# シンチレータとMPPCを組み合わせた突発天体全天軟ガンマ 線観測装置の開発

広島大学 理学研究科 物理科学専攻 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文研究室

M175094

## 鳥越健斗

指導教官:水野 恒史

主查:水野 恒史

副查:杉立 徹

平成 31 年 2 月

ショートガンマ線バースト (SGRB) は重力波源の電磁波対応天体として有力な候補のひとつであり、重 力波と対応付けるには SGRB からのガンマ線放射を常に全天監視し、高精度に位置を決める必要がある。 従来主流であった大型衛星による観測では全天監視と高精度な位置決定の両立が困難であった。そこで、全 天監視のため複数の小型衛星を打ち上げ、各衛星での検出時間差を利用し、高精度な位置決定を行う計画 を日欧共同で進めている。位置決定精度の向上には正確な時間情報と十分な光子統計量が必要となるため、 GPS を用いて各衛星の時間情報を同期し、シンチレータには大面積で光量の高い CsI(Tl) を採用する。光 検出器には小型で消費電力の低い Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)の使用を検討している。本実験で は、150×75×5 mm<sup>3</sup>のシンチレータと浜松ホトニクス社製の S13360-6050CS(受光面積 6×6 mm<sup>2</sup>)を組 み合わせた検出器の性能評価を行う。

受光面の増加による光量・一様性の向上を期待し、2 つの MPPC で読み出したところ、合計の光量は単体の約1.4 倍となり(図1)、光量の一様性・エネルギー分解能の向上を確認した。また、エネルギースレッショルドは単体で読み出した際と同等の10 keV 以下を達成した。続いて、モンテカルロシミュレーターを用いて2 つの MPPC の取り付け位置による光量の依存性を調べたところ、同面に対照的に配置することで同等の光量が得られることが分かった。MPPC は放射線損傷によりノイズが増加するという報告があるため、宇宙での運用を見越して、陽子ビーム照射による性能変化の評価実験についても行った。この実験から、吸収線量が1年分相当(1 krad)に達すると暗電流の大きさは~300 倍に増加することがわかった(図2)。暗電流は検出器を冷却することである程度低減されたが、照射前の状態に戻ることはなく、時間が経過しても大きな変化は見られなかった。また、1 krad 照射した MPPC におけるエネルギースレッショルドが-30 度の温度下で~100 keV となったことなどから、暗電流・被ばく量の低減が今後の課題であることを確認した。そのほか、宇宙での運用時に CsI の長い蛍光成分が観測に与える影響についても調べた結果、大きな問題はないことがわかった。



図 1: <sup>241</sup>Am のエネルギースペクトル。黒のヒストグ ラムはひとつの MPPC で測定したデータ、赤のヒス トグラムは 2 つの MPPC で測定したデータを示す。



図 2: 吸収線量と暗電流の関係。1 krad 照射後、暗電 流が~300 倍に増加している。

# 目 次

第1章	序論	7
1.1	ガンマ線バースト	7
1.2	重力波対応天体	9
第2章	ガンマ線バースト観測機器	11
2.1	ガンマ線バースト観測の歴史....................................	11
2.2	ガンマ線バーストの検出器と観測手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
	2.2.1 シンチレータ	17
	2.2.2 光検出器	18
2.3	ガンマ線バースト位置決定手法	18
2.4	超小型衛星を用いたガンマ線バーストの位置決定	23
2.5	研究目的	25
第3章	CsI(Tl) シンチレータ+MPPC システムの基礎特性	26
3.1	実験セットアップ...................................	26
3.2	シンチレータサイズ依存性....................................	28
3.3	エネルギースレッショルド....................................	29
3.4	複数 MPPC 読出しにおける基礎特性	30
3.5	MPPC <b>取り付け位置の最適化</b>	33
	3.5.1 モンテカルロシミュレーションによる最適化	33
	3.5.2 実験・シミュレーション結果の比較と考察	34
第4章	軌道上陽子の検出器への影響	37
4.1	検出器の放射線損傷・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37
4.2	実験セットアップ...................................	37
4.3	暗電流・スペクトルの評価....................................	41
4.4	エネルギースレッショルド....................................	44
	4.4.1 CsI(Tl) <b>シンチレータの残光による測定への影響</b>	48
第5章	まとめと今後の課題	51
付録A	<b>PhoENiX 計画用 BGO+MPPC システムの基礎特性</b>	52
A.1	PhoENiX 計画	52
A.2	実験セットアップ...................................	52

A.3	エネルギースレッショルドの温度依存性.................................	54
A.4	まとめ	57

# 図目次

1	<sup>241</sup> Am のエネルギースペクトル。黒のヒストグラムはひとつの MPPC で測定したデータ、	
	赤のヒストグラムは 2 つの MPPC で測定したデータを示す。	1
2	吸収線量と暗電流の関係。1 krad 照射後、暗電流が~300 倍に増加している。	1
1.1	火の玉モデルの概念図 [1]	8
1.2	典型的な GRB のライトカーブ [2]。GRB 発生直後の放射の継続時間の違いから 2 種類に大	
	別される。	9
1.3	NASA Fermi 衛星の GBM 検出器・ESA INTEGRAL 衛星の検出器 SPI-ACS で観測された GW170817 に同期した GRB のライトカーブと、LIGO で観測された重力波の周波数の時間	
	変化 [3]。	10
2.1	BATSE 検出器によって得られた GRB の銀河座標での分布 [4]。GRB が全天で等方的に分	
	布していることがわかる。...................................	11
2.2	HXD の外観 [5]	13
2.3	HXD の構造 [5]。水色部分が WAM の検出部を示す。	13
2.4	Fermi-LAT, GBM の外観 [7]。GBM 検出器は常に全天の 80%を監視でき、さらに様々な方	
	向を向いた $12$ 台の検出器で ${ m GRB}$ の位置を $\sim 5$ °の精度で決定できる。 $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	14
2.5	Fermi-LAT, GBM で観測された GRB090510 のライトカーブ [8]。GeV 領域での放射ピーク	
	は MeV 領域でのピークより後に見える。	15
2.6	SGD の外観 [10]	16
2.7	SGD の構造 [11]。緑色部分が全天監視用検出部を示す。	16
2.8	GM 計数管方式の原理図 [12]	17
2.9	シンチレーション方式の原理図 [12]。シンチレータに CsI(Tl) 結晶を、光検出器にフォトダ	
	イオードを使用した例。	17
2.10	CAL の構造 [14]	19
2.11	XRT の構造 [15]	20
2.12	コーデッドマスク+イメージセンサの概念図 [16]	21
2.13	BAT の構造 [17]	21
2.14	CGRO 衛星の概念図 [18]。矢印で示された部分が BATSE 検出器であり、衛星の四隅に計 8	
	台搭載されている。	22
2.15	triangulation 法を用いた GRB 位置決定の概念図 [19]	23
2.16	これまでの主な GRB 観測衛星の観測視野と位置決定精度.............	24
2.17	CAMELOT <b>ミッションの</b> 概念図	24

2.18	シンチレータを衛星の2つの側面に2枚ずつ配置する場合の配置予定図[20]。緑色部分がシ	
	ンチレータを示す。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
3.1	使用したシンチレータと MPPC	27
3.2	検出器のコンフィグレーション	27
3.3	検出器の外観	27
3.4	セットアップのブロック図..................................	28
3.5	$2$ つの異なるサイズのシンチレータで取得した $^{241} \mathrm{Am}$ のエネルギースペクトル。黒のヒスト	
	グラムが $150 imes75 imes5~\mathrm{mm^3}$ 、赤のヒストグラムが $100 imes75 imes5~\mathrm{mm^3}$ サイズのシンチレータ	
	で取得したデータを示している。	29
3.6	$150 imes75 imes5~{ m mm}^3$ サイズのシンチレータと $1~{ m cm}$ 角シンチレータで取得した $^{241}{ m Am}$ のエネ	
	ルギースペクトル。黒のヒストグラムが $150 imes75 imes5~{ m mm}^3$ サイズのシンチレータ、赤のヒ	
	ストグラムが1cm 角シンチレータで取得したデータを示している。	29
3.7	ひとつの MPPC で読み出した際のエネルギー校正直線。黒丸はエネルギーと ADC チャン	
	ネルの関係を示した実際のデータで、赤線は直線によるフィッティング結果を示す。	30
3.8	ひとつの $\mathrm{MPPC}$ で読み出した $^{109}\mathrm{Cd}$ のエネルギースペクトル。 $\mathrm{ADC}$ チャンネル $40$ 以下は	
	ノイズイベントであり、 $2$ つのピークは $22.2~{ m keV}$ と $88.0~{ m keV}$ のガンマ線の光電吸収イベン	
	トを示す。	30
3.9	図 3.8 を ADC チャンネル 100 までの範囲で拡大したもの	30
3.10	<sup>241</sup> Am のエネルギースペクトル。黒のヒストグラムはひとつの MPPC で測定したデータ、	
	赤のヒストグラムは2つの MPPC で測定したデータを示す。青のヒストグラムは MPPC の	
	個数によるエネルギースレッショルドと分解能変化の直接比較を行なうため、赤のヒストグ	
	ラム (2MPPC 読出し結果) の縦・横軸を定数倍し、黒のヒストグラム (1MPPC 読出し結果)	
	に重ねたものである。	31
3.11	MPPC(2 つ使用時)・鉛コリメータの配置と穴のナンバリング。ひとつの MPPC で読み出し	
	た際には pos. 8 直近の位置に取り付けた。	32
3.12	ひとつの $\mathrm{MPPC}$ で測定した $^{241}\mathrm{Am}$ のエネルギースペクトル。黒のヒストグラムは全面照射、	
	カラーヒストグラムは各位置での照射結果を示す。	33
3.13	$2$ つの $\mathrm{MPPC}$ で測定した $^{241}\mathrm{Am}$ のエネルギースペクトル。黒のヒストグラムは全面照射、	
	カラーヒストグラムは各位置での照射結果を示す。	33
3.14	Geant4 で再現したジオメトリ。赤の領域は MPPC の受光面、緑の線はシンチレーション光	
	子の飛跡、青の線はガンマ線を示す。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
3.15	ひとつの $\operatorname{MPPC}$ で測定した $^{241}\mathrm{Am}$ のスペクトル。黒のヒストグラムは実験データを、赤の	
	ヒストグラムはシミュレーション結果を示す。..............................	35
3.16	ひとつの MPPC で測定した <sup>241</sup> Am のスペクトル。シミュレーションではガンマ線のエネル	
	ギーを 59.5 keV に固定した。黒のヒストグラムは実験データを、赤のヒストグラムはシミュ	
	レーション結果を示す。	35
3.17	2 つの MPPC をシンチレータの端からそれぞれ 5 mm の位置に設定したジオメトリ	35
3.18	2 つの MPPC をシンチレータの端からそれぞれ 32.5 mm の位置に設定したジオメトリ	35

4.1	若狭湾エネルギー研究センターにて使用したビームライン	38
4.2	セットアップ写真....................................	39
4.3	セットアップのブロック図..................................	39
4.4	入射陽子のエネルギーとそれが Si に落とす単位長さあたりのエネルギーの関係 [33]	40
4.5	本実験での照射台におけるビームプロファイル............................	40
4.6	アルミ箱の蓋。直径 3 cm の穴を開け、その穴をアルミ箔で覆った。	41
4.7	セットアップのブロック図..................................	41
4.8	吸収線量と暗電流の関係	42
4.9	吸収線量と <sup>241</sup> Am スペクトルの関係	42
4.10	1 krad 照射後のバックグラウンドスペクトルの時間変化	42
4.11	1 krad 照射後のバックグラウンドスペクトルの時間変化 (別個体)	42
4.12	10 rad, 100 rad, 1 krad 照射後の暗電流と経過時間の関係	43
4.13	各吸収線量における暗電流の時間・温度依存性............................	43
4.14	各吸収線量における暗電流の時間・温度依存性 (拡大図)	44
4.15	100 rad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>109</sup> Cd(赤), バック	
	グラウンド (青) のスペクトル	45
4.16	100 rad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>109</sup> Cd(赤), バック	
	グラウンド (青) のスペクトル	45
4.17	300 rad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>109</sup> Cd(赤), バック	
	グラウンド (青) のスペクトル	45
4.18	300 rad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>109</sup> Cd(赤), バック	
	グラウンド (青) のスペクトル	45
4.19	1 krad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>109</sup> Cd(赤), バックグ	
	ラウンド (青) のスペクトル	46
4.20	1 krad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>190</sup> Cd(赤), バックグ	
	ラウンド (青) のスペクトル	46
4.21	$5  ext{ krad }$ 照射後の $ ext{ MPPC }$ を用いて $ ext{ 20 }$ 度の温度下で測定した $ ext{ }^{241} ext{ Am}( extbf{R}),  ext{ }^{109} ext{Cd}(m{ au}),  ext{ } m{ ext{ m v}}$ クグ	
	ラウンド (青) のスペクトル	46
4.22	5 krad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>109</sup> Cd(赤), バックグ	
	ラウンド (青) のスペクトル	46
4.23	5 krad <b>照射後の</b> MPPC を用いて 20 度の温度下で測定した <sup>241</sup> Am(黒), <sup>137</sup> Cs(赤), バックグ	
	ラウンド (青) のスペクトル	47
4.24	各吸収線量照射後のエネルギースレッショルドの温度依存性。1 cm 角サイズの CsI シンチ	
	レータ使用時の実測値を示す。	48
4.25	各吸収線量照射後のエネルギースレッショルドの温度依存性。1 cm 角サイズの CsI シンチ	
	レータとの光量比を考慮して補正した $150 imes75 imes5~\mathrm{mm}^3$ サイズの $\mathrm{CsI}$ シンチレータにおけ	
	る予想値を示す。	48

