

修士論文

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

京都大学大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

吉川 慶

2017 年 1 月 26 日

## 論文要旨

ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発であり、ミリ秒単位で激しく変動する天体であり、エネルギーフラックスのピークを MeV 領域に持つ。放射モデルの解明には MeV 領域の観測が必要であるが、この領域の観測はコンプトン望遠鏡 COMPTEL 以降停滞している。その原因としてコンプトン散乱の測定が難しく、従来の検出器では散乱過程の全物理量を測定できず、到来方向が不明確である。さらに宇宙線と衛星筐体の相互作用により多量の雑音放射線が生じることが挙げられる。これらを打開するには、事象ごとに到来方向を決定することと、ガンマ線以外の事象は強く排除することが必要である。我々は次世代の MeV ガンマ線望遠鏡として、それが可能な電子飛跡検出型のコンプトン望遠鏡 ETCC の開発を行っている。前段のガスを用いた Time Projection Chamber (TPC) でコンプトン散乱を捉え、反跳電子の飛跡とエネルギーを取得し、後段のシンチレータで散乱ガンマ線を吸収し、コンプトン散乱における全物理量を測定する。TPC でエネルギー損失率を得ることで粒子識別を行い、TPC で止まった電子であることを保証し、散乱運動学テストにより、コンプトン散乱イベントであることを保証している。 現行の ETCC では、シンチレータのヒットでトリガーが発生する。しかし ETCC のデータ収集システムにおけるシンチレータは TPC より検出頻度が二桁程度高いため、トリガーの大半は TPC にデータが存在せず、不感時間はシンチレータの検出頻度に依存している。また、TPC とシンチレータはともに VME を用いてデータを収集しているが、その通信速度が遅いことも不感時間が増やす要因となっている。この二つを解決するには、TPC でトリガーを生成すること、データ転送の高速化が必要である。ミリ秒単位で変動する GRB の観測に向けて、数 kHz でのデータ取得を目標に、TPC、シンチレータそれぞれに新回路を開発、トリガーを TPC で発生する方式に変更した。さらに、ギガビットイーサネットですデータを送るようになったことで、データ収集率が 1 kHz の場合に、不感時間を 3.3 % に改善できた。またシンチレータは波形記憶 ADC を導入、波形の立ち上がり時刻から TPC のドリフト時間を求められるように変更し、TPC トリガーの問題であったドリフト時間不定問題を解決した。シンチレータ回路一つに対して、計数率が 3.0 kHz でデータが取得でき、高計数率トリガーを実現した。本論文では TPC トリガー ETCC の原理実証およびその性能評価について報告する。

# 目次

論文要旨	i
<b>第 1 章</b> <b>ガンマ線バーストと MeV 領域の観測機器</b>	<b>1</b>
1.1 <b>ガンマ線バースト</b> . . . . .	1
1.1.1    初期放射の発見 . . . . .	1
1.1.2    BATSE の全天観測 . . . . .	2
1.1.3    残光の発見 . . . . .	3
1.1.4    発生源の候補天体 . . . . .	4
1.1.5    放射のシナリオ . . . . .	5
1.2 <b>これまでの観測機器</b> . . . . .	8
1.2.1    コーデットマスク法 . . . . .	8
1.2.2    コンプトン法 . . . . .	9
1.2.3    これまでの観測機器の問題点と次世代観測機器への要求 . . . . .	11
<b>第 2 章</b> <b>電子飛跡検出型コンプトンカメラ</b>	<b>13</b>
2.1    検出原理 . . . . .	13
2.2 <b>ETCC の構成</b> . . . . .	15
2.2.1    散乱体と吸収体の選択 . . . . .	15
2.2.2    ガス飛跡検出器 . . . . .	15
2.2.3    シンチレータ . . . . .	17
2.3 <b>SMILE 実験</b> . . . . .	20
2.3.1    現行モデル SMILE-II . . . . .	20
2.3.2    SMILE-II データ収集方法 . . . . .	25
2.4 <b>デッドタイム削減のための新トリガー方式とその要求</b> . . . . .	28
<b>第 3 章</b> <b>ガス飛跡検出器読み出し回路</b>	<b>30</b>
3.1    SMILE-II の回路のデータ収集方法と問題点 . . . . .	30
3.2 <b>新読み出し回路</b> . . . . .	31
3.2.1    入出力信号の確認 . . . . .	32
3.2.2    ベースラインおよびスレッシュホールド評価 . . . . .	33
3.2.3    飛跡とエネルギーの取得 . . . . .	35
3.2.4    不感時間の測定 . . . . .	37
3.2.5    通信法の改善による不感時間削減 . . . . .	38

---

第 4 章	シンチレータ回路	40
4.1	現行基板 . . . . .	40
4.1.1	問題点・改善点 . . . . .	40
4.2	新回路開発 . . . . .	41
4.2.1	線形性の確認 . . . . .	42
4.2.2	波形のフィッティング . . . . .	46
4.2.3	重心演算による位置決定とエネルギー較正 . . . . .	46
4.2.4	時間情報の取得 . . . . .	49
4.2.5	不感時間 . . . . .	50
第 5 章	TPC トリガーでの ETCC 試験	52
5.1	原理検証実験 . . . . .	52
5.1.1	セットアップ . . . . .	52
5.1.2	取得できる事象例 . . . . .	52
5.2	事象の識別とイメージング . . . . .	56
5.2.1	検出順序 . . . . .	56
5.2.2	カット条件とイメージング . . . . .	56
5.3	不感時間 . . . . .	60
第 6 章	まとめと今後	61
	謝辞	62
	参考文献	63

# 目次

1.1	BATSE での GRB の観測例 . . . . .	1
1.2	BATSE が観測した GRB の $T_{90}$ 分布と全天マップ . . . . .	2
1.3	GRB990123 のスペクトル . . . . .	3
1.4	BATSE が観測した GRB の Band 関数パラメータ分布 . . . . .	3
1.5	<i>BeppoSAX</i> が観測した GRB970228 の X 線残光イメージ . . . . .	4
1.6	可視光近赤外望遠鏡 WHT が観測した GRB97022 のイメージ . . . . .	4
1.7	GRB030329 のライトカーブ [16]。爆発から 3 週間後の可視光スペクトルは Ic 型 SNR の特徴と似ていた。 . . . . .	5
1.8	GRB050309B の可視光イメージ [17]。赤丸が BAT で検出した位置。青丸が母銀河と思われる楕円銀河の位置。 . . . . .	5
1.9	GRB の放射モデル . . . . .	6
1.10	シンクロトロン放射のスペクトルおよび GRB030329 の残光のスペクトル。 [20][21] . . . . .	7
1.11	GRB100826A のライトカーブおよびモジュレーションカーブ . . . . .	7
1.12	コーデッドマスクの概念図 [27] . . . . .	8
1.13	BAT/ <i>Swift</i> のコーデッドマスク [28] . . . . .	8
1.14	COMPTEL の模式図 [8] . . . . .	10
1.15	シミュレーションによる TOF 分布 [10] . . . . .	10
1.16	コンプトン法の概念図 [29] . . . . .	10
1.17	コンプトン法によるイメージング概念図 . . . . .	10
1.18	COMPTEL/ <i>CGRO</i> が観測した GRB910505 . . . . .	11
1.19	コンプトン散乱における偏光 . . . . .	12
2.1	ETCC 概念図 . . . . .	13
2.2	ガス飛跡検出器内の荷電粒子の飛程とエネルギー損失率 . . . . .	15
2.3	$\mu$ PIC と GEM による TPC 概念図 . . . . .	16
2.4	TPC 外観 . . . . .	16
2.5	10 cm 角 $\mu$ PIC . . . . .	16
2.6	10 cm 角 GEM . . . . .	16
2.7	ガス飛跡検出器用読み出し基板 . . . . .	17
2.8	TPC 読み出し ASIC とその概要 . . . . .	17
2.9	取得できる典型的な飛跡 . . . . .	18
2.10	(左) GSO シンチレータと H8500。(右) 読み出しに使用している抵抗チェーン . . . . .	19

2.11	シンチレータ読み出し回路 . . . . .	19
2.12	シンチレータの高電圧供給基板 . . . . .	20
2.13	SMILE-I 実測による宇宙拡散ガンマ線と大気ガンマ線のフラックス . . . . .	21
2.14	SMILE-II ETCC . . . . .	22
2.15	SMILE-II による $^{137}\text{Cs}$ のスペクトル . . . . .	22
2.16	一般的なガンマ線検出器と電子飛跡検出型コンプトンカメラのちがひ。 . . . .	23
2.17	ETCC による複数の異なる線源の観測。 . . . .	23
2.18	SPring-8 における偏光測定実験セットアップと得られたスペクトル [37] . . . . .	24
2.19	偏光測定実験で得られたモジュレーションカーブ [37]。 . . . .	24
2.20	トリガー回路とデータ通信模式図 . . . . .	26
2.21	ETCC のデータ収集論理 . . . . .	26
2.22	ETCC におけるデータ収集のための信号 . . . . .	27
2.23	TPC トリガー概念図 . . . . .	28
2.24	SMILE-II データ収集システムの不感時間のデータ収集レート依存性。 . . . .	29
3.1	TPC 用基板 . . . . .	31
3.2	TPC 新読み出し回路 . . . . .	31
3.3	旧基板と新基板のハードウェアの変更点。 . . . .	31
3.4	新基板アナログ信号 . . . . .	32
3.5	新基板におけるデータ収集の模式図 . . . . .	32
3.6	新基板におけるデータ収集のための実際の信号 . . . . .	33
3.7	TPC 回路におけるアナログ波形のオフセット調整回路。 . . . .	33
3.8	TPC ベースラインの変化 . . . . .	34
3.9	ベースラインに対する DAC 値を変化させたときの熱雑音によるヒット判定。 . . . .	34
3.10	ベースラインに対する DAC 値を変化させたときのヒット判定を 128 ストリップ分表示したグラフ。 . . . .	34
3.11	$V_{th}$ を変化させたときのベースラインに対するヒット判定 . . . . .	35
3.12	TPC のデータ取得実験セットアップ。 . . . .	35
3.13	新回路で取得した飛跡の例 . . . . .	36
3.14	エネルギー較正曲線およびスペクトル . . . . .	36
3.15	各領域ごとの $^{133}\text{Ba}$ の 30.9 keV の分解能 . . . . .	36
3.16	不感時間測定のセットアップと結果 . . . . .	37
3.17	DAQ Run 信号の成分分析。 . . . .	38
3.18	TCP 通信でのデータ取得の模式図。 . . . .	38
3.19	TCP 再送時間タイムアウト時間を変化させて、線源強度を一定にしたときの不感時間。 . . . .	39
3.20	従来基板と新回路での不感時間の比較。 . . . .	39
4.1	ダイノード信号用デジタル回路 . . . . .	41
4.2	アナログ信号波形整形増幅回路 . . . . .	42
4.3	回路シミュレータによる波形。 . . . .	42
4.4	シンチレータ用新回路の写真 . . . . .	43

4.5	線形性確認のためのセットアップ	44
4.6	テストパルス入力試験	44
4.7	1PMT におけるテストパルスと ADC ch の関係。	45
4.8	1PMT におけるテストパルスの大きさに対する ADC ch とフィット直線との差分。	45
4.9	線源 $^{137}\text{Cs}$ を用いて取得した実際の波形	46
4.10	シンチレータのガンマ線入射位置の再構成。	47
4.11	ピクセル単位の $^{137}\text{Cs}$ のスペクトル	47
4.12	シンチレータ各ピクセルのエネルギー較正	48
4.13	PMT 単位での各線源のスペクトル	48
4.14	各エネルギーごとのエネルギー分解能	49
4.15	シンチレータの立ち上がりからトリガーがはいるまでの時間の求め方	49
4.16	セルフトリガーによる時間分解能	50
4.17	シンチレータの不感時間計測のセットアップと測定結果	51
5.1	実験系模式図。ネットワークを用いて通信している。トリガーコントロールは NIM モジュールで行っている。	53
5.2	ETCC でのトリガーコントロール信号のチャート	53
5.3	実験装置の配置図	54
5.4	ETCC の取得データの例 (muon)	54
5.5	ETCC の取得データの例 (Compton event)	55
5.6	ETCC の取得データの再構成例	55
5.7	(左)TPC の飛跡の位置。(右)シンチレータの立ち上がりから TPC からのトリガーがかかるまでの時間。	56
5.8	TPC とシンチレータのヒット順序によるタイミングチャート、およびシンチレータの立ち上がりから TPC からのトリガーがかかるまでの時間の模式図。	57
5.9	TPC に対するエネルギー損失率による事象の弁別	58
5.10	TPC とシンチレータでそれぞれ取得したエネルギーの分布	58
5.11	カット前と全カット適応後のバックプロジェクションイメージ。	59
5.12	ETCC として動作させたときの $^{137}\text{Cs}$ 線源のスペクトル	59
5.13	ETCC として動作させたときの $^{137}\text{Cs}$ 線源のスペクトル	60

# 表目次

2.1	SMILE-II 性能 . . . . .	24
2.2	TPC 回路に送受信される信号 . . . . .	25
2.3	HA 回路に送受信される信号 . . . . .	28
3.1	新 TPC 回路に送受信される信号 . . . . .	31
4.1	クリアパルス社製 80256v2 . . . . .	40
4.2	新シンチレータ回路に送受信される信号 . . . . .	41

## 第 1 章

# ガンマ線バーストと MeV 領域の観測機器

宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (Gamma-ray burst : GRB) は経験的に MeV 領域にエネルギーフラックスのピークを持つことが知られている。1967 年に核実験探査衛星 VELA によって発見 [2] されてから半世紀余り経つ。本章では、現在までに分かっている GRB の性質とそれを明らかにした観測手法を説明し、物理機構のさらなる理解のために求められる次世代の検出器への要求について述べる。

### 1.1 ガンマ線バースト

#### 1.1.1 初期放射の発見

GRB は数百 keV から数十 MeV までの MeV 領域に中心エネルギーを持つ突発天体である。図 1.1 に示すように、ミリ秒単位で激しく変動し、継続時間は数秒から百秒程度である。1967 年に地上における核実験を監視するために打ち上げられた衛星 VELA(5A、5B、6A、6B) によって偶然発見され、4 機の検出時間の差から到来方向を決定し、太陽系外であることが判明した [2]。

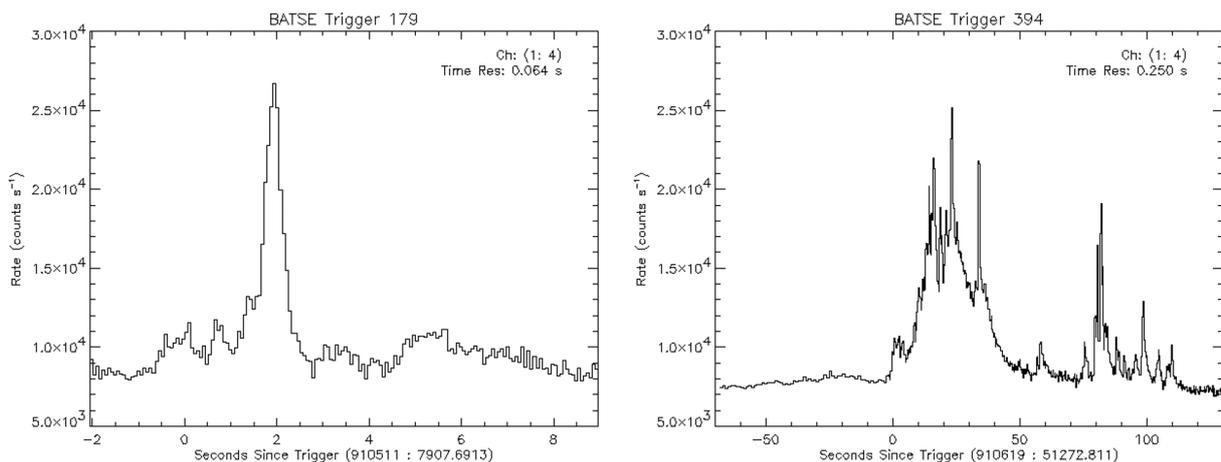


図 1.1 BATSE/CGRO で観測された 2 例の GRB のライトカーブ [3]。数秒間だけの変動する天体もあれば百秒以上変動する天体もある。

### 1.1.2 BATSE の全天観測

1991年にガンマ線観測衛星 *CGRO* に搭載されていた突発天体検出器 BATSE により全天観測が行われた。BATSE によって10年で2704個のGRBを観測 [4] され、発生頻度が1日1個程度であること、全天に等方的に分布していること、継続時間で2種類に分別できることが分かった [3]。等方的であるということは、銀河系のディスクより近傍、もしくは宇宙論的距離のどちらかで起こっていることが示唆される。GRBの継続時間を評価するのに  $T_{90}$  という値が使われている。 $T_{90}$  とはバーストのエネルギーフルエンスの内5%から95%までの90%を含む時間のことをいう。図1.2左は  $T_{90}$  分布を表している。0.3秒あたりと50秒あたりにピークを持ち、2秒を境に2種類に区別することができる。 $T_{90} < 2$  秒の天体を Short GRB、 $T_{90} > 2$  秒の天体を Long GRB と定義がなされた。GRBのスペクトルの特性として、Band関数(式1.1)と呼ばれる二つのべき関数をつないだ関数でフィットするとよく合うことが経験的に理解されている [7]。

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

パラメータは低エネルギー側の指数  $\alpha$ 、高エネルギー側の指数  $\beta$ 、ピークエネルギー  $E_{peak}$ 、規格化定数  $A$  である。具体例として GRB990123 を挙げる。図1.3はそのフラックス [ $\text{photons cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MeV}^{-1}$ ] およびエネルギーフラックス [ $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] を表している。Band関数でフィットできていることがわかる。BATSEが観測したGRBでは全てBand関数フィットされており、パラメータの分布が求められている [4]。図1.4はその分布図を示しており、その中心はそれぞれ  $\alpha \sim -1$ 、 $\beta \sim -2.5$ 、 $E_{peak} \sim 200\text{keV}$  である。BATSEは角度決定精度が数度程度で、天体の特定ができなかった。そのため、角度決定精度の良い検出器が待望されていた。

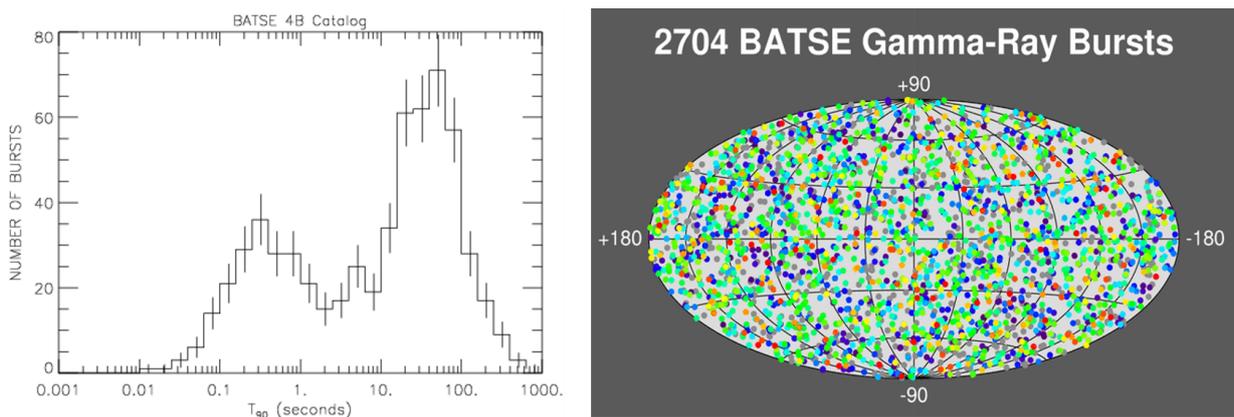


図1.2 BATSE/*CGRO* が観測した2704個のGRBの分布 [3]。左図は  $T_{90}$  分布。2秒を境に分かれている。右図はGRBの全天マップ。等方的に分布していることが分かる。

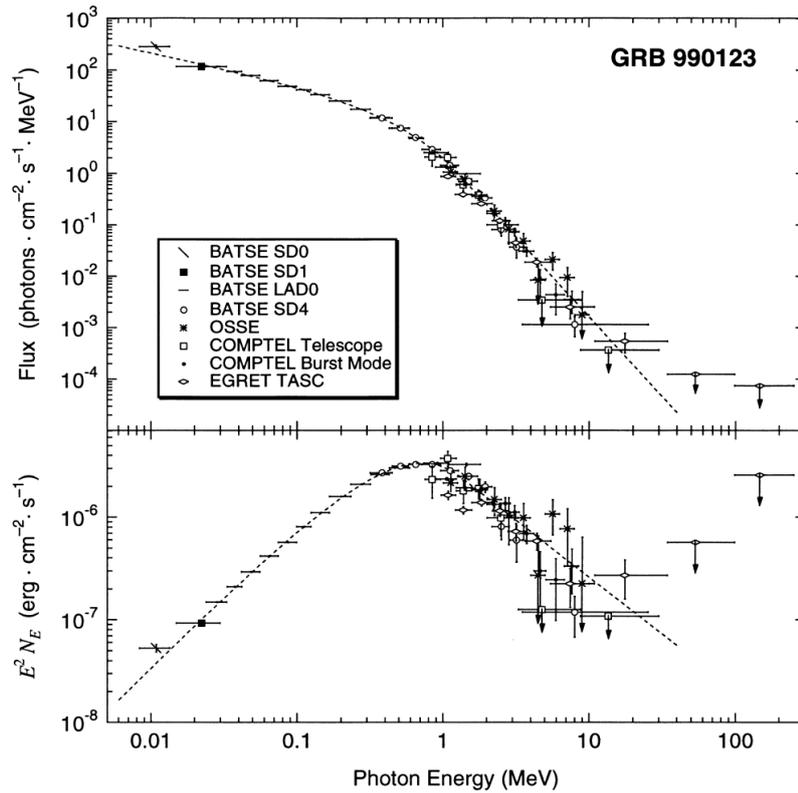


図 1.3 *CGRO* で観測した GRB990123 のスペクトル [12]。BATSE のデータを Band 関数によってフィットして、 $E_{peak} = 720 \text{ keV}$ 、 $\alpha = -0.60$ 、 $\beta = -3.11$  と求められている。

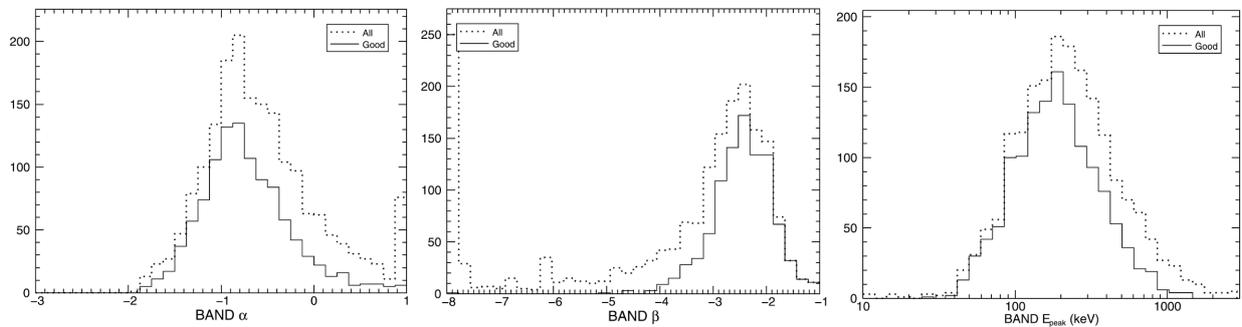


図 1.4 BATSE/*CGRO* で観測した GRB のスペクトルを Band 関数でフィットしたときのパラメータの分布 [4]。左図が低エネルギー側のべき  $\alpha$ 、中央図が高エネルギー側のべき  $\beta$ 、右図がピークのエネルギー  $E_{peak}$  をそれぞれ表している。点線は観測した全ての GRB、実線はフィットにおける  $\chi^2$  統計が  $3\sigma$  以内の GRB である。

### 1.1.3 残光の発見

1997 年にイタリアとオランダが共同で天文衛星 *BeppoSAX* を打ち上げた。この衛星には広視野 X 線望遠鏡 WFC と、優れた方向決定性能を持つ X 線望遠鏡 NFI が搭載されている。GRB970228 の方角を観測したところ、数日間継続する X 線放射を発見 (図 1.5) し、発生方向を 0.02 度以下という精度で決定することができた [5]。この放射は時間によってべき関数的に減光する様子が観測され、GRB に伴って放つ残光 (afterglow) と確認された。残光は、X 線だけでなく、可視光、電波などで数時間から数日にわ

たって観測されることがあり、観測時間が伸びたため、得られる情報が増えた。GRB90228 ではハッブル宇宙望遠鏡による追観測 (図 1.6) により、周辺に母銀河があることが分かった [25]。また分光によって赤方偏位  $z$  を求めて、地球から 80 億光年離れていることが明らかになった [13]。このことから、GRB の多数は宇宙論的距離にあることが示された。

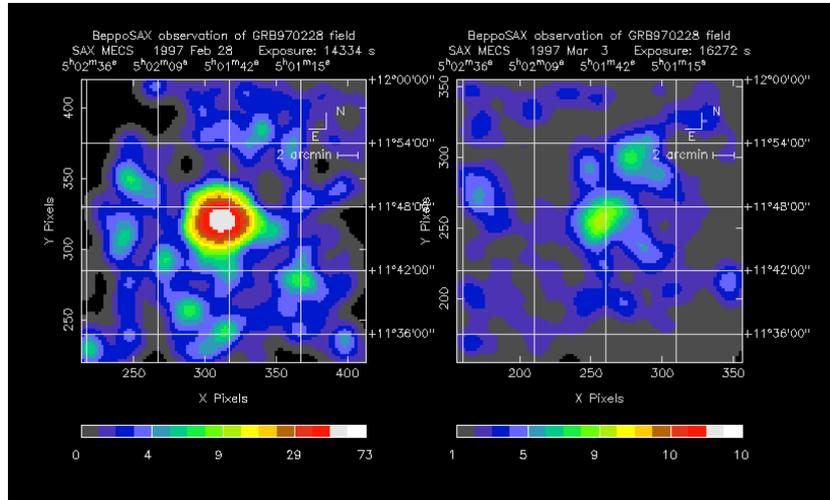


図 1.5 *BeppoSAX* が GRB970228 を観測した X 線イメージ [5]。左図がバーストから 8 時間後、右図がバーストから 3 日後の残光を示している。

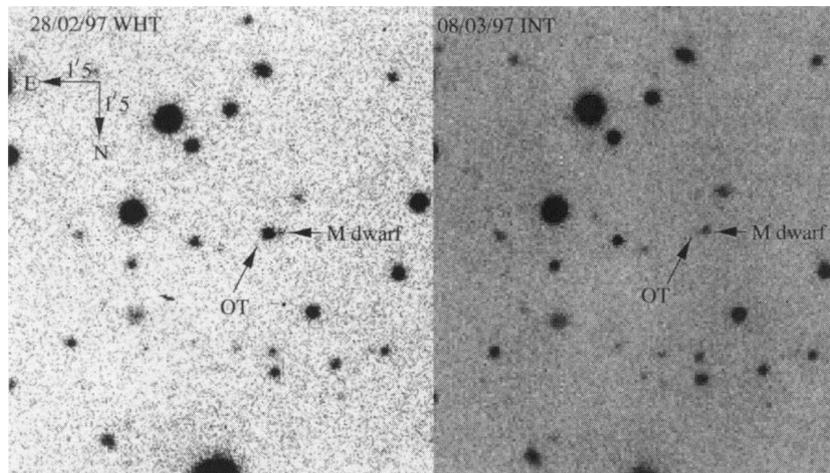


図 1.6 可視光近赤外望遠鏡 WHT が GRB970228 を観測した可視光 V バンドイメージ [6]。OT が GRB の位置である。左図がバースト当日、右図がバーストから 8 日後を表している。約 7 分角四方に広がっている。

#### 1.1.4 発生源の候補天体

GRB には short と long の 2 種類があることは前述の通りである。この違いについて観測から分かったことがある。高エネルギー突発天体探査衛星 HETE-II は 2003 年に、Long GRB である GRB030329 を検出した。この GRB は、今まで BATSE で観測した GRB と比べて上位 0.2% に入る強度だった。HETE-II は検出から 72 分という短時間でほかの観測機器にアラートをすることができた。追観測は可

視光望遠鏡 FORS/VLT などで行なわれた [16]。図 1.7 はその時のライトカーブの時間変化を表している。爆発から 3 週間後のスペクトルでは Ic 型の超新星 SN1998bw と似ていることがわかる。そしてモデルフィットによって求められた衝撃波速度は大きな値を示し、大質量星の超新星爆発であることが示唆された。このような例から Long GRB は大質量星の Ic 型超新星爆発ではないかと考えられている。short GRB については、2004 年に打ち上げられた GRB アラート検出器 BAT/*Swift* により GRB050509B が精度良く観測されている。図 1.8 は可視光による追観測イメージである。BAT による検出した位置の近くに楕円銀河が観測された。楕円銀河は古い銀河とされ、超新星爆発のような現象はあまり起こらない。このことから、中性子星同士や、中性子星とブラックホールの衝突ではないかと考えられているが、観測例が少ないために同定するに至っていない [17]。

