

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02088

研究課題名(和文)ニュートリノレス二重ベータ崩壊発見に向けた超高分解能キセノンガス検出器の実現

研究課題名(英文) Realizing high energy resolution xenon gas detector for neutrinoless double beta decay search

研究代表者

市川 温子 (ICHIKAWA, Atsuko)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50353371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,700,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊(0 $\nu\beta\beta$ )探索のために、大型化が可能で、高エネルギー分解能と3次元飛跡再構成による背景事象識別能力を兼ね備えた高圧キセノンガス検出器の技術を開発した。特に、ベータ線により発生する電離電子の測定のためのElectroLuminescence Collection Cell (ELCC)の設計、製作法を10リットルの小型検出器での評価を通して確立した。0 $\nu\beta\beta$ の信号のエネルギー2.5 MeVでの検出器の性能を評価するため、180リットルの検出器を製作した。期待される背景事象削減能力を見積もり、この検出法により目標とする感度を達成することが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかということは、宇宙の成り立ちにおける大きな謎を理解する上で重要な問題である。そのためには、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊現象を高い感度で探索することが必要とされるが、要求される感度を達成する実験技術はいまだ確立されていない。本研究では、現在の世界記録よりも50倍高い感度での探索が可能となる新しいガス検出器技術の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high pressure Xenon gas detector technology to conduct a neutrinoless double beta decay (0 $\nu\beta\beta$ ) search. The detector is extendable to large size, has high energy resolution and gives 3-dimensional track information which can be used for background discrimination. Ionization electrons generated by beta-rays are detected by a newly developed technology, ElectroLuminescence Collection Cell (ELCC). The design and production method of ELCC was established through measurements using a 10L size prototype detector. To evaluate the performance at 0 $\nu\beta\beta$  signal energy of 2.5 MeV, a 180L size detector was constructed. An algorithm to discriminate background events was developed. Using this algorithm, we have shown that this detector technology has a potential to reach the target sensitivity at the 0 $\nu\beta\beta$  search.

研究分野：素粒子実験

キーワード：希ガス検出器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

中性フェルミオンであるニュートリノは、自身が反粒子であるいわゆるマヨラナ粒子である可能性のある唯一の素粒子である。ニュートリノに数 meV ~ 数百 meV とごくわずかな質量があることが明らかとなった現在、多くの物理現象が、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを前提に説明され得ると考えられている。シーソー機構では、非常に重い右巻きニュートリノ質量と荷電レプトン程度のディラック質量の混合で極端に小さな質量状態を自然に実現する。宇宙における物質・反物質(CP)の非対称性の起源を、重い右巻きニュートリノの崩壊における CP 対称性の破れで説明する「レプトジェネシス」モデルにおいてもニュートリノがマヨラナ粒子であることを前提としている。このように、ニュートリノがマヨラナ粒子であるのかどうかは、新しい種類の素粒子の発見という意味で根源的に重要であると共に、質量の起源、物質・反物質非対称宇宙の起源を理解する上でも大きな意味を持つ。

ニュートリノがマヨラナ粒子であるのかどうかを追及するため、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ )を探索する試みが世界中で進んでいる。これはベータ崩壊の過程で生成した仮想的な反ニュートリノが質量項を通して(マヨラナ粒子であるために)ニュートリノ成分を持ち、原子核に吸収されることでもう一度ベータ崩壊過程を引き起こす事象である。この崩壊事象は、ニュートリノの質量が小さいほど寿命が長くなるためごく稀にしか起きない(寿命  $>10^{25}$  年)。当面の世界的な目標はニュートリノ質量がいわゆる逆階層構造である場合に予想される有効ニュートリノ質量  $10^{-2}eV/c^2$  までを探索することであり、1 トン程度の二重ベータ崩壊核が必要とされている。実験は数 MeV の 2 個の電子のエネルギーの和が作るピークを探すことで行われるが、稀崩壊のため環境背景事象の混入が深刻な問題となる。そのため、高エネルギー分解能、背景事象識別能力、低放射能環境が要求されるが、 $10^{-2}eV/c^2$  に到達する感度の技術はまだ存在していない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、1 トンクラスへの大型化が可能で、高エネルギー分解能と 3 次元飛跡再構成による背景事象識別能力を兼ね備えた  $0\nu\beta\beta$  探索のための高圧キセノンガス検出器を確立することにある。 $^{136}\text{Xe}$  は二重ベータ崩壊核であり、天然存在比 9% で濃縮技術も確立しており、1 トンは現実的に可能な量である。検出器は、8 気圧の高圧キセノンガスによる Time Projection Chamber で、ベータ線により発生する電離電子とシンチレーション光が信号である。事象の起きた時刻を光電子増倍管(PMT)でシンチレーション光を検出し決定する。電離電子は、端面までドリフトさせ、そこで高電場により発光(electro luminescence, EL)増幅して、Multi-pixel Photon Counter(MPPC)光検出器で検出しエネルギーを測定する。多数の MPPC を数 mm 間隔で並べ、それぞれでドリフト時間を測ることにより、二重ベータ崩壊で放出されたベータ線 2 個の 3 次元の飛跡の再構成を行う。研究代表者は、電離電子の測定に、EL 光を大面積でも一様に検出する Electro Luminescence Collection Cell (ELCC) を新しく考案した。これにより、0.5%(FWHM) という半導体検出器に匹敵する分解能を大型ガス検出器で実現する。

