宇宙硬X線偏光検出器PoGO+の感度向上のための 中性子バックグラウンド除去

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻

M151757

大橋 礼恵

高エネルギー宇宙·可視赤外線天文学研究室 主査:水野 恒史 副査:島田 賢也

2017年2月

天体の偏光観測からは、磁場の向きや整列の度合いの情報を得ることができ、特にX線、ガンマ線帯域に おける偏光観測によって、パルサーの放射機構やブラックホール近傍の降着円盤の構造の解明が期待されて いる。しかしこれらのエネルギー帯域ではほとんど偏光観測されておらず、これまでに偏光観測されたのは 一部の天体での限られたエネルギーのみである。

そこで世界で初めて 25-100 keV の硬 X 線帯域をターゲットとした偏光検出を目的としたプロジェクトが、 日本とスウェーデンが共同で開発した PoGOLite(Polarization Gamma-ray Observation-Lite version) 気球 実験である。PoGOLite の検出器は、偏光観測に用いる主検出部 61 本とそれらを取り囲む BGO(Bi₄Ge₃O₁₃) シールド 30 本をそれぞれ光電子増倍管で読み出している。だがバックグラウンドの大部分を占める大気中 性子は、BGO シールドでは除去できない。そこで主検出部自身で、ガンマ線と中性子の信号波形の差を利 用した波形弁別によって、バックグラウンドを除去することで観測精度が向上すると期待されている。しか し従来の ADC(Analog to Digital Converter) のサンプリングレート 37.5 MHz では、波形の立ち上がりに サンプリングの精度が十分ではなく、波形弁別は困難であった。

本研究では、波形弁別を可能にするため、ADCのサンプリングレートを 100 MHz まで向上させ、より 高速信号に対応したアナログ回路の作成など、読み出しシステムを改良した。また波形弁別の較正データ を取得するため、高速中性子を照射する地上実験を行った。そして改良したシステムを搭載し、2016 年に PoGOLite を改良した PoGO+としてスウェーデンからカナダまで飛行する約1週間のフライトが行われ た。ガンマ線と高速中性子には波高値のピークに達するまでに、およそ 80 ns の差が生じていることが確認 できた。この波形の立ち上がり時間の差を利用することで、中性子バックグラウンドを除去し、観測精度 を上げるための波形弁別を行った。また検出器の一部である熱中性子カウンターで取得されたデータから、 中性子バックグラウンドの見積りも行った。

概 要

目 次

第1章	イントロダクション	10
1.1	背景	10
1.2	研究目的....................................	10
1.3	X 線帯域での偏光観測	11
	1.3.1 散乱型偏光計	12
	1.3.2 モジュレーションファクター	14
	1.3.3 Minimum Detectable Polarization(MDP)	15
1.4	気球による X 線観測におけるバックグラウンド	15
1.5	中性子と物質の相互作用	16
第2章	PoGO+ 気球実験	18
2.1	概要	18
2.2	検出器	19
	2.2.1 主検出部とシールド部	20
	2.2.2 熱中性子カウントモニター	22
	2.2.3 光電子増倍管	22
	2.2.4 高速中性子とガンマ線の波形弁別	23
2.3	読み出しシステム....................................	25
	2.3.1 システム概要	25
	2.3.2 Flash ADC Board	26
	2.3.3 Digital I/O Board	27
第3章	PoGO+読み出しシステム改良	29
3.1	電荷有感型増幅器 (Charge Sensitive Amplifier, CSA) の改良	29
	3.1.1 電荷有感型増幅器 (Charge Sensitive Amplifier, CSA)	29
	3.1.2 オペアンプの選定	30
	3.1.3 供給電圧の決定	34
3.2	ADC Sampling Rate の向上	36
3.3	FPGA プログラムの改良....................................	40
	3.3.1 波形保存機能	40
	3.3.2 ヒストグラム生成機能	43
	3.3.3 Hit 数のカウンター機能	44
	3.3.4 イベント間隔計測機能	45

第4章	$^{241}Am^{9}Be$ 照射実験	46
4.1	中性子生成原理	46
4.2	実験セットアップ...................................	46
	4.2.1 Fast プラスチックシンチレータ	46
	4.2.2 遮蔽用シールド	47
	4.2.3 PMT ゲインの決定	49
4.3	中性子ガンマ線照射の実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
	4.3.1 高エネルギー側 (500 keV 付近) のバックグラウンド測定	55
	4.3.2 高エネルギー側 (500 keV 付近) の高速中性子測定	55
	4.3.3 低エネルギー側 (60 keV 付近) のバックグラウンド測定	57
	4.3.4 低エネルギー側 (60 keV 付近) の高速中性子測定	57
	4.3.5 高エネルギー側 (500 keV 付近) のガンマ線測定	59
	4.3.6 低エネルギー側 (60 keV 付近) のガンマ線測定	60
	4.3.7 高速中性子とガンマ線の波形弁別確認	62
第5章	2016 年フライトデータ解析	66
5.1	2016 フライト概要	66
5.2	データの健全性確認	67
	5.2.1 ヒストグラムデータ	67
	5.2.2 波形保存	68
5.3	熱中性子モニターのデータ解析	69
	5.3.1 熱中性子-ガンマ線波形弁別	69
	5.3.2 熱中性子カウントレート	70
5.4	中性子-ガンマ線波形弁別	73
	5.4.1 波形の領域ごとの弁別	73
	5.4.2 弁別の閾値の最適化	81
	5.4.3 テンプレートによる波形弁別	83

第6章 まとめと今後

図目次

1.1	降着円盤を見る角度による偏光度の違い	12
1.2	コンプト散乱の概念図	12
1.3	偏光した光子のコンプト散乱の概念図...............................	13
1.4	散乱型偏光計	14
1.5	モジュレーションカーブ [3]	15
1.6	大気シャワー	16
1.7	${}^{6}\mathrm{Li},{}^{3}\mathrm{He}$ の中性子に対する反応断面積 $\left[14 ight]$	17
91		18
2.1	<i>D</i> C ug u 1 [5]	10
2.2 0.2	Oyg x-1 [5]	10
2.3 9.4	2010 + 7 7 1 - 100 + 00 + 00 + 00 + 0 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 -	19
2.4		20
2.0	SDC ユーットの構造 [3]	21 91
2.0		21 91
2.1 2.2	1000年候田留の岬ル快田原埕	21 99
2.0	※TEJ12日間[11]・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22 99
2.9	7.电」項目目 (1 M1) の構造の概念因 [10] · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	22
2.10	25MSPS での由性子とガンフ娘の油形分別 [1]	24 25
2.11 2.12	55MSFSでの中ピーとガンマ線の波が开加[1]	20
2.12	D_0CO_1 今休 按结网 [16]	20 26
2.13	Flash ADC Board	20
2.14 2.15	Flash ADC Board ブロック図	21 97
2.10 2.16	Digital I/O Board [20]	21 28
2.10 2.17	Digital I/O Board \mathcal{I}_{DW} [16]	20
2.11		20
3.1	CSA の単純化した図	29
3.2	PoGO+のアナログ回路部	30
3.3	実験に使用した PMT(R7899) と Fast プラスチックシンチレータ (EJ204)	31
3.4	実験のセットアップ	31
3.5	PMT のアノード出力波形 (赤)、PMT 出力波形の遅延なしで積分した模擬波形 (青)、AD8057	
	出力 (緑)	31
3.6	AD8057 出力波形と AD8137 出力波形	32

3.7	AD8057 出力波形と AD8138 出力波形	32
3.8	AD8137 出力波形と AD8138 出力波形	32
3.9	PMT のダイノード、アノード出力	33
3.10	時定数を 2.2 us に設定した場合の AD8057 出力波形	34
3.11	PMT ダイノード出力の大信号を入力したときの AD8057 出力 (AD8057 の供給電源+3.5 V)	35
3.12	PMT アノード出力の大信号を入力したときの AD8057 出力 (AD8057 の供給電源+3.5 V) .	35
3.13	PMT ダイノード出力の大信号を入力したときの AD8138 出力 (AD8057 の供給電源+3.3 V)	
	青:LVDS(N)、シアン:LVDS(P)、赤:LVDS(P)-LVDS(N)	35
3.14	PMT アノード出力の大信号を入力したときの AD8138 出力 (AD8057 の供給電源+3.6 V) .	35
3.15	回路に印加する電圧の設定....................................	36
3.16	ADS5295EVM [9]	37
3.17	ADS5295 DUAL CUSTOMPAT モードの出力 [9]	37
3.18	EDX-301 [22]	37
3.19	CardUNIV [9] \ldots	38
3.20	ADS5295EVM と EDX-301 の接続ケーブル [9]	38
3.21	各ボードの接続図 [9]	39
3.22	DUAL CUSTOM での 100MSPS bit $\langle 0 \rangle \sim \text{bit} \langle 2 \rangle$ [9]	39
3.23	DUAL CUSTOM CO 100MSPS bit $\langle 3 \rangle \sim \text{bit} \langle 5 \rangle$ [9]	39
3.24	DUAL CUSTOM での 100MSPS $bit(6) \sim bit(9)$ [9]	40
3.25	DUAL CUSTOM での 100MSPS $bit\langle 9 \rangle \sim bit\langle 11 \rangle$ [9]	40
3.26	波形保存プロセス....................................	41
3.27	波形の立ち上がりの違いを利用した波形弁別 減衰時定数が短い場合 (左) と長い場合 (右) [16]	42
3.28	保存されるデータのフォーマット	43
3.29	ヒストグラム生成ブロック図 [16]	44
4 1		4 17
4.1	EJ299 を PM1 の 文元 叫に 按有 し に凶	41
4.2	カノマ緑に対する近の反心町山惧 $[/]$ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	48
4.3		48
4.4		48
4.5	実験で使用したかシュルド	49
4.0		49
4.1	19日間をノール「PSIC設置後のビタドアダク・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
4.0	Am 照射により得た EJ204 の波向値のヒストクラム	50
4.9	Am 無別により得た E3299 の波筒値のヒストソフム	50
4.10	CS 照射により特に E3204 の波筒値のヒストックム	50
4.11	CS 照別により付た EJ299 の波筒値のヒストノノム	51
4.12	Am maile ひけん E3204 の 成 か ヒ へ ビ ノ ノ ム (同ツイ ノ) · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	51
4.10 A 1A	137Cs 昭射により得た E1928 の波形ヒストグラム(同ノコン)	51
4.14	0.5 派別になり 何に 1.5204 の派がヒストグラム (低ノイン) $1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.$	51
д.10	\bigcirc ଲ別にのり付に D0200 の版// Lハーノノム (IMノーノノ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	01

4.16	EJ204 をつけた PMT のダイノード出力波形	52
4.17	EJ299 をつけた PMT のダイノード出力波形	52
4.18	²⁴¹ Am 照射実験でフライト用検出器によって得た EJ204 の波形ヒストグラム (CH1)	52
4.19	²⁴¹ Am 照射実験でフライト用検出器によって得た EJ204 の波形ヒストグラム (CH10)	52
4.20	引き算後の ${ m EJ204}$ の波形ヒストグラム $(^{137}{ m Cs}$ 照射 $,$ 低ゲイン-高ゲイン $)$	53
4.21	引き算後の ${ m EJ299}$ の波形ヒストグラム $(^{137}{ m Cs}$ 照射 $,$ 低ゲイン-高ゲイン $)$ \ldots \ldots \ldots	53
4.22	高ゲイン設定での測定について、引き算後の ${ m EJ204}$ の波形ヒストグラム $(^{241}{ m Am}$ 照射 - $^{137}{ m Cs}$	
	照射)	53
4.23	高ゲイン設定での測定について、引き算後の ${ m EJ299}$ の波形ヒストグラム $(^{241}{ m Am}$ 照射 - $^{137}{ m Cs}$	
	照射)	53
4.24	高ゲイン設定、 $^{241}\mathrm{Am}$ 照射実験について、引き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器	
	No.0 - 本実験用 EJ204)	54
4.25	高ゲイン設定、 $^{241}\mathrm{Am}$ 照射実験について、引き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器	
	No.10 - 本実験用 EJ204)	54
4.26	高ゲイン設定、 $^{241}\mathrm{Am}$ 照射実験について、引き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器	
	No.20 - 本実験用 EJ204)	54
4.27	高ゲイン設定、 $^{241}\mathrm{Am}$ 照射実験について、引き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器	
	No.30 - 本実験用 EJ204)	54
4.28	バックグラウンド測定において EJ204 で取得した波高値ヒストグラム(低ゲイン)	55
4.29	バックグラウンド測定において EJ299 で取得した波高値ヒストグラム(低ゲイン)	55
4.30	低ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形の典型例 (EJ204)	56
4.31	低ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形の典型例 (EJ299)	56
4.32	低ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ204)	56
4.33	低ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ299)	56
4.34	低ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ204)	57
4.35	低ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ299)	57
4.36	バックグラウンド測定において EJ204 で取得した波高値ヒストグラム(高ゲイン)	57
4.37	バックグラウンド測定において EJ299 で取得した波高値ヒストグラム(高ゲイン)	57
4.38	高ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形の典型例 (EJ204)	58
4.39	高ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形の典型例 (EJ299)	58
4.40	高ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ204)	58
4.41	高ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ299)	58
4.42	高ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ204)	59
4.43	高ゲイン設定、 ²⁴¹ Am ⁹ Be 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ299)	59
4.44	低ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形の典型例 (EJ204)	59
4.45	低ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形の典型例 (EJ299)	59
4.46	低ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ204)	60
4.47	低ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ299)	60
4.48	低ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ204)	60

4.49	低ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ299)	60
4.50	高ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形の典型例 (EJ204)	61
4.51	高ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形の典型例 (EJ299)	61
4.52	高ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ204)	61
4.53	高ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得したエネルギースペクトル (EJ299)	61
4.54	高ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ204)	62
4.55	高ゲイン設定、 ¹³⁷ Cs 照射で取得した波形ヒストグラム (EJ299)	62
4.56	高ゲイン設定、EJ204の波形ヒストグラムの差(図 4.42- 図 4.54)右:拡大図	62
4.57	高ゲイン設定、EJ299の波形ヒストグラムの差(図 4.43- 図 4.55)右:拡大図	63
4.58	低ゲイン設定、EJ204の波形ヒストグラムの差(図 4.34- 図 4.48)右:拡大図	63
4.59	低ゲイン設定、EJ299の波形ヒストグラムの差(図 4.35- 図 4.49)右:拡大図	64
4.60	高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリブレーション (検出器 No.0) での波形の差	
	(²⁴¹ Am ⁹ Be 照射 - ²⁴¹ Am 照射)	64
4.61	高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリブレーション (検出器 No.10) での波形の差	
	(²⁴¹ Am ⁹ Be 照射 - ²⁴¹ Am 照射)	64
4.62	高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリブレーション (検出器 No.20) での波形の差	
	(²⁴¹ Am ⁹ Be 照射 - ²⁴¹ Am 照射)	65
4.63	高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリブレーション (検出器 No.30) での波形の差	
	(²⁴¹ Am ⁹ Be 照射 - ²⁴¹ Am 照射)	65
E 1	坊城吉後の 复球	66
0.1 5 0		00 66
0.2 5.2	ノノ1 ト中のコノトノからの扱影 [4]	67
0.5 5 4	2010 キノノ1 トの靴跡 [4]	67
0.4 5 5		68
5.6	SAS の JSO ICI のエネルキー ヒスト ノフム · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	68
5.0 5.7		60
5.8	3DC 00次/00 例	70
5.0		70
5.10	派形の立ち上がり部分の計算がら付ちれるとストックス	70
5.10		71
5 11	マーナティー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
5.12	2013 年の大気中性子観測時のバックグラウンドレートと高度の関係 [12]	72
5.12	2016 年フライト時の執中性子カウントレートと高度の関係 (赤・LiCAF1 緑・LiCAF2 シ	12
0.10		73
5.14	サン・回及 ····································	74
5 15	つこ イインシレーション この 旅行 こう インシム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	74
5 16	14sample での波高値の分布 (赤:地トキャリブレーション 書・フライト)	75
5.17	15sample での波高値の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	75
5.18	16sample での波高値の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	75
0.10		. 9
	6	
	U	

5.19	17sample での波高値の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	75
5.20	18sample での波高値の分布 (赤:地上キャリプレーション、青:フライト)	75
5.21	19sample での波高値の分布 (赤:地上キャリプレーション、青:フライト)	75
5.22	20sample での波高値の分布 (赤:地上キャリプレーション、青:フライト)	76
5.23	21sample での波高値の分布 (赤:地上キャリプレーション、青:フライト)	76
5.24	20sample での波高値の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	76
5.25	21sample での波高値の分布 (赤:地上キャリプレーション、青:フライト)	76
5.26	20sample での波高値の分布 (赤:地上キャリプレーション、青:フライト)	76
5.27	21sample での波高値の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	76
5.28	22sample での波高値の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	77
5.29	23sample での波高値の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	77
5.30	波形のピークに達する sampling 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)	77
5.31	減衰部分で 1900ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	78
5.32	減衰部分で 1910ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	78
5.33	減衰部分で 1920ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	78
5.34	減衰部分で 1930ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	78
5.35	減衰部分で 1940ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	78
5.36	減衰部分で 1950ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	78
5.37	減衰部分で 1960ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	79
5.38	減衰部分で 1970ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	79
5.39	減衰部分で 1980ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	79
5.40	減衰部分で 1990ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:	
	フライト)	79
5.41	立ち上がり部分でのセレクションで閾値による MDP の分布(セレクション前の MDP/セレ	
	クション後の MDP) 右:拡大図	82
5.42	ピークでのセレクションで閾値による MDP の分布(セレクション前の MDP/セレクション	
	後の MDP)	82
5.43	減衰部分でのセレクションで閾値による MDP の分布(セレクション前の MDP/セレクショ	
	ン 後の MDP)	82
5.44	地上キャリブレーションデータ(ガンマ線)のテンプレート	83

