

$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索のための高圧キセノンガス TPC 検出器 : AXEL

～ 開発奮闘記～

京都大学 理学研究科 高エネルギー物理学研究室

中村 和広, 潘 晟

nakamura.kazuhiro.74x@st.kyoto-u.ac.jp, bansei0526@scphys.kyoto-u.ac.jp

吉田 将

yoshida.masashi.22w@st.kyoto-u.ac.jp

2020 年 (令和 2 年) 11 月 12 日

1 はじめに

ニュートリノがマヨラナ質量を持つか否かという問いが生じてから 80 年以上が経つ。柳田・ゲルマンらによって提唱されたシーソー機構による軽いニュートリノ質量の実現やレプトジェネシスによる物質・反物質非対称宇宙の起源の説明はいずれもニュートリノがマヨラナ粒子であることを前提とするため、その検証は非常に重要である。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) の探索こそが現在ニュートリノのマヨラナ性の検証をし得るほぼ唯一の手段である。われわれの試みについては以前の高エネルギーニュースの投稿でも説明させていただいた [1]。また [2] などに $0\nu\beta\beta$ 崩壊や探索についての詳しい解説がある。ここでは近年の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索を取り巻く状況について簡単に述べさせていただきたい。

現在進行中の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験のほとんどがニュートリノ質量が逆階層構造である場合にあり得る領域をすべて探索しつくすことをマイルストーンとしている (これはニュートリノの有効質量で $\langle m_{ee} \rangle = 20$ meV に対応している)。ところが近年のニュートリノ振動実験の結果からニュートリノ質量が順階層構造を持つことが示唆されはじめている。まだまだ確度が十分でなく結論はもう少し先になりそうだが、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験についても順階層である可能性を考慮して $\langle m_{ee} \rangle = 1$ meV までを探索できるような、さらに高感度な実験が求められはじめてきている。これは非常にチャレンジングな要求であり、たとえば 10 年程度の現実的なタイムスケールでこの感度まで探索しようとする、数十トンレベルのターゲットを用意し、かつバックグラウンドフリーであることが必須となる。今までは大質量や高エネルギー分解能、またはイベントトポロジーのどれかに特化した

戦略の実験が主流であったが、将来計画として Ge 検出器を用いた実験が合流して大質量の Ge 検出器による探索を提案していたり、大質量での探索の代表格であった KamLAND-Zen 実験についてもエネルギー分解能を向上させた次期検出器 (KamLAND2-Zen) が提唱されていたりと、まさに上記の要求すべてを満たす検出器の計画・開発が進められている。そのひとつの解として高圧キセノンガスを用いたタイム・プロジェクション・チェンバー (TPC) がある。

1.1 AXEL 検出器

AXEL は高圧キセノンガス TPC で、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索に欠かせない大質量・高エネルギー分解能・強力な背景事象除去能という 3 つの要素を兼ね備えた検出器としてわれわれが現在設計・開発を行っている。8 気圧の高圧ガスを用いることで 2 – 3 m 程度の大きさの検出器でトンスケールの大質量の崩壊核を確保できる。AXEL では気体キセノンが持つ高いエネルギー分解能を最大限に活かすべく、電離電子の検出にはアバランシェ増幅を伴う検出の代わりにエレクトロルミネッセンス光 (EL 光) を用いた増幅・検出機構を採用している。これにより ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊における Q 値である 2458 keV で 0.5% (FWHM) という非常に高いエネルギー分解能を目指す。Electroluminescence Light Collection Cell (ELCC) とわれわれが呼んで開発している読み出し機構の概要を図 1 に示す。ELCC は周期的に穴が開いたセル状の PTFE (polytetrafluoroethylene) 製の構造物の上下を同じように穴の空いた電極で挟み、さらにセルごとに配置された光検出器 MPPC (浜松ホトニクス, S13370-3050CN) から成っている。電極間に高電圧を印加することでセル内部に高い電場を形成し、ドリフトさ

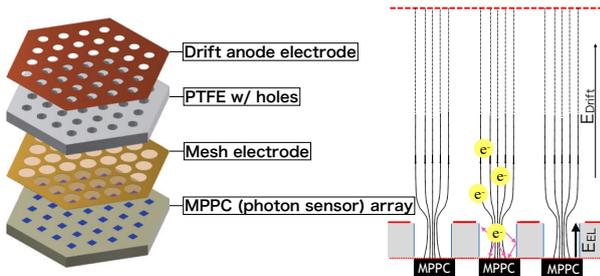


図 1: ELCC の概念図。

れた電離電子がセル内に引き込まれた後にセル内部の電場によって EL 光を発生し、対応する MPPC によって検出される。信号の大きさから元の事象のエネルギーを再構成できることはもちろん、TPC としてセルのヒットパターンとヒットタイミングの情報から 3 次元の飛跡情報を再構成することも強みであり、これによって信号である $0\nu\beta\beta$ 事象とその他の背景事象を弁別することができる。また、ELCC は PTFE を芯とする堅牢な構造でできており、大型化も容易であるという利点もある。

AXEL 検出器の概要については以前にも高エネルギーニュースで紹介させていただいており、その他の検出器要素についてはそちらも参照していただけると幸いである [1]。ただし、読み出し回路と ELCC の設計については当時から大きな変更が加えられている。

読み出し回路についてはもともと ASIC チップ AF-TER または AGET を用いて波形を読み出す手法を考えていたが、メモリ容量や分解能 (ビット数) が性能の要求に満たなかったためディスクリット素子を用いた波形読み出し回路を開発した。この回路の詳細は次節に載せる。

