

ワイヤー電極を用いた比例蛍光読み出しによる
1 相式液体キセノン TPC の研究

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
博士課程 (前期課程)

菅澤佳世

2017 年 1 月 25 日

概要

宇宙には、暗黒物質と呼ばれる光学的に観測されない質量が存在することが様々な観測結果から示唆されている。暗黒物質はまだ発見されていないが、その正体は未知の素粒子だと考えられており、世界中で探索実験が行われている。

暗黒物質の直接探索をリードしているのは液体キセノンを標的に用いた実験である。現在稼働している液体キセノンをを用いた検出器には、1相式シンチレータと2相式 Time Projection Chamber (TPC) の2種類が存在する。1相式シンチレータは液体キセノンをシンチレータとしてのみ用いた検出器であり、暗黒物質とキセノン原子核の相互作用で発生する直接蛍光 (S1) を観測する。2相式 TPC では液体と気体のキセノンが用いられており、S1に加えて、S1と同時に発生した電子を電場によってドリフトさせ、気相中で電荷増幅する際に発生する比例蛍光 (S2) も観測する。S1とS2の両方を観測する TPC 型の検出器は反応位置の決定精度が良く、また S2/S1 比から反跳した粒子が電子なのか原子核なのかを識別することが可能である。

S2を液中で発生させる1相式 TPC は暗黒物質探索において有効な検出器となると予想される。2相式 TPC には液面の管理などの問題があるが、1相式 TPC は液体のみを使用するためこのような問題は発生しない。また、1相式の場合は検出器の形に制限がないため球形の TPC を実現することができる。球形の液体キセノン全体を光電子増倍管で囲むことによって、シンチレーション光の検出効率を高くすることができる。

1相式 TPC を実現するためには、液体キセノン中での S2 について詳しく調べる必要がある。ガス中に比べて液中での S2 の発生には高電場が必要であるため、暗黒物質による低エネルギーイベントでも十分な S2 の発光量が得られるか確かめなければならない。本研究では、液体キセノン中で S2 を発生させる電極として直径 10 μm の金メッキタンングステン線をワイヤーに用いた電極を2種類開発した。これらの電極を用いて1相式 TPC のテストベンチで実験を行い、1相式 TPC の性能を検証した。

検出器内に導入した ^{241}Am 線源による S1 のスペクトルを測定し、59.5 keV の γ 線のピークからテストベンチの発光量を求めたところ、発光量は 13.69 ± 0.02 p.e./keV であった。また、ドリフト電場の形成による S1 光量の減少を測定したところ、ドリフト電場 4 kV/cm で電場がないときに比べて発光量が約半分に減少した。

さらに、ワイヤー電極に高電圧を印加し液体キセノン中での S2 の観測に成功した。ワイヤーの電圧 2 kV と 3 kV の間で S2 の発生が始まり、約 4.8 μs のドリフト時間を持つ S2 が多く見られるようになった。これは先行研究から得られている S2 の発生に必要な電場の閾値である約 400 kV/cm と一致する。これらの S2 は、その S1 光量とドリフト時間から ^{241}Am 線源の表面に付着した線源からの 5.5 MeV の α 線由来の S2 であると考えられる。この 5.5 MeV の α 線由来のイベン

トを含む S2 のスペクトルから、ワイヤーの印加電圧が高くなるほど S2 の光量が増加することを確認した。

^{241}Am 線源から発生する 59.5 keV の γ 線由来の S2 が観測できるかを検証した。S2 が発生しているイベントから S1 光量を用いて 59.5 keV の γ 線由来のイベントを選び出し、そのドリフト時間分布を調べた。 ^{241}Am 線源由来のイベントであればドリフト時間は約 4.8 μs となると予想されるが、ワイヤー電圧 4.5 kV までではこのようなドリフト時間をもつイベントは見られなかった。このうちドリフト時間 4.0–5.5 μs の範囲にあるイベント数は電圧を上げてても変化しておらず、今回の測定では 59.5 keV の γ 線由来の S2 は観測されなかった。

外真空容器の外部から ^{137}Cs 線源と ^{252}Cf 線源を照射し、ワイヤー電圧 4.2 kV においてこれらの線源由来の中性子による原子核反跳および 662 keV の γ 線による S2 を観測した。このデータを用いて S2/S1 比の違いによる中性子と γ 線の識別が可能かを検証したが、中性子と γ 線で差は見られず、粒子識別はできなかった。以上の測定結果より、低エネルギーイベントによる S2 の観測、および粒子識別を行うためにはワイヤーに 5 kV 以上の電圧を印加し S2 の増幅率を上げるか、電離電子の収集効率の改善の必要があると考えられる。

上記の測定に加えて、XMASS で使用されている真空断熱容器内に球形と円筒形の TPC を設置した場合に実現できる TPC の大きさと検出器内に生じる電場を求めた。その結果、電極付近での電場は十分得られるものの、検出器周辺部で十分なドリフト電場が得られないことがわかった。

目次

第 1 章	暗黒物質	1
1.1	暗黒物質の存在	1
1.1.1	暗黒物質の提唱	1
1.1.2	渦巻銀河の回転速度	2
1.1.3	宇宙マイクロ波背景放射	2
1.2	暗黒物質の候補	3
1.2.1	バリオン候補	3
1.2.2	非バリオン候補	4
1.3	WIMP	4
1.3.1	超対称性理論	4
1.3.2	WIMP 直接探索実験	5
1.3.3	間接探索・加速器	6
第 2 章	キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験	7
2.1	暗黒物質探索におけるキセノンの利点	7
2.2	XMASS 実験	10
2.2.1	XMASS 実験概要	10
2.2.2	XMASS 実験における問題点	11
2.3	2 相式 TPC を用いた暗黒物質探索	12
2.4	1 相式 TPC 型検出器	12
2.5	液体キセノン中での比例蛍光に関する先行研究	13
2.5.1	先行研究 1	14
2.5.2	先行研究 2	15
2.5.3	先行研究 3	19
2.6	1 相式 TPC の実現に向けた検証	19
第 3 章	1 相式液体キセノン TPC テストベンチ	20
3.1	テストベンチの構造	20
3.1.1	真空系	21
3.1.2	冷却系	21
3.1.3	Xe ライン	21
3.1.4	検出器部分	22

3.1.5	DAQ	26
3.2	ワイヤー電極	26
3.3	電場シミュレーション	28
3.3.1	SUS 電極	29
3.3.2	ガラスエポキシ電極	29
第 4 章	テストベンチを用いた 1 相式 TPC の性能評価	33
4.1	実験手順	33
4.2	^{241}Am 59.5 keV γ による S1 測定	35
4.3	S1 光量のドリフト電場依存	37
4.4	^{241}Am 5.5 MeV α 由来の S2 測定	38
4.5	^{241}Am 59.5 keV γ 由来の S2 測定	43
4.6	外部線源を用いた粒子識別検証実験	45
4.6.1	^{137}Cs 由来の S2 測定	45
4.6.2	^{252}Cf 由来の S2 測定	48
4.6.3	S2/S1 比による粒子識別	49
第 5 章	1 相式 TPC の構想	52
5.1	球形 TPC	52
5.2	円筒形 TPC	53
第 6 章	まとめと今後の展望	56
	参考文献	58

第 1 章

暗黒物質

宇宙マイクロ波背景放射などの観測から、宇宙のエネルギー密度のうち通常の物質の占める割合は 5% 程度でしかなく、残りの 27% は暗黒物質、68% は暗黒エネルギーであると考えられている。暗黒物質については、その存在を示す様々な観測的証拠があるにもかかわらず正体はわかっていない。本章では暗黒物質の観測的証拠とその候補、現在行われている探索実験について述べる。

1.1 暗黒物質の存在

1.1.1 暗黒物質の提唱

暗黒物質の存在は 1933 年に F. Zwicky によって提唱された [1]。彼はかみのけ座銀河団を構成する銀河の速度からビリアル定理を用いて銀河団の質量を求め、光度から求められる質量との間に大きな差があることを指摘した。この光学的に観測されない"見えない"質量のことを暗黒物質と呼んだ。

銀河団を構成する銀河の速度から銀河団の質量は以下のようにして求められる [2]。銀河団においてビリアル定理

$$2\bar{T} + \bar{U} = 0 \quad (1.1)$$

が成立するとする。ここで、 \bar{T} は銀河団の運動エネルギーの時間平均、 \bar{U} はポテンシャルエネルギーの時間平均である。 \bar{T} は全ての銀河の運動エネルギーについて和をとったものの平均となるため

$$2\bar{T} = \sum_i m_i \overline{v_i^2} = M \overline{v^2} \quad (1.2)$$

と表せる。 M は銀河団の総質量、 $\overline{v^2}$ は時間と質量について平均をとったものである。また、銀河団の銀河が半径 R の球内に一様に分布しているとすると、 \bar{U} は

$$\bar{U} = -\frac{3GM^2}{5R} \quad (1.3)$$

となる。以上より

$$M = \frac{5R \overline{v^2}}{3G} \quad (1.4)$$

が得られる。実際には銀河は一様分布していないので総質量の下限値を

$$M > \frac{\overline{Rv^2}}{5G} \quad (1.5)$$

と見積もる。実際に観測されるのは観測者の視線方向の速度 v_s であるから、 $\overline{v^2} = 3\overline{v_s^2}$ より

$$M > \frac{3\overline{Rv_s^2}}{5G} \quad (1.6)$$

となる。観測より得られた速度は $\overline{v_s^2} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^2/\text{s}^2$ であるため、式 (1.6) より $M > 9 \times 10^{46} g = 4.5 \times 10^{10} M_\odot$ となる。これは銀河団の光度から求められた質量 $8.5 \times 10^7 M_\odot$ の約 500 倍である。この結果は、光学的に観測されない質量が存在することを示している。

1.1.2 渦巻銀河の回転速度

銀河スケールでの暗黒物質の存在を示す観測結果に渦巻銀河の回転速度がある。銀河の中心から距離 r 離れた場所で回転する物体の運動方程式より、回転速度 $v(r)$ は

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad (1.7)$$

となる。ここで $M(r)$ は r より内側の質量、 G は万有引力定数である。星は銀河の中心部に集まっているため、銀河の質量も中心に集中していると考えられる。よって中心から離れた場所では $M(r)$ が一定とみなせるので、 $v(r) \propto r^{-\frac{1}{2}}$ となり回転速度は減少すると予想される。

しかし、実際に観測された回転速度は、銀河中心から離れていっても減少せず一定となっている。図 1.1 は渦巻銀河 NGC6503 の回転速度の測定結果 [3] である。点が観測から得られた回転速度であり、中心からの距離によらず一定値を保っている。この観測結果を説明するためにはディスクやガスによる寄与のみでは足りず、点破線で示されているようなダークハローが必要となる。これは渦巻銀河の回転速度問題と呼ばれており、銀河の周囲に暗黒物質が存在することの証拠となっている。

1.1.3 宇宙マイクロ波背景放射

ビッグバンから約 38 万年後、プラズマ状態にあった電子と陽子が結合して水素原子が生成され光子が直進できるようになった。これは宇宙の晴れ上がりと呼ばれており、このときの光子の波長が宇宙膨張によって伸ばされ現在では約 2.7 K の背景放射として観測されている。これが宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) である。CMB はほぼ等方だが、温度にわずかな非等方性があることが COBE 衛星による観測で発見された。この非等方性は晴れ上がりときの宇宙の密度ゆらぎに起因していると考えられている。CMB の温度非等方性から物質密度パラメータやハッブル定数などの宇宙論パラメータを求めることができる。現在、Planck 衛星による CMB の観測結果から宇宙のエネルギー密度は通常物質 4.9%、暗黒物質 26.8%、暗黒エネルギー 68.3% と求められている [4]。

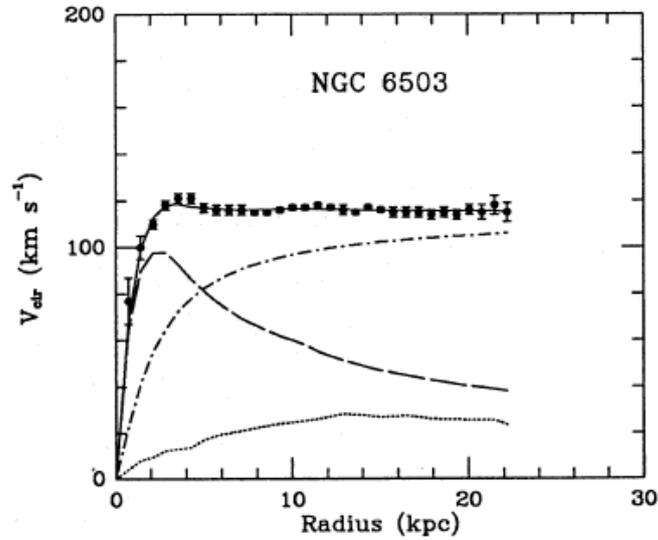


図 1.1 渦巻銀河 NGC6503 の回転速度曲線 [3]。点が測定された回転速度で、破線はディスク、点線はガスによる寄与を示している。点破線は観測結果を説明するために必要なダークハローの寄与を示す。

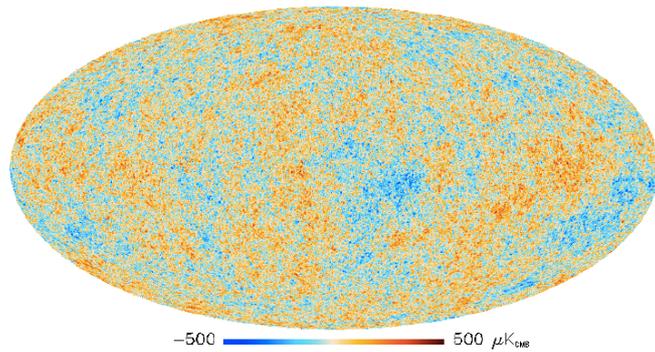


図 1.2 Planck 衛星が測定した CMB の温度非等方性 [4]

1.2 暗黒物質の候補

暗黒物質の正体については様々なモデルが存在するが、その候補は大きくバリオンと非バリオンに分けられる。

1.2.1 バリオン候補

バリオン候補としては、重いが暗いため電磁波での観測にかからない褐色矮星、浮遊惑星、白色矮星、中性子星、ブラックホールといった天体が挙げられる。これらは Massive Compact Halo Object (MACHO) と呼ばれている。電磁波では観測できないが、これらの天体が背後にある星の手前を横切る際に背後の星を増光させる重力マイクロレンズ効果を用いて探索することが可能である。探索の結果、MACHO では暗黒物質の総量を説明するには不十分であることが分かっている。

1.2.2 非バリオン候補

CMB の観測から、バリオンの宇宙のエネルギー密度に占める割合は 5% 程度であるため、非バリオンの暗黒物質が必要である。非バリオンの候補は未知の素粒子であると考えられており、粒子の速度によって 3 種類に分類される。宇宙初期の熱平衡から脱して粒子数が固定された時点において相対論的な速度を持つものを hot dark matter (HDM)、非相対論的な速度を持つものを cold dark matter (CDM) と呼ぶ。この中間的な速度を持つものは warm dark matter (WDM) と呼ばれている。

HDM

HDM の例としてはニュートリノが挙げられる。ニュートリノはわずかであるが質量を持ち、宇宙に大量に存在するため暗黒物質の構成要素となる可能性がある。現在の宇宙の構造は、宇宙初期に存在した小さなスケールの密度ゆらぎから始まり、小さな構造から形成されていったと考えられている。もしニュートリノが暗黒物質であるとする相対論的な速度のためにゆらぎがならされてしまい構造形成ができないため、ニュートリノのような HDM は暗黒物質の候補ではないと考えられている。

CDM

宇宙の構造形成を説明するには暗黒物質は銀河スケールに局在していなければならないため、非相対論的な速度を持つ CDM が暗黒物質の主要な成分と考えられている。CDM の代表的な例としては弱い相互作用と重力相互作用のみする Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) という粒子が挙げられる。WIMP は観測結果を説明するためのモデルとして考えられた粒子であるが、標準理論の問題を解決するために提唱された超対称性理論から予言される粒子の中に WIMP の条件を満たす粒子が存在する。このため WIMP は有力な暗黒物質候補となっている。

1.3 WIMP

1.3.1 超対称性理論

素粒子の標準理論は強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用を記述する理論であり、これまでの実験結果を説明することができる。しかし、電弱相互作用よりも高いエネルギースケールにおいて標準理論がそのまま成り立つとすると問題が生じる。この問題を解決するのが超対称性理論である。超対称性理論では、標準理論の全ての粒子に対してスピンの $\frac{1}{2}$ だけ違う超対称性パートナーを導入する。超対称性パートナーの電荷やバリオン数などの量子数はパートナーである標準理論の粒子と同じである。超対称性理論では R パリティと呼ばれる対称性を導入して標準理論の粒子と超対称性粒子を区別する。 R パリティはバリオン数 B 、レプトン数 L 、スピン S を用いて

$$R = (-1)^{3(B-L)+2S} \quad (1.8)$$

と定義され、標準理論の粒子では $R = +1$ 、超対称性粒子は $R = -1$ となる。 R パリティが保存するのとすると、 $R = -1$ の粒子が崩壊するときはより軽い $R = -1$ の粒子が生成される必要がある。こ

のため、最も軽い超対称性粒子 (lightest supersymmetric particle, LSP) はこれより軽い $R = -1$ の粒子がないので安定となる。この LSP のうちで電荷を持たないニュートラリーノと呼ばれる粒子が WIMP の条件に当てはまる。ニュートラリーノはゲージボソン B 、 W^3 とヒッグスボソン H_u 、 H_d の超対称性パートナーの線形結合で、

$$\tilde{\chi}_i^0 = a_{i1}\tilde{B} + a_{i2}\tilde{W}^3 + a_{i3}\tilde{H}_u + a_{i4}\tilde{H}_d \quad (1.9)$$

と表される。

表 1.1 標準理論の粒子と超対称性パートナー

通常の粒子			超対称性パートナー		
記号	名前	スピン	記号	名前	スピン
$q = u, c, t$	up quarks	$\frac{1}{2}$	$\tilde{q}_u^1, \dots, \tilde{q}_u^6$	up squarks	0
$q = d, s, b$	down quarks	$\frac{1}{2}$	$\tilde{q}_d^1, \dots, \tilde{q}_d^6$	down squarks	0
$l = e, \mu, \tau$	leptons	$\frac{1}{2}$	$\tilde{l}_1, \dots, \tilde{l}_6$	sleptons	0
ν	neutrinos	$\frac{1}{2}$	$\tilde{\nu}_u^1, \dots, \tilde{\nu}_u^6$	sneutrinos	0
g	gluons	1	\tilde{g}	gluinos	$\frac{1}{2}$
W^\pm	W boson	1	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$	charginos	$\frac{1}{2}$
H^\pm	charged Higgs	0			
γ	photon	1			
Z^0	Z boson	1			
$h^0(H_2^0)$	light scalar Higgs	0	$\tilde{\chi}_1^0, \dots, \tilde{\chi}_4^0$	neutralinos	$\frac{1}{2}$
$H^0(H_1^0)$	heavy scalar Higgs	0			
$A^0(H_3^0, P_0)$	pseudoscalar Higgs	0			

1.3.2 WIMP 直接探索実験

暗黒物質が銀河の周りに球状に分布しているとすると、太陽系周辺の密度は約 $0.3 \text{ GeV}/c^2\text{cm}^3$ となる。WIMP はほとんど物質と相互作用しないが、稀に原子核と散乱を起こす。この相互作用は核子のクォークのスピンに依存しない (spin independent, SI) 相互作用と、スピンに依存する (spin dependent, SD) 相互作用の 2 種類に分けられる。SI 相互作用では反応断面積は原子核の質量数の 2 乗に比例する。SD 相互作用では、原子核の核子が偶数の場合スピンが打ち消されるため、質量数が奇数の原子核の方が反応しやすくなる。

散乱によって原子核に渡されたエネルギーをシンチレーション光、イオン化、熱やフォノンの形で観測することで WIMP の検出が可能である。WIMP の直接探索実験は世界中で行われており、シンチレータや半導体など様々な方法が用いられている。現在では液体の Xe をシンチレータに用いた LUX 実験や XENON 実験が直接探索をリードしている。他には NaI をシンチレータに用いた DAMA/LIBRA 実験があり、13 年間の観測結果から暗黒物質の季節変動を観測したと主張して

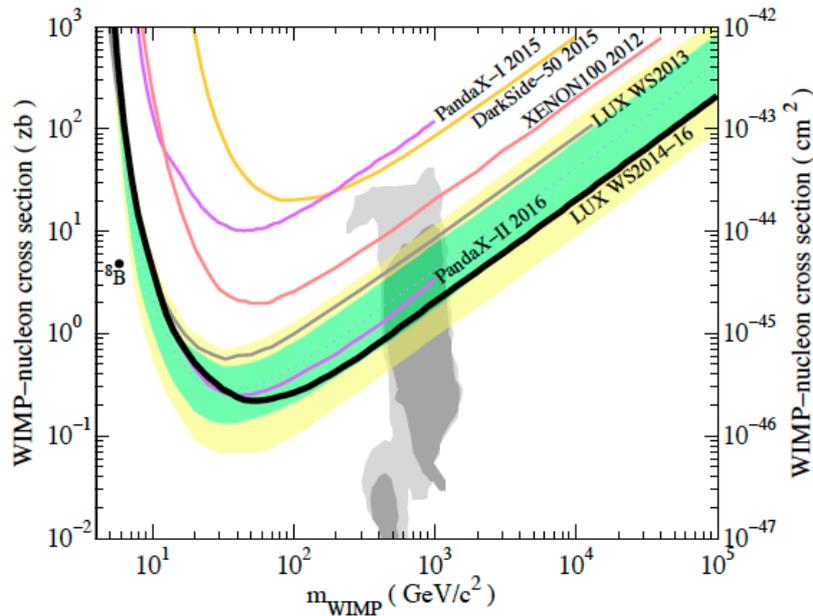


図 1.3 SI 相互作用での WIMP と核子の散乱断面積に対する制限 [5]。黒：LUX 実験による 90% 信頼度での制限。緑のバンドは 1σ 、黄のバンドは 2σ の範囲を示している。

いる。また、半導体を極低温まで冷却して散乱によって発生する電荷信号と熱信号を観測する方法もある。このような実験としては Ge と Si を標的に用いた CDMS 実験がある。

現時点での直接探索の結果には、WIMP の信号を観測したという実験と、信号は観測されず反応断面積に制限をつけている実験の両方が存在する。DAMA/LIBRA 実験や CoGeNT 実験では WIMP を検出したという結果が出ているが、この領域は他の実験では否定されている。現在、反応断面積に最も強い制限をつけているのは LUX 実験であり、図 1.3 に示すような制限を与えている。

1.3.3 間接探索・加速器

WIMP が対消滅する際にはガンマ線や反粒子、ニュートリノが発生する。銀河中心や太陽には重力によって WIMP が集まっていると考えられるので、ここから発生したガンマ線などを観測することで間接的に WIMP を探索することができる。陽電子については、PAMELA 衛星や AMS 実験において 10 GeV 以上のエネルギーで陽電子のフラックスの増加が観測されており、WIMP の対消滅によるものではないかと議論されている。ガンマ線に関しては Fermi 衛星やチェレンコフ望遠鏡、ニュートリノに関しては Super-Kamiokande や IceCube など間接探索が行われているが、WIMP の対消滅による信号は確認されていない。

加速器を用いた探索では高エネルギーの粒子を衝突させることで、暗黒物質となりうる未知の素粒子を生成しようとしている。LHC で実験が行われているが、現在のところこのような素粒子が発見されたという報告はされていない。

第 2 章

キセノンを用いた暗黒物質直接探索 実験

暗黒物質の直接探索において、液体キセノン (LXe) を標的に用いた実験が WIMP と核子との反応断面積に最も強い制限を与えている。本章ではまず LXe が暗黒物質探索において有効である理由を述べ、現在稼働中の Xe を用いた暗黒物質探索実験について説明し、本研究のテーマである 1 相式 TPC 型検出器について述べる。

