

修士論文

反電子型ニュートリノの到来方向測定に向けた MPPC を用いた
イメージング検出器の開発

Development of Imaging Detector using MPPC for Directional Measurement
of Electron Anti-neutrino

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻
相馬圭吾

平成 29 年

概要

液体シンチレータ検出器は、低エネルギーのニュートリノを検出するのに優れた検出器である。しかし、従来の検出方法では水チェレンコフ検出器のようにニュートリノの到来方向に感度が無い。液体シンチレータ検出器にニュートリノの方向感度を持たせ、低エネルギーニュートリノの到来方向を知ることができれば、地球内部の熱分布の情報や遠隔での原子炉モニターなど、新たな知見が得られると期待されている。

反電子ニュートリノの検出には逆 β 崩壊反応 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) を利用する。陽電子 (e^+) による発光と、平均 210 μsec 後に中性子が陽子に捕獲される際に放出される 2.2 MeV のガンマ線による発光を測定すること (遅延同時計測) により検出が行われる。逆 β 崩壊反応により放出される中性子は、反電子ニュートリノの到来方向情報を有しており、中性子が反電子ニュートリノの到来方向情報を失う前に測定が出来れば、液体シンチレータ検出器でもニュートリノの到来方向を測定する事は可能である。しかし、既存の液体シンチレータ検出器では、以下の2点が問題となり、中性子の持つ方向情報が失われてしまっている。

1. 陽子の中性子捕獲断面積が小さい (0.3 barn)
2. 後発信号である γ 線が長距離移動する (~ 40 cm)

これらの問題の解決策として、中性子捕獲断面積が陽子の 0.3 barn よりも大きく (940 barn)、(n, α) 反応を起こす ${}^6\text{Li}$ を液体シンチレータに導入した、Li 含有液体シンチレータの開発が先行研究にて行われた。 α 線は γ 線よりも LS 中での移動距離が短いため、(n, α) 反応が後発信号になることで、反応点が拡散しなくなる。また、陽電子の発光点と中性子の捕獲点を精度良く見積もる事ができる高位置分解能の検出器 (イメージング検出器) が必要であり、現在その開発を進めている。高位置分解能を達成する手段としては、イメージングによって光を集め、ピクセル化された光検出器によって検出することで、発光点を撮像することが考えられている。

本研究では、イメージング検出器として MPPC を用いた検出器を開発した。MPPC とは、Multi-Pixel-Photon-Counter の略称であり、フォトンカウンティングに優れた検出器である。先行研究ではマルチアノード光電子増倍管 (以下、MAPMT) を用いていたが、先発信号と後発信号を続けて撮像できるほどの処理速度を持ち合わせていなかったため、それに変わる検出器が必要であった。そこで、MAPMT に比べて処理速度の速いエレクトロニクスを使用することができ、安価で他実験においても使用実績のある MPPC に着目し、検出器としての開発を目指した。開発にあたり、MAPMT のダークレートが数 Hz であるのに対し、MPPC のダークレートは数百～数千 kHz と大きく、本研究での数 p.e. 程度の低光量実験で使用するには、ダークレート低減のために使用環境に適した冷却機構が必要であった。

そこで本研究では、64ch がアレイ化された MPPC (64ch Array-MPPC) を一気に冷却する機構を独自に開発した。まず初めに MPPC の基礎性能評価を行い、使用にあたっての MPPC の動作確認を行った。そして、MPPC のダークレートを減らすため、冷却機構を取り付けた小型サイズ (約 80mm²) の MPPC 検出器を開発した。乾燥空気を封入した断熱容器内に空冷式のペルチェユニットを配置し、ペルチェパッドに取り付けた伝熱板 (銅板) を伝わるように MPPC を冷却する構造をとった。結果、64ch Array-MPPC を簡単かつ一気に冷却させることができ、 -16.03 °C まで冷却させることに成功した。これにより、1ch あたり 623 kHz であったダークレートは 31 kHz にまで減少し、ダークノイズによる影響を低減させることができた。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	ニュートリノとは	1
1.2	太陽ニュートリノ問題	2
1.3	ニュートリノ振動	3
1.3.1	ニュートリノ振動の発見	4
1.3.2	ニュートリノの質量と階層構造	7
第 2 章	ニュートリノの到来方向測定と目的	8
2.1	地球反ニュートリノ	8
2.2	原子炉反ニュートリノ	10
2.3	超新星反ニュートリノ	11
第 3 章	液体シンチレータによる到来方向検出	12
3.1	液体シンチレータ	12
3.2	逆 β 崩壊反応による反電子ニュートリノ検出	15
3.3	到来方向の測定原理	16
3.4	${}^6\text{Li}$ 含有液体シンチレータ	19
第 4 章	イメージング検出器	21
4.1	イメージング検出機の開発要素	21
4.2	イメージング検出器のデザイン	23
4.3	先行研究	23
4.4	ミラーの反射率測定	25
4.5	LED による撮像	27
4.5.1	キャリブレーション	27
4.5.2	ミラーの比較	28
4.5.3	像の大きさ、集光量の評価	28
4.6	表面精度の測定	30
4.6.1	ミラーのまとめ	32
第 5 章	MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)	33
5.1	APD	33
5.2	MPPC の基本パラメータ	34
5.2.1	キャリブレーション	39
5.2.2	ゲイン	41
5.2.3	ブレイクダウン電圧	41
5.2.4	ダークレート	44

5.2.5	クロストーク	46
5.2.6	アフターパルス	46
第 6 章	MPPC を用いたイメージング検出器の開発	47
6.1	研究目的	47
6.2	MPPC を使用した他実験	48
6.3	冷却機構	49
6.3.1	機構図	49
6.3.2	銅板の厚さの最適化	55
6.4	MPPC の有用性評価	56
6.4.1	デッドタイム	56
6.4.2	冷却テスト	57
6.4.3	ブレイクダウン電圧測定	61
6.4.4	ダークレート測定	64
6.4.5	LED を用いたイメージング測定	69
第 7 章	結論と今後の課題	75
7.1	結論	75
7.2	今後の課題	75

目 次

1.1	pp チェインの様子	2
1.2	CNO サイクル	2
1.3	放出ニュートリノのエネルギースペクトル	3
1.4	1998 年: ミューニュートリノの L/E 分布, 2004 年: 大気ニュートリノの振動測定の結果	5
1.5	神岡鉱山内図	5
1.6	KamLAND 検出器の外観	5
1.7	2013 年: 原子炉ニュートリノの測定結果	6
2.1	U, Th, K 系列のエネルギースペクトル	9
2.2	地球ニュートリノフラックスと検出器からの距離・発生点からの角度との関係	9
2.3	ウラン及びプルトニウムの反応過程	10
2.4	地球ニュートリノと原子炉ニュートリノのイベント数スペクトル	11
3.1	電子スピンの状態と蛍光・燐光のエネルギー遷移	13
3.2	主な溶質 (PPO) の発光スペクトルと吸収スペクトル	14
3.3	液体シンチレータ中での逆 β 崩壊反応	15
3.4	逆 β 崩壊反応における全散乱断面積と陽電子の平均角度分布	17
3.5	逆 β 崩壊反応における陽電子放出角と中性子反跳角の相関	18
3.6	LiLS 中における逆 β 崩壊反応の様子	19
3.7	LiLS 中における Li の濃度と中性子捕獲時間 ΔT の相関	20
4.1	イメージング検出器開発の計画	21
4.2	位置分解能と中性子の角度分布との関係	22
4.3	イメージング検出器の様子	23
4.4	測定に使用した CCD カメラ (C9300-201)	23
4.5	LED を用いたイメージング測定のセットアップ	24
4.6	シミュレーション及び実測の撮像結果.1	24
4.7	反射板サンプルと反射率測定の結果	25
4.8	反射率測定に使用した機器	25
4.9	反射板サンプルの反射率測定の結果	26
4.10	CCD のキャリブレーション撮像の様子	27
4.11	シミュレーション及び実測の撮像結果.2	28
4.12	シミュレーション及び実測の RMS 評価	29
4.13	実測における Total Intensity の評価	30
4.14	ミラー表面の様子	31
4.15	アルミ (生材) ミラーの表面精度測定の結果	31

4.16	ミラーによる反射の種類	31
5.1	APD ピクセル内の電場	33
5.2	APD ピクセルにおけるアバランシェ増幅の様子	34
5.3	S13362-3050DG	35
5.4	NIM-EASIROC モジュール	35
5.5	EASIROC の回路図概要	36
5.6	それぞれの波形の様子	38
5.7	タイミング調整のための 1 p.e. ピーク値のプロット	38
5.8	タイミング調整前後の波形の様子	39
5.9	Input DAC による HV 調整	39
5.10	ユーザー指定の入力電圧 V_{con} とバイアス電圧 V_{op} の相関	39
5.11	Threshold DAC と ADC の相関	40
5.12	ADC と波高の相関	40
5.13	MPPC で検出されるフォトン数の分布例	41
5.14	ブレイクダウン電圧測定のセットアップ	42
5.15	25 °C における 1 p.e., 2 p.e. ピーク	42
5.16	25 °C における 1 p.e. 電荷量	42
5.17	5 °C における 1 p.e., 3 p.e. ピーク	43
5.18	5 °C における 2 p.e. 電荷量	43
5.19	-10 °C における 1 p.e., 3 p.e. ピーク	43
5.20	-10 °C における 2 p.e. 電荷量	43
5.21	ブレイクダウン電圧と温度の関係	44
5.22	ダークレート測定のセットアップ	45
5.23	25 °C におけるダークレートと Threshold の関係	45
6.1	実際に作製した MPPC 検出器をミラーに取り付けた様子	47
6.2	MPPC 検出器の概略図	50
6.3	S13361-6050AE-04	50
6.4	コネクタ変換基盤	51
6.5	MPPC と銅板の間に挟んだ α GEL	51
6.6	銅板の形状	52
6.7	ペルチェ冷却ユニットの設計図	52
6.8	ペルチェ素子の動作原理	53
6.9	MPPC 検出器の設計図	54
6.10	乾燥空気を作るために使用したコンプレッサー	55
6.11	銅板の厚さ最適化実験のセットアップ	55
6.12	各銅板の温度変化の様子	56
6.13	銅板の温度が十分に下がってからの拡大図	56
6.14	デッドタイムにおける連続撮像の efficiency	57
6.15	冷却テストのセットアップ	57
6.16	検出器内に取り付けた温度計の位置	58
6.17	流量を変化させた時の温度変化の様子	58
6.18	容器外部における結露対策のためのセットアップ	59

6.19	流量 0 L/min の温度変化の様子	60
6.20	室温 15 °C における 1 p.e., 2 p.e. ピーク	61
6.21	室温 15 °C における 1 p.e. 電荷量	62
6.22	冷却時における 1 p.e., 2 p.e. ピーク	63
6.23	冷却時における 1 p.e. 電荷量	63
6.24	室温 15 °C、および冷却時における Array1~4 のブレイクダウン電圧	64
6.25	$\Delta V=3.0$ V における各 ch のダークレート	65
6.26	$\Delta V=3.0$ V における各 ch の Threshold 解析の結果	66
6.27	各 ch 毎のダークレート map	68
6.28	MPPC による撮像実験のセットアップ	69
6.29	外部トリガーによるピークホールドの様子	70
6.30	各 ch 毎の 0 p.e., 1 p.e. ピーク値マップ	70
6.31	CCD による撮像と MPPC による撮像の様子	71
6.32	撮像における強度比の計算について	71
6.33	MPPC 検出器の冷却前後でのイメージング撮像の比較 (2 次元)	72
6.34	MPPC 検出器の冷却前後でのイメージング撮像の比較 (3 次元)	72
6.35	滲みの割合の計算について	73
6.36	冷却前後における MPPC 検出器による 1event の撮像の様子	74

表 目 次

1.1	素粒子の分類	1
4.1	到来方向測定に向けたイメージング検出器開発の開発要素	21
4.2	ミラーの光学的パラメータ	23
4.3	RMS への影響	32
4.4	反射率への影響	32
5.1	S13362-3050DG の各パラメータ	35
5.2	フィードバックキャパシタンスの容量と増幅率との関係	37
5.3	各温度における 1 p.e., 2 p.e. ダークレート	45
6.1	S13361-6050AE-04 の基礎パラメータ	50
6.2	室温 (15 °C), $\Delta V=3.0$ V における各 ch の Threshold DAC	66
6.3	MPPC 冷却時の各 ch の 0.5 p.e. ダークレートのまとめ	67
6.4	MPPC 冷却時の各 ch の 1.5 p.e. ダークレートのまとめ	67
6.5	室温 (15 °C) および冷却時におけるダークレートのまとめ	69

第1章 序論

1.1 ニュートリノとは

素粒子は大きく分けると、フェルミオンとボソンに分類される。フェルミオンは物質を構成する素粒子で、6種類のクォークと6種類のレプトンから構成されており、電荷はそれぞれ表 1.1 のようになっている。ニュートリノはレプトンの一種であり、質量が非常に小さく電荷を持たないため、弱い相互作用しか働くことができない。そのため、反応断面積がとても小さく検出が困難な素粒子である。

ニュートリノの存在は、1930年に Wolfgang Ernst Pauli によって β 崩壊におけるエネルギー非保存則を解決するために提唱され、1934年に Enrico Fermi によって”ニュートリノ”と名付けられた。その後、1956年に Frederick Reines と Clyde Cowan によって初めて観測がなされた。

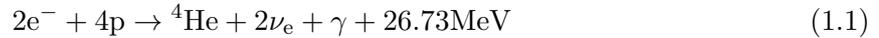
彼らは、原子炉から放出されるニュートリノの検出に成功した。実験では、原子炉のすぐ傍に塩化カドミウムが含まれる水と液体シンチレータを組み合わせた検出器を置き、反ニュートリノと陽子との反応を期待した。反ニュートリノが陽子と反応すると、陽電子と中性子が放出され、その後中性子がカドミウムによって捕獲される。その際、 γ 線が放出される。これを考慮し、陽電子による先発信号と γ 線による後発信号を遅延同時計測することによる検出を行い、(電子)ニュートリノの観測に成功した [1]。以後、L.Lederman, M.Schwartz, J.Steinberger らによって1962年に Brookhaven 国立研究所にてミューニュートリノが [2]、2000年に DONUT 実験にてタウニュートリノが発見された [3]。これにより、ニュートリノが3世代確認された。

表 1.1: 素粒子の分類

	電荷	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	$+\frac{2}{3}$	u アップ	c チャーム	t トップ
	$-\frac{1}{3}$	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム
レプトン	-1	e 電子	μ ミューオン	τ タウオン
	0	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ

1.2 太陽ニュートリノ問題

太陽の内部では活発に核融合反応が起きており、莫大な熱源であるとともに式 1.1 のような反応によって大量のニュートリノを放出している。



このように、太陽内部の核融合反応によって生成される電子ニュートリノを太陽ニュートリノと呼ぶ。核融合反応は、温度によって支配度が異なる、pp チェインと CNO サイクルと呼ばれる 2 つの反応が存在する。それぞれの反応の様子は図 1.1, 1.2 の通りである。太陽の中心温度 ($\sim 1.4 \times 10^7$ K) では、pp チェインが全エネルギーのおよそ 98.5% を占めているが、温度が $> \sim 1.6 \times 10^7$ K においては、CNO 反応が支配的となってくる。また、放出ニュートリノのエネルギースペクトルは図 1.3 のようになっている。

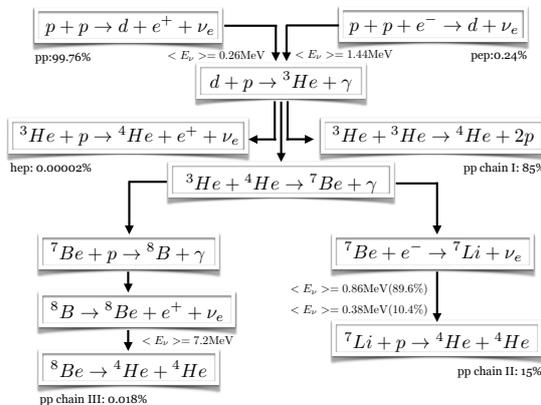


図 1.1: pp チェインの様子

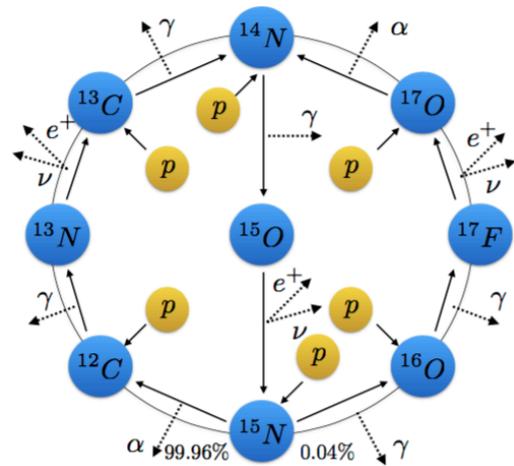
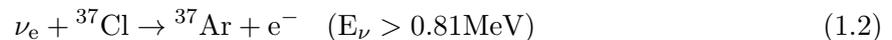


図 1.2: CNO サイクル

太陽ニュートリノ (電子ニュートリノ) 観測は、1960 年代後半から米国の R.Davis らによるホームステイク実験により始まった。ホームステイク実験では、塩素化合物である 2 塩化炭素 (CCl_2) の水溶液を 615 ton を検出器として用いた。この液体 2 塩化炭素検出器は、宇宙線由来のバックグラウンド低減のために地下 1620 m に設置され、さらに中性子由来のバックグラウンド低減のために水中に沈められた。ニュートリノ検出においては、式 1.2 によって太陽ニュートリノを検出した。



ニュートリノによって生成されたアルゴンは、半減期 35 日間で元の塩素に戻ってしまうのだが、35 日以上検出器を稼働させておくことにより生成量と崩壊量が均衡し、一定量のアルゴンが存在するようになる。それから、ガスとなって浮いているアルゴンを取り出し、活性炭に吸わせることで回収を行う。アルゴンは塩素に戻る時に特性 X 線を放射するので、回収したアルゴンガスから放射される X 線を比例計数管で計測することにより、アルゴン数、つまりニュートリノ反応率が計算できる。ただこの方法では、アルゴンを貯めてから検出を行う必要があるため、ニュートリノの飛来時間、飛来方向、エネルギーは分からない。実際にこの方法で得られた太陽ニュートリノフラックスは、標準太陽モデル (SSM:Standard Solar Model) の予想値と比較すると、3 分の 1 程度しか観測されなかった。これが、太陽ニュートリノ問題である。その後、約 30 年に渡りこの問題は謎であったが、KamLAND がニュートリノ振動の存在を証明したことにより、終止符が打たれることとなった。

SSMの予想値：7.9 SNU
 観測値：2.05 ± 0.3 SNU

ただし、SNU(Solar Neutrino Unit) とは、Events/10³⁶atom/sec のことである。

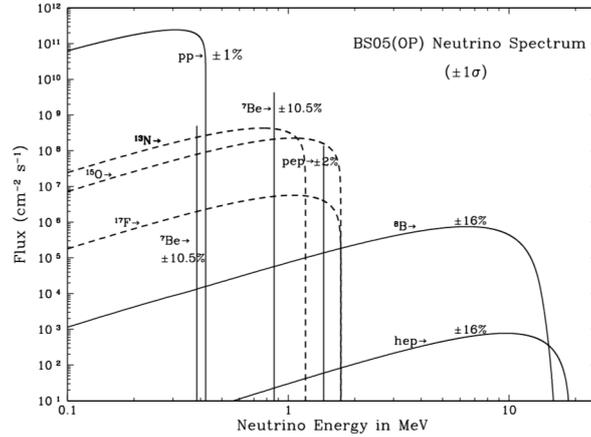


図 1.3: 放出ニュートリノのエネルギースペクトル [10]

1.3 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ニュートリノのフレーバーが周期的に変化する現象である。この現象は、3世代あるニュートリノが異なる質量固有状態の混合となっている場合、そのエネルギー、飛行距離、質量の2乗差に依存してニュートリノのフレーバーが変化・復元を繰り返すものであり、ニュートリノ質量の証拠にもなるものである。例えば、電子ニュートリノが生成され、それが異なる質量固有状態の混合となっていると、異なる質量状態は異なる速度で空間を伝搬していくことになる。すると、空間を進んでいくにつれてその混合状態が変化し、結果フレーバーが変化するのである。それぞれのニュートリノのフレーバー固有状態は以下の式 (1.3) によって計算できる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j} |\nu_j\rangle \quad (j = 1, 2, 3 \quad \alpha = e, \mu, \tau) \quad (1.3)$$

$$U = \begin{pmatrix} c_{21}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\sigma_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\sigma_{13}} & c_{12}c_{13} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\sigma_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\sigma_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\sigma_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

ただし、行列 U は Maki-Nakagawa-Sakata 行列 (MNS 行列) と呼ばれるユニタリ行列であり、 $c_{12} = \cos \theta_{12}$, $s_{12} = \sin \theta_{12}$, ... である。簡単に、2世代間のニュートリノ振動を考えると、混合角 θ_{12} を用いてフレーバー固有状態は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin \theta_{12} |\nu_1\rangle + \cos \theta_{12} |\nu_2\rangle \end{aligned} \quad (1.5)$$

これより、初期状態で ν_e であったものが時刻 t で ν_μ に変化する振動確率は以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_e(0) | \nu_\mu(t) \rangle|^2 = |\sin\theta_{12}\cos\theta_{12}(1 - e^{-i(E_1-E_2)t})|^2 \\ &\simeq \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2}{4E} L \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} \right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

ただし、 $\Delta m^2 [eV^2]$ は2世代間の質量2乗差、 $L [km]$ はニュートリノの飛行距離、 $E [GeV]$ はニュートリノのエネルギーである。これより、振動が顕著な領域は

$$\sin^2(\Delta m^2 L / 4E) = 1 \Leftrightarrow \Delta m^2 L / 4E = \pi/2$$

であるので、 E/L を適切に選択することで広範囲の Δm^2 の探索が可能になる。

ニュートリノ振動実験には、主に”消失 (disappearance) 実験”と”出現 (appearance) 実験”の2種類がある。消失実験では、生成されたニュートリノがあたかも消失したかのような現象を観測する。例えば、原子炉で生成された反電子ニュートリノの観測実験がこれにあたる。原子炉で作られた反電子ニュートリノは、ニュートリノ振動により検出器に到達するまでの間にミューニュートリノやタウニュートリノに変化する。そのため、検出器では反電子ニュートリノの数が減少して観測されることになる。振動は距離によって周期的に起こるため、2箇所以上の異なる距離での観測が望まれる。一方、出現実験は、ニュートリノがそのフレーバーと同じ荷電レプトンを生成するのに十分なエネルギーを持つ場合にのみ観測可能となる。例えば、原子炉で生成された反電子ニュートリノがミューニュートリノに変化したとしても、ミューオンを生成するのに十分なエネルギーを持っていないために観測ができない。このため、高エネルギーのニュートリノが必要となり、一般的には粒子加速器を用いた実験が主となっている。

1.3.1 ニュートリノ振動の発見

ニュートリノ振動の証拠は、1998年に東京大学宇宙線研究所を中心とした Super-Kamiokande (SK) 実験にて世界で初めて発見された。SK 実験では、大気ニュートリノに着目した。大気ニュートリノは、宇宙から到来する高エネルギーの宇宙線 (主に陽子) が大気原子核と反応することによって生成されるニュートリノである。反応式は以下のとおりである。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \Rightarrow \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.7)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \Rightarrow \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.8)$$

式 (1.7)、もしくは式 (1.8) の過程において、 ν_μ が2つと ν_e が1つ生成されるため、それらの比は2に近いはずである。しかし、観測におけるその比は1に近く、大気ニュートリノ異常と呼ばれていた。そんな中、SK グループは地下 1000 m に水チェレンコフ検出器を建設し、この大気ニュートリノを観測した。もしニュートリノ振動を仮定しなければ、上空から到来する (下向きに飛んでくる) ミューニュートリノと地球の裏側から到来する (上向きに飛んでくる) ミューニュートリノの数は同じになるはずである。しかし、実際に観測された上向きのミューニュートリノの数は、 L/E が大きくなるにつれて減少していることが確認された (図 1.4 の左図 [4])。これは、ミューニュートリノが長距離移動する間に、他の種類のニュートリノであるタウニュートリノに変化し観測さ

れることなくすり抜けてしまっている、と考えることで説明がつく。この観測によって、SKグループはニュートリノ振動の発見を報告した。また、その後の2004年には、大気ニュートリノの振動の形を確認したデータの測定に成功した(図1.4の右図[5])。大気ニュートリノ振動の測定の結果、現在では振動パラメータとして、

$$\sin^2 2\theta_{23} \sim 1, \Delta m_{32}^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$$

が測定されている[5]。

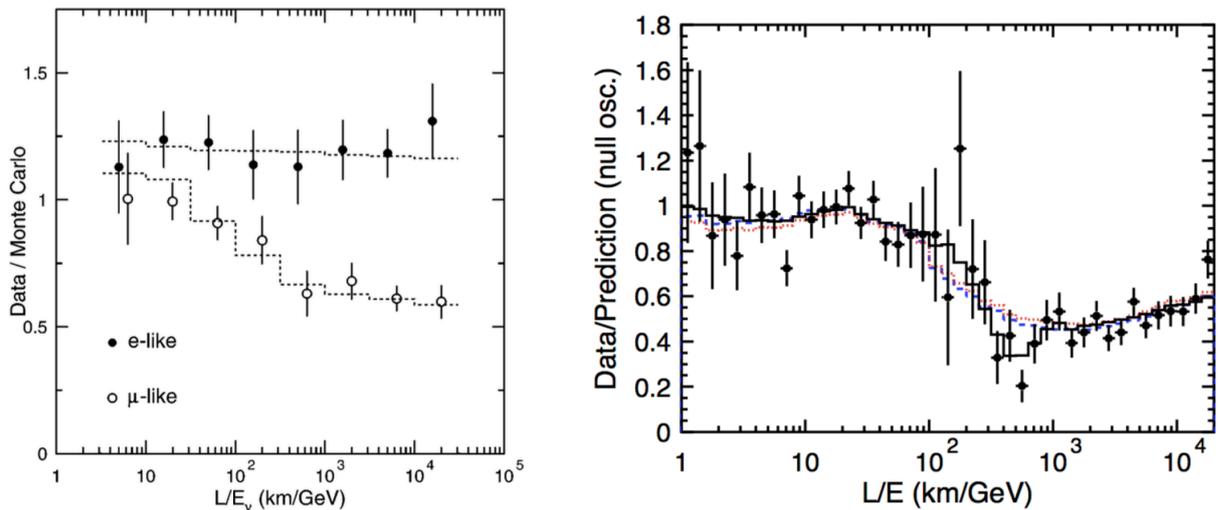


図 1.4: 左図: 1998年に観測されたミューニュートリノの L/E 分布, 右図: 2004年に観測された振動の形を確認したデータ

また、2002年に初めてニュートリノ振動を直接観測することに成功したのは、東北大学を中心とした KamLAND 実験である。KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector) とは、Kamiokande の跡地である岐阜県飛騨市の神岡町にある神岡鉱山に建設された反電子ニュートリノ検出器である。KamLAND は池ノ山山頂から地下 1000 m に建設され、宇宙線ミューオンのフラックスが地上の 10^{-5} まで抑えられている。また、バルーン内部を満たす液体シンチレータを蒸留することによって放射性不純物を除去し、極低バックグラウンド環境を実現している(図 1.5)。

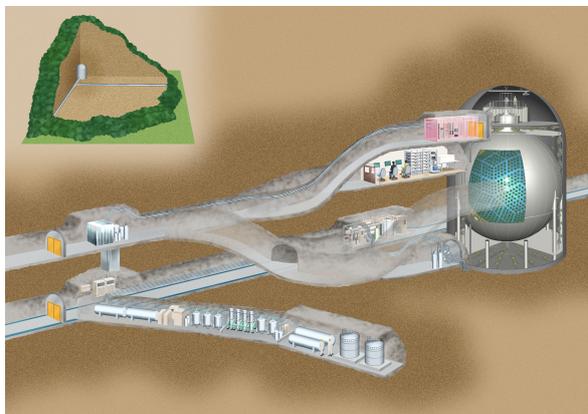


図 1.5: 神岡鉱山内図

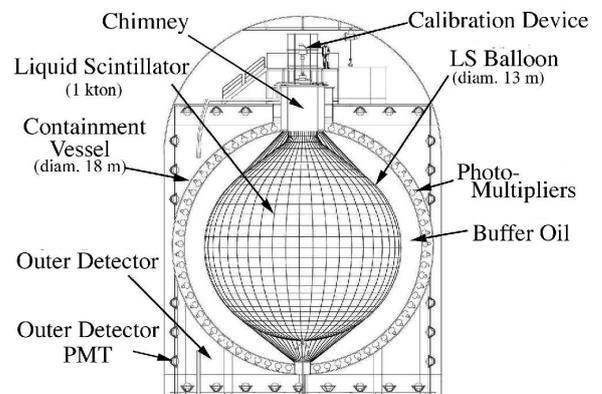


図 1.6: KamLAND 検出器の外観

KamLAND の構造は、高さ 20 m の円筒タンクに 18 m の球形ステンレスタンクが入っており、内部のバルーンは 1 kton の液体シンチレータで満たされている。外側に位置する円筒タンクは約 3 kton の純水で満たされており、20 inch の光電子増倍管が 140 本導入されている。これにより、高エネルギーの宇宙線ミューオンが検出器内部に侵入してきた時、チェレンコフ光の検出によって解析的にミューオンを除去することが可能となっている。また、岩盤から放出される中性子や γ 線が純水によって遮蔽されたり、光電子増倍管の温度上昇を抑えるといった役割も果たしている (図 1.6)。2002 年の KamLAND 実験では、原子炉で生成される反電子ニュートリノ (原子炉ニュートリノ) に着目し、KamLAND で観測された反電子ニュートリノの生存確率を見積もった [7]。その際、発生元の反電子ニュートリノのフラックスを正確に求める必要があるが、原子炉の運転状況と観測データを比較することでこれを行った。2013 年に KamLAND 実験で実際に観測された原子炉ニュートリノの測定結果を図 1.7 に示す。この観測により、

$$\tan^2\theta_{12} = 0.436^{+0.029}_{-0.025}, \Delta m_{21}^2 = 7.53^{+0.18}_{-0.18} \times 10^{-5} [\text{eV}^2]$$