ELCC のセルのジオメトリについては電場形成から電子トラックの追跡、EL 光の発生および発生光の追跡に至るまでの詳細なシミュレーションによって最適化を行った。ジオメトリとしておもに調整を行ったのはセルのピッチと穴径であり、図 2 に様々なジオメトリに対する 30 keV イベントのエネルギー分解能のシミュレーション結果を載せた。キセノンの特性 X 線とほぼ同じエネルギーでデータとの比較が容易という利点から 30 keV での評価を行った。ベストパフォーマンスは 7.5 mm ピッチ・穴径 4 mm の場合 (図 2 中の左端の三角印) であるが、製作の難易度や予算の都合により 10 mm ピッチ・穴径 5 mm (図 2 中の中程の星印) が採用された。

2 180 L 試作機の始動物語

われわれはこれまで 10 L サイズの小型の試作機を製作し、検出器の性能評価を行ってきた。これらの結果については [3, 4] にまとめられており、4 気圧の

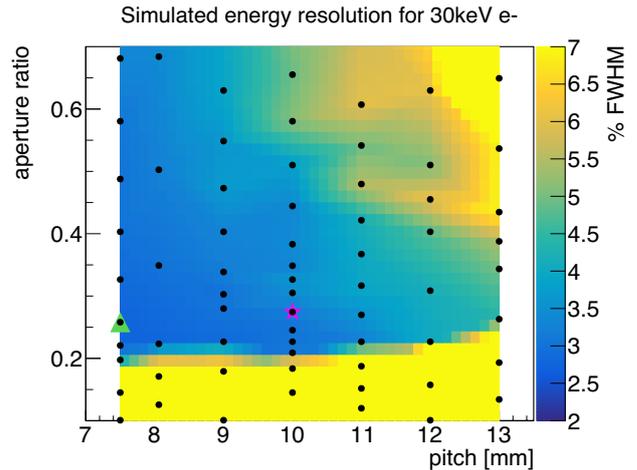


図 2: 様々なセルのピッチと穴径における 30 keV のエネルギー分解能のシミュレーション結果 (8 気圧の場合)。図中黒点ごとにピッチと穴径を仮定してシミュレーションを行いエネルギー分解能 (FWHM) を評価した。ただし縦軸は穴径そのものではなくチャンネルあたりを占めるセル面積として記述している。またカラーマップは各点を内挿している。

キセノンガスを用いて 356 keV のガンマ線事象に対して 2.54%(FWHM), Q 値に外挿することで 0.89 – 1.74%(FWHM) という性能を示すことができた。その次のステップとして 180 L 級の大型試作機を製作し、検出器の大型化のノウハウ取得と Q 値に近いエネルギーにおける性能評価を目指している。

2.1 検出器概要

大型検出器の概念図を図 3 に載せる。大型試作機の圧力容器は直径が 559 mm・長さが 834 mm のステンレス製容器で、森松工業に製作をしていただいた。その容積が 180 L であるので以下 180 L 試作機と呼称する。ドリフト電場を形成するフィールドケージはアルミ電極で製作した。これは、適切な表面処理を行うとキセノンの真空紫外光 (VUV 光、波長約 170 nm) を反射することが期待され、かつ軽量であるからである。フィールドケージは最大で直径が約 500 mm・長さが約 500 mm のサイズ (有効体積: 約 100 L) まで拡張できる。この直径に収まる範囲内に 10 mm 間隔で ELCC セルを配置するとセル数は最大で約 1500 チャンネルとなる。この大量チャンネルの ELCC の組み立て・運用に伴うリスクを軽減するために、180 L 試作機では ELCC を 56 (7×8) チャンネル単位でモジュール化し、それを組み合わせていくことで容易に検出領域を拡大することができる設計とした。MPPC の電圧印加および信号伝達のためのケーブルはブランクフランジに加工されたハーメチックフィードスルーを通して容器外に取り出されるが、チャンネル数が

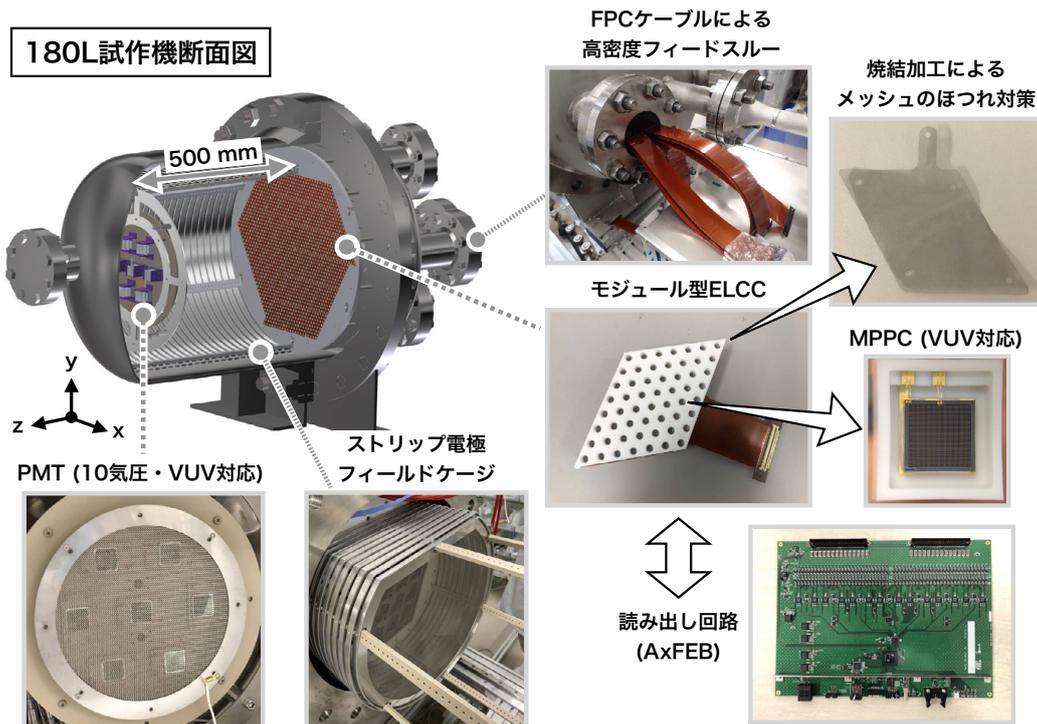


図 3: AXEL 180 L 試作機の概要図。

多いため各チャンネルのラインを密集化する必要がある。この要請を満たすため Flexible Printed Circuit (FPC) ケーブルを採用している。大量チャンネルの MPPC へのバイアス電圧の供給と高いエネルギー分解能での信号読み出しをなるべく安価に実現すべく、当時大学院生であった田中駿祐氏が中心となって AXEL 専用のフロントエンドボード：AxFEB を開発した。AxFEB の主な性能を以下に挙げる。

