

偏光観測衛星 TSUBAME 搭載用
硬X線偏光計の試作と性能評価

榎本 雄太

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2010年 2月

目次

第1章	はじめに	1
1.1	X線の偏光観測	1
1.2	小型衛星プロジェクト	2
1.3	硬X線偏光観測衛星 TSUBAME	3
1.4	本論文の目的	4
第2章	X線偏光と検出方法	5
2.1	コンプトン散乱	5
2.1.1	エネルギー	6
2.1.2	散乱断面積	6
2.2	コンプトン散乱を利用したX線偏光検出	8
第3章	硬X線偏光計	11
3.1	硬X線偏光計の構造	11
3.2	検出器	14
3.2.1	マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT)	14
3.2.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	15
3.3	読み出し回路	16
第4章	MAPMT+プラスチックシンチレータのクロストーク特性評価	22
4.1	目的	22
4.2	セットアップ	22
4.3	測定	25
4.4	結果	25
4.5	クロストーク特性	27
4.6	光量分布	30
4.7	考察	30

第5章	偏光計の試作	34
5.1	試作偏光計の構成	34
5.2	試作偏光計のシールドケース設計	35
5.3	今後の改善点	39
第6章	試作偏光計の性能評価実験	41
6.1	実験施設	41
6.2	セットアップ	41
6.3	実施した測定	45
6.3.1	垂直入射	45
6.3.2	斜め入射	46
6.3.3	外側ピクセル入射	46
6.4	測定	47
6.5	結果	47
第7章	性能評価実験 解析	48
7.1	データ解析手順	48
7.1.1	ゲイン補正・ペDESTAL補正	48
7.1.2	散乱・吸収位置決定	49
7.1.3	コンプトン散乱イベント選定	50
7.1.4	角度計算	56
7.1.5	モジュレーションカーブ作成	56
7.2	結果・考察	60
7.2.1	Q 値の見積もり	60
7.2.2	モジュレーションカーブの改善	61
7.2.3	今後の改善案	62
7.2.4		62
7.2.5	イベント選定についての検証	64
7.3	まとめ	67
第8章	まとめと今後の課題	68
8.1	まとめ	68
8.2	今後の課題	68

付録 A 付録	70
A.1 性能評価実験中に起こったトラブルについて	70
A.1.1 IFC の電源	70
A.1.2 トリガーレートの変動	71

目 次

2.1	コンプトン散乱の模式図	5
2.2	散乱体で落とされるエネルギー	6
2.3	偏光した光子の散乱の模式図	8
2.4	散乱型偏光計の原理	9
2.5	散乱角 θ に対する変調 Q	10
3.1	散乱体・吸収体の配置図	12
3.2	TSUBAME 搭載偏光計の構成図	12
3.3	MAPMT R8900-M16 MOD-UBA	14
3.4	APD	16
3.5	各 APD の内部構造と増幅領域	17
3.6	VATA のシステム図	18
3.7	VATA のトリガシーケンス	18
3.8	コインシデンス測定時のトリガシーケンス	21
4.1	クロストーク特性評価セットアップ	23
4.2	MAPMT とシンチレータ	23
4.3	クロストーク測定のセットアップ	24
4.4	16ch MAPMT のスペクトル	26
4.5	光電吸収イベントのみをプロットしたスペクトル	28
4.6	7ch のクロストーク	29
4.7	全チャンネルのクロストーク特性	29
4.8	全信号の和に対する、各 ch での検出信号が占める割合	31
4.9	7ch の光量分布	32
4.10	全チャンネルの光量分布	32
5.1	試作偏光計の断面図	36
5.2	底面	37

5.3	壁面	37
5.4	APD・CsI シンチレータ用ソケット	38
5.5	蓋	38
5.6	試作偏光計の配線	38
6.1	BL14A 実験ブース内の様子	42
6.2	赤道儀に取り付けた偏光計	43
6.3	性能評価実験 回路セットアップ	44
6.4	試作偏光計のシンチレータ配置	45
6.5	入射軸を傾けた図	46
6.6	散乱体上で入射ピクセルをずらした図	47
7.1	全イベントのエネルギーマップ	51
7.2	全イベントの E_{PMT}	52
7.3	全イベントの E_{APD}	53
7.4	全イベントの $E_{APD} - E_{noise}$	54
7.5	ノイズカット後のエネルギーマップ	55
7.6	回転角 0°	57
7.7	回転角 45°	57
7.8	回転角 90°	57
7.9	回転角 135°	57
7.10	回転角 180°	57
7.11	回転角 225°	57
7.12	回転角 270°	58
7.13	回転角 315°	58
7.14	統合したモジュレーションカーブ	59
7.15	フィッティングしたモジュレーションカーブ	60
7.16	一部のピンを取り除いたモジュレーションカーブ	63
7.17	全イベントのエネルギーマップ	65

表 目 次

3.1 偏光計に使用するシンチレータの性能	13
5.1 フライトモデルとプロトタイプ 比較	34
7.1 フィッティング結果	61
7.2 フィッティング結果	64

要旨

今日、高エネルギー天体からのガンマ線放射機構と、天体周辺の磁場およびそれによる粒子加速現象とは密接に関連していると考えられている。しかし、天体周辺の磁場構造を直接観測することは難しく、粒子加速機構の解明は進んでいない。この現状に対し、X線領域での偏光観測は天体周辺の磁場情報を得る手段として注目されているが、未だその観測例は少なく、観測結果と理論モデルとの検証ができない状況にある。そのような中で、精密な偏光観測を世界に先駆けて行うには、開発期間の短い小型衛星が有利である。本研究室では、Cute-I、Cute-1.7+APD1号機、2号機に続くCute Projectの4機目の超小型衛星として、工学部松永研究室と共同で、超小型衛星「TSUBAME」の開発を行っている。

「TSUBAME」衛星の偏光計は、偏光光子のコンプトン散乱における散乱異方性を利用した散乱型偏光計であり、偏光光子がコンプトン散乱を起こした際の散乱位置・損失エネルギーを検出する散乱体と、散乱光子が光電吸収を起こした際の吸収位置・損失エネルギーを検出する吸収体から構成される。これら2つの同時計測イベントを取得することで、偏光度と偏光方向を検出できる。「TSUBAME」衛星では、この偏光計を用いて、主にガンマ線バーストにおける30~200keVの硬X線の偏光検出を目標にしている。

本研究では、まず、偏光計で使用するMAPMTのクロストーク特性を調査した。次に、偏光計の構造、および偏光検出性能の検証を目的とする偏光計プロトタイプ製作の一環として、検出器や基板を取りまとめるシールドケース部の設計を行った。また、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光科学研究施設(PF)において、82.5keVの偏光X線ビームを偏光計プロトタイプに照射し、性能評価実験を実施した。実験では、回路基板などの不具合が発生したが、偏光検出が可能であることを確認した。起きた不具合については、偏光計エンジニアリングモデルの設計に反映するために、検証を行う。また、取得した実験データから偏光情報を得るためのデータ解析手法について議論し、偏光による散乱異方性の振幅である Q 値が $71.8 \pm 0.66\%$ (82.5keV)と求まった。ただし、reduced χ^2 が237.7と大きく、検出器や解析手法の改善の余地が残る結果と言える。そのため、なぜこのような結果が出たのかを考察し、今後の改善点を提示する。

第1章 はじめに

1.1 X線の偏光観測

現代天文学では、天体から放射される電波、赤外線、可視光、X線、 γ 線など、様々な波長領域での電磁波の観測が行われている。天体の観測方法には、空間構造を映し出す「撮像」、エネルギースペクトルを得る「分光」、天体の放射強度を測定する「測光」、放射の電場の偏りを観測する「偏光」がある。これら4つの手法は、それぞれが独立した物理情報を提供するものとして、様々な視点から天体を研究する上で必要不可欠となっている。実際、可視光や電波領域では、これら4つの手法で数多くの観測がなされており、科学的成果を挙げている。しかし、X線や γ 線領域においては、偏光観測は技術的に難しく、観測例はわずか数例が知られるのみである。

そもそもX線や γ 線は、大気吸収によって地上までは届かないため、地上の望遠鏡などで観測することができない。そのため、衛星や気球などを用いて、観測を行う必要がある。近年は衛星技術や観測技術の発達によって、「撮像」、「分光」、「測光」の領域では、高精度の観測が行われるようになってきた。一方、偏光観測に関しては、高エネルギーの電磁波の波長が非常に短いことから、電波や可視光などと同じ手法では、偏光を観測することができず、コンプトン散乱や光電吸収などの、光子と物質との相互作用を利用しなければならない。しかし、物理過程が複雑であること、検出器の構造が複雑かつ大型である上に消費電力が大きいので衛星で利用しづらいこと、製作コストや技術的な困難さなどから、ほとんど行われてこなかった。

そこで、理学系基礎物理学専攻河合研究室では、アバランシェフォトダイオード (APD) とマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) を用いた、低電力、低コスト、小型の3つの利点をもつ、小型衛星用の散乱型偏光計の開発を行っている。本偏光計は、後に紹介する「TSUBAME」衛星に搭載するための散乱型偏光計であり、これを用いて天体の偏光X線を観測し、その情報から新しい天体の物理を探ることが本研究の大筋の目的である。

X線領域での偏光観測は、「撮像」、「測光」、「分光」という他の観測方法とは独立した、

新しい物理情報を提供すると期待されている。例えば、偏光観測により天体の磁場構造を調べ、光子の放射過程を理論モデルと照らし合わせることによって、今までの観測では特定することができなかった高エネルギー天体の放射過程を決めることができると考えられる。現在、全天で最も大きな爆発現象であるガンマ線バーストに関して、現在最も有力な放射機構として、ファイアーボールモデルが提案されている。太陽質量の数十倍以上の巨大な星の重力崩壊、または中性子星同士の連星の融合によって 10^{52} erg 程度のエネルギーが生成され、そのエネルギーが相対論的ジェットに転換され、放出される。このジェットの方向が我々の視線方向と一致している場合、ジェットによって放射光子がローレンツブーストの効果で強められ、ガンマ線バーストとして観測されるというものである。シンクロトロン放射によって生成した X 線は、天体磁場の状態に応じた偏光を持つため、もしガンマ線バーストの偏光を観測できれば、ジェット衝撃波面の磁場の様子を調べることができる。衝撃波面に形成される磁場構造は、爆発から相対論的ジェットを作り出すという、根本的な過程を探るための重要な手掛かりになる。現在、ガンマ線バーストの偏光検出例は、太陽観測衛星 RHESSI による GRB021206 の偏光度 $80 \pm 20\%$ 、X 線観測衛星 INTEGRAL による GRB041219 の偏光度 $63 \pm 30\%$ などがある [4] が、いずれも精度が高くないこと、データの信頼性が低いこと、また観測例が少ないことが問題であるとして、理論との検証を行うには、さらに精度の高い観測と、多数の観測が必要である。

このように X 線の偏光観測は、未開拓な分野としてこれからの発展が望まれるものである。近年では、様々な研究機関が X 線領域の偏光観測を目指して、検出器や衛星の開発を行っており、開発競争が活発になってきている。

1.2 小型衛星プロジェクト

東京工業大学工学系機械宇宙システム専攻松永研究室では、2002 年度から Cute Project と呼ばれる小型衛星開発が行われている。このような小型衛星の開発は、近年関心が高まっており、何箇所もの大学で行われている。小型衛星は、大型衛星と比べて、短期かつ低予算での開発が可能で、新技術の積極的採用が可能であるなど、多くの利点を持つ。2003 年 6 月には 1 号機である Cute-I が打ち上げられ、予定されたミッションを全て成功させた。この衛星は、6 年経った現在でも運用されているというすばらしい成果を上げている。Cute-I の次の段階の小型衛星である Cute-1.7+APD からは、我々理学系基礎物理学専攻・河合研究室が加わり、理工学共同で衛星開発が行われた。Cute-1.7+APD の理学目標は、1: アバランシェフォトダイオード (APD) の放射線検出器としての宇宙動作実証、2: 南大

西洋磁気異常帯を含む、放射線異常帯の起動荷電粒子探査の2つである。Cute-1.7+APDは2006年2月に打ち上げられ、ハウスキーピングデータ取得などの初期運用や、ミッション機器であるAPDの電源投入などには成功したが、シングルイベントラッチアップ(SEL)が原因と想定される動作不良に陥った。その後、この衛星は2009年11月に大気圏再突入している。この経験から、放射線耐性向上などの改良が施されたCute-1.7+APD IIが開発された。Cute-1.7+APD IIは2008年4月に打ち上げられ、予定されていた初期運用を終え、現在も定常運用を行っている。この衛星では、工学ミッションとして、PDAの動作実証、姿勢データの取得、衛星写真の撮影、各地のアマチュア無線局での広範囲データ取得など、理学ミッションとして、APDの動作実証、様々なエネルギー閾値での荷電粒子分布の観測、荷電粒子分布の時間変動観測などに成功し、大きな結果を残している。

1.3 硬X線偏光観測衛星TSUBAME

現在、Cute-1.7+APD IIに続く小型衛星として、硬X線偏光観測衛星「TSUBAME」を理工学、およびその他の参画機関と合同で開発を行っている。本衛星には、コントロールモーメントジャイロ(CMG)を搭載し、小型衛星の利点を活かした高速姿勢制御と、それによる高度な観測ミッションの実現を目指す。

TSUBAME 理学ミッション

河合研究室は、TSUBAMEの理学ミッションとして、高エネルギー天体、特にガンマ線バースト(GRB)から放射される硬X線(30~200keV)の偏光観測を行う。本衛星には、バーストを検知し天体位置を特定するための広視野バーストモニタ(WBM)を5基、硬X線領域での偏光観測を行う偏光検出器を2基搭載する。衛星壁面5面に設置されたWBMは硬X線のカウントレートの変化を観察しており、入射光子の急激な増加を検知するとバースト発生を判定する。さらに、各WBM間のカウント数の違いから、光子の到来方向を計算する。その後、CMGを利用した高速姿勢制御により偏光計を到来方向に向け、バースト検知から15秒以内での観測開始を目指す。GRBの偏光検出に特化した運用モード、検出器構成を用いることで、月に2回程度のGRB偏光観測を期待している。

最初の節で述べた通り、X線領域での偏光観測は現在急速に開発が進められている分野である。そのため、開発期間が短く、新技術を積極的に使用できる小型衛星は、開発競争において有利な位置にあるといえる。また、GRBなどの突発天体の観測は、

検知から観測までの時間ができるだけ短いことが望ましく、この点でも姿勢制御が容易かつ高速に行える小型衛星が有利である。

1.4 本論文の目的

本研究では、まず、偏光計で使用する MAPMT のクロストーク特性を調査した。次に、偏光計の構造、および偏光検出性能の検証を目的とする偏光計プロトタイプの製作の一環として、検出器や基板を取りまとめるシールドケース部の設計を行った。また、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光科学研究施設 (PF) において、82.5keV の偏光 X 線ビームを偏光計プロトタイプに照射し、性能評価実験を実施した。さらに、取得した実験データから偏光情報を得るための解析を行い、現在の偏光計の検出性能と問題点について考察した。論文では、これらの開発、実験の結果やデータ解析手法について述べると共に、偏光計の検出原理、構造や搭載検出器についても説明する。また、今後の検出器開発に向けて、改善点を挙げる。

第2章 X線偏光と検出方法

X線は波長が非常に短いので、波動性よりも粒子性が顕著に現れる。そのため、可視光などのように、偏光子などを用いて偏光X線と無偏光X線を区別することができない。しかし、偏光X線は、その生成過程や物質との相互作用において、無偏光X線とは違った性質を示すことが知られている。このような粒子性の性質を利用する手法として、光電効果、コンプトン散乱、ブラッグ反射などを利用するものがある。ここでは、「TSUBAME」衛星で採用するコンプトン散乱を用いた偏光の検出方法を述べる。なお、以下で使う「偏光」は、全て「直線偏光」のことを意味する。

2.1 コンプトン散乱

コンプトン散乱は、物質に入射した光子が物質内の電子と衝突を起こすことによって、光子と電子間でエネルギーと運動量をやりとりする過程である。(図 2.1)

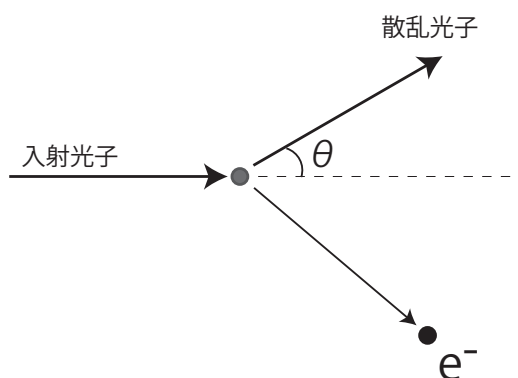


図 2.1: コンプトン散乱の模式図

2.1.1 エネルギー

コンプトン散乱で散乱された散乱光子のエネルギー E' は、入射光子のエネルギーを E_0 、入射方向に対する散乱角を θ 、電子の静止質量を m_e 、光速を c とすると、以下のようにかける。

$$E' = \frac{E_0}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (2.1)$$

コンプトン散乱で入射光子が電子に与えるエネルギー ΔE は、エネルギー保存則より入射光子と散乱光子のエネルギーの差に等しく

$$\Delta E = E_0 - E' = \frac{\frac{E_0^2}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

すなわち、散乱方向に応じて散乱後の光子のエネルギー、および光子が散乱体で落とすエネルギーが決まる。(図 2.2)

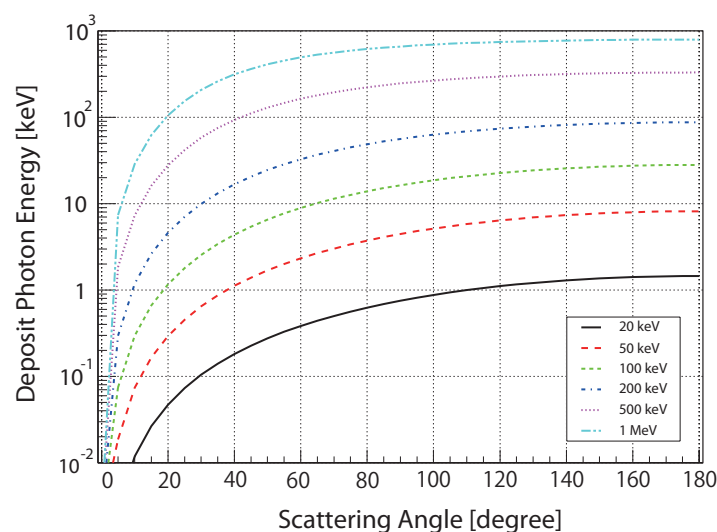


図 2.2: 散乱体で落とされるエネルギー。横軸が散乱角、縦軸が散乱体で落とされる光子のエネルギー。0° は透過を意味するので、落とされるエネルギーは 0 になる。

2.1.2 散乱断面積

光子がコンプトン散乱を起こすときの散乱断面積は、光子の偏光状態によって異なる。

無偏光の光子の場合

無偏光の光子が電子に衝突する場合、微分散乱断面積は Klein-Nishina の式として以下のように与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 (\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta) \quad (2.3)$$

ここで r_0 は電子の古典半径であり、 ϵ は光子の入射エネルギー E_0 、光子の散乱後のエネルギー E' 、散乱角 θ から、

$$\epsilon = \frac{E'}{E_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_0}{m_e c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (2.4)$$

と表される。これらの式からわかるように、無偏光の光子は散乱角 θ が一定の下では、散乱断面積も一定になる。すなわち、等方的に散乱する。

また散乱後の光子の偏光度は以下のように与えられる。[2]

$$\Pi = \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta} \quad (2.5)$$

偏光した光子の場合

次に偏光した光子についてのコンプトン散乱について述べる。偏光した光子がコンプトン散乱をした場合 (図 2.3)、その微分散乱断面積は以下のような Klein-Nishina の式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \epsilon^2 (\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2 \theta \cos^2 \eta) \quad (2.6)$$

ここで、 η は散乱方位角であり偏光面からの角度である。すなわち、偏光した光子の散乱断面積は、散乱方位角 η に依存する。この式で、角度 θ を固定すると、微分散乱断面積は $\eta = 90^\circ$ の時が最大になることがわかる。つまり、偏光した光子がコンプトン散乱する場

合、その偏光面に対して直角に散乱しやすい。これが、偏光した光子が持つ散乱異方性であり、これを利用することで散乱型偏光計をつくることが可能になる。

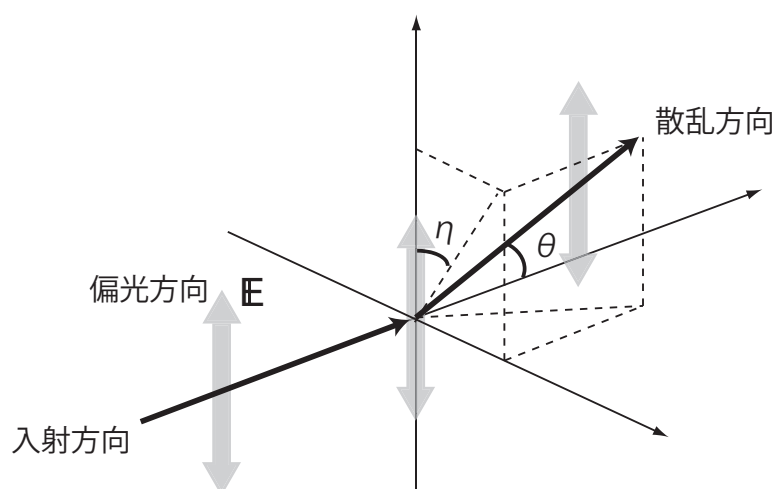


図 2.3: 偏光した光子の散乱の模式図。 θ は入射方向に対する散乱角。 η は偏光方向に対する散乱角。散乱光子の偏光方向は、入射光子の偏光方向と散乱光子の散乱方向とがつくる平面に含まれる。

2.2 コンプトン散乱を利用した X 線偏光検出

散乱型偏光計

上で述べたように、偏光した光子は散乱方位角 η に依存する散乱断面積を持つ。そのため、散乱方位角に異方性が生じる。ここでは、この性質を利用したコンプトン散乱偏光計について述べる。図 2.4 にあるように、微小な検出器 A, B で構成される理想的なコンプトン散乱偏光計を考える。入射光子は検出器 A でコンプトン散乱され、散乱された光子は検出器 B で光電吸収されるとする。 η は散乱方位角であり、入射光子の偏光方向を 0° とする。偏光した光子のコンプトン散乱の異方性から、散乱方位角 η に応じて、検出器 B でのカウント数は変調する。