4.26	<sup>241</sup> Am スペクトル。黒のヒストグラムは陽子照射前に取得したもの、赤のヒストグラムは通	
	常観測時の陽子バックグラウンドレートを想定し、200 Hz でビーム照射を行いながら取得	
	したもの、青のヒストグラムは $\operatorname{SAA}$ 通過を想定して $10^5~\operatorname{Hz}$ でビーム照射を $10~$ 分間行った	
	後、レートを 200 Hz に戻してから取得したものを示す。	49
4.27	200 Hz でビーム照射を行いながら取得した前置増幅器出力波形。通常時の陽子イベントを	
	捉えている。	50
4.28	200 Hz でビーム照射を行いながら取得した前置増幅器出力波形。陽子がシンチレータに大	
	きなエネルギーを落とした際のイベントを捉えている。・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
A.1	各ユニットの形状....................................	53
A.2	検出器の外観	54
A.3	検出器の外観 (拡大図)	54
A.4	Type-D2 の BGO 結晶を 20 度の温度下で測定した際のエネルギースペクトル	55
A.5	Type-D2 の BGO 結晶を-20 度の温度下で測定した際のエネルギースペクトル......	55
A.6	Type-D2 の BGO 結晶を 20 度の温度下で測定した際のエネルギー較正直線	55
A.7	Type-D2 の BGO 結晶を-20 度の温度下で測定した際のエネルギー較正直線	55
A.8	1 cm 角の BGO 結晶を 20 度の温度下で測定した際のエネルギースペクトル	56
A.9	1 cm 角の BGO 結晶を-20 度の温度下で測定した際のエネルギースペクトル	56
A.10	1 cm 角の BGO 結晶を 20 度の温度下で測定した際のエネルギー較正直線 .......	56
A.11	1 cm 角の BGO 結晶を-20 度の温度下で測定した際のエネルギー較正直線 .......	56
A.12	シンチレータの相対強度と温度の関係 [38]	57

# 第1章 序論

## 1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) とは、10<sup>49</sup>-10<sup>52</sup> erg ものエネルギーを主に数百 keV から 数 MeV の帯域でわずか数ミリ-数十秒間に開放する、宇宙で最も激しい爆発現象である。この現象は一日 に数回観測され、宇宙のある一点から突発的に高い強度のガンマ線が降り注ぐ。GRB は主に宇宙論的距離 (100 億光年以上の彼方)で発生し、中心天体から放出された相対論的ジェットがガンマ線を放射している と考えられている。GRB の発生頻度は比較的に高く、その起源やガンマ線放射機構は 40 年以上も前から 研究されているが、いまだに完全には解明されていない。理論的には「火の玉モデル」という標準モデルが 有力である。図 1.1 にこのモデルの概念図を示す [1]。このモデルでは

- 1. 連星中性子星・ブラックホールの合体や超新星爆発の後、中心にコンパクト天体が形成される
- エネルギー開放に伴って発生した光子・電子・陽子が、天体の回転軸方向に向かって対称的に相対論 的ジェットを形成する
- 3. ジェット内での物質の衝突により、複数の相対論的衝撃波が発生する
- 4. 衝撃波により加速された電子が数万ガウスの強磁場に巻き付き、シンクロトロン放射によってガンマ 線を放射する
- 5. 中心から遠く離れると、ジェットと星間物質との相互作用によりX線から電波に渡る広い波長帯域で、 数日から数ヶ月の間電磁波が放射される残光現象が観測される

と考えられているが、いまだに議論中である。そのため、連星中性子星・ブラックホールの合体に伴って発 生する重力波とガンマ線を同時に観測し、直接証拠を得ることが現在の課題となっている。



図 1.1: 火の玉モデルの概念図 [1]

GRB は発生直後の激しい時間変動を示すガンマ線・X 線放射 (プロンプト放射)の継続時間の違いから、 ロング・ガンマ線バースト (long GRB) とショート・ガンマ線バースト (short GRB, SGRB) の 2 種類に大 別される。図 1.2 は典型的な GRB のライトカーブの例である [2]。Long GRB はプロンプト放射の継続時 間が 2 秒以上で、ソフトなスペクトルを示す。また、一部の long GRB において可視光の残光中に超新星 由来のスペクトル成分が発見されたことから、long GRB の起源は太陽の 40 倍以上の質量を持つ大質量星 の重力崩壊であると考えられている。一方、SGRB はプロンプト放射の継続時間が 2 秒未満で、ハードな スペクトルを示す。その早い時間変動から、SGRB の起源は long GRB とは異なり、連星中性子星やブラッ クホールの合体であると考えられている。しかし、継続時間が短いため統計の良いデータを得ることが難 しく、連星合体の直接証拠はいまだ得られていない。連星合体の直接証拠と SGRB との関連性を明らかに することが、その正体に迫る唯一の手段である。



図 1.2: 典型的な GRB のライトカーブ [2]。GRB 発生直後の放射の継続時間の違いから 2 種類に大別される。

### 1.2 重力波対応天体

前節で述べたように、SGRBの起源は連星中性子星やブラックホールの合体時に生成されるジェットからの放射という説が有力であり、連星中性子星合体の直接証拠とSGRBを関連付けることが極めて重要である。連星中性子星合体の直接証拠として重力波の放出が挙げられる。

重力波とはアインシュタインが1916年に提唱した、質量をもった物体が軸対象ではない運動をした際に、 時空のゆがみが光速で伝搬する波動現象である。重力波は巨大な質量をもった物質が光速に近い速度で運動 した際に強く発生するといわれているため、連星中性子性やブラックホールの合体、重力崩壊型超新星など が発生源であると考えられている。2015年9月にはLaser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)をはじめとする研究グループによって初めて、ブラックホール合体による重力波の直接観測が成さ れた。重力波の波形からそれを作り出した物体の大きさや動きを推定でき、通常光のない天体の観測が可 能となるため、重力波天文学は近年注目を集めている。

連星中性子星は互いの重力により引き合いながら回転し、重力波を放出する。距離が近づくほどその強度・周波数は増し、衝突時には非常に強い重力波を放出する。この連星中性子星合体による重力波は、2017 年8月17日にLIGOとヨーロッパの重力波検出器 Virgo によって初めて観測された。これまで連星ブラッ クホール合体による重力波は計4回観測されたが、電磁波対応天体との明確な関連性は報告されていない。 しかし、この重力波イベント GW170817では、重力波望遠鏡で決めた到来方向の誤差領域内に可視光で電 磁波対応天体が発見された。これは連星中性子星の合体後に放出された物質内での早い中性子捕獲反応 (rプ ロセス)により、金やプラチナ、ランタノイド族などの重元素が合成され、それら重元素の放射性崩壊時に 電磁波が放射される「キロノヴァ」という現象によるものであることが確認された。r プロセスによる元素 合成プロセスを捉えたのはこれが初めてであり、重力波と電磁波観測を組み合わせたマルチメッセンジャー 天文学の幕開けとなった。一方、対応する電磁波放射として、ガンマ線が重力波の到来方向と矛盾しない位 置で約 1.7 秒後に検出したという報告が複数のガンマ線検出器によりなされた (図 1.3)[3]。ガンマ線放射の 継続時間やスペクトルは典型的な SGRB のそれと矛盾しないものの、ソフトな熱的成分が付随しているこ とや、重力波観測から見積もられた発生距離に基づいて求められたガンマ線放射光度が典型的な SGRB に 比べて数桁低いことなどから、このイベントが典型的な SGRB を伴っていたかどうかはいまだ議論中であ る。そのため、今後も引き続き観測が必要であり、重力波と GRB を関連付けるには、全天をカバーしつつ 位置決定を行える衛星の使用が重要となる。



図 1.3: NASA Fermi 衛星の GBM 検出器・ESA INTEGRAL 衛星の検出器 SPI-ACS で観測された GW170817 に同期した GRB のライトカーブと、LIGO で観測された重力波の周波数の時間変化 [3]。

# 第2章 ガンマ線バースト観測機器

## 2.1 ガンマ線バースト観測の歴史

GRB はこれまでに様々な観測機器により観測が進められてきた。1960 年代後半、ソ連の核実験を監視 するために打ち上げていたアメリカの衛星 Vela が宇宙からの強いガンマ線を検出し、1973 年に GRB とし て報告された。1991 年には CGRO 衛星に搭載された BATSE (Burst And Transient Source Experiment) 検出器で多くの GRB を観測し、GRB の空間分布が一様であること、起源を銀河系外に持つことなどが明 らかになった。図 2.1 に BATSE 検出器によって得られた GRB の銀河座標での分布を示す [4]。この図か ら、GRB が全天で等方的に分布していることがわかる。1997 年にはイタリアの Beppo-SAX 衛星が GRB の X 線残光を発見し、その正確な位置決定に成功した。この発見に続き、同じ場所に可視残光も発見され たため、可視光での分光観測によって求めた赤方偏移から GRB の距離を推定することが可能となった。ま た、距離情報から GRB の総エネルギーについても推定でき、GRB は地球から数十 数百億年離れた遠方銀 河で起こること、10<sup>52</sup> erg ものエネルギーを主に数百 keV から数 MeV の帯域でわずか数十秒間に開放する 宇宙最大の爆発現象であることが判明した。



図 2.1: BATSE 検出器によって得られた GRB の銀河座標での分布 [4]。GRB が全天で等方的に分布していることがわかる。

1998年には GRB 残光と同じ位置に、通常より一桁大きなエネルギーを放出する特殊な超新星が見つかった。GRB と同じ位置に無関係な超新星が偶然見つかる確率は 1 万分の 1 以下であるため、GRB は特殊な超

新星が原因なのではないかと考えられるようになった。2000年にはHETE-2衛星による残光の詳細なフォ ローアップ観測が進み、シンクロトロン放射によるべき型スペクトルの減衰から、超新星特有のスペクト ルの発現する様子が捉えられた。これは一部のlong GRB が超新星と関係している証拠となった。2004年 には広い視野と位置決定精度を持つ Swift 衛星が打ち上げられ、その衛星に搭載された BAT (Burst Alert Telescope)検出器により SGRB のX線残光の観測・位置決定に初めて成功した。それ以来 Swift 衛星はさ らにいくつかの SGRB を検出しており、それらの残光を観測することで、母銀河を同定することにも成功 した。その結果、一部の SGRB は星生成があまり活発でない楕円銀河等と関連していることがわかり、long GRB とは母銀河の性質が異なる可能性を示した。これらのデータは中性子星やブラックホールの合体を前 提としたモデルで説明されるものと一致していたため、このモデルは強く支持されるようになった。

2005年にはすざく衛星が打ち上げられ、その衛星に搭載された硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD)では、1000を超える GRB の観測に成功した。HXD の主検出器は巨大な Bi<sup>4</sup>Ge<sup>3</sup>O<sup>12</sup>(BGO) シンチ レータで覆われており、それらはアクティブシールドとしてバックグラウンドを反同時計数により低減で きるよう設計されている (図 2.2, 2.3)[5]。さらに、BGO は高いガンマ線阻止能を持つため、このアクティ ブシールドは GRB を広帯域で観測できる。そのため、広帯域全天モニター (Wide-band All-sky Monitor; WAM) としても利用でき、この機能により多くの GRB 観測が行われた。また、WAM の大きな検出面積 によって SGRB の詳細なスペクトルデータを得られるようになったため、LGRB と SGRB のスペクトル の違いを議論できるようになった。SGRB のものはスペクトルが硬く、MeV 近辺をピークとして放射が起 きていることが明らかとなり、ガンマ線放射機構の理解が進んだ [6]。



図 2.2: HXD の外観 [5]



図 2.3: HXD の構造 [5]。水色部分が WAM の検出部を示す。

Fermi 衛星は 2008 年に打ち上げられたガンマ線観測衛星であり、20 MeV から 300 GeV のエネルギー帯 でガンマ線を観測する大面積望遠鏡 (Large Area Telescope; LAT) と、8 keV から 30 MeV のエネルギー帯 でGRB を測定するガンマ線バーストモニター (Gamma-ray Burst Monitor; GBM) を搭載している。GBM 検出器は常に全天の~80 %を監視でき、さらに様々な方向を向いた 12 台の検出器で GRB の位置を~5 ° の精度で決定できる (図 2.4)[7]。LAT と GBM を組み合わせることで、非常に広い視野をカバーしつつ、 keV-GeV 領域の7桁以上にも渡る広帯域 GRB 観測を可能にしている。これにより多くの GeV 領域におけ るガンマ線放射の振る舞いの特徴を明らかにし、ガンマ線放射機構やジェットの速度に制限をかけることに 成功した。図 2.5 に Fermi で観測された SGRB の一例である、GRB090510 のライトカープを示す。GeV 領域でも光子が検出されていること、keV-MeV 領域における放射の開始時間や継続時間が異なることから、 広帯域ガンマ線放射の起源について議論することが可能となった。また、Fermi 衛星のもつ広帯域観測の特 徴と宇宙論的距離で発生する GRB の特徴を利用することで、光速不変の原理といった基礎物理の検証を行 うことができた [9]。



図 2.4: Fermi-LAT, GBM の外観 [7]。GBM 検出器は常に全天の 80%を監視でき、さらに様々な方向を向 いた 12 台の検出器で GRB の位置を ~5 °の精度で決定できる。



