ガンマ線バースト偏光観測衛星 SPHiNX 搭載 シンチレーション検出部の開発

広島大学大学院 理学研究科 博士課程前期 物理科学専攻 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 学籍番号 M162745 内田 和海

> uchida@astro.hiroshima-u.ac.jp 主查:深澤 泰司 副查: 杉立 徹

> > 日付:第1版180209

概 要

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst:GRB) は、宇宙のある一点から突然大量のガンマ線が到来する現象 であり、宇宙最大の爆発現象と言われている。その起源はブラックホール/中性子星連星の衝突合体や、超 新星爆発などによる相対論的ジェットからの放射であると言われているが、ジェットの構造や放射機構など、 未だ謎が多い。これらの天体現象は重力波天体の候補としても挙げられており、重力波天文学が幕を開けた 近年、重力波と GRB が同期しているかを探査することも天体物理学における最重要課題の一つである。 そこで我々は、GRB の発生天体の位置決定とジェット構造の解明のため、ガンマ線バースト偏光観測衛星 SPHiNX を、2021年の打ち上げを目指して開発している。SPHiNX 衛星はコンプトン運動学を用いたガン マ線偏光計を搭載し、散乱体としてプラスチックシンチレータ、吸収体として GAGG シンチレータを蜂の巣 状に並べ、それぞれのシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) と Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) で読み出す構造である。この対称的な構造によって、系統誤差を抑え、従来のガンマ線偏光計より高精度 での偏光観測が可能となる。1年間で~10もの GRB から有意な偏光を観測し、統計的な議論から放射 モデルに強い制限を与える。GAGG シンチレータは宇宙での使用経験が少なく、特に SPHiNX 衛星では 60mm×27.5m×5mm もの大きな GAGG シンチレータを用いる。SPHiNX 衛星はスウェーデンとの共同開 発であり、私は吸収体 (GAGG) とその読み出し回路の部分を担当している。本論文では、GAGG シンチ レータの基礎特性の評価と、MPPC 用の電源回路についての考察を行った。基礎特性評価実験では、実際 に SPHiNX 衛星で用いるサイズの GAGG シンチレータの様々な場所にガンマ線を照射し、その反応位置に おける検出光子数の変動を調べた。その結果、GAGGの読み出し口(光検出器)から 60mm 遠ざかると、 およそ10%の減光が確認され、読み出し口側の角でも5%程度の減光が確認された。この傾向は、検出器応 答を求めるシミュレーションに取り込むとともに、検出器構造の変更を検討した。また、MPPC 用電源回 路の開発では、SPHiNX 衛星での要求性能を満たす、低消費電力・低ノイズの電源回路の開発を行い、衛 星搭載への検討を行った。

目 次

第1章	イントロダクション	7
1.1	研究の背景と目的	7
1.2	ガンマ線バースト (GRB)	8
	1.2.1 GRB の歴史	8
	1.2.2 放射モデル	11
1.3	X 線ガンマ線と物質の反応	13
1.4	X 線ガンマ線偏光計	15
	1.4.1 最小検出可能偏光度 (MDP)	16
	1.4.2 GRB の X 線ガンマ線偏光観測の現状	17
1.5	シンチレータ	22
	1.5.1 シンチレータの概要と性能比較	22
1.6	光検出器	24
1.7	読み出し回路	25
	1.7.1 エネルギー分解能とノイズ	28
第2章	SPHiNX(Segmented Polarimeter for High eNergy X-rays) 計画	31
2.1	SPHiNX 計画の概要	31
2.2	偏光計の構造と目標性能....................................	31
2.3	日本側の担当する開発項目....................................	35
2.4	SPHiNX 衛星の主な性能	35
2.5	SPHiNX 衛星のパスファインダーとしての CUBES 検出器	36
第3章	GAGG シンチレータの基礎特性評価	38
3.1	実験目的	38
3.2	GAGG シンチレータの発光量の温度依存性..............................	38
	3.2.1 実験セットアップ	38
	3.2.2 実験結果と考察	39
3.3	GAGG シンチレータの大きさの違いによる検出光量の変化	44
	3.3.1 実験セットアップ	44
	3.3.2 実験結果と考察	47
	3.3.3 MPPC の選別および、スレッショルドに関する考察	61

第4章 検出器用電源回路の開発

4.1	要求性能	<u> </u>
4.2	正電圧電源の開発	<u> </u>
	4.2.1 回路の設計・開発・ノイズ特性評価	70
4.3	負電圧電源の開発	76
	4.3.1 回路の設計・開発・ノイズ特性評価	76

69

79

第5章 まとめと今後

図目次

1.1	Vela 衛星は、X 線・ガンマ線・中性子線の検出器を搭載し、核開発を監視する Vela プロジェクトで用	
	いられた衛星であり、正二十面体の衛星が計 12 機打ち上げられた。写真はその内の 2 つ (5A・5B) で	
	あり、打ち上げ前のクリーンルームでのものである。[3]	8
1.2	Vela 衛星により、初めて観測されたガンマ線バースト GRB670702 のライトカーブ。数秒程度の間に、	
	パルス状に明るく輝いているのが分かる。[4]	8
1.3	コンプトンガンマ線観測衛星 CGRO(Compton Gamma Ray Observatory) と BATSE 検出器。BATSE	
	検出器は、CGRO 衛星の四隅に計8つ搭載された。[5]	9
1.4	BATSE 検出器によって得られた、GRB の銀河座標での分布。全天で等方的に分布している。[6] ..	9
1.5	上 : ハワイの KeckII 望遠鏡にて取られた、GRB 970228 の母銀河のスペクトル。このスペクトルの	
	ドップラーシフトより、Z≃0.7(約 80 億光年) に起源を持つことが分かった。下:GRB 970228 観測時	
	のバックグラウンドスペクトル。[7]	9
1.6	地上の望遠鏡 (中抜きの円) と、ハッブル宇宙望遠鏡 (黒塗りの円) によって取られた、GRB 970228 の	
	残光のライトカーブ。べき関数的に減光していることが分かる。[8]	10
1.7	打ち上げ前に、Mass Prperties Test とスピンテストを行う際の HETE-II。図中の衛星の、高さ方向	
	の大きさが約 90cm、重量 124kg と比較的小型の衛星である。4 方向に伸びている太陽光パネルは、打	
	ち上げ時には収納される。[9]	10
1.8	ヨーロッパ南天天文台の Very Large Telescope (VLT) に搭載された低分散分光装置、FORS1/FORS2	
	によって取られた、GRB 030329 に付随した超新星爆発 SN 2003dh のスペクトルの時間変化。[10] .	10
1.9	日本の重力波追跡観測チーム J-GEM が撮影した重力波源 GW170817 の、すばる望遠鏡の HSC(Hyper	
	Suprime-Cam) の z バンド、IRSF(InfraRed Survey Facility) 望遠鏡による H, ks バンドの3色合成	
	画像。左図が爆発後 1.17–1.70 日の画像。右図は 7.17–7.70 日の画像。減光と共に赤色に変化している	
	[11]	11
1.10	火の玉モデル [12]	12
1.11	GRB110721A \mathcal{O} spectral energy distribution(SED)[14]	13
1.12	ガンマ線と物質の反応の上で、主要な3つの反応についての相対的な寄与の度合いを示した	
	もの [15]	15
1.13	偏光計の原理。左が単純化した偏光計の模式図の top view。右は quarter view	16
1.14		17
1.15	GAP 検出器 [19]	18
1.16	GRB100826A のライトカーブ (左) と、モジュレーションカーブ(左)[22]	19
1.17	GRB110301A のライトカーブ (左) と、モジュレーションカーブ(左)[23]	19
1.18	GRB110721A のライトカーブ (左) と、モジュレーションカーブ(左)[23]	20
1.19	Astrosat[20]	20

1.20	Astrosat による 11 個の GRB の観測結果 [24]	21
1.21	POLAR 検出器 [21]	22
1.22	プラスチックシンチレータ	23
1.23	BGO	23
1.24	GAGG	23
1.25	シンチレータと光検出器の接続。バルカテープではなく、ESR を用いることもある....	23
1.26	MPPC の等価回路 [26]	24
1.27	MPPC の概念図 [27]	24
1.28	MPPC 信号処理の流れ	25
1.29	MPPC を読み出す場合の回路例	26
1.30	前置増幅器の回路図	26
1.31	微分回路の回路図..................................	27
1.32	PZC 回路の回路図	27
1.33	積分回路の回路図..................................	27
1.34	PeakHold 回路図	28
1.35	FWHM の定義	28
1.36	IDEAS 社 (ノルウェー) による The Silicon Photomultiplier Readout ASIC(SIPHRA)	30
1.37		30
2.1	SPHiNX 衛星全体のモデル	31
2.2	SPHiNX 衛星の偏光計のモデル。青色の部分が散乱体(プラスチックシンチレータ)で、赤	
	色の部分が吸収体 (GAGG シンチレータ) である。	32
2.3	SPHiNX で想定される、様々な GRB に対する MDP。縦軸が MDP、横軸がフラックスであ	
	り、黒いプロットが1秒間、青色が 10 秒間続く GRB を示す。赤色は1秒間の GRB、緑色	
	は 10 秒間継続する GRB の内、40° の角度を持って検出器に入射したもののシミュレーショ	
	ンである。[29]	33
2.4	1 年間に SPHiNX で偏光検出が想定される GRB の個数のシミュレーション。縦軸が GRB	
	の個数で、横軸が GRB の偏光強度を示す。黒色が MDP での値、青色が 4σ 、赤色が 5σ の	
	有意度で決定できる GRB の個数である。[29]	34
2.5	光球面モデルを仮定した時 (赤色の太い実線) と、シンクロトロンモデルを仮定した時(太い	
	黒の点線)の、1年間に観測される偏光度の頻度分布。細い線は太い線の観測結果から推定	
	される全ての GRB に対する偏光度の分布 [29]	34
2.6	SPHiNX 衛星における、日本とスウェーデンの役割分担	35
2.7	CUBES の主な仕様	36
2.8	CUBES 外形	36
3.1	GAGG の温度依存性実験の模式図	39
3.2	1p.e ピークの温度依存性	40
3.3	1p.e ピークの温度変化	41
3.4	GAGG シンチレータの温度を変えて測定した時のエネルギースペクトル	41

3.5	様々なシンチレータの温度に対する発光量の変化 [35]	42
3.6	GAGG シンチレータの温度依存性の測定結果。中抜きの黒いプロットが 662keV 光電吸収	
	ピークのピーク位置であり、赤色で塗られたプロットは、0°C の 1p.e ピークを基準に PMT	
	の温度依存性を差し引いたもの。...................................	42
3.7	受光面材質の違いによる、PMT ゲインの温度依存性 [31]。本実験で用いた PMT はバイア	
	ルカリ受光面である。	43
3.8	GAGG の検出光量の形状依存性実験の模式図	45
3.9	GAGG の検出光量の形状依存性実験の測定時の恒温槽内写真。図 3.8 を上から見ている状況	
	である。	45
3.10	測定する GAGG シンチレータの形状。左から Sample No. 1, 2, 3, 4, 6 である。	46
3.11	Sample No. 1~5と、20mm+50mm の GAGG に、PD 受光面に垂直にガンマ線を照射した	
	ときの測定結果。色の違いは GAGG の height の大きさの違いを示し、黒色が 5mm、赤色	
	が 10mm、緑色が 20mm、青色が 30mm、マゼンタが 30mm と 20mm を繋げた 50mm の大	
	きさのものを示す。....................................	47
3.12	Sample No. 1~5と、20mm+50mm の GAGG に、PD 受光面に垂直にガンマ線を照射した	
	ときの、662keV 光電吸収ピークの変化。横軸が GAGG の大きさ、縦軸が光電吸収ピークの	
	位置を示す。GAGG size が大きくなると、単調に 662keV の光電吸収ピークが減少している	
	のが分かる。	48
3.13	Sample No. 1~5 と、20mm+50mm の、ガンマ線照射位置による出力パルスハイトのヒー	
	トマップ	48
3.14	Sample No. 1~5 と、20mm+50mm の、ガンマ線照射位置による 662keV ピークのエネル	
	ギー分解能のヒートマップ....................................	49
3.15	Sample No. 1~5 の先端 (PD から最も遠いところ) にガンマ線を照射した時のピーク位置の	
	変化。指数減衰関数でフィッティングを行った。..................	51
3.16	SPHiNX サイズの GAGG でのガンマ線照射位置。5mm 刻みで計 55 点に照射した。	52
3.17	大形 GAGG シンチレータ (SPHiNX サイズ) のガンマ線照射位置による検出光子数の変化。	
	中央下側が PD の取付面である。	53
3.18	左図:大形 GAGG シンチレータ (SPHiNX サイズ) のガンマ線照射位置による検出光子数の	
	変化。 右図:実験結果の解釈	54
3.19	エネルギー分解能のヒートマップ	54
3.20	SPHiNX サイズの GAGG の最も大きい面に垂直にガンマ線を照射した時の、PD 受光面か	
	らの距離に対する 662keV 光電吸収ピーク位置の変化。指数減衰関数でフィッティングを行っ	
	た。	55
3.21	GAGG サイズの違いで、吸収係数が異なる理由の解釈図。	56
3.22	GAGG を縦方向に2分割した....................................	57
3.23	GAGG/プラスチックシンチレータの分割数を変更した、SPHiNX 偏光計のモデル	58
3.24	PD のみで取得した ²⁴¹ Am のエネルギースペクトル	58
3.25	S3590-08 の受光感度	59

3.26	MPPC の受光面サイズを変えた時の ¹³⁷ Cs のエネルギースペクトル。左側が S13360-6050CS、	
	右側が S13360-3050CS でのエネルギースペクトル。それぞれのエネルギースペクトルの下	
	部に、662keV、32.2keV それぞれの光電吸収ピークのフィッティングによる、結果を示した。	62
3.27	MPPC の受光面サイズを変えた時の ¹³⁷ Cs のエネルギースペクトル。S13360-3050CS の	
	662keV ピークで規格化した。	63
3.28	GAGG 検出光量の温度依存性実験のセットアップ	64
3.29	SPHiNX で用いる GAGG シンチレータと MPPC の組み合わせでで測定した時の、 ¹⁰⁹ Cd の	
	エネルギースペクトル	64
3.30	SPHiNX で用いる GAGG シンチレータと MPPC の組み合わせでで測定した時の、 ²⁴¹ Am	
	のエネルギースペクトル	65
3.31	各温度での較正直線。	66
3.32	図 3.28 の低エネルギー側を拡大したもの	66
3.33	図 3.32 を 8bin でまとめたもの	68
4.1	LT3482 を用いて開発した正電圧昇圧回路	70
4.2	正電圧昇圧回路の Spice シミュレーションによる結果。十分に低いノイズを達成できている。	71
4.3	実際にユニバーサル基板に組んだ正電圧昇圧回路の写真。ノイズ防止のため、アルミケース	
	に入れ、配線には LEMO 規格と同軸ケーブルを用いている。	72
4.4	実際に作成した正電圧昇圧回路の、RC フィルター前のオシロスコープによる波形。50Ω 受	
	けで、縦軸が 50mV/DIV、横軸が 1μs である。	72
4.5	RC フィルターを通した後のオシロスコープによる波形。	73
4.6	実際に、自作した昇圧回路で、5×5×5mm ³ の GAGG を取り付けた MPPC で、 ²⁴¹ Am の	
	59.5keV を検出した時のオシロスコープによる波形。縦軸 10mV/DIV、横軸 500ns/DIV	73
4.7	自作回路 (赤) と Keithley 6517(黒) で測定したエネルギースペクトル(バックグラウンド)	74
4.8	自作回路 (赤) と Keithley 6517(黒) で測定したエネルギースペクトル(²⁴¹ Am)	75
4.9	自作回路 (赤) と Keithley 6517(黒) で測定したエネルギースペクトル(¹⁰⁹ Cd)。22keV と	
	88keV の間にあるピークは、GAGG を構成する ⁶⁴ Gd のエスケープピークである。....	75
4.10	LT8570-01 で設計した、負電圧電源回路	76
4.11	開発した負電圧電源回路の Spice シミュレーション結果。紫色が RC フィルター前の波形。	
	緑色が RC フィルター後の出力である。	77

