

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	吉田 将
論文題目	Development of a high-pressure xenon gas time projection chamber and evaluation of its performance at around the Q value of ^{136}Xe double-beta decay (高圧キセノンガスタイムプロジェクションチェンバーの開発および ^{136}Xe の二重ベータ崩壊Q値付近におけるその性能評価)		
(論文内容の要旨) 本論文は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) を探索するための高圧キセノンガスを使ったタイムプロジェクションチェンバー測定器 (高圧Xe-TPC) の開発とその装置の性能評価について報告している。ニュートリノは、素粒子物理学の標準モデルでは説明できない、他の素粒子と比べて非常に軽い質量を持っている。その軽いニュートリノ質量を説明するために、ニュートリノがマヨラナ粒子であり、マヨラナ質量項を持つことが期待される。さらに、ニュートリノのマヨラナ性は、宇宙における物質と反物質の非対称性を生成する理論模型においても重要な仮定となる。よって、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は素粒子物理学において重要な研究対象である。本論文における研究で、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊を探索するための実験技術を新たに開発し、同タイプの測定器では世界最高性能のエネルギー分解能を達成した。その結果、高圧キセノンガスTPCを使った $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験に必要な要素技術が確立した。 本論文は大きく4部構成となっている。第1部は、ニュートリノ物理のレビューに始まり、ニュートリノ質量の起源、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の重要性、世界の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験の現状について解説している。次に、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験に関して、高圧Xe-TPCを使った実験を中心に紹介し、吉田氏が行ったAXEL実験についてその基本原理を解説している。ここで、本研究の意義と目的が明確に説明されている。第2部はAXEL実験で使用する高圧Xe-TPC装置の概要、開発中の実験コンポーネント、実証実験に使用されたAXEL実験試作器180Lプロトタイプの説明である。AXEL実験では、エレクトロルミネッセンス光を測定することで、高いエネルギー分解能を達成する。このエレクトロルミネッセンス光をELCCと名付けたセル構造体で測定し、さらに電子の3次元飛跡まで再構成できるように設計されている。第3部はAXEL実験装置の性能実証実験についてである。高感度の $0\nu\beta\beta$ 探索を実現するためには、 ^{136}Xe のベータ崩壊Q値である2458keV付近のエネルギーでの実証が重要である。この目的のために、180Lプロトタイプが製作され、それを使って ^{88}Y とトリウム系列のガンマ線源を用いた測定が行われた。得られたエネルギースペクトルには、 ^{208}Tl ガンマ線による2615keVの明確なピークが観測された。他のガンマ線事象を使ってFWHMエネルギー分解能を評価し、1836keVで $(0.73\pm0.11)\%$ と測定した。これは ^{136}Xe のベータ崩壊のQ値に外挿すると $(0.60\pm0.03)\%$ 、または $(0.70\pm0.21)\%$ のエネルギー分解能に相当し、高圧Xe-TPC測定器で世界最高性能である。また、再構成された飛跡画像について分析し、飛跡の端に電子の数に対応した高密度のエネルギークラスターの観測に成功している。第4部は、本測定で得たエネルギー分解能に影響を与える要因の内訳に基づき、検出器コンポーネントのさらなる開発によるエネルギー分解能の改善について提案している。その改善を持ってAXEL検出器の感度向上について考察し、AXEL実験が達成できる $0\nu\beta\beta$ 探索感度を積算して論文としてまとめている。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) を研究するための高圧キセノンガスタイムプロジェクションチェンバー (高圧Xe-TPC) 測定器の開発と、そのプロトタイプ検出器を使った ^{136}Xe の二重ベータ崩壊Q値付近のエネルギーにおける性能評価について報告している。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は素粒子物理学において非常に重要な研究対象であるが、非常に稀な現象でありまだ観測されておらず、その発見にはこれまでにない高性能測定器の実現が要求されている。本研究で進められている高圧Xe-TPCを使ったAXEL実験は、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊発見を目指した新しい実験である。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見つければ、ニュートリノのマヨラナ質量が測定され、ニュートリノがマヨラナ粒子であることが確定する。ニュートリノのマヨラナ性は、我々の宇宙の起源 (物質と反物質の不均衡) を説明するためにも重要な情報である。本学位論文の研究では、世界最高性能をもつ高圧Xe-TPCを実証し、その実験原理を確立した、素粒子物理学において重要な成果である。

吉田氏は、最初にニュートリノ物理の研究意義、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊が起こるメカニズム、世界の $0\nu\beta\beta$ 崩壊実験の現状を解説し、続いてAXEL実験の実験コンセプトを紹介した。続いて、AXEL実験の測定器要素を説明した。この中で、AXEL実験のユニークな点がELCCと呼ばれるエレクトロルミネッセンス光を測定するセル構造体で、高エネルギー分解能を実現し、荷電粒子の3次元飛跡の再構成を可能とする。この、高エネルギー分解能と3次元飛跡の組み合わせにより、信号事象に対して高い検出効率を維持しながら、背景事象 (バックグラウンド事象) の強力な除去が可能となる。吉田氏は、AXEL実験の試作器180Lプロトタイプで、イオン化電子をELCCに向かってドリフトさせるための電場を発生させるフィールドケージを製作した。そして、180Lプロトタイプを使って、 ^{88}Y とトリウム系列のガンマ線測定を行った。その結果は、エネルギー分解能としてQ値で $(0.60 \pm 0.03)\%$ 、または $(0.70 \pm 0.21)\%$ であり、高圧Xe-TPC測定器で世界最高性能である。続いて、再構成された飛跡の画像を解析して、ガスの拡散定数を評価し、飛跡の端に電子数に対応した高密度のエネルギークラスターを観測した。このクラスターは、 $0\nu\beta\beta$ シグナルとガンマ線バックグラウンドを識別するために使用できる明確な特徴である。エネルギー分解能に影響を与える要因を考察し、測定されたエネルギー分解能が理解できた。このエネルギー分解能の理解を持って、検出器コンポーネントのさらなる開発によるエネルギー分解能の改善について提案して、AXEL実験が達成できる $0\nu\beta\beta$ 探索感度を積算した。

論文は、導入から結論に至るまで、論旨がはっきりしており、本人の理解の深さが読み取れる。本研究の装置開発とデータ解析はAXEL実験グループによる結果ではあるが、その結果を導き出すのに貢献した吉田氏の活躍が明確に確認できた。特に、難しい測定器を安定に運転し信頼できる実験データを取得し、複雑なデータ解析を実行し、世界最高のエネルギー分解能を達成したことは特筆すべきである。その結果、AXEL実験が大きく進展し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊発見に向けての確かな一歩となった。以上のように、本研究における吉田氏の貢献は大きいと判断した。また、この結果は、素粒子物理学の進展に結びつく、ニュートリノ質量起源の解明に向けた重要な成果であると判断した。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、2024年1月15日に、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、吉田氏は多くの質問にも的確に解答した。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降