

2023年度 修士論文

宇宙ガンマ線観測用アクティブシールドに向けた
MPPC光検出器+シンチレータの研究

広島大学 先進理工系科学研究科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M224356 森下 皓暁

主査：深澤 泰司

副査：木坂 将大

副査：岡本 宏己

2024年3月21日

概要

宇宙軟ガンマ線観測では、検出器全体をアクティブシールドで囲むことで、反同時計数を利用して観測の妨げとなるバックグラウンド事象を低減しており、よくシンチレータと光検出器を組み合わせたセットアップが用いられる。そしてそのアクティブシールドとして、BGO 無機シンチレータがよく用いられていて、ガンマ線や荷電粒子に対する阻止能が高いために、高感度の観測を可能にしているが、今後は以下の2点を考慮する必要がある、本論文で対策を検討した。

まず1つ目に、近年用途の多い小型衛星（数 100 kg）や超小型衛星（数 10 kg）において、BGO では重量の問題がある。そこで、密度が約7分の1で軽量のプラスチックシンチレータと光検出器 MPPC を検討する。さらにプラスチックシンチレータには、減衰時定数が数 ns と数十倍速く、出力波形がすどく波高値が高いという特徴がある。しかし、同じくよく使用される MPPC は、従来の光検出器に比べて小型でノイズに強いが、衛星軌道上での運用により、放射線劣化してしまう。この状態になると MPPC 自身がノイズを出すようになり、特に低エネルギーの信号の検出の妨げとなる。そこで放射線劣化した状態を模すために、陽子照射により意図的に劣化させた MPPC を用意し、プラスチックシンチレータの速い信号特性を活かして放射線劣化の影響を減らし、エネルギー閾値をできるだけ下げするために以下の手段を試みた。1つ目に、MPPC 出力を前置増幅器等で電荷積分せず、波形をそのまま増幅する。2つ目に、ノイズはランダムに発生する事象のため、複数 MPPC 間の同時イベントのみを取得することで、検出されるノイズ成分を多くカットする。そして3つ目に、低温環境で実験し、半導体検出器中のキャリアの熱励起を抑制する。以上の3つの実験において、検出されるエネルギー閾値を下げることを確かめた。

そして2つ目に、多分割型アクティブシールドの検討である。アクティブシールドとして使われるようなサイズは数 10-100 cm 程度である。しかしその一方で、大きいほど検出される前に光が減衰し、光量が落ちてしまったり、衛星打ち上げでの振動・衝撃や熱歪みの問題があった。そこで従来から使われていた大きな BGO や CsI などのシンチレータを分割した細長いものに MPPC を取り付けたものを多数用意して組み上げることを考える。すると、光量のロスや振動への対策だけでなく、検出器を多数取り付けることにより生じるデッドスペースを抑えながら、天体事象の位置決定も行いやすくすることを想定したセットアップとなる。そこで、この構成検出器の試作を行った。またできるだけセットアップを小さくすることも含めて、表面実装の MPPC を取り付けるための基板も自ら設計する。そして多チャンネルで読み出すためのシステムの立ち上げを行う。

本論文では、これらの一連の実験結果についてまとめる。

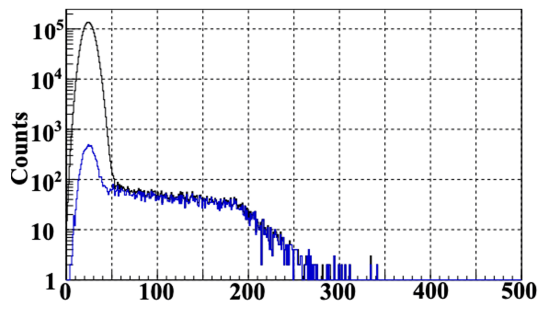


図 1: 同時刻イベントのみの測定 (青線ではエネルギー閾値が下がっている。図 3.29 より抜粋)

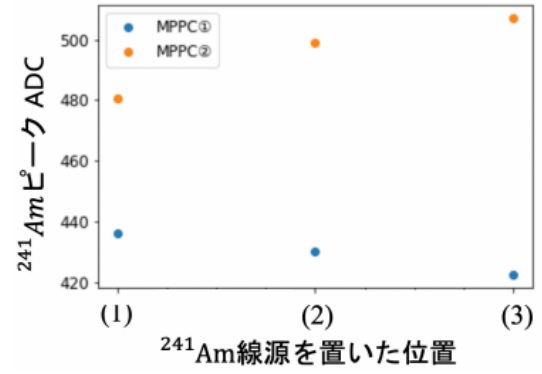


図 2: 線源の照射位置による光量の変化 (図 4.27 より抜粋)

目次

第 1 章 序論	1
1.1 宇宙ガンマ線観測とアクティブシールド	1
1.1.1 宇宙ガンマ線観測	1
1.1.2 人工衛星とガンマ線検出器	1
1.2 ガンマ線バースト観測装置としてのアクティブシールド	2
1.3 アクティブシールドによるバックグラウンド除去	3
1.3.1 軌道上でのバックグラウンドとその除去	3
1.3.2 すざく衛星 HXD	5
1.3.3 ひとみ衛星 HXI/SGD	5
1.3.4 フェルミ衛星 ACD	6
第 2 章 軟ガンマ線観測機器	8
2.1 ガンマ線と物質との反応	8
2.2 本研究で使用した線源のエネルギー	9
2.3 軟ガンマ線観測機器の主な構成要素	10
2.3.1 シンチレータ	10
2.3.2 シンチレーション光読み出しの光センサー	14
2.3.3 光半導体検出器 MPPC	17
2.4 研究の目的	19
第 3 章 プラスチックシンチレータ + MPPC を用いた光量・エネルギー閾値の評価	20
3.1 本実験の目的	20
3.2 実験セットアップ	20
3.3 シンチレータの大きさによる光量依存性	22
3.4 従来 MPPC と改良 MPPC、ピクセルサイズの違いによる光量の比較	23
3.5 検出器の放射線損傷	26
3.5.1 検出器の放射線損傷	26
3.5.2 検出器の放射線損傷の影響の測定	27
3.6 検出器の放射線損傷による影響の軽減	33
3.6.1 波形増幅アンプを用いた測定	34
3.6.2 同時刻イベントのみの測定	35
3.6.3 低温環境での測定	40
3.6.4 ここまでのまとめ	42

第 4 章	シンチレータ + MPPC の多チャンネル読み出しシステムの立ち上げ	43
4.1	本実験の目的	43
4.2	Citiroc 1A	44
4.2.1	CAEN A1702	45
4.3	MPPC 基板設計	48
4.4	実験セットアップ	49
4.5	このセットアップによる信号の読み出し	50
4.5.1	デジタイザのプロンプ出力の確認	50
4.5.2	トリガー・バイアス電圧調整の確認	52
4.5.3	多チャンネルでの信号の読み出し	53
第 5 章	結論・まとめと今後	57
付録		58
A	低温環境での他の実験	58
A.1	前置増幅器と整形増幅器を用いた測定	58
A.2	同時刻イベントのみの測定	58
A.3	両面に MPPC をつけた状態でのプラスチックシンチレータの光量の測定	59
B	FPGA GROWTH DAQ ボードを用いた複数 MPPC での測定	60
B.1	複数 MPPC を用いた読み出しの基礎特性	60
B.2	複数チャンネルの同時測定	62

目次

1	同時刻イベントのみの測定（青線ではエネルギー閾値が下がっている。図 3.29 より抜粋）	2
2	線源の照射位置による光量の変化（図 4.27 より抜粋）	2
1.1	各波長の電磁波に対する大気の透明度 [1]	1
1.2	コンプトンカメラの概念図 [2]	2
1.3	コンプトンイメージングの概念図	2
1.4	ロングガンマ線バーストとショートガンマ線バーストの分布 [3]	3
1.5	コンプトンガンマ線衛星 BATSE 検出器が観測した 2704 個のガンマ線バーストの天球分布 [4]	3
1.6	アクティブシールドによるバックグラウンド除去のイメージ	4
1.7	すざく HXD の検出器 1 ユニットの断面図 [5]	5
1.8	ひとみ衛星 HXI 検出器 [6]	6
1.9	ひとみ衛星 SGD 検出器 [7]	6
1.10	フェルミ衛星 ACD 検出器 [8]	7
2.1	光電吸収の概念図 [9]	9
2.2	コンプトン散乱の概念図 [9]	9
2.3	電子・陽電子対生成の概念図 [9]	9
2.4	有機シンチレータの分子内のエネルギー準位 [10]	12
2.5	有機シンチレータのパルス時間特性 [11]	12
2.6	プラスチックシンチレータ	12
2.7	固体中の電子エネルギーのバンド構造	13
2.8	無機シンチレータのエネルギーバンド構造	13
2.9	無機シンチレータのシンチレーション光の相対強度 vs 蛍光波長 [12]	14
2.10	PD の構造	15
2.11	APD の構造	15
2.12	光電子増倍管の構造 [11]	16
2.13	MPPC	17
2.14	表面実装の MPPC	17
2.15	MPPC の内部構造 [13]	17
3.1	1 つの MPPC を用いた MCA 8000D のセットアップ	20
3.2	同時イベント測定のための CAEN DT5720 を用いたセットアップ	21
3.3	用いた回路 [14][15]	21
3.4	実験の様子	21

3.5	小さいシンチレータでの測定の様子	22
3.6	大きいシンチレータでの測定の様子	22
3.7	1光子ピーク測定	22
3.8	較成直線	22
3.9	シンチレータの大きさによる光量の比較	23
3.10	^{109}Cd を照射した時の通常 MPPC の生信号	24
3.11	^{109}Cd を照射した時の通常 MPPC の生信号	24
3.12	通常 MPPC の検出効率 (50 μm 、赤線) [16]	25
3.13	通常 MPPC の検出効率 (75 μm 、赤線) [16]	25
3.14	改良 MPPC の検出効率 (75 μm 、赤線)[17]	25
3.15	それぞれの MPPC (ピクセルサイズ 50 μm ,75 μm) のスペクトル	26
3.16	放射線劣化によりできた欠陥ピクセルの概念図。オレンジ色のものが信号が来たピクセルで、赤いものが欠陥ピクセル。	27
3.17	日本がハンガリーと共同で打ち上げた超小型衛星に搭載された MPPC の運用によるエネルギー閾値の上昇	27
3.18	CAEN DT 5720[18]	28
3.19	オシロスコープの出力	28
3.20	図 3.19 の拡大図	28
3.21	(上) CAEN DT5720 の波形の模式図、(下) Long-gate を変えた時のエネルギー閾値の変化	29
3.22	(上) 通常 MPPC と波形増幅アンプを用いて測定した、 ^{137}Cs (赤)、 ^{22}Na (青)、 ^{133}Ba (黒)、 ^{57}Co (マゼンタ)、 ^{241}Am (緑)、 ^{109}Cd (シアン) のスペクトル。(下) 上図から得られたエネルギー較正直線。	31
3.23	若狭湾での陽子照射の様子。十字の交点を中心として、手前側から陽子ビームが照射される。	32
3.24	波形増幅アンプで測定したスペクトル。(上) 通常 MPPC、 ^{137}Cs (黒)、 ^{57}Co (青)、 ^{241}Am (赤)、background (灰色)。(下) 放射線劣化した MPPC、 ^{137}Cs (黒)、 ^{133}Ba (青)、background (灰色)	33
3.25	赤が ^{137}Cs 、青が ^{22}Na 、黒が ^{133}Ba のエネルギースペクトル。(上) 前置増幅器と整形増幅器(下) 波形増幅アンプでの測定	34
3.26	前置増幅器+整形増幅器を用いた時の波形	35
3.27	波形増幅器を用いた時の波形	35
3.28	同時刻イベント測定の様子	35
3.29	Coincidence 幅をそれぞれ 40 ns(上)、8 ns(中)、4 ns(下) とした時の ^{137}Cs のエネルギースペクトル。青が Coincidence あり、黒が Coincidence なしの結果を表す。	36
3.30	Coincidence 幅を変えた時の、エネルギー閾値と信号の取得割合の関係	37
3.31	Coincidence ありの ^{57}Co (青)、background (黒) と Coincidence なしの background (灰色) のエネルギースペクトル	38
3.32	(上) 2つの MPPC の波高値を足し合わせたエネルギースペクトル。(下) ^{137}Cs を照射した時の 2つの MPPC の波高値の 2次元プロット	39

3.33	波形増幅を通さずに測定した ^{137}Cs のエネルギースペクトル。青が Coincidence あり、黒が Coincidence なし。	40
3.34	(上) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で波形増幅アンプを用いて測定した ^{137}Cs (赤)、 ^{22}Na (青)、 ^{133}Ba (黒)、 ^{57}Co (マゼンタ)、 ^{241}Am (緑)、 ^{109}Cd (シアン) のエネルギースペクトル。(下) 波形増幅アンプを用いて測定した ^{137}Cs のエネルギースペクトル。 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ での測定が黒、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ での測定が赤。	41
4.1	検出器の概観。細長いシンチレータの両端に MPPC を取り付けたものを多数組み合わせる。	43
4.2	Citiroc ASIC の全体のブロック図 [19]	45
4.3	Citiroc ASIC のトリガーのブロック図 [19]	45
4.4	CAEN A1702[20]	46
4.5	トリガーの回路 [20]	46
4.6	AD 変換部の回路 [20]	47
4.7	タイムスタンプ生成回路 [20]	47
4.8	MPPC 周辺の回路図 [19]	48
4.9	両面基板の表面	49
4.10	両面基板の裏面	49
4.11	MPPC 基板 (左の四角いものが MPPC と基板をはんだ付けしたもの)	49
4.12	実験セットアップ	50
4.13	MPPC の生信号	50
4.14	Slow shaper の出力	51
4.15	図 4.14 の前置増幅器のゲインを上げた時の様子。波高値が高くなっている。	51
4.16	積分時間による波形の違い。青が 12.5 ns 、白が 87.5 ns で、それぞれ 128 回取得した平均の波形を示している。	51
4.17	トリガー調整前。一部のイベントにしかトリガーがかかっていない。	52
4.18	トリガー調整後の様子。各イベントにトリガーがかかっている。	52
4.19	逆バイアス電圧をかける測定の様子	53
4.20	測定の様子	53
4.21	通常 MPPC でのエネルギー較正	54
4.22	放射線劣化 MPPC でのエネルギー較正	54
4.23	^{137}Cs 照射時の通常、放射線劣化 MPPC それぞれの同時イベントの波高値分布	54
4.24	2 チャンネル測定の様子	55
4.25	実験セットアップの概観。 ^{241}Am 線源を鉛でコリメートし、シンチレータに照射して MPPC で読み出す。	56
4.26	^{241}Am 線源の照射位置。両端に MPPC がついている。	56
4.27	^{241}Am 線源の照射位置による光量の変化	56
1	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で前置増幅器と整形増幅器を用いた時のエネルギースペクトル。薄緑が ^{137}Cs 、紫が ^{22}Na 、水色が ^{133}Ba 。	58
2	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で ^{241}Am を用いたときのエネルギースペクトル。青が Coincidence あり、灰色が Coincidence なし。	59

3	-20 °Cで ^{109}Cd を用いたときのエネルギースペクトル。	59
4	複数チャンネル同時測定の設定アップ	60
5	FPGA GROWTH-DAQ ボード	61
6	Raspberry pi4	61
7	小シンチでの、MPPC の数による光量やエネルギー閾値の違い	61
8	2ch 同時測定での各 ch のスペクトル	62
9	図 8 の同時刻イベントを足し合わせたスペクトル	62

表目次

1.1	検出器に用いられるシンチレータ。名前の () 内は添加物	2
2.1	放射線のエネルギー	10
2.2	代表的なシンチレータの比較 [11]	10
2.3	代表的な光検出器の性能の比較 [13]	16
2.4	使用した MPPC[16]	18
3.1	使用した実験機器	21
3.2	使用した MPPC とその光量の測定結果	24
3.3	CAEN DT5720 の性能	28
4.1	Citiroc 1A の性能 [20]	44
4.2	2ch で共に信号が取得されたイベントの割合	55

第1章 序論

1.1 宇宙ガンマ線観測とアクティブシールド

1.1.1 宇宙ガンマ線観測

図 1.1 はさまざまな波長を持つ電磁波が宇宙から地球大気に入射した際、どの程度大気を透過するのかを示している。この図より、電波と可視光以外の波長の光は、大気による吸収や散乱の影響が大きく、本研究で着目しているガンマ線もほとんど地上には届かない。そのため、これらの波長で宇宙を観測するには、気球やロケット、人工衛星などを用いて、大気圏外で観測を行う必要がある。

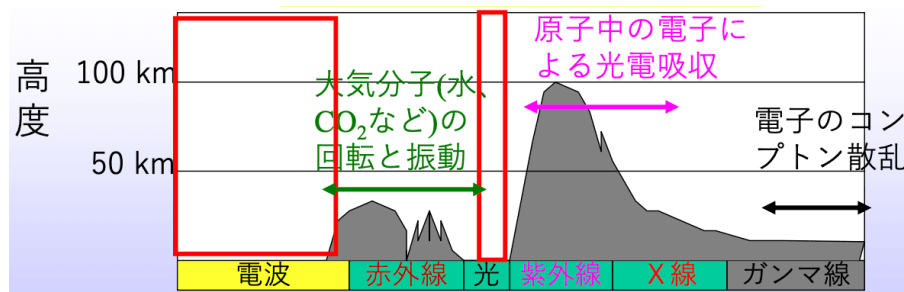


図 1.1: 各波長の電磁波に対する大気の透明度 [1]

また地球上での観測に比べて、人工衛星等を宇宙に打ち上げることにより、天空の広範囲の領域を長期間にわたって連続的に観測することができる。これは宇宙現象の短期間に発生する変化やパターンを検出することにも繋がる。

1.1.2 人工衛星とガンマ線検出器

上述のような理由から、これまで様々な人工衛星が打ち上げられてきた。人工衛星の大きさや目的は様々で、それに応じて搭載される検出器の規模も変わる。

軟ガンマ線帯の観測において、軟ガンマ線偏光分光では、偏光を測定することで、加速電子の運動の非一様性とエネルギーを測定する。これにはすぐく衛星に搭載されたシンチレータ検出器や ASTRO-H 衛星などにも搭載されたコンプトンカメラがよく用いられる。コンプトンカメラは、コンプトン散乱を用いて、受け取ったエネルギーからガンマ線の到来方向を求める。

荷電粒子が入射すると蛍光を発する物質をシンチレータといい、ここで生じた光を増幅して電気信号として検出するものをシンチレータ検出器という。シンチレータという物質については次章で詳しく述べるが、以下のような様々な種類がある。

種類	密度 (g/cm^3)	最大波長 (nm)	減衰時定数 (ns)	用途・特徴
CsI(Tl)	4.5	540	~1000	α 線・X線・ガンマ線、潮解性
NaI(Tl)	3.6	410	230	ガンマ線、潮解性
GSO	6.57	450	~60	ガンマ線、高速検出
BGO	7.1	480	300	ガンマ線、高い検出効率、加工しやすい
GAGG(Ce)	6.63	540	90	ガンマ線、光量大、高速検出

表 1.1: 検出器に用いられるシンチレータ。名前の () 内は添加物

図 1.2 のように、天体などからの光が散乱体 (Scatterer) で散乱し、吸収体 (Absorber) に到達して吸収される。それぞれで落としたエネルギーがわかると、式 1.1 から θ が求まり、到来方向を θ の円錐上に制限できる。この円錐をコンプトンコーンとよび、これを図 1.3 のように複数の光子に対して作成することでその交点から到来方向がわかるという仕組みである。これをコンプトンイメージングという。

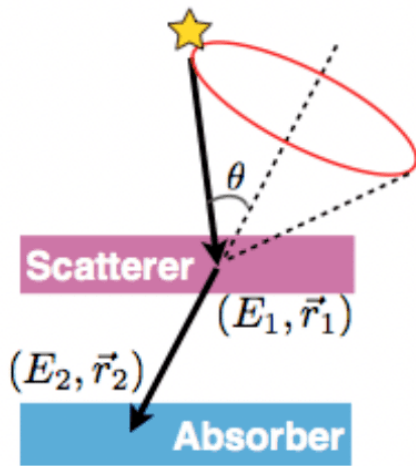


図 1.2: コンプトンカメラの概念図 [2]

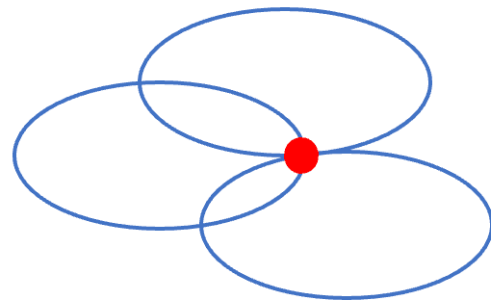


図 1.3: コンプトンイメージングの概念図

$$\cos \theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2(E_1 + E_2)} E_1 \quad (1.1)$$

1.2 ガンマ線バースト観測装置としてのアクティブシールド

BGO アクティブシールドは表面積が非常に大きいため、すざく HXD、ひとみ HXI/SGD の BGO それぞれがここまで述べたような主検出部とは別に、それ自体が広い視野をもったガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst ; GRB) 等のイベントを常時モニターする観測装置として使われることが多い。

GRB は宇宙最大の爆発で、数秒から数時間程度にわたりガンマ線がバースト的に放出される現象である。この放射はプロンプト放射と呼ばれ、その全放射エネルギーは 10^{51}erg 以上にも達し、これは太陽がその生涯に放出する全エネルギーに匹敵する。プロンプト放射では特に 100 keV-1 MeV あたりで強い放射が見られ、BGO アクティブシールドで検出できる。また、その後数日間アフターグロー (残光) と呼ばれる、X

線や可視光、近赤外線でしばらく輝く現象が観測されることもある。バーストの継続時間には、長い場合と短い場合があり、2秒程度を境界として、それぞれロングガンマ線バースト、ショートガンマ線バーストと呼ばれる(図1.4)。ロングは、高速で回転している大質量星が超新星爆発を起こしてブラックホールを形成するときその両極方向に噴出する光速に近い強力なジェットが恒星の外層を突き抜けることで発生し、またショートは中性子星などの、高密度なコンパクト天体が衝突や合体をすることによって生じると考えられている。これらが天の川銀河で起こっている現象ならば、その起源の分布は銀河面に集中すると考えられる。しかし図1.5から、検出されたGRBは全天に等方的に分布しているため、GRBは遠方宇宙を起源とするものであることが分かっている。GRBは1970年にアメリカの核実験監視衛星Velaによって偶然発見され、現在は全天のあらゆる方向から1日に1回程度検出されている。

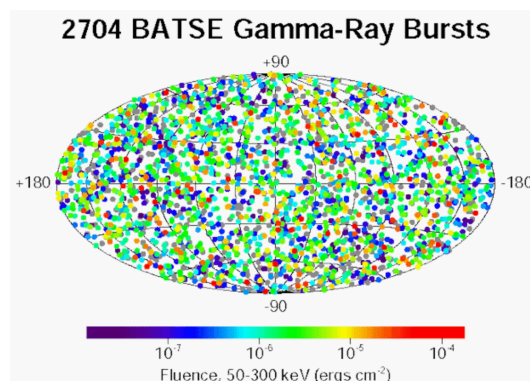
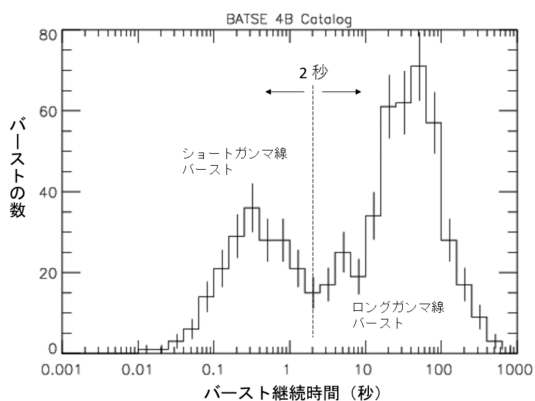


図 1.4: ロングガンマ線バーストとショートガンマ線バーストの分布 [3] 図 1.5: コンプトンガンマ線衛星 BATSE 検出器が観測した 2704 個のガンマ線バーストの天球分布 [4]

1.3 アクティブシールドによるバックグラウンド除去

1.3.1 軌道上でのバックグラウンドとその除去

衛星軌道上の人工衛星に搭載されている検出器は宇宙からさまざまな信号を受け取るが、そのうち目標天体以外由来のものをバックグラウンドと呼ぶ。バックグラウンドが生じる要因としては、以下のようなものがある [21]。

宇宙 X 線背景放射 (CXB)

CXB は活動銀河核 (AGN) やその他の銀河の放射により、宇宙から等方的に飛来する X 線放射である。また、目標天体からの信号だとしても、それによって生じるコンプトン散乱などにより入射光子のエネルギーがわかりにくくなってしまいうため、バックグラウンドとなることもある。

荷電粒子

宇宙空間には荷電粒子として、銀河系から飛来する宇宙線や太陽からの粒子など、高エネルギーの粒子が数多く存在し、それらが検出器に入射すると、直接的にバックグラウンドとなる。

検出器の内在放射線

上2つは外的要因のものであったが、検出器自身が信号を出してバックグラウンドとなることもある。検出器内部の放射性同位体が原因となるが、もともと検出器の構成物質に含まれるものだけでなく、衛星を運用するなかで、宇宙線などが検出器に入射し続けることで、自身が放射化してしまうことが問題となる。そこで生じた放射性同位体が遷移する時にさまざまな放射線を発生させてしまう。

バックグラウンドの除去

図 1.2 から、散乱体と吸収体だけでもガンマ線の到来方向とそのエネルギーを求めることはできるが、ここまで述べたように、これだけでは観測したい現象由来のガンマ線と、バックグラウンドとなるようなその他の宇宙線を区別することができない。そこで、これまでの検出器の全体を囲むように、アクティブシールドというものを使用する。

