

平成30年度 修士論文

暗黒物質直接探索のための1相式液体キセノン
Time Projection Chamber(TPC)テストベンチによる
低エネルギー比例蛍光の観測

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 宇宙線物理学研究室
博士前期課程

学籍番号 261701018

石井 瞭

指導教員 伊藤 好孝 教授

副指導教員 平原 聖文 教授

平成31年2月28日

概要

様々な観測結果から宇宙の質量のほとんどを占有する光学的には観測されない暗黒物質が存在すると考えられている。この暗黒物質の候補に Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) という重い粒子が考えられている。WIMPs はキセノン原子核を反跳すると考えられており、そのイベントレートは非常に小さく、原子核反跳エネルギーは 100 keV 以下と小さい。そのため、WIMPs の直接探索実験では宇宙線や検出器や遮蔽物に含まれる放射性物質由来の γ 線や β 線、 α 線バックグラウンド排除と観測可能な原子核反跳エネルギーの閾値を下げるのが重要となる。キセノンは発光量が多く質量数 A も大きく WIMPs の検出に有利と考えられているため、現在、WIMPs の直接探索を目的に XMASS 実験や XENON 実験、LUX 実験などキセノンを用いた実験が多く行われている。XMASS 実験は液相のみの球状 1 相式シンチレーション検出器である。検出器内部の液体キセノンを光電子増倍管 (PMT) で覆う構造になっており、高い光電面被覆率で観測可能な原子核反跳のエネルギー閾値は低い。しかし、シンチレーション光のみの情報ではイベント発生位置の再構成やバックグラウンドイベントと WIMPs イベントを識別することが難しい。一方、XENON 実験と LUX 実験は 2 相式 (気相と液相) Time Projection Chamber (TPC) 検出器を用いた実験であり、入射粒子による直接蛍光 (S1) と S1 に伴って発生する電子を電場でドリフトさせ気相の高電場領域 (10 kV/cm) で発生させる比例蛍光 (S2) の 2 種類の光を測定することで、S1 の発生位置や S1/S2 比による原子核反跳イベントと電子反跳イベントの識別が可能となっている。しかし、液相と気相を確保するためドリフト方向と検出器形状の自由度が低く、光電面被覆率も小さくなる。そこで、光電面被覆率が高い球状設計が可能で S1、S2 を利用する液相 1 相式 TPC が WIMPs 直接探索実験に有効である。

ただし、液相 1 相式 TPC の課題としては液相での比例蛍光 (S2) の発生に 2 相式 TPC より高い電場 (410 kV/cm 以上) が必要であると先行研究で確認されている。1979 年からすでに 1 相式液体キセノン TPC の先行研究が行われており、1993 年には ^{109}Cd の 22.3 keV 由来の S2 の観測が報告されている。これが報告されている S2 観測の最低エネルギーの S2 であった。先行研究では 1 相式液体キセノン TPC による S2 観測に関する報告はあるが、S1/S2 比による粒子識別に関する報告はない。

神岡宇宙素粒子研究施設内で、S2 の安定的な観測と S1/S2 比解析による粒子識別を可能とする 1 相式液体キセノン TPC を実現するために開発を行ってきた。これまでの開発でワイヤー電極と ^{241}Am が埋め込まれた針線源を用いた実験で 5.5 MeV の α 線由来と考えられる S2 信号が観測できたが、平行電場の形成とドリフト電場の強度が不十分で 59.5 keV の γ 線由来の S2 は観測できなかった。

これらの課題を解決するため本実験で、本実験のセットアップ用に構築した Geant4 によるモンテカルロシミュレーションによって S1 の光量分布を理解し、この結果と有限要素法計算ソフト Femtet による電場設計に基づく新しい検出器を設計し直した。設計し導入した円盤型 ^{241}Am 表面線源によって線源とワイヤー電極間に平行性を維持した強いドリフト電場が形成され、ドリフト電子の収集効率が高くなった。そして、表面線源であるため安定的に 5.5 MeV の α 線、59.5 keV 以下の γ 線と X 線由来の S2 の観測を可能となり、13.9 keV の S2 最低閾値を確認することに成功した。

液相 1 相式 TPC の S1/S2 比による初解析により、 α 線イベントと γ 線イベントの識別に成功した。さらに、TPC 外部から ^{252}Cf 線源を照射させた測定で、S1/S2 比解析により原子核反跳をする中性子イベントと電子反跳をする γ 線イベントの識別も成功した。これにより初めて液体 1 相式 TPC による S1/S2 比解析で WIMPs イベントと γ 線や α 線のバックグラウンドイベントの識別が可能であることが確認できた。

今後は球状 1 相式液体キセノン TPC に適応する電極による S2 観測と S1/S2 比解析による粒子識別を実現するための研究を進めていく。

目次

図目次	10
表目次	11
第 1 章 暗黒物質	13
1.1 暗黒物質の提唱	13
1.2 暗黒物質の候補	14
1.2.1 MACHOs	14
1.2.2 ニュートリノ	14
1.2.3 アクシオン	14
1.2.4 WIMPs	14
1.3 WIMPs の探索実験	16
1.3.1 WIMPs 直接探索におけるバックグラウンド	17
1.3.2 WIMPs イベントとバックグラウンドイベント	17
1.4 WIMPs の反跳エネルギースペクトル	17
第 2 章 キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験	19
2.1 暗黒物質直接探索におけるキセノンの利点	19
2.2 2 相式 TPC 検出器	21
2.2.1 2 相式 TPC の検出原理	21
2.2.2 代表的な 2 相式 TPC	22
2.3 1 相式シンチレーション検出器	23
2.3.1 XMASS 実験	23
2.3.2 XMASS 実験の問題点	23
2.4 液相 1 相式検出器への TPC 機能導入	24
第 3 章 1 相式液体キセノン TPC を用いた実験	27
3.1 先行研究 1 (液相における電荷増幅と S2 観測)	27
3.2 先行研究 2 (S2 観測における下限エネルギー)	28
3.3 先行研究 3 (S2 ゲインファクターの算出)	28
3.4 先行研究 4 (GEM 電極を用いた実験)	30
3.5 先行研究 5 (ワイヤー電極を用いたテストベンチの実験)	31
3.6 先行研究のまとめと本研究の目的	32
第 4 章 1 相式 TPC テストベンチを用いた実験	35
4.1 実験装置	35
4.1.1 真空容器	35
4.1.2 TPC の設計	36
4.1.3 内部線源と外部線源	38
4.1.4 データ収集 (DAQ) 回路	39

4.2	シミュレーションによる検出器設計と理解	40
4.2.1	シンチレーション光シミュレーション	40
4.2.2	電場シミュレーション	47
第5章	測定と結果	49
5.1	実験手順	49
5.1.1	キセノン導入	49
5.1.2	測定	50
5.2	解析方法	50
5.2.1	LED による 1 p.e. 測定	50
5.2.2	S1 解析	51
5.2.3	S2 解析	51
5.3	S1 測定、S2 測定	52
5.3.1	^{241}Am 内部線源による S1 測定	52
5.3.2	S1 のエネルギー校正	53
5.3.3	S1 の時間変化	54
5.3.4	S1 の電場依存性	54
5.3.5	^{241}Am 内部線源による S2 測定	55
5.3.6	S2 のエネルギー校正	55
5.3.7	S2 の電場依存性	56
5.3.8	ドリフト速度の電場依存性	57
5.4	S2/S1 解析	58
5.4.1	^{241}Am 内部線源の S1/S2 解析による粒子識別	59
5.4.2	^{252}Cf 外部線源による中性子測定	60
第6章	今後の課題と展望	65
6.1	課題	65
6.2	展望	65
6.2.1	即発 γ 線タグによる中性子測定	65
6.2.2	Shaping Ring の電場シミュレーション	65
6.2.3	針電極の電場シミュレーション	66
第7章	まとめ	69
Appendix	71
A	^{241}Am の壊変図	71
B	設計図	73
謝辞	75
参考文献	78

目次

1.1	渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線。誤差棒が付いているものは測定値、破線は星、点線はガス、点破線はダークマターの回転速度への寄与を表している [5]。	13
1.2	WIMP と核子の弾性散乱のファインマン図。	15
1.3	DAMA/NaI と DAMA/LIBRA による 2~6 keV の範囲の信号の 6 年間測定結果である。 DAMA グループは暗黒物質の年周期変動があると主張している。 [9]	16
1.4	各直接探索実験によって得られている検出可能な暗黒物質の反応断面積と質量の上限値を表している。 [11]	17
1.5	WIMPs や中性子は原子核反跳を起こし、 γ 線や β 線は電子反跳を起こす。	18
1.6	WIMPs の質量が $M_\chi = 6 \text{ GeV}(\sigma_n^0 = 10^{-44})$, $20 \text{ GeV}(\sigma_n^0 = 10^{-46})$, $100 \text{ GeV}(\sigma_n^0 = 10^{-47})$ 時のキセノン原子核の反跳エネルギースペクトル [8]。	18
2.1	2 相式 TPC 検出器の検出原理 [14]	21
2.2	XENON100 のセットアップ [14]	22
2.3	XENON100 の PMT[14]	22
2.4	XMASS 概観	23
2.5	検出器壁内に含まれる放射性物質由来の検出器壁側で発生するイベントが検出器中心部で発生したイベントと似た光量分布を形成するため、誤ってイベント発生位置を再構成してしまう。(i) は近くの PMT に僅かに入る光子。(ii) は遠方の PMT に届く光子。	24
2.6	球状 1 相式 TPC 検出器のイメージ	24
3.1	左図: K. Masuda による実験のセットアップ。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。右図: 実験で得られたオシロスコープの信号。a が比例計数管で読み出された電荷信号、b が PMT で観測される光量。S1 の後に電荷増幅と S2 の発生が観測されている [16]。	27
3.2	5.5 MeV の α 線の S1 と S2 の電場依存性 (先行研究 1)[16]。	28
3.3	S. Suzuki らによる実験のセットアップ (先行研究 2)[17]。1: HV 絶縁体,2: UV 石英ガラス,3: ステンレス製のカソード,4: 線源,5: GND,6: アノード。アノードは内直径 32 mm のステンレス製のリング上に 2 mm 間隔で直径 3 ~ 4.5 μm の金メッキされたタングステンワイヤーが配置されている。	29
3.4	左図: ^{57}Co 線源の 122 keV γ 線由来の S1 と S2 の電場依存性。右図: ^{241}Am 線源の 5.5 MeV α 線由来の S1 と S2 の電場依存性 (先行研究 2)[17]。	29
3.5	^{109}Cd 線源の 22.2 keV 由来の S2(先行研究 2)[17]	30
3.6	E. Aprile による実験のセットアップ (先行研究 3)[18]	30
3.7	先行研究 3 におけるプリアンプからの信号と下 PMT で観測された S2 信号。横軸は gate grid と anode の電位差 [18]。	31
3.8	毛笠による実験のセットアップ (先行研究 4)[22]	32
3.9	実験で用いた GEM[22]	32
3.10	毛笠のセットアップで Femtet による電場計算結果 (先行研究 4)[22]	32

3.11	菅澤による実験のセットアップ (先行研究 5)[23]	33
3.12	実験で用いられた ^{241}Am 針線源 [23]	33
3.13	図 3.12 の ^{241}Am 内部針線源をゲルマニウム検出器で測定した結果 [23]。59.5 keV より低い γ 線や X 線のピークは観測されていない。	33
3.14	菅澤のセットアップで Femtet による電場計算結果 (先行研究 5)[23]	34
3.15	先行研究 5 の実験で組まれていた DAQ	34
3.16	ワイヤー電圧 0 kV での S1 スペクトルで、青が全イベントで赤がサチレーションしていたイベント。左図: ^{241}Am 内部線源のみ。右図: ^{241}Am 内部線源と ^{137}Cs 外部線源を用いた実験。	34
4.1	テストベンチの外観	35
4.2	本実験のセットアップ	36
4.3	本実験の TPC 内のセットアップ	37
4.4	左図: TPC の外観である。上下の穴は GNG 配線用に空けられたものである。右図: TPC の内部。中央には直径 $10\mu\text{m}$ のワイヤー電極、左側から飛び出しているものが線源ホルダー、下に見える 7 本の金属棒は直径 0.1 mm の GND、その下にあるガラスは PMT の Quartz 窓が見える。	38
4.5	本実験で用いたワイヤー電極とフレーム [23]。ワイヤー電極がフレームにある銅箔にはんだ付けされている。	39
4.6	左図: ^{241}Am 内部線源。右図: 睡蓮花型線源ホルダー	39
4.7	^{137}Cs の壊変図 [26]	41
4.8	外部線源の位置	41
4.9	本実験の DAQ 回路	42
4.10	下 PMT で LED を用いて 1 p.e. を測定した時のヒストグラム	42
4.11	^{241}Am 内部線源で行った実験で測定された各 PMT の光電子数ヒストグラム	43
4.12	Geant4 内で構築した TPC テストベンチのジオメトリー	44
4.13	各反射変数の分類 [27]	44
4.14	^{241}Am 内部針線源で行った実験で測定された PMT の光電子数ヒストグラムと光量シミュレーションとの比較	45
4.15	^{241}Am 内部針線源で行った実験 (高電圧印加なし) で測定された scatter plot と光量シミュレーションとの比較	45
4.16	先行研究のセットアップでの ^{137}Cs 外部線源の光電子数とエネルギーの関係	45
4.17	先行研究 5 で用いられた線源と GND 部分のスペーサー	46
4.18	① A のクラスターを作ったイベントの S1 の発生位置。② B のクラスターを作ったイベントの S1 の発生位置。③ C のクラスターを作ったイベントの S1 の発生位置。②と③は主に有効体積外に存在する直方体の穴にあるキセノン領域で発生している。	46
4.19	睡蓮花型線源ホルダーを用いたジオメトリーでシミュレーションされた上下の PMT で観測される光電子数のヒストグラム。左図: 1.0×10^3 p.e. 以下の範囲。右図: 1.5×10^4 p.e. 以下の範囲。	46
4.20	59.5 keV 以下の低エネルギーの γ 線の光電子数ピークと液体キセノン中のエネルギーデポジットの関係	47
4.21	左図: 各電圧ごとのワイヤー電極表面の電場の計算結果。右図: ワイヤー電極に 5 kV 印加した時の表面線源を始点、ワイヤー電極を終点とした時の電場の位置依存性。	48
4.22	睡蓮花型線源ホルダーを用いたジオメトリーでの Femtet による電場シミュレーション。左図: ワイヤー電極と表面線源の中心を通る断面図での等電位線。右図: ワイヤー電極と表面線源の中心を通る断面図での等電位線。	48
5.1	本実験のガスライン	49

5.2 10月下旬から11月中旬の間に行った実験時のTPC各所の温度と内部の圧力の状態である。青線:上PMTの温度、赤線:下PMTの温度、緑線:熱交換円盤(disk)の温度、紫線:熱交換ボックス外側の温度、黄線:熱交換器の温度、茶線:内容器の圧力、水色期間:ワイヤー電極HV印加、黄色期間:外部線源照射実験、赤色期間: ^{252}Cf 外部線源照射実験 50

5.3 LEDに500Hzで入力する電気パルス 50

5.4 左(右)図は上(下)PMTの1 p.e.測定時の波形面積のヒストグラム。それぞれ二重ガウス関数でフィッティングし2つのピークを0 p.e.と1 p.e.としている。 51

5.5 左図:アノードのHV5kV印加した時の上下PMTの生信号。 ^{241}Am 線源で測定された上下のS1とS2が観測された。右図:5kV印加した時にFADCで記録された波形を用いて解析方法を説明した図。 52

5.6 縦軸、横軸はそれぞれ上下PMTのS1光電子数。左図: ^{241}Am 線源で測定された上下のS1光量散布図。右図:線源の位置で発生したイベントだけを取り出すためにカットした上下のS1光量ヒストグラム。 53

5.7 (A):上PMTの光量が減少する場合の光子の反射過程。(i)の錆や(ii)のネジなどで本来上方へ反射するはずだった光子が失われている。(B):上PMTの光量が最大となる場合の光子の反射過程。下PMTは(A)(B)どの反射過程でも入射する光子数はほとんど変わらないことがわかる。 53

5.8 左図: 1.0×10^3 p.e.以下のS1のヒストグラム。低エネルギーの γ 線による3つのピークが観測されており、ガウス関数を3つ足し合わせた関数でフィッティングしている。右図: 1.5×10^4 p.e.以下のS1のヒストグラム。 α 線由来のピークが観測されており、ガウス関数でフィッティングしている。 54

5.9 ^{241}Am 線源で観測された低エネルギー γ 線のS1によるエネルギー較正と、シミュレーションで得られたエネルギーとS1光量相関。 55

5.10 2018年11月に行われた実験期間中の ^{241}Am 線源の5.5 MeVの α 線由来のS1光量。青線:上PMTの温度、赤線:下PMTの温度、緑線:熱交換円盤(disk)の温度、紫線:熱交換ボックス外側の温度、黄線:熱交換器の温度、茶線:内容器の圧力、水色期間:ワイヤー電極HV印加、黄色期間:外部線源照射実験、赤色期間: ^{252}Cf 外部線源照射実験 56

5.11 左図:本実験でのS1光量の電場依存性。横軸はドリフト電場。右図:プロットが先行研究で得られた各粒子のエネルギーでのS1光量変化の結果で、実線はNESTモデルである[33]。それぞれ0kV時の光量を1としている。 57

5.12 ^{241}Am 線源で観測されたS2の上下PMTの光電子数二次元散布図 57

5.13 左図: 1.5×10^3 p.e.以下のS2のヒストグラムのフィッティング。低エネルギーの γ 線による3つのピークが観測されており、ガウス関数を3つ足し合わせた関数でフィッティングしている。中央図: 4.0×10^2 から 2.5×10^3 p.e.までガウス関数を3つ足し合わせた関数でフィッティングしている。右図: 2.0×10^4 p.e.以下のS2のヒストグラムのフィッティング。 α 線由来のピークが観測されており、ガウス関数でフィッティングしている。 58

5.14 ^{241}Am 線源で観測された低エネルギー γ 線のS2によるエネルギー校正 58

5.15 左図:電場を大きくし初めて観測されるそれぞれのエネルギーのS2の光量を1とした時の相対S2光量の電場変化。右図:縦軸をS2光量、横軸を印加電圧にしたもの。 59

5.16 ^{241}Am 線源を用いて5kVをアノードにかけた時のドリフト時間のヒストグラム。右図:電子反跳エネルギーが90 keV以下各S2イベントに対するドリフト時間の散布図。 59

5.17 左図:L. S. MILLER, et al.による液体と固体それぞれの状態のキセノン中での電子のドリフト速度を測定した結果[34]。右図:距離を8.1 mmとした時の実験結果から求められるドリフト速度。緑が γ 線由来で赤が α 線由来のプロットである。 60

5.18 ワイヤー電極に5kV印加した時の $\log(S2/S1)$ とS2の関係の二次元ヒストグラム。左図:横軸のS2の範囲を 3.0×10^4 p.e.以下にしたもの。右図: 7.0×10^3 p.e.以下に拡大したもの。 60

5.19	^{241}Am 線源を用いた時の $\log(S2/S1)$ のワイヤー電場依存性。赤は $\log(S2/S1)$ で識別された α 由来のピークで、緑は同様に γ と識別されたピーク。	61
5.20	^{241}Am 内部線源と ^{252}Cf 外部線源を用いた時のプロット (赤) と ^{241}Am 内部線源と ^{137}Cs 外部線源を用いた時のプロット (黒) を重ねている。	62
5.21	^{137}Cs 線源を外容器から照射させた時の S1 の発生位置を光量シミュレーションした結果。線源はそれぞれ左側から照射されている。左上:TPC を x-y 平面に射影。右上:TPC を x-z 平面に射影。右下:x 方向一次元分布。	63
5.22	^{252}Cf 線源を外容器から照射させた時の $S\log(S2/S1)$ のヒストグラム。緑が中性子由来のピークで、紫が γ 線由来と考えられる。灰色は ^{241}Am 内部線源の γ 線由来のピークである。左図: S2 が $2.5 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^2$ p.e. の範囲、 $-0.8 \leq \log(S2/S1) \leq 1.2$ の範囲で三重ガウス関数でフィッティングしている。右図: S2 が 1.8×10^4 p.e. 以上、 $0.6 \leq \log(S2/S1) \leq 1.8$ の範囲で二重ガウス関数でフィッティングしている。	64
5.23	^{252}Cf 線源を外容器から照射させた時の $\log(S2/S1)$ のピーク位置。黒色 ^{252}Cf 外部線源と ^{241}Am 内部線源を利用している時のプロットで、その他の色のプロットは各領域での $\log(S2/S1)$ のヒストグラムをフィッティングした時のピーク位置である。緑色が ^{252}Cf 外部線源の中性子由来のピークで、紫が ^{252}Cf 外部線源の γ 線由来と考えられる。青色は ^{241}Am 内部線源の γ 線由来で赤色は α 線由来のピークである。左図: S2 が $2.0 \times 10^2 \sim 4.2 \times 10^3$ p.e. の範囲。右図: S2 が $4.0 \times 10^2 \sim 6.0 \times 10^3$ p.e. の範囲。	64
6.1	^{252}Cf 外部線源を用いて行う中性子測定	66
6.2	^{252}Cf 外部線源を用いて行う中性子測定用の DAQ	66
6.3	shaping ring を 3 つ設置した時の電場シミュレーション。左図: ワイヤー電極と線源ホルダーの中央を通る断面図の等電位線。①②③は新たに設置した shaping ring である。右図: 左図の垂直方向の断面図の等電位線。	67
6.4	shaping ring を 3 つ設置しワイヤー電極の代わりに針電極を設置した時の電場シミュレーション。左図: 針電極と線源ホルダーの中央を通る断面図の等電位線。右図: 左図の垂直方向の断面図の等電位線。	67
6.5	内部線源から針電極までの電場の位置変化。	68
A.1	^{241}Am から放射される γ 線の壊変図 (1)[26].	71
A.2	^{241}Am から放射される γ 線の壊変図 (2)[26].	72
B.1	再設計したスペーサーと線源ホルダー	73

表 目 次

1.1	標準理論の粒子とそれに対応する超対称性粒子	15
1.2	角運動量を持つ原子核ごとの $J(J+1)\mu^2$ の理論値	16
2.1	代表的な液体希ガスの W 値 [13]	19
2.2	Xe の物性値	20
2.3	Xe の同位体とその存在率	21
2.4	各検出器の特徴	25
3.1	各ワイヤー直径ごとの S2 発生に必要な電場の閾値 (先行研究 1)[16]	28
3.2	先行研究 3 において (3.2),(3.3) 式でフィッティングをした結果 [18]	31
4.1	上下の PMT の性能 (印加電圧:800 V、光源:2856K 標準タングステンランプ、常温下、浜松 フォトニクスの試験成績表より)	38
4.2	実験で用いた線源の情報	40
4.3	^{241}Am の主な放射線	40
4.4	^{241}Am 内部線源で行った実験で測定された光電子数ヒストグラムにおける Fitting parameter と分解能	43
4.5	光量シミュレーションの光学パラメータ	44
4.6	Geant4 による γ 線の各エネルギーの S1 光量のシミュレーション結果	47
5.1	各エネルギーの S1 光量	54
5.2	各 HV 時の各エネルギーの S2 光量	56
5.3	アノード電圧 5 kV 時の各 S2 の範囲での各粒子の $\log(S2/S1)$	63

第1章 暗黒物質

本章では、暗黒物質についての基礎や歴史的背景や特徴について述べる。また、暗黒物質を発見するため様々な原理を利用して行われている実験を紹介する。

1.1 暗黒物質の提唱

1933年に Fritz Zwicky が行った、かみのけ座銀河団中の7つの銀河の解析によって暗黒物質の存在が最初に提唱された [1]。銀河団中で銀河が運動する速度の分散と、多体系のビリアル定理から銀河団中の重力ポテンシャルを見積もり総質量を推定した。この値は、光学的観測から得られた質量の400倍以上であった。これは、銀河団の質量は銀河の質量の総和だけではなく、他に见えない物質があるためと考えられた。その後のおとめ座銀河団でも同様の結果が得られた [2]。

銀河内の星の回転運動はニュートン方程式から、

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{mM}{r^2} \quad (1.1)$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (1.2)$$

となる。ここで、 M は銀河の半径 r 内に含まれる総質量、 m 、 r 、 v は回転する天体の質量、回転半径、回転速度、 G は万有引力定数である。この時、銀河の質量分布がほとんど中心に集まっている、銀河系の外側では総質量 M が一定と考えると、回転速度 v が $r^{-\frac{1}{2}}$ に比例するケプラー回転になると考えられる。しかし、1970年の Vera Rubin と W. Kent Ford Jr. による渦巻銀河 M31(アンドロメダ銀河)の回転速度の測定の結果は、観測最大半径の距離まで (1.2) 式よりも大きい速度であった [3]。他にも、渦巻銀河である NGC6503 の観測結果も図 1.1 のように得られた結果は単純なニュートン方程式から算出される回転速度分布と異なっていた [5]。現在まで、ケプラー回転をする銀河は観測されていない。回転速度が半径に対して変化しない平坦回転曲線になっているのは、銀河の質量のほとんどが暗黒物質で構成されているダークハローによって占められているからだと考えられている。

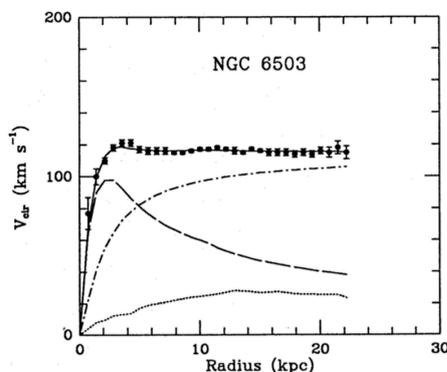


図 1.1: 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線。誤差棒が付いているものは測定値、破線は星、点線はガス、点破線はダークマターの回転速度への寄与を表している [5]。

1.2 暗黒物質の候補

暗黒物質であるための条件は (1) 電氣的に中性 (2) 質量を持つ (3) 宇宙残存量 $\Omega_{DM} = 0.24$ である。である。暗黒物質の候補は様々あり、バリオンか非バリオンかで大きく2つに分けられる。さらに、物質放射平衡時点で相対論的 ($v \approx c$) である熱い物質と相対論的でない ($v \ll c$) 冷たい物質に分けられる。熱い暗黒物質 (hot dark matter) はニュートリノが候補としてあり、冷たい暗黒物質 (cold dark matter) としては、WIMPs やアクシオンが候補である。

1.2.1 MACHOs

褐色矮星、中性子星、ブラックホールなど光らないコンパクトな天体を総称して MACHOs (Massive Astrophysical Compact Halo Objects) と呼ぶ。重力レンズ効果による星の光の増光を利用して、大マゼラン星雲の 1190 万個の星の光の光度曲線を観測する MACHO 実験が行われたが、15 個しか候補が見つからなかった [6]。また、小マゼラン星雲を観測した EROS 実験での結果は 1 個であった [7]。期待される暗黒物質の総質量としては小さいため、暗黒物質の主成分ではないと考えられている。

1.2.2 ニュートリノ

宇宙初期に作られた宇宙背景ニュートリノが暗黒物質の主成分になるためには、ニュートリノの質量が 20 eV 以上必要である。しかし、ニュートリノは熱い暗黒物質になるため、銀河構造形成についての観測事実との対応が良くないことが指摘されていた。スーパーカミオカンデ (SK) 実験でニュートリノ振動効果が発見されたことでニュートリノに質量があることがわかった。もし数 keV 以上の重いニュートリノがあれば主要な冷たい暗黒物質の候補となる。

1.2.3 アクシオン

極低温でボーズアインシュタイン凝縮状態にあるアクシオンは冷たい暗黒物質の候補である。アクシオンは強い相互作用が CP 対称性を保存することを説明するために提案されている。アクシオンは強い磁場中でアクシオンの質量と等価な光子に転換することを利用して、マイクロ波技術による実験が行なわれている。

1.2.4 WIMPs

WIMP とは Weakly Interacting Massive Particle の略称で、相互作用の弱い質量が重い素粒子のことを総称したものである。光子や Z 粒子、ヒッグス粒子の超対称性 (SUSY) 粒子が WIMP の有力候補として考えられている。標準理論の粒子と対応する超対称性粒子を表 1.1 にまとめた。超対称性粒子の質量は加速器を用いても生成できないほど重い可能性があり、未だ発見されていない。

WIMP は原子核中の核子と相互作用をし原子核と弾性散乱をする。この WIMP と核子の相互作用はスピンに依存する場合 (Spin Dependent, SD) と依存しない場合 (Spin Independent, SI) に分けられる。それぞれのファインマンダイアグラムは図 1.2 の通りである。図 1.2 中の (1) は SD WIMP とクォークが Z ボゾンを交換して相互作用をするファインマン図、(3) は SI WIMP とクォークがヒッグス粒子を交換して相互作用をするファインマン図、(2)(4) は SD または SI WIMP とクォークが重い粒子 \tilde{q} を交換して相互作用をするファインマン図である。