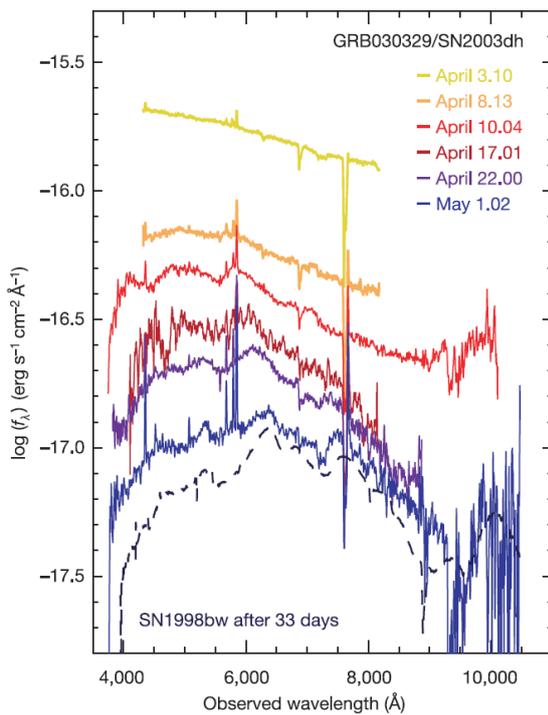


図 1.7 GRB030329 のライトカーブ [16]。爆発から 3 週間後の可視光スペクトルは Ic 型 SNR の特徴と似ていた。

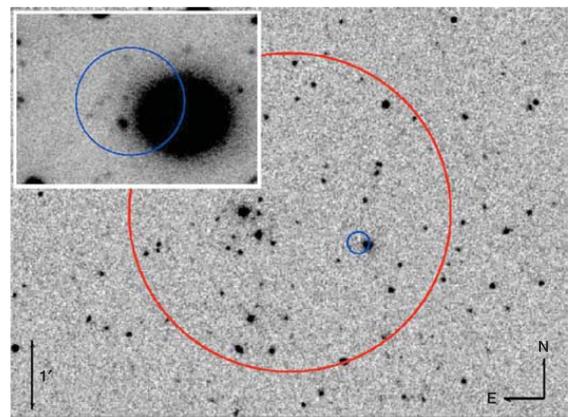


図 1.8 GRB050309B の可視光イメージ [17]。赤丸が BAT で検出した位置。青丸が母銀河と思われる楕円銀河の位置。

### 1.1.5 放射のシナリオ

現在考えられているモデルとして、火の玉モデルを紹介する [18]。図 1.9 にモデルの模式図を示す。GRB はミリ秒スケールで時間変動をしているため、放射領域のスケールとして、 $1 \text{ [ms]} \times 3 \times 10^8 \text{ [m/s]} \sim 10^5 \text{ [m]}$  と概算できる。にこのスケールから大質量星の重力崩壊と仮定する。解放された重力エネルギーはジェットに変換され、ジェットから放射された速度に差がある粗密波が放出される。遅いプラズマに速いプラズマが追いつくと衝撃波 (internal shocks) が形成される。この衝撃波面を電子が行き来することで加速される。そこに磁場が存在すると仮定する。磁場中を電子が運動していると、ローレンツ力によって加速度を受けて、磁力線に巻き付いた形で螺旋運動をすることになる。このとき電子が出す放射がシンクロトロン放射である。この放射は、単位周波数あたりのフラックス  $F_\nu$  を用いて次のように書ける [20]。

$$F_\nu = \begin{cases} \nu^{\frac{1}{3}} & \text{if } \nu_m > \nu \\ \nu^{-\frac{p-1}{2}} & \text{if } \nu_c > \nu > \nu_m \\ \nu^{-\frac{p}{2}} & \text{if } \nu > \nu_m \end{cases} \quad (1.2)$$

ここで、 $\nu_m$  は GRB の初期放射におけるべき関数の折れ曲がりが起こる値である。また、電子の冷却の仕方がエネルギーに依存していて、高エネルギーの方が早く冷却される。 $\nu_c$  は冷却の効果の有無を示す区切りとして、典型的な値を表したものである。p は電子のエネルギー分布  $E^{-p}$  における指数である。理論的に求めたグラフと実際の観測結果を図 1.10 示す。前述の GRB030329 のスペクトルがフィットされ、残光がシンクロトロン放射である強い証拠となっている。シンクロトロン放射は直接観測可能な物理量である偏光度  $\Pi$  と関係している。偏光とは、電磁波がある方向を向いて進むときにその電場および磁場の方位角分布が特定の方向に偏っていることをいう。一般に偏光度は次のように書くことができる。

$$\Pi = \frac{P_\perp - P_\parallel}{P_\perp + P_\parallel} \quad (1.3)$$

単位立体角あたり単位周波数あたりの放射パワーのうち、磁場に垂直な成分を  $P_\perp$ 、平行な成分を  $P_\parallel$  としている。放射パワーとフラックスは比例関係にあるため、偏光度と関係する。GRB100826A の初期放射において、GRB から世界で初めて偏光が検出された [21]。その結果について、図 1.11 に示す。偏光は放射領域や磁場が非対称でないとき大きな値を示さないため、GRB の理解への大きな手掛かりとなる。

ここまでのまとめとして、モデルの制限のためにこれからの観測に望むことを述べる。GRB の初期放射と残光の両方の観測が重要であるが、GRB であるとアラートするために初期放射からの観測が求められる。初期放射のピークエネルギーは MeV 領域にある。short GRB は統計が少ないので観測が期待されている。放射領域や磁場の構造を理解するために偏光も同時に観測できることが望まれる。ジェットの駆動機構、衝撃波の物理、ジェットの組成（電子、陽電子）を理解を目指したい。

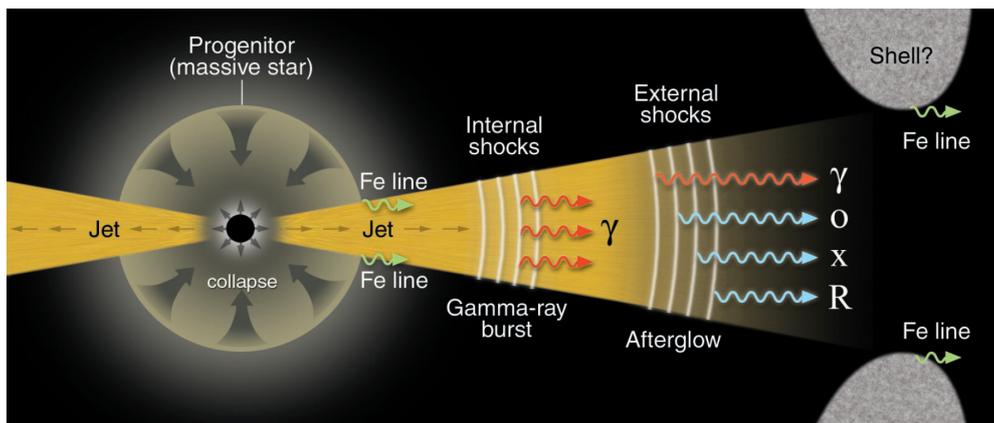


図 1.9 GRB の放射モデル [18]。

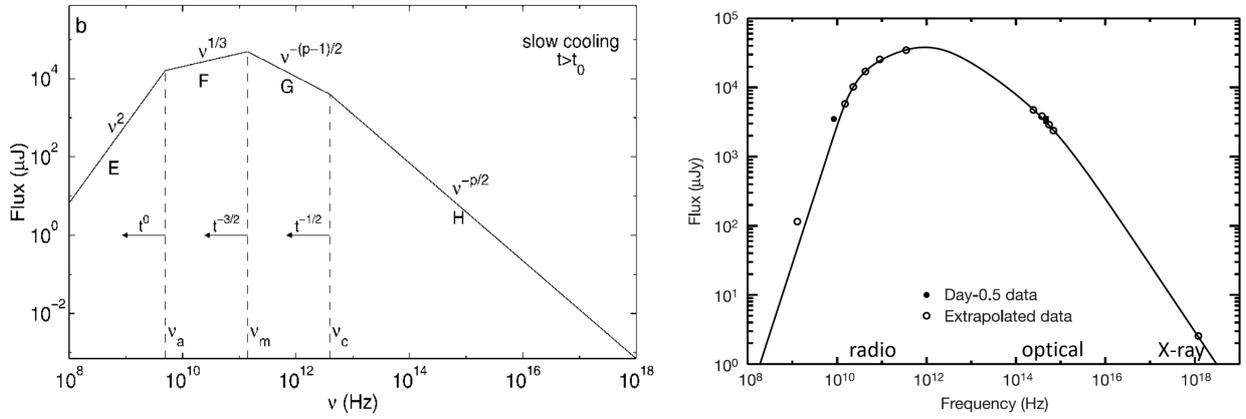


図 1.10 シンクロトロン放射のスペクトルおよび GRB030329 の残光のスペクトル。[20][21]

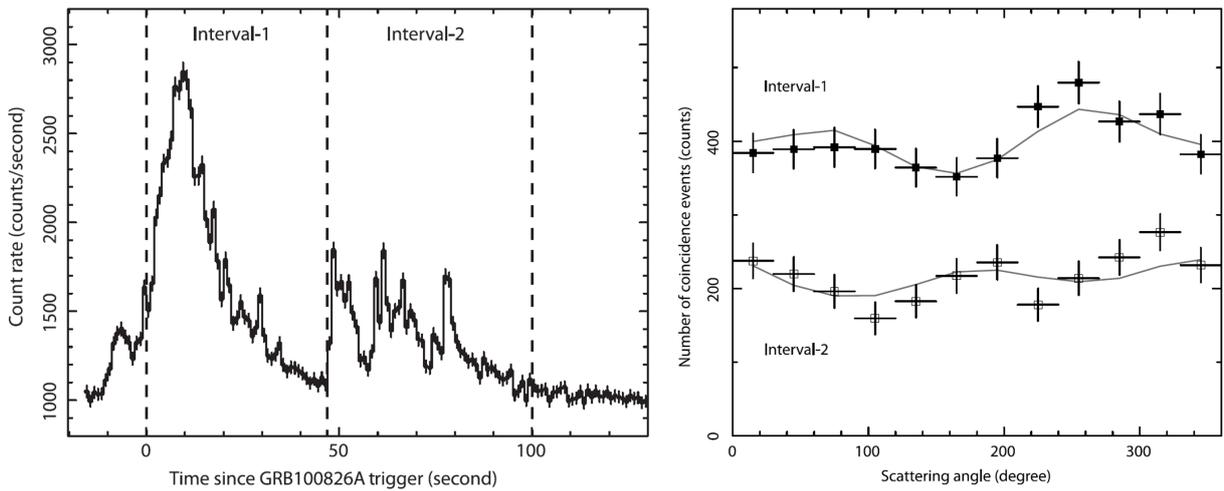


図 1.11 GRB100826A のライトカーブおよびモジュレーションカーブ。[22]Interval-1 は偏光度  $25 \pm 15\%$ 、偏光方向  $159 \pm 18$  度、Interval-2 は偏光度  $31 \pm 21\%$ 、偏光方向  $75 \pm 20$  度である。偏光方向が変わっていることがわかる。

## 1.2 これまでの観測機器

ガンマ線は大気を透過できない。そのため、気球や衛星で観測をされてきた。MeV ガンマ線は波長が fm 程度で原子核の大きさと同程度なので、透過力が高く鏡を素通りすることが多いため、鏡で集光して、有効面積を稼いで二次元検出器によって撮像することが難しい。X 線のように、全反射を利用した鏡を使用するにも、焦点距離が  $10^9$  m と実現が難しい距離になってしまう [23]。そこで、ピンホールカメラを応用して統計的に方向を知るコーデッドマスク法と、散乱体と吸収体の役割をする二つの検出器からなるコンプトン法が用いられてきた。

### 1.2.1 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発展させた方法である (図 1.12)。ピンホールカメラは阻止能の高い物質を検出器の前に置き、その後ろに検出器を置く。入射できる方向を絞ることで、到来方向を二次元の位置情報に変換して検出することができる。ピンホールの径を小さくすれば、角度分解能は上がるが、有効面積はピンホールの開口面積で決まるため、犠牲となる。コーデッドマスク法は開口部をランダムなパターン状にし、ピンホールの数を増やすことで、有効面積を大きくできるメリットがある。また、ピンホールカメラとコーデッドマスク法はともに、検出器に対するマスクの立体角を広げてやることで、容易に視野を広げることができる。一方で到来方向と検出器位置の 1 対 1 対応性はなくなるため、到来方向の決定には検出器にできるピンホールの影の強度分布を用いる。そのため、観測したい天体以外からの、視野内の信号を全てバックグラウンドとして計上してしまう。視野の大きさとバックグラウンドの量はトレードオフの関係にある。また、マスクの物質を厚くすることが困難なため、数百 keV 以上の測定は難しい。図 1.13 は BAT/*Swift* のコーデッドマスクである [28]。マスクと撮像部の距離は 1 m 離してある。エネルギー帯域は 15 keV から 150 keV で、視野は  $\sim 2$  str である。

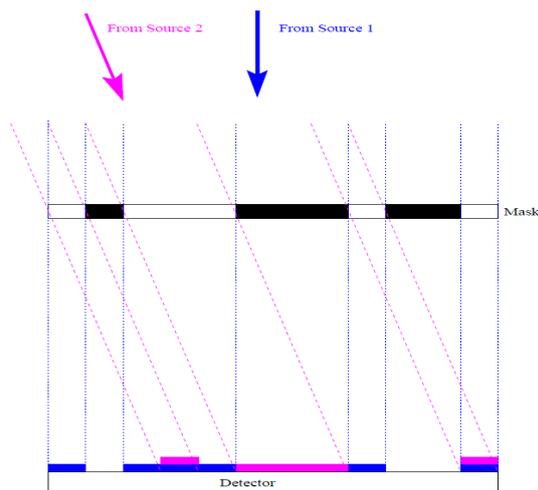


図 1.12 コーデッドマスクの概念図 [27]



図 1.13 BAT/*Swift* のコーデッドマスク [28]

## 1.2.2 コンプトン法

コンプトン散乱を利用したイメージング法である。この領域ではコンプトン散乱が優位なため、光電吸収を利用するより検出効率がよい。コンプトン法には2段の検出器を用いる(図 1.14)。1段目に原子番号の小さな検出器を置き、コンプトン散乱をさせる。この時に散乱点の位置と反跳電子のエネルギーを測定する。2段目に原子番号の大きな検出器を置き、散乱ガンマ線を光電吸収させて、吸収点の位置とエネルギーを測る。入射ガンマ線のエネルギーを  $E_0$ 、反跳電子のエネルギーを  $E_e$ 、散乱ガンマ線のエネルギーを  $E_g$  として、散乱角を  $\phi$  と書くと、エネルギー保存則と運動量保存則から次の関係式を得られる。

$$E_0 = E_e + E_g \quad (1.4)$$

$$\cos\theta = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_e} - \frac{1}{E_e + E_g} \right) \quad (1.5)$$

ここで  $m_e c^2$  は電子の静止エネルギーである。この式から入射ガンマ線の方向を円環上に制限することができる。COMPTEL は 1991 年にガンマ線観測衛星 CGRO に搭載された検出器である(図 1.15)。コンプトン法のおかげで、視野内からのバックグラウンドをある程度抑えることができ、MeV 領域で世界最高の感度を有している [30]。前段は液体シンチレータ NE213A を用いたシンチレーション検出器で、後段は NaI シンチレーション検出器を置いている。液体シンチレータは直径 27.6 cm、高さ 8.5 cm の円柱状のものを 7 個で構成されていて、発光時間の違いから、中性子とガンマ線を識別してバックグラウンドの除去を行っている。NaI シンチレータは直径 28 cm 厚さ 7.5 cm の 14 個の結晶からなっている [9]。液体シンチレータと NaI シンチレータは 1.5 m 離れていて、信号が入射するタイミングの差 (Time of Flight : TOF) からバックグラウンドの除去を行っている(図 1.16)。コンプトン散乱事象では、先に液体シンチレータでコンプトン散乱を起こして反跳電子を発生させてから、散乱ガンマ線が  $1.5 \text{ [m]} / 3.0 \times 10^8 \text{ [m/s]} = 5 \text{ [ns]}$  後に NaI シンチレータに入射する。この時間関係を利用して、前段、後段の順に検出したイベントを抽出することができる [10]。コンプトン法の問題として、円環の重ね合わせでしか方向を決定することができないので最低でも 3 つ円環が必要であり、偽のピークが作られてしまうことがあげられる(図 1.17)。具体例として、GRB910505 の観測結果を図 1.16 に示す。角度分解能を定量的に評価することが難しい原因となっている。

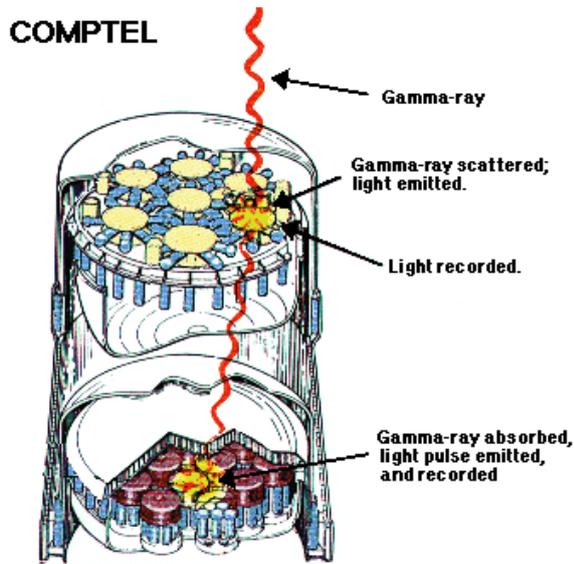


図 1.14 COMPTEL の模式図 [8]

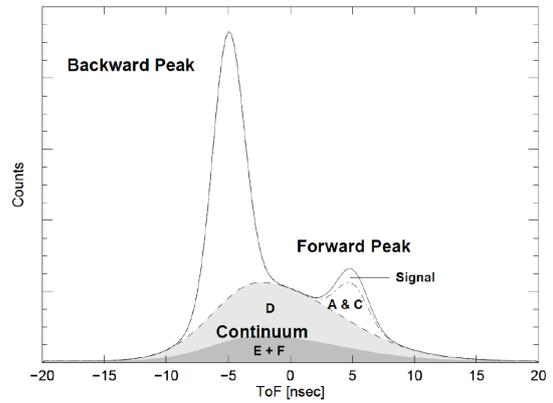


図 1.15 シミュレーションによる TOF 分布 [10]

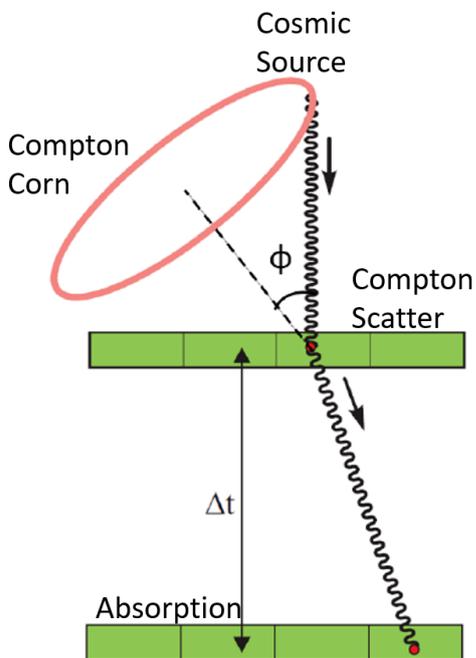


図 1.16 コンプトン法の概念図 [29]

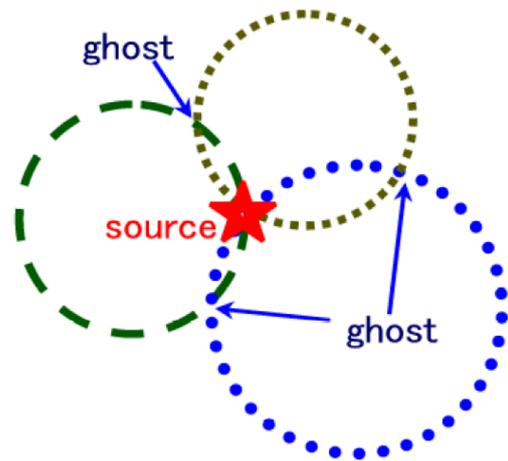


図 1.17 コンプトン法によるイメージング。円環の重ね合わせで線源を特定しているが、偽のピーク (ghost) も発生してしまっている。

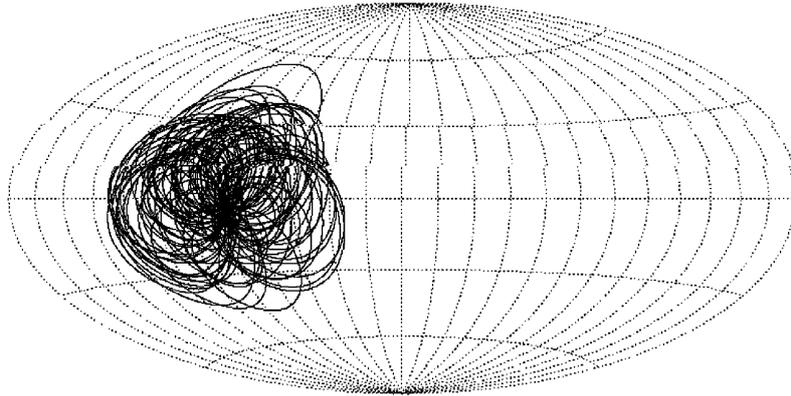


図 1.18 COMPTEL/CGRO が観測した GRB910505[11]。円環の重ね合わせで到来方向を決めている。

### 1.2.3 これまでの観測機器の問題点と次世代観測機器への要求

光子が持つ情報は4つあり、到来時刻、到来方向、エネルギー、偏光度である。これらを観測する技術はそれぞれ、測光、撮像、分光、偏光測定と呼ばれている。ガンマ線バーストからはできればすべての情報を得たい。どれかに特化して観測することもできる。ここまでに挙げた観測機器を例に挙げる。たとえば GAP/ICAROS は偏光に、FREGATE/HETE – II は広視野で測光に特化していて、撮像ができない。撮像ができない（同じ衛星内の検出器に頼る）と視野内のバックグラウンドとシグナルとを区別できない。次世代検出器としては全てができるのが理想である。

ガンマ線バーストはいつどこで起きるのか解明されていないため、広い視野で待ち受けることが重要となってくる。初期放射と残光と二つを観測することができるが、モデルの制限には、まず初期放射の観測が必要であり、中心エネルギーは MeV 領域であることが知られている。そして、残光の観測のために精度の高い方向決定能力も必要である。これまでの検出器の問題点としては、MeV 領域で低バックグラウンドとい方向決定精度が両立できていなかったことにある。コーデッドマスク法は原理的にバックグラウンド量と視野の大きさがトレードオフの関係にあり、バックグラウンドを排除することができない。コンプトン法は方向決定を円環状でしかできないために、偽のピークができてしまう。偏光検出能力を表す指標にはモジュレーションファクターがある。偏光したガンマ線に対するコンプトン散乱の散乱断面積は式 1.6 のようになる。方位角  $\phi$  がこの式に含まれているため、偏向情報を方位角分布から得られる。それが図 1.19 のモジュレーションカーブである。偏光度 100% のガンマ線が入射してきた時のモジュレーションカーブに対して式 1.7 のように定義するモジュレーションファクター  $M$  が偏光検出器の性能指標となる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \left( \frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2\sin^2\theta\cos^2\phi \right) \quad (1.6)$$

$$M = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (1.7)$$

光電効果において光電子の方向を測定することでも偏光を測ることができる。光電効果での散乱断面積は式 1.8 のように書ける。

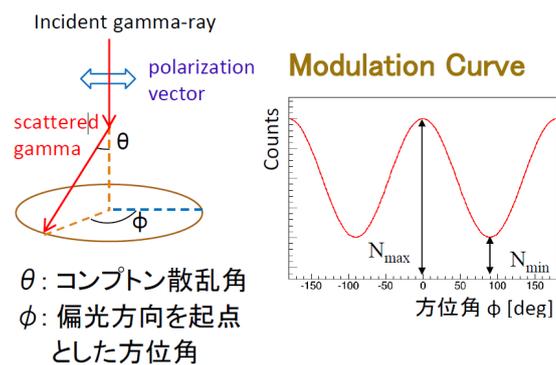


図 1.19 コンプトン散乱における偏光

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \cos^2\phi \tag{1.8}$$

コンプトン散乱と同様にしてモジュレーションファクターを求めることができる。次世代の検出器としては偏光も測れることが必要とされる。

## 第 2 章

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

前章の要求を受けて、MeV 領域で広視野、高い方向決定精度、低バックグラウンド、モジュレーションファクターの要求を満たす検出器を考える。MeV 領域はコンプトン散乱が優位に起こるために、それを利用することがバックグラウンドを減らす方向に働くため、コンプトン法の応用を目指す。コンプトン法は反跳電子の方向を検出していないために、方向を 1 角でしか決定できていない。解決策としては反跳電子の方向も測定してやり、コンプトン散乱における物理量すべてを取得することが挙げられる。そうすれば 2 つの自由度を持つ到来方向を 2 角ともで決定することができる。そこで電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron-tracking Compton Camera) を挙げる (図 2.1)。

### 2.1 検出原理

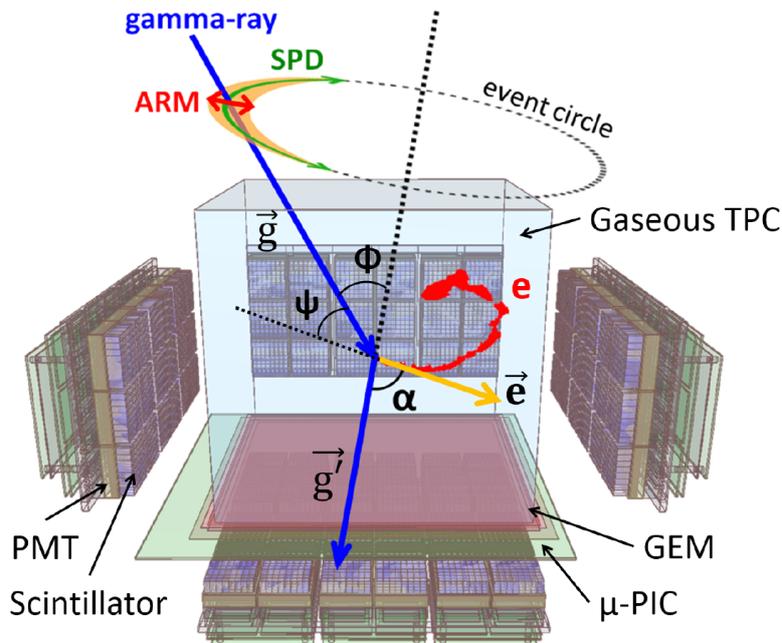


図 2.1 ETCC 概念図

理論的な方向決定の方法について述べる。入射ガンマ線のエネルギー  $E_0$  と、真の到来方向を、 $\vec{s}$ 、散乱ガンマ線のエネルギーと方向を  $E_\gamma$ 、 $\vec{g}$ 、反跳電子のエネルギーと方向を  $K_e$ 、 $\vec{e}$  と定義する。この時、

エネルギー保存則より次式を得る。

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

再構成によって求めることができる入射ガンマ線の到来方向を  $\vec{s}_{rcs}$  とすると式2.2、2.3 のように書くことができる。これはエネルギー保存則と運動量保存則から求めた式である。

$$\vec{s}_{rcs} = \left( \cos\phi - \frac{\sin\phi}{\tan\alpha} \right) \vec{g} + \frac{\sin\phi}{\sin\alpha} \vec{e} \quad (2.2)$$

$$= \frac{E_\gamma}{E_\gamma + K_e} \vec{g} + \frac{\sqrt{K_e(K_e + 2m_e c^2)}}{E_\gamma + K_e} \vec{e} \quad (2.3)$$

ここで、 $\phi$  は散乱角、 $\psi$  は電子の反跳角であり、式2.4、2.5 のように書ける。

$$\cos\phi = 1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma + K_e} \frac{K_e}{E_\gamma} \quad (2.4)$$

$$\cos\psi = \left( 1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma + K_e} \right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + m_e c^2}} \quad (2.5)$$

到来方向2角の決定精度として、ARM (Angular Resolution Measure) とSPD (Scatter Plane Deviation) を定義する。ARM は散乱角の決定精度を表し、SPD は散乱平面の決定精度を示す。この二つで到来方向を扇状に制限する指標である。定義式は以下の通りであり、これを用いて到来方向の誤差の評価を行う。

$$\Delta\phi_{ARM} = \arccos(\vec{s} \cdot \vec{g}) - \arccos\left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma + K_e} \frac{K_e}{E_\gamma}\right) \quad (2.6)$$

$$\Delta\nu_{SPD} = \text{sign}\left(\vec{g} \cdot \left(\frac{\vec{s} \times \vec{g}}{|\vec{s} \times \vec{g}|} \times \frac{\vec{s}_{rcs} \times \vec{g}}{|\vec{s}_{rcs} \times \vec{g}|}\right)\right) \cdot \arccos\left(\frac{\vec{s} \times \vec{g}}{|\vec{s} \times \vec{g}|} \times \frac{\vec{s}_{rcs} \times \vec{g}}{|\vec{s}_{rcs} \times \vec{g}|}\right) \quad (2.7)$$

$\vec{s}$  と  $\vec{g}$  とのなす角を  $\alpha$  とする。 $\alpha$  は式2.8 と式2.9 から二通り求めることができる。式2.9 は光子と電子の散乱であることを仮定しているので、 $\delta\alpha = \alpha_{geo} - \alpha_{kin}$  が大きいとコンプトン散乱運動学に反するとして、バックグラウンドとみなし除外する  $\alpha$  カットという弁別法がある。

$$\cos\alpha_{geo} = \vec{s} \cdot \vec{g} \quad (2.8)$$

$$\cos\alpha_{kin} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + m_e c^2}} \quad (2.9)$$

物質中を粒子が通過するとき、粒子は物質に対してエネルギーを落とす。このときの粒子の飛程に対するエネルギー損失率は実験的に求められている。図2.2 は横軸がエネルギー、縦軸が飛程を表す実測データである。緑線は検出器中で止まった電子、青点線は最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle : MIP) を表している。粒子によって分離できていることがわかる。これを利用して、検出器内で止まった電子であることを保証することを dE/dX カットと呼んでいる。 $\alpha$  カット、dE/dX カットを合わせて行うことでバックグラウンドを強く排除し、高い S/N での観測が可能となる。