式 (2.6) から、 $\eta = 90^\circ$ のときにそのカウント値は最大 (N_\perp) となり、 $\eta = 0^\circ$ のときにカウント値は最小 (N_\parallel) となる。ここで、変調の度合い Q を次式のように定義する。

$$Q = \frac{N_\perp - N_\parallel}{N_\perp + N_\parallel} \quad (2.7)$$

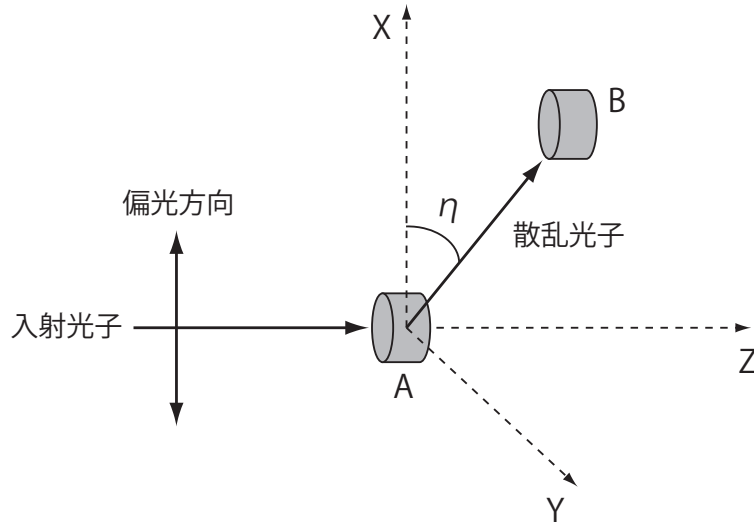


図 2.4: 散乱型偏光計の原理。微小な検出器 A、B を考える。光子は散乱体 A でコンプトン散乱し、吸収体 B で光電吸収を起こす。このようなイベントの数が、角度 η に応じて変調する。

N_{\perp} と N_{\parallel} の値は微分散乱断面積に依存するので、 Q はさらに、次式のような形になる。

$$Q = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 90^\circ) - \frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 0^\circ)}{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 90^\circ) + \frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta = 0^\circ)} \quad (2.8)$$

さらに、式 (2.6) から、 Q は θ を用いて

$$Q = \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - 2 \sin^2 \theta} \quad (2.9)$$

Q は、散乱方向の変調の大きさを示す値であった。もし Q が小さくなると、偏光による変調が統計誤差の範囲内に入ってしまうため、偏光しているかどうか判別がつかなくなる。よって、コンプトン散乱型偏光計では、なるべく Q が大きくなるような検出器配置をとらなければならない。式 (2.9) を見ると、 Q が最大値をとるのは、 $\theta = 90^\circ$ である。つまり、コンプトン散乱偏光計での偏光検出能力を最も高くするためには、 $\theta = 90^\circ$ のイベントを検出すればよく、吸収体を入射方向に対して $\theta = 90^\circ$ の位置に配置すればよいことがわかる。

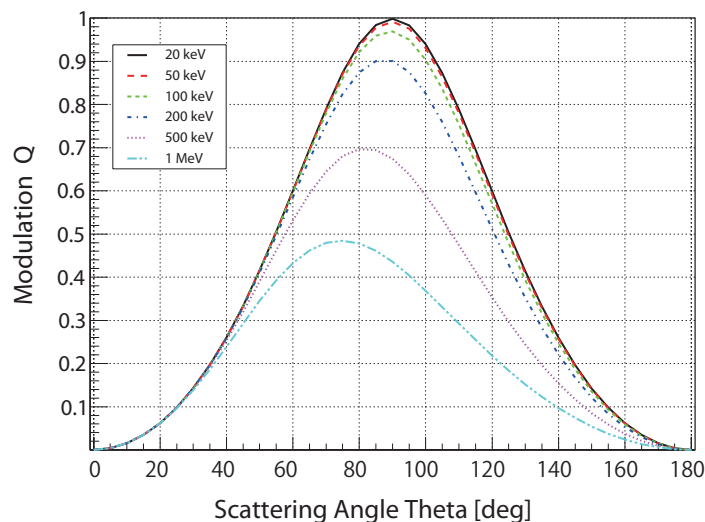


図 2.5: 散乱角 θ に対する変調 Q 。高エネルギーになるにつれて、変調が小さくなっていくことがわかる。硬 X 線領域では、 $\theta = 90^\circ$ で変調が最大になる。

変調因子 (Modulation Factor)

ある検出器に、偏光度 P の光子を入射したときに得られる変調の振幅を Q とすると、同じ検出器が 100% 偏光を持つ光子に対して示す変調は以下の式で与えられる。

$$M = \frac{Q}{P} \quad (2.10)$$

この値 M は、散乱体・吸収体間の位置関係や検出器の大きさによって変化する値で、モジュレーションファクター (MF:変調因子) と呼ばれる。この式を変形すると、

$$Q = MP \quad (2.11)$$

この式からわかるように、 M が大きい偏光計ならば、偏光度 P が小さい光子に対しても、変調 Q が大きくなり、偏光を検出することが可能になる。ここから、 M は偏光計の偏光検出性能を示す値として使われる。一般に、モジュレーションファクターは、100% 偏光に対する M のことである。本論文ではこの定義を採用する。

第3章 硬X線偏光計

この章では、硬X線偏光計、特に河合研究室で現在開発している超小型衛星「TSUBAME」搭載用の散乱型偏光計の構造について説明する。

3.1 硬X線偏光計の構造

散乱型偏光計の基本原理については前章で説明したので、ここでは実際の検出器の構造について述べる。

TSUBAME 搭載用の散乱型偏光計は、X線をコンプトン散乱させて散乱位置を検出する散乱体と、散乱したX線を光電吸収させて散乱方向を検出する吸収体から成る。(図3.1) 入射口から入射してきたX線は、検出器中心の散乱体で散乱され、散乱体を取り囲む吸収体で吸収される。散乱体、吸収体は共にシンチレータ+検出器という構成をしており、散乱、吸収過程で光子が落としたエネルギーをシンチレータで光に変換し、シンチレーション光を検出することによって光子が落としたエネルギーを検出する。散乱体、吸収体でのエネルギー検出から、光子の散乱位置と散乱方向が検出できる。吸収体、散乱体両方でエネルギーを落としたイベントを計数することで、散乱角度分布を取得でき、光子の偏光度、偏光方向がわかる。

これら散乱体、吸収体の大きさや位置は、検出器の性能を向上するために非常に重要になる。例えば、前章で述べた理想的な偏光計と実際の偏光計で異なる点は、散乱体が奥行きを持っていることである。このため、光子は散乱角90度以外の様々な方向に散乱し、結果として検出器のモジュレーションファクターは下がってしまう。一方、散乱体の奥行きを小さくすると、入射光子が反応せずに通り抜けてしまう確率が上がり、検出効率が落ちる。これらのことから、シミュレーションを用いてモジュレーションファクターが最も良くなる散乱体、吸収体の最適な大きさ、位置関係を計算する必要があった。以下で述べる現在の検出器構成は、戸泉修論でシミュレーションによって求められた構成 [9] を採用している。

以下では、散乱体、吸収体の構成と使用されている検出器について述べる。まず、TSUB-

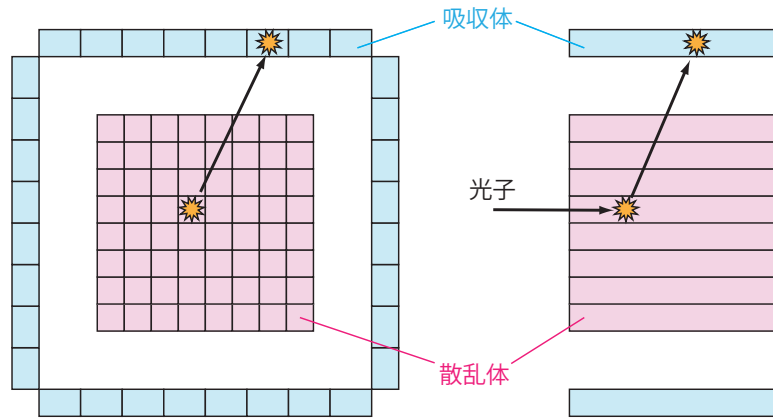


図 3.1: 散乱体・吸収体の配置図。入射してきた光子は散乱体でコンプトン散乱し、吸収体で光電吸収を起こす。

AME 偏光計の構成図を図 3.2 に示す。

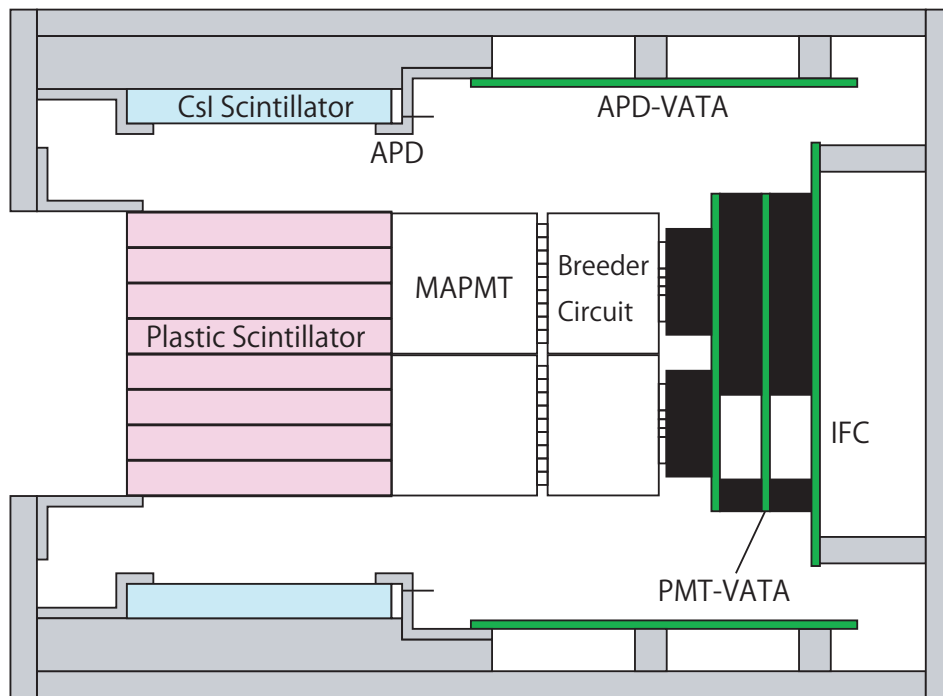


図 3.2: TSUBAME 搭載偏光計の構成図。散乱体にプラスチックシンチレータと MAPMT、吸収体に CsI シンチレータと APD を用いる

散乱体

検出器中心にある散乱体には、プラスチックシンチレータとマルチアノード光電子増倍管 (以下、MAPMT) を用いる。プラスチックシンチレータは、主原料である炭素の原子番号が6と小さく、TSUBAME 衛星が狙う硬 X 線領域の光子に対して、コンプトン散乱が最も支配的になる。コンプトン散乱で光子が落とすエネルギーは非常に小さく、プラスチックシンチレータの光量も少ないため、1 光電子程度のエネルギーまで検出するために光電子増倍管を用いる必要がある。MAPMT はアノードが 16 に分かれている特殊な光電子増倍管であり、複数のシンチレータと組み合わせることで、多チャンネルの位置検出器として使用できる。本偏光計では、プラスチックシンチレータ 64 本と MAPMT4 個を用いて、 8×8 ピクセルの散乱体を成すことになっている。

吸収体

散乱体を取り囲むように配置された吸収体には、CsI(Tl) シンチレータとアバランシェフォトダイオード (以下、APD) を使用する。CsI シンチレータは原子番号 Z が 54 と大きく、100keV 程度までの X 線のほぼ 100% が光電吸収を起こして止まる。また、光量が多く、出力波長が APD の量子効率が最も高い波長域 (500 ~ 800nm) に入るため、APD との相性が良いという利点もある。APD は、Cute1.7+APD II で初めて宇宙空間での放射線検出器としての動作実証が成された検出器である。APD を用いる最大の利点は、小型かつ省電力な点であり、超小型衛星に搭載する検出器には最適である。これらは、検出器壁面 1 枚につき 8 個ずつ並べられ、CsI シンチレータ+APD が 32 セットで散乱体を取り囲むことになる。

シンチレータ	比重	原子番号	波長 [nm]	時定数	光子数 [個/keV]	潮解性
Plastic	1.0	6	420	10	3	なし
CsI(Tl)	4.5	54	550	1000	61	少々

表 3.1: 偏光計に使用するシンチレータの性能

3.2 検出器

この節では、偏光計に使用される検出器について、さらに詳しく述べる。

3.2.1 マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT)

マルチアノード光電子増倍管 (以下、MAPMT) は、入射光子によって光電面で放出された光電子が、ダイノード部分で直線的に増幅され、増幅された信号を複数のアノードで出力することにより、位置検出器としての機能を持つ光電子増倍管である。光電子増倍管は、信号の増幅率が大きく、ノイズが小さいため、1 光電子程度の微弱なエネルギーを持つ光子も検出できる。そのため、偏光計の散乱体においてコンプトン散乱イベントとその散乱位置を知るために、MAPMT は最適な検出器であると言える。



図 3.3: MAPMT R8900-M16 MOD-UBA

これまで河合研究室は、浜松ホトニクスと共同で MAPMT の開発に取り組んできた。小型衛星開発の利点として、新技術の積極的利用が可能な点があるが、本偏光計に使用される MAPMT にも新しい技術が取り入れられている。本偏光計で用いる R8900-M16 MOD-UBA は、光電面にウルトラバイアルカリを採用し、光子から電子への変換効率 (量子効率) を、従来の光電子増倍管に比べて倍以上 ($\sim 40\%$) まで向上させ、16ch の信号検出ができる MAPMT である。R8900 シリーズは広い有効面積 ($\sim 80\%$) と、各ピクセル間で均一な検出効率を持つように改良された MAPMT であり、ウルトラバイアルカリの採用

によって感度の向上、分解能の改善、検出エネルギー下限値の引き下げを狙ったものである。さらに、MAPMT は、微細な内部構造がロケット打ち上げの振動に耐えられないことから、衛星に採用されづらいという経緯があったが、R8900-M16 MOD-UBA の開発ではこの弱点も克服し、高感度で耐震性を持つ新しいMAPMT を実現した。以前から河合研究室はMAPMT R8900-M16 MOD-UBA の基礎特性評価および振動試験を実施しており、その結果は戸泉修論 [9] に詳しくまとめられている。

クロストーク

MAPMT を位置検出器として使用する場合、検出精度に影響する重要な要素として、「クロストーク」がある。クロストークとは、検出器の光学的、電気的な構造の影響で、信号が他のチャンネルに漏れ出す現象のことをいう。この影響により、本来の現象とは異なった情報を検出することになる。

クロストークが生じる主な原因は2つある。1つは、検出器の入射窓から入った光が光電面に移動する間に、他チャンネルの領域に入り込んでしまう光学的なものである。2つ目は、生じた光電子がダイノード部分で増幅される間に、電荷が他のチャンネルに漏れ出す電気的なものである。

MAPMT R8900 シリーズ単体でのクロストーク測定は、前例があり、各チャンネルで0.2~4.4%であることがわかっている [1]。一方、MAPMT R8900-M16 MOD-UBA でのクロストーク測定は行われていない。また、本偏光計では、MAPMT とプラスチックシンチレータを合わせて用いるため、MAPMT 単体使用時とは異なったクロストーク特性を示す。この場合は、シンチレーション光の漏れ出しによるクロストークが支配的になる。そのため、今回の性能評価実験では、事前にMAPMT とプラスチックシンチレータとを光学的に接合した状態で使用し、そのクロストーク特性について調べた。このことについては、次章で説明を行う。

3.2.2 アバランシェフォトダイオード (APD)

アバランシェフォトダイオード (以下、APD) は、河合研究室が放射線検出器として世界で初めて宇宙での動作実証を行った半導体検出器である。APD は、量子効率が高く応答速度が非常に早いフォトダイオード (PD) と、高い信号増幅率を持ち少量の光子を検出できる光電子増倍管 (PMT) の両方の性質を併せ持つ。また、小型、軽量かつ頑丈で、低消費電力であることから、搭載スペースや使用電力に制限のある小型衛星に搭載するのに

最適な検出器である。

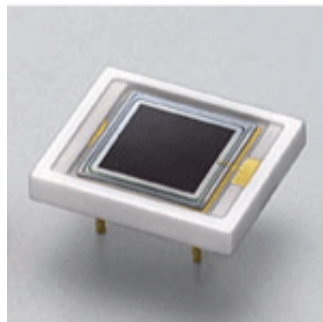


図 3.4: APD の例。写真は受光面が 5mm × 5mm の APD(浜松ホトニクス製 S8664-55)

APD の基本構造

APD は、pn 接合された半導体検出器であり、逆バイアスをかけて使用する。電圧をかけることで生じた空乏層に光子が入射すると、光子のエネルギーに応じた数の電子正孔対が生成される。APD には、高電圧が印加された増幅領域が存在し、生成した電子正孔対はこの領域でなだれ増幅を起こす。そのため、微弱な信号でも増幅して検出することができる。

APD は、その内部構造の違いによって、Beveled-edge type、Reach-through type、Reverse type の 3 種類に分類することができる (図 3.5)。これらは、最大性能を発揮するのに必要な印加電圧や、検出光子の波長域に対する検出効率が異なっており、用途に応じて種類を選ぶ必要がある。今回の偏光計では、CsI のシンチレーション光検出が APD の使用目的である。そのため、暗電流が小さく、CsI シンチレータの波長域 (可視光) での量子効率が高い Reverse type を使用する。

3.3 読み出し回路

偏光計の読み出し回路は、APD 系の信号読み出しを行う APD-VATA 基板、PMT 系の信号読み出しを行う PMT-VATA 基板、それらからのトリガ処理およびデータ通信を仲介する IFC 基板に分けられる。以下で詳しく説明を行う。

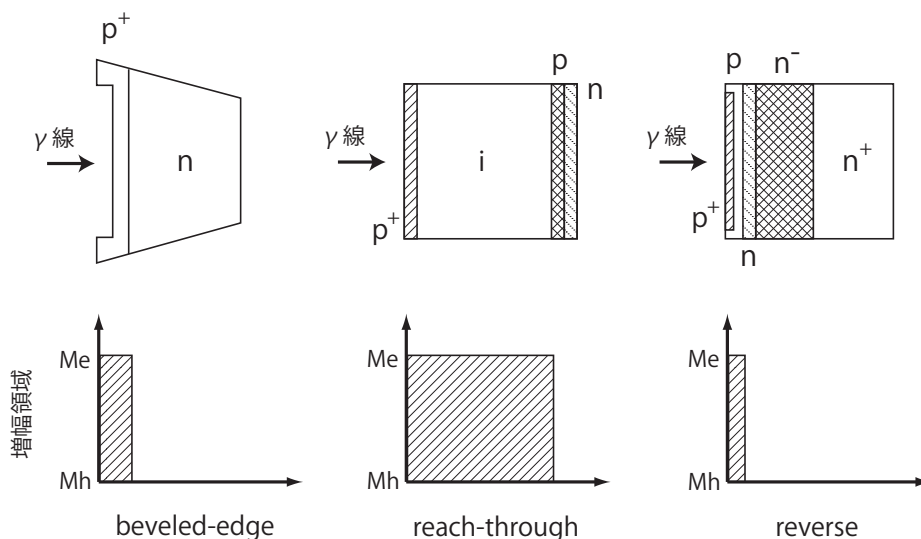


図 3.5: 各 APD の内部構造と増幅領域

VATA

VATA は、アナログ信号読み出し用に製造された VLSI であり、それぞれも VLSI であるアナログ信号増幅部 (VA)、トリガ生成部 (TA) をまとめたものである。本論文では、特別な理由がない限り、VATA とひとまとめにして呼ぶことにする。

VA は主に各チャンネルの信号のサンプルホールドを行う。VA に入力された電荷は、電荷積分型前置増幅器 (Charge Sensitive Amplifier: CSA) によって電圧に変換され、さらに一定の時定数を持つ波形整形増幅器 (Slow Shaper) によって整形される。整形された信号の波高情報はサンプルホールドによって電圧として保存され、出力バッファから 1ch ずつ読み出すことができる。一方、TA は各チャンネルのトリガ信号の生成を行い、VA の動作タイミングを決定する。VA に入力された電荷は CSA 以降で分岐して TA に入り、VA より早い整形時定数をもつ波形整形増幅器 (Fast Shaper) によって整形される。Fast Shaper で整形された信号は、波高弁別器によって設定された電圧閾値を越えたものだけがトリガ信号となる。全チャンネル分のトリガ信号は OR をとって、1つのトリガ信号として出力される。VATA は内部に ADC が内蔵されたものもあるが、本偏光計の信号処理回路では、VATA の内部 ADC は使わず、VATA の外に置かれた ADC を用いて信号の A/D 変換を行う。以下に、VATA のシステム図 (図 3.6) と、トリガシーケンス (図 3.7) を示す。

TSUBAME 偏光計では、APD および MAPMT からの多チャンネル信号処理をそれぞれ VATA を用いて行う。APD 用 VATA として、IDEAS 製 VA32TA7 という VATA チップ

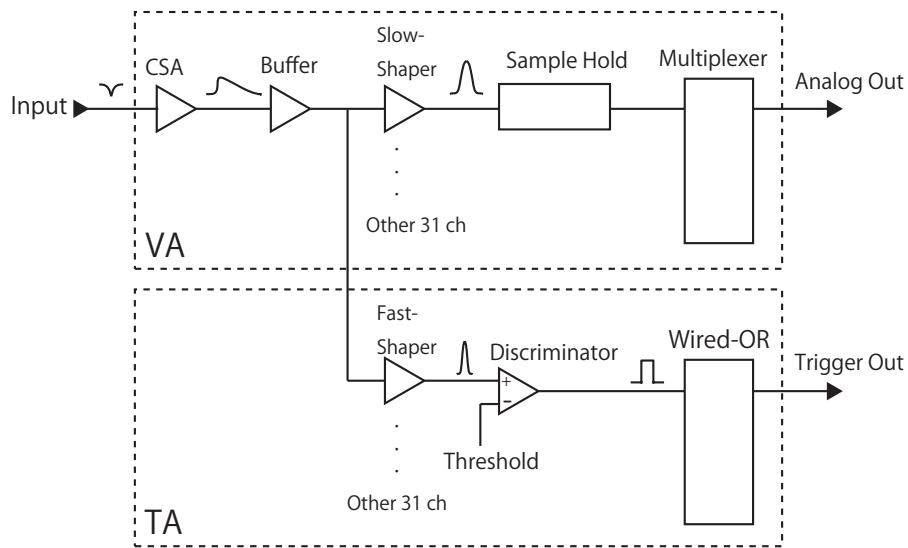


図 3.6: VATA のシステム図。CSA から出力された信号は、分割されて Slow と Fast の 2 つの整形アンプに入力される。TA 側 (Fast) ではトリガ信号が作られ、VA 側 (Slow) ではそのトリガ時間に合わせて、信号のサンプルホールドが行われる。