2.1 暗黒物質探索におけるキセノンの利点

WIMP と原子核の反応のイベントレートは非常に低く、検出器で観測されるエネルギーも 100 keV 以下と小さい。このため WIMP 直接探索実験においてはバックグラウンドを極限まで抑えることと低エネルギー閾値を実現することが重要である。

発光量が多い

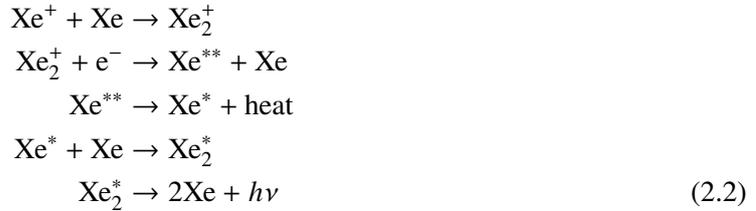
まず第一にシンチレータとして発光量が多いことが挙げられる。WIMP と Xe 原子核の相互作用によって検出器に落とされるエネルギーは 100 keV 以下と小さく、観測されるエネルギーはこの一部である。発光量が多いと低エネルギー事象を観測することができ、エネルギー閾値を下げることができる。また、Xe のシンチレーション光の波長は 178 nm 付近であり、PMT で直接観測可能なため波長変換材を用いることなく信号を観測できる。

以下に Xe の発光過程を示す。入射粒子との相互作用で Xe は励起状態になり、基底状態へと戻る時にシンチレーション光を放出する。発光過程には励起状態のみを経るものと、電離と再結合を経る 2 種類がある。どちらの過程でも最終的には励起した Xe からシンチレーション光が放出されるため、発光波長は同じである。ただし入射粒子との相互作用から発光までにかかる時間は異なる。

(a) 励起のみの発光過程



(b) 再結合を経る発光過程



原子番号と質量数が大きい

SI 相互作用の場合、WIMP と原子核の散乱断面積 σ と原子核の質量数 A の間には $\sigma \propto A^2$ の関係がある。Xe は大きな質量数を持つためイベントレートの低い WIMP の探索において有利である。また、Xe の原子番号は 54 と大きく、密度も 2.9 g/cm^3 と高いため Xe 自身がガンマ線を遮蔽する。この自己遮蔽効果によって Xe に入射したガンマ線はすぐに光電効果またはコンプトン散乱を起こし、放出された電子も Xe 中ですぐにエネルギーを失って停止する。このため Xe の中心部にバックグラウンドの少ない領域ができる。

安定同位体が多い

SD 相互作用は原子核のスピンが 0 でない方が反応しやすいため、質量数が奇数の原子核が良い標的となる。Xe には質量数の異なる同位体が多く存在し、偶数と奇数両方の質量数をもっているため SD 相互作用にも感度があり、SI と SD 両方の相互作用を観測することができる。また、宇宙線などによってつくられる Xe の放射性同位体は半減期が 1 ヶ月と短く、低バックグラウンド環境に置いておくと自然に崩壊するので Xe 自身がバックグラウンドとなることはない。

表 2.1 Xe の安定同位体

Isotope	Abundance(%)
^{124}Xe	0.096
^{126}Xe	0.090
^{128}Xe	1.92
^{129}Xe	26.44
^{130}Xe	4.08
^{131}Xe	21.18
^{132}Xe	26.89
^{134}Xe	10.44
^{136}Xe	8.87

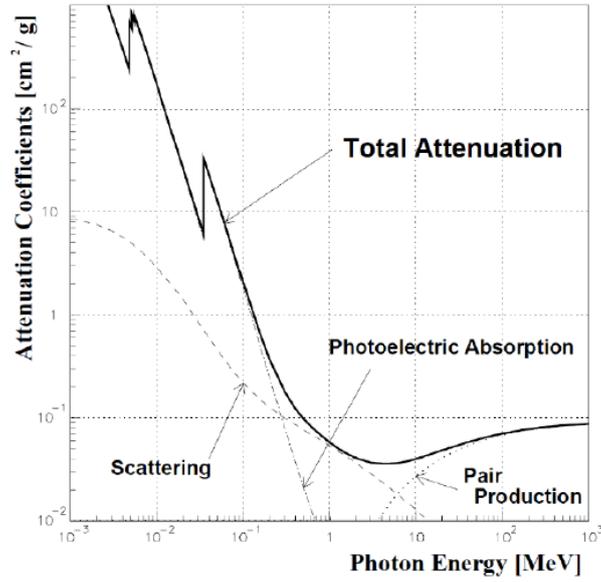


図 2.1 Xe 中での γ 線の減衰係数

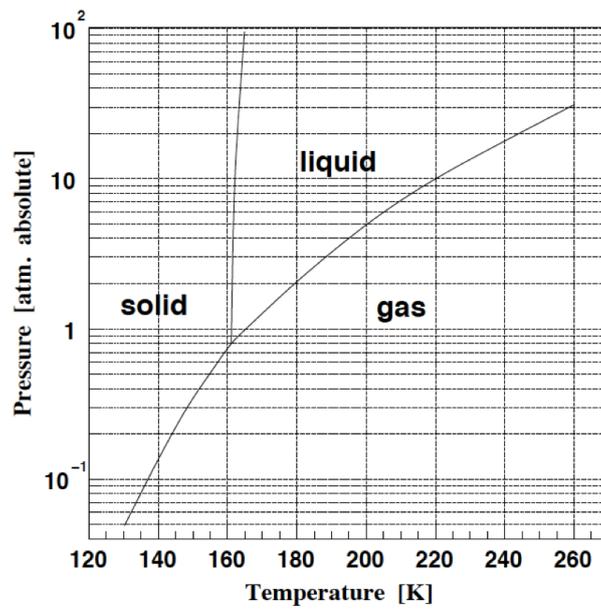


図 2.2 Xe の相図 [6]

取り扱いが容易

Xe は 1 気圧で 165 K で液化する (図 2.2)。これは他の希ガスと比べて高温であるため冷却が容易である。また気相と液相の間で相転移させやすいため、蒸留やゲッターの通過といった純度を保つための作業を容易に行える。

2.2 XMASS 実験

XMASS 実験は岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下 1000 m で行なわれている LXe をシンチレータに用いた暗黒物質直接探索実験である。WIMP と Xe 原子核の相互作用によって発生するシンチレーション光を光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT) で捉える。本節では XMASS 検出器および現在問題となっている検出器内壁起源のバックグラウンドについて説明する。

2.2.1 XMASS 実験概要

WIMP による信号は稀であるので、宇宙線によるバックグラウンドを減らすために検出器は地下に設置されている。神岡の岩盤の密度は 2.7 g/cm^3 なので 1000 m の岩盤は水換算で 2700 m となり、ミューオンフラックスは地上の 10^5 分の 1 となっている。図 2.3 に検出器の構造を示す。検出器本体は断熱のため真空容器に入れられている。642 本の PMT が、五角十二面体に組み合わせられた無酸素銅のホルダーに内向きに取り付けられており、835 kg の LXe を囲んでいる。PMT はほぼ球状に LXe を囲む形で配置されているため、63% という非常に高い光電面被覆率を達成している。

真空断熱容器は直径 10 m、高さ 10.5 m の超純水タンクの中心に設置されている。超純水タンクの役割は WIMP の信号のバックグラウンドとなるガンマ線および中性子の遮蔽である。タンク中には 72 本の 20 インチ PMT が取り付けられており、水中で発生したチェレンコフ光を観測して検出器で起こったイベントとの coincidence をとることでミューオンによるイベントをカットしている。

検出器内で起こったイベントの位置とエネルギーは各 PMT が受け取った光量から再構成される。検出器内部にグリッドを考え、それぞれの場所でイベントが起こった場合の光量分布を Monte Carlo シミュレーションを用いて調べている。光量分布を規格化することで確率密度関数として用いることができ、 i 番目の PMT に n_i 個の光電子が入る確率 $p_i(n_i)$ が求められる。こうして各グリッドごとにイベントが起こった場合の光量分布が作られる。実際に PMT で検出された光電子数から各グリッドごとに次のような尤度を計算し、 L が最大となるグリッドをイベントの発生位置として最もふさわしい場所として反応位置を再構成している。

$$L(\boldsymbol{x}) = \prod_{i=1}^{642} p_i(n_i) \quad (2.3)$$

また、光量分布による事象再構成に加えて、PMT に光子が入射した時間情報を用いた事象再構成も行われている。検出器中心部で起こったイベントの場合 PMT に光子が入射する時間は全ての PMT でほぼ同じになるが、壁際のイベントの場合各 PMT への光子の到達時間に差が生じる。このような検出器内の反応位置による各 PMT への光子の到達時間の差が反応位置の再構成に使用されている。

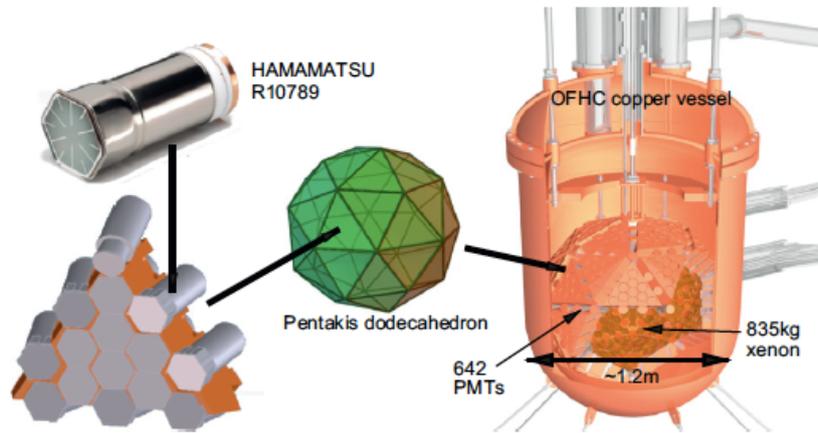


図 2.3 XMASS 検出器 [7]

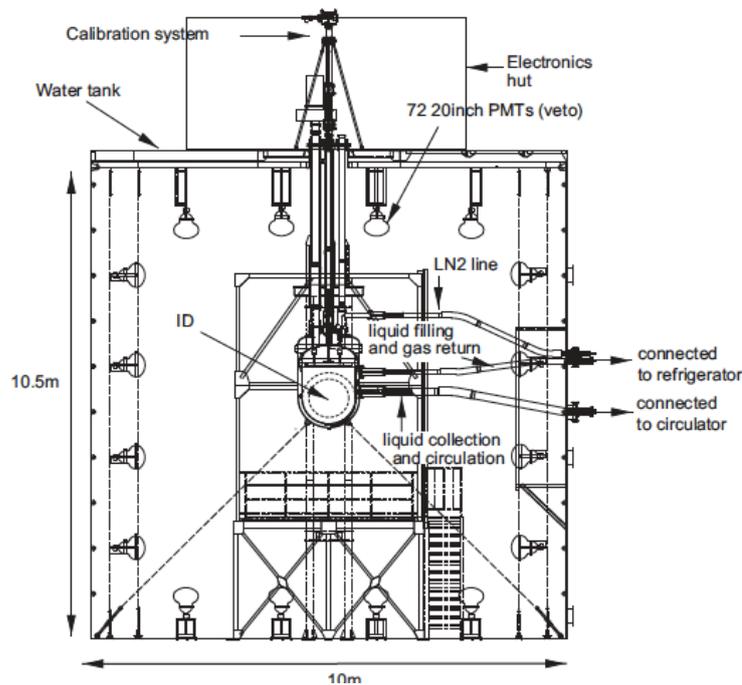


図 2.4 XMASS 検出器全体図 [7]

2.2.2 XMASS 実験における問題点

LXe に入射したガンマ線はすぐにエネルギーを落として止まるため検出器中心部にはガンマ線バックグラウンドの少ないクリーンな領域ができる。WIMP による反応は検出器全体で一様に起こるため、この領域では WIMP の信号がバックグラウンド信号に埋もれずに見えやすくなる。XMASS では中心から半径 20 cm の領域をバックグラウンドの少ない有効体積としており、事象再構成を用いて有効体積中で発生したイベントを選び出している。前述したように主に PMT の光量分布から反応位置を再構成しているが、検出器内壁の近くで起こったイベントを誤って有効体積中のイベントとして再構成してしまうことが問題になっている。これは主に検出器内壁に付着した放射性不純物由来のイベントである。検出器内壁付近で起こったイベントの場合、反応点の近く

の PMT が光を捉えられないことがあるため、PMT のヒットパターンから反応位置を再構成すると有効体積中で起こった WIMP 由来のイベントのように見えてしまう場合がある。これが有効体積へのバックグラウンドの浸み出しとして問題になっている。この問題を解決するために、壁際で起こったイベントでも光子を検出できるようドーム型の光電面をもった新しい PMT の開発が進められている。

しかし、PMT の光量分布と時間情報による反応位置の再構成では位置分解能に限界がある。ハードウェアの視点からこの問題を解決する方法として、LXe 中に電場をかけて電子のドリフトを利用して反応位置を決定する Time Projection Chamber (TPC) にする方法が考えられる。次章では、TPC 機能をもつ検出器を用いた暗黒物質探索実験について説明する。

2.3 2 相式 TPC を用いた暗黒物質探索

現在、暗黒物質直接探索において XENON 実験 [8] や LUX 実験 [9] を代表とした気体と液体両方の Xe を用いた 2 相式 TPC 検出器が稼働している。図 2.5 に 2 相式 TPC の検出原理を示す。まず、LXe 中で起こった入射粒子との反応によってシンチレーション光 (S1 と呼ぶ) が発生する。このとき同時に発生する電子を LXe 中にかけて電場によって検出器上部の気相に向かってドリフトさせる。電子は高電場によって液相から気相へ引き抜かれ、気体の Xe 中で電荷増幅を起こし比例蛍光 (S2 と呼ぶ) が発生する。この S1 と S2 の両方の光を信号として PMT で観測している。

S1 と S2 の時間差は電子のドリフト時間に対応しているため、これを用いてドリフト方向の反応位置を特定することができる。さらに、S1 と S2 の信号の大きさの比が WIMP や中性子による原子核反跳とバックグラウンドとなる γ 線や β 線による電子反跳とで違うため、粒子識別が可能である。具体的には、原子核反跳では Xe 原子核が弾かれるため電離損失が大きく周りの Xe 原子の電離密度が大きくなる。そのため再結合が起りやすく、電場によってドリフトされる電子が少なくなるので S2 の発光量が小さくなる。逆に、電子反跳の場合 Xe 原子の電子が弾かれるため電離密度は小さくなり再結合は起りにくく、結果として S2 の発光量は大きくなる。この原子核反跳と電子反跳による S2/S1 比の違いを用いて WIMP とバックグラウンドの識別を行っている。

2 相式検出器で問題になっているのが液面管理で、図 2.5 に示したように液面は Anode と gate grid の間で平行になるように保たなければならない。また気相の温度と圧力が変わると S2 の発光量が変化するためこれを一定に保つ必要がある。電子を上向きにドリフトして気相で S2 を発生させるので鉛直方向に電場がかけられているが、PMT の光電面は 0 V にする必要があるので側面に設置することができない。このため検出器全体を PMT で覆うことができずシンチレーション光の検出効率が下がってしまう。これらの問題を解決するためには S2 を液中で発生させる 1 相式 TPC が有効である。

2.4 1 相式 TPC 型検出器

1 相式 TPC では、2 相式のように気相を設けず液中で S2 を発生させるのが特徴である。図 2.6 に 1 相式 TPC の例を示す。気相がないため液面やガスキセノンの圧力を管理する必要はなくなる。さらに液体のみなので検出器形状を自由に選ぶことができる。使用する Xe の体積に対して表面積を最も小さくし最大の有効体積をとることができるのは球形の検出器である。球形の場合

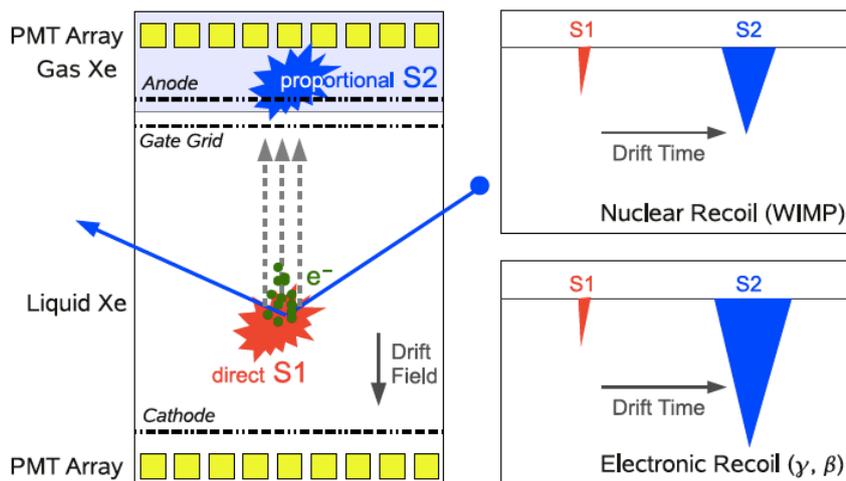


図 2.5 2相式 TPC の検出原理 [8]

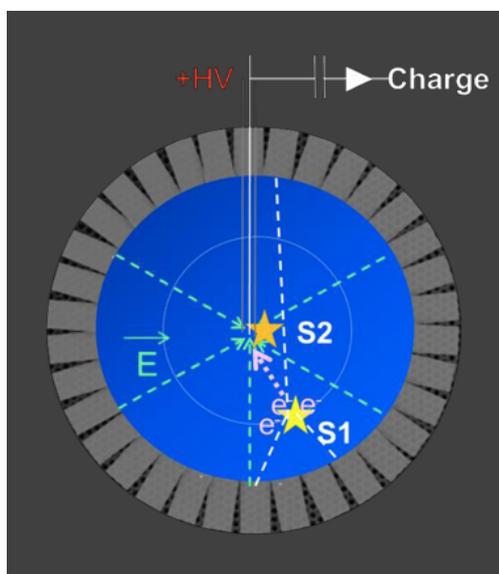


図 2.6 1相式 TPC の例。球形の検出器の中心に電極を設置し、中心で S2 を発生させる。

XMASS 検出器のように全体を PMT で囲むことが可能なため高い光電面被覆率を達成できる。さらに、TPC では Xe をシンチレータとしてのみ使用した場合と比べて反応位置再構成の精度を上げることと粒子識別が可能になるため感度を向上させることができる。ただし、LXe 中で S2 を発生させるためにはガス中で S2 を発生させるときに比べて高電場が必要であるため、その検証が必要である。

2.5 液体キセノン中での比例蛍光に関する先行研究

LXe 中での S2 の発生は 1976 年に A. Lansart らによって発見された [10]。1979 年に発表された研究 [11] でその特性が検証され、LXe 中での S2 が発生するために必要な電場の閾値が求められた。その後 2014 年により詳細な測定が行われ、LXe 中での S2 および電荷増幅が始まる電場の閾

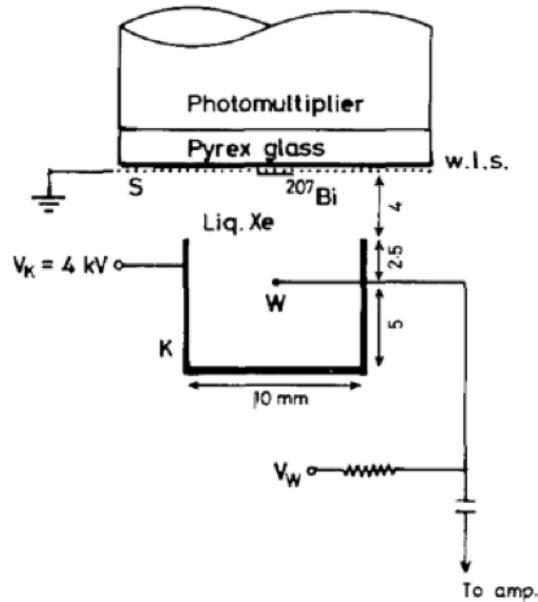


図 2.7 実験装置概略図 [11]。W がワイヤー、K が比例計数管の陰極、S が ^{207}Bi 線源のついたメッシュ状の電極。S は 0 V、K は 4 kV に固定され、W には 4 kV 以上の電圧が印加されている。

値が求められている [12]。本節では LXe 中での S2 について検証した先行研究について述べる。

2.5.1 先行研究 1

まず 1979 年に発表された K. Masuda らによる S2 の特性についての研究 [11] について説明する。この実験ではタングステンワイヤーを陽極に用いて電圧を印加し、ワイヤー付近に形成される高電場領域で発生する S2 を観測している。図 2.7 が実験装置の概略で、上部が空いている箱型の比例計数管と PMT が LXe に浸されている。PMT の光電面の直前には ^{207}Bi 線源のついたメッシュ状の電極が設置されている。比例計数管陰極は 4 kV で固定し、ワイヤーには 4 kV 以上の電圧を印加して実験が行われた。ワイヤーは直径 $4\ \mu\text{m}$ から $20\ \mu\text{m}$ までの様々な直径のものが使用されている。LXe 中ではまず ^{207}Bi 線源から放射される 0.55 MeV、1.05 MeV の γ 線と 0.976 MeV の β 線によって線源付近で S1 が発生する。その際に発生した電離電子を電場によってワイヤー方向へドリフトさせ最終的にはワイヤー付近の高電場で S2 が発生する。これらのシンチレーション光は上部に設置された PMT で観測される。またワイヤーには電荷読み出しのためのチャージアンプが接続されている。

図 2.8 に得られた電荷およびシンチレーション光の信号を示す。a がチャージアンプからの電荷信号で b が PMT の信号である。b の最初の信号が S1 によるものでその後に発生しているのが S2 によるものである。S2 の発生と同時にワイヤーから読み出された電荷量が増加しているのが確認できる。

図 2.9 にワイヤーの電圧を変化させたときの電荷増幅率の変化を示す。横軸はワイヤーと比例計数管陰極の電位差である。ワイヤーの電圧を上げていくと電子なだれによる増幅率の増加が見られ、ワイヤー径が細いほど低い電圧で電子なだれが発生している。図 2.10 に相対的な S2 光量の変

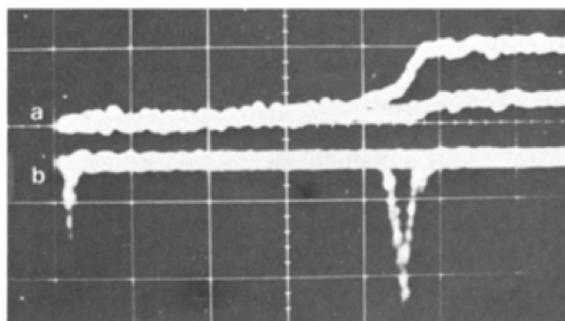


図 2.8 オシロスコープで観測されたチャージアンプ (a)、および PMT(b) の信号 [11]。横軸は $1 \mu\text{s}/\text{div}$ で、S1 の $4 \mu\text{s}$ 後に S2 が発生している。

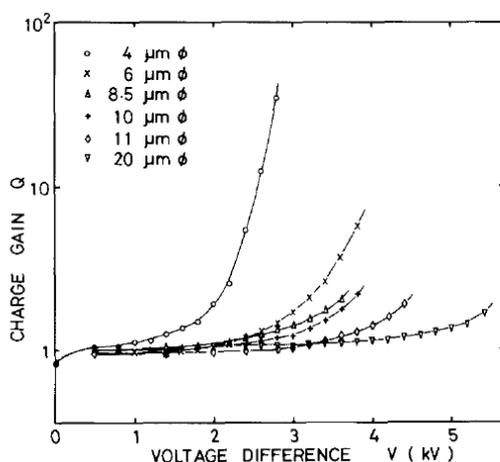


図 2.9 直径の違うワイヤーについての電荷増幅率 [11]。横軸はワイヤーと比例計数管陰極の電位差である。 Q の急激な増加は電子なだれによる。

化を示す。丸が実験から得られた値で実線がフィット結果である。ワイヤーと陰極の電位差が小さいときは S2 は観測されておらず、このことから S2 が発生するためには一定以上の電場が必要であることがわかる。実験結果は円筒形の比例計数管における S2 光量と電場の関係式 (2.4) を用いてフィットされた。

$$L = Br_1 \left[A + E_s \left(\ln \frac{E_s}{A} - 1 \right) \right] \quad (2.4)$$

