

プラスチックシンチレータとMPPCを組み合わせた
天体偏光X線検出器の検討

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室

B083384

中岡 竜也

主査：水野 恒史

副査：小寫 康史

平成26年10月28日

概要

天体からの X 線を偏光観測することによって、撮像や分光では見ることのできない、もしくは分解できないくらい微小な構造を理解するための重要な情報を得ることができる。例えば白色矮星や中性子星の磁場の構造や、ブラックホールを取り巻く反射体の構造等が挙げられる。一般的に偏光 X 線検出器には増幅率の高い光検出器である PMT を用いているが、サイズが大きいことに加え、高い動作電圧、磁場に弱い等の欠点があり、必ずしも扱いやすいとは言えない。そこで本研究では光検出器に、小型で量子効率に優れた MPPC を用いることで、PMT と同程度の性能を持ち、これらの欠点を克服した検出器を目指し、シンチレータ、光検出器、動作温度、読み出し回路等の設定を変更しながら、性能評価を行った。

まず機器の動作確認を行った後、上記の各部の実験条件を 1 つずつ変更しながら性能の向上を図った。シンチレータと MPPC のマッチングの改良や MPPC のピクセルサイズを変更することで集光率の向上を行い、光検出器の動作温度や整形時定数の変更により、ノイズ (ダークカレント) の減少を行った。これらの改良により、60 keV 程度のエネルギーを読み出す際には PMT と同程度のエネルギー分解能が得られることが確認できた。

右の図は上記の改良の一例として、MPPC+プラスチックシンチレータのシステムにおいて、 ^{109}Cd (22.2 keV) の X 線を照射した際のスペクトルで、横軸は ADCch、縦軸はイベント数である。MPPC の読み出し温度を $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、信号の読み出し時間を 50 ns に設定することによって、 $\sim 20\text{ keV}$ のエネルギーを読み出すことに成功し、また ^{109}Cd のピークとノイズが分離でき、ノイズは $\sim 10\text{ keV}$ を実現できたことが分かる。一方、目標としている $\sim 3\text{ keV}$ のスレッシュホールドにはまだ届いておらず、今後はノイズの一層の低減のため、更に高速の読み出しや、ノイズ特性の優れた MPPC の新製品を利用することが考えられる。

図 1: ^{109}Cd (22.2 keV) の X 線を照射した際のスペクトル。右側が ^{109}Cd のピークで、左側がノイズである。

目次

第 1 章 序論	5
第 2 章 偏光 X 線検出器	6
2.1 偏光とは	6
2.2 X 線偏光計の原理	6
2.2.1 コンプトン散乱、トムソン散乱	6
2.2.2 光電効果	7
2.2.3 コンプトン散乱型偏光計	8
2.3 シンチレータ	8
2.3.1 無機シンチレータ	9
2.3.2 有機シンチレータ	9
2.4 光検出器	10
2.4.1 光電子増倍管 (PMT)	11
2.4.2 光ダイオード、なだれ型光ダイオード	12
2.4.3 MPPC	13
2.5 本研究の目的	14
第 3 章 実験機器のセットアップと動作確認	15
3.1 パルス整形	15
3.1.1 前置増幅器	15
3.1.2 整形増幅器	17
3.2 Bias 電源	21
3.2.1 要求性能	21
3.2.2 自作電源の構成	22
3.2.3 出力インピーダンス	25
3.2.4 電源安定性	27
3.3 アナログ-デジタル変換機 (PocketMCA)	27
3.3.1 threshold	28
3.3.2 AD 変換の線形性の確認	29
第 4 章 プラスチックシンチレータ+MPPC システムの性能評価	31
4.1 性能評価の判断基準	32
4.2 シンチレータ部の特性	34
4.2.1 CsI とプラスチックシンチレータの比較	34

4.2.2	プラスチックシンチレータのサイズの影響	35
4.3	MPPC 部の特性	37
4.3.1	MPPC の高圧依存性	37
4.3.2	MPPC のピクセルサイズの影響	38
4.3.3	MPPC の温度特性	40
4.4	読み出し回路の特性	43
4.4.1	整形時定数の影響	44
4.5	絶対光量の議論	46
4.5.1	ADC ch のオフセット確認	47
4.5.2	1 p.e. 付近のスペクトル	47
4.5.3	PMT との比較	48
第 5 章	まとめと今後	52
付 録 A	前置増幅器「CP 5028 Fast Quad Amplifier」の性能評価	53

目次

1	^{109}Cd (22.2 keV) の X 線を照射した際のスペクトル。右側が ^{109}Cd のピークで、左側がノイズである。	1
2.1	x 軸方向に偏光した光子を $-z$ 方向から $+z$ 方向に向け入射させた際のコンプトン散乱の図 . . .	7
2.2	コンプトン散乱型偏光計の概要図	8
2.3	PoGOLite の概略図。[4] より借用。	10
2.4	光電子増倍管 (PMT) の主な構成 [3]	12
2.5	なだれ型光ダイオード (APD) のアバランシェ領域の模式図 [5]	13
2.6	MPPC の等価回路 [5]	14
3.1	シンチレーション検出器における一般的なセッティングの概略図	15
3.2	本実験で MPPC の前置増幅器として用いる回路図	16
3.3	本実験で MPPC の整形増幅器として用いる回路図	18
3.4	パルスの整形の結果生じるアンダーシュートの模式図 [3]	18
3.5	テストパルス挿入回路	19
3.6	MPPC に使用する回路にテストパルスを挿入する際に用いたセットアップの概略図	19
3.7	MPPC からの読み出しに使用する自作回路にテストパルスを挿入した際のパルス波高 vs 出力電位	20
3.8	PMT に使用する回路にテストパルスを挿入する際に用いたセットアップの概略図	21
3.9	PMT からの読み出しに使用する回路 (「CP 5028 Fast Quad Amplifier」および「CP 4056 Fast Amplifier」) にテストパルスを挿入した際のパルス波高 vs 出力電位	21
3.10	製作した Bias 電源の回路図	22
3.11	製作した Bias 電源	23
3.12	使用した DAC(AD7533) の端子名 [12]	24
3.13	DAC「AD 7533」の入力信号の値 B と出力電圧の関係	24
3.14	使用した DDC(R12-100B) の端子名 [13]	25
3.15	DDC「R12-100B」の V_{adj} と V_{ddc} の関係 [13]	25
3.16	出力インピーダンスの概念図	26
3.17	CsI+MPPC の出力を読み出した際の、 V_{source} と整形増幅器の出力の関係	26
3.18	SCA における入力電圧と出力 channel の関係 [3]	28
3.19	MCA の概念図 [3]	28
3.20	PocketMCA のピークの検出と threshold の関係 [15]	29
3.21	整形増幅器の出力電圧と ADC チャンネルの関係	30
4.1	本実験で用いたセットアップの概略図	32

4.2	シンチレータ周りのセットアップの概略図	32
4.3	典型的な MPPC のダークカウン트의印加電圧依存性のグラフ [5]	33
4.4	線源から取得したスペクトルの模式図 [3]	33
4.5	分解能の違いによるスペクトル変化 [3]	34
4.6	ピークチャンネルと半値全幅 [3]	34
4.7	シンチレータの種類を変更した際のスペクトルの比較	35
4.8	典型的な MPPC の、波長と検出効率の関係 [5]	35
4.9	サイズの異なるプラスチックシンチレータのスペクトルの比較	36
4.10	印加電圧と ADC ピークチャンネルの関係	38
4.11	印加電圧とエネルギー分解能の関係	38
4.12	MPPC のピクセルサイズを変更した際のスペクトル比較	39
4.13	(左)MPPC の増幅率の典型的な温度依存性のグラフ [5]。(右)MPPC のダークカウン트의典型的な温度依存性のグラフ [5]	40
4.14	MPPC の温度を変化させた際の降伏電圧の変化	41
4.15	同増幅率下において温度を変化させた際の ^{241}Am のスペクトルの比較	42
4.16	同増幅率下において温度を変化させた際のバックグラウンドのスペクトルの比較	42
4.17	(左) 同増幅率下において温度を変化させた際の ^{152}Eu のスペクトルの比較。(右) 同増幅率下において温度を変化させた際の ^{109}Cd のスペクトルの比較。	43
4.18	整形時定数を変更した際の ^{109}Cd のスペクトルの比較	44
4.19	整形時定数を変更した際の ^{57}Co のスペクトル	45
4.20	MPPC で取得したスペクトルに対し作成したエネルギー較正直線	46
4.21	整形時定数を変更した際の ^{55}Fe のスペクトル	46
4.22	低エネルギーにおける整形増幅器の出力電位と ADCch の関係	47
4.23	整形時定数を変更した際の ^{55}Fe のスペクトル	48
4.24	(左)MPPC と PMT それぞれの最適な設定で読み出した ^{241}Am のスペクトルの比較。(右)MPPC と PMT それぞれの最適な設定で読み出した ^{109}Cd のスペクトルの比較	49
4.25	線源からのエネルギー vs エネルギー分解能	50
4.26	PMT で読み出した ^{55}Fe のスペクトル	50
A.1	前置増幅器に 2 pF のフィードバックコンデンサを使用した際、各部をオシロスコープで見た図	54
A.2	光検出器に PMT を用い、前置増幅器に 2 pF のフィードバックコンデンサを使用した際、各部をオシロスコープで見た図	54
A.3	前置増幅器に 12 pF のフィードバックコンデンサを使用した際、各部をオシロスコープで見た図	55
A.4	プリアンプのフィードバックコンデンサの値を変えた際の ^{241}Am のスペクトル	55

表 目 次

2.1	代表的な無機シンチレータと有機シンチレータ [3]	10
2.2	各光検出器の主な仕様 [3][5]	11
3.1	CP 5028 Fast Quad Amplifier の仕様 [7]	17
3.2	4056 Fast Amplifier の仕様 [8]	20
3.3	ORTEC 572A(571 の後継機) Amplifier の仕様 [9]	20
3.4	各電源の比較 [10] [11]	22
3.5	電源安定性の評価	27
3.6	MCA 8000A と MCA 8000D の主な仕様 [14][15]	28
4.1	使用した線源 [16]	31
4.2	シンチレータの種類を変更した際に使用した読み出し機器	34
4.3	シンチレータの種類を変更した際の比較	35
4.4	プラスチックシンチレータのサイズを変更した際に使用した読み出し機器	36
4.5	サイズの異なるプラスチックシンチレータの比較	36
4.6	比較する 2 種類の MPPC の仕様 [18]	37
4.7	MPPC の印加電圧を変化させた際に使用した読み出し機器	37
4.8	MPPC のピクセルサイズを変更させた際に使用した読み出し機器	39
4.9	^{241}Am の各ピークに対する銅の反応断面積 [cm^2/g] [19]	39
4.10	銅の厚さを変更した際における ^{241}Am の各ピークの減少率 [%]	39
4.11	ピクセルサイズを変更した際の比較	40
4.12	MPPC を動作させる温度を変更させた際に使用した読み出し機器	41
4.13	同増幅率下において温度を変化させた際の ^{241}Am からの 59.5 keV の γ 線の比較	42
4.14	同増幅率下において ^{152}Eu と、 ^{109}Cd からの X 線の -10 $^{\circ}\text{C}$ での測定データ	43
4.15	読み出し回路を変更した際に使用した読み出し機器	44
4.16	整形時定数を変更した際の ^{109}Cd からの 22.0 keV, 22.2 keV の X 線の比較	45
4.17	絶対光量の議論の際に使用した読み出し機器	47
4.18	R7899 の仕様 [22]	48
4.19	各線源を異なる光検出器で読み出した際の比較	49
4.20	1p.e. のピークチャンネル、各線源からの信号の 1 p.e. との比	51
A.1	フィードバックコンデンサの値を変化させた際に使用した機器	56
A.2	プリアンプのフィードバックコンデンサの値を変更した際の ^{241}Am からの 59.5 keV の γ 線の比較	56

第1章 序論

宇宙では、地球上では実現が難しい、あるいは不可能な強磁場、高密度、高温といった極限環境が実現しており、観測によってこうした特異な環境にある天体の性質や、極限環境下での物理現象を調べることができる。観測には通常、光およびその仲間である電磁波が用いられる。