- MPPC への電源供給 (最大 65 V)
- 個々の MPPC の電源電圧の微調整 (10 mV 単位)
- 2 種類のゲインのアンプおよびサンプリング ADC による広いダイナミックレンジの実現
- デッドタイムフリーなデータ取得
- FPGA による制御
- Ethernet によるデータ通信・スローコントロール

特に工夫した点はアナログ処理部である。シミュレーションによると、信号事象において MPPC で観測されるであろう EL 光は 200 ns あたり数 photon equivalent (p.e.) から約 4000 p.e. に達し、継続時間は最大で約 150 μ s にもおよぶ。また、MPPC のゲインのキャリブレーションやモニターのために数十 ns 幅の 1 p.e. のダークカレントも取得したいという要請がある。そこで信号を分岐させて 2 種類のゲインのアンプ (サレン

キーフィルタ) で増幅・整形し、それぞれの出力を別々の ADC によって波形を記録する。サレンキーフィルタの整形時定数や ADC のサンプリングレートはシミュレーションによってエネルギー分解能を損なわない値として決定している。AxFEB では MPPC の個々のバイアス電圧を微調整することで個体差によるゲインの補正を行うことも可能である。当初は AC カップリング読み出しによってこの機能の実現を目指していたが、MPPC に大光量かつ長時間光が入射するため AC カップリング読み出しでは波形が歪むことが明らかとなった。そこで DC カップリングによる読み出しを行いつつ個々の MPPC のバイアス電圧の微調整を行うために、オペアンプのバーチャルショートを利用してオフセット調整を行うという斬新な手法を採用した (図 4)。読み出し回路の詳細な性能や評価の結果については [5] を参照していただきたい。

ELCC と反対側の面には VUV 光に感度を持ち高気圧に対応している PMT (浜松ホトニクス, R8520-406) を設置し、シンチレーション光を検出する。

180 L 検出器の開発は 2018 年から始まり、圧力容器の製作や ELCC 構造の検討、FPC の設計などを経て 2019 年 3 月に組み立てを行った。第 1 フェーズとして ELCC は 3 ユニットの 168 チャンネル、フィールドケージは 10 L 試作機で用いていた直径 18 cm・長さ 10 cm のものを用いて初測定を行った。4 月にはキセノンガスを封入して実際に EL 信号を観測した。図 5 はそのときの初

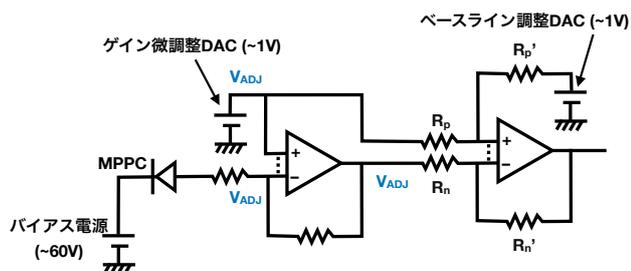


図 4: AxFEB のアナログ部概要。大光量・長時間の信号をゆがみなく処理するために、信号は DC カップリングによって読み出す。さらに、オペアンプのバーチャルショート (図中点線) を応用することで、DC カップリングで個々の MPPC に印加するバイアス電圧とオフセットの微調整機能を実現している。

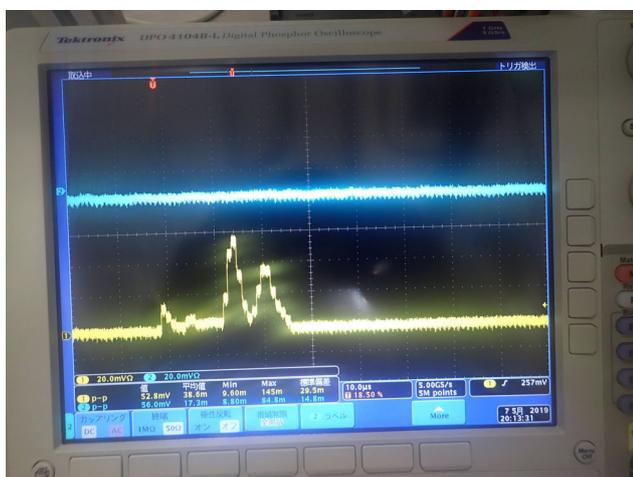


図 5: 180 L 試作機で得られた環境ガンマ線による初信号。

信号であり、メンバー全員で歓声をあげた。

2.2 大気混入，放電，そして DAQ トラブル

検出器の製作から初信号の取得までは非常に順調だった。しかし検出器開発に携わってきた読者の方々には深く共感していただけたと思うが、この手のものがすなりとトラブルなく進むことはまれであり、何らかの問題が発生するのが常である (いや、もちろんそれは単にわれわれの力不足にすぎないのだが……)。ともかく、最初の順調な滑り出しの帳尻を合わせるかのようにそこから困難の日々が続いた。初信号の観測直後に 2 台の循環ポンプと真空ポンプの相次ぐ故障に見舞われ、実験がしばらくストップした。また 2 台目の循環ポンプの故障の際に大気混入が判明し、1 気圧で 560 L 相当のキセノンガスが汚染されてしまった。