図 2.5: Fermi-LAT, GBM で観測された GRB090510 のライトカーブ [8]。GeV 領域での放射ピークは MeV 領域でのピークより後に見える。

2016年には、世界初のカロリメーターによる超高精度軟X線分光観測と、0.3 keVから 600 keV という広帯域高感度観測を目指し、ひとみ衛星が打ち上げられた。この衛星にはコンプトンカメラの周りをアクティブシールドで囲み、視野を絞る狭視野コンプトンカメラをもとに設計された軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector; SGD) が搭載されており、60 keV から 600 keV の帯域で極限までバックグラウンドを低減することで過去最高感度の観測を目指した (図 2.6, 2.7)[10], [11]。SGD のアクティブシールドはSuzaku-HXD に比べて細かくセグメント化されており、各ユニットにおける検出光子数の違いを利用した高精度な位置決定が期待されていた。ひとみ衛星は姿勢制御機能の異常により 2016 年 3 月に運用終了となったが、わずか 1 週間の立ち上げ運用中に SGD のアクティブシールドでひとつの GRB イベントを検出し、期待通り~5 °での位置決定を行うことができた。

このように、従来の GRB 観測においては、GRB そのものの起源やガンマ線放射機構を探るため、位置 決定に特化した衛星 (Swift や HETE-2 など) とガンマ線観測に特化した衛星 (すざくや Fermi など)の2つ の方向で衛星開発が進められてきた。今後は重力波天文学の推進を見据え、ガンマ線で電磁波対応天体を 同定できるよう、広い視野をカバーしつつ高い位置決定精度を持った衛星の開発が必要とされている。





図 2.6: SGD の外観 [10]

図 2.7: SGD の構造 [11]。緑色部分が全天監視用検出 部を示す。

## 2.2 ガンマ線バーストの検出器と観測手法

これまで述べたように、これからの GRB 観測には広い視野と高い位置決定能力、高いガンマ線検出感 度を併せ持った衛星の利用が望まれる。ここでは、従来 GRB 観測に用いられてきた主なガンマ線検出器の 原理について述べ、将来 GRB 検出器として使用するのに適した検出器構成について議論する。

放射線測定は放射線と物質との相互作用を利用して行う。主な測定方式としては、気体との電離作用を 利用したガイガー・ミュラー (GM) 計数管方式と、物質の励起作用を利用したシンチレーション方式があ る。GM 計数管方式の検出器はガスを封止した金属管と管の中心にある電極とで構成され、電極と金属管 の壁との間に高電圧を印加して使用する。GM 計数管方式の原理図を図 2.8 に示す [12]。放射線入射時、ガ スの電離によって生じた電子と陽イオンが電極と金属管の壁にそれぞれ移動し、電流が発生する。この電流 信号を計測することで、入射放射線の数を測定できる。感度が良く、微量な荷電粒子でも計測できる一方、 入射放射線のエネルギーを測定することはできない。

シンチレーション方式の検出器はシンチレータとよばれる結晶と光検出器から構成される。シンチレー ション方式の原理図を図 2.9 に示す [12]。ガンマ線がシンチレータに入射すると、励起作用により入射ガン マ線のエネルギーに比例した数のシンチレーション光が発生する。それを光検出器で電気信号に変換し、処 理することで入射放射線の計数及びエネルギーの測定を行なう。GRB 観測ではガンマ線のエネルギーを測 定することが重要であるため、シンチレーション方式が用いられる。この節ではシンチレータと光検出器の 詳しい説明を行なうとともに、GRB 観測時の課題についても述べる。



図 2 GM 計数管方式の原理図

図 2.8: GM 計数管方式の原理図 [12]



図 2.9: シンチレーション方式の原理図 [12]。シンチ レータに CsI(Tl) 結晶を、光検出器にフォトダイオー ドを使用した例。

### 2.2.1 シンチレータ

シンチレータとは放射線入射時に蛍光する物質のことであり、入射した X 線やガンマ線を光検出器が検 出可能な可視光に変換する。シンチレータに放射線が入射した際、光電効果やコンプトン散乱によってシン チレータ中の原子から電子が叩き出される。叩き出された電子は運動エネルギーを失うまで周りの分子を 励起し、それらが基底状態へと戻る際にシンチレーション光が発生する。そのため、シンチレータの発光量 は叩き出された電子の運動エネルギーに比例する。

シンチレータは無機シンチレータと有機シンチレータの2つに大別される。表2.1 は代表的な無機・有 機シンチレータの特性をまとめたものである[13]。無機シンチレータは無機物結晶で構成されているため、 密度と原子番号が高い。そのため、X線やガンマ線に対して光電吸収を起こしやすく、GRB検出器によく 用いられる。一方で有機シンチレータは有機物結晶で構成されているため、原子番号が低い。そのため、X 線やガンマ線に対してコンプトン散乱を起こしやすく、主に偏光観測等に用いられる。また、蛍光の減衰時 間は数 ns と短く、カウントレートの高い測定に適している。

シンチレータ	密度 $(g/cm^3)$	最高放出波長 (nm)	屈折率	発光減衰時間 (μs)	絶対光収率 (光子/MeV)
無機シンチレ-	-タ				
NaI(TI)	3.67	415	1.85	0.23	38000
CsI(TI)	4.51	540	1.80	0.68~(64~%),~3.34~(36~%)	65000
BGO	7.13	480	2.15	0.30	8200
有機シンチレ-	-タ				
アントラセン	1.25	447	1.62	0.03	16500
スチルベン	1.16	410	1.626	0.0045	8300
プラスチック	1.032	408	1.58	0.0018	11200

表 2.1: 代表的な無機・有機シンチレータの特性 [13]

### 2.2.2 光検出器

光検出器とは入射した光を電気信号へと変換するデバイスであり、感度の良いGRB 観測を実現する際 に望まれる光検出器の特徴としては、

- 光から電気信号への変換効率(量子効率)が良いこと
- 暗電流等のデバイス由来のノイズが低いこと
- 内部増幅率が高いこと

等が挙げられる。GRB 観測には、これまで光電子増倍管 (Photomultiplier Tube; PMT)、雪崩増幅型 光ダイオード (Avalanche Photodiode; APD) が広く用いられてきた。PMT はゲインが  $10^5 - 10^8$  と高く、 暗電流が小さいことに加え、受光面が広いといった利点を持ち、Suzaku-HXD や Fermi-GBM 等に採用さ れた。一方で、構造上受光面に対して垂直方向に長いことや量子効率が 20-30 %と低いこと、動作電圧が 800-1800 V と高いことなどが欠点として挙げられ、宇宙での運用時には細心の注意を払わなければならない。 APD はひとみ-SGD 等で採用された光検出器で、小型で動作電圧が ~300 V と低く、量子効率も ~80 %と 高い。しかし、ゲインは ~  $10^2$  と PMT より低いため、外来ノイズに弱い。

GRB 観測には、一般的に受光面積を稼ぐために大面積のシンチレータが使用される。衛星の設計上、光 検出器はコンパクトであるほうが望ましいが、受光面の狭さやノイズ耐性等の厳しい制限がある。近年で は、APD をマルチピクセル化した光子計測デバイスである MPPC(Multi-Pixel Photon Counters)が登場 し、APD と同等の性能を持ちながら、ゲインが高い(10<sup>5</sup> – 10<sup>6</sup>)という点で注目されている。表 2.2 に PMT, APD, MPPC の特性をまとめた。MPPC を用いることで、読出しシステムの小型化と低いエネルギース レッショルドを同時に達成できる可能性があるため、新しい検出器デザインの候補として期待されている。

		, , ,		
光検出器	ゲイン	<b>動作電</b> 圧 (V)	サイズ (mm)	<b>量子効率</b> (%)
PMT	$10^5 - 10^8$	800-1800	10-760	20-30
APD	$10^{2}$	300-500	5-10	80
MPPC	$10^5 - 10^6$	50-70	1-6	80
光検出器	磁場による影響	電圧・温度依存性	ノイズの大きさ	
PMT	大	小	小	
APD	小	大	大	
MPPC	小	大	大	

表 2.2: PMT, APD, MPPC の特性の比較

## 2.3 ガンマ線バースト位置決定手法

重力波天文学を見据えたこれからの GRB 観測においては、高精度の位置決定を広い視野で実現するということが重要となる。この節では、従来用いられてきた代表的な位置決定手法を挙げるとともに、今後の 重力波天文学において最適なものについて議論する。 チャージトラッキング法

チャージトラッキング法とは、高エネルギーのガンマ線や荷電粒子が検出器内の物質と相互作用した際に発生する電磁シャワー現象を利用した位置決定手法であり、国際宇宙ステーション搭載の高エネルギー電子・ガンマ線観測装置 CALET(CALorimetric Electron Telescope)等で用いられている。 CALET ミッションのメイン検出器であるカロリメータ CAL は、3 つの検出器を組み合わせた構造 となっており、各検出器から得られるシャワー粒子の飛跡情報を組み合わせることで、入射宇宙線の 到来方向や種類を同定する。図 2.10 は CAL の構造の模式図である [14]。上段の電荷測定器 (CHarge Detector; CHD)では、プラスチックシンチレータを用いて電荷測定を行い、原子番号を同定する。中 段のイメージングカロリメータ (IMaging Calorimeter; IMC)では、シンチレーティングファイバー を用いてシャワー初期発達段階での粒子飛跡を検出し、到来方向を同定する。そして下段の全吸収型 カロリメータ (the Total AbSorption Calorimeter; TASC)では、密度と原子番号の大きいタングステ ン酸結晶シンチレータによりシャワーを全吸収し、エネルギーを計測する。この手法では、GeV-TeV 領域の高エネルギーガンマ線を比較的広い視野で、また数分角程度の位置決定精度で測定できる。



図 2.10: CAL の構造 [14]

• 望遠鏡イメージング法

望遠鏡イメージング法とは、反射鏡でX線を全反射させて結像させる手法であり、Swift 衛星のX線 望遠鏡 (X-ray Telescope; XRT) 等で用いられている (図 2.11)。典型的な位置決定精度は秒角レベル であり、現在の位置決定手法の中では最も高精度なものとなっているが、構造上全天に対する瞬間視 野は~1%と低い。そのため、重力波対応天体の同定には、予めガンマ線等での大まかな位置決定が 必要となる。



図 2.11: XRT の構造 [15]

コーデッドマスク+イメージセンサによるイメージング法

コーデッドマスクとは、部分的に X 線を通すパターンを持ったマスクのことであり、位置分解能を 持った X 線検出器と組み合わせて用いられる。その概念図を図 2.12 に示す [16]。マスクを通すこと で、X 線の入射方向によって検出される強度分布パターンが変化するため、到来方向を同定すること ができる。この手法は Swift-BAT 等で用いられており、15 keV から 150 keV のエネルギー領域で観 測が行える (図 2.13)[17]。宇宙ステーションきぼうに搭載されている全天 X 線監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image; MAXI) では、同様の原理でスリット状のマスクを用いて観測を行なっている。 この手法による位置決定精度は、マスクの穴の大きさと検出器の幾何学的距離、検出器の位置分解能 によって決まる。構造上、検出器の向いている方向で発生したバーストのみ位置決定を行えるため、 全天に対する瞬間視野は典型的に ~20 %となる (MAXI は 2 %)。また、イベントの統計量が十分で あれば、数分角の精度で位置決定できる。





図 2.12: **コーデッドマスク**+イメージセンサの概念図 [16]

図 2.13: BAT の構造 [17]

カウントレート法

カウントレート法とは、Suzaku-WAM(図 2.3), Fermi-GBM(図 2.4), Hitomi-SGD(図 2.7), CGRO/BATSE(図 2.1[18])のように複数の検出部が異なる方向を向いている検出器において、各検 出部で検出したイベントのレート差を利用して位置決定を行う手法である。予め検出器のあらゆる角 度からのガンマ線応答をシミュレーションにより推定しておき、実際のカウントレートと比較するこ とで到来方向を制限できる。Suzaku-WAM と Hitomi-SGD では BGO シンチレータが使用されてお り、硬 X 線から軟ガンマ線領域での観測が可能である。位置決定精度は衛星の積載量の制限下で、多 数の大面積シンチレータを全天カバーできるように配置することで向上する。また、検出器のユニッ ト数や光子統計にも依存し、明るいバーストであれば数度以下での位置決定が可能となる。全天に対 する瞬間視野は 50-100 %と広く、単一衛星での位置決定手法の中では最大となる。



図 2.14: CGRO 衛星の概念図 [18]。矢印で示された部分が BATSE 検出器であり、衛星の四隅に計 8 台搭 載されている。

• Triangulation 法

Triangulation 法とは、複数の衛星で検出されたイベントの検出時間差を利用して位置決定を行う手法である。図 2.15 は triangulation 法を用いた GRB 位置決定の概念図である [19]。この例では、衛星 1, 2, 3 の 3 つの衛星を用いて GRB の到来方向を制限する。衛星 1, 2 間の距離  $d_{12}$  と、イベントの検出時間差  $\Delta t_{12}$  がわかっているとき、衛星 1, 2 を結ぶ直線と、衛星 1 と GRB の到来方向を結ぶ直線とのなす角  $\theta_{12}$  は、光速 c を用いて式 2.1 のように表せる。

$$\cos\theta_{12} = \frac{c\Delta t_{12}}{d_{12}} \tag{2.1}$$

つまり、2つの検出器間の距離と検出時間差がわかれば、各検出器を結ぶ直線を中心とした円弧状に 到来方向を制限できる。また、複数の検出器を用いて同様に円弧を増やすことで、さらに到来方向を 制限できる。位置決定精度を上げるためには、十分距離の離れた多数の検出器を使用し、検出時間差 の精度を向上させる必要がある。位置決定を行う上で、IPN (Inter Planetary Network)とよばれる 衛星間連携システムにより様々な衛星のデータを使用することができるが、現在その典型的な精度は 数度程度となっている。しかし、全天に対する瞬間視野は 50-100 %とほぼ全天をカバーできる。



