

氏 名 Andrei G. Prokopets

学位（専攻分野） 博士(学術)

学位記番号 総研大乙第20号

学位授与の日付 平成8年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位論文題目 Development of a Large Scale Liquid Xenon Ionization  
Drift Chamber for Searching for Neutrinoless Double  
Beta-Decay of  $^{136}\text{Xe}$

論文審査委員 主 査 教 授 渡瀬 芳行  
教 授 近藤 健次郎  
助 教 授 鈴木 健訓  
助 教 授 宮島 光弘  
助 教 授 松田 武（高エネルギー物理学研究所）

## 論文の要旨

In the dissertation, the present status of double beta decay experiments is briefly described, and explained what kind of apparatus is required for the third generation of double beta decay experiments. Furthermore, we describe in detail reasons for selection of an isotope of  $^{136}\text{Xe}$ , and our designing consideration. The apparatus, which employs the principle of a self-triggered ionization drift chamber, is an assembly of 43 small independent ionization drift chambers to search for the events due to the neutrinoless double beta decay of  $^{136}\text{Xe}$  and to reduce background by "anti-coincidence" technique. The vacuum, gas filling system equipped with a purifier and also the cooling system for condensing and controlling temperature of liquid xenon are described in detail. The results of performance test of the chamber and the systems by using natural liquid xenon (energy and time resolution along with electronic noises) are shown in the detail. It was concluded, that apparatus works well localizing candidates events and for the reduction of background. The experimental results, which include those on calibration of the system, the background measurements and the active background reduction are also presented. Furthermore, the optimization of the set-up is discussed, and speculation will be made on the next step of experiments, where enriched  $^{136}\text{Xe}$  is assumed to use.

本論文は放射線計測に関連した技術を応用して、素粒子物理学での基本的な物理を検証するための、「ニュートリノレス二重ベータ崩壊」事象を検出するための実験装置を着想し、その設計、制作、試験を行い、実験の可能性を系統的に講述している。

「ニュートリノレス二重ベータ崩壊」事象はニュートリノが質量を有するものであるか否かを探索することになり、従来各種の実験を通して、ニュートリノ質量の測定の研究は行われているが未だ、確実な結論に至っていない。実験としては、ベータ崩壊する原子核から2つの電子がQ値で決まるエネルギーをもって放出される。その電子のエネルギーはラインスペクトルを示すので、競争過程であるニュートリノを伴う崩壊からの電子の連続的なエネルギースペクトルと区別できる。しかし、その崩壊の寿命は、現在の下限值として、 $2.33 \times 10^{24}$ 年以上と長く、計測には、極めて低バックグラウンドの環境が不可欠であると同時に、計測効率を上げた装置が必要である。このため、自然放射能の少ない高エネルギーのQ値を持つ原子核を選ぶとともに、崩壊電子のエネルギーを精度よく測定できることが重要である。この観点から $^{136}\text{Xe}$ をベータ崩壊核(Q値=2.479MeV)とするとともにXe自己を電離電子の計測に使う。

製作したチェンバーは直径25cm、厚さ4cmの円筒状の有効体積( $1,000\text{cm}^3$ )で、電離電子にはイオンチェンバーとして働き、ベータ線によって生成される励起イオンがシンチレーション光を放射するので、それを4個の光電管で検出して、それと電離電子がコレクターに到達するまでの時刻を計測することで、ベータ崩壊が起こった位置を精度よく測定できる。ドリフトチェンバーとしての特性測定をXeガスを満たしたイオンチェンバーとして測定した。コレクターはパッド電極構造(一辺4mmの六角形、43個)になっており、電極面(x-y軸)内はパッド電極の大きさで、ドリフト方向z軸方向での位置精度はドリフト時間測定から0.3mmであった。液体Xeでは、ドリフト速度が小さいため、さらに位置精度は上がるはずである。その後、チェンバーに液体Xe(-110度)で満たし、60Coからの1.332MeVガンマー線を用いてエネルギー分解能を測定し、70keVすなわち5.3%の精度を得た。次にXeからのシンチレーション光の計測を行い発光を確認した。しかし、液体Xeの純度の維持が困難で、長時間安定した計測が出来ず、ドリフトチェンバーとしての試験はできていない。

以上の装置としての基本性能をもとに、「ニュートリノレス二重ベータ崩壊」実験に対する当装置の有効性を検討するため、計算機によるシミュレーション(GEANT3.14)を詳細にわたり行っている。「ニュートリノレス二重ベータ崩壊」実験にとって重要な点は、ベータ線のエネルギーを精度よく測り、検出効率を上げるとともに、バックグラウンドを極力抑えることが必須である。そこで、エネルギー分解能は実測値(2.479MeVで3.5%)を用いて、自然放射能のうち、もっともエネルギー2.479MeVに近い $^{208}\text{Tl}$ ガンマー線(2.61MeV)の影響を計算している。ちょうど、ガンマー線によるコンプトエッジ付近にあたり、詳細に計算した。この結果、 $^{208}\text{Tl}$ からの影響について、そのピークからは十分離れており、 $10^{-4}$ まで落とせること、ベータ線飛跡の位置、パターンに関する選別により、さらに10分の1に落とせることを示した。また、競合する2つのニュートリノを伴う二重ベータ崩壊の過程からベータ線のバックグラウンドは、 $10^{-4}$ 以下に抑えられることを示した。

以上の実験及び、シミュレーションを基に、現在より有効体積を4倍程度増すなどによって、測定できる崩壊寿命値として、 $10^{25}$ 年以上まで達成可能であることを示した。

この様な着眼に基づく、系統的な研究により、実験として非常に困難なテーマであるニュートリノレス二重ベータ崩壊実験に基づいて、新しい可能性を示したことは学術的に大

きな成果であり、博士論文に値すると判断した。

なお、審査に当たっては石原信弘高エネルギー物理学研究所教授、柴村宮道埼玉衛生短期大学教授の2氏からも意見を徴収した。