

修士論文 2025年度（令和7年度）

軟ガンマ線突発現象の観測に向けた  
電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡のレート  
耐性向上と広帯域化

京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
物理学第二教室 宇宙線研究室

佐藤 太陽

[sato.taiyo.65e@kyoto-u.jp](mailto:sato.taiyo.65e@kyoto-u.jp)

2026年1月



## Abstract

ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象として知られており、エネルギーフラックスのピークを MeV 帯域に持つ。1 – 50 MeV 帯の軟ガンマ線で初期放射を高い時間分解能で分光・偏光観測することは、その放射機構・エネルギー散逸過程を解明するうえで重要であると期待されている。一方で、従来の観測機器ではこの帯域で十分な感度を持つ広視野の撮像分光・偏光観測は達成されておらず、また大規模な突発現象の観測では高事象率環境下での不感時間も無視できない。電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) は、ガスを用いた Time Projection Chamber (TPC) とシンチレータから構成され、入射ガンマ線によるコンプトン散乱事象を完全に再構成可能である。ETCC を搭載した気球実験 SMILE-2+ では、0.2 – 2.1 MeV のエネルギー帯域でのガンマ線観測に成功している。本研究では、次期気球実験 SMILE-3 を念頭に、レート耐性を高めるデータ収集系の再設計と、1 MeV 以上での感度向上を目的とした、対生成事象の飛跡情報を用いた識別・再構成手法の開発を行った。現行のデータ収集システムではトリガー方式に起因する高レート時の不感時間増加 (気球フライト中で約 15 %) という問題があるほか、検出器の大型化に伴う運用性低下の懸念があった。そこで不感時間を抑える新トリガー方式 (同条件で数 %) への対応や外部クロック配布による時刻同期、入出力の拡張性を持つ設計のトリガーコントロールユニットを含む新構成を設計し、プロトタイプを製作した。新データ収集系を用いて TPC、シンチレータを運用し、評価を行った。対生成事象解析について、SMILE-3 では高エネルギー事象解析によって観測帯域を 5 MeV まで拡張できると見込まれている。この領域ではコンプトン散乱に加えて電子・陽電子対生成事象が無視できない割合で混入しバックグラウンドとなるが、従来の簡易的な飛跡パラメータに基づく手法では高エネルギーのコンプトン散乱事象との混同が避けられず、感度低下の一因となっていた。そこで本研究では、分子科学研究所の UVSOR BL1U ビームラインでガンマ線を照射する実験を行い、点群解析での 2 トラック構造の検出による対生成事象の識別・再構成手法を構築した。到来方向の再構成により、ビームラインのガンマ線由来の対生成事象を再構成できることを確認した。



# 目次

<b>第1章 MeV ガンマ線天文学</b>	<b>1</b>
1.1 宇宙の高エネルギー突発現象と MeV ガンマ線	1
1.1.1 ガンマ線バースト	1
1.2 光と物質の相互作用	4
1.2.1 光電効果	5
1.2.2 コンプトン散乱	7
1.2.3 電子陽電子対生成	7
1.3 MeV ガンマ線の観測手法	9
1.3.1 コーデッドマスク法	9
1.3.2 コンプトンカメラ	11
1.3.3 次世代望遠鏡に対する要求	13
<b>第2章 ETCC と SMILE 実験</b>	<b>15</b>
2.1 ETCC の検出原理	15
2.2 検出器の構成	17
2.2.1 ガス検出器	17
2.2.2 ピクセルシンチレータアレイ (PSA)	21
2.3 ETCC の雑音除去能力	21
2.4 ETCC による高エネルギー事象観測	23
2.5 気球観測実験 SMILE と SMILE-3 実験	26
2.5.1 SMILE-I / SMILE-2+	26
2.5.2 SMILE-3	28
<b>第3章 SMILE-3 用 DAQ システムとトリガーコントロールユニットの開発</b>	<b>31</b>
3.1 従来のデータ収集システムとその問題点	31
3.1.1 $\mu$ -PIC 読み出し基板	31
3.1.2 PSA ユニット	33
3.1.3 トリガーコントロールユニット (TCU) と ETCC トリガーモード	37
3.1.4 従来システムの問題点	39
3.2 SMILE-3 搭載データ収集システムへの要求	40

3.3	新データ収集システムの設計	41
3.3.1	全体構成	41
3.3.2	$\mu$ -PIC 読み出し基板のアップデート	43
3.3.3	MPPC 搭載型 PSA ユニット	43
3.3.4	TCU 内部のロジック設計とトリガー方式	44
3.3.5	イベント時間情報の付与	47
3.3.6	ハードウェア設計	47
3.4	実験室での性能評価	49
3.4.1	TCU の基本機能確認	49
3.4.2	DAQ 試験	50
3.5	まとめと今後の展望	55
<b>第 4 章</b>	<b>ETCC における対生成事象の識別と再構成</b>	<b>57</b>
4.1	ETCC における電子陽電子対生成事象	57
4.2	UVSOR BL1U 高エネルギー光子照射実験	61
4.2.1	実験の概要	61
4.2.2	実験装置	62
4.3	データの事前解析	66
4.3.1	ビーム同期補正とイベント選別	66
4.3.2	飛跡の再構成と取得できたデータの例	68
4.4	対生成事象の識別と再構成手法の開発	69
4.4.1	識別アルゴリズムの概要	69
4.4.2	解析結果と考察	72
4.5	まとめと今後の展望	74
<b>第 5 章</b>	<b>まとめと今後の展望</b>	<b>77</b>
5.1	まとめ	77
5.2	課題と今後の展望	78
	<b>謝辞</b>	<b>79</b>
	<b>参考文献</b>	<b>80</b>

## 目 次

1.1	BATSE 検出器が観測した 2074 個の GRB の $T_{90}$ 分布 (Kouveliotou et al. (1993))。 . . . . .	2
1.2	BATSE 検出器が観測した GRB の天球上分布 (Fishman et al. (1994))。 . . . .	3
1.3	CGRO 衛星の検出器によって観測されたガンマ線バースト GRB 990123 のスペクトル。上段：光子フラックス $N_E$ 、下段：エネルギーフラックス $E^2 N_E$ (Briggs et al. (1999))。 . . . . .	3
1.4	Fermi 衛星の検出器によって観測された GRB 090902B のスペクトル。Band 関数+パワーロー成分でフィッティングされている (Abdo et al. (2009a))。 . . . .	4
1.5	放射機構およびジェット構造の違いによって期待されるガンマ線偏光度の概略を示す。シンクロトロン放射の場合、磁場配置および観測者の視線角に強く依存して偏光度が変化し、特にトロイダル磁場ではジェット縁を観測する条件下で高い偏光度 ( $\sim 50\%$ ) が期待される一方で、視線角やジェット構造によっては偏光度が低下またはゼロとなる場合もある (Gill et al. (2021))。 . . . .	5
1.6	ガンマ線が Ar を通過するときの反応断面積のエネルギー依存性 (National Institute of Standards and Technology (2009))。 . . . . .	6
1.8	INTEGRAL 衛星に搭載された SPI 検出器の (a): 概念図、(b): 位置感度型検出器 (Ge 検出器アレイ)、(c): コーデッドマスク (Vedrenne et al. (2003))。 . . . .	10
1.9	COMPTEL 検出器の概念図 (Schönfelder et al. (1993))。 . . . . .	12
1.10	多重コンプトン法を用いる COSI 検出器の (a): 概念図、(b): Ge ストリップ検出器アレイ (Chiu et al. (2015))。 . . . . .	13
2.1	ETCC の概念図 (Takada et al. (2022))。 . . . . .	16
2.2	本論文での変数定義。 . . . . .	17
2.3	HPR の ARM・SPD に対する依存性 (Tanimori et al. (2015))。 . . . . .	18
2.4	多重散乱による運動方向情報の劣化 (Nakamura (2018))。 . . . . .	19
2.5	液体 H・気体 He・C・Al・Fe・Sn・Pb における荷電粒子のエネルギー損失率 (Groom & Klein (2000))。 . . . . .	20
2.6	$\mu$ -PIC (Ochi et al. (2001)) と GEM (Sauli (1997), Tamagawa et al. (2006)) を用いた TPC の概念図。 . . . . .	22
2.7	GEM の顕微鏡写真 (左) と電気力線 (右) (Sauli (2016))。 . . . . .	23

2.8	ガス飛跡検出器における荷電粒子とエネルギー損失と飛跡長の関係 (Takada & Tanimori (2019))。 (1) : TPC 内で停止した反跳電子、 (2) : 最小電離粒子、 (3) : 貫通粒子。 . . . . .	24
2.9	ETCC で線源 $^{137}\text{Cs}$ を測定した際の $\Delta \cos \alpha$ 分布。 $^{137}\text{Cs}$ から放射される 662 keV ガンマ線に対応する位置で $\Delta \cos \alpha \simeq 0$ にピークが現れている (Tsukamoto (2025))。 . . . . .	25
2.10	double-hit 事象の概念図 (Oka et al. (2024))。 . . . . .	26
2.11	double-hit 事象解析のシミュレーション結果 (Oka et al. (2024))。 (a) エネルギー分解能、 (b) PSF、 (c) 有効面積。 . . . . .	27
2.12	SMILE-I 実験で使用された ETCC の構造 (Takada et al. (2011)) . . . . .	29
2.13	(a) : SMILE-2+ 実験で使用された ETCC の外観。 (b) 水平飛行中における、天頂角が $60^\circ$ 未満の領域での 0.15 – 2.1 MeV エネルギーバンドのライトカーブ。青線は SMILE-2+ が銀河外拡散ガンマ線および大気ガンマ線を検出した場合に期待される事象率、マゼンタ線は陽子・中性子・電子・陽電子によって誘起されるバックグラウンド事象率、赤線は SMILE-2+ の総推定事象率を表す。下段パネルは、観測された事象率と期待される事象率の差を示す。銀河中心の子午線通過の時刻 (縦の点線) の付近で事象率の増加が見られる。 (Takada & Tanimori (2019)) . . . . .	30
2.14	$\mu$ -PIC の構成比較。 SMILE-2+ では PCB $\mu$ -PIC 1 枚を用いていたが、 SMILE-3 では TGV $\mu$ -PIC 4 枚を組み合わせ、それぞれの $\mu$ -PIC ごとに信号を読み出す。 . . . . .	30
3.1	SMILE-2+ で使用した ETCC データ収集システムのブロック図 (Mizumoto et al. (2015) に加筆)。 . . . . .	32
3.2	$\mu$ -PIC 読み出し基板の外観。 . . . . .	34
3.3	$\mu$ -PIC 読み出し基板のブロック図 (Tahara (2023))。 . . . . .	34
3.4	GSO ピクセルシンチレータアレイと PMT の写真 (図左) と、抵抗分割による PMT の信号読み出し方法 (Mizumoto et al. (2015))。 . . . . .	35
3.5	PMT を用いた PSA ユニット。 GSO ピクセルシンチレータアレイをクリアパルス社製ヘッドアンプユニットモデル 80256 に接続している。 . . . . .	36
3.6	クリアパルス社製ヘッドアンプデータプロセッサ 80339 の写真。 . . . . .	36
3.7	SMILE-2+ で使用した TCU の外観 (Mizumoto et al. (2015))。 . . . . .	37
3.8	SMILE-2+ で使用した ETCC データ収集システムのフローチャート (Mizumoto et al. (2015))。 . . . . .	38
3.9	SMILE-3 搭載データ収集システムの構成図 . . . . .	41

3.10	検出器と TCU 間の通信と動作のイメージ。μ-PIC 読み出し基板 (Encoder 基板) と MPPC 搭載型 PSA ユニット (MPPC HA 基板) の両方で同様の動作を行う。 . . . . .	42
3.11	SMILE-3 に向けて新規開発した μ-PIC 読み出し基板の外観 (Tsukamoto (2025))。基本的な入出力は従来基板 (図 3.2) と同様であるが、外部クロック駆動に対応した。 . . . . .	43
3.12	MPPC と PMT の量子効率の比較 (Iiyama (2025))。赤色の破線は GSO (Ce) の発光ピーク波長を示す。 . . . . .	44
3.13	MPPC 搭載型ヘッドアンプユニットの写真。浜松ホトニクス社製 S13361-3050NE-08 MPPC アレイを 2 × 3 個搭載し、各アレイのデータ取得・データ整形・Ethernet 通信によるデータ送信を一括で行う。 . . . . .	45
3.14	TCU のブロック図。 . . . . .	45
3.15	TCU での ETCC トリガーモードのタイミングチャート。シンチレータにヒットが発生すると、TPC 内の最大ドリフト時間に対応する 8 μs だけコインシデンスウィンドウを開き、その時間内に TPC がヒットした場合はシンチレータのヒット時刻を基準に 9 μs 後にトリガー信号を生成する。 . . . .	46
3.16	TCU のトリガーロジックのステートマシンの状態遷移図。(a): TPC・HA 単体キャリブレーションモード。トリガー遅延時間を示すカウントダウンタイマー TIM は 9 μs にセットされている。(b): ETCC モード。コインシデンスウィンドウを示すカウントダウンタイマー TIM1 は 8 μs に、トリガー遅延時間を示す TIM2 は 9 μs にセットされている。 . . . . .	47
3.17	TCU トリガーロジックのシミュレーション結果。(a): ETCC モードでシンチレータヒット発生後 6 μs に TPC ヒットが発生した場合。(b): ETCC モードでシンチレータヒット発生後 9 μs に TPC ヒットが発生した場合。 . . . . .	48
3.18	TCU のハードウェア設計の概要。メイン基板と I/F 拡張基板に分割し、信号線を適宜統合・複製することで FPGA の入出力ピン数を削減している。 . . . . .	49
3.19	新規開発した TCU の写真。I/F 拡張基板を 2 枚搭載している。 . . . . .	50
3.20	TCU の信号遅延測定のセットアップ図。 . . . . .	50
3.21	TPC 単体キャリブレーションモードの実験セットアップ図。 . . . . .	51
3.22	TPC 単体キャリブレーションモードで取得した飛跡例。2 枚の μ-PIC 読み出し基板をまたぐような飛跡も再構成できている。 . . . . .	52
3.23	TPC に <sup>133</sup> Ba を照射したデータについて、光電吸収イベントを抜き出して作った領域ごとのスペクトル。緑色の枠は GEM によって制限される TPC の有効領域を示す。 . . . . .	52

3.24	各領域のスペクトルから求めたゲインの空間分布。 . . . . .	53
3.25	各 $\mu$ -PIC 読み出し基板間のタイムスタンプ差の時間変化。チャンネル0に 接続した基板を基準として、他の基板のタイムスタンプとの差を示す。(a): クロック同期せず各基板の水晶発振器で駆動、(b): TCU からの外部クロッ クで駆動。 . . . . .	54
3.26	MPPC 搭載型 PSA ユニット単体キャリブレーションモードの実験セット アップ図。 . . . . .	55
3.27	MPPC 搭載型 PSA ユニット単体キャリブレーションモードで取得した (a): バタフライプロット、(b): ADC 0 (左上の MPPC) のピクセルごとのエネ ルギースペクトル。 . . . . .	55
4.1	SMILE-2+実験で取得された TPC の飛跡画像の例 (Takada et al. (2022))。 左上：低エネルギーガンマ線のコンプトン反跳電子、左下：宇宙線あるいは 高エネルギーガンマ線のコンプトン反跳電子、右上：電子陽電子対生成 事象、右下：シャワーイベント。 . . . . .	58
4.2	気球フライト中の大気ガンマ線を double-hit 解析で再構成した際の、入射 ガンマ線の真情報と再構成情報の比較 (Oka (2024))。(a): 天頂角分布 $\theta$ の 比較。(b): エネルギースペクトル $E$ の比較。 . . . . .	59
4.3	(a): ETCC に 10 MeV の光子が入射し、TPC 内部で対生成を起こし double- hit 事象として観測される例。(b): SMILE-2+レベルフライト中のデータに 対し double-hit 解析を適用し、ガンマ線として再構成されたときの、シン チレータで観測されたエネルギースペクトル。511 keV の輝線構造が確認 できる (Oka (2024) に加筆)。 . . . . .	60
4.4	UVSOR BL1U ビームラインの概念図 (Zen et al. (2016))。 . . . . .	61
4.5	蓄積リング内の電子バンチ (緑線) とレーザーパルス (黄線) のタイミングを 示すオシロスコープ画像。 . . . . .	61
4.6	UVSOR BL1U ビームラインで生成されるガンマ線エネルギースペクトル のシミュレーション結果 (Taira (2026))。 . . . . .	62
4.7	UVSOR 実験で用いた TPC 検出器の全体図。 . . . . .	63
4.8	実験で利用した 3 軸読み出し $\mu$ -PIC の外観 (a)、電極の顕微鏡写真 (b)、電 極の断面構造 (c)。 . . . . .	64
4.9	電子飛跡シミュレーションにおける 2 次元読み出し (a) と 3 次元読み出し (b) で得られる飛跡イメージの比較 (Yoshida (2022) に加筆)。上段は荷電 粒子が検出器に平行に走った場合のイメージ、下段は電子飛跡シミュレ ーション。 . . . . .	65

- 4.10 TPC 内部の写真 (a) と模式図 (b)。内径 190 mm のリング型電極 17 枚を 10 mm 間隔で配置し、それぞれを 20 M $\Omega$  の抵抗で直列接続することで均一なドリフト電場を生成する。ドリフトケージの最上面に 10 cm 角、厚さ 100  $\mu\text{m}$  の液晶ポリマー GEM(Tamagawa et al. (2006)) を配置している。 . . . . . 66
- 4.11 6.6 MeV 実験データにおける TPC のカウントレート。ビーム注入ノイズの影響で、1 分ごとにカウントレートが大幅に低下している。 . . . . . 67
- 4.12 良データ区間に対して周期を推定した後の位相分布 (左) と位相畳み込みヒストグラム (右) の例。オレンジで網掛けされた領域がビーム同期ウィンドウ。 . . . . . 68
- 4.13 6.6 MeV (左)、4.8 MeV (中央)、3.3 MeV (右) の各実験データに対する位相畳み込みヒストグラム (上段) とビーム同期事象のみを抽出したヒストグラム (下段)。 . . . . . 69
- 4.14 6.6 MeV ガンマ線を正面から照射した際の TPC の飛跡画像の例。z 軸正の方向がビーム軸。(a) : コンプトン散乱事象。(b) : 核場対生成事象。(c) : 電子場対生成事象の候補。(d) : デルタ線を伴う対生成事象。 . . . . . 70
- 4.15 TPC で取得した飛跡の  $dE/dx$  分布の例。 . . . . . 70
- 4.16 (a): ダウンサンプリングとクラスタリングを行った後の点群の例。(b) : 局所 PCA によって推定された局所方向ベクトルの例。 . . . . . 71
- 4.17 尤度評価による対生成事象の識別の例。上段 : 対生成候補点と始点方向ベクトル。中段 : 反応点からみた点群の角度分布。下段 : 対数尤度比の計算結果。 . . . . . 73
- 4.18 抽出された対生成事象の入射方向分布。赤点はビーム方向を示す。 . . . . . 73
- 4.19 6.6 MeV ガンマ線照射実験での (a): 再構成された入射方向とビーム軸方向の残差分布。(b):  $e^+$  と  $e^-$  の開き角分布。 . . . . . 74
- 4.20 再構成された入射方向とビーム軸方向の残差のエネルギー依存性 (Gros et al. (2018) に加筆)。 . . . . . 75

## 表 目 次

3.1	SMILE-2+で使用したデータ収集システムにおける各信号の説明。信号の方向はTPC読み出し基板・PSAユニットからTCUへの信号を出力、TCUから各基板への信号を入力とする。 . . . . .	32
3.2	検出器とTCU間のLVDS入出力ポートの説明。信号の方向はTPC読み出し基板・PSAユニットからTCUへの信号を出力、TCUから各基板への信号を入力とする。 . . . . .	42
4.1	ビーム照射中のTPCの主要パラメータ。 . . . . .	64

# 第 1 章

## MeVガンマ線天文学

### 1.1 宇宙の高エネルギー突発現象と MeV ガンマ線

#### 1.1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) は、天文学の分野で知られている中で最もエネルギーの高い爆発現象である。経験的に数百 keV から数 MeV 付近にエネルギーフラックスのピークを持つ、数ミリ秒から数百秒の継続時間を持つ強力なガンマ線放射 (初期放射) を放出し、加えて電波から TeV に至る広い波長帯で数日から数週間の継続的な放射 (残光) を伴う。ガンマ線バーストは 1970 年に、地上核実験の監視を目的として打ち上げられた Vela 衛星によって偶然発見された (Klebesadel et al. (1973))。その後、ガンマ線バーストの観測を目的として Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) 衛星に搭載された Burst and Transient Source Experiment (BATSE) 検出器 (Band et al. (1993)) や、Swift 衛星の Burst-Alert Telescope (BAT) 検出器 (Barthelmy et al. (2005))、Fermi 衛星の Gamma-ray Burst Monitor (GBM) 検出器 (Meegan et al. (2009a)) などが打ち上げられ、観測を行った。

BATSE 検出器の観測により、GRB は継続時間によって 2 種類に大別できることが分かった (Kouveliotou et al. (1993))。継続時間を評価する指標として、GRB の総フルエンズの 5% から 95% までを含む時間幅である  $T_{90}$  が用いられる。図 1.1 左に、BATSE 検出器により観測された  $T_{90}$  分布を示す。 $T_{90} \sim 2$  s を境に 2 つのピークが存在し、 $T_{90} < 2$  s の天体を Short GRB、 $T_{90} > 2$  s の天体を Long GRB と分類する。Long GRB は、大質量星の重力崩壊に伴って形成されたブラックホールや中性子星が中心エンジンとなり相対論的ジェットを形成し、そのジェットが恒星外層を貫通して放射を生じるという解釈が有力である。理論的には、回転を保った崩壊コアから降着円盤が形成され、そこからジェットが供給され得ることが示されており (MacFadyen & Woosley (1999))、観測的にも一部の Long GRB で Type Ic 超新星成分が直接検出され、Long GRB がコア崩壊超新星と結

び付くことを強く支持している (Hjorth et al. (2003))。一方 Short GRB は、連星中性子星もしくは中性子星-ブラックホール連星の合体に起因する相対論的アウトフローから発生すると考えられている。一部の Short GRB では重元素合成に伴うキロノヴァが検出され (Tanvir et al. (2013))、決定的には重力波イベント GW170817 に付随して Short GRB である GRB 170817A が観測されたことで (Abbott et al. (2017))、連星中性子星合体が少なくとも一部の Short GRB の起源であることが裏付けられた。

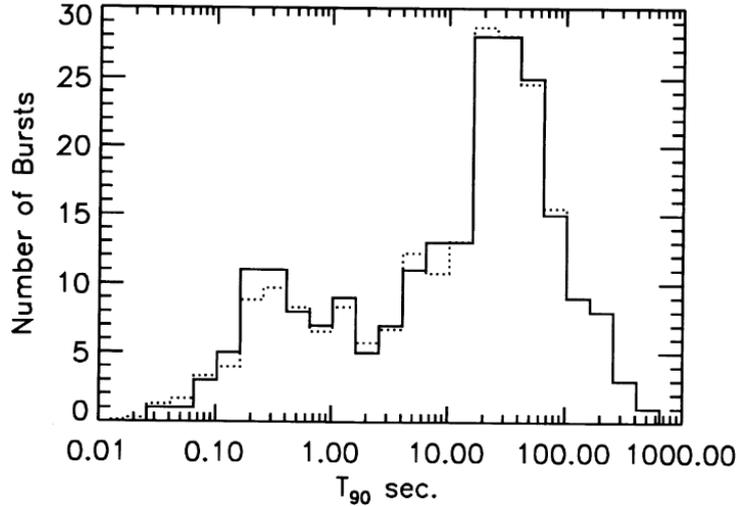


図 1.1: BATSE 検出器が観測した 2074 個の GRB の  $T_{90}$  分布 (Kouveliotou et al. (1993))。

初期放射のスペクトルピークは数百 keV から数 MeV に位置することが多く、放射機構や時間発展を制限するには MeV 帯でのスペクトル形状の測定が本質的に重要である。また図 1.2 に示すように GRB は天球上でほぼ等方的に発生する (Fishman et al. (1994)) ため、検出には広視野のモニター観測が適している。図 1.3 に、代表的なガンマ線バースト GRB 990123 のスペクトルを示す。GRB のスペクトルは経験的に Band 関数 (式 (1.1)) と呼ばれる 2 つのべき関数で表されることが知られている (Band et al. (1993))。

$$\frac{dN}{dE} \propto \begin{cases} \left(\frac{E}{100\text{keV}}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{(2+\alpha)E}{E_{\text{peak}}}\right) & E < \frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{(2+\alpha)} \\ \left[\frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{(2+\alpha)100\text{keV}}\right]^{\alpha-\beta} \exp(\beta-\alpha) \left(\frac{E}{100\text{keV}}\right)^\beta & E \geq \frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{(2+\alpha)} \end{cases} \quad (1.1)$$

ここで  $\alpha, \beta$  はそれぞれ低・高エネルギー側の光子スペクトル指数、 $E_{\text{peak}}$  は  $\nu F_\nu$  (または  $E^2 dN/dE$ ) が最大となるエネルギーに相当する。Short GRB は Long GRB と比べて  $E_{\text{peak}}$  が高く、また低エネルギーの光子指数  $\alpha$  が大きい傾向があることが知られている (Ghirlanda et al. (2009))。そのため、Short GRB を検出するためには MeV 領域での高感度観測が重要となる。

Band 関数の物理的内訳としては、相対論的アウトフローの光球面からの準熱的放射と、光球面より外側での散逸過程により生じる非熱放射の重ね合わせとして解釈されてきた (Mészáros (2006))。準熱成分は時間分解分光により複数の温度を持つ熱的スペクトルの重

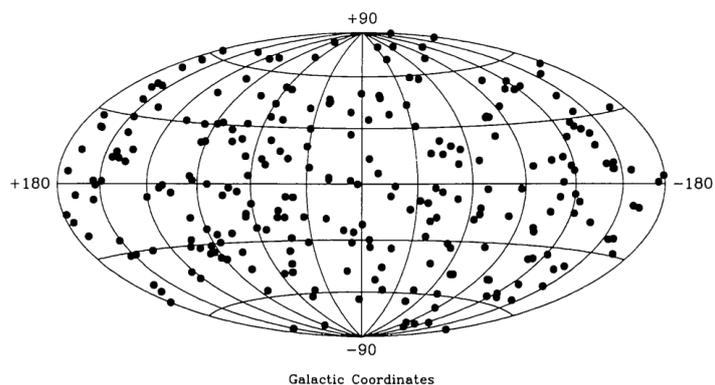


図 1.2: BATSE 検出器が観測した GRB の天球上分布 (Fishman et al. (1994))。

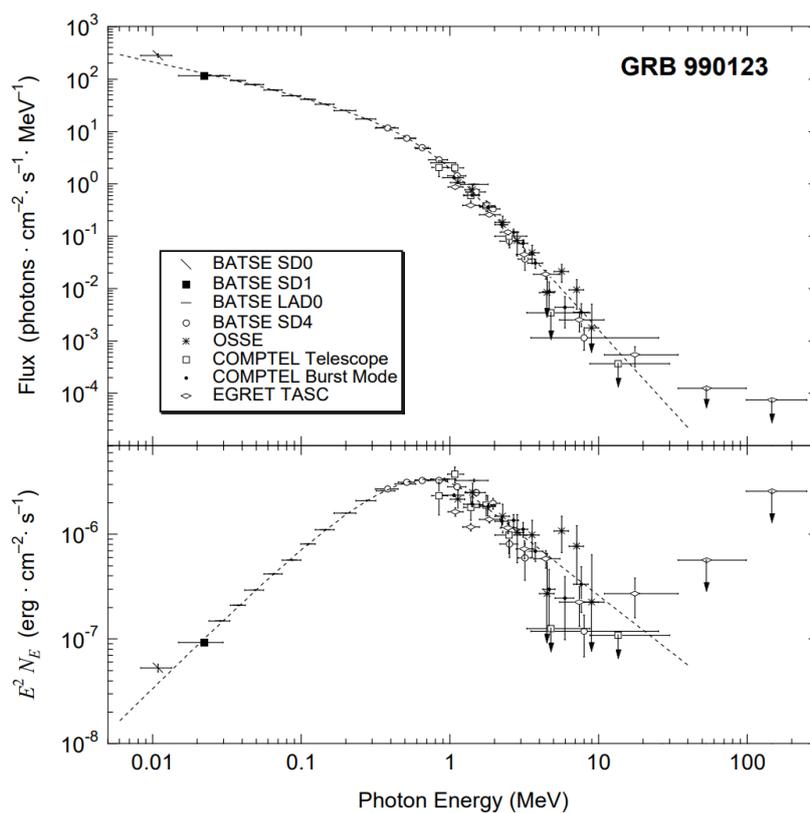


図 1.3: CGRO 衛星の検出器によって観測されたガンマ線バースト GRB 990123 のスペクトル。上段: 光子フラックス  $N_E$ 、下段: エネルギーフラックス  $E^2 N_E$  (Briggs et al. (1999))。

ね合わせとして観測される例が報告されており (Larsson et al. (2011))、非熱成分は内部衝撃や磁気再結合などによって加速された粒子によるシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱が候補として考えられている (Zhang & Yan (2011))。一方で、Fermi/LAT の観測により 100 MeV - GeV 帯まで高エネルギー放射が検出される GRB が存在することが明らかとなった。GRB 080916C ではサブ MeV から GeV までが単一の Band 関数で整合する一方 (Abdo et al. (2009b))、GRB 090902B (Abdo et al. (2009a)) や GRB 090510 (図 1.4, Ackermann et al. (2010)) のように Band 成分に加えて追加のパワーロー成分が必要となる例も報告されている。サブ MeV の Band 成分と高エネルギー成分の関連を議論するためには、中間帯域である  $\mathcal{O}(1)$ MeV 領域において、時間発展成分を分離できる高感度観測が必要である。また偏光は、時間発展やスペクトル形状とは独立に放射機構を制限する情報を提供する。図 1.5 に示すように放射機構やジェット構造によって期待される偏光度は大きく異なり、またエネルギー依存性も異なる。そのため、分光と偏光の同時観測は放射機構の識別に有効である (Gill et al. (2021))。

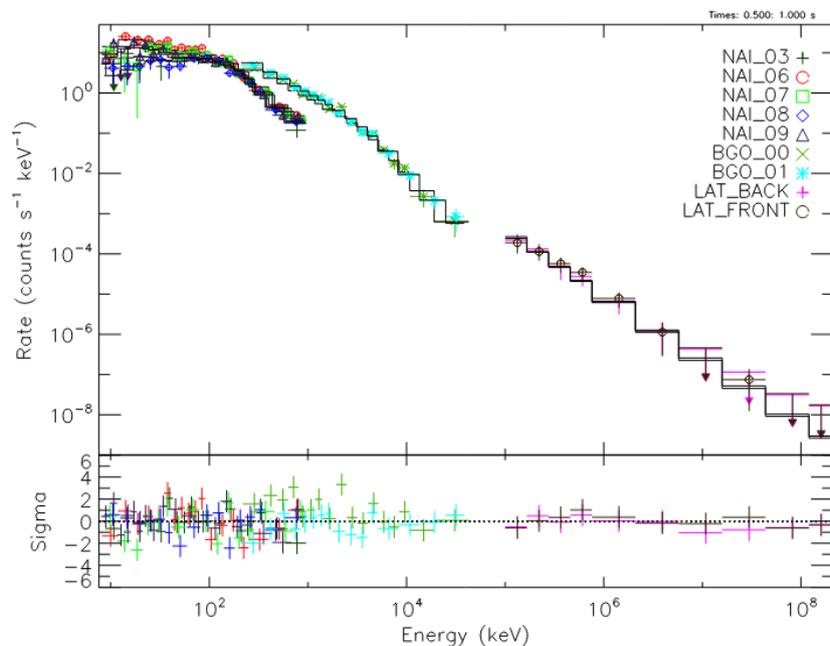


図 1.4: Fermi 衛星の検出器によって観測された GRB 090902B のスペクトル。Band 関数+パワーロー成分でフィッティングされている (Abdo et al. (2009a))。

## 1.2 光と物質の相互作用

ガンマ線は電氣的に中性であるため、物質中を通過するだけで直接物質を電離することはできない。そのため、ガンマ線を検出するためには、ガンマ線が物質と相互作用して生成される荷電粒子を検出する必要がある。ガンマ線と物質の相互作用には光電効果、

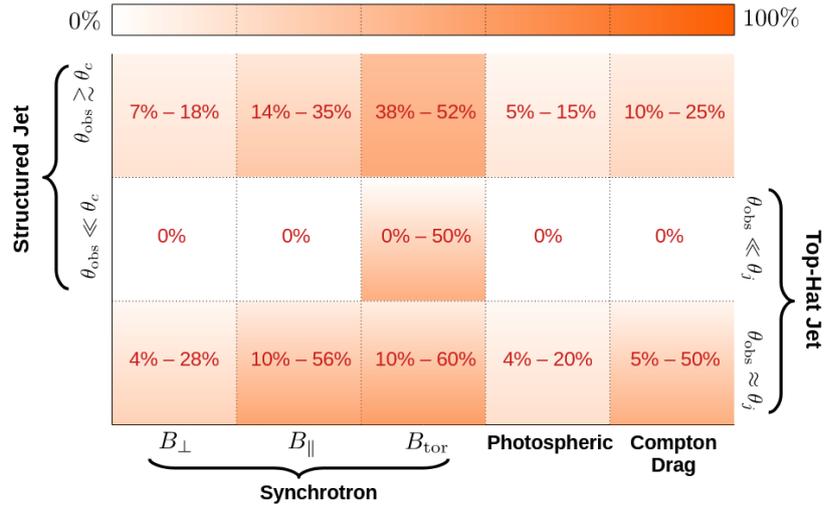


図 1.5: 放射機構およびジェット構造の違いによって期待されるガンマ線偏光度の概略を示す。シンクロトロン放射の場合、磁場配置および観測者の視線角に強く依存して偏光度が変化し、特にトロイダル磁場ではジェット縁を観測する条件下で高い偏光度（～50%）が期待される一方で、視線角やジェット構造によっては偏光度が低下またはゼロとなる場合もある (Gill et al. (2021))。