5.45	フライト中バックグラウンド観測データ(主に高速中性子)のテンプレート......	83
5.46	地上キャリブレーションデータの各 $ ext{sample}$ での χ^2 の分布 (地上キャリブレーションテンプ	
	u - F)	84
5.47	地上キャリブレーションデータの各 sample での χ^2 の分布 (フライトテンプレート) \ldots	84
5.48	地上キャリブレーションデータの 50 sample 分の χ^2 の分布 (地上キャリブレーションテンプ	
	u - F)	84
5.49	地上キャリブレーションデータの 50sample 分の χ^2 の分布 (フライトテンプレート) \ldots	84
5.50	フライトデータの各 $ ext{sample}$ での χ^2 の分布 (地上キャリブレーションテンプレート) \ldots	85
5.51	フライトデータの各 sample での χ^2 の分布 (フライトテンプレート) \ldots	85
5.52	フライトデータの 50 sample 分の χ^2 の分布 (地上キャリブレーションテンプレート) \ldots	85
5.53	フライトデータの 50sample 分の χ^2 の分布 (フライトテンプレート)	85
5.54	2 つのテンプレートについての χ^2 の分布と波形の形の簡略図 (右:形の異なる波形、 2 つの	
	テンプレート、左: 2 つのテンプレートの χ^2 の分布) \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	86
5.55	地上キャリブレーションデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の分布 (横軸: χ^2 [フラ	
	イトテンプレート]、縦軸: χ^2 [地上キャリブレーションテンプレート]) \ldots	87
5.56	フライトデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の分布 (横軸 : χ^2 [フライトテンプレー	
	ト]:縦軸: χ^2 [地上キャリブレーションテンプレート]) \ldots \ldots \ldots	87
5.57	地上キャリブレーションデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の比 (フライトテンプ	
	レート/地上キャリブレーションテンプレート)	88
5.58	フライトデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の比 (フライトテンプレート/地上キャ	
	リブレーションテンプレート)	88

表目次

3.1	AD8057の供給電圧を変えたときのダイナミックレンジ	36
3.2	波形データと共にフライト中に保存される情報.................	43
5.1	立ち上がり部分での弁別結果....................................	80
5.2	ピーク位置での弁別結果	80
5.3	減衰部分での弁別結果....................................	80
5.4	条件の組み合わせによる判定結果....................................	81
5.5	条件の組み合わせによる判定結果	83

第1章 イントロダクション

1.1 背景

天体の観測には、天体の形や明るさを調べるために天体の像を取得する撮像、天体の光度を測る測光、天体の温度や組成を調べるために天体からの光の波長を細かく分けて測定する分光観測、そして光の振動方向とその偏りの度合いを調べる偏光観測の4つがある。電波や可視光などの比較的低いエネルギー帯域では、これら4つの方法で観測されている。一方で、X線、ガンマ線の観測では、撮像、測光、分光観測は行われているが、偏光観測は検出器に高度な技術が必要とされるため、ほとんど行われてこなかった。現在までに報告されている有意な偏光の検出例は少なく、かに星雲では、太陽観測衛星 OSO-8 による 2.6 keV,5.2 keV とガンマ線天文衛星 INTEGRAL による 100-1000 keV、そして Cyg X-1 での 600 keV 以上のエネルギー帯域のみである。つまり X線の偏光観測は発展途上の分野と言える。

そこで硬 X 線領域の偏光観測を発展させるべく、気球による観測を試みるミッションとして 2004 年に PoGO 計画が発足した。これまで 2013 年に PoGOLite、2016 年に PoGO+ミッションとして放球を行って いる。ターゲットとしている 25-100 keV のエネルギー帯域での偏光が検出されれば世界初となるため、非 常に注目されている。硬 X 線領域での偏光観測によってブラックホール周囲の降着円盤の構造やパルサー の放射機構の解明など、高エネルギー帯域での天文学への貢献が非常に期待されている。

検出器には、X線天文衛星「すざく」に採用されているフォスイッチカウンタが採用されており、宇宙 線粒子やバックグラウンドガンマ線などは減衰時定数の異なるシンチレータによる波形弁別を用いて落と すことができる。こうして荷電粒子やガンマ線を除去することで気球での観測において、上空での主要バッ クグラウンドとなるのは大気中性子(高速中性子)であり、これまでは熱中性子検出器を用いて熱中性子の レートを計測し、バックグラウンドを見積っていた。しかしこの方法では、1イベント毎に天体からの信号 とバックグラウンドの高速中性子を弁別することはできない。主検出部で得られるシンチレーション光をイ ベント毎に波形弁別し、高速中性子信号を除去することが可能になれば、バックグラウンドを大幅に除去で き、観測の精度が向上することが期待されている。硬X線と中性子はシンチレータの蛍光波形が10 nsの オーダーで異なり、CSA後に得られる波形の立ち上がり時間の差を検出することで波形弁別が可能になる と考えられている。そのためには、観測に用いる読み出しシステムの高速化が重要な課題である。

1.2 研究目的

観測の主要バックグラウンドとなる高速中性子を除去することは、観測の精度を上げることに大きく影響する。これまで高速中性子については、主検出部とは別の熱中性子検出器で独自にカウントレートのみ検出し、どれだけのバックグラウンドあるのかを見積るという方法が採用されてきた。ただしこの方法では、 熱化された中性子がどれだけ存在するかは計測できるが、高速中性子を直接観測している訳ではないため、 1 イベント毎に硬 X 線と中性子のイベントを弁別することはできない。 主検出部のプラスチックシンチレータの蛍光波形から硬 X 線と高速中性子の信号を波形弁別することが できれば、天体からの硬 X 線放射のみを精度良く検出できる。PoGO のシンチレータの蛍光波形は、硬 X 線よりも中性子の方が 10 ns オーダーで遅いという報告があり [1]、CSA で電荷収集した後に波形の立ち上 がり時間の差が検出されれば、ガンマ線と高速中性子の波形弁別が実現する。そのためには、検出されたシ グナルをアナログーデジタル変換する回路の高速化や信号読み出しシステムの改良が必要である。

本研究では、読み出しシステム等の改良によって、ガンマ線と高速中性子の波形弁別機能の向上を地上 実験で確認し、2016年フライトデータで実際にどれだけ弁別されるかを評価することを目的とする。

1.3 X線帯域での偏光観測

電場及び磁場がある方向に偏って振動している光を偏光という。電磁波が持つ電場ベクトルは進行方向 に対して垂直な面内にあり、その電場ベクトルの軌跡の形によって、直線偏光、円偏光、楕円偏光に分類される。電場ベクトルが一定方向にそろっている電磁波のことを直線偏光しているという。直線偏光の偏光 度 P は

$$P \equiv \frac{N_{\parallel} - N_{\perp}}{N_{\parallel} + N_{\perp}} \tag{1.1}$$

と定義される。 N_{\parallel} は光の電場ベクトルに対して平行方向の強度、 N_{\perp} は電場ベクトルに垂直方向の強度を示す。P = 1の状態を偏光方向が一定にそろっている完全偏光、P = 0の状態を偏光方向が全くそろわない無偏光という。天体からの放射の偏光が検出されれば、放射機構に対する情報を得ることができる。X線、ガンマ線帯域での偏光観測では、ブラックホール周囲の降着円盤の構造や駆動型パルサーの放射機構の解明につながることが特に期待されている。

パルサーは高速回転しており、周期的なパルスが電波 ~ ガンマ線で放射されている。この放射は、パル サー磁気圏中で中性子星の磁力線に沿って運動する相対論的粒子のシンクロトロン放射であり、磁力線を含 む面内に強く偏光していると考えれている。しかしながらこれらの粒子加速が磁気圏のどこで起こってい るかは明らかにされていない。現在は3つのモデルが考えられており[2]、そのモデルによって周期に対す る偏光の様子が異なるため、パルサーの放射の偏光がわかればどのモデルが正しいのか、すなわち放射の メカニズムが解明されると期待されている。

ブラックホールのまわりには、強力な重力によって大量のガスや塵が降着し、円盤状の構造を形成して いる。ガスなどが落下する際に、重力が解放されてX線が放射されるが、降着円盤は非常に小さい角度ス ケールのため、現在の最高分解能を用いた撮像観測でも角度分解には成功していない。しかし偏光観測に よって、間接的にその構造が明らかになる可能性がある。X線は降着円盤の中でもブラックホールに近い 領域から放射されていると考えられており、放射の一部は降着円盤で散乱される。降着円盤を見る角度よっ て、偏光度は異なる。図??のように、真上から見た場合には、様々な方向に反射されることから無偏光と なる。一方で横から見た場合には、散乱される角度は制限されるため、ある特定の方向に偏光されることに なる。したがってこの偏光が観測されれば、降着円盤の構造の理解につながる可能性がある。[3]



図 1.1: 降着円盤を見る角度による偏光度の違い

X線帯域の偏光観測では、電波、可視光領域での偏光観測のように偏向板を用いるのではなく、光電吸収、ブラッグ反射、コンプトン散乱を利用した偏光検出器が用いられる。以下では、PoGO検出器でも採用されているコンプトン散乱利用する散乱型偏光計について述べる。

1.3.1 散乱型偏光計

コンプトン散乱は、入射したガンマ線光子と吸収物質中の電子1つの間で起こる相互作用である。入射 するガンマ線は、コンプトン散乱前後で進行方向が曲げられ、入射ガンマ線の持つエネルギーの一部が散 乱する電子に渡される。散乱の方向は全ての方向に起こることが可能で、電子に伝達されるエネルギーの 大きさは散乱角によって異なる。散乱されるガンマ線と散乱角の関係は、

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)}$$
(1.2)

と表すことができる。 $h\nu$ は散乱前、 $h\nu'$ は散乱後のガンマ線のエネルギー、 m_0c^2 は電子の静止質量エネル ギー、 θ は散乱角である。



図 1.2: コンプト散乱の概念図

また単位立体角あたりの散乱断面積は、クライン仁科の式 (Klein Nishina formula) と呼ばれる。

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = Z \frac{r_{\mathrm{e}}^2}{2} \frac{h\nu'^2}{h\nu^2} \left[\frac{h\nu}{h\nu'} + \frac{h\nu'}{h\nu} - \sin^2\theta \cos^2\phi \right]$$
(1.3)

Z は吸収体の元素番号、 $r_{\rm e}$ は古典電子半径、 ϕ は偏光ベクトルに対する散乱方位角である。 $rac{h
u'}{h
u} = \varepsilon$ とすると

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = Z \frac{r_{\mathrm{e}}^2 \varepsilon^2}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon} + \varepsilon - 2\mathrm{sin}^2 \theta \mathrm{cos}^2 \phi \right) \tag{1.4}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)} \tag{1.5}$$

 $h\nu$ 、 θ 、Zを一定とすると、定数 A,B を用いて

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \mathrm{A} - \mathrm{B}\mathrm{cos}^2\phi \tag{1.6}$$

となる。 $\phi = 90^{\circ}, 270^{\circ}$ のとき、散乱断面積は最大になるため、コンプトン散乱は偏光ベクトルに対して垂直方向の散乱が起こりやすい。



図 1.3: 偏光した光子のコンプト散乱の概念図

偏光の検出にはこの散乱方向の異方性を利用する。そのような方法を用いる検出器は、散乱を起こす散 乱体とその周りで吸収を起こすための吸収体で構成される。散乱体に対する吸収が起こった物質の角度を 検出し、偏光ベクトルに対する角度 φ への依存性を調べることで、偏光度、偏光角の情報を得るという方 法をとる。



図 1.4: 散乱型偏光計

1.3.2 モジュレーションファクター

モジュレーションファクターとは、偏光観測における検出器の感度を示す指標である。上で述べたよう に、コンプトン散乱は偏光ベクトルに対して垂直方向に起こりやすいため、入射 X 線の偏光度を調べるに は、散乱方向の角度分布を求める必要がある。図 1.5 はモジュレーションカーブを表しており、横軸に偏光 角、縦軸にイベント数を示したものである。散乱方向の角度分布の変動中心値(T)に対する変動の振幅値 の比をモジュレーションといい、

$$M = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}} = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2T}$$
(1.7)

 C_{\max} 、 C_{\min} は、散乱角ごとにイベント数をカウントしたときのカウント数の最大値、最小値である。また、 偏光度 100% に対するモジュレーションをモジュレーションファクター (M_{100}) といい、天体の偏光度 P、 検出したモジュレーションファクター M の関係は

$$P = \frac{M}{M_{100}}$$
(1.8)

となる。 M_{100} が予めわかっていると、式 1.8 から、天体偏光度を求めることができる。 M_{100} を知るためには、地上でのシミュレーションや、既知の偏光度を持つビームによる地上実験が必要になる。完璧な偏光装置であれば、 M_{100} は1となり、値が1に近いほど天体の偏光度が小さい場合でも検出される Mが大きくなり、測定における不定性は小さくなる。



図 1.5: モジュレーションカーブ [3]

1.3.3 Minimum Detectable Polarization(MDP)

MDP(最小検出可能偏光度)は偏光計の性能を示すもう一つの指標である。天体の偏光観測においては、 決められた観測時間で、ある統計的信頼度を満たすために天体に必要な偏光度のことである。つまり MDP の値が小さいほど、偏光検出能力の高い偏光計であると言える。ここでは、統計的信頼度を 99% とし、

$$MDP = \frac{4.29}{M_{100}R_{s}} \sqrt{\frac{R_{s} + R_{b}}{T}}$$
(1.9)

と表される [11]。 R_s, R_b は、それぞれシグナルレート (Hz)、バックグラウンドレート (Hz) であり、T は観 測時間である。PoGO+では、7 日間のフライトで MDP $\leq 10\%$ を目指している。

1.4 気球による X 線観測におけるバックグラウンド

地球には、高速で飛び交う宇宙線が飛来している。それらは、水素原子核やヘリウム原子核で構成され、 大気に衝突すると大量の粒子を生成する。この過程で生成されるガンマ線、荷電粒子、中性子がバックグラ ウンドとなる (図 1.6)。気球実験では、まさにこのバックグラウンドが生成される大気中をフライトするた め、人口衛星よりもバックグラウンド環境が悪い。特に中性子においては、天体からの信号と区別すること が困難であり、バックグラウンド軽減の大きな課題となっている。



図 1.6: 大気シャワー

1.5 中性子と物質の相互作用

中性子は非荷電粒子であるため、電磁気的な作用を起こさない粒子である。物質中の原子核と散乱や核 捕獲を起こす。物質の透過率が非常に高く、捕獲が困難であるため、通常の大きさの検出器では、検出する ことはできない。中性子はエネルギーによって分類され、低速中性子と高速中性子に分けられる。0.5 eV を境界として、低いエネルギーを持つものを低速中性子、高いエネルギーを高速中性子と呼ばれる。また室 温で平均エネルギーが約 0.025 eV の中性子は熱中性子と呼ばれる。弾性散乱は原子核の内部エネルギーの 変化はなく、中性子と原子核の弾性的な衝突が起こる散乱である。また中性子と原子核の散乱のとき、原 子核の内部エネルギーを変化させるものが非弾性散乱である。内部エネルギーの変化は、原子核の第一励 起エネルギーを越えるエネルギーが原子核を励起することによって起こる。原子番号の小さな原子核ほど、 中性子との散乱によりエネルギーを変換しやすい。PoGO 偏光計の散乱体にはプラスチックシンチレータ を利用しており、この水素原子と中性子との散乱イベントがバックグラウンドとなっている。

一方、捕獲、吸収反応では、原子核は中性子を吸収することで複合核が形成される。形成された複合核 は不安定であるため、以下のような反応からガンマ線を放出して安定状態になる。

$${}^{1}_{1}H + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}H + \gamma \tag{1.10}$$

この反応は低エネルギーの中性子で支配的であり、特に熱中性子で大きな反応断面積を持つ。また粒子を放 出することで、複合核を新たな原子核に変換する反応を核変換反応という。この反応は、荷電粒子がクー ロン障壁を超えて放出されるため、高いエネルギーを持つ高速中性子が起こす。クーロン障壁が低い場合 は、低エネルギーの発熱反応であり、中性子検出に用いられる。PoGOで使用される熱中性子検出器では、 ⁶Li(n, α)反応を利用している。この反応は、

$${}^{6}\mathrm{Li} + \mathrm{n} \to \alpha + {}^{3}\mathrm{H} + (4.78\mathrm{MeV}) \tag{1.11}$$

となる。



図 1.7: ⁶Li, ³He の中性子に対する反応断面積 [14]

He と Li との反応断面積を図 1.7 に示しているように、⁶Li(n, α) 反応は中性子のエネルギーが高くなる につれ、反応断面積は小さくなり、250 keV 付近に共鳴ピークを持つ。生成されたエネルギーが、ガンマ線 によって外部に出て行くことがないため、中性子を検出する反応として利用しやすい。また中性子のエネル ギーが約 2.5 MeV までの帯域で支配的なため、この帯域での観測で利用することが望ましい。

第2章 PoGO+ 気球実験

2.1 概要

X線、ガンマ線領域での偏光観測は、ブラックホール近くの降着円盤の構造や、パルサーの放射機構な ど、高エネルギー天体の研究において重要な役割りを果たすと期待されている。しかしながら高エネルギー 帯域での偏光観測では、検出器の構造が複雑であり、高度な技術が必要となるため、統計的に有意な観測例 は少ない。PoGO 計画は、気球による硬 X線領域の偏光観測を目的としたミッションとして 2004 年に発足 した。ターゲットとしている主な天体は、パルサーを含む超新星残骸のかに星雲(図 2.1) とブラックホール 連星 Cyg X-1(図 2.2) である。その後、検出器のユニット数を半減させ、到達高度を上げることで、感度の 維持と小型化を実現するための PoGO Lite 計画が 2006 年に立ち上がった。このプロジェクトでは日欧米 が共同で開発を行っており、日本からは、広島大学、東京工業大学、早稲田大学、山形大学、JAXA 宇宙 科学研究所,名古屋大学、東京大学が参加している。気球での観測は、衛星に比べてコストが低く、開発期 間が短いというメリットがあるが、一方で観測時間が限られるため、検出器の低バックグラウンド化と高い 有効面積が必要になる。