表 1.1: 標準理論の粒子とそれに対応する超対称性粒子

標準理論の粒子			対応する超対称性粒子		
記号	名前	スピン	記号	名前	スピン
$q = u, c, t$	up quarks	$\frac{1}{2}$	q_u^1, \dots, q_u^6	up squarks	0
$q = d, s, b$	down quarks	$\frac{1}{2}$	q_d^1, \dots, q_d^6	down squarks	0
$l = e, \mu, \tau$	leptons	$\frac{1}{2}$	l_1, \dots, l_6	sleptons	0
ν	neutrinos	$\frac{1}{2}$	ν_u^1, \dots, ν_u^6	up squarks	0
g	gluons	1	g	gluinos	$\frac{1}{2}$
W^\pm	W boson	1	$\chi_u^\pm, \dots, \chi_u^\pm$	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	$\chi_1^0, \dots, \chi_4^0$	neutralinos	$\frac{1}{2}$
$H^0(H_1^0)$	heavy scalar Higgs	0			
$A^0(H_3^0, P_0)$	pseudoscalar Higgs	0			

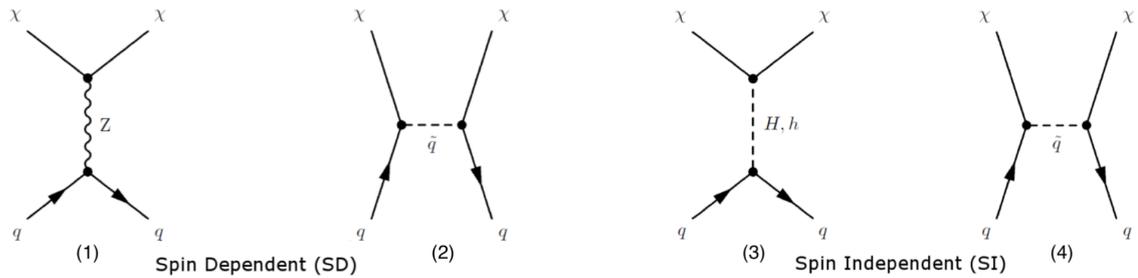


図 1.2: WIMP と核子の弾性散乱のファインマン図。

Spin Dependent (SD) WIMP

スピン相互作用する WIMP の反応断面積 σ_χ は

$$\sigma_\chi \propto J(J+1)\mu^2 \tag{1.3}$$

と書かれ、 $J(J+1)$ に比例することがわかる。ただし、合成スピンを J 、換算質量を μ としている。また、原子核の核子の偶奇によっても、反応は異なる。もし、原子核が偶数核子から構成されていると、スピンうえ向き核子と下向き核子でペアを作る。これは外からスピンがゼロに見えるような状態であるため、 σ_χ は小さくなる。そのため、原子核が奇数核子などペアが作りにくい標的粒子が適しているということになる。表 1.2 から SD 標的に対しては Li や F が理想的であることがわかる。つまり、原子核の合成スピン J がゼロでない時に反応が起きやすいことを意味している。

表 1.2: 角運動量を持つ原子核ごとの $J(J+1)\mu^2$ の理論値

アイソトープ	非対核子	存在比	$J(J+1)\mu^2$
${}^7\text{Li}$	p	92.5%	0.411
${}^{19}\text{F}$	p	100%	0.647
${}^{23}\text{Na}$	p	100%	0.041
${}^{73}\text{Ge}$	n	7.8%	0.065
${}^{127}\text{I}$	p	100%	0.023
${}^{129}\text{Xe}$	p	26.4%	0.124
${}^{131}\text{Xe}$	p	21.2%	0.055

Spin Independent (SI) WIMP

WIMP がスピン相互作用せず、ド・ブロイ波長が原子核サイズ程度よりも大きい場合、核子 1 個 1 個の散乱波が重ね合わせられるコヒーレントな散乱¹をするため、反応断面積 σ_χ は、質量数を A とすると、

$$\sigma_\chi \propto A^2 \mu^2 \quad (1.4)$$

と書け、 A^2 に比例することがわかる。そのため、SI 標的に対しては質量数 A が大きいものが良いことがわかる。

1.3 WIMPs の探索実験

WIMPs の探索実験は「直接探索」、「間接探索」の 2 つがある。直接探索実験は WIMPs が検出器の物質と直接相互作用した時に生じる信号を検出する実験である。間接探索実験は暗黒物質が崩壊や対消滅する際に生成する粒子を宇宙線として観測する実験である。この他、加速器実験により WIMPs の生成の探索も行われている。WIMPs の直接探索実験では、DAMA 実験や CoGeNT 実験などが地球の公転による WIMPs

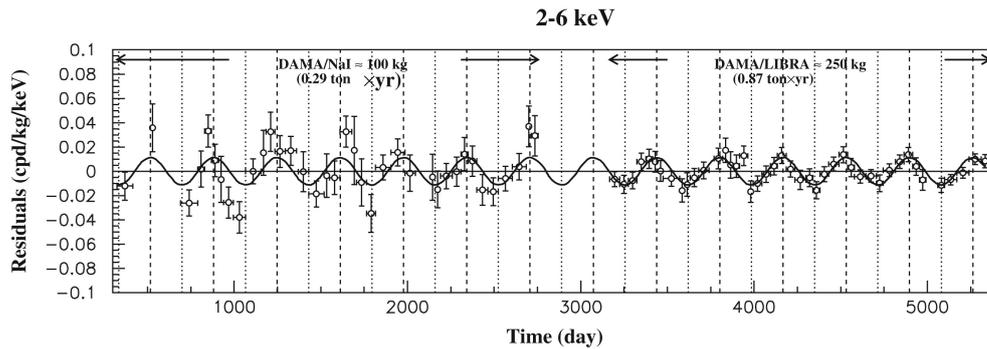


図 1.3: DAMA/NaI と DAMA/LIBRA による 2~6 keV の範囲の信号の 6 年間測定結果である。DAMA グループは暗黒物質の年周期変動があると主張している。[9]

イベントレートの季節変動検出を主張しているが、XENON 実験や XMASS 実験などはその主張を否定している。DAMA 実験や CoGeNT 実験などが検出していたイベントは検出器や検出器外部の遮蔽物に含まれる放射性物質由来の γ 線バックグラウンドイベントと考えられている。

¹コヒーレントな散乱だと波が重ね合わせをすると考えるため、反応断面積 σ は $\sigma \propto |\langle f_1 | H | i_1 \rangle \langle f_2 | H | i_2 \rangle \dots \langle f_n | H | i_n \rangle|^2 = N^2 |\langle f | H | i \rangle|^2$ となる。

現在世界で行われている暗黒物質の直接探索実験で広く利用されている物質が液体の希ガスである。液体の希ガスは密度が高く WIMPs が反応しやすくなり、Time Projection Chamber(TPC) の機能をもつ検出器においては電子配置が閉殻で電離電子を捕獲しにくいため電子を長距離ドリフトさせる際に途中で電子が失われにくいという長所がある。アルゴンを使った DEAP 実験や DARKSIDE 実験などや、キセノンを使った XMASS 実験や XENON 実験、LUX 実験、PandaX 実験 [10] などがある。

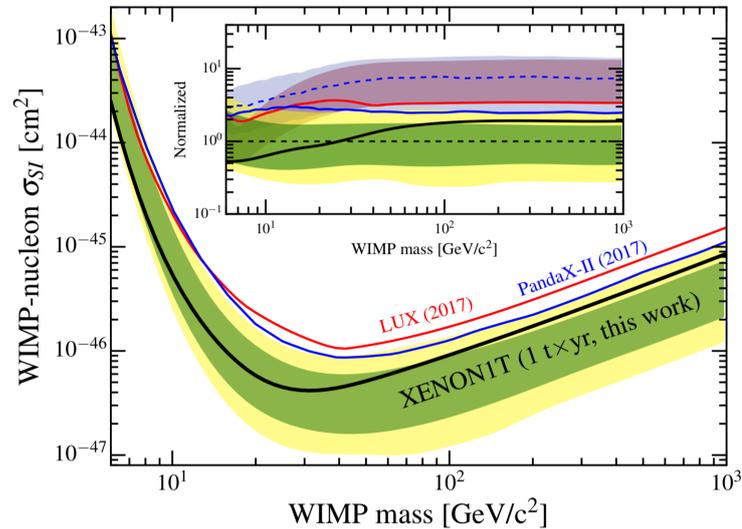


図 1.4: 各直接探索実験によって得られている検出可能な暗黒物質の反応断面積と質量の上限値を表している。[11]

1.3.1 WIMPs 直接探索におけるバックグラウンド

WIMPs の反応断面積は非常に小さく原子核反跳のイベントレートは非常に低いため、WIMPs 以外のイベントとなるバックグラウンドイベントと識別することが重要となる。空気や検出器、検出器外部の遮蔽物に含まれる ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{222}Rn 、 ^{85}Kr 、 ^{40}K 等の放射性物質由来の γ 線や β 線、 α 線および中性子、宇宙から降り注ぐミュー粒子などの宇宙線やそれ起源の中性子がバックグラウンドとなる。

1.3.2 WIMPs イベントとバックグラウンドイベント

キセノンとの相互作用は粒子によって異なる。図 1.5 で示すように WIMPs や中性子はキセノン原子核と原子核反跳を起こすが、 γ 線や β 線はキセノン原子中の電子と電子反跳を起こす。反跳された原子核や電子によってキセノン原子は励起され、エネルギーを落とす時にシンチレーション光が発生する。WIMPs の直接探索実験では主にこのシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) で捉え解析に用いている。原子核反跳イベントと電子反跳イベントを識別するために様々な手法による粒子識別の開発が進められている。

1.4 WIMPs の反跳エネルギースペクトル

WIMP と原子核が弾性散乱するとき等方的な散乱と仮定し反跳エネルギースペクトル式は式 1.5 とかける。

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho_\chi}{2M_\chi \mu^2} \sigma \int_{E \geq \frac{E_R}{v}} \frac{1}{v} f(v) d^3v \quad (1.5)$$

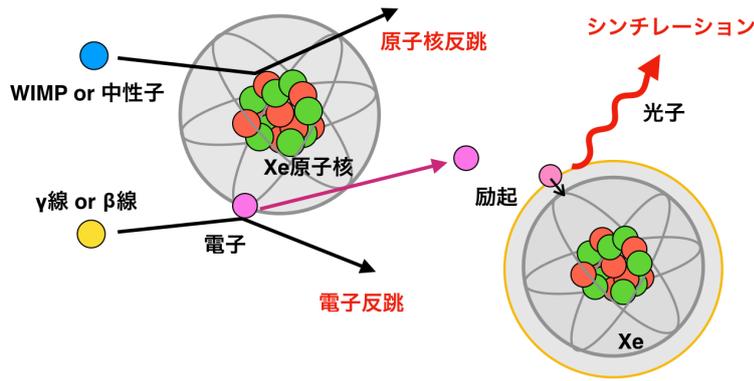


図 1.5: WIMPs や中性子は原子核反跳を起こし、 γ 線や β 線は電子反跳を起こす。

ここで、 M_χ は WIMP の質量、 ρ_χ は WIMP の質量密度、 μ は WIMP と原子核の換算質量、 v は WIMP の速さ、 $f(v)$ はその確率密度分布、 σ は散乱断面積である。

WIMPs の質量を $M_\chi = 100 \text{ GeV}$ 、 $M_\chi = 20 \text{ GeV}$ 、 $M_\chi = 6 \text{ GeV}$ 、それぞれの反応断面積を $\sigma_n^0 = 10^{-47} \text{ cm}^2$ 、 $\sigma_n^0 = 10^{-46} \text{ cm}^2$ 、 $\sigma_n^0 = 10^{-44} \text{ cm}^2$ と仮定した時のキセノン原子核との反跳エネルギースペクトルは図 1.6 のようになる。WIMPs の質量が小さくなると原子核反跳のエネルギーはより小さくなる。そのため、WIMPs を探索するためには可能な限りエネルギー閾値を下げる必要があることがわかる。また、イベントレートも非常に小さいためバックグラウンドを除去することも重要である。

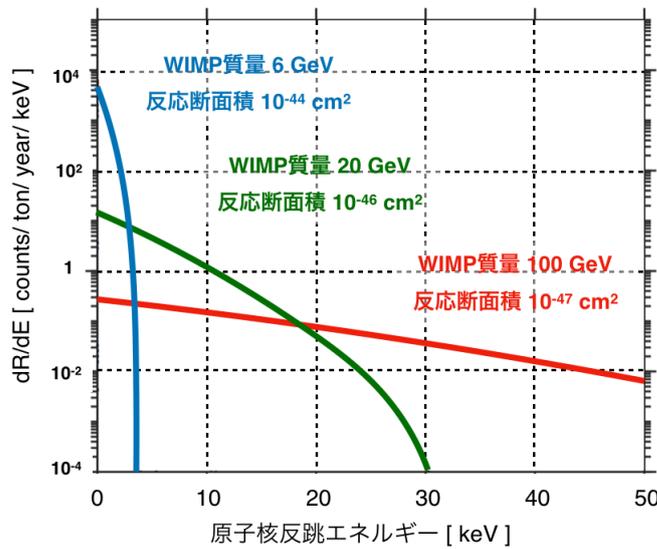


図 1.6: WIMPs の質量が $M_\chi = 6 \text{ GeV}$ ($\sigma_n^0 = 10^{-44}$), 20 GeV ($\sigma_n^0 = 10^{-46}$), 100 GeV ($\sigma_n^0 = 10^{-47}$) 時のキセノン原子核の反跳エネルギースペクトル [8]。

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、液体キセノンを経験的に用いた実験が WIMP と核子との反応断面積に最も強い制限を与えている。本章では液体キセノンが暗黒物質探索において有効である理由と、現在稼働中の液体キセノン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 暗黒物質直接探索におけるキセノンの利点

1 章で述べたが原子核と WIMPs の反跳エネルギーは低く、反応断面積も小さい。このため WIMP 直接探索実験において低バックグラウンドと低エネルギー閾値を実現することが重要となる。

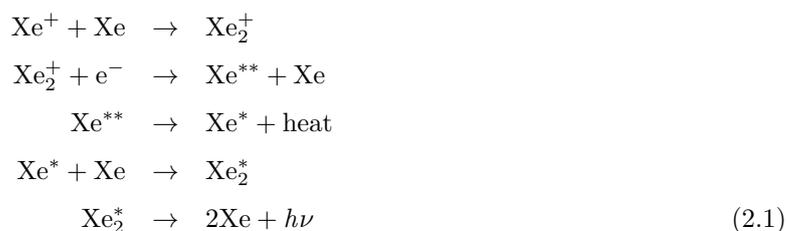
発光過程と発光量

キセノンは同じ希ガス原子と比較しても電離エネルギーを意味する W 値が小さく発光量が大きい (表 2.1)。発光量が大きいと低エネルギー事象をでの観測精度が上がり、エネルギー閾値を下げるができる。また、キセノンのシンチレーション光の波長は約 178 nm で、波長変換材を用いることなく PMT で直接観測が可能である。

表 2.1: 代表的な液体希ガスの W 値 [13]

	液体アルゴン	液体クリプトン	液体キセノン
蛍光の W 値 [eV]	19.5	15.5	14.7
電離の W 値 [eV]	23.3	18.6	15.6

β 線や γ 線は液体キセノン中で電子反跳を起こす。中性子や WIMPs はキセノン中で原子核反跳を起こす。 α 線も含め荷電粒子は最終的にキセノン中で電離を起こす。キセノン中で励起状態の Xe^* 、 Xe^{**} とイオン Xe^+ を生成し、式 2.1 のようなイオンの再結合を含む過程と式 2.2 のような再結合を含まない過程でキセノンが発光する。



どちらの過程でも最終的に Xe と Xe* の二量体 Xe₂* が脱励起することで波長が 175 nm の光を発生する。しかし、この脱励起にもスピン 1 重項と 3 重項の 2 成分が存在するため、1 重項成分は 4 ns、3 重項成分は 22ns と異なる発光時定数を持つ。

どの粒子も以上の二通りの発光過程が存在するが、電子反跳は原子核反跳に比べて生じるイオン密度が小さいため再結合する電子-イオン対を見つけるのに時間がかかり、発光時定数は 45 ns 程度になる。

また、式 2.3 より発光量は電離密度 $\frac{dE}{dx}$ に依存している。ここで全発光量を S 、定数 k_B 、エネルギーを E としている。 $\frac{dE}{dx}$ が小さいと発光量がエネルギー E に比例するが、 $\frac{dE}{dx}$ が大きいと発光量が減少する。

$$S(E) = \int_0^E \frac{1}{1 + k_B \frac{dE}{dx}} dE \quad (2.3)$$

原子核反跳イベントは極めてエネルギーが低いため、反跳原子核がイオン化によるエネルギー損失以外に他のキセノン原子核とさらに反跳を起こすことによるエネルギー損失が起こる。これにより失われたエネルギーは最終的に熱に変換されるため、発光効率が著しく悪くなる。

原子番号と質量数が多い

1 章でも記述したが、SI 相互作用の場合、WIMP と原子核の反応断面積 σ と原子核の質量数 A の間には $\sigma \propto A^2$ の関係がある。キセノンは大きな質量数を持つためイベントレートの低い WIMP の探索において有効である。また、原子番号が大きく密度も 2.9 g/cm³ と高いため、キセノン自身が外部からのガンマ線を遮蔽する。このため、キセノンの中心部にバックグラウンドの少ない有効体積をとることができる。

表 2.2: Xe の物性値

物理量	値	環境条件
原子番号	54	-
原子量	131.29 g/mol	-
沸点	165.1 K	1 atm
融点	161.4 K	1 atm
密度	2.98 g/cm ³	161.35 K

奇数核の天然存在比が多い

これも 1 章で記述したが、WIMPs が SD 相互作用する場合、標的の原子核が奇数核子の方が反応しやすい。キセノンは表 2.3 のように質量数の異なる同位体が多く存在し、奇数核子の質量数をもっている同位体が存在するため SD 相互作用にも感度を持つことになる。また、宇宙線などによってつくられるキセノンの放射性同位体は半減期が 1 ヶ月と短く、地下実験の環境で自然に崩壊するのでキセノン自身がバックグラウンドとなることはない。

取り扱いが容易

Xe は 1 気圧で 165 K で液化する。これは他の希ガスより比較的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による放射性物質の除去やゲッタによる水の除去という純度を保つための作業が容易に行える。

表 2.3: Xe の同位体とその存在率

同位体	存在率 [%]
^{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	26.86
^{134}Xe	10.44
^{136}Xe	8.87

2.2 2相式 TPC 検出器

TPC とは Time Projection Chamber の略称で、電離で生じた電子を電場によってドリフトさせ、その信号を捉えドリフト時間から反応位置を決定する装置のことである。

2.2.1 2相式 TPC の検出原理

2相式 TPC はまず、液体キセノン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) が発生する。このとき同時に発生する電子を液体キセノン中にかけてられた電場によって検出器上部の気相へドリフトさせる。電子は液相から気相へ引き上げられ、気体のキセノン中のアノードワイヤー近傍の高電場領域で電荷増幅を起し比例蛍光 (S2) が発生する。この S1 と S2 の両方の光を PMT で観測している (図 2.1)。

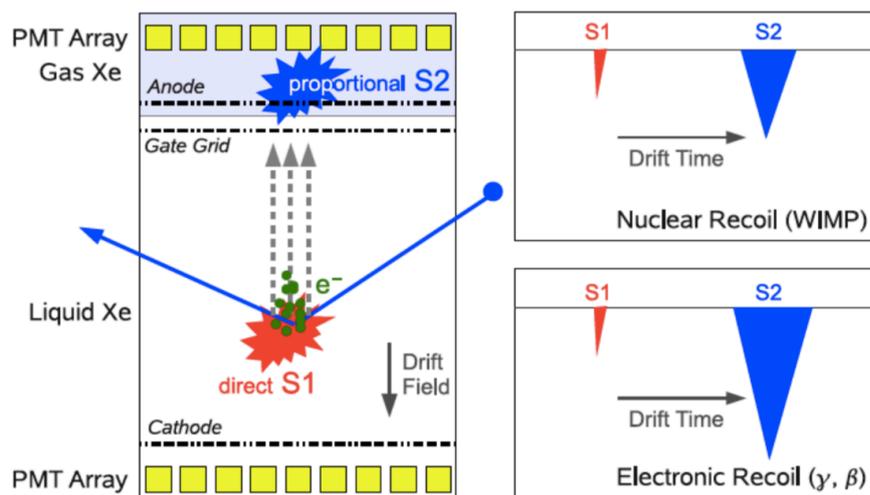


図 2.1: 2相式 TPC 検出器の検出原理 [14]

S1 と S2 の時間差は電子のドリフト時間に対応しており、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、S2/S1 の信号の大きさの比が WIMP や中性子による原子核反跳の方がバックグラウンドとなる電子反跳より小さいため、粒子識別が可能である。

2.2.2 代表的な2相式 TPC

現在、暗黒物質直接探索において XENON 実験¹や LUX 実験を代表とした気体と液体の2相のキセノンを用いた2相式 TPC 検出器が稼働している。LUX 実験はアメリカで行われた実験で使用しているキセノンは約 350 kg、XENON 実験はイタリアで行われている実験で、XENON100 実験では約 170 kg の液体キセノンを用いて実験が行われた。図 2.2 に示すように直径 41.3 cm、縦 80 cm の容器に 99 kg の液体キセノンの TPC の外領域と直径 30.6 cm の TPC 部には 62 kg の液体キセノンが入っている。図 2.3 のように光電子増倍管 (PMT) は上下に並べてあるが、上下で並べ方が異なる。上は 98 本の PMT が同心円形状に配置され、下は 80 本の PMT が縦横に稠密に配置されている。この理由は、XENON100 は上 PMT で S2 を主に捉え発生位置の再構成をするために使われ、下 PMT は S1 を高い収集効率で光子を検出するために用いられている。その上下の PMT の間にカソードとメッシュ構造をしたアノードが約 30 cm 離れた位置に設置されている。これにより縦方向のドリフト電場が形成され、ガス相に 10 kV/cm 以上の電場を形成することで十分な S2 光が発生し、100 %に近いドリフト電子の検出が可能となっている。2相式検出器は下層に液相、上層

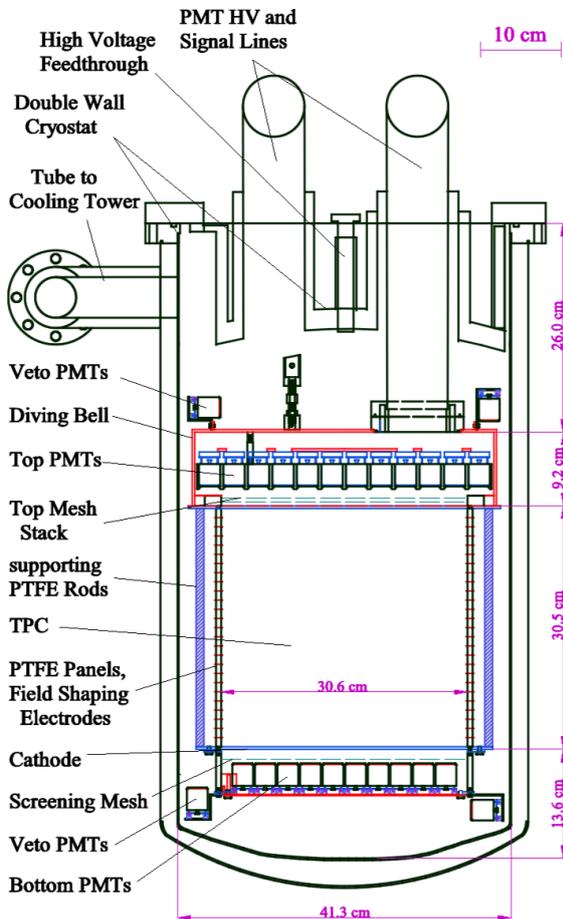


図 2.2: XENON100 のセットアップ [14]

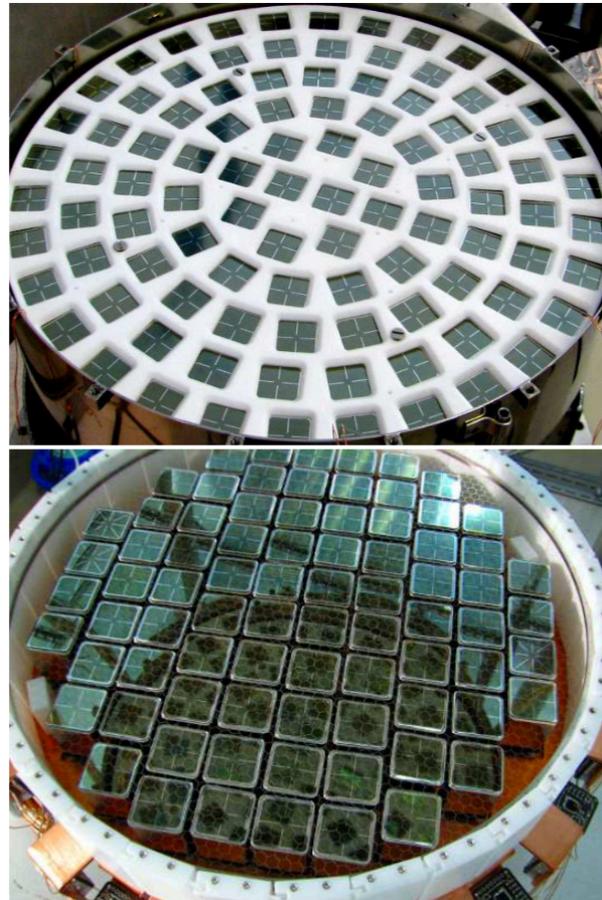


図 2.3: XENON100 の PMT [14]

が液相と検出器とドリフト方向の自由度があまりない。また、気相に電子をドリフトさせるために縦方向の電場を形成する必要があり、PMT を側面に設置することが困難である。上下の PMT のみで光を捉えるため、観測できる光量の下限が高くなってしまう。

¹現在約 2 t の液体キセノンを用いた XENON1T 実験へと現在大型化が進んでいる。

2.3 1 相式シンチレーション検出器

1 相式シンチレーション検出器は液相のみのシンチレーション検出器のことである。ここでは、代表的な液相のみの 1 相式シンチレーション検出器である XMASS 実験について説明する。

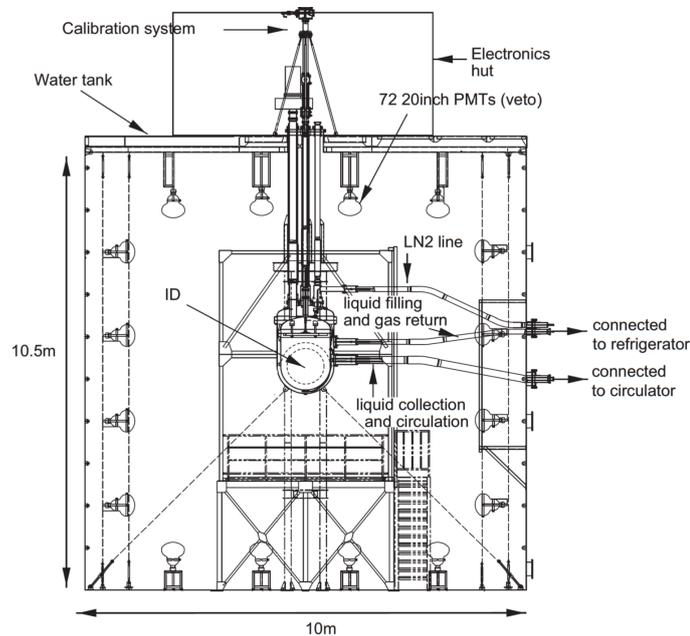


図 2.4: XMASS 概観

2.3.1 XMASS 実験

岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山内地下 1000 m で行われている XMASS 実験は、宇宙線によるバックグラウンドを可能な限り抑えている。XMASS 検出器は 1 トン以上の液体キセノンを用いた大型で低バックグラウンドな検出器である。図 2.4 のようにバックグラウンド排除用の veto 検出器として稼働している純水が入った外検出器 (OD) 容器があり、その中に液体キセノンが入っている内検出器 (ID) 容器がある。外検出器には 72 本、内検出器には 642 本の PMT が設置されている。

2.3.2 XMASS 実験の問題点

直径約 80 cm の容器内には 835 kg の液体キセノンが入っており、そのうち中心から半径 20 cm の領域をキセノンの自己遮蔽能力によってバックグラウンドの少ない有効体積としており、この領域内の事象を再構成することで有効体積中で発生したイベントを選び出している。主に 642 本の PMT の光量分布から反応位置を再構成している。しかし、検出器内壁に存在する放射性不純物由来の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問題がある。これは、PMT 同士の間は無酸素銅製ホルダーがあることや PMT の窓、光電面の反射率や透過率などが原因で PMT 付近で発生した光を捉えられないことがあるため、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ためである (図 2.5)。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た。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。そして、電場を形成していないため、2 相式のように S1/S2 比を用いた粒子識別によるバックグラウンドを取り除く機能を持っていない。

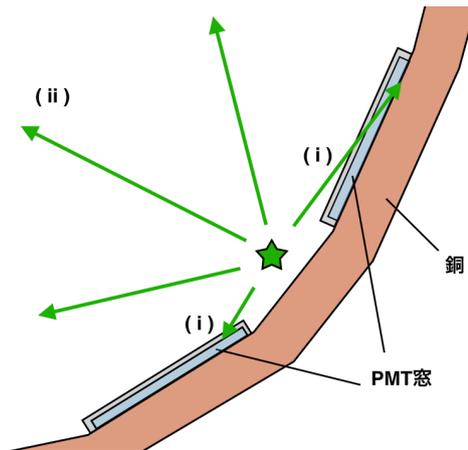


図 2.5: 検出器壁内に含まれる放射性物質由来の検出器壁側で発生するイベントが検出器中心部で発生したイベントと似た光量分布を形成するため、誤ってイベント発生位置を再構成してしまう。(i) は近くの PMT に僅かに入る光子。(ii) は遠方の PMT に届く光子。