コンプトン散乱、電子陽電子対生成の3つの主要な反応がある。これらの反応はガンマ線のエネルギーに依存して発生確率が変わり、エネルギーによって支配的な反応が異なる。図 1.6 に、ガンマ線が Ar を通過するときの反応断面積のエネルギー依存性を示す。以下に各相互作用について説明する。

### 1.2.1 光電効果

ガンマ線が原子核に束縛された電子に吸収され、その電子が原子核から放出される現象を光電効果という。光電効果は低エネルギー（100 keV 以下）のガンマ線で支配的な相互作用である。放出される電子のエネルギー  $E_e$  は、入射ガンマ線のエネルギー  $E_\gamma$  と電子の束縛エネルギー  $E_b$  から

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (1.2)$$

で与えられる。 $E_\gamma$  が K 殻電子の束縛エネルギーより大きいときは K 殻電子との反応確率が高く、その断面積  $\sigma_K$  は

$$\sigma_K = 4\sqrt{2}Z^5 \left(\frac{8}{3}\pi r_e^2\right) \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}\right)^4 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right)^{7/2} \quad (1.3)$$

と書ける。ここで、 $Z$  は原子番号、 $r_e$  は古典電子半径、 $e$  は電気素量、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $m_e$  は電子質量である。ここから  $\sigma_K$  は物質の原子番号  $Z$  の 5 乗に比例し、入射ガ

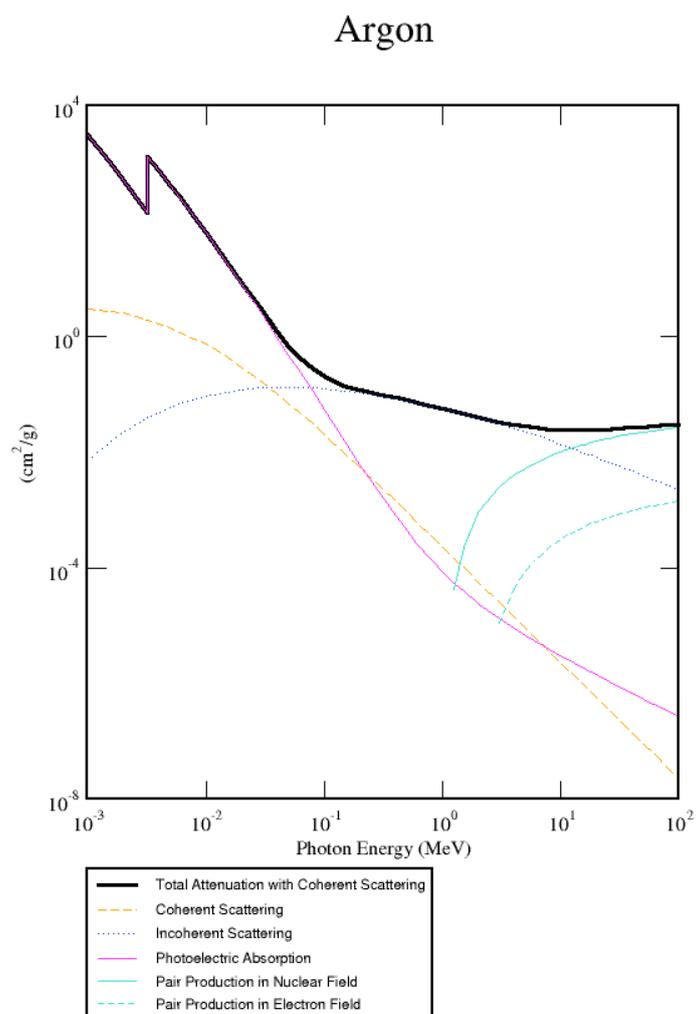


図 1.6: ガンマ線が Ar を通過するときの反応断面積のエネルギー依存性 (National Institute of Standards and Technology (2009))。

ンマ線エネルギー  $E_\gamma$  の  $7/2$  乗に反比例することが分かる。入射ガンマ線が偏光している時、微分散乱断面積はガンマ線の電場ベクトルと放出電子の方向ベクトルのなす角  $\phi$  に依存し、次式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \cos^2 \phi \quad (1.4)$$

つまり、電子はガンマ線の電場ベクトルに平行な方向に放出されやすい。

## 1.2.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱はガンマ線と自由電子との弾性散乱であり、衝突によりガンマ線のエネルギーと進行方向が変化するほか、電子が反跳してエネルギーを得る。コンプトン散乱は軟ガンマ線帯域 (100 keV から 10 MeV 程度) で支配的な相互作用である。入射ガンマ線のエネルギーを  $E_\gamma$ 、散乱後のガンマ線エネルギーを  $E'_\gamma$  は、散乱角  $\theta$  を用いて次式で表される。

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1.5)$$

微分散乱断面積はクライン - 仁科の式で与えられ、無偏光な入射ガンマ線に対しては、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} Z r_e^2 \left( \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{E'_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - \sin^2 \theta \right) \quad (1.6)$$

とかける。コンプトン散乱の反応断面積は原子中の電子数 (原子番号)  $Z$  に比例する。図 1.7a に、入射ガンマ線の微分散乱断面積のエネルギーごとの散乱角依存性を示す。ガンマ線のエネルギーが高くなるほど、散乱角  $\theta$  が小さい方向に散乱されやすいことが分かる (前方散乱)。

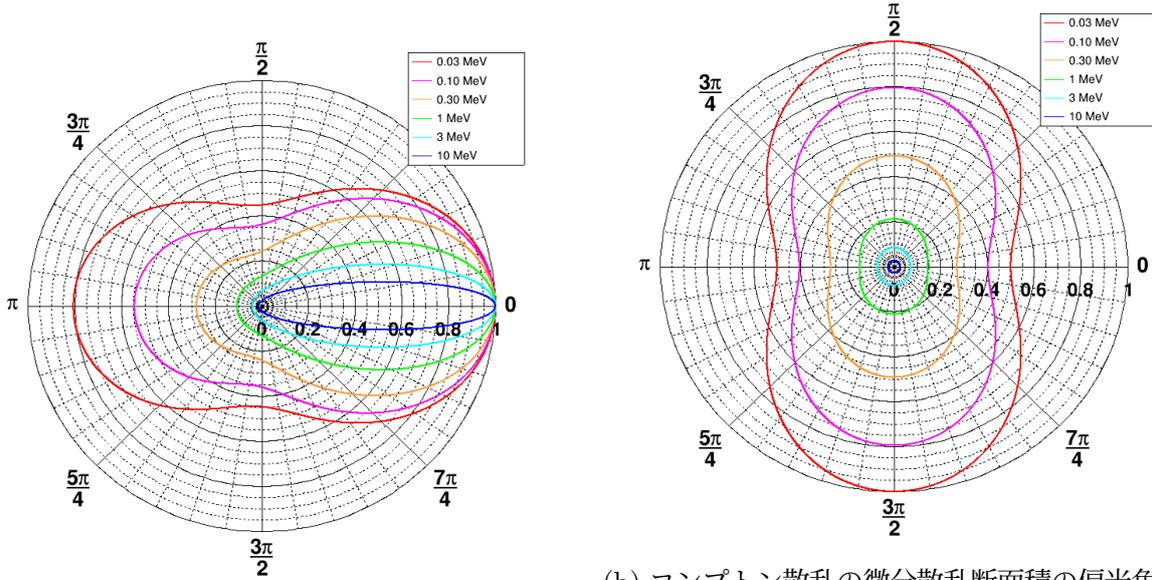
入射ガンマ線が偏光している場合、微分散乱断面積はガンマ線の電場ベクトルと散乱平面のなす角  $\phi$  に依存し、次式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} Z r_e^2 \left( \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{E'_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right) \quad (1.7)$$

微分散乱断面積の偏光角依存性を図 1.7b に示す。コンプトン散乱では、ガンマ線の電場ベクトルに垂直な方向に散乱されやすいことが分かる。

## 1.2.3 電子陽電子対生成

電子陽電子対生成は、入射ガンマ線が原子核 (または原子中の電子) のクーロン場を介して電子・陽電子対に変換される過程であり、高エネルギー (おおむね 10 MeV 以上) で支配的になる相互作用である (図 1.6)。単独の光子が真空中で  $e^-e^+$  対に崩壊すること



(a) コンプトン散乱の微分散乱断面積の散乱角依存性 (Tahara (2023))。

(b) コンプトン散乱の微分散乱断面積の偏光角依存性 (散乱角  $\theta = 90^\circ$ )。光子の電場ベクトルの方向を  $\phi = 0^\circ$  に取っている (Tahara (2023))。

は、エネルギー・運動量保存則を同時に満たせないため起こらず、物質中では原子核（あるいは電子）が反跳運動量を受け取ることで対生成が可能になる。原子核場のクーロン場を介した対生成 (nuclear field pair production) は



で表される。電子・陽電子の静止質量エネルギーの和  $2m_e c^2$  を生成する必要があるため、しきいエネルギーは

$$E_\gamma > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV} \quad (1.9)$$

である。一方、原子中の電子が反跳を受け持つ電子場対生成 (triplet production) は



であり、しきいエネルギーは概ね  $E_\gamma > 4m_e c^2 \simeq 2.044 \text{ MeV}$  となる。対生成の反応断面積は媒介粒子のクーロン場の強さに依存し、原子核場対生成の場合は概ね  $Z^2$  に比例して増大する。電子場対生成では単位電荷を持つ電子が原子1つあたり  $Z$  個あることに対応して  $Z$  に比例する。

入射光子の四元運動量を  $k^\mu$ 、生成された電子・陽電子の四元運動量を  $p_-^\mu, p_+^\mu$ 、反跳した原子核の四元運動量変化を  $q^\mu$  とすると、

$$k^\mu = p_-^\mu + p_+^\mu + q^\mu \quad (1.11)$$

である。ここで  $q^\mu$  が原子核が受け持つ運動量移行に相当し、原子核の反跳エネルギーは  $T_{\text{recoil}} \simeq q^2/(2M)$  ( $M$  は原子核質量) で与えられる。重い原子核では  $M$  が大きいため

$T_{\text{recoil}}$  は小さく、 $E_\gamma \simeq E_- + E_+$  と近似できる ( $E_-$ ,  $E_+$  はそれぞれ電子・陽電子のエネルギー)。

対生成は高エネルギーほど前方に強く指向し、電子・陽電子は入射光子方向の近傍に放出されやすい。典型的な放出角のスケールは

$$\theta \sim \frac{m_e c^2}{E} \quad (1.12)$$

( $E$  は生成レプトンのエネルギー) で表され、 $E_\gamma \gg m_e c^2$  の領域では小さな開き角となる。また、電子と陽電子が受け取るエネルギー分配は連続的であり、低エネルギー光子ではほぼ等分配になりやすいが、高エネルギー光子では一方に偏る傾向がある (Groom & Klein (2000))。入射ガンマ線が線偏光している場合、対生成で作られる  $e^-e^+$  の運動量が張る面 (対生成平面) の方位角  $\phi$  の分布は等方ではなく、一般に偏光方向に対して  $2\phi$  成分の変調を持つ。

$$\frac{d\sigma}{d\phi} \propto [1 + \mu \cos 2\phi] \quad (1.13)$$

偏光したガンマ線では、対生成平面は光子の電場ベクトル  $\vec{E}$  に対して平行な方向に張りやすい。

## 1.3 MeV ガンマ線の観測手法

本章では、MeV ガンマ線を観測するための撮像分光が可能な代表的な手法として、コーデッドマスク法とコンプトンカメラについて説明する。

### 1.3.1 コーデッドマスク法

コーデッドマスク法はピンホールカメラを応用した手法と考えることができる。図 1.8 にコーデッドマスク法を利用した INTEGRAL SPI 検出器 (Vedrenne et al. (2003)) の概念図と検出器の写真を示す。位置感度型検出器の前にパターン化されたマスクを配置し、検出器に投影されたマスクの影から天体の位置を復元する。視野はマスクの大きさと検出器までの距離で決まり、到来方向の決定精度はマスクの開口サイズで決まるため、広い視野と高い角度分解能を両立できる。一方で、その原理上ガンマ線の到来方向を 1 光子ごとに決定することはできず、ガンマ線の再構成には (マスク要素数)  $\times$  (開口率) 程度の光子数が必要になる。また、コンプトン散乱が優位になる高エネルギー帯ではマスクで散乱してエネルギーと到来方向の情報を失った光子がバックグラウンドとして検出されるため、感度が著しく低下する。また、マスクと宇宙線の相互作用による二次放射線もバックグラウンドとなる。

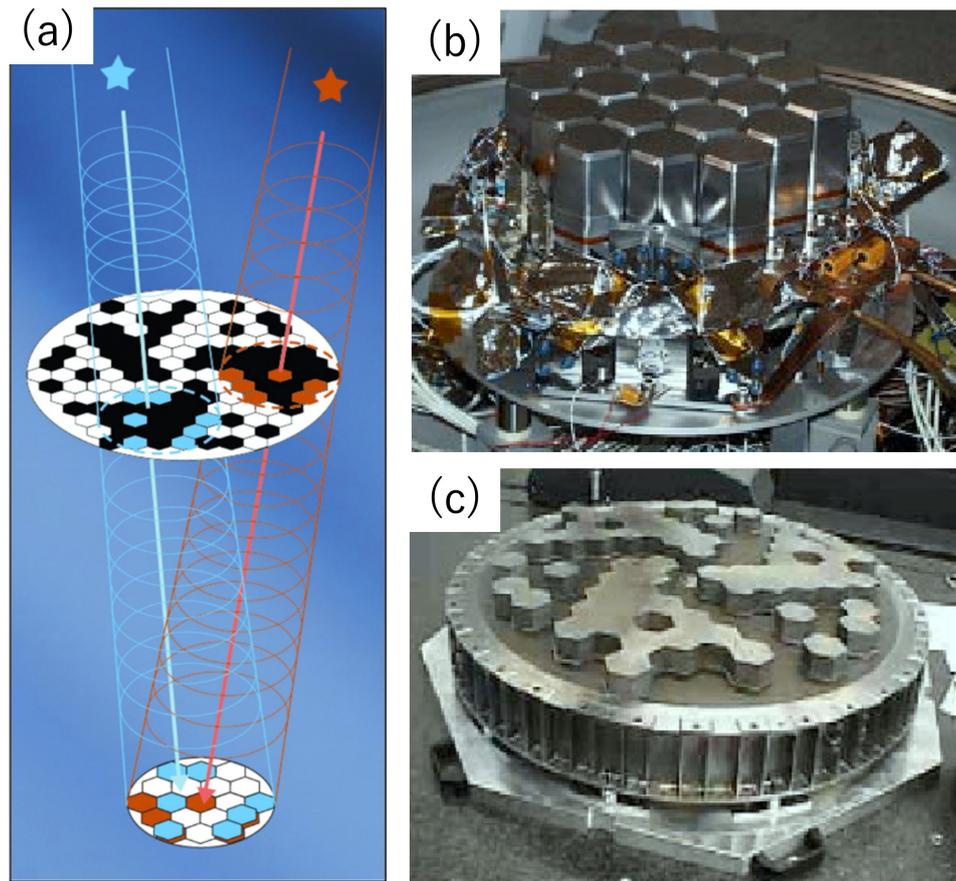


図 1.8: INTEGRAL 衛星に搭載された SPI 検出器の (a): 概念図、(b): 位置感度型検出器 (Ge 検出器アレイ)、(c): コーデッドマスク (Vedrenne et al. (2003))。

### 1.3.2 コンプトンカメラ

コンプトンカメラは、コンプトン散乱の反応特性を利用してガンマ線の到来方向を決定する検出器である。前段に原子番号の小さい散乱体検出器、後段に原子番号の大きい吸収体検出器を配置し、前段でコンプトン散乱の散乱点と反跳電子のエネルギー  $K_e$ 、後段で散乱ガンマ線の吸収点とエネルギー  $E_\gamma$  を測定することで、入射ガンマ線のエネルギー  $E_{\gamma 0}$  と散乱角  $\phi$  を次式で求めることができる。

$$E_{\gamma 0} = K_e + E_\gamma \quad (1.14)$$

$$\cos \phi = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_{\gamma 0}} \right) \quad (1.15)$$

1 光子ごとに散乱角  $\phi$  が求まるため、入射ガンマ線の到来方向は散乱点を頂点、散乱角  $\phi$  を開いた円錐面上に存在することが分かる。複数の光子を検出することで、天球上のある点からの到来方向が円錐面の交点として特定できる。図 1.9 にコンプトンカメラである COMPTEL 検出器 (Schönfelder et al. (1993)) の概念図を示す。COMPTEL 検出器は散乱体検出器として液体シンチレータ NE213A、吸収体検出器として NaI(Tl) 結晶を用いている。MeV ガンマ線の観測では、衛星の筐体や周囲の機器からの二次放射線がバックグラウンドとして検出される。COMPTEL はこの対策として散乱体と吸収体を 1.5 m 離し、検出器間の飛行時間 (Time of Flight: ToF) を利用することで、宇宙からのガンマ線と衛星からのバックグラウンドを識別する手法を用いている。しかし、軌道上の運用では ToF 分布では効果的にバックグラウンドを落とすことができず、COMPTEL の感度は地上実験での予想値より 3 - 4 倍悪化した (Weidenspointner et al. (2001))。

COMPTEL のように散乱体と吸収体を分離したコンプトンカメラに対し、近年は単一の検出器体積内で複数回のコンプトン散乱を起こさせることで到来方向を再構成する多重コンプトン法も提案されている。図 1.10 に多重コンプトン法を採用した COSI (Compton Spectrometer and Imager) 検出器の概念図を示す (Chiu et al. (2015))。COSI はストリップ読み出し型の Ge 検出器アレイにより、ガンマ線の相互作用点の 3 次元位置と、各相互作用でのエネルギー付与を高い分解能で測定できる。入射ガンマ線が検出器内でコンプトン散乱を複数回起こし、最終的に光電吸収で停止する事象では、各相互作用点とエネルギー付与の組  $(\vec{r}_i, \Delta E_i)$  が得られる。このとき、散乱系列の順序が決定できれば、任意の散乱ステップ  $i$  に対してコンプトンの運動学

$$\cos \phi_i = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_{i+1}} - \frac{1}{E_i} \right) \quad (1.16)$$

により散乱角  $\phi_i$  を求めることができる。ここで  $E_i$  は  $i$  番目の散乱直前のガンマ線エネルギーである。また、3 点以上の相互作用点がわかれば、最後が全吸収でなくとも入射エネルギー  $E_0$  を求められる。最初の 2 回でのエネルギー損失を  $\Delta E_1, \Delta E_2$  とし、2 回目の

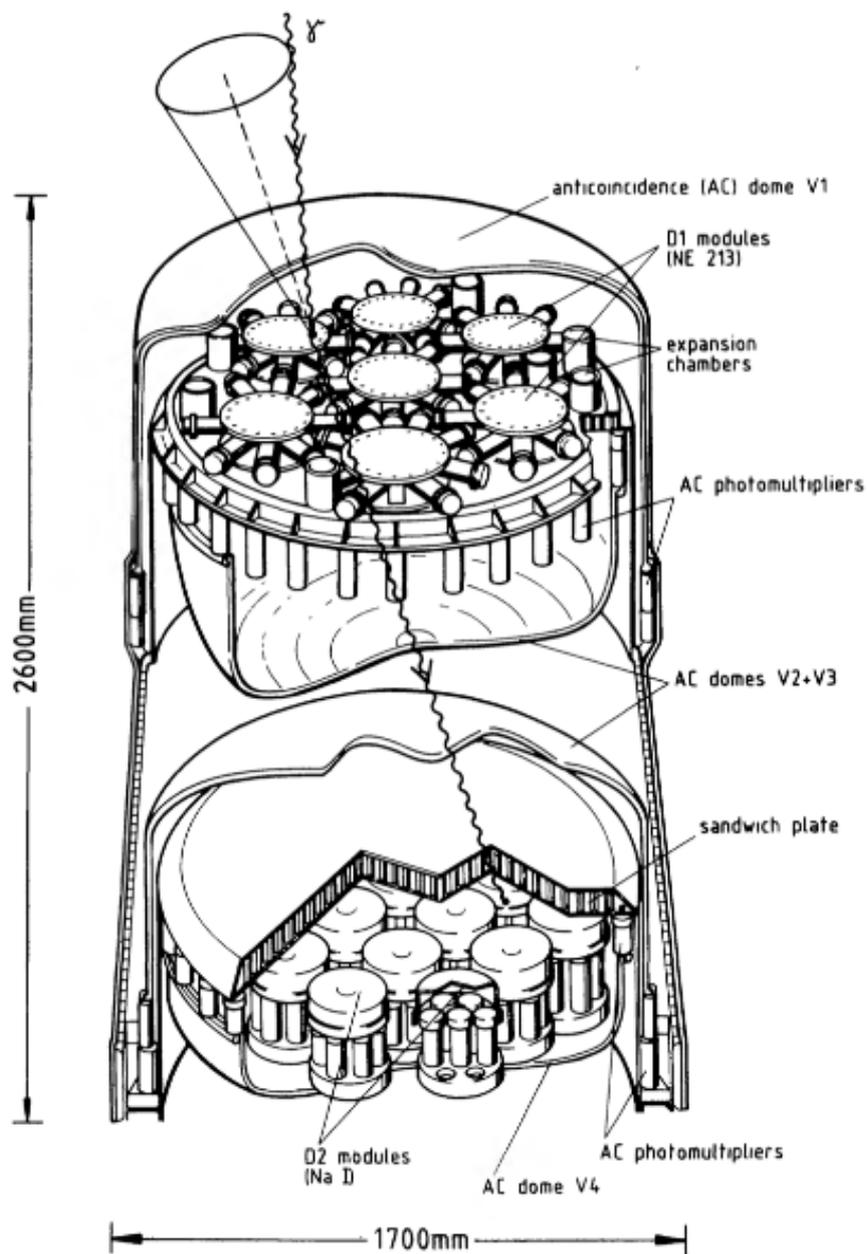


図 1.9: COMPTEL 検出器の概念図 (Schönfelder et al. (1993))。

散乱角を  $\phi_2$  とすると、

$$E_0 = \Delta E_1 + \frac{1}{2} \left( \Delta E_2 + \sqrt{\Delta E_2^2 + \frac{4\Delta E_2 m_e c^2}{1 - \cos \phi_2}} \right) \quad (1.17)$$

と計算できる。多重散乱の情報を同時に用いることで、単一散乱に比べて幾何学的拘束が強まり、誤再構成の抑制や角度分解能の改善が期待できる。しかし、観測された相互作用点列がどの順序で起こったかは観測できないため、運動学的な整合性や検出器内での散乱確率を用いた尤度評価により最尤の系列を選択する必要がある、これは多重コンプトン法固有の課題である。また、この方式でも最終的に得られる情報は各光子の到来方向の円錐状制約であるため、複数光子の統計的処理により天体位置を特定する点は変わらない。

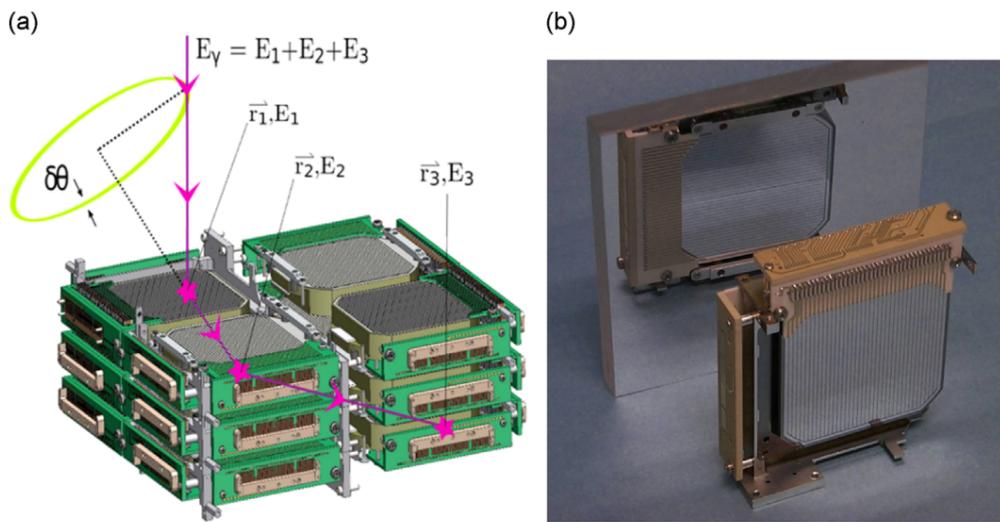


図 1.10: 多重コンプトン法を用いる COSI 検出器の (a): 概念図、(b): Ge ストリップ検出器アレイ (Chiu et al. (2015))。

### 1.3.3 次世代望遠鏡に対する要求

光子が持つ情報はエネルギー、到来方向、到来時間、偏光情報である。GRB の観測ではすべての情報を組み合わせて議論することで放射機構の解明に近づくことが期待される。いずれかの測定に特化した検出器も開発運用されており、例えば偏光のみ測定可能な IKAROS/GAP 検出器 (Yonetoku et al. (2011)) や POLAR 検出器 (Orsi et al. (2011))、時間分解能に特化した Fermi/GBM 検出器 (Meegan et al. (2009b)) がある。しかし、撮像を行わない検出器では目標天体とそれ以外のバックグラウンドを区別できないため、感度が制限される。そのため、次世代の MeV ガンマ線望遠鏡では、分光・撮像・偏光の同時観測が可能な検出器が求められる。



## 第 2 章

# ETCC と SMILE 実験

### 2.1 ETCC の検出原理

ETCC の概念図を図 2.1 に示す。ETCC は COMPTEL 検出器のようなコンプトンカメラの発展型であり、散乱体としてガスによる Time Projection Chamber (TPC)、吸収体として位置に感度を持つシンチレータアレイを用いている。固体検出器よりも密度が低いガスを用いることで、反跳電子のエネルギーに加え反跳電子の方向ベクトルをも測定可能としている点が特徴である。

ETCC では、TPC でコンプトン散乱位置と反跳電子の飛跡方向  $\vec{e}$  およびエネルギー  $K_e$  を測定し、PSA で散乱ガンマ線の吸収位置・エネルギー  $E_\gamma$  を測定し、コンプトン散乱位置と散乱ガンマ線の吸収位置から散乱ガンマ線の方向ベクトル  $\vec{g}$  を求める。入射ガンマ線のエネルギーを  $E_0$ 、入射方向の単位ベクトルを  $\vec{s}$  とすると、コンプトン散乱の運動学式から、

$$E_0 = E_\gamma + K_e \quad (2.1)$$

$$\vec{s} = \left( \cos \phi - \frac{\sin \phi}{\tan \alpha} \right) \vec{g} + \frac{\sin \phi}{\sin \alpha} \vec{e} = \frac{E_\gamma}{E_\gamma + K_e} \vec{g} + \frac{\sqrt{K_e(K_e + 2m_e c^2)}}{E_\gamma + K_e} \vec{e} \quad (2.2)$$

$$\cos \phi = 1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma + K_e} \frac{K_e}{E_\gamma} \quad (2.3)$$

が成り立つ。ここで、 $\phi$  はコンプトン散乱の散乱角、 $\alpha$  は  $\vec{g}$  と  $\vec{e}$  のなす角である (図 2.2)。

ETCC では 1 光子に対する到来方向決定精度を、Angular Resolution Measure (ARM) と Scatter Plane Deviation (SPD) の 2 量で定義する。ARM は散乱角の決定精度 (散乱角の誤差) であり、SPD は散乱面のねじれ (電子飛跡方向の誤差に起因) を表す量であ

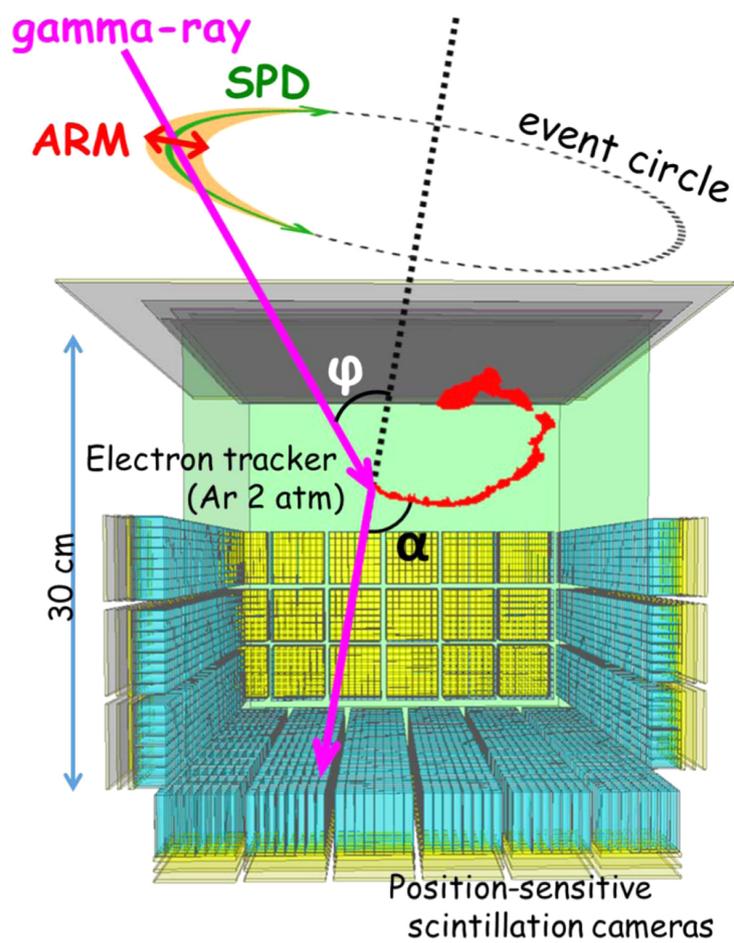


図 2.1: ETCC の概念図 (Takada et al. (2022))。

る。ARM と SPD は真の到来方向  $s_{true}$  を用いて以下のように定義される。

$$ARM = \arccos(\vec{s} \cdot \vec{g}) - \arccos\left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \frac{K_e}{E_\gamma + K_e}\right) \quad (2.4)$$

$$SPD = \text{sign}\left(\vec{g} \cdot \left(\frac{\vec{s} \times \vec{g}}{|\vec{s} \times \vec{g}|} \times \frac{s_{true} \times \vec{g}}{|s_{true} \times \vec{g}|}\right)\right) \cdot \arccos\left(\frac{(\vec{s} \times \vec{g}) \cdot (s_{true} \times \vec{g})}{|\vec{s} \times \vec{g}| |s_{true} \times \vec{g}|}\right) \quad (2.5)$$

集光撮像系を用いる他波長の検出器では角度分解能の評価のため、観測システムの点光源に対する空間的な画像応答を表す Point Spread Function (PSF) が用いられる。反跳電子の方向を測定しない従来型コンプトン法では、ARM のみで角度分解能の評価を行う事が多いが、ARM 分布は1光子の入射方向を円錐状に制限するのみであり、画像としての点光源の広がりを評価する PSF 分布の評価には不十分である。一方、ETCC で ARM と SPD の2つのパラメータによって光子の到来方向の誤差領域を扇形に制限することが可能であるため、他波長の検出器と同様に PSF による角度分解能の評価が可能となる。点源のイメージング画像から全イベントの 50 % が含まれる最小の角度領域を Half Power Radius (HPR) と定義する。様々な ARM・SPD 条件に対する HPR の変化を図 2.3 に示す。

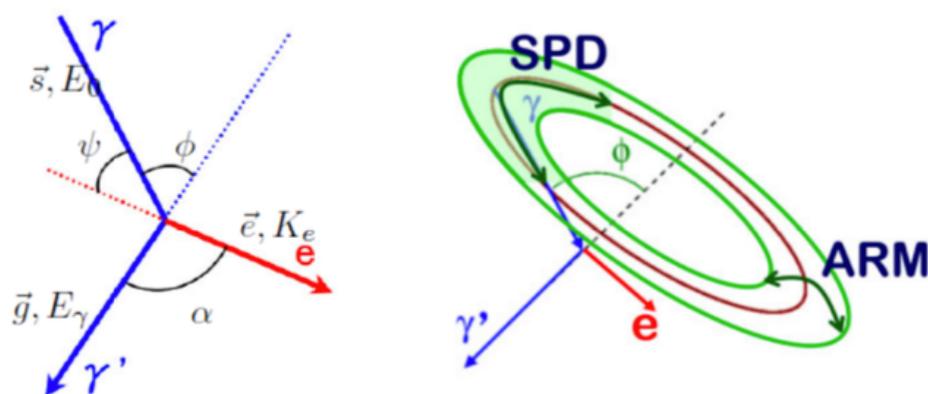


図 2.2: 本論文での変数定義。

## 2.2 検出器の構成

### 2.2.1 ガス検出器

ETCC の散乱体検出器に必要な要求として、(1) コンプトン散乱の反応点・反跳電子のエネルギーと運動方向を測定可能であること、(2) コンプトン散乱に対して高い反応断面積を持ち、光電吸収の反応断面積は小さいこと、(3) 検出器の大型化が容易であること、(4) 記録される事象のうちガンマ線以外による事象（荷電粒子の入射による飛跡・シャワー事象など）を除去できる方法を持つこと、が挙げられる。(1) について、特に反跳電子の