図 2.15: triangulation 法を用いた GRB 位置決定の概念図 [19]

上記のように、位置決定精度が最も高いのはX線望遠鏡を用いる方法であるが、構造上視野が限られて しまう。また、カウントレート法を用いても地球の影による影響で、常に全天監視を行なうことはできな い。一方、triangulation法を用いた場合にはそれが可能となるため、位置決定精度を向上させることで、今 後の重力波対応天体の同定において重要な役割を果たすことが期待される。

## 2.4 超小型衛星を用いたガンマ線バーストの位置決定

前節で述べたように、重力波対応天体の同定を見据えた GRB 観測における課題は、広い観測視野と高い 位置決定精度を兼ね備えた観測の実現である。図 2.16 はこれまでの主な GRB 観測衛星の観測視野と位置決 定精度をまとめたものである。現在、 $2\pi$  str 以上の観測視野と数分角以上の位置決定精度を同時に持つ衛星 は存在しない。そこで、我々は複数の超小型衛星を地球上空に打ち上げ、全天を監視しつつ triangulation 法 により位置決定を行なう、CAMELOT(Cubesats Applied for MEasuring and LOcalising Transients) ミッ ションを提案している [20]。このミッションは広島大学とハンガリーの研究チームが共同で進めており、常 に全天を監視しつつ、数十分角の位置決定精度の実現を目指している [21]。図 2.17 はこのミッションの概 念図である。各衛星間の相対時刻を GPS を用いて ~10  $\mu$ s レベルで同期させ、ライトカーブを相互相関関 数を用いて解析することで検出時間差を測定する [22]。また、典型的な明るい GRB の光子フラックスは、 10 keV から 300 keV のエネルギー帯で ~100 photons/s/cm<sup>2</sup> であり、数十分角の位置決定精度を実現する には、検出器のエネルギースレッショルドが ~10 keV であることが望まれる [23]。



図 2.16: これまでの主な GRB 観測衛星の観測視野と位置決定精度



図 2.17: CAMELOT ミッションの概念図

衛星は3U(340×100×100 mm<sup>3</sup>) サイズで、検出器には光量とガンマ線阻止能が共に高く、大面積の結晶 を実現できる CsI(Tl) シンチレータと、小型でゲインが高い MPPC を接合したものを搭載する予定である。 CsI シンチレータは150×75×5 mm<sup>3</sup> のものを衛星の2つの側面に2枚ずつ、もしくは100×75×5 mm<sup>3</sup> のものを3枚ずつ搭載する案が検討されている(図2.18)[20]。一般的に、面積の小さいシンチレータほどシ ンチレーション光が光検出器に入射しやすくなるため、光量は大きくなる。一方で、検出器のユニット数が 増えるほど多数の読出し回路を使用しなければならないため、超小型衛星ミッションにおいては特に、サイ ズ・消費電力による厳しい制限を受ける。そのため、光量とサイズ比を考慮し、適切な方を選択する必要が ある。

MPPC については光量とその一様性の向上のほか、コインシデンス法による暗電流の低減、冗長化を目的に、各シンチレータにつき2つ使用することが検討されている。本研究ではシンチレータの面積が MPPC

の受光面より大きいため、ガンマ線の入射位置によって集光率に変化が現われることが予想される。そのた め、エネルギー応答を考える上で光量の一様性を確認する必要がある。コインシデンス法とは複数の検出 器で同時に検出されると期待されるイベントを、時間情報を利用して抽出する手法であり、これを用いる ことでノイズが複数の検出器で偶然同時に検出される場合を除き、ノイズイベントをカットできる。また、 MPPC は宇宙で使用された実績がほとんどなく、軌道上陽子による悪影響が詳しく調べられていない。そ のため、検出器の放射線損傷による影響の評価が必要となる。



図 2.18: シンチレータを衛星の 2 つの側面に 2 枚ずつ配置する場合の配置予定図 [20]。緑色部分がシンチ レータを示す。

### 2.5 研究目的

本研究では、CAMELOT ミッションで使用予定である、CsI シンチレータと MPPC を組み合わせた検 出器の性能評価を行なう。まず最初に、前節で述べた2つのサイズのシンチレータの光量をそれぞれ測定 し、サイズ比を考慮しながら搭載に適切なものを選択する。続いて、検出器のエネルギースレッショルド、 光量の一様性について評価する。また、2つの MPPC の取り付け位置によって光量が変化する可能性があ るため、実験とシミュレーションから最適な取り付け位置を見積もる。最後に、軌道上陽子を想定した陽子 ビームを検出器に照射する実験を行い、その影響について評価する。

# 第3章 CsI(Tl)シンチレータ+MPPCシステム の基礎特性

CAMELOT ミッションにおいて重要である十分な光子統計の達成のため、シンチレーターには光量とガン マ線阻止能が共に高く、大面積の結晶を実現できる CsI(Tl)を、また読出しをコンパクトに行なうため、光検 出器には小型でゲインが高い MPPCを使用することが検討されている。CsIシンチレータは150×75×5 mm<sup>3</sup> のものを4枚、もしくは100×75×5 mm<sup>3</sup>のものを6枚搭載する案が検討されているが、光量に大きな差 がなければユニット数が少なくなる方を採用したい。そこでまず、サイズの異なるこれら2つのシンチレー タの光量をそれぞれ測定し、サイズ比を考慮しながら搭載に適切なものを選択した。続いて、2つの MPPC で読み出すことで光量とその一様性の向上のほか、コインシデンス法による暗電流の低減が期待されるた め、MPPC単体または2つで読み出した際のエネルギースレッショルドと光量の一様性の評価を行った。 さらに、2つの MPPCの取り付け位置による光量の依存性をシミュレーションを行うことで確認し、最適 な位置を見積もった。

### 3.1 実験セットアップ

本実験では、Amcrys 社製の CsI(Tl) シンチレータと浜松ホトニクス社製の最新モデルの MPPC であ る S13360-6050CS を使用した (図 3.1)。シンチレータは衛星への搭載が検討されている 150 × 75 × 5 mm<sup>3</sup> と 100 × 75 × 5 mm<sup>3</sup> のサイズのものを用いて光量の比較を行った。使用した MPPC はピクセルピッチが 50 µm、有効受光面サイズが 6 × 6 mm<sup>2</sup>、開口率が 74 %となっており、受光面の大きさがシンチレータの 幅と概ね一致するものを選択している [24]。25 度における降伏電圧はそれぞれ 50.82 V と 50.27 V であり、 KEITHLEY 社製の 2400 型高圧電源を用いて 53.4 V の電圧を印加した。

検出器のコンフィグレーションについて、図 3.2 に示す。MPPC をシンチレータに取り付ける際には、 G-tech 社製のオプティカルラバー  $(1 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3)$ をシンチレータの  $75 \times 5 \text{ mm}^2$ の面の中心に置き、その 上に MPPC を重ね、バルカーテープを 3 重に巻いてそれらを固定した。2 つの MPPC で読み出す際には、 光量の一様性を考慮し、同面の端から 18.75 mm の位置にそれぞれ対称的に取り付けた。ただし、この位置 は暫定的なものであり、最適な位置はシミュレーションにより見積もる。MPPC 全体のサイズは  $10 \times 9 \text{ mm}^2$ であるため、固定時にはプラスチック製のスペーサーを使用した。また、光漏れ防止のため、シンチレータ と MPPC の接着面を除いた部分を 3M 社製の反射材である (Enhanced Specular Reflector; ESR) でカバー した。さらに、静電遮蔽のため、検出器を 2 mm 厚のアルミ箱の中に入れ、実験を行った (図 3.3)。エネル ギースレッショルドの目標値は ~10 keV であるため、数 10-100 keV 程度のエネルギー帯でガンマ線を放射 する  $^{109}$ Cd,  $^{241}$ Am を使用して測定を行った。まずは常温での評価を行うため、ESPEC 社製の LU-113 型 恒温槽を用いて温度を 25 度に固定した。使用した放射線源が放射する放射線の内、割合が高いもののエネ ルギーを表 3.1 に示す。より詳細なセットアップについては各実験に対応する節にて述べる。



図 3.1: 使用したシンチレータと MPPC



図 3.2: 検出器のコンフィグレーション



図 3.3: 検出器の外観

表 3.1: 使用した放射線源と、主な	放射線エネル	ギー [26]
放射線源	$^{241}\mathrm{Am}$	$^{109}\mathrm{Cd}$
	13.9 / 9.61	22.0 / 29.5
ガンマ線エネルギー $(\mathrm{keV})$ / 割合 $(\%)$	$17.8 \ / \ 5.78$	22.2 / 55.7
	$59.5 \ / \ 35.9$	88.0 / 3.61

## 3.2 シンチレータサイズ依存性

GRBの検出時刻を精度良く求めるには十分な光子統計が必要となる。そこで必要とされるのが大面積で 光量の高いシンチレータであるが、一般にサイズが大きくなるほど集光率は悪くなる。この節では、搭載 可能な異なるサイズのシンチレータ ( $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ ,  $100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ ) をそれぞれひとつの MPPC 読出し、光量の比較を行った。使用した機器は、クリアパルス社製の 5028 型 4CH 前置増幅器、EG&G ORTEC 社製の 571 型波形整形増幅器 (整形時定数 1 µs)、AMPTEK 社製の MCA8000A である。整形時 定数は CsI(Tl) の発光減衰時間である ~0.68 µs と近い値に設定した [13]。セットアップのブロック図を図 3.4 に示す。放射線源はシンチレータの中心から 20 cm 離して置き、全面に放射線があたるよう考慮した。 図 3.5 は  $^{241}$ Am のエネルギースペクトルであり、黒のヒストグラムが  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ 、赤のヒストグ ラムが  $100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータでそれぞれ取得したデータを示している。ADC チャン ネルは MPPC で検出した光子数に比例した値を示すため、入射ガンマ線のエネルギーと集光率に比例し て大きくなる。黒のヒストグラムにおいて ADC チャンネル 220 付近に広がって分布しているイベントが 59.5 keV ガンマ線の光電吸収イベントに対応しており、このピークチャンネル値を用いて光量比較を行っ た。 $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータにおける光量 (ピークチャンネル  $\sim 220$ ) と $100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ サイズのシンチレータにおける光量 (ピークチャンネル~250)の差は~13%であった。一方で、2つのシ ンチレータのサイズ差は 33 %であるため、光量の損失分以上に大面積である利点の享受が期待される。ま た、 $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータを使用することでユニット数をひとつ削減できるため、構造 をよりシンプルにできる。これらの理由から、 $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータが搭載に適してい ると考え、以後の実験ではこのシンチレータを使用した。

続いて、絶対光量が既知の 1 cm 角 CsI(Tl) シンチレータを用いて、  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータの絶対光量を計算した。絶対光量の評価は同じ CsI(Tl) シンチレータ同士の光量比較時に有用である。  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータの絶対光量は、1 cm 角シンチレータの絶対光量 ~37 photons/keV に、 そのシンチレータとの光量比 ~28 %(図 3.6) と MPPC の検出効率 ~35 %[24] を掛けることで、 ~3.6 p.e./keV と計算できた。



図 3.4: セットアップのブロック図



図 3.5: 2 つの異なるサイズのシンチレータで取得し た  $^{241}$ Am のエネルギースペクトル。黒のヒストグラ ムが  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ 、赤のヒストグラムが  $100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータで取得したデータ を示している。



図 3.6:  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータと 1 cm 角シンチレータで取得した <sup>241</sup>Am のエネルギー スペクトル。黒のヒストグラムが  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ サイズのシンチレータ、赤のヒストグラムが 1 cm 角 シンチレータで取得したデータを示している。

### 3.3 エネルギースレッショルド

エネルギースレッショルドが低いほど多くの光子を検出できるため、光子統計が必要な本ミッションに おいては ~10 keV の低スレッショルドの達成を目指している。エネルギースレッショルドの評価の際には、 <sup>109</sup>Cd の 22.2 keV ガンマ線と 88.0 keV ガンマ線、<sup>241</sup>Am の 59.5 keV ガンマ線を用いてエネルギー較正直線 を作った。図 3.7 はひとつの MPPC で読み出した際のエネルギー校正直線である。エネルギーを x、ADC チャンネル値を y とすると、較正直線の式は y = 3.5x + 7.2 と求まった。また、図 3.8 にひとつの MPPC で読み出した <sup>109</sup>Cd のエネルギースペクトルを、図 3.9 にその拡大図を示す。ADC チャンネル 40 以下はノ イズイベントであり、2 つのピークは 22.2 keV と 88.0 keV のガンマ線の光電吸収イベントを示している。 ノイズが駆け上がり始めるチャンネル以下に分布するガンマ線イベントは、その強度によってはノイズに埋 もれてしまうため、スレッショルドをノイズの駆け上がり始めるチャンネルに対応するエネルギー値と定義 した。その値は ~10 keV と計算でき、目標値の達成を確認できた。2 つの MPPC で読み出した際のエネル ギースレッショルドについても、同様の方法で 10 keV 以下と求まった。詳しくは次節で述べる。