図 2.1: かに星雲 [5]



☑ 2.2: Cyg x-1 [5]

2013年には、スウェーデンのキルナから放球し北極圏を周回する約2週間のパスファインダーフライト が行われ、かに星雲を観測した。このフライト結果から、データに予想以上のバックグラウンドが含まれて いることがわかった。ここでのバックグラウンドは、1.4章で述べたように、宇宙線が大気に衝突した結果 生じる荷電粒子やガンマ線、中性子のことである。バックグラウンドの中でも8割が中性子に起因してい ると推定され、これらを除くことが課題となっている。これは、PoGO Lite の検出器はアクティブなシー ルドで荷電粒子とガンマ線バックグラウンドを低減できていたが、パッシブシールドだけでは中性子の除 去は困難であることを示している。ターゲットとしている硬X線と中性子の波形弁別をすることができれ ば、バックグラウンドがイベントの数倍を占めている問題は解決されると考えられている。そのためには、 シンチレーション光の波形の違いから硬X線と中性子を弁別できるように、データの読み出しシステムを 開発することが必要である。新システムにより、イベント毎の波形弁別が可能になれば、より高い精度の 観測が実施できると期待される。また 2013年のフライトでは排熱の問題も生じ、データ読み出し部の温度 が高くなり、フライトの途中で偏光計の電源を落とすこともあった。これらの問題点を解決するためにも、 データ読み出しシステムの改良がチーム内で要望されていた。

2016年の PoGO+プロジェクトのフライトでは、検出器および読み出しシステムの改良を行われた。2013 年のフライトと同じく、スウェーデンのキルナから放球し、カナダまでの約1週間のフライトが行われた。



図 2.3: 2016 年フライト前の PoGO+のゴンドラ

2.2 検出器

PoGO+に搭載されている検出器には、天体からの放射の偏光を検出する主検出部の Fast プラスチック シンチレータとガンマ線を遮蔽する鉛、鈴、銅でできたパッシブなコリメータと BGO アクティブシールド (Bottom BGO)、そして光電子増倍で構成されている。主検出部は SDC(Sandwich Detector Cell) と呼ば れ、フライトでは 61 ユニットで構成されており、蜂の巣状に並べられている。そして SDC の周囲を覆って いるのは、SAS(Side Anti-coincidence Shield) と呼ばれる 30 ユニットから成る BGO シンチレータである。 そして SDC のサイドに 2 つ設置されているのは、熱中性子も検出する LiCAF(LiCaAIF₆) シンチレータで ある。これらはバックグラウンドである高速中性子を見積もるための熱中性子モニターとしての役割を果 たす検出器全体は高速中性子を熱化させるために 10-15 cm 厚のポリエチレンシールドで覆われている。こ のように PoGO+の検出器は複数種類のシンチレータとコリメータから成る。また検出器は、バックグラウ ンド源や検出器自身の異方性をキャンセルするために、6 分間で 1 回転する。



図 2.4: PoGO+の検出器 [11]

様々な方向からやってくるバックグラウンドイベントは、特に荷電粒子やガンマ線の場合、検出器の側面 や底面から入射した場合は、SDC のまわりを囲っている BGO アクティブシールドと Bottom BGO crystal で遮蔽できる。また斜めから入射した場合は、コリメータであるコリメータで反応したものについては低 減できる。このシステムによって効率良くバックグラウンドを除去できるが、BGO シンチレータは中性子 に対して反応断面積が大きくないため、中性子は除去できない。

2.2.1 主検出部とシールド部

SDC ユニットは図 2.5 のような構造をしており、減衰時定数が短い (~2 ns)Fast プラスチックシンチレー タと遅い (~300 ns)BGO シンチレータパッシブなコリメータ、そして光電子増倍管で構成されている。シ ンチレータの発光の強度 I の振る舞いは、基底状態と励起されたエネルギー準位に対応した減衰時定数 τ と 励起後の時間 t に依存した以下のような指数関数で表現される。

$$I = I_0 \exp^{-t/\tau} \tag{2.1}$$

この減時定数は、一般的に有機シンチレータでは発光の減衰時定数は短く、発光量(上記 I を時間積分した もの)は小さい。一方で BGO のような無機シンチレータでは、減衰時定数は長く、発光量が大きい。減衰 時定数は、シンチレータを構成する材料に依るが、プラスチックシンチレータのほとんどの減衰時定数が数 ns と非常に短い。このように減衰時定数の違いによって、図 2.6 のように CSA 後の波形の立ち上がりに差 が生じ、波形弁別によって検出したイベントが天体からの放射(Fast プラスチックシンチレータでの反応) なのかバックグラウンド (BGO での反応)なのかを判断できる。





図 2.5: SDC ユニットの構造 [5]

図 2.6: 各検出器によって得られる CSA 波形 減衰時 定数の違いによって立ち上がりに差が見られる [6]

PoGO+の偏光の検出方法は、1.3.1 で述べたように、コンプトン散乱を利用した方法である。検出器を 上から見た様子が、図 2.7 である。SDC のコリメータを通り抜けてきた講師は、Fast プラスチックシンチ レータでコンプトン散乱を起こし、その散乱光が周辺の別の SDC ユニットで再度コンプトン散乱もしくは 光電吸収を起こす。255 keV より低いエネルギー帯域では、落とすエネルギーはコンプトン散乱よりも光電 吸収の方が高いため、各ユニットで落ちたエネルギーを測ることで、どちらのユニットでコンプトン散乱、 光電吸収が起きたかを求め、散乱方向を知ることができる。偏光している X 線光子は、偏光方向と垂直に 散乱されやすい。そのため、図 2.7 にあるように、多数の光子の散乱、吸収イベントを検出することで散乱 方向の偏り、すなわち散乱光子の分布の偏りがわかり、入射 X 線の偏光を調べることができる。



図 2.7: PoGO+検出器の偏光検出原理

2.2.2 熱中性子カウントモニター

熱中性子カウントモニターは、高速中性子バックグラウンドの見積もりを目的として、搭載されている。 6 Li(n, α)反応 (式 1.11)の反応を利用して、ポリエチレンで熱中性子まで減速させた高速中性子を検出している。検出器は、5 mm 厚の LiCAF シンチレータを 4 cm 厚の BGO シンチレータで上下から挟み、後段に光電子増倍管が設置されたフォスウィッチ型の構造である (図 2.8)。



図 2.8: 熱中性子検出器 [17]

2.2.3 光電子増倍管

シンチレータから発せられる光信号は、発光量が大きいものでも数万光子 / MeV と非常に微弱である。 この光信号を対応する電気信号に変換する装置として、光電子増倍管 (Photomultiplier tube, PMT) が広 く用いられている。PMT は増倍率が 10⁶ 程度もあり、ランダムなノイズをあまり加えず、数百個以下の光 子からなる光信号でも電子回路で利用可能な大きさの電気信号に変換する。シンチレータと組み合わせる ことで、放射線の検出とスペクトル測定などの目的で広く使用されている。図 2.9 に PMT の構造の概念図 を示す。



図 2.9: 光電子増倍管 (PMT)の構造の概念図 [15]

ガンマ線(放射線)がシンチレータに入射すると、シンチレーション光が発生し、PMTの光電面から入

射する。PMT は主に、光子を電子に変換する光電面と、ダイノードと呼ばれる数段程度の電子増倍器、そして増倍された電子を集めて電流として出力するアノードから構成されており、これらが真空のガラス管に 收まっている。光電面に入射した光子は光電効果が起こし、光電子が叩き出される。光電子は、ダイノード の手前にある収束電極によって第一ダイノードに導かれ、衝突すると、一つの光電子から複数の二次電子が 放出される。二次電子はダイノードに印加された電圧によって加速され、第二ダイノードに入射する。最 後のダイノードまで同じ過程を繰り返した後、増幅された電子はアノードに集められ、電流として出力さ れる。一般的な PMT は約 10⁶ ~ 10⁷ 倍の光電子増倍率を持つ。PMT の光電子増幅率は、印加する電圧に よって決まる。PoGO で利用している R7899 には、電源ユニットも付属している。電圧は基準電圧 (12 V) とコントロール電圧 (0-5 V) の2種類であり、PMT の印加電圧はコントロール電圧の 250 倍である。増幅 率はコントロール電圧が高いほど大きくなる。

PMT から出力される電子は、第一ダイノードと光電陰極にかける電圧によって、光電陰極から出てくる 光電子の初速度が決まり、電子が PMT から出力される走行時間に影響を与える。PMT に印加する電圧が 低すぎると、この走行時間の分布が広がり、PMT の応答時間の性能が下がる。すなわちゲインを下げ過ぎ ると出力される光電子が十分に加速されず、出力信号の波形になまりが生じる。

市販されている PMT の性能 (光電面のサイズ、形状、増幅率など) は様々であるが、PoGOLite での観 測の場合、ターゲットとしているエネルギー帯域の 25 keV の硬 X 線光子がコンプトン散乱を起こすとき に落とすエネルギーが検出できなければならない。光子がコンプトン散乱を起こして、散乱される光子の エネルギー $h\nu$ は以下の式 1.2 で表される。 $h\nu$ =25 keV の場合、散乱角にも依るが $h\nu'$ は、だいたい 22-23 keV である。したがって入射 X 線が落とすエネルギーは 2-3keV であることがわかる。電子が光電面から真 空中に飛び出すためには、真空と物質の間に存在する電位障壁以上のエネルギーが必要となる。そのため 光電面でのエネルギー損失はなるべく低くなるようにしなければならない。PoGO+では、低ノイズかつ集 光効率が高い PMT(浜松ホトニクス R7899) を採用している。この PMT は、Fast プラスチックシンチレー タのシンチレーション光の波長帯 (約 408 nm) で量子効率は約 25% である。このようにして、硬 X 線帯域 でのイベントの検出を可能にしている。

2.2.4 高速中性子とガンマ線の波形弁別

有機シンチレータで検出されるシンチレーション光の多くが減衰時定数が ps~ns と短い既発蛍光である が、実際には長寿命の蛍光が観測されることが多い。長寿命の遅発蛍光の成分は数百 ns という遅い減衰時 間を持っている。全体の発光量は、既発蛍光の速い成分と、長寿命の遅い成分の和で表される。一般的には 応答の速い即発成分のみに着目されるが、減衰の遅れも一部の目的の観測に有用である。その有用になる例 しては、励起された粒子の種類に依って、遅発蛍光に現れる光の割合が異なることを利用した観測である。 この現象を用いて、プラスチックシンチレータなどの特定のシンチレータは同じエネルギーを検出器に落 とした場合でも異種の粒子間の弁別を行うことができる。特にプラスチックシンチレータを用いて中性子 検出器として使用する際に、ガンマ線が起こす事象を取り除くために使われることが多い。図 2.10 はアル ファ粒子、高速中性子、ガンマ線に対して液体プラスチックシンチレータの一種である NE213 で観測され たシンチレーション光の波形を示している。



図 2.10: シンチレータで検出された放射線の発光強度 [1]

このような割合に違いが見られるのは、異なる種類の放射線によってエネルギー損失 dE/dx が異なるか らである。ある場所での発光強度はエネルギー損失に比例するが、一ヶ所であまり大量にエネルギーが損失 されるとすべてを既発成分で発光することができず、遅発成分として放射される割合が増加する傾向にあ り、その結果として、このような波形の減衰に違いが見られる。中性子が散乱してエネルギーを与える陽 子、ガンマ線はこのエネルギー損失が大きく異なるため、シンチレータで放射線の弁別ができる。

PoGO+では、シンチレーション光そのままではなく、プリアンプで電荷を積分した後の波形を処理して いる。PoGOLite の ~37.5 MHz でサンプリングを行った場合で波形弁別を行うと、図 2.11 のようになり、 70 MHz では、図 2.12 のようになると予想される。



図 2.11: 35MSPS での中性子とガンマ線の波形弁別 図 2.12: 70MSPS での中性子とガンマ線の波形弁別 [1] [1]

2つの図は、2つの時間で波高値 V1(early) と V2(late)の比とイベント数を対応させた図である。図 2.11 では黒い線が中性子、赤い線がガンマ線を示している。45-75 keV 帯域において 35 MHz でサンプリングを 行った場合では、中心の緑色の破線から左側の成分を信号から差し引くことで中性子の成分を弁別しよう としている。この結果、約 51 %の中性子イベントを落とすことができるが、28 %のガンマ線イベントも失 うことになる。図 2.12 は 60keV のエネルギーに対して、サンプリングレートを 70MSPS まで上げたとき の中性とガンマ線のイベントから得られる波形で、縦軸と横軸は図 2.11 と同様なシミュレーション結果で ある。実線が中性子で、破線がガンマ線である。35 MHz でのサンプリングと同様に緑色の破線から左側の 成分を差し引くと、83 %の中性子成分を落すことができ、ガンマ線は 81 %を残すことができる。この結果 から、今回の読み出し回路の改良によって 70MHz でのサンプリングが可能になれば、ガンマ線イベントと 中性子バックグラウンドの弁別精度が上がると期待される。

2.3 読み出しシステム

2.3.1 システム概要

現在、PoGO+の検出器は 61 ユニットの SDC、30 ユニットの SAS、そして 2 ユニットの熱中性子カウ ントモニターから構成されている。2013 年にフライトした PoGOLite とは熱中性子モニターが 1 ユニット から 2 ユニットになった点のみが変更されている。SDC と SAS の読み出しハードウェア回路は統一されて いる。ソフトウェア面では、後述するヒストグラムの作成機能は共通であるが、主検出部については、波形 保存機能に加えて Fast プラスチックシンチレータと BGO シンチレータの波形弁別が追加で備わっている。 PoGO+のシステム全体図を図 2.13 に示す。



図 2.13: PoGO+全体接続図 [16]

それぞれのシンチレータで発生した光信号が 93 本の PMT で電気信号に変換され、16ch のアナログ入 力がある FADC Board 6 枚に伝送される。PoGOLite では 8 ch 入力の FADC Board 12 枚で処理してい た。それぞれの FADC Board で A-D 変換後に最終的にデジタル部の保存されたデータは、1 枚の Router Board を介し、CPU に伝送される。(右下の Space Wire Component 部) このシステムで保存されるのは、 波形データと波形のピークとなる ADC チャンネルのヒストグラムである。

波形データは、偏光検出に用いる SDC、バックグラウンド除去のための SAS、熱中性子をカウントして いる LiCAF 検出器についてそれぞれ保存されている。あるイベントに対してスレッショルドを超えたチャ ンネルの Hit パターンを SDC と SAS の全 91 ユニットについて保存し、それらの Hit があった波形を保存 している。こうして保存された波形データからは、偏光解析の際に同時イベントであったか、また波高値か らエネルギーの情報を得ている。

ヒストグラムは、LiCAF も含めた全 93 ユニットで保存されている。SAS ではスレッショルドを超える と、VETO 信号が出力され、その間は SDC も SAS も波形データは保存されない。しかし各検出器が正常 に動作しているかの健康状態を確認するために、どのユニットでもスレッショルドを超えた波高値を全て保 存し、個別のヒストグラムを生成している。熱中性子検出器については、波形の減衰時定数が他の検出器に 比べて非常に長いため、同じロジックで動作させることはできないが、FADC Board 内部で独自に擬似的 にサンプリングレートを遅くすることで、波形とヒストグラムデータの保存を行っている。

2.3.2 Flash ADC Board

FADC Board は、アナログ信号を処理する 16ch の入力ポート、16 ポートの CSA を持ち、A-D 変換を

行う 2 つの ADC、FPGA から構成されている。FADC Board はシマフジ電機製で、2013 年のフライトに 使用したもの (8 ch 入力) から、2016 年のフライトに向けて改良を行った。改良については、3 章で詳しく 述べる。FADC Board の写真とブロック図を図 2.14、図 2.15 を以下に示す。



☑ 2.14: Flash ADC Board



図 2.15: Flash ADC Board ブロック図

CSA に入力されたアナログ信号は ADC で連続的 12 ビットの分解能を持ったデジタルデータに変換され て FPGA に伝送される。現在 FADC Board に実装されている ADC は Texas Instruments 社の ADS5295 で、最大サンプリングレートが 100MSPS という性能を備えている。また FPGA は Xilinx 社製の Spartan 6(PoGOLite では Spartan 3)を使用しており、この 100 MSPS に対応できる。DAC(Digital to Analog Converter) は、PMT にかかる電圧を制御する役目を持っており、PMT に付属している DC-DC コンバー タにより、DAC が生成したリファレンス信号の電圧のおよそ 250 倍の電圧が PMT にかけられる。このよ うなリファレンス電源を用いることで、PMT 一本一本の高圧電源を制御できる。また DAC の出力電圧す なわち PMT の印加電圧は、SpaceWire 通信によって書き換える (値を変化させる) ことが可能である。シ グナルを保存するかどうかの判定は後述の Digital I/O(DIO) Board が担うが、FADC Board では、Digital Board が判定に利用する各種のトリガーや VETO 信号を A-D 変換した波形データから生成して送ってい る。PoGO+ではノイズに強い LVDS のみを利用している。

2.3.3 Digital I/O Board

DIO Board は、シングルエンドの CMOS デジタルポートが入出力それぞれ 8 ポート、差動の LVDS デ ジタルポートが入出力それぞれ 12 ポート、搭載されている。DIO Board の写真とブロック図を以下に示す。





⊠ 2.16: Digital I/O Board [20]

図 2.17: DIgital I/O Board ブロック図 [16]

SDC や SAS の FADC Board がスレッショルドを超える信号を受け取ったときに出力する Trigger 信号と VETO 信号を集め、検出したシグナルが主検出部の Fast プラスチックシンチレータで検出されたガンマ線 信号か、バックグラウンドのどちらなのかを判断し、保存すべき天体からの放射であると判断すれば、SDC と SAS の FADC Board 全 6 枚に波形保存の Trigger 信号を FADC Board に返す。そして FADC Board 上 で、波形およびヒストグラムデータが保存される。