が測定されている。

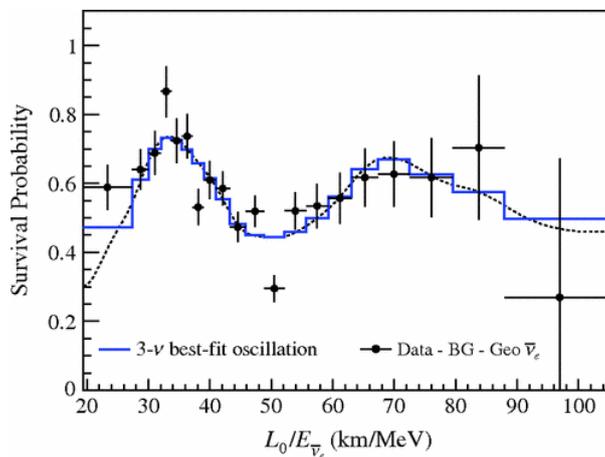


図 1.7: 2013 年の KamLAND 実験で観測された原子炉ニュートリノの測定結果 [6]

1.3.2 ニュートリノの質量と階層構造

〈質量〉

ニュートリノには3種類のフレーバーがあることが知られているが、最近まで質量はないとされていた。しかし、先に記述したニュートリノ振動の発見により、ニュートリノが質量を持ち、かつ3種類それぞれの質量 (m_1, m_2, m_3) が異なることが証明された。式 1.6 より、“ニュートリノに質量が存在しない ($\Delta m^2 = 0$) ならば、振動確率は0となりニュートリノ振動は起こらない”。この命題の対偶を取ると、“ニュートリノ振動が起こるならば、ニュートリノに質量が存在する”となる。つまり、ニュートリノ振動はニュートリノに質量があることを条件として起こるのであって、ニュートリノ振動が観測されたということは、ニュートリノに質量があることを裏付けたのと同じことである。ただし、判明したのはニュートリノに質量がある、ということであり、質量の絶対値は未だ判明していない。

〈質量階層構造〉

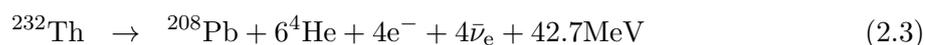
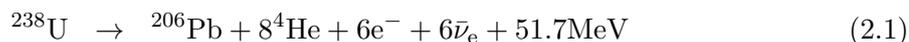
太陽ニュートリノや原子炉ニュートリノの振動観測から、 m_1 と m_2 の質量二乗差 Δm_{21}^2 が得られ、大気ニュートリノの振動観測から、 m_2 と m_3 の質量二乗差 Δm_{32}^2 が得られたが、それぞれの絶対値は分かっていない。また、これらの観測では、 m_2 と m_3 のどちらが大きいということも分かっていない。これは、“ニュートリノ質量階層性問題”と呼ばれ、もし $m_3 \gg m_2 > m_1$ の場合は標準階層構造 (NH)、 $m_2 > m_1 \gg m_3$ の場合は逆階層構造 (IH)、 $m_1 \sim m_2 \sim m_3$ の場合は準縮退構造 (QD) と名前が付けられている。

第2章 ニュートリノの到来方向測定と目的

反電子ニュートリノの到来方向測定における観測対象は、地球反ニュートリノ、原子炉反ニュートリノ、超新星反ニュートリノである。この章では、それぞれのニュートリノについて、到来方向測定に関する視点から記述する。

2.1 地球反ニュートリノ

地球反ニュートリノは、地球内部に存在する放射性元素の β 崩壊により発生する反ニュートリノで、以下のような崩壊連鎖反応によって発生することが判っている。



地球は固体内核・液体内核・マントル・地殻といった層構造になることが知られている。しかし、さらなる具体的な地球内部組成については直接観測は不可能であり、隕石の分析や火山・マグマなどの噴出物についての研究といった、化学的側面から推定しているのが現状である。そんな中、大陸活動や火山活動、地震に直結する現象をもたらす地熱は極めて重要である。この地熱について、地表で観測されている熱流量はおよそ 44.2 ± 1.0 TW と計算されている [8]。しかし、限定的な観測点から地球全体を知ることが困難であり、31 TW 程度だという計算もある [9]。そんな中、2011年には、地球内部に含まれる”放射性物質から発生する熱量”はおよそ $20_{-8.6}^{+8.8}$ TW と見積もられ [12]、放射性物質が地熱のおよそ半分を占めることが分かった。つまり、放射性物質の分布に関する情報を得ることができれば、地熱に対する理解は一層深まることになる。

地球内部において崩壊連鎖反応により発生したニュートリノは容易に地表に到達するため、これを観測することができれば、地球内部の放射性物質の量や分布に関する情報を得ることができると言える。ただし、KamLANDのような陽子による捕獲反応を使った実験の反応閾値は 1.8 MeV となり、式 (2.4),(2.5) のカリウムは今後の課題となっている。

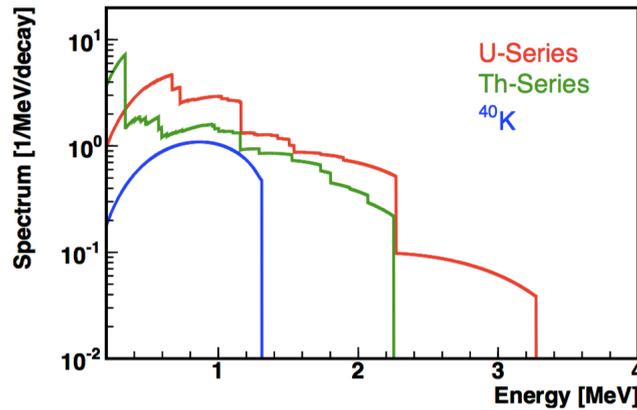


図 2.1: U, Th, K 系列のエネルギースペクトル [11]

現在、地球内部の組成は明らかにはなっておらず、地球ニュートリノ観測による解明が進められている。図 2.2 の左図に、地球ニュートリノのフラックスと KamLAND 検出器からの距離との関係を示す。これによると、地殻からのフラックスが最も大きいことが分かる(約 70%)。地殻からのフラックスは検出器からの距離が近いところでほとんどを占めているため、より深いマントルなどの情報を得るため、正確に見積もることが重要である。また、図 2.2 の右図に、地球ニュートリノフラックスと地球ニュートリノの発生点からの角度との関係を示す。これより、地球ニュートリノフラックスは 80° 以上の範囲で多くなっていることが分かる。ただ、マントルに関して、上部マントルは 60° ~ 70° の範囲で、下部マントルは 30° ~ 40° の範囲で多くなっている。以上より、地殻やマントルから到来する地球ニュートリノフラックスは角度に依存していると言える。そのため、より深いマントルからの情報を得るためには、到来方向を測定する技術が有用な手段となってくる。

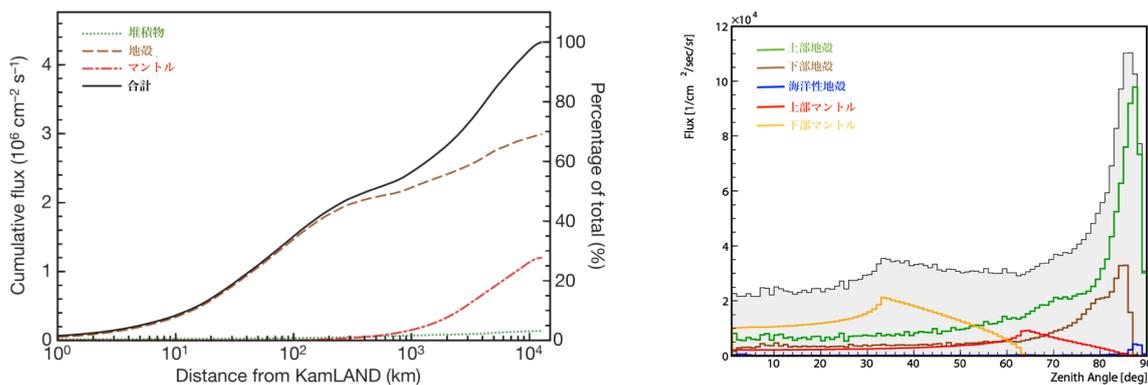


図 2.2: 左図:地球ニュートリノのフラックスと KamLAND 検出器からの距離との関係, 右図:地球ニュートリノフラックスと地球ニュートリノの発生点からの角度との関係

2.2 原子炉反ニュートリノ

原子炉が運転していると、核融合反応の過程で反ニュートリノが生成される。これを原子炉反ニュートリノと呼ぶ。原子炉においては、一般的に3~5%の²³⁵Uが含まれるウラン(²³⁸U)燃料が用いられているが、²³⁸U自身は核分裂を起こさない。しかし、以下の反応過程のように高速中性子を吸収してプルトニウムになり、さらにそのプルトニウムが高速中性子を吸収して核分裂を起こす。

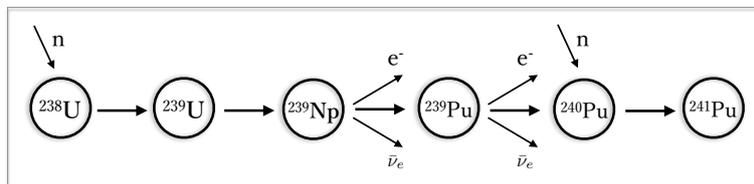


図 2.3: ウラン及びプルトニウムの反応過程

これら核分裂によって放出される平均エネルギーはおよそ200 MeV程度であり、ワット [W] の単位に計算し直すと、

$$4.45 \times 10^{-20} \times 200 = 8.9 \times 10^{-20} [\text{kWh}]$$

となる。ただし、1 MeV=4.45×10⁻²⁰kWhとして計算した。

原子炉ニュートリノの到来方向測定は、主に地球ニュートリノのバックグラウンド低減において重要な役割を持つ。図 2.4 に、低エネルギー領域のニュートリノスペクトルを示す。地球ニュートリノのイベントが原子炉ニュートリノのイベントに埋もれてしまっていることが分かる。つまり、原子炉ニュートリノを区別して排除しなければ、地球ニュートリノ解析のバックグラウンドになってしまう。つまり、もし反電子ニュートリノの到来方向検出が可能になれば、原子炉から到来するニュートリノの量を正確に測定できるため、バックグラウンド低減につながる。

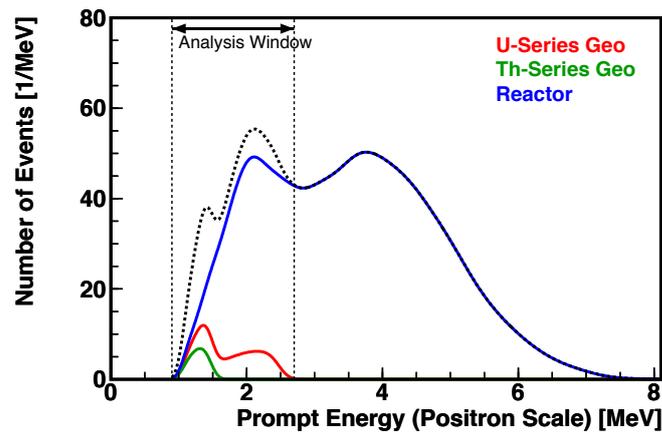


図 2.4: 地球ニュートリノと原子炉ニュートリノのイベント数スペクトル (地球ニュートリノのイベントが原子炉ニュートリノのイベントに埋もれている様子が分かる)

2.3 超新星反ニュートリノ

太陽よりおよそ8倍以上重い星は、超新星爆発と呼ばれる爆発によって最期を迎える。恒星の中心では熱核融合反応が起こっており、初めのうちは水素が反応を起こし、ヘリウムやベリリウムといった原子核が生成されていく。その後、反応が進み星が最期を迎える時、表面から水素の層、炭素の層、酸素の層といった具合に、中心に向かうにつれて重い原子核の層が形成されている。中心部には、最も安定な鉄の層(コア)ができている。この鉄の層は、自身の重力や外層の圧力に対して、電子の縮退圧によってそれを支えている超高密度な状態となっている。核融合反応によって鉄が増えてくると、縮退圧では支えられずにさらに高密度・高温となり、ここで鉄は光と熱を吸収して分解反応を起こす。この過程で陽子と中性子が生成されるが、その陽子が縮退圧の源である電子を捕獲して反応 2.11 を起こす。



こうして、星は縮退圧を失いながら圧縮を続け、最期には重力的に崩壊し超新星爆発を起こす。この際にも、電子と陽電子の対消滅反応によっても全てのフレーバーの(反)ニュートリノが生成される。



これらのニュートリノを超新星ニュートリノと呼ぶ。超新星ニュートリノの到来方向測定は、光学的な観測にとって重要な役割を果たす。望遠鏡を使った光学的な観測では、星が超新星爆発を起こして発光が起これなければ観測ができない。しかし、超新星ニュートリノは爆発以前において観測が可能のため、これから起こる超新星爆発を予測することができる。さらに、超新星ニュートリノの到来方向測定が可能であれば、どの方角の星が超新星爆発を起こすかを制限できるため、光学的な観測においても重要な役割を果たす。実際、SNEWS (SuperNova Early Warning System) と呼ばれる、光学的観測に活かそうというシステムの導入が考えられている [13]。

第3章 液体シンチレータによる到来方向検出

液体シンチレータ (Liquid Scintillator) を用いた検出においては、ニュートリノが到来したことは観測できるが、ニュートリノの到来方向を知ることは容易ではない。なぜなら、方向情報を持った中性子が陽子に捕獲されるまでに長距離移動してしまい、後発信号の発光点が不明になってしまうからである。また、後発信号の γ 線がエネルギーを落とし切るまでに時間がかかることも問題となる。この章では、液体シンチレータ中での発光原理を踏まえ、ニュートリノの到来方向を検出する原理について説明し、問題の解決策について記述する。

3.1 液体シンチレータ

液体シンチレータは、トルエンやドデカンなどの有機溶媒に PPO などの発光物質の溶質を溶かし込んだ液体で、放射線作用によって発光が起こる液体である。溶媒と溶質の種類や使用量の組み合わせによって特性が決まってくるため、その選び方が重要となってくる。以下、溶媒と溶質について記述する。

〈溶媒〉

溶媒は液体シンチレータの主成分であり、以下の条件を満たすものを選択する必要がある。

- ・シンチレーションの発光過程におけるエネルギー伝達効率が良い
- ・溶質の発光スペクトル付近に溶媒の吸収スペクトルがない
- ・溶質をよく溶かし、高純度であること

〈溶質〉

溶質は液体シンチレータ中での発光に直接的に関与してくるため、その重要度は高い。性能を上げるためには、式 3.1 で表される蛍光量子収率が大きい物質を使用する。

$$\text{蛍光量子収率} = \frac{\text{蛍光放出の分子数}}{\text{励起状態の分子数}} \quad (3.1)$$

また、液体シンチレータの発光機構は以下のようにになっている。

発光機構

1. 放射線エネルギー吸収による溶媒分子の励起
2. 溶媒分子間のエネルギー移行
3. 励起溶媒分子から溶質分子へのエネルギー移行
4. 溶媒分子からの蛍光

これらのエネルギー伝達の機構は、分子のエネルギー準位及び電子遷移によって説明される [21]。分子の励起状態は、電子スピンの取り方によって 1 重項状態と 3 重項状態に分かれる。図 3.1 の左

図のように、基底状態にある電子スピンの向きと励起状態にある電子スピンの向きが逆になっている状態を1重項状態、同じ状態を3重項状態と呼ぶ。3重項状態は、1重項状態よりも低いところに準位を持つ。以上述べてきた励起状態は電子軌道間の電子遷移に基づくもので、エネルギーの低い順に第1電子励起準位、第2電子励起準位、.....と呼ばれる(図3.1の右図)。液体シンチレータにおける発光には主に、1重項・1重項間の輻射的遷移によって生じる”蛍光”、3重項・1重項間の輻射的遷移によって生じる”燐光”がある。蛍光は数 ns 以内に生じるため、シンチレーション光の速い成分を形成する。また、燐光はスピンの反転を伴う禁制遷移であるため、およそ 10^4 s 以上の長い寿命を持つ。常温では、溶液中の分子の拡散運動が盛んなので、長寿命の3重項励起状態にある分子は他の分子と相互作用を起こし、励起状態から燐光を放出しないでエネルギー失活する確率が高い。そのため、常温の液体シンチレータ中における燐光は観測されない程度に小さくなる。ただし、十分に温度が低い場合や粘性の大きい溶液では燐光はよく観測されるため、注意が必要である。

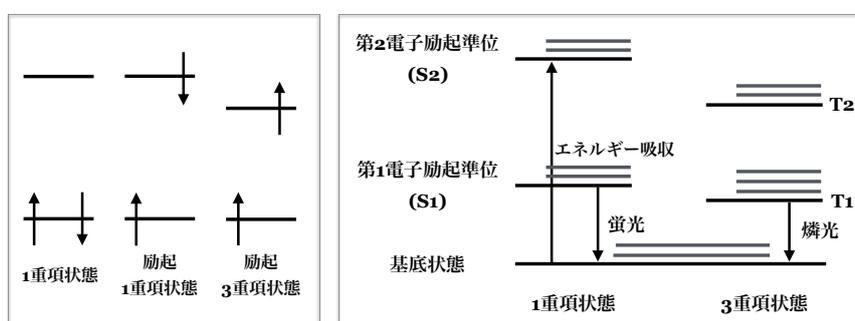


図 3.1: 左図: 1重項状態と3重項状態の電子スピン, 右図: 蛍光と燐光のエネルギー遷移

液体シンチレータ中での発光では、不純物の混入によって”クエンチング”と呼ばれる蛍光の減光効果が確認されている。クエンチングにはいくつかの種類がある。

1. 化学クエンチング

放射線エネルギーが溶媒を励起し、この励起エネルギーが蛍光体に吸収されるまでの過程において生じるクエンチング。物質の化学的特性によって決まるものではあるが、シンチレーション光の発光機構が複雑であるために、化学クエンチングについてもまだ完全には解明されていない。

2. 酸素クエンチング

溶液に含まれる酸素によって起こるクエンチング。化学クエンチングの1種ではあるが、一般的に別個として議論されることが多い。溶液に不活性ガスを封入することで酸素が取り除かれるため、クエンチングを減少させることができる。本研究で使用した液体シンチレータについても、完成後窒素でパージを行っている。

3. 色クエンチング

溶質の発光スペクトルと、クエンチング物質の吸収スペクトルが重なる部分で蛍光を吸収するクエンチング (図 3.2)。光学的クエンチングとも呼ばれる。シンチレーション光は近紫外領域から可視領域に広がっている分布していることが多いため、この領域に吸収スペクトルを持つ物質が溶液中にあると、色クエンチングを起こす。

4. 電離クエンチング

重粒子のようなエネルギー損失が大きい粒子が液体シンチレータ中を飛行する時に起こるクエンチング。粒子の飛跡に沿って電離・励起分子の密度が高い領域が作られ、発光効率が低下してしまう事が原因であると考えられる。

5. 濃度クエンチング

溶質の濃度に関して起こるクエンチング。低濃度であれば、溶質を増やすことで溶媒-溶質間のエネルギー移行がしやすくなるため、発光量は増大する。しかし、ある濃度で極大点に達し、そこから溶質を増やし続けると逆に発光量が減少してしまう。これは、溶質自身の吸収スペクトルと重なる部分での自己吸収が原因となる。

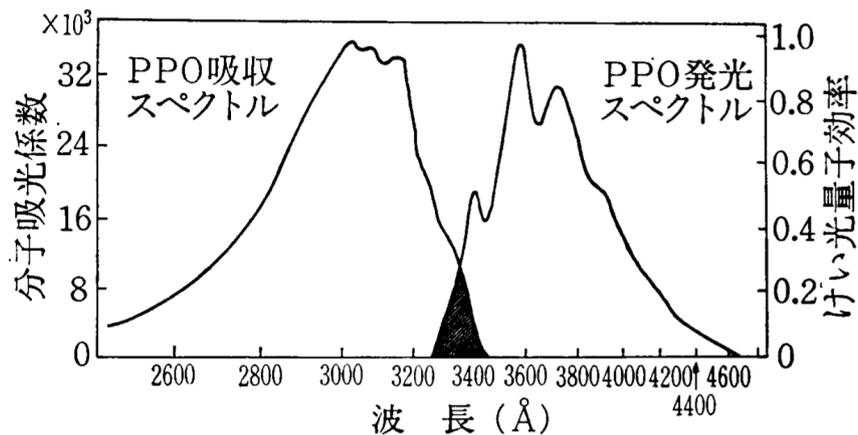


図 3.2: 主な溶質 (PPO) の発光スペクトルと吸収スペクトル

3.2 逆β崩壊反応による反電子ニュートリノ検出

液体シンチレータを用いた反電子ニュートリノの検出には、逆β崩壊反応と呼ばれる以下の反応を利用する。



ニュートリノ検出に用いられる液体シンチレータ中には、陽子が大量に含まれている。そのため、液体シンチレータに反電子ニュートリノが飛び込むと、反応式 3.2 によって中性子と陽電子が生成される (図 3.3)。生成された陽電子は、液体シンチレータ中に含まれる電子と即座に反応して対消滅を起こし、0.511 MeV の γ 線を 2 本放出する。これが、先発信号となる。一方、放出された中性子は熱化した後、液体シンチレータ中をおよそ 210 μs 漂った後に陽子に捕獲される。この時 2.2 MeV の γ 線が放出され、これが後発信号となる。これら先発信号と後発信号を遅延同時計測することにより、反電子ニュートリノを検出するのである。

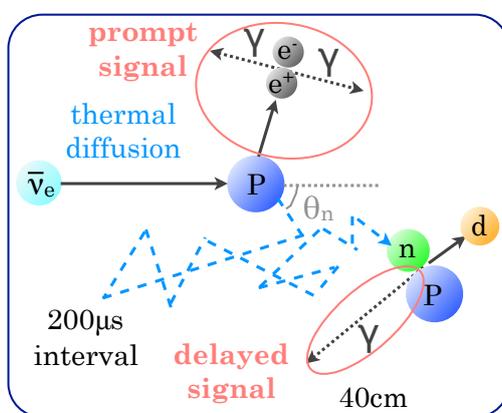


図 3.3: 液体シンチレータ中での逆β崩壊反応

液体シンチレータを用いて反電子ニュートリノを検出するためには、反応式 3.2 が起こる必要があるが、そのための条件として反電子ニュートリノのエネルギー閾値 (E_{Th}) が計算できる。4元運動量の保存則より、

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 &= p_3 + p_4 \Leftrightarrow (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2 \\ &\Leftrightarrow m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2) = m_3^2 + m_4^2 + (2E_3 E_4 - \mathbf{p}_3 \cdot \mathbf{p}_4) \\ &\Leftrightarrow m_2^2 + 2E_1 m_2 = m_3^2 + m_4^2 + (2E_3 E_4 - \mathbf{p}_3 \cdot \mathbf{p}_4) \end{aligned}$$

ここで、閾値を考える上で陽電子と中性子の運動エネルギーを 0 とすると、

$$\begin{aligned} E_{\text{Th}} &= \frac{m_3^2 + m_4^2 + 2m_3 m_4 - m_2^2}{2m_2} \\ &= \frac{(m_3 + m_4)^2 - m_2^2}{2m_2} = 1.806[\text{MeV}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

となる。ただし、添え字番号は、1:反電子ニュートリノ, 2:陽子, 3:陽電子, 4:中性子である。

また、先発信号・後発信号のエネルギー ($E_{\text{prompt}} \cdot E_{\text{delayed}}$) は以下のように計算できる。

先発信号のエネルギー

先発信号のエネルギーは、放出された陽電子が対消滅して出す γ 線のエネルギーなので、

$$\begin{aligned} E_{\text{prompt}} &= K_{e^+} + m_{e^+} + m_{e^-} \\ &= E_\nu + m_p - m_n - m_e - K_n + 2m_e \\ &\sim E_\nu - 0.78[\text{MeV}] \end{aligned}$$

ただし、各粒子について、 K は運動エネルギー、 m は質量、 E はエネルギーである。式変形の過程では、エネルギー保存則 ($E_\nu + m_p = K_{e^+} + m_{e^+} + K_n + m_n$) を適用した。また、陽電子は中性子に比べて質量が非常に軽く、運動エネルギーの大半を得ることになるため、近似として $K_n \approx 0$ とした。

後発信号のエネルギー

後発信号のエネルギーは、陽子による中性子捕獲反応から放出される γ 線のエネルギーなので、

$$\begin{aligned} E_{\text{delayed}} &= m_n + m_p - m_d \\ &= 2.22[\text{MeV}] \end{aligned}$$

ただし、 m_d は重水素の静止質量である。

3.3 到来方向の測定原理

反電子ニュートリノの到来方向を測定するためには、逆 β 崩壊反応により放出される陽電子による発光 (先発信号) と中性子の吸収点 (後発信号) を特定する必要がある。以下、放出される陽電子と中性子について記述する。

〈陽電子〉

まず、逆 β 崩壊反応における微分散乱断面積について計算する [14]。微分散乱断面積は以下のように書ける。

$$\left(\frac{d\sigma(E_{\bar{\nu}_e})}{d\cos\theta_e} \right)^{(1)} = \frac{\sigma_0}{2} \left[(f^2 + 3g^2) + (f^2 - g^2)v_e^{(1)}\cos\theta_e \right] E_e^{(1)} p_e^{(1)} - \frac{\sigma_0}{2} \left[\frac{\Gamma}{M} \right] E_e^{(0)} p_e^{(0)} \quad (3.4)$$

式 (3.4) において、 f はベクトル結合定数、 g は軸性ベクトル結合定数であり、それぞれ、 $f=1.0$ 、 $g=1.26$ である。また、 $v_e^{(i)}$ 、 $E_e^{(i)}$ 、 $p_e^{(i)}$ は陽電子の速度、エネルギー、運動量の第 i 次近似を表して

おり、その他の各パラメータについては以下のとおりである。

$$E_e^{(0)} = E_\nu - \Delta \quad (\Delta = M_n - M_p) \quad (3.5)$$

$$E_e^{(1)} = E_e^{(0)} \left[1 - \frac{E_\nu}{M} (1 - \nu_e^{(0)} \cos\theta) \right] - \frac{y^2}{M} \quad (y^2 = (\Delta^2 - m_e^2)/2) \quad (3.6)$$

$$\sigma_0 = \frac{G_F^2 \cos^2\theta_C}{\pi} (1 + \Delta_{inner}^R) (\Delta_{inner}^R = 0.024) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \Gamma = & 2(f + f_2)g \left[(2E_e^{(0)} + \Delta)(1 - \nu_e^{(0)} \cos\theta_e) - \frac{m_e^2}{E_e^{(0)}} \right] \\ & + (f^2 + g^2) \left[\Delta(1 + \nu_e^{(0)} \cos\theta_e) + \frac{m_e^2}{E_e^{(0)}} \right] \\ & + (f^2 + 3g^2) \left[(E_e^{(0)} + \Delta) \left(1 - \frac{1}{\nu_e^{(0)}} \cos\theta_e \right) - \Delta \right] \\ & + (f^2 - g^2) \left[(E_e^{(0)} + \Delta) \left(1 - \frac{1}{\nu_e^{(0)}} \cos\theta_e \right) - \Delta \right] \nu_e^{(0)} \cos\theta_e \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで、 G_F はフェルミ定数で $\frac{G_F}{\hbar c^3} = 1.16637 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$ 、 $\cos^2\theta_C = 0.97$ 、 $f_2 = \mu_p - \mu_n = 3.706$ 、 M は平均核子質量である。これらより計算される、逆 β 崩壊反応の全散乱断面積は図 3.4 の左図のようになる。また、反電子ニュートリノの進行方向に対する陽電子の平均放出角は図 3.4 の右図のようになる。これより、逆 β 崩壊反応において放出される陽電子の平均放出角はほぼ 0 であり、等方的に放出されることが分かる。また、陽電子は放出されてから即座に電子と反応して対消滅を起こす。その飛行距離は数 mm 程度と小さく、陽電子の発光点はほぼ反電子ニュートリノの発生点であると考えられることができる。

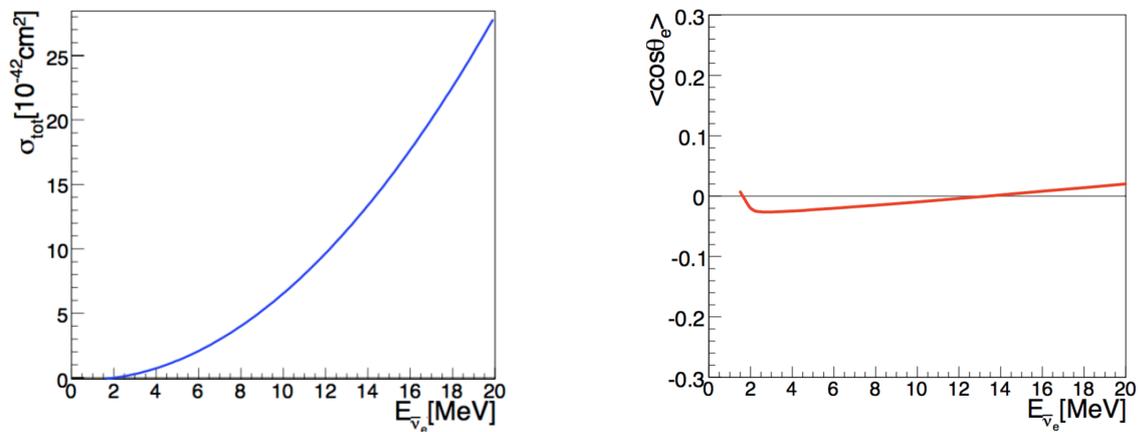


図 3.4: 左図:逆 β 崩壊反応における全散乱断面積, 右図:陽電子の平均角度分布

〈中性子〉

ニュートリノのエネルギーが数 MeV 程度と低エネルギーである場合、逆 β 崩壊反応により放出される中性子の運動エネルギーはおよそ 100 keV となる。放出された中性子は、陽電子とは異なりすぐには反応を起こさずに熱化し、およそ $210 \mu\text{s}$ 漂った後に陽子に捕獲される。反電子ニュートリノの進行方向に対する中性子の反跳角 $\cos\theta$ は、反電子ニュートリノのエネルギーに依存し、式 3.9 で表すことができる [15]。

$$\langle \cos\theta \rangle = \frac{2}{3A} \quad (3.9)$$

ただし、 A は中性子が散乱される原子の原子番号である。数 MeV 程度の低エネルギーでは、水素原子による散乱断面積が大きくなり、式 3.9 において $A=1$ を代入すると、反跳角は小さく抑えられることになる。また、中性子の反跳角と陽電子の放出角の相関を図 3.5 に示す。反電子ニュートリノのエネルギーが 3 MeV 以下である場合には、中性子の反跳角が 35° 以下に抑えられていることが分かる。これより、低エネルギー領域の検出においては、中性子が反電子ニュートリノの到来方向情報を保持していると考えられることができる。

