

比例蛍光読み出しによる1相式液体キセノンTPCの開発

名古屋大学大学院 理学研究科
素粒子宇宙物理学専攻 宇宙地球物理系 宇宙線研究部
博士課程前期2年
261401143 毛笠莉沙子

2016年1月26日

概要

宇宙には、水素など我々がよく知る通常物質の5倍以上もの質量で、暗黒物質と呼ばれる正体不明の物質が存在している。現在、暗黒物質の直接探索実験が世界で盛んに行われており、中でも XMASS 実験等のキセノンを用いた実験では、大量の液体キセノンを標的とし暗黒物質がキセノン原子核を反跳した際に発光するシンチレーション光を観測することで暗黒物質をとらえようとしている。暗黒物質による信号は非常に弱くまれであるため、より感度のよい実験を行うためには、バックグラウンド (BG) となる他の粒子による信号を弁別する必要がある。特に問題となる BG である検出器内壁起源の放射性物質由来の事象は、検出器内での信号の発生位置を特定することで弁別可能である。反応位置の特定から感度向上を目指す場合に Time projection chamber (TPC) という時間情報から位置情報を求める機能を持った検出器が有効である。

液体キセノン TPC は入射した粒子がキセノン中で起した電離により発光する primary scintillation (S1) を start 信号とし、S1 発光の元になる電離電子をキセノン中に生成した電場でドリフトさせ電荷増幅とともに放出する比例蛍光 (proportional scintillation: S2) を stop 信号とする。S1 と S2 の2つの信号を光で読み出し、その時間差を用いて S1 の反応位置を計算することができる。電離電子のドリフトと S2 発光のための電場を生成するため、液体キセノン TPC は電極を必要とする。

現在、世界では2相式液体キセノン TPC による暗黒物質探索実験が稼動し、BG 除去において成果を挙げている。これは S1 を液体中で観測し、電離電子を液相から気相に引き抜いて気体中で S2 発光を起すので2相式と呼ばれている。しかし2相式の TPC には液面安定管理の問題、高電圧の必要性といった問題が存在しており、今後さらなる検出器の大質量化にもなって改善する必要がある。一方、XMASS 実験などの液相のみの1相式キセノン検出器は、S1 情報のみを用いてエネルギーや位置を再構成する。電場が不必要なため、低いエネルギーしきい値や大型化が容易というメリットの反面、位置再構成能力に劣る。本研究では、XMASS 実験のような1相式液体キセノン検出器でも実現可能な TPC を開発し、位置再構成性能の向上を果たすことが目的である。XMASS 検出器のような球状検出器で TPC を実現するためには、検出器形状によらない1相式液体キセノン TPC の開発が求められる。また、1相式液体キセノン TPC を暗黒物質探索に応用するためには、5keV 程度の低い入射粒子エネルギーに対し S2 を読み出す必要がある。そのため本研究では、液体キセノン中の S2 発光の特性研究から、S2 発光に必要な電場のしきい値や発光量などの各パラメータを定量的に求めることを目標に TPC プロトタイプを開発した。

液体キセノン中での S2 読み出しに関する研究は、1979年にタングステンワイヤーを電極に用いた研究、同じくタングステンワイヤーを電極に用いて前者の検証を行った2014年の研究がある。両者ともに S2 発光に必要な電場は 400 kV/cm 以上であると報告している。しかし2015年に報告された ThickGEM 電極を用いた実験では、その10分の1以下の電場で S2 観測を行った例が報告されており、これらの経緯から GEM 電極では低い電場で S2 発光が可能であるのか検証する必要がある。よって本研究ではガラス素材の GlassGEM を電極に用いて TPC プロトタイプを開発した。同時に TPC プロトタイプを運転するために必要な、キセノン導入・液化・保持を行うためのテストベンチも開発した。

開発した TPC プロトタイプの性能評価実験の結果約 500 cc の液体キセノンを検出器に導入し、0.016 MPa、 -106.1°C で2日間以上保持することができた。このキセノンの状態で ^{241}Am 線源から

の 59.5keV γ 線を用いて S1 光量を測定したところ、7.87 p.e./keV と求められた。これは XMASS 検出器とほぼ同等な値である。次に TPC の検証として GlassGEM 電極に電圧を印加し S1 光量のドリフト電場依存性を調べた。その結果、1.2 kV/cm のドリフト電場に対して、40 % の S1 光量の低下が観測された。これは先行研究と矛盾のない数値であり、GlassGEM 電極によって液体キセノン中に期待通りのドリフト電場を形成できた。一方、ドリフト電場を 0.4 kV/cm、GlassGEM 電極両面間に 2.5 kV の電位差をかけて S2 発光のための電場として 37 kV/cm を形成した状態で S2 発光の測定を試みた。しかしながら今回の TPC プロトタイプでは S2 の発光は確認できなかった。これは ThickGEM 電極を用いた先行研究と食い違う結果となった。

目次

概要	i
第 1 章 暗黒物質	1
1.1 暗黒物質の証拠	1
1.2 暗黒物質探索実験	3
1.2.1 液体キセノン検出器	5
第 2 章 1 相式液体キセノン TPC の先行研究	8
2.1 キセノン TPC の原理	8
2.2 液体キセノン中での比例蛍光読み出しに関する先行研究	11
2.2.1 タングステンワイヤー電極を用いた比例蛍光観測	11
2.2.2 タングステンワイヤー電極を用いた比例蛍光観測 2	15
2.2.3 ThickGEM 電極を用いた比例蛍光観測	18
2.3 1 相式液体キセノン TPC の必要性和課題	20
第 3 章 1 相式液体キセノン TPC の開発	21
3.1 TPC プロトタイプ	21
3.1.1 TPC プロトタイプ概要	21
3.1.2 GlassGEM を用いた電極開発	26
3.1.3 電場シミュレーション	30
3.2 キセノン液化テストベンチ	31
3.2.1 テストベンチ概要	31
3.2.2 真空系	33
3.2.3 キセノン導入・回収系	33
3.2.4 冷却系	34
3.2.5 フィードスルー	36
3.2.6 DAQ	37
第 4 章 1 相式液体キセノン TPC の検証実験	38
4.1 実験 1 - キセノン導入・液化・保持試験と S1 光量測定	38
4.1.1 キセノン導入・液化・保持試験	38
4.1.2 S1 光量測定	42
4.2 実験 2 - S1 光量のドリフト電場依存性	46
4.3 実験 3 - S2 発光観測実験	48
第 5 章 まとめと今後の展望	49

第1章 暗黒物質

宇宙に存在する質量のうち、我々がよく知る水素などの通常の物質の割合は少なく、その5倍ほどの正体不明の質量が存在していることが研究によってわかっている。その正体不明の質量源を暗黒物質と呼んでおり、観測的事実からその存在が証明されている。暗黒物質の正体は未だ解明されておらず、実験による観測もされていないが、その有力な候補として WIMP が挙げられる。本章では、暗黒物質研究の歴史と暗黒物質の有力候補である WIMP の直接観測を目指す諸実験について述べ、特に液体キセノンを用いた WIMP 探索実験について詳しく述べる。

1.1 暗黒物質の証拠

始めて暗黒物質の存在を示唆したのは、1930年代のアメリカの天文学者 F.Zwicky によるかみのけ座銀河団の速度分散の解析である [1]。彼は観測した銀河団の速度分散が、光で観測できる質量の分布から計算された値よりも実際に観測された値が大きかったことから光で観測できない質量が存在すると推測し、その質量源を暗黒物質と呼んだ。1970年代には、多くの渦巻銀河の回転曲線の測定が行われ暗黒物質の存在が議論されるようになった

図 1.1 に渦巻き銀河の回転速度曲線を示す。黒点が実測値であり、銀河の中心から距離が大きくなっても回転速度が一定であることを示している。銀河の回転曲線がこのようになるためには、点破線のような暗黒物質による寄与が必要である。光で観測できる物質は銀河の中心付近に集まっているため、光で観測できない暗黒物質が銀河の遠方にまで広がっている証拠と言える。

WMAP による宇宙背景放射の揺らぎの観測から、暗黒物質の存在として、通常のバリオン物質ではない、素粒子的な暗黒物質 WIMP を強く示唆するが証拠が得られた。

WIMP とは Weakly Interactive Massive Particles の略であり、質量が大きく、他の物質とほとんど相互作用しない素粒子の呼称である。これは観測的証拠から要求される暗黒物質の性質をもとに考えられた粒子であり、その性質は、電磁氣的に中性であること、大きな質量を持つこと、宇宙年齢程度の寿命を持ち安定であること、非相対論的であることである。素粒子の標準模型を拡張した超対称性理論によって予言される粒子の中でも最も軽いニュートラリーノが WIMP の候補として有力視されている。

以降、本論文では暗黒物質探索の最も有力な候補である WIMP を観測対象とする実験について述べる。

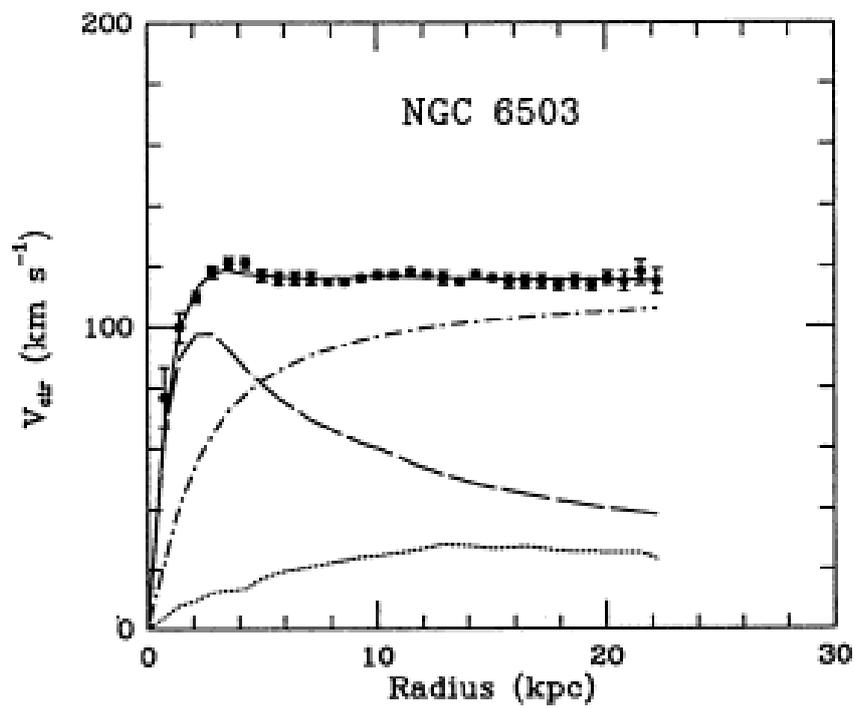


図 1.1: 銀河の観点曲線の例 [2]。渦巻銀河 NGC6503 の銀河回転速度曲線横軸銀河中心からの距離 r 、縦軸が角回転速度である。黒点が実測値で、長破線と最下部の点線はそれぞれ disk の星とガスの質量から見積もられた寄与。点破線が実測値から光で観測可能な質量からの寄与を引いた分を示しており、これがハローの暗黒物質による寄与である。

1.2 暗黒物質探索実験

WIMP は他の物質とほとんど反応せず、弱い相互作用と重力相互作用しかしないため、検出が困難である。WIMP の検出を目指して世界中で行われている実験には直接探索・間接探索・加速器による探索があるが、ここでは WIMP と標的となる原子核との衝突を直接観測することを目指す直接探索について述べる。

WIMP の質量は数 $\text{GeV}/c^2 \sim \text{TeV}/c^2$ と予測され、速度は銀河の回転速度 220km/s 程度で地球へと降り注ぐため、原子核との衝突で核子が受け取るエネルギーは数 $\text{keV} \sim$ 数十 keV と予想される。そのため WIMP の直接観測を行うためには、より低いエネルギーしきい値を持った検出器が必要である。

WIMP 探索において、 100 GeV 程度の重い WIMP に関する観測は報告されていないが、 10 GeV 程度の軽い WIMP (Low-mass WIMPs) に関しては DAMA/LIBRA、CoGeNT などのグループによる季節変動の観測から暗黒物質の存在が主張されている。しかしこれらは他の実験で求められた WIMP 存在領域の制限においては否定されている。

直接探索の手法は、ターゲット原子核の種類や、WIMP と原子核の衝突によって核子が受け取るエネルギーを何を通して観測するかによって異なる。CoGENT は Ge 半導体を用いて電荷を読み出す半導体検出器、CDMS は Si, Ge 半導体を使い電荷と格子振動を読み出すボロメーター検出器、XMASS 実験は液体キセノンからのシンチレーション光を検出するシンチレーション検出器である。

現在、LUX と XENON100 といった液体キセノンを用いた検出器が WIMP の存在領域に対して最も強い制限をつけており、WIMP 直接観測実験をリードしている。液体キセノンは以下に述べる優れた特徴により、現在多くの暗黒物質探索実験に利用されている。図 1.2 に LUX 実験の WIMP 存在領域への制限を示す [3]。本研究は液体キセノンを用いた検出器においてさらなる検出器の感度向上を目指した 1 相式液体キセノン TPC の開発を目的とする。次節において液体キセノン検出器について詳しく述べる。

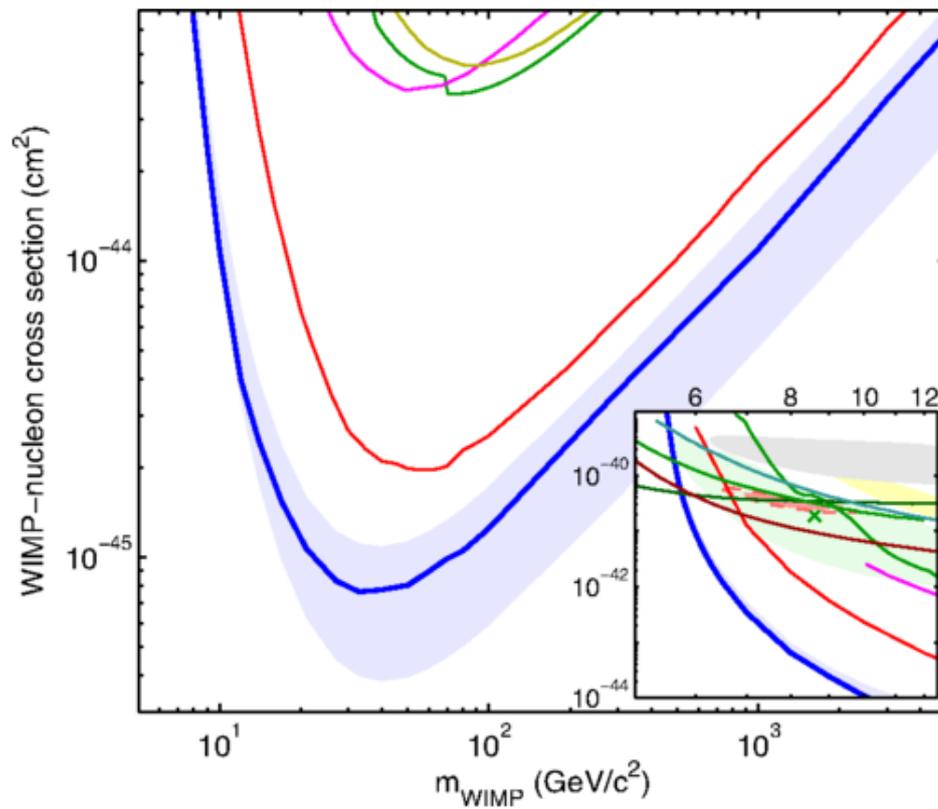


図 1.2: LUX 実験による WIMP 制限曲線 [3]。縦軸が WIMP と核子の反応断面積、横軸が WIMP 質量である。青の実線が最も強い制限である LUX の結果で薄い青のバンドは $\pm 1\sigma$ を示している。右下の図は Low-mass WIMP 部分に関する拡大図。

1.2.1 液体キセノン検出器

キセノンは重い希ガスであり、WIMP との衝突でエネルギーを受け取るとキセノン分子が励起しシンチレーション光を発光する。WIMP 直接探索に対する液体キセノンの利点を以下に述べる。

1. 発光量が多い

WIMP と原子核との反跳で原子核が受け取るエネルギーは数 keV～数十 keV 程度と非常に小さいため、エネルギーしきい値や分解能の面から、ターゲット原子核が受け取る運動エネルギーあたりの発光量が多いことが重要である。液体キセノンは発光量が多く、例えば XMASS 検出器における発光量は 12.5 p.e./keV[4] と、NaI 結晶シンチレーターに匹敵する発光量を達成している。

2. 長波長

キセノンの励起分子から発光するシンチレーション光の波長は約 178 nm であり、これは紫外域の光であるが、比較的高波長なため波長変換材なしで直接 PMT での検出可能である。同じ重い希ガスである液体 Ar の場合ではシンチレーション光のエネルギーが高く 128 nm の波長で発光するため波長変換材が必要となる。

3. 光読み出しによる希ガス検出器

キセノン検出器は、キセノン原子の励起と電離の両方の過程からシンチレーション光を検出することができる。また希ガスであるキセノンは電子を捕獲しないため、電離電子のドリフトや電子の雪崩増幅が可能である。

4. セルフシールドリング

原子番号が大きいので外部からのガンマ線が内部に侵入しにくく、自己遮蔽によりバックグラウンド (BG) の低減が可能。

5. 比較的高温で液化可能

キセノンは $-111.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ という希ガスの中でも比較的高い沸点を持つため、液相・気相の相転換がしやすい。蒸留によって放射性不純物を取り除く純化作業も行いやすく、液体のため検出器デザインにも自由度がある。

これらの利点を持つ液体キセノンを用いた暗黒物質探索実験の例として、本研究が関係する XMASS 実験について述べる。

XMASS 実験 [5] は岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山坑内にて行われており、池の山の地下 1000m に検出器が設置されている。検出器を地下に設置することで宇宙線による BG を低減している。また BG 低減のために、図 1.3 に示すように、検出器は $\phi 10\text{ m}\times 10\text{ m}$ の水タンクのなかに設置され、宇宙線や岩盤からの放射性物質の遮蔽を行っている。水タンク内には 20 インチ光電子増倍管が設置され、水チェレンコフ装置として、宇宙線ミューオンの識別にも用いられる。図 1.4 に示すように、検出器構造は、直径はおよそ 80 cm の真空断熱容器の内側に 642 本の PMT が 60 面体で並べられている。光電面被服率は約 6 割で、1 keV あたりの光量は 12.5 p.e.、トリガーしきい値として 0.5 keV を達成している。その内側にターゲットである液体キセノンが満たされており、質量 835 kg、温度は約 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。

XMASS 実験の特徴は液体キセノンのみを使った 1 相式のシンチレーション検出器としては、世界最大質量であり、観測可能な入射粒子のエネルギーのしきい値が非常に低い (0.5 keV) という点である。これらはターゲット原子核との衝突がまれでエネルギーの小さい WIMP の観測において有利である。

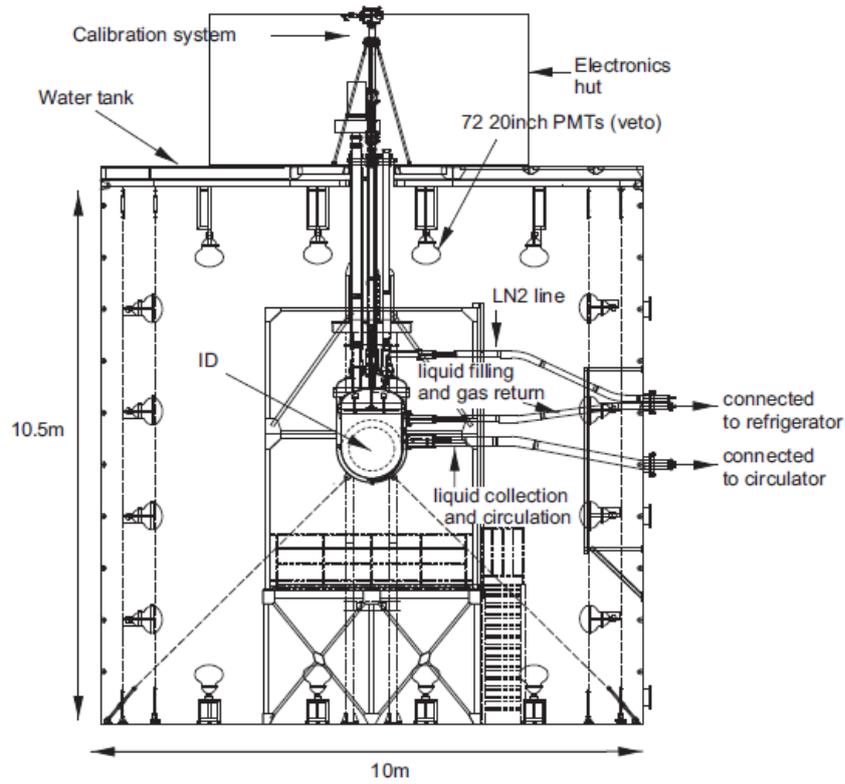


図 1.3: XMASS 検出器の全体図 [5]

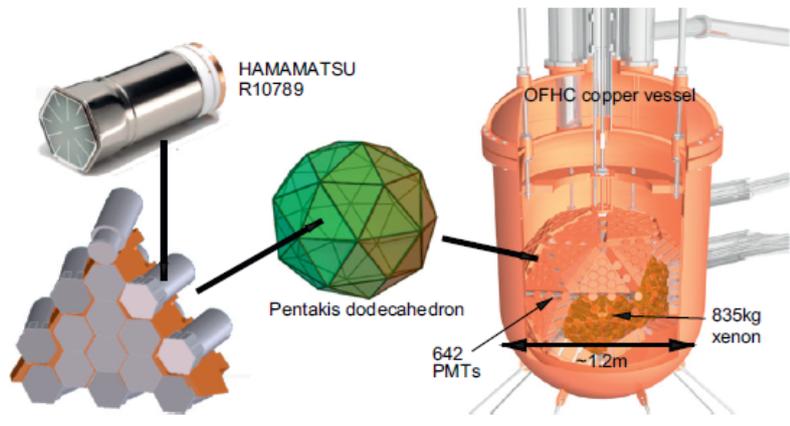


図 1.4: XMASS 検出器の内部構造 [5]