第3章 PoGO+読み出しシステム改良

3.1 電荷有感型増幅器 (Charge Sensitive Amplifier, CSA)の改良

この章では、PoGO+の FADC Board の改良項目の一つである、アナログ回路部について述べる。

3.1.1 電荷有感型増幅器 (Charge Sensitive Amplifier, CSA)

シンチレータで検出された光子は光電子増倍管で電子に変換、増倍され、電流として転送される。その 電荷を収集し、積分するのが Charge Sensitive Amplifier(CSA) である。CSA の重要な役目の一つは、信号 雑音比を最大にすること、すなわちノイズを除去することである。ノイズに対する性能は入力の静電容量 に大きく依存する。入力静電容量は主に検出器の固有静電容量や検出器との接続ケーブルによって生じる。 そのため検出器と接続するケーブルは長くならないよう考慮する必要がある。ただしシンチレータと光電 子増倍管の出力は比較的大きいため、半導体検出器やガス入り電離箱などに比べて、ノイズへの要求はそ れほど厳しくならない。

一般的な CSA の回路図を図 3.1 に示す。



図 3.1: CSA の単純化した図

図 3.1 では、フィードバック抵抗値 R_f と入力静電容量 C_f から時定数が R_fC_f と決まり、入力パルスの幅がこの時定数よりも短ければ、出力電圧は入力された電荷を全て積分した値に比例する。検出器で起こる事象の生成率が小さいすなわち入力されるパルスとパルスの間隔が長いとすると、抵抗 R_f を通して放電され、電圧値はやがてゼロになる。CSA は元々半導体ダイオード検出器と組み合わせて使用されるために開発されたが、他の多くの検出器にも適していることが実証されており、静電容量が変化しない検出器にも使用されている。[14]

ADC ~ FPGA を 37.5 MHz から 70 MHz 以上へ高速化するにあたって、この前段のアナログ回路部も 高速処理に対応しているか確認が必要がある。

入力された信号を増幅しているのは、回路に実装されたオペアンプである。このオペアンプの性能によっ て、どれだけ高速な信号を高精度で増幅できるかが決まる。PoGO+ではシンチレーション光のような高速 且つ微弱な信号を処理するため、また太陽光発電という限られた電力のため、高速かつ低消費電力のオペ アンプを使用している。FADC Board で使用しているアナログ回路図を図 3.2 に示す。



図 3.2: PoGO+のアナログ回路部

PoGO+の FADC Board には ADC の前には光電子増倍管からのアナログ信号の整形、増幅を行う回路 CSA(Charge Sensitive Amplifier)が実装されている。このオペアンプは、高速処理に特化した性能をもっ ている増幅器である。さらに CSA の後ろには、差動出力オペアンプがある。そこで、より高速応答に対応 できるオペアンプを新たに選定する。後段のオペアンプはシングルエンドの信号を差動信号に変換してノ イズ耐性を高め、アナログ回路の後に接続されている ADC に高速に信号を伝送している。このようにア ナログ回路は、CSA、差動アンプの2つの部分に分けることができ、以下ではそれぞれ前段、後段と言う。 PoGO+では、1 枚の FADC Board に 16 チャンネルの入力を備えており、チャンネル数分の CSA、差動ア ンプが搭載されている。

オペアンプの選定のための実験には、PMT(浜松ホトニクス製, R7899)、Fast プラスチックシンチレー タ (ELJEN TECHNOLOGY, EJ204, $1.0 \times 1.0 \times 1.5$ cm³) と自作の回路を使用した。PMT、シンチレータ は PoGO+で使用しているものと同じ型番である(図 3.3、3.4)。



図 3.3: 実験に使用した PMT(R7899) と Fast プラス チックシンチレータ (EJ204)



図 3.4: 実験のセットアップ

最初に、従来の FADC Board で使用してきたオペアンプの性能を調べた。オペアンプは前段、後段それ ぞれに、アナログデバイセズ社の AD8057 と AD8137 が採用されていた。

AD8057 の立ち上がりが、PMT 信号に十分追従しているかを、オシロスコープで波形を取得して調べた。得られた波形が図 3.5 である。ここではアノード波形と、最終ダイノード波形を AD8057 を通した波形の 2 種類を取得している。この後、アノード波形をパソコン上で積分することで、遅延のまったくない理想のオペアンプでの模擬積分を行い、比較している。こうして PMT の出力を遅延なしで積分したものに、AD8057 のオペアンプの出力が立ち上がり部分で数 ns のオーダーで遅れていないため、前段のオペアンプは、従来のものが使用できると判断した。



図 3.5: PMT **のアノード**出力波形 (赤)、PMT 出力波形の遅延なしで積分した模擬波形 (青)、AD8057 出 力 (緑)

次に後段の AD8137 については、前段のオペアンプ (AD8057) の出力と比較したところ、図 3.6 のよう

な波形が得られた。AD8137の出力が AD8057の出力に対して、およそ 8 ns 遅れて立ち上がっていること がわかった。そこで新たなオペアンプの候補として、AD8138 についても同様に波形を取得し、AD8057の 出力と比較した。得られた波形は図 3.7 で、AD8138の波形は AD8057の信号に 3 ns しか遅れることなく 立ち上がっていることがわかった。





図 3.6: AD8057 出力波形と AD8137 出力波形

図 3.7: AD8057 出力波形と AD8138 出力波形

AD8137、AD8138の出力同士を比較しても、図 3.8のように立ち上がり始めが速いピークに達した後の 収束が速い (うねりの振幅が小さい) という差が見えた。よって、後段のオペアンプは AD8138 を採用する ことにした。



図 3.8: AD8137 出力波形と AD8138 出力波形

使用するオペアンプが決定すると、入力抵抗値やフィードバックコンデンサの容量を最適な値に設定した。PoGO で利用する PMT は正の信号(最終ダイノード)と負の信号(アノード)の2 つの出力を持っている。過去のフライトでは、ゲインの高いアノードをトリガとして利用する可能性があった開発の歴史的な経緯から、データとして保存するのは、ダイノード信号であった。しかし図 3.9 のように、アノード信号の方が、ダイノード信号のおよそ 1.5 倍のゲインを持っている。PoGO+ではアノード信号が保存される可能性が高かった、またシンチレータ部の改良により、光量も増加する予想があったため、ゲインを従来の半分に設定することにした。



図 3.9: PMT のダイノード、アノード出力

電荷入力のため、回路のゲインはフィードバックコンデンサの容量(図 3.2 の C_f)によって決まり、 $1/C_f$ である。ゲインを半分にするため、22 pF を 47pF に変更した。回路の時定数は、フィードバックコンデンサの容量とフィードバック抵抗値(図 3.2 の R_f)で決まり、 R_fC_f である。時定数を決定するにあたって注意することは、信号のパイルアップの影響を受けないように設定することである。PoGOLite の 2013 年のフライト結果から、バックグラウンドを含めた信号のレートはおよそ 12 kHz、このうち回路が飽和するような大信号のレートは1 kHz とわかっているため、このレートでパイルアップを起こさないように時定数を決める。従来は C_f が 22 pF、 R_f が 100 kΩ であり、時定数は C_fR_f =2.2 us である。イベントレートが λ のとき、時刻 t までにパイルアップする確立は以下の式で表される。

$$P(\lambda) = 1 - \exp(\lambda t) \tag{3.1}$$

図 3.10 のように、オペアンプの出力が立ち上がりから、基準電圧に戻るまでにおよそ 6 us かかるため、式 3.1[14] を用いて計算すると、パイルアップする確率は 6.9%となった。ただしこれらは回路が飽和するよう な大信号ではないため、波形を保存している PoGO では、データ解析に利用できる。回路が飽和してしま うような大信号とパイルアップする確率は 0.6% しかないため、我々はこの確率ではパイルアップの影響は ないと考え、現状の時定数を維持することにした。ゲインを半分にしたことで、 C_f の値が 2 倍になってい るため、 R_f の値を半分にすることで時定数を維持する。



図 3.10: 時定数を 2.2 us に設定した場合の AD8057 出力波形

3.1.3 供給電圧の決定

PMT は正の信号 (ダイノード)と負の信号 (アノード)の2つの出力を持っている。過去のフライト では、データとして保存するのは、ダイノード信号であった。しかし図 3.9 のように、アノード信号の方 が、ダイノード信号のおよそ1.5倍のゲインを持っており、将来的にアノード信号を利用することを考慮 し、ダイノードとアノードの両方については、V_{p-p}=2.0 Vを12 bit(0-4095 チャンネル)の幅で使うこと ができる。そのためアナログ回路のダイナミックレンジも、ADC チャンネルの範囲を最大限使うことがで きるように設定することが望ましい。回路のダイナミックレンジは、オペアンプの供給電圧によって変化す る。ここでは、波形に大きな影響が生じない程度に電圧値を変え、定常時のオフセットとダイナミックレン ジが V_{p-p}=2.0 V になる値を調べる。ダイナミックレンジは、PMT の大信号を回路に入力し、飽和する電 圧値を調べる方法を用いた。PMTのダイノード、アノードを入力し、AD8057の出力でそれぞれ図 3.11、 図 3.12 のような波形が得られた。この+3.5 V の例では、電源 0 V の出力を基準としてダイノード入力で 1 飽和する電圧が+0.72 V、アノードが+2.7 V だったため、AD8138 に入力されるダイナミックレンジは、 2.71-0.72=1.99 V となる。次に AD8138 の LVDS 出力を調べた。ここでは両者の差分を表示し、LVDS を 模擬した。この際にプローブの GND は浮かせたままにしておく必要がある。図 3.13、3.14 は AD8057 の 供給電源をそれぞれ+3.3 V、+3.6 Vに設定した場合の AD8138 の出力である。+3.3 V のときは、ダイナ ミックレンジ $\pm 1.0 V_{p-p}$ を使いきれていない。一方で+3.6 V に設定したときは、ダイナミックレンジが ほぼ $\pm 1.0 \, \mathrm{V}_{\mathrm{p-p}}$ となっていることが確認できた。 $\mathrm{AD8057}$ の供給電圧を変え、ダイナミックレンジは表 3.1のようになった。この結果 AD8138 のゲインが1より若干小さいことがわかっていたため、AD8057 への 供給電圧値は+3.6 V とすることにした。




きの AD8057 出力 (AD8057 の供給電源+3.5 V)

図 3.11: PMT ダイノード出力の大信号を入力したと 図 3.12: PMT アノード出力の大信号を入力したとき の AD8057 出力 (AD8057 の供給電源+3.5 V)





図 3.13: PMT ダイノード出力の大信号を入力したと きの AD8138 出力 (AD8057 の供給電源+3.3 V) 青: 図 3.14: PMT アノード出力の大信号を入力したとき LVDS(N)、シアン:LVDS(P)、赤:LVDS(P)-LVDS(N)のAD8138出力(AD8057の供給電源+3.6V)

次に AD8057 のオフセット電圧 (V_{ref}) を決定した。入力する PMT 信号がダイノード、アノードによっ て、オフセットをジャンパーピンで変更できるようにすることでどちらの信号を利用することになっても、 波形が飽和しないレンジをかせぐ。増幅した波形が飽和する値は、表 3.1 に載せた AD8057 の出力時点で 0.72 V と 2.81 V である。ダイナミックレンジの限界付近では、ゲインが悪くなることと、波形のアンダー シュート分を考慮して、波形が飽和する限界電圧からおよそ全体の1割(200 mV)離れた値をオフセット電 圧値に設定した。ダイノード入力の場合は+2.60 V、アノード入力の場合は+1.10 V である。

AD8138 は差動出力であるため、AD8138 のオフセット電圧(VPED)は AD8057 の2本のオフセット電 圧の中間値 (ダイナミックレンジの中間値でもある)の 1.80 V に設定しておく(図 3.15)。

供給電圧 [V]	飽和する電圧値 [V]	ダイナミックレンジ [V]	-
+3.3 V	0.68(D), 2.57(A)	2.57-0.68=1.89	- ダイノード入力·(D) アノード入力·(A)
$+3.5 \mathrm{V}$	0.72(D), 2.71(A)	2.71 - 0.72 = 1.99	
+3.6 V	0.72(D), 2.81(A)	2.81 - 0.72 = 2.09	

表 3.1: AD8057 の供給電圧を変えたときのダイナミックレンジ



図 3.15: 回路に印加する電圧の設定

3.2 ADC Sampling Rateの向上

今まで PoGOLite で使用していた ADC は TI(Texas Instrument) 社の ADS5271 で、サンプリングレートは最大 50 MHz であった。しかし読み出す FPGA(Spartan 3) の性能で律速され、37.5 MHz で動作させられていた。改良後に使用する ADC は TI 社の ADS5295 で、サンプリングレートが最大 100 MHz である。ADS5295 は同時に 8 チャンネルの入力が可能で、各チャンネルは 80 mW という低消費電力で動作している。また A-D 変換の性能は 12 ビットで、入力電圧 V_{p-p} =+2.0 V を 0 から 4095 チャンネルのデジタル値に変換できる。

本研究では、改良後に使用する予定の Xilinx 社製の FPGA、Spartan 6 を組み合わせた動作確認を行った。実験では、ADS5295 が実装された TI 社製の評価ボード ADS5295EVM (図 3.16)と Spartan 6 が実装された有限会社ヒューマンデータ製のテストボード EDX-301 (図 3.18)を使用した。



⊠ 3.16: ADS5295EVM [9]



図 3.17: ADS5295 DUAL CUSTOMPAT モードの出 カ [9]



表

裏(ハンダ面)

⊠ 3.18: EDX-301 [22]

またこれら2枚の評価ボードを直接つなぐことはできないため、有限会社プライムシステムズ製のCardUNIV(図3.19)とフラットケーブルを介して図3.20のように接続した。



⊠ 3.19: CardUNIV [9]



図 3.20: ADS5295EVM と EDX-301 の接続ケーブル [9]

ADS5295EVM は、外部からの入力以外にボードの内部でシグナルを生成し、A-D 変換した値を出力す るテストモードが使用できる。テストモードの一例が、「DUAL CUSTOMPATTERN」である。このモー ドのときには、パソコンから設定した 2 つの値を 1sample 毎に交互に繰り返すような値が出力される(図 3.17)。EDX-301 は、USB 接続によって VHDL コードのコンフィグレーションと 5 V の電源供給を行って おり、28 ピンの I/O ピンコネクタ 2 つで入力および出力が可能である。EDX-301 からの出力線は、直接 プローブ経由でオシロスコープに接続している。また ADS5295EVM の内部クロックは 80 MHz であるた め、A-D 変換を 100 MHz で行えるかの検証には、図 2.16 のようなシマフジ電機製の SpaceWire DIO2 か らの 100 MHz のクロックを使用した。これは PoGO+で使用しているのと同一で、パラレルデータ入力お よび出力を各 8ch 持ち、デジタル差動入力および出力が各 16ch、32ch で可能である。また SDRAM には、 16 Mbyte が備わっている。

図 3.21 に実験に用いる信号線についてのブロック図を示す。CardUNIV には 8 チャンネルが接続されて いるが、ADS5295EVM から出力しているのは 16 チャンネルの中の ch1 と ADC のクロックのみである。 今回は DIO ボードに搭載されている USER-FPGA で 100 MHz のクロックを生成し、LVDS デジタル出力 のうち 1ch を使用して、外部クロックとして伝送した。また EDX-301 のピンアサイン上、ADS5295 から 出力される ADC 値 12 ビットのパラレルデータのうち、4 ビットまでしか同時に見ることができない。そ のため 4ch 読み出しのオシロスコープで 4bit ずつ読み出しを確認した。



図 3.21: 各ボードの接続図 [9]

実験では、ADS5295EVM の複数のテストモードで ADS5295 の動作確認を行ったが、詳しくは 2014 年 度の大橋卒業論文で述べている。ここでは、一例として「DUAL CUSTOMPATTERN」のときについて 述べる。このモードで正常に読み出しが行えていれば、値を 0000、FFFF に設定していたため、出力デー タのすべてのビットが、サンプリングレートである 100 MHz で HIGH と LOW の状態を交互に行き来して いるはずである。得られた結果が図 3.23 から 3.25 である。全 12 ビットが 100 MHz で変動していることが 確認できたため、Spartan 6 で正常に A-D 変換されたデータが読み出されていることがわかった。



図 3.22: DUAL CUSTOM での 100MSPS bit $\langle 0 \rangle \sim \boxtimes 3.23$: DUAL CUSTOM での 100MSPS bit $\langle 3 \rangle \sim$ bit $\langle 2 \rangle$ [9] bit $\langle 5 \rangle$ [9]



図 3.24: DUAL CUSTOM での 100MSPS bit $\langle 6 \rangle \sim \boxtimes 3.25$: DUAL CUSTOM での 100MSPS bit $\langle 9 \rangle \sim$ bit $\langle 9 \rangle$ [9] bit $\langle 11 \rangle$ [9]

3.3 FPGA プログラムの改良

アナログ回路部の高速化に伴い、A-D 変換後のデジタルデータの処理を行う回路部の改良も行った。この章では、FPGA のロジックの改良について述べる。ロジックは VHDL 語で作成した。100 MHz サンプリングの基本部分は、FADC Board 製作を依頼したシマフジ電機が作成したものを利用させていただいた。

3.3.1 波形保存機能

2.3 章で述べたように、FADC ボード上の FPGA では主検出部 SDC、シールド部 SAS および熱中性子 カウンタ LiCAF の波形を保存している。波形保存は、以前のフライトから行われており、12 bit の ADC 値を 50 サンプル分だけ保存する。本研究では FADC ボードの入力チャンネルが 16ch に増えたことにより、 16ch の信号を処理するロジックに改良を行った。