### 3. 研究の方法

図 1 に ELCC の概念図を載せる。EL 増幅領域をセル化し、電子を増幅領域に引き込んで増幅し各セルにつき一つの光検出器(MPPC)で光量を測定するため、各セルでカバーする領域で一様な増幅率を保てれば、検出器全体に渡って高い一様性を得ることができる。また、堅固な構造のため大型化がしやすいという利点を持っている。設計ではガス中の電離電子の伝搬等をシミュレーションで再現し、セル内で一様な増幅を得よう電極やセルピッチを最適化する。高電場による放電を防ぐ工夫も施す。キセノンガスによる EL 光は深紫外光であるので、近年開発された深紫外光に高い感度を持つ MPPC を用いる。64 チャンネル試作機を 10 リットルの検出器(HP10L)に設置し、低エネルギーガンマ線を用いて評価し、デザインと製法を確立する。

$0\nu\beta\beta$  の Q 値(2.5 MeV)付近での性能評価を行うための 180 リットル 1,500 チャンネルの検出器(HP180L)の製作を行う。そのために、1,500 チャンネルの MPPC の波形を読み出すためのフロントエンドボードを開発する。シンチレーション光の検出には、25 mm 角、耐圧 10 気圧、深紫外光に感度を持ち、低放射能素材からなる PMT を用いる。電離電子をドリフトさせるためには、カソード電極に 60kV の高圧をかける必要がある。この高電圧を高圧容器の外で発生させ容器に導入するのは難しいため、コッククロフト・ウォルトン型電圧発生器を製作し容器内に配置して外部からは AC 電圧を導入する。キセノンに不純物が混じるとエネルギー分解能を悪化させるため、チェンバー、検出器材料をアウトガスの小さいもので製作するとともに、ガスを純化装置を通して循環させる。高価なキセノンガスを繰り返し用いるため液体窒素による液化回収装置を作る。検出器の製作、運用を通してガスハンドリングの技術を確立させる。飛跡を用いた背景事象除去能力について調べる。キセノン中でのドリフト電子の拡散のため残念ながら 2 本の電子を明確に区別することはできないが、背景事象のうちアルファ線につい

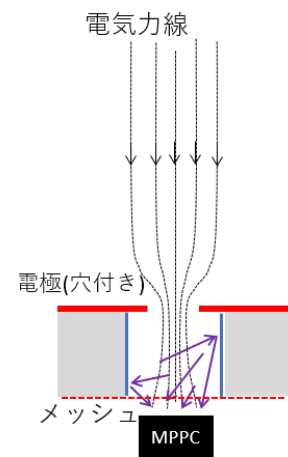


図1 ELCC の概念図

ては、飛跡の広がり数がセルに限られるためほぼ完璧に落とすことができる。ガンマ線に関してもクーロン散乱で複数の箇所でも反応したような事象は落とすことができる。残りのガンマ線由来の背景事象を区別するアルゴリズムを開発し、それでも残り得る背景事象数を評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1) ELCC のデザイン、製作法の確立

三次元の有限要素法により求めた電場の下で、ガス中のキセノン原子に散乱されながらドリフトする電子の伝搬を短い計算時間で計算するシミュレーションを開発した。これにより、ELCC の穴の径、深さ、電圧、セルピッチを網羅的に調べ、一セルのカバーする範囲で一様な増幅を得るパラメータセットを得た。HP10L による測定からシミュレーションが増幅過程を良く再現していることが示されている。もう一つ、性能を出すために重要なのは、放電対策である。試作と測定の試行錯誤、電場計算などにより、放電を十分に抑えることができる構造、製作法を確立した。

##### (2) HP10L によるエネルギー分解能の評価

得られたデータ中の 30keV 特性 X 線を用いた各セルの EL 増幅度の較正法を確立した。また高いエネルギー分解能を得るには、MPPC の非線形応答性を補正することが必須である。そこで、応答を LED を用いて別途測定し、モデル化した。得られたモデルを用いて補正した後のガンマ線によるエネルギースペクトラムが図 2 である。356 keV で 3.8% (半値全幅) の分解能を達成しており、これは、 $0\nu\beta\beta$  の Q 値 (2.46 MeV) で 0.8~1.7% の分解能に対応する。