ここで、 L は相対的な S2 光量、 A は S2 の発生に必要な電場の閾値、 E_s はワイヤー表面での電場の大きさ、 r_1 はワイヤーの半径、 B は定数である。このフィットから得られた S2 の発生に必要な電場の閾値を表 2.2 に示す。ワイヤー直径によって閾値には差があり、 $410\text{--}700 \text{ kV/cm}$ という値が得られている。

2.5.2 先行研究 2

次に 2014 年に発表された E. Aprile らによる研究 [12] について説明する。この研究では LXe 中の電荷増幅と比例蛍光の発生に必要な電場の閾値がそれぞれ求められている。

実験装置の TPC 部分の概略を図 2.11 に示す。ワイヤーの張られた四角い枠型の電極が積み重ね

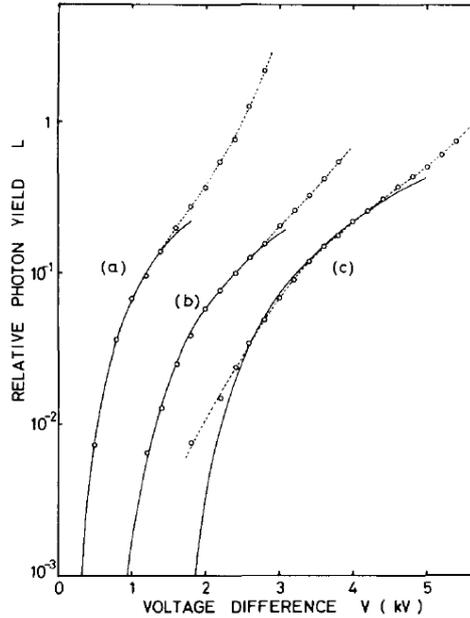


図 2.10 相対的な S2 光量 [11]。丸がデータ点で実線が式 2.4 によるフィット結果である。ワイヤー直径はそれぞれ (a)4 μm 、(b)10 μm 、(c)20 μm である。

表 2.2 S2 の発生に必要な電場の閾値

ワイヤー直径 [μm]	電場 [kV/cm]
4	700
10	490
20	410

られた構造をしている。枠はステンレス製で、protection grid、gate grid、cathode は直径 100 μm のタングステンワイヤー 9 本がはんだ付けされており、anode は金メッキタングステンワイヤー 1 本が溶接されている。anode のワイヤーには直径が 5 μm のものと 10 μm のものの 2 種類を用いて実験が行われた。cathode には ^{210}Po 線源が取り付けられており、ここから発生する 5.4 MeV の α 線による S1 と S2 を上下に設置された 2 つの PMT で観測している。また、anode に接続された電荷有感型前置増幅器によって電荷の読み出しも行われている。 ^{210}Po 線源付近で S1 と同時に発生した電子は gate に向かってドリフトし、gate を通過した後 anode のワイヤー付近の高電場領域で加速され S2 が発生する。protection grid は 0 V に固定されており、cathode、gate、anode にはそれぞれ電圧が印加されている。gate と cathode 間のドリフト領域の電場は 1 kV/cm で一定になっており、gate と anode の電位差は直径 10 μm のワイヤーを用いたときは最大で 6.75 kV、直径 5 μm のワイヤーを用いたときは最大で 3 kV とされた。

図 2.12 にオシロスコープで観測された PMT とプリアンプの信号の波形を示す。上の 2 つが PMT の波形で、最初の波形が S1 でその後に発生しているのが S2 である。下がプリアンプの信号で、S2 の発生と同時にワイヤーで電荷増幅が起きているのが確認できる。図 2.13 に cathode に -0.5 kV、anode に 5 kV 印加した時の電場シミュレーションの結果を示す。赤い線が電気力線で、電子のドリフトする経路を示している。

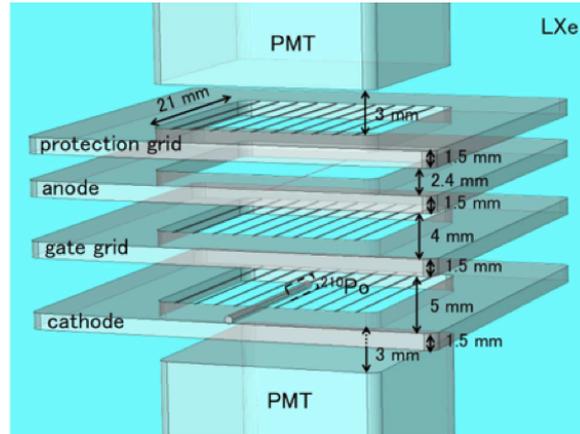


図 2.11 実験装置の TPC 部分の概略図 [12]。LXe は上下から 2 つの PMT で観測されている。cathode と gate の間がドリフト領域で、anode 付近の高電場で S2 の発生と電荷増幅が起こる。

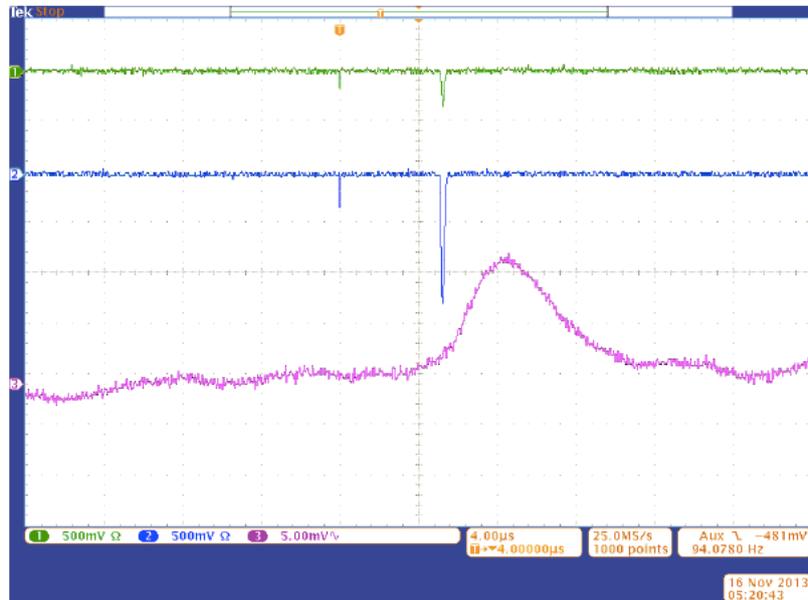


図 2.12 オシロスコープで観測された S1 と S2 の波形 [12]。緑が上 PMT、青が下 PMT、紫がプリアンプの信号である。gate と anode の電位差は 6.5 kV、cathode と gate の電位差は 0.5 kV に設定されている。

この測定から得られた電荷信号と S2 光量の電圧との関係を図 2.14 に示す。電圧が高くなると電荷増幅および S2 が発生しているのが確認できる。ワイヤーが細い方が低い電圧で S2 が発生している。得られた結果は式 (2.5)、(2.6) を用いてフィットされ、S2 に関するパラメータが求められた。

$$\Delta N_e = N_e \theta_0 \exp\left(-\frac{\theta_1}{E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_2}\right) \Delta \vec{x} \quad (2.5)$$

$$\Delta N_\gamma = N_e \theta_3 (E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_4) \Delta \vec{x} \quad (2.6)$$

ここで、 N_e と N_γ はそれぞれ電子が距離 $\Delta \vec{x}$ を進む間に発生する電子の数と光子の数である。 θ_i はフィットパラメータで、 E は電場の強さ、 \vec{x} は電子の位置、 V_A は anode の電位差、 d_w はワイ

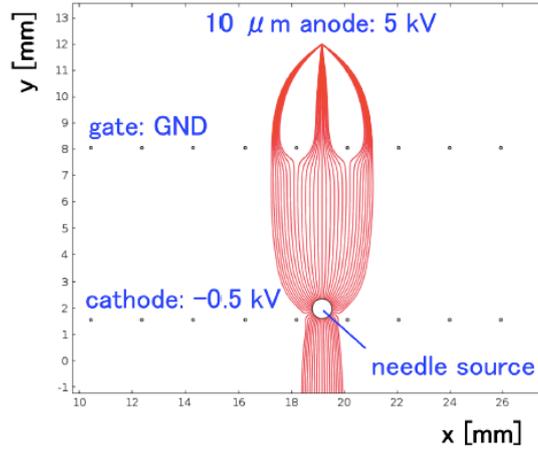


図 2.13 電場シミュレーションの結果 [12]。赤い線は電子がドリフトする経路を示している。

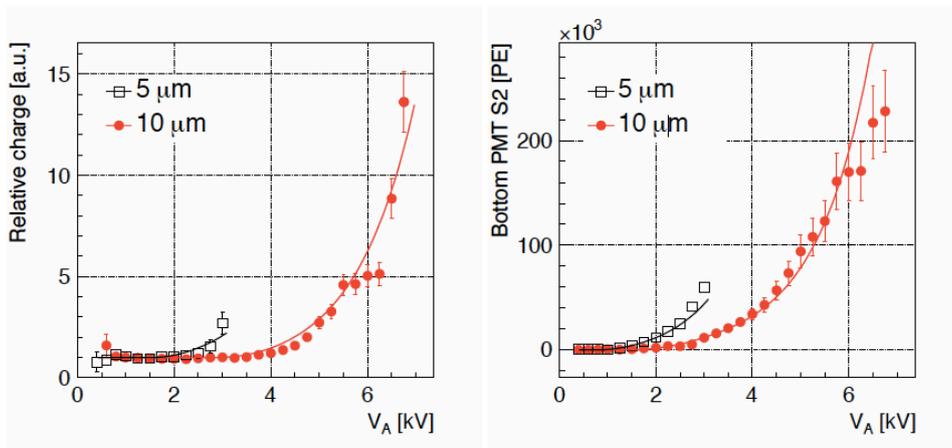


図 2.14 左：プリアンプからの電荷信号、右：下 PMT で観測された S2 の光量 [12]。横軸は anode と gate の電位差である。

ヤーの直径、 $\Delta \vec{x}$ は電子のドリフトする道筋である。(2.5)、(2.6) 式を積分したものが電子数の変化と S2 の光子数になる。5 μm 、10 μm のワイヤーそれぞれのデータと、両方を合わせたデータをフィットした結果を表 2.3 に示す。 θ_2 は電荷増幅が起こるのに必要な電場の閾値、 θ_4 は S2 が発生するために必要な電場の閾値である。5 μm と 10 μm の両方を合わせたデータから、S2 が発生するために必要な電場は $412 \pm 10 \text{ kV/cm}$ 、電荷増幅が起こるのに必要な電場は $725 \pm 48 \text{ kV/cm}$ と求められている。

表 2.3 フィット結果

parameter	5,10 μm	10 μm	5 μm
θ_2 [kV/cm]	725 ± 48	586 ± 47	750 ± 1
θ_4 [kV/cm]	412 ± 10	399 ± 7	416 ± 13

2.5.3 先行研究 3

ワイヤー以外の電極として Gas Electron Multiplier (GEM) を用いた先行研究がある。GEM とは薄いシートに小さい穴が無数にあげられているものであり、この両面に電位差を与えることで穴の中に高電場を形成する。この GEM 電極を用いて LXe 中での S2 を観測したという結果が 2013 年に発表された [13]。この研究では厚さ 0.4 mm の金メッキされた FR4 基板に直径 0.3 mm の穴が 1 mm ピッチであげられた Thick GEM を使用している。約 7.5 kV/cm の電場で 4 MeV の α による S2 が見え始めたと報告されており、ワイヤーを用いた研究に比べて閾値が非常に低い。しかしこの結果は後の実験で否定されており、LXe 中に生じた泡でガス増幅が起き S2 が発生したと予想されている [14]。また本研究の前に Glass GEM を電極に用いた研究が行われており、穴内部に 38 kV/cm の電場を形成して S2 の観測実験が行われたが、S2 は観測されていない [15]。以上の結果より、LXe 中での S2 の発生には約 400 kV/cm 以上の電場が必要になると考えられる。

2.6 1 相式 TPC の実現に向けた検証

1 相式 TPC を暗黒物質探索で用いるためには、100 keV 以下の低エネルギーイベントに対する感度が必要になる。先行研究では 0.55 MeV の γ や 5.4 MeV の α 由来の S2 が観測されているが、さらにエネルギーが低いイベントでも S2 が発生するかどうかを確かめて、S2 が発生する S1 のエネルギー閾値を求めなければならない。

S2 の発生とその光量は、S1 の電子をどれだけ高電場領域までドリフトできるかということと、電荷増幅を起こさせる高電場領域の電場の大きさによる。このため LXe 中での S2 の特性を詳しく調べる必要がある。S2 の発生に必要な閾値である約 400 kV/cm の電場を実現するにはワイヤーを電極に使用するのが確実であるため、本研究ではワイヤーを用いた電極を開発しこれを用いて S2 の測定を行った。以降、3 章で実験に使用したテストベンチの説明を行い、4 章で実験結果について述べる。

第 3 章

1 相式液体キセノン TPC テストベンチ

S2 を LXe 中で発生させる 1 相式液体キセノン TPC 型検出器が暗黒物質探索において有効な検出器となるかを評価するために、1 相式液体キセノン TPC のテストベンチを用いてその性能評価を行った。使用したテストベンチは東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設に製作されたもの [15] である。本章では実験に使用したテストベンチについて述べる。

3.1 テストベンチの構造

図 3.1 に検出器から Xe ボトルまでのテストベンチ全体を示す。左側にある円筒形の容器が外真空容器 (Outer Vacuum Chamber, OVC) で、内部に内真空容器 (Inner Vacuum Chamber, IVC) が入っており、IVC の内部に TPC が組み立てられている。Xe は右端にあるボトルにガス状態で保管されている。Xe のボトルは、床に固定された円筒形の容器の中に上から吊り下げられて浮かんだ状態で入っており、その重さはロードセルで計られている。円筒形の容器は Xe 回収の際にボトルを冷やすための液体窒素を導入するためのものである。検出器とボトルは繋がれており、実験のたびに Xe はボトルから IVC 内へ導入・回収される。



図 3.1 テストベンチ全体。左側の円筒形の容器が検出器の入った外真空容器で、右端が Xe ボトルである。

3.1.1 真空系

Xe を液体の状態を保つためには OVC を真空引きして検出器を真空断熱する必要がある。IVC に Xe が入っている間は OVC の真空引きを行い、 10^{-5} Pa 台の真空度を保っている。また IVC に Xe を導入する前には、内部に残った気体分子や水分によって Xe の発光量が低下するのを防ぐため、IVC と Xe 導入のラインを真空引きする必要がある。今回の実験では、Xe を導入する前に IVC の圧力が 10^{-4} Pa 台になるまで真空引きを行った。

3.1.2 冷却系

Xe を液体の状態を保つために検出器は常に冷却されていなければならない。本実験で使用したテストベンチはパルスチューブ冷凍機（アルバック・クライオ PC150U+UW701）を用いて冷却を行っている。OVC 内部は図 3.2 のような構造になっており、検出器の上部に冷凍機が設置されている。冷却に関わる部分は上からコールドヘッド、熱交換円盤、熱交換ボックスである。コールドヘッドから熱交換円盤を挟んでその下にある熱交換ボックスが冷却される。熱交換ボックスの内側の上部には、熱交換円盤から熱交換ボックスへの熱伝導を良くするための fin と呼ばれる 3 枚の板がついている。IVC 内に導入されたガス Xe は熱交換ボックスの内壁にぶつかることで冷却され、液化して IVC の底にたまっていく。液化した Xe がたまると IVC 底の温度も下がるため全体が冷却される。

LXe の状態を知るために IVC には温度計が設置されており、熱交換円盤、熱交換ボックス外側、fin、IVC 外側の底にそれぞれ 1 つずつ取り付けられている。IVC 内の TPC 部分にも 2 つの温度計が設置されている。冷凍機の温度は、冷却が行われるコールドヘッドに取り付けられたヒーターの出力を変えることで調節する。熱交換円盤に取り付けられた温度計の温度が設定した値になるように、PID 制御によってヒーターの出力をコントロールしている。また、熱交換ボックスには緊急時に冷却を行うための液体窒素ラインが巻き付けられている。

3.1.3 Xe ライン

図 3.3 に Xe の導入と回収のラインを示す [15]。ボトルには約 1.2 kg のガス Xe が入っており、これは常温の気体で 204 L、液体で 405 cc に相当する。導入および回収の際は、ラインに設置した Mass Flow Controller (MFC)（堀場製 SEC-Z512MGX）によって Xe の流量の調節と総流量の確認を行っている。本実験では最大で 1 L/min の流量で IVC に Xe を導入した。また、Xe 中に含まれる不純物による発光量の低下を防ぐため、導入時にゲッターを通して Xe の純化を行っている。本研究の前に行われた研究 [15] では 1 つのゲッター（日本 API AG-100-Xe）のみを使用していたが、本実験ではもう 1 つのゲッター（SAES Monotorr PS4-MT3-R-1）を追加し、2 つのゲッターを使用することで Xe の純度をより高めている。

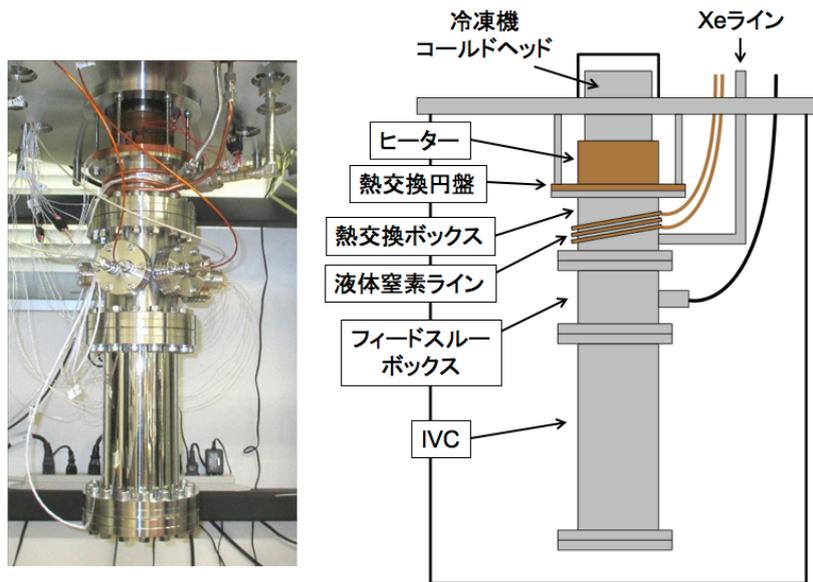


図 3.2 OVC の内部。上部にある冷凍機から全体が冷却される。Xe は熱交換ボックスから導入され、液化して一番下の IVC にたまっていく。

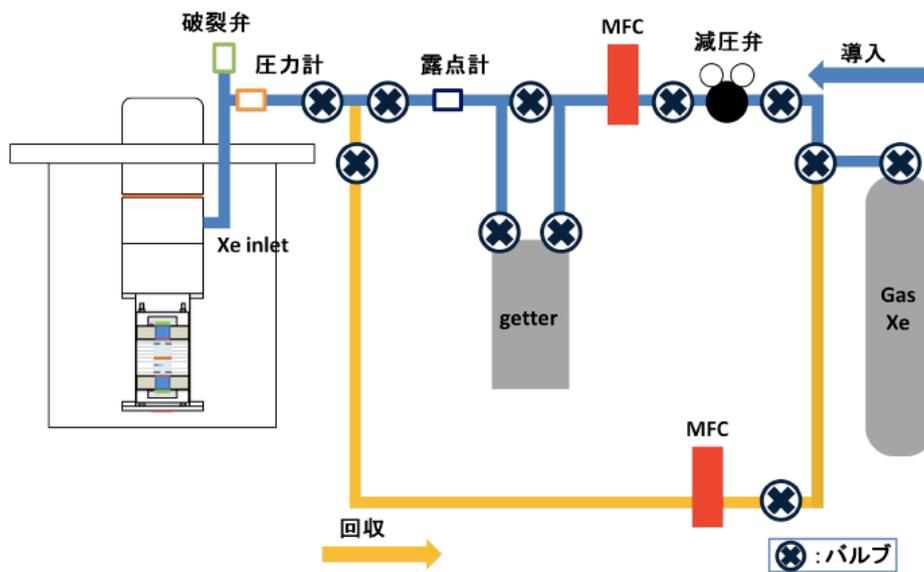


図 3.3 Xe 導入・回収のライン [15]。本研究の測定では導入時の MFC とゲッター（日本 API 製）の間にもう一つ SAES 製のゲッターを追加している。

3.1.4 検出器部分

検出器本体である TPC は IVC の内部に図 3.4 のような構造で組み立てられている。LXe 領域の中心にワイヤー電極、その下側に ^{241}Am 線源と LED、各 PMT の光電面の前に GND 電極が設置されており、上下に設置した 2 つの PMT でシンチレーション光を観測する。電極などはスペーサーに固定されて 4 本のねじ棒を支柱にして積み上げられている。スペーサーの中心部には一辺が 32 mm の正方形の穴があいており、この部分が PMT によって観測される LXe 領域となっている。

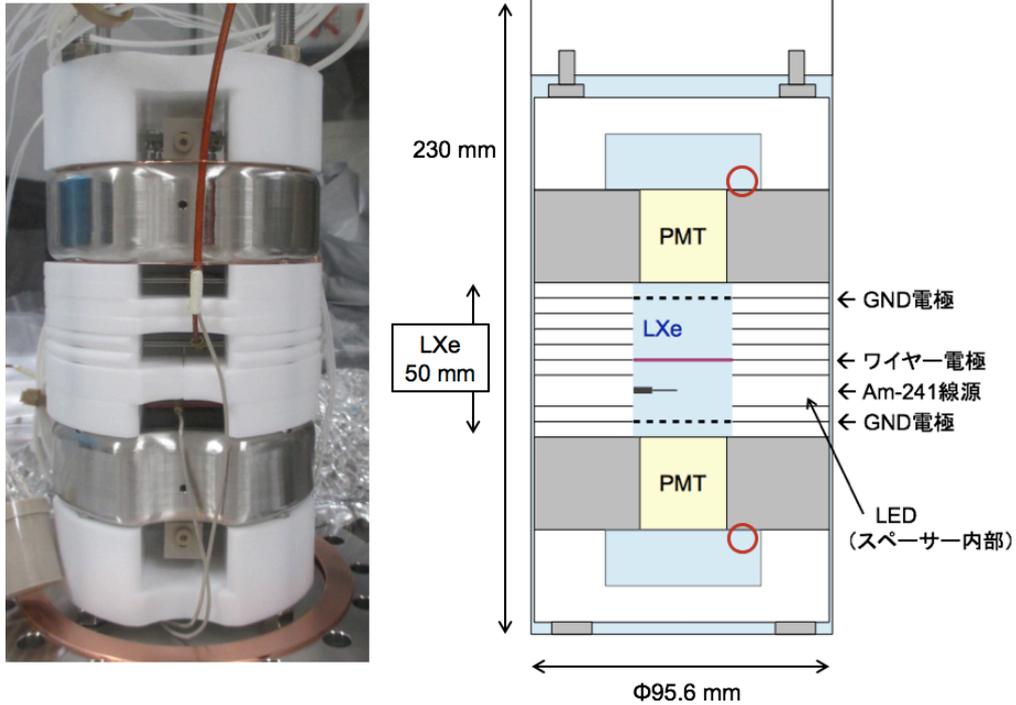


図 3.4 TPC とその模式図。PMT で観測される LXe 領域の大きさは $32\text{mm} \times 32\text{mm} \times 50\text{mm}$ である。模式図の白い部分がテフロン spacer、灰色の部分が SUS の PMT ホルダーで、赤い丸は温度計の位置を示している。