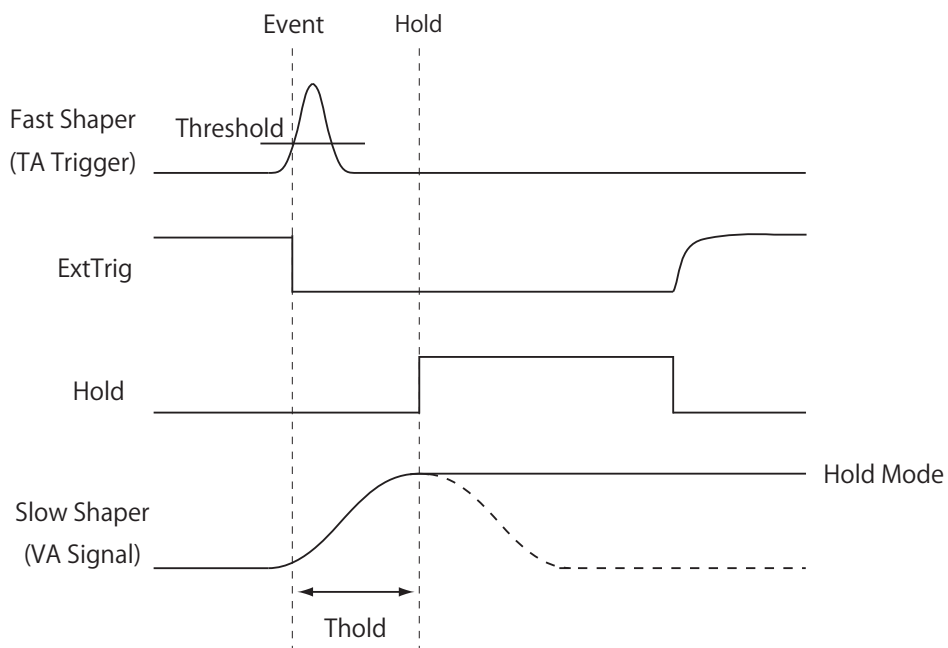


図 3.7: VATA のトリガシーケンス。まず、TA 側で Fast Shaper によって整形された信号からトリガ信号が作られる。トリガ信号から時間 T_{hold} だけ遅らせた Hold 信号が VA に入力され、Slow Shaper の出力電圧をホールドする。

を使用する。このチップと ADC を合わせた回路を 1 つの基板に載せ、これを以後、APD-VATA 基板と呼ぶ。TSUBAME 偏光計では、APD-VATA 基板を 2 枚使用し、32ch の信号を読み出す。一方、PMT 用 VATA には、同じく IDEAS 製 VA32HDR14、TA32CG2 を合わせた VATA チップを使用する。この VATA を 2 個と ADC2 個を搭載した基板で、計 64ch の信号を読み出す。この基板を以後、PMT-VATA 基板と呼ぶ。

IFC

APD-VATA、および PMT-VATA からのデジタル信号を統括する基板として、インターフェース基板 (IFC) がある。IFC には、FPGA が搭載され、以下のことを行う。

- VATA のレジスタ書き込み (Thold、Threshold 等の設定書き込み)
- トリガー信号の論理演算処理
- ADC 制御
- 外部バスとのデータ通信

偏光計のトリガシーケンス

2 種類の検出器を搭載する本偏光計では、使用する検出器によって 3 種類の異なるトリガシーケンスを用意する。本偏光計で行える測定は、以下の 3 種類に分かれる。

- APD 単体での測定
- PMT 単体での測定
- コインシデンス測定

APD 単体、もしくは PMT 単体での測定は、主に動作試験やデバッグ、キャリブレーションに用いる。一方、コインシデンス測定は、本偏光計の特徴のひとつであり、偏光観測時に用いる。以下で、各測定でのトリガシーケンスについて説明する。

APD 単体測定

APD 単体での測定には、APD-VATA を用いて、「VATA」の項で説明したものと同様のトリガシーケンスを用いる。

PMT 単体測定

PMT 単体での測定では、TA を使わずに MAPMT の最終段ダイノード信号からトリガ信号をつくり、サンプルホールドのタイミングを決める。これは、一度分散させた信号をもう一度 TA で集めるより、ダイノードから直接トリガをつくった方が、回路として簡単であるからである。

コインシデンス測定

散乱型偏光計では、コンプトン散乱イベントを取得する必要がある。本偏光計では、コンプトン散乱イベントを取得しつつ、バックグラウンドを落とす目的で、PMT と APD の同時イベントのみを計測する、特殊な測定モードを用意する。これを以後、「コインシデンス測定」と呼ぶ。コインシデンス測定時のトリガシーケンスは図 3.8 のようになる。

コインシデンス取得のトリガとして起点になるのは、PMT のダイノード信号である。PMT のダイノード信号がスレッシュホールドを超えると、PMT トリガが立ち上がる。このとき、PMT 信号の波高値を記録しておき、PMT トリガの立ち上がりから一定時間経過するまでに APD トリガが立ち上がると、コインシデンスイベントとして判定する。そして、記録されていた PMT 波高値のデータを読み出しに行く。一方、APD 信号は、PMT トリガから一定時間 (Thold) だけ経過した時点でサンプルホールドされる。

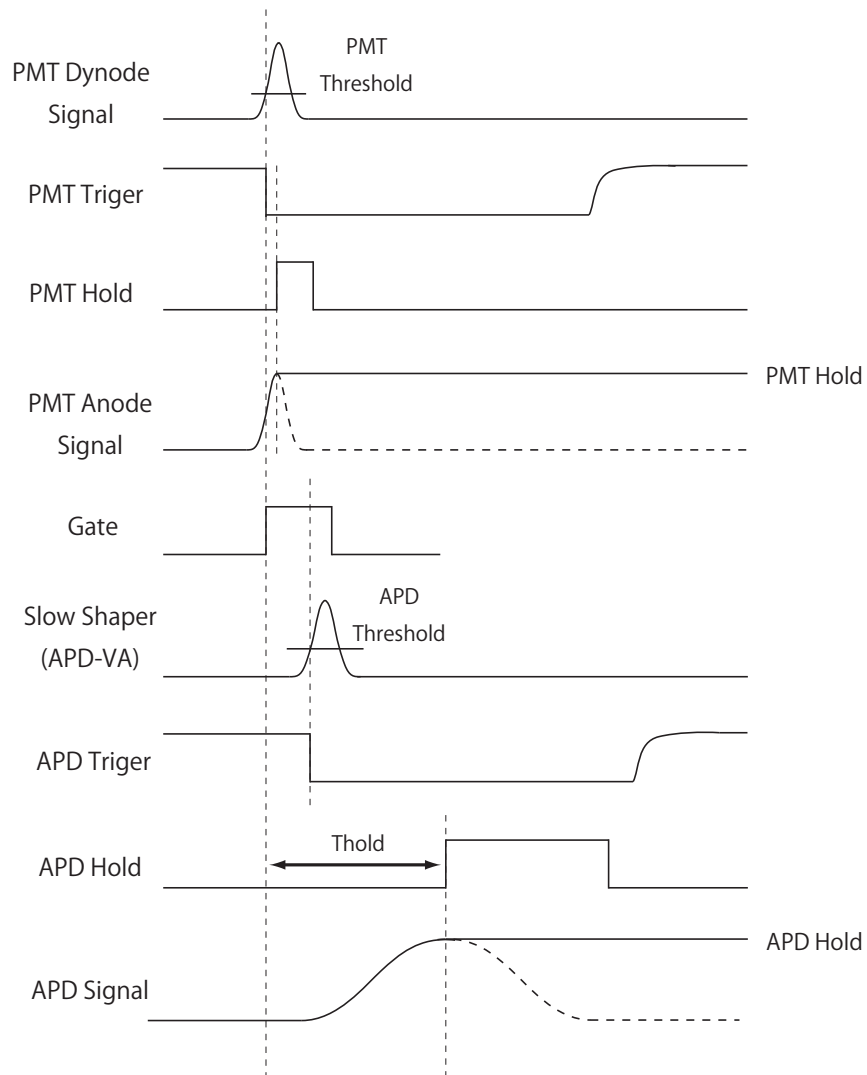


図 3.8: コインシデンス測定時のトリガシーケンス。最初に、シンチレータの減衰時定数の短いPMTのダイノード信号が入力され、トリガが立ち上がる。その時点から一定時間だけゲート信号が開き、この間にAPDのトリガ信号が検知されると、コインシデンスイベントと判定する。

第4章 MAPMT+プラスチックシンチレータのクロストーク特性評価

4.1 目的

前章で説明した通り、MAPMT 単体のクロストークは、せいぜい数%と小さいものであり、単体で位置検出器として使用する際には、問題にならない。一方、TSUBAME 偏光計では、MAPMT とプラスチックシンチレータを合わせて使用するため、それとは異なるクロストーク特性を持つ。クロストークによって信号の大部分が他のピクセルに漏れ出すと、ピクセル間での正確な波高値比較が難しくなり、位置決定精度が落ちてしまう。そのため、クロストークによって検出した値が本来の物理現象とどれだけずれるのかを、事前に見積もっておく必要がある。本章では、偏光計の性能評価実験前に行った、クロストーク特性の評価実験について説明する。

4.2 セットアップ

本実験では、MAPMT1 個とプラスチックシンチレータ 16 本を使用して、16ch のシンチレーション検出器をつくった。プラスチックシンチレータの光子入射面側には、直径 1mm 程度の穴を開けたタングステンシート (タングステン粉末と樹脂の複合材量) を設置した。タングステンシートは厚さ 3mm、比重が 11.5 程度であり、鉛と同程度の阻止能を持つため、ほとんどシートの穴のみからしか光子が通過しないと考えられる。そこで、タングステンシートの上に ^{241}Am 線源を設置し、シートの穴を通して特定のシンチレータ 1 本のみを線を当て、クロストークによって漏れ出したシンチレーション光が、どのように検出されるかを調べた。(図 4.1)

MAPMT、MAPMT のプリアンプ回路、およびプラスチックシンチレータは、偏光計の試作機に実際に使用するものを使用した。プラスチックシンチレータは底面が一辺 6.5mm の正方形、長さ 49mm の直方体である。1 本ごとに反射材を巻いてシンチレーション光が他のシンチレータに漏れ出さないようにし、最後にテフロンテープでまとめて、1 つの大

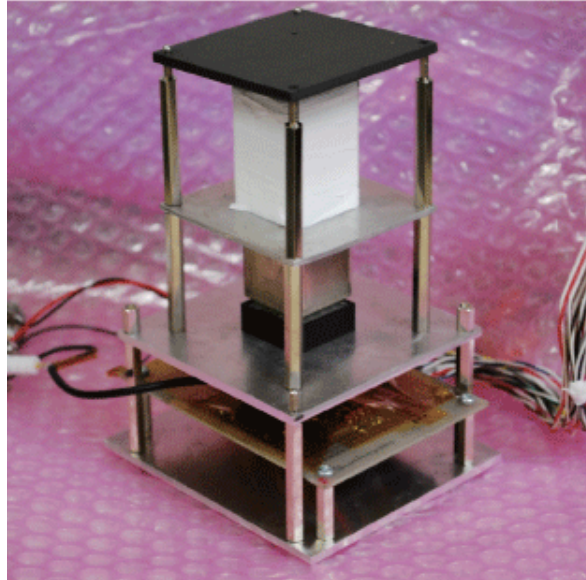


図 4.1: クロストーク特性評価のセットアップ。一番上の黒い板がタングステンシート。タングステンシートには穴が開いており、その上に ^{241}Am 線源を置く。

きな直方体を成した。シンチレータの片方の底面には、反射材、テフロンテープが巻かれておらず、そこで MAPMT の光入射面と接合する。接合面にはオプティカルグリスを塗り、シンチレータ・検出器間の接着と光量増加を狙った。接着面の周りをテフロンテープで巻き、最終的にはシンチレータ・MAPMT で 1 セットのものとして取り扱った (図 4.2)。MAPMT には高圧電源から -820V を印加した。

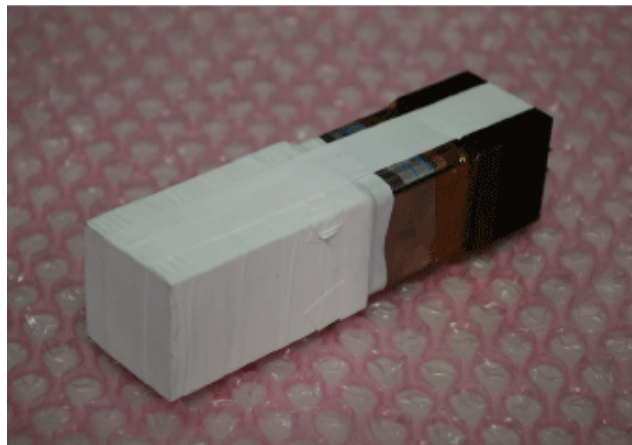


図 4.2: MAPMT と光学的に接合したプラスチックシンチレータ。中には反射材を巻き、外側をテフロンテープで巻いて固めてある。

次に、図 4.3 に信号処理の回路図を示す。

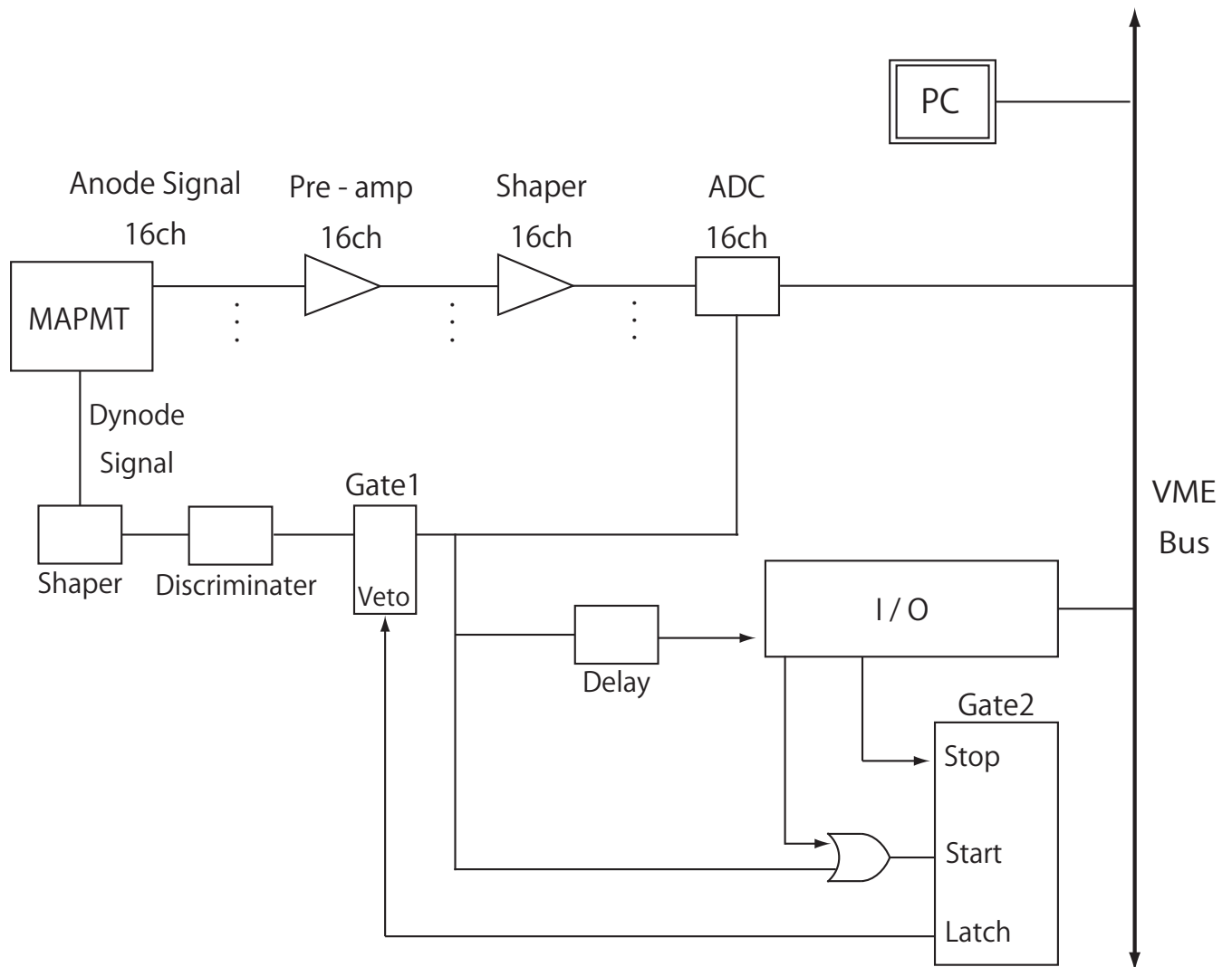


図 4.3: クロストーク測定のセットアップ。検出信号はアノードから読み出す。ダイノード最終段からの信号を利用して、サンプルホールドやデータ読み出しのためのゲート信号をつくる。

検出信号は、アノードから取り出し、8ch プリアンプ (クリアパルス 557 型)2 個、16ch 整形アンプ (クリアパルス 4066 型) で増幅・整形したのち、8chADC (豊伸電子 PHADC V006)2 個に入力した。整形アンプは内部の抵抗・コンデンサを変えることによってゲインと時定数が各チャンネルごとに設定できる。今回はどちらの値も全チャンネルで統一し、ゲインを 20 倍、時定数を $1\mu\text{s}$ に設定した。ADC の出力は VME バスを介して、PC に保存した。また、プリアンプからプリアンプまでの信号読み出しの回路は、自作のものを用いた。

一方、ダイノード信号からはトリガ信号をつくる。ダイノード信号がスレッシュホールド電圧を超えると、ゲート信号がつけられる。ゲート信号は3分割されて、以下の用途に使用される。

1. ADC のサンプルホールド
2. AD 変換終了後のデータ読み出し

ADC の AD 変換に時間を要するので、AD 変換終了後にデータを読み出すように、Delay させて検出トリガよりも遅い信号をつくる。今回の測定では、Delay を $10\mu\text{s}$ に設定した。

3. 自身の Veto 入力

ゲート信号が開いている間に、他の信号が入力すると波高が変化してしまうので、トリガ検出からデータ読み出しが完了するまで、ゲート回路の入力を停止させる。そのために、もうひとつゲート回路を用いる。以後、初段のゲート回路を Gate1、次段のゲート回路を Gate2 とする。Gate2 のスタート入力は、Gate1 の出力に繋がっており、Gate1 からゲート信号が出力されると、Latch 信号を出力する。これは、Gate1 の Veto に入力されるので、Gate2 の信号がストップされない限り、Gate1 は入力を受け付けない。データ読み出しが終了すると、I/O から Gate2 のストップ入力は信号が流れ、Latch 信号が停止する。その後、再び Gate1 からのゲート信号を待つことになる。

4.3 測定

以上のセットアップを用いて、特定のチャンネルのみに 線が当たる状況での全チャンネルの信号を記録する。これを 16ch 分行った。測定は、1ch につき 600 秒行った。

4.4 結果

まず、特定のチャンネルのみに 線を入射させた場合の、スペクトルを示す。図 4.4 は、7ch に当てた場合である。なお、図 4.4 は、事前に測定された MAPMT のゲインデータを元に、規格化してある。

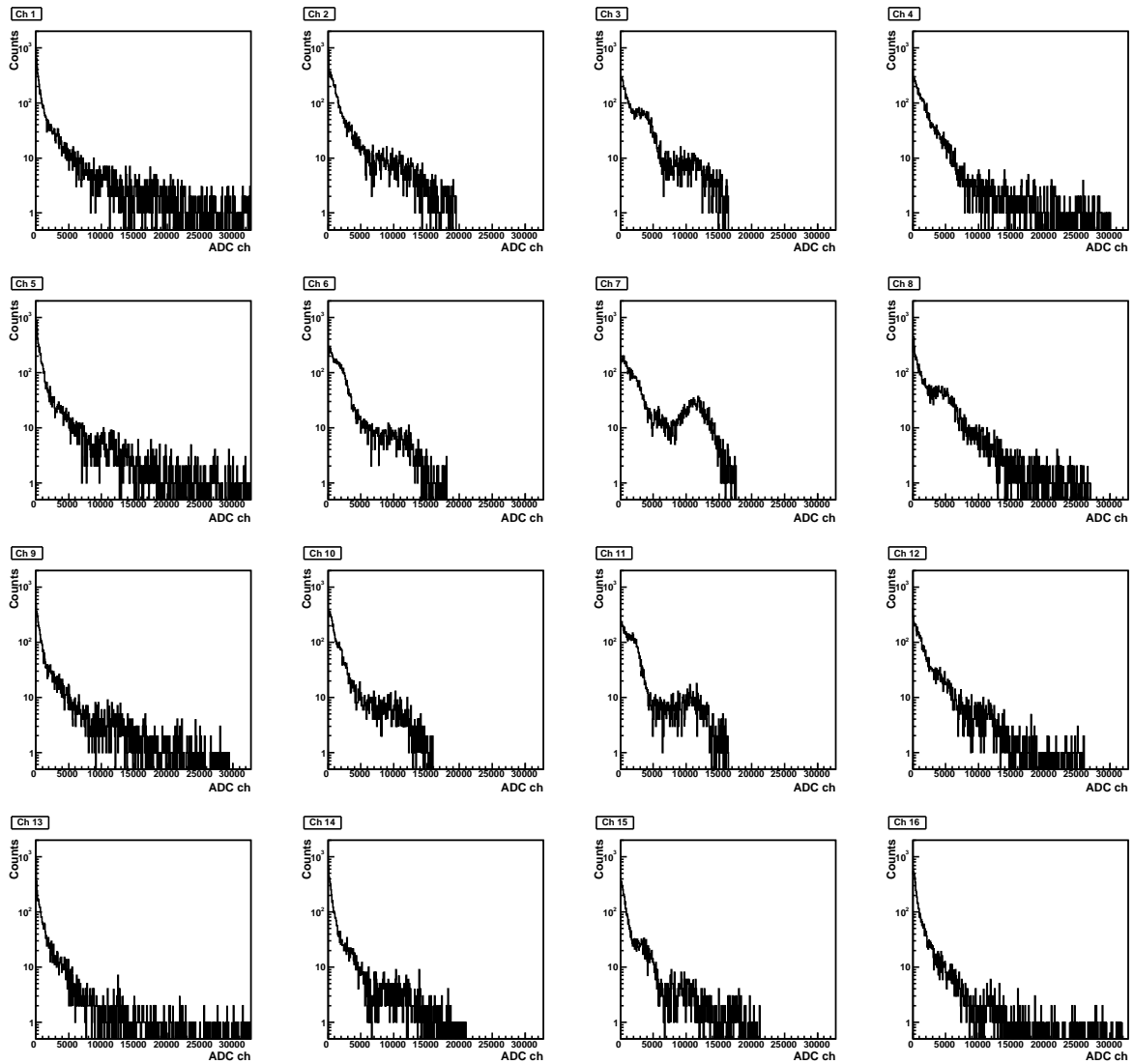


図 4.4: 16ch MAPMT のスペクトル。横軸は ADC 波高値、縦軸はカウントである。7ch に光電吸収によるピークが見える。

次に、解析に必要なイベントだけを取り出す。本実験では、クロストーク特性によって、測定値にどのような影響が出るのかを定量的に調べることが目的である。そのため、検出されるべき信号の大きさが予めわかっていることが必要である。 ^{241}Am から放射される線が、プラスチックシンチレータ内で起こす相互作用には、光電吸収とコンプトン散乱がある。そのうち、コンプトン散乱によって落とされるエネルギーは単一ではないので、今回の測定の定量的な指標として用いることができない。よって、ここでは、線を入射させたチャンネルで光電吸収が起こったイベントのみを取り出す。