図 3.26 に、 ADC からの信号入力から波形が保存されるまでのプロセスを示す。



図 3.26: 波形保存プロセス

FADC ボードは、ADC からの信号を受け取ると、波形の判定を行い、4 本の信号を DIO ボードに伝送 する。まず ADC チャンネルの Trigger スレッショルドを超えていれば Trigger 信号を出力され、同時に Hit スレッショルドを超えた場合は、そのチャンネル情報である Hit Pattern も出力される。また SAS の BGO 信号であるかの判定も行われ、波形の立ち上がりが遅い BGO 信号であれば、Pulse Shape Discri(PSD) 信 号が出力される。そして ADC チャンネルが高すぎるイベントで、Upper Discri のスレッショルドを超えて いれば、Upper Discri(UD) が出力される。4 本の信号を受け取った DIO ボードは、PSD、UD の両方を受 け取らなければ、このイベントを保存する信号、DoWrite を FADC ボードに返す。また PSD を受け取る と、Peak Slow Discri を、UD を受け取ると Upper Discri を FADC ボードに返す。

PSD の判定は図 3.27 のように信号波形の立ち上がりの違いによる波形弁別を行う。縦の破線から左側 が Fast プラスチックシンチレータ、右側が BGO シンチレータの波形を表している。まずそれぞれの波形 データ (=ADC 値) から 6clock 分の時間と、37clock 分の時間を遅らせた波形を生成する。そしてデータの 波形から 6clock 遅らせた波形を差し引く。37clock 遅らせた波形もデータの波形から差し引く。

Fast プラスチックシンチレータの波形での差し引きでは、波形の立ち上がりが速いことから、6clock 遅らせた波形を引いた場合と 37clock 遅らせた波形を引いた場合では、2つの波高値 PeakFast と PeakSlow はほぼ等しい。それに対して BGO シンチレータの波形での差し引きでは、波形の立ち上がりが遅いことか

ら、6clock 遅らせた波形を引いた場合と 37clock 遅らせた波形を引いた場合では、2 つの波高値 PeakFast と PeakSlow に差が生じ、PeakSlow > PeakFast となる。



図 3.27: 波形の立ち上がりの違いを利用した波形弁別 減衰時定数が短い場合(左)と長い場合(右)[16]

FPGA に入力されたデジタル信号は、DIO ボードからイベントの保存フラグが返されるまでの時間に 保存するべき信号を逃してしまうため、予め遅延させておいたデータ 50 サンプルを保存するようにする。 LiCAF シンチレータは減衰時定数が 1600 ns と、他のシンチレータに比べて非常に長い。そのため SDC の 波形のように、500 ns に立ち上がり部分が収まらない。この問題を解決するために、ADC 出力の 6sample の平均をとってデータを保存している。また DIO ボードから DoWrite を受け取った各 FADC ボードは全 チャンネルでデータを保存すると、デッドタイムが長くなってしまう。そのため Hit スレッショルドを超え たチャンネルすなわち HitPattern のチャンネルのみを保存することで、デッドタイムを抑えている。イベ ントの波形は時間情報と共に、一時的に FPGA のメモリに保存される。表 3.2 のような情報が、波形と共 に保存される。データは図 3.28 のようなフォーマットで、イベント番号、そのボード内 16 ch の Hit、UD、 PSD などの情報と共に保存される。このような形でデータが保存されることで、フライト後のオフライン 解析の際に、どの時刻でどのチャンネルのデータなのか、またそのときの各 FADC ボードのヒットパター ンや UD 情報などを知ることができる。データには、図 3.28 のように波形と共に HitPattern などの情報が 保存される。16 bit 配列の中で 12 bit に ADC 値を詰めると、4 bit が余る。トリガ情報以降は、この 4 bit

の余りに情報を詰めている。

evendid	イベント番号	
Now time(clock)	時間	
Hit	そのイベントについて、その FADC 内 16ch の Hit スレッショルドを	
	上回ったチャンネルパターンを出力	
Trig	Trigger スレッショルドを上回ったチャンネルパターン出力	
UD	UD スレッショルドをうわまわったときにチャンネルパターン出力	
PSD	立ち上がりが遅 BGO 信号と判定されたチャンネルパターン出力	
UDLDAbs	UDAbs スレッショルド、LDAbs スレッショルドを	
	上回ったチャンネルパターン出力	
TimeAfterTrig	その ch について前のイベントのトリガーがあったタイミングから	
	次のトリガーのクロック数	
LiveTime	観測が行えている Live Time	
	(データ保存、UD、UDLDAbs は立っていない時間)	
board	6 ボード中のどのボードかを示す(読み出している PC が保存)	
ch	各イベントについて、FADC ボードの中のチャンネル情報	
PPS	DIO ボードから PPS によって出力される擬似イベントか	
	LiCAF 中性子検出器のイベントかを締め示す	

表 3.2: 波形データと共にフライト中に保存される情報



図 3.28: 保存されるデータのフォーマット

各 FADC ボードの時刻は、ボードの内部クロックに従って時刻付けされている。そのため時間がたつに つれ、FADC ボード間で時刻にずれが生じる。しかしフライト中は、このずれを補正することはできない。 そのためフライト後のオフライン解析の際に、時刻の補正を行えるように、DIO ボードから各 FADC ボー ドに一定の時間間隔で GPS 信号(偽信号)が送られ、このタイミングに同期して波形データが保存される。 この GPS 信号を受け取った時刻を用いて、時刻のずれを補正することができる。

3.3.2 ヒストグラム生成機能

波高値のヒストグラムデータは、バックグラウンドレートの測定や各ユニットの健康状態を管理するために保存されている。波高値は元の ADC チャンネルを元に計算すると、ノイズやオフセットが各チャンネ

ルによって異なるため、今の ADC 値と 37 クロック前の ADC 値(つまり PSD における PeakSlow の値) を詰めている。図 3.29 に、ヒストグラム生成のロジックをブロック図に示す。



図 3.29: ヒストグラム生成ブロック図 [16]

A-D 変換された信号は波形保存の過程と同一のブロックを用いて、Hit スレッショルドを超えているかの判定を行う。スレッショルドを超えている場合、HitPattern が出力される。そして Hit スレッショルドを超えているチャンネルの BaseLine が決められる。その後、予め 37 クロック遅延させていたデータとの引き算を行い、一定の時間内でピークホールドされて、このチャンネルの波高値が決まり、そのチャンネルのヒストグラムに保存される。

3.3.3 Hit 数のカウンター機能

偏光方向を知るには、検出器内で複数回ヒットしたイベントを扱う必要がある。ヒットの回数に関係無 く、イベントは全て保存することが望ましいが、波形保存の処理にかかるデッドタイム、ハードディスクの 容量を考慮し、偏光の検出に利用できるよう、2回以上ヒットしたイベントのみを保存することにした。つ まり一度に光電吸収でエネルギーを全て落とした場合、またはコンプトン散乱を起こした後に再び反応す ること無く検出器の外に通り抜けて行ったような場合のイベントは保存しない。そのためにイベント毎に ヒットしたチャンネル数を数える機能を新たに追加した。これにより、Hit がいずれか 1 枚の FADC ボードのみで起こった場合、各 FADC ボードで Hit を数え、2 回以上ヒットしたイベントの場合は信号を DIO ボードに出力することにした、全 FADC ボードの情報はスウェーデン製の Logic Discrimination Board でまとめられ、DIO ボードに集められている。複数ボードでの Hit 数のカウントは、この Board で行われ、DIO へ送られる。

Hit したチャンネルを示す HitPattern は、120 ns にわたって出力されている。一方で、今回採択したア ルゴリズムでは、Hit のチャンネル数をカウントするには、40 ns しかかからない。よって1回の Hit が立っ ている間に余裕を持って複数かどうかの判定を行えている。その後 110 ns の中で2 チャンネル以上が Hit していれば、イベントを保存することになる。したがって Hit が同時でなく、Hit したチャンネル数の計算 にかかる時間ほどのオーダーで遅れて Hit した場合も同時のイベントとみなし、保存する。

3.3.4 イベント間隔計測機能

PMTの信号には、アフターパルスというノイズが起こることがある。アフターパルスは、PMTの第一 ダイノードの弾性散乱電子によって起こる。本来の信号パルスの数 ns 数十 ns 後に現れるため、一般的に は信号処理回路によって問題にはならない。しかし PoGO+のようにシンチレータの減衰時定数が短い場 合は、2 つの信号として時間分解されて検出されてしまい、擬似 Hit や VETO を起こしてしまう。とくに コンプトン散乱の Hit 信号のように検出される場合には、偏光計のモジュレーションファクター M_{100} を悪 くさせることになる。2013 年の PoGOLite のフライトでは、このアフターパルス信号は除去できないでい たが、今回 FPGA が Spartan 6 になり、性能がアップしたため、取り込むことができた。このノイズをカ ウントしないために、Trigger 信号の後に次のイベントまでの時間を計測する機能を追加した。この機能に よってフライト後のオフライン解析の際に、PMT のアフターパルスを除去することが可能になる。

第4章 ²⁴¹Am⁹Be**照射実験**

この章では、2017/1/56の2日間に広島大学工学部F2棟加速器室にて行った²⁴¹Am⁹Be照射実験について述べる。2.2.4で述べたように、CSAから出力された高速中性子とガンマ線の信号波形には差がある。しかしこのような差がどれほどのものなのか、PoGO+のフライトと同じ読み出し回路では未確認の状態であった。そのため地上実験によって高速中性子のみ、またガンマ線のみの波形を取得することで、波形弁別が可能であるかを試験することが目的である。

4.1 中性子生成原理

中性子源となるものは数種類存在するが、 241 Am⁹Be は核反応を利用した方法の代表例である。 α 線を Be のような原子番号の低い元素に照射すると、高速中性子が発生する。その過程を、式 4.1 に示す。

$${}^{9}\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + n + 5.708\text{MeV}$$

$$\tag{4.1}$$

²⁴¹Amの半減期が約433年と長いため、長期間にわたって取り替えることなく使用できる。また放射するエネルギーは平均で4MeVである。

4.2 実験セットアップ

データ取得は、PoGO+o FADC ボードを用いて、フライトと同様に行う。本実験で使用するのは2 チャンネルのみであり、使用する FADC ボードは1 枚であるため、DIO ボードや Logic Distribution Board は 使用しない。また線源は、中性子照射には $^{241}Am^{9}Be$ を、ガンマ線には ^{137}Cs を用いた。

4.2.1 Fast プラスチックシンチレータ

使用するプラスチックシンチレータは、ELJEN TECHNOLOGY 製の EJ204(1.0×1.0×1.5cm³)であり、 フライト時と同じ製品である。またシンチレータは、ELJEN TECHNOLOGY 製の EJ299(2.5cmdia×2.5cm) という、ガンマ線と高速中性子の波形弁別が既に報告されているものを使用する。EJ299 は、3章で利用し た EJ204 と同様に反射材としてゴアテックスで巻き、オプティカルグリスを塗った状態で PMT の受光面 に接着している(図 4.1)。EJ299 のサイズは1インチ角である。



図 4.1: EJ299 を PMT の受光面に接着した図

4.2.2 遮蔽用シールド

²⁴¹Am⁹Be 線源は、高速中性子と共に平均で約4 MeV のガンマ線も放射している。そこで中性子とガン マ線を取得するためには、それぞれを遮蔽するシールドを設ける必要がある。そこで高速中性子のデータ を取得する際にはガンマ線を遮蔽するために鉛のシールドを、ガンマ線のデータを取得する際には高速中 性子を遮蔽するためにポリエチレンのシールドを置くことにした。

シールドの厚さは、ガンマ線、中性子に対する反応断面積から決定した。実効線量に対する透過線量の 割合である放射線透過率は、式 4.2 で表される。

$$I/I_0 = \exp(-\rho\sigma d) \tag{4.2}$$

 ρ は遮蔽物の密度 [g/cm³]、 σ は反応断面積 [cm²/g]、d は遮蔽物の厚さ [cm] である。この式を用いて、透 過率を1割以下に抑えるように、ガンマ線と中性子に関して計算する。鉛のガンマ線に対する反応断面積 は図 4.2 のようになる。この図から鉛の約4 MeV のガンマ線に対する反応断面積は、0.04cm²/g とわかる。 また使用する鉛ブロックは、密度が 11.34 g/cm³ である。したがって、必要な厚みは d \simeq 5cm である。



図 4.2: ガンマ線に対する鉛の反応断面積 [7]

ポリエチレンは、水素原子(H)4つと炭素原子(C)2つからなる分子を多数持つ高分子である。1分子の 質量は 4.7×10^{-23} g、密度は0.96g/cm³ である。したがって、分子個数密度は $\frac{0.96}{4.7 \times 10^{-23}} \simeq 2.0 \times 10^{22} cm^{-3}$ となる。水素、炭素の反応断面積は、図 4.3、図 4.4 より、4 MeVの中性子に対してはそれぞれ 2.0×10^{-24} cm²、 2.0×10^{-24} cm² である。1分子に含まれる原子数をかけて足し合わせると、 $\sigma \simeq 1.2 \times 10^{-23}$ cm² となる。式 4.2 に値を代入すると、d $\simeq 9.6$ cm が求まる。



図 4.3: 中性子に対する水素原子の反応断面積 [8]

図 4.4: 中性子に対する炭素原子の反応断面積 [8]

したがって、5cm 厚の鉛、10cm 厚のポリエチレンによって遮蔽することにした(図 4.6、図 4.5)。



図 4.5: 実験で使用したポリエチレンシールド

図 4.6: 実験で使用した鉛シールド

EJ204、EJ299 をつけた PMT は隣り合わせて設置した(図 4.7)。通常は線源レートを確認しながら、線 源と検出器の距離を調整していくが、最も近い距離に置いた場合でもレートが高すぎることはなかった。そ のため 4.2.2 章で計算した厚さのシールドを隔てた上で、それ以上の距離をとらずに設置することにした。



図 4.7: 検出器をシールド内に設置後のセットアップ

4.2.3 PMT ゲインの決定

PMT に印加する電圧によって、取得するエネルギー範囲を調節する必要がある。本実験では、過去に EJ299 で波形弁別が確かめられている高いエネルギー範囲と、PoGO+で観測する低いエネルギー範囲の両 方を測定する。そのため2つの場合のゲインを設定した。

PoGO+のフライト前に行ったキャリブレーションでは、²⁴¹Am を照射し、60 keV が 1500ch 程度に相 当するように PMT のゲインを調節した。同様に本実験の低いエネルギー範囲では、²⁴¹Am を 600 秒照射 し、60 keV が 1500ch 程度に設定した。図 4.10、4.11 は、EJ204、EJ204 に ²⁴¹Am を照射したときの波高 値のヒストグラムである。2 本の PMT に印加するコントロール電圧は、EJ204 の方が+4.55 V、EJ299 の 方が+4.90 V である。



図 4.8: ²⁴¹Am 照射により得た EJ204 の波高値のヒス 図 4.9: ²⁴¹Am 照射により得た EJ299 の波高値のヒス トグラム トグラム

ー方で高いエネルギー範囲の測定では ²⁴¹Am⁹Be 線源の最大 4 MeV のイベントを抑えられるように 4 MeV に 4096ch、1 MeV がおよそ 1000ch になるように設定する。調節には、¹³⁷Cs を用いて、480 keV のコ ンプトンエッジが ~ 500ch になるよう設定した。100 秒の測定で得られた波高値のヒストグラムが図 4.10、 4.11 である。2 本の PMT に印加するコントロール電圧は、EJ204 の方が+3.00 V、EJ299 の方が+3.20 V である。



図 4.10: ¹³⁷Cs 照射により得た EJ204 の波高値のヒス 図 4.11: ¹³⁷Cs 照射により得た EJ299 の波高値のヒス トグラム トグラム

本実験では、ガンマ線と高速中性子のわずかな波形の差を判定するため、波形がなまっていると大きく影

響を受ける。そこで PMT の印加電圧、シンチレータの大きさによる波形の差をそれぞれ調べた。図 4.12 か ら図 4.15 は、各ゲインに設定した際に EJ204、EJ299 で取得した波形のヒストグラムである。また図 4.18、 4.19 はスウェーデンにて、フライト前に²⁴¹Am 照射によるキャリブレーションにおいて取得した 61本の SDC のうちの1ユニットの信号波形ヒストグラムである。統計をあげるため、波高値の異なる波形をピー ク値が 2000ch になるように重ねてある。複数のピークがある場合は、最初のピークを 2000ch に規格化し ている。



グラム(高ゲイン)

図 4.12: ²⁴¹Am 照射により得た EJ204 の波形ヒスト 図 4.13: ²⁴¹Am 照射により得た EJ299 の波形ヒスト グラム(高ゲイン)



図 4.14: ¹³⁷Cs 照射により得た EJ204 の波形ヒストグ 図 4.15: ¹³⁷Cs 照射により得た EJ299 の波形ヒストグ ラム(低ゲイン) ラム(低ゲイン)

各波形の 25sample 点以降、特に 35 sample あたりでパイルアップが起こっているように見えている。こ の原因を調べるために、図 4.16、4.17 はそれぞれ EJ204、EJ299 をつけた PMT の出力波形をオシロスコー プで取得した。その結果、このパイルアップは決まったタイミングで起こることが多く、イベント波形の立 ち上がりからある一定時間遅れて、アフターパルスが現れてることが確認できた。



図 4.16: EJ204 をつけた PMT のダイノード出力波形 図 4.17: EJ299 をつけた PMT のダイノード出力波形



図 4.18: ²⁴¹Am 照射実験でフライト用検出器によって 図 4.19: ²⁴¹Am 照射実験でフライト用検出器によって 得た EJ204 の波形ヒストグラム (CH1) 得た EJ204 の波形ヒストグラム (CH10)