図 3.5 浜松ホトニクス製の PMT R8520-406

Spacer には LXe からのシンチレーション光を反射するテフロンを用いている。また、上下の PMT を固定しているホルダーに 1 つずつ温度計を設置している。

使用した PMT は浜松ホトニクス製の R8520-406 (図 3.5) である。LXe の発光波長 178nm における量子効率は約 30% で、光電面は一辺が 24mm の正方形をしている。+HV 用のブリーダーを使用しており、光電面は 0V になっている。PMT は SUS のホルダーに入れられてブリーダーと共に固定されている。GND 電極は直径 $100\ \mu\text{m}$ のタングステンワイヤー 7 本が SUS のフレームに溶接されたもので、PMT の光電面の前にそれぞれ 1 つずつ置かれている。高電圧を印加するワイヤー電極については 3.2 節で詳しく説明する。

^{241}Am 線源と LED は検出器の較正に使用する。図 3.6 に使用した ^{241}Am 線源を、図 3.7 にその

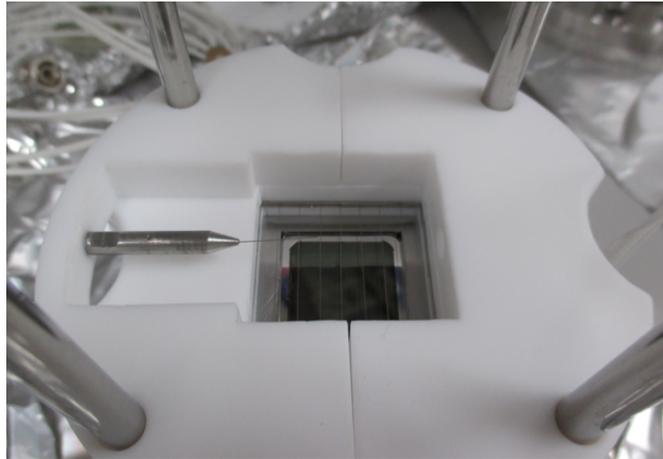


図 3.6 ^{241}Am 線源をテフロン spacer に取り付けた様子。線源の向かい側の spacer には穴が明けられており LED が入っている。

模式図を示す。線源の針の部分はステンレスのチューブになっており、その中のタングステンワイヤーの先に ^{241}Am が蒸着されている。ステンレスチューブによって α 線は外に出てこれないように封じられている。しかし、この ^{241}Am 線源と同じように製作された他の線源では、表面に α が付いていることが確認されている。そのため使用した ^{241}Am 線源の表面にも α が付いている可能性がある。

^{241}Am の半減期は 432 年で、 α 崩壊によって表 3.1 にあるエネルギーの放射線を放出する。測定時の強度は 345 MBq であった。図 3.8 がゲルマニウム検出器で測定された、実験で使用した ^{241}Am 線源のスペクトルである。60 keV 付近にピークが確認できる。レートは低いながら 100 keV と 120 keV 付近にもピークが存在する。また、線源の向かい側の spacer には穴があいており、その中に LED が入っている。

表 3.1 ^{241}Am の放射線のエネルギー

γ 線	59.5 keV, 26.4 keV
X 線	13.9 keV, 17.8 keV, 20.8 keV
α 線	5.49 MeV, 5.44 MeV

^{241}Am 線源の先端から見た PMT の光電面被覆率は以下のようにして求められる。光電面は一辺が 24 mm の正方形、線源から上 PMT までの距離は 35 mm、下 PMT までの距離は 15 mm である。線源の先端から光電面を見込む立体角を用いると、

$$\left(\frac{24^2}{35^2} + \frac{24^2}{15^2} \right) \times \frac{1}{4\pi} \approx 0.24 \quad (3.1)$$

より、光電面被覆率は約 24% となる。

IVC 内にある PMT の信号読み出しなどのケーブルは、IVC 上部のフィードスルーボックスにあるポートを介して外部と接続される。フィードスルーボックスには ICF70 のポートが 5 つと ICF34 のポートが 1 つ付いている。本実験では ICF70 の 5 つのポートのうち 4 つを使用しており、それぞれに上 PMT、下 PMT、ワイヤー電極のケーブルと、上下 PMT の温度計と LED の線を接続している。ICF34 のポートには fin の温度計の線を接続している。

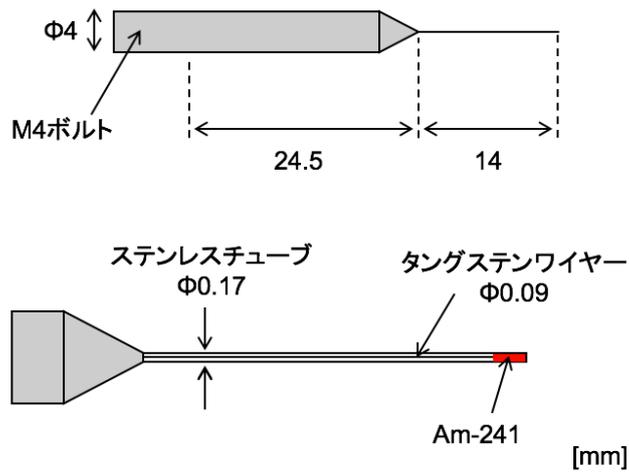


図 3.7 実験で使した ^{241}Am 線源の模式図。針部分のステンレスチューブの内側にあるタングステンワイヤーの先に ^{241}Am が蒸着されている。

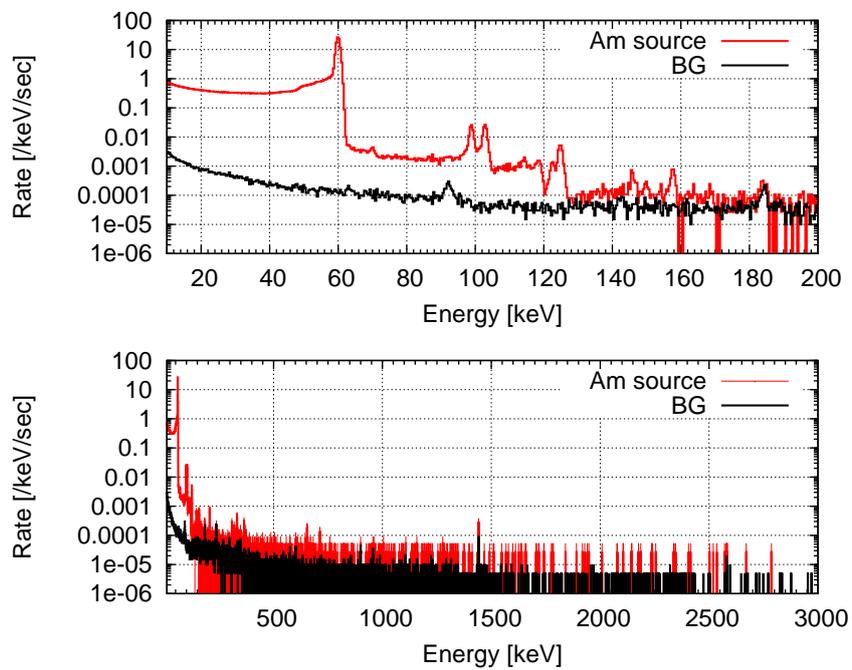


図 3.8 ゲルマニウム検出器で測定した ^{241}Am 線源のスペクトル

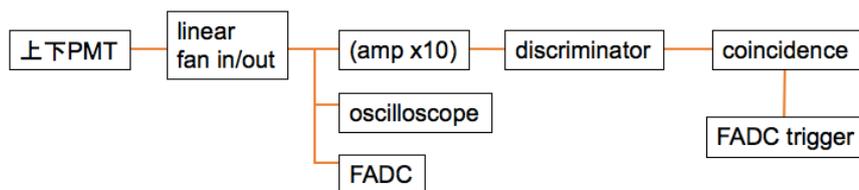


図 3.9 データ取得回路 1

3.1.5 DAQ

データの取得には Flash analog-to-digital converter(FADC) (CAEN 製、DT5751) を用いて、PMT の波形を記録している。ダイナミックレンジは 1 V、サンプリングレートは 1 GHz で 1 ns ごとに信号の電圧値が記録される。S1 の数 μs 後に発生する S2 を記録するため 1 イベントあたり 10 μs 間にわたって波形を取得した。図 3.9 と図 3.10 にデータ取得の回路を示す。上下 PMT からの信号は linear FAN IN / OUT で 3 つに分けられ PMT アンプ、オシロスコープ、そして FADC に入る。信号は PMT アンプで 10 倍に増幅された後 discriminator に入り、設定された閾値を超えていれば幅 100 ns の矩形波が出力される。discriminator の閾値の上限は -700 mV であるため、PMT の信号に対して -70 mV 以上の閾値を設定してデータを取得するときは PMT アンプは使用していない。coincidence では信号を出力する条件を切り替えられる。本実験では主に ^{241}Am 線源に近い下 PMT の信号が入力されたときに、幅 100 ns の矩形波を出力するように設定して測定を行った。FADC のトリガーには coincidence からの出力信号が使用されており、トリガーがかかると PMT の波形が記録される。回路 2 では coincidence の後に preset scaler を入れて FADC のトリガーに入る信号を間引いている。回路 2 はイベントレートが高いデータを取得する時に使用し、トリガー信号を減らすことでデータを取りきれなくなるのを防いでいる。FADC でデータを取得している間は clock generator からの 10 Hz の信号、下 PMT の discriminator、coincidence、preset scaler からの信号を scaler で計測しており、データ取得にかかった時間とイベントレートを求めている。

3.2 ワイヤー電極

400 kV/cm 以上の高電場を形成して LXe 中での S2 を観測するため、ワイヤーを用いた電極を作製した。電極はすでにあるテストベンチのセットアップで使用できる大きさに設計した。ワイヤーには直径 10 μm の金メッキタングステン線を使用し、ワイヤーを固定するフレームには SUS とガラスエポキシ (FR4) の 2 種類を用いた。

図 3.2 に作製した SUS とガラスエポキシの電極を示す。両方ともフレームの外寸は 42 mm 四方、内寸は 32 mm 四方の正方形で、中心に 1 本のワイヤーが張られている。SUS フレームは厚みが 1.8 mm で、ワイヤーは 2 枚のフレームに挟まれて溶接されている。ガラスエポキシフレームは厚みが 1.6 mm で、フレームの上の一部に厚み 35 μm の銅箔がついている。この銅箔の上にワイヤーがはんだ付けされている。はんだは LXe 中に溶出しないようヤニなしのもので、Xe 導入前の IVC の真空引きに耐えられるよう高真空対応のもの (Allectra 315AC solder) を用いた。超音波はん

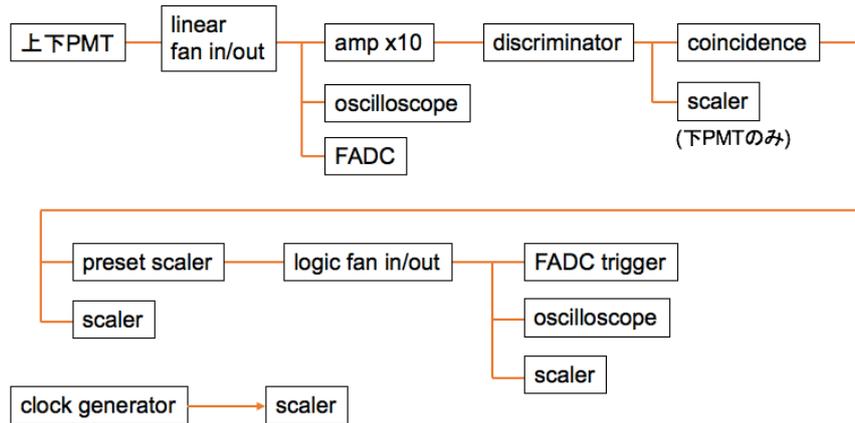


図 3.10 データ取得回路 2。preset scaler を入れて信号を間引き、scaler を用いてデータ取得時間とカウント数を計測している。



図 3.11 作製したワイヤー電極。左が SUS を、右がガラスエポキシをフレームに使用した電極である。両方とも中心に 1 本の金メッキタングステン線が張られている。

だごてを用いてフラックスを使用せずにはんだ付けを行った。図 3.12 がはんだ付け方法の模式図である。まず片側の銅箔にワイヤーをはんだ付けし、ワイヤーの先に 5 円玉 (3.75 g) をくくりつけて垂らしワイヤーに張力をかけた状態でもう一方の銅箔にはんだ付けした。

ワイヤー電極への電圧印加にはカプトンのケーブルを使用した。ケーブルの先端に圧着端子を取り付け、PEEK のねじを用いてフレームの穴に固定している。図 3.13 にガラスエポキシ電極にケーブルを接続した様子を示す。放電を防ぐため、圧着端子は熱収縮チューブで二重に覆われている。ケーブルの電極と反対側にはフィードスルーボックスのポートの内側に接続するコネクタが取り付けられている。MHV のコネクタが付いたケーブルと、SHV のコネクタが付いたケーブルの 2 種類を用いてワイヤーに電圧を印加した。ワイヤー電極への電圧印加にはマクセック製の直流高圧電源 DMS-30K01PLRPBX2 を使用した。最大 30 kV まで印加可能で、170 μ A 以上の電流が流れると電圧が落ちるようになっているものである。

それぞれの電極を使用した場合の TPC 内の電極、線源、PMT 間の距離を図 3.14 に示す。ワイヤーの鉛直方向の高さが 2 つの電極でわずかに違うため距離が異なっている。ワイヤーから線源の



図 3.12 ガラスエポキシフレームへのワイヤーのはんだ付け方法の模式図。まず左側をはんだ付けし、5円玉をくくりつけたワイヤーを垂らして張力をかけた状態で右側をはんだ付けする。

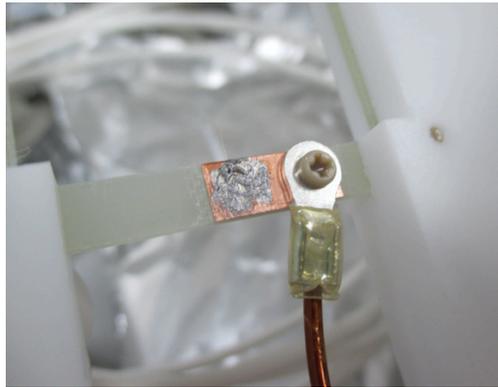


図 3.13 スペーサーに固定されたガラスエポキシフレームにケーブルを接続した様子

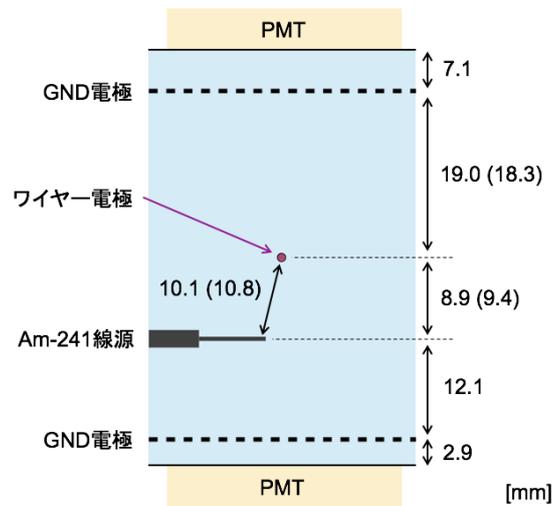


図 3.14 TPC セットアップにおける電極、線源、PMT 間の距離。2つの値が書かれている箇所は、括弧なしが SUS 電極、括弧内がガラスエポキシ電極を設置した場合の距離を表している。

針の先までの距離は SUS 電極で 10.1 mm、ガラスエポキシ電極で 10.8 mm となる。

3.3 電場シミュレーション

有限要素法解析ソフト Femtet (ムラタソフトウェア製) を用いて、作製した 2 種類のワイヤー電極に電圧を印加したときに検出器内に発生する電場のシミュレーションを行った。

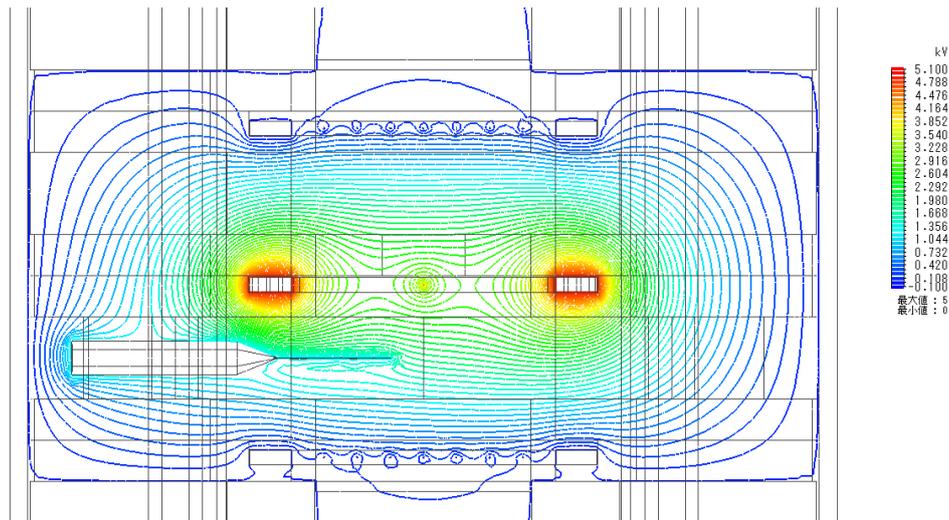


図 3.15 SUS 電極に 5 kV 印加した場合のシミュレーション結果。ワイヤーを含む断面での等電位線を表しており、赤いほど電位が高くなっている。

3.3.1 SUS 電極

まず、SUS 電極を使用した場合のシミュレーション結果を述べる。図 3.15 に電極に 5 kV 印加したときの検出器内の等電位線を示す。上下の GND 電極から SUS フレームまでの間がドリフト領域であり、この部分では等電位線はほぼ等間隔でフレームに平行になっている。ワイヤー近傍では等電位線が同心円状になり、ワイヤー表面近くの高電場領域で S2 が発生する。SUS 電極の場合はワイヤーだけでなくフレーム全体にも電圧がかかる。そのため LXe 領域のうちワイヤーから水平方向に距離がある場所で起こったイベントの場合、電子はワイヤーではなくフレームに向かってドリフトするため S2 が発生しなくなる。

SUS 電極に 5 kV 印加したときのワイヤーから ^{241}Am 線源の針の先までの間の電場の大きさを図 3.16 に示す。ドリフト領域の電場は 1-2 kV/cm でほぼ一定となっている。ワイヤー近傍で電場は急激に大きくなりワイヤーの表面で最大値 550 kV/cm をとる。また、電極への印加電圧とワイヤー表面の電場の関係を図 3.17 に示す。印加電圧とワイヤー表面の電場の大きさは比例していることがわかる。

3.3.2 ガラスエポキシ電極

次に、ガラスエポキシ電極を使用したときのシミュレーション結果を述べる。電極に 5 kV 印加したときの等電位線を図 3.18 に示す。SUS 電極と違ってフレームに電圧がかからないため、等電位線はワイヤーを中心にしてほぼ同心円状になっている。このためドリフト電場は SUS 電極のように一様にはならないが、電子はワイヤーに向かってドリフトするため SUS 電極のようにイベント位置によって S2 が発生しない可能性はなくなる。

ガラスエポキシ電極に 5 kV 印加したときのワイヤーから ^{241}Am 線源の針の先までの間の電場の大きさを図 3.19 に示す。ワイヤーに近づくほど電場は大きくなっていき、ワイヤー表面で最大値 880 kV/cm をとる。SUS 電極に比べてワイヤー近傍の電場が強いことがわかる。電極への印加電

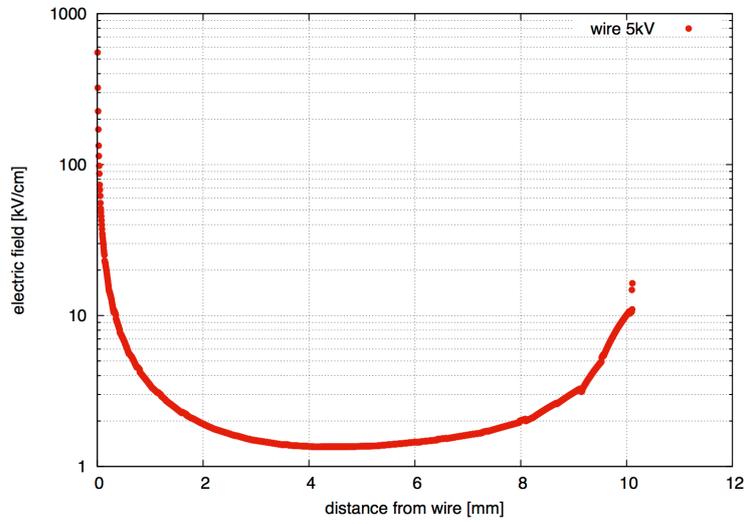


図 3.16 SUS 電極に 5 kV 印加したときのワイヤーから ^{241}Am 線源の針の先 (10.1 mm) までの電場の大きさ。ワイヤー表面での値は 550 kV/cm である。

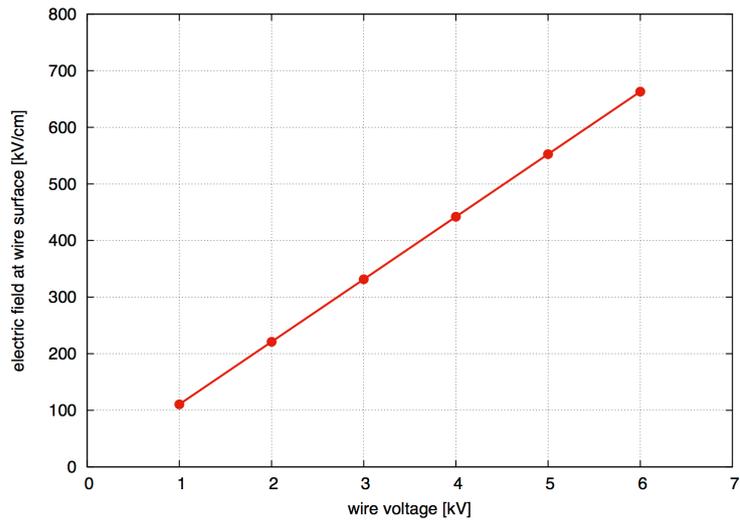


図 3.17 SUS 電極における印加電圧とワイヤー表面での電場の関係

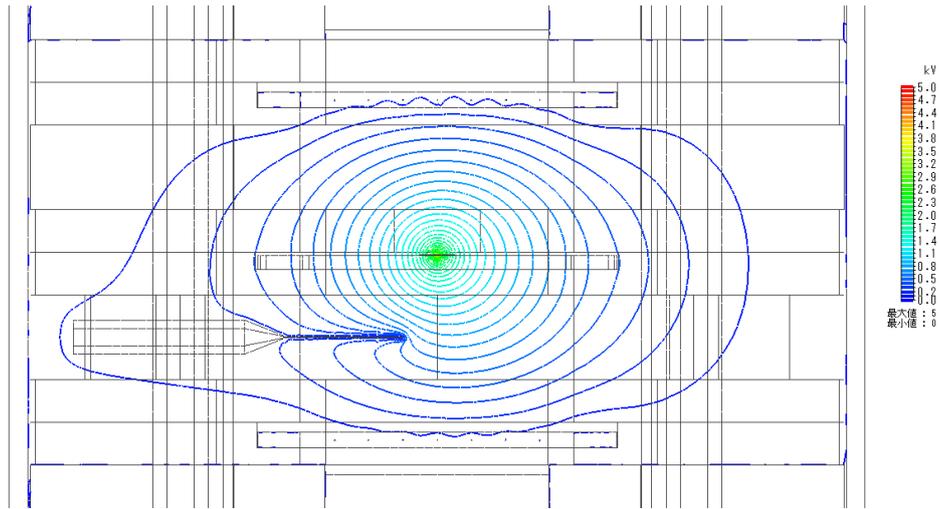


図 3.18 ガラスエポキシ電極に 5 kV 印加した場合のシミュレーション結果。ワイヤーを含む断面での等電位線を表している。

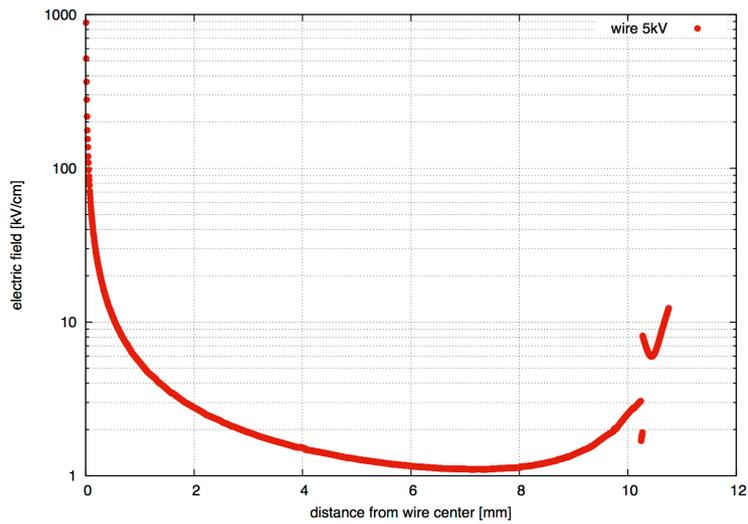


図 3.19 ガラスエポキシ電極に 5 kV 印加したときのワイヤーから ^{241}Am 線源の針の先 (10.8 mm) までの電場。ワイヤー表面での値は 880 kV/cm である。