図 3.7: ひとつの MPPC で読み出した際のエネルギー校正直線。黒丸はエネルギーと ADC チャンネルの関 係を示した実際のデータで、赤線は直線によるフィッティング結果を示す。



図 3.8: ひとつの MPPC で読み出した <sup>109</sup>Cd のエネル ギースペクトル。ADC チャンネル 40 以下はノイズイ ベントであり、2 つのピークは 22.2 keV と 88.0 keV 図 3.9: 図 3.8 を ADC チャンネル 100 までの範囲で拡 のガンマ線の光電吸収イベントを示す。



大したもの

#### 複数 MPPC 読出しにおける基礎特性 3.4

これまで、シンチレータの最適なサイズやエネルギースレッショルドなどをひとつの MPPC で読み出す ことで評価してきた。しかし、MPPCの受光面がシンチレータのサイズに比べて小さいため、シンチレー ション光の読出し効率が低く、絶対光量が低くなっていることや、光量がシンチレーション光の発生位置 に大きく依存性してしまっていることなどが懸念される。そこで、これらの問題を解決するため、複数の MPPC による読出しを考える。一般的に MPPC を増やすほど暗電流も増加してしまうため、コインシデ ンス法を用いて読出しを行なうことで暗電流の低減を行なうとともに、絶対光量とその一様性向上を狙う。

前節のセットアップでは2チャンネル読出しに対応していなかったため、本実験では多チャンネル読出しが 可能なシマフジ電機社製の Flash ADC Board を使用した。このボードは本来、硬 X 線偏光検出器 PoGO+ の気球実験 [25] のために製作されたものであり、前置増幅器、整形増幅器 (整形時定数 2.2  $\mu$ s、変更不可)、 アナログ-デジタル変換回路、FPGA(Field-Programmable Gate Array) が内蔵されている。FPGA では各 イベント毎に波形情報と信号のトリガー時刻が記録され、それぞれのチャンネルで読み出された信号のト リガー時刻が 5  $\mu$ s 以内で一致している場合、コインシデンスイベントというタグがつくよう設定を行った。 以後の実験ではこのボードを用いて測定を行った。

まず始めに、2 つの MPPC で測定したエネルギースレッショルドと分解能、光量の変化について調べた。 図 3.10 は <sup>241</sup> Am のエネルギースペクトルであり、黒のヒストグラムがひとつの MPPC で測定したデータ、赤のヒストグラムが 2 つの MPPC で測定したデータを示している。青のヒストグラムは MPPC の個数によるエネルギースレッショルドと分解能変化の直接比較を行なうため、赤のヒストグラム (2MPPC 読出し結果) の縦・横軸を定数倍し、黒のヒストグラム (1MPPC 読出し結果) に重ねたものである。黒と青のヒストグラムにおける低エネルギー領域 (ADC チャンネル 60 以下) でのイベント数の比較から、コインシデンス法によってノイズを大きく低減できていることがわかる。これによりエネルギースレッショルドも向上し、~8 keV を達成した。また、2 つの MPPC で読み出すことで、エネルギー分解能は 36.0±0.4 %から 28.8±0.2 %へと向上した。さらに、黒のヒストグラムにおける 59.5 keV ガンマ線の光電吸収ピーク (ADC チャンネル ~250) を赤のヒストグラムのもの (ADC チャンネル ~350) と比較することで、2 つの MPPC で読み出したことにより光量が ~1.4 倍に増加したことが確認できる。



図 3.10: <sup>241</sup>Am のエネルギースペクトル。黒のヒストグラムはひとつの MPPC で測定したデータ、赤のヒ ストグラムは 2 つの MPPC で測定したデータを示す。青のヒストグラムは MPPC の個数によるエネルギー スレッショルドと分解能変化の直接比較を行なうため、赤のヒストグラム (2MPPC 読出し結果) の縦・横 軸を定数倍し、黒のヒストグラム (1MPPC 読出し結果) に重ねたものである。

続いて、光量の一様性を測定するため、放射線照射位置による光量の違いを調べた。本実験におけるセットアップを図 3.11 に示す。厚さ 1 mm でシンチレータと同サイズ (150 × 75 × 1 mm<sup>3</sup>) の 2 枚の鉛シート に、それぞれ直径 1 mm の穴を図 3.11 のように 10 箇所開け、シンチレータから 1 mm, 13 mm の位置に配

置した。それぞれの穴の位置を pos. 1 から pos. 9, pos. 9' とよび、穴の上に <sup>241</sup>Am を置くことでガンマ 線をコリメートした。3.1.1 節で述べたように、ひとつの MPPC で読み出す際には MPPC をシンチレータ の中心に、2 つの MPPC で読み出す際には同面の端から 18.75 mm の位置に対称的に取り付けた。2 つの MPPC で測定する際にも、MPPC 直近での照射結果を考慮に入れる必要があるため、シンチレータの端か ら 18.75 mm、MPPC から 10 mm の位置に pos. 9' を作った。



図 3.11: MPPC(2 つ使用時)・鉛コリメータの配置と穴のナンバリング。ひとつの MPPC で読み出した際 には pos. 8 直近の位置に取り付けた。

まず、ひとつの MPPC で測定した際の光量の一様性について評価した。図 3.12 は、放射線源をシンチ レータの中心から 20 cm 離して置き、鉛シートを使用せず全面に放射線を照射した結果 (黒のヒストグラ ム) と、pos.2, 3, 5, 6, 8, 9 での照射結果をまとめたものである。pos.1, 4, 7 での結果は pos.3, 6, 9 のもの と類似していたため、省略している。光量の一様性を評価する上で、各位置で測定した 59.5 keV ガンマ線 の光電吸収ピークチャンネルの内、最大となった位置での値と最小となった位置での値の比を「非一様性」 と定義した。ひとつの MPPC で読み出したところ、光量は pos. 8 で最大 (ピークチャンネル ~180) とな り、pos. 9 で最小 (ピークチャンネル ~300) となったため、非一様性は 40 %と求まった。続いて、2 つの MPPC で測定した結果を図 3.13 に示す。光量は pos. 9'で最大 (ピークチャンネル ~410) となり、pos. 8 で最小 (ピークチャンネル ~320) となったため、非一様性は 22 %と求まった。表 3.2 に、MPPC の個数に よる非一様性とエネルギー分解能の変化についてまとめる。2 つの MPPC で読み出すことで、光量の一様 性とエネルギー分解能が向上することがわかった。





ラーヒストグラムは各位置での照射結果を示す。

図 3.12: ひとつの MPPC で測定した <sup>241</sup>Am のエネ 図 3.13: 2 つの MPPC で測定した <sup>241</sup>Am のエネル ルギースペクトル。黒のヒストグラムは全面照射、カ ギースペクトル。黒のヒストグラムは全面照射、カ ラーヒストグラムは各位置での照射結果を示す。

表 3.2: MPPC の個	固数による非一	様性とエネル	/ギー分館	解能の変化
----------------	---------	--------	-------	-------

読出し	非一様性 [%]	エネルギー分解能 [%]
$1 \mathrm{MPPC}$	$\sim \! 40$	$36.0{\pm}0.4$
2  MPPC	$\sim 22$	$28.8 {\pm} 0.2$

#### MPPC取り付け位置の最適化 3.5

### 3.5.1 モンテカルロシミュレーションによる最適化

これまでは光量の一様性を考慮し、2つの MPPC を対称的に配置した。ここでは、更なる集光率の向上 のため、対称的な配置の中でも光量が最大となる配置を考える。配置の最適化を行なう際には、各コンフィ グレーションで MPPC の検出光子数を計算する必要がある。しかし、ガンマ線がシンチレータと相互作用 を起こすと、ランダムな方向に大量のシンチレーション光が発生するため、その飛跡を追って検出光子数を 計算するのは非常に困難である。そこで、光子や電子などの様々な粒子と物質との相互作用を再現できるモ ンテカルロシミュレータ Geant4 を用いて実験と同様のジオメトリを再現し、2 つの MPPC の取り付け位 置を変化させながら、検出光子数の変化を調べた。図 3.14 にそのジオメトリを示す。赤の領域は MPPC の 受光面、緑の線はシンチレーション光子の飛跡、青の線はガンマ線を示している。実験では検出器を2mm 厚のアルミ箱に入れていたため、その箱の上面部分も再現した。また、反射材についても再現し、その反射 率は 99.9%とした [27]。放射線源はシンチレータの中心から 20 cm 離した位置に置き、<sup>241</sup>Am と同様の放 射線エネルギー・割合で、ランダムな方向にガンマ線を照射するよう設定を行った。シンチレーション光の 1 keV あたりの発生数は 65 photon/keV[13]、その吸収長は 350 cm に設定した。



図 3.14: Geant4 で再現したジオメトリ。赤の領域は MPPC の受光面、緑の線はシンチレーション光子の 飛跡、青の線はガンマ線を示す。

### 3.5.2 実験・シミュレーション結果の比較と考察

まず、前節で述べたシミュレーションのセットアップで実験結果を再現できるかどうかを確認した。その際、ひとつの MPPC で測定した<sup>241</sup>Am のスペクトルを用いて比較を行った。シミュレーションでは各 イベント毎に検出光子数を計算できるため、それを横軸にとってスペクトルを作った。その結果を図 3.15 に示す。この図において、黒のヒストグラムは実験データを、赤のヒストグラムはシミュレーション結果を 示している。シミュレーションにより得たスペクトルの縦・横軸は実験で得たスペクトルのそれと比例関係 であるため、それぞれ定数倍することでスペクトルを重ね、形状比較を行いやすくしている。実験データに おける ADC チャンネル 60 以下のイベントは MPPC の暗電流によるものであり、ADC チャンネル 350 以 上のイベントは環境放射線によるものである。シミュレーションではそれらを考慮していないため、その領 域ではスペクトルは一致しないが、放射線源由来のイベントについては概ね再現できていることがわかる。

ここで、ADC チャンネル 120 付近のピークの由来について考える。<sup>241</sup>Am は~15 keV のエネルギーを 持ったガンマ線を~10 %の割合で放射するが [26]、そのガンマ線は 2 mm 厚のアルミ箱にて~98 %の確率 で光電吸収されるため [28]、スペクトルには現れないと考えられる。そのため、ADC チャンネル 120 付近の ピークは 59.5 keV ガンマ線に由来するものであると推測できる。そこで、ガンマ線のエネルギーを 59.5 keV に固定し、再度シミュレーションを行った。その結果を図 3.16 に示す。スペクトルの形状が図 3.15 と同様 に実験結果と一致しているため、ADC チャンネル 120 付近のピークは 59.5 keV ガンマ線に由来すること がわかった。59.5 keV のエネルギーが ADC チャンネル 250 に対応することから、ADC チャンネル 120 は ~28.6 keV に対応することが計算によって求まる。ここで、Cs は~31.0 keV の特性 X 線 (K $\alpha$  線)を出す ことから [29]、<sup>241</sup>Am の 59.5 keV ガンマ線が CsI シンチレータ表面で反応し、発生した特性 X 線がシンチ レータ外に逃げたことで、その差分である 59.5 – 31.0 = 28.5 keV に対応するピークがスペクトルに現れた と考えられる。

続いて、実験と同様に2つの MPPC をシンチレータの端からそれぞれ18.75 mm の位置に対称的に配置 し、測定を行った際の光量の変化についても比較した。放射線源からランダムな方向に2万発の放射線を発 生させ、検出光子数をひとつの MPPC または2つの MPPC で測定するという流れを、20 回繰り返すこと で、検出光子数の分散を求めた。その結果、検出光子数はひとつの MPPC で測定した場合に15129±1203、 2 つの MPPC で測定した場合に 23974±1191 となり、優位な差が見られた。その比は ~1.5 倍であり、実験 における光量比~1.4倍とほぼ一致している。これらの結果から、シミュレーションのセットアップは信頼 できると判断した。



グラムはシミュレーション結果を示す。



図 3.16: ひとつの MPPC で測定した <sup>241</sup>Am のスペク 図 3.15: ひとつの MPPC で測定した <sup>241</sup>Am のスペク トル。シミュレーションではガンマ線のエネルギーを トル。黒のヒストグラムは実験データを、赤のヒスト 59.5 keV に固定した。黒のヒストグラムは実験データ を、赤のヒストグラムはシミュレーション結果を示す。

次に、2 つの MPPC をシンチレータの端からそれぞれ 5 mm, 32.5 mm の位置に設定し、シミュレー ションを行った。図 3.17, 3.18 にそのジオメトリを示す。ここでも同様に 2 万発の放射線を発生させ測定 する流れを20回繰り返し、検出光子数の分散を求めた。その結果、検出光子数は端から5 mmの位置で 23146±2032、端から 32.5 mm の位置で 23199±1629 となった。これらの結果によると、2 つの MPPC を 同じ面に対称的に取り付けた場合の検出光子数は、誤差の範囲内で一致している。つまり、対称的な配置 を行なうという条件下では光量が変化しないため、自由度の高い配置が可能となる。表 3.3 に各コンフィグ レーションでの検出光子数をまとめる。なお、対辺にひとつずつ MPPC を配置した場合、配線等が複雑化 するため、ここでは考えていない。



ぞれ5mmの位置に設定したジオメトリ



図 3.17: 2 つの MPPC をシンチレータの端からそれ 図 3.18: 2 つの MPPC をシンチレータの端からそれ ぞれ 32.5 mm の位置に設定したジオメトリ