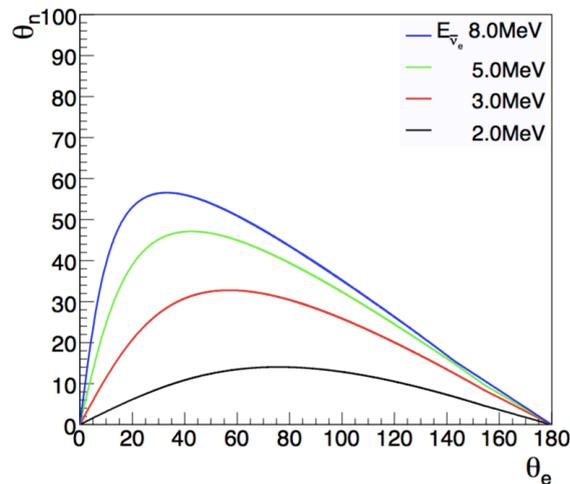


図 3.5: 逆 β 崩壊反応における陽電子放出角と中性子反跳角の相関 ($E < 3$ MeV では反跳角は 35° 以下になることが分かる)

以上より、陽電子による発光 (先発信号) と中性子の吸収点 (後発信号) を結ぶ方向が反電子ニュートリノの到来方向であると考えられることができる。よって、逆 β 崩壊反応における反電子ニュートリノの到来方向測定では、“陽電子の発光点”、及び“中性子の発光点”の特定が必要不可欠である。しかし、既存の液体シンチレータでは、

1. 陽子の中性子捕獲断面積が小さく (0.3 barn)、中性子が拡散する
2. 後発信号である γ 線が長距離移動する (~ 40 cm)

といったために中性子吸収点の位置情報が失われてしまう。そこで、これらの問題を解決する液体シンチレータが必要になってくる。当研究室では、先行研究でこれらの問題を解決した ${}^6\text{Li}$ 含有液体シンチレータの開発が完了している。

3.4 ${}^6\text{Li}$ 含有液体シンチレータ

先行研究において、液体シンチレータ中に ${}^6\text{Li}$ を導入した ${}^6\text{Li}$ 含有液体シンチレータ (LiLS) の開発が完了した [24]。LiLS 中での反応は図 3.6 のとおりである。

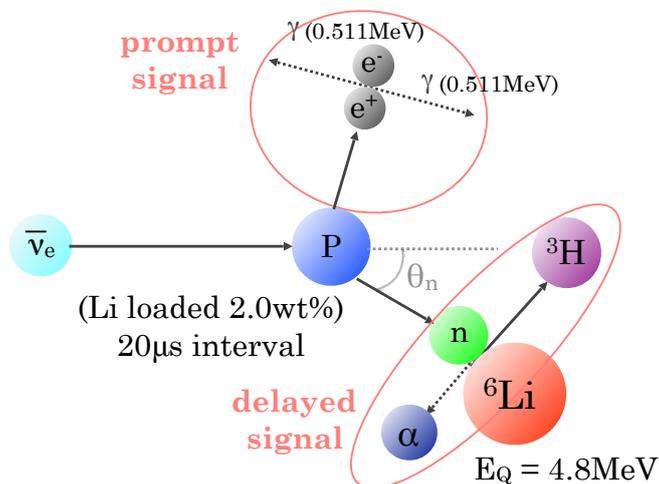
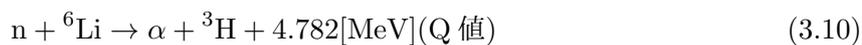


図 3.6: LiLS 中における逆 β 崩壊反応の様子 (放出中性子がすぐに陽子に捕獲され (20 μs)、後発信号が拡散していないことが分かる)

既存の液体シンチレータとの相違点は、

1. ${}^6\text{Li}$ の中性子との反応断面積が大きいため熱化の過程で中性子が拡散しない
2. (n, α) 反応による ${}^3\text{H}$ と α 線が後発信号となり、長距離移動しない

である。これらは、上記で述べた問題点を解決していることが分かる。1 に関して、陽子の中性子捕獲断面積は 0.3 barn であるが、 ${}^6\text{Li}$ のそれは 940 barn である。これにより、KamLAND 液体シンチレータと比較して中性子捕獲時間が短縮し、中性子を拡散させず早期捕獲できる。100 keV の中性子を LiLS 中で発生させ、 ${}^6\text{Li}$ に捕獲されるまでの中性子捕獲時間 ΔT を計算した結果を図 3.7 に示す。図 3.7 より、Li の濃度が 2.0 wt% 程度で ΔT が 210 μs から 20 μs と、10 分の 1 程度になっていることが分かる。また、2 に関して、 (n, α) 反応で放出される α 線と ${}^3\text{H}$ のエネルギーについて記述する。反応式は以下のとおりである。



ただし Q 値は、 ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{H}$, ${}^4\text{He}$ の結合エネルギーを 31.994 MeV, 8.481 MeV, 28.295 MeV として計算した。Q 値は、反応前後における質量エネルギーの差であるので、以下のように表すことができる。

$$Q = \left(\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2} m_H v_H^2 \right) - T_n \quad (3.11)$$

ここで、 ${}^6\text{Li}$ に捕獲される熱中性子とは、弾性散乱によりエネルギーを失い、室温程度の熱運動をする中性子のことである。よって、中性子の運動エネルギー T_n について、周囲が室温で熱運動する単原子分子の運動エネルギーと考えると、エネルギー等分配則より、

$$T_n = 0.0129 \text{ MeV}$$

となる。この値は (4.782 MeV に比べ) 非常に小さいため無視でき、式 3.10 の Q 値は次のようになる。

$$Q = \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2}m_H v_H^2 \quad (3.12)$$

ここで、運動量保存則 $m_\alpha v_\alpha = m_H v_H$ を適応させると、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 + \frac{1}{2} \frac{m_\alpha^2 v_\alpha^2}{m_H^2} \\ &= \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_H}\right) \\ \therefore \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 &= \frac{Q}{1 + \frac{m_\alpha}{m_H}} = 2.055 [\text{MeV}] \end{aligned} \quad (3.13)$$

また、 ^3H の運動エネルギーも計算して並べると、以下のようになる。

$$T_\alpha = 2.055 [\text{MeV}]$$

$$T_H = 2.727 [\text{MeV}]$$

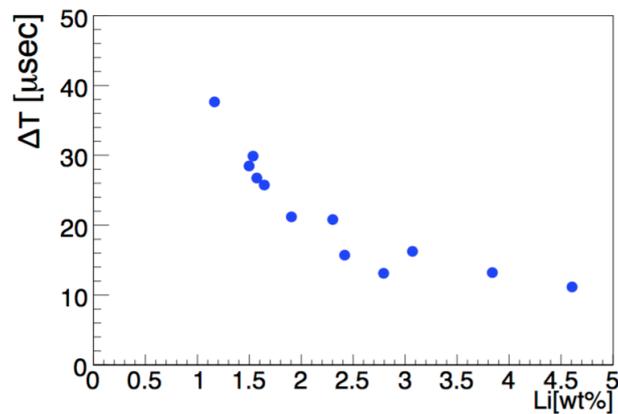


図 3.7: LiLS 中における Li の濃度と中性子捕獲時間 ΔT の相関 (濃度が 2.0 wt% になると ΔT がおよそ 20 μs になっていることがわかる)

第4章 イメージング検出器

この章では、我々が研究している到来方向測定とイメージング検出器について記述する。イメージング検出器とは、光検出器と光学デバイスを組み合わせた検出器のことである。到来方向測定において重要になるのが、“液体シンチレータ”と“イメージング検出器”の2つになるが、液体シンチレータに関しては先行研究において開発が完了していた(第3章)。そこで現在では、残るイメージング検出器の開発によって到来方向測定を実現しようと計画している。将来的には、200 LサイズのLiLSを用いて、イメージング検出器を四方に配置してニュートリノイベントを撮像することで、原理検証を行うことを目標としている。また、その後大型化を目指している。本研究はこの目標に向け、30 Lサイズの縮小系イメージング検出器の開発を行った(図4.1)。



図 4.1: 30L サイズの LiLS を撮像対象としたセットアップ計画

4.1 イメージング検出機の開発要素

LiLSの開発により、中性子が位置情報を保持したまま吸収されることが可能となった。しかし、陽電子の発光点と中性子の吸収点の検出には、中性子の角度分布を測定できる位置分解能を有するイメージング検出器を使用する必要がある。到来方向測定に向けたイメージング検出器の開発においては、要求値が大きく分けて3つ存在する。それを表にまとめたものが、表4.1である。表4.1には、それぞれの要素に対する開発装置も合わせて載せてある。本研究では、これら3つの要求値を満たした装置(光学デバイスと光検出器)を開発することで、イメージング検出器の実現を目指した。ここで、位置分解能に関して、中性子の角度分布の関係を図4.2に示す。

表 4.1: 到来方向測定に向けたイメージング検出器開発の開発要素

要素	要求値	現在値	開発装置
獲得光電子数	2 p.e. 以上	1.2 p.e.	光学デバイス
位置分解能	2.5 mm 以下	2.5 mm	光学デバイス
デッドタイム	20 μ s 程度	200 μ s	光検出器

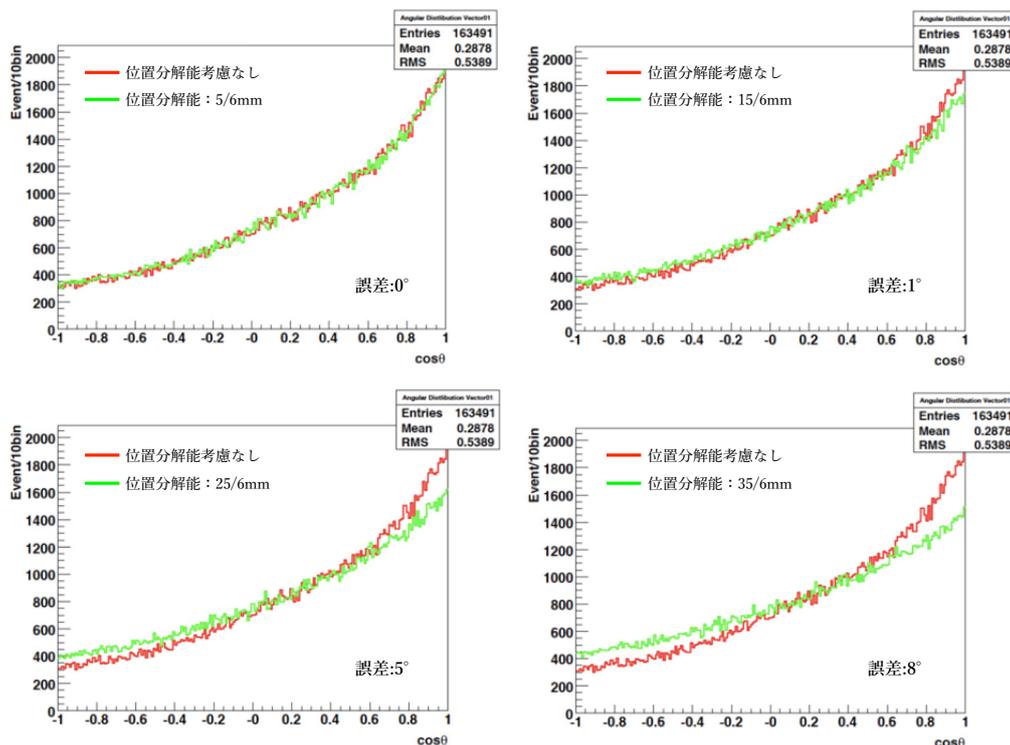


図 4.2: 位置分解能を変化させた時の中性子の角度分布との関係。位置分解能 15/6 mm=2.5 mm(像面スケール) では位置分解能を考慮しない場合とほぼ一致していることが分かる (測定誤差およそ 1°)。[25]

図 4.2 より、イメージング検出器には像面スケールで位置分解能 2.5 mm 以下が要求される。ここでいう位置分解能は、物体スケールではなく像面スケールに変換してある。変換の際に使用した $\frac{1}{6}$ 倍は、光学ミラーの”倍率”というものであり、実際の物体の大きさに対して像面に映る割合を示すものである。例えば、30 cm の物体を撮像する場合、倍率 $\frac{1}{6}$ 倍のミラーでは、5 cm の像面に全体が映ることになる。

本研究では、光学デバイスとして 2 枚 1 組のミラーを、光検出器として MPPC を用いたイメージング検出器を開発した。表 4.1 の中で、デットタイムは光検出器の持つ性能であるが、光検出器である MPPC 検出器に関しては次章で説明するため、この章では主にミラーについて記述する。ミラーは液体シンチレータの領域全体の発光を光検出器の面積に集光する重要な役割を果たし、イメージングにおいては主に以下の 2 点が要求される。

1. 獲得光電子数: ミラーの反射率が高く、より多くの光を集められる
2. 位置分解能: 30 L サイズの液体シンチレータ中で発光が起こった際、近接した発光を分離できる

先行研究において、位置分解能に関しては十分な性能を持つミラーが完成していた。しかし、反射率が低いために、獲得光電子数に関しては十分な性能を持っていなかった。そこで本研究では、複数の試作ミラーを作製し、反射率測定・撮像測定・表面精度測定によってミラーの改善を目指した。

4.2 イメージング検出器のデザイン

イメージング検出器による光の検出では、先に置かれた光学デバイスによって光を反射 (屈折) させ、集光を行う。そして、後に置かれた光検出器により光を検出する。図 4.3 の左図にはミラーによる集光の様子を示す。ミラーはプライマリーミラーとセカンダリーミラーの2つ1組の系で、図 4.3 の右図のようにになっている。

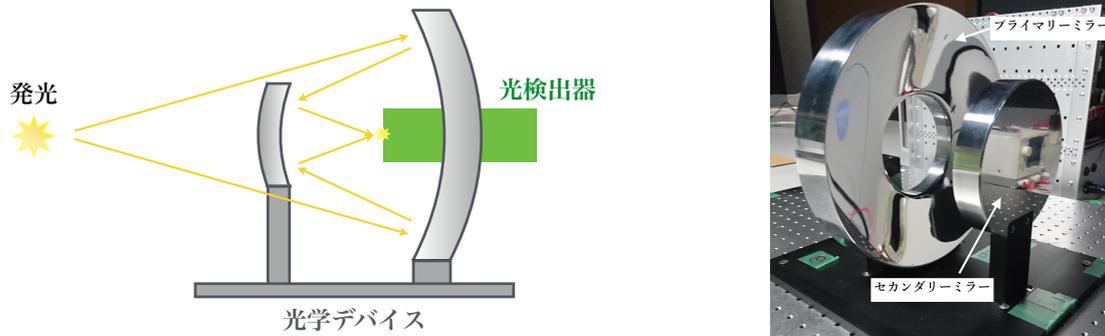


図 4.3: 左図: イメージング検出器による検出の様子, 右図: 実際に作製したミラー

4.3 先行研究

先行研究においてミラーの光学的設計は完成していた。その設計を基に、ミラーの材質による性能の差異を比較し、"アルミニウム (Cr メッキ)+点群データ"が最も良いという結論に至った。そのミラーの各パラメータを表 4.2 に示す。

表 4.2: ミラーの光学的パラメータ

ミラー	材質	半径 [mm]	厚さ [mm]	焦点距離 [mm]	メッキ	反射率 [%]
プライマリー	Al	145	50	1000	Cr	55~ 60
セカンダリー	Al	75	30	-	Cr	55~ 60

作製後、ミラーが設計通りに作られているかを確認するため、LED 光源から出た光をミラーを用いて集光し、その像を CCD カメラで撮影することで、ミラーの性能評価を行った。測定に使った CCD カメラは浜松ホトニクス製の C9300-201 である (図 4.4)。測定のセットアップは図 4.5 のとおりである。

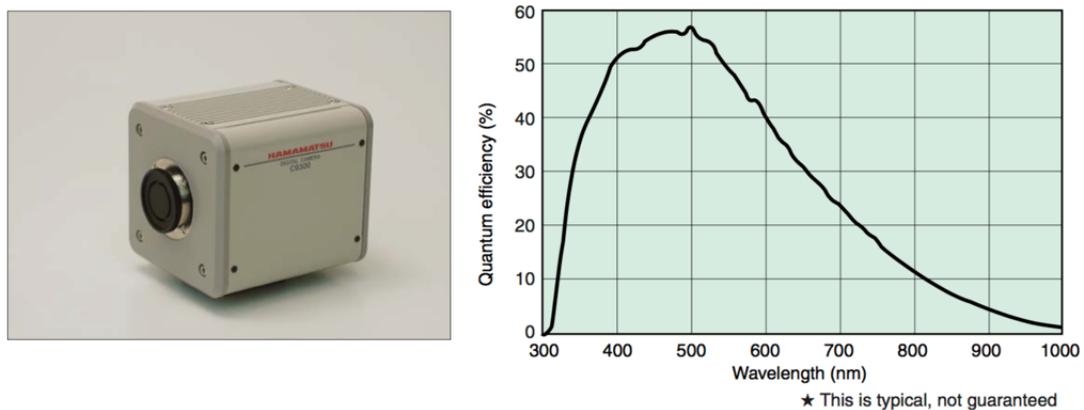


図 4.4: 測定に使用した CCD カメラ (C9300-201)[16]

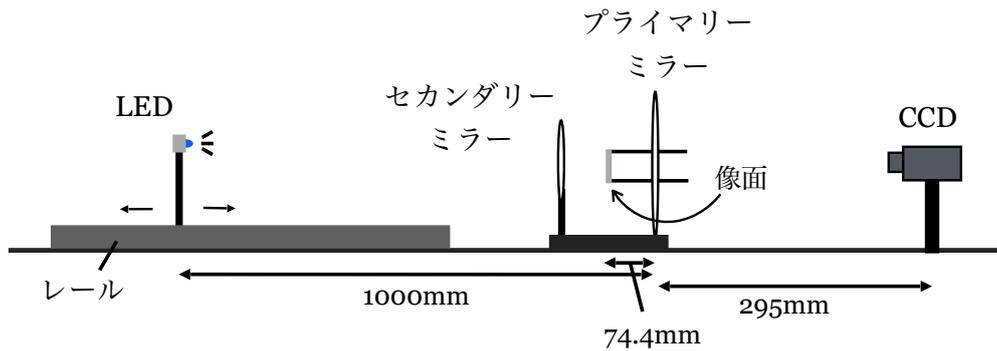


図 4.5: LED を用いたイメージング測定の設定アップ (焦点距離を $Z=0$ とし、 ± 150 mm 動かした時の像の様子を撮影した)

測定には、シンチレーション光に近い波長 $400\sim 410$ nm で、指向性が $\pm 15^\circ$ である青色 LED を使用した。また、簡単のために紙で作った像面に像を映し、それを CCD カメラで撮影した。なお、アライメントには物差しを使用しており、 1° のアライメント精度である。測定後、ZEMAX(光線追跡ツール) によるシミュレーション結果との比較を行った (図 4.6)。本研究で開発しているイメージング検出器は、 300 mm^2 (30 L サイズ) の液体シンチレータを光源として使用することを予定しているので、上記の測定では LED 光源を焦点距離 (1000 mm) から ± 150 mm 動かして撮像を行った。図 4.6 は、距離 850 mm (1000 - 150 mm) の時の像の様子である。シミュレーションと比較すると、像の形が同じで、大きさもほぼ同じであることが分かる (要求の 1)。しかし、ミラーの反射率はおよそ 60% と低かった (要求の 2)。

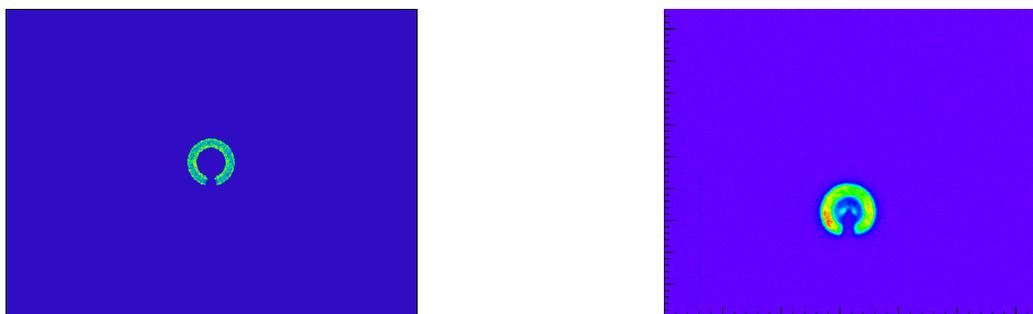


図 4.6: 左図:シミュレーションによる撮像の様子, 右図:実際の撮像の様子 (どちらも $Z=-150$ mm の時の撮像。光がセカンダリーミラーによって遮られている中心部が欠けて C の形をしている。)

4.4 ミラーの反射率測定

先行研究において開発されたミラーの反射率はおよそ 60%と低く、まだ改善の余地があると考えた。ミラーの反射率は、獲得光電子数に大きく影響するため重要なパラメータとなる。そこで、母材やメッキコーティングなどを変えた 3 種類の反射板サンプルを作製し、それぞれの反射率を測定した。その結果が図 4.7 の右図である。



図 4.7: 左図:3 種類の反射板サンプル, 右図:反射板サンプルの反射率測定の結果

実際のミラーとこれらサンプルには磨き方や表面精度に違いがあるため、アルミ (Cr メッキ) の反射率は一致していない。測定の結果から、アルミニウムにメッキを施さず、生材としてミラーを作製することが反射率向上につながると考えられる。そこで、TECH LABO.LLC に依頼し、アルミ (生材) ミラー、アルミ (Cr メッキ) ミラー、及び鋼鉄 (NAK) ミラーの研磨加工と作製をして頂いた。そして、それらの反射率の測定を行った。プライマリーミラーの反射面は平面ではなく曲面であるため、測定にはレーザーポインタとパワーメータを用いた (図 4.8 の左図)。また、セカンダリーミラーについては、研磨の関係で中央に平面部が存在するため、平面反射率測定機で測定を行った (図 4.8 の右図)。測定の結果を図 4.9 に示す。

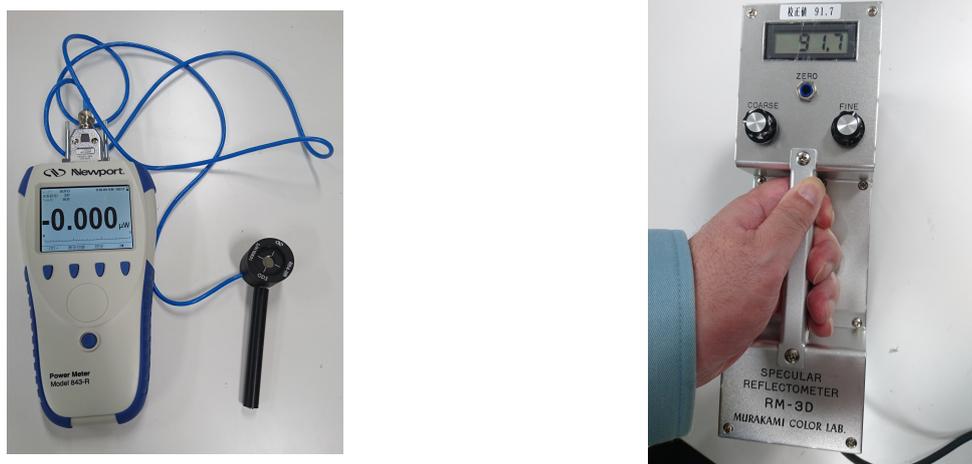


図 4.8: 左図:パワーメータ, 右図:平面反射率測定機

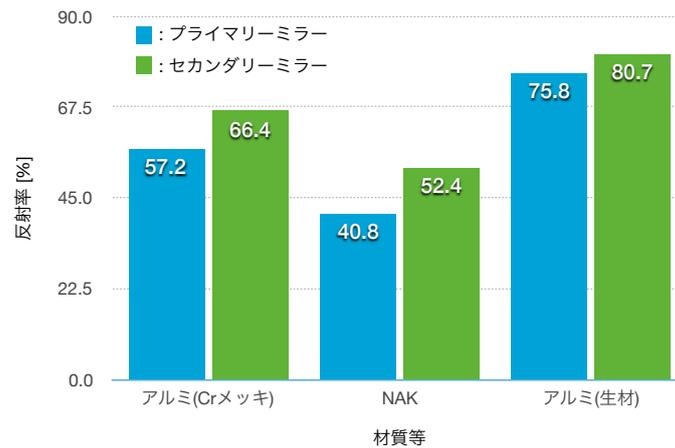


図 4.9: 反射板サンプルの反射率測定の結果

この結果より、ミラー加工した場合においてもアルミ(生材)の反射率が最も高いことが分かった。ただ、アルミ(Crメッキ)ミラーとNAKミラーについては、サンプルと比較して反射率が逆転している。これは、NAKはアルミニウムよりも硬いために磨きにくく、ミラーサイズでは磨きが十分できないことが原因であると考えられる。ここで、反射率が最も良かったアルミ(生材)を使用した場合の後発信号の獲得光電子数を計算する。計算式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 \text{獲得光電子数} &= (\text{液体シンチレータの発光効率}) \times \exp\left(-\frac{\text{飛行距離}}{\text{減衰長}}\right) \\
 &\quad \times (\text{光学系の入射瞳}) \times (\text{反射率})^2 \times (\text{量子効率}) \\
 &= 8145[\text{photon/MeV}] \times 4.8[\text{MeV}] \times 0.1125 \times \exp\left(-\frac{150[\text{mm}]}{1670[\text{mm}]}\right) \\
 &\quad \times \left(\frac{\pi \times 125^2}{4\pi \times 1000^2} - \frac{\pi \times 75^2}{4\pi \times 875^2}\right) \times 0.758 \times 0.807 \times 0.40 \\
 &\sim 2.0[\text{p.e.}]
 \end{aligned}$$

ただし、液体シンチレータのパラメータは参考文献[26]、光学系の入射瞳はミラー設計パラメータを参照した。計算より、目標値であった2p.e.を超えることが確認できた。なお、先行研究で完成していたアルミ(Crメッキ)ミラーの反射率~60%では、獲得光電子数は~1.3 p.e.であった。

4.5 LED による撮像

作製した3種類のミラーの集光性能を評価するため、先行研究と同様にLEDによる撮像測定を行った。セットアップは図4.5と同じであり、ZEMAXによるシミュレーションとの比較も行った。評価については、上記のイメージングにおける要求2つに対するものであり、RMSを用いた広がりの評価と、集光量の評価を行った。

4.5.1 キャリブレーション

ピクセル数とmmとの相関を知るため、キャリブレーションを行った。方法は、像面に方眼紙を使用し、後方から一様に光を当てて撮像を行いピクセル数とmmを対応させた。図4.10が撮像の様子である。方眼紙の目が撮像できていることがわかる。これよりキャリブレーションを行うと、113ピクセルあたり10mmであり、ピクセル単位に直すと

$$\sim 0.0885[\text{mm}/\text{pixel}]$$

であることが分かった。

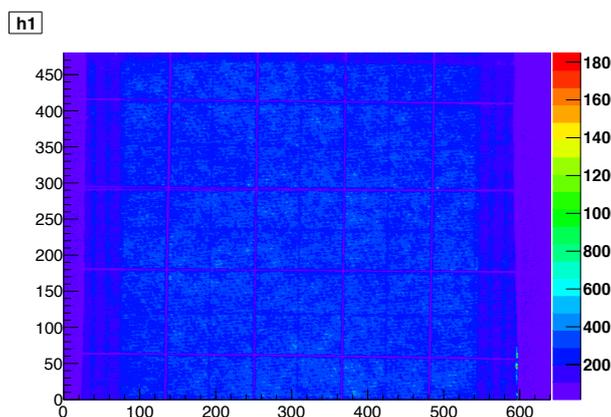


図 4.10: CCD のキャリブレーション撮像の様子

4.5.2 ミラーの比較

先に述べた3種類のミラーについて、それぞれLEDを $Z=-150\text{ mm}\sim+150\text{ mm}$ まで動かした時の像の様子を撮影した。結果は図4.11のとおりある。

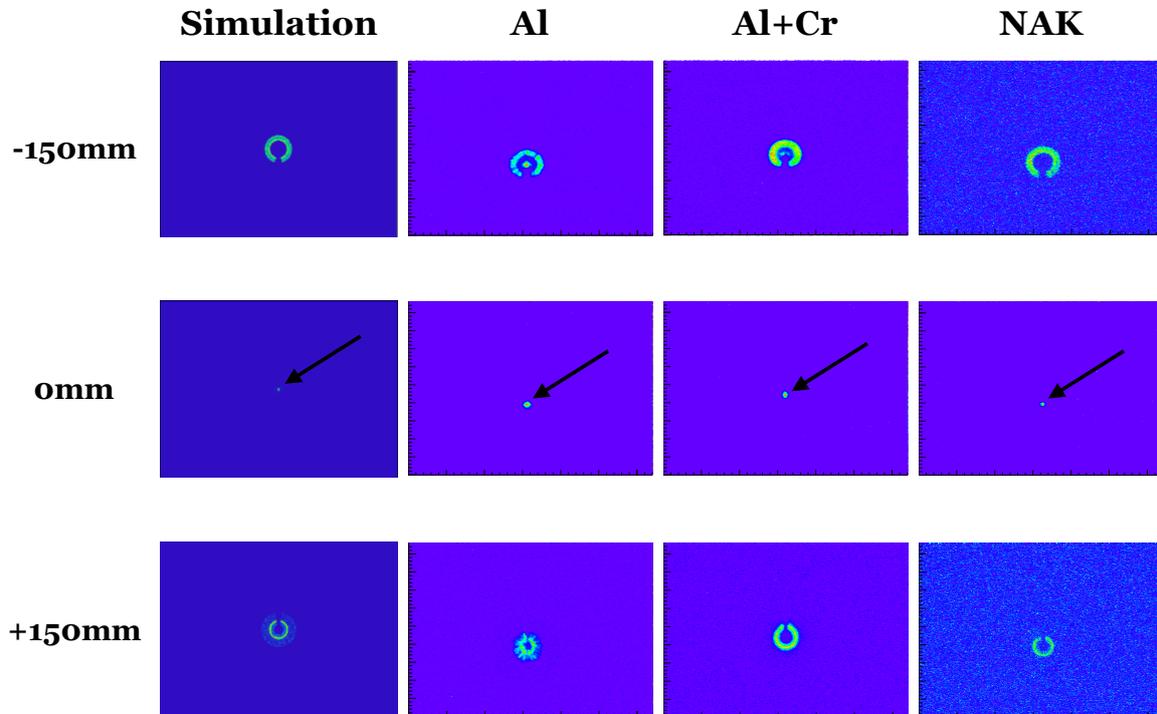


図 4.11: シミュレーションと3種のミラーの撮像の様子 ($Z=-150\text{ mm}, 0\text{ mm}, 150\text{ mm}$ の時の像を載せてある)