汚染されたキセノンガスは ^{136}Xe 濃縮ガスではなく天然存在比ガスであるため、こんなものはさっさと捨て

てしまって新しいガスを購入すればよいのだが、それでも値段にして数百万円分のキセノンを躊躇なく廃棄できるほどリッチではないという懐事情もあり、何とか純化して再利用できないものかと画策した。前向きに、自力で可能なキセノンガス純化の限界を知るよい機会と捉えてキセノンガスの蘇生に関する知見を得るべく、汚染ガスの蒸留を試みた。蒸留といっても専用の設備を整えるだけの余力は無かったので、ステンレス製回収容器 (500 mL) と液体窒素を利用した大まかな温度調整による簡易蒸留を試みた。除去対象の不純物は窒素・酸素・水・二酸化炭素で¹、窒素と酸素はキセノンより低沸点、水と二酸化炭素は高沸点である。まずは回収容器を液体窒素にゆっくり沈めて底から徐々に冷やしてキセノンを固化回収し、キセノンの沸点である 165 K 以下でも残る気相部を排気して低沸点側の不純物を除去、その後回収容器を液体窒素からゆっくり出して温め、キセノンの沸点付近でコントロールしつつキセノンを気化する。そして回収容器に残った固相部を完全に気化・排気して高沸点側を除去するという手法で蒸留を行った。この冷却・昇温のセットを複数回繰り返し、1 回のセットごとにシンチレーション光量と EL 光量をそれぞれ測定したところ、2 セットの蒸留操作でシンチレーション光量は新品のキセノンと同程度まで回復する一方、EL 光量は十分回復せず、3 回・4 回と蒸留を繰り返してもそれ以上改善しないことが判明した。

さらなる純化のため、実際にどのような混入成分がどれだけ残っているのかを確認すべく残留ガス分析計 RGA (Stanford Research System, RGA200) を導入し成分分析を試みた。成分分析の結果、複数回の簡易蒸留後も関わらず対象ガスにはまだ窒素が ~ 5000 ppm 含まれていることが判明した。このキセノンを、ゲッターに通せる窒素混入量である ~ 100 ppm まで純化するため、冷媒を液体窒素からよりキセノンの沸点に近い液体アルゴンに変更し温度コントロールの精度を上げて、再度同様の蒸留操作を行った。これにより混入窒素量の ~ 1000 ppm 以下への減少は確認したものの、今度は RGA 本体の残存ガス成分のせいでこれ以上高い感度での成分分析ができないことが判明した。現在、RGA 配管系の体積を減らす改造とベーキングを行い RGA 本体の内圧を減らそうと試みており、当初のポンプ故障による大気混入から一年半が経過したものの、キセノンの回復には決着がつかっていない。

液体窒素による蒸留と並行して、新規循環ポンプの選定・購入を行った。大気混入の再発を防止するためにメタルベローズポンプ (IBS, MB-601HPAL) とし、さらに循環系に露点計 (Michell Instruments, PURA) を整備して大気混入などの異状をすぐに検知できるように

¹アルゴンの方が二酸化炭素より大気中に多く含まれるが、アルゴンの励起準位はキセノンより高いので悪影響を与えない。

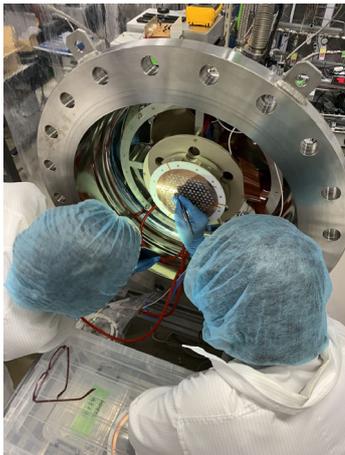


図 6: セルの内部に残ったメッシュの切れ端を取り除いている様子。

した。

大気混入キセノンの救済はできていないものの、このままでは実験が進まないで新規に約4気圧ぶんのキセノンガスを購入し新しい循環系に導入して測定を再開しようとしたところ、今度はELCCでの放電があらゆる箇所が生じた。具体的には、ELCCモジュールの境界・ELCCをネジで土台に固定するための貫通穴・セル内部に付着したメッシュ電極の切れ端ゴミなどが問題箇所であり、いずれもELCCをモジュール化したことに由来する放電であった。応急処置として境界部にカプトンテープを貼り、メッシュの切れ端を弱粘着性の綿棒でひとつひとつ取り除くことで放電箇所をひとつひとつ潰し、いよいよあとは測定！ というところまで漕ぎつけた(図6)。

しかし困難は続くもので、今度はDAQの不調に悩まされることとなった。AxFEBの起動後にデータ取得が開始されなかったり、データの取得中に突然データが記録できなくなってしまうエラーが頻発した。エラーが発生した場合はAxFEBおよびその制御ボードの電源の再起動を何回か繰り返すことで復活するという昔のファミコンの起動時のような対症療法を発見し、何とか検出器の性能評価を行うに足るデータの取得に成功した。しかしひどいときには8時間のシフト中の大半の時間をDAQエラーと再起動に費やす場合もあった。このDAQトラブルの原因究明と対処については3.1節で述べる。

2.3 性能評価と初D論

上記の数々の困難を乗り越え(?), 2019年冬に4日間の連続運転によって4気圧における ^{22}Na 線源を用いた511 keVのデータを取得し、180 L試作機最初の性能評価を行った。図7は511 keV付近のエネルギースペクトルである。511 keVピークのほかにキセノンの特性X