XMASS 検出器では、各 PMT が受け取る光量パターンから反応位置の再構成を行っている。しかし PMT の光電面の影で起こる壁際での BG 事象については光量からの反応位置再構成が上手く行かず、検出器内部で起こったイベントのように見えることがある。このような問題の解決に、時間情報から位置情報を求める機能を持った Time projection chamber (TPC) が有効である。

第2章 1相式液体キセノンTPCの先行研究

2.1 キセノン TPC の原理

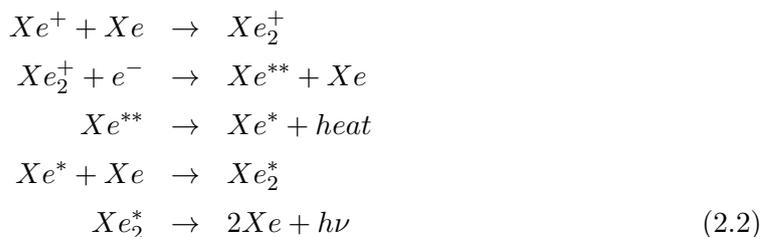
本節ではキセノン TPC の原理を述べる。TPC とは Time Projection Chamber の略であり、start と stop の 2 つの信号を観測することで、その時間差から物質の反応位置を求める機能を持つ検出器である。drift chamber を含め、一般的な TPC は外部から受け取った start 信号と、検出器内で電荷増幅したチャージ信号を電極で読み出した stop 信号を利用する。一方、キセノン TPC は start・stop 信号ともにキセノン自身が発するシンチレーション光の読み出しのみで成立する点が特徴である。

キセノンのシンチレーション光発光過程を述べる [6]。希ガスの場合、シンチレーション光は励起分子の脱励起によって発光する。入射粒子がキセノン原子核にエネルギーを与え、励起分子を生成する過程には、キセノン原子の電離を経るものと経ないものの 2 種類存在する。

- 励起のみの過程



- 電離を経る発光過程



どちらの場合も励起分子から発光するため、同じ波長 178 nm のシンチレーション光が発生する。キセノン中に入射した粒子とキセノン原子との衝突によって発光するシンチレーション光を primary scintillation(S1) と呼び、式 (2.2) の過程で S1 発光のもとになる電離電子を電場によってドリフトし、さらなる高電場によって電荷増幅し発光させた比例蛍光を proportionall scintillation(S2) と呼ぶ。キセノン TPC はこの S1 と S2 を start・stop 信号に利用する。

入射粒子がガンマ線や電子の場合は電子反跳が起こるが、WIMP の場合は原子核反跳を起す。この 2 つの反応では、キセノン電離の際のキセノンイオンと電離電子の密度に違いが生じる。電子反跳の場合、キセノン中での電離損失が小さいくイオンペアが広範囲に分布するため、再結合が起こりにくい。一方、原子核反跳はイオンペアの密度が大きいため再結合が速く起こる。キセノン中にドリフト電場を形成し電離電子をドリフトして S2 発光に利用する際、これらのイオンペア密度の違いから、再結合を逃れてドリフトされる電子の数に違いが現れるため、S1 と S2 の光量比から S1 発光が電子散乱によるものか原子核散乱か判別する particle ID が可能である。大型

暗黒物質探索実験において、XENON100 や LUX のように S2 発光を気体キセノン中で行う 2 相式キセノン TPC がすでに稼動しているが、TPC での反応位置再構成に加えて particle ID も行うことで BG 弁別に成果を出している。

図 2.1 に S1・S2 発光をともに液体キセノン中で行う 1 相式液体キセノン TPC の概念図を示す。上段左が球状の検出器の中心に点電極を設置して中心方向へ電離電子をドリフトする例を示し、右は現在稼動している 2 相式 TPC のように円筒検出器にメッシュ電極を設置し検出器上部へ電子をドリフトする例を示している。

図 2.1 の下段には S1・S2 の PMT 出力の波形をオシロスコープで観測した場合の模式図を示す。電離電子がドリフトされる道筋の違いにより電極への到達時間にばらつきが起こると S2 の波形の幅が広がって観測される。そのため検出器内に一様にドリフト電場を生成する必要がある。観測された S1・S2 の時間差は電子のドリフト時間となるため、電子のドリフト速度を用いて粒子の反応位置から電極までの距離の計算が可能である。

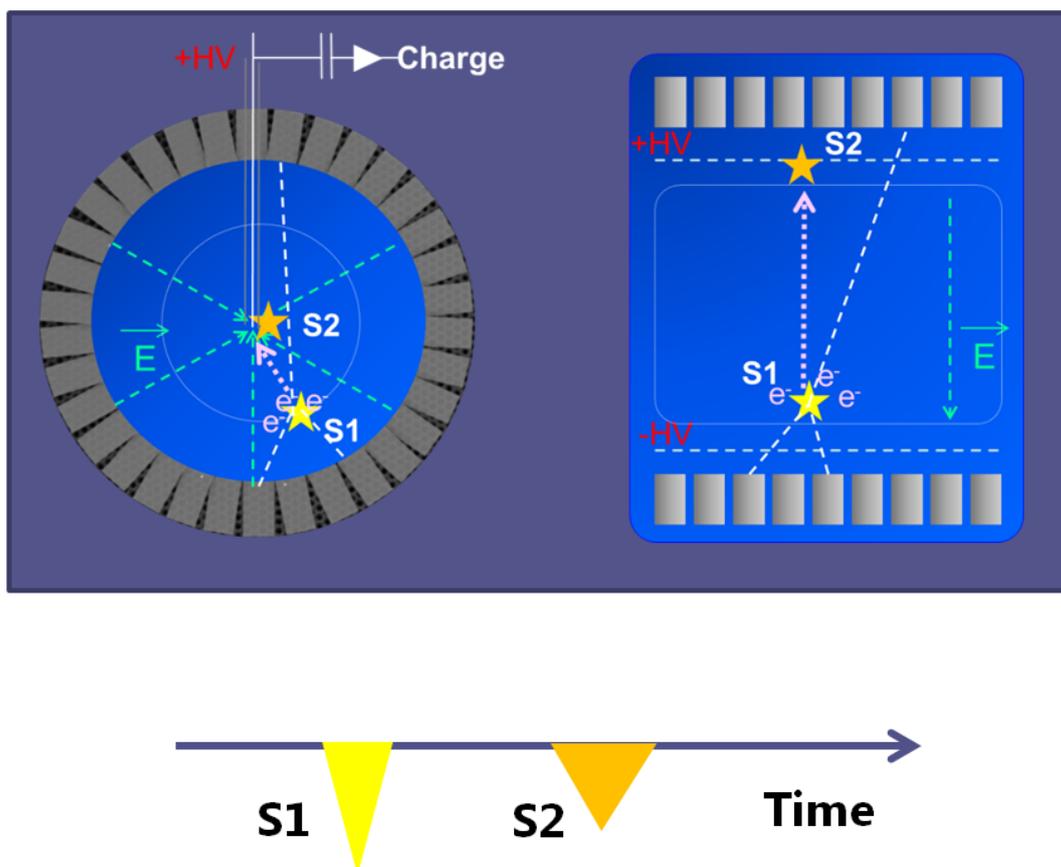


図 2.1: キセノン TPC の模式図。上段：検出器模式図。左が球状の検出器の中心に点電極を設置し、中心方向へ電離電子をドリフトする例。右は現在稼動している 2 相式 TPC のような円筒検出器において、メッシュ電極を液中に設置し検出器上部へ電子をドリフトする例。星印がシンチレーション光の発光を示し、点矢印が電離電子のドリフトを示す。下段：S1・S2 の PMT 出力の波形をオシロスコープで観測したイメージ図。S1 に遅れて、波形の幅が広がった S2 の信号が観測される。2 つの信号の時間差が電離電子のドリフト時間を示す。

暗黒物質探索において、S1・S2 の発光をともに液体中で行う 1 相式のキセノン TPC は未実現であるが、液体中での比例蛍光読み出しの研究は 2 相式の実現以前の 1970 年代に行われており、近年はその検証および電極開発が競争状態にある。それらの研究は S2 発光を起すために必要な電

場のしきい値や、1 電離電子あたりの S2 発光量の測定など、1 相式液体キセノン TPC の実現に向けた液中比例蛍光の特性研究を行っている。その理由は、S2 発光には S1 発光の元になる電離電子を利用するためドリフト電場を大きくするほど S2 発光量が大きくなると同時に S1 発光の発光量が減少するので、S1 と S2 の両方を観測するためには、できるだけ少ない電離電子で十分な S2 発光量を得ること、S1 発光のためのエネルギーしきい値を暗黒物質探索に必要な 5keV 程度に抑えたまま S2 発光を行うことが求められるからである。

次節から液体キセノン中での比例蛍光読み出しに関する先行研究を紹介する。

2.2 液体キセノン中での比例蛍光読み出しに関する先行研究

2.2.1 タングステンワイヤー電極を用いた比例蛍光観測

はじめに、本研究を始めるきっかけとなった研究である、1979年に発表された液体キセノン比例蛍光カウンターに関する研究を紹介する [7]。

この研究以前にも液体キセノン中の電荷増幅および S2 発光の観測は報告されていたが [8]、詳しい特性の検証はされていなかった。そのためこの実験では比例計数管のような構造を液体キセノン中にしずめて S2 の観測を行い、液体キセノン中での S2 発光に必要な電場のしきい値を報告している。

図 2.2 に実験セットアップを示す。PMT の直前に GND に接続したメッシュ電極 (S) を設置し、そこに金属プレートに塗った ^{207}Bi 線源が貼り付けてある。比例計数管の陰極が面積 $7.5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、長さ 30 mm の箱 (K) であり常に $+4\text{ kV}$ を印加してある。箱の中心に張った陽極ワイヤーであるタングステンワイヤー (W) に $+5\text{ kV} \sim +8\text{ kV}$ を印加することで線源電極・陽極間に電場を形成している。また、これらの構造全体を液体キセノン内に設置し、ワイヤー径を $4\text{ }\mu\text{m} \sim 20\text{ }\mu\text{m}$ まで変更しながら実験を行っている。

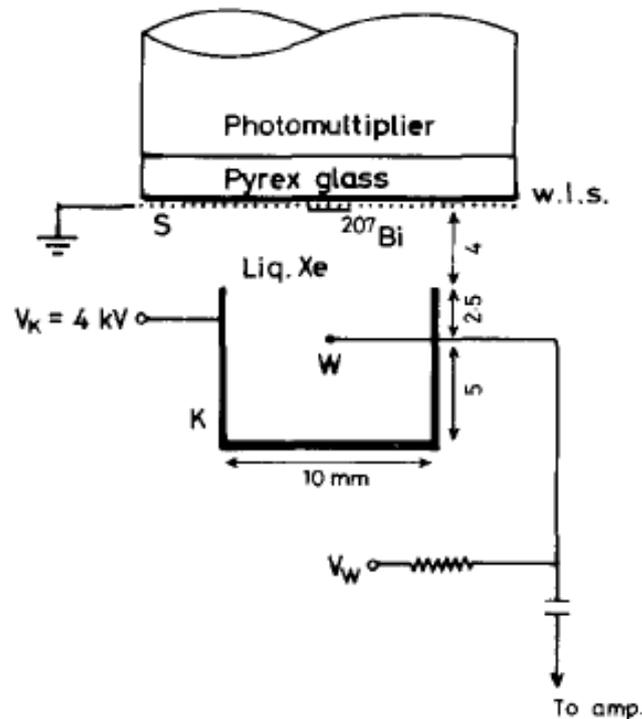


図 2.2: 液体キセノンを用いた比例蛍光カウンター概要図 [7]。上部から PMT、線源設置のための GND 電極 S、比例計数管陰極 K、中心陽極のタングステンワイヤー W である。K の電位は $+4\text{ kV}$ に固定されており、W に印加する電圧を $+4\text{ kV}$ 以上で変化させながら比例蛍光を観測している。

S2 の観測手順を述べる。S に設置された線源付近で S1 が発生し、そのとき同時に発生した電離電子は GND よりも電位の高い K および最終的に W に引き寄せられていく。そして W 表面付近で急激に大きくなった電場によって電荷増幅および S2 発光が起きる。PMT によって S1・S2 を観測し、W に接続した電荷有感型前置増幅器 (チャージアンプ) によって電荷を測定している。

図 2.3 はオシロスコープの写真で、観測した発光波形とチャージアンプ出力波形が示されている。a が W に接続したチャージアンプからの信号で、電子の到達により電荷が誘導された様子がわ

かる。また b が PMT からの信号で、先の小さい波形が S1 でデータ取得のトリガー信号にもなっており、後ろの大きな波形が S2 である。両者の間が電離電子のドリフトにかかった時間 $4.5\mu\text{s}$ 程度である。

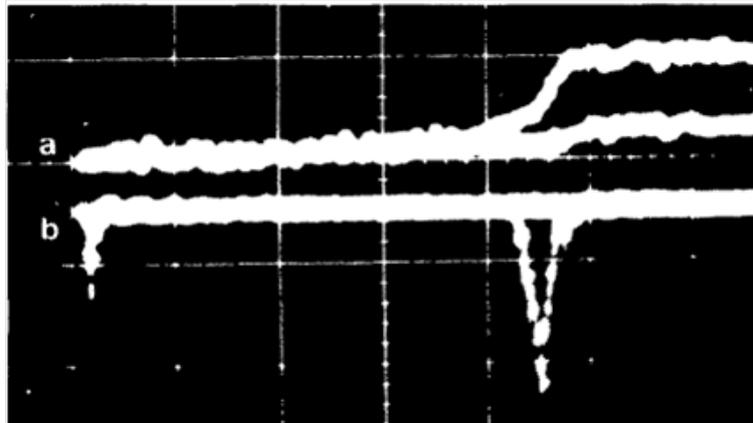


図 2.3: オシロスコープで観測したチャージアンプ出力と PMT 出力の波形 [7]。横軸 $1\mu\text{s}/\text{div}$ のオシロスコープ図。a がチャージアンプからの出力。b が PMT 出力の波形であり、1 つ目の波形が S1 でありトリガー信号に使われている。2 つ目の波形が S2 の波形である。

図 2.4 にタングステンワイヤーの直径を変えながら、ワイヤーへの印加電圧 V と電荷増幅率 Q の関係をプロットした図を示す。ワイヤー径 $4\mu\text{m}$ の場合は 1.5 kV あたりから急激な Q の増加がみられ電荷増幅が起きたことがわかる。またワイヤー径 $20\mu\text{m}$ の場合には $4\mu\text{m}$ の場合よりも電圧が必要で、 5 kV あたりから電荷増幅が起こっている。これより、ある電場勾配以上で電荷増幅が起こることがわかる。

図 2.5 にワイヤーへの印加電圧 V に対する S2 光量 L の関係をプロットした図を示す。ワイヤー径を $4\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ まで変えて測定しており、いずれのワイヤー径でもある電場以下では光子が観測できず、破線になっている。この現象から S2 発光が起こるための電場にはしきい値があるとわかる。しきい値は図 2.5 のプロットへ、気体キセノン中での比例蛍光発光量の式を液体キセノン中の円筒電場というセットアップに合わせて変形した式 (2.3) でフィッティングし、求めている。

$$L = Br_1 \left[A + E_s \left(\ln \frac{E_s}{A} - 1 \right) \right] \quad (2.3)$$

S2 発光のための電場のしきい値は $E_{th} = A = ap/b$ で表され、 $B = \eta b$ 、 $a = 0.0074$ 、 $b = 0.0066$ 、 η は比例係数である。ワイヤー近傍の電場を、陽極ワイヤー半径 r_1 、比例計数管の陰極半径 r_2 として $E_s = V/[r_1 \ln(r_2/r_1)]$ と表している。

図 2.6 にワイヤー径 $4\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ でのフィッティング結果を示す。また表 2.1 にこのフィッティングから求められた電場のしきい値を示す。

表 2.1: S2 発光電場しきい値

ワイヤー径 (μm)	4	10	20
電場しきい値 (kV/cm)	700	490	410

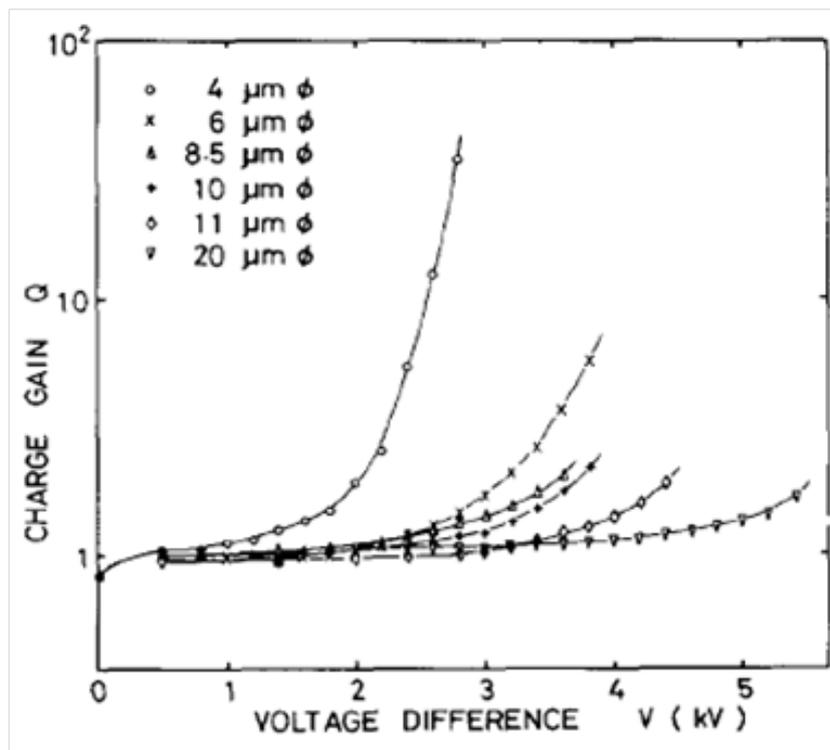


図 2.4: 電荷増幅率と印加電圧 [7]。ワイヤーへの印加電圧 V と電荷増幅率 Q の関係を調べたプロットである。左からワイヤー径 $4 \mu\text{m}$ 、 $6 \mu\text{m}$ 、 $8.5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ の結果である。 $4 \mu\text{m}$ の場合は 1.5 kV あたりから急激な Q の増加がみられる。

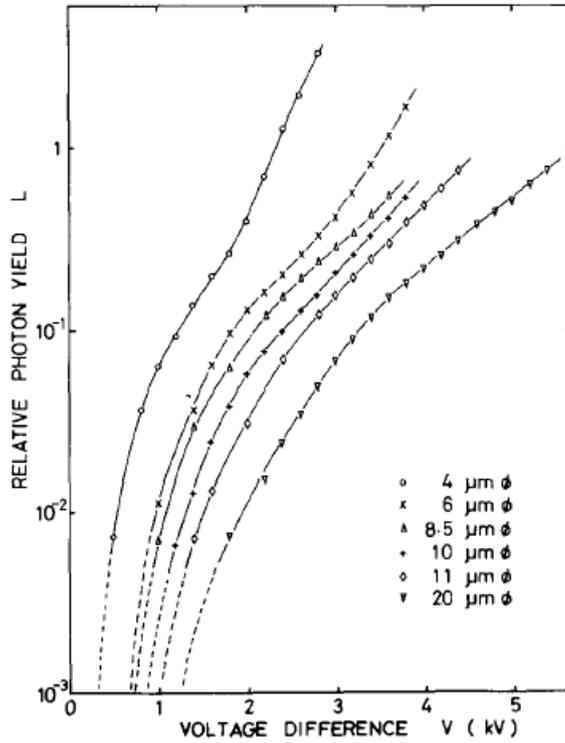


図 2.5: 発光量と印加電圧の関係 [7]。ワイヤーへの印加電圧 V と S2 光量 L を調べた結果のプロットである。左からワイヤー径 $4 \mu\text{m}$ 、 $6 \mu\text{m}$ 、 $8.5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ の結果である。破線部分は S2 の光子が観測できなかった領域。

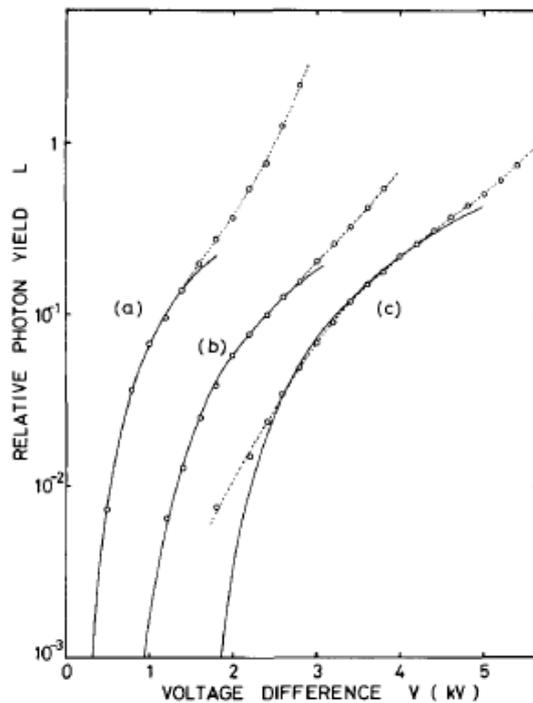


図 2.6: 発光量と印加電圧の関係を式 (2.3) でフィッティングした結果 [7]。図 2.5 のワイヤー径 $4 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ のプロットに対してフィッティングを行っている。

2.2.2 タングステンワイヤー電極を用いた比例蛍光観測 2

前節の研究の検証実験として 2014 年におこなわれた実験を紹介する [9]。この実験は 1 章で紹介した XENON100 のグループによって行われ、いわば暗黒物質探索用 1 相式液体キセノン TPC の実現に向けたテスト実験だと言え、本研究と目的を同じとする。

