

平成17年度修士論文

シンチレータを用いた
位置敏感型 γ 線スペクトロメータの開発

西村広展

京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二教室 宇宙線研究室
平成18年2月1日

概要

無機シンチレータは 100keV から 10MeV 程度のガンマ線に対して有用なスペクトロメータとして利用されている。とくに天体からの硬 X 線・ガンマ線観測においては非常に重要な役割を担ってきた。現在でも世界各地で開発が進んでいる MeV ガンマ線観測用コンプトンカメラの吸収体や井戸型硬 X 線検出器の検出部やアクティブシールド部などに利用されている。

当研究室にて開発中の次世代型コンプトンカメラにおいても高いエネルギー分解能、位置分解能および大面積をもつ位置敏感型ガンマ線スペクトロメータが必要となる。そこで、本研究では無機シンチレータに関する研究とそれをもちいた高い位置分解能と広い有効面積をもつシンチレーションカメラの製作をおこなった。

上記のようなシンチレーションカメラの製作にはシンチレータ結晶をピクセル化しアレイ上に並べ、各ピクセルからシンチレーション光を読み出す方法が有利である。そこで我々は、エネルギー分解能を落とすことなく、ピクセル結晶をアレイ化する技術を開発した。またシンチレーション光デバイスとしては、高位置分解能かつ大有効面積をもつフラットパネル PMT(浜松ホトニクス社)の利用と大面積 Si PIN Photodiode Array(浜松ホトニクス社+当研究室 以下 PDA)の開発を行った。8×8 マルチアノード PMT(H8500 アノードピッチ 6mm)に 8×8 個の 6×6×13mm³GSO(Ce)結晶からなるアレイをとりつけることにより、放射線耐性が強く、計数性能が高い検出器を製作した。この検出器においては複数台の H8500 のアノード電極を抵抗チェーンで結ぶことで 16×16cm²の大面積中の 572 ピクセルを 12ch のアナログ回路でよみだしている。この方法により 80keV~1300 keV のガンマ線を 6mm 角のピクセル毎に捕らえることができ、平均 10% (FWHM) @662keV のエネルギー分解能を得た。そして現在気球搭載用の次世代コンプトンカメラに組み込み、試験運転中である。PDA は 10×10cm²の大面積中に 20×20 個の 4.5mm 角受光面を持つ。この素子に 4.5×4.5×20mm³の CsI(Tl)結晶 400 個からなるシンチレータアレイを接着することにより、低電力、軽量、耐衝撃性という性質をもつシンチレーションデバイスを作成した。さらにこの検出器の 1 ピクセル毎に読み出し試験を行い 50keV~1300keV のガンマ線を観測し、平均 8% (FWHM) @662keV というエネルギー分解能を得た。

目次

第 I 部	γ 線カメラとシンチレーター検出器	4
第 1 章	γ 線天体観測	5
1.1	高エネルギー天文学	5
1.1.1	超新星爆発・元素合成	5
1.1.2	電子・陽電子対消滅。陽電子の存在。	6
1.1.3	その他・高エネルギー粒子加速等	6
1.2	硬 X 線・ γ 線観測方法	6
1.2.1	高エネルギー光子と物質 (検出器) の相互作用	6
1.2.2	放射線検出器	8
1.2.3	硬 X 線・ γ 線天体観測装置	9
第 2 章	シンチレーションカメラ	15
2.1	シンチレーションの基本原理	15
2.2	各種シンチレータ	16
2.2.1	有機シンチレータ	17
2.2.2	無機シンチレータ	17
2.2.3	液体シンチレータ、気体シンチレータ	22
2.3	光輸送	22
2.4	光デバイス	25
2.4.1	光電子増倍管 PMT	25
2.4.2	半導体デバイス	27
2.5	シンチレータ検出器による硬 X 線・ γ 線測定	29
2.5.1	シンチレータ検出器による硬 X 線・ γ 線エネルギースペクトラム	29
2.5.2	シンチレータ物質の選択	32
2.5.3	シンチレータ検出器におけるエネルギー分解能	33
2.6	位置敏感型シンチレータ検出器 (シンチレータカメラ)	35
2.6.1	1 結晶 vs 多チャンネル光読みだし	35
2.6.2	ピクセルシンチレータを用いた位置分解法	36
2.6.3	ピクセル型とアンガー型	37
2.7	pixel シンチレータアレイ	37
2.7.1	ピクセルシンチレータ結晶	37
2.7.2	シンチレーターアレイの製作	39

第 II 部	MAPMT と GSO:Ce を用いた γ 線カメラの開発	41
第 3 章	GSO(Ce) 結晶の性能評価と GSO ピクセルシンチレータアレイの製作	43
3.1	GSO シンチレータの諸性質	43
3.2	GSO ピクセルシンチレータの評価	44
3.2.1	評価用結晶	44
3.2.2	GSO ピクセルシンチレータ結晶評価用 set up	44
3.2.3	評価結果	46
3.3	GSO(Ce) ピクセルシンチレータアレイ (GSO-PSA)	48
3.3.1	GSO-PSA の製作	48
3.3.2	シングルアノード PMT による GSO-PSA の評価	49
第 4 章	H8500 によるピクセルシンチレータアレイの読みだし	51
4.1	浜松ホトニクス社 H8500 マルチアノード PMT	51
4.1.1	仕様	51
4.2	抵抗チェーンを用いた H8500 の読みだし	52
4.3	5cm 角 6mm ピクセル GSO-PSA カメラ	53
4.3.1	セットアップ	53
4.3.2	γ 線全面照射による 16ch 読みだし 5cm 角 6mm ピクセル GSO-PSA の性能評価	54
4.3.3	4ch による 5cm 角 6mm ピクセル GSO-PSA カメラの読みだし	59
4.4	3mm 角 GSO ピクセルアレイ (PSA) + H8500	59
4.5	大型シンチレータカメラの製作 (6mm 角 GSO(Ce)572 ピクセル)	61
4.6	次世代型 MeV γ 線カメラへの応用	63
4.7	フラットパネル PMT を用いたシンチレータカメラ開発の今後	65
4.7.1	位置分解能の向上およびエネルギー分解能の向上	65
4.7.2	アナログ集積回路を用いた低電力化、高性能化	65
第 III 部	大面積半導体光デバイス:PDA と CsI(Tl) を用いた γ 線カメラ開発	67
第 5 章	400chPIN 型 Photodiode Array(PDA) の性能評価	69
5.1	仕様	69
5.2	PIN 型 PDA の電気試験による性能評価	71
5.2.1	半導体検出器の電気的特性とノイズ	71
5.2.2	400chPDA 中のピクセルの電気的特性	72
5.3	400ch Si PIN PDA アレイの X 線照射における性能評価	72
5.3.1	set up	74
5.3.2	PDA 評価用 Setup におけるノイズ	74
5.3.3	X 線スペクトル測定結果	76
5.3.4	PDA 素子の電気的性質と実験値の比較	77
第 6 章	400ch PIN PDA による 400chCsI(Tl) シンチレータアレイの読みだし	78
6.1	PDA アレイ + CsI(Tl) シンチレータによる γ 線測定	78
6.2	400ch CsI(Tl) シンチレータアレイ	79
6.2.1	仕様	80
6.2.2	製作方法およびアライメントのずれ	80

6.3	400chCsI(Tl) + 400chPDA による γ 線測定および性能評価	81
6.4	CsI(Tl) + Si(PDA) におけるエネルギー分解能の諸要因	82
6.5	γ 線カメラとしての今後の課題・開発	83
第IV部 まとめ		85
第7章 まとめ		86
7.1	大面積GSO-PSAカメラの実現	86
7.2	大面積半導体検出器の性能評価	86
7.3	将来の位置敏感型スペクトロメータの開発。	86
AppendixA		88
A.1	半導体検出器における電気ノイズ	88
A.1.1	ノイズの起源	88
A.2	Shaping time 決定の予備実験	90
A.3	低温におけるPDAおよびPDA + CsI(Tl) の性能	90
A.4	クリアパルス社製VAヘッドアンプを用いた測定。	92

第I部

γ 線カメラとシンチレータ検出器

第1章 γ 線天体観測

1.1 高エネルギー天文学

われわれは遠い天体からくる光によってその天体やそのまわりで起こっている物理事象を知ることができる。その光のエネルギーは電波から γ 線まで、広い領域にわたっている。とくに近年の高エネルギー γ 線観測により数々の高エネルギー物理事象が宇宙空間で起きていることが解明されてきている。

数10keVを越える硬X線・ γ 線の領域でも観測がすすんできており、いくつかの核子レベルのスケールの物理現象がみられている。

1.1.1 超新星爆発・元素合成

宇宙に存在する元素は星の内部の核融合や中性子捕獲によって生成されていくと考えられている。とくに超新星爆発時におこる中性子捕獲 (R-Process) ではウランなどの重元素が生成され、重元素のほとんどはこの時生成されると考えられている。そしてこの生成された重元素は不安定なものが多いため、その多くはすぐに崩壊していき安定な核にかわる。この時、崩壊に伴う放射線が発生し、その多くは決まったエネルギーの γ 線をともなっている。核崩壊の半減期は非常に短いものから長いものまであり、超新星爆発を観測できれば半減期が数秒から数年の様々な放射性物質からの γ 線とそれに伴う周囲の物質との相互作用がみられ、元素合成過程の解明もすすむと思われる。また、観測可能な距離での超新星爆発は非常に稀であるため、前述の短寿命放射性元素の観測は難しいが半減期が数百年以上の放射性元素は現在見つかった超新星残骸中から発見されている。

また ^{26}Al のような長寿命放射性同位体は超新星残骸の星間空間への拡散とともに広がるため ^{26}Al は超新星残骸のおきた周辺にひろがり放射し続けていると考えられる。この ^{26}Al による1.8MeVの γ 線はCOMPTEL検出器によって銀河面上から検出されているが、その分布についてはやはり $1^\circ \sim 3^\circ$ 程度もしくはそれ以上の角度分解能による感度のよい観測が期待されている。

	エネルギー (keV)	半減期	天体
^{56}Ni	158,270,480,759,812	6.10day	
^{56}Co	847,1238,2598	77.2day	SN1987A,SN1991T
^{57}Co	122,136	271.7day	SN1987A
^{44}Ti	1157	63year	Cas A SNR
^{26}Al	1809	7.4×10^5 year	galactic plane,Vela SNR

表 1.1: 宇宙空間における放射性同位元素

1.1.2 電子・陽電子対消滅。陽電子の存在。

電子には反物質である陽電子が存在する。陽電子は電子と衝突すると対消滅で消滅するため物質中の寿命は短い。しかし対消滅のさいに511keVの γ 線を放出する。このピークと思われるものがHEAO-3やOSSE、INTEGRAL衛星IBISなどにより銀河中心から観測されている。この陽電子は放射性核種などの β^+ 崩壊による生成、もしくは高エネルギー γ 線の対生成過程によってうまれるが、まだその起源を決定するような観測はなされていない。

1.1.3 その他・高エネルギー粒子加速等

硬X線・ γ 線領域においては核反応以外にも粒子加速現場におけるシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などによる放射、などがコンパクト天体や超新星残骸、銀河中心、活動銀河核などから検出されており電子・陽子の高エネルギー運動が徐々に明らかになりつつあるが、X線領域に比べると検出器の開発が遅れているためさらなる感度の良い観測が求められている。

1.2 硬X線・ γ 線観測方法

1.2.1 高エネルギー光子と物質(検出器)の相互作用

X線・ γ 線を計測することは、つまり光子と検出器の相互作用をみるということである。X線と γ 線領域の光子の物質との相互作用は以下の3つがある。

- 光電効果

X・ γ 線が物質中の原子内の電子にすべてのエネルギーをあたえ叩きだす。電子はX線のエネルギーから仕事関数を引いた分の運動エネルギーで物質中に飛び出す。飛び出した電子は散乱をうけつつ、物質中の電子を電離させながらとまる。たたき出された電子のあった電子準位には高いエネルギー準位から電子が遷移してくる。(その際特性X線が発生し、そのX線はまた他の電子を電離させる。) X・ γ 線に対する光電効果の反応断面積 σ_{ph} は一般的に

$$\sigma_{ph} \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \quad (1.1)$$

となっている。nは(4~5)。ただし各電子殻における結合エネルギーでは断面積が不連続となるエッジが存在する。入射X線エネルギーがK殻における電子の束縛エネルギーよりも大きい時、K殻電子に対する反応断面積 σ_k が一番大きく

$$\sigma_k = 4\sqrt{2}\sigma_T\alpha^4 Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (1.2)$$

ここで

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{e^2}{2\varepsilon_0 hc} \text{(微細構造定数)} \\ \sigma_T &= \frac{e^2}{6\pi\varepsilon_0^2 m_e^2 c^4} \text{(トムソン散乱断面積)} \\ m_e &: \text{(電子静止質量)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

である。

- コンプトン散乱

γ 線光子が物質中の電子と非弾性衝突をおこし、電子を弾き飛ばす。 γ 線光子も散乱をうける。入射光子エネルギーを E_γ 、散乱 γ 線を E'_γ とすると散乱角 ϕ との関係は

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \phi)} \quad (1.4)$$

とかける。またその散乱微分断面積は Klein-Nishina の公式より

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + E(1 - \cos \theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \left(1 + \frac{E^2(1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)(1 + E(1 - \cos \theta))} \right) \quad (1.5)$$

とかける。ただし

$$E = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2}$$

である。

- 対生成

γ 線エネルギーが 1.02MeV を越えると γ 線が電子と陽電子に分かれる電子・陽電子対生成を起こすようになる。この反応の際 γ 線は運動量は物質中に落して消滅し、電子と陽電子が生成される。反応断面積は

$E_\gamma \ll 1/\alpha Z^{1/3}$ のとき

$$\sigma_{pair} \propto Z^2 (\ln E_\gamma - const) \quad (1.6)$$

$E_\gamma \gg 1/\alpha Z^{1/3}$ のとき

$$\sigma_{pair} \propto Z^2 \left(\ln \frac{1}{Z^{1/3}} - const \right) \quad (1.7)$$

と表される。

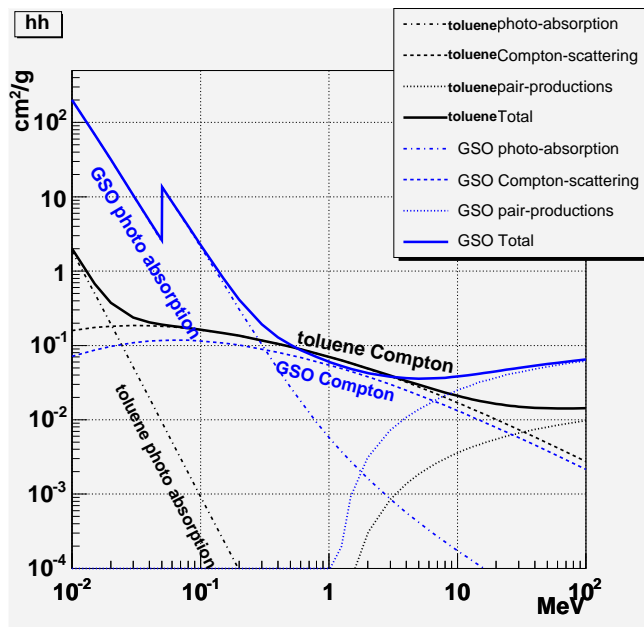


図 1.1: トルエン (プラスチック材料) と GSO(Gd_2SiO_5) の光子に対する各反応の断面積 [1]。

以上の3種類の反応により生まれた電子が検出器中を走り、エネルギーに応じた電子・イオン対を生成する。これらの電子・イオン対を検出器により電荷信号にかえて γ 線を検出する。検出器中で、光子がどの反応を起こすのかは各反応における断面積で決定し、それは主に光子エネルギーを物質の平均原子量によって決定する。

図 1.1は固体のシンチレータとして使われているプラスチック(トルエン)とGSO結晶の高エネルギー光子(10keV~100MeV)に対する各相互作用における反応断面積である。Zのちいさなトルエンは数十keVから数十MeVの範囲でコンプトン散乱が卓越するが、Zの大きなGSOは200keVあたりまで光電効果の確率が高く、10MeV以上になると対生成の反応断面積が多くなる。

1.2.2 放射線検出器

前節のような反応により物質中に生じた電子・イオン対を定量的に測定することにより、 γ 線の検出を可能にする。これは他の放射線に対しても同じである。(違うのは電子・イオン対生成にいたるまでのプロセスである。) 内部で生じた電子・イオン対を検出する方法として次のような3つの方法がある。

- 電荷直接検出 比例計数管・半導体検出器等
- 光変換検出 シンチレータ等
- 熱検出 カロリメータ

電荷直接検出は発生した電荷を電極のとりつけと電場の印加により電極にあつめ、電気信号として取り出す方法である。検出体としてはガス・液体・固体などさまざまな形態がある。また比例計数管のように検出部に増幅機構があるものがある。

光変換検出は電子・イオン対が生じた直後におきるシンチレーション光やチェレンコフ光を光デバイスで電気信号に変換する方法である。

熱検出器は電子・イオン対生成の後に検出器に与えられる熱エネルギーによる温度上昇を熱素子によって電気信号に変換する方法である。

現在のところ小型の検出器の性能は固体の半導体検出器やカロリメータが精密で性能が格段にいいが、大型の検出器ではやはりガス検出器が良く使われている。また γ 線などにたいしてはZが大きく密度の高いものが製作可能なシンチレータの利用が多い。

1.2.3 硬 X 線・ γ 線天体観測装置

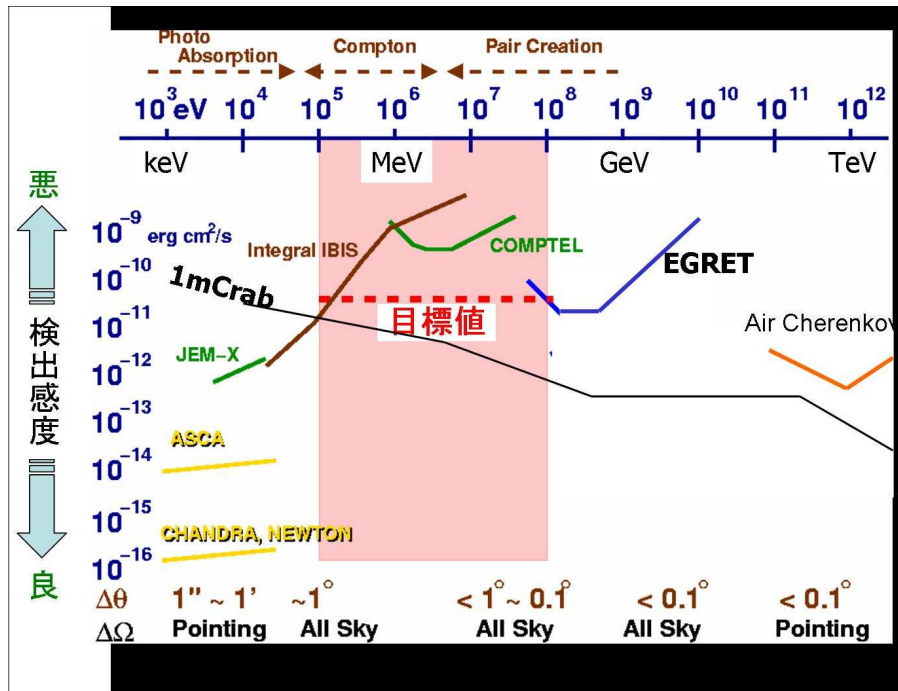


図 1.2: X 線・ γ 線領域における現在までの観測と到達感度。
目標値は次世代コンプトンカメラのもの。

天体からの高エネルギー光子は TeV 領域の γ 線まで観測されている。しかし 10keV 付近まで高感度な観測が行われてきたがそれ以上のエネルギー領域では急激に感度が悪くなってきている。これは X 線望遠鏡の利用が困難になってくるためである。このため数十 keV 以上の観測においては望遠鏡以外の方法で S/N 比の高い観測をおこない検出感度や角度分解能を得る必要がある。現在では以下に紹介するような方法にて硬 X 線・及び γ 線の観測がおこなわれてきている。

Collimator Method [光電吸収]

コリメータ法は検出部の前に視野を制限するコリメータを設置し、到来する光子を制限し、ターゲット天体のエネルギー情報は得るシンプルな方法である。複数のコリメータを用いることで一つのコリメータの視野が角度分解能となる撮像装置になるが、コリメータの壁は対象光子に対して十分厚くなければいけないため細かいものは製作は困難で、撮像能力に非常に乏しい。しかも視野が非常に狭い。さらに 100keV を越える光子にたいしてはコリメータ部でコンプトン散乱や荷電粒子により生成された光子がバックグラウンドとなるため低バックグラウンド化が必要である。

[すざく HXD] アクティブシールド井戸型検出器 2005 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星すざくに搭載されている HXD 検出器はコリメータとして BGO シンチレータを用い、コリメータに放射線が衝突した、もしくは γ 線がエネルギーを落した場合のイベントを認識し捕えることができる (アクティブシールド)。このアクティブシールドにより低バックグラウンド環境を実現し、100keV 程度までの感度をもつ PIN 型 Si 検出器と GSO シンチレーター検出器の 2 段構造での観測を行っている。

Coded Mask Method [光電吸収]

Coded Mask 法はあるパターンをもつコリメータによりできる入射硬 X 線・ γ 線の影を検出器によって捕える方法である。入射 γ 線の方向によって生成される影の形が異なることを利用し、コリメータの形と検出部までの距離・形できまる変換行列を用いることで数分という高い角度分解能をえることができ、広い視野を確保できる。数百 keV 程度までの γ 線に対しては、最高の角度分解能をもつ方法である。ただし、検出部にあらわれるパターンをもとに到来方向をきめるためパターンがバックグラウンドに対して十分に認識できる統計が必要である。とくに数 100keV 程度より大きな γ 線イベントではコリメータによるコンプトン散乱の影響がバックグラウンドとなりまたコリメータを透過する確率も増えてくるため、感度が悪くなっていく。

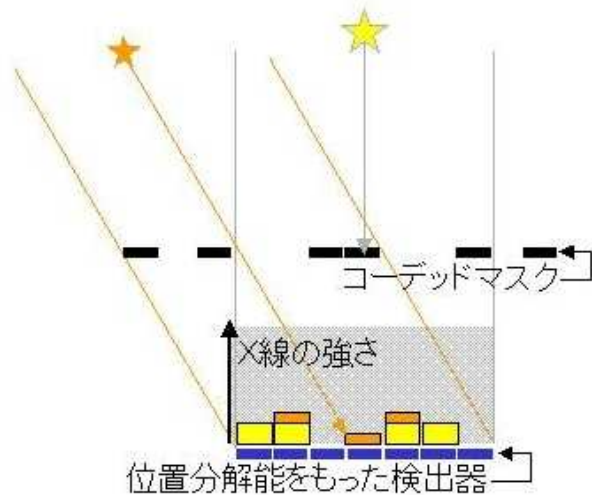


図 1.3: Coded Mask 法 概念図

[INTEGRAL 衛星] INTEGRAL 衛星 (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) はヨーロッパの研究機関が共同で打ち上げた、硬 X 線・ γ 線観測衛星である。JEMX・SPI・IBIS という 3 種類の Coded Mask Camera を搭載している。このうち IBIS 検出器はタングステン製のマスクと CdTe 半導体検出器および CsI(Tl) シンチレータ検出器を用い 20keV~6MeV というエネルギー範囲を 12 分角程度の角度分解能での撮像が可能である。(ただし、高エネルギー側では検出効率が非常に悪い。) これにより、銀河中心における 511keV γ 線放射の分布および銀河面リッジ成分の非熱的成分の解明などが進んでいる。

[swift 衛星] swift 衛星は 2005 年に打ち上げられた γ 線バーストモニター用検出器である。swift 衛星の主要検出部は BAT(Burst Alert Monitor) という 32768 個の CdTe 検出器を用いた Coded Mask Camera を搭載しており 1.4str という広い視野と 17 分角という角度分解能をもつ (15~150keV)。この衛星により、発見された γ 線バーストは直ちにその位置情報が全世界に配信されるシステムが整備されている。

Compton Method [コンプトン散乱]

数 100keV 領域より数 10MeV 領域の γ 線においては光電吸収確率がへり、コンプトン散乱が主な物質との相互作用となる。このため、上記のような井戸型もしくは Code Mask 型の検出器ではコリメータで、 γ 線を完全に止めるのが困難になるため S/N が非常に悪くなってくる。そこで考案され、1990 年代に活躍した CGRO 衛星に搭載された COMPTEL 検出器にももちいられたのが「コンプトン法」である。「コンプトン法」を用いた「コンプトンカメラ」は散乱体と吸収体からなる。散乱体と吸収体はどちらも位置分解能及びエネルギー分解能をもつ検出器で、散乱体検出部でコンプトン散乱した γ 線が吸収体において光電吸収によりエネルギーが吸収されたとき、コンプトン散乱の運動学より、到来 γ 線と散乱 γ 線のなす角度 ϕ を求めることができる (式 1.9、図 1.4)。

$$E_0 = E_e + E_\gamma \quad (1.8)$$

$$\cos \phi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_e + E_\gamma} \right) \quad (1.9)$$

これにより入射 γ 線の到来方向を散乱 γ 線から ϕ の角度をもつリング状(コンプトンリング)に限定することになる。そしていくつかの散乱 γ 線の方向が違うリングを重ね合わせることで、到来 γ 線の方向を決定できる。この方法では最低で3イベントがあれば到来 γ 線の方向が1点に決まるため、coded mask法よりも少ない統計数で位置を決定できる。さらにコリメータを用いずに運動学により方向を決定するため、広い視野を実現することが出来る。ただし、周囲のバックグラウンドも同様にリング状に検出されるため、バックグラウンドの影響を受けやすい。また、偶然同時事象や、吸収体でコンプトン散乱→散乱体で光電吸収、また散乱体コンプトン散乱→吸収体でコンプトン散乱などのイベントも正規のイベントと分離できないため、S/Nが悪くなりやすい。このためきちんとしたバックグラウンドの除去、見積りを行わなければならない。

コンプトンカメラの角度分解能は式(1.9)より散乱 γ 線の決定精度と、散乱体と吸収体のエネルギー分解能、そしてバックグラウンドの除去能力による。また検出有効面積は(散乱体のコンプトン散乱断面積) \times (散乱 γ 線の吸収体での吸収確率)に比例する。第2項は散乱 γ 線の吸収体への到達確率と反応断面積の積である。

[COMPTEL] COMPTEL 検出器は CGRO 衛星 (1991 年打ち上げ) に搭載された、コンプトン検出器である。散乱体に液体シンチレータ吸収体に NaI(Tl) シンチレータを用いることで角度分解能 $1.2 \sim 3^\circ$ (σ) での観測をおこなった。地球大気からの γ 線バックグラウンドを軽減するため散乱体と吸収体を約 2m 離し TOF 法により上方からきたイベントと下から来たイベントを分離している。これにより大気 γ 線によるバックグラウンドを劇的におとしそれまでほとんど観測がなされなかった 1MeV \sim 30MeV の領域において 30 余りの天体を検出した。

Advanced Compton Camera

COMPTEL におけるバックグラウンド除去能力は大気 γ 線にたいしては有効であったが、衛星本体から、もしくは検出器内部でのコンプトン散乱によるバックグラウンドなどには弱く当初予想していた感度よりも一桁悪い結果となっている。

近年コンプトン法のバックグラウンド除去能力を高めた次世代型コンプトンカメラが開発されている。次世代型コンプトン法は従来のコンプトン法では捕えることの出来なかった電子の反跳方向をとらえることにより、入射 γ 線と散乱 γ 線なす平面を決定し、 γ 線の到来方向をコンプトンリングから扇型に限定することが出来る図 1.6。

$$E_0 = K_e + E_\gamma \quad (1.10)$$

$$\vec{s} = \left(\cos \phi - \frac{\sin \phi}{\tan \alpha} \right) \vec{g} + \frac{\sin \phi}{\sin \alpha} \vec{e} \quad (1.11)$$

ここで

$$\cos \phi = 1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma + K_e} \frac{K_e}{E_\gamma} \quad (1.12)$$

$$\cos \alpha = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}} \right) \quad (1.13)$$

である。また運動学と幾何学の2通りにより散乱角を求めることができるため、散乱体でコンプトン散乱をおこし、吸収体で吸収されたというイベントのみを選び出すことができる。不完全なコンプトンイベントは排除できる。

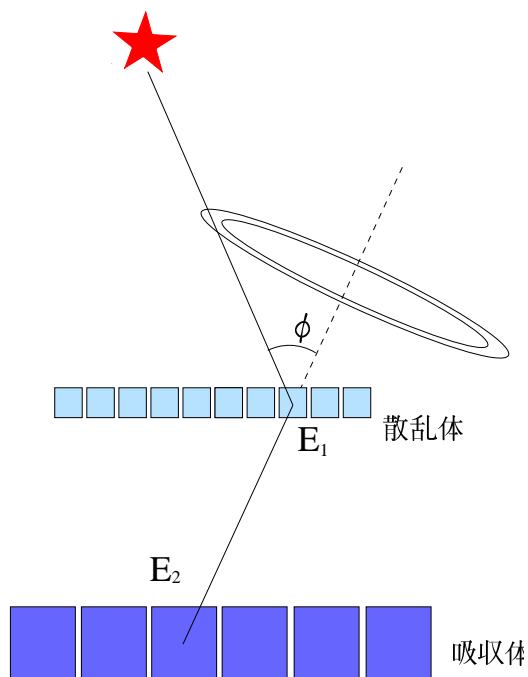


図 1.4: コンプトン法 概念図

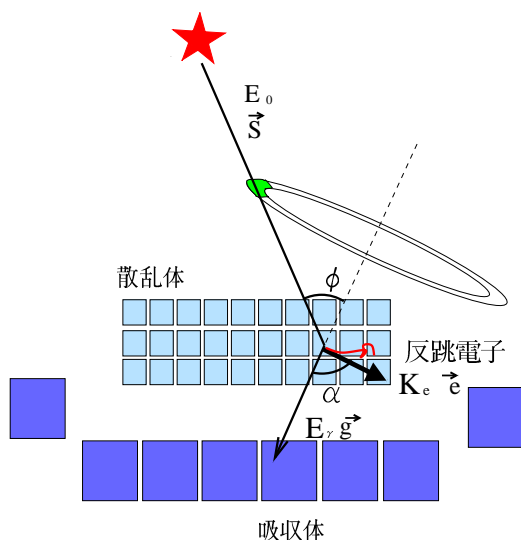


図 1.6: 次世代コンプトン法 概念図

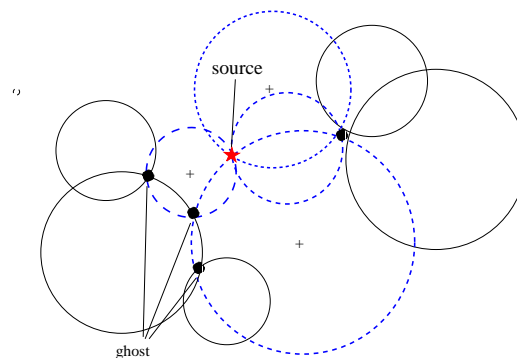


図 1.5: コンプトンカメラから天に描いたコンプトンリング

青線が天の γ 線源によるイベント。数個の円で点源を位置を決定できる。黒線はバックグラウンドによりえがかれたリング。バックグラウンドにより生じるリングとの重なりによる偽のイメージができる。点源自身のイベントリングでも偽イメージはできる。

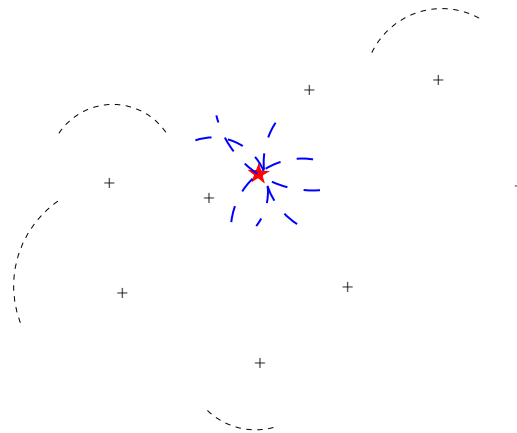


図 1.7: コンプトンカメラから天に描いたコンプトンリング

青線が天の γ 線源によるイベント。黒線はバックグラウンドによりえがかれたリング。バックグラウンド γ 線も方向がわかるため天体とは干渉しない。また、コンプトン条件を満たさないイベントは排除される。

我々はガス検出器を散乱体に、吸収体にシンチレータカメラを採用し次世代型コンプトンカメラの開発を進めている。

次世代コンプトンカメラの性能は通常のコンプトンカメラ同様、散乱体のエネルギー分解能および位置分解能、吸収体のエネルギー分解能および位置分解能に大きく依存し、さらに散乱体の電子飛跡取得能力により格段に向上する。

われわれが開発している次世代コンプトンカメラへの角度分解能への吸収体のエネルギー分解能及び位置分解能への寄与は図 1.8、図 1.9 にしめされている [2]。検出効率も散乱体のコンプトン散乱確率

