

2022 年度 修士論文

MEG II 実験液体キセノンガンマ線検出器の較正
及び時間分解能評価
(Calibration and Timing Resolution Evaluation of
Liquid Xenon Gamma Ray Detector in MEG II Experiment)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
素粒子物理国際研究センター 大谷航研究室

修士課程 2 年
学籍番号 35-216091

松下 彩華

2023 年 1 月 27 日

概要

MEG II 実験では $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を $O(10^{-14})$ の高感度で探索している。高感度探索を実現するためには高分解能の検出器を使用する必要がある。本稿では、液体キセノンガンマ線検出器の光センサー較正および時間分解能評価について述べる。

液体キセノン検出器内の光センサーの応答は時間変動する。光センサーの応答の変動はエネルギースケール変動をもたらすため、物理データ取得時のトリガー閾値を適切に保持するためには、ビームタイム中にセンサー較正を継続的に行う必要がある。本研究では 2022 年物理ランにおいて光センサーのゲインや検出効率の較正を行なった。その結果、Photo Multiplier Tube (PMT) のゲインは印加電圧を定期的に調整することで 0.65×10^5 – 0.80×10^5 の範囲内で安定的に運用できた。また、光センサーの検出効率の較正の結果、液体キセノンの光量の不安定性が発覚した。

液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能評価のために時間較正用タイミングカウンターの作成を行なった。その結果、43.8 ps の時間分解能を持つカウンターの製作に成功した。時間較正用タイミングカウンターを使用して、ターゲット内のガンマ線放出位置の広がりの影響を測定した。2021 年に行なった測定では 68.4 ± 2.8 ps であり、2022 年に行なった測定では 68.1 ± 1.7 ps であった。液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能を評価した結果 2021 年データでは 67.4 ± 16.2 ps であることがわかった。2022 年データについては信号事象エネルギーでの時間分解能はより詳細な解析の後に評価する必要があるが、55 MeV では 67.6 ± 1.7 ps であり、少なくとも 2021 年と同程度の時間分解能を有していることがわかった。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	$\mu \rightarrow e\gamma$ の物理	3
2.1	標準理論	3
2.2	cLFV 反応	4
2.3	$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊	4
2.4	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索	6
第 3 章	MEG II 実験	9
3.1	概要	9
3.2	ビーム	9
3.3	ターゲット	10
3.4	COBRA 電磁石	10
3.5	ドリフトチェンバー	11
3.6	陽電子タイミングカウンター (pixelated Timing Counter, TC)	11
3.7	輻射崩壊同定用検出器 (Radiative Decay Counter, RDC)	12
3.8	液体キセノンガンマ線検出器	13
3.9	DAQ (Data AcQuisition)	13
3.10	MEG II 実験検出器座標系	14
第 4 章	液体キセノンガンマ線検出器	15
4.1	液体キセノンガンマ線検出器概要	15
4.2	較正用 LED	24
4.3	較正用アルファ線源	25
4.4	液体キセノンガンマ線検出器でのイベント再構成原理	26
4.5	エネルギー再構成	28
4.6	位置再構成	28
4.7	時間再構成	29
第 5 章	液体キセノンガンマ線検出器の較正	31
5.1	液体キセノンガンマ線検出器較正概要	31
5.2	ノイズ除去	31
5.3	PMT ゲイン	32
5.4	MPPC ゲイン	32

5.5	MPPC PDE, PMT QE	32
5.6	宇宙線データを用いたエネルギースケール較正	32
5.7	${}^7_3\text{Li}(p, \gamma){}^8_4\text{Be}$ 反応によるエネルギースケール較正	32
5.8	${}^{58}\text{Ni}(n, \gamma){}^{59}\text{Ni}$ 反応によるエネルギースケール較正	33
5.9	CEX データ取得 (CEX ラン)	34
第 6 章	2022 年物理ラン中の光センサー較正	37
6.1	2022 年ビームタイムスケジュール	37
6.2	ノイズ除去	38
6.3	PMT ゲイン	44
6.4	MPPC PDE, PMT QE	48
第 7 章	液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価原理	61
7.1	CEX ランセットアップ	61
7.2	時間分解能評価方法	63
第 8 章	ガンマ線放出位置の広がり σ_{vertex} の測定に関する検出器開発と較正・性能評価および σ_{vertex} 測定結果	65
8.1	ガンマ線放出位置の広がり (σ_{vertex}) 測定原理	65
8.2	プレシャワーカウンター製作	67
8.3	プレシャワーカウンターにおけるイベント再構成手法	72
8.4	プレシャワーカウンターキャリブレーション	74
8.5	2021 年 σ_{vertex} 測定条件	79
8.6	2021 年 σ_{vertex} 測定結果	80
8.7	2022 年 σ_{vertex} 測定条件	82
8.8	2022 年 σ_{vertex} 測定結果 (1 回目測定)	82
8.9	2022 年 vertex 測定測定結果 (2 回目測定)	86
第 9 章	液体キセノンガンマ線検出器時間較正および時間分解能測定結果	91
9.1	液体キセノンガンマ線検出器時間較正手法	91
9.2	2021 年液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価	97
9.3	2022 年液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価	103
9.4	まとめ	109
第 10 章	結論および展望	111
	謝辞	113
	参考文献	115

目次

2.1	標準理論の素粒子 [9]	3
2.2	ニュートリノ振動を介した $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊過程	4
2.3	TeV スケール超対称性粒子を伴う $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊過程	5
2.4	右巻き超対称性マヨラナニュートリノを導入した SUSY-seesaw モデルに基づく $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 崩壊分岐比と $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比の関係 [18]	5
2.5	信号事象	6
2.6	物理的背景事象	7
2.7	偶発的背景事象	7
3.1	MEG II 実験検出器	9
3.2	PSI リングサイクロトロン [23]	10
3.3	ターゲット。写真内ドットがマーカーを示す。 [8]	10
3.4	COBRA 電磁石 (図中のスペクトロメータ部分は MEG 実験のもの) [21]	11
3.5	ドリフトチャンバー [8]	11
3.6	陽電子タイミングカウンター [23]	12
3.7	陽電子タイミングカウンターのピクセル。シンチレータと SiPM から成る。 [8]	12
3.8	RDC による RMD 由来陽電子検出のイメージ図。 [8]	12
3.9	RDC の構造。手前のプラスチックシンチレータ層と奥の LYSO 層から成る。 [8]	12
3.10	RDC のプラスチックシンチレータ層。各プラスチックの両側に設置されている SiPM を通して読み出しを行なっている。 [8]	12
3.11	WaveDREAM ボード。上は HV カードが装着されておらず、下は HV カードが装着されている。HV カードが実装されている WaveDREAM ボードから SiPM に HV を印加することができる。 [8]	13
3.12	MEG II 実験で使用されている WaveDREAM ボードのデザイン [8]	13
4.1	液体キセノン検出器内部の様子。写真左側に MPPC が、その他の面に PMT が敷き詰められていることがわかる。	15
4.2	液体キセノン中の減衰曲線。ガンマ線が入射した場合は時定数 45 ns、アルファ線の場合は時定数 22 ns のシンチレーション過程が生じる。 [33]	17
4.3	液体キセノン検出器内の MPPC および PMT 配置。Inner 面には 4092 個の MPPC が縦 93 個、横 44 個に敷き詰められている。 [20]	18
4.4	液体キセノン検出器座標系 (uvw 座標) [23]	18
4.5	液体キセノン検出器コントロールシステム。VG は気相のバルブを表し、VL は液相のバルブを表す。	19
4.6	MPPC 内の電界。電界によりキャリアがドリフトする過程でアバランシェ増幅が起こる。 [46]	20

4.7	各 APD に直列接続されたクエンチング抵抗。 [46]	20
4.8	MPPC の信号波高スペクトル [46]	21
4.9	開発された MPPC のデザイン [8]	22
4.10	ハイブリッド接続。信号は直列回路で読み出され、印加電圧は並列にかけられる。 [42]	23
4.11	MPPC が設置される PCB	23
4.12	PCB の断面図 [8]	23
4.13	PCB のインストール作業の様子 [8]	24
4.14	ゲイン較正用 LED の設置位置	25
4.15	ゲイン較正用 LED	25
4.16	PDE, QE 測定に用いられている線源 [23]	25
4.17	^{241}Am 線源の位置 [23]	26
4.18	液体キセノン検出器でのガンマ線位置、エネルギー、タイミングの再構成手順	27
4.19	再構成位置によるバイアス補正のイメージ [23]	29
4.20	電磁シャワー補正のイメージ [23]	29
5.1	CW ランセットアップ [21]	33
5.2	$^7_3\text{Li}(p, \gamma)^8_4\text{Be}$ 反応で生じるガンマ線のスペクトル	33
5.3	$^7_3\text{Li}(p, \gamma)^8_4\text{Be}$ 反応により生じたガンマ線の uvw 座標ごとのエネルギースペクトル	33
5.4	中性子生成器 [21]	34
5.5	$^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ 反応により生じたガンマ線のスペクトル	34
5.6	液体キセノン検出器入射面上でのパッチ区分 [20]	35
5.7	BGO 検出器	35
5.8	BGO 駆動台	35
5.9	CEX ランセットアップ	36
6.1	2022 年ビームタイムスケジュール	37
6.2	セルペダスタルテンプレート	38
6.3	高周波ノイズテンプレート	39
6.4	温度依存ノイズテンプレート。上図は横軸が時間、縦軸が電圧を示し、温度依存ノイズテンプレート作成に仕様した各データの平均電圧を示す。なお、色の違いは DRS チップの温度を表している。下図は横軸が DRS の温度、縦軸が上図の -400 ns から -650 ns の領域を積分して求めた電荷と -650 ns から -750 ns の領域を積分して求めた電荷の差を表す。すなわち、下図は DRS 温度とペダスタル波形の傾きの関係を示している。	39
6.5	DRS チップ動作原理 [40]	40
6.6	スタートセル依存ノイズテンプレート	40
6.7	スタートセル依存ノイズの影響	40
6.8	ノイズ削減が波形に与える影響	41
6.9	ノイズがエネルギー再構成に与える影響。	42
6.10	ノイズがエネルギー再構成に与える影響。	43
6.11	ノイズがエネルギー再構成に与える影響。(十分な頻度でノイズテンプレートを更新した場合)	43
6.12	ノイズがエネルギー再構成に与える影響。(十分な頻度でノイズテンプレートを更新した場合)	44
6.13	LED 強度スキャンの結果	45

6.14	2022 年 6 月 29 日 (run423203–423224) の各 PMT のゲイン	46
6.15	2022 年 6 月 29 日 (run423203–423224) の PMT ゲイン分布	46
6.16	2022 年 7 月 1 日 (run423307–423328) の各 PMT のゲイン	46
6.17	2022 年 7 月 1 日 (run423307–423328) の PMT ゲイン分布	46
6.18	LED データイベントディスプレイ。検出器内部のゲイン較正用 LED を点灯させた時の光量分布を表す。Outer 面最上部の PMT 一列は光量が低く、これは液体キセノンの液面が検出器内最上部まで達していないためだと考えている。	47
6.19	2022 年ビームタイム中の PMT 平均ゲインの推移	47
6.20	QA 比のイメージ図	48
6.21	α ラン中のイベントの QA 比分布。図中赤線の領域を α 線由来のイベントとして識別している。	49
6.22	アルファ線イベントと宇宙線イベントの全センサー波形の和	50
6.23	各線源ごとに再構成された z 座標	51
6.24	各線源ごとの MC による想定検出光電子数と実際の検出光電子数の関係 (チャンネル 127)	52
6.25	2021 年ビームタイム中の PMT QE と y 座標の関係 [20]	53
6.26	outer 面 PMT の y 座標と QE の関係 (2022 年ビームタイム開始時)。QE は y 座標が等しい PMT 同士で平均値を計算している。	53
6.27	各面の PMT の y 座標と QE の関係 (2022 年ビームタイム開始時)	54
6.28	outer 面 PMT の y 座標と QE (2022 年ビームタイム終了時)。QE は y 座標が等しい PMT 同士で平均値を計算している。	55
6.29	outer 面 PMT の y 座標と QE (2022 年ビームタイム終了後にキセノンを試験的に追加)。QE は y 座標が等しい PMT 同士で平均値を計算している。	55
6.30	ビームタイム中の光量補正前 QE の推移。この推移は検出光量の変動を表している。	56
6.31	ビームタイム中の光量補正前 QE の推移 (検出器立ち上げ期間)	57
6.32	ビームタイム中の PDE の推移	58
6.33	平均 PDE の推移予測	58
6.34	各ビームレートを想定した際の物理ラン終了時の PDE, QE マップ	59
7.1	CEX ランセットアップ	61
7.2	プレシャワーカウンター	62
7.3	BGO 検出器前面に取り付けられたプレシャワーカウンター	62
7.4	液体水素ターゲット	63
7.5	液体水素ターゲット内水素圧力の時間推移 (2022 年 CEX ラン)。青線が気体水素の圧力、緑線が気体ヘリウムの圧力を示す。一度ターゲットの冷却が開始すると 2–3 時間の冷却の後にターゲットの液化が開始され、ターゲット内の液体水素が十分な量に達した時点で DAQ を開始し、12 時間程度 DAQ を継続した後にターゲットの昇温により DAQ を中断するというサイクルで DAQ が行われた。	63
8.1	σ_{vertex} 測定セットアップ	65
8.2	液体キセノン検出器の前面に設置されたリファレンスカウンター	66
8.3	σ_{vertex} 測定原理	66
8.4	カウンターの構造	67
8.5	I-V 曲線の例	69

8.6	リフレクターで包まれたカウンター	69
8.7	ブラックシートで遮光されたカウンター	69
8.8	カウンター時間分解能評価のセットアップのイメージ	70
8.9	時間分解能評価の際に線源を設置する位置。25 箇所についてスキャンする。	70
8.10	時間分解能評価の様子	70
8.11	カウンター時間分解能評価のセットアップ	71
8.12	PSI アンプの回路図 [50]	71
8.13	各チャンネルの波高分布	72
8.14	時間分解能と CF の関係 (plate id=2, absolute timing resolution)	72
8.15	シンチレータ板 (plate id=2, 3) の各測定点での時間分解能	73
8.16	各シンチレータ板の左右のチャンネルの時間差	73
8.17	エリアでのカウンターキャリブレーションセットアップ	74
8.18	線源とチャンネル間距離とチャンネルでの信号検出平均時間の関係 (plate id0 の場合)。シンチレータの実効速度とチャンネルのオフセットを求めることができる。	75
8.19	線源位置とチャンネル位置のイメージ。図 8.18 ではこの distance を横軸にしている。	75
8.20	エリアでのカウンターキャリブレーションセットアップ	76
8.21	プレート (id=3) 中の問題のあるチャンネル。チャンネル 0 とチャンネル 1 がシンチレータから剥がれている可能性がある。	78
8.22	故障したプレート (id=3)	78
8.23	ポールゼロキャンセリング有りの場合と無しの場合のトリガーカウンターの波高分布	79
8.24	プレシャワーカウンターとリファレンスカウンターのガンマ線ヒットタイミング時間差 (2021 年 σ_{vertex} 測定)	80
8.25	各カウンターの時間分解能 (2021 年 σ_{vertex} 測定) (左) プレシャワーカウンター (右) リファレンスカウンター	80
8.26	各プレート間の時間差分布 (2021 年 σ_{vertex} 測定)。(左上) プレシャワーカウンター プレート 0 とリファレンスカウンター プレート 0 の時間差 (右上) プレシャワーカウンター プレート 1 とリファレンスカウンター プレート 1 の時間差 (左下) プレシャワーカウンター プレート 0 とリファレンスカウンター プレート 1 の時間差 (右下) プレシャワーカウンター プレート 1 とリファレンスカウンター プレート 0 の時間差	81
8.27	プレシャワーカウンターとリファレンスカウンターでのガンマ線ヒットタイミングの二次元分布	83
8.28	BGO 検出器で測定されたガンマ線スペクトル (イベントセレクション適用前、2022 年 vertex 測定、1 回目) (左) 全 16 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO エネルギースペクトル) (右上) BGO 検出器中央 4 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO センターエネルギースペクトル)	83
8.29	BGO 検出器で測定されたガンマ線スペクトル (イベントセレクション適用後、2022 年 vertex 測定、1 回目) (左) 全 16 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO エネルギースペクトル) (右上) BGO 検出器中央 4 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO センターエネルギースペクトル)	84
8.30	各カウンターでのガンマ線ヒット位置 (左) pre-shower counter (右) reference counter	84
8.31	各カウンター内の 2 枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布 (イベントセレクション適用後)(左) プレシャワーカウンター (右) リファレンスカウンター	85

8.32	プレシャワーカウンターとリファレンスカウンター間のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布 (イベントセレクション適用後)	85
9.1	液体キセノン検出器の時間較正概念図	92
9.2	検出光電子数と ΔT_{diff} の関係	93
9.3	図 9.2 をスライスして求めた ΔT_{diff} 分布 ($0.095 \leq 1/\sqrt{N_{\text{phe}}} < 0.100$ の領域)	94
9.4	検出光電子数と time walk の関係。エラーバーは図 9.3 で求めた標準偏差を表す。	94
9.5	チャンネル 2000 の MPPC の ΔT_{diff} の分布	95
9.6	pre-shower counter と液体キセノン検出器のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布	96
9.7	液体キセノン検出器で w 座標が 0.7 cm から 0.9 cm に再構成されたイベントの pre-shower counter と液体キセノン検出器のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布	96
9.8	time offset の位置依存性	97
9.9	2021 年 CEX ランで取得したイベントの uv 分布	98
9.10	pre-shower counter と液体キセノン検出器でのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布	99
9.11	液体キセノン検出器内の奇数番目のチャンネルのみで再構成された時間と偶数番目のチャンネル のみで再構成された時間の時間差分布	100
9.12	CEX ランにおける pre-shower counter の 2 枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布	100
9.13	入射ガンマ線エネルギーと液体キセノン検出器時間分解能の関係	101
9.14	液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性	102
9.15	液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性 (uv 平面)	102
9.16	プレシャワーカウンターと液体キセノン検出器でのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布	103
9.17	液体キセノン検出器内の奇数番目のチャンネルのみで再構成された時間と偶数番目のチャンネル のみで再構成された時間の時間差分布	103
9.18	CEX ランにおけるプレシャワーカウンターの 2 枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間 差分布	104
9.19	入射ガンマ線エネルギーと液体キセノン検出器時間分解能の関係	105
9.20	液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性	106
9.21	液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性 (uv 平面)	106

表目次

4.1	MEG II 実験で使用している PMT の特徴 [23]	24
5.1	液体キセノン検出器の較正手法一覧	31
6.1	2022 年液体キセノン検出器立ち上げ時の光量変動の要因	57
6.2	ビームレートを変更した場合の予測 PDE 減少速度および物理データ取得終了時の予測 PDE	59
8.1	I-V 測定に使用した MPPC サンプル	68
8.2	プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターで使用するシンチレータ板	69
8.3	2021 年 vertex 測定および CEX ランでの各カウンターとプレートの対応関係	75
8.4	2021 年プレシャワーカウンタートリガー設定	75
8.5	2021 年プレシャワーカウンターキャリブレーション時のプレート時間分解能	76
8.6	2021 年プレシャワーカウンターキャリブレーション時のカウンター時間分解能	76
8.7	2022 年プレシャワーカウンタートリガー設定	77
8.8	2022 年プレシャワーカウンターキャリブレーションデータ取得時のポールゼロキャンセリングの有無	77
8.9	2022 年プレシャワーカウンターキャリブレーション時のプレート時間分解能	77
8.10	2022 年プレシャワーカウンターキャリブレーション時のカウンター時間分解能	78
8.11	2021 年 σ_{vertex} 測定条件	80
8.12	2021 年 σ_{vertex} 測定解析に使用したパラメータ (方法 1)	81
8.13	2021 年 σ_{vertex} 測定解析に使用したパラメータ (方法 2)	81
8.14	2022 年 σ_{vertex} 測定条件	82
8.15	σ_{vertex} 測定解析時のイベントセレクション条件	84
8.16	プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの時間分解能 (2022 年 σ_{vertex} 測定、1 回目)	86
8.17	σ_{vertex} 測定結果 (2022 年 σ_{vertex} 測定、1 回目、方法 1)	86
8.18	プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの時間分解能 (2022 年 σ_{vertex} 測定、2 回目、方法 1)	87
8.19	σ_{vertex} 測定結果 (2022 年 σ_{vertex} 測定、2 回目、方法 1)	87
8.20	2022 年 σ_{vertex} 測定結果まとめ	88
9.1	タイムウォーク較正でのセンサーのグループ分け	92
9.2	時間較正に適用されるイベントの条件	93
9.3	液体キセノン検出器時間分解能評価に使用したイベントセレクション条件	98
9.4	液体キセノン検出器時間分解能評価結果 (2021 年 CEX ラン)	101

9.5 液体キセノン検出器時間分解能評価結果 (2022 年 CEX ラン) 104

第 1 章

序論

素粒子物理学において、標準理論は電弱スケールの事象を正しく記述できている一方、暗黒物質など標準理論では説明できない問題も存在する。そのため、標準理論を超えた新物理の探索が行われている。MEG II 実験では新物理の手がかりとなる荷電レプトンフレーバーの破れの現象である $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を探索している。前身となる MEG 実験では 4.2×10^{-13} (90% C.L.) という崩壊分岐比の上限を与えた。MEG II 実験では検出器の性能向上により感度を 10 倍向上させることを目標として検出器のコミッショニングが行われてきた。2021 年のエンジニアリングランから物理データの取得を開始し、2022 年の物理ランでは 4 ヶ月間物理データの取得を行った。

本稿は液体キセノンガンマ線検出器の光センサー較正と時間分解能評価という 2 部構成となっている。第 2 章では MEG II 実験の背景となる $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索について述べ、その後、第 3 章で MEG II 実験の概要および検出器構成について述べる。その後第 4 章で液体キセノンガンマ線検出器について、ガンマ線検出原理およびイベント再構成手法について述べる。その後、本稿の一つ目の議題である液体キセノンガンマ線検出器の光センサー較正について第 5 章および第 6 章で述べる。第 5 章では較正手法の概要について、第 6 章では 2022 年物理ランにおける較正状況について述べる。次に、本稿の二つ目の議題である液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能評価について第 7 章から第 9 章で述べる。第 7 章では液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能評価のセットアップおよび時間分解能評価手法について述べる。第 8 章では液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価のために必要な、ターゲット上ガンマ線崩壊点の広がり (σ_{vertex}) の測定について述べる。 σ_{vertex} 測定で使用する検出器の研究開発、性能評価および較正手法について述べた後、 σ_{vertex} の測定結果を報告する。第 9 章では液体キセノンガンマ線検出器の時間較正手法について述べた後、第 8 章での結果を受けて、液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能評価結果を述べる。最後に本稿の前半の議題である液体キセノンガンマ線検出器の光センサー構成および、後半の議題である時間分解能評価について第 10 章でまとめおよび今後の研究方針を述べる。

第2章

$\mu \rightarrow e\gamma$ の物理

MEG II 実験では $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を探索している。本章では $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索の意義について述べる。

2.1 標準理論

標準理論は素粒子物理の基本的枠組みであり、今までの多くの実験結果を説明してきた。2012年のヒッグス粒子の発見により標準理論で予言される素粒子は全て発見された [1] [2]。

多くの成功を収めている標準理論であるが、一方で暗黒物質や反物質に関して説明ができないなどの限界も指摘されてきた。また、重力について標準理論では記述できないという問題もある。4つの力はエネルギースケールとともに分離したと考えると、これらの力は理論的に統一できると考えて然るべきである。しかし、標準理論においては電磁気力と弱い力の相互作用については統一に成功しているものの、強い力や重力の統一には至っていない。そこで、超対称大統一理論や超弦理論など、標準理論を超えた新たな理論が提唱されている。

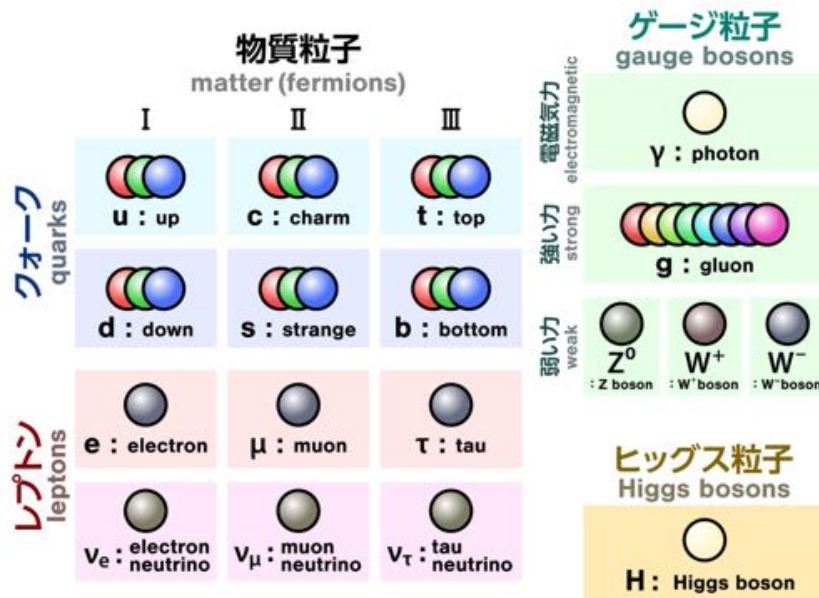


図 2.1 標準理論の素粒子 [9]

2.2 cLFV 反応

標準理論では禁止されている一方で、いくつかの新物理理論から期待される事象の一つに荷電レプトンフレーバー保存の破れ (charged Lepton Flavor Violation, cLFV) という現象がある。

標準理論を構成する 18 種類の素粒子のうち、物質を構成する 12 種類の素粒子をフェルミオンと呼ぶ (図 2.1)。そして、フェルミオンのうち強い相互作用の影響を受ける 6 種類の素粒子がクォーク、影響を受けない残り 6 種類の素粒子がレプトンである。レプトンはさらに荷電レプトンとニュートリノに分類することができる。クォークやレプトンには 3 世代のフレーバーが存在し、標準理論ではクォークの世代間混合は許されている一方で、レプトンの世代間混合は許されていない。しかし、ニュートリノ振動が発見されたことで、中性レプトンのフレーバー保存が破られていることがわかった [3] [4]。新物理では荷電レプトンでもフレーバーが破れることが予言されている。

2.3 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊

標準理論にニュートリノ振動を含めた拡張モデルでは、ニュートリノ振動によって $\mu \rightarrow e\gamma$ が図 2.2 に示す過程を経て起こりうると考えられる。この時の分岐比は以下のように計算される [5] [18]。

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{j=2,3} U_{\mu j}^* U_{ej} \frac{\delta m_{j1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54} \quad (2.1)$$

α : 微細構造定数

U_{ij} : ニュートリノ混合の PMNS 行列

δm_{ij} : ニュートリノの世代間質量差

M_W : W ボソン質量

この分岐比は W ボソンの質量に対してニュートリノの質量差は 10 桁程度小さいことから極めて小さな値となり、実験的に観測することは不可能である。

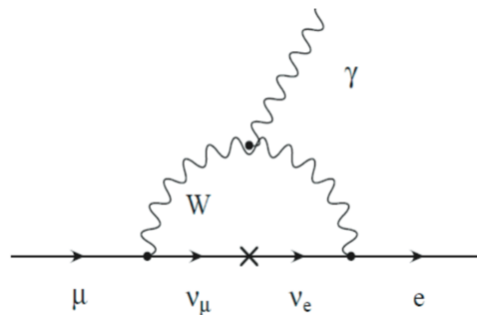


図 2.2 ニュートリノ振動を介した $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊過程

新物理の理論の一つとして超対称大統一理論が提唱されている。超対称性大統一理論では、強い力による相互作用と電弱相互作用の統一を可能とする。超対称性大統一理論に基づくと、TeV スケールの超対称性粒子を伴った図 2.3 の崩壊過程を経ることができる。その場合の分岐比は $10^{-12} - 10^{-14}$ と予測されており、実験により観測可能な値である [10] [11] [12] [13]。

また、大統一理論によらないモデルとしては、右巻き超対称性マヨラナニュートリノを導入した seesaw 機構を仮定した超対称性理論が挙げられ [14] [15] [16] [17]、図 2.4 のような分岐比の関係が導かれる。実験的に $\theta_{13} \sim 9^\circ$ と観測されている [19] ことを考慮すると、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比は比較的高い領域になることが予測される。MEG 実験で既に 4.2×10^{-13} (90% C.L.) という崩壊分岐比の上限が与えられており [7]、図 2.4 中の多くの領域はすでに排除されていることになる。MEG II 実験で $O(10^{-14})$ の探索感度を達成することができれば新物理で予測されている $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比の領域を十分に探索することができ、また、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の発見が期待される。

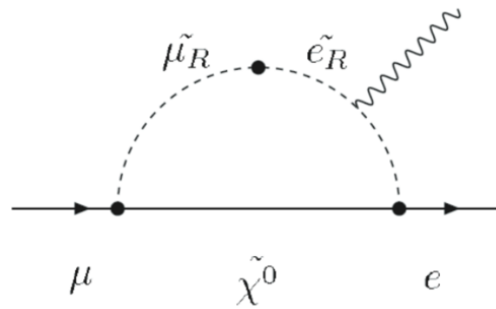


図 2.3 TeV スケール超対称性粒子を伴う $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊過程

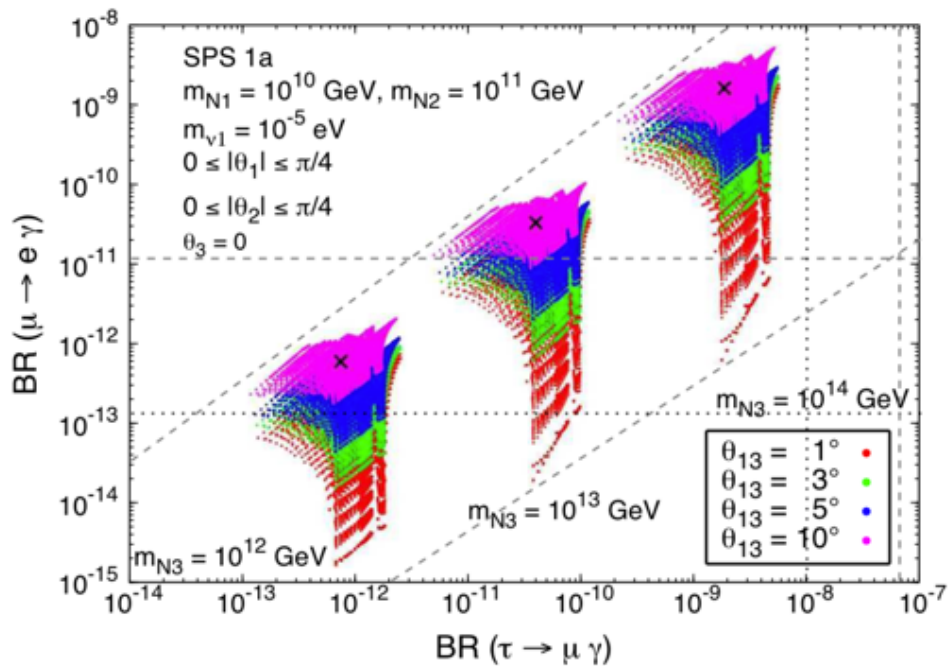


図 2.4 右巻き超対称性マヨラナニュートリノを導入した SUSY-seesaw モデルに基づく $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 崩壊分岐比と $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比の関係 [18]

2.4 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索

2.4.1 信号事象

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は二体崩壊であるからミューオンの静止系では崩壊により生じる陽電子とガンマ線は以下のような特徴を持つ (図 2.5)。

- 同時に放出される
- 反対方向に放出される
- 互いに同じエネルギーを持ち、そのエネルギーはミューオン質量の半分の 52.8 MeV である

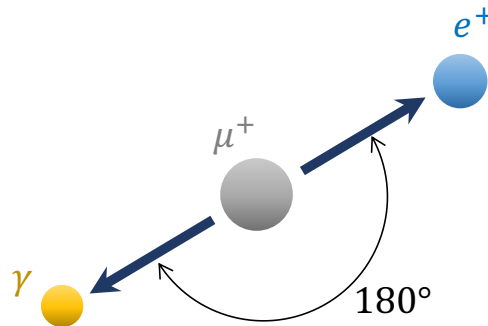


図 2.5 信号事象

2.4.2 背景事象

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索においては物理的背景事象と偶発的背景事象の二種類の背景事象が存在する。

物理的背景事象になるのは、ミューオンの輻射崩壊 (Radiative Muon Decay, RMD) である。RMD では $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu\gamma$ という崩壊により陽電子とガンマ線が放出される。 ν_e と $\bar{\nu}_\mu$ のエネルギーが小さい場合は信号事象に近いイベントとなる。しかし、十分な分解能で測定すれば、陽電子とガンマ線の放出角度とエネルギーが信号事象と異なるため区別することができる。MEG II 実験では高分解能の測定器を使用するため、物理的背景事象は主要な背景事象とはならない。

偶発的背景事象とは異なる起源を持つ陽電子とガンマ線が同時刻、反対方向に信号事象と近いエネルギーを持って生成されるという事象である。MEG II 実験では偶発的背景事象が主な背景事象となる。偶発的背景事象の陽電子の発生源は Michel 崩壊 ($\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu$) である。ガンマ線の発生源は RMD もしくは、Michel 崩壊由来の高エネルギー陽電子と物質中の電子による対消滅である。

偶発的背景事象数 N_{BG} は式 2.2 のように表される。 [8]

$$N_{BG} \propto R_\mu^2 \times \Delta E_\gamma^2 \times \Delta P_e \times \Delta \Theta_{e\gamma}^2 \times \Delta t_{e\gamma} \times T \quad (2.2)$$

R_μ : ミューオンビーム強度

ΔE_γ : ガンマ線エネルギー分解能

ΔP_e : 陽電子運動量分解能

$\Delta \Theta_{e\gamma}$: ガンマ線と陽電子の放出角のなす角の分解能

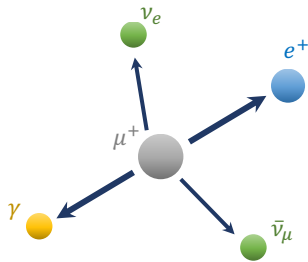
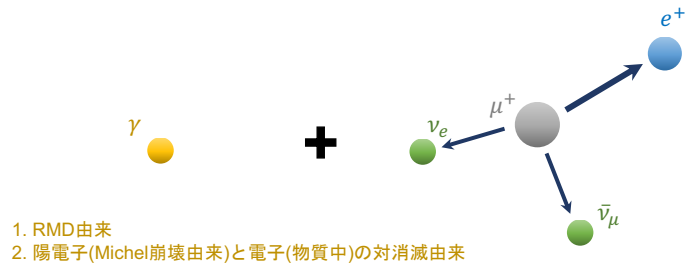


図 2.6 物理的背景事象



1. RMD由来
2. 陽電子(Michel崩壊由来)と電子(物質中)の対消滅由来

図 2.7 偶発的背景事象

$\Delta t_{e\gamma}$: ガンマ線と陽電子の時間差分解能

T : 測定時間

高感度で探索するためには多くのミュオン崩壊を調べつつ、背景事象数を抑えることが重要である。偶発的背景事象は R_μ^2 に比例して増加してしまう。そのため、偶発的背景事象を抑えつつ大強度ミュオンビームを使用して多くのミュオン崩壊を調べるためには、高分解能の検出器を使用することで偶発的背景事象を削減する必要がある。

第 3 章

MEG II 実験

3.1 概要

MEG II 実験の検出器の概要を図 3.1 に示す。 μ^+ ビームがターゲット上で静止し、崩壊で発生する e^+ は COBRA 電磁石による勾配磁場で螺旋状の軌跡を描いて掃き出される。ドリフトチャンバーで e^+ の飛跡を再構成し、タイミングカウンターで時間を測定する。 μ^+ の崩壊の結果生じたガンマ線は液体キセノン検出器で検出され、ガンマ線のエネルギー、位置、時間が再構成される。

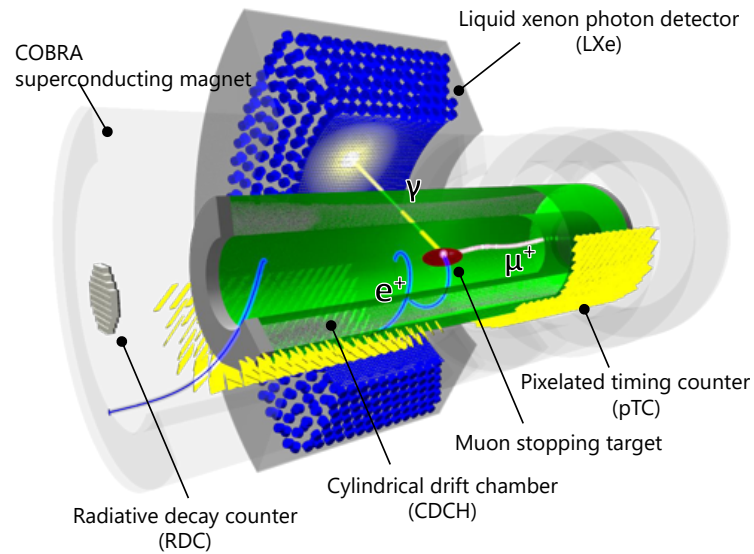


図 3.1 MEG II 実験検出器

3.2 ビーム

MEG II 実験は大強度直流 μ^+ ビームが利用可能な PSI の $\pi E5$ ビームラインで行われている。まず、陽子がコッククロフト・ウォルトン加速器で 870 keV まで加速され、次に Injector2 サイクロトロンに入射され 72 MeV まで加速される。その後、陽子はリングサイクロトロン (図 3.2) に入射され 590 MeV まで加速される。この結果生成された陽子ビームは $\pi E5$ ビームライン上流にあるターゲット E に入射し二次粒子が生成される。このターゲット E は 4 cm 厚のカーボングラファイトで構成されており、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ の反応により生じた 29.8 MeV/c の表面

ミューオンを取り出すことでミューオンビームとして利用している。



図 3.2 PSI リングサイクロトロン [23]

3.3 ターゲット

μ^+ ビームは検出器中央のターゲット (図 3.3) で静止する。ターゲットには高い μ^+ ビーム静止効率が求められる。一方、ターゲットの物質質量によって陽電子が多重散乱されたり対消滅したりすると、陽電子の検出効率が低下したり背景ガンマ線が生成されたりしてしまう。

ターゲットは厚さ $174\ \mu\text{m}$ で、ビーム軸に対して 15 度傾けて設置されており、ターゲットのビームに対する実効的な厚みを伸ばすことで μ^+ の高静止効率を実現し、また、 90° 付近にある検出器方向の実効的な厚みを抑えることで検出器方向への陽電子の多重散乱等は抑制される。ターゲットにプリントされたマーカをカメラで光学的に観測することでターゲットの歪みをモニターし、ターゲットホールを陽電子の飛跡から再構成することでターゲットの位置をモニターしている。



図 3.3 ターゲット。写真内ドットがマーカを示す。 [8]

3.4 COBRA 電磁石

COBRA (COnstant Bending RAdius) 磁石は特殊な勾配磁場を発生させる超伝導電磁石である。ターゲットから放出された陽電子は COBRA で発生させた勾配磁場により掃き出される (図 3.4)。この時、陽電子の軌跡の曲率は放出角度にはほぼ依存せず、運動量に依存する。そのため、信号事象エネルギー付近の陽電子を選択的に検出することが可能であり、高レート環境に耐えられる陽電子スペクトロメータを実現できる。

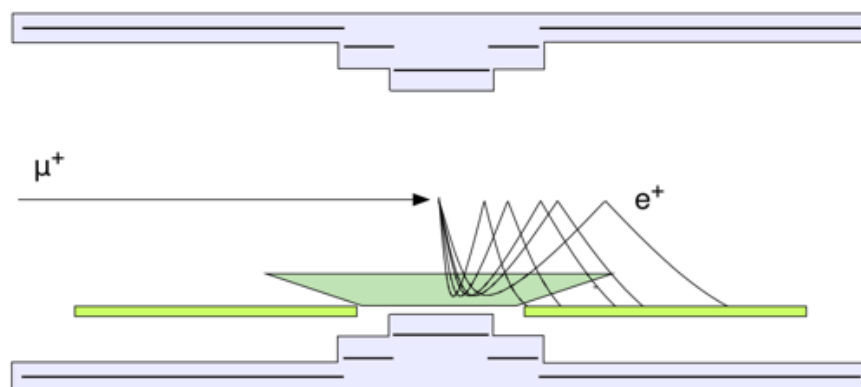


図 3.4 COBRA 電磁石 (図中のスペクトロメータ部分は MEG 実験のもの) [21]

3.5 ドリフトチェンバー

ドリフトチェンバーでは陽電子の飛跡を再構成する。全長 193 cm の円筒一体型の構造をしており、ヘリウム、イソブタン、酸素、2-プロパノールを 88.5% : 9.8% : 0.5% : 1.2% の比率で混合したガスを使用することで物質量を削減している。ドリフトチェンバーは 9 層の層状の構造をしており、各層はセンスワイヤーとフィールドワイヤーから成る。各層は 6 度から 8 度の差をつけて互い違いに張られている (図 3.5)。また、センスワイヤーは金メッキされた直径 20 μm のタングステンが使用され、フィールドワイヤーは直径 40 μm の銀アルミニウムが使用されている。ドリフトセルはほぼ正方形で、大きさは最内層は 6.6 mm であり、最外層は 9.0 mm である。また、陽電子がタイミングカウンターに侵入する直前まで飛跡を追うことが可能であり、ターゲットとタイミングカウンター間の陽電子飛跡時間の高精度測定が可能となる。

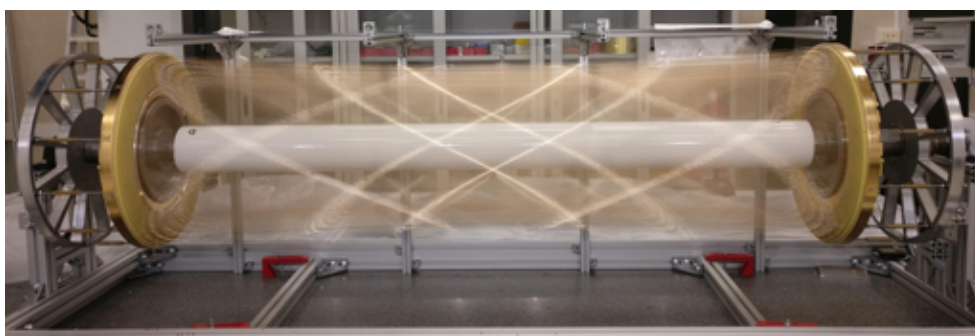


図 3.5 ドリフトチェンバー [8]

3.6 陽電子タイミングカウンター (pixelated Timing Counter, TC)

陽電子タイミングカウンターは上流側、下流側それぞれ 256 個、計 512 個のカウンターモジュールから成る (図 3.6)。各シンチレータの大きさは $40 \times 120 \times 5 \text{ mm}^3$ もしくは $50 \times 120 \times 5 \text{ mm}^3$ である。また、各シンチレータの両端には直列接続された 6 個の Silicon PhotoMultiplier (SiPM) が接着されており読み出しを行なっている (図 3.7)。細分化された構造により、陽電子が複数のシンチレータに連続してヒットすることで時間分解能が向上し、また、パイルアップの削減が可能で高レートの実験環境にも耐えられる。

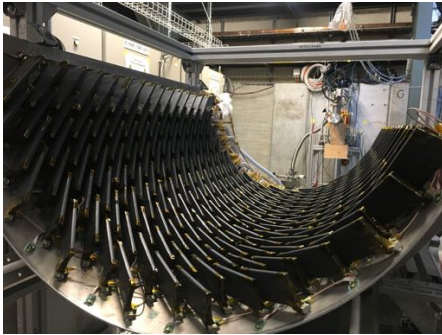


図 3.6 陽電子タイミングカウンター [23]

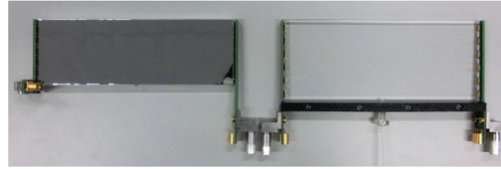


図 3.7 陽電子タイミングカウンターのピクセル。シンチレータと SiPM から成る。 [8]

3.7 輻射崩壊同定用検出器 (Radiative Decay Counter, RDC)

RDC は偶発的背景事象の原因となる背景ガンマ線同定用検出器である。RMD で高エネルギーのガンマ線が発生する際に放出される 3 MeV 程度のエネルギーを持った陽電子は COBRA 電磁石による勾配磁場によってビーム軸近くに掃き出される。この陽電子を RDC で検出して RMD 由来の背景ガンマ線を同定することで探索感度の向上が見込まれる (図 3.8)。下流側 RDC は既に導入されており、上流側 RDC は開発中である。下流側 RDC は手前のプラスチックシンチレータ 12 本の層と奥の LYSO 結晶格子 76 個の層から構成される (図 3.9、図 3.10)。プラスチックシンチレータでは陽電子の時間を測定し、LYSO では陽電子のエネルギーを検出している。