読出し / 位置	検出光子数
1 MPPC	$15129{\pm}1203$
$2~\mathrm{MPPC}$ / $5~\mathrm{mm}$	$23199 {\pm} 1629$
$2~\mathrm{MPPC}$ / $18.75~\mathrm{mm}$	$23974{\pm}1191$
$2~\mathrm{MPPC}$ / $32.5~\mathrm{mm}$	$23146{\pm}2032$

表 3.3: 検出<u>光子数の MPPC 読み出し個数と位置に</u>よる依存性

# 第4章 軌道上陽子の検出器への影響

### 4.1 検出器の放射線損傷

これまでに、MPPC は小型でゲインが高い等の様々な利点をもつこと、また地上実験にて大面積 CsI(Tl) シンチレータを読みだした際に 10 keV 以下のエネルギースレッショルドを達成したことを述べた。しか し、宇宙で使用する際には CsI と MPPC の軌道上陽子による放射線損傷の影響を考慮しなければならない。 CsI は放射線損傷により光量が低下することが知られているが、その効果は低軌道でわずか 1 %/year であ る [30]。また、10 年間運用中の Fermi 衛星に搭載されている大面積 CsI シンチレータにおいても、大きな 問題は報告されていない [31]。一方で CsI は減衰時間 680 ns の主蛍光成分 (確率 64 %) に加えて、~3 ms の長い蛍光成分 (確率 36 %) を持ち [13]、その残光発生後にも主蛍光成分の ~5 %もの強度が残ると報告さ れている [32]。この残光が原因でハイレートなバックグラウンド下においてパイルアップが発生し、観測に 支障をきたす恐れがある。そのため、通常観測時の陽子バックグラウンドレート下において、また南大西洋 異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) のハイレートなバックグラウンド領域の通過後においてスペクト ルを正常に取得できるかどうかを調べる必要がある。

また、MPPCは放射線損傷による暗電流の増加が報告されており、低エネルギースレッショルドに悪影 響を与えることが懸念される。そこで、この章では数ヶ月、数年分に相当する陽子ビームを MPPC に照射 した後の暗電流・スペクトルの評価のほか、通常観測時・SAA 中のレートで CsI シンチレータに陽子照射 を行った際の<sup>241</sup>Am のスペクトル評価を行った。

### 4.2 実験セットアップ

我々は陽子ビームを照射する上で、若狭湾エネルギー研究センターのビームラインをお借りし、実験を 行った(図 4.1)。まず始めに、MPPCへのビーム照射実験に関するセットアップを述べる。MPPCは計 4 つ、浜松ホトニクス社製の13360-6050CSを使用し、No.1からNo.4の番号を振った。各MPPCの25度に おける降伏電圧と印加電圧について表 4.1 にまとめる。MPPC-No.4 については降伏電圧がほかのものに比 べて1V程度低いため、印加電圧も同様に低く設定した。また、本実験において陽子ビームのエネルギー は軌道上での典型値200 MeV に固定し、ターゲット(MPPCは受光面、シンチレータは最も広い面)に対 して垂直に照射した。

表 4.1: 使用した MPPC の降伏電圧と印加電圧

MPPC <b>番号</b>	降伏電圧 [V]	印加電圧 [V]
No.1	51.73	55.00
No.2	51.70	55.00
No.3	51.71	55.00
No.4	51.00	54.00

まず1年間運用時の放射線損傷による暗電流・スペクトルの変化を調べるため、MPPC-No.1において 吸収線量が10 rad, 50 rad, 100 rad, 1 krad 相当になるよう照射を行った。ここで、1 krad は衛星軌道上 で1年間運用した際に想定される吸収線量に相当する。MPPCの吸収線量の計算方法については後述する。 各吸収線量に達するまでビーム照射を行った後、1 cm 角の CsI(Tl) シンチレータに光学グリスを用いて取 り付け、暗電流と<sup>241</sup>Am のスペクトルを測定した。この実験では MPPC の取り付け・取り外しを何度も 行なうため、ハンドリングの容易な1 cm 角のシンチレータを使用した。光漏れ防止のため、シンチレータ と MPPC の接着面を除いた部分を反射材 ESR でカバーし、バルカーテープを3 重に巻いてそれらを固定 した。また静電遮蔽のため、検出器は厚さ2 mm のアルミ箱に入れた。

続いて吸収線量がそれぞれ異なる MPPC において暗電流・スペクトルの長期モニタを行ない、各吸収線 量毎にその時間変化を調べた。MPPC-No.2, No.3, No.4 にそれぞれ吸収線量が 100 rad, 300 rad, 5 krad 相 当になるようビーム照射を行い、各 MPPC からの信号を同時にモニタできるよう、3 つの読出し回路を用 いて読出しを行った。また、スペクトル評価の際には<sup>241</sup>Am を用いた。これらの実験では KEITHLEY 社 製の 2400 型, 2410 型, 6517 型高圧電源を 1 台ずつ、クリアパルス社製の 5028 型 4CH 前置増幅器を 1 台、 EG&G ORTEC 社製の 571 型波形整形増幅器 (整形時定数 1 µ s) を 3 台、AMPTEK 社製の MCA8000A を 1 台、同社製の MCA8000D を 2 台使用した。検出器の周辺温度を制御する際には、ESPEC 社製の LU-113 型恒温槽を使用した。セットアップの写真とプロック図を図 4.2, 4.3 に示す。



図 4.1: 若狭湾エネルギー研究センターにて使用したビームライン



図 4.2: セットアップ写真

KEITHLEY 2400 高圧電源	$\blacktriangleleft$		EG&G ORTEC 571 波形整形増幅器	-	AMPTEK MCA8000A
KEITHLEY 2410 高圧電源	◀	クリアパルス 5028 4CH 前置増幅器	EG&G ORTEC 571 波形整形増幅器		AMPTEK MCA8000D
KEITHLEY6517 高圧電源	◀		EG&G ORTEC 571 波形整形増幅器	<u> </u>	AMPTEK MCA8000D

図 4.3: セットアップのブロック図

ここで、MPPC の吸収線量の計算方法について記す。図 4.4 は入射陽子のエネルギーとそれが Si に落 とす単位長さあたりのエネルギーの関係を示したものである [33]。この図から、入射陽子のエネルギーが 200 MeV の時、Si に落とす単位長さあたりのエネルギーは ~0.85 keV/µm となることが読み取れる。使用 した MPPC の Si 部分の厚みが 1.3 mm、面積が 6×6 mm<sup>2</sup>、密度が 2.33 g/cm<sup>3</sup> であることから、200 MeV の陽子がひとつ入射した際の吸収線量は ~ $1.6 \times 10^{-7}$  rad/proton と求まる。逆に、吸収線量 1 rad に相当す る陽子数は、この逆数を取ることで ~ $6.3 \times 10^6$  proton/rad と計算できる。次に、本実験のセットアップに おいて 1 秒間あたりに MPPC の受光面に照射される陽子数を求める。図 4.5 に本実験での照射台における ビームプロファイルを示す。ビームは楕円状にガウス分布し、照射する陽子数と MPPC の受光面にヒット する陽子数の割合から、利用効率は ~1.9 %と求まった。また、使用したビームの出力は 0.1 nA であったた め、これを素電荷  $1.6 \times 10^{-19}$  C で割ることで、1 秒間あたりに照射される陽子数が ~ $6.25 \times 10^8$  proton/s と計算できる。この値に上で求めた利用効率を掛けることで、1 秒間あたりに MPPC の受光面にヒット する陽子数が ~ $11.9 \times 10^6$  proton/s と求まる。最後に、吸収線量 1 rad に相当する陽子数をこの値で割ること で、吸収線量 1 rad に相当する照射秒数が導出される。この値を参考に、各吸収線量に相当する照射秒数を 決めた。



図 4.4: 入射陽子のエネルギーとそれが Si に落とす単 位長さあたりのエネルギーの関係 [33]

図 4.5: 本実験での照射台におけるビームプロファイル

続いて、CsI シンチレータへのビーム照射実験に関するセットアップを述べる。本来は、3.2 節にて衛星搭 載候補として選別した  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータを用いて実験を行なうべきであるが、移動時 に万が一損傷した場合、以後の実験に支障をきたす可能性があったため、サイズの異なる  $100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ を使用した。これら 2 つのシンチレータは同じ厚みを持つため、陽子がそれぞれのシンチレータに落とすエネ ルギーは等価であると考えられる。そのため、 $100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サイズのシンチレータの使用は CsI 残光に よる影響を評価する上で問題にはならない。MPPC は 3.2 節と同様に浜松ホトニクス社製の 13360-6050CS を使用した。この MPPC の降伏電圧は 51.75 V であり、55.00 V の印加電圧下で測定した。シンチレータと MPPC の取り付け・固定方法は 3.1 節と同様に行った。静電遮蔽のため検出器を厚さ 2 mm のアルミ箱に入 れるが、陽子がアルミニウムによって大きく散乱されないよう、アルミ箱の蓋には直径 3 cm の穴を開け、 その穴をアルミ箔で覆った (図 4.6)。使用した機器はクリアバルス社製の 6721型 SiPM 用バイアス電源、同 社製の 506E型前置増幅器、EG&G ORTEC 社製の 571型波形整形増幅器 (整形時定数  $1 \mu$  s)、AMPTEK 社製の MCA8000D、Tektronix 社製の TDS 3032B型オシロスコープである。この実験では、ビーム照射 中における波形の変化を確認するため、モニター室にてオシロスコープの画面を遠隔で監視した。セット アップのブロック図を図 4.7 に示す。

まず、通常観測時の陽子バックグラウンドレートを想定し、200 Hz でビーム照射を行いながら<sup>241</sup>Am を 当て、波形・スペクトルの変化を測定した。ビーム照射は、0.3 秒の陽子照射期間と 0.7 秒の無照射期間を 繰り返す設定であった。次に SAA 通過を想定して 10<sup>5</sup> Hz でビーム照射を行った後、レートを 200 Hz に戻 した上で同様に波形・スペクトルの変化を測定し、CsI 残光による観測への影響を評価した。

40



図 4.6: アルミ箱の蓋。直径3 cm の穴を開け、その穴をアルミ箔で覆った。



図 4.7: セットアップのブロック図

# 4.3 暗電流・スペクトルの評価

まず、20度の温度下で MPPC-No.1 の吸収線量が 10 rad, 50 rad, 100 rad, 1 krad 相当になるよう 200 MeV の陽子照射を行った結果について述べる。図 4.8 に吸収線量と暗電流の関係を示す。この図から、1 krad 照 射後には暗電流が ~300 倍に増加していることがわかる。図 4.9 は吸収線量と  $^{241}$ Am スペクトルの関係を示している。この図では吸収線量の増加に伴う暗電流イベントの増加だけでなく、ゲインの低下も見られる。図 4.8 より、100 rad 照射後の暗電流は ~ $10^{-4}$  A、また回路抵抗は 1 kΩ であることから、暗電流による電圧降下分は ~0.1 V と計算でき、電圧降下によるゲイン低下は ~1 % であると考えられる [24]。しかし、実際には ~50 %のゲイン低下が発生しているため、暗電流による電圧降下以外の原因があると考えられる。

また、吸収線量が10 rad, 50 rad, 100 rad と増加するにつれ、59.5 keV ガンマ線の光電吸収ピークは低チャ ンネル側にシフトしているが、1 krad 照射後のスペクトルではそのピークが見えず、高チャンネル側に新 たにイベントが発生している。このイベントの起源を調べるため、バックグラウンドスペクトルを測定し た。図 4.10 に 1 krad 照射後のバックグラウンドスペクトルの時間変化を示す。この図と図 4.9 から、バッ クグラウンドスペクトルと<sup>241</sup>Am のスペクトルが同一形状であることがわかる。つまり、図 4.9 で見られ た 1 krad 照射後の高チャンネル側のピーク構造は 59.5 keV ガンマ線由来ではなく、バックグラウンドに起 因している。このピーク構造は時間とともに減衰し、数時間後には見えなくなった。この現象は同条件にて 1 krad 照射した別個体においても確認できた (図 4.11)。この高吸収線量照射直後に発生したバックグラウ ンド構造の詳細については現在調査中であるが、発生した理由として MPPC を構成する金属部品の局所的 な放射化が候補として考えられる。ここで、図 4.12 に 10 rad, 100 rad, 1 krad 照射後の暗電流と経過時間 の関係を示す。1 krad 照射から 7 日間経過後も暗電流の変化はほぼ見られなかった。



図 4.8: 吸収線量と暗電流の関係



図 4.9: 吸収線量と<sup>241</sup>Am スペクトルの関係



図 4.10: 1 krad 照射後のバックグラウンドスペクトル の時間変化



図 4.11: 1 krad 照射後のバックグラウンドスペクトル の時間変化 (別個体)



図 4.12: 10 rad, 100 rad, 1 krad 照射後の暗電流と経過時間の関係

続いて、MPPC-No.2, No.3, No.4 の吸収線量がそれぞれ 100 rad, 300 rad, 5 krad 相当になるよう陽子 を照射し、暗電流の時間・温度依存性を調べた。図 4.13 に MPPC-No.1(吸収線量 1 krad)の結果も含めた 暗電流の時間・温度依存性について示す。また、図 4.14 には図 4.13 の経過時間 10<sup>6</sup> s 以上の範囲を拡大し たものを示す。100 rad, 300 rad, 1 krad 照射のグラフにおける経過時間 10<sup>6</sup> s 付近の領域では、検出器を 20 度から-20 度まで冷却しているため、暗電流が低減されている。また、図 4.14 の各グラフにおいて暗電 流が下がっている領域では、検出器を 20 度から-30 度まで冷却している。これらの図から、暗電流は吸収 線量に依らず時間経過による低下はほぼ見られないこと、検出器を冷却するとある程度暗電流は低減され たが、陽子照射前の暗電流値には戻らないことがわかった。