波形の比較は、それぞれの波形を積算したヒストグラムをイベント数で割ってから、2つのヒストグラム どうしを差し引く方法をとった。まず PMT のゲインの違いによる差を調べるために、高ゲインの状態と低 ゲインの状態で¹³⁷Cs を照射した際に取得した波形のうち、500 keV 付近の波形を比較した。図 4.20、4.21 は低ゲインの波形から高ゲインの波形を差し引いた後の各シンチレータの波形ヒストグラムである。どち らのシンチレータについても、ゲインによる大きな波形の差はなく、低ゲインの設定、すなわちコントロー ル電圧+3.0 V(実効的な PMT 間高圧は 750 V)で測定を実施することにした。



図 4.20: 引き算後の EJ204 の波形ヒストグラム (¹³⁷Cs 図 4.21: 引き算後の EJ299 の波形ヒストグラム (¹³⁷Cs 照射, 低ゲイン-高ゲイン) 照射, 低ゲイン-高ゲイン)

次に高ゲインの設定で、²⁴¹Am と¹³⁷Cs をそれぞれ照射した際に取得した 60 keV 付近の波形ヒストグ ラムを比較した。これによって光量の違いによる波形の差を確認する。それぞれのシンチレータについて 差し引きを行い、図 4.22、4.23 を得られた。どちらのシンチレータにおいても、²⁴¹Am を照射時の波形が 減衰が速いことが確認された (黄色)。EJ204 では約 40 ns、EJ299 ではピーク位置で約 70-80 ns の差が見 られた。²⁴¹Am のエネルギー分解能 50 %で、予想される検出光子数は約 55 個/60 keV である。そのため 寄与の小さい減衰時定数の長い成分は統計揺らぎで放射されることがあるためと考えられる。一方で¹³⁷Cs のように光量が多く、光子を次々に放射する確率が高い場合は、波形の減衰の仕方がなだらかになる。



図 4.22: 高ゲイン設定での測定について、引き算後の 図 4.23: 高ゲイン設定での測定について、引き算後の EJ204の波形ヒストグラム (²⁴¹Am 照射 - ¹³⁷Cs 照射) EJ299の波形ヒストグラム (²⁴¹Am 照射 - ¹³⁷Cs 照射)

次に PoGO+の検出器を用いて、²⁴¹Am 照射によるキャリブレーションにおいて各検出器で取得した波 形と、本実験で使用する EJ204 に ²⁴¹Am を照射した際に取得した波形を比較した。この比較からシンチ レータの大きさによって差がどれほど生じるのか調べる。PoGO+は Fast プラスチックシンチレータ 12 cm + BGO4 cm の 16 cm の長さ、本研究では 1 × 1 × 1.5 cm³ のサイズである。図 4.24 から 4.27 は、フライ ト用検出器のうち 0、10、20、30 番と本実験で使用する EJ204 で取得した波形を比較した結果である。本 実験の PMT のゲイン調整用に取得した波形では、アフターパルスの影響が大きくなっている(黄色)が、 立ち上がり部分では 10 ns 程度ピーク位置では、大きいもので 50 ns の差が生じる (オレンジ色) ことを確 認した。これは大きいシンチレータでは、光子の PMT 到達時間に幅が生じるためと考えられる。



図 4.24: 高ゲイン設定、²⁴¹Am 照射実験について、引図 4.25: 高ゲイン設定、²⁴¹Am 照射実験について、引 本実験用 EJ204)



き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器 No.0 - き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器 No.10 - 本実験用 EJ204)





図 4.26: 高ゲイン設定、²⁴¹Am 照射実験について、引図 4.27: 高ゲイン設定、²⁴¹Am 照射実験について、引 き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器 No.20)き算後の波形ヒストグラム (フライト用検出器 No.30) - 本実験用 EJ204) - 本実験用 EJ204)

中性子ガンマ線照射の実験結果 4.3

以下では工学部での2日間の実験(2017/1/56)において、²⁴¹Am⁹Be線源を用いて高速中性子、¹³⁷Cs 線源でガンマ線の信号波形を取得した結果について述べる。実験は以下の手順で行った。高エネルギー側と は、500 keV 付近、低エネルギー側とは 60 keV 付近である。

- 1. PMT を低ゲインに設定し、高エネルギー側のバックグラウンド測定を行った (線源なし、鉛シールドのみ)
- PMT を低ゲインの状態で²⁴¹Am⁹Be 線源を組み上げた鉛シールドに設置し、高エネルギー側の高速 中性子の測定を行った
- 3. PMT を高ゲインに設定し、低エネルギー側のバックグラウンド測定を行った
- 4. PMT を高ゲインの状態で²⁴¹Am⁹Be 線源を組み上げた鉛シールドに設置し、低エネルギー側の高速 中性子の測定を行った
- 5. PMT を高ゲインの状態で¹³⁷Cs を照射し、低エネルギー側のガンマ線測定を行った

6. PMT を低ゲインに設定して¹³⁷Cs を照射し、高エネルギー側のガンマ線測定を行った

4.3.1 高エネルギー側 (500 keV 付近) のバックグラウンド測定

PMT のゲインは 4.2.3 で予め決めたように、EJ204 の方を+3.00V、EJ299 の方を+3.20V に設定した。 測定時間は約 3 時間である。図 4.28、4.29 は、各シンチレータで取得した波高値のヒストグラムである。



図 4.28: バックグラウンド測定において EJ204 で取 図 4.29: バックグラウンド測定において EJ299 で取 得した波高値ヒストグラム(低ゲイン) 得した波高値ヒストグラム(低ゲイン)

EJ204、EJ299のバックグラウンドレートは、それぞれおよそ 0.11 Hz、3.9 Hz であり、ほぼ退席に比例 している。中性子とガンマ線を比較するエネルギー範囲 (500 keV) はおよそ 500ch 付近である。

4.3.2 高エネルギー側 (500 keV 付近)の高速中性子測定

PMT のゲインは変えず、²⁴¹Am⁹Be 線源を置き、測定を行った。測定時間は約2時間である。図 4.30、 4.31 は各シンチレータで取得した典型的な波形の一例である。



図 4.30: 低ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 図 4.31: 低ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 形の典型例 (EJ204) 形の典型例 (EJ299)

図 4.32、4.33 は、波高値をヒストグラムに詰めたエネルギースペクトルである。比較する 500 ch 付近 (500 keV) では、バックグラウンドは1桁レートが低めで、無視する。



図 4.32: 低ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得したエ 図 4.33: 低ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得したエ ネルギースペクトル (EJ204) ネルギースペクトル (EJ299)

さらに取得した波形のうち、500 keV±200 keV(300 700 keV) のイベントの波形を重ねた波形を重ねた ヒストグラムが、図 4.34、4.35 である。波形を重ねた時点で、EJ299 においては、立ち上がりおよび減衰 が速い成分と遅い成分が分かれている様子が見られた。



図 4.34: 低ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 図 4.35: 低ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 形ヒストグラム (EJ204) 形ヒストグラム (EJ299)

4.3.3 低エネルギー側 (60 keV 付近) のバックグラウンド測定

PMT のゲインを上げるため、EJ204、EJ299 のコントロール電圧を+4.50 V、+4.90 V に設定した。線 源を置かず、鉛シールド内でバックグラウンド測定を 8 時間行った。図 4.36、4.37 は、各シンチレータで 取得した波高値のヒストグラムである。



図 4.36: バックグラウンド測定において EJ204 で取 図 4.37: バックグラウンド測定において EJ299 で取 得した波高値ヒストグラム(高ゲイン) 得した波高値ヒストグラム(高ゲイン)

EJ204、EJ299のバックグラウンドレートは、それぞれおよそ 3.0 Hz、3.5 Hz であった。

4.3.4 低エネルギー側 (60 keV 付近)の高速中性子測定

次に PMT のゲインを変えず、²⁴¹Am⁹Be を照射し、高速中性子の測定を行った。測定時間は約5時間で ある。図 4.38、4.39 は各シンチレータで取得した典型的な波形の一例である。



図 4.38: 高ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 図 4.39: 高ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 形の典型例 (EJ204) 形の典型例 (EJ299)

図 4.40、4.41 は、波高値をヒストグラムに詰めたエネルギースペクトルである。どちらのシンチレータ についても、高速中性子の連続成分が確認できる。本実験では、事前に²⁴¹Am を照射し PMT のゲインを調 整したように、60 keV 付近を低エネルギー範囲とし、波形の比較を行うこととする。これらのスペクトル では、1500 ch 付近が 60 keV に相当する。今回もバックグラウンドの寄与は1割以下であるため無視する。



図 4.40: 高ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得したエ 図 4.41: 高ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得したエ ネルギースペクトル (EJ204) ネルギースペクトル (EJ299)

さらに取得した波形のうち、60 keV 付近のイベントの波形を重ねた波形を重ねたヒストグラムが、図 4.42、4.43 である。パイルアップしているように見える波形については、一部は本実験前に確認していた PMT のアフターパルスであると考えられる。光量が多く、メインの信号の波高値が低いため、波高の低い アフターパルスまで寄与が見えている可能性がある。



図 4.42: 高ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 図 4.43: 高ゲイン設定、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波 形ヒストグラム (EJ204) 形ヒストグラム (EJ299)

4.3.5 高エネルギー側 (500 keV 付近) のガンマ線測定

次に PMT のゲインを下げ、¹³⁷Cs 照射し、500 keV 付近の高エネルギー側でガンマ線データを取得した (引き続き PMT が鉛シールドの中)。測定時間は約 10 分間である。図 4.44、4.45 は、各シンチレータで取 得した典型的な波形の一例である。



図 4.44: 低ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形の 図 4.45: 低ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形の 典型例 (EJ204) 典型例 (EJ299)

図 4.46、4.47 は、波高値をヒストグラムに詰めたエネルギースペクトルである。PMT のゲイン決定の ために、4.2.3 で ¹³⁷Cs を照射した際と同様に、500 ch 付近にコンプトンエッジが確認できる。



図 4.46: 低ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得したエネル 図 4.47: 低ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得したエネル ギースペクトル (EJ204) ギースペクトル (EJ299)

さらに取得した波形のうち、500 keV 付近のイベントの波形を重ねた波形を重ねたヒストグラムが、図 4.48、4.49 である。



図 4.48: 低ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形ヒ 図 4.49: 低ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形ヒ ストグラム (EJ204) ストグラム (EJ299)

4.3.6 低エネルギー側 (60 keV 付近) のガンマ線測定

再び PMT のゲインを上げ、¹³⁷Cs 照射し、60 keV 付近の低エネルギー側でガンマ線データを取得した。 測定時間は約 10 分間である。図 4.50、4.51 は、各シンチレータで取得した典型的な波形の一例である。



図 4.50: 高ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形の 図 4.51: 高ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形の 典型例 (EJ204) 典型例 (EJ299)

図 4.52、4.53 は、波高値をヒストグラムに詰めたエネルギースペクトルである。飽和しているイベント が多いが、低エネルギー範囲の連続成分が見えている。



図 4.52: 高ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得したエネル 図 4.53: 高ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得したエネル ギースペクトル (EJ204) ギースペクトル (EJ299)

さらに取得した波形のうち、60 keV 付近のイベントの波形を重ねた波形を重ねたヒストグラムが、図 4.54、4.55 である。



図 4.54: 高ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形ヒ 図 4.55: 高ゲイン設定、¹³⁷Cs 照射で取得した波形ヒ ストグラム (EJ204) ストグラム (EJ299)

4.3.7 高速中性子とガンマ線の波形弁別確認

各測定で取得した波形について、高速中性子とガンマ線の比較を行う。比較は、4.2.3 章で行ったものと同様に、イベント数で規格化した波形ヒストグラムどうしの引き算を行い、その差を確認する。最初に PMT のゲインを上げた状態で、低エネルギー範囲 (60 keV) での比較を行う。図 4.56、4.57 は、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波形ヒストグラムから¹³⁷Cs 照射で取得した波形ヒストグラムを差し引いた比較である。



図 4.56: 高ゲイン設定、EJ204の波形ヒストグラムの差(図 4.42 - 図 4.54)右: 拡大図



図 4.57: 高ゲイン設定、EJ299 の波形ヒストグラムの差(図 4.43 - 図 4.55)右: 拡大図

Z軸のマイナス側(青色)に現れる波形がガンマ線の波形から、プラス側に現れる波形(赤色)が高速中性 子の波形で相対的に強い成分である。EJ204については、高速中性子の方が立ち上がりから徐々に遅れピー ク及び減衰が約150 ns 遅れていることが確認できた。EJ299については、アフターパルスの影響が大きい ため、差がわかりいにくいが、ピークに達するまでの時間が遅れているため、立ち上がりについては差を確 認できた。

次に PMT のゲインを下げた状態で測定した、高エネルギー側 (500 keV 付近) の高速中性子とガンマ線 の比較を行う。図 4.58、4.59 は、²⁴¹Am⁹Be 照射で取得した波形ヒストグラムから ¹³⁷Cs 照射で取得した波 形ヒストグラムを差し引いた比較である。



図 4.58: 低ゲイン設定、EJ204の波形ヒストグラムの差(図 4.34 - 図 4.48)右: 拡大図



図 4.59: 低ゲイン設定、EJ299の波形ヒストグラムの差(図 4.35 - 図 4.49)右: 拡大図

EJ204、EJ299のどちらについてもガンマ線と高速中性子の差を確認できた。とくに EJ299 について は、立ち上がりで大きく差が見えており、ピークに達するまでの時間差は約100 ns であることがわかった。 EJ204 については、EJ299 に比べて差がわかりにくいが、減衰部分で約 50 ns の差が確認できた。立ち上が りについては、さらに差が小さくなり、およそ 30 ns の差であった。

次に PoGO+の検出器でフライト前に ²⁴¹Am を照射したキャリブレーションで取得した波形と今回の高 速中性子を照射した際の波形を比較した。どちらも PMT のゲインは高く設定した状態 (60 keV) である。 フライト検出器と工学部実験のガンマ線どうしの比較がすでに図 4.24 から 4.27 に示したようにシンチレー タのサイズが大きいことで、光量の低いフライト検出器の方が減衰が速い。また工学部実験のガンマ線と中 性子の比較から中性子の比較から中性子の減衰が遅い。よってフライト検出器のガンマ線は、工学部実験の 中性子よりも減衰が近いはずである。実際に図 4.60 から 4.63 は本実験で ²⁴¹Am⁹Be を照射した際の波形を イベント数で規格化ものから、PoGO+検出器の地上キャリブレーションでの波形をイベント数で規格化し たもの差し引いた結果である。PoGO+のSDCは61本あるが、ここでは一部のユニットのみについて載せ る。上記の推定通りに、立ち上がり部分では差が見られないが、減衰部分では約150 ns の差が確認できた。



Waveform samples(EJ204) ,2200 0.003 န္<u>ဘ</u>100 0.002 ၓိုးစစ ₹ 1900 0.001 . E1800 A 700 , 1600 -0.001 1500 -0.002 1400 1300 -0.003 1200 20 10 15 25 30 Sample number

照射 - ²⁴¹Am 照射)

図 4.60: 高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリ 図 4.61: 高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリ ブレーション (検出器 No.0) での波形の差 (²⁴¹Am⁹Be ブレーション (検出器 No.10) での波形の差 (²⁴¹Am⁹Be 照射 - ²⁴¹Am 照射)



図 4.62: 高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリ 図 4.63: 高ゲイン設定、本実験と PoGO+の地上キャリ 照射 - ²⁴¹Am 照射)

ブレーション (検出器 No.20) での波形の差 (²⁴¹ Am⁹ Be ブレーション (検出器 No.30) での波形の差 (²⁴¹ Am⁹ Be 照射 - ²⁴¹Am 照射)

本実験により、中性子/ガンマ線の弁別用シンチレータとして市販されている EJ299 だけでなく、PoGO 実験で利用している EJ204 にもある程度の波形弁別能力があることがわかった。同じサイズのシンチレータ であれば、ピークに達するまでの時間差は EJ299 で 50 ns、EJ204 で 80 ns である。ただしサイズが異なる と、常に立ち上がり部に差が生じる。また PMT ごとのアフターパルスなどの個性も波形に影響を与える。 よってフライト検出器の波形弁別の最適化は、フライト検出器自身で取得したデータで行うことにする。

第5章 2016年フライトデータ解析

5.1 2016 フライト概要

PoGO+プロジェクトは、2013年にパスファインダーフライトを行った PoGOLite の改良版として、2016年にフライトを行った。7月12日にスウェーデンのキルナにあるスウェーデン宇宙公社(SSC)から放球し、7月18日にカナダのビクトリア島に達し、7日間のフライトを終えた。図 5.1 は放球直後の気球である。フライトにおいて、気球は図 5.3 にような軌跡を通った。本フライトでは、2013年のフライトから改良された検出器や読み出しシステム(本研究の担当項目については3章参照)を搭載した。フライト中はかに星雲や Cyg X-1 の観測を行った。この章では、本フライトで取得したデータについて検出器の動作の健全性を確認した後、ガンマ線と高速中性子の波形弁別を中心に述べる。



図 5.1: 放球直後の気球



図 5.2: フライト中のゴンドラからの撮影 [4]



図 5.3: 2016 年フライトの軌跡 [4]

5.2 データの健全性確認

フライトで取得したデータを確認し、読み出しシステムが正常に動作したことの確認を行った。

5.2.1 ヒストグラムデータ

2.3 で述べたように、ヒストグラムデータは各検出器が正常に動作しているかの健康状態を確認するため に、生成されている。ここではヒストグラムデータを確認することで、データの健全性を確かめた。

フライト中のデータファイルは、6分ごとに生成されている。図 5.4 は、例としてひとつのデータフファ イルでの検出器毎に、ヒストグラムデータに保存されたイベント数をプロットしている。



Events in different units

図 5.4:6 分測定中の全検出器のイベント数ヒストグラム

横軸の 0 から 60 までが SDC のイベント数、61 から 90 までが SAS のイベント数、91 と 92 が熱中性子 検出器のイベント数である。全検出器が動作し、イベントを出力していることが分かる。赤色が全イベン ト、紫色が 3000 ADC 以上のイベント数である。紫色では、SAS の方がイベント数が多い。これは SAS に 使われている BGO のシールドは、SDC よりシンチレータが長いため、高いエネルギーを落とす宇宙線の イベント数を反映していると考えられる。一方で水色の方は、PMT の熱ノイズによる1光子イベントも含 まれており、SDC と SAS ではより差が見られない。

