

気球搭載宇宙硬X線偏光検出器PoGO Liteの主検 出部の開発と性能評価

広島大学大学院 理学研究科 物理科専攻
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室
山本 和英

修士論文

2007年02月09日

概要

硬 X 線領域で偏光観測を行うことは、撮像、測光、分光という従来の方法では探ることのできない磁場や降着円盤の構造を解明する全く新しいプローブとなる。しかし X 線領域での偏光観測は困難であり、現在までに偏光を観測した例は、太陽観測衛星 OSO-8 によるかに星雲からのみである。このような未開拓な分野を発展させるべく、我々は 2009 年の気球による偏光観測を目指し、天体硬 X 線偏光検出器 PoGO Lite (Polarized Gamma-ray Observer Light version) の開発を進めている。そして最初のフライトでかにパルサーや CygX1 からの偏光を観測し、その放射機構、降着円盤の構造の解明を目指している。

PoGO Lite は、コンプトン散乱の異方性を利用し 25 ~ 100 keV の硬 X 線領域に感度を持つ偏光計である。井戸型フォスウィッチカウンターのデザインを採用し、波形弁別により効率よくバックグラウンド除去を行う。1 ユニットは、散乱体、吸収体を兼ねた主検出部である減衰時定数の速いプラスチックシンチレーター (fast シンチレーター)、コリメーターである減衰時定数の遅いプラスチックシンチレーター (slow シンチレーター)、シールド部である BGO と光電子増倍管からなる。これを 217 本並べることで、大面積と低バックグラウンド化を実現し、6 時間のフライトで、かにパルサーからの 10 % の偏光を検出できる等、かつてない高い感度を誇る。このような高感度を得るには、高いバックグラウンド除去能力と低エネルギーまでの検出能力が、必要不可欠である。低エネルギーの X 線検出には、fast シンチレーター、slow シンチレーター共に大きな光量が要求される。本研究では、これら fast、slow シンチレーター、光電子増倍管を含めた各コンポーネントの性能評価及び、バックグラウンド除去の鍵となる波形弁別の性能評価を行った。

その結果 4 章で述べるプラスチックシンチレーターの特性試験では、fast シンチレーターでは、5.9 keV の X 線に対して約 3 photo-electron となり、slow シンチレーターの位置依存性の試験では根元と先端で光量比が 1 : 2 となった。fast シンチレーター、slow シンチレーター共に PoGO Lite の光電子増倍管との組み合わせで十分な光量が得られた。5 章で述べる光電子増倍管受け入れ試験では、測定を行った全ての光電子増倍管が正常に動作していることが確認でき、温度試験から低温下では光電子増倍管のゲインが増加することが分かった。さらに 6 章で述べる波形弁別試験では、実機のフォスウィッチユニットを用いて波形弁別により fast シンチレーターのイベントのみを抜き出すことが出来た。さらに現状で各シンチレーターでの下限スレシヨルドが fast シンチレーターで 14 keV、slow シンチレーターで 60 keV、BGO で 30 keV まで達成できた。

目次

第 1 章	Introduction	3
第 2 章	X 線偏光観測	4
2.1	偏光とは	4
2.2	偏光観測の意義	4
2.2.1	降着円盤の幾何学構造	4
2.2.2	回転駆動型パルサーの放射メカニズム	5
2.3	偏光計の原理	7
2.3.1	ブラッグ反射を利用した偏光計	7
2.3.2	光電効果を利用した偏光計	8
2.3.3	散乱型偏光計	8
第 3 章	PoGOLite 検出器	13
3.1	PoGOLite 計画の概要	13
3.2	PoGOLite 検出器のコンポーネント	14
3.2.1	シンチレーター	14
3.3	光電子増倍管	14
3.4	PoGOLite 検出器の構成	14
3.5	PoGOLite の偏光検出原理	15
第 4 章	プラスチックシンチレーターの特性試験	19
4.1	目的	19
4.2	時定数の速いプラスチックシンチレーターの特性試験	20
4.2.1	初期モデルの基礎特性試験	20
4.2.2	ロット依存性	22
4.2.3	ボトム BGO の透過率測定	22
4.2.4	光学ラバーの厚み依存性	24
4.3	時定数の遅いプラスチックシンチレーターの特性試験	27

4.3.1	位置依存性	28
4.3.2	基礎特性試験	29
第 5 章	光電子増倍管の受け入れ試験	31
5.1	PoGOLite の光電子増倍管	31
5.2	試験の目的	33
5.3	初期不良の有無の確認試験	33
5.4	光電子増倍管の基礎特性試験	37
5.5	光電子増倍管の温度依存試験	41
第 6 章	PoGOLite フォススイッチユニットの試験	43
6.1	目的	43
6.2	簡易フォススイッチを用いた試験	43
6.2.1	整形アンプを利用した波形弁別試験	44
6.2.2	PoGOLite のアナログ回路を用いた波形弁別試験	50
6.2.3	温度特性試験	54
6.3	実機のフォススイッチユニットの特性試験	57
6.3.1	実験セットアップ	57
6.3.2	実験結果	58
第 7 章	まとめと今後の課題	62

第1章 Introduction

天体の放射を観測する方法には、以下の4つの方法がある。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る分光、光の偏りと方向を調べる偏光である。これまで電波、可視の波長領域では、上記4つ全ての方法で観測が行われてきた。しかしX線、 γ 線領域においては、撮像、測光、分光の3つの方法では観測が行われてきたが、偏光観測は非常に困難であるためほとんど行われていない。現在までにX線領域で偏光の観測をしたのは1例しかなく、太陽観測衛星OSO-8(1975-76)により、ブラッグ反射を利用して、2.6keV、5.2keVの軟X線領域で、かに星雲からの偏光を捉えたものである。これ以降は、X線、 γ 線領域での偏光観測を行った例は無く、RHESSI衛星が γ 線バーストからの偏光を捉えたという報告(Coburn et al.2003)があるが、データ解析に大きな不定性があると考えられ(Rutledge et al.2004)信頼性に欠けるものである。このようにX線偏光観測は、未だに開拓されていない分野であり、偏光観測でしか理解出来ない天体の物理が数多く存在している。例えば、シンクロトロン放射やコンプトン散乱、サイクロトロン吸収が絡む天体において、磁場や降着円盤の構造、ひいては放射機構を解明するには、偏光観測で探る他ない。そのためX線領域での偏光観測への期待は大きい。

このX線偏光測定分野を開拓するべく、2009年の気球による偏光観測を目指し、天体硬X線偏光検出器PoGOLite(Polarized Gamma-ray Observer -Light version)の開発を進めている。PoGOLiteは、コンプトン散乱の異方性を利用した偏光計であり、『すざく』衛星搭載硬X線検出器で用いられている、井戸型フォスウィッチカウンターのデザインを採用し、波形弁別により効率よくバックグラウンド除去を行う。散乱体、吸収体を兼ねたユニットを217本並べることで、大面積と低バックグラウンド化を両立させ、6時間のフライトで、かにパルサーからの10%の偏光を検出できる等、かつてない高い感度を誇る検出器である。この高感度の実現には、センサーが高い性能を持つことと、波形弁別により効率良くバックグラウンドを除去することが鍵となる。そこで本論文では、センサーの各コンポーネントの特性試験及び、波形弁別性能の評価試験を行った。

第2章 X線偏光観測

2.1 偏光とは

偏光とは電場および磁場が特定の方向にしか振動していない光のことであり、その電場ベクトルの軌跡の形によって直線偏光、円偏光、楕円偏光に分類される。その振動面の分布が直線方向に限られる場合を特に直線偏光と呼ぶ。光の偏光方向の強度を N_{\parallel} 、それに垂直な方向の強度を N_{\perp} とすると、直線偏光の偏光度 P は以下のように定義される。

$$P \equiv \frac{N_{\parallel} - N_{\perp}}{N_{\parallel} + N_{\perp}} \quad (2.1)$$

$P=1$ のときを完全偏光、 $P=0$ のときを無偏光と呼ぶ。天体からの光が偏光していれば、それは放射領域やメカニズムが非等方性を持つとすることを意味し、偏光観測から放射機構に対する重要な知見を得ることが出来る。

2.2 偏光観測の意義

天体からの偏光生成プロセスとしてシンクロトロン放射やコンプトン散乱が考えられる。偏光を生み出す天体のほとんどは、磁場や散乱の絡む非熱的な系である。以下でこのような系からの偏光を観測することによって解明できる天体現象について述べる。

2.2.1 降着円盤の幾何学構造

ブラックホール連星系やセイファート銀河の中心に位置するブラックホール周辺には降着円盤が存在する。降着円盤とは、大量のガスや塵などが、ブラックホールや白色矮星のような中心天体からの重力によって落下する際に、天体の周りに形成される円盤であり、落下の際に重力エネルギーが解放され X 線で強く光っている。ブラックホールの持つ降着円盤のサイズは $10^{11}\text{cm} \sim 10^{-7}\text{pc}$ で、我々の銀河系内近傍にあるとして距離を $\sim 1\text{kpc}$ と仮定するとそのサイズは $10^{-10}\text{rad} \sim 10^{-5}\text{arcsec}$ である。現在世界最高の分解能を持つ X 線天文衛星 Chandra をもってしても空間分解能はせいぜい 0.5arcsec がいいところであり、撮像での降着円盤の幾何学構造を探ることは不可能である。しかし偏光観測を用いることによ

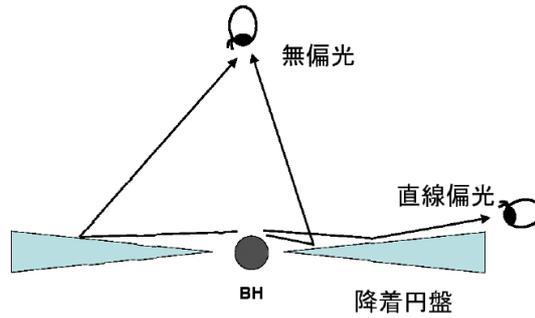


図 2.1: 降着円盤を見込む角度に応じて光子の散乱角は異なる

て間接的に降着円盤の幾何学構造を解明することができる。図 2.1 のように中心のブラックホール周辺からは X 線が放出されており、散乱角によって光子の偏光度は異なる (詳しい計算は例えば Poutanen et al. 1996, MNRAS 283,892などを参照)。例えば真上から降着円盤を見る場合には、様々な方向に散乱された光子を観測することになる為、無偏光の光子を観測することになる。それに対して真横から降着円盤を見た場合は、ある一定の方向に散乱された光子のみを観測するため偏光した光子を観測することになる。つまり見る角度によって光子の偏光度および偏光ベクトルの向きが異なる。よってブラックホール連星や活動銀河核を X 線で偏光観測することにより、光子の散乱がおきている事、すなわち降着円盤の存在の直接証拠になると共に、間接的に降着円盤の幾何学構造を知ることができる。

2.2.2 回転駆動型パルサーの放射メカニズム

周期的な線放射が高速回転する中性子パルサーから観測されている。この放射は、パルサー磁気圏中で中性子星の磁力線に沿って運動する相対論的粒子から放出され、その放射は強くビーミングしており、磁力線を含む面内に強く偏光していると考えられる。しかしながら粒子加速が磁気圏内のどこで起こっているかは全く分かっていない。これまでに理論的なモデルとして次の様な 3 つのモデルが考えられている (図 2.2)。1 つ目は、回転している中性子星の極の表面付近で磁力線に平行な磁場が生じ、そこで粒子が加速されながら磁場に巻き付いて表面付近で放射が起こる Polar Cap モデルと呼ばれるものである。2 つ目のモデルは、Outer Gap モデルと呼ばれる (Cheng et al.1986)。中性子星からは磁力線が出ており中性子星が回転していなければその磁力線は無限遠まで閉じたままの状態を取ることができる。しかし実際は中性子星が回転している為に、ある半径 r_L (ライトシリンダー) で磁力線の速度が光速になってしまい、その r_L を越えると磁力線が切れて開いた状態 (Outer gap 領域) になり、電荷のない領域が出来る。その時の r_L は中性子星の角速度 ω を用いて $r_L = c/\omega$

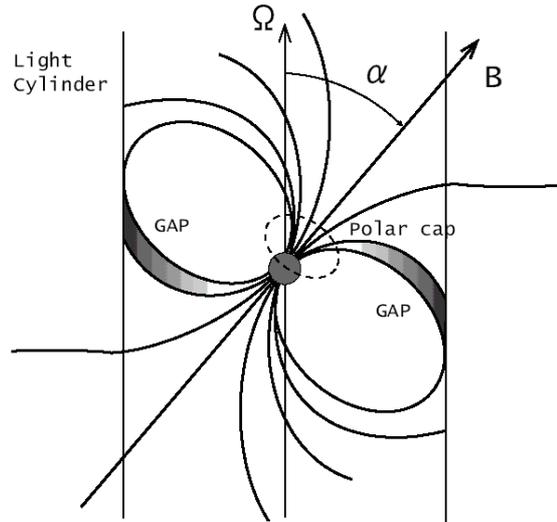


図 2.2: 回転駆動型パルサーの放射理論モデル。それぞれのモデルで異なる領域の磁気圏から線が放射される。polar cap モデルは極近傍から、outergap モデルは、ライトシリンダー近傍から線が放射される。caustic モデルは極からライトシリンダーにかけての領域で線が放射される。

と表される。閉じた磁力線の上では、電荷の分離によってパルサーの回転起電力 ($\sim 10^{15}\text{V}$) が打ち消されるために、電荷は加速されず効率的な放射を起こすことが出来ない。しかし、磁場が開いている Outer Gap 領域では 10^{15}V というポテンシャルによって、電子陽電子の対生成及び、加速が行われて線が放射されるというのが、Outer Gap モデルである。しかしこのモデルでは、かにパルサーで見られるようにパルスが放射されていない位相での放射 (off-pulse 放射) をうまく説明することができない。そこで3つ目のモデルとして polar cap からライトシリンダーにかけての領域で放射が行われる caustic モデル (Dyks & Rudak 2003) が考え出された。このモデルは加速領域を polar cap からライトシリンダーまで拡張することで、光速が有限なために異なる領域から放射が起きることによって生じる時間差と光行差の効果が生じ、かにパルサーのようなパルサー天体のライトカーブを説明しようとするものである。

このように回転駆動型パルサーの放射機構を説明するモデルとして、polar cap モデル、outer gap モデル、caustic モデルという3つのモデルがあるものの、これまでの分光や測光観測ではどれが正しいのか決着をつけることができていない。しかしそれぞれのモデルは図 2.3 のように位相毎に全く異なる偏光度、偏光面を予言する為、偏光観測を行うことによって初めて回転駆動型パルサーの放射機構を不定性なく決定することができる。

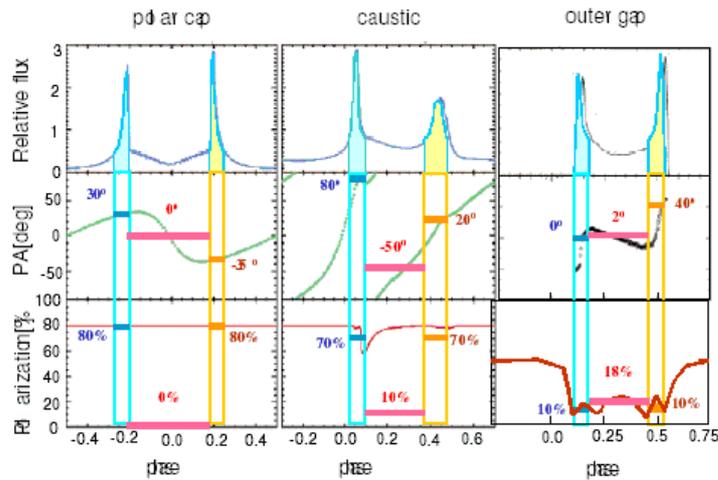


図 2.3: かにパルサーに対して、それぞれのモデルで予想される各位相での偏光度と偏光面の理論予想。共にに各モデルで異なる為、偏光観測を行うことで放射機構を決定する事が出来る。

2.3 偏光計の原理

X 線は粒子性が強いため電波や可視光のように偏光板などを用いて偏光を観測することが出来ない。X 線領域での偏光観測には、光電効果、ブラッグ反射、コンプトン散乱を利用した検出器が存在する。ここでは、それらの方法を用いた X 線偏光計について述べる。

2.3.1 ブラッグ反射を利用した偏光計

入射した X 線の波長を λ 、結晶の格子定数を d 、結晶面にたいしての角度を θ とすると、任意の整数に対して式 (2.2) の回折条件が与えられる。

$$m\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.2)$$

この条件が満たされて起こる反射をブラッグ反射と呼ぶ。この時、入射した X 線は、その偏光面 (電場ベクトル) が結晶面に対して平行な場合は反射率が最大となり、面に対して垂直な場合は反射率はゼロとなる。よって偏光した X 線を結晶に入射した場合はある一定方向にのみ散乱されるため、結晶面を固定したまま回転させることによって、モジュレーションファクタ (後述) が 100% に近いモジュレーションを得ることができる。この原理を用いたのが OSO-8 衛星で、この衛星によるかに星雲の観測が、現在まで唯一 X 線で偏光を測った例である。しかし、このブラッグ反射が起きるのは特定の波長のみであり、さらに 3 次以上

の反射の場合はその強度が急激に落ちてしまう。その為、OSO-8 衛星では、1 次と 2 次の反射、つまり単色の 2.6keV、5.2keV という非常に狭いエネルギー領域でしか偏光を検出できなかった。

2.3.2 光電効果を利用した偏光計

偏光した X 線が光電吸収される時、K 殻から放出される電子の角度分布を含んだ微分散乱断面積は、式 (2.3) で与えられる (Ramsey et al.1994)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{\sin^2\theta \cos^2\phi}{(1 - \beta \cos\theta)^4} \quad (2.3)$$

ここで θ は入射光子の方向と放出された光電子の方がなす角、 ϕ は入射光子の偏光方向と放出された光電子の方向が成す方位角、 β は電子の速度 v と光速を c の比 ($\beta = \frac{v}{c}$) である。この式から、 $\phi = 0$ 度、つまり入射光子の偏光方向に沿って光電子が放出されやすいことが分かる。

この性質を利用して偏光を検出することができる。例えばガス比例計数管の中に偏光した光子を入射させると、比例計数管の中で光電吸収された光子は偏光面に沿って光電子を放出して偏光方向に偏った電子雲が形成される。その電子雲を GEM(Enrico Costa et al.2001)などで増幅し、更に読み出しとなる電極をピクセル化することで電子雲の広がり方向を捉え偏光を観測する研究が現在行われている。

また光電吸収は数 keV から数十 keV で支配的な相互作用であり、ブラッグ反射と異なり連続的に偏光を捉えることができる為、軟 X 線領域での偏光観測に適している。また後述のコンプトン散乱の場合 (式 2.4) と比較すると、コンプトン散乱の反応断面積は散乱角が 90 度ではない限り方位角がどのような値を取ってもゼロになり得ないが、光電吸収の場合ではその反応断面積は、 $\phi = 90$ 度の時はゼロになる。よって方位角ごとの変調を考えた場合、コンプトン散乱では原理的にモジュレーションファクタ (セクション 2.3.3 で述べる) は、100%になりえないが、光電吸収ではモジュレーションファクタ 100%を達成できる。

2.3.3 散乱型偏光計

コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、光子と電子が衝突することによって、光子と電子の間でエネルギーと運動量をやりとりする過程である。(図 2.4)

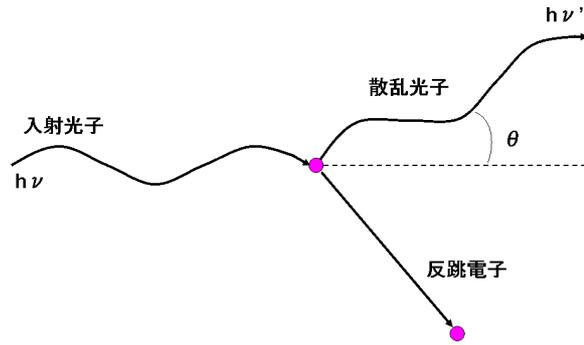


図 2.4: コンプトン散乱の概念図

入射 X 線光子のエネルギーを $h\nu$ として電子の静止質量を m_e とすると、散乱後の光子のエネルギー $h\nu'$ は以下の式 (2.4) で表せる。

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (2.4)$$

式から分かるように散乱光子は全角度に散乱することが可能であり、電子に伝えられるエネルギーは 0 から入射 X 線のエネルギーに近い値まで存在しうる。 $h\nu \ll m_e c^2$ のときは、 $h\nu = h\nu'$ でありトムソン散乱となる。実際の物質における散乱では、束縛電子の持つ運動量のため、 θ が一定でも $h\nu'$ の周りで広がったエネルギー分布となる (ドップラーブロードニング)。

散乱 X 線の角度分布は、微分散乱断面積 $d\sigma/d\Omega$ に対する Klein-Nishina の式 (2.5) で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \left(\frac{k_0}{k_c}\right)^2 \left(\frac{k_c}{k_0} + \frac{k_0}{k_c} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi\right) \quad (2.5)$$

ここで $r_0 = \frac{e^2}{4\pi m_e c^2}$ は古典電子半径、 $k_0 = h\nu$ および $k_c = h\nu'$ は、それぞれ入射光子のエネルギーと散乱光子のエネルギー。 ϕ は入射光の電場ベクトルの向きから測った散乱方向の方位角、 θ は光子の入射方向に対する散乱方向の仰角、 e は電子の電荷である (図 (2.5))。

式 (2.5) で分かるように偏光した光子のコンプトン散乱は方位角について異方性があり、偏光方向に対して垂直 ($\theta=90$ 度) に最も散乱しやすいと言える。この性質を用いたのが、散乱型偏光計である。