第1章 イントロダクション

1.1 研究の背景と目的

GRB は、10^{52~54}erg ものエネルギーを数秒から数百秒という短時間で放出する、宇宙最大の爆発であ る。宇宙論的距離に起源を持ち、超新星爆発や中性子星連星/ブラックホールの衝突合体による、相対論的 ジェットからの放射と言われている [1] ため、宇宙線の加速機構や重力波、宇宙論パラメータへの制限を与 える物理学上の重要な天文現象である。しかし、GRB の発見から 50 年を経た今でも、ガンマ線の放射機 構やジェットの構造は分かっていない。これまでのエネルギースペクトルの研究から、ガンマ線の放射機構 については大きく2つのモデルが提唱されている。一つは、ジェット中で、密度が高く光学的に厚い領域か ら放射されているとする「光球面モデル」、もう一つは物質が磁場に巻き付いてシンクロトロン放射をして いると考える「シンクロトロンモデル」である。偏光に着目すると、「光球面モデル」は無偏光に近いのに 対し、「シンクロトロンモデル」では最大 70%近い偏光が予想される。よって、十分な統計量の GRB の偏 光を観測し、その偏光度の頻度分布が無偏光に近ければ「光球面モデル」、平均で40%近い偏光度があれ ば「シンクロトロンモデル」と区別することができる [2]。これまで、GAP 検出器 (日本) や Astrosat(イ ンド)、POLAR(中国) などによって、GRB のガンマ線偏光観測が試みられてきている。しかし、精度の 高い偏光観測は未だ数例に留まっている。この理由は、GRB が突発天体であることと、X 線ガンマ線偏光 観測の技術的な難しさにある。可視光や電波では、偏光板を用いるなどすでに確立した技術により偏光観 測を行うことができるが、X 線ガンマ線では透過力が高く、こうした方法を用いることが出来ないからで ある。そこで我々は、GRBのガンマ線の偏光観測に特化した SPHiNX 衛星を 2021 年に打ち上げることを 計画している。SPHiNX 衛星は偏光した光子がコンプトン散乱をする際に散乱角に異方性を持つ性質(コ ンプトン運動学)を用いたガンマ線偏光計を搭載し、散乱体としてプラスチックシンチレータ、吸収体と して GAGG シンチレータを蜂の巣状に並べ、それぞれのシンチレーション光を光電子増倍管(PMT)と Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) で読み出す構造である。年間数十もの GRB を観測し、モデルの切り 分けをすることができる。また、GRB の位置決定能力も有しており、GRB と重力波天体の対応を調べる など、重力波天文学の進展に貢献することが期待できる。

私は SPHiNX 衛星において、吸収体である GAGG シンチレータの読み出し系を担当している。GAGG シンチレータは宇宙での使用経験が少ないことに加え、SPHiNX 衛星では 60mm×27.5m×5mm もの大形 の GAGG シンチレータを用いる。そのため、シンチレーション光を GAGG 自身で吸収してしまう自己吸 収が無視できない。また、シンチレーション光の漏洩を防ぐ反射材の選定や、光検出器のための低ノイズの 高圧電源が必要となる。

本研究は、SPHiNX 衛星における反射材を含む GAGG シンチレータの基礎特性を明らかにし、光検出 器用の電源回路を開発することで、SPHiNX 衛星の吸収体におけるガンマ線検出性能の向上を目的とした ものである。

7

ガンマ線バースト (GRB) 1.2

ガンマ線バースト (Gamma-ray Burst: GRB) は、 10^{45} Jものエネルギーが、わずか $10^{-2} \sim 10^2$ 秒とい う短時間に放出される、宇宙最大の爆発現象である。その放射は主にガンマ線帯域で構成され、1日に一回 程度と比較的高い頻度で観測されるにも関わらず、発見から 50 年近い現在でも、その放射機構や幾何学的 構造など多くの謎が残されている。これは GRB が突発現象であり、いつどこで発生するかが予想できない ため、観測が難しいことに起因する。以下の項では、GRB の発見から現在提唱されている主な放射モデル、 それらのモデルの制限に有力と言われている X 線ガンマ線偏光観測について述べる。

1.2.1 GRBの歴史

GRB の研究は、軍事衛星によって幕が開かれた。アメリカ・ソ連の冷戦時代、アメリカはソ連の核実験 を監視するために、核実験監視衛星 Vela を打ち上げた。その衛星が、地球の方向からではない(宇宙から の) 信号を捉えたのである。これは、1967年7月2日に発見されたため、後に GRB 670702 と名付けられ た。下図 1.1、1.2 はそれぞれ、Vela 衛星 (5A・5B) の打ち上げ前の写真と、その計画の中で観測された、 GRB 670702 のガンマ線ライトカーブである。突発的に、そして数秒という短い間だけ、ガンマ線のカウン ト数がバックグランドに比べて 1000 倍以上も上昇しているのが分かる。



2 Time (seconds)

図 1.1: Vela 衛星は、X線・ガンマ線・中性子線の検出器 を搭載し、核開発を監視する Vela プロジェクト で用いられた衛星であり、正二十面体の衛星が計 図 1.2: Vela 衛星により、初めて観測されたガンマ線バー 12 機打ち上げられた。写真はその内の 2 つ (5A・ 5B) であり、打ち上げ前のクリーンルームでのも のである。[3]

スト GRB670702 のライトカーブ。数秒程度の間 に、パルス状に明るく輝いているのが分かる。[4]

その後、1991年に NASA からコンプトンガンマ線衛星 CGRO(図 1.3) が打ち上げられ、それに搭載さ れた BATSE(Burst And Transient Source Experiment) 検出器によって、GRB の全天観測が行われた。 BATSE は打ち上げから 2000 年までの間に、2704 個もの GRB を観測し、全天での GRB の分布を詳細に 調べた。それを銀河座標に表したのが、図1.4 である。

COMPTON OBSERVATORY INSTRUMENTS





図 1.3: コンプトンガンマ線観測衛星 CGRO(Compton Gamma Ray Observatory) と BATSE 検出器。 BATSE 検出器は、CGRO 衛星の四隅に計 8 つ搭 載された。[5]

図 1.4: BATSE 検出器によって得られた、GRB の銀河 座標での分布。全天で等方的に分布している。[6]

これによると、GRB は宇宙全体で等方的に発生していることが分かる。つまり、GRB は我々の銀河か ら極端な遠方か、太陽系のごく近傍、銀河ハローなど球対称に広がった領域のいずれかに起因することが 分かったのである。また、BATSE による GRB 観測データの蓄積により、ガンマ線バーストの継続時間 2 秒を境に大きく 2 つの種族に分けれらることが分かった。つまり、2 秒以上のバースト継続時間を持つロ ングガンマ線バースト (LGRB)、2 秒未満のショートガンマ線バースト (SGRB) である。しかし、BATSE 検出器の角度分解能では、GRB の母天体を突き止めるには至らず、距離 (赤方偏移) が分からないため、詳 細な解析が出来ない状態であった。

この状況を打開したのが、1997年に打ち上げられた、イタリアのX線天文衛星 BeppoSAX である。BeppoSAX の特徴は、広域カメラ (WFC:Wide Field Camera)と、X線望遠鏡 (NFI:Narrow Field Instruments) を搭載しており、BeppoSAX 自身でガンマ線バーストの発生位置を高い精度で同定できることである。実際に、1997年に発生したイベント GRB 970228 では、GRB の発生位置を 0.02 度以下という高い精度で測定した。また、8 時間後の NFI での観測によって、冪乗で減光する X線源が発見された。その後の地上の望遠鏡での観測でも、可視・赤外線で減光する天体が発見された。GRB 発生から数秒程度のガンマ線帯域 での明るい放射をプロンプト放射と呼び、その後数日程度、電波 ~X線で光る現象をアフターグロー (残光) と呼ぶ。

残光のスペクトル観測から赤方偏移が分かり、GRB 970228 の母天体は地球から約 80 億光年離れた銀河 にあることが分かった。それによって、GRB の母天体が放出した総エネルギーが見積もられたが、そのよ うな莫大なエネルギー生成を説明する機構がなかなか解明されなかった。



図 1.5: 上:ハワイの KeckⅡ 望遠鏡にて取られた、GRB 970228 の母銀河のスペクトル。このスペクトルの ドップラーシフトより、Z~0.7(約 80 億光年) に 起源を持つことが分かった。下:GRB 970228 観 測時のバックグラウンドスペクトル。[7]



図 1.6: 地上の望遠鏡 (中抜きの円) と、ハッブル宇宙望遠 鏡 (黒塗りの円) によって取られた、GRB 970228 の残光のライトカーブ。べき関数的に減光してい ることが分かる。[8]

そこで大きな転機となったのが、2000年に打ち上げられた HETE-II(High Energy Transient Explorer -II) による GRB 観測ネットワーク (GCN:Gamma Ray Burst Coordinates Network)の構築と、2004年の GRB 観測専門衛星 Swift の打ち上げである。HETE-II は GRB が発生すると、瞬時に発生座標を地上の望 遠鏡に送る機能を持っている。これによって、それまで難しかった GRB のバースト直後からの残光を観測 する環境が整えられた。



 図 1.7: 打ち上げ前に、Mass Prperties Test とスピンテ ストを行う際の HETE-II。図中の衛星の、高さ方 向の大きさが約 90cm、重量 124kg と比較的小型 の衛星である。4 方向に伸びている太陽光パネル は、打ち上げ時には収納される。[9]



図 1.8: ヨーロッパ南天天文台の Very Large Telescope (VLT)に搭載された低分散分光装置、 FORS1/FORS2によって取られた、GRB 030329 に付随した超新星爆発 SN 2003dh のスペクトル の時間変化。[10]

図 1.8 に、HETE-II によって迅速かつ高精度で位置を同定され、Very Large Telescope(VLT)の FORS1/FORS2 によって分光観測された、GRB 030329 に付随した超新星爆発 SN 2003dn のスペクトルを示す。爆発初期 は構造のない平坦なスペクトルだが、急激な減光と共に、1ヶ月後には重力崩壊型超新星である Ic 型超新 星のスペクトルとよく似た構造が現れた。GRB 030329 は LGRB に分類されるバーストであり、これによ り LGRB と超新星爆発の関連が示唆された。また、2005 年には Swift 衛星の広視野ガンマ線バーストモ ニター (BAT) が SGRB に分類される GRB 050509B を観測した。継続時間が約 40 ミリ秒という大変短い バーストであったが、同衛星により詳細に位置を同定された。またその後の地上の望遠鏡での観測により、 発生位置には楕円銀河が存在することが分かった。楕円銀河は比較的古い銀河であり、星形成はあまり行わ れず、すなわち超新星爆発も発生しないため、SGRB は中性子星同士、もしくは中性子星とブラックホール など年齢の古い種族の天体の衝突合体によるものではないかということが予想された。しかし直接観測さ れたわけではなく、観測も難しいため、LGRB の正体解明のためには新たな観測方法が必要とされていた。

2015年9月、アメリカの重力波望遠鏡 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) は、重力波 GW 150914 の初検出に成功した。中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体が動くと、 その周辺の空間が歪み、伝搬するため、重力波が発生する。GW 150914 はブラックホール同士の衝突と考 えられ、電磁波は検出されなかったが、中性子連星や中性子星-ブラックホール連星の合体時には、重力波と GRB などの電磁波が同期して発生することが予想された。そして 2017 年 8 月 17 日、Advanced LIGO と ヨーロッパの重力波望遠鏡 Advanced Virgo によって、初めて中性子星連星の合体による重力波 GW 170817 が検出されたのである。重力波に付随して、Fermi 衛星の GBM(Gamma-ray Burst Monitor) 検出器が軟ガ ンマ線のバーストを検出した。これまでの観測と比較して、このバーストは SGRB に分類されるものであ り、GRB 170817A と名付けられた。また、地上の可視・赤外線望遠鏡でも追観測が行われ、急激な減光を するキロノバ (kilonova)SSS17a を発見した。(図 1.9) これらの観測結果から、SGRB である GRB 170817A は中性子星連星の衝突合体によって引き起こされたことが明らかになったのである。



図 1.9: 日本の重力波追跡観測チーム J-GEM が撮影した重力波源 GW170817 の、すばる望遠鏡の HSC(Hyper Suprime-Cam) の z バンド、IRSF(InfraRed Survey Facility) 望遠鏡による H, ks バンドの3色合成画像。 左図が爆発後 1.17–1.70 日の画像。右図は 7.17–7.70 日の画像。減光と共に赤色に変化している [11]

1.2.2 放射モデル

GRB の総放射エネルギーは 10⁵⁴erg にも達するが、その放射過程は明らかになっていない。一般に、相対論的に膨張する火の玉からのジェットによる放射だと考えられているが、そのジェットの構造や、ガンマ

線の放射機構など、未だ謎が多い。特に議論されているのが、光球面からの熱的放射か、シンクロトロン放 射かということである。以下に、それぞれの放射について述べていく。

相対論的火の玉モデル

GRB における標準モデルとして、火の玉モデル (Fireball model) というものがある。これは、中性子 星/ブラックホール連星の合体や超新星爆発などの重力崩壊によって、中心にコンパクト天体ができる。こ の重力崩壊によってエネルギーが解放され、光子・電子・陽子からなる火の玉が生まれる。その火の玉が、 天体の回転軸方向に対称的に相対論的な速度 (ローレンツファクター Г ~300) を持ったジェットとして加速 膨張をする。ジェットの内側(天体に近い部分)では、光学的に厚く、光子が出てくることが出来ないが、 膨張して光学的に薄くなった部分では、ガンマ線を放出することができる。また、ジェットは速度差を持っ たシェル状に放出され、そのシェル同士の衝突による内部衝撃波 (internal shock) によってもガンマ線が放 出されると考えられている。また、中心エンジンから遠く離れた部分では、ジェットと星間物質との相互作 用によって X 線 ~ 電波まで幅広い電磁波を残光として放射すると考えられる。これらを図示したものが、 図 1.10 である ([12] から引用)。



図 1.10: 火の玉モデル [12]

以上が標準的な「火の玉モデル」であるが、なぜジェットが形成されるのか、磁場の形成や構造、放射機 構など、様々なモデルが提唱されているが、まだ決着がついていない。残光に関しては、シンクロトロン放 射という節が有力であるが、プロンプト放射については、まだまだ議論がなされており、様々なモデルが提 唱されている。プロンプト放射におけるガンマ線の放射機構についてよく議論がなされているのは、ジェッ ト中の磁場に加速されてた電子がトラップされて光るシンクロトロン放射(シンクロトロンモデル)か、光 球面での熱的光子の開放による放射(光球面モデル)かということである。下図 1.11 は、GRB110721A の Spectral Energy Distribution(SED) である。全体として高エネルギー側に幅を持ったシンクロトロン放射 でフィッティング出来ているが、100keV 付近に熱的放射のピークの存在が示唆されている。また、シンク ロトロンモデルには、べき指数問題という問題がある。GRB の観測された光子数に対するエネルギースペ クトルは、2つのべき関数を指数関数で繋いだバンド関数で表される。このとき、シンクロトロン放射を仮 定すると、低エネルギー側のべき指数が –2/3(death line) を超えない [13] はずであるが、実際の観測デー タではこれを超える GRB が多々存在する。これがべき指数問題である。



 \boxtimes 1.11: GRB110721A \mathcal{O} spectral energy distribution(SED)[14]

また、シンクロトロンモデルにも、ジェット中で一様な螺旋状に磁場が存在する order synchrotron model:SO モデルや、プラズマスケールでランダムな磁場が存在する random synchrotron model:SR モデルなど、様々なモデルが提唱されているが、それらは全て、プロンプト放射のX線・ガンマ線偏光度・及びその時間変化を統計的に調べることで切り分けることができる。偏光に着目すると、光球面モデルではほぼ無偏光にピークを持ち、最大偏光度も 40%程度にとどまるのに対し、放射自身が偏光しているシンクロトロンモデルでは、最大 70%近い偏光の検出が予想される。

1.3 X線ガンマ線と物質の反応

本節では、X 線ガンマ線偏光観測を行う上で必要となる、放射線(主に X 線・ガンマ線)と物質との相 互作用について述べる。放射線検出器での測定上、重要な役割を担っているのは、光電吸収、コンプトン散 乱、電子対生成である。

光電吸収

光電吸収は、光子が物質の構成原子の軌道電子にエネルギーを与え、束縛から開放し、光子自身は完全 に消滅する過程である。この時、束縛から解放された光電子のエネルギー *E*_e- について、以下の式が成り 立つ。

$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$

ここで、*E*^b は光電子が最初に存在していた殻の結合エネルギーである。この過程は、原子番号 Z が大きい 物質において支配的なものとなり、光電吸収確率 *τ* を荒く近似すると、以下のように書ける。

$$\tau \simeq$$
定数 $\times \frac{Z^n}{E_{\gamma}^{3.5}}$

ここで、Zの指数nは、ガンマ線のエネルギーによって、4~5の範囲で変化する。

コンプトン散乱

コンプトン散乱は、光子が物質中の電子と反応し、電子に光子のエネルギーの一部を与え、光子自身は 進行方向を角度 θ だけ曲げられる過程である。散乱ガンマ線エネルギー hv'と散乱角 θ の関係は以下のよ うに書ける。

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

ここで、 m_0c^2 は電子の静止質量エネルギーであり、511keV である。また、散乱ガンマ線の角度分布はク ライン・仁科の式として知られており、微分散乱断面積 $d\sigma/d\Omega$ として

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \left[\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right] \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{[1 + \cos^2\theta)(1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right]$$

と書ける。ここで、 $\alpha \simeq h\nu/m_0 c^2$ 、 r_0 は古典電子半径を示す。入射ガンマ線が100%直線偏光をしている場合は、散乱ガンマ線の角度分布に異方性が現れ、以下の式のようになる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}}\right)^2 \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}'} + \frac{E_{\gamma}'}{E_{\gamma}} - 2\mathrm{sin}^2\theta\mathrm{cos}^2\phi\right)$$