電磁波の種類は波長によって分けられ、波長の長いものから電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、 γ 線と大別される。これらの電磁波を観測する方法として、天体の像を得る撮像、天体の光度を測る測光、波長を細かく分けてスペクトルを取得する分光、電磁波の電場ベクトルの偏りを調べる偏光等がある。電波、可視光の領域の観測では、上記の4つの方法が全て用いられている。しかしX線、 γ 線の領域の観測では、撮像、測光、分光の3つの方法はよく用いられているが、偏光観測はほとんど行われていない。X線領域の偏光観測を行うことで、白色矮星や中性子星の磁場や、ブラックホールを取り巻く反射体の構造など、撮像では見ることができない天体の情報を得たり、一般相対論効果の確認といった基礎物理の検証が可能となる。

一般的な偏光X線検出器に用いられている光検出器である光電子増倍管(PMT)は、増幅率の高さから広く普及しているが、サイズが大きく磁場に弱い等の欠点があり、必ずしも扱いやすい光検出器とは言えない。これに対し、小型で量子効率に優れた光検出器である multi-pixel photon counter(MPPC)を用いることで、PMTと同程度の性能で、より柔軟なデザインの検出器を実現できる可能性がある。そこで本論文では、MPPCの欠点を克服し、PMTを使用した際と同等の感度を持った検出器を目指し、プラスチックシンチレータ+MPPCの組み合わせで、サイズ、温度、読み出し速度等、様々なコンフィギュレーションを比較し、性能評価を行う。

第2章 偏光X線検出器

2.1 偏光とは

光（電磁波）は、進行方向に垂直な方向に、電場と磁場が振動している。また、電場と磁場も垂直である。一般に光には、多くの波長の光が混じり、またそれらの電場、及び磁場の振動方向に偏りが無い。しかし時として、電場、磁場の振動方向に規則性が生じることがあり、これを偏光と呼ぶ。偏光は、偏りの仕方によって、円偏光、楕円偏光、直線偏光に分類される。天体からの偏光を測定することで、天体の磁場や反射体の構造といった、撮像ではみることが不可能な、あるいは分解できないくらい微小な幾何学的構造を知ることができる。

2.2 X線偏光計の原理

本節では、X線を検出し、更に偏光も測定可能な検出器の原理について、物理プロセスに対応させて述べる。

2.2.1 コンプトン散乱、トムソン散乱

コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、高エネルギー光子が電子に衝突することで、光子のエネルギーの一部を電子に与え、また向きを変える現象である。この反応は、エネルギーのやりとりのある非弾性散乱である。

x 軸方向に振動する（偏光している）光が静止した電子に衝突する場合を考える（図 2.1）。この図において、角度 θ は入射光子と散乱光子の角度、 ϕ は入射光子の偏光方向と、散乱光子の方向の x - y 平面への射影の角度である。光子と電子の反応断面積は、Klein-Nishina の式 [1] で表される。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \frac{E^2}{E_0^2} \left[\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right] \quad (2.1)$$

また、エネルギー・運動量保存則より以下を得る。

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

ここで、 r_0 は電子の古典質量半径 (2.818×10^{-15} m)、 E_0 は入射光子のエネルギー、 E は散乱光子のエネルギー、 mc^2 は電子の静止エネルギー (511 keV) である。この式より、 ϕ が 90° 、 270° のときに散乱確率が最大になり、 0° 、 180° のときには最小になることが分かる。これは、散乱光子が入射光子の偏光方向に対して垂直方向に散乱されやすいことを示しており、この原理を用いて偏光を測定することができる。

図 2.1: x 軸方向に偏光した光子を $-z$ 方向から $+z$ 方向に向け入射させた際のコンプトン散乱の図。P 点は散乱後の光子の方向ベクトルを xy 平面に射影した点

トムソン散乱

トムソン散乱はコンプトン散乱の低エネルギー側の極限で、電子のエネルギーが変化せず、光子の運動方向のみが変化する現象である。この反応は弾性散乱である。

トムソン散乱はコンプトン散乱と同じ原理で偏光を測定できる。式 2.1 で $E = E_0$ とするとトムソン散乱の断面積となり、やはり入射光子の偏光方向に対して垂直方向に散乱されやすいことが分かる。

2.2.2 光電効果

光電効果とは、原子に束縛された電子に光子が当たると、電子が光子の全エネルギーを受け取り、束縛エネルギーを引いたエネルギーを運動エネルギーとして持ち飛び出す現象である。X線は電磁波の中でも高いエネルギーを持つため、K殻の電子の反応断面積が最も大きい。光電効果が起こると電子を1つ失うため、他の自由電子や、原子内の他の原子がK殻に移動する。この際、電子の準位の違いにより、蛍光X線が発生する。

入射光子のエネルギーが電子の静止エネルギーに対して小さい場合の反応断面積は、次のように近似される [2]。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{mc^2}{E_0} \right)^{\frac{7}{2}} \frac{4\sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)} \quad (2.3)$$

ここで、 Z は原子番号、 mc^2 は電子の静止エネルギーを示し、 $\beta = v/c$ (v は速度、 c は光速) である。角度 θ, ϕ の定義は、2.2.1 と同じである。この式より、 ϕ が 0° のときに散乱確率が大きいことが分かる。このことは、放出された電子は入射光子の偏光方向に対して平行に飛びやすいことを意味する。この原理を用いるのが、光電効果を用いた偏光計である。

2.2.3 コンプトン散乱型偏光計

コンプトン散乱型偏光計は、コンプトン散乱と光電効果を利用した偏光計である。図 2.2 はその概要図であり、中心の散乱体に入射光子が当たると、コンプトン散乱され、周りの吸収体で光電吸収をする構造となっている。コンプトン散乱の反応断面積 (式 2.1) により、散乱光子は入射光子の偏光方向に対して垂直方向に多く散乱される。このことを利用し、各吸収体に届く散乱光子の数の違いを測定することで、偏光を測定することができる。偏光の検出には、一般にシンチレータと光検出器の組み合わせを用いる。シンチレータと光検出器については、次節以降で記述する。

コンプトン散乱の反応断面積は、原子中の電子の数、つまり原子番号 Z の 1 乗に比例し、光電効果は Z の 4~5 乗に比例する。よって、 Z の大きい物質ほど光電効果の割合が大きくなる。このことから、散乱体は Z の小さい物質を利用し、吸収体には Z の大きいものを利用することが多い。

コンプトン散乱型偏光計が観測する典型的なエネルギーである 30 keV の光子が散乱体で散乱した際のエネルギー損失は、2.2 式によって求められる。偏光が測定可能なエネルギー損失は $\theta = \pi/2$ のときに最大となるが、それでも ~ 1.7 keV と低い。従って、シンチレータとしてはエネルギー当たりの光量が多いものが、光検出器としては量子効率が高いものが望ましい。

図 2.2: コンプトン散乱型偏光計の概要図

2.3 シンチレータ

シンチレータとは、放射線が当たることで蛍光を発する物質のことを指す。この蛍光をシンチレーション光と呼ぶ。シンチレータは、入射光子の運動エネルギーを検出可能な光に変換することで、放射線の検出、及びスペクトル測定を容易にしている。コンプトン散乱型偏光計では、入射光子をコンプトン散乱させる散乱体、及び吸収体としての役割を持つ。

理想的なシンチレータに求められる性質は、以下のようなものが挙げられる。

- 入射した電磁波との反応確率が高い

- 広いエネルギーに渡り、反応した電磁波のエネルギーに比例した光子を放出する
- 短時間で大量の光子を放出する
- 自身の発したシンチレーション光を吸収・散乱しない
- 加工しやすく、潮解性がない等、扱いやすい
- 光検出器との屈折率の差が大きくない

これらの性質を可能な限り満たし、吸収体、散乱体各々の目的に応じたシンチレータと光検出器の組み合わせを選ぶ必要がある。

2.3.1 無機シンチレータ

無機シンチレータは無機物の結晶を用いて作成したシンチレータをのことであり、一般に減衰時間が数 100 ns～数 μ s と長く、光量が多いという特徴を持つ。代表的なものに、NaI、CsI、BGO 等がある (表 2.1)。原子番号の大きい元素を使用するため密度が高く、光電吸収が起こりやすいのが特徴である。

減衰時間が長いことは、カウントレートが高い測定には不向きであり、また光電吸収が起こりやすいことから、「散乱体」としては一般に適さない。しかし、散乱光子を検出する「吸収体」としては有用である。

2.3.2 有機シンチレータ

有機シンチレータは、有機物の結晶、もしくは蛍光性のある有機物質をプラスチックの中に溶かして作成したシンチレータのことであり、代表的なものに、アントラセン、プラスチックシンチレータ等がある (表 2.1)。減衰時間が無機シンチレータより 2 桁～3 桁も短く、光量は代表的な無機シンチレータである NaI の 1/3 程度となっている。扱いが容易で加工しやすく、サイズや形にとらわれない、安価であることが利点である。

原子番号の小さい元素を使用しているため、無機シンチレータよりも密度が小さく、コンプトン散乱が起きやすい。また減衰時間が短いため、高計数率で動作させることができる。従って本研究の対象である散乱型偏光計の「散乱体」として有用である。

プラスチックシンチレータを用いた X 線偏光計の例として、国際気球観測用の PoGOLite (Polarised Gamma-ray Observer - Light-weight version) が挙げられる (図 2.3)。PoGOLite は 6 角柱のプラスチックシンチレータを蜂の巣状に並べ、散乱体と吸収体を兼ねた構造を取る。その周囲に BGO を並べ、大面積を実現しつつバックグラウンドを除去している。光検出器には後述の PMT が用いられている。[4]

表 2.1: 代表的な無機シンチレータと有機シンチレータ [3]

シンチレータ	密度 (g/cm ³)	絶対光収率 (光子数/MeV)	減衰時間 (μ s)	屈折率
無機シンチレータ				
NaI(Tl) ¹	3.67	38,000	0.23	1.85
CsI(Tl) ¹	4.51	65,000	3.34	1.80
BGO	7.13	8,200	0.30	2.15
有機シンチレータ				
アントラセン	1.25	16,500	0.03	1.62
プラスチックシンチレータ	1.032	11,200	0.0018	1.032

¹ 光量を増加させる目的で Tl を加えている

図 2.3: PoGOLite の概略図。[4] より借用。

2.4 光検出器

光検出器とは、入射した光子を電気信号（電子）に変換する装置である。また、その電気信号を増幅する機能を持つものもある。

光検出器の性能は大きく分けて3つに大分される。1つは動作電圧で、この値 (Bias 電圧) が低いほど、一般に取扱いが楽になる。また、光検出器の出力が動作電圧に敏感に反応してしまうと、より精密に電圧を調整する必要がある。次に受光面で、シンチレーション光を電気信号に変換する確率（量子効率）が主な性能を決める。受光面の大きさも、大きければそれだけ多くの光を集めやすくなり、利点となる。最後に内部増幅率および (内部) ノイズである。増幅率が高いほど、外来のノイズに負けにくい信号となり、より低エネルギーの信号を扱うことが可能となる。ノイズのうち、受光面や内部増幅器で発生するものが内部ノイズであり、やはり光検出器の性能を決める。

また、光検出器+シンチレータの組み合わせの性能を示す数値として、絶対光量が挙げられる。これは、光検出器が1つの光電子を検出し増幅した信号 (シングルフォトエレクトロン: 1p.e.) と、線源からの信号の比のことであり、システム全体としての検出効率の目安となる。

本節では、一般的に用いられている光検出器（PMT, PD, APD, MPPC）の性能と、それらの特性について述べる。表 2.2 に、これらの光検出器の主な仕様を示す。

表 2.2: 各光検出器の主な仕様 [3][5]

光検出器	大きさ (mm)	動作電圧 (V)	増幅率	量子効率 (%)
光電子増倍管 (PMT)	10~760	800~1800	$10^5 \sim 10^8$	20~30
なだれ型光ダイオード (APD)	0.04~10	~400	$1 \sim 10^2$	~80
MPPC(multi-pixel photon counter)	1~6	~80	$10^5 \sim 10^6$	~80

2.4.1 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管 (photomultiplier tube; PMT) は、現在最も広く普及している光検出器の 1 つである。紫外～赤外までの電磁波に感度を持ち、非常に高い増幅率を持つのが特徴である。また、広い範囲で入射光子に対する線形性を保ち、受光面の大きさも幅広い規格のものが市販されている。