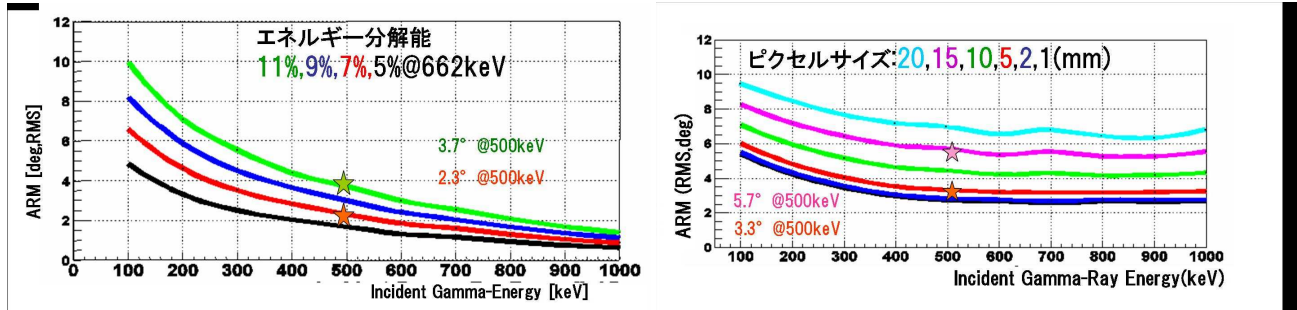


図 1.8: 吸収体のエネルギー分解能の角度分解能への寄与 [2] 図 1.9: 吸収体の位置分解能の角度分解能への寄与 (散乱体サイズ 30cm³)[2]。

と散乱 γ 線の吸収体での吸収確率によってきまる。次世代コンプトンカメラは原理的に強いバックグラウンド能力をもつため、COMPTELのようにTOFを用いる必要はなく、吸収体を散乱体の近くで比較的自由に配置することが可能である。この散乱体と吸収体の配置により、有効面積及び視野が数倍のファクターでかわるため、次世代型コンプトンカメラにおいてはこの配置が重要である。当然散乱 γ 線の吸収確率が1になるような配置が望ましいが、 γ 線入射方向は開けておく必要があるため50%~60%程度の立体角が設計できる最大の立体角である。

実際は吸収体の有効感度エリアや設置のための治具などの理由で、大きな吸収確率を得ることは難しい。

本修士論文ではこの次世代コンプトンカメラ用の吸収体検出器の開発について述べる。

対生成用多層チェンバー [対生成]

γ 線のエネルギーが10MeV以上になるとコンプトン散乱よりも対生成反応が主要になる。また生成される電子・陽電子も数十MeV以上のエネルギーをもつため、ガスチェンバーやSiストリップも多段構造により、飛跡およびエネルギー検出が可能である。生成電子及び陽子の飛跡がわかれば入射 γ 線の到来方向が決定する。また電子・陽電子生成は特徴的な対称的な飛跡を描くためバックグラウンド除去も簡単であるこの方法によりGeV領域で数百個の天体を観測を行った観測器がCGRO衛星に搭載されたEGRET検出器である。

EGRETのガスチェンバーをSi strip読みだしにした検出器が2007年打ちあげ予定のGLAST検出器である。このGLAST衛星により電子・陽子の加速機構の解明やパルサー加速機構の解明やブラックホール近傍での物理、暗黒物質の探索などさまざまな物理が期待されている。

大気チェレンコフ望遠鏡 [対生成]

数十 GeV をこえる高エネルギー γ 線が大気中で対生成を起こし生み出した電子・陽電子は高エネルギーであるため、電子カスケードを起こす。このとき同時にチェレンコフ光を発生する。 γ 線入射方向および電子カスケードの発達方向、チェレンコフ光の放出方向には強い相関があるので、地上からチェレンコフ光を捕えることにより、 γ 線の入射方向などを決定することができる。とくに TeV 領域ではチェレンコフ光の発光量も増えるため、地上における観測が可能になっている。現在 CANGAROO、HESS、MAGIC などのプロジェクトにより、TeV 領域 γ 線の観測が行われている。

第2章 シンチレーションカメラ

天体観測用硬X線・ γ 線検出器では、高阻止能をもつ主要検出部としてシンチレータがしばしば使われて来た。近年は硬X線領域ではINTEGRAL衛星に搭載されたGeやCdTeといったエネルギー分解能に優れた半導体検出器の開発も進んで来ているが、1MeV以上の γ 線領域においては大型化が可能な無機結晶シンチレーション検出器は依然重要な地位を占めている。

シンチレータ検出器における検出原理は図2.1に表されるように

- 1、放射線がシンチレータ物質中に入射。1次電子生成。電子・イオン対生成。(エネルギー損失)
- 2、シンチレーション光発生。(発光)
- 3、光デバイスに向け集光。(集光)
- 4、光デバイスで光電子発生。(信号化)

というプロセスでおこなわれる。この章ではシンチレーションカメラを構成するシンチレータ・光デバイス・光伝達に関する各要素及びシンチレーション検出器の一般的性質について述べる。さらにコンプトンカメラの吸収体が必要とする、大面積かつまた高エネルギー分解能の位置敏感型スペクトロメータとしてのシンチレーション検出器の実現に対して必要な一般的事項について述べる。

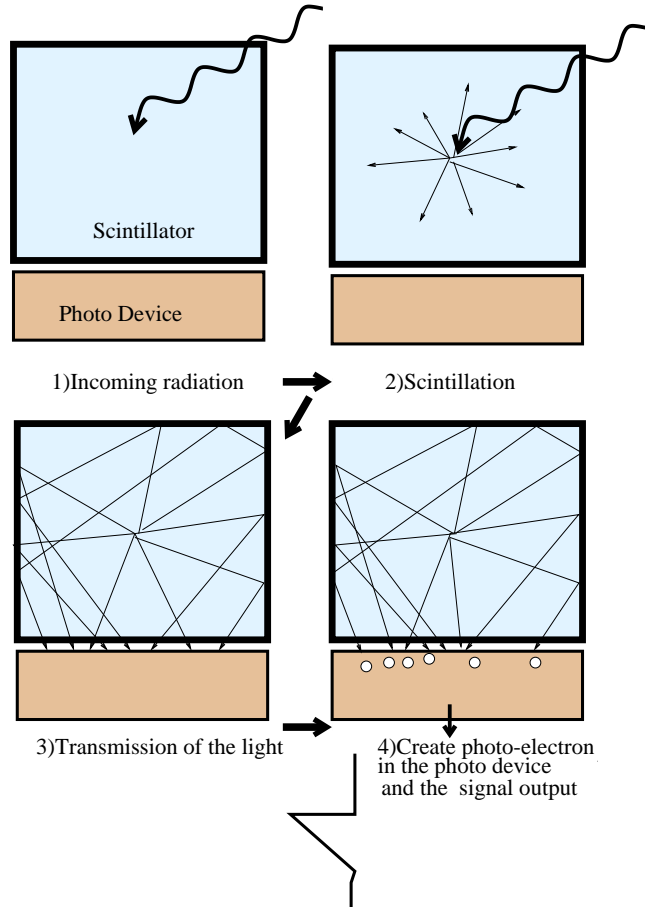


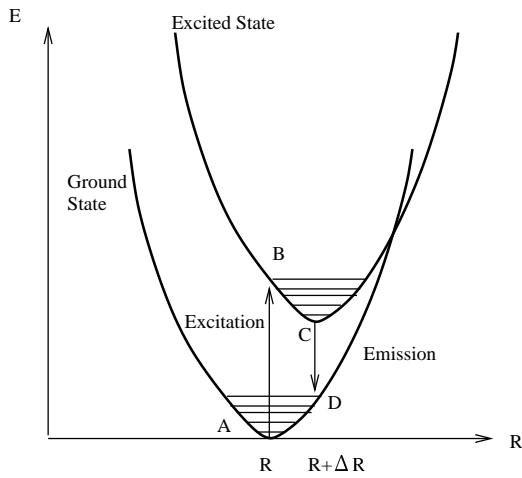
図 2.1: シンチレータ検出器の概観

2.1 シンチレーションの基本原理

放射線の入射に対して物質中でおこる $100\mu\text{s}$ 以下の発光現象を一般的にシンチレーションという。多くの物質でシンチレーション現象がおきているが、なかでも発光量が多く、光伝達性が良い物質が一般的にシンチレータとしてよばれる。

原子もしくは分子中に入射した放射線は原子中の束縛電子を励起状態に引き上げる。励起状態に引き上げられた電子は熱エネルギーを放出しながら励起状態の再下面に達し、基底状態に戻る。この励起状態から基底状態に遷移する際、状態間のエネルギー差に等しい光子を放出する。このときの光子エネルギーが紫外領域から可視光領域である場合、光デバイスによる観測が可能となる。

この過程におけるシンチレーション光の発光効率 η はシンチレーション効率として次の式で与えられる



- 1、放射線のエネルギーにより A → B に電子が励起。
- 2、熱運動でエネルギーを落しながら励起状態の安定点に移動。(B → C)
- 3、C → D で自発放射でシンチレーション光発光電子は基底状態に (C → D)

図 2.2: 代表的なシンチレーション光発光プロセス [3]

$$\eta = \frac{\text{energy of scintillation light}}{\text{energy deposit}} = \frac{h\nu_e}{W_{e-h}} T q_A \quad (2.1)$$

ここで

$h\nu_e$ = シンチレーション光子の平均エネルギー

W_{e-h} = 電子を励起するために必要な平均エネルギー

T = 励起電子が発光点にエネルギーを輸送する効率。

q_A = 発光点において発光する確率。

である。

$T = 1, q_A = 1$ という理想的なシンチレーション過程を想定し、 $\beta = W_{e-h}/E_g$ (E_g はバンドギャップエネルギー) をもちいると

$$\eta = \frac{h\nu_e}{W_{e-h}} = \frac{h\nu_e}{\beta E_g} \quad (2.2)$$

とかける。通常物質は β は 3~7 の値をとり、NaI、CsI、ZnS、GaP などは 3 である。NaI(Tl) シンチレータの場合 $h\nu_e = 3.02 \text{ eV}$ 、 $E_g = 5.9 \text{ keV}$ であるので、 $\eta_{max} = 17\%$ となる。しかし、多くの実験においては $\eta_{exp} = 13\% \sim 8\%$ という報告がなされている。これは T や q が 1 ではなく途中でエネルギーを熱エネルギーとして損失していくためである。

2.2 各種シンチレータ

シンチレータ物質は固体、液体、気体まで、様々な形状で、様々な物質でみつまっている。これらは大きく下記の様に分類される。そしてこの節ではそれぞれについて、(とくに無機シンチレータについて) 性質などを紹介する。

- 固体シンチレータ
 - 有機シンチレータ
 - 無機シンチレータ
- 液体シンチレータ
- 気体シンチレータ

2.2.1 有機シンチレータ

アントラセン・スチルベンなど。シンチレーション光の減衰定数は10ns以内で非常にはやい。発光効率は0.02~0.03でそれほど大きくないが、発光波長が紫外領域にピークをもち波長変換器(WLS)や波長変換ファイバーによる読みだしに向いている。そしてその発光機構はベンゼン環中の π 電子の励起によるものである。そして発光過程にはシンチレーション発光の他に減衰時間が非常にながい燐光成分も存在する。

アントラセンもスチルベンも純粋結晶では非常にもろいが、発光機構が分子構造によっているため結晶構造がこわれてもシンチレーションの性質は失わない。このためスチレンやトルエンなどの有機溶媒にとかしこむことで液体状にすることが可能である。またその液体を重合化することで、固化させることができる。これは一般にプラスチックシンチレータとよばれており、大型のものも非常に安価に作成可能であるため、荷電粒子検出器として非常によく使われている。

また多くの有機シンチレータが異なる荷電粒子に対して波形がことなるため、波形弁別により粒子を分けることが可能である。

2.2.2 無機シンチレータ

BaF₂、NaI(Tl)、CsI(Tl)、などに代表される無機結晶のシンチレータである。大きなZをもつため、光電吸収断面積が大きくまた発光効率も0.1程度をもつものがあり硬X線、 γ 線検出にむいている。ただし、有機シンチレータに比べると高価であり、また壊れやすい。無機シンチレータの発光機構はいくつかに分けられる。BGOは図2.2で説明されるような過程で、発光する。またGSO:Ce、NaI:Tl等はCeやTlといったシンチレーション不純物がつくる準位を通して励起電子が基底状態に戻され、このシンチレーション不純物における遷移が発光となってみえる。これらをexciton luminescenceと呼ぶ。またexciton luminescenceの一種であるがYAG:Ybなどは通常はYbはYb³⁺のかたちで存在するがYb²⁺が生じていると、準位(4f¹³)からYb³⁺の4f¹⁴への遷移がおきるようになり発光がおきているこれをcharge-transfer luminescenceという。またBaF₂等は励起によって生じた価電子帯のホールがF⁻(2p)中の電子と素早く結合することで、速い応答時間となる紫外域のシンチレーション光を発する。(Core-valence luminescence)このように無機シンチレータは結晶構造中のエネルギー構造が、シンチレーション過程に深く関わっているため、不純物濃度や温度などさまざまな影響によりその性能が変化する。

以下に代表的な無機シンチレータとその特徴について取り上げる。

NaI(Tl)

1948年に発見された発光量が非常に多い代表的な無機シンチレータである。150keV以上の γ 線に対して線形性をもつ応答をする。発光量は約40000 photons/MeVで発光波長ピークが415nmと光電子増倍管の感度領域に合うため、20%程度の高い量子効率でシンチレーション光を捕えることが可能である。また減衰時定数は230ns程度で、高計数率な測定にはあまり向かない。

発光量はTlの濃度によってきまり、Tlの濃度は1.3mol%あたりが最大の発光量となっている。古くに発見されているのにも関わらず、それ以後、この結晶を全ての性能で上回る結晶が長らくで発見されないため非常に良く使われている。生産もさかんで60cmクラスの一枚板大型結晶も製作されている。ただし強い潮解性があるため厳重に管理された乾燥室内で密封する必要がある。またへきかい性があるためにこわれやすいという欠点がある。さらに温度によってシンチレーション効率が変化し、低温になれば発光量が減る。

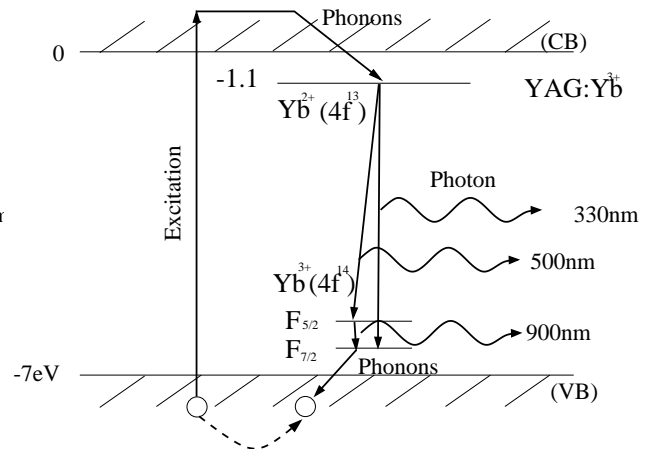
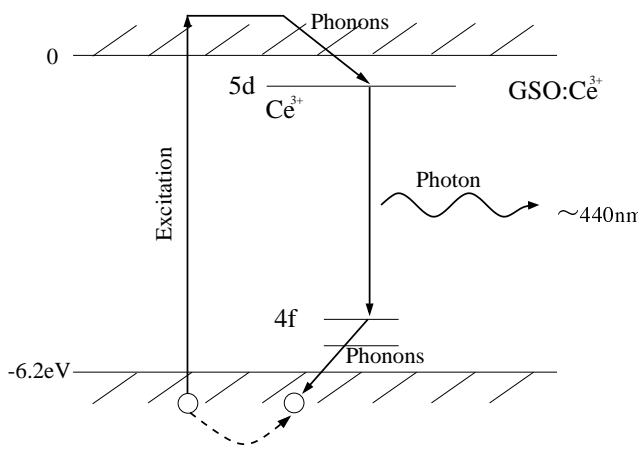


図 2.3: GSO(Ce) の発光機構 Exciton (dopant) luminescence [3]

図 2.4: YAG の発光機構 Charge-transfer luminescence[3]

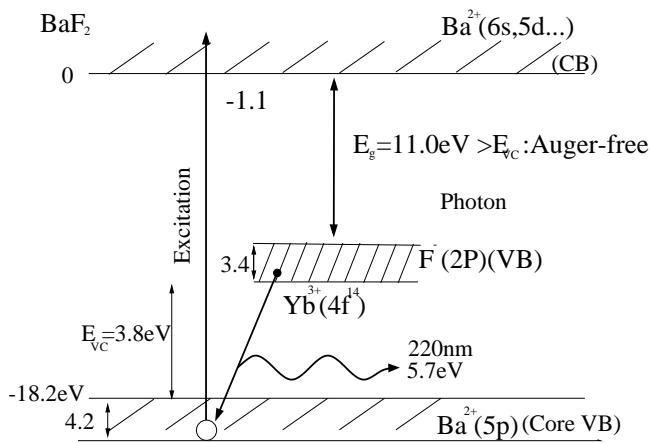


図 2.5: BaF₂ の発光機構 [3]

	Density (g/cm ³)	Absorption coeffi- cient @511keV (/cm)	Decay time (ns)	wave length (nm)	light yield (relative)	hydroscopic	radiation hard- ness (gray)	refraction index
NaI(Tl)	3.67	0.34	230	415	1	strong	10	1.85
CsI(Tl)	4.53	0.44	1050	550	0.85	weak	10	1.8
CsI(Na)	4.53	0.44	630	420	0.90	strong		1.8
BGO	7.13	0.92	300	480	0.07- 0.12	no	10 ²⁻³	2.15
LSO:Ce	7.4	0.87	40	420	0.4-0.75	no	10 ⁵	1.82
YSO:Ce	4.45	0.38	40	420	0.3-0.45	no	10 ⁴	1.79
YAP:Ce	5.35	0.46	28	370	0.4	no	10 ²⁻³	1.94
YAG:Yb	4.57		3	330/500	0.02	no		1.82
GSO:Ce	6.71	0.70	30-60	440	0.18	no	> 10 ⁶	1.85
LGSO	7.2		43	420	0.4	no		
LaBr ₃ :Ce	5.3	0.45	28	385	1.30	strong		1.9
LaCl ₃ :Ce	3.79	0.34	26	385	0.7-0.9	strong		1.9
CWO	7.9	0.92	5000	475	0.3-0.4	no	10	2.3
PWO	8.28	1.15	< 3 < 20	430	0.04	no	10 ⁵⁻⁶	2.2
BaF ₂	4.89	0.48	0.6/620	220/310	5/16	no	10 ⁴⁻⁵	2.2

表 2.1: 各種無機シンチレータのパラメータ

通常の市販品の結晶と市販品の光電子増倍管でも、6~7%(FWHM @ 662keV) のエネルギー分解能を得ることができるシンチレータである。

CsI(Tl)

NaI(Tl) よりも Z が大きく密度も NaI(Tl) の 3.67g/cm³ より大きな 4.53g/cm³ をもっている。発光量も光子数は約 45000/MeV~55000/MeV([8], [9]) と NaI(Tl) よりも多いが、発光のピークが 550nm と可視光側にあるために光電子増倍管 (アルカリ光電陰極) で測定するとその収光量は NaI(Tl) の 8 割程度になりエネルギー分解能も 6%前後 (FWHM@662keV) となる。しかし、可視光に感度のあるフォトダイオードで読み出すことにより高い量子効率を実現でき、格段にいいエネルギー分解能を得ることが出来る。現在シリコンドリフト検出器を用いて 4.34%(FWHM@662keV) というエネルギー分解能を得たという報告もある [11]。しかし主減衰定数が長く (1057ns)、また 10 μ sec 程度の長寿命成分もあるため、高計数率測定には不利である。また温度による発光量の減少も確認されている。[10]

Tl のかわりに Na をドーブした CsI(Na) は発光波長・発光量が NaI(Tl) と同等で、密度、吸収計数は CsI(Tl) の同じで、減衰時定数が両者の中間ぐらいという、二つの結晶のいいところを合わせたようなものであり、NaI(Tl) の代替品として使われている。

BaF₂

フッ化バリウム。通常の exciton luminescence (slow 成分) に加えて図 2.5 のような Core-Valence luminescence による非常に高速な発光 (fast 成分) がある。slow 成分は 620ns の減衰時間であるのに対して、fast 成分は 0.6ns と非常に早い。また発光波長がそれぞれ 310ns、220ns であるため、波長フィルタによって弁別可能である。

YSO・YSO・YAG (イットリウム酸化結晶+ Ce)

YSO:Ce (Y₂SiO₅:Ce) NaI(Tl) よりも高速応答かつ高密度なシンチレータとして開発された。発光量が少ない分エネルギー分解能はわるいが減衰時間が短く 40ns 程度であるため、医療分野を中心に利用されていた。

YAP (YAlO₃:Ce) イットリウム酸化アルミニウム結晶。「YAP」と通常呼ばれる。

NaI(Tl) に比べると発光量は約 40% と劣るが、減衰時間が非常に短く 28ns である。また低エネルギー電子に対する発光量の線形性がよく、低エネルギーγ線におけるエネルギー分解能も良い。

さらに高エネルギー荷電粒子による放射化の影響も小さいことも報告されている。

このためγ線エネルギー計測・計数計測などで使われる。

ただし結晶成長が難しく、大きな物は作りにくく高価になる傾向がある。

YAG:Ce (Y₃Al₅O₁₅:Ce), YAG:Yb15% (Y₃Al₅O₁₅:Yb15%) Ce がドープされた YAG は YAP に比べると大きなメリットはないが、Yb を大量にドープを行った場合でも charge-transfer luminescence で高速発光する (3ns)。とくに低温 (110K) にすると、時定数は 10 倍 (40ns) になるが光量も約 10 倍になる (NaI(Tl) 比 0.2)。Yb はニュートリノの検出に感度があり、バックグラウンド除去の方法も提案されており、ニュートリノ検出用として期待されている。

GSO:Ce

Gd₂SiO₅ ケイ酸ガドリニウム

発光量が NaI(Tl) の 2 割程度ありつつ、大きな Z 及び高密度、高阻止能かつ、高速応答というバランスのとれたシンチレータ。

また放射線耐性に非常にすぐれており、宇宙環境下での使用も期待され、X 線天文衛星「すざく」の HXD の高エネルギー側のエネルギー検出器として搭載されている。

さらに潮解性もないため扱いやすいがへきかい性をもつため加工には注意が必要である。

Ce の濃度により発光量がかわり 0.5mol% から 1mol% あたりでピークとなる。また、発光減衰時定数と Ce 濃度にも相関関係が存在し、Ce 濃度とともに減衰時定数が短くなっていくことが知られている。(Ce 0.5mol%/一方で、Ce による着色が存在し、透過率は Ce 濃度の増加にともない減少していく。しかし GSO:Ce に 200ppm 程度の Zr を添加することで、発光効率や減衰時定数を大きく変化することなく Ce による着色を防ぐことができることが報告されている。

LSO:Ce

Lu₂SiO₅:Ce。Lu は原子番号 Z が大きくまた密度も 7.4g/cm³ と非常に大きいためγ線検出等にむいている結晶である。減衰時定数も 40ns と短く、また発光量も NaI(Tl) の 70% と大発光量を出している。し

かし、内部の不純物などの影響のせいか低エネルギー電子の線形性が悪く、光量ほどのエネルギー分解能は得られていない。

また Lu には放射性同位元素 ^{176}Lu が 2.6% 程度存在するため低バックグラウンド実験には向かない。

近年は $\text{LuAlO}_3(\text{LuAP})$ という高速 (18ns)、高密度 ($8.34\text{g}/\text{cm}^3$) という結晶も医療 PET 用に開発されている。(エネルギー分解能 10%(FWHM))

BGO

$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ビスマス酸化ゲルマニウム。

発光量は $\text{NaI}(\text{Tl})$ の 1 割未満だが、大きな Z 及び高い密度 ($7.13\text{g}/\text{cm}^3$) をもつため γ 線阻止能が非常に高い。また減衰時間も短く生産性も高いため PET の検出部やまたは天体観測用硬 X 線・ γ 線検出器の Active Shield 部などに利用されている。

ただし、温度変化に対する光量の変化が大きいことが知られている。

CWO・PWO

CdWO_4 と PbWO_4 などのタングステン結晶は、その大きな Z と密度で、非常に大きな阻止能をもつ。CWO は十分な発光量をもっているが、減衰時定数が 5000ns と非常に長く、高計数率測定が不可能であった。そこで主にロシア、中国、日本で開発されたのが高阻止能・高計数率な測定が可能なシンチレータとして開発されたのが PWO である。しかしまだ発光量が少ないためさらなる改良が期待される。

$\text{LaBr}_3;\text{Ce}$ 、 $\text{LaCl}_3;\text{Ce}$

ランタンブロマイド・ランタンクロライド

最近サンゴバン (Saint gobain) 社より商品化された大光量、高速シンチレータである。ハロゲン化 La は励起状態と基底状態のバンドギャップが約 3eV 程度と非常に狭くなるため $\text{NaI}(\text{Tl})$ などにくらべると、生成する電子・イオン対の数が非常に多くなる。 LaBr_3 は $\text{NaI}(\text{Tl})$ よりも大きな発光量 (1.2 倍～1.5 倍) および速い時定数 (30ns) をもつ。この非常に大きな発光量により数百 keV γ 線においても Ge 等の半導体検出器に近いエネルギー分解能を得ることが出来る。現在 662keV の γ 線にたいするエネルギー分解能 (FWHM) として LaCl_3 3.8% LaBr_3 2.8% という数字が報告されている。

ただし潮解性が非常に強く、商業化されてまもないため非常に高価である。

また天然 La は ^{139}La (99.91%)、 ^{137}La (0.09%) から構成されており、後者の方は 1.02×10^{11} 年の半減期で β^- 崩壊もしくは軌道電子捕獲によりそれぞれ 739keV と 1436keV の γ 線を放出しているため検出器の自己バックグラウンドとなる。

LBO:Cu

$\text{Li}_3\text{B}_4\text{O}_7;\text{Cu}$ 。中性子検出器用に開発が進められている検出器。中性子に対して反応断面積の大きな Li や B を含む結晶である。

半導体

CdS(In)、CdS(Te)、ZnO(Ga)、などの半導体からもシンチレーション光がでることが知られている。いずれも発光減衰時定数は短いものの発光量が非常にすくない。

今後の無機シンチレータ物質の開発

無機シンチレータ物質は主に γ 線計測用に応答が速くより高密度で大きなZで吸収長が短かつ大発光量なものが求められており、これに向けて結晶の開発もおこなわれている。大質量化の有力な物質はタングステンと鉛の化合物である。現在はPWOの消光の影響が小さくなるような、添加物の研究などがおこなわれている。大発光量のシンチレータとしては β と E_g が小さな物質が候補としてあげられる。たとえば PbI_2 ($\beta = 2, E_g = 2.5\text{eV}$) は最大で 200000 photons/MeV という発光をえられる可能性があるが、そのためには、励起後のエネルギー遷移が効率的に光に変換するような不純物を調節しなければならず非常に多大な努力が必要となる。

2.2.3 液体シンチレータ、気体シンチレータ

液体有機シンチレータ トルエン等の有機溶媒に活性化物質を加えたものが用いられている。固体シンチレータと同等の密度をもち、発光量も多いものがある。液体であるために検出器構造に自由度がある。とくに放射線源を液体シンチレータ中にいれることができるため、低エネルギーの β 線や α 線でも正確な測定が可能である。とくに有機溶媒に溶解する物質などは、自己吸収を取り除いた正確な測定ができるため試料分析などには最適である。

液体Xeシンチレータ 液体Xeは40000 photons/MeV程度の大発光量をもち、かつ $Z=54$ と原子番号が大きく 3g/cm^3 と密度をもち、各放射線に対して非常に大きな反応断面積をもつため、ニュートリノやダークマターなどの中性粒子検出 [6] や MeV γ 線検出器 [7] としての利用が進められている。問題は非常に高価である点である。

ガスシンチレータ 希ガスなどもシンチレーション光を出すことが知られている。その減衰時定数は数 ns と非常に速い。しかしシンチレーション効率が数%と非常に悪く、また密度も非常に小さいために単体で用いられることは少ない。ただ応答時間が数 ns 程度なのでシンチレータ検出器としては非常に速い応答時間をしめす。表 2.2 は代表的なガスの大気圧における発光波長と発光光子数である。比例計数管のように強い電場をかけると一次電子は加速され、その衝突により電子増幅がおこる。この電子増幅の際にもシンチレーション光は発生し、これをとらえることで数十倍から数百倍の光子を検出することが出来る。電場の強度を電子カスケードが起きない程度にすれば強電場中における増幅率の揺らぎを避けることができ、比例計数管よりも高いエネルギー分解能を得ることが出来る。これは蛍光比例係数管とよばれ、X線天文衛星「てんま」「あすか」に搭載され活躍した。

この2次シンチレーション光発光プロセスにより発生する光の波長は表 2.3 に表されている。

2.3 光輸送

シンチレータ中で発生したシンチレーション光は結晶中を通過し光デバイスへと到達する。多くの場合実験装置の形状等により、シンチレータ物質と光デバイスの配置が制約され、等方的に発生したシンチレーション光を全立体角において光を損失することなく光デバイスで読み出すことは不可能である。

表 2.2: 大気圧における気体シンチレータの特性 [4]

	発光平均波長	発光光子数 (4.7MeV α 線 200nm 以上)
Xe	325nm	3700
Kr	318nm	2100
Ar	250nm	1100
He	390nm	800
NaI(Tl)	410nm	41000

表 2.3: ガス比例シンチレーション計数管中で発生する光のスペクトル特性 [5]

	発光平均波長	スペクトルの半値 幅
Ar	128nm	10nm
Kr	147nm	12nm
Xe	173nm	14nm

このためより効率よくシンチレーション光をよみだすために、シンチレータから光デバイスまでの光の経路に工夫を与えることは非常に重要である。シンチレーション光を効率よく集めるものとしては以下のようなものが使われており装置に応じて最適なものを組み合わせてやる必要がある。

反射材・反射剤

発生したシンチレーション光を光デバイスに集光するのに不可欠なものとして反射材がある。通常、発生したシンチレーション光を効率よくとらえるために光読みだし面以外の結晶境界面に達した光はふたたび結晶内部に反射させる。ただし反射材の反射率は100%ではないため、数十回の反射のうちに反射面や結晶中で減衰する。結晶の大きさはたかだか数 cm から数十 cm 程度なので、光の伝達過程はシン

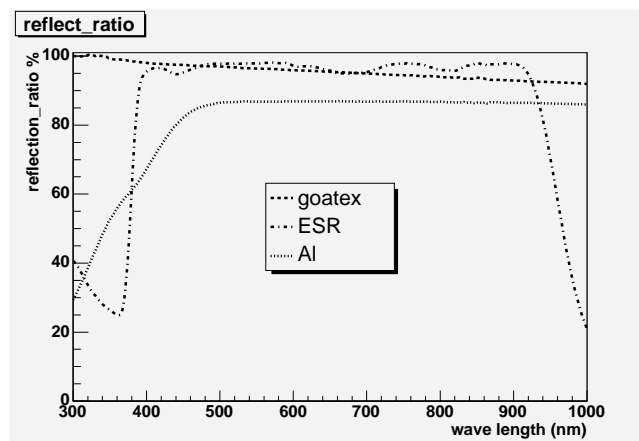


図 2.6: 各種反射材と各波長における反射率

チレーション光の減衰時間よりも十分短い時間内におわる。当然、反射効率がよいほど光読みだし面にあたる確率が増えるため結晶境界面は反射率が高い状態にする必要がある。このため使用する反射材は反射率が高いものを用いる。また、結晶表面の状態も反射率に大きく影響してくるため研磨をおこなうなどの加工が求められる。

反射材・反射剤としては以下のようなものがあげられる。

- 1、金属系反射材・反射剤
- 2、テフロン系反射材
- 3、多層膜系反射材

金属系反射材 金属はその光沢からわかるように光を全反射する性質をもっている。板状・棒状のものは通常反射材として用いるには結晶への取り付けが困難であるため、金属原子をシート状の樹脂に蒸着させることで反射シートを作成したり、金属粉を適切な溶媒に溶かし込むことにより、反射剤をつくり使用部位に塗るといった形で使用される。種類としては銀やチタンやアルミニウムなどが反射率が高く良く利用される。

テフロン系反射材 Dupont 社が開発したテフロン® はフッ化エチレン樹脂であり乳白色をした絶縁性の物質で薄くすると軟らかく伸縮性をもつ。このテフロンは反射材として利用出来る。同じようなフッ化樹脂を用いた反射材としてジャパングアッテックス社のハイパーシート ガスケット®がある。200 μ mの厚みである。これは広い波長域で乱反射ではあるが反射率が100%に近い値を出している。

多層膜系反射材 ポリエステル系樹脂の多層膜構造をもつビキューイティESR(Enhanced Specular Reflector)®という反射材がおもに液晶のバックライト用に3M社より開発されている。この反射材は65 μ mという薄さで、可視光領域で、90%以上の反射率をもっている。硬質で曲げに強く折れにくく伸縮性も無いいため、加工には工夫が必要である。