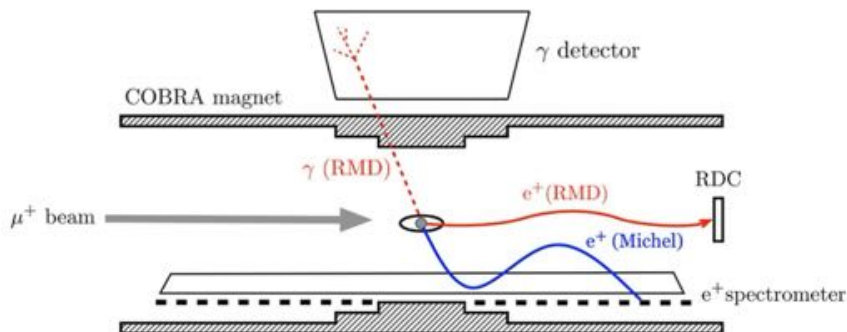


図 3.8 RDC による RMD 由来陽電子検出のイメージ図。 [8]

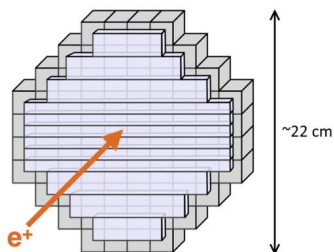


図 3.9 RDC の構造。手前のプラスチックシンチレータ層と奥の LYSO 層から成る。 [8]

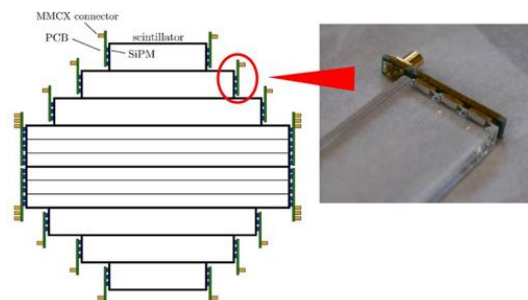


図 3.10 RDC のプラスチックシンチレータ層。各プラスチックの両側に設置されている SiPM を通して読み出しを行なっている。 [8]

3.8 液体キセノンガンマ線検出器

液体キセノン検出器ではガンマ線のエネルギー、位置、時間を測定する。真空断熱容器内に 900 L の液体キセノンが満たされており、また、入射面側には 4092 個の Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) が、その他の面には計 668 個の Photo Multiplier Tube (PMT) が設置されている。ガンマ線が入射した際のシンチレーション光をこれらの光センサーで読み出すことでガンマ線の再構成を行っている。液体キセノン検出器の詳細については第 4 章で述べる。

3.9 DAQ (Data Acquisition)

MEG II 実験では波形データを直接取得している。生の波形データを取得することで液体キセノン検出器で問題となるパイルアップ事象を判別、解析することが可能となる。MEG II 実験では検出器を細分化したことによる多大な読み出しチャンネル数(約 10000 チャンネル)に対応するため、WaveDREAM と呼ばれる DAQ ボードが開発された(図 3.11、図 3.12)。WaveDREAM ボードは、波形取得以外に、HV 供給、信号増幅、トリガーなどの機能を有する。WaveDREAM には 2 つの波形取得装置 Domino Ring Sampler (DRS) [40] が搭載され、1 ボードあたり 16 チャンネルの読み出しが可能である。



図 3.11 WaveDREAM ボード。上は HV カードが装着されておらず、下は HV カードが装着されている。HV カードが実装されている WaveDREAM ボードから SiPM に HV を印加することができる。[8]

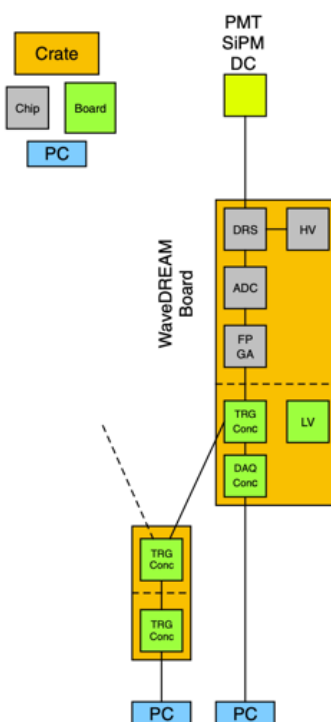


図 3.12 MEG II 実験で使用されている WaveDREAM ボードのデザイン [8]

3.10 MEG II 実験検出器座標系

MEG II 実験検出器座標系 xyz では、ターゲット中心を原点として、ビーム軸方向を z 方向、地面に対し鉛直方向を y 方向とし、 x 方向はターゲットに対して液体キセノン検出器と反対方向に正の向きが定義されている。

第 4 章

液体キセノンガンマ線検出器

4.1 液体キセノンガンマ線検出器概要

液体キセノン検出器ではガンマ線がキセノンに入射した際のシンチレーション光を検出器内壁に設置されている MPPC と PMT で読み出すことによりガンマ線のエネルギー、位置、時間の再構成を行う (図 4.1)。液体キセノンの長所と短所は以下の通りである。

- 長所
 - 高密度であり高阻止能力を有する (密度 2.98 g/cm^3)
 - 大発光量 (46000 photon/MeV)
 - ガンマ線に対する高速応答 (発光時定数 45 ns)
 - 液体であることによる高い均一性
 - 短い放射長 (2.77 cm)
 - 粒子識別性
- 短所
 - シンチレーション光波長が真空紫外領域である (波長 175 nm)
 - 低温で保持する必要がある (169 K) [31]
 - 不純物による光量低下を防ぐため高純度で保持する必要がある
 - 高価

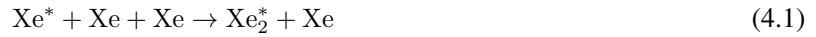


図 4.1 液体キセノン検出器内部の様子。写真左側に MPPC が、その他の面に PMT が敷き詰められていることがわかる。

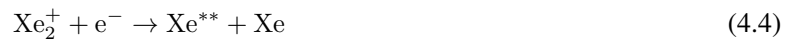
ガンマ線が液体キセノンに入射するとシンチレーション光が発生する。シンチレーション光の発生過程には複数

の種類があり、各過程の時定数は異なる。

一つ目のシンチレーション過程は励起過程であり、以下のような反応が起こる。



二つ目のシンチレーション過程は再結合過程であり、以下のような反応である。



ガンマ線やアルファ線がキセノンに入射した際には、この励起過程および再結合過程が起こるが、この再結合の反応速度はキセノンに落とされたエネルギーに依存し、ガンマ線では時定数 45 ns のシンチレーション光が、アルファ線では時定数 22 ns のシンチレーション光が発生する。

例えば、不純物として酸素が混入した場合、酸素によりキセノンの電離が抑制されることでシンチレーション光の発光量が減少する。また、酸素や水などの不純物が混入するとシンチレーション光の吸収も起こる。そのため、光量は適切にモニターし、光センサーのキャリブレーションに取り込む必要がある。光量が低下すると入射ガンマ線のエネルギーを過小に評価することに繋がる。その結果、ガンマ線のイベント再構成が適切に行われずという問題が生じる。また、物理データ取得時のトリガー発行条件としてガンマ線エネルギーによる閾値が設定されており、データの質を保てなくなるという問題も生じる。そのため、ビームタイム中モニターし続け、校正結果を更新し続ける必要がある。

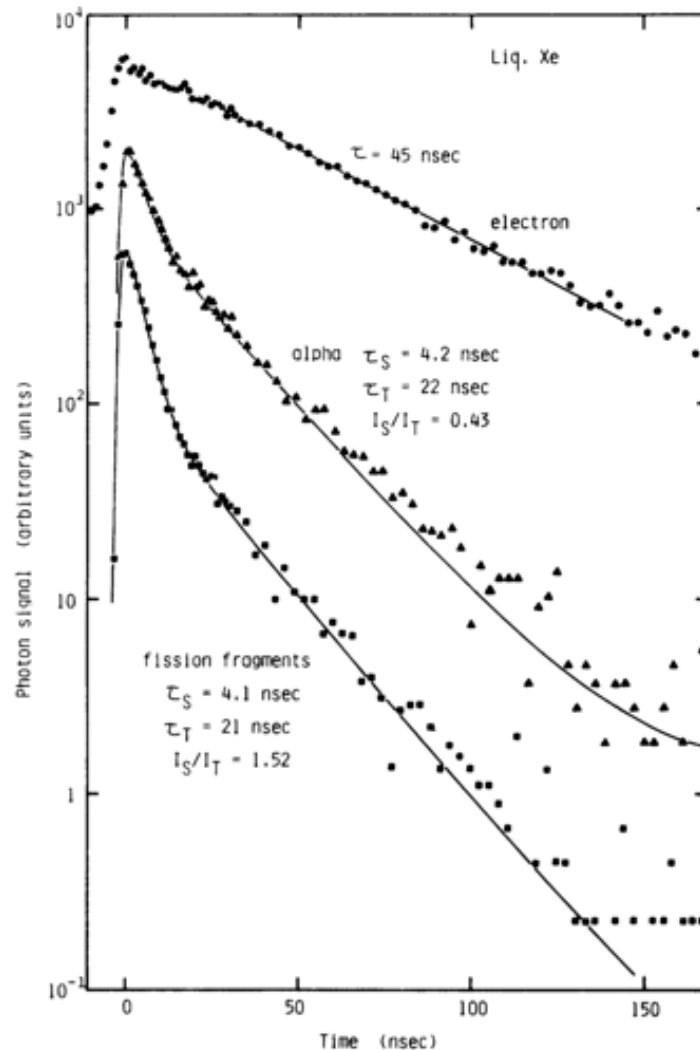


図 4.2 液体キセノン中の減衰曲線。ガンマ線が入射した場合は時定数 45 ns、アルファ線の場合は時定数 22 ns のシンチレーション過程が生じる。[33]

4.1.1 液体キセノンガンマ線検出器座標系

液体キセノン検出器内の MPPC と PMT の配置を図 4.3 に示す。図 4.3 は液体キセノン検出器をターゲット側から見た時の展開図になっている。検出器は計 6 面から成り、ターゲットに最も近いガンマ線入射面を Inner 面、ビーム上流側および下流側の面をそれぞれ Upstream 面、Downstream 面とする。また、検出器の上部および下部の面をそれぞれ Top 面、Bottom 面とし、ビーム軸から最も離れた面を Outer 面とする。液体キセノン検出器を基準とする座標系 (u, v, w) を図 4.4 に示す。また、MEG II 実験検出器座標系 (x, y, z) と液体キセノン検出器座標系 (u, v, w) の関係を式 4.8、4.9、4.10 に示す。Inner 面の中心を原点とし、ビーム軸と並行な方向に u 座標、Inner 面に沿った方向に v 座標、深さ方向に w 座標を定義する。液体キセノン検出器の一様性等の議論ではこの座標系を使用する。なお、液体キセノン検出器の高さは約 2.2 m であり、 uvw 座標の原点とターゲット中心の距離 R_{in} は 64.84 cm である。

$$u = z \quad (4.8)$$

$$v = \arctan(-y/x) \times R_{in} \quad (4.9)$$

$$w = \sqrt{x^2 + y^2} - R_{in} \quad (4.10)$$

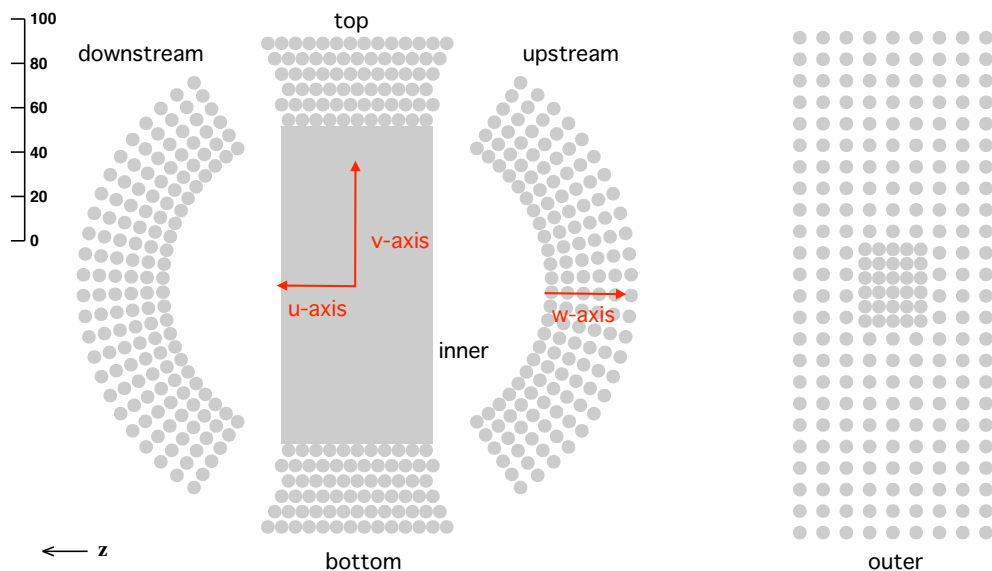


図 4.3 液体キセノン検出器内の MPPC および PMT 配置。Inner 面には 4092 個の MPPC が縦 93 個、横 44 個に敷き詰められている。[20]

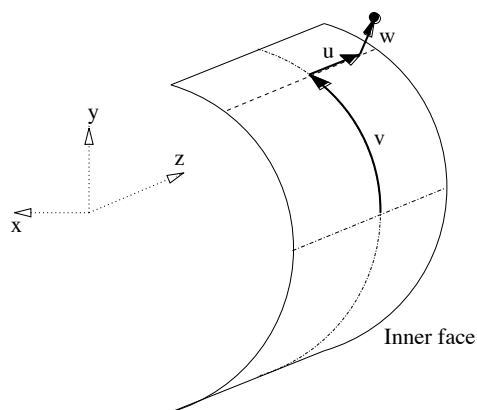


図 4.4 液体キセノン検出器座標系 (uvw 座標) [23]

4.1.2 キセノン輸送システム

キセノン輸送システムは液相と気相から成る。シャットダウン中、キセノンは 1000 L デュワーもしくは高圧ガスタンクで貯蔵される。また、液相、気相ともに純化システムを有している。液相の純化は液体キセノンの輸送時に液純化装置を通過させることで行われる。液純化装置では主に液体キセノン中の水を取り除くことができ、70 L/h の速度で純化が行われる。しかし、液純化装置はポンプによるノイズを発生させることから物理データ取得中は稼

働させることができない。気相の純化はゲッターを通して行われ、物理データ取得中も継続的に純化が行われている。気相の純化速度は液体キセノン相当で 0.6 L/h、すなわち、気体キセノン相当で 12.5 L/min である。

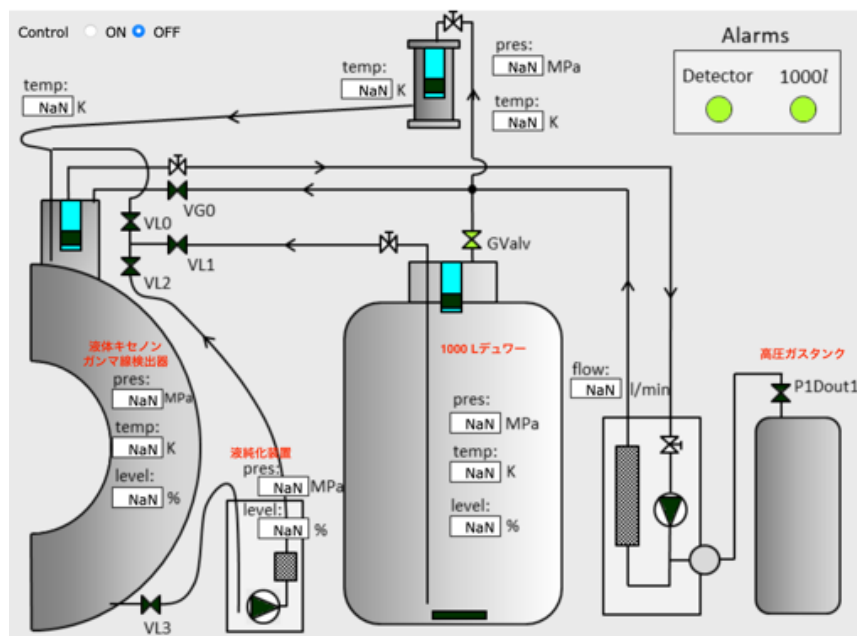


図 4.5 液体キセノン検出器コントロールシステム。VG は気相のバルブを表し、VL は液相のバルブを表す。

4.1.3 MPPC

MEG 実験では液体キセノン検出器の光センサーとして PMT のみが使用されていた。しかし、PMT は円形のため密に敷き詰めるのが困難である。実際、PMT の光電面直径は 46 mm であるのに対し、PMT 設置時の中心間距離は 62 mm であり、PMT 間に隙間が存在した。その結果、浅い領域で相互作用したイベントについて光電面付近で反応したイベントと PMT 間で反応したイベントではシンチレーション光の収集効率が異なり、分解能の悪化をもたらした。

これらの問題を解決するため、MEG II 実験では Inner 面の光センサーを PMT から MPPC に変更した。MPPC は PMT と比較して大きさが小さく、また四角い形状をしているため密に敷き詰めることが可能である。しかし、4.1 節で述べたように液体キセノン検出器では真空紫外光のシンチレーション光を検出する必要があり、真空紫外光に感度のある MPPC を開発する必要があった。以降では、まず、一般的な MPPC について述べた後、MEG II 実験液体キセノン検出器で使用されている真空紫外光に感度のある MPPC の特徴について述べる。

MPPC 動作原理

Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) は浜松ホトニクス製の Silicon Photo-Multiplier (SiPM) のことである。MPPC は複数のガイガーモード Avalanche Photo Diode (APD) から構成される半導体素子である。各 APD の pn 接合に逆バイアス電圧を印加すると空乏層が形成される。光子が空乏層に入射すると電子正孔対が生成され、電界により N⁺、P⁺ 側にドリフトされる。バイアス電圧としてブレイクダウン電圧以上の電圧を印加した場合、素子中のキャリアは結晶中の格子と衝突し、新たな電子正孔対が生成される。新たに生成された電子正孔対がさらに格子と衝突し新たな電子正孔対を生成する、という過程を繰り返すことでガイガーモードを実現でき、アバランシェ増幅が起こる (図 4.6)。その結果 10^5 – 10^6 という高増倍率を実現できる。

一度ピクセルに光子が入射したのちに、次に光子が入射した際に光子を検出するためには最初のガイガー放電を停止させる必要がある。そのために、MPPC の各 APD にはクエンチング抵抗が直列に接続されている (図 4.7)。アバランシェ増幅によりガイガー放電が起こると、クエンチング抵抗により電圧降下が発生し APD の動作電圧が低下する。その結果、バイアス電圧がブレイクダウン電圧を下回り、アバランシェ増幅が停止する。この状態になれば新たに光子が入射しても検出することが可能である。

MPPC で検出される信号の大きさは印加電圧に依存する。バイアス電圧とブレイクダウン電圧の差をオーバー電圧と呼び、ゲインはオーバー電圧に対して一次関数的に増幅する。また、入射光子数に対して十分なピクセル数を有する MPPC を使用することで、MPPC に入射した光子数を計測することができる (図 4.8)。

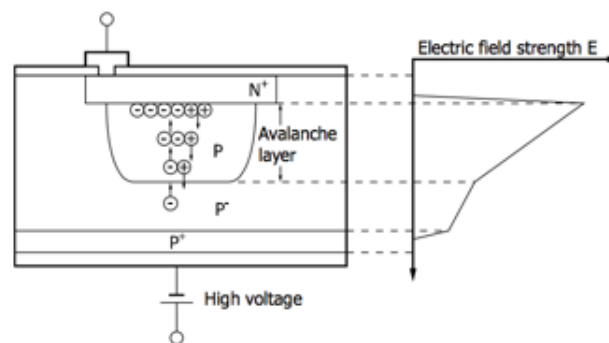


図 4.6 MPPC 内の電界。電界によりキャリアがドリフトする過程でアバランシェ増幅が起こる。[46]

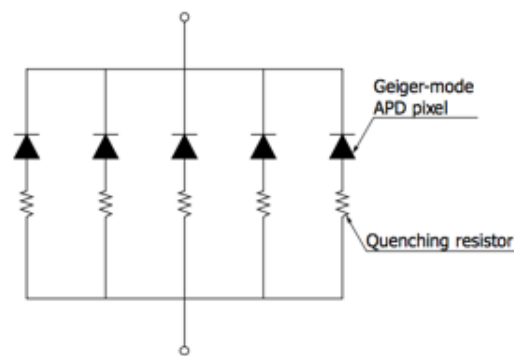


図 4.7 各 APD に直列接続されたクエンチング抵抗。[46]

MPPC の長所

PMT は一般的に $10^6 - 10^7$ の増幅率を有するが、MPPC も PMT と同程度の約 10^6 の増幅率を有する。また、PMT は磁場に有感であるため COBRA による磁場の影響を受けてゲインが増減するが、MPPC は磁場により応答が影響を受けない。さらに、MPPC は単一光子識別能力に優れている。また、PMT は動作時に 800–1000 V 程度の印加電圧を必要とするが、MPPC は 50–60 V 程度の印加電圧で動作させる事ができる上に、MPPC は PMT より小型であり、より密に検出器内壁に敷き詰めて高精細な読み出しを実現できる。

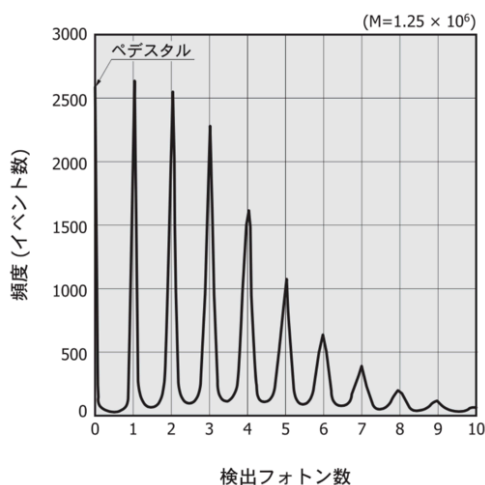


図 4.8 MPPC の信号波高スペクトル [46]

MPPC の短所

MPPC は上記のように多くの長所を有するが、一方で MPPC 特有の問題点も存在し、キャリブレーションの際には以下の問題点に注意する必要がある。

■**ダークノイズ** 光子が入射していない場合でも、熱励起やトンネル効果によりキャリアがアバランシェ増幅を起し信号として検出される現象。液体キセノン検出器は低温 (169 K) に保たれているため大きな問題とはならない。

■**クロストーク** あるピクセルで発生したアバランシェ増幅の過程で生じた光子が他のピクセルに入射し、入射したピクセルでアバランシェ増幅を発生させてしまう現象。入射光子数を過大に測定してしまうという問題がある。

■**アフターパルス** アバランシェ増幅の際にメインのパルスから遅れたパルスが生じる現象。これは、アバランシェ増幅の過程で生成されたキャリアが格子欠損に捕獲され、その後解放されたキャリアが遅れてアバランシェ増幅を起こすことで発生する。

■**温度依存性** 温度が上昇すると MPPC のブレイクダウン電圧は増加する。そのため、印加電圧が一定に保たれている場合でも温度変化によりオーバー電圧が変化し、MPPC の増幅率が変わってしまう。しかし、液体キセノン検出器で使用している MPPC の温度係数は $56 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}$ であり、液体キセノンの温度は 169 K に 0.1 K の精度で制御されているためエネルギー分解能の悪化をもたらすほどの影響はないと考えられる。

■**放射線損傷による光子検出効率 Photon Detection Efficiency (PDE) 減少** 放射線損傷により PDE が徐々に減少する。MEG II 実験ではビーム中で MPPC を使用するため、放射線損傷による PDE の減少は液体キセノン検出器でのガンマ線イベント再構成において大きな影響を及ぼす。そのため、継続的な較正を行うことが重要である。

MEG II 実験で使用されている MPPC の特徴

MPPC を液体キセノン検出器で使用するためには以下の条件を満たす必要がある。

- 液体キセノンのシンチレーション光である真空紫外光 (波長 175 nm) に対する十分な感度
- 低温 (169 K) の液体キセノン中で動作可能
- パイルアップ削減のため、信号波形の時定数が液体キセノンのシンチレーション光の時定数 (45 ns) と比べ

長くないこと

- 読み出しチャンネル数の制約から一つの MPPC で少なくとも $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 程度の面積を占有可能

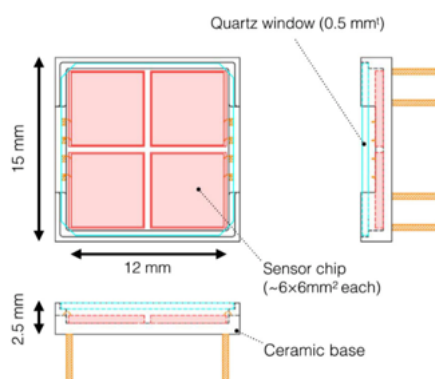


図 4.9 開発された MPPC のデザイン [8]

既存の MPPC では上記の要請を満たすものが存在しなかったため、浜松ホトニクスと共同で新たな MPPC が開発された。新たに開発された MPPC は真空紫外光に対して有感である。真空紫外光のシリコン結晶に対する減衰長は 5 nm 程度と短い。従来の MPPC では真空紫外光が有感領域に到達する前に前面に存在する保護層やシリコン結晶により減衰されていた。そのため、真空紫外光に対する感度が無かった。液体キセノン用に開発された MPPC では従来の樹脂製の保護層を撤廃し、真空紫外光の減衰を低減させた。表面の保護のために、代わりに真空紫外光に対して透明なクォーツ窓を設置している (図 4.9)。その際に、クォーツ窓と MPPC 素子の間には液体キセノンが入り込むことのできる隙間が空けられている。クォーツの屈折率は 1.61 であり、液体キセノンの屈折率 1.64 と近い値である。そのため、クォーツ窓と素子間を液体キセノンで埋めることで境界面での反射を防いでいる。また、真空紫外光によりシリコン表面付近で生成されたキャリアの収集効率を上げるため、素子中の $p+$ 層を薄くした。

従来の MPPC は大きくても $6 \times 6 \text{ mm}^2$ であり液体キセノン検出器における要請を満たしていない。新たに開発された MPPC では、 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ のチップを 4 つ並べた構造にすることで、パッケージの大きさは $15 \times 15 \text{ mm}^2$ となり、一つの MPPC で十分な領域を占めることができる。信号は直列で読み出し、電圧は並列に印加する手法をハイブリッド接続 (図 4.10) と呼び、MEG II 実験で使用している MPPC では 4 つのチップの接続の際にこの手法を採用している。信号を直列に読み出すことで、センサーのキャパシタンスの増加を防ぎ、波形の時定数を液体キセノンのシンチレーション光の時定数と同程度の $40\text{--}50 \text{ ns}$ 程度に抑えている。一方、バイアス電圧は並列に印加することで必要なバイアス電圧を抑えることができ、また、チップ間に電位差がないことで放電を防ぐことができるというメリットがある。なお、ハイブリッド接続では各チップに同じバイアス電圧が印加されるため、4 つのチップのブレークダウン電圧は揃えられている必要がある。

MPPC へのバイアス電圧の印加および信号の読み出しは PCB を通して行われる (図 4.11)。PCB の信号線はグラウンドで囲われており、ノイズを抑制している (図 4.12)。PCB から読み出された信号は同軸ケーブルを通して WaveDREAM へ伝達される。一枚の PCB には 22 個の MPPC が設置され、ビーム軸に対して 2 枚の PCB が並べて敷設されている。上流側、下流側それぞれ 93 枚の PCB が図 4.13 のように液体キセノン検出器の入射面側にインストールされている。

製造ロット

液体キセノン検出器用に開発されたこの MPPC は浜松ホトニクスにおいて 4 回に分けて製造された。各製造ロットを早い時期に製造されたものから順に A,B,C,D と呼んでいる。ロットに応じてセンサーのクロストークやア

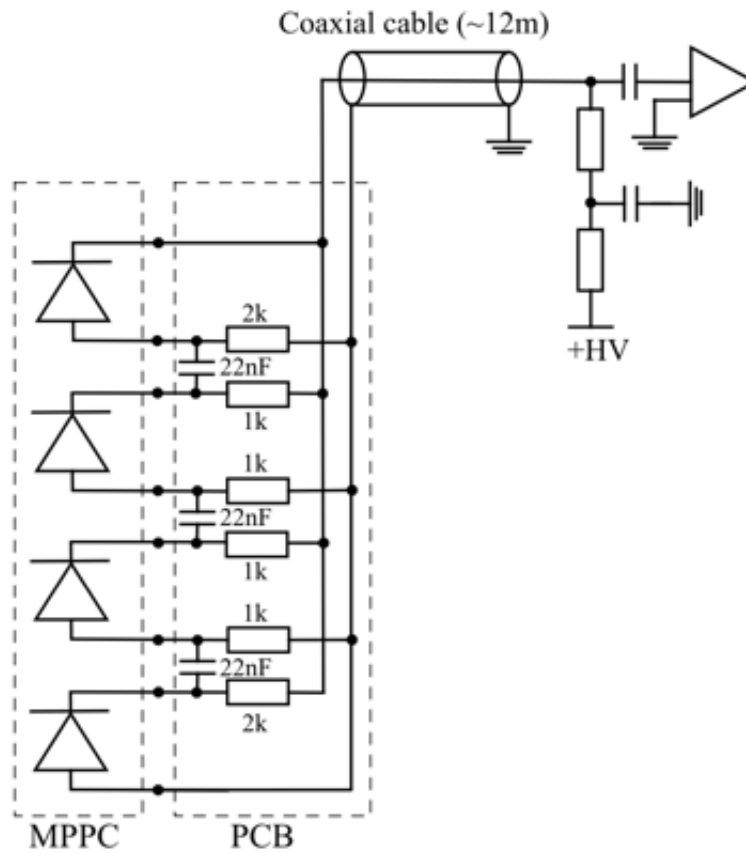


図 4.10 ハイブリッド接続。信号は直列回路で読み出され、印加電圧は並列にかけられる。[42]

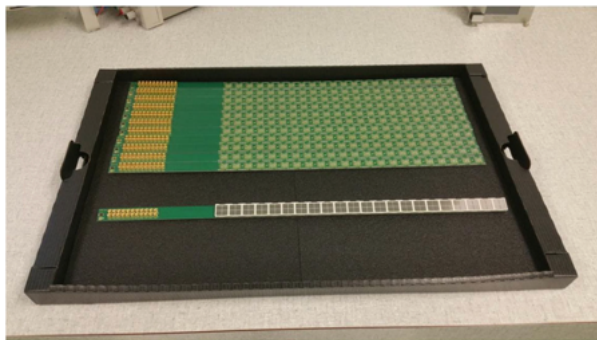


図 4.11 MPPC が設置される PCB

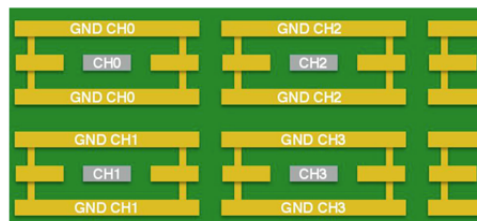


図 4.12 PCB の断面図 [8]

フターパルスといった相関ノイズの大きさやタイムオフセットが異なることがわかっており、今後のセンサーキャリブレーションの議題の中でもロットごとに議論をする場合がある。

4.1.4 PMT

液体キセノン検出器で使用する PMT は、真空紫外光に対して高い検出効率を持ち、低温環境で動作可能であり、キセノンへの熱流入を抑えるために低電流で動作可能であるという特徴を持つ必要がある。MEG 実験ではこれら

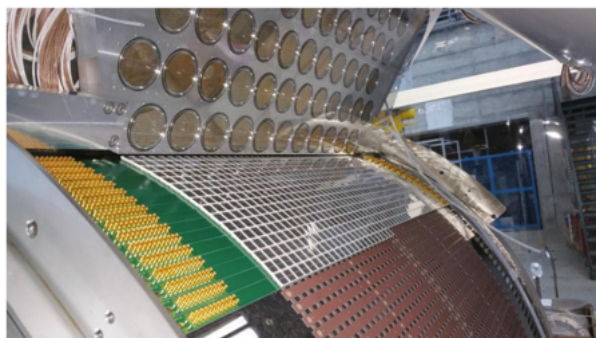


図 4.13 PCB のインストール作業の様子 [8]

の要請を満たした PMT が浜松ホトニクスと共同開発され、MEG II 実験でも引き続き使用されている。MEG II 実験で使用している PMT の特徴を表 4.1 に示す。また、MEG 実験において、ビームタイムの経過に伴ったゲインの減少、および、ビームのオン、オフの切り替え時に一部の PMT のゲインが数十秒という短時間でシフトするという現象が発覚している。そのため、これらの変動も較正する必要がある。

表 4.1 MEG II 実験で使用している PMT の特徴 [23]

型番	R9869
大きさ	57 mm ϕ
有感領域	45 mm ϕ
PMT の長さ	32 mm
カソード材質	K - Cs - Sb
ダイノード種類	メタルチャンネル
ダイノード数	12

4.2 較正用 LED

液体キセノン検出器内部にはセンサーのゲイン較正で使用する LED があらかじめ設置されている (図 4.15)。図 4.14 に LED の設置位置を示す。図 4.14 中の old LED from MEG は MEG 実験から使用し続けているもので PMT のゲイン較正に使用する。new LED from MEG II は MEG II 実験から新たに導入されたもので、MPPC ゲイン較正用に使用する。

PMT ゲイン較正には波長 470 nm の青色 LED を使用する。LED は液体キセノン検出器の上流側および下流側の側面にそれぞれ 6 箇所設置され、1 箇所につき 3 個の LED が取り付けられており、LED はアルミ箔のピンホールとテフロンで減光されている。また、3 つの LED はテフロンによる減光の度合いが異なっている。テフロンで減光することで、LED の強度を上げて光量の安定化を図ることができ、また、光を散乱させることで検出器内部を一様に照らすことができるというメリットがある。

MPPC ゲイン較正用 LED は Outer 面に 12 箇所、Upstream 面と Downstream 面にそれぞれ 2 箇所ずつ設置されており、1 箇所につき 3 個の LED が設置されている。この 3 個の LED の光量は等しい。

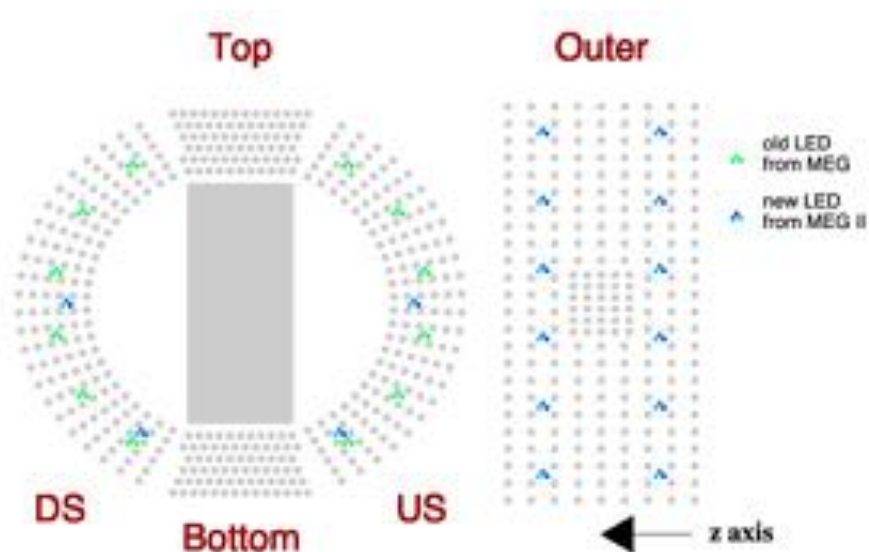


図 4.14 ゲイン較正用 LED の設置位置



図 4.15 ゲイン較正用 LED

4.3 較正用アルファ線源

液体キセノン検出器内部には MPPC の PDE および PMT の QE の較正用のアルファ線源として ^{241}Am が設置されている (図 4.16)。 ^{241}Am 線源の設置位置を図 4.17 に示す。 ^{241}Am 線源はタングステン製直径 $100\ \mu\text{m}$ のワイヤーに設置されており、一本のワイヤーには $12.4\ \text{cm}$ の等間隔で 5 つの線源が付けられている。各ワイヤーの端点が液体キセノン検出器の上流側と下流側の側面に繋がれることで検出器内にワイヤーが張られている。

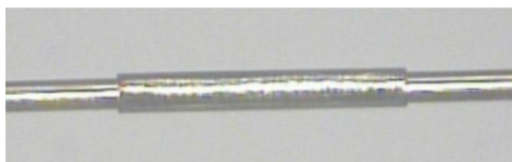


図 4.16 PDE, QE 測定に用いられている線源 [23]

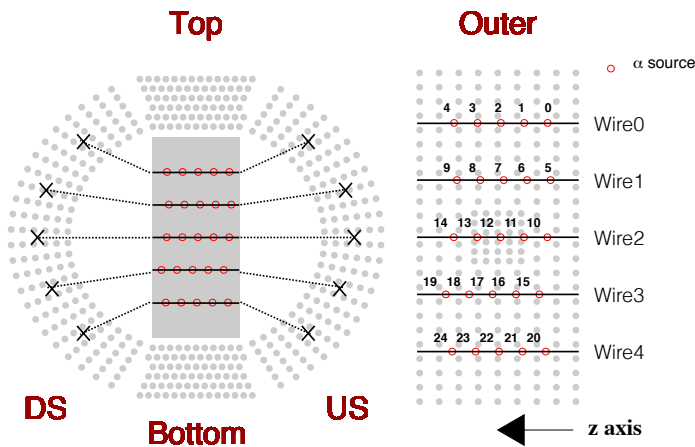


図 4.17 ^{241}Am 線源の位置 [23]

^{241}Am 線源から放出される α 線は 5.5 MeV のエネルギーを持ち、液体キセノン中での飛程が $50\ \mu\text{m}$ 程度であることから、 ^{241}Am 線源は実質的に点状の線源と見なすことができる。また、 α 線によるシンチレーション光の波長はガンマ線によるシンチレーション光の波長と等しいため、 α 線を用いて求めた PDE や QE の値はガンマ線に対しても使用することができる。

4.4 液体キセノンガンマ線検出器でのイベント再構成原理

液体キセノン検出器ではガンマ線の位置、エネルギー、タイミングを再構成している。再構成の流れを図 4.18 に示す。

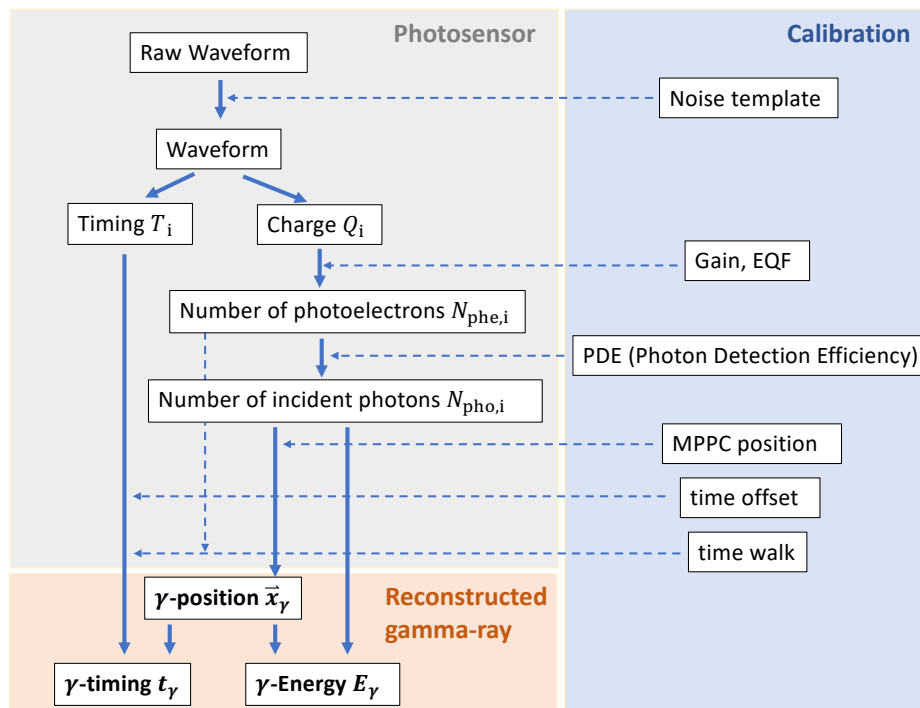


図 4.18 液体キセノン検出器でのガンマ線位置、エネルギー、タイミングの再構成手順

まず、各センサーの波形が WaveDREAM を通して記録される。そこから、検出信号とは独立に周期的に発行されるトリガーで取得されたペダスタルデータから抽出して作成したノイズテンプレートを差し引くことでノイズが削減された補正後の波形を得ることができる (6.2 節)。次に波形を積分することで各センサーで読み出された積分電荷を算出する。各センサーのゲインや、クロストークやアフターパルスなどの相関ノイズによる電荷増加の影響を表す指標である過剰電荷係数 Excess Charge Factor (EQF) をキャリブレーションによりあらかじめ求めておき、これらのパラメータを用いて各センサーの光電子数を求める。その後、MPPC の光子検出効率 Photon Detection Efficiency (PDE) および PMT の量子効率 Quantum Efficiency (QE) もキャリブレーションにより測定されているため、各センサーの入射光子数 N_{pho} は電荷 Q およびゲイン G を用いて式 4.11 のように表される。

$$N_{\text{pho}} = \frac{Q}{G \times PDE \times EQF} \quad (4.11)$$

なお、MPPC PDE および PMT QE はセンサー表面に入射した光子数に対する検出光子数の割合を表す。

また、波形から各センサーの信号検出時間を算出する事ができ、あらかじめキャリブレーションにより把握しているオフセットの効果を差し引いた後に時間再構成に利用される。

以上のように、ガンマ線のイベント再構成では事前にセンサーの較正により各種パラメータを適切に測定し、再構成に適用する必要がある。また、較正で求めたパラメータはオフラインでのイベント再構成だけでなく、トリガーのエネルギー閾値の計算にも使用される。そのため、オンラインでも十分な分解能で物理データを取得するた

めには適切な頻度で高精度の較正を行う必要がある。特に、PMT のゲインや MPPC の PDE はビーム照射により減少し続けるため、較正を行わないとエネルギー閾値が適切でなくなり、物理データの質を保証できない。

4.5 エネルギー再構成

ガンマ線エネルギー E_γ は以下のように、検出光子数を元に再構成される。[20]

$$E_\gamma = C \times T(t) \times F(u, v, w) \times N_{\text{sum}} \quad (4.12)$$

$$N_{\text{sum}} = (r_{\text{MPPC}}(t) \times N_{\text{MPPC}} + N_{\text{PMT}}) \quad (4.13)$$

$$N_{\text{MPPC,PMT}} = \sum_{i \in \text{CMPPC,PMT}} A_i \times F_{\text{face},i}(u, v, w) \times N_{\text{pho},i} \quad (4.14)$$

$N_{\text{pho},i}$ は各センサーに入射した光子数である。 A_i はセンサーの有感領域の大きさの違いを補正する。MPPC は検出器入射面側に敷き詰められている一方、PMT は素子間の隙間が大きく、有感領域の割合の違いを補正している。 $F_{\text{face},i}(u, v, w)$ はエネルギー応答一様性の補正因子である。式 4.14 から、全 MPPC および PMT で検出された電荷の合計を求める。しかし、実際には MPPC と PMT についてそれぞれ全センサーの波形を足し合わせ積分することで $N_{\text{MPPC,PMT}}$ を求めている。 C は光子数をエネルギーに変換する係数であり、 $r_{\text{MPPC}}(t)$ は全 MPPC と全 PMT の検出光子数の比の補正係数であり、 $T(t)$ はエネルギースケールの時間依存補正関数である。液体キセノンの光量の変動やセンサーの状況により時間変動するため、センサーキャリブレーションで正しく値を把握することが重要である。

4.6 位置再構成

ガンマ線が液体キセノン中で最初に相互作用する位置は MPPC の光量分布から再構成される。各 MPPC で検出された光子数 N_{pho} を uv 平面上でフィットし、光量分布のピークを求める。その後以下の χ_{pos}^2 を最小にするような光量分布を求める。

$$\chi_{\text{pos}}^2(\mathbf{x}) = \sum_{i \in \text{PM around the peak}} \frac{(N_{\text{pho},i} - C \times \Omega_i(\mathbf{x}))^2}{\sigma_{\text{pho},i}^2} \quad (4.15)$$

$$\sigma_{\text{pho},i} = \frac{N_{\text{pho},i}}{\sqrt{N_{\text{phe},i}}} \quad (4.16)$$