3種類のミラー全てについて、像の形・大きさはシミュレーションに近いことが分かるが、ここで注目すべきなのが、本研究におけるミラー作製の要求2つである。

1. 獲得光電子数: ミラーの反射率が高く、より多くの光を集められる
2. 位置分解能: 30 Lサイズの液体シンチレータ中で発光が起こった際、近接した発光を分離できる

そこで、各ミラーについて像の大きさ、および集光量の評価を行った。

4.5.3 像の大きさ、集光量の評価

〈像の大きさの評価〉

まず、像の大きさの評価について説明する。評価にはRMS計算を用いた。RMSとは、Root Mean Squareの略称で、モノの中心よりどの程度広がっているのかを表す指標として用いられるパラメータである。RMS計算の手順は以下のとおりである。ただし、 x は横軸、 y は縦軸、 I は光の強度である。また、実際に3種のミラーについて各 Z におけるRMSを計算した結果を図4.12に示す。

1. 撮像データからバックグラウンドデータを差し引く。
2. Z=0 の撮像において、式 4.1 より像の中心位置 (\bar{x}, \bar{y}) を求める。

$$\bar{x} = \frac{\sum xI}{\sum I}, \bar{y} = \frac{\sum yI}{\sum I} \tag{4.1}$$

3. 撮像を確認し、中心位置 (\bar{x}, \bar{y}) から半径 R にある像の部分だけを取り出してくる。
ただし、光の強度や滲みによって像が判別しづらかった撮像があったため、いくつかの R で取り出し、誤差として評価した。
4. 式 4.2 より強度の重み付けをした RMS を計算する。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(\{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2\} \times I)}{\sum I}} \tag{4.2}$$

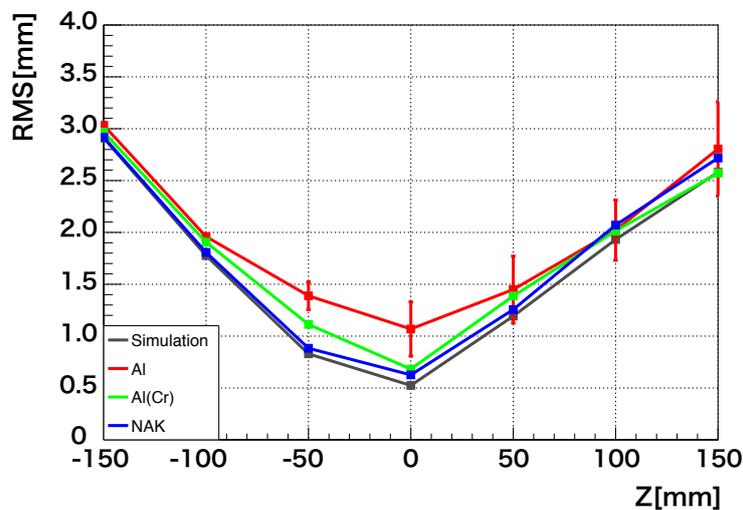


図 4.12: シミュレーションと3種のミラーのRMS(3種のミラー全てについて、シミュレーションをよく再現していることが分かる。また、ほとんどの領域で位置分解能 2.5 mm を満たしていることが分かる。)

3種のミラーそれぞれについて、シミュレーションとグラフの形は一致していることが分かる。これは、設計通りにミラーが作られている証拠といえる。像の大きさについては、シミュレーションと最も一致しているのが NAK であった。ただし、NAK の反射率は約 50% であるため、要求の 1 は良いが要求の 2 が不十分である。逆に、アルミ (生材) の反射率は約 80% と高いが、像の大きさがやや大きく、要求の 2 は良いが要求の 1 が NAK には劣る。ただし、アルミ (生材) ミラーによる像の大きさは、NAK に比べて中心 (Z=0) 付近で 0.5 mm 大きいだけで、端ではほぼ一致している。中心付近では集光は十分に小さくなっていることから、イメージングには影響ないと考えられる。よって、現段階で使用するミラーとしては、アルミ (生材) ミラーが最適であると言える。

〈集光量の評価〉

次に、集光量の評価について記述する。ただし、集光量はミラーの反射率に比例すると考えられるため、ここではその確認を行った程度である。3種のミラーについて、撮像の Total Intensity を比較したものを図 4.13 の左図に示す。ただし、最も良いアルミ (生材) の最大を 1 としてプロットしてある。また、 $Z=-150\text{ mm}\sim+150\text{ mm}$ の範囲における平均を図 4.13 の右図にまとめた。予想したとおり、集光量は反射率と同様の傾向があることが分かった。このことから、反射率が高いアルミ (生材) ミラーが最適であると言える。

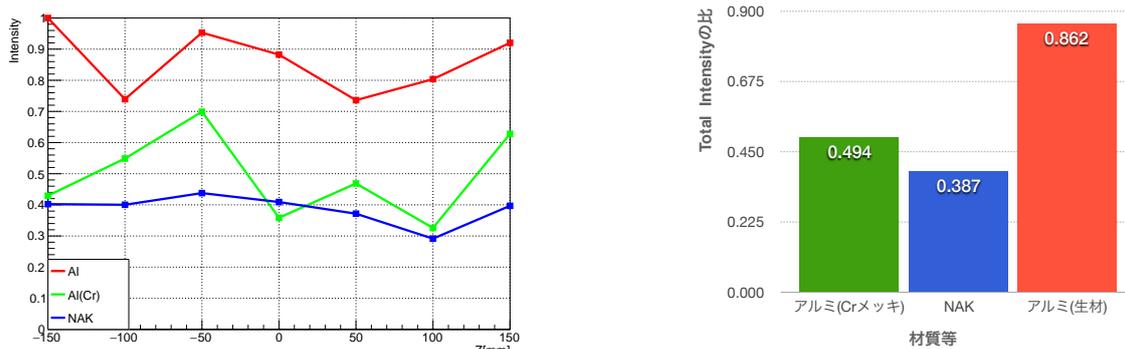


図 4.13: 左図: 3種のミラーの Total Intensity の比較 (反射率同様、アルミ (生材) が最も高くなっている), 右図: $Z=-150\text{ mm}\sim+150\text{ mm}$ の範囲における平均の比較

4.6 表面精度の測定

ミラー表面の研磨精度は、反射率測定や RMS 評価の結果に影響を大きく与えられられる。そこで、株式会社キーエンスのマイクロスコープ (VHX-6000) を使用して表面精度の測定を行った。なお、反射率が最も良かったアルミ (生材) ミラーと RMS が最も良かった NAK ミラーの 2 種類の測定を行った。その様子を図 4.14 に示す。図 4.14 より、アルミ (生材) ミラーの方が NAK ミラーよりも傷が多く入っていることが分かった。これは、アルミ (生材) の方が NAK よりも軟らかいため、研磨の際に細かい傷が残りやすいことが原因と考えられる。また、NAK に比べてアルミ (生材) の写真の方が明るくなっていることが分かる。これは、アルミ (生材) の方が NAK よりも材質的に光沢があるために、光を多く反射していると考えられる (反射率が高いと同義)。次に、ミラー表面の傷の深さを測定した結果を図 4.15 に示す。

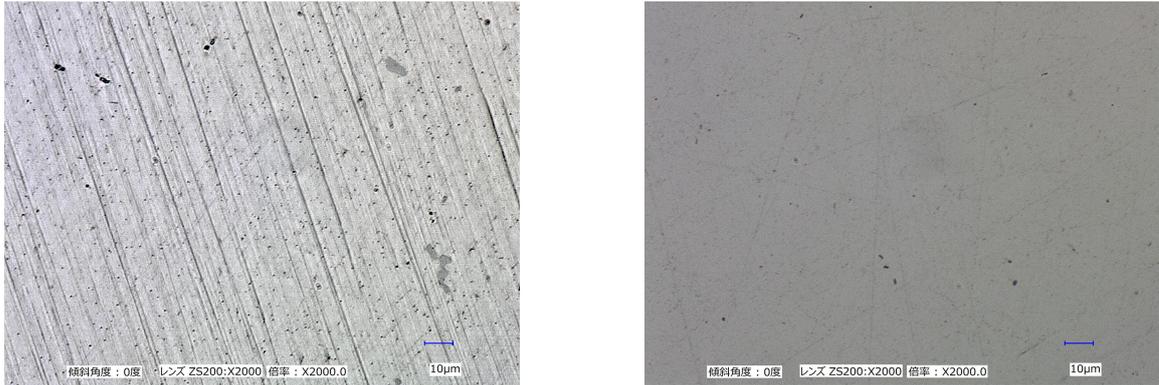


図 4.14: 左図: アルミ (生材) ミラーの表面, 右図: NAK ミラーの表面

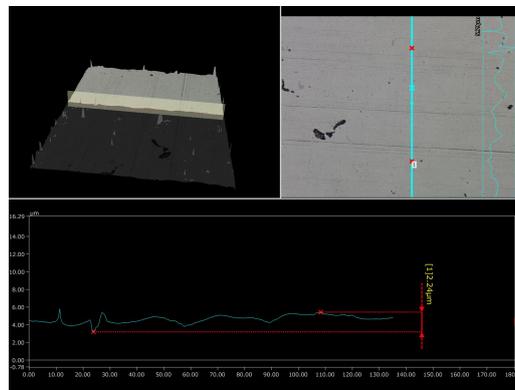


図 4.15: アルミ (生材) ミラーの表面精度測定の結果 (およそ $2 \mu\text{m}$ の深さの傷があることが分かった)

アルミ (生材) ミラーには、およそ $2 \mu\text{m}$ 程度の傷が多く入っていることが分かった。一方、NAK ミラーについても同様の測定をしたが、表面がツルツルで凹凸がほとんどなかったためか、測定不可であった。よって、NAK ミラー表面の傷は測定限界 ($\sim 0.1 \mu\text{m}$) 以下であることが分かった。先行研究によると、光の反射には正反射、光沢反射、完全拡散反射の3種類があり、正反射が像を作る反射、光沢反射が像の滲みを作る反射、完全拡散反射が像を作らず外へ逃げていく反射であると考えられている [27]。

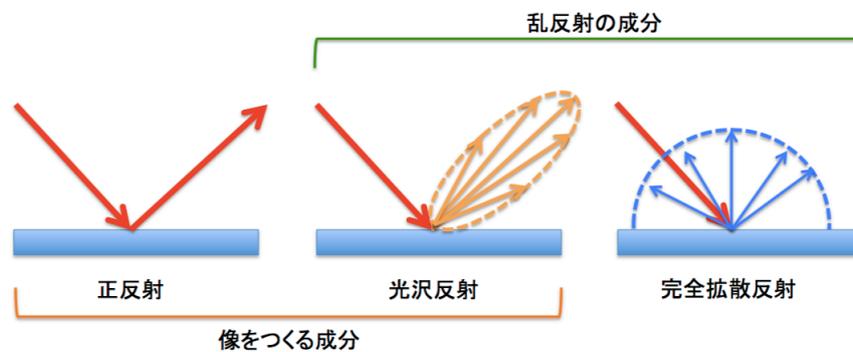


図 4.16: ミラーによる反射の種類

4.6.1 ミラーのまとめ

以上の測定結果から、ミラーについての考察を行う。アルミ(生材)ミラーは、反射率:高, RMS:大であった。これは、ミラー表面の傷によって光沢反射の成分が多くなってしまい、LED撮像がぼやけてしまっていた(光沢反射は像は作るため、反射率が高い)。一方、NAKミラーは、反射率:低, RMS:小であった。これは、ミラー表面に傷がないために光沢反射の成分は少ないが、NAK材は表面が曇りがかった(光沢のない)材質であるために完全拡散反射の成分が多くなっていた。以上のように考えることで、反射率とRMS(像の滲み)の結果が裏付けられる。つまり、反射率は”表面の研磨精度”、RMSは”材質(あるいはメッキなどの表面の光沢)”に影響を受けると結論づけられる。今後ミラー作製の際は、NAKのように硬い材質で、光沢のある金属を使用することで更なる改善が見込める。現段階としては、SUS304という材質でミラーを作製することを検討している。SUS304は、NAKとアルミニウムの間の硬さであるため、次作としては適切であると考えている。また、電解研磨によってアルミ(生材)ミラーの傷をさらに小さくすることも考えている。

表 4.3: RMS への影響

ミラー	表面状態	光沢反射	RMS
アルミ(生材)	傷あり	多い	△
NAK	傷なし	少ない	○

表 4.4: 反射率への影響

ミラー	表面状態	完全拡散反射	反射率
アルミ(生材)	光沢あり	少ない	○
NAK	光沢なし	多い	×

第5章 MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)

MPPCとは、複数のガイガーモード APD(Avalanche Photo Diode) ピクセルで構成されている光半導体素子のことであり、フォトカウンティングにとっても優れた素子である。高ゲイン、高検出効率、低電圧・磁場中で動作可能などの特徴を持つため、PMTとは異なる使用方法ができる。ただ、一般的にダークレートが大きいため、使用に際しては注意が必要である。この章では、MPPCを構成する APD について記述し、MPPC の特徴について紹介していく。

5.1 APD

APD は、逆電圧 (バイアス電圧) を印加することにより光電流が増倍される、アバランシェ増幅と呼ばれる増幅機構を持つ光半導体素子である。受光感度が高く、微弱な信号の測定が可能となっている。信号を増倍することによりノイズの影響を低減できるため、PIN フォトダイオードに比べて高い S/N が得られ、リニアリティに優れているのも特長である。PIN フォトダイオードとは、P 型-I 型-N 型半導体がこの順に層構造 (P 層, I 層, N 層) を成している半導体素子のことであり、I 層は真性半導体と呼ばれる不純物濃度が小さい半導体で、逆電圧をかけた場合には I 層に集中して電界が発生することになるため、小さい逆電圧でも十分な受光感度・応答速度を備えているフォトダイオードである。以下、アバランシェ増幅の原理について記述する。

1. APD に逆電圧を印加すると、PN 接合部に高電場領域が形成される (図 5.1)
2. バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光が入射すると、電子-正孔対が発生 (図 5.2 の左図)
3. 結晶との衝突を避けたキャリアのエネルギーが増大していく
4. 十分にエネルギーを持ったキャリアが結晶と衝突すると、新たな電子-正孔対が発生される :イオン化 (図 5.2 の右図)
5. イオン化は連鎖的に起こるため、雪崩のように増幅が起こる

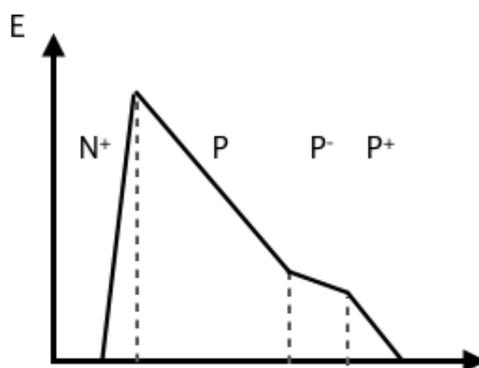


図 5.1: APD ピクセル内の電場 (PN 接合部において電場が大きくなっていることが分かる)

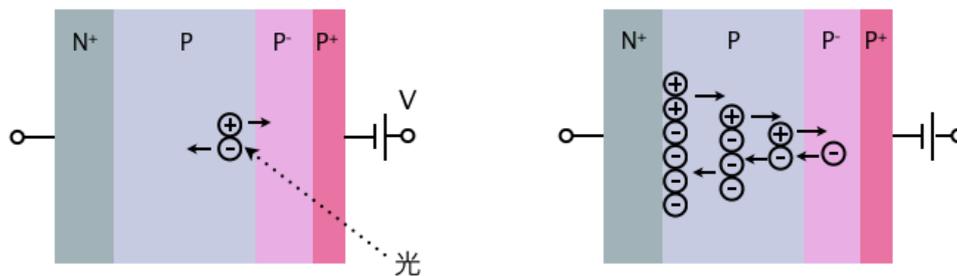


図 5.2: APD ピクセルにおけるアバランシェ増幅の様子

APD は PMT と比較しても様々な優れた特性を持っているため、近年使われることが多くなってきている。以下に、PMT と比較して優れた特徴を記述する。

1. 高検出効率

一般的に、波長 400 nm 付近における PMT の検出効率はおおよそ 25%だが、APD のそれはおおよそ 40%と高くなっている。

2. 時間応答性

PMT 内部では非常に高い電流が発生するため、イベント後にデバイスを電氣的にリセットすることが必要になる。その結果、長い不感時間が生じてしまう。一方 APD は、電圧がブレイクダウン電圧以下になると、アバランシェが瞬時に消滅するため、不感時間を短く抑えることができる。APD の時定数は約数 ns~ 数十 ns と優れた時間応答性を示す。

3. 磁場中で動作可能

PMT の内部では入射光子を電子に変換し、それらの電子を増倍する構造になっている。そのため、外部磁場がある環境では使用不可である。一方、APD はイオン化によってアバランシェ増幅を起こすため、磁場中でも動作可能である、

5.2 MPPC の基本パラメータ

MPPC は APD ピクセルが複数個並べられた光検出器である。そのため、基本動作は APD ピクセルに則った形になる。MPPC にはいくつか重要なパラメータが存在する。この節では、それらについての説明及び実際に測定した結果について記述する。実際の測定に関しては、浜松ホトニクス製の MPPC(S13362-3050DG) を使用した (図 5.3)。また、各パラメータについてまとめたものが表 5.1 である。S13362-3050DG は缶構造になっており、内部にはペルチェ素子を搭載しているため、外部電源から電流を流すことによって -25°C まで温度を下げる事が可能となっている。今回のパラメータ測定においても、 25°C (室温)、 5°C 、 -10°C と温度を変化させて実験を行った。また、データ取得のためのモジュールとして、NIM-EASIROC を使用した (図 5.4)。

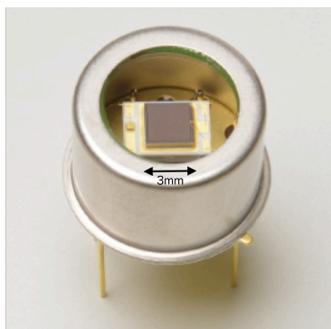


図 5.3: S13362-3050DG

表 5.1: S13362-3050DG の各パラメータ [19]

パラメータ	値	単位
有効光電面	3×3	mm ²
ピクセルピッチ	50	μm
ピクセル数	3600	個
最大波長感度	450	nm
ゲイン	1.7×10^6	-
降伏電圧	51.1 ± 5	V
ダークレート (typ.)	25	kHz
PDE	40	%
動作保証温度	-20 ~ +60	°C



図 5.4: NIM-EASIROC モジュール

NIM-EASIROC モジュールは、KEK・東北大学・大阪大学が共同で開発したもので、SiTCP が提供するソフトウェアにより、Ethernet 接続した PC から MPPC に直接 HV をかけることができ、また容易にデータを取得できるよう設計されている [18]。トリガーについては、セルフトリガーと外部トリガーの 2 種類を利用することができ、今回の実験ではセルフトリガーでデータを取得した。図 5.5 に EASIROC の回路図の概要を示す。

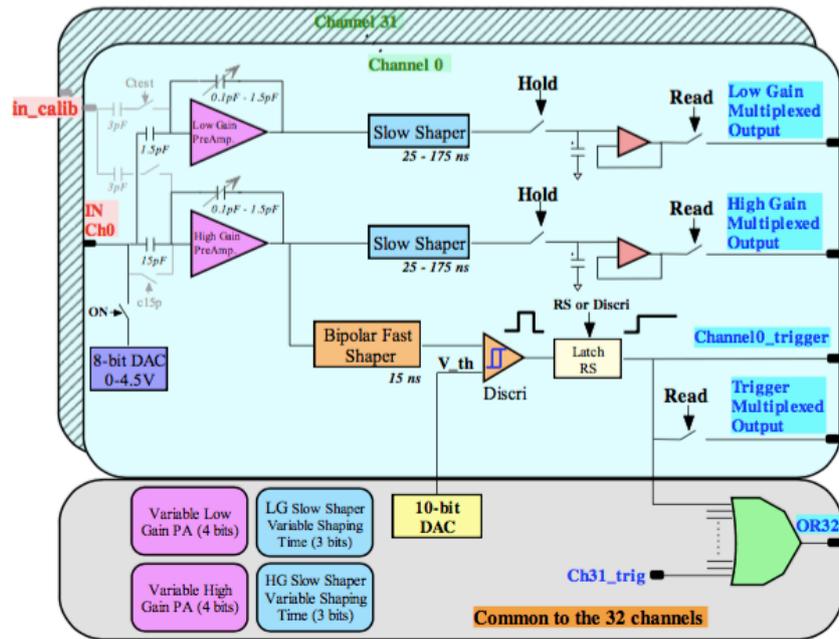


図 5.5: EASIROC の回路図概要

NIM-EASIROC は、インターフェースに 32ch 用 68 ピンアサインコネクタを 2 個 (chip1, chip2) 装備しており、MPPC を最大 64ch まで一度に使った測定ができるようになっている。また、Amp を通した後の信号を出力できる HG、選んだ波形を出力することができる Probeなどを備えている。NIM-EASIROC に信号が入ると、2 種類のキャパシターによって High gain と Low gain の信号に分けられる。それぞれのキャパシタの容量比で増幅比が決まっており、High gain と Low gain で 10:1 の比で電荷を分割する。その後、High gain 側の信号は、Fast Shaper と Slow Shaper と呼ばれる波形を形成する。Fast Shaper とは、時間応答の早い信号波形であり、時定数が決められている (15 ns)。また、Slow Shaper とは、与えられた時定数に従って時間軸方向に信号が鈍った波形であり、その時定数はユーザーが決めることができるようになっている。Fast Shaper は Discriminator への入力となり、ユーザが決めた 32ch 共通の閾値 (Threshold DAC 値) を超えていると Trigger 信号を作り出す。セルフトリガーモードの場合、この Trigger 信号が Slow Shaper の波高を Hold する。結果、Hold された波高が ADC として出力されることになる。以下に、今回主に使用したユーザーが設定できるパラメータについてまとめる [18]。

Input DAC

Input DAC は、MPPC のバイアス電圧を ch 毎に調整するための機能である。MPPC にかかる電圧を制御することはとても大切であるため、重要な機能となる。詳細については、この章の 5.2.1 の”キャリブレーション”の項で記述する。

PreAMP

EASIROC には、信号を反転増幅させる PreAMP が 2 つ搭載されている。増幅率はユーザーによって変更することができ、HG 側は 10~150 倍、LG 側は 1~15 倍まで増幅可能となっている。

これらの変更は、フィードバックキャパシタンスの容量を変えることで行っており、表 5.2 にその対応を示す。

表 5.2: フィードバックキャパシタンスの容量と増幅率との関係 (ユーザーは 1~15 の数字を入力することによって容量の変更を行う)

容量 [pF]	増幅率 (HG 側)	増幅率 (LG 側)	入力番号
1.5	10.0	1.00	15
1.4	10.7	1.07	7
1.3	11.5	1.15	11
1.2	12.5	1.25	3
1.1	13.6	1.36	13
1.0	15.0	1.50	5
0.9	16.0	1.60	9
0.8	18.8	1.88	1
0.7	21.4	2.14	14
0.6	25.0	2.50	6
0.5	30.0	3.00	10
0.4	37.5	3.75	2
0.3	50.0	5.00	12
0.2	75.0	7.50	4
0.1	150	15.0	8

時定数

ユーザーは Slow Shaper の時定数を 25 ns~180 ns の間で決定することができる。時定数を短くすると信号波高が高くなるため、ベースラインとの S/N は良くなるが、Hold 信号を入力するまでの時間が短くなってしまう。一方、時定数を長くするとその逆のことが起こる。そのため、ユーザーは測定に合わせて時定数を決定する必要がある。

Threshold DAC

ユーザーは Threshold DAC と呼ばれる値を操作することにより、discriminator の閾値を決定することができる。入力する値は 10 bit 精度 (1~1023) になっており、値が小さくなるほど閾値は大きくなる仕様である。設定は 32ch(chip 毎に) 共通となるため、ch 毎の細かい設定はできない。

Discr Mask

discriminator の出力を on,off する機能。ch 毎に設定することができ、0 で off, 1 で on となる。

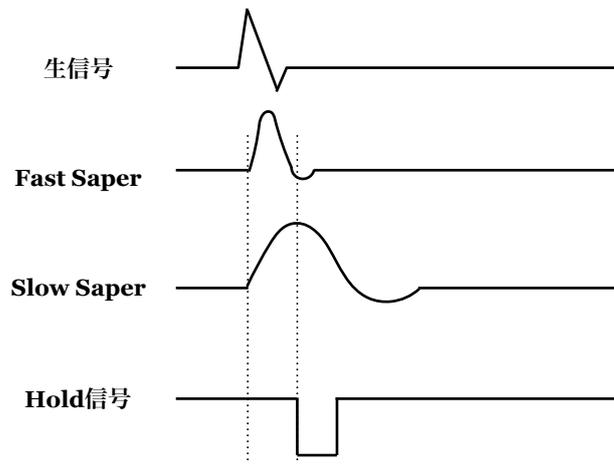


図 5.6: それぞれの波形の様子

ここで注意したいのが、EASIROC の電荷測定法は”波高測定型”であり、”電荷積分型”ではない。また、Hold 信号と Slow Shaper の頂点のタイミングが自動的に一致していないため、Delay などを利用してユーザーがタイミング調整をする必要がある。実際に、Hold 信号を Delay させながら 1p.e. 信号のピーク値をプロットしたものを図 5.7 に示す。これより、時定数 50 ns の場合には Delay: 65 ns 付近を使用するのが良いことがわかる。

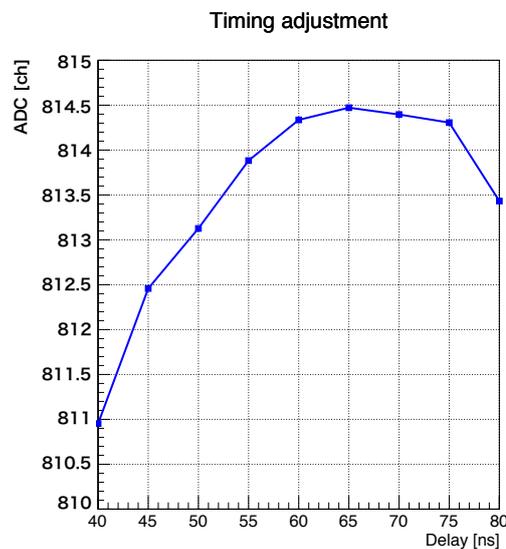


図 5.7: Trigger 信号を Delay させた時の 1 p.e. ピーク値のプロット。Delay: 65 ns が最もタイミングが合っているため、ADC 値が大きくなっている (SlowShaper の時定数は 50 ns)

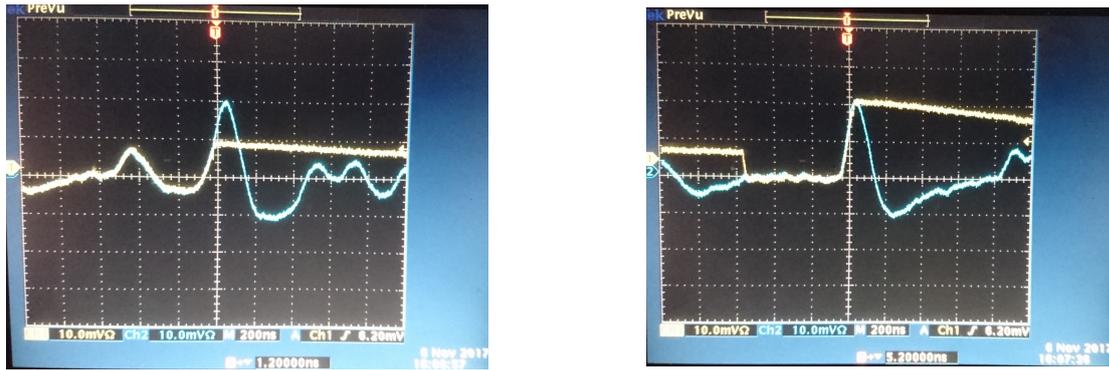


図 5.8: 左図: タイミング調整前, 右図: タイミング調整後 (どちらの図も青線が Hold 前の信号、黄線が Hold 後の信号)

5.2.1 キャリブレーション

NIM-EASIROC モジュールを使用してユーザーが設定できる各パラメータに対するキャリブレーションについて記述する。

〈バイアス電圧 (V_{op})〉

NIM-EASIROC には Input DAC と呼ばれる、MPPC のバイアス電圧をチャンネル毎に調整できる機能が搭載されている。Input DAC は 8 bit 精度の DAC であり (9 bit 目は on,off 設定)、5 V を 8 bit で使いきるようにできている。つまり、ユーザーは 255~511 の値を設定することで、1 bit あたりおよそ 20 mV 間隔でバイアス電圧を調整できるのである。Input DAC を使ったバイアス電圧調整の様子を表したものが図 5.9 である。また、ユーザーが設定できる HV の値 (V_{con}) と実際にかかるバイアス電圧の値 (V_{op}) をキャリブレーションした結果が、図 5.10 である。ただし、Input DAC=490 として測定を行った。

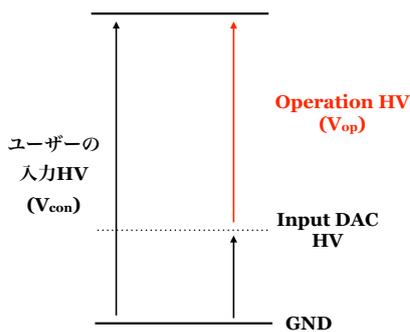


図 5.9: Input DAC による HV 調整

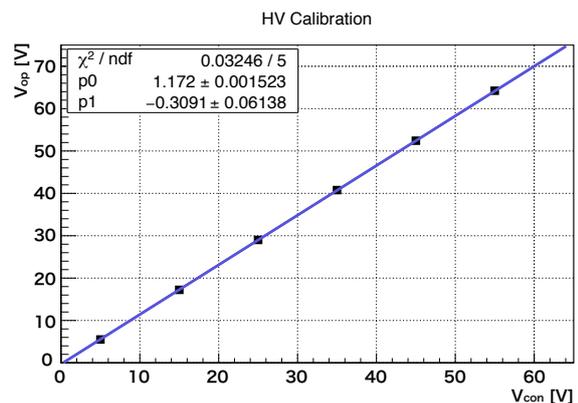


図 5.10: ユーザー指定の入力電圧 V_{con} とバイアス電圧 V_{op} の相関

図 5.10 より、キャリブレーション関数

$$V_{op} = 1.172 \times V_{con} - 0.3091 \quad (5.1)$$

が得られた。

〈Threshold DAC〉

EASIROCでは32ch毎共通(chip共通)の閾値(Threshold DAC)を設定することができるが、ユーザーが入力する値は単に10 bitの値(1~1023)であるため、波高やADCとの相関を知る必要がある。そこで、Threshold DACのキャリブレーションを行った。chip1についての結果を図5.11に示す。図5.11はThreshold DACとADCの相関であるが、図5.12と組み合わせることで、Threshold DACとmVの相関も分かる。