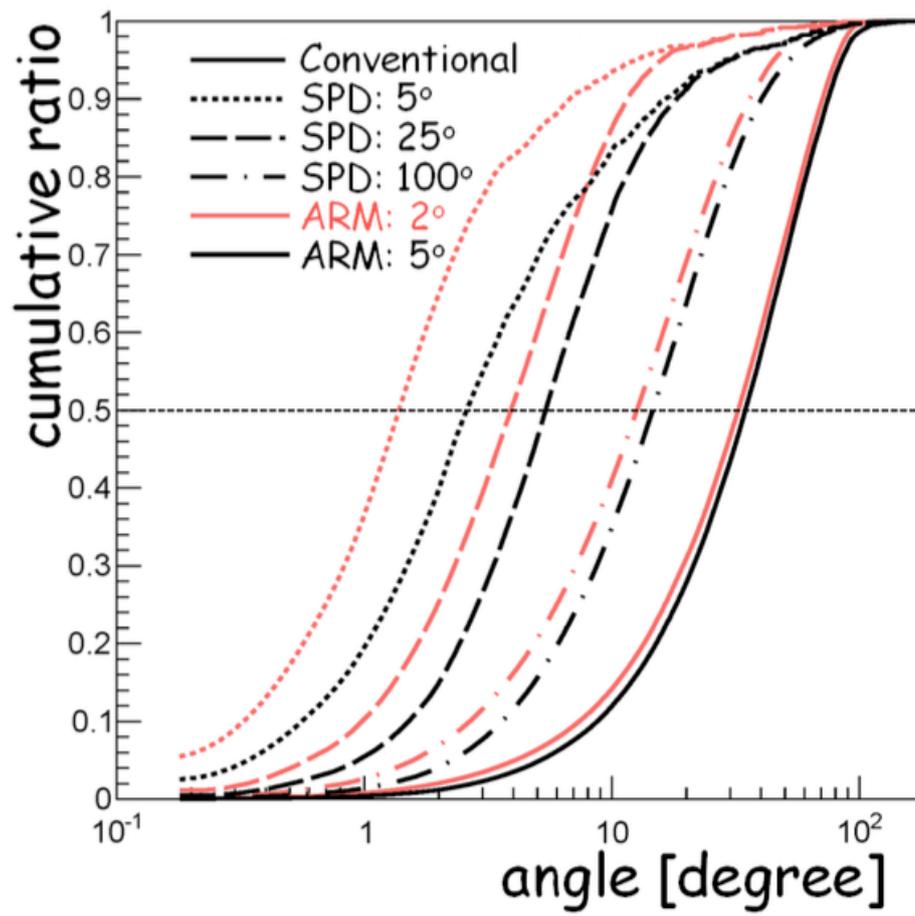


図 2.3: HPR の ARM・SPD に対する依存性 (Tanimori et al. (2015))。

方向と始点位置を取得することが重要である。荷電粒子が物質中を通過する際、粒子は散乱体物質とクーロン多重散乱を繰り返す、反跳方向の情報を徐々に失っていく。多重散乱による電子の進行方向の変化はモーリエ理論 (Lynch & Dahl (1991)) に修正を加えた形で記述されるが、小さい散乱角では散乱角の分布は正規分布に近似できる。電子が  $x$  進む間に初期方向から曲げられる角度の平均  $\theta_{rms}$  は、

$$\theta_{rms} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left( 1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0} \right) \quad (2.6)$$

と表せる。ここで、 $X_0$  は物質の放射長、 $\beta, c, p$  はそれぞれ電子の速度と運動量である。式 2.6 から、放射長が長い物質を散乱体として用いることでより反跳方向を正確に測定できることが分かる。図 2.4 に、Ar ガス (1 atm)、CF<sub>4</sub> ガス (3 atm)、固体の Si における、電子の散乱角度のシミュレーション結果を示す。Si 固体検出器を考える場合、50 keV の電子が物質内を 0.1 mm 進む間に電子は  $\sim 200^\circ$  の散乱を受けてしまうため、ピクセル検出器などを使って電子の飛跡を追跡することは困難である。一方、1 atm の Ar ガスでは 50 keV の電子の場合 1 mm 進んだ場合でも散乱角は  $\sim 10^\circ$  に抑えられることができる。現行の MPGD (Micro Pattern Gas Detector) 技術では数百  $\mu\text{m}$  オーダーの空間分解能が達成されているため、ガス検出器を用いることで十分に反跳電子の方向を測定することが可能となる。

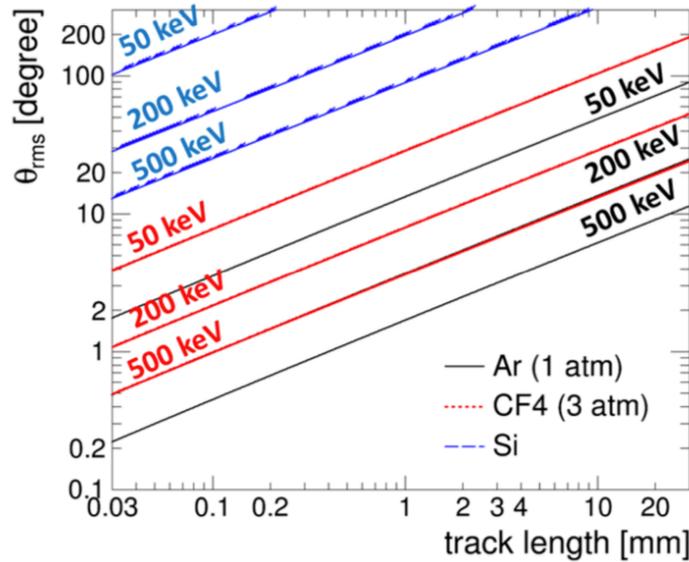


図 2.4: 多重散乱による運動方向情報の劣化 (Nakamura (2018))。

また、荷電粒子の電離損失は Bethe-Bloch の式より

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e c^2 \beta^2} N Z \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (2.7)$$

と表される。ここで、 $N$  は物質中の原子数密度、 $Z$  は原子番号、 $I$  は平均励起ポテンシャルである。粒子エネルギーとエネルギー損失率の関係を図 2.5 に示す。荷電粒子が物質中

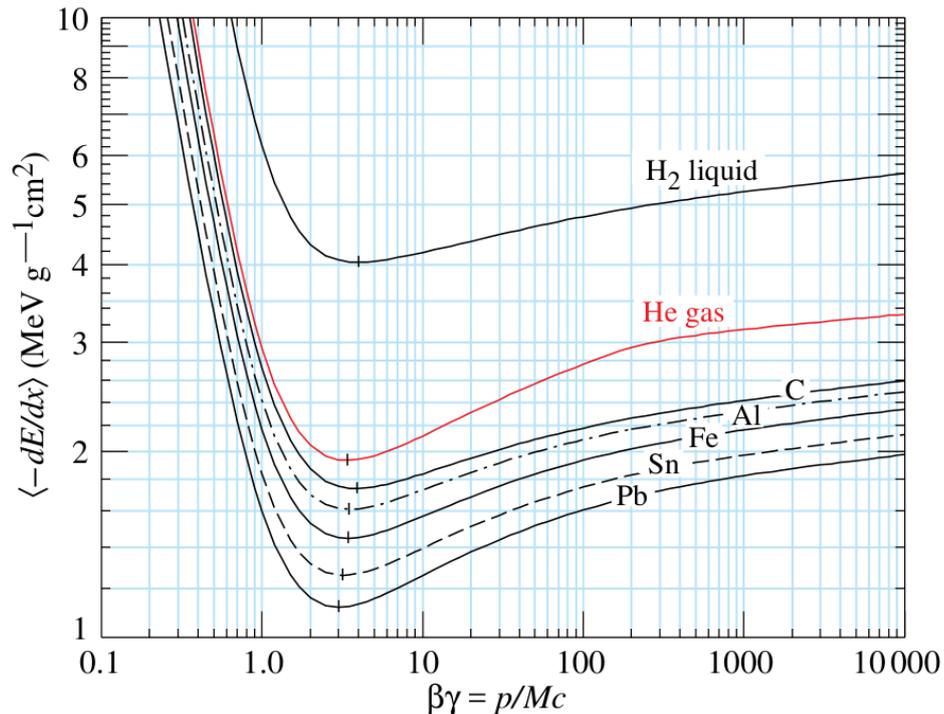


図 2.5: 液体 H・気体 He・C・Al・Fe・Sn・Pb における荷電粒子のエネルギー損失率 (Groom & Klein (2000))。

で減速して停止に至る過程では、停止直前の低速領域において  $1/\beta^2$  の寄与が支配的となり、エネルギー損失率が急激に増加する。この結果、飛跡の終端近傍でエネルギー損失が最大となる現象が生じ、これは一般にブラッグピークと呼ばれる。このブラッグピークを TPC で検出することで、反跳電子の飛跡における始点と終点を識別できる。また、式 (2.7) で記述されるエネルギー損失率は、 $\beta\gamma$  がある程度大きい領域では  $1/\beta^2$  項の減少と対数項の増加が釣り合い、 $dE/dx$  が広い範囲で緩やかな極小値をとる。この極小近傍で物質中のエネルギー損失が最も小さく、かつ運動量に対して変化が小さい荷電粒子を最小電離粒子 (minimum ionizing particle: MIP) と呼ぶ。MIP 領域では、物質中の単位長さあたりの平均電離量がほぼ一定となるため、検出器応答の較正や、宇宙線ミュオン等の貫通粒子によるバックグラウンドの評価に有用である。

上記の要求を満たすため、我々は散乱体検出器として  $\mu$ -PIC (Micro Pixel Chamber : Ochi et al. (2001)) と GEM (Gas Electron Multiplier: Sauli (1997), Tamagawa et al. (2006)) を用いた TPC (Time Projection Chamber) を採用している (図 2.6)。 $\mu$ -PIC は、1つ1つのピクセルが比例計数管を輪切りにしたような構造を持つ電極一体型の微細ガス増幅器であり、高い空間分解能と安定した長期動作が可能である。Anode と Cathode に電位差 300 – 500 V を印加することで、電極近傍に強い電場が生成され電子増幅を起こす。増幅率は 6000 程度であり (Nagayoshi et al. (2004))、TPC 全体のガス増幅器として GEM と組み合わせて用いられる。読み出し数を減らすため、Anode・Cathode はそれぞれ

れを直交するストリップ状に繋がっており、それぞれのストリップからの信号を読み出すことで2次元位置情報を取得する。GEMはポリイミドや液晶ポリマーの両面に銅箔を貼り付け、微細な穴を多数あけた構造を持つガス増幅器である。GEMに電位差を印加することで、穴の中に強い電場が生成され、電子増幅を起こす(図 2.7)。GEMは増幅率 $\sim 10$ 程度で運用している。

ETCCの運用に必要なTPCのガス利得を計算すると以下ようになる。TPC内の電子飛跡の全てを記録するにはMIP相当のエネルギー損失を信号として検出する必要がある。Arガス(2 atm)を例に考えると、MIPのエネルギー損失は $5.06 \text{ keV/cm}$ で、電離粒子を1個生成するのに必要なエネルギー(W値)は $26 \text{ eV}$ であり(Groom & Klein (2000))、MIPは $\mu\text{-PIC}$ の1ストリップ幅( $400 \mu\text{m}$ )を通過する間に約7.8個の電離電子を生成することになる。現行の $\mu\text{-PIC}$ 読み出し回路の信号しきい値は $\sim 20 \text{ fC}$ であるため、 $\mu\text{-PIC}$ 1 chあたりに到達する電子数は少なくとも $\sim 10^5$ 個必要であり、TPC全体のガス利得は $\sim 10^4$ 程度が必要となる。これは $\mu\text{-PIC}$ とGEMの両方を用いることで達成可能である。TPCのガスは、W値が低く利得が得やすいArガスを主成分とし、さらに電子の拡散抑制とペニング効果(Groom & Klein (2000))によるガス増幅率向上を狙った添加物を混合した、Ar :  $\text{CF}_4$  : iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (分圧比 95 : 3 : 2) ガスを用いている。

### 2.2.2 ピクセルシンチレータアレイ (PSA)

ETCCの吸収体(PSA: Pixel Scintillator Array)は、散乱体TPCでコンプトン散乱した後のガンマ線をできるだけ高確率で全吸収し、その吸収位置と吸収エネルギーを測定する役割を担う。そのため、ETCCのダイナミックレンジはPSAのダイナミックレンジによって決定される。PSAで測定されるエネルギー $E_\gamma$ はコンプトン散乱角 $\phi$ (ARM)を決める主要因であり、位置情報は散乱後ガンマ線方向 $\vec{g}$ の決定精度に直結する。現在のETCCでは、GSO( $\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$ )無機シンチレータを用いる構成が多い。GSOは短い減衰時間( $\sim 56 \text{ ns}$ )、高い密度( $6.7 \text{ g/cm}^3$ )を持ち、エネルギー分解能は $662 \text{ keV}$ で $\sim 7\%$ とETCCを成立させるのに十分な性能を持つ(Avdeichikov et al. (1994))。また、潮解性を持たず取り扱いが容易であること、高い放射線耐性を持つことも利点である。

## 2.3 ETCC の雑音除去能力

ETCCでは、ガンマ線以外のバックグラウンド事象を除去するため、以下2つの方法を用いている。

第一に、TPCで得られる飛跡長とエネルギー損失( $dE/dx$ )を用いた荷電粒子識別である。式 2.7 から分かるように、TPC内での荷電粒子のエネルギー損失率は荷電粒子の

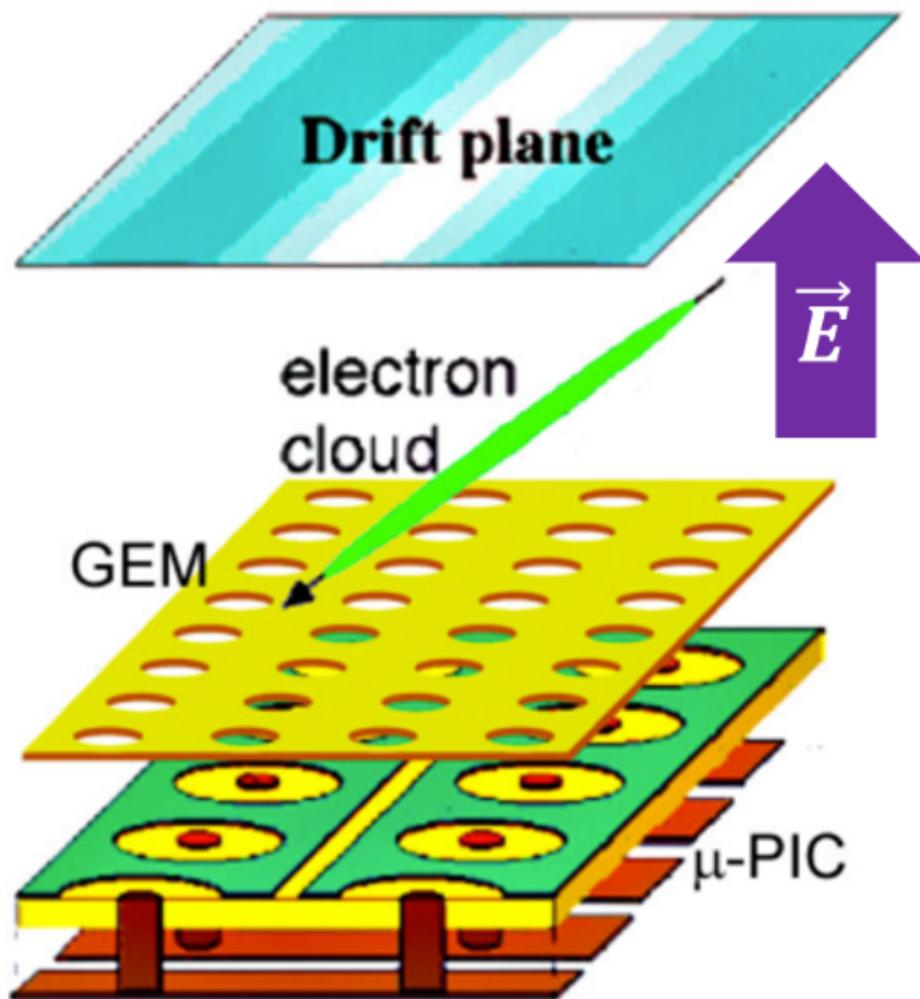


図 2.6:  $\mu$ -PIC (Ochi et al. (2001)) と GEM (Sauli (1997), Tamagawa et al. (2006)) を用いた TPC の概念図。

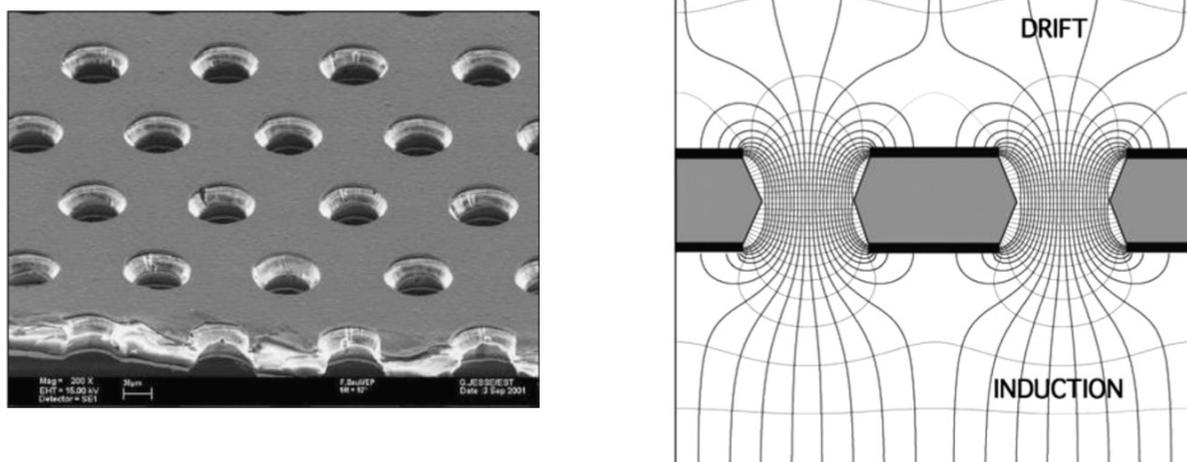


図 2.7: GEM の顕微鏡写真 (左) と電気力線 (右) (Sauli (2016))。

電荷と質量・運動量によって決まる。図 2.8 に、TPC 内での荷電粒子のエネルギー損失と飛跡長の関係を示す。エネルギー損失率はこの散布図内の傾きとして表され、粒子の情報を与える。この図内には、大きく分けて (1) 電子が TPC 内で停止した成分、(2) 最小電離粒子のエネルギー損失率に沿う成分、(3) ガス検出器の大きさ (30 cm 程度) を貫通した高エネルギー粒子の成分、の 3 つの成分が見られる。TPC 内部で止まった電子である (1) の成分のみを選択することで、宇宙線由来の高エネルギー荷電粒子などのバックグラウンド事象を強力に抑制できる。

第二に、反跳電子方向が得られることを利用したコンプトン運動学テスト ( $\alpha$ -cut) である。散乱ガンマ線と反跳電子のなす角  $\alpha$  は、測定したエネルギー値からコンプトン運動学的に計算できる  $\alpha_{kin}$  と、検出器で測定した散乱方向から幾何学的に計算できる  $\alpha_{geo}$  の 2 通りの方法で求めることができる。

$$\cos \alpha_{kin} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}} \quad (2.8)$$

$$\cos \alpha_{geo} = \vec{g} \cdot \vec{e} \quad (2.9)$$

$$\Delta \cos \alpha = |\cos \alpha_{kin} - \cos \alpha_{geo}| \quad (2.10)$$

図 2.9 に、 $^{137}\text{Cs}$  からのガンマ線を測定した実験データの  $\Delta \cos \alpha$  分布を示す。 $\Delta \cos \alpha$  が小さい事象のみを選択することで、偶発同時計数事象を強く抑制できる。

## 2.4 ETCC による高エネルギー事象観測

ETCC の標準解析では、反跳電子が TPC 内で停止し、散乱後ガンマ線のみが PSA で吸収される事象 (single-hit 事象: 図 2.1) を用いてきた。single-hit 事象解析は事象定義が

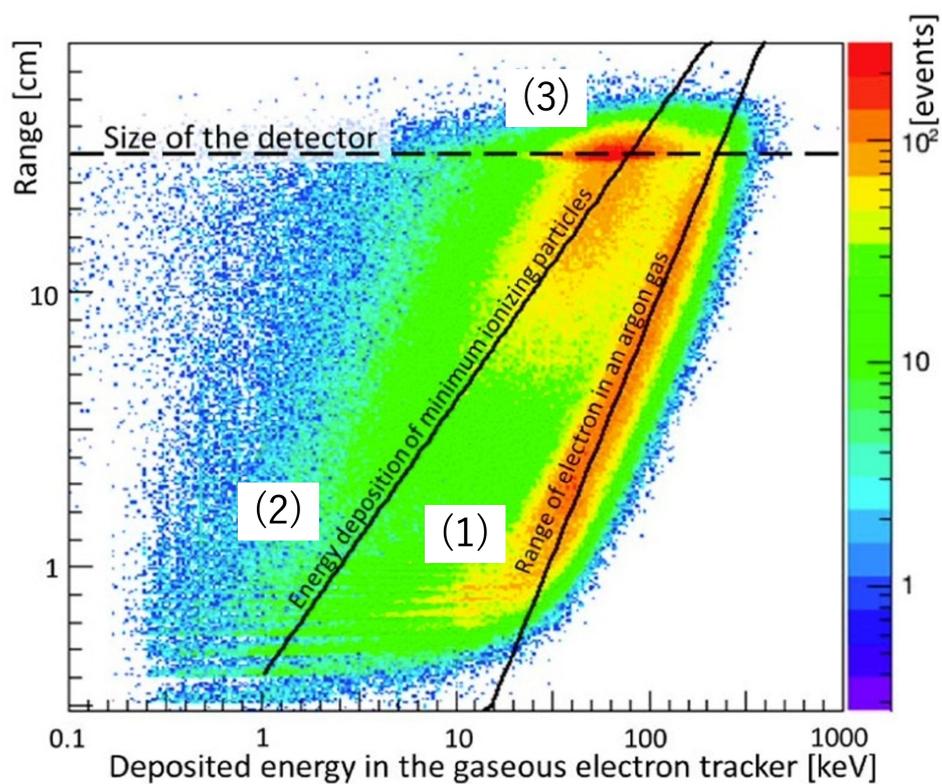


図 2.8: ガス飛跡検出器における荷電粒子とエネルギー損失と飛跡長の関係 (Takada & Tanimori (2019))。 (1) : TPC 内で停止した反跳電子、 (2) : 最小電離粒子、 (3) : 貫通粒子。

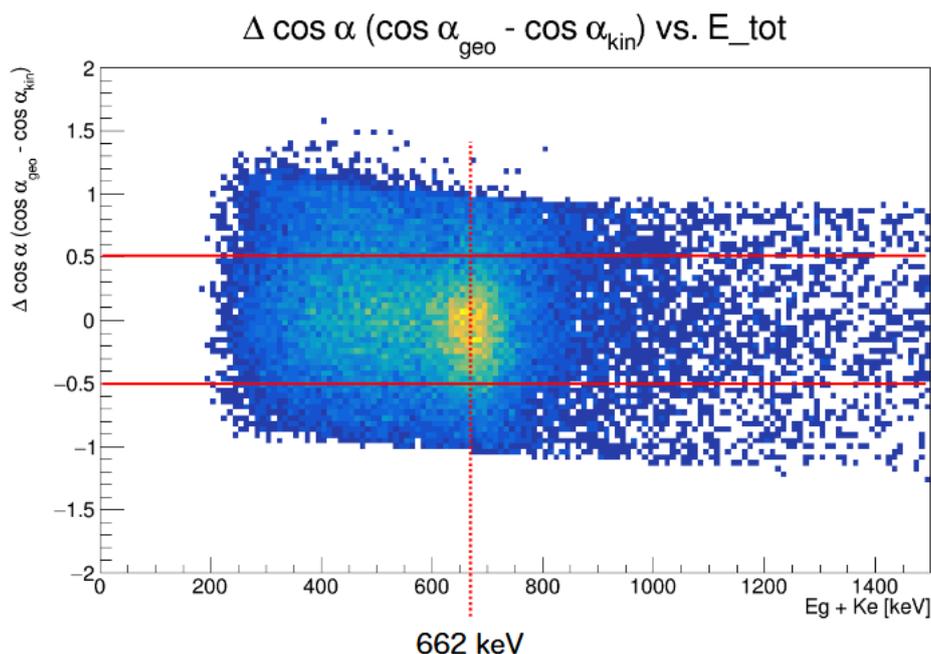


図 2.9: ETCC で線源  $^{137}\text{Cs}$  を測定した際の  $\Delta \cos \alpha$  分布。 $^{137}\text{Cs}$  から放射される 662 keV ガンマ線に対応する位置で  $\Delta \cos \alpha \simeq 0$  にピークが現れている (Tsukamoto (2025))。

明快でエネルギー再構成も比較的単純である反面、入射エネルギーが高くなるにつれて反跳電子が TPC から脱出しやすくなり、有効面積が伸びにくいという問題を抱える。

この課題に対して、反跳電子が TPC 内部でエネルギーを落としきらず、電子と散乱ガンマ線の両方が PSA に到達する事象 (double-hit 事象: 図 2.10) を解析対象として高エネルギー側へ観測帯域を拡張する手法が提案されている (Oka et al. (2024))。double-hit では PSA に 2 つのヒットが生じるが、その一方は散乱後ガンマ線の全吸収、もう一方は TPC 外へ抜けた反跳電子のエネルギー損失に対応する。double-hit 事象解析では、TPC 内の電離飛跡に対してその終端位置に最も整合する PSA ヒットを電子側として同定し、残りを散乱後ガンマ線側として扱うことで、散乱ガンマ線の方向ベクトル  $\vec{g}$  と反跳電子の方向ベクトル  $\vec{e}$  を決定する。これにより、single-hit と同様の枠組みで入射方向を再構成できる。

double-hit 解析では、入射エネルギー  $E_0$  の推定において 2 つの PSA ヒットから得られるエネルギー情報を用いるが、TPC 外の不感領域でのエネルギー損失を考慮する推定項が増えるほか、電子エネルギーの計測にも PSA のエネルギー分解能が影響するため、single-hit に比べてエネルギー分解能が劣化し、結果として ARM も悪化する傾向がある (図 2.11 (a))。一方、double-hit 解析は SPD に対して顕著な改善をもたらす。これは、入射エネルギーが高い double-hit 事象では反跳電子の運動量が大きく、多重散乱による初期方向の劣化が小さくなるほか、電子が TPC から脱出して PSA に到達する幾何条件により、飛跡終端 (脱出点) の同定が容易になるためである。結果として PSD としては改善す

る傾向にあり、HPR は 1.5 MeV 付近で single-hit に比べて約 2 倍良くなる (図 2.11 (b))。さらに、有効面積は高エネルギー側で急減せず、1.5 - 3 MeV 程度の範囲でほぼ一定の値を保つことが示され (図 2.11 (c))、double-hit 解析が高エネルギー帯での観測能力拡張に有効であることが実証された。

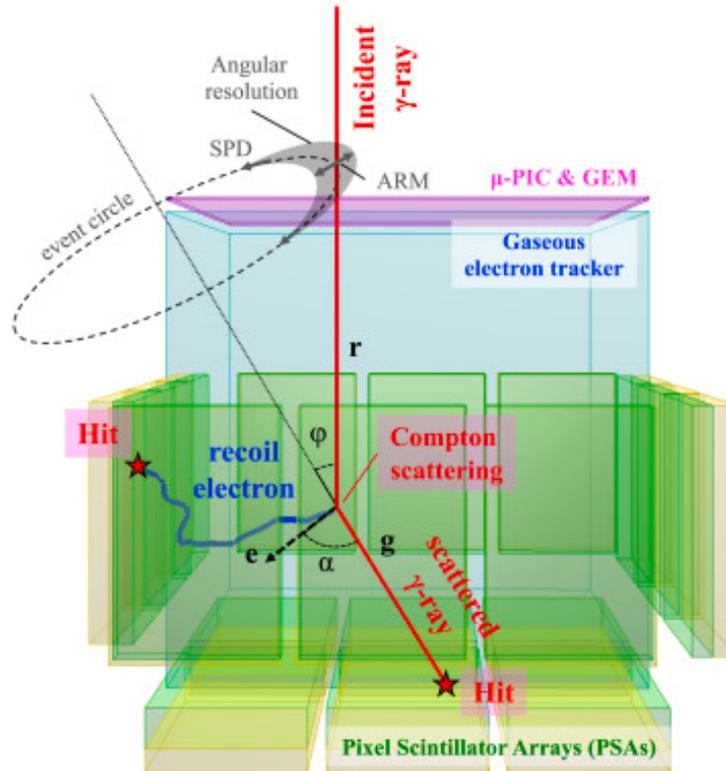


図 2.10: double-hit 事象の概念図 (Oka et al. (2024))。

## 2.5 気球観測実験 SMILE と SMILE-3 実験

### 2.5.1 SMILE-I / SMILE-2+

SMILE (Sub-MeV/ MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-ballon Experiment) 実験は、ETCC による MeV ガンマ線観測の原理実証から科学観測へ進むための気球搭載実験であり、これまでに SMILE-I、SMILE-2+ の 2 回が実施されている。第一回の SMILE-I は 2006 年に実施され、気球高度での動作確認と雑音除去能力の実証を目的とした。SMILE-I ETCC は TPC の有感領域が  $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  であり、150 keV から 1 MeV のガンマ線に対して約  $1 \text{ mm}^2$  の有効面積を持つ (図 2.12)。三陸大気球観測所から ETCC を搭載した B100 気球が放球され、32 - 35 km の高度での 4.1 時間の水平浮遊を含む 6.8 時間の飛行を行った。この実験では、天頂角  $60^\circ$  以下のガンマ線を対象に、100 keV - 1 MeV のエネ

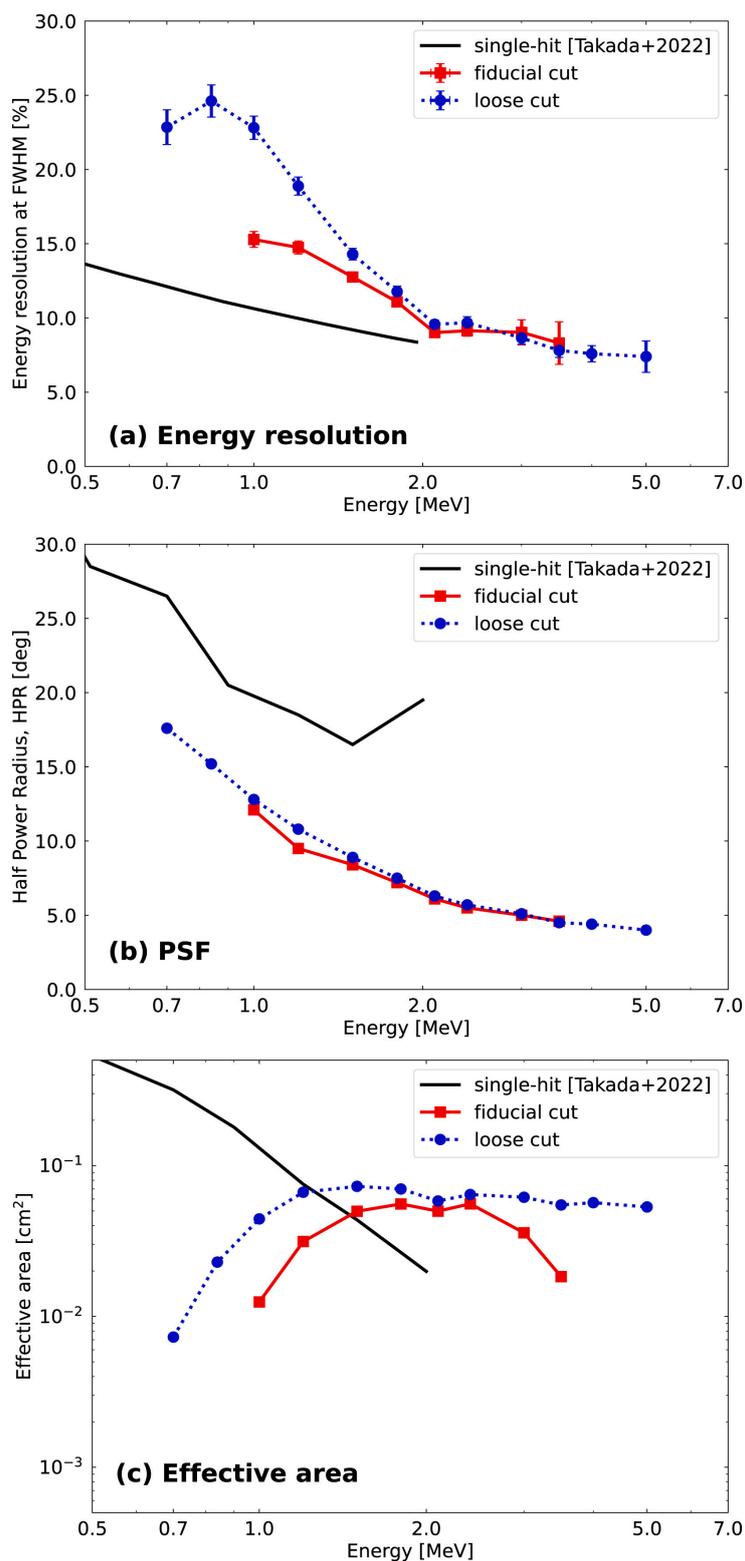


図 2.11: double-hit 事象解析のシミュレーション結果 (Oka et al. (2024))。 (a) エネルギー分解能、(b) PSF、(c) 有効面積。

ルギーのガンマ線 420 イベントを検出した。また、宇宙拡散ガンマ線と大気ガンマ線の寄与を分離する解析では、過去の観測と整合する結果が得られた (Takada et al. (2011))。

その後 SMILE-II 実験用として、30 cm × 30 cm × 30 cm、Ar1 気圧の TPC と PSA を搭載した ETCC を開発し、性能評価を行った。TPC 読み出しには 3.1.1 節で述べる読み出し基板を用いることで大型化を実現したほか、Time over Threshold (ToT) 情報を利用することでより詳細な電子飛跡情報を取得できるようになった。SMILE-II ETCC は 300 keV で約 1 cm<sup>2</sup> の有効面積を持ち、地上での放射線源を用いた試験において、662 keV ガンマ線に対して ARM 6.9°、PSF 15° (HWHM) を達成した。また、この ETCC による数時間の気球観測ではかに星雲からのガンマ線を約 5 $\sigma$  で検出することが期待されたが、飛翔する機会を得られなかった (Tanimori et al. (2017))。