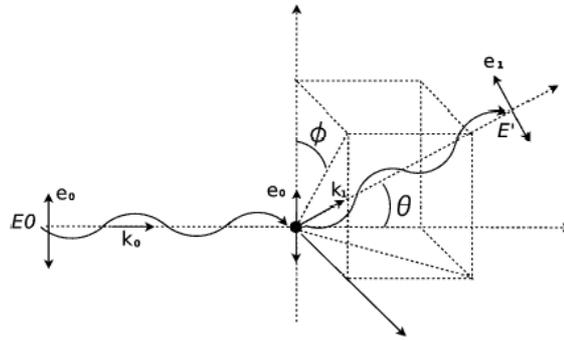


図 2.5: 偏光した光子が散乱された時の概念図

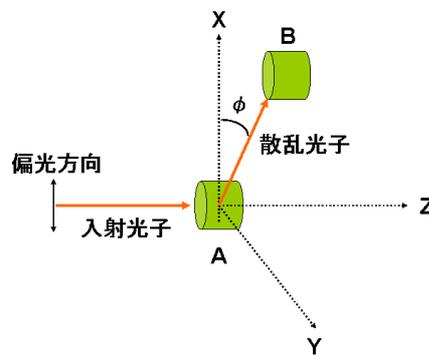


図 2.6: 理想的な偏光計。微小体積の散乱体 A でコンプトン散乱された光子が、微小体積の検出器 B で検出される。検出されるイベントは角度 ϕ に依存する。

散乱型偏光計の検出原理

上記のように偏光した光子は偏光方向に対して垂直に最も散乱されやすいことから、偏光を検出するには、最も単純には、原子番号が小さくコンプトン散乱を起こしやすい物質(散乱体)で散乱された光子をそのまわりに配置した検出器で検出し、カウント数の異方性を測ればよい。PoGOLite 検出器もこの散乱型の偏光計である。

図 (2.6) のように微小体積の散乱体 A で光子が散乱され、微小体積の検出器 B で検出する理想的な偏光計で考える。検出器 B を光子の入射ベクトルに対して軸対称に動かして方位角 ϕ でのカウント数の変調を測る。このとき θ と ε は変化しないので、微分断面積の式 (2.5) は C、D を正の定数とすると以下のように表せる (式 (2.6))

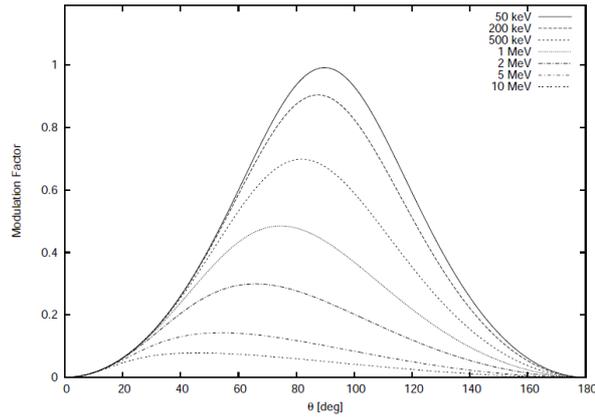


図 2.7: モジュレーションファクタの θ 依存性

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = C - D \cos 2\phi (C > D) \quad (2.6)$$

これから検出される散乱光子の数は、 ϕ について周期 π で変調する。この変調は散乱体や検出器が有限の大きさを持っていても同様である。

散乱型偏光計の能力の指標のひとつにモジュレーションファクタ M というものが有る。これは、100%偏光した入射光子について、散乱光子のカウントレートを N とすると次式のように定義される。

$$M \equiv \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (2.7)$$

ここで N_{max} はカウントレートの変調での最大値、 N_{min} はカウントレートの変調での最小値であり (式 2.1) の偏光度で光の強度の代わりに装置で検出されたイベント数を用いた式になっている。このパラメータは、完全偏光に対して装置により偏光由来の異方性がなまされていない度合を示すもので N_{min}/N_{max} が小さいほど M は 1 に近くなり、偏光の情報がよく保たれていることになる。逆に入射光子の散乱位置と吸収位置を知る精度が悪いとモジュレーションが小さくなり、 M は小さくなる。これは偏光がなまされていることに対応する。それ以外にも、 M は検出器の位置 (散乱角 θ) によって変わる。

図 (2.7) は、無限小のサイズの散乱体・吸収体を用いた際のモジュレーションファクタを散乱角の関数としてプロットしたものであり、微小体積の散乱体、吸収体で構成された理想的な偏光計の場合でも、 θ が 90 度から外れた散乱を用いるとモジュレーションファクタを小さくしてしまうことが分かる。また光子のエネルギーが電子の静止質量 511keV より大きい場合も M は 1 より小さくなる。

ここで、ある偏光度 P の光子を入射したときのモジュレーションファクターを M 、100パーセント偏光に対するモジュレーションファクターを M_{100} とすると、 P は $P = \frac{M}{M_{100}}$ と表せる。逆に M と P から M_{100} を求めることもできる。 M が小さくなると、偏光による変動が統計誤差の範囲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いが、 M_{100} が大きい偏光計ならば P が小さくとも M が大きくなり、偏光を検出することができる。したがって M_{100} が大きい偏光計は性能が良いと言える。 M_{100} を大きくするには、装置を小型にする、散乱角を 90 度付近に制限する、光源以外の事象 (バックグラウンド) を下げる等の手段がある。

第3章 PoGOLite 検出器

3.1 PoGOLite 計画の概要

宇宙からの X 線、 γ 線は地球の大気により吸収、散乱されるため地上まで到達しない。その為天体からの X 線、 γ 線を検出するには装置を衛星や気球に搭載して観測をする必要がある。PoGOLite 計画は、気球による X 線偏光観測を狙ったミッションである。2004 年に 30-100 keV の X 線偏光を狙った PoGO 計画として発足し、その後装置のサイズを約半分にし、到達高度を上げる (大気による吸収を減らす) ことで同程度の感度を達成する PoGOLite 計画として 2006 年に発足した。2009 年のフライトに向けて日欧米の国際協力の下で、開発を行っている。日本からは、広島大学、東京工業大学、山形大学、宇宙科学研究所が参加しており、特に、広島大学は、読み出し回路の開発と評価、東京工業大学は、光電子増倍管の開発と評価を主に担当しており、センサーの試験やシミュレーションプログラムの開発も共同で行っており、PoGOLite グループの中でも中心的な役割を担っている。気球による観測は、衛星に比べてコストが安く、開発期間が短いというメリットがある。その反面、観測時間に制限がつく (~ 6 時間) 為高い S/N (シグナルとノイズの比) が必要になる。我々がターゲットにしている天体からの放射強度は代表的な X 線天体である、かに星雲の放射強度の約 10 分の 1 程度 (25-100 keV で 0.3 光子/s/cm²) である。このよう状況で観測を実現するには、検出器の低バックグラウンド化が必要不可欠である。PoGOLite 検出器は、『すざく』衛星の硬 X 線検出器でも採用された井戸型フォスウィッチカウンターのデザインを用いることによって低バックグラウンド化を実現し、コンプトン散乱の異方性を利用して 25 keV-100 keV の領域で偏光観測を行う。これまで実験室での各コンポーネント毎の詳細試験や、アメリカ合衆国アルゴンヌ研究所及び、筑波の高エネルギー加速器機構のシンクロトロンビームを用いた 7 ユニットから成るプロトタイプの偏光試験、大阪大学の核物理研究センターのプロトンビームを用いた読み出し回路の試験等を通して順調に開発を行ってきた。現在はセンサーの量産を始めており、読み出し回路の開発やセンサーの試験も行っている。2009 年の最初のフライトでは、Cyg-X1 やかにパルサーからの偏光を観測することによって、その放射機、降着円盤の構造の解明を行い、本格的な X 線偏光観測の幕開けを目指している。

3.2 PoGOLite 検出器のコンポーネント

3.2.1 シンチレーター

シンチレーターとは、電荷を帯びた粒子が当たると蛍光を出す物質である。粒子が物質を通過する際に、結晶中の最外殻電子を励起し、励起された電子は10万分の1秒から10億分の1秒という短い時間で元の状態に戻る。この、励起されたエネルギー順位と元の状態との差に応じた光(シンチレーション光)が出る。

シンチレーターは、有機シンチレーターと無機シンチレーターの2種類のグループに分類できる。有機シンチレーターは、一般に減衰時定数が短い光量小さい。それに対して無機シンチレーターは、減衰時定数が長く、光量大きいという特徴がある。PoGOLite 検出器は、有機シンチレーター(プラスチックシンチレーター)と無機シンチレーター(BGOシンチレーター)を主検出部及びシールド部に用い、減衰時定数の違いから両者の信号を区別する(3.4及び6章)。

3.3 光電子増倍管

光電子増倍管は、光を読み出すセンサーであり光センサーの中でも極めて高感度、高速応答な検出器である。図(3.1)に示すように光を電子に変換する陰極(光電面)、集束電極、電子増倍部、電子を集める陽極を真空の容器に収めたものである。光が光電面に入射すると光電効果により光電面から真空中に光電子が放出される。その光電子は集束電極によって電子増倍部に導かれ、電子増倍部では二次電子放出によって増倍される。増倍された電子は、出力信号として陽極に集収される。典型的な光電子増幅率(陽極電流と陰極電流の比)は $10^6 \sim 10^7$ 倍にも達する。この二次電子放出効果による増幅の為、光電子増倍管は、紫外光、可視光、近赤外光の測定に使われる受光素子の中では際立った感度と低ノイズ性を有している。また高速時間応答特性、受光面の大きなものが出来るなどの特徴があり、高エネルギー加速器実験、高エネルギー宇宙観測において広く用いられている。例えば超新星SN1987Aからのニュートリノの観測で有名なカミオカンデやX線衛星『すざく』搭載硬X線検出器でもこの光電子増倍管が用いられている。

3.4 PoGOLite 検出器の構成

PoGOLite 検出器は、217ユニットから成り、それぞれのユニットは通常のプラスチックシンチレーター(減衰時定数は、約2 ns:fastシンチレーター)、減衰時定数の長い(~230ns)シンチレーター(slowシンチレーター)、BGOシンチレーター(減衰時定数~300ns)と言

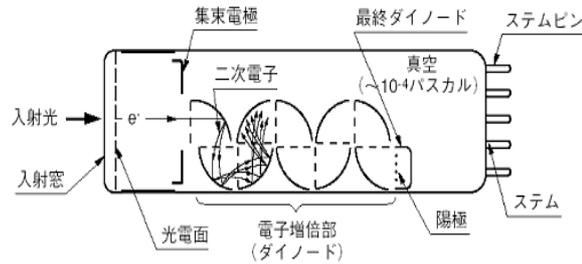


図 3.1: 光電子増倍管 (ヘッドオン型) の断面図

う、それぞれ異なる減衰時定数を持つシンチレータ - で構成されており、読み出しは 1 本の同じ光電子増倍管で行う (図 3.2)。主検出部となる Fast シンチレータは光子の散乱体かつ吸収体として用いる為、原子番号 Z の小さいプラスチックを用いており長さ 20 cm と X 線に対して十分な反応率を持っている。コリメーターはバッググラウンド除去の為、十分狭い視野 (約 1.2 mSr) を持つ長さ 60 cm の中空の六角形である為、加工の容易なプラスチックを用いる。六角形という形状にすることによって円形に比べ、隣り合うユニット間がほぼには密着し、四角形よりも面の数が多いため、より精度良く散乱の角度、すなわち偏光方向のを知ることができる。底辺のシンチレータ (厚さ 3 cm) 及び側面のシールドには阻止性の高い (原子番号の大きい) BGO を用いる。またコリメーターはプラスチックである為、高エネルギーの X 線に対して阻止性が小さい。その為コリメーターの外周にスズ及び鉛をパッシブシールドとして巻く。鉛を巻くことでバッググラウンド源となる X 線、 γ 線を吸収しバッググラウンドを低減させる。また鉛は光電吸収をする時に特性蛍光 X 線 (約 74 keV) を放出する為、それを吸収する為に内側にスズを巻く。スズの特性蛍光 X 線は約 20 keV である為、PoGO の観測エネルギーバンドではほとんど検出されず影響を与えない。

3.5 PoGOLite の偏光検出原理

上記で説明したように PoGO 検出器は、1 ユニットが主検出部 (fast シンチレータ)、コリメーター (slow シンチレータ)、底面シールド部 (BGO) から成り、それを 217 本蜂の巣状に並べ側面を 54 本の BGO シールドで囲んだ検出器である (図 3.3)。

観測対象の天体からの 線光子は、主検出部の fast シンチレータに当たり、コンプト

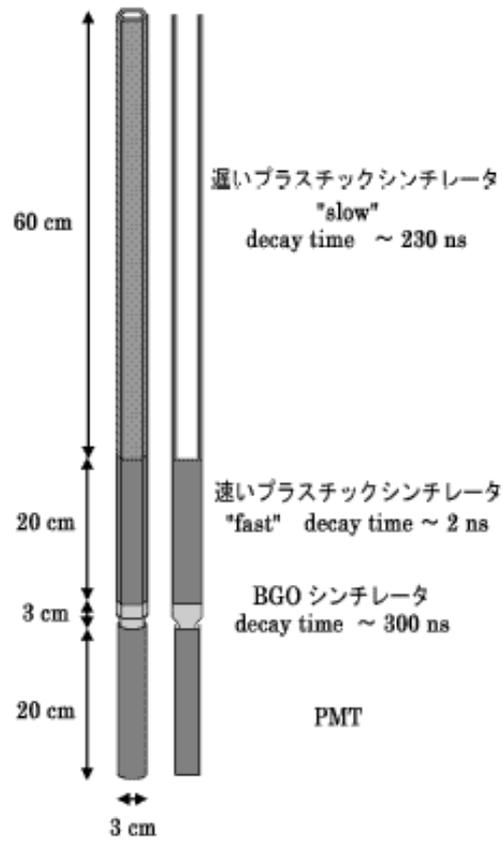


図 3.2: PoGOLite 検出器の 1 ユニットの構成

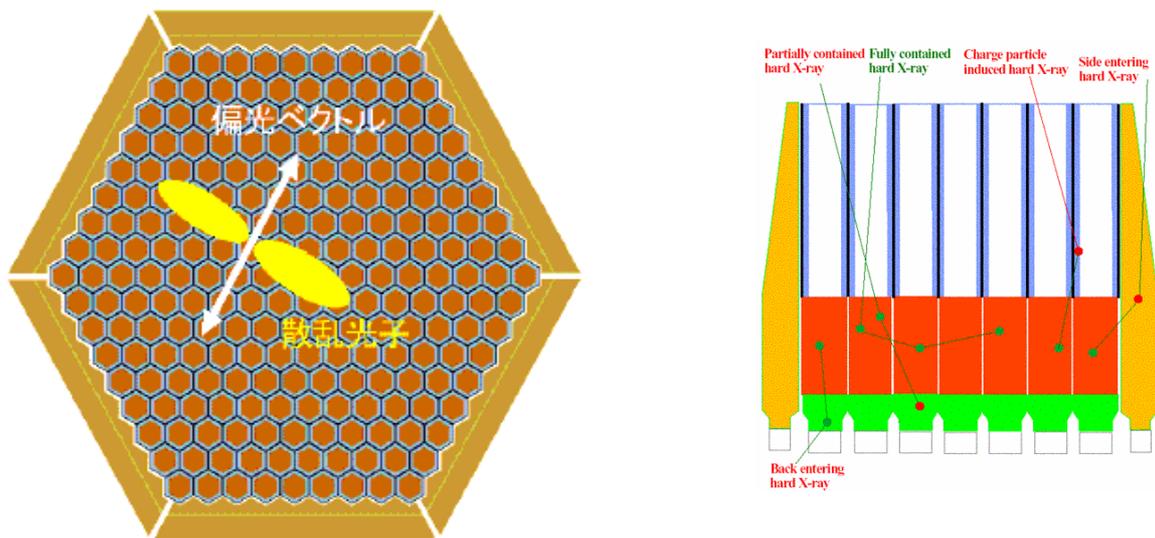


図 3.3: (左) 真上から見た PoGOLite 検出器。X 線光子は偏光ベクトルに対して垂直方向に散乱しやすく、この散乱方位角から偏光方向を測る。(右)PoGOLite 検出器の断面図

ン散乱されてその周辺の別ユニットの fast シンチレーターで光電吸収される。その 2 つのユニットに落ちたエネルギーを測ることによってどちらのユニットでコンプトン散乱、光電吸収がされたかが分り、散乱方向を知ることができる。X 線光子は偏光ベクトルに対して垂直な方向に散乱されやすいので、散乱方向から X 線の偏光ベクトルの方向を決定することができる。

しかし、観測対象の天体以外だけでなく、宇宙背景放射や大気からの散乱線、高エネルギー荷電粒子 (電子、ミュオン等) が耐えずあらゆる方向からやってくる。それらのバックグラウンドになるようなイベントは、正面以外は側面、底面シールドでエネルギーを落とすため、除去することができる。正面方向からくるバックグラウンドイベントは、真正面以外は長いコリメーターに当たり反応するため除去することができる。これら全てのイベントの信号を同じ光電子増倍管を用いて読み出すため、それぞれの信号を区別するのに各シンチレーターの時定数の違いから、プリアンプの立上りの速さの違いを利用した波形弁別を行う。それによって主検出部で反応したイベントのみをとりだすことができる。この波形弁別については、6 章で詳しく述べる。図 (3.4) は、バックグラウンドのシミュレーション結果である。左図は、slow シンチレーター /BGO が上述したようなアクティブシールド (スレシヨルドが 30 keV) として機能した場合のバックグラウンドを成分に分解した図であり、低エネルギーでは視野内の X 線背景放射 (CXB) が主成分である一方、高エネルギーでは上向き、下向きの大気ガンマ線の寄与が大きくなる事が分かる。右図は、slow シンチレーター /BGO

のスレシヨルドを 10 keV、30 keV、100 keV、300 keV、1 MeV と変えた場合のバックグラウンド強度である。これを見ると 100 keV 以下のスレシヨルドでは、バックグラウンドが 10~20 mCrab と十分小さくなっていることが分かる。一方、300keV 以上では PoGOLite の有効面積が最大となる 30-50 keV では、バックグラウンドがターゲット天体からの強度と変わらないくらいまで大きくなってしまふ為、slow シンチレーターやボトム BGO のスレシヨルドを最低 100 keV(可能なら 30 keV) 以下にすることが必要であることが分かる。また観測エネルギーの下限 25 keV を実現するには、fast シンチレーターにおいて光電吸収体では 20-25 keV まで slow/BGO の信号と区別できること、散乱体では吸収体とのコインシデンスも活用した上で、2-3 keV まで slow/BGO の信号と区別できることが要求される。

PoGOLite のエネルギー下限が 25keV であるのに対して、国内の PHENEX 計画や CIPHER、GRAPE 計画等の諸外国の他ミッションは、エネルギー下限が 40~50 keV 程度、バックグラウンドが 1 Crab 程度である。このように PoGOLite 検出器は徹底した低バックグラウンド化、高性能センサー及び光電子増倍管により、100 mCrab の強度の天体から 10% 偏光を検出することができる。また高感度観測を実現する為には、主検出部である fast シンチレーターはもちろん、slow シンチレーター、BGO が十分な光量を持つこと、これらの信号を波形弁別で区別することが重要であることが分かる。

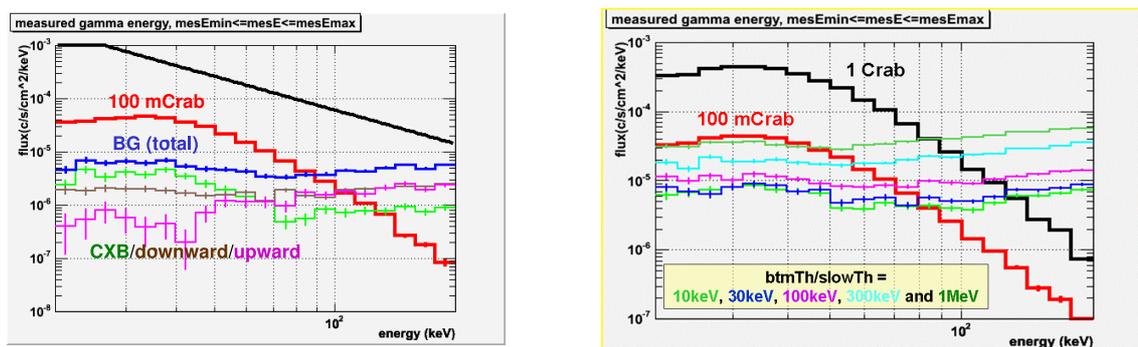


図 3.4: (左)slow シンチレーター / ボトム BGO のスレシヨルドが 30keV の場合のバックグラウンド成分分解。(右)slow シンチレーター /BGO のスレシヨルドを変えた時のバックグラウンド。

第4章 プラスチックシンチレーターの特性 試験

4.1 目的

3章で述べたように、PoGOLite 検出器において高いバックグラウンド除去能力と、40-50 keV 以下の低いエネルギーの X 線に対する感度は、必要不可欠である。低エネルギー光子に対する感度を得る為には、主検出部である減衰時定数の速いプラスチックシンチレーター (fast シンチレーター)、コリメーターである減衰時定数の遅いプラスチックシンチレーター (slow シンチレーター) 共に大きな光量を要求される。6章で詳しく述べる波形弁別では、fast シンチレーターで散乱及び吸収の起きたイベントと BGO 及び slow シンチレーターで散乱、吸収されたイベントを切り分けて fast シンチレーターのみで反応したイベントを取りだす。PoGOLite では、25-100 keV の領域をターゲットにしており、天体からの光子数の多い低エネルギーにおいて天体からのイベントを正しく波形弁別できるかどうか、感度に効いてくる。したがって最下限である 25 keV の X 線が進行方向に対して 90 度方向にコンプトン散乱された 2~3 keV のエネルギーを十分検出できるだけの光量が要求される。また 3章で述べたように、slow シンチレーターで検出できるエネルギーを出来るだけ下げることが、バックグラウンド除去性能に効いてくる (具体的には 100 keV 以下)。そのためこの 2 種類のシンチレーターが PoGOLite の要求する性能を得られるか測定を行った。また slow シンチレーターは、視野を絞る目的で厚さが 2 mm、長さが 60 cm と長い構造になっている為、その先端部と根元では光量に差が生じてしまう。そこで位置による光量の依存性も測定した。また最終的な 1 ユニットでは、2 本のシンチレーターにボトム BGO と光電子増倍管が取り付けられ全長が 1 m と非常に長くなる為アライメントを取るのが困難である。そのためボトム BGO と光電子増倍管の間に光学ラバーを挟む。光学ラバーを挟むことによって光量が減衰するためその減衰の厚さによる依存性も測定した。以上のような測定を行い全体として PoGOLite の要求性能を満たすかを試験した。本試験はシンチレーターの性能評価を主に担当するアメリカ合衆国スタンフォード線形加速器センターで 2005 年夏に行った。