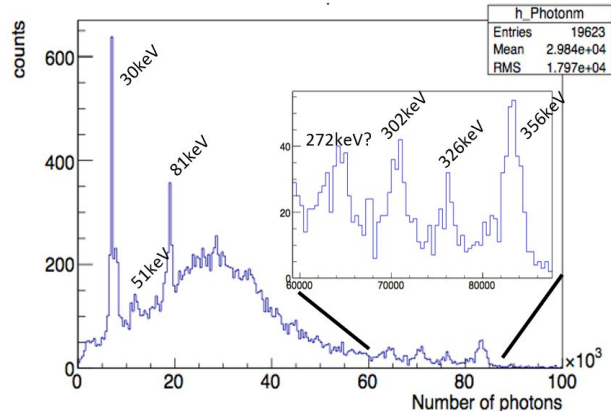


図2 180リットル検出器による $^{133}\text{Ba}$ からのガンマ線のスペクトラム

##### (3) フロントエンドボードの開発

MPPC には、50V 程度のバイアス電圧を、個々の特性に応じて 0.01V の精度で印加する必要がある。信号の読み出しとしては、光子数にして 20 ~ 35,000 個/ $\mu\text{s}$  のダイナミックレンジで数百マイクロ秒にわたる波形をデジタル化して記録する必要がある。さらに、MPPC のゲインの補正のために 1 光子の測定も必要である。通常、MPPC のバイアス電圧は、100V 程度の DAC と 2V 程度の DAC を組み合わせて、個々の特性に応じた電圧を印加している。2 台の DAC を用いている関係で、読み出しを AC 結合にしている。この場合、長いパルスの波形が歪んでしまう。我々は、バイアス電圧によるオフセットを打ち消して DC 結合のまま読み出す方式を新たに開発した。この他にも、さまざまな工夫により、要求性能を満たすボードの開発に成功した。

##### (4) コッククロフト・ウォルトン型電圧発生器の開発

ガス容器内で高電圧を発生させるための電源である。アウトガスを抑えつつ、チェンバー内の限られたスペースに収めるために、フレキシブルプリント基板と表面実装素子を用いたコッククロフト・ウォルトン型回路を構成した。基板上的電極の形状を放電しにくいように設計している。ファンクションジェネレータ、オーディオアンプ用素子とトランスを用いて AC のパルスを生じさせて入力する。基板 1 枚で 30 キロボルトの高電圧を発生されることに成功しており、これを 2 枚用いることで要求される 60 キロボルトの電圧を得る。

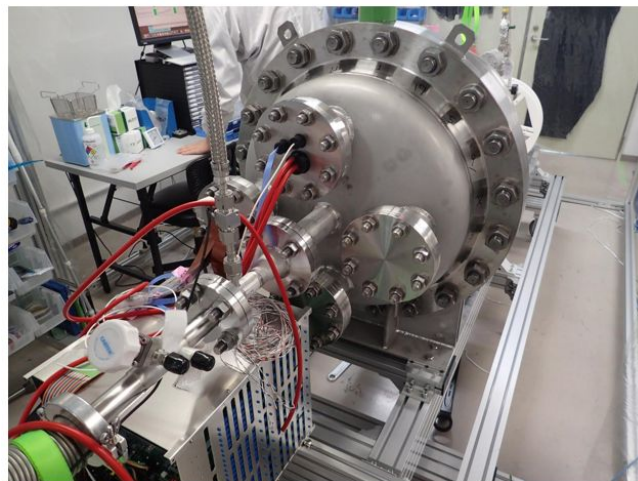


図3 180リットル検出器の外観

##### (5) 180 リットル検出器の建設

図 3 に HP180L の外観を示す。

##### (6) 飛跡情報を用いた背景事象識別アルゴリズムの開発

$0\nu\beta\beta$  探索において、主な背景事象源は、 $^{214}\text{Bi}$  の崩壊に伴い放出される 2.45 MeV のガンマ線である。これは、1 トンクラス検出器において飛跡のクラスタが有感領域内に 1 個しかないと

いう要求などによって 0.7%に落とすことができる。さらに深層機械学習を用いたアルゴリズムによってさらに 10 分の一に落とせることを示した。背景ガンマ線は、主にはガス容器である。開発した背景識別アルゴリズムを用いると、1 トンの検出器で数年のデータを取ることで有効ニュートリノ質量  $2 \times 10^{-2} \text{eV}/c^2$  までを探索することが可能という見込みもとなった。ガス容器を薄肉にすることができれば、さらに感度は向上し、 $10^{-2} \text{eV}/c^2$  という目標に到達する見込みが立ったと言える。

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 8 件 )