その後、2018 年に実施された SMILE-2+ 実験では SMILE-II ETCC を元に、ガスを Ar 1 気圧から 2 気圧に変更、DAQ システムを VME ベースから Ethernet ベースへ変更したほか、double-hit 事象解析を行うため PSA をガス容器内部に配置するなどの改良を加えた ETCC を開発し、気球観測実験が行われた (図 2.13 (a))。オーストラリア・アリススプリングスの気球観測所から放球され、37.8 - 40.4 km の高度で 26 時間の水平浮遊を含む観測を行った。かに星雲からのガンマ線は実験前の想定通り 5.1 時間の観測で 4  $\sigma$  で検出された。さらに、光度曲線の変化から銀河中心領域の高度に依存してガンマ線強度が変動する結果が得られた (図 2.13 (b))。これは、雑音除去の結果最終的に残った事象の大部分が宇宙由来のガンマ線であることを示している。これらの結果は、ETCC が MeV ガンマ線天文学において有望な検出器技術であることを示している (Takada et al. (2022))。

## 2.5.2 SMILE-3

次期計画である SMILE-3 では、有効面積が  $\sim 5$  cm<sup>2</sup>、空間分解能が PSF 5 - 10° 程度、測定帯域が 0.2 MeV から 10 MeV と上限を拡大した ETCC の開発を進めている。

この性能目標を達成するために行う改良は以下の通りである。

- TPC 充填ガスを Ar : CF<sub>4</sub> : iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (95 : 3 : 2) 2 気圧から CF<sub>4</sub> を主成分とするガス 3 気圧へ変更し、コンプトン散乱確率の向上と光電吸収確率の低減を図る。
- ポリイミド基板製の PCB (Printed Circuit Board)  $\mu$ -PIC からガラス基板を使った TGV (Through Glass Via)  $\mu$ -PIC へ変更する。TGV  $\mu$ -PIC は放電耐性が高く高ゲイン化が可能であり、高圧ガスによる運用でも安定動作が期待できる。
- $\mu$ -PIC の読み出しピッチ間隔を 0.8 mm から 0.4 mm へ変更し、より高精細な飛跡を取得可能にする。
- PSA の光検出器を PMT から MPPC (3.3.3 節) へ変更し、MPPC の増幅を High/Low 2 系統に分けることで、PSA のダイナミックレンジを拡大するほか、エネルギー分解能を向上させることで ARM の改善を図る。

- 検出器全体のトリガーシステムを改良し、Common-Start トリガー方式から Common-Stop トリガー方式へ変更し、不感時間を削減する。

$\mu$ -PIC の変更について、SMILE-2+では 30 cm 角の PCB  $\mu$ -PIC 1 枚を用いて TPC を構成していた。また、 $\mu$ -PIC 素子自体の読み出しピッチは 0.4 mm であったが、 $\mu$ -PIC 読み出し基板で 2 ストリップをまとめて読み出していたため、実質的な読み出しピッチは 0.8 mm であった。これに対し、SMILE-3 では 15 cm 角の TGV  $\mu$ -PIC 4 枚を組み合わせて TPC を構成し (これは、ウェハーサイズの制約により 30 cm 角の  $\mu$ -PIC が製造困難であることによる)、それぞれの TGV- $\mu$ -PIC ごとに信号を読み出す (図 2.14)。読み出しピッチが 2 倍細くなることを考慮すると、SMILE-2+では  $\mu$ -PIC 読み出し基板を 6 枚使用していたのに対し、SMILE-3 では 24 枚使用することになる。

SMILE-3 実験ではまず 2028 年にオーストラリアでの 1 日飛翔による観測を行い、その後スーパープレッシャー気球による約 1 ヶ月の長期間観測を計画している。オーストラリアでの 1 日飛翔での主な観測目標は、銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線 (511 keV) の空間分布の測定である。

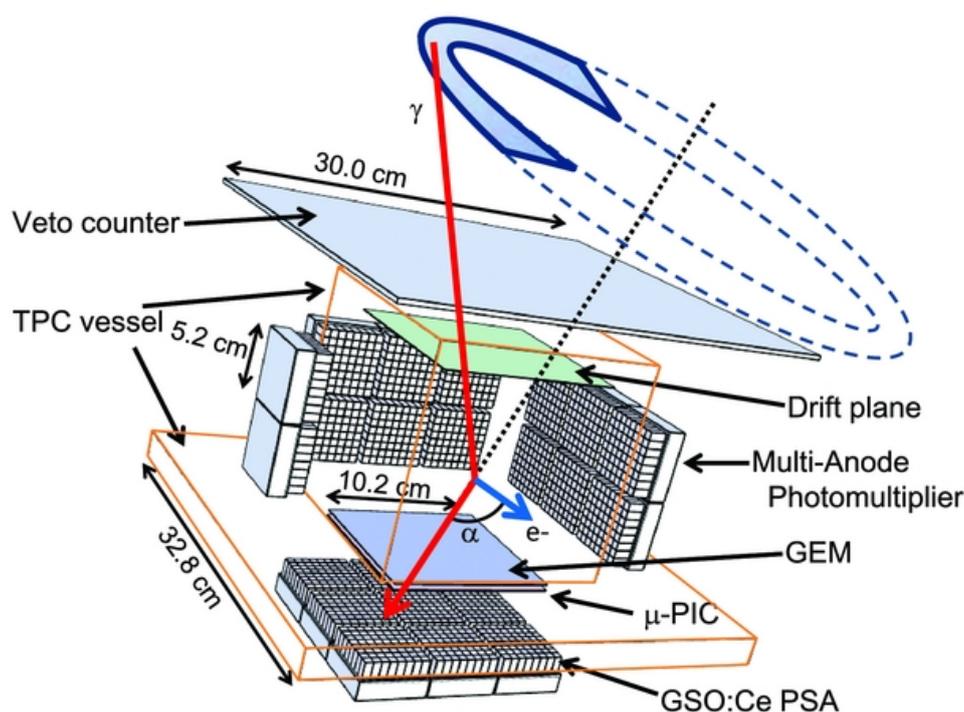


図 2.12: SMILE-I 実験で使用された ETCC の構造 (Takada et al. (2011))

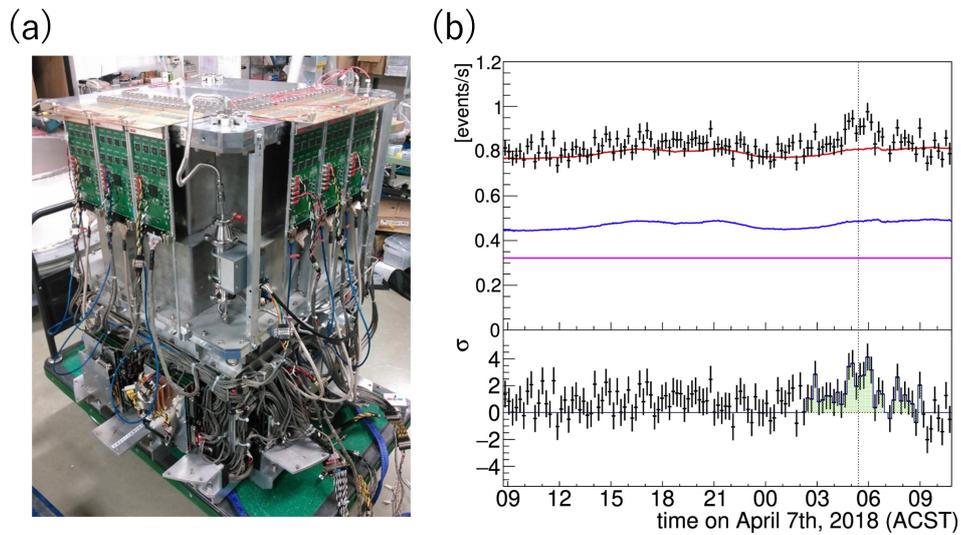


図 2.13: (a) : SMILE-2+ 実験で使用された ETCC の外観。(b) 水平飛行中における、天頂角が  $60^\circ$  未満の領域での  $0.15 - 2.1$  MeV エネルギーバンドのライトカーブ。青線は SMILE-2+ が銀河外拡散ガンマ線および大気ガンマ線を検出した場合に期待される事象率、マゼンタ線は陽子・中性子・電子・陽電子によって誘起されるバックグラウンド事象率、赤線は SMILE-2+ の総推定事象率を表す。下段パネルは、観測された事象率と期待される事象率の差を示す。銀河中心の子午線通過の時刻 (縦の点線) の付近で事象率の増加が見られる。(Takada & Tanimori (2019))

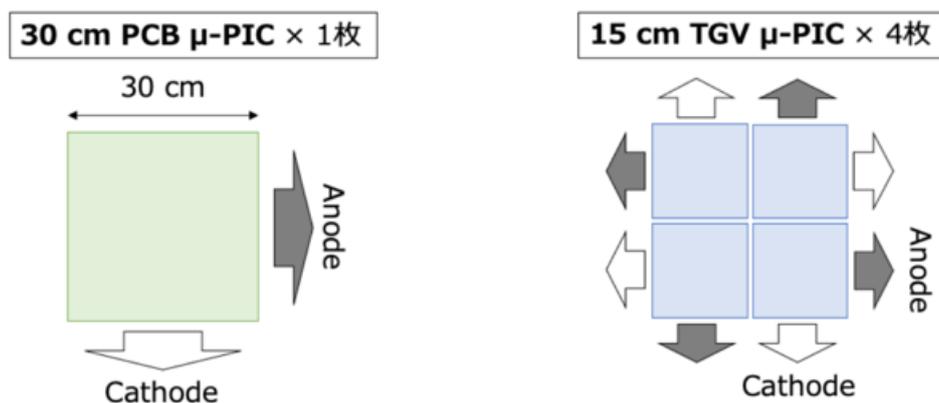


図 2.14:  $\mu$ -PIC の構成比較。SMILE-2+ では PCB  $\mu$ -PIC 1 枚を用いていたが、SMILE-3 では TGV  $\mu$ -PIC 4 枚を組み合わせ、それぞれの  $\mu$ -PIC ごとに信号を読み出す。

---

## 第 3 章

# SMILE-3用 DAQ システムとトリガーコントロールユニットの開発

本章では、次期気球実験 SMILE-3 に搭載する ETCC のために新たに設計・開発したデータ収集 (DAQ) システム、およびその中心となるトリガーコントロールユニット (Trigger Control Unit: TCU) について述べる。1.1.1 節で述べたように、GRB 放射の時間変動を分解するには ms スケールの時間分解能と、数 kHz の計数率でも運用可能な高レート耐性を持つ検出器が必要となる。しかし、SMILE-2+以前の DAQ システムでは上記要件を達成することが困難であり、また検出器の大規模化に伴いシステムの安定性が確保できない可能性がある。そこで本研究では、システム全体の拡張性と運用安定性を確保しつつ、不感時間低減と時刻同期を実現する新 DAQ へ移行する方針を立て、TCU を含む新システムを設計・試作し、実験室環境で性能評価を行った。

### 3.1 従来のデータ収集システムとその問題点

この章では、SMILE-2+で使用されていた、 $\mu$ -PIC 読み出し基板と PMT PSA ユニットを用いた ETCC のデータ収集 (DAQ) システムについて説明する。図 3.1 に、SMILE-2+の ETCC DAQ システムのブロック図を示す。ETCC の DAQ システムは、フロントエンド系 (TPC、PSA、TCU: Trigger Control Unit) とバックエンド系 (PSA データプロセッサ、DAQ CPU) から構成される。SMILE-2+の DAQ システムの信号の説明を表 3.1 に示す。

#### 3.1.1 $\mu$ -PIC 読み出し基板

図 3.2 に  $\mu$ -PIC 読み出し基板 (Encoder 基板) の外観、図 3.3 にそのブロック図を示す。Encoder 基板は主として、 $\mu$ -PIC からの多チャンネル信号を処理する 8 個の ASIC

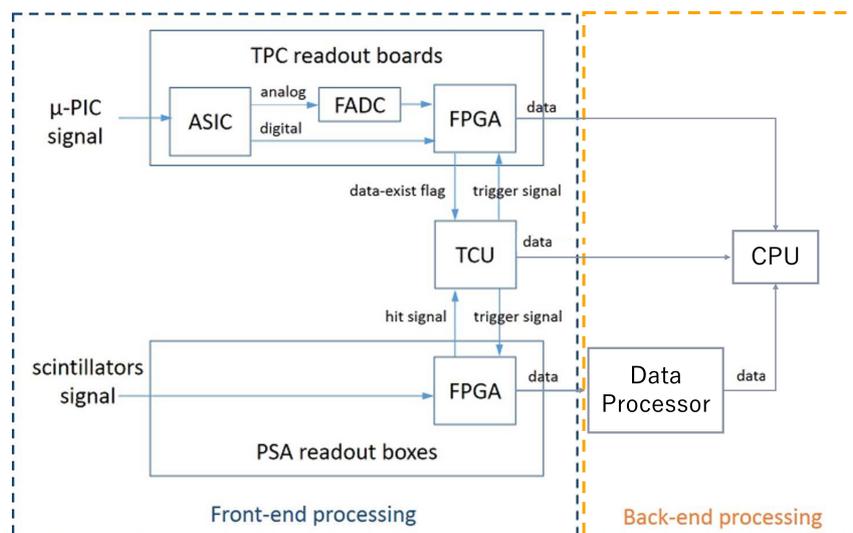


図 3.1: SMILE-2+で使用した ETCC データ収集システムのブロック図 (Mizumoto et al. (2015) に加筆)。

表 3.1: SMILE-2+で使用したデータ収集システムにおける各信号の説明。信号の方向は TPC 読み出し基板・PSA ユニットから TCU への信号を出力、TCU から各基板への信号を入力とする。

信号名	方向	説明
Hit_TPC	出力	TPC でしきい値を超えた信号が発生
Data_exist	出力	Hit_TPC が真値になってから 10.24 $\mu$ s 間真値
DAQ_Run	出力	TPC 読み出し基板の不感時間を示す
Trigger_TPC	入力	TCU からの TPC データ取得トリガー
Hit_PSA	出力	PSA でしきい値を超えた信号が発生
Process	出力	PSA でデータ保持中
Trigger_PSA	入力	TCU からの PSA データ取得トリガー
Veto_PSA	入力	Hit_PSA を無効化
Valid	入力	PSA のデータを保存する
Clear	入力	PSA のデータを破棄する

(FE2009bal ASIC (Mizumoto et al., 2015))、波形を時間情報として取得する4個のFADC、イベントバッファリングと制御・整形・通信を担うFPGA、およびPC(中央CPU)へデータを送信するEthernetインタフェース、外部トリガー入出力用のLVDS(Low Voltage Differential Signaling)インタフェースから構成される。 $\mu$ -PICから入力されるストリップ信号は基板上の8個のASICにより、読み出し基板1枚あたり合計128chを並列に処理して各チャンネルの前置増幅・波形整形を行う。ASICは同一入力から2系統の出力を生成し、(i)サムアンプによって16chの波形を合計したアナログ信号と、(ii)しきい値判定に基づくデジタルヒット信号(しきい値を超えている間のみ真値を出力するToT情報)に分岐する。8個のASICから出力されたアナログ側は2chずつまとめてFADCで50MHzでサンプリングされ(つまり $\mu$ -PICストリップとしては32ch分の和をサンプリングする)、デジタル側は128ch分がFPGAに入力されて100MHzで取り込まれ、それぞれFPGA内部のリングバッファに保存される。同時に3ch以上でヒットが存在する場合にはヒット信号(Hit\_TPC)を外部へ送信している。これは電子回路のノイズ等による誤トリガーを防止するため3ch以上のヒットを検出するロジックとなっている。また、Hit\_TPCが出力されてから10.24 $\mu$ s間、リングバッファ内に飛跡データが保持されていることを示すData\_exist信号が出力される。外部からトリガー信号(Trigger\_TPC)が入力されるとデータ取得を停止してリングバッファ内のデータをFIFOへ転送し、リングバッファ中の10.24 $\mu$ s分の波形情報とヒット情報を同一イベントとしてまとめ、Ethernetインタフェースを介してSiTCP(Uchida(2008))を用いたTCP通信によりデータ集積用CPUへ送信する。リングバッファ長はTPCのドリフト速度を $\sim 4$ cm/ $\mu$ sとした場合、最大で $\sim 30$ cmのドリフト距離を記録したうえで前後に十分なマージンを持つような値に設定されている。また、リングバッファからデータを読み出し整形を行っている間は次のトリガーを受け付けることができないため、これを外部へ知らせるためにDAQ\_Run信号を出力している。DAQ\_Run信号が真値の間はトリガーを受け付けない状態であり、 $\mu$ -PIC読み出し基板の不感時間に相当する。TPCにデータがあるときにトリガーをかけた場合の不感時間は $\sim 100$  $\mu$ s程度である。外部から見たとき $\mu$ -PIC読み出し基板は、トリガー信号を入力すると直近の10.24 $\mu$ s分のデータを出力する検出器として機能し、これはデータ取得の終了時刻を基準とするコモンストップトリガー方式に相当する。

### 3.1.2 PSAユニット

SMILE-2+実験までに用いられたPSAユニットでは、6mm $\times$ 6mm $\times$ 13mm(底面は26mm)のGSO結晶を8 $\times$ 8個アレイ化したものを用いている(図3.4左)。PSAからの光読み出しには浜松ホトニクス社製のマルチアノード光電子増倍管(PMT: Photomultiplier)H8500Cを用いた(図3.4左)。PMTからの信号読み出しでは信号数の削減のため、各PMTのアノード64チャンネルを抵抗分割回路で4端子にまとめて読み出している(図3.4

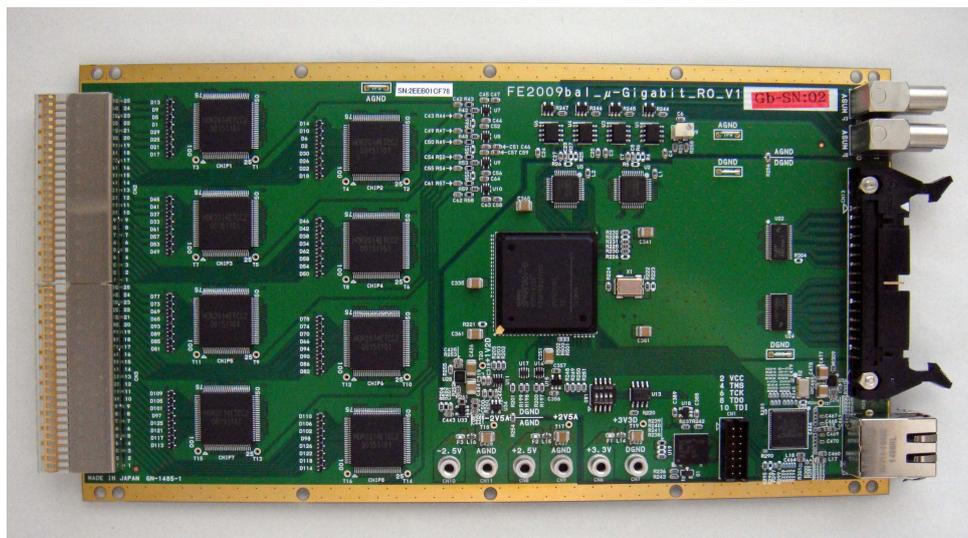


図 3.2:  $\mu$ -PIC 読み出し基板の外観。

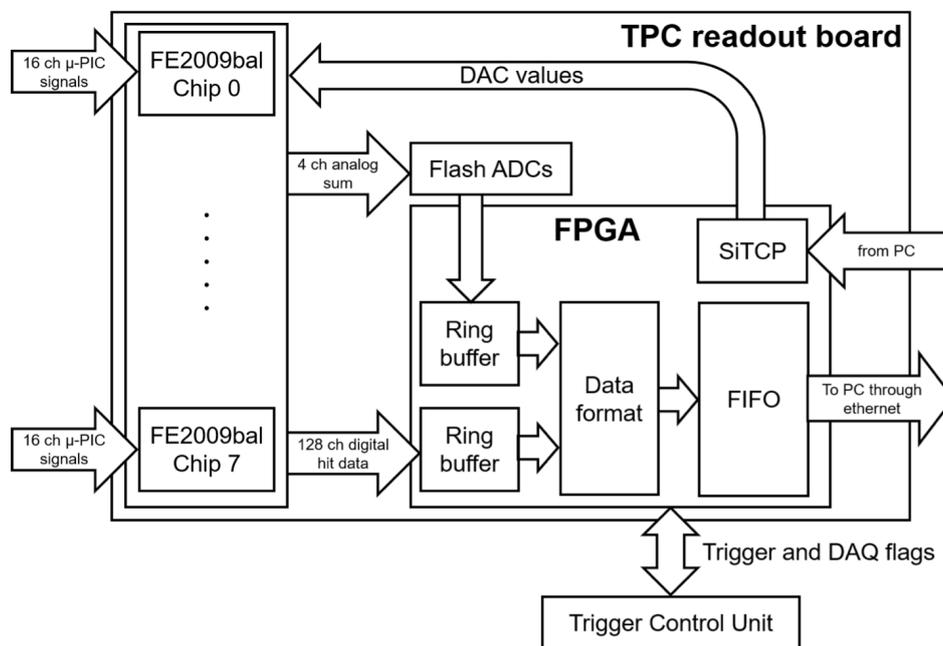


図 3.3:  $\mu$ -PIC 読み出し基板のブロック図 (Tahara (2023))。

右)。4端子の電荷から、エネルギー  $E$  は

$$E \propto Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (3.1)$$

とし、位置は重心演算

$$x = \frac{-Q_1 - Q_2 + Q_3 + Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}, \quad (3.2)$$

$$y = \frac{Q_1 - Q_2 - Q_3 + Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (3.3)$$

のように求めることができる。

PSA でのデータ処理には、クリアパルス社製ヘッドアンプユニットモデル 80256 (図 3.5) とヘッドアンプデータプロセッサ 80339 (図 3.6) を用いた。ヘッドアンプユニット 1 つあたり 6 つの PMT を接続でき、各 PMT の 4 端からの信号を受け取り、アナログ信号の増幅整形を行う。外部からのトリガー信号 (Trigger\_PSA) を受け取ると、それを基準に波形をサンプリングし FPGA 内で波形テンプレートと比較して波高値を計算しデータプロセッサへ送信する。データプロセッサでは、ヘッドアンプユニットからのデータを受け取り、イベントごとにデータを整形して Ethernet で DAQ CPU へ送信する。この検出器はトリガー信号 (Trigger\_PSA) を受け取るとデータ取得を開始するコモンスタートトリガー方式で動作する。後述の ETCC トリガーモードでは、トリガーを送信した後にそのデータが有効かどうかを判定する過程が存在するため、データプロセッサへ有効データを保存する信号 (Valid) とデータ破棄を指示する (Clear) を受信できるようになっている。1 イベントあたりのデータ処理時間は  $\sim 20 \mu\text{s}$  程度である。

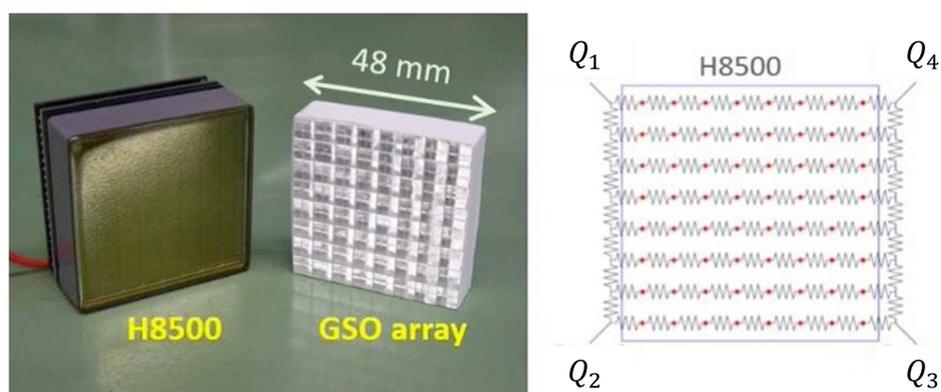


図 3.4: GSO ピクセルシンチレータアレイと PMT の写真 (図左) と、抵抗分割による PMT の信号読み出し方法 (Mizumoto et al. (2015))。

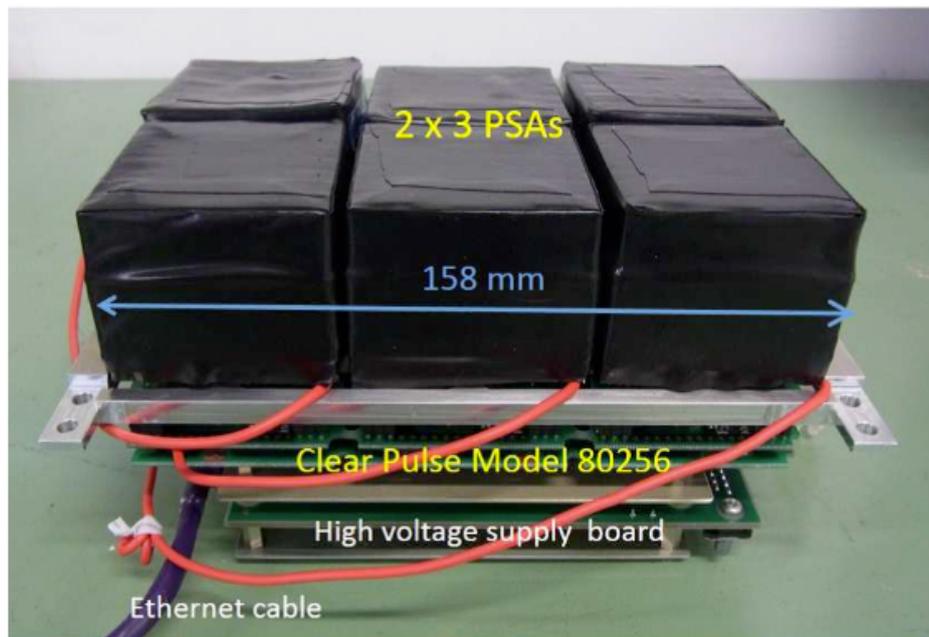


図 3.5: PMT を用いた PSA ユニット。GSO ピクセルシンチレータアレイをクリアパルス社製ヘッドアンプユニットモデル 80256 に接続している。

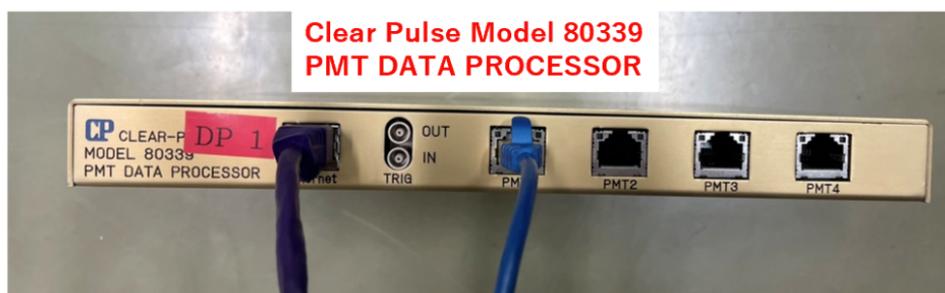


図 3.6: クリアパルス社製ヘッドアンプデータプロセッサ 80339 の写真。

### 3.1.3 トリガーコントロールユニット (TCU) と ETCC トリガーモード

フロントエンド系では、図 3.7 に示す TCU がデータ取得の開始/停止およびトリガー信号の生成を制御する。TCU はメイン基板、TPC 入出力基板、PSA 入出力基板、GPS 入出力基板、電源基板から構成される。メイン基板には FPGA と Ethernet ポートが搭載され、DAQ CPU からのコマンドを受け取って動作を制御する。TPC 入出力基板は 1 枚あたり TPC 読み出し基板 4 枚と通信でき、PSA 入出力基板は 1 枚あたり PSA ユニット 6 台と通信できる。2.5.1 節で述べた SMILE-2+ 実験では  $\mu$ -PIC 読み出し基板 6 枚と PSA ユニット 15 台を用いており、このとき TCU には TPC 入出力基板 2 枚と PSA 入出力基板 3 枚が搭載されている。GPS 入出力基板には、グローバル時刻を取得するためのシリアル入力、強制トリガとして用いる PPS 信号入力 (詳細は 3.3.5 節で述べる)、荷電粒子除去のための veto トリガ入力  $\times 5$  がある。すべての基板は電源基板から給電される。



図 3.7: SMILE-2+ で使用した TCU の外観 (Mizumoto et al. (2015))。

TCU には ETCC モード、PSA 較正モード、TPC 較正モードの 3 つの DAQ モードがある。図 3.8 に SMILE-2+ の ETCC モードのフローチャートを示す。DAQ システムの動作周波数は 100 MHz であり、光子は 1 クロックサイクルの間に  $\sim 3$  m 進むが、これは検出器サイズ  $\sim 30$  cm に比べて十分に小さい。そのため、TPC 領域内でのコンプトン散乱と散乱ガンマ線の PSA 到達は同一時刻に起こるとみなせる。スタンバイ状態の PSA のいずれかに

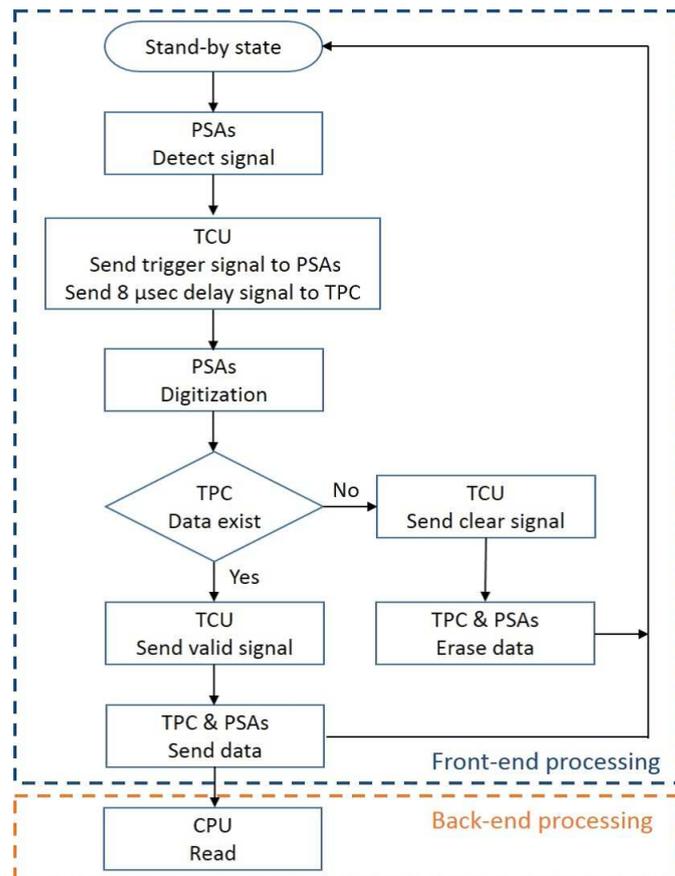


図 3.8: SMILE-2+でを使用した ETCC データ収集システムのフローチャート (Mizumoto et al. (2015))。

光子が入射すると TCU へヒット信号 (Hit\_PSA) が送信される。TCU は Hit\_PSA 信号を受け取ると即座に PSA 入出力基板を通して全 PSA ユニットへトリガー信号 (Trigger\_PSA) と Veto\_PSA を送信し、PSA のデータ取得を開始させる。TCU はその後 TPC 読み出し基板からの Data\_exist 信号 (3.1.1) を受け取るまで  $9\mu\text{s}$  だけ待機する。 $9\mu\text{s}$  は TPC の最大ドリフト時間に相当し、TPC 内でコンプトン散乱が起こった場合に TPC からの信号が到達するまでの最大時間である。Data\_exist 信号を受け取ると TPC 入出力基板を通して全 TPC 読み出し基板へトリガー信号 (Trigger\_TPC) を送信するほか、PSA に Valid 信号を送信し、取得したデータをデータプロセッサへ送信させる。 $9\mu\text{s}$  以内に Data\_exist 信号が来なかった場合、このイベントは PSA のみが単独でヒットしたものとみなし、TCU は PSA にデータ破棄信号を送信する。

### 3.1.4 従来システムの問題点

この DAQ システムの問題点として、以下の点が挙げられる。

1つ目は、トリガー方式に起因する不感時間の増加である。上述のトリガー方式は TPC にデータが存在するかどうかで動作が分岐するが、TPC にデータが存在しない場合は不感時間はヘッドアンプユニットの処理時間 ( $\sim 20\mu\text{s}$ ) が支配的になる。ヘッドアンプユニットをより高速な処理が出来るものに変更したとしても、TPC の最大ドリフト時間  $\sim 10\mu\text{s}$  だけ待機する必要があるため、この時間が TPC にデータが存在しない場合の不感時間の下限となる。また、TPC にデータが存在する場合は TPC のリングバッファの読み出しとデータ整形にかかる時間 ( $\sim 100\mu\text{s}$ ) が支配的になる。シンチレータは TPC に比べて阻止能が高いため、ETCC ではシンチレータの計数率は TPC の計数率より 2桁程度高くなることが多く、トリガーをかけたイベントの大半は TPC にデータが存在しない。これを式で表すと、

$$deadtime[\%] \approx f_{PSA} \times 20[\mu\text{s}] + f_{ETCC} \times 100[\mu\text{s}] \quad (3.4)$$

$$f_{PSA} \approx 100 \times f_{ETCC} \quad (3.5)$$

となる。 $f_{PSA}$  は PSA ユニットの計数率、 $f_{ETCC}$  は ETCC としての計数率である。SMILE-2+ の気球フライトでは、水平浮遊中で  $f_{ETCC} \approx 500\text{ Hz}$ 、 $f_{PSA} \approx 5\text{ kHz}$  程度であり、不感時間は約 15% に達していた。この場合でも、TPC にデータが存在しない場合の不感時間が全体の大部分を占めている。PSA のみがヒットしたイベントに対して不感時間が発生しないようなトリガー方式に変更することで、同条件下で不感時間を数パーセント以下に抑えることが可能になる。