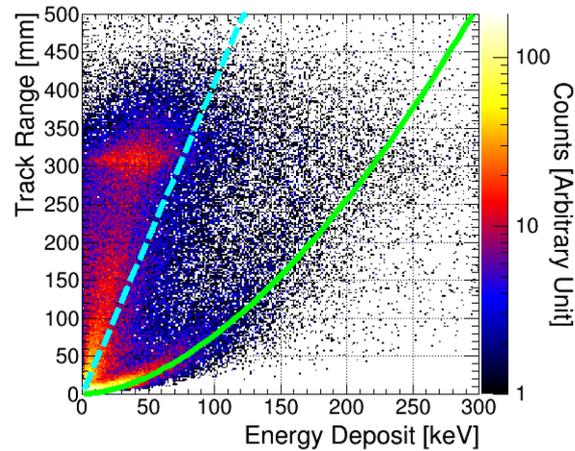


図 2.2 ガス飛跡検出器内の荷電粒子の飛程とエネルギー損失率

## 2.2 ETCC の構成

### 2.2.1 散乱体と吸収体の選択

我々が開発している ETCC では散乱体としてガスを用いる。電子が物質中を通過する際に、多重散乱の影響を受けて反跳方向の情報を失いやすい。このときの散乱をモーリエ散乱というが、モーリエ理論 [35] によると、散乱角の広がり  $\theta_{rms}$  は次のように書ける。

$$\theta_{rms} = \frac{13.6MeV}{\beta_{cp}} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left( 1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0} \right) \text{ [rad]} \quad (2.10)$$

典型的な値として、200keV の電子に対して、Si、Ar (1 atm、20 °C) が 10 度散乱する飛跡長はそれぞれ  $\sim 10^{-2}$  mm、 $\sim 10$  mm と三桁違ってくる。同じ大きさの検出ピクセルを仮定すると、散乱体をガスにした方が高い方向決定精度が得られることがわかる。

吸収体としては、散乱を抑えて、吸収をさせることが望ましい。コンプトン散乱は電子数に比例して断面積を大きくする。一方、光電吸収は原子番号の 5 乗に比例して断面積を増やす。そのため、阻止能の高い無機シンチレータを選択している。無機シンチレータは半導体検出器に比べ、エネルギー分解能は劣るが、安価で大質量の検出器を作れ、散乱ガンマ線の吸収効率がよい。

### 2.2.2 ガス飛跡検出器

ガス飛跡検出器として、gas electorn multiplier (GEM)[32]、micro pixel chamber ( $\mu$ PIC)[31] を用いた Time Projection Chamber (TPC) を利用している (図 2.3、2.4)。それぞれについて説明する。 $\mu$ PIC は微細構造を持ったガス検出器の一種であり、一つのピクセルが比例計数管を輪切りにしたような形になっている (図 2.5)。アノードの直径は 50  $\mu$ m、ピクセルは 400  $\mu$ m 間隔で、読み出し数を減らすため二次元のストリップ状につながっていた構造をしている。アノードとカソードの間の電位差により電子雪崩を起こし増幅している。安定して動作する利得は  $\sim 6000$  である。最小電離粒子は 1 atm の Ar ガス中でのエネルギー損失は 2.54 keV/cm であり 400  $\mu$ m 中に約 3.9 個の電子を作る。そのような少ない電子を捉えることは難しい。最小電離電子を検出するには利得が  $\sim 2 \times 10^4$  必要であり、補助増幅器とし

て、GEM を利用する (図 2.6)。GEM は利得を 10 倍程度で使用し、 $\mu$ PIC の利得を数千に抑えている。GEM はポリイミドや液晶ポリマー (LCP) の両面に銅膜が張られた構造になっている、二枚の銅膜の間に電位差を作り出すことで増幅している。TPC の動作原理は次の通りである。TPC 内を荷電粒子が通過するとガスを電離させ、その飛跡に沿った形で電子雲を形成する。TPC には電場がかけられており、電場に沿って電子がドリフトを行う。TPC の後段に二次元の読み出し回路 (GEM、 $\mu$ PIC) を置くことで、電子雲の測定ができる。電場に垂直な方向は読み出し回路によって、電場に平行な方向は時間を見てやることで、測定することができる。

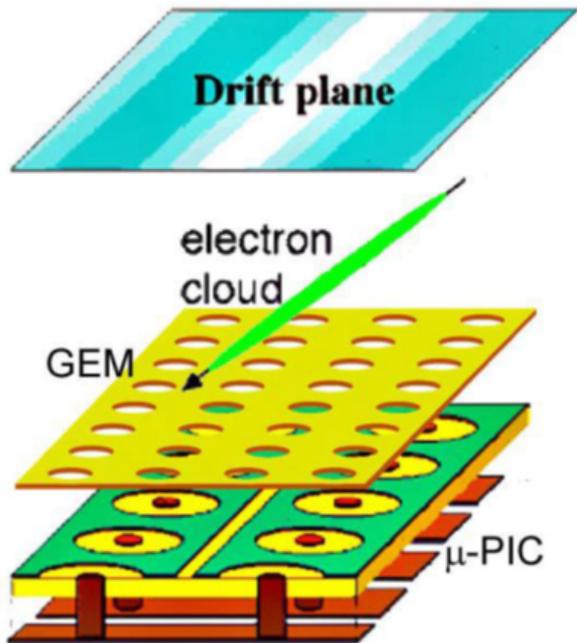


図 2.3  $\mu$ PIC と GEM による TPC 概念図

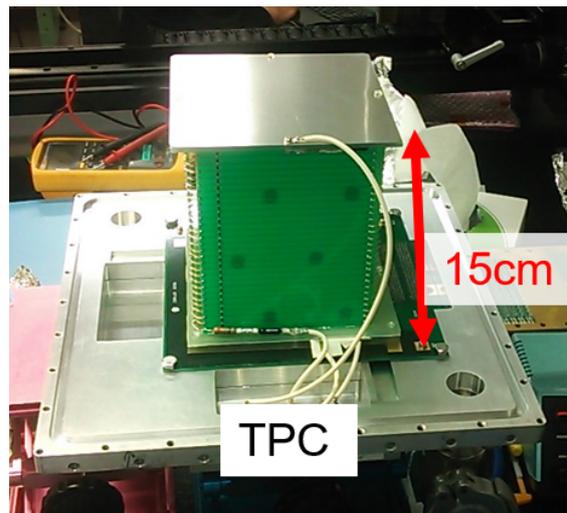


図 2.4 TPC 外観

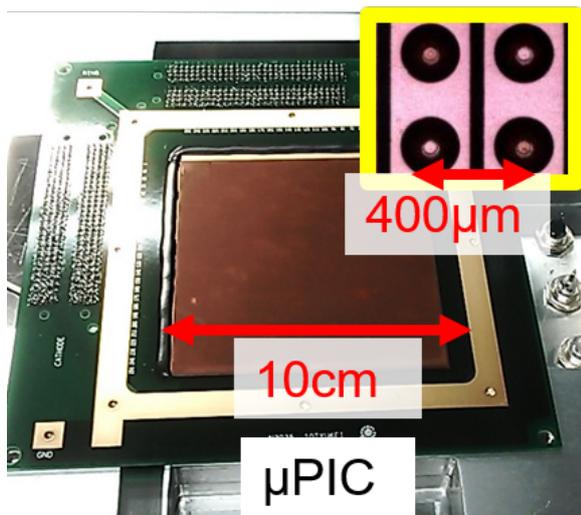


図 2.5 10 cm 角  $\mu$ PIC

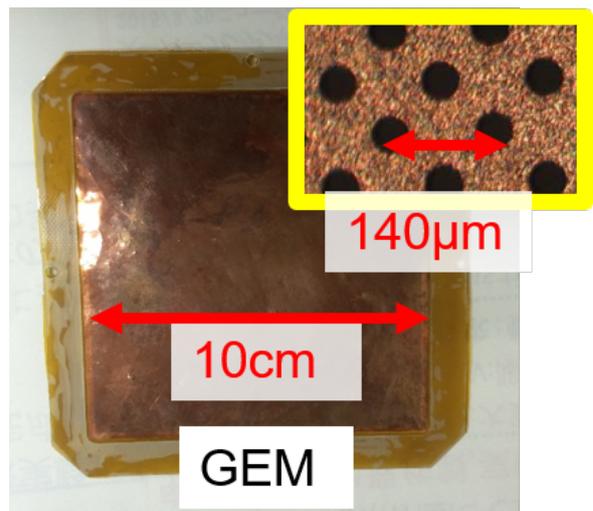


図 2.6 10 cm 角 GEM

図 2.7 はガス飛跡検出器用の読み出し基板である。この基板は 4 つの Flash Analog Digital Converter (FADC) とイーサネットポート、FPGA、8 つの Application Specific Integrated Circuit (ASIC)

チップ (図 2.8) からなっている。μPIC から送られてくる 256 ストリップの信号を 2 本ずつまとめられ、128 チャンネル分の信号が読み出し回路に入力される。まず ASIC チップでアナログ信号とヒットパターンの信号に分けられる。アナログ信号は 32 チャンネルずつ 4 つにまとめられて、50 MHz の FADC で波形の取得をされる。そして、デジタル化された波形情報は Feild-programmable gate array (FPGA) 内部のリングバッファに保存されていく。デジタルの信号は 1 チャンネルごとに、FPGA の 100 MHz で、128 bit のデジタルパターンへと変換される。デジタル化した波形情報と各チャンネルのヒット情報はそれぞれリングバッファに逐次保存する。外部 LVDS 信号のトリガーにより、データ取得を停止して、リングバッファのデータを規定時間分、遡って読み出し、整形したデータを FIFO を通して、VME モジュールのメモリーボードに送信する仕組みになっている。取得できる典型的な飛跡を図 2.9 に示す。

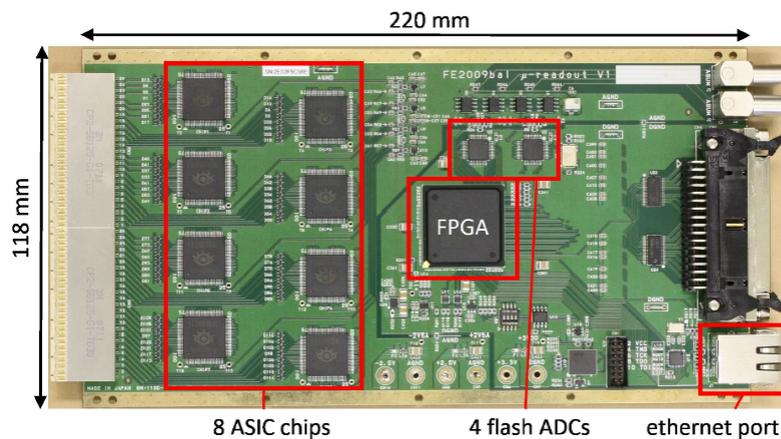


図 2.7 ガス飛跡検出器用読み出し基板

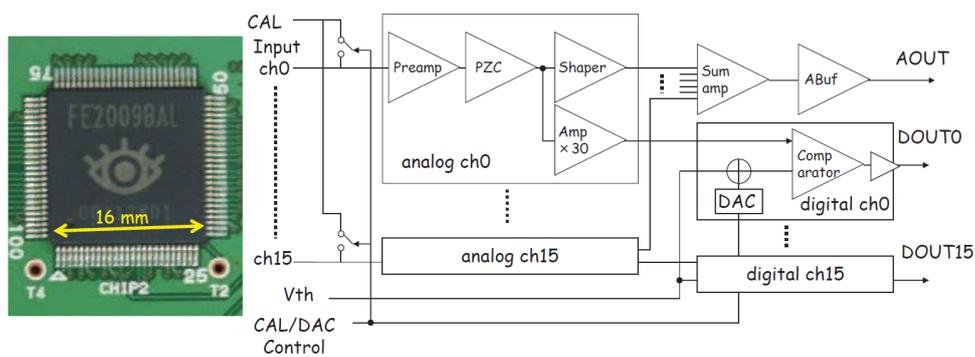


図 2.8 TPC 読み出し ASIC とその概要

### 2.2.3 シンチレータ

散乱ガンマ線の吸収体として、6 mm 角、長さ 13 mm の GSO( $Gd_2SiO_5 : Ce$ ) 無機シンチレータを用いている。この長さは 500 keV のガンマ線に対して、1 放射長となっていて、高い阻止能を有し、早い減衰時間 (30 ns ~ 60 ns) を持ち、放射化しにくく、また潮解性がないという特徴がある。これを 8 × 8 本のアレイにしている。光検出器としては浜松ホトニクス社製のマルチアノード PMT である H8500 を用いている (図 2.10 左)。読み出し信号数を減らすために、64 チャンネルの信号を図 2.10 右のような抵抗

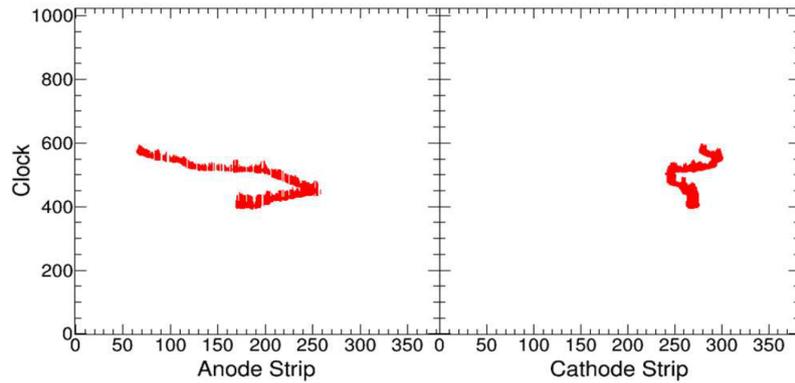


図 2.9 取得できる典型的な飛跡

でチェーン状につなぎ、読み出し信号数には4本のみになっている。位置の特定には4本からの電荷の重心演算をしている。光子のエネルギーを  $E$ 、入射した座標を  $(X, Y)$ 、4つの読み出しから得られた電荷の大きさを  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  とすると、次のように書ける。

$$E \propto Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (2.11)$$

$$X = \frac{Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (2.12)$$

$$Y = \frac{Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (2.13)$$

読み出し回路にはクリアパルス社製モデル 80256 と VME モジュール 80057 を用いている (図 2.11)。光電子増倍管 6 個を接続することができ、増幅整形をモデル 80256 がしていて、取得したデータを、VME モジュール 80057 へ送信を行っている。波形をサンプリング ADC で 12 bit にて取得していて、データを処理する時間が  $20 \mu\text{sec}$  かかる。エネルギー分解能は  $662 \text{ keV}$  に対して平均 11% となっている。光電子増倍管への高電圧の供給には図 2.12 の基板を用いている。典型的には  $-1 \text{ kV}$  程度供給している。一つの基板につき 3 個の電圧供給モジュールからおのおの 2 個の光電子増倍管に供給しているので、1 基板あたりは 6 個の光電子増倍管に対応している。通信は RS-232C で行い、電圧値をモニターおよび電圧供給用の DAC 値の送信をしている。

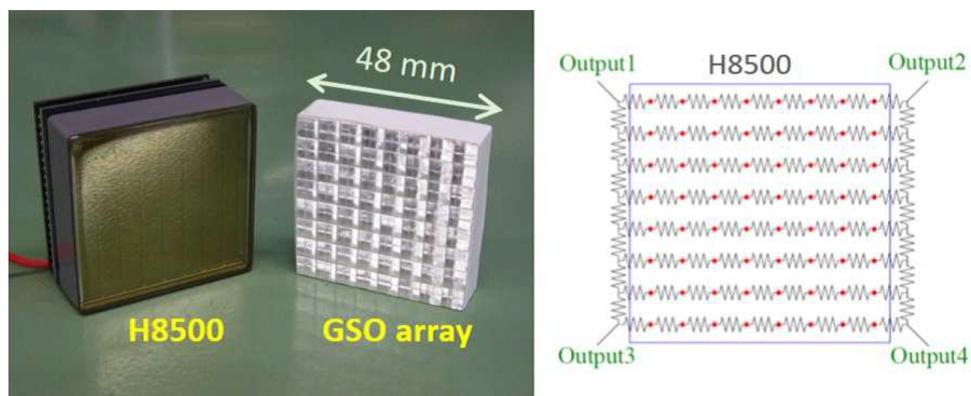


図 2.10 (左) GSO シンチレータと H8500。(右) 読み出しに使用している抵抗チェーン

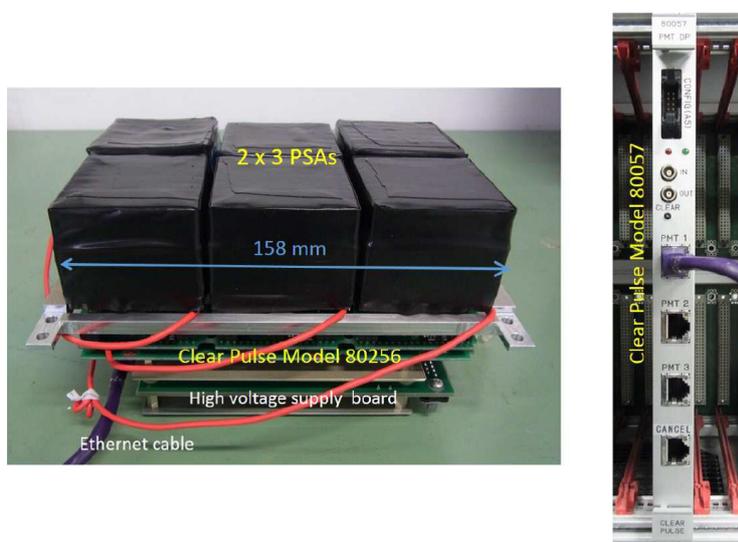


図 2.11 シンチレータ読み出し回路

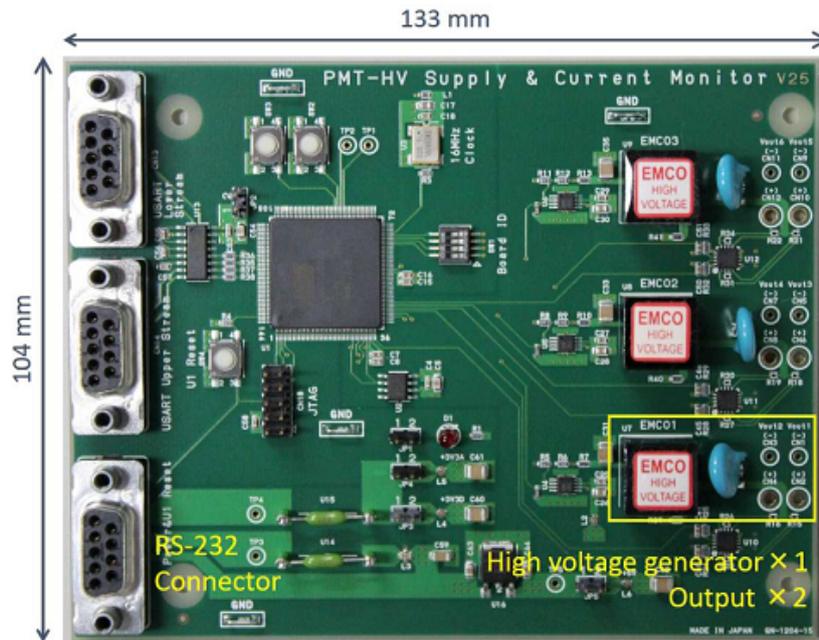


図 2.12 シンチレータの高電圧供給基板

## 2.3 SMILE 実験

SMILE 実験は ETCC による観測で、気球観測で原理実証を行い、最終的に衛星搭載による全天観測を目指す実験である。2006 年に 10 cm ETCC を用いて、気球で高度 35 km で観測を行った [24]。宇宙線拡散ガンマ線や大気ガンマ線の観測をし、過去の別の検出器による観測と矛盾のない結果を得ている (図 2.13)。この SMILE-I では、宇宙環境下でのガンマ線観測において、雑音が除去できることが示された。次のステップとして SMILE-II では、蟹星雲などの明るい天体を観測し、地上較正試験から予測される検出感度と比較し、天体観測能力を実証を目的としている (SMILE-II)。現在は SMILE-II の角度分解能および検出感度の向上のための改良を行っていて、2018 年に豪州で放球する計画 (SMILE-II+) を進めている。本節では SMILE-II の性能および課題について述べたうえで、GRB 観測のために必要な要求とそれを満たす方法について述べ、SMILE-II+ 以降に向けた改良点を提示する。

### 2.3.1 現行モデル SMILE-II

図 2.14 は現行モデル SMILE-II の写真である。30 cm 立方 TPC のまわりに 108 個のシンチレータが底面および側面に配置してある。SMILE-II の性能について紹介する。図 2.15 左は、SMILE-II ETCC を用いてガンマ線再構成画像から、ガンマ線源設置位置を中心とする領域で事象を取り出して得たエネルギースペクトルである。画像の切り出しを行わないと、ガンマ線源から直接観測された成分 (図中 662 keV 付近のピーク) と、検出器周囲の空気等で散乱された低エネルギーの連続的な成分が見られる。しかし、画像からガンマ線源付近の事象だけ取り出しを行うことで、散乱成分である連続成分を強く排除することができる。その結果、検出器に入射するガンマ線のエネルギースペクトルが観測できている。図 2.15 右では、GSO シンチレータのみを用いて取得した  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトルとの比較である。SMILE-II ETCC は、散乱ガンマ線の吸収体として GSO シンチレータを使用している。そのエネルギー分解能はほぼ同じ

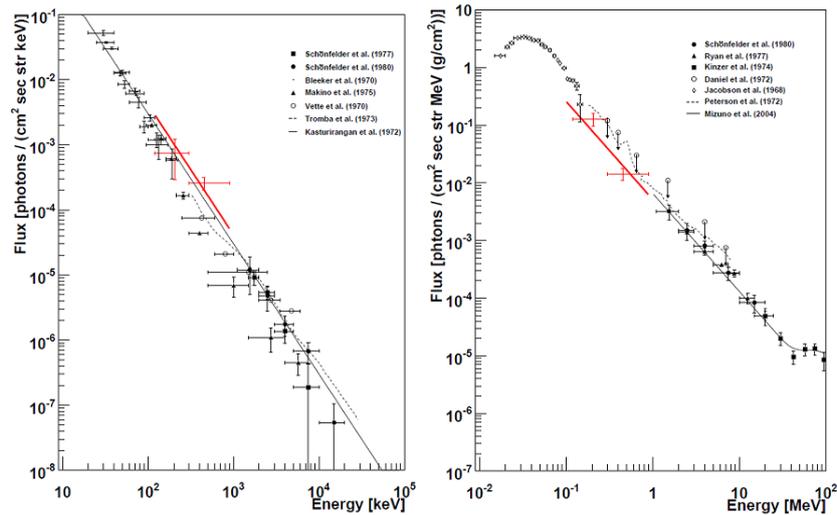


図 2.13 SMILE-I ETCC により観測した宇宙ガンマ線のフラックス (左) と大気ガンマ線のフラックス (右)[24]。赤線が SMILE-I による結果である。過去の気球実験や衛星観測の結果と矛盾のない結果を示している。

(662 keV に対して ETCC は半値全幅で 11%、GSO シンチレータのみは半値全幅で 11%) である。このため、図 2.15 右においても、ガンマ線のエネルギーが光電吸収されたピークの幅とほぼ同じになっている。一方で、GSO シンチレータのスペクトルには、低エネルギーから 480 keV 付近まで続く連続的な成分があり、ピークとの間に明瞭な落ち込みがあるが、SMILE-II ETCCC のスペクトルでは、明らかな落ち込みはない。両者のスペクトル構造についての模式図 2.16 に示す。GSO シンチレータのような一般のガンマ線検出器では、ガンマ線が全吸収されるとエネルギースペクトルにピークを作る。しかし、MeV ガンマ線領域ではコンプトン散乱が有意であるため、検出器中で散乱を起こし、散乱ガンマ線は検出されない事象も多い。コンプトン反跳電子のエネルギーは散乱角に依存し、180 度散乱で最大値を取る。このため、2 の成分によるスペクトルには高エネルギー側にコンプトンエッジと呼ばれる構造を作る。662 keV のガンマ線に対する反跳電子の最大エネルギーは 478 keV であり、図 2.16 右赤のスペクトルの構造と一致する。ところが、ETCC は散乱検出器と吸収検出器の同時を取るため、反跳電子のみが測定されることは原理的になく、図 2.16 の 2 に相当する事象はスペクトルには表れない。一方、検出器外部でコンプトン散乱を起こした事象は、ガンマ線が検出器に入射するため、一般の検出器でも ETCC でも検出され、連続成分として観測される。この成分は、全吸収のピークと連続的につながり、180 度散乱で最小値をとる。このため、ETCC のエネルギースペクトルにはコンプトンエッジが無く、全吸収ピークと連続的につながる散乱成分のみが観測されることになり、図 2.15 のようなスペクトルが得られる。

それぞれの天体について理解するためには、その天体から放射されているエネルギースペクトルを正しく観測する必要がある。MeV 天文学開拓にはイメージングスペクトロスコピーが必須である。その能力を検証するために異なるエネルギーのガンマ線源を複数同時に観測する試験を行った。図 2.17 は SMILE-II を用いて行った結果である。エネルギーに制限を加えないと 3 種類の線源が見えるが、エネルギーで切り分けると分離することができた。このことは、複数の天体が視野内に存在していても、その天体の周囲の事象からエネルギースペクトルを得ることができることを意味している。ETCC は明確に角度決定精度を定義できるため、周囲からの漏れ込みと分離できる。コンプトン法を用いたガンマ線イメージングは角度決定精度を明確に定義することができていなかったが、MeV ガンマ線天文学を発展させる

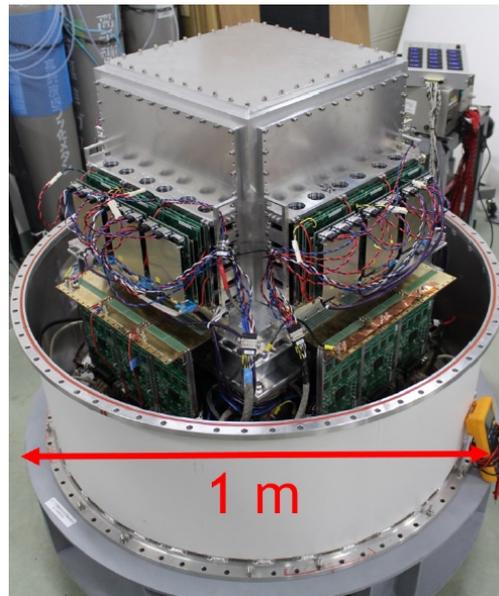


図 2.14 SMILE-II ETCC

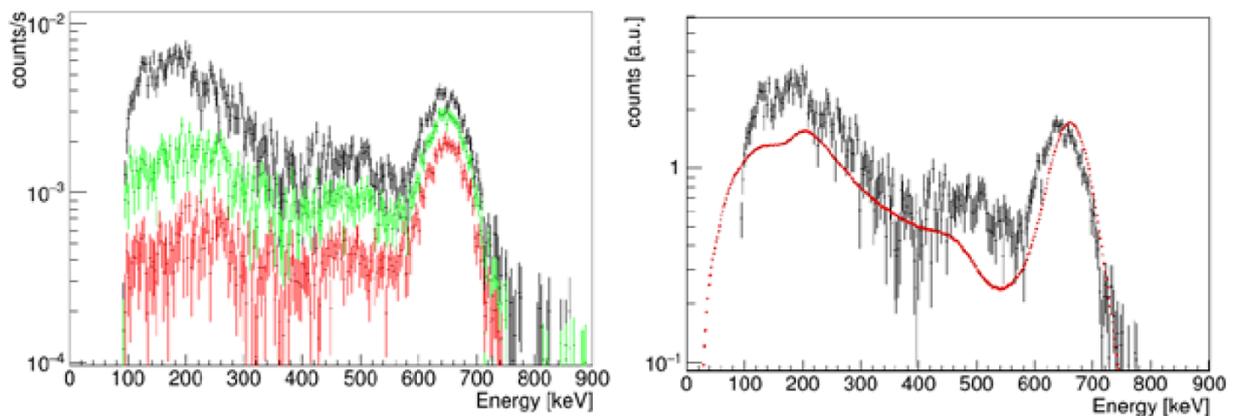


図 2.15 SMILE-II による  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル [36]。左図はイメージでカットしている。赤は線源を中心に 15 度でカット、緑は線源を中心に 30 度でカット、黒はカット無しである。散乱成分がカットによって排除されていることがわかる。

ためには、深く議論する必要がある。

偏光したガンマ線がコンプトン散乱を起こすと、散乱ガンマ線と反跳電子は入射ガンマ線の電場方向に飛びやすい、という性質を持つ。このため、コンプトン散乱を利用した検出器は、一般に偏光検出能力を持っている。ETCC でも偏光を検出することが期待できる。これを実証する。するために SPring-8 のビームライン BL08W を用いて実験を行った (図 2.18) ビームラインからは 182 keV のガンマ線が放射され、Al 板で散乱する。鉛のシールドを置き、入射窓は 10 cm の開口部を持たせていて、ETCC には 123 keV から 148 keV の間で偏光度 96% 程度で入射する。この状態で ETCC を方位角方向に回転させながら、測定を行った。ETCC はシンチレータの配置が原因で幾何的な効果から得られた散乱ガンマ線の分布はそのままではきれいな正弦曲線にはならない。幾何的效果をシミュレーションによって補正することが必要になる。図 2.19 は無偏光状態で入射したガンマ線の分布で得られた散乱ガンマ線の分布を