C : 光量分布のスケール

$\Omega_i(\mathbf{x})$: 光センサーに対する立体角

ここで求められたガンマ線相互作用位置を $(u_{\text{fit}}, v_{\text{fit}}, w_{\text{fit}})$ と表すことにする。 $(u_{\text{fit}}, v_{\text{fit}}, w_{\text{fit}})$ には位置に依存したバイアスが含まれている。これはシンチレーション光の発生箇所の重心が電磁シャワーの発達により、ガンマ線のヒット位置から離れた位置にあることに起因している。例えば u 方向の絶対値の大きな領域に入射したガンマ線は位置再構成では検出器側面方向にバイアスされる。 v 方向に関しては液体キセノン検出器はターゲットを中心とする円弧を描いた形状をしているためバイアスは生じない。 w 方向は電磁シャワーの発達に伴い w が大きな方向へバイアスされる。そのため、あらかじめモンテカルロシミュレーションにより求めている $u_{\text{fit}}, v_{\text{fit}}, w_{\text{fit}}$ に応じた値を使用してこのバイアスを補正している (図 4.19)。

また、イベントごとの電磁シャワー発達方向のふらつきによるバイアスも補正する必要がある。 uvw の各方向に対して、複数のフィット範囲の結果の差分を使用して補正を行う。モンテカルロシミュレーションで複数フィット範囲の結果の差分に対する補正值をあらかじめ取得し、補正が行われる (図 4.20)。

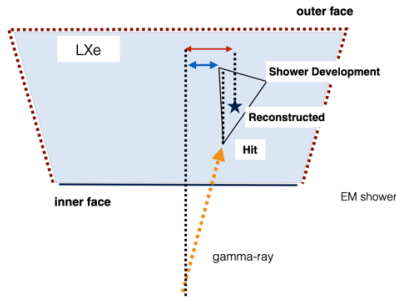


図 4.19 再構成位置によるバイアス補正のイメージ [23]

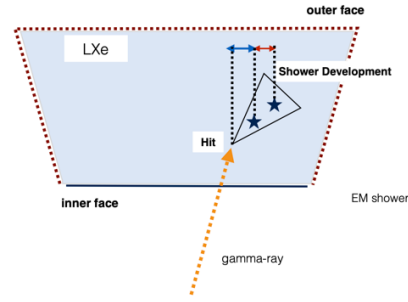


図 4.20 電磁シャワー補正のイメージ [23]

4.7 時間再構成

ガンマ線と液体キセノンが最初に相互作用した点におけるヒット時間 t_γ は以下で定義される χ^2 を最小にする時間として再構成される。

$$\chi^2 = \sum_{i \in \text{MPPC, PMT}} \chi_i^2 \quad (4.17)$$

$$\chi_i^2 = \Delta t_i^2 / \sigma_i^2 \quad (4.18)$$

$$\Delta t_i = t_{i, \text{pm}} - t_{i, \text{shower prop}} - t_{i, \text{scinti prop}} - t_{i, \text{walk}} - t_{i, \text{offset}} - t_\gamma \quad (4.19)$$

$t_{i, \text{pm}}$ は各センサーの信号検出時間であり、コンスタントフラクション法を用いて算出される。コンスタントフラクション法では波高を基準に閾値を設定し、その閾値に達した時間を $t_{i, \text{pm}}$ として採用する。コンスタントフラクション法を用いることでタイムウォークの影響を抑えることができる。

$t_{i, \text{shower prop}}$ はガンマ線が最初に相互作用した点から光源までの電磁シャワーの発達にかかった時間であり、 $t_{i, \text{scinti prop}}$ は光源から各センサーまでのシンチレーション光の伝搬時間である。

$t_{i, \text{walk}}$ は各センサーのタイムウォークの効果であり、 $t_{i, \text{offset}}$ は各センサーのオフセットである。この2つのパラメータは CEX ランのデータを使用した時間較正で得られる。これらの較正については第7章で述べる。

第 5 章

液体キセノンガンマ線検出器の較正

5.1 液体キセノンガンマ線検出器較正概要

4.4 節で述べたように、液体キセノン検出器でガンマ線イベントの再構成をするためには各センサーやエネルギースケールの較正が重要である。本節では液体キセノン検出器の較正の概要について述べ、次章以降で本研究で取り組んだ内容の詳細を述べる。

表 5.1 液体キセノン検出器の較正手法一覧

目的	名称	使用線源	頻度
ノイズ	Pedestal ラン	(ペDESTALトリガー)	1 回/日
PMT ゲイン	Strong LED ラン	LED	1 回/日
MPPC ゲイン	Weak LED ラン	LED	3 回/週
MPPC PDE, PMT QE	Alpha ラン	^{241}Am 由来の α 線	1 回/日
エネルギースケール	Cosmic-ray ラン	宇宙線	3 回/週
エネルギースケール	CW(Cockcroft-Walton) ラン	$^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 由来の 17.6 MeV ガンマ線	3 回/週
エネルギースケール	NG(Neutron Generator) ラン	$^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ 由来の 9 MeV ガンマ線	3 回/週
エネルギースケール	CEX(Charge EXchange) ラン	$\pi^-p \rightarrow \pi^0n, \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 由来の 55, 83MeV ガンマ線	1 回/年
タイミング	CEX ラン	$\pi^-p \rightarrow \pi^0n, \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 由来の 55, 83MeV ガンマ線	1 回/年

キセノン検出器の較正手法を表 5.1 に示す。CEX ラン以外の較正用データは物理データ取得中に定期的に取得されている。一方、CEX ランはターゲットやビームのセットアップを物理データ取得時とは異なる状態に変更する必要があり、年 1 回の CEX データ取得用の専用ビームタイムを用意する必要がある。なお、CEX ラン中も物理ラン中と同様に他の較正データも取得されるが、CW ランと NG ランはセットアップが CEX ランのセットアップと干渉するため CEX ランのビームタイム中は取得されない。

5.2 ノイズ除去

データ解析の際に信号波形からノイズテンプレートを差し引くことでノイズの影響を削減する。詳細は第 6 章で議論する。

5.3 PMT ゲイン

MEG 実験での経験から、PMT のゲインはビームタイム中減少することが知られている。そのため、液体キセノン検出器の内部にインストールされている LED を使用して PMT のゲインを較正する (図 4.14)。また、PMT のゲインの低下はセンサーごとの S/N 低下による時間分解能の悪化をもたらす可能性があり、さらに、読み出しエレクトロニクスダイナミックレンジ内に信号波形を収めるためにもゲインを調整する必要がある。そのため、ビームタイム期間中は適宜 PMT への印加電圧を変更し PMT ゲインを一定の範囲内 ($6.5 \times 10^5 - 8 \times 10^5$) に収めるよう調整するとともに、PMT ごとのゲインをモニターする必要がある。詳細は第 6 章で議論する。

5.4 MPPC ゲイン

検出器内部にあらかじめ設置されている低強度 LED を、数個の光子が検出される程度の強度で発光させる。1 光電子数に対応するピークからゲインを求める。実際には、クロストークやアフターパルスが時間に依存するためそれらの影響を正しく見積もるために複数の積分範囲で解析するなどの過程がある。

5.5 MPPC PDE, PMT QE

MEG II 実験の過去のエンジニアリングランにおいて、MPPC PDE がビームタイム中に減少することが発覚した。PDE の減少の詳細なメカニズムは現時点で不明だが放射線損傷によるものだと考えられている。入射光子数を正しく測定し、入射ガンマ線のエネルギーを正確に再構成するためには PDE の変動をモニターする必要がある。詳細は第 6 章で議論する。

5.6 宇宙線データを用いたエネルギースケール較正

適切なイベントセレクションを適用することでターゲットから入射したガンマ線に近いイベントを選択することができ、それらのイベントのピークエネルギーの時間変動を追うことでエネルギースケールの安定性を補正する。

5.7 ${}^7_3\text{Li}(p, \gamma){}^8_4\text{Be}$ 反応によるエネルギースケール較正

コッククロフト・ウォルトン (CW) 加速器で加速された陽子を $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ターゲットに入射し、 ${}^7_3\text{Li}(p, \gamma){}^8_4\text{Be}$ の反応により生じる 17.6 MeV のガンマ線を使用してエネルギースケールや一様性を補正する。CW ランのセットアップを図 5.1 に示す。CW ランでは通常の物理ランで使用されているターゲットはパーキングポジションへと収納され、 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ターゲットが代わりに設置される。また、検出器下流側から CW 加速器から伸びるビームラインが挿入される。

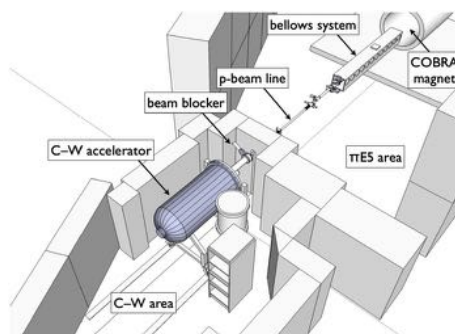


図 5.1 CW ランセットアップ [21]

$^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応で放出されるガンマ線スペクトルを図 5.2 に示す。17.6 MeV 付近にピークが見られることがわかる。また、uvw 座標ごとのエネルギースペクトルを図 5.3 に示す。uvw によらず 17.6 MeV 付近にピークが見られる。

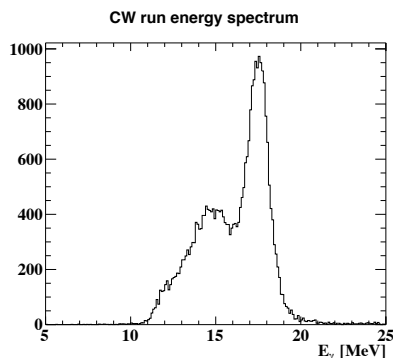


図 5.2 $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応で生じるガンマ線のスペクトル

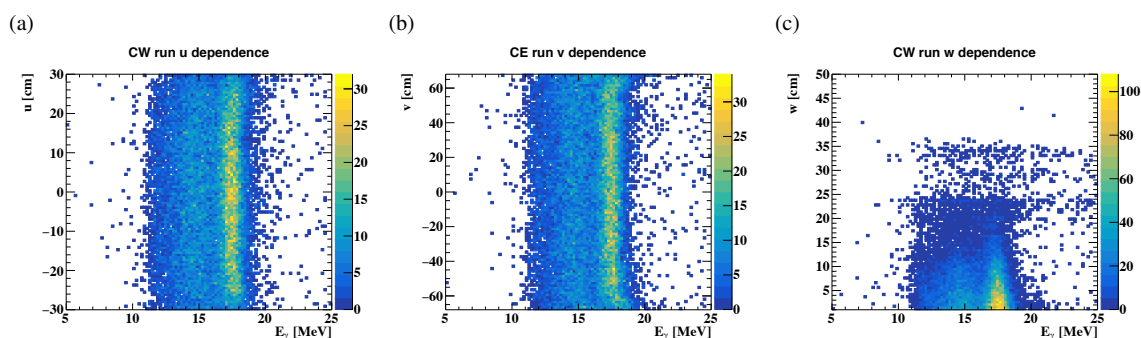


図 5.3 $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応により生じたガンマ線の uvw 座標ごとのエネルギースペクトル (a) u 方向 (b) v 方向 (c) w 方向

5.8 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ 反応によるエネルギースケール較正

液体キセノン検出器の前面には図 5.4 のような中性子生成器 Neutron Generator(NG) が設置されており、ニッケル上で熱中性子が捕獲される際の $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ の反応により生じる 9.0 MeV のガンマ線を使用してエネルギースケールや一様性を補正する。(図 5.5)

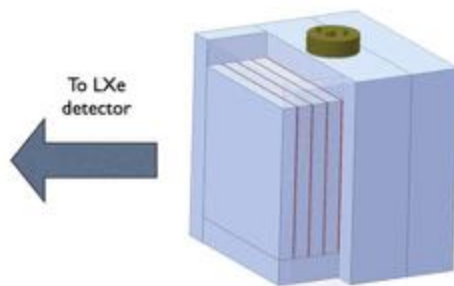
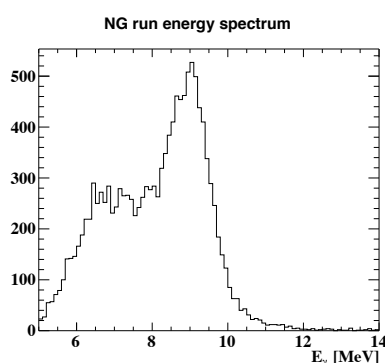


図 5.4 中性子生成器 [21]

図 5.5 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ 反応により生じたガンマ線のスペクトル

5.9 CEX データ取得 (CEX ラン)

CEX ランでは π^- と p の荷電交換反応 (Charge EXchange, CEX) の結果生じるガンマ線を利用して液体キセノン検出器の較正や性能評価を行う。CEX ランでは物理データ取得時とは異なるビームやターゲットを使用する。液体水素ターゲットに π^- ビームを入射すると以下の反応によりガンマ線が放出される。

$$\pi^- p \rightarrow \pi^0 n \quad (5.1)$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (5.2)$$

最初の過程で生成される π^0 のエネルギー E_{π^0} は

$$E_{\pi^0} = \frac{(m_{\pi^-} + m_p)^2 + m_{\pi^0}^2 - m_n^2}{2(m_{\pi^-} + m_p)} = 137.85 \text{ MeV} \quad (5.3)$$

であり、最終的に生成されるガンマ線のエネルギー E_γ は

$$E_\gamma = \frac{E_{\pi^0}}{2} \pm \sqrt{\frac{E_{\pi^0}^2}{4} - \frac{m_{\pi^0}^2}{2(1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})}} \quad (5.4)$$

と表され、特に 180° に放出されるガンマ線対を選択すると 54.9 MeV と 82.9 MeV のガンマ線を得ることができる。この 54.9 MeV というエネルギーは信号事象のエネルギーである 52.8 MeV に近いエネルギー領域であるため液体キセノン検出器の較正に有用である。CEX ランではターゲットを挟んで液体キセノン検出器の反対側に BGO 検出器を設置することで (図 5.7)、 180° のガンマ線対を選択している。液体キセノン検出器の入射面を 24 のパツ

チに分割し、それぞれのパッチに対応する位置に BGO 検出器を移動させることで 180° のガンマ線対を使用しつつ検出器全体をスキャンしている (図 5.6, 図 5.8)。また、BGO 検出器の前面には時間較正用カウンターを設置して

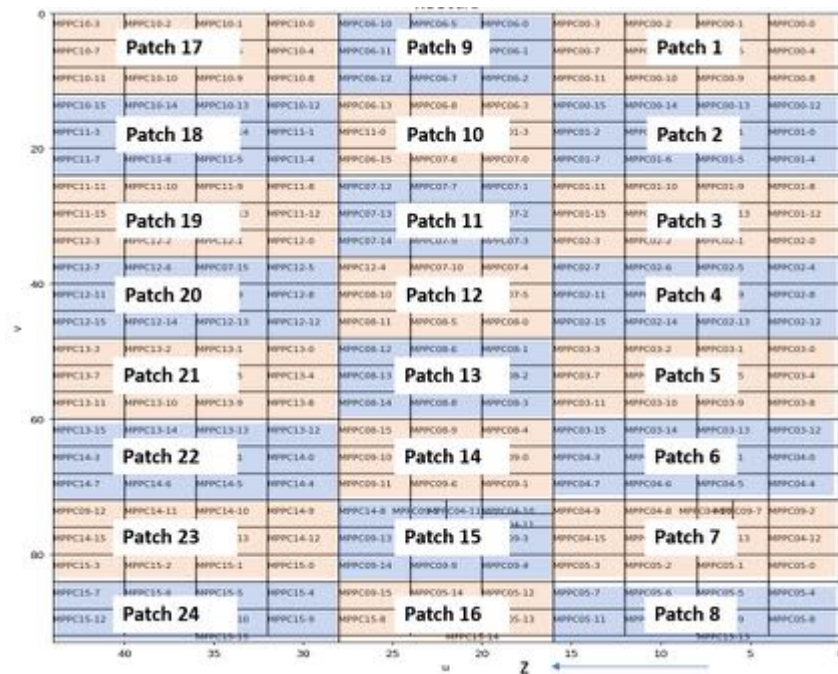


図 5.6 液体キセノン検出器入射面上でのパッチ区分 [20]

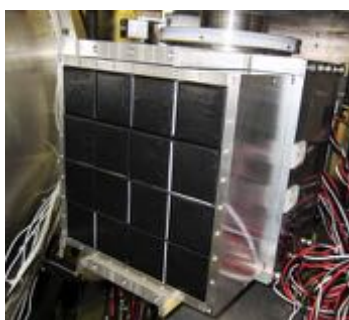


図 5.7 BGO 検出器

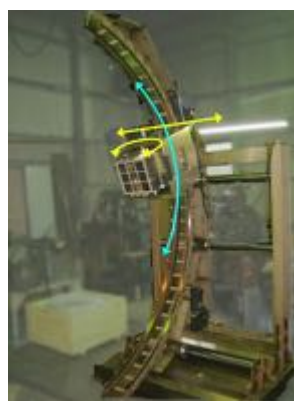


図 5.8 BGO 駆動台

いる (図 5.9)。以下このカウンターをプレシャワーカーと呼ぶ。CEX の過程で生成されるガンマ線は同時に放出されるため、プレシャワーカーを参照点として用いることで液体キセノン検出器の時間較正を行うことができる。

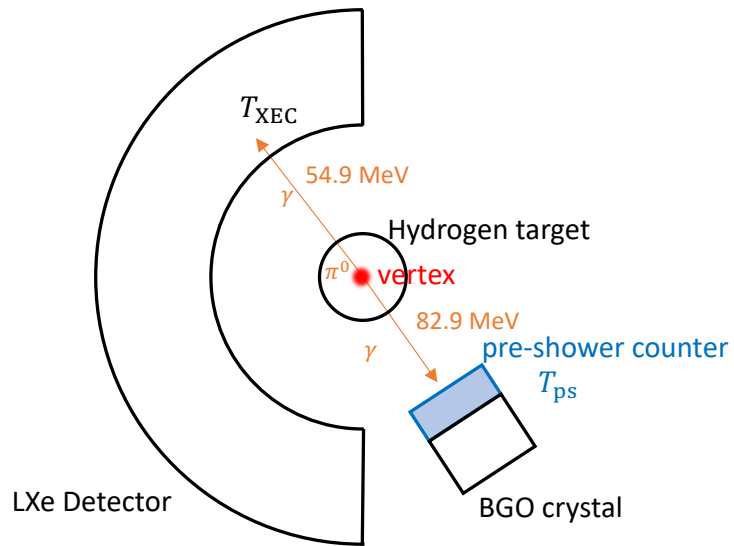


図 5.9 CEX ランセットアップ

第 6 章

2022 年物理ラン中の光センサー較正

6.1 2022 年ビームタイムスケジュール

2022 年物理ランのスケジュールを図 6.1 に示す。2021 年エンジニアリングラン終了後、MPPC の PDE 回復を目的としてアニーリングが行われた。6 月 13 日から液体キセノン検出器の立ち上げ作業を開始し、液体キセノンの検出器への輸送および純化が行われた。7 月 14 日より物理データ取得を開始し、段階的に $3 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ 、 $4 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ および $5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ のビームレートで物理データを取得した。11 月 17 日に物理ランは終了し、12 月 4 日から 12 月 16 日まで液体キセノン検出器の性能評価を目的とする CEX ランを行った。

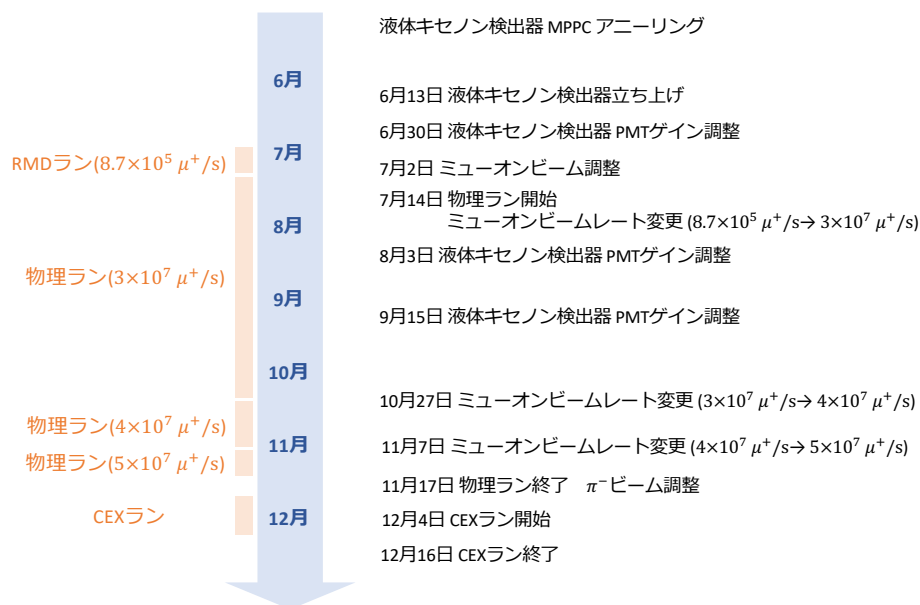


図 6.1 2022 年ビームタイムスケジュール

6.2 ノイズ除去

ペDESTALデータを取得し、あらかじめノイズテンプレートを作成することで、ノイズ除去を行う。ペDESTALデータは周期的に発行されるトリガーを使用して取得される。

ノイズは高周波成分と低周波成分に分類することができる。高周波成分は時間再構成に影響を与え、時間分解能の悪化の原因となる。一方、低周波成分は波形のペDESTALに影響を与え、その結果積分電荷を正しく計算できなくなるためエネルギー分解能を低下させる。液体キセノン検出器では以下に示す 4 種類のノイズを除去している。

6.2.1 セルペDESTAL

各センサーの信号は WaveDREAM 内の DRS(Domino Ring Sampler) を通して読み出される。この DRS は 1024 個のセルから構成されており、あらかじめ使用する電圧領域のオフセットはキャリブレーションされているが、セル間の電圧のオフセットが存在する。このオフセットが低周波のノイズの発生源となるため、ペDESTALデータから各セルの電圧を抽出しテンプレートを作成し、データのノイズ除去の際にはこのテンプレートが差し引かれる (図 6.2)。

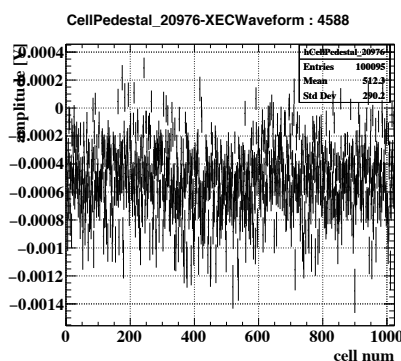


図 6.2 セルペDESTALテンプレート

6.2.2 高周波ノイズテンプレート

WaveDREAM の各ボードには同期用の同位相 80 MHz sine 波がクロック信号として入力されている。クロック信号に同期した高周波のノイズが発生するため、クロック信号に同期したテンプレートを作成し、データから差し引く (図 6.3)。

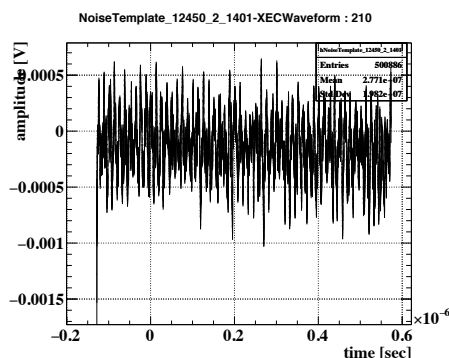


図 6.3 高周波ノイズテンプレート

6.2.3 温度依存ノイズ

DRS のチップ温度に依存して DRS の各セルにはリーク電流が流れている。リーク電流により電圧降下が起こると、ペDESTAL 波形に傾斜が生じる。異なる DRS チップ温度の条件下で収集されたペDESTAL データを用いることで、温度と波形の傾斜の関係をj得て、データ解析の際に補正する (図 6.4)。

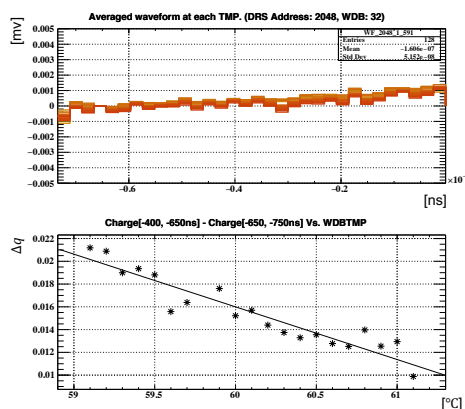


図 6.4 温度依存ノイズテンプレート。上図は横軸が時間、縦軸が電圧を示し、温度依存ノイズテンプレート作成に仕様した各データの平均電圧を示す。なお、色の違いは DRS チップの温度を表している。下図は横軸が DRS の温度、縦軸が上図の -400 ns から -650 ns の領域を積分して求めた電荷と -650 ns から -750 ns の領域を積分して求めた電荷の差を表す。すなわち、下図は DRS 温度とペDESTAL 波形の傾きの関係を示している。

6.2.4 スタートセル依存ノイズ

波形を記録する最初の DRS セルをスタートセルと呼ぶ。DRS 内でインバータ遅延鎖によって作られたサンプリング信号はトリガーがかかると停止し、各コンデンサの電圧情報が読み出される (図 6.5)。この時、トリガーがかかり波形サンプリングが停止するタイミングはインバータ遅延鎖のサイクルとは独立であるため、スタートセルはイベントごとに変動する。原因は不明だが、スタートセルと相関してノイズが生じることがわかっている。スタートセルに依存した波形テンプレートを作成し、データ解析の際に差し引く (図 6.6)。テンプレートの横軸はスタートセルからのセルの距離を示しており、1024 のセルを 8 セルごとにまとめて 128 ビンに分割している。

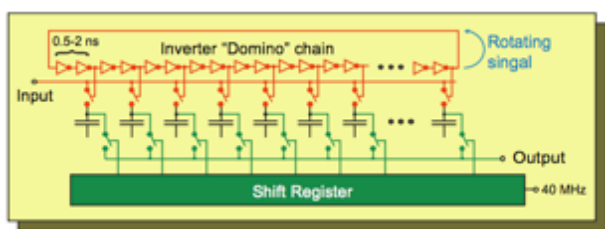


図 6.5 DRS チップ動作原理 [40]

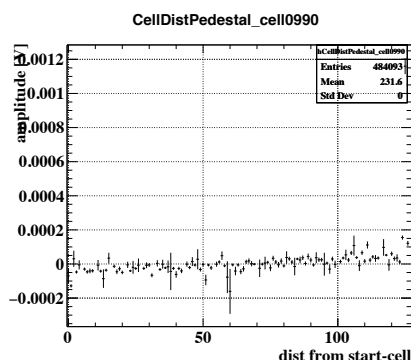
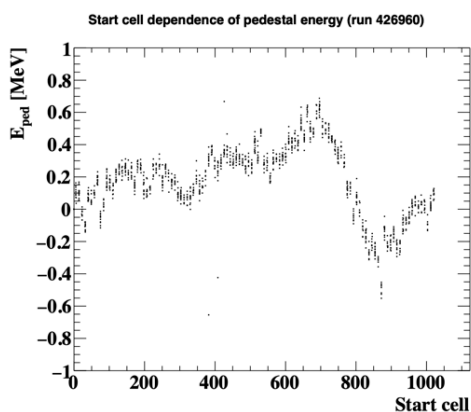


図 6.6 スタートセル依存ノイズテンプレート

図 6.7 はスタートセルノイズテンプレート適用前後のペDESTALデータの再構成エネルギーを示している。スタートセル依存のノイズを補正することでノイズのエネルギーに対する影響が ± 0.1 MeV 以内に抑えられていることがわかる。これは、信号事象エネルギーに対して 0.5% 以下の影響でありエネルギー分解能に比べ十分小さい。

(a)



(b)

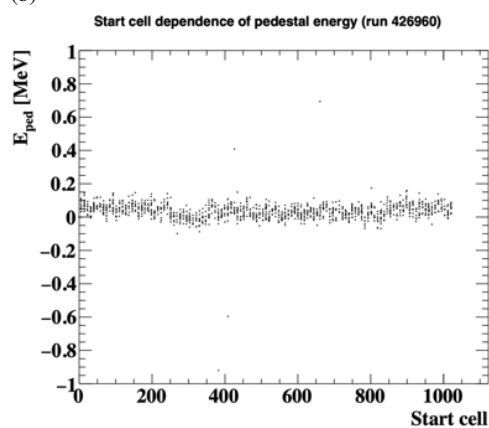


図 6.7 スタートセル依存ノイズの影響。(a) スタートセル依存ノイズ削減前 (b) スタートセル依存ノイズ削減後

上記で示したノイズテンプレートの適用の有無による波形への影響を図 6.8 に示す。この波形は MPPC と PMT それぞれ全センサー波形の和を表している。高周波のノイズが削減され、ペDESTALの 0 からのずれが補正され、また、波形の傾斜も改善していることがわかる。

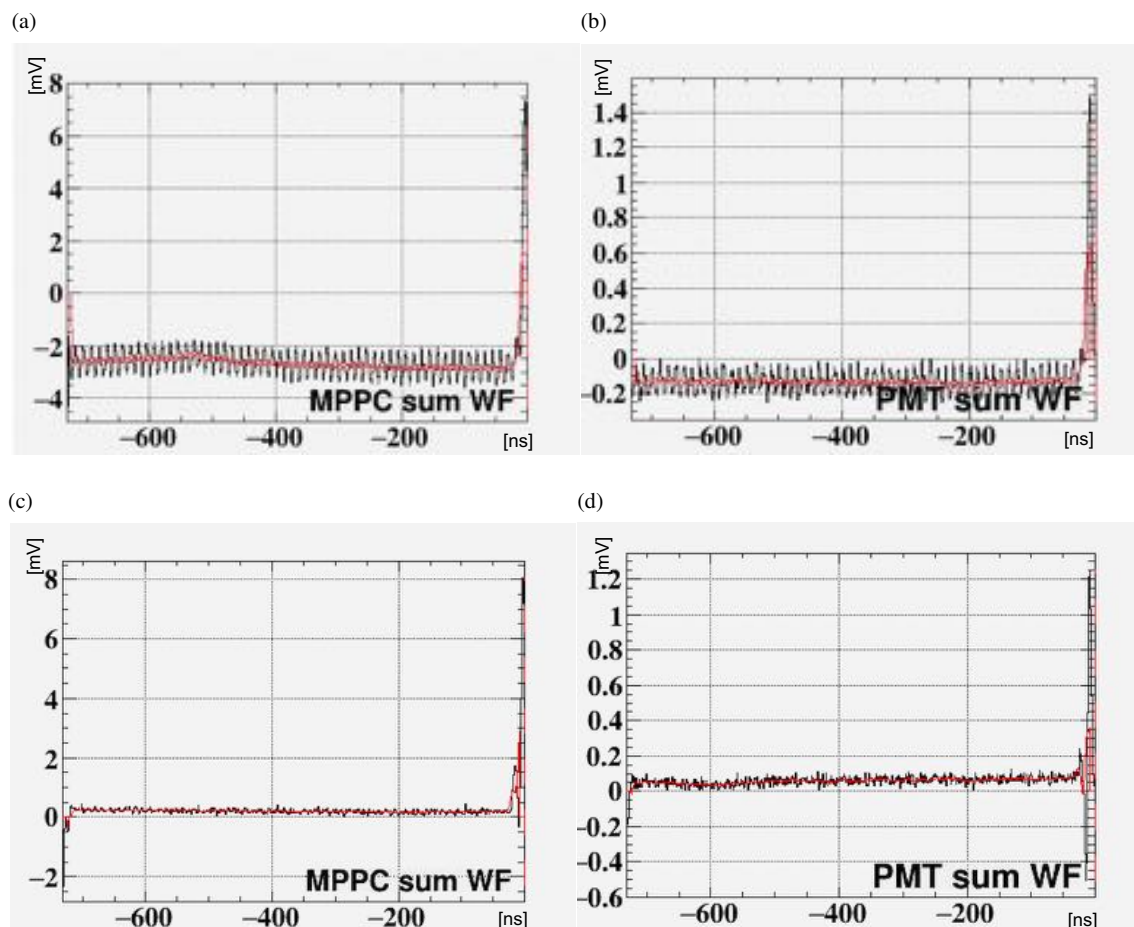
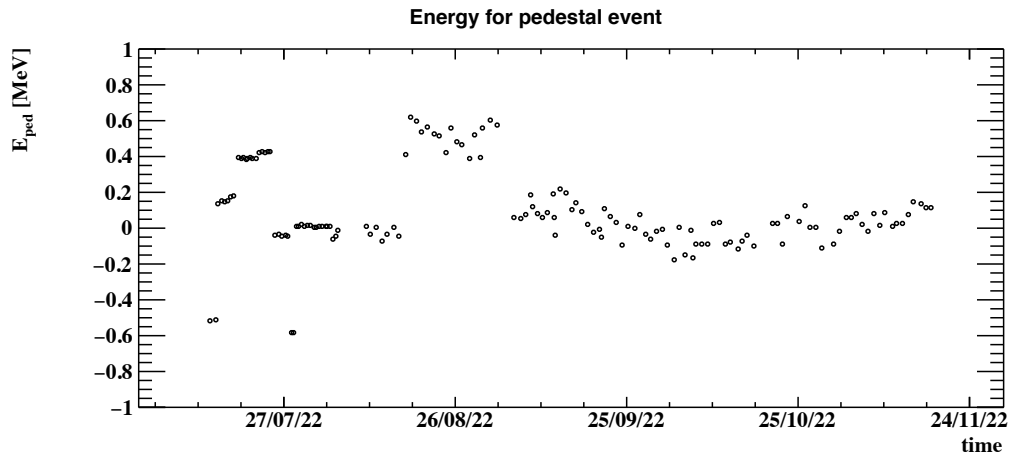


図 6.8 ノイズ削減が波形に与える影響。MPPC および PMT について全センサー波形の和を表す。黒線はローパスフィルタを適用していない波形、赤線はローパスフィルタを適用した波形を表す。(a) ノイズ削減前の MPPC 波形 (b) ノイズ削減前の PMT 波形 (c) ノイズ削減後の MPPC 波形 (d) ノイズ削減後の PMT 波形

図 6.9 に 2022 年物理ラン中のノイズ状況を示す。物理ラン中は定期的にペDESTALデータの波形を確認し、必要に応じてノイズテンプレートを更新している。しかし、現状の更新状況は不十分であり、物理解析開始前にはより短周期でノイズテンプレートを追加する必要がある。現状、物理ランを通してノイズがエネルギー再構成に与える影響は ± 0.7 MeV、すなわち信号事象エネルギーに対して 1.5% である。これは無視できない値であるが、物理ラン中の一部期間についてノイズテンプレートの更新頻度を高め、ノイズ状況の改善を図ったところ、ノイズがエネルギー再構成にあたる影響を 0.03 MeV まで低減させることに成功している (図 6.11)。そのため、今後は全物理ラン期間において同程度のノイズ状況まで改善できる見通しである。図 6.10 はペDESTALイベントに対する再構成エネルギー分布の広がりを見せている。広がり大きな部分でも 0.15 MeV 以下に抑えられている。ペDESTALイベントに対する再構成エネルギー分布の広がりについても、ノイズテンプレートの更新頻度を高めることで 0.09 MeV 以下に抑えられる見通しである (図 6.12(b))。改善後のノイズレベルはエネルギー分解能と比べて十分小さいため問題とはならない。

(a)



(b)

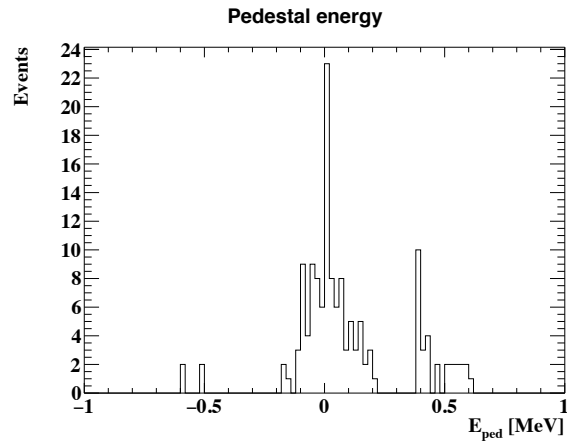
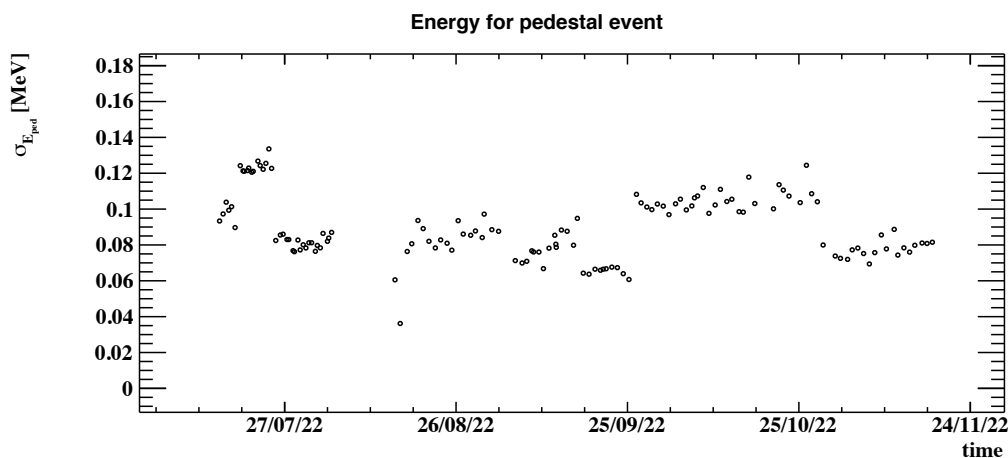


図 6.9 ノイズがエネルギー再構成に与える影響。ペダスタルイベントに対する再構成エネルギーの平均値。物理ラン中は適宜ペダスタルデータの波形を確認してノイズテンプレートの更新を行なっている。物理ラン中に更新したノイズテンプレートを適用済の結果である。(a) 2022 年物理ラン中のノイズ状況の時間変動 (b) ペダスタルイベントに対する再構成エネルギー分布

(a)



(b)

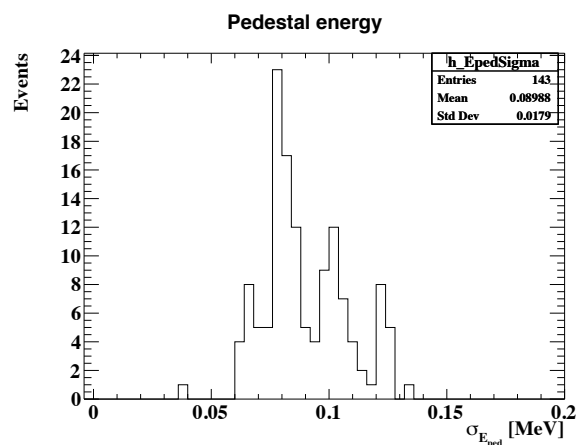
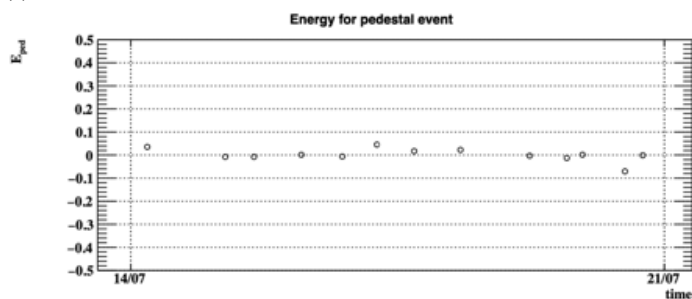


図 6.10 ノイズがエネルギー再構成に与える影響。ペダスタルイベントに対する再構成エネルギー分布の広がり。物理ラン中は適宜ペダスタルデータの波形を確認してノイズテンプレートの更新を行なっている。物理ラン中に更新したノイズテンプレートを適用済の結果である。(a) 2022 年物理ラン中のノイズ状況の時間変動 (b) ペダスタルイベントに対する再構成エネルギーの広がり分布

(a)



(b)

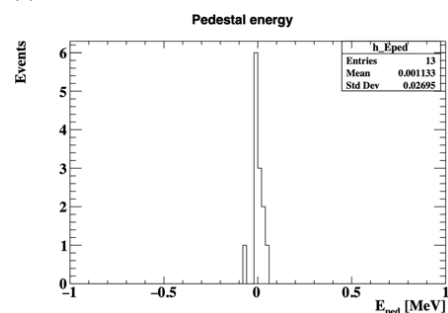


図 6.11 ノイズがエネルギー再構成に与える影響。ペダスタルイベントに対する再構成エネルギーの平均値。ビームタイム終了後に、高頻度にノイズテンプレートを更新しノイズ状況の改善を図った。ペダスタルデータがエネルギー再構成に与える影響は ± 0.1 MeV 以内に抑えることができています。(a) ノイズ状況の時間変動 (b) ペダスタルイベントに対する再構成エネルギー分布

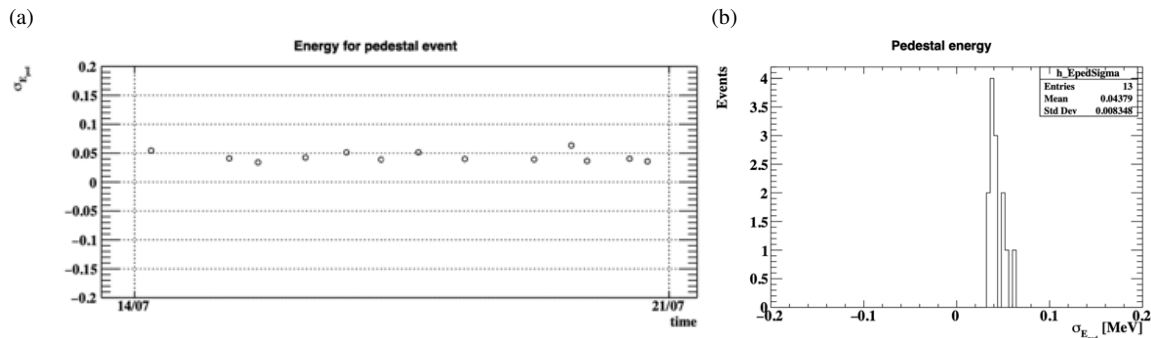


図 6.12 ノイズがエネルギー再構成に与える影響。ペDESTALイベントに対する再構成エネルギー分布の広がり。ビームタイム終了後に、高頻度にノイズテンプレートを更新しノイズ状況の改善を図った。ペDESTALデータに対して再構成したエネルギー分布の広がりには 0.08 MeV 以内に抑えられている。(a) ノイズ状況の時間変動 (b) ペDESTALイベントに対する再構成エネルギーの広がり分布

6.3 PMT ゲイン

6.3.1 PMT ゲイン測定原理

PMT のゲイン G は光子数統計を利用して計算される。一つの PMT で検出される平均光子数 \bar{N}_{pe} は式 6.1 で表される。

$$\bar{N}_{pe} = \bar{N}_{LED} \times \Omega \times PDE \quad (6.1)$$

\bar{N}_{LED} : 光源 (LED) から放出される平均光子数

Ω : 立体角

また、PMT の積分電荷 q は式 6.2 で表される。

$$q = G \times e \times N_{pe} \quad (6.2)$$

式 6.1 および式 6.2 より、PMT の積分電荷分布の広がり σ_q について以下が成立する。ただし、ゲイン分布の広がり σ_G および LED 強度の広がり σ_{LED} は十分小さく、また、光源はポアソン光源として $\sigma_{pe}^2 = \bar{N}_{pe}$ が成立する。

$$\sigma_q^2 = (G^2 + \sigma_G^2) \times e^2 \times (\sigma_{pe}^2 + \sigma_{LED}^2) + \sigma_0^2 \quad (6.3)$$

$$\simeq G^2 \times e^2 \times \bar{N}_{pe} + \sigma_0^2 \quad (6.4)$$

$$= G \times e \times \bar{q} + \sigma_0^2 \quad (6.5)$$

従って、PMT の積分電荷の分散と平均の間の線形性を利用して、LED の強度をスキャンすることでゲインを求めることができる。

6.3.2 PMT ゲイン測定手法

図 4.14 に示した 12 個の LED を光らせて PMT の信号を取得した。LED の強度を 22 段階に変更し、各 LED 強度につき 1000 イベントのデータを取得した。なお、物理データ取得中は物理データ取得時間を削らず、キャリブレーションデータ取得時間を削減する必要があるため、週 3 回のみ 22 段階の LED 強度スキャンを行い、週 4 回は 4 段階の LED 強度のみのデータを取得している。