圧とワイヤー表面の電場の関係を図 3.20 に示す。SUS 電極に比べて同じ印加電圧でも全体的に表面の電場が大きくなっている。

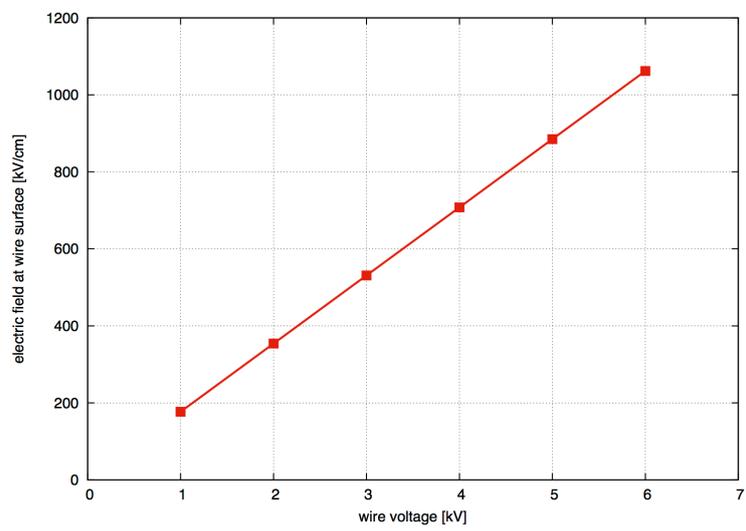


図 3.20 ガラスエポキシ電極における印加電圧とワイヤー表面での電場の関係

第 4 章

テストベンチを用いた 1 相式 TPC の性能評価

4.1 実験手順

TPC の性能評価のための測定は、IVC に Xe を導入して行う。本節では実験の流れとその手順を説明する。

1. TPC の組み立て

まず IVC 内部に TPC の構造を組み立てる。電極、PMT、²⁴¹Am 線源、温度計、LED をスペーサーを用いて固定して積み上げる。

2. 真空引き

組み立てた IVC をフィードスルーボックスの下に接続し、真空引きを行う。不純物による光量の低下を防ぐため、IVC 内圧が 10^{-4} Pa 台に達するまで真空引きする。

3. 予冷

IVC 全体を冷却するには時間がかかるため、最初に少量の Xe を入れた状態で予冷を行う。本実験では IVC にガス状態で約 3 L の Xe を導入して予冷した。このときの IVC 内圧は約 0.015 MPa(G) であった。この状態で冷凍機を作動させ、温度コントロールが行われる熱交換円盤の設定温度 (set point variable, SV と表す) を -112 °C に設定し、12–18 時間程度予冷する。ここで -112 °C に設定しているのは、予冷している間に IVC 内で Xe が固化しないようにするためである (図 2.2 参照)。また OVC の真空引きも開始する。

4. Xe 導入

予冷によって IVC 内の温度が下がった状態から Xe を導入する。SV を -125 °C に下げ、流量 0.45 L/min で IVC への Xe の導入を開始した。IVC に Xe を導入する際は 400 °C に加熱した 2 つのゲッターを通過させて不純物を取り除いている。IVC の圧力が 0.1 MPa まで上昇した時点で導入を一旦停止し、圧力が 0.065 MPa まで低下したら導入を再開した。これを何度も繰り返し、IVC に少しずつ Xe を導入して液化させていく。IVC が冷やされ Xe

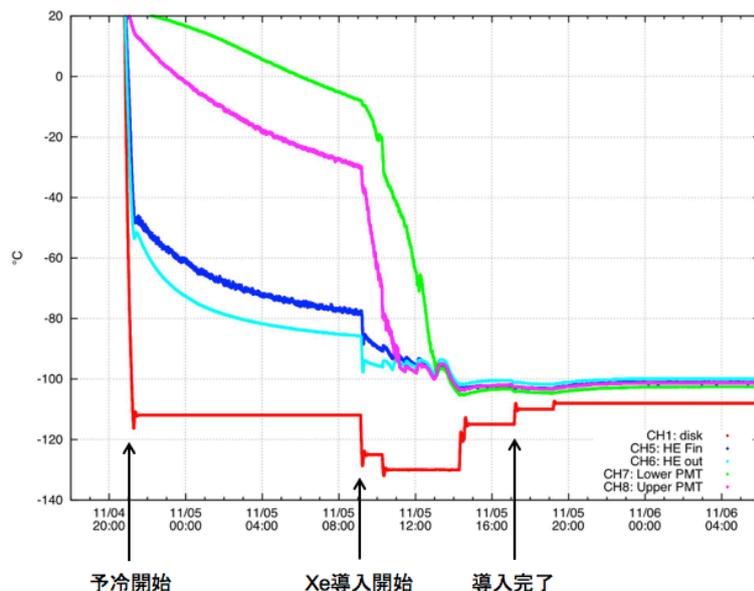


図 4.1 予冷および Xe 導入時の温度変化。赤：熱交換円盤、青：fin、水色：熱交換ボックス外側、ピンク：上 PMT、緑：下 PMT

が液化して底にたまり始めると、Xe をさらに追加しても IVC の圧力が下がり続けるようになる。このような状態になったら流量を最大 1 L/min まで増やし Xe を継続的に導入する。Xe がほとんど IVC に導入されボトルに残っている Xe が少なくなると流量が減少し始める。MFC の流量がほぼ 0 になった時点で IVC を封じ、これで IVC への Xe の導入は完了となる。その後 Xe が液体の状態を保てる範囲で SV を調節し、温度と圧力が安定したら測定を行う。図 4.1 に 2016 年 11 月 4 日から行った予冷および Xe 導入時の IVC の温度変化を示す。予冷にかけた時間は約 12 時間、Xe 導入にかかった時間は約 8 時間であった。

5. Xe 回収

Xe を回収するときは、IVC を封じたままでまず Xe ボトルが吊り下げられて入っている容器に液体窒素を導入してボトルを冷却する。その後で OVC の真空引きと冷凍機の運転を止め、IVC とボトルを繋ぐ回収ラインのバルブを開けて Xe をボトルに回収する。IVC を温めるため OVC に窒素ガスを導入して真空断熱を破り、熱交換ボックスに巻きつけられた液体窒素ラインにも窒素ガスを温めながら循環させる。回収を続けて IVC の圧力が-0.1 MPa、回収ラインの MFC の流量が 0 になった時点でボトルの栓を閉める。これで回収は完了となる。

以上のようにして IVC に Xe を導入・回収し 3 度の測定を行った。表 4.1 に実験日、測定時の Xe の温度と圧力、使用した電極の情報をまとめる。実験日は予冷を開始した日から Xe を回収した日までを示している。測定 2 では途中で SV を上げて LXe の温度と圧力を上げたため 2 つに分けている。

表 4.1 実験時の LXe およびセットアップの情報

番号	測定 1	測定 2-1	測定 2-2	測定 3
実験日	2016/8/27 – 8/30	2016/9/12 – 9/17	(2-1 と同じ)	2016/11/4 – 11/10
温度 [°C]				
熱交換円盤	-111.0	-111.0	-108.0	-108.0
熱交換ボックス fin	-102.8	-103.4	-100.6	-101.4
熱交換ボックス外側	-102.9	-103.0	-100.2	-99.8
上 PMT	-102.5	-105.0	-101.9	-100.9
下 PMT	-105.6	-105.6	-102.5	-102.1
IVC 圧力 [MPa(G)]	0.027	0.024	0.045	0.048
使用した電極	SUS	FR4	(2-1 と同じ)	FR4
電極のケーブルのコネクタ	MHV	MHV	(2-1 と同じ)	SHV
データ取得回路	回路 1	回路 1	(2-1 と同じ)	回路 2

4.2 ^{241}Am 59.5 keV γ による S1 測定

まず、ワイヤーへの電圧印加なしで検出器内部に導入した ^{241}Am 線源による S1 の測定結果について述べる。 ^{241}Am による S1 の測定は、検出器で測定される光量の変化を見るために測定 1 から 3 まで全てで行っている。データ取得回路 2 ではイベントレートの測定が可能のため、この回路を用いてデータを取得した測定 3 の結果を説明する。データ取得条件を表 4.2 に示す。FADC のトリガーには下 PMT の信号を用い、discriminator の閾値を -10 mV に設定して ^{241}Am 線源由来の S1 の波形を取得した。preset 値は信号を間引く度合いを表しており、この測定では 5 回に 1 回信号を通過させている。取得したイベント数は合計 50000 イベントである。測定にかかった時間と、coincidence の後に接続された scaler のカウント数からイベントレートは 569 Hz であった。

表 4.2 59.5 keV γ による S1 のデータ取得条件

discriminator 閾値	-10 mV
preset 値	5
FADC トリガー信号	下 PMT
取得イベント数	50000

図 4.2 に FADC で記録された S1 の波形とその解析方法を示す。このような解析を行う前に S1 の波形が記録されていないイベントをカットする。これらは S1 ではなく S1 の tail やノイズによって FADC のトリガーがかかったイベントである。このようなイベントは S1 の波形が記録されている時間が早いため、次のようなカットで取り除くことができる。図 4.2 にあるように S1 が発生する直前の時間を T_1 とする。各イベントについて $T_1 - 300$ ns から T_1 までの電圧の平均値を求め、この値を S1 のペDESTAL とする。取得した全てのイベントについて S1 のペDESTAL 値をヒストグラムに詰め、ピークをフィットする。S1 のペDESTAL を求める範囲に S1 の波形が記録されている

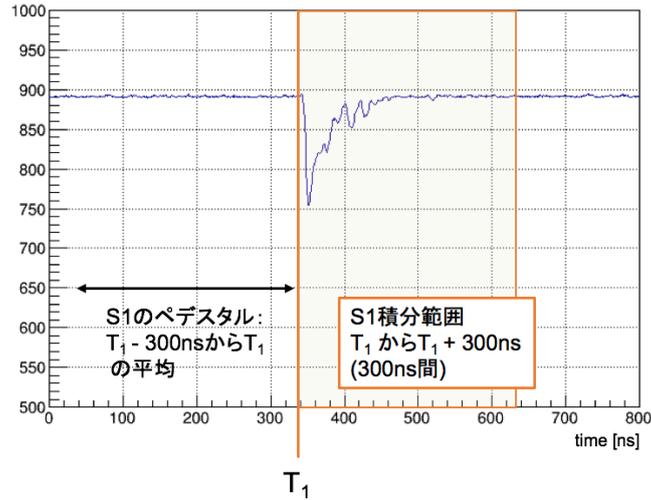


図 4.2 FADC で記録された S1 の波形と解析方法。 T_1 から $T_1 + 300$ ns の範囲で、電圧値のペダスタルからの差を積分した値が S1 の波形面積 (S1sum) である。

イベントをカットしたいため、フィットしたピークの平均から $\pm 3\sigma$ 以内に入っていないイベントをカットする。このカットをかけた後に残ったイベントについて解析を行う。

T_1 から $T_1 + 300$ ns の範囲で、記録された電圧値と S1 のペダスタルの差を積分した値を S1 の波形面積 (=S1sum) とする。S1sum のヒストグラムが S1 のスペクトルとなる。図 4.3 にこの測定で得られた S1 のスペクトルを示す。横軸の S1sum は上下 PMT それぞれについて積分した波形面積を足し合わせた値であり、単位は [mV ns] である。S1sum 6500 付近のピークが ^{241}Am の 59.5 keV によるものである。このピークをガウス分布でフィットし、このフィット結果から PMT の増幅率を用いて以下のように S1 光量を計算した。

波形面積を a [mV ns] とすると、これに含まれる電荷量は 50Ω のターミネータを用いているため

$$Q = \frac{a \times 10^{-12} [\text{Vsec}]}{50[\Omega]} \quad (4.1)$$

となる。PMT で発生した光電子数は

$$n[\text{p.e.}] = \frac{Q[\text{C}]}{(1.6 \times 10^{-19}) \times \text{gain}} \quad (4.2)$$

と求められる。gain は PMT の増幅率である。増幅率は PMT への印加電圧に依存し、今回の測定で印加した 800 V では 10^6 となる。実験に使用した PMT のゲインカーブを図 4.4 に示す。59.5 keV ピークのフィット結果から得られた波形面積の mean は 6511 ± 9.1 であるので、式 (4.1) と式 (4.2) より光電子数は 814 ± 1 p.e. と求められる。よって発光量は 13.69 ± 0.02 [p.e./keV] となる。

XMASS 検出器における発光量は約 14 [p.e./keV] である。XMASS の光電面被覆率は約 63% であるが、本実験で用いた装置の光電面被覆率は約 24% であり、XMASS に比べて約 4 割の被覆率で同程度の発光量が得られた。これはテフロンスペーサーによって反射されたシンチレーション光が PMT で観測されているためだと考えられる。

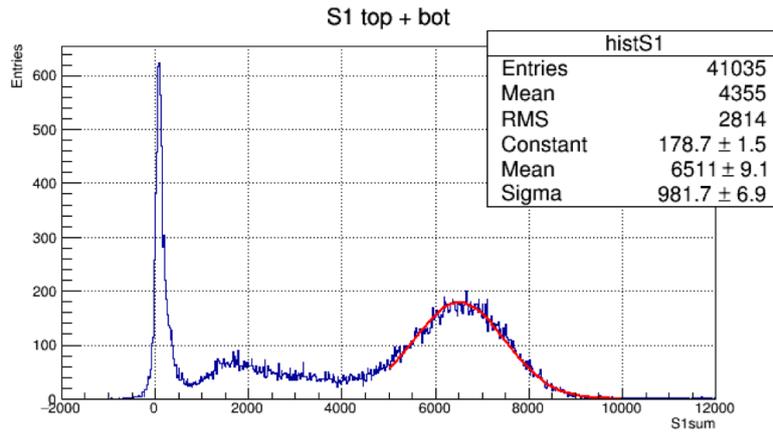


図 4.3 ^{241}Am 線源の S1 スペクトル。横軸の S1sum は波形面積で単位は [mV ns] である。S1sum 6500 付近のピークが 59.5 keV γ 線に対応している。

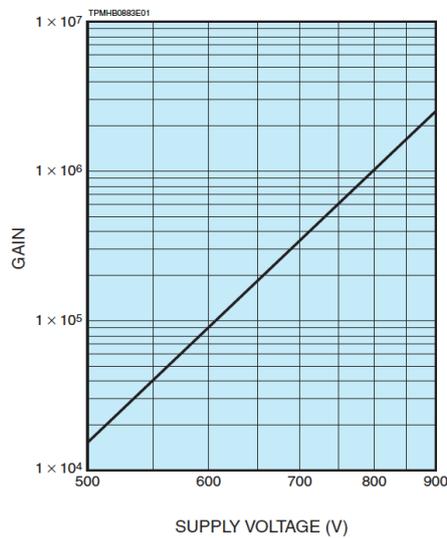


図 4.4 PMT R8520-406 のゲインカーブ。印加電圧 800 V での増幅率は 10^6 である。

4.3 S1 光量のドリフト電場依存

LXe 中に電場をかけると再結合を経る発光過程に必要な電子がドリフトされるため、S1 の発光量が低下する。暗黒物質探索では低エネルギーイベントを観測する必要があるので電場によってどの程度発光量が減少するのを知る必要がある。SUS 電極を用いたセットアップではより一様なドリフト電場が生じるので、これを用いてドリフト電場の大きさに対する S1 の発光量を測定した。

解析に用いたデータは測定 1 で得たものである。表 4.3 にデータ取得条件を示す。discriminator の閾値を -10 mV に設定し、ワイヤーに 4 kV までの電圧を 1 kV 刻みで印加してデータを取得した。各電圧での ^{241}Am の S1 スペクトルにおける 59.5 keV のピーク値を用いて S1 光量の変化を調べた。解析方法は、S1 発生前の 200 ns 間の電圧の平均値を S1 のペDESTAL に使用したこと以外は 4.2 節で説明した方法と同じである。トリガーがかかる前の波形を記録する時間が短かったためこ

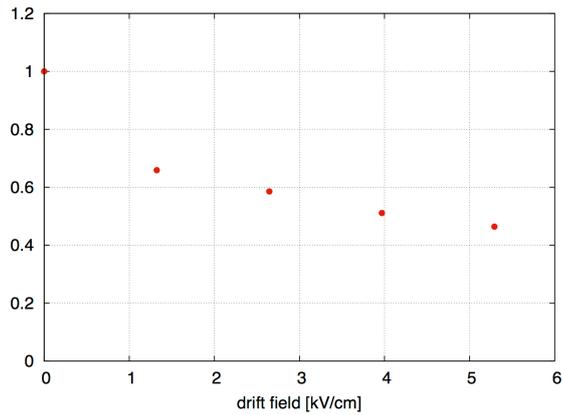


図 4.5 測定から得られた S1 光量のドリフト電場依存性。縦軸は電場がないときの光量を 1 としたときの相対的な光量を表している。

のようにペDESTALを取る範囲を変更している。

表 4.3 S1 光量のドリフト電場依存のデータ取得条件

discriminator 閾値	-10 mV
FADC トリガー信号	下 PMT
取得イベント数	10000(各電圧)

各電圧でのドリフト電場の値には電場シミュレーションから得られた値を使用した。LXe 中での 59.5 keV γ 線の平均自由行程は 0.43 mm であるため、 ^{241}Am 線源表面からワイヤーへ向かって距離 0.43 mm の点における電場の大きさを用いている。

図 4.5 が測定から得られたドリフト電場による S1 光量の変化である。電場がないときの光量を 1 としている。ドリフト電場が強くなるほど S1 の光量は減少しており、電場がないときと比較して約 4 kV/cm で光量が半分になっている。図 4.6 に示した先行研究 [16] と比べて全体的に光量の減少の度合いは小さくなっている。ドリフト電場 1 kV/cm 程度までは光量が急に減少し、それより強い電場では光量の減り方が緩やかになるのは [16] と一致している。

4.4 ^{241}Am 5.5 MeV α 由来の S2 測定

測定 2-2 において、LXe 中での S2 の観測に成功した。図 4.7 がガラスエポキシ電極に 4.9 kV 印加したときにオシロスコープで観測された S2 の波形である。S1 の約 4 μs 後に S2 が発生しているのが確認できる。測定 2-2 ではガラスエポキシ電極への印加電圧を変化させ、S2 の光量変化を測定した。

データ取得条件を表 4.4 に示す。S1 の波高が高いイベントで S2 の発生頻度が高かったため、波高の高い S1 を記録するために discriminator の閾値を -200 mV に設定した。電極への印加電圧を 0 V から 4.7 kV まで変化させ、各電圧で 10000 イベントずつ波形を取得した。

まず S1 および S2 の解析方法について説明する。S1 についてはこれまでと同様に、 $T_1 - 200 \text{ ns}$

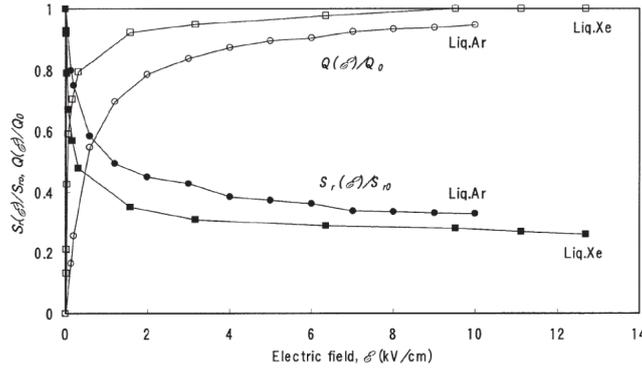


図 4.6 S1 光量のドリフト電場依存についての先行研究 [16]。縦軸は電場がないときの光量を 1 としたときの相対的な光量を表している。黒い四角が LXe 中でのシンチレーション光量である。

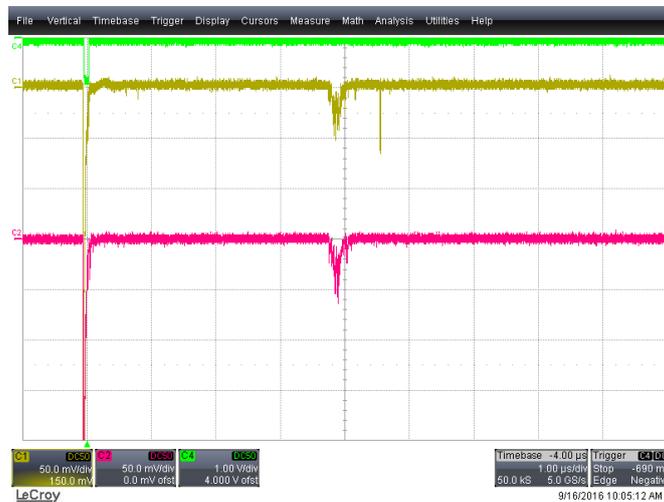


図 4.7 測定 2-2 において電極に 4.9 kV 印加したときにオシロスコープで観測された S1 と S2 の波形。黄色が上 PMT の信号、赤が下 PMT の信号で、横軸 1 $\mu\text{s}/\text{div}$ 、縦軸 50 mV/div である。S1 の約 4 μs 後に S2 が発生している。

表 4.4 5.5 MeV α 由来の S2 のデータ取得条件

discriminator 閾値	-200 mV
FADC トリガー信号	下 PMT
取得イベント数	10000 (各電圧)

から T_1 の電圧の平均値を S1 のペDESTAL とし、 T_1 から $T_1 + 300 \text{ ns}$ の範囲でペDESTAL との差を積分した値を S1sum とする。S2 については図 4.8 のように解析する。 $T_1 + 2\mu\text{s}$ から $T_1 + 8\mu\text{s}$ の範囲で上下 PMT 両方の電圧が S1 のペDESTAL に対して 10 mV 下回ったとき、S2 が発生したとみてトリガーをかける。このトリガーがかかった時間を T_2 とし、 $T_2 - T_1$ をドリフト時間と定義する。 $T_2 - 400 \text{ ns}$ から $T_2 - 200 \text{ ns}$ の間の電圧の平均値を S2 のペDESTAL とし、 $T_2 - 200 \text{ ns}$ から $T_2 + 800 \text{ ns}$ までの 1 μs 間にわたり、電圧値と S2 のペDESTAL の差を積分した値を S2 の波形面積 (=S2sum [mV ns]) とする。以降、S1sum および S2sum の単位は [mV ns] とする。