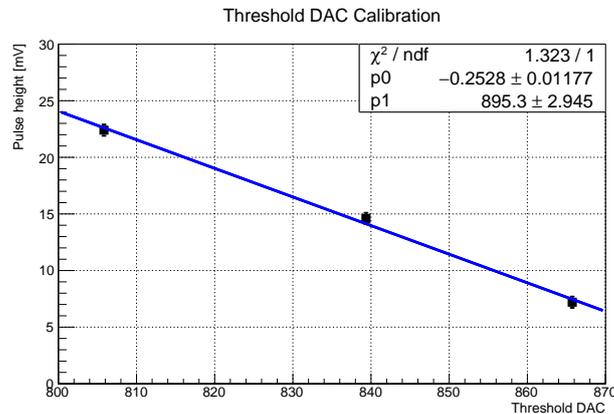


図 5.11: Threshold DAC と ADC の相関

図 5.11 より、キャリブレーション関数

$$\text{Pulse height [mV]} = -0.2528 \times (\text{Threshold DAC} - 895.3) \quad (5.2)$$

が得られた。

〈ADC vs mV〉

DAQによって取得できるのはADC[ch]値であるため、波高がどの程度なのかは分からない。そこで、ADCと波高[mV]のキャリブレーションを行った。結果は図5.12のとおりである。

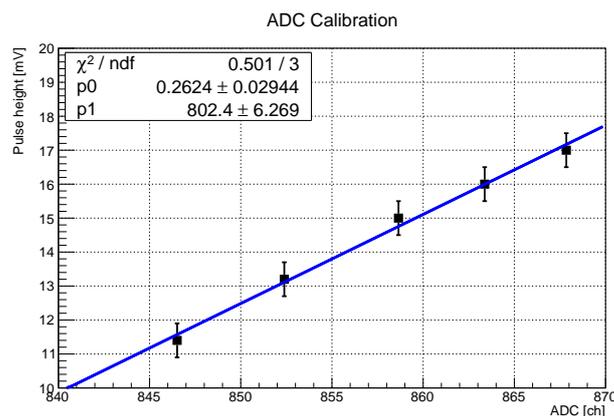


図 5.12: ADC と波高の相関

図 5.12 より、キャリブレーション関数

$$\text{Pulse height [mV]} = 0.2624 \times (\text{ADC} - 802.4) \quad (5.3)$$

が得られた。

5.2.2 ゲイン

MPPCが微弱な光を検出すると、個々のAPDピクセルのアバランシェ増幅によって光を増幅させて検出する。この1APDピクセルあたりの増幅率のことを”ゲイン”と呼び、式5.4で書くことができる。

$$G = \frac{Q_{pixel}}{e} \quad (5.4)$$

ただし、 G はゲイン、 Q_{pixel} は1APDピクセルの電荷、 e は素電荷である。また、ADC分布に現れる1 p.e., 2 p.e., ... の各ピーク値からそれぞれの平均差 $d[\text{ch}]$ を考えると、 d は1 p.e.を検出した時の出力電荷量にあたるため、ゲインは式5.5のようにも表すことができる。

$$G = \frac{d \times r}{e} \quad (5.5)$$

r はADC分解能 [pC/ch] である。MPPCのゲインは一般的に 10^6 程度と高いため、1 p.e. 程度の光も検出可能となっている。

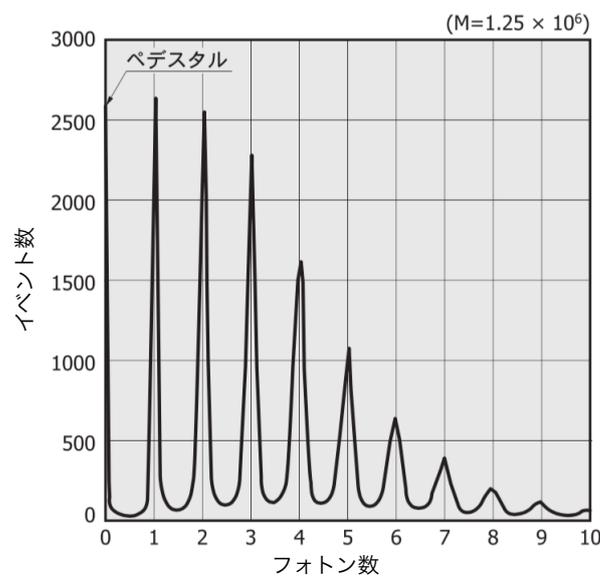


図 5.13: MPPC で検出される光子数の分布例 (1 p.e., 2 p.e., ... と等間隔で出力されていることが分かる [17])

5.2.3 ブレイクダウン電圧

MPPCに逆電圧を印加していくと、ある電圧以上においてゲインが急激に大きくなる。この閾値電圧のことを”ブレイクダウン電圧 (降伏電圧)”と呼び、この状態をガイガーモードと呼ぶ。つまり、MPPCはガイガーモードで動作する。実際にMPPCにかかる電圧は、バイアス電圧からブレイクダウン電圧を引いた値になるため、素子ごとに異なるブレイクダウン電圧を理解しておくことが非常に重要となる。一般的に、MPPCにはブレイクダウン電圧から+3.0 V(以下 $\Delta V=3.0$ V)の電圧をかけることが推奨されているが、ゲインやダークノイズが異なってくるため、行う測

定を考慮して $\Delta V=1.0\sim 5.0$ V 程度の範囲で電圧を調整することになる。また、同一の素子であっても温度によってブレイクダウン電圧は変化するため、温度を一定に保つなどの温度制御方法をとる必要がある。

以下、ブレイクダウン電圧の測定方法について記述する。先に記述した式 5.4 に $Q = CV$ を適用させると

$$G = \frac{d \times r}{e} = \frac{C_{pixel}}{e} \cdot (V_{bias} - V_{br}) \tag{5.6}$$

と書くことができる。ここで、 V_{bias} がバイアス電圧、 V_{br} がブレイクダウン電圧である。これより、 G は V_{bias} に比例し、関数の x 切片がブレイクダウン電圧 V_{br} であると理解することができる。したがって、ADC 分布測定によって得られる 1 p.e., 2 p.e., ... の各ピーク値からそれぞれのピーク差を求め、バイアス電圧を変化させながらこの測定を何度か行い、ピーク差-バイアス電圧のプロットを作成する。このプロットから、フィッティングによって x 切片 (ブレイクダウン電圧) を求めることができる。今回行ったブレイクダウン電圧測定のセットアップは図 5.14 のとおりであり、測定の結果も合わせて示す。

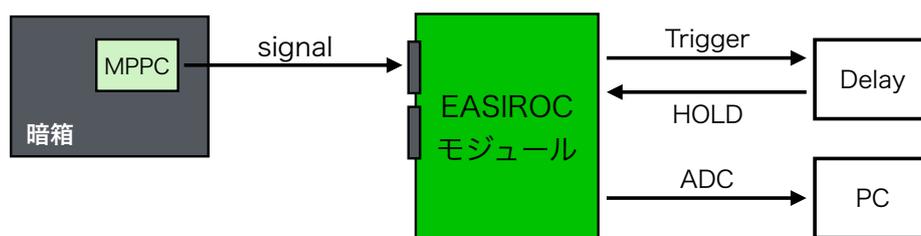


図 5.14: ブレイクダウン電圧測定のセットアップ

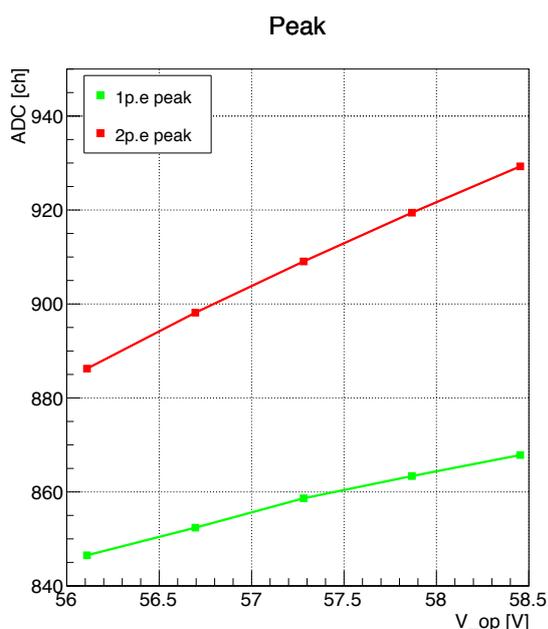


図 5.15: 25 °C における 1 p.e., 2 p.e. ピーク

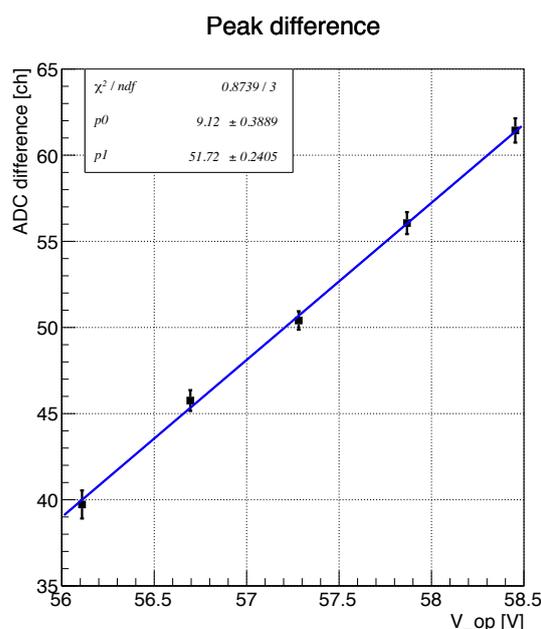


図 5.16: 25 °C における 1 p.e. 電荷量

図 5.15 は、25℃における 1 p.e. と 2 p.e. のピーク値をそれぞれフィットしたものである。また、図 5.16 は、2 p.e.-1 p.e. をプロットしたものであるが、これが各電圧における 1 p.e. の電荷量に相当する。つまり、図 5.16 の x 切片がブレイクダウン電圧となる。フィッティング結果は、

$$\text{ADC difference} = 9.12 \times (V_{\text{op}} - 51.72) \tag{5.7}$$

であり、ブレイクダウン電圧が 51.72 V であることが分かった。同様に、温度が 5℃, -10℃における測定結果を以下に示す。

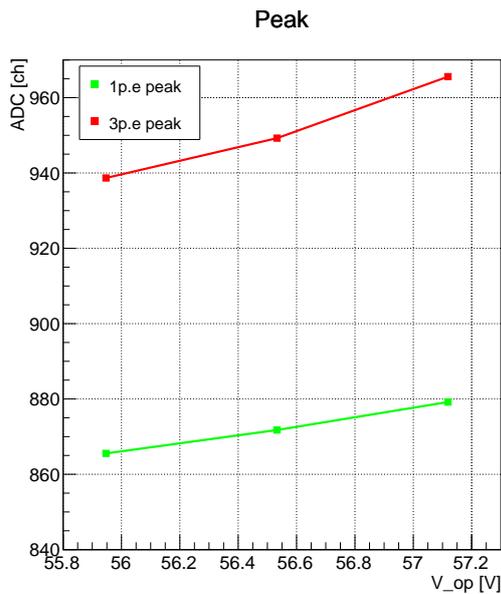


図 5.17: 5℃における 1p.e.,3 p.e. ピーク

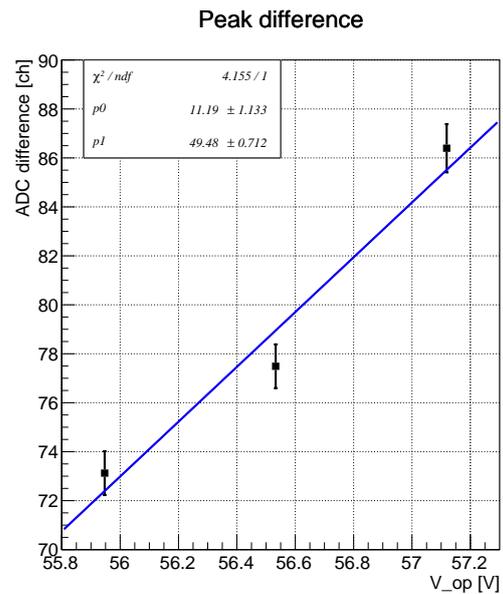


図 5.18: 5℃における 2 p.e. 電荷量

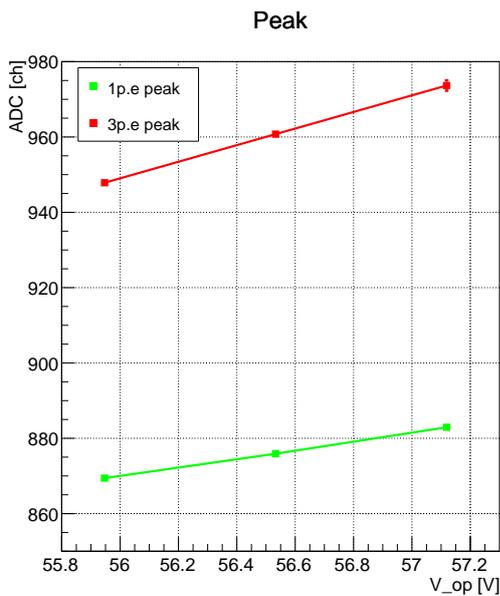


図 5.19: -10℃における 1p.e.,3 p.e. ピーク

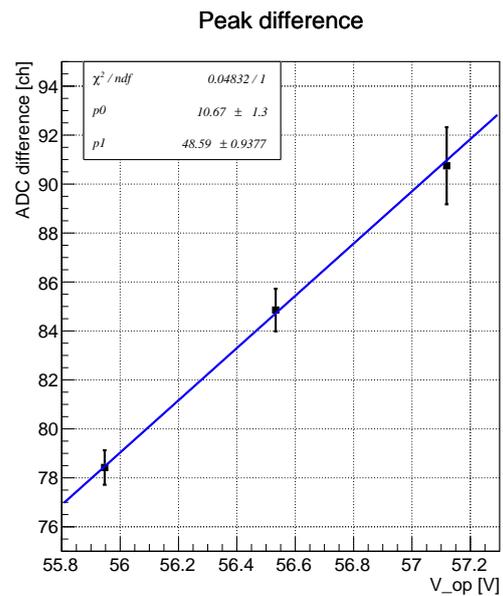


図 5.20: -10℃における 2 p.e. 電荷量

これらから得られたフィッティング結果は、5℃,-10℃の場合についてそれぞれ

$$5\text{℃} : \text{ADC difference} = 11.19 \times (V_{\text{op}} - 49.48) \quad (5.8)$$

$$-10\text{℃} : \text{ADC difference} = 10.67 \times (V_{\text{op}} - 48.59) \quad (5.9)$$

であり、ブレイクダウン電圧が

$$5\text{℃} : 49.48\text{ V}$$

$$-10\text{℃} : 48.59\text{ V}$$

であることが分かった。以上の結果より、温度によってブレイクダウン電圧が変化しているのが分かる。これらブレイクダウン電圧と温度の関係をグラフに表したものが図5.21である。MPPCの動作を一定に保つためには、バイアス電圧からブレイクダウン電圧を引いた値(ΔV)を等しくする必要があるので、測定の際はこの結果を参考にしながら電圧調整、または温度制御を行うことになる。

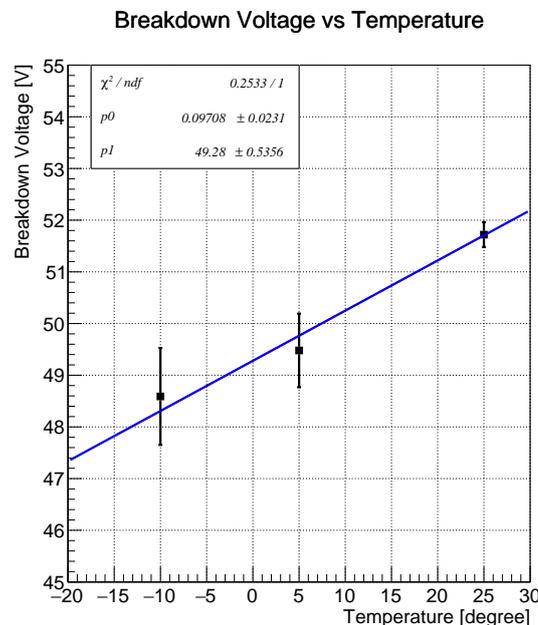


図 5.21: ブレイクダウン電圧と温度の関係

5.2.4 ダークレート

MPPCは1 p.e.程度の光も検出可能であるが、光が入射していないにも関わらず1 p.e.信号を検出してしまうことがある。この信号を”ダークノイズ”と呼び、1秒間あたりのダークノイズのカウント数を”ダークレート”と呼ぶ。MPPCのダークレートはPMTなどと比べると極端に大きく、そのために1 p.e.程度の光を検出する実験においては重大なノイズとなってしまふ。ただし、ダークノイズは熱振動によって生成される熱雑音が主であるため、温度を下げることによりダークレートが低減することが分かっており、上記のような低光量実験の際には低温環境を実現させることが必要となってくる。

以下、ダークレートの測定方法について記述する。今回行ったダークレート測定のセットアッ

プは、図 5.22 のとおりである。

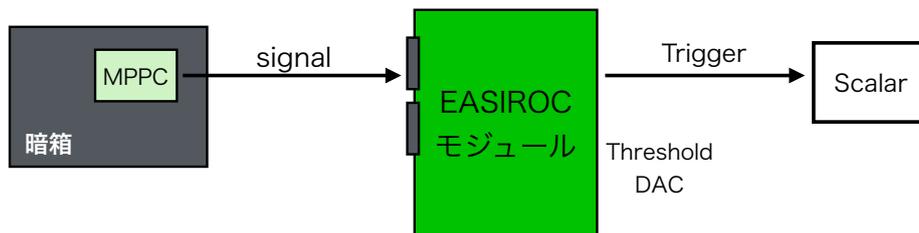


図 5.22: ダークレート測定の設定アップ

暗箱に入れた MPPC にブレイクダウン電圧以上の電圧をかけ、ガイガーモードで動作させた。この状態において、MPPC で検出された信号を EASIROC モジュールに入力し、あらかじめ設定していた閾値を超えて Trigger のかかった信号をスケーラーでカウントした。測定は Threshold DAC を変えながら行い、各 Threshold DAC において 10 秒間の測定を行った。測定の結果は図 5.23 のとおりである。

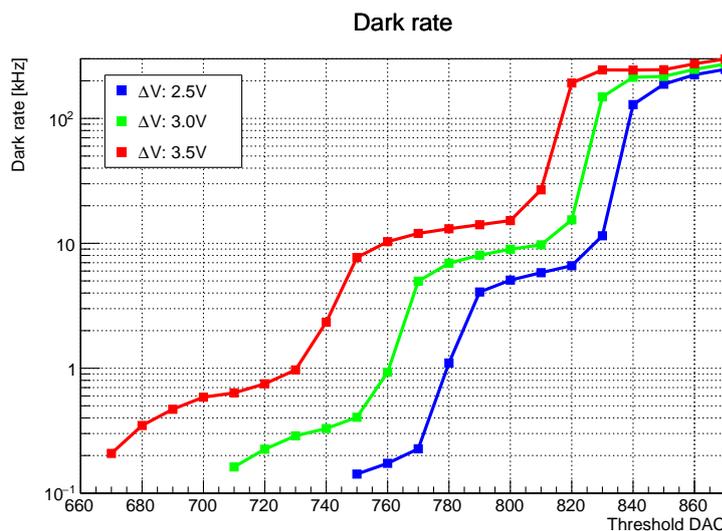


図 5.23: 25 °C におけるダークレートと Threshold の関係

Threshold DAC が小さくなると (閾値が高くなると)、ダークレートが階段のように減少している様子が分かる。これは、MPPC は 1 p.e., 2 p.e., ... と波高が定まった信号を出力しているため、光子数の境目でダークレートが一気に減少するからである。図 5.23 では、高いところから 1 p.e., 2 p.e., ... のダークレートとなっている。同様に、5 °C, -10 °C のダークレートも測定し、各温度における 1 p.e., 2 p.e. のダークレートをまとめたものを表 5.3 に示す。

表 5.3: 各温度における 1 p.e., 2 p.e. ダークレート (電圧は $\Delta V=3.0$ に設定した)

温度 [°C]	1.0 p.e.[kHz]	2.0 p.e.[kHz]
25	213.6	6.932
5	58.87	1.822
-10	1.210	-

表 5.3 より、フォトン数を増やすとダークレートが低減することが分かる。また同様に、温度が下がるとダークレートが低減することが分かる。前者については、第4章のミラー開発により改善が見込まれる。後者は、MPPC 検出器に冷却機構を取り付けることにより改善が見込まれる。実際に本研究において開発した MPPC 検出器には、冷却機構を取り付け、ダークレートを低減させる方法を取った(詳細については第6章)。

5.2.5 クロストーク

MPPC が光を検出すると、検出した APD ピクセルが他の APD ピクセルに影響を与え、出力とは異なる信号を同時に発生させてしまうことがある。これを”クロストーク”と呼ぶ。実際の信号が、クロストークによってそれよりも大きい信号として検出されてしまうため、注意が必要である。例えば、真には 1 p.e. の発光を 1000 イベント観測する測定を行ったとする。もし、MPPC 素子のクロストークが 10%だとすると、100 イベントが 2 p.e. 以上の信号として出力されることになる。つまり、1 p.e. 信号イベントが 900 イベント、2 p.e. 以上の信号イベントが 100 イベントとなり、実際の発光と異なってきてしまう。そのため、近年クロストークを低減した MPPC が開発されており、今回使用した S13362-3050DG のクロストークはカタログ値で 3%となっている [19]。また、測定においてクロストークを見積もっておくことも重要である。

5.2.6 アフターパルス

MPPC が光を検出すると、時間差を伴って出力とは異なる信号が遅れて出力されてしまうことがある。これを”アフターパルス”と呼ぶ。光量が非常に小さい測定においては、イベント数を多く見積もってしまうため、注意が必要である。例えば、真には 1 p.e. の発光を 1000 イベント観測する測定を行ったとする。その際、アフターパルスが 10%あれば、検出したイベント数は 1100 イベントとなり、実際に検出したイベントの中に偽のイベントが入り込んでしまうことになる。そのため、クロストークと同様に、低減及び測定による見積もりが重要となってくる。

第6章 MPPCを用いたイメージング検出器の開発

6.1 研究目的

先行研究までは、イメージング検出器に組み込まれる光検出器はMAPMTを使用していた。しかし、LiLS中での逆 β 崩壊反応による先発信号と後発信号の時間差はおよそ $20\ \mu\text{s}$ である一方、MAPMTに使われているエレクトロニクスデッドタイムはおよそ $200\ \mu\text{s}$ である。これより、現段階では先発信号と後発信号を連続撮像することはできず、連続撮像を可能にするためにはデッドタイムが短いイメージング検出器が必要になる。先に挙げたMPPC読み出し用モジュールのEASIROCモジュールは、read clockが $32+ \text{tic}$ 分でデッドタイムは $30\sim 50\ \mu\text{s}$ となるため、MPPCを検出器として使用すればデッドタイムの短い測定が可能になる。しかし、MPPCはダークレイトが非常に高く、1 p.e.相当光を検出するイメージング研究では温度を下げる必要が出てくるが(第5章に記述)、イメージング検出器として組み込み可能かつ、実験室サイズの冷却機構を取り付けたArray-MPPC検出器はなかった。そこで本研究では、上記に挙げたような制約をクリアし、簡単かつ一気にArray-MPPCを冷やすことができるMPPC検出器を開発することを目的とした。実際に、いくつかの企業の方と協力して検出器を設計・作製を行い、その基礎パラメータ測定及び温度測定によって十分にダークレイトを減らせることを確認した。

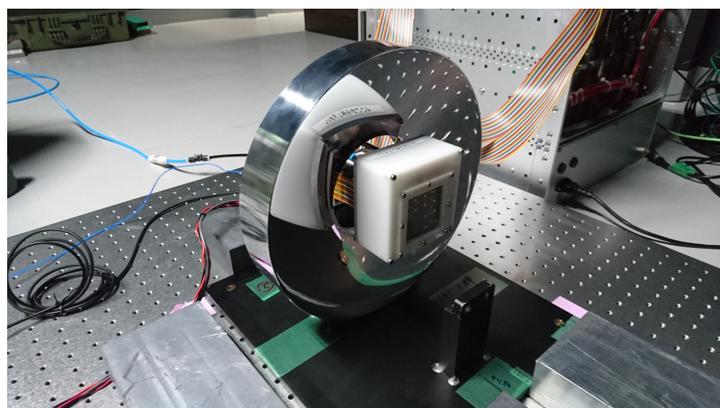


図 6.1: 実際に作製したMPPC検出器をミラーに取り付けた様子

6.2 MPPC を使用した他実験

ここでは、MPPC を使用している主な他実験について簡単に紹介する。

T2K 実験 [22]

T2K(Tokai-to-Kamioka) 実験は、長基線ニュートリノ振動実験である。名前のとおり、茨城県東海村に位置する J-PARC から、ミューオンニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町に位置する SK 検出器に向けて飛ばし、 $\mu_\nu \rightarrow \mu_e$ を観測しようとする実験である。T2K 実験では、280 m 離れた所に near detector(ND280) を配置しており、フォトンセンサーとして MPPC をおよそ 64,000 個使用している。MPPC の冷却には、独自に構築されたチラーによる大規模な冷却水システムを採用している。なお、測定における獲得光電子数は数十 p.e. 程度である。

MEGII 実験 [29]

MEGII 実験は、レプトンフレーバーの保存則を破る $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊を探索する MEG 実験の次世代実験である。実験では液体キセノン検出器が用いられており、液体キセノンが放出するシンチレーション光を光センサー (MPPC と PMT) で捉えることにより、ガンマ線を検出する。MPPC は液体キセノン中で使用され、十分に冷却されている (165 K 程度である) ため、ダークノイズは常温に比べて $\frac{1}{10^5}$ 程度に抑えられている。

J-PARC E40 実験 [28]

J-PARC E40 実験は、 Σp 散乱の微分散乱断面積を求める実験である。実験では、液体水素標的中で $\pi^\pm + p \rightarrow K^+ + \Sigma^\pm$ 反応によって Σ を生成し、 Σ の生成と Σp 散乱事象の同定を周囲の検出器で行う。散乱陽子の飛跡を測定するため、シンチレーションファイバーを配置したファイバートラッカー (CFT) が用いられ、それぞれのファイバーを個別に読み出すため、約 5000 個の MPPC が使用されている。CFT によって検出される粒子は様々であり、MIP(Minimum Ionizing Particle) の π 粒子による獲得光電子数は 20 p.e. 程度、陽子による獲得光電子数 300 p.e. 程度となっている。

AXEL 実験 [23]

AXEL 実験は、高圧キセノンガスを用いたニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 探索実験である。通常の二重 β 崩壊 ($2\nu\beta\beta$) では、ニュートリノが運動エネルギーを持ち出すため、Q 値を上限として連続スペクトルが観測される。しかし、ニュートリノを伴わない $0\nu\beta\beta$ の場合、全ての運動エネルギーが電子に分配されるため、Q 値に鋭いピークが観測される。そのため、 $0\nu\beta\beta$ 探索実験においては、高いエネルギー分解能が要求される。AXEL 実験では、読み出しに MPPC を用いることで、エネルギー分解能の向上を図っている。なお、獲得光量は $10^3 \sim 10^4$ p.e. 程度と大光量実験となる。

g-2 実験 [30]

g-2 実験は、米国の Fermi 国立研究所で行われている、ミューオンの異常磁気モーメントの値を精密に測定することを目的とした実験である。実験では、チェレンコフ発光体であるフッ化鉛 (PbF₂) と MPPC を 54 個用いてチェレンコフ検出器を作り、約 2~3.1 GeV の電子のエネルギーを測定する。2014 年の試作機では、MPPC の温度を安定させるため、クーラーボックスからの冷却空気で MPPC を冷却する構造を取っている。

上記のように、MPPC は他実験において使用実績がありその性能は保証されているが、本研究のような低光量かつ限られた領域に検出器を配するような実験状況ではなかった。そのため、本研究では、使用環境に適した冷却機構を独自に開発する必要がある。

6.3 冷却機構

MPPC 基礎パラメータの測定において、MPPC のダークレートは非常に大きいことが確認できた。ダークレートが大きいと、ダークノイズに 1 p.e. などの低光量のイベントが埋もれてしまい測定ができないため、冷却によって低減させる必要がある。今回の MPPC 検出器の開発にあたっては、ダークノイズによる誤イベント検出率 (ノイズ検出率) を 10% 以下とし、ダークレートの目標値を 64ch で 2.0 [MHz] 以下と設定した。なお、ノイズ検出率は式 6.1 により計算した。なお、感度時間とは信号検出からピークホールドをするまでの時間のことであり、この間にダークノイズが入り込むことによって誤イベントの検出が起こってしまう。今回の測定では、感度時間を 50ns に設定しているため、ダークレート (64ch) が 2.0 [MHz] 以下であれば、ノイズ検出率は 0.1 [events/event] 以下となる。

$$\text{ノイズ検出率 [events/event]} = \text{ダークレート [Hz/ch]} \times (64\text{ch 分}) \times \text{感度時間 [s]} \quad (6.1)$$

Array-MPPC を用いた実験は多々あるが、大光量実験のために冷却がいない場合や、冷却が必要な場合にも主な冷却方法として、恒温槽の中に入れたり、空間的に MPPC を冷やしたりする方法が挙げられる。しかし、本研究で扱っているミラー一体型の小型検出器では、それらの方法を取ることは現実的ではなかったため、Array-MPPC に冷却機構を取り付ける方法を考え、開発を行った。結果、MPPC 素子の温度を -16.03 °C まで下げることに成功し、ダークレートは 64ch で 1.98 [MHz] と十分に低減していることを確認した。ここでは、その冷却機構の製作について記述する。

6.3.1 機構図

MPPC 検出器の構造設計については、川口液化ケミカル株式会社、及び東北電子産業株式会社と協力して行った。MPPC 検出器は主に、①MPPC、②コネクタ変換基盤、③伝熱板 (銅板)、④ペルチェ冷却ユニット、⑤密閉断熱容器の 5 つから成る (図 6.2)。設計の概略図を図 6.2 に示す。以下、①~⑤について、開発の詳細を記述する。