6.3.3 PMT ゲイン調整原理

6.3.1 節で述べた手法で求めた PMT ゲインを元に、各 PMT の印加電圧を変更し、PMT ゲインの調整を行う。ゲイン調整は 2022 年物理ラン中 3 回行われた。PMT の印加電圧は以下の経験的な式から求められる。

$$G \propto (V - V_0)^k \quad (6.6)$$

V_0 : ツェナーダイオードにおける電圧およびケーブルによる電圧降下。フィット結果から 100 V を使用している。

k : ダイノードの素材や段数に依存する係数。9.5 である。

6.3.4 PMT ゲイン測定結果

2022 年 7 月 23 日に取得されたデータの結果を例に示す。全 22 強度の LED データについて \bar{q} と σ_q^2 の関係をプロットしたものが図 6.13 である。式 6.5 より、図 6.13 を線形フィットした際の傾きから PMT のゲインを求めることができる。

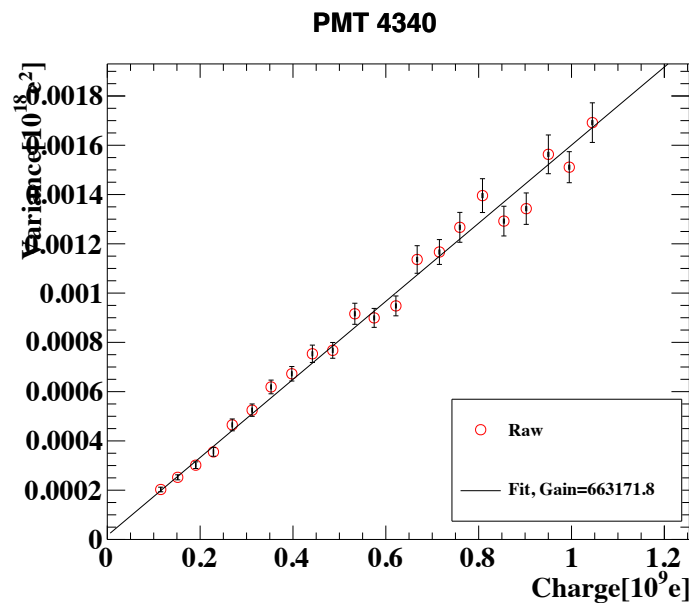


図 6.13 LED 強度スキャンの結果

2022 年物理ラン開始に先立ち、7 月 1 日に PMT の印加電圧を調整し PMT のゲインを 0.8×10^6 に揃えた。まず、ゲイン調整前の 6 月 29 日時点での PMT のゲイン分布を図 6.14 および図 6.15 に示す。6 月 29 日時点での PMT 印加電圧は 2021 年ビームタイム終了時の印加電圧が適用されている。PMT ゲインは 0.8×10^6 から 1.5×10^6 に渡り広く分布している。式 6.6 に従って PMT の印加電圧を調整した結果が図 6.16 および図 6.17 である。PMT の平均ゲインは 0.77×10^6 に揃えることができた。また、検出器応答の一様性を考慮すると PMT のゲインの分布は十分小さくなるのが望ましいが、標準偏差は 0.032×10^6 であり分布の広がりや 4.2% という十分小さな値に抑えることができた。ショートしているなど、何らかの原因で信号が見えないチャンネルについては bad チャンネルとして解析の際に排除される。ゲイン 4.0×10^4 付近に分布が存在するのは bad チャンネルについて一律の値が入れているためであり、ゲインの平均や分散を求める際には bad チャンネルは使用されない。

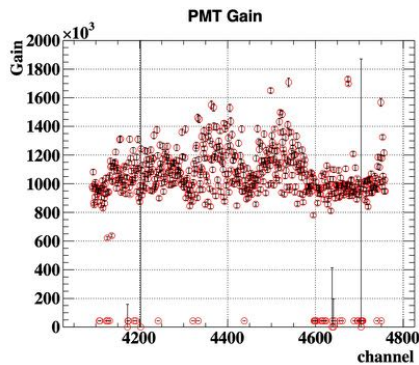


図 6.14 2022 年 6 月 29 日 (run423203-423224) の各 PMT のゲイン

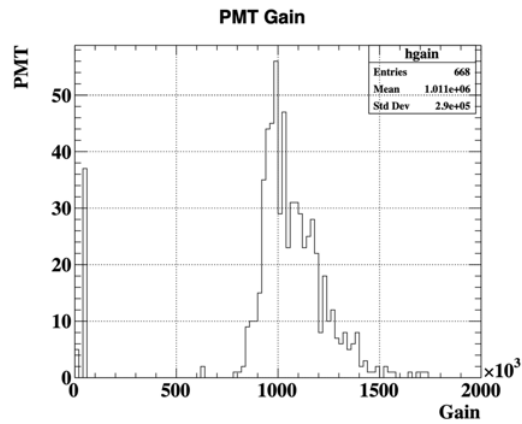


図 6.15 2022 年 6 月 29 日 (run423203-423224) の PMT ゲイン分布

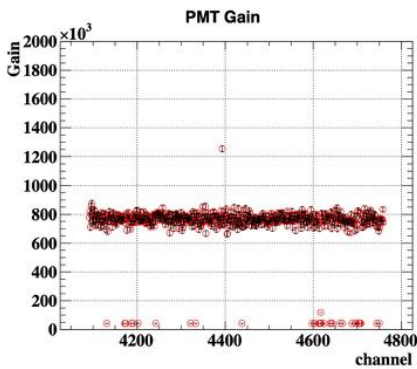


図 6.16 2022 年 7 月 1 日 (run423307-423328) の各 PMT のゲイン

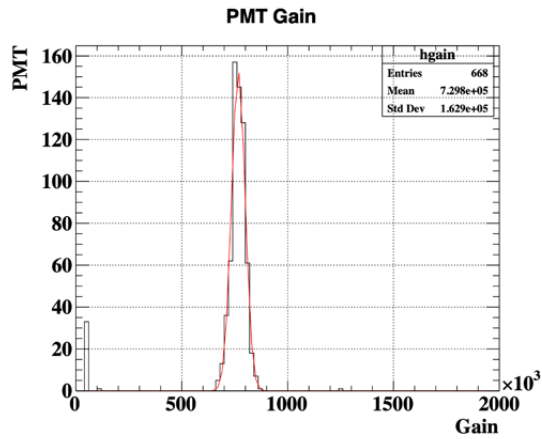


図 6.17 2022 年 7 月 1 日 (run423307-423328) の PMT ゲイン分布

また、PMT ゲインを求める際の LED 強度スキャンデータのイベントディスプレイを図 6.18 に示す。Outer 面の最上部一列の PMT については光量が低いことがわかる。これは検出器内部の液体キセノンが不足しており最上部 PMT 一列分について液体キセノンで満たされていないためだと理解している。液体キセノンの液面の問題については 6.4.2 節で議論する。

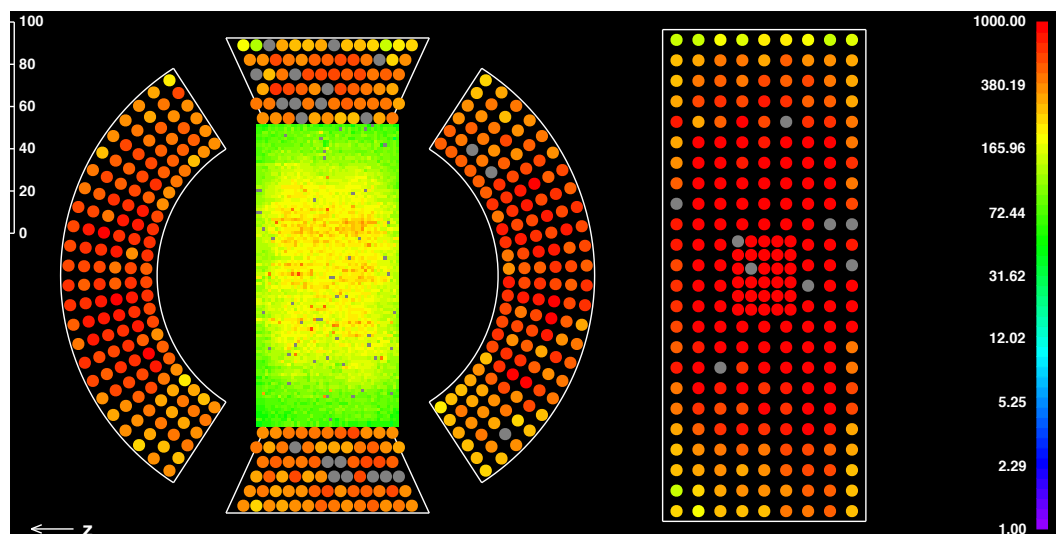


図 6.18 LED データイベントディスプレイ。検出器内部のゲイン較正用 LED を点灯させた時の光量分布を表す。Outer 面最上部の PMT 一列は光量が低く、これは液体キセノンの液面が検出器内最上部まで達していないためだと考えている。

2022 年 6 月 30 日以降の 2022 年ビームタイム中の PMT 平均ゲインの推移を図 6.19 に示す。基本的に毎月の 4 日間程度の短期間の加速器シャットダウン期間中に PMT ゲインの調整を行った。ただし、10 月は PMT ゲインが十分な値に保たれており調整する必要がなかったため、また、11 月は CEX ランの直前であり PMT ゲインの調整により検出器応答の一様性が悪化するリスクを冒すのは得策ではないと判断し、PMT ゲインの調整は行わなかった。図 6.19 で見られるギャップがゲイン調整に対応する。また、7 月 14 日の前後で PMT ゲインの減少速度が異なるのは図 6.1 に示すようにビームレートが変更されたためである。一方で、10 月 27 日にミュオンビームレートが $3 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ から $4 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ に変更された前後や、11 月 7 日に $4 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ から $5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ に変更された前後ではすでにゲインの減少速度が十分小さく、ゲインの減少速度に大きな違いは見られなかった。ビームタイムを通して 0.65×10^6 から 0.80×10^6 の範囲に PMT ゲインは保たれた。

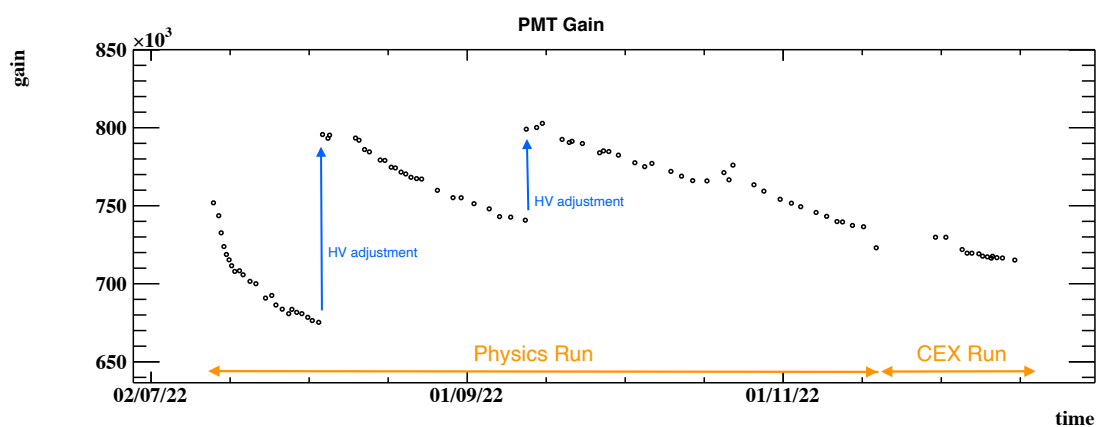


図 6.19 2022 年ビームタイム中の PMT 平均ゲインの推移

6.4 MPPC PDE, PMT QE

6.4.1 PDE, QE 測定原理

PMT QE の較正に関しては、真の PMT QE は一定であると仮定し、本較正で計算した QE の値はキセノン光量に相当するものであると考え、算出された QE をノーマライズすることで光量をモニターしている。

α 線を用いて PDE, QE を測定する際の主なバックグラウンドの要因は宇宙線や環境放射線である。PDE 測定においては専用のトリガーを使用しバックグラウンドと α 線由来のイベントの識別をしている。まず、 α 線源を設置しているワイヤーの端点は検出器の上流側および下流側に固定されているが、ワイヤーの端点の近辺に位置する 32 個の PMT (上流側、下流側各 16 個) の積算波形が閾値を超えたイベントを取得する。また、バックグラウンドイベントを排除するために QA 比を使用する (図 6.20、図 6.22)。QA 比とは信号の電荷と振幅の比のことで、ここでは全 PMT の波形を足し合わせた積算波形の QA 比を使用する。 α 線由来のイベントと宇宙線イベントではエネルギーデポジットの密度の違いにより QA 比が異なる。トリガーが発行される際にもこの QA 比が使用されるが、PDE の解析においても各イベントの QA 比を求め、QA 比が 6 以下のイベントを α 線由来のイベントとして扱うことにする。QA 比の分布を図 6.21 に示す。

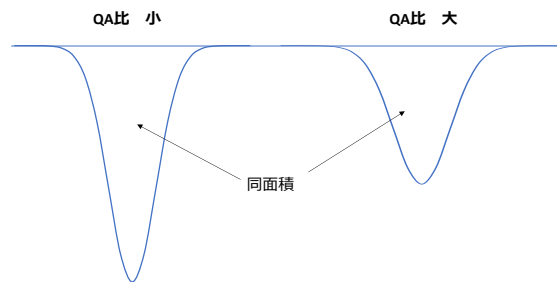


図 6.20 QA 比のイメージ図

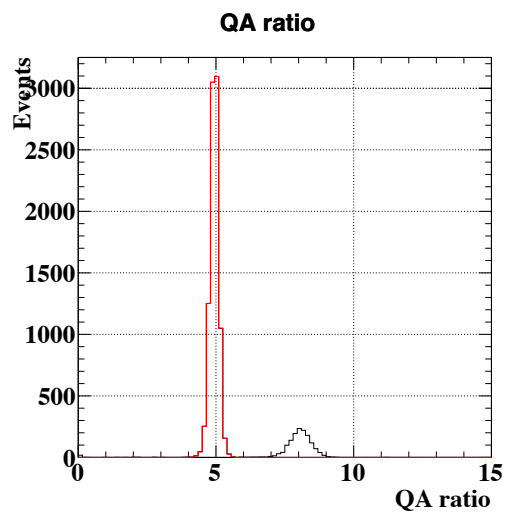
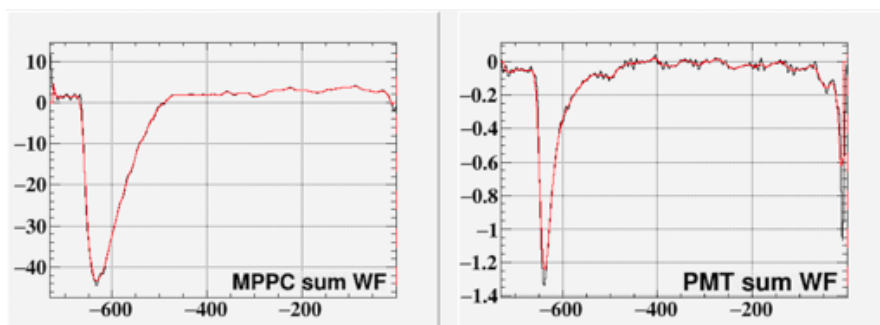


図 6.21 α ラン中のイベントの QA 比分布。図中赤線の領域を α 線由来のイベントとして識別している。

(a)



(b)

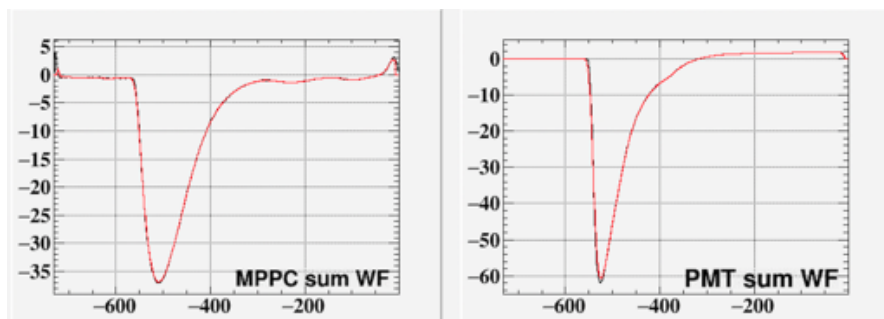


図 6.22 アルファ線イベントと宇宙線イベントの全 PMT 波形の和 (a) アルファ線イベント (b) 宇宙線イベント

^{241}Am 線源の位置と α 線のエネルギーは既知であるため、モンテカルロシミュレーション (MC) から予想検出光電子数を見積もる。その結果と実際にセンサーで検出した光電子数を比較することで PDE、QE を求めることができる (式 6.7)。まず、QE は原理的に時間変動しないと考えられるため、PMT で実際に検出した光電子数から光量の変動を追うことができる。MPPC の場合は PDE も時間変動するので、PMT から見積もった光量変動を考慮に入れて較正する。2021 年ビームタイムと比べて 2022 年の光量は 0.72 倍程度に小さくなっている。以降では 2021 年の光量を 1 に規格化して議論を進める。

$$PDE_{\text{data}} = PDE_{\text{MC}} \times \frac{N_{\text{data}}}{N_{\text{MC}}} \times R_{LY} \quad (6.7)$$

PDE_{data} : 測定した PDE の値

PDE_{MC} : MC シミュレーションで仮定している PDE の値

N_{data} : 実際に検出された光電子数

N_{MC} : MC シミュレーションの結果想定される検出光電子数

R_{LY} : 光量変動による補正係数

実際に、 $N_{\text{data}}/N_{\text{MC}}$ を求める際には、 α 線の放出元となった ^{241}Am 線源ごとに解析する。まず、5 本のワイヤーの内どのワイヤーに設置されている線源由来のイベントであるかを特定する。ワイヤーの端点が固定されている検出器の上流側下流側側面において、ワイヤー端点に近接する 4×4 個の PMT で検出された合計検出光電子数を計算する。各ワイヤーについて両端点の近接 PMT 32 個の合計検出光子数を比較し、光子数が最大のワイヤーを特定する。次にワイヤー内の 5 個の線源の内どの線源由来のイベントであるかを特定する。検出光電子数で重みづけされた PMT の平均位置から z 方向の線源位置を推定する。このようにして線源の位置を再構成した結果が図 6.23 である。それぞれの色は各線源に対応しており、取得されたイベントを放出元の線源ごとに区別できていることがわかる。放出元の α 線源ごとに MC シミュレーションで計算された想定検出光電子数と実際に検出された光電子数を求めプロットしたものが図 6.24 である。この相関係数を式 6.7 の $N_{\text{data}}/N_{\text{MC}}$ として使用する。

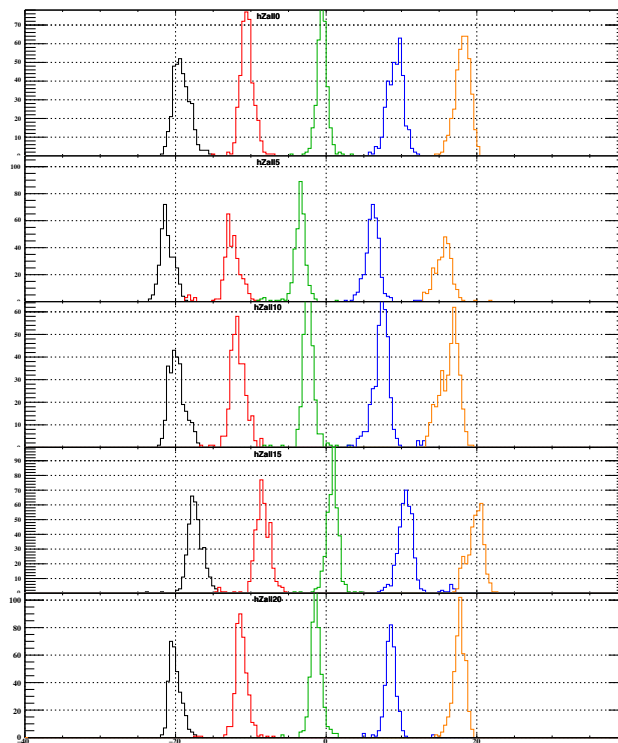


図 6.23 各線源ごとに再構成された z 座標

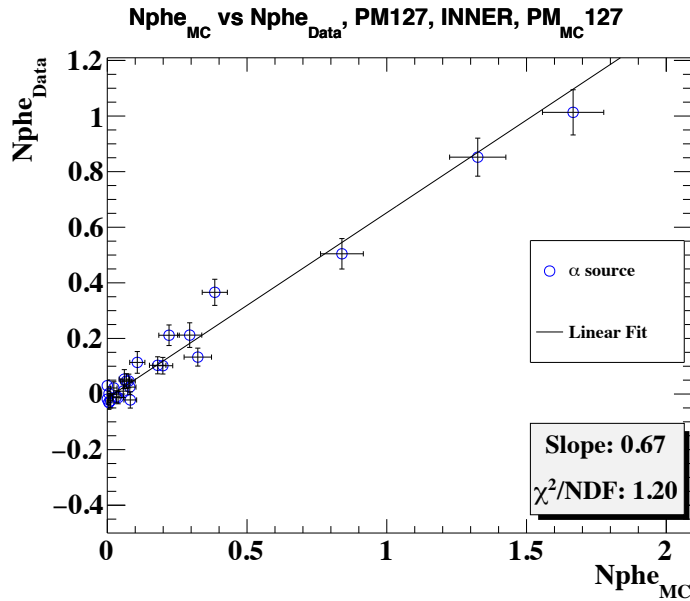


図 6.24 各線源ごとの MC による想定検出光電子数と実際の検出光電子数の関係 (チャンネル 127)

6.4.2 液体キセノン液面に由来する光量の非一様性

PMT での検出光電子数の y 依存性から液体キセノンの液面の高さを見積もることができる。なお、検出器内部には液面計が設置されているが故障により現在は使用することができない。先行研究では、2021 年ビームタイム中は液体キセノン液面が検出器の最上部に達していないことが判明した。2021 年ビームタイム中の液面の高さは 83 cm と推定されている [20](図 6.25)。そのため、2022 年ビームタイム開始時に液体キセノンを新たに追加した上で、液体キセノンの液面の高さを再評価した。

Outer 面 PMT の y 座標と、同じ y 座標の PMT で平均した QE の値を図 6.26 に示す。最上部一列の PMT について検出光量が小さく出ていることがわかる。これは PMT 最上部一列分が液体キセノンに満たされていないためだと考えられる。一方、その他 4 面の PMT については検出光量の y 座標依存性は見られず、液体キセノンで満たされていない PMT は Outer 面の最上部 1 列のみだと考えられる (図 6.27)。その結果、2022 年ビームタイム開始時の液体キセノンの液面は 89 cm と評価した。

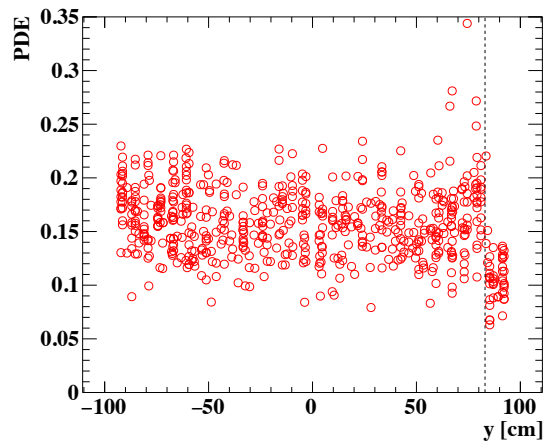


図 6.25 2021 年ビームタイム中の PMT QE と y 座標の関係 [20]

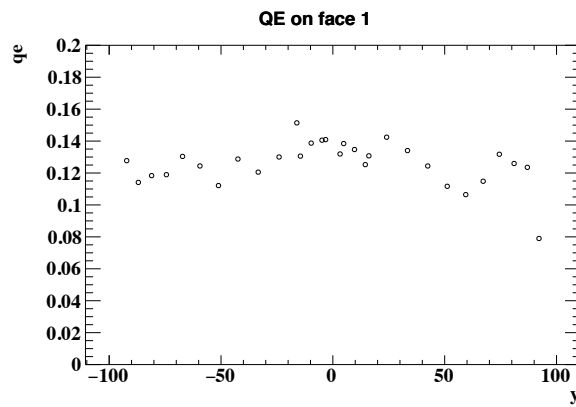


図 6.26 outer 面 PMT の y 座標と QE の関係 (2022 年ビームタイム開始時)。QE は y 座標が等しい PMT 同士で平均値を計算している。

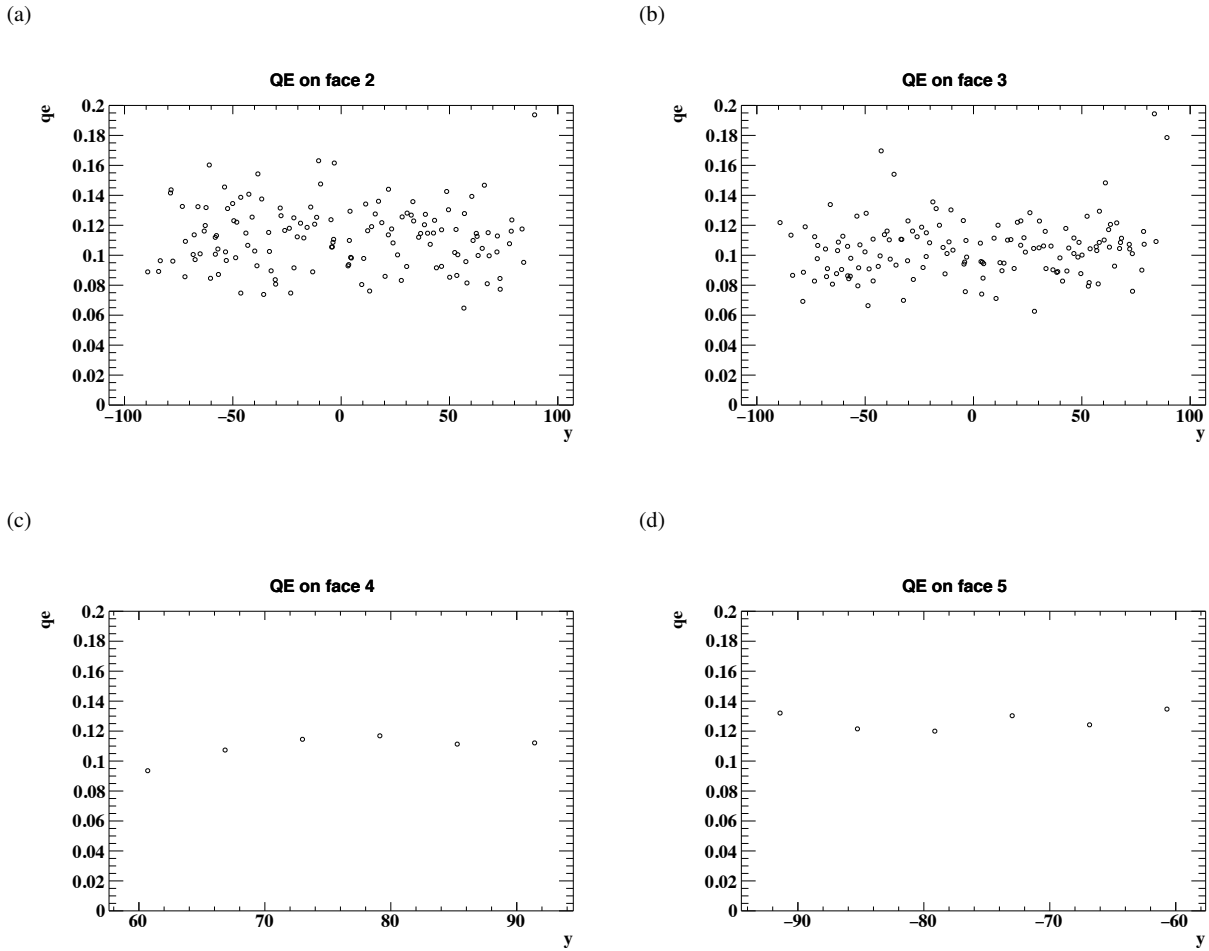


図 6.27 各面の PMT の y 座標と QE の関係 (2022 年ビームタイム開始時)(a) Upstream 面 (b) Downstream 面 (c) Top 面 (d) Bottom 面

なお、2022 年ビームタイム終了時にも再度液体キセノンの液面の高さを求めた (図 6.28)。ビームタイム開始時と同様最上部の PMT 一列分について液体キセノンで満たされていないと考えられ、液面の高さはビームタイム開始時と変わっていないと考えられる。

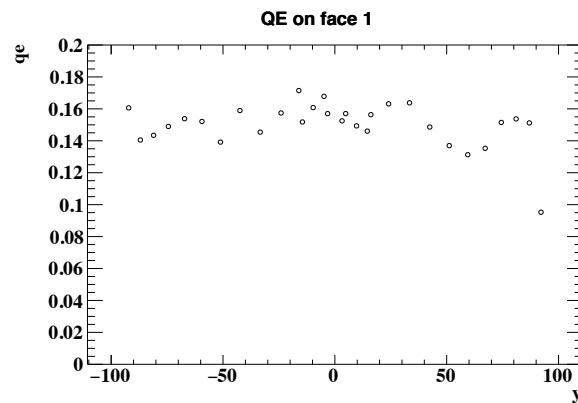


図 6.28 outer 面 PMT の y 座標と QE(2022 年ビームタイム終了時)。QE は y 座標が等しい PMT 同士で平均値を計算している。

なお、2022 年ビームタイム終了後に試験的に約 7 L の液体キセノンを検出器に追加し液面の高さを確認した。液体キセノン追加後の QE の分布が図 6.29 である。検出器最上部の PMT も他の PMT と同程度の検出光電子数を持っていることがわかり、液面は検出器最上部まで達していると考えられる。シャットダウン中に新たに液体キセノンが追加される予定であり、2023 年物理ラン開始時は検出器立ち上げの段階で液面をモニターしつつ液体キセノンを検出器へ輸送することにより、液体キセノンが完全に満たされた状態での物理データ取得を目指す。

また、図 6.26、図 6.28、図 6.29 で平均光量に変化している。図 6.26 から図 6.28 で光量が増しているのは図 6.19 で示したようにビームタイム中にキセノンガスの純化により光量が増したためである。一方、図 6.28 から図 6.29 で光量が減少しているのは検出器に試験的にキセノンガスを追加した際に純化を行っていないため不純物が混入したためだと考えている。

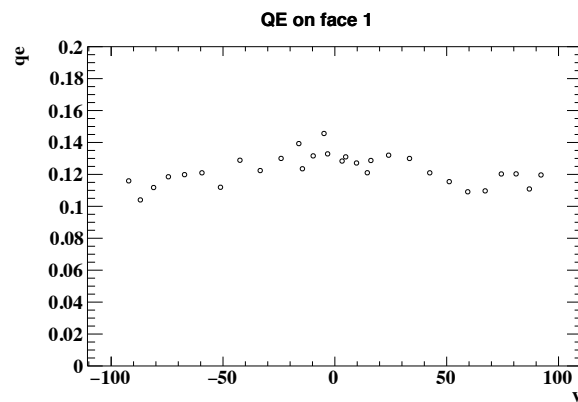


図 6.29 outer 面 PMT の y 座標と QE(2022 年ビームタイム終了後にキセノンを試験的に追加)。QE は y 座標が等しい PMT 同士で平均値を計算している。

6.4.3 液体キセノン純度に起因する光量の時間変動

式 6.7 において、PMT の場合は QE の時間変動は原理的には存在しないと考えられる。よって、 α 線データでの PMT の検出光電子数を用いて光量の変動を追うことができる。

ビームタイム開始直後の検出器立ち上げ時期は光量の変動が大きいことがわかる。図 6.31 に検出器立ち上げ時期の PMT の光量の推移を示す。表 6.1 に 2022 年検出器立ち上げ時の光量変動の要因と考えられる項目を列挙した。6 月 13 日に 2022 年の最初のキャリブレーションデータが取得された。6 月 13 日の光量は 2021 年と比べて 0.73 倍であった。原因としては、シャットダウン中にデュワーにキセノンが保管されている際に不純物が混入し、キセノンが検出器へ輸送される際のゲッターによる純化で不純物を除去しきれなかった (表 6.1, 項目 A)、もしくは、アニリング中に MPPC 内からガスや不純物が出たことで検出器内に不純物が存在したということが考えられる。その後、6 月 14 日から 15 日にかけて光量が大きく減少している。2021 年ビームタイム中に検出器内部の液体キセノンの液面が十分に無かったことを受け、2022 年はキセノンを追加するためにこの高圧ガスタンク内のキセノンを検出器内に新たに追加した。この時、高圧ガスタンク内のキセノンに不純物が混入していたため光量が減少したと考えられる (表 6.1, 項目 B)。その後、液体キセノンの純化とともに光量が回復していることがわかる (表 6.1, 項目 C)。そして、7 月 3 日に 1000L デュワーから検出器へ気体のキセノンを輸送した (表 6.1, 項目 D)。その際に再び光量の減少が見られる。2022 年に新たに追加したキセノンが原因で 1000 L デュワー内に不純物が混入したためだと考えられる。光量の減少が見られたため、7 月 7 日から再び液体キセノンの純化を行なった (表 6.1, 項目 E)。その後、7 月 12 日から 15 日にかけて液純化装置内の液体キセノンを検出器へ回収した。これは、検出器の液面の高さを 6.4.2 節で述べた手法で見積もったところ、検出器最上部の PMT は液体キセノンで満たされていないことがわかったため、液純化装置内の液体キセノンも検出器に戻すことにしたためである。その結果光量は 0.96 倍と減少した。なお、この後もビームタイム中は継続的に気体キセノンの純化は行われている。ビームタイム中光量が上がっているのは気体キセノンの純化により液体キセノン中の酸素などの不純物が取り除かれ、光量が回復しているためだと考えられる。

2022 年物理ラン終了時点でも光量は回復し続けている。2022 年ビームタイムでの経験から、2023 年物理ラン開始時は事前に十分液体キセノンの純化を行う必要がある。

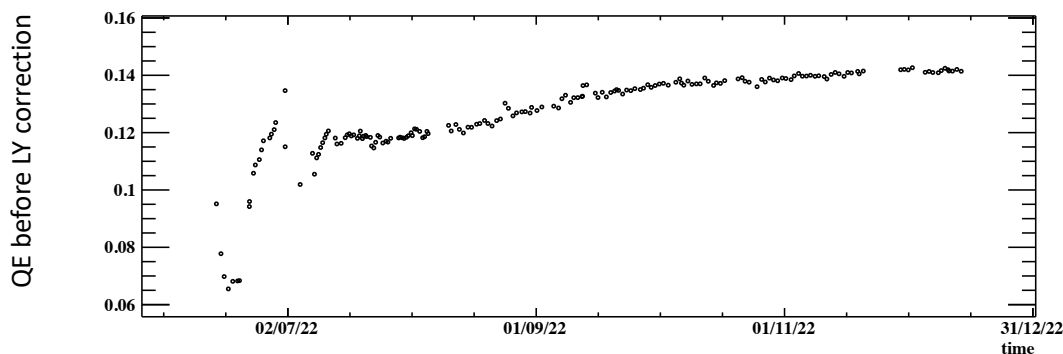


図 6.30 ビームタイム中の光量補正前 QE の推移。この推移は検出光量の変動を表している。

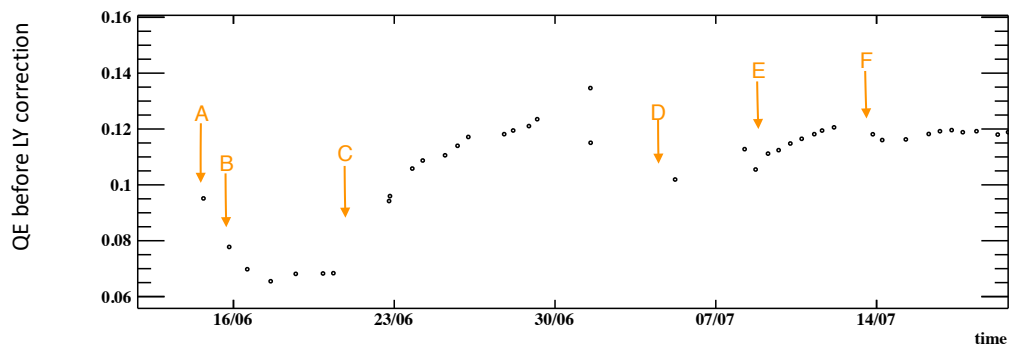


図 6.31 ビームタイム中の光量補正前 QE の推移 (検出器立ち上げ期間)

表 6.1 2022 年液体キセノン検出器立ち上げ時の光量変動の要因

図 6.31 中の記号	日付	操作
A	6 月 11 日 ~13 日	1000L デュワーから検出器へ液体キセノンの輸送
B	6 月 14 日 ~15 日	高圧ガスタンクから検出器へ気体キセノンの輸送
C	6 月 21 日 ~28 日	液体キセノンの液純化
D	7 月 3 日	1000L デュワーから検出器へ気体キセノンの輸送
E	7 月 7 日 ~12 日	液体キセノンの液純化
F	7 月 12 日 ~15 日	液純化装置内の液体キセノンを検出器へ回収

6.4.4 2022 年ビームタイム中の PDE 推移

2022 年ビームタイム中の PDE の推移を図 6.32 に示す。MEG II 実験の過去のエンジニアリングランで発覚しているように、PDE の値はビームタイムとともに減少していることがわかる (図 6.32)。なお、ビームタイム開始直後の PDE の値にばらつきが大きいのは液純化ポンプによるノイズの影響でデータのフィットが正しく行われていないものがあるためである。

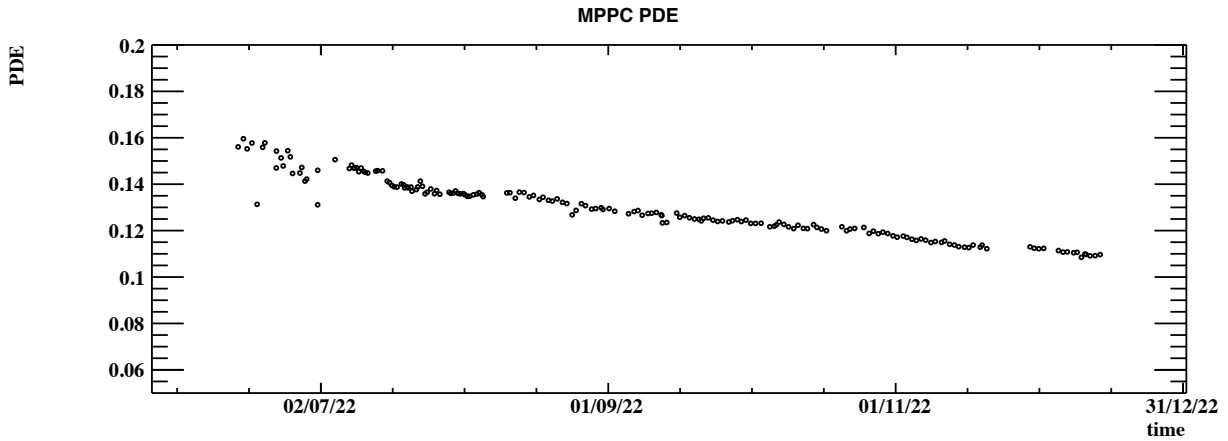


図 6.32 ビームタイム中の PDE の推移

6.4.5 PDE 減少の観点からのビームレートの議論

ビームレートを議論する上で PDE の値および減少速度は考慮すべき事項の一つである。9 月末の時点で MEG II 実験は $3 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ のビームレートでデータ取得を行っていたが、PDE の観点からビームレートを上げることが可能であるかの検討をした。

平均 PDE の推移予測を図 6.33 に示す。 $3 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ のビームレートの時はそれ以前の PDE のプロットを直線フィットした結果を示している。そのほかのビームレートの時は、直線上に推移すると仮定し、直線の傾きはビームレートに比例するとして PDE の予測値を求めた。また、ビームレートの変更は 10 月 1 日に実施されるものと仮定した。9 月末の時点では 2022 年の物理データ取得は 11 月下旬までを想定されており、暫定的に 12 月 1 日時点での PDE の値を求めた。その結果、 $5 \times 10^7 \mu^+/\text{s}$ のビームレートを使用した場合でも物理ラン終了時には 9% 以上の PDE を有すると期待できる。

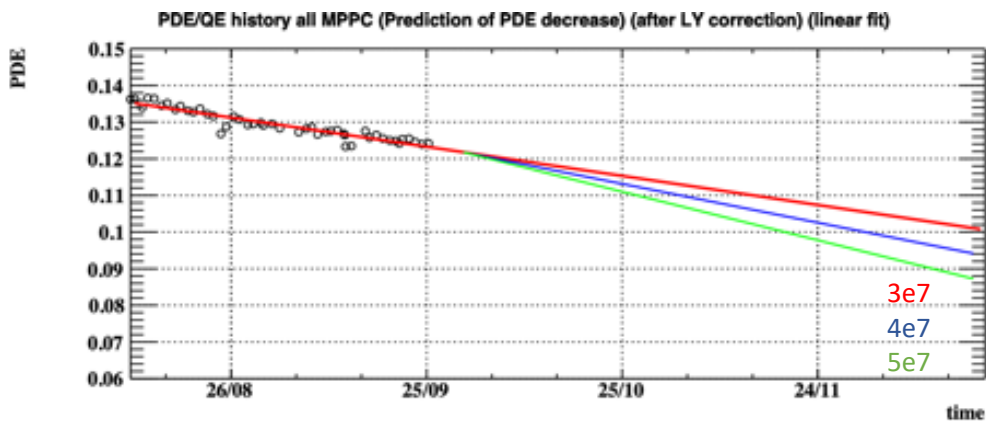


図 6.33 平均 PDE の推移予測

表 6.2 ビームレートを変更した場合の予測 PDE 減少速度および物理データ取得終了時の予測 PDE

ビームレート [μ^+ /s]	予測 PDE 減少速度 [/日]	12 月 1 日時点での予測 PDE
3×10^7	0.00026	0.106
4×10^7	0.00035	0.100
5×10^7	0.00044	0.095

また、各ビームレートを仮定した場合の物理ラン終了時点での予測 PDE のマップを図 6.34 に示す。PDE の減少速度は u 座標に依存しており、これはセンサーの位置によって放射線損傷の度合いが異なることによると考えられる。ビームレート $5 \times 10^7 \mu^+$ /s を使用した場合、PDE の減少速度の位置依存性を考慮しても PDE は物理ラン終了時に十分な値を有すると考えられる。以上より、PDE の状況のみを考慮した場合、10 月上旬に $5 \times 10^7 \mu^+$ /s にビームレートを変更しても 2022 年ビームタイムを完遂することは可能であるという結論を得た。その後、MEG II 実験コラボレーション内での議論の結果、2022 年ビームタイム中に段階的に $4 \times 10^7 \mu^+$ /s と $5 \times 10^7 \mu^+$ /s のビームレートでもデータを取得することが決定した (図 6.1)。