ライトガイド・光ファイバー

検出器の形状によっては、シンチレータ結晶面に直接光デバイスを取り付けることが困難なことがある。とくに大型の検出器の場合、光デバイスの大きさ、数量などによりシンチレーション光を小さな光デバイスに集光する必要がある。また光電子増倍管を使用するさいに磁場の影響を避けるためにシンチレータ物質から離す必要性が生じる時などもある。このように光を結晶から光デバイスまで誘導するのがライトガイドである。ライトガイドは透過性のよい屈折率が高い(全反射が起こりやすい)固体が用いられる。また、シンチレータと光デバイスが大きく離れており、シンチレータ中もしくはライトガイドの透過率の影響により光の減衰がみられる場合、光ファイバーを用いて光輸送を行う方法がある。光ファイバーは光子入射に対して臨界角内に放出された光子の全反射を繰り返すことにより長距離を低減衰率で輸送することができる。

WLS

WLSとはWavelength shift(波長変換器)の略称である。シンチレータ発光波長と光デバイスにおける波長感度が一致しない場合が多々ある。このとき、可視光により励起され違う波長の可視光を放出する

WLSが利用される。WLSは光デバイスとシンチレータ物質の間にはさみこんだり、シンチレータ作成時に中に含ませたりする。

オプティカルグリス、オプティカルセメント

シンチレータ物質と光デバイス、シンチレータ物質とライトガイド間は反射や散乱による光の損失を防ぐために屈折率が両物質間の中間の値をもつ透明な物質を介して取り付けられるのが良い。これは物質間に空気や水分の層を作らせず、屈折率の変化による反射・散乱を極力減らすためである。このような物質としてオプティカルグリスやオプティカルセメントがある。オプティカルグリスの一種であるOKEN6262(応用光研社)はガラスとほぼ同じ屈折率をもつ。オプティカルグリスは硬化性及び接着性が小さいため取り外しが容易である。しかし、長時間の使用に関してはグリスの劣化により透過率が落ちて来る。一方でオプティカルセメントとよばれる物質は硬化・ガラス面などへの接着能力があり、取り外しは不可能であるが、大気・水分および温度変化にたいして強く長期間の安定した発光を確保が可能である。

2.4 光デバイス

シンチレータ物質より放出した光を効率よく電気信号に変換する光デバイスにはさまざまなものが存在している。

ここではいくつか代表的なものを紹介する。

2.4.1 光電子増倍管 PMT

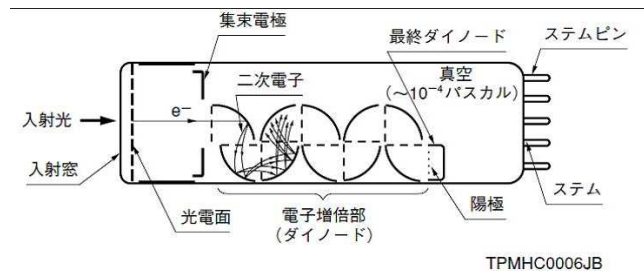


図 2.7: 代表的な光電子相増倍管の構造 (ボックス型)[13]

微弱な光を電気信号に変換するモジュールとして古くから使われているのが光電子増倍管である。光電子増倍管は入射光子を光電子に変換する光電陰極、光電子を増倍するダイノード構造からなる(図 2.7)。入射光子を光電子に変換する確率(量子効率)は光電陰極物質の電子親和エネルギーおよび厚さ、構造により決まる。図 2.9、図 2.11 が代表的な光電陰極面に使われている物質とその量子効率を表した図である。量子効率は最大で 30%程度となっている。光電陰極で生成された光電子はダイノード間の高圧電場で加速され次段のダイノードに衝突し 10 倍程度の数の光電子に変換される。これを数段繰り返すことにより、光電子数は 10^6 倍程度の利得を得る。このため数 photon という微小光でも大きな電気信号としてとりだすことが出来るのが光電子増倍管の大きな長所である。時間特性がそのダイノード構造により数 ns~数十 ns 程度の遅延が起り、また光電陰極の感度も波長によって物質毎に大きく変わるため、

反射型光電面

分光カーブ (Sナンバー)	光電面	入射窓	分光感度特性		
			波長範囲 (nm)	最高感度波長	
				放射感度(nm)	量子効率(nm)
○ 150M	Cs-I	MgF ₂	115~195	120	120
○ 250S	Cs-Te	合成石英	160~320	200	200
○ 250M	Cs-Te	MgF ₂	115~320	200	190
○ 350K(S-4)	Sb-Cs	硼硅酸	300~650	400	350
○ 350K(S-5)	Sb-Cs	UV	185~650	340	270
○ 350S(S-19)	Sb-Cs	合成石英	160~650	340	210
○ 351U(Ext S-5)	Sb-Cs	UV	185~700	450	235
— 451U	バイアルカリ	UV	185~730	340	320
— 452U	バイアルカリ	UV	185~750	350	315
— 453K	バイアルカリ	硼硅酸	300~650	400	360
— 453U	バイアルカリ	UV	185~650	400	330
— 454K	バイアルカリ	硼硅酸	300~680	450	430
— 455U	バイアルカリ	UV	185~680	420	400
— 456U	低暗電流バイアルカリ	UV	185~680	375	320
— 457U	バイアルカリ	硼硅酸	300~680	450	450
— 550U	マルチアルカリ	UV	185~850	530	250
— 550S	マルチアルカリ	合成石英	160~850	530	250
○ 551U	マルチアルカリ	UV	185~870	330	280
○ 551S	マルチアルカリ	合成石英	160~870	330	280
○ 552U	マルチアルカリ	UV	185~900	400	260
○ 552S	マルチアルカリ	合成石英	160~900	400	215
— 554U	マルチアルカリ	UV	185~900	450	370
— 555U	マルチアルカリ	UV	185~850	400	320
— 556U	マルチアルカリ	UV	185~930	420	320
— 557U	マルチアルカリ	UV	185~900	420	400
— 558K	マルチアルカリ	硼硅酸	300~800	530	510
○ 650U	GaAs(Cs)	UV	185~930	300~800	300
○ 650S	GaAs(Cs)	合成石英	160~930	300~800	280
— 651U	GaAs(Cs)	UV	185~910	350	270
○ 750K	Ag-O-Cs	硼硅酸	300~1100	730	730
— 850U	InGaAs(Cs)	UV	185~1010	400	330
○ —	InP/InGaAsP(Cs)	硼硅酸	300~1400	—	—
○ —	InP/InGaAsP(Cs)	硼硅酸	300~1700	—	—

図 2.8: 反射型光電陰極 [13]

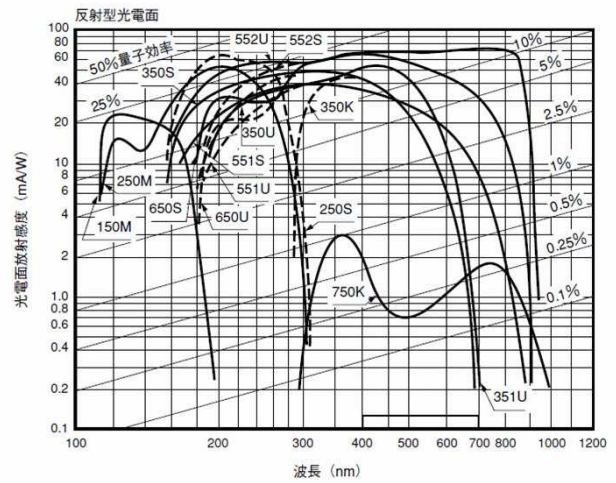


図 2.9: 反射型光電陰極の量子効率 [13]

透過型光電面

分光カーブ (Sナンバー)	光電面	入射窓	分光感度特性		
			波長範囲 (nm)	高感度波長	
				放射感度(nm)	量子効率(nm)
○ 100M	Cs-I	MgF ₂	115~200	140	130
○ 200S	Cs-Te	合成石英	160~320	210	200
○ 200M	Cs-Te	MgF ₂	115~320	210	200
— 201S	Cs-Te	合成石英	160~320	240	220
— 201A	Cs-Te	サファイア	150~320	250	220
○ 300K(S-11)	Sb-Cs	硼硅酸	300~650	440	410
○ 400K	バイアルカリ	硼硅酸	300~650	420	390
○ 400U	バイアルカリ	UV	185~650	420	390
○ 400S	バイアルカリ	合成石英	160~650	420	390
○ 401K	高温用バイアルカリ	硼硅酸	300~650	375	360
— 402K	バイアルカリ	硼硅酸	300~650	375	360
○ 500K(S-20)	マルチアルカリ	硼硅酸	300~850	420	360
○ 500U	マルチアルカリ	UV	185~850	420	290
○ 500S	マルチアルカリ	合成石英	160~850	420	280
○ 501K(S-25)	マルチアルカリ	硼硅酸	300~900	650	600
○ 700K(S-1)	Ag-O-Cs	硼硅酸	300~1200	800	780

図 2.10: 透過型光電陰極の量子効率 [13]

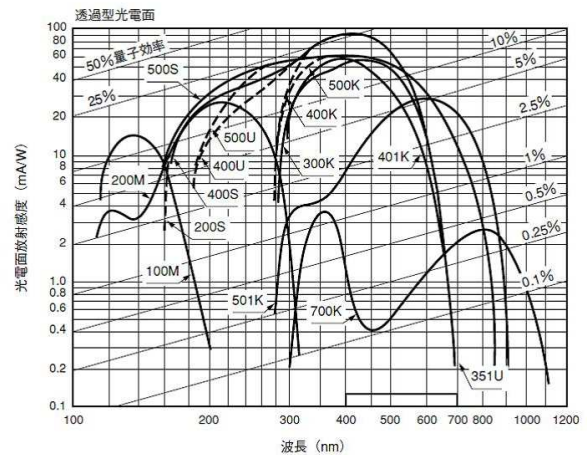


図 2.11: 透過型光電陰極の量子効率 [13]

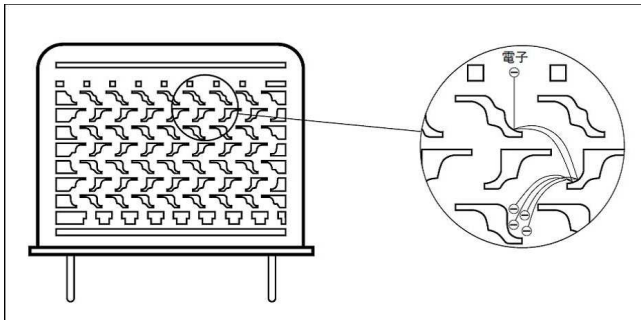


図 2.12: メタルチャンネルダイノード構造 [13]

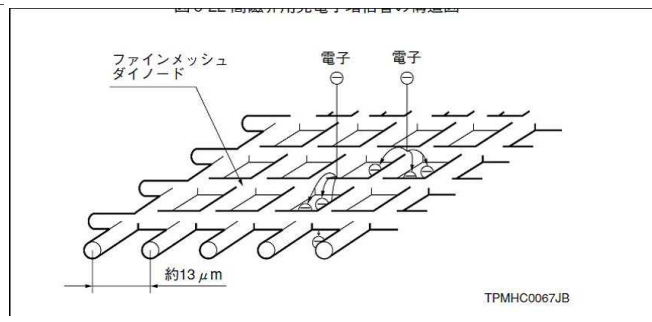


図 2.13: ファインメッシュダイノード構造 [13]

使用用途に応じた増倍管の選択が必要となる。また光電子増倍管は強磁場環境によわい。

PSPMT

カメラなど位置分解型のシンチレータ読みだしには、1 cm 以下の位置分解能と広い有効面積をもつ光デバイスが必要である。そこで開発されたのが、1枚の広い光電陰極に対し、入射光子位置情報を読みだすことが可能な位置敏感型PMTである。位置敏感型PMTのダイノード構造にはメタルチャンネルダイノード構造とファインメッシュダイノードの二種類がある(図 2.12、図 2.13)。前者のほうがクロストークが少なく、強度があるが、後者の方が一様性が良くコンパクトであるという特徴をもつ。またアノード構造も X プレートと Y プレートからなるクロスプレート構造と個別読みだしができるマルチアノード構造のものが製作されている。

本修士論文においてはメタルチャンネルマルチアノードPMT 8500 を使用している。

2.4.2 半導体デバイス

半導体検出基本原理 半導体では荷電子帯と伝導帯のエネルギーバンドが約 1eV 程度であるため、絶縁帯よりも小さなエネルギーで荷電子帯の電子が伝導帯にうつることが出来る。代表的な半導体検出器である Si 中では平均 3.6eV のエネルギーで一つの電子が荷電子帯から伝導帯にうつる。このとき伝導帯に自由電子が、荷電子帯には正孔が生成する。シンチレーション光子のエネルギーは 3~4eV 程度なので、半導体中で電子を伝導帯に励起することが確率をもつ。この励起確率である量子効率も最大で 90% 近くまで達する。このため、シンチレーション光を半導体に照射することにより発光光子数と同程度の電子正孔対を生成することができるため光電子増倍管などに比べ非常に統計ゆらぎが小さな観測が可能となる。

さてこの伝導帯への電子励起は電子の熱運動エネルギーにおいても起こるため、純粋な半導体中では常に一定量の電子正孔対が存在している(真性キャリア密度)。しかし通常半導体には不純物が混ざり込んでいる。不純物は半導体のエネルギーバンド構造に新たにドナー準位もしくはアクセプタ準位を生成する。アクセプタ準位は価電子帯のすぐ上、ドナー準位は伝導帯のすぐ下に存在するため熱励起により簡単にそれぞれ価電子帯に正孔が、伝導帯に電子が移動する。

半導体中に存在するキャリア密度は

$$n_p n_e = n \quad (2.3)$$

で決まっており Si の場合常温で $n=10^{10}/\text{cm}^3$ であり通常の不純物濃度にくらべ極めて小さいため不純物が存在すると熱励起で生成される正孔および電子はドナー準位もしくはアクセプタ準位につかまり、半導体中の電荷キャリアは n 型の場合は電子のみ p 型の場合正孔のみということになる。このため通常の

半導体は電気伝導度をもっているため、生成した電荷のみを収集することは困難である。そこで通常P型とN型を接合するとにより、電荷キャリアの存在しない空乏層を形成することにより、逆バイアス電圧を印加し電荷収集を可能にする。

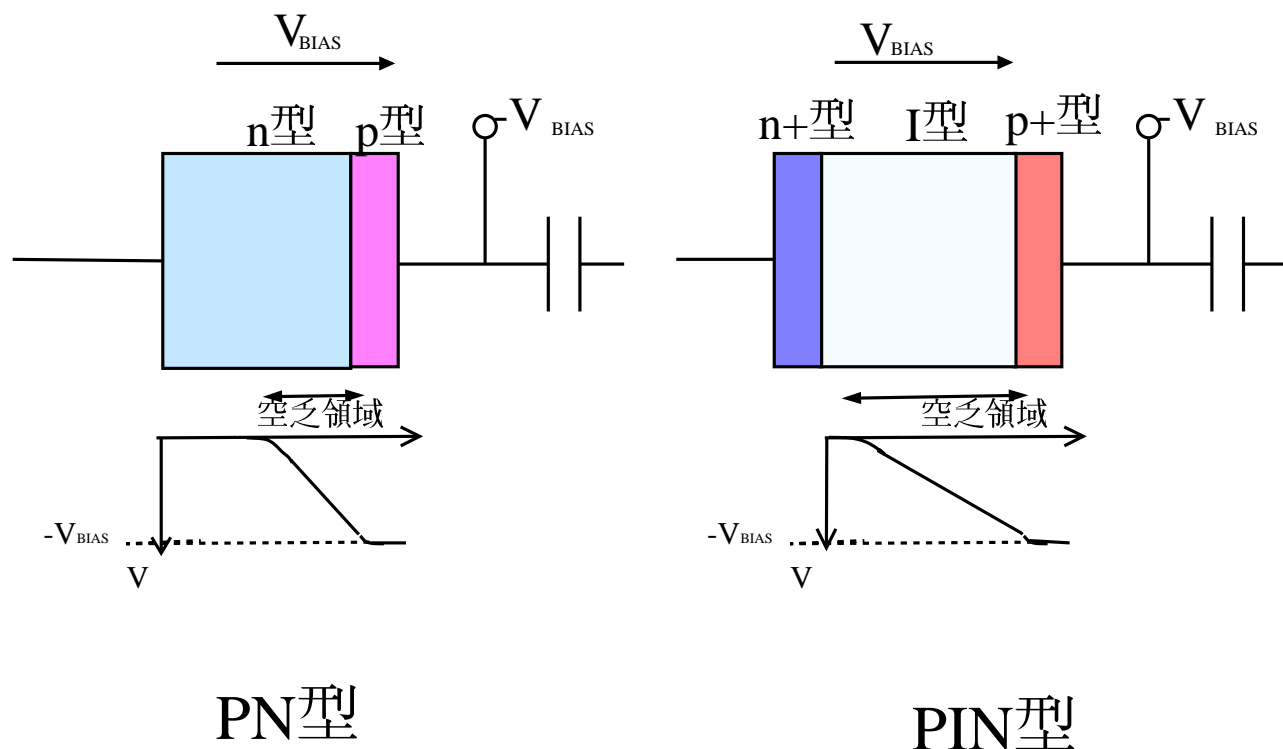


図 2.14: PN 接合と PIN 接合

PIN フォトダイオード

シンチレータ光を半導体検出器で捕えるためには結晶の大きさに応じて面積が数 mm^2 から数 cm^2 必要になってくる。しかし、半導体検出器における雑音はその検出部の電荷容量の増加にともない増加するため、大きな面積なものを製作する際は電荷容量を抑えるために厚くする必要がある。空乏層厚は印加電圧と不純物量が少ない側の不純物密度によって決定する。そこで、非常に純度の高い n 型のウエハに強くドーピングされた p+ 型の電極を取り付けることで、n 型の純度を高め (補償)、空乏層厚の厚いものを作成することが出来る。このような構造を PIN 構造とよぶ図 2.14。ただし、厚さの増加はリーク電流の増加にもつながり雑音源となるため光検出用の大面積フォトダイオードは通常この構造で面積と厚さおよび使用する増幅整形回路に応じて、設計される。

PIN 型検出器は光半導体だけではなくその厚い構造を用い硬 X 線・ γ 線検出器としても利用されている。

シリコンドリフト検出器

近年、大型のフォトダイオード素子として最近開発されているのがシリコンドリフト検出器である。シリコンドリフト検出器はアノード電極にむけての電場を形成することによりアノードを従来よりかなり小さくした検出器である。アノード電極が非常に小さいため電荷容量が小さくなる。半導体検出器に

おけるノイズの寄与のうち素子性能に依存するのは電荷容量と暗電流であるが、暗電流は冷却することにより抑制可能であるために電荷容量を小さくすることで、より広く薄い検出器が製作可能となる。

アパランシェフォトダイオード

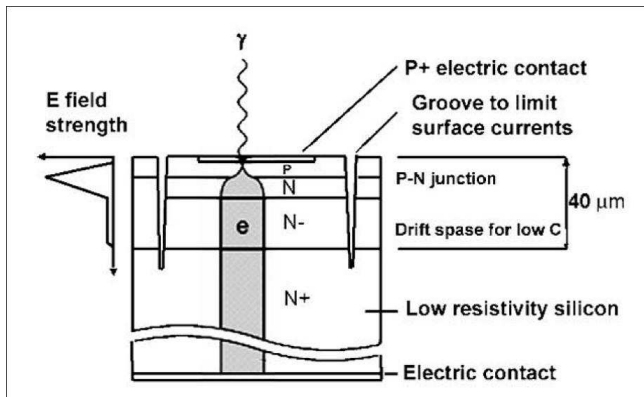


図 2.15: アパランシェフォトダイオード (S8148 Hamamatsu)[14]

通常の半導体検出器は増幅機構をもたないため、常温での対雑音特性が悪い。アパランシェダイオードは 100V~300V 程度の電圧を図 2.15 のような電極構造にあたえ、電極付近で雪崩増幅をおこすことにより 50~100 程度の利得を得る。これにより、素子の外部による雑音に対して高い S/N 比を得ることができる。

現在は有効面積が 1cm 角の大型なものも製作されている。しかし有効面積を広くとるための複数の素子を細密に並べる技術は現在開発がすすんでいるところである。

;

photodiode array

Si Photodiode を用い位置敏感型シンチレータ検出器を作るには複数の Photodiode 素子を並べ、個別に信号を取り出すシステムが必要である。しかし、一般に市販されている Photodiode 素子は強度および配線の問題、リーク電流の軽減という観点から素子の周りをガードしているため露光面積が検出器全体の 40% 程度しかなく、並べた時の不感領域が大きくなる。このため 1 素子毎にガードをかためるのではなく、一枚の N 型半導体の上に複数の P 型電極が存在する Array 構造のチップを作成すれば、ガードは必要なく不感エリアが小さくかつ素子ピッチサイズの位置分解能をもつ光検出器が出来る。このように、photodiode をアレイ上に並べたものを Photodiode Array(略して PDA) とよぶことにする。

Photodiode Array の構造としては二種類存在し、光検出面にピクセル構造を作る方法と読みだし面ピクセル構造を方法がある。前者の方が作成が楽であるが、後者の方が有効面積を広くとることができ配線の引き回しも短くて済み浮遊容量も少なくなる (図 2.16)。

2.5 シンチレータ検出器による硬 X 線・ γ 線測定

2.5.1 シンチレータ検出器による硬 X 線・ γ 線エネルギースペクトラム

シンチレータ検出器で、短色の硬 X 線・ γ 線のエネルギースペクトラムを取得すると、エネルギー検出器の大きさによって次のような形の応答が考えられる。

低エネルギー (100keV 以下) の場合

Z が大きく硬 X 線領域でも光電吸収確率がコンプトン散乱より大きい場合、えられる応答関数は入射 X 線のエネルギーをしめす大きな光電吸収ピーク (図 2.17(A)) と特性 X 線が検出器外に逃げ出したエス

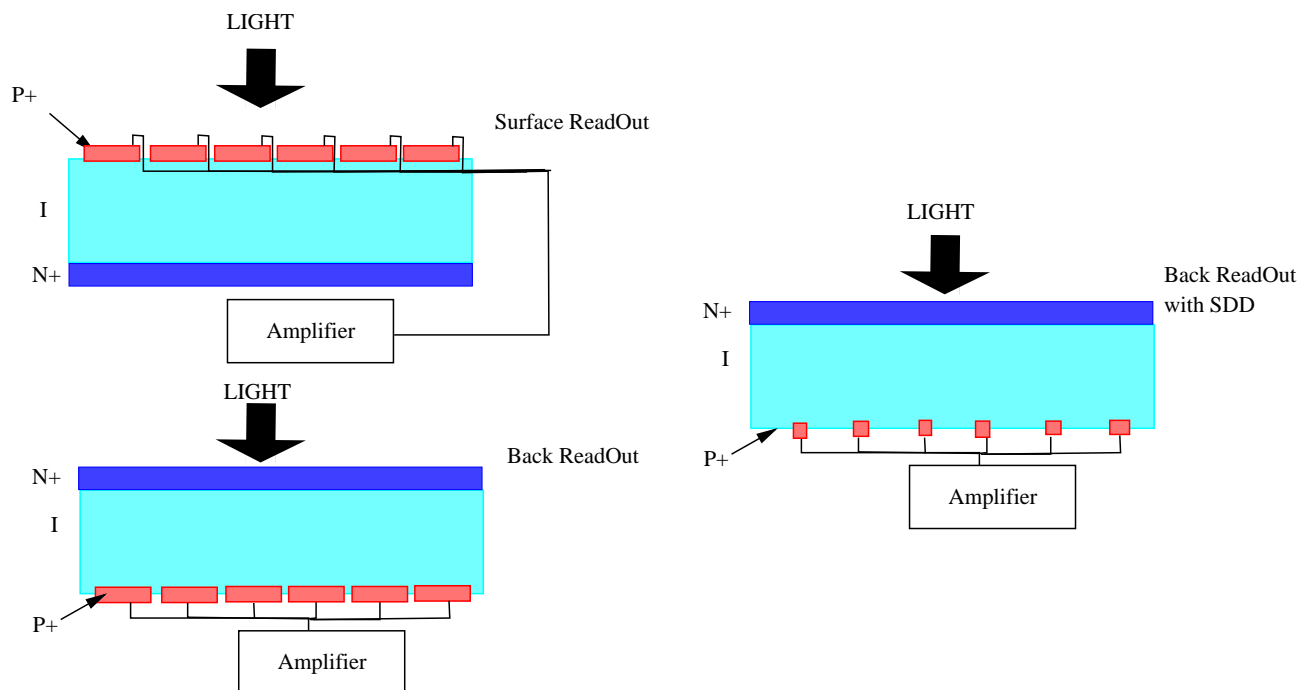


図 2.16: フォトダイオードアレイの構造

(左上) 表面読みだし型 (左下) 裏面読みだし型 (右) 裏面読みだし SDD

ケープピーク同図 (B) から構成される。エスケープピークのエネルギーは、光電吸収ピークより特性 X 線のエネルギー分だけ下がったところにある。特性 X 線は K 殻からのものが多いためそのエネルギーは例えば NaI(Tl) ではヨウ素の 25keV の特性 X 線によるピークがみられる。

エスケープピークの高さは硬 X 線が主に反応する結晶の深さによるため薄い検出器や低エネルギーの硬 X 線ほど顕著になってくる。また低エネルギー領域では、光デバイスおよび読みだし回路におけるノイズにより測定可能なエネルギー帯域が制限される。

γ 線 100keV 以上 (小型検出器の場合)

光電吸収の断面積より、コンプトン散乱や対生成の相互作用断面積大きくなる場合、入射 γ 線の検出器内での反応は様々になる。例えばコンプトン散乱 γ 線や対生成陽電子と物質内電子の相互作用による対消滅光子など、透過能力の高い放射線ができるため、検出器外に入射 γ 線のエネルギーが逃げ出しやすい。検出器が小型で、このような二次的な γ 線をすべて検出器外に逃してしまう場合、そのエネルギースペクトルは

- 光電吸収による成分 (入射 γ 線エネルギー 図 2.18(C))
- コンプトン散乱の反跳電子エネルギー 同図 (D)
- 対生成→対消滅による (入射 γ 線エネルギー - 対消滅エネルギー光子)。ただし入射 γ 線エネルギー > 1.02MeV の場合。同図 (E)

の 3 個の成分からなる。

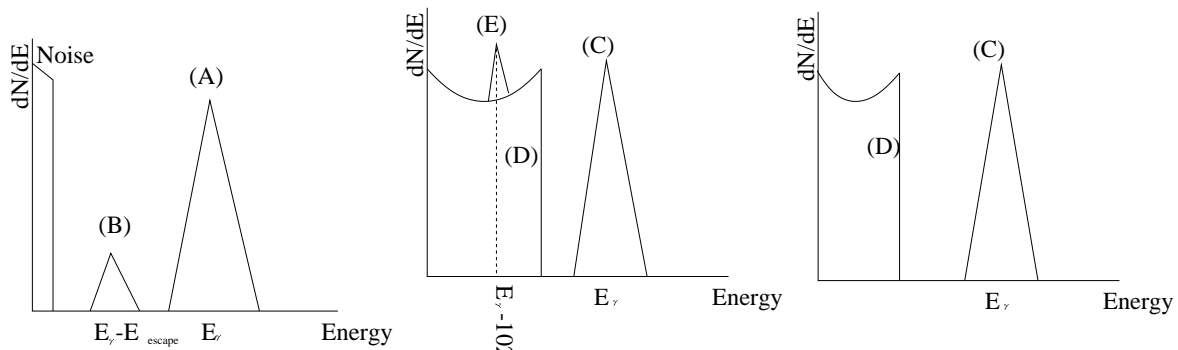


図 2.17: 硬 X 線に対する応答
 E_{escape} は物質の特性 X 線エネルギー

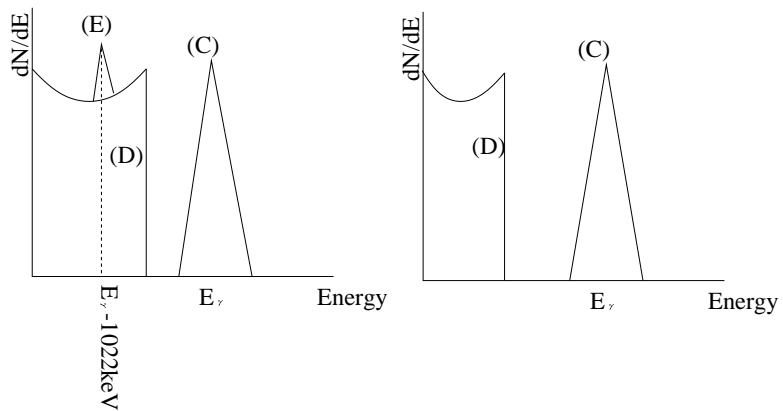


図 2.18: γ 線に対する小型検出器応答
 (左) E_γ (入射 γ 線エネルギー) $>1022\text{keV}$ (右) $E_\gamma < 1022\text{keV}$

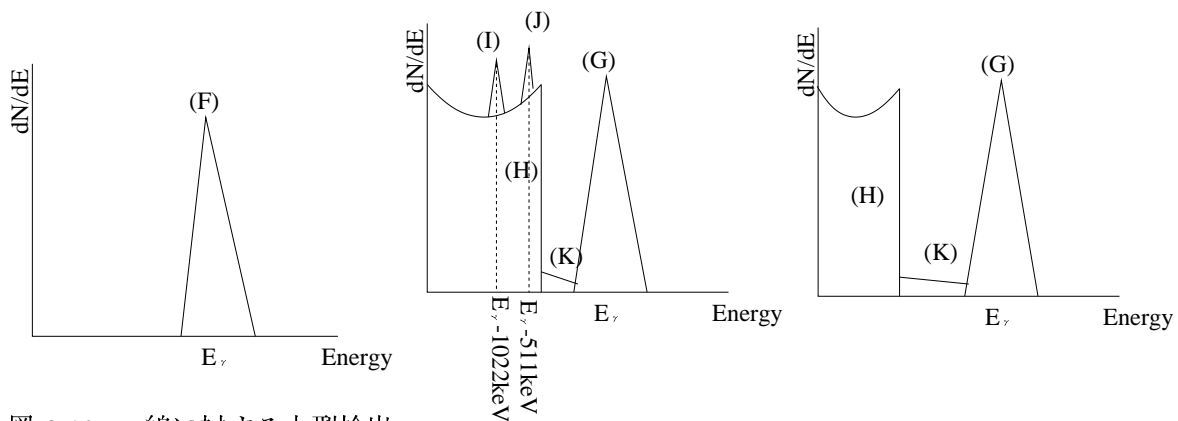


図 2.19: γ 線に対する大型検出器応答

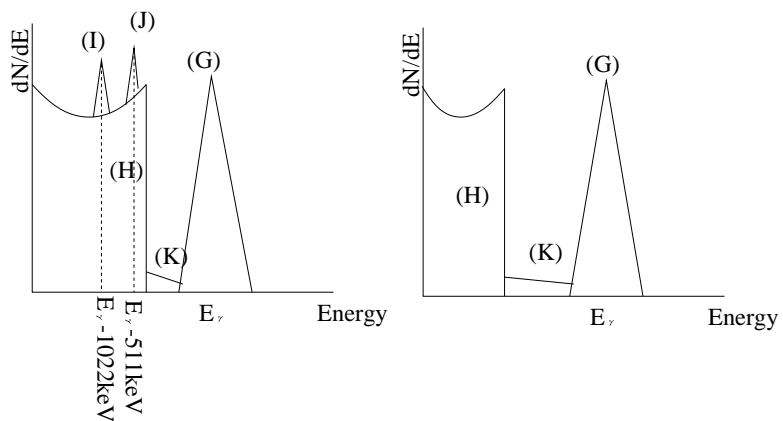


図 2.20: γ 線に対する中型検出器応答
 (左) E_γ (入射 γ 線エネルギー) $>1022\text{keV}$ (右) $E_\gamma < 1022\text{keV}$

γ線 (100keV 以上)(大型の場合)

検出器が副次的なγ線の外部への逃げ出しを不可能にするほど大きくまた入射窓も工夫されている検出器であるとそのエネルギースペクトラムは、入射γ線の全エネルギーをしめす全エネルギーピークの一つになる。(図 2.19 (F))

γ線 (100keV 以上)(中型の場合)

実際の検出器では入射位置や大きさに制限があるため上述のような極端な場合の重ね合わせとなる。(図 2.20)

- 全エネルギー吸収ピーク (入射γ線エネルギー) (G)
- コンプトン散乱の反跳電子エネルギー (H)
- 複数回のコンプトン散乱による反跳電子エネルギーの和 (G)
- 対生成→対消滅による2光子逃散の成分 (入射γ線エネルギー - 対消滅エネルギー光子)。ただし入射γ線エネルギー > 1.02MeV の場合。ダブルエスケープピーク (J)
- 対生成→対消滅による1光子逃散の成分 (入射γ線エネルギー - 対消滅エネルギー光子)/2。ただし入射γ線エネルギー > 1.02MeV の場合。シングルエスケープピーク (I)。

2.5.2 シンチレータ物質の選択

いままで紹介してきたシンチレータ物質と光検出器をうまく選ぶことで、目的に応じた検出器を作ることが可能である。硬 X 線・γ線検出器を製作する際に要求されるシンチレータの重要な特性は