そこで、これらの問題を解決する一つの方法として 1 相式検出器にも TPC 機能を導入し S2 も扱う方法が考えられる。

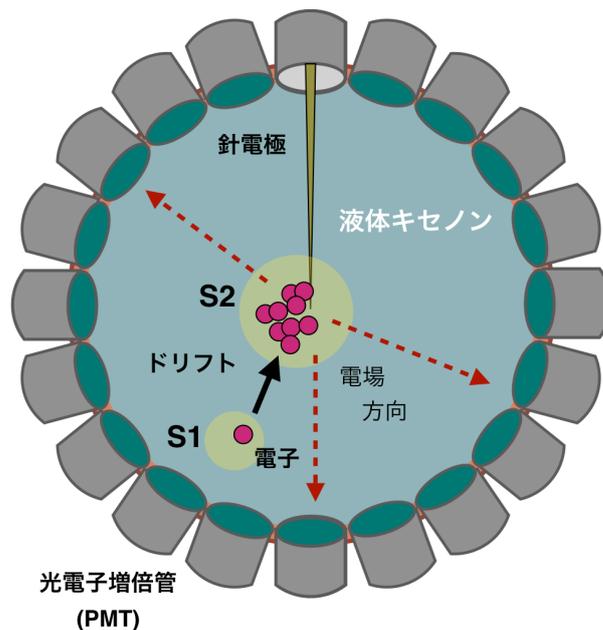


図 2.6: 球状 1 相式 TPC 検出器のイメージ

2.4 液相 1 相式検出器への TPC 機能導入

液相 1 相式シンチレーション検出器と液相 1 相式 TPC、2 相式 TPC の特徴を表 2.4 にまとめた。1 相式の利点としては液相のみなので TPC 導入する際、容器の形状を選ばず 1 相式検出器に応用がしやすいことが挙げられる。球形である XMASS 検出器のように全体を PMT で囲むデザインが可能のため高い光電面被覆率を実現でき、TPC 機能を導入することで光量のみで解析するより反応位置再構成と粒子識別の精度を高

められる (図 2.6)。ただし、先行研究より液体キセノン中で 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を形成する必要があることが明らかになっている。また、報告されている S2 の最小エネルギーは ^{109}Cd の 22.2 keV の γ 線に対するものであり、さらに 1 相式での S1/S2 比による粒子識別の実現はまだ報告されていない。次章では 1 相式液体キセノン TPC を用いた先行研究を紹介する。

表 2.4: 各検出器の特徴

検出器	液相 1 相式シンチレータ	液相 1 相式 TPC	2 相式 TPC
形状の自由度	高い	高い	低い
光電面被覆率	高い	高い	低い
イベント発生位置の再構成	Δ	\circ	\circ
S2 発生の電場閾値	-	490 kV/cm 以上	10 kV/cm 以上
S1/S2 比による粒子識別	\times	\circ	\circ
暗黒物質直接探索実験	XMASS 実験	無い	XENON 実験, LUX 実験

第3章 1相式液体キセノンTPCを用いた実験

本章では、過去に行われた液体1相式TPCを用いて行われた実験を紹介する。ワイヤー電極を使用して電場を形成し、液体キセノン中での電子の比例増幅、S2発生に必要な電場の閾値を明らかにした実験を説明した後、神岡にある1相式液体キセノンTPCテストベンチを利用したこれまでの実験についても説明する。

3.1 先行研究1 (液相における電荷増幅とS2観測)

1979年にK. Masudaによって図3.1の左に示すセットアップで ^{207}Bi 線源を用いた1相式液体キセノンTPCの実験が行われた[16]。液体キセノン中にPMT1個と箱型の比例計数管が浸されており、PMT側にあるメッシュ状のGNDワイヤーに ^{207}Bi 線源がつけられている。4kVで印加された箱型の比例計数管の中央にあるタングステンワイヤーに4kV以上の電圧を印加している。この実験で用いられたタングステンワイヤーは直径 $4\ \mu\text{m}$ から $20\ \mu\text{m}$ までの6種類の異なる直径のワイヤーでそれぞれ測定されている。

^{207}Bi 線源から0.55 MeV、1.05 MeVの γ 線と0.976 MeVの β 線によるS1が線源付近で発生し、S1発生に伴って生成した電子がワイヤー方向へドリフトされてワイヤ表面付近でS2が発生する。PMTで観測される光量とワイヤーで読み出される電荷を用いて解析が行われた。図3.1の右は実験で得られたオシロスコープの信号だが、S1の後に電荷増幅とS2の発生が観測されていることが確認できる。

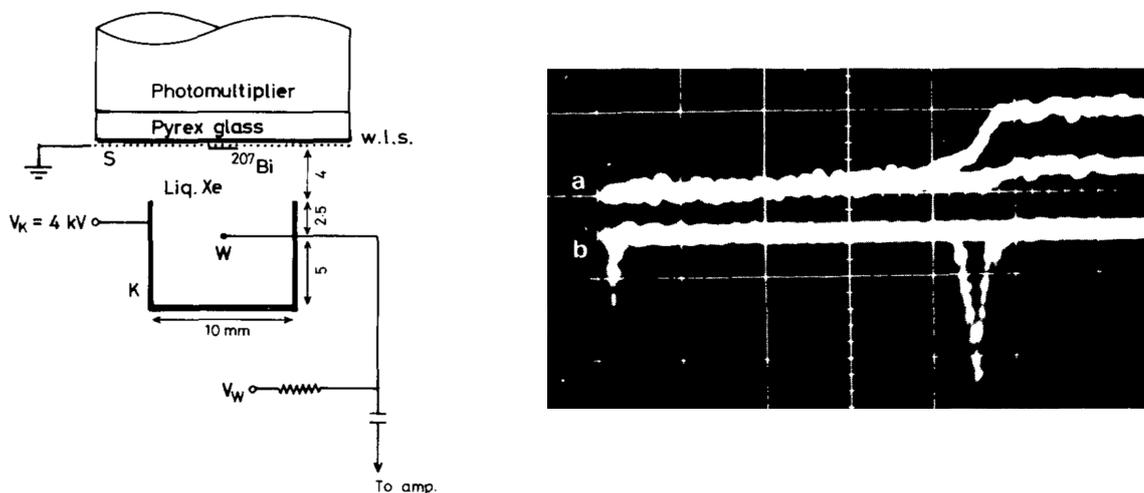


図 3.1: 左図: K. Masuda による実験のセットアップ。Wがワイヤー、Kが比例計数管の陰極、Sが ^{207}Bi 線源のついたメッシュ状の電極。Sは0V、Kは4kVに固定され、Wには4kV以上の電圧が印加されている。右図: 実験で得られたオシロスコープの信号。aが比例計数管で読み出された電荷信号、bがPMTで観測される光量。S1の後に電荷増幅とS2の発生が観測されている[16]。

図3.2の右図から電圧が大きいほど高い電荷増幅率が見られ、ワイヤーの直径が小さいほど低い電圧で電荷増幅が発生していることが確認できる。また、この実験で得られたS2光量の電場依存性から、表3.1のようにそれぞれのワイヤー直径でのS2発生に必要なワイヤ表面付近の電場の下限値が求められた。

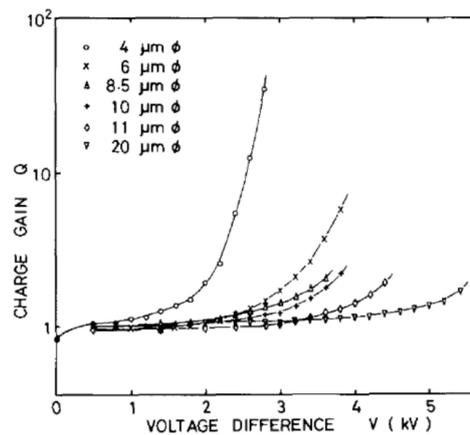


図 3.2: 5.5 MeV の α 線の S1 と S2 の電場依存性 (先行研究 1)[16]。

表 3.1: 各ワイヤー直径ごとの S2 発生に必要な電場の閾値 (先行研究 1)[16]

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

3.2 先行研究 2 (S2 観測における下限エネルギー)

1993 年には S. Suzuki らによって図 3.3 のセットアップで ^{241}Am 線源と ^{57}Co 線源、 ^{109}Cd 線源を用いた 1 相式液体キセノン TPC の実験が行われた [17]。PMT の前に GND を接着させた石英ガラスが置かれ、その下にアノードワイヤー、線源が置かれたカソードの順で設置されている。アノードは内直径 32 mm のステンレス製のリング上に 2 mm 間隔で直径 3 ~ 4.5 μm の金メッキされたタングステンワイヤーが配置されている。S1 が線源付近で発生し、S1 発生に伴って生成した電子がワイヤー方向へドリフトされてワイヤ表面付近で S2 が発生する。PMT で観測される光量とワイヤーで読み出される電荷を用いて解析が行われた。

^{241}Am 線源から発生する 5.5 MeV の α 線由来と ^{57}Co 線源から発生する 122 keV 由来の S1 と S2 の光量電場依存性が観測されている。図 3.4 からそれぞれ電場を大きくするほど S1 が減少し S2 は増加している。また、 α 線より γ 線の方が S1 の減少比率と増加率が大きいことも確認できる。

また、図 3.5 で見られるように ^{109}Cd 線源から発生する 22 keV 由来の S2 が観測できたと報告されている。ただし、22 keV に関する詳細な解析結果は報告されていない。

3.3 先行研究 3 (S2 ゲインファクターの算出)

2014 年に E. Aprile らによる研究 [18] が行われている。実験装置は図 3.6 のようにステンレス製の枠内にワイヤーが張られた 4 層構造になっている。protection grid、gate grid、cathode は、それぞれ直径 100 μm のタングステンワイヤー 9 本がはんだ付けされている。anode は金メッキタングステンワイヤー 1 本がはんだ付けされており、ワイヤーの直径が 5 μm のものと 10 μm のものの 2 種類をそれぞれ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プリアンプによって電荷の読み出しも行われている。protection grid は 0 kV に固定されており、cathode、gate、anode には

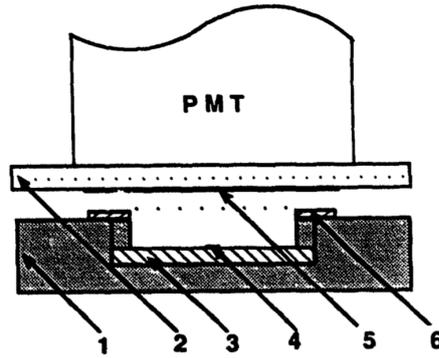


図 3.3: S. Suzuki らによる実験のセットアップ (先行研究 2)[17]。1: HV 絶縁体, 2: UV 石英ガラス, 3: ステンレス製のカソード, 4: 線源, 5: GND, 6: アノード。アノードは内直径 32 mm のステンレス製のリング上に 2 mm 間隔で直径 3 ~ 4.5 μm の金メッキされたタングステンワイヤーが配置されている。

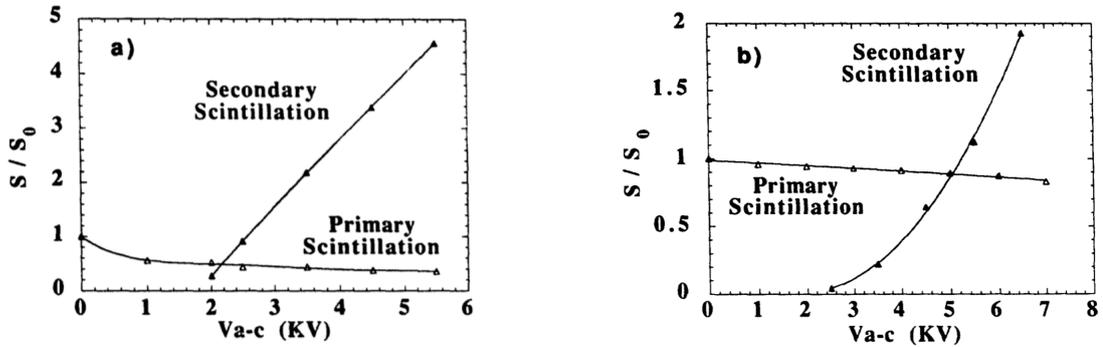


図 3.4: 左図: ^{57}Co 線源の 122 keV γ 線由来の S1 と S2 の電場依存性。右図: ^{241}Am 線源の 5.5 MeV α 線由来の S1 と S2 の電場依存性 (先行研究 2)[17]。

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 で一定にし、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 3.00 kV としている。これにより、 ^{210}Po 線源付近で S1 と同時に発生した電子が anode と gate grid、cathode で形成されてきた電場によって上方へドリフトし、anode ワイヤー付近の高電場領域で S2 が発生するようになっている。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は図 3.7 に示したようになった。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。また、ワイヤーが細かい方が低い電圧で S2 が発生している。得られた結果は式 3.1、3.2 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。

$$\Delta N_e = N_e \theta_0 \exp\left(-\frac{\theta_1}{E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_2}\right) \Delta \vec{x} \quad (3.1)$$

$$\Delta N_\gamma = N_e \theta_3 (E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_4) \Delta \vec{x} \quad (3.2)$$

ここで、 ΔN_e と ΔN_γ はそれぞれ N_e 個の電子が距離 $\Delta \vec{x}$ を進む間に比例増幅によって発生する電子の数と光子の数である。ここで θ_0 は電離電子ゲイン因子、 θ_1 は電離電子ゲインの傾き、 θ_2 は電荷増幅に必要な電場下限値、 θ_3 は S2 ゲイン因子、 θ_4 は S2 発生に必要な電場下限値、 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 はワイヤーの直径、 $\Delta \vec{x}$ は電子のドリフト距離である。式 (3.1)、(3.2) を積分したものが電子数の変化量と S2 の総光子数になる。5 μm 、10 μm のワイヤーそれぞれのデータをフィットした結果を θ_i を求めるパラメータとして表 3.2 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 S2 が発生するために必要な電場は 416 ± 13 kV/cm、

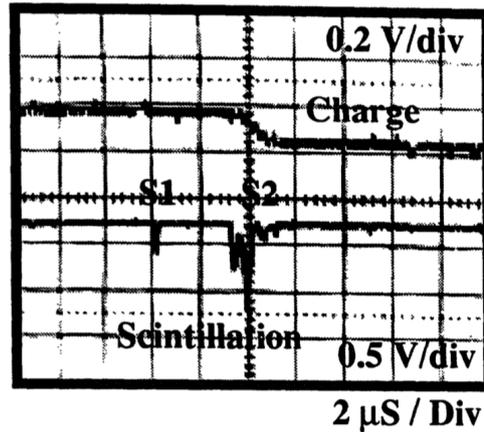


図 3.5: ^{109}Cd 線源の 22.2 keV 由来の S2(先行研究 2)[17]

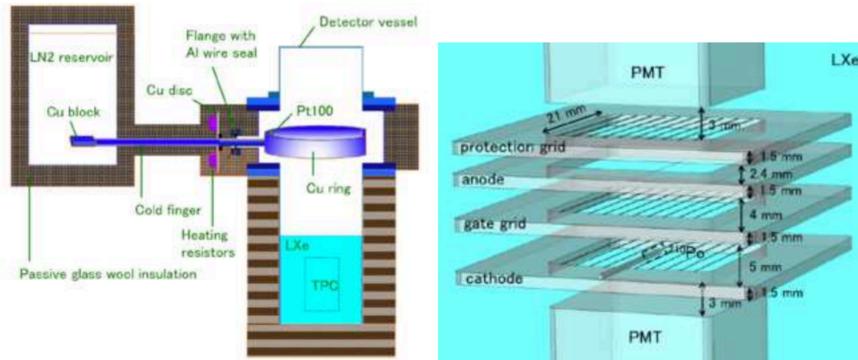


図 3.6: E. Aprile による実験のセットアップ (先行研究 3)[18]

$399 \pm 7 \text{ kV/cm}$ と、電荷増幅が起こるのに必要な電場は $750 \pm 1 \text{ kV/cm}$ 、 $586 \pm 47 \text{ kV/cm}$ と求められている。

また、各ワイヤー直径ごとの1電子あたり発生する光子数を求めることができる S2 ゲインファクターは $10 \mu\text{m}$ のワイヤーで1電離電子単位ワイヤー電極の電場と直径あたりの光子数は $1.68 \times 10^{-2} [\text{photon}/e^-(\text{kV}/\text{cm} \cdot \mu\text{m})]$ と求められている。

3.4 先行研究 4 (GEM 電極を用いた実験)

ワイヤー以外の増幅電極として Gas Electron Multiplier (GEM) を用いた研究がある。GEM とは図 3.9 のように薄い絶縁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 電極を用いて約 7.5 kV/cm の電場で 4 MeV の α 線による S2 が見え始め、ワイヤーを用いた研究に比べて S2 観測に必要な電場の閾値が非常に低い結果が報告されている [20]。しかし、この結果は後の実験で否定されており、液体キセノン中に GEM によって発生した泡でガス増幅が起き S2 が発生したと予想されている。また、神岡宇宙素粒子研究施設内にある 1 相式液体キセノン TPC テストベンチを利用して、図 3.8 のセットアップで毛笠莉莎子が Glass GEM(図 3.9) を電極に用いた研究を行っている。図 3.10 に示すように穴内部に 38 kV/cm の電場を形成することで S2 の観測を狙って実験が行われたが、S2 は観測されていない [22]。よって、液体キセノン中での S2 の発生には先行研究 3 で示された約 400 kV/cm 以上の電場が必要になると考えられている。

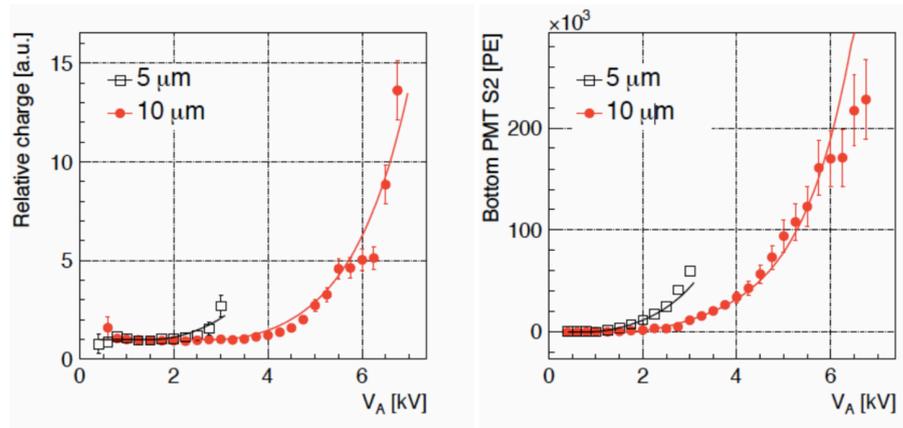


図 3.7: 先行研究 3 におけるプリアンプからの信号と下 PMT で観測された S2 信号。横軸は gate grid と anode の電位差 [18]。

表 3.2: 先行研究 3 において (3.2),(3.3) 式でフィッティングをした結果 [18]

parameter	10 & 5 μm	10 μm	5 μm
θ_0 :charge gain factor[$1/(\mu\text{m}\cdot\text{e}^-)$]	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[PE/(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

3.5 先行研究 5 (ワイヤー電極を用いたテストベンチの実験)

菅澤佳世によって、毛笠莉莎子が用いた液体 1 相式 TPC テストベンチを利用しワイヤー電極での S2 観測を目的とした実験が行われた。図 3.11 はその時のセットアップの図である。ワイヤー電極は直径 10 μm の金メッキタンングステンワイヤーで GND は直径 100 μm のタンングステンワイヤーである。図 3.12 に示すような針線源に ^{241}Am が SUS パイプ内部に埋め込まれたものを使用した。図 3.13 はこの線源の放射線をゲルマニウム検出器で測定した結果であり、59.5 keV 以下のエネルギーの γ 線や X 線のピークは見られず、針線源から十分に放射されていないことがわかる。この線源による S1 と S2 の観測をワイヤー電極に 0 ~ 5 kV まで印加して行われた。

この実験では S1 は ^{241}Am の 5.5 MeV の α 線由来と 59.5 keV の γ 線由来はそれぞれ観測されたが、S2 は 5.5 MeV の α 線由来のみが観測され 59.5 keV の γ 線由来は観測されなかった。また、 ^{252}Cf と ^{137}Cs の 2 つの外部線源による中性子と γ 線の粒子識別もできていなかった。59.5 keV の γ 線由来は観測されないことと約 2 MeV の中性子と数 MeV の γ 線の粒子識別ができなかったこと、また、図 3.14 の線源とワイヤー間に、低エネルギーの γ 線や外部線源が生成する電子を高い収集効率でドリフトできるだけの平行性と大きさを兼ねた電場が形成されておらず、ドリフト中に電子が失われたと考えられている。その他にも、図 3.15 のように PMT の信号をそのままの波高で FADC に取り入れているため、S2 で観測されていた 5.5 MeV の α 線の S1 が FADC でサチレーションしていたという問題もあった。サチレーションしていたイベントを割り出すと図 3.16 のように 59.5 keV ピークより大きいエネルギーのイベントはほとんどサチレーションしていることが確認できた。

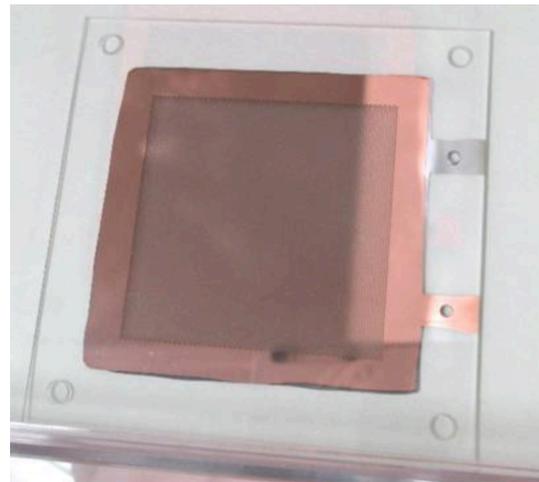
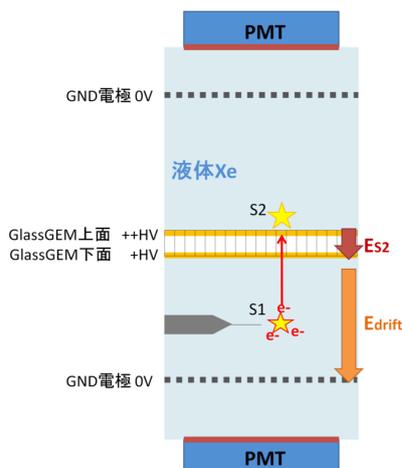


図 3.8: 毛笠による実験のセットアップ (先行研究 4)[22]

図 3.9: 実験で用いた GEM[22]

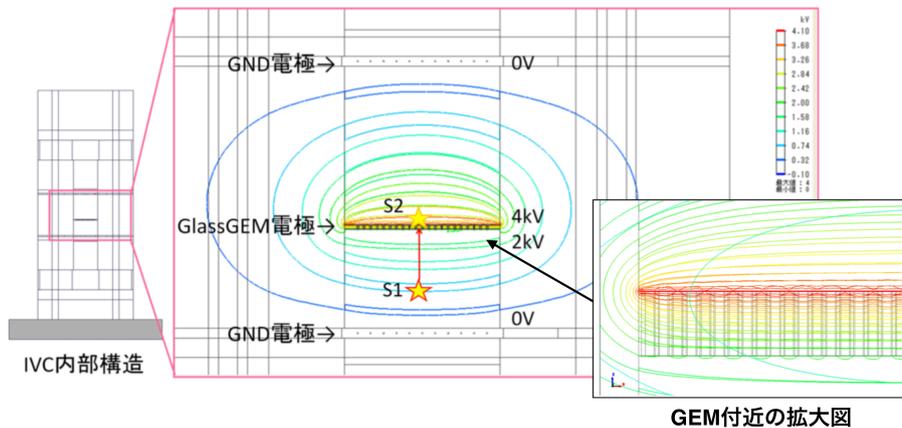


図 3.10: 毛笠のセットアップで Femtet による電場計算結果 (先行研究 4)[22]

3.6 先行研究のまとめと本研究の目的

先行研究では S2 の観測には 410 kV/cm 以上の電場を形成する必要があると報告されている。S2 観測の最低エネルギーは 22 keV であった。また、先行研究 5 で用いたセットアップによる実験では針電極とワイヤー電極間のドリフト電場の強さと平行性が不十分であり、さらに、針線源は ^{241}Am がパイプ内に埋め込まれた設計になっているため 59.5 keV より低いエネルギーの γ 線と X 線が放射されず、 59.5 keV 以下の S2 が観測されなかった。

WIMPs の探索を行うためには、キセノン原子核の典型的な反跳エネルギーである数十 keV のエネルギーの S2 の観測をテストベンチで成功させる必要がある。さらに、WIMPs のイベントレートは 1 トンのキセノンを用いて 1 年間測定して数十イベント程度と低いため、電子反跳をするバックグラウンドイベントと原子核反跳をする WIMPs のイベントを S1/S2 比を用いて識別する必要がある。そこで、本研究では低いエネルギー閾値を設定し、針線源からは放射されなかった ^{241}Am 線源の 26.3 keV 、 13.9 keV の γ 線や X 線が放射されるように新たに表面型 ^{241}Am 線源を導入して報告されている S2 の最低エネルギーである 22.2 keV より低い 13.9 keV の S1、S2 の観測を試みた。また、 γ 線、X 線由来のイベントと α 線由来の電子反跳イベント、 ^{252}Cf 外部線源由来の中性子の原子核反跳イベントの識別を S1/S2 比で行うことも目的に、TPC を構成する PTFE スパースの再設計や S2 観測に必要な電場を形成するために電場設計と線源ホルダーの設計、

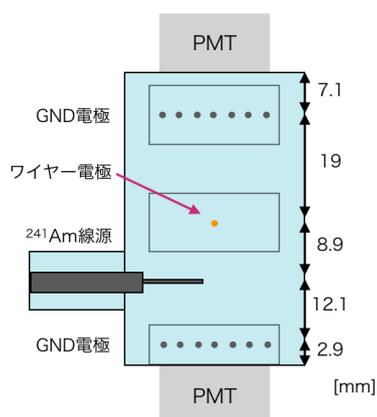


図 3.11: 菅澤による実験のセットアップ (先行研究 5)[23]

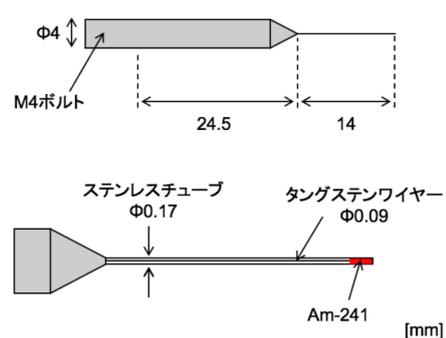


図 3.12: 実験で用いられた ^{241}Am 針線源 [23]

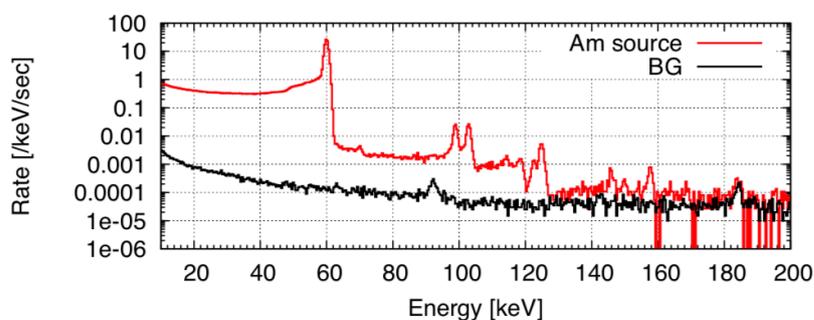


図 3.13: 図 3.12 の ^{241}Am 内部針線源をゲルマニウム検出器で測定した結果 [23]。59.5 keV より低い γ 線や X 線のピークは観測されていない。

ワイヤー電極と線源間の距離の調整、DAQ の組み替えなどを行った。次の章では新しく設計した検出器について説明する。

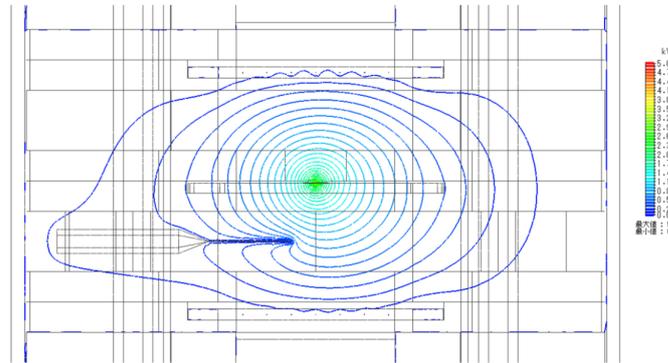


図 3.14: 菅澤のセットアップで Femtet による電場計算結果 (先行研究 5)[23]