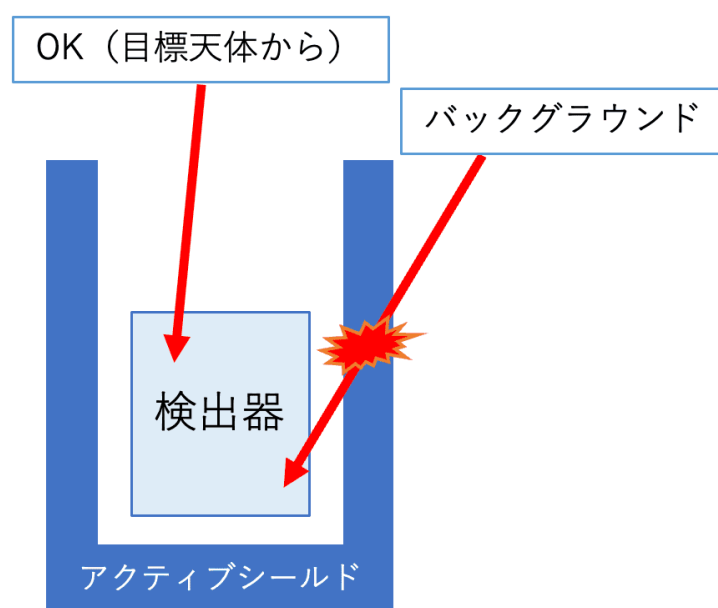


図 1.6: アクティブシールドによるバックグラウンド除去のイメージ

図 1.6 はアクティブシールドによって囲まれた検出器のイメージ図である。シールドに何らかの放射線がきた際にシールド自身からシンチレーション光が発生するため、図 1.6 の右側のように目標天体の視野外からきたものをシールドの信号と反同時計数処理（同時に反応したイベントを除去する）をすることで、バックグラウンドとして処理することができる。このアクティブシールドとして、様々な種類のシンチレータという蛍光物質が使われる。これは観測の感度を向上させるには不可欠で、感度を良くするためにはできるだけシールドで微弱な信号でも反応するために、シールドのエネルギー閾値ができるだけ低いことが求められる。次に、これまでの衛星に使用されていたアクティブシールドに着目する。

1.3.2 すざく衛星 HXD

すざく衛星の硬 X 線検出器（Hard X-ray Detector：HXD）は、10-600 keV の X 線を観測する装置である。

図 1.7 はすざく HXD の検出器の 1 ユニットの断面図で、検出器として半導体検出器、および、シンチレータ（GSO, BGO）と光電子増倍管（Photo-multiplier tube：PMT）が使用されている。実際にはこれ 16 本が正方形の形に配置され、その周囲をさらに 20 本の柱状の BGO アクティブシールドで囲うことで、できるだけバックグラウンドを下げることを実現している。この BGO アクティブシールドシールドは、天体の視野外からのガンマ線・宇宙線を止めるとともに、BGO を通り越して内部の主検出部で検出された場合も、BGO 信号との同期を反同時計数でとることで、バックグラウンドイベントとして除去できる。BGO の放射化によって出て、主検出部で検出されたイベントも、BGO で信号があれば同様に除去できる。

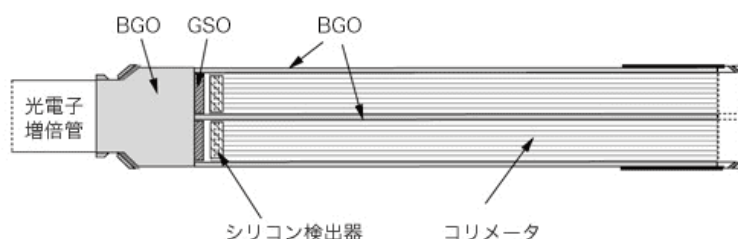


図 1.7: すざく HXD の検出器 1 ユニットの断面図 [5]

しかしこの検出器全体を BGO で囲んでいたため、衛星を打ち上げ、運用する際に発生してしまう振動により破損しやすいという問題点があった。この BGO シールドは長細く、それを上下から押さえて固定していたため、打ち上げ時の振動・衝撃に対する対策で苦労している。

1.3.3 ひとみ衛星 HXI/SGD

ひとみ（ASTRO-H）衛星の硬 X 線撮像検出器（Hard X-ray Imager：HXI）は、5-80 keV、軟ガンマ線検出器（Soft Gamma-ray Detector：SGD）は 60-600 keV のガンマ線を観測する。HXI のイメージャー本体は 4 層の Si 両面ストリップ検出器で、その下に、より高エネルギーの光子を受けるための CdTe 両面ストリップ検出器となっていて、BGO アクティブシールドで囲んでいる。SGD も同様に、主検出部は多層 Si/CdTe センサーをそれぞれ散乱体、吸収体とした半導体コンプトンカメラとなっていて、それを BGO で囲んでいる。HXI、SGD ともに BGO の光は Avalanche Photo Diode（APD）で読み出している。

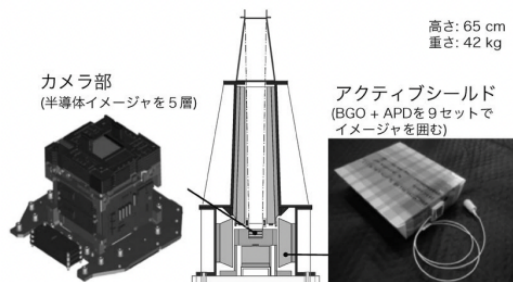


図 1.8: ひとみ衛星 HXI 検出器 [6]

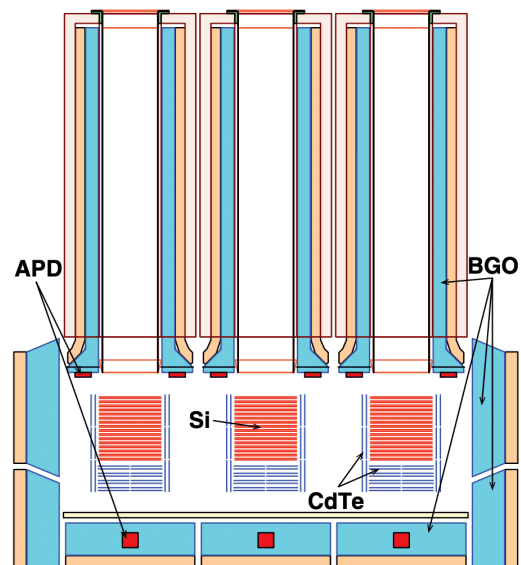


図 1.9: ひとみ衛星 SGD 検出器 [7]

この衛星ではすぐくでの振動の問題を受け、少し分割気味の BGO で囲んでいたのだが、外側のケースに貼り付けるということをしていたため、そのケースと BGO の膨張率の違いから、BGO が割れてしまうのを防ぐ対策や、接着剤でつけているためにその部分では光がロスしてしまい、検出できる光量が少なくなってエネルギー閾値が下がらない問題、また APD は増幅率がそこまで高いわけではないため、運用の際にできるだけ低温の環境を実現しなければならないという難しさもあった。

1.3.4 フェルミ衛星 ACD

フェルミガンマ線観測衛星 LAT (Large Area Telescope) 検出器に使用されている反同時検出器 (Anti-Coincidence Detector : ACD) は、図 1.10 のようにタイル状、またはリボン状のプラスチックシンチレータである。この ACD には 89 枚のセグメント化されたプラスチックシンチレータが使用されていて、LAT 検出器のトラッカー (上述した Si 両面ストリップ検出器) のみの周囲を覆っている。すぐく HXD、ひとみ HXI/SGD は宇宙線だけでなく、視野外からのガンマ線や放射化によるバックグラウンドの除去も必要であるため BGO が使われていたが、フェルミ衛星の場合は GeV 領域のため放射化バックグラウンドは気にならず、また全方向が視野なので、ガンマ線を除去する必要はなく、宇宙線の除去がメインのため、ガンマ線の感度が弱くて軽いプラスチックシンチレータが使われている。

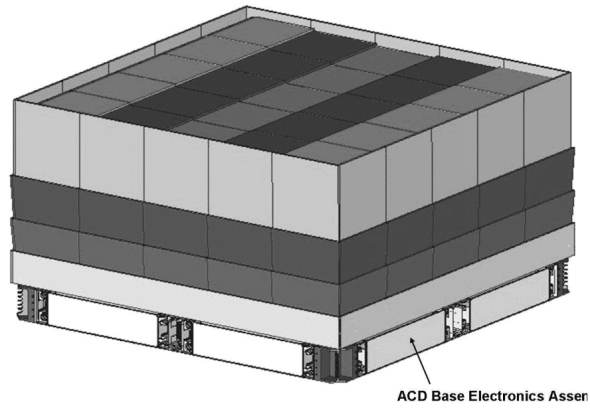


図 1.10: フェルミ衛星 ACD 検出器 [8]

信号は、光ファイバーを経由して、光電子増倍管 PMT で読み出していて、99.97% 以上の荷電粒子（宇宙線）をバックグラウンドとして除去できる。

第2章 軟ガンマ線観測機器

本章ではこの研究に関連するガンマ線や、観測機器について記述する。

2.1 ガンマ線と物質との反応

ガンマ線と物質との反応は、ガンマ線のエネルギーが低い順に以下のようなものがある。いずれもガンマ線光子のエネルギーの全部または一部を電子のエネルギーに変換するものである。

光電吸収

ガンマ線の光子がエネルギーを、原子中のある軌道電子に与えて消滅し、その軌道電子を原子の外へ放出する現象を光電効果という。軌道電子がもともといた場所には外側の軌道の電子が遷移する。この時にその軌道間のエネルギーの差が特性 X 線として放出されるか、2次電子が生成される。光電効果で生じる特性 X 線はエネルギーが低い場合には、その物質中で吸収される。放射線測定器にガンマ線が入射し、検出器に当たってすべてのエネルギーを電子に与えて止まる場合、エネルギースペクトルにこの光電吸収ピークが現れる。

コンプトン散乱

ガンマ線光子が物質に入射して電子と衝突した際に、光子が散乱され、入射光子よりもエネルギーの低い光子となり、物質中の電子がエネルギーを受け取って跳ね飛ばされる現象をコンプトン散乱という。この時の光子や電子を、それぞれコンプトン散乱光子、コンプトン反跳電子という。放射線測定器にガンマ線が入射した際、散乱角度によって、電子に与えるエネルギーが変化するため、連続的なガンマ線スペクトルになる。散乱角が 180 度の場合、電子に与えるエネルギーは最も高くなり、コンプトン散乱エッジがエネルギースペクトルに現れる。エネルギー E のガンマ線が角度 θ 方向でコンプトン散乱した後のエネルギー E' は、

$$E' = \frac{E}{1 + 1.96 \cdot E \cdot (1 - \cos \theta)} \quad (2.1)$$

となる。単位は MeV である。また検出器の周辺の物質で散乱した後にエネルギーを一部失い、検出器に入射する場合があります。この時もスペクトル中にコンプトン連続部エネルギーが観測される。そのうち物質に 180 度で散乱したガンマ線が検出器に入射して電子にエネルギーをすべて与えて止まる場合、後方散乱ピークが現れる。

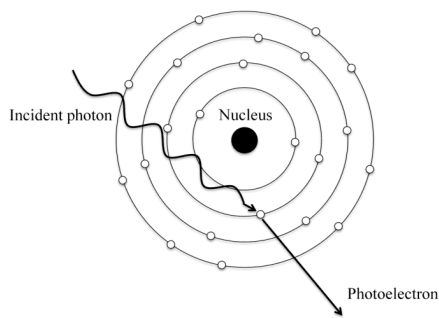


図 2.1: 光電吸収の概念図 [9]

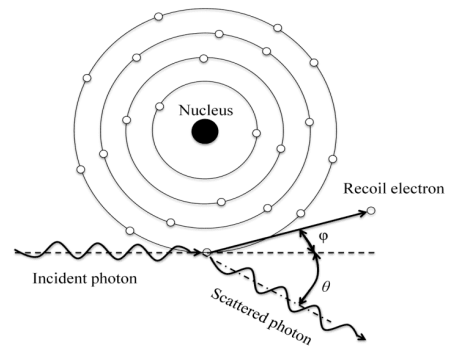


図 2.2: コンプトン散乱の概念図 [9]

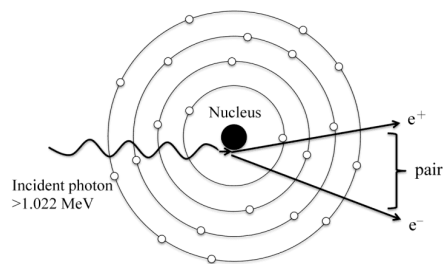


図 2.3: 電子・陽電子対生成の概念図 [9]

電子・陽電子対生成

ガンマ線光子が、原子の原子核の近くを通過するとき、原子核の近くの強い電場によって、陽電子と電子の対となって光子エネルギーを消滅させる。光子が、合計の静止質量エネルギーに相当する 1.02 MeV 以上のエネルギーを持つ必要がある。ただし、この反応確率はガンマ線のエネルギーが数 MeV に近づくまでは非常に低いため、この反応が起こるのは主に 10 MeV 以上の高エネルギーのガンマ線に限られる。

2.2 本研究で使用した線源のエネルギー

本研究で使用した放射線源とそのエネルギーは以下の表 2.1 のとおりで、この表の光電吸収 E_{abs} やコンプトン散乱エッジ E_{edge} のエネルギーの値を用いている。

コンプトンエッジのエネルギーは、光電吸収ピークのエネルギーから以下の式 (2.2) で求められる。

$$E_{edge} = \frac{2E_{abs}^2}{mc^2 + 2E_{abs}} \quad (2.2)$$

RI	E_{abs} (keV)	E_{edge} (keV)
^{137}Cs	662	477
^{22}Na	511	341
^{133}Ba	356	196
^{57}Co	122	
^{109}Cd	88	
^{241}Am	59.5	
^{109}Cd	22.2	

表 2.1: 放射線のエネルギー

2.3 軟ガンマ線観測機器の主な構成要素

これまでにも述べたように、高エネルギーのガンマ線の検出には、目的に応じたシンチレータと、そこで発生するシンチレーション光を検出する光センサーで構成されている。本章では代表的なものとその特性について述べる。

2.3.1 シンチレータ

シンチレータは、入射した放射線が内部で反応した結果として可視光を放出する。その性質を利用し、荷電粒子や透過性の高い高エネルギーの X 線やガンマ線を検出するのによく用いられている。シンチレータに放射線が入射すると、光電吸収やコンプトン散乱によってシンチレータ内の原子から電子が叩き出される。その電子が周囲の分子を励起し、それらが基底状態に戻る時に、シンチレーション光が発生する。

シンチレータには無機シンチレータと有機シンチレータがある。無機シンチレータは、無機物の結晶から構成されており、密度や原子番号が高く、X 線ガンマ線に対して光電吸収を起こしやすい。有機シンチレータは、有機結晶シンチレータ、それらを適当な溶媒中に溶解して得た有機液体シンチレータ、さらにそれらを高分子化したプラスチックシンチレータなどがある。特にプラスチックシンチレータは容易に制作できて加工もしやすく、扱いやすいという特徴がある。有機シンチレータは密度や原子番号が低く、X 線ガンマ線に対してコンプトン散乱を起こしやすい。以下に代表的なシンチレータとその特徴をまとめる。

シンチレータ	密度 (g/cm^3)	減衰時間 (ns)	発光量 (photons/MeV)
無機シンチレータ			
BGO	7.13	300	6000
CsI(Tl)	4.51	1050	56000
有機シンチレータ			
アントラセン	1.25	30	15000
プラスチック (EJ200)	1.023	2.1	10000

表 2.2: 代表的なシンチレータの比較 [11]

前章の ASTRO-H (図 1.6) を含め、従来の衛星計画では、アクティブシールドとして BGO[22] という無

機シンチレータが用いられていることが多い。BGO は密度と原子番号が大きく、ガンマ線や荷電粒子に対する阻止能が高いため、アクティブシールドとして最適である。

フェルミ衛星ではプラスチックシンチレータを用いている。CubeSat などの超小型衛星計画での打ち上げの際、BGO だと重量オーバーしてしまう可能性がある一方、プラスチックシンチレータは BGO の約 1/7 の密度のため軽量化できる。例えば、1U CubeSat (1 辺 10 cm サイズ) の場合、10cm × 10cm × 3cm の BGO プレートを使用すると、5 枚のプレートでカバーする必要があるため、BGO の重量は約 10 kg となる。この重量は、衛星に搭載される他のシステムに割り当てられるリソースをかなり制限してしまうことになるため、より軽いシンチレータが適している。ただプラスチックシンチレータは、C や H などから構成されるという組成の特徴から BGO と比べるとガンマ線に対する阻止能はあまりない。しかし、安価で BGO と同程度またはそれ以上の光量がありながら、BGO などに比べて減衰時間が速いことから、ガンマ線の高速計数や高計数率の測定に向いていること、減衰時間が短いために波高値は高くなるため、前置増幅器などを用いた信号の電荷積分の必要がなく、ノイズに対して信号を拾いやすい利点がある。

以下に、それぞれの無機・有機それぞれのシンチレータの詳細を記述する。

有機シンチレータ

ここでは特に、本研究で用いている、プラスチックシンチレータの特徴を示す。

- ポリビニルトルエンという透明なプラスチックに、蛍光物質を混ぜたもの。
- 安価
- 荷電粒子、ガンマ線、高速中性子など様々な放射線測定に使用
- 光量は少ない (NaI の 1/3 程度)
- α 線のように電離密度の高い放射線に対しては発光効率が低く、エネルギー対パルス波高値の直線性が悪い (消光作用)。

有機物における蛍光のメカニズムは、単一分子のエネルギー準位間の遷移に起因するため、物理的な状態には依存しない。

光出力 有機シンチレータの光の収率は、放射線の種類に依存する。そのため、絶対的な光収率を表すため、MeVee(MeV electron equivalent) を定義する。1MeVee の光を発生する放射線のエネルギーは、高速電子では 1MeV だが、荷電重粒子では数 MeV となる。

また、放射線に長くさらされると、有機シンチレータの特性は劣化する。これは、光や酸素による高分子の分解や、極端な環境によるひび割れにより、大きなシンチレータから出る光の出力が低下することによる。

時間応答 シンチレーション効率の時間依存性は、蛍光状態になるのに要する有限な時間と遅発蛍光と燐光に対応する遅いシンチレーションの成分により表される。

光の強度を I とすると、

$$I = I_0(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (2.3)$$

ここで、 τ_1 は蛍光準位への励起を表す時定数で、 τ_2 はその減衰を表す時定数である。

一方で、励起過程は標準偏差で特徴づけられるガウス分布関数によってうまく表される。全体としての時間と光の関係は、

$$\frac{I}{I_0} = f(t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.4)$$

パルス波形弁別 パルス波形弁別とは、粒子検出器の出力信号パルスの形状により放射線の種類を弁別することである。シンチレーション光のほとんどは即発蛍光であるが、遅発蛍光に対応する長寿命成分も観測される。そこで全体的な光収率曲線を二つの指数減衰、すなわちシンチレーションの速い成分（数 ns）と遅い成分の和（数百 ns）で表し、遅い成分に現れる光の割合が励起粒子の種類に依存することを用いて、粒子の弁別を行う。

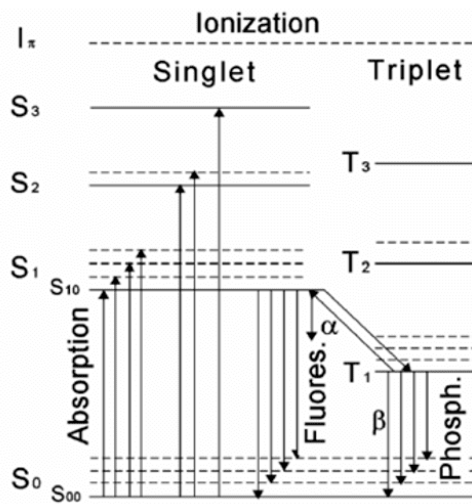


図 2.4: 有機シンチレータの分子内のエネルギー準位 [10]

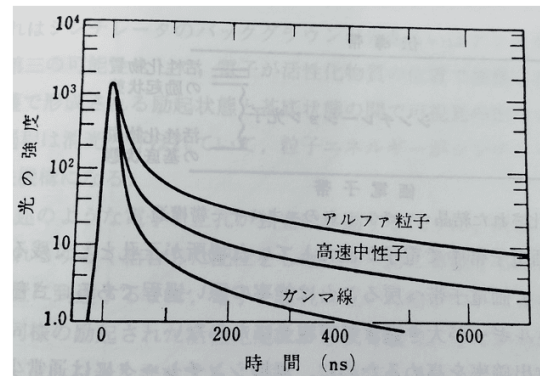


図 2.5: 有機シンチレータのパルスの時間特性 [11]

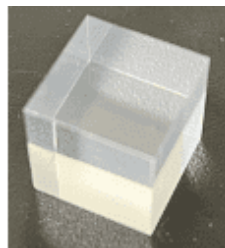


図 2.6: プラスチックシンチレータ

無機シンチレータ

ここで、衛星でこれまでよく用いられている無機シンチレータの特徴を示す。

シンチレーションメカニズム シンチレーションのメカニズムは結晶格子の構造に依存する。CsIのような純粋な無機結晶格子では、電子は選択されたエネルギーバンドを占めることしか許されない。禁制帯またはバンドギャップとは、純粋な結晶において電子が決して見出すことのできないエネルギー範囲のことである（図 2.7）。

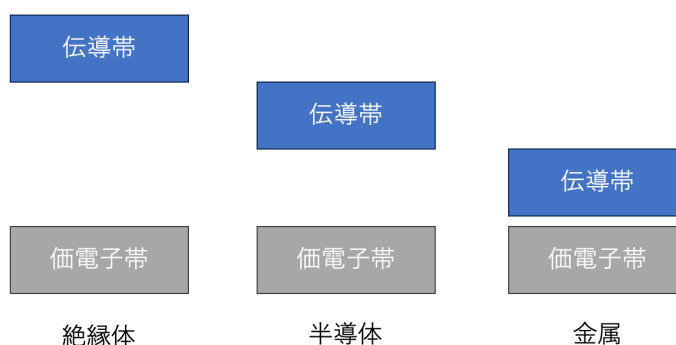


図 2.7: 固体中の電子エネルギーのバンド構造

純粋な結晶では、エネルギーの吸収によって電子が価電子帯から伝導帯に上昇し、価電子帯にギャップができる。しかし、光子の放出によって電子が価電子帯に戻るのは非効率的なプロセスであるため、1回の崩壊で放出される光子は少なく、エネルギーは他のメカニズムで放出される。さらに、純結晶のバンドギャップ幅は、結果として放出される光子が可視光域に入るには高すぎる。

そのため、結晶には少量の不純物が添加される。例として、Tl は CsI に微量添加される。不純物は活性剤と呼ばれ、バンドギャップ構造（エネルギー構造）を変化させる特別なサイトを格子に作る。図 2.8 のように、結晶全体のエネルギー構造は変化せず、活性化剤サイトのエネルギー構造だけが変化する。

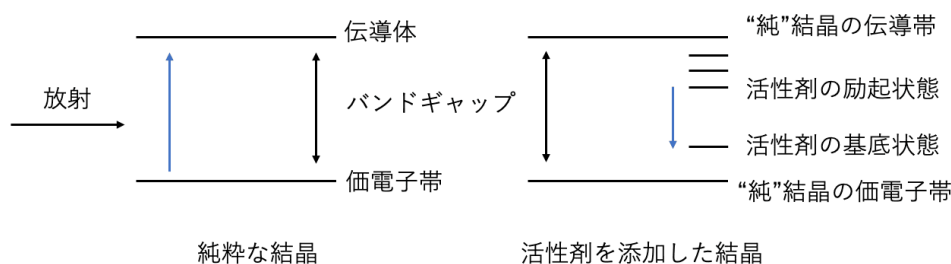


図 2.8: 無機シンチレータのエネルギーバンド構造

試料内のわずかな活性化サイトで、エネルギー構造が変化する。純結晶では禁制帯であるはずのエネルギー準位が生成され、電子はこれらの準位を通して価電子帯に戻り、脱励起することができる。また、このとき活性化剤が結晶内に存在することによって生じるエネルギー準位は、純粋な結晶よりも狭い。そのため、

電子の上準位から下準位への遷移によって放出される光子は、純結晶よりもエネルギーが低くなる。発光スペクトルは長波長側にシフトし、バルク結晶の光吸収帯の影響を受けない。これにより、光子は可視域で放出される。

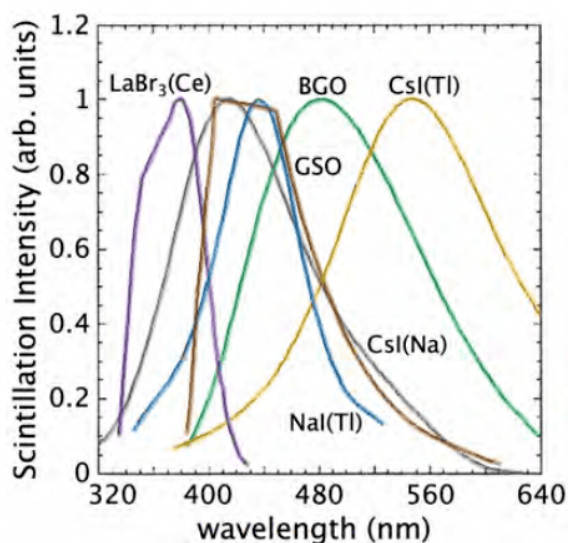


図 2.9: 無機シンチレータのシンチレーション光の相対強度 vs 蛍光波長 [12]

そして、結晶を通過する荷電粒子（光電子など）は、多数の電子-正孔対を生成する。

- 正孔はすぐに活性化剤部位の位置に移動し、その部位はイオン化される。活性化因子のイオン化エネルギーは典型的な格子サイトよりも小さいため、活性化因子のサイトは優先的にイオン化される。
- 伝導帯に上昇した電子は結晶中を自由に移動し、イオン化した活性化サイトまで移動する。
- 電子は不純物サイトに落下し、独自の励起状態を持つ中性の不純物配置を作る。
- 励起状態から基底状態へと遷移する。
- 脱励起は、高い確率で光子の放出とともに速やかに起こる。
- 活性化剤は、光子が可視となるように選択される。
- 活性化剤の励起状態の典型的な半減期は 10^{-7} 秒で、結晶中を電子が移動する時間はもっと短い。したがって、光出力のタイミングは状態の半減期に依存する。

2.3.2 シンチレーション光読み出しの光センサー

まず本節では、これまでの科学衛星等で使用されている、様々な種類のシンチレーション光読み出しのための光センサーについて記す。

フォトダイオード

基本的なフォトダイオード (PD) の構造はPN型と呼ばれ、p型半導体とn型半導体を接合したものになっている。PDに逆電圧をかけることによって、n型半導体の電子の一部がp型半導体へと移動し、ホールと結合することで、その領域は電荷が存在しない空乏層という領域ができる。よってこの空乏層のn側は正に、p側は負に帯電するため内部電界が発生し、そこに光が入射して電子とホールが発生して光電流として検出される。