PMT の一般的な構成を図 2.4 に示す。まず入射した光子は光電陰極により電子に変換される。このプロセスは光電効果によるものである。電子が飛び出る（電位障壁を超える）程度のエネルギーが必要なため、PMT に通常用いられている金属だと 3~4 eV 程度の光子のエネルギーが必要となる。次に光電陰極からの電子は印加電圧により加速され、ダイノードと呼ばれる電極表面に衝突する。ここでは電子の衝突によりダイノード中の電子が励起され、2 次電子放出が起こる。このときに放出される電子の量は、印加電圧に依存する。この後は図に示されているように、後段のダイノードに衝突、電子の放出を繰り返すことで、最終的な増幅率が $10^5 \sim 10^8$ 程度となる。この増幅率の高さにより、多くの X 線検出器では PMT が用いられている。

PMT には、自発的電子放出というものがある。これは、電子が光電陰極の電位障壁を超える熱エネルギーを持つ場合に起こる現象で、信号と同様にダイノードに衝突して増幅されるため、ノイズの原因になってしまう。しかし金属陰極では自発的電子放出は比較的少ないため、ノイズが低いという特徴を持つ。

一方、その高い電位障壁は、量子効率が低くなってしまいうデメリットとなって現れる。また、電子を加速、増幅させるのに必要な電圧は約 1000 V と高い。構造上サイズが大きいことや、それに伴う電子の移動距離の増加により、磁場に弱いことも欠点として挙げられる。

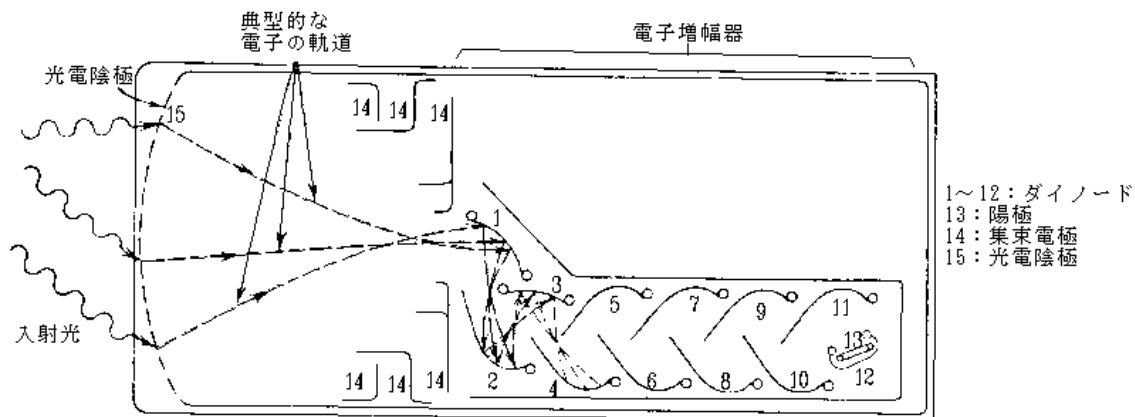


図 2.4: 光電子増倍管 (PMT) の主な構成 [3]

2.4.2 光ダイオード、なだれ型光ダイオード

光ダイオード (PD)

光ダイオード (photodiode; PD) は、PMT とは違い受光面に半導体を用いた光検出器である。一般的に p 型半導体と n 型半導体を接合したダイオードに、逆バイアスを印加して用いることが多い。半導体のバンドギャップは $1\sim 2$ eV 程度のため、PMT と比べて更に広い波長で感度を持ち、量子効率を高くすることが可能となる。また、小型で磁場の影響を受けにくく、印加電圧も約 100 V とそれほど高くないことも、PMT がない利点である。しかし、PMT のように内部で信号を増幅する機能がなく、シンチレータの光量が低い場合にはノイズの影響により信号を読み取ることが難しい。大型化することが難しい点も、受光面を十分大きくすることができない欠点になる。

なだれ型光ダイオード (APD)

なだれ型光ダイオード (avalanche photodiode; APD) は、PD に内部増幅の機能を加えた光検出器である。印加電圧が約 400 V 程度と PD よりも高くなっているが、PD の欠点であるノイズに負けやすい性質を克服している。

APD のアバランシェ領域の模式図を図 2.5 に示す。APD に入射してきた光は、内部で反応し、電子正孔対を生成する。印加されている電圧により、電子はアバランシェ層へ到達する。アバランシェ層は高い電圧が印加されており、ここに入射した電子は電子正孔対を連鎖的に起こす。これを雪崩増幅と呼ぶ。この結果、最終的な増幅率が $10\sim 10^2$ となる。増幅率では PMT に劣るが、PD の特徴である、高い量子効率、広範囲にわたる感度、低電圧での動作等により、総合的に同等の性能を得ることも可能となる。

APD を用いる際に必要な注意点として、温度依存性、印加電圧依存性がある。アバランシェ層による増幅を行っているため、その電子正孔対の生成確率は温度、電圧に敏感になってしまう。よって、APD を安定に動作させるためには安定した Bias 電源を用い、また温度をコントロールする必要がある。PMT と同じく自発的電子放出があり、同様に増幅してしまうため、ノイズの原因となる。また、pn 接合型ダイオード

ドには降伏電圧が存在する。この電圧を超えた逆バイアスを印加すると、電子正孔対の生成が暴走状態になり、入射した光子に依存せず一定数の電子を放出するようになる。

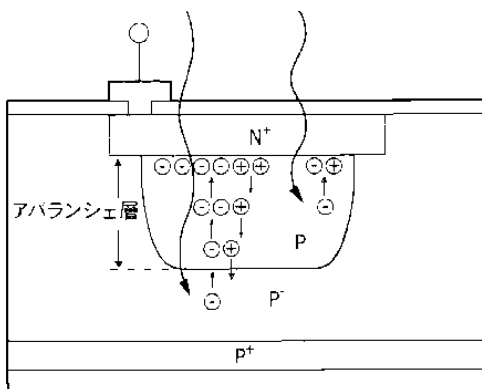


図 2.5: なだれ型光ダイオード (APD) のアバランシェ領域の模式図 [5]

2.4.3 MPPC

上記の APD をピクセル化し、各ピクセルの和を並列に読みだしたものを PPD(pixelated photon detector) と総称する。代表的な光検出器メーカーである浜松ホトニクス社からは MPPC(multi-pixel photon counter) として商品化されている。本論文では、以下 MPPC という呼称を用いる。

MPPC の基本的な構造は APD と同じで、ほぼ同じ特性を持っているが、最も異なる点は、降伏電圧を超えた電圧 (ガイガーモード) で動作させていることである。MPPC の等価回路を図 2.6 に示す。APD をガイガーモードで動作させると、雪崩増幅が起こり、このピクセルに電流が流れる。その結果、ダイオードに直列に接続されたクエンチング抵抗に電圧降下が発生し、降伏電圧以下になったときに雪崩増幅が終息する。このとき 1 ピクセルからの出力電荷 Q_{pix} は、 C_{pix} をピクセル 1 つのキャパシタンス、 V を印加電圧、 V_{bd} を降伏電圧として、

$$Q_{\text{pix}} = C_{\text{pix}}(V - V_{\text{bd}}) \quad (2.4)$$

と表される [5]。この式より、1 つのピクセルに光子が入射したときに出力される電荷は、光子数に寄らず一定であることが分かる。よって、2 つ以上の光子を 1 つのピクセルで計測することはできない。そこで、受光面を微小ピクセルに分割することで、入射してきた光子数の計測が可能となり、入射光子に対する出力の線形性が保てる。

MPPC の利点は APD のそれとほぼ同じで、60 % 以上という高い量子効率を持つこと、小型であることなどが主な特徴となる。しかし増幅率はガイガーモードで動作させているため $10^5 \sim 10^6$ と非常に高い。更に印加電圧は 80 V 未満と、PMT、APD と比較しても低く、扱いやすい光検出器である。PMT と APD の利点を兼ね合わせたような特徴を持つため、近年注目されている光検出器である。

一方 PD や APD にあった、自発的電子放出によりノイズが大きいというデメリットは存在する。また MPPC は、ピクセル間の光子の伝播 (クロストーク) を防ぐため、受光面に不感部分が存在する。このため他の検出器と違い、受光面全体で光子の検出を行うことができない。

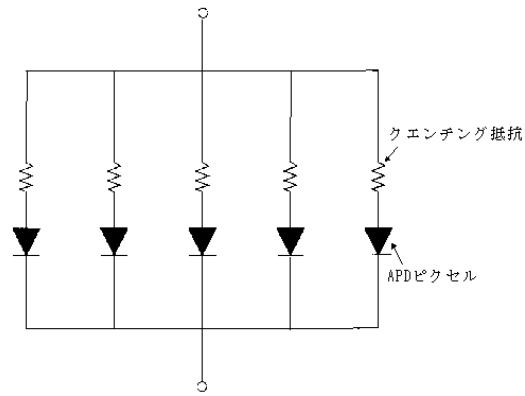


図 2.6: MPPC の等価回路 [5]

2.5 本研究の目的

本研究では、PoGOLite に挙げられるような X 線偏光検出器に広く用いられているプラスチックシンチレータ+PMT の組み合わせに対し、より性能の良い検出器、もしくは同等の性能で柔軟な設計が可能な検出器の開発を目標とし実験を行う。そこで光検出器として PMT の代わりに MPPC を用いることで、その高い量子効率を生かし、天体から多く放出される低エネルギー光子に対し PMT と同程度の感度を持ったシステムが実現可能か確認するため、性能評価を行った。

第3章 実験機器のセットアップと動作確認

本研究では、前章で述べたシンチレータと光検出器 (特にプラスチックシンチレータと MPPC) という組み合わせを用いて、実際に線源から放射線の読み出しを行う。図 3.1 は、シンチレータ+光検出器を用いてシンチレーション検出器において線源からスペクトルを得る際に用いる一般的なセットアップである。本研究でも同様のセットアップを用い、それぞれの機器について動作確認を行った。本章では、機器毎の動作原理と、実際の動作確認実験について述べる。

図 3.1: シンチレーション検出器における一般的なセッティングの概略図

3.1 パルス整形

一般に光検出器からの信号は、入射 X 線・ γ 線のエネルギーに比例した電荷パルスであり、これを電圧に変換することでエネルギーに比例した波高となる。この電荷・電圧変換を行うものが前置増幅器である。但し、前置増幅器の出力は長いテールを持つため、パイルアップが容易に起き、そのままではエネルギーの測定が難しい。そこでテールを除き (信号の整形)、また増幅をかけるものを整形増幅器と呼ぶ。その上でデジタル変換することで、計算機で処理できるようになる。本実験では、光検出器に MPPC、また比較検証用に PMT を使用する。MPPC 用には、回路の動作を理解し、パラメータを自分で変更しやすいように、同じく MPPC を用いた中川卒論 [6] を参考に自作の前置増幅器・整形増幅器作成し、PMT 用 (比較用) には、市販のものを用いた。

3.1.1 前置増幅器

前置増幅器とは、光検出器の直後につける回路で、光検出器の電荷パルスを電圧に変換する役割を持つ。従って入力電荷に比例した電圧を出力し、適当な時間内に元の電圧 (グラウンドレベル) へ戻らなければならない。増幅前のノイズの混入を可能な限り防ぐため、光検出器と前置増幅器の距離は近いことが望ましい。

MPPC 用前置増幅器

図 3.2 に、本実験で使用する MPPC の前置増幅器の回路図を示す。これは一般的な電荷有感型増幅器の回路構成であり、PMT 用の前置増幅器も基本的な構成は同じである。

この回路の出力電圧 V_{out} は、入力電荷を Q 、コンデンサ C_1 の電気容量を C_1 とおくと、

$$V_{\text{out}} = -\frac{Q}{C_1} \quad (3.1)$$

となる。また、この回路の減衰時間 τ_1 は、抵抗値 R_1 と、電気容量 C_1 の積で決まる。

$$\tau_1 = R_1 \times C_1 \quad (3.2)$$

本研究では、 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ 、 $C_1 = 1 \text{ nF}$ 、つまり $\tau_1 = 100 \text{ }\mu\text{s}$ を基本とし、また必要に応じパラメータを変えて実験を行った。尚、本研究で使用する MPPC は 4 チャンネル出力なため、それらの波高を加えるためのサムアンプを後段に接続している。