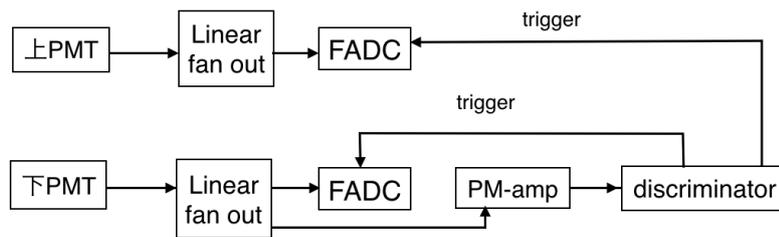


図 3.15: 先行研究 5 の実験で組み立てていた DAQ

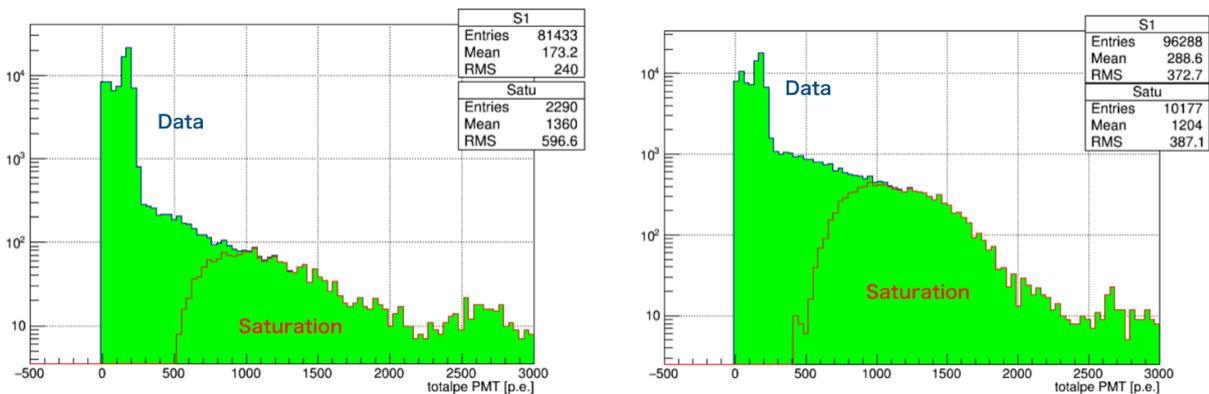


図 3.16: ワイヤ電圧 0 kV での S1 スペクトルで、青が全イベントで赤がサチレーションしていたイベント。左図: ^{241}Am 内部線源のみ。右図: ^{241}Am 内部線源と ^{137}Cs 外部線源を用いた実験。

第4章 1相式TPCテストベンチを用いた実験

本章では、2018年10月31日から2018年11月15日の間に行った1相式TPCテストベンチを用いた実験のセットアップやDAQ回路、圧力と温度の状態を説明する。3章5節で説明した2017年8月に行われた針線源を用いた先行研究の上下PMTの光量相関をシミュレーションで再現することで、光学的パラメータをチューニングし、 ^{241}Am 線源由来の13.9keVの γ 線や α 線を観測できると考えられるセットアップを設計した。また、電場シミュレーションを行ってS2観測が可能な電場が形成できるか確認した。これらのシミュレーションについても説明する。

4.1 実験装置

3章5節で紹介した先行研究で用いられていた棒状の内部線源では、 α 線と低いエネルギーの γ 線がSUSの外に放射されないという問題があったので、表面内部線源を設計し導入した。また、電場シミュレーションにより、ワイヤー電極の電子収集効率を向上させるために線源とワイヤー電極の距離を菅澤佳世による先行研究(10 mm)よりも近い8.1 mmに近づけた。そして、シンチレーション光のシミュレーションにより、外部線源の安定したS1とS2測定のためにスペーサーの形状も再設計した。



図 4.1: テストベンチの外観

4.1.1 真空容器

外真空容器や内容器、ガスラインは3章5節の先行研究と同様のカブリ数物連携宇宙研究機構神岡分室内にある装置を利用している。本実験で用いた1相式TPCのテストベンチ(図4.1)はSUS304でできた外真

空容器 (OVC) とその中に同じく SUS304 でできた内容器 (IVC) で構成されている。IVC を外容器外から断熱するために OVC 内はターボ分子ポンプで 10^{-1} Pa のオーダーまで真空引きをしている。また、IVC 内に導入するキセノンガスの純度を保てるように IVC 内はターボ分子ポンプで 10^{-5} Pa のオーダーまで真空引きしている。

IVC 内は IVC の上端に設置しているパルスチューブ冷凍機で冷却されている。2つのゲッター (API AG-100-Xe, SAES Monotorr PS4-MT3-R-1) を使用しキセノン内の水蒸気などの不純物を除去した状態で IVC 内に封入し冷却して液化させている。液体キセノンの状態は、熱交換円盤、熱交換ボックス外側、熱交換器、IVC 外側の底に設置された温度計で確認している。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 制御によってコールドヘッドに取り付けられたヒーターの出力をコントロールし調節する。また、熱交換ボックスに巻きつけられた液体窒素ラインに液体窒素を導入して緊急時に冷却を行うことになっている。

4.1.2 TPC の設計

内容器の中のスペーサや内部線源は今回改めて設計を行い、導入したものである。それに伴い電場計算は改めて行う必要があった。ここでは、それらについて説明する。

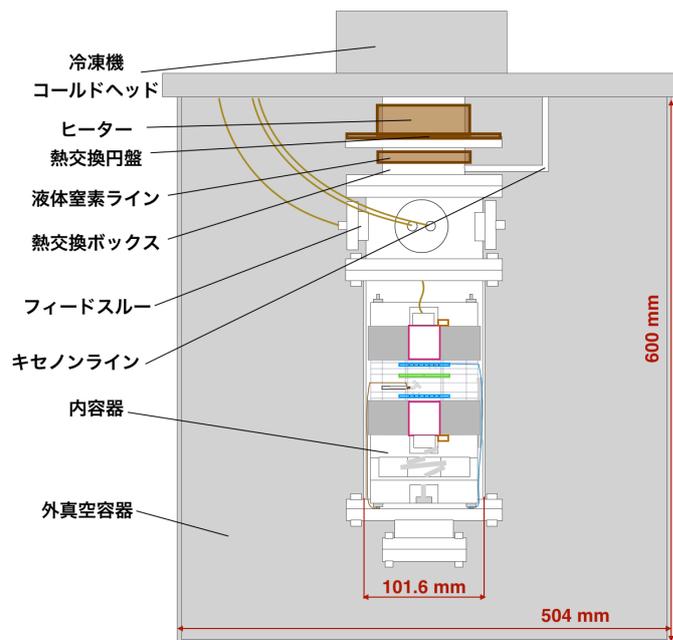


図 4.2: 本実験のセットアップ

TPC 内のジオメトリーは図 4.3 のように $\phi = 101.6$ mm の内容器内で主に PTFE のスペーサーで構成されている。上下には浜松フォトニクス社製の PMT、R8520-406(LV1297(上) と LV1288(下)) を使用している (表 4.1.2)。上下の PMT は GND をとるため SUS で作成されたホルダーで固定されており、その間には PTFE で作成された $\phi = 95$ mm の円柱のスペーサーがある。スペーサーは中央に液体キセノンが入る 32 mm \times 32 mm の穴が縦に開けられている。外部線源を用いた実験で有効体積以外で S1 が発生しにくくするため、先行研究で行われていた実験で用いられていたスペーサーよりも配線用の穴などを小さく再設計したものである。詳細なスペーサーの設計図は Appendix として図 B.1 に示している。

内容器、PMT の光電面、PMT ホルダー、GND ワイヤーは GND に落としている。また、線源ホルダーもワイヤーを巻きつけ内容器に接続させ GND に落としている。上下 GND ワイヤーは 35 mm 離れている。

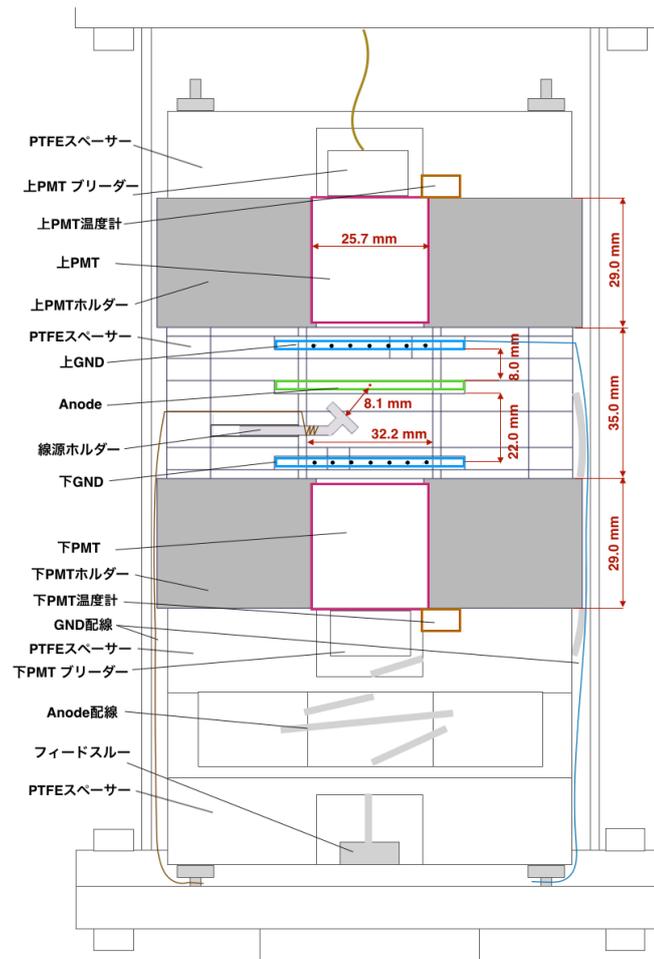


図 4.3: 本実験の TPC 内のセットアップ

その間にワイヤー電極と線源ホルダーが設置されていて、ワイヤー電極と ^{241}Am 内部表面線源までの距離は 8.1 mm にした。

ワイヤー電極

図 4.5 にあるようにガラスエポキシ (FR4) 製フレームの外寸は 42 mm 四方、内寸は 32 mm 四方の正方形で、中心に 1 本の直径 $10\ \mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤーが無鉛半田によって厚みは 1.6 mm で、フレームの上の一部に厚み $35\ \mu\text{m}$ の銅箔にはんだ付けされている。ワイヤー電極への電圧印加にはカプトン被覆ケーブルを使用している。ケーブルの電極フレームとの接続部分は曲げやすいようにカプトンを剥いている。その部分から放電を防ぐため、圧着端子は熱収縮チューブで二重に覆っている。ケーブルの電極接続部分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を取り付けている。ワイヤー電極の印加には MHV のコネクタが付いたケーブルを、その他は SHV のコネクタが付いたケーブルを用いた。

ワイヤー電極への電圧印加にはマクセック社製の直流高圧電源 (DMS-30K01PLRPBX2[25]) を使用した。最大 30 kV まで印加可能で、 $170\ \mu\text{A}$ 以上の電流が流れると電圧が落ちるようになっている。

^{241}Am 線源

5.9 MeV の α 線由来の S1 と S2 を安定的に観測するため今回新たに導入した。図 4.6 のように直径 8 mm、厚さ 1 mm の円盤系となっている。中央には縦 1 mm、横 1.2 mm 四方の白金版に ^{241}Am が蒸着されてい

表 4.1: 上下の PMT の性能 (印加電圧:800 V、光源:2856K 標準タングステンランプ、常温下、浜松フォトリニックスの試験成績表より)

Serial No.	陰極感度 (Sk)[$\mu\text{A}/\text{m}$]	陽極感度 (Sp)[A/m]	陽極暗電流 (Idb)[nA]	陰極青感度指数 (Skb)
LV1297(上)	96.8	343.0	0.78	11.50
LV1288(下)	105.2	258.0	0.78	11.90

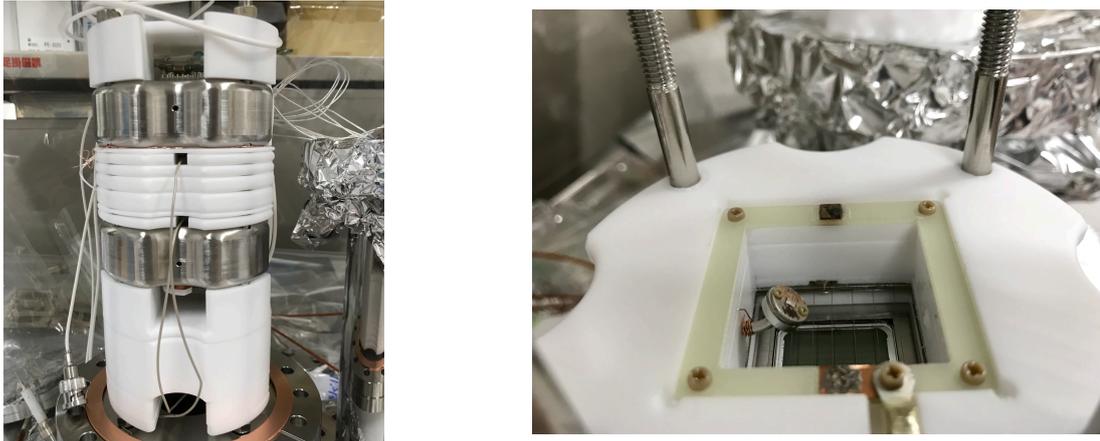


図 4.4: 左図: TPC の外観である。上下の穴は GNG 配線用に空けられたものである。右図: TPC の内部。中央には直径 $10\mu\text{m}$ のワイヤー電極、左側から飛び出しているものが線源ホルダー、下に見える 7 本の金属棒は直径 0.1 mm の GND、その下にあるガラスは PMT の Quartz 窓が見える。

る。これを発注した SUS 製の睡蓮花型線源ホルダーに取り付けた。線源ホルダーは長さは 30 mm で、直径は 2 mm の円柱の先端を 45 度曲げて直径 8 mm 、厚み 2 mm の円柱が溶接されている。先端の円柱には 5 mm の間隔をあけてネジ穴をあけ、この部分に直径 8 mm の ^{241}Am 線源をねじ止めして固定した。この設計は、線源表面付近で発光する S1 とワイヤー電極付近で発光する S2 に対して、線源ホルダー自身になるべく上下の PMT の影にならないようにしている。また、針線源の問題であった平行電場形成の不十分性を解決するため、円盤状になっている線源ホルダーの先端を 45 度曲げることで線源からワイヤー電極までの平行電場を形成している。

4.1.3 内部線源と外部線源

本実験で用いた線源について説明する。表 4.2 にまとめたように上述の内部線源に加え 3 つの外部線源を用いている。

内部線源

すでに述べたように液体キセノン中に浸された線源ホルダーに設置された内部線源には ^{241}Am を用いている。主な放射線は表 4.3 にあるようなものである。 ^{241}Am は ^{237}Np に α 壊変する際に 5.5 MeV の α 線が生成される。また、 59.5 keV (35.9%) や 33.2 keV (0.13%)、 26.3 keV (2.4%) の γ 線も生成される。 ^{237}Np の L 殻から 13.9 keV (42.0%) の特性 X 線もある。より詳しい壊変図は Appendix として図 A.1、A.2 に示した。

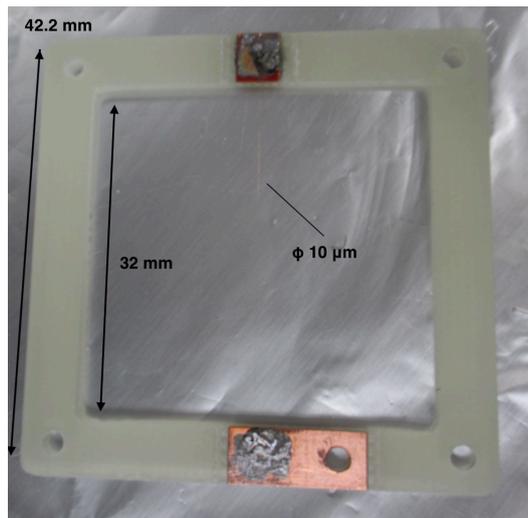


図 4.5: 本実験で用いたワイヤー電極とフレーム [23]。ワイヤー電極がフレームにある銅箔にはんだ付けされている。

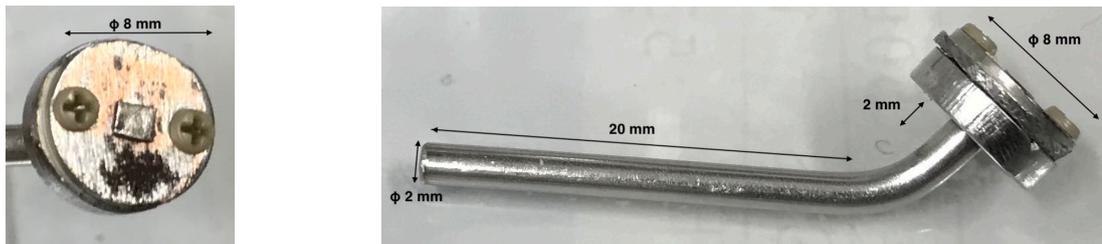


図 4.6: 左図: ^{241}Am 内部線源。右図: 睡蓮花型線源ホルダー

外部線源

OVC の外壁から照射する外部線源として ^{137}Cs 、 ^{252}Cf を用いた。 ^{137}Cs は図 4.7 のように 662 keV の γ 線を放射する。 ^{252}Cf は全壊変の 3.1 % は自発核分裂、96.9 % は α 壊変をする。自発核分裂をする際、1 核分裂あたり 3.76 個の中性を放出する。この時の中性子の平均エネルギーは約 2 MeV である。そして、中性子と同時に平均数 MeV の γ 線も放射する。

5 章で説明する電場シミュレーション (図 4.21) から、線源ホルダー接続位置付近のキセノン領域はドリフト電場の大きさが十分でなくあまり平行に形成されてないため、そこで発生した電子がドリフトされにくい。なるべく線源ホルダー接続位置付近のキセノン領域での発光を避けるため、外部線源の設置位置は図 4.8 のように液体キセノン領域の中心位置と同じ高さであり、内部線源ホルダーの接続位置と反対方向にした。

4.1.4 データ収集 (DAQ) 回路

図 4.9 のように本実験の DAQ 回路を組んだ。用いた Flash analog-to-digital converter (FADC) (CAEN 製、DT5751[24]) は 4 チャンネルで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 10 μs の間記録される。

5.5 MeV の α 線由来の信号と 59.5 keV 以下の γ 線や X 線の信号を同時に FADC に記録するために、上下 PMT から出力される信号をディバイダーで二つに分け、一方をそのまま FADC に入力し、もう一方を 16 dB に設定したアテネーターを通して波高を減衰させ FADC に入力した。また、PM-amp で上下 PMT の信

表 4.2: 実験で用いた線源の情報

	線源	強度
内部線源	^{241}Am	100 Bq
外部線源	^{137}Cs (神岡 31)	1.02 MBq
	^{60}Co (神岡 33)	2.47 MBq
	^{252}Cf (神岡 35)	3.7 MBq

表 4.3: ^{241}Am の主な放射線

半減期	主な α 線 [MeV]	放出割合 [%]	主な光子 [keV]	放出割合 [%]
432.2 年	5.388	1.4	26.3	2.4
	5.443	13.0	33.2	0.13
	5.486	84.5	59.5	35.9
			13.9	42.0 (Np-L)

号の波高を 10 倍にし、ディスクリミネータで閾値 (55 mV) を超えた信号をそれぞれコインシデンスさせた信号を FADC のトリガー信号とした。

PMT からの信号をディバイダーで分けた後の信号を keV 領域解析用、ディバイダーで分けた後さらに 16 dB のアテネーターを通しサチレーションしないようにした信号を MeV 領域解析用とした。

4.2 シミュレーションによる検出器設計と理解

本節では、針線源を用いた先行研究で問題となった S1 スペクトルや上下 PMT の S1 光量の相関を理解するために開発した Geant4[27] による光量シミュレーションと、検出器設計において行った有限要素法による電場シミュレーションについて説明する。

4.2.1 シンチレーション光シミュレーション

Geant4[27] に基づき作られた XMASS 検出器のモンテカルロ・シミュレーション (XMASS MC[28]) は、PMT や検出器部材などの構造は正確に再現されており発生したシンチレーション光で発生した光子を全てトラッキングできる。液体キセノンの光学パラメータや検出器部材の反射率などいくつかのパラメータについては、内部較正線源による実データの分布を正しく再現するように決められている。この XMASS MC を改造し、本研究で用いた検出器におけるシンチレーション光の発生と伝播をシミュレーションで再現し、検出器内での光子の振る舞いや上下の PMT の応答、実験結果の理解を深めることができる。また、XMASS MC を利用しているため XMASS 検出器との比較が容易となる。

針線源を用いた先行研究での ^{241}Am 内部線源の 59.5 keV 光電ピークの算出

実験時には PMT のゲインを確認するため、較正用 LED で 1 p.e. を測定した。信号の解析方法としては、FADC のトリガーのタイミングの 150 ns 後から 350 ns 後までの 200 ns 間の ADC 値の平均をペDESTAL 値とした (式 4.1)。1 p.e. 信号の波形面積は FADC のトリガーのタイミングの 400 ns 後から 420 ns 後までの

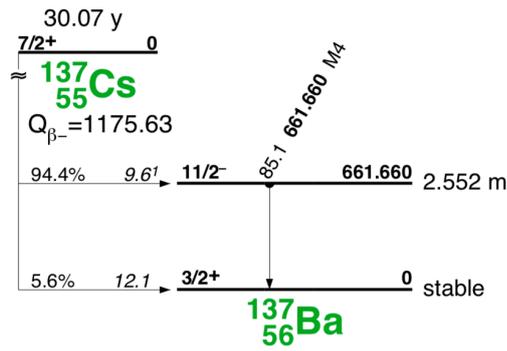
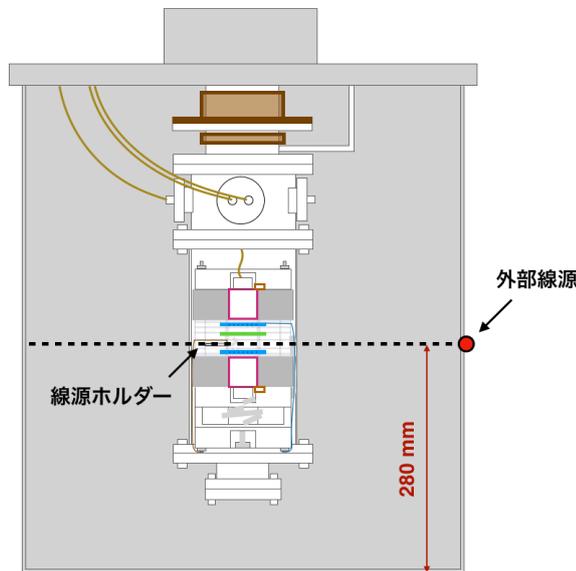
図 4.7: ^{137}Cs の壊変図 [26]

図 4.8: 外部線源の位置

20 ns 間の ADC 値の積分値からペDESTALを引いて計算している (式 4.2)。

$$V_{\text{pedestal}} = \frac{\int_{150\text{ns}}^{350\text{ns}} V_{\text{ADC}} dt}{\int_{150\text{ns}}^{350\text{ns}} dt} \quad (4.1)$$

$$S_{1\text{PE}} = \int_{400\text{ns}}^{420\text{ns}} (V_{\text{pedestal}} - V_{\text{ADC}}) dt \quad (4.2)$$

波形面積のヒストグラムを描くと図 4.10 のように 0 p.e. のピークと 1 p.e. ピークの 2 つが形成される。光電子数 2 つのガウス関数でフィッティングすると、0 p.e. のピーク位置は -0.93 ± 0.03 mV·nsec で、1 p.e. のピーク位置は 56.7 ± 0.8 mV·nsec となった。この結果から、波形面積を光電子数に変換する式は

$$p = \frac{S + 0.93}{57.6} \quad (4.3)$$

となる。

(4.2) 式を利用して、波形面積を光電子数に変換して S1 光量分布を求め、それぞれ 59.5 keV ピークをガウス関数、バックグラウンドを二次関数または三次関数としてフィッティングをすると図 4.11 のようになった。その時のフィッティングパラメータは表 4.4 にあるようになった。59.5 keV における上下 PMT の比は Top/Bot=0.32 だった。

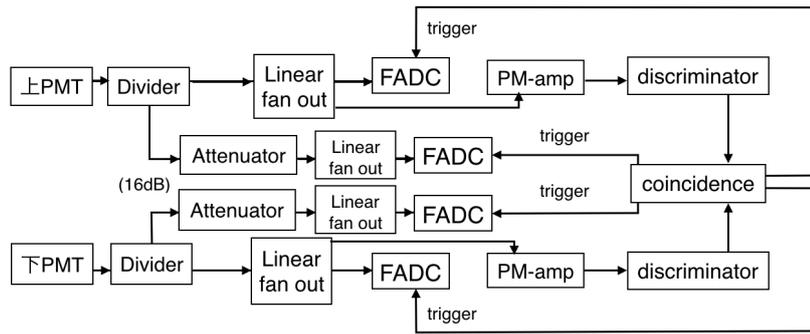


図 4.9: 本実験の DAQ 回路

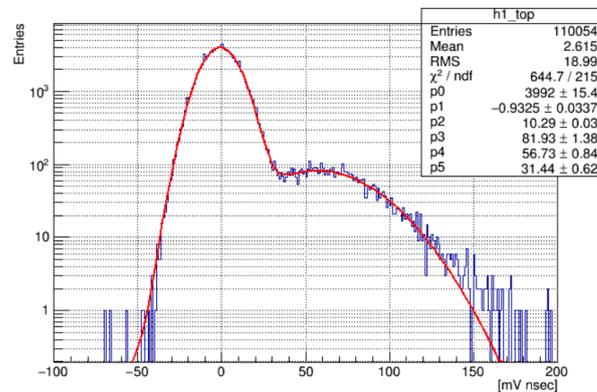


図 4.10: 下 PMT で LED を用いて 1 p.e. を測定した時のヒストグラム

針線源を用いた先行研究のセットアップでの ^{241}Am 内部線源由来の事象のシミュレーション

まず光学パラメータをチューニングするために、3章5節で説明した2017年8月の先行研究をシミュレーションした。ジオメトリーは図4.12のように図3.11で示したジオメトリーを再現した。実物通り線源ホルダー部分のテフロンに直方体の窪みが一つ、ワイヤー電極とGND電極がある部分には配線用の直方体の空洞が計3つある。検出器の線源ホルダー上にある ^{241}Am 線源から生成される59.5 keVの γ 線を仮定して発生させた。このシミュレーションで設定した光学パラメータは表4.5にまとめた。

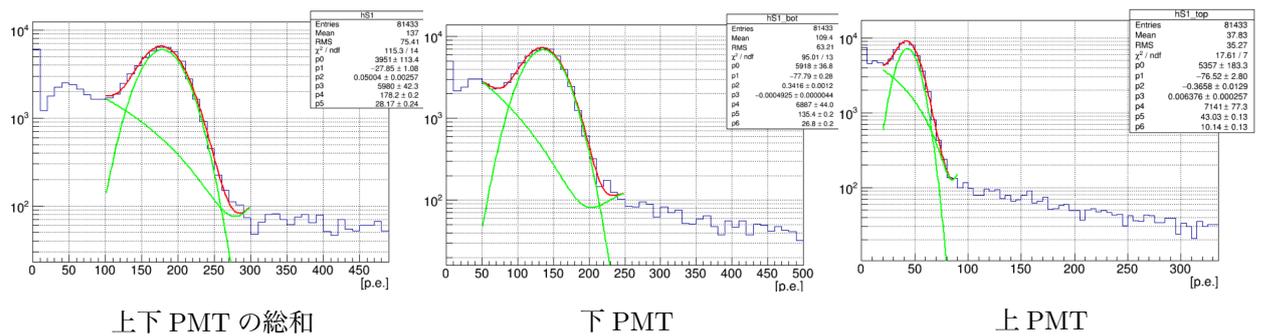
図4.13はGeant4[27]内で実装できる物質の反射率である。各文字は C_{bs} が後方散乱の確率、 C_{ss} が物体の平均表面での反射率、 C_{sl} がマイクロファセット面¹で方向がガウス分布である反射の反射率、 C_{dl} が表面より内部から \cos 分布で反射するランバート反射率、 R はフレネル反射率である。これらの変数の関係は

$$C_{dl} + C_{bs} + C_{ss} + C_{sl} = 1.0 \quad (4.4)$$

となっている。

フレネル反射率は $R=0.5$ で、テフロン表面で光子が物体の平均表面での反射のみ($C_{ss}=1.0$)の場合とランバート反射のみ($C_{dl}=1.0$)有効にした場合のシミュレーションによる光電子数ヒストグラムを、実験結果と比較した(図4.14)。上下PMTの総和のヒストグラムからは59.5 keVのピーク位置に差が無いように見えるが、各PMTごとのヒストグラムを見るとランバート反射と鏡面反射とで59.5 keVピークの位置の違いを見ることができる。図4.15はscatter plotを重ね描きしたものである。上PMT/下PMTの関係は鏡面反射のみを有効にした場合より、ランバート反射のみにした場合の方が下PMTの光電子数を増やし上PMT