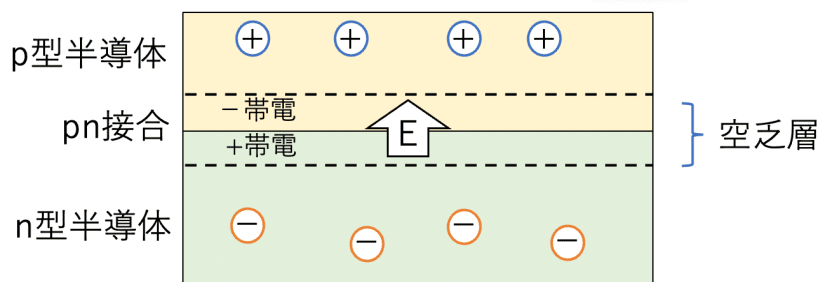


図 2.10: PD の構造

PDは動作電圧が数10Vと低いが、後述のPMTのような電子の増幅機構がないため、発生する光量が少ない場合に他のノイズ等の影響を受け、エネルギー閾値が高くなってしまふ。

アバランシェ・フォトダイオード

アバランシェ・フォトダイオード (APD) の光電流の発生原理はPDと同じであるが、APDは発生したキャリアを増倍することができる点が異なっている。構造はPDのp型半導体がp、p+、p-の3層に分かれている。p-層で光を吸収してキャリアを生成し、p層でそれらを強い電界で加速してエネルギーを与える。その電子・ホール対が結晶格子に衝突することで再び電子・ホール対が発生し、これを繰り返すことで電子雪崩 (アバランシェ) が起こし、~100倍程度の増倍率を実現できる。p+はキャリア濃度が高い層になっている。

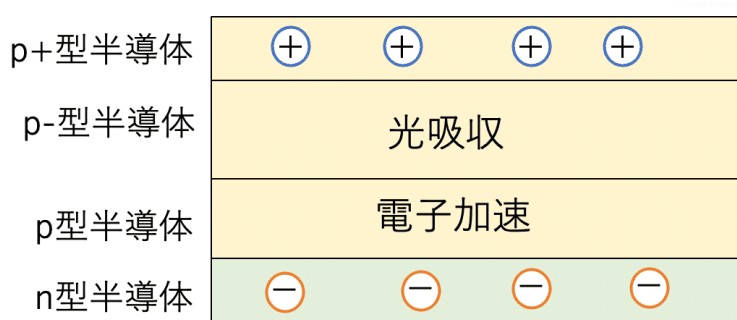


図 2.11: APD の構造

外部電圧が降伏電圧 (印加電圧を徐々に大きくしていった時、大きな電流が流れ始めるようになる電圧) 以下では、電圧に応じて増倍率は数百倍程度まで上がり、シグナルと入射した光量は比例関係になる。降伏

電圧以上ではガイガー放電という現象が起こり、光量の大きさに関係なく、光の入射によって素子に固有の出力が発生する。すなわち高い増倍率 ($10^5 \sim 10^6$ 倍) は得られるが、これでは入射した光子の数が分からないため、単一の APD は通常降伏電圧以下で運用されることが多い。

光電子増倍管

光電子増倍管 (Photo-multiplier tube : PMT) は真空管の一種で、入射窓に入射した光子が光電面に衝突することで光電子が発生する。それが集束電極により真空状態の内部を加速されてダイノードに衝突して電子数が増倍され、電子増倍が起こる。これを繰り返す、最終的に電子の増倍率は $10^6 \sim 10^7$ 倍となり、陽極から取り出される。この増倍率の高さが PMT の特徴であり、1つの光子を検出できるが、動作電圧が 700 V 以上と高いことやサイズが大きいことなどが問題となる。

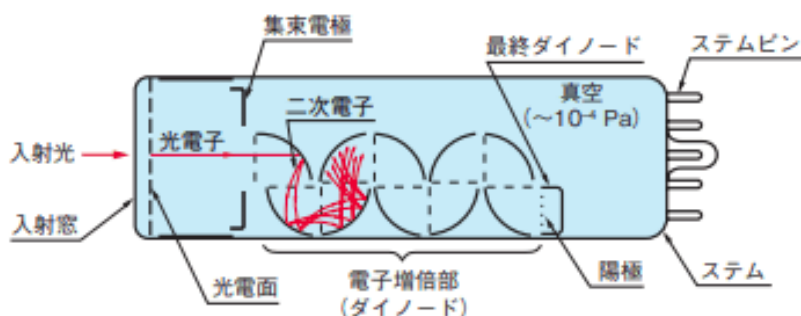


図 2.12: 光電子増倍管の構造 [11]

表 2.3 に、以上代表的な光センサーの特徴についてまとめる。本研究で用いている検出器は、MPPC と呼ばれるものである。その詳細については後述する。

光検出器	増倍率	量子効率 (%)	動作電圧 (V)	コンパクト・軽量化
PD	1	~80	5-50	○
APD	10^2	80	100-500	○
PMT	$\sim 10^7$	20-30	800-1000	×
MPPC	$\sim 10^6$	80	30-60	○

光検出器	ノイズ	磁場の影響	電圧と温度の影響
PD	小	小	小
APD	大	小	大
PMT	小	大	小
MPPC	大	小	大

表 2.3: 代表的な光検出器の性能の比較 [13]

2.3.3 光半導体検出器 MPPC

様々な光センサーについて前述したが、本研究では、光半導体検出器 MPPC (図 2.13) を用いる。MPPC は APD をマルチピクセルにした半導体検出器で、光電子増倍管と同等の性能を持ちつつも低電圧で動作し、十分な増倍率 (ゲイン) があり、サイズが小さいことから宇宙での観測に用いるのに適している。図 2.15 に MPPC の内部構造を示す。MPPC はガイガーモードで動作し、APD の各ピクセルに光子が入射すると、直列に並んだクエンチング抵抗に電流が流れ、電圧降下が起こり放電が止まる。その後再び充電され、ガイガーモードで動作するようになる。これにより、各ピクセルに光子が入射すると一定の電流が流れる。また、それぞれのピクセルからの出力の和を読み出すため、その値は反応したピクセル数に比例する。よって、光子数を計測することができる。



図 2.13: MPPC

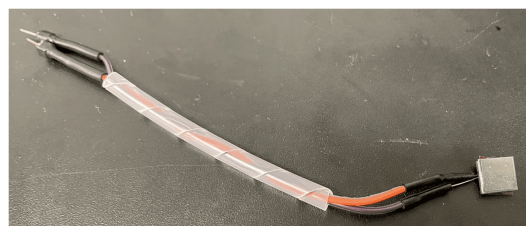


図 2.14: 表面実装の MPPC

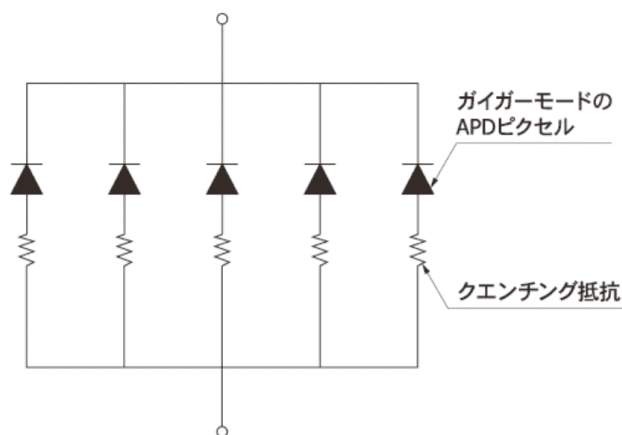


図 2.15: MPPC の内部構造 [13]

増倍率

MPPC の増倍率とは、以下の式 2.5 のように各ピクセルが 1 光子を検出して発生した電荷 Q を電荷量 ($q = 1.602 \times 10^{-19}$) で割ったものである。 Q は式 2.6 のように逆電圧 V_R とブレイク電圧 V_{break} で決まる。

$$M = \frac{Q}{q} \quad (2.5)$$

$$Q = C \times (V_R - V_{break}) \quad (2.6)$$

電圧が V_{break} 以下では放電が止まるため、電荷量を求める際にはその時にある電荷を引く必要がある。この2式より増倍率は、大きいピクセル容量で逆電圧も高いほど高くなる。

検出効率

検出効率 PDE (Photon Detection Efficiency) とは、MPPC に入射した光子のうちどのくらいを実際に検出することができるのかを示す性能であり、以下の式 2.7 で表される。

$$PDE = \frac{\text{検出光子数}}{\text{入射光子数}} = F_g \times QE \times P_a \quad (2.7)$$

ここで F_g は開口率 (ピクセル領域全体のうち光検出可能な部分の割合)、QE は量子効率 (光子を電子に変換する効率)、 P_a はアバランシェ確率 (光電効果でピクセル内に生成されたキャリアがアバランシェ増倍を起こす確率) である。

使用した MPPC

本研究で使用した MPPC (浜松ホトニクス社) は以下の通りである。MPPC は典型的に数十 V の低電圧で動作する。これらの型番はクロストークや暗電流が少ないことが特徴であり、また受光面が Black case で囲まれているものは丈夫で扱いやすいために選んだ。

1krad 照射済みの MPPC とは、福井県の若狭湾エネルギー研究センターにおいて、200MeV の陽子 (1MeV 中性子相当) を 1krad、 $1.71 \times 10^{10} \text{ protons/cm}^2$ 照射して擬似的に放射線劣化させたものであり、これは地球低軌道 (上空 500-600 km) で約 1 年間衛星運用を行なったと仮定したものである。ピクセルサイズが $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ のものは、3.4 節での比較のために、最下段のものは 4 章で MPPC を取り付ける基板設計をした MPPC である。

MPPC	受光面サイズ (mm)	ピクセル数	Vop	備考
S13360-6050CS (No.1)	6.0 × 6.0	14400	54.2 V	通常 (Black case)
S13360-6050CS (No.2)	6.0 × 6.0	14400	54.15 V	通常 (Black case)
S13360-6050CS (放射劣化 No.1)	6.0 × 6.0	14400	54.73 V	1krad 照射済み (Black case)
S13360-6050CS (放射劣化 No.2)	6.0 × 6.0	14400	55.68 V	1krad 照射済み (Black case)
S13360-3050CS	3.0 × 3.0	3600	54.48 V	通常
S13360-3050CS-HRQ	3.0 × 3.0	3600	54.92 V	改良
S13360-3075CS	3.0 × 3.0	1600	54.8 V	通常
S13360-3075CS-HRQ	3.0 × 3.0	1600	54.83 V	改良
S13360-6050VE	6.0 × 6.0	14400	~54 V	通常 (表面実装)

表 2.4: 使用した MPPC[16]

2.4 研究の目的

前節で示したように従来の軟ガンマ線観測では BGO シンチレータが主にアクティブシールドとして用いられ、高感度観測を可能にしてきた。このような背景を踏まえ、本研究ではシンチレータ+ MPPC 光検出器を用いたアクティブシールドについて検討する。

まず1つ目に、BGOは密度が高いため、小型衛星（数 100 kg）や超小型衛星（数 10 kg）に向けて、そして速い信号を読めるという特徴を活かして、プラスチックシンチレータを検討する。光検出器としては、サイズが小さくノイズが少なく信号の増幅率も良い MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を用いるが、衛星軌道上での運用により MPPC 光検出器が放射線劣化してしまう問題への対策として、疑似的に陽子照射で放射線劣化させたものを用いて実験を行う。放射線劣化（放射線を大量に浴びて性能が悪くなること。放射化は陽子などにより原子核が励起して不安定同位体になる、崩壊時に放射線を出すものができること）によって上昇してしまったエネルギー閾値を、いくつかの方法で下げることができるのかを調べる実験を行う。

そして2つ目に、衛星の大きさに関わらず使える手法として、従来から使われていた大きな BGO や CsI などのシンチレータを分割したものに MPPC を取り付けたものを1セットとして多数取り付け、それぞれからの信号を多チャンネル読み出しすることで、光量のロスや振動の衝撃への対策だけでなく、天体事象の位置決定も行いやすくすることを想定したセットアップを考える。またできるだけセットアップを小さくすることも含めて、表面実装の MPPC を取り付けるための基板も自ら設計する。そして、多チャンネルで読み出すためのシステムの立ち上げを行う。

第3章 プラスチックシンチレータ+MPPCを用いた光量・エネルギー閾値の評価

本章では、プラスチックシンチレータ (EJ-200[23]) と MPPC を用いた実験のシステムについて記す。

3.1 本実験の目的

本実験では、プラスチックシンチレータ+光検出器 MPPC を用いている。小型衛星や超小型衛星でのアクティブシールドとしては、BGO シンチレータでは重すぎるという問題があるため、軽量のプラスチックシンチレータを用いた。また、同じくこれらの衛星で使用する MPPC 光検出器は、長い年月衛星軌道上で運用することで、主に陽子などの宇宙線の衝突で、ダメージを受けてしまうという問題がある。放射線損傷を受けると検出器が自らノイズとなる信号を出し続け、観測の妨げになってしまうため、ここではプラスチックシンチレータの速い信号特性を利用して放射線劣化の影響を減らし、エネルギー閾値があまり上がらないようにする実験を行った。また他の実験として、シンチレータの大きさによる光量依存性や、改良版 MPPC での光量の違いについても調べた。

3.2 実験セットアップ

本章で使用した、プラスチックシンチレータを用いたセットアップは以下の通りである。

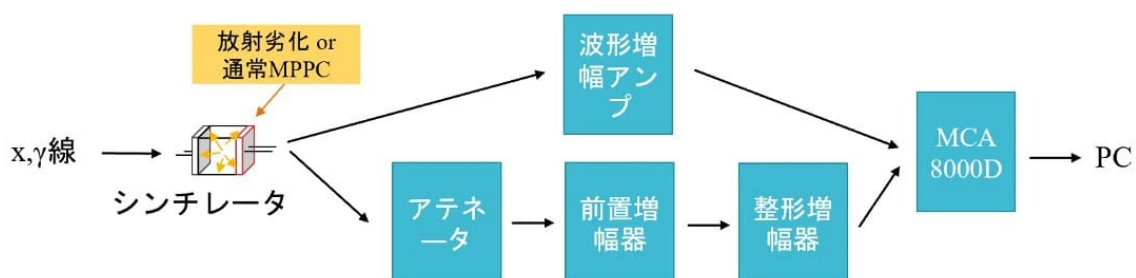


図 3.1: 1つの MPPC を用いた MCA 8000D のセットアップ

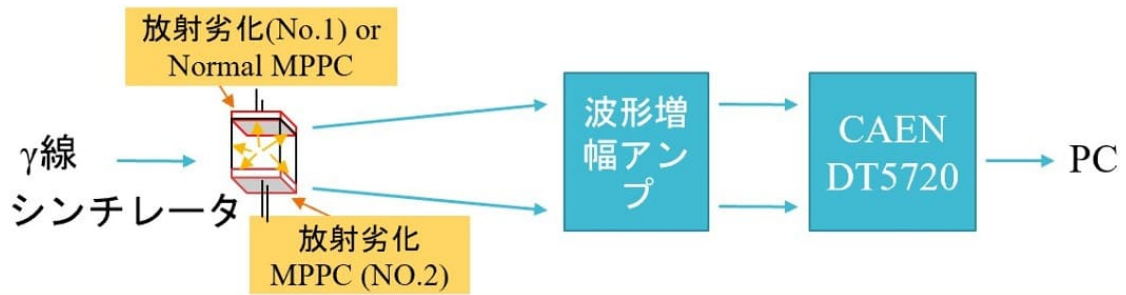


図 3.2: 同時イベント測定のための CAEN DT5720 を用いたセットアップ

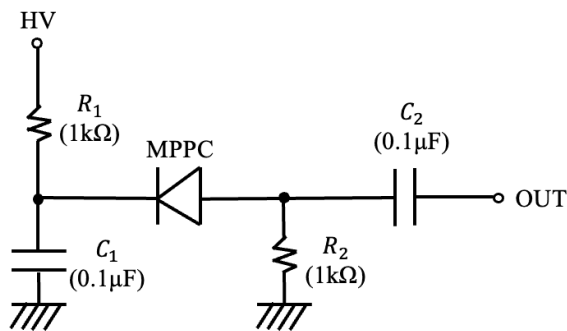


図 3.3: 用いた回路 [14][15]



図 3.4: 実験の様子

機器	機能
ソースメータ	高圧電源の印加
前置増幅器 (プリアンプ)	電荷を電圧に変換・増幅 (積分)
整形増幅器 (シェイパー)	増幅・整形
波形増幅アンプ	信号増幅

表 3.1: 使用した実験機器

基本的なセットアップとしては、高圧電源を MPPC にかけるためにソースメータ (2410、2470 Keithley 社) を用いて、X 線やガンマ線がシンチレータに入射して発生したシンチレーション光を MPPC で読み出し、後に続く回路 (図 3.3) につなげる。まず図 3.1 の上側については、MPPC の信号を前置増幅器 (FAST QUAD PREAMPLIFIER/MODEL 5028、CLEAR-PULSE 社) で増幅し、同時にノイズを除去する。ここで、前置増幅器は回路のコンデンサにたまった電荷を積分するため、パイルアップし、サチュレーションを起こす可能性がある。そこで、整形増幅器 (MODEL 571、ORTEC 社と 4077-4 型 FAST/SLOW Shaper、整形時定数 50ns、CLEAR PULSE 社) で波形を整形したり、事前にアテネータで信号を適切に減衰させることにより対応する。そのアナログ信号を ADC(アナログ・デジタル・コンバータ、MCA8000D、Amptek 社 [24]) でデジタル信号に変換し、最終的に PC で読み出す。下側のように、後の実験で登場する波形増幅アン

プ (NO8-11 OCTAL PULSE AMPLIFIER、LeCroy 社) を用いる場合は、波形をそのまま 10 倍に増幅し、ADC、PC で読み出す。図 3.2 は波形増幅アンプを通した後、CAEN DT5720[18] というデジタイザに入力している。CAEN DT5720 の特徴については、後の実験のところ詳しく記述する。

またそのほかに、バルカテープ (アズワン社製 P.T.F.E THREAD SEAL TAPE) をシンチレータに 5-6 周巻くことで MPPC に効率よくシンチレーション光が届くようにしたり、光学グリス (TSK5353, Momentive Performance Materials Inc.) を塗ることでシンチレータと MPPC の間の屈折率を調節したりしている。

3.3 シンチレータの大きさによる光量依存性

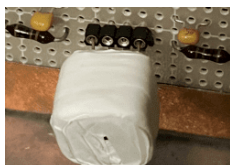


図 3.5: 小さいシンチレータでの測定の様子



図 3.6: 大きいシンチレータでの測定の様子

本研究での多くの実験で 1cm 四方の立方体のプラスチックシンチレータ (図 3.5) を用いているが、実際に検出器と共に宇宙空間で使用する際は、相応の大きさになると考えられる。その一方で大きいシンチレータでは、MPPC から離れたところで生じたシンチレーション光が MPPC に届くまでに減衰してしまうことなどから、光量が損なわれると考えられる。そのため本節では、大きい直方体 (1cm×5cm×30cm、図 3.6) のシンチレータを用いて、光量を測定した。その際、1cm の立方体のプラスチックシンチレータでの結果との比較から、計算して求めた。

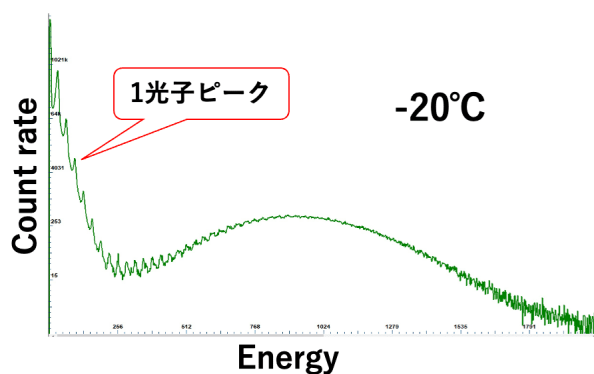


図 3.7: 1 光子ピーク測定

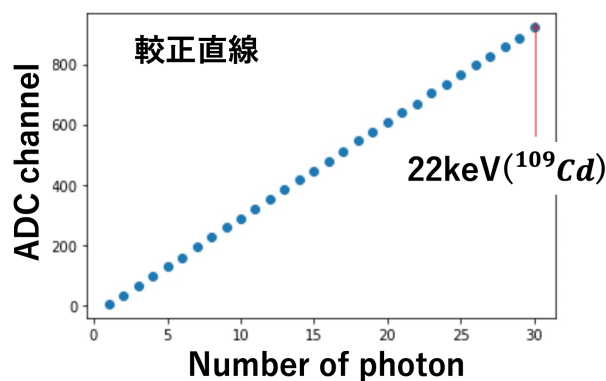


図 3.8: 較成直線

図 3.7 では、1cm 角の小さいシンチレータと ^{109}Cd (22keV) の線源を照射した。図 3.1 の下側のセットアップで、シンチレータに MPPC を 1 つだけつけ、またプラスチックシンチレータの光量はほとんど温度依存性がない [25] ことから、1 光子のピークを見やすくする (熱に依存するノイズの減少) ために -20°C の低温で測定を行った。1 光子ピークとは、微弱な光信号を高速に処理し、一つ一つの光子の到達を検出し、光子数に対応して離散的に現れる信号ピークを観測しているものである。その結果から 1 光子のピークを数え、較成直線を求めた (図 3.8)。これらの結果から、この小さいシンチレータの光量として、 ^{109}Cd の光

電吸収ピーク 22keV が約 30 光子に対応することがわかった。これは、プラスチックシンチレータのカタログ [23] に記載されている値と比較すると小さくなっているが、MPPC の量子効率が 30% 程度であることと、この MPPC はブラックケースで覆われていて、実際に検出可能な有効面積は $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ であることを考慮すれば、妥当な値であることがわかる。

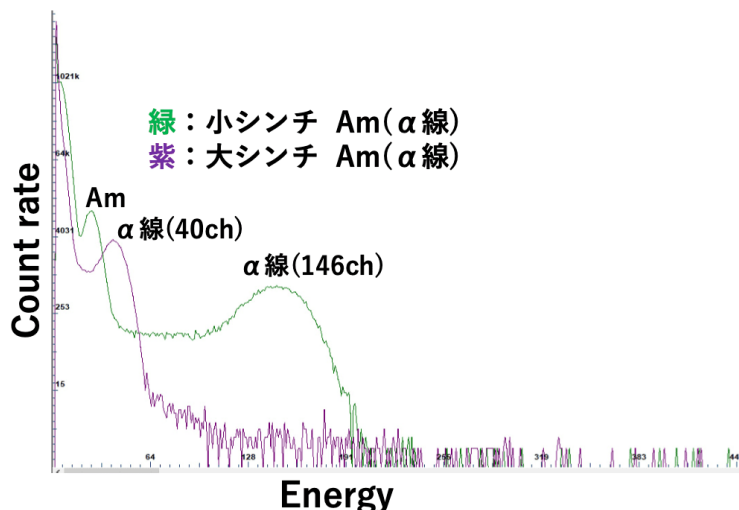


図 3.9: シンチレータの大きさによる光量の比較

そして図 3.9 が、 α 線を出す ^{241}Am 線源を照射し、波形増幅アンプのみを使用した測定（図 3.1 の上側で、シンチレータに MPPC を 1 つのみ装着）でそれぞれのピークの位置を比較したものである。大シンチでは、ノイズの影響で 59.5 keV のガンマ線の吸収ピークは見えていない。 α 線のピークの位置を決めると、小シンチのピークは、大シンチの約 3.6 倍の位置に確認でき、上述の結果と合わせて、大シンチでは光量は 22keV に対し 8.3 光子程度と求まった。

ここで、 α 線の正体は 5 MeV 程度の He-4 の原子核であり、同じエネルギーのガンマ線とは異なるシンチレーション光を出すため、ガンマ線のピークの位置との関係はエネルギー比になっていない。具体的には、 α 線が通過する際、イオン対生成による再結合や、エネルギー損失による発光の抑制などが生じ、これは quenching 効果と呼ばれ、415keV 相当程度になるとされている [26][27]。

3.4 従来 MPPC と改良 MPPC、ピクセルサイズの違いによる光量の比較

ここでは、1cm 角立方体プラスチックシンチレータを用いて測定した、従来型の MPPC と、改良型の MPPC の光量について述べる。従来型はここまでの測定にも用いているもの（ただし表 3.2 に示す通り、大きさがことなる）で、改良版とは Cherenkov Telescope Array (CTA) と呼ばれる計画で開発されており、SiPM カメラに用いられている、新型の MPPC のことを指す [17]。この MPPC はその内部に使われているクエンチング抵抗が数 10 倍ほど大きくなっており、図 3.10、3.11 を比較するとわかるように、減衰時定数が大きくなっている。これは MPPC の復帰時間が遅くなることを意味するため、信号に対してとても速い放射線劣化したピクセルの寄与が小さくなる（後述する欠陥ピクセルの回復時間が遅くなり、常にノイズを出し続けていても波高値が低くなる）ことが期待されている。またさらに、この改良版 MPPC では表面の処理など

により、紫外線領域の光に対する感度（量子効率）が従来のものよりも高いため、プラスチックシンチレータの発光領域を考慮すると、光量をより多く確保できるのではないかと考えた。そこで、ここではこれらの光量の比較を行う。図 3.1 の下側に示すセットアップを用いて、常温 20 °C で ^{109}Cd の線源を照射して測定し、1 photon のピークと光電吸収ピークを同時に確認した。それぞれについて、適切にアテネータを入れて信号がサチュレーションを起こさないようにした。

1cm 角立方体プラスチックシンチレータ (EJ-200) と、以下の浜松ホトニクス社の 3 mm 四方の MPPC を用いて測定した。シンチレータの、MPPC をつけていない 5 面と、つけた面の MPPC がいない部分 (1cm の正方形から切り抜いた部分) は反射材 ESR (3M 社) とテフロンテープで覆った。

MPPC	ピクセルサイズ	Vop	型	22 keV に対する光子数
S13360-3050CS	50 μm	54.48 V	通常	15
S13360-3050CS-HRQ	50 μm	54.92 V	改良	17
S13360-3075CS	75 μm	54.8 V	通常	20
S13360-3075CS-HRQ	75 μm	54.83 V	改良	22