ここで、 E_{γ} は入射ガンマ線のエネルギー、 E'_{γ} は散乱後のガンマ線のエネルギー、 ϕ は入射ガンマ線の偏光 方向に対する偏光方位角である。これはまた、物質中でのコンプトン散乱の場合、その確率は物質中の電子 の個数、つまり原子番号 Z の1 乗に比例することとなる。また、偏光方向に垂直に散乱しやすいことを意味する。

電子対生成

ガンマ線のエネルギーが電子の静止質量エネルギーの2倍(1.02MeV)を超えると、ガンマ線がそれぞれ 511keVを持った電子・陽電子対に転換することがある。これを電子対生成と呼ぶ。原子核当りの電子対生 成確率は、大まかに吸収物質の原子番号の2乗に従った変化をする。

以上、3つの相互作用、光電吸収・コンプトン散乱、電子対生成に関して、相対的な寄与の大きさを図示 したものが下図 1.12 である。それぞれの線は、2 つの効果が等しくなるような *Z* と *hv* の値を示す。



図 1.12: ガンマ線と物質の反応の上で、主要な3つの反応についての相対的な寄与の度合いを示したもの[15]

後述するように、現在主流な偏光観測の原理は、これら光電吸収とコンプトン散乱の微分散乱断面積の Z 依存と、コンプトン散乱角度の偏光ガンマ線に対する異方性を利用している。

1.4 X線ガンマ線偏光計

これまで紹介してきた X 線・ガンマ線と物質の相互作用を利用した、偏光計の仕組みについて紹介する。 X 線・ガンマ線帯域での偏光計は大きく、ブラッグ反射型、コンプトン散乱型、光電子追跡型の3種類に分 けられる。ブラッグ反射型は、偏光ガンマ線に対するブラッグ反射の強弱を利用したものである。ブラッグ 反射を利用するため、透過率の低い低エネルギー帯域(~1keV)を対象とする。偏光度 100%の X 線が入 射したときに検出できる偏光度の指標となるモジュレーションファクター *M* が大きく、良い検出器となる が、ブラッグの回折条件を満たすエネルギー範囲にしか感度を持たない。

また、光電子追跡型偏光計は、偏光した X 線に対する、光電吸収の際に放出される光電子の放出方向の異 方性を利用したものである。この光電子の飛跡をガス検出器などで撮像して偏光を測定することとなり、理 論上は *M* = 1 が可能となる。しかし、光電子の飛程は短いため、高い位置分解能を要し、一般に数 keV を 観測対象とする。SPHiNX ではコンプトン散乱型偏光計を用いるため、以下に原理を説明する。

コンプトン散乱型偏光計

コンプトン散乱型偏光計は、偏光した X 線・ガンマ線に対するコンプトン散乱の異方性を利用した偏光 計である。実際に使われるのは、下図 1.13 に示すように、中心に散乱を起こしやすい Z の小さい物質(散 乱体)を配置し、そこで X 線・ガンマ線を散乱させる。そこで散乱されたガンマ線を、散乱体の周りに配 置した、光電吸収を起こしやすい Z の大きい物質(吸収体)で光電吸収させることで、入射ガンマ線の偏 光ベクトルの方向を知ることができる。



図 1.13: 偏光計の原理。左が単純化した偏光計の模式図の top view。右は quarter view

また、偏光計自身の系統誤差を抑えるために、偏光計全体を回転させることもある。原理上、光電吸収 の支配的な低エネルギー領域(~5keV)での偏光検出能力は低い一方、数十 keV~数百 keV と幅広い領域 での観測が可能であり、硬 X 線・軟ガンマ線帯域では現在もっとも有力な方法と言える。ここで、偏光情 報に関係のない、どちらか片方のシンチレータのみで検出されたイベントを1 ヒットイベント、偏光情報 に必要な、両方のシンチレータで同時に反応したイベントを2 ヒットイベントと呼ぶこととする。

1.4.1 最小検出可能偏光度 (MDP)

ここで、図 1.13 において、偏光角度 φ とその角度おけるカウントレートをプロットすると、理想的には 以下の図 1.14 のようにサインカーブを描くはずである。



図 1.14

ここで、カウントレートが最大の時の値を Nmax、最小の時の値を Nmin として、モジュレーションファ クター M_{obs} を

$$M_{obs} = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{mac} + N_{min}} \tag{1.1}$$

と定義する。また、偏光度 100%の入射光に対するモジュレーションファクターを M₁₀₀ とすれば、偏光検 出器の性能を示す指標となる最小検出可能偏光度 (Minimum Detectable Polarisation:MDP) は、

$$MDP(99\%) = \frac{4.292}{\epsilon AFM_{100}} \sqrt{\frac{\epsilon AF + B}{T}}$$
(1.2)

と表すことができる。ここで、 ϵA は検出器の有効面積であり、T は観測時間、F は GRB のフラックス (ph cm⁻² s⁻¹)、B はバックグラウンドのフラックスである。MDP は、その検出器において 99%の信頼度で偏 光の検出が可能となる最小の偏光度である。つまり、MDP が小さいほど、(小さい偏光度も検出可能な)良 い偏光計ということになる。GRBの場合には、典型的にはTは数秒(仮に5秒とする)である。また明る い GRB では、天体信号である *ϵAF*(1000c/s とする)がバックグランド B のレートを大幅に上回ること が期待される。よって検出器の性能である M₁₀₀ = 0.4 程度を実現できれば、

$$MDP(99\%) = \frac{4.292}{1000 \times 0.4} \sqrt{\frac{1000}{5}} \sim 15\%$$
(1.3)

となる。実際の GRB の偏光情報の検出には上記の MDP だけでなく、いかに M₁₀₀ を求めるか、バックグ ランドを正確に差し引くかなど、検出器の系統誤差を理解することも重要となる。

GRBのX線ガンマ線偏光観測の現状 1.4.2

これまで、様々なミッションで、硬X線・軟ガンマ線偏光観測による GRB ジェットの研究が行われて きた。歴史的には、2002 年に NASA の RHESSI 衛星(Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) が、GRB 021206 から偏光度 (80±20%) を 5.7σ 観測したと報告した。(その後の再解析によって、 41⁺⁵⁷%に修正された [16])また、2004 年には ESA の INTEGRAL 衛星の 2 検出器、SPI と IBIS によって、 GRB 041219A からそれぞれ (98±33%, 96±40%)[17]、(22±13%~90±36%)[18] の偏光度を 2σ レベルで検 出している。いずれの観測も、高い偏光度を示しているが、これらの検出器は偏光観測を目的として設計さ れたものではなかったため、精度の良い観測とは言えなかった。 以下に、最近の GRB 偏光観測の現状を、主なミッション、GAP、Astrosat、POLAR とともに述べる。

GAmma-ray burst Polarimeter -GAP-

GAP 検出器は、2010 年 5 月に打ち上げられたソーラーセイル実証機 IKAROS に搭載されたガンマ線 バースト偏光観測専用の検出器である。70-300keV 程度のガンマ線に感度をもった検出器であり、中心に散 乱体として12角形のプラスチックシンチレータ、その周りに吸収体として直方体の CsI シンチレータを 12 個並べることで、コンプトン散乱型偏光計を構成している (図 1.15)。検出器重量は約4 kg と小型である。



図 1.15: GAP 検出器 [19]

GAP は、そのミッション期間中に 30 個もの GRB を観測し、そのうち 3 つから有意な偏光を観測した。 以下にその 3 つ、GRB 100826A、GRB 110301A、GRB 110721A の結果を述べる。

GRB 100826A は、BATSE が観測した GRB の上位 1%に入る明るさを持ち、GAP の正面からわずか 20 度 しかずれていない方向で発生した。図 1.16 は、GAP による GRB 100826A のライトカーブとモジュレー ションカーブである。ライトカーブに着目すると、0-50 秒当りで明るく輝き (Interval-1)、その後 50-100 秒あたりでもう一度輝いている (Interval-2)。偏光度は Interval-1 で 25±15%、Interval-2 で 31±21%であっ た。面白いことに、Interval-1 では、偏光方向が 159±18° であったのに対し、Interval-2 では 72±20° と変 化していた。



図 1.16: GRB100826A のライトカーブ(左)と、モジュレーションカーブ(左)[22]

次に、GRB 110301A と GRB 110721A について述べる。図 1.17 が GRB 110301A と GRB 110721A の ライトカーブとモジュレーションカーブであり、偏光度 70±22%、偏光角は 73±11° であった。



図 1.17: GRB110301A のライトカーブ (左) と、モジュレーションカーブ(左)[23]

図 1.18 が、GRB 110721A のライトカーブとモジュレーションカーブである。この GRB は GAP に 30 度で入射し、84(+16/-28)°の偏光度と 160±11°の偏光角を記録した。



図 1.18: GRB110721A のライトカーブ(左)と、モジュレーションカーブ(左)[23]

以上のことから、GRB 100826A は 30 度程度の偏光度だが偏光角度が変化し、残りの 2 つの GRB は 70 度と高い偏光度を持っていることが分かった。

Astrosat

Astrosat は、2015 年 9 月に打ち上げられ、2018 年 1 月現在も観測を続けている、インド初の天文衛星 である。検出器の 1 つに、Cadmium Zinc Tlluride Imager(CZTI) がある (図 1.19)。本来はコーデッドマ スクを利用した点源観測用の検出器であるが、100keV 以上コーデッドマスクが透過し始めること、および コンプトン散乱が起きやすくなるため、広視野の GRB 用偏光計としても機能させることが可能である。打 ち上げられてから 1 年間で 11 個の GRB の偏光を観測した。その結果を図 1.20 に示す。それぞれの図で、 横軸が偏光角 (°)、縦軸が偏光度 (%)、赤色の線が 68%、緑色の線が 95%、青色が 99%の confidence level を示す。



☑ 1.19: Astrosat[20]



図 1.20: Astrosat による 11 個の GRB の観測結果 [24]

これを見ると、ほとんどの GRB が 70%程度の偏光度を有していることが分かる。特に、GRB 160821A, 160131A, 160509A, 160821A, 160910A の 5 つは精度の高いデータとなっており、信憑性が高い。

POLAR

POLAR は、2016 年 9 月に中国の天宮 2 号 (宇宙実験室)に搭載された GRB 偏光観測に特化した検出器で ある。スイス・ポーランド・中国の共同開発であり、プラスチックシンチレータと multi anode pmt(MAPMT) を用いたコンプトン散乱型偏光検出器である (図 1.21)。プラスチックシンチレータのみで作られているた め、エネルギー分解能は低くなり、バックグラウンドノイズも無視できないが、有効面積が広く、数十例の GRB 観測が期待されている。



図 1.21: POLAR 検出器 [21]

これら様々なミッションによって、GRB の硬 X 線・ガンマ線偏光観測がなされてきたが、未だに観測 例が少なく、ジェットのモデルを特定するには至っていないのが現状である。

1.5 シンチレータ

SPHiNX では、散乱体としてプラスチックシンチレータ、吸収体として Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:GAGG シンチ レータを用いる。本節では、それらのシンチレータなど、実験でよく使われるシンチレータについて紹介 する。

1.5.1 シンチレータの概要と性能比較

以下に、それぞれのシンチレータの特徴と、実験で用いるシンチレータの形状について表 1.1 にまとめた。また、図 1.22、1.23、1.24 はそれぞれ今回の実験で用いるプラスチックシンチレータ、BGO、GAGGの実物の写真である。

20,

表 1.1: シンチレータの特徴







図 1.22: プラスチックシンチレータ

🗵 1.23: BGO

🗵 1.24: GAGG

プラスチックシンチレータは応答が早いが、発光量が少ない。また、密度が小さいため、コンプトン散 乱を起こしやすく、散乱体としての利用のための試験となる。本実験では Eljen 社の EJ-204 という高速計 数用のプラスチックシンチレータを用いる。BGO は密度が大きいため吸収体として機能するが、応答が遅 く常温では発光量が小さい。一方 GAGG は、応答がある程度速く光量も多いため、近年期待されている物 質である。しかし、宇宙で使われた経験が少ないことや、SPHiNX 衛星で用いる GAGG シンチレータは大 きい (5mm×27.5mm×60mm) ものであり、シンチレーション光を GAGG 自身で吸収してしまう自己吸収 などが無視できないことなどを考慮する必要がある。

シンチレータと光検出器の接続

シンチレータと光検出器の受光面の屈折率の違いから、両者を直接接触させて測定すると大幅な光量の 損失となる。そこで、本実験では接触面にオプティカルグリスを塗布する。本実験で用いるオプティカルグ リスは、TANAC 社の TSK2525 であり、これはシンチレータや Si より小さい屈折率 n=1.453(@25°C) を 持つ。これを使うことによって、斜めからきたシンチレーション光が接触面で全反射せずに後段の光検出器 まで届けることができる角度を広げることができる。また、発生したシンチレーション光が漏れ出るのを 防ぐために、シンチレータと光検出器をバルカテープや白色のゴアテックス、ESR などで覆う。このバル カテープは、シンチレータと光検出器を固定する目的も孕んでいる。これらを図に表したのが下図 1.25 で ある。



図 1.25: シンチレータと光検出器の接続。バルカテープではなく、ESR を用いることもある

本実験では、特に断らない限り反射材には ESR を用いる。これは、バルカテープやゴアテックスは、他 用途向けに作られたのに対し、ESR は反射材として作られているため、反射率が高いことが期待されるか らである。

1.6 光検出器

放射線を検出する光センサとして、光電子増倍管 (PMT) やフォトダイオード (PD)、アヴァランシェフォ トダイオード (APD)、Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) などが挙げられる。なお、MPPC は浜松ホト ニクス社の登録商標であり、一般的には Si-PM と呼ばれる。以下にそれぞれの検出器の特徴を表 1.2 にま とめた。[32]

	大きさ	動作電圧	量子効率	ゲイン	ゲインの
	(mm)	(V)	(%)		温度依存性
光電子増倍管 (PMT)	$10 \sim 760$	$800 \sim 1800$	$20 \sim 30$	$10^5 \sim 10^8$	小
フォトダイオード (PD)	$0.1 \sim 30$	~ 100	~ 80	1	小
アヴァランシェフォトダイオード (APD)	$0.2 \sim 10$	~ 400	~ 80	$1 \sim 100$	中
Multi-Pixel Photon Counte(MPPC)	$1 \sim 6$	$50 \sim 70$	~ 60	$10^5 \sim 10^6$	大

表 1.2: 光センサ性能比較 [32]

以下に MPPC の動作原理を述べた。

MPPC の動作原理

MPPC は、APD をクエンチング抵抗を介して並列接続し、マルチピクセル化した構造を持っている (図 1.26)。それぞれの APD は降伏電圧以上 (ガイガーモード) で動作しているため、フォトン検出時に入射フォ トン数に依らない、一定のパルスを出力する。以下の図 1.27 は MPPC の概念図である。



今、MPPCの1ピクセルにフォトンが入射したとすると、その光エネルギーにより電子-正孔対が発生す る。この時できた電子-正孔対は、印加されている逆電圧によって正孔は p⁺ 側へ、電子は n⁺⁺ 側へ加速さ れ、アバランシェ層で雪崩増幅を引き起こす。これによって出力された電荷はクエンチング抵抗を通って流 れだす。そのため、逆電圧は一時的に降伏電圧以下に下がり、放電現象は終了する。その後は APD は再充 電を行い、逆電圧が降伏電圧まで回復することで次のパルスに備える。以上がパルス出力までの流れであ る。それぞれの APD は並列接続されているので、最終的に出力される波形はそれぞれの APD から出力さ れる波形を足し合わせた形となる。

1.7 読み出し回路

以下に、MPPC でシンチレータを読み出し、エネルギースペクトル(ヒストグラム)を作成するまでの 一連の流れについて述べる。大まかな流れは以下の図 1.28 の通りである。



図 1.28: MPPC 信号処理の流れ

MPPC から出力された電荷信号を前置増幅器で電圧信号に変換し、微分・積分回路(整形増幅器)を通し てガウシアンに近い形に整形している。最終的には、Mulch Channel Analyser(MCA)でデジタル化し、パソ コンでエネルギースペクトルが作られる。本研究では、前置増幅器は Clear Pulse 社のものを、整形増幅器は Ortec, もしくは Clear Pulse 社の市販品を用いており、MCA は Amptek 社の PocketMCA(MCA8000A/D) を用いた。実際に SPHiNX や CUBES に搭載する場合は、前置増幅器から MCA までの役割を、ノルウェー の IDEAS 社による ASIC、IDE3380 が担う。以下に、それぞれの回路の概要を述べる。

まず、MPPCの読み出し回路について述べる。MPPCは、他の光検出器と比べて比較的単純な読み出し 回路で動作することも利点の一つである。また、電圧も +/-60V 程度の電源があれば良い。ここで我々が 考えなくてはならないことは、主に (1) 駆動用電源の極性 (2) 出力信号の極性の2点である。下図 1.29 に、 それぞれの組み合わせでの読み出し回路例と、出力波形について示す。