¹Geant4では物体表面を微小平面の集合体として扱っており、マイクロファセット面とはその微小平面のことをいう。

図 4.11: ^{241}Am 内部線源で行った実験で測定された各 PMT の光電子数ヒストグラム表 4.4: ^{241}Am 内部線源で行った実験で測定された光電子数ヒストグラムにおける Fitting parameter と分解能

PMT Info	mean [p.e.]	sigma [p.e.]	Resolution [%]
Total	178.2 ± 0.2	28.2 ± 0.2	37.2 ± 0.2
Bottom	135.4 ± 0.2	26.8 ± 0.2	46.5 ± 0.3
Top	43.0 ± 0.1	10.14 ± 0.1	55.4 ± 0.5

の光電子数を減らすことがわかった。また、分解能はランバート反射のみにした時の方がよくなる。実験で得られる分解能は PMT の窓のパラメータや FADC、解析方法によってシミュレーションより分解能が悪くなると考えられる。本研究でのシミュレーションのチューニングでは、光量分布全体を再現することが困難であったため、ピーク位置が最も再現するように、各部材での反射係数を最適化した。

先行研究のセットアップでの外部線源測定のシミュレーション

先行研究のセットアップでの ^{137}Cs 外部線源の光電子数とエネルギーの関係の二次元ヒストグラムを光量シミュレーションによって描くと、図 4.16 のような 3 つのクラスターができた。これは、同じエネルギーの入射粒子でも異なる光量が PMT で観測されていることを意味している。それぞれのクラスターは高い光量のものから順に A、B、C とする。この 3 つのクラスターができる原因を追究するために、それぞれの縞を作るイベントの S1 の位置を調べた。すると、A は中央のキセノン領域で S1 が発生したイベントで、B と C は配線用の直方体の穴や線源ホルダーの固定部分にある直方体の穴 (図 4.17) のキセノン領域で S1 が発生したイベントであることがわかった。図 4.18 は A、B、C それぞれのクラスターを作るイベントの S1 の発生位置を検出器を上から見た平面に射影した二次元ヒストグラムである。

先行研究では ^{252}Cf 外部線源と ^{137}Cs 外部線源を用いた測定で S2/S1 の粒子識別ができていなかったのは、同じエネルギーであるため S1 に伴って発生する電子数は同じで S2 の光量が同じであっても、PMT で観測される S1 にばらつきができてしまうため、S2/S1 の分解能が悪く粒子識別ができなかったと思われる。よって外部線源を用いた測定はスペーサーの形状が影響与えるため、スペーサーの再設計を行い、スペーサーの穴径を最小限にするように変更を加えた。

本実験のセットアップでのシミュレーション

4 章で説明した本実験で構成したジオメトリー (図 4.2) を Geant4[27] で構築し、新しい ^{241}Am 内部線源を導入したとき上下の PMT で観測される光電子数をシミュレーションした。

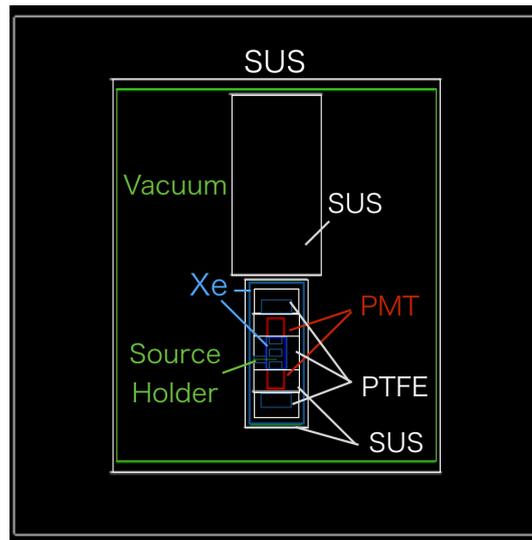


図 4.12: Geant4 内で構築した TPC テストベンチのジオメトリー

表 4.5: 光量シミュレーションの光学パラメータ

物質	特性	値
液体キセノン	吸収長	600 cm
	散乱長	52 cm
	発光量	200 photon/keV
PTFE	反射率	95.0 %
線源ホルダー	反射率	20.0 %
PMT ホルダー	反射率	20.0 %
PMT 光電面	量子効率	30.0 %
石英ガラス	吸収長	7.145 cm

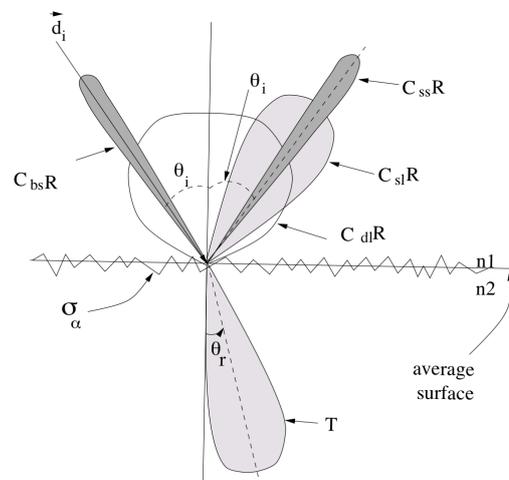


図 4.13: 各反射変数の分類 [27]

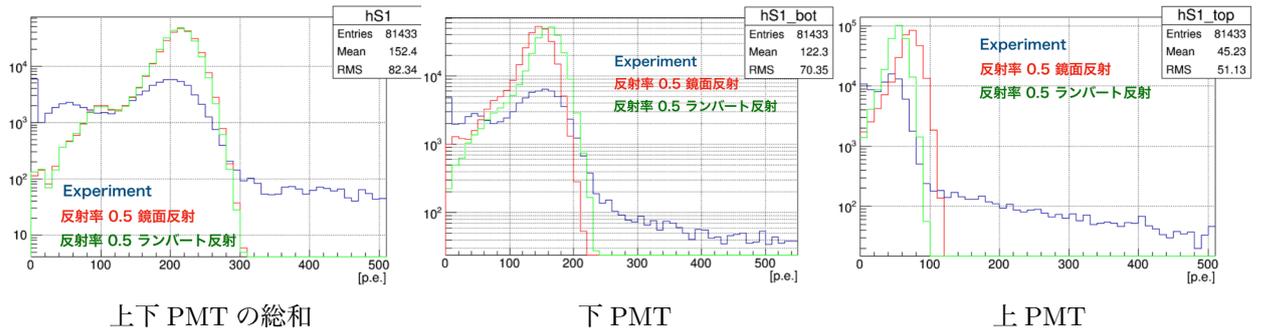


図 4.14: ^{241}Am 内部針線源で行った実験で測定された PMT の光電子数ヒストグラムと光量シミュレーションとの比較

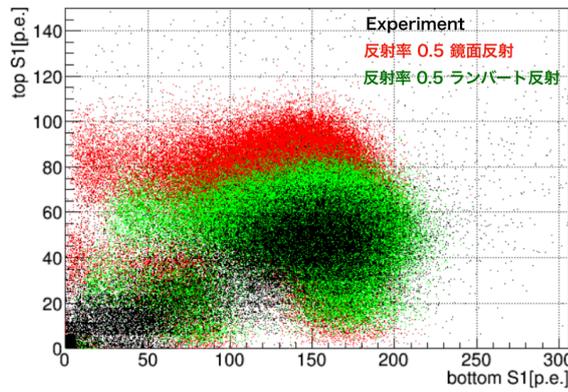


図 4.15: ^{241}Am 内部針線源で行った実験 (高電圧印加なし) で測定された scatter plot と光量シミュレーションとの比較

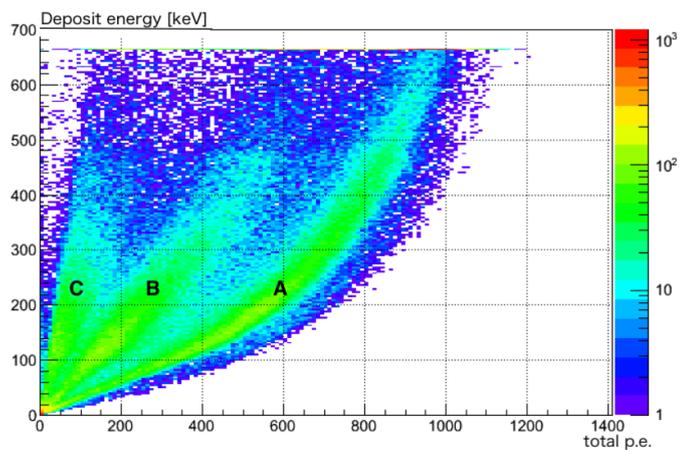


図 4.16: 先行研究のセットアップでの ^{137}Cs 外部線源の光電子数とエネルギーの関係

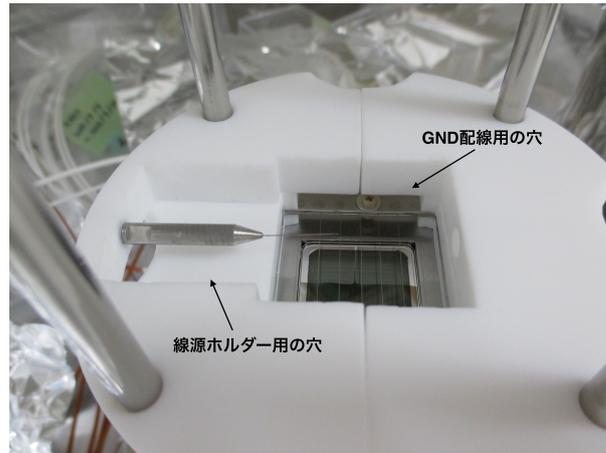


図 4.17: 先行研究 5 で用いられた線源と GND 部分のスペーサー

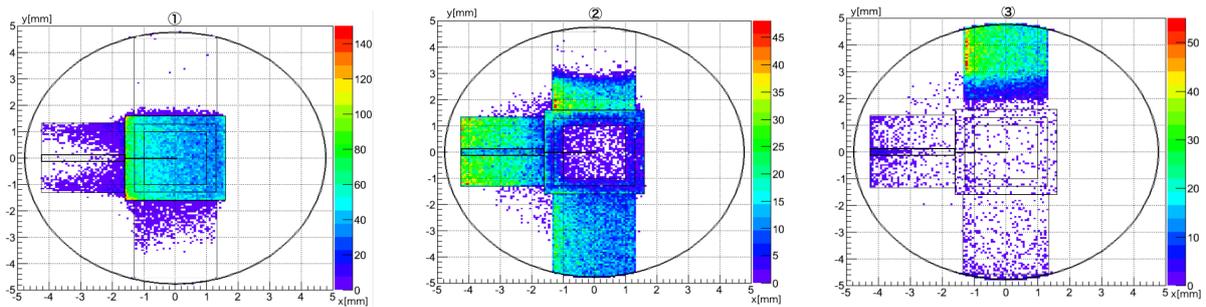


図 4.18: ① A のクラスターを作ったイベントの S1 の発生位置。② B のクラスターを作ったイベントの S1 の発生位置。③ C のクラスターを作ったイベントの S1 の発生位置。②と③は主に有効体積外に存在する直方体の穴にあるキセノン領域で発生している。

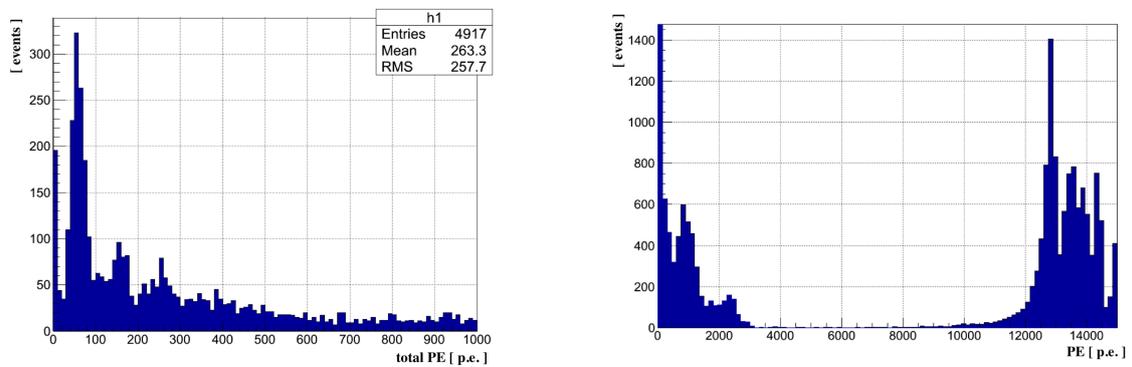


図 4.19: 睡蓮花型線源ホルダーを用いたジオメトリでシミュレーションされた上下の PMT で観測される光電子数のヒストグラム。左図: 1.0×10^3 p.e. 以下の範囲。右図: 1.5×10^4 p.e. 以下の範囲。

図 4.19 の左図の範囲で見られる光電子数ピークを生成する γ 線由来のエネルギーを調べるために図 4.20 のように光電子数と液体キセノン中のエネルギーデポジットの関係を二次元ヒストグラムにした。光量分布をガウス関数でフィッティングすると、59.5 keV の γ 線由来のピークは 250 ± 3 p.e.、26.3 keV は 157 ± 1 p.e.、13.9 keV は 56.2 ± 0.9 p.e. になった。これらは良い線形性が見られ直線でフィッティングすると、

表 4.6: Geant4 による γ 線の各エネルギーの S1 光量のシミュレーション結果

13.9 keV(γ)	26.3 keV(γ)	59.5 keV(γ)	PE/keVee
56.2 ± 0.9	157 ± 1	250 ± 3	5 ± 2

$$E_{S1} = (0.219 \pm 0.004) \times S1 + (3.9 \pm 0.6) \quad (4.5)$$

となり、発光量は 5 ± 2 p.e./keVee と計算された。

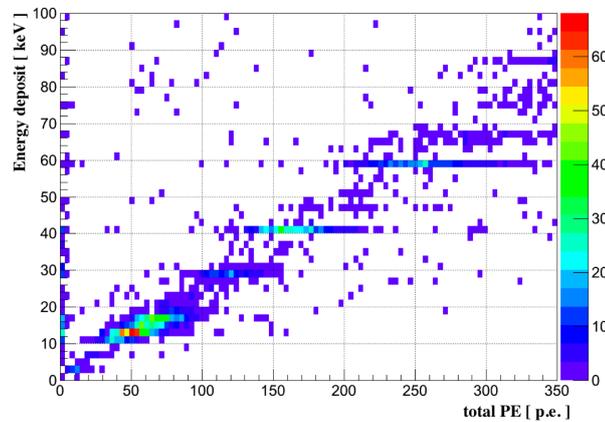


図 4.20: 59.5 keV 以下の低エネルギーの γ 線の光電子数ピークと液体キセノン中のエネルギーデポジットの関係

4.2.2 電場シミュレーション

次に設計したジオメトリーで S2 が発生する条件の電場が形成されているかをシミュレーションで確認するため、電場を有限要素法解析システム Femtet[30] で計算を行った。

睡蓮花型線源ホルダーを取り入れたシミュレーション

睡蓮花型線源ホルダーを導入した場合に、S2 が観測できる閾値である 410 kV/cm 以上の電場を直径 10 μm のワイヤー電極の表面に形成するのに必要な印加電圧を計算した。

GND 電極と線源ホルダー、PMT ホルダーは 0 kV でワイヤー電極に 0 kV から 5.5 kV を印加させた時の各電圧ごとのワイヤー電極表面の電場計算を行った。計算結果は図 4.21 の左図の通りであり、3 kV 以上ワイヤー電極に印加すると S2 観測に必要な電場 410 kV/cm 以上が形成されることが確認できた。

ワイヤー電極に 5 kV を印加し、GND 電極と線源ホルダー、PMT ホルダーは 0 kV で等電位線と電場の位置分布を確認した。図 4.22 から等電位線を確認すると、設計した睡蓮花型線源ホルダーは針電極よりワイヤー電極へ十分な平行電場に分布し、図 4.21 の右図よりドリフト電場は線源表面から 4 mm ワイヤー電極へ離れた位置まで一様であり、ワイヤー電極から 0.1 mm 離れた位置では約 700 kV/cm と先行研究にある S2

が観測できる閾値とされる 410 kV/cm を超えている。ゆえに、線源ホルダー表面で発生した α 線はすぐに液体キセノン中で電離電子を生成し、その電子が平行電場によってワイヤー電極に引き寄せられ、ワイヤー電極付近に近づくと S2 が発生すると考えられる。

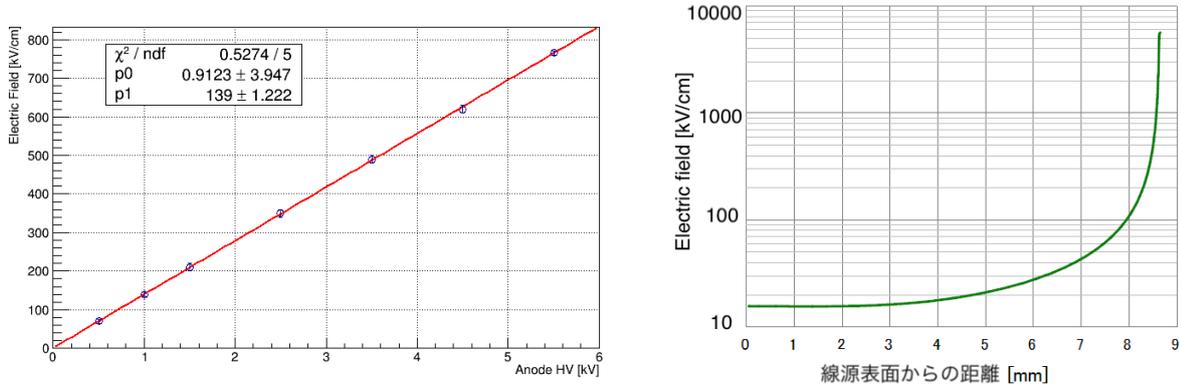


図 4.21: 左図: 各電圧ごとのワイヤー電極表面の電場の計算結果。右図: ワイヤー電極に 5 kV 印加した時の表面線源を始点、ワイヤー電極を終点とした時の電場の位置依存性。

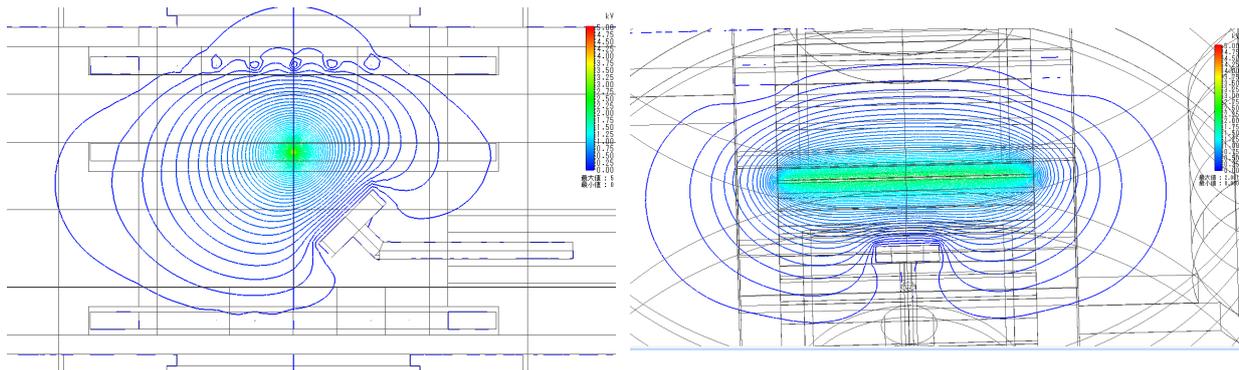


図 4.22: 睡蓮花型線源ホルダーを用いたジオメトリーでの Femtet による電場シミュレーション。左図: ワイヤー電極と表面線源の中心を通る断面図での等電位線。右図: ワイヤー電極と表面線源の中心を通る断面図での等電位線。

第5章 測定と結果

5.1 実験手順

5.1.1 キセノン導入

キセノンの発光量の減少の原因は水、酸素や窒素などの残留ガスが原因である。反応式 5.1 のように、酸素や窒素がキセノンの発光過程に必要である励起状態のキセノンや電子と反応してしまうからである。ターボ分子ポンプによって外真空容器と内容器、ガスラインの真空引きを行いなるべく容器内の不純物を排除し、キセノンの純度を維持できるようにした。本実験では外真空容器は 0.25 Pa 、内容器は $8.2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 、ガスラインは $5.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ まで真空引きをした。



その後、内容器にキセノンを入れる前に少量のキセノンを導入して内容器を冷やす予冷という作業を行った。図 5.1 のようにキセノンボトルから TPC までにガスラインにゲッターがあるため、導入されるキセノンは 2 台のゲッターによって純度が高められている。液体キセノン中は露点計で $-120 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下になっていた。内容器の圧力が 1.014 MPa 程度¹になるまでキセノンを導入した。図 5.2 の 10 月 31 日から 11 月 1 日 9:00

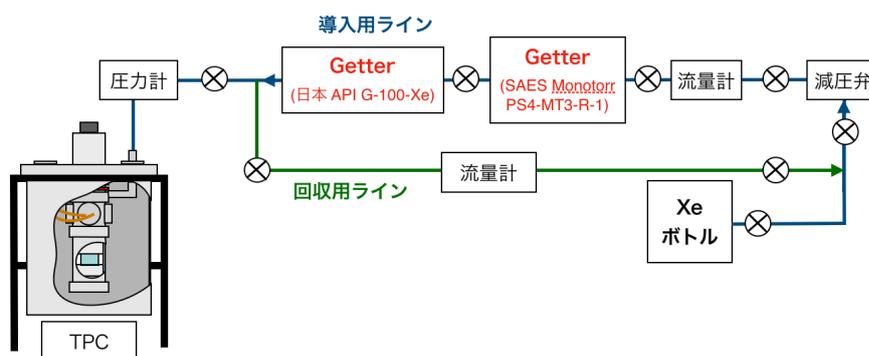


図 5.1: 本実験のガスライン

前までが予冷期間であるが、各装置の温度と圧力が徐々に減少していることが確認できる。予冷の後、冷却機の温度を $-120 \text{ }^\circ\text{C}$ から $-113 \text{ }^\circ\text{C}$ に上昇させながら、圧力が 1.01 MPa 以上にならないように $0.1 \sim 1 \text{ L/min}$ の流量で 9 時間かけて約 282 L のキセノン徐々に導入した。

¹仮に冷凍機が故障で停止して容器内の圧力が上昇しても 1.014 MPa 程度で止まるためである。

5.1.2 測定

内容物の圧力が1.04 MPa、上下 PMT の温度が -103°C の状態安定し始めたところから測定を始めた。11月1日にLEDによる上下PMTの1 photo-electron(p.e.)の測定を行い、11月1日から11月14日までS1の光量測定、11月2日と6日、12日、13日にアノードに電圧をかけて行うS2の観測をした。中性子によって装置自体がアクティブしてバックグラウンドとなるので、全ての測定が完了した11月13日の午後から ^{252}Cf 線源を用いた実験を行った。

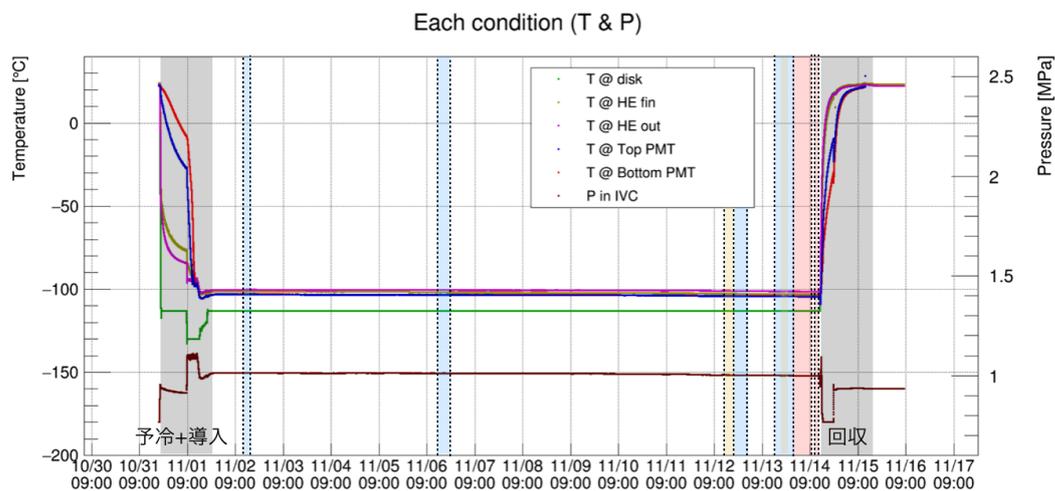


図 5.2: 10月下旬から11月中旬の間に行った実験時のTPC各所の温度と内部の圧力の状態である。青線:上PMTの温度、赤線:下PMTの温度、緑線:熱交換円盤(disk)の温度、紫線:熱交換ボックス外側の温度、黄線:熱交換器の温度、茶線:内容物の圧力、水色期間:ワイヤー電極HV印加、黄色期間:外部線源照射実験、赤色期間: ^{252}Cf 外部線源照射実験

5.2 解析方法

5.2.1 LEDによる1 p.e. 測定

3章5節で説明した先行研究と同様に、TPC内に ^{241}Am 線源と同じ高さに設置されたLEDを用いて、上下のPMTの1 p.e.を測定し、1 p.e.あたりの波形面積から波形面積を光電子数に変換する校正式を求めた。LEDを500 Hzで光らせる際の電気信号をFADCのトリガーとして測定している。

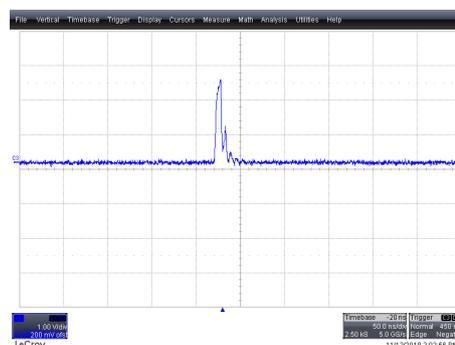


図 5.3: LEDに500 Hzで入力する電気パルス

解析方法は4章と同様に、FADCが信号を集積し始めた150 ns後から350 ns後までの200 ns間のADC値の平均をペDESTAL値とした(式5.5)。ただし、この解析方法ではその200 ns間に1 p.e. 信号が入ってしまう可能性があるため2乗和平均(RMS)でカットをかけることで、1 p.e. がペDESTAL区間に入っている信号を排除している。1 p.e. 信号の波形面積 S_{1PE} はFADCが信号を集積し始めてから400 ns後から420 ns後までの20 ns間のADC値の積分値からペDESTALを引いて計算している(式5.6)。

$$V_{\text{pedestal}} = \frac{\int_{150\text{ns}}^{350\text{ns}} V_{\text{ADC}} dt}{\int_{150\text{ns}}^{350\text{ns}} dt} \quad (5.5)$$

$$S_{1PE} = \int_{400\text{ns}}^{420\text{ns}} (V_{\text{pedestal}} - V_{\text{ADC}}) dt \quad (5.6)$$

この20 ns 間に1 p.e. 信号が来ないことがあるがため、波形面積のヒストグラムを描くと0 p.e. ピークと1 p.e. ピークの2つのピークが見られる。それらを二重ガウス関数でフィッティングすると図5.4のようになった。

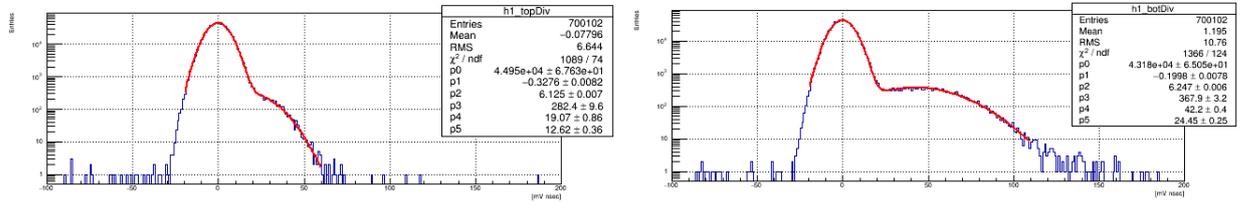


図 5.4: 左 (右) 図は上 (下)PMT の 1 p.e. 測定時の波形面積のヒストグラム。それぞれ二重ガウス関数でフィッティングし2つのピークを0 p.e. と1 p.e. としている。

この結果から波形面積を光電子数に変換する較正式は

$$PE_{Top} = \frac{S + 0.32}{19.39} \quad (5.7)$$

$$PE_{Bot} = \frac{S + 0.20}{42.29} \quad (5.8)$$

となった。

5.2.2 S1 解析

S1 の立ち上がり前 t_0 までの300 ns 間のADC値の平均値をS1 のペDESTALとし(式5.9)、S1 信号の立ち上がり直前 t_1 から300 ns 間のADC値の積分からペDESTAL引いた値をS1 の波形面積 S_{S1} とした(式5.10)。そして、S1 の波形面積を1 p.e. 測定で求めた式5.7を用いて光電子数に変換した。

$$V_{\text{pedestal}}^{S1} = \frac{\int_{t_0-300\text{ns}}^{t_0} V_{\text{ADC}} dt}{\int_{t_0-300\text{ns}}^{t_0} dt} \quad (5.9)$$

$$S_{S1} = \int_{t_0}^{t_0+300\text{ns}} (V_{\text{pedestal}}^{S1} - V_{\text{ADC}}) dt \quad (5.10)$$