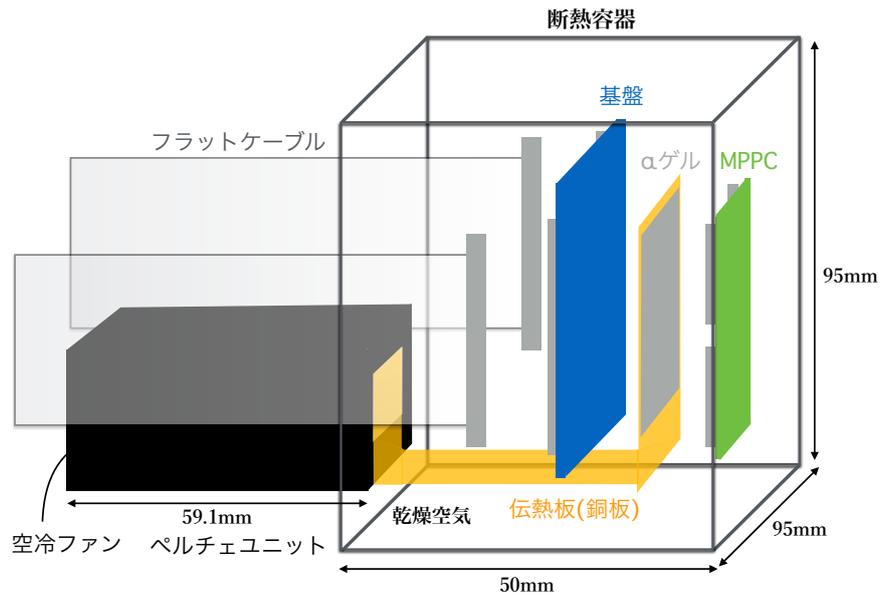


図 6.2: MPPC 検出器の概略図

①MPPC

MPPC は、光の検出に直接的に関わってくるものなので、用途に合わせて高性能なものを選ぶ必要がある。本研究では、マルチ ch の Array-MPPC が必要であり、かつダークレートをなるべく低く抑えるため、浜松ホトニクス製の 16ch Array-MPPC(S13361-6050AE-04) を 4 つ使用した。

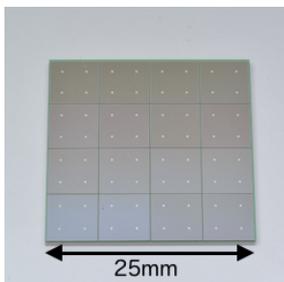


図 6.3: S13361-6050AE-04

表 6.1: S13361-6050AE-04 の基礎パラメータ [20]

パラメータ	値	単位
有効光電面	6×6	mm ²
ピクセルピッチ	50	μm
ピクセル数	14336	個
最大感度波長	450	λm
降伏電圧	53±5	V
PDE	40	%
ゲイン	1.7×10 ⁶	-
ダークレート	2	MHz
動作保証温度	-20~+60	℃

②コネクタ変換基盤

MPPC の裏に付いているコネクタは samtec 社製の ST4-40-1.00-LDP-TR であるが、MPPC の信号読み出しモジュールである EASIROC モジュールに搭載されているコネクタはヒロセ社製の HIF6-68D-1.27R であり、コネクタの変換が必要であった。そこで、東北電子産業株式会社に依頼し、コネクタ変換基盤を作成して頂いた (図 6.4 の左図)。実際に 16ch Array- MPPC を 4 つ装着したものが図 6.4 の中図である。

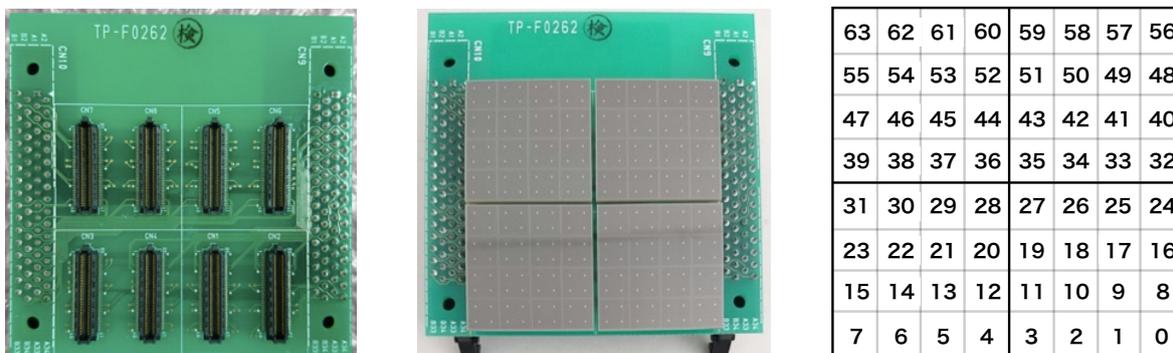


図 6.4: 左図: コネクタ変換基盤 (東北電子産業株式会社製), 中図: 16ch Array- MPPC を 4 枚装着後, 右図: ch 番号一覧

③伝熱板 (銅板)

MPPC を冷やす必要があるため、MPPC とコネクタ変換基盤の隙間に銅板と株式会社タイカ製の”シート状熱伝導ラムダゲル (α GEL COH-4000LVC)”を挟み、銅板を検出器後方に伸ばした。 α GEL は高い緩衝性能・熱伝導率・電気絶縁性を有したゲル状シートである (図 6.5)。MPPC に銅板を直接貼り付けると、間に隙間 (空気溜まり) ができてしまうために熱移動の効率が落ちてしまうが、 α GEL を挟むことで銅板と MPPC の間の寸法公差が無くなり、熱が効率的かつ均一に伝わるようになると期待される。



図 6.5: MPPC と銅板の間に挟んだ α GEL

銅は熱伝導率が高く、自由な形に加工しやすいために伝熱板として適切であると考え、選択した。銅板の形状は、ペルチェユニットのペルチェパッド部分の大きさ (22 mm^2) と MPPC の大きさ (50 mm^2) を考慮して決定した (図 6.6)。正方形 (50 mm^2) の部分を MPPC の裏に貼り、ペルチェ素子を細長い先端部分に貼り付ける。簡単な構造ではあるが、銅板を伝って効率的に MPPC

を冷やすことができる。また、銅板の厚さによっても熱効率に変化してくるため、厚さの最適化についての実験を行った(項目4に記述)。

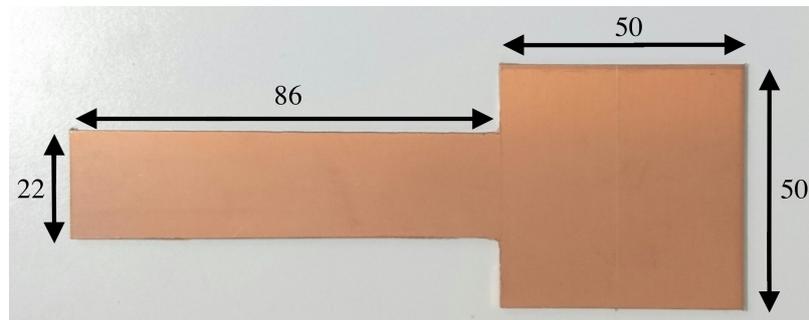


図 6.6: 銅板の形状(断熱のため、周りはスーパーインシュレーションを使用した)

④ペルチェ冷却ユニット

検出器後方に伸ばした銅板の端には、ペルチェ素子と排熱機構を組み合わせた”ペルチェ冷却ユニット”を取り付けた。これにより、銅板伝いにMPPCを冷やす構造を設計した。なお、ペルチェ冷却ユニットは株式会社ビックスに作成を依頼した。ペルチェ冷却ユニットには主に、空冷式と水冷式の2種類がある。空冷式は、放熱面にファンなどで空気を送り排熱を行う形式である。ファンの駆動音がしたり空気の流れができたりと、使用環境によってはデメリットはある。しかし、小型化が可能であることや他の装置を用意する必要がないため、排熱が簡単に行える。一方水冷式は、中に水が流れる金属などを放熱面に接しさせ、水を媒介として排熱を行う形式である。水は空気に比べると熱伝導率が良いので、排熱能力が高くなる。しかし、チラーを用意したり水の通り道を確認したりする必要があるため、空冷式に比べると大掛かりなものになりやすい。今回の場合は、検出器自体を小型にする必要があったため、空冷式を選択した。

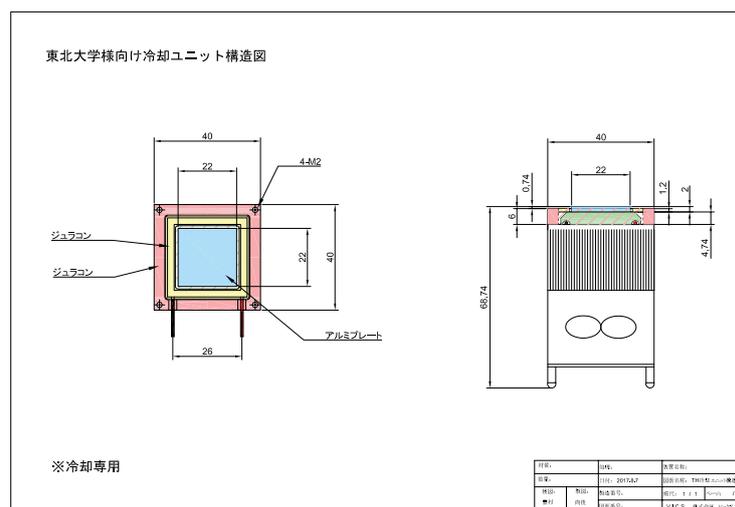


図 6.7: ペルチェ冷却ユニットの設計図

ペルチェ素子とは、2枚の金属のPN接合部に直流電流を流すことで金属間で熱のやり取りをさせ、冷却や放熱を行うことができる半導体素子のことである。PN接合部において、電流がNからPに流れる箇所では吸熱反応が、PからNに流れる箇所では発熱反応が起こる(図6.8)。これにより、金属の片面は冷却され、もう片面は加熱されるのである。このような電子冷却には以下のメリットが挙げられる。

- ・ 駆動音がなく静か
- ・ 小型化が容易であり、形状を自由に決定できる
- ・ 電流の向きにより容易に冷却、加熱を選択できる

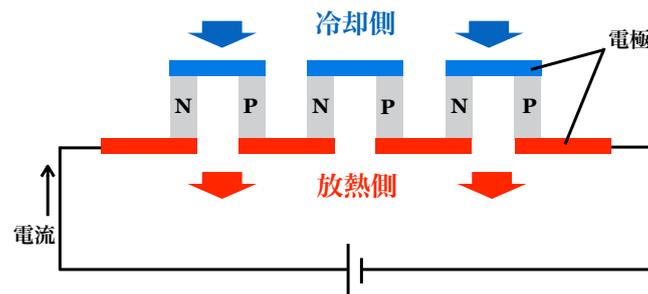


図 6.8: ペルチェ素子の動作原理

今回の検出器作製に関しても、そのサイズが小さいことがネックとなっていた。大型の検出器であれば、冷却のために真空断熱デュワーに液体窒素を入れたり、恒温槽を使用したりできる。しかし、小型でサイズに制約のある場合にはこれらを使用することができない。そこで、小型かつ冷却能力に優れているとして、ペルチェ素子は最も適切な選択肢の一つと言える。

⑤密閉断熱容器

ベルチェ冷却ユニットを使用して空気中でMPPCを冷やすと、外気温との温度差によって結露が発生してしまうため、対策が必要となる。そこで、川口液化ケミカル株式会社に依頼をし、内部を乾燥空気循環させることができるポートを取り付けた密閉断熱容器を作製して頂いた。密閉断熱容器を取り付けた検出器の設計図を図6.9に示す。

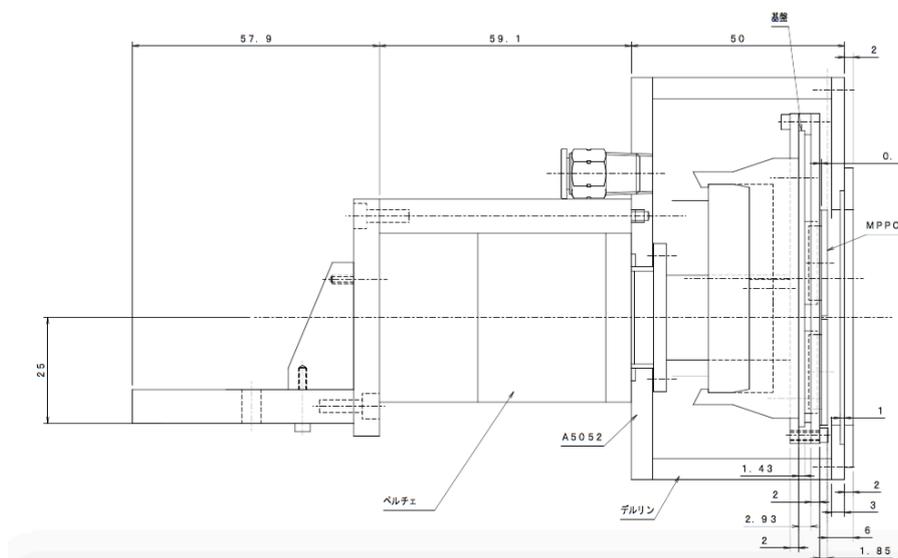


図 6.9: MPPC 検出器の設計図。密閉断熱容器は右側の四角に囲まれた部分 (後方からは信号読み出し用のフラットケーブルが2本、乾燥空気循環用ポートが2本、温度センサー (Pt) の取り出しポートが1本出ている)

容器内の環境は、結露対策にとって重要である。一般的に、結露対策に最も適した環境は真空であり、光電子増倍管も真空構造を取っている。しかし、内部を真空にすると、耐久性の問題である程度大きい (厚い) 外壁が必要になってくるが、今回の場合大きさに制約があるために真空は選択しなかった。また、次に考えられる案として、乾燥窒素が挙げられる。乾燥窒素は露点がおおよそ -70°C と低く、結露対策に用いられることが多い。しかし、密閉した空間で使用する場合、窒息の恐れがある。本研究で使用している部屋 (暗室) は光漏れ防止のために窓などがなく、窒素の使用はするべきではないと判断した。ただ、循環用ポートは気体であれば循環させることができるため、将来的に密閉しない空間でMPPC検出器を扱う場合には、乾燥窒素の使用は適切である。以上のことに加え、コストを考慮した上で、内部に循環させる気体は乾燥空気を選択した。

乾燥空気を作り出すコンプレッサーは、日立産機システム株式会社のPOD-0.75LESを使用した (図6.10)。このコンプレッサーは、内部にドライヤーを搭載しており、おおよそ 0.75MPa まで圧力を引くことで、圧力下露点 15°C 以下の乾燥空気を作り出す。 0.75MPa , 圧力下露点 15°C の空気の場合、大気圧下でおおよそ -15°C の露点となるため、結露対策としての効果が期待される。



図 6.10: 乾燥空気を作るために使用したコンプレッサー (日立産機システム株式会社 POD-0.75LES)

6.3.2 銅板の厚さの最適化

冷却機構の中に含まれる銅板は、冷却をペルチェ素子から MPPC へと伝える重要な役割がある。そのため、最も効率よく冷却が伝わる形状を決定する必要がある。そこで、厚さがそれぞれ異なる、1 mm、2 mm、3 mm、の 3 枚の銅板を用意し、それぞれが MPPC をどの程度冷やすことができるかの測定を行い、銅板の厚さの最適化を行った。実験のセットアップは図 6.11 の通りである。

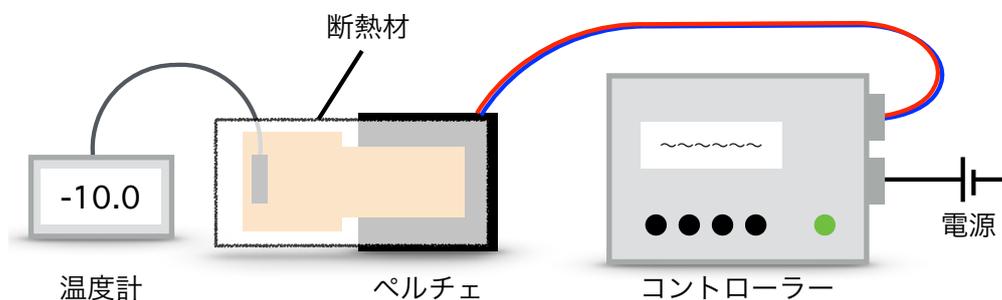


図 6.11: 銅板の厚さ最適化実験のセットアップ

<手順>

1. 銅板のサンプルを作る
2. 断熱材を使ってサンプルと温度計を貼り付ける
3. ペルチェユニットを駆動させ、ペルチェ素子温度と銅板の温度の変化を記録する

測定の結果は、図 6.12 と 6.13 のとおりである。図 6.12 は、銅板の温度を銅板の厚さごとにプロットしたものである。また、図 6.13 は、銅板の温度が十分に下がったところでの拡大図である。これらの結果から、銅板の厚さは 2mm が最適であることが分かった。また、温度の安定性としては、図 6.13 から、温度のゆらぎはおよそ $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ となっていることが分かる。MPPC 検出器に使用する MPPC(S13361-6050AE-04) はカタログ値で $54\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ となっており、 $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ では $\pm 8.1\text{ mV}$ の電圧変動が生じることになる。この値は、 $\Delta V(\sim 3.0\text{ V})$ に比べて非常に小さいため、測定中における電圧変動による影響は無視できると考えられる。

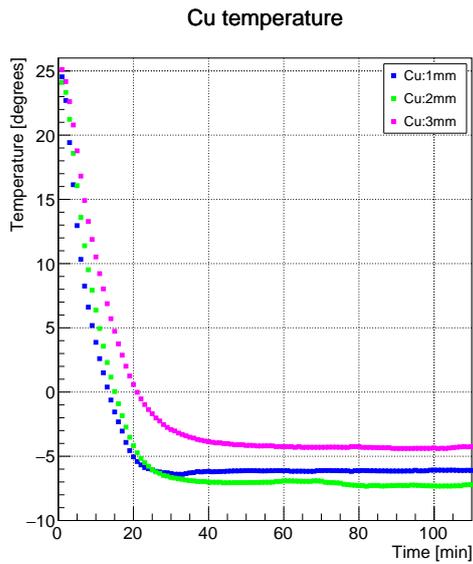


図 6.12: 各銅板の温度変化の様子

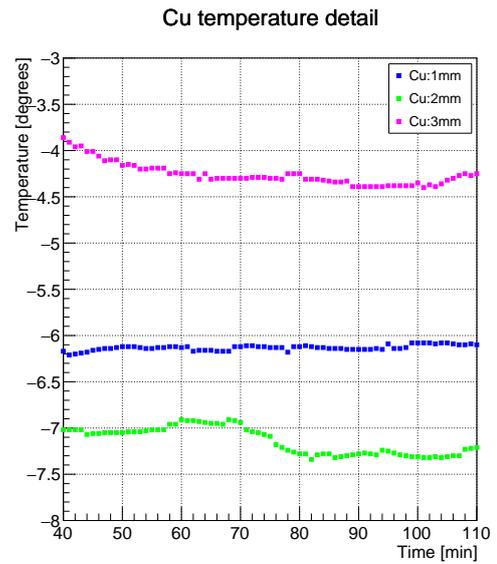


図 6.13: 銅板の温度が十分に下がってからの拡大図

6.4 MPPC の有用性評価

6.4.1 デッドタイム

MPPC 検出器開発の一番の目的は、デッドタイムの短い測定を可能にするためであった。そこで、デッドタイムによって後発信号がどの程度取得可能か、連続撮像の efficiency 計算を行った。図 6.14 にデッドタイムと連続撮像の efficiency との相関を示す。なお、efficiency の計算には、式 6.2 を用いた。

$$\text{efficiency} = \frac{\text{デッドタイム } t_d \text{ において取れるイベント数 } N_d}{\text{デッドタイムフリーで取れるイベント数 } N_{\text{all}}} \quad (6.2)$$

ただし、イベントの時間応答関数を $N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right)$ と定義し、後発信号の時定数を $t_0 = 20 \mu\text{s}$ とした。 N_d 及び N_{all} は以下のとおりである。

$$N_d = \int_{t_d}^{\infty} N_0 \exp\left(-\frac{t}{20}\right) dt \quad (6.3)$$

$$(6.4)$$

$$N_{\text{all}} = \int_0^{\infty} N_0 \exp\left(-\frac{t}{20}\right) dt \quad (6.5)$$

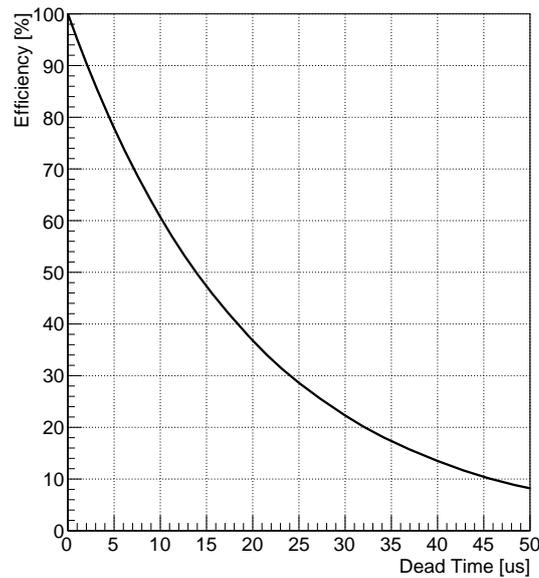


図 6.14: デッドタイムにおける連続撮像の efficiency(50 μs で約 8.21%, 30 μs で約 22.3%となる)

MAPMT を使用しての測定は、デッドタイムが 200 μs であり、efficiency は約 0.00454%となり、ほぼ 0%である。一方 MPPC を使用しての測定では、デッドタイムが 30~50 μs となるため、efficiency は 8.21~22.3%となり、かなり向上することが分かる。

6.4.2 冷却テスト

検出器に取り付けた冷却機構によって、MPPC が何 $^{\circ}\text{C}$ まで冷却できるのかの測定を行った。また、そのオペレーション方法の確立も行った。検出器はミラーに取り付けてられており、セットアップは図 6.15 のとおりである。なお、検出器に取り付けた温度計は 2 つあり、図 6.16 のように銅板と MPPC の温度を測定できるようになっている。

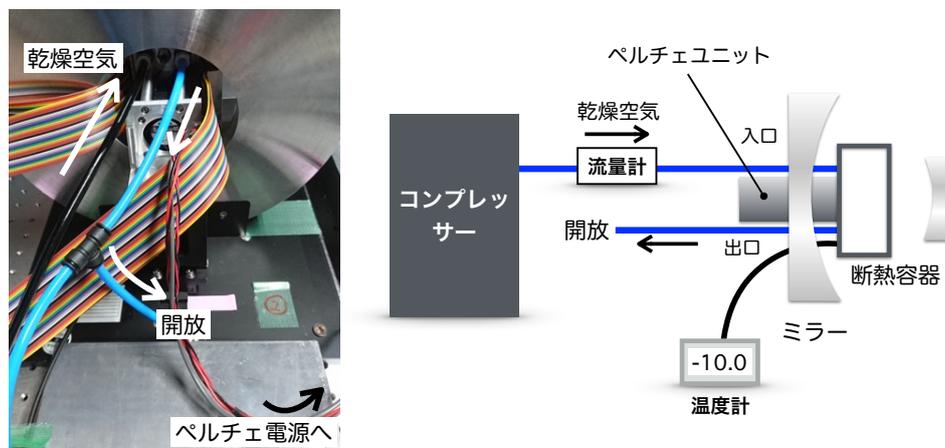


図 6.15: 冷却テストのセットアップ (検出器後方に温度計・ペルチェ電源が配線され、コンプレッサーで生成した乾燥空気を送れるようになっている)

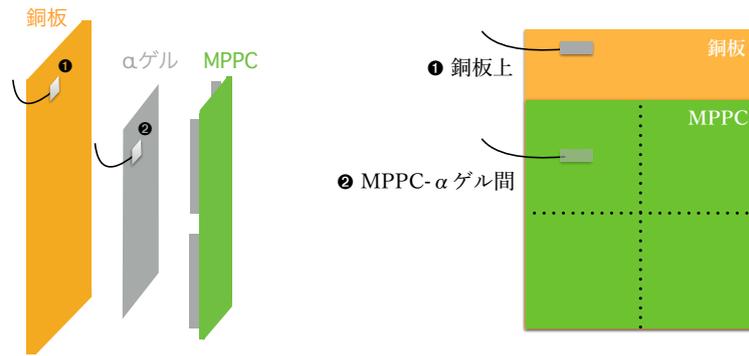


図 6.16: 検出器内に取り付けた温度計の位置 (MPPC と銅板の温度を測定できるように配置してある)

冷却テストの測定手順は以下のとおりである。

<手順>

1. コンプレッサーを動作させて乾燥空気を数分間流し、容器内に充填させる
2. 乾燥空気の流量を絞り、ペルチェユニットを駆動させて温度の記録を開始する
3. 検出器に結露が発生しているかを確認しながら、流量による温度変化を測定する

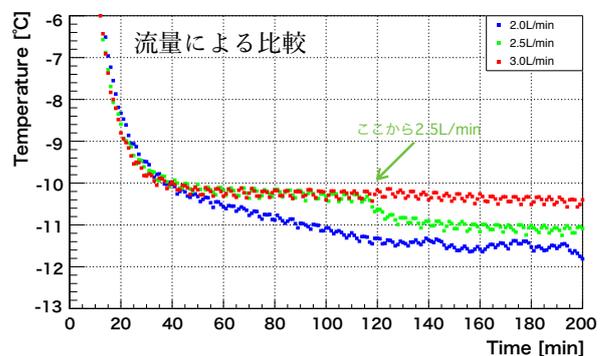
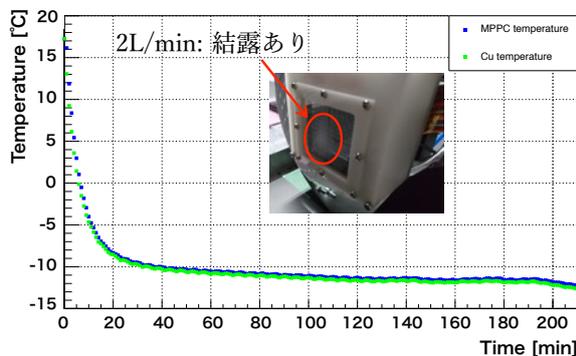
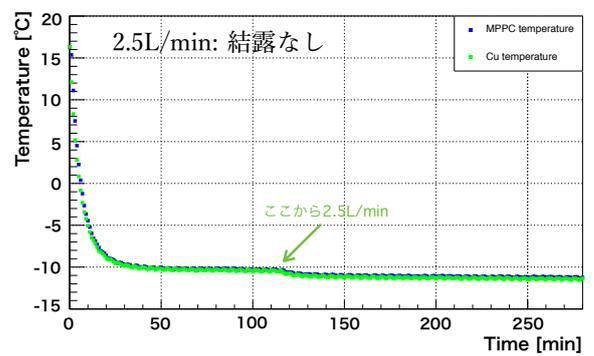
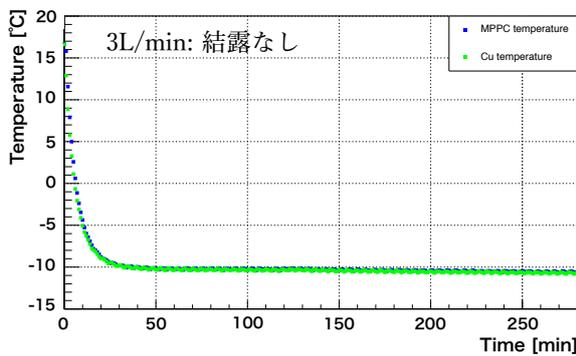


図 6.17: 流量が 3 L/min, 2.5 L/min, 2 L/min の時の温度変化の様子とそれぞれの比較 (最低到達温度はそれぞれ約 -10.8 °C, -11.3 °C, -12.0 °C)

図 6.17 は、測定の結果である。流量が多いと、乾燥空気の熱によって冷却が十分に行われず、最低到達温度が高いことが分かった。また、逆に流量が少ないと結露が発生してしまうことがわかった。温度が下がれば下がるだけダークレートは減少するはずなので、流量が少ない状態でも結露が発生しないような対策を施し、再測定を行った。対策としては、検出器後方から送っている乾燥空気を分岐させ、前方の透明窓に吹き付ける構造をとった(図 6.18)。

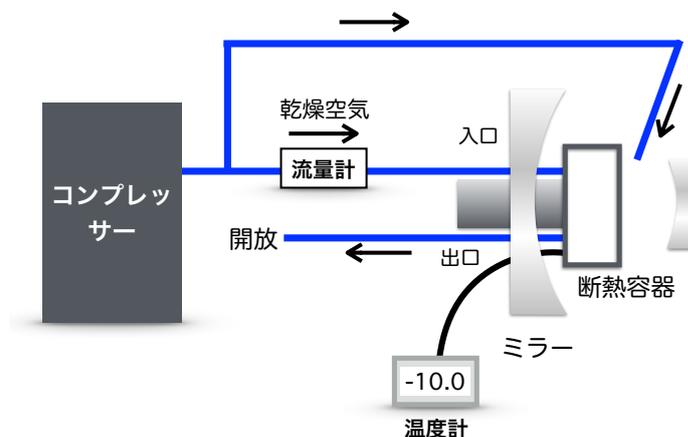


図 6.18: 容器外部における結露対策のためのセットアップ

上述の測定で発生した結露は透明窓の中心から徐々に広がるものであったため、この方法が簡単かつ効果的であると考えた。実際、乾燥空気を吹き付けて測定を行うと、結露が発生しないことを確認できた。そこで、乾燥空気を少量吹き付けながら内部に流す乾燥空気の流量を 0 L/min にし、断熱容器内を乾燥空気で密封にした状態で測定した。その結果を図 6.19 に示す。最低到達温度は $-16.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、結露が発生しないことも確認できた。これより、以下のオペレーション方法によって本研究の目的であった Array-MPPC を簡単かつ一気に冷却することに成功した。また、MPPC を使用する際には温度の安定性も重要になってくるが、図 6.19 の右図から分かるとおり、温度ゆらぎは $\pm 0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、十分な安定性と言える。実際、MPPC のカタログ値によると、温度ゆらぎによる電圧変動は $54\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ であるため、測定中の電圧変動は $54\text{ mV}/^{\circ}\text{C} \times \pm 0.07\text{ }^{\circ}\text{C} = \pm 3.78\text{ mV}$ となり、 $\Delta V = 3.0\text{ V}$ に比べて非常に小さいため、変動は無視できると考えても良い。