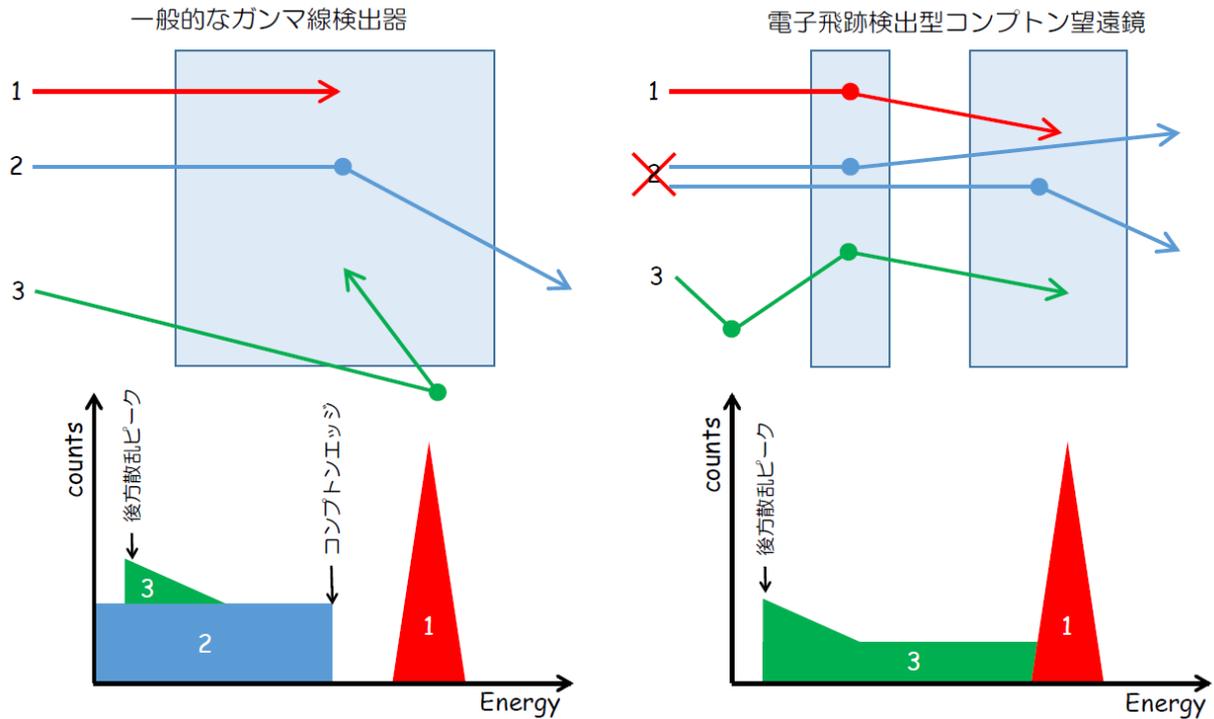


図 2.16 一般的なガンマ線検出器と電子飛跡検出型コンプトンカメラのちがいを [36]。検出器内での散乱事象を排除することができる。

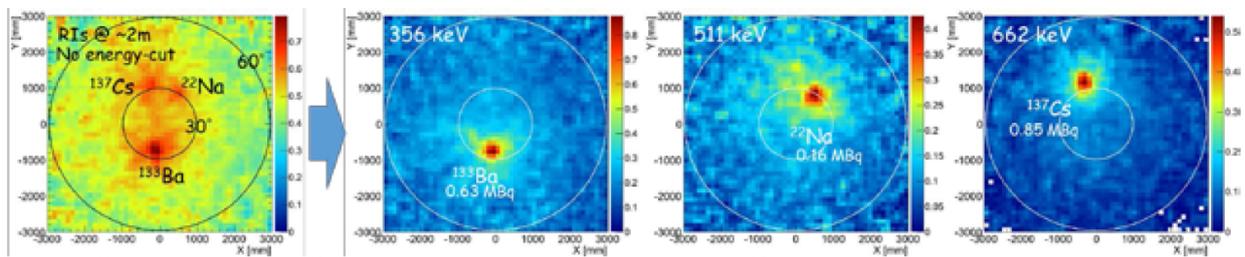


図 2.17 ETCC による複数の異なる線源の観測 [36]。エネルギーカットをすることで、線源を分離することができる。

割って補正したものである。正弦曲線が ETCC の方位角に応じて変化するのが分かる。それぞれの角度において正弦曲線でフィットすることで得られた偏光角は誤差の範囲で一致した。また、振幅から偏光検出能力を示すモジュレーションファクターは  $0.58 \pm 0.02$  と大きな値が得られた。これは Geant4[38] によるシミュレーションとも一致する。ETCC は期待通りの偏光検出能力を持っていることが分かった。

ここまでのまとめとして、SMILE-II の性能を表に示す。1 章で示した要求のうち、満たしていないのは不感時間である。改良点を挙げるため、SMILE-II データ収集方法について説明し、必要なアップデートについて議論する。

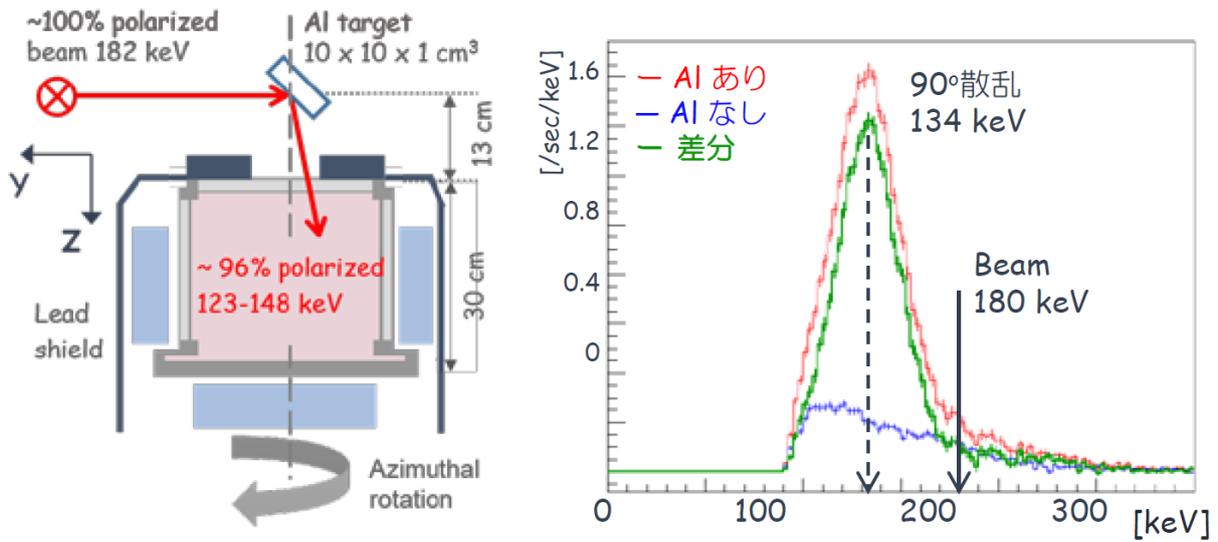


図 2.18 SPring-8 における偏光測定実験セットアップと得られたスペクトル [37]

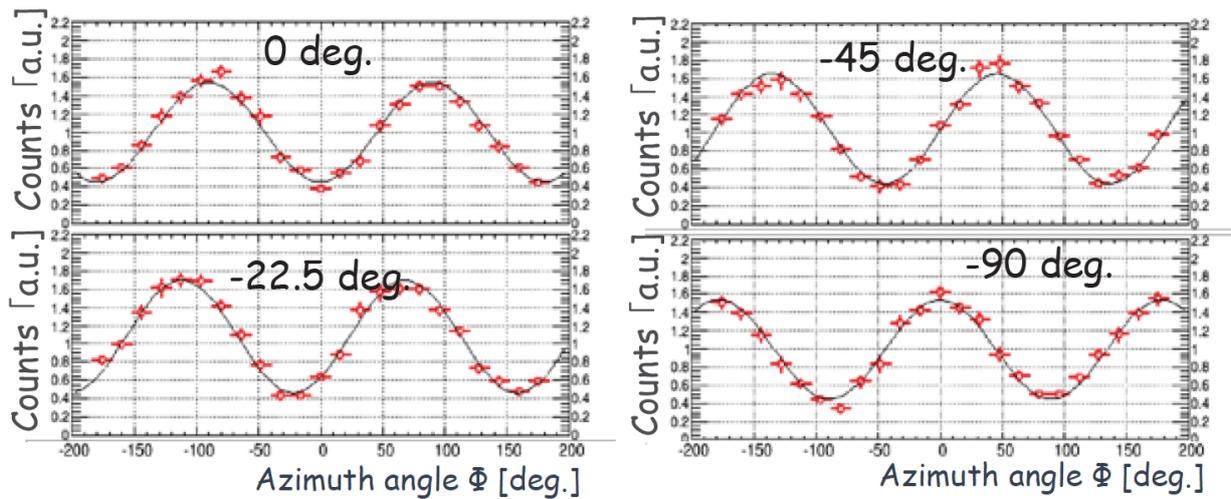


図 2.19 偏光測定実験で得られたモジュレーションカーブ [37]。

表 2.1 SMILE-II 性能

ダイナミックレンジ	90 keV-1.3 MeV
エネルギー分解能	11%@662 keV
角度決定精度	~0.1 度
視野	~3str
モジュレーションファクター	~0.6@130 keV
不感時間/事象	~20μsec

### 2.3.2 SMILE-II データ収集方法

SMILE-II は3種類のデータ収集法がある。TPC 較正モード、シンチレータ較正モード、そして ETCC ガンマ線計測モードである。較正モードでは、それぞれ、検出器自身のヒット信号を用いてトリガーをかけることで、データ収集を行っている。2つのエネルギー較正では、RI 線源を用いて測定をするが、線源の強さやバックグラウンドなど実験環境を良いものに整えることができる。ここでは ETCC モードで生じる問題点を整理するために、ETCC ガンマ線計測モードについて詳細に説明する。

ガス飛跡検出器とシンチレータとのトリガーコントロールを図 2.21 左の回路が行っている。それぞれからの信号を受信して、回路の状態を把握し、データ収集のための信号を発信している。TPC のデータは VME モジュールのメモリーボードに蓄えられる。シンチレータのデータはクリアパルス社製モデル 80256 から VME モジュール 80057 に送っている。トリガーをかける論理は図 2.21 右のようになっている。まずシンチレータのヒットでトリガーを発生させている。シンチレータのデータをデジタル化し、同時に信号を送り、TPC にデータが存在しているのかどうか確認をとる。TPC にデータがある場合は TPC、シンチレータともに CPU にデータを送り、次のトリガーが発生するまで、スタンバイ状態に移行する。TPC にデータがない場合は TPC、シンチレータともにデータを削除して、スタンバイ状態へと戻る(図 2.22)。TPC、シンチレータ回路に送受信される信号は表 2.2、2.3 にまとめてあり、図 2.23 にタイミングチャートを示す。不感時間については、TPC にデータがない場合シンチレータのデータ処理時間  $20 \mu\text{s}$  となり、TPC にデータがある場合 TPC のデータを送るのにかかる時間は  $\sim 100 \mu\text{s}$  である。シンチレータは TPC に比べて阻止能が高く、ETCC として稼働させた現行モデルではシンチレータの計数率は TPC の計数率よりも 2 桁程度高く、大半は TPC にデータがないイベントになってしまっている。そのため、このシンチレータのヒットが原因となって、不感時間を増大させている。また、VME の通信速度が遅いため、不感時間を増やす原因となっている。このことを式で表すと次のようになる。

$$\text{deadtime}[\%] \simeq f_{\text{scintillator}} \times 20 \mu\text{s} + f_{\text{ETCC}} \times 100 \mu\text{s} \quad (2.14)$$

$$f_{\text{scintillator}} \simeq 100 \times f_{\text{ETCC}} \quad (2.15)$$

$f_{\text{scintillator}}$ 、 $f_{\text{ETCC}}$  はそれぞれシンチレータ、ETCC のヒット計数率である。この式において、TPC にデータがない事象での不感時間が大部分を占めている。

表 2.2 TPC 回路に送受信される信号

信号名	方向	説明
data exist	出力	データが存在している。
process	出力	リングバッファから前段 FIFO にデータを送信中である。
trigger	入力	トリガーをかける。リングバッファから前段 FIFO にデータを送信する。
transfer	入力	後段 FIFO からデータをメモリーボードに送信する。
clear	入力	前段 FIFO のデータを消去し、リングバッファを始動する。
veto	入力	trigger 信号の入力を止める。
reset	入力	事象番号をリセットする。

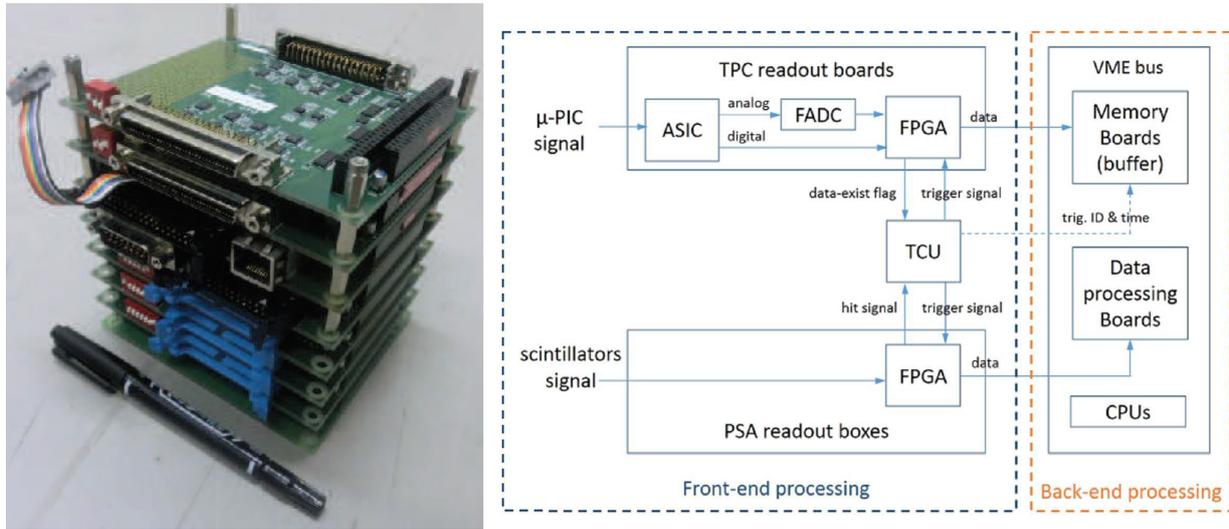


図 2.20 トリガー回路とデータ通信模式図

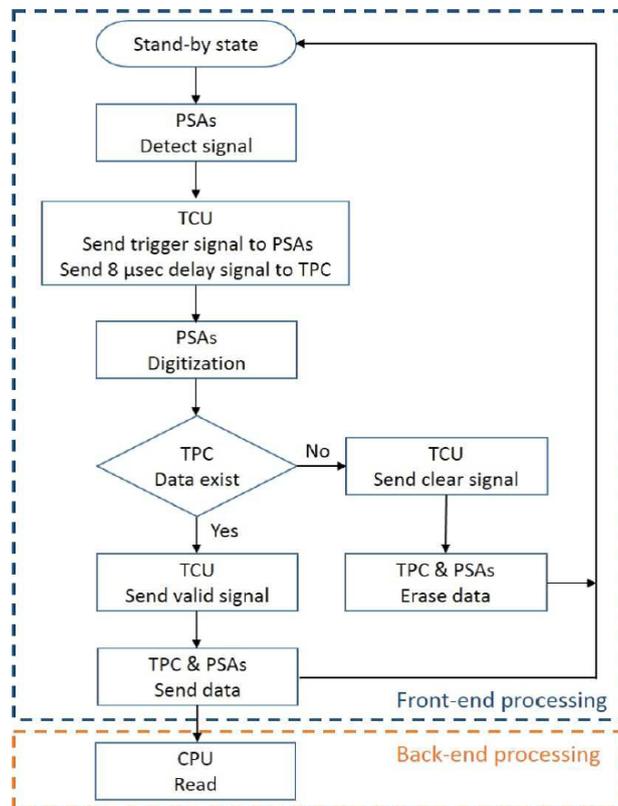


図 2.21 ETCC のデータ収集論理

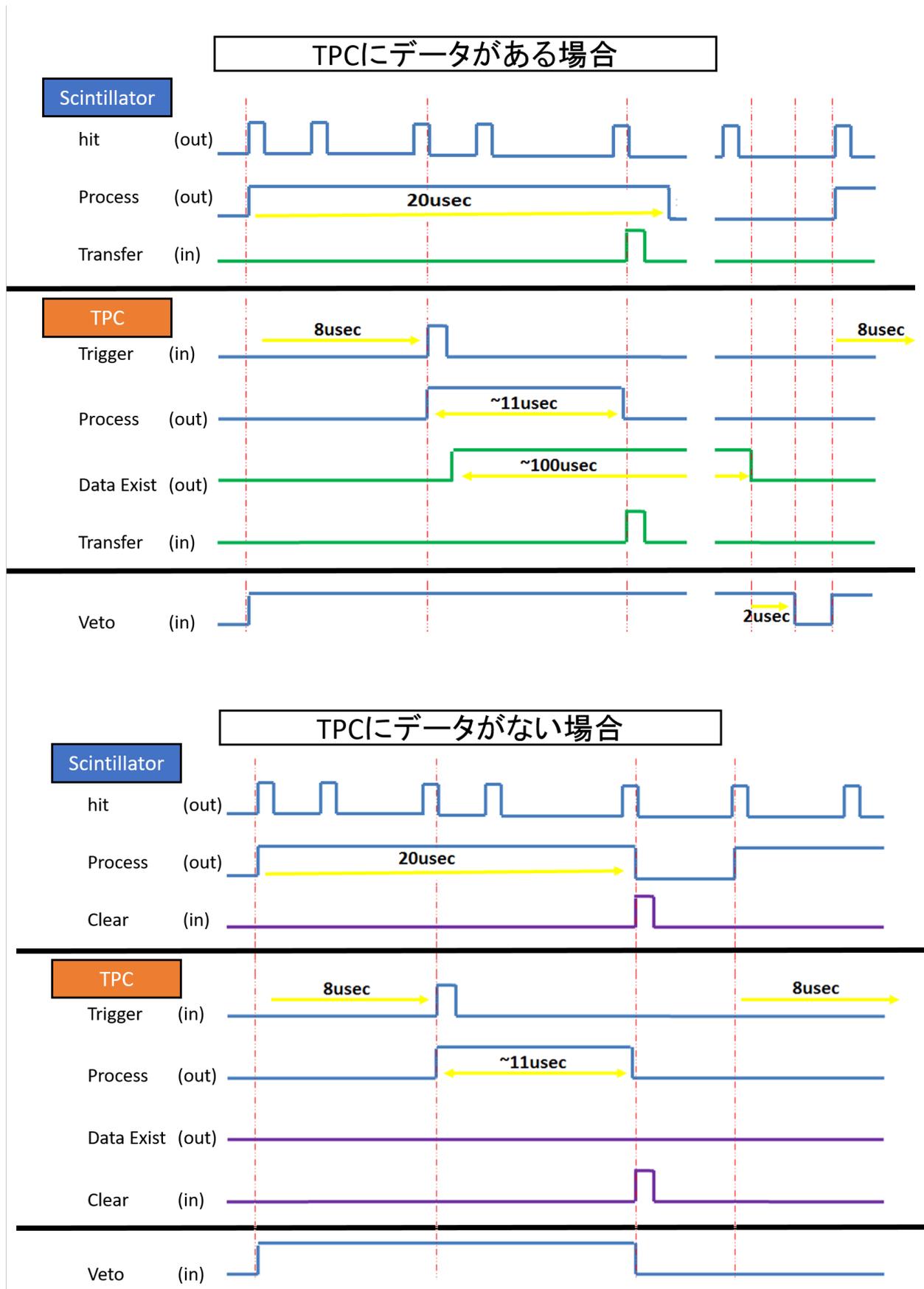


図 2.22 ETCC におけるデータ収集のための信号

表 2.3 HA 回路に送受信される信号

信号名	方向	説明
process	出力	リングバッファから前段 FIFO にデータを送信中である。
transfer	入力	trigger 入力時のみ受けつけ可能。データを VME モジュールに送信する。
clear	入力	trigger 入力時のみ受けつけ可能。データを破棄する。
veto	入力	trigger 信号の入力を止める。
reset	入力	事象番号をリセットする。

### 2.4 デッドタイム削減のための新トリガー方式とその要求

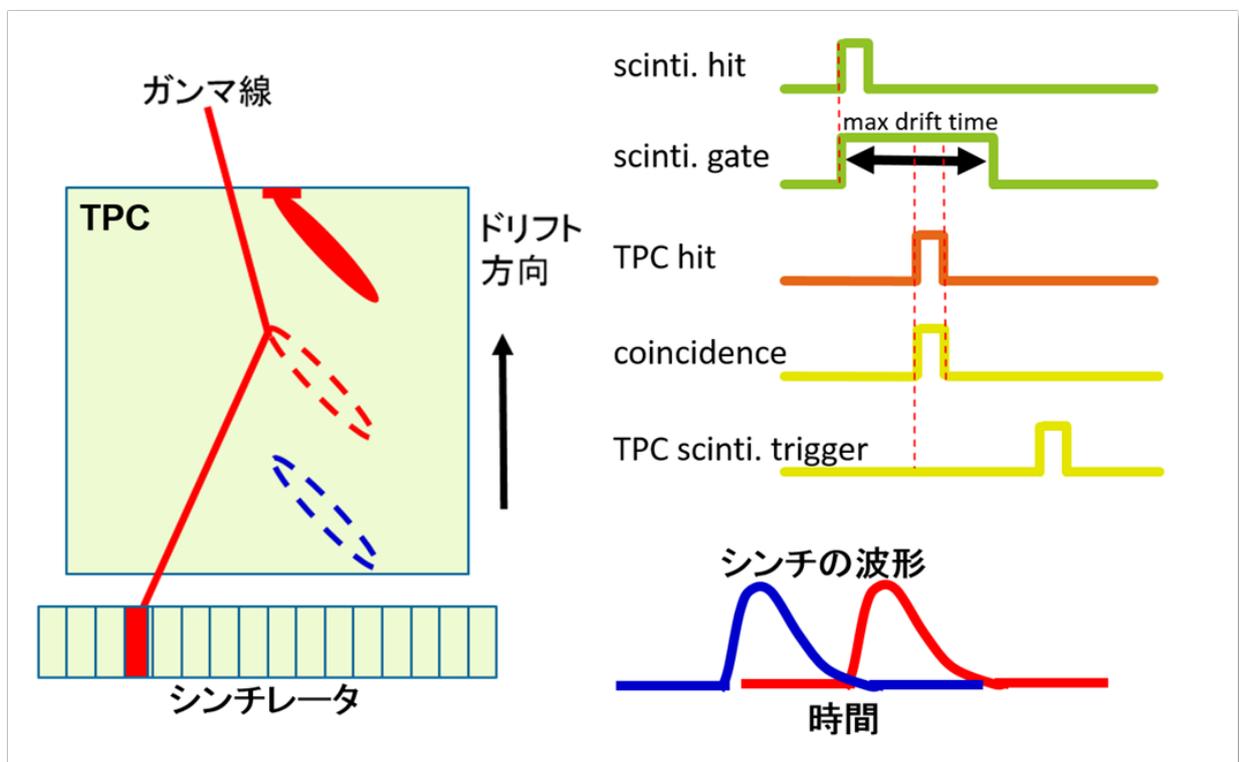


図 2.23 TPC トリガー概念図

GRB はミリ秒で時間変動をする天体である。精度良く検出するためには一桁小さいサブミリ秒でデータを取得することが必要になって来る。そのためには、数 kHz でデータを取得することが要求となる。図 2.20 は現行 ETCC の不感時間を表しているが、1 kHz 付近で不感時間が既に 70% 前後となっている。これは GRB 観測において問題である。不感時間の大半はシンチレータでトリガーをかけたが、TPC にデータがないことが多いことは述べた。その対策として、まず TPC でトリガーをかけて、シンチレータのデータを確認することを考える。トリガー数そのものが 2 桁減り、不感時間の原因を取り除くことができる。TPC トリガーの概念図を図 2.24 に示す。TPC でトリガーをかけるると散乱点からドリフトした後のタイミングの電子を検出することになるので、電子のドリフト時間の情報が失われる。ドリフト時間を取得するためには、シンチレータをコモンストップに変更し、FADC で波形をサンプリングすることが挙

げられる。また不感時間削減のためには通信の高速化も必要となってくる。次章からは、必要な要求に応えることのできる基板開発について述べる。

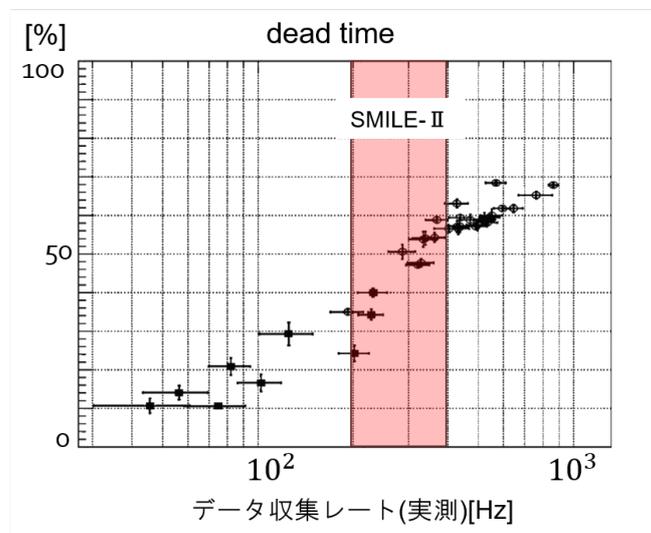


図 2.24 SMILE-II データ収集システムの不感時間のデータ収集レート依存性。

## 第 3 章

# ガス飛跡検出器読み出し回路

本章では、ETCC における二種類の検出器のうち、ガス飛跡検出器について述べる。ETCC からの要請を受けて、ガス飛跡検出器には数 kHz でのデータ取得が必要となってくる。ここでは現行回路の問題点を明らかにし、新回路開発と問題点の解決までの説明を行う。

### 3.1 SMILE-II の回路のデータ収集方法と問題点

現行の SMILE-II ETCC での TPC 回路の動作について詳細に述べる。図 3.1 に TPC 基板の模式図を示す。TPC 回路に trigger 信号が入力されるとすぐに FPGA へと送られ、リングバッファへの書き込みを中止し、トリガー以前の  $10 \mu\text{s}$  のデータを FPGA 内の FIFO に入れる。process 信号が FPGA から出力される。この信号はリングバッファから FIFO に書き込んでいる間は継続して、出力される。もしデータの中にヒットパターンがあれば、data exist 信号が出力される。process 信号終了後に transfer 信号を TPC 回路が受信すると、前段 FIFO からメモリーボードへとデータが送られる。メモリーボードからは数千イベントごとにまとめて、VME バスを介して DAQ 用 PC へとデータを送っている。これはメモリーボードと PC 間の通信を減らし、不感時間を削減するためである。この通信は ms のオーダーで行われる。前段 FIFO から飛跡データとアナログ波形データを統合する際にイベント番号がデータ内に付加されている。もし外部から trigger 信号を入力後、 $8 \mu\text{s}$  の間に TPC 回路にヒットしたデータがなければ、トリガーコントロール回路が clear 信号を TPC 回路に送信する。transfer 信号が送られた場合も、clear 信号が送られた場合も、前段 FIFO にあるデータを消去し、リングバッファによるデータ取得を再開する。

以上のことを踏まえると、TPC 基板の不感時間としては 2 種類がある。第一にリングバッファから前段 FIFO に送る時間 (process 信号継続時間) で、これは実測で  $\sim 11 \mu\text{s}$  である。第二にメモリーボードが蓄えたデータを PC に送信するのにかかる時間であり、これはバッファの上限である 8.3 MByte 貯蔵されたときの送信時間は  $\sim 1 \text{ms}$  である。数キロヘルツでデータを取得を目指す際に問題となるのは、 $\sim 1 \text{ms}$  の時間である。

この問題を解決するために 2 点を改良することにした。第一はメモリーボードをなくし、FIFO からネットワークを介して PC へ通信することである。10 kByte/event  $\times$  数 kHz  $\sim$  100 MByte  $<$  1 Gbps であることから、ギガビット通信ならば十分可能なことが分かる。このため、SiTCP 技術 [33] を用いてギガビットイーサネットを用いることにした。また、通信回数削減のために、PC 側を常に待ち受け状態にし、回路のタイミングで送る機構とする。二つ目の改良点は送受信するトリガー信号である。TPC でトリガーをかける際に必要十分な信号にし、簡略化を行いたい。それについては表 3.1 にまとめている。

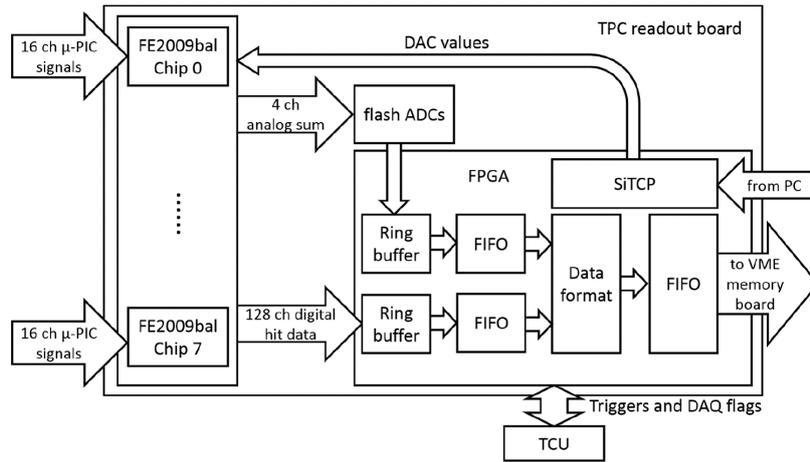


図 3.1 TPC 用基板

ヒットの判定については、ノイズとの区別をするために連続する 3 ストリップ以上のストリップがヒットしている場合、ヒットと判定する。

表 3.1 新 TPC 回路に送受信される信号

信号名	方向	説明
trigger	入力	トリガーをかける。リングバッファから前段 FIFO にデータを送信する。
reset	入力	トリガー番号をリセットする。
hit	出力	ヒットしたタイミングで信号を出す。
Data exist	出力	前段バッファ以降にデータが存在する。
process	出力	リングバッファから前段 FIFO にデータを送信中である。

### 3.2 新読み出し回路

旧回路を改善した新読み出し回路を作成した。図 3.4 は新基板の写真である。不感時間削減に関わるハードウェアの変更としては、メモリーボードとつなぐコネクタ削除している (図 3.5)。