5.2.3 S2 解析

S2 の立ち上がり前 t_1 までの300 ns 間のADC値の平均値をS2 のペDESTALとし(式5.11)、S2 の立ち上がり直前 t_1 から1600 ns 間のADC値の積分からペDESTAL引いた値をS2 の波形面積とした(式5.12)。そ

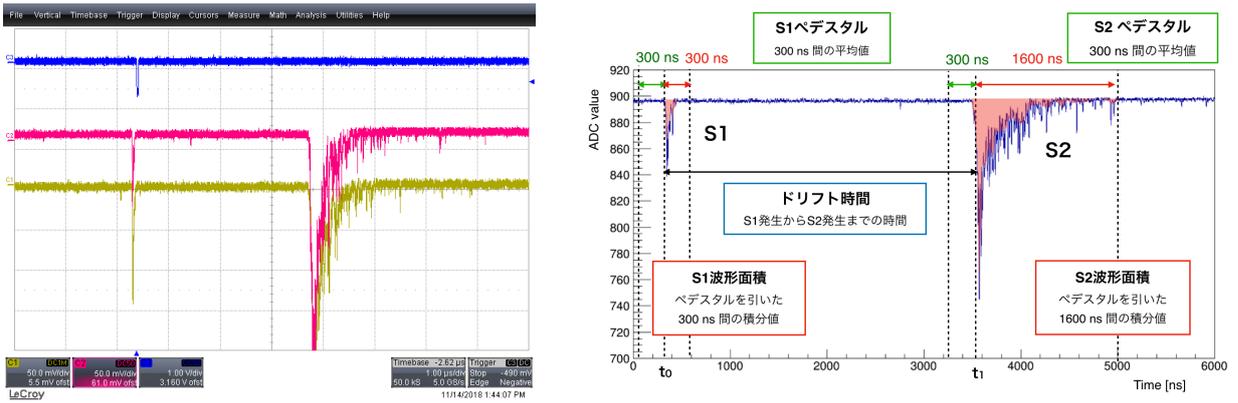


図 5.5: 左図: アノードの HV5 kV 印加した時の上下 PMT の生信号。 ^{241}Am 線源で測定された上下の S1 と S2 が観測された。右図: 5kV 印加した時に FADC で記録された波形を用いて解析方法を説明した図。

して、S2 の波形面積を 1 p.e. 測定で求めた式 5.7 を用いて光電子数に変換した。また、S1 の立ち上がり時間 t_0 と S2 の立ち上がり時間 t_1 の差 $t_1 - t_0$ をドリフト時間とした (図 5.5)。

$$V_{\text{pedestal}}^{S2} = \frac{\int_{t_1-300\text{ns}}^{t_1} V_{\text{ADC}} dt}{\int_{t_1-300\text{ns}}^{t_1} dt} \quad (5.11)$$

$$S_{S2} = \int_{t_1}^{t_1+1600\text{ns}} (V_{\text{pedestal}}^{S2} - V_{\text{ADC}}) dt \quad (5.12)$$

5.3 S1 測定、S2 測定

この節では ^{241}Am 内部線源由来の S1、S2 を観測の結果を示す。本研究で得られた S1 や S2 の電場依存性測定結果と先行研究を比較することで、本研究で用いた検出器が正常に稼働しているかを確認する。その後、 γ 線と X 線の S2 観測から電子反跳イベントの S2 光量のエネルギー較正式を求め、本研究で観測できる S2 エネルギーの閾値を設定する。そして、S1 と S2 の発生時間からドリフト速度算出し先行研究と比較することで、観測された S2 イベントが線源表面付近で発生した S1 に伴って発生した電子がドリフトされ電荷増幅を起こしたものであることを確認する。

5.3.1 ^{241}Am 内部線源による S1 測定

図 5.6 の左図は、アノード電圧が 0 kV の時に ^{241}Am 線源を用いて測定した時の上下 PMT での S1 の光量の相関を示す二次元散布図である。上 PMT で $1.8 \times 10^3 \sim 9.0 \times 10^3$ p.e.、下 PMT で $3.0 \times 10^3 \sim 4.0 \times 10^3$ p.e. の範囲のクラスターは、5.5 MeV の α 線由来と考えられる。また、上 PMT で 3.0×10^3 p.e. 以下、下 PMT で 2.0×10^3 p.e. 以下の範囲のクラスターは、59.5 keV 以下の γ 線由来と考えられる。

図 5.6 の左図において、下 PMT の光電子数が $3.0 \times 10^3 \sim 4.0 \times 10^3$ p.e. の範囲に下 PMT の光量があまり変化が無い縦のクラスターができています。5.5 MeV の α 線由来の S1 光は線源付近で発生するため、線源ホルダーの影になってしまうが下 PMT で検出される光子は一定数保たれる。一方、上 PMT は上方に行く光子に加え線源ホルダーで反射した光子も上方へ行く。しかし、線源は図 4.6 のように ^{241}Am が付着した四角形の金属板とその金属板がついた金属円盤の 2 種類で構成されており、線源周辺の金属円盤が部分的に酸化してしまっている。これにより、金属面の反射率の不均一性が原因で上 PMT で検出される光量が変化していることが考えられる (図 5.7)。この二次元散布図で上下 PMT の光電子数比が上 PMT/下 PMT = 2.2 で線形になった領域が確認できる。これらのイベントは S1 発光の直接光を捉えているイベントであると考え

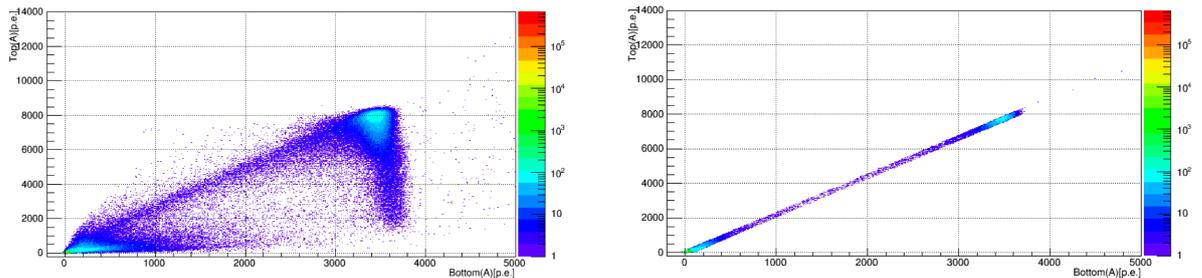


図 5.6: 縦軸、横軸はそれぞれ上下 PMT の S1 光電子数。左図: ^{241}Am 線源で測定された上下の S1 光量散布図。右図: 線源の位置で発生したイベントだけを取り出すためにカットした上下の S1 光量ヒストグラム。

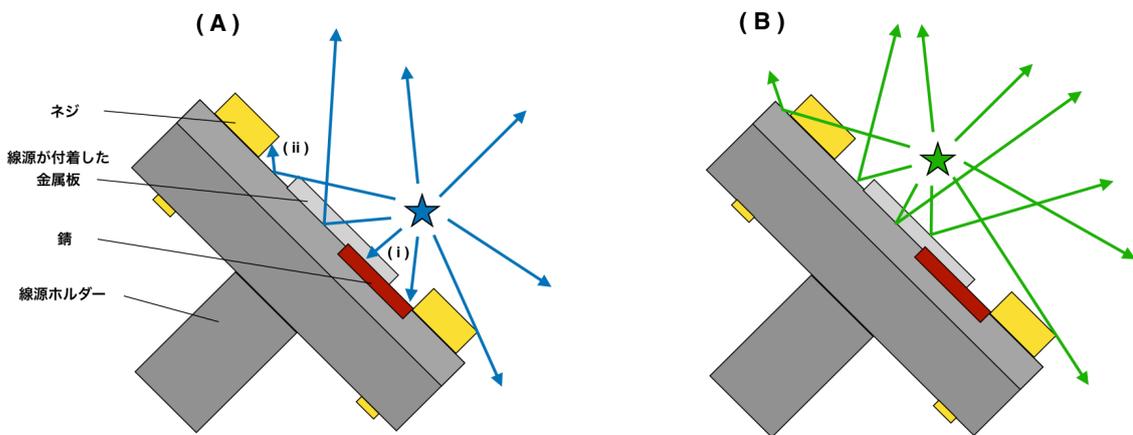


図 5.7: (A): 上 PMT の光量が減少する場合の光子の反射過程。(i) の錆や (ii) のネジなどで本来上方へ反射するはずだった光子が失われている。(B): 上 PMT の光量が最大となる場合の光子の反射過程。下 PMT は (A)(B) どの反射過程でも入射する光子数はほとんど変わらないことがわかる。

られるので、このイベントについて解析していく。図 5.6 の右図は以後の解析に用いるイベントをカットした後の二次元散布図である。

5.3.2 S1 のエネルギー較正

図 5.8 に示すように上下の PMT の光電子数を足し合わせたヒストグラムを見ると 1.0×10^4 p.e. 以上の位置に一つ、 1.0×10^3 p.e. 以下に 3 つのピークが観測された。そこで、 1.0×10^4 p.e. 以上のピークは 5.5 MeV 由来としガウス関数で、 1.0×10^3 p.e. 以下の 3 つのピークは大きい方から順に 59.5 keV、23.3 keV、13.9 keV 由来とし 45 p.e. から 340 p.e. の範囲で三重ガウス関数でフィッティングした。すると、5.5 MeV は $(1.15 \pm 0.01) \times 10^4$ p.e. で 59.5 keV と 26.3 keV、13.9 keV はそれぞれ $(2.54 \pm 0.03) \times 10^2$ p.e.、 $(1.11 \pm 0.06) \times 10^2$ p.e.、 48 ± 6 p.e. ($\chi^2 = 69.6/51$) となった。ピークとなった光量はそれぞれ表 5.3.2 にまとめた。S1 発光量は α 線由来のイベントより γ 線由来のイベントの方が大きいという特徴が確認できた。以後、イベントの由来となる粒子を明確にするため、1 keV の α 線由来のエネルギーと 1 keV γ 線や X 線由来の電子反跳エネルギーの単位をそれぞれ 1 keV_α 、 1 keV_{ee} (ee; electron equivalent) とする。

この結果をもとに発光量が同等であった γ 線、X 線の三測定点を一次関数でフィッティングし、 γ 線や X 線に対するエネルギー較正をすると、図 5.9 のようになった。この時に求められた較正式は、

$$E_{S1} = (0.223 \pm 0.006) \times S1 + (2.6 \pm 1.2) \quad (5.13)$$

表 5.1: 各エネルギーの S1 光量

α 線		γ 線			
5.5 MeV $_{\alpha}$ [10^4 p.e.]	p.e./keV $_{\alpha}$	13.9 keV $_{\gamma}$ [p.e.]	26.3 keV $_{\gamma}$ [p.e.]	59.5 keV $_{\gamma}$ [p.e.]	p.e./keV $_{\gamma}$
1.15 \pm 0.01	2.1 \pm 0.1	48 \pm 6	111 \pm 18	254 \pm 3	4 \pm 2

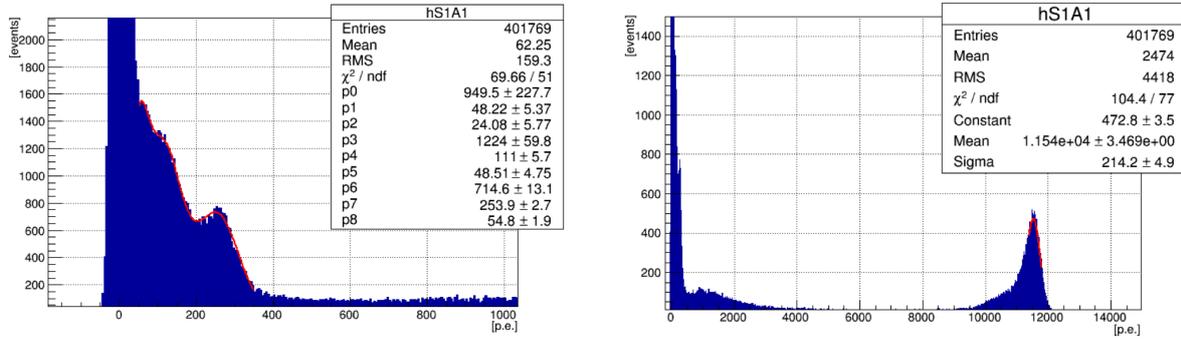


図 5.8: 左図: 1.0×10^3 p.e. 以下の S1 のヒストグラム。低エネルギーの γ 線による 3 つのピークが観測されており、ガウス関数を 3 つ足し合わせた関数でフィッティングしている。右図: 1.5×10^4 p.e. 以下の S1 のヒストグラム。 α 線由来のピークが観測されており、ガウス関数でフィッティングしている。

となった。これは、表 4.2.1 と比較すると光量シミュレーションと本実験の結果がよく一致している。

5.3.3 S1 の時間変化

図 5.10 は今回の実験期間内に観測された 5.5 MeV の α 線由来の S1 の光量の変化を表している。この図で色が塗られている期間は図 5.2 と同様である。11 月 2 日と 11 月 6 日、11 月 12 日でそれぞれ光量が減少している。それぞれの期間においてワイヤー電極に約 5.5 kV の電圧印加時に放電が起こっている。この放電によって、液体キセノンの純度が悪くなった事による S1 光量の減少だと考えられる。この放電により減少した S1 の光量は 5 日間かけて回復している。本セットアップではキセノン導入した後は循環させずにそのままにしているが、不純物が気相のキセノンと一緒に冷凍機で冷却される際に固化して留まり、純化が進み回復したと考えられる。回復の時間は気相のキセノンを循環させゲッターを通すことでより早くなると考えられる。

また、導入直後 11 月 1 日に測定した S1 の光量より 11 月 12 日に測定した S1 の光量方が大きくなった原因は液体キセノン中に混在していた不純物となる水が初めは S1 に必要な電子が捕獲し (反応式 5.14) 光量を減少させていたが、時間が経つにつれて水が密度の違いから上方へ移動し有効体積内の液体キセノンの純度が上がったことによるものだと考えられる。



5.3.4 S1 の電場依存性

S1 は 2.1 で説明したように 2 つの過程で発生している。電場をかけると再結合をする S1 の過程 (式 2.1) に必要な電子がドリフトされてしまうので、S1 の光量が減少する。この S1 光量の減少は Birk's Law にドリ

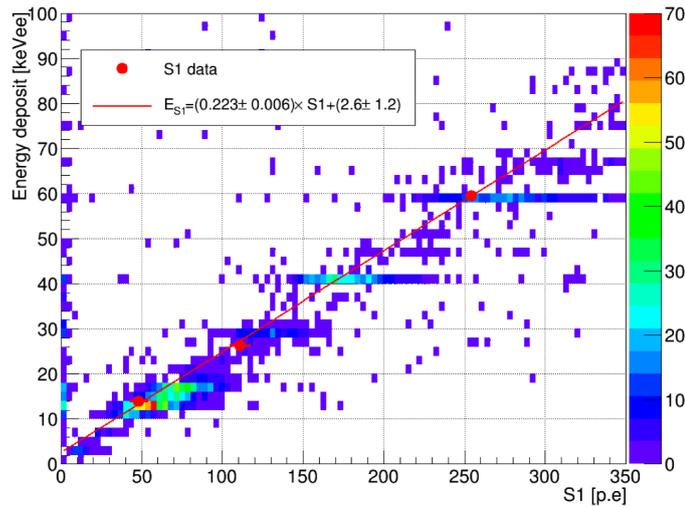


図 5.9: ^{241}Am 線源で観測された低エネルギー γ 線の S1 によるエネルギー較正と、シミュレーションで得られたエネルギーと S1 光量相関。

フト電場 E_D を導入することで式 5.15 で表すことができる [33]。

$$S1 = C \cdot \left(1 - \frac{A}{1 + \frac{1}{\rho} \frac{k_B}{E_D} \frac{dE}{dx}}\right) \quad (5.15)$$

ただし、シンチレーション効率を A 、実験で求められる定数を k_B 、媒体の密度を ρ としている。

アノード電極に HV を 0~5.5 kV まで印加した時のドリフト電場と 59.5 keV の γ 線の S1 の光量の関係を図 5.11 に示した。印加電圧が 0 kV の時の光量を 1 として、相対的光量が縦軸である。このプロットを式 5.15 でフィッティングしたところ $p0 = 0.81 \pm 0.20$ 、 $p1 = 1.9 \pm 1.1$ と求められた。ただし、ここでのフィッティング関数は式 5.15 の $C=1$ 、 $A=p0$ 、 $\frac{k_B}{\rho} \frac{dE}{dx} = p1$ としている。59.5 keV のシンチレーション効率は $81 \pm 20\%$ だった。この結果は右図の先行研究 [33] を再現しており、検出器が正常に稼働していたことが確認できる。

5.3.5 ^{241}Am 内部線源による S2 測定

図 5.12 は、アノード電圧が 5 kV の時に ^{241}Am 線源を用いて測定した時の上下 PMT の光電子数二次元散布図である。上 PMT で $7.0 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^4$ p.e.、下 PMT で $6.0 \times 10^3 \sim 9.0 \times 10^3$ p.e. の範囲のクラスターは、5.5 MeV の α 線由来と考えられる。また、上 PMT で 3.0×10^3 p.e. 以下、下 PMT で 2.0×10^3 p.e. 以下の範囲のクラスターは、59.5 keV 以下の γ 線由来と考えられる。S1 測定時と異なり S2 はアノード電極付近で発生するため線源ホルダーの影響はほとんどない。この二次元散布図で上下 PMT の光量相関比が上 PMT/下 PMT = 1.25 の関係が確認できる。S1 の光量相関比である上 PMT/下 PMT = 2.2 より S2 光量相関比の方が下 PMT の割合が大きくなっているのは、S2 の発生位置がワイヤー電極付近と S1 観測時に影となっていた線源ホルダーから離れ、その影響をほとんど受けなくなったためだと考えられる。

5.3.6 S2 のエネルギー校正

図 5.13 に示すように上下の PMT の光電子数を足し合わせたヒストグラムを見ると 1.4×10^4 p.e. 以上の位置に一つ、 5.0×10^3 p.e. 以下に 3 つのピークが観測された。そこで、 1.4×10^4 p.e. 以上のピークは 5.5 MeV 由来としガウス関数で、 1.0×10^3 p.e. 以下の 3 つのピークは大きい方から順に 59.5 keV、23.3 keV、13.9 keV 由来とし 3 重ガウス関数でフィッティングした。5 kV 印加したとき 5.5 MeV は $(1.629 \pm 0.002) \times 10^4$

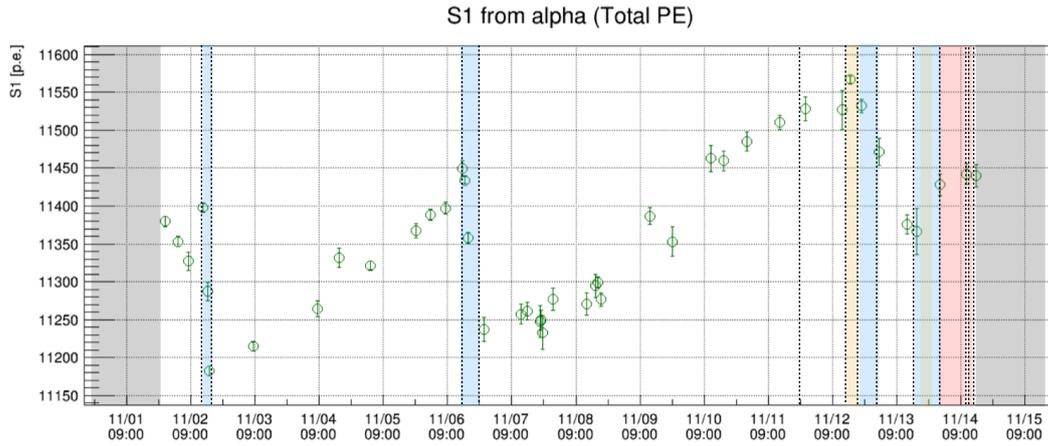


図 5.10: 2018 年 11 月に行われた実験期間中の ^{241}Am 線源の 5.5 MeV の α 線由来の S1 光量。青線:上 PMT の温度、赤線:下 PMT の温度、緑線:熱交換円盤 (disk) の温度、紫線:熱交換ボックス外側の温度、黄線:熱交換器の温度、茶線:内容器の圧力、水色期間:ワイヤー電極 HV 印加、黄色期間:外部線源照射実験、赤色期間: ^{252}Cf 外部線源照射実験

p.e. で 59.5 keV と 33.2 keV、26.3 keV、13.9 keV はそれぞれ $(2.31 \pm 0.02) \times 10^3$ p.e.、 $(1.3 \pm 0.2) \times 10^3$ p.e.、 $(1.02 \pm 0.02) \times 10^3$ p.e.、 $(3.9 \pm 0.6) \times 10^2$ p.e. と観測され、13.9 keV の X 線の S2 を観測することに成功した。13.9 keV の S2 観測は本研究が初めてであり、これまでで最も低いエネルギーでの S2 観測である。それぞれのピークの光量は表 5.3.6 の通りである。

表 5.2: 各 HV 時の各エネルギーの S2 光量

HV kV	α 線		γ 線				発光量 [p.e./keVee]
	5.5 MeV $_{\alpha}$ [10^4 p.e.]	発光量 [p.e./keV $_{\alpha}$]	13.9 keVee [10^2 p.e.]	26.3 keVee [10^3 p.e.]	33.2 keVee [10^3 p.e.]	59.5 keVee [10^3 p.e.]	
5.0	1.63 ± 0.01	3.0 ± 0.1	3.94 ± 0.66	1.02 ± 0.02	1.34 ± 0.16	2.31 ± 0.02	39 ± 1
4.5	0.793 ± 0.002	1.4 ± 0.1	2.96 ± 0.24	0.520 ± 0.097	0.772 ± 0.035	0.972 ± 0.049	16 ± 2

この結果をもとに γ 線や X 線に対する S2 エネルギー較正をすると、1 次関数でフィッティングすると図 5.14 のようになった。この時に求められた校正式は、

$$E_{S2} = (0.0255 \pm 0.0004) \times S_2 + (0.6 \pm 0.8) \quad (5.16)$$

となり S1 と同様線型性が確認できた。これにより 60 keV 以下の電子反跳イベントの S2 光量を式 5.16 により電子反跳エネルギーに変換することができる。以後、S2 光量 250 p.e.(7 keVee) 以上を解析する。

5.3.7 S2 の電場依存性

電場をかけると再結合をする S1 の過程 (式 2.1) に必要な電子をドリフトさせ、その電子によって S2 が発生する。そのため、電場を大きくするとドリフトされる電子の数が増えるので S2 の光量が増加し、電荷増幅のゲインも大きくなる。先行研究の図 3.7 と同じ指数関数的増幅をしている。このことから、S1 の電場依存性測定と同様、本研究で用いた検出器が正常に稼働していたことが確認できる。

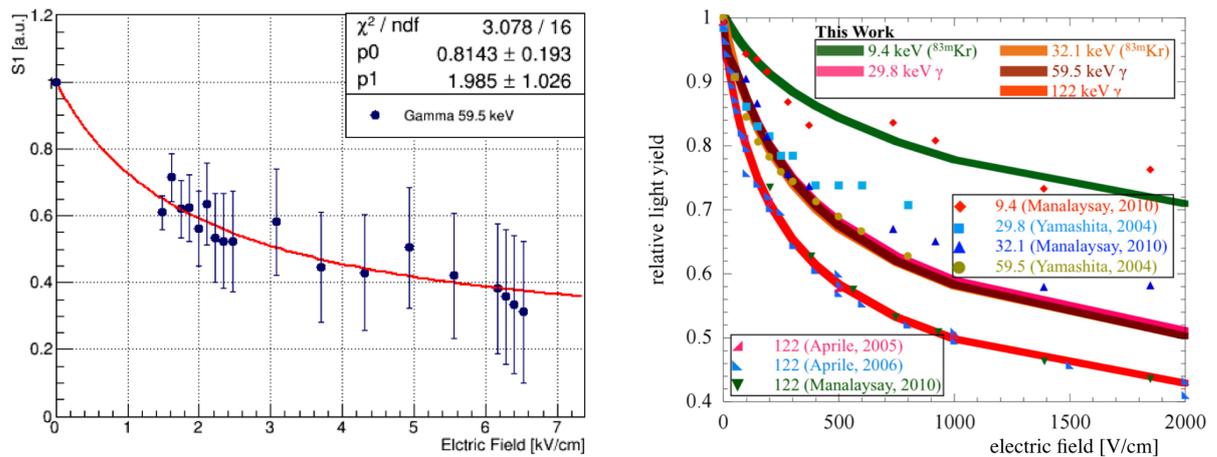


図 5.11: 左図: 本実験での S1 光量の電場依存性。横軸はドリフト電場。右図: プロットが先行研究で得られた各粒子のエネルギーでの S1 光量変化の結果で、実線は NEST モデルである [33]。それぞれ 0 kV 時の光量を 1 としている。

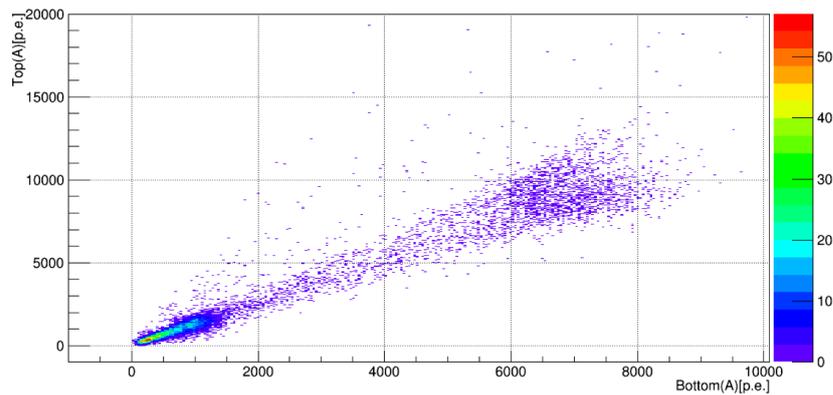


図 5.12: ^{241}Am 線源で観測された S2 の上下 PMT の光電子数二次元散布図

13.9 keV のピークを観測するにはワイヤー電極に 4.5 kV 以上つまり 625 kV/cm 以上の電場がワイヤー電極表面に必要だった。10 keV 以下に閾値を下げるためにはワイヤー電極表面で 625 kV/cm 以上の高電場が必要だと思われる。

α 線の S2 電場依存性に注目するとワイヤー電極に 5.3 kV と 5.4 kV を印加した時の S2 光量は同等である。この原因としては S1 に伴って発生した電子の電子収集効率が 100% になったことが考えられるが、本実験では 5.4 kV までしか印加できなかったため原因は特定できなかった。今後 5.4 kV 以上電圧をワイヤー電極に印加できるよう開発を進め、高電場での S2 電場依存性を確認する必要がある。

5.3.8 ドリフト速度の電場依存性

HV を 0 ~ 5.5 kV までアノード電極に印加したときの、それぞれの S1 発生時間から S2 発生までの時間差を図 5.16 の左図に示す。ここでピークの時間をドリフト時間としている。図 5.16 の右図から 59.5 keV 以下に対する S2 が 3.5 から 3.8 μs のドリフト時間で分布していることがわかる。また、求められたドリフト時間を用いて、ドリフト距離を線源からワイヤーまでの直線距離である 8.1 mm としてドリフト速度を計算した。その結果のグラフが図 5.17 の右図である。L. S. MILLER et al.[34] による液体キセノン中のドリフ

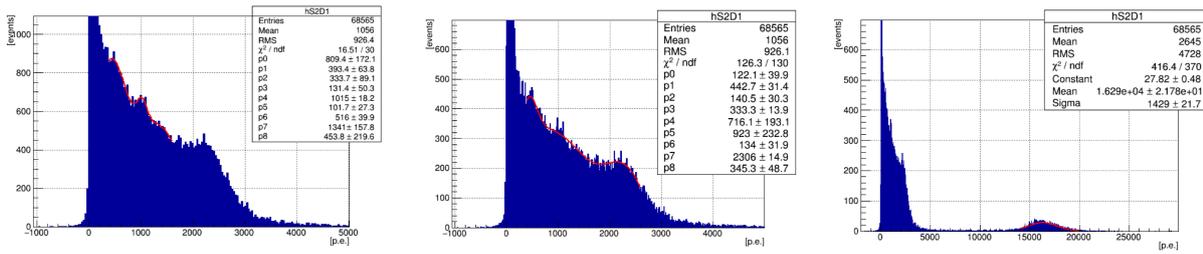


図 5.13: 左図: 1.5×10^3 p.e. 以下の S2 のヒストグラムのフィッティング。低エネルギーの γ 線による 3 つのピークが観測されており、ガウス関数を 3 つ足し合わせた関数でフィッティングしている。中央図: 4.0×10^2 から 2.5×10^3 p.e. までガウス関数を 3 つ足し合わせた関数でフィッティングしている。右図: 2.0×10^4 p.e. 以下の S2 のヒストグラムのフィッティング。 α 線由来のピークが観測されており、ガウス関数でフィッティングしている。