＜オペレーション方法＞

1. コンプレッサーを動作させて乾燥空気を数分間流し、容器内に充填させる。またその際、検出器の透明窓に乾燥空気を吹き付けておく。
2. 乾燥空気の流量を0 L/minにし、ペルチェユニットを駆動させる。

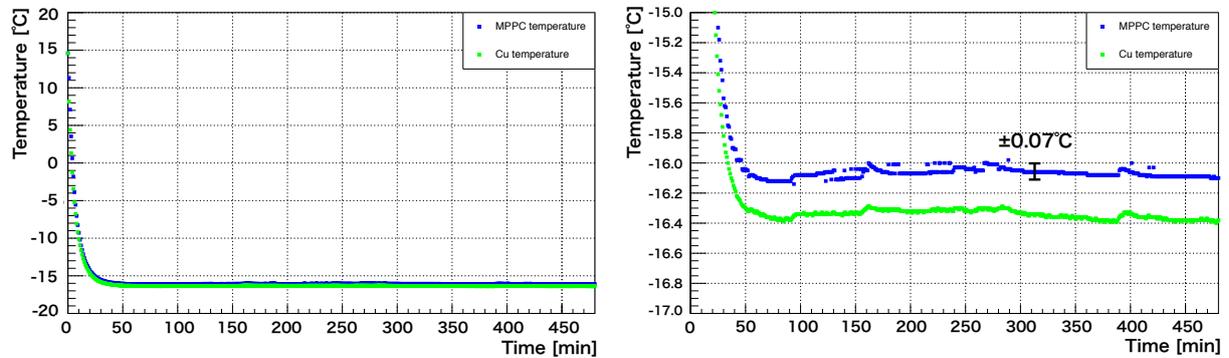


図 6.19: 左図: 流量 0 L/min, 乾燥空気を透明窓に吹き付けて測定した時の温度変化の様子, 右図: -15~17 °Cにおける拡大図

6.4.3 ブレイクダウン電圧測定

S13362-3050DG と同様に 64ch Array-MPPC でもブレイクダウン電圧測定を行った。64ch Array-MPPC は 16ch Array-MPPC を 4 つ (以下、Array1~4) 使用しているため、それぞれの Array に対して 1ch ずつ (ch0, 4, 56, 36) 測定を行い、得られたブレイクダウン電圧をその Array 共通のブレイクダウン電圧とした。測定方法は同様である。室温 15℃ における測定結果は以下の図 6.20 と図 6.21 のとおりである。

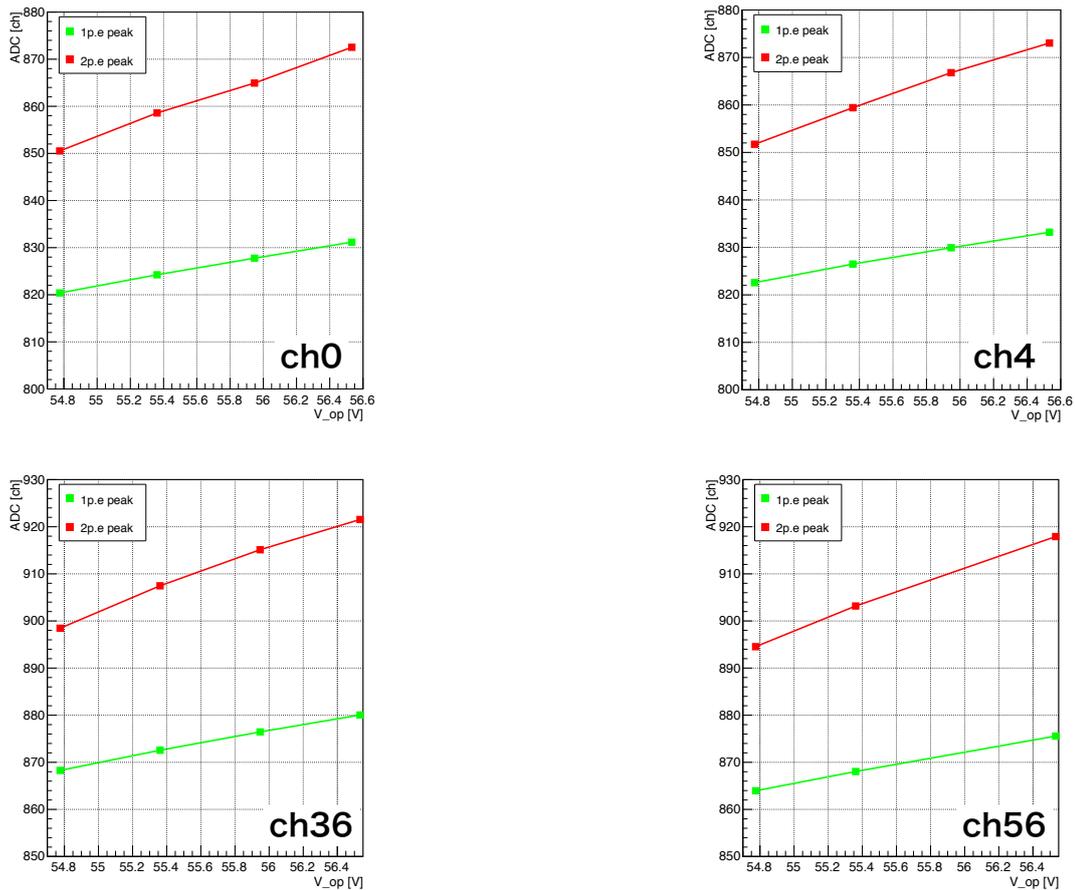


図 6.20: 室温 15℃ における 1 p.e., 2 p.e. ピーク

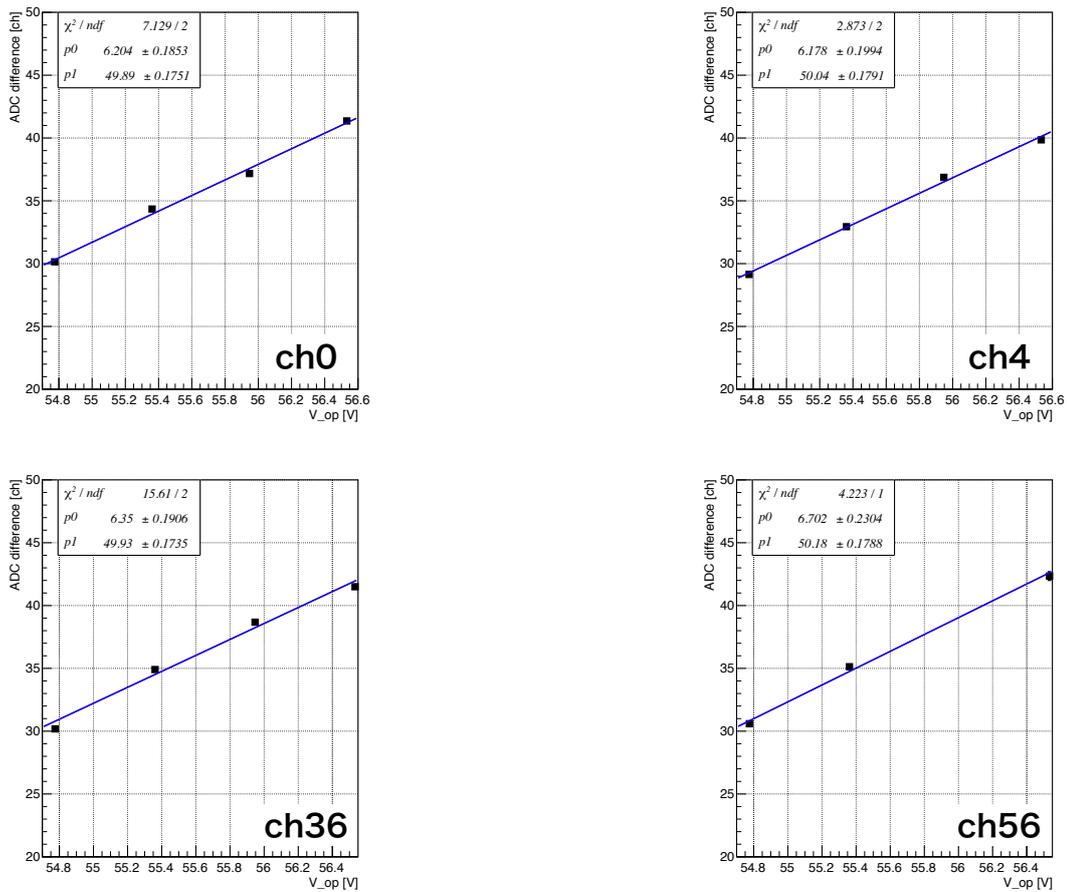


図 6.21: 室温 15 °C における 1 p.e. 電荷量

図 6.21 より、フィッティング結果はそれぞれ

$$\text{ch0 : ADC difference} = 6.204 \times (V_{\text{op}} - 49.89) \quad (6.6)$$

$$\text{ch4 : ADC difference} = 6.178 \times (V_{\text{op}} - 50.04) \quad (6.7)$$

$$\text{ch36 : ADC difference} = 6.350 \times (V_{\text{op}} - 49.93) \quad (6.8)$$

$$\text{ch56 : ADC difference} = 6.702 \times (V_{\text{op}} - 50.18) \quad (6.9)$$

$$(6.10)$$

であり、室温 15 °C におけるブレイクダウン電圧は ch0:49.89 V, ch4:50.04 V, ch36:49.93 V, ch56:50.18 V が得られた。また、冷却を行った場合にも同様の測定を行った。その結果は、図 6.22 と図 6.23 のとおりである。

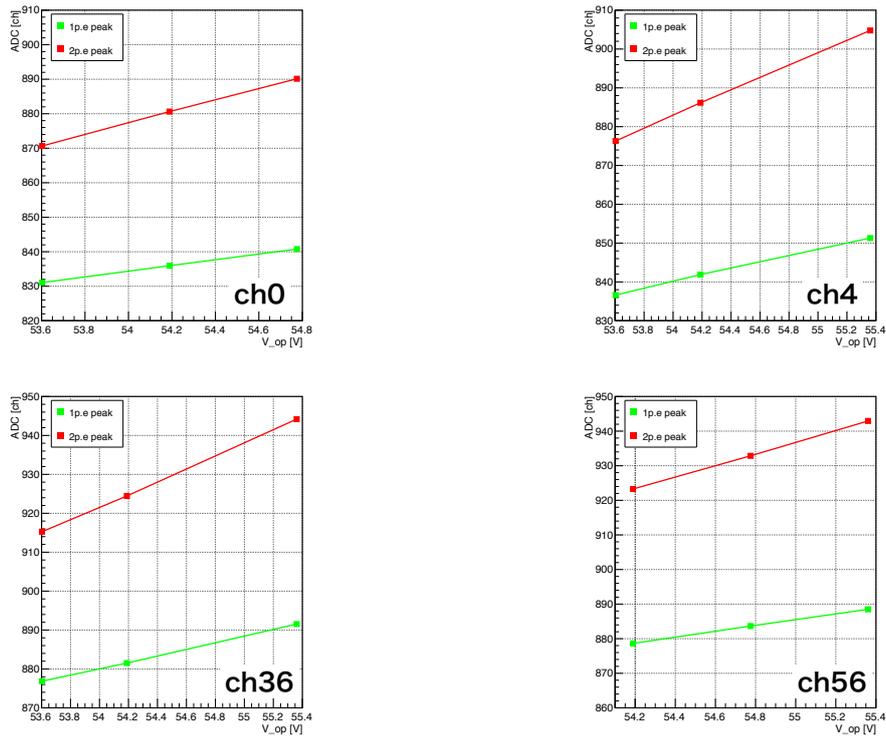


図 6.22: 冷却時における 1 p.e., 2 p.e. ピーク

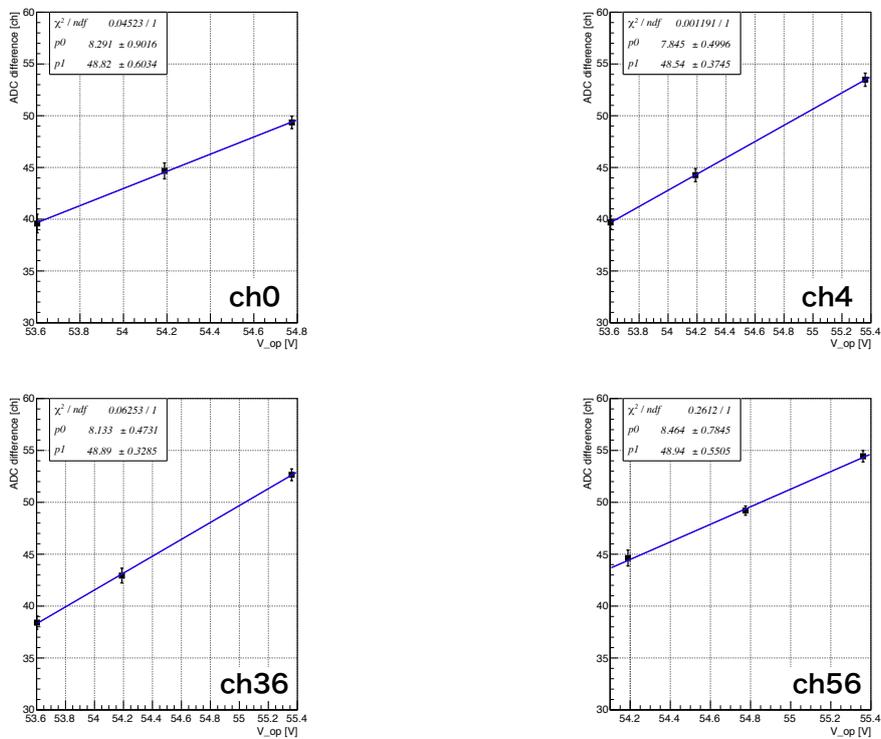


図 6.23: 冷却時における 1 p.e. 電荷量

図 6.23 より、フィッティング結果はそれぞれ

$$\text{ch0 : ADC difference} = 6.844 \times (V_{\text{op}} - 48.82) \quad (6.11)$$

$$\text{ch4 : ADC difference} = 7.845 \times (V_{\text{op}} - 48.54) \quad (6.12)$$

$$\text{ch36 : ADC difference} = 8.133 \times (V_{\text{op}} - 48.89) \quad (6.13)$$

$$\text{ch56 : ADC difference} = 6.908 \times (V_{\text{op}} - 48.94) \quad (6.14)$$

$$(6.15)$$

であり、冷却時におけるブレイクダウン電圧は ch0:48.82 V, ch4:48.54 V, ch36:48.89 V, ch56:48.94 V が得られた。以上の測定より、Array1~4 のブレイクダウン電圧は以下の図 6.24 のとおりに決定した。

Array4	15°C: 49.93 V	15°C: 50.18 V	Array3
	-16°C: 48.89 V	-16°C: 48.94 V	
Array2	15°C: 50.04 V	15°C: 49.89 V	Array1
	-16°C: 48.54 V	-16°C: 48.82 V	

図 6.24: 室温 15 °C、および冷却時における Array1~4 のブレイクダウン電圧

6.4.4 ダークレート測定

MPPC を運用するにあたり、最も懸念されたていたのがダークレートである。一般的に、MPPC のダークレートは MAPMT のダークレートに比べ、およそ $10^4 \sim 10^5$ 倍になる。そのため、ダークノイズに埋もれてイベントが撮像できないことが考えられる。6 章の基礎パラメータの測定において、MPPC を冷やすことでノイズが減ることを確認したが、1ch MPPC の簡単な測定であった。そこで、64ch Array-MPPC に関しても同様の測定によってダークノイズを見積もった。

測定はブレイクダウン電圧測定同様、それぞれの Array について 1ch ずつ (ch0, 4, 56, 36) に対して Discri をかけ行った。MPPC を動作させる電圧は、ブレイクダウン電圧から $\Delta V=3.0$ V が一般的であるため、上記のブレイクダウン電圧を参照して、室温 (-15 °C) では 53.18 V, 冷却時 (-16 °C) では 51.94 V に設定した。測定結果は図 6.25 である。

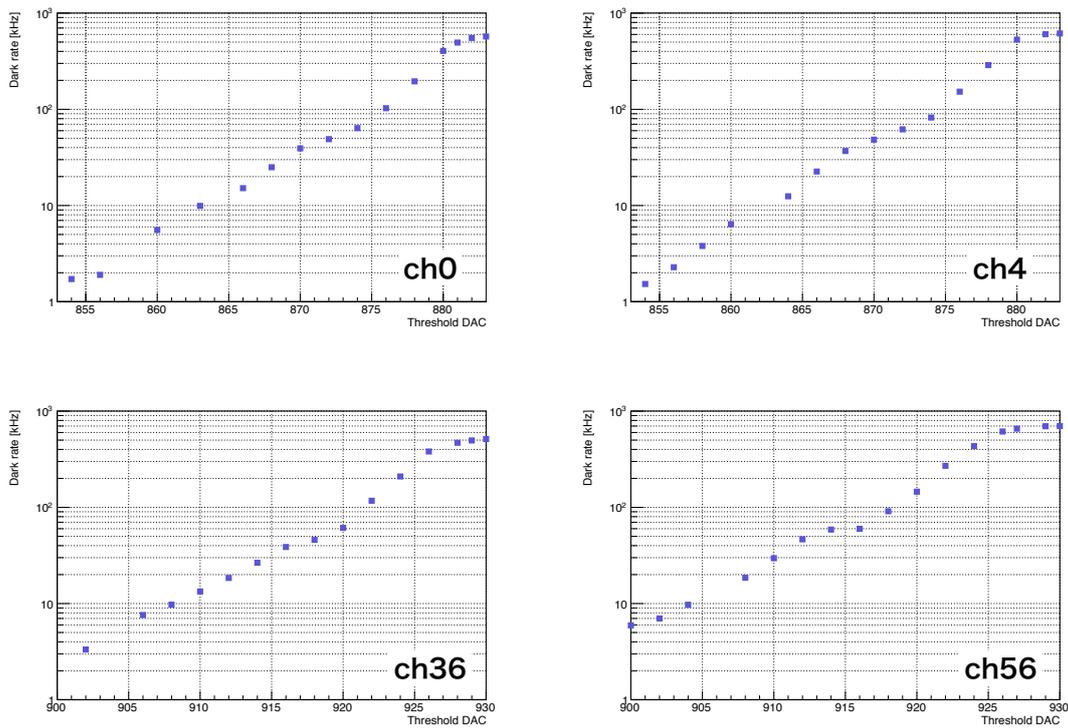


図 6.25: $\Delta V=3.0$ V における各 ch のダークレート

図 6.25 においては、S13362-3050DG での測定のようにはっきりとした階段構造になっていないため、以下の方法を用いて Threshold 解析を行った。解析結果は、図 6.26 のとおりである。

1. データ点を多元多項式でフィッティングする (うまくフィッティングさせるため、原点を 0 にして横軸を反転させた)
2. フィッティング関数の各点における微分を取り、縦軸の正負を逆転させた微分関数を作る
3. 2 で得られた微分関数の各ピークをガウス関数でフィッティングし、mean 値の小さい方から 1 p.e., 2 p.e.Threshold とする

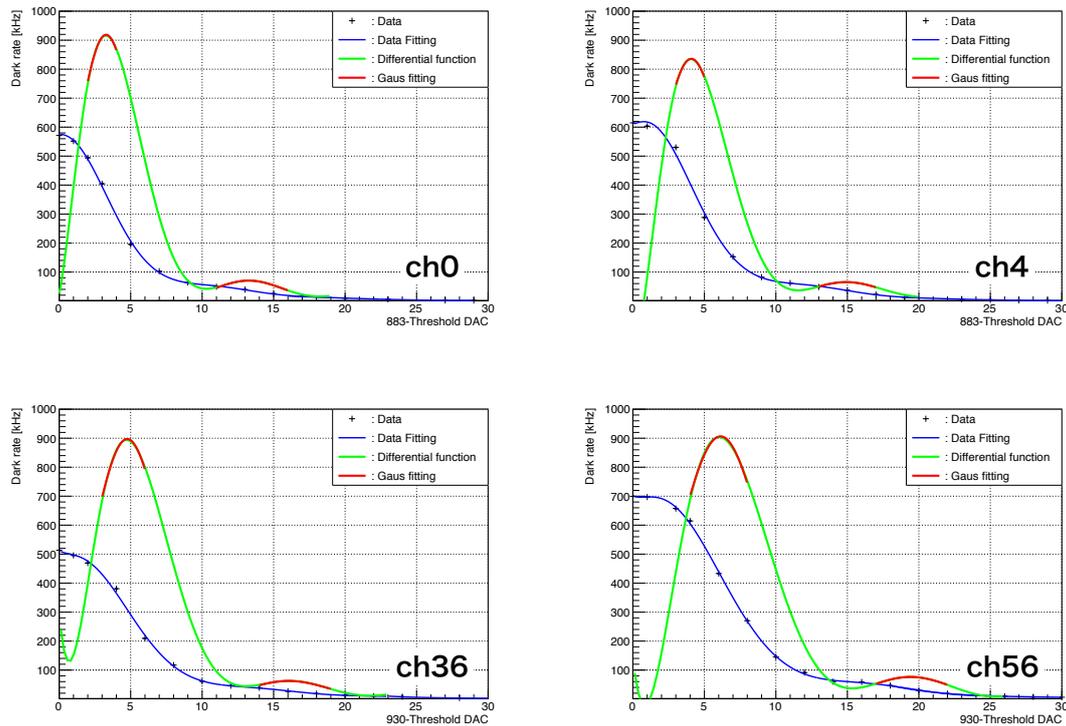


図 6.26: $\Delta V=3.0\text{ V}$ における各 ch の Threshold 解析の結果 (1 p.e., 2 p.e.Threshold においてピークが立っていることが分かる)

図 6.26 より得られた各 Threshold を表 6.2 にまとめた。ブレイクダウン電圧からの電圧差 (ΔV) が同じであれば、MPPC の Gain は同じになるので、温度が変化した (冷却した) 場合でも表 6.2 の Threshold を設定することができる。

表 6.2: 室温 (15 °C), $\Delta V=3.0\text{ V}$ における各 ch の Threshold DAC

Threshold	0.5 p.e.	1.0 p.e.	1.5 p.e.	2.0 p.e.
ch0	884.703	879.718	874.734	869.749
ch4	884.329	878.914	873.500	868.085
ch36	930.878	925.238	919.598	913.958
ch56	930.507	923.869	917.232	910.594

以上の測定により、各 ch(Array1~4) の Threshold が決定したので、MPPC を冷却した時のダークレート測定を行った。測定方法は 1ch の場合と同様である。冷却時の各 ch の 0.5 p.e., 1.5 p.e. ダークレート (DR) をまとめたものを表 6.3, 6.4 に示す。また、ch 毎に map 化したものを図 6.27 に示す。

表 6.3: MPPC 冷却時の各 ch の 0.5 p.e. ダークレートのまとめ (電圧は $\Delta V=3.0$ V に設定した)

ch	DR[kHz]	ch	DR[kHz]	ch	DR[kHz]	ch	DR[kHz]
0	35.3	16	33.2	32	33.6	48	24.2
1	30.6	17	30.2	33	26.9	49	23.7
2	27.9	18	33	34	37.3	50	21.3
3	25.8	19	38.8	35	37	51	31.4
4	34.3	20	24.8	36	36.3	52	18.4
5	36	21	36.9	37	34.7	53	26.3
6	21.8	22	32.4	38	40.9	54	16.6
7	31.9	23	34	39	40.1	55	43.4
8	35.2	24	24.1	40	37.7	56	26.9
9	37.1	25	24.1	41	48	57	16.9
10	30.9	26	26.2	42	31.9	58	30.8
11	21	27	30.1	43	32.3	59	17.4
12	40.8	28	28.6	44	34.1	60	23.6
13	37.1	29	33.2	45	32.8	61	32.9
14	22.2	30	35.6	46	46.9	62	22.5
15	42.8	31	30.4	47	33.6	63	18.3

表 6.4: MPPC 冷却時の各 ch の 1.5 p.e. ダークレートのまとめ (電圧は $\Delta V=3.0$ V に設定した)

ch	DR[kHz]	ch	DR[kHz]	ch	DR[kHz]	ch	DR[kHz]
0	5.5	16	5.8	32	1.6	48	4.7
1	5.8	17	4.3	33	5.3	49	4
2	5.7	18	5.4	34	4.1	50	5.3
3	3.5	19	3.9	35	5.6	51	4.7
4	3.7	20	3.6	36	6.1	52	3.1
5	2.6	21	4.5	37	4.8	53	2.4
6	2.8	22	3.4	38	3.5	54	3.2
7	2.6	23	3	39	6.9	55	6.5
8	5.1	24	3.8	40	6.4	56	5.9
9	5.6	25	4.9	41	6.2	57	1.8
10	5.4	26	2.9	42	5	58	6.6
11	3	27	3.4	43	4.7	59	6.9
12	4.4	28	3.6	44	5.1	60	1.4
13	1.2	29	3	45	2	61	5
14	4.9	30	5.4	46	6.9	62	5.8
15	5.7	31	3.3	47	6.8	63	4.1

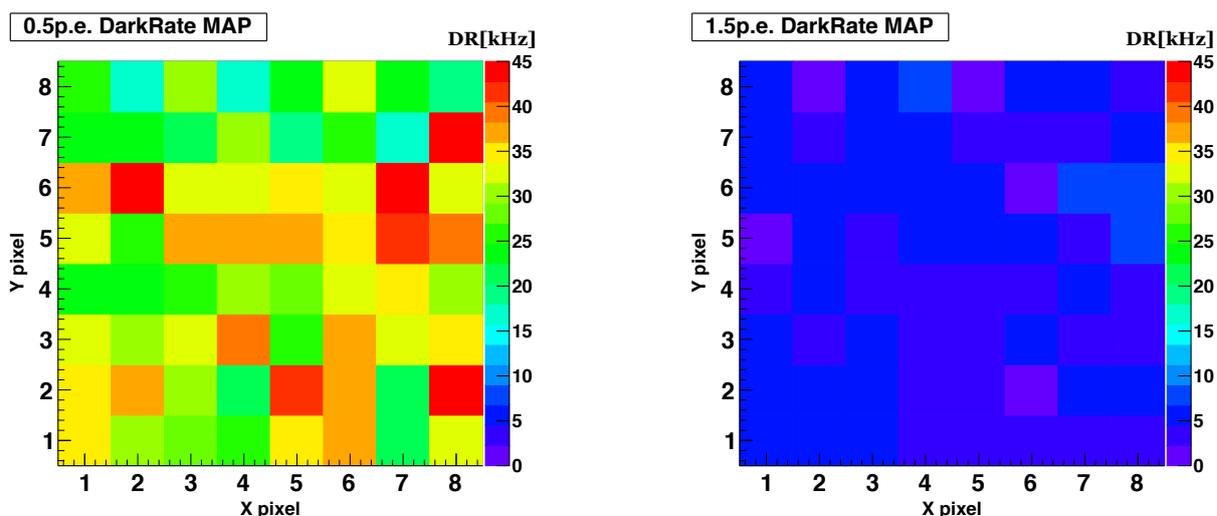


図 6.27: 各 ch 毎のダークレート map

表 6.3, 6.4 においてダークレートのばらつきが見られるが、これにはいくつか原因があると考えられる。以下にその可能性をまとめる。

1. 温度変化によるもの

上記のダークレート測定の際には、MPPC の温度が -16°C 程度になっていることを確認してから測定を開始しているが、数日間にわたり行っているため、温度が全て同じになっていないことが考えられる。温度モニターを開発し、同じ温度で測定することが解決策となる。

2. Gain のばらつき

今回の測定では、ブレイクダウン電圧は 16ch Array に対して 1ch ずつ測定し、Array 共通で電圧設定を行った。また、Threshold についても同様である。そのため、16ch の中で Gain に個性があるために、ばらつきが生じていることが考えられる。これらのパラメータを 1ch 毎に正確に測定することが解決策となる。

3. ノイズによるもの

信号をオシロスコープで確認すると、フラットケーブルによるノイズ (ダークノイズではない) が発生していることが確認できた。そこでダークレート測定では、このノイズの影響を無くするため、 $(\Delta V=3.0\text{ V}$ の時のノイズレート) $-(\Delta V=0.0\text{ V}$ の時のノイズレート) の計算を行った。フラットケーブルによるノイズはなかなか安定せず、時間によってふらついていたため、誤差の大きな測定になってしまったことが考えられる。外部からのノイズ対策を考えることが解決策となる。

以上のように測定のばらつきはあるものの、室温 (15°C) における典型的なダークレートは、

$$0.5\text{ p.e.: } 623.5[\text{kHz}/\text{ch}], 1.5\text{ p.e.: } 108.3[\text{kHz}/\text{ch}]$$

程度であったため、検出器に取り付けた冷却機構によって Array-MPPC を一気に冷却し、ダークレートを減らすことに成功したといえる。表 6.5 に、室温 (15°C) および冷却時におけるダークレートをまとめる。

表 6.5: 室温 (15 °C) および冷却時におけるダークレートのまとめ

温度	0.5 p.e. DR[/ch]	0.5 p.e. DR	1.5 p.e. DR[/ch]	1.5 p.e. DR
室温 (15 °C)	623.5[kHz]	39.9[MHz]	108.3[kHz]	6.93[MHz]
冷却 (-16 °C)	31.0[kHz]	1.98[MHz]	4.40[kHz]	281.6[kHz]

以上より、冷却機構の開発により Array-MPPC を一気に冷却させることに成功し、今回の MPPC 検出器開発における目標値であった 2.0[MHz] を達成したことを確認できた。なお、式 6.1 よりノイズ検出率を計算すると、

$$\text{ノイズ検出率} = 1.98[\text{MHz}] \times 50[\text{ns}] = 0.099[\text{events/event}]$$

となり、ノイズ検出率 9.9% となった。

6.4.5 LED を用いたイメージング測定

冷却機構の開発が完了し、冷却によってダークレートを減らすことができる MPPC 検出器の開発が完了した。そこで、実際に光源を撮像できるのかを確認するため、ミラーの RMS 測定の時と同様に、比較的発光のタイミングを合わせることが簡単な LED 光源を用いてイメージング測定を行った。この測定においては、MPPC 検出器による撮像の様子を確認することに加え、以下の2つの項目についての比較を行った。