図 4.4 を見ると、入射させたチャンネル (7ch) のスペクトルに、光電吸収のピークが見える。これをガウス関数を用いてフィッティングし、取り出す範囲を決める。低エネルギー側はノイズが近いのでピークから 1σ 、高エネルギー側ではピークから 3σ の範囲を光電吸収のイベントとした。入射したチャンネルで光電吸収が起こったイベントのみをプロットしたスペクトルは図 4.5 のようになる。

すると、図 4.5 から、光子が入射していないはずのチャンネルにも、ピークが出来るのがわかる。しかし、これがシンチレーション光の漏れ出しによるピークだと考えると、上手く説明がつく。すなわち、光子が入射したチャンネルで発生した信号が、クロストークによってある割合で漏れ出し、隣や斜めのチャンネルで検出されていると考えられる。

ここから、クロストークの定量的な評価、および偏光計の位置検出に影響する MAPMT の光量分布の算出に移る。

4.5 クロストーク特性

一般的に、MAPMT の n ピクセルのクロストークの大きさ ($cr(n)$) は、光を入射したピクセルの信号 ($g(n)$) と、その周りのピクセル m の信号 ($g(m)$) の平均を用いて、以下のよう求められる。[1]

$$cr(n) = \frac{\sum g(m)}{k \times g(n)} \quad (4.1)$$

ここで、 k はピクセル n を取り囲むピクセルの数である。いま、全ての光電吸収イベントに対し、 $cr(n)$ を求めて、ヒストグラムにプロットすると、図 4.6 のようになる。

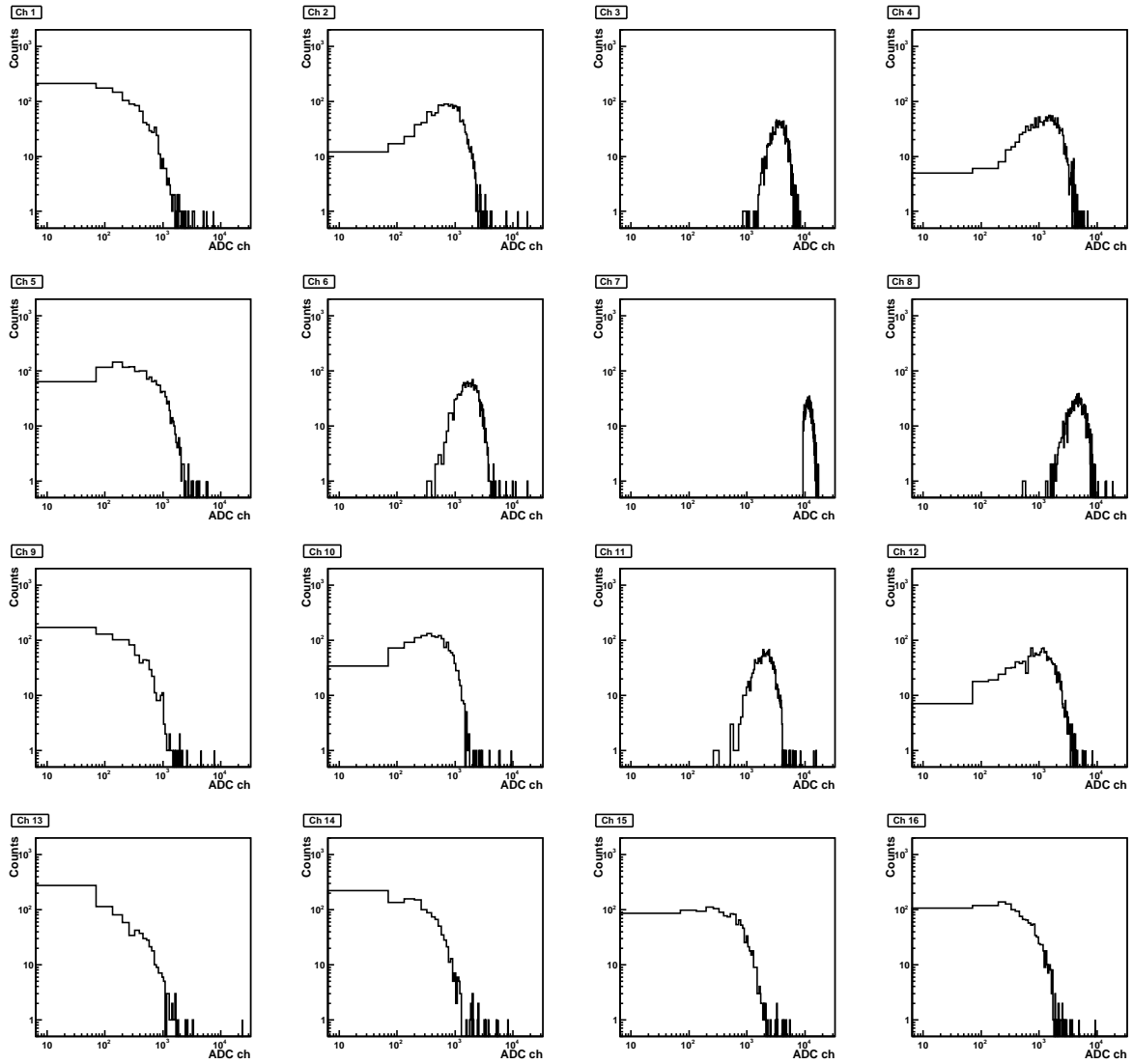


図 4.5: 光電吸収イベントのみをプロットしたスペクトル。横軸はADC 波高値の対数、縦軸はカウントである。7ch の周りのチャンネルには、クロストークによるであろうピークが見られる。

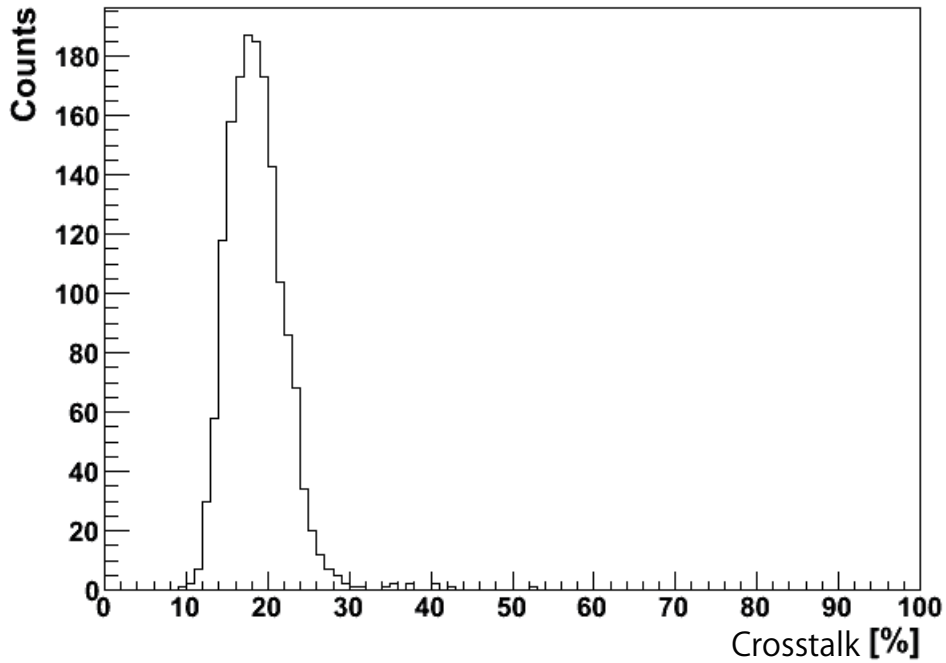


図 4.6: 7ch のクロストーク。横軸はクロストーク (%), 縦軸はカウント値である。

これをガウシアンでフィッティングすると、7ch でのクロストークが $18.2 \pm 3.4\%$ と求まった。これを全チャンネル分求めると、MAPMT とプラスチックシンチレータのクロストークの大きさは、図 4.7 のようになった。

				対応 ch			
23.6	17.2	18.8	13.6	1	2	3	4
19.7	16.5	18.2	18.7	5	6	7	8
20.7	17.5	19.8	20.1	9	10	11	12
20.6	17.4	20.8	21.3	13	14	15	16

[%]

図 4.7: 全チャンネルのクロストーク特性

4.6 光量分布

前節で、MAPMT とプラスチックシンチレータのクロストーク特性は求められた。次に、クロストークによって、シンチレーション光が各チャンネルにどのように分布するかを考える。

クロストークによって漏れ出したシンチレーション光が、他のチャンネルで信号として観測されるとすると、1 イベントで各チャンネルが検出した信号の和が、もともと検出されるはずだった信号の大きさといえることができる。(ただし、これはノイズが信号に比べて無視できるほど小さいと考えている。) この考えを使って、1 イベント毎に信号の和を計算し、各チャンネルで検出した信号がその和に対してどれだけの割合を占めるのかを調べた。すなわち、あるチャンネルで 100 のシンチレーション光が発生した場合、各チャンネルでどれだけの光が検出されるか、という値である。先ほどの 7ch 入射の例で、この割合を横軸にしてスペクトルを書いたものが図 4.8 になる。

それぞれのチャンネルでのピークをガウス関数でフィッティングして中心値を求めると、これは光の漏れ出す量の平均値になる。今まで見てきた 7ch 入射の場合、結果は図 4.9 のようになる。

これが、特定のピクセルでシンチレーション光が生じた際に、クロストークの影響を受けて、最終的な信号がどのように検出されるかを示す分布である。本論文では、これを MAPMT・プラスチックシンチレータの「光量分布」と呼ぶことにする。これを、16 ピクセルに対して、測定した結果は図 4.10 のようになる。

求めたこれらの分布は、クロストークに対してのシンチレータ・MAPMT のレスポンスとして、第 7 章 性能評価実験のデータ解析で、コンプトン散乱の散乱位置決定で利用する。

4.7 考察

光量分布の特徴

図 4.10 から、入射光子によってシンチレーション光が発生したチャンネル(図中の赤枠)でさえ、発生した信号の 40~50%程度しか検出できていないことがわかる。その他の信号は、1 つ隣のチャンネルに 7~13%ずつ、斜め隣のチャンネルには 2~6%ずつ漏れている。斜めより隣のチャンネルに多くの光が漏れ出しているのは、シンチレータで生じたシ

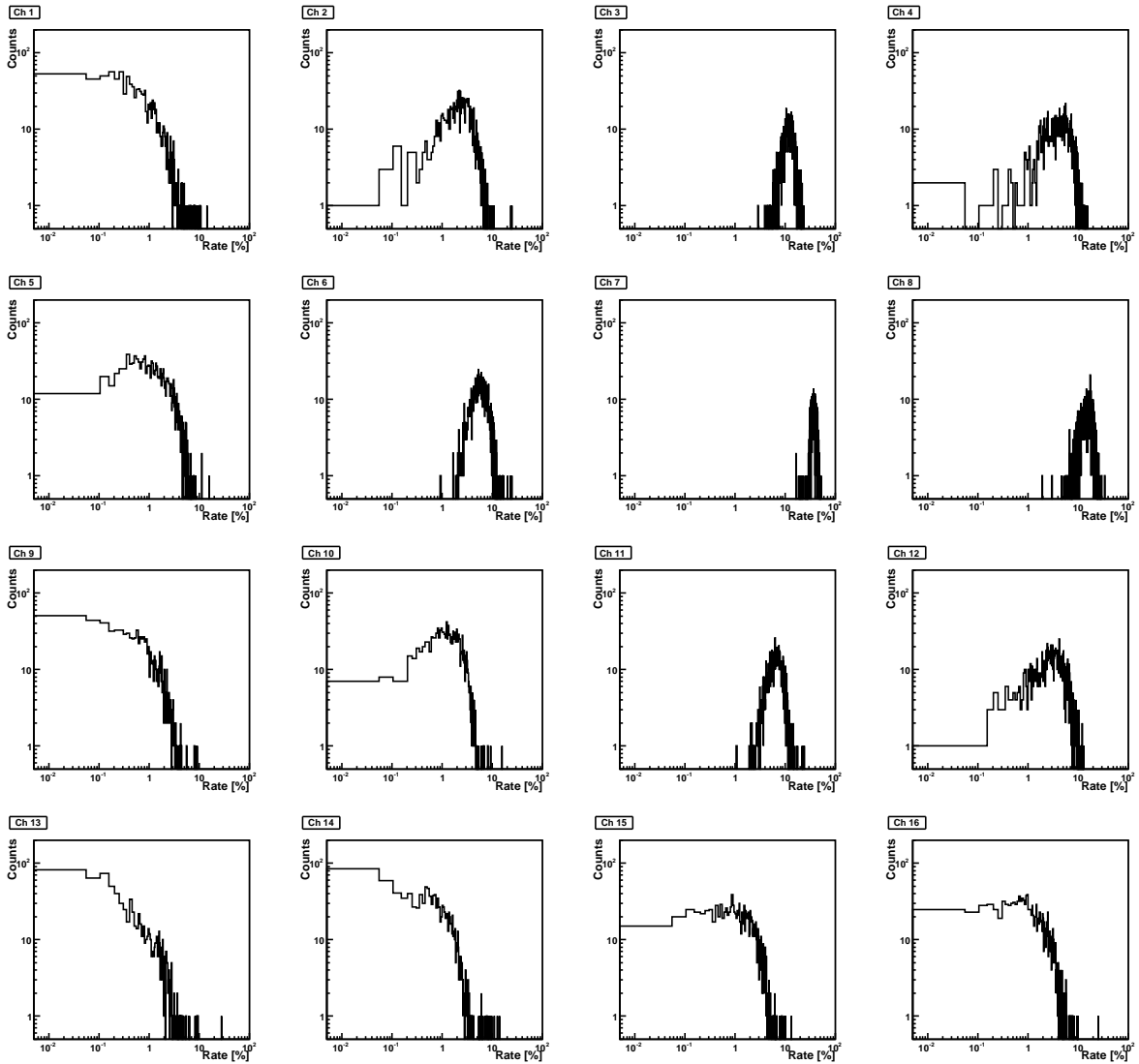


図 4.8: 全信号の和に対する、各 ch での検出信号が占める割合。横軸は割合 (%)、縦軸はカウントである。各ピークを中心値が、そのチャンネルに対して漏れ出したシンチレーション光の割合の平均と言える。

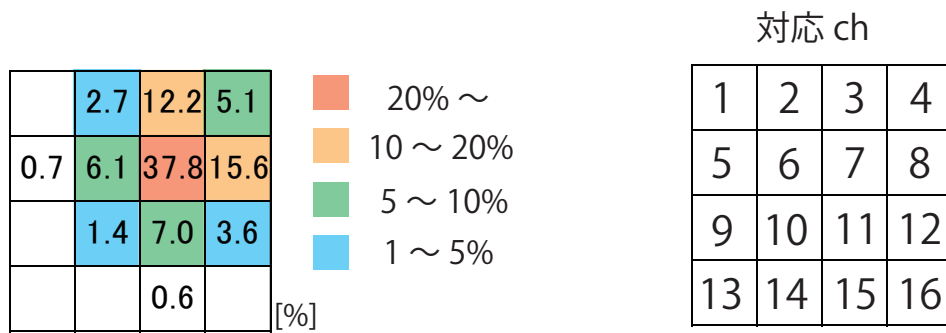


図 4.9: 7ch の光量分布。赤いマスが 7ch である。光量に応じて、色分けしてある。色分けに関しては、図 4.10 を参照。

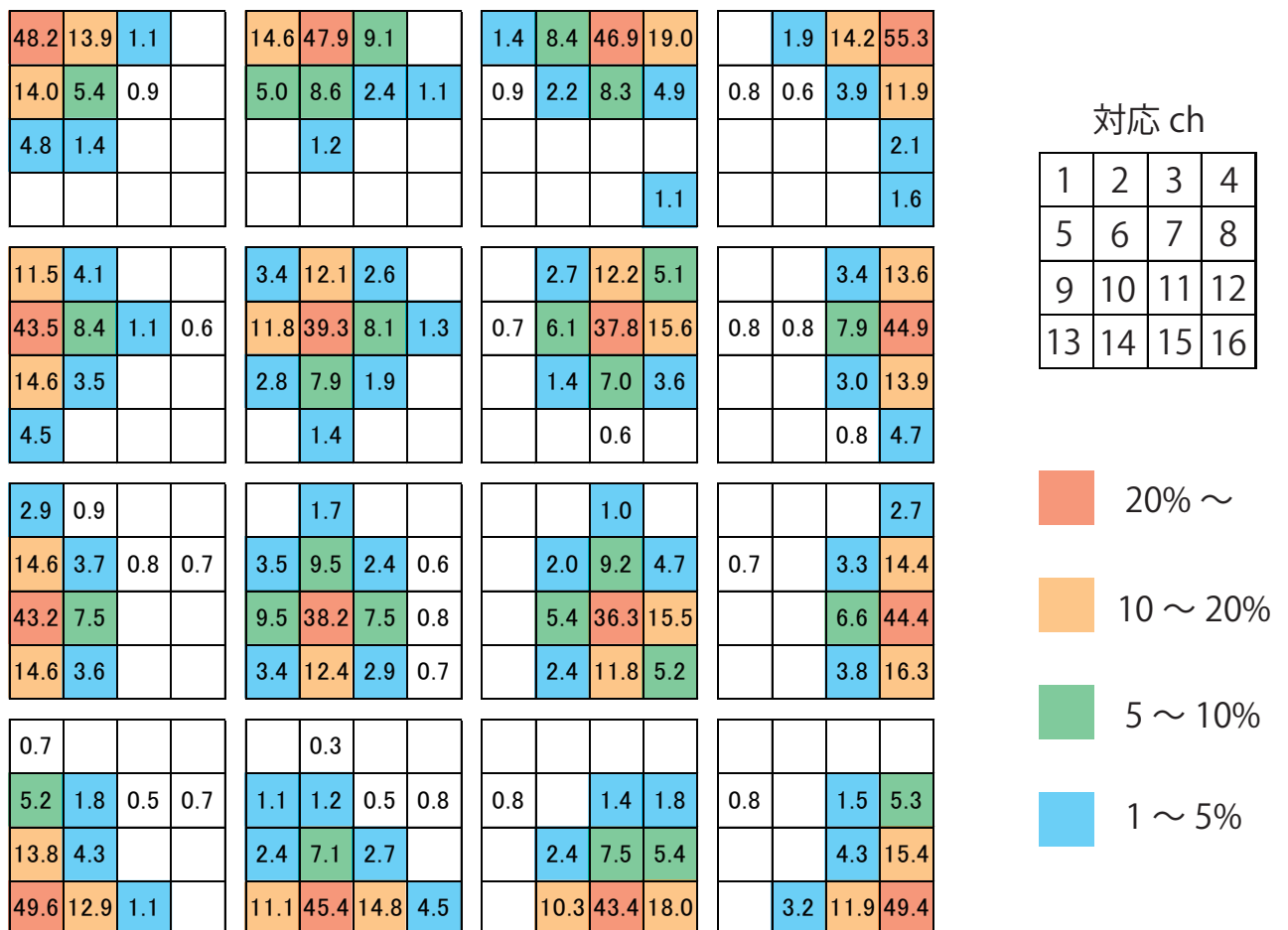


図 4.10: 全チャンネルの光量分布。単位は%。光量に応じて、色分けしている。

シンチレーション光が、MAPMTの入射窓から光電面に入射する際に放射状に広がるため、距離が近い上下左右のチャンネルに多く入射するからだと思われる。

また、全体的に、壁際のチャンネルは中心の4チャンネルに比べ、入射する光が多くなる傾向が見られる。これは、シンチレーション光が入射した際に、PMT内部の壁に衝突した光子が反射して、それ以上広がらないからだと考えられる。

クロストーク改善の方法

MAPMT およびプラスチックシンチレータを合わせて使用した場合、クロストークが生じる原因としては、以下の2つが考えられる。

1. 入射窓と光電面の間での光子の広がり
2. ダイノード部分での増幅電荷の広がり

このうち、ダイノード部分での増幅電荷の広がりによるクロストークは、たかだか～4%^[1]であり、それほど大きくはない。また、これはMAPMTの内部構造に影響されるため、同じ機器を使う限り、改善することは難しい。

一方、今回の測定でのクロストークには、入射窓と光電面の間での光子の広がりが大きく寄与していると考えられる。シンチレーション光がシンチレータの端面から放射状に出ていくとすると、MAPMTの入射口から光電面に辿り着くまでに、別のチャンネルへの漏れがどうしても生じてしまう。シンチレーション光の漏れを少なくするためには、ライトガイドを用いて光を収束させる方法が考えられるが、ライトガイドによる光の吸収や、部品が増えることで構造が複雑になることなど、長所・短所の見極めが難しいと思われる。

第5章 偏光計の試作

河合研究室では、以前から偏光計のシンチレータ配置のシミュレーションや、読み出し回路の製作、使用検出器の性能評価などを行ってきた。今回の性能評価実験は、これらシミュレーションによる性能予想の検証や、現在の基板、検出器でのデータ取得の実現を目的としたものである。この性能評価実験に向けて、偏光計の試作を行った。

5.1 試作偏光計の構成

試作偏光計の基本構成は、3章で説明した偏光計の検出器構成とほぼ同じである。よって、異なる部分のみを以下に挙げる。

- 検出器・シンチレータの数

試作偏光計では、シンチレータおよび検出器がフライトモデルでの数よりも少ない(表 5.1 参照)。そのため、両シンチレータ間の距離が異なる。また、吸収体が囲む角度が 180° になるので、検出器を回転させながら実験を行う必要がある。

表 5.1: フライトモデルとプロトタイプ 比較

機器	フライトモデル	プロトタイプ
APD	32	16
CsI シンチレータ	32	16
MAPMT	4	1
プラスチックシンチレータ	64	16

- APD の大きさ

今回の偏光計試作では、APD として浜松ホトニクス製 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ APD(S8664-33-8825(X)) を使用した。CsI シンチレータの端面が $6.5\text{mm} \times 10\text{mm}$ であることを考え