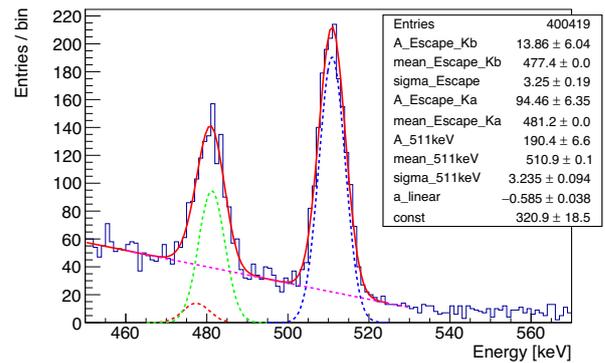


図 7: 511 keV 付近のエネルギースペクトル。右のピークが511 keV, 左のピークはキセノンの特性 X 線 (30 keV) が検出領域外に逃げたエスケープピークである。

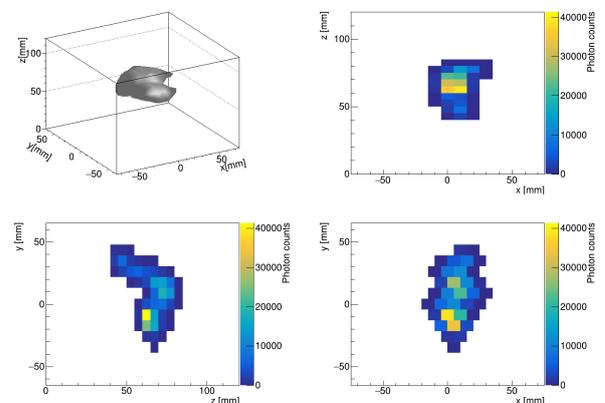


図 8: 511 keV 事象のイベントディスプレイ。

線 (30 keV) が検出領域外に逃げたエスケープピークも見える。エネルギー分解能については511 keVのピークで $1.49 \pm 0.04\%$ (FWHM) を達成した。これは単純に統計的ゆらぎの影響のみを考えて \sqrt{E} でQ値に外挿すると 0.68% (FWHM) という目標に近い優れた分解能である。さらに統計的な影響以外にもエネルギーに比例する効果も考慮して K_α , K_β 特性 X 線 (29.78 keV, 33.62 keV) とエスケープピーク (481 keV), フルピーク (511 keV) のエネルギー分解能からQ値に外挿することで $1.18 \pm 0.01\%$ (FWHM) という評価結果を得た。

また、ガンマ線によって生じた光電子の飛跡の再構成にも成功しており、図8にその一例を示す(511 keV事象)。電子の止まり際での多重散乱による集中的なエネルギー損失(blob構造)も見えている。

初めての性能評価の結果について随分とあっさりと言いたが、511 keVピークの測定・性能評価はプロジェクト発足からのひとつの大きな目標であり、前身の小型試作機から何度も挑戦してはなかなか達成できずに苦しみもがいてきた過程である。2.2節のトラブルに加え、ここにたどり着くまでの何年もものトライアンドエラーの積み重ねという背景があっただけに、初めて511 keVの

ピークが見えたときは本当に感動したものである。ここまでの成果と苦勞の結晶として AXEL 初の博士論文を潘がまとめている。

3 現在の状況

511 keV での評価ができたことはひとつの大きな節目ではあったが前述の通りトラブル対処には場当たりのなものも多く、次のステップに向けてまだまだ解決すべき課題が多い測定であった。この節では 180 L 試作機の初期フェーズでのいくつかの問題の対策と現在の状況を述べる。

3.1 検出器の改良

まず解決しなければならない大きな問題は初期版の ELCC モジュールでの放電である。前節で放電箇所の対処をしたと述べたが、構造的な弱点の対処には至っていない。ELCC を土台にネジ止め固定するための貫通穴での放電とメッシュ電極のほつれがセルの内部に入り込むことで生じる放電を根本的に解決する必要がある。そこで圧入コネクタピンを利用した固定方法を採用することで貫通穴が生じない構造に変更した。メッシュ電極のほつれ対策はなかなか解決策が決まらずに苦勞した。まずはメッシュの端をスポット溶接することを試したが、スポット溶接機の電極にメッシュが張り付いてしまい、うまくいかなかった。そこでメッシュを購入していた株式会社「くればあ」に相談したところ、ステンレスメッシュを焼結加工することでほつれにくくする方法を提案していただいた。送られてきたサンプルを比較したところ、焼結メッシュは普通のメッシュに比べてほつれが生じにくいだけでなく、ヨレが生じにくい点も優れていた (図 3 右上)。さらにほつれを減らすために、カット方法も工夫し、大きな問題となっていたメッシュのほつれを減らすことができた。

初期型 ELCC では MPPC の故障のしやすさも問題となった。MPPC とメッシュの距離が非常に近く (図 1 参照)、セル内の放電によると思われる MPPC の故障が頻発した。AXEL で用いている VUV 光に感度をもつ MPPC は、一般的な可視光用 MPPC とは異なり半導体の検出面やワイヤーボンディングの部分が樹脂で覆われていないため、物理的接触や放電によって故障しやすい構造をしている。メッシュの距離を大きく離すと MPPC に入射する光量が減少してしまうため、妥協案として 0.5 mm 厚の PTFE シートを挟み込むことでメッシュとの距離をかせぐことにした。この対策をしてからは、放電による MPPC の故障は生じなくなった。

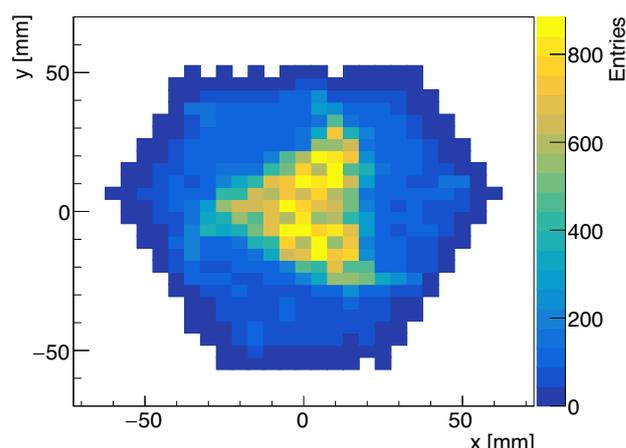


図 9: イベントの光量重心分布。意図しないブーメラン状の構造が見える。

2.3 節で述べた性能評価では、光量重心分布に原因不明の周期的な構造が現れていた (図 9)。しばらくの間原因がわからず色々考察をしていたが、後に veto チャンネル指定ミスと AxFeB のファームウェアのバグの両方が原因であったことが明らかとなった。これにより DAQ 段階で検出領域内部のチャンネルを不当に veto しており、実質的な有効面積が減少した状態での測定となってしまう。