図 4.9 にワイヤーに電圧を印加していないときの S1 スペクトルを示す。discriminator の閾値

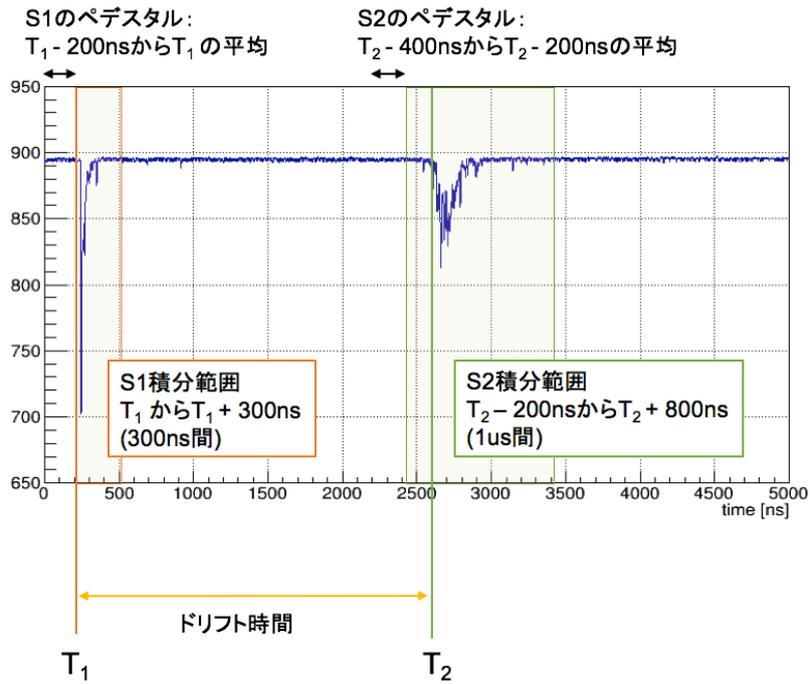


図 4.8 S1 および S2 の解析方法。S1 のペDESTALに対して上下 PMT 両方の電圧が 10 mV 下回ったとき、S2 が発生したとみてトリガーをかけ、この時間を T_2 とする。 $T_2 - 200$ ns から $T_2 + 800$ ns まで S2 のペDESTALとの差を積分した値を S2 の波形面積 (S2sum) とする。

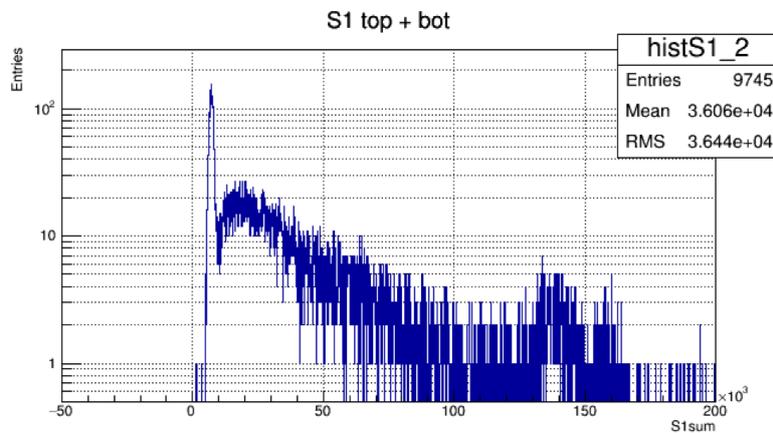


図 4.9 ワイヤーへの電圧印加なしで discriminator の閾値を -200 mV に設定したときの S1 スペクトル。S1sum ~ 6000 のピークは 59.5 keV の γ 線の一部に対応している。S1sum ~ 140×10^3 付近にもピークがみられる。

を -200 mV に設定しているため、59.5 keV の γ 線による S1 は一部しか見えておらず、それよりも光量の大きい S1 が多く見えている。S1sum ~ 6000 のピークは 59.5 keV の γ 線の一部に対応している。S1sum ~ 20×10^3 付近のイベントは図 3.6 にある 100 keV、120 keV 付近のピークによるものと考えられる。また、S1sum ~ 140×10^3 にピークがあるのが確認できる。

ワイヤーの電圧を 0 V から上げていくと、2-3 kV の間で S2 が発生し始めるのが確認された。図 4.10 はワイヤー電圧を 2 kV から 4.7 kV まで変化させたときの、S2 のトリガーにかかったイ

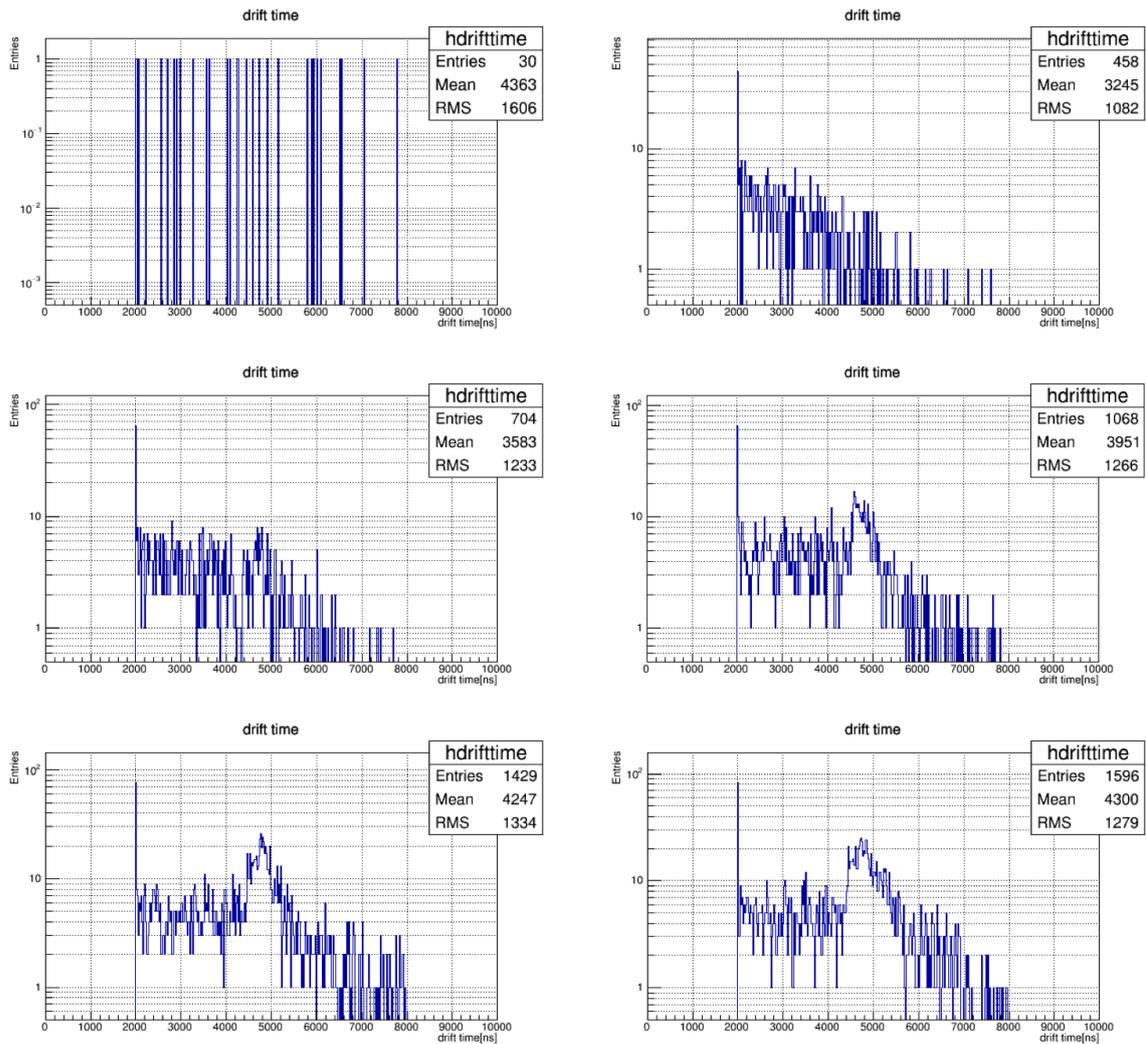


図 4.10 ワイヤーの電圧を変えたときの、S2 のトリガーにかかったイベントのドリフト時間分布の変化。上段左：2 kV、上段右：3 kV、中段左：3.5 kV、中段右：4 kV、下段左：4.5 kV、下段右：4.7 kV

イベントのドリフト時間分布の変化である。2 kV では 30 イベントが S2 のトリガーにかかっているが、0 kV と 1 kV においても同程度のイベント数がトリガーにかかっていたため、別の S1 によってトリガーがかかったバックグラウンドイベントであると考えられる。3 kV では 458 イベントがトリガーにかかっているため、2 kV と 3 kV の間の電圧で S2 が発生し始めたことがわかる。電場シミュレーションの結果より、ワイヤー電圧 2 kV と 3 kV の間でワイヤー表面の電場は 400 kV/cm を超える。これは先行研究で求められている S2 が発生するための電場の閾値と一致している。

ワイヤー電圧が高くなるほど S2 のトリガーにかかるイベント数が増加しており、4 kV 以上の電圧ではドリフト時間 4.8 μ s 付近にイベントが集中しているのがわかる。ドリフト時間 2 μ s のところに鋭いピークが見られるが、これは実際には $T_1 + 2\mu$ s よりも早い時間に発生した S2 が $T_1 + 2\mu$ s において -10 mV 以上の波高があったためトリガーにかかったイベントである。

図 4.11 にワイヤー電圧 4.7 kV において S2 のトリガーにかかったイベントのドリフト時間、S1sum、S2sum に関するスカッタープロットを示す。左上はドリフト時間と S1sum、右上はド

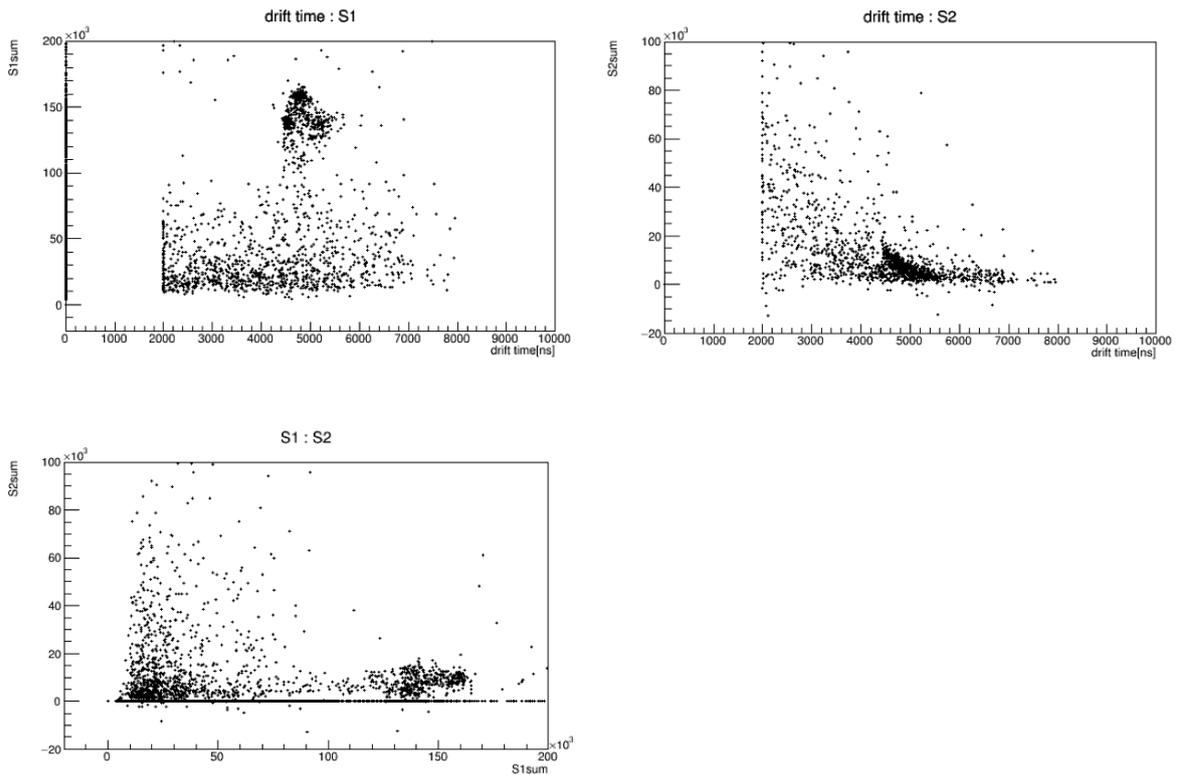


図 4.11 ワイヤー電圧 4.7 kV で S2 のトリガーにかかったイベントのドリフト時間、S1sum、S2sum に関するスキャタープロット。左上：ドリフト時間と S1sum、右上：ドリフト時間と S2sum、左下：S1sum と S2sum の相関を表している。

ドリフト時間と S2sum、左下は S1 と S2 の相関をそれぞれ表している。左上の図では、ドリフト時間 $4.8 \mu\text{s}$ 付近、S1sum 150×10^3 付近にイベントの集中がみられる。また右上の図では、ドリフト時間 $4.8 \mu\text{s}$ 付近、S2sum 5×10^3 付近にイベントが集中している。これらの S1sum と S2sum の値を持つイベントが、図 4.10 で見られたドリフト時間 $4.8 \mu\text{s}$ 付近のイベントに対応している。

LXe 中での電子のドリフト速度から、 ^{241}Am 線源付近での S1 と同時に発生した電子がワイヤーまでドリフトするのにかかる時間を求めることができる。LXe 中での電子のドリフト速度は図 4.12 のように電場に依存している [17]。図 4.12 を参考に、ここでは $1\text{--}4 \text{ kV/cm}$ ではドリフト速度 $0.2 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、 4 kV/cm 以上ではドリフト速度 $0.3 \text{ cm}/\mu\text{s}$ として電子のドリフト時間を求めた。ドリフト経路における電場の強さはシミュレーションから得られた値を使用した。線源の針の先からワイヤーまでの距離は約 1 cm である。針の先からワイヤーに向かって距離 0.9 cm までの経路上の電場は $1\text{--}4 \text{ kV/cm}$ で、 0.9 cm よりワイヤーに近いところでは 4 kV/cm を超える。線源から 0.9 cm の距離ではドリフト速度 $0.2 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、残り 0.1 cm では $0.3 \text{ cm}/\mu\text{s}$ とすると、線源からワイヤーまで電子がドリフトするのにかかる時間は約 $4.8 \mu\text{s}$ と求められる。よって、ドリフト時間 $4.8 \mu\text{s}$ 付近に集中したイベントは ^{241}Am 線源由来のものであると考えられる。これらのイベントの S1sum は 150×10^3 程度であり、これは S1 スペクトルにみられたピークに一致する。この結果は何らかの放射線源が ^{241}Am 線源の針の先に付着していることを示している。実験で使用した ^{241}Am 線源と同様にして製作された他の線源では、表面に α が付いていることが確認されている。そのため、線源の針の先に付着した ^{241}Am による 5.5 MeV の α 線がクエンチングによって光量が減少して見えて

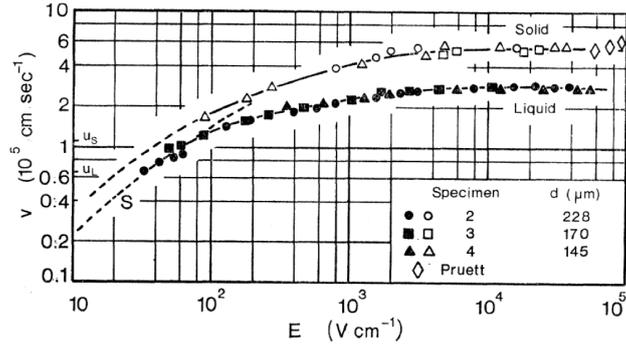


図 4.12 Xe 中での電子のドリフト速度 [17]。黒い図形が 163 K の LXe 中でのドリフト速度である。

いると考えられる。

次に、ワイヤー電圧を変化させたときの S2 の光量変化について述べる。イベントが集中している $4000 \text{ ns} < \text{drift time} < 5500 \text{ ns}$ かつ $100 \times 10^3 < S1\text{sum} < 200 \times 10^3$ の範囲のイベントを選び出して解析を行った。この範囲にあるイベントの、ワイヤー電圧を変化させた時の S2 スペクトルの変化を図 4.13 に示す。電圧が高くなるほどトリガーにかかるイベント数が増加し、その S2sum (S2 の光量) も増加している。

この S2 スペクトルから求めたワイヤー電圧に対する S2 光量を図 4.14 に示す。S2 のスペクトルの mean を縦軸の値に、RMS をそのエラーバーに使用し、3 kV での値を 1 に規格化している。縦軸は相対的な S2 光量を表している。ワイヤーの電圧が高くなるほど S2 の光量が増加しているのがわかる。

4.5 ^{241}Am 59.5 keV γ 由来の S2 測定

測定 3 では、 ^{241}Am 線源の 59.5 keV γ 線由来の S2 が観測できるかを検証した。表 4.5 にデータ取得条件を示す。LXe 中の電場によって S1 の発光量が低下するため、ワイヤーに電圧を印加しても 59.5 keV の S1 が記録されるように discriminator の閾値を -30 mV に設定してデータを取得した。図 4.15 がワイヤー電圧 0 V と 4.5 kV のときの S1 スペクトルである。0 V に比べて 4.5 kV では光量が減少しているが、59.5 keV のピークは見えている。イベントレートは 0 V で 407 Hz、4.5 kV で 390 Hz であった。

表 4.5 59.5 keV γ 由来の S2 のデータ取得条件

discriminator 閾値	-30 mV
preset 値	5
FADC トリガー信号	下 PMT
取得イベント数	30000 (各電圧)

S2 の解析方法は 4.4 節で示した方法と同じである。ただし、59.5 keV という低エネルギーの S1 由来の S2 を調べるため、S2 のトリガーをかける条件を S1 のペDESTAL に対して上下 PMT 両方の電圧が 5 mV 下回ったときに変更した。

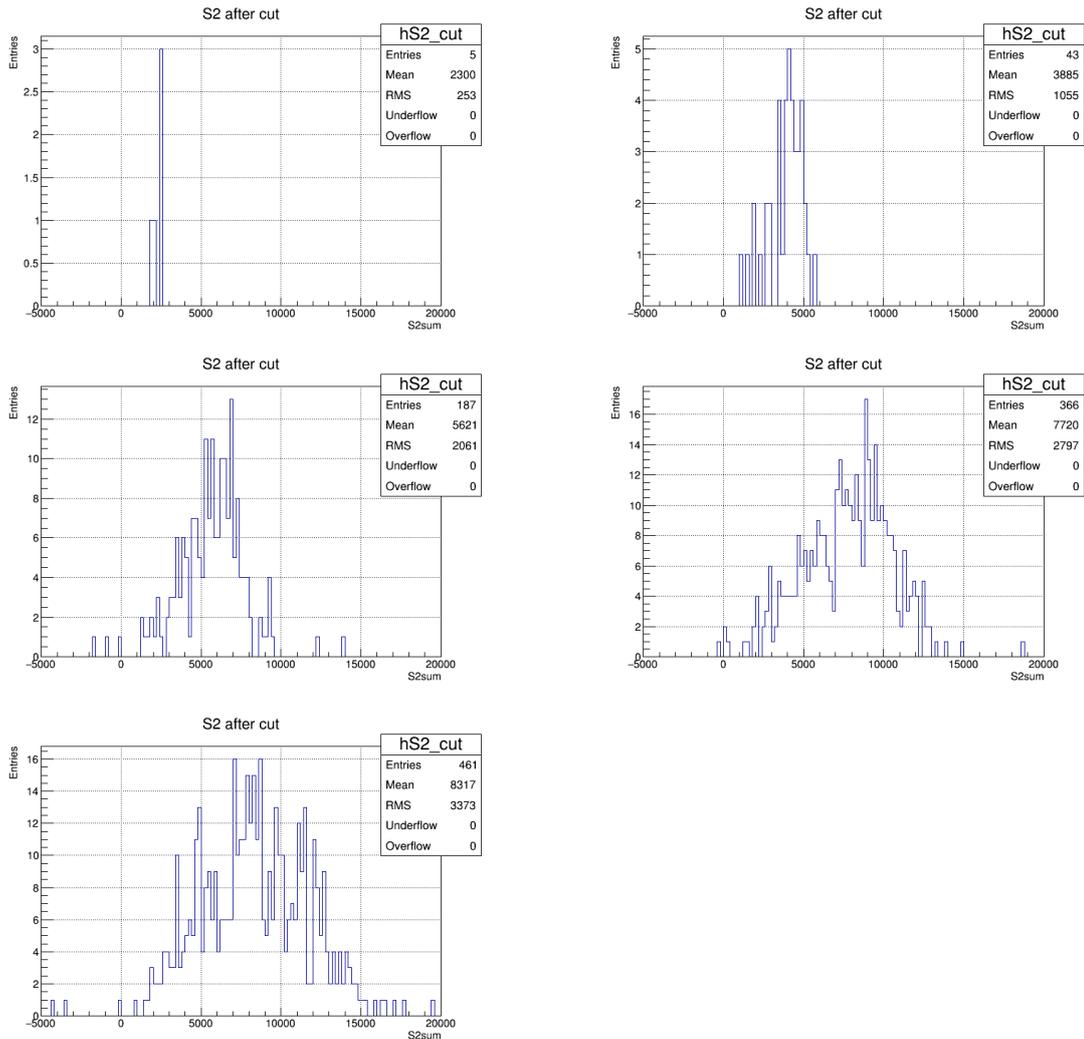


図 4.13 ワイヤー電圧を変化させたときの S2 スペクトルの変化。4000 ns < drift time < 5500 ns かつ $100 \times 10^3 < S1sum < 200 \times 10^3$ の範囲にあるイベントをプロットしている。上段左：3 kV、上段右：3.5 kV、中段左：4 kV、中段右：4.5 kV、下段左：4.7 kV

図 4.15 の S1 スペクトルより 59.5 keV γ のピークは $S1sum < 10000$ であるため、S2 のトリガーにかかったイベントのうち $S1sum$ がこの範囲にあるイベントを選び出して、そのドリフト時間分布を調べた。ワイヤー電圧を 0 V から 4.5 kV まで変化させたときの $S1sum < 10000$ の範囲にあるイベントのドリフト時間分布の変化を図 4.16 に示す。 ^{241}Am 線源由来の S2 であれば、そのドリフト時間は $4.8 \mu\text{s}$ 程度だと予想されるが、4.5 kV までの電圧では $4.8 \mu\text{s}$ 付近に集中したイベントは見られなかった。さらに、 $S1sum < 10000$ かつ $4000 \text{ ns} < \text{drift time} < 5500 \text{ ns}$ の範囲にあるイベントを選び出し、S2 のトリガーにかかったイベント数を調べた。その結果を図 4.17 に示す。ワイヤーの電圧を上げてても S2 のトリガーにかかったイベント数は増加していないため、これらのイベントは S1 によるバックグラウンドだと考えられる。

59.5 keV の γ 線由来の S2 が観測されなかった理由としては、エネルギーが小さいため S1 と同時に発生する電子数が少なく、4.5 kV までの電圧では電荷増幅のために必要な S2 の増幅率が足りないことが考えられる。低エネルギーの S1 由来の S2 を観測するためには、より高い電圧をワイヤーに印加する必要がある。測定 3 ではワイヤーへの電圧印加ケーブルに SHV コネクタが付いた