また検出器ごとのエネルギースペクトルが、図 5.5、5.6 である。6 本のヒストグラムは、それぞれ6分 間測定の中で1分ごとのデータである。SAS のエネルギーヒストグラム(図 5.5)では、バックグラウンド となる宇宙線などの対消滅した 511 keV のピークが見える。また熱中性子検出器のヒストグラム(図 5.6) では、800 ch 付近に 511 keV、1800 ch 付近に熱中性子を検出したピークが見られる。エネルギーヒストグ ラムでは、1分ごとのヒストグラムの間で 511 keV のピークとなる ADC チャンネルが変化していないこと が確認でき、ゲインが観測中に大きく変動していないことがわかった。



図 5.5: SAS のうちの 1ch のエネルギーヒストグラム 図 5.6: 熱中性子検出器のエネルギーヒストグラム

5.2.2 波形保存

SDC や熱中性子検出器で保存された波形を確認し、波形データが正常に保存されていることを確認した。 図 5.7 は、保存された SDC の波形の例である。想定通り 50 サンプルが保存されている。0 10 サンプルが 信号検出前の回路のオフセットを示しており、ピーク値から差し引くことで、この波形で検出した。信号の 波高値は、700 - 350 = 350 ADC と求まる。サンプリングレートは、SDC も SAS も同じ 10 ns/sample で ある。



図 5.7: SDC の波形の一例

5.3 熱中性子モニターのデータ解析

5.3.1 熱中性子-ガンマ線波形弁別

2.2.2 章で述べたように、熱中性子検出器は、上下を BGO シンチレータで挟んだ構造をしており、データには熱中性子を LiCAF で検出したイベントの他に BGO が検出したイベントも存在している。熱中性子 モニターの波形の例は、図 5.8 である。保存された波形の中から LiCAF のイベント抜き出すには、LiCAF と BGO シンチレータの減衰時定数の違いを利用する。原理は図 3.27 のように、時間を遅らせた波高値を比較し、その値によって弁別する。波形弁別するために、オフセットから 6 点後の波高値を Fast output とす る。またオフセットから 25 点後の波高値を Slow output とする。縦軸を Slow output、横軸を Fast output とすると、図 5.9 が作成できる。立ち上がりが遅いほど、Fast output に対して、Slow output の値が大き くなるため、赤い線から左にできる branch が LiCAF で検出されたイベントであり、熱中性子のイベント と判断できる。(Fast,Slow) = (600,1500) に見られる構造が熱中性子の核捕獲イベントに対応する



図 5.8: 熱中性子検出器で取得した波形



図 5.9: 波形の立ち上がり部分の計算から得られるヒ ストグラム

5.3.2 熱中性子カウントレート

BGO シールドでのイベントとの波形弁別によって、熱中性子イベントのみを抜き出し、カウントレートの変動を調べた。6分毎に生成されるデータファイルごとにカウントレートを求め、その変動をヒスト グラムにしたものが図 5.3.2、拡大したものが図 5.11 である。赤色、青色のプロット点は搭載されている 2台の LiCAF についての値である。データ点がない部分は、7日間の間に検出器や読み出し回路の電源の OFF/ON を行った時間帯である。カウントレートはおよそ 12 Hz で、徐々に 1 Hz 上昇していることがわ かった。また約 24 時間周期で 0.5 Hz の細かい変動があることもわかった。

地球の持つ磁場は、南極の地磁気極から出て、北極の地磁気極に入る形になっている。地球に到来した 荷電粒子は、磁場方向にしたがって地球に降ってくるため、北南極の地磁気極に集まってくる。そのため地 磁気極に近づくにつれて、荷電粒子のフラックスも多く、その結果大気と反応し大気中性子の量も多くな る。したがってカウントレートが徐々に変動している原因は、ゴンドラの軌道が徐々にカナダに位置する地 磁気極に近づいているためであると考えられる。


図 5.10: LiCAF によって検出された熱中性子のカウントレートの変動(横軸: MJD、縦軸:カウントレート)



Count Rate of LiCAF1 and LiCAF2

図 5.11: 図 5.3.2 と同じプロットを縦軸のみ拡大した図

バックグラウンドレートは、高度によって変化することがわかっている([12])。図 5.12 は、2014年に熱

中性子検出器 (LiCAF) を搭載した PoGOLino が大気中性子の観測を行った際の、高度と大気中性子レートの関係を示している高度との相関を確認した。

また 2016 年のフライトでも図の最初に俸給直後の上昇中はレートが上昇していることが見てとれる。しかしピークにい達した後は高度 40 km でもほぼ 11 12 Hz で一定値であり、PoGOLino の 5 Hz よりも約 2 倍高い点が異なる。地上から上空 15 km までは中性子レートは上昇し、pfotzer 最大を越えるとゆるやかに減少に転じている。PoGO+の高度と大気中性子レートの関係を示している。

2013年のフライトでの大気中性子レートは、図??に示したような変動をしている。PoGO+では、2013年のフライト時にあった熱中性子検出器周りのポリエチレンシールドの隙間をポリエチレンで塞いだ。こうしたポリエチレンシールドの差や太陽活動に起因して、熱中性子のカウントレートにどれだけの差が生じるのかは、チーム内で検討中である。なお PoGOlite では、高度がピークに達した後では、平均レートは 2.5 Hz であり、今回は約4倍レートが高い。



図 5.12: 2013 年の大気中性子観測時のバックグラウンドレートと高度の関係 [12]



図 5.13: 2016 年フライト時の熱中性子カウントレートと高度の関係 (赤:LiCAF1、緑:LiCAF2、シアン: 高度)

5.4 中性子-ガンマ線波形弁別

5.4.1 波形の領域ごとの弁別

4章で調べたように、PoGO+で利用している EJ204 プラスチックシンチレータと中性子とガンマ線で は、出力波形が異なる。ただしシンチレータのサイズ、PMT の個性により波形が異なることもわかったた め、ここではフライトデータ中の高速中性子の弁別のために、フライト前に行った²⁴¹Am の照射によるキャ リプレーションで取得した波形を比較対象とする。荷電粒子イベントはアクティブシールドで除去される ので、フライトデータで残っているバックグラウンドは、ほとんどが高速中性子に起因すると考えられる。 よって良い弁別条件とは、地上で取得したガンマ線データはなるべく残し、フライト中のバックグラウンド 観測のデータはなるべく除去するものである。またシンチレーション光子数が多いほど、波形の統計ゆらぎ が小さくなるため、波形弁別はエネルギーが高いほど精度が高いと予想される。本研究では PoGO+の最も エネルギーが高い帯域の 60-80 keV にエネルギー範囲を絞って弁別を行った。また SDC は 61 本であるが、 ユニットのゲインなどの個性を考慮し、1 ユニットごとに弁別を行うことにした。以下の結果は、61 本の SDC のうち中心に設置された 1 ユニットの値である。

図 5.14、5.15 は、フライトでバックグラウンド観測中及び地上キャリブレーションでの波形ヒストグラムである。典型的な波形を抽出するため、パイルアップ(アフターパルスも含む)のためにオフセットに テールがあったり、後半で別の信号が見えているような波形は除去してある。



図 5.14: 地上キャリブレーションでの波形ヒストグ 図 5.15: フライトデータ (バックグラウンド観測中)の ラム 波形ヒストグラム

これらのヒストグラムに詰まっている波形一つずつについて、ガンマ線イベントか高速中性子イベント か判定できる条件を調べる。弁別は、波形の1.立ち上がり部分、2. ピークになる sampling 点、3. 減衰部分 にそれぞれ制限をつけることで行う。利用する波形の数は地上ガンマ線データ 4008 個、フライト中のバッ クグラウンドデータ 3005 個である。

1. 立ち上がり部分は、ある sampling 点での波高値が条件となる。高速中性子のように遅い立ち上がり であれば、同じ sampling 点で波高値を比較したときに、高速中性子の放が低い波高値のはずである。逆に ガンマ線の方が高いはずである。図 5.16 から 5.29 は、14sample から 23sample での波高値の分布につい て、フライトデータと地上キャリブレーションデータで比較した結果である。14sample の図 5.16 では、地 上キャリブレーションの方がすでに平均 1650 ADC まで達しているのに対し、フライトデータは遅いため まだ平均 1580ADC にしか達していないことが分かる。14 23sample までの推移を見ると、14sample では まだ両方とも平均 1600ADC ほどであるが、23sample では、平均も 2000ADC に近く、ほとんどがピーク に達している。これらの中から、なるべくガンマ線(地上キャリブレーション)と中性子(フライトバック グラウンド)の差が大きい sample を弁別に利用したい訳である。



図 5.16: 14sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ 図 5.17: 15sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ ブレーション、青:フライト)



Wave Height at sample17(GroundCal,60-80 keV) hist_heightsample17 3005 Entries Mean 1927 10² RMS 59.2 hist_heightsample17 4008 Entries Mean 1963 RMS 37.99 10 2000 (ADC channels)

Wave Height at sample15(GroundCal,60-80 keV)

վն

ADC chan

2000 (ADC channels)

(ele

図 5.18: 16sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ 図 5.19: 17sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ ブレーション、青:フライト) ブレーション、青:フライト)



図 5.20: 18sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ 図 5.21: 19sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ ブレーション、青:フライト) ブレーション、青:フライト)

10



ブレーション、青:フライト)

hist_heightsample15

hist_heightsample15

3005

1776

100.9

4008

1836

72.17

Entries

Entries

Mean

RMS

Mean

RMS

102 102

10 ŧ

10



ブレーション、青:フライト)



図 5.22: 20sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ 図 5.23: 21sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ ブレーション、青:フライト)



Wave Height at sample21(GroundCal,60-80 keV) \$103 hist_heightsample21 Entries 3005 Mean 1974 RMS 29.31 10² hist_heightsample21 Entries 4008 Mean 1983 10 RMS 15.33 10-1 2000 (ADC channels) 1800 1900 1950

図 5.24: 20sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ 図 5.25: 21sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ ブレーション、青:フライト) ブレーション、青:フライト)



ブレーション、青:フライト)



図 5.26: 20sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ 図 5.27: 21sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ ブレーション、青:フライト)



図 5.28: 22sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ 図 5.29: 23sample での波高値の分布 (赤:地上キャリ ブレーション、青:フライト) ブレーション、青:フライト)

2. ピークになる sampling 点は、立ち上がりが遅い高速中性子の方がピークの位置が後ろになるはずである。図 5.30 は、波形のピークに達する sampling 点の分布である。



Peak Sample(60-80 keV, 0ch)

図 5.30: 波形のピークに達する sampling 点の分布 (赤:地上キャリブレーション、青:フライト)

3. 減衰部分では、ある波高値に減衰するまでの時間で弁別する。高速中性子はガンマ線よりシンチレーションが遅い時間まで発光され続けるため、ピークを経て減衰するのにも時間がかかる。図 5.31 から図 5.40 は、各波形の減衰部分である波高値を下回るまでの sample 点の分布である。中性子の方が減衰が遅いため、後ろの sample 点に多く分布するはずである。



図 5.31: 減衰部分で 1900ch の波高値に達する sample 図 5.32: 減衰部分で 1910ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト) 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト)



図 5.33: 減衰部分で 1920ch の波高値に達する sample 図 5.34: 減衰部分で 1930ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト) 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト)



図 5.35: 減衰部分で 1940ch の波高値に達する sample 図 5.36: 減衰部分で 1950ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト) 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト)



図 5.37: 減衰部分で 1960ch の波高値に達する sample 図 5.38: 減衰部分で 1970ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト) 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト)



図 5.39: 減衰部分で 1980ch の波高値に達する sample 図 5.40: 減衰部分で 1990ch の波高値に達する sample 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト) 点の分布 (赤: 地上キャリブレーション、青: フライト)

立ち上がり、ピークの位置、減衰部分での弁別は、上記の各ヒストグラムに閾値をつけ、その閾値を超 えたイベントを中性子と判定し、全イベントの中で中性子と判定されたイベントの割合を、フライトデー タと地上キャリプレーションデータについて求めた。

立ち上がり部分の弁別では、14sample から 23sample のどれが弁別に適しているかを調べる際に、フラ イトデータを最も除去し、地上データを最小しか除去しないように、各 sample では両者の交差 (図の赤と 青色の交差)を閾値とした。各 sample で、表 5.1 のように結果となった。ピークの位置での弁別では、数 個の閾値を設定した結果、表 5.2 のような結果となった。減衰部分での弁別では、1950ch から 1990ch まで のどこまで減衰するのを弁別に適しているか判定するために、立ち上がり時と同時に各 ADC 値内では、両 者の交差を閾値とした。表 5.3 の結果となった。

こうして3種類のセレクションの中で、それぞれ最も中性子イベントを除去でき、ガンマ線イベントを 残す条件として、立ち上がり部分では16sample、ピークの位置では24sample、減衰では1970chを選んだ。 これら3つを組み合わせて弁別した結果は、表5.5になった。この判定では、パターン8が3種類のセレク ションのどれにも中性子と判定されない、すなわちもっともガンマ線らしいと判定されることに対応する。

結果として、パターン8のみをデータ解析に利用すると、フライトデータでは約45%、地上キャリブレー

sample 点	閾値 [ch]	中性子と判定されたイベントの	中性子と判定されたイベントの	中性子イベントの比率
		割合 [%](フライト)	割合 [%](地上)	(フライト/地上)
14	1550	39	18	2.2
15	1770	43	18	2.4
16	1870	42	14	3.0
17	1920	39	13	3.0
18	1930	28	7.1	3.9
19	1940	23	5.6	4.1
20	1960	25	8.3	3.0
21	1960	25	5.3	4.7
22	1950	10	2.0	5.0
23	1940	5.4	0.80	6.8

表 5.1: 立ち上がり部分での弁別結果

閾値 [sample]	中性子と判定されたイベントの	中性子と判定されたイベントの	中性子イベントの比率
	割合 [%](フライト)	割合 [%](地上)	(フライト/地上)
20	70	47	1.5
21	56	33	1.7
22	42	22	1.9
23	35	14	2.5
24	26	8.7	3.0

表 5.2: ピーク位置での弁別結果

ADCch	閾値 [smple]	中性子と判定されたイベントの	中性子と判定されたイベントの	中性子イベントの比率
		割合 [%](フライト)	割合 [%](地上)	(フライト/地上)
1950	32	33	20	1.1
1960	34	25	7.8	3.2
1970	31	29	10	2.5
1980	29	29	10	2.9
1990	28	21	6.0	3.5

表 5.3: 減衰部分での弁別結果

パターン	立ち上がり	ピーク	減衰	このパターンに合致した	このパターンに合致した
				割合 [%](フライト)	割合 [%](地上)
1	N	N	N	14	1.6
2	Ν	Ν	G	6.5	2.0
3	G	Ν	N	3.2	1.6
4	Ν	G	Ν	0.0	0.0
5	Ν	G	G	16	9.2
6	G	Ν	G	2.7	3.4
7	G	G	N	7.3	6.1
8	G	G	G	45	75

N:条件によって中性子と判定された場合、G:条件によってガンマ線と判定された場合

表 5.4: 条件の組み合わせによる判定結果

ションデータでは約75% がガンマ線であると判定された。つまりフライトデータは、55% を中性子起因の バックグラウンドとして除去できた。その際、ガンマ線データは25% しか失わずにすんでいる。現在、チー ム内で行われている解析では、およそ Signal: Noise = 15:85 の割合となっている。本研究で行った弁別 方法を取り入れることで、Signal: Noise = 11:38 の割合に改善できると考えられる。

5.4.2 弁別の閾値の最適化

5.4.1 章では、各パラメータの閾値をおおまかに決めた。しかしより MDP を改善するために閾値を網羅 的に調べ、MDP が最も改善する値を調べた。最適な閾値を求めるために、MDP について現状の解析での MDP と今回の弁別を加えた後の MDP の比の値をそれぞれのセレクションについて求めた。図 5.41 は、立 ち上がり部分でのセレクションについて、閾値を変えたときの MDP のセレクション前後の値の比をプロッ トした結果である。Z 軸の値が大きいほど MDP が改善されていることを示している。このセレクションで は、16sample の波高値が 1863ch 以下のイベントを中性子イベントと判定するときに MDP が最も改善さ れることがわかった。



図 5.41: 立ち上がり部分でのセレクションで閾値による MDP の分布(セレクション前の MDP/セレクション後の MDP) 右:拡大図

図 5.42 は、ピーク位置でのセレクションについて、図 5.43 は、減衰部分でのセレクションについて、 閾値によるセレクション前後の MDP の値の比をプロットした結果である。ピーク位置のセレクションで は、ピークになる sample が 26sample 以上の波形を中性子イベントと判定する場合に MDP が最も改善さ れることがわかった。また減衰部分でのセレクションでは、2000ch から減衰し、1950ch に達する sample が 35sample 以上である波形を中性子イベントとみなすときに、MDP が最も改善されることがわかった。



図 5.42: ピークでのセレクションで閾値による MDP 図 5.43: 減衰部分でのセレクションで閾値による MDP の分布(セレクション前の MDP/セレクション後の の分布(セレクション前の MDP/セレクション後の MDP) MDP)

各パラメータで最適な閾値を求めたため、3 種類の値を組み合わせた結果を調べた (表 5.5)。全ての弁別 で、ガンマ線と判定された場合 (パターン 8) の割合は、フライトデータが 45%、地上キャリブレーション データで 79% となった。