図 1.29 より、大きく4 種類の読み出し回路が考えられる。すなわち、

Cir. 1 負電圧・負極性読み出し ⇒ 負電圧出力

Cir. 2 正電圧・負極性読み出し (出力段に AD カップリング必要)⇒ 負電圧出力

Cir. 3 正電圧・正極性読み出し ⇒ 正電圧出力

Cir. 4 負電圧・正極性読み出し (出力段に AC カップリング必要)⇒ 正電圧出力

である。後段に接続する回路や、使用できる電源からの要求や利便性によって選ぶ。[Cir. 3] の読み出し回 路が簡単であり、浜松ホトニクス社の推奨回路でもあるため、本論文において特に断らない限り、MPPC の読み出しには [Cir. 3] を用いる。

前置増幅器

MPPC から出力される信号は瞬間的なパルス状であり、インピーダンスも大きいため直接測定すること は難しい。そこで、本研究で用いる回路では、入力インピーダンスの小さい前置増幅回路を MPPC の直後



図 1.29: MPPC を読み出す場合の回路例

に接続することで微弱な電荷信号を積分し、電圧信号に変換している。 単純化した回路図は以下の図 1.30 のように書ける。



図 1.30: 前置増幅器の回路図

この回路の出力電圧 V_{out} は、MPPC から出力された電荷を Q、コンデンサの静電容量を C_f とすると、

$$V_{out} = -\frac{Q}{C_f} \tag{1.4}$$

となる。また、この時のパルスの減衰時間 τ_f は抵抗値 R_f と静電容量 C_f の積なので、

$$\tau_f = R_f \times C_f \tag{1.5}$$

となる。

微分+PZC(Pole-Zero Cancellation) 回路

前置増幅器からの出力波形は、シンチレータの発光時定数に従った早い立ち上がりと、前置増幅器の減 衰時定数に従った非常にゆっくりとしたベースラインへの減衰が見られる。このままだと高レート時に後続 のイベントが重なった波形が観測される (図 1.28 参照)。そこで、前置増幅器の後段に微分回路を接続する ことで、ベースラインへの復帰を素早く行う。





図 1.31: 微分回路の回路図

図 1.32: PZC 回路の回路図

図 1.31 のような CR 微分回路のみでは、パルスにアンダーシュートを生じ、高イベントレート時に基準 電圧が変わり、パルスを正確に測定することが出来なくなる。そのため本研究で用いる回路では CR 微分 回路のコンデンサ *C*_d に並列に抵抗 *R*_p を接続することにより、アンダーシュートの少ない波形となってい る。この時、CR 微分回路の抵抗値を *R*_d として、

$$\tau_f = C_d \times R_d \tag{1.6}$$

となるよう設定することで、アンダーシュートは抑えられる。また、回路の整形時定数 Td は、

$$\tau_d = \frac{R_p R_d}{R_p + R_d} C_d \tag{1.7}$$

となる。

積分回路

微分回路で微分された波形は、立ち上がり時間が非常に早く、最大波高値を維持する時間も短い。そこ で、図 1.33 のような積分回路を通して立ち上がり時間を調節することで正確にアナログ-デジタル (AD) 変 換を行えるようにする。



図 1.33: 積分回路の回路図

この積分回路によって出力される波形の立ち上がり時定数は、

$$\tau_i = C_i \times R_i \tag{1.8}$$

となる。波形をガウシアンに近い形に整形するために、*Ti* は PZC 回路の微分時定数と等しくする。

○Peak Hold 回路について

PeakHold 回路とは、その名の通り、ピーク値を保持する回路である。一般に、検出器からの信号が最大 波高値を維持する時間は大変短い。そのため、直接波形をデジタル化しようとすると、正確にピーク値を捉 えることが困難になる (高速の処理能力を持った OP アンプが必要)。そこで、以下のような回路を通すこ とで、次の信号が来るまでピーク値を維持することが可能となり、遅いサンプリングレートでも正確に信号 を処理することが可能となる。下図 1.34 は一般的な PeakHold 回路の回路図である。



図 1.34: PeakHold 回路図

今、電圧信号がInから入ってくると、OPアンプとダイオードを通って、コンデンサ電圧が入力電圧と等 しくなるまでコンデンサに電荷が充電される。その後、波形のピークを過ぎてコンデンサ電圧が入力電圧を 下回ると放電が始まるが、ダイオード側にはダイオードの整流作用により電流は流れず、後段の OP アンプは 入力インピーダンスが高いため流れない。これによってピーク時の電圧が保持される。しかしこれでは、次に パルスが来た時に、波高値が積み上げられていくため、コンデンサに溜まった電荷をリセットしなければなら ない。そこで、コンデンサと並列に抵抗を繋ぐことで放電している。この抵抗でリセットする代わりに、フォ トスイッチリレー素子などを使うこともある。また、本実験で用いる PocketMCA(amptek;MCA8000A/D) では、内部で PeakHold が動いている。

1.7.1 エネルギー分解能とノイズ

放射線のエネルギースペクトルを解析するにあたって、最も重要なパラメータの一つとして、エネル ギー分解能 (Energy Resolution) を定義しておく。本研究で出てくる分解能は、スペクトルを CERN から リリースされているデータ解析ソフト ROOT でガウシアンフィットし、そのピーク値 (PeakCh) と半値全 幅 (FWHM) から算出する。FWHM は、以下の図 1.35 に示す通り、ガウス分布の最大値の半分の値を取る ところの幅で定義される。



図 1.35: FWHM の定義

FWHM は、ガウシアンの分散を σ^2 とすれば、次式 (1.9) で書ける。

$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln^2} \simeq 2.35\sigma \tag{1.9}$$

と書ける。この FWHM を用いて、本研究で用いるエネルギー分解能は下式 (1.10) で定義する。

$$[Resolution] = \frac{FWHM(ch)}{PeakCh(ch)} \times 100$$
(1.10)

以降、この上式のエネルギー分解能を用いて評価を行なっていく。ここで、この分解能を決める一因とし て、ノイズが大きく関わってくる。アナログ回路におけるノイズ要因は暗電流性ノイズと容量性ノイズに大 別され、それらをまとめた回路雑音 δ²_{noise} は以下のように表せる [28]。

$$\delta_{noise}^2 = 2q_e (I_{ds}/M^2 + I_{db}F)\tau a_1 + 4kTR_s (C_{tot}^2/M^2)(1/\tau)a_2 \tag{1.11}$$

ここで、 q_e は電気素量、 I_{ds} は MPPC の表面電流、M は MPPC の増幅率、F は過剰雑音係数、 τ はプリ アンプの時定数、k はボルツマン定数、T は絶対温度、 R_s はプリアンプの雑音抵抗、 C_{tot} は MPPC 容量 とプリアンプの容量を足したもの、 $a_1 \ge a_2$ はフィルター特性によって決まる係数である。右辺第1項が暗 電流性ノイズを、右辺第2項が容量性ノイズを意味する本来は右辺に 1/f ノイズも加わるが、これは整形時 定数に依存せず、今回は寄与が小さいとして無視する。

SPHiNX で用いる ASIC

SPHiNX では、上述の回路が詰まった集積回路(Application Specific Integrated Circuit:ASIC)を用い る。ここで用いる ASIC は、ノルウェーの IDEAS 社による、Si-PM 読み出し専用 ASIC:IDE3380(図 1.36) であり、上述の前置増幅器からデジタル化 (MCA) 部分までが 7.6 mm× 6.8 mm もの小さなチップに収 まっており、これだけで 16ch もの読み出しが可能である。また、前置増幅部分のキャパシタ容量を変える ことができるため、ゲインの調整も容易である。その他にも、整形時定数の変更などが可能である。特筆し ておくべき点として、MPPC への印加電圧を、1V(8bit) 変えることができる点である。この機能により、 例えば外部に –60V 程度を出力できる安定した電源があれば、MPPC への印加電圧を –61 ~ –60V まで、 約 4mV 単位で変える事が可能となり、結果的に MPPC の出力ゲインを変えることができることになる。 これはゲインの温度変化が激しい MPPC にとっては大変に重要な機能とも言える。しかし、IDE3380 が受 け付けることのできる信号の極性は負入力であり、印加電圧の調整機能を使うには、その構造上 (図 1.37 参 照)MPPC と ASIC は DC 結合である必要が有る。つまり、図 1.29 における [Circ. 1] の回路(から、出力 段のコンデンサと帰還抵抗を除いたもの)で読み出さなくてはならず、必然的に負電圧が必要である。



図 1.36: IDEAS 社 (ノルウェー) による The Silicon Photomultiplier Readout ASIC(SIPHRA)



図 1.37

第2章 SPHiNX(Segmented Polarimeter for High eNergy X-rays)計画

2.1 SPHiNX 計画の概要

SPHiNX 衛星は、スウェーデン王立工科大学 (KTH) と共同で開発を行っているガンマ線バースト偏光 観測専用衛星であり、2021 年の打ち上げを予定している。以下に、SPHiNX 衛星の外観を示す (図 2.2)。



図 2.1: SPHiNX 衛星全体のモデル

横幅はおよそ 50cm 程度で、衛星全体の重量は 75kg 以下の比較的小型の衛星である。パスファインダー 検出器として、同じシンチレータと光検出器で構成したシンチレーション検出器:CUBES を、MIST 衛星 に搭載して 2019 年以降に打ち上げ予定である。以下に SPHiNX 検出器の構造について述べる・

2.2 偏光計の構造と目標性能

SPHiNX 衛星の検出器は、散乱体にプラスチックシンチレータ、吸収体に GAGG シンチレータを蜂の巣 状に配置したコンプトン散乱型偏光計である (図 2.2)。この高い対称性により、系統誤差を抑え、精度の良 い観測が期待できる。



図 2.2: SPHiNX 衛星の偏光計のモデル。青色の部分が散乱体(プラスチックシンチレータ)で、赤色の部分が吸収体 (GAGG シンチレータ) である。

プラスチックシンチレータは PMT に、GAGG は MPPC にそれぞれ接続されており、出力信号は ASIC により処理、ヒストグラム化し地上へ送信する。MPPC は浜松ホトニクス社の S13360-6050PE、PMT は 同は浜松ホトニクス社の R7600U-200 を用いる。それぞれのデータシートによる性能を表 2.1 に示す。

検出器	S13360-6050PE	R7600U-200
大きさ (mm)	$7.35 \times 6.85 \times 1.45$	$30 \times 30 \times 22.6$
重量 (g)	1	33
ピクセル数	14400	
印加電圧 (V)	~ 60	800(Max. 900)
感度波長 (nm)	320-900(Peak 450)	300-650(Peak 600)
ゲイン (Typ.)	1.7×10^{6}	2×10^{6}

表 2.1: SPHiNX 衛星の位置づけ

S13360-6050PE は、表面実装用の MPPC である。本研究では実際に MPPC を用いた実験を行うが、表 面実装用の部品な扱いが難しいため、同じモデルの S13360-6050CS を用いる。この MPPC は、受光面を 取り囲む外周部分が少し大きく、基板取付用のピンが2本出ていること以外は、S13360-6050PE と同じで ある。

次に、下表 2.2 に、他のミッションと比較した SPHiNX の位置づけを示す。

SPHiNX 衛星は、検出器のセグメント化によりスレッショルドを下げ、数 10keV の低エネルギー側から の偏光情報を取得することで、1.2 節で述べた GRB の熱的放射領域での観測も可能にする。また、~120° という広視野かつ、数。程度の位置分解能を持つため、SPHiNX 自身での天体の位置決めが可能となり、 GRB を含む、重力波対応天体のフォローアップ観測にも大いに役立つと考えられる。

下図 2.4 に、GRB の継続時間とフラックスに対する、予想される SPHiNX の最低検出可能偏光度 (MDP) を示す。

	偏光観測に特化			偏光観測も可能	
検出器名	GAP	POLAR	SPHiNX	INTEGRAL	ASTROSAT
検出器重量 (kg)	4	30	25	680	50
偏光観測可能な					
エネルギー帯域 (keV)	70-300	50-500	30-600	200-800	100-300
視野(度)	± 45	± 45	± 60	± 4	半球
偏光検出例	3	?	~10/年	数例	11
	(有意なもののみ)	(未報告)	(想定)	(信憑性が低い)	(内5例が特に有意)

表 2.2: SPHiNX 衛星の位置づけ



図 2.3: SPHiNX で想定される、様々な GRB に対する MDP。縦軸が MDP、横軸がフラックスであり、黒いプロットが 1 秒間、青色が 10 秒間続く GRB を示す。赤色は 1 秒間の GRB、緑色は 10 秒間継続する GRB の内、40°の角度を持って検出器に入射したもののシミュレーションである。[29]

これを見ると、明るい GRB が検出器にまっすぐ入射した場合の最低検出可能偏光度 (MDP) は~10%に も達する。また、以下に GRB 偏光強度に対する、偏光を検出できる強度と個数のシミュレーションを示す (図 2.4)。



図 2.4: 1 年間に SPHiNX で偏光検出が想定される GRB の個数のシミュレーション。縦軸が GRB の個数で、横軸 が GRB の偏光強度を示す。黒色が MDP での値、青色が 4σ、赤色が 5σ の有意度で決定できる GRB の個数 である。[29]

図 2.4 より、SPHiNX は 1 年間で ~10 もの GRB から、統計的に有意な偏光度を観測できる能力を有す る。ここで、図 2.5 に、図 2.4 をもとに作成した、GRB の光球面放射モデルを仮定した時とシンクロトロ ン放射モデルを仮定した時の頻度分布を示す。光球面モデルでは 40%以下の低い偏光度、シンクロトロン モデルでは平均 40%の高い偏光度の分布が予想される。



図 2.5: 光球面モデルを仮定した時 (赤色の太い実線) と、シンクロトロンモデルを仮定した時(太い黒の点線)の、1 年間に観測される偏光度の頻度分布。細い線は太い線の観測結果から推定される全ての GRB に対する偏光度 の分布 [29]

これにより、SPHiNX 衛星の1年間のミッション期間中で検出するであろう~10の GRB のみで、GRB
の放射モデルを判定することができると考えている。

2.3 日本側の担当する開発項目

SPHiNX 衛星は日本とスウェーデンの共同研究であるが、研究を円滑に進めるために各々の担当するパートを明確に区分しておく必要がある。下図 2.6 に、日本とスウェーデンの役割を示す。



図 2.6: SPHiNX 衛星における、日本とスウェーデンの役割分担

役割分担は単純明確であり、散乱体部分(プラスチックシンチレータ+ PMT)はスウェーデン側が担当 し、吸収体部分(GAGG+MPPC)は日本が担当する。私は特に、GAGG や MPPC の基礎特性の評価、及 び MPPC 用電源回路の開発を担っている。

2.4 SPHiNX 衛星の主な性能

SPHiNXの目標性能を踏まえて、特に注意しておくべき仕様について表 2.3 にまとめた。

衛星サイズ (検出器サイズ)	$480{\times}525{\times}700\mathrm{mm}^3$
衛星重量 (検出器重量)	$25 \mathrm{kg}(9.6 \mathrm{kg})$
消費電力	25W
使用可能な電圧	3.3V and $12-16V(unregulated)$
データ通信量	150 MByte/day(2.3 Mbit/s)
想定される温度	$-5(Cold case) \sim 40(Hot case)^{\circ}C$

表 2.3: SPHiNX 衛星の仕様

これを見ると、限られたスペース・重量・電力であるため、なるべく省スペース・少ない部品数・省電力で開発を進める必要がある。使用可能な電圧に関しては、3.3Vと衛星バスからの直接電源 12-16V が使用可能であるが、12-16V の方は整流されておらず、安定していないため、3.3V の方を優先して用いることを念頭に置く。温度は、太陽に照らされる Hot case では 40°C、太陽に照らされない Cold case では-4°まで下がる事がシミュレーションで分かっている。回路設計や実験を行うにあたって、以上の事を念頭に置いておかなければならない。

2.5 SPHiNX 衛星のパスファインダーとしての CUBES 検出器

CUBES - CUbesat x-ray Background Explorer using Scintillators -

CUBES は、スウェーデン王立工科大学のプロジェクト KTH Student Satellite Project という学生が主体で作る CubeSat:MIniature STudent satellite(MIST)の検出器の一つである。この MIST 衛星は 3U 型(100mm×100mm×300mm)の CubeSat であり、CUBES を含め計7つの検出器の搭載が計画されている。SPHINX 衛星のパスファインダー検出器として、SPHiNX 衛星で用いる GAGG シンチレータ、プラスチックシンチレータ、そして SPHiNX 衛星に搭載候補であり、従来からよく利用されている BGO を搭載する。各々のシンチレーション光を MPPC で読み出す仕組みである。

CUBES の仕様を以下の表 2.7 にまとめた。括弧書きは MIST 衛星全体での値である。また、右側の図 2.8 は、想定される CUBES 完成時の外形である。