2つ目は、現状の TCU の構造ではこれ以上の検出器の大規模化に対応できないことである。TCU は最下段に電源基板があり、その上に PSA 入出力基板、メイン基板、TPC 入出力基板、GPS 入出力基板が積み重ねられた構造となっている。この中で電力消費量が

最も大きいのはFPGAを搭載したメイン基板であり、SMILE-2+ ETCCではメイン基板より上に搭載されたTPC入出力基板で電圧降下が発生しやすく、安定動作の妨げとなっていた。SMILE-3ではTPC読み出し基板が6枚から24枚に増加するため、既存のTCU構造では電源供給がさらに不安定になることが予想される。

3つ目は、検出器全体での時刻同期が取りにくいことである。TPC読み出し基板とPSAユニットは1つ1つが独立に動作しイベントデータの取得を行っているため、解析前にそれぞれのデータの対応付けを行う必要がある。これはトリガーID(トリガー回数を各基板でカウントする)とイベントごとの時刻情報を用いて行うが、従来のDAQシステムはそれぞれの基板で水晶発振器を持ち、独立したクロックを用いているため、長時間の観測ではクロックドリフトにより時刻情報が必ずずれてしまう。そのため、いずれかの基板でトリガー信号の取り逃しが発生した場合、対応するイベントデータの紐付けが困難になる。SMILE-2+実験ではこの対策のため、定期的に計測を止め時刻同期を取り直す作業を行っていた。TCUから各基板へクロックを配布し同期を取ることで、時間情報に基づくデータの対応付けを容易にする必要がある。

## 3.2 SMILE-3搭載データ収集システムへの要求

SMILE-3搭載ETCCシステムに向け、前節で述べた従来システムの問題点を解決するほか、2.5.2節で述べた検出器のアップデートに対応するほか、気球搭載の検出器であることを考慮すると新DAQシステムには以下の要求がある。

- 検出器の構成変更に対応する。特に、SMILE-3ではTPC読み出し基板が6枚から24枚に増加するほか、3.3.3節で述べる、MPPCを搭載しインターフェースを変更した新型PSAユニットを18台搭載するため、これらの変更に対応可能とする。また、将来的に4.2.2節で述べる3軸読み出し $\mu$ -PICへアップグレードする可能性も検討されているが、その場合SMILE-3と同様の体積を確保する場合は $\mu$ -PIC読み出し基板が18枚、PSAユニットが20台程度となるため、これらの拡張にも対応可能とする。
- 高レート時の不感時間を低減する。SMILE-2+実験では気球フライト中の不感時間が約15%に達していたが、SMILE-3ではこれを数パーセント以下に抑える。
- GRBやパルサーの時間発展を観測するため、時間分解能 $< 1\text{ms}$ を達成する。GPS時刻情報とイベント時間情報の紐付けを行い、検出器全体で時刻同期を取る仕組みを導入する。
- 気球システムに組み込んだ状態で安定に動作する。気球飛翔高度で1日から数カ月間の連続観測が可能とするほか、外部からのコマンドでDAQシステムの動作モードを切り替え可能とする。

- 気球運用時に十分な耐衝撃性を持つ。放球時やパラシュート展開時の衝撃に耐えるため、鉛直方向に 10 - 15 G、水平方向に 3 - 5 G の衝撃に耐えられる設計とする。

### 3.3 新データ収集システムの設計

#### 3.3.1 全体構成

図 3.9 に SMILE-3 搭載 ETCC のデータ収集システムの構成図を示す。TCU に接続する検出器ユニットは  $\mu$ -PIC 読み出し基板が 24 枚、PSA ユニットが 16 台である。加えて、時刻情報の付与のための GPS モジュールとの通信機能とアンチコインシデンスユニットの制御機能を TCU に内蔵する。DAQ システムとしての SMILE-2+ からの変更点として、以下の点が挙げられる。 $\mu$ -PIC 読み出し基板と MPPC 搭載型 PSA ユニット (MPPC HA) の両方で外部クロックによる動作が可能な設計とし、TCU から配布した 50 MHz クロックで動作させることで検出器全体で時刻同期を取る。MPPC HA について、トリガー方式を  $\mu$ -PIC 読み出し基板と同様にコモンストップトリガー方式に変更するほか、LVDS 入出力インターフェースも統一する。また、検出器の読み出し部に加え TCU もすべて圧力容器内部に格納する設計とし、圧力容器間をまたぐ配線を削減する。これを実現するためには TCU・Encoder・HA の各基板を新規設計する必要がある。

TCU と接続されている LVDS 入出力ポートの詳細について表 3.2 に示す。また、以下に説明する読み出し基板と TCU、DAQ CPU 間の通信と動作のタイミングチャートについて、図 3.10 に示す。

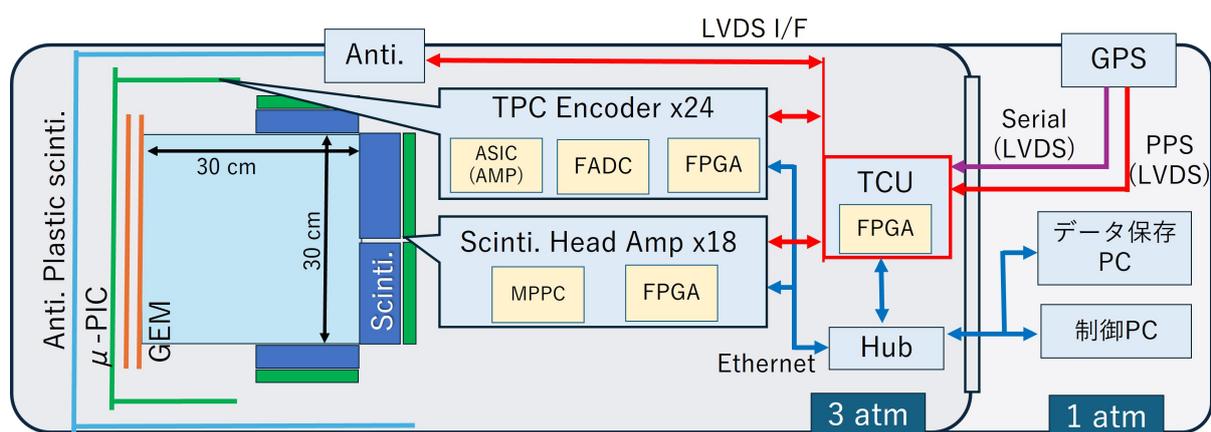


図 3.9: SMILE-3 搭載データ収集システムの構成図

表 3.2: 検出器と TCU 間の LVDS 入出力ポートの説明。信号の方向は TPC 読み出し基板・PSA ユニットから TCU への信号を出力、TCU から各基板への信号を入力とする。

信号名	方向	説明
Hit	出力	検出器でしきい値を超えた信号が発生
DAQ_Run	出力	リングバッファのデータ読み出し中
External_Clock	入力	外部クロック入力 (50 MHz)
DAQ_enable	入力	データ取得有効化
Trigger	入力	TCU からのデータ取得トリガー
Signal_counter	入力	第2トリガーカウンターのインクリメント (SMILE-3 では不使用)
Count_reset	入力	トリガーカウンタリセット

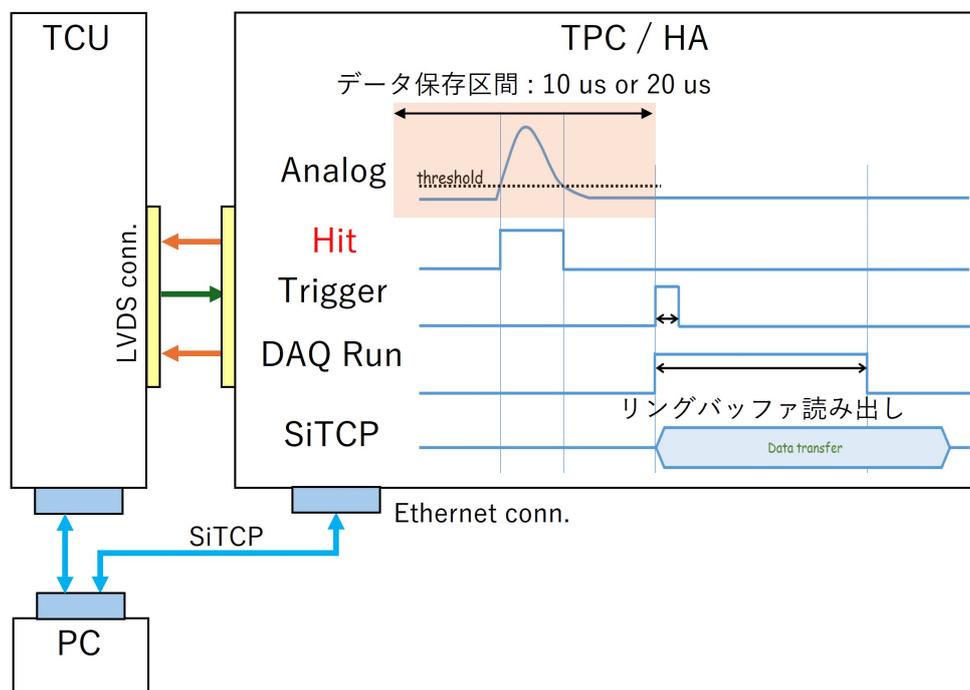


図 3.10: 検出器と TCU 間の通信と動作のイメージ。μ-PIC 読み出し基板 (Encoder 基板) と MPPC 搭載型 PSA ユニット (MPPC HA 基板) の両方で同様の動作を行う。

### 3.3.2 $\mu$ -PIC 読み出し基板のアップデート

SMILE-3 に搭載する  $\mu$ -PIC 読み出し基板は、図 3.11 に示すように新規設計を行った (Tsukamoto (2025))。新読み出し基板では外部クロック入力を追加しており、TCU から 50 MHz のクロックを入力して動作させることで検出器全体での時刻同期が可能になる。また、旧基板では  $\mu$ -PIC に大信号が入力された際に ASIC が飽和してしまい、復旧のためには DAQ を一旦停止して基板をリセットする必要があった。そこで新基板では ASIC の飽和を検出し、自動的に ASIC のみの電源リセットを行う機能を追加している。また、旧基板の設計から約 10 年が経過していることから、現在入手可能な部品を用いて基板設計を一新している。既存のセットアップのまま読み出し基板のみを交換できるよう、入出力インターフェースは外部クロック入力以外は従来基板と同様となっている。

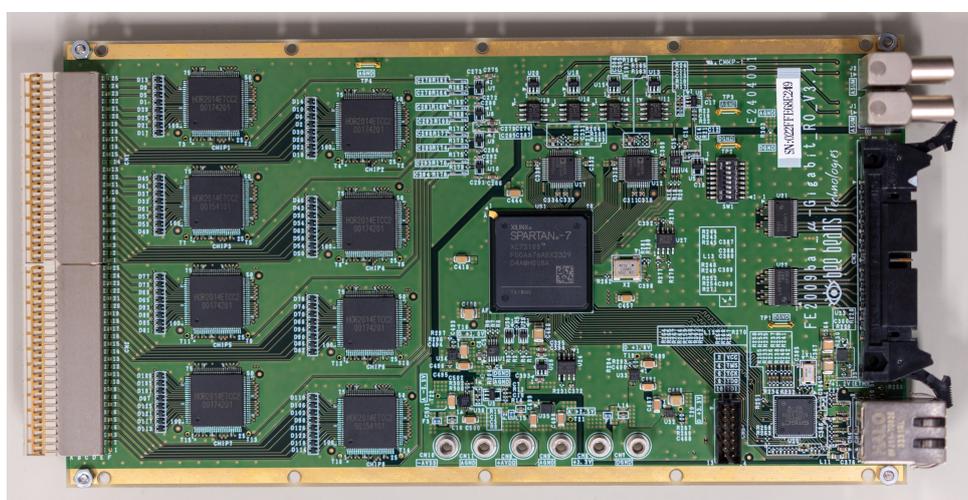


図 3.11: SMILE-3 に向けて新規開発した  $\mu$ -PIC 読み出し基板の外観 (Tsukamoto (2025))。基本的な入出力は従来基板 (図 3.2) と同様であるが、外部クロック駆動に対応した。

### 3.3.3 MPPC 搭載型 PSA ユニット

次期検出器システムへの搭載に向け、PSA の光読み出しは PMT から MPPC へ移行している。MPPC は GSO(Ce) の発光ピーク ( $\sim 440$  nm) に対して PMT より 2 倍量子効率が良いため (図 3.12)、エネルギー分解能は  $\sqrt{2}$  倍向上すると期待される。図 3.13 に、MPPC 搭載型ヘッドアンプユニット (MPPC HA) の写真を示す。MPPC HA では、MPPC/RC 基板・AMP 基板・ADC 基板・FPGA 基板の 4 枚で 1 ユニットの構成する。MPPC/RC 基板では複数 MPPC を直列接続して動作させ、抵抗分割 (RC) により四端から読み出した電荷から重心演算でエネルギーと吸収位置を求める。AMP 基板では電荷積分 (時定数  $\sim 6.6 \mu\text{s}$ ) 後に High/Low gain の 2 系統で信号を増幅する。これは、低エネルギーの事象

に対応する High gain 系と、高エネルギー事象に対応する Low gain 系を用意することで PSA のダイナミックレンジを拡大するためである。ADC 基板では 2.5 MHz サンプリングの 14-bit 逐次比較 ADC を用い、さらに外部へ信号の有無を出力するため High gain 四端和からヒット判定するアナログトリガ回路が搭載されている。取得した波形データは FPGA 基板 (Spartan-7) へ送られリングバッファに保存される。DAQ 中の検出器の動作フローは  $\mu$ -PIC 読み出し基板と同様であり、図 3.10 に示す。外部からのトリガ信号によりデータ取得を停止し、リングバッファのデータを 20.48  $\mu$ s 分読み出してイベントデータとしてまとめ、Ethernet インタフェースを介して PC へ送信する。また、FPGA 基板では MPPC の HV 制御や温度情報に基づく HV 調整によるゲイン安定化なども行っている。検出器は、トリガー信号が入力された時刻にデータ更新を停止し直前の時系列データを保存するコモンストップトリガー方式である。

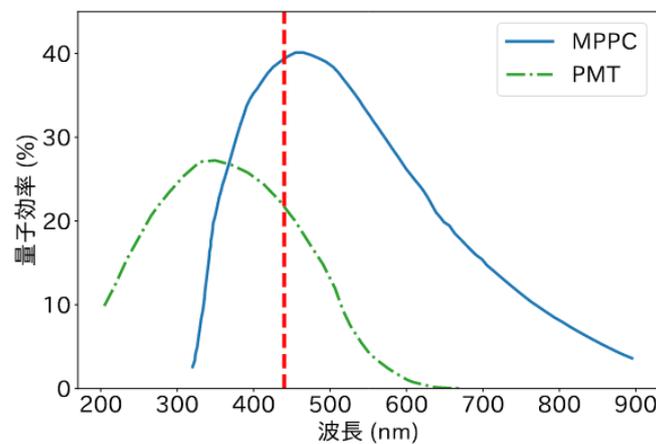


図 3.12: MPPC と PMT の量子効率の比較 (Iiyama (2025))。赤色の破線は GSO (Ce) の発光ピーク波長を示す。

### 3.3.4 TCU 内部のロジック設計とトリガー方式

トリガー回路内部のブロック図について図 3.14 に示す。インターフェースとしては、 $\mu$ -PIC 読み出し基板および MPPC HA を制御するための LVDS 入出力ポートを 42 セット搭載するほか、GPS モジュールやアンチコインシデンスユニット用の外部信号入力ポートを備えている。また CPU との通信のために Ethernet 通信を用い、SiTCP による UDP 通信で PC から各種設定を切り替え、TCP 通信で時刻情報やスケーラー情報を中央 CPU に送信する。内部に ETCC モード、TPC・HA 単体キャリブレーションモードで動作するロジックがあり、DAQ モードに応じて出力を MUX で切り替える仕様となっている。

トリガーロジックについて、TPC・HA 単体キャリブレーションモードについてはヒット信号を 9  $\mu$ s だけ遅延させた後にトリガー信号を生成する方式を採用する。ETCC モー

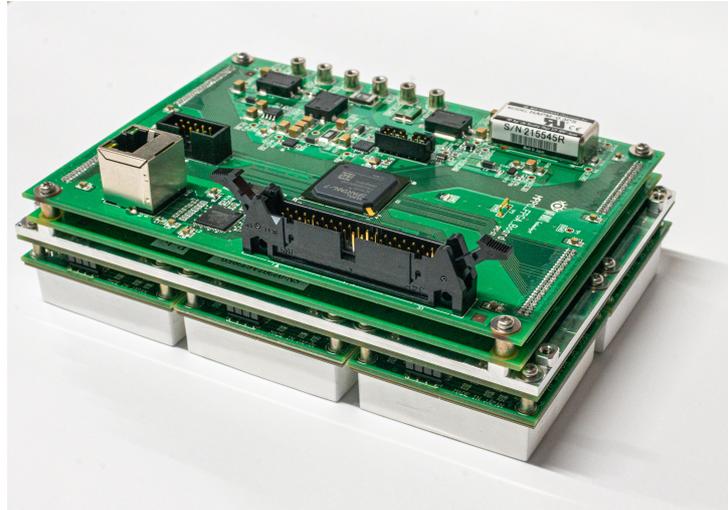


図 3.13: MPPC 搭載型ヘッドアンプユニットの写真。浜松ホトニクス社製 S13361-3050NE-08 MPPC アレイを2×3個搭載し、各アレイのデータ取得・データ整形・Ethernet 通信によるデータ送信を一括で行う。

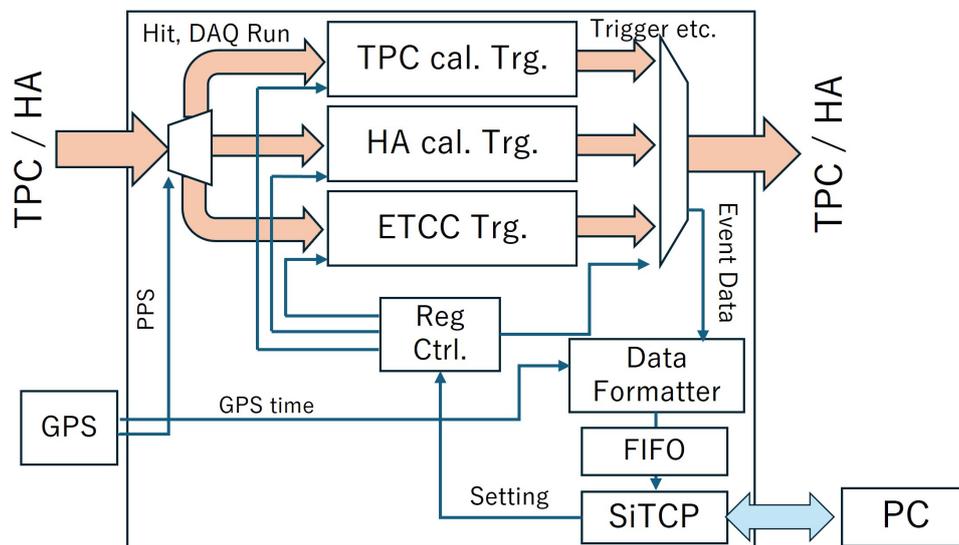


図 3.14: TCU のブロック図。

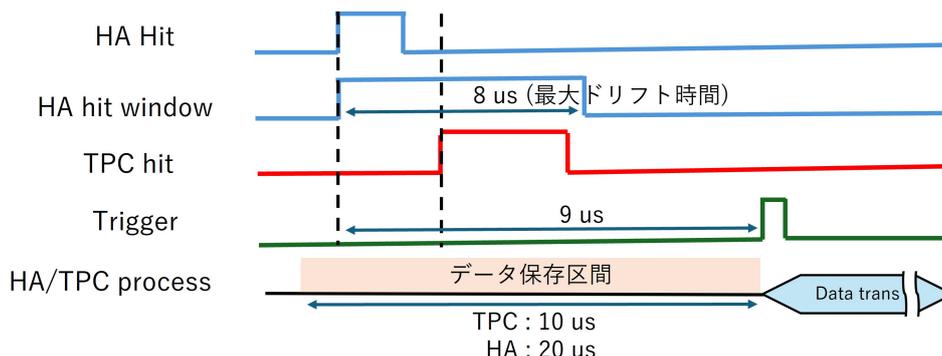


図 3.15: TCU での ETCC トリガーモードのタイミングチャート。シンチレータにヒットが発生すると、TPC 内の最大ドリフト時間に対応する  $8\ \mu\text{s}$  だけコインシデンスウィンドウを開き、その時間内に TPC がヒットした場合はシンチレータのヒット時刻を基準に  $9\ \mu\text{s}$  後にトリガー信号を生成する。

ドについては、TPC とシンチレータの両方がヒットした場合にのみトリガー信号を生成することで不感時間を削減できる [Yoshikawa \(2017\)](#) で提案されたコモンストップトリガー方式を採用する。図 3.15 に TCU での ETCC トリガーモードのタイミングチャートを示す。シンチレータにヒットが発生すると、TPC 内の最大ドリフト時間に対応する  $8\ \mu\text{s}$  だけコインシデンスウィンドウを開き、その時間内に TPC がヒットした場合はシンチレータのヒット時刻を基準に  $9\ \mu\text{s}$  後にトリガー信号を生成する。TPC がヒットしなかった場合はトリガーを発生しないため、シンチレータ単独ヒット時の不感時間を大幅に削減できる。また、コインシデンスウィンドウを開いている間にもう一度シンチレータにヒットが発生した場合は、最新のヒット時刻を基準に再度  $8\ \mu\text{s}$  のコインシデンスウィンドウを開く。シンチレータのデータ取得ウィンドウはトリガー遅延時間よりも長いため、このような事象でも 2 回のシンチレータのヒット両方のデータを取得できる。ロジックは HDL で記述したステートマシンで実装しており、FPGA 上で動作する。図 3.16 にステートマシンの状態遷移図を示す。また、図 3.17 に FPGA 動作のシミュレーション結果を示す。図 3.17 (a) では ETCC モードでシンチレータヒット発生後  $6\ \mu\text{s}$  に TPC ヒットが発生した場合を示しており、シンチレータヒット時刻を基準に  $9\ \mu\text{s}$  後にトリガー信号が生成されている。図 3.17 (b) ではシンチレータヒット発生後  $9\ \mu\text{s}$  に TPC ヒットが発生した場合を示しており、コインシデンスウィンドウ外で TPC ヒットが発生したためトリガー信号は生成されていない。また、シンチレータがヒットしただけでは不感時間は発生しないことが確認できる。

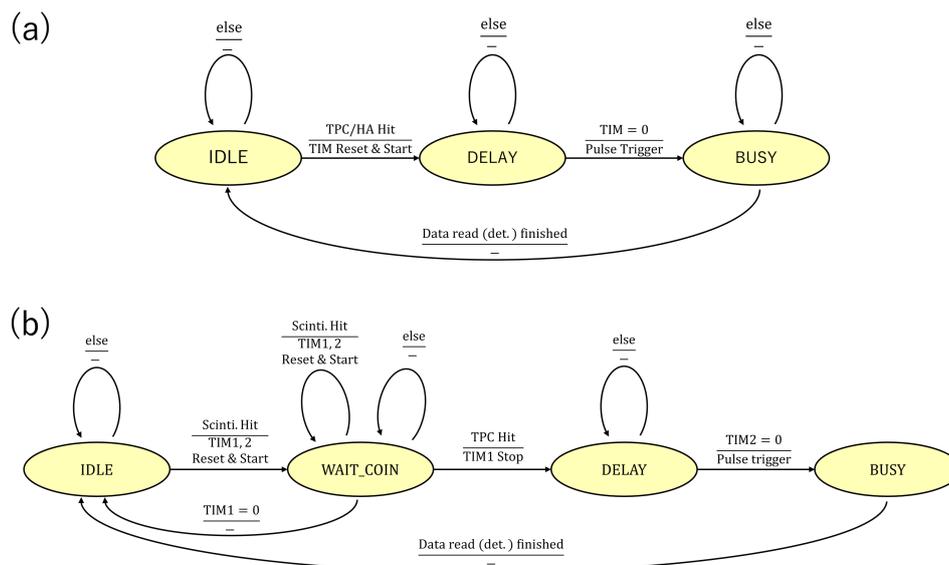


図 3.16: TCU のトリガーロジックの状態マシンの状態遷移図。(a): TPC・HA 単体キャリブレーションモード。トリガー遅延時間を示すカウントダウンタイマー TIM は  $9\mu\text{s}$  にセットされている。(b): ETCC モード。コインシデンスウィンドウを示すカウントダウンタイマー TIM1 は  $8\mu\text{s}$  に、トリガー遅延時間を示す TIM2 は  $9\mu\text{s}$  にセットされている。

### 3.3.5 イベント時間情報の付与

取得したデータへの時間情報の付与は以下のように行う。各検出器からデータ収集 CPU へ送信されるデータには、トリガー ID と DAQ 開始からのタイムスタンプ (時間分解能は  $0.1\text{ ms}$ ) が含まれている。タイムスタンプをインクリメントするカウンター自体は同期されていないので同一トリガー ID に対してタイムスタンプは 1 カウントずれる可能性はあるが、動作クロックは同期されているためそれ以上にはずれない。そのため  $1\text{ ms}$  以下の時間分解能を達成するには十分である。また、検出器内時刻とグローバル時刻の対応付けを行うため、SMILE-2+実験と同様に次の仕組みを導入する。TCU は GPS からの 1 PPS (Pulse Per Second) 信号を受信しており、検出器のヒット状況に関わらずこの 1PPS 信号に同期して検出器にトリガーを送信する。また、同時に GPS からの時刻情報とトリガー ID を DAQ CPU へ送信する。後解析で 1 PPS 信号に同期したトリガー ID と各イベントデータのトリガー ID を対応付けることで、各イベントデータに正確な時刻情報を付与できる。

### 3.3.6 ハードウェア設計

本 DAQ システムでは検出器ユニットそれぞれについて表 3.2 の 7 対の LVDS 信号線を TCU と接続する必要がある。SMILE-3 では検出器ユニットを 42 台搭載するため合計で

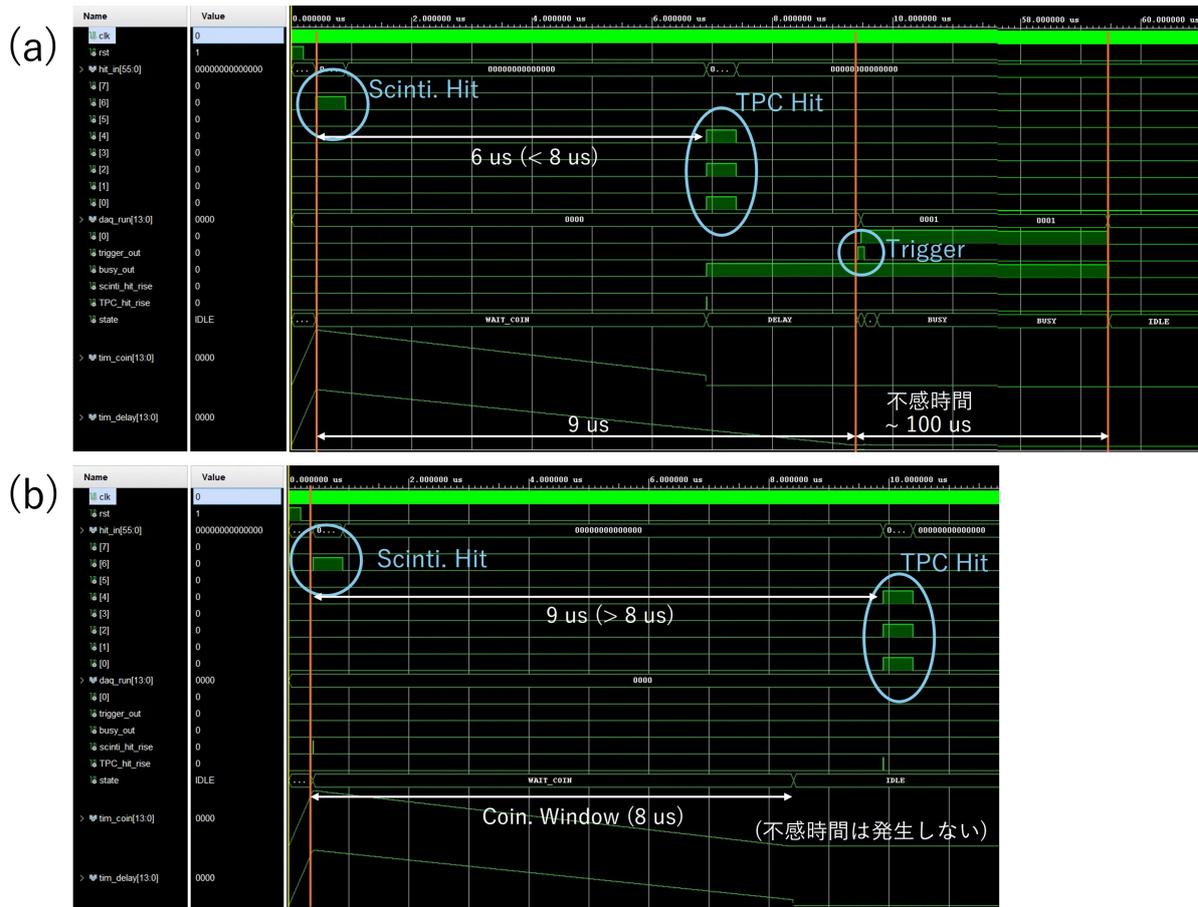


図 3.17: TCU トリガーロジックのシミュレーション結果。(a): ETCC モードでシンチレータヒット発生後 6  $\mu\text{s}$  に TPC ヒットが発生した場合。(b): ETCC モードでシンチレータヒット発生後 9  $\mu\text{s}$  に TPC ヒットが発生した場合。

294 対の LVDS 信号線が必要となり、また将来の実験で更に増える可能性もある。一方で、出力信号は全ての検出器ユニットで共通であるほか、入力信号も全てを独立して読み出す必要があるわけではない。そのため、TCU のハードウェア設計では I/O の拡張性と FPGA の入出力ピンの削減を目的として、FPGA 基板と I/F 拡張基板に分割する設計を採用した。図 3.18 に TCU のハードウェア設計の概要を示す。I/F 拡張基板は FPGA 基板とバックプレーンコネクタで接続され、1 枚辺り検出器ユニット 4 基を接続可能である。入力信号に関して、Hit 信号は各検出器ユニットから独立して読み出す必要があるが、DAQ\_Run 信号は通常 TPC 全体・PSA 全体それぞれについてどれか 1 つでもデータ取得中であるかどうかを知るだけで十分である。そのため、I/F 拡張基板内で DAQ\_Run 信号に対して OR 回路を設け、FPGA 基板との接続本数を削減している。出力信号についても同様であり、DAQ\_enable 信号は検出器ユニットごとに制御する必要があるが、それ以外の信号は全ての検出器ユニットで共通であるため、I/F 拡張基板内で信号を複製している。この設計により、FPGA に実際に接続する LVDS 信号線は合計で 99 本に削減できる。また、I/F 拡張基板は FPGA 基板に対して並列に接続されるため、従来システムで問題となっていた電力供給問題も克服できる。

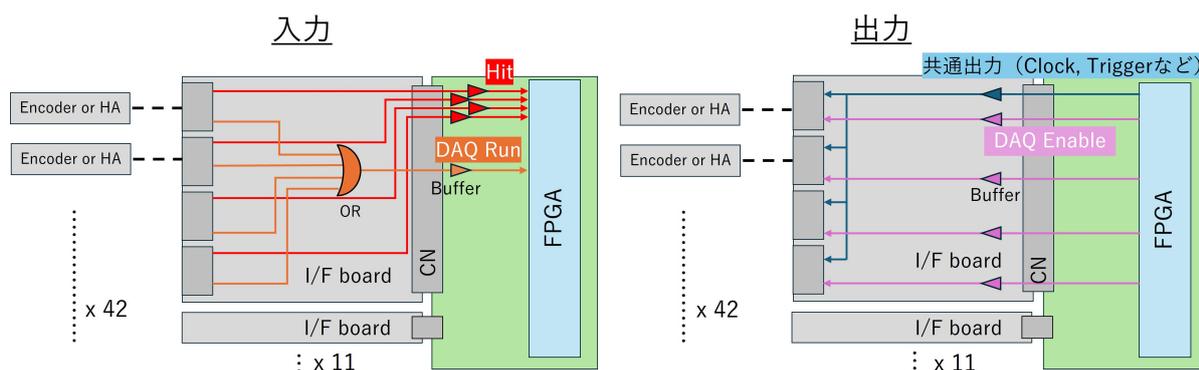


図 3.18: TCU のハードウェア設計の概要。メイン基板と I/F 拡張基板に分割し、信号線を適宜統合・複製することで FPGA の入出力ピン数を削減している。

## 3.4 実験室での性能評価

### 3.4.1 TCU の基本機能確認

新規開発した TCU を強度を確保するアルミニウム製治具に組み込んだ写真を図 3.19 に示す。FPGA 基板は 14 個のバックプレーンコネクタを備え、I/F 拡張基板を 11 枚接続することで SMILE-3 搭載 ETCC システムに対応可能である。

TCU の回路的な遅延を測定するため、図 3.20 に示すセットアップで実験を行った。ファンクションジェネレータで矩形波信号を生成し、図中の①、②の信号の到達時間差をオン