1. CCD による撮像との比較
2. 冷却前後でのイメージング撮像 (ダークノイズ) の比較

測定のセットアップは図 6.28 のとおりである。LED の発光に合わせて信号を Hold できるよう、Delay を用いてタイミング調整を行った。また、信号のピークがきちんとホールドできている様子も合わせて図 6.29 に示す。

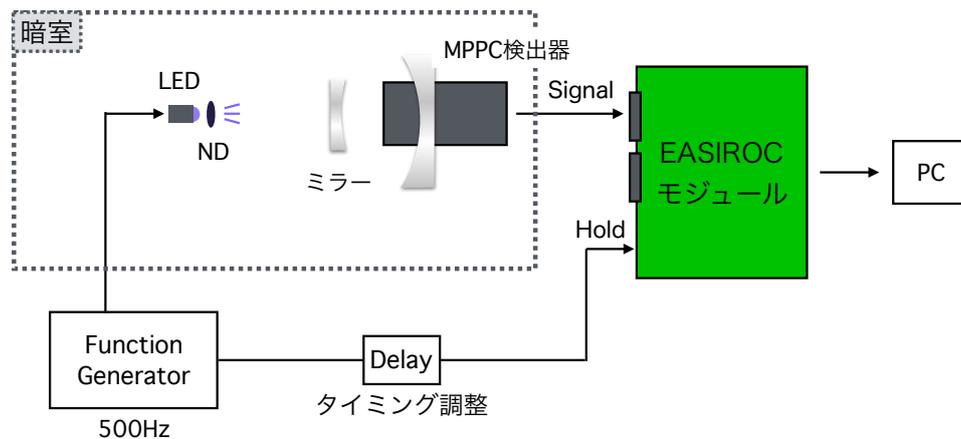


図 6.28: MPPC による撮像実験のセットアップ

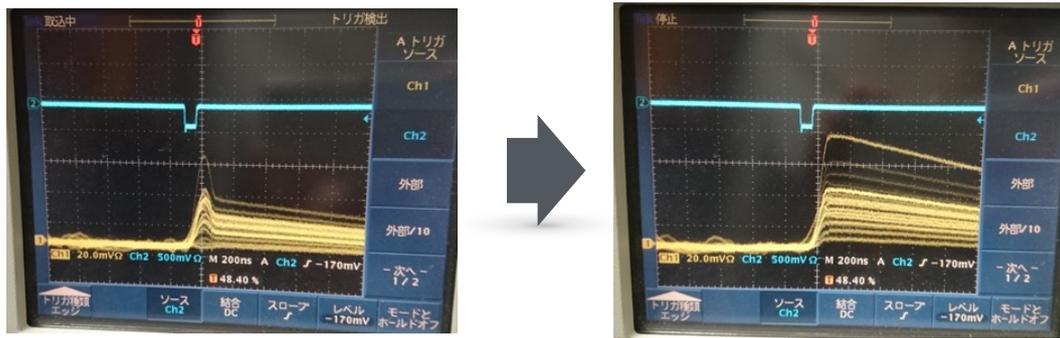


図 6.29: 外部トリガーによるピークホールドの様子 (左図: タイミング調整前, 右図: タイミング調整後)

MPPC 検出器による撮像は初の試みであったため、まず初めに 0.5 p.e. Threshold 決めを行った。各 ch 毎にペダスタルと 1 p.e. ピークの ADC 測定を行い、1 p.e. ピーク値とペダスタル値の中間を 0.5 p.e. Threshold とした。その測定結果を図 6.30 に示す。

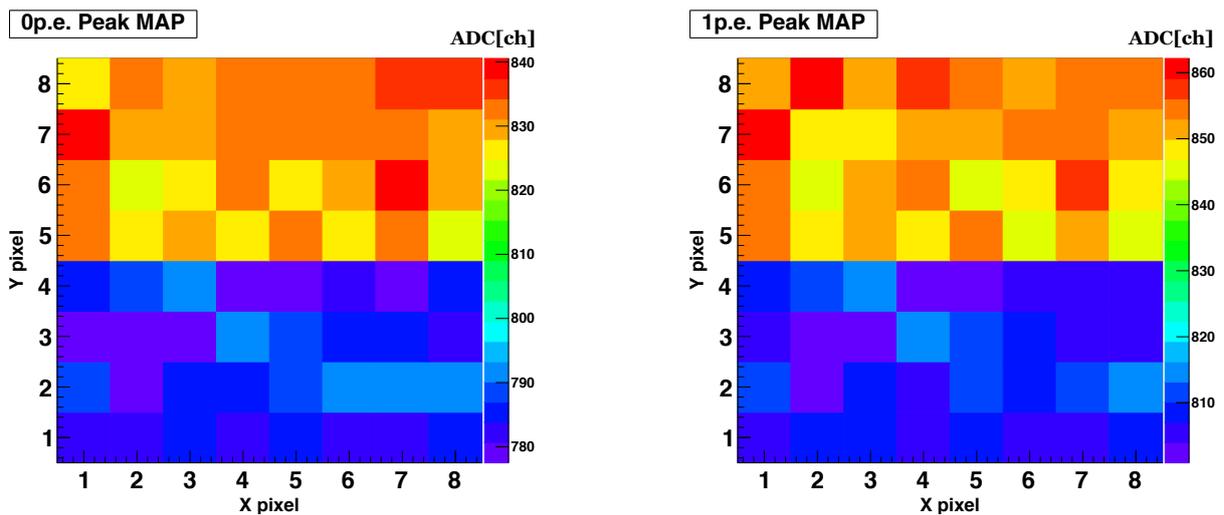


図 6.30: 各 ch 毎の 0 p.e., 1 p.e. ピーク値マップ

以上より、0.5 p.e. Threshold が決定できた。次ページから、実際に MPPC 検出器でイメージング撮像測定を行った結果と、「1. CCD による撮像との比較」、「2. 冷却前後でのイメージング撮像 (ダークノイズ) の比較」について記述する。

1. CCD による撮像との比較

CCD による撮像を 64ch の大きさに合わせてピクセル化したものと、冷却後の MPPC による撮像の様子を図 6.31 に示す。

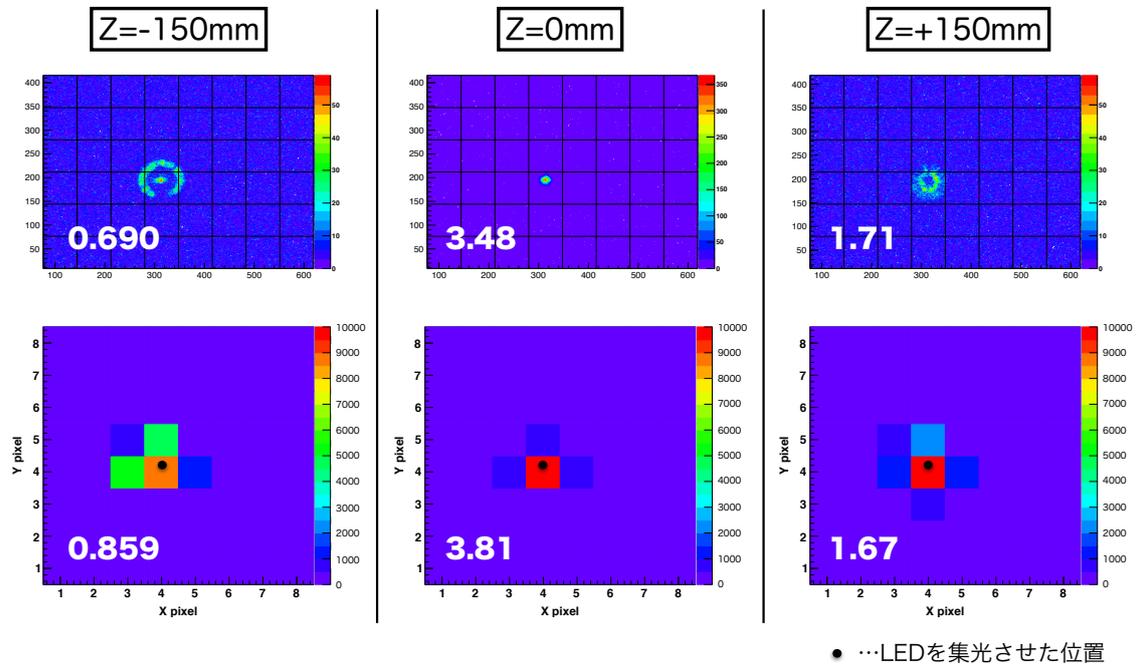


図 6.31: CCD による撮像と MPPC による撮像の様子 (同じピクセル内に集光が撮像できている様子が分かる)

図 6.31 より、CCD と MPPC の撮像では、同じピクセル内に集光が撮像されていることが分かる。また、この事実を数値的に説明するため、図 6.32 にあるような範囲で強度比をそれぞれ計算し、比較を行った。図 6.31 における白抜きの数字がそれぞれの強度比であるが、上下で見比べてみるとほぼ同じ値となっている。これより、MPPC 検出器による撮像では CCD による撮像を再現できていることが分かる。

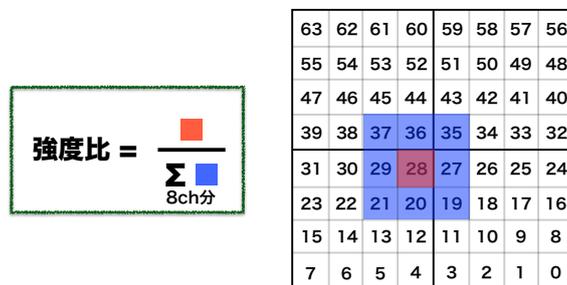


図 6.32: 撮像における強度比の計算について (集光ピクセル ch28 とその周りの 8ch 分の合計との比をとった)

2. 冷却前後でのイメージング撮像 (ダークノイズ) の比較

最後に、MPPC 検出器の冷却前後でのイメージング撮像の比較を行う。冷却前後での撮像の比較について、2次元ヒストグラムを描いたものを図 6.33 に、また3次元ヒストグラムを描いたものを図 6.34 に示す。

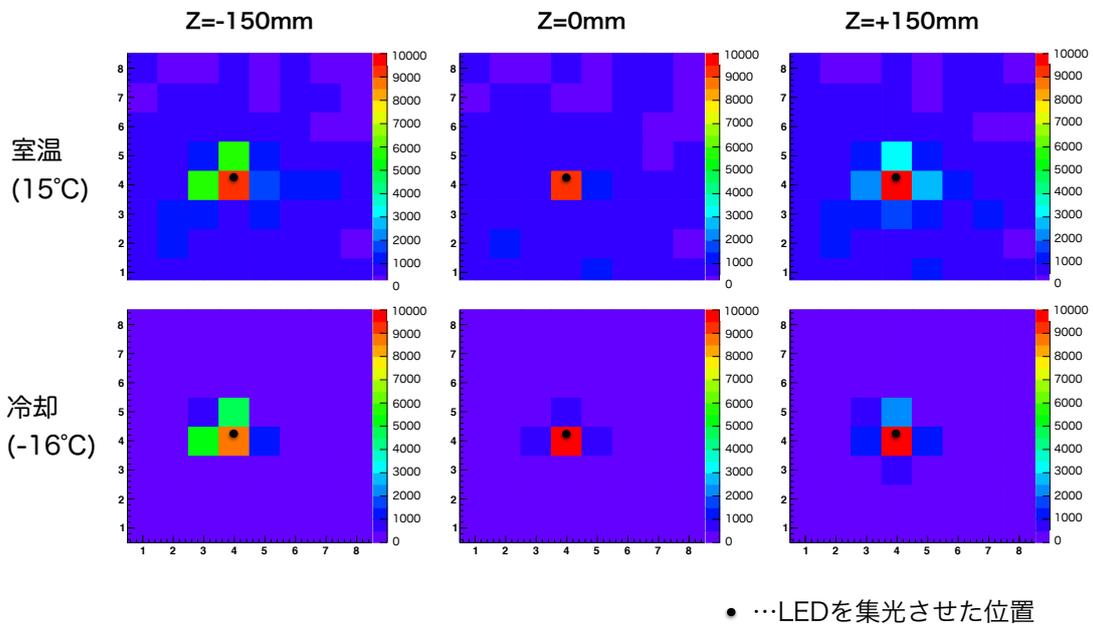


図 6.33: MPPC 検出器の冷却前後でのイメージング撮像の比較 (2次元)

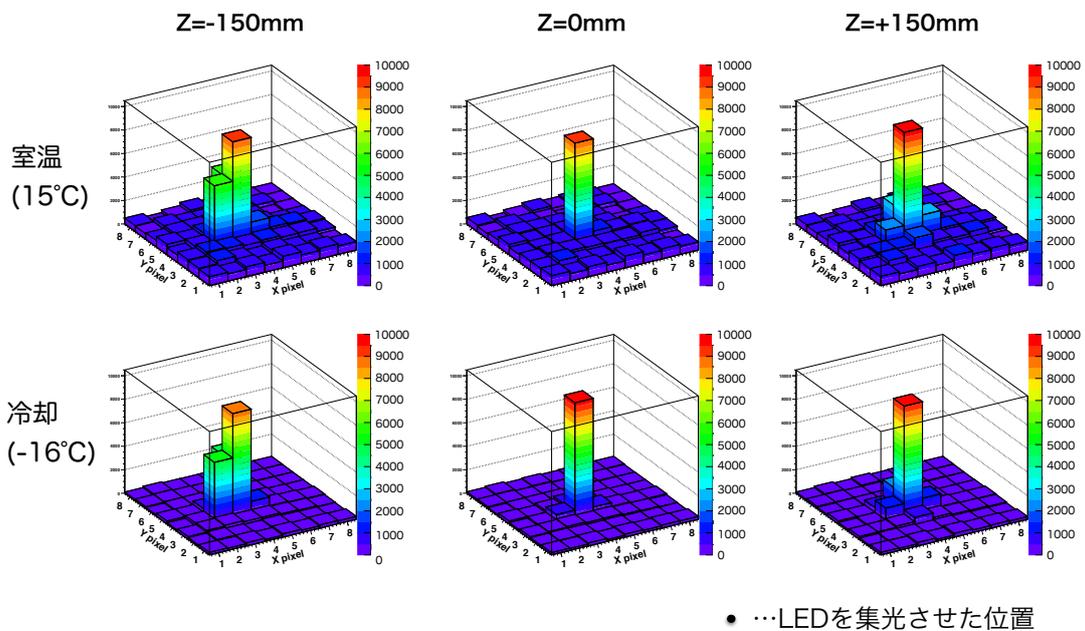


図 6.34: MPPC 検出器の冷却前後でのイメージング撮像の比較 (3次元)

図 6.33、図 6.34 より、冷却前後で周りのダークノイズが低減している様子が分かる。ダークノイズがどの程度低減したのかを数値的に見積もるため、Z=0 の撮像におけるノイズ検出率を式 6.16 により見積もった。

$$\text{ノイズ検出率} = (\text{ch28 以外の合計イベント数}) / (\text{ch28 のイベント数}) \quad (6.16)$$

$$15\text{ }^\circ\text{C}: 4.267[\text{events/event}]$$

$$-16\text{ }^\circ\text{C}: 0.340[\text{events/event}]$$

これより、ダークノイズが実際に低減していることを確認した。しかし、冷却後のノイズ検出率 0.340[events/event] では、初めに説明したようにノイズ検出率 10%以下になってはいない。そこで、撮像を改めて確認したところ、ch28 の周りに集光の滲みが確認された。つまり、上記の値は滲みを含んだものになっていた。そこで、真のノイズ検出率を計算するため、図 6.35 にあるような範囲で”滲みの割合”を計算すると、

$$\begin{aligned} \text{”滲みの割合”} &= (\text{ch28 の周辺 5ch 分のイベント数の合計}) / (\text{ch28 のイベント数}) \\ &= 0.249[\text{events/event}] \end{aligned}$$

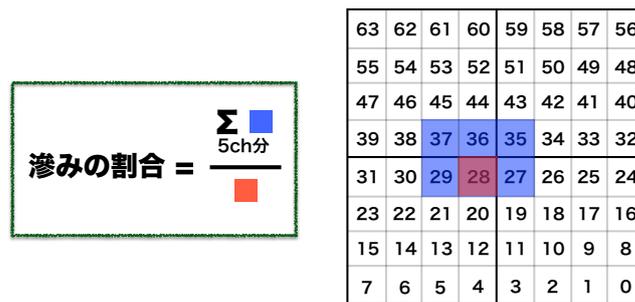


図 6.35: Z=0 の撮像における滲みの割合の計算について (集光ピクセル ch28 とその周辺の滲みが確認された 5ch 分の合計との比をとった)

となった。以上より、真のノイズ検出率は以下のように計算され、冷却機構の開発によって MPPC 検出器のダークノイズが低減し、開発の目標であったノイズ検出率 10%以下となっていることが確認された。

$$\text{真のノイズ検出率} = 0.340 - 0.249 = 0.091[\text{events/event}]$$

最後に、図 6.33、図 6.34 の $Z=0$ における 1event ごとの撮像を図 6.36 に示しておく。ダークノイズが写り込むイベントは、室温では 16/16 であったのに対し、冷却時は 2/16 と低減しており、1event の撮像が可能となっていることが分かる。

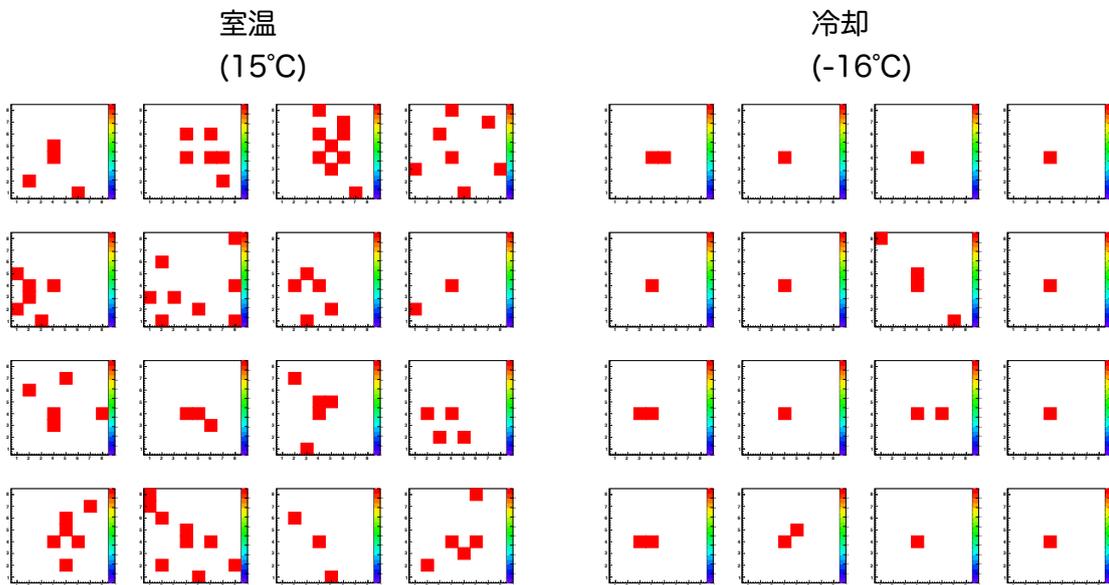


図 6.36: 冷却前後における MPPC 検出器による 1event の撮像の様子 (室温ではダークイベントが 16/16 撮像されているのに対し、冷却時は 2/16 に減少している様子がわかる)

第7章 結論と今後の課題

7.1 結論

本研究においては、“ミラーの再作製”および“MPPC 検出器”の開発を行った。“ミラーの再作製”については、ミラー表面の研磨傷が像のシャープさ (RMS) に影響を及ぼし、材質の光沢が反射率に影響を及ぼす、ということを確認できた。また、作製したミラーが設計通りに作られており、中性子の角度分布が十分に測定可能な位置分解能 (<2.5 mm) を有していることを確認した。今までの反射率 $\sim 60\%$ から $\sim 80\%$ と改善することに成功し、平均獲得光電子数が 1.3 p.e. から 2.0 p.e. と向上することにより、表 4.1 の要求 2 つを満たす高位置分解能・高獲得光電子数のミラーを作製することに成功した。

“MPPC 検出器の開発”については、Array-MPPC 用の冷却機構を独自に開発し、簡単かつ一気に冷却することに成功した (最低到達温度 -16.03 °C)。結果、ダークレートは目標値の 2.0 MHz を達成し、ノイズ検出率が 10% 以下となることを確認した。MPPC に使用するエレクトロニクスのデッドタイムはおよそ 30 μ s なので、MPPC 検出器が完成すれば LiLS での連続撮像が可能となる。実際、デッドタイムによる efficiency は MAPMT 検出器 (200 μ s): 0.00454% から MPPC 検出器 (30 μ s): 22.3% と大幅に向上する (図 6.14)。

本研究により、イメージング検出器の開発が完了したため、ニュートリノの到来方向測定に向け大きな前進となった。

7.2 今後の課題

今後の課題としては大きく 3 つある。1 つ目は、ミラーについてである。今回作製したミラーの内、RMS は NAK ミラーが、反射率はアルミ (生材) ミラーが最も良かった。そのため、研磨精度が撮像に与える影響を考慮し、アルミ (生材) ミラーに電解研磨や樹脂コーティングを施すことで、RMS・反射率ともに良いミラーを作製することを考えている。2 つ目は、MPPC の ch 数を増やすことである。今回は 64ch の MPPC 検出器を開発したが、1ch あたりの大きさが 6 mm となってしまうため、位置分解能に制限がかかっていた。そこで、ch 数を増やした検出器を開発することが課題となってくる。これに関しては、エレクトロニクスを増やし、すでに市販されている 256ch Array-MPPC を使用することで、新たな開発なしに 256ch の検出器が実現できる。そして 3 つ目は、エレクトロニクスの改善である。現在のデッドタイムの限界はおよそ 30 μ s となっており、連続撮像の可能性は見たもののその efficiency は 22.3% に留まっていた。そこで、新たにマルチ ADC システムを開発するなどの工夫により、デッドタイムをさらに減らすことが今後の課題となってくる。

関連図書

- [1] C.L.Cowan, J.F.Reines. et al. Science 124(1956)103
- [2] G.Danby, et al. Phys.Rev.Lett. 9(1962)36
- [3] K.Kodera, et al. Phys.Lett.B 504(2001)218
- [4] Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998)
- [5] Y. Ashie et al., Phys. Rev. Lett. 93, 101801 (2004)
- [6] A. Gando et al.(KamLAND Collaboration) Phys. Rev. D 88, 033001 - Published 2 August 2013
- [7] K. Eguchi et al. (KamLAND Collaboration),Phys. Rev. Lett. 90, 021802 (2003)
- [8] H.N.Pollack et al., ReV. Geophys. 31 (1993)
- [9] A.H.Hofmeister et al., Tectonophysics 395 (2005)
- [10] John N.Bahcall, Aldo M. Serenelli and Sarbani Basu. New Solar Opacities, Abundances, Helioseismology, and Neutrino Fluxes. Astrophys. J., 621:L85-L88,2005
- [11] S.Enomoto, Doctoral Dissertation, Tohoku Univ. (2005)
- [12] A. Gando et al., (KamLAND Collaboration), Nature Geosci. 4, 647 (2011)
- [13] P.Antonioli, et al., arXiv:hep-ph/0406214v2 (2004)
- [14] P. Vogel and J. F. Beacom, Phys. Rev. D 60, 053003 (1999)
- [15] E.Amaldi, in Encyclopedia of Physics, edited S.Fluegge, Vol.38.2
- [16] High frame rate Digital Camera C9300-201 Datasheet (浜松ホトニクス)
- [17] 光半導体素子ハンドブック / 第3章 Si APD, MPPC (浜松ホトニクス)
- [18] EASIROC テストボード仕様書, 東北大学, 本多良太郎 (2013年3月30日)
- [19] MPPC S13362series Datasheet (浜松ホトニクス)
- [20] MPPC S13361series Datasheet (浜松ホトニクス)
- [21] 液体シンチレーションにおけるエネルギー移行機構 とクエンチング, 日本原子力研究所 ラジオアイソトープ・原子炉研修所, 石河寛昭
- [22] Nucl.Instrum.Meth.A622:567-573,2010

- [23] Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 875 (2017) 185 - 192
- [24] 電子型反ニュートリノの方向検出に向けたリチウム含有液体シンチレータの開発, 東北大学, 修士論文, 渡辺 寛子 (平成 20 年度)
- [25] 液体シンチレータによる反電子ニュートリノの飛来方向検出方法の研究開発, 東北大学, 修士論文, 森川 拓也 (平成 21 年度)
- [26] 反電子ニュートリノの到来方向測定に向けた新型検出器の開発, 東北大学, 修士論文, 白旗 豊 (平成 27 年度)
- [27] マルチアノード PMT を使ったイメージング検出器による粒子識別の研究, 東北大学, 修士論文, 高井 貴行 (平成 28 年度)
- [28] Σp 散乱実験のための MPPC 多チャンネル読み出しシステムの開発, 東北大学, 修士論文, 塩崎 健弘 (平成 26 年度)
- [29] MEG II 実験のための真空紫外光に感度のある大型 MPPC を用いた高精細読み出し液体キセノンガンマ線検出器の開発, 東京大学, 修士論文, 小川 真治 (平成 27 年度)
- [30] $g - 2$ 実験用カロリメータのための MPPC 読み出しによる積層型フッ化鉛チェレンコフ検出器の開発, 大阪大学, 修士論文, 矢井 克忠 (平成 25 年度)

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方々に大変ご尽力を賜りました。ここに感謝の意を表したいと思います。

井上邦雄先生には、指導教官として中間発表会に何度も出席して頂き、本番に向けて的確なアドバイスを頂きました。とてもお忙しい時期にも関わらず、本当にありがとうございました。最後のイメージング撮像の追実験は大変でしたが、なんとか良い結果が出てホッとしております。

白井淳平先生には、主査であるが故に最後の最後までご相談を受けて頂き、結果的に良い発表スライドを完成させることができました。また、飲み会ではプライベートなお話もさせて頂き、年の功を感じさせて頂きました。今年で退官されるということで、本当に長い間お疲れ様でした。

カメラグループの方々には、研究を通して本当にお世話になりました。

渡辺寛子先生には、実験に関するアドバイスを、修士論文の執筆・発表に関して最後までお付き合い頂きました。子育てによりお忙しい時期と被ってしまっていたのにも関わらず、最後までお力添え頂き大変感謝しております。

三井唯夫先生には、ミラーの性能評価について色々ご相談に乗って頂きました。光学的な視点での考え方やきちんとした物理的理解など、とても参考になりました。

石徹白晃治先生には、エレクトロニクス関係でお世話になりました。MPPC 検出器の提案や部品の選定、EASIROC の firmware の更新など、様々な場面でお力になって頂き感謝しております。

白旗豊さんとは隣の席で、僕が困った時にはいつも相談に乗って頂きました。物理的な評価方法のご指導や、実験での具体的なアドバイスなど、とても助かりました。また、個人的には一緒に飲み連れて行って頂いたり、ここまで研究に勤しめたのも白旗さんのおかげだと思っております。

大塚君には、MAPMT のセッティングや暗室の整理など、色々苦勞をかけたと思います。これからは違う研究テーマになると思いますが、頑張ってください。

また、高エネルギー加速器研究機構の中村勇様には、MPPC 運用にあたって1週間みっちりご指導を頂きました。また、その後もメールでアドバイスを頂いたり、大変お世話になりました。この場を借りて感謝の意を表したいと思います。

また、他 KamLAND の先生方にも大変お世話になりました。

清水格先生には、主に TA の指導でお世話になりました。困った時に優しくフォローして頂き、ありがとうございました。

池田晴雄先生には、CCD 撮像におけるパソコン関係でお世話になりました。また、ミラーと MPPC 検出器の実験に協力して頂きありがとうございました。最後に、MPPC による ADC 分布がしっかりと見え、1 イベントの撮像ができ本当に良かったです。

丸藤祐仁先生には、主にバルーン作業でお世話になりました。また、実験で線源によるエネルギーキャリブレーションを行った際、コンプトン散乱について詳しく説明をして頂き、ありがとうございました。

上島考太先生には、バルーン作業でご指導を頂きました。また、飲み会などの行事でとてもお世話になりました。いつも気軽に話し掛けて頂き、とても楽しい時間を過ごさせて頂きました。

玉江京子先生には、プログラム関係でお世話になりました。4年生からプログラム講習を開いて頂いたのは勿論の事、困った都度相談に乗って頂きありがとうございました。

古賀直之先生、中村健悟先生、澤田孫一さんには、神岡への出張の際に大変お世話になりました。

古賀先生には、一緒に作業を手伝って頂いただけでなく、宿舎で地元の話をしたりと、神岡生活の助けとなって頂きました。

中村先生には、PPO 蒸留やキセノンシフトで大変お世話になりました。僣越ながら、とても丁寧で解りやすいご指導を頂き、大変ためになりました。

澤田さんには、鉱山内のウォークアラウンドで困った時に助けて頂き、ありがとうございました。

寺島亜寿紗さんには、バルーン作業でとても優しくご指導を頂きました。また、中間発表が終わった時に話し掛けて頂き、ありがとうございました。

細川佳志さんには、いつも楽しませて頂いていました。バルーン作業や神岡での作業で車に乗せて頂いた際、色々とお話をさせて頂きありがとうございました。

また、技術職員の方々にもお世話になりました。

根本憲一さんには、ミラー関係で最初から最後まで大変お世話になりました。新しいミラーの作製や表面精度測定など、多くの実験に関わって頂きました。また、MPPC 検出器の冷却テストでもお世話になりました。自分一人ではできないような実験を、夜遅くまでお付き合い頂きまして、本当に助かりました。

中嶋隆さん、鈴木貴士さんには、必要な部品の手配や銅板の型作製などをして頂きありがとうございました。

三浦邦子さんには、ミラーと MPPC 検出器の組み合わせを CAD で再現して頂いたり、実験室の配置を考えて頂き、ありがとうございました。

また、先輩の林田真悟さん、小原脩平さん、蜂谷尊彦さん、尾崎秀義さんとは色々な興味深いお話ができ、飲み会などでも楽しい時間が過ごせました。ありがとうございました。

また、同期の上澤康平さん、澁川友菜さん、日野陽太さん、本田佳己さんとはとても仲良くさせて頂きました。研究室だけでなく、プライベートでも関わる事が多く、とても楽しい研究室ライフが送れたのも皆さんのおかげです。

後輩の方々についても、現在バルーン作業も佳境に入り、大変な時期ではあると思いますが、体調だけには気をつけて頑張りすぎずに頑張ってください。

最後になりますが、同期の皆さんや先輩、後輩、他 KamLAND の先生方、Collaborator のの方々、多くの方々には大変お世話になりました。改めて感謝の意を表します。今後のニュートリノ科学研究センターの発展をささやかながら祈念しております。