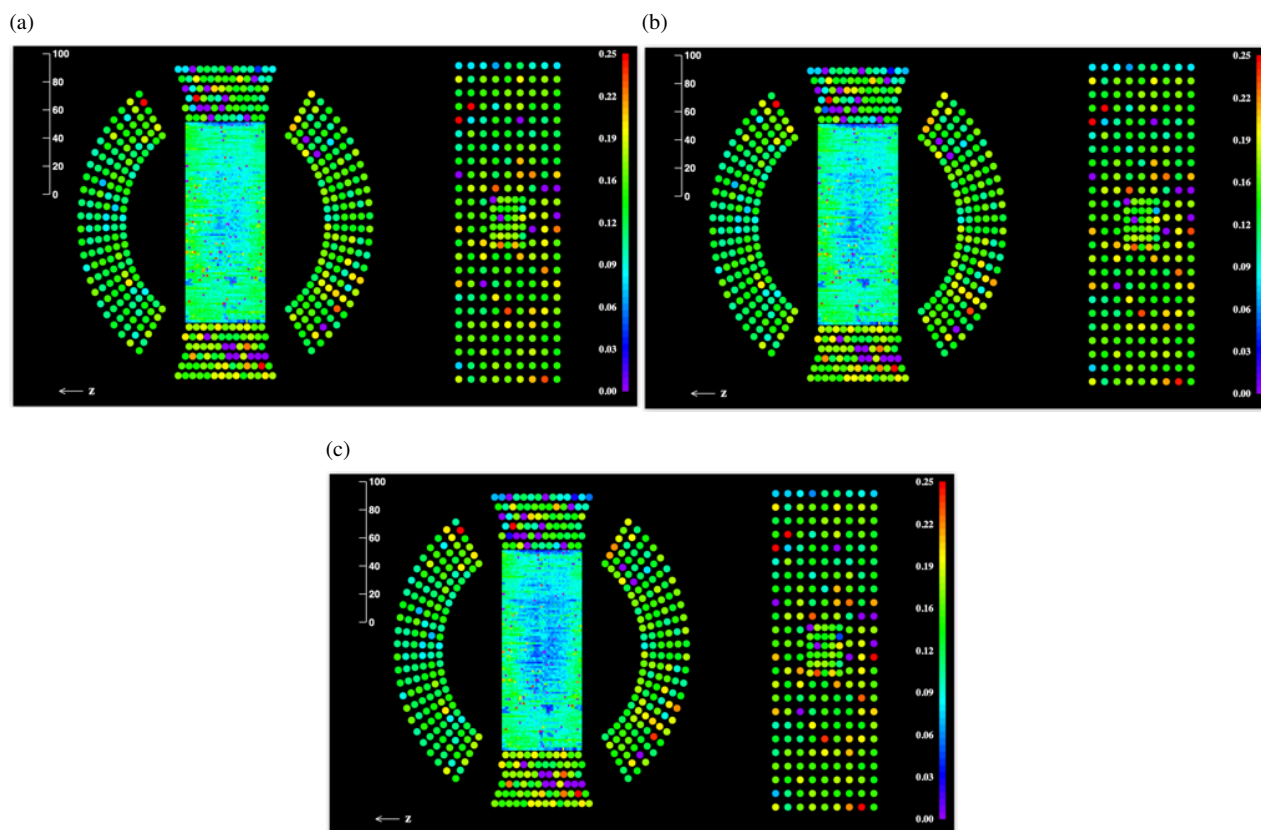


図 6.34 各ビームレートを想定した際の物理ラン終了時の PDE, QE マップ (a) ビームレート $3 \times 10^7 \mu^+$ /s の時の物理ラン終了時想定 PDE, QE (b) ビームレート $4 \times 10^7 \mu^+$ /s の時の物理ラン終了時想定 PDE, QE (c) ビームレート $5 \times 10^7 \mu^+$ /s の時の物理ラン終了時想定 PDE, QE

物理ラン終了時の平均 PDE は 11.1 % であった。ビームレート $4 \times 10^7 \mu^+$ /s では PDE の減少速度は 0.00032 ± 0.00004 /日 であり、ビームレート $5 \times 10^7 \mu^+$ /s では PDE の減少速度は 0.00029 ± 0.00006 /日 であった。特にビームレート $5 \times 10^7 \mu^+$ /s における PDE 減少速度は想定よりも小さいことがわかった。また、ビームタイム開始直後とビームレート $3 \times 10^7 \mu^+$ /s 期間の終盤についてそれぞれ PDE の減少速度を一次元フィットにより求めると

それぞれ 0.00029 ± 0.00003 /日 および 0.00016 ± 0.00001 /日 であり、PDE の減少速度はビームタイム経過とともに小さくなっているため、線形フィットにより予想したことで PDE の減少速度を実際よりも大きく見積もっていたと考えられる。

6.4.6 まとめ・展望

MPPC および PMT のゲインや PDE、光量の較正はエネルギースケールを安定に保ち、物理データ取得においてトリガーのエネルギー閾値を適切に保持するためには必要不可欠である。光センサーの応答は時間変動するため、常にモニターし較正し続ける必要がある。2022年物理ラン中、光センサーの較正を行い続けることで安定的に物理データを取得することができた。

ノイズ環境については、物理ラン中の暫定的なノイズテンプレート更新状況では、エネルギー再構成に与える影響は 1.5% である。

また、PMT ゲインについては PMT への印加電圧を調整することでゲインを 0.8×10^6 に揃え、ゲインの広がり は 4.2% まで抑えることができています。ビームタイム中もゲイン減少をモニターし、適宜印加電圧を調整することでビームタイム全期間に渡り、PMT ゲインを 0.65×10^6 から 0.8×10^6 の範囲内で安定的に運用できた。

PMT を用いた光量のモニタリング結果より、液体キセノンの光量が 2021 年と比べ減少していることが判明した。新たに追加した液体キセノンに混入していた不純物もしくは、アニーリングにより MPPC から放出された不純物により光量が減少したと推測している。また、QE の位置依存性から液体キセノンの液面を推定することができる。現状、Outer 面最上部一列の PMT は液体キセノンで満たされていないことがわかった。

今後は、物理データの解析に向けより詳細なセンサー較正を行う。まず、ノイズテンプレートをより短周期で更新することでノイズ状況の改善を目指す。エネルギー再構成に対する影響として 0.03 MeV まで抑えることができる見通しである。その上で、再度センサーのゲインおよび PDE、光量の較正を行う。また、物理データ取得中もビーム有りの状態で LED データは一定の割合で取得されており、その解析も行う。

さらに、2022年物理ラン中に光量の減少が見られたことから、2023年ビームタイム開始時は十分に液体キセノンの純化を行なった上で物理データの取得を開始する必要がある。シャットダウン中は十分な時間的余裕があり液体キセノン検出器へのキセノン輸送を早めに開始することで純化の時間を確保することが可能である。また、液体キセノンの液面が検出器最上部まで達していないことから、シャットダウン中に液体キセノンが追加される予定であり、2023年は検出器応答の一様性の改善が期待される。

第7章

液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価原理

7.1 CEX ランセットアップ

$\mu \rightarrow e\gamma$ 事象では陽電子とガンマ線が同時に放出される。そのため、ターゲット上での陽電子とガンマ線の放出時間差 $t_{e\gamma}$ を精度よく求める必要がある。以降では液体キセノン検出器の時間分解能評価について述べる。

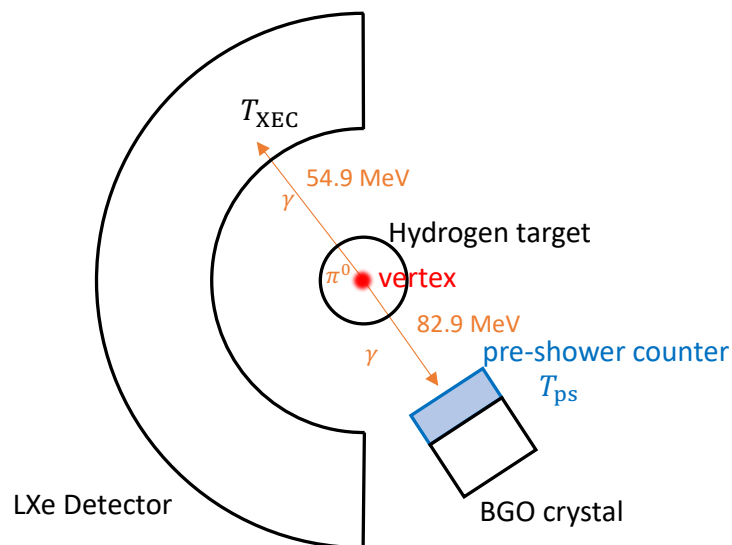


図 7.1 CEX ランセットアップ

CEX ランのセットアップを図 7.1 に示す。先述の通り、液体キセノン検出器の反対側に BGO 検出器を設置し、CEX 反応の結果 180° の角度で放出されるのガンマ線対を使用して液体キセノン検出器の時間較正および時間分解能評価を行う。BGO 検出器は 16 個の BGO 結晶から成る。各結晶の大きさは $46 \times 46 \times 200 \text{ mm}^3$ で、 4×4 で並べられている。また各結晶に取り付けられている PMT を通してシンチレーション光を読み出している。BGO 検出器の前面にはプレシャワーカウンターが設置されている (図 7.2、図 7.3)。

液体水素ターゲットの構造を図 7.4 に示す。2.5 気圧の気体水素のバッファータンクがターゲット部分に繋がれている。冷却が進み圧力が低下すると水素が液化し、その際の圧力減少からターゲットの液量を推定することができる (図 7.5)。CEX ランのパッチスキャンデータ取得ではターゲット圧力が 2.1 bar に達した時点でデータ取得を開始した。また、冷却を終了すると、安定に気体に戻る。液体水素ターゲットの冷却には問題があり、CEX ラン中

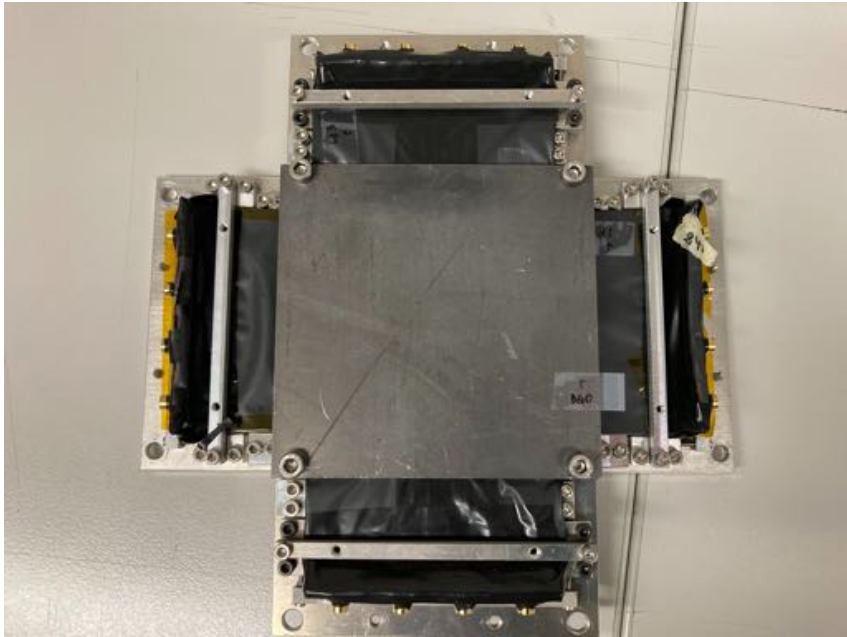


図 7.2 プレシャワーカウンター



図 7.3 BGO 検出器前面に取り付けられたプレシャワーカウンター

ターゲットは安定ではなかった。また、ターゲットは完全に液体水素で充填されている状態ではなかった。

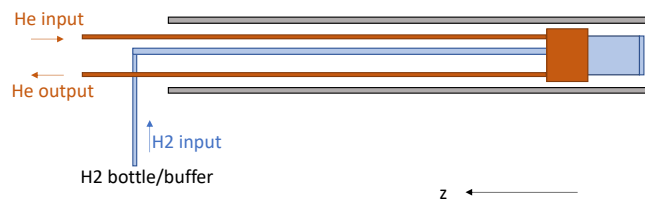


図 7.4 液体水素ターゲット



図 7.5 液体水素ターゲット内水素圧力の時間推移 (2022 年 CEX ラン)。青線が気体水素の圧力、緑線が気体ヘリウムの圧力を示す。一度ターゲットの冷却が開始すると 2-3 時間の冷却の後にターゲットの液化が開始され、ターゲット内の液体水素が十分な量に達した時点で DAQ を開始し、12 時間程度 DAQ を継続した後にターゲットの昇温により DAQ を中断するというサイクルで DAQ が行われた。

7.2 時間分解能評価方法

ターゲットから 180° の角で放出されるのガンマ線対のプレシャワーカーンターでのガンマ線ヒットタイミングと液体キセノン検出器で再構成されたガンマ線のヒットタイミングの時間差分布から以下のように液体キセノン検出器の時間分解能 σ_{LXe} を評価することができる。

$$\sigma_{\text{LXe}} = \sigma(T_{\text{LXe}} - T_{\text{ps}} - T_{\text{TOF}}) \ominus \sigma_{\text{ps}} \ominus \sigma_{\text{vertex}} \quad (7.1)$$

ここで、 T_{LXe} は液体キセノン検出器で再構成されたガンマ線ヒットタイミング、 T_{ps} はプレシャワーカーンターで再構成されたガンマ線ヒットタイミング、 T_{TOF} はガンマ線の飛行時間 time of flight (TOF)、 σ_{ps} はプレシャワーカーンターの時間分解能を表す。 π^- と p の CEX 反応において π^0 が生成され、その π^0 からガンマ線が放出されるが、その際の π^- ビームの大きさと π^- のガンマ線崩壊位置へ広がる効果を σ_{vertex} とする。 T_{TOF} はターゲット中心位置の測定値と液体キセノン検出器およびプレシャワーカーンターで再構成されたガンマ線ヒット位置の距離から求める。そのため、液体キセノン検出器の時間分解能評価では σ_{vertex} を差し引く必要がある。

第 8 章

ガンマ線放出位置の広がり σ_{vertex} の測定に関する検出器開発と較正・性能評価および σ_{vertex} 測定結果

8.1 ガンマ線放出位置の広がり (σ_{vertex}) 測定原理

液体キセノン検出器の時間分解能評価では σ_{vertex} を求める必要がある。液体キセノン検出器の時間分解能は概算値として 50–70 ps 程度と見積もられている。一方、 σ_{vertex} は 50 ps 程度の寄与があると予測されており、液体キセノン検出器の時間分解能評価において σ_{vertex} が与える寄与が大きいため精度よく求めることが重要である。2020 年 CEX ランでは σ_{vertex} は MC シミュレーションの結果を使用し、実測はされなかった。2021 年 CEX ランでは新たに σ_{vertex} の測定方法を確立した。そして、2021 年および 2022 年の CEX ランでは実測された σ_{vertex} を用いて液体キセノン検出器の時間分解能を評価した。

σ_{vertex} 測定のセットアップを図 8.1 に示す。 σ_{vertex} 測定では液体キセノン検出器の前面にリファレンスカウンターを設置する (図 8.2)。プレシャワーカウンターとリファレンスカウンターの時間分解能はカウンター内の 2 枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布から求めることができるため、これらのカウンターにおけるガンマ線のヒットタイミングの時間差の分布から σ_{vertex} を求めることが可能である (図 8.3)。この手法を方法 1 と呼ぶことにする。

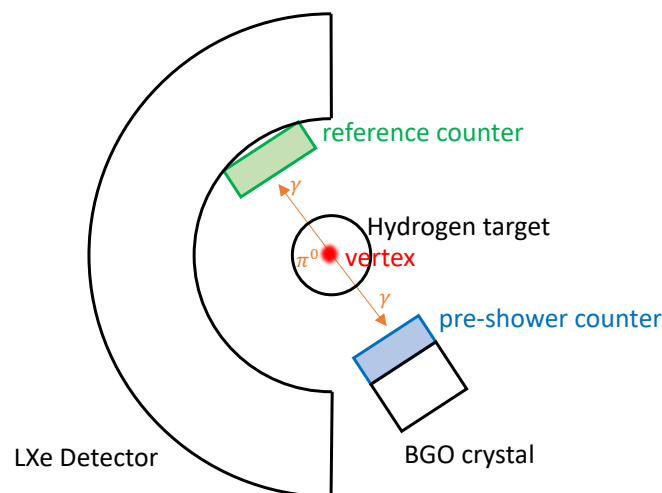


図 8.1 σ_{vertex} 測定セットアップ



図 8.2 液体キセノン検出器の前面に設置されたリファレンスカウンター

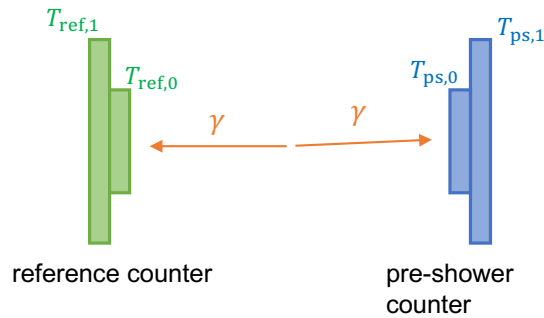


図 8.3 σ_{vertex} 測定原理

$$\sigma_{\text{vertex}} = \sigma(T_{\text{ps}} - T_{\text{ref}}) \ominus \sigma_{\text{ps}} \ominus \sigma_{\text{ref}} \quad (8.1)$$

$$\sigma_{\text{ps}} = \sigma\left(\frac{T_{\text{ps},0} + T_{\text{ps},1}}{2}\right) = \sigma\left(\frac{T_{\text{ps},0} - T_{\text{ps},1}}{2}\right) \quad (8.2)$$

$$\sigma_{\text{ref}} = \sigma\left(\frac{T_{\text{ref},0} + T_{\text{ref},1}}{2}\right) = \sigma\left(\frac{T_{\text{ref},0} - T_{\text{ref},1}}{2}\right) \quad (8.3)$$

$T_{\text{ps}}, T_{\text{ref}}$: プレシャワーカウンター (リファレンスカウンター) のガンマ線ヒットタイミング

$T_{\text{ps},i}, T_{\text{ref},i}$: プレシャワーカウンター (リファレンスカウンター) の i 番目のプレートでのガンマ線ヒットタイミング ($i = 0, 1$)

カウンター間の時間差ではなくプレート間の時間差を用いて σ_{vertex} を求めることもできる。この手法を方法 2 と呼ぶことにする。方法 1 と方法 2 では原理的には同等の方法であり、基本的には方法 1 で求めた結果を採用することにするが、確認のため方法 2 での結果も併記する。方法 2 では以下のようにプレートの組み合わせを変えてプ

レート間の時間差を求めることで σ_{vertex} を求める。

$$\sigma_{\text{vertex}}^2 = 2\sigma^2 \left(\frac{T_{\text{ps},0} + T_{\text{ps},1}}{2} - \frac{T_{\text{ref},0} + T_{\text{ref},1}}{2} \right) - \frac{\sigma^2 (T_{\text{ps},0} - T_{\text{ps},1}) + \sigma^2 (T_{\text{ps},1} - T_{\text{ps},0}) + \sigma^2 (T_{\text{ps},0} - T_{\text{ps},1}) + \sigma^2 (T_{\text{ps},1} - T_{\text{ps},0})}{4} \quad (8.4)$$

なお、式 8.4 は以下の式を σ_{vertex} について解くことで求まる。

$$\sigma \left(\frac{T_{\text{ps},0} + T_{\text{ps},1}}{2} - \frac{T_{\text{ref},0} + T_{\text{ref},1}}{2} \right) = \frac{\sigma_{\text{ps},0} \oplus \sigma_{\text{ps},1} \oplus \sigma_{\text{ref},0} \oplus \sigma_{\text{ref},1}}{2} \oplus \sigma_{\text{vertex}} \quad (8.5)$$

$$\sigma (T_{\text{ps},0} - T_{\text{ref},0}) = \sigma_{\text{ps},0} \oplus \sigma_{\text{ref},0} \oplus \sigma_{\text{vertex}} \quad (8.6)$$

$$\sigma (T_{\text{ps},1} - T_{\text{ref},1}) = \sigma_{\text{ps},1} \oplus \sigma_{\text{ref},1} \oplus \sigma_{\text{vertex}} \quad (8.7)$$

$$\sigma (T_{\text{ps},0} - T_{\text{ref},1}) = \sigma_{\text{ps},0} \oplus \sigma_{\text{ref},1} \oplus \sigma_{\text{vertex}} \quad (8.8)$$

$$\sigma (T_{\text{ps},1} - T_{\text{ref},0}) = \sigma_{\text{ps},1} \oplus \sigma_{\text{ref},0} \oplus \sigma_{\text{vertex}} \quad (8.9)$$

8.2 プレシャワーカウンター製作

σ_{vertex} 測定ではプレシャワーカウンターとリファレンスカウンターの2つのカウンターが必要である。リファレンスカウンターはプレシャワーカウンターと同じ構造をしている。2020年 CEX ランで使用されているカウンターも使用可能であるため、2021年の σ_{vertex} 測定では新たにもう一つカウンターを製作する必要があった。本章ではリファレンスカウンターの製作およびラボでの事前性能評価について述べる。

8.2.1 デザイン

カウンターは2枚のプラスチックシンチレーター板と鉛コンバーターから構成される。シンチレーター板の大きさは $80 \times 175 \times 5 \text{ mm}^3$ であり、2枚シンチレーター板を直交して重ねる(図 8.4)。その上に $80 \times 80 \times 4 \text{ mm}^3$ の鉛コンバーターが設置される。先行研究の結果、シンチレーター板の末端領域では時間分解能および位置分解能が悪化することが判明している。そのため、横長のシンチレーター板を直交するように重ね、共通領域のみを使用することで分解能の位置依存性を軽減している。シンチレーション光はシンチレーター板の両端に設置された MPPC で読み出される。使用した MPPC の型番は S14160-3050HS である。シンチレーター板の一端には20個の MPPC が接着され、5個ずつ直列接続され4チャンネルで読み出される。

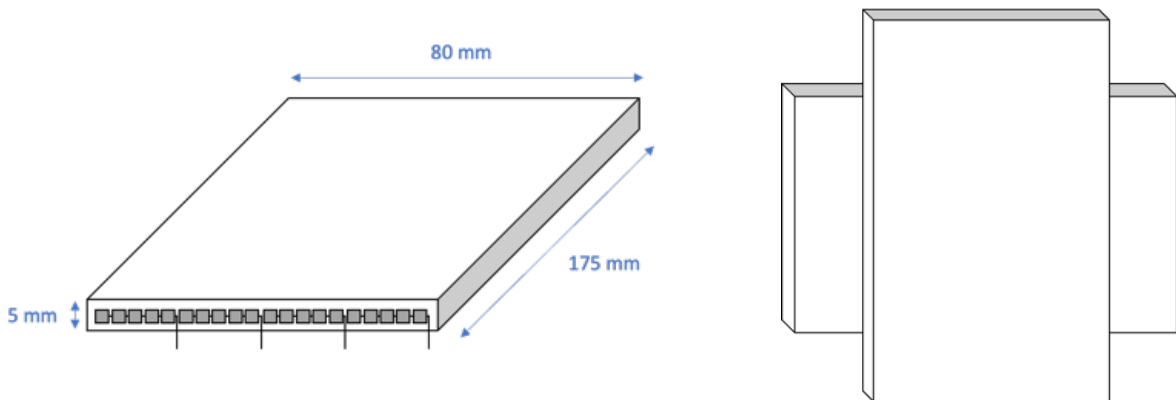


図 8.4 カウンターの構造

8.2.2 MPPC I-V 測定

カウンター製作時の MPPC の配置を最適化するために MPPC の I-V 応答を測定した。MPPC の性能はオーバー電圧に依存する。そのため、I-V 応答の挙動が近い MPPC を選択し 5 個ずつ直列接続することでカウンターの性能に位置依存性が生じる事を防いでいる。新たなカウンターの製作には 80 個の MPPC が必要であるが、195 個の MPPC を用意し、挙動が近い MPPC をグルーピングし、80 個の MPPC を選択した。

I-V 応答の測定のために用意した MPPC は以下の通りである。

表 8.1 I-V 測定に使用した MPPC サンプル

型番	シリアル番号	個数	コメント
S14160-3050HS	79480-79524	45	カウンター製作以前から存在
S14160-3050HS	87216-87365	150	カウンター製作時に新たに納品

I-V 測定時は MPPC を 25 °C の恒温槽に設置する。そして、MPPC に 35V から 45V まで電圧を印加し、電流値を測定した。得られた各 MPPC の I-V 曲線を以下の関数でフィットした (図 8.5)。

$$I(V) = \begin{cases} a \times (V - b)^2 + c & (b \leq V) \\ c & (V < b) \end{cases} \quad (8.10)$$

なお、フィット関数中の b がブレイクダウン電圧 V_{break} であり、 $V_{\text{break}} + 5 \text{ V}$ をオペレーション電圧 V_{op} とする。I-V 応答が近い MPPC を選択するために、 i 番目の MPPC と j 番目の MPPC の挙動の違いを以下の $d_{i,j}$ という指標を用いて評価する。ただし w は値のオーダーを合わせるための便宜的なパラメータである。

$$d_{i,j} = \sqrt{w_{i,j,0} \times (I_{\text{op},i} - I_{\text{op},j})^2 + w_{i,j,1} \times \left(\frac{dI_{\text{op}}}{dV_i} - \frac{dI_{\text{op}}}{dV_j} \right)^2} \quad (8.11)$$

なお、オペレーション電圧における I-V 曲線の傾きは $V = V_{\text{op}}$ 付近で以下のように直線フィットして求める (図 8.5)。

$$\frac{dI_{\text{op}}}{dV} = d \times V_{\text{op}} + e \quad (8.12)$$

グループ内の MPPC について $d_{i,j}$ を足し合わせて d を求め、 d が最小になるように MPPC をグルーピングする。

$$d = \sum_i \sum_j d_{i,j} \quad (8.13)$$

測定の結果、以前から所持していたシリアル番号 79480-79524 の MPPC と新たに用意したシリアル番号 87216-87365 の MPPC ではブレイクダウン電圧に 0.2V 程度の系統的な差が見られた。データシートの値も同様の差が存在しているため、リファレンスカウンターの製作においてはシリアル番号 87216-87365 のみを使用することにした。

I-V 測定の結果挙動が近い MPPC を 5 個ずつ選択し、カウンター製作時に直列接続する MPPC の組み合わせを決定した。また、各チャンネルに印加する電圧もこの I-V 測定により決定した。

8.2.3 製作工程

PCB に半田付けされた MPPC をオプティカルセメントでシンチレーター板の両端に接着した。その後、シンチレーター板をリフレクターとブラックシートで包みコネクタ付近はブラックテープで遮光した (図 8.6、図 8.7)。

以降、プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの各シンチレーター板を区別するため表 8.2 のように id を指定する。

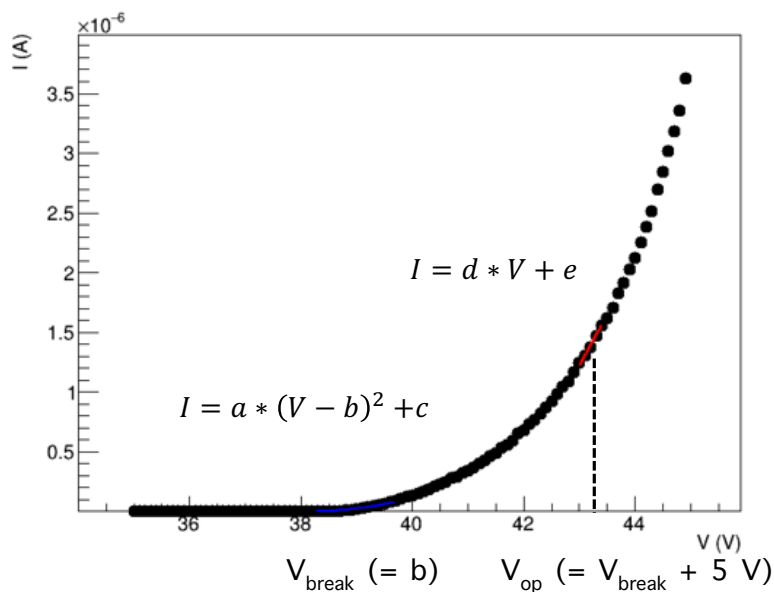


図 8.5 I-V 曲線の例

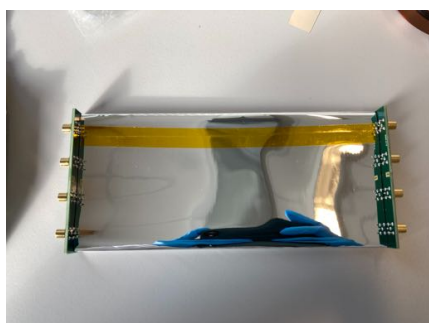


図 8.6 リフレクターで包まれたカウンター



図 8.7 ブラックシートで遮光されたカウンター

表 8.2 プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターで使用するシンチレーター板

plate id	説明
0	2021 年以前から使用
1	2021 年以前から使用
2	2021 年に新たに製作
3	2021 年に新たに製作

8.2.4 ラボテスト

vertex 測定を行う前に、事前に必要性能を満たしているか確認するためにシンチレーター板 (id2, id3) の時間分解能を測定した。シンチレーター板の上側に ⁹⁰Sr の線源を設置し、下側にトリガーカウンターを設置する。線源位置を動かし 25 点について 5000 イベントずつデータを取得する (図 8.8、図 8.9、図 8.10)。

セットアップを図 8.11 に示す。カウンターの各チャンネルには HV モジュールから I-V 測定により求められたオペレーション電圧を印加する。各チャンネルから読み出された信号は PSI アンプ (図 8.12) を通して DRS4

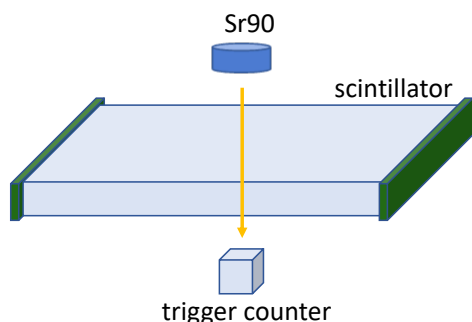


図 8.8 カウンター時間分解能評価のセットアップのイメージ

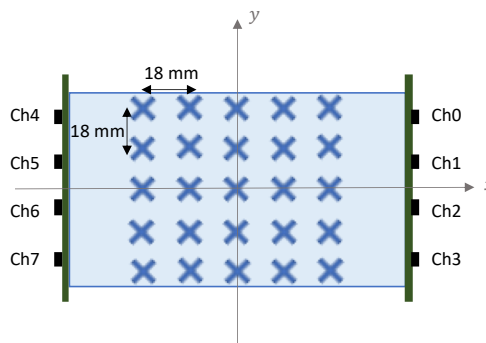


図 8.9 時間分解能評価の際に線源を設置する位置。25 箇所についてスキャンする。



図 8.10 時間分解能評価の様子

evaluation board で測定される。トリガーカウンターには 73 V の電圧が印加され、トリガー信号は分圧器を通った後 DRS に入力される。また、各ボードはファンクションジェネレーターから生成した sine 波 (25 MHz, 500 mVpp) を入力することで同期する。

各チャンネルの波高分布を図 8.13 に示す。いずれのチャンネルも DRS のダイナミックレンジ内に波高が分布していることがわかる。

信号時間測定には、コンスタントフラクシオン (CF) 法を用いた。各チャンネルの CF time の分布をガウシアンでフィットし、その平均をチャンネル平均時間として定義する。式 8.14 で定義される T_{abs} の分布から絶対時間分解能 (absolute timing resolution) を、式 8.15 で定義される $T_{\text{left-right}}$ の分布から左右差時間分解能 (left-right timing resolution) を求める。ただし、実際に σ_{vertex} 測定や液体キセノン検出器の時間分解能評価で使用する各カウンターの時間分解能は σ_{vertex} 測定データおよび CEX ランデータを使用して改めて測定される。

$$T_{\text{abs}} = \frac{1}{N_{\text{ch}}} \sum_{i=0}^7 T_i - T_{\text{trigger}} \quad (8.14)$$

$$T_{\text{left-right}} = \frac{1}{N_{\text{ch}_{\text{left}}}} \sum_{i=4}^7 T_i - \frac{1}{N_{\text{ch}_{\text{right}}}} \sum_{i=0}^3 T_i \quad (8.15)$$

T_i : チャンネル平均時間 (チャンネル i)

T_{trigger} : チャンネル平均時間 (トリガーカウンター)

N_{ch} : シグナルを検出したチャンネル数

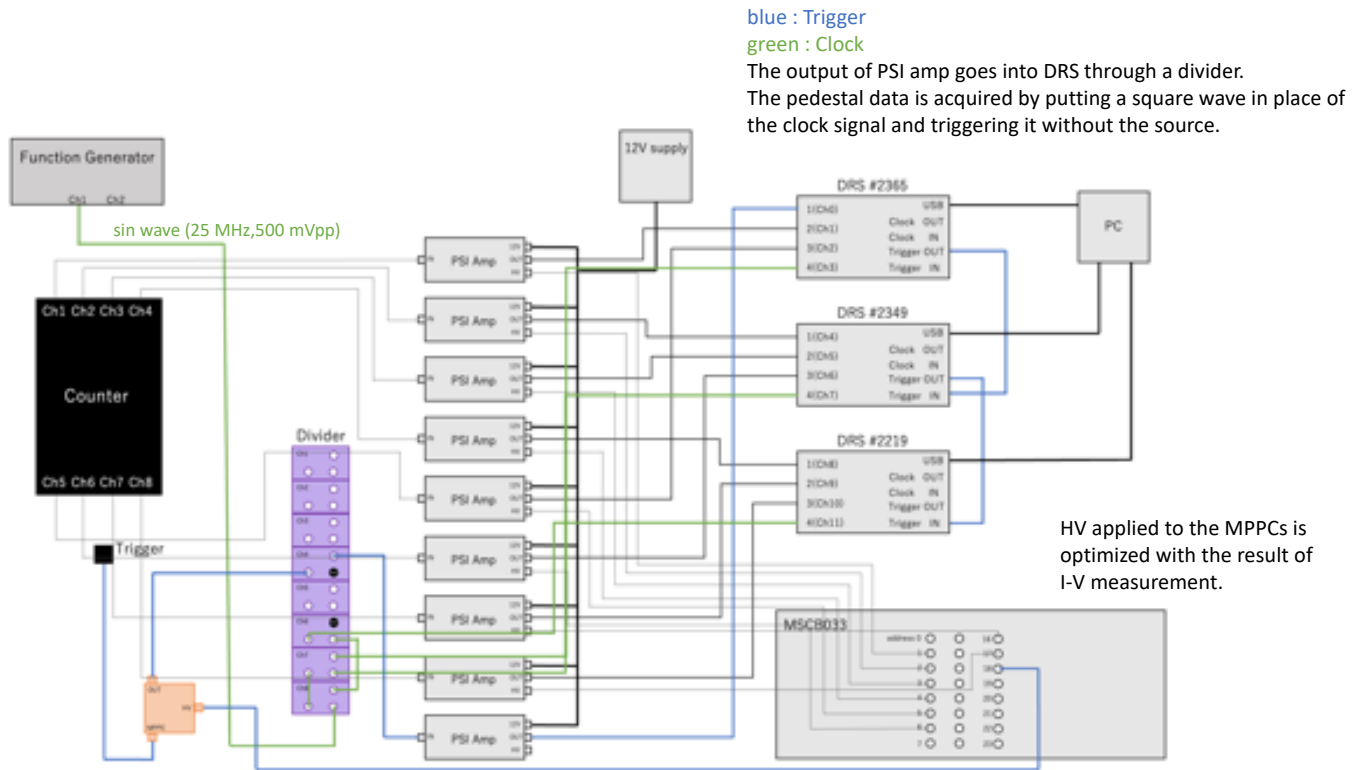


図 8.11 カウンター時間分解能評価のセットアップ

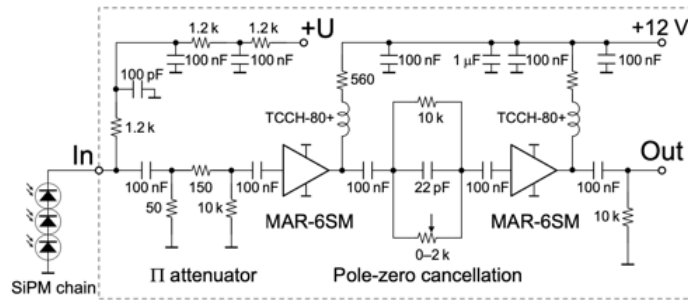


図 8.12 PSI アンプの回路図 [50]

$N_{\text{ch}_{\text{right}}}$: チャンネル 0 から 3 の内、シグナルを検出したチャンネル数

$N_{\text{ch}_{\text{left}}}$: チャンネル 4 から 7 の内、シグナルを検出したチャンネル数

まず、解析で用いる CF の値を決定するために複数の CF に対してプレートの時間分解能を求めた (図 8.14)。その結果、絶対時間分解能は $CF = 0.15$ の時に最も分解能が良いため、以降の解析では $CF = 0.15$ を用いる。

また、各線源位置での時間分解能の結果を図 8.15 に示す。CEX ランおよび σ_{vertex} 測定で使用するためには少なくとも液体キセノンの時間分解能と同程度の時間分解能のカウンターをプレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターとして使用する必要があり、1 枚のプレートの時間分解能としては 70 ps 程度の性能を有している必要がある。全測定点において少なくとも 55 ps の分解能を有していることから、今回製作したプレートはプレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターとして十分な時間分解能を達成している。また、 $T_{\text{left-right}}$ の分布の

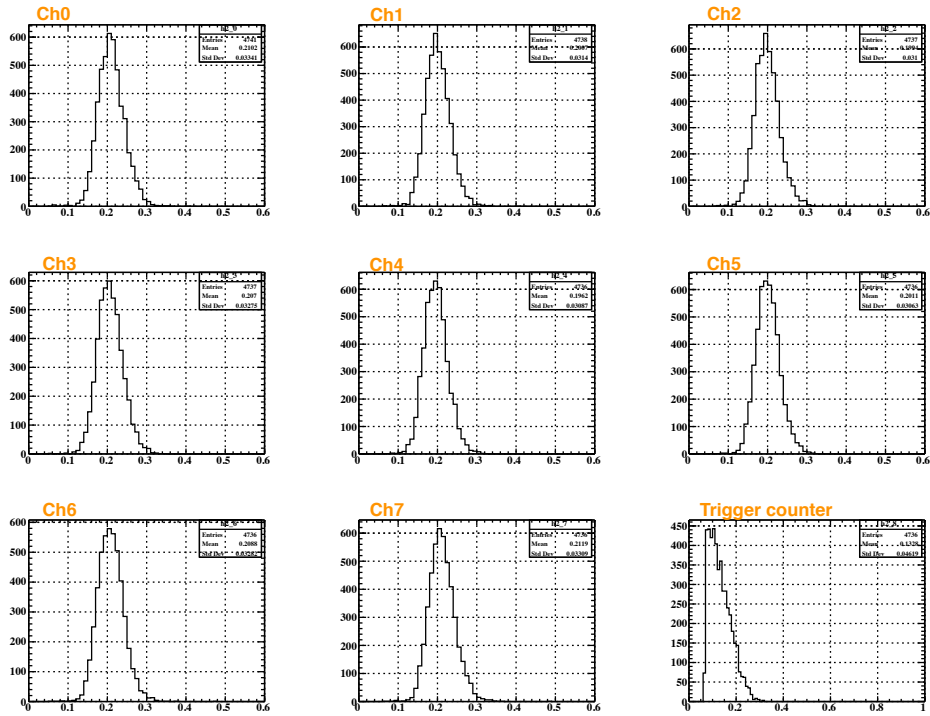


図 8.13 各チャンネルの波高分布

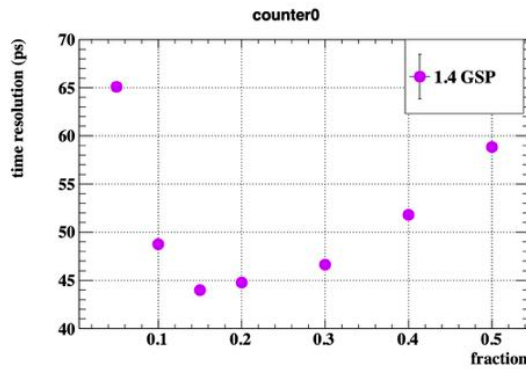


図 8.14 時間分解能と CF の関係 (plate id=2, absolute timing resolution)

平均をプロットしたものが図 8.16 である。 x に対して線形に分布していることから、プレートの左右のチャンネルの時間差からガンマ線ヒット位置の x 座標を再構成できることがわかる。

8.3 プレシャワーカウンターにおけるイベント再構成手法

プレシャワーカウンターではガンマ線のヒットタイミングおよびヒット位置を測定する。プレシャワーカウンターでのガンマ線ヒットタイミング T_{ps} は信号波形が閾値を超えたチャンネルのみを使用した CF time の平均値として定義される。

$$T_{\text{ps}} = \frac{1}{N_{\text{ch}}} \sum_{i=0}^{15} T_i \quad (8.16)$$

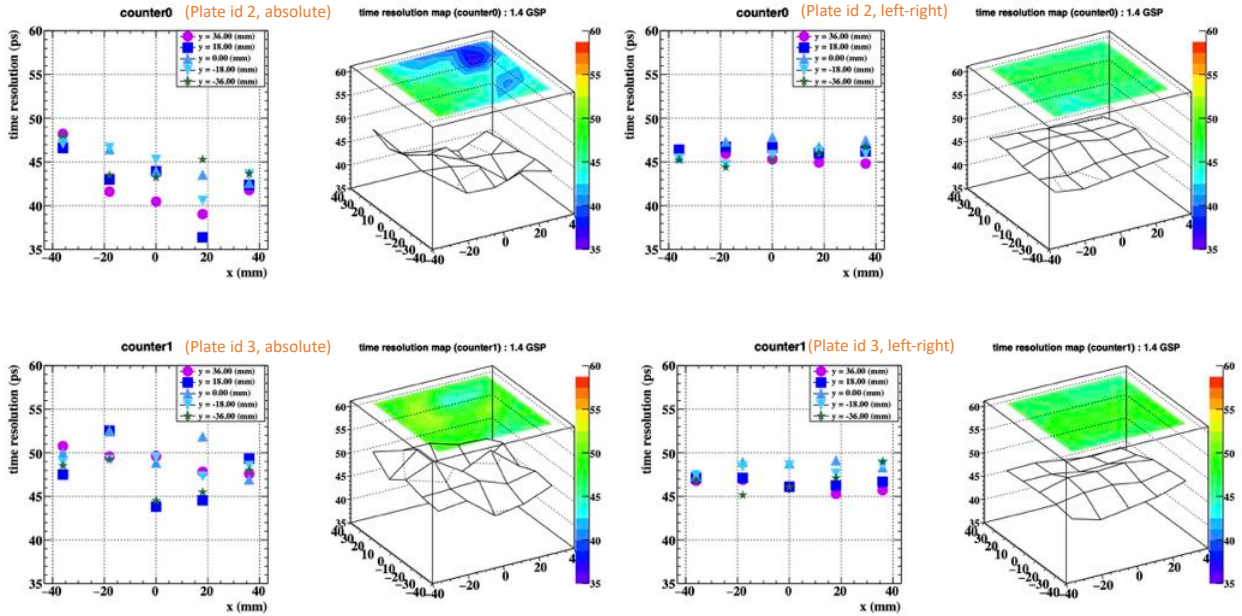


図 8.15 シンチレーター板 (plate id=2, 3) の各測定点での時間分解能

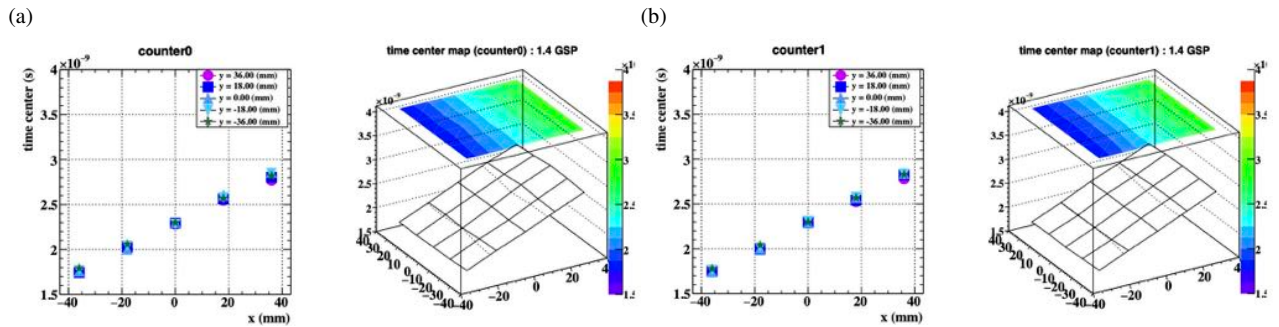


図 8.16 各シンチレータ板の左右のチャンネルの時間差 (a) plate id2 (b) plate id 3

N_{ch} : シグナルを検出したチャンネル数

T_i : チャンネル i の CF time(信号が閾値を超えなかった場合は 0)

また、プレシャワーカウンターではガンマ線のヒット位置も再構成される。各プレートについてガンマ線のヒット位置の x 座標を求め、各プレートで再構成された x 座標と 2 枚のプレートの設置位置をもとにカウンター上でのガンマ線ヒットタイミングを再構成する。プレート上でのガンマ線の再構成位置 x_{plate} は式 8.17 のように計算される。

$$x_{plate} = \frac{v_{eff}}{2} (T_{left} - T_{right}) \tag{8.17}$$

$$T_{right} = \frac{1}{N_{chright}} \sum_{i=0}^3 T_i \tag{8.18}$$

$$T_{left} = \frac{1}{N_{chleft}} \sum_{i=4}^7 T_i \tag{8.19}$$

N_{chright} : チャンネル 0 から 3 の内、シグナルを検出したチャンネル数

N_{chleft} : チャンネル 4 から 7 の内、シグナルを検出したチャンネル数

ここで、 v_{eff} はシンチレーション光の実効速度であり、8.4 節で求める値を使用する。

なお、プレシャワーカウンターで再構成されたガンマ線のヒット位置は CEX ランの解析のイベントセレクションで使用される。プレシャワーカウンターは 2 枚のプレートから成るが、2 枚のプレートが重なっており、かつ鉛コンバーターも重なっている領域はプレートの一部に限られる。また、CEX 反応の結果生じるガンマ線対のうち 180° の角に放出されているものを選択的に使用するためにもカウンターの中央付近に入射したガンマ線を使用する。この時に、プレシャワーカウンター上で再構成されたガンマ線のヒット位置が使用される。