表 3.2: 使用した MPPC とその光量の測定結果

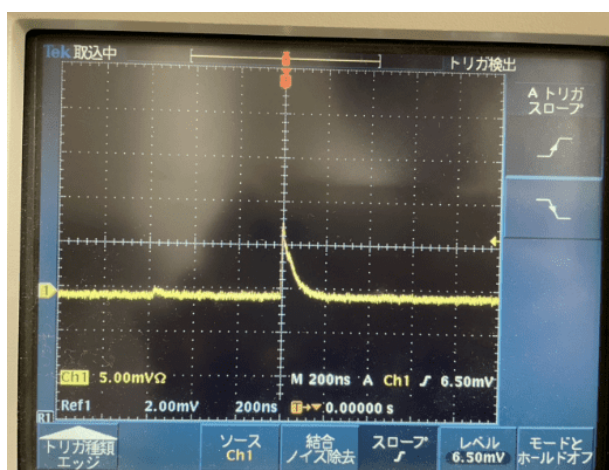


図 3.10: ^{109}Cd を照射した時の通常 MPPC の生信号

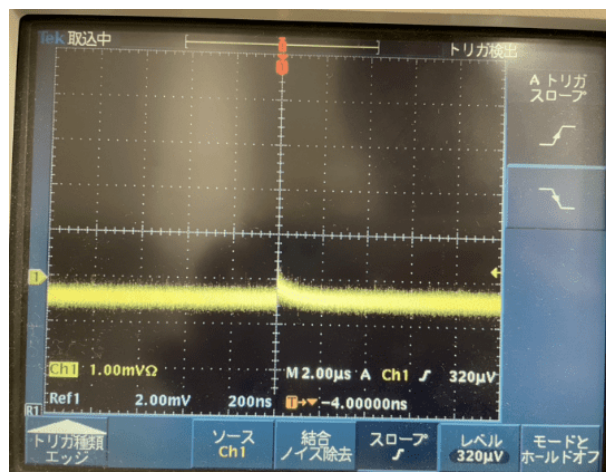


図 3.11: ^{109}Cd を照射した時の通常 MPPC の生信号

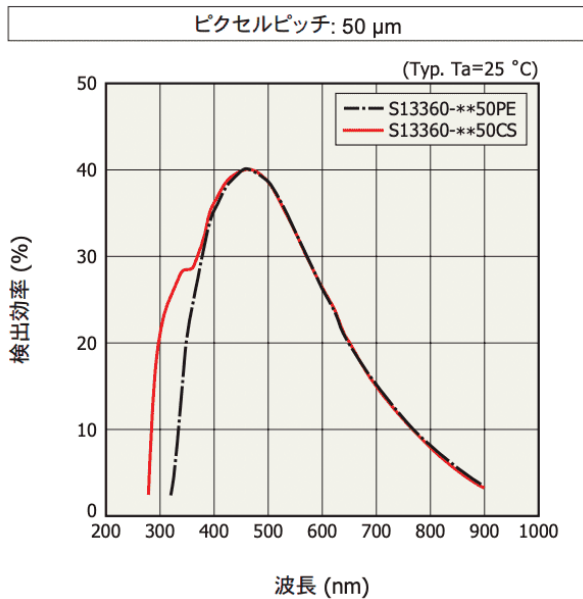


図 3.12: 通常 MPPC の検出効率 (50 μm 、赤線) [16]

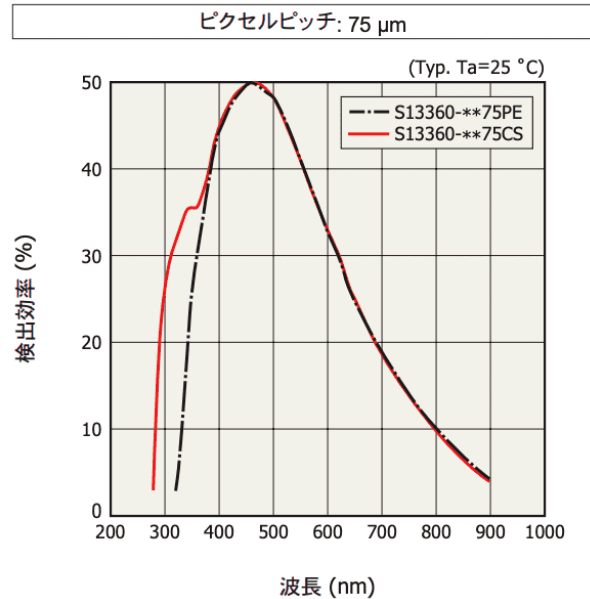


図 3.13: 通常 MPPC の検出効率 (75 μm 、赤線) [16]

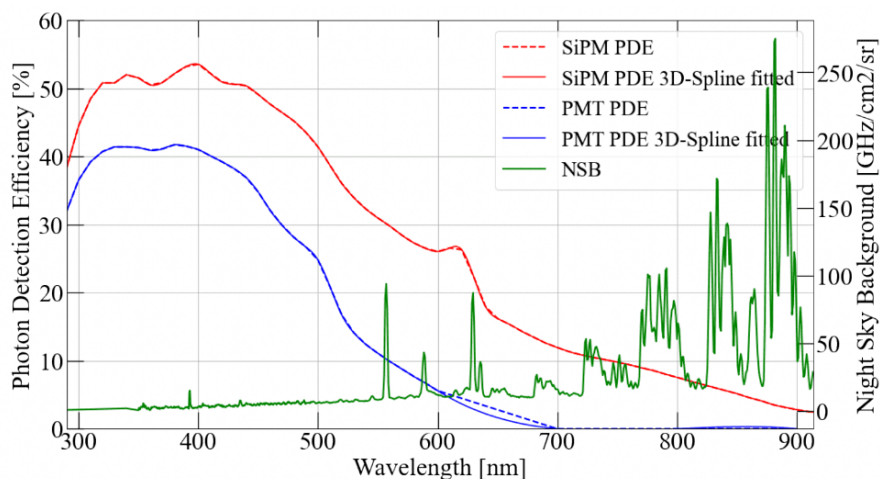


図 3.14: 改良 MPPC の検出効率 (75 μm 、赤線)[17]

図 3.15 の (a) から (d) に測定したエネルギースペクトルを示す。それぞれ ^{109}Cd の光電吸収ピーク (22 keV) に対する光子数は表 3.2 に示す通りで、どちらのピクセルサイズでも、改良版の方が光子数が多いことが分かった。これは、MPPC 検出部表面の改良などにより、紫外線に対する検出効率が上がったためだと考えられるが、その理由についての詳細は明らかにされていない。またピクセルサイズによる違いについても、75 μm の方が光子数が多くなった。これは、ピクセルサイズが大きい (つまり、ピクセル数が少ない) 方が、ピクセル間の仕切りなどのデッドスペースが少ないため、一般的に検出効率が良いと考えられる。図 3.12、3.13 より、プラスチックシンチレータの発光波長である 420 nm 付近では、ピクセルサイズが 75 μm のものは、50 μm のものよりも 1.3 倍程度検出効率が高いことがわかり、また図 3.14 より、

改良版は通常版よりも 1.1 倍程度検出効率が高いことがわかり、それぞれ表 3.2 の結果とコンシステントであることがわかる。

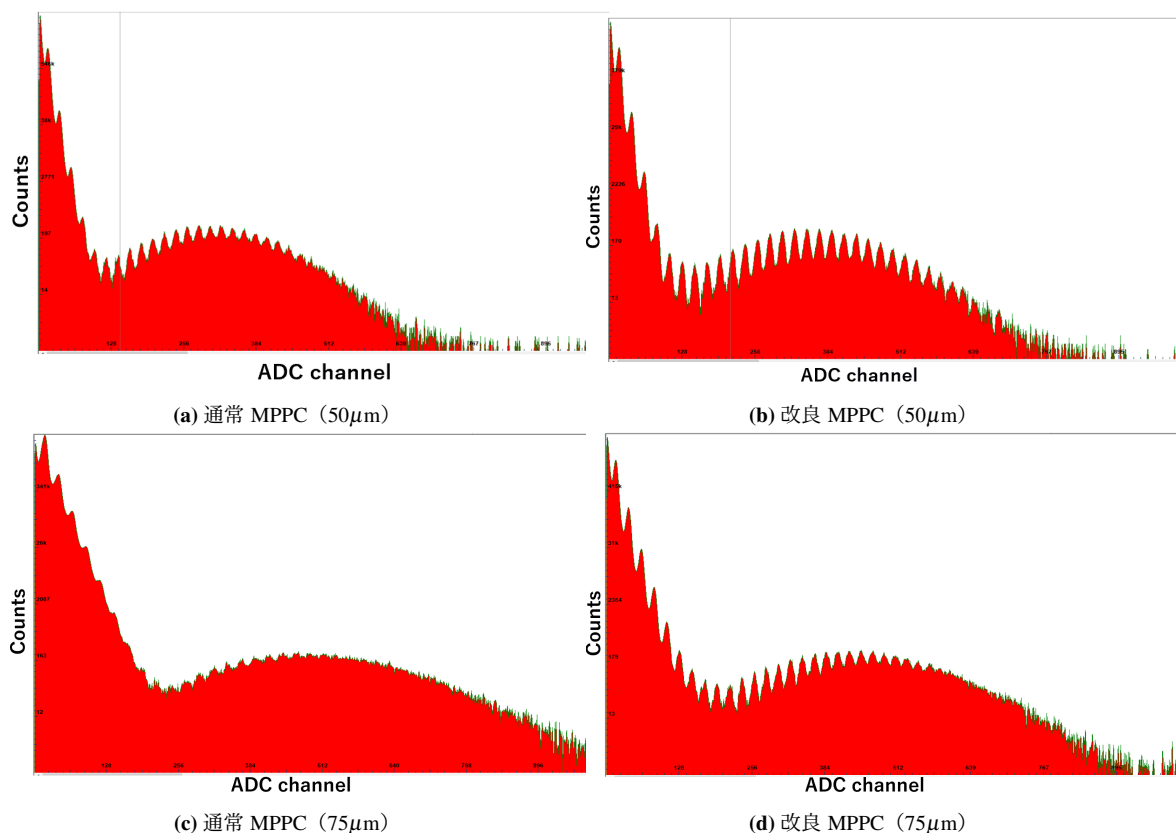


図 3.15: それぞれの MPPC (ピクセルサイズ 50 μ m,75 μ m) のスペクトル

3.5 検出器の放射線損傷

MPPC は小型で扱いやすく、ゲインも高いため、宇宙での観測に適していて実際によく使われているのだが、長年衛星運用を続けることで、軌道上で宇宙から飛来する放射線（主に陽子）により損傷してしまうことを考慮しなければならない [28]。ここからは放射線損傷による影響とその軽減の実験についてまとめる。

3.5.1 検出器の放射線損傷

まず、MPPC が衛星の軌道上運用により放射線損傷を受ける原理について述べる。MPPC は複数のピクセルから構成されている半導体検出器である。MPPC はガイガーモードで光子の検出を行っていて、各ピクセルが信号検出の意味の”1”、または信号未検出の意味の”0”を出力する。これにより通常の場合は、天体などの信号を検出した時のみ各ピクセルは”1”を出力するが、放射線損傷を受けるとそのピクセルの禁制帯に新たなエネルギー準位が作られてしまう。それにより暗電流を感知しやすくなり、図 3.16 の赤いピクセルのように何も信号を検出していなくても”1”を出力してしまう。さらにこの欠陥ピクセルによる出力はタイ

ムインターバルが信号に比べてとても短く、常に出力をし続けるために、信号検出の際に常に影響を及ぼしてしまう。図 3.17 は、CAMELOT(Cubesat Applied for MEasuring and LOcating Transients) という日本とハンガリーの共同プロジェクトで、実際に打ち上げられた超小型衛星に搭載された MPPC のエネルギー閾値(検出限界)の運用期間による変化を示している。これより、MPPC は軌道上での運用年数により放射線のダメージを受け、エネルギー閾値が上昇してしまうことがわかる。

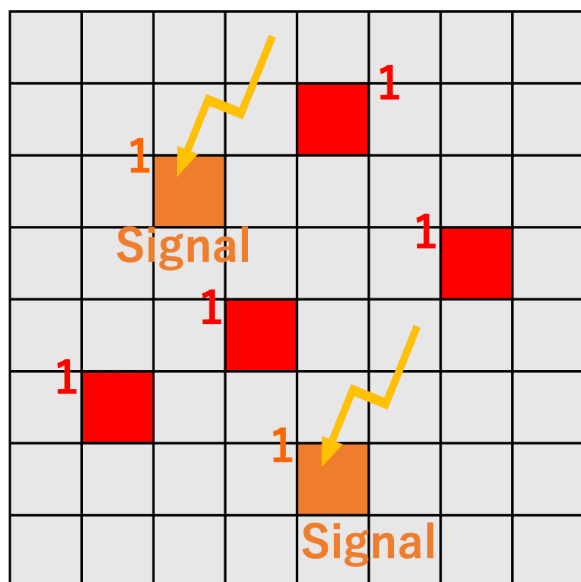


図 3.16: 放射線劣化によりできた欠陥ピクセルの概念図。オレンジ色のものが信号が来たピクセルで、赤いものが欠陥ピクセル。

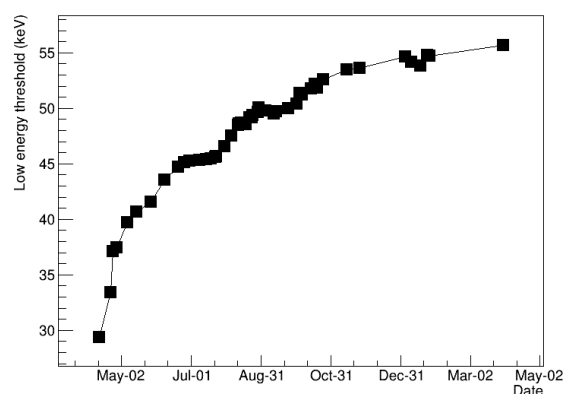


図 3.17: 日本がハンガリーと共同で打ち上げた超小型衛星に搭載された MPPC の運用によるエネルギー閾値の上昇

3.5.2 検出器の放射線損傷の影響の測定

以上のような原理で MPPC は放射線損傷を受ける。上述のように、検出器を長年宇宙の衛星軌道上で使い続けると、宇宙線などの衝突により、MPPC がダメージを受けて放射線劣化してしまうことが考えられる。ここでは、プラスチックシンチレータと通常 MPPC または放射線劣化した MPPC を用いた測定の比較によりその影響を示す。

CAEN DT5720

ここではまず、図 3.2 にあり、本測定で用いている CAEN DT5720 について記す。このデジタイザを使用するには、Windows の環境に COMPASS というソフトウェアをインストールし、また関連するドライバーも入手する必要がある [18]。デジタイザの電源を入れパソコンと正しく接続されると、測定のためのパラメータ等を任意の値に設定できるようになる。表 3.3 はその性能である。



図 3.18: CAEN DT 5720[18]

性能	詳細
読み出しチャンネル	2 (オプションで最大 4)
動作電圧	12 V
サンプル周波数	250 MS/s i.e. 4 ns/S
Coincidence window	4 ns
分解能	12 bit

表 3.3: CAEN DT5720 の性能

そして、本実験で重要な値となる、このデジタイザで測定をする際のパラメータであるゲート幅の設定について記す。

このボードは、取得された ADC 値が、設定したトリガー閾値を超えるとトリガーが発生し、波形データが出力データとして記録される。記録データの開始と終了は Pre-gate と Long-gate により設定できる。また、取得した波形の ADC 値の最大値を出力し、これを用いてスペクトルを生成することができる。さらに、このボードは、同時計数条件（同時計数の幅については後述）をフィルタリングしてデータを出力することもできる。

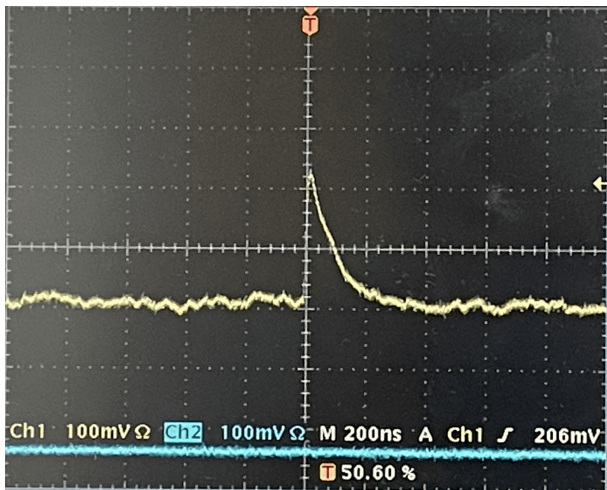


図 3.19: オシロスコープの出力

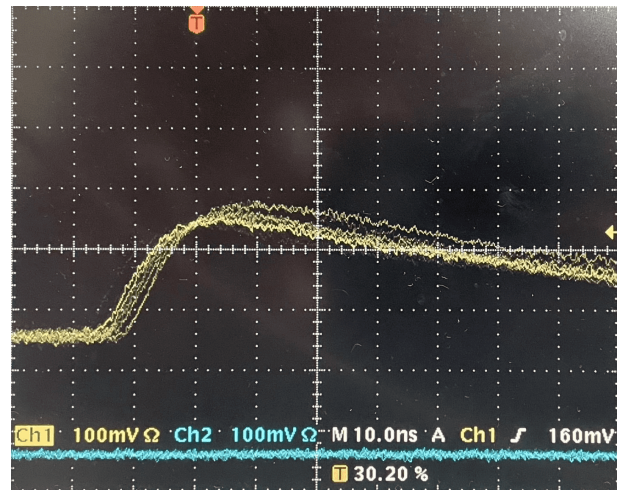


図 3.20: 図 3.19 の拡大図

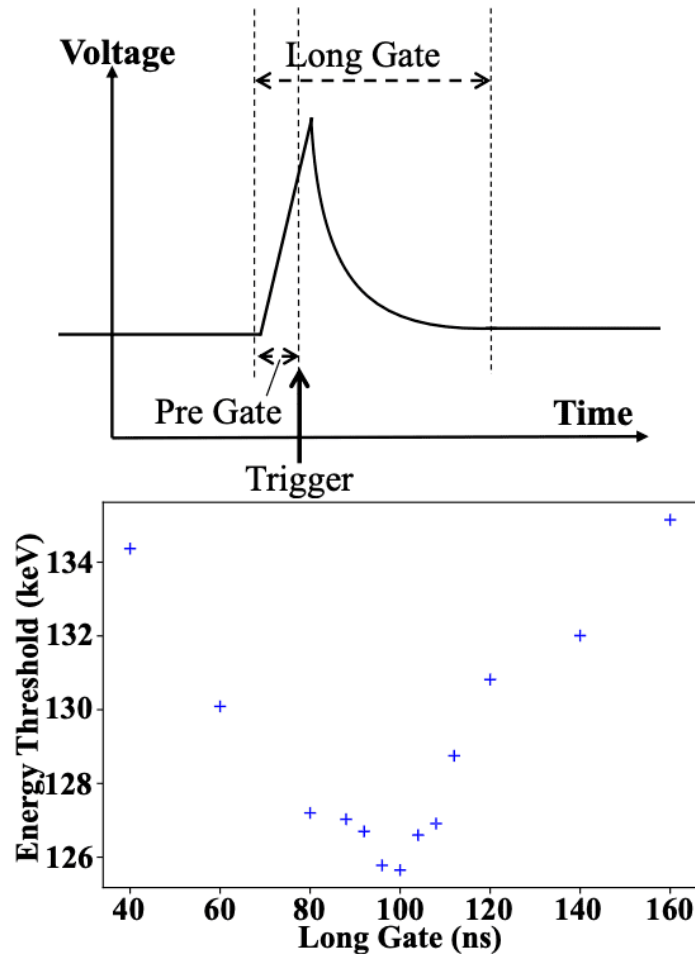


図 3.21: (上) CAEN DT5720 の波形の模式図、(下) Long-gate を変えた時のエネルギー閾値の変化

図 3.21 はオシロスコープで見た波形の例である。まず Long-gate はエネルギースペクトル取得の際に利用する波形の幅を表し、波形の立ち上がりから減衰するまでの時間を指定する。次に Pre-Trigger を十分な時間設定することで、トリガーがかかった際その少し前の情報も保存することができる。また、CAEN DT5720 の情報処理の問題により、式 3.1 に従うように設定する必要がある。ここで、実際にスペクトル取得で直接参照されるのは、Pre-gate の値である。

$$Pre - Gate \leq Pre - Trigger - 32ns \quad (3.1)$$

事前に図 3.19、3.20 のように波形増幅アンプの出力をオシロスコープで確認し、Pre-gate を 12ns とすることを決めた。次に Long-gate に関しては、値をさまざまに変えて測定を行い、エネルギー閾値が最も低くなったものを用いた。この計算には ^{137}Cs のコンプトンエッジを用いている。Long-gate を長くしすぎると、放射線劣化による MPPC のノイズが多く取得され、エネルギー閾値が悪くなると考えられる。その結果は図 3.21 (下) に示す。よってここでは、Long Gate を 100ns とした。トリガー閾値は、特に断りのない限り、 40 Ch_{th} (この場合 107 keV 相当) とした。ここで添字“th”は、CAEN DT5720 のトリガー閾値チャンネルを

表す。

コンプトンエッジの位置の決め方

エネルギー閾値を求める際に、光電吸収ピークは場所がはっきりしているが、コンプトンエッジはピークでないため、本研究でどのようにその位置を決め、エネルギー較正を行ったのかについて、具体的な実験内容について示す前に、ここで示す。

プラスチックシンチレータはBGOなどの無機シンチレータに比べて阻止能が低いため、エネルギーが高い線源を照射すると、光電吸収ピークではなくコンプトンエッジが検出されるが、コンプトンエッジの位置を目視で決めると無視できない誤差が生じてしまう可能性がある。それを避けるため、ここでは本論文でコンプトンエッジの位置を求めた方法について記載する。まず通常のMPPCにおいて、光電吸収ピークが検出できる線源 (^{57}Co 、 ^{109}Cd 、 ^{241}Am) を用いて、エネルギー較正直線を作成した。次にそれをもとに、 ^{137}Cs 、 ^{21}Na 、 ^{133}Ba のコンプトンエッジの位置を求めた。図 3.22(上) の破線はその位置を表す。またこの測定においては、光量を増やすために、1cm 角立方体シンチレータにMPPCを1つのみ付けていて、サチュレーションを起こさないようにするために、53.2 V ($V_{br} + 2V$) の電圧をかけて測定を行っている。

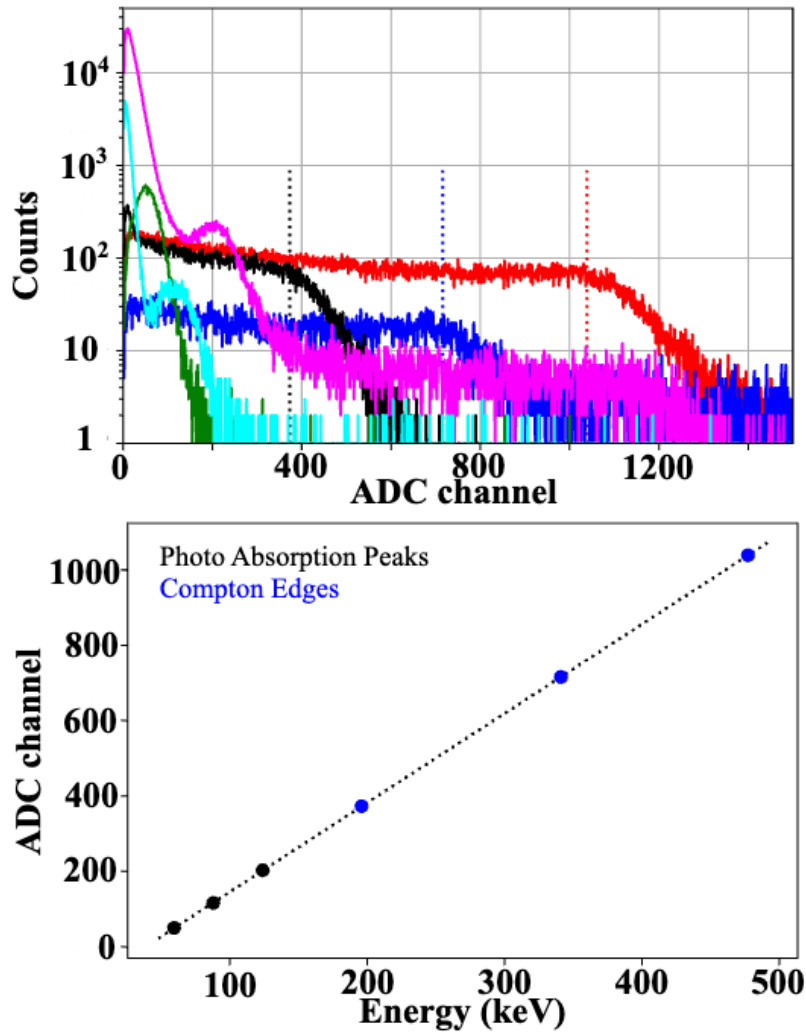


図 3.22: (上) 通常 MPPC と波形増幅アンプを用いて測定した、¹³⁷Cs (赤)、²²Na (青)、¹³³Ba (黒)、⁵⁷Co (マゼンタ)、²⁴¹Am (緑)、¹⁰⁹Cd (シアン) のスペクトル。(下) 上図から得られたエネルギー較正直線。

放射劣化した MPPC を用いると、低エネルギーの光電吸収ピークがはっきりとは確認できず、コンプトンエッジのエネルギー分解能も悪くなるため、図 3.22 (上) を拡大して擬似的にエネルギー分解能を悪くし、放射劣化した MPPC で取得したスペクトルに重ね合わせることで、コンプトンエッジの位置を決めた。この決め方により生じる誤差は 5 ADC channel 程度で、エネルギー換算で 2-3% 程度だと見積もっている。

放射線損傷の影響

以上のような設定で、実際に測定によりこの影響を確かめた際の結果を以下に示す。本実験では、上空 500-600 km の地球低軌道で宇宙線を防ぐシールド等を何も使わずに 1 年間衛星運用を行ったと仮定し、若狭湾エネルギー研究センター (福井県) で図 3.23 のように、200 MeV の陽子を 10 Gy : 1 krad (1.71×10^{10} protons/cm²)、1 MeV の中性子換算で 6×10^9 neutrons/cm² 照射した MPPC (放射劣化 No.1, No.2) を用いた [29]、[30]。200

MeV というのは南大西洋異常帯（放射線が特に多くなる領域）を考慮している [31]。このビーム照射試験では、Si の厚さが 1.3 mm であるこの MPPC への 200 MeV 陽子の堆積率は $1.6 \times 10^{-7} \text{rad/proton}$ で、ビーム中の約 1.9% の陽子が、 $\sigma = 13.7 - 13.9 \text{mm}$ の広がりをもったガウス分布で MPPC に入射し、毎秒約 106 個の陽子をほぼ均一に照射することができる。またこの比較実験は、図 3.2 のセットアップで、通常もしくは放射線劣化した MPPC を片側に 1 つのみ装着して行った。