- 発光量
- Z(原子番号)
- 密度

である。シンチレータの生成光子数は1000~10000photons/MeV ぐらいであるため、検出したいエネルギーが低いときは発光量の多いものを使用しないと非常にS/N比が悪くなる。また検出器内部での光との相互作用(光電効果、コンプトン散乱、対生成)が合うような物質を選ぶべきである。Coded-Maskの検出部やコンプトン散乱の吸収体として用いるときは検出器に全エネルギー与えるような反応が望ましく、コンプトン散乱のように透過力の高いγ線がエネルギーをもって逃げるような相互作用は好ましくない。そのためには図 1.1 のようにZが大きく高いエネルギーまで光電吸収確率が大きな物質(例 GSO)使うべきである。またコンプトン散乱の散乱体のように積極的にコンプトン散乱をさせる場合はプラスチックのようなZの小さな物質で構成するのがよい。に密度の高い物質の方が小さくなるのでよい。またコンプトン散乱の吸収体の場合、二次元の位置分解能力に加えて斜め入射にたいする深さ方向の精度も要求され、これは結晶の厚さできまるため密度が高くZが大きな物質がいい。また、1MeV程度の散乱γ線に対してはほとんどが最初検出器内部でコンプトン散乱をおこすため高い位置分解能とエネルギー分解能を得るためにはできる限り狭い領域で二次散乱γ線を捕える必要がある。このためにも高い密度が必要である。

2.5.3 シンチレータ検出器におけるエネルギー分解能

シンチレータ検出器におけるエネルギー分解能は次の4つが大きなファクターとなる。

- シンチレーション光子数統計 揺らぎ。 σ_{pe}^2
- シンチレータ検出器内部の発光効率の位置および電子エネルギー依存性 σ_{int}^2
- シンチレーション光の集光率(光輸送)依存性 σ_{trans}^2
- 読みだし回路ノイズ σ_{noise}^2

以上の成分を総合したものが、最終的に得られるエネルギー分解能である。

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{pe}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{trans}^2 + \sigma_{noise}^2} \quad (2.4)$$

● シンチレーション光子数統計 揺らぎ σ_{pe}^2

シンチレーション発光は確率的なプロセスをとるため、その発光光子数は同じエネルギー損失に対しても統計的な揺らぎを生じる。この揺らぎはポアソン統計揺らぎを近似できるため、

$$\sigma_{pe} = \sqrt{N_{photons}}$$

$N_{photons}$: 光電子数
と表される。

光電子数はシンチレーション光子数に平均の集光率と量子効率をかけたものである。

シンチレーション検出器の場合、それぞれの放射線のエネルギー損失 E に対して、

$N_{photons} \propto E$ という関係が成り立っているので

$$\sigma_{pe} \propto \sqrt{E}$$

となる。このため、 σ_{pe} が大きいときシンチレーション検出器のエネルギー分解能 $\frac{\Delta E}{E}$ (%) は

$$\frac{\Delta E}{E} (\%) \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (2.5)$$

と表される。

● シンチレータ内部における位置及び電子エネルギーによる発光効率の揺らぎ σ_{int}^2

発光効率の位置依存性 シンチレーション発光効率は結晶中に含まれる不純物の量、結晶構造により変化する。つまり、均一な結晶でない場合、発光効率に位置依存性があらわれシンチレーションが起こる点による発光量の揺らぎが生じてしまう。

これは、結晶の製作行程において改善されるべき点であり、現在ではさまざまな結晶種で均一な結晶が製作されている。

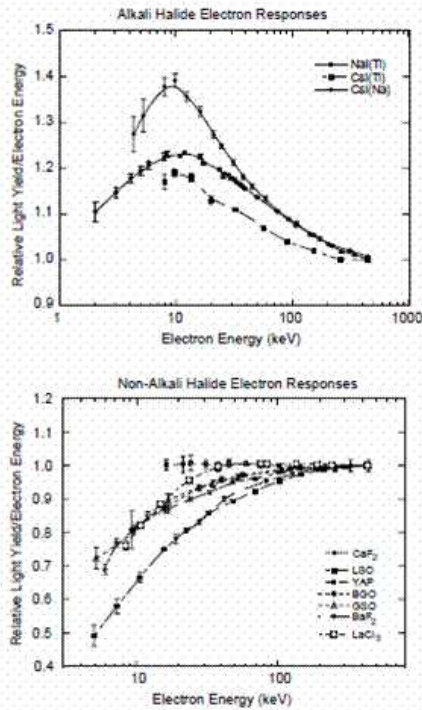


図 2.21: 電子エネルギーと相対発光量 [15]

電子エネルギーによる発光効率の揺らぎ ほとんどのシンチレータ物質において低エネルギー電子に対するシンチレーション効率のエネルギー依存性があることが報告されている。

これは低エネルギー側で線形性が崩れるとともにコンプトン散乱を伴い全エネルギーを検出器に与えたイベントと、光電吸収を起こしたイベントとの間に発光量のずれが生じ、エネルギー分解能を悪化させる [tawara]。図 2.21 は各シンチレータ物質における電子のエネルギーとシンチレーション光の相対値の関係を表したグラフである。NaI(Tl)、CsI(Tl)等の物質においては 10keV~20keV あたりに発光効率のピークをもち、GSO、BGO 等の物質では、100keV 以下の領域では発光効率が落ちている。

シンチレーションプロセスによる発光効率の揺らぎ シンチレーションプロセス内にはその過程が複数あり、発光効率が違う場合がある。このときこの発光効率の違いが発光量の揺らぎとなる。

●光輸送に関する位置依存性 σ_{trans}^2

シンチレーション光を光デバイスで電子がするまでに、シンチレーション光発生点と光デバイスまでの光の経路によりシンチレーション光の集光量に違いが生じる。

シンチレーションによる光電子数はシンチレータの形状および反射材の材質、シンチレータ結晶および光デバイス面の屈折率などの影響を強く受ける。

とくにシンチレータの体積に対する、シンチレータ光読みだし面の大きさが小さいものほど影響をうけやすい。

●回路ノイズによる影響 σ_{noise}^2

電子回路上のノイズは直接光電子数の揺らぎとなるためエネルギー分解能に影響を与える。

電子回路上のノイズは普通シグナルの大きさによらず回路によってほぼ一定である。このため光電子増倍管のように光デバイス内で信号を大きくすると S/N 比が良くなり回路ノイズの影響は非常に小さくすることが出来る。

しかし Si PIN 検出器のような増幅機構をもたないような光デバイスの場合は回路ノイズの影響が大きくなりやすいので、低ノイズ増幅器や低温での使用などが必要となる。

半導体検出器におけるノイズについては AppendixA.1 で詳しく述べる。

2.6 位置敏感型シンチレータ検出器 (シンチレータカメラ)

シンチレータを利用した位置敏感検出器を製作する場合、複数の光デバイスよみだしを用いて製作する必要がある。最も単純な位置分解法は一つのシンチレータと一つの光電子増倍管からなる検出器を単純にならべる方法である。しかしこの方法は光電子増倍管の並べる間隔により位置分解能が制限される。このため、高位置分解能かつ大有効面積をもつシンチレーションカメラを製作するために次のような方法が開発されている。

- 1結晶 vs 多チャンネル光読みだし (例アンガー型)
一つのシンチレータ物質に対して複数の光読みだし口をつくり読みだした光量分布により発光点を決定する。アンガー型が有名
- シンチレータピクセル型
反射材などにより光学的に分離されたピクセルシンチレータ結晶を並べ、それを位置敏感型光デバイスをもちいて読みだす。
- 混合型 (プラナー型等)
上記二つの方法の混在型。

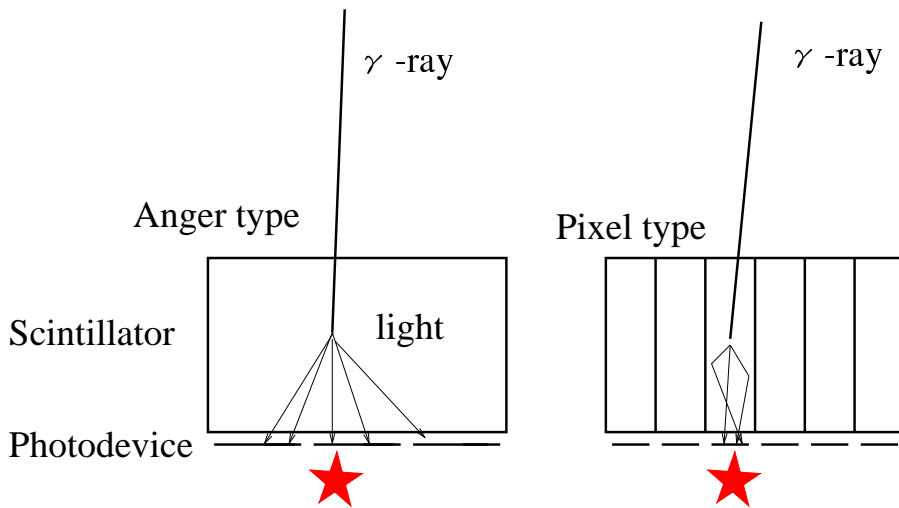


図 2.22: アンガー型 (左) とピクセル型 (右) 位置敏感型シンチレーションカメラ

2.6.1 1結晶 vs 多チャンネル光読みだし

一つの大きな1結晶に対して複数の光デバイスによりシンチレーション光を取得しその光量分布により位置を特定する方法は、アンガー型カメラを代表に古くから使われている。アンガーカメラは薄いシンチレータの広い面の片面にシングルアノードの光電子増倍管を複数並べた構造となっている。広がったシンチレーション光を複数の光電子増倍管に入射させることにより、その光量比から発光中心点(γ線入射点)を判別する。エネルギー分解能は各光電子増倍管に入射した光子数で決定するため、光電子増倍管の単位面積と充填率によってきまる。また位置分解能は光電子増倍管のピッチと光の広がり具合、および各光電子増倍管におけるエネルギー分解能できまる。アンガーカメラの場合、重心演算でもとめる

ため光電子増倍管のピッチよりも細かい位置分解能を得ることができる。このため数 cm の光電子増倍管で数 mm の位置分解が可能となり、非常に低コスト・低電力で高い位置分解能を得ることが出来る。ただし、各光電子増倍管におけるエネルギー分解能は入射光子数によって決まるため、光電子増倍管のピッチの細かさにたいしても限界がある。また光電子増倍管のパッケージによるシンチレーション光の不感部が増えるとエネルギー分解能が悪くなるため、この点においても光電子増倍管のピッチは制限される。有効感度領域面積に関しては壁面での光の反射・損失の影響があるため、外側から結晶の厚さ程度の領域が位置分解能のない不感領域となるのは避けられない。さらに有効感度領域は結晶の厚さと周囲に巻く反射材の種類、及び光電子増倍管の大きさなどによっても決定される。大面積のものを製作する場合は結晶の周辺部が不感領域となるため、アンガーカメラは通常複数枚の結晶を組み合わせるのではなく一枚の大きな結晶を製作することで大型化を行う。現在は50cm 角程度の大きさの NaI(Tl) 結晶が製作されているため、40cm 程度の有効面積をもつアンガーカメラは製作可能である。しかし、結晶の種類によっては大きな結晶をつくるのが難しいものもある。

このようなタイプの欠点としては、一つのイベントの光が結晶全体にひろがるため平均の位置情報が得られないため

- 複数コンプトン散乱が判断できない
- 高計数率に弱い
- 1 箇所割れが全体に影響

また有効面積に関して

- 結晶が厚いのは不利。
- 複数台を並べるのは不利。

などの欠点がある。

2.6.2 ピクセルシンチレータを用いた位置分解法

ピクセルシンチレータを用いた位置分解法は反射材によりシンチレーション光を一箇所にとどめて、光デバイスに伝達する方法である。反射材の効果により、光ピクセル内に閉じ込めるためピクセル内の位置情報は失われ、ピクセルの読みだし面が全体的に光る。この光を同サイズの光デバイスで、検出することにより位置を検出する。位置分解能はピクセルのサイズできまりエネルギー分解能はピクセルとそれに対応する光デバイスの S/N で決定する。有効感度領域はピクセルシンチレータ間の反射材もしくは光デバイスの不感領域の占有空間によってきまる。

シンチレータと光デバイスを細かくすればする程位置分解能はあがる。また有効感度領域は原理的に制限されずデバイスの工夫で改善され、端の方までピクセル面積の足し算で確保できるため大面積化が非常に用意である。また、結晶種、結晶厚みなどの変更にたいしてもエネルギー分解能が多少かわるものの位置分解能と有効面積はかわらないため、柔軟な設計が可能である。また光を閉じ込めることにより、複数の発光点の情報をそのまま、よみだせる複数コンプトン散乱や偶発事象の判定が可能である。また、隣接ピクセルにおける不具合の影響も少ない。

しかし、現在まで

- 均一で性能をもつピクセルアレイの製作が困難
- 広有効面積をもった高位置分解能光検出器がなかった。

- 高価である

のような理由でアンガー型に比べ開発、利用が遅れてきた。

2.6.3 ピクセル型とアンガー型

コンプトンカメラの吸収体に必要とされるものはまず、位置分解能とエネルギー分解能である。ピクセル型・アンガー型ともに設計次第でシンチレータ物質のもつエネルギー分解能を達成できる。ただしピクセル型の方が形状の影響が出やすいため悪くなる傾向がある。位置分解能はピクセル型の方が1mm程度まで分解することが可能であり、さらに小さく出来ることも期待される [16]。

次に有効領域面積である。有効領域面積は10~30cm角を一面程度までならばアンガーカメラ1台で、中央部の有効領域面積とあてることで、100%を確保できるが、30cm角を越えまた立体構造を作るなど複数台のカメラが必要になると不感領域を少なくパッケージすることのできるピクセル型が有利である。

計数率にたいする応答はとくに宇宙環境を考えると重要である、それは、検出器の不感時間を決定し観測時間に影響を及ぼすからである。この点に関しては、大面積で1トリガーとなるアンガー型より、小面積ごとにトリガーをわけれるピクセル型の方が有利である。

また吸収体にもイベントセレクション能力があれば、コンプトンカメラのバックグラウンド除去に役立つ。アンガータイプは全体に光がひろがるため、大発光量イベントなど限られたものしか除去できない。とくに偶発的に2箇所ではシンチレーション光が起きたときやコンプトン散乱により散乱された γ 線が別点で吸収されたときなど誤った位置を計算してしまう(図 2.23)。ピクセル型の場合はシンチレーション光が起きたピクセルの情報が光検出器につたわるため、このイベントの解析も可能となる。

さらに光検出器に関してはアンガー型はシンチレーション光を分散させ、多数の光デバイスで捕えるため個々の光デバイスは少光子計数が要求され、S/N比がよいものが必要となる。このため、半導体検出器は現段階ではS/Nが悪く使用できない。また光デバイスのゲインが揃っている必要もあるため補正が困難な程バラツキのあるものは使用できない。一方でピクセル型はピクセルピッチにあった光デバイスであれば使用可能である。また、ピクセル内の光は乱反射によりピクセル内に一様に広がるため光デバイスに入射する光は中心がピクセル中心でピクセル幅に広がった光であるといえる。このため、ピクセルピッチの光デバイスでなくてもピクセル幅より狭い位置分解能をもつ位置敏感型フォトデバイスならば位置分解可能である。

最後に耐衝撃性に関すればアンガーの方が割れやすい構造をもっている。また結晶の一部が破損した場合、ピクセル型ではその該当ピクセルのみの性能が劣化するが、アンガー型の場合は広い範囲で光の歪みによる像の歪みがみられるようになる。また運搬等の際も小型モジュール化ができるピクセル型に比べて、大型なものにならざるを得ないアンガー型の方がリスクが大きい。さらに大型の結晶は熱変化による膨張・破損が起きやすい。さらに上空に打ち上げたあとの位置およびエネルギー補正がアンガー型は難しい。

2.7 pixel シンチレータアレイ

この章ではピクセル型シンチレータに用いるシンチレータアレイについて的一般事項及び作成方法について述べる。

2.7.1 ピクセルシンチレータ結晶

シンチレータアレイ作成において使用する結晶について留意すべき点は以下のようなことである。

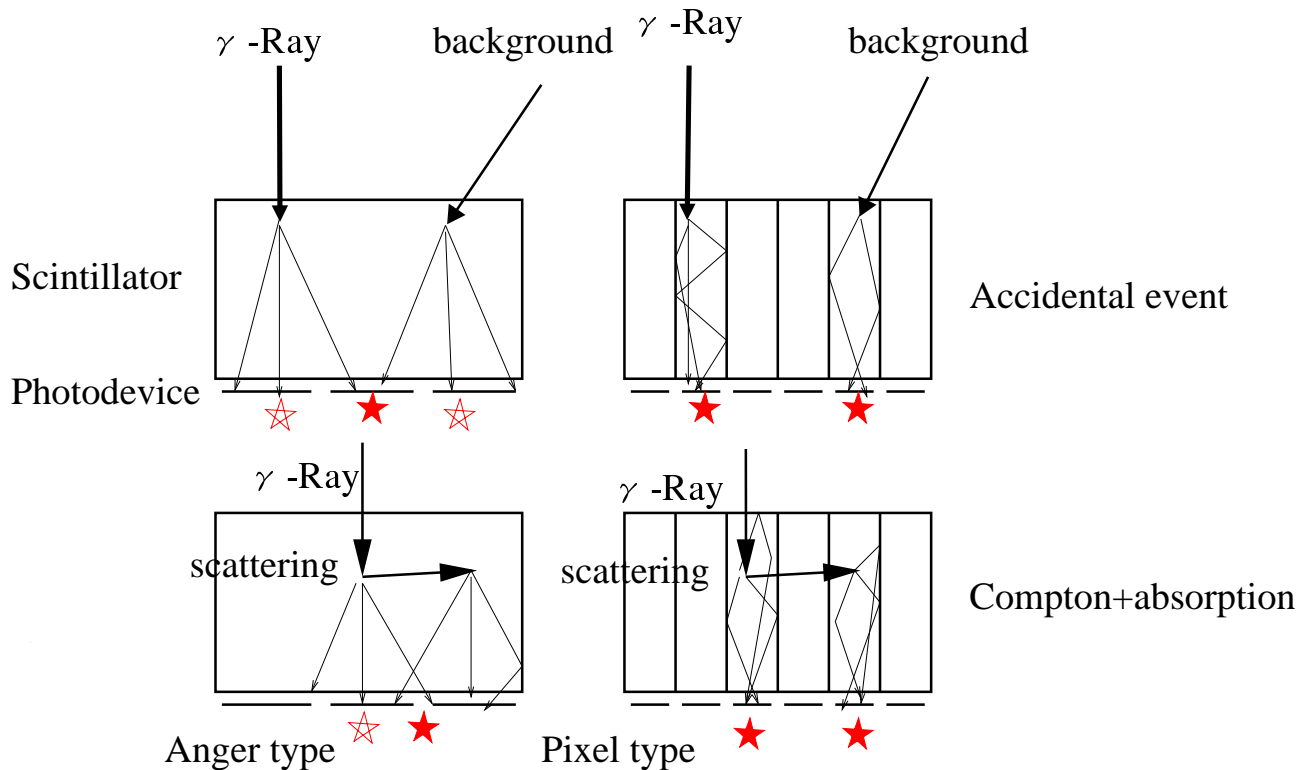


図 2.23: 同時イベント (上) 偶発同時計数。(下) コンプトン散乱同時計数
 アンガー型 (左) : ニヶ所で同時に光ると間違った位置を計算する。判別不能
 ピクセル型 (右) : ニヶ所で同時に光ったという事実を知れる

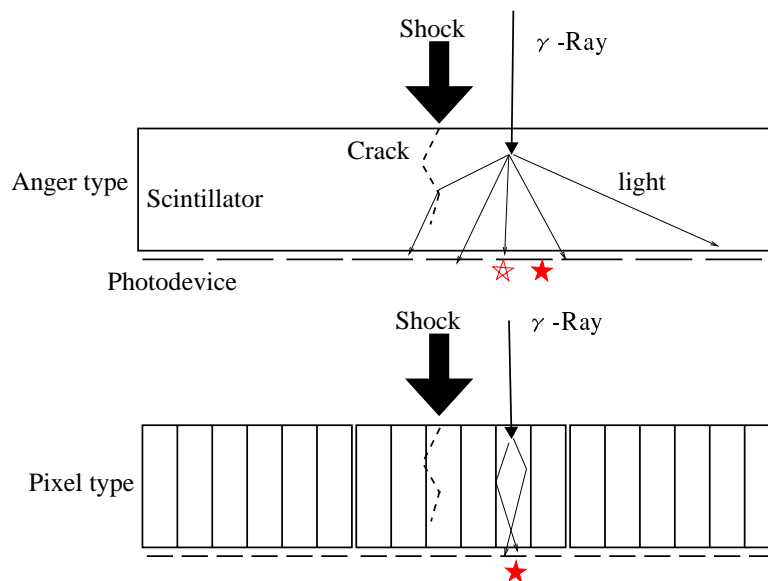


図 2.24: 結晶中にヒビ等が入ったとき
 (上) アンガータイプ : 傷の部分で光が曲がるため、広い範囲に影響。
 (下) ピクセルタイプ : 光学的につながっていないので傷ついたピクセル以外は無傷。

エネルギー分解能 ピクセルシンチレータアレイの性能は構成するピクセルシンチレータに大きく左右される。しかも同じ結晶種でも、製造元、ロットなどによって大きく性能が変わる場合があるので、使用する結晶の性能の確認は必要である。

へきかい性 NaI(Tl) や GSO:Ce にはへきかい面が存在するため、結晶をピクセル化、及び表面を研磨加工する際、大きく割れることがおきる。このため、結晶種によっては加工時に加工方向などを注意すべきである。

また外部衝撃・温度変化などによりへきかい方向にひびが入りやすい。

潮解性 NaI(Tl) は潮解性があるため、作業はドライルームでする必要がある。また CsI(Tl) も弱いながらも潮解性があるため、長時間使用による劣化をふせぐため、光デバイスとの接着後は密閉容器に封入することが必要である。

反射材・表面状態 隣接ピクセルに光が洩れ込まないように、ピクセル間には遮光材が必要である。しかも、シンチレーション光の多くは直接光デバイスの方向に向かわないためエネルギー分解能の向上のためにはピクセル壁で反射がおこる必要がある。このため遮光材は反射率の高い反射材を使うべきで、また、より良く反射させるために結晶表面も研磨した方がよい。

反射材については Section 2.3。

価格 ピクセルシンチレータアレイの価格はピクセルの単価によって決まる。非常にたくさんのピクセルを使うときは単価の数%の差が膨大な金額になるため、慎重に決定するべきである。

2.7.2 シンチレータアレイの製作

アレイの形状決定

シンチレータアレイを設計を決定する要素はつぎの通りである。

- ピクセルサイズ：面積 要求位置分解能、光デバイスピッチ。
- ピクセル厚さ：対象となる γ 線エネルギー阻止能。
- ピクセル数(アレイサイズ)：光デバイスサイズ
- 価格

以上のような条件をバランス良くくみあわせてシンチレータを選ぶ必要がある。

反射材・接着材

ピクセルシンチレータをアレイ化する際に反射材および接着剤を用いるが、個々のピクセルシンチレータの性能を最大限に発揮出来るようなものでかつ結晶のアライメントをきちんと正確に固定しなければならない。

アレイの組み立て方法

シンチレータをアレイ状に組み立てるには以下のような方法がある。

●**反射材・接着剤 混合剤の利用 (図 2.25)**。 ピクセルシンチレータを治具上にアライメントどおりにならべ、そこに銀粉等の反射剤と硬化能力のある接着剤を流し込みかためる。

長所はアライメントが正確に決まり、かつ反射材設置と接着を一度におこなえるため、非常に低コストである。

短所は混合剤のため反射能力を確保するのが難しい。

特に混合剤の注入時および接着時において、均一性を確保するという技術的な課題がある。

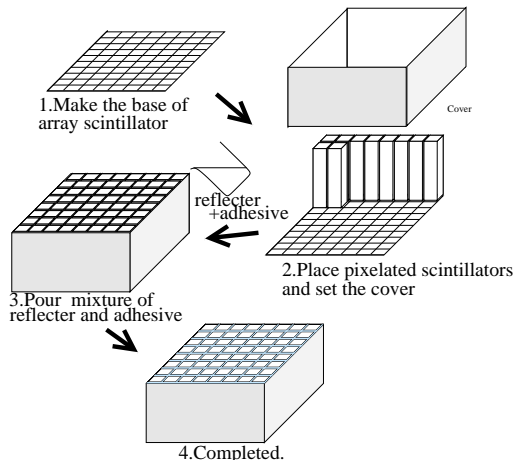


図 2.25: 反射・接着混合剤方式

●**硬質反射材+シンチレータピクセル (図 2.26)**。 ESRのような硬い反射材を用いると、ピクセルを列べながら確実に反射材を挟み込んでいくことができる。

硬質の反射材で型をとれるためアライメントは確保できた、反射率も確保できる [18]。

また、反射材を挿入する過程をチェック出来るため、均一性の確保も可能である。ただし、硬質のESRを精度良く加工するにはレーザー加工などの特殊技術が必要。また、作業工程が増えるためコスト高になりやすい。

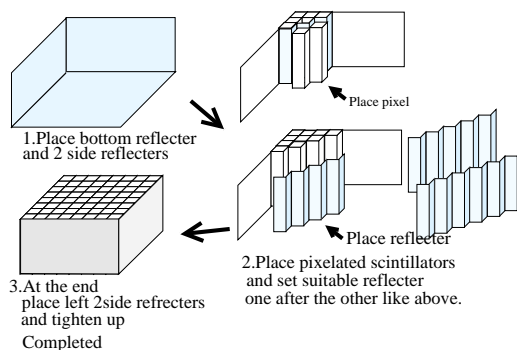


図 2.26: 硬質反射材方式

●**反射材+結晶ピクセルの組み立て方 (図 2.27)**。 ピクセルシンチレータにあらかじめテフロンテープなどの反射材をまく、もしくは反射剤を添付しておき、このシンチレータ結晶をならべアレイ化を行う。

反射材をピクセル毎にとりつけるため、反射率は高くなりまた均一性が確保できる。信頼性も高い。短所はアライメントの正確性の確保が簡単ではないこと、および手間がかかることである。

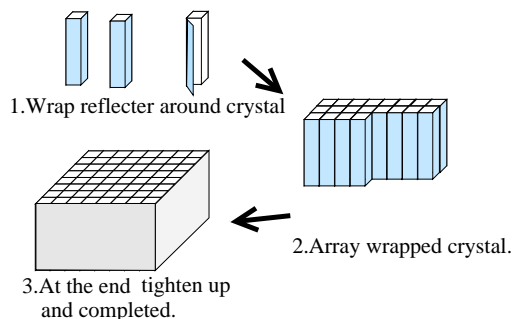


図 2.27: 反射材付きピクセル組み立て方式

第II部

MAPMTとGSO:Ceを用いた γ 線カメラの 開発

GSO : Ce シンチレータと位置敏感型光電子増倍管をもちいた γ 線カメラ開発

Section 1.2.3にて、紹介したように我々は次世代 MeV γ 線カメラを開発している。このカメラに使用される散乱 γ 線カメラには高位置分解能および高エネルギー分解能かつ大有効面積なものが要求される。この第 II 部及び第 III 部ではこの散乱 γ 線カメラの開発状況について報告する。

Section 2.6 で議論したように位置敏感型 γ 線検出器のなかではピクセル型シンチレータ検出器がその拡張性から今後、位置分解能、エネルギー分解能および検出効率等をバランス良く改善していくことが期待されている。またモジュール化により、散乱体の形状にあわせて有効面積を広くとることが出来、また経済的リスクも少ない。さらに衛星観測等に対する対応力などの面で、メリットがあることを述べた。とくに我々は 50cm 角程度の次世代コンプトンカメラの開発を視野にいれており、この大きさに見合う散乱 γ 線検出器の候補としてピクセル型シンチレーションカメラの開発をおこなっている。なお開発においては位置敏感型検出器としての性能に加え宇宙環境での使用できるものを求めている。

宇宙環境におけるシンチレータの大きな問題として検出器の放射化の問題がある。この放射化によるバックグラウンド増大は検出器性能およびその寿命に大きな影響を及ぼす。このため極力放射化の少ない物質が望ましい。また、検出器の厚みは小さい方が Z 軸方向の不定性が少なくなり、さらに体積が小さい方が荷電粒子線の影響を受けにくいいため、高密度、高物質量の物質がよい。加えて光の発光量は多い方がよくその減衰定数は小さい方がいい。

このような条件にもっとも近いものとして GSO(Ce)(Gd₂SiO₅:Ce) シンチレータがある。われわれはこの宇宙環境に適した結晶を利用した、GSO(Ce) ピクセルシンチレータカメラ (以下 GSO-PSA カメラ) の開発をおこなった。

光デバイスに関しては耐衝撃性、電力などの観点から半導体を用いた検出器が望ましいが、GSO 発光波長域に高い感度を持ち、高 S/N で多チャンネル大面積のものは現段階では製作が難しい。そこで、当面の気球実験などに使用できるモデルとして、位置敏感型光電子増倍管の利用による GSO-PSA カメラの開発を進めている。

位置敏感型光電子増倍管では浜松ホトニクス社で開発された大面積 位置敏感型 光電子増倍管 (Flat panel PMT) H8500 の性能が向上し、ピクセルシンチレータの読みだしに応用が可能となった。この H8500 と GSO-PSA を組み合わせることでエネルギー分解能 10% @ 662 keV、位置分解能 6mm かつ有効感度領域が約 80% となる、GSO-PSA カメラの低電力モジュール化に成功した。これにより次世代コンプトンカメラの散乱検出カメラを低電力で構成することが出来るようになり、この GSO-PSA カメラは気球実験搭載用に採用された。

この第 II 部ではこの GSO-PSA カメラの開発に関して、GSO-PSA の製作と PMT H8500 による読みだしについて述べる。

第3章 GSO(Ce)結晶の性能評価とGSOピクセルシンチレータアレイの製作

GSO(Ce)(Gd₂SiO₅:Ce)結晶はSection 2.2.2で述べたように、高密度(6.71g/cm³)、高い γ 線吸収係数(Z=64)、高速応答(60ns)、十分な発光量、強い放射線耐性などの特性をもっており宇宙環境での γ 線測定に最も適したシンチレータである。

この章ではGSO(Ce)ピクセルシンチレータアレイ(GSO-PSA)の製作と、そのためにおこなったGSOピクセルシンチレータの評価について述べる。

3.1 GSOシンチレータの諸性質

GSO:Ce結晶を用いてシンチレータ検出器を設計・製作する時、いくつかの種類のGSO結晶を調べ、選定することで、最適な結晶を選び出す必要がある。ピクセルシンチレータアレイ(PSA)は、原材料溶解→結晶化→切断→研磨→アレイに組み立てという工程で製作されるが、この製作過程(原料・不純物濃度や研磨方式など)の違いによりピクセル結晶の特性が変わってくる。GSO(Ce)は日立化成工業が特許を持っているため、現在、製造・販売できるのは日立化成工業のみである。日立化成工業によると以下のようなものがピクセル結晶の特性に影響するといわれている。

- 均一性・形状・大きさ
- 表面研磨方法
- Ce濃度
- Zr濃度

均一性・形状・大きさ

Section 2.5.3にあるようにこの3つ要素はピクセル結晶のシンチレータとしての性質に大きく影響をおよぼす。GSO(Ce)結晶は主なるつぼからの回転引き上げ方式(チョクラルスキー法)により作成される。しかしへきかい性等の影響により大きく均一なものを製作するのは難しい。現在日立化成においては $\phi 10\text{cm} \times 29\text{cm}$ の大型のものが作成されているため、ピクセルシンチレータを製作していくには十分な大きさである。しかし、Ce濃度やその他の不純物によって結晶の発光量が変わるため、通常ある程度の性質の揺らぎはある。日立化成で製作しているGSO(Ce)もCe濃度のばらつきなどの影響もあり、一回の引き上げの結晶内で10~15%、異なる結晶間においても同程度の発光量のばらつきをもつ。

形状・大きさはシンチレータカメラに要請される位置分解能や γ 線阻止能に基づき加工可能な範囲内で決定をするが、それぞれの形状によってピクセルシンチレータの性能に重要な項目がかわってくるため形状ごとの評価が重要である。

Ce 濃度と発光量・透過率・減衰定数

GSO : Ce はシンチレーション励起物質として Ce が GSO に微量に添加されている。GSO(Ce) は Ce の濃度があがるとそのシンチレーション光減衰定数が速くなっていくという性質をもっている。このため高計数用の検出器を開発するためには Ce 量の多い結晶が有効になるが、逆に Ce が増えていくと透過率が悪くなる問題がおこる。透過率悪化の理由は Ce による着色である。Ce は通常結晶中 3 価 Ce^{3+} で存在するが、結晶生成のさいのわずかな他の不純物によって Ce^{4+} となる。この Ce^{4+} が透過率の減少の原因であると考えられている。

実際 Ce 1.5mol% が添加されている結晶では透過率による収光量の位置依存性が報告されている [19]。また Ce 濃度が高いほど、一回の引き上げで作成される結晶中でのムラが多くなる [20]。

Zr 添加

GSO(Ce) 結晶に 200ppm 程度の Zr を加えることにより、減衰定数を変化させることなく出力光量が 20% 程度増加し、エネルギー分解能も 1% 程度 (FWHM@662keV) 改善することが報告されている [20]。これは着色の原因とされる Ce^{4+} を Zr を添加することにより Ce^{3+} におきかえ、着色を防ぎ透過率を改善するためであると考えられている。