図 3.2: 本実験で MPPC の前置増幅器として用いる回路図

PMT 用前置増幅器

本実験では PMT の前置増幅器として、クリアパルス社の「5028 Fast Quad Amplifier」を使用した。これはプラスチックシンチレータを読みだすミッションである PoGOLite の開発段階で用いられた前置増幅器であり、早い応答を特徴とする。基本的な構成は MPPC に用いている自作の前置増幅器と同様であるが、後段にサムアンプではなくバッファが用いられている。このバッファにより、出力インピーダンスを低く抑え、減衰時間の変更を行っている [7]。表 3.1 に、この前置増幅器の仕様を示す。

表 3.1: CP 5028 Fast Quad Amplifier の仕様 [7]

	項目	値
増幅器	コンデンサ (図 3.2 の C1 相当)	2 pF
	抵抗 (同図の R1 相当)	1 G Ω
	減衰時間	70 μ s
バッファ	増幅率	1
	出力インピーダンス	50 Ω

3.1.2 整形増幅器

MPPC 用整形増幅器

図 3.3 に、本実験で使用した整形増幅器の回路図を示す。この回路の中には、ポールゼロキャンセルを行いながらパルスを整形する部分 (図中 S1) と、増幅を行う部分 (図中 S2) がある。ポールゼロキャンセルとは、パルスを整形した際に起こるアンダーシュート (図 3.4) をなくすことで、図 3.3 の R2 に適切な抵抗を挿入することで実現する。このポールゼロキャンセルにより、高計数率でのエネルギー分解能の劣化を抑えることができる。

このとき、C2 と R2 の値を

$$\tau_1 = C_2 \times R_2 \quad (3.3)$$

となるように調整すると、アンダーシュートがなくなる。また回路の整形時定数 τ_2 は

$$\tau_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_2 \quad (3.4)$$

となる [3]。また、後段の増幅器の増幅率 A は以下のようにになる。

$$A = 1 + \frac{R_6}{R_5} \quad (3.5)$$

本研究では、整形部分 S1 の各パラメータを、 $R_2 = 100$ k Ω 、 $C_2 = C_3 = 1$ nF、 $R_3 = R_4 = 1$ k Ω とした。また、増幅部分 S2 の各パラメータを、 $R_5 = 1$ k Ω 、 $R_6 = 3.9$ k Ω とした。このとき、 $\tau_2 = 1$ μ s、 $A = 4.9$ となる。

図 3.3: 本実験で MPPC の整形増幅器として用いる回路図

図 3.4: パルスの整形の結果生じるアンダーシュートの模式図 [3]

この MPPC で使用する自作の前置増幅器・整形増幅器の性能を調べるため、この回路にテストパルスを入力して実験を行った。図 3.5 がテストパルスを入力するための回路図である。Pulse Generator から鋭い立ち上がりの方角波を入力すると、コンデンサ C_p によって電荷パルスが生じる。このとき発生する電荷 Q_p は、テストパルスの電位を V_p 、コンデンサ C_p の電気容量を C_p とすると、以下のようになる。

$$Q_p = V_p \times C_p \quad (3.6)$$

本実験では、 $R_p = 50 \Omega$ 、 $C_p = 3300 \text{ pF}$ (PMT 用の前置増幅器、整形増幅器の場合は 50 pF) を基本とした。 $R_p = 50 \Omega$ としたのは、ケーブルのインピーダンスと整合を取り、反射を抑えるためである。このテストパルス回路で発生した電荷を、光検出器からの電荷に模して、前置増幅器・整形増幅器に入力する。

図 3.5: テストパルス挿入回路

図 3.6 のようなセットアップで、テストパルスの波高値を変化させながら整形増幅器の出力波高値をオシロスコープで測定した結果、図 3.7 のグラフを得た。テストパルス挿入回路のコンデンサと前置増幅器のコンデンサの比は 3.3:1 のため、前置増幅器の出力電圧は、テストパルスの電圧の 3.3 倍となる。整形増幅器の増幅率は 3.1.2 で述べたように 4.9 倍のため、100 mV のテストパルスの波高値では、出力は約 1600 mV となる。ところが実際の出力は約 1300 mV 程度となっている。これは前置増幅器でオペアンプのスルーレートが現れているため、整形増幅器で波高値の低下が起きていることが原因と考えられる。但しこのグラフから、この回路では出力 5000 mV 程度までは線形性が保てているため、その範囲では利用可能ということが分かる。

図 3.6: MPPC に使用する回路にテストパルスを挿入する際に用いたセットアップの概略図

図 3.7: MPPC からの読み出しに使用する自作回路にテストパルスを入れた際のパルス波高 vs 出力電位

PMT 用整形増幅器

本研究では PMT 用の整形増幅器として、クリアパルス社の「4077 Fast/Slow Amplifier」を使用する。ただし当該機器の Fast 端子のみを使用するため、同型機である「4056 Fast Amplifier」の仕様を、表 3.2 に示す。この整形増幅器には増幅率を確認する表示はないため、増幅率の確認のため、ORTEC 社の「571 Amplifier」をリファレンスとして使用した。表 3.3 に、この整形増幅器の仕様を示す。これらの整形増幅器は、自作の整形増幅器と同様に増幅器としての機能も持っている。本実験では、増幅率は 1 倍で使用した。

表 3.2: 4056 Fast Amplifier の仕様 [8]

項目	値
整形時定数	0.05 μ s
増幅率	0~28

表 3.3: ORTEC 572A(571 の後継機) Amplifier の仕様 [9]

項目	値
整形時定数	0.5, 1, 2, 3, 6, 10 μ s
増幅率	1~1500

PMT で使用する前置増幅器・整形増幅器の性能を調べるため、図 3.8 のようなセットアップで実験を行う。MPPC のときと同様にテストパルスの波高値を変化させながら整形増幅器の出力波高値をオシロスコープで測定した結果、図 3.9 のグラフを得た。テストパルス挿入回路のコンデンサは 50 pF のため、前置増幅器での増幅率は 25 倍である。整形増幅器の増幅率は 1 倍のため、グラフから適切に増幅できていることが分かる。またグラフの直線性より、PMT で用いたセットアップでは、出力 10 V 程度までは利用可能ということが分かる。

図 3.8: PMT に使用する回路にテストパルスを挿入する際に用いたセットアップの概略図

図 3.9: PMT からの読み出しに使用する回路 (「CP 5028 Fast Quad Amplifier」および「CP 4056 Fast Amplifier」) にテストパルスを挿入した際のパルス波高 vs 出力電位

3.2 Bias 電源

Bias 電源とは、「2.4 光検出器」の項で述べた、光検出器を動作させるための電源である。本研究で用いるため、何種類かの電源を比較・評価した。その結果について、以下に述べる。

3.2.1 要求性能

MPPC を動作させる電源に必要な性能として、次の条件を満たす必要がある。まず、使用する MPPC を動作させるのに必要な 70~80V の電圧を出力し、更に MPPC の敏感な印加電圧依存性を無視できる程度の刻み幅で電圧をコントロールできる必要がある。また、測定時間中に電圧変化が起こるとエネルギー分解能の低下につながるため、安定した出力ができ、ノイズが小さいものが要求される。更に、電源の出力インピーダンスが大きいと MPPC に実際に印加されている電圧が分かりづらくなるため、精度の低下の原因となる。よって、出力インピーダンスが小さいものが望ましい。これらの要求を満たす物として、当研究室では KEITYLEY 社のソースメーター 617、及び 2400 を保有しているが、他の実験との兼ね合いで当初から専有はできなかった。そこで次善作として、クリアパルス社の Bias 電源「E6625」、及び自作の Bias

電源を用い、KEITHLEY 617 を参照に性能評価を行った上で実験に使用することにした。表 3.4 は、今回用いた電源の基本的なスペックである。

表 3.4: 各電源の比較 [10] [11]

Bias 電源	KEITHLEY 617	KEITHLEY 2400	CP E6625	自作電源
出力電圧	0~200 V	0~200 V	0~200 V	55~125 V
最小電圧刻み幅	0.05 V	0.005 V	アナログ入力	0.08 V
出力インピーダンス	数 k Ω	0 ¹	10 M Ω	50 M Ω
出力の積分回路	無	無	有	有
出力電圧フィードバック	無	有	無	無

¹ 出力電圧のフィードバックがあるため、見た目のインピーダンスは 0 となる

3.2.2 自作電源の構成

3.2.1 の要求性能を満たす電源として、回路を設計し製作を行った。図 3.10 と図 3.11 が、設計した回路と製作した電源である。次項で、各部の役割と動作を記述する。

図 3.10: 製作した Bias 電源の回路図

図 3.11: 製作した Bias 電源

DAC(Digital Analog Converter)

DAC とは、複数の入力端子の電圧の有無により、出力電圧をコントロールできる素子である。図 3.12 に、今回使用した DAC である ANALOG DEVICES 社の「AD7533」の各端子の名称を示す。

この素子は図 3.12 の入力端子 BIT1~BIT10 の電圧の有無を 10bit の信号と認識する。この 10bit 信号を 10 進法に変換した値を B とおくと、出力電圧 V_{DAC} は、端子 V_{ref} に印加された電圧 V_{ref} を用いて以下のように表される。

$$V_{DAC} = -V_{ref} \left(\frac{B}{1024} \right) \quad (3.7)$$

図 3.13 は、 $V_{ref} = 4[V]$ の際の B の値と出力電圧 V_{DAC} のグラフである。このグラフから、製作回路は全範囲で正しく動作していることが確認できる。

BIT1~BIT10 の端子への電圧の有無をスイッチにより制御することで、精度よくコントロールされた出力電圧を得ることができる。この電圧を後段の回路のリファレンス電圧とする。

図 3.12: 使用した DAC(AD7533) の端子名 [12]

図 3.13: DAC の入力信号の値 B と出力電圧の関係。 $V_{ref} = 4[V]$ である。

DDC(DC/DC Converter)

DDC とは、入力された電圧を別の電圧に変換する素子である。図 3.14 に、今回使用した DDC である RECOM 社の「R12-100B」の各端子の名称を示す。

この素子は V_{adj} 端子に印加した電圧 V_{adj} によって、出力電圧 V_{ddc} を 55 V～135 V までコントロールすることができる。 V_{ddc} と V_{adj} の関係は図 3.15 のようになり、式で表すと、

$$V_{ddc} = 20V_{adj} + 55 \quad (3.8)$$

となる。

本回路では V_{adj} 端子に DAC の出力電圧を印加することによって、出力範囲内の電圧をコントロールしている。出力電圧は V_{adj} の 20 倍のため、DDC 出力の最小の刻み幅は約 80 mV となる。また、MPPC に印加する電圧である 65～75 V の範囲の電圧を出力することができるため、動作に必要な条件を満たしていることが分かる。

図 3.14: 使用した DDC(R12-100B) の端子名 [13]

図 3.15: DDC 「R12-100B」 の V_{adj} と V_{ddc} の関係 [13]

3.2.3 出力インピーダンス

回路や機器には、出力する際にある値の抵抗を持つ。これを出力インピーダンスと呼ぶ。電源の場合、電圧を発生させる回路と、出力端子の間にある抵抗値を指す。図 3.16 に、その概念図を示す。

「3.2.1 要求性能」にあるように、電源の出力インピーダンスは基本的に小さいことが望ましい。これは、出力電圧 (V_{source}) と、実際に印加する機材、本研究では光検出器に印加される電圧 (V_{input}) の間に差が生じてしまうためである。

しかし、本実験で用いている MPPC は急激な電圧変化に弱く、連続的な電圧変化を行うことが望ましい。よって時定数の長い積分回路を出力に設けることで、MPPC にかかる付加を軽減することができる。この際は、ある程度の出力インピーダンスが発生する。

また、出力端子に印加されている電圧を測定し、出力電圧にフィードバックを行っている電圧源も存在する。出力インピーダンスの影響を無視できるため、見かけ上の出力インピーダンスの値を 0Ω にすることが可能である。本研究で用いた電源では、KEITHLEY 2400 が該当する。

図 3.16: 出力インピーダンスの概念図。図の R_m に当たるものが出力インピーダンス

実際に MPPC に電圧を印加し、出力インピーダンスの確認を行った。図 3.17 は、それぞれの電源の出力電圧 (V_{source}) と、 ^{137}Cs の 662 keV の γ 線を、CsI シンチレータと MPPC(S10985-50C) を用いて電荷に変換し、前述の自作前置増幅器・整形増幅器を用いて増幅・整形を行った際の出力波高値の関係である。MPPC の増幅率は、MPPC に実際に印加されている電圧 (V_{input}) に依存するため、同じ出力波高値のときは同じ電圧が印加されていると考えることができる。また、KEITHLEY 617 は出力インピーダンスが低く、ほぼ無視できると思ってよい。図 3.17 において自作電源は、CP E6625 と比べて出力インピーダンスにより 5 倍程度の電圧降下が発生している。自作電源は 50 M Ω の出力インピーダンスのため、CP E6625 の出力インピーダンスは 10 M Ω 程度と計算され、これはバッファ部の出力インピーダンスの値 (クリアパルス社よりの情報) と一致している。