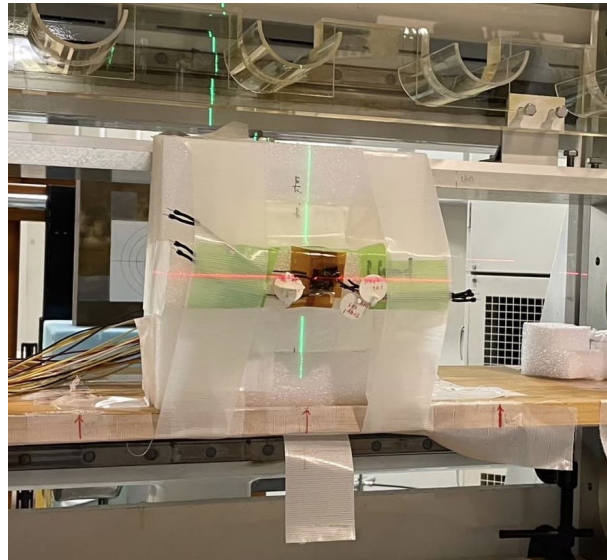


図 3.23: 若狭湾での陽子照射の様子。十字の交点を中心として、手前側から陽子ビームが照射される。

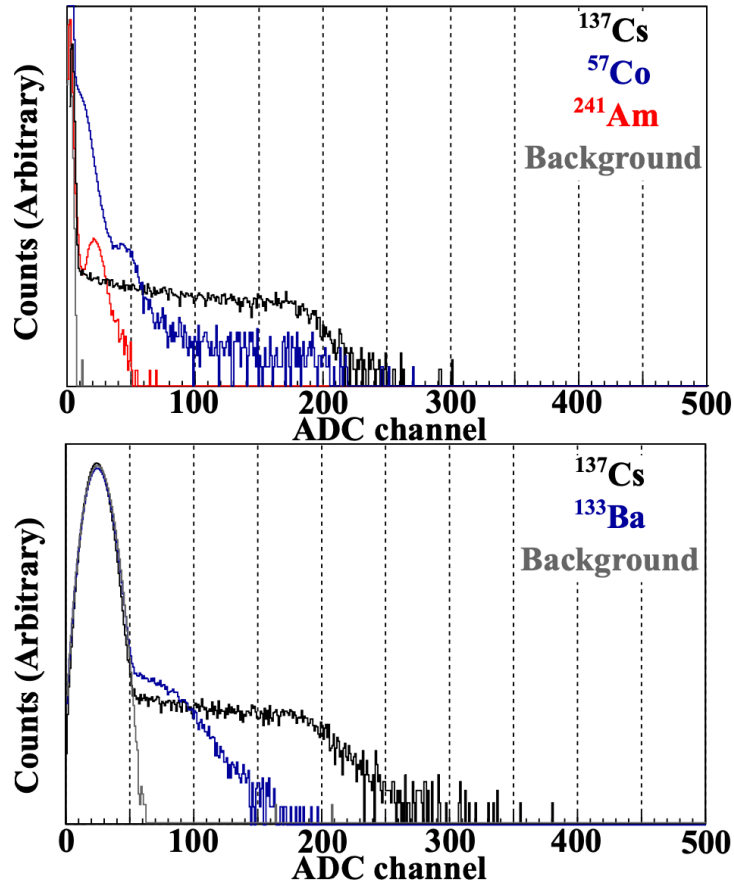


図 3.24: 波形増幅アンプで測定したスペクトル。(上) 通常 MPPC、 ^{137}Cs (黒)、 ^{57}Co (青)、 ^{241}Am (赤)、background (灰色)。(下) 放射線劣化した MPPC、 ^{137}Cs (黒)、 ^{133}Ba (青)、background (灰色)

図 3.24 (上) は通常 MPPC を用いた結果で、ここでは ^{137}Cs と ^{133}Ba のコンプトンエッジ (477 keV、196 keV) が確認でき、それらから求めたエネルギー較正直線からエネルギー閾値は 23 keV と計算することができる。一方同図の下は放射線劣化した MPPC のを用いた結果で、同様にエネルギー閾値は 132 keV と計算され、これ以下の低エネルギーの信号の検出は難しい。

このように、放射線劣化により大幅にエネルギー閾値が上がり、低エネルギー側のピークなどはこのノイズに埋もれてしまうことがわかった。以降の測定では、エネルギー閾値とは、 ^{137}Cs を照射したときのスペクトルにおいて、その信号が MPPC のノイズに埋もれなくなる ADC channel と定義して、そのエネルギーを求めている。本章のエネルギー閾値を計算したすべての測定において、同じ ^{137}Cs 線源を同時期に使用しているため、線源の種類やレートの違いによるエネルギー閾値の揺らぎは最小化できていると考えている。

3.6 検出器の放射線損傷による影響の軽減

ここからは、この放射線損傷による影響を、宇宙空間で実際に実現できる環境を再現して軽減することができないかを目的として行った種々の実験について記す。

3.6.1 波形増幅アンプを用いた測定

MPPC の出力はあまり強くないため、信号の検出のためには何らかの形で増幅を行うが、まず波形増幅アンプ（MPPC からの電流を増幅し、電流の時間プロファイルと同じ波形の電圧信号に変換する）を用いた測定を行った。従来の前置増幅器と整形増幅器を用いた測定を行うと、さまざまなノイズが検出される際に減衰時間の長いものや短いもの全てが積分されて蓄積するため、信号がわからなくなってしまう。そこで波形増幅アンプは、波形の出力をそのまま大きくするため、増倍率は小さくなってしまいが、信号を見やすくすることができると考えられる。この実験は、図 3.1 の上側と下側のセットアップで行った。

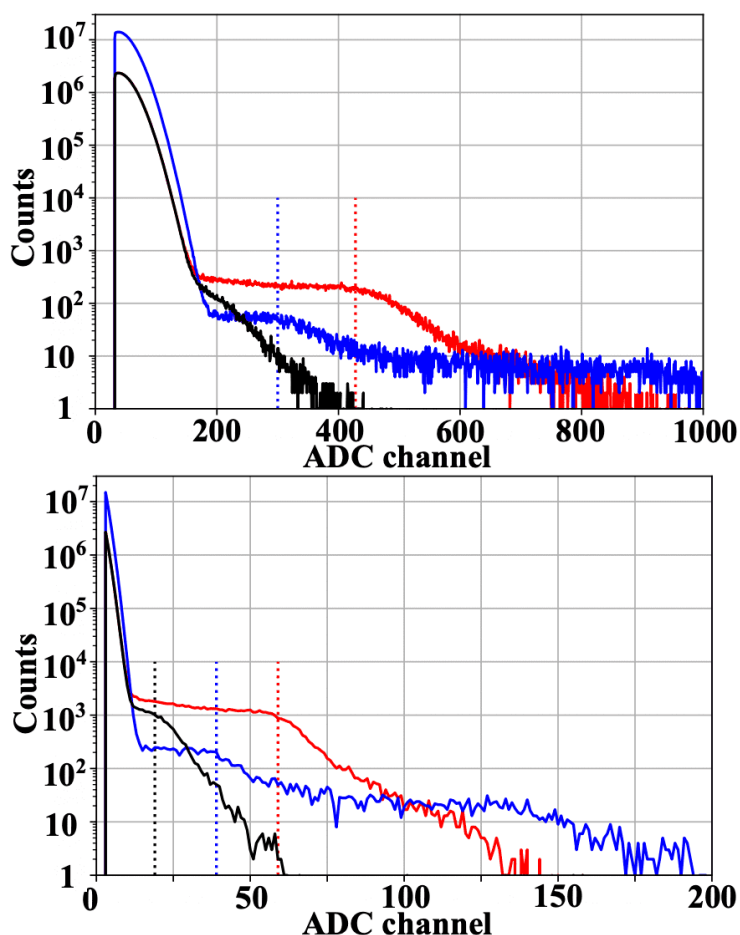


図 3.25: 赤が ^{137}Cs 、青が ^{22}Na 、黒が ^{133}Ba のエネルギースペクトル。(上) 前置増幅器と整形増幅器 (下) 波形増幅アンプでの測定。点線はそれぞれのコンプトンエッジの位置を示しているが、上図の ^{133}Ba については、そのエネルギーとエネルギー閾値がほぼ同じであるため、表示していない。

^{137}Cs 、 ^{22}Na 、 ^{133}Ba の線源を照射し、コンプトンエッジを確認した。図 3.25 (上) が前置増幅器と整形増幅器を用いた測定の結果であるのに対し、同図の下は波形増幅アンプのみを用いて測定した結果である。ここで、上図のエネルギースペクトルの測定時には、アテネータを 31 dB 通している。波形増幅アンプは、入力信号を単純に 10 倍程度にして出力するもので、放射劣化によるノイズにはさまざまな減衰時間のものがあるため、積分しない分スペクトルが見やすくなり、エネルギー閾値が下がり、求めた較正直線からこの

測定では 198 keV から 128 keV まで、65% 程度に抑えられることがわかった。図 3.26 と 3.27 はこれらそれぞれの測定の時の波形を示したものであるが、これらからも、ノイズが低減されていることがわかる。

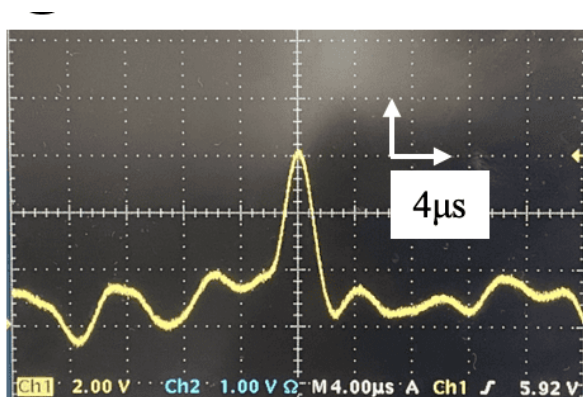


図 3.26: 前置増幅器+整形増幅器を用いた時の波形

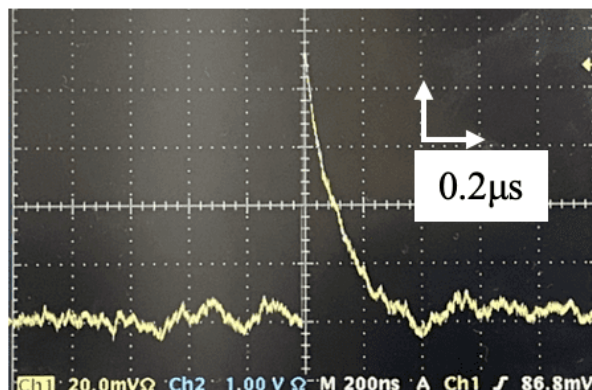


図 3.27: 波形増幅器を用いた時の波形

波形増幅アンプはその特性から、増幅率が前置増幅器と整形増幅器よりも小さいのであるが、このように低エネルギーの信号まで検出することができ、さらには消費電力を抑えることもできるため、衛星に搭載して長期運用を想定する際には、より適していると考えられる。

3.6.2 同時刻イベントのみの測定

ここでは、図 3.2 のセットアップで放射線劣化した MPPC2 つを用いて、同時刻に来たイベントのみを取得し、同期を取ることで、エネルギー閾値を下げるできないかということを調べた実験について記す。また、2 つの MPPC でほとんど同じエネルギースペクトルが得られているため、そのうちの一方のみを示す。ここでも図 3.3 の回路を用いていて、断りのない限り、全て気温 20 °C のもとで行った。

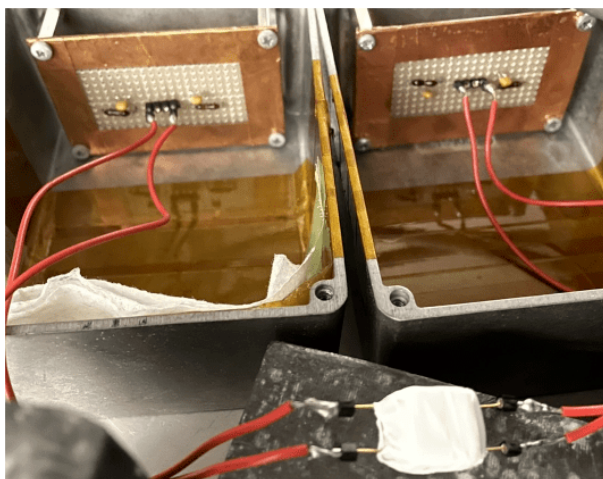


図 3.28: 同時刻イベント測定の様子

この実験は、Coincidence 幅を変化させて行った。このデジタイザでは、最も狭い幅で 4 ns という値を設

定でき、以降4 ns 刻みに幅を広げて測定することができる。図 3.29 はその中で Coincidence 幅をそれぞれ、40ns、8ns、4ns と設定して測定した時のスペクトルを示す。ノイズはランダムに発生する事象であるため、2つの MPPC で同期したイベントのみを取得することで、以下の図 3.29 の青色のエネルギースペクトルのようにエネルギー閾値を下げる可以降低。また、Coincidence 幅を短くすることで、偶然イベントをさらに除去して図 3.29 (下) のようにエネルギー閾値をさらに下げることができるが、同時に短くしすぎると信号（特に低エネルギー側）も損なわれてしまう。

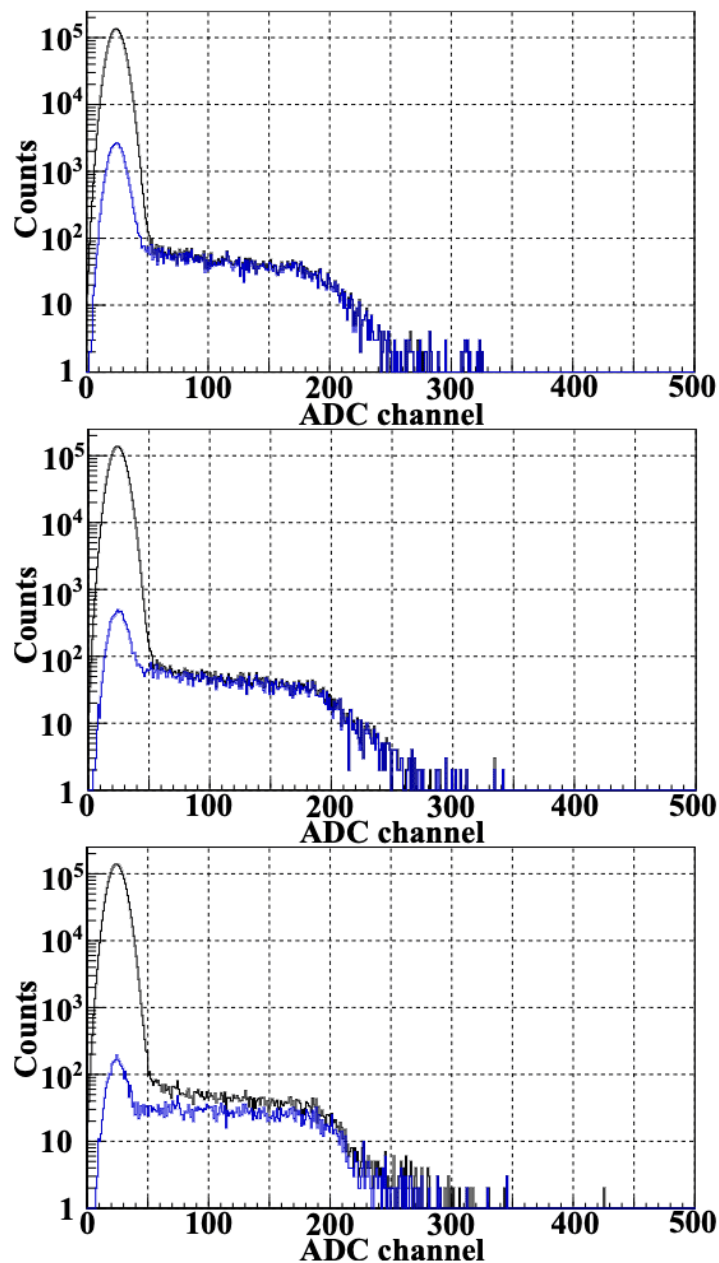


図 3.29: Coincidence 幅をそれぞれ 40 ns(上)、8 ns(中)、4 ns(下) とした時の ^{137}Cs のエネルギースペクトル。青が Coincidence あり、黒が Coincidence なしの結果を表す。

そこで、最適な Coincidence 幅を求めるために、異なる幅を設定していくつかの測定を行い、それぞれのときのエネルギー閾値との関係を図 3.30 にまとめた。

以下の図 3.30 は、Coincidence 幅を変えて幾つかの測定を行い、Energy Threshold を求めた結果を記す。同期測定をしていない場合は、Coincidence 幅が ∞ の場合に相当するため、同図に図 3.24 (下) の結果も記した。

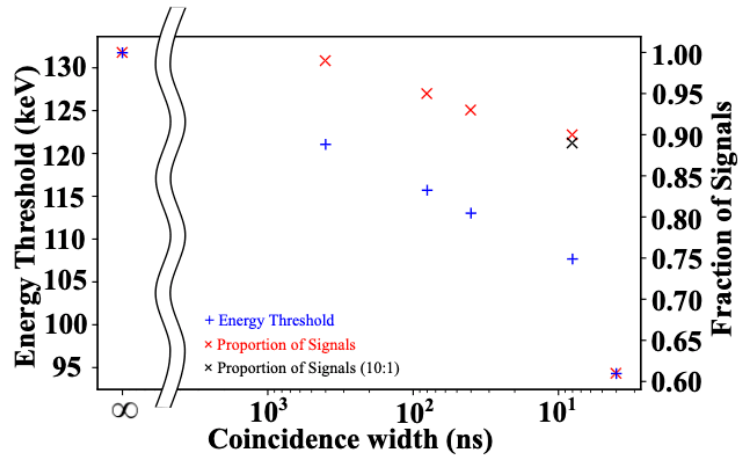


図 3.30: Coincidence 幅を変えた時の、エネルギー閾値と信号の取得割合の関係

この図では、Coincidence ありとなしの結果を比較して、検出された信号の割合も示している。信号として、この場合は 54 ADC channel より大きいものをカウントし、後述する波高値が 10:1 の測定については、7 ADC channel より大きいものをカウントした。Coincidence 幅が 4ns のときは、信号側が半分程度損なわれてしまっているため、エネルギー閾値が低く、信号も 90% 程度取得できている 8 ns をこのセットアップでの最も良い Coincidence 幅とする (図 3.30(中))。

この結果により、MPPC を 1 つのみ用いた場合に比べて、同期測定をすることで、エネルギー閾値を 132 keV から 108 keV まで、82% 下げることができた。

またここでの最適な Coincidence 幅は 8 ns であったと結論づけたが、CsI のような減衰時間の長い無機シンチレータを使用する場合は、約 50-100 ns の幅が必要となり、それによりエネルギー閾値は今回の測定よりも増加する可能性がある。そのため、この方法は特にプラスチックシンチレータの使用において適切な方法であると考えられる。

エネルギー閾値を下げたことによる効果

上記のようにエネルギー閾値を下げることで、同期を取る前は検出が難しかったエネルギーの線源を確認できるという利点が考えられる。ここでは、 ^{57}Co の線源を置いて測定を行った。ここで Coincidence 幅は、上記の設定 8ns とした。

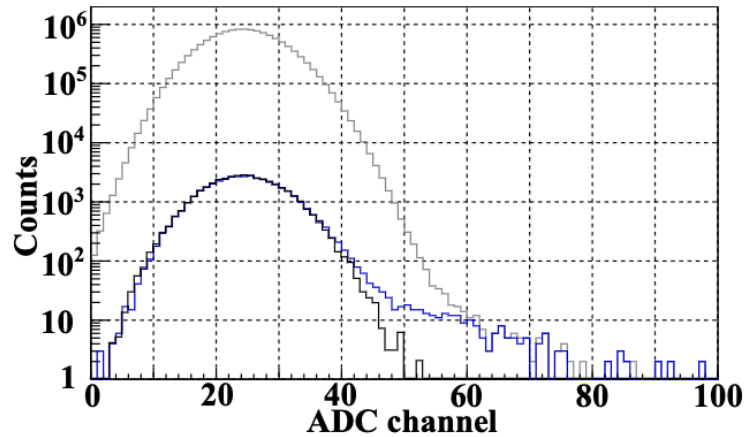


図 3.31: Coincidence ありの ^{57}Co (青)、background (黒) と Coincidence なしの background (灰色) のエネルギースペクトル

図 3.31 より、60-70 ADC channel の部分に、 ^{57}Co による信号を確認できる。これは図 3.22 の較正直線から、 ^{57}Co の光電吸収ピーク (122keV) だと判断した。

上述のように、2つの MPPC についてほとんど同じエネルギースペクトルが得られた。しかし、これを実際に確認するために、図 3.29 (中) のデータを用いて、同時刻イベントに対するこれらの2つの出力の波高値を足し合わせた (図 3.32[上])。その結果、エネルギー較正直線よりエネルギー閾値は 93 keV となり、図 3.29 (中) と比べてより低い値が得られた (同時刻イベント測定なしの時の約 70%)。これは、足し合わせたことにより、大小さまざまな波高値を持っていたノイズが平均化されたことに起因すると考えている。さらに、同時刻イベントの2つの MPPC の波高値を2次元のヒストグラムにプロットした (図 3.32[下])。ほとんどのイベントでは、両者の波高値がほとんど同じ値であることがわかるが、いくつかでは一方の MPPC の波高値が他方よりも大きいものもあることがわかる。これらのイベントは、シンチレータ内で、どちらかの MPPC により近い位置で発生したものであると考えている [32]。ここでそれにあたる、一方の波高値が大きいイベントについては、1 cm 角立方体シンチレータを用いた今回の実験では、計算した結果すべての同時刻イベントに対して約 2-3% となっているため、影響は少ないと考えている。

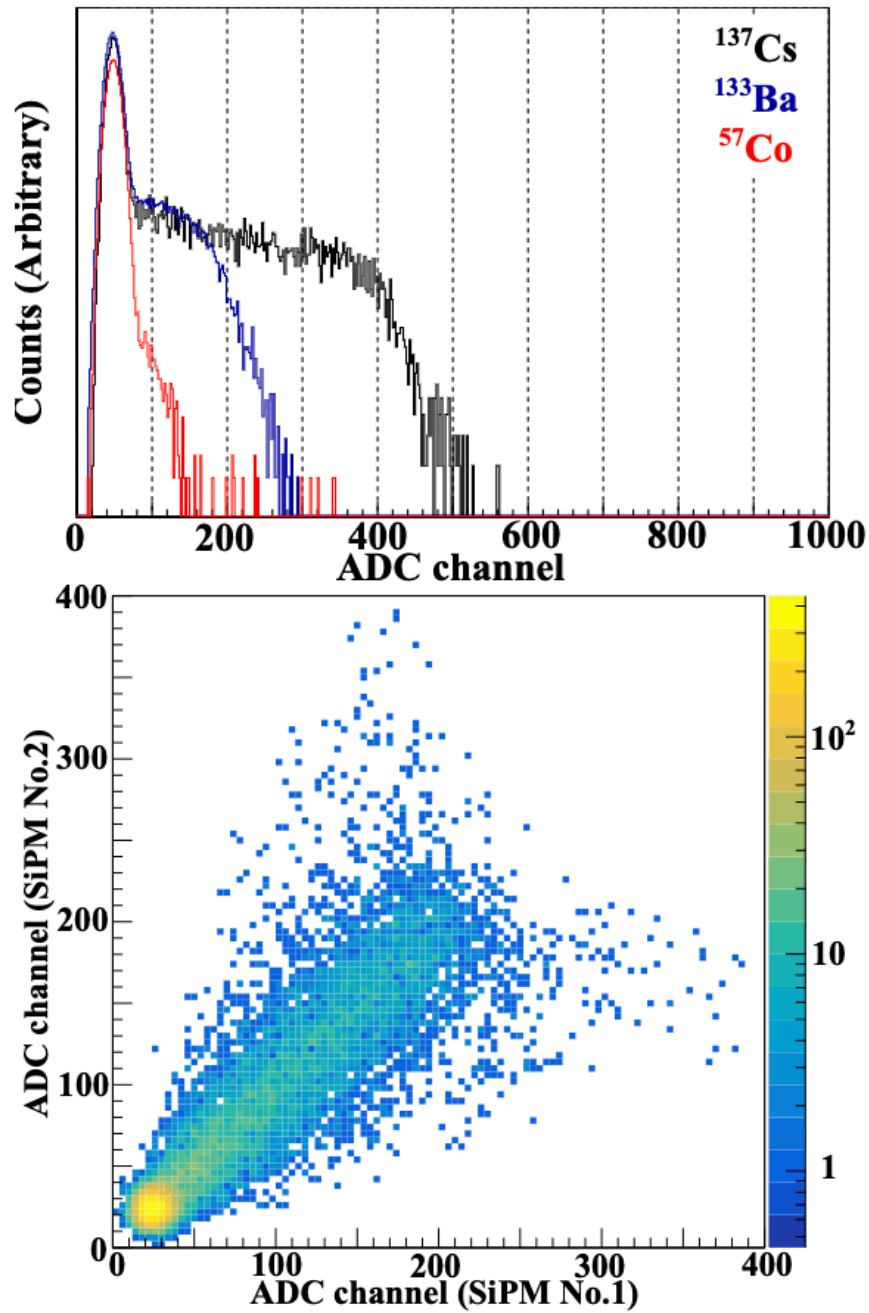


図 3.32: (上) 2つの MPPC の波高値を足し合わせたエネルギースペクトル。(下) ^{137}Cs を照射した時の 2つの MPPC の波高値の 2次元プロット

波高値が 10:1 の時の同時刻イベントのみの測定

CubeSat では、消費電力を抑えるため、MPPC に印加される電圧はできるだけ多くの MPPC 間で同じにする必要がある。その場合、各 MPPC のゲインが異なるため、波高値がそれぞれ異なる可能性がある。そ