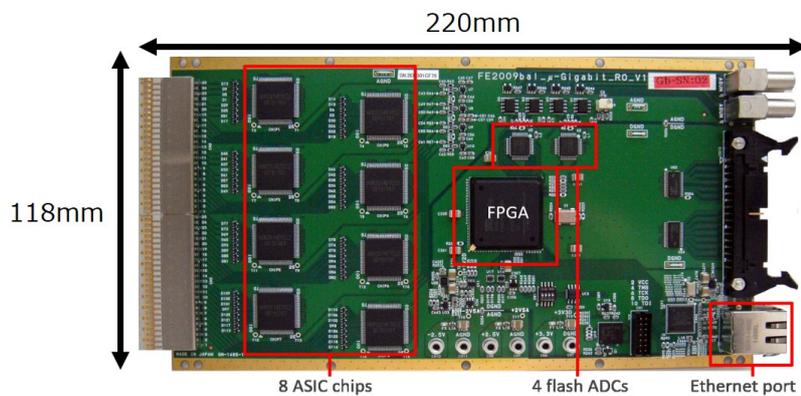


図 3.2 TPC 新読み出し回路

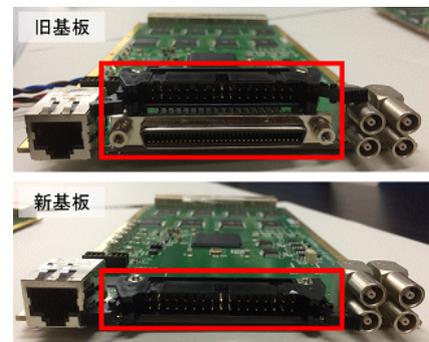


図 3.3 旧基板と新基板のハードウェアの変更点。VME メモリーボードとのコネクタを削除した。

### 3.2.1 入出力信号の確認

図 3.4 は  $\mu$ PIC から信号を新回路を経て出力したアナログ信号である。この信号を利用して、デジタル信号が入出力が行われるのか確認した。TPC 回路との外部通信および論理の構成は NIM モジュールも用いている。図 3.5 はデータ収集時の信号の模式図であり、実際に取得された信号が図 3.5 である。TPC 回路から出力された hit 信号が出力されたタイミングでデータが存在していることを示す Data exist 信号が出力される。出力された hit 信号を  $8\ \mu\text{s}$  送らせて trigger 信号として入力した。意図している通りに回路が動作していることが確認できた。ここからの実験はこのデジタル信号を利用し、データを取得して行う。

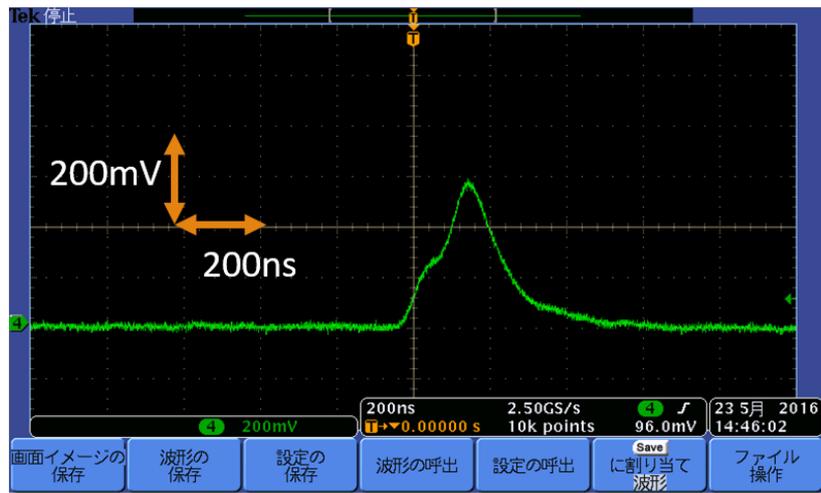


図 3.4 新基板アナログ信号

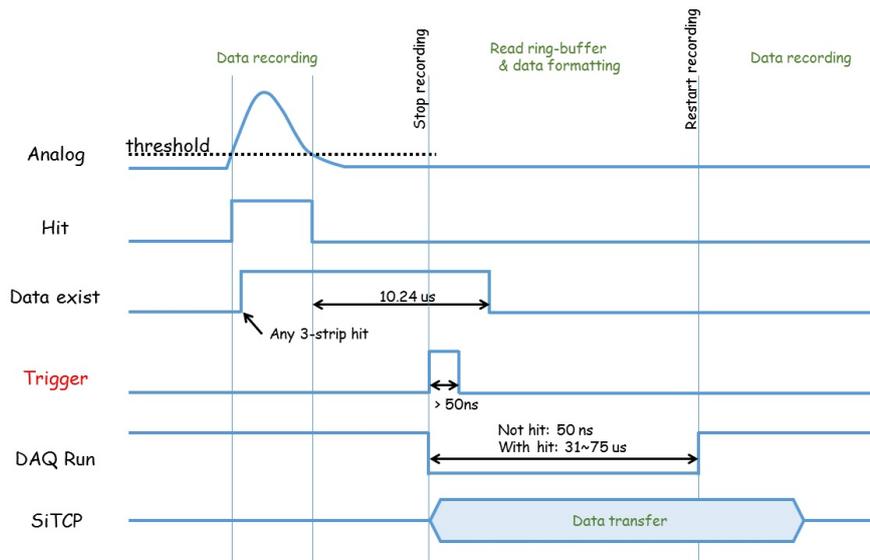


図 3.5 新基板におけるデータ収集の模式図

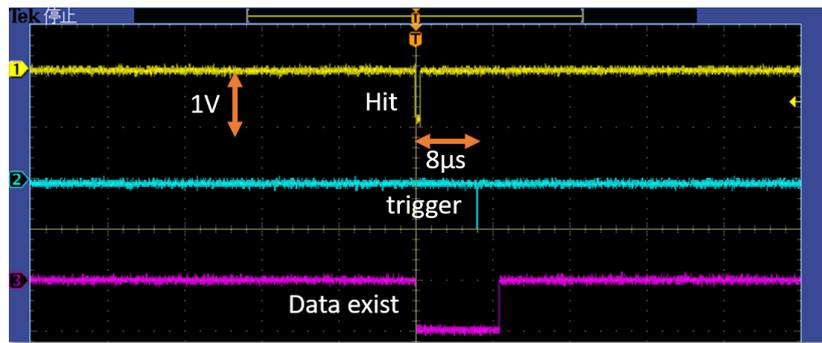


図 3.6 新基板におけるデータ収集のための実際の信号

### 3.2.2 ベースラインおよびスレッシュホールド評価

TPC 回路からはアナログ信号およびストリップごとのデジタルヒットパターンがデータとして取得される。まずはアナログ波形のベースラインの評価を行う。アナログ波形は図 3.7 のような回路を用いている。図中の左の赤矢印と 10 kΩ の抵抗が可変抵抗を表していて、ここでオフセットの調整している。図 3.7 は取得されるアナログ波形を重ねあわせたものをプロットしたものである。可変抵抗の変化に応じてベースラインが変化していることがわかる。アナログ波形は 1024 チャンネルで波高値を取得しているが、ベースラインを約 150 チャンネルに設定することにした。この値はダイナミックレンジを広くとり、ベースラインの予期せぬ変化にも対応できる値である。

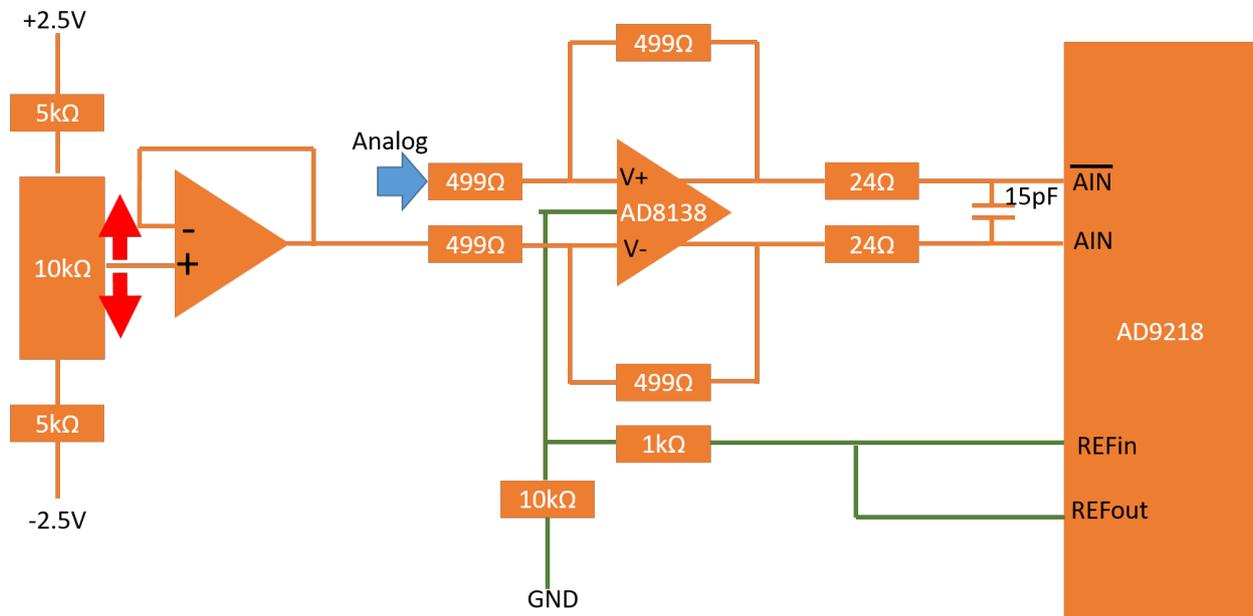


図 3.7 TPC 回路におけるアナログ波形のオフセット調整回路。左の赤矢印と 10 kΩ の抵抗が可変抵抗を表している。

次にストリップごとのデジタルヒットパターンのスレッシュホールド評価を行った。ストリップごとにアンプのバイアスがあり、共通の電圧でスレッシュホールドを決めてしまうことができない。ので、個々の特性を吸収するための個別 DAC を ASIC 内に設けている。また、基板上の共通の閾値を決める  $V_{th}$  を設けて

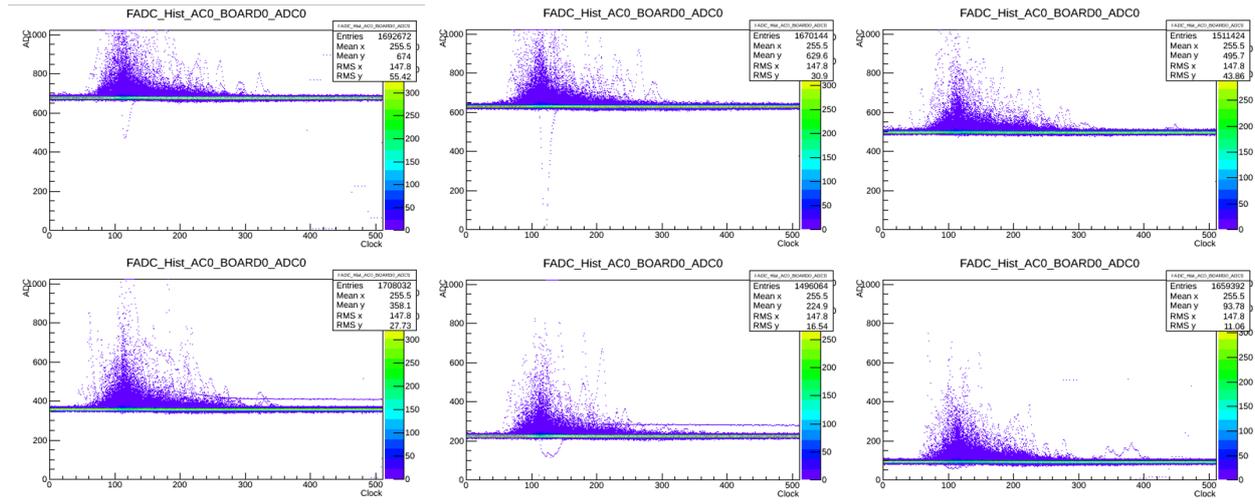


図 3.8 可変抵抗の大きさの変化にともなうベースラインの変化。これはアナログ波形の重ね合わせをプロットしたものである。可変抵抗の値を変えるとベースラインが変化していくことがわかる。

いる。まずストリップごとの評価を行った。TPC 回路に接続せずに、基板のみにして信号が入らない状態にし、熱雑音のみの状態にする。スレッシュホールドには 0 から 63 の DAC 値を入力することができる。ベースラインに対して、どの DAC 値でヒットと判定するのかを見るため、DAC 値を変えながらデータを取得した。1 ストリップあたりの結果が図 3.8 である。横軸を DAC 値であり、縦軸は 1 がヒットしていること、0 がヒットしていないことを表している、1 事象あたりに規格化している。誤差関数でフィットして 0.5 となる値をベースラインがスレッシュホールドとなる DAC 値とした。また全 128 ストリップに対して評価したグラフが図 3.9 である。ストリップごとの個性が消えたのか確認するために  $V_{th}$  値を用いて実験を行った。 $V_{th}$  は 128 ストリップ全体のスレッシュホールドを変化させる入力値で、0 から 16383 の範囲で変化させることができる。ベースラインに対して、ヒットと判定するのか、 $V_{th}$  を変化させながら、評価した。その結果を 3.10 に示す。 $V_{th}$  が 9000 付近にベースラインがあることがわかる。この図からストリップごとの個性を消すことができたことが確認できる。

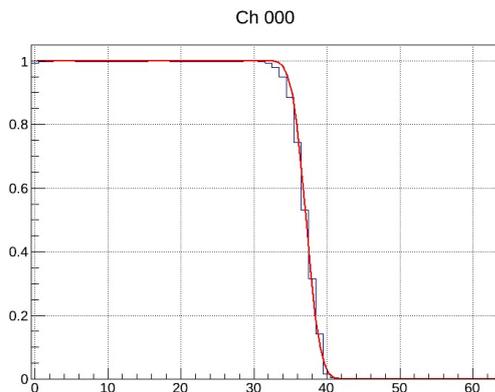


図 3.9 ベースラインに対する DAC 値を変化させたときの熱雑音によるヒット判定。

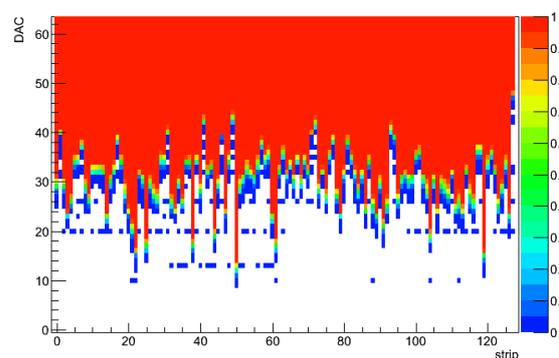


図 3.10 ベースラインに対する DAC 値を変化させたときのヒット判定を 128 ストリップ分表示したグラフ。横軸をストリップ番号、縦軸を DAC の値、色をヒット判定としている。

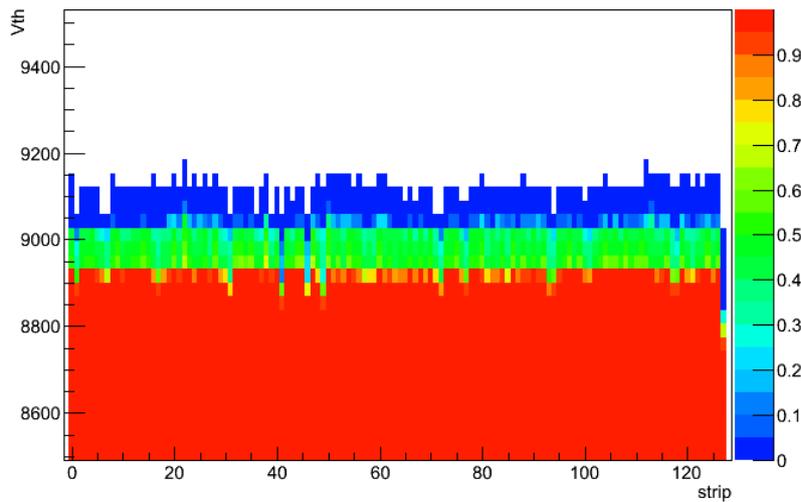


図 3.11 Vth を変化させたときのベースラインに対するヒット判定。横軸をストリップ番号縦軸を Vth の値、色をヒット判定としている。

### 3.2.3 飛跡とエネルギーの取得

ベースラインとスレッシュホールドの評価ができたので、TPC としての動作の検証をした。図 3.12 は実験セットアップを表している。10 cm 立方 TPC のアノードとカソードに新回路をそれぞれ接続した。取得できた飛跡を図 3.13 に示す。横軸がストリップ番号、縦軸がクロックを表している。アノードとカソードで同じ飛跡を見ているのが、同じクロックに対応して飛跡があることがわかる。次にエネルギー較正を行った。線源には  $^{133}\text{Ba}$  と  $^{109}\text{Cd}$  を用いた。 $\mu\text{PIC}$  の領域を  $4 \times 4$  の 16 分割しそれぞれの領域についてスペクトルおよびエネルギー分解能を求めた。図 3.14 には較正直線および、スペクトルを示す。図 3.15 には領域ごとの  $^{133}\text{Ba}$  の 30.9 keV のエネルギー分解能を表している。エネルギー分解能が比較的悪くなっている領域では、放電によって導通して使えないストリップが多くなっていた。一部測定できていない領域があり、エネルギー分解能が落ちていると思われる。

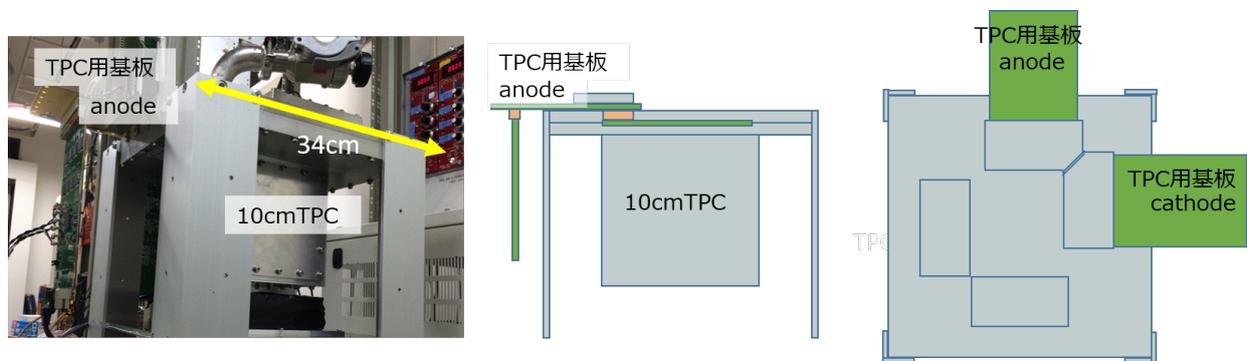


図 3.12 TPC のデータ取得実験セットアップ。

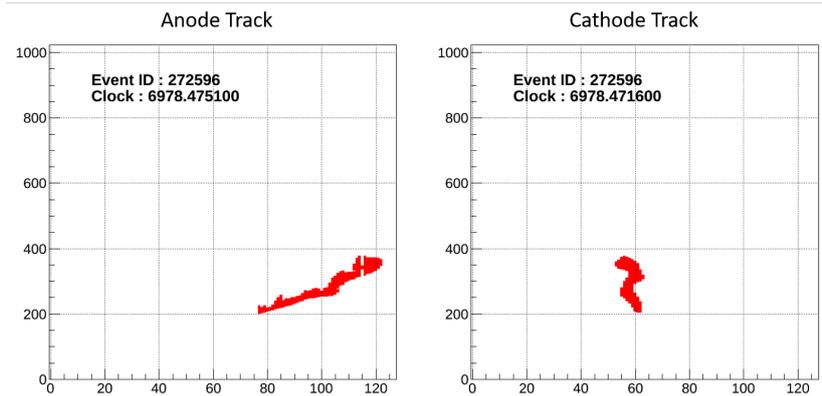


図 3.13 新回路で取得した飛跡の例

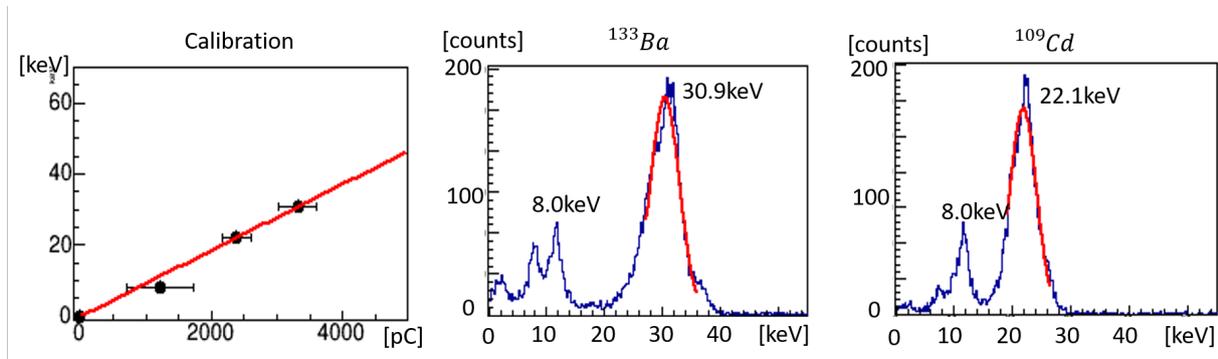


図 3.14 エネルギー較正曲線およびスペクトル

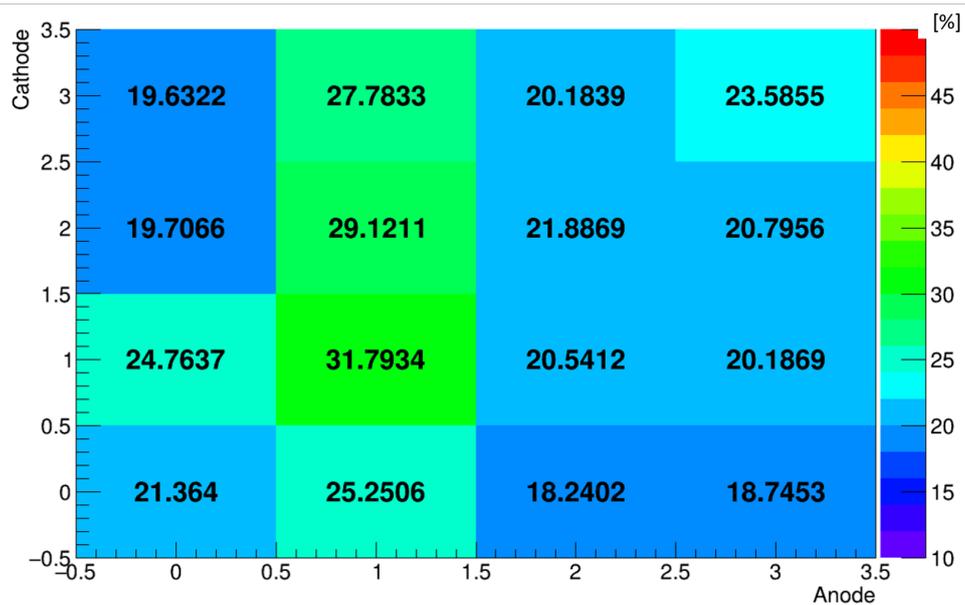


図 3.15 各領域ごとの  $^{133}\text{Ba}$  の 30.9 keV の分解能 (FWHM)。放電によって導通し使えなくなったストリップの多い領域は分解能が悪くなっている。通常の領域では平均 20% 程度の分解能である。

### 3.2.4 不感時間の測定

ここでは実測による不感時間の計測について述べる。TPC 回路が不感であるとき DAQ Run 信号が出力が止まる。これを利用して測定する。測定にはクロックジェネレータとスケーラーを用いた。実験セットアップを図 4.18 左に示す。ここで、クロックジェネレータによる 10 MHz の信号の総信号数を clock、クロックジェネレータによる 10 MHz の信号と DAQ Run 信号を論理反転させた信号に対して論理積をとった信号の総信号数を deadclock とすると、不感時間は次の式のように書ける。

$$deadtime[\%] = deadclock / clock \times 100 \tag{3.1}$$

この式を用いてシンチレータと線源の距離を変え、計数率を変化させ、不感時間を測定した。そのセットアップと結果を図 3.16 に示す。測定結果では TPC 基板 1 枚に対しては線源強度を強くしていくにつれて、データ収集レート、不感時間はともに増えている。1 kHz で不感時間が 3.1% と数 kHz でデータ取得をするという目標を達成している。しかし、TPC 基板を 2 枚使用したときには動作が異なっていた。線源強度を強くするにつれて、はじめは、データ収集レート、不感時間はともに増えている。数百 Hz 付近から線源強度を強くすると不感時間が増加することで、逆にデータ収集レートが下がっている。この点について改善を行う必要がある。

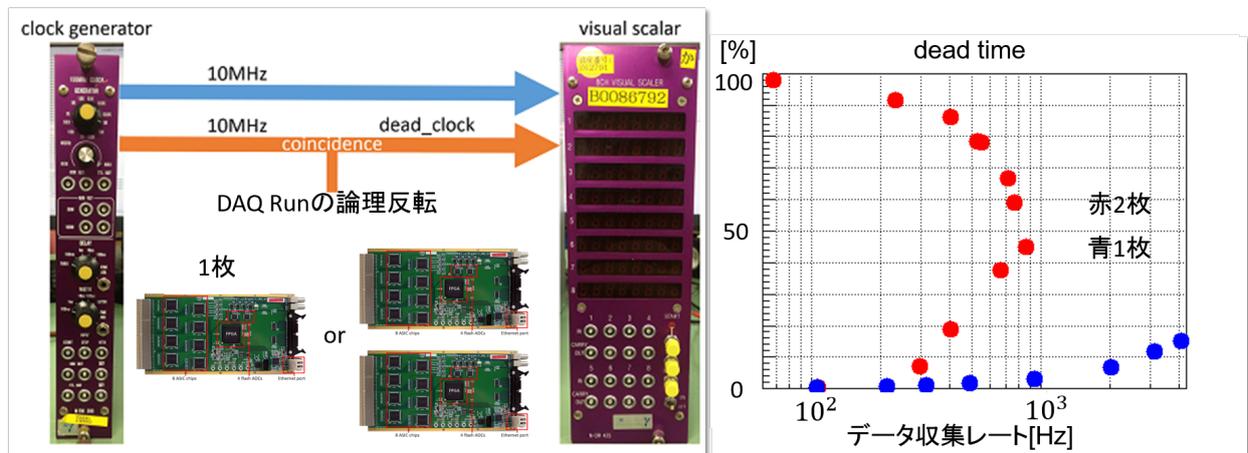


図 3.16 左は不感時間測定のセットアップ。右はデータ収集レートに対する不感時間のグラフとなっている。青点は TPC 回路 1 枚のときである。線源強度を大きくするにつれて、データ収集レートが増大し、不感時間が増加している。赤点は TPC 回路 2 枚のときである。線源強度を大きくするにつれて、はじめはデータ収集レートと不感時間がともに増加しているが、800 Hz 程度から不感時間の増加が顕著になり、データ収集レートが低下している。

### 3.2.5 通信法の改善による不感時間削減

ここでは、回路と PC とでデータ送信に使用している TCP 通信について説明する。TCP 通信では接続側が送信したデータに対して待ち受け側は確認応答したというパケットを返す。もし待ち受け側からの確認応答パケットを接続側が受信できなければ、接続側は時間をおいて再びデータを送る。この時間を TCP 再送時間タイムアウト時間という [34]。不感時間を測定している DAQ Run 信号を分析すると 2 成分あることが分かった (図 3.17)。線源強度が弱いときは、 $30\ \mu\text{s}$  ほどで、それは回路のデータ処理に由来する成分である。線源が強くなると、 $500\ \text{ms}$  という長い成分が現れる。この  $500\ \text{ms}$  という値は SiTCP でのデフォルトの TCP 再送時間タイムアウト時間と一致する。図 3.18 のように回路からは同時にデータが送られるため、2 枚の回路の内どちらかが送ることができず、再送されているのではないかと考えた。そこで、この TCP 再送時間タイムアウト時間を変更させながら不感時間を測定することにした。その結果を図 3.19 に示す。TCP 再送時間タイムアウト時間の値に依存して不感時間が変化していることがわかる。1 ms は TCP 再送時間タイムアウト時間の SiTCP における設定できる最小値である。1 ms に固定して、従来の基板との不感時間の比較した結果を図 3.20 に示す。従来の基板では VME モジュールの通信速度に律速してデータ収集レートが  $900\ \text{Hz}$  で限界となっているが、新回路では  $1\ \text{kHz}$  で不感時間が 3.3% と要求値を満たす。数 kHz でのデータ取得を達成することができた。

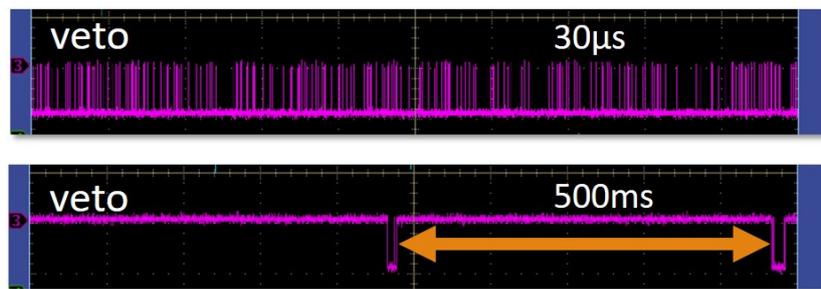


図 3.17 DAQ Run 信号の成分分析。線源強度が弱いときは、 $30\ \mu\text{sec}$  ほどで、それは基板に由来する成分である。線源が強くなると、 $500\ \text{ms}$  という長い成分が現れる。

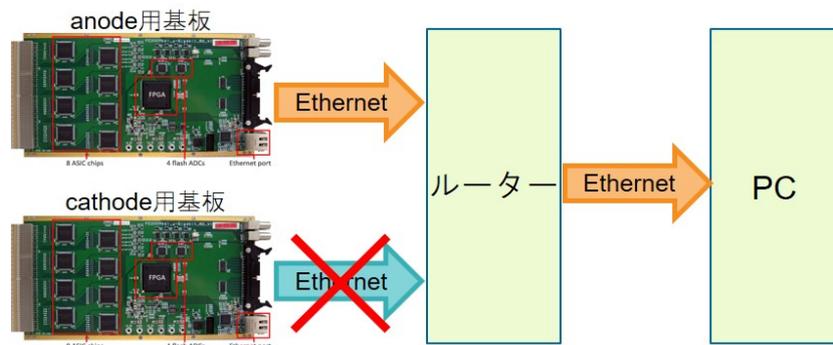


図 3.18 TCP 通信でのデータ取得の模式図。2 つの基板が同時にデータを送るため片方が受信できないことがある。その場合、TCP 再送時間タイムアウト時間の値だけ待って再送する。