8.4 プレシャワーカウンターキャリブレーション

8.4.1 2021 年 CEX ランにおけるプレシャワーカウンターキャリブレーション

ラボでの事前性能評価の結果、2021 年に新たに製作した 2 枚のプレートは要求される時間分解能を達成したが、エリアではノイズ環境などが異なるため、エリアで時間分解能を再測定した。また、チャンネル間の時間オフセットとシンチレーション光の実効速度のキャリブレーションも行う必要がある。セットアップを図 8.17 に示す。基本的なセットアップはラボでの事前性能評価と同じであるが、MPPC への電圧印加および信号波形取得は WaveDREAM を通して行われる。この時の WaveDREAM とカウンターのチャンネル対応および接続に使用するケーブルは CEX ランおよび σ_{vertex} 測定時と同じものを使用する。図 8.17 中の slot0 および slot1 の WaveDREAM でプレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの信号が読み出される。なお、WaveDREAM はクレート単位でまとめて設置されており、クレート内の各 slot に WaveDREAM が設置されている。slot8 の WaveDREAM でトリガーカウンターの信号が読み出される。しかし、slot8 の WaveDREAM は電圧印加機能を有していないため、slot0 または slot1 の WaveDREAM のうち、余っているチャンネルからトリガーカウンターへ電圧を印加している。

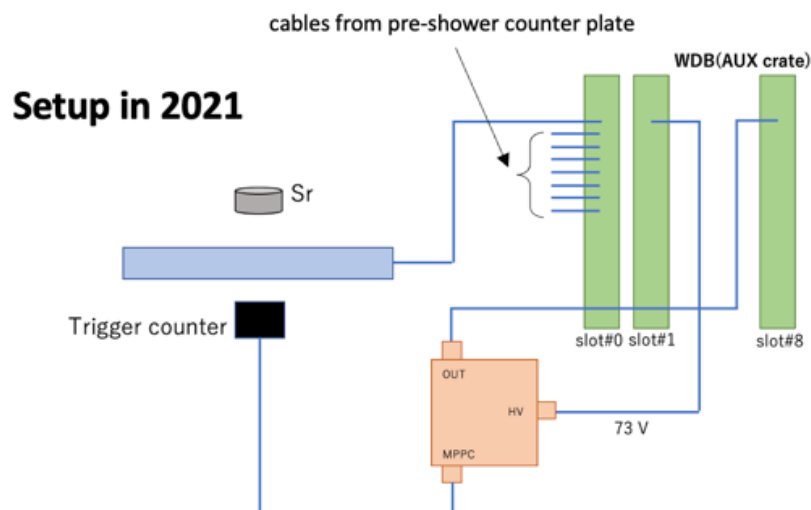


図 8.17 エリアでのカウンターキャリブレーションセットアップ

2021 年 vertex 測定および CEX ランで使用したプレートとチャンネルの対応を表 8.3 に示す。2021 年以前から使用していたプレート (id=0,1) と比べ、2021 年に新たに制作したプレート (id=2,3) の方が時間分解能が良いため CEX ランでは後者のプレートを使用することにした。また、プレート (id=2) についてはプレシャワーカウンター

としてもリファレンスカウンターとしても使われ、かつ、ケーブルやチャンネルの対応が σ_{vertex} 測定と CEX ランで異なるためそれぞれのケーブルング条件でキャリブレーションする必要がある。

表 8.3 2021 年 vertex 測定および CEX ランでの各カウンターとプレートの対応関係

カウンター	ケーブル長 [m]	チャンネル番号	σ_{vertex} 測定用プレート	CEX ラン用プレート
プレシャワーカウンター (BGO 側)	10	0-7	plate id 1	plate id 2
プレシャワーカウンター (BGO 側)	10	8-15	plate id 3	plate id 3
リファレンスカウンター (LXe 側)	15	16-23	plate id 0	-
リファレンスカウンター (LXe 側)	15	24-31	plate id 2	-

ラボでの性能評価時と同様に ^{90}Sr とトリガーカウンターを使用し、線源位置を 25 点動かし各点につき 5000 イベントずつデータを取得する。そして、ラボ試験と同様の手法で各チャンネルの信号検出平均時間を算出する。DAQ の設定を表 8.4 に示す。

表 8.4 2021 年プレシャワーカウンタートリガー設定

パラメータ	値
プレートの各チャンネルのフロントエンドゲイン	25
トリガーカウンターフロントエンドゲイン	2.5
トリガーレベル	-0.08 V

線源位置とチャンネル位置の距離を横軸とし、チャンネルの信号検出平均時間を縦軸としてプロットしたのが図 8.18 である。このプロットの直線フィットの傾きからシンチレーターの実効速度を求める。シンチレーターの実効速度はチャンネルに依存しないため、傾きのパラメータを共通に用いた上で、各チャンネルのオフセットとまとめて直線フィットした。フィット直線の、線源位置とチャンネル位置の距離が 0 mm の時の時間を時間オフセットとして定義する。

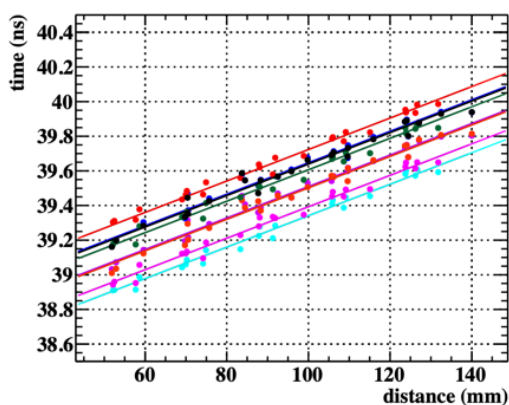


図 8.18 線源とチャンネル間距離とチャンネルでの信号検出平均時間の関係 (plate id0 の場合)。シンチレーターの実効速度とチャンネルのオフセットを求めることができる。



図 8.19 線源位置とチャンネル位置のイメージ。図 8.18 ではこの distance を横軸にしている。

また、ラボテストと同様の手法でプレートの時間分解能を評価した。

エリアでのプレート時間分解能評価結果を表 8.5 に示す。絶対時間分解能の評価ではトリガーカウンターの時間分解能 (46.7 ps) は差し引かれている。なお、波形解析の際はペDESTALデータを取得し、ノイズ除去をしている。また、 σ_{vertex} 測定用プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの時間分解能と CEX 用プレシャワーカウンターの時間分解能を表 8.6 に示す。いずれのカウンターも十分な時間分解能を有しており CEX ランおよび σ_{vertex} 測定に使用できることがわかった。

表 8.5 2021 年プレシャワーカウンターキャリブレーション時のプレート時間分解能

プレート id	絶対時間分解能 [ps]	左右差時間分解能 [ps]
0	71.6	57.8
1	76.4	60.2
2	61.2	52.8
3	62.8	52.6

表 8.6 2021 年プレシャワーカウンターキャリブレーション時のカウンター時間分解能

カウンター	絶対時間分解能 [ps]	左右差時間分解能 [ps]
プレシャワーカウンター (σ_{vertex} 測定)	44.4	40.0
リファレンスカウンター (σ_{vertex} 測定)	47.1	39.1
プレシャワーカウンター (CEX ラン)	43.8	37.3

8.4.2 2022 年 CEX ランにおけるプレシャワーカウンターキャリブレーション

2022 年も 2021 年と同様の原理でキャリブレーションを行なった。しかし、2022 年は新たにプレシャワーカウンターキャリブレーション用のトリガーが用意されたことでケーブルリングが変更された。2022 年のプレシャワーカウンターキャリブレーションデータ取得時のセットアップを図 8.20 に示す。新たに slot13 の WaveDREAM にトリガーカウンター用のチャンネルが用意され、そのチャンネルからトリガーカウンターへ直接電圧を印加できるようになった。また、DAQ の設定を表 8.7 に示す。

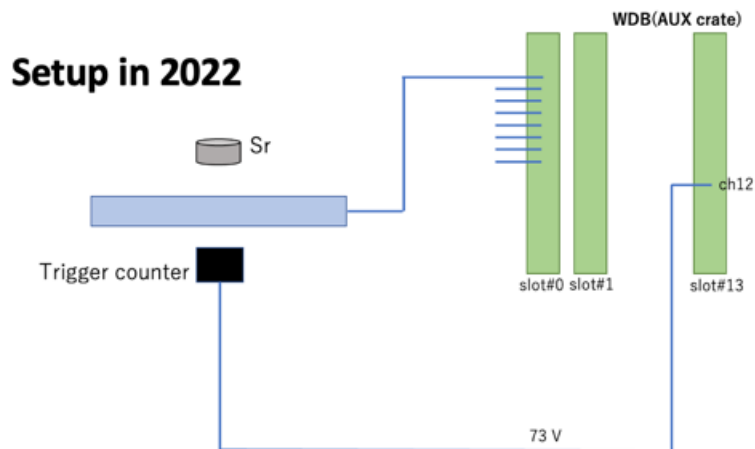


図 8.20 エリアでのカウンターキャリブレーションセットアップ

表 8.7 2022 年プレシャワーカウンタートリガー設定

パラメータ	値
プレートの各チャンネルのフロントエンドゲイン	25
トリガーカウンターフロントエンドゲイン	2.5
トリガーレベル	-0.06 V

また、トリガーカウンターにポールゼロキャンセリングを適用していなかったことがデータ取得中に発覚し、一部データのみトリガーカウンターにもポールゼロキャンセリングを適用してデータを取得した。ポジションスキューデータ取得時のトリガーカウンターのポールゼロキャンセリングの有無は表 8.8 の通りである。なお、ポールゼロキャンセリングを適用せずにポジションスキューデータを取得していたプレートに関しては、少なくとも 1 点はトリガーカウンターにポールゼロキャンセリングを適用した上でデータを取得した。そのため、トリガーカウンターにおけるポールゼロキャンセリングの有無による時間分解能への影響 (約 40 ps) を評価し補正した上で較正を行なった。

表 8.8 2022 年プレシャワーカウンターキャリブレーションデータ取得時のポールゼロキャンセリングの有無

プレート id	プレート	トリガーカウンター
plate id 0	有	無
plate id 1	有	無
plate id 2 (CEX 用)	有	有
plate id 2 (σ_{vertex} 測定用)	有	無
plate id 3	有	無

また、プレートのキャリブレーション中にプレート (id=3) のチャンネル 0 とチャンネル 1 に問題がある可能性が示唆された。プレート (id=3) の線源位置 (36 mm, -18 mm) の時の各チャンネルの波高分布を図 8.21 に示す。チャンネル 0 とチャンネル 1 の波高が他チャンネルと比べ低いことがわかる。この結果から、プレート (id=3) のチャンネル 0 およびチャンネル 1 は MPPC がシンチレータから剥離している可能性が示唆された。また、当初プレート (id=3) は σ_{vertex} 測定のみでなく CEX ランでも使用予定であったが、上記の問題が発覚したため CEX ランでは使用しないことにした。なお、プレート (id=3) については CEX ラン終了後に点検した結果 MPPC がシンチレータから剥離していることがわかった (図 8.22)。

2021 年と同様の方法で各プレートの時間分解能を評価した。各プレートの時間分解能を表 8.9 に、各カウンターの時間分解能を 8.10 に示す。

表 8.9 2022 年プレシャワーカウンターキャリブレーション時のプレート時間分解能

プレート id	絶対時間分解能 [ps]	左右差時間分解能 [ps]	トリガーカウンター Pzc
0	73.9	65.7	Pzc の効果は補正済み
1	68.3	62.0	Pzc の効果は補正済み
2 (σ_{vertex} 測定)	61.5	53.5	Pzc の効果は補正済み
2 (CEX ラン)	52.6	50.8	Pzc を適用してデータ取得
3	66.4	61.9	Pzc の効果は補正済み

プレート (id=2) の時間分解能は σ_{vertex} 測定時のケーブリングでトリガーカウンターにポールゼロキャンセリングを適用せずに取得したデータと、CEX ラン時のケーブリングでトリガーカウンターにポールゼロキャンセリン

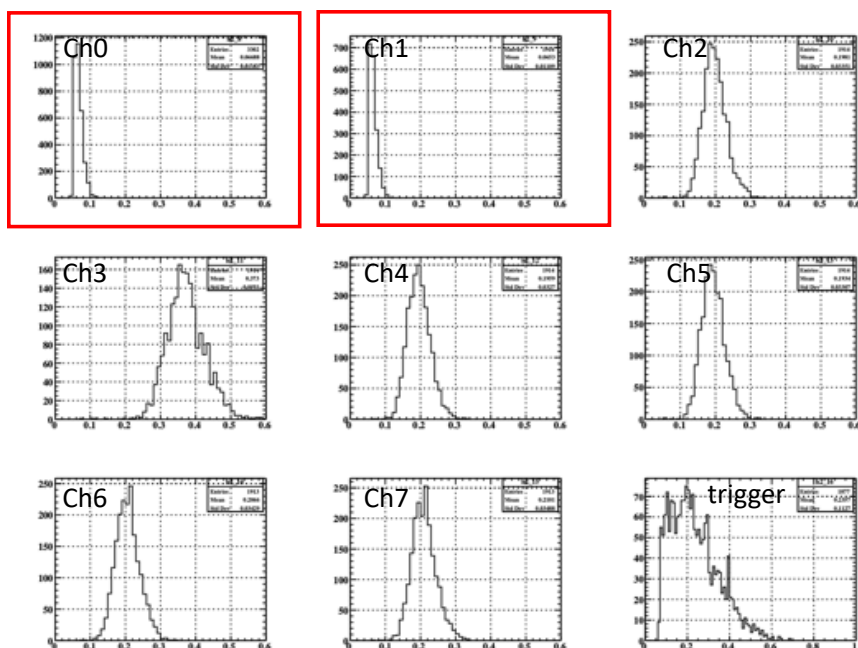


図 8.21 プレート (id=3) 中の問題のあるチャンネル。チャンネル 0 とチャンネル 1 がシンチレータから剥がれている可能性がある。

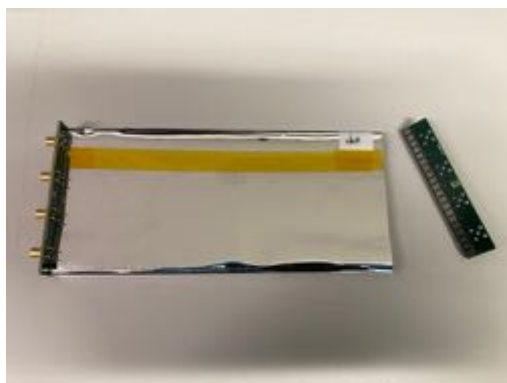


図 8.22 故障したプレート (id=3)

表 8.10 2022 年プレシャワーカーカウンタキャリブレーション時のカウンタ時間分解能

カウンタ	絶対時間分解能 [ps]	左右差時間分解能 [ps]
プレシャワーカーカウンタ (σ_{vertex} 測定)	47.6	43.8
リファレンスカウンタ (σ_{vertex} 測定)	48.1	42.4
プレシャワーカーカウンタ (CEX ラン)	43.1	40.1

グを適用して取得したデータがある。前者については、前述の方法でポールゼロキャンセリングによる影響を補正して時間分解能を求めた。しかし、プレート (id=2) の時間分解能は上記の 2 つの条件下でそれぞれ 61.6 ps と 52.6 ps と乖離が見られる。この原因としては、トリガーカウンタの分解能の不安定性が考えられる。各プレートについて、線源位置 (0 mm, 0 mm) の時にトリガーカウンタにポールゼロキャンセリングを適用した場合としない場合の波高分布を図 8.23 に示す。特に、プレート (id=2) のデータ取得時はトリガーカウンタにポールゼ

ロキャンセリングを適用した場合の波高分布が他のプレートのデータ取得時と比べ低い。このデータでトリガーカウンターの波高分布が低い原因は不明であるが、トリガーカウンターに落とされるエネルギーの違いがトリガーカウンターの時間分解能に影響を与えていると考えられる。

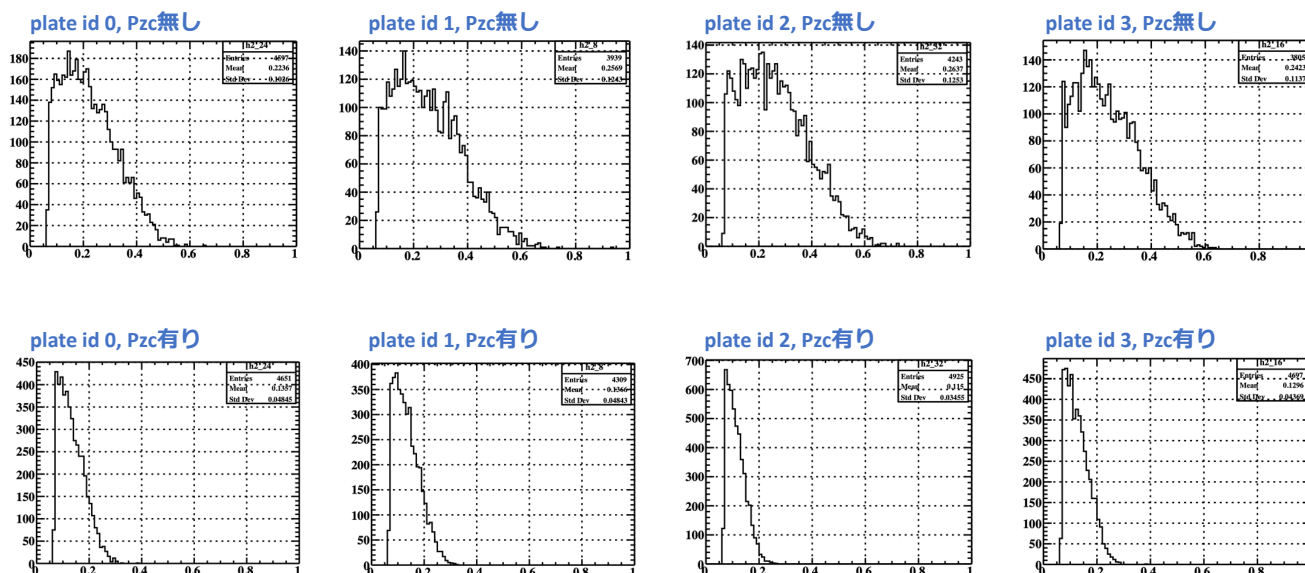


図 8.23 ポールゼロキャンセリング有りの場合と無しの場合のトリガーカウンターの波高分布

また今後は、2021 年と 2022 年のプレシャワーカウンターのキャリブレーション結果を比較することで 2023 年以降の CEX ランにおけるプレシャワーカウンターのキャリブレーションの必要性を検討する。プレシャワーカウンターおよびファレンスカウンターのキャリブレーションにおいてはケーブリング作業を行う必要がある。しかし、ケーブリング作業は WaveDREAM に損傷を与える可能性があるため、可能な限り避けることが望ましい。また、全キャリブレーションデータの取得には数日かかることから、作業の簡略化を目指している。仮に、2023 年以降も毎年カウンターのキャリブレーションデータ取得が必要と判断された場合でも、 σ_{vertex} 測定や CEX ランデータを用いたキャリブレーションが可能であるか検討し、キャリブレーション専用データの取得の必要性について考える。

8.5 2021 年 σ_{vertex} 測定条件

2021 年 σ_{vertex} 測定時の測定条件を表 8.11 に示す。CEX ランでは液体水素ターゲットが使用される。ターゲット冷却の安定性の問題から 2021 年 σ_{vertex} 測定では十分な DAQ 時間を確保できなかった。液体水素ターゲットは冷却が進むにつれターゲットセル内の気体水素の圧力が低下する。そのため、ターゲットセル内の気体水素圧力はセル内の液体水素の充填率の指標となる。気体水素圧力が高く、ターゲットが十分に充填されていない状態ではあったが、DAQ 時間の制約の都合上 σ_{vertex} 測定が開始された。そのため、測定開始時の DAQ レートは 0.08 Hz であり、想定 DAQ レートの 0.5 Hz を下回るレートであった。これは、ターゲットセル内の液体水素の量が不十分であり、ビームが液体水素ターゲットに十分に入射していなかったためだと考えられる。測定終了時の DAQ レートは想定と同程度である。時間の経過とともにターゲットの冷却が進み、ビームが液体水素ターゲット内に入射するようになったためだと考えられる。 σ_{vertex} 測定では少なくとも 5000 イベントのデータが必要であるが、実際に取得できたイベント数は 2400 イベントであった。そこからさらにイベントセレクションにより統計数は削減され

るため、十分な統計は得ることができなかった。

表 8.11 2021 年 σ_{vertex} 測定条件

パラメータ	値
ビームレート [1/s]	2.2×10^5
BGO 位置 (ϕ, θ, z)	(15.5, 0, 0)
DAQ レート (測定開始時)	0.08 Hz
DAQ レート (測定終了時)	0.5 Hz
フロントエンドゲイン	25
Pzc	有
トリガー閾値	-0.02 V

8.6 2021 年 σ_{vertex} 測定結果

まず、8.1 節で示した方法 1 の手法で求める。図 8.24、図 8.25 より、方法 1 で σ_{vertex} を求めるのに使用するパラメータは表 8.12 のようになった。

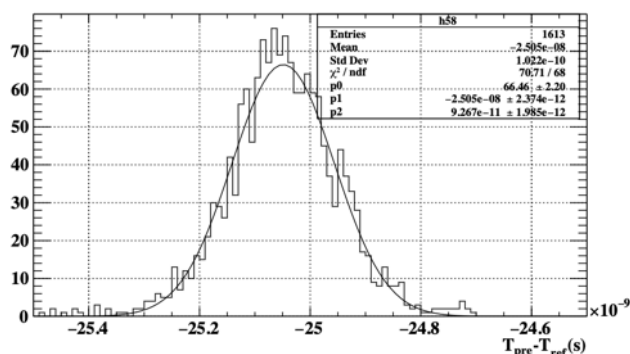


図 8.24 プレシャワーカウンターとリファレンスカウンターのガンマ線ヒットタイミング時間差 (2021 年 σ_{vertex} 測定)

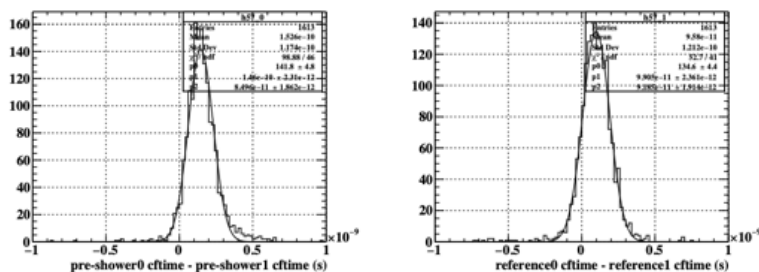


図 8.25 各カウンターの時間分解能 (2021 年 σ_{vertex} 測定) (左) プレシャワーカウンター (右) リファレンスカウンター

以上より、 σ_{vertex} は 68.4 ± 2.8 ps となった。

次に方法 2 でも σ_{vertex} を求めた。各プレート間の時間差分布を図 8.26 に示す。そして方法 2 の解析に用いた値を表 8.13 に示す。

この結果、方法 2 で求めた σ_{vertex} は 65.0 ± 6.1 ps となった。方法 1 で求めた結果と有意には離れておらず、コ

表 8.12 2021 年 σ_{vertex} 測定解析に使用したパラメータ (方法 1)

パラメータ	値 [ps]
$\sigma(T_{\text{ps}} - T_{\text{ref}})$	92.7 ± 2.0
σ_{ps}	42.5 ± 0.9
σ_{ref}	45.9 ± 1.0

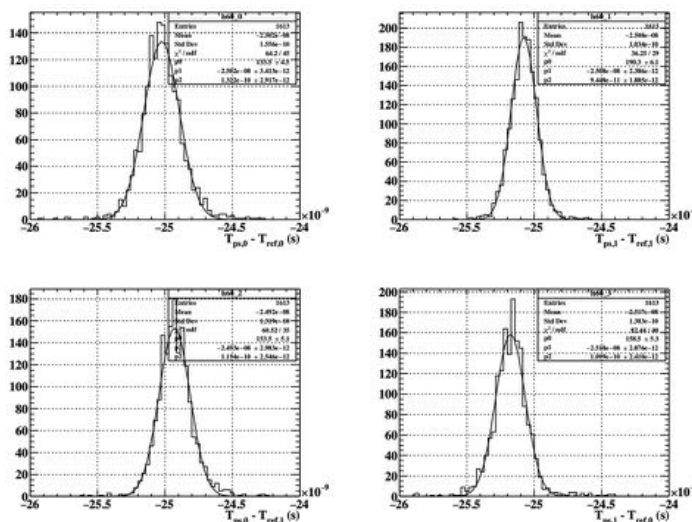


図 8.26 各プレート間の時間差分布 (2021 年 σ_{vertex} 測定)。(左上) プレシャワーカープレート 0 とリファレンスカウンタープレート 0 の時間差 (右上) プレシャワーカープレート 1 とリファレンスカウンタープレート 0 の時間差 (左下) プレシャワーカープレート 0 とリファレンスカウンタープレート 1 の時間差 (右下) プレシャワーカープレート 1 とリファレンスカウンタープレート 0 の時間差

表 8.13 2021 年 σ_{vertex} 測定解析に使用したパラメータ (方法 2)

パラメータ	値 [ps]
$\sigma(T_{\text{ps}} - T_{\text{ref}})$	92.7 ± 2.0
$\sigma(T_{\text{ps},0} - T_{\text{ref},0})$	132.2 ± 2.9
$\sigma(T_{\text{ps},1} - T_{\text{ref},1})$	94.5 ± 1.9
$\sigma(T_{\text{ps},0} - T_{\text{ref},1})$	115.4 ± 2.6
$\sigma(T_{\text{ps},1} - T_{\text{ref},0})$	109.9 ± 2.4

ンシステントな結果となった。液体キセノンガンマの時間分解能評価の際に使用する σ_{vertex} としては方法 1 で求めた 68.4 ± 2.8 ps を使用することにする。

データ取得中に DAQ レートが大きく変わったことから、方法 1 について時間依存性について検討した。取得したイベントを 3 期間に分け σ_{vertex} を評価するとデータ取得時間順に 61.4 ± 6.2 ps、 59.7 ± 5.3 ps、 61.3 ± 5.3 ps となり有意な時間依存性は見られなかったが、統計数が十分でなくエラーが大きいため時間依存性について十分な議論はできなかった。

8.7 2022 年 σ_{vertex} 測定条件

2022 年 σ_{vertex} 測定時の測定条件を表 8.14 に示す。異なる測定条件で 2 回 σ_{vertex} 測定を行った。初回の測定時は液体水素ターゲットの準備状況の影響で、CEX データ取得時とは異なるセットアップで測定を行った。2 回目の測定時は CEX データ取得時と同様のセットアップで測定した。その結果、1 回目の測定ではイベントセレクション適用前のイベント数として 15358 イベント、2 回目の測定では 19497 イベントという十分なイベント数を取得できた。

表 8.14 2022 年 σ_{vertex} 測定条件

パラメータ	値 (1 回目)	値 (2 回目)
ターゲット位置 (x [mm], y [mm], z [mm])	(-6, -8.5, 0)	(-6, -3.3, 0)
気体水素圧力 [bar] (測定開始時)	1.9	2.1
気体水素圧力 [bar] (測定終了時)	1.7	1.8
ビームレート [/s]	2.3×10^5	0.6×10^5
BGO 位置 (ϕ , θ , z)	(15.5, 0, 0)	(15.5, 0, 0)
DAQ レート (測定開始時)	2.7 Hz	0.5 Hz
DAQ レート (測定終了時)	2.7 Hz	0.7 Hz
フロントエンドゲイン	25	25
Pzc	有	有
トリガー閾値 [V]	-0.02	-0.02

8.8 2022 年 σ_{vertex} 測定結果 (1 回目測定)

まず、適切なイベントセレクションの条件を設定する必要がある。2021 年の σ_{vertex} 測定結果では十分な統計が無かったことから詳細な解析は断念したが、2022 年の σ_{vertex} 測定では十分なデータ量を取得でき、より詳細な解析まで行えた。

σ_{vertex} 測定ではターゲットから 180° の角度で同時に放出されたガンマ線を選択する必要がある。

各カウンターのガンマ線ヒットタイミングを図 8.27(a) のように二次元分布で表す。横軸がプレシャワーカウンターでのガンマ線ヒットタイミング、縦軸がリファレンスカウンターでのガンマ線ヒットタイミングである。図 8.27(a) では、40 ns ごとの構造と、その各構造内で複数の線状の構造が見られる。後者についてはチャンネル間のオフセットの較正が正しくなされていないため生じていると考えられる。プレシャワーカウンターとリファレンスカウンターの全 32 チャンネルでシグナルが検出されたイベントのみを選択すると、カウンターのガンマ線ヒットタイミング再構成では全チャンネルのタイミングの平均を使用するため各チャンネルのオフセットの影響が相殺される。そこで、全 32 チャンネルでシグナルが検出されたイベントのみを選択してプロットしたものが図 8.27(b) である。各構造内に一本の線状の構造のみ存在することがわかる。一方、40 ns ごとの構造は原因がわかっておらず、今後継続して原因を究明する。今回はプレシャワーカウンターとリファレンスカウンターに $-0.67 \mu\text{s}$ から $-0.63 \mu\text{s}$ の時間領域で検出され、全 32 チャンネルで信号が検出されたイベントのみを使用する。

次に、BGO 検出器で測定したガンマ線のエネルギースペクトルを図 8.28 に示す。先述の通り、BGO 検出器では BGO 結晶が 4×4 に配置されている。全 16 結晶で検出したエネルギーの合計を BGO エネルギー、中心の 4 結晶のみで検出したエネルギーの合計を BGO センターエネルギーと以降記述することにする。特に、BGO センター

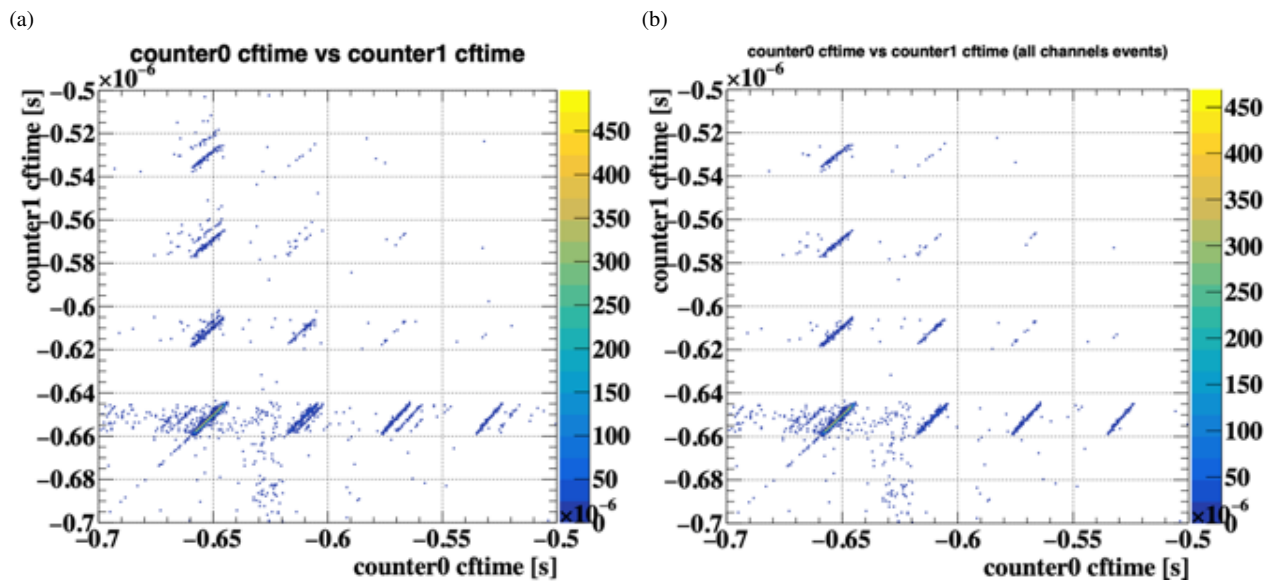


図 8.27 (a) イベントセレクション適用前 (b) イベントセレクション適用後

エネルギースペクトルにおいて低エネルギーイベントが検出されている事がわかる。

一方、BGO センターエネルギー > BGO エネルギー × 0.9 という条件を施した時のエネルギースペクトルが図 8.29 である。本条件を課すことでターゲットから 180° の角度で放出される 55 MeV と 83 MeV のガンマ線に対応するピークが明確に現れる。本条件は BGO 検出器の中心付近に垂直に入射してきたガンマ線を選択することになり、これは、ターゲット中心付近から放出してきたガンマ線を選択することを意味し、ターゲットセルの内壁にビームが照射され放出されたバックグラウンドを排除することができる。そのため、vertex 解析においては、BGO センターエネルギー > BGO エネルギー × 0.9 という条件を課すことにする。

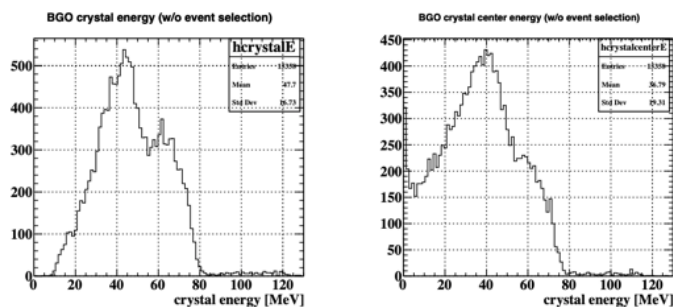


図 8.28 BGO 検出器で測定されたガンマ線スペクトル (イベントセレクション適用前、2022 年 vertex 測定、1 回目) (左) 全 16 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO エネルギースペクトル) (右上) BGO 検出器中央 4 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO センターエネルギースペクトル)

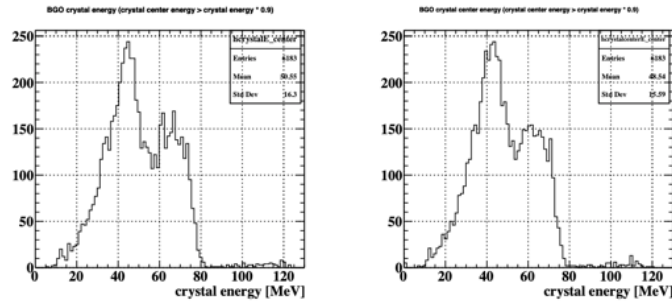


図 8.29 BGO 検出器で測定されたガンマ線スペクトル (イベントセレクション適用後、2022 年 vertex 測定、1 回目) (左) 全 16 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO エネルギースペクトル) (右上) BGO 検出器中央 4 結晶で測定されたガンマ線エネルギースペクトル (BGO センターエネルギースペクトル)

また、プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの有感領域の内、鉛コンバーターが設置されているのは 2 枚のシンチレーター板が重なっている $8 \times 8 \text{ cm}^2$ の領域のみである。そこで、カウンターで再構成されたガンマ線ヒット位置が鉛コンバーターの領域内に存在するイベントのみを解析には使用する。各カウンターで再構成されたガンマ線のヒット位置を図 8.30 に示す。

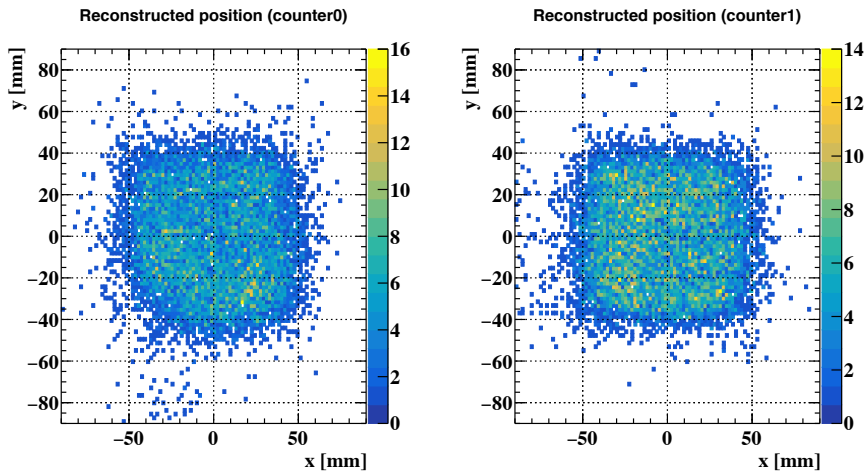


図 8.30 各カウンターでのガンマ線ヒット位置 (左) pre-shower counter (右) reference counter

以上の議論より、 σ_{vertex} 測定では表 8.15 に示したイベントセレクションを適用する。

表 8.15 σ_{vertex} 測定解析時のイベントセレクション条件

パラメータ	条件
シグナルが検出されたチャンネル数 N_{eff}	$N_{\text{eff}} = 32$
プレシャワーカウンターでのガンマ線ヒットタイミング $T_{\text{ps}}[\text{s}]$	$-0.67 \times 10^{-6} < T_{\text{ps}} < -0.63 \times 10^{-6}$
リファレンスカウンターでのガンマ線ヒットタイミング $T_{\text{ref}}[\text{s}]$	$-0.67 \times 10^{-6} < T_{\text{ref}} < -0.63 \times 10^{-6}$
BGO エネルギー E_{BGO} および BGO センターエネルギー $E_{\text{BGOcenter}}$	$E_{\text{BGOcenter}} > E_{\text{BGO}} \times 0.9$
各カウンターのガンマ線ヒット位置 $x_{\text{counter}}[\text{mm}], y_{\text{counter}}[\text{mm}]$	$-40 < x_{\text{counter}} < 40$ かつ $-40 < y_{\text{counter}} < 40$

イベントセレクションの条件が確定したため、ここから σ_{vertex} の解析について述べる。まずは、8.1 節で述べた 1 つ目の手法での解析結果をまとめる。イベントセレクション適用後の各カウンター内の 2 枚のプレートのガンマ

線ヒットタイミングの時間差分布を図 8.31 に示す。従って、プレシャワーカーカウンターの時間分解能は 42.3 ± 0.6 ps であり、リファレンスカウンターの時間分解能は 42.1 ± 0.7 ps である。また、プレシャワーカーカウンターとリファレンスカウンターのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布を図 8.32 に示す。プレシャワーカーカウンターとリファレンスカウンターの時間差分布の広がりには 92.0 ± 1.3 ps である。すなわち、 σ_{vertex} の大きさは 70.0 ± 1.8 ps である。

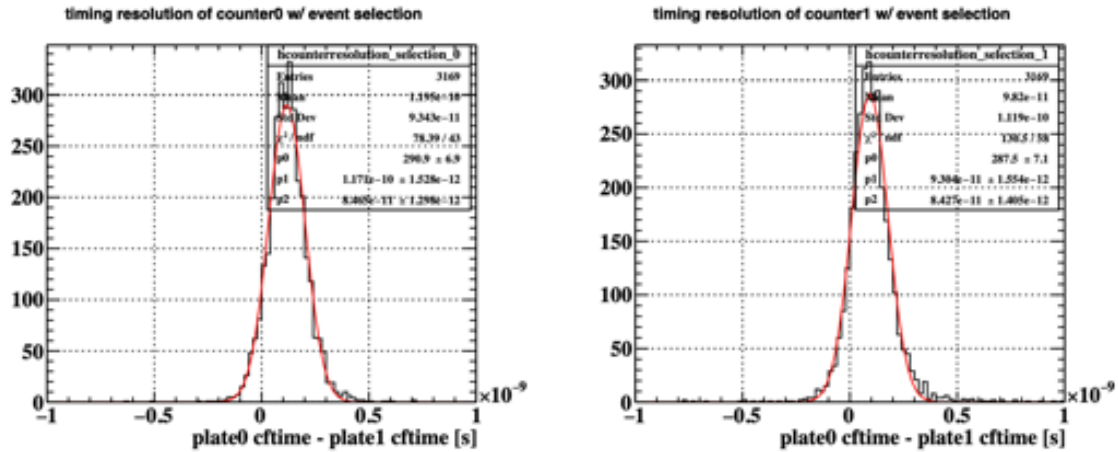


図 8.31 各カウンター内の 2 枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布 (イベントセレクション適用後)(左) プレシャワーカーカウンター (右) リファレンスカウンター

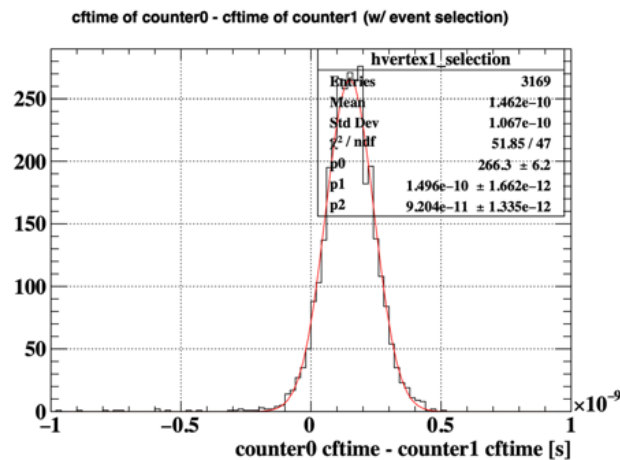


図 8.32 プレシャワーカーカウンターとリファレンスカウンター間のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布 (イベントセレクション適用後)

さらに、vertex の大きさのエネルギー依存性や時間依存性についても確認した。液体キセノンガンマ線の時間較正および時間分解能評価では CEX 反応の結果 180° の角度に放出される 55 MeV のガンマ線と 83 MeV のガンマ線を使用する。そこで、BGO 検出器側に 55 MeV のガンマ線が入射し、液体キセノン検出器側に 83 MeV のガンマ線が入射した場合と、BGO 検出器側に 83 MeV のガンマ線が入射し、液体キセノン検出器側に 55 MeV のガンマ線が入射した場合で場合分けして解析を行った。さらに、ターゲットの状態の時間変動の影響についても検討するため、1 回目の測定において取得されたイベントを前半と後半の期間で分割して解析した。各条件でのプレシャワーカーカウンターおよびリファレンスカウンターの時間分解能を表 8.16 に示す。また、各条件での σ_{vertex} の結果を 8.17 に示す。

各条件でのカウンターの時間分解能の結果について比較する。まず、条件 0 と比較して条件 1 でカウンターの時

表 8.16 プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの時間分解能 (2022 年 σ_{vertex} 測定、1 回目)

条件番号	条件	σ_{ps} [ps]	σ_{ref} [ps]
0	イベントセレクション未適用	47.4 ± 0.4	43.8 ± 0.4
1	イベントセレクション適用済	42.3 ± 0.6	42.1 ± 0.7
2	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV	41.3 ± 0.9	41.5 ± 1.1
3	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV	39.3 ± 1.0	41.8 ± 1.0
4	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (前半期間)	40.3 ± 1.2	41.8 ± 1.4
5	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (後半期間)	41.2 ± 1.3	39.5 ± 1.4
6	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (前半期間)	40.7 ± 1.8	41.7 ± 1.5
7	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (後半期間)	37.7 ± 1.5	41.2 ± 1.5

表 8.17 σ_{vertex} 測定結果 (2022 年 σ_{vertex} 測定、1 回目、方法 1)

条件番号	条件	σ_{vertex} [ps]
0	イベントセレクション未適用	81.4 ± 1.2
1	イベントセレクション適用済	70.0 ± 1.8
2	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV	67.2 ± 2.8
3	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV	69.4 ± 2.9
4	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (前半期間)	60.8 ± 3.8
5	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (後半期間)	72.0 ± 4.0
6	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (前半期間)	60.3 ± 4.1
7	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (後半期間)	71.7 ± 3.9

間分解能が向上している。これは、イベントセレクションによって条件 1 では低エネルギーのバックグラウンドのイベントが排除されたためだと考えられる。

次に、各条件での σ_{vertex} 測定の結果について比較する。ガンマ線エネルギーによるイベントの選択、すなわち、55 MeV と 83 MeV のガンマ線がそれぞれ BGO とキセノン検出器のどちらに入射したかによる選択は σ_{vertex} 測定の結果に影響を与えないことがわかる。条件 2 と 3、条件 4 と 6、条件 5 と 7 を比較すると値に有意な差は見られない。一方、時間依存性については条件 4 と 5、条件 6 と 7 を比較すると有意な差が見られる。データ取得時の前半期間よりも後半期間の方が σ_{vertex} が大きいことがわかる。これは、データ取得中に液体水素ターゲットが充填することで、データ取得開始時はビームがターゲット内に完全に入射していない状態であったのが後半では前半に比べてターゲット内にビームが入るようになったためだと考えられる。実際、データ取得中はターゲット内の気体水素の圧力が低下し続けており、これはターゲット内の液体水素の量が増加していることを意味している。