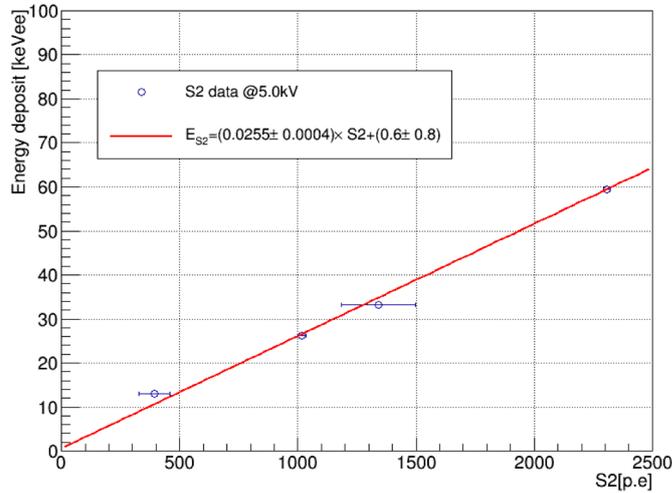


図 5.14: ^{241}Am 線源で観測された低エネルギー γ 線の S2 によるエネルギー校正

ト速度と比較すると、先行研究はドリフト電場が 2 kV/cm の時 $2.0 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ を超えているが、本研究結果では $1.8 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ 程度である。この違いは、本研究で電子のドリフト距離を線源表面付近からワイヤー電極までとして計算しているためドリフト速度が過小評価されており、実際はワイヤー電極から約 1 mm 離れた位置で S2 が発生しているとして計算すると先行研究のドリフト速度と一致し辻褄があう。これより、観測された S2 イベントは内部線源表面付近で発生した電子がドリフトされワイヤー電極付近で電荷増幅され発生した S2 であると言える。

α 線より γ 線の方がドリフト速度が遅く求められているが、これはドリフト時間を求める際に S2 の波高に閾値を設定し、その閾値を超えた時間を利用して解析をしているため起きる time walk と考えられる。図 5.16 の右図において S2 の光量が小さいイベントほどドリフト時間の分散が大きくなり 3700 ns までドリフト時間が伸びていることが確認できる。

5.4 S2/S1 解析

図 2.1 で説明したように、S1 光量と S2 光量の比から粒子識別が可能である。そこで、 ^{241}Am 内部線源から放射される α 線イベントと γ 線イベントが S1/S2 解析によって識別できるかを確認する。そして、S1/S2 の電場依存性を測定することで、S1/S2 解析による識別能力の電場依存性を確認した。

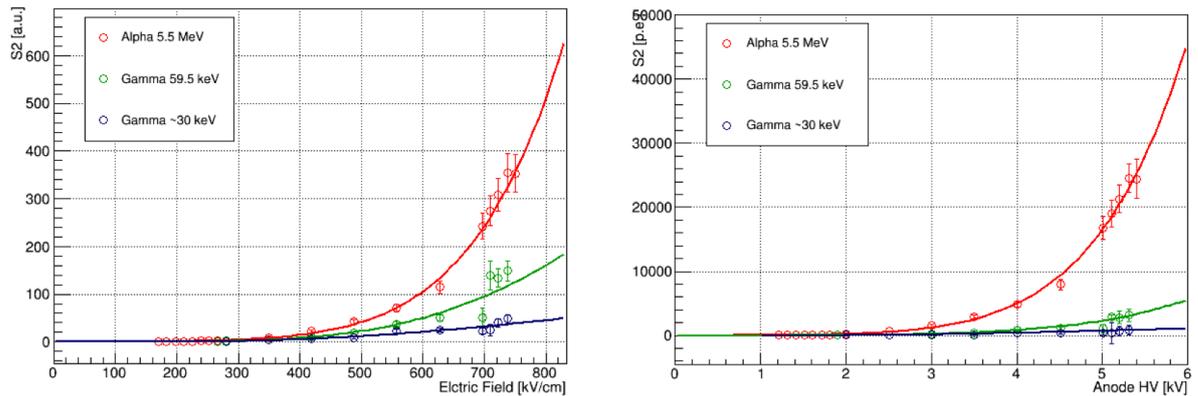


図 5.15: 左図: 電場を大きくし初めて観測されるそれぞれのエネルギーの S2 の光量を 1 とした時の相対 S2 光量の電場変化。右図: 縦軸を S2 光量、横軸を印加電圧にしたもの。

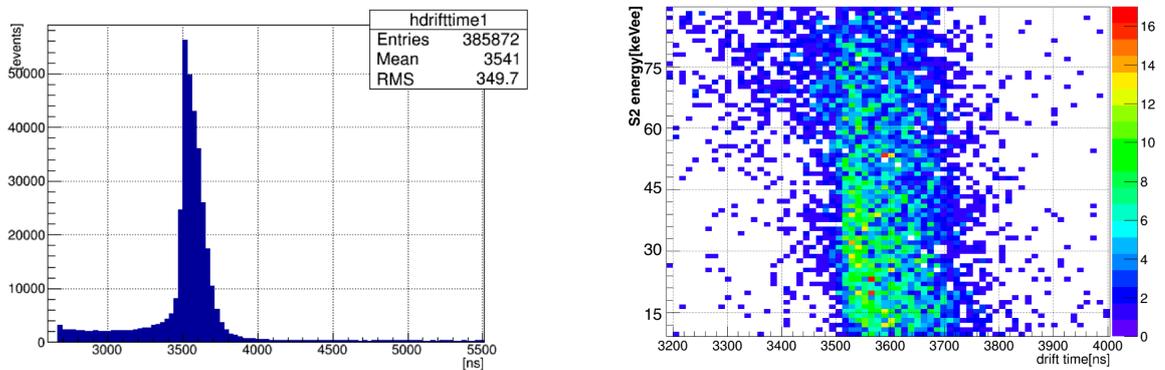


図 5.16: ^{241}Am 線源を用いて 5kV をアノードにかけた時のドリフト時間のヒストグラム。右図: 電子反跳エネルギーが 90 keVee 以下の各 S2 イベントに対するドリフト時間の散布図。

さらに、 ^{252}Cf 外部線源を用いて、放射される中性子による原子核反跳イベントと γ による電子反跳イベントの識別ができるかを確認する。これにより、1 相式液体キセノン TPC において S1/S2 解析による WIMPs (原子核反跳) イベントとバックグラウンド (電子反跳) イベントの識別が可能であるかを確認する。

5.4.1 ^{241}Am 内部線源の S1/S2 解析による粒子識別

図 5.18 のように S2 と $\log(S2/S1)$ の二次元相関図から 5.5 MeV の α 線由来の S2 と 59.5 keV の γ 線由来の S2 を識別が可能である。また、S2/S1 が α 線由来よりも γ 線由来の方が大きいという期待される結果が得られた。図 5.18 の左図の 5.0×10^3 p.e. 以下で $\log(S2/S1) = 1$ 周辺にあるクラスターは γ 線や X 線に対するものである。 1.5×10^4 p.e. 周辺で $\log(S2/S1) = 0$ 周辺にあるクラスターは α 線に対するものである。

S2/S1 の電場依存性

HV を 0 ~ 5.5 kV までワイヤー電極に印加した時の S2/S1 の変化を見た。図 5.18 でわかったように、S2/S1 が大きい方を γ 線や X 線由来とし、S2/S1 が小さい方を α 線由来としてそれぞれの各電場でのピーク値をガウス関数のフィッティングにより求めた。すると、図 5.19 のようになった。また、 $\log(S2/S1)$ の各

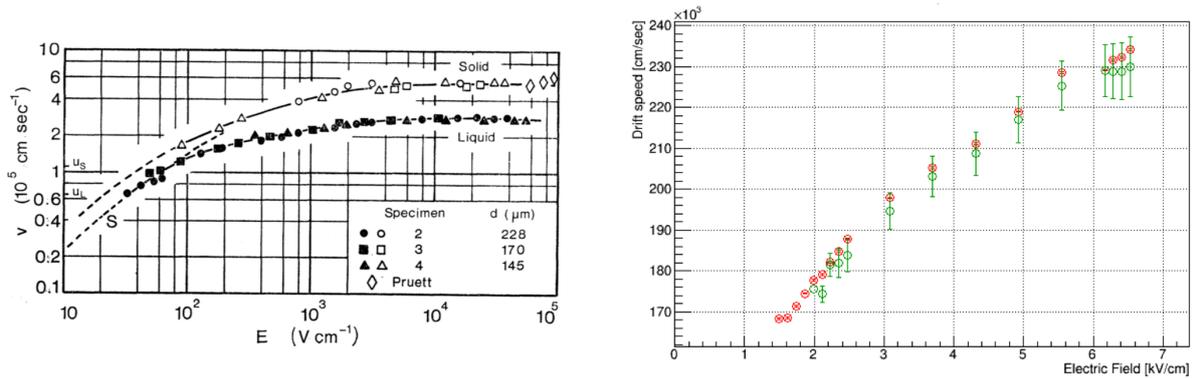


図 5.17: 左図: L. S. MILLER, et al. による液体と固体それぞれの状態のキセノン中での電子のドリフト速度を測定した結果 [34]。右図: 距離を 8.1 mm とした時の実験結果から求められるドリフト速度。緑が γ 線由来で赤が α 線由来のプロットである。

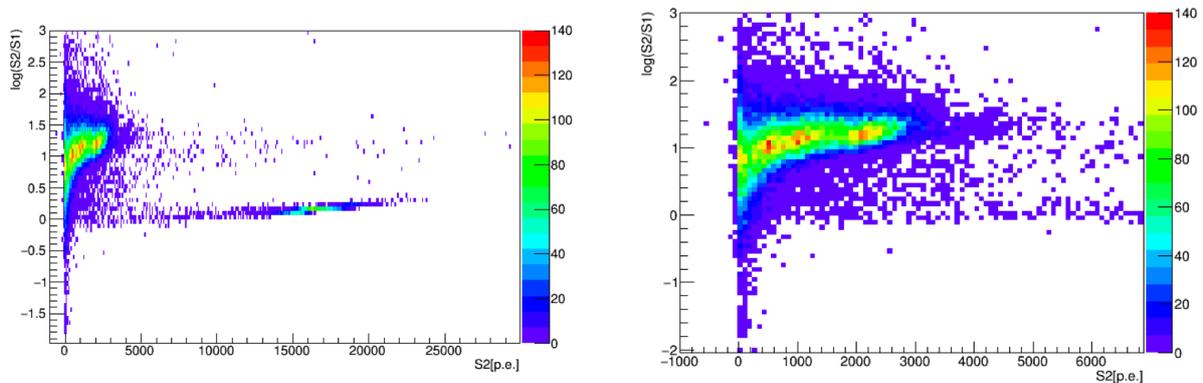


図 5.18: ワイヤ電極に 5 kV 印加した時の $\log(S2/S1)$ と $S2$ の関係の二次元ヒストグラム。左図: 横軸の $S2$ の範囲を 3.0×10^4 p.e. 以下にしたもの。右図: 7.0×10^3 p.e. 以下に拡大したもの。

点を 1 次関数でフィッティングすると、

$$\log(S2/S1)_{\gamma} = (3.9 \pm 0.1) \times 10^{-3} \times S2 - (2.5 \pm 0.1) \quad (5.17)$$

$$\log(S2/S1)_{\alpha} = (3.3 \pm 0.4) \times 10^{-3} \times S2 - (1.1 \pm 0.2) \quad (5.18)$$

となった。このことから、ワイヤ電極表面の電場が 800 kV/cm 以下の範囲では電場を上げることで、 $S1$ と $S2$ の電場依存性測定から電場が大きいほど $S1$ 光量は減少し $S2$ 光量は増加するため 59.5 keV 以下の γ 線と 5.5 MeV の α 線の $S2/S1$ が共に大きくなることが確認できた。しかし、それぞれの識別能力が電場を大きくしてもあまり変化しないことが確認された。ただし、 $S2$ の電場依存性測定から印加電圧 5.4 kV (ワイヤ電極表面で 760 kV/cm) 以上では $S2$ 光量の増加率が減少する可能性があり、 $S2/S1$ 比についても高電場での電場依存性の確認が必要であると思われる。

5.4.2 ^{252}Cf 外部線源による中性子測定

^{252}Cf 外部線源を用いた時の $\log(S2/S1)$ と $S2$ の二次元ヒストグラムを見ると、 ^{241}Am 内部線源による 59.5 keV 以下の γ 線によってできる $\log(S2/S1)=1$ 付近のクラスターと 5.5 MeV α 線によってできる $\log(S2/S1)=0$ 付近のクラスターの他に、 $S2$ の光量が大きくなるにつれて $\log(S2/S1)$ の値が 0 から 1 へと大きくなっている

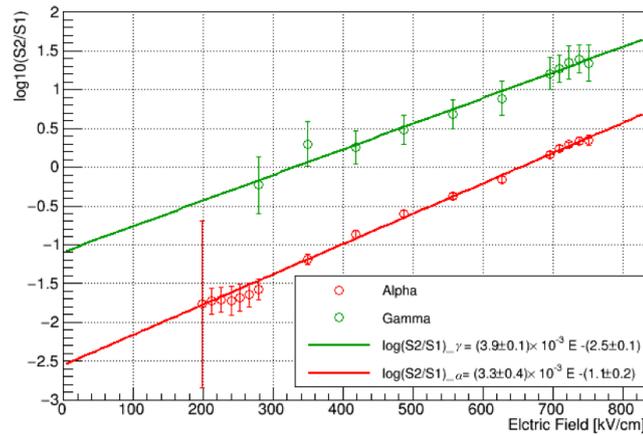


図 5.19: ^{241}Am 線源を用いた時の $\log(S2/S1)$ のワイヤー電場依存性。赤は $\log(S2/S1)$ で識別された α 由来のピークで、緑は同様に γ と識別されたピーク。

長く伸びた ^{241}Am 内部線源では見られなかったクラスターができています。このような縞ができるのは、電場シミュレーションからもわかるように、液体キセノン領域全体で等電場が形成されていないため、外部線源の S1/S2 比が S1 の発光位置に依存することが原因である。図 5.21 に示す光量シミュレーションから明らかだが、外部線源照射時の S1 の発生位置分布は線源側の液体キセノン中で鉛直方向に広がっている。上下 PMT の S1 光量比で液体キセノンの有効体積内部のイベントを選別しているが、それでもドリフト電場が線源ホルダーとワイヤー電極間よりも弱く平行性が不十分な領域が存在しており、その位置でのドリフト電子の収集効率が悪く S2 の光量が下がり $\log(S2/S1)$ も小さくなっている。エネルギーが大きくなると液体キセノンの有効体積内部で S1 が発生しやすくなり、ドリフト電場大きく平行性が十分な位置で S1 に伴う電子が発生するため、内部線源の γ 線の $\log(S2/S1)$ の値と同じ大きさである $\log(S2/S1)=1$ になると考えられる。

このクラスターに混在していると思われる ^{252}Cf 線源由来の中性子和 γ 線を識別するために、図 5.20 に γ 線のみを放射する ^{137}Cs 外部線源照射データを ^{252}Cf 外部線源照射データに重ねて示した。 ^{137}Cs からは 662 keV の γ 線が照射されるが、キセノン中では主にコンプトン散乱をするためコンプトン端が見られることが光量シミュレーションから確認できた。コンプトン端のエネルギー値は以下の式から、477.6 keV と求められる。

$$E_c = \frac{2E^2}{m_e c^2 + 2E} \quad (5.19)$$

コンプトン端のエネルギー値を式 5.16 で S2 の光量に変換すると 1.9×10^4 p.e. に相当する。実際にそれぞれの外部線源を用いた時の $\log(S2/S1)$ と S2 の二次元ヒストグラムを見ると、外部線源によってできる領域に ^{137}Cs 外部線源と ^{241}Am 内部線源を同時に照射させた時のデータである黒のプロットが 1.9×10^4 p.e. まで伸びていることがわかる。

この黒のプロットの下にある赤のプロットが中性子由来のイベントだと考えられる。 ^{252}Cf から放射される中性子の平均エネルギーは約 2 MeV で、最大で約 10 MeV のエネルギーを持つ。中性子のエネルギーを E_n 、反跳する原子核の質量数を A 、中性子の散乱角 θ としたとき、中性子の原子核反跳エネルギー E_r は式 5.20 で表される。

$$E_r = \frac{2E_n(A+1 - \cos^2\theta - \cos\theta\sqrt{A^2-1 + \cos^2\theta})}{(1+A)^2} \quad (5.20)$$

中性子の散乱角が $\theta \sim 180^\circ$ の時の最大原子核反跳エネルギーは $E_n = 2$ MeV とし、原子核反跳イベントのエネルギーの単位を eVr としたとき、 $E_r \simeq 58$ keVr であり、 $E_n = 10$ MeV とした時、 $E_r \simeq 290$ keVr である。それぞれ $L_{eff} \simeq 0.2$ [35] より電子反跳エネルギーに換算し直すとそれぞれ 12 keVee、58 keVee となる。ワイヤー電極に 5 kV 印加した時の S2 の光電子数は式 5.16 より 4.1×10^2 p.e.、 2.3×10^3 p.e. となる。よって中性子由来のイベントは S2 が 2.3×10^3 p.e. 以下の範囲にあると考えられる。

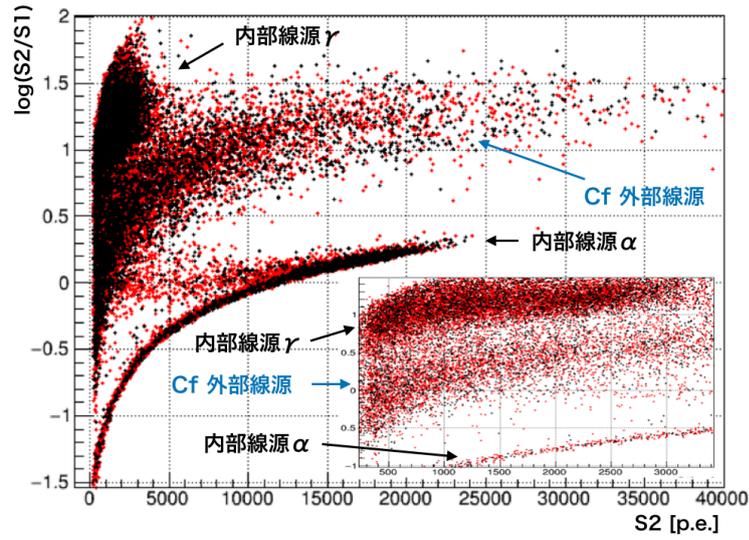


図 5.20: ^{241}Am 内部線源と ^{252}Cf 外部線源を用いた時のプロット (赤) と ^{241}Am 内部線源と ^{137}Cs 外部線源を用いた時のプロット (黒) を重ねている。

そこで、 ^{252}Cf 線源を外容器から照射させた時の $S2$ を $2.5 \times 10^2 \sim 4.0 \times 10^4$ p.e. の範囲を7つに分けて $\log(S2/S1)$ のヒストグラムを描き、ガウス関数でフィッティングした。図5.22の左図に $2.5 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^2$ p.e. の範囲の $\log(S2/S1)$ ヒストグラム、右図には 1.8×10^4 p.e. 以上の範囲の $\log(S2/S1)$ ヒストグラムを示した。

$$R = \frac{\text{Peak}_{h_2} - \text{Peak}_{h_1}}{\frac{1}{2}(W_{h_1} + W_{h_2})} \quad (5.21)$$

$$R = 1.18 \times \frac{\text{Peak}_{h_2} - \text{Peak}_{h_1}}{(W_{0.5h_1} + W_{0.5h_2})} \quad (5.22)$$

式 5.22 で定義した分離度 R は $S2$ が $2.5 \times 10^2 \leq S2 \leq 3.5 \times 10^2$ p.e. ($7 \leq S2 \leq 10$ keVee) の範囲では 0.54 で緑のピーク位置が $\log(S2/S1) = -0.47 \pm 0.15$ の中性子の原子核反跳由来のイベントと紫のピーク位置が $\log(S2/S1) = -0.049 \pm 0.054$ の γ 線の電子反跳由来のイベントを分離することができた。中性子由来のイベントは $S2$ が 2.3×10^3 p.e. 以下と考えられるが、 1.8×10^4 p.e. 以上の範囲で観測されたのは、電子の収集効率が高いワイヤー電極付近で $S1$ が発生し、電子の収集効率が大きい分 $S2$ が大きくなっているためだと考えられる。他の範囲も含めフィッティングした結果は表 5.4.2 の通りである。

この結果から中性子由来の原子核反跳よりも γ 線由来の電子反跳の方が $S2/S1$ が大きいという期待される結果を得ることができている。表 5.4.2 の結果を $\log(S2/S1)$ と $S2$ の scatter plot に重ね書きしたプロットを図 5.23 に示した。アノード電極に 5 kV 印加した時の $S2$ が 2.5×10^2 p.e. (7 keVee) 以上の範囲での α 線、中性子、 γ 線の各粒子の $\log(S2/S1)$ を求めることができ、粒子識別をすることに成功した。1 相式液体キセノン TPC において $S1/S2$ 比による粒子識別は本研究が初めてである。WIMPs のイベントは中性子と同様原子核反跳をするため、WIMPs の原子核反跳エネルギー 100 keVr 以下つまり 20 keVee ($S2$ 光量が 8.0×10^2 p.e.) 以下の範囲に中性子と同じ $S1/S2$ 比の領域にクラスターを作ると考えられる。これにより、1 相式液体キセノン TPC によって WIMPs イベントと α 線や γ 線のバックグラウンドイベントを識別できることが確認できた。

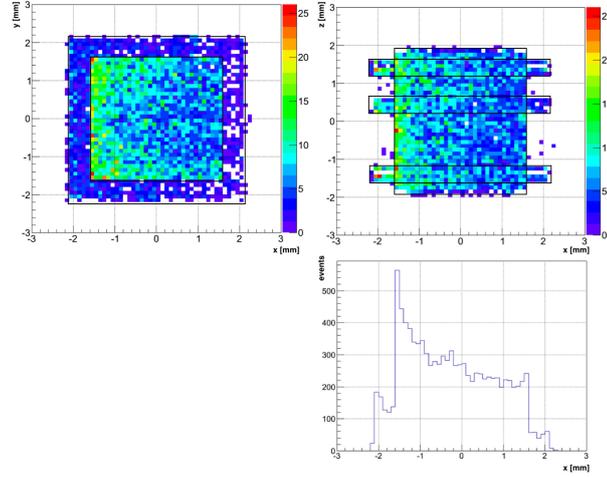


図 5.21: ^{137}Cs 線源を外容器から照射させた時の S1 の発生位置を光量シミュレーションした結果。線源はそれぞれ左側から照射されている。左上:TPC を x - y 平面に射影。右上:TPC を x - z 平面に射影。右下: x 方向一次元分布。

表 5.3: アノード電圧 5 kV 時の各 S2 の範囲での各粒子の $\log(S2/S1)$

S2 の範囲 [10^4 p.e.]	^{252}Cf			^{137}Cs	^{241}Am	
	中性子	γ 線	$R_{n\&\gamma}$	γ 線	α 線	γ 線
$0.025 \leq S2 \leq 0.035$	-0.47 ± 0.04	-0.049 ± 0.054	0.54 ± 0.04	-0.27 ± 0.10	-1.5 ± 0.1	0.77 ± 0.02
$0.050 \leq S2 \leq 0.075$	-0.16 ± 0.15	0.12 ± 0.04	0.40 ± 0.03	0.057 ± 0.022	-1.3 ± 0.1	0.98 ± 0.01
$0.20 \leq S2 \leq 0.23$	0.16 ± 0.10	0.51 ± 0.08	0.82 ± 0.04	0.52 ± 0.03	-0.75 ± 0.08	1.2 ± 0.1
$0.23 \leq S2 \leq 0.25$	0.31 ± 0.17	0.61 ± 0.13	0.57 ± 0.04	0.61 ± 0.05	-0.70 ± 0.05	1.3 ± 0.1
$0.30 \leq S2 \leq 0.40$	0.40 ± 0.11	0.67 ± 0.08	0.84 ± 0.05	0.67 ± 0.03	-0.45 ± 0.01	1.3 ± 0.1
$0.45 \leq S2 \leq 0.55$	0.69 ± 0.14	0.92 ± 0.25	0.43 ± 0.04	0.79 ± 0.02	-0.35 ± 0.016	1.3 ± 0.2
$1.8 \leq S2$	1.0 ± 0.3	1.3 ± 0.1	0.56 ± 0.09	1.3 ± 0.1	-	-

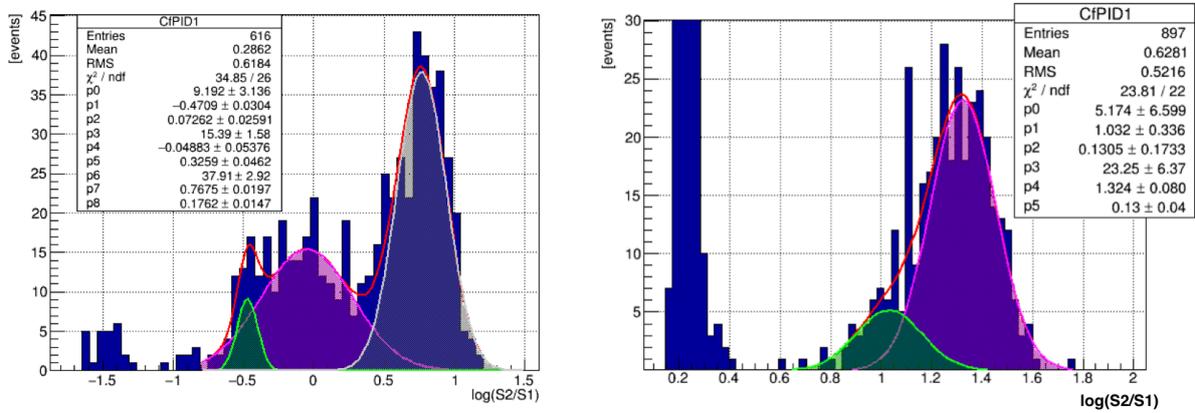


図 5.22: ^{252}Cf 線源を外容器から照射させた時の $\text{Slog}(S2/S1)$ のヒストグラム。緑が中性子由来のピークで、紫が γ 線由来と考えられる。灰色は ^{241}Am 内部線源の γ 線由来のピークである。左図: $S2$ が $2.5 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^2$ p.e. の範囲、 $-0.8 \leq \log(S2/S1) \leq 1.2$ の範囲で三重ガウス関数でフィッティングしている。右図: $S2$ が 1.8×10^4 p.e. 以上、 $0.6 \leq \log(S2/S1) \leq 1.8$ の範囲で二重ガウス関数でフィッティングしている。

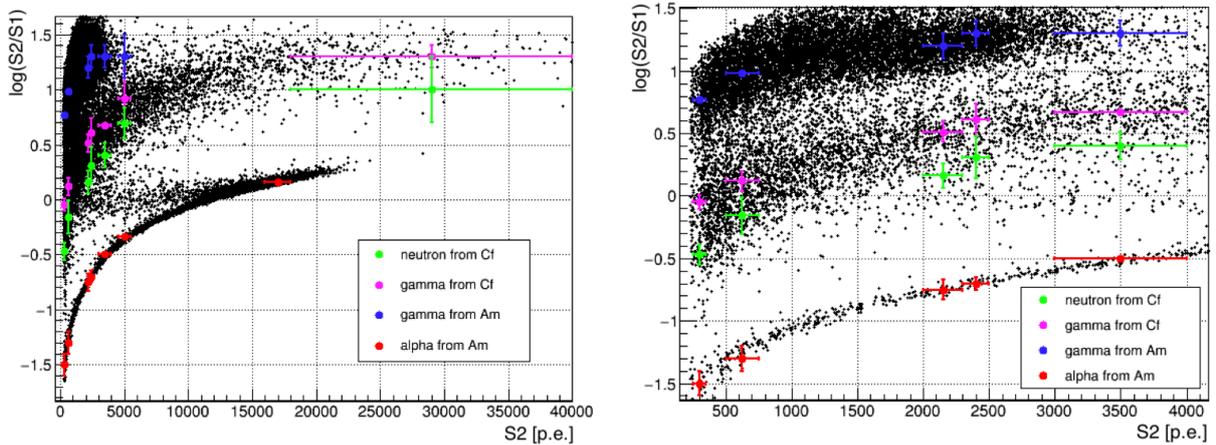


図 5.23: ^{252}Cf 線源を外容器から照射させた時の $\log(S2/S1)$ のピーク位置。黒色 ^{252}Cf 外部線源と ^{241}Am 内部線源を利用している時のプロットで、その他の色のプロットは各領域での $\log(S2/S1)$ のヒストグラムをフィッティングした時のピーク位置である。緑色が ^{252}Cf 外部線源の中性子由来のピークで、紫が ^{252}Cf 外部線源の γ 線由来と考えられる。青色は ^{241}Am 内部線源の γ 線由来で赤色は α 線由来のピークである。左図: $S2$ が $2.0 \times 10^2 \sim 4.2 \times 10^3$ p.e. の範囲。右図: $S2$ が $4.0 \times 10^2 \sim 6.0 \times 10^3$ p.e. の範囲。

第6章 今後の課題と展望

6.1 課題

印加電圧と電場設計

本研究ではワイヤー電極に 5.5 kV 以上の電圧を印加することができなかった。そのため、5.3 kV と 5.4 kV 印加時の S2 光量が同等であった原因が不明である。また、液体キセノン領域全体でドリフト電場の一様性と平行性を維持した設計ができていないため、外部線源を用いた時に S2 光量の位置依存性が発生していた。