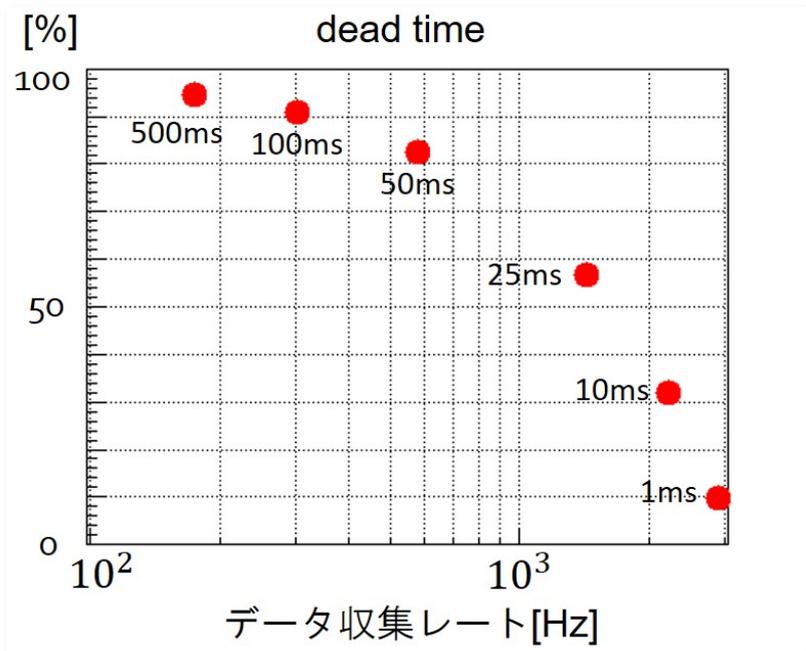


図 3.19 TCP 再送時間タイムアウト時間を変化させて、線源強度を一定にしたときの不感時間を測定した。TCP 再送時間タイムアウト時間に依存して不感時間が減少している。

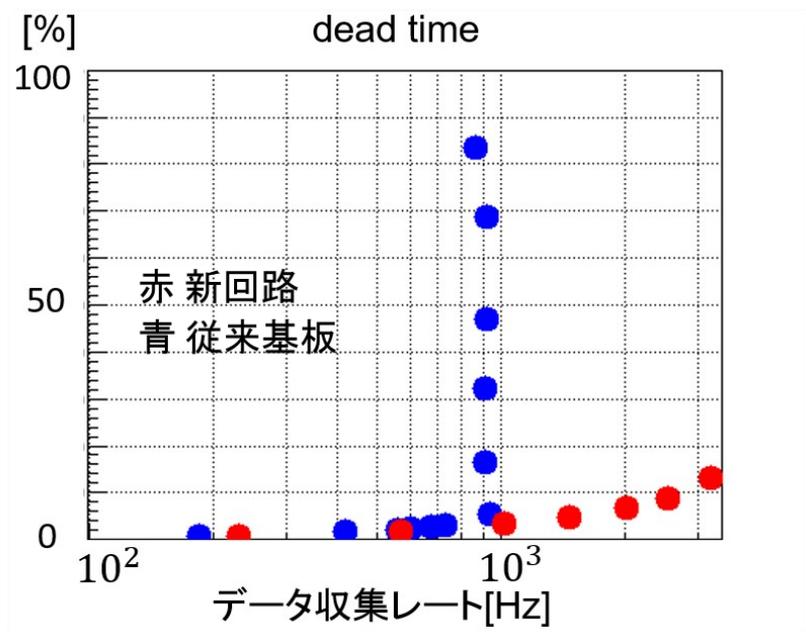


図 3.20 従来基板と新回路での不感時間の比較。従来基板ではデータ収集レートが 900 Hz で飽和状態となる。

## 第 4 章

# シンチレータ回路

この章では、シンチレータ回路の現状について説明し、必要な変更を明らかにし、新回路を開発、性能を評価する。

### 4.1 現行基板

浜松ホトニクス社製のマルチアノード光電子増倍管 H8500 を 6 本同時に読み出すために開発された回路 80256v2 について説明する。抵抗分割回路により光電子増倍管一つあたり、4 系統で読み出し、それぞれの系統については電荷増幅器、波形整形増幅器、サンプルホールド、ADC から構成される。光電子増倍管ごとのトリガー回路の 6 本分の論理和で出力がなされる。ピークホールド回路により波高値を計算し、信号線で接続した VME モジュールでデータを読み出す。1 事象あたりの処理時間は 20  $\mu\text{s}$  となっている。基本性能は表 4.1 に示す。

表 4.1 クリアパルス社製 80256v2

検出器	浜松ホトニクス社製 H8500
収容回路数	24 チャンネル (PMT1 個あたり 4 チャンネル)
増幅器形式	電荷増幅、波形整形 (ピーキングタイム 5 $\mu\text{s}$ )
ADC	12 bit
ダイナミックレンジ	-800 pC
トリガー	ダイノード
処理時間	1 事象あたり 20 $\mu\text{s}$
データ送信方法	イーサネットケーブルを通じて VME モジュールに送信
トリガー制御	LVDS 信号による外部との送受信
所要電源	+6 V、120 mA

#### 4.1.1 問題点・改善点

要請としては三つであり、アナログ波形を読み出す際に、サンプルホールドから波形サンプリングによる ADC に変更すること、コモンスタートからコモンストップによるトリガーに変えること、通信速度向上することである。現行回路のように、TPC のデータの有無に応じて、データを送信または破棄といった操作が必要なくなる。データ収集のための信号を表 4.2 にまとめた。ヒットの判定は PMT 3 つの論理

和になっている。

表 4.2 新シンチレータ回路に送受信される信号

信号名	方向	説明
trigger	入力	トリガーをかける。リングバッファから前段 FIFO にデータを送信する。
reset	入力	トリガー番号をリセットする。
hit	出力	シンチレータにヒットしたタイミングで信号を出す。
process	出力	データを処理している時間は信号を出す。

## 4.2 新回路開発

まず、回路シミュレータを用いて、アナログ波形の整形増幅回路をシミュレーションした。図 4.1 は、ダイノード信号のための回路である。非反転増幅器が二つ、コンパレータ回路が一つでできている (図 4.1)。ダイノード信号はシンチレータの発光時間で時定数が決まり、時定数は 30 ns 程度である。コンパレータ回路は外部から 2.5V を入力して、0 から -2.5 V までスレッシュホールドとして設定することができ、0 から 4095 ch の DAC がそれに対応している (0.61 mV/DAC)。コンパレータ回路でスレッシュホールドと比べて High と判定された場合、FPGA に信号が送られ、PMT 3 個の論理和としてヒット信号が出力される。図 4.2 は抵抗チェーンから出力された信号の 1 系統分を表している。電荷積分型増幅器および反転増幅器で電荷として増幅され、ポールゼロキャンセル、増幅、オフセット調整と構成される。シミュレーションの結果を図 4.3 に示す。入力電荷としては、となっている。色が各地点での波形を表している。最終的にピンクの波形が出力される。この波形は、時定数  $\sim 3 \mu s$  となっている。

要求を受けて開発したシンチレータ用読み出し基板が図 4.4 である。性能確認のために試験をした。

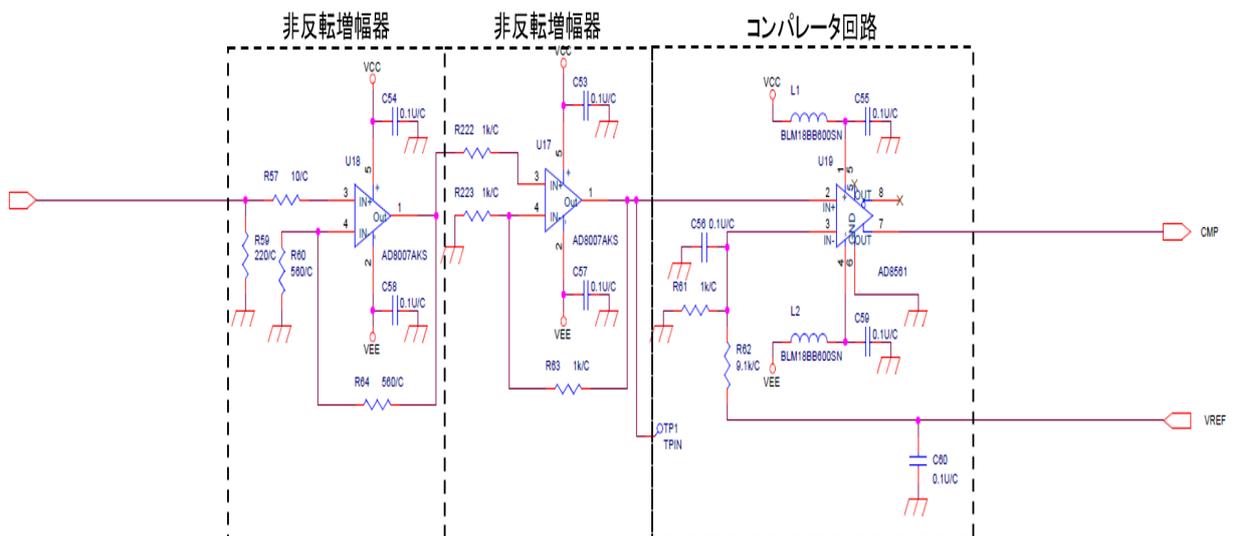


図 4.1 ダイノード信号用デジタル回路

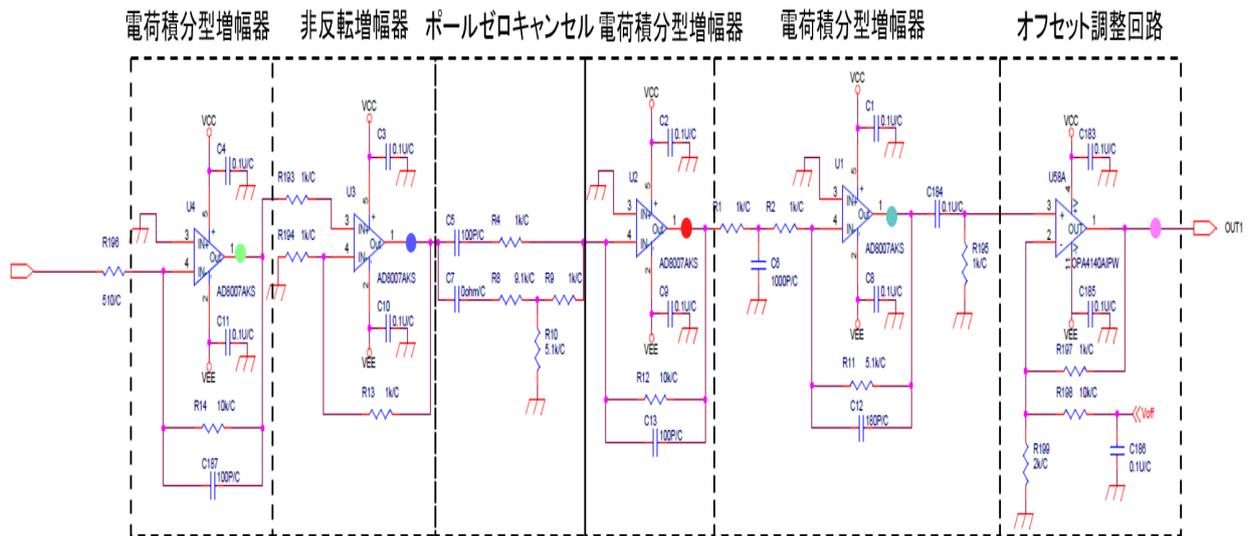


図 4.2 アナログ信号波形整形増幅回路

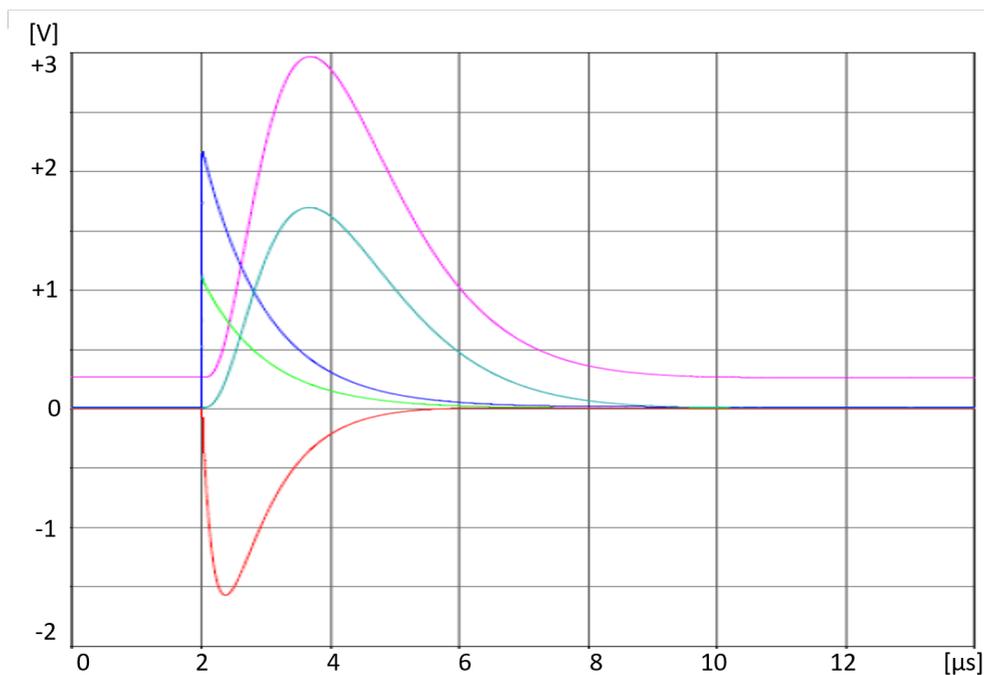


図 4.3 回路シミュレータによる波形。図 4.2 の回路図上にある点の箇所での波形が描かれている。点の色が対応している。

### 4.2.1 線形性の確認

まず、シンチレータに 1 MeV のガンマ線が入射した時に光電子増倍管のアノードから出力される信号の電荷量を次の式から概算した。

$$charge = L \times \Xi \times \eta \times \sigma \times e \tag{4.1}$$

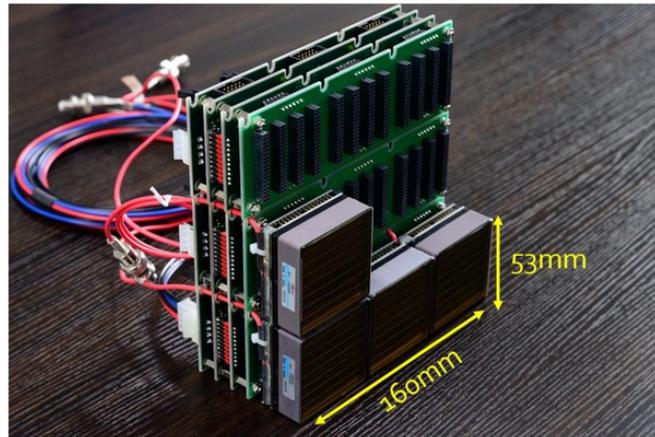


図 4.4 シンチレータ用新回路の写真

ここで、 $L$  は GSO シンチレータの発光量 ( $14000[\text{photon/MeV}]$ )、 $\Xi$  はシンチレータから光電面までの伝達効率 ( $\sim 90\%$ )、 $\eta$  は光電面における量子効率 ( $\sim 30\%$ )、 $\sigma$  は光電子増倍管での増幅率 ( $\sim 10^6$ )、 $e$  は素電荷 ( $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ) である。これらを代入して計算すると、 $1 \text{ MeV}$  のガンマ線に対する H8500 アノードからの信号の電荷量は約  $700 \text{ pC}$  と概算することができる。この回路における線形性は  $700 \text{ pC}$  を超える値まで確保したい。この  $700 \text{ pC}$  という値を受けて、現行の基板のダイナミックレンジは  $800 \text{ pC}$  である。

線形性の確認のための実験を行った。そのときのセットアップを図 4.5、図 4.6 に示す。パルスジェネレータにて矩形波を  $0 \text{ V}$  を基準に  $-10 \text{ mV}$  から  $-4000 \text{ mV}$  まで大きさを変えて生成し、を微分回路を通して入力した。この微分回路は GSO シンチレータの減衰時定数  $60 \text{ ns}$  に合わせて、 $R=50 \Omega$ 、 $C=100 \text{ pF}$  とし、減衰時定数  $\tau=CR=50 \text{ ns}$  と決めた。微分回路を通した後の波形が図 4.5 の黄色波形である。水色波形は、パルス生成から  $8 \mu\text{s}$  後に trigger 信号としてシンチレータ回路に入力している。この結果を図 4.7 と図 4.8 に示す。入力電荷が  $10 \text{ pC}$  から  $100 \text{ pC}$  までの値を直線でフィットし、その直線との差分を図 4.8 にプロットした。  $1000 \text{ pC}$  以上では線形性が保てていないが、  $1000 \text{ pC}$  までは差分が  $2\%$  以内に収まっていることがわかる。GSO シンチレータの分解能は  $1 \text{ MeV}$  で  $10\%$  程度なので、分解能に比べて影響が小さい。線形性は要求を満たしていると言える。

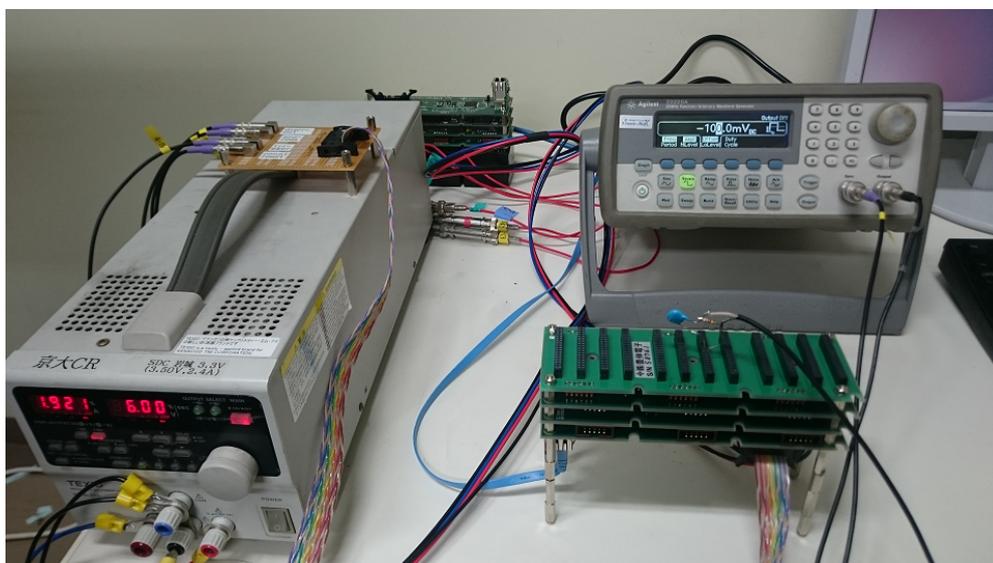


図 4.5 線形性確認のためのセットアップ。正面右が新基板、正面右奥がパルスジェネレータ、左が基板に対する電源である。

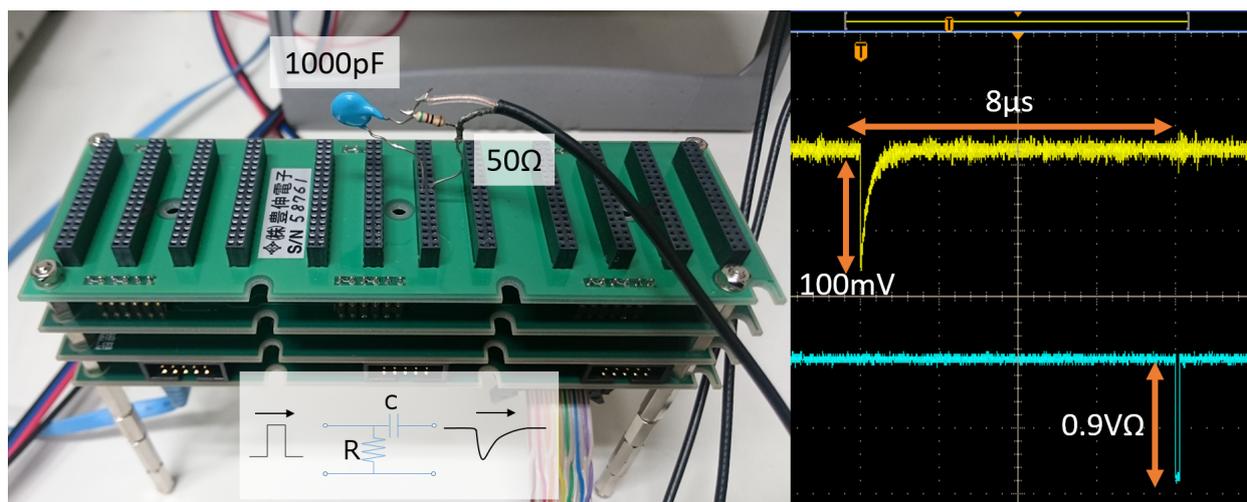


図 4.6 テストパルス入力試験

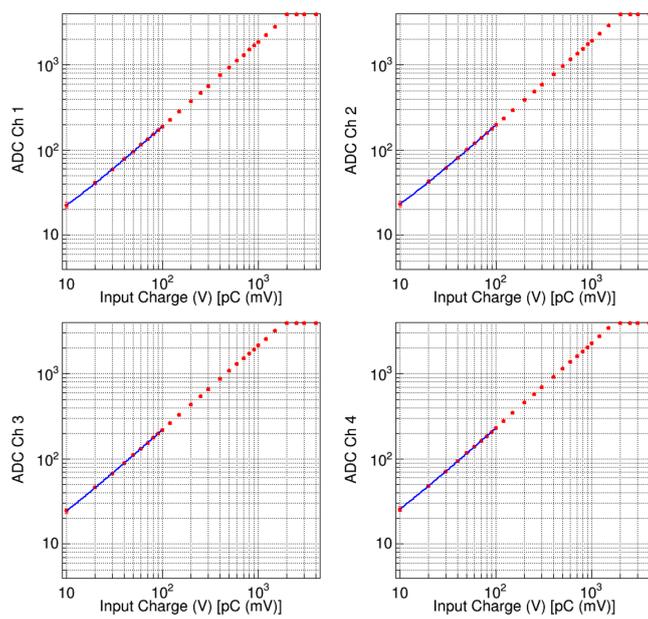


図 4.7 1PMT におけるテストパルスと ADC ch の関係。

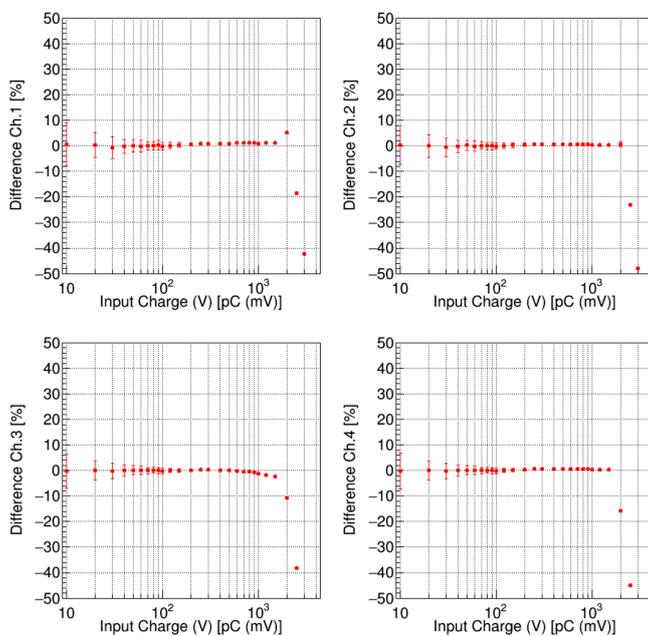


図 4.8 1PMT におけるテストパルスの大きさに対する ADC ch とフィット直線との差分。フィット直線は図 4.7 から求めている。

### 4.2.2 波形のフィッティング

線形性が保証できたので次はシンチレータと光電子増倍管を用いて実際の波形を取得した。線源には $^{137}\text{Cs}$ を用いた。実際の波形を図4.9に示す。波形の大きさと時間情報を得るために波形をこの二つを変数にもつ関数でフィットする必要がある。その関数を次式のように選んだ。

$$y = C \left( \frac{x - x_0}{\tau} \right)^2 \times \exp \left[ -\frac{x - x_0}{\tau} \right] + y_0 \quad (4.2)$$

$x$ が時刻、 $y$ が電圧を表している。また、時定数を $\tau$ 、立ち上がり時刻を $x_0$ 、オフセットを $y_0$ 、 $C$ を規格化定数としている。この関数は時定数がすべて等しい1階微分2階積分回路に矩形波を入れたときに得られる関数である。アンダーシュートまでは再現できていないが、フィット(図4.9の赤線)が良い精度で表せていることが確認できる。

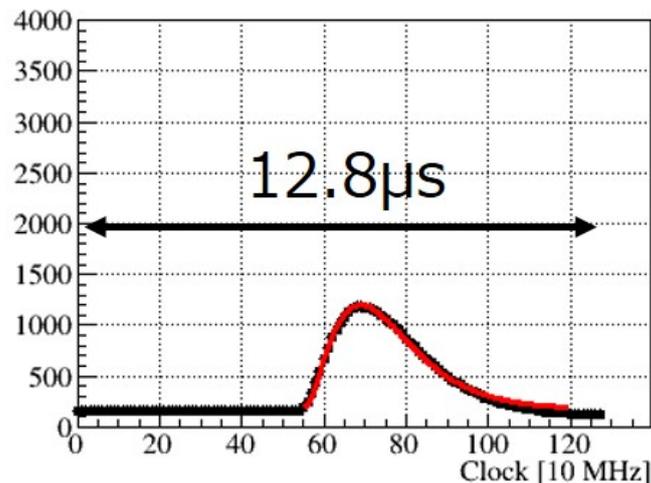


図4.9 線源 $^{137}\text{Cs}$ を用いて取得した実際の波形。横軸はクロック、縦軸はADC値である。10MHzでサンプリングしているので1 clock=100 nsである。

### 4.2.3 重心演算による位置決定とエネルギー較正

エネルギー較正を行うために、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{22}\text{Na}$ を $1.5 \times 10^6$ イベントずつ測定した。64ピクセルのシンチレータを読み出し数を減らすために4系統で波形サンプリングしているため、一光子ごとにどのピクセルに入射したのか、特定しなければならない。そこで重心演算を用いた。図4.10上のように位置を64ピクセルに特定することができた。横方向につぶれているのは抵抗チェーンの接続方法によるものである。このイメージを多次元フィットを行い、実際の形状である格子状に補正した。これが、図4.10下である。これを各ピクセルごとにスペクトルを表示したのが、図4.11となっている。ピクセルごとにエネルギー較正直線を求めたのが図4.12である。エネルギー較正後に、各ピクセルごとのスペクトルを足し合わせて描いたスペクトルが図4.13となっている。そしてこのスペクトルからエネルギー分解能を求めたものが図4.14である。 $^{137}\text{Cs}$ のピークである662 keVの分解能の3光電子増倍管の平均は11.1%(FWHM)であった。これは今までの基板と同等の値である。

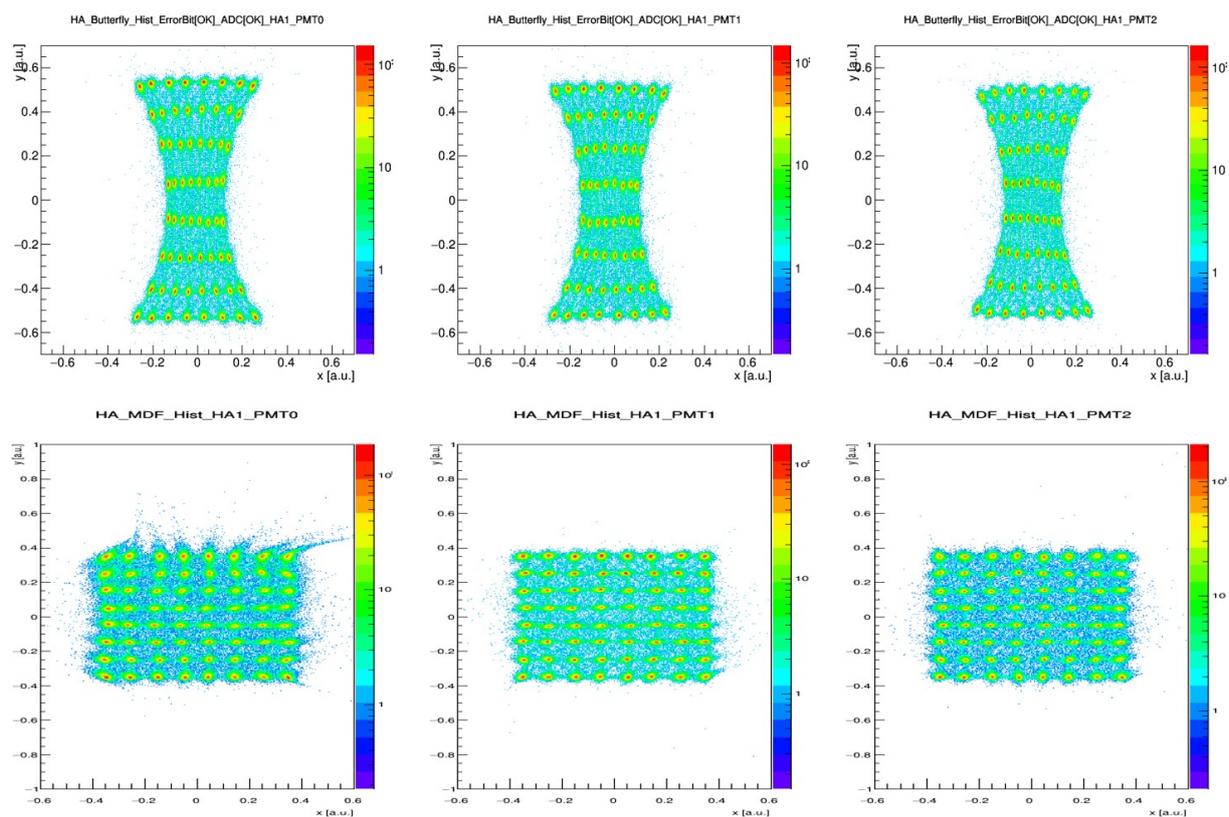


図 4.10 シンチレータのガンマ線入射位置の再構成。上の3つの図は重心演算により、入射したピクセルを求めたイメージ。下の3つの図は多次元解析によりピーク位置を格子状に写像したイメージ。