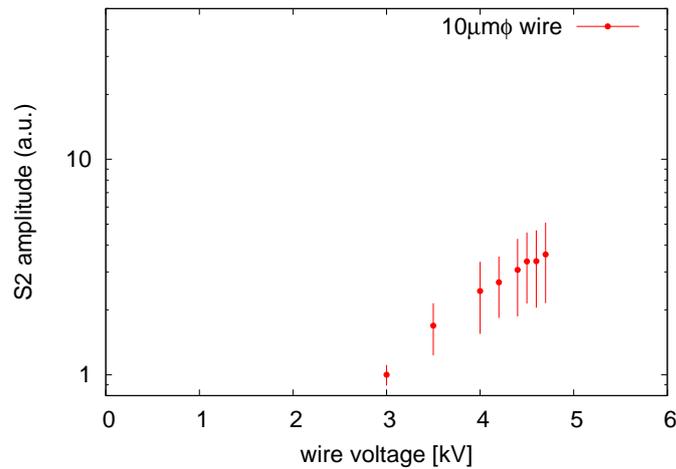


図 4.14 ワイヤー電圧と S2 光量の関係。3 kV での光量を 1 に規格化している。4000 ns < drift time < 5500 ns かつ $100 \times 10^3 < S1sum < 200 \times 10^3$ の範囲のイベントの S2 スペクトルから求めている。

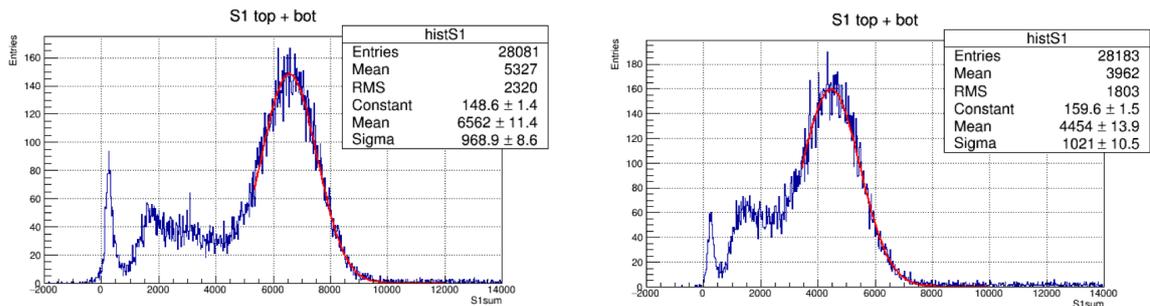


図 4.15 閾値-30 mV での S1 スペクトル。左がワイヤー電圧 0 V、右が 4.5 kV のときのものである。59.5 keV の γ 線のピークをフィットしている。

ものを使用したが、4.5 kV で放電しそれ以上の電圧を印加することはできなかった。S2 の増幅率を上げるためにはさらなる高電圧を印加する必要があるため、ワイヤーに電圧を印加するフィードスルーの改善が必要である。

4.6 外部線源を用いた粒子識別検証実験

測定 3 では OVC の外側から ^{137}Cs 線源と ^{252}Cf 線源を照射し、これらの線源由来の S2 を観測した。上 PMT と同じ高さの位置に線源がくるように OVC の外側に線源をはりつけた状態で測定を行った。

4.6.1 ^{137}Cs 由来の S2 測定

まず ^{137}Cs 線源を照射したときの結果を述べる。 ^{137}Cs の半減期は 30.1 年で、95% が ^{137}Ba の励起準位に β 崩壊し、基底状態に戻る際に 662 keV の γ 線を放出する。測定時の強度は 0.770 MBq

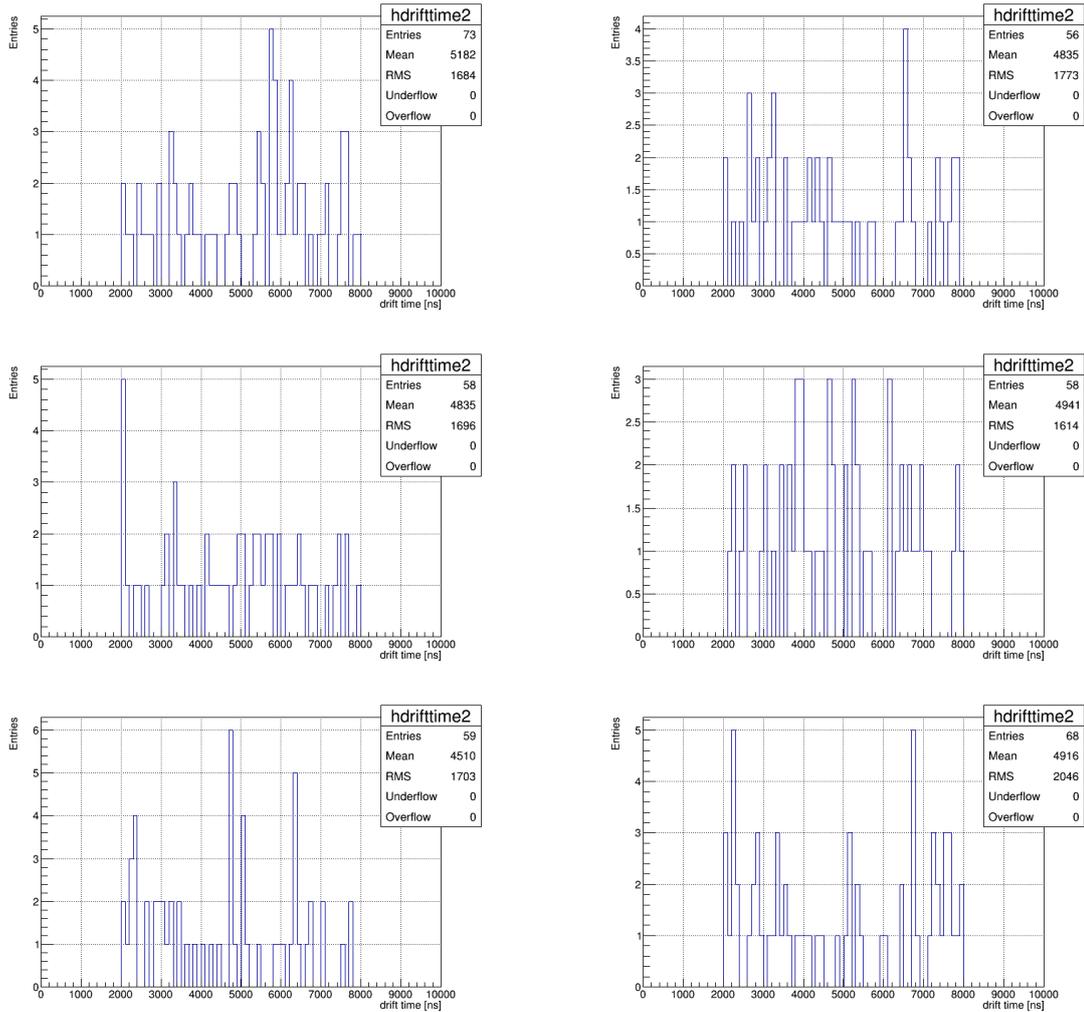


図 4.16 ワイヤー電圧を変化させたときのドリフト時間分布の変化。S2 のトリガーにかかったイベントのうち、59.5 keV γ によるイベントを含む S1sum < 10000 の範囲にあるイベントをプロットしている。上段左：0 V、上段右：1 kV、中段左：2 V、中段右：3 kV、下段左：4 kV、下段右：4.5 kV

であった。データ取得条件を表 4.6 に示す。

表 4.6 ^{137}Cs 由来の S2 のデータ取得条件

discriminator 閾値	-30 mV
preset 値	5,10
FADC トリガー信号	下 PMT
取得イベント数	0 V : 30000、4.2 kV : 90000

ワイヤーに電圧を印加していない状態での、 ^{137}Cs 線源を照射したときとしていないときの S1 スペクトルが図 4.18 である。左が内部の ^{241}Am 線源のみ、右が OVC の外側から ^{137}Cs を照射したときのものである。 ^{137}Cs を照射したときの S1 スペクトルには、S1sum 10×10^3 から 100×10^3 の間で ^{241}Am 線源のみのときには見られない S1 が発生している。この部分が ^{137}Cs による S1 であ

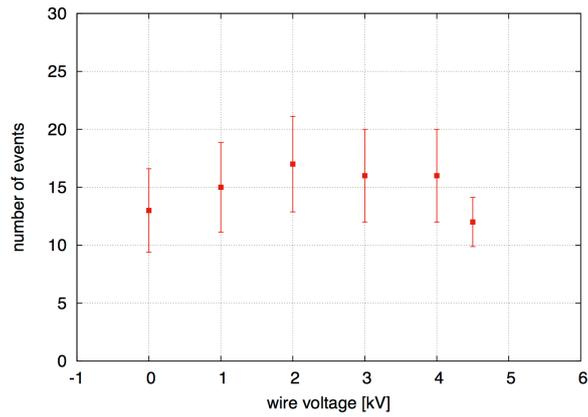


図 4.17 59.5 keV の γ 線由来のイベントが現れると予想される $S1sum < 10000$ かつ $4000 \text{ ns} < \text{drift time} < 5500 \text{ ns}$ の範囲にあるイベントのうち、S2 のトリガーにかかったイベント数。

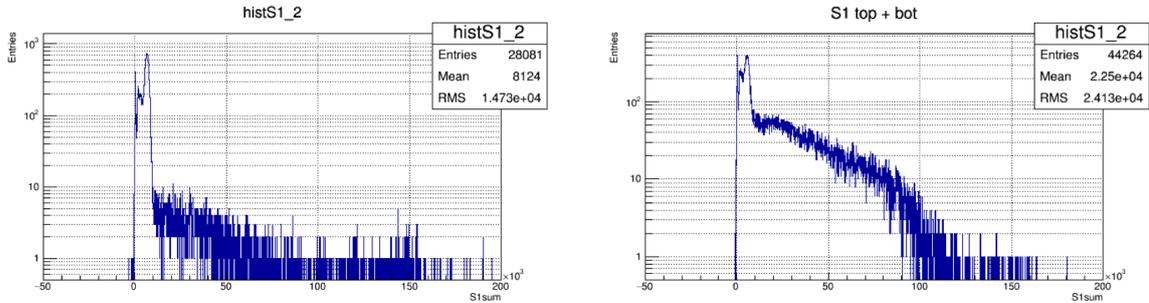


図 4.18 ワイヤー電圧 0 V での S1 スペクトル。左が内部の ^{241}Am 線源のみ、右が OVC の外側から ^{137}Cs 線源を照射したときのものである。

る。イベントレートは ^{241}Am 線源のみのとき 409 Hz、 ^{137}Cs を照射したときは 1800 Hz であった。

図 4.19 にワイヤーに 4.2 kV 印加したときに S2 のトリガーにかかったイベントのドリフト時間分布と、ドリフト時間、S1sum、S2sum の相関を示す。S2 のトリガーをかける条件は、 $T_1 + 1.5 \mu\text{s}$ から $T_1 + 8 \mu\text{s}$ の範囲で上下両方の PMT の出力電圧が S1 のペDESTAL に対して -10 mV 下回ったときとした。左上のドリフト時間分布から、ドリフト時間 $1.5 \mu\text{s}$ から $4 \mu\text{s}$ の範囲に多くのイベントが発生しているのが確認できる。この範囲のドリフト時間を持つイベントは、図 4.19 左下のドリフト時間と S1sum の相関から $10000 < S1sum < 50000$ に集中しているので、 ^{137}Cs 由来の S2 であるといえる。また、図 4.19 右上のドリフト時間と S2sum の相関から、ドリフト時間が長くなるほど S2 の光量が減少しているのが確認できる。 ^{137}Cs を照射し、ワイヤーに 4.2 kV 印加したときのイベントレートは 1500 Hz であった。

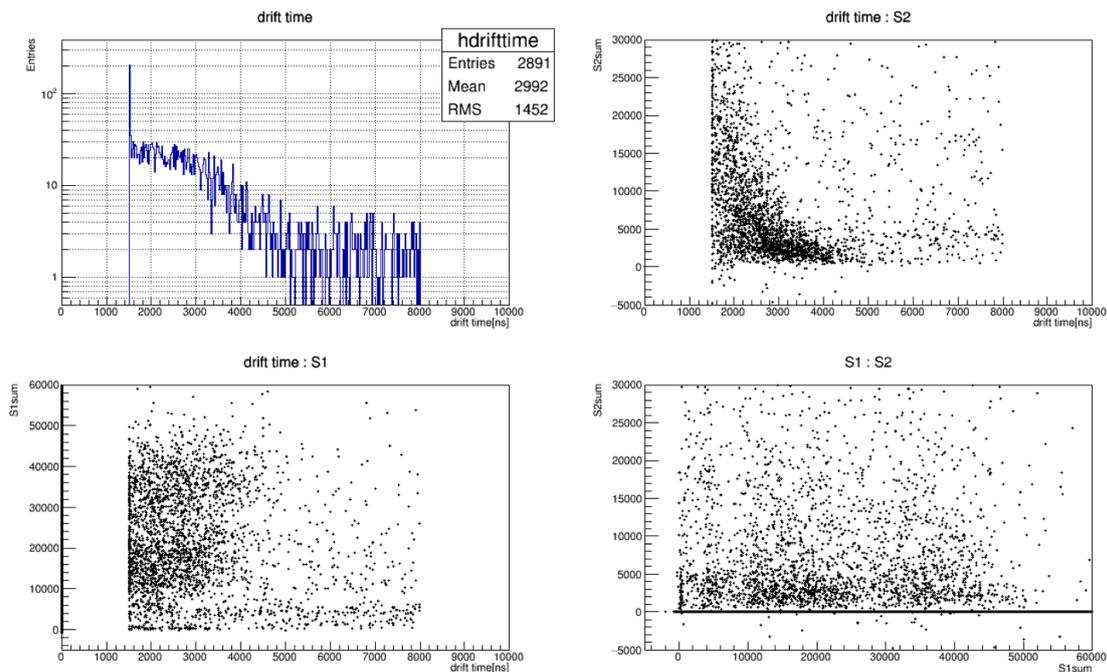


図 4.19 OVC 外側から ^{137}Cs 線源を照射し、ワイヤーに 4.2 kV 印加したときのドリフト時間分布およびドリフト時間、S1sum、S2sum の関係。左上：ドリフト時間分布、左下：ドリフト時間と S1sum の相関、右上：ドリフト時間と S2sum の相関、右下：S1sum と S2sum の相関。

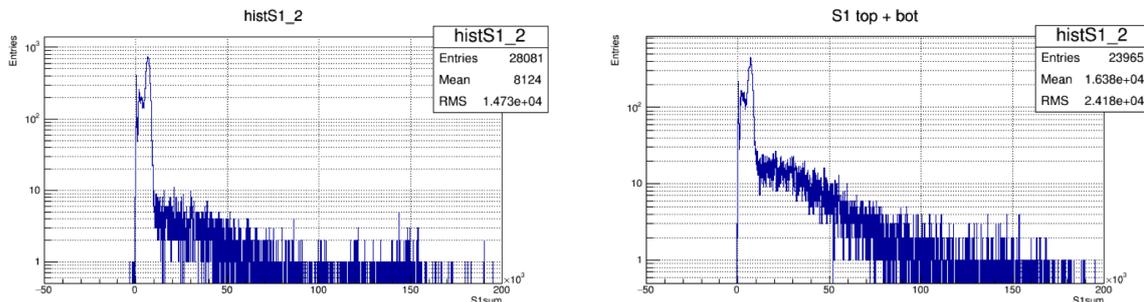


図 4.20 ワイヤー電圧 0 V での S1 スペクトル。左が内部の ^{241}Am 線源のみ、右が OVC の外側から ^{252}Cf 線源を照射したときのものである。

4.6.2 ^{252}Cf 由来の S2 測定

次に、OVC の外側から ^{252}Cf 線源を照射したときの測定結果を述べる。 ^{252}Cf の半減期は 2.65 年で、自発核分裂によって平均 3.8 個の中性子と γ 線を放出する。測定時の強度は 0.226 MBq であった。データ取得条件は ^{137}Cs 線源を照射したときと同じである。

図 4.20 に示しているのは、 ^{252}Cf 線源を照射したときとしていないときのワイヤー電圧 0 V での S1 スペクトルである。左が内部の ^{241}Am 線源のみ、右が OVC の外側から ^{252}Cf を照射したときのものである。S1sum 10×10^3 から 100×10^3 の間で ^{252}Cf による S1 が確認できる。イベントレートは ^{241}Am 線源のみのとき 409 Hz、 ^{137}Cs を照射したときは 712 Hz であった。

図 4.21 にワイヤーに 4.2 kV 印加したときに S2 のトリガーにかかったイベントのドリフト時間

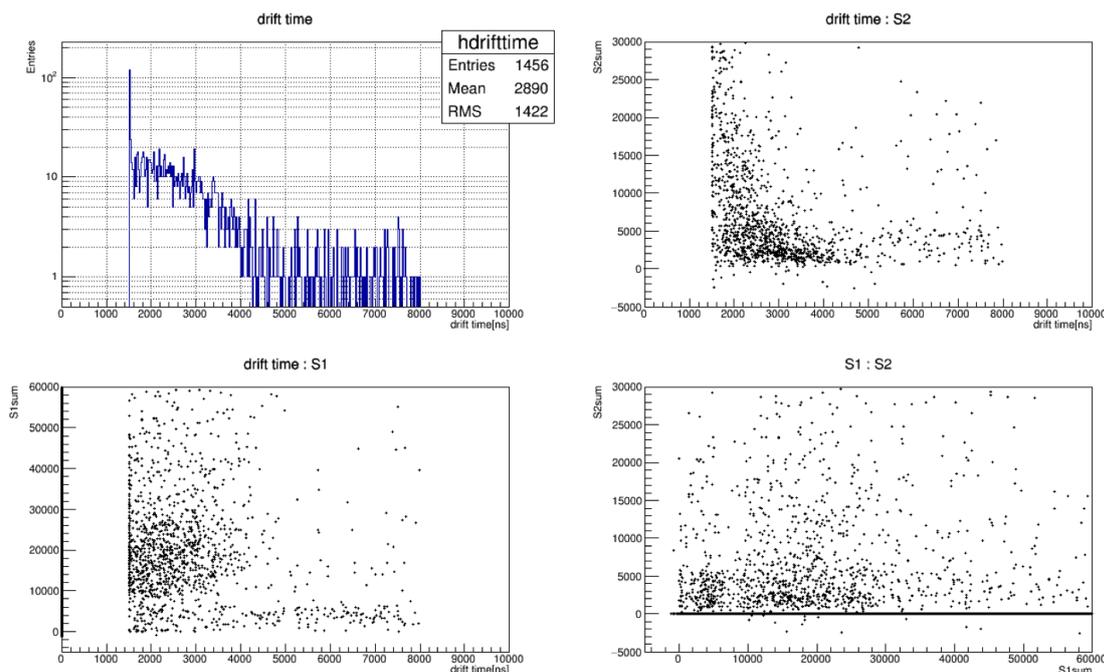


図 4.21 OVC 外側から ^{252}Cf 線源を照射し、ワイヤーに 4.2 kV 印加したときのドリフト時間分布およびドリフト時間、S1sum、S2sum の関係。左上：ドリフト時間分布、左下：ドリフト時間と S1sum の相関、右上：ドリフト時間と S2sum の相関、右下：S1sum と S2sum の相関。

分布と、ドリフト時間、S1sum、S2sum の相関を示す。S2 のトリガーをかける条件は ^{137}Cs を照射したときと同じである。 ^{137}Cs を照射したときと同様に、ドリフト時間 $1.5 \mu\text{s}$ から $4 \mu\text{s}$ に多くのイベントが発生している。この範囲のドリフト時間を持つイベントは、 $10000 < \text{S1sum} < 30000$ に集中しているため ^{252}Cf 由来の S2 であるといえる。 ^{252}Cf を照射し、ワイヤーに 4.2 kV 印加したときのイベントレートは 624 Hz であった。

4.6.3 S2/S1 比による粒子識別

原子核反跳と電子反跳で S2/S1 比が違うことを用いて Xe と相互作用した粒子を識別することができる。中性子は Xe と原子核反跳するため S2/S1 比が小さく、 γ 線は電子反跳するため S2/S1 比が大きくなる。OVC の外側から ^{137}Cs 線源と ^{252}Cf 線源を照射して取得したデータを用いて、 γ 線と中性子による S2/S1 比の差が見られるかを調べた。

解析にはワイヤーに 4.2 kV 印加して取得した 90000 イベント分のデータを使用した。S2 のトリガー条件は、 $T_1 + 1.5 \mu\text{s}$ から $T_1 + 8 \mu\text{s}$ の範囲で上下 PMT 両方の出力電圧が S1 のペDESTAL に対して -10 mV 下回ったときとしている。S2 のトリガーにかかったイベントから、外部線源由来のイベントを見るために $\text{S1sum} > 10000$ かつ $2000 \text{ ns} < \text{drift time} < 4000 \text{ ns}$ のイベントを選び出して解析した。

図 4.22 は ^{252}Cf を照射したときの S1sum に対する $\log_{10}(\text{S2/S1})$ の値を示している。 ^{252}Cf は中性子と γ 線の両方を放出するため、原子核反跳と電子反跳の差が見えていれば S2/S1 比の違いによってイベントが 2 つのバンドに分かれると予想される。しかし、今回の測定ではバンドが 2 つに分離しているのは確認できなかった。

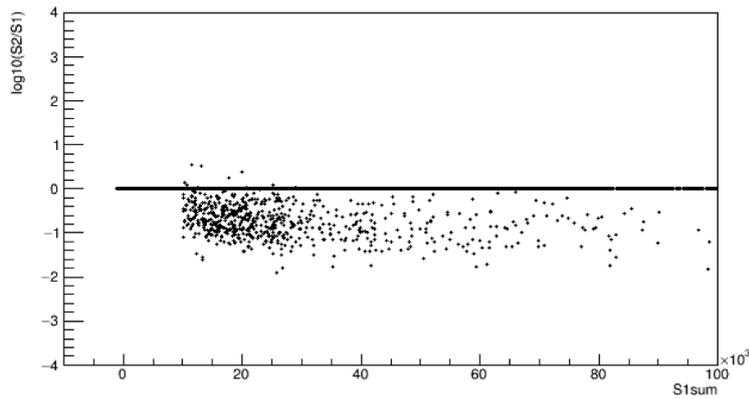


図 4.22 OVC の外側から ^{252}Cf を照射したときの $S1\text{sum}$ に対する $\log_{10}(S2/S1)$ の値。S2 のトリガーにかかったイベントのうち $S1\text{sum} > 10000$ かつ $2000 < \text{drift time} [\text{ns}] < 4000$ の範囲に含まれるイベントをプロットしている。

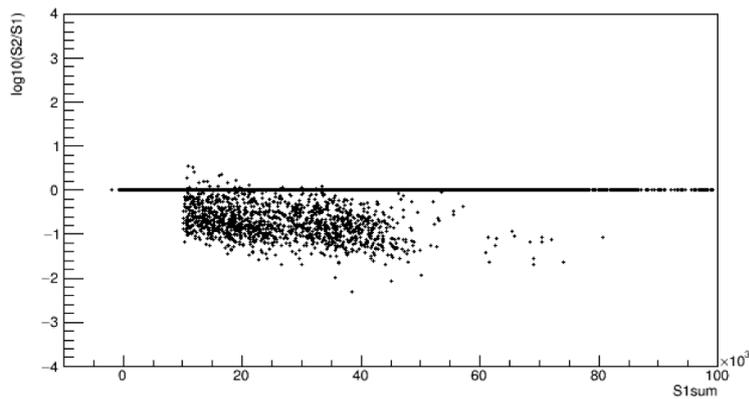


図 4.23 OVC の外側から ^{137}Cs を照射したときの $S1\text{sum}$ に対する $\log_{10}(S2/S1)$ の値。S2 のトリガーにかかったイベントのうち $S1\text{sum} > 10000$ かつ $2000 < \text{drift time} [\text{ns}] < 4000$ の範囲に含まれるイベントをプロットしている。