図 3.17: CsI+MPPC の出力を読み出した際の、 V_{source} と整形増幅器の出力の関係。前置増幅器と整形増幅器は自作のものを用い、 ^{137}Cs を照射した。黒が KEITHLEY 617、赤が CP E6625、緑が自作電源を Bias 電源に用いた結果。

3.2.4 電源安定性

前項で記述した各電源に対して、電源の安定性を比較するため、実際に MPPC(S10985-50C) に電圧を印加して、 $^{137}\text{Cs}+\text{CsI}$ のスペクトルを取得した。前置増幅器・整形増幅器は 3.1 で述べた自作のものを共通に使用し、電源の安定性の評価にはエネルギー分解能の値を用いた。この際、Bias 電源毎に出力インピーダンスが異なり、実際に MPPC にかかる電圧に差が出るため、電圧を調節して同じ ADC 値に ^{137}Cs の 662 keV のピークがくるようにした。電源毎に印加した電圧とエネルギー分解能を、表 3.5 にまとめる。

この表から、参照元の KEITHLEY 617 と CP E6625, 自作電源を比較した場合、エネルギー分解能、つまりノイズの観点からはどの電源も性能に有意な差はないことが確認できた。そこで占有でき、且つ出力インピーダンスの低い CP E6625 を当面の間使用し、自作電源は予備電源として保持することにした。

表 3.5: 電源安定性の評価

電源	KEITHLEY 617	CP E6625	自作電源
印加電圧 [V]	71.3	84.6	113.5
ピークチャンネル [ch]	1051	1060	1051
エネルギー分解能 [%]	9.0±0.2	9.1±0.2	9.4±0.2

3.3 アナログ-デジタル変換機 (PocketMCA)

アナログ情報を PC で扱いやすいデジタル情報に変換するものをアナログ-デジタル変換器 (ADC:analog to digital converter) と呼ぶ。本実験のように、電圧値などのアナログ情報をデジタル情報に変換するものを特に SCA(single channel analyzer; 図 3.18 参照) と呼ぶ。この SCA を並列に複数並べたものを MCA(multi channel analyzer; 図 3.19 参照) と呼び、本実験で使用する PocketMCA は、この MCA の AMPTEK 社の商品名である。MCA に求められる基本的な性能は、入力電圧に対し範囲で線形な出力を行う点である。変換の精度が悪いと非線形な出力となり、使用する際に不便である。次に変換の分解能である。入力電圧と出力は、図 3.18 のようなガウス関数となるが、このステップ幅が小さいと、より微細な信号の差を測ることができ、性能の良い MCA となる。最後に変換にかかる時間である。デジタル信号に変換する時間が長いと、次の信号を受け入れるまでに長い時間がかかるようになり、多くの時イベントをロスしてしまう。これを dead time と呼び、dead time が短いほど、効率良くイベントを取得できる。

本実験では、4.3.2 (サイズの異なる MPPC の比較) までは MCA 8000A、その後 (温度依存性以降) は dead time が少なく扱いやすい MCA 8000D の 2 つの MCA を用いた。表 3.6 は、2 つの MCA の主な仕様である。

図 3.18: SCA における入力電圧と出力 channel の関係 [3]

図 3.19: MCA の概念図 [3]

表 3.6: MCA 8000A と MCA 8000D の主な仕様 [14][15]

機器	MCA 8000A	MCA 8000D
電源供給方式	AC アダプタ	AC アダプタ/USB
入力電圧最大値	5 V/10 V	1 V/10 V
ADCch 最大値	8192 ch	8192 ch
信号変換時間	$< 5 \mu\text{s}$	10 ns
PC 接続方式	D-sub 9pin	USB

3.3.1 threshold

前項の AD 変換時の dead time を少なくする方法として、不必要な信号の変換を行わないことが挙げられる。変換を行う信号と行わない信号の区切りのことをスレシヨルド (threshold) と呼ぶ。

本研究で用いている PokcetMCA には、2つの threshold がある。1つは LLD(low level discriminator) と呼ばれるもので、低 channel の信号を除去する目的で用いられる。検出器からの信号には、増幅された

ノイズが含まれるが、これらのノイズ全てに対し AD 変換を行うと、大きな dead time を生む要因となる。よって、あらかじめ決められた波高値以下のものをノイズとみなし AD 変換を行わないことで、dead time を短くすることができる。LLD の機能は MCA 8000A と MCA 8000D のどちらでも使用できる。

もう 1 つは slow threshold である。PocketMCA は図 3.20 の波形において、 V_1 と V_2 を信号とみなし、AD 変換を行う。しかし slow threshold を設定すると、最大波高値のピークホールドを行い、そこからある決められた値だけ下がった信号のみ AD 変換を行う。これは、1 つの信号がノイズ等の影響によりパイルアップされ 2 つに見えていると考えることができるためである。そのため、図 3.20 において slow threshold よりも波高値の下がらない V_1 については AD 変換を行わない。こちらも LLD と同様に dead time を短くすることができる。ノイズも slow threshold で決められた値だけ下がることができなければ AD 変換されないため、LLD の役割も持つことができる。slow threshold の機能は、MCA 8000D のみ使用できる。

図 3.20: PocketMCA のピークの検出と threshold の関係 [15]

3.3.2 AD 変換の線形性の確認

AD 変換の線形性を確認するため、「4.4.1 整形増幅器」の図 3.6 で示したセットアップの出力を、オシロスコープの代わりに PocketMCA に接続してデータを取得した。図 3.21 は、横軸が整形増幅器の出力電位で、縦軸が PocketMCA の ACD チャンネルである。この図から、どちらの MCA を用いても約 4000ch (入力電圧で 5 V) までは線形性があり、その範囲で使用できることが分かる。この範囲は、「4.4.1 整形増幅器」で用いた回路 (自作の前置増幅器、整形増幅器とテストパルス挿入回路) でサチュレーションが起きない領域に対応している。

図 3.21: 整形増幅器の出力電圧と ADC チャンネルの関係。黒が MCA 8000A、赤が MCA 8000D のデータ。

第4章 プラスチックシンチレータ+MPPCシステムの性能評価

本章では、実際にプラスチックシンチレータとMPPCを組み合わせて、放射線源からの信号を読み出し、各部のパラメータを変更することで、低エネルギーのX線を読み出すのに適切なコンフィグレーションを探り、また性能評価を行った。

今回使用した放射線源とそれらの諸元を、表4.1に示す。

表 4.1: 使用した線源 [16]

線源	^{137}Cs	^{241}Am	^{152}Eu
半減期	30.07 年	432.2 年	13.54 年
放射線 (X 線)(keV) / 割合 (%)	31.8 / 2.04	14.0 / 9.6	39.5 / 21.1
	32.2 / 3.76	17.8 / 5.7	40.1 / 38.3
放射線 (γ 線)(keV) / 割合 (%)	661.7 / 85.1	59.5 / 35.9	121.8 / 28.6
		26.3 / 2.4	778.9 / 12.9
線源	^{109}Cd	^{57}Co	^{55}Fe
半減期	462.6 日	271.8 日	2.73 年
放射線 (X 線)(keV) / 割合 (%)	22.0 / 29.5	6.4 / 32.6	5.89 / 8.5
	22.2 / 55.7		5.90 / 16.9
放射線 (γ 線)(keV) / 割合 (%)	88.0 / 3.6	14.4 / 9.2	
		122.1 / 85.6	

実験セットアップ

図4.1に、本実験で用いた線源から信号を読みだした際のセットアップの概略図を示す。

シンチレータが発した光をできるだけ多く光検出器に導く必要があるため、光検出器と接触しない面には反射材を巻く。図4.2のように、内側にゴアテックス、外側にバルカテープを巻く。バルカテープは、シンチレータと光検出器の固定目的にも使用している。また、シンチレータと光検出器の受光面で光が反射しないよう、MOMENTIVE社の光学グリース「TSK5353」を使用している。

測定には恒温槽を用い、シンチレータ、光検出器、また必要に応じて前置増幅器、整形増幅器を恒温槽内部に入れてスペクトルを取得した。また、出力波高値を確認する際には、各出力にオシロスコープを適時接続して行った。

図 4.1: 本実験で用いたセットアップの概略図

図 4.2: シンチレータ周りのセットアップの概略図

4.1 性能評価の判断基準

各部の性能比較・評価のため、以下の物理量を判断基準とした。

ノイズ ノイズの起源は様々であるが、本研究で支配的なノイズは光検出器自身、つまり MPPC から発生する。このノイズの量は印加電圧に依存する。図 4.3 は、MPPC のノイズの典型的な印加電圧依存性を示している。この増加は、2.4.2 に記述した自発的電子放出によるもので、印加電圧を高くすると、バンドギャップを超える電子が多くなるためである (以降、ダークカレントと呼称する)。ダークカレントは図 4.4 のように低エネルギー側に広く分布する形となり、印加電圧を高くするとそのカウント数も大きく増加する。従って同じ増幅率でもダークカレントを減らすことができれば、低エネルギーまでピークがノイズに埋もれなくなり、性能が高いということになる。また一般に、低温にするとダークカレントが低くなる。

ピークチャンネル (peak channel) ピークチャンネルとは、MCA を用いてスペクトルを取得した際の、光電吸収イベントの ADC 値の平均のことである (図 4.4 の H_0)。ピークチャンネルの変化は、シンチレータと光検出器 (MPPC) の双方が原因となる。シンチレータの場合は、シンチレータ自身の発光量、または光が検出器に入射する割合 (集光率) が大きいほどピークチャンネルが大きくなり、ダークカレントと信号をより良く分離することができる。光検出器の場合は、増幅率が高くなる、またはシンチレーション光を電子に変換する割合 (量子効率) が高くなる程ピークチャンネルが大きくなる。前者は一般にダークカレントも同様に増幅するため、性能の向上はあまり期待できない。ただし外来のノイズに対しては分離力が大きくなる。後者は純粋な信号の増加に繋がり、一般に性能が向上する。

エネルギー分解能 線源からの放射線は同一のエネルギーを持っているが、様々な原因でイベント毎に信号の大きさが異なり、最終的に PocketMCA のチャンネルの違いとして現れる。図 4.5 に示すように、ピークチャンネル H_0 を中心に分布の差が小さいほど分解能は良くなり、接近した 2 つのエネルギーの放射線を区別することが可能となる。エネルギー分解能は、次式で求めることができる。

$$\text{分解能 } R = \frac{\text{FWHM}}{H_0} \quad (4.1)$$

ここで、FWHM は半値全幅 (full width at half maximum) と呼ばれるもので、図 4.6 に示す。線源からの信号をガウス関数でフィッティングを行ったときのピークチャンネルでのカウント数を Y とおくと、その半分 $Y/2$ のカウント数の部分には有限の幅がある。FWHM とはこの幅のことであり、本研究ではチャンネル数で表される。分解能 R の値が小さい程良いセットアップであり、良い検出器と言える。

図 4.3: 典型的な MPPC のダークカウントの印加電圧依存性のグラフ [5]

図 4.4: 線源から取得したスペクトルの模式図 [3]

図 4.5: 分解能の違いによるスペクトル変化 [3]

図 4.6: ピークチャンネルと半値全幅 [3]

4.2 シンチレータ部の特性

本実験では、一般的なプラスチックシンチレータとして、Eljen 社の EJ-204 を用いた。まず大きな問題なく読み出せている確認を行うため、MPPC で読みだした実績のある CsI(Tl) を読みだして比較し、次いでプラスチックシンチレータのサイズを変えて影響を見た。