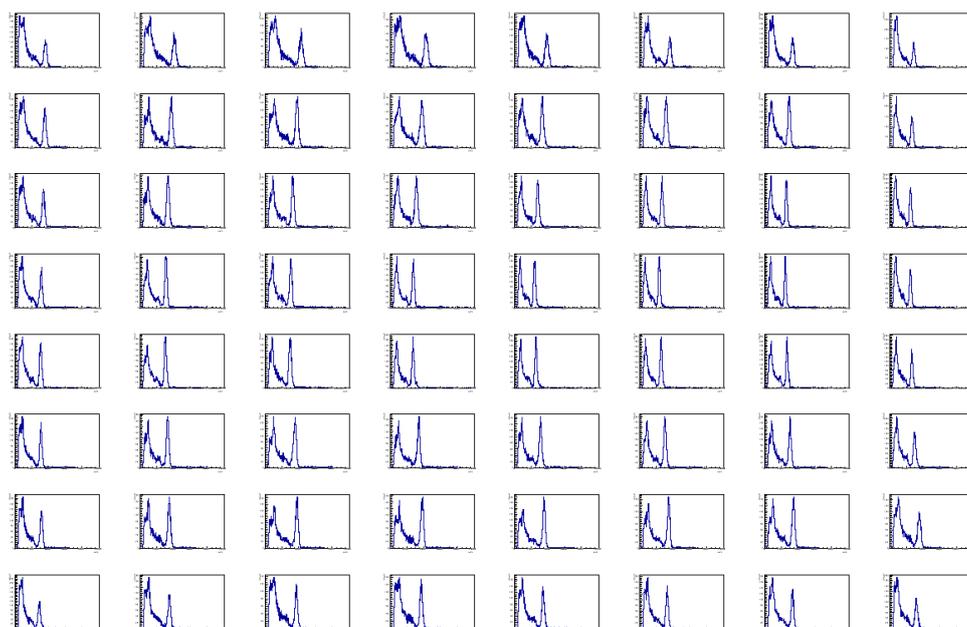


図 4.11 ピクセル単位の  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル



図 4.12 シンチレータ各ピクセルのエネルギー較正。横軸、縦軸がそれぞれ各線源のピークの ADC 値、エネルギーとなっている。

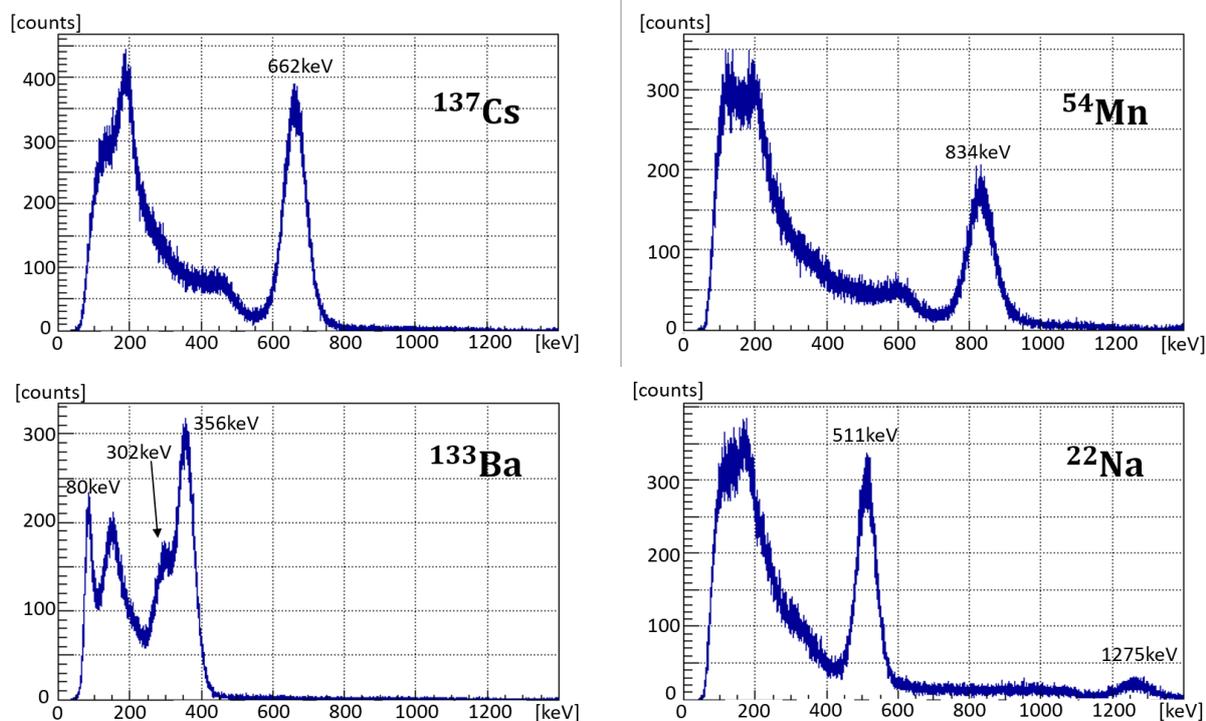


図 4.13 PMT 単位での各線源のスペクトル

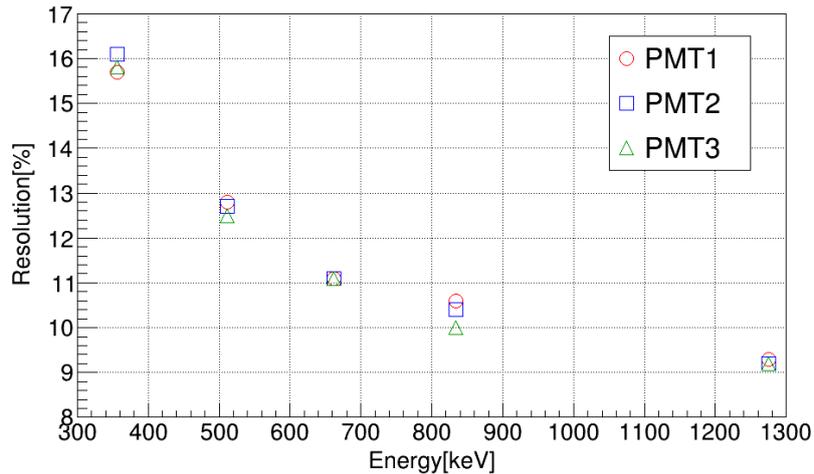


図 4.14 各エネルギーごとのエネルギー分解能

#### 4.2.4 時間情報の取得

時間情報の取得のために二つの情報を用いている。一つ目は、波形ごとに関数をフィットすることによる時間情報である。二つ目は、FPGA による時間情報である。TPC の空間分解能の要請から、数十 ns の時間分解能が必要であるため、FADC のサンプリングは 10 MHz であるが、それより細かい 100 MHz で FPGA はクロックを数えている。外部から trigger 信号を受信してから、次のクロックまでの時間を数えることでより正確に時間情報を得ることができる (図 4.15)。これをサブクロックと呼ぶことにする。0 クロックからシンチレータが立ち上がるまでの時間を  $T$  と定義すると、シンチレータの波形の立ち上がりから、トリガーが入るまでの時間は  $128 - T$  と書くことができる。さらにサブクロック  $t$  を用いてより正確に表すと  $128 - T + 1 - t/10$  と書ける。シンチレータでセルフトリガーをした際は同じ時刻に波形が立ち上がることを利用して、時間分解能を求める。波形立ち上がりからトリガーまでの時間の分布図を図 4.16 に示す。図 4.16 左はサブクロックを用いていない場合であり分解能は  $0.089 \mu\text{s}$  (FWHM)、図 4.17 右はサブクロックを用いた場合であり、分解能は  $0.031 \mu\text{s}$  (FWHM) である。飛跡のドリフト速度を  $50 \text{ mm}/\mu\text{s}$  と仮定すると、それぞれ  $4.4 \text{ mm}$  と  $1.5 \text{ mm}$  となる。uPIC の読み出しピッチが  $0.8 \text{ mm}$  であることから、サブクロックを用いると同等程度の精度であることが分かる。

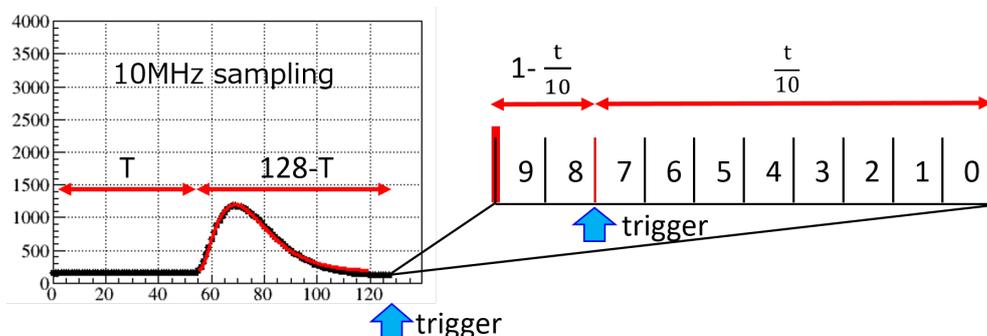


図 4.15 シンチレータの立ち上がりからトリガーがはいるまでの時間の求め方

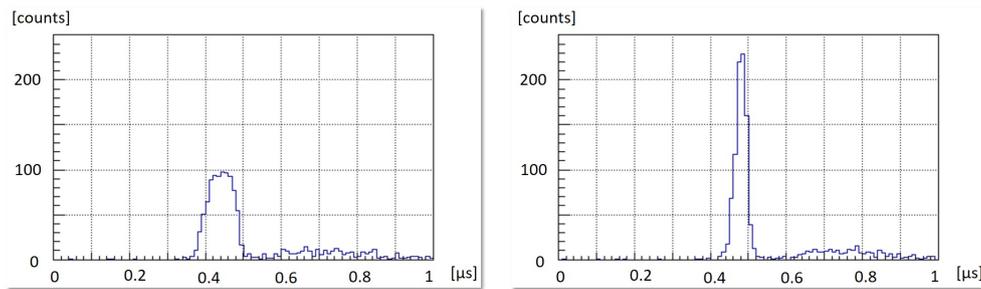


図 4.16 セルフトリガーによる時間分解能

#### 4.2.5 不感時間

ここまでで、新回路が現行の回路と比べて、同等のエネルギー分解能をもち、ガンマ線到来の時間情報を取得できることがわかった。ここでは実測による不感時間の計測について述べる。シンチレータが不感であるとき process 信号が出力されている。これを利用して測定する。測定にはクロックジェネレータとスケーラーを用いた。実験セットアップを図 4.17 左に示す。TPC と同様に、不感時間の評価をする。クロックジェネレータによる 10 MHz の信号の総信号数を clock、クロックジェネレータによる 10 MHz の信号と process 信号の論理積の総信号数を deadclock とすると、不感時間は次の式のように書ける。

$$deadtime[\%] = deadclock / clock \times 100 \quad (4.3)$$

この式を用いてシンチレータと線源の距離を変えて不感時間を測定した。不感時間を図 4.17 右に示す。赤点が基板 1 台、青点が基板 3 台での結果である。数 kHz でデータを取得するという目標に対して、達成できていないことが分かる。TPC のデータを収集速度と比較しても不感時間が一桁程度多くなっている。これは process 信号が 1 ms から 2 ms と継続する事象が存在することによる。不感時間を減らすために 2 つの改良を行った。まず第一に、通信手法を変更した。この回路では 1 事象ごとにデータを PC に送信しているが、回路内のバッファにデータを貯めて、25 事象ごとにデータを送信するように変更した。通信回数を減らすことができ、不感時間を減らすことができる。第二にデータ量の削減を行った。トリガーがかかったとき、全シンチレータからの波形データを PC に送信していたが、スレッシュドを超えシンチレータのみデータを送る仕様にした。シンチレータ 9 つのうち、一つ分のデータを送るので、1/9 に減らすことができる。また、この回路では 1 事象あたり 2311 Byte のデータとなっていて、そのほとんどが波形サンプリングのデータになっている。波形を 10 MHz でサンプリングしているが、これを 2.5 MHz に減らすことで、1/4 に削減することができる。この改良によりデータ量を  $1/4 \times 1/9 = 1/36$  に減らすことができる。

この 2 つの改良を行ったあと、データ取得試験をした。1 回路のみで動作させたが、データ収集レートが 3.0 kHz で不感時間が 100% となった。改良前は 700 Hz という値に対して改善していて数 kHz でデータを取得するという要求を満たす。今後の課題として、サンプリングを 2.5 MHz に変更しているので、変化したエネルギー分解能と時間分解能について、要求を満たすものなのか、評価する必要がある。

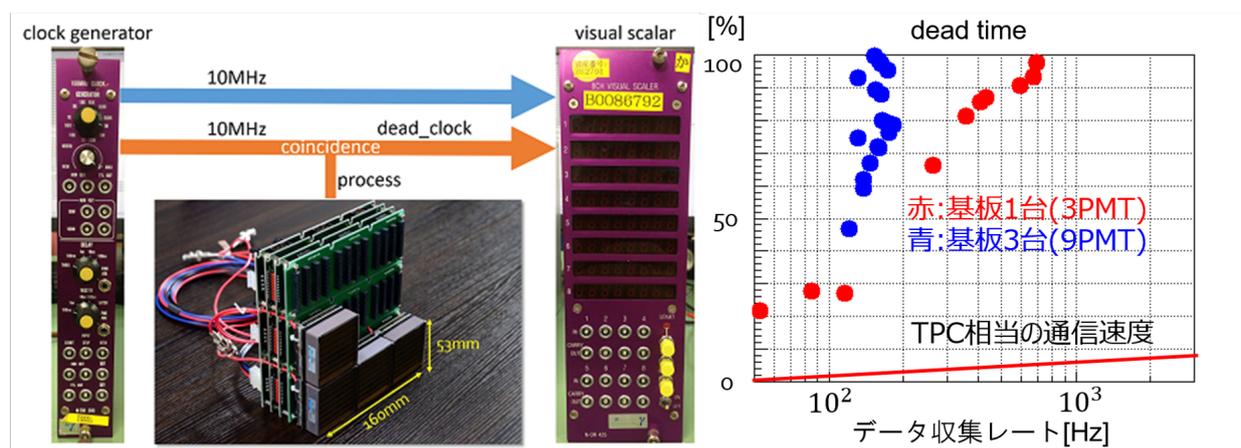


図 4.17 (左) 不感時間計測のセットアップ。(右) データ収集レートに対する不感時間の測定結果。

## 第 5 章

# TPC トリガーでの ETCC 試験

本章までに、TPC 回路、シンチレータ回路それぞれについて新規開発し、試験を行った。本章ではそれらを組み合わせて ETCC として試験することで、新しいトリガー方式でガンマ線検出ができるのかを検証する。

### 5.1 原理検証実験

#### 5.1.1 セットアップ

TPC トリガー ETCC 試験機の模式図を図 5.1 に示す。データの収集には新 TPC 回路、新シンチレータ回路、汎用 NIM モジュールを組み合わせて構築したトリガーコントロール回路を用いた。データの送信にはイーサネットを用いた。VME モジュールを完全に省くことができたので、コンパクトに収めることができた。トリガーコントロールのための論理は図 5.2 に表す。シンチレータにヒットがあった場合、gate 信号を作る。この時間幅は TPC の有感領域を端から端までドリフトする時間 (約  $3 \mu\text{s}$ ) より長い  $4 \mu\text{s}$  とした。gate と TPC hit の論理積を取り、出力された信号を  $8 \mu\text{s}$  送らせて、トリガー信号として両検出器に入力する。veto の時間は process 信号の論理和であるため、シンチレータ用基板のみするときと同様に不感時間が長くなっている。図 5.3 に実験装置の配置図を示す。線源には  $^{137}\text{Cs}$  を用いた。線源があるときのトリガー計数率は  $4.7 \text{ Hz}$ 、線源を置かないとき (バックグラウンド) のトリガー計数率は  $1.7 \text{ Hz}$  だった。

#### 5.1.2 取得できる事象例

図 5.4、5.5、5.6 は取得できるデータの典型例である。TPC からは飛跡とアナログ波形データが得られる。シンチレータからはアナログ波形データが得られる。図 5.4 では有感領域を横切るように直線的な飛跡であり、シンチレータの波形が飽和している。このため、ミュー粒子を検出していると考えられる。図 5.5、5.6 はコンプトン散乱イベントのデータである。シンチレータの波形からは、3 種類の情報を得る。波形の大きさから検出したガンマ線のエネルギーを求める。4 つの読み出し信号の重心演算から、検出したシンチレータのピクセルを求め、実験装置のジオメトリを元にガンマ線の吸収位置を求める。また波形の時間情報から、シンチレータの立ち上がり時刻からトリガーが入るまでの時間 TDC を求める。TPC からは検出した電子のエネルギーと飛跡を得る。飛跡に関してはドリフトして  $\mu\text{PIC}$  で検出したタイミングでトリガーをかけているので、散乱点の  $z$  座標がわからない (図 5.6 赤の飛跡)。これをシンチレータの時間情報 TDC で補正する。この事象ではオフセットを補正して算出すると、 $1.38 \mu\text{s}$  であり、ドリフト

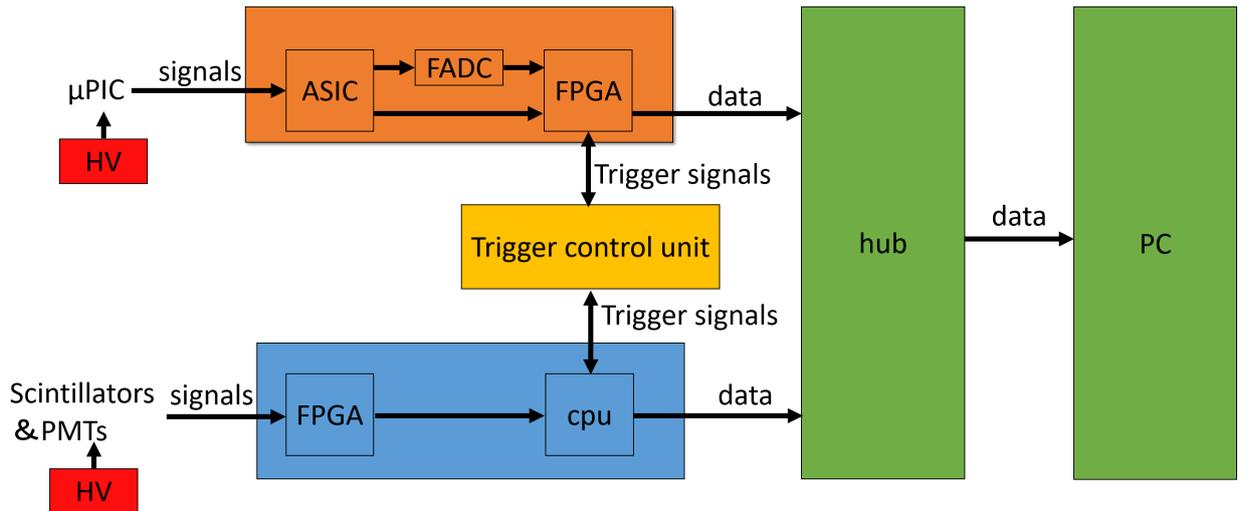


図 5.1 実験系模式図。ネットワークを用いて通信している。トリガーコントロールは NIM モジュールで行っている。

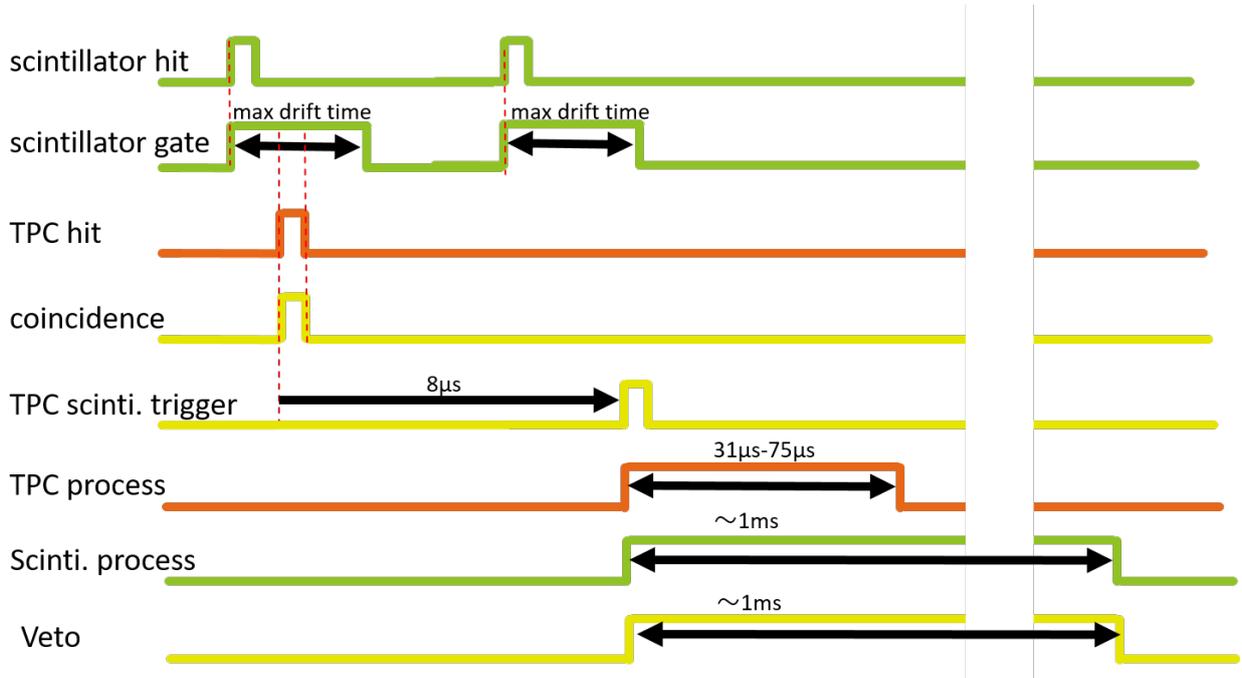


図 5.2 ETCC でのトリガーコントロール信号のチャート

速度  $51.1\text{mm}/\mu\text{s}$  でかけることで、距離換算で、飛跡の  $z$  座標を  $70.55\text{mm}$  分足している。その結果、青の飛跡を得る。式 2.1、2.2、2.3 を用いて、再構成を行っている。