研磨方式

日立化成において、結晶表面を鏡面状態に仕上げる技術として機械による研磨方式と化学溶液による方式が採用されている。機械研磨による方法は他の結晶と同様にいくつかの研磨レベルによる工程をへて完成するためコストがかかる。また GSO はへきかい性があるため結晶面に応じた磨き方が必要となり、大量生産することが難しい。一方濃リン酸液 (150 度～300 度) に付けて表面をとかず化学エッチング法では機械研磨より表面状態は悪く見えるが、エネルギー分解能などの性質はあまり劣らないとされている。しかもその工程は機械研磨に比べると非常に簡単であるためコストが安くあがる [19]。

3.2 GSO ピクセルシンチレータの評価

3.2.1 評価用結晶

GSO ピクセルの性能およびその特性を調べ、最適化を行うために表 3.1 に示す 8 種類 21 個の GSO(Ce) 結晶ピクセルの評価をおこなった。各グループに対し複数個の結晶を用意したのは同条件加工における性能のばらつきをしらべるためである。これらの評価により、研磨方法、Ce 濃度、Zr の添加による及びその他の原因による性能の違いを調べた。

3.2.2 GSO ピクセルシンチレータ結晶評価用 set up

各 GSO ピクセルを評価するために、図 3.1 のようなセットアップで各結晶における γ 線にたいする発光量およびエネルギー分解能を測定した。シンチレーション光用光デバイスとして光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製 シングルアノード PMT R6231) を使用した。評価用の結晶は反射材を二重巻きにし、オプティカルコンパウンド OKEN 6262 で、PMT に取り付けた。反射材は小さなピクセルを再現性よく巻き付けることが出来るゴアテックス (Section 2.3 参照) を用いた。また取り付けの際は治具を用いる

¹ピクセルを切り出したもとの結晶

Group ID	サイズ	Ce 濃度	Zr doping	親 ingot ¹	研磨方式	個数
Grop1	6×6×13 mm ³	0.5mol%	無	A	化学エッチング	2
Grop2	6×6×13 mm ³	0.5mol%	無	A	機械研磨	2
Grop3	6×6×13 mm ³	0.5mol%	無	B	化学エッチング	2
Grop4	6×6×13 mm ³	0.5mol%	無	C	化学エッチング	3
Grop5	6×6×13 mm ³	0.5mol%	有	D	化学エッチング	4
Grop6	6×6×13 mm ³	1.0mol%	有	E	化学エッチング	2
Grop7	4×6×20 mm ³	1.0mol%	無	F	化学エッチング	3
Grop8	4×6×20 mm ³	1.0mol%	有	G	化学エッチング	3

表 3.1: 評価用 GSO(Ce)

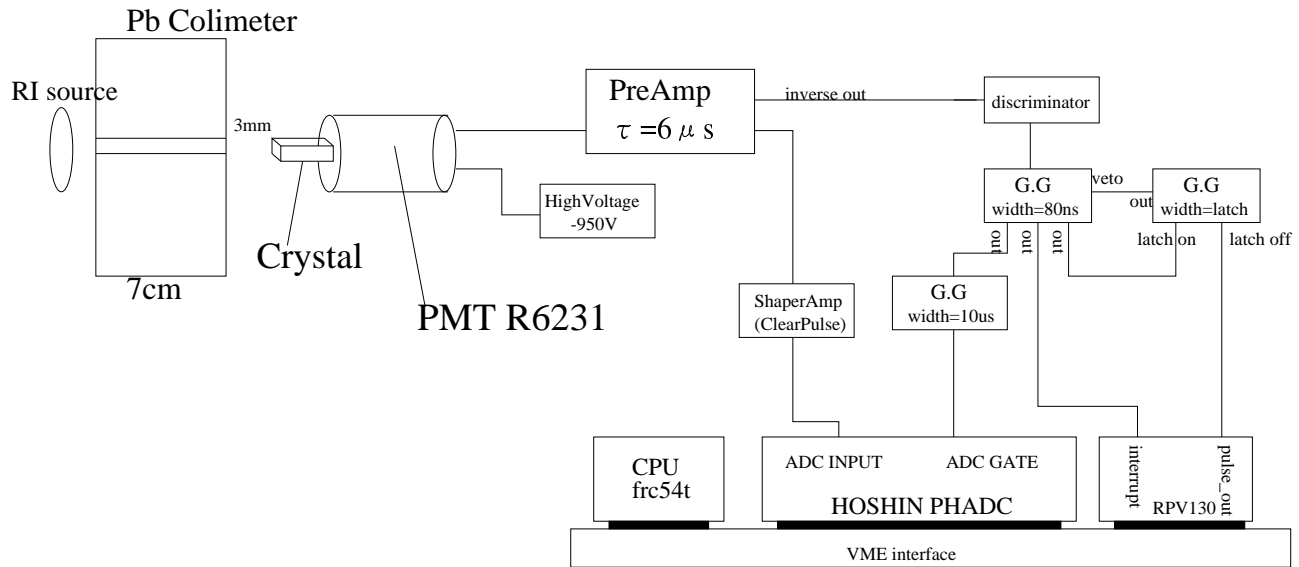


図 3.1: 評価結晶 DAQ

ことで、取り付け環境が変わらないようにした。PMTには-950Vの高圧を林栄精器製安定直流高圧電源より供給し、信号は電荷積分型増幅器(自作時定数 $6\mu\text{s}$ 以下プリアンプ)により増幅ののちクリアパルス社製波形整形アンプ(時定数 $1\mu\text{s}$)によりガウシアン整形して、豊伸電子製のピークホールド型ADCの1chに入力し、デジタル化した。

今回プリアンプ自作の際に時定数を GSO(Ce) の蛍光減衰時間に合うように調整をした。図 3.2 は GSO(Ce) に 662keV の γ 線を照射した時のプリアンプにおける信号の大きさとプリアンプの時定数の関係を示した。時定数が $4\mu\text{s}$ 以下で、急激に出力信号がおちているため十分な積分時間を確保し、かつ高計数を処理できるようにプリアンプの時定数は $6\mu\text{s}$ とした。

シンチレータに γ 線を照射するために用いた線源は ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 、 ^{57}Co で、それぞれの 662keV、356keV、511keV、122keV を用いて校正をおこなうこととした。これらを 7cm の厚さの鉛に ϕ 3mm の穴があいているコリメータ越しにおき γ 線を照射した。

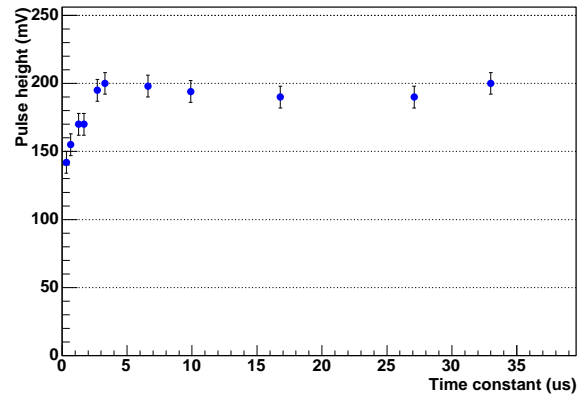


図 3.2: 前置増幅器時定数 vs.662keV γ 線等価増幅器出力

3.2.3 評価結果

今回取得したスペクトラムのうち図 3.3 が Group1 の一つ目の結晶である。それぞれの 122keV、356keV、511keV、662keV の光電吸収ピークが確認できる。 ^{57}Co は使用した線源が弱かったために外部バックグラウンドによる影響を強くうけている。図 3.3 の右下の ^{57}Co のスペクトラムにおいて 2000ch 付近に立っているのが 122keV のピークでその左側に存在するのがバックグラウンドとなっている。これらの入射 γ 線エネルギーと ADC 値のあいだの線形性が確認でき、エネルギー分解能は 8.3% (FWHM)@662 keV であった (図 3.4、図 3.5)。一般的に GSO の発光量はおよそ 8000photons/MeV であるといわれている。このため光電面での量子効率を含めた際の統計的なゆらぎにより 6%~7%(FWHM@662 keV) のエネルギー分解能の悪化が考えられるため、これに光伝達による揺らぎなどを考慮すると、今回測定された値はさほど悪くはない値といえる。

その他の結晶の結果の相対光量とエネルギー分解能をあらわしたグラフが図 3.6 である。グラフ中の誤差は事前に同じ結晶を用いておこなった、反射材の巻き方、接着方法などを含めた繰り返し測定の再現性試験によって見積もった測定誤差である。図 3.6 より次のようなことが分かる。

- 同一グループ内のばらつき

今回各グループ内で 2 ないし 3 個の結晶を測定した。その結果各グループ内において結晶ごとにエネルギー分解能および光量にばらつきがみられた。

これは結晶生成時における Ce 濃度の不均一性や研磨むらなどの影響があると考えられる。日立化成からも製造過程によって 10% 程度の発光量の違いが生じるというデータが報告されているため、それを裏付けている。

- インゴット間のばらつき

Group1、Group3、Group4 は全ての条件は同じで、どれも Ce 0.5mol% 添加化学研磨 $6 \times 6 \times 13$ のピクセルであるがピクセルを切り出すインゴットのみが違う。これらのグループ間にも違いがみられた。これも Ce 濃度やその他の不純物濃度の違いによるものと考えられる。

- 研磨方法の違い Group1 と Group2 では研磨方法に違いがあるが、その性能には上記の個体のばら

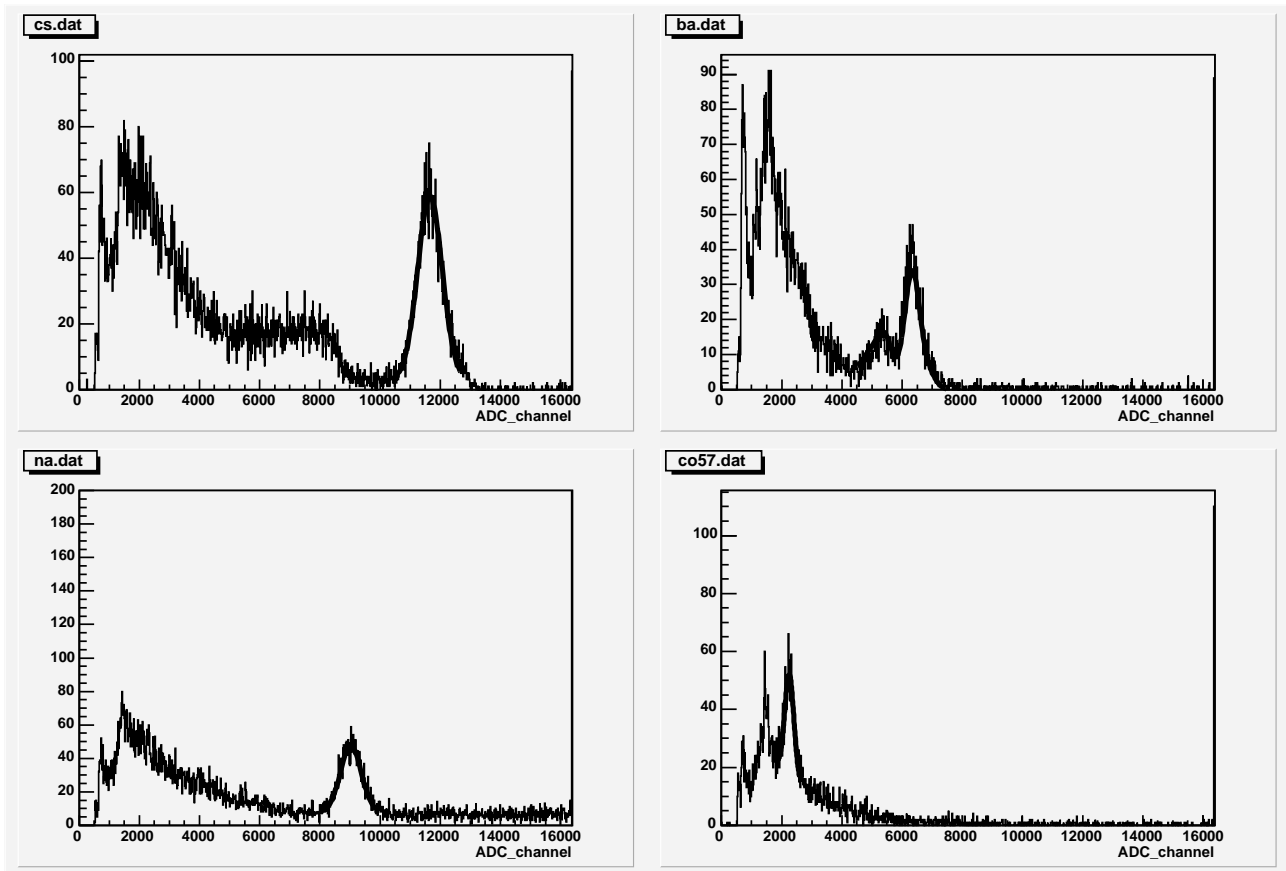


図 3.3: 評価結晶 Group1-1 スペクトル

左上 ^{137}Cs 、右上 ^{133}Ba 、左下 ^{22}Na 、右下 ^{57}Co 。

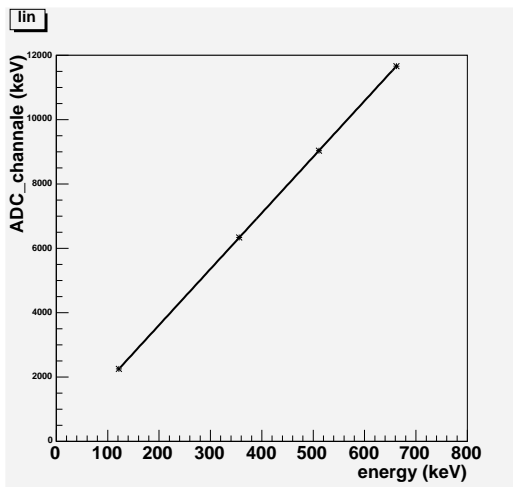


図 3.4: 評価結晶 Group1-1 線形性

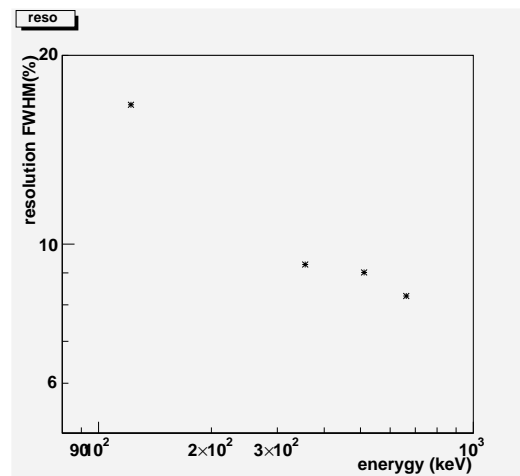


図 3.5: 評価結晶 Group1-1 エネルギー分解能

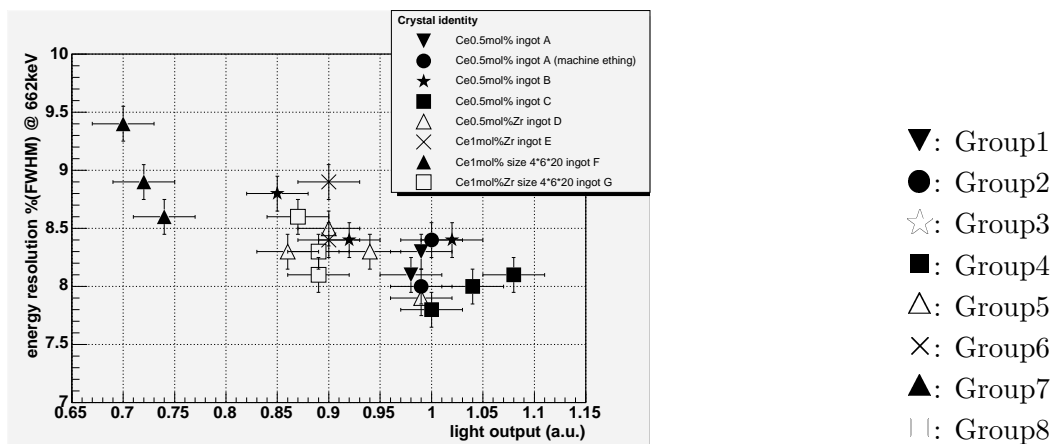


図 3.6: 各結晶における 662keV γ 線に対する相対集光量とエネルギー分解能 (FWHM)。

つきよりも大きな違いはみられなかった。

- Ce 濃度および Zr 添加の影響 Group1、Group3、Group4 と Group5、Group6 の比較をおこなうと、インゴット間のばらつきに対して Ce 濃度および Zr 添加による有意な影響はみられなかった。しかし Group7、Group8 を比べると発光量及びエネルギー分解能に顕著な違いがみられた。長さが 20mm ある 1 mol% の Ce が添加された結晶 (Group7) では、他の結晶より光量が 20%~30% 程度すくない。形状が違うためこれだけでは、透過率の影響をのべることはできないが、同じ形状に Zr が 200ppm 添加されている結晶 (Group8) が他の結晶と同じぐらいの光量を得ていることから考えると、Group7 の結晶は Ce による着色の影響がみられ Group8 の結晶は Zr の添加によって着色の影響をのがれているといえる、

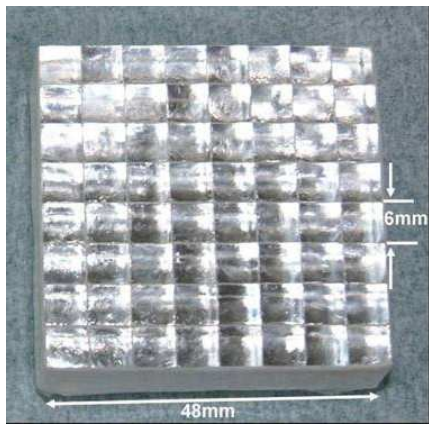
以上より、 $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$ の大きさの結晶においては Ce の濃度や Zr 添加による透過率の違いや研磨方法の違いよりも製造段階に生じる不純物濃度などの結晶の個性の影響が強い。しかし $4 \times 6 \times 20 \text{ mm}^3$ という細長い結晶においては、日立化成の報告にあるような Ce 濃度による透過率の悪化および Zr 添加による透過率の回復の傾向がみられた。

この測定の結果 $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$ のような比較的正方形に近い場合は Ce 濃度や Zr の添加・不添加の影響は結晶の個性の影響よりも小さいことがわかった。 $4 \times 6 \times 20 \text{ mm}^3$ のような細長い結晶になると Ce の添加による着色の影響が顕著になり、この着色の影響は Zr の添加により防ぐことができる。また研磨方法においては日立化成の報告のように二つの方法による顕著な差はなかった。よって研磨は安いほうである化学研磨を行うのがよい。このため $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$ よりも短いずんぐりした結晶を用いるときは、結晶の個性など結晶化の際に生じる影響が一番大きいいため、安定生産性と価格できめるべきである。上記結晶より細長い場合透過率悪化が懸念されるため Zr を添加するべきである。

3.3 GSO(Ce) ピクセルシンチレータアレイ (GSO-PSA)

3.3.1 GSO-PSA の製作

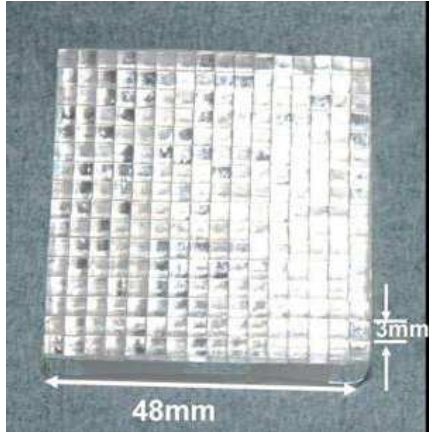
前節における GSO(Ce) 結晶の評価をもとにピクセル結晶のアレイ化を行った。今回、作成したシンチレータアレイは図 3.7 と図 3.8 である。結晶の厚みは 500keV の γ 線の吸収長を考慮し、13mm とした。結晶の幅は使用予定であるマルチアノード PMT のアノードピッチである 6.08mm にあわせ、6mm



外寸	49×49×13mm ³
結晶数	8×8
結晶種	GSO(Ce)(日立化成)
添加物	0.5mol% Ce
結晶サイズ	6×6×13mm ³
反射材	ESR ^a 65μm
アレイ組み立て	WES 社

^aSection 2.3 参照

図 3.7: 6mm 角 GSO シンチレータアレイ



外寸	49×49×13mm ³
結晶数	16×16
結晶種	GSO(Ce) (日立化成)
添加物	0.5mol% Ce and 200ppm Zr
結晶サイズ	3×3×13mm ³
反射材	ESR 65μm
アレイ組み立て	WES 社

図 3.8: 3mm 角 GSO シンチレータアレイ

と 3mm にした。(ただし、ESR 反射材をはさみこみため実際は 5.97mm, 2.97mm 程度になっている。) ピクセル数もそれぞれ 8×8、16×16 と、H8500 のサイズに合わせて作成した。使用する GSO 結晶は前節の議論により、

6×6×13mm³: 0.5%mol Ce doped, 化学研磨結晶

3×3×13mm³: 0.5%mol Ce and 200ppm doped, 化学研磨結晶

を用いた。3×3×13mm³ 結晶は 6×6×13mm³ よりも細長いいため、結晶内での反射回数が増え、光の伝達距離が伸びることを考慮し Zr が添加されたものを選んだ。アレイへの組み立ては WES 社においておこない、組み立て方法は使用するマルチアノード PMT の光電面をより広く有効に利用するために反射材として ESR を用いた硬反射材方式を用いた (2.26)。また均一な光の収光を重視したため接着材などによる固化は行っていない。これは ESR により形状が固定され、強度は確保されるから実現したものである。またアライメントの精度も 0.5mm 程度である。1 ピクセル結晶毎の大きさのばらつきは 10μm 程度であるため、幅方向にはある程度吸収される。厚み方向の結晶のずれについては、光電面側を平面にし、反対側で結晶の厚さのずれを吸収している。そして最外周部の外側は白色のテフロンテープで固定されている。

3.3.2 シングルアノード PMT による GSO-PSA の評価

製作した GSO(Ce)6mm 角ピクセルシンチレータアレイを 5 インチ角シングルアノード光電子増倍管 R6236(浜松ホトニクス社) に OKEN 6262 グリスでとりつけ、前節で用いた DAQ(図 3.1) に組み込んだ。

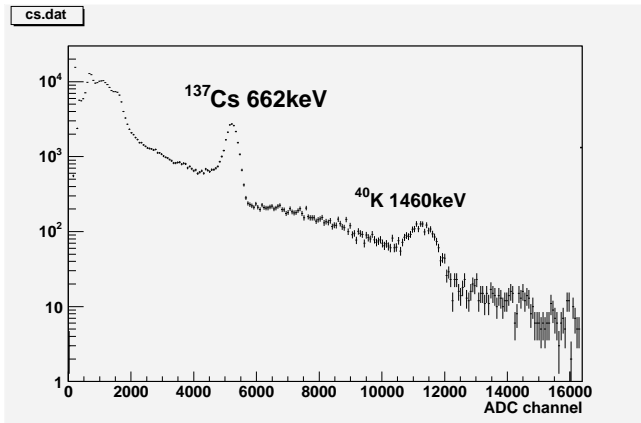


図 3.9: 6mm 角 GSO シンチレータアレイの R6236 による 1 ピクセル測定

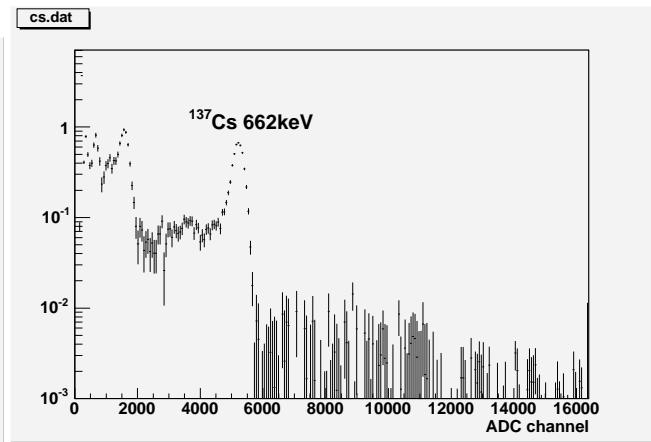


図 3.10: 6mm 角 GSO シンチレータアレイ R6236 による 1 ピクセル測定 (図 3.9 からバックグラウンドを除いたもの)

そして $\phi 3\text{mm}$ コリメータをもちい、1 ピクセルのみに γ 線を照射した。この時得られた ^{137}Cs のスペクトルが図 3.9 である。コリメータから γ 線を照射しているピクセル以外も全て同じ光電面に接しているため、他のピクセルにおける環境バックグラウンドイベントも同時に測定するため、非常にバックグラウンドの多いスペクトルとなっている。これは 662keV のピークの他にコンクリート中に存在する ^{40}K による 1460 keV の γ 線ピークがあることからわかる。バックグラウンドを引いたスペクトルが図 3.10 である。このスペクトルにおけるエネルギー分解能は 8.6%@662keV となる。結晶の違いや PMT の違い、反射材の違いなどあるため単純な比較はできないが、このエネルギー分解能は 1 ピクセルの試験 (Section 3.2) の値と大きくはなれておらず、ピクセルの性能を保ちつつアレイ化することに成功したといえる。

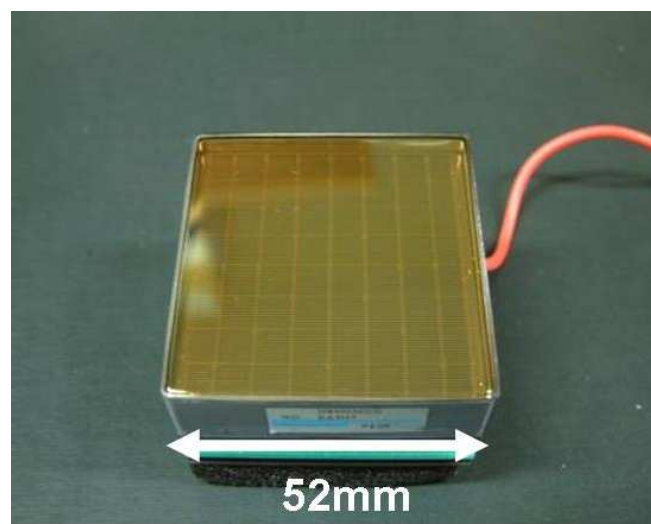
第4章 H8500によるピクセルシンチレータアレイの読みだし

浜松ホトニクス社製のフラットパネルPMTは $49 \times 49 \text{mm}^2$ という広い有効面積と6mmピッチならばで8×8のマルチアノードをもつ位置敏感型光検出器である。広い有効面積はγ線カメラ用に開発され、世界各地での使用が始まっている。

この章ではこのマルチアノードPMTを抵抗チェーンによる読みだし回路をもちいて前章で製作したGSOピクセルシンチレータアレイ(GSO-PSA)をよみだすことで、位置敏感型γ線スペクトロメータの製作をおこない、次世代コンプトンカメラの吸収体として十分に応用できることも確認する。

4.1 浜松ホトニクス社 H8500 マルチアノードPMT

4.1.1 仕様



最大有感波長	420nm
光電陰極	バイアルカリ
入射窓	Borosilicate glass 1.5mm
ダイノード構造	12段メタルチャンネル
アノードPixel数	64
アノードピッチ	6.08mm(端のみ6.26mm)
増幅率	10^6
有感面積	$49 \times 49 \text{mm}^2$
外寸	$52 \times 52 \times 28 \text{mm}^3$
重量	140g

図 4.2: 仕様

図 4.1: H8500 写真

図 4.1 が浜松ホトニクス社製 マルチアノードPMT H8500 の写真と仕様である。 $49 \times 49 \text{mm}^2$ の正方形光電陰極にたいして、12段のメタルチャンネルのダイノードに、64chのアノードが用意されている。外寸が $52 \times 52 \text{mm}^2$ であるため複数台を最密に並べた場合の有効感度領域が89%と従来のマルチアノードPMTに比べると非常に広くとることが可能である(図 4.3 参照)。増幅率は約 10^6 と通常のシングルアノードPMTと同様の値をもつが、光電陰極及びダイノード格段への印加電圧を一律に同じ値を印加するため、ダイノード構造の特性の違いなどにより生じる増幅率の調節はできない。カソード・アノード間における電子増幅率は一つのPMTの64chのなかで最大で5倍のばらつきがある。高圧電源の入力およびアノード信号の出力はバックプレーンより行うことにより最密に並べるのに邪魔にならないようになっている。またダイノード最終段における信号の和も出力できるようになっている。

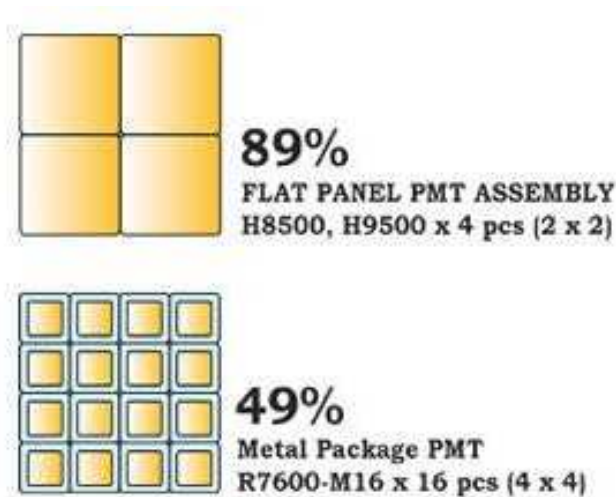


図 4.3: 従来品との有効面積の比較 [21]

4.2 抵抗チェーンを用いた H8500 の読みだし

PMT H8500 の 64 個のアノードからの信号を処理するために Si 用に開発された VA/TA などのアナログ集積回路の利用や開発が行われている。しかし、これらはそれぞれの用途においてダイナミックレンジや周波数、形状などを最適化する必要がある。このような集積回路を我々が開発しているシンチレーションカメラに完全に組み込むには改良とそれに伴うコストと時間が非常にかかるため、我々は抵抗チェーンを用いた読みだし回路を製作した。抵抗チェーンを用いると、各アノードにおける出力値の情報が総出力(和)と抵抗分割法により計算されるイベントの平均の位置情報にまとめられる。このため、チェーン内での電荷の分布情報が失われ、マルチイベントヒット等の判定ができなくなるが、チャンネル数を劇的にへらすことができ、通常の市販のアナログ回路を利用できるため低価格で短時間のうちに開発できる。抵抗チェーンの使用の仕方はいくつかあるがわれわれが用いた代表的な方法を次に紹介する。図 4.4 と図 4.5 が抵抗チェーン読みだしの概念図である。

16ch 読みだし (図 4.4)

8 個のアノードを抵抗でつなぎ、両端から信号を読み出す。読み出した 16ch 分の信号を

$$x = 8 \times \frac{\sum a_i}{\sum (A_i + a_i)} \quad (4.1)$$

$$y = \sum (i \times \frac{A_i + a_i}{8}) \quad (4.2)$$

の重心演算と抵抗分割式を利用することで発光の中心点を決定する。またエネルギー情報は読みだした ADC データの和であるが、該当部分のチェーンのみの和を使用することも可能である。

$$E = \sum (A_i + a_i) \quad (4.3)$$

4ch 読みだし (図 4.5)

8 個のアノードを抵抗でつなぎ、さらに 8 本の抵抗チェーン同士も抵抗でつなげる。4ch の信号を

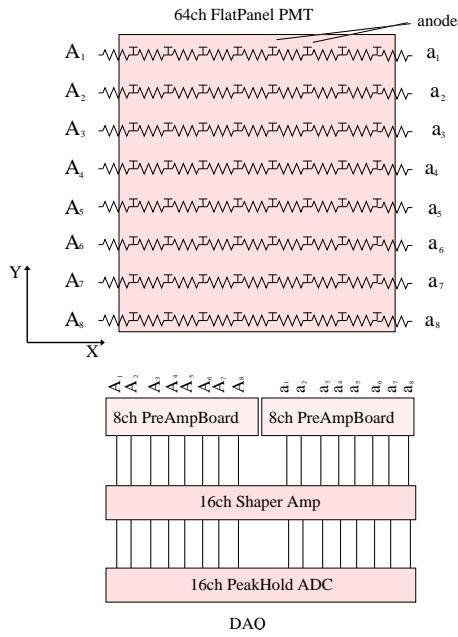


図 4.4: H8500 抵抗チェーン読みだし

$$y = \sum i \times \frac{A_i + a_i}{8}$$

$$x = 8 \times \sum a_i \Sigma (A_i + a_i)$$

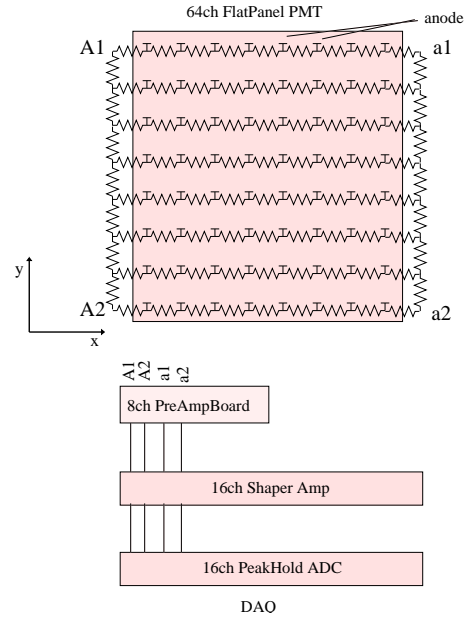


図 4.5: H8500 抵抗チェーン読みだし

$$y = \frac{(A2+a2)-(A1+a1)}{A1+A2+a1+a2}$$

$$x = \frac{(a1'+a2')-(A1'+A2')}{A1'+A2'+a1'+a2'}$$

ここで a1', a2', A1', A2' は a1, a2, A1, A2 で決まる補正要素

$$x = \frac{a1 + a2 - (A1 + A2)}{A1 + A2 + a1 + a2} \quad (4.4)$$

$$y = \frac{A2 + a2 - (A1 + a1)}{A1 + A2 + a1 + a2} \quad (4.5)$$

$$E = A1 + A2 + a1 + a2 \quad (4.6)$$

により計算することにより発光の中心点の位置情報を決定出来る。ただしこの式で計算するとピクセルは分離しているが歪んだ形で、計算されるため、扱いやすくするためには補正計算を利用するのが便利である。エネルギー情報は全チャンネルの和として計算される。