8.9 2022 年 vertex 測定測定結果 (2 回目測定)

1 回目の σ_{vertex} 測定終了後、CEX データの取得を開始したが、種々の都合上、ビームレートとターゲットの位置が変更された。それに伴い、変更後のビームレートおよびターゲットの位置で再び σ_{vertex} 測定を行った。イベントセレクションは 1 回目の測定時と同様に表 8.15 に示した条件を採用した。1 回目の測定と同様の解析手法で vertex の大きさを求めた。各カウンターの時間分解能の結果を表 8.18 に、 σ_{vertex} 測定の結果を表 8.19 に示す。

2 回目の σ_{vertex} 測定の結果についてエネルギー依存性について確認する。条件 2 と 3、条件 4 と 6、条件 5 と 7 を比較すると値に有意な差は見られない、1 回目の σ_{vertex} 測定の結果と同様に、55 MeV と 83 MeV の選択の違い

表 8.18 プレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターの時間分解能 (2022 年 σ_{vertex} 測定、2 回目、方法 1)

条件番号	条件	σ_{ps} [ps]	σ_{ref} [ps]
0	イベントセレクション未適用	49.8 ± 0.4	45.9 ± 0.3
1	イベントセレクション適用済	41.7 ± 0.6	43.5 ± 0.6
2	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV	42.0 ± 0.9	41.3 ± 0.9
3	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV	38.6 ± 0.9	45.0 ± 1.0
4	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (前半期間)	41.8 ± 1.2	39.9 ± 1.4
5	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (後半期間)	41.5 ± 1.3	41.9 ± 1.2
6	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (前半期間)	36.9 ± 1.3	43.1 ± 1.3
7	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (後半期間)	37.1 ± 1.2	45.2 ± 1.6

表 8.19 σ_{vertex} 測定結果 (2022 年 σ_{vertex} 測定、2 回目、方法 1)

条件番号	条件	σ_{vertex} [ps]
0	イベントセレクション未適用	79.7 ± 1.1
1	イベントセレクション適用済	68.1 ± 1.7
2	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV	66.3 ± 2.4
3	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV	66.1 ± 2.8
4	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (前半期間)	69.6 ± 3.5
5	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (後半期間)	65.2 ± 3.9
6	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (前半期間)	67.3 ± 3.7
7	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (後半期間)	66.2 ± 3.9

による σ_{vertex} の差は見られない。次に、時間依存性について、条件 4 と 5、条件 6 と 7 を比較すると、有意な差は見られず、これは 1 回目の σ_{vertex} 測定とは異なる。原因としてはターゲット位置の違いが挙げられる。1 回目の σ_{vertex} 測定では y 方向に -8.5 mm ターゲットの位置がビーム軸に対してずれていたのに対し、2 回目の測定ではターゲット位置が移動され、y 方向のずれが -3.3 mm に改善された。その結果、1 回目の測定時はデータ取得開始時にはビームが十分ターゲットに入射していなかったのに対し、2 回目の測定ではデータ開始直後からビームがターゲットに十分入射していたために σ_{vertex} に時間依存性が見られなかったと考えられる。

次に、1 回目の σ_{vertex} 測定の結果と 2 回目の σ_{vertex} 測定の結果を比較する。1 回目と 2 回目の σ_{vertex} 測定の結果を表 8.20 に示す。確認のため 8.1 節で示した方法 2 で求めた結果も併記する。

表 8.20 2022 年 σ_{vertex} 測定結果まとめ

条件番号	条件	1 回目		2 回目	
		方法 1 σ_{vertex} [ps]	方法 2 σ_{vertex} [ps]	方法 1 σ_{vertex} [ps]	方法 2 σ_{vertex} [ps]
0	イベントセレクション未適用	81.4 ± 1.2	84.5 ± 2.3	79.7 ± 1.1	80.6 ± 2.3
1	イベントセレクション適用済	70.0 ± 1.8	72.3 ± 3.6	68.1 ± 1.7	67.5 ± 3.5
2	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV	67.2 ± 2.8	69.2 ± 5.4	66.3 ± 2.4	65.3 ± 5.0
3	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV	69.4 ± 2.9	70.0 ± 5.8	66.1 ± 2.8	65.7 ± 5.6
4	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (前半期間)	60.8 ± 3.8	60.3 ± 7.7	69.6 ± 3.5	69.3 ± 7.2
5	イベントセレクション適用済、BGO 55 MeV キセノン検出器 83 MeV (後半期間)	72.0 ± 4.0	76.4 ± 7.6	65.2 ± 3.9	65.2 ± 7.9
6	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (前半期間)	60.3 ± 4.1	54.1 ± 8.9	67.3 ± 3.7	64.6 ± 7.9
7	イベントセレクション適用済、BGO 83 MeV キセノン検出器 55 MeV (後半期間)	71.7 ± 3.9	72.1 ± 7.9	66.2 ± 3.9	68.7 ± 7.6

1 回目の測定時と比べ、2 回目の測定時は σ_{vertex} が有意に小さい。1 回目の測定時は 2.3×10^5 のビームレートを使用していたが、2 回目の測定時は 0.6×10^5 のビームレートを使用した。ビームレートはビーム上流側に設置されているスリットの開閉により調整される。そのため、ビームレートと σ_{vertex} に相関がある可能性がある。しかし、2 回目の測定ではターゲットの位置も変わっていることから、ビームレートの違いで 2 回目の測定時の σ_{vertex} が小さいことを説明できると結論づけることはできない。

一方、2 回の σ_{vertex} 測定で結果が有意に異なっていることから、CEX データを用いた液体キセノン検出器の時間分解能評価では CEX のデータ取得と同じビームおよびターゲットのセットアップでデータが取得された 2 回目の σ_{vertex} 測定の結果を使用する必要がある。

なお、 σ_{vertex} 測定において TOF の補正は行われているが、プレシャワーカウンター及びリファレンスカウンターの有感領域は $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ であり、TOF に与える影響は $2 - 3 \text{ ps}$ 程度である。また、仮に DRS 間の時間同期が正しく行われていないという問題が発生した場合、方法 1 と方法 2 の解析結果に有意な差が生じる可能性があるが、本結果では二つの解析手法で結果に有意な差は見られていない。実測により求めた σ_{vertex} はモンテカルロシミュレーションでの予測値よりも大きく、今後系統誤差について検討する。

第 9 章

液体キセノンガンマ線検出器時間較正および 時間分解能測定結果

9.1 液体キセノンガンマ線検出器時間較正手法

4.7 節で述べたように、液体キセノン検出器の時間再構成では各光センサーのタイムオフセットとタイムウォークの効果をあらかじめ把握しておく必要がある。CEX ランではプレシャワーカウンターでのガンマ線ヒットタイミングを時間の基準点とすることでこれらの較正を行うことができる。図 9.1 に液体キセノン検出器の時間較正の概念図を示す。

キャリブレーションは以下の手順で行う。

1. センサーグループごとにタイムウォークを求める
2. 1. で求めたタイムウォークを補正し、各センサーのタイムオフセットを求める
3. 1. で求めたタイムウォークと 2. で求めたタイムオフセットの補正を施し、さらに残りのタイムウォークを求める
4. 2. で求めたタイムオフセットと 3. で更新したタイムウォークの補正を施し、残りのタイムオフセットを求める
5. タイムオフセットの位置依存性を求める (グローバル補正)

9.1.1 タイムウォーク較正

タイムウォークの較正は光センサーを 6 個のグループに分割して行う (表 9.1)。MPPC と PMT ではタイムオフセットが異なるため分けて較正する必要がある。また、タイムウォークの応答には MPPC の製造ロット依存性があり、また、PMT については Outer 面とその他の面で応答が異なるため以下のような分類を行う。

まず、時間較正ではプレシャワーカウンターでのガンマ線ヒットタイミング T_{ps} を基準として使用する。 T_{ps} はプレシャワーカウンターで測定されたガンマ線ヒットタイミングである。

図 9.1 中の $\Delta T_{TOF\ BGO}$ はターゲット位置からプレシャワーカウンター上でのヒット位置までのガンマ線飛行時間 TOF (time of flight) である。ターゲット位置は測定した中心値を使用し、プレシャワーカウンター上のヒット位置は 8.3 節で述べた手法で再構成される。この 2 点間の距離と光速から $\Delta T_{TOF\ BGO}$ を求めることができる。同様に、 $\Delta T_{TOF\ XEC}$ はターゲット位置から液体キセノン中の相互作用点までのガンマ線飛行時間である。

図 9.1 中の T_{int} は液体キセノン中のガンマ線相互作用点でのガンマ線ヒットタイミングである。プレシャワーカ

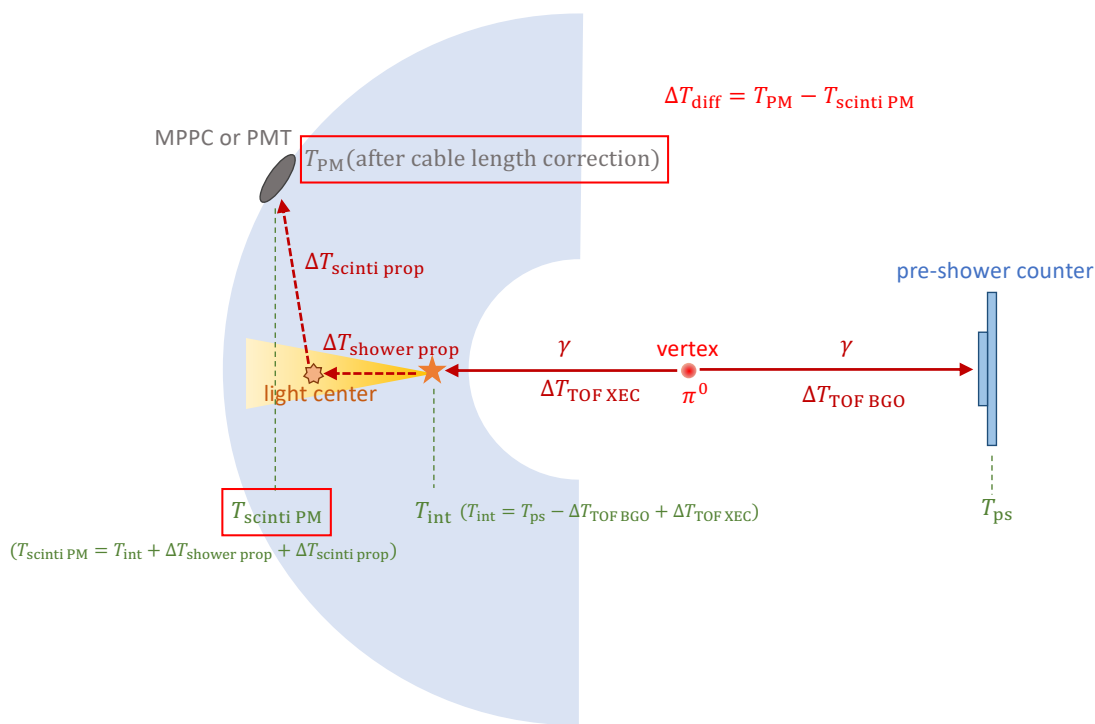


図 9.1 液体キセノン検出器の時間較正概念図

表 9.1 タイムウォーク較正でのセンサーのグループ分け

グループ番号	種類	詳細
0	MPPC	ロット A
1	MPPC	ロット B
2	MPPC	ロット C
3	MPPC	ロット D
4	PMT	Outer 面
5	PMT	Outer 面以外の 4 面

ウンターの時間を基準として使うことで、式 9.1 のように表せる。

$$T_{\text{int}} = T_{\text{ps}} - \Delta T_{\text{TOF BGO}} + \Delta T_{\text{TOF XEC}} \quad (9.1)$$

次に液体キセノンの電磁シャワーの影響を考慮する。液体キセノン中の相互作用点から光源中心までのシャワーの伝播にかかる時間を $\Delta T_{\text{shower prop}}$ とする。また、光源中心から各センサーにシンチレーション光が到達するまでの時間を $\Delta T_{\text{scinti prop}}$ とする。 $\Delta T_{\text{scinti prop}}$ は光源中心の位置および各センサーの位置と液体キセノン中のシンチレーション光伝播速度から求めており、シンチレーション光伝播速度は 8 cm/ns を使用している。これは液体キセ

ノン検出器の時間中心のエネルギー依存性を最小にし、最善の時間分解能になるように最適化されている。これらの値を用いると、シンチレーション光が光センサーに伝達する時間 $T_{\text{scinti PM}}$ は式 9.2 のように表せる。

$$T_{\text{scinti PM}} = T_{\text{int}} - \Delta T_{\text{shower prop}} + \Delta T_{\text{scinti prop}} \quad (9.2)$$

一方、各光センサーにおいて波形解析によって求められた信号検出時刻を T_{PM} とする。タイムウォークとタイムオフセットが補正されるか否かはキャリブレーションの段階に依存する。キャリブレーション手順 1 ではタイムウォークとタイムオフセットの補正はされていない T_{PM} を使用するが、手順 2 ではタイムウォークのみ補正した T_{PM} が、手順 3 と 4 ではタイムウォークとタイムオフセットを補正した T_{PM} を使用する。本来、タイムウォークとタイムオフセットの効果が正しく較正されていれば T_{PM} と $T_{\text{scinti PM}}$ は等しい値となるはずであり、これらの時間差 ΔT_{diff} を較正に使用する。

$$\Delta T_{\text{diff}} = T_{\text{PM}} - T_{\text{scinti PM}} \quad (9.3)$$

なお、時間較正には表 9.2 の条件を満たすイベントを使用する。

表 9.2 時間較正に適用されるイベントの条件

パラメータ	条件
BGO 全結晶で検出したガンマ線エネルギー $E_{\text{all BGO}}$	$E_{\text{all BGO}} > 65 \text{ MeV}$
BGO 中央 4 結晶で検出したガンマ線エネルギー E_{center}	$E_{\text{center}} > E_{\text{all BGO}} \times 0.5$
液体キセノン検出器内で再構成されたガンマ線ヒット位置 u	$ u < 30 \text{ cm}$
液体キセノン検出器内で再構成されたガンマ線ヒット位置 v	$ v < 68 \text{ cm}$
液体キセノン検出器内で再構成されたガンマ線ヒット位置 w	$1 \text{ cm} < w < 18 \text{ cm}$
pre-shower counter 内の全 16 チャンネル中信号が検出されたチャンネル数 N_{eff}	8 または 16

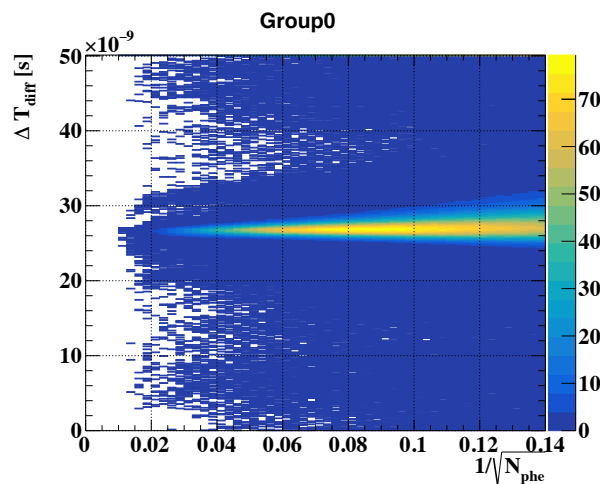


図 9.2 検出光電子数と ΔT_{diff} の関係

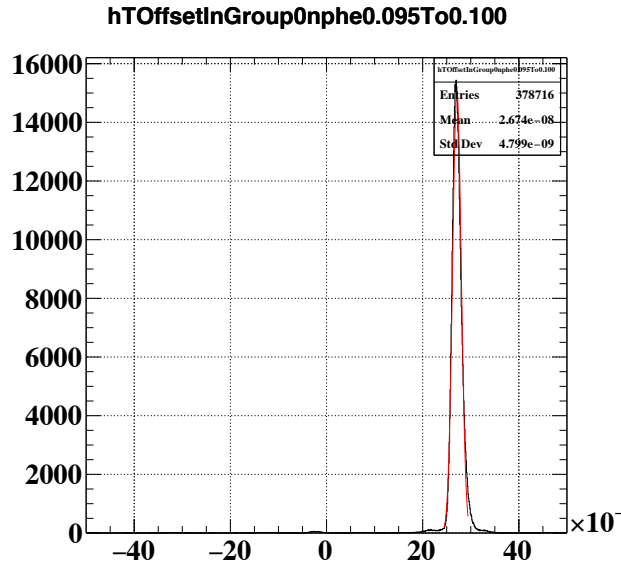


図 9.3 図 9.2 をスライスして求めた ΔT_{diff} 分布 ($0.095 \leq 1/\sqrt{N_{\text{phe}}} < 0.100$ の領域)

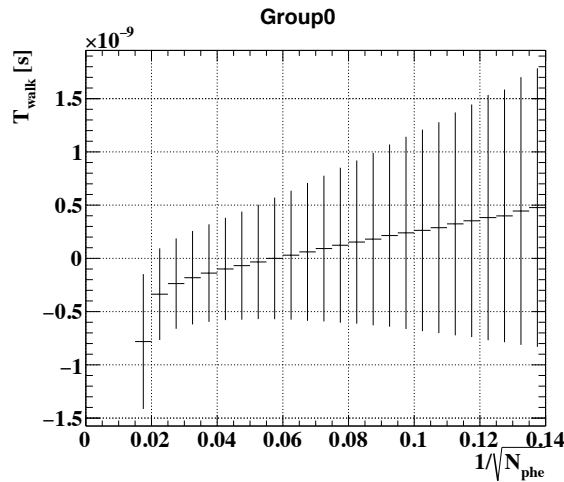


図 9.4 検出光電子数と time walk の関係。エラーバーは図 9.3 で求めた標準偏差を表す。

まず、各センサーの検出光電子数 N_{phe} と ΔT_{diff} を求め、表 9.1 で示したグループごとにプロットする。図 9.2 にグループ 0 の結果を示した。検出光電子数に依存した ΔT_{diff} の変動をタイムウォークの効果として較正する。図 9.2 の各 X 軸のビンごとに ΔT_{diff} の分布をスライスし、ガウシアンでフィットして平均と標準偏差を求める (図 9.3)。ここで求めた平均をタイムウォークとし、平均が 0 になるように調整したタイムウォークを図 9.4 に示す。図 9.3 で各 $1/\sqrt{N_{\text{phe}}}$ の範囲に対応するタイムウォークを求める際には、光電子数が多い領域では十分にイベント数が存在しないため、イベント数が 500 未満の N_{phe} の領域についてはフィットしていない。

以上のようにタイムウォークの効果を $1/\sqrt{N_{\text{phe}}}$ に依存したパラメータとして取得できた。以降、各センサーについて検出された光電子数に応じてこの補正パラメータを使用することでタイムウォークを補正できる。

9.1.2 タイムオフセット較正

タイムオフセットはセンサーごとに補正パラメータを求める。各チャンネルの ΔT_{diff} の分布の平均をそのチャンネルのタイムオフセットとする。なお、タイムオフセットの較正では直前のタイムウォーク較正の結果を使用してタイムウォーク補正後の時間を使用する。例としてチャンネル 2000 の ΔT_{diff} の分布を図 9.5 に示す。

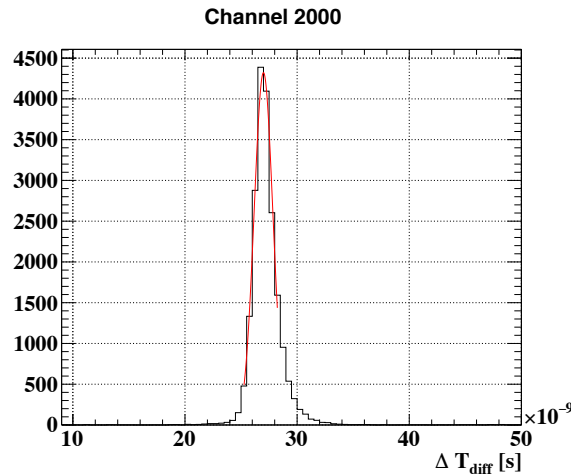


図 9.5 チャンネル 2000 の MPPC の ΔT_{diff} の分布

9.1.3 グローバル補正

再構成されたガンマ線ヒット位置の uvw 座標とオフセットの依存性を較正する。現状は u 、 v 、 w の各次元方向の補正のみ行なっている。図 9.6 にプレシャワーカウンターと液体キセノン検出器のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布を示す。一方、液体キセノン検出器で再構成されたガンマ線ヒット位置の w 座標が 0.7 cm から 0.9 cm の範囲のイベントについてのプレシャワーカウンターと液体キセノン検出器でのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布を図 9.7 に示す。図 9.6 の平均を基準にしてオフセットを評価する。例えば、 w 座標が 0.7 cm から 0.9 cm の範囲のイベントについては図 9.6 と図 9.7 の平均の差が補正に使用される。また、タイムオフセットの uvw 依存性を図 9.8 に示す。

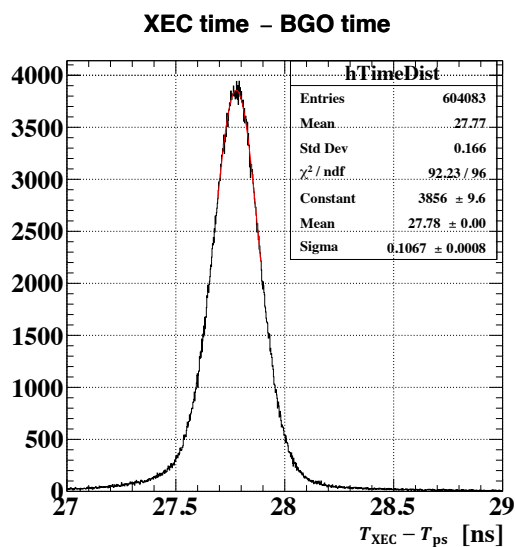


図 9.6 pre-shower counter と液体キセノン検出器のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布

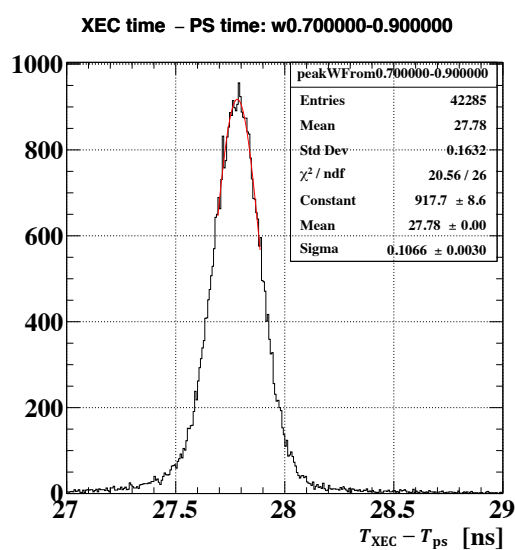


図 9.7 液体キセノン検出器で w 座標が 0.7 cm から 0.9 cm に再構成されたイベントの pre-shower counter と液体キセノン検出器のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布

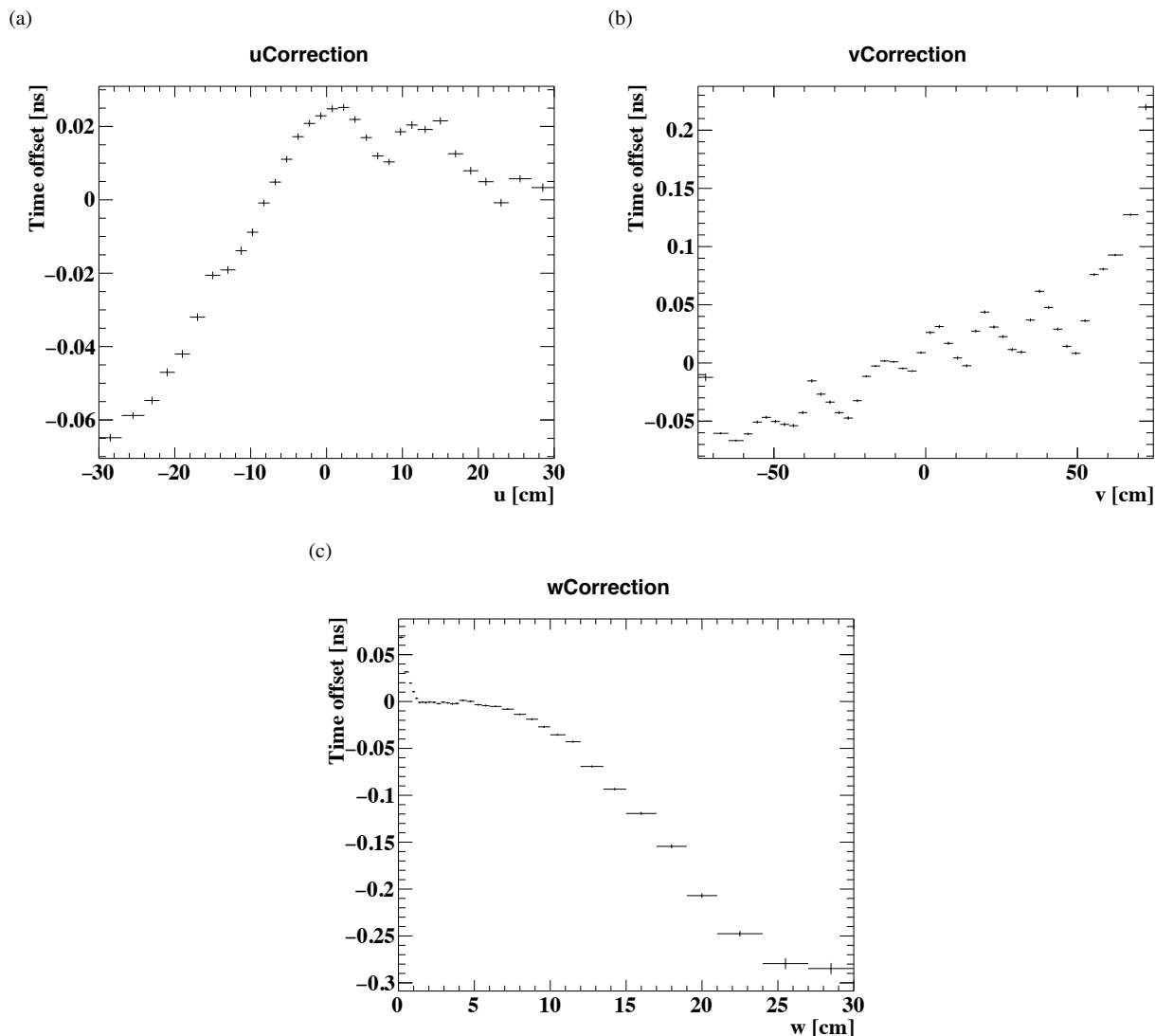


図 9.8 time offset の位置依存性 (a) u 依存性 (b) v 依存性 (c) w 依存性

9.2 2021 年液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価

CEX ランでは液体キセノン検出器の入射面を 24 のパッチに分割し、各パッチごとにイベントを取得している (図 5.6、図 9.9)。液体水素ターゲットの安定性に問題があり、十分な DAQ 時間を確保できなかったためパッチ 2、6、7 についてはイベントを取得できず、全パッチのスキャンを完了させることができなかった。なお、パッチ 13 のイベント数が多いのは参照用パッチとして繰り返しイベントを取得しているためである。また、パッチ 13 で重なる十字の領域でイベント数が多いのは、最初は各パッチ十分なイベント数を取得することを目標としてデータを取得していたが、途中で時間的制約からパッチごとの取得イベント数を削減したためである。

プレシャワーカウンターと液体キセノン検出器のガンマ線ヒットタイミングの時間差分布を図 9.10 に示す。図 9.10(a) および図 9.10(b) ではそれぞれ 55 MeV および 83 MeV のガンマ線が液体キセノン検出器に入射したイベントを選択している。その他のイベントセレクションの条件は表 9.3 に示す通りである。

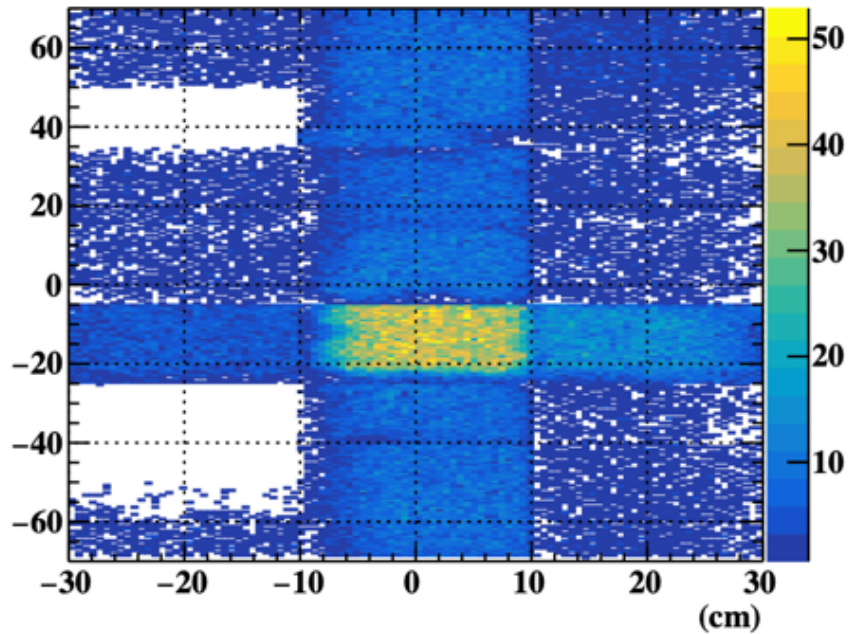


図 9.9 2021 年 CEX ランで取得したイベントの uv 分布

表 9.3 液体キセノン検出器時間分解能評価に使用したイベントセレクション条件

パラメータ	条件
BGO 全 16 結晶 (中央 4 結晶) で検出したガンマ線エネルギー $E_{\text{all BGO}}(E_{\text{center}})$	$E_{\text{center}} > E_{\text{all BGO}} \times 0.5$
液体キセノン検出器内で再構成されたガンマ線ヒット位置 u	$ u < 30 \text{ cm}$
液体キセノン検出器内で再構成されたガンマ線ヒット位置 v	$ v < 68 \text{ cm}$
液体キセノン検出器内で再構成されたガンマ線ヒット位置 w	$1 \text{ cm} < w < 18 \text{ cm}$
プレシャワーカウンター内の全 16 チャンネル中信号が検出されたチャンネル数 N_{eff}	16

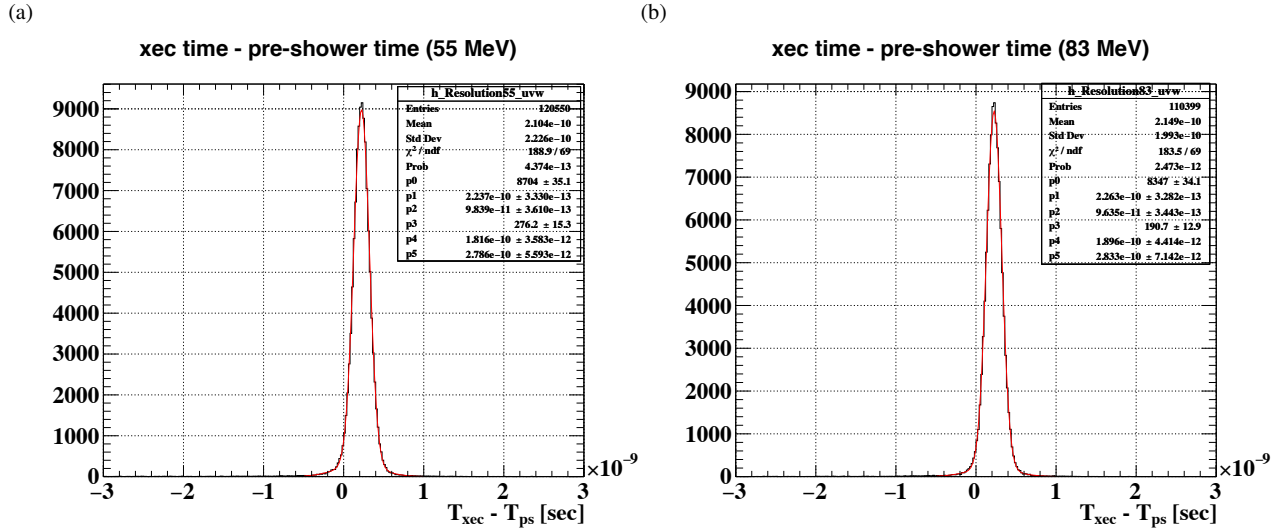


図 9.10 pre-shower counter と液体キセノン検出器でのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布 (a) 液体キセノン検出器に 55 MeV、BGO に 83 MeV のガンマ線が入射した場合 (b) 液体キセノン検出器に 83 MeV、BGO に 55 MeV のガンマ線が入射した場合

また、液体キセノン検出器の時間分解能評価では偶奇チャンネル時間分解能 σ_{evenodd} という指標も用いることが可能である。これは、液体キセノン検出器の光センサーのチャンネル番号の内、偶数番目のチャンネルのみを用いて時間再構成をしたガンマ線ヒットタイミングと奇数番目のチャンネルのみを用いて時間再構成したガンマ線ヒットタイミングの時間差から求める時間分解能である。偶奇チャンネル時間分解能ではノイズや位置再構成の不定性というコヒーレントな効果は相殺される。

$$\sigma_{\text{evenodd}} = \sigma(T_{\text{PM,even}} - T_{\text{PM,odd}}) / 2 \tag{9.4}$$

液体キセノン検出器の偶数番目のチャンネルのみを用いて再構成された時間と奇数番目のチャンネルのみを用いて再構成された時間の時間差を図 9.11 に示す。

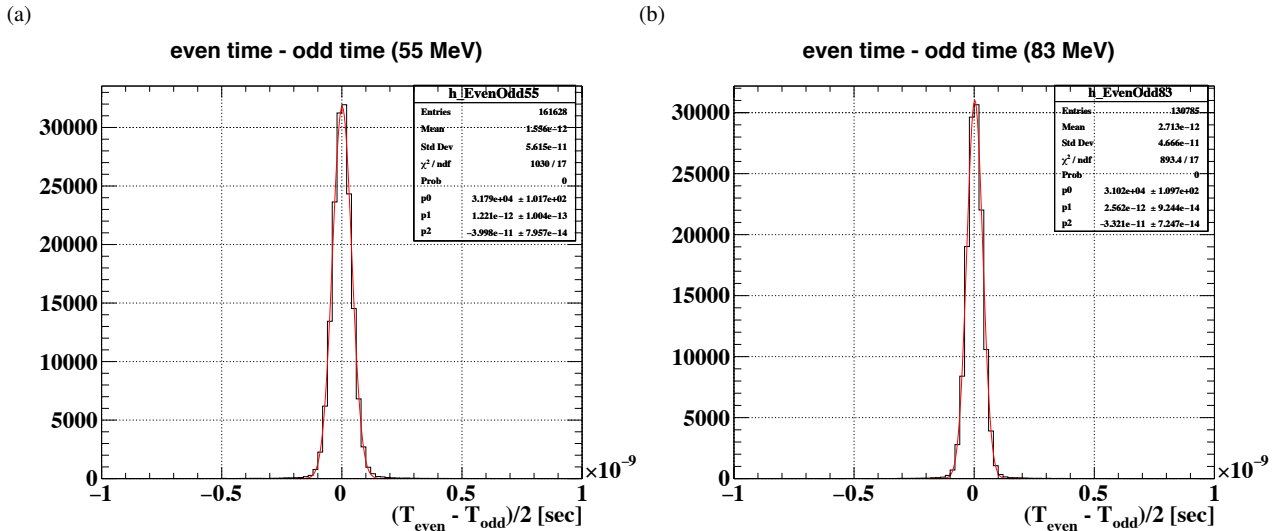


図 9.11 液体キセノン検出器内の奇数番目のチャンネルのみで再構成された時間と偶数番目のチャンネルのみで再構成された時間の時間差分布 (a) 液体キセノン検出器に 55 MeV、BGO に 83 MeV のガンマ線が入射した場合 (b) 液体キセノン検出器に 83 MeV、BGO に 55 MeV のガンマ線が入射した場合

また、プレシャワーカーの時間分解能は 2 枚のプレートの時間差分布から求める (図 9.12)。その結果、プレシャワーカーの時間分解能は 28.2 ± 0.1 ps であった。

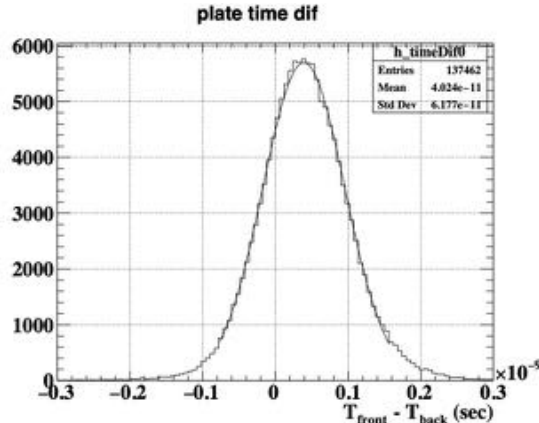


図 9.12 CEX ランにおける pre-shower counter の 2 枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布

以上の結果をまとめると表 9.4 のようになる。なお、図 9.10 のフィットではダブルガウシアンを使用し、コア成分のフィット結果を使用している。また、絶対時間分解能の評価では $\sigma_{\text{vertex}} = 68.4 \pm 2.8$ ps を使用している。さらに、表 9.4 の結果を元に、信号事象エネルギー 52.8 MeV での液体キセノン検出器の時間分解能を推定する。図 9.13 に入射ガンマ線エネルギーと液体キセノン検出器の時間分解能の関係を示す。図中の 55 MeV および 83 MeV のプロットは CEX ランのデータから求めた表 9.4 に示した結果である。曲線は式 9.5 によるフィット結果を示す。この結果、信号事象エネルギーでの絶対時間分解能は 67.4 ± 16.2 ps、偶奇チャンネル時間分解能は 40.7 ± 0.4 ps である。モンテカルロシミュレーションの結果では絶対時間分解能は 55 ps、偶奇チャンネル時間分解能は 40 ps と見積もられており、偶奇チャンネル時間分解能はモンテカルロシミュレーションと同程度の分解能が得られている。一方、絶対時間分解能は 55 MeV ガンマ線に対して 64.9 ± 8.3 ps であり、モンテカルロシミュレーションの結果よりも悪い値である。また、主に σ_{vertex} の見積もりによる誤差が大きいことに注意する必要がある。なお、このモン

テカルロシミュレーションには検出器内壁での反射による影響は考慮されていないため、反射の影響も考慮したシミュレーション結果を用意し結果を比較することを今後検討している。

$$\text{timing resolution} = \sqrt{\frac{a^2}{E_\gamma} + b^2} \tag{9.5}$$

表 9.4 液体キセノン検出器時間分解能評価結果 (2021 年 CEX ラン)

	信号事象エネルギー (52.8 MeV)	55 MeV	83 MeV
絶対時間分解能 [ps]	67.4 ± 16.2	64.9 ± 8.3	61.8 ± 8.8
偶奇チャンネル時間分解能 [ps]	40.7 ± 0.4	40.0 ± 0.1	33.2 ± 0.1

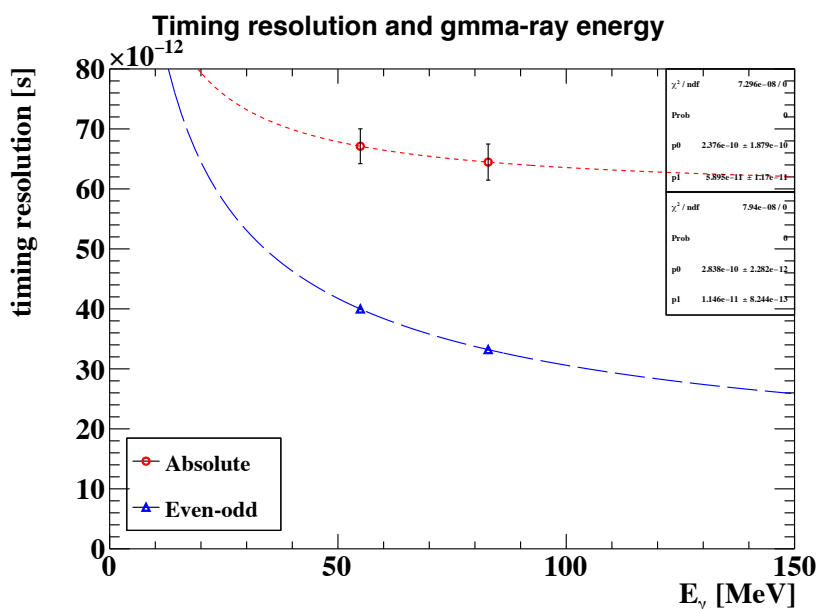


図 9.13 入射ガンマ線エネルギーと液体キセノン検出器時間分解能の関係

時間分解能の位置依存性を図 9.14 および図 9.15 に示す。図 9.14 は uvw の各 1 次元に対する絶対時間分解能と偶奇チャンネル時間分解能を示す。図 9.15 は uv 平面に対する絶対時間分解能の分布を示す。一部データを取得できていないパッチがあるため、全領域について十分なイベント数を取得できていないわけではないことに注意する必要があるが、u 方向および v 方向については位置による時間分解能の変動は 10 ps 以内に抑えられている。一方、w 方向の時間分解能依存性は大きく、 $w > 15$ cm の深い領域では時間分解能は 80 ps より悪い値となる。これは、主に位置分解能の w 依存性の影響を受けていると考えられる。時間再構成では再構成されたガンマ線相互作用位置を使用しており、位置分解能は w が大きい領域ほど悪いことがわかっている。そのため、時間分解能も深い領域で悪化していると考えられる。また、2 次元平面で見ると時間分解能の位置依存性は 15 ps 程度に抑えられていることがわかる (図 9.15)。

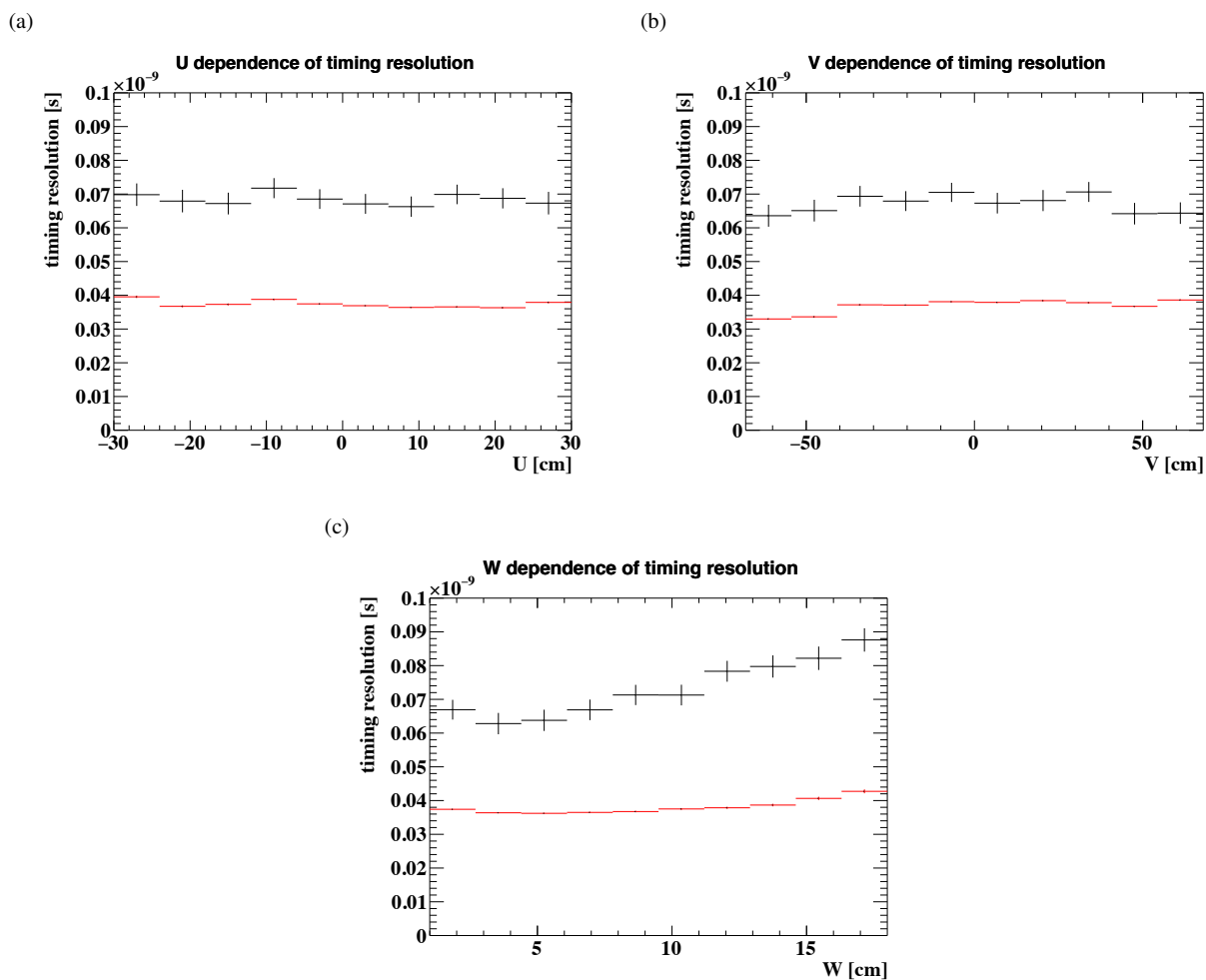


図 9.14 液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性。図中黒線が絶対時間分解能、赤線が偶奇チャンネル時間分解能を示す。(a) u 依存性 (b) v 依存性 (c) w 依存性