基板サイズ (L×W×H)	$50 \text{mm} \times 50 \text{mm} \times 15 \text{mm}$		
消費電力	1W以下 (8W)	1 cm	Electronic components
データ出力量	5 MByte/day	1.5 cm	
データフォーマット	1分間に1回、	Plastic	
	各シンチレータのエネルギー	Scintiliator	
	スペクトル	SI DAT	
温度	$20\pm20^{\circ}\mathrm{C}$	SI-PIVIT	
重量 (MIST 全体)	$0.08 \mathrm{kg}(4 \mathrm{kg})$	Circuit board	5 cm
			CUBES 外形

図 2.7: CUBES の主な仕様

CUBES は、衛星軌道上での放射線環境を調べることを目的に計画されており、検出器としては、シンチ レータと MPPC を用いる。

CUBES は以下の大きく3つの構成要素に分けられる。

○ 3 つのシンチレータ

放射線を接続した光検出器で検出可能な可視光 (シンチレーション光) に変換する

- $Ce Gd_3Al_2Ga_3O_{12}(GAGG)$
- $Bi_4Ge_3O_{12}(BGO)$
- プラスチックシンチレータ

◦ シンチレータと光を読み出す光センサー Si-PM

シンチレーション光を電荷信号に変換する。

○ 電子回路

信号処理回路、電源制御回路、メモリなどの電子回路

シンチレータは全て1辺10mmの立方体であり、これらのシンチレータから出力された光を MPPC で読み 出し、SPHiNX で利用する ASIC で AD 変換した後、FPGA で処理してヒストグラム化し、地上へ送信す る流れとなる。

第3章 GAGGシンチレータの基礎特性評価

3.1 実験目的

SPHiNX 計画では、検出感度の向上のため、27.5mm×5mm×60mm という比較的大きな GAGG シンチ レータを用いる予定である。そのため、シンチレーション光を GAGG シンチレータ自身が吸収してしまう 自己吸収が無視できないと考えられる。また、このような大形のシンチレータと MPPC の相性についても 十分に調べられていない。これらの情報は、SPHiNX で用いる GAGG シンチレータの形状の決定や、偏光 ガンマ線に対する応答をシミュレーションするためにも必要である。本章では、GAGG シンチレータの基 礎特性について調べ、実際の SPHiNX 衛星で用いるシンチレータ形状や MPPC について考察することを目 的とする。研究の流れとしては、まず GAGG シンチレータが衛星軌道での温度域においてどの程度の発光 量の変化を示すのかを調べる。その後、GAGG シンチレータの自己吸収特性や、SPHiNX で用いる GAGG シンチレータの最適な形状を調べる。また、SPHiNX で用いる MPPC についても実際に測定を通して決定 する。最後に、現状 SPHiNX で用いる予定である GAGG シンチレータと MPPC の組み合わせで、目標と するスレッショルドを達成できるかを検証する。

3.2 GAGG シンチレータの発光量の温度依存性

多くの無機シンチレータは、シンチレーション光子の発光量が温度に依存する。GAGG シンチレータの温度依存性を測定した報告としては、ゲインの温度依存性の大きい MPPC と GAGG シンチレータの組み合わせで -10° C~50°C の範囲を測定したもの [33] や、PMT と GAGG シンチレータの組み合わせで -60° C~160°C の範囲を測定したもの [34] があるが、SPHiNX 衛星軌道上で GAGG シンチレータの想定さ れる温度変化 (-4° C~40°C) を詳細に測定したものは無い。また、スウェーデンチームにより、25°C~55°C での GAGG シンチレータの温度変化は測定されているため、我々は -25° C~+25°C の範囲を、12.5°C き ざみ ($\pm 25^{\circ}$ C, $\pm 12.5^{\circ}$ C, 0°C) で測定を行う。

3.2.1 実験セットアップ

本実験では、小型の GAGG シンチレータ (5×mm5×5mm×mm)と、浜松ホトニクス社製の PMT:R7899 型(光電面 φ22mm)を用いて実験を行う。小型の GAGG シンチレータを用いる理由としては、大きい GAGG シンチレータと比べて熱容量が小さく、温度変化が短時間で行われること、PMT と GAGG シンチ レータの再接続が容易であり、実験の再現性が期待できることが挙げられる。また、PMT を用いる理由は、 MPPC ほど温度依存が無く、ある程度の分解能があるため、1 photo-electron(1 p.e) ピークによって温度 変化のキャリブレーションが可能だと考えたためである。以下に、本実験の実験条件と、その模式図(図 3.1) を示す。



図 3.1: GAGG の温度依存性実験の模式図

○ 測定条件

光検出器 浜松ホトニクス社製 PMT:R7899

電源装置 TEXIO PW24-1.5AQ

前置増幅器 クリアパルス社製 CP506E

整形増幅器 Ortec571

データ取得 amktek 社製 MCA8000A 300 秒

放射線源 ¹³⁷Cs

測定温度 $\pm 25^{\circ}$ C, $\pm 12.5^{\circ}$ C, 0° C (計 5 点)

実験は大きく2回に分けられ、最初はGAGGシンチレータを付けずに、陰極-陽極間電圧を高めに設定(入 力電圧が4.9V、内部で250倍に増幅される)し、温度を変えてエネルギースペクトルを取得することで、 1p.eの温度変化を取得した。その後、GAGGシンチレータ(5mm×5mm×5mm)を取り付け、温度を変え て測定し、GAGGシンチレータ+PMTの温度変化を測定した。最終的に、後者の実験結果から1p.eの変 動を割り算することで、GAGGシンチレータのみの温度変化とした。

3.2.2 実験結果と考察

以下に、実験結果について述べる。下図 3.2 は、GAGG シンチレータを付けずに、各温度で測定した PMT の 1p.e ピークのエネルギースペクトルである。低温ほどゲインが大きく、-25°C から +25°C の温度 変化で -22%ほどの変動が有ることがわかる。この結果は、過去に本研究室で測定された同型の PMT にお ける結果である、+20° ~ -30°C で 20~50%の変化 [30] の結果とコンシステントであるため、このセット アップで GAGG を取り付け、GAGG の温度依存性測定を行う。



図 3.2: 1p.e ピークの温度依存性

また、図 3.3 に、ピークをガウス関数 (1p.e ピーク成分)+一次関数 (バックグラウンド成分) でフィッティ ングした結果を、グラフにプロットした。

これらから、温度を下げるにつれて、1p.e のカウント数は下がり、ゲインが単調に上昇していることが 分かる。次に、GAGG シンチレータを取り付けて、各温度で測定した時のデータをエネルギースペクトル で示す (図 3.4)。

これを見ると、温度を下げるにつれて、¹³⁷Csの 662keV 光電吸収ピークの位置がエネルギーが高い方向 にシフトしていることが分かる。このデータには、PMT の温度変化も内包されているため、GAGG シン チレータのみの温度変化を調べるために、1p.e ピークの変動から補正を行う。補正に使った計算は以下の とおりである。

[GAGG シンチレータのみのピーク位置] = [各温度での 662keVピーク位置] × [基準とする 1p.e ピーク位置] [各温度での 1p.e ピーク位置]

ここでは、基準は0°Cとした。また、0°Cを基準とした時の、ピーク位置(GAGG シンチレータのシ ンチレーション光の発光量)の比を表 3.6 にまとめた。これは、SPHiNX の温度変化域 ~40°C に対して、 10%程度の発光量の変動となり、BGO などの吸収体としてよく使われる無機シンチレータと比較 (図 3.5) して、小さいことが分かる。発光量 10%の変動は、SPHiNX で GAGG シンチレータの読み出しに用いる予 定である、浜松ホトニクス社製の MPPC: S13360-6050Cs における印加電圧 0.4V 程度の変化に対応する。 一方、MPPC の増幅率の温度係数は、データシートから 54mV/°C であり、50°C の温度変化で 2.7V の変 化に対応する。よって仮に GAGG と MPPC の出力信号を一定に保とうとすると、電圧の調整幅は ~3.1V が必要と見積もられる。

また、本来はこれらのデータには、PMT の受光面の材質による温度依存性も含まれており、一般的なバイ アルカリ型の陽極感度の温度依存が、GAGG の発光波長 520nm で約-0.4%/°C[31] なので。GAGG 自身の 温度依存性より十分に小さいと考えられる。



図 3.3: 1p.e ピークの温度変化



図 3.4: GAGG シンチレータの温度を変えて測定した時のエネルギースペクトル



図 3.5: 様々なシンチレータの温度に対する発光量の変化 [35]



図 3.6: GAGG シンチレータの温度依存性の測定結果。中抜きの黒いプロットが 662keV 光電吸収ピークのピーク位 置であり、赤色で塗られたプロットは、0°C の 1p.e ピークを基準に PMT の温度依存性を差し引いたもの。



図 3.7: 受光面材質の違いによる、PMT ゲインの温度依存性 [31]。本実験で用いた PMT はバイアルカリ受光面である。

表 3.1: GAGG シンチレータの温度変化による変動

温度 (°C)	ピーク位置	0℃を基準とした比 (%)
-25.0	$1476.0{\pm}24.8$	99.4
-12.5	$1485.4{\pm}27.8$	98.8
0.0	$1466.8{\pm}27.6$	100.0
12.5	$1416.9{\pm}23.3$	103.5
25.0	$1343.8{\pm}18.7$	109.2

3.3 GAGG シンチレータの大きさの違いによる検出光量の変化

前述の通り、SPHiNX 衛星では比較的大きな GAGG シンチレータ用いる。実際に SPHiNX で用いるた めには、このサイズでの性能や、シンチレーション光の自己吸収特性について調べておく必要がある。ま た、検出器応答をシミュレーションする上でも、GAGG シンチレータのガンマ線反応位置による検出光子 数の変化は必要な情報である。そこで、本節では GAGG シンチレータのサイズによる発光量の変化(自己 吸収特性)について、実際に測定を行う。

3.3.1 実験セットアップ

本実験では、GAGG シンチレータのガンマ線照射位置や、GAGG シンチレータの大きさによる検出光 子数の変化を調べる。そのために、ガンマ線源を 50mm 厚の鉛コリメータで ϕ 3mm にコリメートし、正確 に位置を変化させることのできる自動 X 軸ステージを用いて実験を行った。本実験の模式図を図 3.8 に示 した。

¹³⁷Cs 線源を取り付けた鉛コリメータを自動 X 軸ステージ (神津精機:XA16-01, 位置分解能 0.2µm)の上 に置き、平行移動が可能にした。自動 X 軸ステージと直行する鉛直方向での応答の変化も見るために、PD を取り付けた GAGG シンチレータを入れたアルミニウムケースを、ジャッキで上下に動かす。PD からの 信号はプリアンプで増幅し、恒温槽外の整形増幅器で整形、MCA でデジタル化してパソコンに取り込む。 X 軸ステージも恒温槽外のパソコンからコントローラードライバ (神津精機:CRUX-A) を利用してパソコン から操作する。本実験では、以下の 6 種類の GAGG シンチレータについて、測定を行う。

測定する GAGG サイズは、Sample No. 1~6 の 6 種類で、No. 1~No. 4 は、底辺が 5mm×5mm で、 長さはそれぞれ 5mm, 10mm, 20mm, 30mm である。Sample No.5 は、Sample No. 3 と No.4 をオプティ カルグリスで光学的に接着したもので、底辺 5mm×5mm、長さが 20mm+30mm=50mm である。ここで、 Sample No. 5 では、PD に近い側に 30mm の GAGG、遠い側に 20mm の GAGG を配置した。表 3.2 に測 定する GAGG サンプルの大きさを、図 3.10 にそれぞれの写真を示す。シンチレーション光読み出し用の PD は、GAGG シンチレータの一番小さい面に取り付け、Sample No.1~5 については、長辺方向 (side) に 5mm 刻みで、Sample No.6(SPHiNX サイズ) については直行する鉛直方向についてもスキャンを行った。 また、全てにおいて、取り付け軸方向 (top) に照射した場合も測定した。ここで、実験室使用順序の関係 で、Sample No. 6 のみ異なる実験セットアップ (Shaper のみ異なる) で行っており、Sample No. 1~5 の ピーク位置の単純な比較は出来ない。



図 3.8: GAGG の検出光量の形状依存性実験の模式図



図 3.9: GAGG の検出光量の形状依存性実験の測定時の恒温槽内写真。図 3.8 を上から見ている状況である。

Sample No.	width(mm)	length(mm)	height(mm)
1	5.0	5.0	5.0
2	5.0	5.0	10.0
3	5.0	5.0	20.0
4	5.0	5.0	30.0
5	5.0	5.0	50.0(30+20)
6	5.0	27.5	60.0

表 3.2: 測定する GAGG シンチレータのサイズ。Sample No. 1~6 と番号を付けた。



図 3.10: 測定する GAGG シンチレータの形状。左から Sample No. 1, 2, 3, 4, 6 である。

○ 測定条件

- 光検出器 浜松ホトニクス社製 PD:S3590-08
- **電源装置** keithley6517型: 60.000V
- 前置増幅器 クリアパルス社製: CP580K
- 整形増幅器 クリアパルス社製: CP4417
- データ取得 amktek 社製: MCA8000D
- **放射線源**¹³⁷Cs / 5cm 厚、 φ3mm の鉛コリメータでコリメート
- **測定温度** 20°C

3.3.2 実験結果と考察

まず、形状の比較しやすい Sample No. 1~5 についての測定結果について述べる。以下に、各形状の top 照射におけるエネルギースペクトルを示した (図 3.11)。



GAGG various size

図 3.11: Sample No. 1~5 と、20mm+50mm の GAGG に、PD 受光面に垂直にガンマ線を照射したときの測定結 果。色の違いは GAGG の height の大きさの違いを示し、黒色が 5mm、赤色が 10mm、緑色が 20mm、青 色が 30mm、マゼンタが 30mm と 20mm を繋げた 50mm の大きさのものを示す。

これを見ると、GAGG サイズが大きくなるにつれて、ピーク位置が単調に減少していることが分かる。 また、30mm と 20mm を接続した Sample No. 5(図 3.11 中マゼンタ)は、接着面における反射率の不連続 性により、2山のピーク構造が見られる。コンプトンエッジから、左側のピークが 662keV の光電吸収ピー クであると考えられる。また、それぞれのエネルギースペクトルの、662keV 光電吸収ピークに対して、ガ ウシアンでフィッティングしたときの、ピーク位置 (Ch) を、GAGG の長さに対してプロットしたものが図 3.12 である。

Sample No.1 は、No. 4 に比べて 3 割ほど、No. 5 は 7 割ほど検出光子数が多いことが分かる。これは、 GAGG が大きいと、シンチレーション光が PD に入射するまでに減衰してしまうことなどが原因であると 考えられる。

次に、side にガンマ線を照射した時の測定結果を示す。以下の表 3.3 に、全サイズの side 照射での結果 を示した。第一列は Sample No.、第二列が照射位置の PD からの距離、第三列が 662keV をガウシアンで フィッティングした時のピーク位置 (channel)、第四列が 662keV ピークの分解能 (%) である。これらの結 果をヒートマップに示したのが下図 3.13 である。横軸の値がそれぞれ測定した GAGG のサイズ (mm) で、 左から Sample No.1, 2, 3, 4, 5 を示し、縦軸が照射位置 (mm)、色が 662keV の光電吸収ピークの位置を示 す。また、分解能についても、同じようにヒートマップで示したものが図 3.14 である。



図 3.12: Sample No. 1~5と、20mm+50mm の GAGG に、PD 受光面に垂直にガンマ線を照射したときの、662keV 光電吸収ピークの変化。横軸が GAGG の大きさ、縦軸が光電吸収ピークの位置を示す。GAGG size が大き くなると、単調に 662keV の光電吸収ピークが減少しているのが分かる。



GAGG heat map

図 3.13: Sample No. 1~5 と、20mm+50mm の、ガンマ線照射位置による出力パルスハイトのヒートマップ



図 3.14: Sample No. 1~5 と、20mm+50mm の、ガンマ線照射位置による 662keV ピークのエネルギー分解能のヒートマップ

Sample No.	Irradiation Position(mm)	Peak Channel(Ch)	$\operatorname{Resolution}(\%)$	
1	5	$2273.9 {\pm} 0.6$	$5.91 {\pm} 0.05$	
2	5	$2206.4 {\pm} 0.4$	$6.44{\pm}0.03$	
	10	$2202.3 {\pm} 0.5$	$6.67{\pm}0.06$	
3	5	$2077.4 {\pm} 0.6$	$6.39{\pm}0.06$	
	10	$2060.5{\pm}0.5$	$6.67{\pm}0.04$	
	15	$2045.0 {\pm} 0.5$	$6.58{\pm}0.04$	
	20	$2041.8 {\pm} 0.7$	$6.66{\pm}0.07$	
4	5	$1862.1 {\pm} 0.4$	$7.47{\pm}0.04$	
	10	$1824.5 {\pm} 0.4$	$7.35{\pm}0.05$	
	15	$1789.7 {\pm} 0.5$	$7.57{\pm}0.05$	
	20	$1763.4 {\pm} 0.5$	$7.49{\pm}0.06$	
	25	$1763.4 {\pm} 0.5$	$7.05{\pm}0.05$	
	30	$1763.5{\pm}0.5$	$7.00{\pm}0.06$	
5	5	$1612.5 {\pm} 0.4$	$8.05{\pm}0.05$	
	10	$1569.0 {\pm} 0.5$	$8.36{\pm}0.07$	
	15	$1515.0 {\pm} 0.4$	$8.88{\pm}0.05$	
	20	$1476.0 {\pm} 0.5$	$8.59{\pm}0.06$	
	25	$1460.9 {\pm} 0.6$	$7.86{\pm}0.09$	
	30	$1459.6 {\pm} 3.6$	$7.36{\pm}0.6$	
	35	$1312.5 {\pm} 0.9$	$9.24{\pm}0.2$	
	40	$1314.4 {\pm} 0.6$	$8.66{\pm}0.1$	
	45	$1311.6 {\pm} 0.5$	$8.72{\pm}0.09$	
	50	$1309.7 {\pm} 0.7$	$8.73 {\pm} 0.1$	