4.2.1 CsI とプラスチックシンチレータの比較

図 4.7 は、CsI とプラスチックシンチレータで ^{241}Am のスペクトルを取得したものである。プラスチックシンチレータを用いたシステムは、反応確率の観点から数 10 keV が上限のエネルギーであることから、この線源を用いた。電源には CP E6625 を使用し、印加電圧は 84.6 V (MPPC には 71.3 V 印加されていることに相当) に設定した。信号の読み出しに使用した機器を表 4.2 にまとめる。それぞれのスペクトルの 59.5 keV の γ 線のピークチャンネルの値とシンチレータのサイズを表 4.3 にまとめる。この表から、プラスチックシンチレータは CsI に比べてピークチャンネルが 40 %程になることが分かる。一方文献 [3] によると、光量の比は 20 %である。両者の違いは、プラスチックシンチレータの発光波長 (最大放出波長=408 nm[17]) の方が CsI の発光波長 (最大放出波長=540 nm[3]) よりも MPPC とのマッチングが良いこと (図 4.8 参照) と、プラスチックシンチレータの方がサイズが小さく集光率が高いためと理解できる。いずれにせよ、プラスチックシンチレータを MPPC で大きな問題なく読み出せていると判断できる。

表 4.2: シンチレータの種類を変更した際に使用した読み出し機器

項目	使用機器
電源	CP E6625
MPPC	S10985-50C
印加電圧	84.6 V (MPPC には 71.3 V)
前置増幅器	自作
整形増幅器	自作
PocketMCA	MCA8000A

図 4.7: シンチレータの種類を変更した際のスペクトルの比較。黒が CsI で、赤がプラスチックシンチレータ。CsI で低エネルギー側にあるものは 14.0 keV と 17.8 keV のピークが見えている。プラスチックシンチレータは低エネルギーの X 線、及び γ 線によるイベントが見えている。

表 4.3: シンチレータの種類を変更した際の比較

シンチレータの種類	CsI	プラスチックシンチレータ
ピークチャンネル [ch]	117.8	46.84
サイズ [mm]	10 × 10 × 30	5 × 10 × 15

図 4.8: 典型的な MPPC の、波長と検出効率の関係 [5]

4.2.2 プラスチックシンチレータのサイズの影響

次にプラスチックシンチレータの集光率を上げるため、受光面とのマッチングの良いサイズに変更して比較を行った。使用したプラスチックシンチレータは、 $5 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$ と、 $4 \times 4 \times 15 \text{ mm}^3$ である。

本研究に用いている光検出器である MPPC の受光面は $6 \times 6 \text{ mm}$ のため、この受光面より大きいものと、収まるもので比較を行っている。図 4.9 は、異なるプラスチックシンチレータのサイズで ^{241}Am のスペクトルを取得したものである。信号の読み出しに使用した機器を表 4.4 にまとめる。それぞれのスペクトルの 59.5 keV の γ 線のピークチャンネルの値等を表 4.5 にまとめる。この表から、MPPC の受光面に収まるサイズのものがピークチャンネルが約 20 % 高く、より良く集光できていることが分かる。また、エネルギー分解能も 4 % 改善されており、集光率の増加により統計揺らぎが小さくなったと考えられる。一方、MPPC に接するシンチレータの面積を 3 倍変化させても光量の増加は 20 % となっており、マッチングの向上による光量の増加はある種のサチュレーションが生じていることも分かる。よって以下の実験では、 $4 \times 4 \times 15 \text{ mm}^3$ の物を使用することとした。

表 4.4: プラスチックシンチレータのサイズを変更した際に使用した読み出し機器

項目	使用機器
電源	CP E6625
MPPC	S10985-100C
印加電圧	84.6 V (MPPC には 71.3 V)
前置増幅器	自作
整形増幅器	自作
PocketMCA	MCA8000A

図 4.9: サイズの異なるプラスチックシンチレータのスペクトルの比較。線源は ^{241}Am を用いた。黒が $5 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$ のもので、 $4 \times 4 \times 15 \text{ mm}^3$ である。

表 4.5: サイズの異なるプラスチックシンチレータの比較

シンチレータのサイズ	$5 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$	$4 \times 4 \times 15 \text{ mm}^3$
ピークチャンネル [ch]	43.7	52.8
エネルギー分解能 [%]	50.2 ± 1.4	46.3 ± 1.6

4.3 MPPC 部の特性

本節では、「S10985-50C」と「S10985-100C」の2種類のMPPCを用いる。表4.6に、両者の基本的な性質を示す。受光面の大きさや信号の読み出し方は同じだが、ピクセルサイズの違いと、それに付随するピクセル数や開口率³に違いがある。ここでは、同じシリーズのMPPCでピクセルサイズを変更して性能に変化が現れるかを調べ、併せて印加電圧依存性や温度特性の確認を行い、適切な設定を検討した。

表 4.6: 比較する 2 種類の MPPC の仕様 [18]

型番	S10985-50C	S10985-100C
ピクセルサイズ [μm]	50 × 50	100 × 100
ピクセル数	3600 × 4	900 × 4
開口率 [%]	61.5	78.5

4.3.1 MPPC の高圧依存性

まず、MPPC に印加する適切な電圧を設定するため、「S10985-50C」を用いて実験を行った。式 2.4 より、本実験で使用する光検出器 MPPC の増幅率は印加電圧に依存して増加する。その依存性を調べたものが、図 4.10 である。この図は、横軸が印加電圧、縦軸が¹³⁷Cs のスペクトルを取得した際の、662 keV の γ 線のピークチャンネルの値である。信号の読み出しに使用した機器を表 4.7 にまとめる。また使用した Bias 電源は KEITHLEY 617 である。

同じデータで縦軸をエネルギー分解能にしたものが図 4.11 である。この図から、降伏電圧ぎりぎりの極端に低電圧な状態では分解能が悪くなるのが分かる。また、一般にダークカウントは高電圧になるほど増加するため(図 4.3)、光量の低いプラスチックシンチレータでは印加電圧を高くしすぎるのも妥当ではない。従って 70 V 程度が適切であると考えられる。この MPPC の降伏電圧をオシロスコープで確認したところ 68.8 V であったため、20 °C では降伏電圧から +1.2 V 程度が適切と考えられる。

表 4.7: MPPC の印加電圧を変化させた際に使用した読み出し機器

項目	使用機器
電源	KEITHLEY 617
MPPC	S10985-50C
印加電圧	69.0~72.0 V
シンチレータ	CsI
前置増幅器	自作
整形増幅器	自作
PocketMCA	MCA8000A

³受光面のうち、入射光に対する応答がある面積の割合。MPPC はピクセル間のクロストーク (増幅された電子・正孔が別のピクセルに移動し、増幅されること) を低減するため、ピクセル間に障壁を設けており、開口率が 100 % とはならない。

図 4.10: 印加電圧と ADC ピークチャンネルの関係

図 4.11: 印加電圧とエネルギー分解能の関係

4.3.2 MPPC のピクセルサイズの影響

次に、シンチレータが発した光の集光率が MPPC のピクセルサイズにどう影響するかを検証した。図 4.12 は、MPPC のピクセルサイズを変更して、 ^{241}Am のスペクトルを取得したものである。MPPC はピクセルサイズによりインピーダンスに違いがあり、また降伏電圧、増幅率等の個体差も存在する。そのため、出力波形をオシロスコープで確認し、59.5 keV の γ 線からの信号が、おおむね同じ波高値、つまり同じ ADC 値になるように調整した。MPPC のピクセルサイズは、測定の際のダイナミックレンジに影響するが、どちらの MPPC も 59.5 keV の γ 線を測定する際の線形性に影響はないことを確認した。測定条件 Bias 電源に CP E6625、シンチレータはプラスチックシンチレータを使用している。信号の読み出しに使用した機器を表 4.8 にまとめる。また ^{241}Am には 26.3 keV の γ 線、17.8 keV の X 線が存在し、スペクトルのピークとダークカレントの谷間に現れるため、分解能を求める際に誤差の原因となる。そこで、線源とシンチレータの間に厚さ 200 μm の銅を置き、低エネルギー側の遮蔽を行った。物質によって遮蔽される電磁波の割合は $\exp(-\rho\sigma x)$ によって表される。ここで ρ は遮蔽物の質量密度、 σ は遮蔽物に対する電磁波の反応断面積、 x は遮蔽物の厚さである。銅の場合、 $\rho = 8.96 [\text{g}/\text{cm}^3]$ となる。 ^{241}Am の代表的な γ 線、X 線に対する銅の反応断面積を表 4.9、銅によって遮蔽される ^{241}Am の γ 線、X 線の割合を、ピーク毎に表 4.10 に示す。また、印加した電圧値と得られたピークチャンネル、及びエネルギー分解能を表 4.11 にまとめる。

図 4.12 と表 4.11 から、ピクセルサイズ 100 μm のほうが低エネルギー側のイベント数 (60 keV に対するコンプトン散乱及び 20 keV 前後の低エネルギーイベントが、ダークカレントの影響で広がったもの) が低く、また分解能が向上していることが分かる。これは、集光率の向上により実効的に光量が増加した結果により低い増幅率で動作できるようになり、ダークカレントが減ったことが原因と考えられる。そこで以下の実験には MPPC のピクセルサイズが 100 μm のものを使用する。

表 4.8: MPPC のピクセルサイズを変更させた際に使用した読み出し機器

項目	使用機器
電源	CP E6605
シンチレータ	plastic(small)
印加電圧	84.6 V (MPPC には 71.3 V)
前置増幅器	自作
整形増幅器	自作
PocketMCA	MCA8000A

図 4.12: MPPC のピクセルサイズを変更した際のスペクトル比較。赤がピクセルサイズ 50 μm で、黒が 100 μm 。

表 4.9: ^{241}Am の各ピークに対する銅の反応断面積 [cm^2/g][19]

エネルギー	14.0 keV	17.8 keV	26.3 keV	59.5 keV
反応断面積	8.91	4.58	1.54	0.16

表 4.10: 銅の厚さを変更した際における ^{241}Am の各ピークの減少率 [%]

銅の厚さ	14.0 keV	17.8 keV	26.3 keV	59.5 keV
100 μm	99.97	98.35	74.95	13.62
200 μm	100	99.97	93.72	25.38
400 μm	100	100	99.61	44.32

表 4.11: ピクセルサイズを変更した際の比較

型番	S10985-50C	S10985-100C
印加電圧 [V]	84.60	90.50
ピークチャンネル [ch]	44.65	42.67
エネルギー分解能 [%]	54.8±1.0	51.2±1.1

4.3.3 MPPC の温度特性

MPPC のアバランシェ領域における増幅率は、素子の温度に大きく依存する。これは、素子の温度が高いほど原子内の格子振動が大きくなり、電子（正孔）が十分に加速できないためである [5]。また、素子の温度の上昇はノイズ量の上昇も招く。図 4.13 は、左が典型的な MPPC の素子温度と、増幅率の関係である。また右側は、典型的な MPPC の素子温度とダークカウントの関係である。これらの図から、MPPC は低温にするほど増幅率は高く、ダークカレントは少なくなることが分かる。ただし、低温にすると降伏電圧も変化することに注意が必要である。

図 4.13: (左)MPPC の増幅率の典型的な温度依存性 [5]。ピクセルサイズは 100 μm のものを使用している。(右)MPPC のダークカウントの典型的な温度依存性 [5]。ピクセルサイズは 100 μm のもので、周囲温度は 25 $^{\circ}\text{C}$ で固定している。

降伏電圧の温度依存性

MPPC 自身からのノイズは 2.4.2 で述べたように熱励起された電子によるダークカレントであり、低温にする程低減される。但し降伏電圧も温度に依存するため、準備として様々な温度で降伏電圧をオシロスコープを用いて確認した。降伏電圧は、MPPC から出力され増幅された信号が電氣的ノイズに埋もれて見えなくなる電圧とした。MPPC は S10985-100C を、Bias 電源は KEITHLEY 2400 を用いた。結果を図 4.14 にまとめる。この図から温度を 10 $^{\circ}\text{C}$ 下げると、降伏電圧も 0.6 V 程度下がることが分かる。これは、MPPC の典型的な値である 0.57 V/10 $^{\circ}\text{C}$ [5] に概ね一致している。

図 4.14: MPPC の温度を変化させた際の降伏電圧の変化

温度変化によるノイズ特性

次に MPPC の増幅率の影響をなくすため、各線源からの信号が同じ波高値、つまり同じピークチャンネルになるようにオシロスコープで出力波形を確認しながら電圧を調整し、スペクトルを取得した。温度変化に対するスペクトルの変化を細かく確認するため、前置増幅器のコンデンサ C_1 、抵抗 R_1 の値を変更し、 $C_1 = 10 \text{ pF}$, $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ とした。これにより、電荷-電圧の変換計数が 100 倍となる。前置増幅器の減衰定数は変わらないため、整形増幅器の変更点はない。