図 2.7 に実験セットアップを示す。前節の実験装置は筒型の陰極と陽極ワイヤーの比例計数管の形を取っていたのに対し、本節の実験では液体キセノン中にメッシュ電極を層状に設置することで PMT 光電面に対して平行な電場を形成し、液体キセノン領域全体を使って電子のドリフトを行っている。下から順に、針状の ^{210}Po 線源を設置した cathode、平行電場形成のためのガイドの役割をもつ gate grid、そして電荷増幅および S2 発光を引き起こす anode ワイヤーが積み上げられており、anode よりも上の領域は発光には関係がなく、protection grid をはさんで PMT 光電面直前を GND にしている。anode はステンレスの枠にタングステンワイヤーを 1 本張った構造で、ワイヤーは $\phi 5 \mu\text{m}$ 、 $\phi 10 \mu\text{m}$ の 2 種類で実験を行っている。cathode と gate grid 間の電子のドリフトのための電場は $\sim 1 \text{ kV/cm}$ に保たれ、anode には gate grid に対して $+0.4 \text{ kV} \sim +6.5 \text{ kV}$ の電位が与えられている。

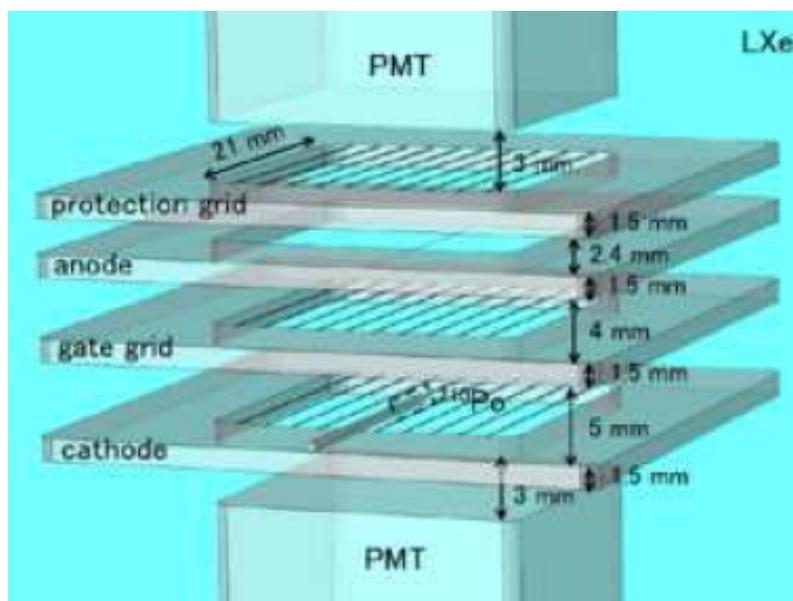


図 2.7: TPC 模式図 [9]。上下 2 本の PMT の間に電極が積み上げられている。電極は下から、cathode および線源、gate grid、anode が設置されている。

図 2.8 に cathode に -0.5 kV 、gate grid に 0 V 、anode に $+5 \text{ kV}$ を印加した際の液体キセノン中での電気力線のシミュレーション図を示す。cathode 上の線源から anode までを結ぶ電気力線が 3 通りあり、電子がドリフトされる道筋を示している。

図 2.9 はオシロスコープの写真で、 ^{210}Po 線源由来の 5.4 MeV α 線により観測した電荷信号と PMT 出力の波形が示されている。cathode に -0.5 kV 、gate grid に 0 V 、anode に $+6.5 \text{ kV}$ を印加した際の観測結果である。図の上側 2 本の線が上下 PMT からの波形信号であり、波形ははじめの小さい波形が S1、後の大きい波形が S2 の信号となっている。下側の線が anode ワイヤーに取り付けられたチャージアンプによる電荷信号であり、S2 発光と同時に電荷到達による誘導電荷が観測されている。

図 2.10 に anode ワイヤーへの印加電圧に対する電荷信号および S2 発光量のプロットを示す。anode ワイヤー径 $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ それぞれの場合において、印加電圧を大きくすると、あるところから観測量が増えているのがわかる。また太いワイヤーの方が高電圧を印加しても放電したり切

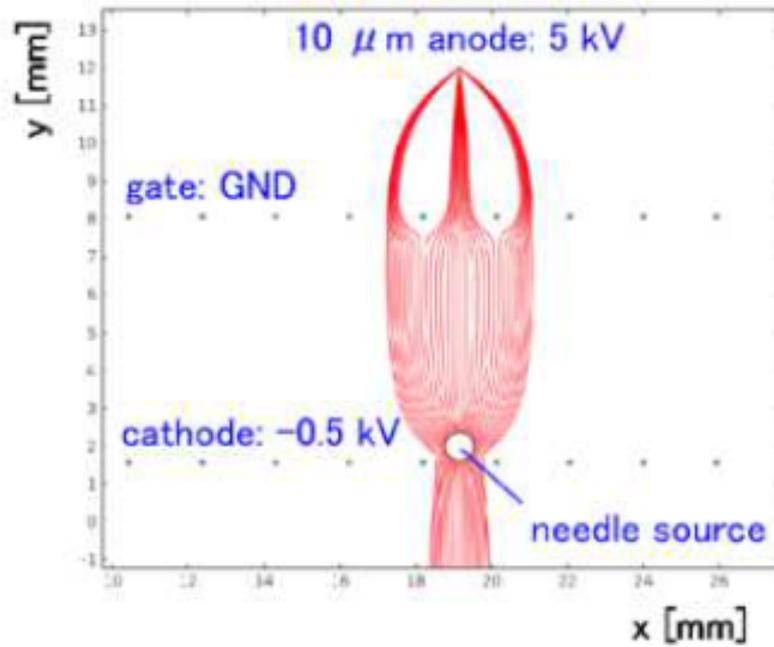


図 2.8: 電気力線のシミュレーション [9]。cathode に -0.5 kV、gate grid に 0 V、anode に $+5$ kV を印加した際の液体キセノン中での電気力線のシミュレーション図を示す。cathode 上の線源から anode までを結ぶ電気力線が 3 通りあり、電子がドリフトされる道筋を示している。

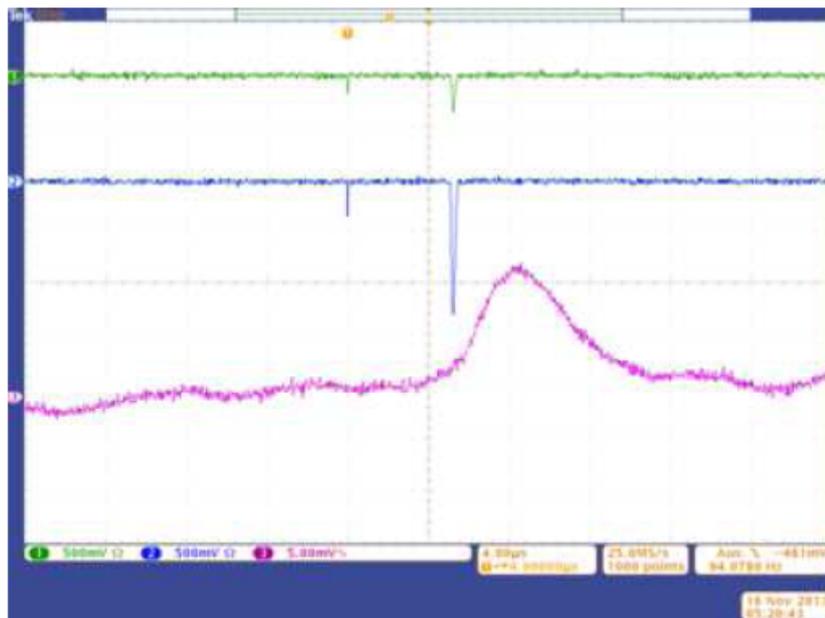


図 2.9: オシロスコープで観測した電荷信号と PMT 出力の波形 [9]。cathode に -0.5 kV、gate grid に 0 V、anode に $+6.5$ kV を印加した際の ^{210}Po 線源由来の 5.4 MeV α 線による観測結果。上 (緑) と中 (青) : 上下 PMT からの波形信号。はじめの小さい波形が S1、後の大きい波形が S2 の信号である。下 : anode ワイヤーに取り付けられたチャージアンプの出力。電荷到達による誘導電荷の観測と同時に S2 が発光している。

れたりにくいため、高い電圧 V を印加して測定できている。

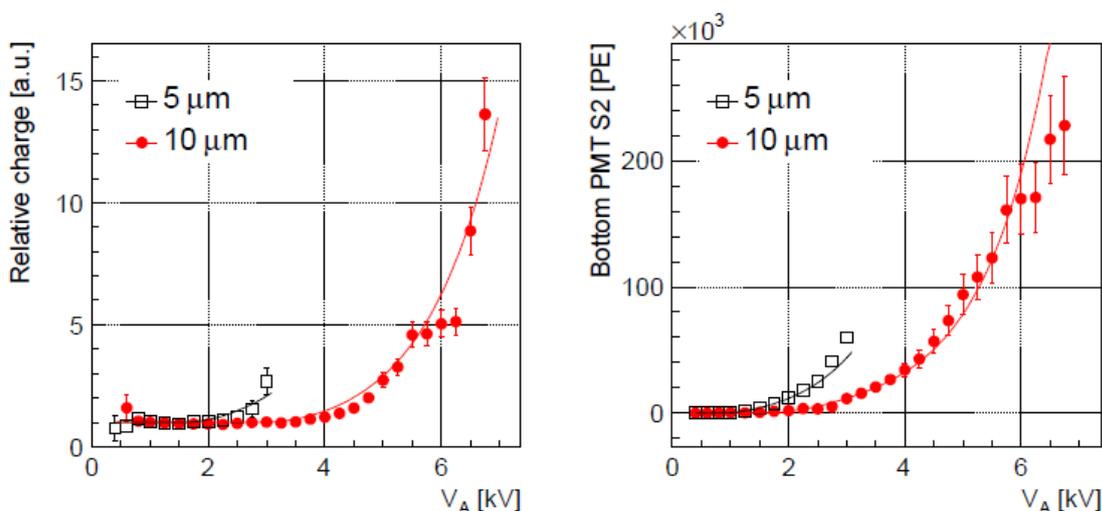


図 2.10: 印加電圧に対する測定結果 [9]。左：電荷信号のプロット。anode ワイヤ径 $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ それぞれにおいて、印加電圧を大きくするとあるところから急激に誘導電荷が観測されている。右：S2 発光量のプロット。電荷信号と同様に印加電圧を大きくすると観測量が増えているのがわかる。

最後に図 2.11 の観測結果へのフィッティングで求められた各パラメータの表を示す。フィッティング方法は前節の実験と同様に、式 (2.3) を使用している。S2 発光のための電場しきい値は $\phi 5 \mu\text{m}$ と $\phi 10 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤを用いた実験結果のフィッティング結果 θ_4 の S2 threshold において $412^{+10}_{-133} \text{ kV/cm}$ と報告されている。これは前節の実験と近い値であり、約 40 年ぶりに液体キセノン中での比例蛍光発光に関する検証がなされたといえる。また 1 電離電子あたりの S2 発光量も 209^{+95}_{-75} 光子と求められている。

parameter	10 & 5 μm	only 10 μm	only 5 μm
θ_0 : charge gain factor [$1/(\mu\text{m}\cdot e^-)$]	0.80 ± 0.10	1.15 ± 0.15	1.46 ± 0.02
θ_1 : slope in charge gain [kV/cm]	242 ± 45	561 ± 119	298 ± 1
θ_2 : threshold of charge mult. [kV/cm]	725 ± 48	586 ± 47	750 ± 1
θ_3 : S2 gain factor [$\text{PE}/(\text{kV/cm}\cdot\mu\text{m})$]	16.6 ± 1.1	13.3 ± 0.4	17.9 ± 3.4
θ_4 : threshold of S2 [kV/cm]	412 ± 10	399 ± 7	416 ± 13
χ^2/ndf	$125/63$	$71.4/42$	$19.9/16$
θ_3 : S2 gain factor [$ph/e^-/(\text{kV/cm}\cdot\mu\text{m})$]	$(2.09^{+0.65}_{-0.47}) \times 10^{-2}$	$(1.68^{+0.51}_{-0.36}) \times 10^{-2}$	$(2.26^{+0.80}_{-0.65}) \times 10^{-2}$

図 2.11: フィッティングパラメーターの表 [9]。図 2.11 の観測結果に対して式 (2.3) でフィッティングした結果から求めた各パラメータを示している。S2 発光のための電場しきい値は $\phi 5 \mu\text{m}$ と $\phi 10 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤを用いた実験結果のフィッティング結果 θ_4 の S2 threshold において $412^{+10}_{-133} \text{ kV/cm}$ と示されている。同様に 1 電離電子あたりの S2 発光量も 209^{+95}_{-75} 光子と示されている。

2.2.3 ThickGEM 電極を用いた比例蛍光観測

最後に 2015 年に行われた ThickGEM という電極を用いた研究について紹介する [10]。GEM とは Gas Electron Multiplier の略であり、薄いフィルムの表裏が銅電極になったものの全体に小さな穴が無数に空けられた構造である。中でも基板が 1 ミリ程度の比較的厚いものを ThickGEM と呼ぶ。表裏の銅電極に電位差を与えることで穴の内部に急激な電場勾配を形成できるので、電荷増幅および S2 発光に利用できる。詳しい発光原理は小節 3.1.2 で述べる。

図 2.12 に実験セットアップを示す。電極は ^{241}Am 線源を設置した cathode と ThickGEM、PMT 保護のため GND に接続したメッシュ電極が水平に積み上げられている。この実験で使用された ThickGEM は、厚さ 0.4 mm の G10 基板の表裏が銅電極になっており、直径 0.4 mm の穴が 1 mm ピッチで無数に開けられている。cathode から ThickGEM 上面までの電離電子のドリフトのための電場は 1 kV/cm で固定し、ThickGEM 上下面への印加電圧を変更することで S2 発光のための電場を形成する。線源付近で発光した S1 と ThickGEM の穴付近で発光した S2 信号を測定している。

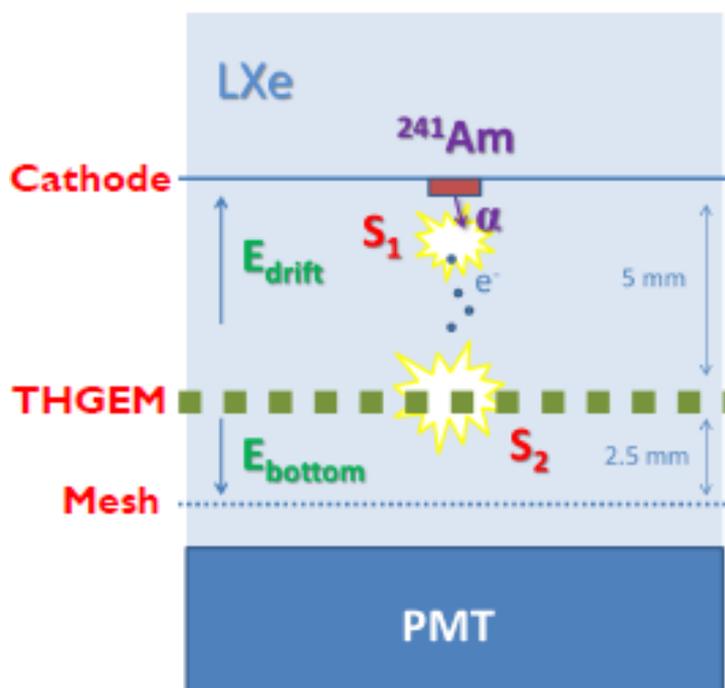


図 2.12: ThickGEM 設置の模式図 [10]。上部から ^{241}Am 線源を設置した cathode と ThickGEM、PMT 保護のため GND に接続したメッシュ電極が水平に積み上げられており、線源付近で発光した S1 と ThickGEM の穴付近で発光した S2 信号を最下部の PMT で測定している。

図 2.13 にオシロスコープで観測した S1 と S2 の PMT 出力の波形を示す。ThickGEM 上下面への印加電圧 500 V~2500 V の 4 種類において S1・S2 の PMT 出力の波形を観測している。電極の厚みが 0.4 mm より GEM の穴中に形成されている電場は 1.2 kV/cm~62.5 kV/cm と計算される。左上 A 図の印加電圧 500 V、電場 1.2 kV/cm の場合でも S2 の波形が観測されている。

図 2.14 に印加電圧に対する S2 波形の電荷積分値を示す。縦軸に S2 の PMT 出力の波形を積分した S2 area (mV $\cdot\mu$ s)、横軸に ThickGEM 上下面への印加電圧 (V) をプロットしており、印加電圧を大きくするほど S2 の電荷積分値が大きくなっており、S2 発光量が大きくなるのがわかる。印加電圧と発光量の関係は比例関係で近似できる。

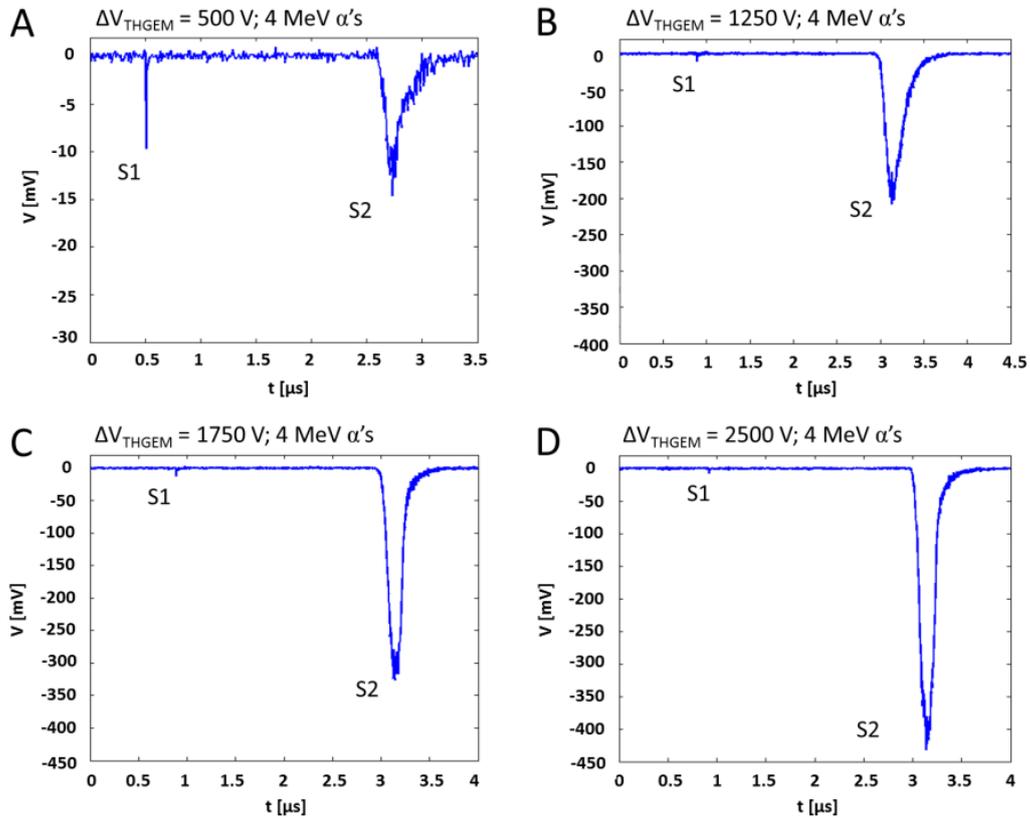


図 2.13: オシロスコープで観測した S1 と S2 の PMT 出力の波形 [10]。左上から ThickGEM 上下面への印加電圧 500 V、1250 V、1750 V、2500 V の場合の PMT 出力の波形信号。4 つの場合と S1・S2 信号が観測されている。

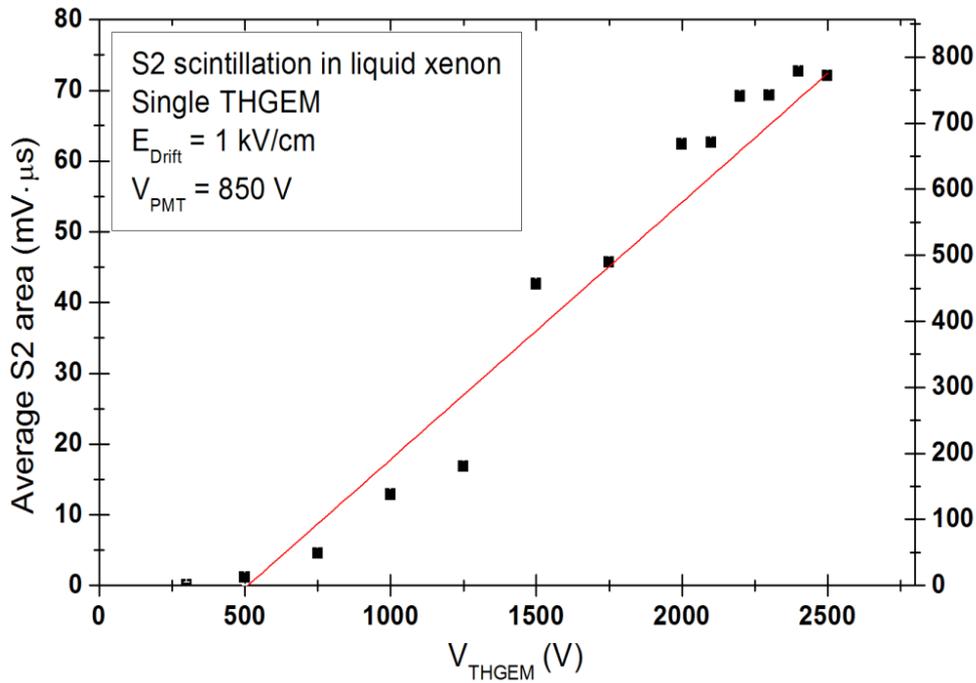


図 2.14: 印加電圧に対する S2 波形の電荷積分値 [10]。縦軸に S2 の PMT 出力の波形を積分した S2 area (mV· μs)、横軸に ThickGEM の表裏に印加した電圧 (V) をプロットしたグラフ。電位差を大きくするほど S2 の電荷積分値が大きくなり、印加電圧と発光量の関係は比例関係で近似できる。