ここで、そのような場合でも同時刻イベントのみの測定が適切に行えることを実証するために、2つの MPPC のうち片方の MPPC の波高値を意図的に 10 分の 1、すなわち図 3.2 に示した波形増幅アンプを通さないようにし、3.6.2 節と同様の方法で同時刻イベントのみの測定を行った。また、波高値が低い方のトリガー閾値も、もう一方の 10 分の 1 である 4 Ch_{th} に設定した。図 3.33 に、 ^{137}Cs 線源を照射し、波形増幅アンプを使用しなかった方のエネルギースペクトルを示す。ここでもエネルギー閾値が下がっていることがわかり、信号の取得割合も図 3.30 から約 90% であることがわかる。エネルギースペクトルが図 3.29 (中) と比べて粗くなっているのは、ビンの違いによるものである。ここで、図 3.29 と同じように、波形増幅アンプを通したほうのエネルギースペクトルを表示していないのは、信号の取得割合が下がってしまったためである。この原因は CAEN DT5720 の仕様上、トリガー閾値として 1sb という単位を使用しているが、図 3.33 において単位 1sb あたりの寄与が大きくなってしまったため、波高値が高い方では、一部の信号が取得されなくなるためだと考えている。

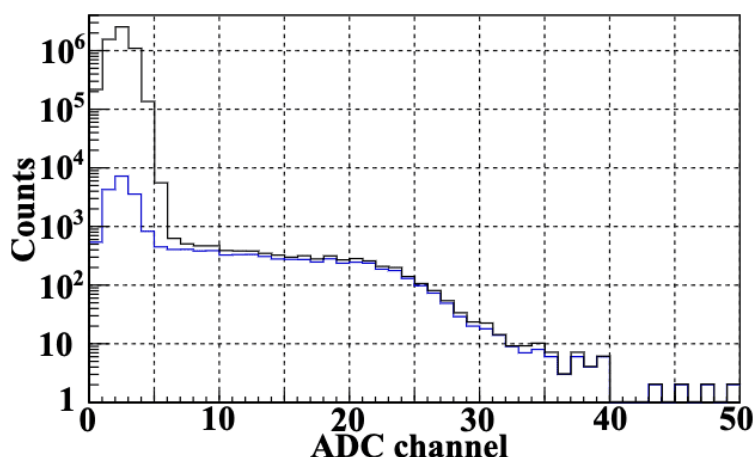


図 3.33: 波形増幅を通さずに測定した ^{137}Cs のエネルギースペクトル。青が Coincidence あり、黒が Coincidence なし。

3.6.3 低温環境での測定

次に、低温での測定を行った。低温では、物質内部の電荷の自由な移動が制限されるため、抵抗が増加すると考えられる。また、さらに MPPC の暗電流は、光電子が検出素子に到達する前に発生する熱電子によって引き起こされるため、熱電子の発生が減少する低温では暗電流が減少すると考えられる。さらに、低温では物質のバンドギャップが狭くなり、より低いエネルギーの光を吸収しやすくなる。光電子のエネルギーは、物質内での電子運動によって増幅されるため、低温で物質中の電子の熱運動が抑制され、物質内での運動がより規則的になると、電子がより効果的に吸収された光のエネルギーを受け取ることができ、MPPC の増幅率が上昇すると考えられる。以上のような理由から、低温測定によるノイズ軽減を試みた。この実験は、図 3.1 の上側のセットアップで行った。また、MPPC にかかる電圧は、常温での実験と条件を同じにするため、 $54.75 (\sim V_{br} + 5)\text{V}$ として測定を行った。

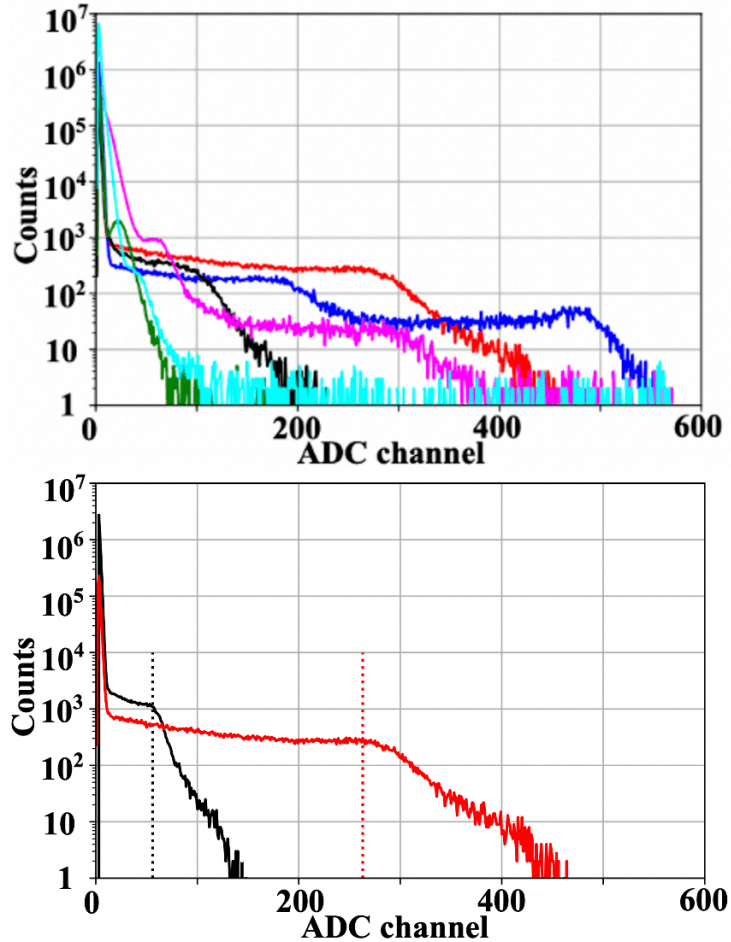


図 3.34: (上) -20 °Cで波形増幅アンプを用いて測定した ¹³⁷Cs (赤)、²²Na (青)、¹³³Ba (黒)、⁵⁷Co (マゼンタ)、²⁴¹Am (緑)、¹⁰⁹Cd (シアン) のエネルギースペクトル。(下) 波形増幅アンプを用いて測定した ¹³⁷Cs のエネルギースペクトル。20 °Cでの測定が黒、-20 °Cでの測定が赤。点線は、それぞれの ¹³⁷Cs のコンプトンエッジのエネルギーの位置を示す。

図 3.34 (上) は、低温-20 °Cでの各種線源を照射した時のスペクトルを表し、常温の時に比べて、より低エネルギーまでの光電吸収ピークが検出できていることがわかる。同図 (下) は、比較のために、常温 20 °Cと低温-20 °Cでのスペクトルを一つずつ示す。ここでは ¹³⁷Cs のコンプトンエッジ (477keV) のみを示しており、それぞれ常温と低温で各線源のエネルギースペクトルから作成したエネルギー較正直線から、エネルギー閾値は 132 keV から 43 keV まで下がり、34% 程度に抑えられることがわかった。プラスチックシンチレータの光量の温度依存性は最大でも 4% である [25] ことから、この閾値変化は MPPC のノイズの減少によるところが大きいと考えられる。この MPPC の暗電流は室温で ~0.3 mA、-20 °Cで ~0.1 mA である。したがって、暗電流も 3分の1に減少し、エネルギー閾値の減少とほぼ一致していて、これは波形増幅アンプでの増幅で電荷積分をしていないためであると考えている。

3.6.4 ここまでのまとめ

以上の3つの実験についてのまとめを記す。ここでは、プラスチックシンチレータと放射線劣化したMPPCを用いて、検出されるエネルギー閾値を下げることを試みた。具体的には、波形増幅アンプを用いてエネルギー閾値を約65%（198 keV から 128 keV）、同時刻イベントのみを測定して信号の足し合わせをすることで約70%（132 keV から 93 keV）、-20 °Cの低温で測定することで約33%（132 keV から 43 keV）に下がることを確認した。同時刻イベントのみの測定では、2つのMPPCの波高値を意図的に10:1に設定しても同様の結果が得られた。

最後に、本来は運用の実用性から、より大きなシンチレータが必要となると考えられるが、もともとのエネルギー閾値が高くてもこれら3つの方法を組み合わせることで、原理的・理想的には、エネルギー閾値を約15%まで下げることができると考えている。

第4章 シンチレータ+MPPCの多チャンネル読み出しシステムの立ち上げ

本章では、複数のMPPC+シンチレータを用いて、セットアップを作成し、実験を行う。

4.1 本実験の目的

この研究のテーマは、これまで大きなシンチレータで構成されていたアクティブシールドを細かく分割することを検討するため、複数のMPPCと小さいシンチレータを用いて光量のロスを抑え、エネルギー閾値を下げることである。図4.1に想定している検出器の概観を示す。アクティブシールドとして使われるような検出器のサイズは数10-100cm程度であると考えられ、一つの検出器では光量が少なくなってしまう、さらに振動などにも弱くなってしまう欠点がある。そこで検出器を分割して、細長い検出器の両端にMPPCを付けたものを1単位として、それを多数組み合わせたような検出器を考えている。

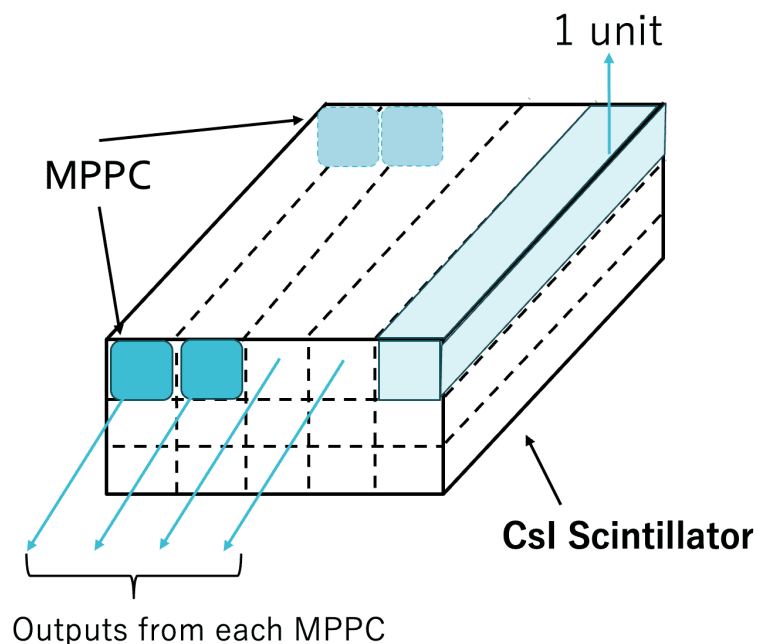


図 4.1: 検出器の概観。細長いシンチレータの両端にMPPCを取り付けたものを多数組み合わせる。

これにより、先に挙げた欠点に対する対策ができ、さらにそれぞれの検出器を遮蔽することで、(1)どのシンチレータで反応(発光)が起きたのか、2次元位置情報がわかり、そして(2)反応した1単位での

2つのMPPCの光量の比から細長いシンチレータのどの部分で反応したのかの1次元情報がわかる。それらを合わせることで、3次元での到来方向を知ることができ、ガンマ線バーストの発生位置の制限やバックグラウンドの除去にもつながる。さらに、シンチレータを小さな立方体ではなく直方体とし、MPPCをその両面だけに取り付けるようにすることで、デッドスペースの体積増加も抑えることができる。このようなセットアップにより、反同時計数の能力を高めるとともに、ガンマ線バーストなど、高エネルギー天体現象の検出数を増やすなどの効果がある。これを実現するためには、多数のMPPCからの出力に対応するために、独立の多チャンネル読み出しが可能なセットアップが必要となる。そこで次節では、本研究で使用するASICについて記す。

4.2 Citiroc 1A

本章で使用しているデジタイザ CAEN A1702 (CAEN 社 [20]) には、Citiroc 1A ([19]) という ASIC が用いられているため、ここではそれによるデータ処理について説明する。

Citiroc 1A は、32 ch の読み出しが可能なフロントエンドの ASIC であり、スウェーデン王立工科大学で MIST CubeSat に搭載する、CUBES 検出器のためにも利用されているものである。CUBES とは、地球低軌道で運用される環境放射線検出器で、場所によって異なる宇宙線（陽子、電子など）の最新のデータを取得する目的のものである。この Citiroc 1A について、表 4.1 にその性能を示す。

性能	詳細
読み出し対象	SiPM
チャンネル数	32
出力	正
感度	1/3 光電子までのトリガー
タイミング分解能	≥ 100 ps RMS
ダイナミックレンジ	10^6 ゲイン SiPM の場合、2500 光電子
前置増幅器 (preamp)	10-600 倍
整形増幅器 (shaper)	Slow : 12.5-87.5 ns Fast : 15 ns
消費電力	225 mW (全 ch オンの時)
入力	32 の独立した HV がかった SiPM
出力	32 トリガー出力 2つの ASIC のトリガー出力 (OR)
プログラム可能な内部機能	32 の SiPM の HV 調整 トリガー閾値調整 (10 bits) チャンネルごとのゲイン調整 32 のトリガーマスク

表 4.1: Citiroc 1A の性能 [20]

まず、MPPC からの電荷信号を電圧信号に変換するが、ここで図 4.2 のように、増幅率の高低により、High-gain(HG) と Low-gain(LG) の 2 つが出力されるようになっているが、今回用いているデジタイザ CAEN

A1702 では、HG のみを使用している。32 ch があるため、全部で 32 の信号が処理される。8-bit Input DAC でオフセットを決め、MPPC にかける電圧を調整する。図 4.3 は図 4.2 のトリガー部分を切り取ったもので、10 bit DAC で全チャンネルのエネルギー閾値を決め、さらに 4 bit DAC でそれぞれのチャンネルで個別でエネルギー閾値を微調整することができる。そしてそれぞれの信号について、閾値のエネルギーを超えた信号が検出されると、電圧の値をピークホールドし、そのアナログ電圧波形を出力する。この ASIC が搭載されているデジタイザについて、次節でより詳しく記す。

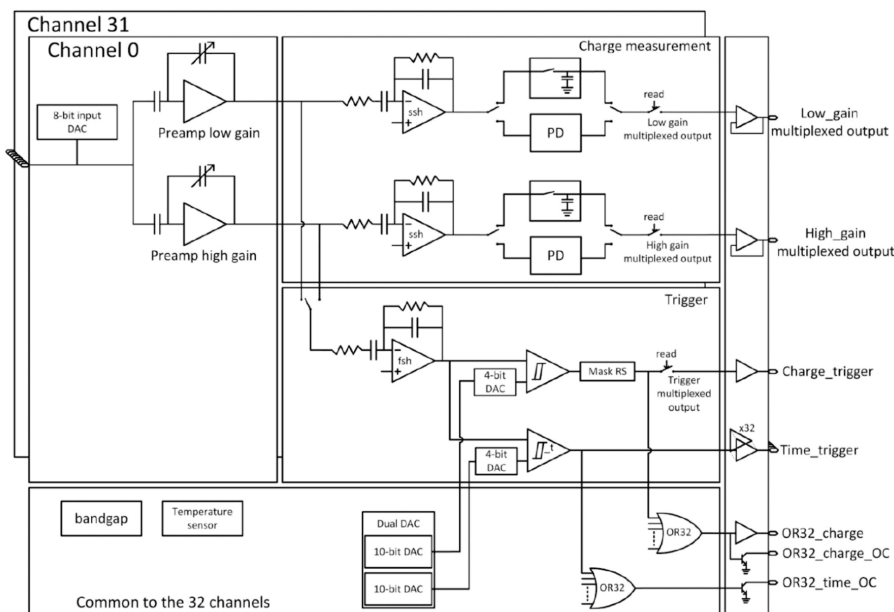


図 4.2: Citiroc ASIC の全体のブロック図 [19]

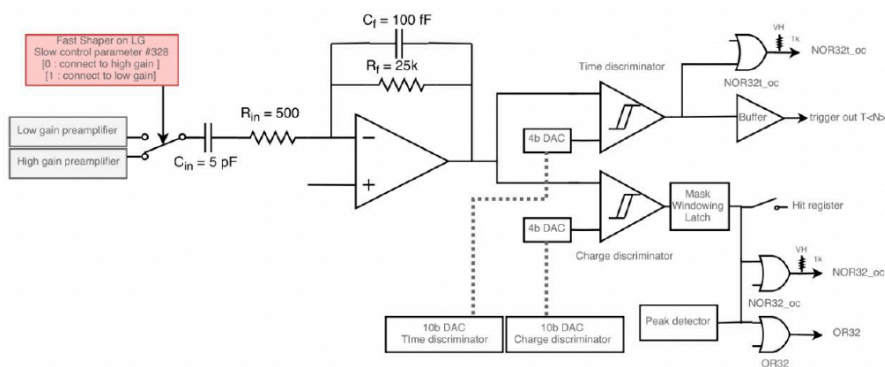


図 4.3: Citiroc ASIC のトリガーのブロック図 [19]

4.2.1 CAEN A1702

そして次に、測定に使用する、この ASIC が搭載されたデジタイザ CAEN A1702 の機能について説明する。本ボードは、外部から電圧、電流がそれぞれ 5 V、 ~ 1.5 A となるように電源を供給し、高エネルギー

実験解析ソフトウェアである ROOT ベースで読み出す環境が必要である。Windows などで使用できる仮想環境の Ubuntu では起動せず、Ubuntu をインストールした Linux PC とボードをイーサネットケーブルで接続し、CAEN A1702 のホームページ [20] からダウンロードしたソフトウェアを展開し、コンパイルすることでボードの GUI を起動することができ、PC との接続が確認できた。また、このデジタイザで測定を行う際、“CITIROC_PROBEbitstream.txt” と “CITIROC_SC_PROFILE1.txt” という 2 つの設定ファイルが読み込まれるようになっている。

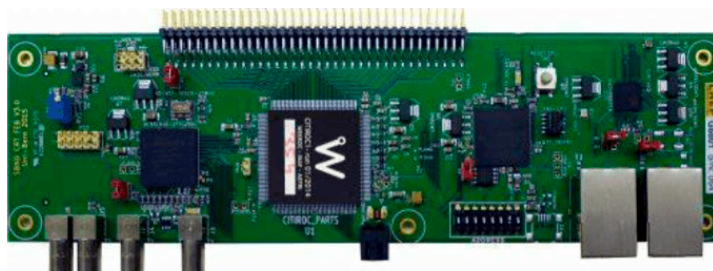


図 4.4: CAEN A1702[20]

このデジタイザには以下の図 4.5 や 4.6 のような回路が搭載されている。図 4.5 はトリガーの回路を示しており、各 ASIC 内には 32 のチャンネルがあり、そのそれぞれに、1 から 2500 p.e (photoelectrons : 光子が検出器に入射した際に生成される電荷の単位) のダイナミックレンジを持つ Charge Amplifier (前置増幅器) がある。その後には 15 ns のシェイピングタイムを持つ速い整形増幅器がある。FPGA による ASIC の制御や AD 変換を含む信号処理がされ、最大 32 のデジタル信号が生成される。隣接する偶数・奇数のチャンネルの結合信号が形成される (C0&C1、C2&C3、… C30&C31)。これらの信号と個々のチャンネルトリガーがトリガーセクターに送られ、その組み合わせによってイベントのトリガーが形成される。これにより、検出器として運用する際、反同時計数の信号として使うことができる。

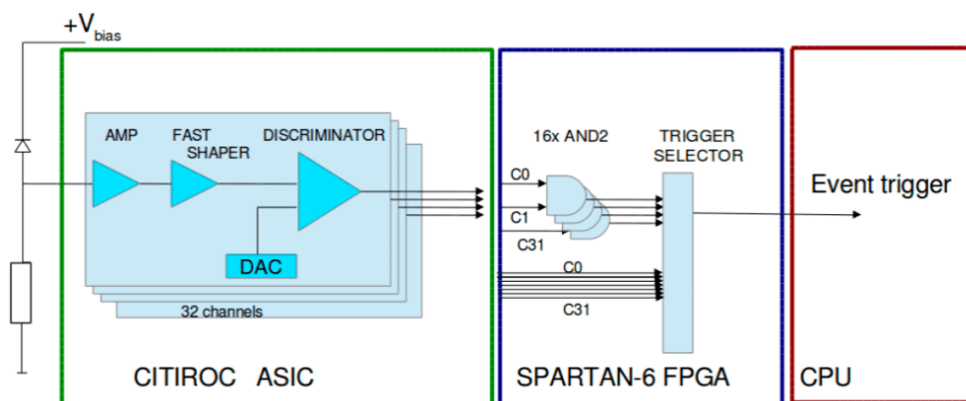


図 4.5: トリガーの回路 [20]

図 4.6 に ADC 変換部の回路図を示す。各チャンネルごとに抵抗によって MPPC にかかる電圧を 20-90 V で調整することができる。Charge Amplifier (前置増幅器) により増幅された MPPC のパルスは、設定可能なシェイピングタイム (12.5-87.5 ns) を持つ遅い整形増幅器に入る。32 の整形増幅器の振幅はアナログマ

マルチプレクサ（複数の入力をひとつの信号として出力する）に結線され、ADCに入力して波高値のデジタル値が生成される。CPUがトリガー割り込みを受信すると、読み出しのサイクルが開始される。最終的にパルスハイトを出力することができるため、天体からのガンマ線などの信号を検出するのに役立つ。

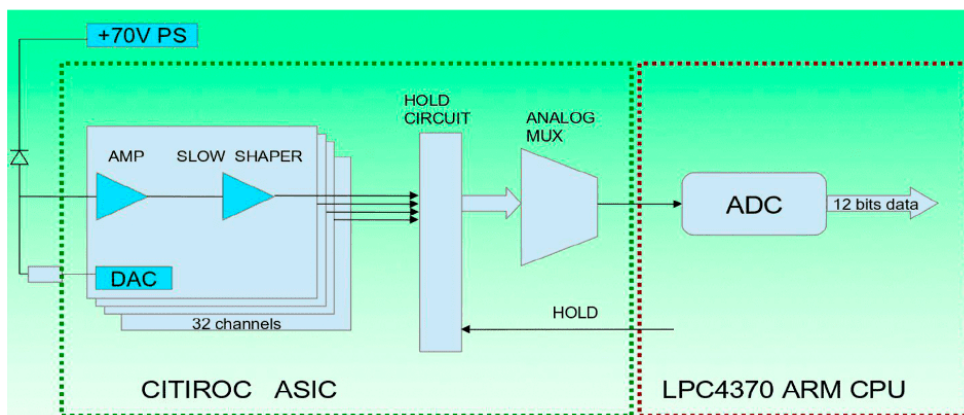


図 4.6: AD 変換部の回路 [20]

図 4.7 にタイムスタンプジェネレーターについて示す。タイムスタンプジェネレーター TDC (Time-to-Digit Converter) は、カウンター（クロック周波数：250 MHz）とディレイチェーンインターポレータ（精度：1 ns）によって、高い周波数でイベントの時間を追跡し、イベントの発生時刻が精密に記録され、クロスカウンターの単なるカウントを補完して高い分解能を達成できる。タイムスタンプは、興味のあるイベントと参照パルスとの間の時間間隔として定義されている。

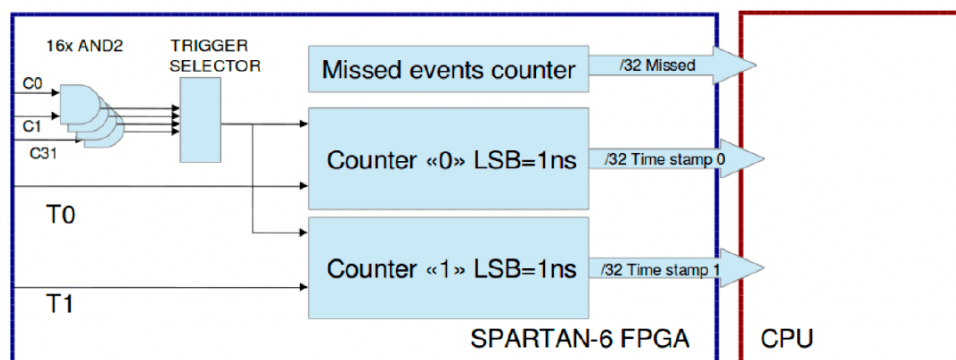


Figure 9.7: Block-scheme of time stamp generation circuit

図 4.7: タイムスタンプ生成回路 [20]

そして、図 4.8 は MPPC 周辺の回路を表している。この回路はボードの裏側に内蔵されているが、図のように抵抗とコンデンサを入れることで、グランドとボードへの入力信号との間に電位差を作る必要がある。

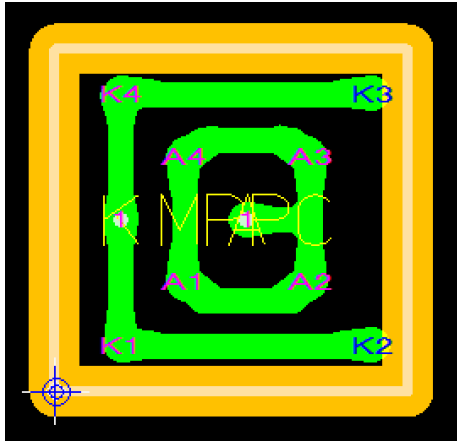


図 4.9: 両面基板の表面

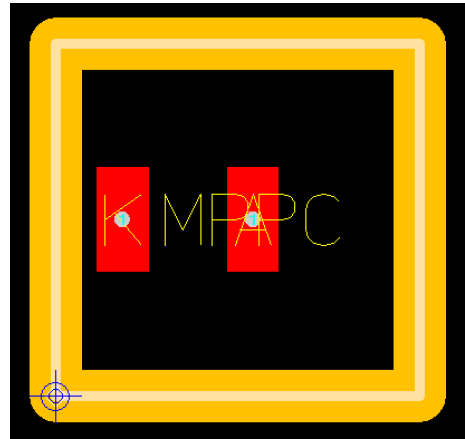


図 4.10: 両面基板の裏面

このようにして作成した基板と、使用する MPPC をはんだ付けし、MPPC 基板とした（図 4.11）。これをシンチレータの両端に取り付け、図 4.11 のように複数組み合わせたような概観を想定している。

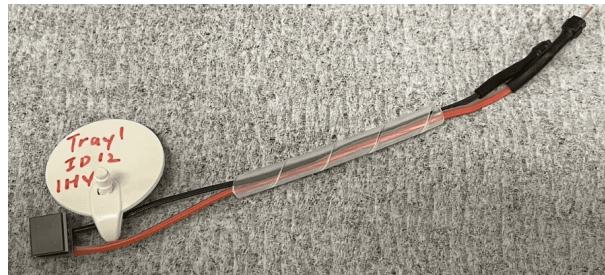


図 4.11: MPPC 基板（左の四角いものが MPPC と基板をはんだ付けしたもの）

4.4 実験セットアップ

本節では、前節で示した基板を用いた本測定のセットアップについて記す。この基板を用いて、MPPC を CsI シンチレータの両側につけたものを一つのまとまりとし、これを複数作成する。それを図 4.12 のように、フラットケーブルや LAN ケーブルを用いて、それぞれからの信号を 32 ch 同時読み出しが可能な ASIC デジタイザである CAEN A1702 を接続した PC で読み出す。