20 °C で印加電圧を降伏電圧 +1 V (これをオーバー電圧: $V_{ov} = 1 \text{ V}$ とする) にし、他の温度では増幅率が同じになるように V_{ov} を調整して ^{241}Am のスペクトルを取得したものが図 4.15 である。信号の読み出しに使用した機器を表 4.12 にまとめる。また、59.5 keV の γ 線の各温度でのピークチャンネル、エネルギー分解能、印加電圧と V_{ov} を、表 4.13 にまとめる。図 4.15 では、10 °C ないしはそれ以下の温度で ^{241}Am のスペクトルに大きな変化は見られず、同様に表 4.13 においてもエネルギー分解能に大きな差はない。よって、図 4.15 のピークの左側のイベント群は銅によって遮蔽しきれない X 線が主たるイベントであり、ダークカレントの影響は小さいと考えられる。そこで、各温度で線源のないダークカレントのみのスペクトルを取得した。結果を図 4.16 にまとめる。この図を見ると、同じ増幅率では低温ほど明らかにダークカレントが低下することが確認できた。

表 4.12: MPPC を動作させる温度を変更させた際に使用した読み出し機器

項目	使用機器
電源	KEITHLEY 2400
MPPC	S10985-100C
シンチレータ	plastic(small)
前置増幅器	自作
整形増幅器	自作
PocketMCA	MCA8000D

図 4.15: 同増幅率下において温度を変化させた際の ^{241}Am のスペクトルの比較。

表 4.13: 同増幅率下において温度を変化させた際の ^{241}Am からの 59.5 keV の γ 線の比較

温度	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C
ピークチャンネル [ch]	1054	1008	1009	1016
エネルギー分解能 [%]	39.1±0.6	40.1±0.7	39.2±0.7	40.7±0.7
印加電圧 [V]	69.42	70.04	70.64	71.24
V_{ov} [V]	0.86	0.89	0.90	1.00

図 4.16: 同増幅率下において温度を変化させた際のバックグラウンドのスペクトルの比較

更に、より低いエネルギーの信号とダークカレントを比較するため、 ^{152}Eu , ^{109}Cd で 20 °C と -10 °C において同じ印加電圧でスペクトルを取得した結果を図 4.17 にまとめる。-10 °C に冷却することで、線源からの信号とダークカレントがより良く分離できていることが分かる。特に ^{109}Cd は 20 °C では 22 keV のピークは全く見えなかったのが、-10 °C にすることで大きく改善していることが分かる。

^{152}Eu の 39.5 keV, 40.1 keV の X 線、 ^{109}Cd の 22.0 keV, 22.2 keV の X 線に対応するイベントのピークチャンネル、エネルギー分解能を表 4.14 にまとめる。ただし、光電ピークのすそとダークカレントが重なっているため、分解能の値は参考程度のものである。

以上から、低エネルギーの X 線に対しては MPPC はより低温で測定を行うことが望ましく、またその際は、降伏電圧が温度によって変わるのに合わせて印加電圧も調整する必要があることが分かった。また、 $-10\text{ }^\circ\text{C}$, $1\text{ }\mu\text{s}$ で整形というコンフィグレーションで、ノイズと線源からの信号の境界 (図 4.17(右) の谷の部分) はおよそ 15 keV であり、これがしきい値に対応する。

図 4.17: (左) 同増幅率下において温度を変化させた際の ^{152}Eu のスペクトルの比較。 $V_{\text{ov}} = 1\text{ [V]}$ としている。(右) 同増幅率下において温度を変化させた際の ^{109}Cd のスペクトルの比較。 $V_{\text{ov}} = 1\text{ [V]}$ としている。

表 4.14: 同増幅率下において ^{152}Eu と、 ^{109}Cd からの X 線の $-10\text{ }^\circ\text{C}$ での測定データ

線源	^{152}Eu	^{109}Cd
X 線のエネルギー [keV]	40.1 keV, 39.5 keV	22.0 keV, 22.2 keV
ピークチャンネル [ch]	526.1	357.7
エネルギー分解能 [%]	53.1 ± 2.1	49.8 ± 1.7

4.4 読み出し回路の特性

これまでの実験では、MPPC の動作温度を変化させることにより、MPPC から発生するノイズ (ダークカレント) の減少を行った。よりダークカレントの影響を減らすためには、パルスを整形する段階でもダークカレントを落とすことが望ましい。パルス整形時に積分されるダークカレントは読み出す速度に依存し、より速く最大波高値に到達する前置増幅器と整形時定数の短い整形増幅器を使用することで、積分されるダークカレントの量を最小限に留めることが可能となる。プラスチックシンチレータは CsI と比較して減衰時間が短いため、整形時定数を短くすることによる信号のロスが少なく、ダークカレントのみを低減できると期待できる。

本実験では PoGOLite の開発段階で用いられた前置増幅器である「5028 Fast Quad Amplifier」を使用し、MPPC からの読み出しを行った。また整形増幅器には、同じく PoGOLite の開発段階で用いられた整形増幅器である Clear Pulse 社の「4077 Fast/Slow Amplifier」を使用する。

この回路にはサムアンプが組み込まれていないため、予め MPPC の読み出し端子を全て結合し、前置増幅器に入力を行った。

本節において信号の読み出しに使用した機器を表 4.15 にまとめる。

表 4.15: 読み出し回路を変更した際に使用した読み出し機器

項目	使用機器
電源	KEITHLEY 2400
MPPC	S10985-100C
シンチレータ	plastic (small)
前置増幅器	5028 Fast Quad Amplifier
整形増幅器	4077 Fast / Slow Amplifier
PocketMCA	MCA8000D

4.4.1 整形時定数の影響

整形時定数を短くした際のダークカレント、信号の変化を見るため、整形増幅器を自作のもの ($1 \mu\text{s}$) と「4077 Fast/Slow Amplifier」 (50 ns) でそれぞれ読み出した際のスペクトルの比較を行った。。「5028 Fast Quad Amplifier」のフィードバックコンデンサの値は 2 pF であるが、この設定では MPPC の信号を適切に読み出すことができないことが分かった (付録 A 参照)。そのため、 10 pF のコンデンサを並列に接続し、 12 pF として実験を行った。整形増幅器の増幅率は 571 Amplifier を増幅率 1 倍で用いた場合と同じ出力電圧になるように、オシロスコープを見ながら調整を行った。

^{109}Cd のスペクトルを -10°C の条件で、整形時定数 $1 \mu\text{s}$ と 50 ns で取得したものが図 4.18 である。MPPC に印加した電圧は 69.18 V である。また、 ^{109}Cd からの 22.0 keV , 22.2 keV の X 線のピークチャンネル、エネルギー分解能、印加電圧を表 4.16 に示す。この図から、時定数 $1 \mu\text{s}$ の自作の前置増幅器・整形増幅器では完全にはできていなかったノイズと信号の分離が、整形時定数を変化させることによって、はっきりと分離されている。このことから、整形時定数を短くすることで、より低エネルギー ($\sim 10 \text{ keV}$) の信号を検出できることを確認できた。

図 4.18: 整形時定数を変更した際の ^{109}Cd のスペクトルの比較。赤が整形時定数 50 ns 、黒が $1 \mu\text{s}$ である。

表 4.16: 整形時定数を変更した際の ^{109}Cd からの 22.0 keV, 22.2 keV の X 線の比較

整形時定数	50 ns	1 μs
ピークチャンネル [ch]	392.4	357.6
エネルギー分解能 [%]	55.9 \pm 1.3	49.8 \pm 1.7
印加電圧 [V]	69.18	69.18

^{109}Cd よりも低いエネルギーが読み出せるか確認するため、線源を ^{57}Co に変更して測定を行った。-10 $^{\circ}\text{C}$ において取得したスペクトルが図 4.19 である。 ^{57}Co は 122 keV の強度が強く (表 4.1)、コンプトン散乱のイベントに埋もれているが、 ^{57}Co の信号の位置は 220 チャンネル程度と、はっきりと特定できる。また、図 4.20 は MPPC で取得したスペクトルを、横軸が線源のエネルギー、縦軸がピークチャンネルとしたときのエネルギー較正直線である。プラスチックシンチレータの発光量は 10 keV 程度以上では概ね線形とみなせるので [20]、この図から 220 チャンネルのエネルギーは 14 keV 程度と分かる。これらから、 ^{57}Co の 14.4 keV の信号の有無・位置は特定できることが確認できた。同様に ^{55}Fe の 5.9 keV の信号を読み出したものが図 4.21 である。ダークカレントと信号が重なっているため、信号の位置はこのままでは特定できない。よって、 ~ 10 keV 以下のエネルギーの検出には更なる改良が必要である。

図 4.19: 整形時定数を変更した際の ^{57}Co のスペクトル

図 4.20: MPPC で取得したスペクトルに対し作成したエネルギー較正直線。図の 2 点は、 ^{241}Am と ^{109}Cd である。

図 4.21: 整形時定数を変更した際の ^{55}Fe のスペクトル

4.5 絶対光量の議論

光検出器が 1 つの光電子を検出し増幅した際の信号を、シングルフォトエレクトロン (1 p.e.) と呼ぶ。1 p.e. と線源からの信号の比が絶対光量であり、検出効率の目安となる。本節では 1 p.e. を含むスペクトルを取得し、同条件で読み出した各線源のピークチャンネルとの比を計算することで絶対光量を求める。また、一般的に X 線偏光計に用いられている PMT と、本研究で用いた MPPC(S10985-100C) の絶対光量の比較を行い、これについて議論を行う。本節において信号の読み出しに使用した機器を表 4.17 にまとめる。

表 4.17: 絶対光量の議論の際に使用した読み出し機器

項目	使用機器
電源	KEITHLEY 2400
MPPC	S10985-100C
シンチレータ	plastic(small)
前置増幅器	5028 Fast Quad Amplifier
整形増幅器	4077 Fast / Slow Amplifier
PocketMCA	MCA8000D

4.5.1 ADC ch のオフセット確認

1 p.e. は低い ch に現れるため、今までの測定と違い PocketMCA の AD 変換の際のオフセットが無視できなくなる。そこで、本節で用いている回路において、3.3.2 で行った AD 変換の線形性の確認の実験と同様の実験を、1 p.e. が現れる 100ch 以下の領域に対して行った。図 4.22 は、横軸が整形増幅器の出力電圧、縦軸が PocketMCA (MCA8000D) の ADCch である。この図から、AD 変換を行っている PocketMCA に 0 mV の入力を行うと、0.5 ch に相当することが分かった。今後の実験では、この値による補正を行う。

図 4.22: 低エネルギーにおける整形増幅器の出力電位と ADCch の関係

4.5.2 1 p.e. 付近のスペクトル

1 p.e. 付近の X 線について議論を行うため、前節で取得した ^{55}Fe のスペクトルを用いる。このままではピークチャンネルの位置は分からないため、同様の条件で MPPC ダークカレントのスペクトルを取得し (図 4.23 の黒)、それらの差分を取ることで、ダークカレントの除去を行った。図 4.23 のうち、赤がダークカレントの除去を行ったスペクトルである。この図において、 ^{55}Fe の信号のある 5.9 keV 付近 (ADCch で 100 ch 付近) では、線源の信号とダークカレントによる信号の寄与が同程度になっている。よって、5 keV 程度の信号を検出するためには、更なるダークカレントの低下が必要であることが分かった。

図 4.23: 整形時定数を変更した際の ^{55}Fe のスペクトル。黒が ^{55}Fe のスペクトル、青がダークカレントのスペクトル、赤が差分のスペクトルである。

4.5.3 PMT との比較

2.4.1 で述べたように、多くの X 線検出器には PMT が用いられている。本研究の目標の 1 つである PMT と同等の感度を持つ検出器が現状で実現できているかを確認するために、PMT と MPPC での比較を行った。光検出器以外の機器については、同条件で実験を行った。

本実験で使用した PMT は、PoGOLite で使用実績のある浜松ホトニクス社の「R7899-EG」である。表 4.18 に、この PMT の主な仕様を示す。この PMT は磁場の影響を小さくするため、受光面の周囲を透磁率の大きい金属で覆い、磁気遮蔽を行っている。また、小型の高圧電源「C4900-51」を組み込んである [21]。プラスチックシンチレータのサイズは、MPPC と同様に $4 \times 4 \times 15 \text{ mm}^3$ を使用している。