4.3 5cm角 6mmピクセル GSO-PSA カメラ

4.3.1 セットアップ

H8500 に 6×6×13mm³GSO シンチレータで製作された 8×8 アレイ (6mm ピッチ GSO-PSA) をオプティカルグリッド (OKEN 6262) で取り付け (図 4.6)、前述の 16ch 抵抗チェーン回路、および 4ch 抵抗チェーン回路で読みだした。抵抗チェーンは図 4.7(右) のように読みだし基板状にチップ抵抗を配置することで作成し、これを H8500 のバックプレーン部 (図 4.7(左)) にとりつける。これで、約 5cm 角 (外寸 5.2cm 角 有効感度領域 4.8cm 角) で 6mm ピッチで 64 ピクセルの位置分解能をもつシンチレーションカメラができた (5cm 角 6mm ピクセル GSO-PSA カメラ)。これは読みだし基板から両側各 8 本ずつ 16ch の信号 (4ch 読みだしの場合は両側の 8 本をそれぞれ抵抗をつないだ両端の 4ch) を同軸ケーブルで

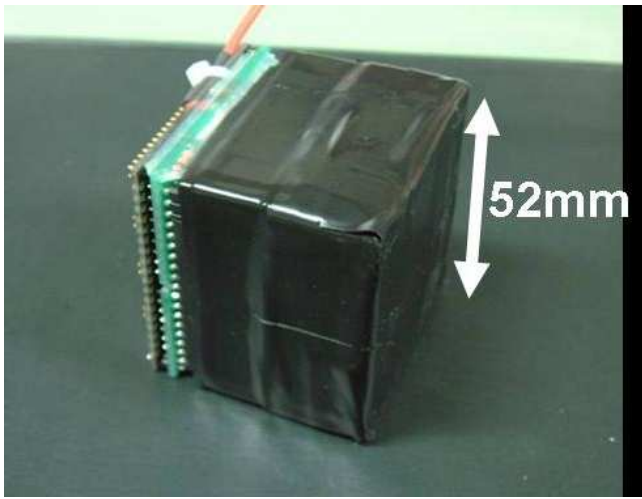


図 4.6: 5cm 角 6mm ピクセル GSO-PSA カメラ

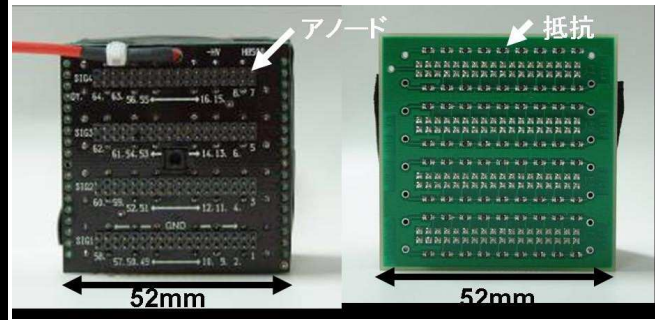


図 4.7: 左: H8500 バックプレーン。右: 抵抗チェーン付き H8500 用読みだし基板

読みだし、前置増幅器で各チャンネルを増幅している。前置増幅器は 8ch の入出力と 1ch の反転 SUM 増幅出力を搭載したものを 16ch 抵抗チェーンでは 2 台、4ch 抵抗チェーンでは 1 台 (4ch 分のみ) 使用している。各出力は豊伸電気製の波形整形増幅器 (Shaping Amp 整形時定数 $1\mu\text{s}$) により、増幅整形されたのち、豊伸電気製のピークホールド ADC に入力される。波形整形増幅器の各チャンネルの増幅率は前置増幅器の入力段からの増幅率が全てのチャンネルが全く同じになるように微調整をしている。反転 SUM 出力はトリガー用の信号としてディスクリミネーターに入力され、このタイミングで ADC のゲートが開き全チャンネルにおける波高値をデジタル化している。

4.3.2 γ 線全面照射による 16ch 読みだし 5cm 角 6mm ピクセル GSO-PSA の性能評価

約 30cm 程離れた点から ^{137}Cs の線源、及び ^{57}Co からの γ 線を 5cm 角 16ch GSO-PSA カメラの全面に照射した。

得られた各イベントについてその ADC 値と式 4.1 を用いて、位置情報の計算をし、各イベントの発光地点の中心の位置情報を表したものが図 4.8 と図 4.9 である。ピクセル毎の点状に集まり、 8×8 個の点が完全に分離されている。これはピクセルシンチレータの各々の発光中心点が分離でき、各イベントの発生ピクセルを決定できることを示している。またピークから離れたところに分布しているイベントは 1 イベント内に複数のヒットピクセルがあった場合などのイベントだと考えられ、適切ではないイベントとして扱うことができる。これは読みだした 8 本 (16ch) の抵抗チェーンの各 ADC 値の分布をみることで、検証することができる。図 4.10 は 8 本抵抗チェーンの信号 ($A_i + a_i$) の中で一番大きな信号の ADC 値を横軸に二番目に大きな信号の ADC 値を縦軸にとったものである。今回製作した 5cm 角 16ch GSO-PSA カメラはアノードピッチとピクセルピッチがあっているため、1 ピクセルからの信号はほとんど 1 アノード、1 抵抗チェーンを通過するはずである。実際は光のガラス面の光のひろがりにより隣接アノードに約 30% 程度の光がもれている (詳細 Appendix A.4 参照) ため、二番目の抵抗チェーンにも信号が流れるが、その量は MAX の抵抗チェーンにおける光量に比例するはずである。図 4.10 (左) のうち、分布の濃い相関がこの光の広がりによるもので、その上側にひろがる場所はコンプトン散乱による複数列発光であることが予想される。また、この MAX の抵抗チェーンと二番目の抵抗チェーンが隣接していない場合も、コンプトン散乱や複数列発光である可能性が高い。これらを図 4.10 (右) のように除去すると、図 4.11 (図 4.8 のイベント数を対数表示化したもの) にみられたピクセル間のイベントは図 4.12 (図 4.10

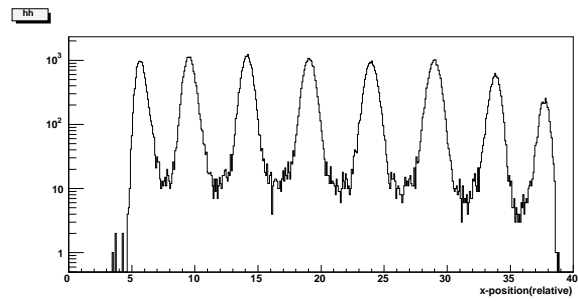
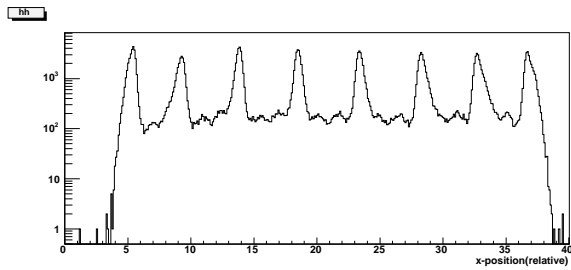
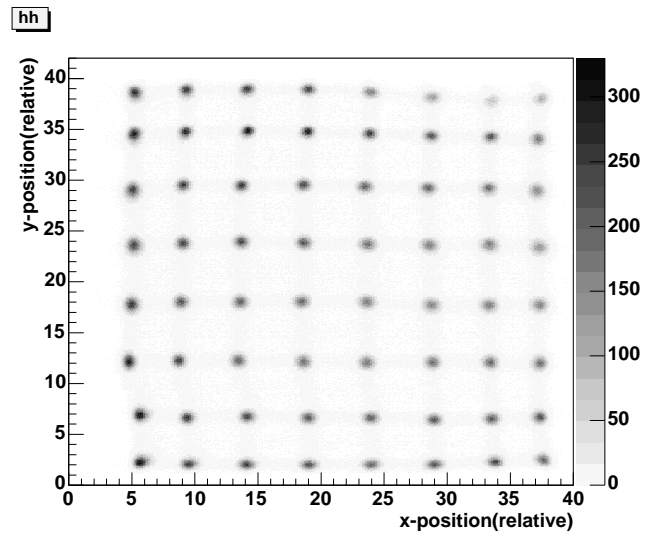
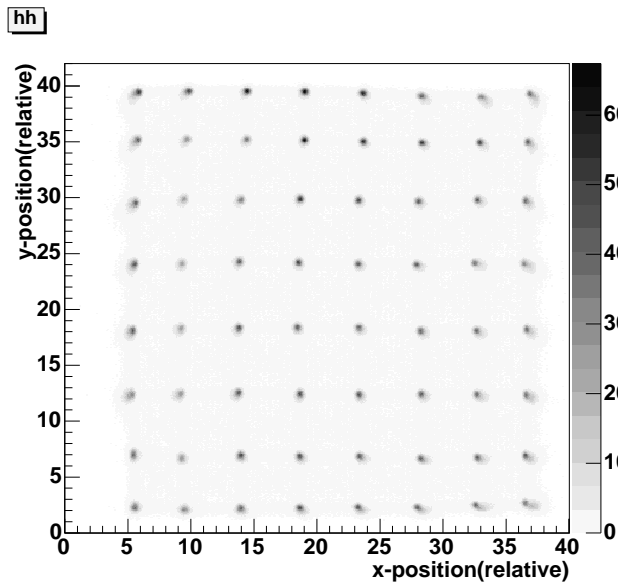


図 4.8: 16ch 抵抗チェーン ^{137}Cs γ 線全面照射 (上) イベントマップ。(下) 上から 4 段目の X 軸射影。
 図 4.9: 16ch 抵抗チェーン ^{57}Co γ 線全面照射 (上) イベントマップ。(下) 上から 4 段目の X 軸射影。

のカット後)のように消える。とくに Y 軸方向のピクセル間に存在していたイベントは消去される。このことから、ピクセル間に存在するイベントは予想されている約 30%程度の通常の光もれ以外による複数ピクセルにおける発光、つまりコンプトン散乱もしくは荷電粒子の通過、偶発事象など、コンプトンカメラの吸収体に求められているイベントとは違うイベントだと考えられる。

以上のことは ^{137}Cs と ^{57}Co (図 4.8、図 4.9) のイベント分布をみても予想される。図 4.9(下)においてピクセル位置と思われるピークのイベント数と、ピクセル間にあるイベントの比は約 100:1 であるが、図 4.8(下)の ^{137}Cs の場合は約 50:1 程度となっている。つまりコンプトン散乱により複数のピクセルが発光する確率が高い ^{137}Cs のほうがピクセル間のイベント多い結果となっている。

計数率に関しては、アレイの面積が大きいため、線源からの照射が平行にならないことおよび、バックグラウンドが非常に多く、またピクセル毎に光電吸収ピークの評価を行う必要があるため正確な議論はここではおこなわない。大雑把な議論としては今回の測定は 5cm 角全体で数 kHz の γ 線放射により、やはり同程度のデータ取得をおこなっており、また測定データも 8 割～9 割程度が有効なデータとして得られ、測定エネルギースペクトラムにおいても光電吸収ピークとコンプトン散乱の構造がよくみられるため、今回の測定においては数 kHz(1 ピクセルあたり 50～150Hz) 程度でほとんどの光電吸収イベントを測定できたと考えられる。

エネルギー情報に関しては各ピクセル毎にエネルギースペクトラムをかくと図 4.13、図 4.14 のようになる。エネルギー分解能は典型値として 10%、良いピクセルで 9%程度、一部の悪いピクセルで 11～12%程度となっている。いずれも FWHM@662keV。

以上の結果より 8×8 の 6mm 角 GSO ピクセルと H8500 を用いた有効感度領域 49×49mm² の位置分解能型スペクトロメータは 6mm 以下の位置分解能をもち エネルギー分解能 10%(FWHM)@662keV をもつ。しかも約 52mm 角 (PMT サイズ) に納まっているため、これを組み合わせることでさらに大きな検出器が作成できると期待される。

各ピクセルにおける発光量の違い 今回作成した、5cm 角 GSO-PSA カメラにおいては図 4.15(左)のように各チャンネルにおける ADC 値ピーク@662keV がばらついている。このばらつきの原因には次の 3 つがある。

1. GSO シンチレーターの発光量の違い。

前章での測定結果において日立化成において製作されている GSO(Ce) 結晶には 10%程度の発光量の違いが同じインゴット内にもある。

2. GSO 結晶から PMT 光電面までの光輸送。

シンチレーション光は GSO 結晶から PMT 光電面までは結晶→オプティカルグリッド→PMT ガラス面→PMT 光電面という経路をとるが各プロセスにおいて光学的不良部があると収光量がへる。またアノードと GSO 結晶の間にずれがあると次項の影響が効いてくる。

3. PMT H8500 のゲインの位置依存性

H8500 には各アノードの電子増倍率のばらつきがあり、またアノードとアノードの中点付近は非常に増倍率がわるくなっている。このため、結晶の位置によって得られる電荷信号の大きさはかわってくる。

第 3 項目のアノードゲインに関しては各 PMT 毎に浜松ホトニクス社にて DC-light による測定が行われているため、図 4.15(中) これをもとに補正をおこなうことが出来る。補正を行ったものが図 4.15(右)である。用いた PMT はピクセル間で図 4.15(中) 中で左側部分のゲインが大きな傾向をしめしており、実

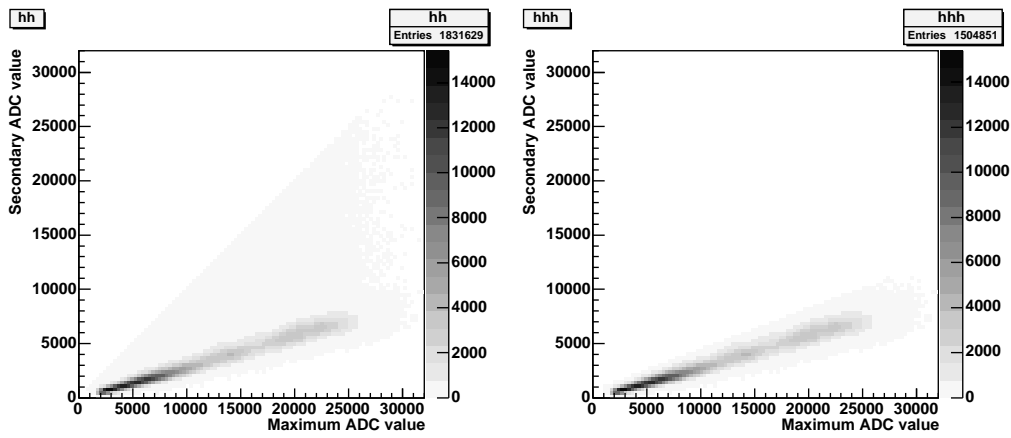


図 4.10: 16ch 抵抗チェーン 8 抵抗チェーン内の最大 ADC と二番目の ADC の関係。 左: 全イベント。 右: カットで残したイベント (^{137}Cs 照射時)

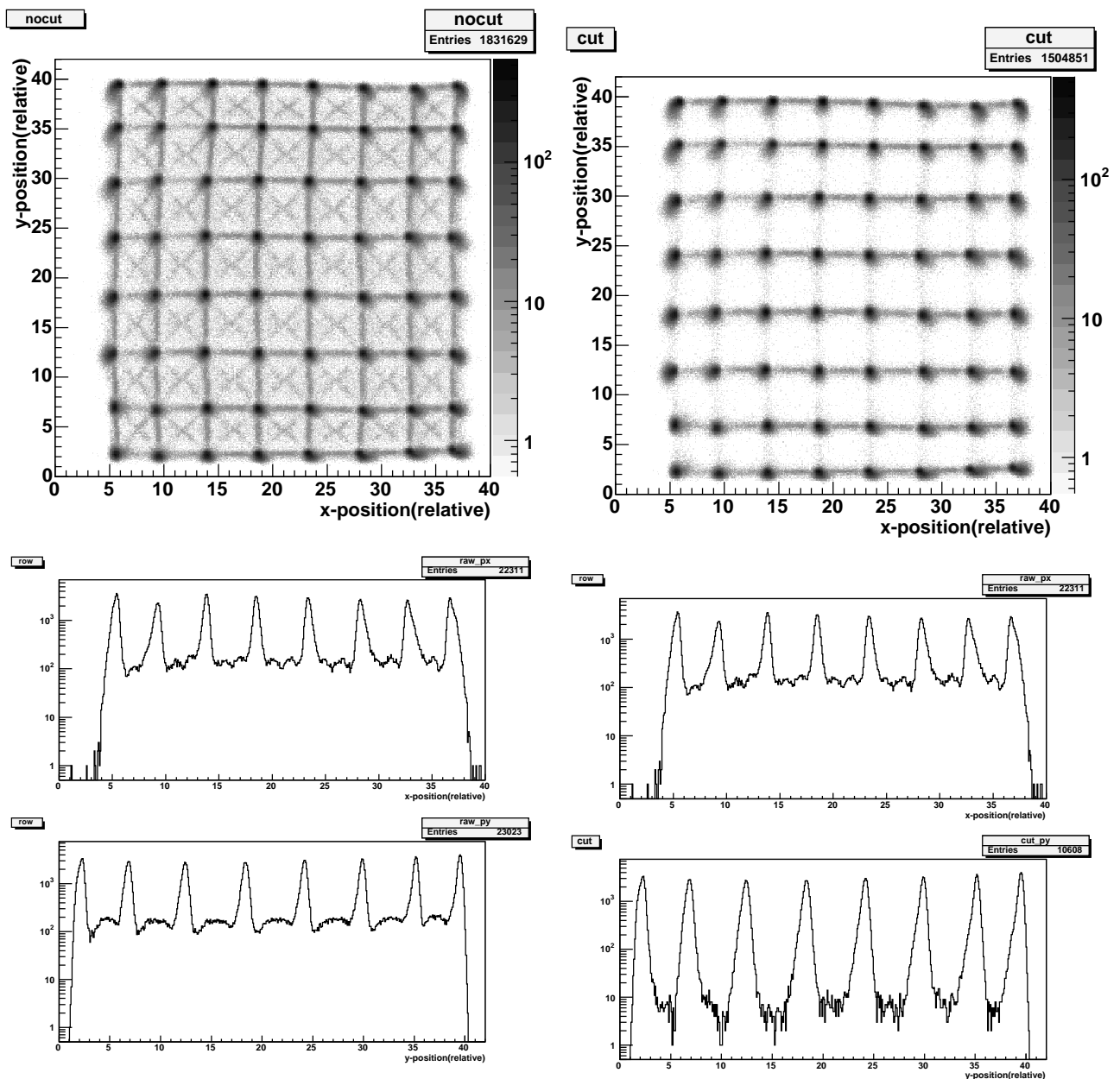


図 4.11: 上: 図 4.8 の対数表示。中央: 上から 4 行目 X 軸射影。下: 左から 4 列目 Y 軸射影

57

図 4.12: 図 4.11 に 図 4.10 のカットをかけたもの。

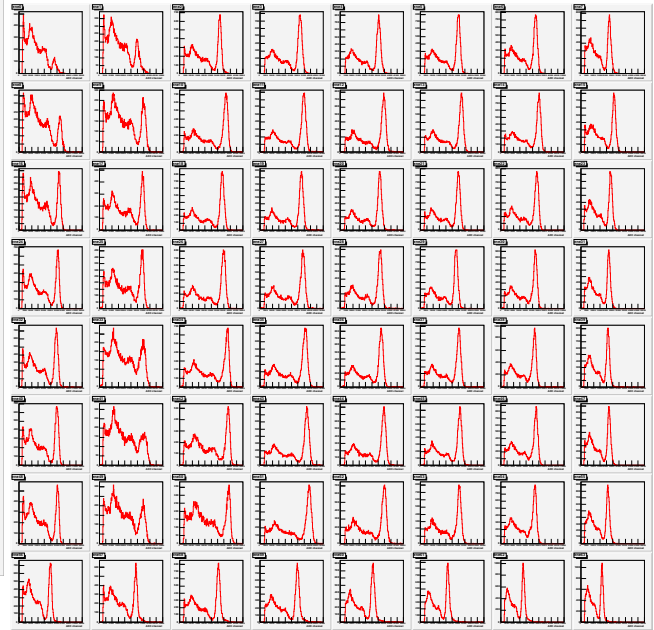
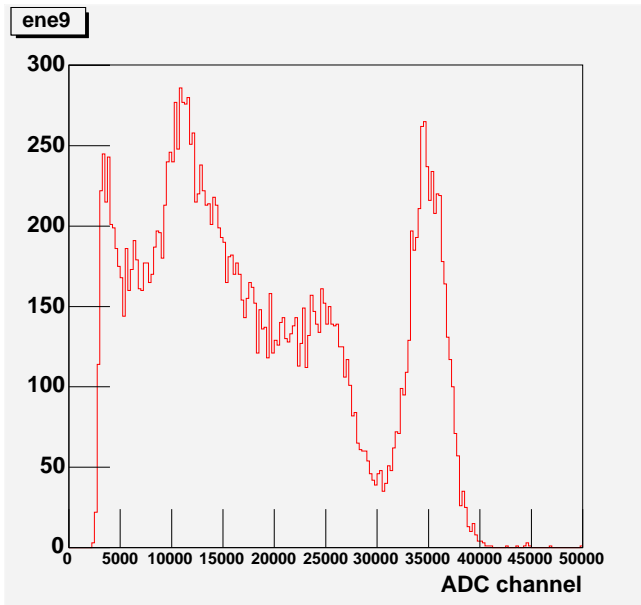


図 4.13: Cs エネルギースペクトラム 上から 2 段目
左から 3 番目のピクセルのスペクトラム
エネルギー分解能 10.5%(FWHM)@662keV

図 4.14: 64ch の Cs エネルギー スペクトラム

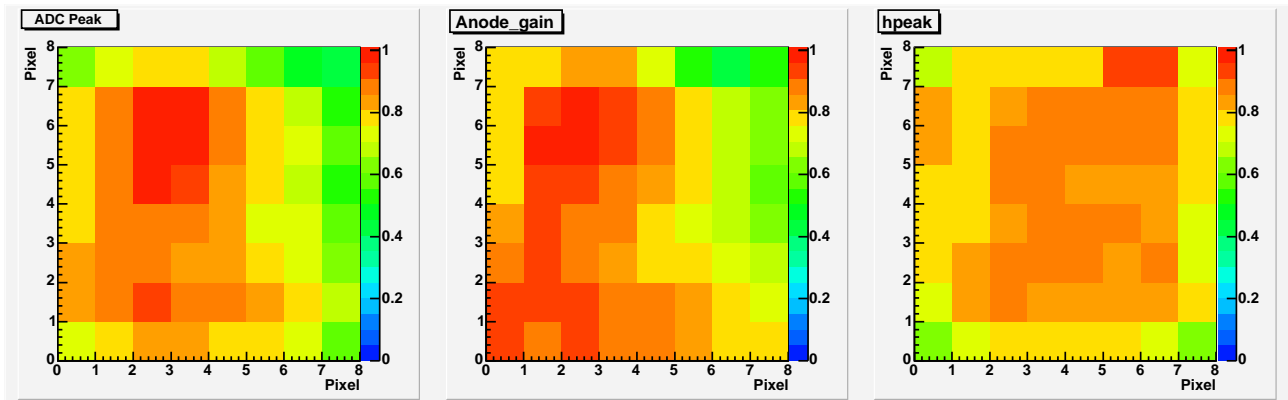


図 4.15: 5cm シンチレーションカメラ (試作) のゲイン

- (左): ^{137}Cs の 662keV γ 線に対する各ピクセルの ADC 値 (相対値)
- (中): 使用した PMT の各アノードピクセルにおけるゲイン (相対値)
- (右): 左を中で補正したもの (相対値)

験結果も左の方が大きくどちも最大値と最小値で 2.3 倍、2.5 倍の差がみられる。ここで、補正を行うとその差は 1.7 倍となる。これは結晶の個性による差よりもかなり大きい分布の様子は中央部がゲインが高く端の数点がゲインが低くなっているため、端のピクセルに特有に起こる現象に原因があると考えられる。大きな物として各所における光の広がりがある。中央部付近の結晶からのシンチレーション光は、直下のアノードに加え、少し直下からずれていても隣のピクセルに吸収されるが一番端の結晶ではアノードとのずれの方向によっては光が光電面以外で吸収される確率が高くなり光量が減っている可能性がある。また、反射材の間隙から洩れる光が外ににげてしまっている可能性もある。このような理由から結晶の外周部付近での光量が落ちてしまっている。

4.3.3 4ch による 5cm 角 6mm ピクセル GSO-PSA カメラの読みだし

また別の結晶および H8500 を用い 8 本の抵抗チェーン同士をさらに両端で結びつけた抵抗チェーン回路(図 4.5) を用いることで 4ch の読みだしを行った。図 4.16 は ^{137}Cs を照射させた際のイベントマップである。図 4.16 左は式 (4.5)、(4.6) に代入して得られる位置を表したものであり、(右) は補正計算を行ったものである。64 個のピクセルが完全に分かれているのがわかる。これにより 4ch 読みだしによっても位置分解ができることが分かる。またエネルギースペクトラムも図 4.17 のように 16ch 読みだしとあまりかわらない分解能 (10.5%) でとらえることができている。ただしダイナミックレンジが端の方で狭くなっている (PMT の HV など調節可能)。この方法を用いると 64ch のアノードを 4ch で読みだすことになりチャンネル数が 16 分の 1 になるため、電力削減ができる。

4.4 3mm 角 GSO ピクセルアレイ (PSA) + H8500

6mm 角 GSO(Ce) による H8500 による位置分解は可能であった。つぎに位置分解能を向上させるために 3mm 角の GSO ピクセルの利用の可能性をみる。まず 3mm 角 GSO-PSA(図 3.8) を H8500 にとりつけ 6mm 角 GSO-PSA と同様の測定を行った。16ch による読みだしの結果が図 4.19 である。最外周のピクセルが内側のピクセルと分離できないが、その中 14×14 個のピクセルは分離されている。6mm ピッチのアノードを用いて、3mm PSA からの光を分離できるのは H8500 の受光窓のガラスが 1.5mm 厚あるためである。シンチレーション光は光電陰極まで到達するまでに、このガラス中で広がり、いくつかのアノードに信号を出す。この光の広がりにより、H8500 は 6mm ピッチのアノードで、3mm 以下の位置分解能をもつことができる。

またエネルギー分解能も代表的なピクセルをひとつとりだすと 11%(FWHM)@662keV を得ている。(図 4.20:図 4.19 中 下から番目 左から番目の ^{137}Cs のスペクトル) この値は $3 \times 3 \times 13 \text{ mm}^3$ の単一ピクセルをシングルアノード PMT で測定した値がおよそ 10%程度であることを考えると妥当な値であるといえる。また違う 3mm 角の PSA を用いて、4ch による読みだしも行った。 ^{137}Cs からの γ 線を全面に照射したときのイベントマップが図 4.21、図 4.22、図 4.23 である。16ch 読みだしと同様 14×14 のピクセルを認識することができ、エネルギー分解能もある平均的なピクセルをとりだすとほぼ同程度の 11% ものがえられた。

以上のように 3mm 角 GSO-PSA を 6mm のアノードピッチの H8500 で読みだすことが可能である。ただし、外周のピクセルが二つつながっているためエネルギー情報が正確に得られる領域は 67%となる。

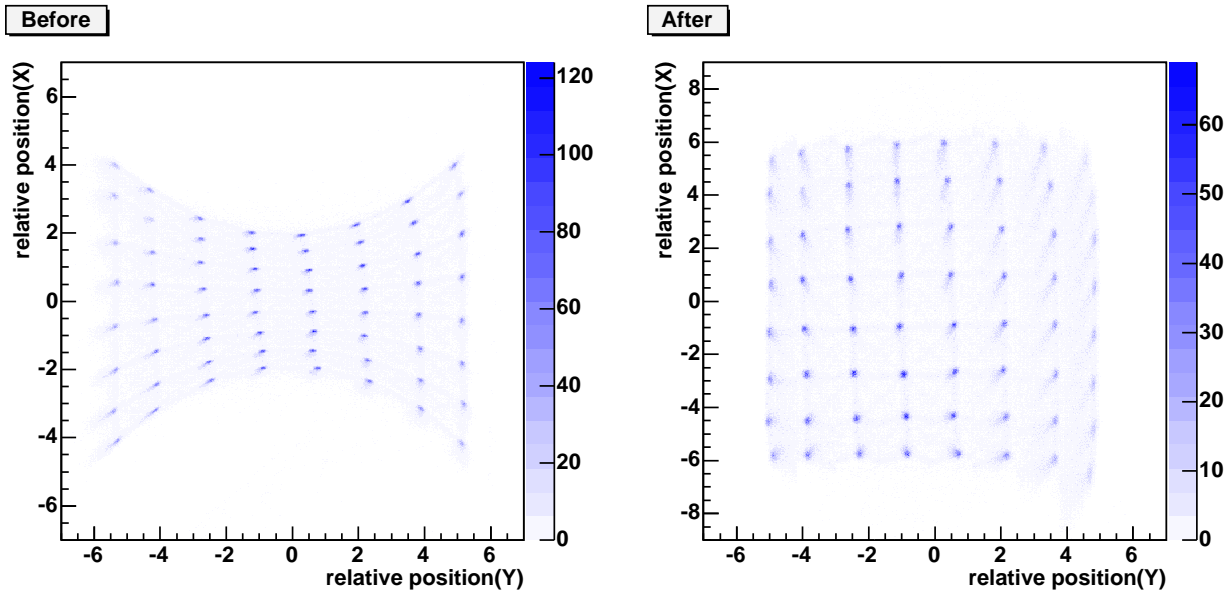


図 4.16: 5cm 角 6mm ピッチ 4ch 読みだし PSA カメラの ^{137}Cs 全面照射時のイベントマップ (左): 補正前。(右): 補正後。

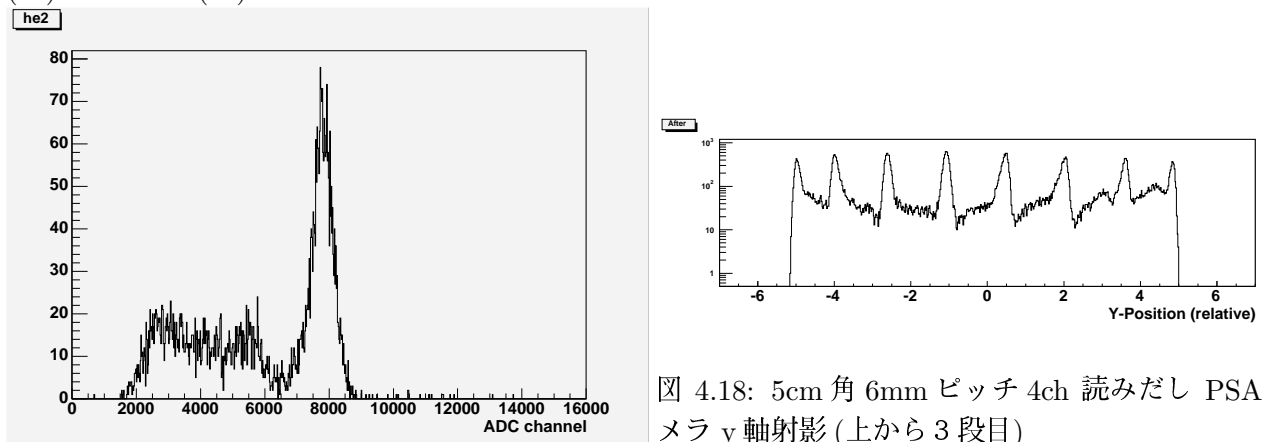


図 4.17: 5cm 角 6mm ピッチ 4ch ^{137}Cs スペクトラム (上から 2 段目左から 3 番目)