タングステンワイヤー電極を用いた実験では、S2 発光に必要な電場のしきい値は、前者がワイヤー径 $20\ \mu\text{m}$ において $410\ \text{kV/cm}$ 、後者が $\phi 5\ \mu\text{m}$ と $\phi 10\ \mu\text{m}$ の測定結果のフィッティングから $412_{-133}^{+10}\ \text{kV/cm}$ と報告されている。一方、この実験では数 kV/cm の電場から S2 発光が起きたと報告されており、光子の観測をスムーズに行うことができたとされている場合の電場 $30\ \text{kV/cm}$ と比較しても、タングステンワイヤー電極実験での 10 分の 1 の電場である。また 1 電離電子あたりの S2 発光量も 2 つめのタングステンワイヤー電極実験で 209_{-75}^{+95} 光子と求められているのに対して、この実験では ~ 600 光子と、S2 発光量も大きい。

GEM 電極を使用した場合に、上記のように小さい電場で大きな S2 発光量が得られた原因として、以下の 2 つが推測できる。

- 構造の小さい穴の角部分で高電場が形成された
- 穴部分にキセノンの気泡がたまってしまい、ガス増幅が起きた

これらの推測の検証のため、本研究ではガラス素材の GlassGEM 電極を用いて TPC 開発を行い、この ThickGEM 電極を用いた実験結果との比較検証を行う。

2.3 1 相式液体キセノン TPC の必要性と課題

現在、2 相式のキセノン TPC が暗黒物質探索において安定して稼動し、TPC の反応位置再構成と particle ID によって BG 除去に成功している。しかしながら 2 相式の TPC には、長期間の観測をする際に液相と気相の間の液面管理の安定性の問題や、液相の上部に気相の部分を作らなくてはならないため検出器形状に制限がある。これらの点を踏まえると、今度の暗黒物質探索に要求される長期的に大質量のキセノンを用いた検出器において、さらなる感度向上への手法として 1 相式の TPC が考えられる。特に XMASS 検出器のような球状の検出器を TPC 化するには 1 相式の実現が不可欠である。

TPC プロトタイプでの検証実験において、検出器への入射粒子のエネルギーごとに S1・S2 の発光量がどれだけ得られるのかを定量的に求めることで、1 相式 TPC が暗黒物質探索に有効であるかの判断につながる。その理由は、S2 発光には S1 発光の元になる電離電子を利用するためドリフト電場を大きくするほど S2 発光量が大きくなると同時に S1 発光の発光量が減少するので、S1 と S2 の両方を観測するためには、できるだけ少ない電離電子で十分な S2 発光量を得ること、S1 発光のためのエネルギーしきい値を暗黒物質探索に必要なエネルギーである 5keV 程度に抑えたまま S2 発光を行うことが求められるからである。

前述のように、タングステンワイヤー電極を用いた実験で求められた S2 発光のための電場のしきい値が $412_{-133}^{+10}\ \text{kV/cm}$ であるのに対して、ThickGEM 電極を用いた実験ではその 10 分の 1 の電場でも S2 の発光が観測されている。これはとても興味深い結果であり、GEM を用いると低い電場でも S2 発光が可能かどうかを検証する必要がある。そのために本研究では、将来的に球状の TPC を見据えつつも、まずは円筒形の簡単な検出器形状において、GEM を電極に用いて TPC プロトタイプを開発した。

以後、3 章では本研究において開発を行った TPC プロトタイプの概要、TPC を運転するために必要な、キセノン導入・液化・保持を行うためのテストベンチの概要を述べる。さらに、4 章において、テストベンチを用いて行ったキセノン導入・液化・保持試験と S1 光量測定実験、TPC プロトタイプの検証として行った S1 光量のドリフト電場依存性の確認および S2 観測実験について述べる。

第3章 1 相式液体キセノン TPC の開発

本章では、TPC プロトタイプの開発、およびキセノン液化テストベンチの開発について述べる。これらは 2014 年 10 月から設計を開始し、岐阜県飛騨市神岡町にある神岡宇宙素粒子研究施設の研究棟 1 階にある実験室に組み立てた。

3.1 TPC プロトタイプ

3.1.1 TPC プロトタイプ概要

図 3.1 に開発した TPC プロトタイプの模式図を示す。2 本の光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube:PMT) で上下から液体キセノン領域をはさんでおり、液体キセノン領域中には、GlassGEM 電極 1 枚、 ^{241}Am 線源、そして PMT の直前にそれぞれ 1 つずつ GND 電極がある。GlassGEM 電極の下面に + HV を印加し、上面には下面よりもさらに高い + HV を印加することによって、下 GND 電極から GlassGEM 下面までに電離電子ドリフトのための電場を形成する。そして GlassGEM 上下面間に与えた高電位によって GlassGEM の穴の中に電荷増幅および S2 発光のための高電場を形成する。 ^{241}Am 線源付近で S1 発光が起こり、S1 発光の元になる電離電子をドリフトし、GlassGEM 電極の穴を上面に抜ける際に S2 発光が起こる。このセットアップでは GlassGEM によって遮られ S1 が上 PMT まで届きにくいいため、S1 信号を下 PMT で、S2 信号を上 PMT で測定することを想定している。

このような TPC プロトタイプの構造を円筒形の真空容器の内部に組み上げており、その容器を内真空容器 (Inner vacuum chamber:IVC) と呼んでいる。

図 3.2 に IVC の内部構造を示す。2 本の PMT の間に液体キセノン領域を生成し、かつ IVC 内の液体キセノンの余分な容量を減らすためのテフロン spacer を設計した。これは IVC 内径に合わせた $\phi 95\text{ mm}$ の円柱型であり、中央には PMT の光電面に合わせた $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ の穴を開けた。この spacer を高さ 50 mm に積み上げることで、体積 500 cc の角柱型の液体キセノン領域を形成している。薄いテフロン spacer は何枚か積み上げる構造により、spacer 間に電極を設置したり、電極の位置を調節したりできる機能を持つ。また内部線源・LED を設置する構造を持つ spacer も用意した。PMT 固定用の spacer には PMT の筒を GND にたもつためステンレスを使用した。これらの spacer は IVC の底に設けたねじ穴と 4 本のねじ棒を用いて積み上げた。

図 3.3 に PMT の写真を示す。PMT は浜松ホトニクス製の R8520-406 という製品を使用しており、光電面は $24\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ の正方形で、全長は 28 mm という角柱型をしている。ブリーダ回路は、低溶出材料を用いて浜松ホトニクスと新たに開発したもので、光電面が cathode となっている + HV 式の PMT である。最大印加電圧は 900 V で、PMT に高電圧を印加するための電源は林栄製の RPH-011 を使用した。

また図 3.4 に示すように、PMT の固定はステンレスホルダーに PMT をはめ込み、基板ごと PEEK のつめ状の部品とねじでとめる方法をとった。また液体キセノンの水面が PMT まで達しているかを温度から確認するため、PMT ホルダーにねじ止めで温度計を設置した。IVC 内部にはステンレスホルダーごとねじ棒を用いて積み上げている。

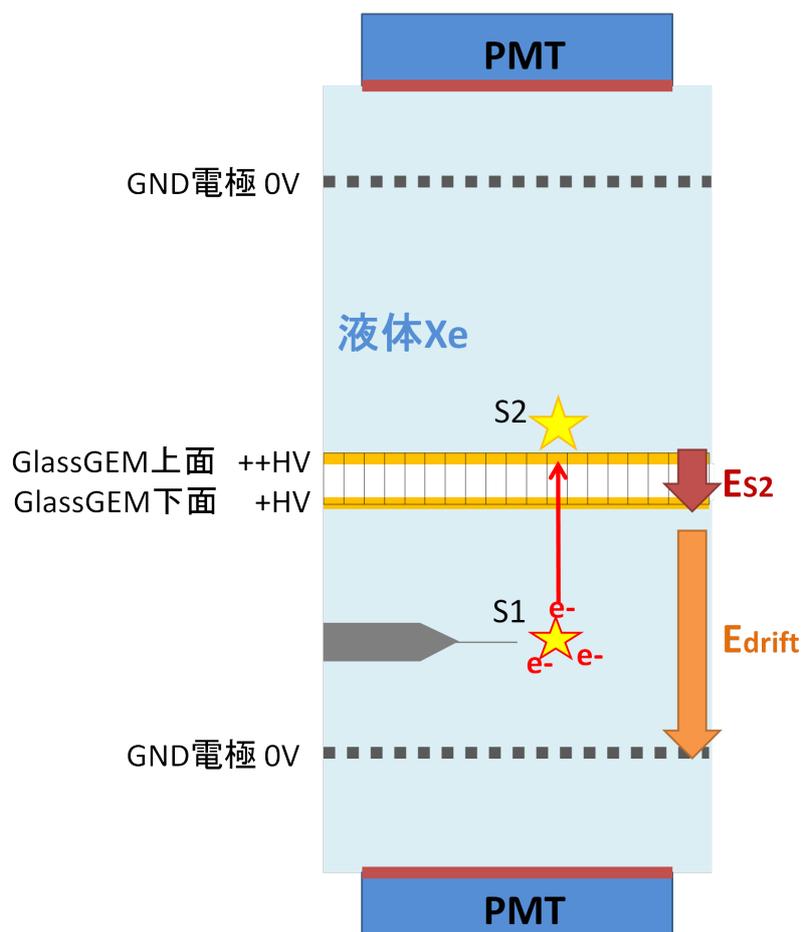


図 3.1: TPC プロトタイプの様式図。2本の光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube:PMT) で上下から液体キセノン領域をはさんでおり、液体キセノン領域中には、GlassGEM 電極 1 枚、 ^{241}Am 線源、そして PMT の直前にそれぞれ 1 つずつの GND 電極がある。GlassGEM の上下面に電位差を与えることで、下 GND 電極から GlassGEM 下面までに電離電子のドリフト電場、GlassGEM 上下面間に S2 発光のための高電場を形成する。

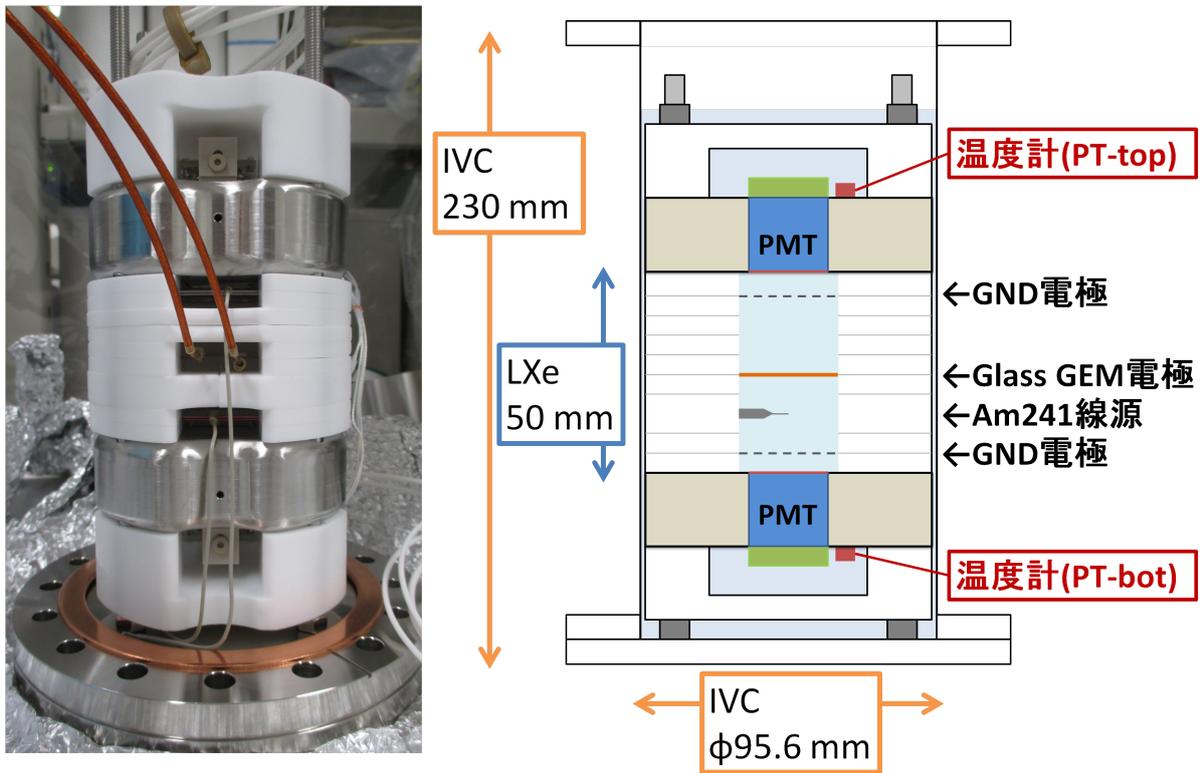


図 3.2: IVC 内部構造。左が実物の写真で右が模式図である。テフロンスペーサーは間に電極をはさんで設置したり、内部線源を取り付けたりすることができる。



図 3.3: 浜松ホトニクス製の PMT R8520-406 と + HV のプリーダ回路基板。

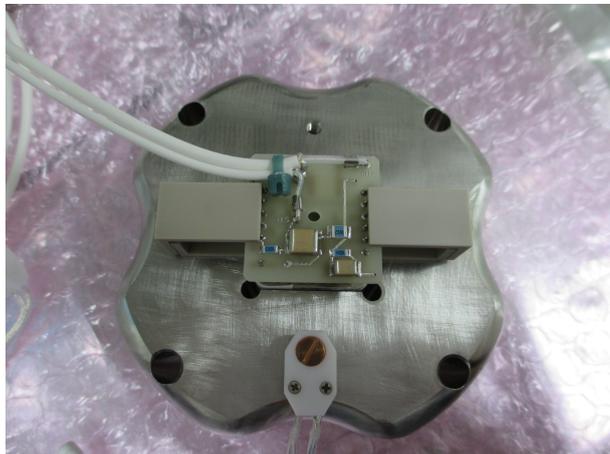


図 3.4: PMT ホルダー。ステンレスの PMT ホルダーに PMT をはめ込み本体と基板の間、基板の上部を PEEK のつめのような部品ではさんで固定している。また温度計もねじ止めしてある。

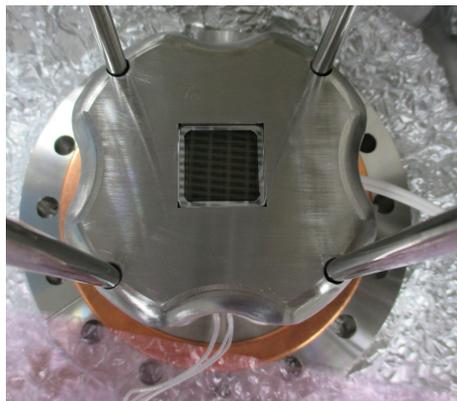


図 3.5: PMT ホルダー裏側。PMT の光電面に合わせてステンレスホルダーに穴を開けてある。

図 3.6 に検出器較正に用いる内部線源 ^{241}Am の写真を示す。中央の銀色の針状のものが線源で、針の先端部分にアメリシウムが蒸着してある。346.5 Bq で 59.5 keV の γ 線を放出する。針から先の太くなっている金属部分は土台であり、端は M4 のねじとなっている。白い半月状の部品は検出器内部に線源を設置するためのテフロンスペーサーである。

図 3.7 に ^{241}Am と LED を設置した様子を示す。LED は内部線源とともに較正に用いる。線源の向かい側のテフロンスペーサーに空けた穴の中へ LED が差し込んである。

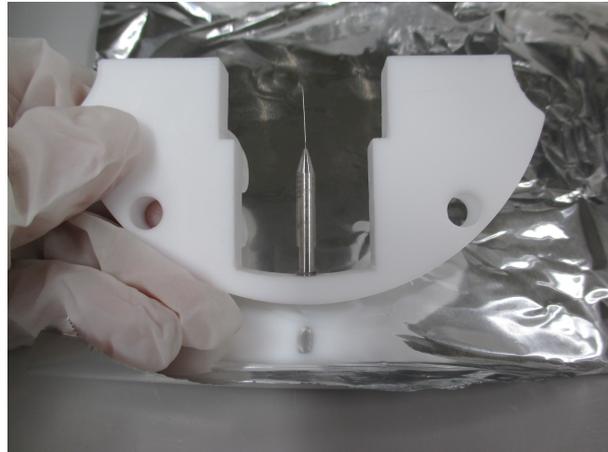


図 3.6: 内部線源 ^{241}Am 。中央の銀色の針状のものが線源であり針の先端部分にアメリシウムが蒸着してある。346.5 Bq で 59.5 keV の γ 線を放出する。針から先の太くなっている金属部分は土台であり、端は M4 のねじとなっている。白い半月状の部品は検出器内部に線源を設置するためのテフロンスペーサーである。

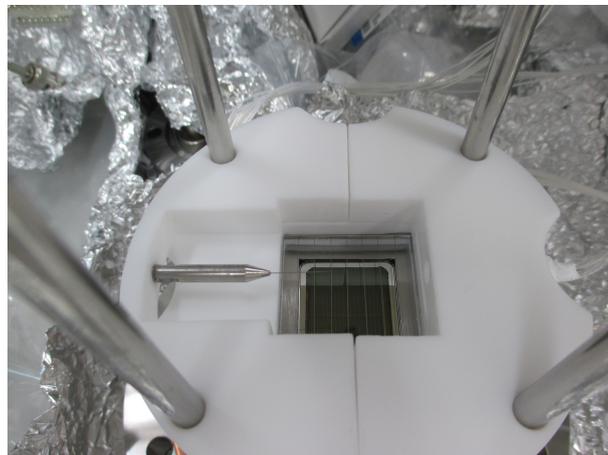


図 3.7: 内部線源 ^{241}Am と LED を設置した様子。左手のテフロンスペーサーのねじ穴に ^{241}Am 線源が取り付けられている。線源の向かい側のテフロンスペーサーに穴が開いており、その中へ LED が差し込んである。

3.1.2 GlassGEM を用いた電極開発

本研究では HOYA 製の Glas Gas Electron Multiplier(GEM) を用いて TPC プロトタイプの電極を開発した。

図 3.8 に本研究のために製作した GlassGEM のマスク図面を示す。GlassGEM は感光性ガラス基板 (PEG3) に裏表に銅電極をメッキで貼った構造で、ガラス全体は 42 mm×42 mm の正方形で、厚さが 0.68 mm、中央に 32 mm×32 mm の銅メッキ部分がある。銅メッキの内側 25 mm×25 mm が有効領域となっており、直径 170 μm の穴が 9167 個あいている。有効領域の大きさは PMT の光電面 24 mm に合わせて設計した。

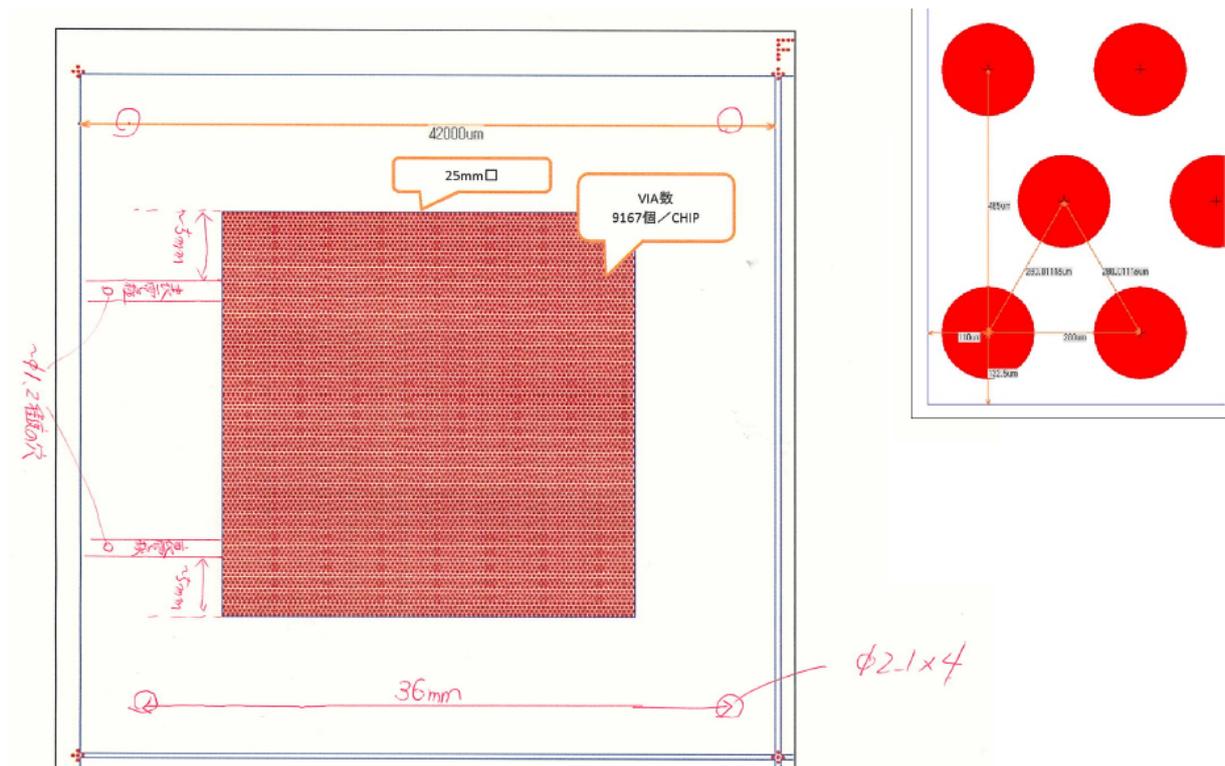


図 3.8: GlassGEM マスク図面。左は GlassGEM 全体の図面であり、特に銅メッキの範囲、有効領域となる穴をあける範囲を指示してある。手書きの線は表裏の銅メッキにそれぞれ電圧を印加するための銅の帯電極を意味する。右上図は有効領域内の穴の配置を拡大したものある。直径 170 μm の穴が 9167 個あいている。