ファームウェアのバグを修正したところ今度は DAQ が動かなくなってしまった。AxFeB の開発者の田中氏は研究室を去っており、またグループにはファームウェアの開発経験があるものもいなかったため、デバッグ作業は開発環境 (Vivado) の使い方を覚えるところからはじまった。問題箇所の特定に 1 ヶ月近い時間を要したが、トリガーボードと AxFeB の間の LVDS 通信のタイミングのずれが原因であることが明らかとなった。さらに、2.2 節での DAQ トラブルの調査も行ったところ、AxFeB 同士が同期していないことが原因であることがわかった。AxFeB 同士を同期させる機能を実装することで、起動直後にデータの取得が開始されない問題を解決した。

相変わらず問題は次から次へと生じてはいるが、今度は最初の場合当たりの対処とは違い、根本的な解決を試みつつ次の測定に進むことができた。

3.2 662 keV での性能評価

ファームウェアのバグ修正により有効体積を増やすことができ、 ^{137}Cs 由来の 662 keV ガンマ線による事象も有効体積内に収まるようになった。放電対策を施した改良版 ELCC の性能評価と併せて、エネルギー分解能のエネルギー依存性を詳細に評価して Q 値まで外挿

するため、複数のガンマ線源を用いてデータ取得を行った。使用したガンマ線源は ^{133}Ba (303 keV, 356 keV, 384 keV)・ ^{22}Na (511 keV)・ ^{137}Cs (662 keV) である。

データ取得は2020年3月30日から4月3日までの5日間で行った。京都大学でCOVID-19感染拡大防止のための研究活動制限措置が取られる前にデータを揃えることができたのは幸いであった。

圧力容器には3.8気圧のキセノンを導入し、2種類のフィルター(モレキュラーシーブとゲッター)を通して循環することで継続的に純化しながら測定を行った。測定期間を通して圧力の変動は < 0.07 気圧と安定しており、露点計によるモニターで水分量 < 0.2 ppmを保っていることを確認している。ドリフト電場とEL増幅電場はそれぞれ目標値である $E_{\text{drift}} = 100$ V/cm/bar と $E_{\text{EL}} = 3$ kV/cm/bar を印加することができた。測定中はELCCでの放電が1日に2回程度生じたが、いずれも継続的なものではなく単発の放電であり、放電するとインターロックが作動し電圧を落とすので、シフターが手動で再度電圧をかけるという体制でデータを取り続けることができた。

解析の際は検出領域に完全に収まる事象のみを残している。具体的には、ELCC面方向についてはELCCの最外層チャンネルにヒットがある事象をカットし、ドリフト方向についてはELCC面を $z = 0$ cmとして、 $2 < z < 9.975$ cmの領域に全ヒットが収まっている事象のみを選択した。ELCC設計時のシミュレーションにおいては $z = 2$ cmで電子を生成しており、 $z < 2$ cmの領域で生成された電離電子についてはELCCへ100%収集されることが保証できない。実際、 $z < 2$ cmを含めるとエネルギー分解能が悪化することが分かったので、全有効体積の20%にもおよぶ領域であるものの、カットして評価することとした。

カット後のデータについて、ELCCの各セルのEL増幅ゲインを揃える補正と、大光量に対するMPPCの非線形応答の補正をした。データ取得は2-3時間のランに分けて行っており、これらの補正はランごとに適用している。図10に、 ^{137}Cs を使用したランで得られた光量分布(エネルギースペクトルに相当)を示す。

補正後の各ランについて K_{α} ピークを揃えることで、ランごとのキセノン温度による変動を補正してラン同士を足し合わせた。さらにドリフト中の電離電子が酸素などの不純物に吸着されて減少する効果を、 K_{α} ピークの z 位置依存性から電子寿命に相当する距離を算出して補正した。これらすべての補正後、662 keVピークに含まれていた事象の飛跡を図11に示す。図8よりも飛跡が長いぶん、 dE/dx のあまり高くない部分とblob部分とが綺麗に分かれているのがわかりやすい。