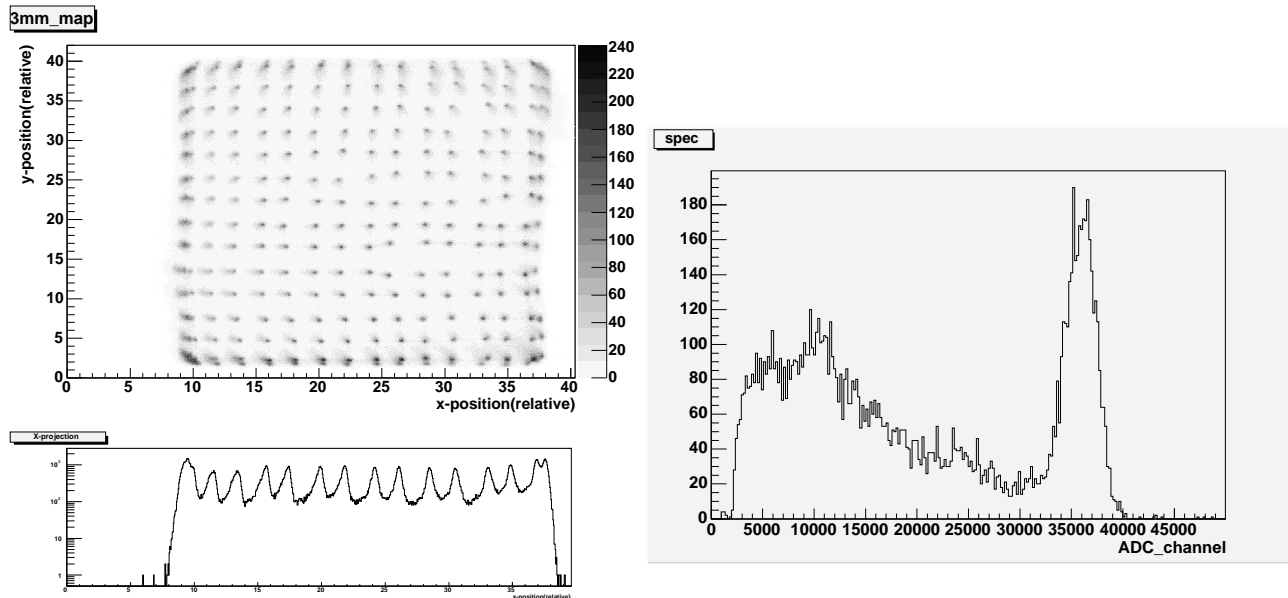


図 4.20: 3mm ピッチ 16ch 読みだしの上から 2 段目
右から 3 番目の ^{137}Cs スペクトラム

図 4.19: 5cm 角 3mm ピッチ 16ch ^{137}Cs 全面照射時のイベントマップ
(上): イベントマップ (下): 上から 5 段目における X 軸射影

4.5 大型シンチレータカメラの製作 (6mm 角 GSO(Ce)572 ピクセル)

前述の 5cm 角カメラを並べることで、位置分解能が同等で、大面積のシンチレーションカメラが製作可能である。まず有効面積を 80%以上確保するために 5cm 角 6mm ピッチ GSO-PSA を拡張した。しかし省電力という観点から、抵抗チェーンを複数の PMT にわたって結ぶことによって、より低電力化が可能となる。今回はその原理実証としてまず 6mm 角 GSO ピクセルを使用した 8ch 抵抗チェーン読みだしによる GSO-PSA カメラを製作した。このカメラでは図 4.24 のように 3 個の PMT を 8 本の抵抗チェーンにつなぎ、これを 3 セット用意した。これにより 5cm 角 GSO カメラ 9 台 (572ch) を 48ch のアナログ回路で読み出すことができる。かつ約 $16 \times 16 \text{cm}^2$ という大面積なものが作成可能である。図 4.25 が今回作成した 16cm 角 572ch の GSO シンチレータカメラの写真である。9 個の PMT を 53mm ピッチで配置し、外周部の固定部も含めると $16 \times 16 \text{cm}^2$ になっており、有効感度領域が 81%となる。

図 4.26 が $16 \times 16 \text{cm}^2$ の GSO シンチレーションカメラに 40cm 離れた点から ^{137}Cs からの γ 線を照射させたときのイベントマップである。572 個のピクセルがはっきりと分かれていることがわかる。また図 4.27 が取り出してきた代表的な点における ^{137}Cs のエネルギースペクトラムである。エネルギー分解能は悪いピクセルで 13%程度良いピクセルで 9.8%となっており、10%台のものが標準的である。図 4.28 は各点における 662keV におけるピークの ADC 値の分布である。PMT 毎のゲインのバラツキと、PMT 内でのアノードゲインのばらつきがみられる。とくに 5cm カメラの際にみられた PMT の端においてゲインが低くなっている傾向も強くみられ、これらのピクセルでエネルギー分解能が悪くなっている。またダイナミックレンジは S/N 比で決まる。とくに抵抗チェーンの端にあたるピクセルでは片端に電荷がかたよりもう一端が非常に弱くなりノイズに負けてしまう。実際は悪いピクセルで 100keV~800keV 程度、良いピクセルで 80keV~1200keV 以上のエネルギー範囲が使用可能である。

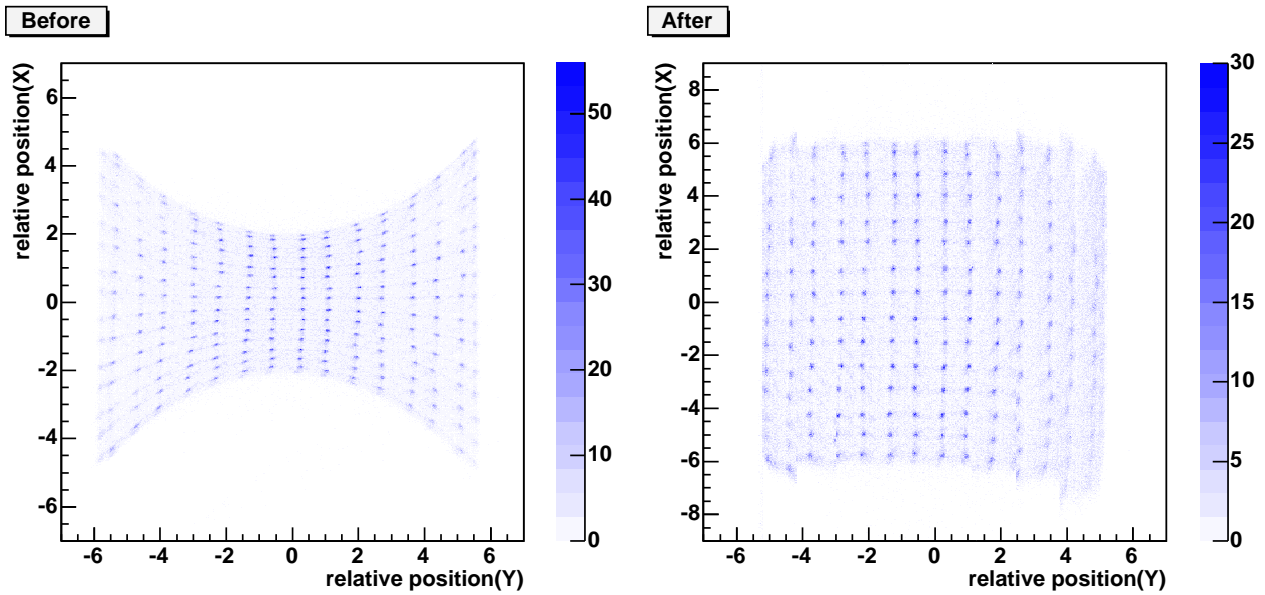


図 4.21: 5cm 角 3mm ピッチ 4ch ^{137}Cs 全面照射時のイベントマップ

(左) : 補正前。(右) : 補正後。

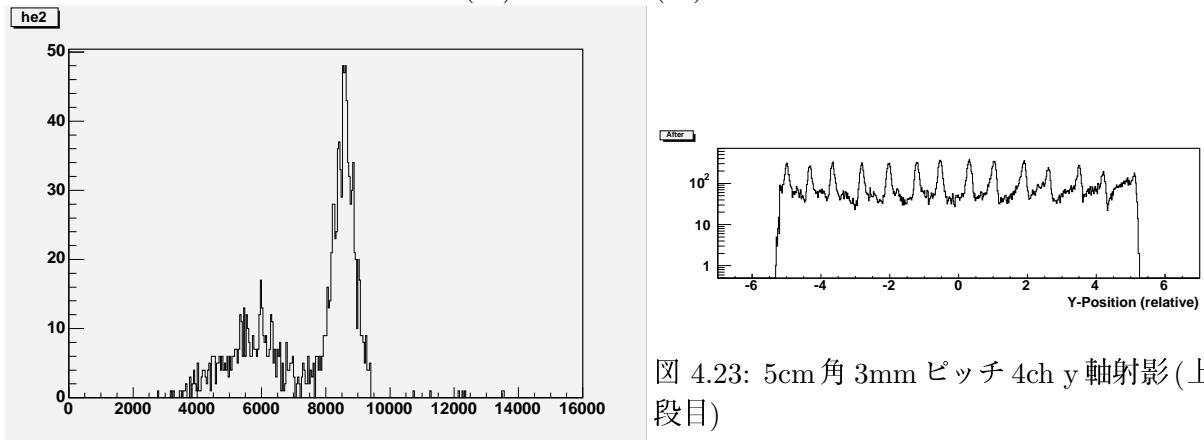


図 4.23: 5cm 角 3mm ピッチ 4ch y 軸射影 (上から 3 段目)

図 4.22: 5cm 角 3mm ピッチ 4ch 上から 2 段目右から 3 番目の ^{137}Cs スペクトラム

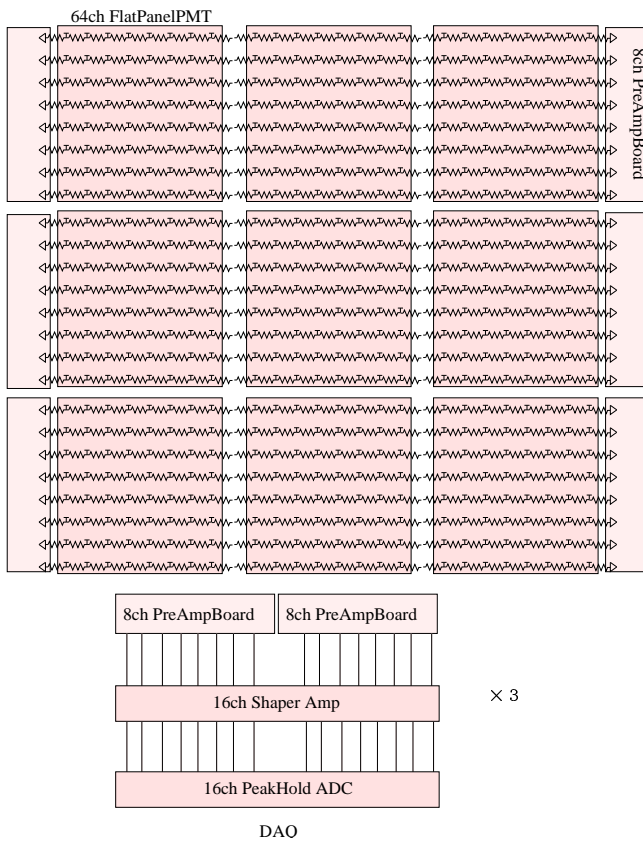


図 4.24: 複数台 PMT 抵抗チェーン読みだし



図 4.25: 写真:複数台 PMT 抵抗チェーン読みだし

このように複数の GSO(Ce) のピクセル結晶アレイをフラットパネル PMT と組み合わせることで、エネルギー分解能 10% @662 keV、位置決定精度 6mm、ダイナミックレンジ 100keV~1MeV(平均)、で 16cm 角で有効感度領域が 82%となるものの製作に成功した。この手法をもとにするとエネルギー分解能および位置分解能を維持したまま、同じ充填率でどこまでも大きな検出器が原理的に製作可能である。また電力に関しても 4ch での読みだしが可能であることが示されているので、さらなる省電力化も可能である。さらに 3mm 角結晶を利用することで、高い位置分解能をもつものにも対応可能である。

4.6 次世代型 MeV γ 線カメラへの応用

今回の研究で確立した大面積 GSO(Ce) とフラットパネル PMT を用いた大面積位置敏感型スペクトロメータの作成技術は次世代コンプトンカメラの吸収体として応用されている。まず、3つの PMT を 4ch で読み出すことで更なる低電力化がおこなわれた GSO-PSA カメラが気球搭載用次世代コンプトンカメラに組み込まれている図 4.31。気球搭載用次世代コンプトンカメラは 8×8 GSO-PSA がくっついている 3 個の PMT を 4ch で読み出す 4ch-3PMT ユニットカメラが 11 台組み込まれている。4ch-3PMT ユニットカメラは気球搭載用に低電力に設計するため 2112 個の 6mm ピッチピクセルを 44ch のアナログ回路で読み込んでいる。2112 ピクセルは完全に分離されており、またエネルギー分解能も 10%~11%(FWHM@662keV) と十分な数字を得るとともに散乱体であるガス検出部の周囲 800cm²(全立体角の約 50%) を囲いこんでおりコンプトンカメラの検出効率を確保することができている。さらに 3mm 角 GSO ピクセルのアレイを用いたシンチレーションカメラの大型化も進行している。

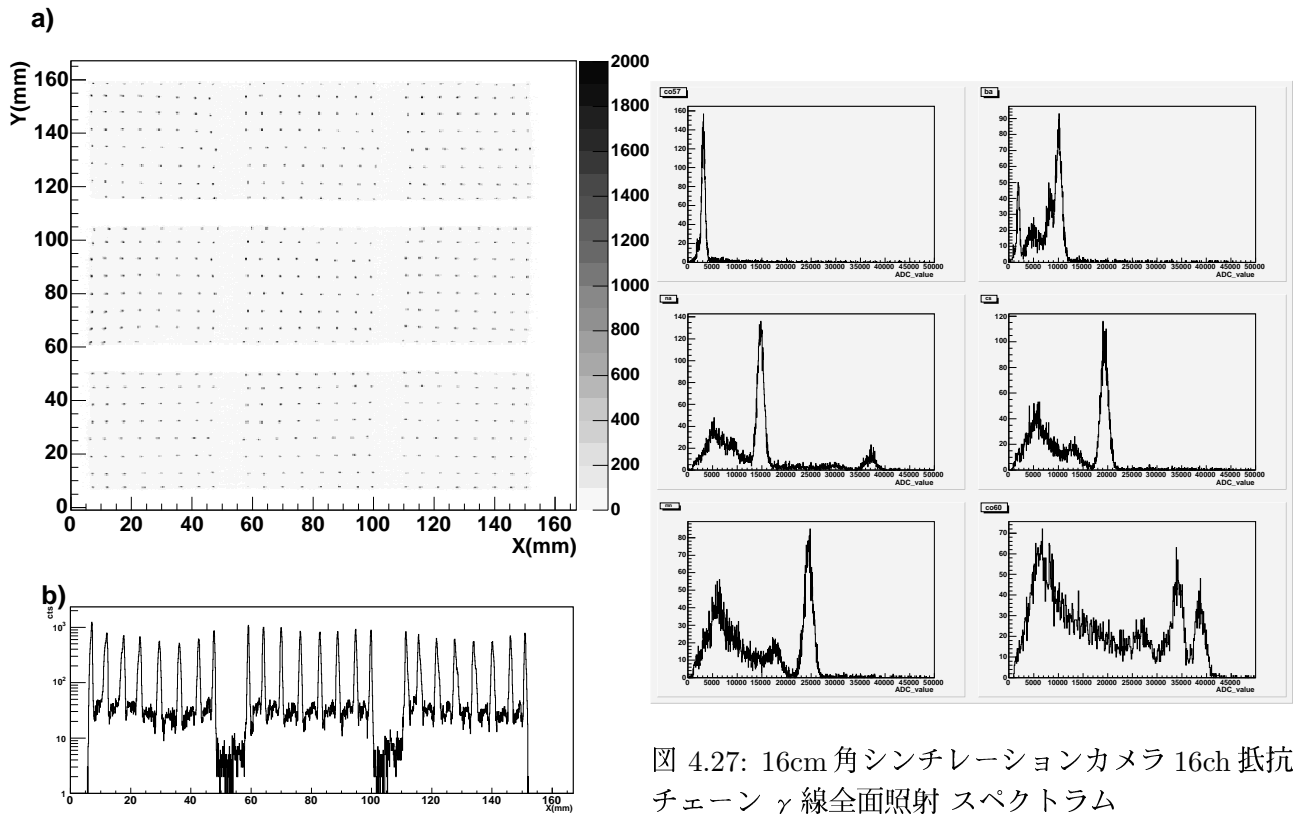


図 4.27: 16cm 角シンチレーションカメラ 16ch 抵抗チェーン γ 線全面照射 スペクトラム

図 4.26: 16cm 角シンチレーションカメラ 16ch 抵抗チェーン ^{137}Cs γ 線全面照射
 (上) イベントマップ
 (下) 下から 12 列目の X 軸射影

(左上) ^{57}Co (右上) ^{133}Ba
 (左中) ^{22}Na (右中) ^{137}Cs
 (左下) ^{54}Mn (右下) ^{56}Co

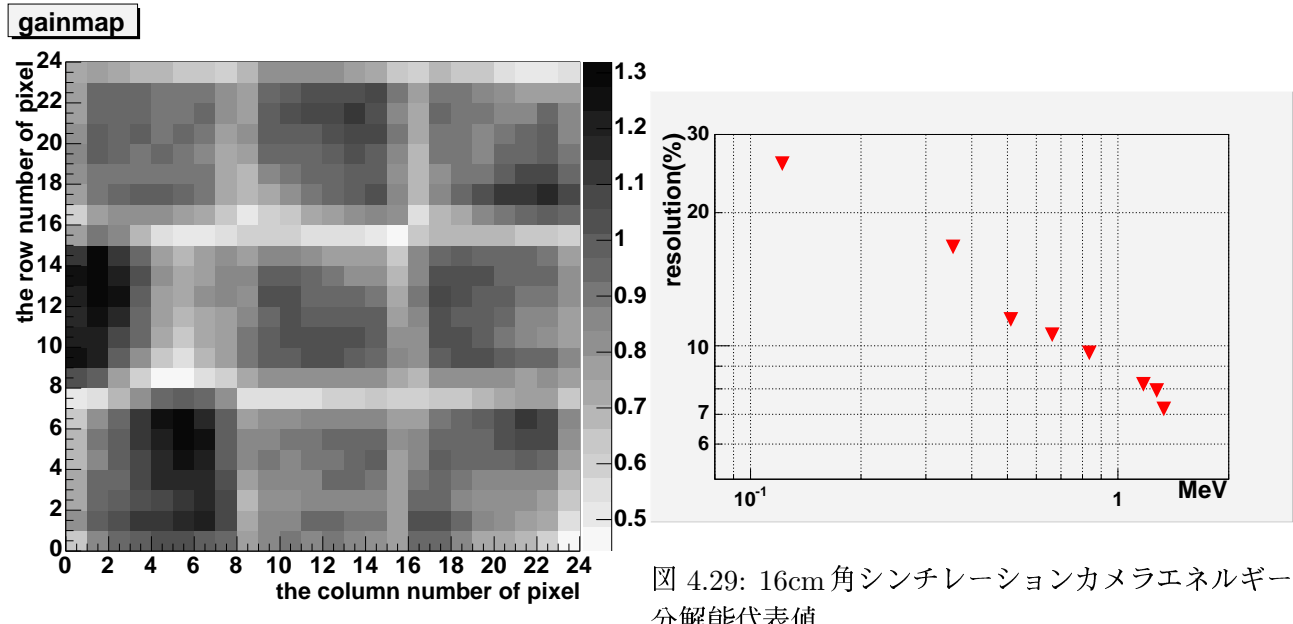


図 4.29: 16cm 角シンチレーションカメラエネルギー分解能代表値

図 4.28: 16cm 角シンチレーションカメラ 662keV ADC value 分布

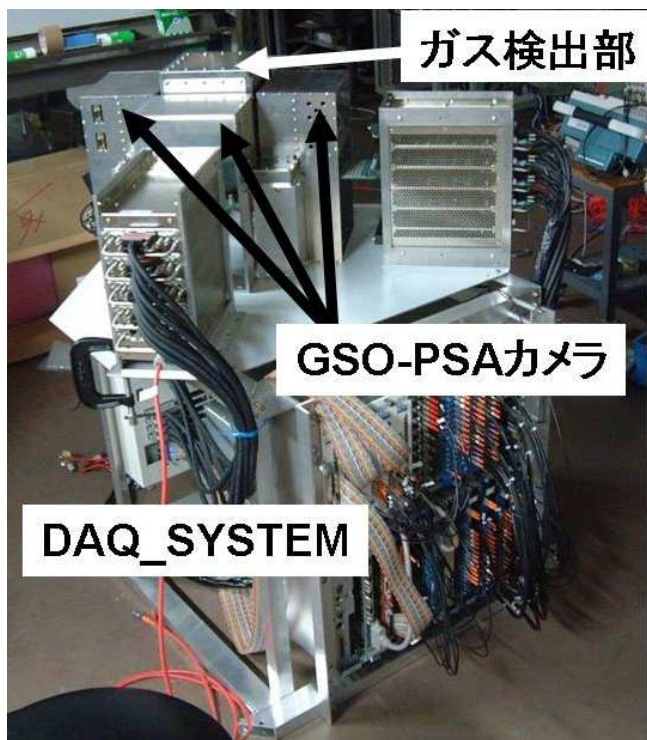


図 4.30: 気球搭載用次世代コンプトンカメラ

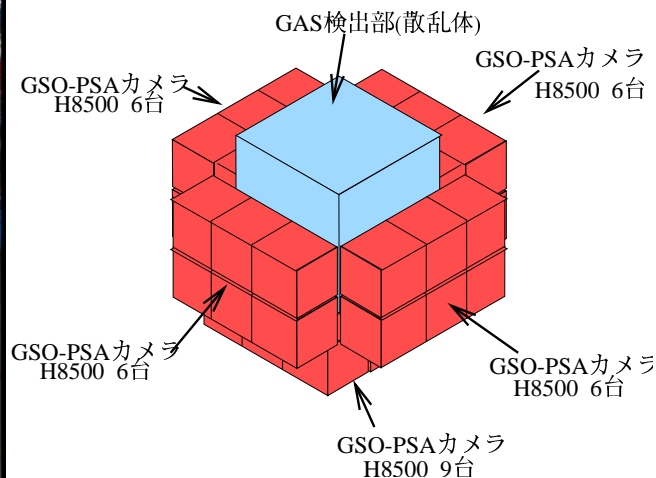


図 4.31: 気球搭載用カメラ：検出部模式図

4.7 フラットパネルPMTを用いたシンチレータカメラ開発の今後

4.7.1 位置分解能の向上およびエネルギー分解能の向上

今回開発したシステムにおいて、位置分解能は結晶のピクセルの大きさおよびアノードピッチで決定している。3 mm 結晶と 6 mm ピッチアノードをもちいた場合、3 mm の位置分解能は得られるが有効感度領域が70%を切ってしまう。しかし現在浜松ホトニクス社より H9500 という 3mm ピッチ 256ch というフラットパネル PMT が開発されており、これを用いることで 3mm ピッチでも広い有効面積を確保することができる。また更に細かいサイズの結晶によりさらに細かいものを作成できると考えられる。エネルギー分解能については結晶を細長くするほど光輸送の点で不利になりエネルギー分解能は悪くなる可能性がある。これは反射材および、結晶とのコンタクトのところの改良が必要である。GSO 結晶の欠点の一つは発光量の少なさであり、光子数の統計揺らぎによるエネルギー分解能への寄与が大きい。このため近年では GSO と LSO を組み合わせ発光量をふやし、密度を高くした LGSO など開発されている。またその他発光量が非常に多い La 系のシンチレータの利用やタングステン系の高密度のシンチレータの利用により薄くても γ 線に対する断面積の大きなものの作成なども考えられる。とくに La 系のシンチレータでは 3%(FWHM) @662 keV 程度のエネルギー分解能が報告されており、大きな可能性を秘めている。放射線耐性や価格などを考慮すると現在のところ GSO(Ce) が宇宙環境での使用は依然有力であるため、この点に関する各種開発が必要である。

4.7.2 アナログ集積回路を用いた低電力化、高性能化

今回のシステムでは抵抗チェーンを用いることで、省チャンネル化を実現したが、その後ろの回路が通常のアナログ回路であるために非常に電力消費量が多い。また抵抗チェーン内部でのアノード信号の分布などの情報が失われる (PMT 毎の分布はダイノードアウトより取得可能。) ためコンプトン散乱

や偶発事象におけるマルチヒットイベントにたいして、十分な対処が出来ず、誤った位置情報を返してしまう。これに対しイベント毎に全アノードチャンネルの情報が残っているとイベントセレクションを行うことができより精度が高い位置分解能をあたえる。またエネルギー情報についても各ピクセルごとにばらついているゲインを足し合わせる前に補正を行うことが出来るためより正確にすることができる。

そこで現在クリアパルス社がおこなっている VA チップの H8500 用への最適化による低電力化および全チャンネル読みだしが望まれる (AppedixA.4 参照)

第III部

大面積半導体光デバイス:PDAとCsI(Tl)を用いた γ 線カメラ開発

大面積半導体デバイス：PDA と CsI(Tl) を用いた γ 線カメラ開発

Section 1.2.3 のべたようにコンプトンカメラの γ 線検出効率は、散乱 γ 線の検出効率、つまり吸収体のシンチレータカメラの有効検出面積に比例する。このため、散乱体(ガス検出部)に応じた大きさのものが必要となる。とくに、天体観測用 50cm 次世代コンプトンカメラでは $50 \times 50\text{cm}^2$ 程度シンチレータカメラが必要となる。

一方で γ 線天体観測は人工衛星など飛翔体上で行う必要があり、このため消費電力に強い制限がかかる。エネルギー分解能を確保するためには光デバイスの面積も同サイズぐらいに引き上げる必要があるため、単位面積あたりに光デバイスが消費する電力の抑制は不可欠である。

たとえば前章で利用した光電子増倍管 H8500 はデバイス電流のために 1 個あたり平均 0.1W 程度の電力を消費する。50cm 角立方体の下半分に配置すると、として合計 $7500\text{cm}^2=300$ 個の H8500 が必要になる。このため読みだし回路を除いたところで、30W の電力が必要になる。現在運用されている「すざく」衛星が駆動装置を含めた衛星全体で 500W であることを考えると非常に大きな量である。

半導体光デバイスは光電子増倍管などに比べ、高電圧を必要としないため格段に電力消費量が少なくすることができる。また CsI(Tl) と Si 半導体の組合せは量子効率が非常に高く、光電子収集率が非常に高いため、良いエネルギー分解能を得ることが出来る。とくに PIN 型 Si 素子を用いることで、常温でも低ノイズで数 cm^2 の大きさをもつものが製作可能となっている。

そこで、我々の研究室では Si PIN 半導体検出器を光デバイスとして用いたシンチレーションカメラの開発を行ってきた。次の 2 章では当研究室が開発している大面積 PIN Photodiode Array (以下 PIN PDA) の性能評価とシンチレータアレイ取り付けによるシンチレーション光読みだし試験、および性能評価について紹介する。

第5章 400chPIN型 Photodiode Array(PDA)の性能評価

ガンマカメラのシンチレーション光読みだしデバイスとして有力な Photodiode Array(PDA) は前述のような長所があるものの素子作成の段階で大型化に制約がかかっており、従来までは $5\times 5\text{cm}^2$ 程度のものしか作成されず、大面積・多チャンネルの製造は行われてこなかった。このため、数10cmクラスの光にたいする検出器を作成しようとする、アレイ間の不感領域が大きくなり、広い有効面積を確保することができない。そこで、当研究室では浜松ホトニクス社と共同で、5mmピッチで400枚電極が付いている $10\times 10\text{cm}^2$ の大面積PIN型Siフォトダイオードアレイを製作した(図5.1)。

この章では製作した400chPIN PDAの紹介及び、性能評価について述べる。

5.1 仕様

外寸	110.0×110.0mm ²
素子数	20 × 20
素子サイズ	4.5×4.5mm ²
素子間	0.5mm
素子厚さ	0.3mm
マウント基板	2.8mm
sensitive area	8100mm ² /12100mm ² (外寸)
暗電流	Max 4nA Typ 1nA
端子間容量	Max 20pF Typ 12pF
読みだしコネクタ	KX14-140K2D1 日本航空電子

表 5.1: 400ch PIN PDA

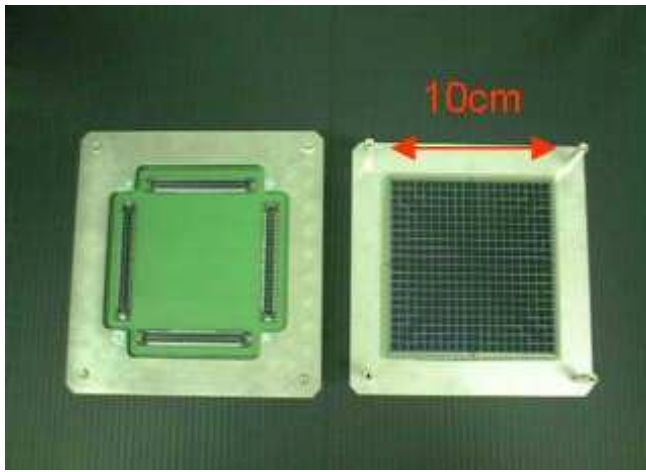


図 5.1: 400ch PDA 写真 左:裏面(コネクタ面) 右:受光面

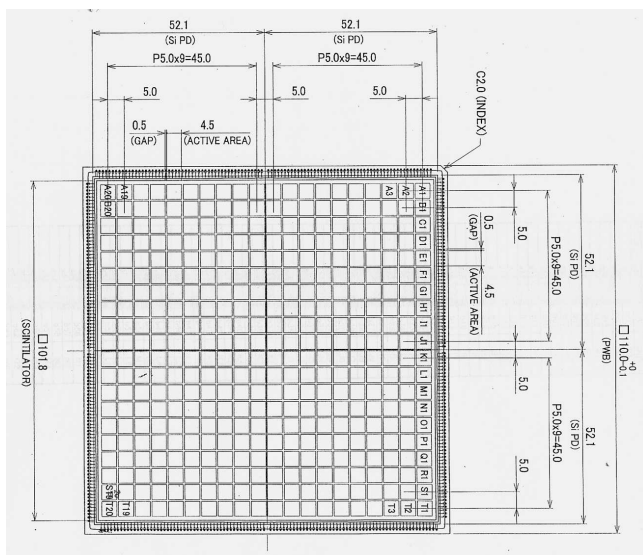


図 5.2: 400ch PIN PDA 図面

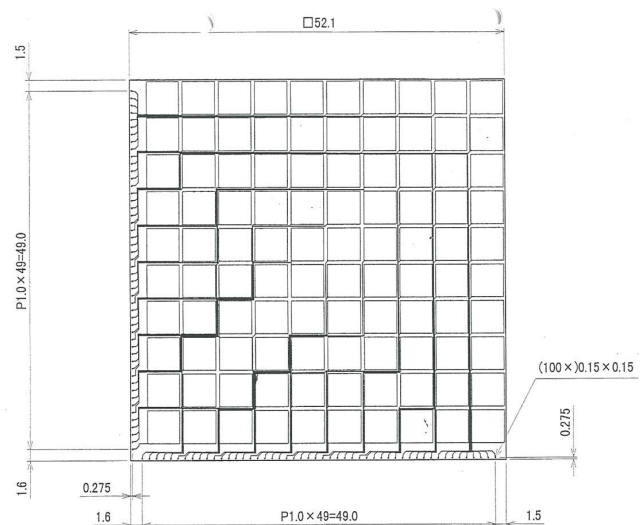


図 5.3: 400ch PIN PDA 配線図 (100ch 分)

表 5.1 が今回製作した 400chPIN 型 PDA の仕様である。すでに商品化している PIN 型ダイオード S3590-08(受光面積 $10 \times 10 \text{mm}^2$) をベースにした 4.5mm 角素子が 5mm ピッチで 10×10 個が $5 \times 5 \text{cm}^2$ に配置されたチップを作成した。量子効率は図 5.4 のように CsI(Tl) の波長域で約 90% を達成している。このチップは各ピクセルにおける電極をピクセル間に配線することでチップの二辺に出している(図 5.3)。この $5 \times 5 \text{cm}^2$ のチップを 4 枚つなげることにより、4.5mm 角素子が $20 \times 20 (5 \times 5 \text{cm}^2)$ 個配置された $10 \times 10 \text{cm}^2$ を作成した(図 5.2)。またこの PDA をアレイ化したさいの不感スペースを小さくするため、読みだしコネクタは素子面の裏側に配置してある(図 5.1 左)。

今回、浜松ホトニクス社にて製作された不良ピクセルのない 8 枚の $5 \times 5 \text{cm}^2$ の良品チップうちの 4 枚によりシンチレータ取り付け用の PDA(ID: PDA sci) を製作した。また残りの 4 枚と 10 個程の不良ピクセルを含む $5 \times 5 \text{cm}^2$ チップを 4 枚加えることで約 380 ピクセルが良品のピクセルである 10cm 角 PDA を各種試験用に 2 枚(ID: PDA1789、PDA2250) 製作し、今回の性能評価に用いた。(不良ピクセルとは端子間容量およびリーク電流が仕様値を上回っているピクセルである。)

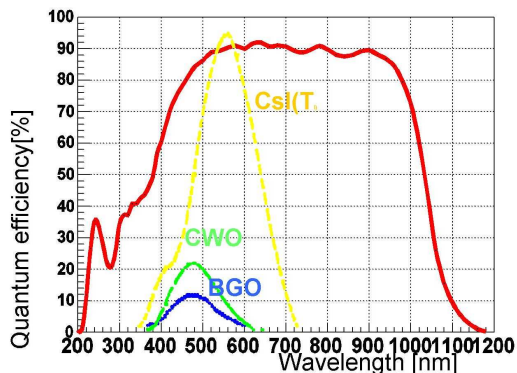


図 5.4: PDA の量子効率

5.2 PIN 型 PDA の電気試験による性能評価

PIN 型 PDA(PhotoDiodeArray) をはじめ、半導体検出器において検出器性能を決定するのはノイズである。半導体検出器における S/N 比は用いる電子回路 (Charge Sensitive Amp)、素子温度、リーク電流、電気容量で決定するため、素子のリーク電流や電気容量などの電気的性質をチェックすることで検出器のノイズレベルの目安を調べることが出来る。