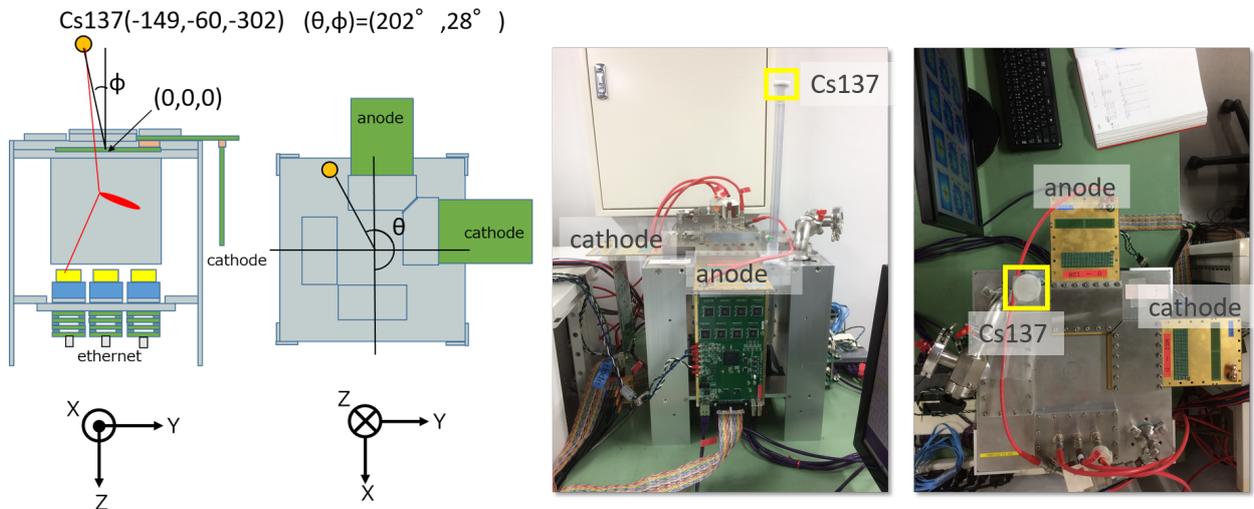


図 5.3 実験装置の配置図。実験系座標は TPC 容器上板の中心を原点とした左手系座標系に定義した。

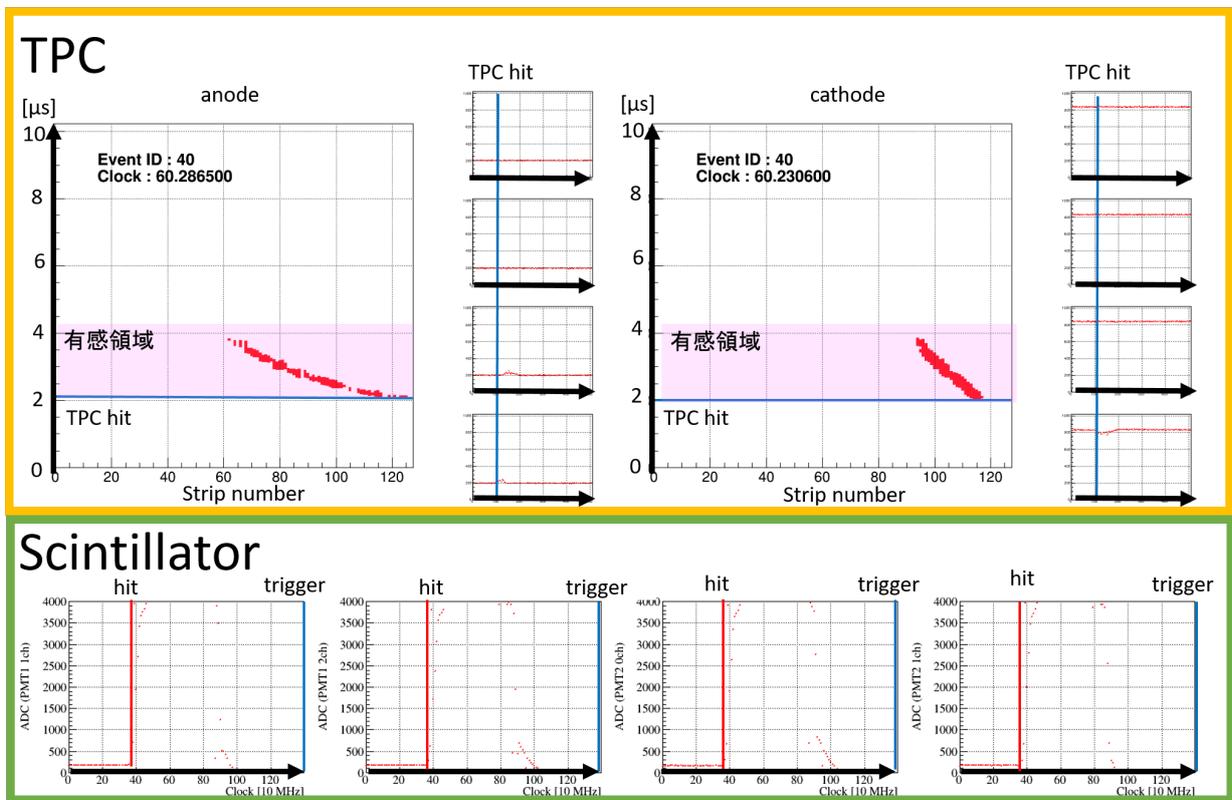


図 5.4 ETCC の取得できるデータの典型例を表す。検出しているのはミュー粒子である。

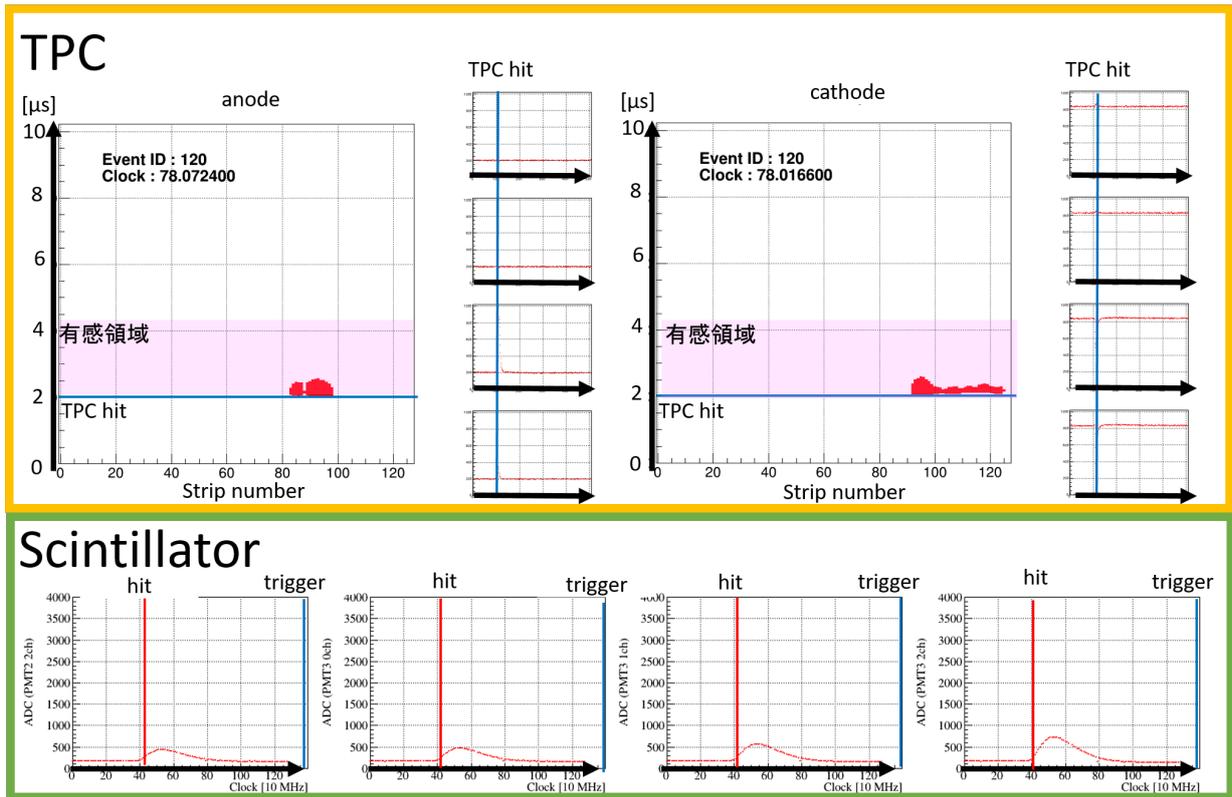


図 5.5 ETCC の取得できるデータの典型例を表す。コンプトン散乱事象を表している。

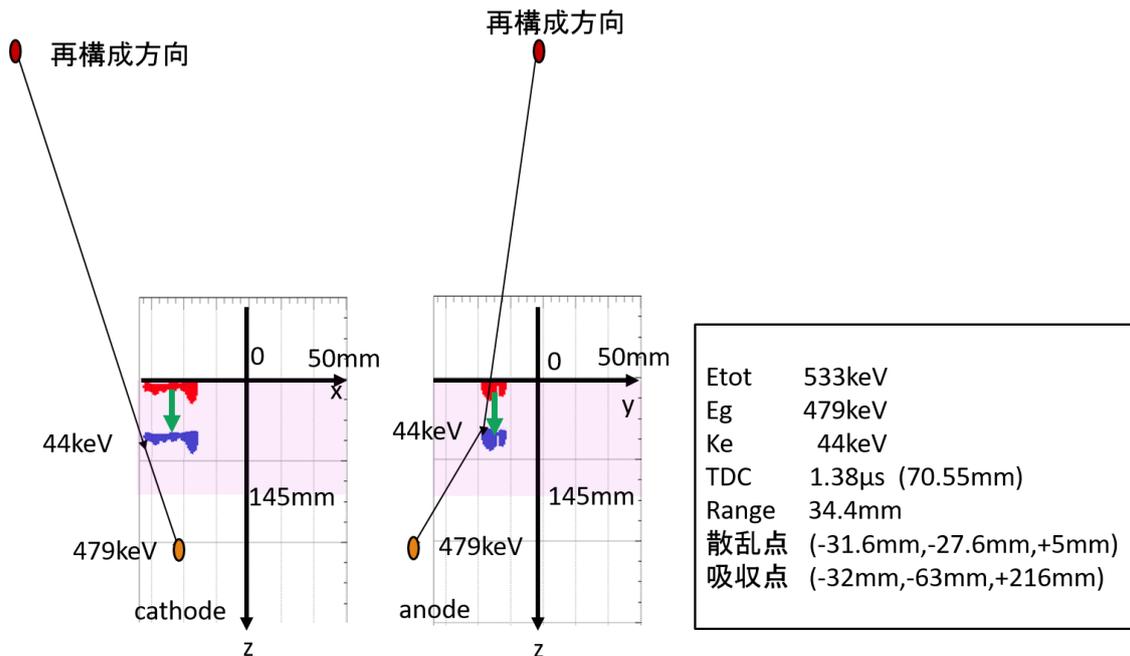


図 5.6 図 5.5 と同じ事象のガンマ線到来方向再構成を表している。図網掛け部分は TPC の有感領域である。

## 5.2 事象の識別とイメージング

### 5.2.1 検出順序

ここでは取得したデータを用いた解析について述べる。図 5.7 左はトリガーがかかったタイミングでの飛跡において、クロックの一番小さい値を表している。TPC に対してはセルフトリガーとなっているので、ピークとして現れる。それが 205 クロック付近だと考えられる。それよりもクロックの小さい値で事象が存在しているのは、シンチレータで先にヒットして、その後、TPC で偶然事象が検出されたと考えられる。図 5.7 右はシンチレータの時間情報である。これを理解するために図 5.8 と合わせて説明する。シンチレータの hit 信号を広げて、ゲートにして、その間に TPC がヒットした場合、データを収集している。 $\mu$  粒子など TPC とシンチレータをほぼ同時にヒットする事象では、GEM と  $\mu$ PIC の間をドリフトする時間分だけ、検出時間にずれが生じる。その時間を  $\Delta t$  とする。TPC のヒット信号が幅を持っているので、TPC が先にヒットして、その後シンチレータがヒットすると偶然同時事象であるが、データを収集してしまう。データ収集する論理として、シンチレータが先にヒットしたことを組み込む必要がある。今回は解析でこの条件を課した。

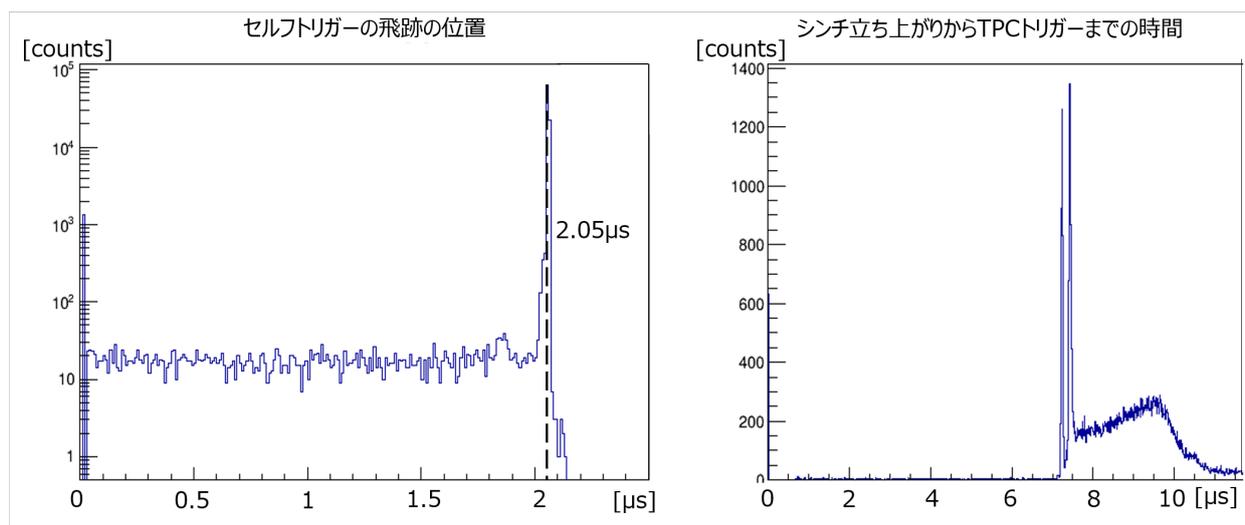


図 5.7 (左)TPC の飛跡の位置。(右) シンチレータの立ち上がりから TPC からのトリガーがかかるまでの時間。

### 5.2.2 カット条件とイメージング

カット条件には以下の 4 つがある。1 つ目は前述の通り、検出順序である。2 つ目は fiducial cut である。TPC の有感領域を出ていく電子や、有感領域外から入ってくる電子を除外する必要がある。それを判断するために有感領域を内側に 20 mm ずつ削ることにした。20 mm と大きいのは GEM と  $\mu$ PIC の位置が場所に応じて 5 mm から 8 mm ずれているため、検出領域が狭まっていることによる。3 つ目は粒子の TPC へのエネルギー損失率を用いたカットの  $dE/dx$  cut である (図 5.9)。式 5.1 かつ 5.2 の条件を課している。

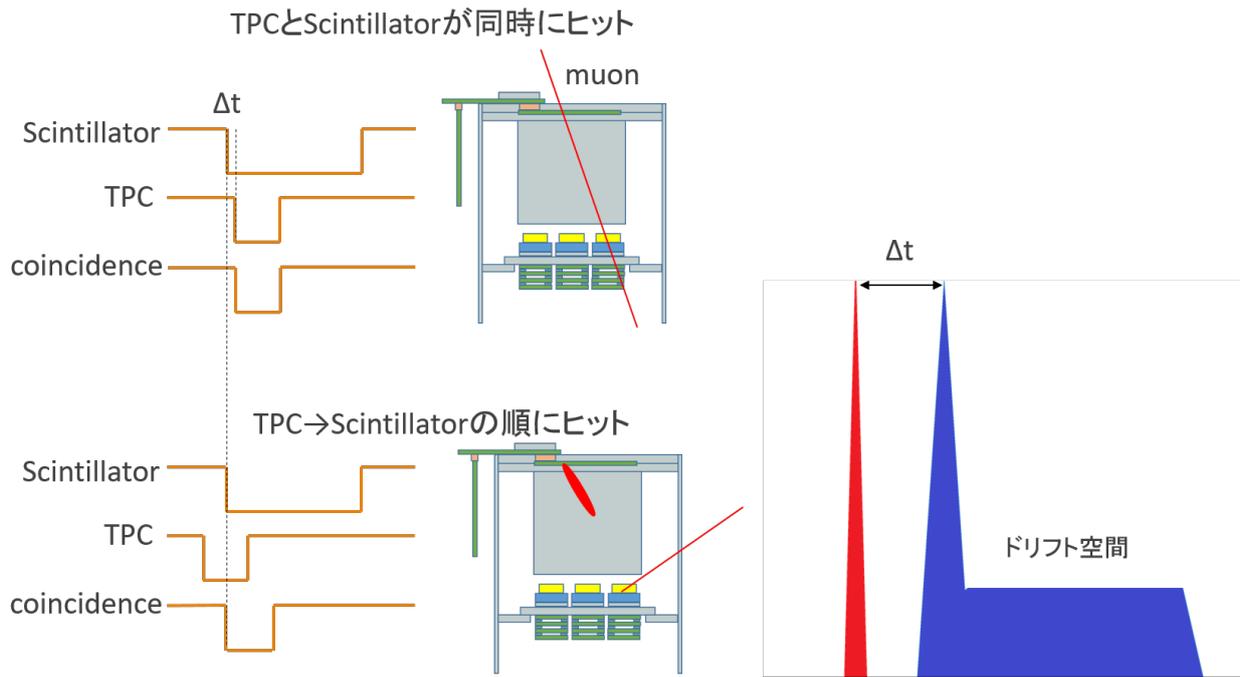


図 5.8 (左)TPC とシンチレータのヒット順序によるタイミングチャート。(右) シンチレータの立ち上がりから TPC からのトリガーがかかるまでの時間の模式図。

$$\begin{cases} Range > \frac{7.1}{1.74 \times 10^{-3}} \times \left( \frac{K_e}{1000} \right)^{1.72+0.22} + 11 \\ Range < \frac{7.1}{1.74 \times 10^{-3}} \times \left( \frac{K_e}{1000} \right)^{1.72-0.22} + 19 \end{cases} \quad (5.1)$$

ここで Range[mm] は飛跡長、 $K_e$  は TPC のエネルギーを表している。これにより粒子識別を行って、電子であることを保証している。4 つ目にエネルギーカットである。ETCC として取得したエネルギーを 662keV を中心に 10% 範囲にある事象を選んだ。図 5.10 は横軸が TPC のエネルギー  $K_e$ 、縦軸がシンチレータのエネルギー  $E_g$  である。コンプトン散乱事象として検出されていれば、 $K_e + E_g = 662 \text{ keV}$  の直線として表れる。カットをしていくにつれて、直線が強調されていっていることが分かる。図 5.11 は全事象および全カット後のバックプロジェクションイメージである。第 3 象限の白十字が線源の位置である。図 5.12 は ETCC として動作させたときの  $^{137}\text{Cs}$  線源のスペクトルである。カットによって雑音が除去できている。図 5.11 のイメージおよび図 5.12 のスペクトルから、 $^{137}\text{Cs}$  線源からのガンマ線を検出できていると考えられる。

課題として、まず ARM、SPD を定量化し、それを用いた角度決定精度を算出する必要がある。またシンチレータの時間情報を使って、飛跡の位置情報を取得しているので、飛跡の上下方向の位置分解能は TPC とシンチレータの両方に依存する。シンチレータでトリガーした時と角度決定精度を比較して評価する必要がある。

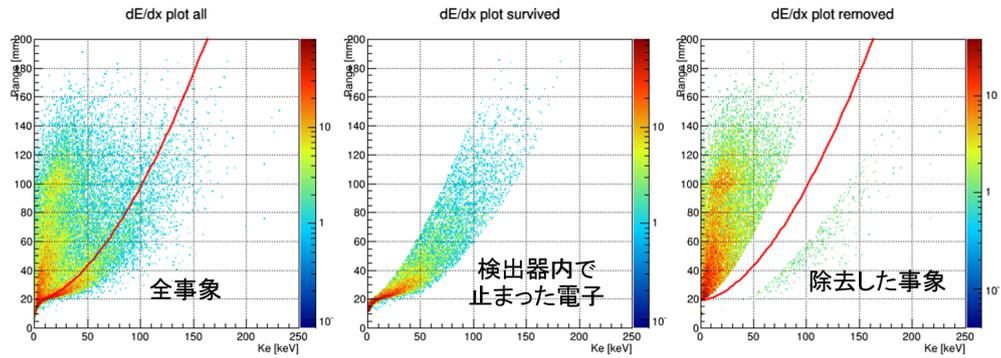


図 5.9 TPC に対するエネルギー損失率による事象の弁別。左図の事象から中心図の事象を残し、右図の事象を除外した。

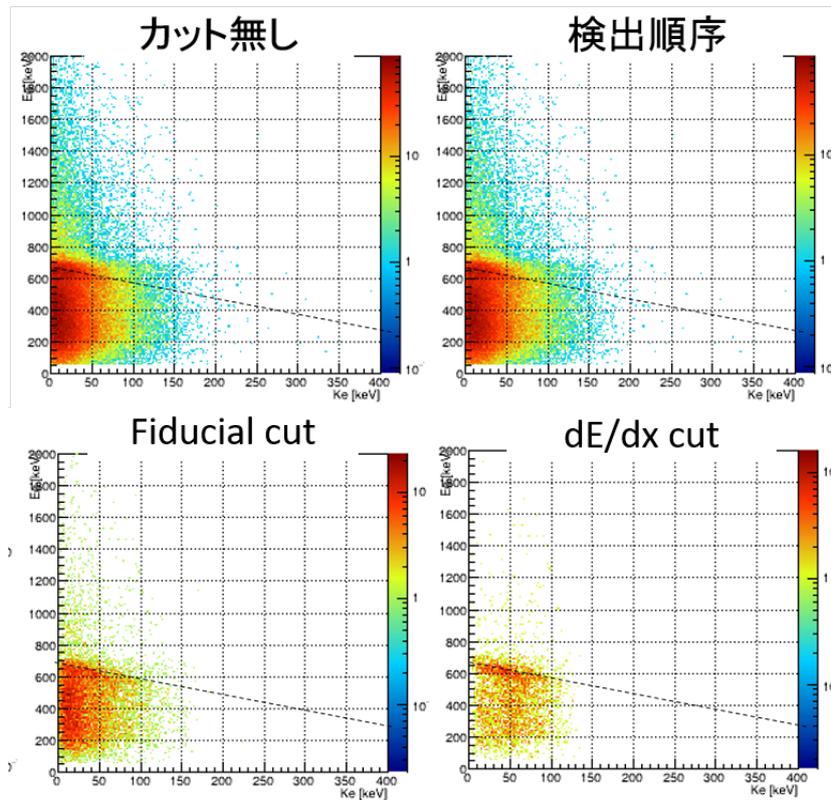


図 5.10 各カット条件におけるエネルギーの分布。横軸が TPC のエネルギー  $K_e$ 、縦軸がシンチレータのエネルギー  $E_g$  である。点線は  $K_e + E_g = 662 \text{ keV}$  を表している。

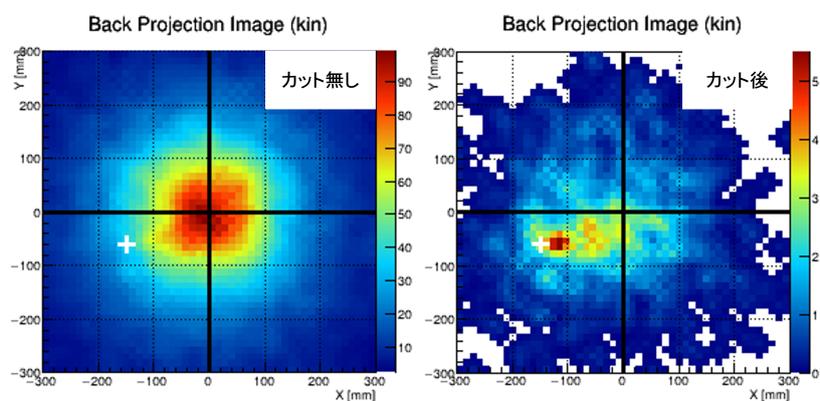


図 5.11 カット前と全カット適応後のバックプロジェクションイメージ。

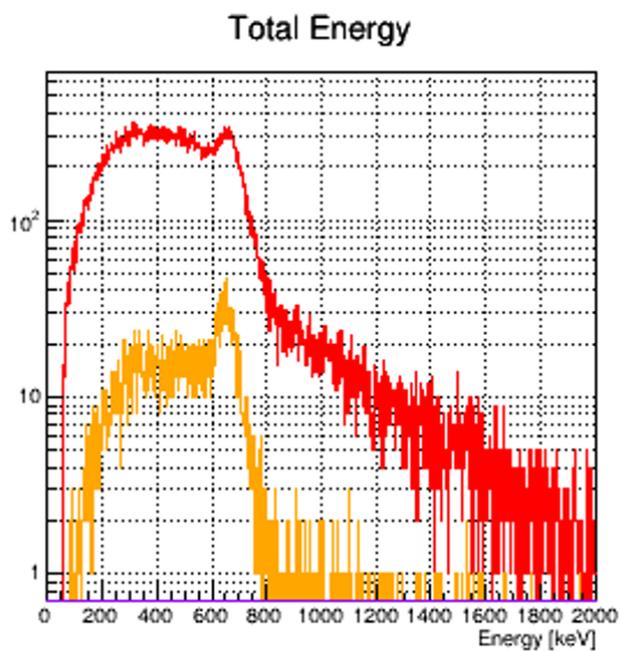


図 5.12 ETCC として動作させたときの  $^{137}\text{Cs}$  線源のスペクトルである。赤は全事象、橙は全カット後のスペクトルである。雑音を除去できている。

### 5.3 不感時間

ETCC として動作をさせたときの不感時間を測定した。この測定ではシンチレータ読み出し回路の改良前である。180 Hz 程度でデータ収集レートが限界に達する。これは、1 事象あたりの TPC 回路の不感時間は  $30\mu\text{s}/\text{event}$ 、シンチレータ回路の不感時間は  $\sim 1\text{ ms}/\text{event}$  であるため、シンチレータ回路の不感時間で決まっている。ネットワークに接続する回路は増えたが、その影響による不感時間の増加は見られない。改良後のシンチレータ回路で試験を行うと、不感時間が大幅に改善でき、目標値である数 kHz でのデータ収集ができることが期待される。

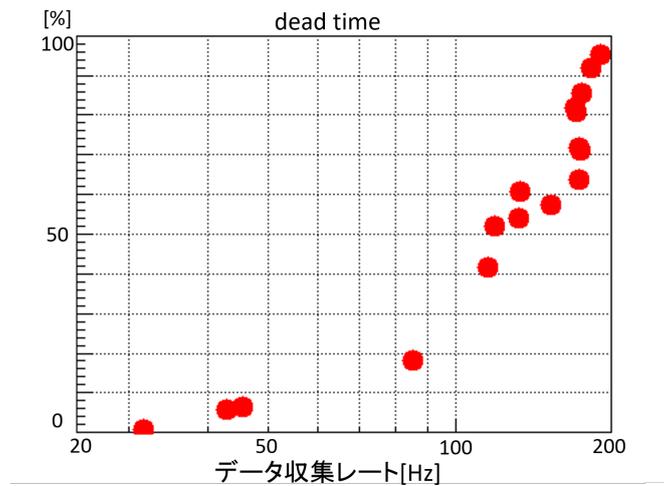


図 5.13 ETCC として動作させたときの  $^{137}\text{Cs}$  線源のスペクトルである。赤は全事象、橙は全カット後のスペクトルである。雑音を除去できている。

## 第6章

# まとめと今後

GRB はミリ秒単位で変動する天体であり、観測のためには数 kHz でのデータ取得が必要となってくる。現行の SMILE-II ETCC では数百 Hz で不感時間が数十 % と測定ができない。不感時間を増やしている原因はトリガーのかけ方にある。現行の ETCC では阻止能の高いシンチレータでトリガーをかけている。ETCC として動作させたときにシンチレータの計数率は TPC と比べたときに 100 倍程度高い。また、現行 ETCC では VME でデータを取得しているため通信速度が遅く不感時間を増やす原因となっていて、通信速度の向上が必要である。そこで、TPC でトリガーをかけること、ネットワークでデータを収集することの 2 つができる仕様にした TPC、シンチレータそれぞれ回路を開発した。TPC についてはネットワークデータを取得できるように変更し、データ収集レートが 1 kHz に対して不感時間を 3.3% と要求を満たす回路ができた。シンチレータについては TPC でトリガーをかける仕様に変更したために、飛跡の時間情報を得られるようにする必要があった。そこでコモンストップでデータを取得できるように変更し、FADC で波形をサンプリングすることにした。シンチレータからの波形が立ち上がってから、トリガー信号までの時間が取得できるようになった。時間分解能については FWHM で  $0.031\mu\text{s}$  となっていて、ドリフト速度から位置分解能を求めると 1.5 mm となる。 $\mu\text{PIC}$  のピッチ幅  $0.8\text{ }\mu\text{m}$  と比べて同等程度である。不感時間に関しては回路基板にある cpu の速度が遅いため PMT9 個回路 3 つ分ではデータ取得レートが 180 kHz で不感時間が 100% になってしまうという課題があった。データ量の削減ならびに通信方法の変更によって、3.0 kHz でのデータ収集が可能になった。新回路を用いて ETCC として動作実証実験を行った。TPC とシンチレータのヒット順番を解析から得ることで、偶然同時事象を排除することができた。また、線源を用いてイメージングを行った。偶然同時事象の排除によって、コンプトン散乱事象であることを保証し、イメージでは期待する位置にアクセスがあった。

今後の課題としては、改良後のシンチレータ回路を用いて不感時間を測定し、数 kHz でのデータ取得ができるのか検証を行う。波形サンプリングレートを 10 MHz から 2.5MHz に変更したことによる時間分解能ならびにエネルギー分解能の変化に対して、評価を行う。また ETCC として動作させたときの、イメージングでは、シンチレータでトリガーをかけたときと TPC でトリガーをかけたときで ARM、SPD の評価を行い、角度決定精度への影響を検証する。

# 謝辞

修士過程での2年間を通して多くの人のお世話になり、忙しくも楽しい日々を過ごすことができました。まずはじめに谷森達教授にご指導いただき感謝をしたいと思います。高田淳史助教には厳しくも優しく叱咤激励してくださり、大変お世話になりました。検出器や天文だけにとどまらず、たくさんの知識を教わりました。水本哲矢さんには些細なことで詰まる私に丁寧に教えてくださいました。龍門で食事をした時には、小銭を持たない私の命を救ってくださいました。水村好貴さんは、入学当初から、お世話になりました。同室で気安く話せたおかげで何度も助かりました。園田真也さんは、私の実験の進み具合など気にかけて下さることが嬉しかったです。友野大さんには RCNP での実験で大変お世話になりました。澤野達也さんには、いつも優しく接して頂き、心が休まりました。古村翔太郎さんは入学したての何もわからない私に偏光や計算機について教えてくださいました。岸本哲朗さんは相談したら問題解決に至るまで、粘り強く付き合ってくださいました。竹村泰斗さんは、MeV クループらしさとはどのようなものが体現しててくださいました。宮本奨平さんは私の進路の相談に親身になって聞いてくださり、感謝の気持ちでいっぱいです。後輩の二人はいつも遅くまで研究しているのが印象的です。谷口幹幸君は神戸大を中心に他の研究室の裏事情についてよく知っていて、聞いていて楽しかったです。中村優太君は、柔道技を松村さんにかけているところを僕にも見せてください。同期である中増勇真君が、こつこつ研究を進められているのに刺激を受けて、私も進めることができました。社会に出ても応援しています。MeV グループのみならず、宇宙線研究室の皆さんには、優しく接してくださり、感謝しております。今まで本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] V. Schonfelder; The Universe in Gamma Rays, Springer (2001)
- [2] R. W. Klebesadel *et al.*, Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin. *ApJ*, 182:L85, June 1973
- [3] Gamma-Ray Astrophysics NSSTC, <https://gammaray.nsstc.nasa.gov/ssc/>
- [4] Adam Goldstein *et al.*, The batse 5b gamma-ray burst spectral catalog. *ApJS*, 208(2):21, 2013
- [5] Costa *et al.*, Discovery of the X-Ray Afterglow of the Gamma-Ray Burst of February 28 1997 *Nature*, 387,784, 1997
- [6] J. van Paradijs *et al.*, Transient optical emission from the error box of the  $\gamma$ -ray burst of 28 February 1997 *Nature*, 386,687, 1997
- [7] D. Band *et al.*, BATSE observations of gamma-ray burst spectra *ApJ*, 413:281-292, August 1993
- [8] V. Schonfelder *et al.*, Instrument Description and performance of the imaging Gamma-Ray Telescope aboard the Compton Gamma-Ray observatory *ApJ*, 86:657-692, June 1993
- [9] CGRO science support center, <https://heasarc.gffc.nasa.gov/batse/>
- [10] G. Weidenspointer *et al.*, The COMPTEL instrumental line background. ,*AA*, Vol. 411.,pp. L131-139, 2003
- [11] J. M. Ryan *et al.*, Astrophysics challenges of MeV-astronomy instrumentation. ,*New Astronomy Review*, 48:199-204, February 2004
- [12] M. S. Briggs *et al.*, Observations of grb 990123 by the compton gamma ray observatory. ,*ApJ*, 524(1):82, 1999
- [13] Andrew S. *et al.*, The Fading Optical Counterpart of GRB 970228, 6 Months and 1 Year Later. ,*ApJ*, 516:683, 1999
- [14] ISAAC Newton Group of Telescope, <http://www.ing.iac.es/Astronomy/telescopes/wht/>
- [15] D. Band, comparison of the gamma-ray burst sensitivity of different detectors *ApJ*, 588(2):945-951, 2003
- [16] J. Hjorth *et al.*, A very energetic supernova associated with the  $\gamma$ -ray burst of 29 March 2003, *Nature*, 423,847, 2003
- [17] N. Gehrels *et al.*, A short  $\gamma$ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift  $z = 0.225$ , *Nature*, 423,847, 2003
- [18] P. Mészáros *et al.*, Gamma-Ray Burst: Accumulating Afterglow Implications, Progenitor Clues, and Prospects, *Science*, 291,79-84, 2001
- [19] P. Kumar *et al.*, Properties of Gamma-Ray Burst Progenitor Stars, *Science*, 321,376-379, 2008

- [20] Sari *et al.*, Spectra and Light Curve of Gamma-Ray Burst Afterglows, *ApJ*,497 ,L17-L21, 1998
- [21] P. A. Price *et al.*, The bright optical afterglow of the nearby  $\gamma$ -ray burst of March 2003, *Nature*, 423,844-847, 2003
- [22] D. Yonetoku *et al.*, Detection of gamma-ray polarization in prompt emission of GRB 100826A , *ApJ*,497 ,L17-L21, 1998
- [23] G. K. Skinner. ,Diffractive/reactive optics for high energy astronomy. I. Gamma-ray phase Fresnel lenses. , *AA*,375 , 2001
- [24] A. Takada *et al.*, Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Ray at Balloon Altitudes with an Electron-tracking Compton Camera , *ApJ*,733(1),15 , 2011
- [25] E. Pian *et al.*, Hubble Space Telescope Imaging of The Optical Transient Associated with GRB 970508, *ApJ*,492,103-106 , 1998
- [26] George B. Rybicki et al. 2004, *Radiative Processes in Astrophysics*, Physics textbook
- [27] B. Wunderer. PhD thesis, Technical University Munich, 2002
- [28] NASA Goddard Space Flight Center, <https://swift.gsfc.nasa.gov/>
- [29] A. Zaglauer. PhD thesis, Technical University Munich, 2005
- [30] Schoenfelder *et al.*, Instrument description and performance of the Imaging Gamma-Ray Telescope COMPTEL aboard the Compton Gamma-Ray Observatory, *ApJ*,86(2),657-692, 1993
- [31] A. Ochi *et al.*, A new design of the gaseous imaging detector : Micro Pixel Chamber ., *NIMA*,471,264-267, 2001
- [32] F. Sauli *et al.*, GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors., *NIMA*,386,2-3,1,195-199, 2007
- [33] T. Uchida et al., *IEEE TNS* 55. 3, 1631, 2008
- [34] ネットワークと TCP 通信, <http://www.7key.jp/nw/tcpip/tcp/tcp2.html>
- [35] G. R. Lynch and O. I. Dahl, Approximations to multiple Coulomb scattering ., *NIMB*,58,6-10, 1991
- [36] A. Takada, Innovation in MeV gamma-ray astronomy based on an electron-tracking Compton telescope ., *JAXA – RR* 2016
- [37] S. Komura *et al.*, Balloon-Borne Experiment for Deep Sky Survey of MeV Gamma Rays using an Electron-Tracking Compton Camera, *Proceedings of 34<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.*, 2015
- [38] S. Agostinelli *et al.*, *NIMA*,506,250, 2003