図 4.13: 各吸収線量における暗電流の時間・温度依存性



図 4.14: 各吸収線量における暗電流の時間・温度依存性(拡大図)

## 4.4 エネルギースレッショルド

続いて、吸収線量が 100 rad, 300 rad, 1 krad の MPPC のエネルギースレッショルドを 20 度から-30 度まで 10 度刻みで評価した。まず初めに、20 度と-30 度の温度下で 100 rad 照射後の MPPC を用いて <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウンド (青) のスペクトルを測定した。その結果を図 4.15, 4.16 に示す。 同様に 300 rad 照射後の MPPC での測定結果を図 4.17, 4.18 に、1 krad 照射後の MPPC での測定結果を 図 4.19, 4.20 に、5 krad 照射後の MPPC での測定結果を図 4.21, 4.22 に示す。測定温度によって MPPC の ゲインが変化するため、温度変化に応じてアンプのゲインを調整している。これらのスペクトルから、吸収 線量と温度が低いほどエネルギースレッショルドも低くなっていることが読み取れる。一方で、図 4.22 の 5 krad 照射後の MPPC では-30 度の温度下においても <sup>109</sup>Cd の 88 keV ガンマ線の光電吸収ピークが見え ないため、エネルギースレッショルドは極端に悪くなっていると考えられる。この MPPC に 20 度の温度 下で <sup>137</sup>Cs を照射したところ 662 keV の光電吸収ピークが確認できたため、正常に動作していることが確 認できた (図 4.23)。しかし、エネルギースレッショルドは ~300 keV と非常に高いため、十分な光子統計 を得られず、GRB の位置決定能力の低下や位置決定自体が不可能になることが考えられる。



図 4.15: 100 rad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.16: 100 rad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.17: 300 rad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.18: 300 rad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.19: 1 krad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.20: 1 krad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>190</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.21: 5 krad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.22: 5 krad 照射後の MPPC を用いて-30 度の温 度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>109</sup>Cd(赤), バックグラウ ンド (青) のスペクトル



図 4.23: 5 krad 照射後の MPPC を用いて 20 度の温度下で測定した <sup>241</sup>Am(黒), <sup>137</sup>Cs(赤), バックグラウン ド (青) のスペクトル

次に、100 rad, 300 rad, 1 krad 照射後の MPPC で測定したスペクトルにおける<sup>241</sup>Am, <sup>109</sup>Cd の光電吸 収ピークを用いてエネルギー校正直線をつくり、ノイズの駆け上がり部分をエネルギースレッショルドと定 義し、評価を行った。なお、いずれの光電吸収ピークも確認できなかったスペクトルに関しては、評価を 行なっていない。図 4.24 に各吸収線量照射後のエネルギースレッショルドの温度依存性を示す。本実験で 使用したシンチレータは 1 cm 角のものであったため、衛星に搭載予定である 150 × 75 × 5 mm<sup>3</sup> サイズの シンチレータでの結果に換算する必要がある。そのため、それぞれのシンチレータ間での光量比を用いて 図 4.24 の結果を補正した。補正後のエネルギースレッショルドの温度依存性を図 4.25 に示す。補正の際に は、1 cm 角サイズのシンチレータにおける光量が搭載予定のものの 3.6 倍となっていることを考慮した (図 3.6)。図 4.25 より、1 年運用に相当する吸収線量 ~1 krad を浴びた MPPC におけるエネルギースレッショ ルドは、-30 度の温度下で 100 keV 以下となっている。この値は陽子照射前の MPPC を 20 度の温度下で 測定した結果の 10 倍である。5 krad 照射後のエネルギースレッショルドが ~300 keV となってしまってい たことと同様に、スレッショルドの悪化は位置決定能力の低下をもたらす。スレッショルドの悪化を抑える ためには、運用時における検出器の冷却はもちろんのこと、放射線損傷防止のために MPPC 自体に何らか の遮蔽機構を設ける必要がある。これらの結果を受け、現在 CAMELOT チーム内では遮蔽機構も含めた構 造設計検討が行われている。





図 4.24: 各吸収線量照射後のエネルギースレッショル ドの温度依存性。1 cm 角サイズの CsI シンチレータ 使用時の実測値を示す。

図 4.25: 各吸収線量照射後のエネルギースレッショル ドの温度依存性。1 cm 角サイズの CsI シンチレータ との光量比を考慮して補正した  $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$  サ イズの CsI シンチレータにおける予想値を示す。

### 4.4.1 CsI(Tl) シンチレータの残光による測定への影響

通常観測時の陽子バックグラウンドレート ~200 Hz 下において、また SAA(10 kHz 以上のハイレートな バックグラウンド領域)の通過直後において、スペクトルを正常に取得できるかどうかを調べた。前節の実 験とは異なり、ここでは 100 × 75 × 5 mm<sup>3</sup> サイズの CsI(Tl) シンチレータに陽子照射を行いながら <sup>241</sup>Am を当て、MPPC で信号を読みだした。図 4.26 のデータはどれも <sup>241</sup>Am のスペクトルであるが、黒のヒスト グラムは陽子照射前に取得したもの、赤のヒストグラムは通常観測時の陽子バックグラウンドレートを想定 し、200 Hz でビーム照射を行いながら取得したもの、青のヒストグラムは SAA 通過を想定して 10<sup>5</sup> Hz の ビーム照射を 10 分間行った後、レートを 200 Hz に戻してから取得したものを示している。SAA 通過後を 想定した条件下で取得したデータ (青)の総イベント数は、陽子照射前と比較して ~13 %減少しているが、 スペクトルの形は一致している。総イベント数減少の原因については後に触れる。また、通常観測時におい ても同様にスペクトル形状の変化は見られなかったため、CsI の残光は通常観測時の陽子バックグラウンド レート下においても、SAA 通過直後においてもスペクトルに影響を及ぼさないことがわかった。



図 4.26: <sup>241</sup>Am スペクトル。黒のヒストグラムは陽子照射前に取得したもの、赤のヒストグラムは通常観 測時の陽子バックグラウンドレートを想定し、200 Hz でビーム照射を行いながら取得したもの、青のヒス トグラムは SAA 通過を想定して 10<sup>5</sup> Hz でビーム照射を 10 分間行った後、レートを 200 Hz に戻してから 取得したものを示す。

続いて、200 Hz でビーム照射を行いながら取得した前置増幅器出力波形を図に示す。図 4.27 は通常時の陽子イベントを、図 4.28 は陽子がシンチレータに大きなエネルギーを落とした際のイベントを捉えている。縦軸は電圧 (1 マスが 1 V に対応) 横軸は時間 (1 マスが 200  $\mu$ s に対応) を表す。前置増幅器の出力は負極性であるため、図 4.27 の横軸左端から 100  $\mu$ s 付近で見られる大きな電圧降下は陽子イベントを示し、広く分布する ~1 V の電圧降下はガンマ線イベントを示す。陽子入射後には電圧が大きく上昇するオーバーシュート現象が見られる。図 4.27 ではガンマ線イベントを検出できているが、図 4.28 では検出できていないことがわかる。これは入射陽子数の統計的ばらつきにより、瞬間的に多くの陽子が入射したことで回路に大電流が流れ、前置増幅器が飽和したためであると考えられる。今回の測定条件ではこの現象によって有効観測時間が ~13 % 失われたが、前置増幅器の回路検討により改善される余地があるため、ここでは大きな問題として扱わないこととした。

今回の測定では、衛星軌道上で想定されるバックグラウンド成分の内、比較的大きなエネルギーを検出 器に与え、かつハイレートな陽子バックグラウンドが及ぼす CsI 残光の影響について評価を行った結果、今 回用いた電気回路系統におけるスペクトル性能については問題がないことを確認した。しかし、CsI 残光の 影響についてはほかにも以下のような事項において引き続き検討を行う必要がある。まず、今回は前置増 幅器出力をモニタしたが、CsI 残光の影響を原理的に評価したい場合はできるだけ検出器に近い信号をモニ タするべきである。今回の測定においては、MPPC の出力信号をモニタすることに相当する。本実験では セットアップの問題から MPPC の出力信号をモニタすることはできなかったが、今後同様の実験を行う際 には検討が必要である。もう一点、軌道上バックグラウンドとして検出器にさらに大きなエネルギーを付与 する重粒子イオンの影響についても評価すべきである。今回使用した 200 MeV の陽子ビームを同様のセッ トアップで 5 mm 厚の CsI シンチレーターに対して照射した結果、5-10 MeV 程度のエネルギーをシンチ レーターに与えていたことがわかった。このエネルギーは通常観測信号に比べて十分大きいが、軌道上に 存在する重粒子イオンはさらに大きなエネルギーをシンチレーターに与えると考えられるため、重粒子イオンによる CsI 残光の評価も必要である。重粒子イオンは陽子に比べて軌道上でのレートが低いことから、本実験では陽子による影響を優先して評価した。今後は他の重粒子ビームが利用できる機会を捉えて、CsI 残光の影響をさらに調べる必要がある。





図 4.27: 200 Hz でビーム照射を行いながら取得した 前置増幅器出力波形。通常時の陽子イベントを捉えて いる。

図 4.28: 200 Hz でビーム照射を行いながら取得した 前置増幅器出力波形。陽子がシンチレータに大きなエ ネルギーを落とした際のイベントを捉えている。

# 第5章 まとめと今後の課題

本研究では、CAMELOT ミッションで使用予定である、CsI(Tl) シンチレータと MPPC を組み合わせ た検出器の性能評価を行なった。このミッションでは大面積シンチレータを小型の光検出器で読み出し、十 分な光子統計を達成することが重要である。そこで、コインシデンス法を用いて2つの MPPC で読み出す ことで、暗電流の低減や光量とその一様性の向上を試みた。第3章では光量のシンチレータサイズ依存性 や2つの MPPC で読み出した際のエネルギースレッショルド・一様性の変化、また2つの MPPC の取付 位置による光量の変化等を調べた。MPPC は小型でゲインが高い等の様々な利点を持つ一方で、放射線損 傷により暗電流が増加するという報告がある。また、CsI についても長い蛍光成分が観測に悪影響をもたら すことが懸念されていたため、第4章では陽子ビームを MPPC や CsI に照射した結果ら軌道上陽子の検出 器への影響を評価した。

第3章ではまず、 $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3 \ge 100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ サイズのシンチレータにおける光量の違い を調べた。 $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ サイズのシンチレータにおける光量は $100 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ サイズのものより ~13%低かった。一方で面積が33%大きいことを考慮すると、光量の損失分以上に大面積である利点を享 受できると考えられるため、 $150 \times 75 \times 5 \text{ mm}^3$ サイズのシンチレータがより搭載に適していると判断し た。また、このシンチレータの絶対光量は、絶対光量が既知の1 cm角 CsI(Tl)シンチレータとの光量比と MPPCの検出効率から~37 photons/keV と見積られた。続いて、25度の温度下でエネルギースレッショ ルドを評価したところ、ひとつの MPPC で読み出した際には目標値の~10 keV を、2 つの MPPC で読み 出した際には~8 keV を達成した。そのほか、2 つの MPPC で読み出したことで受光面が増え、光量が1.4倍に増加し、エネルギー分解能と光量の一様性も向上した。また、2 つの MPPC を対称的に取り付けるこ とで、同等の光量が得られることをシミュレーションにて確認した。

第4章ではまず、複数の MPPC にそれぞれ異なる吸収線量になるよう陽子ビームを照射し、暗電流とス ペクトルの変化を見た。宇宙で1年間運用した際に想定される吸収線量1krad を照射した MPPC におい ては、暗電流が照射前に比べて~300倍に増加した。暗電流は検出器を冷却することである程度低減された が、照射前の状態に戻ることはなく、時間が経過しても大きな変化は見られなかった。また、1krad 照射 した MPPC におけるエネルギースレッショルドが-30度の温度下で~100keV となったことなどから、運 用時における検出器の冷却・陽子の遮蔽が必須であることを確認した。続いて、CsI 残光の観測への影響を 調べるため、通常観測時と SAA 通過直後を想定したレートにてシンチレータに陽子ビームを照射しつつ、 スペクトルを測定した。その結果、照射前のスペクトルと形状が一致していたため、CsI 残光はスペクト ルに影響を及ぼさないことがわかった。また、多数の陽子が瞬間的に入射することにより有効観測時間が ~13 %減少していたが、この問題は前置増幅器の回路検討により改善すると考えられる。今後は、シール ドに関する議論のほか、放射線損傷した MPPC のエネルギースレッショルドの改善を念頭に電圧依存性等 の詳細な測定を行う。