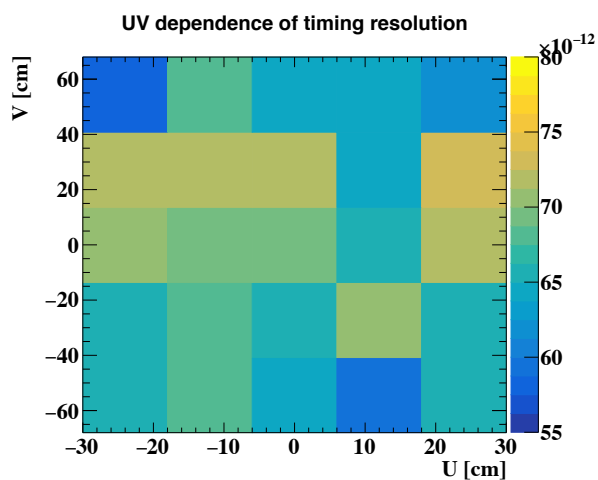


図 9.15 液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性 (uv 平面)

9.3 2022 年液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価

2022 年 CEX ランで取得したデータを用いて液体キセノン検出器の時間分解能を評価した。ここでは暫定的に、2021 年 CEX ランの解析で使用したものと同様のイベントセレクションの条件を課した (表 9.3)。今後、時間較正に使用するパラメータやイベントセレクション条件の最適化を行う必要がある。まず、液体キセノン検出器で再構成されたガンマ線ヒットタイミングとプレシャワーカウンターでのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布を図 9.16 に示す。

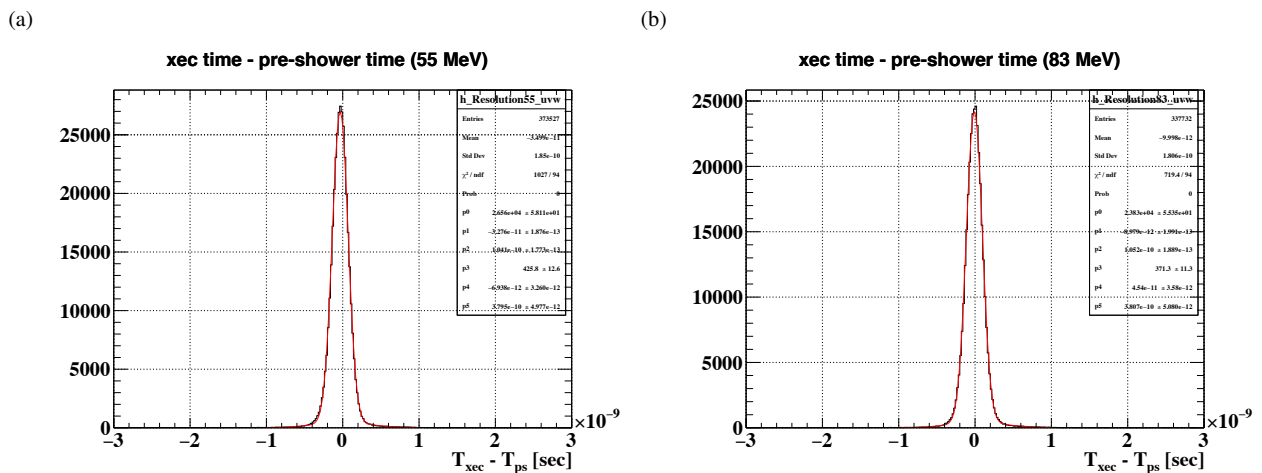


図 9.16 プレシャワーカウンターと液体キセノン検出器でのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布 (a) 液体キセノン検出器に 55 MeV、BGO に 83 MeV のガンマ線が入射した場合 (b) 液体キセノン検出器に 83 MeV、BGO に 55 MeV のガンマ線が入射した場合

液体キセノン検出器内の偶数番目のチャンネルのみを使用して再構成されたガンマ線ヒットタイミングと奇数番目のチャンネルのみを使用して再構成されたガンマ線ヒットタイミングの時間差分布を図 9.17 に示す。

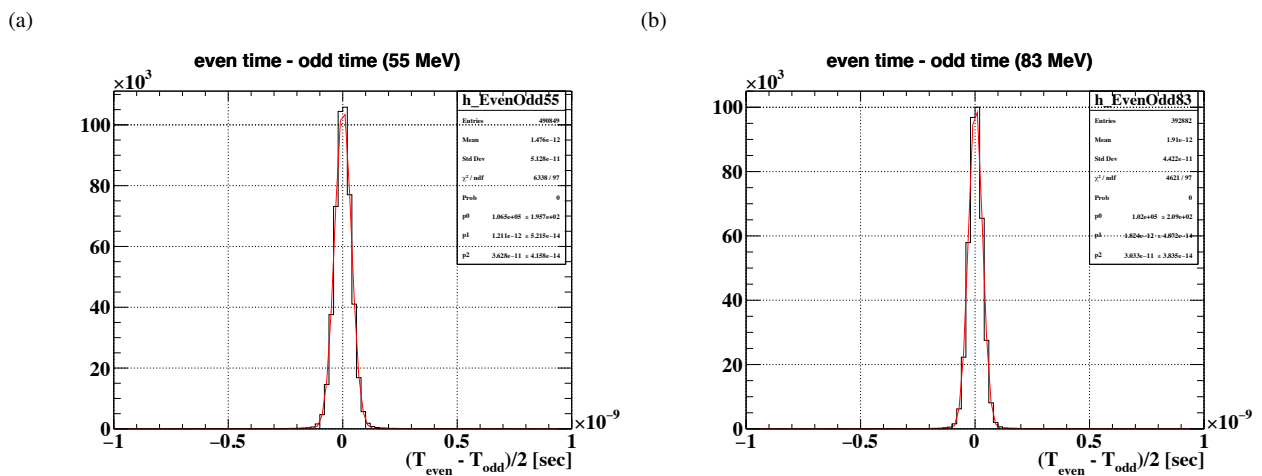


図 9.17 液体キセノン検出器内の奇数番目のチャンネルのみで再構成された時間と偶数番目のチャンネルのみで再構成された時間の時間差分布 (a) 液体キセノン検出器に 55 MeV、BGO に 83 MeV のガンマ線が入射した場合 (b) 液体キセノン検出器に 83 MeV、BGO に 55 MeV のガンマ線が入射した場合

プレシャワーカウンターを構成する2枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布を図9.18に示す。この結果からプレシャワーカウンターの時間分解能は 40.4 ± 0.03 ps である。フィット結果がガウシアンからずれているのはイベントセレクションによるバイアスを受けているためだと考えられる。プレシャワーカウンター全チャンネルで信号が検出されたイベントを選択することでフィットの不一致の影響が低減することが予測される。

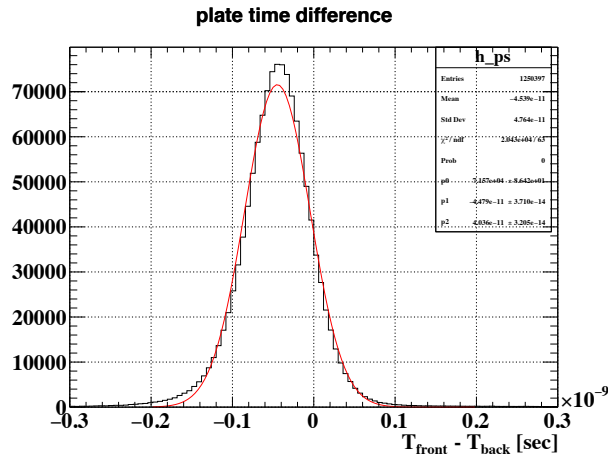


図 9.18 CEX ランにおけるプレシャワーカウンターの2枚のプレートのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布

以上の結果をまとめると2022年CEXランデータから求めた液体キセノン検出器の時間分解能は表9.5のようになる。また、表9.5の値を元に、信号事象エネルギー52.8 MeVでの液体キセノン検出器の時間分解能を推定すると絶対時間分解能は 68.4 ± 1.2 ps、偶奇チャンネル時間分解能は 36.9 ± 0.2 ps となる(図9.19)。しかし、図9.19からわかるように、83 MeVでの絶対時間分解能が悪く、フィットが正しく行われていないため、信号事象エネルギーにおける時間分解能は正しく評価できていないと考えられる。今後詳細な解析の後に再度評価を行う。

表 9.5 液体キセノン検出器時間分解能評価結果 (2022年CEXラン)

	信号事象エネルギー (52.8 MeV)	55 MeV	83 MeV
絶対時間分解能 [ps]	68.4 ± 1.2 (参考値)	67.6 ± 1.7	69.2 ± 1.7
偶奇チャンネル時間分解能 [ps]	36.9 ± 0.2 (参考値)	36.3 ± 0.0	30.3 ± 0.0

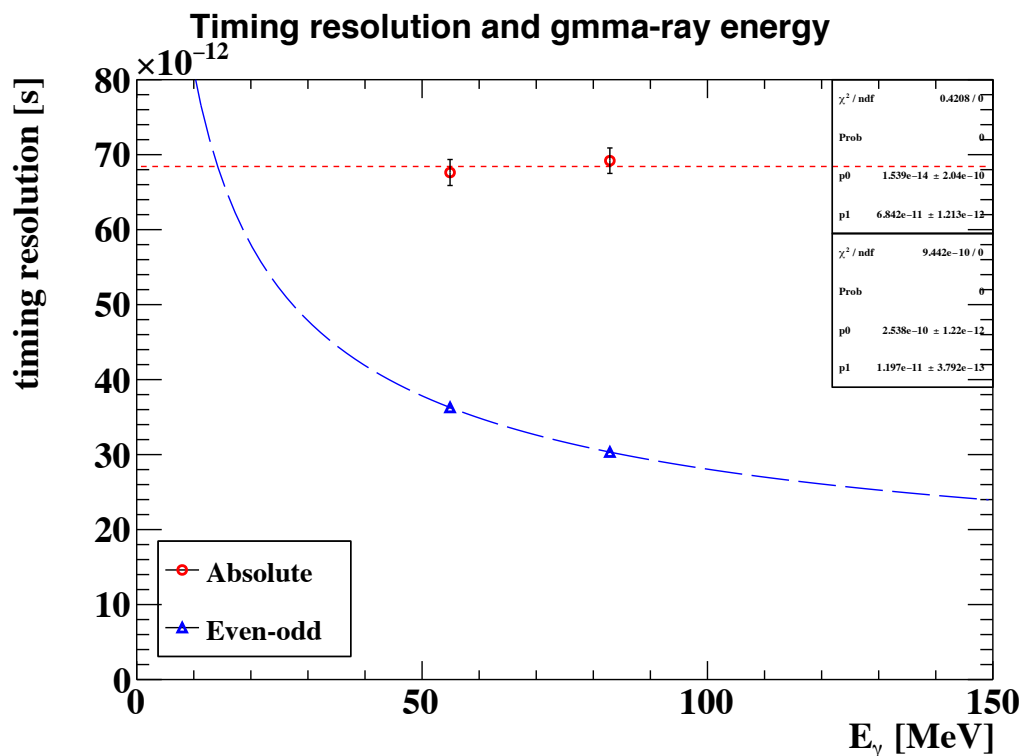


図 9.19 入射ガンマ線エネルギーと液体キセノン検出器時間分解能の関係

また、液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性を図 9.20 および図 9.21 に示す。u 方向および w 方向については 2021 年の結果と同様の傾向を示している。u 方向の時間分解能の位置依存性による影響は 10 ps にとどまり、また w 方向には位置再構成の影響による分解能依存性が見えるがその影響は 2021 年と同程度である。一方、v 方向に関しては、 $v = -35 \text{ cm}$ と $v = 20 \text{ cm}$ 付近の領域で分解能が悪化しており、一方、 $v > 50 \text{ cm}$ の領域では時間分解能が良いことがわかる。また、v 方向の時間分解能の位置依存性による影響は 20 ps 程存在する。また、図 9.21 からわかるように、 $-6 \text{ cm} < u < 18 \text{ cm}$ かつ $14 \text{ cm} < v < 41 \text{ cm}$ の領域で時間分解能が悪いことがわかる。今後原因を究明する。光センサーの較正に問題がある、グローバル補正が不十分である、エネルギー再構成の位置依存性によるイベントセレクションでのバイアスの影響が表れている等の可能性を検討している。

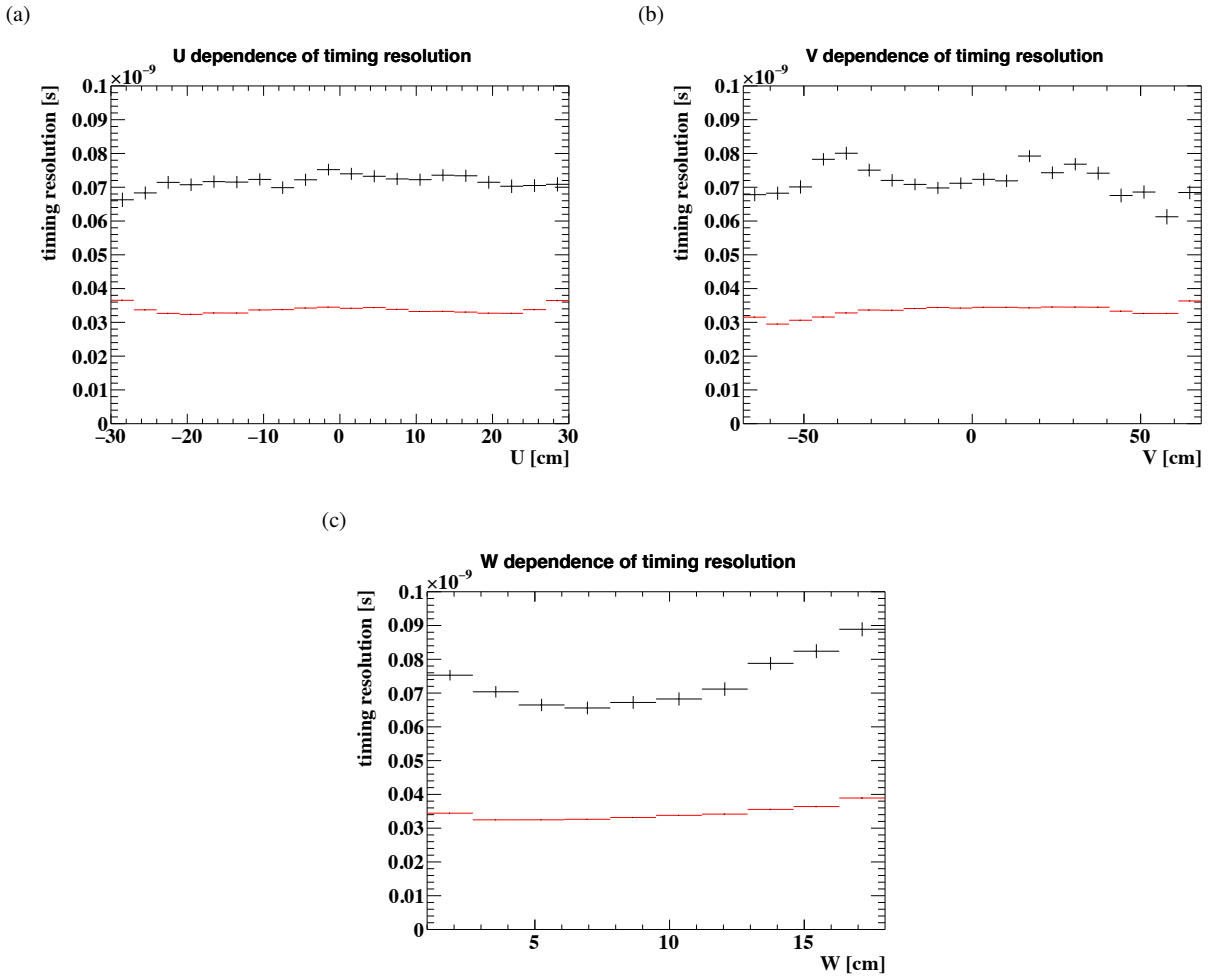


図 9.20 液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性。図中黒線が絶対時間分解能、赤線が偶奇チャンネル時間分解能を示す。(a) u 依存性 (b) v 依存性 (c) w 依存性

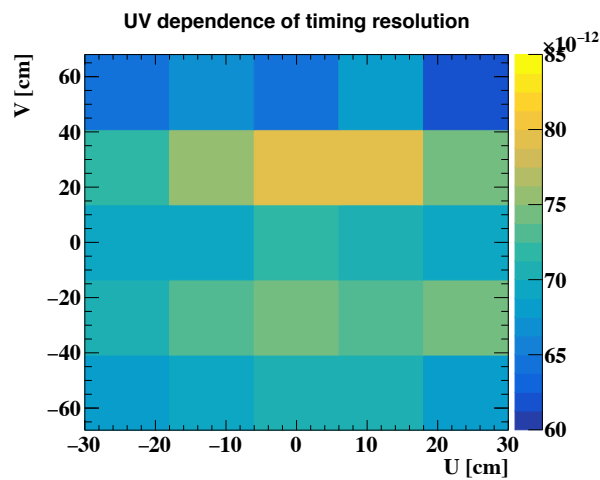


図 9.21 液体キセノン検出器時間分解能の位置依存性 (uv 平面)

2021 年と 2022 年の結果を比較すると、55 MeV での液体キセノン検出器の時間分解能は 2021 年は 64.9 ± 8.3 ps

であるのに対し、2022 年は 67.6 ± 1.7 ps であり、同程度の時間分解能を有していることがわかる。ただし、2022 年データについてはより詳細な解析を今後行う予定である。また、偶奇チャンネル時間分解能は 2021 年データと 2022 年データでは 40.0 ± 0.1 ps と 36.3 ± 0.0 ps となっており、シミュレーション結果である 40 ps と同程度の性能を有していることがわかる。

9.3.1 時間分解能評価の改善可能性

これまでの液体キセノン検出器の時間較正および時間分解能評価の結果を踏まえ今後の改善点を議論する。

プレシャワーカウンターの修理

2022 年 CEX ラン終了時にプレシャワーカウンターおよびリファレンスカウンターに使用されている 4 枚のシンチレーター板のうち 1 枚について、シンチレーターと MPPC が剥離していることが判明した。現状原因はわかっておらず、原因を究明するとともにカウンターの修理を行う必要がある。また、現状のカウンター固定方法や MPPC の接着方法も再検討し変更の必要があれば対処する。また、2022 年 σ_{vertex} 測定時に液体キセノン検出器の前面にカウンターを設置した際に、ケーブルが何らかの原因で力を受けたことにより故障した。この件についても原因を調査し対応策を検討する。

プレシャワーカウンターの印加電圧の再最適化

現状プレシャワーカウンターに印加されている電圧はカウンター制作時点での I-V 測定の結果求められた値である。しかし、プレシャワーカウンターの信号波高の低下が確認されている。2022 年の CEX ランではトリガーの閾値設定に影響が出るほどの低下は見られなかったが、2023 年以降の CEX ランでは各チャンネルへの印加電圧を再調整する必要がある。また、同時に原因の調査も行う。放射線損傷が原因であれば CEX ラン中に光量の減少が確認されるはずであり、CEX ラン中のプレシャワーカウンターの検出電荷量の変動を確認する。

プレシャワーカウンター較正の必要性の検討および手法の再検討

プレシャワーカウンターで正しくガンマ線ヒットタイミングを再構成するためにはプレシャワーカウンターの較正を行う必要がある。一方、プレシャワーカウンターの較正データの取得は、各プレートにつき 25 点、さらに各点につき 5000 イベント取得する必要があるため時間のかかる作業でもある。2021 年と 2022 年のプレシャワーカウンターの較正データを比較し、2023 年以降も較正データを毎年取得する必要性の是非を検討する。

2023 年以降もプレシャワーカウンターの較正データを毎年取得する必要があるとの結論が出た場合、較正手法の見直しを行う。現状は線源位置をスキャンしたデータを CEX ラン前に取得しているが、CEX ランのデータ自体を用いて較正を行うことができるかを検討する。また、CEX ランおよび σ_{vertex} 測定のイベントセレクションの指定次第ではキャリブレーションの必要性が低くなる。例えば、イベントセレクションとしてカウンターの全チャンネルで信号が検出されたイベントのみを使用することにした場合、カウンターのガンマ線ヒット時間は各チャンネルでの信号検出時刻の平均をガンマ線ヒットタイミングとして使用しているため、カウンター間のオフセットの影響は相殺される。一方、ガンマ線のヒット位置の再構成においてはチャンネル間のオフセットが較正されていないとバイアスになり得るが、現状どの程度の影響があるか把握できていない。今後、イベントセレクションの設定について検討し、較正が必要ないようであれば 2023 年以降のプレシャワーカウンターの較正は行わない。

CEX ラン実施時期の検討

2021 年および 2022 年はいずれも物理ラン終了後、すなわち、年間のビームタイムの最後の期間に行った。ビームタイム中は PDE が減少することを考慮すると物理ラン終了後の状態で CEX ランを行うことで PDE が最低の状

態での液体キセノン検出器の分解能を評価することができ、ビームタイム中の分解能の最低の状態を把握できるという長所がある。一方、CEX ランをビームタイム開始時、すなわち物理ラン開始以前に実施するというのも検討すべきである。シャットダウン中に MPPC のアニーリングが行われ、ビームタイム開始時は PDE が最大である。PDE が最大の状態での液体キセノン検出器の性能を把握することも重要である。また、CEX ランでは物理ラン中に取得される較正データよりもより詳細なデータを取得可能であり、物理ラン開始以前に行うことで、検出器立ち上げ段階での問題点に早く気づくことができる、また、CEX ランでの較正結果を物理データ取得開始後早い段階から適用可能であるなどのメリットがある。さらに、CEX ランでは液体水素ターゲットの安定性が問題であり、ターゲットの状況次第で DAQ を終了させるために必要な時間が大幅に前後するという事情がある。仮に液体水素ターゲットが想定以上に安定だった場合、CEX ランの期間を早期に切り上げ、物理ランの開始を早めることができる。CEX ランをビームタイムの最後に行った場合、CEX ランと物理ランではビームやターゲットのセットアップが異なるためその切り替え作業を考えると物理ランを再開することは困難である。2023 年についてはビームタイム開始直後の CEX ランの実施は困難であると結論が出ているが、2024 年以降の CEX ランの実施時期について検討の可能性はある。

MPPC、PMT ゲインと時間分解能の関係性に関する研究

本稿では詳細は述べていないが、2022 年の CEX ランでは PMT および MPPC の印加電圧を変更した状態でも試験的に CEX データを取得した。PMT に関しては 2022 年物理ランでは PMT ゲインが 0.8×10^6 に設定されるよう印加電圧を調整した。しかし、PMT は時間経過とともにゲインが減少することがわかっており、同等のゲインを今後数年間の物理ラン中も保持しようとする印加電圧を上げ続ける必要がある。そのため、PMT への印加電圧を通常よりも下げ、ゲインを 0.6×10^6 に調整した上で CEX データを取得した。PMT のゲインが 0.6×10^6 の状態でも同程度の性能を持つことが示された場合、長期的な物理データ取得中に PMT のゲインを下げざるを得なくなった場合にも DAQ を続けることが可能であるということになる。また、MPPC は通常の物理ラン中はオーバー電圧 7 V で運用しているが、オーバー電圧 5 V での CEX データも取得した。オーバー電圧を下げることでクロストークやアフターパルスの発生確率が低下することが期待される一方、ゲインは低下することが予測される。オーバー電圧が時間分解能に与える影響を調査することで今後の物理ランで使用する MPPC オーバー電圧について検討する。

液体キセノンガンマ線検出器時間較正手法の改善

液体キセノン検出器の現状の時間較正手法には改善の余地がある。例えば、グローバル補正では現状は u、v、w の各一次元方向の補正しかなされていない。これは 2021 年の CEX ランで取得できた統計量では一次元方向の補正が限界だったためである。また、2021 年は全 patch のスキャンが完了しなかったため、uv 平面ではイベントが存在しない領域があったことも影響している。2022 年の CEX ランでは十分な統計量のデータが取得できており、uv 平面の 2 次元平面でのグローバル補正も可能であると考えている。今後は、2 次元のグローバル補正も適用した上でより時間分解能が向上するかを確認する。また、較正で使用する波形解析パラメータやシンチレーション光伝播速度などについても最適化を行う。現状、2022 年データについては 2021 年データに対して最適化されたパラメータを用いて解析している。改めて各パラメータの最適化を行う必要がある。

より詳細な液体キセノンガンマ線検出器時間分解能の評価

2022 年の CEX ランのデータについて上記のような較正手法の改善の後に、より詳細な時間分解能評価を行う。タイムオフセットおよび時間分解能の位置依存性、時間依存性、ターゲット圧力依存性、ターゲット位置依存性などについてより詳細に解析する。また、CEX ランのパッチスキャン中は中央付近のパッチ 13 を参照用パッチとして定義しており、パッチを変えるたびにパッチ 13 データを取得している。このパッチ 13 のデータの時間変動を追

うことでタイムオフセットの時間変動を知ることができる。仮にタイムオフセットが変動することでガウシアン分布が広がっていた場合、時間分解能を過小評価することになる。また、イベントセレクションについてもより詳細に検討し、最終的な時間分解能を評価する。

9.4 まとめ

2021年 CEX ランおよび 2022年 CEX ランのデータを使用し、液体キセノン検出器の時間分解能を評価した。まず、2021年 CEX ランに先立ち、 σ_{vertex} 測定で使用するリファレンスカウンターを制作した。その結果、2枚のプレートについてラボでの事前性能評価において 44.0 ps および 48.8 ps の時間分解能を有するカウンターの制作に成功した。エリアでのプレシャワーカウンター較正の結果、CEX ランおよび σ_{vertex} 測定で使用する全カウンターについて 50 ps を上回る高分解能を有していることがわかり、これは液体キセノン検出器の時間分解能評価で使用するための要求性能を達成している。2021年 σ_{vertex} 測定では十分なイベント数は取得できなかったものの σ_{vertex} は 68.4 ± 2.8 ps となった。この結果を使用し、液体キセノン検出器の時間分解能を評価した結果、信号事象エネルギー 52.8 MeV では 67.4 ± 16.2 ps であった。uv 方向位置依存性が時間分解能に与える効果は約 15 ps であり、w 方向には主に位置再構成の影響による時間分解能の位置依存性が見られる。

2022年 CEX ランでは事前のプレシャワーカウンター較正で一部カウンターに問題が発覚した。問題のあるカウンターについては σ_{vertex} 測定のみで使用されたが、十分な時間分解能を有しており、 σ_{vertex} 測定の解析に影響は及ぼさないと考えている。 σ_{vertex} 測定は 2 回行われ、それぞれ異なるターゲット位置およびビームレートで行われた。これは CEX ランの途中でターゲット位置およびビームレートが変更されたためである。これら 2 回の σ_{vertex} 測定の結果を比較すると有意に異なっており、液体キセノン検出器の時間分解能評価の際には同様のセットアップで取得された σ_{vertex} 測定の結果を使用しなければならないことがわかった。そのため、液体キセノン検出器の時間分解能評価にはパッチスキャンと同様のセットアップで取得された 2 回目の結果 (68.1 ± 1.7 ps) を使用することにする。この結果を使用し、液体キセノン検出器の時間分解能を評価すると、55 MeV ガンマ線に対して 67.6 ± 1.7 ps であった。また、83 MeV での時間分解能が 55 MeV での時間分解能と比較して悪いため、信号事象エネルギーに対する時間分解能評価は正しく行うことができていない。そのため、今後詳細な解析の後に信号事象エネルギーでの時間分解能を評価する必要がある。現状の結果は時間較正に使用するパラメータやイベントセレクションは最適化されておらず、今後改善される可能性がある。さらに、v 方向の位置依存性が見られており、原因を究明する。

また、液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能向上を目指す。RMD イベントを用いて求めた $t_{e\gamma}$ 分解能は、液体キセノン検出器でのガンマ線検出時間分解能と陽電子タイミンングカウンターの時間分解能の結果とコンシステントである。一方、陽電子タイミンングカウンターの時間分解能はタイミンングカウンターでのヒット数 n_{TC} を用いて $110/\sqrt{n_{\text{TC}}}$ であり、現状 $t_{e\gamma}$ 分解能は液体キセノン検出器の時間分解能で制限されている。液体キセノン検出器の時間分解能を向上させることでより高感度での $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索が可能である [27]。

第 10 章

結論および展望

本研究では光センサー較正および CEX ランデータを使用した液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能評価を行なった。

10.0.1 光センサー較正

液体キセノンガンマ線検出器では光センサーのゲインや PDE、QE などのパラメータを使用し入射光子数を再構成することでガンマ線のエネルギーを計算している。そのため、ガンマ線のエネルギー再構成を正確に行うためには光センサーの較正を行い、ゲインなどのパラメータを正確に把握しておく必要がある。光センサーの応答は時間変動するため、ビームタイム中光センサーの較正を行い続ける必要がある。特に、物理データ取得時はトリガーのエネルギー閾値を適切に保つためには光センサーの較正は重要である。まず、ノイズテンプレートを作成し、定期的に更新することでエネルギーに対する影響を 1.5% 以下に抑えることができた。しかし、これは物理解析に向けた較正としては不十分であり、今後、ノイズテンプレートをより短周期で更新することにより 0.03 MeV 以下の影響まで抑える見通しである。

PMT のゲインについては、ビームタイム中は 0.8×10^6 に調整し、必要に応じて PMT 印加電圧の再調整を行なった。その結果、ビームタイムを通して 0.65×10^6 から 0.8×10^6 の範囲内で安定的に PMT ゲインを運用することができた。

MPPC の PDE は放射線損傷により減少することが過去の MEG II 実験の実績からわかっており、DAQ 継続のために要求される 4% の PDE をビームタイム終了まで確保するためにはモニターし続ける必要がある。2022 年物理ラン開始時点では平均 PDE は 17.7% であり、物理ラン終了時は 11.1% であった。物理ラン終了まで十分な PDE を確保した状態で運用することができた。また、PDE および QE のモニター結果より、光量が 2021 年と比較して低下していることが判明した。光量補正前 QE の推移により光量をモニターすると、2021 年はビームタイムを通して 16% 前後で推移していたのに対し、2022 年はビームタイム開始直後は 9.6% であり、その後不純物混入によるものと思われる影響により 6.5% まで急激に低下した。その後液体キセノンの純化により 11.0–11.5% 程度まで回復し物理ランを開始した。物理ラン開始後も気体キセノンの純化は行われており、物理ラン終了時まで光量の回復傾向が見られた。2023 年は十分に液体キセノンの純化を行なった上で物理ランを開始する必要がある。また、QE の測定結果から液体キセノンガンマ線検出器内の液体キセノンの液面を推定したところ Outer 面の最上部一列は液体キセノンで満たされていないことが判明した。シャットダウン中に液体キセノンを追加することで 2023 年の物理ランでは検出器応答の一様性が改善されることが期待される。

光センサー較正に関しては、物理データ解析に先立ち、より詳細な較正を行う必要がある。ノイズテンプレートをより短周期で作成することで物理ラン中全期間を通してノイズ環境を改善する必要がある。また、物理データ取得時に一定の割合で LED を使用したゲイン較正データも取得されているため、このデータの解析により光量や

PMT のゲインの時間変動をより詳細に較正することができる。

10.0.2 液体キセノンガンマ線検出器時間分解能評価

高感度で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を探索するためには、ターゲット上でのガンマ線と陽電子の放出タイミングの時間差を高精度に測定する必要がある。そのため、液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能を評価することは重要である。

液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能は CEX ランで評価される。CEX ランでは液体水素ターゲットに π^- ビームを入射することで放出されるガンマ線のうち、 180° の角度で放出されたものを選択することで 55 MeV および 83 MeV のガンマ線を使用する。プレシャワーカウンターでのガンマ線ヒットタイミングと液体キセノンガンマ線検出器でのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布の広がりから液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能を見積もる。その際に、ターゲット中で π^0 がガンマ線に崩壊する位置 (vertex) の広がり (σ_{vertex}) を求める必要がある。そこで、新たにリファレンスカウンターを作成し、液体キセノン検出器の前面に設置し、プレシャワーカウンターとリファレンスカウンターでのガンマ線ヒットタイミングの時間差分布から σ_{vertex} を評価した。2021 年 σ_{vertex} 測定では、 $\sigma_{\text{vertex}} = 68.4 \pm 2.8$ ps と測定された。2022 年 σ_{vertex} 測定では、2 回に渡り異なるセットアップで測定を行なった。これは、CEX ランの途中でターゲット位置およびビームレートが変更されたためである。その結果、2 回の測定結果に有意な差が見られ、液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能評価においては時間分解能評価用の DAQ と同様のセットアップである 2 回目の σ_{vertex} 測定の結果を使用する必要があることがわかった。そのため、2 回目の測定結果である $\sigma_{\text{vertex}} = 68.1 \pm 1.7$ ps を液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能評価では使用することにした。プレシャワーカウンターを時間基準として液体キセノン検出器の光センサーのタイムウォークやタイムオフセットの較正をし、また、uvw 方向の 1 次元での位置依存性補正を行なった上で液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能を評価した。2021 年 CEX ランのデータを用いた時間分解能評価の結果は 67.4 ± 16.2 ps であった。2022 年データに関しては信号事象エネルギーでの時間分解能は今後より詳細な解析の後に評価するが、55 MeV での時間分解能は 67.6 ± 1.7 ps と評価された。ただし、2022 年データに関しては暫定的な値であり、より詳細な解析を進める必要がある。

今後は主に、2022 年データの時間分解能評価を引き続き行う。時間較正では液体キセノン中でのシンチレーション伝播速度をはじめとしたさまざまなパラメータが使用される。現在は 2021 年データで最適化された値を使用して較正されているため、2022 年データについても改めて最適化する必要がある。また、液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能について、時間依存性、位置依存性、ターゲット圧力依存性等についても検討する。さらに、CEX ラン中はパッチスキャン中に、パッチを移動するたびに中央付近の特定のパッチのデータを取得しており、そのデータを使用することでタイムオフセットの時間変動を追うことができる。仮に、タイムオフセットの時間変動が無視できないほど大きかった場合は時間分解能悪化の原因となる。これらの詳細な解析を行うことで最終的な液体キセノンガンマ線検出器の時間分解能を求める。

謝辞

本研究を行う機会を与えてくださった森俊則教授、大谷航准教授に感謝致します。PSI に滞在し、現地で各国の研究者と実験を遂行するという貴重な経験を積むことができました。指導教員である大谷航准教授にはミーティングや発表練習などの場面でご指導を頂きました。岩本敏幸助教には、研究を進める上で日々ご相談をさせて頂き、また、PSI での生活においてもお世話になりました。内山雄祐特任助教にはミーティングでアドバイスを頂きました。潘晟特別研究員には、特に光センサー較正において共に研究を進めて頂きました。特に、恩田理奈博士には液体キセノン検出器時間分解能評価に関して多くのことを教えて頂きました。小林暁氏には光センサー較正について引き継ぎを頂き、液体キセノン検出器全般について多くの知見をいただきました。大矢淳氏には液体キセノン検出器時間較正に関してアドバイスをいただき、ご協力をいただきました。また、米本拓氏、山本健介氏、吉田圭佑氏、李維遠氏とは PSI で共に研究生活を過ごし、日々議論を交わす機会を頂きました。東京では辻直希博士、増田隆之介氏、村田樹氏、池田史氏、上田裕貴氏、横田凜太郎氏と楽しい研究生活を送ることができました。また、素粒子センターの秘書の方々には出張時の事務手続き等でお世話になりました。

最後に、研究生活を支えてくれた家族に感謝します。特に、進学をサポートしてくれた祖父へ感謝します。

参考文献

- [1] S. Chatrchyan et al., Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics* (2012). doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021, arXiv:1207.7235
- [2] G. Aad et al., Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics* (2012). doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020, arXiv:1207.7214
- [3] Y. Fukuda et al., Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical Review Letters* (1998). doi:10.1103/PhysRevLett.81.1562, arXiv:9807003
- [4] Q. R. Ahmad et al., Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by 8B solar neutrinos at the sudbury neutrino observatory. *Physical Review Letters* (2001). doi:10.1103/PhysRevLett.87.071301, arXiv:0106015
- [5] S. Petcov The processes of $\mu \rightarrow e\gamma, \mu \rightarrow 3e, \nu' \rightarrow \nu + \gamma$ in the Weinberg-Salam model with neutrino mixing, *Sov. J. Nucl. Phys.* 25, 340. (1997)
- [6] B. W. Lee, R. E. Shrock, Natural suppression of symmetry violation in gauge theories: Muon- and electron-lepton-number nonconservation. *Physical Review D* (1977). doi:10.1103/PhysRevD.16.1444
- [7] A. M. Baldini et al., Search for the lepton flavour violating decay $\mu \rightarrow e + \gamma$ with the full dataset of the MEG experiment: MEG Collaboration. *European Physical Journal C* (2016). doi:10.1140/epjc/s10052-016-4271-x, arXiv:1605.05081
- [8] A. M. Baldini et al., The design of the meg II experiment. *The European Physical Journal C* 78(5), 380 (2018). doi:10.1140/epjc/s10052-018-5845-6
- [9] Higgstan. <http://higgstan.com/>
- [10] R. Barbieri, L. J. Hall, Signals for supersymmetric unification, *Physics Letters B* 338, 212-218. (1994)
- [11] R. Barbieri, L. Hall, A. Strumia, Violations of lepton flavour and CP in supersymmetric unified theories, *Nuclear Physics B* 445, 219-251. (1995)
- [12] P. Ciafaloni, A. Romanino, A. Strumia, Lepton flavour violations in SO(10) with large $\tan \beta$, *Nuclear Physics B* 458, 3-22. (1996)
- [13] J. Hisano, T. Mori, M. Yamaguchi, Exact event rates of lepton flavor violating processes in supersymmetric SU(5) model, *Physics Letters B* 391, 341-350. (1997)
- [14] J. Hisano, et al., Lepton-flavor violation in the supersymmetric standard model with seesaw-induced neutrino masses, *Physics Letters B* 357, 579-587. (1995)
- [15] J. Hisano, et al., Lepton-flavor violation via right-handed neutrino Yukawa couplings in the super-symmetric standard model, *Physics Review D* 53, 2442-2459. (1996)
- [16] J. Hisano, D. Nomura, Solar and atmospheric neutrino oscillations and lepton flavor violation in

- supersymmetric models with right-handed neutrinos, *Physics Review D* 59, 116005. (1999)
- [17] J. Casas, A. Ibarra, Oscillating neutrinos and $\mu \rightarrow e\gamma$, *Nuclear Physics B* 618, 171-204. (2001)
- [18] S. Antusch, E. Arganda, M.J. Herrero, A.M. Teixeira, Impact of θ_{13} on lepton flavour violating processes within SUSY seesaw, *J. High Energy Phys.* 11 (2006) 090, <http://stacks.iop.org/1126-6708/2006/i=11/a=090>.
- [19] K. Abe, et al., Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam, *Physical Review Letters* (2011). doi:10.1103/PhysRevLett.107.041801
- [20] S. Kobayashi, Full Commissioning of Liquid Xenon Scintillation Detector to Search for $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ with the Highest Sensitivity in MEG II Experiment. PhD thesis (2022)
- [21] J. Adam et al., The MEG detector for $\mu \rightarrow e^+\gamma$ decay search. *European Physical Journal C* (2013). doi:10.1140/epjc/s10052-013-2365-2, arXiv:1303.2348
- [22] R. Onda, Suppression of γ -ray backgrounds for the highest sensitivity of $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ search in MEG II experiment. PhD thesis (2021)
- [23] 小林暁, MEG II 実験液体キセノン検出器における高精度なガンマ線位置測定に関する研究. 修士論文 (2019)
- [24] 恩田理奈, MEG II 実験における γ 線検出の時間較正と背景事象削減のための研究開発. 修士論文 (2019)
- [25] R. Onda, et al., Optimal design of plastic scintillator counter with multiple SiPM readouts for best time resolution, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 936, 563-564.
- [26] S. Kobayashi, et al., Precise measurement of 3D-position of SiPMs in the liquid xenon gamma-ray detector for the MEGII experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 936, 189-191.
- [27] S. Ogawa, Liquid xenon detector with highly granular scintillation readout to search for $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ with sensitivity of 5×10^{-14} in MEG II experiment, PhD thesis (2020)
- [28] D. Kaneko, The final result of $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ search with the MEG experiment, Ph.D. dissertation, The University of Tokyo. (2016)
- [29] A. Papa, Search for the lepton flavour violation in $\mu \rightarrow e\gamma$. the calibration methods for the meg experiment. PhD thesis (2009)
- [30] T. Doke, K. Masuda, Present status of liquid rare gas scintillation detectors and their new application to gamma-ray calorimeters, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 420(1-2) 62 (1999)
- [31] E. Aprile, T. Doke, Liquid xenon detectors for particle physics and astrophysics. *Reviews of Modern Physics* (2010). doi:10.1103/RevModPhys.82.2053, arXiv:0910.4956
- [32] A. Baldini, et al., Liquid Xenon Scintillation Calorimetry and Xe Optical Properties, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 13, 547-555. (2006)
- [33] A. Hitachi, et al., Effect of ionization density on the time dependence of luminescence from liquid argon and xenon, *Physical Review B* 27, 5279-5285. (1982)
- [34] Y. Nishimura, A Search for the Decay $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ Using a High-Resolution Liquid Xenon Gamma-Ray Detector. PhD thesis (2010)
- [35] K. Fujii, et al., High-accuracy measurement of the emission spectrum of liquid xenon in the vacuum ultraviolet region, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 795, 293-297. (2015)
- [36] Y. Hisamatsu The Performance Test of Photo multiplier for MEG Liquid Xenon Calorimeter, Master's thesis, The University of Tokyo. (2005)
- [37] 小川真治, MEG II 実験のための真空紫外光に感度のある大型 MPPC を用いた高精細読出し液体キセノンガン

- マ線検出器の開発. 修士論文 (2016)
- [38] S. Ritt, R. Dinapoli, U. Hartmann Application of the DRS chip for fast waveform digitizing, *Nucl. Instr. Meth. A* 623, 486-488. (2010)
- [39] S. Ritt, Design and performance of the 6 GHz waveform digitizing chip DRS4. in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* (2008). doi:10.1109/NSSMIC.2008.4774700
- [40] S. Ritt, The DRS chip: Cheap waveform digitizing in the GHz range. in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2004). doi:10.1016/j.nima.2003.11.059
- [41] A. M. Baldini, et al., MEG Upgrade Proposal, arXiv:1301.7225. (2013)
- [42] K. Ieki, et al., Large-Area MPPC with Enhanced VUV Sensitivity for Liquid Xenon Scintillation Detector, arxiv:1809.08701.
- [43] V. Andreev et al., A high-granularity scintillator calorimeter readout with silicon photomultipliers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2005). doi:10.1016/j.nima.2004.12.002
- [44] W. Ootani et al., Development of deep-UV sensitive MPPC for liquid xenon scintillation detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2015). doi:10.1016/j.nima.2014.12.007
- [45] Erika Gautti, Radiation damage on silicon photo-multipliers, <https://www.desy.de/garutti/LECTURES/SiPM-RadDamage.pdf>
- [46] 浜松ホトニクス, MPPC ハンドブック https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf
- [47] 松澤暢生, MEG II 実験液体キセノンガンマ線検出器の光センサーの性能評価並びに検出器安定性の検証. 修士論文 (2018)
- [48] A. Baldini et al., A radioactive point-source lattice for calibrating and monitoring the liquid xenon calorimeter of the MEG experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2006). doi:10.1016/j.nima.2006.06.055
- [49] J. Adam et al., Calibration and monitoring of the MEG experiment by a proton beam from a Cock-croftWalton accelerator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2011). doi:10.1016/j.nima.2011.03.048
- [50] P.W.Cattaneo et al., "Development of High Precision Timing Counter Based on Plastic Scintillator with SiPM Readout," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61(5) 2657, Oct (2014)