これにより、Signal:Noise=12:38 となる。そしてこの弁別によって、MDP は現状の値から 12% 改善されることが予想される。

パターン	立ち上がり	ピーク	減衰	このパターンに合致した	このパターンに合致した
				割合 [%](フライト)	割合 [%](地上)
1	N	N	N	11	1.0
2	Ν	Ν	G	4.1	1.2
3	G	Ν	N	2.7	1.0
4	Ν	G	Ν	0.0	0.0
5	Ν	G	G	16	8.3
6	G	Ν	G	2.0	2.1
7	G	G	N	12	6.4
8	G	G	G	45	79

N:条件によって中性子と判定された場合、G:条件によってガンマ線と判定された場合

表 5.5: 条件の組み合わせによる判定結果

5.4.3 テンプレートによる波形弁別

弁別のパラメータをさらに微調整し、なるべく多くの sample 点を使って波形弁別の精度を上げるため に、波形テンプレートを作成することによる弁別を行った。波形データには、パイルアップや PMT のア フターパルスが起こっているイベントも含まれているため、5.4.1 章と同様に、そのようなイベントを除い て典型的なイベントのみで、テンプレートを作成した。テンプレートと各イベントの波形を比較し、その χ^2 の値によって、ガンマ線であるか中性子であるかを判定する。図 5.44、5.45 は、それぞれ地上キャリブ レーションデータとフライトデータで作成したテンプレートである。



図 5.44: 地上キャリブレーションデータ(ガンマ線)図 5.45: フライト中バックグラウンド観測データ(主のテンプレート に高速中性子)のテンプレート

 χ^2 の計算の際には、以下の2点に注意した。

(1) 波形の中には波高値を 2000ch に規格化した際に、数 sample にわたって 2000ch に張り付くものも ある。さらにテンプレートの上側のエラーが値が小さくなっているため、2000ch に張り付くような波形の χ^2 は大きくなってしまう。そのため 18sample から 26sample の間で、2000ch の値になるイベントは、そ のサンプルでの χ^2 の値を 0.1 とした。また 0 から 11sample、48、49sample は χ^2 の計算には含めていな い。0 11 はオフセットであり、中性子かガンマ線イベントに影響しない。最後の 48、49sample は、波形の 立ち上がり位置を規格化する際に存在しない波形が生じるためである。バックグラウンド観測中のフライ トデータと地上キャリブレーションデータでそれぞれ χ^2 を計算したところ、以下のような結果となった。 図 5.46、5.47 は、地上キャリブレーションデータについて、2 つのテンプレートと比較した場合の 50sample

それぞれの sample 位置での χ^2 の値の分布である。本来とは異なるフライトデータのテンプレートでは、 13 19sample、25sample 以降で χ^2 が大きくなっており、先の解析で見た立ち上がり、ピーク位置がガンマ 線と中性子で異なることが現れている。



図 5.46: 地上キャリブレーションデータの各 sample で 図 5.47: 地上キャリブレーションデータの各 sample の χ^2 の分布 (地上キャリブレーションテンプレート) での χ^2 の分布 (フライトテンプレート)

また図 5.48、5.49 は、各 sample での χ^2 を足し合わせた合計 χ^2 の分布である。上で述べたように、 0~11sample と 48,49sample での χ^2 の値は 0.1 として含まれる。地上キャリブレーションのテンプレート では、 χ^2 が 200 程度までしかイベントがないが、フライトのテンプレートでは、 χ^2 の値が大きいイベント もあり、300 程度までイベントが存在している。



図 5.48: 地上キャリブレーションデータの 50sample 図 5.49: 地上キャリブレーションデータの 50sample 分の χ^2 の分布 (地上キャリブレーションテンプレート) 分の χ^2 の分布 (フライトテンプレート)

フライトデータについても、同様の分布を調べた。図 5.50、5.51 は、フライトデータについて、2 つの テンプレートと比較した場合の 50sample それぞれの χ^2 の値の分布である。2 つの分布の間に大きな差は 見られない。



図 5.50: フライトデータの各 sample での χ^2 の分布 図 5.51: フライトデータの各 sample での χ^2 の分布 (地上キャリプレーションテンプレート) (フライトテンプレート)

また図 5.52、5.53 は、各 sample での χ^2 を足し合わせた値の分布である。この分布も大きな差は見られ ないが、 χ^2 が 50 以下の領域では、地上キャリプレーションのテンプレートの方がするどい分布になって いる。



図 5.52: フライトデータの 50sample 分の χ^2 の分布 図 5.53: フライトデータの 50sample 分の χ^2 の分布 (地上キャリプレーションテンプレート) (フライトテンプレート)

次に地上キャリブレーションデータとフライトデータそれぞれについて、各イベントで2つのテンプレートの χ^2 の値を比較した。結果は図 5.55、5.56 である。横軸がフライトのテンプレート、縦軸が地上キャリブレーションのテンプレートでの χ^2 の値である。図 5.46、5.47 で見えていたように、地上キャリブレーションデータについては、フライトのテンプレートでの χ^2 が大きいイベントが多い。一方でフライトデータについては地上キャリブレーションのテンプレートでの χ^2 が大きいイベントが多い。

これらの図から、フライトのテンプレートでの χ^2 を地上キャリブレーションのテンプレートでの χ^2 で 割った値の分布を調べた(図 5.57、5.58)。どちらも比が1と4付近に2つピークがある。また地上キャリ ブレーションデータでは、比が大きい(地上キャリブレーションのテンプレートを使った方が χ^2 が低い) 領域にイベントが多く分布している。「U」の字の構造が見られる。これは波形を見てみると、以下のこと がわかった。図 5.54 は、図 5.55、図 5.56 の簡略図であり、「U」は1から3の領域に分けられる。図 5.54 の左側の1から3の領域は右側の各波形の形に対応している。1は立ち上がりも早く、減衰も早い波形、2 は立ち上がりは早く、地上のテンプレートとフライトのテンプレートの中間程度の速さで減衰する。そして 3 は、立ち上がりも、減衰も遅い波形である。このテンプレートは、波形の分類に役立つことが分かった。 またこの際の自由度は36 であるため、 $\chi^2 = 50$ なら $\chi^2/dof = 50/36$ であり、その波形とテンプレートはよく 一致している状況である。



図 5.54: 2 つのテンプレートについての χ^2 の分布と波形の形の簡略図 (右:形の異なる波形、2 つのテン プレート、左:2 つのテンプレートの χ^2 の分布)



Chi Square(flight/ground, 60-80 keV, 0ch)

図 5.55: 地上キャリブレーションデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の分布 (横軸 : χ^2 [フライト テンプレート]、縦軸 : χ^2 [地上キャリブレーションテンプレート])



Chi Square(flight/ground, 60-80 keV, 0ch)

図 5.56: フライトデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の分布 (横軸 : χ^2 [フライトテンプレート] : 縦軸 : χ^2 [地上キャリプレーションテンプレート])



図 5.57: 地上キャリブレーションデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の比 (フライトテンプレート/ 地上キャリブレーションテンプレート)



図 5.58: フライトデータで 2 つのテンプレートについての χ^2 の比 (フライトテンプレート/地上キャリブ

レーションテンプレート)

このテンプレートを用いた弁別では、どちらのテンプレートでも χ^2 が 50 以下にイベントが多く存在す るため、どちらのテンプレートも χ^2 が 50 以下のイベントはガンマ線とみなす。またフライトのテンプレー トより、地上キャリブレーションのテンプレートでの χ^2 の値が小さいイベントは中性子よりもガンマ線に 近いと考えられるため、図 5.55、5.56 で、青いラインより下に分布するイベントをガンマ線とみなすこと にした。その結果、フライトデータでは 52%、地上キャリブレーションデータでは 84% がガンマ線である と判定された。これは先の立ち上がり、ピーク位置、減衰の時間で得た弁別結果と同程度である。5.4.1 章 で述べたように、現時点での解析では、フライトデータは Signal : Noise = 15 : 85 の割合となっている。 今回の中性子、ガンマ線弁別方法では、バックグラウンドを 48% 削減、天体信号は 16% しか失わないと考 えられることから、この弁別方法を適用できれば、この弁別方法によって、Signal : Noise = 13 : 44 の割 合になる。これらの値を偏光検出の感度 MDP で比較すると、MDP はおよそ 10% 改善することが予想さ れる。

第6章 まとめと今後

X線やガンマ線などの高エネルギー帯域での偏光観測では、パルサーの放射機構やブラックホール近傍 の降着円盤の構造の解明が期待されている。しかし高エネルギー帯域での偏光観測は、今まで有意な偏光 の検出例が少なく、発展途中の分野である。そこで25-100keVの硬X線帯域をターゲットとしたPoGOプ ロジェクトは、気球を用いた偏光観測を行ってきた。2013年のパスファインダーフライトで、大気中性子 がバックグラウンドの大部分を占めていることがわかった。ガンマ線と中性子ではある種のシンチレータで は、シンチレーション光の減衰に差が生じ、中性子の方がより遅い信号となる。PoGOでもこのような特徴 を利用できれば、大気中性子イベントを除去し、より高感度の観測が可能となる。また以前のフライト中に 読み出しシステムの排熱が十分に行えず、観測中に検出器の電源を落とすこともあった。このような問題点 を解決するため、本研究ではPoGO+の中性子への応答を調べるとともに、読み出しシステムの改良を行っ た。また実際に、2016年のフライトデータについて、ガンマ線と大気中性子の波形弁別によるバックグラ

読み出しシステムについては、データの処理を行う FADC ボードの改良を行った。ボードの入力チャン ネルを従来の 8ch から 16ch に増やすことで、ボードの枚数を減らし、スペースに余裕を作ることで、排熱 の向上を促した。また従来は ADC のサンプリングレートが 37.5 MHz であり、中性子ちガンマ線の波形弁 別には波形の立ち上がりのサンプリング精度が十分ではなかった。そこで ADC のサンプリングレートを 100 MHz まで高速化した。

PMT 信号の積分などを行うアナログ回路部の高速化も行った。使用するオペアンプをより高速応答に対応したものに変更し、回路のダイナミックレンジも ADC の 4095ch を最大限利用できるように設定した。

デジタル信号を処理する FPGA のアルゴリズムも改良した。波形、ヒストグラムデータの保存機能に加 え、2回以上検出器で反応したイベントのみを保存する機能や、PMT のアフターパルスを除去するために イベントから次のイベントまでの時間を計測する機能を新たに追加した。

中性子とガンマ線の波形の可能性を実証するためには、改良を行った FADC ボードで地上実験を行い、 ガンマ線源 (¹³⁷Cs)、中性子線源 (²⁴¹Am⁹Be) を照射し、波形を取得した。その結果、PoGO ミッションで利 用している EJ204 プラスチックシンチレータで高速中性子とガンマ線で波形の差をすることが確認できた。

2016年の PoGO+フライトデータについて、61本の SDC のうち 1 ユニとに関してガンマ線と主要バッ クグラウンドである大気中性子イベントの波形弁別を行った。フライト中のバックグラウンド観測データ は、大部分が大気中性子であり、より多くフライトデータを除去し、ガンマ線地上キャリブレーションデー タをなるべく残すことが良い弁別である。まず波形の立ち上がり部分、ピーク、減衰部分のそれぞれについ て、ガンマ線と大気中性子を弁別する条件を適応し、ガンマ線線源を照射した地上キャリブレーションデー タとフライトデータのそれぞれで中性子と判定され、除去される割合を調べた。3 つのセレクションによっ て、中性子イベントと判定される割合は、フライトデータでは 55%、地上キャリブレーションデータでは 21% となった。現在、チーム内で行われている解析では、Signal: Noise = 15:85 の割合となっている。 本研究で行った弁別方法を取り入れることで、Signal: Noise = 12:38 の割合になることがわかった。 また波形の全サンプル情報を利用し、弁別の精度向上を目指し、テンプレートによる弁別も行った。波 形データには、パイルアップや PMT のアフターパルスが起こっているイベントも含まれているため、テン プレートにはそのようなイベントを除外し、典型的な波形のみを利用した。フライトデータ、地上キャリブ レーションデータで、それぞれのテンプレートでの χ^2 の値から、ガンマ線か中性子かを判定した。その結 果、フライトデータでは 48%、地上キャリブレーションデータでは 16% が中性子として除去された。この テンプレートでは、S:N = 13:44 となり、偏光検出能力 MDP が約 10% 改善することが予想される。

今後は、典型的でないパイルアップなどを含むイベントについて、3項目のセレクションとテンプレート解析のどちらが有用かを調べる。こうして確立した中性子・ガンマ線弁別手法を、SDC61ユニットのうち、残りの 60 ユニットについても適用する。最終的には天体観測とバックグラウンド観測のデータの比較、 Crab パルサーの振幅を指標として S:N および MDP の具体的に改善させる。

謝辞

本論文を書くにあたって、ひろたかさんには大変お世話になりました。実験がなかなか進まないときに、夜 遅くまで指導していただいたときは、ひろたかさんの体力に改めて驚きました。スウェーデンに行った際 にも、私が他のメンバーと話すのをサポートしていただいたおかげで、苦戦しながらもコミュニケーショ ンをとることができました。大学院生活でスウェーデン出張に2度も行かせていただき、大変貴重な経験 ができたと思っています。空港のラウンジでのんびりした経験も、きっと二度とできないような経験です。 KTH では、みんな夕方には帰宅して、朝は早くに研究室に来ているという健康的な生活習慣で、日本との 違いに驚くと同時に羨ましいとも思っていました。体力がなく、夜型生活ができない私は、あきれるほどに よく体調を崩してしまい、ひろたかさんにご迷惑をおかけしました。正直こんなに遅くまで研究室にいる ことになると思っていなかったので、憂鬱な日も多かったですが、無事に修論を書き上げることができたの は、ひろたかさんのおかげです。(体力、気力的に、きっとこれが私の限界です。)

PoGO チームの皆さんにも大変お世話になりました。スウェーデンのメンバーには、実験や解析につい て多くのアドバイスをいただきました。私の英語がつたなく、毎回会議でわかりにくい発表をしても根気強 く聴いていただけき、感謝しています。広大でもひろたかさんをはじめ、水野さん、河野さん、内田くんも 解析についてアドバイスをいただいたり、解析を手伝っていただき、ありがとうございました。4年生から これまで PoGO に携わることができて、貴重な経験ができたと思います。

お茶部屋では1年という短い間でしたが、いつも和やかな雰囲気で過ごしやすかったです。たまにうる さいくらいにおしゃべりが止まらないときもありましたが、いつも楽しかったです。来年以降もどうか平 和なお茶部屋にしてください。M1のみなさんには、特に修論シーズンは激励会や発表練習のメモなど、サ ポートしていただき、感謝しています。発表練習のときは、休日まで出てきていただいて申し訳ないと思っ ていましたが、本当に助かりました。4年生にみなさんとは話す機会もあまりなかったように思いますが、 個性的かつしっかりしたみなさんが心身ともに健康で活躍するのを期待しています。

3年生のハイサイの一環で、この研究室にお世話になった時期がありました。あのときに大野さんに指 導していただきながら FPGA をいじったりして、それが楽しかったので4年生でも実験を続けようと思え ました。大野さんには本当に感謝しています。

可視、赤外の先生方は、天体データの解析ではない私の研究テーマでも、コロキウムや修論発表練習で 真剣に聞いてくださって多くのアドバイスをいただき、感謝しています。ありがとうございました。

関連図書

- [1] Tuneyoshi Kamae 'Puls-Shape-Discri with 70MHz Sampling'2008
- [2] J. Dyks 'Relativistic Effects and Polarization in Three High-Energy Pulsar Models'2004
- [3] M. Axelsson 'Measuring energy dependent polarization in soft γ-rays using Compton scattering in PoGOLite'2007
- [4] 高橋弘充 '硬X戦偏光検出器 PoGOLite 気球実験 2016 年の再フライト'2016 年度
- [5] 高橋弘充 'PoGOLite 気球実験 2013 年パスファインダーフライト (2)'2014 年度
- [6] 吉田広明 '気球搭載宇宙硬 X 線偏向検出器 PoGOLite 主検出部の地上試験による性能実証'2009 年度 広島大学修士論文
- [7] National Institute of Stanfords and Technology (NIST) Physics laboratory
- [8] 日本原子力開発機構/核データ研究グループ
- [9] 大橋礼恵 '気球搭載宇宙硬 X 戦偏光検出器 PoGOLite の硬 X 戦と中性子の弁別回路の開発'2014 年 度 広島大学卒業論文
- [10] **河野貴文** 'Ground calibration and flight data analysis of PoGOLite balloon experiment for cosmic gamma-ray polarization measurement'2014 年度 広島大学修士論文
- [11] PoGO+チーム 'Calibration and performance studies of the balloon-born hard X-ray polarimeter PoGO+'2016 年度
- [12] Merline Kole 'Background Studies for the Balloon-Borne Hard X-ray Polarimeter PoGOLite'2014
- [13] Takafumi Kawano 'Pathfinder flight of the Polarized Gamma-ray Observer(PoGOLite) in 2013'2014
- [14] Glenn F. Knoll 'Radiation Detection and Measurement 4th Edition'2013
- [15] 浜松ホトニクス '光電子増倍管 その基礎と応用(第7章 シンチレーション計数法)'2014
- [16] 松岡正之 '宇宙軟ガンマ線の気球・衛星観測におけるシンチレータ信号の波形ディジタル処理の実 証'2010 年度 広島大学修士論文
- [17] 米谷光生 '宇宙硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球の放球中の中性子バックグラウンド評価'2011 年度 広島大学修士論文
- [18] TEXAS INSTRUMENTS '12-Bit, 100MSPS, 8-Channel Analog-to-Digital Converter'

- [19] TEXAS INSTRUMENTS ADS5295, 8-Channel, Analog-to-Digital Converter Evaluation Module User's Guide
- [20] シマフジ電機株式会社 HP SpaceWire DIO2
- [21] シマフジ電機株式会社 SpaceWire DIO-II ボード(双方向拡張バス)取り扱い説明書 Ver0.1
- [22] HUMANDATA HP EDX-301