図 3.9 に GlassGEM 全体の写真を示す。図 3.8 のマスク図面のように予備を含めて 4 枚製作した。

図 3.10 に GlassGEM を電極に用いた電荷増幅および S2 発光の機構を示す [11]。図では、GlassGEM の上面に + HV を印加し、電子が GlassGEM 上面に引き寄せられる。下面には上面よりもさらに高い + HV を印加しており、GlassGEM 上下面間に与えた電位差によって穴の中に高電場が形成されているため、引き寄せられた電子は穴を通過しながら電荷増幅および S2 発光を起こす。GlassGEM は 0.68 mm と、GEM としては厚めであるため、高電位を印加可能である。

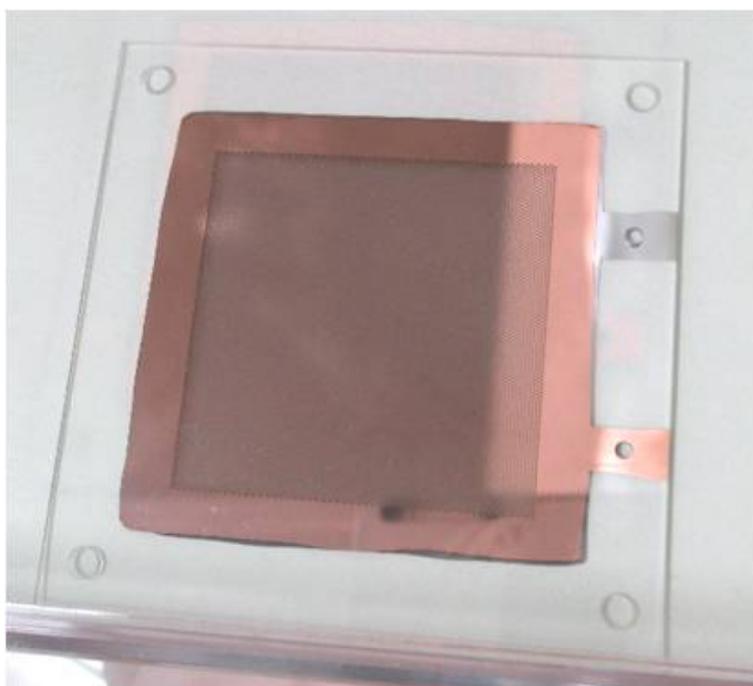


図 3.9: GlassGEM。表裏の銅に電圧を印加するため、右端に電極の銅の帯電極がのびている。

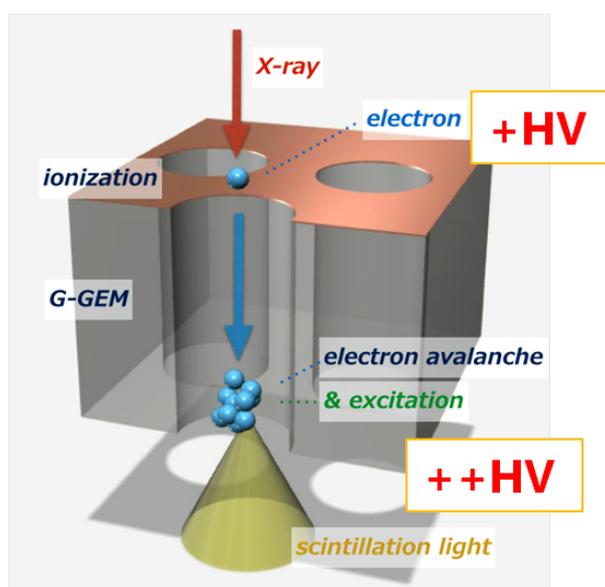


図 3.10: GlassGEM を用いた S2 発光の機構 [11]。GlassGEM の上面に $+HV$ を印加し、電子が GlassGEM 上面に引き寄せられる。下面には上面よりもさらに高い $+HV$ を印加しており、GlassGEM 上下面間に与えた電位差によって穴の中に高電場が形成されているため、引き寄せられた電子は穴を通過しながら電荷増幅および S2 発光を起こす。

GlassGEM の表裏の銅電極にそれぞれ高電圧を印加するためのケーブルを用意した。図 3.11 に作成したケーブルの端子部分の写真を示す。約 -100 度の液体キセノン中という低温環境下かつ数 kV の高電圧に耐えられるケーブルとしてコスモ・テック製の同軸真空側プラグ付きカプトンケーブル MHV-JJ を選定した。ケーブルはワイヤーストリッパーで剥き、芯線のみをニチフ製の銅線用裸圧着端子 R 1.25-2 を圧着した。その際ケーブルの剥いた部分や端子との圧着部分に PEEK の熱収縮チューブをかぶせて補強し、放電を防いだ。

また図 3.1.2 にケーブルと GlassGEM の接続の様子を示す。ケーブルと GlassGEM との接続は、ケーブルに圧着した端子の穴と、GlassGEM の帯電極部に開けた穴とを PEEK の M1.2 ねじとナットを用いて固定した。半田を使用するとキセノンへ溶出する恐れがあるためねじどめとした。しかし 4 章で述べる実験の最中に、ある電圧以上印加すると放電して電源が落ちてしまうという現象がおきた。M1.2 のねじが弱く端子が電極から外れたり、端子の端から放電が起きたりした可能性があるため、これらの電圧印加の機構には今後改善の余地がある。

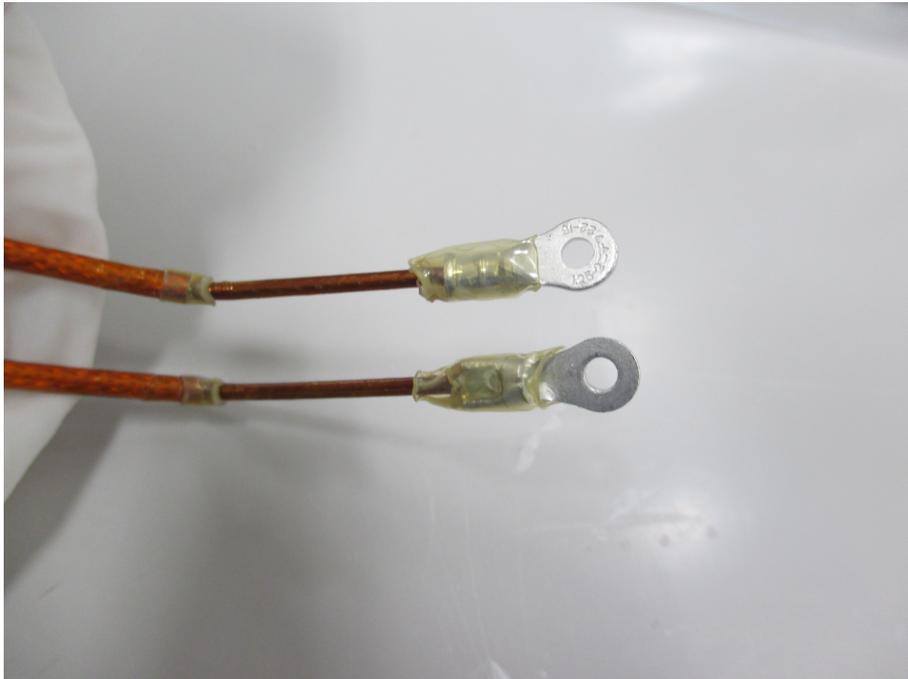


図 3.11: ケーブルの端子部分。ケーブルの端に圧着端子を圧着し、熱収縮チューブで覆った。

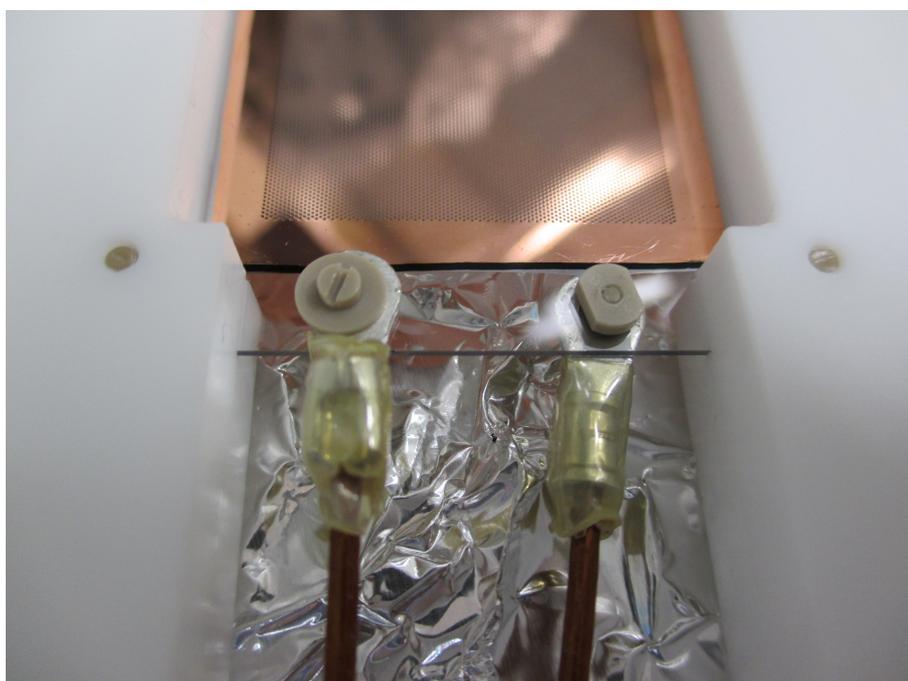


図 3.12: ケーブルと GlassGEM の接続の様子。圧着端子付きケーブルを PEEK の M1.2 ねじを用いて GlassGEM に固定した様子。

3.1.3 電場シミュレーション

図 3.2 のような TPC プロトタイプ のセットアップで GlassGEM 電極に電圧印加した際、液体キセノン中にどのような電場が形成されるかを、ムラタソフトウェアの有限要素法解析ソフト femtet を用いてシミュレーションした。図 3.13 に、シミュレーションのジオメトリと解析結果の等電位図を示す。下 PMT の光電面から高さ 3 mm に GND 電極を設置し、そこから高さ 2 cm の GlasGEM の下面までをドリフト領域、GlassGEM 下面から上面までを S2 発光領域とした。GlassGEM の下面に +2 kV、上面に +4 kV 印加することでドリフト電場 1 kV/cm、の平行 GlassGEM の穴のなかに S2 発光電場 30 kV/cm を作る設定とし、それぞれ期待される平行電場が形成された。図 3.14 に GlassGEM の穴部分を拡大した等電位図を示す。

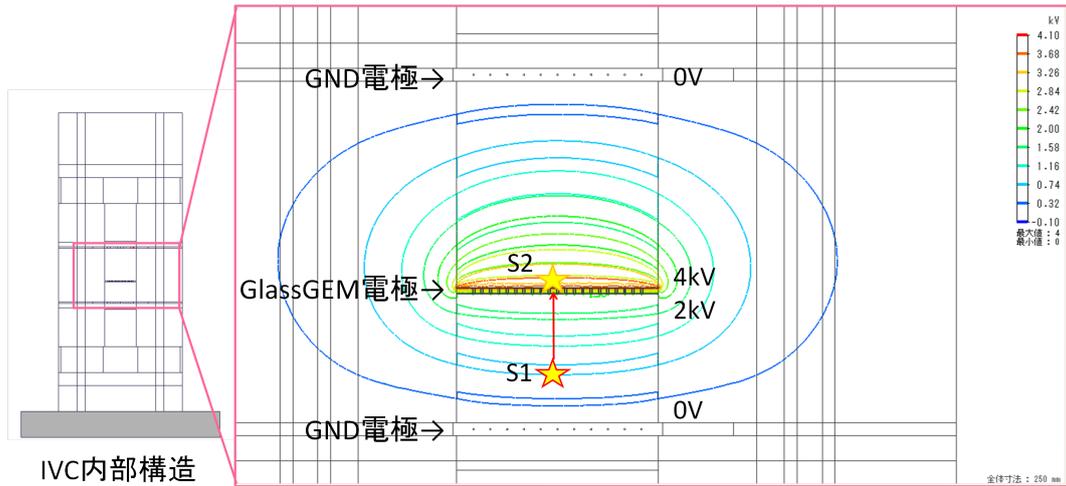


図 3.13: 液体キセノン領域での等電位図。解析メッシュはジオメトリ全体 2 mm、GlassGEM 0.5 mm。ドリフト電場と S2 発光電場がそれぞれ GlassGEM 電極に平行に形成された。

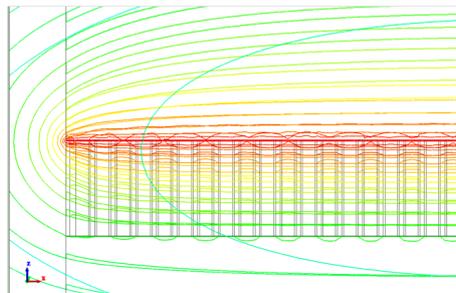


図 3.14: GlassGEM 穴付近の等電位図。解析メッシュ 0.08 mm でシミュレーションした。

3.2 キセノン液化テストベンチ

テストベンチは液体キセノンを保持しシンチレータとして使用するための構造として、キセノンライン・冷却系・検出器部分の3つの要素にわけることができる。また検出器部分に関連して、検出器内部のPMTや温度計からのケーブルを検出器外に接続するためのポートを要したフィードスルーボックス、PMTで読み出した信号を波形データとして取得するためのDAQシステムを持つ。後述するように本装置には真空ポンプ、マスフローコントローラー、ゲッターといった機器を接続し使用する。はじめに装置全体の構造を述べ、各要素を順に紹介する。なお、本テストベンチの設計にあたって XMASS 検出器本体 [5] ならびに XMASS 実験で使用しているテストベンチ”Moon chamber[12]”の構造を参考にした。

3.2.1 テストベンチ概要

図3.15にテストベンチの全体の写真を示す。右端のガスキセノンボトルから検出器へキセノンラインが繋がっている。左端の大きな円筒状の容器は真空断熱の役目を担う外真空容器 (Outer Vacuum Chamber:OVC) であり、その内側には検出器本体となる内真空容器 (Inner Vacuum Chamber:IVC) が設置してある。

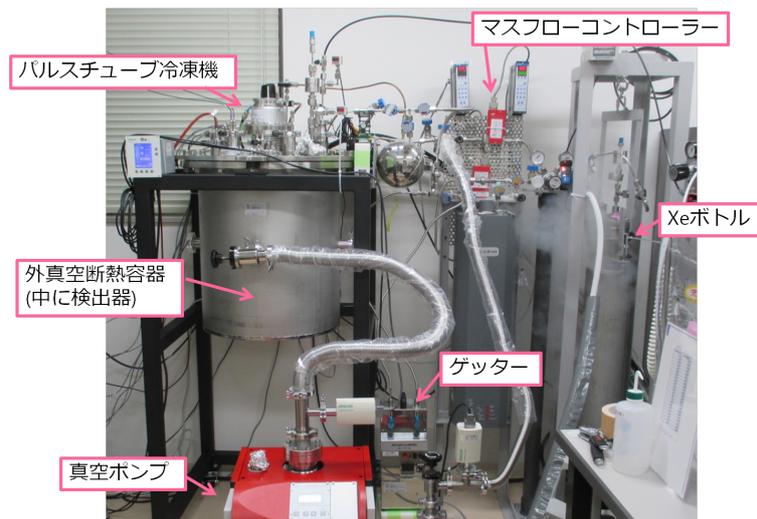


図 3.15: 装置全体の写真

OVCの上フランジには各フィードスルーおよび冷凍機を設置してある。またOVC内には上から順に冷凍機コールドヘッド、熱交換円盤、熱交換ボックス、フィードスルーボックス、IVCがそれぞれボルトによって連結し吊り下がっている。これらはICF152のフランジに肉厚2mmのステンレスの筒をつけた容器である。IVCは直径95.6mm×高さ230mmの円筒型であり、その容積は約500ccである。

図3.16にOVC内部の見取り図を示す。図3.17にOVC内部に吊り下げられたIVCの写真を示す。キセノンの吹き出し口は熱交換ボックスに取り付けられているため、熱交換ボックス・フィードスルーボックスはともに液化したキセノンの通り道であり、最下部のIVCと繋がっている。

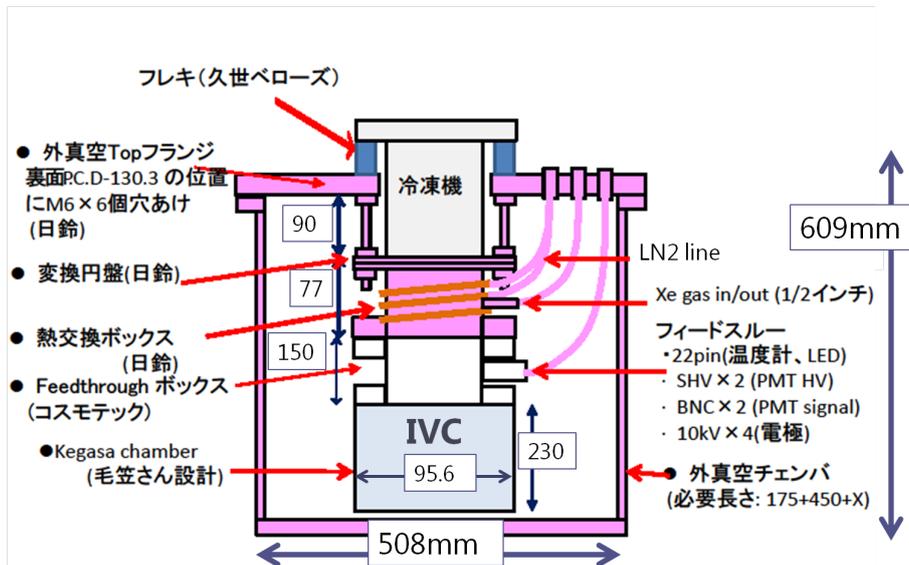


図 3.16: 外真空容器内部図

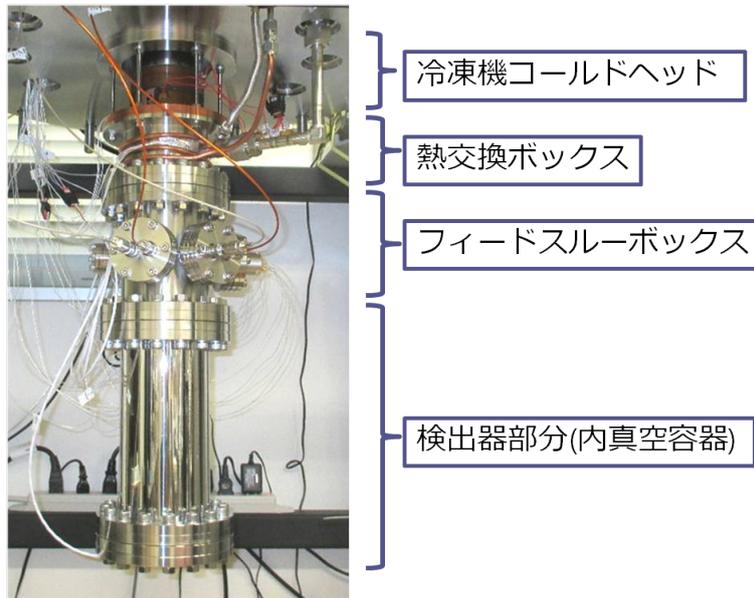


図 3.17: 外真空容器内部に吊り下げられた内真空容器 (IVC)

3.2.2 真空系

キセノンラインおよび外・内真空容器は実験時以外にはOVCは真空断熱のため、IVCは内部の不純物除去のため真空ポンプを用いて真空引きし、真空度はそれぞれOVC 1.8×10^{-3} Pa、IVC 9.2×10^{-5} Paに保たれている。真空ポンプは大ポンプ（Hicube80 Classic MVP070）、小ポンプ（Hicube80 ECO）の2つを用いており、ともにファイファーバキューム社製のドライ排気セット（ドライ粗びきとターボ分子ポンプ）である。

3.2.3 キセノン導入・回収系

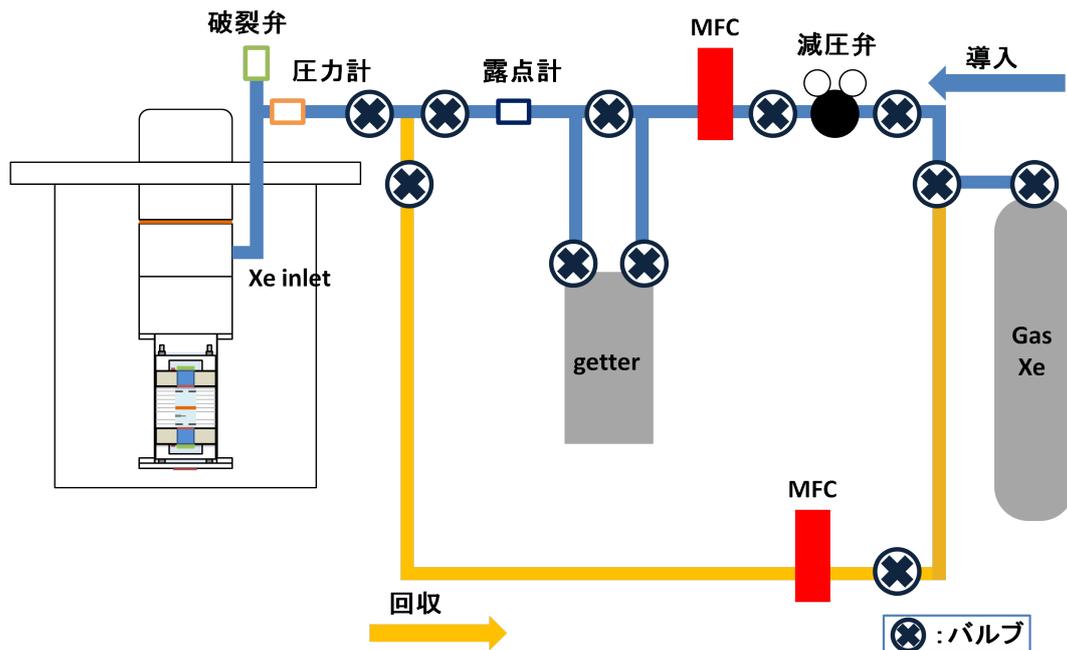


図 3.18: キセノン導入・回収系の模式図

図 3.18 にキセノン導入・回収系の模式図を示す。図の右端にあるのがガスキセノンボトルで体積は 5.5 L であり、常温で 3.2 MPa、実験時以外は 1.2 kg のガスキセノンが保持してある。1.2 kg のガスキセノンが全て液化すると約 405 cc になる。ここで IVC 内の容器全体の体積は 489.6 cc であるが、スパーサーなど内部構造をすべて設置した状態で上 PMT の温度計が液体キセノンに浸るまでの高さで計算した場合、体積は 371.1 cc になるため、十分な量のガスキセノンが用意されている。