すべての補正をかけた後、線源ごとに足し合わせたエ

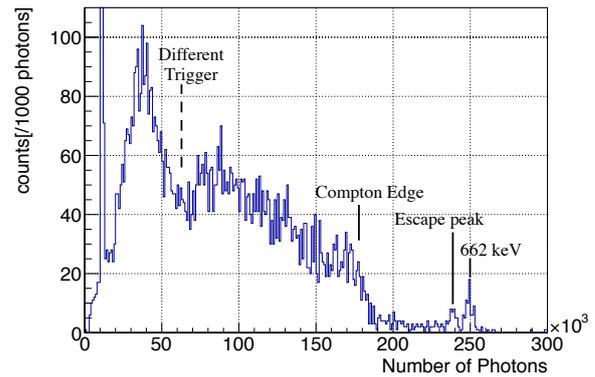


図10: ^{137}Cs ランにカット・補正を施した典型的なスペクトル。

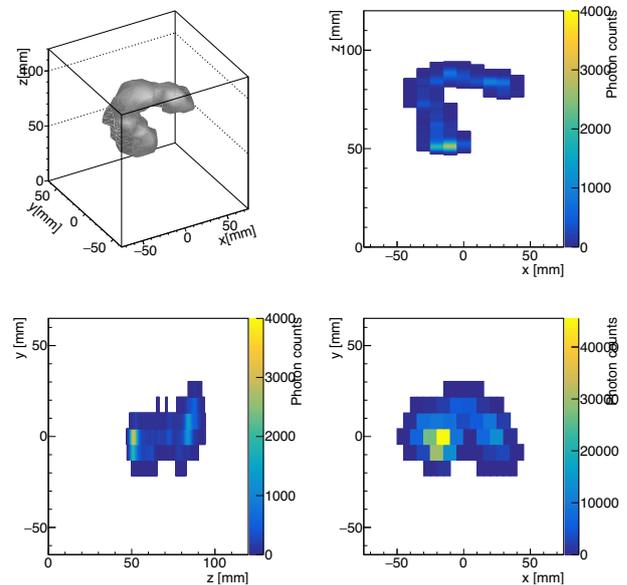


図11: 662 keV 事象のイベントディスプレイ。

ネルギースペクトルに対して、ガンマ線フルピークとエスケープピークをガウス関数でフィットしてエネルギー分解能を評価した。特性X線(K_{α} と K_{β})については全ランを足し合わせて、同じくガウス関数でエネルギー分解能を評価した。特性X線とガンマ線フルピークそれぞれのエネルギーに対するエネルギー分解能(FWHM)を示したものが図12である。2.3節と同様に、 \sqrt{E} の項のみの場合とエネルギーに比例する項も加えた場合とで、ガンマ線フルピークのみについてフィットして評価したところ、それぞれ

$$\text{FWHM [keV]} = (0.3989 \pm 0.0050)\sqrt{E}$$

$$\text{FWHM [keV]} = (0.3877 \pm 0.0469)\sqrt{E}$$

$$+ (0.56 \pm 2.46) \times 10^{-3} \times E$$

となった。つまり、エネルギーに比例する項は十分小さ

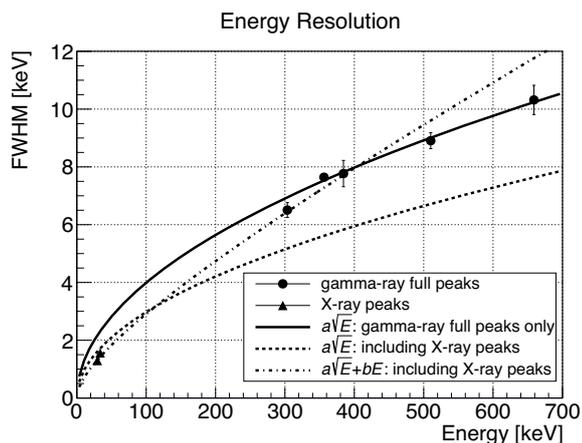


図 12: エネルギー分解能のエネルギー依存性。

く抑えられており純粋に統計的ゆらぎのみがエネルギー分解能に効いているということである。これを用いて外挿すると Q 値でのエネルギー分解能は 0.80%(FWHM)である。

一方、特性 X 線についてはエネルギー分解能がより良く出ている(統計的ゆらぎのみで Q 値に外挿して ~0.5%)。このため、2.3 節ではエネルギーに比例する項が大きく評価されてしまったが、図 12 から分かるように、特性 X 線を含めてエネルギーに比例する項を含めた評価はガンマ線フルピークの分解能をよく説明できない。blob 部分で光量が多いことによる MPPC の出力飽和の影響を補正しきれず、blob 部分よりもエネルギーの低い特性 X 線と比べて、高いエネルギーでの分解能が悪化していると考えている。今後、100 keV 程度のガンマ線による評価で理解を進めていき、MPPC の出力飽和補正の改良などでエネルギー分解能の改善に繋げていく予定である。

3.3 放電箇所の特定と考察

これまで放電箇所を特定するには測定後に ELCC に残った焦げから想像するしかなかったため、焦げ跡が残らないような小さな放電では放電箇所が特定できなかった。また、大気中での放電試験だけではキセノンガス中では放電のしやすさや湿度やほこりの量などの条件が異なるため、放電箇所の究明には限界があった。

そこでわれわれは、180 L 試作機のチェンバー内に市販の USB カメラモジュールをインストールして放電の様子を記録することを試みた。図 13 はチェンバー内にインストールしたカメラで撮影された放電の様子である。動体検知アプリ motion によって、放電の前後 1 秒が自動的に記録される。記録された様子から、ELCC での放電は ELCC の外周部(図中で白色の帯で示した部分)に集中していることが明らかとなった。さらに、2.2

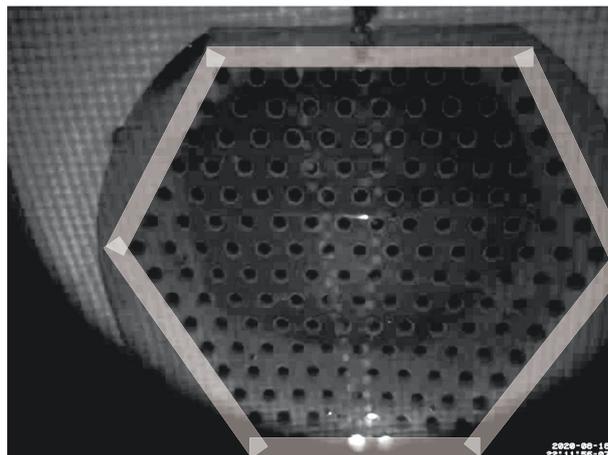


図 13: チェンバー内のカメラによって捕らえられた放電の様子。放電は ELCC 外周部の白色の帯で示した部分に集中していることがわかった。

節で述べたデータ取得中に突然データが取れなくなる DAQ トラブルについても放電のタイミングと同期していることが明らかとなった。

撮影された動画から得られた知見によって、外周部の裏側にも GND 電極を配置することで GND 電極への電場の集中を防ぐ設計に変更し、外周部での放電は解決された。

