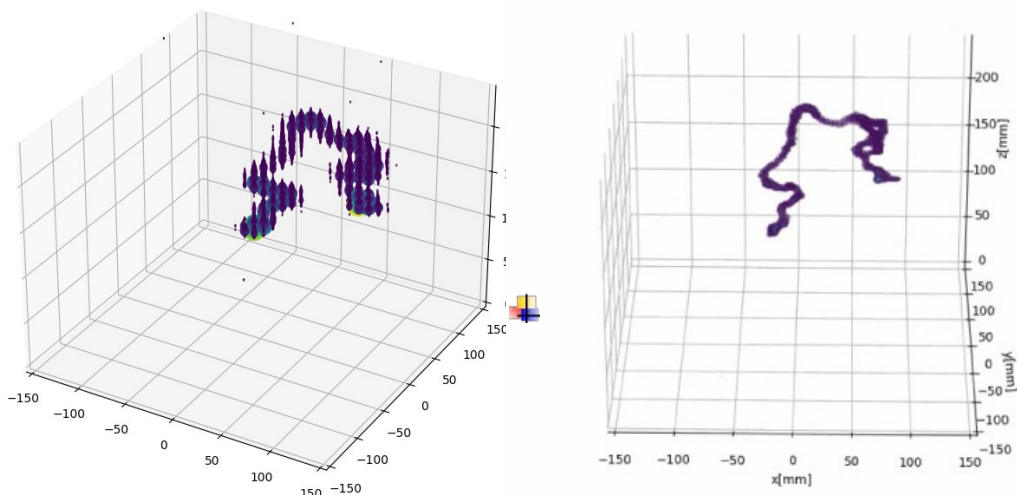


令和 6 年度（2024） 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：高圧キセノンガス検出器を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊探索 英文：Search of neutrinoless double beta decay with high-pressure Xenon gas detector	
研究代表者 市川温子（東北大学） 参加研究者 東北大学：中村輝石、秋山晋一、浦野壮規、KEK：坂下健、京都大学：中家剛、菅島 文悟、木河達也、疋田純也、広瀬昌憲、神戸大学：身内賢太郎、東京大学：関谷洋之、池田一得、吉田将、中島康博	
研究成果概要 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)探索に向けて、高圧キセノンガスを用いた Time Projection Chamber(TPC)検出器 AXEL を開発している。電離電子の検出に Electroluminescence 光を用いる ELCC という独自に開発した機構を採用し、高いエネルギー分解能を達成している。 神岡宇宙素粒子研究施設で建設中の 1000L 検出器の製作に向けて構成要素の開発を進めている。ドリフト電場生成のための高電圧をチェンバー内で発生させるために開発したコッククロフトワオルトン(CW)回路について、大気中ではあるが目標電圧 76kV を生成することに成功した。また、CW 回路への AC 入力電圧が電離電子読み出しに悪影響を及ぼさないことを確認するため、京都大学にある 180L 検出器のチェンバー内に導入し、約 40 日間にわたり安定にデータを取得した。その結果、CW 回路による悪影響は観測されず、高い性能を保っていることを確認した。TPC としてチェンバー内で高電圧を発生させて運用に成功したのは世界初であり、結果を論文[1]で公表した。集積度を上げて 64 チャンネルにした読み出し回路についてファームウェアの開発が進んでおり、ADC の動作確認を行った。AXEL 検出器では、TPC に必要とされるイベント発生時間の決定	
	
図 1 再構成された飛跡。エネルギーは 2.6 MeV。左図は、電離電子の検出位置、時間からそのまま再構成したもの。右図は、さらにドリフト中の拡散を考慮して逆畳み込みしたもの。	

のためシンチレーション光を検出している。真空紫外光であるキセノンのシンチレーション光を、安価に高い効率で検出するためにアクリルの板に波長変換剤をコートし、裏面に取り付けた MPPC で検出する方式の開発を進めている。アルファ線を用いた表かでは期待通りの性能が得られた。

解析においては、エネルギー分解能を原理的限界(半値全幅 0.29%@1.8MeV)よりも悪化させる主要因である EL 増幅率の較正方法を改良し、その寄与を 0.39%から 0.12%へと低減した。また、飛跡の再構成において、電離電子のドリフト中の拡散を考慮してリチャードソン・ルーシー法により逆畳み込みを行うことで、シャープな飛跡の再構成することに成功した。図 1 にその例を示す。

$0\nu\beta\beta$ の信号と背景事象の識別には、エネルギーと飛跡のパターンを用いる。パターンの認識には、機械学習を用いる予定で、6 年前にシミュレーションで CNN による識別性能をスタディしていた。今回、最新の畳み込みニューラルネットワーク(CNN)である 3D CNN を適応し、信号検出効率 27%、背景事象除去効率 99.9996%という結果を得た。また、CNN の出力である信号尤度の分布を、背景事象であるガンマ線事象についてシミュレーションと 180L 検出器でのデータで比較した。図 2 にその結果を示す。シミュレーションとデータで違いが見えており、今後、この違いの原因を理解する、あるいは系統誤差として定量化することで実際の探索に用いることを可能としていく。この CNN では、計算メモリの制限から、飛跡の含まれる直方体の大きさに上限を設けているため、信号検出効率が下がっている。今後、グラフニューラルネットによる開発を進めて検出効率を向上する予定である。また、上記の逆畳み込みは、まだパターン認識に取り入れていない。これを取り入れることで、識別能力のさらなる向上を目指す。並行し

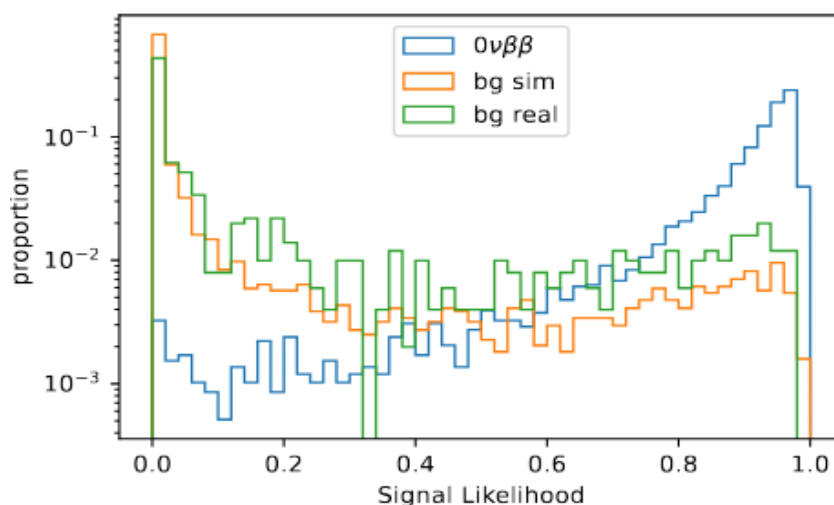


図 2: 飛跡パターンを用いた 3D CNN の信号尤度分布。緑の線が 180L 検出器で得た 2.6MeV ガンマ線事象に適応した分布。オレンジが、同じ条件のシミュレーションの分布。

てエネルギー分解能も向上することで、 $0\nu\beta\beta$ 探索感度を上げる。

[1] “In-situ high voltage generation with Cockcroft-Walton multiplier for xenon gas time projection chamber”, S. Akiyama *et al.*, accepted by PTEP, arXiv.2501.08554