ガスキセノンは、キセノンボトルからキセノン導入ラインを通じて熱交換ボックスに設置されたキセノン吹き出し口から導入される。キセノン導入の流量のコントロールはライン上に設置したマスフローコントローラー (MFC) で行う。MFC は堀場製の SEC-Z512MGX を使用している。またキセノン中に不純物が含まれると発光量が下がるため、ラインにゲッターを組み込んでキセノン導入の際に純化を行っている。ゲッターは日本 API 製の AG-100-Xe を 400 °C に加熱しながら使用している。ゲッターは高温に熱せられた合金製フィルターで、化学反応によりキセノンガス中の不純物となる活性ガスや水分を取り去る。また内部の水分量を調べるため露点計もライン上に設置してある。

3.2.4 冷却系

冷却系はキセノンを液化するための機構である。冷凍機のコールドヘッドから熱交換円盤をはさんで熱交換ボックスの上端からボックス全体を冷却することで、熱交換ボックス内に導入されたガスキセノンが内壁にぶつかり冷やされて液化しながら IVC へ溜まっていく。

図 3.19 に示すように熱変換円盤上と熱交換ボックス外壁に 1 つずつ白金温度計が取り付けられている。温度計は林電工製の 89CRZ-2005-100 A(Ni) という Pt100 温度計を 3 線式で使用している。温度計はそれぞれ熱変換円盤と熱交換ボックス外壁に直接アルミテープで貼り付けている。キセノン冷却の際には、熱交換円盤上の温度計と冷凍機コールドヘッドに巻き付たヒーターに接続したコントローラーによって PID 制御を行う。PID は Proportional-Integral-Derivative の略であり、出力値と目標値との偏差、偏差の積分、および微分の 3 つの要素に対して入力値を制御する方法である。ヒーターは 200 W の電熱線ヒーターを使用していて、電源は菊水製の PAN110-3A を使用している。PID コントローラーはチノー製の DB-1000B である。

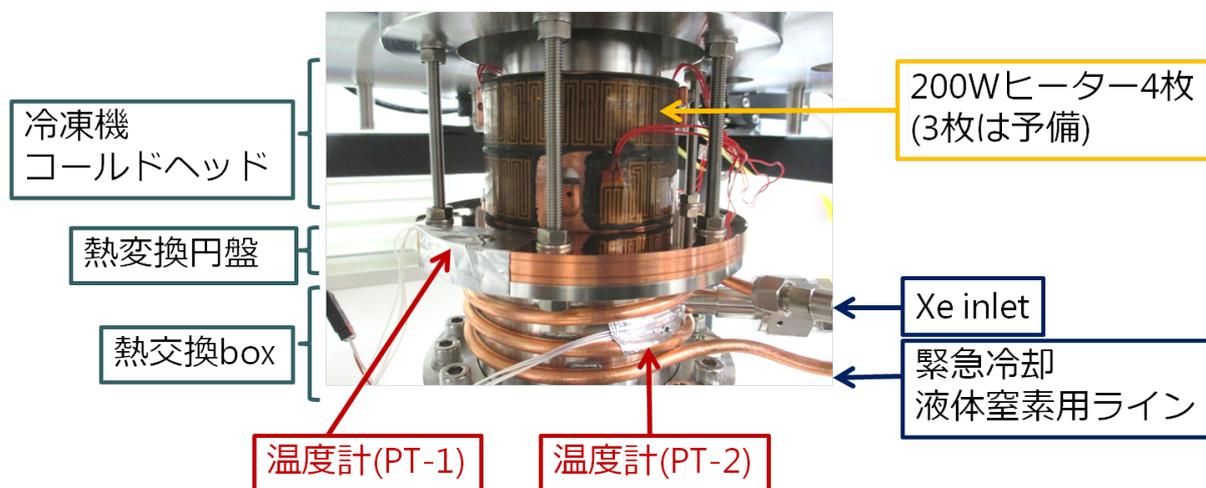


図 3.19: 冷却系の要素

また図 3.20 に示すように、熱交換ボックスの内側上部には上部は削り出しで製作された、4 枚の板状の構造があり、fin と呼んでいる。これは熱変換円盤から熱交換ボックス内部空間への熱の伝導をよくしている。この部分にも 1 つ温度計を設置した。

図 3.21 には温度計の写真を示す。冷却系に計 3 つ、上下 PMT 付近に 1 つずつと本装置には計 5 つの温度計が設置してある。各温度計に割り振った名称と設置位置を表 3.1 にまとめる。

表 3.1: 温度計一覧

温度計名	設置位置
PT-1	熱変換円盤状
PT-2	熱交換ボックス外壁
PT-3	熱交換ボックス fin
PT-top	上 PMT ホルダー
PT-bot	下 PMT ホルダー

内部のキセノン状態把握には、前述した 5 つの温度計と、キセノン吹き出し口のライン上に設置した圧力計の値を利用しているが、各値の記録にはキーエンス製の TR V550 というデータロ

ガーを使用した。図 3.22 に温度コントローラーおよび、各温度計表示、キセノンラインに設置した露点計の表示装置、データロガーの写真を示す。

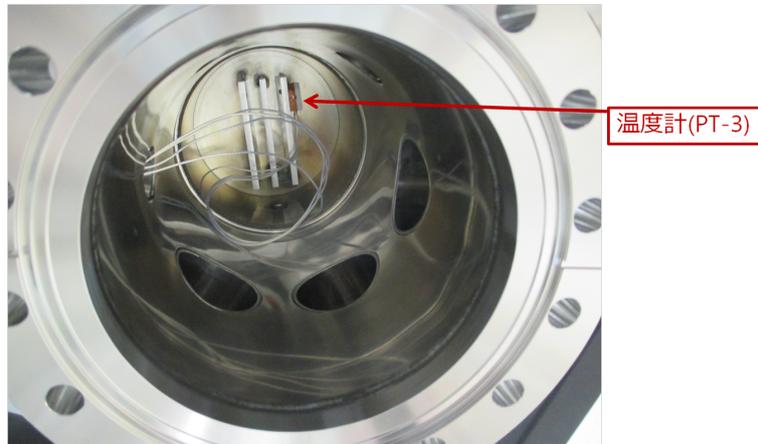


図 3.20: fin。熱交換ボックスを下から覗き込んだ様子。上部は削り出しで製作された、側部と一体となった構造になっており、冷凍機コールドヘッド、熱変換円盤と伝わってきた熱が fin と筒の側面を通して、ボックス内部に導入されたキセノンを冷却する。



図 3.21: 白金温度計。中央の青い部分。写真は装置に固定するためのテフロン製温度計ホルダーにはめ込んだ様子。熱交換ボックス内部の fin と、IVC 内部の PMT 付近にはこのホルダーごとねじ止めして温度計の固定を行っている。



図 3.22: 温度コントローラーおよび、各温度計表示、キセノンラインに設置した露点計の表示装置、データロガーの写真。左上がPID制御を行う温度コントローラー、左下はヒーター電源で、右下がデータロガー、右上にキセノンラインに接続した露点計の表示がある。その他温度計の表示もまとめてこの棚に置いてある。

3.2.5 フィードスルー

熱交換ボックスの下部に、検出器内部の PMT や温度計からのケーブルを検出器外に接続するためのポートをまとめて一つのボックスに用意しフィードスルーボックスとしている。図 3.23 にフィードスルーボックスの図面を示す。ICF70 のポートが4つと ICF34 のポートが2つある。

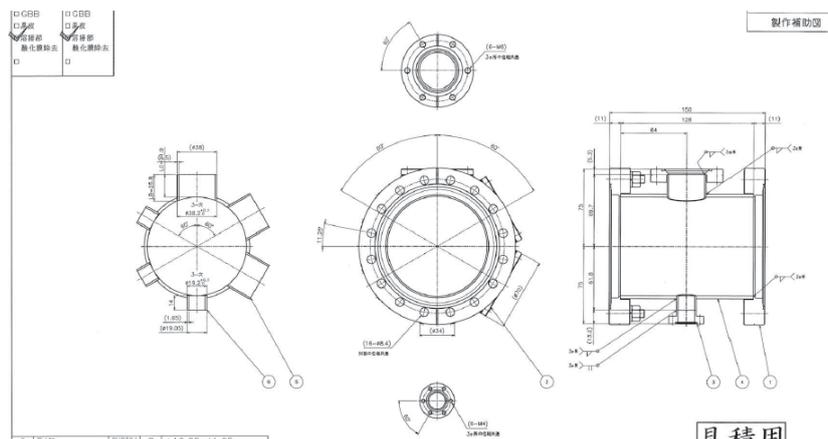


図 3.23: フィードスルーボックスの図面。

ポートに接続するフィードスルーは、京セラ製電流導入端子同軸タイプを使用している。環境系のフィードスルーは、内部温度計からの出力用が、多ピン BURNDY 22 PIN ICF70、温度計用が多ピン BURNDY 8 PIN ICF34 フランジフランジである。GlassGEM への電圧印加用のフィードスルーは MHV コネクタ 2 つの ICF70 フランジを使用し、上下 PMT の signal 線と HV 線にそれぞれ接続するため BNC と MHV のコネクタを 1 つずつ付けた特注の ICF70 フランジも使用している。

3.2.6 DAQ

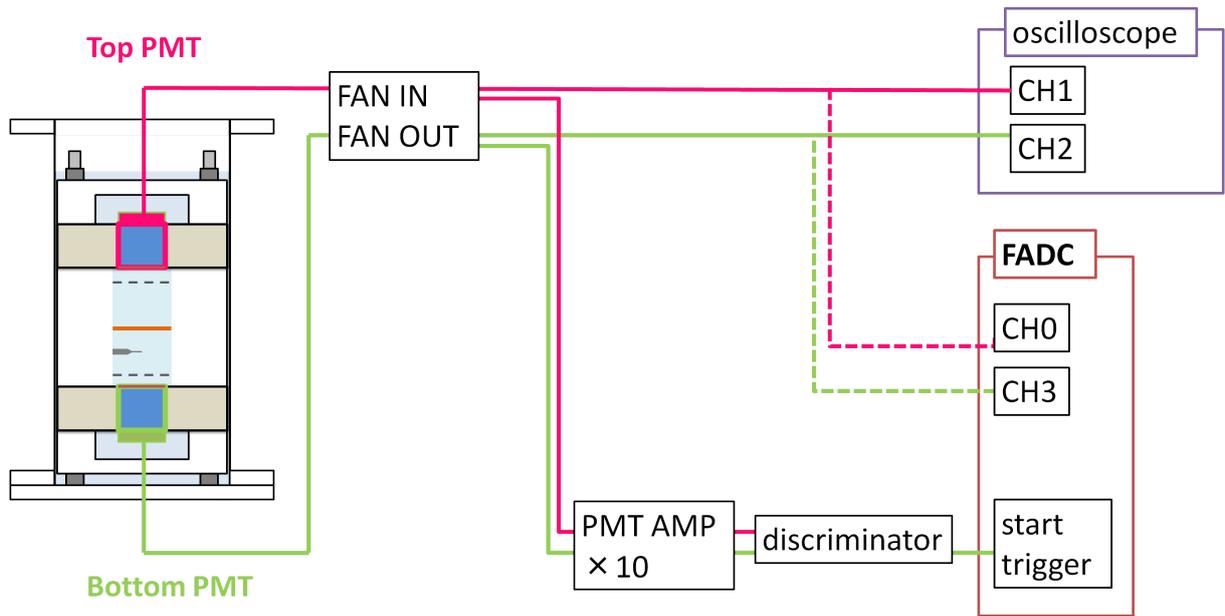


図 3.24: DAQ システムの模式図

図 3.24 に DAQ システムの模式図を示す。使用した NIM モジュールは、リニア FAN OUT(富士ダイヤモンド製 RIS250)、PMT アンプ(富士ダイヤモンド製 0353t)、ディスクリミネーター(Kaizu 製 KN240)、コインシデンス(テクノランド製 N-TM103)である。またオシロスコープは IWATSU-LeCroy 製 WaveRunner 104MXi でデータサンプリングは 10 GHz/S 帯域 1 GHz のものを使用した。データの取得には FlashADC(FADC) を使用しており、CAEN 製の DT5751 というサンプリングレート 1 GHz、ADC 出力 10 bit のものである。

また図 3.25 にオシロスコープと NIM モジュールの写真を示す。

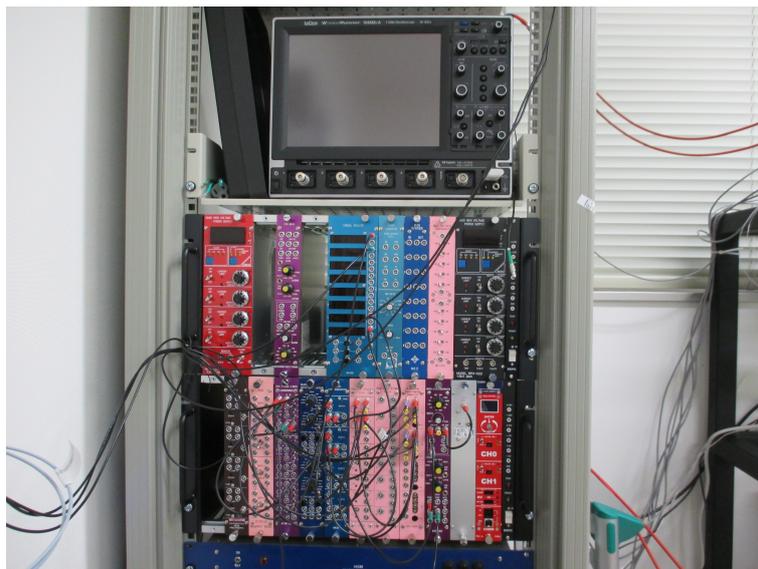


図 3.25: オシロスコープと NIM モジュール

第4章 1相式液体キセノンTPCの検証実験

開発したテストベンチおよびTPCプロトタイプの性能を評価には以下の実験が必要である。

- キセノン導入・液化・保持試験およびS1光量測定
- S1光量のドリフト電場依存性
- S2発光観測実験

実験1ではTPC運用以前に、テストベンチが液体キセノンシンチレーション検出器として動作可能であるかの評価を行った。実験2、3はTPCプロトタイプの性能評価として、GlassGEM電極に電圧を印加した場合のPMT出力信号の測定を行った。S2発光のためには、S1発光のもとになる電離電子をドリフトするための「ドリフト電場」と、さらなる高電場で電離電子を電荷増幅させ比例蛍光を発生させる「S2発光電場」の2つの電場を正しく形成する必要がある。そのためそれぞれの電場形成を確認するためにS1光量のドリフト電場依存性の測定と、S2発光観測実験を行った。

4.1 実験1 -キセノン導入・液化・保持試験とS1光量測定

本節では、TPC運用以前にテストベンチが液体キセノンシンチレーション検出器として動作可能であるかを評価するため、キセノン導入・液化・保持試験と、内部線源 ^{241}Am によるS1光量測定を行った。キセノン導入・液化・保持試験には、キセノン流量や冷凍機温度のコントロールの基準値を経験的に求め安定したキセノン液化の手法を確立するという目的もある。これらの実験について、それぞれ手順と結果を述べる。

4.1.1 キセノン導入・液化・保持試験

図4.1にキセノンの相図を示す。キセノンは $-111.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ という希ガスの中でも比較的高い沸点を持つため、液相・気相の相転換がしやすいという利点がある。本研究では、後述のように圧力 0.016 MPa 、温度 $-106.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ というキセノン状態でTPCプロトタイプの検証実験を行ったが、キセノン三重点は $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり実験時の温度と非常に近い。そのためキセノンの導入・液化・保持の手順においては、IVC圧力と各温度計温度を注視し、キセノンの気化による圧力上昇や、冷やしすぎによる固化に注意する必要がある。試験前のテストベンチは、OVCは真空断熱のため、IVCは内部の不純物除去のため真空引きし、真空度はそれぞれOVC $1.8 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 、IVC $9.2 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ に保っていた。また実験室の室温は空調により $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ に保っていた。またガスキセノンボトルの圧力 3.2 MPa 、ボトルの重さを量るロードセルの表示は内部に 1.2 kg のガスキセノンが入った状態で 14.12 kg だった。これらの初期条件から試験を開始した。以下に実際に行った試験の手順を示す。

＜キセノン導入・液化・保持試験の手順＞

1. IVC予冷

IVC全体を冷却するため、真空引きされていたIVCに 0 Pa までガスキセノンを導入して

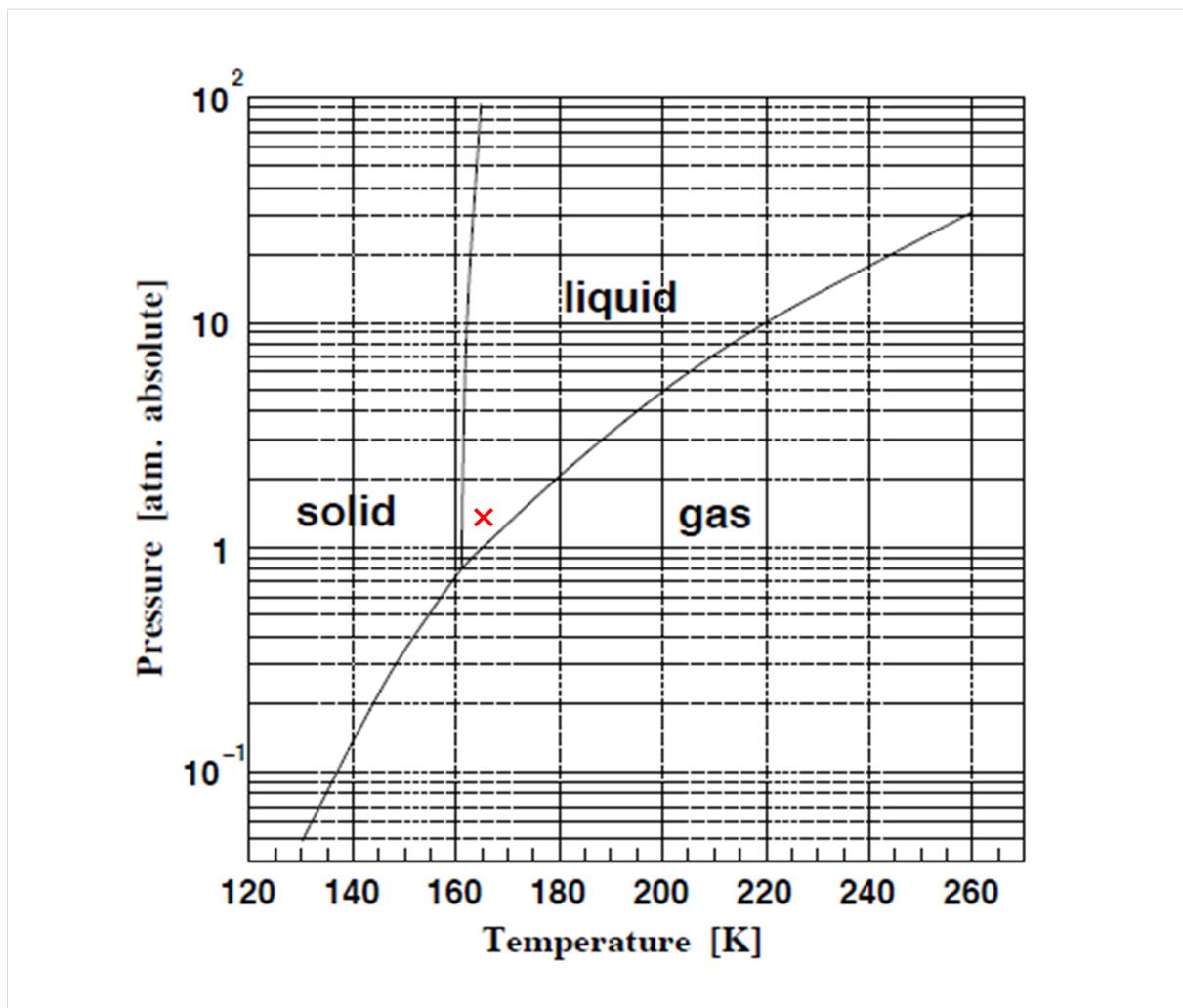


図 4.1: キセノン相図。赤い×印が後述する実験時のキセノン状態の温度 $-106.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、圧力 0.016 MPa である。

内部を満たした。熱交換円盤に取り付けた温度計 (PT-1) に接続した PID コントローラーの設定温度 (SV 値) を $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ に設定し冷凍機を作動させた。PID コントローラーは、冷凍機コールドヘッドに巻いたヒーターに接続しており、ヒーターへの電源出力を制御することで温度を保っている。IVC 温度が十分下がるまで一晩予冷を行った。