ると、光量としてはロスすることになるが、暗電流や静電容量によるノイズの大きさを検討した結果、3mm×3mmが最も良いと判断した。

5.2 試作偏光計のシールドケース設計

性能評価実験を行う上で、試作偏光計の検出器、および基板等を取りまとめるためのシールドケースが必要である。そのため、シールドケースの設計を行った。設計の際、シールドケースが満たすべき条件は、以下のようなものである。

- 現状のシンチレータ配置、基板形状に沿ったものであること

シミュレーションによる予測結果の検証や、APD-VATA および PMT-VATA を組み合わせたコインシデンス取得など、実験の目的に沿ったものであることが必要である。ただし、今回は試作であり、実験の簡略化を図るために、シンチレータおよび検出器の数を減らして実験した。

- 分解・組み立てがなるべく容易であること

実験を行う上で、シンチレータや検出器、基板等の取り外し、付け替えを頻繁に行うことが予想された。そのため、それらの操作がなるべく容易に行えることが重要である。

- エンジニアリングモデル以降の開発に再利用できる構造であること

今回の試作偏光計は性能評価実験のみで使用するため、実際に宇宙に打ち上げられるような強度にする必要はない。しかし、今後の偏光計開発を考える上では、今回の構造を元にした方が、効率や作業速度の点で良い。よって、上に挙げたような条件をクリアしつつ、構造的に強いものを考案した。

以上の条件を満たすようなシールドケースの設計を行った。設計には3D CADソフトのPro Engineerを使用し、製作はシーアイ工業に依頼した。まず、試作偏光計の断面図を示す(図5.1)。

以下で、各部分の設計の特徴を説明する。

- 底面(図5.2)

KEKでの実験では、偏光計を15°ずつ回転させながら測定を行う予定であった。そのため、回転台などを使用しやすいように、円形を採用した。底面の外周付近には、

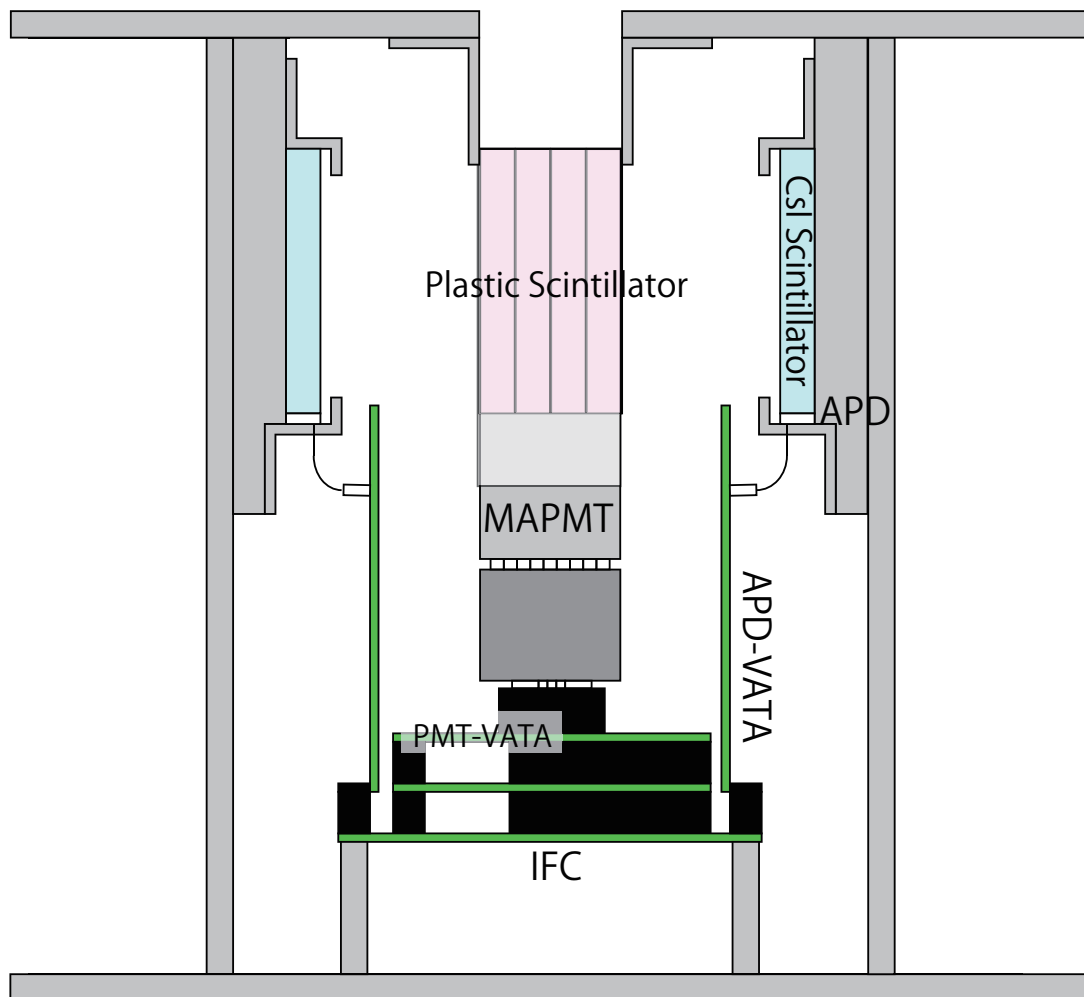


図 5.1: 試作偏光計の断面図。試作であるため、MAPMT は 1 個、プラスチックシンチレータは 16 本と、フライトモデルよりも少ない。また、図では表記していないが、APD は 16 個、CsI シンチレータは 16 本になっている。

15°刻みで穴を開けてあり、最小回転角 15°きざみで方位角の調整を行うことが可能である。

- 壁面 (図 5.3)

壁面は 4 枚の板を組み合わせる方式を採った。これにより、APD・CsI シンチレータ用ソケット (後述) や、APD-VATA 基板を 1 枚 1 枚に取り付け、最後に統合することが可能になった。4 枚の板は互いに支えあう形で固定でき、底面からもネジで固定できるようになっている。

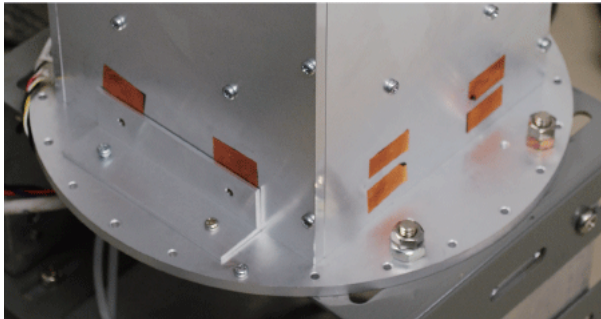


図 5.2: 底面

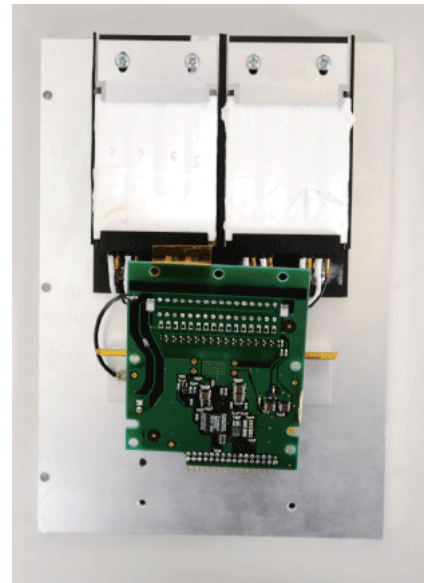


図 5.3: 壁面

- APD・CsI シンチレータ用ソケット (図 5.4)

CsI シンチレータと APD を 4 個ずつを 1 つのブロックとして管理できるように考案した。壁面への固定用にネジ穴を持つ厚い背面と、シンチレータおよび APD を上下から固定するための留め具 2 つからなる。下方の留め具には、APD の足が出るように長円形の穴が開けてある。また、APD に印加される高電圧を考慮して、背面および下方の留め具は、黒アルマイト処理 (酸化アルミニウムの被膜) をし、絶縁するようになっている。これらによって、吸収体系の取り外しや配置変換が容易になった。

- 蓋 (図 5.5)

蓋も、底面と同じ理由で円形にしてある。また、入射口の周囲に L 字金具 4 つからなる筒を構成し、この筒でプラスチックシンチレータの固定を行った。

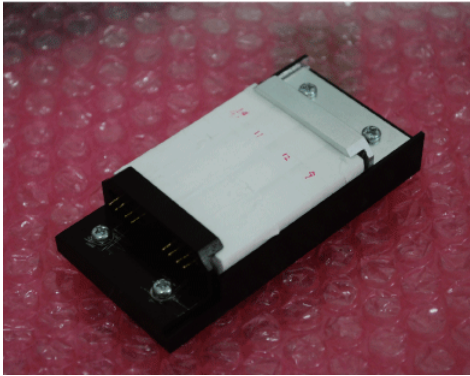


図 5.4: APD・CsIシンチレータ用ソケット

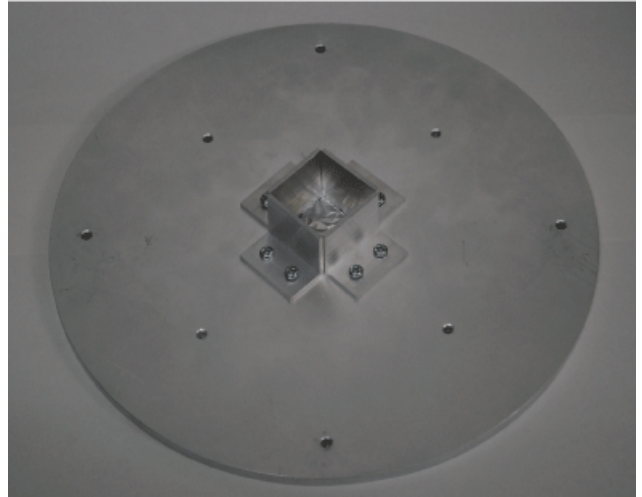


図 5.5: 蓋

- 基板

APD-VATA 基板は壁面、PMT-VATA および IFC 基板は底面に、それぞれ固定できるようにになっている。これにより、APD と MAPMT とを別々に用いて測定が行えるようになっている。

- 配線 (図 5.6)

APD と APD-VATA 基板の接続は、ケーブルを使って行った。その他の外部に出ていく配線は、性能評価実験での偏光計の回転の影響をなるべく受けないように全て底面から出すようにした。

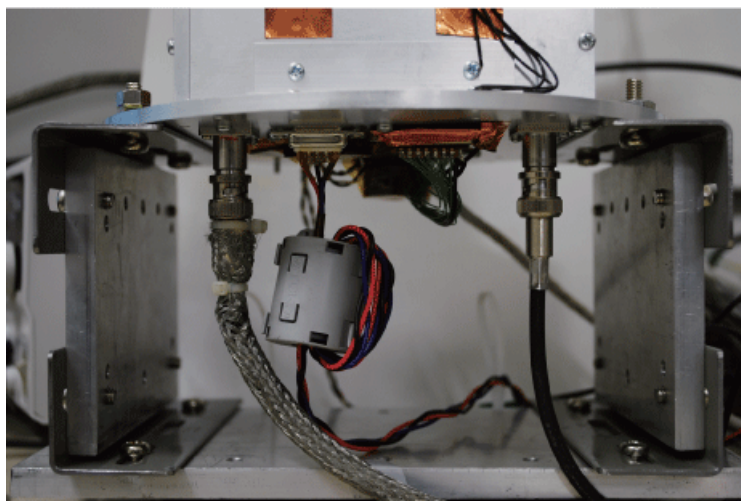


図 5.6: 試作偏光計の配線

これらシールドケースは、素材としてアルミニウム (A5052) を使用し、底面、壁面、蓋は厚さを 5mm とした。また、電氣的シールドとして用いるため、導通性のあるアロジンメッキを使用している。

5.3 今後の改善点

この試作偏光計シールドケースは、次章で述べる KEK での性能評価試験に使用された。また、各検出器、回路基板のキャリブレーションにも使用した。それらの過程で生じた、構造上の難点について挙げ、改善案を検討する。

質量

今回は、試験中での耐久性、およびバックグラウンドやノイズを抑えるために、シールドケースのほとんどの部分で 5mm のアルミを採用した。これにより、遮蔽性、および強度は十分な性能を発揮したが、全体の質量が 3kg 以上になり、非常に重かった。さらに、フライトでは、軌道上の荷電粒子を落とす目的で、パッシブシールドとして、錫や鉛などを偏光計外壁に配置することを考えており、アルミと比較しての質量増加が見込まれる。そのため、今後は、軽量化した構造を考案する必要がある。

強度

一方、強度の点でも構造を見直さなければならない。実際に衛星に搭載する場合、衛星打ち上げ時の振動により、非常に大きな力がかかる。そのため、この力に耐え得るような強度を持つ筐体にしなければならない。また、振動によって偏光計内部の検出器やシンチレータの配置がずれることも考えられる。ずれが大きいと、検出器として動作しない、または性能が大幅に変化する、などの不都合が生じる。そのため、今回の試作以上の検出器把持機構が求められる。特に、MAPMT とプラスチックシンチレータの固定は重要な問題になると思われる。

機能性

試作偏光計のシールドケースは、実験での利便性を考え、APD と CsI シンチレータを 1 つのソケットにまとめ、管理した。これは、APD などの交換の際には非常に有効だった

が、壁面から分離させるために、背面を厚くするなどの工夫が必要だった。しかし、フライトモデルを考えると、APD 固定などの様々な構造は、なるべく一体になっている方が、強度の点で有利である。また、軽量化にも繋がるなどの利点もある。一方、試験やキャリブレーションを行う上では、分解・組み立てが容易である方が良い。そのため、強度・重量と、利便性の兼ね合いを考えて、今後は設計する必要がある。

第6章 試作偏光計の性能評価実験

2009年12月、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光科学研究施設(PF)で我々は製作した試作偏光計の性能評価実験を実施した。この章では、性能評価実験のセットアップと、行った実験について述べる。データの解析、考察については、次章以降に回す。

6.1 実験施設

高エネルギー加速器研究機構(以下、KEK)の放射光科学研究施設(以下、PF)は、電子がシンクロトロン運動するときに放射されるシンクロトロン光を用いて、大強度のX線ビームをつくる放射光施設である。PFでは、1つのシンクロトロンリングから何本ものビームが引き出され、複数のビームラインが形成されている。ビームはさらに枝分かれして、各々の実験ステーションに送られる。

本実験で使用したのは、ビームライン14のステーションA(以下、BL14A)である。BL14は電子を鉛直方向に何回も蛇行させる垂直ウィグラーを光源としている。BL14Aでは、X線をシリコン結晶でブラッグ反射させて、単色光を作るようになっており、鉛直方向に強く偏光したX線ビームが得られる。エネルギー領域は、使用する結晶の種類によって変わり、今回使ったSi(553)では23.0~82.7keVである。ビームの偏光度は正確にはわかっていないが、2008年2月時点で $89.7 \pm 0.6\%$ (50keV)であるという報告がある[3]。

6.2 セットアップ

全体のセットアップ

BL14Aの実験ステーションの作業ブースは、金属壁で覆われた3m四方程度の部屋になっている。今回は、ブース内に偏光計とその台座になる赤道儀、検出器に印加する高圧電源が入ったNIMビン、および回路基板に電源を供給する安定化電源を設置した。その他のVMEラック、トリガ信号モニタ用のオシロスコープは外に置き、ブース内とはLEMO

ケーブル、LAN ケーブルなどで信号をやり取りした。また、ブース内は空気が籠りやすいため、温度が上がって APD の性能が大きく変化しないようにクーラーを設置し、排気はブース外に出ていくように誘導しながら常に稼働しておいた。これにより、ブース内の気温はおよそ 19℃ に保たれていた。

図 6.1 に、ブース内の様子を示す。

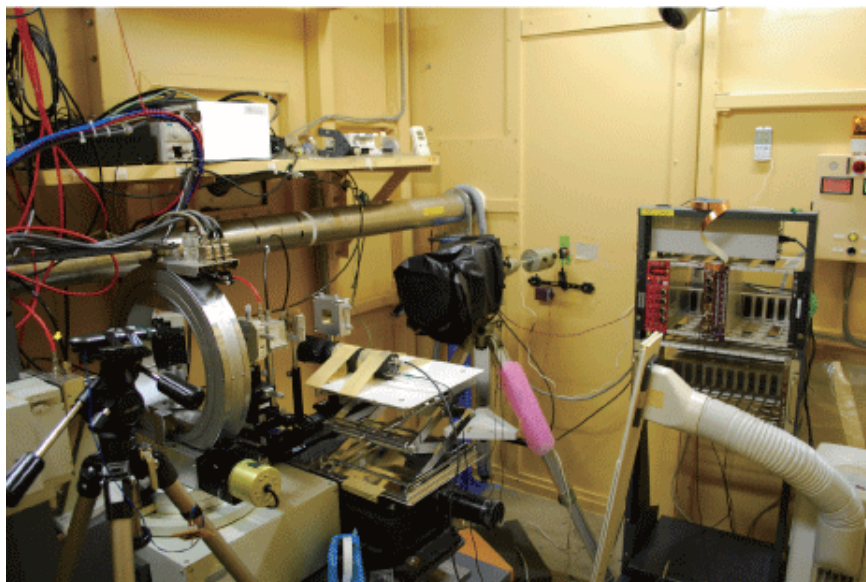


図 6.1: BL14A 実験ブース内の様子。左側にビームライン、中央奥に偏光計と赤道儀、その右隣に NIM のラックとクーラーが置いてある。

今回は、偏光計を回転させながら測定を行うので、回転できる台座として赤道儀を使用した。赤道儀はもともと望遠鏡を設置するための道具だが、回転軸が 2 軸ある、回転角度の目盛が付いている、偏光計の重さ (~ 3kg) にも耐えられるなどの利点があり、簡易的な土台として利用することにした。赤道儀に偏光計を設置するために、予め実験室で固定具を作製しておいた (図 6.2)。固定の際に、固定具部品および固定具の取り付け位置をずらすことで、偏光計の回転軸合わせなどの調整ができるようになっている。

偏光計の傍には、NIM のラックを置き、ここから APD および MAPMT に高圧電源を供給した。また、その上には安定化電源を置き、こちらは回路基板の電源供給に使用した。

ビームは 2 つのコリメータによって、直径 1mm 程度のビームとして照射される。コリメータの間にはタングステンや鉛の薄板を設置できるホルダがあり、薄板の厚さを変えることでビームの強度を調節できるようになっている。本来、NaI シンチレータと光電子増倍管を用いて、ビーム強度を測定する予定になっていたが、光電子増倍管の不調が原因で測定できなかった。また、ビームの入射位置と偏光計回転軸や入射位置の調整は、X 線感

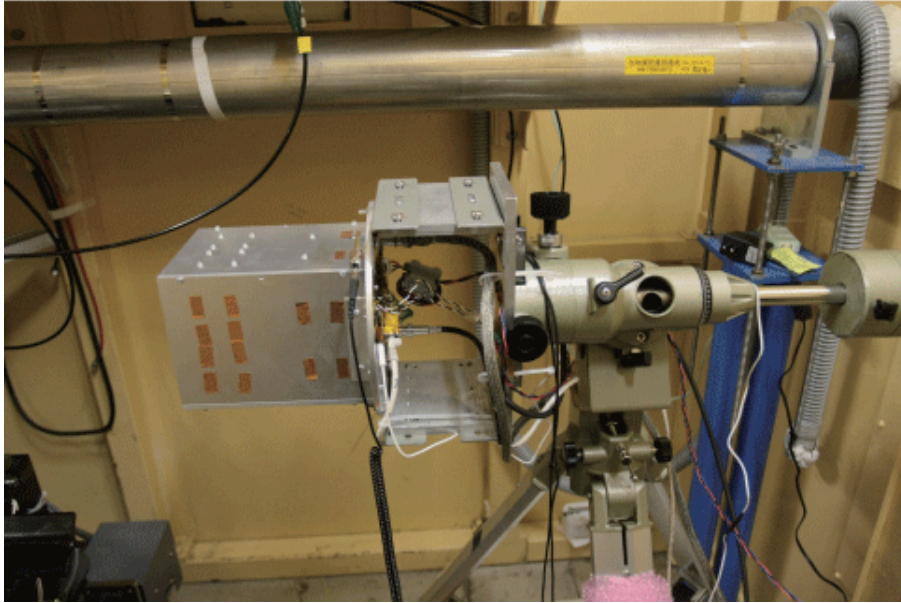


図 6.2: 赤道儀に取り付けた偏光計。偏光計と赤道儀の間には、固定用の土台が設置されており、電源線や信号線などの配線は土台の側面から外に出している。

光紙を用いて、目測で行った。

回路セットアップ

図 6.3 に性能評価実験での回路セットアップを示す。

1つの APD-VATA 基板で APD8 個の信号を処理し、APD-VATA 基板を 2 枚使用した。PMT はブリーダー回路、コネクタ変換基板を経由して PMT-VATA 基板と接続した。PMT のダイノード信号は PMT 単体測定時、およびコインシデンス測定時のトリガ信号として取り出していた。APD、PMT 共に VATA 基板を介して高電圧が印加された。VATA 基板はどちらも IFC に接続し、論理演算やサンプルホールドの設定は全て IFC 上で行った。今回の偏光計では、底面の裏側に I/O 基板が張り付いており、これを介して入出力が行われた。I/O は FPGA が搭載された VME-DP(クリアパルス製 80057C PMT-DataProcessor) に接続してある。我々が PC から実際に制御していたのは VME-DP までであり、それ以降 (I/O、IFC) は VME-DP 上の FPGA が全て制御していた。VME-DP は VME バスを介して Linux PC とデータ通信を行った。