図 4.1: PoGOLite 用 fast シンチレーター。全長 20 cm

4.2 時定数の速いプラスチックシンチレーターの特性試験

4.2.1 初期モデルの基礎特性試験

PoGOLite 検出器の主検出部である fast シンチレーターの最初の試作品 (以降 2003 年ロットと呼ぶ) のエネルギー分解能、光量についての試験を行った。

セットアップ

fast シンチレーターは図 (4.1) の様に六角柱の形状をしており長さが 20.0 cm で向かい合う辺の間の長さが 2.755 cm である。この側面と上面は実機で反射材として用いられる VM2000(多層樹脂膜) で覆い、底面と光電子増倍管を光学グリースを用いて接続した。ここで、光電子増倍管は、PoGOLite ミッションで用いられる R7899 ではなく、同じ浜松ホトニクス社の 39 mm 径の H3178X を用いた。これは、R7899 では、光電面が小さく fast シンチレーターを直接接合して測定することができないためである。

実験セットアップは図 (4.2) のようになっている。光電子増倍管 (Model H3178X ,S/N WA1651, 印加電圧 -870V) から出た電荷信号は、プリアンプ (CSA, Clear Pulse 557) を通って電荷量に比例する電圧値に変換されて、シェーピングアンプ (Clear Pulse 4056) に入り波形整形され、最終的に ACD ボード (PCI9812) に入り AD 変換される。ここでは、 ^{241}Am (59.5 keV)、 ^{55}Fe (5.9 keV) の放射線源を用いて測定を行った。PoGOLite では、上述したように観測エネルギーの最下限値である 25 keV の X 線の 90 度方向へのコンプトン散乱の際に落とす 2~3 keV まで検出しなくてはならない。その為、そのエネルギーに近い 5.9 keV の ^{55}Fe と、光電吸収した際のエネルギーとして 59.5 keV の ^{241}Am を用いて測定を行った。

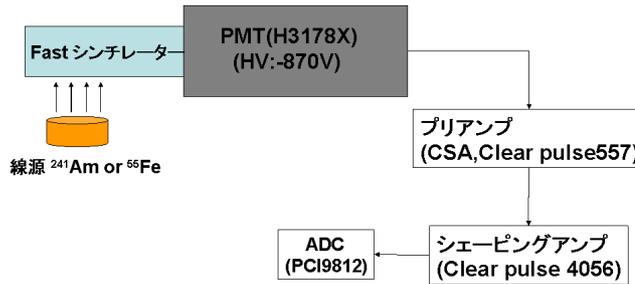


図 4.2: fast シンチレータ特性試験のセットアップ

実験結果

この試験の結果 ^{241}Am (59.5 keV) のスペクトルが、図 (4.3) ^{55}Fe (5.9 keV) のスペクトルが図 (4.3) のように得られた。

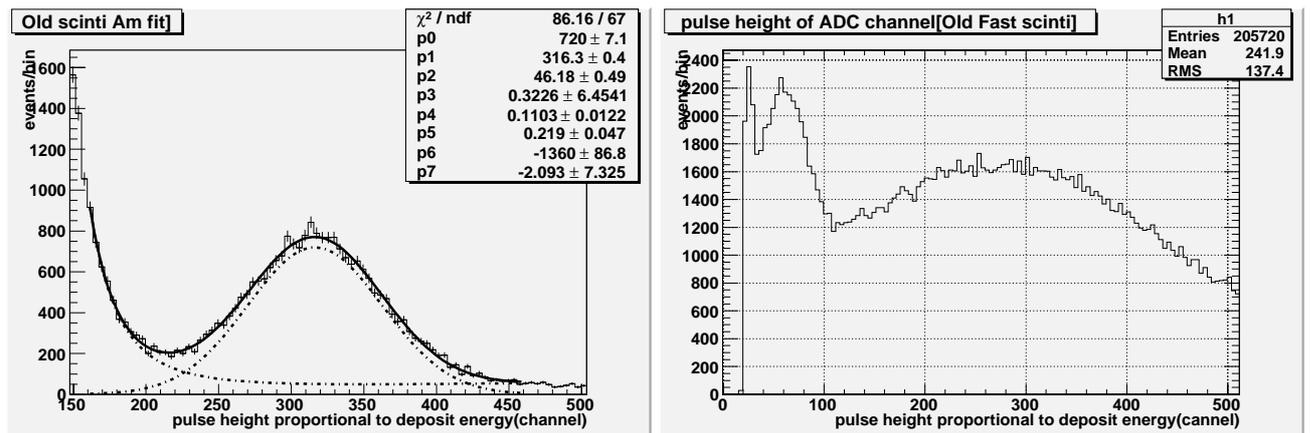


図 4.3: (左) ^{241}Am (59.5 keV) のガウシアン関数+バックグラウンドでフィッティングしたスペクトル。(右) ^{55}Fe (5.9 keV) のスペクトル

^{241}Am からの 59.5 keV の X 線が fast シンチレータで光電吸収される際に出る光子及び光電面から出る光電子の数の分布は、ポアソン分布に従う。ここで生じる光電子の数が 100 個程度と多い為、ガウシアンで近似をすることが出来る。従ってここで得られた ^{241}Am (59.5 keV) のスペクトルは、ガウシアン+バックグラウンドモデル関数(式 4.1) でフィッティングを行った。その結果が、図 (4.3 左) となる。

$$\text{Gaussian} + \text{BG}(x, p[0], \dots, p[7]) = p[0] \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-p[1]}{p[2]}\right)^2} + p[3] + p[4] \cdot x + p[5] \cdot e^{-\left(\frac{p[6]}{x-p[7]}\right)} \quad (4.1)$$

(x は変数、p[1] はガウシアンピークチャンネル、p[2] は標準偏差、p[3]…p[7] はバックグラウンドを表すパラメーターである)

このフィッティングの結果よりエネルギー分解能を半値幅 (FWHM) で求めると $\text{FWHM} = \frac{2.35 \times \sigma}{\text{PeakChannel}} \times 100$ より $34.3 \pm 0.4\%$ となった。また、図 (4.3 右) より 5.9 keV に対して光電子増倍管の熱ゆらぎによる one photo-electron との比が約 4.8 p.e.(photo-electron) となった。2-3 keV の光子に対して one photon-electron より大きな出力が得られる為、十分な性能 (光量) を有していると結論付けられる。

4.2.2 ロット依存性

上述したように、PoGOLite の主検出部に用いられる fast シンチレーターの試作 (2003 年ロット) の試験を行い、必要十分な性能を持つことが確かめられた。そこで大量生産に移行しそのサンプルが出来上がってきた (2004 年ロット)。しかしそのサンプルの性能が 2003 年のロットに比べ光量が約 5% 低いものであったため、製造元 (アメリカ合衆国 Elgen Technology 社) にフィードバックをかけた。その結果、製造過程で微小な不純物が混入していたことが判明し、改善を行い再度サンプルが出来上がってきた (2005 年ロット)。この 2005 年のロットが 2003 年と同程度以上の性能が出ているか測定、比較を行った。セットアップは前節 (図 4.2) と同じである。

測定の結果 $^{241}\text{Am}(59.5\text{keV})$ を用いたものを、図 4.4 左、 $^{55}\text{Fe}(5.9\text{keV})$ を用いたものが図 4.4 右にまとめる。それぞれ黒が 2003 年ロット、赤が 2004 年ロット、青が 2005 年ロットであり、これらの $^{241}\text{Am}(59.5\text{keV})$ ピークチャンネル、エネルギー分解能 FWHM(%), 光量比、one photo-electron 比をまとめたものが、表 (4.1) である。これから分かるように、2005 年のロットは、2003 年のロットよりも光量、one photo-electron との比共に約 5% 増加したことが分かる。このように 2005 年ロットで 2003 年ロットを上回る性能が確認できたので fast シンチレーターの全 217 本の大量生産に入った。

4.2.3 ボトム BGO の透過率測定

PoGOLite 検出器は、アクティブシールドとして光電子増倍管と fast シンチレーターの間にボトム BGO を挟む。ボトム BGO は大きさが約 3 cm と小型な為、内部減衰はほぼ無視で

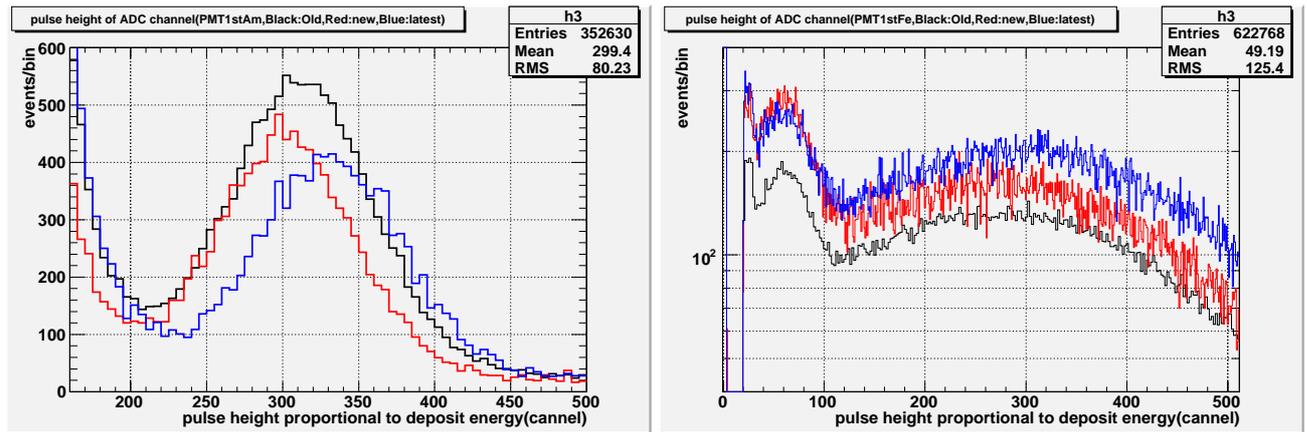


図 4.4: (左)2003(黒)、2004(赤)、2005 年ロット (青) の ^{241}Am (59.5keV) スペクトルによる光量比較。(右)3 本のロットの ^{55}Fe (5.9keV) のスペクトルによる光量の比較

表 4.1: 2003、2004、2005 年のロットのエネルギー分解能、光量、one photo-electron 比のまとめ

	ガウシアンフィット ピークチャンネル	エネルギー分解能 (%)	光量比 (%)	One photon 比 (p.e./5.9 keV)
2003 年ロット	317.0±0.4	34.1±0.4	100	~ 4.8
2004 年ロット	302.2±0.8	34.5±1.1	95	~ 4.5
2005 年ロット	331.1±0.7	33.5±0.6	104	~ 5.0

き、fast シンチレーターの光の透過率はその形状、主には上面 (幅 2.85 cm の六角形) と下面 (直径 2.3 cm の円) の面積比で決まる。そこでボトム BGO による光の透過率を調べる為に、ほぼ同じ形状で取扱いやすいアクリルライトガイドをもちいて透過率の測定を行った。また 6 章での波形弁別試験の際に簡易フォスイッチとして 1 cm 角の小型 fast シンチレーターを用いる。その結果を実機の長さ 20 cm の fast シンチレーターを用いた場合にスケールする基礎データとして、1 cm 角の fast シンチレーターと実機の fast シンチレーターでの比較試験を行った。

図 (4.5) のように、小型 fast シンチレーター+光電子増倍管 (R7899)、小型 fast シンチレーター+アクリルライトガイド+光電子増倍管 (R7899)、実機の fast シンチレーター+アクリルライトガイド+光電子増倍管 (R7899) の 3 つのコンフィグレーションで ^{241}Am (59.5 keV) を用いて測定を行った。

得られたスペクトルを図 (4.6) に、この各スペクトルを式 (4.1) のガウシアン+バックグ

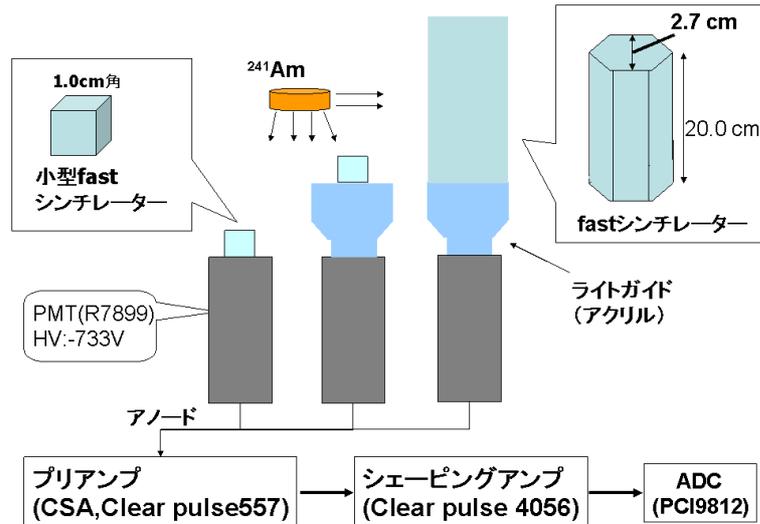


図 4.5: BGO の透過率試験+小型 fast シンチレーターと実機の fast シンチレーターの光量比較試験セットアップ

ラウンドの関数でフィッティングを行った結果を表 (4.2) に示す。

この結果、小型 fast シンチレーターを用いたアクリルライトガイドの有無による比較から、ボトム BGO を通すことによって光量が約 60% になることが分かった。さらに小型 fast シンチレーター+アクリルライトガイドと fast シンチレーター+アクリルライトガイドの比較から、PoGOLite 用 fast シンチレーターをボトム BGO を通して読み出した光量は、小型 fast シンチレーター単体に比べ約 40% であることが分かった。エネルギー分解能は光電子数のゆらぎで決まりポアソン分布に従う為平均値を N とすると標準偏差は \sqrt{N} となる。従ってエネルギー分解能 (半値幅 FWHM) は、式 (4.2) の関係がある。よって 60 keV の X 線に対するエネルギー分解能が約 40% であったことから、光電子数は約 35 個と求まり、5.9 keV の X 線で約 3 photo-electron であり、3 keV の X 線まで十分 one photo-electron と区別出来ることが分かる。

$$\text{FWHM} = \frac{2.35\sigma}{\text{peakchannel}} = \frac{2.35\sqrt{N}}{N} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \quad (4.2)$$

4.2.4 光学ラバーの厚み依存性

光学ラバーとは、二液性 RTV ラバーで作られる物で、無色透明で可視光の透過性が良く、弾力があり、加工や繰り返しの取扱いに優れている。このことから光電子増倍管とシンチレーターやライトガイドとの接合の為、高エネルギー実験の分野で広く用いられている。こ

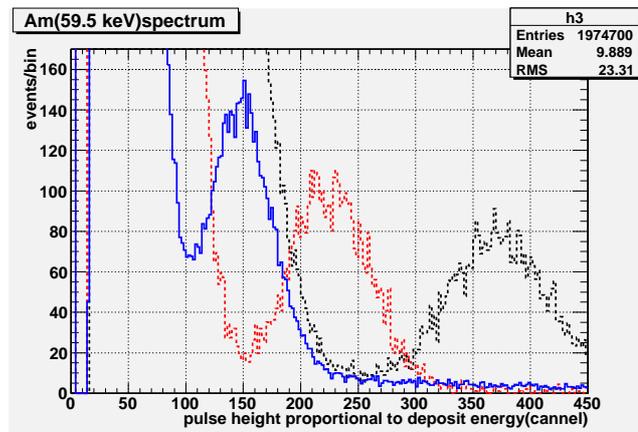


図 4.6: 各コンフィグレーションでの ^{241}Am (59.5 keV) スペクトル。黒が小型 fast シンチレーター、赤が小型 fast シンチレーター+アクリルライトガイド、青が fast シンチレーター+アクリルライトガイド

表 4.2: 各コンフィグレーションによる光量、エネルギー分解能

	ガウシアンフィット ピークチャンネル	エネルギー分解能 (%)	光量比 (%)
小型 fast シンチレーター (1 cm 角)	372.7 ± 0.7	28.0 ± 0.6	100
小型 fast シンチレーター (1 cm 角)+ アクリルライトガイド	225.4 ± 0.6	36.3 ± 0.7	60
fast シンチレーター+ アクリルライトガイド	149.2 ± 0.6	39.8 ± 1.8	40

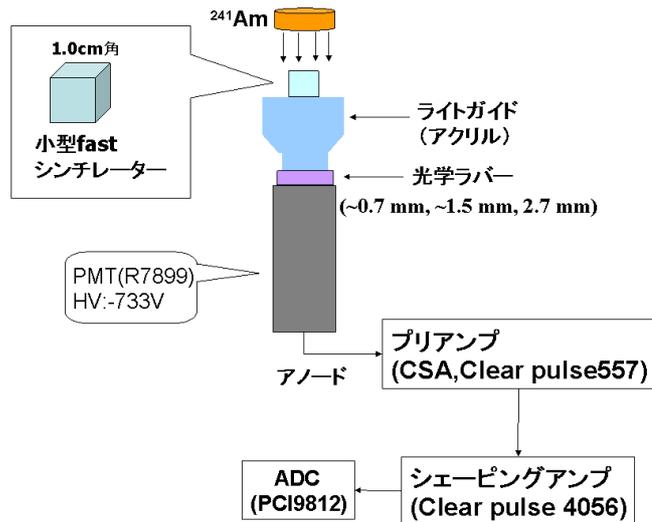


図 4.7: 光学ラバーによるの光量の厚さ依存試験のセットアップ

表 4.3: 光学ラバーによる光量の厚さ依存性

	ガウシアンフィットピークチャンネル	エネルギー分解能 (%)	光量比 (%)
光学ラバー無し	204.1 ±0.4	35.5±0.5	100
～ 0.7 mm	191.1±0.4	37.9±0.7	93.6
～ 1.5 mm	184.4±0.4	37.8±0.5	90.5
～ 2.7 mm	162.5±0.4	39.9±0.7	79.6

の光学ラバーは、KE108 と CAT108 をそれぞれ 20 対 1 でよく混ぜ、水平な台に乗せた容器に流し込んで一晩おいて作成する。このような光学ラバーを厚さ ~0.7 mm、~1.5 mm、~2.7 mm の三種類作成した。これらを図 (4.7) のようなセットアップで線源に ^{241}Am (59.5keV) を用いて測定し、光量の比較を行った。

得られたスペクトルを図 (4.8) に、これをガウシアン+バックグラウンド関数 (式 4.1) でフィッティングを行った結果を表 (4.3) にまとめる。この結果から、光学ラバーの厚さによる光量の減少は、およそ 5%/0.7 mm であることが分かった。またエネルギーエネルギー分解能は、光電子数を N_e として $N_e^{-\frac{1}{2}}$ に比例するという関係があり、そのため光量の減少が 5%/0.7 mm であった為、エネルギー分解能も 0.7 mm 当たり 3%悪くなっていると理解できる。この結果から実機では、光量の減少が少なく、かつ十分な強度及びアライメントの調整の余地があるものとして、1 mm 厚程度のものを作成して用いることとした。

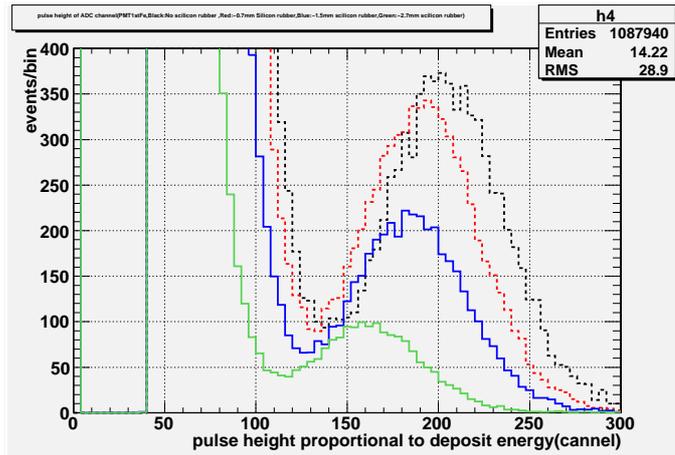


図 4.8: 各厚さの光学ラバーでの ^{241}Am (59.5 keV) スペクトル。黒が光学ラバー無し、赤が ~ 0.7 mm、青が ~ 1.5 mm、緑が ~ 2.7 mm のスペクトル

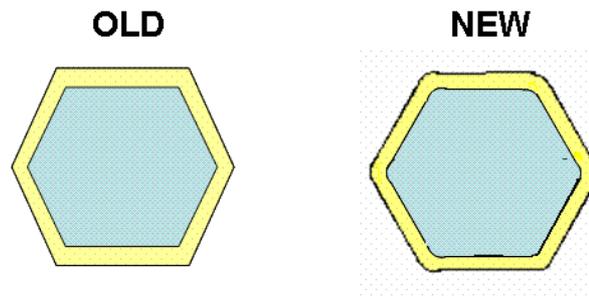


図 4.9: slow シンチレーターの形状。左が古いデザインのもので断面が六角形になっている。右が新しいデザインで六角形の角を落とし丸みのある形状になっている。

4.3 時定数の遅いプラスチックシンチレーターの特性試験

slow シンチレーターのこれまで (2004 年まで) の形状は、図 (4.9 左) に示すように断面が六角形の形状であった。この slow シンチレーター (OLD と呼ぶ) の光量の位置依存性は、先端部と根元で 1 : 3 となっており、根元で 30keV まで測定できたとして、先端では、120keV までしかアクティブシールドとして機能しないことになる。先端部の光量の大幅な減衰は、角から光が逃げやすい為と考えられ、新たに図 (4.9 右) に示すように、六角形の角を落とし丸みのあるデザインのシンチレーター (NEW と呼ぶ) を作成した。これにより、OLD の際に外に逃げてしまっていた光を反射させることにより、先端と根元での位置依存性が小さくなることを期待した。ここでは、 β 線源を用いて新旧 2 種類の slow シンチレーターの位置依存性の比較試験を行い、また根元に ^{241}Am を照射して、エネルギー分解能などの基礎特性を求めた。