表 3.3: Sample No. 1~5 における、各ガンマ線照射位置での 552keV ピークのフィッティング結果。Irradiation Position は、照射位置の PD 受光面からの距離を示す。

これらの結果から、GAGGの長さが長くなるほど、PDに入射する光子数は減少していることが分かる。 また、GAGGのPDに近いところから照射する方が、PDから遠いところに照射するよりもPDへ入る光 子数が多い。分解能に関しては、最も小さいGAGG:Sample No. 1では6%を切っているのに対し、単一の GAGGで最も大きいSample No. 4では8%程度である。2つのGAGGを接続しているSample No. 5で は、全体的に分解能が悪く、不均一な分布をしている。特にGAGGの接着面である30mm付近での分解能 が悪く、9%にまで達している。これらの結果は、GAGGシンチレータが大きくなると、シンチレーション 光の自己吸収が効いてくることや、PDに入射する光子数の不定性が大きくなることから引き起こされたも のであると解釈できる。

GAGG の自己吸収特性を調べるために、上述の side に照射した結果の内、PD から最も遠いところに照 射した結果に着目した。光の物質中での吸収という物理過程を考えれば、吸収係数を ε、物質中での光が進 んだ距離を x、発生したシンチレーション光の強度を I₀、吸収を受けた後のシンチレーション光の強度を I

$$I = I_0 exp(-\varepsilon x)$$

が成り立つはずである。図 3.15 は、Sample No.1 から No. 4(No. 5 は、2 つの GAGG を接続しており、並 列に議論できないため除外した)の side 照射の PD から最も遠いところに照射した時の、662keV 光電吸収 ピークの位置をプロットしている。横軸が GAGG の長さ(= 照射位置の PD 受光面からの距離)、縦軸が 662keV の光電吸収ピークの位置を示す。図中の赤線は、上式でフィッティングを行った結果である。フィッ ティング結果により、吸収係数 $\varepsilon = 0.01001 \pm 0.00001 \text{mm}^{-1}$ となった。これは、発生シンチレーション光が GAGG 中を約 100mm 進むと、1/e(~40%) に減衰することを意味する。理想的にはカラーシフトにより、 シンチレータの発光波長と吸収波長はなるべく重ならないようにしているが、発光波長は単一波長ではな く、広がりを持っている。そのため、部分的に GAGG シンチレータの発光波長と吸収波長が重なっている ことが主な原因であると考えられる。



図 3.15: Sample No. 1~5 の先端 (PD から最も遠いところ) にガンマ線を照射した時のピーク位置の変化。指数減衰 関数でフィッティングを行った。

次に、SPHiNX サイズの GAGG, Sample No. 6 の測定を行う。このサンプルに関しては、最も大きい面 に垂直にガンマ線を照射した。照射した位置は縦、横 5mm 刻みで計 55 点である。照射位置を図 3.16 に示 した。図中で赤破線が交わっているところに $\phi = 3mm$ にコリメートしたガンマ線を照射した。

以下に、測定結果を示す。図 3.17 は、図 3.16 のそれぞれの点における測定結果のエネルギースペクトル である。各エネルギースペクトルの位置は、図 3.16 の位置と対応している。従って、3.17 において、下側



図 3.16: SPHiNX サイズの GAGG でのガンマ線照射位置。5mm 刻みで計 55 点に照射した。

に PD が取り付けられていることとなる。

これら全てのエネルギースペクトルについて、¹³⁷Csの662keV 光電吸収ピークをガウシアンでフィッティングし、図 3.18 のように、ピーク位置のヒートマップを作成した。

この図を見ると、PD 取りつけ面に最も遠い位置では、全体の平均から約 5%程度パルスハイトが低く なっていることが分かる。また、PD 取付面の角でも、約 2%程度パルスハイトが下がっていることが分か る。この現象の解釈として、図 3.18 右のように考えた。まず、PD 読み出し口から遠いところでは、GAGG シンチレータ自身によるシンチレーション光子の自己吸収が起こったと考えられる。また、PD 接着面の角 でもパルスハイトが低いことに関して解釈すると、PD 接着面の角からの光は、PD への入射角が大きくな り、結果的に光が入りにくくなることが原因であると考えられる。次に、下図 3.19 に 662keV のエネルギー 分解能のヒートマップを示す。

これを見ると、全体的には大きな変化はないが、読み出し口周辺だけ分解能が悪いことが確認できる。 実際にエネルギースペクトルを見ても、低エネルギー側に広がったピークとなっている。これは、PD 付近 で光電吸収され、シンチレーション光が直接 PD に入ったことにより、GAGG の吸収の影響を余り受けな かった直接光と、周りの反射材で反射され、長い経路を通ったことにより、GAGG の吸収の影響を大きく 受けた間接光によって、ピークが広がってしまったと考えられる。

この SPHiNX サイズの GAGG に関しても、同様に吸収係数を算出する。ここでは、PD 受光面と垂直 方向 (図 3.16 中の縦方向の 0mm のラインに沿って) のみについて考えた。以下に、各点における 662keV 光電吸収ピークと PD からの距離をプロットした (図 3.20)。

また、サイズの異なる GAGG 測定時と同様に、指数関数的に減衰する関数でフィッティングを行った。 その結果、吸収係数は 0.00171±0.00001mm⁻¹ となった。これは、シンチレーション光子が GAGG 内を



図 3.17: 大形 GAGG シンチレータ (SPHiNX サイズ) のガンマ線照射位置による検出光子数の変化。中央下側が PD の取付面である。



図 3.18: 左図: 大形 GAGG シンチレータ (SPHiNX サイズ) のガンマ線照射位置による検出光子数の変化。 右図:実験結果の解釈



図 3.19: エネルギー分解能のヒートマップ



図 3.20: SPHiNX サイズの GAGG の最も大きい面に垂直にガンマ線を照射した時の、PD 受光面からの距離に対す る 662keV 光電吸収ピーク位置の変化。指数減衰関数でフィッティングを行った。

1/0.00171~600mm だけ進むと 1/e にまで減衰することを意味する。これは、底辺が 5mm×5mm の GAGG シンチレータを用いて測定した時の吸収係数 0.01mm⁻¹ と約 6 倍の違いがある(底辺が 5mm×5mm のサ イズで算出したものの方が、SPHiNX サイズで算出したものよりも 6 倍程度吸収されやすい)。この原因 を考察するにあたって、GAGG の幾何構造と反射材として使用している ESR に着目した。本来 ESR は、 GAGG の発光波長 520nm でほぼ 100%の反射率を持つが、それは理想的な場合であり、なおかつ GAGG シンチレータと ESR の間には多少の空気の層が存在すると考えられる。そのため、空気と GAGG シンチ レータの反射率の違いにより、ESR と GAGG の間にシンチレーション光がトラップされる可能性が考えら れる。この効果は、ESR での反射回数が多いほど効いてくると考えられる。

ここで、27.5mmの横幅を持った GAGG シンチレータと、5mmの横幅を持った GAGG シンチレータと では、内部で発生したシンチレーション光子が同じ角度に放出されたとしても、5mmの横幅のものの方が 反射する回数が多くなる。この効果によって、6 倍もの吸収係数の違いが現れたと考えられる。これらを図 示したものが図 3.21 である。左側が SPHiNX サイズの GAGG で、右側が底辺 5mm×5mm の GAGG シ ンチレータを意味する。実線の矢印がシンチレーション光子の動きを表すが、反射の度に減衰して(矢印の 線が細くなって)いることを示している。この結果、シンチレータはあまりに細長い形状にすると検出光量 が減り、性能が悪化してしまうと考えられる。



図 3.21: GAGG サイズの違いで、吸収係数が異なる理由の解釈図。

SPHiNX 衛星の検出器構造の変更

以上のGAGGのガンマ線反応位置による検出光量の変化に関する実験を踏まえて、SPHiNX 衛星で利用 する検出器構造の変更を行った。検出器縦方向の光量の変化に関しては、MPPCを追加すると大きなギャッ プが生じるなど、検出器の構造上対応は難しいため、横方向(光検出器取付面における角での応答の異方



図 3.22: GAGG を縦方向に2分割した

性)について対応を考えた。具体的には、図 3.22 のように、GAGG を縦方向に 2 分割し、それぞれからの シンチレーション光を MPPC で独立に読み出す構造とした。また、プラスチックシンチレータ部分も 1 区 画あたり、4 セグメントからより対称性の優る 6 セグメントに変更した。そのため、使用する PMT の本数 が 28 本から 42 本、MPPC の個数も 60 個から 120 個に変化した。この変更によって、角による減光の効 果も減り、コンプトン散乱で光子の飛んだ方向を測定する角度分解能の向上が見込まれる。これらの変更を 取り込んだ、新しい SPHiNX 衛星の偏光計のモデルを下図 3.23 に示す。縦に半分にしたことによって検出 光量をどれだけロスするかは、実際に半分にした GAGG を利用して今後計測予定である。

出力光子数に関する考察

本実験は PD で読み出しを行ったため、PD のみでの (GAGG を付けずに測定した)²⁴¹Am のエネルギー スペクトルのピーク位置と比較することで、SPHiNX サイズの GAGG における PD への入射光子数を概算 することができる。MPPC はピクセル化された構造を持っているため、入射光子数がピクセル数に近くな ると、パイルアップによりエネルギーと出力 ADC の線形性が崩れることがある。この効果を考慮していく 上でも、光子数を計算することは必要である。同セットアップで、GAGG を外して測定した²⁴¹Am のエネ ルギースペクトルを下図に示す。

図 3.24 における 59.5keV の光電吸収ピークをガウシアンによってフィッティングすると、ピーク位置は 2614±1[ch] であった。まず、PD 単体での結果をまとめ、次に PD に GAGG を取り付けてシンチレーショ ン光を読み出した場合について考える。



図 3.23: GAGG/プラスチックシンチレータの分割数を変更した、SPHiNX 偏光計のモデル





まず、59.5keV によって、(GAGG 無しの)PD の空乏層領域で生成された電子-ホール対の数 N_p は Si の エネルギーバンドギャップ 3.65[eV] を用いて、

$$N_p = \frac{59.5 \times 1000[eV]}{3.65[eV]} \simeq 16301 \text{ (ff)}$$

と書ける。シンチレーション光が電子に変換される効率である量子効率 QE は、受光感度 S[A/W] と波長 λ を用いて、以下のように書ける。

$$QE = \frac{S[A/W] \times 1240}{\lambda} \times 100[\%]$$

浜松ホトニクス社の S3590-08 に関するデータシートから、受光感度は図 3.25 のようになり、GAGG の 発光波長 520nm においては、S=0.36[A/W] となる。



図 3.25: S3590-08 の受光感度

よって、 $QE \simeq 85\%$ となる。ここで、GAGG を取り付けた PD によって生成される電子-ホール対の数 N_q は、GAGG と 662keV のガンマ線によって生成されたシンチレーション光子の数 x を用いて

 $N_q = 0.85x$

である。よって、PD のみでの 59.5keV のピークチャンネル 2614[ch] と PD+GAGG での 662keV のピーク チャンネル *y* を用いて、

$$16301:2614 = 0.85x:y$$

が成り立つ。

ここで、大形 GAGG の各点に関して 662keV の光電吸収で生じた光子が PD の受光面まで届いた数 *x* を 計算したのが以下の表 3.4 となる。

この表において、1 列目は PD 受光面からの距離、1 行目は受光面中心を 0 とした時の、PD 受光面と直行 する方向への距離であり、図 3.16 に対応している。全点での平均値は 21281 光子である。*QE* = 85%,GAGG の時定数 88ns、MPPC の fill factor:74%とすると、MPPC:S13360-6050CS の時定数 27ns の間に検出され

表 3.4: GAGG+PD の各点での、662keV の光電吸収の後に PD ま受光面まで届いた光子数。1 列目はガンマ線照射 位置の、PD 受光面からの距離である。

mm/mm	-10	-5	0	5	10
55	20694	20672	20604	20501	20668
50	20775	20741	20685	20550	20694
45	20811	20850	20743	20651	20787
40	20983	20967	20917	20807	20911
35	21118	21134	21119	21042	21096
30	21287	21315	21282	21231	21272
25	21417	21414	21438	21405	21444
20	21578	21585	21632	21560	21563
15	21669	21755	21852	21743	21742
10	21638	21917	22192	22086	21822
5	21391	21879	22772	22425	21623

る光子数は 3300 光子となる。ここで、S13360-6050CS のピクセル数は 14400 ピクセルであり、受光面積 が PD の 10×10mm² に対して。6×6mm² であるので、大形サイズの GAGG と S13360-6050CS でのサチュ レーション確率は

$$\frac{3300 \times ((6 \times 6)/(10 \times 10))}{14400} \times 100 \simeq 8[\%]$$

となる。SPHiNX のエネルギー帯域は 20-600keV であるので、600keV でもほとんどパイルアップすること はなく、これらの組み合わせで十分に精度の良い観測ができると考えられる。

3.3.3 MPPC の選別および、スレッショルドに関する考察

この項では、SPHiNX 衛星で用いる MPPC の選定、及び SPHiNX の要求性能の一つであるスレッショ ルドの達成可能性について実際に実験を行って考察する。

MPPC の選別

SPHiNX では、MPPC に関して現在2つの候補がある。すなわち、浜松ホトニクス社製のS13360-6050CS か、S13360-3050CS である。以下にデータシートによる性能を比較した (表 3.5)。

MPPC 型名	有効受光面サイズ (mm)	ピクセル数	ダークカウント:Typ.(kcps)	端子間容量 (pF)
S13360-6050CS	6.0×6.0	14400	2000	1280
S13360-3050CS	$3.0{\times}3.0$	3600	500	320

表 3.5: S13360-6050CS と S13360-3050 の比較

これを見ると、S13360-6050CS の方は受光面が大きく、ピクセル数が多いため、効率的に光子を集める ことができ、出力電荷量の増加、S/N 比の向上が期待できる。一方、S13360-3050CS は受光面が小さく、ピ クセル数が少ないため、端子間容量が小さくなり、必然的にダークカレントが小さくできると期待できる。 以下の実験では、実際に 10mm×10mm×10mm の大きさの GAGG シンチレータを、それぞれの MPPC を 用いて測定を行い、SPHiNX 衛星で実際にどちらの MPPC を用いるかについて検討する。 以下に、本実験での測定条件について記述した。

○ 測定条件

光検出器 浜松ホトニクス社製 S13360-6050CS/3050CS

電源装置:浜松ホトニクス社製: C12332-01 (Hamamatsu MPPC 評価回路) Vbr+2V

前置増幅器 浜松ホトニクス社製: C12332-01 (Hamamatsu MPPC 評価回路)

整形増幅器 クリアパルス社製: CP4417

データ取得 amktek 社製: MCA8000D

放射線源 ¹³⁷Cs

測定温度 恒温槽内にて 20°C 設定

本実験では、浜松ホトニクス社製の MPPC 評価回路の動作確認も兼ねて、電源・及びプリアンプに C12332-01 を用いた。本回路では、出力電圧の温度係数を変更することが可能であるが、恒温槽内での実験であり、 温度変化はさせないため、温度係数は 0(温度補正無し) と設定した。また、MPPC への印加電圧は、ブレー クダウン電圧+2V とした。これは、浜松ホトニクスのデータシートの推奨電圧に従った。S13360-6050CS と S13360-3050CS のそれぞれで、ブレークダウン電圧が 51.51V、51.08V であったので、S13360-6050CS には 53.51V、S13360-3050CS には 53.08V を印加した。

以下に、測定結果を示す。図 3.26 において、左図が、S13360-6050CS による結果であり、右図が S13360-3050CS による測定結果である。また、図 3.27 に、S13360-3050CS での 662keV 光電吸収ピークによって、 S13360-6050CS のエネルギースペクトルを規格化したものを重ねて示す。



図 3.26: MPPC の受光面サイズを変えた時の¹³⁷Cs のエネルギースペクトル。左側が S13360-6050CS、右側が S13360-3050CS でのエネルギースペクトル。それぞれのエネルギースペクトルの下部に、662keV、32.2keV それぞ れの光電吸収ピークのフィッティングによる、結果を示した。