51

# 付 録 A PhoENiX 計画用 BGO+MPPC シス テムの基礎特性

## A.1 PhoENiX 計画

高エネルギー粒子 (加速された粒子) は宇宙の至る場所で発見されているが、その起源や加速機構につい ては未だにわかっておらず、現在も粒子加速に関する研究が様々な宇宙プラズマに対して行われている。最 も身近な天体である太陽においても、太陽フレアによって粒子加速が起きていることはわかっているが、そ の加速機構も加速場所も解明されておらず、複数のモデルが乱立している状態である。そこで、磁気リコネ クションに伴う粒子加速の理解を目的に、高精度ミラーと高速度カメラ・高精度検出器を用いて、磁気リコ ネクションが引き起こす太陽フレアを観測する PhoENiX 計画が現在提案されている。太陽フレアにおける 粒子加速モデルを制限するには高精度の硬 X 線-軟ガンマ線の偏光分光観測も重要であるため、本ミッショ ンではひとみ衛星に搭載された軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector; SGD) の使用が検討されて いる。感度の良い偏光観測のため、SGD を BGO アクティブシールドで囲んでバックグラウンド除去を行 うが、本ミッションではアクティブシールドを読み出す光検出器に MPPC を採用することを視野に入れて いる。これは、MPPC がひとみ衛星で使用された APD に比べて小型でゲインが高く、動作電圧も低いた め、検出器の小型化と低スレッショルド実現による更なる感度向上が期待できるためである。そこで、この 章では PhoENiX 計画用の大型 BGO シンチレータを MPPC で読み出した際の基礎特性について調べた。

### A.2 実験セットアップ

アクティブシールドに用いられる BGO ユニットは主検出器を隙間なく取り囲むため、各ユニット毎に 異なる形状をしている。図 A.1 は各ユニットの形状を示しており [35]、本実験では Type-D2 を評価に使用 した。徳田卒論 [36]・修論 [37] には同ユニットを APD で読み出した際の基礎特性がまとめられており、比 較時の参考にした。エネルギースレッショルドの温度依存性が主な測定項目であるが、測定結果の妥当性を 検証するため、シンチレーション光の損失が少ない 1 cm 角の BGO 結晶でも同様に測定を行った。



図 A.1: 各ユニットの形状

図 A.2 に検出器の外観写真を示す。光漏れ防止のため、BGO 結晶にはゴアテックス社製の反射材を2重 に巻き、測定を行った。MPPC には浜松ホトニクス社製のS13360-6050CS を使用し、光学グリスを用いて BGO 結晶に図 A.3 のように取り付け、反射材で覆った。MPPC の 25 度における降伏電圧は 53.2 V であ り、20 度で測定する際には 54.93 V、-20 度で測定する際には 52.77 V をそれぞれ印加した。印加電圧は、 降伏電圧の温度係数 54 mV/C<sup>o</sup> を用いて各測定温度における降伏電圧を計算した後 [24]、その値より 3 V 高い電圧になるよう設定した (浜松ホトニクス社の推奨設定)。測定温度については、徳田卒論・修論と同じ 値に設定することで、測定結果を比較できるようにした。また、静電遮蔽のため、検出器を厚さ 1 mm のア ルミ箱の中に入れて実験を行った。使用した機器は、クリアパルス社製の 5028 型 4CH 前置増幅器、EG&G ORTEC 社製の 571 型波形整形増幅器 (整形時定数 0.5  $\mu$ s)、AMPTEK 社製の MCA8000A、ESPEC 社製 の LU-113 型恒温槽である。整形時定数は BGO の発光減衰時間である 0.3  $\mu$ s と近い値に設定した。



図 A.2: 検出器の外観



図 A.3: 検出器の外観 (拡大図)

## A.3 エネルギースレッショルドの温度依存性

アクティブシールドにおいて低スレッショルドを実現することは、高精度のバックグラウンド除去に繋 がるため、より感度の良い偏光観測を可能にする。ここでは Type-D2 と 1 cm 角の BGO 結晶のエネルギー スレッショルドを 20 度、-20 度の温度下でそれぞれ測定した結果について述べる。エネルギースレッショ ルドの評価の際には <sup>133</sup>Ba の 81.0 keV, 356 keV、<sup>22</sup>Na の 511 keV、<sup>137</sup>Cs の 662 keV それぞれの光電吸収 ピークを用いてエネルギー較正直線を作った。

Type-D2 の BGO 結晶を 20 度、-20 度の温度下で測定した際のエネルギースペクトルを図 A.4, A.5 に、 そのエネルギー較正直線を図 A.6, A.7 に示す。エネルギーを x、ADC チャンネル値を y とすると、較正直 線の式は 20 度での結果において y = 0.20x - 7.6、-20 度での結果において y = 0.24x - 9.5 と求まった。ま た、ノイズが駆け上がり始める ADC チャンネルはそれぞれ 22 と 13 であったため、それらをエネルギース レッショルドと定義すると、その値は 20 度の温度下において 148 keV、-20 度の温度下において 93.8 keV と求まった。



定した際のエネルギースペクトル

160

140

12

80 60

20 0[

ADC channel

This Data

Linear Fitiing



図 A.4: Type-D2 の BGO 結晶を 20 度の温度下で測 図 A.5: Type-D2 の BGO 結晶を-20 度の温度下で測 定した際のエネルギースペクトル



定した際のエネルギー較正直線

ergy (keV)

図 A.6: Type-D2 の BGO 結晶を 20 度の温度下で測 図 A.7: Type-D2 の BGO 結晶を-20 度の温度下で測 定した際のエネルギー較正直線

続いて、1 cm 角の BGO 結晶における測定結果について述べる。1 cm 角の BGO 結晶を 20 度、-20 度 の温度下で測定した際のエネルギースペクトルを図 A.8, A.9 に、そのエネルギー較正直線を図 A.10, A.11 に示す。20度の温度下では<sup>109</sup>Cdの22.2 keV ガンマ線がノイズに埋もれて見えなかったため、別線源も用 いて正確にエネルギー較正を行った。エネルギーをx、ADC チャンネル値を y とすると、較正直線の式は 20 度での結果において y = 1.90x - 18.7、-20 度での結果において y = 2.20x - 14.5 と求まった。また、ノ イズが駆け上がり始める ADC チャンネルはそれぞれ 35 と 230 であったため、それらをエネルギースレッ ショルドと定義すると、その値は20度の温度下において24.6 keV、-20度の温度下において15.2 keVと求 まった。



図 A.8: 1 cm 角の BGO 結晶を 20 度の温度下で測定 した際のエネルギースペクトル

1400

1200

1000

800

000 ADC

40

200

channe

This Data

Linear Fitiing



図 A.9: 1 cm 角の BGO 結晶を-20 度の温度下で測定 した際のエネルギースペクトル



した際のエネルギー較正直線

Energy (keV)

300

400

500

600

図 A.10: 1 cm 角の BGO 結晶を 20 度の温度下で測定 図 A.11: 1 cm 角の BGO 結晶を-20 度の温度下で測 定した際のエネルギー較正直線

ここで、エネルギースレッショルドの温度依存性について、APD 読出しにおける測定結果も含めて表 A.1 に示す。Type-D2, 1 cm 角の BGO 結晶を MPPC で読み出した際の各温度でのスレッショルド比は共 に~1.6 倍となった。一般に 20 度から-20 度まで温度変化させた際の BGO の光量は~1.4 倍になるため (図 A.12))[38]、MPPCのノイズ低下がスレッショルドの向上に寄与していると考えられる。Type-D2のBGO 結晶を APD で読み出した際の各温度でのスレッショルド比は~2.7倍となっているが、徳田卒論にて外来 ノイズを落としきれていないとの記述もあり、比較に用いるには信頼性に欠けると判断したため、ここで は言及しない。結果としては、-20度の温度下にて MPPC で読み出すことで、APD 読み出し時よりも低い 94 keV というスレッショルドを達成できた。

衣 A.1. エイルイースレッショルトの温度低行住						
エネルギースレッショルド (keV)						
検出器温度 (C°)	Type-D2(MPPC 読出し)	Type-D2(APD 読出し)[36][37]	1 cm 角結晶			
20	148	412	24.6			
-20	93.8	150	15.2			

▲ 1・エネルギースレッショルドの涅度依存性



図 A.12: シンチレータの相対強度と温度の関係 [38]

# A.4 まとめ

PhoENiX 計画用 BGO を MPPC で読み出した際のエネルギースレッショルドの温度依存性について調べた結果、-20 度の温度下にて MPPC で読み出すことで、APD 読み出し時よりも低い 94 keV というスレッショルドを達成できた。



本論文を作成するにあたり協力して下さった多くの皆様に感謝申し上げます。

# 参考文献

- [1] A. Gomdoc, "Unveiling the Secrets of Gamma Ray Bursts", 2012, Contemp.Phys. 53, 339-355
- [2] NASA, In a Flash NASA Helps Solve 35-year-old Cosmic Mystery (https://www.nasa.gov/mission\_pages/swift/bursts/short\_burst\_nsu\_multimedia\_prt.htm)
- [3] Goldstein A., et al., "An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A", 2017, Apj 848, L14
- [4] NASA, BATSE All-Sky Plot of Gamma-Ray Burst Locations (https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cgro/batse\_src.html)
- [5] NASA, The Suzaku Technical Description (https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/prop\_tools/suzaku\_td/suzaku\_td.html)
- [6] M. Ohno, et al., "Spectral Properties of Prompt Emission of Four Short Gamma-Ray Bursts Observed by the Suzaku-WAM and the Konus-Wind", 2008, PASJ, 60S, 361
- [7] NASA, Jim Grossmann (https://imagine.gsfc.nasa.gov/observatories/learning/fermi/multimedia/spacecraft\_gallery.html)
- [8] NASA, Investigating Gamma-Ray Bursts (https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/grbs/)
- [9] A. A. Abdo, et al., "A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects", 2009, Nature, 462, 331
- [10] JAXA, 「ひとみ」(ASTRO-H)の観測装置 (http://fanfun.jaxa.jp/countdown/astro\_h/instruments.html)
- [11] S. Watanabe, et al., "The Si/CdTe semiconductor Compton camera of the ASTRO-H Soft Gammaray Detector (SGD)", 2014, Nucl. Instrum. Meth. A, 765, 192
- [12] 富永 浩二 「放射線測定について」 (http://www.jeta.or.jp/jeta127/pdf/kangikyou/houshasen-keisoku.pdf)
- [13] Glenn F. Knoll 「放射線計測ハンドブック (第4版)」 オーム社 (2013)
- [14] CALET, 装置構造 (https://calet.jp/id28/)

- [15] PennState, XRT Overall Description (https://www.swift.psu.edu/xrt/techDescription.html)
- [16] 井上 一, 小山 勝二, 高橋 忠幸, 水本 好彦 「現代の天文学 17 宇宙の観測 (3)」
- [17] NASA, Swift's Burst Alert Telescope (BAT) (https://swift.gsfc.nasa.gov/about\_swift/bat\_desc.html)
- [18] NASA, GSFC, P.J.T.Leonard (https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-of-the-Compton-Gamma-Ray-Observatory-The-Burst-And-Transient-Source\_fig1\_216776009)
- [19] K. Hurley, et al., "THE INTERPLANETARY NETWORK SUPPLEMENT TO THE FERMI GBM CATALOG OF COSMIC GAMMA-RAY BURSTS", 2013, Astrophys. J. Supp., 207, L39
- [20] N. Werner, et al., "CAMELOT: Cubesats Applied for MEasuring and LOcalising Transients Mission Overview", 2018, Proc. SPIE 10699, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray, 106992P (6 July 2018)
- [21] M. Ohno, et al., "CAMELOT: design and performance verification of the detector concept and localization capability", 2018, Proc. SPIE 10699, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray, 1069964 (6 July 2018)
- [22] A. Pál, et al., "CAMELOT Concept study and early results for onboard data processing and GPS-based timestamping", in: Proc. SPIE 2018 (in press), arXiv:1806.03685
- [23] P.Narayama Bhat, et al., "The 3rd Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Six Years", 2016, Astrophys. J. Supp., 223, L28
- [24] 浜松ホトニクス 「S13360 シリーズ データシート」
- [25] M. Chauvin, et al., "Calibration and performance studies of the balloon-borne hard X-ray polarimeter PoGO+", 2017, Nucl. Instrum. Meth. A, 859, 125-133
- [26] The Lund/LBNL Nuclear Data Search (http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp)
- [27] 3M, ESR (http://multimedia.3m.com/mws/media/466120O/esr.pdf)
- [28] XCOM: Photon Cross Sections Database (https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database)
- [29] Albert Thompson "X-RAY DATA BOOKLET"
- [30] S. Bergenius Gavler, et al., "Radiation Hardness Tests of CsI(Tl) Crystals for the GLAST Electromagnetic Calorimeter", 2005, Nucl. Instrum. Meth. A, 545, 842-851

- [31] A. A. Abdo, et al., "The On-orbit Calibrations for the Fermi Large Area Telescope", 2009, Astropart. Phys., 32, 193
- [32] Samta C. Thacker, et al. "Low-Afterglow CsI:Tl microcolumnar films for small animal high-speed microCT."
- [33] Helmuth Spieler, Introduction to Radiation Detectors and Electronics (http://www-physics.lbl.gov/ spieler/physics\_198\_notes/)
- [34] 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 ASTRO-H プロジェクトチーム (2015)「X 線天文衛星 ASTRO-H 実験計画書 (第3分冊)」
- [35] K. Nakazawa, et al., "Hard x-ray image onboard Hitomi (ASTRO-H)", 2018, JATIS, 4, 1410
- [36] 徳田 伸矢 「X 線天文衛星 ASTRO-H 用搭載型 BGO シンチレータの光量試験」 広島大学 (2012)
- [37] 徳田 伸矢 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載アクティブシールドセンサー部受け入れ試験及び機能検証」 広島大学 (2014)
- [38] 中本 達也 「高阻止能結晶シンチレータとフォトダイオードを用いたガンマ線検出器の開発」 広島大 学 (2002)