4 これからについて

未だ改善点は残されているものの、数々のトラブルを克服し安定的にデータを取得して検出器性能の評価ができるところまで到達した。簡単に今後の展望について述べて結びとしたい。

4.1 大型試作機の今後の目標

511 keV と 662 keV における性能評価を達成し、放電耐性を向上させた ELCC の設計も行った次のステップとして、いよいよチャンネル数を増やした検出器の製作・運転を目指していく。12 ユニットの ELCC モジュール(672 チャンネル)、長さ 20 cm のフィールドケージをインストールして有効体積を 8 倍に増やすことで ^{136}Xe の二重ベータ崩壊の Q 値である 2458 keV 付近のエネルギーで直接評価するための準備を今まさに進めている。

その先としてはさらにユニット数を 27 ユニット(約 1500 チャンネル)に増やし、フィールドケージをフルスペックである 40 cm まで拡大させていく予定である。エネルギー分解能の評価のほかにもトラッキング性能の評価や環境・内部放射線バックグラウンドの調査を行っていく。

4.2 さらに感度向上を目指して

4.2.1 機械学習による背景事象削減

この検出器では、 $2\nu\beta\beta$ 事象はエネルギー値によって、アルファ線事象やコンプトン散乱を起こしたガンマ線事象はイベントトポロジーの違いによって、簡単に除去することが可能である。しかし、ガンマ線の光電吸収事象で特に Q 値に近いエネルギーの事象は信号事象と非常によく似ているため除去が難しい。特に問題になると予想されているのは ^{214}Bi 由来の 2448 keV のガンマ線で、これは信号である 2458 keV と 0.4%しか差がないためにエネルギー分解能だけで完全に除去することはできない。そこで両者のベータ線の数の違いから信号事象とガンマ線事象の切り分けを試みようとしている。具体的には機械学習による画像認識アルゴリズムを用いて電子の止まり際に見られる blob 構造の数を判別し信号事象の選別を行う。機械学習では DenseNet [6] を元にしたモデルを用いてシミュレーション事象による学習を行った。シミュレーションを用いた評価として信号効率 53.8%, 背景事象除去率 99.3%という結果を得ている。

この評価はすべてシミュレーションによるものなので、より正確にパフォーマンスを見積もるためには実データによる評価も必要である。たとえば画像認識アルゴリズムの前提となるトラッキングの性能について、フルスペックの 180 L 検出器を用いてデータとシミュレーションの比較などによる評価を検討している。

4.2.2 バリウムイオン検出

1節でも述べたが、ニュートリノ質量の順階層構造まで探索することを考えたとき、トンスケールでバックグラウンドフリーな実験が求められる。 ^{136}Xe の二重ベータ崩壊娘核である ^{136}Ba を捉えることができれば、 $2\nu\beta\beta$ 以外の背景事象は完全に落とすことができる。 $2\nu\beta\beta$ はエネルギー測定で簡単に落とせるので、バリウムをタグすることができれば背景事象のない $0\nu\beta\beta$ 探索が可能となり、ニュートリノ質量が順階層である場合にも高感度で探索を進めることができる。世界では、これまで nEXO グループ [7] が固体キセノンを使って、NEXT グループ [8] が有機極性分子を使って、それぞれ専用セットアップでのバリウム単原子のタグに成功してきた。AXEL でも修士 2 年の菅島を中心にバリウムタグの研究を開始しており、nEXO に倣ってキセノン固液相中でのバリウム原子タグを目指している。具体的には、二重ベータ崩壊により生成される Ba^{++} を冷却した銅プローブに電場で収集し、銅プローブ表面に固着している薄いキセノン固液相中で Ba^+ あるいは Ba 原子に転じたところにレーザーを照射して、バリウム特有の発光を観測してタ

グすることを目指している。すでに冷却銅プローブによるキセノン固液相の生成には成功しており、キセノン固液相中に加熱式のバリウムイオン源で多量のバリウムをドーブして発光を観測すべく、研究が進行中である。ぜひ今後の報告に期待していただきたい。

謝辞

ここで紹介した AXEL 実験 180 L 試作機の研究・開発は JSPS 科研費 15H02088, 16J09462, 17J00268, 18J13957, 18J00365, 18J20453, 18H05540, 19K14738, 20H00159, 20H05251 の助成を受けたものです。また、東京大学宇宙線研究所共同利用研究の助成を受けています。読み出し回路 AxFEB は KEK Open-It の協力のもと開発されました。京都大学の市川温子氏・中家剛氏、東京大学宇宙線研究所の中村輝石氏、東北大学の小原脩平氏、京都大学 OB の田中駿祐氏をはじめとした共同研究者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 市川 温子, 田中 駿佑, 中村 輝石, 潘 晟, 柳田 沙緒里, 高エネルギーニュース, **34-4**, 287 (2016).
- [2] 丸藤祐仁, 井上邦雄, 高エネルギーニュース, **30-3**, 198 (2011).
石原 信弘, 高エネルギーニュース, **26-2**, 85 (2007).
岸本 忠史, 高エネルギーニュース, **24-3**, 182 (2005).
- [3] S. Ban, *et. al.*, Nucl. Instrum. Meth. A. **875**, 185 (2017), arXiv.1701.03931.
- [4] S. Obara, *et. al.*, Nucl. Instrum. Meth. A. **958**, 162803 (2020), arXiv.1909.09343.
- [5] K. Z. Nakamura, *et. al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **67-7**, 1772–1776 (2020), arXiv.2001.20104.
- [6] G. Huang, *et. al.*, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, 2261–2269 (2017), arXiv.1608.06993
- [7] Chambers, C. *et. al.*, Nature **569**, 203–207 (2019).
- [8] A. D. McDonald *et. al.* (NEXT Collaboration), Phys. Rev. Lett. **120**, 132504 (2018).