線源に ^{241}Am を用いて、59.5 keV の γ 線を読み出しスペクトルを比較したものを図 4.24 に示す。この際 PMT に印加する電圧は、4.4.1 の実験において、50 ns の整形時定数で読み出した際のピークチャンネルと同じになるように調整を行った。PMT は -10°C に設定した恒温槽内に置き、印加した電圧は $3.798 \text{ V} \times 250 = 949.5 \text{ V}$ である。各光検出器のピークチャンネルとエネルギー分解能を表 4.19 に示す。これらの図から、どちらの光検出器もダークカレントと信号を十分に分離できていることが分かる。

表 4.18: R7899 の仕様 [22]

項目	値	単位
受光面の直径	22	mm
ダイノード数	10	個
印加電圧	1250	V
増幅電圧	0~1800	V

図 4.24: (左)MPPC (黒) と PMT (赤) それぞれの最適な設定で読み出した ^{241}Am のスペクトルの比較。
 (右)MPPC (黒) と PMT (赤) それぞれの最適な設定で読み出した ^{109}Cd のスペクトルの比較

表 4.19: 各線源を異なる光検出器で読み出した際の比較

線源	項目	MPPC	PMT
^{241}Am	ピークチャンネル	1441	1433
	エネルギー分解能	31.8 ± 0.4	32.1 ± 0.5
^{109}Cd	ピークチャンネル	439.8	485.0
	エネルギー分解能	62.5 ± 1.8	57.8 ± 1.7

図 4.25 に、MPPC 及び PMT を用いた際のエネルギーとエネルギー分解能の関係を示す。また系統誤差が支配的な場合、エネルギー分解能は低エネルギーほどポワソン分布に従い悪くなる。この場合のエネルギー分解能は、 $1/\sqrt{\text{energy(keV)}}$ に比例するため、図に破線で表示してある。この図から、どちらの光検出器も、概ね統計誤差が支配的であることが分かる。ただし、 ^{241}Am の検出では MPPC のほうがエネルギー分解能が良いのに対し、MPPC の傾きは PMT のそれに比べて急になっていることから、MPPC は低エネルギーではダークカレントの影響が残っていると考えられる。そのため、ダークカレントを減らすことで性能向上を見込むことができると考えられる。

図 4.25: 線源からのエネルギー vs エネルギー分解能。赤が MPPC で、黒が PMT である。

最期に PMT の絶対光量の導出のため、 ^{55}Fe のスペクトルを取得する。図 4.26 は、これまで PMT で読み出したのと同じセットアップでの ^{55}Fe のスペクトルである。MPPC では分離できなかった ^{55}Fe の 5.9 keV のエネルギーが、PMT では 60 ch 程度に確認することができる。また、20 ch 付近には PMT の 1 p.e. が確認できた。

PMT と MPPC の絶対光量を比較するため、各々の 1 p.e. のピークチャンネルと、これまでに測定した ^{241}Am と ^{109}Cd が何 p.e. に相当するかを表 4.20 にまとめる。この表から、MPPC の検出効率自体は PMT と同程度が達成されており、性能向上にはダークカレントの低減が有効であると考えられる。

図 4.26: PMT で読み出した ^{55}Fe のスペクトル

表 4.20: 1p.e. のピークチャンネル、各線源からの信号の 1 p.e. との比

光検出器	MPPC	PMT
1 p.e peak[ch]	13.6	15.3
^{241}Am [p.e.]	106.0	93.6
^{109}Cd [p.e.]	32.1	31.6

第5章 まとめと今後

本研究では、偏光 X 線検出器として広く用いられているプラスチックシンチレータ+PMT の組み合わせに対し、光検出器に MPPC を用いたシステムを検討する。これにより、従来のシステムより扱いやすい検出器になると期待される。そのために、3 章では使用した実験機器の性質・性能の確認を行い、4 章ではシステム検討のためにシンチレータ、光検出器、温度や読み出し回路など、実験条件を変更しながら実際にスペクトルを取得し評価を行った。

3 章では、前置増幅器、整形増幅器、自作電源について動作確認を行い、それを通して装置の理解を深めた。また電源安定性の評価では、自作電源も含めエネルギー分解能の値が 1 %未満で一致し、どの電源を用いても変わらない性能を発揮することが確認できた (3.2.4 節)。

4 章ではまずシンチレータの評価を行い、プラスチックシンチレータ+MPPC の組み合わせで実際に線源からの信号が取得でき、更にシンチレータのサイズを比較したことにより約 20 %の光量の増加が確認でき、MPPC とのマッチングの改善が行えた (4.2 節)。また、MPPC のピクセルサイズの評価を行うことで、エネルギー分解能を 5 %程度改善できた。更に読み出し回路も改善を行うことで、常温・ $\tau \sim 1 \mu\text{s}$ の典型的な時定数のアンプでは ^{152}Eu の 40 keV の X 線のピークを識別できる程度であったのが、低温・高速アンプ (50 ns) に変更することで、 ^{57}Co の 14 keV の γ 線まで見えるようになり、ノイズ (ダークカレント) の量を大きく減少することができた (4.3 節)。絶対光量の議論により、60 keV 程度のエネルギーを読み出す際には PMT と同程度の性能になることが確認できた (4.5 節)。現状のセットアップで実現できている閾値は 10 keV 程度である。

目標となる $\sim 2 \text{ keV}$ の閾値の実現には、更なるノイズ (ダークカレント) の低下が必要であり、今後アンプの高速化や、吸収体との同時計数を行いたい。また光検出器 MPPC も、現在使用している「S10985-100C」の新製品である「S12573-100C」が開発された。ノイズの低減が主な改善点のため、こちらも同様の効果が見込まれ、これらの改良を通して PMT と同等の性能である 2 keV の放射線の読み出しを目指すことが課題である。

付録 A 前置増幅器「CP 5028 Fast Quad Amplifier」の性能評価

前置増幅器のフィードバックコンデンサの容量を小さくすると前置増幅器での増幅率が上がるため、同じ増幅率の信号を得る際の光検出器の増幅率を下げるができる。これは光検出器に印加する電圧を下げるができるため、よりダークカレントが減ると期待される。そこで前置増幅器「CP 5028 Fast Quad Amplifier」の特性調査のため、フィードバックコンデンサの容量を変化させながらプラスチックシンチレータを用いて ^{241}Am の 59.5 keV の γ 線の信号を取得し、オシロスコープで確認する。

2 pF のコンデンサを使用した際の MPPC の出力波形、前置増幅器を接続した際の MPPC の出力部の波形、前置増幅器の出力波形をオシロスコープで確認したものを、図 A.1 に示す。本研究で、この前置増幅器と共に用いる整形増幅器の整形時定数は 50 ns であるが、前置増幅器の立ち上がり時間はそれよりも長いことが分かる。一方、光検出器に PMT を用いて読み出した場合は、出力波形は図 A.2 となり、 ~ 40 ns の立ち上がりを示す。つまり、前置増幅器自体は十分に高速であり、整形増幅器「4077 Fast/Slow amplifier」との組み合わせに問題がないことが分かる。このため 2 pF のフィードバックコンデンサを用いた前置増幅器で MPPC の読み出しとして用いた場合、何らかの原因で立ち上がりが遅くなってしまうことが分かる。すると全電荷を整形増幅器で積分できず、電荷をロスすることが考えられる。

そこで 2 pF のコンデンサに 10 pF のコンデンサを並列に接続し、フィードバックコンデンサを 12 pF にして同様に出力波形を取得した。結果を図 A.3 に示す。この図から、前置増幅器の立ち上がり時間は整形時定数の 50 ns に近いことが分かる。すると、2 pF の場合に比べて電荷のロスが少ないため、時定数 50 ns の整形増幅器を組み合わせる際に、本来の性能を発揮できると予想される。実際にフィードバックコンデンサが 2 pF と 12 pF の場合の ^{241}Am の 59.5 keV の γ 線のスペクトルを取得したものが、図 A.4 である。信号の読み出しに使用した機器を表 A.1 にまとめる。また、 ^{241}Am の 59.5 keV の γ 線のピークチャンネル、エネルギー分解能、印加電圧を表 A.2 に示す。この図から 2 pF のコンデンサで読み出したものは、低エネルギー側の信号 (~ 500 ch) を読み出す際に 12 pF よりもエネルギー分解能が悪く、電荷のロスによるダークカレントの相対的増加が見られていると考えられる。以上のことから 12 pF のフィードバックコンデンサを用いることが適切ということが分かり、本実験では 12 pF のフィードバックコンデンサを用いた前置増幅器で実験を行った。

図 A.1: 前置増幅器に 2 pF のフィードバックコンデンサを使用した際、各部をオシロスコープで見た図。黒は MPPC の出力波形、青は前置増幅器を接続した際の MPPC 出力部の波形、水色は前置増幅器の出力波形。

図 A.2: 光検出器に PMT を用い、前置増幅器に 2 pF のフィードバックコンデンサを使用した際、各部をオシロスコープで見た図。青は前置増幅器を接続した際の PMT 出力部の波形、水色は前置増幅器の出力波形。

図 A.3: 前置増幅器に 12 pF のフィードバックコンデンサを使用した際、各部をオシロスコープで見た図。黒は MPPC の出力波形、青は前置増幅器を接続した際の MPPC 出力部の波形、水色は前置増幅器の出力波形。

図 A.4: プリアンプのフィードバックコンデンサの値を変えた際の ^{241}Am のスペクトル。黒は 12 pF のコンデンサ、赤は 2 pF のフィードバックコンデンサを使用している。

表 A.1: フィードバックコンデンサの値を変化させた際に使用した機器

項目	使用機器
電源	KEITHLEY 2400
MPPC	S10985-100C
シンチレータ	plastic(small)
前置増幅器	5028 Fast Quad Amplifier
整形増幅器	4077 Fast / Slow Amplifier
PocketMCA	MCA8000D

表 A.2: プリアンプのフィードバックコンデンサの値を変更した際の ^{241}Am からの 59.5 keV の γ 線の比較

項目	2 pF	12 pF
ピークチャンネル [ch]	1441	1449
エネルギー分解能 [%]	55.9 ± 1.3	55.7 ± 1.4
印加電圧 [V]	68.79	69.18
V_{ov} [V]	0.23	0.62

謝辞

本論文を作成するに当たり、協力して下さった多くの方に感謝致します。水野さんには、本論文を作成するための基本的知識を始め、実験機器の使用方法や実験手法、解析に至るまで、幅広く指導していただきました。卒論実験を本格的に行い始めてから私の遅刻回数が大きく減ったのは、水野さんのおかげだと思っております、本当に感謝致します。ひろたかさんには、実験につまづいた際に適切なアドバイスを頂きました。深沢先生にはセミナーや自作電源の製作等で多くの助言を頂きました。また研究室の皆様、大部屋の皆様には、楽しい時間、快適な研究環境を提供していただき、大変感謝しています。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] F. Lei, et al., Space Science Reviews, 82 (1997) 309
- [2] W. Heitler, The Quantum Theory of Radiation, Oxford University Press, London (1970)
- [3] Glenn F. Knoll 「放射線計測ハンドブック」 第3版, 日刊工業新聞社 (2001)
- [4] T. Kamae, et al., Astroparticle Physics, 30 (2008) 72
- [5] 浜松ホトニクス 「光半導体素子ハンドブック」
- [6] 中川 崇之 「NaI(Tl) シンチレータとアレイ型 APD を組み合わせた携帯型放射線モニターの構築」 卒業論文 (広島大学, 2011)
- [7] CP 5028 QUAD FAST PREAMPLIFIER 取扱説明書
- [8] CLEAR PULSE 4056 Fast Amplifier 取扱説明書
- [9] ORTEC 572A スペックシート
- [10] KEITHLEY 2400 スペックシート
- [11] CLEAR PULSE E6625 スペックシート
- [12] ANALOG DEVICES 7533 スペックシート
- [13] RECOM R12-100B スペックシート
- [14] AMPTEK PocketMCA 8000A スペックシート
- [15] AMPTEK PocketMCA 8000D スペックシート
- [16] decay data search
(<http://ie.lbl.gov/toi/>)
- [17] Eljen Technology EJ-204 スペックシート
- [18] 浜松ホトニクス S10985 シリーズ スペックシート
- [19] NIST XCOM
(<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>)
- [20] T. Mizuno, et al., NIMA, 600 (2009) 609

[21] HAMAMATSU C4900-51 スペックシート

[22] R7899 仕様

(<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/3001/R7899/index.html>)