2. キセノン導入 1

約 14 時間の予冷によって熱交換ボックス外壁に取り付けた温度計 (PT-2) の温度が $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$ に下がった時点で、キセノンの導入を開始した。キセノンの導入量はマスフローコントローラー (MFC) によって制御した。初回のキセノン導入は、MFC の流量設定 0.45 L/m で行い、IVC 内圧 0.015 MPa でキセノン導入を止めた。導入されたガスキセノンは熱交換ボックスの内壁および fin にぶつかり冷却されるので圧力が下がっていくが、キセノン導入の初期では IVC の冷却が十分ではなく、IVC 内部のキセノンが全てガス状態なため冷却に時間がかかった。そのため SV 値を $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで徐々に下げながら、MFC 流量 0.35 L/m で IVC 内圧 0.05 MPa までキセノン導入後、約 30 分放置し、IVC 内圧が 0.035 MPa 程度まで下がったら再度キセノン導入するという作業を約 9 時間繰り返した。その際各温度計温度も注視し、IVC 内圧と温度を相図と照らし合わせて内部キセノンの状態を推測した。

3. キセノン導入 2 -安定供給-

2. の作業を繰り返すうちに、キセノン導入を停止後に IVC 内圧が微増した。このとき IVC 内 0.061 MPa、PT-1 温度 -100.8°C であり、相図からキセノンの液化が起こったと判断した。IVC 内部に液体のキセノンが溜まると、熱容量が大きい SV を変更しても内部の温度への影響が小さくなっていった。その後突然 IVC 内圧が 0.015 MPa まで降下し、内部のキセノンが急激に液相へと相転換したため、MFC の流量を 0.8 L/m まで増やしたところ、IVC 内圧が 0.07 MPa で安定したままで約 4 時間キセノン導入をし続ける事ができた。この状態を安定供給と呼ぶ。安定供給の間に徐々に SV 値を上げていき、 -112°C とした。

4. キセノン保持

3. の安定供給後、MFC の流量が 0 L/m になり、ガスキセノンボトルの圧力が負圧、ロードセル表示が 12.95 kg となった。ガスキセノンの重さは、容器体積 5.5 L、充填時の圧力 3.25 MPa から 1.2 kg と計算できるので、導入開始前の 14.12 kg と比較してキセノンの導入が完了したと判断した。予冷開始から導入完了までは約 26 時間かかり、MFC の累積流量は 209.27 L だった。

このときのキセノン状態は IVC 内圧 0.016 MPa、PT-1 温度 -106.1°C であり、IVC 内部の液体キセノンは約 405 cc と計算される。SV 値 -112°C において、このキセノン状態を 2 日間保つことができた。PT-1 とキセノン液面との距離があるため、実験中のキセノン温度である -106.1°C よりも SV 値が低い値となっている。

図 4.2 にキセノン導入・液化・保持試験時の IVC 圧力および冷却系に設置した温度計 (PT-1~3) の出力のプロットを示す。

表 4.1 にキセノン導入後、安定にキセノンを保持した際の IVC 内部圧力を示す。

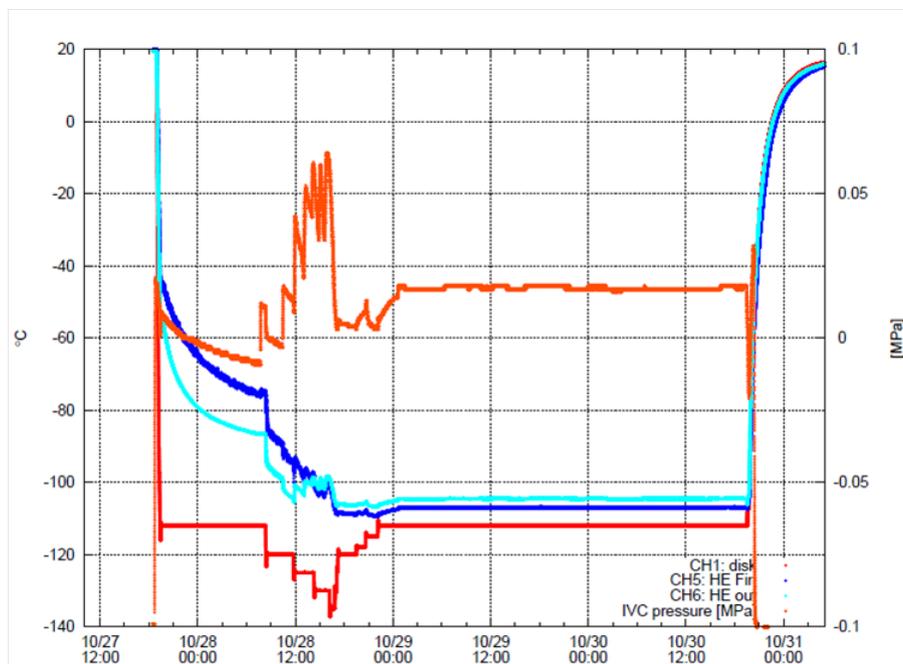


図 4.2: IVC 圧力と各温度計値の推移。橙の線が IVC 内圧、赤の線が熱変換円盤上に取り付けてあり温度コントローラーに接続した温度計 (PT-1)、水色が熱交換ボックス外壁に取り付けた温度計 (PT-2)、青が熱交換ボックス内部の fin に取り付けた温度計 (PT-3) の出力のプロット。IVC 内圧 0.016 MPa、PT-1 温度 -106.1°C で安定したキセノン保持の状態で行った。

表 4.1: 実験時の液体キセノン状態

IVC 内部圧力	0.016 MPa
上 PMT 温度	-106.1 度

キセノン回収作業は、冷凍機電源をオフにしボトルを液体窒素で冷却しながら、キセノン回収ラインの MFC 流量設定を 4.5 L/min として行った。回収時の MFC の累積流量は 238.19 L となり、導入時の累積流量は 209.27 L であったため 14 パーセントのずれがあるが、これは MFC の性能誤差だと考えられる。キセノン回収後のボトル圧力は室温 20 °C において 3.2 MPa となり実験前の値と一致したため、キセノンの回収が完了したと判断した。

以上の結果から、キセノン導入・液化・保持の手法を確立し、回収作業も含めて、テストベンチの性能に問題がないと判断した。

4.1.2 S1 光量測定

次に内部線源 ^{241}Am による S1 光量測定を行った。実験時のキセノン条件は前節の表 4.1 に示した値で、上下 PMT にはそれぞれ 885 V の HV を印加した。S1 光量は、PMT の電荷増幅率から 1 光電子あたりの PMT 出力を求め、オシロスコープを用いて測定した波形の面積を近似計算し電荷積分値を求めた値を逆算することで求めた。以下に計算手順を詳しく述べる。

はじめに本装置で用いた PMT の 1 光電子あたりの PMT 出力を求めた。図 4.3 に横軸印加 HV に対する縦軸電荷増幅率のグラフである PMT の gain カーブを示す。グラフから 885 V 印加時の電荷増幅率は 1.6×10^6 と読み取れるため、1 光電子の出力信号は $1 \times 1.6 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.56 \times 10^{-13}$ C となる。

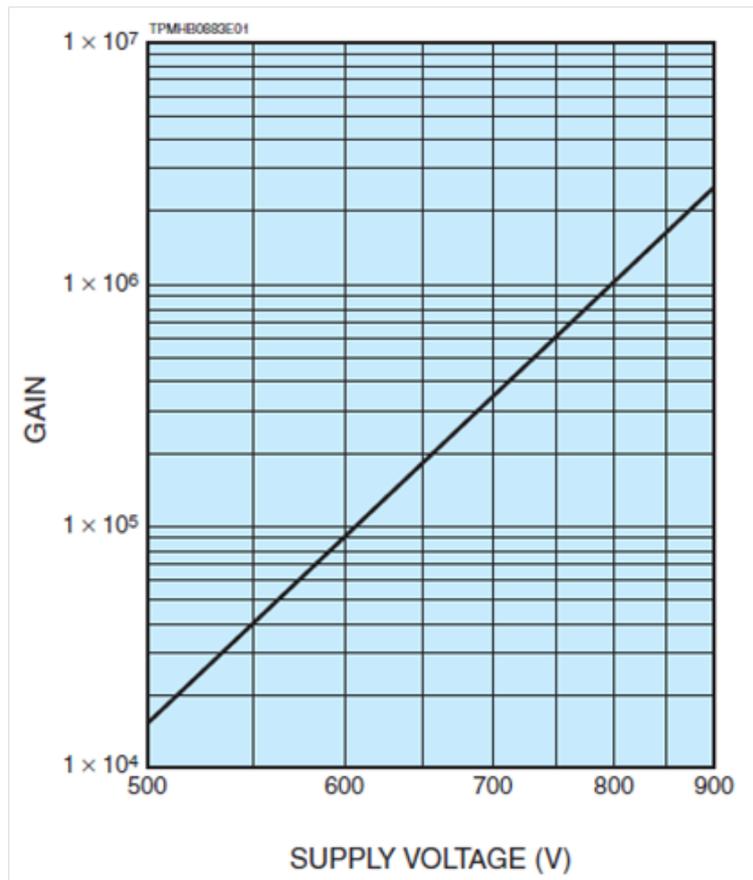


図 4.3: PMT の gain カーブ [13]。横軸印加 HV に対する縦軸電荷増幅率のグラフ。885 V 印加時の電荷増幅率は 1.6×10^6 と読み取れる。

次に PMT 出力をオシロスコープで測定した際の DAQ について述べる。図 3.24 の DAQ システムの概略図に示すように、上下 PMT からの出力はリニア FAN OUT を用いてそれぞれ 1 : 1 に分け、一方を PMT AMP を用いて 10 倍にし discriminator へ、もう一方をオシロスコープに接続した。オシロスコープは IWATSU-LeCroy 製の WaveRunner 104MXi で、データサンプリングは 10 GHz/S 帯域 1 GHz のものを使用した。

図 4.4 にオシロスコープで観測した S1 の波形を示す。本実験時のセットアップは、上下 PMT の間に GlassGEM が設置してあり、線源は下 PMT と GlassGEM の間にあるため、線源由来の S1 は上 PMT まで届きにくく、主に下 PMT で測定されている。その結果波高 120 mV、発光時間 100 ns の波形信号が下 PMT から得られた。

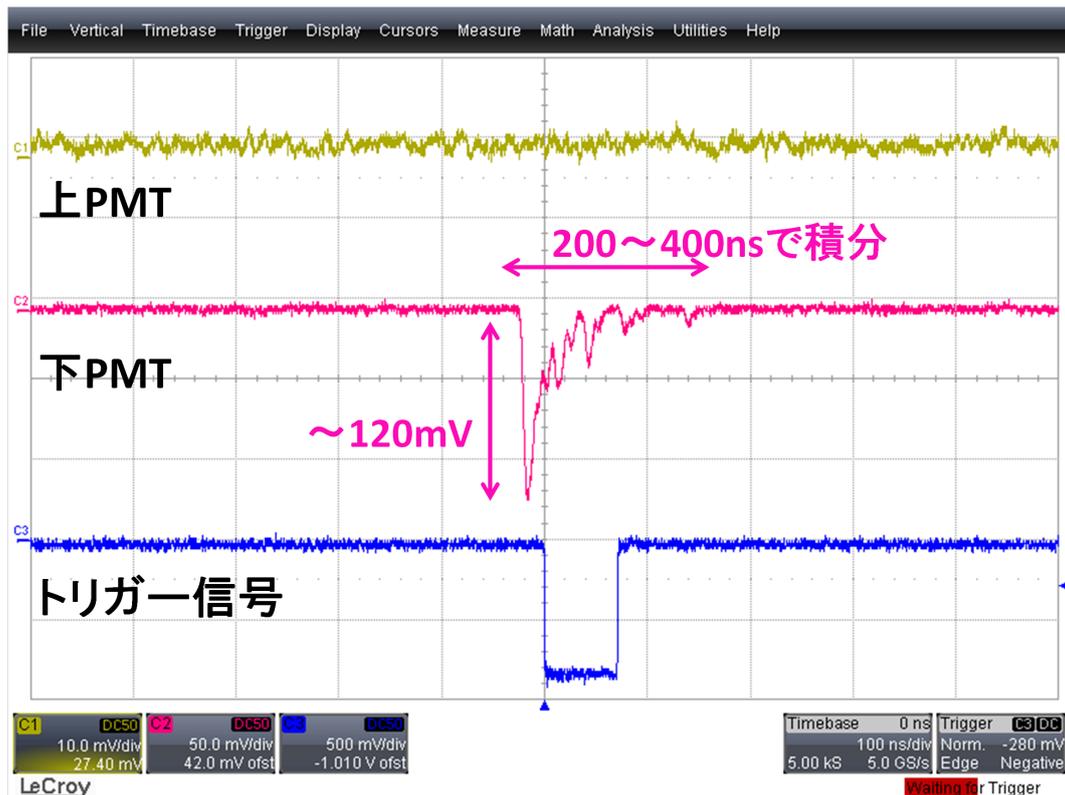


図 4.4: オシロスコープで観測した PMT 出力の波形。横軸 100 ns/div、下 PMT 出力の縦軸 50 mV/div である。上：上 PMT 出力からの波形信号。中：下 PMT 出力からの波形信号。波高 120 mV、発光時間 100 ns の S1 波形。下：下 PMT 出力から生成したトリガー信号。PMT AMP によって 10 倍に増幅後、discriminator threshold の設定を 150 mV にした。

ここで図 4.4 のオシロスコープで取得した波形から、59.5 keV γ 線由来のシンチレーション光による PMT 出力を波形面積を三角形として計算する。波高は 120 mV であり、50 Ω ターミネーターを使用しているので電流は、

$$120 \times 10^{-3} \div 50 = 2.4 \times 10^{-3} (\text{C/s})$$

シンチレーション光の発光時間は横軸から 100 ns と読み取り、波形の charge 積分値は、

$$2.4 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-9} \times \frac{1}{2} = 1.2 \times 10^{-10} (\text{C})$$

前述の 1 光電子の出力信号 $2.56 \times 10^{-13} \text{ C}$ 用いて p.e. 単位で表すと

$$\frac{1.2 \times 10^{-10}}{2.56 \times 10^{-13}} = 468.7 (\text{p.e.})$$

よって、 ^{244}Am 線源由来のガンマ線エネルギー 59.5 keV から

$$468.7 \div 59.5 = 7.87 (\text{p.e./keV})$$

となり本装置の発光量は 7.9 p.e./keV と求められた。

これは 1 相式液体キセノンシンチレーション検出器である XMASS 検出器の 59.5 keV での光量 12.5 p.e./keV ($13.9 \text{ p.e.} \times 0.9$) と近い数字である [4]。

しかしながら本装置は XMASS 検出器よりも発光量が小さく、その原因として考えられるのは、内部部品の汚れや、用意したキセノンの純度が低いことである。この点への対策として内部構造の超音波洗浄を再度行うことや Xe 導入ラインのゲッターをもう一台追加してキセノンの純化を行うことなどを検討中である。

次に、上記で求めた S1 光量が、 ^{241}Am 由来の γ 線による S1 であることをデータ解析によるスペクトルから確認した。

先ほどと同じ図 3.24 に示した DAQ システムにおいて、リニア FAN OUT で分けた上下 PMT からの出力を、オシロスコープではなく Flash ADC (FADC) に接続してデータ取得を行った。FADC は CAEN 製の DT5751、サンプリングレート 1 GHz、ADC 出力 10 bit のもので、FADC へのトリガー信号は下 PMT からの信号を discriminator threshold 150 mV の設定で NIM 信号にしたものである。オシロスコープで確認したように、上 PMT にはほとんど S1 が届いていないため下 PMT の出力信号のみをトリガーに用いた。この条件でイベント数 2 万のランを 3 回行い、計 6 万イベントの波形データを取得した。各 3 回のランのトリガーレートは 350~400 Hz であり、今回使用した ^{241}Am 線源の 346.5 Bq に近い値となった。

取得したデータの解析手順を述べる。FADC を用いて 1 GHz でサンプリングしたデータは、PMT 出力 1 V を 10 bit に変換した adc 値を計 1200 ns 分を 1 波形として記録した。各波形において、0~150 ns の adc 値の平均をペDESTAL とし、(adc 値-ペDESTAL) 値を 200~400 ns の間で積分し、adcsun を求めた。adcsun は 1 波形の積分電荷量であり光量を示す。

図 4.5 に解析結果である S1 スペクトルを示す。横軸 adcsun、縦軸イベント数であり、6 万イベント分プロットした。上段が上 PMT、下段が下 PMT で測定したスペクトルである。上 PMT 出力の解析結果はほぼペDESTAL ピークのみが見えている。下 PMT 出力の解析結果はペDESTAL ピークの他に 2 つのピークが見えており、それぞれ ^{241}Am 由来の 59.5 keV と 13.9 keV γ 線に対応している。

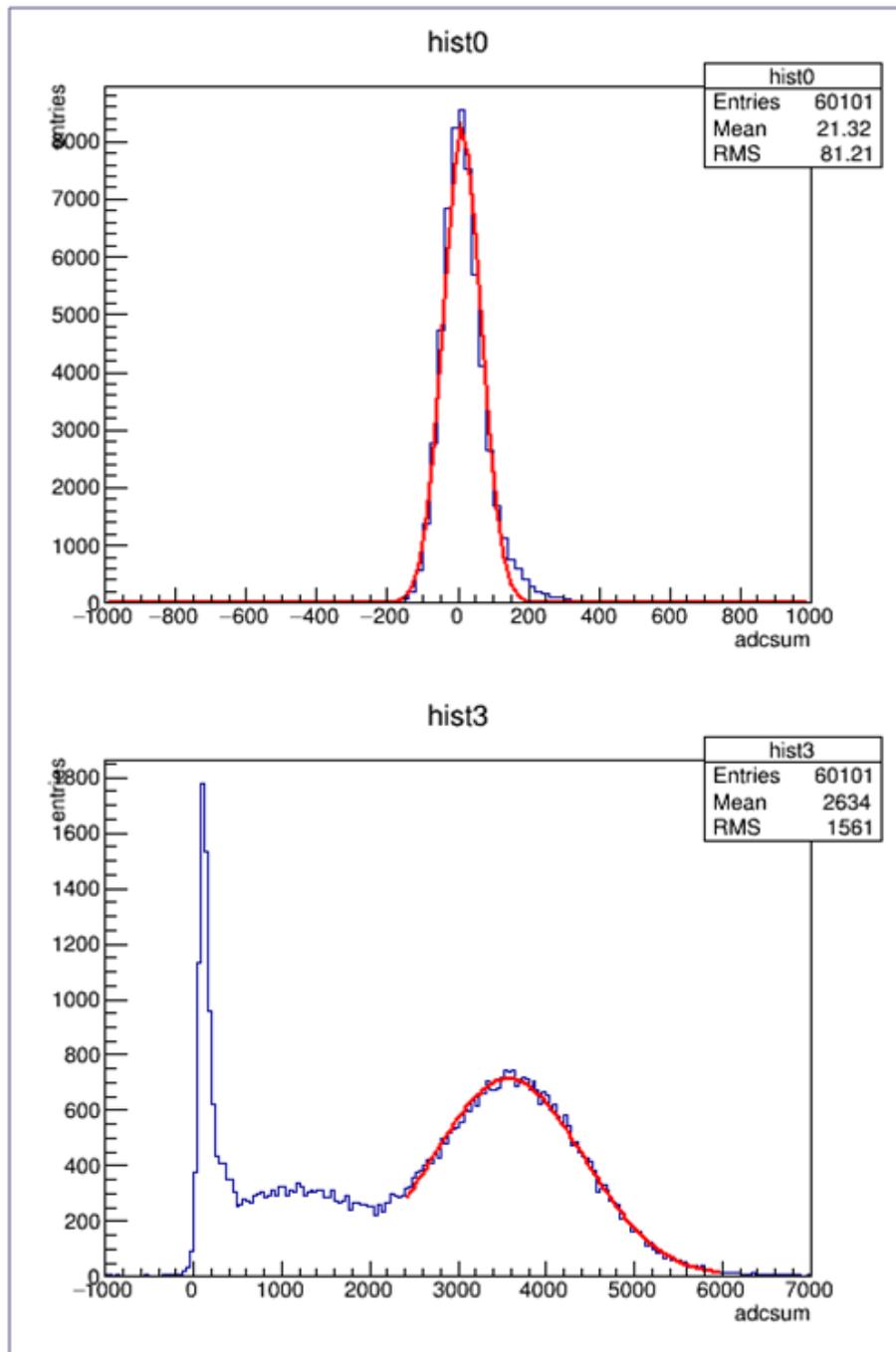


図 4.5: ^{241}Am 線源由来 γ 線による S1 スペクトル。横軸 adcsun、縦軸イベント数であり、6 万イベント分プロットした。上段が上 PMT、下段が下 PMT で測定したスペクトルである。本実験時のセットアップは上下 PMT の間に GlassGEM が設置してあり、線源は下 PMT と GlassGEM の間にあるため、線源由来の S1 は上 PMT まで届きにくい。そのため上 PMT 出力の解析結果はほぼペDESTALピークのみが見えている。下 PMT 出力の解析結果はペDESTALピークの他に 2 つのピークが見えており、それぞれ ^{241}Am 由来の 59.5 keV と 13.9 keV γ 線に対応している。

4.2 実験2 - S1 光量のドリフト電場依存性

本節の実験では、ドリフト電場による S1 光量減少の測定を行う。2 章で説明したようにキセノンの発光には 2 種類の過程がある。電離を経る発光過程ではキセノンイオンと電離電子が発生するため、キセノン中に電場を形成すると電離電子をドリフトでき、キセノンイオンと電子の再結合を妨げるため S1 の発光量が下がるという現象が起きる。

ここでは GlassGEM の表裏の銅電極に同じ電圧を印加することで厚さ 0.68 mm の 1 枚の電極として扱った。前節の S1 光量観測実験と同じセットアップで、液体キセノン中のドリフト電場としてそれぞれ 0 kV/cm、0.4 kV/cm、0.8 kV/cm、1.2 kV/cm の場合に発生する ^{241}Am 由来の 59.5 keV γ 線による S1 光を観測し、その発光量を比較した。