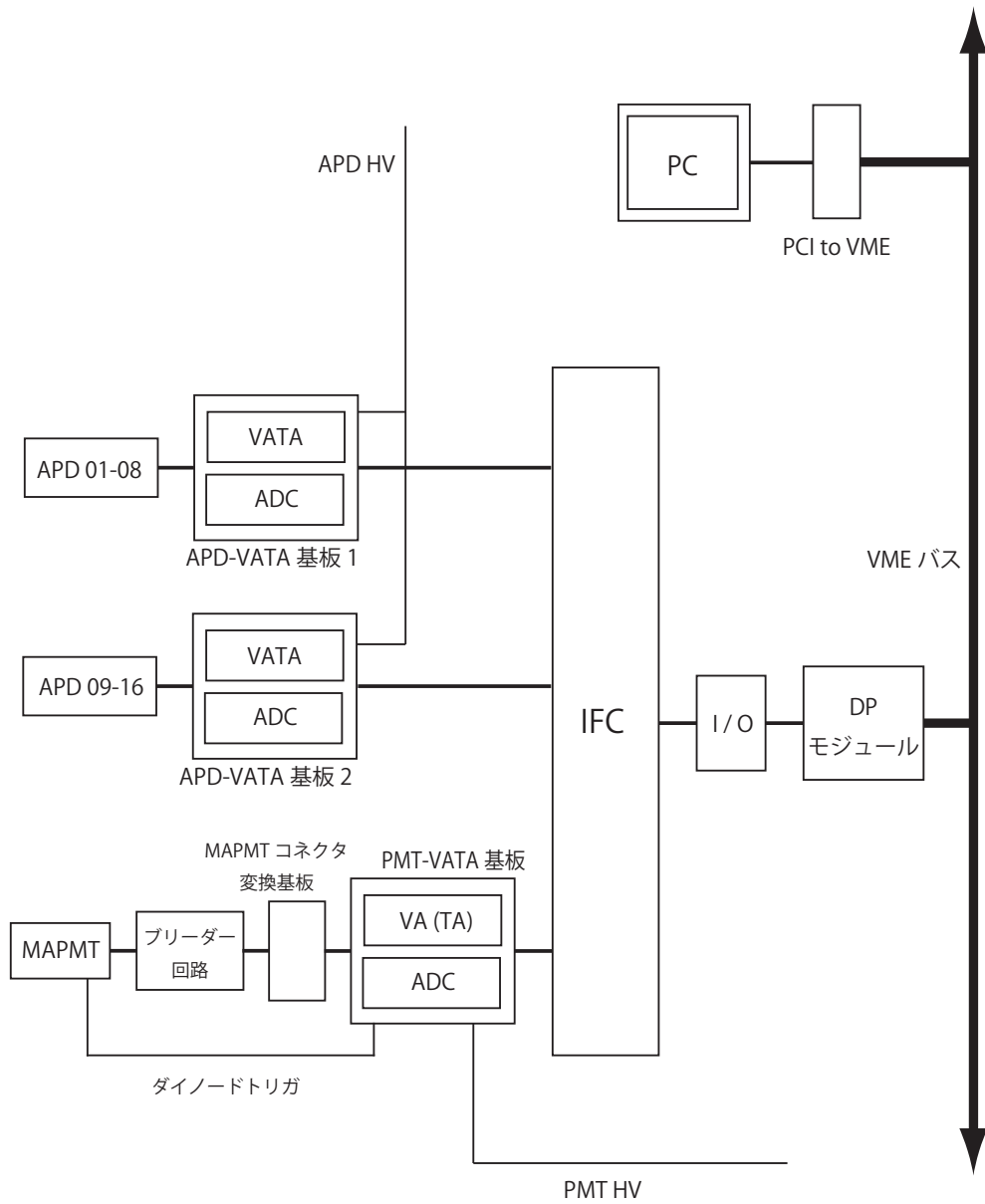


図 6.3: 性能評価実験 回路セットアップ

6.3 実施した測定

この節では、実際に行った測定について説明する。実験中に生じたトラブルについては、付録で詳しく説明し、考察を行う。

シンチレータ配置

今回の偏光計プロトタイプでは、シンチレータおよび検出器がフライトモデルでの数よりも少ない。そのため、APD系は 360° の範囲をカバーすることができない。したがって、今回の実験では図 6.4 のような配置で APD 系を設置し、 45° ずつ回転させながら測定を行った。この配置の場合、1 回の測定で散乱角によるカウントの変調を確認でき、最後に結果を統合すれば、 360° カバーした測定と同一のデータが得られるはずだからである。

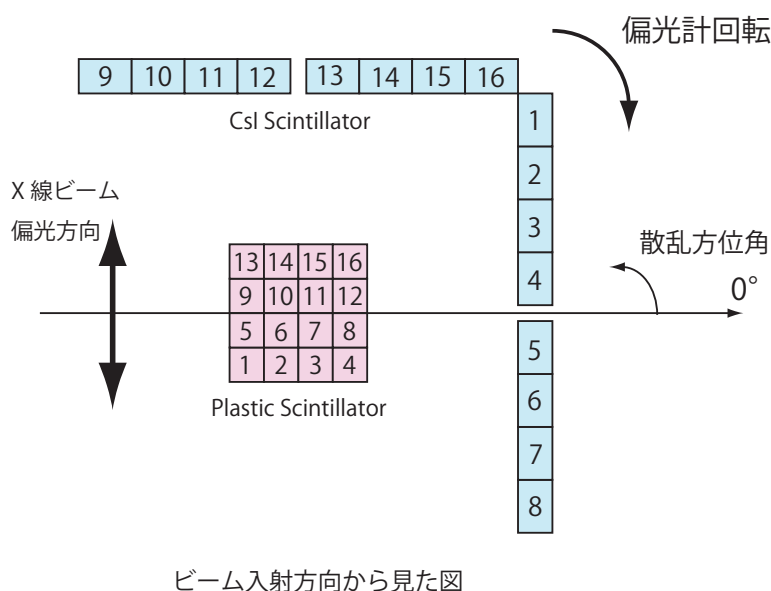


図 6.4: 試作偏光計のシンチレータ配置。番号は散乱体・吸収体のチャンネル番号。このシンチレータ配置によって、 180° の範囲をカバーする。この図の状態を偏光計の回転角 0° と定義した。また、この図のように散乱方位角を設定した。

6.3.1 垂直入射

偏光計中心付近のプラスチックシンチレータ 1 ピクセルを狙ってビームを当て、 45° ずつ回転させて測定を行った。回転角は $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲を 45° ずつ測定した。偏光計の回転

軸をビーム入射軸に合わせて、常に同じピクセルにビームが入射するように設定したが、回転軸が若干ずれていたらしく、偏光計を回転させていくと入射ピクセルが変化したことが、後の解析でわかった。

6.3.2 斜め入射

偏光計の回転軸をビーム入射軸に対して傾けて測定を行った。プラスチックシンチレータに斜めに入射させることで、ビームが複数のシンチレータを通過することになり、コンプトン散乱を起こす可能性のあるピクセルが複数になる。これがカウントの変調にどのような影響をもたらすかを調べるのが目的である。傾け方として、ビーム入射軸と偏光計回転軸のなす角が 15° の場合と 22° の場合の、2通り行った。

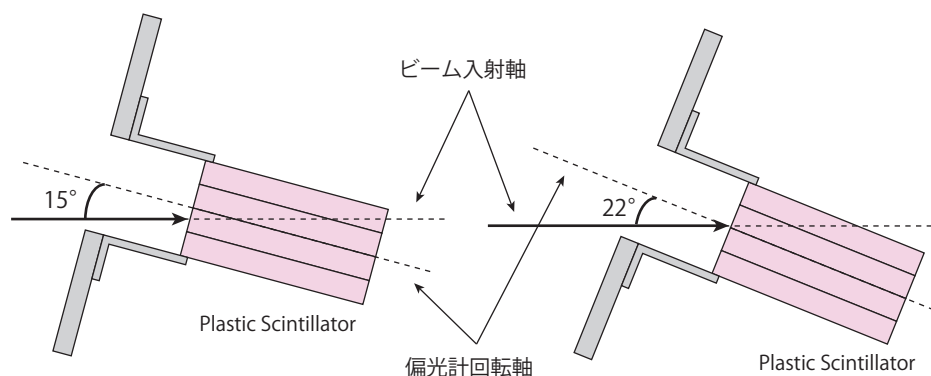


図 6.5: 偏光計回転軸に対し、ビーム入射軸を傾けて入射させた図。 15° 傾けたとき (左) は最低 3 本、 22° 傾けたとき (右) は最低 2 本のプラスチックシンチレータに、ビームが入射する。

6.3.3 外側ピクセル入射

偏光計の回転軸をビーム入射軸と合わせて、プラスチックシンチレータの外側のピクセルにビームを入射した。入射ピクセルによって、モジュレーションカーブがどのように変化するかを調べた。入射位置として、図 6.6 のように 2 通りの場合を選んで、実験を行った。

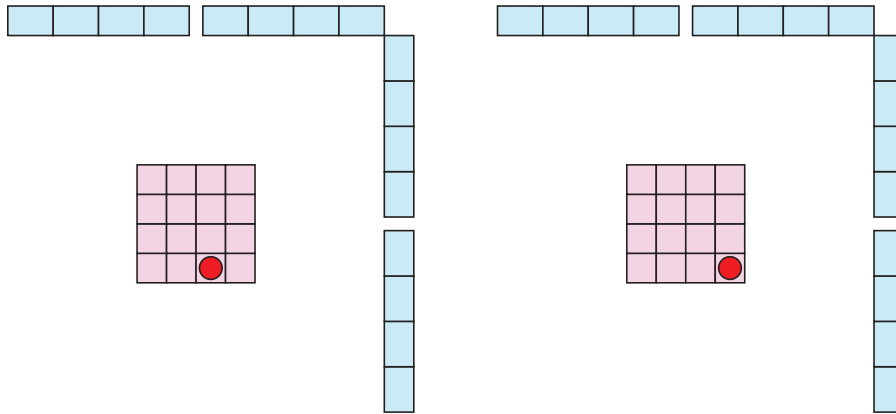


図 6.6: 散乱体上でビーム入射ピクセルをずらした図。左は中央の4つから1ピクセル、右は中央の4つから2ピクセル離れた図。

6.4 測定

前節までに述べたセットアップ、実験内容で、ビーム照射を行った。ビームのエネルギーは常に 82.5keV に固定した。ビームタイムの制限から、垂直入射は $0 \sim 360^\circ$ (45° おき)、斜め入射および外側ピクセル入射は $0, 30, 45, 60, 90^\circ$ での測定のみを行った。1回の測定時間は150秒に設定し、各回転角度で数回の測定を行った。また、ビームの強度をある程度見積もるために、偏光計を回転させた直後に、PMT 単体での計数測定を毎回行った。

6.5 結果

以上で述べたようなセットアップで実験を行い、APD と MAPMT のコインシデンスによるコンプトン散乱イベント取得に成功した。データの解析、および結果については、次章以降で説明する。

第7章 性能評価実験 解析

この章では、性能評価実験のデータ解析の手順、およびその結果を述べる。なお、今回は垂直入射のデータのみの解析を行った。

7.1 データ解析手順

本偏光計で得られるデータは、1 イベントごとに、MAPMT の波高値 16 ピクセル分、および APD の波高値 16 ピクセル分である。これらを用いてモジュレーションカーブを作成するには、以下の手順が必要である。

1. ペDESTAL補正・ゲイン補正
2. 散乱・吸収位置決定
3. コンプトン散乱イベント選定
4. 角度計算・補正
5. モジュレーションカーブ作成

各手順について、垂直入射で偏光計の回転角 0° でのデータを例にして、説明する。

7.1.1 ゲイン補正・ペDESTAL補正

ペDESTAL補正

APD および PMT の信号検出で使用している ADC は、各 ch でそれぞれ異なったペDESTAL (ゼロ点) を持つ。そのため、APD および PMT の信号を入力せずに ADC の出力値を記録し、これらを各 ch のペDESTAL値としてデータから差し引く。

ゲイン補正

各 APD、および MAPMT の各 ch にはそれぞれ固有の増幅率がある。そのため、同一エネルギーの光子が入射しても、異なった波高値を返す。よって、同じ波高値を返すように補正を行う。今回は、PMT のゲイン補正には ^{241}Am 線源を当てたときの光電ピーク波高、APD のゲイン補正には ^{57}Co 線源を当てたときの光電ピーク波高を用いた。ただし、APD のデータは、コインシデンスを用いて測定しており、プラスチックシンチレータで 1 度コンプトン散乱を起こした光子を検出しているため、ピークが広がる。そのため、APD のゲイン補正には不定性があるが、目安としては良い値だと言える。

エネルギー換算

APD および PMT で得られるのは、ADC の波高値である。そのため、以降の解析での理解を容易にするため、ADC の波高値をエネルギーに換算しておく。エネルギー換算には、ゲイン補正で用いたデータを再び使用した。ただし、MAPMT はクロストークの影響で、光電ピーク波高値と ^{57}Co 由来の線の光電吸収エネルギーとは対応しない。そのため、第 4 章で光量分布を求めたときと同様の考えを用いて、PMT の全チャンネルの信号の和が、光電吸収エネルギーと対応するとして、換算を行った。

不適切なイベントの除去

宇宙線検出による極端に大きな信号や、明らかに不自然なデジタルノイズなどは、この時点で取り除いておき、以降の解析では用いていない。

7.1.2 散乱・吸収位置決定

検出信号の大きさを比較して、散乱体での散乱位置 (ピクセル)、および吸収体での吸収位置 (ピクセル) を決定する。

散乱位置決定

MAPMT にはクロストーク特性があるので、検出された信号には必ず他ピクセルからの信号の漏れ出し分が含まれている。そのため、単純に信号値の比較によって散乱位置を

決定することはできない。ここでは、今回の解析では、第4章で測定した光量分布を利用して、散乱位置を決定する手法を考案した。

第4章では、散乱体の1ピクセルでエネルギーが落とされたとき、クロストークによって最終的な検出信号がどのように現れるかを調べた。そこで、各PMTピクセル(1~16)に対し、以下のような値 $D_i (i = 1 \sim 16)$ を定義する。

$$D_i = \sum_{j=1}^{16} \left(\frac{E_j}{\sum_{k=1}^{16} E_k} - M_{i,j} \right)^2 \quad (7.1)$$

この中で、 $E_j / \sum_{k=1}^{16} E_k$ は、ピクセル j で検出した信号がPMT全体の信号の和に対し、どれだけの割合を占めるかを示す値である。一方、 $M_{i,j}$ は、第4章で得た、ピクセル i の光量分布でのピクセル j の値であり、光量分布の定義から、ピクセル i で発生したシンチレーション光がピクセル j にどれだけ分配されるかを示す値である。これらの差を求めて2乗したものの和をとった値 $D_i (i = 1 \sim 16)$ は、ピクセル i で散乱が起きたとき得られる信号の予想値(光量分布)と、実際の検出信号の間の「ずれ」を示す値と言える。よって、今回の解析では、この値を16通り計算し、最も D_i が小さくなる(予想と最も近い)ピクセル i を、コンプトン散乱が起こったPMTピクセルと判断することにした。

吸収位置決定

吸収体では、各ピクセルは光学的に分離しており、散乱光子が入射したピクセルのみで大きな信号が検出されるはずである。よって、今回の解析では、吸収体16ピクセルの中で、最も大きな信号を検出したピクセルを散乱光子の吸収位置と判断した。これ以後、吸収ピクセルでの検出したエネルギーを E_{APD} と呼ぶ。

7.1.3 コンプトン散乱イベント選定

検出したイベントには、偏光検出に必要なコンプトン散乱イベント以外に、PMT、APDのノイズや宇宙線を検出したイベントが含まれている。そのため、カット条件を決め、コンプトン散乱イベントのみを取り出す必要がある。

ここで、PMTで検出したエネルギーの全チャンネルの和として、 E_{PMT} を定義する。これは、PMTの各チャンネルでの信号が、クロストークによって漏れ出したシンチレーション光を観測したものであり、その和をとれば元の信号の大きさになる、という考えに基づいている(これは、第4章で光量分布を求めたときと同じ考えである)。

最初にまず、全イベントをエネルギーによって2次元ヒストグラムに描いた図を示す(図7.1)。

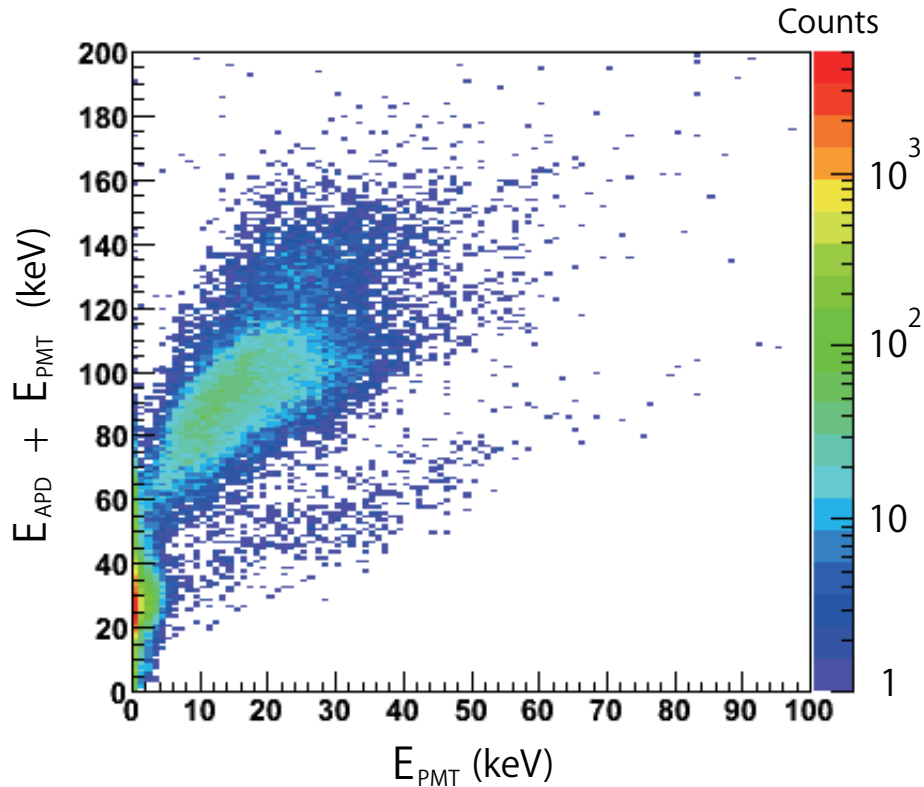


図 7.1: X線ビームを偏光計(回転角 0°)に垂直入射したときの全イベントのエネルギーマップ。横軸はPMTで検出したエネルギーの全チャンネルでの和(E_{PMT})、縦軸はPMTおよびAPDで検出したエネルギーの和($E_{PMT} + E_{APD}$)。縦軸付近に多くのイベントが集まっているのが見えるが、これらはすべてノイズによるものであり、取り出すべきコンプトン散乱イベントはその右上の領域だと考えられる(考察を参照)。

横軸は、先ほど定義した、PMTで検出したエネルギー E_{PMT} 、縦軸はPMTおよびAPDで検出したエネルギーの和($E_{PMT} + E_{APD}$)である。これらからノイズを取り除くため、以下の条件を満たすイベントだけをコンプトン散乱イベントだと定めた。

1. $5.7 \leq E_{PMT} \leq 31.4$
2. $40.0 \leq E_{APD} - E_{noise} \leq 102.8$

以下で、式の意味について解説する。

PMT の制限

全イベントでの E_{PMT} をヒストグラムにしたものを図 7.2 に示す。

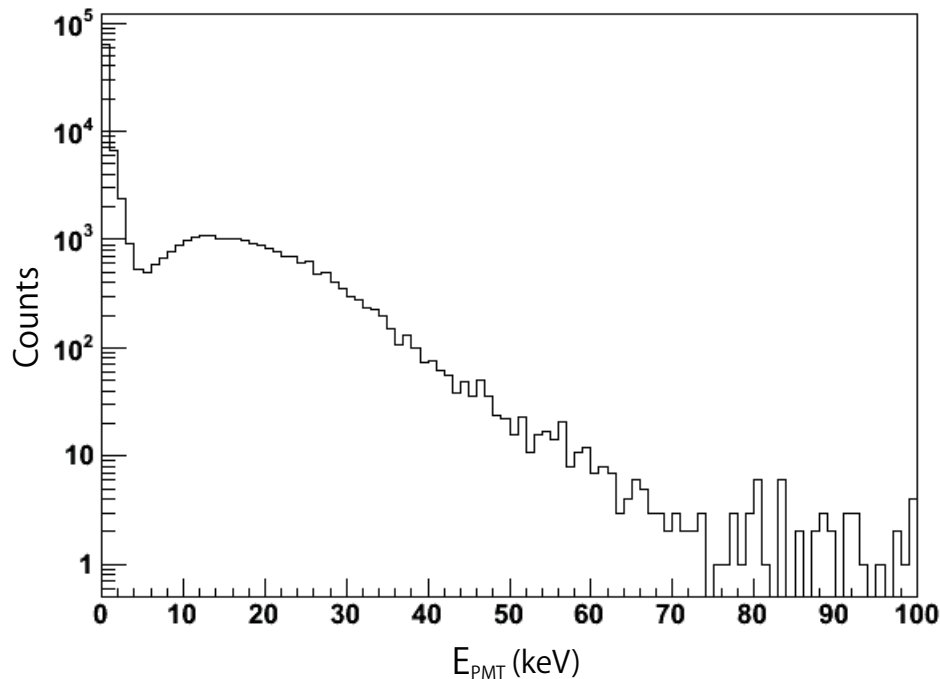


図 7.2: 全イベントの E_{PMT} のスペクトル。横軸はエネルギー (keV)、縦軸はカウント数。

この図によると、ノイズ以外にピークが存在することがわかる。これは、ビームのエネルギー 82.5keV とは一致せず、ノイズとも異なるためコンプトン散乱によるピークだと判断できる (これについての妥当性については、後で考察を行う)。これをガウス関数でフィットして、 $(\text{Peak} - 1\sigma)$ の位置から $(\text{Peak} + 2\sigma)$ までの範囲内のイベントをコンプトン散乱として定めた。

APD の制限

一方、APD はノイズが大きいいため、 E_{APD} でヒストグラムをつくると、図 7.3 のようになだらかなピークができる。

そこで、ノイズとイベントをはっきり区別するため、別の方法を考える。CsI シンチレータで散乱光子を検出したイベントの場合、検出ピクセルだけが大きい信号を検出し、他ピクセルで検出されるのはそれよりも比較的小さいノイズ信号になる。よって、吸収ピクセ

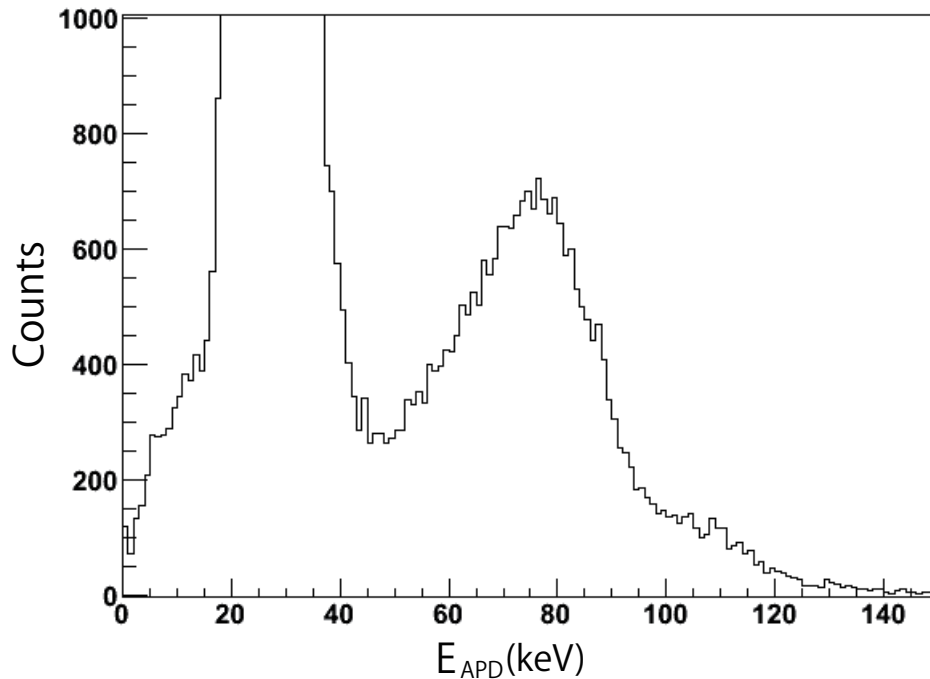


図 7.3: 全イベントでの E_{APD} のスペクトル。横軸はエネルギー (keV)、縦軸はカウント数。なだらかなピークができています。

ルでの信号 E_{APD} と、他の吸収体ピクセルでの信号 E_{noise} の差を全て計算し、全ての差が大きいとき (1 ピクセルだけが大きい信号を検出したとき) だけ、コンプトン散乱イベントだと判別すればよい。全イベントの $E_{APD} - E_{noise}$ をヒストグラムにしたものを図 7.4 に示す。