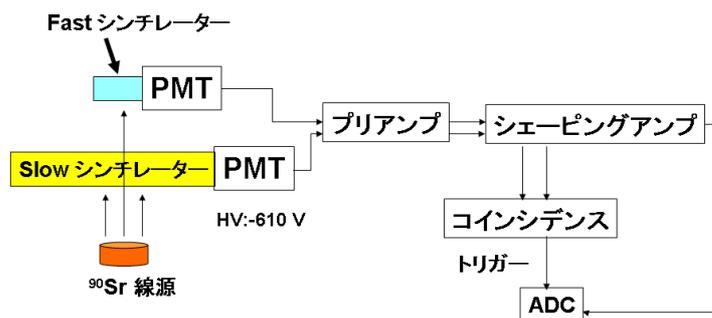


図 4.10: slow シンチレーター (NEW) の光量の位置依存性試験のセットアップ

4.3.1 位置依存性

slow シンチレーターは、上記で述べたように厚さが 2 mm と薄い為、阻止能が小さく、データ取得の効率が悪い。さらに放射線源の照射位置による依存性が大きく、 ^{241}Am では根元以外は光量が低過ぎる為、精度良くピーク的位置を出すことができない。そのため今回の実験では、 β 線である ^{90}Sr (最大エネルギー 2.2 MeV) を用いて測定を行った。 β 線は、物質と反応する際その透過距離に応じて一定のエネルギーを落とす為、距離さえ同じにしておけば、一定の光量が得られる。各場所での光量を比較すれば先端から光電子増倍管までの信号の減衰がどの程度か見積もることができる。

実験セットアップ

図 (4.10) に示すセットアップを用いて測定を行った。測定の位置は、光電子増倍管から、5 cm、15 cm、25 cm、35 cm、45 cm、55 cm の 6 点で行った。

上記で述べた様に、透過距離が一定のイベントのみを取得しなくてはならない。そこで図 (4.10) のように、 ^{90}Sr の線源と slow シンチレーターを挟んで反対側に小型 fast シンチレーター (1 cm 角) をアクリルライトガイドを通して取り付けられた光電子増倍管を用意して slow シンチレーターの出力とコインシデンスを取り完全に slow シンチレーターを透過したイベントのみデータ取得した。

実験結果

実験の結果、得られたスペクトルを図 (4.11) に示す。ここで、黒が光電子増倍管から 5 cm、赤が 15 cm、青が 25 cm、ピンクが 35 cm、灰色が 45 cm、緑が 55 cm の位置に ^{90}Sr を

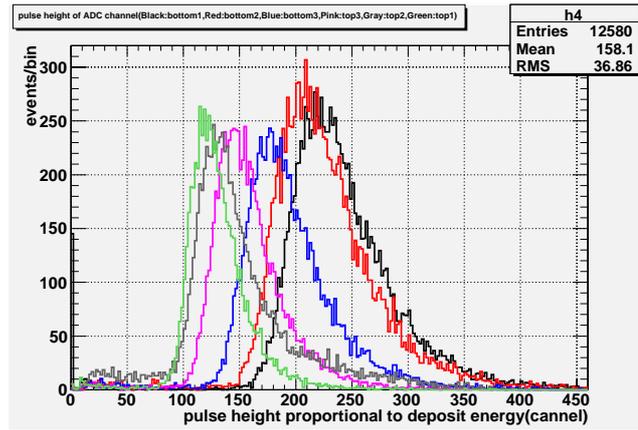


図 4.11: slow シンチレーター (NEW) の位置依存性。黒が光電子増倍管から 5 cm、赤が 15 cm、青が 25 cm、ピンクが 35 cm、灰色が 45 cm、緑が 55 cm の位置に ^{90}Sr を照射した時のスペクトル

照射した時のスペクトルになる。ここから先端部 (緑) と根元 (黒) の光量比が、およそ 1 : 2 となることが分かる。また二種類の形状の違う slow シンチレーターの位置依存性を図 (4.12) にまとめる。ここから断面の六角形の古いデザイン (OLD) の光量が先端と根元で、およそ 1 : 3 だったものが、六角形の角を落としたデザイン (NEW) では上記で述べたように 1 : 2 となり位置依存性が半分になったことが分かる。

4.3.2 基礎特性試験

上記で位置依存性を測った新しい slow シンチレーターで、60 keV のエネルギーに対して光量、分解能等の基礎特性を測る実験を行った。図 (4.13) のように slow シンチレーターに反射材として VM2000 を巻き、3.9 mm 径の光電子増倍管 (H3178X) に光学グリースで取り付け根元に ^{241}Am (59.5 keV) を照射して測定を行った。

得られたスペクトルを図 (4.14) に示す。式 (4.1) でフィッティングした結果、エネルギー分解能が $41.1 \pm 2.3\%$ と求めた。エネルギー分解能の値から式 (4.2) を用いて絶対光量を求めると約 33 p.e. となった。

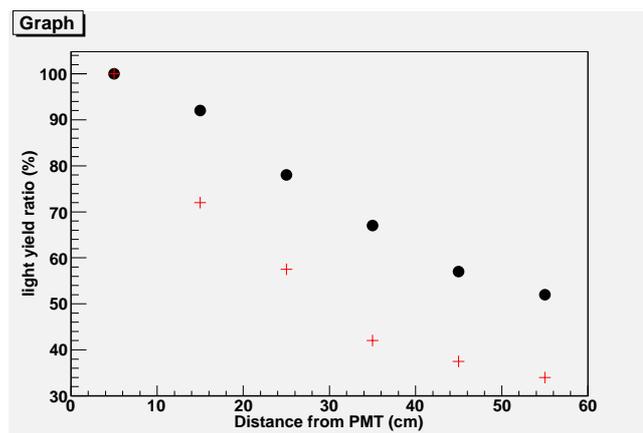


図 4.12: NEW と OLD の slow シンチレーターの光量の位置依存性の比較。黒が NEW、赤が OLD のシンチレーターの光量比

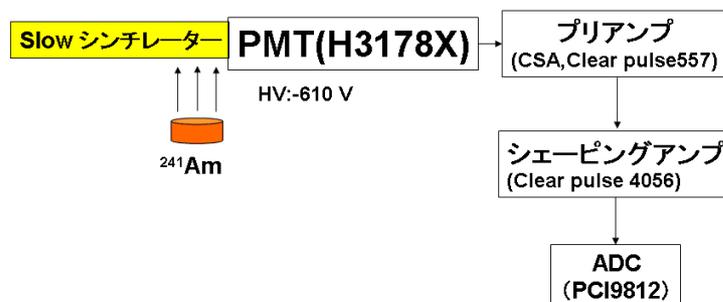


図 4.13: slow シンチレーター (NEW) の根元で ^{241}Am (59.5 keV) のスペクトルを取得する為のセットアップ

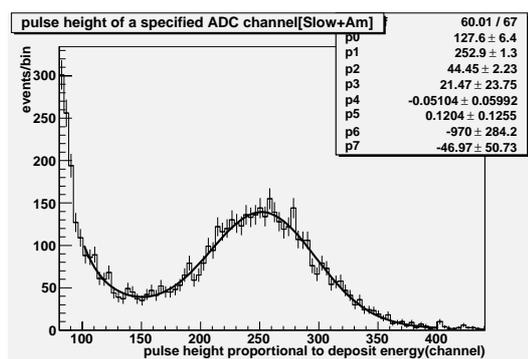


図 4.14: slow シンチレーター (NEW) の根元で取った ^{241}Am (59.5 keV) のスペクトル

第5章 光電子増倍管の受け入れ試験

5.1 PoGOLite の光電子増倍管

3章で述べたように、光電子増倍管は、光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電管を基本に、電子増倍機能を付加した高感度光検出器で、光センサーの中でも極めて高感度、高速応答な光検出器である。

PoGOLite ミッションは、高度約 40 km で気球による観測を行う為に使用環境の面から次のような条件を満たす光電子増倍管が必要となる。まず第一に 40 km の高度になると、気圧が ~ 1 mmHg となるため最も真空放電が起こりやすくなるため、光電子増倍管の回路を外気にさらさないようにしなければならない。さらに、気球ミッションでは、空間や重量の制限がある為、出来る限りコンパクトで軽量であり、低消費電力で運用できる光電子増倍管が必要である。そこで PoGOLite 検出器で用いる光電子増倍管は、高圧電源と光電子増倍管を一体化した光電子増倍管アッセンブリとなっている。また PoGOLite が目指す観測領域の低エネルギー側の ~ 25 keV で 90 度散乱した X 線の落とすエネルギーは 2-3 keV で、発生するシンチレーション光は 5 個程度である。これを読み出す為には、光電子増倍管の量子効率を考慮すると、光電子 1 個に相当する信号を読み出さなくてはならない。その為低ノイズでなくてもいけない。さらに気球高度では高エネルギー荷電粒子 (数 GeV \sim 数 100 GeV) が存在し、この荷電粒子は主検出部である fast シンチレーターやボトム BGO に ~ 1 kHz の高カウントレイで大きなエネルギー (数 MeV) を落とす。それによって光電子増倍管の出力に大電流が生じると、光電子増倍管以降の回路に大きな不感時間が生じる。このような高エネルギー荷電粒子が常に降り注いでいる状況化での運用になる為、大信号を光電子増倍管の内部で低減させる工夫が必要である。そこで『すざく』搭載、硬 X 線検出器のプリーダー回路のデザインを参考に東京工業大学と広島大学が共同設計し、低ノイズ、大信号に対する不感時間の低減をも実現したものが PoGOLite の光電子増倍管 (アッセンブリ) R7899 である。光電子増倍管の外観を図 (5.1) に、プリーダーの回路図を図 (5.2) に示す。

この光電子増倍管は外周に直接反射材を巻いており、これにより実質的な量子効率が約 3 割向上し、微弱な信号まで検出することが可能となった。そしてその反射材の外周に μ メタルを巻き磁場の影響を抑えている。大信号イベントに関しては、不感時間を短くする為にクランプダイオード (図 5.2 D1-D4) を設けてあり、ある閾値を越える電流はその電流を



図 5.1: PoGOLite の光電子増倍管 R7899

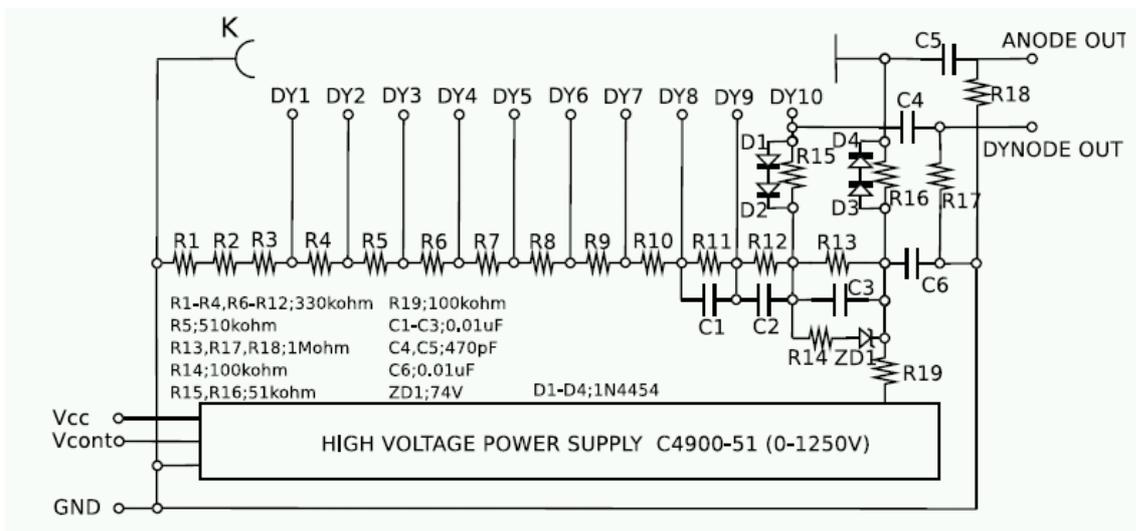


図 5.2: R7899 のプリーダー回路図

グラウンドに流すようになっている。また低ノイズを実現する為にリップルノイズの小さい DC-DC コンバータ (C4900-51) を用い、さらに積分回路を設けてフィルタリングすることによりリップルノイズを極限まで低減させている。DC-DC コンバータは高圧用に DC+5 V を、DC-DC コンバータの動作用に DC+12V を外部電源から供給することで高圧を 250 倍に増幅し+1250 V までの高圧を光電子増倍管に印加することができる。小電力に関しては、C4900-51 が従来の DC-DC コンバータに比べ低消費電力である。さらにプリーダー回路の段間抵抗を大きくすることによって、プリーダー回路に定常的に流れる電流を低減して消費電力を 1 本当たり 250 mW(1100 V 印加時)、全光電子増倍管で約 55 W と低消費電力を実現している。ツェナーダイオード (ZD1) はこの低消費電力 (低電流) でもゲインを安定させる為に用いたものである。

表 5.1: 2007 年 1 月現在での広島大学所有の全光電子増倍管 (R7899) のスペック

シリアル番号	陰極感度 ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	陽極感度 (A/lm)	増幅率 10^6	暗電流 (nA)
ZL6468	126.0	533.0	4.2	0.38
ZL6484	128.0	818.0	6.4	0.36
ZL6500	135.0	1210.0	9.0	3.10
ZL6501	138.0	939.0	6.8	0.80
ZL6503	124.0	329.0	2.7	0.47
ZL6505	134.0	666.0	5.0	0.48
ZL6516	124.0	470.0	3.8	0.44

5.2 試験の目的

PoGOLite 検出器は、fast シンチレーター、slow シンチレーター BGO、そして光電子増倍管を組み合わせたものを 1 ユニットとして、それを 217 本並べた構造になっている。その為、光電子増倍管も最低 217 本必要となる。光電子増倍管は、同じ型のものであってもそれぞれ個性が有りゲインや量子効率が異なる為、印加電圧を調整することでゲインをそろえる。またゲインの低い光電子増倍管は、相対的に高圧電源のリプルノイズの影響が大きくなる。そのため各光電子増倍管のゲインや量子効率を調べておく必要がある。その為ここでは、広島大学が実験に用いる為購入した 7 本の光電子増倍管の初期不良が無いか確認すると共に、ゲインや量子効率等の基礎特性データの取得の試験を行った。さらに実際のフライト環境を考慮して、低温度環境化で正常に動作する事の確認とゲインの温度依存性を調べる試験を行い、他の光電子増倍管と比較した。これらの測定に用いた広島大学所有の光電子増倍管のスペックシート上でのスペックを表 (5.1) に示す。

5.3 初期不良の有無の確認試験

ここでは、光電子増倍管の初期不良チェックとして次のことを確認した。光電子増倍管のアノード、ダイノード出力の one photo-electron 出力とプリアンプ (CP506E) を通した波形をそれぞれオシロスコープで見てリプルノイズが十分小さい事、顕著なアフターパルスが無いことを確認した。さらにパルサーによるテストパルス (プリアンプのテスト端子入力に入れた) と共にダイノードの信号で one photo-electron のスペクトルを取り one photo-electron

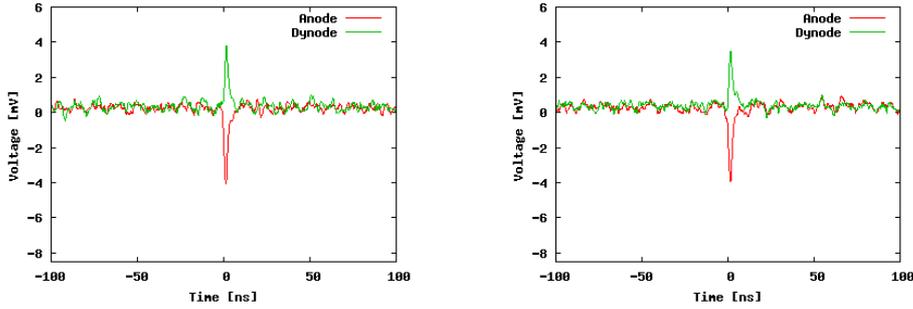


図 5.3: 光電子増倍管のアノード、ダイノード出力波形 (左 ZL6468、右 ZL6484)

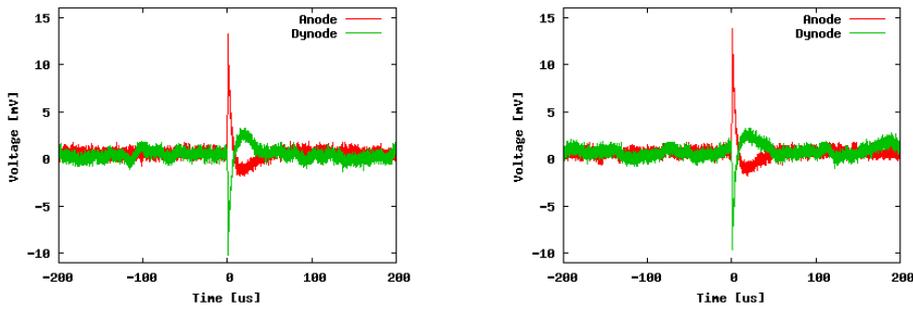


図 5.4: 光電子増倍管のアノード、ダイノードのプリアンプ (CP506E) 出力 (オシロスコープの 1 マスが $40\mu\text{s}$) (左 ZL6468、右 ZL6484)

ピークとリップルノイズから分離できることと、テストパルスの広がり σ が one photo-electron に比べて十分小さいことを定量的に確認した。さらに上記で述べた大信号に対する不感時間を短くする為の、クランプダイオードが正常に働いているか調べた。

リップルノイズが十分小さいことと、アフターパルスの有無の確認では、まず各光電子増倍管に運用の際は約 1100 V を印加する為、1100 V を印加してアノード、ダイノード出力とプリアンプ出力をオシロスコープで観察した。そのアノード、ダイノードの典型的な波形が図 (5.3) で、プリアンプ出力の典型的な波形が、図 (5.4、5.5) のようになった。図 (5.3) よりリップルノイズが、アノード、ダイノード出力 (one photo-electron) に対して 10 分の 1 以下と十分小さいことが確認できた。さらに、図 (5.4) からはアノード、ダイノードのプリアンプ出力に目立ったアフターパルスが無いことが分かった。また (5.5) と長い時間レンジで見ても同様に目立ったアフターパルスが無いことが確認でき、ここで試験した全 7 本については、顕著なアフターパルスは出ていないことが確認された。

次に one photo-electron ピークとリップルノイズが分離できることと、テストパルスの広がりを定量的に調べる試験では、図 (5.6) のようなセットアップを用いて、パルサー (BNC, PB-4) によるテストパルスと共に one photo-electron のスペクトルを積分時間 300s で取得した。その結果、各スペクトルが図 (5.7) のように得られた。これから、one photo-electron

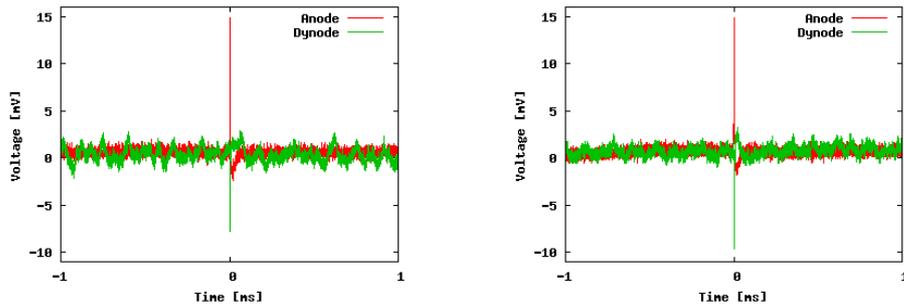


図 5.5: 光電子増倍管のアノード、ダイノードのプリアンプ (CP506E) 出力 (オシロスコープの 1 マスが $200\mu\text{s}$) (左 ZL6468、右 ZL6484)

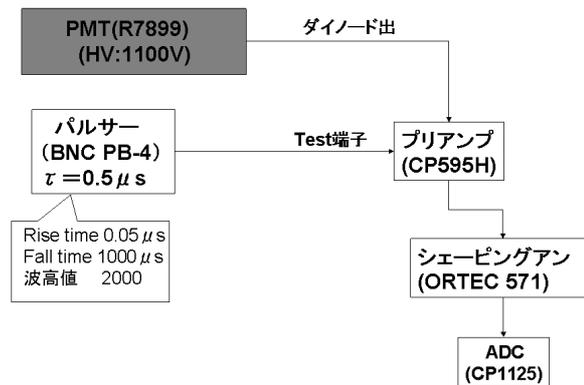


図 5.6: one photon ピークと共にパルス信号のスペクトルを取りその広がりを確認する実験のセットアップ

ピークとリップルノイズが分離できており、テストパルスの広がりも one photo-electron に比べて十分小さいことが分かった。

さらにこの図 (5.7) のテストパルスの半値幅を one photo-electron のピークで割り、広がり割合を求めた。今回測定した光電子増倍管及び他の既に測定が終わったもの (東京工業大学による測定) をまとめた結果を図 (5.8) に示す (2006 年 11 月 2 日時点)。この結果から、測定の終わった光電子増倍管の one photo-electron ピークに対するテストパルスの広がり割合は、8%以下と十分小さいことが分かった。また広島大学の全光電子増倍管も他のものと同じような結果であることが確認できた。

最後に、クランプダイオードが正常に働いているか調べる測定では、光電子増倍管に緑色の LED (0db と 13db) を照射して擬似的に大信号に対応する光を照射してやり、出力信号がクランプすることを確かめた (図 5.9)。左図のように閾値を越えないような 1V の入力信号に対しては出力信号はクランプされず、LED の発光に対応した出力が見られる。これに対