^{137}Cs を照射したときについても同様の解析を行った結果を図 4.23 に示す。 ^{137}Cs は γ 線を放出するため電子反跳のみを起こす。S2/S1 比は 1 つのバンドにまとまっている。

図 4.24 に、図 4.22 と図 4.23 の結果を重ね書きしたものを示す。黒が ^{137}Cs 、赤が ^{252}Cf を照射したときの結果を表している。2 つの結果はほぼ重なっており、原子核反跳と電子反跳による差は見られなかった。これは S2 の光量が小さく、相対的にその誤差が大きくなっているためだと考えられる。粒子識別を行うにはワイヤーにより高い電圧を印加して電荷増幅率を上げ、S2 の光量を大きくする必要がある。

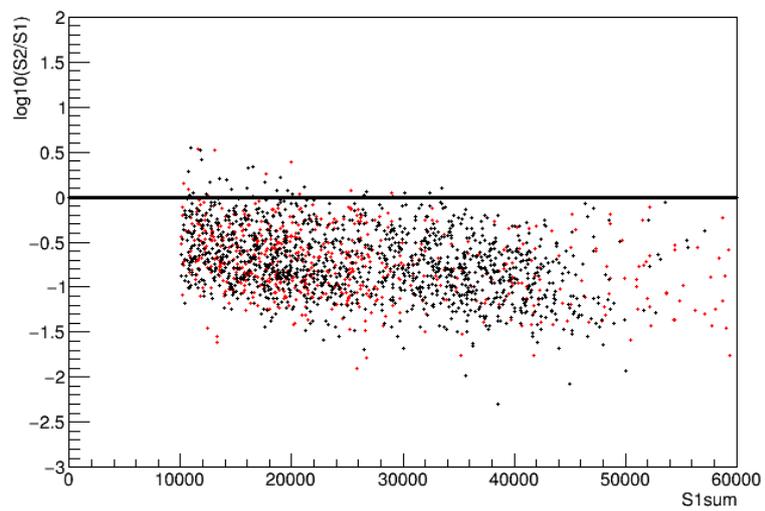


図 4.24 図 4.22 と図 4.23 の結果を重ね書きしたもの。黒が ^{137}Cs 、赤が ^{252}Cf を照射したときの結果である。

第 5 章

1 相式 TPC の構想

1 相式 TPC は LXe のみを使用するため、検出器形状を自由に決めることができる。シンチレーション光の検出効率を上げるためには LXe 全体を PMT で囲み、光電面被覆率を高くすることが望ましい。高い光電面被覆率を取ることができる 1 相式 TPC の形状としては球形と円筒形が考えられる。XMASS 実験で使用されている真空断熱容器内にこの 2 種類の形状の TPC を設置するとした場合に実現できる TPC の大きさと検出器内に生じる電場を求めた。

5.1 球形 TPC

XMASS 検出器は球形のシンチレータであるため、中心に電極を導入することで TPC にすることができる。球形 TPC では電子を検出器中心に向かってドリフトさせ、電極付近で S2 を発生させる。

XMASS 検出器内に上部から吊り下げる形で電極を導入したときに検出器内に生じる電場をシミュレーションを用いて求めた。半径 40 cm の LXe の中心に半径 5 mm の球形の電極を導入するとする。電極は半径 3 mm の円柱形の棒の先端に取り付けられている。電極に 5 kV 印加したときのシミュレーション結果を図 5.1 に示す。左が検出器全体、右が電極付近を拡大した等電位線を表している。LXe 中の等電位線は電極を中心にほぼ球殻状になっている。このため LXe 中で発生した電離電子は中心の電極に向かってドリフトするといえる。

図 5.2 はこのシミュレーションから得られた電極から水平方向の電場の大きさである。電極に 5 kV 印加したとき電極表面では 10 kV/cm の電場が形成されるが、中心から離れるほど電場は小さくなり LXe の表面近くでは 0.001 kV/cm となる。LXe の外縁部では電場が小さいため、検出器の中心から遠い位置で発生した電子は電極に向かってドリフトすることができないと予想される。

半径 b の球形の検出器の中心に半径 a の電極を設置し検出器表面との間に ϕ の電位差を与えたとき、中心からの距離 r における電場の大きさは

$$E(r) = \frac{ab}{b-a} \frac{\phi}{r^2} \quad (5.1)$$

で与えられる。球形の TPC の場合 $E(r) \propto r^{-2}$ となるため中心から離れるほど急激に電場が減少する。外縁部でもドリフト電場を維持し電子を引っ張ってこれるようにすることが球形の TPC における課題である。

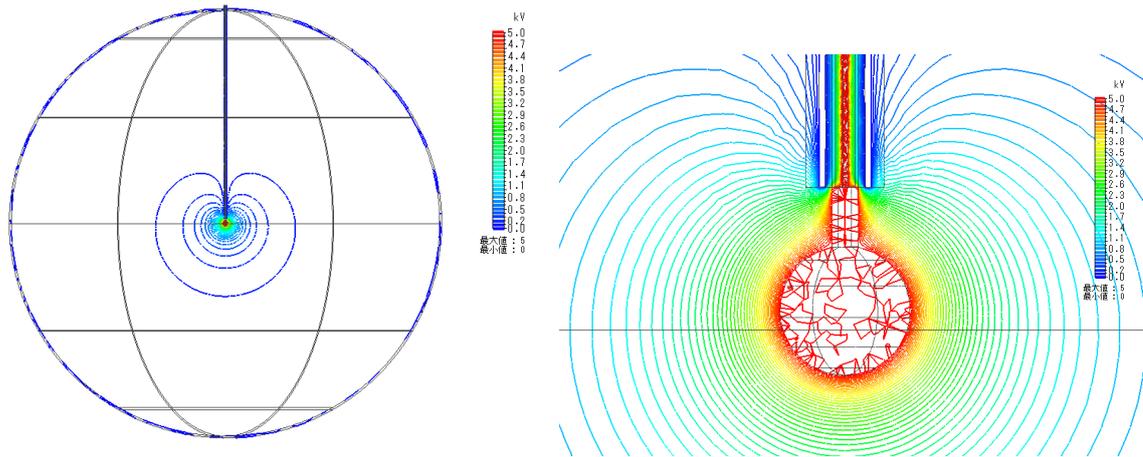


図 5.1 XMASS 検出器 (半径 40 cm) の中心に半径 5 mm の球形の電極を導入し 5 kV 印加したときの電場シミュレーション結果。左は検出器全体、右は電極付近を拡大した部分の等電位線を表している。

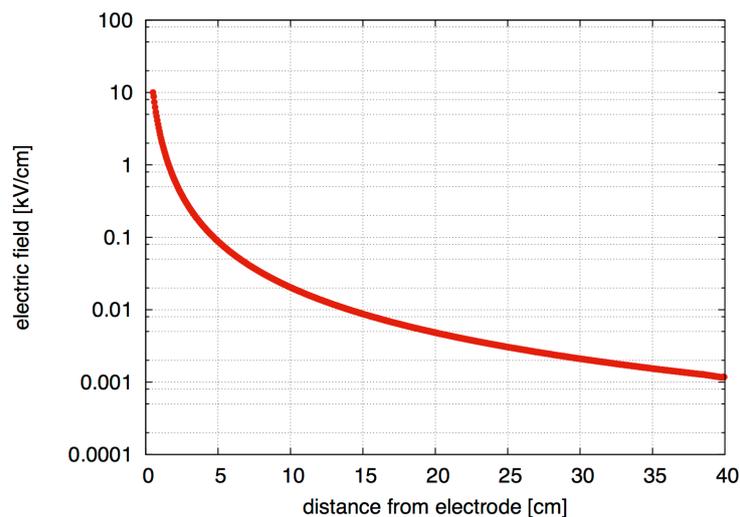


図 5.2 電極に 5 kV 印加したときの LXe 中の電場の大きさ。横軸は検出器中心（電極）から水平方向の距離を示している。

5.2 円筒形 TPC

円筒形の TPC としては、比例計数管のように円筒の中心にワイヤーを 1 本張った構造が考えられる。この形状ではワイヤーに向かって電子をドリフトさせその近傍で S2 を発生させる。PMT の配置の仕方としては、円筒の側面と上下面の全体に配置し検出器全体を囲む構造と、側面のみに配置する構造の 2 種類が考えられる。ただし前者の場合は、円筒の上下面に置く PMT の光電面の前にメッシュ状の電極などを設置し GND に落とす必要がある。図 5.3 に XMASS 実験で使用され

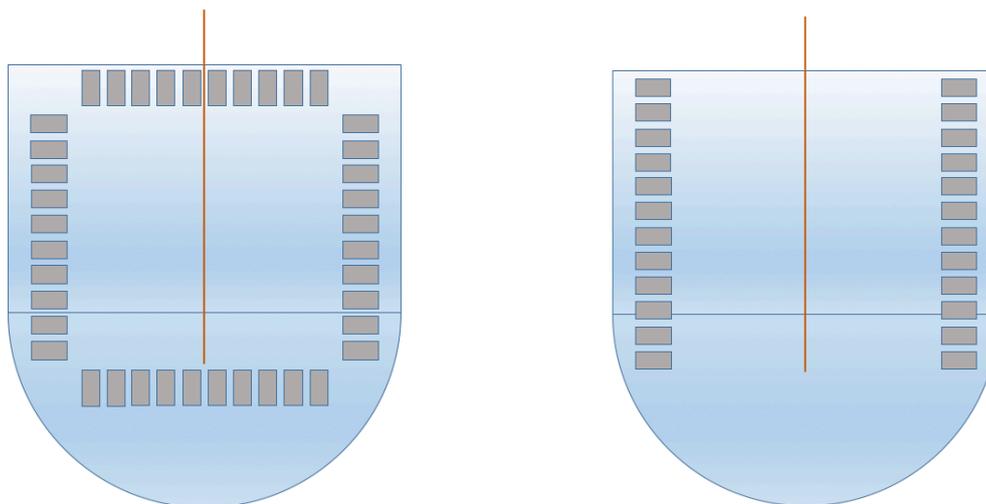


図 5.3 XMASS の真空断熱容器を用いた円筒形 TPC のモデル。中心の茶色の線がワイヤーで、灰色の四角形が PMT である。左：全体を PMT で囲んだ場合、右：側面だけに PMT を配置した場合

ている真空断熱容器内部に円筒形の TPC を作製した場合の模式図を示す。どちらも検出器の中心に鉛直方向に 1 本のワイヤーを設置している。

図 5.3 のような円筒形の TPC をつくるとした場合に、それぞれの PMT の配置の仕方について、PMT に囲まれた LXe の体積が最大となる TPC の大きさとそのとき TPC 内に生じる電場を求めた。XMASS 実験の真空断熱容器は下部が半球で上部が円筒形になっている。ここでは半球の半径を 55 cm、円筒の半径を 55 cm、高さを 70 cm として TPC の大きさと電場を計算した。PMT の長さは現在 XMASS で開発中のドーム型 PMT と同じ 14 cm とした。

まず上下と側面全体を PMT で囲んだ場合について述べる。真空断熱容器の上端に円筒形 TPC の上端を合わせるとすると、TPC の大きさが半径 52.6 cm、高さ 86.1 cm のときに TPC の体積は最大となる。ここから PMT の分を引くと、PMT で囲まれた部分の LXe は半径 38.6 cm、高さ 58.1 cm の円筒形になる。LXe の密度を 2.96 g/cm^3 とすると PMT で囲まれた LXe の質量は約 805 kg となる。この大きさの円筒形の LXe において、中心に直径 $10 \mu\text{m}$ のワイヤーを張り電圧を印加したときに生じる電場を求める。半径 b の円筒の中心に半径 a のワイヤーを張り、ワイヤーと円筒側面との電位差を ϕ としたとき、ワイヤー中心からの半径方向の距離 r における電場の大きさは

$$E(r) = \frac{\phi}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (5.2)$$

で与えられる。図 5.4 は式 (5.2) において $a = 5 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 、 $b = 38.6 \text{ cm}$ 、 $\phi = 5 \text{ kV}$ としたときの電場の大きさのグラフである。ワイヤー表面では 889 kV/cm の電場が生じている。ドリフト領域の電場は $0.1\text{--}0.01 \text{ kV/cm}$ で球形の TPC と比べて大きい、電子がドリフトするには小さいと考えられる。

次に円筒の側面だけに PMT を配置した場合について述べる。全体を囲んだ場合と同様にして計算すると、この構造では PMT に囲まれた部分の LXe が半径 40.4 cm、高さ 78.3 cm の円筒形のときに LXe の体積は最大となる。このときの LXe の質量は 1186 kg である。式 (5.2) を用いて、半

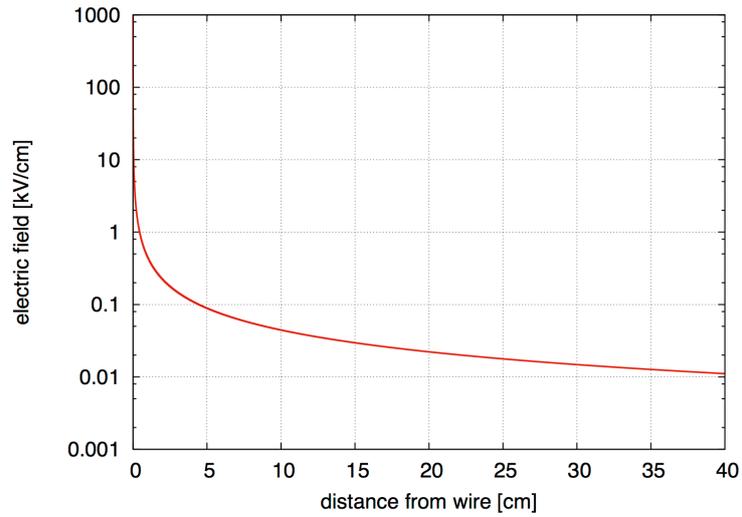


図 5.4 半径 38.6 cm の円筒形 TPC の中心に半径 5 μm のワイヤーを張り 5 kV 印加したときに生じる電場の大きさ。横軸はワイヤーから円筒の半径方向の距離を表している。

径 40.4 cm の円筒の中心に直径 10 μm のワイヤーを張り 5 kV 印加したときに生じる電場を求めた。円筒形 TPC の半径は LXe 全体を PMT で囲んだ場合と約 2 cm しか変わらないため、検出器全体に生じる電場の大きさは図 5.4 に示したグラフとほぼ同じになる。側面のみを PMT を配置した場合はワイヤー表面で 885 kV/cm の電場が生じる。

第 6 章

まとめと今後の展望

現在、LXe を標的に用いた暗黒物質の直接探索において、1 相式シンチレータと 2 相式 TPC の検出器を使用した実験が行われている。検出器内でのより正確な反応位置の再構成と粒子識別を行うには、S1 と S2 の両方を観測する TPC 型の検出器が有効であるが、2 相式の検出器には液面管理などの問題が存在する。S2 を液中で発生させる 1 相式 TPC 型の検出器では 2 相式検出器における問題を解消することができる。さらに、検出器形状が自由なため、LXe 全体を PMT で囲むことができる球形の TPC の実現が可能である。

暗黒物質探索において 1 相式 TPC を実現するためには、LXe 中での S2 について知る必要がある。LXe 中での S2 の発生には約 400 kV/cm というガス中に比べて高い電場が必要であるため、暗黒物質による低エネルギーの信号でも十分な S2 の発光量が得られるか検証しなければならない。

本研究では、LXe 中で S2 を発生させる電極として SUS とガラスエポキシのフレームに直径 10 μm の金メッキタングステン線を張った 2 種類のワイヤー電極を開発した。これらの電極を用いて 1 相式液体キセノン TPC のテストベンチで実験を行い、その性能を検証した。

ワイヤーに電圧を印加せずに、 ^{241}Am 線源の S1 のスペクトルを測定し 59.5 keV の γ 線のピークからテストベンチの発光量を求めたところ、 13.69 ± 0.02 p.e./keV という XMASS 実験に近い発光量が得られた。また、SUS 電極を用いてドリフト電場の形成による S1 光量の減少を測定したところ、ドリフト電場 4 kV/cm で、電場がないときに比べて発光量が約半分に減少した。

さらに、ワイヤー電極に高電圧を印加し LXe 中での S2 の観測に成功した。ガラスエポキシ電極を用いた測定で、印加電圧 2 kV と 3 kV の間で S2 の発生が始まり、約 4.8 μs のドリフト時間を持つ S2 が多く見られるようになった。これは先行研究から得られている S2 の発生に必要な電場の閾値の約 400 kV/cm に一致している。また、ワイヤーの電圧を上げるほど S2 の光量が増加することが確認できた。観測された S2 はその S1 光量とドリフト時間から、 ^{241}Am 線源の表面に付着した線源からの 5.5 MeV の α 線由来の S2 であると考えられる。

^{241}Am 線源を用いて 59.5 keV の γ 線由来の S2 が観測できるかを検証した。 ^{241}Am 線源由来のイベントであればドリフト時間は約 4.8 μs となると予想される。S1 光量を用いて 59.5 keV の γ 線由来のイベントを選び出し、そのドリフト時間分布を調べたところ、ワイヤー電圧 4.5 kV まではこのようなドリフト時間をもつイベントは見られなかった。これらのイベントのうち、ドリフト時間が 4.0–5.5 μs の範囲にあるイベントを選び出し、ワイヤーの電圧を変化させたときのイベント数の変化を調べたところ、電圧 0 V から 4.5 kV ままでイベント数に変化は見られず、今回の測定では 59.5 keV の γ 線由来の S2 は観測されなかった。4.5 kV 以下の電圧では S2 の電荷増幅率が低

く、59.5 keV という低エネルギーの S1 由来の S2 が十分な発光量を持って発生していないと考えられる。

OVC の外側から ^{137}Cs 線源と ^{252}Cf 線源を照射し、これらの線源由来の中性子による原子核反跳および 662 keV の γ 線による S2 を観測した。S1 光量を用いて外部線源由来のイベントを選び出し、S2/S1 比の違いによる中性子と γ 線の識別が可能かを検証したが、粒子識別はできなかった。これは S2 の光量が小さいためだと考えられる。

以上の結果より、低エネルギーイベントによる S2 の観測および S2/S1 比による粒子識別を行うには、ワイヤーに 5 kV 以上の電圧を印加して S2 の発光量を上げるか、電離電子の収集効率を改善する必要があると考えられる。

XMASS 検出器の中心に半径 5 mm の球形の電極を導入して 5 kV の電圧を印加した場合、電極表面では 10 kV/cm、LXe の表面では 0.001 kV/cm の電場が発生する。また、XMASS の真空断熱容器の中心に直径 10 μm のワイヤーを導入して円筒形の TPC とした場合、ワイヤー電圧 5 kV で表面で約 900 kV/cm、ドリフト領域で 0.1–0.01 kV/cm の電場が形成される。中心から離れた場所で起こったイベントでも電子をドリフトできるようにすることが球形と円筒形の TPC における課題である。

現在のセットアップでは、ワイヤーへの電圧印加ケーブルを接続するポートの検出器側（ガス Xe 中）で放電が起り、5 kV 以上の電圧をワイヤーに印加することができなかった。ケーブルのコネクタが MHV の場合は 4.9 kV、SHV の場合は 4.5 kV で放電し、コネクタの絶縁部分が黒く焦げているのが確認された。S2 の発光量を上げるためにはより高い高電圧が必要であるため、フィードスルーの改善が必要である。その方法として、ワイヤー電極のケーブルを接続するポートを IVC の底に移動し、LXe に浸けることで放電を防ぐことを検討している。今後は、5 kV 以上の電圧をワイヤーに印加し、より高い電圧においてどこまで低いエネルギーのイベント由来の S2 が観測されるか、また S2/S1 比による粒子識別が可能かを確かめていく。

参考文献

- [1] F. Zwicky, *Helv. Phys. Acta* 6, 110-127 (1933).
- [2] F. Zwicky, *Astrophys. J.*, 86 (1937) 3.
- [3] K.G. Begeman, A.H. Broeils and R.H. Sanders, *MNRAS* 249 (1991) 523.
- [4] Planck Collaboration, *A&A* 571, A1 (2014).
- [5] D.S. Akerib et al., LUX Collaboration, arXiv:1608.07648v1 (2016).
- [6] E. Aprile and T. Doke, *Rev. Mod. Phys.* 82 (2010) 2053.
- [7] K. Abe et al., XMASS Collaboration, *Nucl. Instrum. Meth. A* 716 (2013) 78.
- [8] E. Aprile et al., XENON100 Collaboration, *Astropart. Phys.* 35 (2012) 573.
- [9] D.S. Akerib et al., LUX Collaboration, *Nucl. Instrum. Meth. A* 704 (2013) 111.
- [10] A. Lansiaart et al., *Nucl. Instrum. Meth.* 135 (1976) 47.
- [11] K. Masuda et al., *Nucl. Instrum. Meth.* 160 (1979) 247.
- [12] E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012.
- [13] L.Arazi et al., 2013 JINST 8 C12004.
- [14] E. Erdal et al., 2015 JINST 10 P11002.
- [15] 毛笠莉沙子、名古屋大学大学院理学研究科修士論文 (2016)
- [16] T. Doke et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 41 (2002) 1538.
- [17] L.S. Miller, S. Howe and W.E. Spear, *Phys. Rev.* 166 (1968) 871.

謝辞

修士課程の2年間、研究を行うにあたり大変多くの方々にお世話になりました。この場を借りて心からお礼を申し上げます。

指導教員の伊藤好孝先生には、研究の進め方や実験結果の考察など様々なことをご指導いただきました。特にデータを徹底的に解析することの大切さを教わりました。進路について長い間迷ってしまいましたが、考える時間をくださったことに感謝しております。ありがとうございました。

東京大学宇宙線研究所の関谷洋之先生には、神岡での研究で大変お世話になりました。お忙しい中一緒に本研究の実験をしてくださり、データの解析方法についても多くのアドバイスをいただきました。テストベンチ初のS2を観測できたことを大変嬉しく思います。ありがとうございました。

増田公明先生には、LXe中のS2について研究をされていたため、先生が実験された際のセットアップなどについて教えていただきました。技術部の川端哲也さまにはガラスエポキシのフレームを何個も製作していただきました。東京大学宇宙線研究所の竹田敦先生には超音波はんだごてを使わせていただいたり、 ^{241}Am 線源について詳しい情報を教えていただきました。佐藤和史先生には、実験のDAQシステムに関してお世話になりました。ありがとうございました。

名古屋の研究室において、田島宏康先生、松原豊先生、阿部文雄先生、さこ隆志先生、山岡和貴先生、奥村暁先生、毛受弘彰先生、三宅美沙先生には授業や普段の研究生活でお世話になりました。事務の海内智代さまには出張の事務手続きでお世話になりました。ありがとうございました。

神岡宇宙素粒子研究施設において、鈴木洋一郎先生、Kai Martens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、安部航先生、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、Benda Xu先生、田阪茂樹先生にはミーティングやXMASSシフト、神岡での研究生活でお世話になりました。鈴木洋一郎先生が名古屋大学で行われた暗黒物質についての特別講義は大変勉強になりました。ありがとうございました。

毛笠莉沙子先輩にはテストベンチに関する多くのことを丁寧に教えていただきました。瀧谷寛樹先輩には解析の基本的なことを教えていただきました。ありがとうございました。神岡への出張でいないことが多かったですが、名古屋の研究室の同期の朝倉悠一朗くん、上野真奈さん、及川仁士くん、佐藤雄太くん、土屋暁くん、武藤史真くん、森千尋さん、山根暢仁くんとは2年間同じ研究室で過ごせて楽しかったです。ありがとうございました。

最後に、この研究を行うにあたりお世話になりました皆様、そして家族と友人に心から感謝を申し上げます。