図 7.4 を見ると、ノイズによるピークと、コンプトン散乱によるピークが分離できていることがわかる。よって、図 7.4 の中で、コンプトン散乱イベントによるピークをガウス関数でフィットして、(Peak - 2σ) の位置から (Peak + 3σ) までの範囲内のイベントをコンプトン散乱として定めた。

条件によるカットの結果

図 7.1 から、以上の 2 つの条件でコンプトン散乱イベントを取り出してプロットすると、図 7.5 のようになる。

以後の解析では、これらのコンプトンイベントのみを扱うこととする。

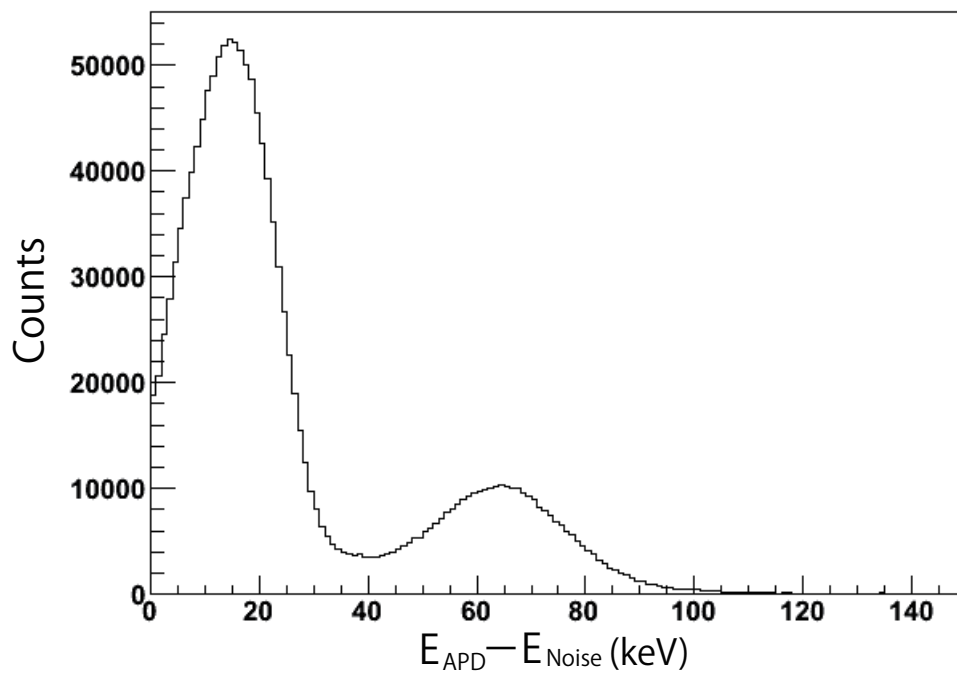


図 7.4: 全イベントの $E_{APD} - E_{noise}$ をプロットしたもの。横軸はエネルギー (keV)、縦軸はカウント数。ノイズイベントによるピーク (左) と、コンプトン散乱イベントによるピーク (右) に分かれていることがわかる。

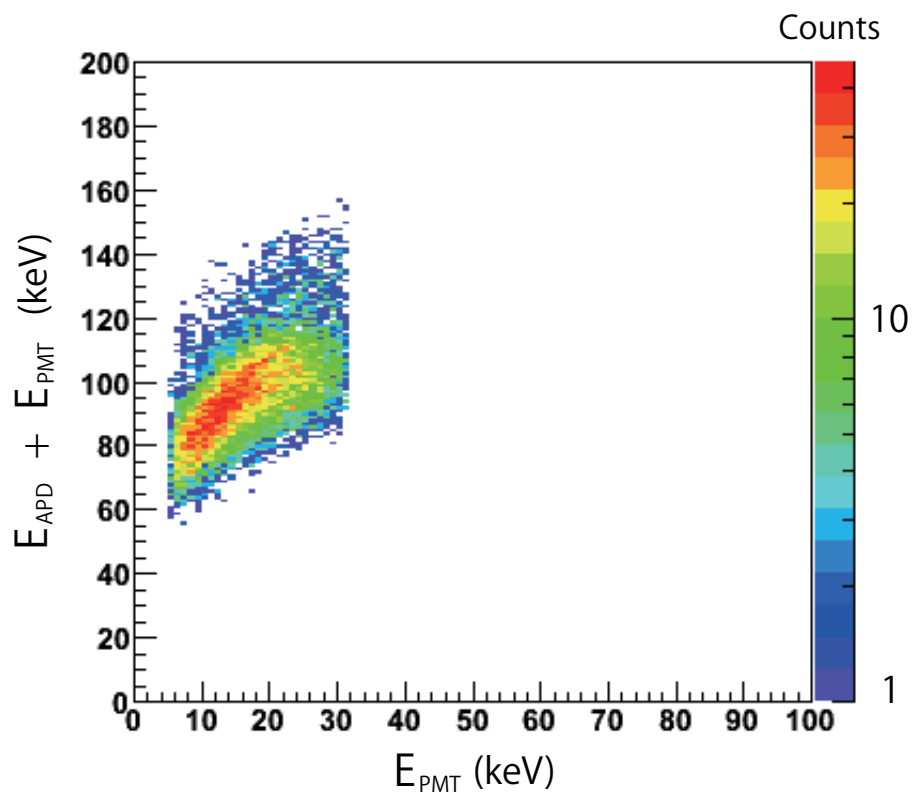


図 7.5: 条件でカットした後のエネルギーマップ。ノイズ成分が取り除かれ、コンプトン散乱イベントが残っていることがわかる。

7.1.4 角度計算

以上の手順から、1 イベントごとのコンプトン散乱での散乱・吸収位置が割り出せた。すると、それらの位置関係から、入射光子の散乱角度が求められる。本解析では、散乱方向ベクトルの始点を散乱体ピクセル(プラスチックシンチレータ)の中心とし、終点を吸収体ピクセル(CsI シンチレータ)の表面中心として、角度を計算した。ここで、終点をCsI シンチレータの表面に設定したのは、想定される散乱光子のエネルギー領域では、ほとんどの散乱光子がCsI シンチレータの表面で吸収されるからである。また、偏光計の回転角が 0° のときの水平方向を、散乱角の 0° と定義した(図??)。

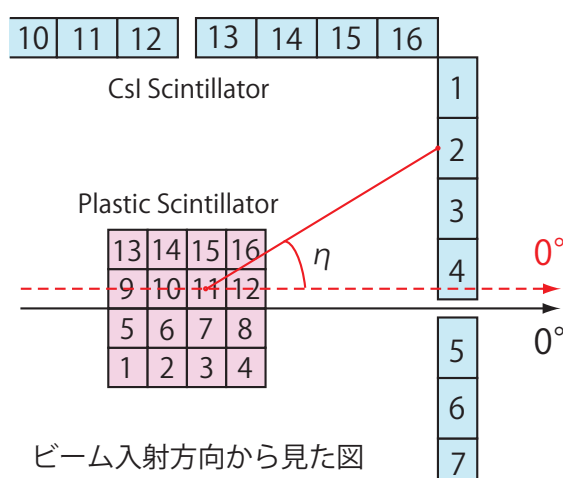


図 7.6: 角度計算の模式図。黒い矢印が散乱方位角の 0° 方向。散乱ピクセルを11、吸収ピクセルを2としたとき、このイベントの散乱方位角 η は、ピクセル11の水平方向(赤い矢印)と、散乱体ピクセル11の中心と吸収体ピクセル2の表面中心を結ぶ線が成す角である。

7.1.5 モジュレーションカーブ作成

以上の手順を用いて、各イベントでの光子の散乱方位角が求まった。これらを集計して、横軸を散乱方位角 [deg]、縦軸をカウントにしたヒストグラムをつくり、散乱角によるカウントの変調の様子を調べる。ただし、試作偏光計は吸収体の数が少なく、測定できるのは吸収体が存在する 180° の範囲のみである。そのため、偏光計を 45° ずつ回転させ

ながら、 180° ずつのモジュレーションカーブを作成し、1 周分 (8 つ) のカーブを足し合わせることで、 360° のモジュレーションカーブを求めた。

ヒストグラムの作成

横軸を散乱方位角 [deg]、縦軸をカウントとしたヒストグラムをつくる。この際、

モジュレーションカーブ結果

まず、偏光計を 45° ずつ回転させながら測定したときの、各偏光計回転角での、モジュレーションカーブを示す (図 7.6 ~ 7.13)。それぞれ、横軸が散乱角 [deg]、縦軸がカウントである。

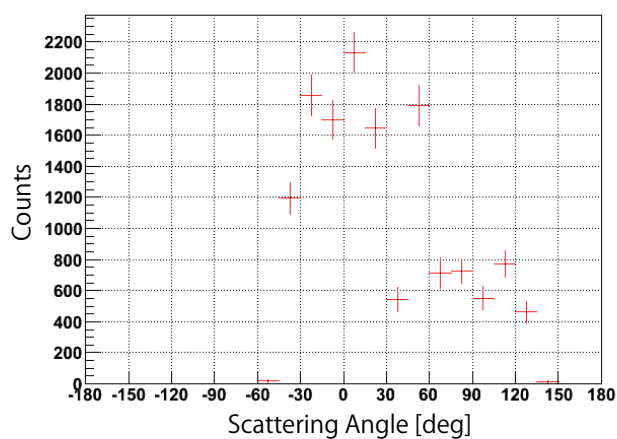


図 7.7: 回転角 0°

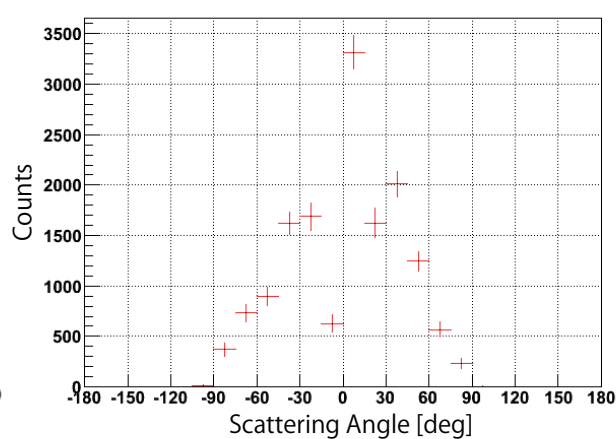


図 7.8: 回転角 45°

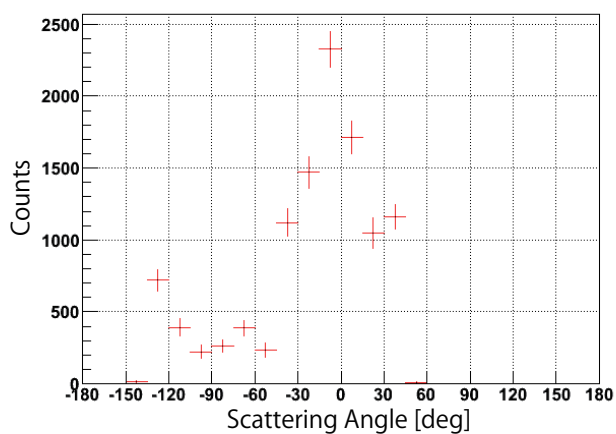


図 7.9: 回転角 90°

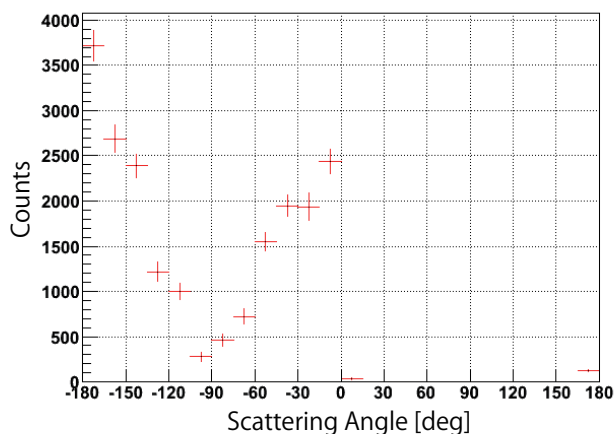


図 7.10: 回転角 135°

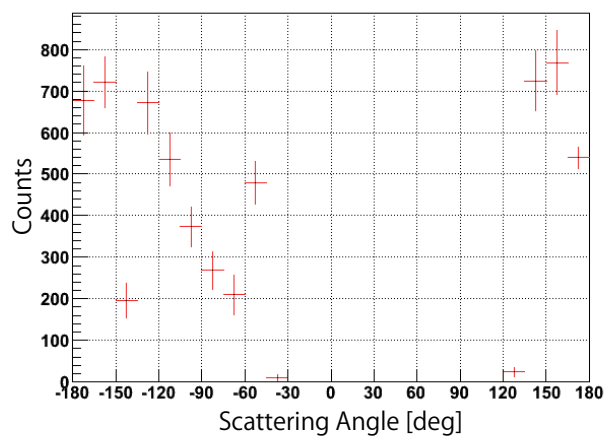


図 7.11: 回転角 180°

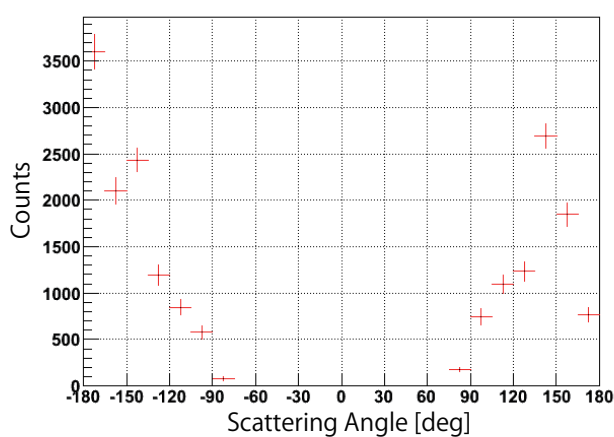


図 7.12: 回転角 225°

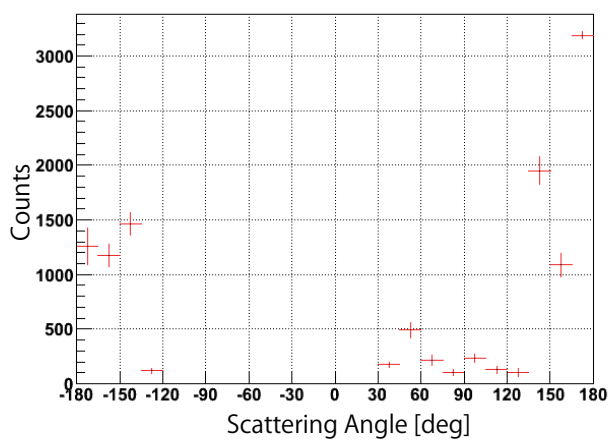


図 7.13: 回転角 270°

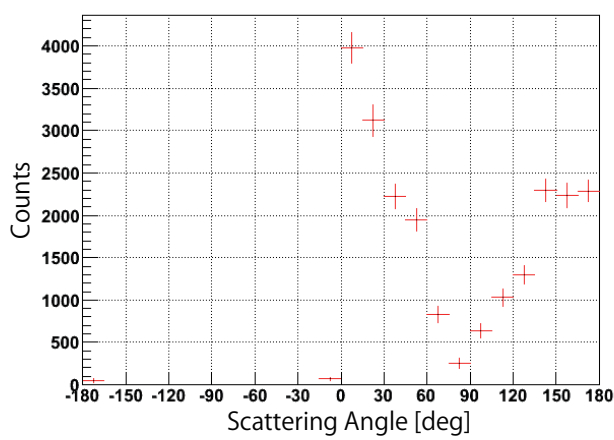


図 7.14: 回転角 315°

次に、これらを足し合わせたものを示す。ただし、これらはそれぞれ入射光子数が異なるので、イベント数を基準にして各カーブのカウント数を規格化し、足し合わせた。結果は、図 7.14 のようになった。

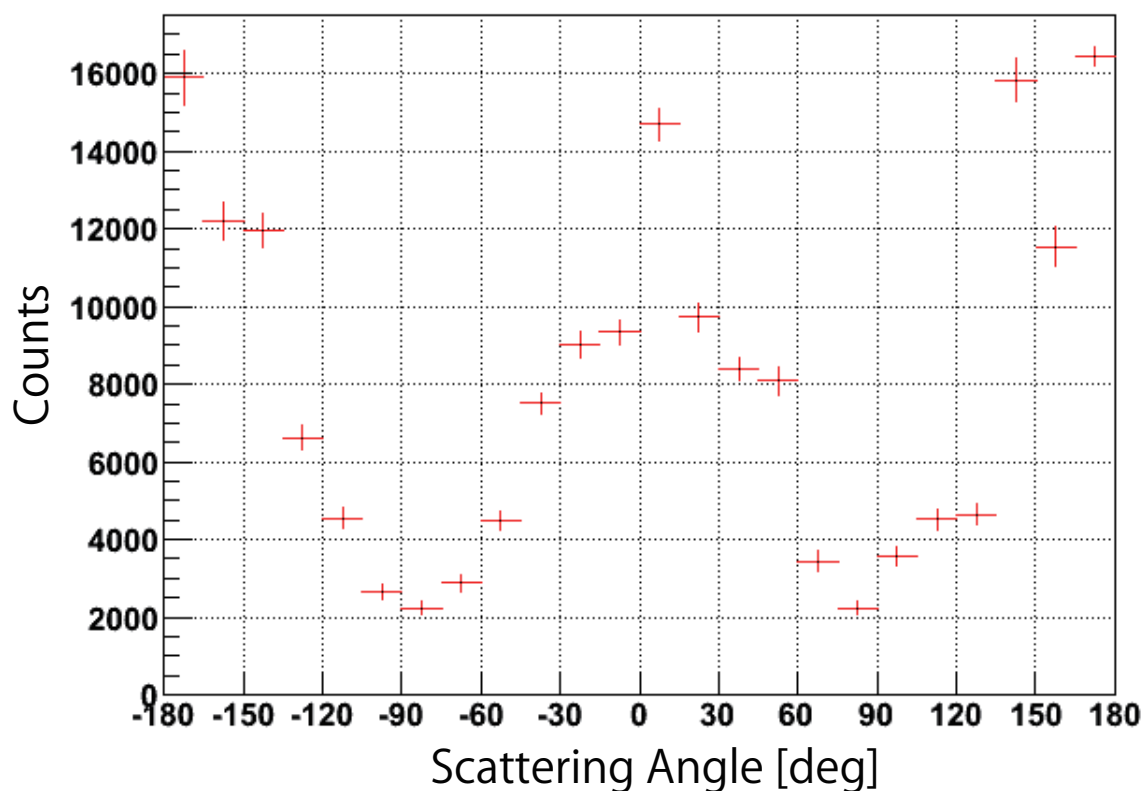


図 7.15: 全角度のデータを足し合わせたモジュレーションカーブ。散乱角によるカウントの変調が現れていることがわかる。

今、水平方向を 0° とし、入射光子の偏光方向は地面に垂直である。よって、 0° 方向に散乱しやすく、 90° 方向には散乱しにくい。したがって、図 7.14 から、偏光光子の散乱角によるカウントの変調が検出できたことがわかる。しかし、ところどころにカウントが極端に大きくなっている部分があることもわかった。

7.2 結果・考察

7.2.1 Q 値の見積もり

偏光計の性能を評価する値の1つである Q 値を見積もる。 A, B, θ_0 を変数として、モジュレーションカーブを正弦関数 $f(\theta) = A \cos 2(\theta - \theta_0) + B$ でフィッティングすると、図 7.15 のようになった。

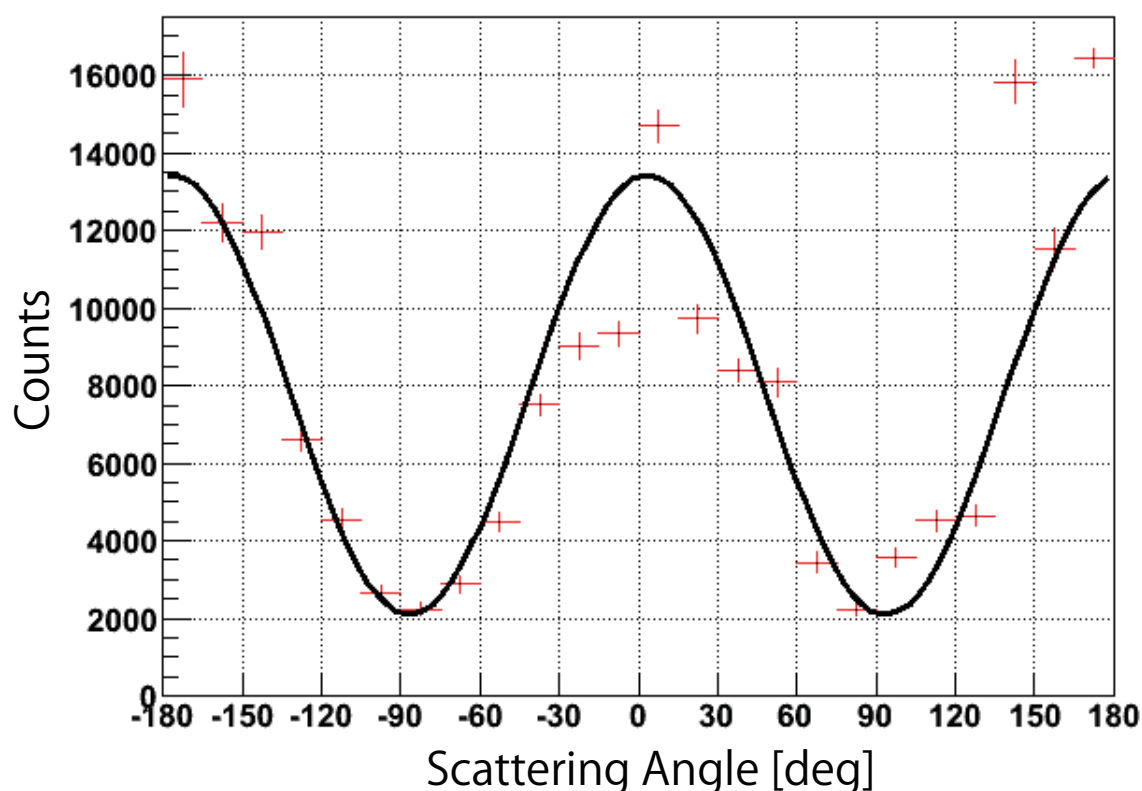


図 7.16: 図 7.14 を正弦関数でフィッティングした図。カウントの大きい場所は、フィット曲線を大きく外れている。

フィットパラメータから、 Q 値も求まる。フィットパラメータ、および Q 値は、表 7.1 のようになった。

仮に、ビームの偏光度を 90% とすると、モジュレーションファクターは 81.0 ± 1.3 である。これは、戸泉修論 [9] で得られたシミュレーションの値 47.8 ± 0.9 と比べて非常に大きい。しかし、今回の偏光計では散乱体の数が少なく、入射光子もビームによって一点に照射したものである。散乱体全体に光子が当たった場合、モジュレーションカーブがなま