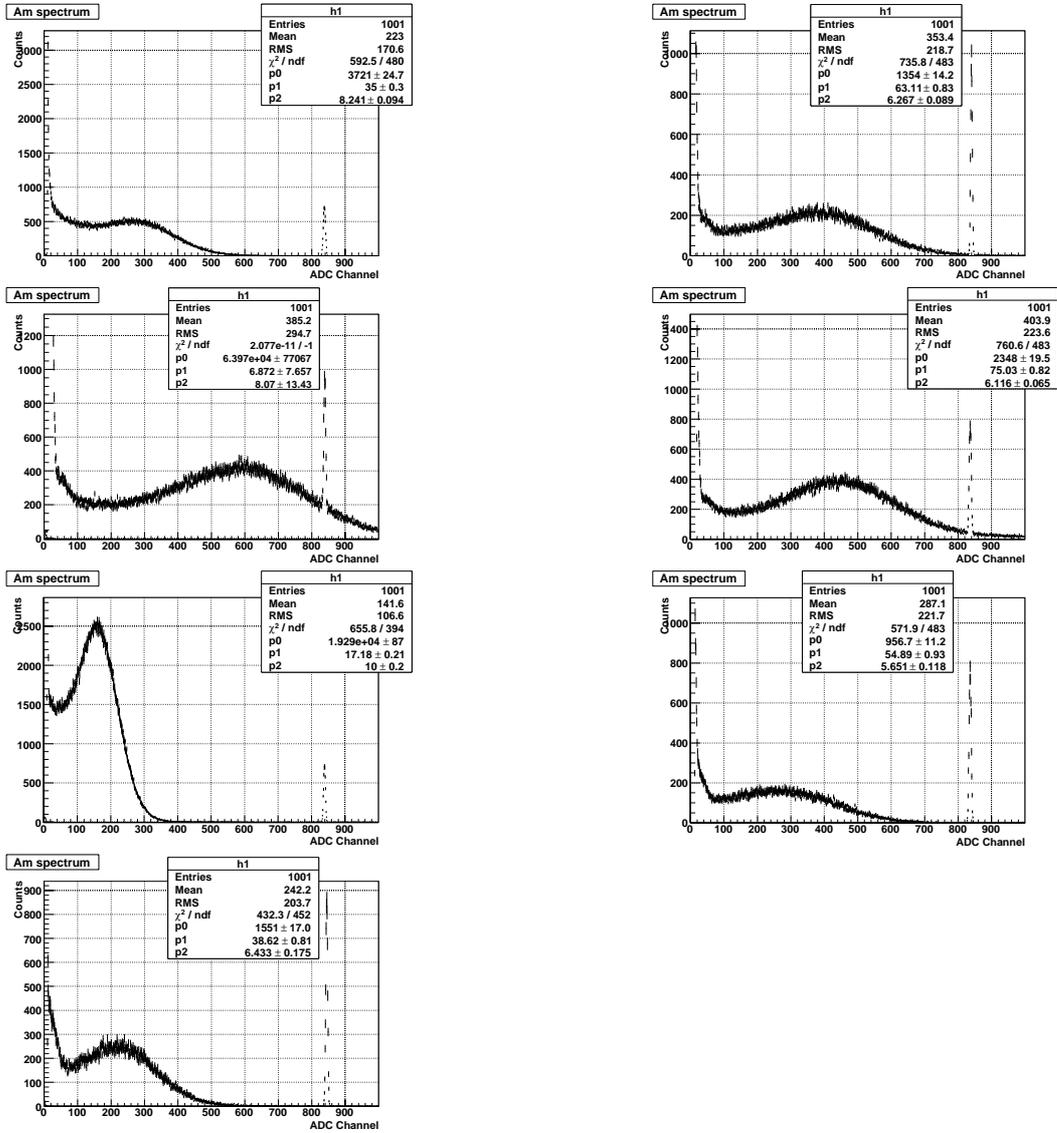


図 5.7: テストパルスと共に取得した one photo-electron スペクトル (左側の上から順に、ZL6468、ZL6500、ZL6503、ZL6516、右側の上から順に ZL6484、ZL6501、ZL6505 の広島大学の全光電子増倍管 7 本)

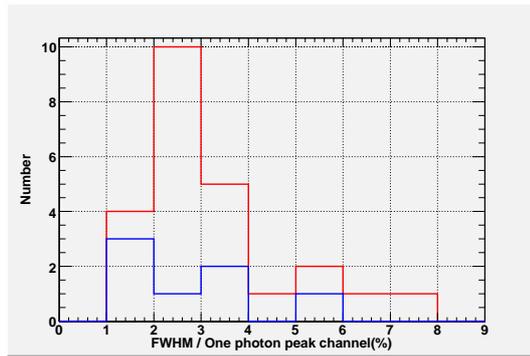


図 5.8: テストパルスの半値幅/one photo-electron ピークチャンネルの個数分布 (%)。赤は既に測定が終わったもの (2006 年 11 月 2 日時点)、青は広島大学の全光電子増倍管。

して右図のように入力信号が 4V と閾値を越えるような大きな信号に対しては、出力信号がクランプされており、正常にクランプダイオードが動作していることが分かる。こうして全光電子増倍管で、正しくクランプダイオードが取り付けられていることが確認された。

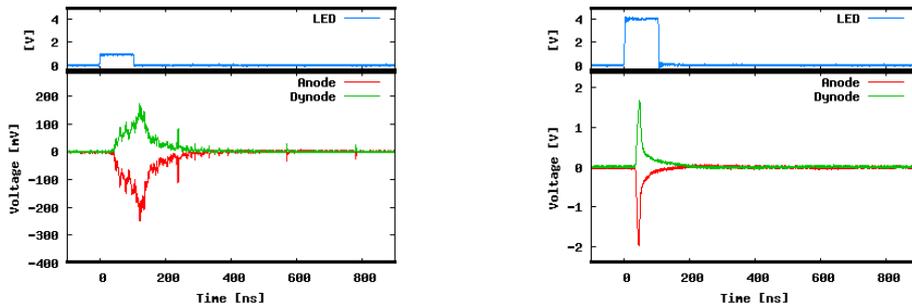


図 5.9: 普通の信号 (1V) では正常に動作している (左) 大信号 (4V) では信号がクランプしてる (右)

5.4 光電子増倍管の基礎特性試験

ここでは、印加電圧を変えて、それぞれの光電子増倍管のゲインの印加電圧依存性を調べた。またこの測定から各光電子増倍管の相対ゲイン、量子効率を求めた。

実験セットアップ

図 (5.10) のように各光電子増倍管に反射材としてテフロンテープを巻いた直径 2.54 cm、厚さ 2 cm の円筒形 fast シンチレーターを光学グリースで付けた。線源には ^{55}Fe (5.9 keV) を用いて測定を行った。光電子増倍管のダイノード出力をプリアンプ (Clear Pulse 595H) に

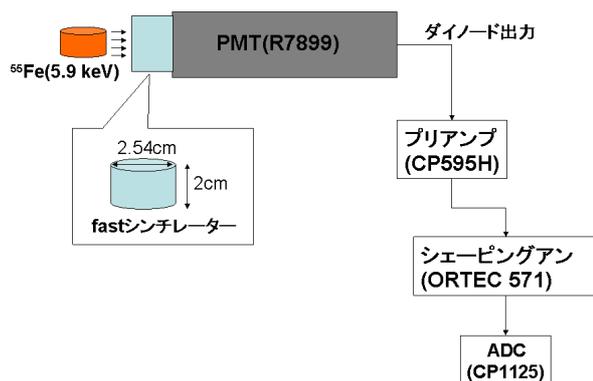


図 5.10: 光電子増倍管の印加電圧依存性の測定セットアップ

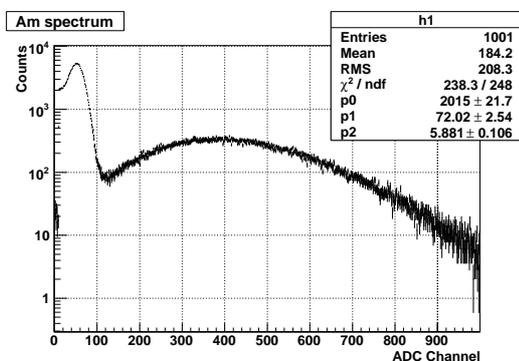


図 5.11: HV:1250V 時の ZL6500 で取得した $^{55}\text{Fe}(5.9 \text{ keV})$ のスペクトル

通して、シェーピングアンプ (ORTEC 571) を通して ADC(Clear Pulse 1125) でデータ取得した。

^{55}Fe のスペクトル

ここでは、光電子増倍管に印加する電圧を 800V から 1250V まで 50V 刻みで変えて各電圧で 200 秒間づつデータを取得して図 (5.11) のようなスペクトルを得た。

ここでは、観測の最小エネルギーにもっとも近い放射線源である $^{55}\text{Fe}(5.9 \text{ keV})$ を用いた。 $^{55}\text{Fe}(5.9\text{keV})$ を用いた際に光電子増倍管から出てくる光電子の数は数個程度と少ない為、確率分布はポアソン分布に従う。一般にポアソン分布は式 (5.1) のように記述され整数値のみを取るが、ゲインのゆらぎの為、光電子増倍管の出力電荷は連続分布を取る。そこでスペクトルのフィッティングの際は、ポアソン分布を実数に拡張した関数 (Root ライブラリの PoissonD という関数) を用いた。また ADC のチャンネルは光電子の数ではなく、それに比

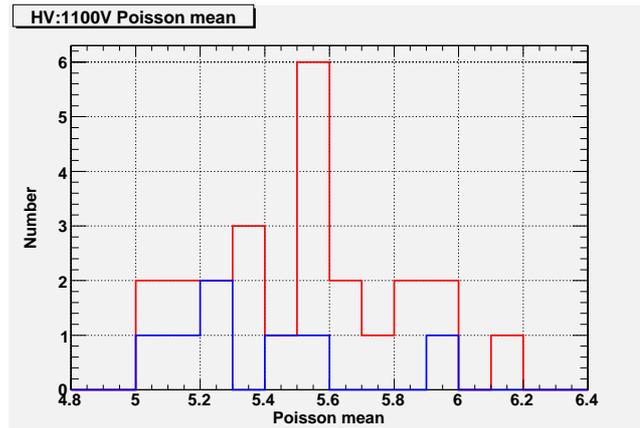


図 5.12: 印加電圧が 1100 V の時の各光電子増倍管のポアソン分布の平均値 μ の分布

例した値を取るの、その比例定数もフィッティングのパラメータとして用いた。こうしてフィッティングを行いポアソン分布の平均値を求めた結果を図 (5.12) にまとめる。ここから 5.9 keV の X 線が fast シンチレーターで反応した際の PoGOlite 検出器の光電子増倍管の出力電荷は平均値 5-6 のポアソン分布に従うことが分かる。これはゲインのゆらぎ等の効果を含んだ値であり、実際の光電子の数 (one photo-electron との比で分かる) はもっと大きな値をとる (図 5.15 参照)。

$$P(x; \mu) \equiv \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} \quad (5.1)$$

(x : 変数、 μ : 平均値、 e : 自然対数)

ゲインの印加電圧依存性

高圧依存性及び光電子増倍管のゲインは、印加高圧のべき乗に比例することが知られている。前述の、800V から 1250V まで印加電圧を変化させた取得した ^{55}Fe (5.9 keV) スペクトルのピークチャンネル 10 点を、印加電圧の関数としてプロットした。これを以下の式 (5.2) でフィッティングした結果の一例を、図 (5.13) に示す。ここで印加電圧が 1250 V の時の絶対ゲインは、浜松ホトニクス社から納品されたときのスペックシートの値を採用した。こうして、広島大学の 7 本の各光電子増倍管の高圧依存性と、ゲインを求めた。

$$F(V) = a \times V^b \quad (5.2)$$

(V : 印加高圧 (kV 単位)、 a, b : 定数)

この 7 本を含め測定の終わった光電子増倍管 (2006 年 11 月 2 日時点) のこの式 (5.2) から求めた絶対ゲイン a (運用時を想定した、印加電圧が 1000 V の時) と、高圧依存性 b の

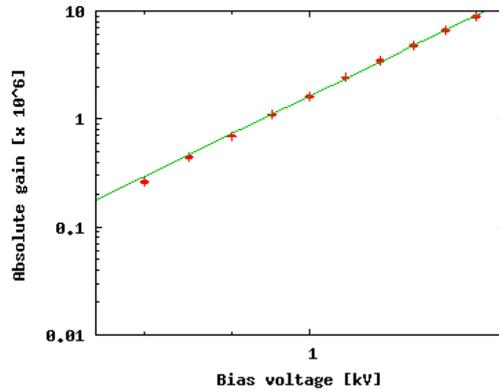


図 5.13: 光電子増倍管 (ZL6500) のゲインの印加電圧依存性

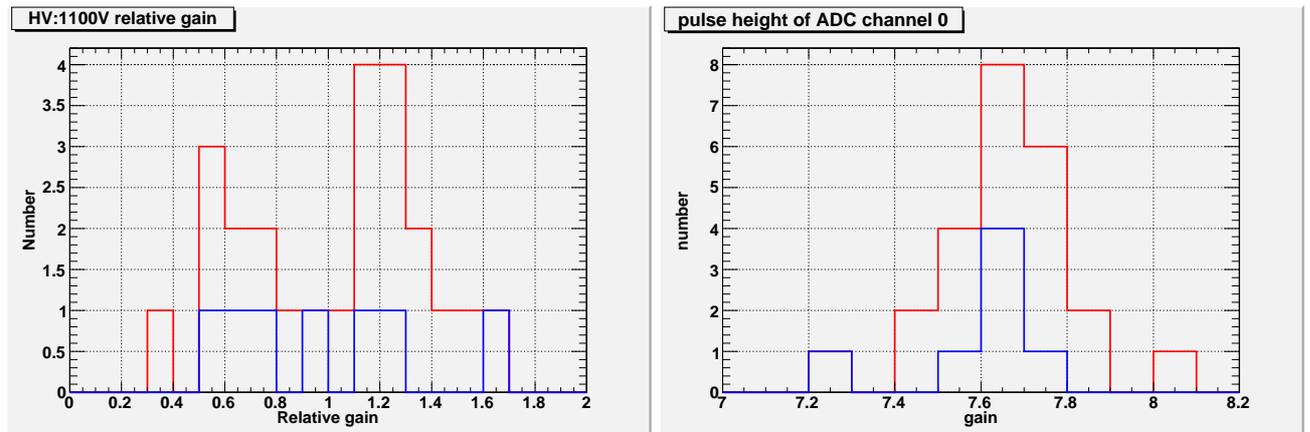


図 5.14: (左) 印加電圧 1000 V 時の光電子増倍管の相対ゲインの分布 ($\times 10^6$)。 (右) 各光電子増倍管の高圧依存指数

分布をそれぞれ図 (5.14) に示す。これらの結果 3 章、6 章で使用している光電子増倍管は PoGOLite の標準的なもので試験を行っていると言える。

量子効率測定

図 (5.11) のスペクトルの ^{55}Fe (5.9 keV) ピークと one photo-electron ピークの比を求め、各光電子増倍管の相対的な量子効率を求めた。その分布は図 (5.15) のようになった。この図から、PoGOLite の光電子増倍管は 5.9 keV の X 線に対し、プラスチックシンチレーターとの組み合わせで、平均 8 p.e. の光電子を出し、一般の光電子増倍管に比べ、高い値でそろった分布をしていると分かった。例えば、3 章 (4.2) で用いた光電子増倍管 (H3178X) では、5.9keV の X 線に対して ~ 5 p.e. であり、PoGOLite 用の光電子増倍管 (R7899) はこの 1.5 倍程度である。

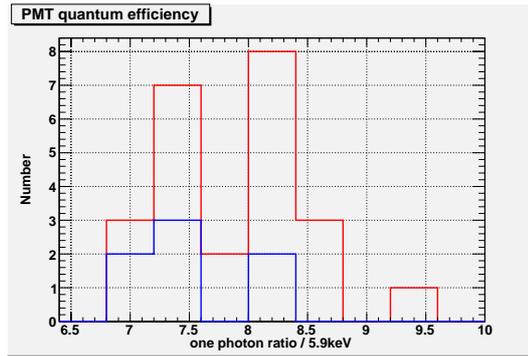


図 5.15: 各光電子増倍管の量子効率分布

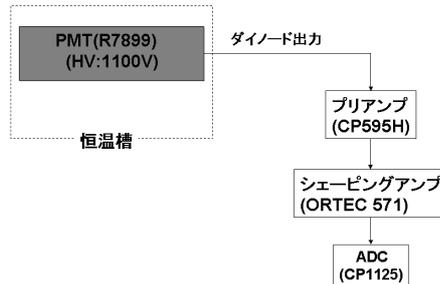


図 5.16: 光電子増倍管の温度依存試験セットアップ

5.5 光電子増倍管の温度依存試験

低温環境下で光電子増倍管が正常に動作していることを確認すると共に、温度によってゲインがどう変化するかを調べる為、図 (5.16) のようなセットアップを用いて、恒温槽で 0、-15、-30 度と温度を変えて (図 (5.17) の温度サイクル)、各光電子増倍管の one photo-electron ピークのスペクトルを取得した。その結果、各温度でのスペクトルが、図 (5.18) のようになり、温度が下るに連れてゲインが上がっていることが分かった。この 3 点の温度での one photo-electron のピークチャンネルと図 (5.7) でテストパルスと共に取った常温での one photo-electron ピークチャンネルとをプロットしたものが、図 (5.19) である。この図から、光電子増倍管の温度によるゲインの変化は、光電子増倍管によってばらつきはあるが、-30 度では常温に比べてゲインが 20-50% 増加することが分かった。よって気球観測時に期待される低温環境下では、常温での試験より高い性能が期待できる。

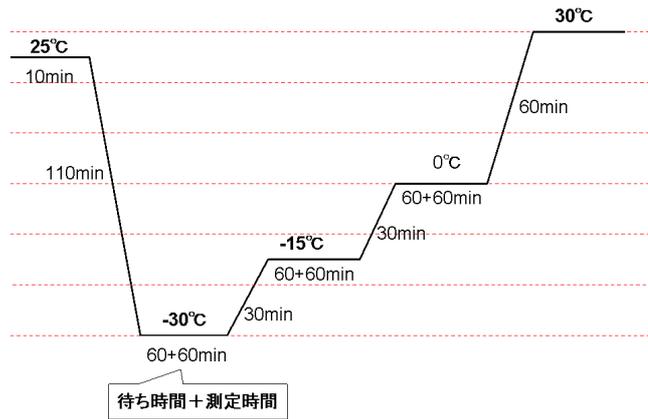


図 5.17: 恒温槽の温度変化サイクル

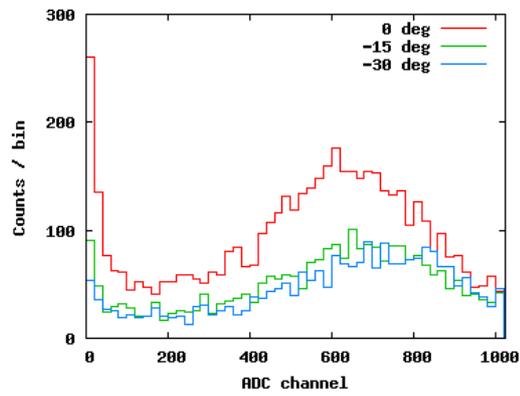


図 5.18: ZL6500 の one photo-electron スペクトル

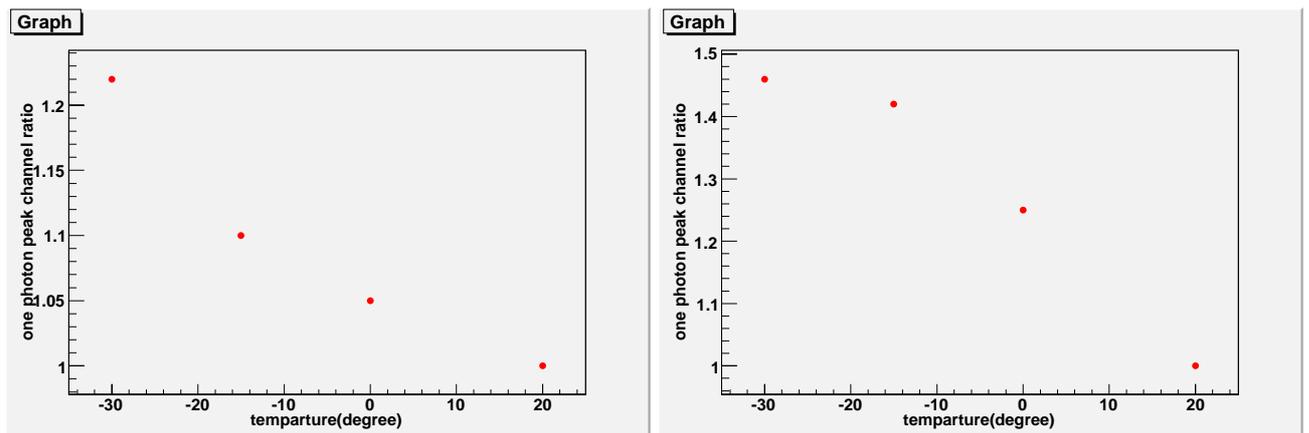


図 5.19: 各光電子増倍管のゲインの温度依存性。(左)ZL6500、(右)ZL6505。

第6章 PoGOLite フォスイッチユニットの 試験

PoGOLite 検出器は一本の光電子増倍管で、slow シンチレーター (コリメーター)、fast シンチレーター (主検出部)、ボトム BGO (シールド部) を読み出す構造になっている (井戸型フォスイッチ検出器)。すなわち fast シンチレーターのイベント以外の slow シンチレーターや BGO などでも反応したイベントも全て読み出してしまふ。そのため全てのイベントの中から fast シンチレーターで反応したイベントのみを選択的に抜き出さなくてはならない。そこで、PoGOLite では、シンチレーターの減衰時定数の違いを利用した波形弁別法と呼ばれる方法で fast シンチレーターのイベントのみを抜き出す。本章では、PoGOLite のフォスイッチユニットの試作機を用い、実機デザインの回路と組み合わせ、特に波形弁別性能に焦点を当てて性能評価を行った。