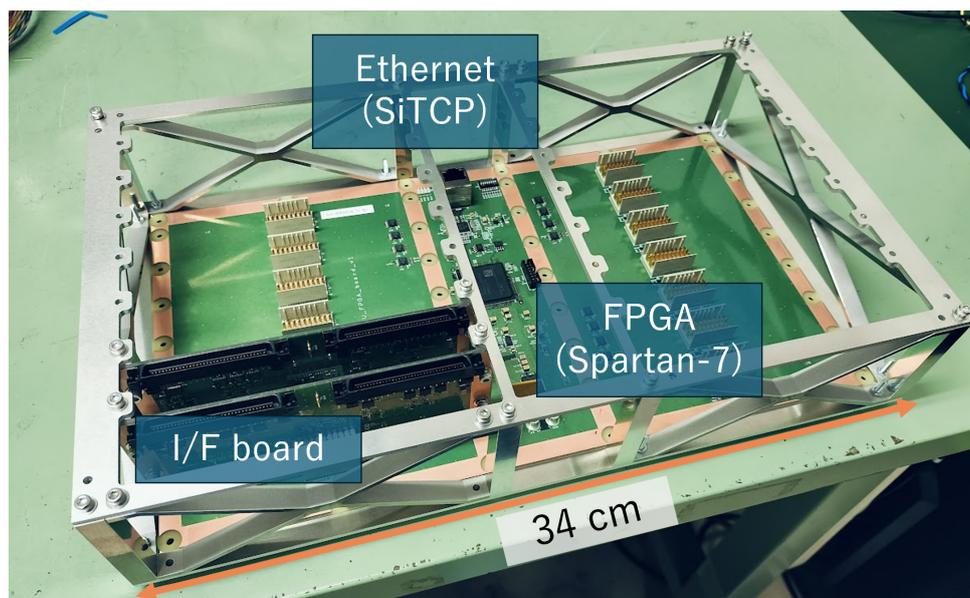


図 3.19: 新規開発した TCU の写真。I/F 拡張基板を 2 枚搭載している。

ロスコープで測定する。結果、遅延時間は平均で 38.8 ns で、遅延時間差は全 ch で  $\pm 3$  ns 以内であった。これは動作クロック周期の 10 ns に比べ小さいため、遅延時間差による影響は無視できる。

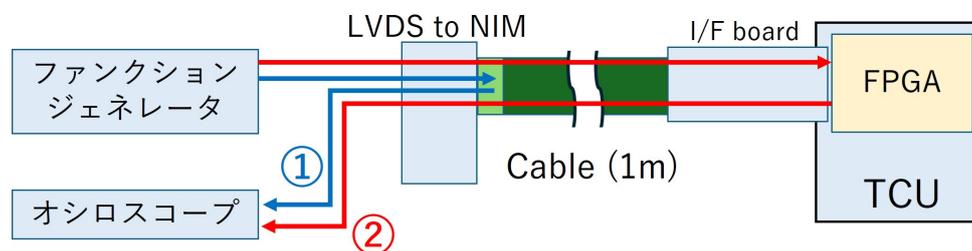


図 3.20: TCU の信号遅延測定のセットアップ図。

## 3.4.2 DAQ 試験

### 1) TPC キャリブレーションモード

TPC 単体キャリブレーションモードのテストをするため、 $\mu$ -PIC 読み出し基板 6 枚を用いた TPC で実験を行った。図 3.21 に実験セットアップを示す。使用した TPC は 256 ch 3 軸 TGV  $\mu$ -PIC (Yoshida (2022)) と GEM の組み合わせで構成されている。通常の  $\mu$ -PIC では x, y 軸の  $90^\circ$  直交した 2 方向への飛跡の投影イメージを取得できるが、3 軸 TGV  $\mu$ -PIC では  $120^\circ$  ずつ傾けた 3 方向への投影イメージを取得できる。1 軸あたりの

チャンネル数は256 chで、1軸あたり2枚の $\mu$ -PIC読み出し基板を用いて読み出しを行う。TPCの詳細については4.2.2節で述べる。このTPCにAr:CF<sub>4</sub>:iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (分圧比 95:3:2)を1気圧で封入し、<sup>133</sup>Ba放射線源からのガンマ線を照射した。

取得したデータに対し、トリガーIDのみで6枚の $\mu$ -PIC読み出し基板のデータを対応付け、飛跡の投影イメージを再構成した。図3.22に、DAQ開始後約1時間経った際に取得できた飛跡の例を示す。6枚の $\mu$ -PIC読み出し基板それぞれで破綻の無い飛跡が取得できており、特に2枚の基板をまたぐような飛跡も再構成できていることが分かる。

また、<sup>133</sup>Ba放射線源からのガンマ線を用いてエネルギーキャリブレーションを行い、TPCのゲインの空間分布を測定した。図3.23に、TPCに<sup>133</sup>Baを照射したデータについて、1つの $\mu$ -PIC読み出し基板のASICごとに光電吸収イベントを抜き出して作った領域ごとのスペクトルを示す。<sup>133</sup>Baの特性X線30.9 keVと、GEMの素材であるCuの特性X線8.0 keVが観測されている。電荷素量をe[pC]とすると、ガスゲイン $G_{gas}$ は以下の式で求められる。

$$G_{gas} = Q \cdot \frac{W}{E_{peak}} \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{1}{A} \quad (3.6)$$

図3.24に、各領域のスペクトルから求めたゲインの空間分布を示す。また、4章で述べる対生成事象観測実験でも同様のセットアップでTPC単体キャリブレーションモードを用いて測定を行った。DAQシステムは期間中安定して動作し、約20時間の総測定時間中にトリガーの取りこぼしやデータ欠損は発生しなかった。以上の結果から、新DAQシステムはTPCとして正常に動作しトリガーIDの対応付けも問題ないことが確認できた。

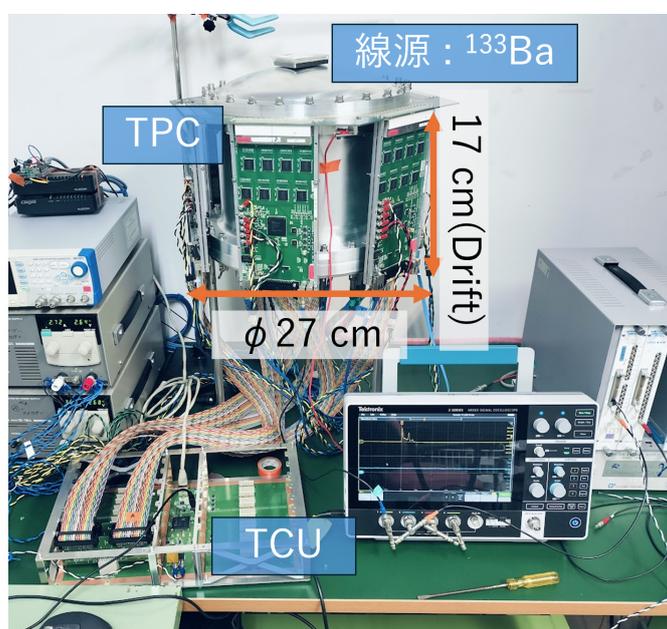


図 3.21: TPC 単体キャリブレーションモードの実験セットアップ図。

また、TCUから各 $\mu$ -PIC読み出し基板へ外部クロックを配布し、基板間でクロック同

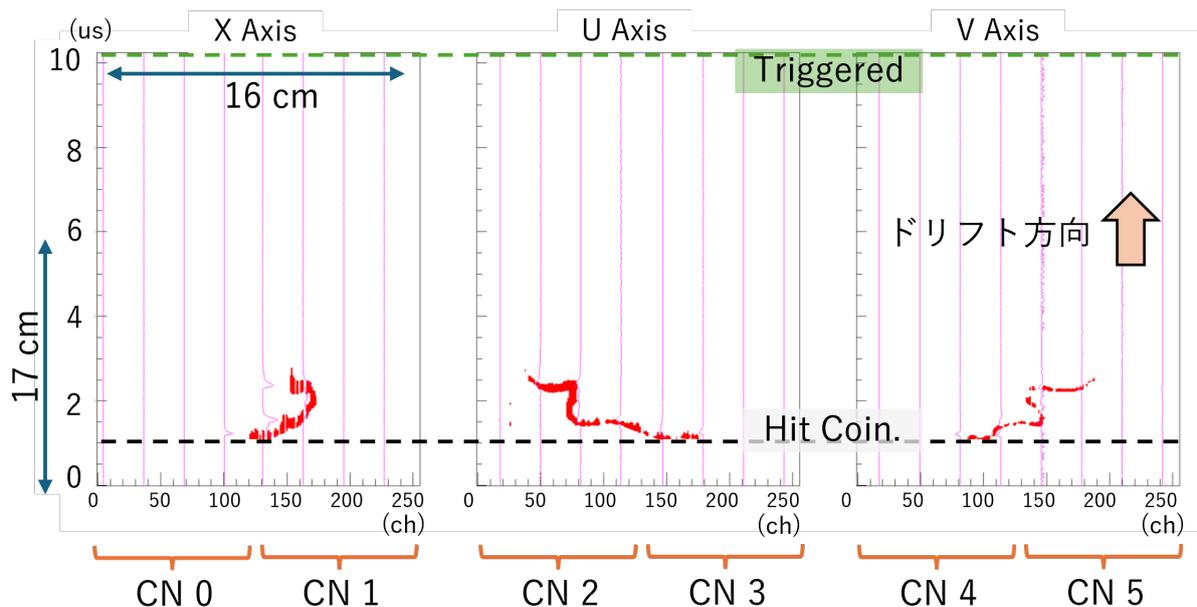


図 3.22: TPC 単体キャリブレーションモードで取得した飛跡例。2 枚の  $\mu$ -PIC 読み出し基板をまたぐような飛跡も再構成できている。

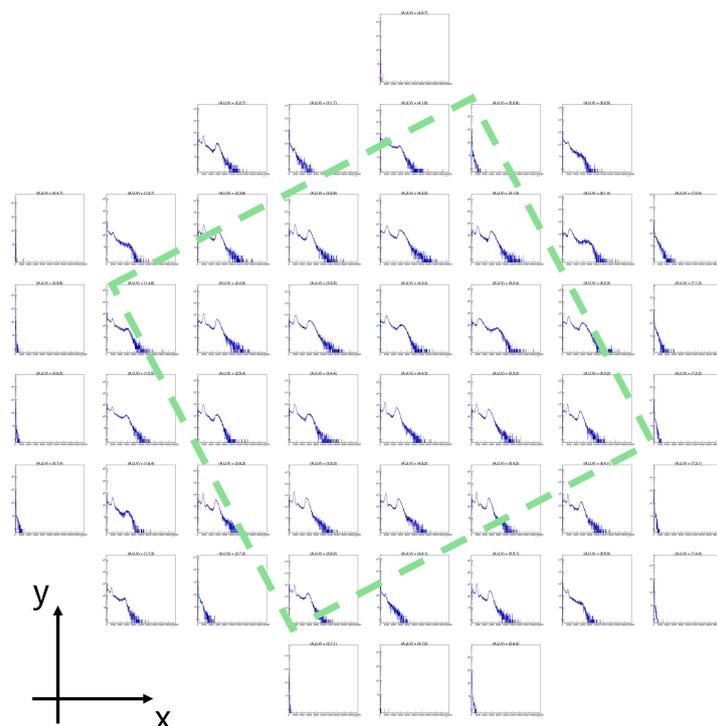


図 3.23: TPC に  $^{133}\text{Ba}$  を照射したデータについて、光電吸収イベントを抜き出して作った領域ごとのスペクトル。緑色の枠は GEM によって制限される TPC の有効領域を示す。

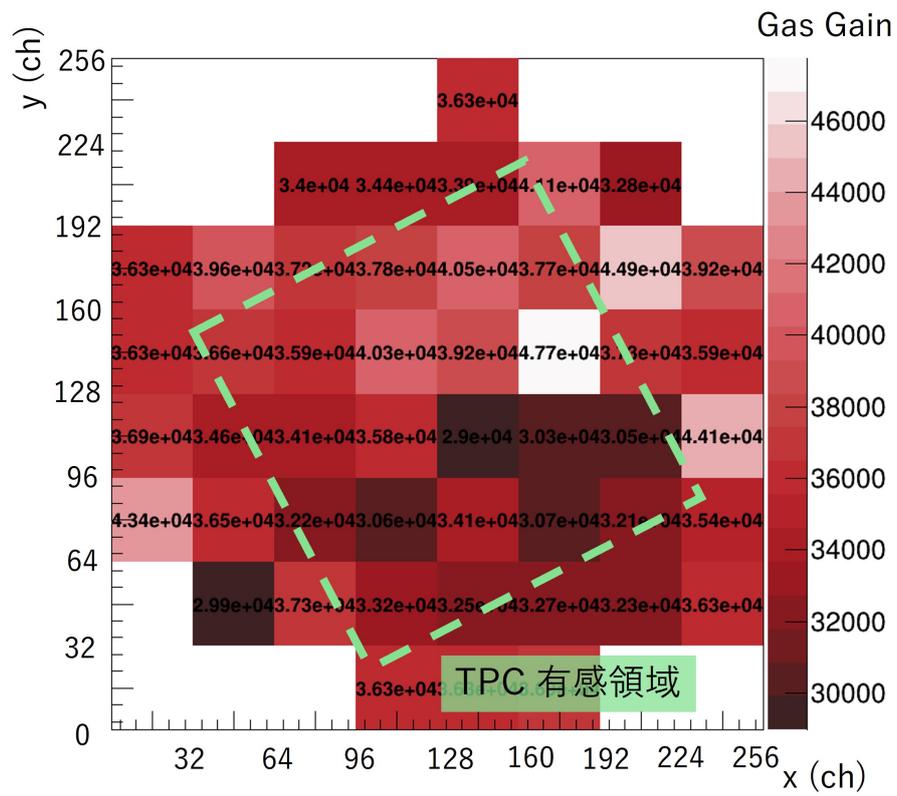


図 3.24: 各領域のスペクトルから求めたゲインの空間分布。

期を行う機能の確認を行った。図 3.25 にクロック同期の有無による各基板間のタイムスタンプ差の時間変化を示す。クロック同期を行わなかった場合 (図 3.25 (a))、基板間でタイムスタンプ差が徐々にずれていく。 $\mu$ -PIC 読み出し基板の水晶発振器の周波数公差は 25 ppm であり、100 秒間で最大約 2.5 ms のずれが発生しうるが、実際の測定でも同程度のずれが観測されている。一方で TCU からの外部クロックで駆動した場合 (図 3.25 (b))、基板間でタイムスタンプの差は  $\pm 0.1$  ms、時刻付けのカウンター値としては  $\pm 1$  カウンターに収まっていることが分かる。よって、TCU からの外部クロックで駆動することで各基板間で時刻同期が取れることができ、トリガーの取り逃しが発生した場合でもデータの対応付けが可能になることが確認できた。

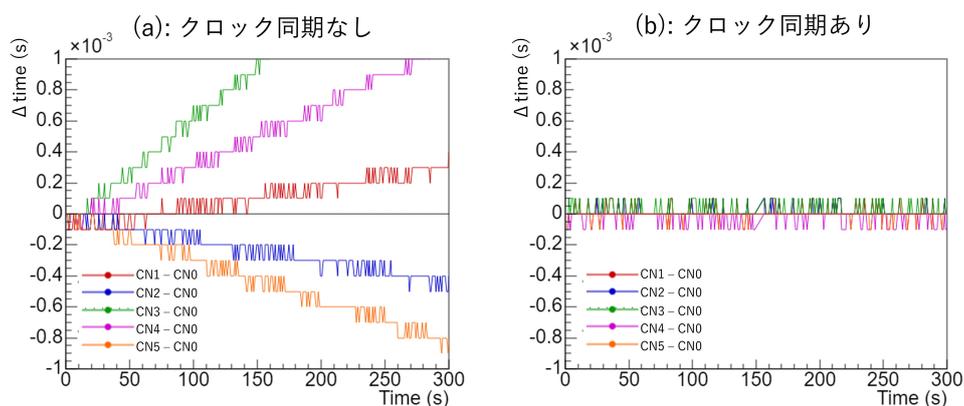


図 3.25: 各  $\mu$ -PIC 読み出し基板間のタイムスタンプ差の時間変化。チャンネル 0 に接続した基板を基準として、他の基板のタイムスタンプとの差を示す。(a): クロック同期せず各基板の水晶発振器で駆動、(b): TCU からの外部クロックで駆動。

## 2) HA キャリブレーションモード

MPPC 搭載型 PSA ユニット単体キャリブレーションモードのテストを行うため、図 3.26 に示す実験セットアップで実験を行った。3.3.3 節で述べた MPPC HA ユニットは現在ファームウェアの開発中であり、外部トリガーによる駆動が成功していない状況であったため、代わりに  $3 \times 3$  個の MPPC アレイを搭載した試作型 MPPC HA ユニットを用いて試験を行った (Tsuda (2022))。試作型 MPPC HA は MPPC HA フライトモデルと比較して搭載する MPPC の個数が違う、クロック同期機能を持たない、アンプが 1 系統のみであるなどの違いがあるが、基本的な動作は同様であり TCU との通信の仕様も同じである。そのため、TCU の MPPC HA 制御機能の確認には十分である。この MPPC HA ユニットに 26 mm 厚のシンチレータを 7 つ、13 mm 厚のシンチレータを 1 つ搭載し、恒温槽で温度を  $1^\circ\text{C}$  に保ちながら  $^{137}\text{Cs}$  放射線源からのガンマ線を照射した。このとき MPPC 付近の温度は約  $25^\circ$  であった。取得したデータに対し、4 端の電荷から重心演算によってガ

ンマ線の反応位置を2次元マップに再構成し(図 3.27 (a)), 各ピクセルごとにエネルギースペクトルを作成した(図 3.27 (b))。シンチレータをセットしていない1つを除き全てのMPPCでピクセルごとに $^{137}\text{Cs}$ の662 keVピークが確認できた。以上の結果から、新DAQシステムはMPPC HAユニットとして正常に動作し、トリガーIDの対応付けも問題ないことが確認できた。



図 3.26: MPPC 搭載型 PSA ユニット単体キャリブレーションモードの実験セットアップ図。

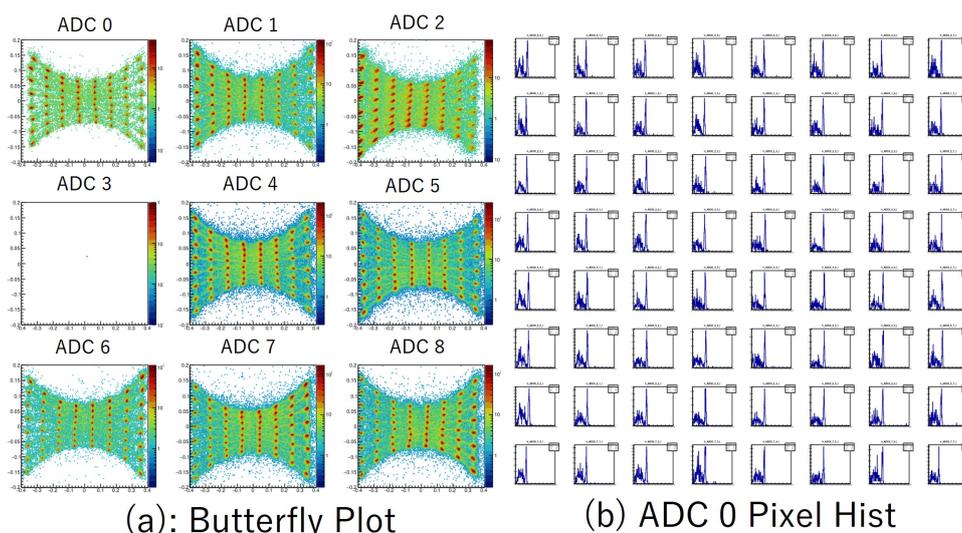


図 3.27: MPPC 搭載型 PSA ユニット単体キャリブレーションモードで取得した (a): バタフライプロット、(b): ADC 0 (左上のMPPC) のピクセルごとのエネルギースペクトル。

### 3.5 まとめと今後の展望

本章では、次期気球実験 SMILE-3 に向けて、ETCC のデータ収集 (DAQ) 系を高レート環境でも運用可能な構成へ移行するため、新DAQシステム (TCU を含む) の設計・

試作、および実験室環境での基本性能評価を行った。新DAQシステムでは、トリガーロジックをシンチレータとTPCのコインシデンスが取れた場合のみ所定遅延後にトリガーを生成する方式とすることで不感時間を抑制する設計とした。また、I/F拡張基板での信号統合・複製によりFPGA接続本数を削減し、従来課題であった電源供給面の制約も含めて拡張性・安定性を高める方針を採った。試作したTCUは、単独での動作確認に加え、 $\mu$ -PIC読み出し基板6枚を用いたTPC単体キャリブレーションモード試験およびMPPC搭載型PSAユニット単体キャリブレーションモード試験を実施した。DAQ試験としてTPC単体キャリブレーションモードを実施し、6枚の $\mu$ -PIC読み出し基板を用いたTPCで、トリガーIDに基づくデータ対応付けにより破綻のない飛跡投影像が再構成でき、基板をまたぐ飛跡も取得できることから、TPCとして正常に動作することを確認した。また、新規開発するMPPC HAユニットと同様の動作を持つ試作型MPPC HAユニットを用いたMPPC搭載型PSAユニット単体キャリブレーションモード試験を実施し、各ピクセルで $^{137}\text{Cs}$ の662 keVピークが確認できることから、MPPC HAユニットとして正常に動作することを確認した。さらに、TCUから外部クロックを配布して基板間クロック同期を行った結果、非同期時に観測されるタイムスタンプのドリフトが同期時に起こらないことを示した。

今後の展望として、SMILE-3に搭載するETCCシステム全体を構築し、ETCCモードとして動作することを確認するほか、高レート環境下での不感時間低減効果の評価を行う予定である。

## 第 4 章

# ETCC における対生成事象の識別と再構成

数 MeV 以上のガンマ線観測では、コンプトン散乱事象に加えて電子・陽電子対生成事象が無視できない割合で混入し、観測データの再構成や背景除去に新たな課題が生じる。本研究で開発を進める電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) では、TPC により荷電粒子の飛跡を 3 次元点群の形で取得できるため、対生成事象についても飛跡情報を活用した識別・再構成が期待できる。しかし、現在の ETCC 解析で利用されている簡易的な飛跡パラメータに基づく対生成事象の識別法では、高エネルギーコンプトン散乱事象との混同が避けられず、高エネルギー帯域での感度低下の原因となっていた。そこで本章では、TPC の飛跡画像の解析により対生成事象を識別し、再構成する手法の開発を目的とする。UVSOR BL1U ビームラインにおける実験データに本手法を適用し、その有効性を検証することを目指す。

### 4.1 ETCC における電子陽電子対生成事象

図 4.1 は、SMILE-2+実験のレベルフライト中に取得された TPC の飛跡画像の例である。このように、ETCC の実データ解析においては、ガンマ線による事象としてコンプトン反跳電子の飛跡に加えて、対生成により生じる  $e^+/e^-$  の飛跡も検出される。

ETCC でのガンマ線観測において、1 MeV 以上のエネルギー帯域で主要な有効面積を持つのは double-hit 事象 (2.4 節) の再構成である。この解析において、TPC 内部での対生成事象が混雑し、排除できないバックグラウンドとして影響を与えるという問題が認識されていた (Oka (2024))。図 4.2 は、気球フライト中の大気ガンマ線を模擬したバックグラウンドを ETCC に入射させ、double-hit 解析を適用し再構成されたガンマ線に対し、天頂角  $\theta < 60^\circ$  でカットをかけた際の再構成エネルギースペクトルのシミュレーション結果である。ここで大気ガンマ線の天頂角依存性のモデルは PARMA/EXPACS (Sato (2016)) を用い、ガンマ線のエネルギー範囲は 0.01 MeV から 1 TeV までとした。  $E_{true}, \theta_{true}$  が入射させたガンマ線の真のエネルギーと天頂角 ( $0^\circ$  が天頂方向、 $90^\circ$  が水平線方向) であ

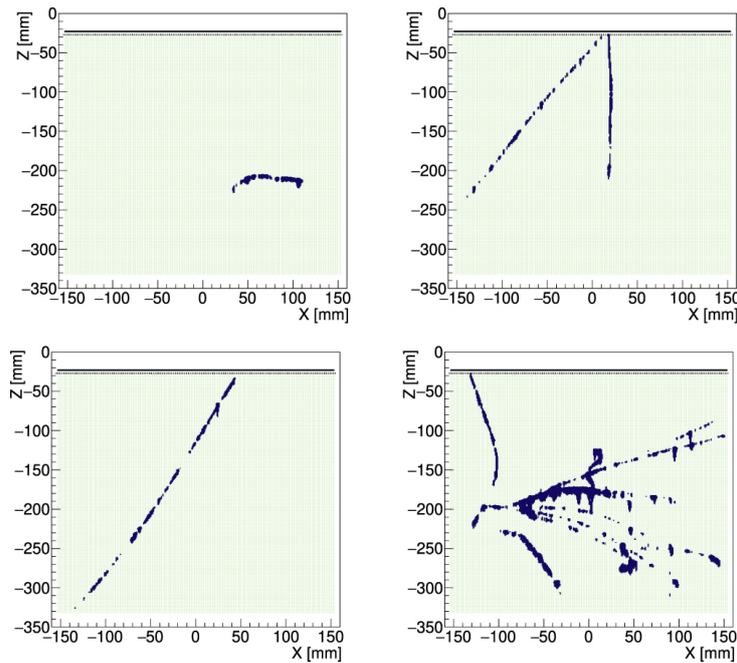


図 4.1: SMILE-2+実験で取得された TPC の飛跡画像の例 (Takada et al. (2022))。左上：低エネルギーガンマ線のコンプトン反跳電子、左下：宇宙線あるいは高エネルギーガンマ線のコンプトン反跳電子、右上：電子陽電子対生成事象、右下：シャワーイベント。

り、 $E_{reco}, \theta_{reco}$  が double-hit 解析で再構成されたエネルギーと天頂角である。30 - 40 km の気球高度では、大気ガンマ線の多くは大気密度の高い同高度以下の大気によって生成されるため、大きな天頂角を持つ。このため、方向を正しく再構成できている場合は、天頂角でカットをかけることで多くを排除できる。しかし、 $\theta > 90^\circ$  の事象の多くが誤った角度に再構成され、 $\theta < 60^\circ$  の領域に漏れこんでいることが分かる (図 4.2(a))。また、漏れ込んだガンマ線の多くは  $E > 10$  MeV の事象である (図 4.2(b))。このように、double-hit 解析では観測帯域の上限を超えた高エネルギーのガンマ線が誤って再構成される問題があり、ETCC の高エネルギー帯域での感度低下を招いている。

入射方向を大きく誤っている事象の多くは、TPC 内でコンプトン散乱ではなく対生成が起きた事象であると考えられる。典型的な対生成事象の観測シミュレーション結果を図 4.3(a) に示す。この事象では、ガス TPC 内部で  $e^+/e^-$  の飛跡が生まれたのち、 $e^+$  が底部シンチレータ付近で対消滅を起こし、2本の 511 keV ガンマ線が back-to-back に放出されている。放出されたガンマ線のうち一方は ETCC 外部に逃げているが、もう一方がシンチレータで光電吸収を起こし、double-hit 事象として記録される。このような傾向は実際の観測データにおいても確認されている。図 4.3(b) は、SMILE-2+ のレベルフライト中のデータに対して double-hit 解析を適用しガンマ線と再構成された事象に対し、そのときにシンチレータで観測されたエネルギースペクトルを示している。ここで、シンチレータエネルギースペクトルには 511 keV の輝線構造が観察されており、対生成事象が雑音と

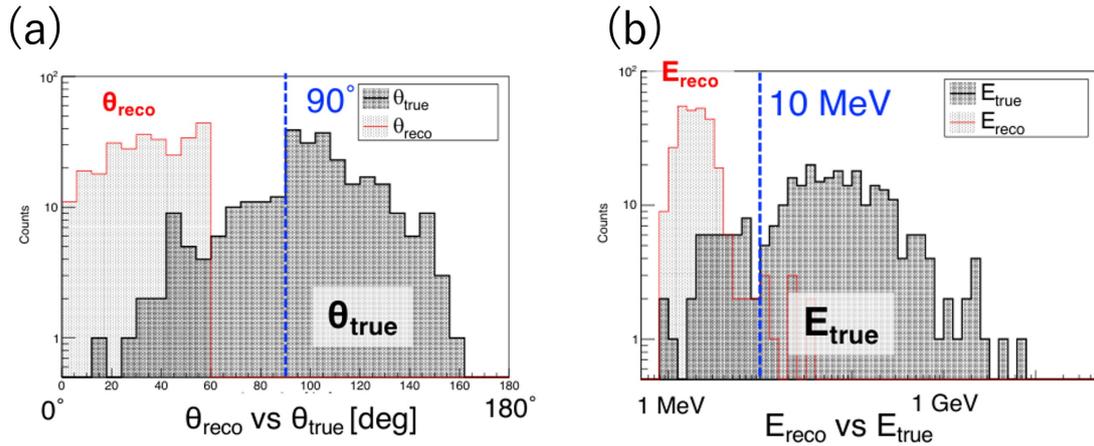


図 4.2: 気球フライト中の大気ガンマ線を double-hit 解析で再構成した際の、入射ガンマ線の真情報と再構成情報の比較 (Oka (2024))。 (a): 天頂角分布  $\theta$  の比較。 (b): エネルギースペクトル  $E$  の比較。

して寄与していることが示唆されている。

対生成事象では、TPC 内に同一の端点を持つ 2 本の飛跡が観測される。生成された  $e^+/e^-$  は多くの場合 1 MeV 以上のエネルギーを持ち、その場合荷電粒子は MIP 状の飛跡 ((2.7)) を形成し TPC 有感領域外へと飛び出すことが多い。single-hit 解析では TPC 内部でエネルギーが全て吸収されるような低エネルギーの電子飛跡のみを対象とするため、 $dE/dx$  や飛跡端点の座標などの特徴量を用いることで容易に対生成事象を排除できる。しかし、double-hit 解析で対象となる飛跡は有感領域外に飛び出す 1 本の MIP 状の飛跡であり、 $dE/dx$  などの特徴量では対生成事象を識別することが難しい。コンプトン散乱事象と対生成事象の弁別においては、SMILE-2+では行っていない飛跡形状の違いを画像解析的に捉えることが重要であると考えられる。

数 MeV 帯ではコンプトン散乱が主要な相互作用である一方、エネルギーの上昇に伴い対生成事象の寄与が増大する。対生成には原子核の電場で起きる (核場) 対生成と、電子の電場で起きる (電子場、いわゆる triplet) 対生成があり、前者では反跳核の運動量が観測されないため、入射光子の運動量保存条件を完全には復元できず、再構成角度に本質的な劣化要因が残る。一方、後者では反跳電子が観測され得るため、理想的にはこの限界を回避しうる可能性がある。

一方で、対生成事象は単に除去すべき雑音という側面だけでなく、より高いエネルギー帯域における有効な光子観測手段になりうる。つまり、ETCC は TPC を対生成のコンバーター/トラッカーとして、シンチレータをカロリメータとして用いる事で対生成望遠鏡として運用できる。Fermi-LAT のような固体のコンバーターとトラッカーを利用する対生成望遠鏡と比較して、ガス TPC はトラッカー内での多重散乱による角度分解能の劣化が小さいため、100 MeV 以下の低エネルギー帯域の観測に強みを持つ。HARPO 実験 (Gros

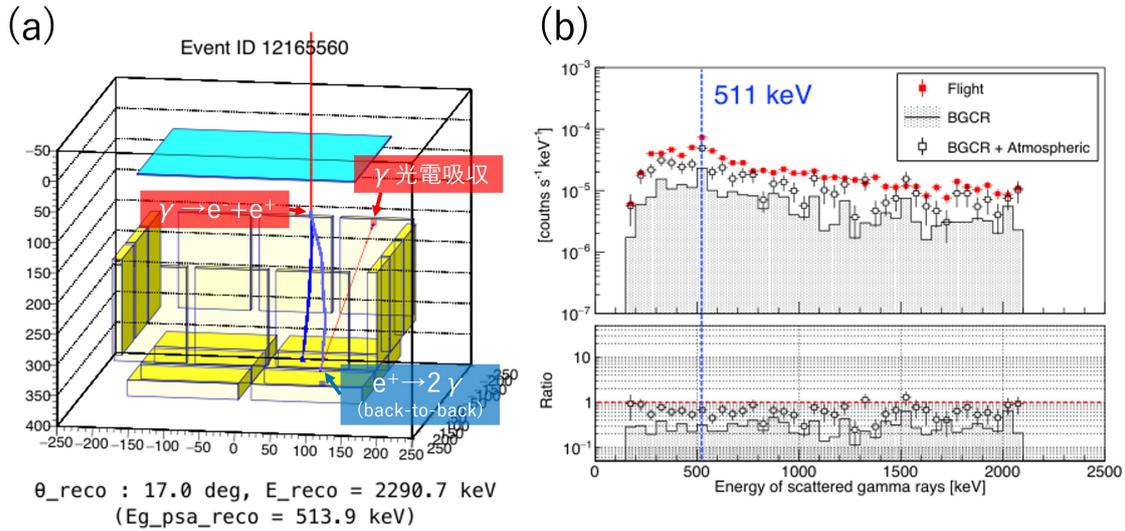


図 4.3: (a): ETCC に 10 MeV の光子が入射し、TPC 内部で対生成を起こし double-hit 事象として観測される例。(b): SMILE-2+レベルフライト中のデータに対し double-hit 解析を適用し、ガンマ線として再構成されたときの、シンチレータで観測されたエネルギースペクトル。511 keV の輝線構造が確認できる (Oka (2024) に加筆)。

et al. (2018)) では、ガス TPC を用いた対生成望遠鏡プロトタイプにガンマ線を照射する実験を行い、50 MeV 以下のガンマ線での対生成事象の飛跡再構成と入射方向推定、偏光測定を実証している。最小で 4.68 MeV のガンマ線で再構成に成功し、そのときの角度分解能は  $19^\circ$  であった。50 MeV 以上のガンマ線での角度分解能は Fermi-LAT を 2 倍以上上回る結果を得ている。また、Ueno (2011) では  $\mu$ -PIC を用いたガス TPC で対生成望遠鏡を構成し、18 MeV のガンマ線に対して角度分解能  $7.0^\circ$  を達成している。