図 4.6 にドリフト電場ごとの S1 スペクトルを示す。解析方法は前節と同様である。横軸 adcsun、縦軸イベント数であり、6 万イベント分プロットした。上段が上 PMT、下段が下 PMT で測定したスペクトルである。上 PMT 出力の解析結果はほぼペDESTALピークのみが見えている。下 PMT 出力の解析結果はペDESTALピークの他に 2 つのピークが見えており、それぞれ ^{241}Am 由来の 59.5 keV と 13.9 keV γ 線にそれぞれ対応しているが、ドリフト電場が大きくなるごとにピークの adcsun 値が小さくなっている。

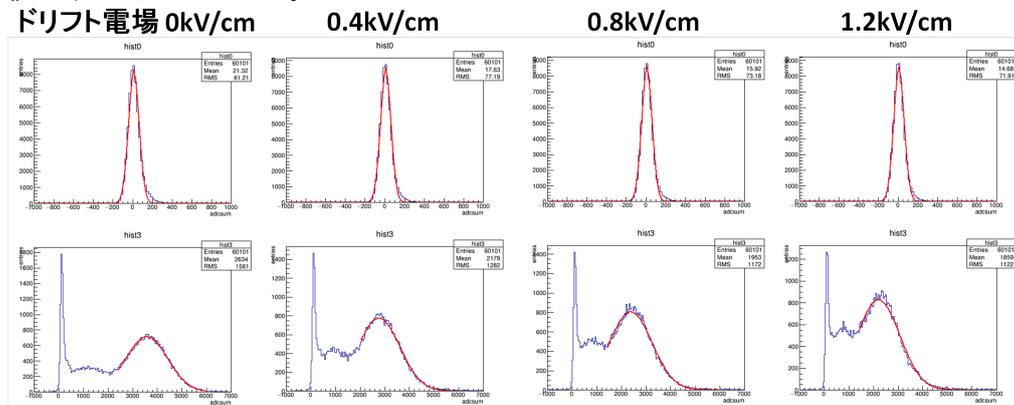


図 4.6: ドリフト電場ごとの S1 スペクトル。横軸 adcsun、縦軸イベント数であり、6 万イベント分プロットした。上段が上 PMT、下段が下 PMT で測定したスペクトルである。上 PMT 出力の解析結果はほぼペDESTALピークのみが見えている。下 PMT 出力の解析結果はペDESTALピークの他に 2 つのピークが見えており、それぞれ ^{241}Am 由来の 59.5 keV と 13.9 keV γ 線にそれぞれ対応しているが、ドリフト電場が大きくなるごとにピークの adcsun 値が小さくなっている。

図 4.6 に示した 4 つの S1 スペクトルから、59.5 keV のピークに対応する adcsun 値を求め、表 4.2 にまとめた。また、表 4.2 の値をドリフト電場なしの場合の光量を基準に規格化し、各電場中での S1 光量の相対変化を図 4.7 に示した。その結果 1.2 kV/cm の電場では基準値の 40 % まで光量が落ちており、この値は図 4.8 に示す文献値 [14] と一致する。これは S1 発光の元になる電離電子ドリフトされ、キセノンイオンと電子の再結合が妨げられるため S1 発光量が下がったことを示しており、GlassGEM 電極を用いて生成したドリフト電場によって、電離電子が GlassGEM 電極へ期待通り誘導出来たと考えられる。

よって、GlassGEM への印加電圧に対応したドリフト電場を形成できたと判断する。

表 4.2: ドリフト電場ごとの 59.5 keV のピークに対応する adcsun 値の比

ドリフト電場 (kV/cm)	0	0.4	0.8	1.2
adcsun 比	1	0.77	0.67	0.62

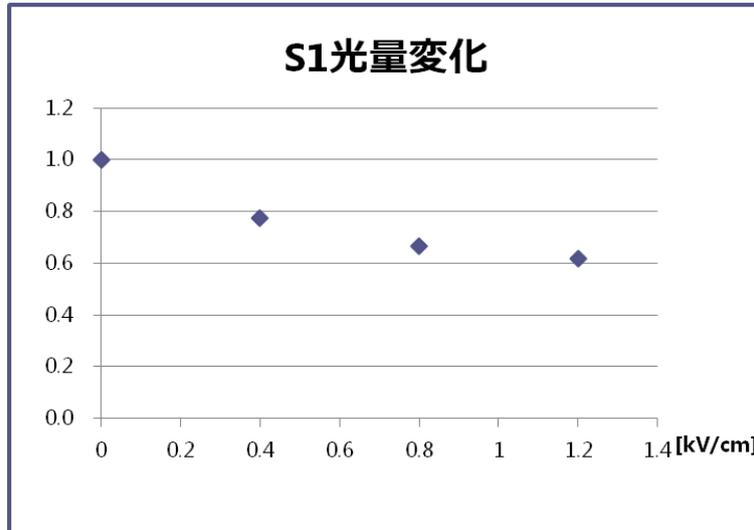


図 4.7: ドリフト電場による S1 光量の相対的变化。横軸ドリフト電場 (kV/cm)、縦軸 adcsun。1.2kV/cm の電場では基準値の 40 %まで光量が落ちた。

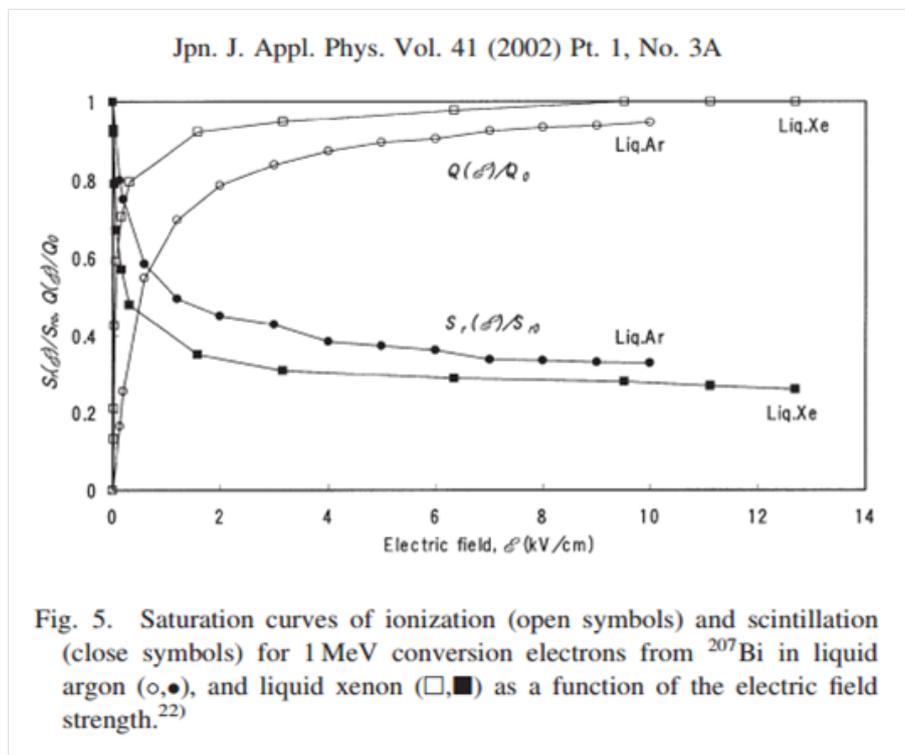


図 4.8: 液体キセノン中での S1 光量の電場依存性 [14]

4.3 実験3 - S2 発光観測実験

続いて GlassGEM の表裏銅電極に電位差を与えることで、S2 発光のための電場を形成し、S2 発光観測実験を行った。この実験は 2.2.3 節で紹介した ThickGEM 電極実験と比較検証を行う。ThickGEM 電極実験では GEM の表裏に電位差 500 V~2500 V を印加しており、数 kV/cm の電場から S2 の発光が起こったと報告されている。

3.1.3 節で示したように、事前に有限要素法解析ソフト femtet を用いて電場のシミュレーションを行った。GlassGEM の下面に+2 kV、上面に+4 kV をそれぞれ印加したシミュレーションの結果、ドリフト電場は 1 kV/cm、GlassGEM の表裏銅電極間で形成される S2 発光電場は 30 kV/cm と、期待される平行電場が液体キセノン領域に形成された。実際の実験では、印加することのできた最大電圧 3.5 kV を GlassGEM 上面電極に、下面に 1 kV を印加した。シミュレーションでのセットアップでは GND 電極から GlassGEM 下面までの距離を 2 cm と設定したが、実験時には距離 2.5 cm の位置に GlasGEM を設置したため、ドリフト領域電場 0.4 kV/cm、S2 発光電場 37 kV/cm の条件で測定を行った。実験セットアップおよび DAQ システムは前節の実験 2 と同様で、オシロスコープを用いて PMT 出力の波形を測定した。

以下に測定手順を示す。S1 信号は下 PMT、S2 信号はドリフト電子が GlassGEM の穴を通過した後発光するため上 PMT でそれぞれ観測する。液体キセノン中のドリフト電場 0.4 kV/cm での電子のドリフト速度は 0.7 mm/ μ s であり [15]、本装置の ^{241}Am 線源から GlassGEM 下面までの距離 1 cm から、S1・S2 の時間差は 14 μ s ほどと予測した。よって、下 PMT 出力 (S1) をオシロスコープのトリガー信号として約 14 μ s 後に上 PMT 出力に S2 波形が現れるイベントがあるか、また上 PMT 出力 (S2) をオシロスコープのトリガー信号として約 14 μ s 前に下 PMT 出力の S1 波形が現れるイベントがあるかをイベントレート 700 Hz において、約 5 分ずつ目視で確認した。測定の結果、上下 PMT どちらからの出力をトリガーした場合にも、期待する信号は見られなかった。この測定結果から、今回の条件下では S2 発光は観測できなかったと判断する。

S2 発光が観測できなかった原因を考察する。4.2 節よりドリフト電場の形成は問題ないと思われるので、S2 発光電場が足りなかったと推測されるが、2.2.1、2.2.2 で紹介したタングステンワイヤー電極実験において求められた S2 発光のための電場しきい値と比較すると、本実験で形成した S2 発光電場で発光がなかったことと矛盾しない。よって、ThickGEM 実験での数 kV/cm から発光が起こった事例は再現できなかったといえる。

2.2.3 節で述べた、GEM 電極を使用した場合に小さい電場で大きな S2 発光量が得られた原因の推測として、1 つめの「構造の小さい穴の角部分で高電場が形成された」可能性に関しては、ThickGEM 電極の穴が $\phi 400 \mu\text{m}$ であるのに対して、本装置の GlassGEM の穴は $\phi 170 \mu\text{m}$ とより細かい構造であるため考えにくい。次に 2 つめの「穴部分にキセノンの気泡がたまってしまい、ガス増幅が起きた」可能性に関しては ThickGEM 実験のグループ内ですでに推測されている [16]。一方、本装置の IVC 内部構造は上下のボルトでねじ棒に軽く固定されているのみであり、液面の上部も開放された空間があるため、キセノンの泡ができたとしても液面のう上まで逃げていくことができ、GlassGEM 周りに気泡が滞在する事は考えにくい。よって ThickGEM 電極実験で S2 が観測でき、本実験で観測できなかったという結果は、GEM の穴にキセノンの気泡ができたという推測をすると説明できる。

第5章 まとめと今後の展望

今後、暗黒物質探索は感度向上のためより大きな検出器を用いた大質量探索が必要となってくる。また BG の除去も常に付いて回る問題である。これらを踏まえて液体キセノン検出器のさらなる進化を考えたとき、TPC によって粒子の反応位置を決定する事で、検出器内壁付近の BG を切り分ける方法が有効である。現在、比例蛍光の発光を気体キセノン中で行う 2 相式液体キセノン TPC が稼動している。しかし 2 相式には液面管理、検出器形状の制限といった問題があげられる。これらを解消し、特に XMASS 検出器のような球状の検出器においても TPC を実現するためには 1 相式液体キセノン TPC の開発が求められる。

暗黒物質探索において、S1・S2 の発光をともに液体中で行う 1 相式のキセノン TPC は未実現であり、まず液体キセノン中での比例蛍光発光の特性から研究が必要である。その理由は、S2 発光には S1 発光の元になる電離電子を利用するため、ドリフト電場を大きくするほど S2 発光量が大きくなると同時に S1 発光の発光量が減少するので、S1 と S2 の両方を観測するためには、できるだけ少ない電離電子で十分な S2 発光量を得ること、S1 発光のためのエネルギーしきい値を暗黒物質探索に必要な 5keV 程度に抑えたまま S2 発光を行うことが求められるからである。特に 2015 年に報告された ThickGEM 電極を用いた実験では、先行研究であるングステンワイヤー電極を用いた実験でも求められた S2 発光のための電場しきい値の 10 分の 1 以下の電場で S2 観測した例が報告されており、GEM 電極では低い電場で S2 発光が可能であるのか検証する必要がある。よって本研究では、円筒の簡単な検出器形状において、ガラス素材の GlassGEM を電極に用いた TPC プロトタイプを開発し、TPC プロトタイプを運転するために必要なキセノン導入・液化・保持を行うためのテストベンチも同時に開発した。

テストベンチが液体キセノンシンチレーション検出器として動作可能であるかの性能評価のためにキセノン導入・液化・保持試験を行った。約 500 cc の液体キセノンを検出器に導入し、0.016 MPa、 -106.1°C で 2 日間以上保持することができた。また ^{241}Am 線源からの 59.5keV γ 線を用いて S1 光量を測定したところ、7.87 p.e./keV と求められた。これらから、開発したテストベンチが汎用の液体キセノン実験に使えることを確認した。

次に TPC プロトタイプ性能評価を行った。GlassGEM の表裏の銅電極に同じ電圧を印加することでドリフト電場のみを形成して、S1 光量の減少を測定した。その結果、1.2 keV/cm のドリフト電場に対して、40 % の S1 光量の低下が観測された。これは先行研究と矛盾のない数値であり、GlassGEM 電極によって液体キセノン中に期待通りのドリフト電場を形成できた。次に S ドリフト電場を 0.4 kV/cm、GlassGEM 電極両面間に 2.5 kV の電位差を印加し S2 発光のための電場として 37 kV/cm を形成した状態で S2 発光の観測を試みた。結果として今回のセットアップでは S2 を観測することはできず、ThickGEM 電極による、数十 kV/cm 電場条件下で S2 観測という先行研究の結果に対しては否定的な結果となった。しかしこの結果は、タングステンワイヤー電極実験において求められた S2 発光のための電場しきい値とは矛盾しない。したがって本実験の電場形成に問題はないとすると、S2 観測のためには、より高い電場を形成する必要であると考えられる。先行研究 ThickGEM 電極実験の低い電場でも S2 蛍光が観測された理由としては、ThickGEM の穴中にのこったガスキセノンの気泡中で電荷増幅が起こった可能性が考えられる。

今後、1 相式液体キセノン TPC 実現のため、本テストベンチにおいて液中比例蛍光を観測するためには、新たな電極や電極への電圧印加の機構を開発する必要がある。直近の改善案は GlassGEM

電極を、より耐電圧性の高いガラスである PEG3C を用いた GlassGEM に変更することや電圧印加の端子部分と GlassGEM の間の固定をより太い PEEK ねじを用いて強固にすることがあげられる。また GlassGEM 以外の電極としてタングステンワイヤーを用いた電極の開発も計画中である。さらに電極の機構を試行錯誤しながら実験を続けていくことで、1 相式液体キセノン TPC の実現に向け、液中比例蛍光読み出しを行っていきたい。

謝辞

修士課程の2年間、名古屋の研究室と神岡の研究所で研究活動を行うにあたり、大変多くの方々にお世話になりました。末筆ながらこの場を借りてお礼を申し上げます。

指導教官である伊藤好孝先生には、入学したての頃にはログブックの書き方やノギスの使い方から教えていただき、研究活動が進むにつれて設計のアイデアに行き詰った私の相談にも快く乗って頂くなど、常に細やかな指導をしていただきました。学会や研究会の発表直前にはお忙しいところ夜遅くまで練習に付き合ってください、私の理解の追いついていない事柄をホワイトボードで説明していただいたことなどは忘れられません。特にこの修士論文執筆に関しては私の取りかかりが遅く、直前まで慌しくしてしまいご迷惑おかけしましたが、大変丁寧なご指導で支えていただきました。ありがとうございます。

東京大学宇宙線研究所の関谷洋之先生には、神岡滞在中に様々なご指導をいただきました。検出器を一から立ち上げる機会にご一緒できた事をとて光栄に思います。私の力不足で思うように開発が進まず悔しいこともありましたが、朝早くから夜遅くまで実験に付き合ってください、一步一步研究を進めるなかでとても充実した時間を過ごすことができました。設計・組立・操作など実験装置に関することは何もかも教えていただきました。ありがとうございます。

名古屋の研究室において、増田公明先生には、私の研究テーマの先行研究者ご本人ということもあり、かなり専門的な技術に関する助言をいただきました。XMASSの先生方とともに比例蛍光に関する講義を受講できたことは、研究への理解を大きく深めました。ありがとうございます。修士生活後半は出張が多くなり、なかなか名古屋の研究室にいたことが少なかったですが、田島宏康先生、松原豊先生、阿部文雄先生、さこ隆志先生、奥村暁先生、山岡和貴先生、毛受弘彰先生、三宅美沙先生には、授業やコロキウムなどにおいて、研究全般のご指導を賜りました。ありがとうございます。特に田島宏康先生においては就職活動についてもご支援をいただき、お忙しいところありがとうございます。出張や物品の発注が多い立場でしたので、事務の海内智代さんには事務手続きに関して大変お世話になりました。いつもありがとうございます。

神岡宇宙素粒子研究施設において、鈴木洋一郎先生、中畑雅行先生、森山茂栄先生、山下雅樹先生、岸本康宏先生にはミーティングや学会前の発表練習においてご指導を賜りました。ありがとうございます。竹田敦先生にはMoon Chamber Workを見学させていただいたり、線源に関して図面や情報をいただいたりと、大変お世話になりました。ありがとうございます。安部航先生にはM1の頃に同期3人でチェレンコフ実験と解析のご指導をいただき、実験の基本を学ぶ事ができました。ありがとうございます。小川洋先生、小林兼好先生、平出克樹先生、Byeongsu Yang先生、市村晃一先生にはシフト業務時にエキスパートとしてのご指導を賜りました。夜中の電話にもすぐ対応していただき大変助かりました。ありがとうございます。田阪茂樹先生には実験室でお会いするたび、実験の進捗を気にかけてお声がけいただき、研究への姿勢などアドバイスいただいたことが大変印象に残っています。ありがとうございます。佐藤和史先生には実験セットアップのDAQシステムを作ってください、解析の指導までしていただきました。おかげで無事データ取得ができました。ありがとうございます。神岡ではXMASSの先輩方はもちろん、他実験の先生方や先輩方からも多くのご指導を賜りました。毎日勉強になる事ばかりで大変有意義な日々でした。貴重な経験をさせていただきありがとうございます。

最後にこの研究を行うにあたってお世話になりました全てのみなさまへ感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Zwicky, F., "Republication of: The redshift of extragalactic nebulae" *Helv. Phys. Acta*, 6, 110 (1933)
- [2] K.G Begeman et al.. "Extended rotation curves of spiral galaxies - Dark haloes and modified dynamics" *Journal: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (ISSN 0035-8711)*, vol. 249, April 1, 1991, p. 523-537.
- [3] D.S. Akerib et al. (LUX Collaboration) "First Results from the LUX Dark Matter Experiment at the Sanford Underground Research Facility" *Phys. Rev. Lett.* 112, 091303 — Published 4 March 2014
- [4] *Phys.Rev. Lett.* 113 (2014) 121301, *Phys.Rev. Lett.* 113 (2014) 121301
- [5] The XMASS Collaboration (K. Abe et al.) "XMASS detector" *Nucl. Instr. and Meth. in Phys.Res.A716* (2013) 78-85
- [6] 月出 章 "希ガス液体の放射線効果" *日本放射線化学会 会誌第 96 号* (2013)
- [7] K. Masuda et al. " A liquid xenon proportional scintillation counter" *Nuclear Instruments and Methods Volume 160, Issue 2, 15 March 1979, Pages 247—253*
- [8] j. Prunier, R. Allemand, M. Laval and G. Thomas "Some properties of xenon liquid-filled nuclear detectors" *Nucl.Instr. and Meth.* 109 (1973) 257.
- [9] E. Aprile et al. "Measurements of proportional scintillation in liquid xenon using thin wires" *Journal of Instrumentation, Volume 9, November 2014*
- [10] L. Arazi et al. "Gaseous photomultipliers and liquid hole-multipliers for future noble-liquid detectors" *7th Symposium on Large TPCs for Low-Energy Rare-Event Detection, Paris November 14, 2014*
- [11] 藤原 健 "GlassGEM とその応用" http://www.nuclear.jp/~fujiwara/?page_id=23
- [12] 小林雅俊 東京大学宇宙線研究所修士論文 (2015)
- [13] 浜松ホトニクス PMT カタログ http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R8520-406_TPMH1342E.pdf
- [14] Tadayoshi DOKE1* , Akira HITACHI2, Jun KIKUCHI1, Kimiaki MASUDA3, Hiroyuki OKADA1 and Eido SHIBAMURA" Absolute Scintillation Yields in Liquid Argon and Xenon for Various Particles" *Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41* (2002) pp. 1538—1545
- [15] L.S. Miller, S. Howe, and W.E. Spear, et al., "Charge Transport in Solid and Liquid Ar, Kr, and Xe" *Phys. Rev.*, 166 (1968) 871.

E. Aprilea et al. "Measurements of proportional scintillation in liquid xenon using thin wires" Journal of Instrumentation, Volume 9, November 2014

- [16] Eran ERDAL "Bubble-assisted Liquid Hole-Multipliers: bubble stability and electroluminescence in varying electrode configurations" <https://agenda.infn.it/contributionDisplay.py?sessionId=2&contribId=127&confId=8839>