6.1 目的

上記で述べたように、PoGOLite 検出器において fast シンチレーター、slow シンチレーター、ボトム BGO の波形弁別能力は、測定可能なエネルギーシresholdや、バックグラウンドと天体からの信号の識別能力を決める主要な性能である。具体的には、fast シンチレーター (光電吸収) で 25 keV 以上、fast シンチレーター (コンプトン散乱) で 2-3 keV 以上、slow シンチレーター/BGO で 30 keV 以上。また実際の気球による観測は、高度約 40 km で行われる為、最低時で気温が-20~-30 度程度になると予想される。光電子増倍管、シンチレーターには温度依存性がある為、気球高度で予想されるような低温環境化での試験が必要不可欠である。そこでシンチレーターの温度特性試験と、フォスイッチユニットの試作機を用いた性能評価試験を行った。

6.2 簡易フォスイッチを用いた試験

上記で述べたように、PoGOLite 検出器はプリアンプの波形を取得する波形弁別法を採用している。それにより回路の簡易化を測ると共に、パイルアップなどに強いシステムになっ

ている。一方、『すざく』硬 X 線検出器などでは、整形アンプを用いてピーク値を測るシステムによる波形弁別法が用いられ実績を残している。そこでここでは、簡易フォススイッチを用いて、プリアンプを用いた波形弁別法と整形アンプによる波形弁別法の性能比較、さらに気球実験ので予想される低温下での温度試験を行った。

6.2.1 整形アンプを利用した波形弁別試験

二重整形アンプによる波形弁別法

井戸型フォススイッチカウンタは Welcome 気球実験や『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器で用いられてきたコンセプトで、その読み出しはプリアンプ出力を 2 種類の整形時定数を持つ整形アンプに通し、その波高値を比べる方法が取られてきた。この方法はアナログ回路が複雑になる反面、デジタル郡は単純であり、データ容量も少なく済む。何より過去の実績のある方法である。そこで PoGO Lite の波形弁別法との比較用として、市販の二重整形アンプを用いた読み出しを試験した。この二重整形アンプによる波形弁別は、時定数が 50-100 ns 程度と 1-2 μ s 程度の 2 種類の整形アンプ (fast シェーピングアンプと slow シェーピングアンプ) を用いて、1 つのシグナルを 2 系統に分けて異なる時定数で積分して測定する方法である。fast シンチレーターからの信号は、減衰時定数が ~ 2 ns と非常に短い為、fast シェーピングアンプと slow シェーピングアンプの両方の時定数で十分電荷を集めることができる。それに対して slow シンチレーターや BGO からの信号は、 ~ 230 ns、 ~ 300 ns と減衰時定数が長い為、slow シェーピングアンプでは十分電荷を集めることができるが、fast シェーピングアンプでは積分しきれずに、十分電荷を集めることが出来ない。これにより、fast シンチレーターからの信号は、fast シェーピングアンプ、slow シェーピングアンプ共に同じ波高値になるのに対して、slow シンチレーター、BGO からの信号は fast シェーピングアンプの出力より slow シェーピングアンプの出力が大きくなる (図 6.1)。これらを fast シェーピングアンプ、slow シェーピングアンプの波高値として 2 次元散布図にプロットすると、図 (6.2) のようになり、各シンチレーターからの信号を各ブランチに分けることができる。この 2 次元プロットから fast シンチレーターの信号のみを抜き出すことによって、ターゲット天体からの信号のみを得ることが出来、天体のスペクトル、偏光度を精度良く測ることが出来る。

実験セットアップ

図 (6.3) のようなセットアップで、小型 fast シンチレーターのみ付けた場合と、小型 fast シンチレーター+小型 slow シンチレーターないしは (小型 BGO) を付けた場合の比較試験を行った。それぞれ小型シンチレーターを光学グリースを用いて取り付け、そのダイノード信

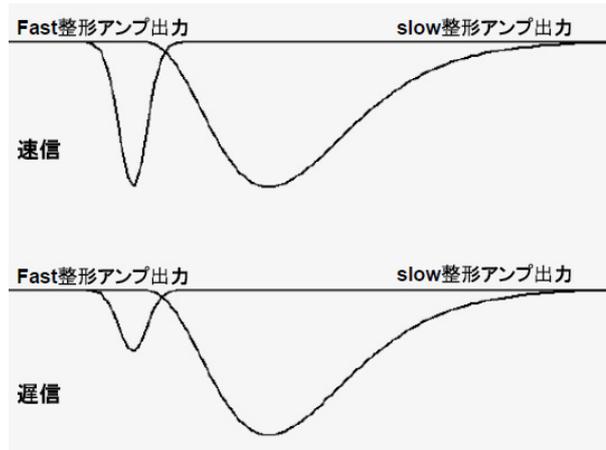


図 6.1: 異なる時定数による積分

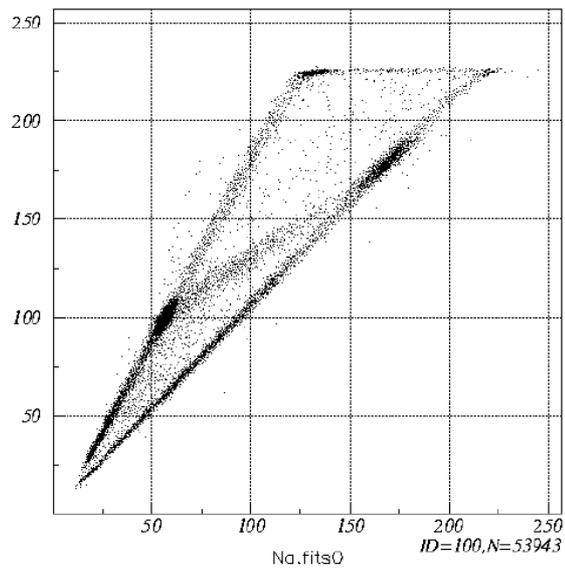


図 6.2: シェーピングアンプを用いた波形弁別の 2 次元プロット (GSO シンチレーター +BGO)。すざく衛星の硬 X 線検出器を用いた場合の結果である。(科学衛星 Astro-E2 実験計画書 第 2 分冊, 宇宙科学研究所)

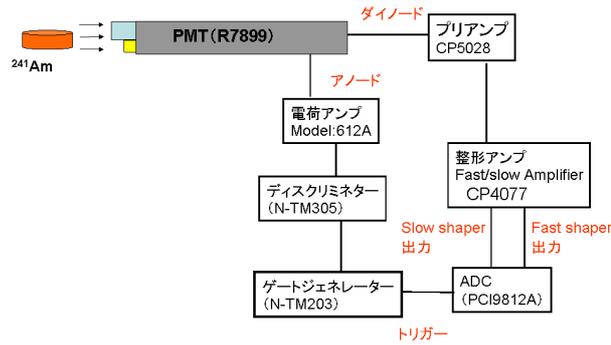


図 6.3: シェーピングアンプを用いた波形弁別試験のセットアップ

号を高速プリアンプ (CP5028) に通してその出力を fast/slow シェーピングアンプ (CP4077) に通し、その fast シェーピングアンプ出力、slow シェーピングアンプ出力共に ADC に入れてそのピーク値を取得した。そのデータ取得の際のトリガー信号は、光電子増倍管のアノード信号を電流アンプ (CP612A) に通して、それをディスクリミネーター (N-TM305) に通してゲートジェネレーター (N-TM203) に入れ作った。

ここで用いた整形アンプの fast シェーピングアンプ部は、クリアパルス社により開発された物で、減衰時定数の速い fast プラスチックシンチレーター用に特別速い時定数 (50 ns) を持つ。一方 slow シェーピングアンプ部の時定数は、BGO/slow シンチレーターの信号を十分に積分出来る物として、 $2 \mu\text{s}$ に設定した。

実験結果

実験の結果、fast シンチレーターのみを用いた測定から得られた 2 次元プロットを図 (6.4) に、fast 軸、slow 軸に投影した ^{241}Am (59.5 keV) のスペクトルを図 (6.5) に示す。このスペクトルを式 (4.1) のガウシアン+バックグラウンド関数でフィッティングした結果を、表 (6.1) にまとめる。さらに fast シンチレーター+slow シンチレーター、fast シンチレーター+BGO での得られた 2 次元プロットを図 (6.6) に示す。図の線 (赤線の間を fast シンチレーターの、緑線より上を slow シンチレーターの、青より上を BGO のイベントとしてイベントを抜き出す) で fast シンチレーターブランチ、slow シンチレーターブランチ、BGO ブランチを定義して、fast シンチレーターで反応したイベントを全イベントから抜き出して slow 軸に投影したスペクトルが、図 (6.7) である。この図の赤が fast シンチレーターで反応のあったイベントのスペクトルである。さらに個々のシンチレーターのみで反応したイベントを抜き出し slow 軸に投影したスペクトルを図 (6.8) に示す。またスペクトルを式 (4.1) でフィッティ

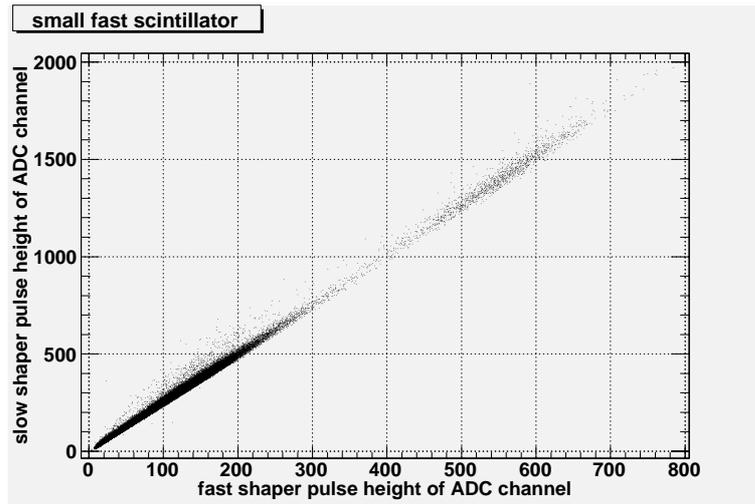


図 6.4: シェーピングアンプを用いた波形弁別の 2 次元プロット (小型 fast シンチレーター)

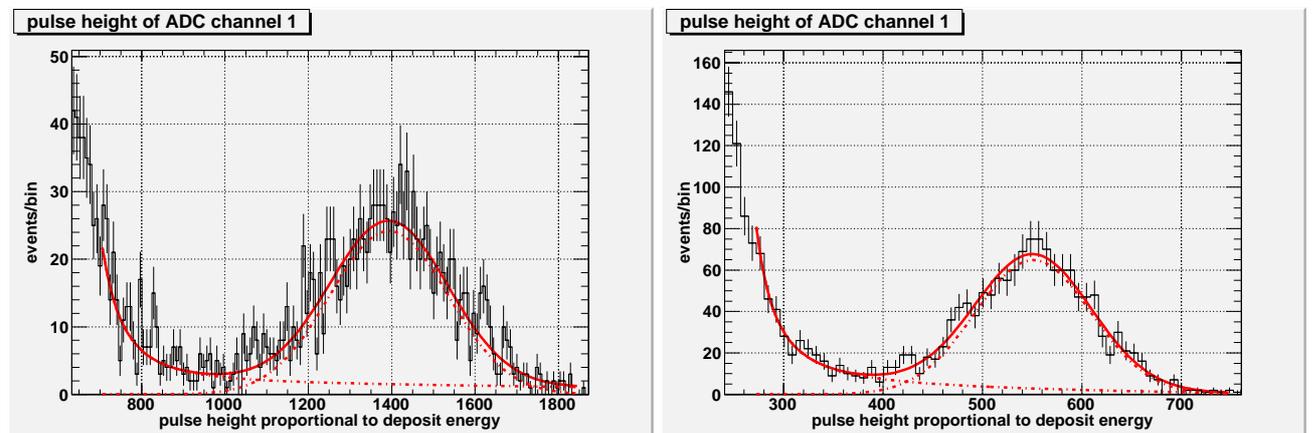


図 6.5: (左)slow 軸に投影した ^{241}Am (59.5 keV) のスペクトル (右)fast 軸に投影した ^{241}Am (59.5 keV) のスペクトル

ングした結果を表 (6.1) にまとめる。

この結果より、fast シンチレーター+slow シンチレーター、fast シンチレーター+BGO から fast シンチレーターブランチを切り出して求めた光量は、fast シンチレーターのみでの測定結果と数%程度しか差がなくほぼ同じと言える。エネルギー分解能の比較では、fast シンチレーターのみより 10%程度エネルギー分解能が悪いが、fast のみのフィッティングで BG の差引の関係で実際よりも良くなっていると考えられる。これらから波形弁別法により欲しい信号のみを選択的に選び出せると結論できる。

さらに得られた、fast シンチレーター+BGO(slow) シンチレーターの 2 次元プロットの fast シンチレーターで反応のあったイベントのブランチと BGO(slow シンチレーター) で反応のあったイベントのブランチの傾きの比から開き角を求めた。fast シンチレーター+slow

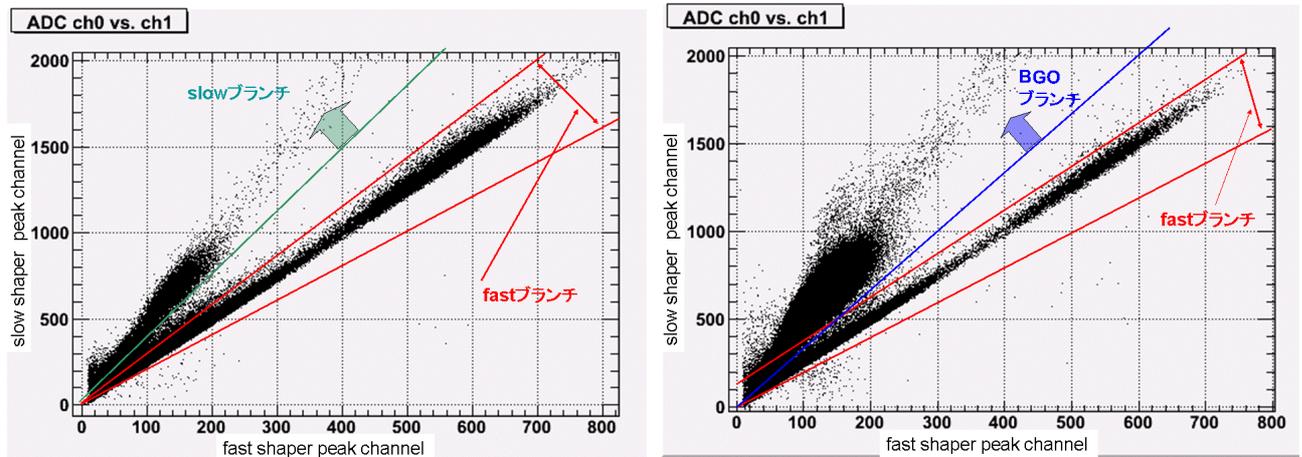


図 6.6: 各シンチレーターで反応したイベントのブランチの定義 (左) fast+slow シンチレーターの 2次元プロット。2本の赤線の間イベントを fast シンチレーターのイベントと定義。緑線より上を slow シンチレーターでのイベントと定義。(右)fast シンチレーター+BGOの 2次元プロット。赤線は同様に fast シンチレーターイベント。青線より上を BGO シンチレーターのイベントと定義。

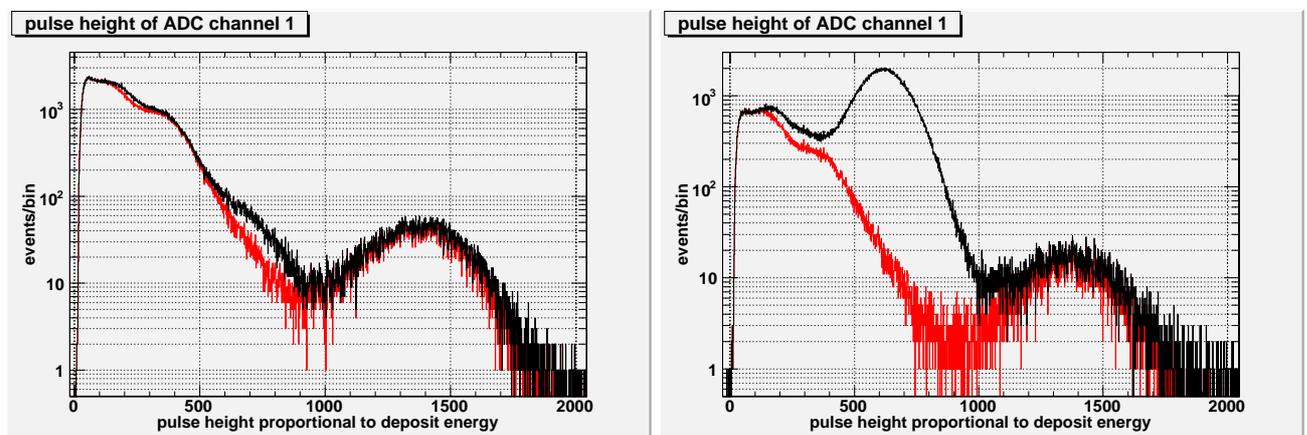


図 6.7: 各 2次元プロットから fast シンチレーターで反応のあったイベントのみを抜き出して slow 軸に投影したスペクトル。黒が全イベント、赤が、fast シンチレーターでのイベント。(左)fast+slow シンチレーター。(右)fast シンチレーター+BGO

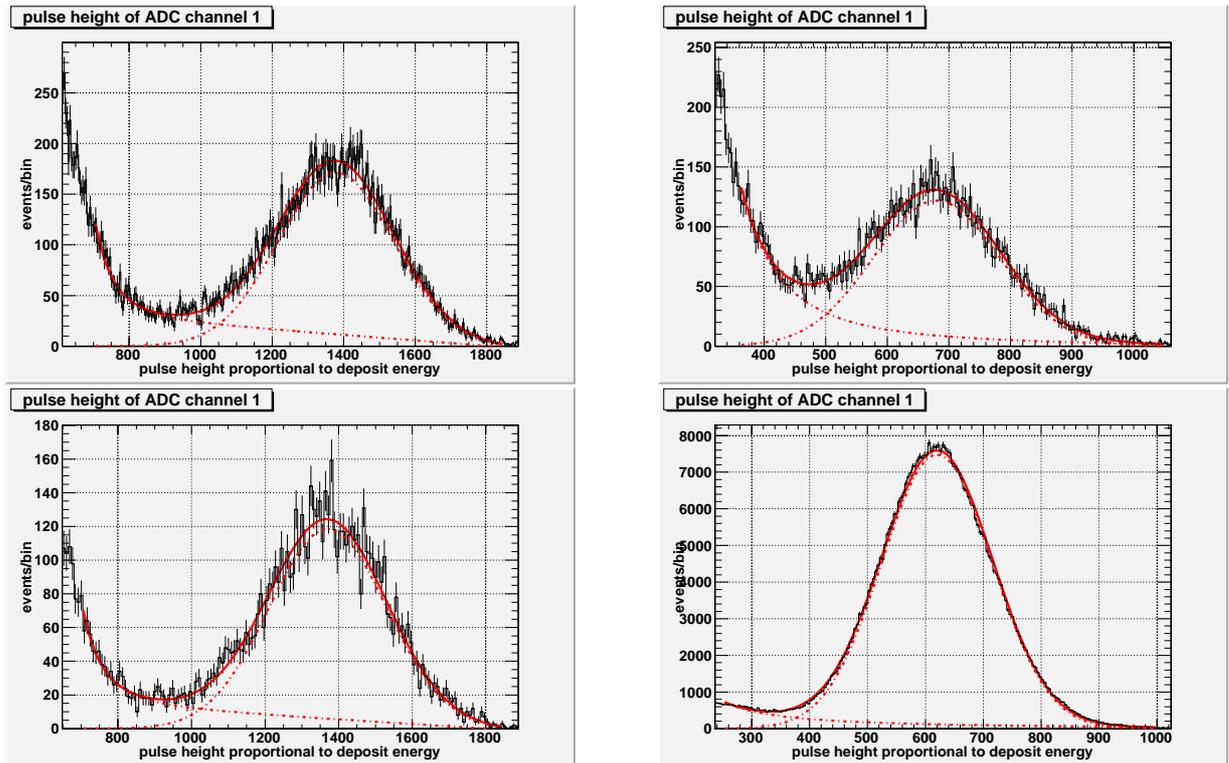


図 6.8: 図 6.6 の各 2 次元プロットから各々のシンチレーターでのみ反応のあったイベントを抜き出して slow 軸に投影したスペクトル。上段が fast シンチレーター+slow シンチレーター、下段が fast シンチレーター+BGO。左が fast シンチレータースペクトル、右が slow シンチレーター/BGO スペクトル。

表 6.1: fast+slow シンチレーター、fast シンチレーター+BGO で波形弁別を行い各々のシンチレーターでのイベントを抜き出してフィッティングした結果

コンフィグレーション	シンチレーター	ガウシアンフィット	ガウシアンフィット	エネルギー分解能	エネルギー分解能
		ピークチャンネル slow 軸投影	ピークチャンネル fast 軸投影	slow 軸投影 %	fast 軸投影 %
fast	fast	1393.3±6.1	550.9±2.2	24.0±1.3	25.0±1.0
fast	fast	1378.0±1.7	541.8±0.7	27.5±0.3	27.9±0.4
+slow	slow	679.9±2.3	144.4±0.5	35.6±1.1	40.5±1.0
fast	fast	1370.3±2.9	539.9±1.1	27.4±0.6	27.9±0.4
+BGO	BGO	620.3±0.2	125.0±0.1	36.3±0.0	42.3±0.1

シンチレーターの fast シンチレーターの傾きが 2.4 で、slow シンチレーターが 5.1 であり、fast シンチレーター+BGO の fast シンチレーターの傾きが 2.4 で、BGO の傾きが 5.5 であった。それぞれのブランチの傾きから fast に対する傾きの比を求めると、fast シンチレーター+slow シンチレーターで 2.1、fast シンチレーター+BGO で 2.3 となった。この比が、異なる読み出し方法で波形弁別性能を比べる指標となる。