WIMPs の直接探索実験に用いるためには本研究よりドリフト距離が長くなるため、8 mm 以上のドリフト距離での S2 観測を行う必要もある。そして、球状 1 相式液体キセノン TPC を実現するためには本実験で用いたワイヤー電極ではなく針電極の方が有効であると考えられる。そのため、針電極による S2 観測や S2 電場依存性、S1/S2 比による粒子識別を確認する必要がある。

中性子測定

本研究では中性子の統計量が ^{241}Am 内部線源由来の γ 線や α 線よりも非常に少なかった。また、 ^{252}Cf 外部線源から放射される中性子と γ 線の両方を測定していたため、中性子イベントの選別が難しかった。そのため、即発 γ 線タグにより中性子測定を行い、再度 S1/S2 比による 1 相式液体キセノン TPC の粒子識別能力を確認する必要があると思われる。

6.2 展望

6.2.1 即発 γ 線タグによる中性子測定

^{252}Cf 線源から放射される中性子と γ 線を選別するために、Time of Flight (TOF) を利用する実験を考えている。図 6.1 のように TPC 検出器と ^{252}Cf 線源の距離を 1 m 近く離し、TPC 検出器側に γ 線を遮蔽するための鉛を置き、反対方向に線源のそばにシンチレーターを置く。 γ 線は光速で飛行し中性子は約 2×10^7 m/sec の速さで飛行するため、シンチレーターと検出器の上下 PMT とのコインシデンスを取った時 (図 6.2)、TOF 分布で 0 ns と 50 ns あたりにピークができると考えられる。この 0 ns は ^{252}Cf 線源から放射される γ 線が鉛を貫通し TPC 検出器で観測されるイベントで、50 ns のピークは鉛を貫通し TPC 検出器で観測される中性子のイベントとなる。TOF で 50 ns 周辺のイベントを選別すると中性子のみのイベントだけを選ぶことができると考えられる。

6.2.2 Shaping Ring の電場シミュレーション

今回のセットアップでは、PTFE スパーサの壁付近の電場形成が不十分であったため、外部線源由来の S2 は入射する粒子のエネルギーと S1 発生位置の 2 つに依存していた。そこで、GND に落とした SUS 製の shaping ring を 3 つ設置し電場形成が向上するか電場シミュレーションを行った。この shaping ring の外寸は 42 mm 四方、内寸は 32 mm 四方の正方形で厚さは 1 mm である。図 6.3 はワイヤー電極に 5 kV 印加した時の電場シミュレーションの結果である。図 4.21 より壁面付近の電場が形成されていることがわかる。外

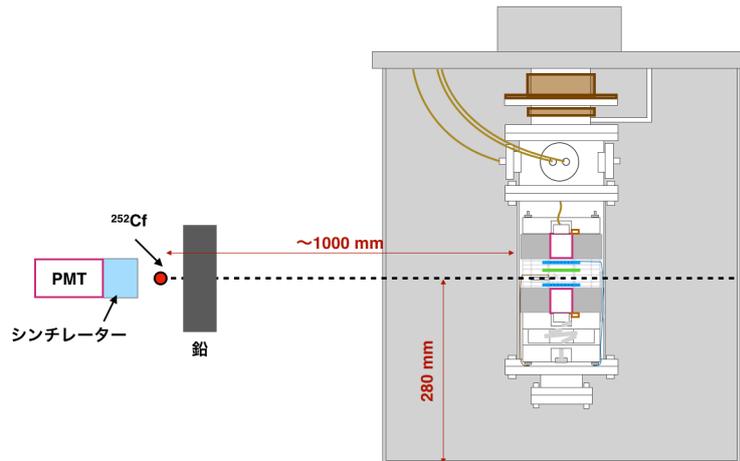


図 6.1: ^{252}Cf 外部線源を用いて行う中性子測定

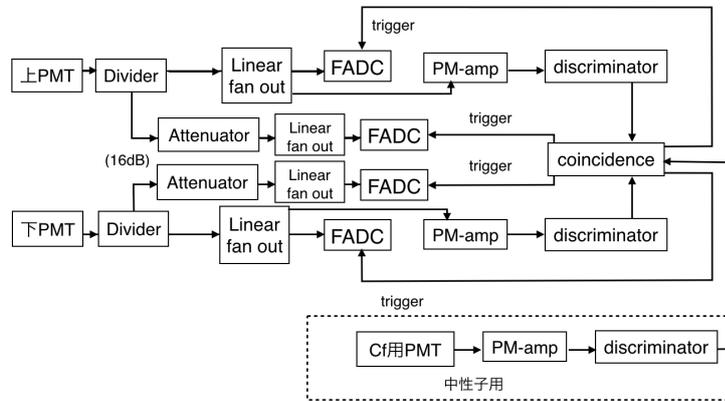


図 6.2: ^{252}Cf 外部線源を用いて行う中性子測定用の DAQ

部線源を用いた測定を考慮すると shaping ring を導入した方がドリフト電子の収集効率が向上し、S2/S1 の分解能も向上すると考えられる。

6.2.3 針電極の電場シミュレーション

XMASS 検出器のような光電面被覆率の高い球状 1 相式シンチレーターに TPC 機能を導入することを想定すると現在実験を行なっているワイヤー電極より針電極を用いる方が現実的である。今後は、針電極での S2 観測が課題となる。そこで、針電極を shaping ring を用いた 1 相式液体キセノン TPC テストベンチに導入したジオメトリーで電場シミュレーションを行った。

今回想定した針電極は線源ホルダー方向へ 2 段階に曲げられたタングステン針である。直径 0.1 mm で初め曲げられており、2 段階目の曲がり部分も直径 0.1 mm、そして先端は直径 0.01 mm となっている。また、針電極の根元部分にはドリフト電場が形成されないようにするために GND に落とした SUS の外径 0.5 mm、内径 0.4 mm の円筒を設置した。この針電極に 5 kV 印加した時の電場シミュレーションの結果は図 6.4 に示した。針電極表面で電場は 1.2×10^3 kV/cm で 13.9 keV の S2 観測に必要な電場 625 kV/cm 以上となった。このセットアップでは内部線源と針電極の距離は 9.3 mm であるが、ワイヤー電極と異なり線源ホルダーに近づくにつれて指数関数的に電場が減少している (図 6.5)。ドリフト電子の収集効率がワイヤー電極より

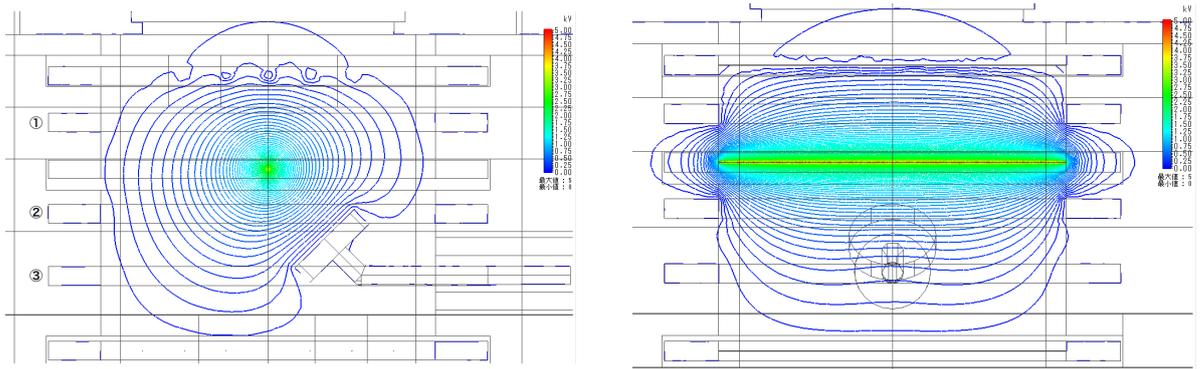


図 6.3: shaping ring を 3 つ設置した時の電場シミュレーション。左図: ワイヤ電極と線源ホルダーの中央を通る断面図の等電位線。①②③は新たに設置した shaping ring である。右図: 左図の垂直方向の断面図の等電位線。

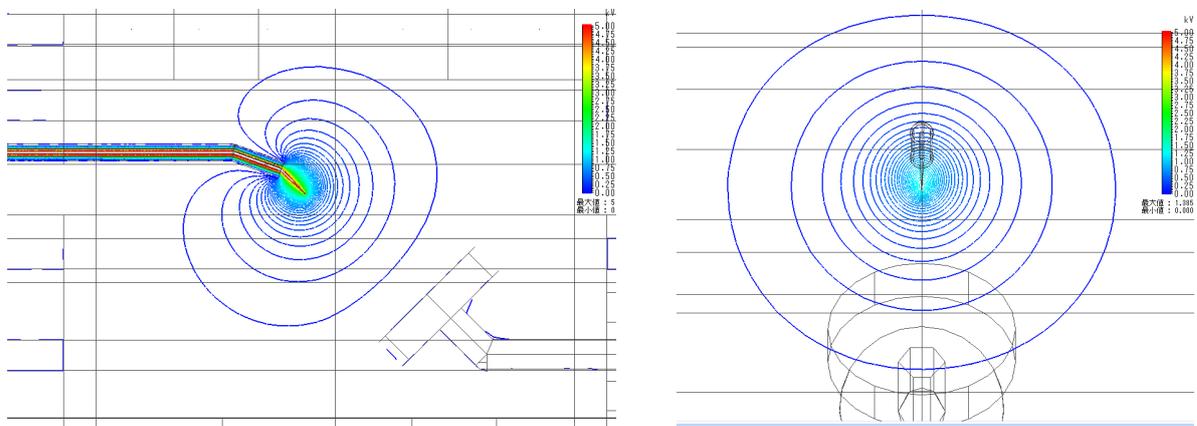


図 6.4: shaping ring を 3 つ設置しワイヤ電極の代わりに針電極を設置した時の電場シミュレーション。左図: 針電極と線源ホルダーの中央を通る断面図の等電位線。右図: 左図の垂直方向の断面図の等電位線。

悪くなる可能性がある。高い収集効率を再現するためには線源と針電極の距離を近づける必要があると思われる。

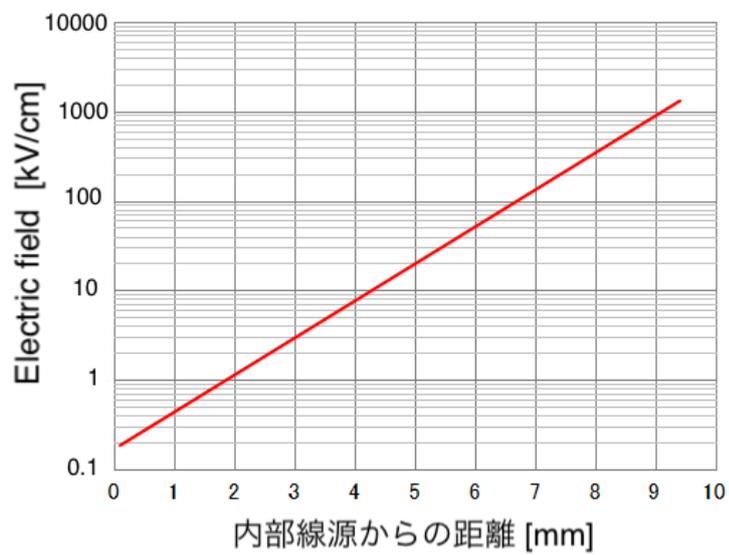


図 6.5: 内部線源から針電極までの電場の位置変化。

第7章 まとめ

暗黒物質直接探索を目指した1相式液体キセノン TPC の開発のためには、数十 keV の反跳エネルギーの S2 の観測をテストベンチで実現させることが必要である。そこで、電場シミュレーションとシンチレーション光のシミュレーションを行い、 ^{241}Am 表面線源と検出器の再設計を行った。さらに、直径 $10\ \mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤーを用いたアノード電極から $8.13\ \text{mm}$ 離れた位置に ^{241}Am 表面線源を新たに導入した。このセットアップの1相式液体キセノン TPC テストベンチで、約2週間実験を行った。

ワイヤー電極に電圧を印加していない状態で $5.5\ \text{MeV}$ は $(1.15 \pm 0.01) \times 10^4\ \text{p.e.}$ で $59.5\ \text{keV}$ と $26.3\ \text{keV}$ 、 $13.9\ \text{keV}$ はそれぞれ $(2.54 \pm 0.03) \times 10^2\ \text{p.e.}$ 、 $(1.11 \pm 0.06) \times 10^2\ \text{p.e.}$ 、 $48.2 \pm 5.4\ \text{p.e.}$ と観測され、これはシンチレーション光シミュレーションとよく一致していた。また、ワイヤー電極に電圧を印加した時の S1 光量の減少と S2 光量の増加は先行研究を再現する結果が得られ、検出器が正常に稼働していることが確認できた。

$5\ \text{kV}$ 印加したとき S2 光量は $5.5\ \text{MeV}$ に対して $(1.63 \pm 0.01) \times 10^4\ \text{p.e.}$ で $59.5\ \text{keV}$ と $26.3\ \text{keV}$ 、 $13.9\ \text{keV}$ はそれぞれ $(2.31 \pm 0.02) \times 10^3\ \text{p.e.}$ 、 $(1.03 \pm 0.02) \times 10^2\ \text{p.e.}$ 、 $(3.94 \pm 0.66) \times 10^2\ \text{p.e.}$ と観測され、 $13.9\ \text{keV}$ の X 線の S2 を観測することに成功した。1相式液体キセノン TPC による $10\ \text{keV}$ 領域のイベントに対する S2 観測は本研究が初めてである。そして、 ^{241}Am 内部線源と ^{252}Cf 外部線源を用いた中性子測定で、ワイヤー電極に $5\ \text{kV}$ 印加した時の S2 が $2.5 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^2\ \text{p.e.}$ の $10\ \text{keV}$ 領域で $\log(\text{S2/S1})$ は ^{252}Cf 外部線源の中性子由来が -0.47 ± 0.04 、 ^{252}Cf 外部線源の γ 線由来が -0.049 ± 0.054 と分離度 0.54 ± 0.04 で粒子識別できた。1相式液体キセノン TPC による S2/S1 での原子核反跳をする中性子と電子反跳をする γ 線の粒子識別も本研究が初めてである。これにより、1相式液体キセノン TPC による S1/S2 解析で WIMPs(原子核反跳) イベントと γ 線(電子反跳) や α 線のバックグラウンドイベントを選別することができることが確認できた。

本実験で $13.9\ \text{keV}$ の S2 が観測できたのは、 ^{241}Am 線源を表面線源に変えたことで線源ホルダー構造体の中でエネルギーを落とすことがなくなり、また、線源ホルダーの形状によってワイヤー電極間のドリフト電場の一様性と平行性が維持できるようになり、ドリフト電子の収集効率が上がったためだと考えられる。

S2/S1 の分解能を向上させるためには、本実験で用いた TPC 内の PTFE スペーサー壁面付近の電場形成を十分にするとドリフト電子の収集効率も一樣になるため shaping ring で電場形成をする必要があると思われる。

^{252}Cf 外部線源を用いた中性子測定をする際、シンチレーターをもう1台導入し TOF を測定することで、中性子のみのイベント選別することができる。これにより、中性子のみの S2/S1 を測定することもできると考えられる。

電場シミュレーションで針電極でも S2 観測に十分な高電場が得られた。今後は、十分な電場形成と各粒子の S2/S1 を再確認した上で、光電面被覆率の高い球状1相式液体キセノン TPC 検出器の開発に向けて針電極による S2 測定を目指した開発が期待される。

Appendix

A ^{241}Am の壊変図

図 A.1 と図 A.2 は ^{241}Am 線源から放射される線源の壊変図である。

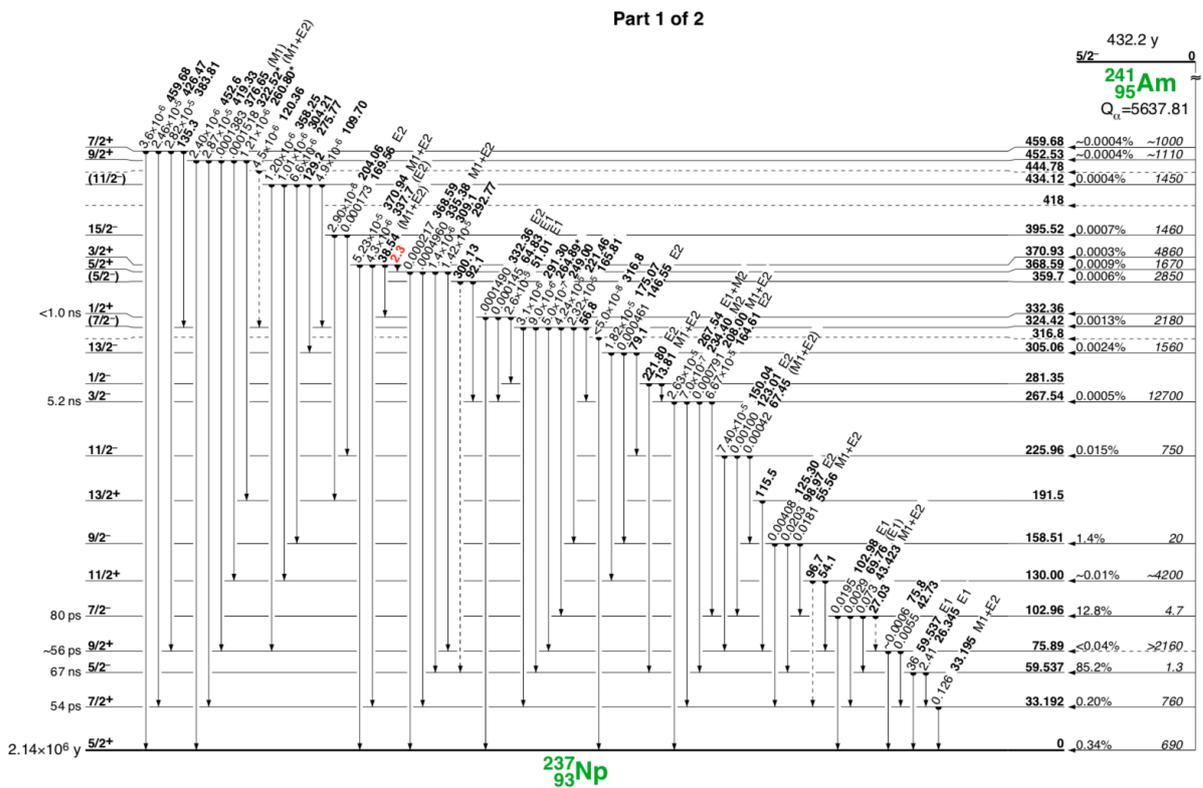


図 A.1: ^{241}Am から放射される γ 線の壊変図 (1)[26]

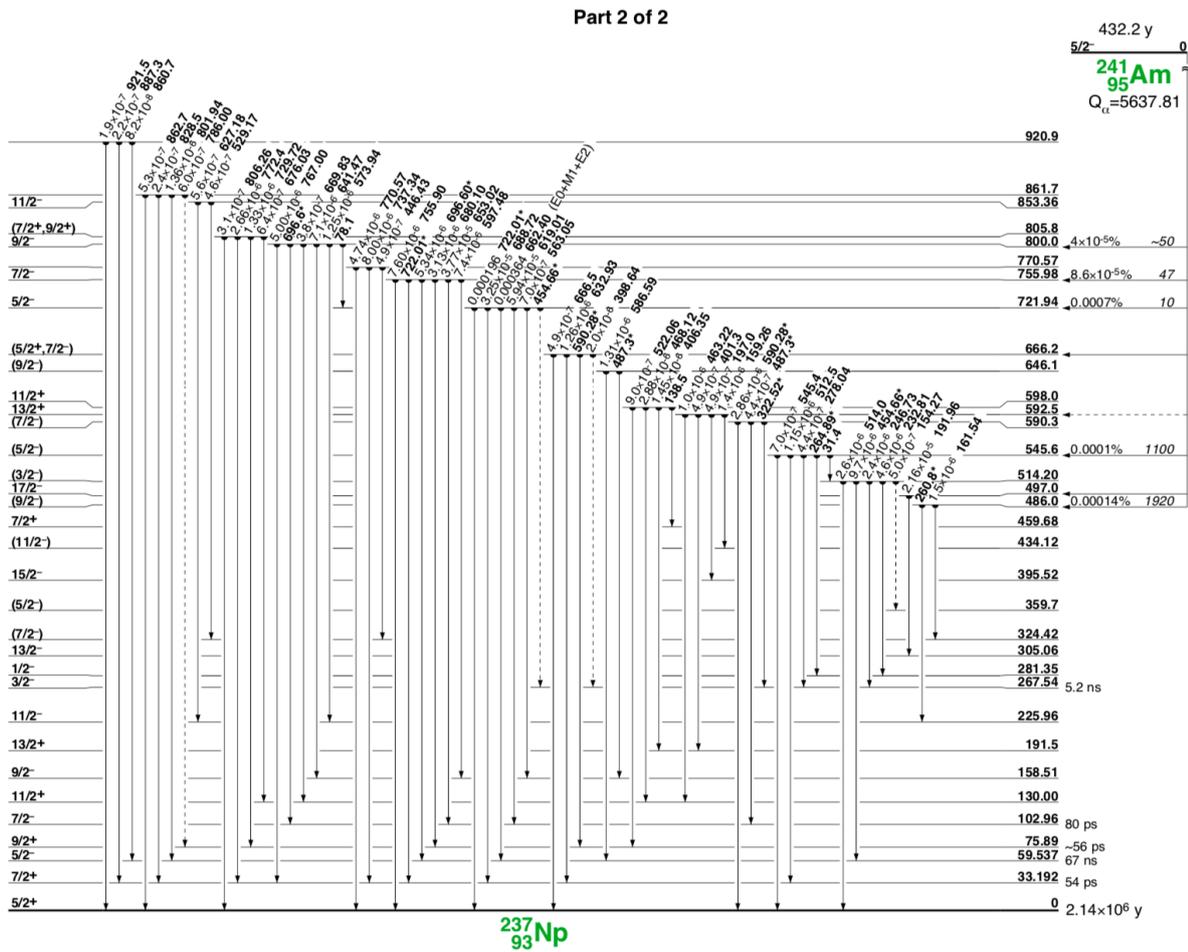


図 A.2: ²⁴¹Am から放射される γ 線の壊変図 (2)[26]

謝 辞

指導教員である伊藤好孝先生には、実験の計画や実験データの解析方法から学会の発表練習、修士論文作成まで丁寧にご指導していただきまして、大変お世話になりました。ありがとうございました。実験は基本的に神岡で行う上に、就職活動や怠慢により大学に足を運ぶ機会が少なかったことや、ミーティングをする際時間変更をしていただいたり、同じ名古屋の地に居ながらお手数をおかけしテレビ会議にさせていただいたりとお忙しい中大変ご迷惑をおかけしました。申し訳ありませんでした。

関谷洋之先生には、1相式液体キセノン TPC テストベンチによる実験の準備や取り扱い、解析、発表用スライドの添削までしていただき、お忙しい中大変お世話になりました。ありがとうございました。また、猪谷駅から茂住のバス停間のバスの本数が少ない上電車の時間とかみ合わないため、車で送っていただいたことがありますが非常に助かりました。

佐藤和史先生と市村晃一先生には、XMASS MC を1相式液体キセノン TPC テストベンチ仕様に構築する際に、XMASS MC の事やプログラミングについて基本的なところから一つ一つ教えていただきました。ありがとうございました。

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、Benda Xu 先生、田阪茂樹先生、加藤伸行君には、XMASS Collaboration meeting や XMASS シフト、神岡での生活等でお世話になりました。XMASS シフト (夜シフト) で睡魔に負けてシフト時間に遅れてしまうなど、ご迷惑をおかけすることがあり大変申し訳ありませんでした。特に平出克樹先生には、初めての XMASS シフトで入坑する際、半袖である私を見兼ねて上着をお貸ししていただいたことは今でも感謝しております。坑内の寒さと注意されることから逃れることができました。ありがとうございました。

神岡研究施設での生活は、普段の生活が恵まれていることに気づかされるものでした。スーパーカミオカンデのタンクオープンの際にタンク内の掃除に関わることができたことは一生の思い出になると思います。

毛笠梨沙子さんや菅澤佳世さんが1相式液体キセノン TPC の研究と開発を進めていただいたお陰もありまして安定して高電場をかけることができました。また、装置の仕様や解析のご指導のお陰もありまして、 ^{241}Am 線源の 13.9 keV の γ 線由来の S2 を観測や粒子識別に成功することができました。全てを一から作っていたらと考えるととても達成し得なかったと思います。ありがとうございました。

名古屋の研究室にいたことが少なかったですが、研究室の方々とは、研究や学問の他に世間話など楽しい話をミーティングや昼食の時間、飲み会でしていただきました。楽しく2年間を過ごすことができました。ありがとうございました。名古屋でお会いした時はまたお世話になるかもしれません。よろしくお願いいたします。

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。

2019年2月 石井 瞭

参考文献

- [1] F. Zwicky, "Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln", *Helvetica Physica Acta* 6: 110 – 127(1933)
- [2] F. Zwicky, "On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae". *Astrophysical Journal* 86(1937)
- [3] V. C. Rubin, "Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 (R = 4kpc) to UGC 2885 (R = 122 kpc)" *Astrophysical Journal*(1980)
- [4] C. Carignan, "EXTENDED HI ROTATION CURVE AND MASS DISTRIBUTION OF M31" *ApJ Letters*(2006)
- [5] K.G.Begeman, A.H.Broeils and R.H.Sanders et al., *MINRAS* 249 (1991) 523
- [6] C. Alcock et al. "MACHO Project Limits on Black Hole Dark Matter in the 1 – 30 M_{\odot} Range" *ApJ*, 542, 281 (2000)
- [7] P. Tisserand et al. "Limits on the Macho content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds" *Astronomy & Astrophysics* 469, 387 (2007).
- [8] McCabe et al. "Prospects for dark matter detection with inelastic transitions of xenon" *arXiv:1512.00460v2*(2016)
- [9] R. Bernabei et al. "Particle dark matter signal in DAMA/LIBRA"
- [10] Changbo Fu et al. "Limits on Axion Couplings from the First 80 Days of Data of the PandaX-II Experiment" *Phys. Rev. Lett.*(2017)
- [11] E. Aprile et al. "Dark Matter Search Results from a One Tonne \times Year Exposure of XENON1T" *astro-ph*(2018)
- [12] P. Cushman et al. "Snowmass CF1 Summary: WIMP Dark Matter Direct Detection", *arXiv:1310.8327* (2013)
- [13] S. Suzuki et al. "Applications of Rare Gas Liquids for Radiation Detectors" CRC Press, Boca Raton, 2011, Chap. 31, pp. 879-922, and references therein.
- [14] E. Aprile et al. "The XENON100 Dark Matter Experiment" *Astropart. Phys.* 35 (2012)
- [15] K. Abe et al. "XMASS detector" *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*A716 (2013)
- [16] K. Masuda et al. "A liquid xenon proportional scintillation counter" (1979)
- [17] S. Suzuki et al. "Detection of energy deposition down to the keV region using liquid xenon scintillation" *NIM A* 327 (1993)
- [18] E. Aprile et al. "Measurements of proportional scintillation and electron multiplication in liquid xenon using thin wires" (2014)

- [19] 松原隆彦 ”現代宇宙論—時空と物質の共進化” 東京大学出版会
- [20] L. Arazi et al.”Gaseous photomultipliers and liquid hole-multipliers for future noble-liquid detectors”(2014)
- [21] E. Erdal et al.”Direct observation of bubble-assisted electroluminescence in liquid xenon” (2015)
- [22] 毛笠莉沙子 ”比例蛍光読み出しによる 1 相式キセノン TPC の開発” 名古屋大学 (2016)
- [23] 菅澤佳世 ”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 の開発” 名古屋大学 (2017)
- [24] CAEN の HP DT5751 のカタログ <https://www.caen.it/products/dt5751/>
- [25] マクセレック社の HP 直流高圧電源のカタログ http://www.max-elec.com/seihin_siyou.htm
- [26] R. B. Firestone”Table of Isotopes”(1996)
- [27] KEK ”Geant4 Tutorial” <https://wiki.kek.jp/display/geant4/Home>
- [28] N.Y. Kim et al.”Micro-source development for XMASS experiment” Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A784, 499-503 (2015)
- [29] A.Levin et al.”A more physical approach to model the surface treatment of scintillation counters and its implementation into DETECT”(1996)
- [30] Murata Software ”Femtet 製品情報” <http://www.muratasoftware.com/products/>
- [31] 応用光研工業株式会社 HP ” ^{241}Am ライトパルサー”http://www.oken.co.jp/web_oken/Am_jp.htm
- [32] W.R.Leo ”Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments A How-to Approach” Springer-Verlag
- [33] M.Szydagis et al.”NEST: A Comprehensive Model for Scintillation Yield in Liquid Xenon” physics.ins-det(2011)
- [34] L.S. Miller et al.”Charge Transport in Solid and Liquid Ar, Kr, and Xe” PhysRev(1967)
- [35] E. Aprile, et al. ”First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment” Physical Review Letters 105 (2010).
- [36] AFP/NASA, ESA, CXC, M. Bradac (University of California, Santa Barbara), and S.Allen (Stanford University)