K.D. Nakamura, S. Ban, M. Hirose, A.K. Ichikawa, Y. Ishiyama, A. Minamino, K. Miuchi, T. Nakaya, H. Sekiya, S. Tanaka, K. Ueshima, “Angular dependence of columnar recombination in high pressure xenon gas using time profiles of scintillation emission”, 査読有, Journal of Instrumentation, 2018,13, P07015, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/07/P07015>

S. Ban, K. Nakamura, A. K. Ichikawa, T. Nakaya, A. Minamino, S. Yanagita, S. Tanaka, S. Akiyama, M. Hirose, H. Sekiya, K. Ueshima, K. Miuchi, “Electroluminescence collection cell as a readout for a high energy resolution Xenon gas TPC”, 査読有, Nuclear Instrumental and Methods in Physics Research, A, 2017,875,185, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.015>

K. Nakamura, A.K. Ichikawa, T. Nakaya, A. Minamino, S. Ban, A. Yanagita, S. Tanaka, M. Hirose, H. Sekiya, K. Ueshima, K. Miuchi, “AXEL - A high pressure xenon gas TPC for neutrinoless double beta decay search”, 査読有, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2017,845,394, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.083>

S. Ban, A.K. Ichikawa, T. Nakaya, A. Minamino, K. Nakamura, Y. Ishiyama, K. Haneda, S. Yanagita, M. Hirose, H. Sekiya, K. Ueshima, K. Miuchi, “AXEL : A high pressure Xe gas TPC for neutrinoless double beta decay search”, 査読有, Proceedings of Science, 2016, 248, 067, <https://doi.org/10.22323/1.248.0067>

### [ 学会発表 ] ( 計 7 3 件 )

S. Obara, “Basic Study of Positive Ion Detection at TPC for  $0\nu 2\beta$  search AXEL”, 15th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2019), 2019

S. Ban, “High pressure Xe gas TPC for  $0\nu 2\beta$  decay search : AXEL”, International Workshop on Double Beta Decay and underground science (DBD18), 2018

S. Ban, “Development of a high energy resolution xenon gas TPC for  $0\nu\beta\beta$  decay search: AXEL”, The 4th International Conference on Science, Application and Technology of Xenon Radiation Detector (XeSAT2018), 2018

吉田将『 $0\nu 2\beta$  崩壊探索用高圧キセノンガス TPC のための高電圧ドリフト電場形成』日本物理学会 2018 年秋季大会 測定器開発優秀修士論文特別賞受賞記念講演

市川温子『高圧キセノンガス TPC』日本物理学会 2018 年次大会 シンポジウム「素粒子・宇宙線・原子核・応用研究のためのユニークな TPC 開発」

K.D. Nakamura, “High pressure xenon gas detector with segmented electroluminescence readout for  $0\nu 2\beta$  search”, The 3rd International Conference on Science, Application, and Technology of Xenon Radiation Detectors (XeSAT2017), 2017

“AXEL High pressure Xenon gas TPC for neutrinoless double beta decay search”, A.K. Ichikawa, International Workshop on Double Beta Decay and underground science DBD16 (DBD16), 2016

“AXEL high pressure xenon gas TPC for neutrinoless double beta decay search”, K.D. Nakamura, 14th Vienna conference on instrumentation (VCI2016), 2016

### [ その他 ]

<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/Neutrino/AXEL/index.html>

## 6 . 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：中家 剛

ローマ字氏名：Tsuyoshi Nakaya

所属研究機関名：京都大学  
部局名：理学研究科  
職名：教授  
研究者番号(8桁)：50314175

(2)研究分担者  
研究分担者氏名：南野 彰宏  
ローマ字氏名：Akihiro Minamino  
所属研究機関名：横浜国立大学  
部局名：工学研究院  
職名：准教授  
研究者番号(8桁)：70511674

(3)研究分担者  
研究分担者氏名：関谷 洋之  
ローマ字氏名：Hiroyuki Sekiya  
所属研究機関名：東京大学  
部局名：宇宙線研究所  
職名：准教授  
研究者番号(8桁)：90402768

(4)研究協力者  
研究協力者氏名：中村 輝石  
ローマ字氏名：Kiseki Nakamura

(5)研究協力者  
研究協力者氏名：潘 晟  
ローマ字氏名：Sei Ban

(6)研究協力者  
研究協力者氏名：中村 和広  
ローマ字氏名：Kazuhiro Nakamura

(7)研究協力者  
研究協力者氏名：吉田 将  
ローマ字氏名：Masashi Yoshida

(8)研究協力者  
研究協力者氏名：小原 脩平  
ローマ字氏名：Shuhei Obara

(9)研究協力者  
研究協力者氏名：田中 駿祐  
ローマ字氏名：Shunsuke Tanaka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。