6.2.2 PoGOLite のアナログ回路を用いた波形弁別試験

プリアンプの信号の立上り時間を利用した波形弁別法

今回用いたプリアンプは、PoGOLite のフライトデザインであり、オペアンプに AD8057、抵抗 100 k Ω 、コンデンサー 20 pF を用いており、fast シンチレーターの速い信号の立上りに追従できるような速く、低消費電力なプリアンプである。このプリアンプを用いて各シンチレーターのプリアンプの信号の立上り時間の差を利用した波形弁別を行った。実機と同じ 20 M sample/s でプリアンプ出力の波形データを取得し、その波形を 2 種類の時間で遅延させその差分の波高値をそれぞれ 2 次元にプロットして波形弁別を行う。図 (6.9 上) に示すように、遅延が大きい場合は、fast シンチレーター、BGO、slow シンチレーター共に遅延時間に比べてプリアンプ出力の立上りが十分早い為、プリアンプ出力の波高値が、そのまま差分の出力になるそれに対して遅延が小さい場合、図 (6.9 下) に示すように、fast シンチレ

ターの信号は立上りが早い為に差分の波高値はわずかに小さくなるだけだが、slow シンチレーター、BGO の信号は立上りがゆっくりな為差分と取ると波高値が非常に小さくなる。この2つの遅延時間での波高値を2次元にプロットして整形アンプの時と同様にして波形弁別を行う。この遅延の時間によって信号の波高値が変わって開き角が変化する為、開き角が大きくてかつ fast ブランチが細くなる遅延時間を実際に条件を変えて2次元をプロットを作り決定した。まず短い遅延時間は、図(6.9)のような fast シンチレーターのプリアンプの出力から分かるように、立上りが非常に速く 100 ns 程度でピークに達している為、2 clock(100 ns)と決定した。次に長い遅延時間の決定は十分長い遅延時間の 30 clock から、20、18、16、14、12、10、8 clock と8つの遅延時間でそれぞれ2次元プロットを作成した。30~14 clock までは、2次元にほとんど変化は見られなかったが、12 clock 以下からは、遅延が短いため slow シンチレーター/BGO の信号の正しい波高値を取れなくなり開き角が小さくなっていったため、14 clock に決定した。こうして決定した 2 clock(100 ns)、14 clock(700 ns) の2つの時間で遅延させてその差分の波高値を fast(2 clock) 軸と slow(14 clock) 軸の2次元座標にプロットして得られた2次元プロットの例が図(6.10)である。

実験セットアップ

図(6.11)に示すように、光電子増倍管のダイノード出力を PoGOLite 検出器のアナログ部であるプリアンプ(オペアンプ AD8057)に入れその出力を ADC に入れて実機と同じ 20 M sample/s で波形データを取得した。そのデータ取得のトリガーを整形アンプの時と同様に光電子増倍管のアノード出力でつくっている。

小型 fast シンチレーター+小型 BGO、小型 fast シンチレーター+小型 slow シンチレーターを光学グリースを用いて光電子増倍管の光電面に接合して ^{241}Am (59.5 keV) を用いて測定を行った。

実験結果

実験の結果、それぞれ図(6.12)に示すような2次元プロットが得られた。この2次元プロットから fast シンチレーターで反応したイベントのブランチを切出し($y=x-5$ 以上 $y=1.17x$ 以下の領域)、slow 軸に投影して得られたスペクトルを式(4.1)でフィッティングしたものが、図(6.13)である。これらの結果からエネルギー分解能と、fast シンチレーターのブランチと slow シンチレーターブランチ、BGO ブランチの傾きから2つのブランチの開き角(傾きの比)を求めた。その結果を表(6.2)にまとめる。

この結果、PoGOLite 検出器のアナログ回路での波形弁別試験の結果(表 6.2)と整形アン

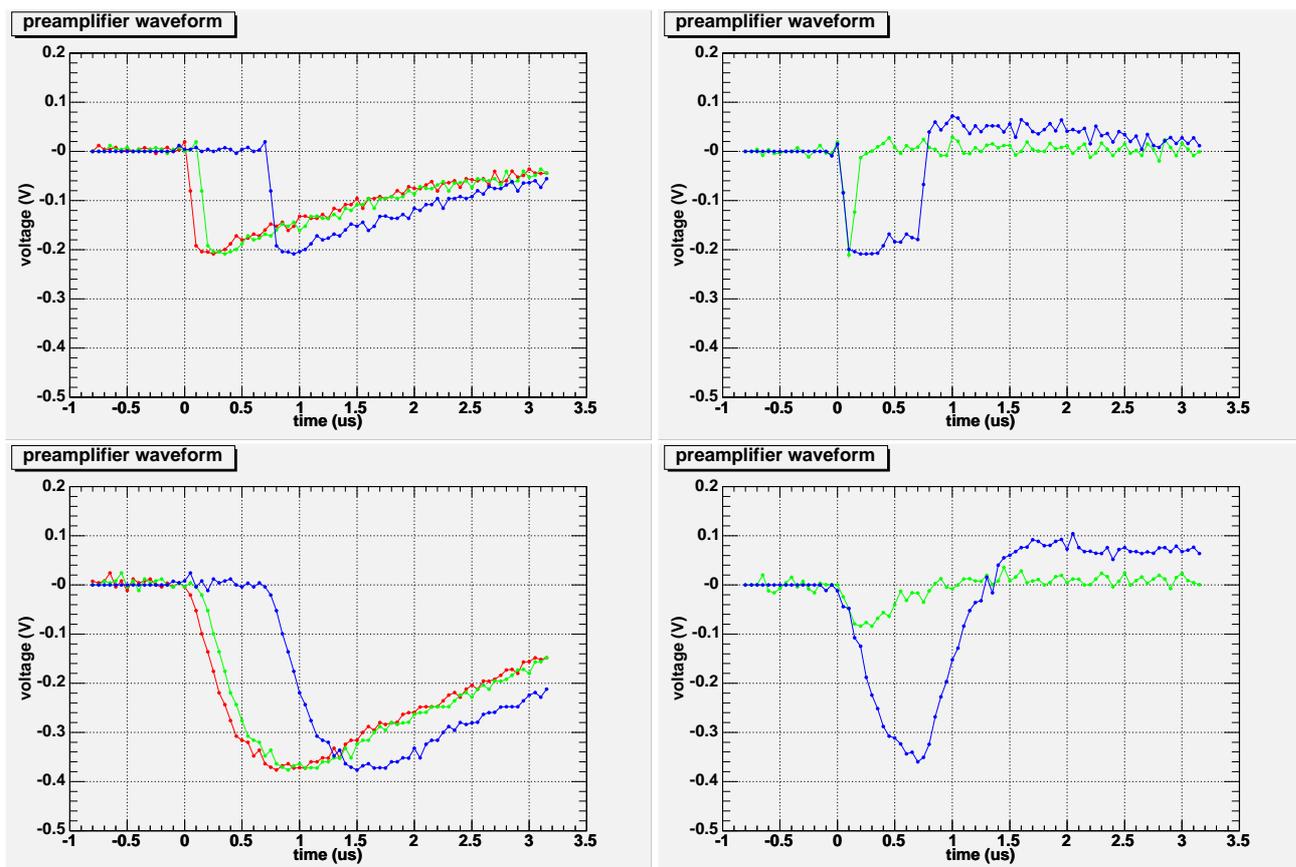


図 6.9: (上)fast シンチレーター信号、(下)slow シンチレーター/BGO 信号。赤がプリアンプ出力、緑が 2 clock 遅延、青が 14 clock 遅延させた波形。(右) プリアンプ出力と各遅延波形との差分の波形。

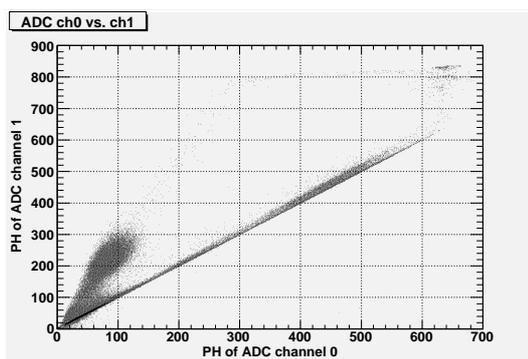


図 6.10: プリアンプの波形の遅延時間を変えてプロットした差分波高値の 2 次元プロット

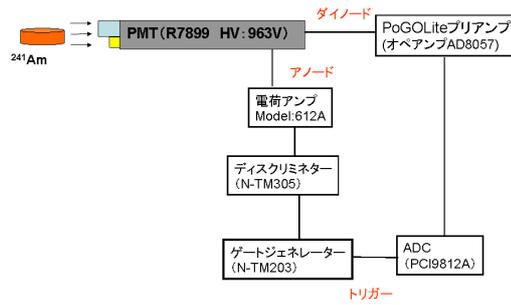


図 6.11: セットアップ

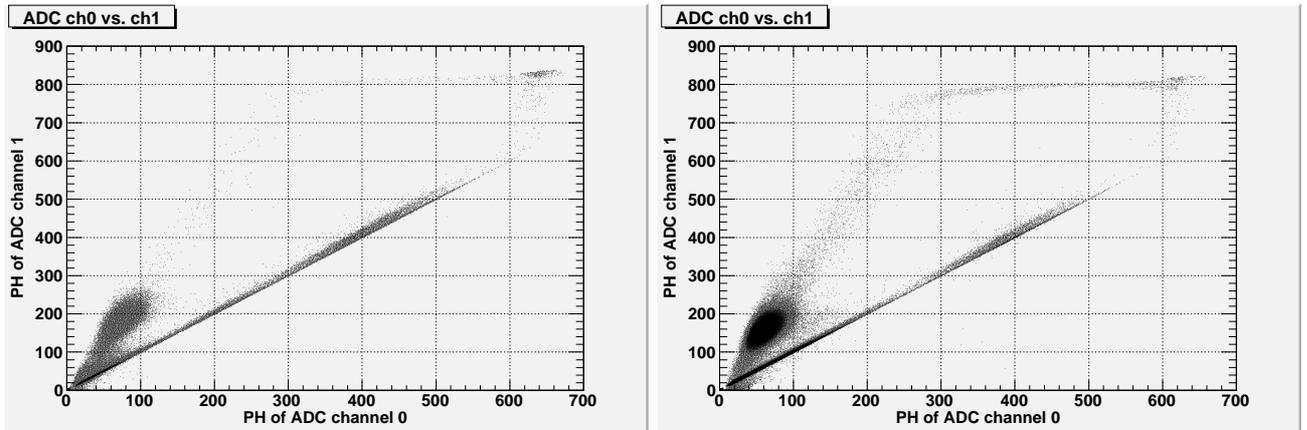


図 6.12: PoGO Lite のアナログ部を用いた波形弁別の 2 次元プロット。(左)fast シンチレーター+slow シンチレーター。(右)fast シンチレーター+BGO

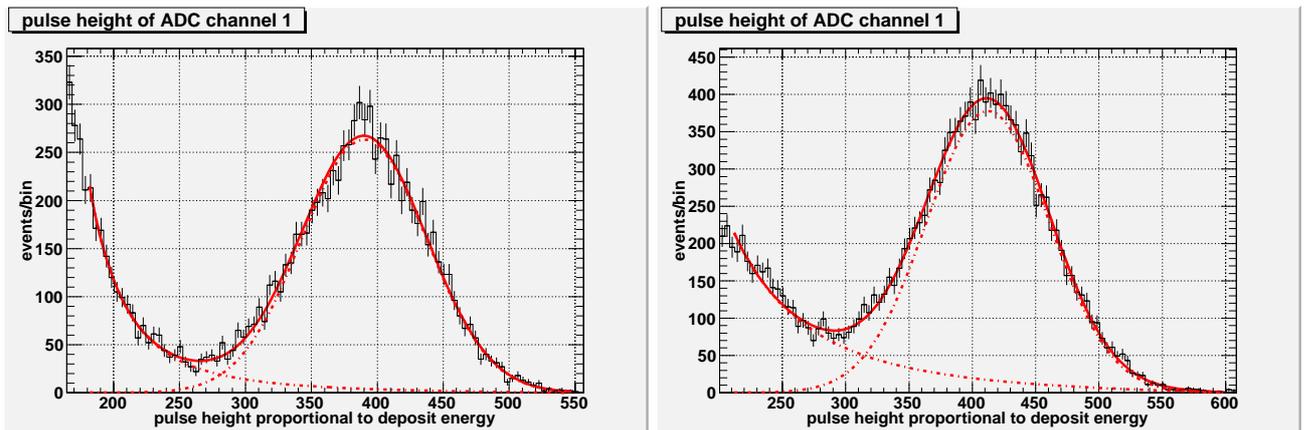


図 6.13: PoGO Lite のアナログ部を用いた波形弁別で fast シンチレーターでのイベントのみを抜き出した ^{241}Am スペクトル。(左)fast シンチレーター+slow シンチレーター。(右)fast シンチレーター+BGO。

表 6.2: PoGOLite アナログ回路での波形弁別性能

	エネルギー分解能 (%)	開き角 (傾きの比)
fast シンチレーター +slow シンチレーター	28.6±0.4	2.58
fast シンチレーター +BGO	27.6±0.3	2.78

プを用いた波形弁別試験の結果(表 6.1)を比較すると2つのシンチレーターの組み合わせ共に、市販のプリアンプとシェーピングアンプを用いた波形弁別性能と比較すると、エネルギー分解能は、両者共にほぼ同じ値になっている。さらにブランチの開き角を比較すると、整形アンプを用いた測定による開き角(傾きの比)は、fast シンチレーター+slow シンチレーターで2.1、fast シンチレーター+BGOで2.3となっており、これに対してプリアンプによる波形弁別の開き角は、それぞれ2.6、2.8となっており整形アンプに比べ2割ほど比が大きくなっていることが分かった。これらの比較から、PoGOLite 検出器のプリアンプの波形取得による波形弁別は、整形アンプを用いた波形弁別と同等以上の性能があることが分かった。

6.2.3 温度特性試験

PoGOLite は、天体からの硬 X 線を観測する為、装置全体を気密箱に入れた上で高度約 40 km まで気球で持ち上げる。その為センサーの温度は-20~-30 度程度まで下がると予想される。一方光電子増倍管やシンチレーターは、ゲインや光量が一般に温度に依存する為センサーの特性は常温とは異なったものになる。そこで小型シンチレーターを用いた簡易フォス イッチを恒温槽に入れ温度を変化させて実験を行った。上記の PoGOLite アナログ回路を用いた実験と同様の、図(6.11)のセットアップで fast シンチレーター+slow シンチレーター、fast シンチレーター+BGO の組み合わせで、シンチレーターと光電子増倍管を恒温槽に入れ測定を行った。測定を行った温度は、30 度から-30 度までの 10 度刻みの 7 点で、線源に ^{241}Am (59.5 keV) を用いた。

その結果、各温度に対して開き角を求めプロットしたものが、図(6.14)である。図から低温ほど傾きの比が大きくなることが分かった。30 度と-30 度の 2 次元プロットを図(6.15)に示す。

fast シンチレーター、slow シンチレーター、BGO の各ブランチを抜き出して ^{241}Am (59.5

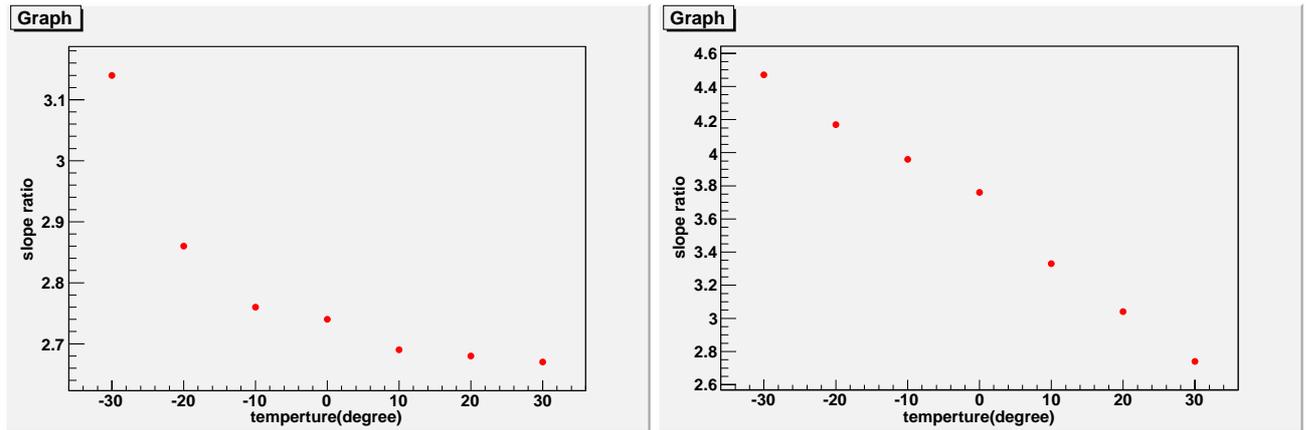


図 6.14: 開き角の温度依存性。fast シンチレーターブランチの傾きに対する slow シンチレーター、BGO ブランチの傾き比 (左)fast+slow シンチレーター。(右)fast シンチレーター+BGO

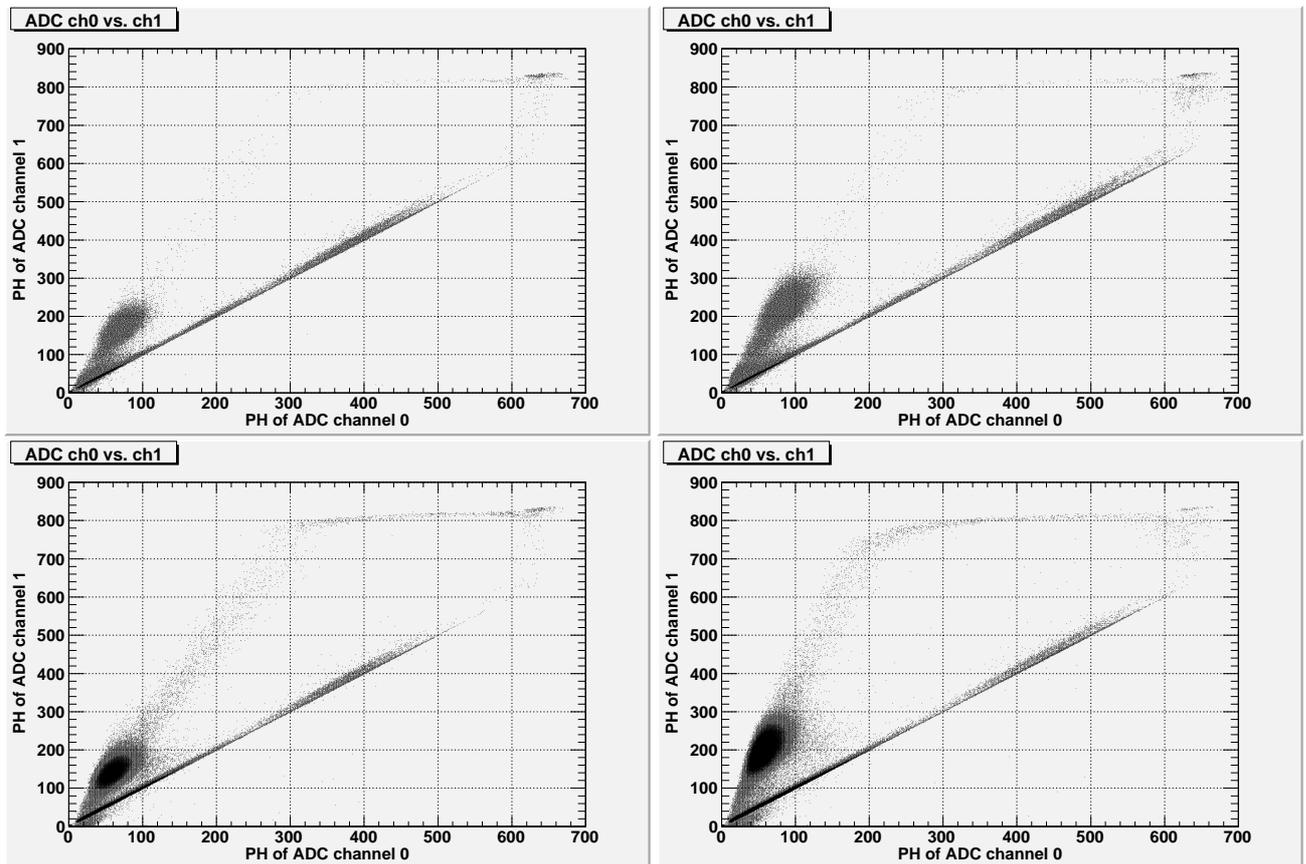


図 6.15: 温度を変えて取得した2次元分布。(左)30度での測定。(右)-30度での測定。(上)fast シンチレーター+slow シンチレーター (下)fast シンチレーター+BGO