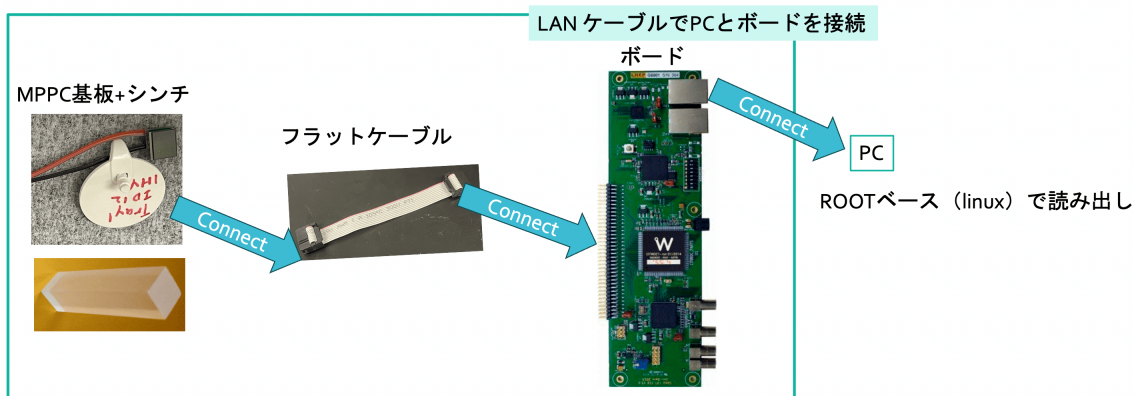


図 4.12: 実験セットアップ

まず、この MPPC と基板が正常に機能することを確認するため、これに MPPC の動作電圧付近の 54 V をかけ、生信号を確認した (図 4.13)。このように確認できたため正常に動作していると判断し、今後同様の MPPC を複数用意する予定である。

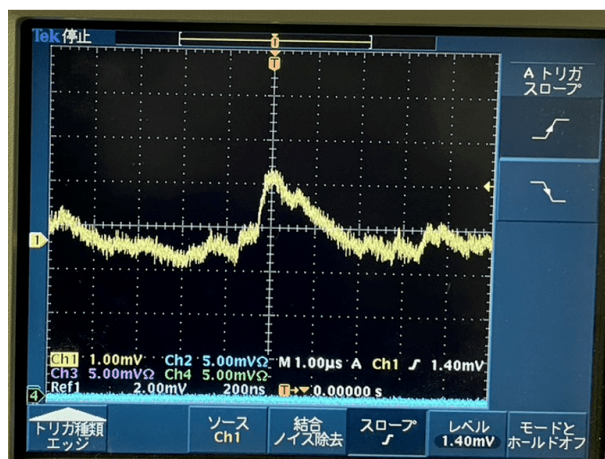


図 4.13: MPPC の生信号

4.5 このセットアップによる信号の読み出し

本実験の目的は、上述のように多くの信号を同時に読み出すことであるが、まずひとまとまりのセットアップでの実験を行う。これができたら、同じものを複数再現し、組み立て方なども工夫するという流れである。

4.5.1 デジタイザのプロープ出力の確認

まず動作確認のために、ボードに搭載されている ASIC の出力をプローブを用いてオシロスコープで確認した。初めにオシロスコープでプローブの補正を行った後、ボード上のテストピンの出力部分にプローブ

ブ、もう片方にグランドを繋いだ。前置増幅器、slow/fast shaper（整形増幅器）それぞれの出力を確認でき、設定ファイルから選択できる。

ここではテストのため、前章と同じ通常の MPPC と 1 cm 角立方体のプラスチックシンチレータを使って実際に内部で電圧をかけて測定を行った。図 4.14 は Slow shaper のプローブ出力をオシロスコープで確認した図で、このようにトリガー信号を確認することができた。また図 4.15 は図 4.14 と比べて前置増幅器のゲインを上げた時の様子で、波高値が高くなっていることから、ゲインの設定が適切に効いていることがわかった。また同様に Fast shaper 出力と前置増幅器の出力もオシロスコープで確認でき、さらに Fast shaper の出力は Slow shaper の出力に比べ、確かに速くなっていることもわかった。

その一方で図 4.2 のように、このデジタイザでは 32ch に対して共通の電圧をかけるようになっており、さらにそこから個別のチャンネルごとに最大 4.5 V のバイアス電圧を逆向きにかけることで微調整できるような仕組みになっているが、この値を変えてみても、プローブ出力のゲインの変化を確認することはできなかった。

他の機能として、Slow shaper の積分時間を変更（12.5-87.5 ns）することができるが、図 4.16 のように積分時間の設定は適切に動作していることが確認できた。

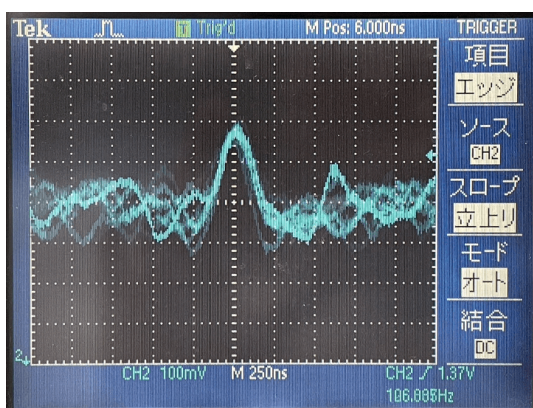


図 4.14: Slow shaper の出力

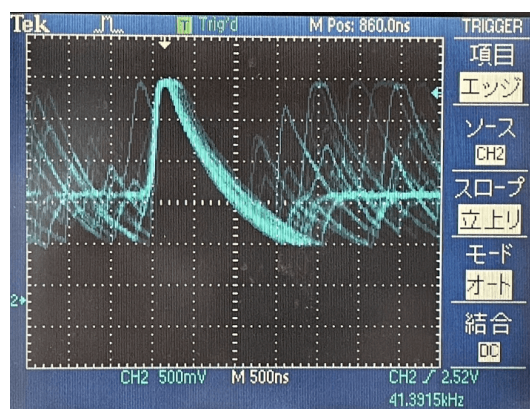


図 4.15: 図 4.14 の前置増幅器のゲインを上げた時の様子。波高値が高くなっている。

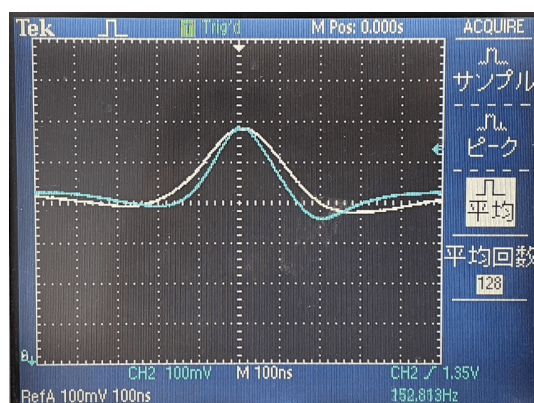


図 4.16: 積分時間による波形の違い。青が 12.5 ns、白が 87.5 ns で、それぞれ 128 回取得した平均の波形を示している。

4.5.2 トリガー・バイアス電圧調整の確認

プローブ出力の確認の次の段階として、このデジタイザを正しく使用するために、ノイズに対してトリガーを適切にかけることができるのかの確認を行った。

適切な測定ができていないかの確認のしやすさと、光量が多いと信号がサチュレーションを起こしやすい傾向が見られたため、ここでも通常の MPPC と CsI よりも光量が少ない 1 cm 角立方体のプラスチックシンチレータを使って測定を行った。ここでは MPPC の信号をデジタイザの ch0 に入力して測定を行った。

図 4.17、4.18 はそれぞれ、黄色がデジタイザの TOUT（トリガー検証出力）の信号、青がプローブの Fast shaper（トリガー生成）の出力である。初めの状態（図 4.17）では、隣り合う偶数・奇数のチャンネルでの同期がないとトリガーがかからない設定になっているため、プローブの出力の一部のイベントに対してしかトリガーがかかっておらず、これでは適切に信号が取得できない。そこで、デジタイザの設定を”OR32”としてトリガーをかけるチャンネルを選択することで、図 4.18 のように、各イベントに対してトリガーがかかるようになることがわかった。これで適切に測定を行うことができるようになったと判断した。

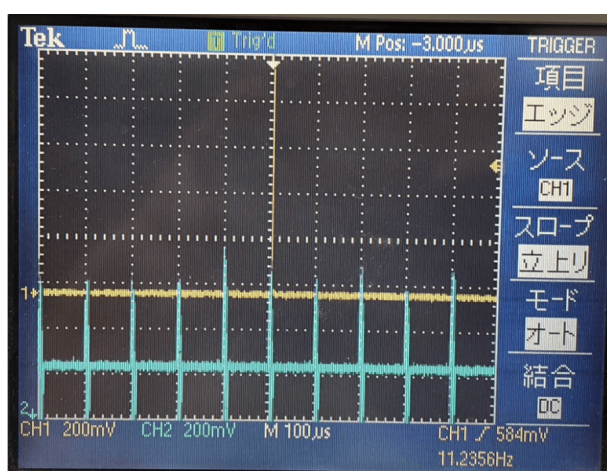


図 4.17: トリガー調整前。一部のイベントにしかトリガーがかかっていない。

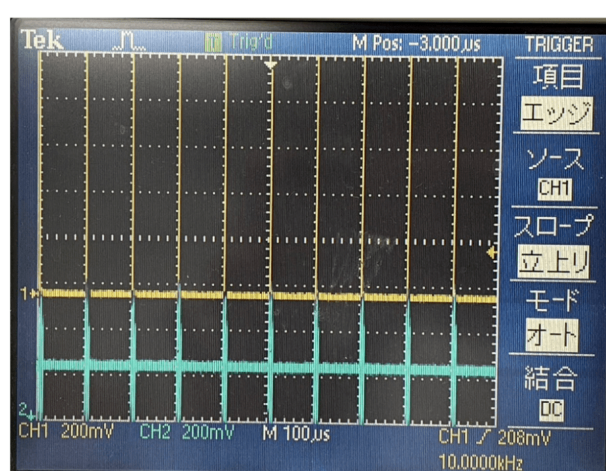


図 4.18: トリガー調整後の様子。各イベントにトリガーがかかっている。

次に、前節での述べたが、このソフトウェアの設定ファイルにおいて、各チャンネルのバイアス電圧の値を変えてみても、MPPC 出力のゲインに変化が見られなかったため、まず通常通りに電圧を MPPC にかけている状態で、それと逆向きに電圧をかけた際、実効的に MPPC にかかる電圧を低くすることができるのかを、外部電源を用いて調べた。

測定には、適正電圧付近の 54V の電圧をかけるのにソースメータ（Keithley 社）を、それと逆向きに数 V かけるのにトランジェント電圧発生装置（トラ電）を用いた。そしてそれらを MPPC の HV 側と出力側に接続し、電圧をかけた際に流れる電流を調べた（図 4.19）。

その結果、MPPC に 54 V の電圧のみをかけたときにソースメータ側に流れた電流は $\sim 0.2 \mu\text{A}$ 、53 V の電圧の時は $\sim 0.09 \mu\text{A}$ であった。次に、MPPC に 54V の電圧をかけた状態で逆向きに 1V の電圧をかけると、電流値は $\sim 0.09 \mu\text{A}$ となった。これは一方から 53 V をかけた時と同じ値であることから、この時に MPPC に実効的にかかっていた電圧は 53V となっていることが考えられる。また、この逆向きにかかる電圧を大きくしていくと、この電流値は小さくなっていることが確認でき、トラ電に異常に大きな電流が流れると

いったこともなかったため、結果として逆向きにかけた電圧の分だけ、MPPC の実効的な電圧の値を下げる
ことができるが、何らかの原因でデジタイザのバイアス調整が効いていないということがわかった。



図 4.19: 逆バイアス電圧をかける測定の様子

4.5.3 多チャンネルでの信号の読み出し

多チャンネル読み出しの環境構築

まず環境構築のため、MPPC +プラスチックシンチレータを用いて 3 章の測定の再現を試みた。プラスチックシンチレータの両側にそれぞれ、通常 MPPC と放射線劣化 MPPC を付け、各種線源を照射して同時に測定を行い、エネルギー較正を行った。

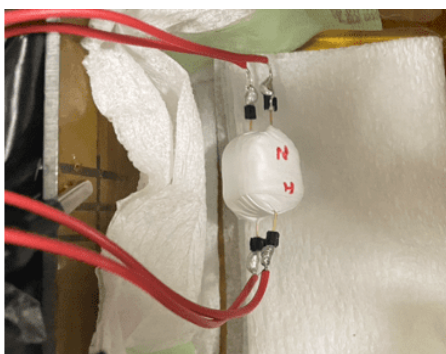


図 4.20: 測定の様子

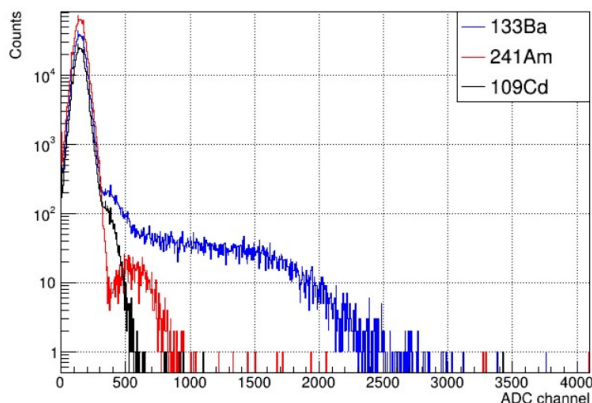


図 4.21: 通常 MPPC でのエネルギー較正

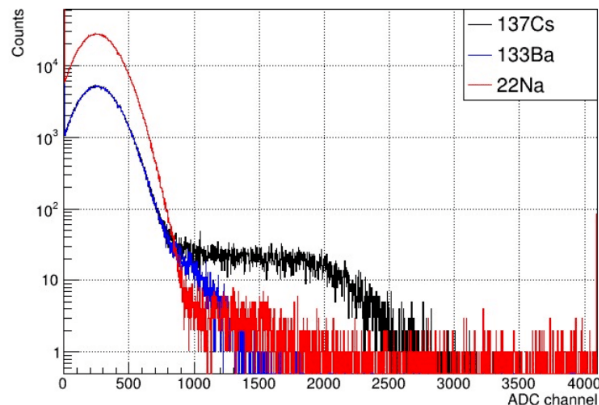


図 4.22: 放射線劣化 MPPC でのエネルギー較正

図 4.21、4.22 より、それぞれエネルギー較正を行なってエネルギー閾値を求めると、通常 MPPC は 20 keV、放射線劣化 MPPC は 112 keV と求まった。

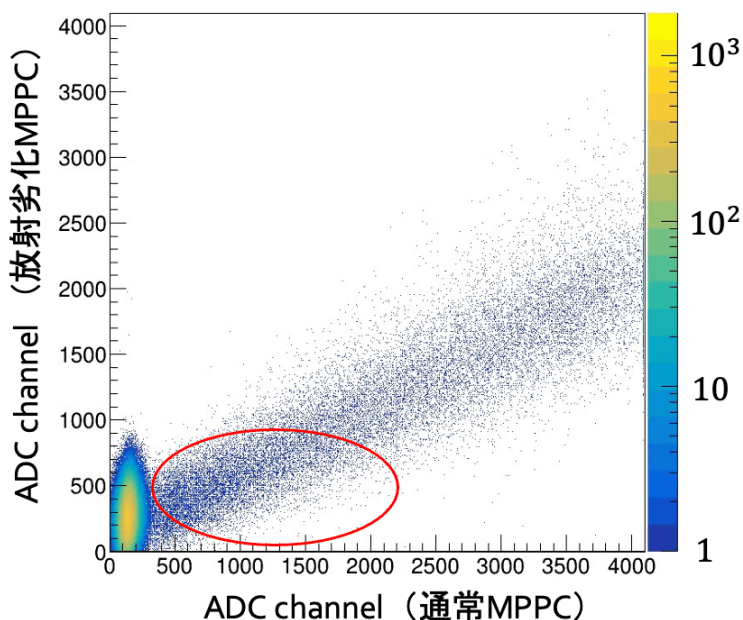


図 4.23: ^{137}Cs 照射時の通常、放射線劣化 MPPC それぞれの同時イベントの波高値分布

また前章の図 3.32 と同様に、図 4.21、4.22 の ^{137}Cs のスペクトルについて、通常 MPPC と放射線劣化 MPPC で同時に取得できたイベントの波高値を図 4.23 に二次元プロットした。図 4.22 の ^{137}Cs のエネルギースペクトル（黒）を見ると、500-800 ADC channel あたりではノイズに埋もれて放射線源の信号は検出できていないが、図 4.23 の赤丸で囲まれた部分を見ると、本来信号が取得されている範囲であることがわかる。よってこれより、このセットアップで Coincidence を取ることができていると判断し、それによりエネルギー閾値が下がることも期待できる。

これより、より多くのチャンネルでの読み出しも可能になったと考えられる。

2つのシンチレータを用いた信号の読み出し

実際に多チャンネル読み出しのセットアップを衛星軌道上で運用する際、常にすべてのチャンネルで読み出しを行うわけではなく、消費電力を抑える観点から、信号が確認されたチャンネルのみその時検出を行うというのが理想である。そこでここでは、何らかのイベントが検出された際、複数チャンネルで同時に信号が検出されるはずであるため、その確認を行った。

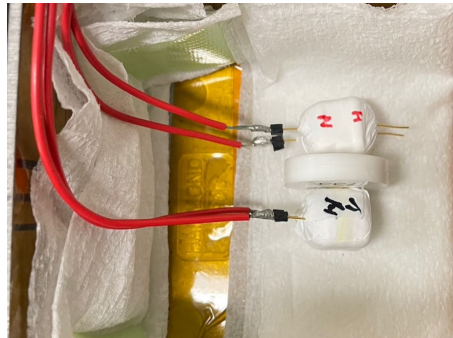


図 4.24: 2チャンネル測定の様子

放射線劣化していない通常 MPPC をプラスチックシンチレータにつけたものを2セット準備（一方はシンチレータの両面に MPPC をつけている）してそれぞれ別のチャンネルに接続した。まず図 4.24 のように、その2つのシンチレータの間に ^{22}Na の線源縦向きに置いた。 ^{22}Na は、電子・陽電子対消滅により、同時に180度反対方向に511 keVのガンマ線が出るため、それをとらえるという目的である。比較のため、同じ配置で線源を ^{137}Cs に変えた測定も行い、それぞれの測定で全検出信号の数に対する、2チャンネル両方でノイズではない高い波高値の信号が検出できたイベントの割合を調べた。線源の置き方などによる揺らぎを小さくするため、それぞれの条件で3回ずつ測定を行った。また、それぞれの線源を2つのシンチレータの間に横向きに置いた場合での測定も行なった。

線源	全信号イベント数	2ch 共に信号のイベント数	割合
^{22}Na (縦)	21500	822	~3.82%
^{137}Cs (縦)	49592	254	~0.51%
^{22}Na (横)	8095	39	~0.48%
^{137}Cs (横)	17081	8	~0.05%

表 4.2: 2ch で共に信号が取得されたイベントの割合

表 4.2 から ^{137}Cs に比べて ^{22}Na の方が同時に取得された波高値が高いイベントが7.5倍程度多いため、少なからず電子・陽電子対消滅によるイベントを取得することができていると考える。

直方体シンチレータを用いたガンマ線到来方向の位置決定

ここで、本研究の目的である、直方体シンチレータと MPPC を用いたガンマ線事象の位置決定について述べる。この実験では、図 4.25 のように、穴を開けた数枚の鉛シートを重ねて、ガンマ線が穴からしか通

らないようにして、図 4.26 のようにシンチレータにガンマ線を照射する位置を変えて、その時の MPPC の波高値を確認した。ここでは、 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 3\text{cm}$ の CsI シンチレータの両端に、通常 MPPC を 2 つつけて測定を行った。

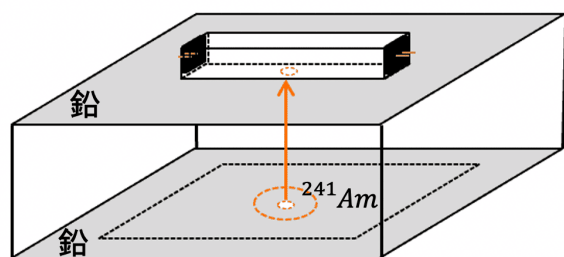


図 4.25: 実験セットアップの概観。 ^{241}Am 線源を鉛でコーティングし、シンチレータに照射して MPPC で読み出す。

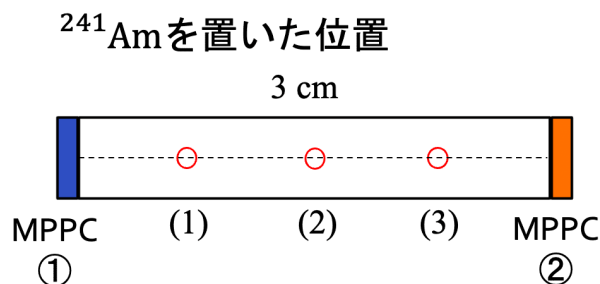


図 4.26: ^{241}Am 線源の照射位置。両端に MPPC が付いている。

図 4.27 は、横軸に ^{241}Am 線源を置いた位置、縦軸にその時の 2 つの MPPC それぞれの ^{241}Am の光電吸収ピークの ADC channel をプロットしたものである。

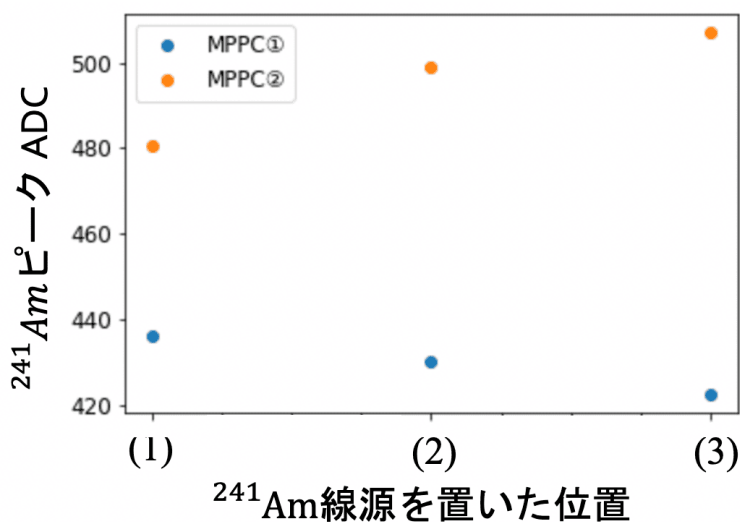


図 4.27: ^{241}Am 線源の照射位置による光量の変化

この結果から、ガンマ線の照射位置と MPPC との距離が近いほど、MPPC の波高値が高いことがわかる。ここでは長辺が 3cm のシンチレータで測定しているが、もう少し長いもので測定すればより波高値の違いが見やすくなるのと、実際に検出したいガンマ線バーストなどはエネルギーが高いため、より分解能が良くなり、見やすくなると思っている。あらかじめどの位置のイベントの時に光量の比がどうなるかを較正して求めておくことで、位置決定につなげられると考えている。

問題としては、本来は (2) の中心位置において、2 つの MPPC の波高値が一致するようにゲインを揃えておくべきなのだが、測定に用いたデジタイザの機能として、各チャンネルにかける共通電圧からバイアス電圧で微調整する機能が適切に動作していなかったため、これは今後の課題とする。

第5章 結論・まとめと今後

本研究では宇宙ガンマ線観測用のアクティブシールドのために衛星に搭載できるセットアップに向け、シンチレータ + MPPC 光検出器を用いた実験を行った。

まず小型衛星に向け、軽量のプラスチックシンチレータと、衛星軌道上での運用を想定した放射線劣化させた MPPC を用いて、検出されるエネルギー閾値を下げることを試みた。具体的には、波形増幅アンプを用いてエネルギー閾値を約 65% (198 keV から 128 keV)、同時刻イベントのみを測定して信号の足し合わせをすることで約 70% (132 keV から 93 keV)、 -20°C の低温で測定することで約 33% (132 keV から 43 keV) に下がることを確認した。そして、本来は運用の実用性から、より大きなシンチレータが必要となると考えられるが、もともとのエネルギー閾値が高くてもこれら 3 つの方法を掛け合わせることで、原理的・理想的には、エネルギー閾値を約 15% まで下げることができると考えている。この実験に関しては、用いた波形増幅アンプよりもより増幅率の大きなものを製作してより弱い信号を見やすくしたり、今回と同じ方法でも、同時刻イベントをとる MPPC の数をさらに増やすといった改善点が考えられる。また問題点として、セットアップの大きさや重量に制限がある中で、どのように低温環境を実現するのか、実際に衛星運用していてエネルギーの較正を行いたい場合、どのようにしてエネルギーを識別すればよいのかということなども考えられる。

そして衛星の大きさに関わらず使える手法として、従来から使われていた大きな BGO や CsI などのシンチレータを分割したものに MPPC を取り付けたものを 1 セットとして多数取り付け、それぞれからの信号を多チャンネル読み出しするセットアップも構築した。そのための MPPC を取り付ける基板も自ら実装し、多チャンネル読み出しができるデジタイザについて、まず動作確認のためにそのテストピンからの出力から、前置増幅器や整形増幅器が適切に動作していること、そしてデジタイザのトリガー機能や MPPC の実効電圧についても確認できた。またプラスチックシンチレータを用いた測定の再現や ^{22}Na 線源を用いた電子・陽電子対消滅による同時イベントの取得で、多チャンネル読み出しの環境の構築を行った。さらに、ガンマ線事象の位置決定として、直方体シンチレータの両端に付けた MPPC の波高値が、コリメートした線源の照射位置により増減することを確認した。今後の課題として、バイアス電圧を各チャンネル個別に変更できるようにしてそれぞれのゲインを調整することや、シンチレータの分割によって実際にエネルギー閾値が下がるのかを調べるということが考えられる。

付録

A 低温環境での他の実験

ここでは、3章の実験に関連して、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温環境で、前置増幅器と整形増幅器を用いた測定や、同時刻イベントのみの測定を行った結果について記しておく。