図 3.26 から、662keV の光電吸収ピークにおいて、S13360-6050CS の方が約 1.6 倍ほど分解能が良い ことが分かる。両者の結果を重ね描きした図 3.27 を見ると、662keV のピークが少し歪んでいるように見 えるが、これは GAGG を構成する ⁶⁴Gd の特性 X 線によるエスケープピークが見えているためである。 S13360-3050CS では、分解能が悪く、⁶⁴Gd のピークと分離できていないことからも、S13360-6050CS の方 が、SPHiNX ミッションに適している事が分かる。実験セットアップの関係上、スレッショルドを変えて いるので、低エネルギーのノイズ成分は見えていないが、6mm と 3mm で大きな差は見られなかった。

SPHiNX におけるスレッショルドに関する実験

SPHiNX 衛星で用いる GAGG シンチレータと、MPPC の組み合わせで、実際に SPHiNX で要求するス レッショルドを実現できるのかについて検証した。実験では、-25°C, 0°C, 25°C の各温度で、MPPC:S13360-6050CS および GAGG:60mm×27.5mm×5mm の組み合わせで行った。反射材には ESR を 1 重で巻いてい る。以下に、実験セットアップについて述べる。



図 3.27: MPPC の受光面サイズを変えた時の¹³⁷Cs のエネルギースペクトル。S13360-3050CS の 662keV ピークで 規格化した。

○ 測定条件

光検出器 浜松ホトニクス社製 S13360-6050CS

電源装置 keithley6517型: 55.000V

前置増幅器 クリアパルス社製: 506E 型

整形增幅器 ORTEC 社製:571 型

データ取得 amktek 社製: MCA8000A

放射線源 ¹⁰⁹Cd

測定温度 恒温槽内にて ±25°C, 0°C 設定

図 3.28 に実験セットアップの模式図を示す。MPPC+GAGG の組み合わせでは、出力電荷数が多く、プ リアンプがサチュレーションを起こすため、MPPC のとプリアンプの間にパッシブな減衰器 (Attenuator) を挿入した。設定した減衰レベルは 8dB であり、これによりプリアンプが線形性を保つことのできるレベ ルにまで、出力信号を減衰させた。また、本実験では、正確にエネルギーを測定する必要があるため、エネ ルギーの低い放射線源 (¹⁰⁹Cd, ²⁴¹Am)を用いて、前述した MPPC がサチュレーションを起こす確率を下 げている。また、本実験では、照射位置による依存があまり出ないように、GAGG の top から、コリメー トしないガンマ線の照射を行った。

これらの実験セットアップで測定を行った時の、¹⁰⁹Cd のエネルギースペクトルを図 3.29 に示す。低エ ネルギー側 22keV のピークが見えており、スレッショルドは 20keV 以下を達成できていることが分かる。 また、²⁴¹Am のエネルギースペクトルは図 3.30 である。



図 3.28: GAGG 検出光量の温度依存性実験のセットアップ



図 3.29: SPHiNX で用いる GAGG シンチレータと MPPC の組み合わせでで測定した時の、¹⁰⁹Cd のエネルギース ペクトル



図 3.30: SPHiNX で用いる GAGG シンチレータと MPPC の組み合わせでで測定した時の、²⁴¹Am のエネルギース ペクトル

これら図 3.29 の 22keV、 88keV 光電吸収ピークと、図 3.30 の 59.5keV ピークから、それぞれの温度での較正直線を算出する。以下の表 3.6 が、それぞれのピークのフィッティング結果である。

図 3.31 に、表 3.6 をグラフに描き、それぞれの温度での較正直線を作った。フィッティングに用いた関数は一次関数

$$y[ch] = p0 \times x + p1$$

である。図中左上の注釈の p0, p1 がそれぞれフィッティングによって得られたパラメータである。 つまり、それぞれの温度での較正直線は以下の式で書ける。

y[ch] = 22.0x[keV] - 23.0	at $-25^{\circ}C$
y[ch] = 14.6x[keV] - 30.5	at $0^{\circ}C$
y[ch] = 7.8x[keV] - 15.0	at $+25^{\circ}C$

一方、図 3.28 を 8bin で bin まとめし、低エネルギー側を拡大すると(図 3.32)、-25 ℃の低エネルギー側のノイズとコンプトン散乱成分の分離チャンネルは 60±4[ch], 0° では 36±4[ch], 25°C では 36±4[ch] と読み取れる。これらをそれぞれ上式に当てはめると、スレッショルドは
-25°C で 3.8±0.2keV
0°C で 4.6±0.3keV
25°C で 6.5±0.5keV
となる。



図 3.31: 各温度での較正直線。



図 3.32: 図 3.28 の低エネルギー側を拡大したもの

温度 (°C)	エネルギー	ピーク位置 (ch)	分解能 (%)
-25.0	59.5	$1278.4{\pm}0.3$	$25.39 {\pm} 0.04$
	22	$462.3 \pm \ 0.2$	$38.03 \pm \ 0.09$
	88	$2004{\pm}1$	$15.3 {\pm} 0.1$
0.0	59.5	$826.2 {\pm} 0.1$	$24.61 {\pm} 0.03$
	22	291.9 ± 0.08	$40.9834 {\pm}~0.06$
	88	$1293.8 {\pm} 0.3$	$15.62{\pm}0.05$
25.0	59.5	$445.54{\pm}0.06$	$26.54{\pm}0.02$
	22	$700.2 \pm \ 0.2$	$16.81 \pm\ 0.07$
	88	$700.2 {\pm} 0.2$	$16.81 {\pm} 0.07$

表 3.6: 各温度での²⁴¹Am(59.5keV) と¹⁰⁹Cd(22keV, 88keV)の光電吸収ピークのガウシアンフィッティングの結果

SPHiNX の観測エネルギー帯域である 20keV~600keV を達成するには、安全ファクターを 0.5 として、実 験室で 10keV 程度のスレッショルドを達成できれば良いので、SPHiNX ミッションでの観測エネルギー帯 域である 20keV-というのは十分達成可能であると考えられる。



図 3.33: 図 3.32 を 8bin でまとめたもの

第4章 検出器用電源回路の開発

本章では、CUBES や SPHiNX で用いる、MPPC 用の電源について開発を行う。MPPC の読み出しに は、正電圧を用いる方法と、負電圧を用いる方法の2通りある。前述の通り、MPPC 出力ゲインを、IDEAS 社の ASIC:IDE3380 で変更するには、負電圧での読み出しが必要となる。衛星バスからの供給電圧は 3.3V であるため、正電圧から負電圧約 –55V に降圧する必要が有り、一般に、正電圧で約 +55V に昇圧する よりも多くの消費電力を必要とし、昇圧時のリップルノイズも問題となる。以下では、SPHiNX/CUBES 用に正電圧・負電圧回路を設計・シミュレーションし、実際に回路に組み込んで性能試験を行うことで、 SPHiNX/CUBES への使用を検討した。

4.1 要求性能

衛星搭載用の MPPC 電源回路を開発するにあたって、いくつかの要求があるため、以下に記述する。

ミッション	消費電力	出力電圧	ノイズレベル	サイズ (mm)
CUBES	基板全体で 1W 以下	$\sim 60 V(+)$	Keithley6517 と同程度の	$50 \times 50 \times 15$
			エネルギー分解能を有すること	
SPHiNX	$\sim 3 W/unit(32 MPPCs)$	${\sim}60\mathrm{V}(+\mathrm{or}-)$	同上	同上

表 4.1: S13360-6050CS と S13360-3050 の比較

表 4.1 から分かる通り、省エネルギー・低ノイズ・省スペースを実現しなければならない。そのために、低 ノイズ・低消費電力の DCDC コンバーターを探し、なるべく部品点数を減らして設計しなければならない。

4.2 正電圧電源の開発

まず初めに、低ノイズ・省スペース・省エネルギーでの開発が可能だと見込まれる、+3.3Vから~+60V の昇圧回路の開発を行う。開発は、

- (1). 開発条件をできる限り満たす、DC-DC コンバーターを探す。
- (2). 回路シミュレータ LTSpice を用いて設計・回路の動作シミュレーション。
- (3). ユニバーサル基板で回路を組み、ノイズ解析。
- (4). 実際に MPPC を読み出し、Keithley 6517 との比較。

の順に進める。

4.2.1 回路の設計・開発・ノイズ特性評価

数多くの DC-DC コンバーターを探し、Linear Technology 社の LT3482 を用いて開発を行うこととした。 LT3482 は、スイッチング周波数を調整可能な昇圧型スイッチングレギュレータであり、パワースイッチ、 ショットキーダイオード、APD 電流モニタが内蔵されているので、外付けの部品が少なくできる。LT3482 を選んだ理由として、

○ APD 用に作られた DC-DC コンバーターであり、低ノイズが期待できる

。 大きさが 3mm×3mm と小さい

● 動作温度域が-40°C~+85°Cと幅広く、衛星環境に耐えうる

○ 入力電圧が 2.5V~16V であり、CUBES での供給電圧 3.3V に適合する

。比較的簡単な回路で動作可能 ⇒ 部品点数が少なくできる

。名古屋大学の CUBESAT:ChubuSat-2 衛星の MPPC 読み出し電源として使われた実績がある

などの長所が挙げられる。

LT3482のデータシートの回路例を参考に、回路パラメータ(抵抗・コンデンサ・インダクタ値)を最適化 する。動作電圧 3.3V、出力電圧 62V、ノイズを除きやすくするため、スイッチング周波数は高めの 1.1MHz と設定した。下図 4.1 に、実際に設計した回路図を示す。



!.tran 0 5 4.96 10m

図 4.1: LT3482 を用いて開発した正電圧昇圧回路

これを、回路シミュレータ LTspice でシミュレーションした結果が図 4.2 である。


図 4.2: 正電圧昇圧回路の Spice シミュレーションによる結果。十分に低いノイズを達成できている。

これを見ると、出力段に RC フィルター無しでも、安定時のノイズレベルが 0.03mV とかなりの低ノイ ズを実現できていることが分かる。また、このときの消費電力は、内部抵抗 1Ω、MPPC を接続していない とき、19mW であり、十分に省エネルギーであると言える。

シミュレーション上で動作の確認・及び SPHiNX/CUBES での要求性能が達成できることが分かったの で、必要となるパーツを選び、この回路を実際にユニバーサル基板上で作成していく。実際に組んだ回路を 下図 4.3 に示した。

外来電波を回路上の配線が広い、ノイズとなることを防ぐために、回路全体を HAMMOND 製のダイキャ ストアルミケースに入れ、スペーサーとボルトで固定している。また、アルミケース外部との通信(3.3V 電 源の供給や、昇圧された 63V 電圧の出力)には、LEMO 規格と同軸ケーブルを用いている。また、LT3482 は QFN パッケージであり、ユニバーサル基板へ組み込む場合は、変換基板が必要である。図 4.3 中の紫色 の基板が変換基板であり、その中央に LT3482 素子がリフローされている。この変換基板の下側にも、抵 抗、コンデンサがはんだ付けされている。インダクタはノイズを発生させる要因ともなるので、フェライト カバーされているものを選んだ。実際にこの回路を松定プレジション製の電源装置:PLE-18-2 から 3.3V の 電源供給で動作させた。この時の、オシロスコープ (50Ω) による波形が図 4.4 である。

振幅にして 100mV 程度ではあるが、~1MHz の周期性を持ったリップルノイズが確認できる。このリッ プルノイズを除くために、0.1μF、100Ω のパッシブなローパスフィルターを、アルミケース外に接続した。 RC フィルターを通した後の信号が図 4.5 である。100mV ほどあったリップルノイズは ~25mV 程度にまで 減少できている。

このままの出力電圧は ~63V であり、MPPC に印加する場合には少々高すぎるため、可変抵抗器を用い て分圧を行う。ここでは、20k Ω の可変抵抗器を用いて、55.00V に降圧した。これを用いて、20°C 設定の 恒温槽内で 10×10×10×cm³ の GAGG シンチレータに ²⁴¹Am を照射して MPPC:S13360-6050CS を読み出 したときの、MPPC の生波形を図 4.6 に示す。

これは ²⁴¹Am の 59.5keV を検出した時の波形であるが、MPPC の出力パルスが十分に低ノイズで観測 できていることが分かる。



図 4.3: 実際にユニバーサル基板に組んだ正電圧昇圧回路の写真。ノイズ防止のため、アルミケースに入れ、配線には LEMO 規格と同軸ケーブルを用いている。



図 4.4: 実際に作成した正電圧昇圧回路の、RC フィルター前のオシロスコープによる波形。50Ω 受けで、縦軸が 50mV/DIV、横軸が 1µs である。



図 4.5: RC フィルターを通した後のオシロスコープによる波形。



図 4.6: 実際に、自作した昇圧回路で、5×5×5mm³ の GAGG を取り付けた MPPC で、²⁴¹Am の 59.5keV を検出し た時のオシロスコープによる波形。縦軸 10mV/DIV、横軸 500ns/DIV

CUBES/SPHiNX での目標性能として、実験室環境で Keithley 6517 高圧電源装置と同程度のエネルギー 分解能を有することであった。そこで実際に、自作の高圧電源回路と Keithley 6517 の両方でエネルギースペ クトルを取得し、比較していく。図 4.7 は、自作回路と Krithley で取得したバックグラウンドのエネルギー スペクトルである。出力電圧はどちらとも 55.00V で、MPPC:S13360-6050CS と 10mm×10mm×10mm の GAGG シンチレータを用いている。



図 4.7: 自作回路(赤)と Keithley 6517(黒) で測定したエネルギースペクトル (バックグラウンド)

低エネルギー側のノイズレベルは、目視ではほとんど違いがないことが分かる。高エネルギー側のピー クはプリアンプのサチュレーションピークであり、低エネルギー側のピークは、整形増幅器が、信号を反射 したことによる擬似ピークである。検出器での信号処理の都合上、以下のエネルギースペクトルでもこの 擬似ピークは現れる。次に、実際に²⁴¹Amを測定した結果を以下に示す (図 4.8)。また、¹⁰⁹Cd を測定した 結果を図 4.9 に示した。

²⁴¹Am の 59.5keV 光電吸収ピークと、¹⁰⁹Cd の 88keV 光電吸収ピークを、それぞれガウシアンでフィッ ティングした結果は以下のとおりである。

	59.5keV ピーク	エネルギー分解能	88keV ピーク	エネルギー分解能
Keithley 6517	$1725 \pm 1 [ch]$	29.1±0.2 [%]	2645 ± 2 [ch]	$21.2 \pm 0.2 ~[\%]$
自作回路	$1718{\pm}1$ [ch]	$28.8{\pm}0.2~[\%]$	$2659{\pm}2~[\rm{ch}]$	$21.1 {\pm} 0.2 ~[\%]$

これを見ると、LT3482を用いた自作回路と Keithley 6517を用いて取得した²⁴¹Am と¹⁰⁹Cd のエネル ギー分解能は、誤差の範囲内で一致している。よって、CUBES や SPHiNX に置いても、十分に使える性 能を持っていると考えられる。また、この時に 3.3V 供給用の電源装置に表示された電流値は 0.12A であっ たが、ここでの電流消費は、ほとんど可変抵抗による電圧調整時にパッシブに分圧したことによるもので ある。



図 4.8: 自作回路 (赤) と Keithley 6517(黒) で測定したエネルギースペクトル (²⁴¹Am)



図 4.9: 自作回路 (赤) と Keithley 6517(黒) で測定したエネルギースペクトル (¹⁰⁹Cd)。22keV と 88keV の間にある ピークは、GAGG を構成する ⁶⁴Gd のエスケープピークである。

4.3 負電圧電源の開発

前述の通り SPHiNX では、MPPC の読み出しで用いる ASIC の関係上、負電圧で MPPC を読み出すことが望ましい。そこで、本節では負電圧電源回路の検討を行う。

4.3.1 回路の設計・開発・ノイズ特性評価

まず最初に、+3,3V 入力で負電圧 ~ -60Vを出力できる DC-DC コンバータを探した。その結果、条件に 適合するものは LT3759EMSE#PBF のみであったが、シミュレーションの結果ノイズレベルが大きく、使 用を断念した。次に候補となったのが、Linear Technology 社の LT8570-01(LT8570 の小電流出力バージョ ン) である。LT8570-01 は、入力電圧が 0.3V~40V と幅広く、反転構成での動作も可能である。回路定数の 計算の結果、-56V程度の電圧を作るには、入力電圧が~9V 以上必要であることがわかった。3.3V から 9V 程度の電圧への昇圧は比較的簡単に低ノイズ・省エネルギーを実現できるので、+3.3V → +12V → -56V と いう 2 つの DC-DC コンバーターを用いた変圧方式で開発を行っていく。以下では、まず 12V → -56V の 部分の開発を行い、負電圧電源装置の衛星での可用性について議論していく。以下に、LT8570-01 のデータ シートを参考に、+12V から -56V へと変換する回路を設計した。その回路図が図 4.10 である。