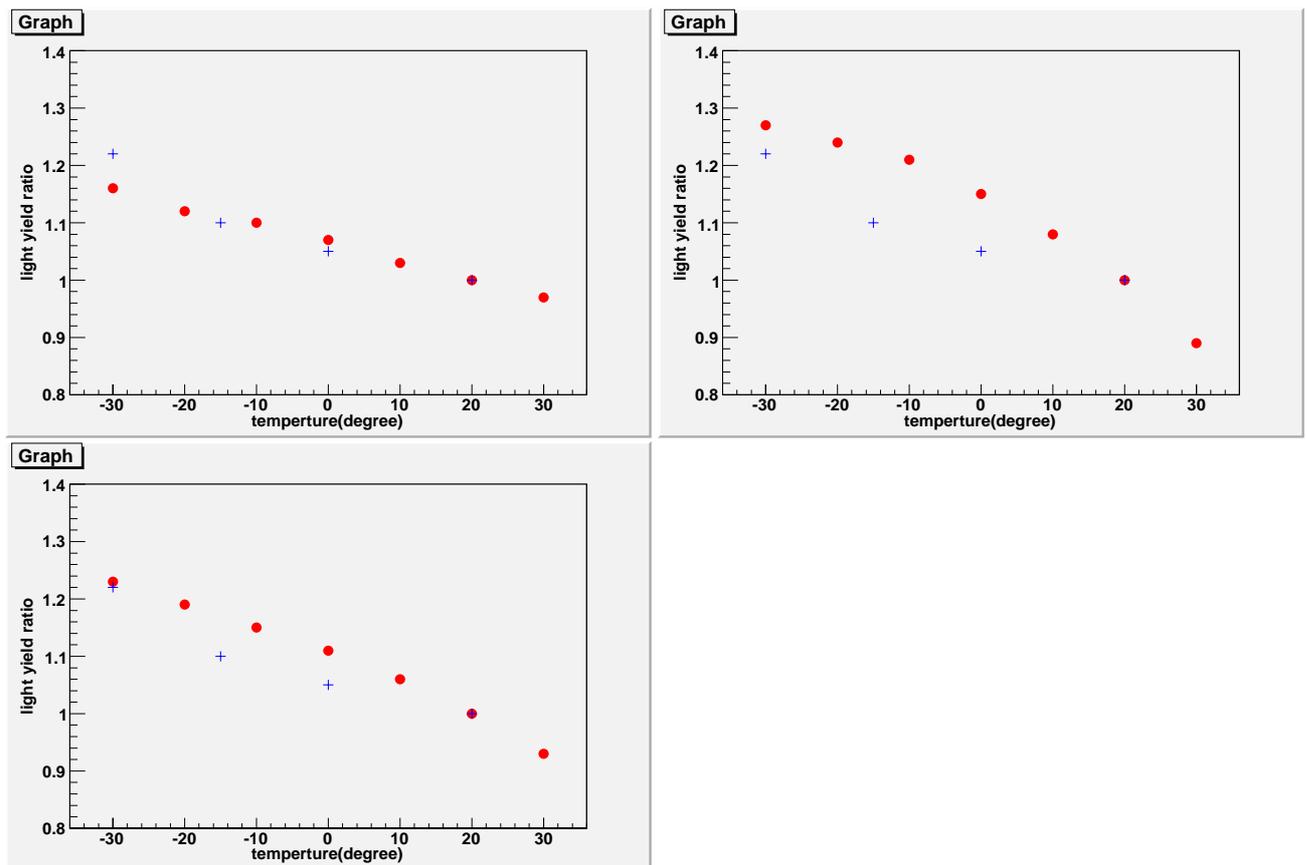


図 6.16: シンチレーターの光量の温度依存性 (14 clock 軸投影)。赤が各シンチレーターでの光量比、青が5章で求めた光電子増倍管のゲインの温度依存性 (左上)fast シンチレーターの光量比。(右上)BGO シンチレーターの光量比。(左下)slow シンチレーターの光量比。

keV) のピークチャンネルを式 (4.1) でフィッティングを行って求め各温度に対してプロットしたものが図 (6.16) である。これから 30 度の時の光量に比べ-30 度では、fast シンチレーターで約 2 割、BGO で約 4 割、slow シンチレーターで約 3 割ピーク値が増加していることが分かる。4章で述べたように、光電子増倍管は常温に対して-30 度下ではゲインが、約 2 割増す。これを考慮すると、fast シンチレーターはこの範囲の温度変化に伴う光量の変化はなく、BGO では 2 割、slow シンチレーターでは 1 割の光量の増加があることが分かった。30 度と-30 度での fast シンチレーター+BGO、fast シンチレーター+slow シンチレーターの 2 次元プロットのブランチの重なる分離点から fast シンチレーターの下限エネルギーレシヨールドを求めた。その結果、fast シンチレーター+slow シンチレーターでは、30 度の時約 9.0 keV だったものが、-30 度で約 7.8 keV になり、fast シンチレーター+BGO では、30 度の時約 11.0 keV だったものが-30 度で約 9.9 keV になった。これより低温下では、光量の増加により下限エネルギーレシヨールドが最低 1 割下がるということが分かった。

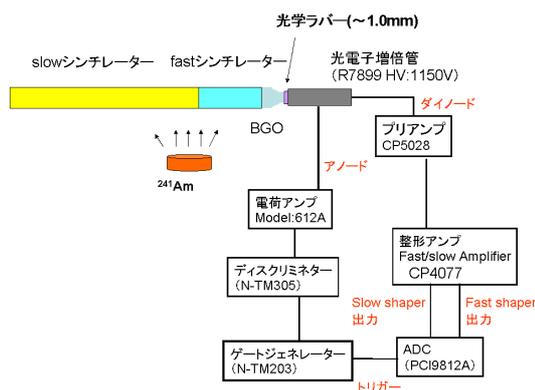


図 6.17: セットアップ

6.3 実機のスウィッチユニットの特性試験

ここまで PoGOLite 検出器の各構成要素 (センサー及びアナログ回路) がそれぞれ高い性能を持つことが確かめられてきた。一方、実機のスウィッチユニットであるスウィッチユニット (図 3.2) は、全長 1 m にも及ぶ長い構造をしており、光量の減衰は避けることができない。そこで、最終確認として、実機のスウィッチユニットの試作器とアナログ回路を組み合わせて試験を行った。

6.3.1 実験セットアップ

今回の測定で用いたスウィッチユニット (PDC) は、本試験のため試作機を借り受けたものであり、ボトム BGO の側面が曇りガラス状になっている古いデザインのものである。スウィッチユニットの長い全長の為、簡易スウィッチの試験より光量が減少することが予想されることもあり、実際の PoGOLite のオペレーションと同じ高い高圧で実験を行った。PDC を厚さ ~ 1.0 mm の光学ラバーを挟んで光電子増倍管に光学グリースで接合し、長い L 型のレールに固定して横に置いて測定を行った。図 (6.17) のように光電子増倍管のダイノード出力を PoGOLite のアナログボード (AD8057) に入れ、この信号を ADC に入れて、このプリアンプ出力信号自体でトリガーをかけてデータ取得を行った。 ^{241}Am の線源を用いて、fast シンチレーター+BGO に照射した場合、slow のみに照射した場合とでデータを取得した。slow シンチレーターの測定では光量が低い為ピークの判断が難しい為、比較用として線源を照射しないバックグラウンドランも行った。

6.3.2 実験結果

ここでは、ピークの位置によるイベントセレクションを行った。その結果、fast シンチレーター+BGO に ^{241}Am (59.5 keV) を照射し、遅延時間 (2 clock, 14 clock)、(3 clock, 14 clock) で得られた 2 次元プロットが図 (6.18 上) に、slow シンチレーターのみ照射して得られた 2 次元プロット (遅延時間 3 clock, 14 clock) が図 (6.18 下) となった。ここでは、ケーブルが長く波形がなまってしまっている為 fast ブランチが 2 clock の遅延では太くなってしまっている。実際のフライトでは、プリアンプ出力が直接 ADC に入る為、信号がなまらず 2 clock でもこの 3 clock 程度のブランチの細さになると期待され、フライト時には 3 clock の細さと、2 clock の開き角が期待される。ここでは、(3 clock、14 clock) で解析を行った。

fast シンチレーター+BGO の二次元プロットから fast ブランチ、BGO ブランチをそれぞれ抜き出して slow 軸に投影して式 (4.1) でフィッティングしたスペクトルが、図 (6.19) である。さらに slow シンチレーターの根元に ^{241}Am (59.5 keV) を照射して得られたスペクトルとバックグラウンドランで得られたスペクトルを重ね描きしたものを図 (6.20) に示す。この図からの 100 チャンネル辺りにバックグラウンドランにはない山があることが確認でき、slow シンチレーターでの ^{241}Am (59.5 keV) のピークと考えられる。これらの結果をまとめたものを表 (6.3) に示す。

これらの結果から、まず fast シンチレーターでのエネルギー分解能から小型シンチレーターとの光量比を計算すると、小型 fast シンチレーターのエネルギー分解能が 27.6 % である為、式 (4.2) の関係を用いて計算すると $(\frac{43.3}{27.6})^2 = 2.46$ となり小型 fast シンチレーターの光量に対して $\frac{1}{2.46} \times 100 = 41\%$ となる。常温では、slow シンチレーターブランチと BGO ブランチの傾きは、ほぼ等しく、BGO の X 線阻止能が高い為 slow ブランチは BGO ブランチに埋もれてしまうことから fast シンチレーターブランチと BGO ブランチの分離点が下限エネルギースレシヨルドとなる。これまでと同様に fast シンチレーターでの ^{241}Am (59.5 keV) のピークチャンネルから分離点 (80,100) のエネルギースレシヨルドを求めると fast シンチレーターで ~ 14 keV、slow シンチレーターで ~ 60 keV、BGO で ~ 30 keV となった。

以上から現時点で、各シンチレーターでの下限エネルギースレシヨルドが、fast シンチレーターで ~ 14 keV、slow シンチレーターで ~ 60 keV、BGO で ~ 30 keV まで達成されている。3 章の図 (3.4) より、この slow シンチレーター / BGO の下限エネルギースレシヨルドは、必要最低限のバックグラウンドは落とすことができると言える。今後目標の、fast シンチレーターで下限スレシヨルド 2-3 keV、slow シンチレーター / BGO で 30 keV を達成する為の工夫の余地としては次のようなことが考えられる。

- ボトム BGO を側面を磨いたものに変える。現状は側面が曇ガラス状のものを使っており、磨いたものに変えることによって光量が 40% 程度増加することが確認されてお

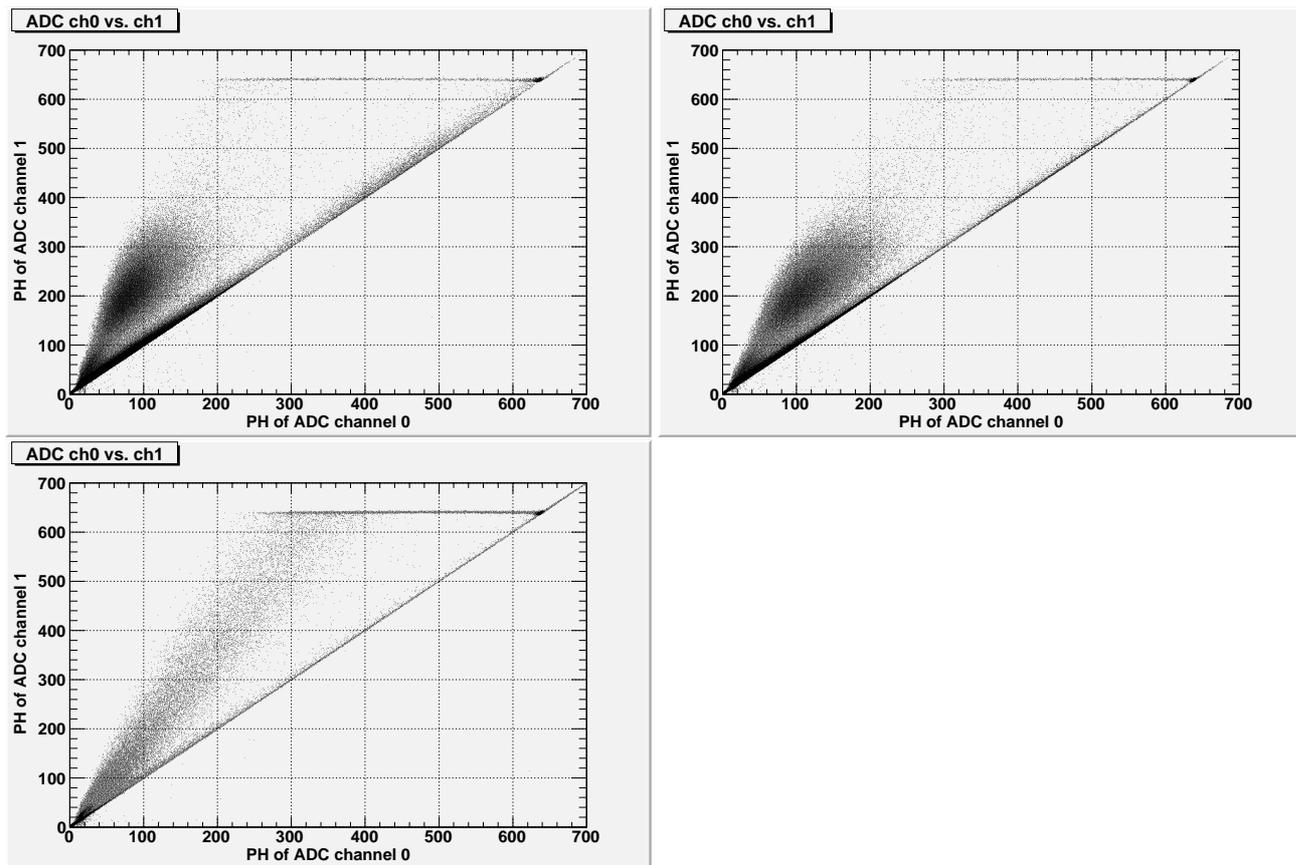


図 6.18: (左上)fast シンチレーター+BGO に $^{241}\text{Am}(59.5 \text{ keV})$ を照射した 2 次元 (遅延時間 2 clock、14clock)。 (右上)fast シンチレーター+BGO に $^{241}\text{Am}(59.5 \text{ keV})$ を照射した 2 次元 (遅延時間 3 clock、14clock)。 (下)slow シンチレーターの根元に $^{241}\text{Am}(59.5 \text{ keV})$ を照射した 2 次元 (遅延時間 3 clock、14clock)。

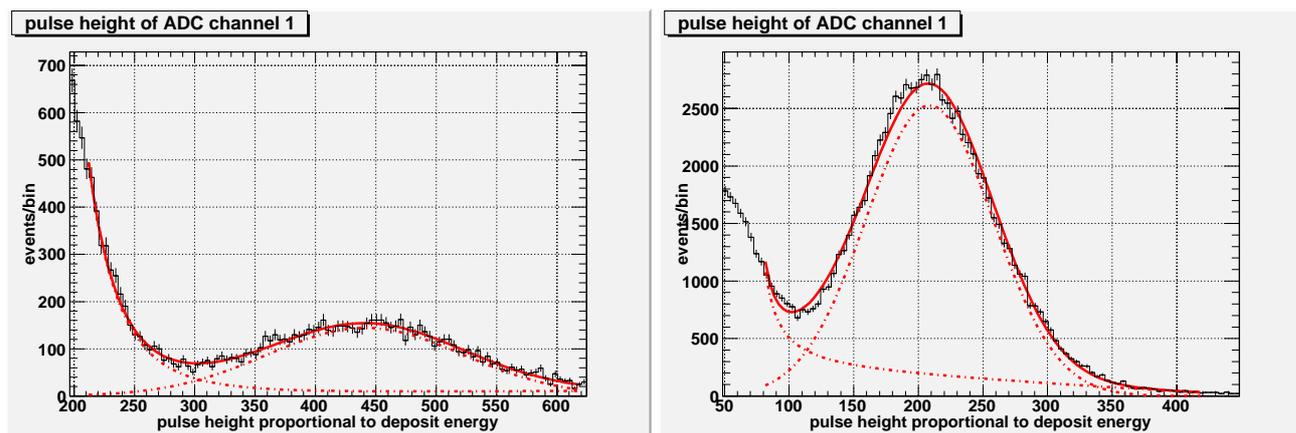


図 6.19: fast シンチレーターブランチと BGO ブランチの slow 軸投影した $^{241}\text{Am}(59.5 \text{ keV})$ スペクトル。 (左)fast シンチレーター (右)BGO

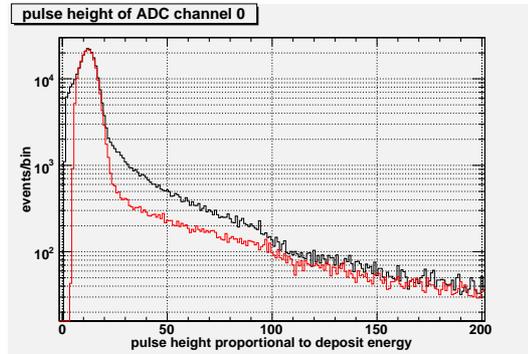


図 6.20: slow シンチレーター+バッググラウンドのスペクトル。(黒)slow シンチレーター
ブランチのスペクトル、(赤)バッググラウンドのスペクトル

表 6.3: 各シンチレーターブランチの slow 軸投影の光量、エネルギー分解能 (FWHM)

	ガウシアンフィット ピークチャンネル	エネルギー分解能 (%)	光量比 (%)	One photo-electron 比 (p.e.)
fast シンチレーター	441.1 ± 1.7	43.3 ± 1.6	100	33.9
BGO	208.6 ± 0.3	55.7 ± 0.5	47	16.0
slow シンチレーター	~100	---	23	7.7

り、全体の光量の増加が期待される。

- 低温下で運用する。上記の温度依存性で述べたように気球高度(約-30度)で運用した場合、シンチレーターの光量増加を考慮すると slow シンチレーターで約 10%、BGO で約 20%の光量増加が期待できる。これらを考慮すると、各シンチレーターでの下限エネルギー・スレシールドは、fast シンチレーターのスレシールドが、fast 軸で ~14 keV から 8 keV、slow シンチレーターで 60 keV から 30 keV、BGO で 30 keV から 11 keV へと改善すると期待される。
- 正規のジグを用いて縦置きに固定して運用する。これにより光電子増倍管とボトム BGO の接合が良くなり光量の増加が見込める。
- アルゴリズムを工夫する。アルゴリズムを工夫することによって各ブランチの間に存在するイベントを取り除けばより低いエネルギーまで分離できるようになると考えられる。
- 光電吸収イベントとのコインシデンスを取る。これによりバックグラウンドイベントにより反応している BGO のイベントを落とすことができ、より 2 次元プロットのブランチの分離が良くなる。

以上のような工夫により今以上に性能が向上し目標性能を達成できると考えられる。

第7章 まとめと今後の課題

現在までに X 線領域で偏光の観測をしたのは 1 例しかなく、その様な未開拓の X 線偏光分野を切り開くべく気球搭載硬 X 線偏光検出器 PoGOLite の開発が行われている。PoGOLite 検出器は、『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器で用いられている、井戸型フォスウィッチカウンターのデザインを採用した検出器であり波形弁別により効率よくバックグラウンド除去を行う高感度を誇る検出器である。その高感度の実現には、センサーが高い性能を持つことと、波形弁別により効率良くバックグラウンドを除去することが鍵となる。本研究では、そのセンサーの各コンポーネントの特性試験及び、波形弁別性能の評価試験を目的として実験を行った。その結果、PoGOLite 検出器の各構成要素がそれぞれ高い性能を持つことが確かめられた (4 章～5 章)。そこで最終確認として、実機のユニットと実機のアナログ回路を組み合わせた試験を行った (6 章)。その結果、現時点で各シンチレーターでの下限エネルギーレスレシールドが主検出部である fast シンチレーターで ~ 13 keV、slow シンチレーターで ~ 60 keV、BGO で ~ 30 keV まで達成された。2 章のバックグラウンドシミュレーションの結果より、この下限エネルギーレスレシールド 60keV では、必要最低限のバックグラウンドは落とすことができることが分かった。

シンチレーターの温度依存性 (5 章、6 章) を考慮して、低温環境で利用することで光量の増加が見込める。さらにボトム BGO のデザインの変更や正規のジグを使うことでロスしていた光量を抑えることが出来ると考えられる。さらにデータ処理のアルゴリズムを工夫するなどして目標性能を達成できるように開発を進めていきたい。

謝辞

本論文を作成を含め3年間の研究生生活を通じて、いろいろと丁寧にご指導くださった、大杉節氏、深沢泰司氏に厚く感謝申し上げます。そして3年に渡り水野恒史氏には、Pythonに始まり、実験やら、多くの何よりも大切な事やらを指導いただき本当に感謝しております。よく私相手に最後まで根気よく指導をしてくれたものだと感心してしまいます。恒史氏ならではの、諦めの悪さの賜と言えましょう。本当にありがとうございました。この御恩は一生忘れません。そして次に、4年間学生実験の頃から本当に良く遊んでもらったり、研究の手助けをしてもらった川埜さん。ありがとうございました。楽しい学生生活が送れました。そして大野さん、うっかり夜型になってからかなりの回数の卓球、牛丼特盛りコース本当に楽しかったです。修論時期の深夜にこんなに楽しく過ごせたのは、真に大明神のおかげです。次に都さん、何か忙しい時期には差入れをしていただき、ありがとうございました。コロツケ、眠眠打破は最高でした。そして克典、大学入学して以来、早6年共によく成長したものです。むらっ気が目立ちましたが、ノリも良くいろんなところに行ったり、遊んだり本当に楽しかったです。ありがとう。そして江川さん結構、愚痴を言い合ったりなど、良い気分転換になりました。そして密かな雑学王で話が面白かったです。田中君、変な癖を伝染するのはやめてください。竹本氏キューブでした。西野翔君、私をだしにして焼肉の人に接近しようとし過ぎです。もっと自力で頑張ってください。そしてキャッチボール等いろんなスポーツにつき合ってくれてありがとう、おかげで文武両道を実現できました。宮本くんは、リアクションナンバー1でした。お茶しっかり買うように。白井くん、恒史さんに叩かれてよく愚痴なんかきいてもらってありがたかったです。浅野氏、吉田氏、夜は楽しませてもらいました。ちよぺー、かなり个性的で研究室入る前からよく話しをして楽しかったです。いつまでもその個性を大事にして下さい。その他の研究室のみなさん、楽しい研究室生活を送れたのはみなさんのおかげです本当にありがとう。その他私の学生生活を支えてくれたケニーさん兄さんを筆頭に本当にありがとうございます。みなさまあつての私でした。

参考文献

金井義和：2005年度 東京工業大学 卒業論文 『気球搭載硬 X 線偏光計の試作と性能評価』

有元誠：2006年度 東京工業大学 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』

Tomi Ylinen. 2006, Royal Institute of Technology, Master of Science Thesis 『Construction and accelerator-based tests of the PoGO-Lite prototype』

Mozsi Bank Kiss. 2006, Royal Institute of Technology, Master of Science Thesis 『Construction and laboratory tests of the PoGO-Lite prototype』