A.1 前置増幅器と整形増幅器を用いた測定

セットアップは図 3.1 と同じだが、同様に測定するとサチュレーションを起こしたため、電圧の値は変えずに、図 3.1 に示しているアテネータを $43(31+12)\text{ dB}$ 通して測定を行った。

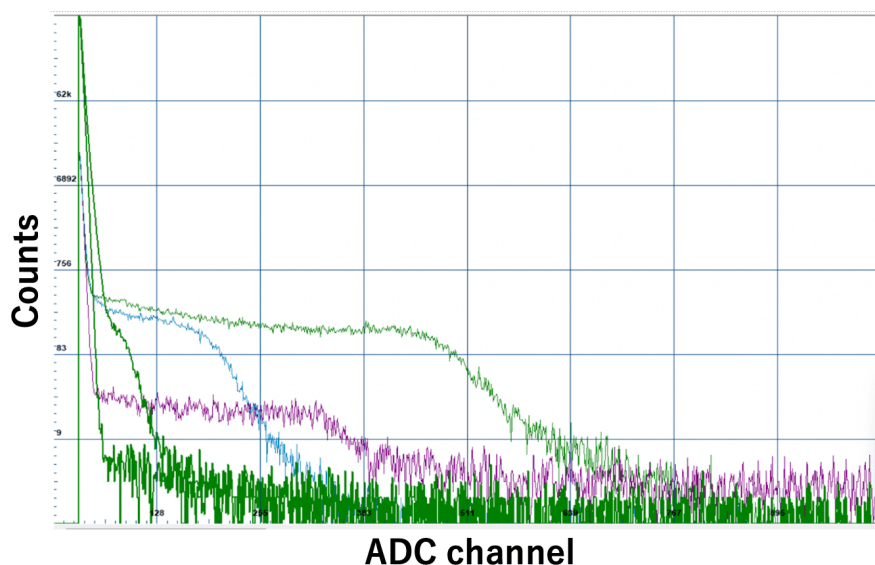


図 1: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ で前置増幅器と整形増幅器を用いた時のエネルギースペクトル。薄緑が ^{137}Cs 、紫が ^{22}Na 、水色が ^{133}Ba 。

図 1 から、エネルギー閾値は 70 keV と求まり、常温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の結果と比べて約 35% となった。

A.2 同時刻イベントのみの測定

同時刻イベントのみの測定について、セットアップは図 3.2 と同じだが、ここでも同様に電圧の値は変えずに、図 3.1 に示しているアテネータを 10 dB 通して測定を行った。また、測定前に、3章と同様にして

適切な Long-gate を探り、120 ns とした。

^{137}Cs と ^{133}Ba を照射して、エネルギー較正直線からエネルギー閾値を求めると、39.5 keV となり、20 °C での測定（スペクトルの足し合わせはなし）と比べ、約 30% となった。図 2 は、エネルギー閾値が下がったことにより、 ^{241}Am の光電吸収ピークを確認したものである。

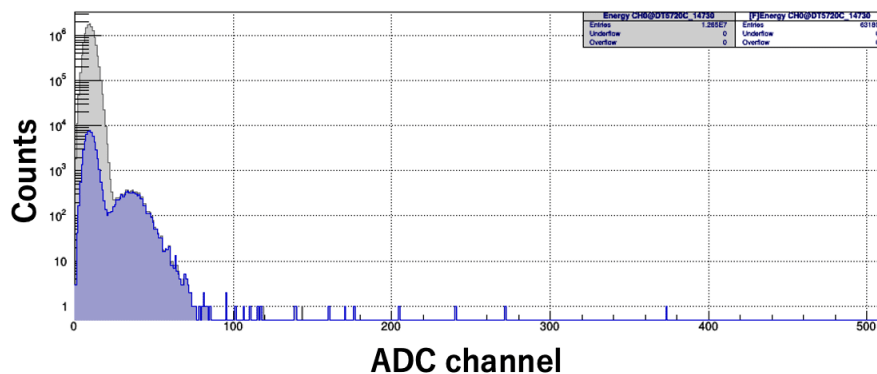


図 2: -20 °C で ^{241}Am を用いたときのエネルギースペクトル。青が Coincidence あり、灰色が Coincidence なし。

A.3 両面に MPPC をつけた状態でのプラスチックシンチレータの光量の測定

光量の測定は 3.3 節でも行っているが、ここでは 3 章で 3 つのエネルギー閾値を下げる実験を行った際の条件（両面に MPPC をつけた状態）の時の光量について記す。

ここでは図 3.1 の下側に示すセットアップを用いて、1 photon のピークを見やすくするために、低温-20 °C で ^{109}Cd の線源を照射して実験を行った。

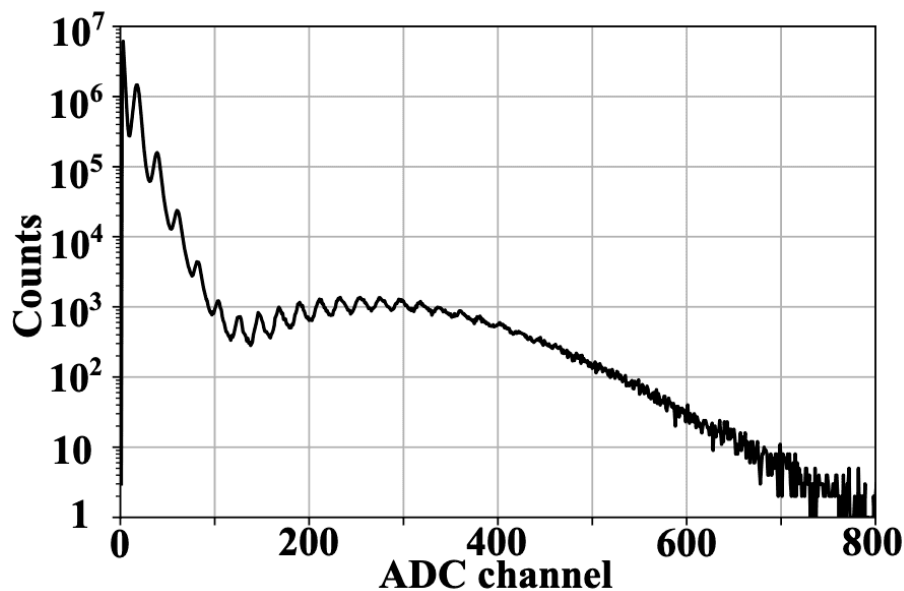


図 3: -20 °C で ^{109}Cd を用いたときのエネルギースペクトル。

結果は図3で、 ^{109}Cd の光電吸収ピーク 22 keV が 14 光子に対応することがわかった。これは換算すると 0.63 photon/keV となり、カタログ [23] に記載されている値と比較すると小さくなっているが、3.3 節と同様の理由と、さらに両側に MPPC をつけたことにより光量が半分になることを考慮すると、妥当な値であると言える。

B FPGA GROWTH DAQ ボードを用いた複数 MPPC での測定

B.1 複数 MPPC を用いた読み出しの基礎特性

ここではこれまでと異なるボードを用いた、複数 MPPC の読み出しについて記す。MPPC の受光面は約 6mm 平方でシンチレータの面約 1cm 平方に対して小さいことから、シンチレーション光の読み出し効率が悪く、絶対光量が低くなってしまったり、シンチレーション光の発生位置によって光量が変わってしまうことが考えられる。そこでそれらの対策として、複数 MPPC による多チャンネル読み出しを考える。

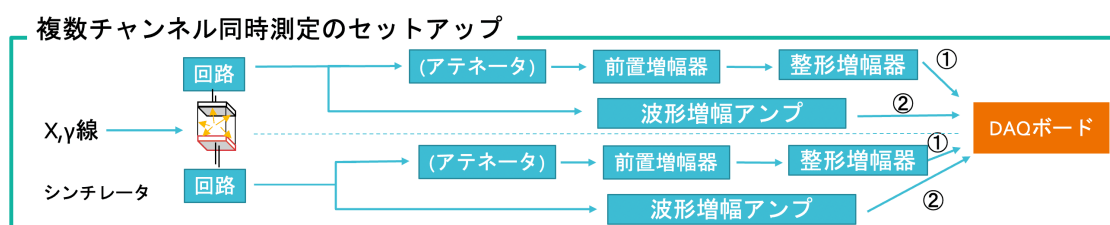


図 4: 複数チャンネル同時測定のセットアップ

ここでの狙いは、同時刻に取得されたイベントを足し合わせることで、エネルギー閾値を下げ、低エネルギー側の信号を検出しやすくするということである。またこれまでの実験では、検出に MCA 8000D (Pocket MCA) を利用していたが、本節ではシマフジ社製の FPGA(Field-Programmable Gate Array) GROWTH-DAQ ボード (図 5) と呼ばれる、複数チャンネルの同時測定ができるボードを、Raspberry pi4 (図 6) と共に使用した。

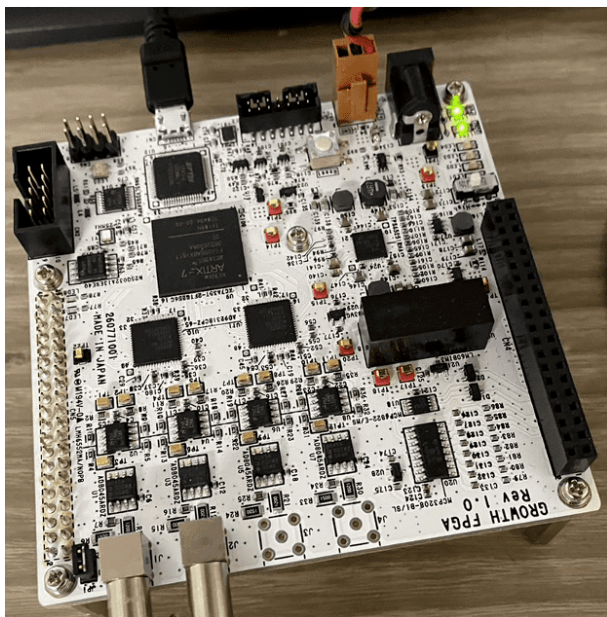


図 5: FPGA GROWTH-DAQ ボード

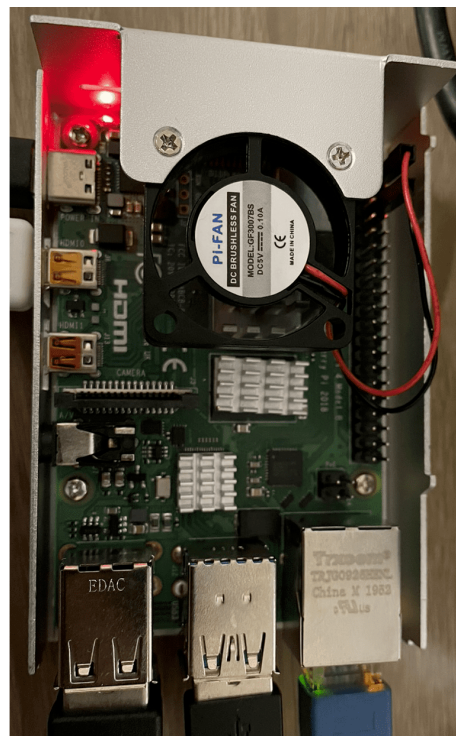


図 6: Raspberry pi4

ここではまず、1cm 角の立方体プラスチックシンチレータを用いて図 4 のセットアップで実験を行った。

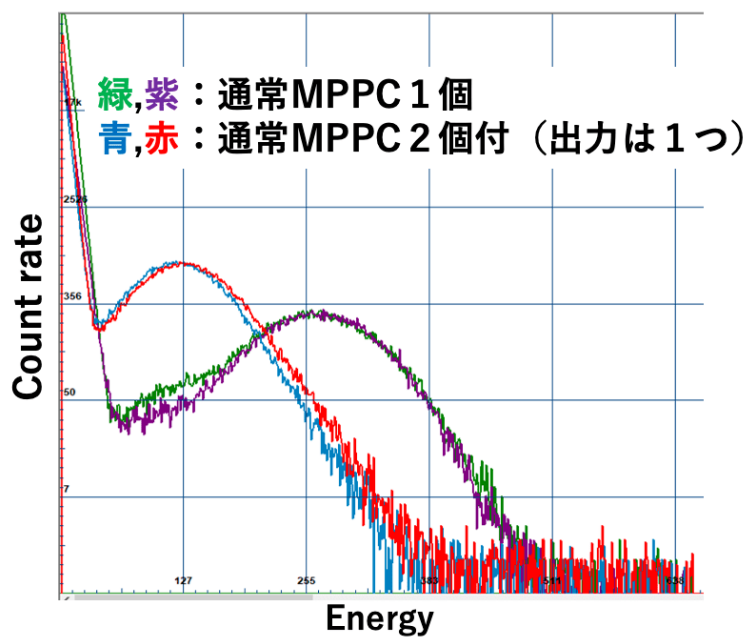


図 7: 小シンチでの、MPPC の数による光量やエネルギー閾値の違い

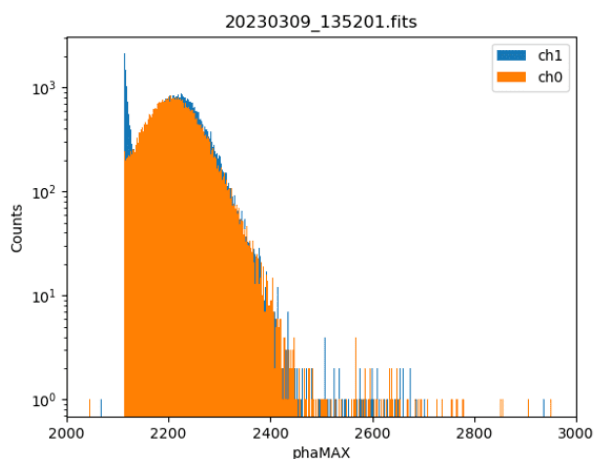


図 8: 2ch 同時測定での各 ch のスペクトル

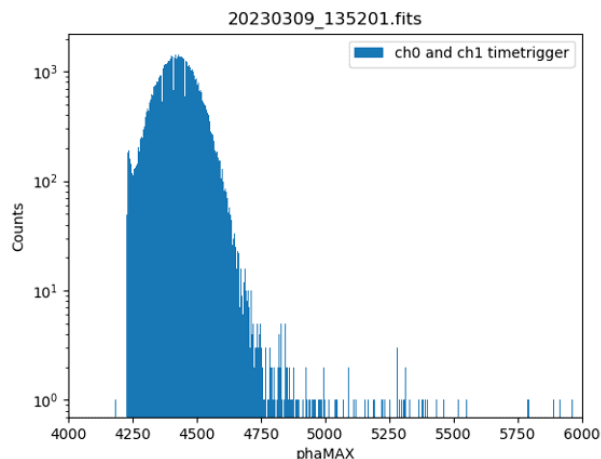


図 9: 図 8 の同時刻イベントを足し合わせたスペクトル

本測定での結果は、FITS ファイル形式により得られる。その中に信号が来た時刻やエネルギーなどの情報が記載されており、ファイルを `fv` コマンドで読み込むことにより、それらを閲覧できる。ここで取得できる FITS ファイルの `timetag` は、最小の単位が 10ns となっており、ここで同時刻イベントとみなしているのは、 $\text{timetag} \leq 10$ (つまり 100ns 以下) の精度で同じ時刻にカウントされたイベントである。

これら図 8 と 9 は、表面実装の MPPC (図 2.14) と ^{109}Cd の線源を用いて測定を行った。 ^{137}Cs の光電吸収ピークが 22keV であることと、各図の左側に見えている閾値のチャンネルからそのエネルギーを計算すると、図 8 の 1 チャンネルが 9.53keV であるのに対し、2 ch の同時刻イベントを足し合わせた図 9 でも 9.48keV となり、ほとんど改善は見られなかった。また図 7 において、青や赤の線で示す、通常 MPPC を 2 つつけて行った測定では、光量が半分程度に減少しただけでなく、エネルギー閾値も悪くなったため、このセットアップによる測定において、1cm 角の立方体のシンチレータでは、両面に MPPC を 2 つつけて測定し、足し合わせるメリットはあまりないと考えた。

B.2 複数チャンネルの同時測定

次に、複数チャンネルを用いた信号の同時測定である。前節でのゲート測定も 2 つの信号で測定していたが、そこではゲート作成であったのに対し、本項での実験は前項のように 2 つとも信号を取得している。

謝辞

本研究を進めるにあたり指導していただきました、深澤先生、ひろたか先生に大変感謝いたします。深澤先生には学部4年から3年間指導教員として様々な方面でお世話になりました。研究のおおまかな方針を定めてくださったり、投稿論文、本論文などの細かな添削をしてくださったりしたおかげで、ここまで研究を進めることができました。ひろたか先生は、M1の途中に、研究に関する悩み相談をしていただいたのが初めだったと記憶していますが、そこから実際に実験を行う上での細かい手順などを指導・監督してくださり、とても心強かったです。自分一人ではどうすればよいかわからない状況がたくさんありましたが、先生のお話を聴きながらとても勉強させていただきました。チェコでの国際学会では、人生初の海外経験だったこともあり、不安や緊張がとても大きかったです。研究の聴講・発表だけでなく、いろいろな意味で本当に貴重な経験をさせていただきました。M2では私の思わぬ足の怪我などもあり、ご心配をおかけしたと思いますが、何とか無事に研究会・学会での発表を終えることができ、特に投稿論文に関しては、Rejectという結果の後励ましていただき、無事に再投稿、卒業前にAcceptされることができてよかったと思うのと同時に、先生方のサポートなくしては決して成し遂げられることではありませんでした。

研究室のみなさんもありがとうございました。みなさんのおかげでとても居心地良く、過ごすことができました。楊さんとは就活の話をしたり、珍しい食べ物をいただいたり、いろいろお世話になりました。眞武さんとは、ポケモンを探して大学を歩き回ったのがいい思い出です。今澤さんはカラオケに行った時などの様子がとても印象に残っていますが、B4の研究ではとてもお世話になりました。濱田さんはゴルフに関して、完全初心者でしかも左利きで始めてしまった私に根気強く教えてくださり、ありがとうございました。ファミリーコースと一緒に回ったのは楽しかったです。榎木さんはチェコでのことが一番印象には残っていますが、他にも研究のことだけでなく、若狭湾で明け方一緒に海まで歩いたり、食事や飲みにもよく誘っていただき、今まであまり上下のつながりの経験がなかった自分としてはとても新鮮で楽しかったです。丹羽くんとは6年前の入学式前にアパートの食堂で出会ってから、一番長い付き合いでした。一緒にテスト勉強したり、ゲームしたり、出かけたり、良い意味で気を遣わなくて良い関係だったと思っています。佐崎さん、橋爪くん、堀くん、阪本さん、コロナもあって6人でごはんに行くことができなかったのはとても残念でしたが、みなさんと3年間、一緒に研究生生活を送ることができて良かったです。M1は2人しかいなくて大変だったと思いますが、浦田くんは2年間、深田くんも小部屋に来てから関わる機会が多く、楽しかったです。修論時期のお菓子もありがとうございました。B4のみなさんは、自分が人見知りな性格であることもあり、なかなか関わりづらいこともあったと思いますが、研究だけでなく、共通の趣味のことなど、仲良くしてくださってありがとうございました。

家族には6年間遠くから見守ってもらい、生活のサポートだけでなく、心配や寂しい思いをたくさんさせてしまったと思います。これからも心配をかけてしまうとは思いますが、しっかり恩返ししていきたいと思っています。よろしくお祈りします。

ここまで数えきれないほどたくさんの人に支えられ、広島での6年間の生活を送ることができました。これからは全然違う道に進むこととなりますが、広島でのことを忘れず、学んだことを活かして、頑張っていきたいと思っています。ありがとうございました。

2024年3月

参考文献

- [1] 広島大学 高橋弘充 先生 授業資料, X線・ガンマ線観測衛星/気球.
- [2] 一戸悠人 東京大学 2012年度, 修士論文 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器におけるコンプトン再構成アルゴリズムの開発」.
- [3] ガンマ線天文学, <https://gammaray.nsstc.nasa.gov/>.
- [4] ガンマ線バースト, <https://apod.nasa.gov/apod/ap000628.html>.
- [5] すざく衛星, <https://www.isas.jaxa.jp/j/special/2008/suzaku/19.shtml>.
- [6] ひとみ衛星 hxi, https://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2019_112_07/112-7_471.pdf.
- [7] H. Tajima, S. Watanabe, Y. Fukazawa, R. D. Blandford, T. Enoto, A. Goldwurm, K. Hagino, K. Hayashi, Y. Ichinohe, J. Kataoka, J. Katsuta, T. Kitaguchi, M. Kokubun, P. Laurent, F. Lebrun, O. Limousin, G. M. Madejski, K. Makishima, T. Mizuno, K. Mori, T. Nakamori, T. Nakano, K. Nakazawa, H. Noda, H. Odaka, M. Ohno, M. Ohta, S. Saito, G. Sato, R. Sato, S. Takeda, H. Takahashi, T. Takahashi, T. Tanaka, Y. Tanaka, Y. Terada, H. Uchiyama, Y. Uchiyama, K. Yamaoka, Y. Yatsu, D. Yonetoku, T. Yuasa, Design and performance of soft gamma-ray detector onboard the hitomi (astro-h) satellite, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4 (2018) 021411–.
- [8] 吉田和人 茨城大学 2014年度, 修士論文 「フェルミ衛星による超新星残骸 HB 3 のガンマ線観測」.
- [9] 笠井裕也 首都大学東京 2015年度, 修士論文 「EPID の画質向上を目的とした散乱光子とエネルギー特性に関する研究」.
- [10] シンチレーション検出器, *Radioisotopes and Radiation Methodology*.
- [11] Glenn f.knoll 「放射線計測ハンドブック 第3版」 日刊工業新聞社.
- [12] 清野愛海 東京大学 2018年度, 修士論文 「大型シンチレータ検出器の光量増加と実用性向上を目指した反射材の改良と性能評価」.
- [13] MPPC, https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html.
- [14] H. Takahashi, N. Hirade, N. Uchida, K. Hirose, T. Mizuno, Y. Fukazawa, K. Yamaoka, H. Tajima, M. Ohno, Silicon photomultiplier (si-pm) comparisons for low-energy gamma ray readouts with bgo and csi (tl) scintillators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 989 (2021) 164945.

- [15] K. Torigoe, Y. Fukazawa, G. Galgóczi, T. Mizuno, K. Nakazawa, M. Ohno, A. Pál, H. Takahashi, K. Tanaka, N. Tarcai, N. Uchida, N. Werner, T. Enoto, Z. Frei, Y. Ichinohe, L. Kiss, H. Odaka, J. Řípa, Z. Várhegyi, Performance study of a large csi(tl) scintillator with an mppc readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 924 (2019) 316–320.
- [16] MPPC, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf.
- [17] 改良版 MPPC, http://www.cta-observatory.jp/Publications/Theses/Mth_2022_Iwasaki.pdf.
- [18] CAEN DT5720 manual, available at, <https://www.caen.it/products/dt5720/>.
- [19] ASIC, Citiroc 1A, <https://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/citiroc-1a/89-citiroc1a-datasheet-v2-53/file>.
- [20] CAEN A5702, <https://www.caen.it/products/dt5702/>.
- [21] 山崎智紀 広島大学 2006 年度, 卒業論文 「すざく衛星硬 X 線 GSO 検出器における軌道上バックグラウンドのモデル化の研究」.
- [22] BGO シンチレータ, available at, <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/hitomi.html>.
- [23] 使用したプラスチックシンチレータ ej-200, <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>.
- [24] MCA 8000D manual, available at, <https://www.amptek.com/-/media/ametekamptek/documents/resources/products/user-manuals/mca8000d-user-manual-b1.pdf?la=en&revision=75b93881-a2e4-4d92-9d84-0d67b5d34614>.
- [25] L. Peralta, Temperature dependence of plastic scintillators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 883 (2018) 20–23.
- [26] J. Zhou, N. Gaughan, F. Becchetti, R. Torres-Isea, M. Febraro, N. Zaitseva, A. Di Fulvio, Light output quenching in response to deuterium-ions and alpha particles and pulse shape discrimination in deuterated trans-stilbene, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1027 (2022) 166287.
- [27] Y. Morishita, A. Di Fulvio, S. Clarke, K. Kearfott, S. Pozzi, Organic scintillator-based alpha/beta detector for radiological decontamination, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 935 (2019) 207–213.
- [28] X. Zheng, H. Gao, J. Wen, M. Zeng, X. Pan, D. Xu, Y. Liu, Y. Zhang, H. Peng, Y. Jiang, X. Long, D. Lu, D. Yang, H. Feng, Z. Zeng, J. Cang, Y. Tian, In-orbit radiation damage characterization of sipms in the grid-02 cubesat detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1044 (2022) 167510.

- [29] N. Hirade, H. Takahashi, N. Uchida, M. Ohno, K. Torigoe, Y. Fukazawa, T. Mizuno, H. Matake, K. Hirose, S. Hisadomi, K. Nakazawa, K. Yamaoka, N. Werner, J. Řípa, S. Hatori, K. Kume, S. Mizushima, Annealing of proton radiation damages in si-pm at room temperature, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 986 (2021) 164673.
- [30] S. Hatori, T. Kurita, Y. Hayashi, M. Yamada, H. Yamada, J. Mori, H. Hamachi, S. Kimura, T. Shimoda, M. Hiroto, T. Hashimoto, M. Shimada, H. Yamamoto, N. Ohtani, K. Yasuda, R. Ishigami, M. Sasase, Y. Ito, M. Hatashita, K. Takagi, K. Kume, S. Fukuda, N. Yokohama, G. Kagiya, S. Fukumoto, M. Kondo, Developments and applications of accelerator system at the wakasa wan energy research center, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 241 (2005) 862–869.
- [31] J. Řípa, G. Galgóczi, N. Werner, A. Pál, M. Ohno, L. Mészáros, T. Mizuno, N. Tarcai, K. Torigoe, N. Uchida, Y. Fukazawa, H. Takahashi, K. Nakazawa, N. Hirade, K. Hirose, S. Hisadomi, T. Enoto, H. Odaka, Y. Ichinohe, Z. Frei, L. Kiss, Estimation of the detected background by the future gamma ray transient mission camelot, *Astronomische Nachrichten* 340 (2019) 666–673.
- [32] N. Uchida, H. Takahashi, M. Ohno, T. Mizuno, Y. Fukazawa, M. Yoshino, K. Kamada, Y. Yokota, A. Yoshikawa, Attenuation characteristics of a Ce : Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ scintillator, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 986 (2021) 164725.