図 4.10: LT8570-01 で設計した、負電圧電源回路

後段に、100kΩの抵抗器と10nFのコンデンサで構成する、比較的時定数の大きい RC 積分回路を接続 し、高周波ノイズをカットしている。また、ここでは、スイッチング周波数は上述の正電圧昇圧回路に合わ せて1.1MHzと設定した。高周波に設定することで、リップルノイズをフィルター回路によって除去しや すくする狙いもある。また、回路図中のインダクタ L1 と L2 は、結合定数 k=0.99 で結合している。これ は、結合していない場合 (k=0) もシミュレーションをしたが、結合している場合に比べて、ノイズレベル が 5mV ほど大きく、周波数の低い除去の難しいリップルノイズが発生したためである。結合定数 0.99 と いう値は、一般的に市販されている結合されたインダクタがおおよそその程度であるからである。以下に、 回路図 4.10 をシミュレーションした時の、安定時の波形を示す。



図 4.11: 開発した負電圧電源回路の Spice シミュレーション結果。紫色が RC フィルター前の波形。緑色が RC フィ ルター後の出力である。

図中紫色が後段の RC フィルター前の波形であり、緑色が RC フィルターを通した後の波形である。ノ イズレベルは RC フィルター前で 12mV 程度、RC フフィルター後は 1mV 程度となっている。理想的な状 況でこの程度であり、実際に回路を組んだらもっと大きくなることが想定される。また、この時の消費電力 は内部抵抗を 1Ω として ~264mV であった。これは、高電圧電源 1 ユニットで複数個の MPPC を動作させ るとしても、数 W オーダーの電力を消費してしまうことになる。そのため、LT8570-01 を使った SPHiNX で使用可能な負電圧電源回路の開発は難しいという結論に至った。

SPHiNX で用いる MPPC 用負電圧電源回路の代替案の検討

上述の通り、市販の DC-DC コンバーター素子から、低ノイズ・低消費電力で負電圧を開発するのは難 しい。そこで、以下では、その代替案について考察する。代替案としては大きく、以下の 2 通りが考えら れる。

- (1). モジュール化された、高圧電源を用いる
- (2). 正電圧電源を用いる。

ここで、(1)の方法として候補に上がっているのが、Advanced Energy 社から開発・販売されている ULTRAVOLT XS シリーズである。これは、1 辺 10mm 程度のキュービック状で、重量 5g のモジュール で、正、または負極性に 100V までの出力が可能である。しかし、これは宇宙での使用を想定されているも のではなく、実際に衛星に用いるためには、真空試験や放射線耐性試を行う必要がある。これらについては 現在 SPHiNX チームで検討中である。

次に、方法 (2) についてであるが、この方法を用いる場合は、ASIC に内蔵されている電圧調整機能 (1V/8bit) を使わないことになると同時に、外部に電圧調整回路を別途組む必要がある。この方法(2) に ついても、少ない部品点数と、省エネルギーの要求性能を満たすことが可能か、SPHiNX チームと現在検 討を行っている。

第5章 まとめと今後

本研究では、SPHiNX 衛星シンチレーション検出部の、吸収体 (GAGG シンチレータ) 部分の特性評価と、読み出しに用いる光検出器 MPPC 用の電源回路の開発を検討した。GAGG シンチレータの基礎特性評価では、GAGG シンチレータの衛星軌道上での温度変化に対する発光量の変化を調べた。その結果、 -25°C~+25°C の温度変化において、高温になると約 10%の減少を確認した。また、GAGG の大きさによるシンチレーション光の自己吸収特性についても実験を行い、GAGG 読み出し口付近と、読み出し口から 60mm 遠い部分では、約 10%の減光が確認された。また、読み出し口側の角の部分でも、読み出し口直下に比べて約 5%の減光が確認された。これらの結果は、検出器応答を求めるシミュレーションに取り込むとともに、検出器構造の変更につながった。

MPPC 読み出し用高圧電源の開発では、正電圧読み出しにおいては十分に SPHiNX 要求性能を満たす 電源回路の開発を行うことが出来た。この回路は CUBES で用いられると共に、SPHiNX 衛星での使用も 検討している。また、負電圧回路の開発においては、市販の DC-DC コンバーター素子を用いた +3.3V か ら~ -60V 程度の変換回路は、SPHiNX の要求性能を満たせないことが分かった。そのため、その代替案 を検討した。今後は、2021 年の打ち上げに向け、変更したサイズの GAGG での基礎特性を実測し、MPPC からのデータ処理回路の開発及び地上との通信系との結合を行う。偏光計として組み上げた後には、日本の 放射光施設 SPring-8 を用いた偏光応答試験などにも参加する。以下に、SPHiNX 衛星の今後のスケジュー ルについてまとめた。

SPHiNX 衛星の今後のスケジュール

2018	 偏光計プロトタイプ開発開始 (Phase B)
2019 上旬	 Bench Top Model(BTM:実験室用モデル)の開発開始 (Phase C)
2019 中旬	 BTM モデル試験(振動試験など)
2020	 Proto Fright Model(打ち上げ同等品) の作成 (Phase D)
2021 下旬	 Launch !

謝辞

まず何よりも、人工衛星の検出器の開発というロマンあふれるテーマを提供していただき、スウェーデンに2回も赴く機会を与えて下さった、深沢先生並びに高橋先生に深く御礼申し上げます。

また、実験や解析に関する質問に懇切丁寧に対応していただいた水野先生、大野先生にもここに感謝の 意を表します。

研究室外では、共同で研究を行ってきた SPHiNX/CUBES/PoGO+チームの皆様、正電源用 DC-DC コ ンバータのリフロー作業や回路の相談にのっていただいた、広島大学技術センター 技術主任の落様、負電 源用 DC-DC コンバータについて大変有益なご提案をいただいた東京エレクトロンデバイス (株)の森田様 に深謝します。

その他、本研究に関わるすべての方々に感謝を申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- J. I. Katz, T. Piran, and R. Sari, Implications of the Visible and X-Ray Counterparts to GRB 970228, PHYSICALREVIEWLETTERS, VOLUME 80, NUMBER 8, 23 FEBRUARY 1998
- [2] M. Axelsson, L. Baldini, G. Barbiellini, M. G. Baring, R. Bellazzini, J. Bregeon, M. Brigida, P. Bruel, R. Buehler, G. A. Caliandro, R. A. Cameron, P. A. Caraveo, C. Cecchi, R. C. G. Chaves, A. Chekhtman, J. Chiang, R. Claus, J. Conrad, S. Cutini, F. D'Ammando, F. de Palma, C. D. Dermer, E. do Couto e Silva, P. S. Drell, C. Favuzzi, S. J. Fegan, E. C. Ferrara, W. B. Focke, Y. Fukazawa, P. Fusco, F. Gargano, D. Gasparrini, N. Gehrels, S. Germani, N. Giglietto, M. Giroletti, G. Godfrey, S. Guiriec, D. Hadasch, Y. Hanabata, M. Hayashida, X. Hou, S. Iyyani, M. S. Jackson, D. Kocevski, M. Kuss, J. Larsson, S. Larsson, F. Longo, F. Loparco, C. Lundman, M. N. Mazziotta, J. E. McEnery, T. Mizuno, M. E. Monzani, E. Moretti, A. Morselli, S. Murgia, E. Nuss, T. Nymark, M. Ohno, N. Omodei, M. Pesce-Rollins, F. Piron, G. Pivato, J. L. Racusin, S. Raino', M. Razzano, S. Razzaque, A. Reimer, M. Roth, F. Ryde, D. A. Sanchez, C. Sgro', E. J. Siskind, G. Spandre, P. Spinelli, M. Stamatikos, L. Tibaldo, M. Tinivella, T. L. Usher, J. Vandenbroucke, V. Vasileiou, G. Vianello, V. Vitale, A. P. Waite, B. L. Winer, K. S. Wood, J. M. Burgess, P. N. Bhat, E. Bissaldi, M. S. Briggs, V. Connaughton, G. Fishman, G. Fitzpatrick, S. Foley, D. Gruber, R. M. Kippen, C. Kouveliotou, P. Jenke, S. McBreen, S. McGlynn, C. Meegan, W. S. Paciesas, V. Pelass, GRB110721A: AN EXTREME PEAK ENERGY AND SIGNATURES OF THE PHOTOSPHERE, The Astrophysical Journal Letters, 757:L31 (6pp), 2012 October 1
- [3] NASA's HEASARC: Observatories "Vela 5A" https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/vela5a.html
- [4] R. Klebesadel, I. Strong & R. Olson (LANL), Vela Project
- [5] Mark L. McConnell, High Energy Polarimetry of Prompt GRB Emission, New Astron. Rev. 76 (2017)
- [6] R. Klebesadel, I. Strong & R. Olson (LANL), Vela Project
- [7] J. S. BLOOM, S. G. DJORGOVSKI, S. R. KULKARNI, THE REDSHIFT AND THE ORDINARY HOST GALAXY OF GRB 970228, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 554 : 678–683, 2001 June 20
- [8] A. S. Fruchter, E. Pian, S. E. Thorsett, L. E. Bergeron, R. A. Gonzalez, M. Metzger, P. Goudfrooij, K. C. Sahu, H. Ferguson, M. Livio, M. Mutchler, L. Petro, F. Frontera, T. Galama, P. Groot, R. Hook, C. Kouveliotou, D. Macchetto, J. van Paradijs, E. Palazzi, H. Pedersen, W. Sparks, M.

Tavani, The Fading Optical Counterpart of GRB 970228, Six Months and One Year Later, astro-ph, 516:683-692, 10 May 1999

- [9] MIT HETE-2 Picture Gallery:HETE-2 at Mass Properties Testing
- [10] Jens Hjorth, Jesper Sollerman, Palle Mller, Johan P. U. Fynbo, Stan E. Woosley, Chryssa Kouveliotou, Nial R. Tanvir, Jochen Greiner, Michael I. Andersen, Alberto J. Castro-Tirado, Jos Mara Castro Cern, Andrew S. Fruchter, Javier Gorosabel, Pll Jakobsson, Lex Kaper, Sylvio Klose, Nicola Masetti, Holger Pedersen, Kristian Pedersen, Elena Pian, Eliana Palazzi, James E. Rhoads, Evert Rol, Edward P. J. van den Heuvel, Paul M. Vreeswijk, Darach Watson, Ralph A. M. J. Wijers, A very energetic supernova associated with the gamma-ray burst of 29 March 2003, Nature.423:847-850,2003
- [11] Yousuke Utsumi, Masaomi Tanaka, Nozomu Tominaga, Michitoshi Yoshida, Sudhanshu Barway, Takahiro Nagayama, Tetsuya Zenko, Kentaro Aoki, Takuya Fujiyoshi, Hisanori Furusawa, Koji S. Kawabata, Shintaro Koshida, Chien-Hsiu Lee, Tomoki Morokuma, Kentaro Motohara, Fumiaki Nakata, Ryou Ohsawa, Kouji Ohta, Hirofumi Okita, Akito Tajitsu, Ichi Tanaka, Tsuyoshi Terai, Naoki Yasuda, Fumio Abe, Yuichiro Asakura, Ian A. Bond, Shota Miyazaki, Takahiro Sumi, Paul J. Tristram, Satoshi Honda, Ryosuke Itoh, Yoichi Itoh, Miho Kawabata, Kumiko Morihana, Hiroki Nagashima, Tatsuya Nakaoka, Tomohito Ohshima, Jun Takahashi, Masaki Takayama, Wako Aoki, Stefan Baar, Mamoru Doi, Franois Finet, Nobuyuki Kanda, Nobuyuki Kawai, Ji Hoon Kim, Daisuke Kuroda, Wei Liu, Kazuya Matsubayashi, Katsuhiro L. Murata, Hiroshi Nagai, Tomoki Saito, Yoshihiko Saito, Shigeyuki Sako, Yuichiro Sekiguchi, Yoichi Tamura, Masayuki Tanaka, Makoto Uemura, Masaki S. Yamaguchi, the J-GEM collaboration, J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817, Publications of the Astronomical Society of Japan, (2014), Vol. 00, No. 0
- [12] Unveiling the Secrets of Gamma Ray Bursts, Gomboc, A. Contemp. Phys. 53 (2012) 339-355
- [13] The Synchrotron Shock Model Confronts a "Line of Death" in the BATSE Gamma-Ray Burst Data, R. D. Preece1, M. S. Briggs1, R. S. Mallozzi, G. N. Pendleton, W. S. Paciesas, and D. L. Band, The Astrophysical Journal Letters, Volume 506, Number 1
- [14] Magnus Axelsson ,FERMI/SWIFT GRB SYMPOSIUM 2012: POLARISATION AND THERMAL EMISSION IN GRBS, The Fermi/Swift gamma-ray burst Symposium 2012
- [15] R. D. Evans, THE ATOMIC NUCLEUS(1995), 736 pages
- [16] C. Wigger, W. Hajdas, K. Arzner, M. G¨ udel, A. Zehnder, Gamma-Ray Burst Polarization: Limits from RHESSI Measurements, ApJ, 2004 June 7
- [17] S. McGlynn, D. J. Clark, A. J. Dean, L. Hanlon, S. McBreen, D. R. Willis, B. McBreen, A. J. Bird2 and S. Foley, Polarisation studies of the prompt gamma-ray emission from GRB 041219a using the spectrometer aboard INTEGRAL, A&A 466, 895-904 (2007)

- [18] D. Gotz, P. Laurent, F. Lebrun, F. Daigne, Z. Bosnjak, Variable polarization measured in the prompt emission of GRB 041219A using IBIS on board INTEGRAL, ApJ, 2009
- [19] ガンマ線バースト偏光検出器 山形大学記者発表資料,村上敏夫,米徳大輔(金沢大),郡司修一(山 形大), 三原建弘(理研)
- [20] Astrosat, isro HP
- [21] Gamma-ray burst polarization experiment onboard China's Spacelab: POLAR, Bobing Wu (伯冰), Institute of High Energy Physics, CAScd, China On behalf of the POLAR Collaboration Institute of High Energy Physics (China), Univ. de Genve; ISDC; PSI (Switzerland), NCBJ (Poland), LAPP Annecy (France), IACHEC meeting
- [22] Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Shuichi Gunji, Tatehiro Mihara, Kenji Toma, Tomonori Sakashita, Yoshiyuki Morihara, Takuya Takahashi, Noriyuki Toukairin, Hirofumi Fujimoto, Yoshiki Kodama, Shin Kubo, and IKAROS Demonstration Team, DETECTION OF GAMMA-RAY PO-LARIZATION IN PROMPT EMISSION OF GRB 100826A, 6 pages, 3 figures, accepted for publication in ApJL, 2011
- [23] DAISUKE YONETOKU, TOSHIO MURAKAMI, SHUICHI GUNJI, TATEHIRO MIHARA, KENJI TOMA, YOSHIYUKI MORIHARA, TAKUYA TAKAHASHI, YUDAI WAKASHIMA, HA-JIME YONEMOCHI, TOMONORI SAKASHITA, NORIYUKI TOUKAIRIN, HIROFUMI, FUJI-MOTO, AND YOSHIKI KODAMA, MAGNETIC STRUCTURES IN GAMMA-RAY BURST JETS PROBED BY GAMMA-RAY POLARIZATION, Accepted for publication to ApJL (7 pages, 3 figures), 2012
- [24] PROMPT EMISSION POLARIMETRY OF GAMMA RAY BURSTS WITH AST ROSAT CZT-IMAGER., Tanmoy Chattopadhyay, Santosh V. Vadawale, E. Aarthy, N. P. S. Mithun, Vikas Chand, Rupal Basak, A. R. Rao, Sujay Mate, Vidushi Sharma, Varun Bhalerao, Dipankar Bhattacharya, ApJ, Jul 2017
- [25] Calibration and performance studies of the balloon-borne hard X-ray polarimeter PoGO+
- [26] 横山 将志, 魚住 聖, 「Multi Pixel Photon Counter の研究開発」
- [27] 浜松ホトニクス, 光半導体素子ハンドブック
- [28] R.Sato, J.Kataoka, Y.Kanai, Y.Ishikawa, N.Kawabata, T.Ikagawa, T.Saito, Y.Kuramoto, N.Kawai clear Instruments and Methods in Physics Research AJ 556 (2006) 535542
- [29] SPHiNX proposal
- [30] 山本和英「広島大学 2007 年修士論文」
- [31] 光電子増倍管ハンドブック 第4版, 浜松ホトニクス, 2018
- [32] 宇井崇紘「広島大学 2010 年度卒業論文」

- [33] Seitz, B., Campos Rivera, N. and Stewart, A.G. (2016) Energy resolution and temperature dependence of Ce:GAGG coupled to 3mm x 3mm silicon photomultipliers. IEEE Transactions on Nuclear Science, 63(2), pp. 503-508.
- [34] Kamada Kei, Yoshikawa Akira, Endo Takanori, Tsutsumi Kousuke, Shoji Yasuhiro, Kurosawa Shunsuke, Yokota Yuui, Prusa Petr, Nikl Martin, Growth of 2-inch size Ce:doped Lu2Gd1Al2Ga3O12 single crystal by the Czochralski method and their scintillation properties, Journal of Crystal Growth, Volume 410, p. 14-17.
- [35] C.L. MELCHER et al, Scintillators for well logging applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volumes 4041, Part 2, 2 April 1989, Pages 1214-1218