対生成には原子核の電場で起きる(核場)対生成と、電子の電場で起きる(電子場、いわゆる triplet)対生成があり、前述の実験はどちらも核場対生成のガンマ線を再構成の対象としている。核場対生成では運動量保存に必要な反跳を原子核が担うが、原子核の反跳運動量ベクトルは(原子核の重さにより)通常観測できず、入射光子の入射方向を完全には復元できない。 $\mathcal{O}(10)$  MeV ではこの不定性により、原理的に角度分解能が数度程度に制限される。一方、triplet 対生成では反跳電子が飛跡として観測できるため、この運動学的リミットを超えた角分解能を達成できる可能性がある。

この観点から、UVSOR BL1U における逆コンプトン散乱ガンマ線照射実験データを用い、点群解析に基づく対生成事象の抽出と、抽出事象からの入射方向推定を試みた。

## 4.2 UVSOR BL1U 高エネルギー光子照射実験

### 4.2.1 実験の概要

対生成事象の識別・再構成手法の実観測データによる検証を目的として、2025年6月16日から6月21日にかけて、愛知県岡崎市・分子科学研究所の極端紫放射光施設 UVSOR の BL1U ビームラインにおいて高エネルギー光子照射実験を行った。BL1U ビームラインの概念図を図 4.4 に示す。電子蓄積リング内の 750 MeV の電子ビームに波長 800 nm の Ti:Al レーザーを照射し、6.6 MeV までの逆コンプトン散乱ガンマ線を生成する (Kato et al. (2024))。本実験では、特定の散乱角のガンマ線のみをコリメートすることで 3.3/4.8/6.6 MeV のガンマ線を生成し、TPC に照射する実験を行った。また、各実験におけるガンマ線エネルギースペクトルのシミュレーション結果を図 4.6 に示す。逆コンプトンガンマ線の繰り返し周波数は 1 kHz であり、バンチ幅は 100 ps 程度である。さらに、ビームラインには蓄積リング内の電子の制動放射に由来する数十 MeV のバックグラウンドが入射している。蓄積リング内の電子バンチは図 4.5 に示すように、レーザー間隔と比較して非常に狭い間隔で到来している。そのため、電子の制動放射バックグラウンドは常時入射していると考えてよい。

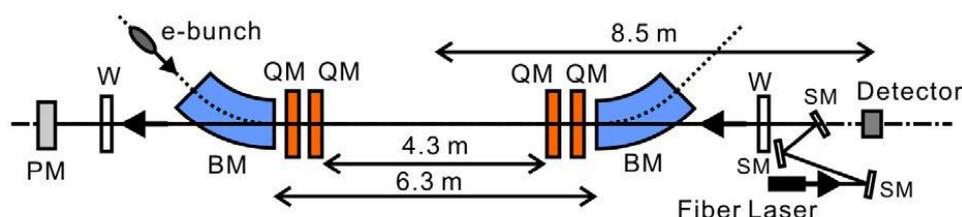


図 4.4: UVSOR BL1U ビームラインの概念図 (Zen et al. (2016))。



図 4.5: 蓄積リング内の電子バンチ (緑線) とレーザーパルス (黄線) のタイミングを示すオシロスコープ画像。

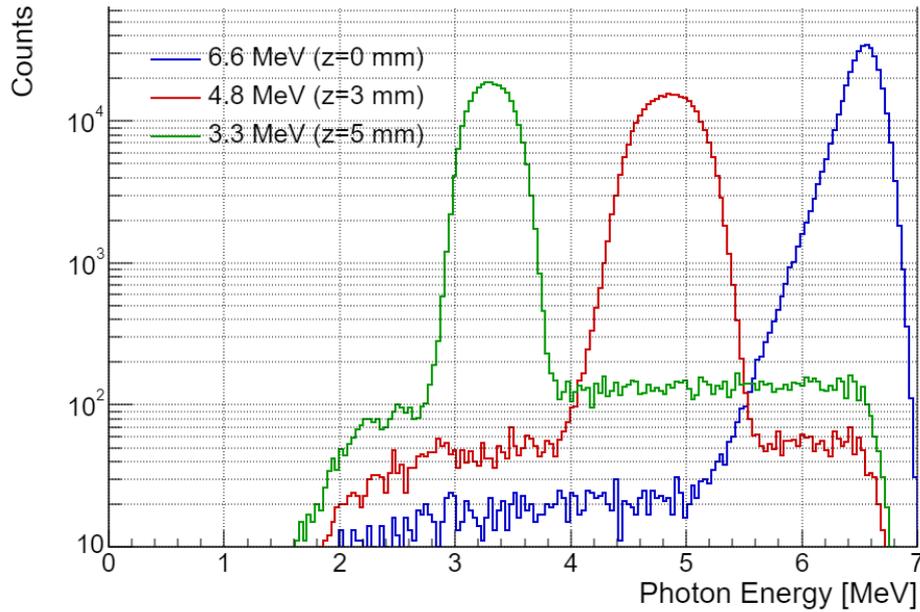


図 4.6: UVSOR BL1U ビームラインで生成されるガンマ線エネルギースペクトルのシミュレーション結果 (Taira (2026))。

## 4.2.2 実験装置

本実験で用いた TPC 検出器の全体図を図 4.7 に示す。中心の TPC 本体とトリガーコントロールユニット、高圧電源を供給する HV module、検出器全体の電源を供給する DC/DC ユニット、House Keeping data を収集する HK monitor で構成される。

本 TPC は対辺 122.88 mm の 3 軸 256ch TGV  $\mu$ -PIC と 10 cm 角 GEM を用いてガス増幅・検出を行う。外観と電極構造を図 4.8 に示す。3 軸  $\mu$ -PIC は図 4.8 (b), (c) に示すように、従来の Anode/Cathode の 2 軸に加え、Cathode と同じ面に同心円状に 2 つ目の Cathode 面を追加し、それぞれの信号を同一平面上で 120° ずつ傾いた 3 方向から読み出す構造を持つ。対生成事象のような同時刻に複数箇所にヒット点が存在する事象の場合、従来の 2 軸読み出しではヒット点を 2 次元イメージに完全に再構成することができず、複雑な飛跡の再構成に大きな不定性が生じるが (図 4.9 (a))、3 軸読み出しでは各軸の情報を組み合わせることで不定性を大幅に低減できる (図 4.9 (b))。  $\mu$ -PIC は対辺が 12 cm の正六角形の有感領域を持つが、本セットアップではその上に 10 cm 角の GEM を重ねて使用しているため、有感領域は 10 cm 角に制限される。ピクセルピッチは 0.48 mm であり、Anode (X 軸)、Cathode (U 軸、V 軸) それぞれ 256ch の読み出しを持ち、容器外に放射状に配置された 6 つのコネクタから読み出す構造になっている。ガス容器内部の  $\mu$ -PIC と GEM、ドリフト電場を生成するドリフトケージの配置を図 4.10 に示す。  $\mu$ -PIC の Cathode をグラウンドに接続し、  $\mu$ -PIC Anode、GEM 下面、GEM 上面、ドリフトケージ上面の電圧を外部の高圧電源で制御する構造になっている。ガスは Ar/CF<sub>4</sub>/iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (分圧比 95 : 3 :

2) を封入した。ビームライン実験中の TPC に関するパラメータを表 4.1 に示す。 $\mu$ -PIC の印加電圧については実験室での事前試験で、MIP 状の飛跡を安定して取ることができ、かつキャリブレーション線源を照射した時にフラッシュ ADC が飽和しないような値を選定した。しかし、事前のキャリブレーション試験で  $\mu$ -PIC での放電が頻発し安定した測定が困難であったため、放電が発生しない電圧を選定し、ビームライン実験中はその電圧で運用した。

今回の実験では、3 章で開発した新 DAQ システムを用いてデータ収集を行った。 $\mu$ -PIC 読み出し基板は Spartan 7 FPGA を搭載しクロック同期機能を持つ新基板を 6 枚使用した。また、検出器のトリガー制御を行う TCU 基板も新規設計したものを使用し、TPC 単体キャリブレーションモードで運用した。

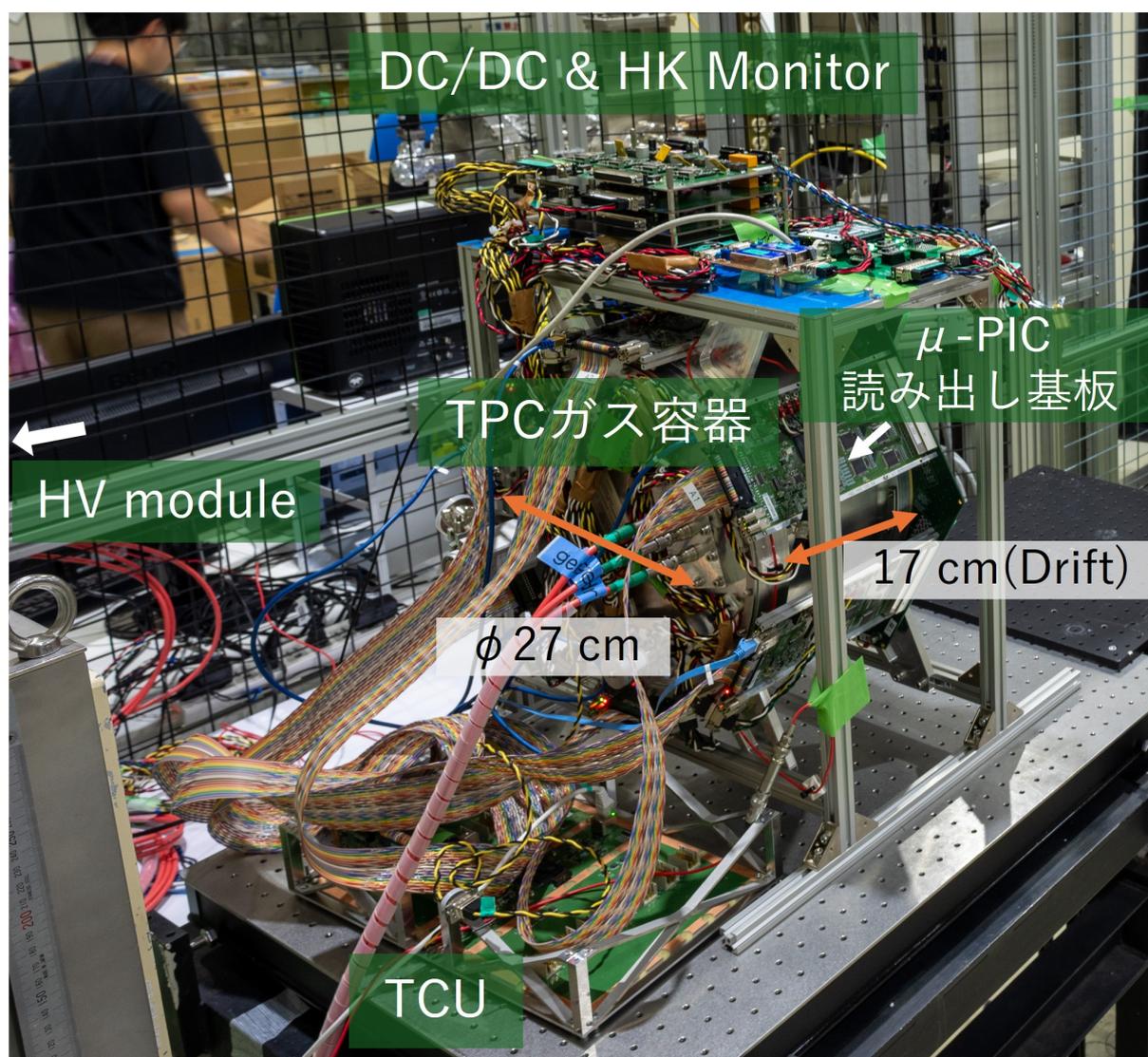


図 4.7: UVSOR 実験で用いた TPC 検出器の全体図。

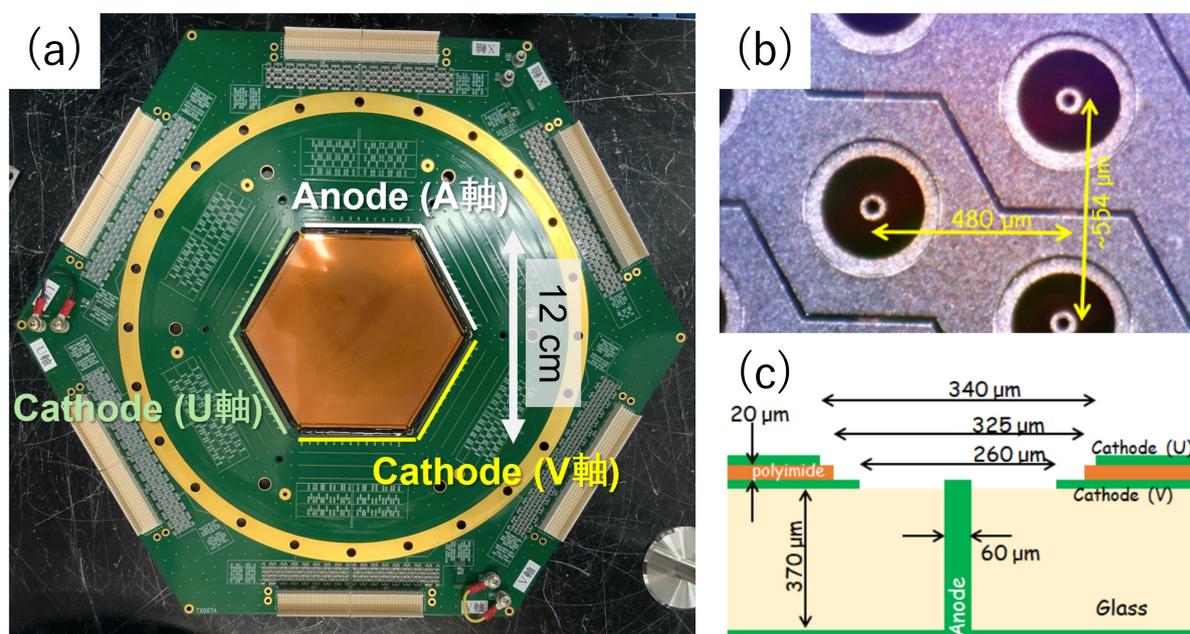


図 4.8: 実験で利用した 3 軸読み出し  $\mu$ -PIC の外観 (a)、電極の顕微鏡写真 (b)、電極の断面構造 (c)。

表 4.1: ビーム照射中の TPC の主要パラメータ。

ガス種	Ar/CF <sub>4</sub> /iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (分圧比 95 : 3 : 2)
ガス圧	絶対圧 2 atm
$\mu$ -PIC 電圧 (Anode)	455 V
GEM 電圧	-780 V (ドリフトケーシング側), -360 V ( $\mu$ -PIC 側)
ドリフトケーシング上部電圧	-4800 V
ドリフト電場	224.7 V/cm

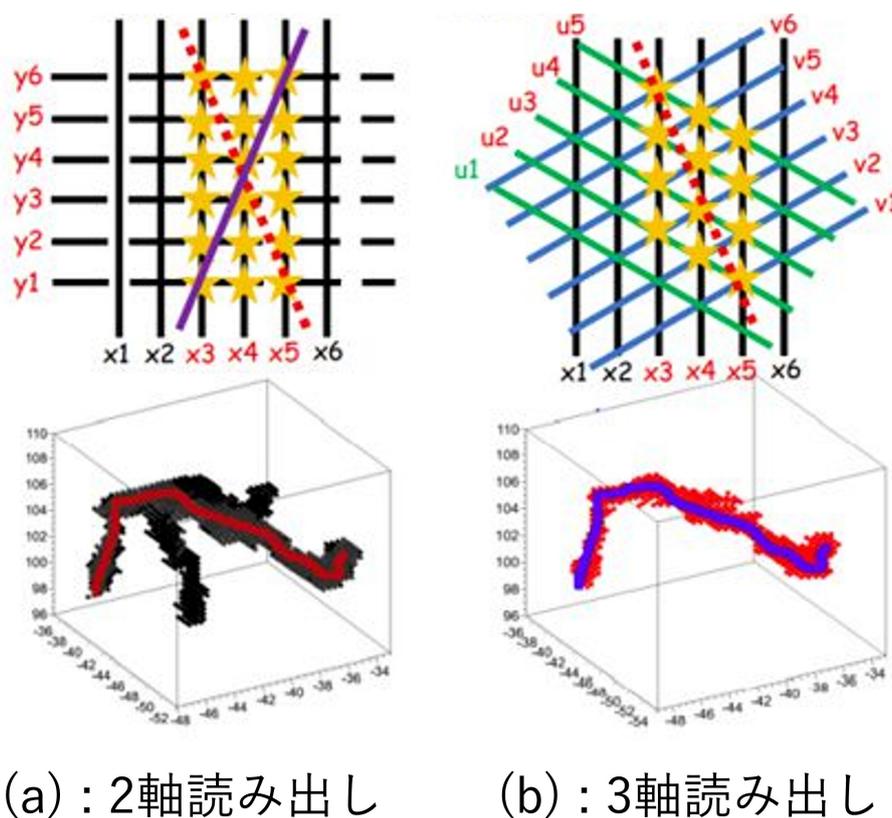


図 4.9: 電子飛跡シミュレーションにおける 2 次元読み出し (a) と 3 次元読み出し (b) で得られる飛跡イメージの比較 (Yoshida (2022) に加筆)。上段は荷電粒子が検出器に平行に走った場合のイメージ、下段は電子飛跡シミュレーション。

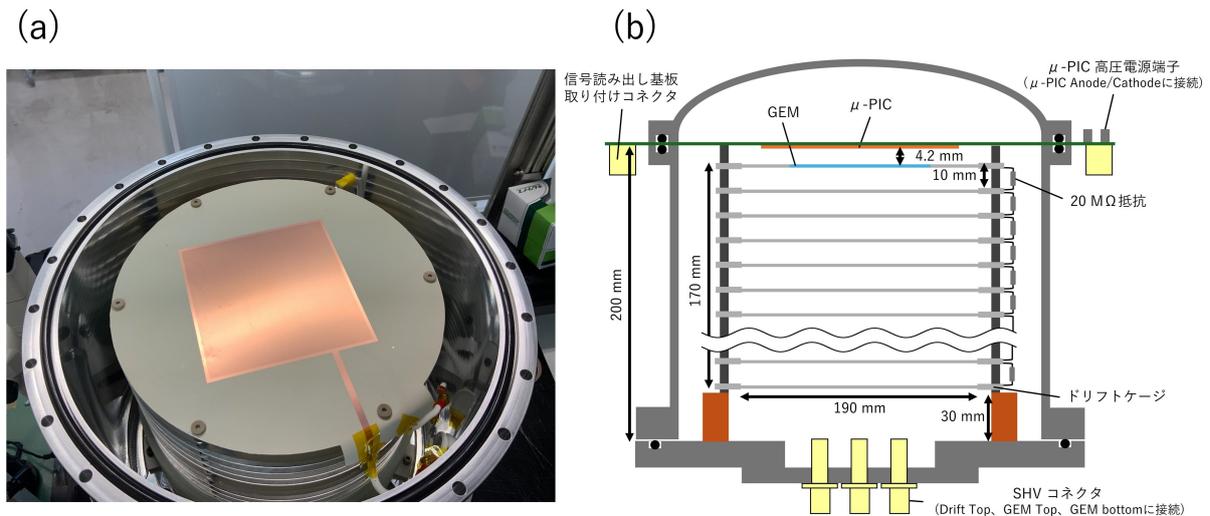


図 4.10: TPC 内部の写真 (a) と模式図 (b)。内径 190 mm のリング型電極 17 枚を 10 mm 間隔で配置し、それぞれを 20 MΩ の抵抗で直列接続することで均一なドリフト電場を生成する。ドリフトケージの最上面に 10 cm 角、厚さ 100 μm の液晶ポリマー GEM (Tamagawa et al. (2006)) を配置している。

## 4.3 データの事前解析

### 4.3.1 ビーム同期補正とイベント選別

本実験で取得した事象は、レーザーと同期して約 1 kHz で発生する逆コンプトン散乱ガンマ線による事象と、常時入射する制動放射バックグラウンドによる事象が混在している。本実験ではレーザー同期信号を DAQ システム内に取り込んでいないため、事象の時刻情報を用いてビーム由来の事象とそれ以外のバックグラウンド事象を区別する必要がある。また、ビームラインには約 1 分間隔で電子蓄積リングのビーム注入が行われるが、その際にカウントレートが大幅に低下し不安定になることが分かった (図 4.11)。これは、ビーム注入時に発生する粒子によって TPC にデータサイズの大きな飛跡が多数記録され、Ethernet 通信が詰まることで不感時間が大幅に増加するためと考えられる。これは μ-PIC 読み出し基板の Ethernet 通信に関わるパラメータが高速通信に最適化されていなかったことによる。この事象もバックグラウンドとして除去する必要がある。実験データのタイムスタンプの分解能は 0.04 ms であり (1 イベントのタイムスタンプの分解能は 0.1 ms であるが、6 枚の読み出し基板それぞれでタイムスタンプを記録しているため平均値の分解能は  $1/\sqrt{6}$  倍になる)、ビーム事象の周期を特定するには十分である。しかし、実験中のカウントレートは 100 – 300 Hz 程度であり、これはビーム 1 周期あたり 0(0.1) 事象に相当するため、ロバストに周期を推定するには工夫が必要である。そこで、下記のような検出器のカウントレートの変化によってレーザータイミングの周期と位相を推定し、ビーム

同期事象と非同期のバックグラウンド事象を区別する解析を実施した。

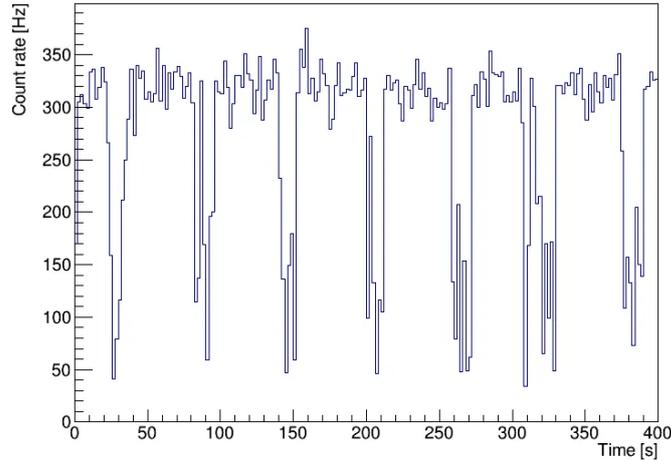


図 4.11: 6.6 MeV 実験データにおける TPC のカウントレート。ビーム注入ノイズの影響で、1 分ごとにカウントレートが大幅に低下している。

まず、カウントレートが中央値の 50 % 以下に低下している時間区間をビーム注入ノイズの影響がある区間として除去し、1 分程度の安定した良データ区間を抽出する。次に、各良データ区間ごとのビーム周期を Rayleigh テストによって推定する。Rayleigh テストは、ある候補周期を仮定した時にイベント時刻の位相が一様分布からどれだけ偏っているかを、位相ベクトルの和によって定量化する手法である。候補周期  $P$  に対し、各イベント時刻  $t_i$  の位相  $\phi_i = 2\pi(t_i \bmod P)/P$  を計算し、位相ベクトルの和

$$S(P) = \sum_{i=1}^N e^{i\phi_i(P)} \quad (4.1)$$

を求める。このとき、位相が周期に対応して特定方向へ集中している場合は  $|S(P)|$  が大きくなり、位相が一様に分布している場合は互いに打ち消し合って  $|S(P)|$  は小さくなる。候補周期  $P$  を変化させながら  $|S(P)|$  を計算し、最大値を与える周期をビーム周期として採用する。周期推定後の位相分布の例を図 4.12 に示す。位相分布のピークと半値全幅 (FWHM) を求め、ピーク位置をビーム同期タイミング、(時間分解能を考慮して) FWHM と  $0.04 \mu\text{s}$  の最小値をビーム同期ウィンドウとする。上記の解析を全ての良データ区間に対して実施し、各事象がビーム同期ウィンドウ内に入っているか否かによってビーム同期事象と非同期事象を区別する。

位相推定結果の例を図 4.13 に示す。6.6 MeV、4.8 MeV、3.3 MeV の各実験データに対し、推定周期の平均値を使った位相畳み込みヒストグラムと、ビーム同期事象と判定された事象のみを抽出したヒストグラムを併記する。どのエネルギー設定においても、ビーム同期事象は位相畳み込みヒストグラムのピーク部分に集中していることが分かる。一定間隔で現れる縞状の構造は、電子補充のノイズによる TPC の動作不安定の影響による。ま

た、ビーム同期事象の位相ピークは数千秒の時間スケールでわずかに ( $\mathcal{O}(10^{-6})$  ms) シフトしていることが分かる。これは、電子蓄積リング及びそれと同期するレーザーの周波数がわずかに変動しているためと考えられる。

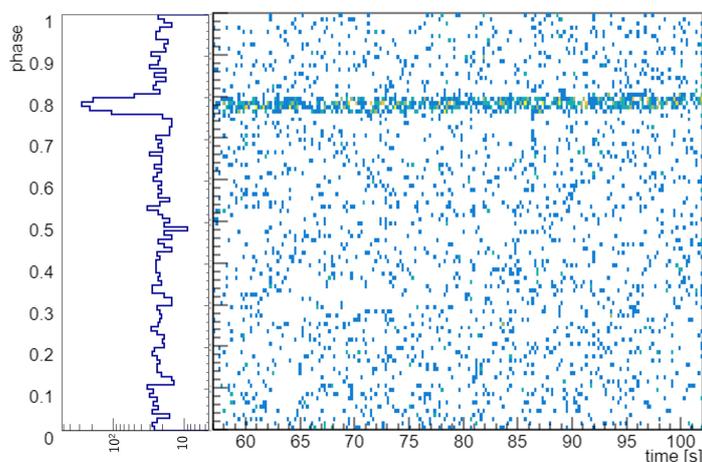


図 4.12: 良データ区間に対して周期を推定した後の位相分布 (左) と位相畳み込みヒストグラム (右) の例。オレンジで網掛けされた領域がビーム同期ウィンドウ。

### 4.3.2 飛跡の再構成と取得できたデータの例

取得した TPC のデータに対して 3 軸ストリップのヒット情報の同時計数を取ることで、3 次元点群として飛跡を再構成する。図 4.14 に、6.6 MeV のガンマ線照射実験で取得したビーム同期事象の飛跡画像の例を示す。図 4.14(a) は MIP 状の飛跡が 1 本観測されている事象であり、高エネルギー光子のコンプトン散乱事象であると考えられる。図 4.14(b) は、同一の端点を持つ 2 本の MIP 状飛跡が観測されている事象であり、対生成事象であると考えられる。図 4.14(c) は、同一の端点から 3 本の飛跡が伸びており、電子場対生成事象 (triplet 事象) である可能性がある。図 4.14(d) は、対生成の 2 本の飛跡に加え、片方の飛跡から枝分かれする飛跡が観測されている。これは、荷電粒子がガス内電子を弾き飛ばし追加の電子飛跡が生成される (デルタ線) 現象であると考えられる。また、MIP 状飛跡では連続した飛跡にならず、途切れたり断片化したりして観測されることが多いことが分かる。これは、当初の想定より低い電圧で  $\mu$ -PIC を運用したことにより、検出器内の増幅率依存や電離電子の個数のゆらぎなどにより MIP 状飛跡を完全に取得できるだけのガス増幅率が得られない場合があったためと考えられる。

飛跡と電荷情報から  $dE/dx$  分布 (2.3) を計算したものを図 4.15 に示す。ここで飛跡長は記録された点群の最大距離を用いて計算している。複数の構造が見られるが、22.5 cm 付近の横線状の構造は TPC の有感領域内で最も長い飛跡に対応しており、15 cm 付近に

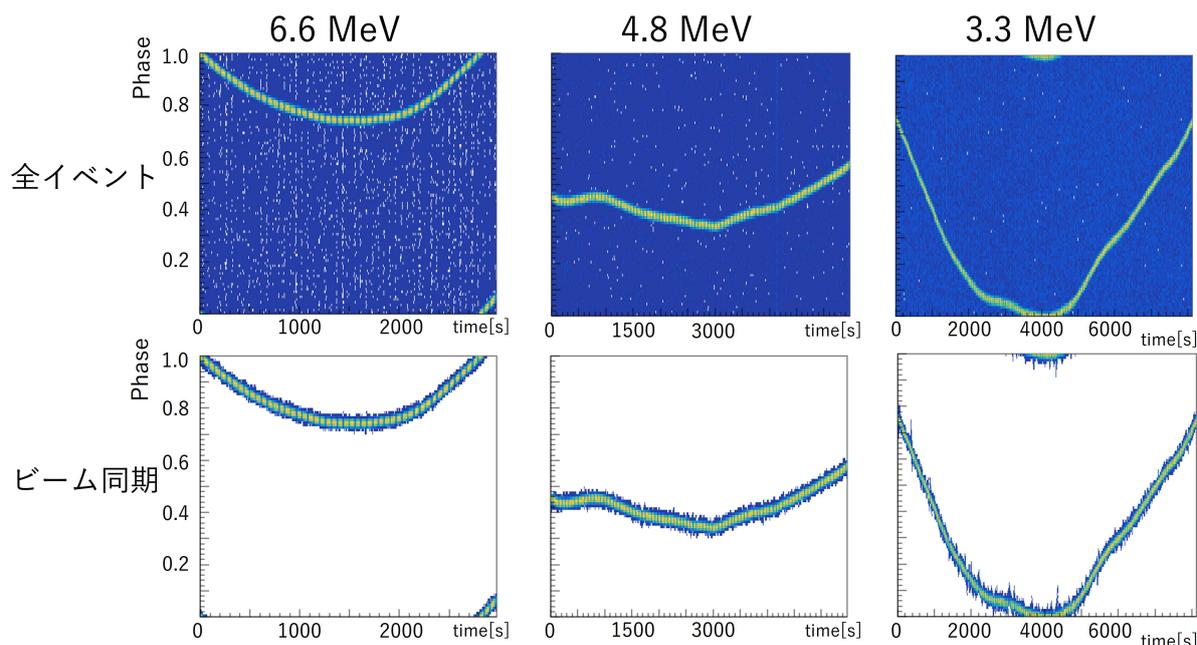


図 4.13: 6.6 MeV (左)、4.8 MeV (中央)、3.3 MeV (右) の各実験データに対する位相畳み込みヒストグラム (上段) とビーム同期事象のみを抽出したヒストグラム (下段)。

切片を持つ斜めの構造は有感領域を縦向きに貫通する飛跡に対応していると考えられる。また、原点を通る傾きが約  $0.5 \text{ cm/keV}$  の構造は MIP 状飛跡で、傾きが  $0.04 \text{ cm/keV}$  程度の構造は TPC 内で停止した低エネルギー電子の飛跡に対応していると考えられる。今回の対生成事象の解析では、MIP 状飛跡を対象として解析を行った。

## 4.4 対生成事象の識別と再構成手法の開発

### 4.4.1 識別アルゴリズムの概要

本節では、3次元飛跡から対生成事象を抽出するアルゴリズムを述べる。目標は、断片化した飛跡や多重散乱によって曲がった飛跡、デルタ線などの擾乱がある実データに対しても、2本トラック構造と反応点(交点)を頑健に推定し、最終的に対生成らしさを統計量として与えることである。コンプトン散乱と対生成の反応断面積を考慮すると、対生成が雑音事象として実効的な影響を持つのは少なくとも  $3 \text{ MeV}$  以上のエネルギー帯域であると考えられる。本アルゴリズムは、反応点近傍では対生成粒子が  $\mathcal{O}(1) \text{ MeV}$  のエネルギーを持ち、運動方向の情報を失わず直線的に飛跡を形成すると仮定して設計した。処理は大きく、(i) 前処理(点群均一化とクラスタリング)、(ii) 局所方向推定と交点候補生成、(iii) 角度分布に基づく尤度評価、の3段から構成される。

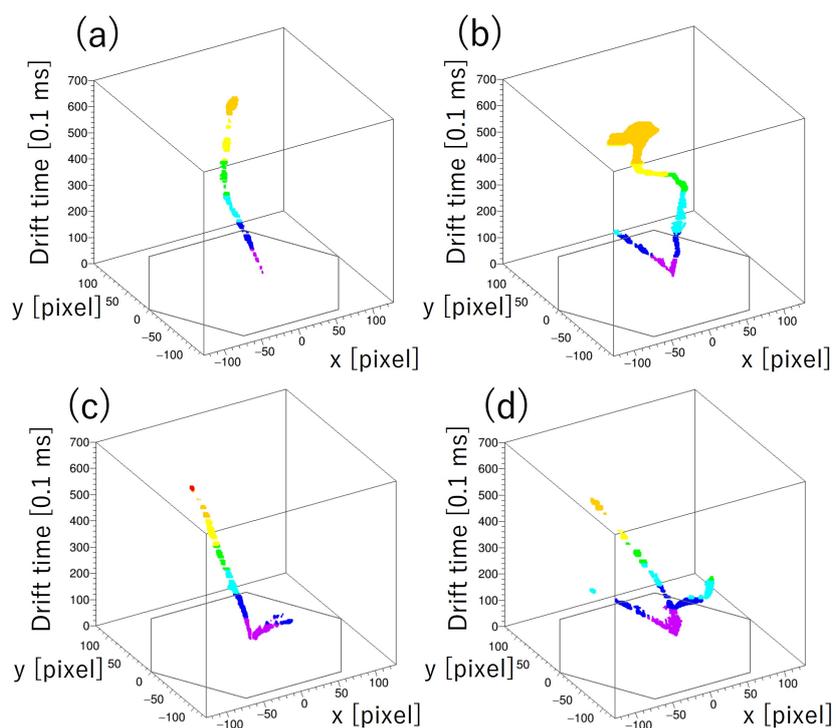


図 4.14: 6.6 MeV ガンマ線を正面から照射した際の TPC の飛跡画像の例。z 軸正の方向がビーム軸。(a) : コンプトン散乱事象。(b) : 核場対生成事象。(c) : 電子場対生成事象の候補。(d) : デルタ線を伴う対生成事象。

