

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	中村 和広
論文題目	Development of a large-sized high-pressure xenon gas time projection chamber for neutrinoless double beta decay search (ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための大型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)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、素粒子物理学で未解決課題である「ニュートリノはマヨラナ粒子か？」を調べことを目標に、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索用の大型高圧キセノンガスTPC検出器の開発研究について発表している。高圧キセノンガスTPC検出器の大型化を可能とする様々な技術を考案し、さらに実証機を製作しその性能評価を行った。その結果、同種の検出器の中で世界最高レベルのエネルギー分解能を達成し、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) 探索に向けての重要なマイルストーンとなる研究結果を報告している。</p> <p>ニュートリノは多くの謎を持った素粒子であり、素粒子物理学において重要な研究対象である。ニュートリノ振動の発見 (2015年梶田氏がノーベル物理学賞受賞) によりニュートリノに質量があることが分かったが、まだその質量の値と質量の起源が分かっていない。その質量と質量起源を決めるには、$0\nu\beta\beta$ 崩壊を研究する必要がある。しかし、$0\nu\beta\beta$ 崩壊は非常に稀な現象であり、世界中で探索が進められているが、発見には至っていない。$0\nu\beta\beta$ 崩壊核として^{136}Xeを使った場合は、その寿命が2.3×10^{26}年よりも長いことが分かっている。このような稀な現象を発見するためには、多数の元素を集め信号事象の観測率を上げ、さらに極低バックグラウンド環境を実現し、信号を探索することが重要である。そのために注目されている測定器が大型高圧キセノンガスTPCである。本論文では、そのTPCの新技术の開発と測定器性能の実証が発表されている。</p> <p>論文は大きく4部構成となっている。第1部は、$0\nu\beta\beta$ 崩壊の物理とその探索実験の現状のレビューである。特に、$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索において、多くの信号事象を集めるための実験装置の大型化と高密度化、背景事象を極限まで落とすための実験装置の高性能化について解説している。第2部は、本論文で提案している大型キセノンガスTPC検出器を使ったAXEL実験の特徴を説明している。TPC検出器を使って$0\nu\beta\beta$ 崩壊からの2電子の飛跡の再構成、Electroluminescence (電界発光) 過程を信号増幅に使うことで高いエネルギー分解能が達成可能であること、そして発光を観測する光検出システムに独自に開発したELCC (Electroluminescence Light Collection Cell) のユニット構造を採用することで、大型化が比較的容易に実現できることを説明している。AXEL実験はこれらの実験技術を採用することで、世界最高感度で$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索を実現する計画である。第3部は、AXEL実験装置の各要素技術の詳細な説明である。ELCC技術の確立、ELCCに付属する多数の光センサーMPPCの読み出し用電子回路の開発、データ収集システムの開発、そしてMPPCの較正について、詳細に解説している。特に、TPCを動作させるための高電圧印加における放電対策や新技术であるELCCの安定動作の実現は、本論文の中核と言える。第4部は、AXEL実験の新技术を実証するために製作した180リットルTPCでの原理検証実験についてである。これまで問題であった放電問題を解決し、180リットルTPCで^{88}Y放射線源からの1.8 MeV γ 線を観測した。γ 線の光電効果で出た電子飛跡を測定し、1.8MeVにおけるエネルギー分解能$0.885\pm 0.03\%$を達成した。このエネルギー分解能は、$0\nu\beta\beta$ 崩壊からの2電子が持</p>			

つ2.5MeVに外挿すると $0.77 \pm 0.03\%$ となり、高圧キセノンガスTPCとして世界最高レベルの性能を達成したことが分かった。その後、AXEL実験の目標である0.5%のエネルギー分解能実現に向けての様々な考察が続く。

本論文は、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索を可能とする実験技術の開発とその実証を主目標としており、装置の大型化実現性と世界最高レベルのエネルギー測定精度を実証した。素粒子物理学において重要な研究課題である $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見可能性を飛躍的に向上させる重要な研究結果である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索のための大型高圧キセノンガスTPC検出器の開発研究について発表している。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は、その発見によりニュートリノ質量を決定しその質量起源が解明できることから、ニュートリノ研究を進める上で素粒子物理学において重要な研究課題である。本論文の結果は、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊を世界最高感度で探索できる新しい実験技術の提案と実証であり、素粒子物理学を発展させる重要なものと言える。

審査において、中村氏は $0\nu\beta\beta$ 崩壊研究の動機と現在行われている実験の現状を明確且つ簡潔に説明した。次に、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の研究を飛躍的に発展させる可能性のあるAXEL実験について紹介し、中村氏が開発してきた180リットルの大型高圧キセノンガスTPC検出器の基幹技術とこれまでであった問題点について報告した。最大の問題は、TPCを動作させる時に印加する高電圧による放電問題であった。放電問題は多数の要因が複雑に絡み合った複合問題であったが、中村氏はELCCの構造を一つずつ改良していくことにより放電問題を解決し、最終的にAXEL実験で目指していた3kV/cm/barの高電圧印加に成功した。これにより、ELCC技術が確立し、高圧キセノンガスTPCの大型化が実現する。AXEL実験のもう一つの特徴は、TPCによる荷電粒子飛跡の観測とElectroluminescenceプロセスを使った高いエネルギー分解能の実現である。中村氏は180リットルの大型高圧キセノンガスTPC検出器を実証機として、 ^{88}Y からの γ 線を観測することで、光電効果で出た電子飛跡の測定とエネルギー分解能の評価を行った。エネルギーの測定には、各光検出器MPPCの較正、その後の信号の波形処理、ヒット検出、クラスタリング、ヒットの再構成をして初めて事象の再構成ができる。その後、時間補正と位置補正を行なって、 ^{88}Y からの1.8 MeV γ 線のエネルギーが測定された。このデータ解析は、中村氏がほぼ単独で行った研究で、その随所に独創性が見て取れた。放電問題の解決から、データ解析、エネルギー測定の説明は詳細に渡っており、今後の同種の研究のお手本となる素晴らしいものであった。以上の結果より、中村氏の活躍で大型高圧キセノンガスTPC検出器における世界最高レベルのエネルギー分解能が達成できたと判断した。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た。

中村氏が行ったAXEL実験は共同研究であるが、その結果を導き出した氏の実力は本物である。本論文の結果に対し、中村氏の貢献は非常に大きいと判断できる。本研究結果をベースに、AXEL実験によって $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索は次のステージに進むと考えられる。さらに、この結果により、ニュートリノ研究が進展し、素粒子物理学の発展に結びつくことが期待できる。

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、令和4年4月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 令和 年 月 日以降