表 7.1: フィッティング結果

A	5666.6 ± 82.1
B	7768.5 ± 62.4
θ_0 [deg]	3.5 ± 0.4
Q [%]	72.9 ± 1.2
reduced χ^2	39.8

されるので、一点に照射した場合よりもモジュレーションファクターが低くなることが予想される。よって、今回の値を元にシミュレーションを行い、本来の検出器性能を見積もる必要がある。これは、今後の課題とする。

また、reduced χ^2 が非常に大きい原因は、カウントが極端に大きいピンが存在することと、エラーの見積もりが小さいことの2つが挙げられる。以下で、これを考察する。

7.2.2 モジュレーションカーブの改善

reduced χ^2 の改善を図るには、モジュレーションカーブの極端な凹凸を無くし、誤差の見積もりを大きくとる必要がある。以下では、それらの改善案について述べる。

カウントの凹凸

今回の解析で、モジュレーションカーブのカウントに影響するのは、散乱角を求めるときに用いる、光子の散乱・吸収位置である。これらは、それぞれ複数ある検出器の ADC 出力値を比較して決定した。しかし、今回の測定では、APD のゲイン補正に不定性があると考えられる。

APD のゲイン補正には、入射口の前に ^{57}Co を置き、コインシデンス測定をしたデータの光電ピーク位置を用いた。しかし、コインシデンス測定では、プラスチックシンチレータでコンプトン散乱してきた光子を検出するので、APD 単体測定時とは異なり、広がったスペクトルが得られる。したがって、フィッティングによってピーク位置を求める際に、不定性が生じる。ゲイン補正の値を間違えると、APD 間の出力値の大小関係が狂い、実際とは異なった散乱角を検出することになる。

また、APD のゲインが低い、もしくはシンチレータとの接合で光量をロスしている、などの原因で信号が小さいために、スレッシュホールドを越えられず、数え落としたコンプトン

散乱イベントが存在する可能性もある。現在の VATA の仕様によると、TA のスレッシュホールドは全 APD について統一されており、個別に設定することができない。そのため、ゲインの低い APD では、散乱光子が検出できないため、カウントが少なくなる。

これらの理由により、APD のカウントを数え間違えることによって、モジュレーションカーブカウントの凹凸が生じると考えられる。

7.2.3 今後の改善案

今回の実験では、APD での吸収位置検出が最も結果に影響してくると思われる。そこで、APD 側での位置検出精度を向上させるための、改善案を挙げる。

- ノイズを小さくする

今回の解析では、検出信号が最も大きいピクセルを、散乱光子の吸収位置と判定した。そのため、ノイズを小さくすることで誤判定を少なくでき、位置検出精度が向上する。また、ノイズを小さくすることで、APD のスレッシュホールドを下げることで、より小さい信号でも検出できるようになり、数え落としも減らすことができる。

- APD スレッシュホールドの個別設定

現在の APD のスレッシュホールド設定だと、全ての APD で統一して設定しなければならない。しかし、APD で得られる信号は、APD 自身のゲインや、シンチレータから受ける光量など、様々な要因によって変化する。そのため、各チャンネルごとにスレッシュホールドを設定できれば、信号の小さいチャンネルでも、信号の数え落としが少なくなる。ただ、これはノイズの大きさや、基板での実現が可能かどうかによるので、慎重に考えていく必要がある。

7.2.4

今、モジュレーションカーブ中で極端にカウントが多いピンを除いて、フィッティングを行ってみる。すると、結果は図 7.16 のようになる。以後、すべてのピンを含んだモジュレーションカーブをカーブ A(図 7.14)、図 7.16 のようにピンを取り除いたモジュレーションカーブをカーブ B と呼ぶ。

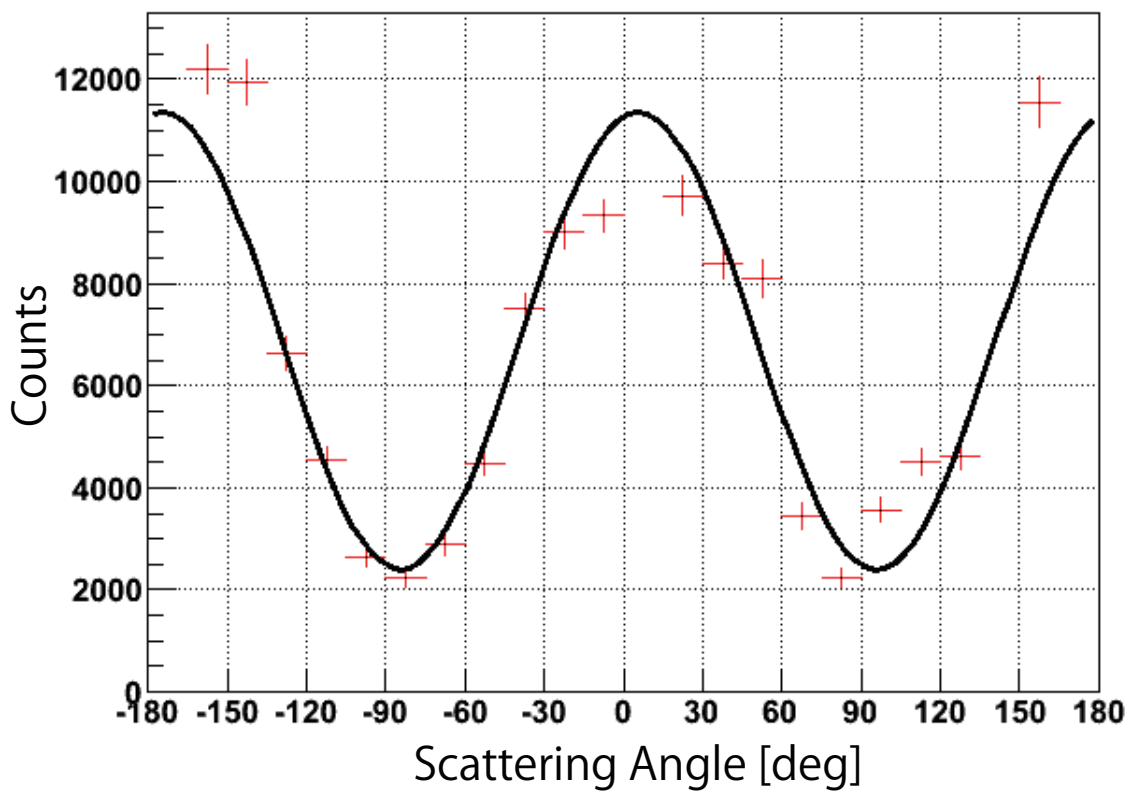


図 7.17: 図 7.14 から極端にカウントの大きい 1、13、22、24 ビンを取り除き、図 7.15 と同じ正弦関数でフィッティングした図。カウントが大きいビンが取り除かれた結果、変調は小さくなる。

この場合のフィッティングパラメータを表 7.2 に示す。なお、各パラメータの定義は、表 7.1 と同じである。

表 7.2: フィッティング結果

A	4476.1 ± 99.8
B	6875.0 ± 74.3
θ_0 [deg]	5.7 ± 0.6
Q [%]	65.1 ± 1.6
reduced χ^2	12.7

この場合、モジュレーションファクターは 72.3 ± 1.8 % (ビーム偏光度 90%) である。

7.2.5 イベント選定についての検証

本偏光計では、コンプトン散乱イベントを用いて、偏光検出を行う。そのため、コンプトン散乱イベントの選定が、偏光検出精度を高める上で重要になると思われる。そこで、エネルギーマップから選定したイベントが本当にコンプトン散乱イベントかどうかを考察する。

まず、解析手順の説明で用いた 2 次元エネルギーマップを、もう一度図 7.17 に示す。

今回は、イベント選定について考えるために、全イベントの中でも特徴がありそうな領域を赤い枠で囲い、番号を振った。以下で、その特徴について考える。

領域 1

領域 1 は、PMT で検出したエネルギー (E_{PMT}) が非常に小さく、PMT、APD で検出したエネルギーの和 ($E_{PMT} + E_{APD}$) も、60keV 以下である。そのため、X 線ビームを検出したものとは考えにくい。よって、これは PMT、または APD のノイズによるイベントであると考えられる。

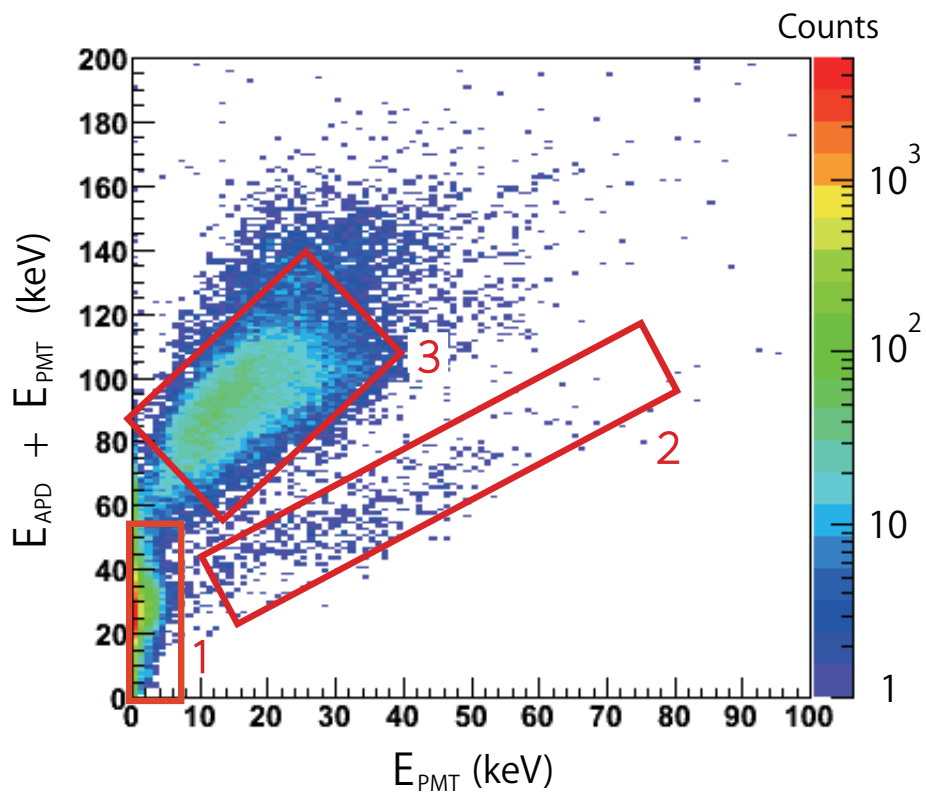


図 7.18: 全イベントのエネルギーマップ。横軸はPMTで検出したエネルギーの全チャンネルでの和 (E_{PMT})、縦軸はPMTおよびAPDで検出したエネルギーの和 ($E_{PMT} + E_{APD}$)。ここでは、全イベントの中でも目立った特徴が見られる領域3種類を選び、赤い枠で囲った。イベントの分類については、本文を参照。

領域 2

領域 2 は、PMT で検出したエネルギー (E_{PMT}) が APD で検出したエネルギー (E_{APD}) よりも大きく、かつ、エネルギーの和 ($E_{PMT} + E_{APD}$) が E_{PMT} に比例するようなイベントである。領域 2 のプロット点から大雑把に見積もると、これらのイベントでは、 E_{APD} がおよそ 15 ~ 30keV の範囲内に収まることがわかる。この値は、領域 1(ノイズイベント)で E_{APD} が取り得る値と良く一致している。よって、APD はノイズを検出したイベントだと考えられる。

一方、 E_{PMT} は領域 1 のイベントよりは大きく、かつ、ビームのエネルギー 82.5keV よりも小さいため、ノイズおよび X 線ビーム以外のものを検出したことになる。候補としては、強度調節用のタンゲステンに X 線ビームが当たった際の後方散乱光子がある。この場合、散乱角によって光子のエネルギーが変わるため、領域 2 のような幅広い分布を取り得る。

よって、特定はできないが、領域 2 のイベントは、散乱体でビーム由来ではない X 線を検出し、APD ではノイズを検出したものであると考えられる。

領域 3

領域 3 は、PMT でおよそ 5 ~ 30keV、APD でおよそ 50 ~ 90keV を検出したイベントであり、エネルギー領域で見れば、散乱体でコンプトン散乱した光子が吸収体で吸収されたイベントとしても良いように思われる。しかし、ビームのエネルギーが 82.5keV で一定である以上、 $E_{PMT} + E_{APD} = 82.5$ となつて、領域 3 は横軸に平行な直線になるはずである。そこで、領域 3 が図 7.17 のように傾いて広がった形を取る理由を考える。

考えられる理由としては、PMT と APD の分解能が挙げられる。PMT や APD の検出信号には、増幅過程のゆらぎやノイズが含まれるため、検出したエネルギーも必ずゆらぎを持つ。そのため、直線になるはずの領域 3 が広がった形になると考えられる。これを確かめるには、APD や PMT の分解能を、線源を使って測定し、領域 3 の広がりと比較すればよい。しかし、APD、PMT の分解能は、検出するエネルギーによって変化するため、領域 3 と比較できるようなデータを取るためには、使用する線源を限定しなければならない。そのため、今回は検証を行えなかった。

以上から、現時点では、領域 3 をコンプトン散乱イベントとして選んでも良いかと思われる。しかし、今後精度ある観測を行うためには、PMT、APD の分解能を測定して比較・検討することにより、解析方法の改善が必要になる。

7.3 まとめ

試作偏光計の性能評価実験のデータを解析し、モジュレーションカーブを作成した。それによって、試作偏光計によって散乱角による変調が検出できることを確認した。また、変調の大きさを示す Q 値は、 $71.8 \pm 0.66\%$ と高い値が得られた。しかし、モジュレーションカーブの歪みや、誤差の見積もりなど、改善すべき部分がまだ多く残っており、今後は検出器の性能向上、および解析方法の検討という2方面から、開発を進めていく必要がある。

第8章 まとめと今後の課題

8.1 まとめ

本論文では、超小型衛星 TSUBAME 搭載用偏光計の試作と、試作偏光計による性能評価実験について述べた。

偏光計の試作では、検出器および基板をとりまとめるシールドケースの設計を行った。これは、性能評価実験用に設計されたシールドケースでありながら、今後の偏光計開発にも利用できる形として、考案した。そのため、実験を行う上での利便性を考慮しつつ、実際の衛星搭載も視野に入れ、強度の点でも意識した作りになっている。今回の実験では特に問題なく使用できたが、今後の検出器開発の際には、衛星搭載時に対する欠点を考慮し、開発を進めていく必要がある。

また、偏光計の性能評価実験に向けて、マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) のクロストーク特性の評価を行った。これにより、MAPMT の各チャンネルでの光量分布を測定することができた。このデータは、性能評価実験での散乱位置検出に使用し、効果を挙げることができた。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) での性能評価実験では、試作偏光計に偏光 X 線ビーム (82.5keV) を照射し、現在の検出器構成で光子のコンプトン散乱イベントを検出できることを確認した。また、そのデータを解析してモジュレーションカーブを作成し、偏光光子のコンプトン散乱による散乱異方性が検出できたことを確かめた。さらに、モジュレーションカーブのフィッティングから、散乱角によるカウントの変調の大きさを示す Q 値を算出し、 $71.8 \pm 0.66\%$ という値を得た。しかし、モジュレーションカーブやフィッティングの様子から、改善すべき点が判明した。

8.2 今後の課題

今後は、まず、試作偏光計を使用して、VATA 基板などの回路システムのバグを見つけ出し、改善することが必要になる。また、今回の試作偏光計の構造を踏まえた上で、衛星搭載に

向けて、検出器・基板の固定方法の検討や、強度を考慮した構造の見直しを行う。一方では、本論文の解析方法の更なる検討や、衛星で理学検出器を制御するための FPGA のプログラムの開発なども行っていきたい。

付録A 付録

A.1 性能評価実験中に起こったトラブルについて

今回の性能評価実験では、準備期間が短かったこともあり、予期せぬトラブルが多く発生した。ここでは、それについて取り上げ、原因や今後の解決策について述べる。

A.1.1 IFCの電源

コインシデンス測定を行った際、IFCの電源が急に落ちてしまい、測定が停止してしまうトラブルがあった。原因は特定できず、比較的短時間で停止する場合も多かったため、長時間(5~10分など)の測定が困難だった。また、今回のデータ取得のために作成したプログラムは、途中で測定が停止すると、それまでに測定したデータがファイルに保存されない仕様であった。そのため、長時間測定を試みた挙句にデータが保存されないという事態を避け、150秒間の測定を何回も繰り返すこととした。

一方で、PMTモードで測定を行う際も、IFCの電源が落ちて、測定が停止する問題も発見されている。この問題については、現地で発生条件の検証を行った。すると、以下のような条件が重なると電源が落ちるらしいということがわかった。

- IFC基板にAPD-VATA基板が接続されていて、APD-VATAの電源がONになっている。
- APD-VATA基板に1個でもAPDが接続している

ここから、APD-VATA基板が電源停止の条件になっているだろうことがわかる。また、APDの代わりに100pFコンデンサを接続しても電源が落ちることから、APD-VATA基板のAPD接続部分に容量が載ることで、電源停止が起こるのではないかと推測できる。

また、各基板のVATAの電源は、IFC上に実装されたりニアレギュレータで供給されており、IFCがON/OFFを管理している。そのため、IFC上のFPGAのリセットやシャットダウンと連動し、電源遮断が発生するとの見方もあった。

しかし、現地でのこれ以上の検証や改善は難しく、PMT 単体での測定時は APD-VATA 基板の電源を切っておくことで、測定の途中停止は回避できた。この問題では、今後の原因追究、および基板の改良が必要である。

A.1.2 トリガーレートの変動

コインシデンスモードでの測定中、ビームレートがほとんど変化していないにも関わらず、偏光計のイベントレートが大きく変動するときがあることがわかった。変動の仕方は様々だったが、主に、前半は上昇してからほぼ一定になる場合が多かった。

KEK 実験中に調べたところ、測定データの読み出しが問題になっている可能性があることがわかった。1 イベントごとに測定データの読み出しに費やした時間を記録していったところ、読み出しが非常に遅い ($\sim 1\text{ms}$) イベントが存在した。今回の基板および測定プログラムでは、データを読み出ししているうちは、次のイベントを取得しない。そのため、読み出しに時間をかけた分、イベントレートが低くなるはずである。データ読み出しの時間が長くなる原因は未だにわかっていないが、原因があるとするれば、IFC、I/O ボード、DP モジュール、測定プログラムのいずれかであると予想できる。しかし、これらを切り離して原因を追及するのは、現在は困難であると思われる。

また、その他の可能性 (アナログ信号部など) も棄却されてはいないため、十分な検証が必要である。

関連図書

- [1] Y.Kawasaki et al. “Performance of a multi-anode photomultiplier employing a weak electrostatic focusing system (Hamamatsu R8900 series)”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A564, 378-394 (2006)
- [2] F. Lei et al. “Compton Polarimetry in Gamma-Ray Astronomy”, Space Science Reviews, 82, 309-38 (1997)
- [3] T.Mizuno et al. “A Monte Carlo method for calculating the energy response of plastic scintillators to polarized photons below 100keV”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A600, 609-617 (2009)
- [4] S. McGlynn et al. “Polarisation studies of the prompt gamma-ray emission from GRB 041219a using the spectrometer aboard INTEGRAL”, A&A, 466, 895-904 (2007)
- [5] 有本 誠, 修士論文「気球硬 X 線偏光計 PoGO のシミュレーションによる性能評価」東京工業大学 (2006)
- [6] 金井 義和, 卒業論文「気球搭載用 X 線偏光計の試作と性能評価」東京工業大学 (2005)
- [7] 金井 義和, 修士論文「Performance Evaluation of Phoswich Detector Cell for the Balloon-Borne Astronomical Soft Gamma-Ray Polarimeter PoGOLite 」東京工業大学 (2006)
- [8] 戸泉 貴裕, 卒業論文「硬 X 線偏光計用多チャンネルシンチレーション検出器の開発」東京工業大学 (2007)
- [9] 戸泉 貴裕, 修士論文「東工大衛星 Cute-1.7+APDII の荷電粒子観測とガンマ線バースト偏光観測衛星 TSUBAME の検出器開発」東京工業大学 (2009)

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にお世話になりました。まず、このような研究の場を与えて頂いた、河合教授、谷津助教に深く感謝致します。

谷津さんには、実験の初歩から、検出器・電気回路についての知識、本論文に対するアドバイスなど、何から何まで懇切丁寧に教えて頂きました。中森さんには、実験装置の使い方やデータ解析の方法などを教えて頂きました。また、自分が作成したスライドやポスターに対して、いつも細かいアドバイスを頂き、非常に助かりました。戸泉さんには、実験や発表のことから、日々の研究室生活に関することまで、様々な面で助けて頂きました。本当にありがとうございました。

共に衛星開発を行う工学部松永研究室の方々には、TSUBAMEの開発やCute-1.7の運用など、様々なところでご協力頂きました。また、偏光計開発にあたっては、早稲田大学の片岡準教授、高エネルギー加速器研究機構の岸本準教授、クリアパルスの久保様、シーアイ工業の山品様など、多くの方々大変お世話になりました。

研究室の皆様には、普段からとても良くして頂き、本当にありがとうございます。研究のことではもちろん、学生生活に関することまで、色々なことを教えて頂きました。1年間、楽しい研究室生活を送ることができたのも、皆様のおかげです。

お世話になった方々の名前全てを挙げることはできませんが、関わって頂いた皆様に深く感謝致します。本当にありがとうございました。