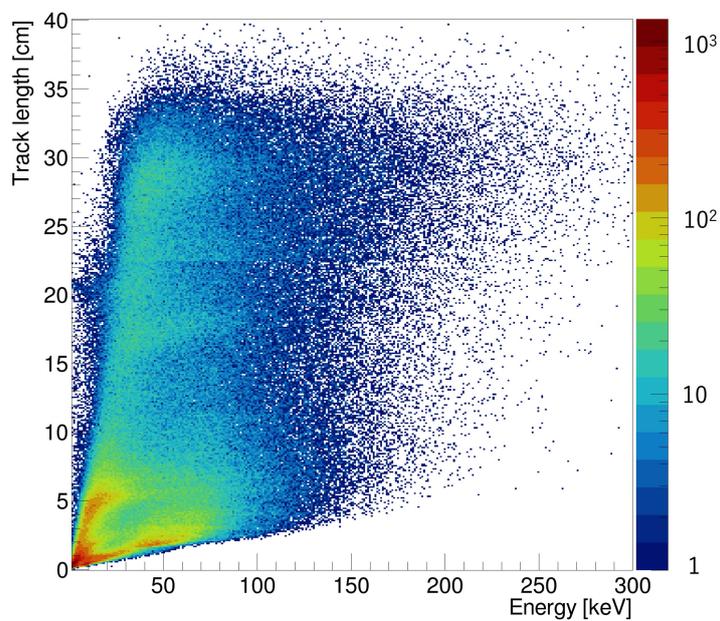


図 4.15: TPC で取得した飛跡の  $dE/dx$  分布の例。



跡の広がりから誤って生成された可能性が高いため除外する。また、交点から飛跡方向の始点  $\mathbf{p}_i$  までの距離が 5 cm 以上である組み合わせは、多重散乱によって飛跡方向の信頼度が低下している可能性が高いため除外する。このような条件を満たす直線ペアの交点を対生成点候補として抽出する。

最後に、各反応点候補に対して対生成らしさを定量化する。図 4.17 に、尤度評価による対生成事象の識別の例を示す。この段階では、対生成点 (図 4.17 左) だけではなくデルタ線 (図 4.17 中央) や多重散乱によって生成された交点候補 (図 4.17 右) も含まれている可能性がある。反応点候補の周囲の点群を反応点から見た相対角度として表現すると (図 4.17 中段)、対生成事象では二つの軸方向に点が集中する傾向がある。一方、背景や単一トラック事象では角度分布はより一様に近い。そこで本研究では、二軸への集中モデルを対立仮説  $H_1$ 、一様分布を帰無仮説  $H_0$  として、対数尤度比 (LLR) を定義する。LLR が大きいほど対生成らしさが高いと解釈できる (図 4.17 下段)。対立仮説  $H_1$  (2トラック仮説) では、各点がいずれかの軸に近い角度を持つと仮定し、角度に対するガウス型の混合分布

$$p(x_i | H_1) = \frac{1}{2} g(\theta_{i1}; \sigma) + \frac{1}{2} g(\theta_{i2}; \sigma) \quad (4.2)$$

を用いる。ここで

$$g(\theta; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.3)$$

であり、 $\sigma$  は集中幅 (rad) である。

帰無仮説  $H_0$  (一様仮説) では、方向が球面上で一様であると仮定し、

$$p(x_i | H_0) = \frac{1}{4\pi} \quad (4.4)$$

とする。事前確率を  $P(H_1) = \pi$  ( $P(H_0) = 1 - \pi$ ) とすると、ベイズ則より

$$P(H_1 | \{x_i\}) = \frac{\pi \mathcal{L}(H_1)}{\pi \mathcal{L}(H_1) + (1 - \pi) \mathcal{L}(H_0)} = \frac{1}{1 + \exp(\log \frac{1-\pi}{\pi} - \text{LLR})}. \quad (4.5)$$

本研究では  $P(H_1 | \{x_i\}) > 0.5$  の頂点候補を対生成事象として採択する。

#### 4.4.2 解析結果と考察

対生成事象が同定できれば、 $e^+$  と  $e^-$  の運動量方向ベクトルから入射ガンマ線方向を推定できる。今回の実験では粒子ごとの運動量を測定していないため、運動量が概ね等分配されると仮定して二つの方向ベクトルの和を入射方向の推定値とした。図 4.18 に、各エネルギーのビーム同期事象から抽出された対生成事象の入射方向分布を示す。また、ビーム非同期事象から抽出された対生成事象の再構成結果も示す。これは電子蓄積リングの制動放射で生成された数十 MeV 程度の光子が TPC に入射して対生成を起こした事象であ

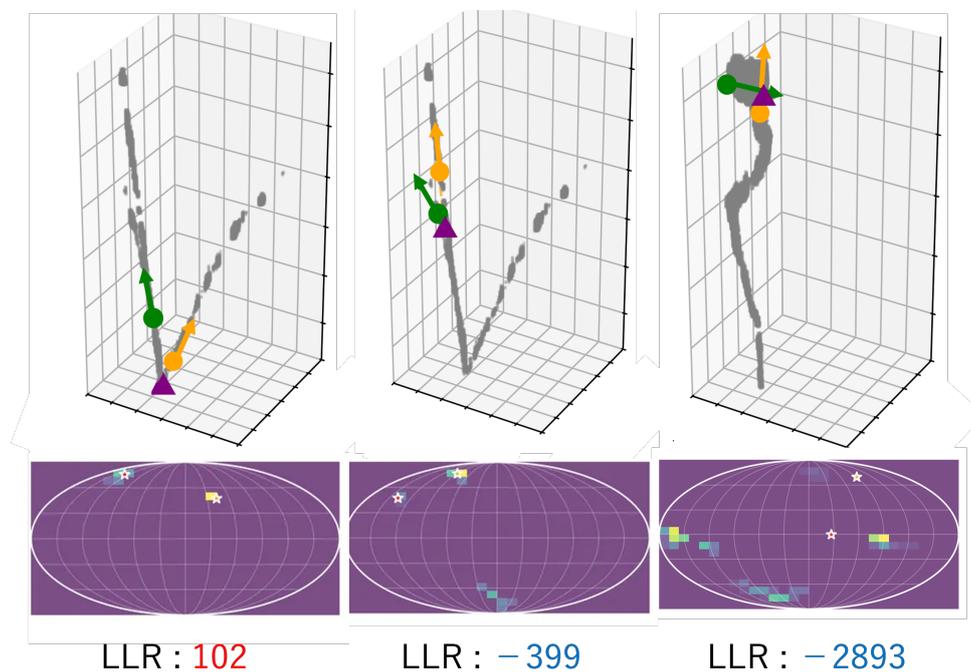


図 4.17: 尤度評価による対生成事象の識別の例。上段：対生成候補点と始点方向ベクトル。中段：反応点からみた点群の角度分布。下段：対数尤度比の計算結果。

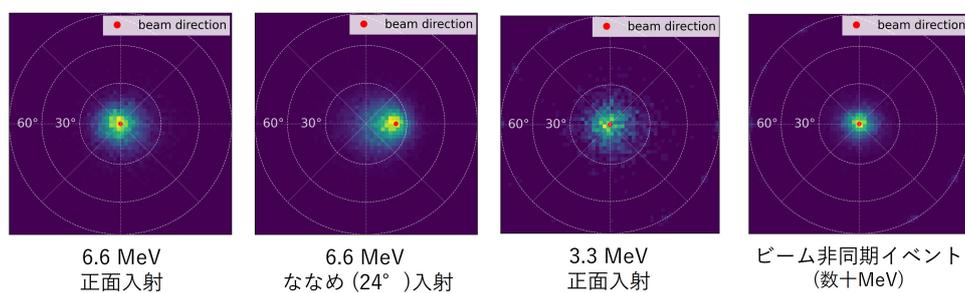


図 4.18: 抽出された対生成事象の入射方向分布。赤点はビーム方向を示す。

ると考えられる。どのエネルギー設定においても、ビーム軸方向に入射方向が集中していることが分かる。

6.6 MeV ガンマ線の照射において、再構成された方向とビーム軸方向とのなす角度分布を図 4.19 (a) に示す。同期事象に対する残差の 68 % containment angle は  $16.2^\circ$  であり、非同期事象に対しては  $12.0^\circ$  であった。また、2本のベクトルがなす角を対生成の開き角として図 4.19 (b) に示す。同期事象と非同期事象で分布形状が異なることが分かる。

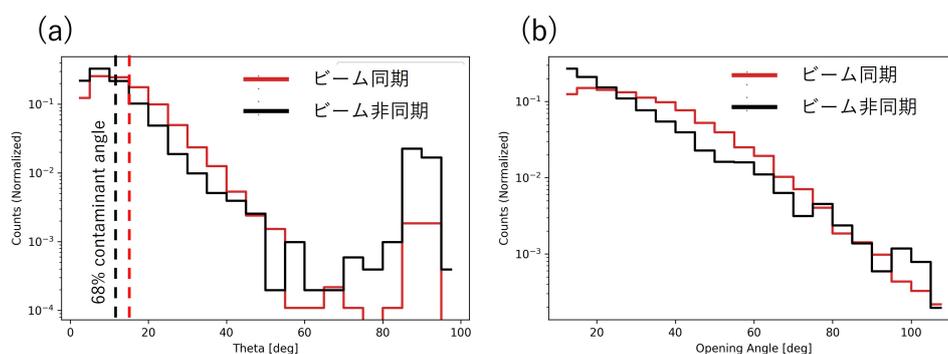


図 4.19: 6.6 MeV ガンマ線照射実験での (a): 再構成された入射方向とビーム軸方向の残差分布。(b):  $e^+$  と  $e^-$  の開き角分布。

図 4.20 に、本実験での残差のエネルギー依存性と、核場対生成における原子核反跳による理論的な到来方向不定性の比較を示す。10 MeV 以下のエネルギー帯域では、原子核反跳による不定性によって到来方向の精度が制限されることが分かる。また推定した到来方向の残差は、その大部分が核場対生成における原子核反跳の運動量の不定性によって説明できる。これは過去の研究結果 (Gros et al. (2018)) とも整合的である。

## 4.5 まとめと今後の展望

本章では、電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) において、MeV 帯以上で無視できない割合で混入する電子・陽電子対生成事象が、double-hit 解析における誤再構成や背景漏れ込みの主要因となりうる点を整理し、TPC で得られる 3次元飛跡情報を用いた対生成事象の識別・再構成手法を開発した。本研究では、飛跡の 2本トラック構造と反応点を点群解析として頑健に推定できるアルゴリズムとして、(i) ボクセル化による点群密度の均一化と DBSCAN によるクラスタリング、(ii) 局所 PCA に基づく方向ベクトル推定と交点候補生成、(iii) 反応点周りの角度分布に対する尤度比 (LLR) 評価、からなる識別アルゴリズムを構築した。

本手法を、UVSOR BL1U における逆コンプトン散乱ガンマ線照射実験データに適用し、実データ環境下での有効性を検証した。本実験ではレーザー同期信号を DAQ へ取り込ん

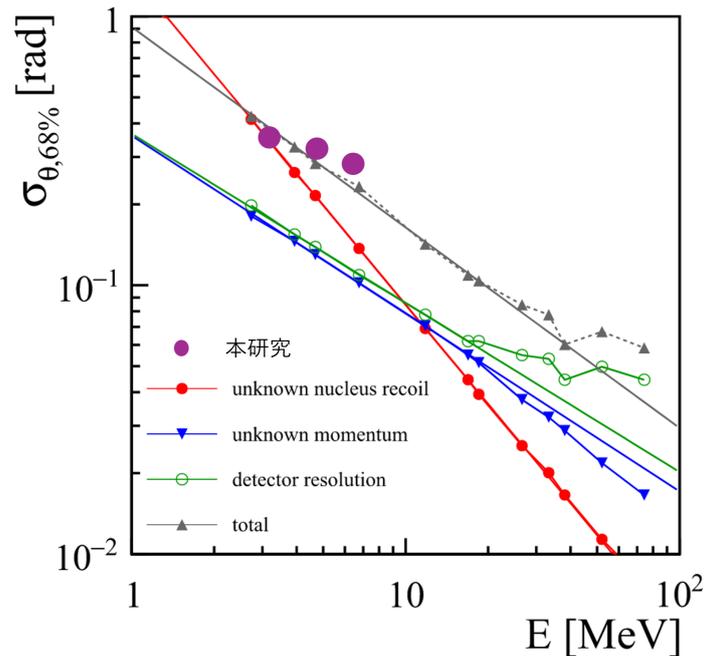


図 4.20: 再構成された入射方向とビーム軸方向の残差のエネルギー依存性 (Gros et al. (2018) に加筆)。

でない制約があるため、Rayleigh テストによりイベント時刻からビーム周期と位相を推定し、ビーム同期事象と非同期事象を分離した。そのうえで、3軸読み出し  $\mu$ -PIC により再構成した3次元点群から、対生成候補(核場・電子場候補を含む)を抽出し、抽出事象の到来方向推定を行った。6.6 MeV 照射データでは、抽出した対生成事象の到来方向がビーム軸方向に集中することを確認し、再構成方向とビーム軸の残差として 68% containment angle が  $16.2^\circ$  (同期事象) を得た。残差のエネルギー依存性は、核場対生成における原子核反跳運動量の不定性による到来方向限界と整合的である。以上より、6.6 MeV 以下のガンマ線に対して、TPC 飛跡点群の幾何学的特徴に基づく対生成事象の抽出が可能であることを実験的に確認した。また、3章で述べた DAQ システムを用いて

今後の展望として以下が挙げられる。今回の実験は TPC 単体での測定であったため、飛跡の  $z$  軸方向の絶対座標が不明であった。そのため、対生成やコンプトン散乱が TPC 内のガスで発生したのか、あるいは筐体と反応して生成されたのかを区別できない。そのため、対生成とコンプトン散乱の分岐比などを用いた妥当性の検証が困難であった。来年度に UVSOR で SMILE-3 ETCC にガンマ線を照射する実験を予定しており、double-hit 解析によるガンマ線のキャリブレーション測定に加えて、対生成事象の識別・再構成手法の検証を行う予定である。ガンマ線の座標およびエネルギー情報を組み合わせた詳細な解析を行う予定である。また、本実験のセットアップを再現したシミュレーションを構築し、対生成事象の識別率や誤同定率の定量的評価を行う予定である。



---

## 第 5 章

### まとめと今後の展望

#### 5.1 まとめ

本研究では、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) の放射機構およびエネルギー散逸過程の解明最終目標として、気球 MeV ガンマ線観測実験 SMILE-3 に向けた電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) の性能向上に取り組んだ。GRB の初期放射を MeV 帯域で高い時間分解能で分光・偏光観測することは、その放射機構・エネルギー散逸過程を解明するうえで重要である。そのためには、大規模な ETCC システムでも突発現象を安定的に観測できるレート耐性と安定性を持ったシステムと、数 MeV 以上の高エネルギー帯域での感度向上が必要である。

本研究では、SMILE-3 実験の要求を満たす新規 DAQ システムおよびトリガーコントロールユニット (TCU) の開発を行った。従来の SMILE-2+ 実験系では、高計数率環境下での不感時間が約 15% に達する課題や、検出器の大型化に伴うシステム安定性の懸念があった。これに対し、本研究ではシンチレータと TPC のコインシデンス成立時のみトリガーを発行するロジックを実装し、不感時間を大幅に削減可能な設計とした。また、ハードウェア構成を FPGA 基板と I/F 拡張基板に分割することで、SMILE-3 で必要となる数百本の信号線に対応可能な拡張性と、電源供給の安定性を確保した。試作機を用いた評価実験では、TPC および MPPC 搭載型 PSA ユニットの単体キャリブレーションモードが正常に動作することを確認した。さらに、TCU からの外部クロック分配による基板間時刻同期機能を実証し、長時間観測においてもデータの時刻ずれが生じないシステムを構築した。これにより、高レート環境下でも安定して高精度なデータを取得する基盤が確立された。

第二に、数 MeV 以上の帯域での感度向上を目指し、TPC で得られる 3 次元飛跡情報を用いた対生成事象の識別・再構成手法を開発した。従来の手法では困難であった対生成事象とコンプトン散乱事象の識別に対し、点群密度の均一化、局所主成分分析 (PCA) による方向推定、および尤度比評価を組み合わせた新たなアルゴリズムを構築した。この手法を

UVSOR BL1Uにおける3.3 – 6.6 MeVガンマ線照射実験のデータに適用した結果、対生成事象特有のV字型飛跡を高精度に抽出し、その到来方向を再構成することに成功した。再構成された到来方向はビーム軸と良い一致を示し、その角度分解能 (68% containment angle) は16.2度であった。この誤差は核場対生成における原子核反跳による原理的な物理限界と整合しており、数 MeV 帯域での対生成事象の識別・再構成が可能であることを実験的に示した。

## 5.2 課題と今後の展望

今回のDAQシステムの試験では地上環境および部分的なシステム構成での検証にとどまっていた。今後はファームウェアの開発中であるMPPC HAユニットとの統合試験を進めるほか、SMILE-3 ETCCシステム全体を構築し、大規模なシステムかつガス容器内でも安定して動作するかを検証する必要がある。

対生成事象の識別・再構成手法に関しては、今回は容器内にシンチレータを内蔵したETCCを用意することが困難であったため、TPC単体での評価にとどまった。完全なETCCを用いたビーム照射試験を行い、ETCC動作下での実際的な対生成事象の識別・再構成手法の評価を行いたい。また、本実験を再現したモンテカルロシミュレーションを構築し、様々な入射エネルギーや入射角度に対する手法の汎用性を評価することも重要である。

---

## 謝辞

本修士論文を完成させるにあたり、大変多くの方にご指導とご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。まず指導教員の高田淳史准教授は、天文学に対して殆ど素人であった私に、どんな些細な内容であっても丁寧にご指導くださり、深く感謝しております。また検出器開発とはなんたるか、実験とはなんたるかを根本から教えて頂き、また体現してくださいました。ヴュルツブルク大学の岡知彦さんには TCU の設計から UVSOR 実験の準備・実施まであらゆる面で大変お世話になりました。また、研究対象に対して多面的な方向からアプローチする姿勢を学ばせて頂きました。米田浩基さんにはアルゴリズム開発や結果の解釈について多くのご助言を頂きました。松永海さんには UVSOR 実験の一部の解析をご支援頂きました。他波長の適度に離れた分野を専門とする松永さんからの視点は、検出器開発に専念しがちな私にとって非常に新鮮であり、研究の幅を広げることができました。同期で同じ SMILE プロジェクトのメンバーである出口颯馬君は、研究や雑談に関わらず忌憚のない意見を投げ合える貴重な存在で、日々の研究活動を楽しく進めることができました。後輩の小野田晴樹君と奥村紗那さんには実験準備や SMILE に関わる雑務など、多くの面で助けて頂きました。上林暉君とは研究の合間のしょうもない雑談や将来の夢を語り合う時間が、研究の良い息抜きとなりました。小俣雄矢君は同期の中でムードメーカー的存在であり、研究室の雰囲気をも明るくしてくれました。加藤寛之君は日常の雑談でも独自の視点に基づく説得力のある議論を展開してくれ、私の視野を広げてくれました。上村悠介君はハードウェア開発をメインとする、生活リズムの流動性が高いなど私と似たようなタイプで、気の合う同期でした。中山和哉君は研究に対するストイックさと真面目さが印象的で、私も見習うべき点が多々ありました。同室の成田拓仁さん、寺内健太さん、坂本洗さんには、日中には思う存分研究に集中でき、夜には楽しい雑談でリフレッシュできる理想の居室環境を提供して頂き、ありがとうございました。最後に、宇宙線研究室の皆様にご心より感謝申し上げます。



---

## 参考文献

- Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J. et al. (1993) “Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts,” *The Astrophysical Journal*, 413, L101. doi: [10.1086/186969](https://doi.org/10.1086/186969).
- Fishman, G. J., Meegan, C. A., Wilson, R. B. et al. (1994) “The First BATSE Gamma-Ray Burst Catalog,” *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 92, 229. doi: [10.1086/191968](https://doi.org/10.1086/191968).
- Briggs, M. S., Band, D. L., Kippen, R. M. et al. (1999) “Observations of GRB 990123 by the Compton Gamma-Ray Observatory,” *The Astrophysical Journal*, 524, 1, 82–91. doi: [10.1086/307808](https://doi.org/10.1086/307808).
- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M. et al. (2009a) “*FERMI* OBSERVATIONS OF GRB 090902B: A DISTINCT SPECTRAL COMPONENT IN THE PROMPT AND DELAYED EMISSION,” *The Astrophysical Journal*, 706, 1, L138–L144. doi: [10.1088/0004-637X/706/1/L138](https://doi.org/10.1088/0004-637X/706/1/L138).
- Gill, R., Kole, M., & Granot, J. (2021) “GRB Polarization: A Unique Probe of GRB Physics,” *Galaxies*, 9, 4, 82. doi: [10.3390/galaxies9040082](https://doi.org/10.3390/galaxies9040082).
- National Institute of Standards and Technology (2009) “XCOM: Photon Cross Sections Database,” NIST.
- Vedrenne, G., Roques, J.-P., Schönfelder, V. et al. (2003) “SPI: The Spectrometer Aboard INTEGRAL,” *Astronomy & Astrophysics*, 411, 1, L63–L70. doi: [10.1051/0004-6361:20031482](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031482).
- Schönfelder, V., Aarts, H., Bennett, K. et al. (1993) “INSTRUMENT DESCRIPTION AND PERFORMANCE OF THE IMAGING GAMMA-RAY TELESCOPE COMPTEE ABOARD THE COMPTON GAMMA-RAY OBSERVATORY,” *Astrophysical Journal Supplement*, v.86, p.657. doi: [10.1086/191794](https://doi.org/10.1086/191794).
- Chiu, J.-L., Boggs, S., Chang, H.-K. et al. (2015) “The Upcoming Balloon Campaign of the Compton Spectrometer and Imager (COSI),” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 784, 359–363. doi: [10.1016/j.nima.2014.11.099](https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.11.099).
- Takada, A., Takemura, T., Yoshikawa, K. et al. (2022) “First Observation of the MeV Gamma-Ray Universe with Bijective Imaging Spectroscopy Using the Electron-tracking Compton Telescope on Board SMILE-2+,” *The Astrophysical Journal*, 930, 1, 6. doi: [10.3847/1538-4357/ac6103](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6103).
- Tanimori, T., Kubo, H., Takada, A. et al. (2015) “AN ELECTRON-TRACKING COMPTON TELESCOPE FOR A SURVEY OF THE DEEP UNIVERSE BY MeV GAMMA-RAYS,” *The Astrophysical Journal*, 810, 1, 28. doi: [10.1088/0004-637X/810/1/28](https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/1/28).
- Nakamura, Y. (2018) 「電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける充填ガスの改良とガス純化システムの開発」.

- Groom, D. E. & Klein, S. R. (2000) "Passage of Particles through Matter," *The European Physical Journal C*, 15, 1-4, 163–173. doi: [10.1007/BF02683419](https://doi.org/10.1007/BF02683419).
- Ochi, A., Nagayoshi, T., Koishi, S. et al. (2001) "A New Design of the Gaseous Imaging Detector: Micro Pixel Chamber," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 471, 1-2, 264–267. doi: [10.1016/S0168-9002\(01\)00996-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00996-2).
- Sauli, F. (1997) "GEM: A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 386, 2-3, 531–534. doi: [10.1016/S0168-9002\(96\)01172-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01172-2).
- Tamagawa, T., Tsunoda, N., Hayato, A. et al. (2006) "Development of Gas Electron Multiplier Foils with a Laser Etching Technique," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 560, 2, 418–424. doi: [10.1016/j.nima.2006.01.047](https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.01.047).
- (2016) "The Gas Electron Multiplier (GEM): Operating Principles and Applications," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 805, 2–24. doi: [10.1016/j.nima.2015.07.060](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.060).
- Takada, A. & Tanimori, T. (2019) "SMILE: Sky Survey Project in MeV Gamma Ray—Dawn of MeV Gamma-ray Astronomy—," *RADIOISOTOPES*, 68, 12, 865–875. doi: [10.3769/radioisotopes.68.865](https://doi.org/10.3769/radioisotopes.68.865).
- Tsukamoto, H. (2025) 「高感度 MeV ガンマ線観測実験 SMILE-3 に向けた  $\mu$ -PIC 読み出し基板の開発と放射性廃棄物の放射能濃度測定」.
- Oka, T., Ogio, S., Abe, M. et al. (2024) "High-Energy Extension of the Gamma-Ray Band Observable with an Electron-Tracking Compton Camera," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1063, 169242. doi: [10.1016/j.nima.2024.169242](https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169242).
- Takada, A., Kubo, H., Nishimura, H. et al. (2011) "OBSERVATION OF DIFFUSE COSMIC AND ATMOSPHERIC GAMMA RAYS AT BALLOON ALTITUDES WITH AN ELECTRON-TRACKING COMPTON CAMERA," *The Astrophysical Journal*, 733, 1, 13. doi: [10.1088/0004-637X/733/1/13](https://doi.org/10.1088/0004-637X/733/1/13).
- Mizumoto, T., Matsuoka, Y., Mizumura, Y. et al. (2015) "New Readout and Data-Acquisition System in an Electron-Tracking Compton Camera for MeV Gamma-Ray Astronomy (SMILE-II)," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 800, 40–50. doi: [10.1016/j.nima.2015.08.004](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.004).
- Tahara, K. (2023) 「高感度宇宙 sub-MeV ガンマ線観測に向けた CdZnTe 検出器による電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発」.
- Iiyama, H. (2025) 「MeV ガンマ線気球観測実験 SMILE-3 に向けた GSO (Ce) シンチレータのバックグラウンド評価」.
- Oka, T. (2024) 「SMILE-2+気球観測データを用いた宇宙 MeV ガンマ線背景放射の解析」.
- Zen, H., Taira, Y., Konomi, T. et al. (2016) "Generation of High Energy Gamma-ray by Laser Compton Scattering of 1.94- $\mu$ m Fiber Laser in UVSOR-III Electron Storage Ring," *Energy Procedia*, 89, 335–345. doi: [10.1016/j.egypro.2016.05.044](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.05.044).

- Taira, Y. (2026) “Private Communication with Taira.”
- Yoshida, Y. (2022) 「電子飛跡決定精度の向上を目指した新電極構造を持つガス飛跡検出器の開発」.
- Gros, P., Amano, S., Attié, D. et al. (2018) “Performance Measurement of HARPO: A Time Projection Chamber as a Gamma-Ray Telescope and Polarimeter,” *Astroparticle Physics*, 97, 10–18. doi: [10.1016/j.astropartphys.2017.10.008](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.10.008).
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. (1973) “OBSERVATIONS OF GAMMA-RAY BURSTS OF COSMIC ORIGIN,” *ApJ*. . . doi: [doi:10.1086/181225](https://doi.org/10.1086/181225).
- Band, D., Matteson, J., Ford, L. et al. (1993) “BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Spectra. I - Spectral Diversity,” *The Astrophysical Journal*, 413, 281. doi: [10.1086/172995](https://doi.org/10.1086/172995).
- Barthelmy, S. D., Barbier, L. M., Cummings, J. R. et al. (2005) “The Burst Alert Telescope (BAT) on the Swift MIDEX Mission,” *Space Science Reviews*, 120, 3-4, 143–164. doi: [10.1007/s11214-005-5096-3](https://doi.org/10.1007/s11214-005-5096-3).
- Meegan, C., Lichti, G., Bhat, P. N. et al. (2009a) “THE *FERMI* GAMMA-RAY BURST MONITOR,” *The Astrophysical Journal*, 702, 1, 791–804. doi: [10.1088/0004-637X/702/1/791](https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/791).
- MacFadyen, A. & Woosley, S. E. (1999) “Collapsars - Gamma-Ray Bursts and Explosions in ”Failed Supernovae”,” *The Astrophysical Journal*, 524, 1, 262–289. doi: [10.1086/307790](https://doi.org/10.1086/307790).
- Hjorth, J., Sollerman, J., Møller, P. et al. (2003) “A Very Energetic Supernova Associated with the G-Ray Burst of 29 March 2003.”
- Tanvir, N. R., Levan, A. J., Fruchter, A. S. et al. (2013) “A ”Kilonova” Associated with Short-Duration Gamma-Ray Burst 130603B,” *Nature*, 500, 7464, 547–549. doi: [10.1038/nature12505](https://doi.org/10.1038/nature12505).
- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D. et al. (2017) “Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger\*,” *The Astrophysical Journal Letters*, 848, 2, L12. doi: [10.3847/2041-8213/aa91c9](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9).
- Ghirlanda, G., Nava, L., Ghisellini, G. et al. (2009) “Short versus Long Gamma-Ray Bursts: Spectra, Energetics, and Luminosities,” *Astronomy & Astrophysics*, 496, 3, 585–595. doi: [10.1051/0004-6361/200811209](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811209).
- Mészáros, P. (2006) “Gamma-Ray Bursts,” *Reports on Progress in Physics*, 69, 8, 2259–2321. doi: [10.1088/0034-4885/69/8/R01](https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/8/R01).
- Larsson, J., Ryde, F., Lundman, C. et al. (2011) “Spectral Components in the Bright, Long GRB 061007: Properties of the Photosphere and the Nature of the Outflow: Spectral Components in GRB 061007,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414, 3, 2642–2649. doi: [10.1111/j.1365-2966.2011.18582.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18582.x).
- Zhang, B. & Yan, H. (2011) “The Internal-Collision-Induced Magnetic Reconnection and Turbulence (ICMART) Model of Gamma-Ray Bursts,” *The Astrophysical Journal*, 726, 2, 90. doi: [10.1088/0004-637X/726/2/90](https://doi.org/10.1088/0004-637X/726/2/90).
- Abdo, A. A., Ackermann, M., Arimoto, M. et al. (2009b) “Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C,” *Science*, 323, 5922, 1688–1693. doi: [10.1126/science.1169101](https://doi.org/10.1126/science.1169101).
- Ackermann, M., Asano, K., Atwood, W. B. et al. (2010) “*FERMI* OBSERVATIONS OF GRB 090510: A SHORT-HARD GAMMA-RAY BURST WITH AN ADDITIONAL, HARD POWER-LAW COMPONENT FROM 10 keV TO GeV ENERGIES,” *The Astrophysical Journal*, 716, 2, 1178–1190. doi: [10.1088/0004-637X/716/2/1178](https://doi.org/10.1088/0004-637X/716/2/1178).

- Weidenspointner, G., Varendorff, M., Oberlack, U. et al. (2001) “The COMPTEL Instrumental Line Background,” *Astronomy & Astrophysics*, 368, 1, 347–368. doi: [10.1051/0004-6361:20000489](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000489).
- Yonetoku, D., Murakami, T., Gunji, S. et al. (2011) “Gamma-Ray Burst Polarimeter (GAP) Aboard the Small Solar Power Sail Demonstrator IKAROS,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63, 3, 625–638. doi: [10.1093/pasj/63.3.625](https://doi.org/10.1093/pasj/63.3.625).
- Orsi, S., Haas, D., Hajdas, W. et al. (2011) “Response of the Compton Polarimeter POLAR to Polarized Hard X-rays,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 648, 1, 139–154. doi: [10.1016/j.nima.2011.04.012](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.04.012).
- (2009b) “The Fermi Gamma-Ray Burst Monitor,” *The Astrophysical Journal*, 702, 1, 791–804. doi: [10.1088/0004-637X/702/1/791](https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/791).
- Lynch, G. R. & Dahl, O. I. (1991) “Approximations to Multiple Coulomb Scattering,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 58, 1, 6–10. doi: [10.1016/0168-583X\(91\)95671-Y](https://doi.org/10.1016/0168-583X(91)95671-Y).
- Nagayoshi, T., Kubo, H., Miuchi, K. et al. (2004) “Development of  $\mu$ -PIC and Its Imaging Properties,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 525, 1-2, 20–27. doi: [10.1016/j.nima.2004.03.019](https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.03.019).
- Avdeichikov, V., Bergholt, L., Guttormsen, M. et al. (1994) “Light Output and Energy Resolution of CsI, YAG, GSO, BGO and LSO Scintillators for Light Ions,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 349, 1, 216–224. doi: [10.1016/0168-9002\(94\)90623-8](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90623-8).
- Tanimori, T., Mizumura, Y., Takada, A. et al. (2017) “Establishment of Imaging Spectroscopy of Nuclear Gamma-Rays Based on Geometrical Optics,” *Scientific Reports*, 7, 1, 41511. doi: [10.1038/srep41511](https://doi.org/10.1038/srep41511).
- Uchida, T. (2008) “Hardware-Based TCP Processor for Gigabit Ethernet,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55, 3, 1631–1637. doi: [10.1109/TNS.2008.920264](https://doi.org/10.1109/TNS.2008.920264).
- Yoshikawa, K. (2017) 「MeV ガンマ線望遠鏡 ETCC における新トリガー方式の開発と不感時間削減」.
- Tsuda (2022) 「MeV ガンマ線天体観測実験 SMILE-3 に向けた高エネルギー分解能を目指した MPPC シンチレーション検出器開発」.
- Sato, T. (2016) “Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes,” *PLOS ONE*, 11, 8, e0160390. doi: [10.1371/journal.pone.0160390](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160390).
- Ueno, K. (2011) “Development of a Wide Band MeV Gamma-Ray Based on a Gaseous Time Projection Chamber and a Scintillation Camera.”
- Katoh, M., Ota, H., Yamazaki, J. et al. (2024) “Light Source Developments at UVSOR BL1U,” *Journal of Physics: Conference Series*, 2687, 3, 032005. doi: [10.1088/1742-6596/2687/3/032005](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2687/3/032005).
- Ester, M., Kriegel, H.-P., & Xu, X. (1996) “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise,” 226–231.