この節では作成した 400chPDA の電気的特性を浜松ホトニクスによる試験結果により確認する。

5.2.1 半導体検出器の電気的特性とノイズ

半導体検出器のような小さな信号を読み出すには CSA(Charge Sensitive Amp, 電荷敏感型増幅器) を使用する。CSA(Charge Sensitive Amp) を用い信号増幅するときの S/N 比は CSA 内部の電気容量値・抵抗値および CSA に接続している検出器の入力容量値・抵抗値・暗電流値により決定する。半導体検出器における等価電荷雑音は式 (5.1) で表される。

$$Q_{rms}^2 [C^2] = 1.253 \left(\frac{2kT}{R_p} + 2eI \right) \tau + 1.253 (2kTR_s C^2) \frac{1}{\tau} \quad (5.1)$$

ここで Q_{rms} はノイズによる電荷量揺らぎ、 T :温度、 k :ボルツマン定数、 R_p :等価並列抵抗、 R_s :等価直列抵抗、 I :半導体暗電流、 C^2 :等価入力容量、 τ がshaping time である (AppendixA.1 参照)。(上式以外にいくつかのノイズ要素が計算できるが、今回の実験においては無視できるぐらい微量である。) 式 (5.1) より半導体検出器のキャパシター値及び暗電流値が検出器のノイズに大きな影響をあたえることがわかる。通常素子の大きさが大きくなるほど、電気容量および暗電流ともに増大するため従来の P 型や N 型半導体では、大面積化をおこなうと冷却してノイズをおさえて使用する必要があり、大面積のものがなかなか実用化しなかった。しかし PIN 型半導体のように空乏層厚を広くすることがで、電荷容量、暗電流を抑えたまま大面積のものが常温での利用が可能となっている。

この式 (5.1) で回路におけるノイズを定量的に見積もることができるので、端子間容量、およびリーク電流を調べることで、素子の電気ノイズに対する性能見積もることが出来る。

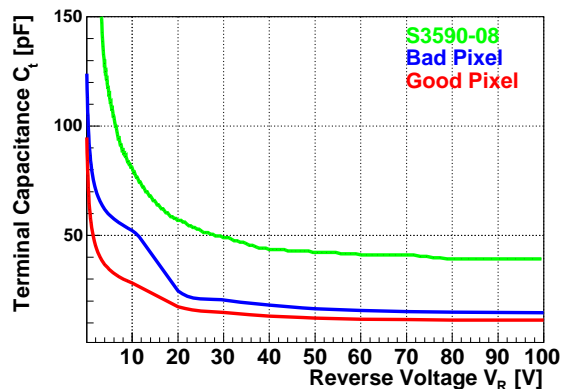


図 5.5: バイアス電圧 vs 電荷容量

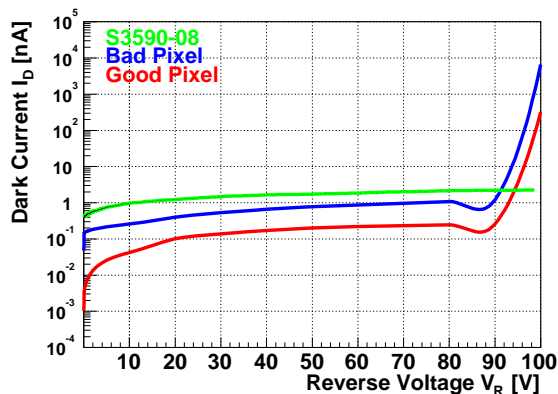


図 5.6: バイアス電圧 vs 暗電流

5.2.2 400chPDA 中のピクセルの電気的特性

以下の素子における電荷容量およびリーク電流のデータは浜松ホトニクス社における試験の結果である。

図 5.5. と図 5.6 は今回作成した 400chPDA の代表的な素子の端子間の逆バイアス電圧と電荷容量、リーク電流のそれぞれの関係である。バイアス電圧をかけることにより、空乏層がひろがり、電荷容量が小さくなっているのが分かる。そして 50V 付近で完全空乏層化していると思われる。またリーク電流もバイアス電圧が 80V あたりまで、ほぼ低水準で一定であるため、50V~80V 程度のバイアス電圧で低ノイズで動作することが期待される。S3590-08 よりも容量、リーク電流ともに値が小さいのは面積が小さいためである。

また今回試作した 400ch PDA(1789, 2520, sci) の印加逆バイアス電圧が 70V のときの各ピクセル間端子電荷容量を測定した結果が図 5.7, 図 5.8, 図 5.9, である。各ピクセル位置の電荷容量をカラーマップで示しているが、3 枚の PDA いずれも共通して X のような形でやや悪いところが広がっているがこれは読みだしパターンの距離によるものと思われる。同様の環境でリーク電流を測定したものが図 5.10, 図 5.11, 図 5.12 である。リーク電流は十字型にやや悪いピクセルが存在するが、これは PDA チップを 400ch に組み上げる際に生じる、チップ壁面間の絶縁距離が短くなるためである。しかし、図中の赤いピクセル以外は仕様で決められている値より小さいため、この素子により発生するノイズは、光検出には重大な影響は及ぼさないとと思われる。

5.3 400ch Si PIN PDA アレイの X 線照射における性能評価

前節における電気的特性の議論において、PDA アレイを構成している素子は十分低ノイズであることが予想される。次に京都大学において、半導体素子中で生成される電子・正孔対ををよみだし、得られた S/N 比と電気的特性より期待される S/N 比との比較を行った。

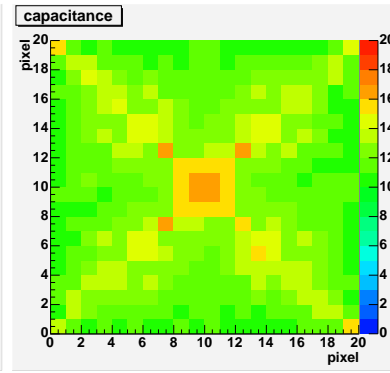
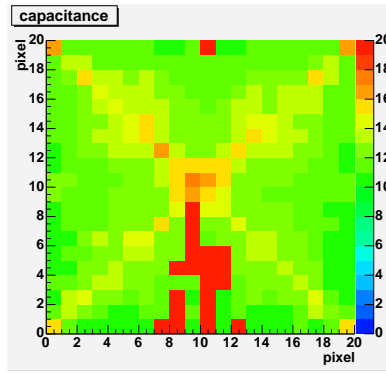
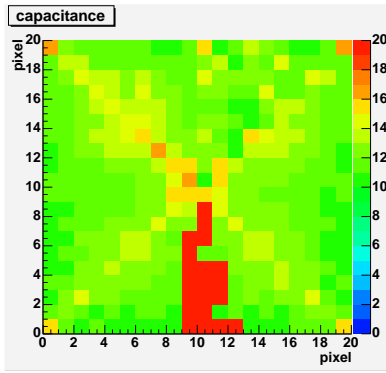


図 5.7: PDA1789 端子間容量分布 カラーマップ (pF)

図 5.8: PDA2520 端子間容量分布 カラーマップ (pF)

図 5.9: PDA sci 端子間容量分布 カラーマップ (pF)

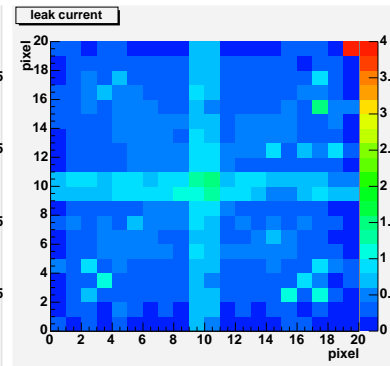
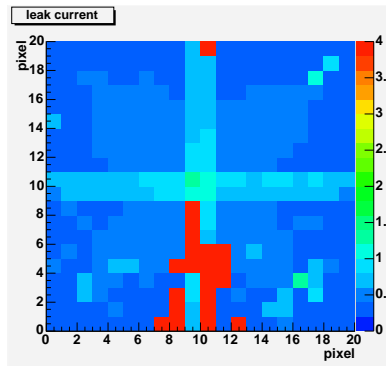
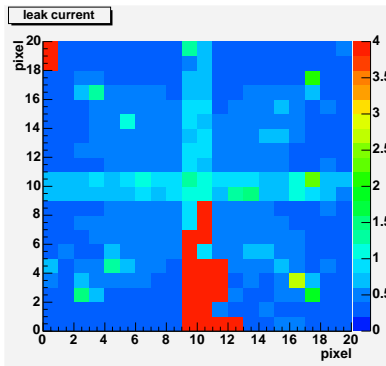


図 5.10: PDA1789 リーク電流分布 カラーマップ (nA)

図 5.11: PDA2520 リーク電流分布 カラーマップ (nA)

図 5.12: PDA sci リーク電流分布 カラーマップ (nA)

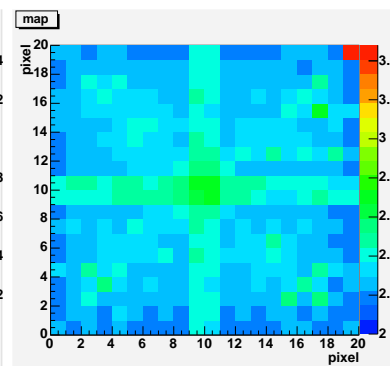
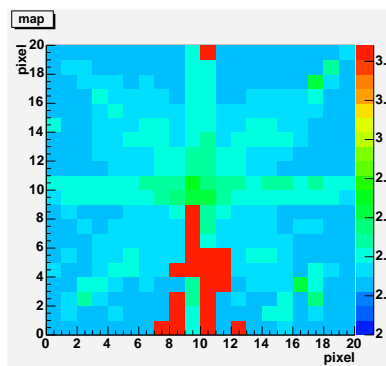
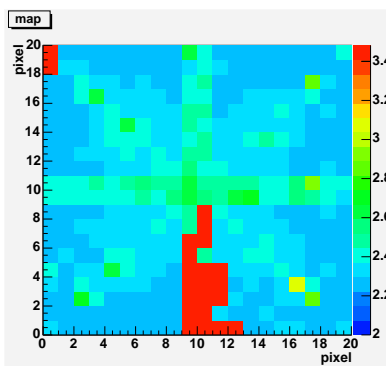


図 5.13: PDA1789 ノイズ下限予想値 カラーマップ (keV)

図 5.14: PDA2520 ノイズ下限予想値 カラーマップ (keV)

図 5.15: PDA sci ノイズ下限予想値 カラーマップ (keV)

素子中での電子・正孔対の生成には可視光のかわりに標準線源からの硬 X 線・ γ 線を用いた。Si の平均イオン化エネルギーは 3.65eV であるため、数十 keV の X 線に対して $\sim 10^6$ の電子・正孔対が生成する。この電子・正孔対を CSA 回路で読みだし、硬 X 線・ γ 線のエネルギー分解能を評価することで信号生成の確認および読みだし信号の S/N を評価することが出来る。とくにシンチレーション光の発光光子数が sub-MeV γ 線に対して $\sim 10^6$ 程度なので、シンチレーション光デバイスの S/N の評価としては最適である。

5.3.1 set up

X 線・ γ 線を用いた素子の性能評価は以下のような set up で行った。図 5.16 が今回使用した DAQ

初段帰還定数	0.5pF 5000M Ω
初段減衰時定数	2.5ms
電荷電圧変換係数	-2V/pC
微分回路時定数	50 μ s
等価雑音	1.25keV
雑音勾配	20eV/pF(Si 等価)
バイアス抵抗	1000M Ω
カップリング容量	6800pF

表 5.2: 電荷敏感型増幅器
5005H 仕様

Set up である。PIN PDA を外部ノイズから遮断するため、ステンレス製の箱に収め BNC コネクターを通し Charge Sensitive Amp 5005H(クリアパルス社製表 5.2) に接続した。5005H と PDA は恒温槽の中にいれ、一定温度 (25 度) の測定が可能となるようにした。5005H からの増幅シグナルは Ortec 社製 Shaping Amp 571 で波形整形した後、豊伸製の VME PHADC で デジタル化を行い Sun microsystems 社製 VME CPU frc54t で データ取得を行った。

照射 X 線源としては ^{241}Am 標準を利用した。 ^{241}Am は α 壊変方式で崩壊し、半減期は 432.2 年である。5MeV \sim 6MeV の α 線と 26.4keV、59.5keV の γ 線及び 11keV、13.9keV(L_α)、17.8keV(L_β)、20.8keV(L_γ) の 4 本の特性 X 線を放射している。今回の実験で用いた線源はプラスチックコーティングにより α 線は放出されないようになっている。この線源により 10keV \sim 60keV の各 photon のみを照射出来る。 ^{241}Am 標準密封 X 線源を PDA 素子面より約 5cm 離れたところに設置し測定を行った。

5.3.2 PDA 評価用 Setup におけるノイズ

今回の測定 setup において式 5.1 のパラメーター値 R_s 、 R_d 、 C 、 I は

$$R_p = 8.33 \times 10^8 / e[eV/A]$$

$$R_s = 1.75 \times 10 / e[eV/A]$$

$$I = I_{detector}$$

$$C = C_{detector} + C_{PreAmp} + C_{else}$$

$$C_{PreAmp} + C_{else} = 110pF$$

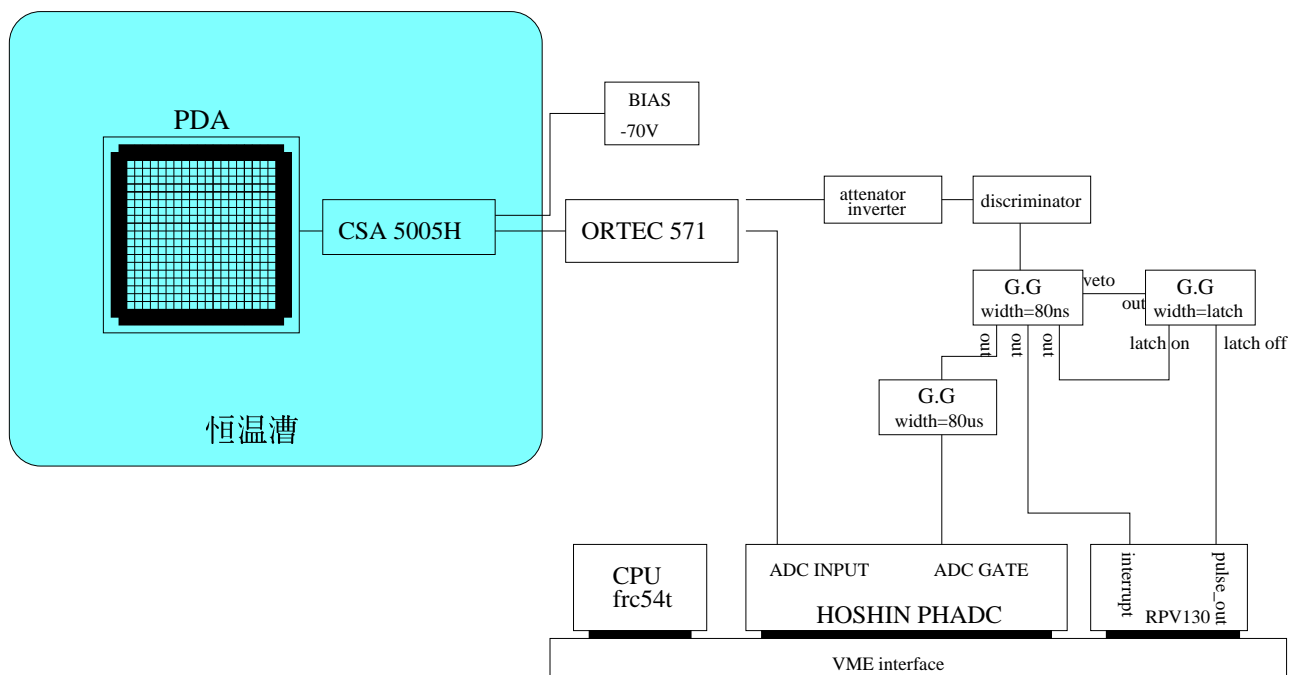


図 5.16: PDA 評価用 DAQ

となっている。これらを代入し、shaping time を決めることで最低限のノイズの大きさおよび分解能への影響をあらかじめ見積もることができる。shaping time は PDA の典型的な電気的特性 $I_{detector} = 0.2\text{nA}$ 、 $C_{detector} = 10\text{pF}$ 、 $T=298\text{K}$ を代入することで τ :shaping time と Q :ノイズの関係が得られる。この関係を表したグラフが図 5.17 である。ちなみに R_p および R_s 、 $C_{PreAmp}=70[\text{pF}]$ は使用した CSA によって見積もられ、 C_{else} : 浮遊容量は中継基板 (0.3~2cm) および接続ピン、中継用同軸ケーブル (1cm)、CSA アンプ入力部 BNC コネクタなど各 10pF 程度を見積もって計算している。

図 5.17 中の縦軸は Si 等価エネルギー分解能 FWHM(keV) で、ノイズの電荷揺らぎを、Si 中で生成される電荷量に対応する X 線エネルギーで表している。(つまり Si の X 線検出器としてのエネルギー分解能に換算している。) これよりこの PDA + CSA の set up においては shaping time は $2\sim 3\mu\text{s}$ とすることでノイズの最小値をとることが予想される。使用した ortec 571 は (0.5、1、2、3、 $10\mu\text{s}$) の 5 段階の設定値であるため今回は shaping time は $3\mu\text{s}$ とした (shaping time とエネルギー分解能 (ノイズ) の関係の実測値については AppendixA.2)。

そして、shaping time を $3\mu\text{s}$ としたときの各ピクセルにおけるノイズが各ピクセルの電気的特性値 (電気容量およびリーク電流) から求められる。その結果が図 5.13、図 5.14、図 5.15 である。カラスケールは Si 等価ノイズ FWHM(keV) で表しており、電気容量の大きなところおよびリーク電流の大きなところがノイズが多いと予想される。しかしその大きさは Si 等価ノイズで 3keV 程度で、硬 X 線検出に利用できるレベルである。

ただしこの計算には読みだし口付近の浮遊容量、外部からのノイズ、フィルター回路の性能などが正確に考慮されていないため、実際のノイズをすべてふくんでいるわけではない。このため、実際に X 線スペクトル測定を行うことにより計算による理想的ノイズ値と実際のノイズ値の比較をおこなう。

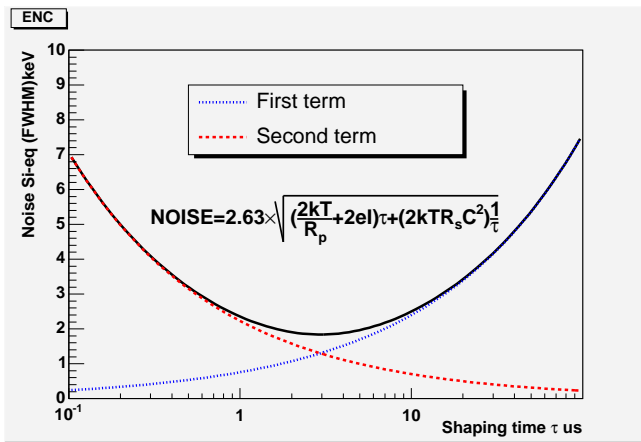


図 5.17: Shaping time vs. Circuit Noise
 青線が平方根内第一項 暗電流の影響。
 赤線が平方根内第二項 電荷容量の影響。

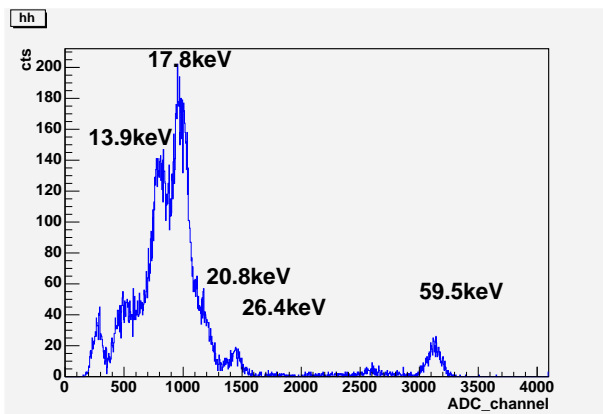


図 5.18: PDA2520 9-11 ピクセル ^{241}Am スペクトル

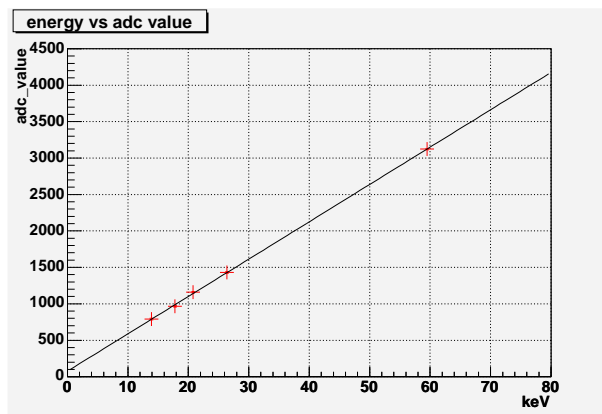


図 5.19: X-ray energy vs. adc value

5.3.3 X線スペクトル測定結果

上記セットアップにおいて恒温槽内を 25 度に保ち評価用 PDA ID 2520 の中の (9-11 (y 方向 9 番目 x 方向 11 番目)) ピクセルを測定したスペクトルが fig.5.18 である。 ^{241}Am から放射されている 13keV～20keV の特性 X 線と 26.4keV と 59.5keV の γ 線が確認出来る。またこのスペクトルよりレスポンスの線形性も確認され、エネルギー分解能も 2.8keV (Si 等価 FWHM @ 59.5keV) が得られた。このピクセルにおいて電気特性より計算される理想的ノイズの大きさは fig.5.13 より 2.5keV であり、また電荷数の統計ゆらぎは 59.5keV で 0.34keV となるので (ファノファクター=0.1 を仮定)、予想される分解能の理想値は 2.52keV となり、実験値とは矛盾しない。

13keV 以下のスペクトルが切れているのは評価版 (ID2520) に施されているガラスコーティングと空気による吸収のためで、また 59.5keV のピークが 20keV あたりの特性 X 線に比べて小さいのは、素子がうすく断面積が小さいためである。

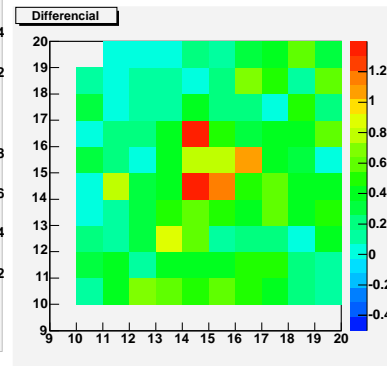
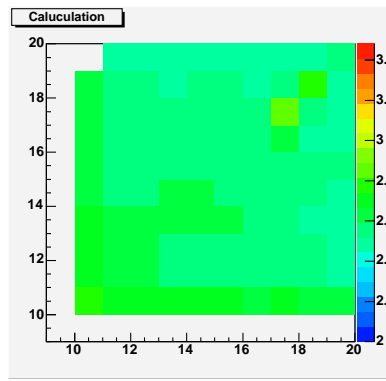
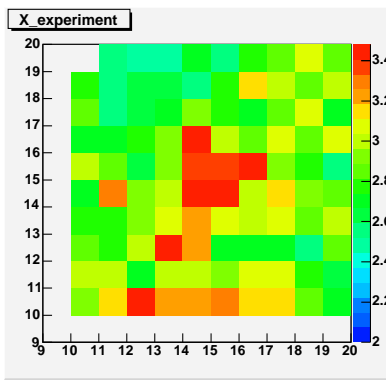


図 5.20: エネルギー分解能実験値 カラーマップは Si 等価 FWHM(keV)@59.5keV

図 5.21: 回路ノイズ(予想値) + 統計揺らぎ

図 5.22: 差

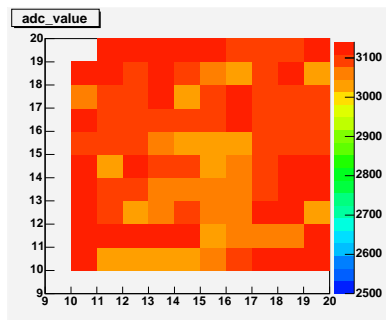
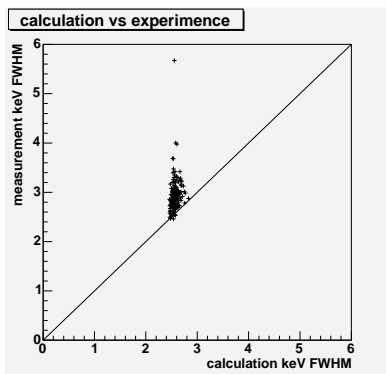


図 5.23: エネルギー分解能の計算子測値と実測値@59.5keV

図 5.24: 59.5keV ピークの ADC 値分布

5.3.4 PDA 素子の電気的性質と実験値の比較

この X 線によるスペクトル測定を PDA2520 の RED ゾーンのない図 5.14 の右上の 1/4 の領域 100ch においておこなった。図 5.20 が各ピクセルにおける、エネルギー分解能である。図 5.21 の統計揺らぎを含めた計算結果と比べたものが図 5.22 と図 5.23 である。

実験値と理想値がほぼ一致しているピクセルがある一方で図の中央部付近で、実験値ノイズが理想値ノイズよりも多くなっている。これは理想値の計算に含まれていない PDA コネクターと CSA 間の接続部における浮遊容量の見積りに問題があると思われる。しかしおおむね分解能が 4keV(Si 等価 FWHM) 以内におさまっており、シンチレーション光検出器としての利用が十分可能であることを示している。また、電気試験的試験から計算される理想値からのずれが悪いピクセルでもほぼ 200%程度内に収まっており多くのピクセルについては 2 割～3 割程度実際の電気回路ノイズが多い程度であるため、電気的試験のみで素子の性能がある程度評価できることを示している。

以上の結果を踏まえるとシンチレータを接着するための PDA sci の素子については電気的試験による Bad Channel は 1 ピクセルのみであり、十分にシンチレーション光検出器として使用可能なものであることが確認出来た。また、59.5keV に対する各ピクセルにおける応答のばらつきも図 5.24 に示されるように 1%程度しかなく均一性も確認された。

第6章 400ch PIN PDAによる400chCsI(Tl)シンチレータアレイの読みだし

前章において400ch PIN PDAの素子性能が確認された。この章においてはPDA素子を用いたシンチレーション光読みだし試験および400ch CsI(Tl)アレイの製作、PDAへの接着、性能評価について述べる。

6.1 PDAアレイ+CsI(Tl)シンチレータによる γ 線測定

試験用に製作した400ch-Si PIN PDA1789に $4.5 \times 4.5 \times 20 \text{mm}^3$ のCsI(Tl)シンチレータを取り付け、シンチレーション光による γ 線エネルギースペクトルを得ることで、素子のシンチレーション光に対する感度及び接着具合の確認を行った。

setup



図 6.1: 写真：PDA1789に試験用CsI(Tl)ピクセルシンチレータを接着

WES社において研磨加工した 4.5mm 角 $\times 20 \text{mm}$ CsI(Tl)結晶をテフロンテープ($100 \mu\text{m}$)で二重巻きしたものをPDA1789の数点に浜松ホトニクス社にて接着をおこなった。また同時にアレイの接着用に 4×4 のCsI(Tl)アレイも製作し、同様に接着をおこなった。(図 A.6)

この際の接着剤の厚みは数 $10 \mu\text{m}$ 以下と思われる。DAQは前章の図 5.16 とほぼ同じ構成で、Shaping AMPの増幅率を1.7分の1に調節した。

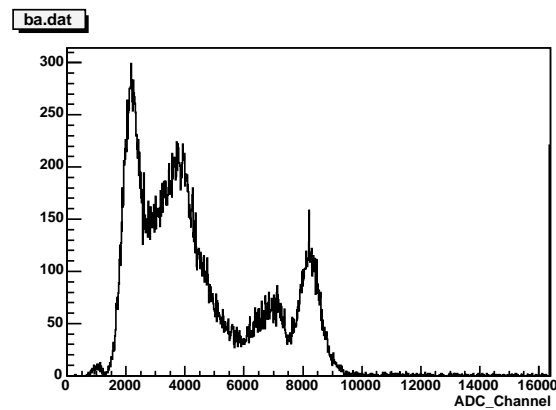
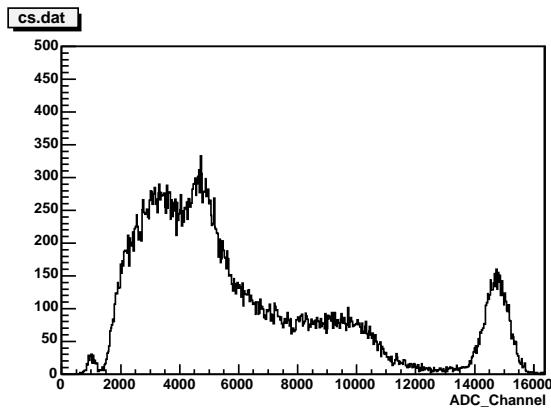


図 6.2: PDA 接着試験用 CsI(Tl) : ^{137}Cs スペクトル 7.1% @662keV (FWHM) 図 6.3: PDA 接着試験用 CsI(Tl) : ^{133}Ba スペクトル

γ線測定

PDA の収納されている箱の外、PDA 表面から約 20cm 離れた位置に ^{137}Cs および ^{133}Ba をそれぞれおいた時に得られたスペクトルは図 6.2、図 6.3 である。 ^{137}Cs の 662keV のγ線によるスペクトルと ^{133}Ba の 276keV、303keV、356keV、384keV によるγ線のスペクトルが確認出来る。7.1%@662keV(FWHM) というエネルギー分解能が得られた。

このシンチレータ結晶を PMT(浜松ホトニクス社 R6231) を用いて測定すると、7.7%@662keV(FWHM) のエネルギー分解能となっており、PDA を用いた測定により、PMT よりも良い分解能がえられている。また発光量も 662keV γ線に対し、61000 photons を得ている。

しかし 4×4 のアレイ部においては光量が約 2/3 になりエネルギー分解能も 10%前後という悪い結果が得られた。ただし、この部分には接着硬化直後において、接着面に気泡が確認されており、この影響によると思われる。

6.2 400ch CsI(Tl) シンチレータアレイ

前節で PSD + CsI(Tl) の組合せが適切な接着がおこなわれた場合、十分な性能が得られることを示した。以上を受け、400ch PDA とカップリングする 400ch ピクセルシンチレータアレイを製作した。次の仕様は次のとおり。

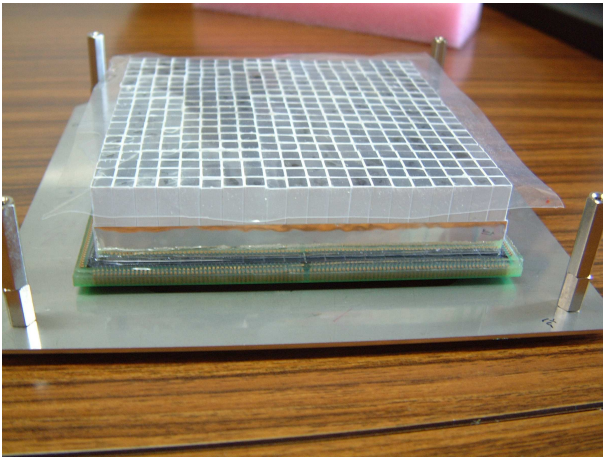


図 6.4: $CsI(Tl)$ アレイを接着した PDA(外周シールド前)

6.2.1 仕様

外寸	$101 \times 101 \times 20 \text{mm}^3$
結晶数	20×20
結晶種	CsI(Tl) WES 社
結晶サイズ	$4.5 \times 4.5 \times 20 \text{mm}^3$
結晶性能	前節で使用したものと同等
反射材	テフロンテープ $\sim 100 \mu\text{m} \times 2$
製作	WES 社

結晶の大きさは PDA のピッチサイズに合わせ製作を行い、結晶の高さは CsI(Tl) の γ 線@ 511keV の阻止能より決定した。

6.2.2 製作方法およびアライメントのずれ

今回 WES にて製作した 400ch ピクセルシンチレータアレイは、各ピクセル毎に反射材を巻きその後にアレイ上に列べるという手法で製作した。

WES 方式による列べ方により、アライメントのずれ 0.4mm 以下の十分な精度のあるものとなっている。このピクセルシンチレータアレイを浜松ホトニクスにて光学接着剤で PDA sci との接着を行い、WES 社にて外部のシーリングを行った。

接着剤の厚みが不足すると硬化中に気泡が入るなど不完全な接着が起こり、エネルギー分解能の悪化が起こると予想されたため、接着の際、接着剤の厚みの最小値が $0.2 \mu\text{m}$ となるように接着をおこなった。(CsI(Tl) アレイを接着した PDA sci の写真が図 6.4) である。

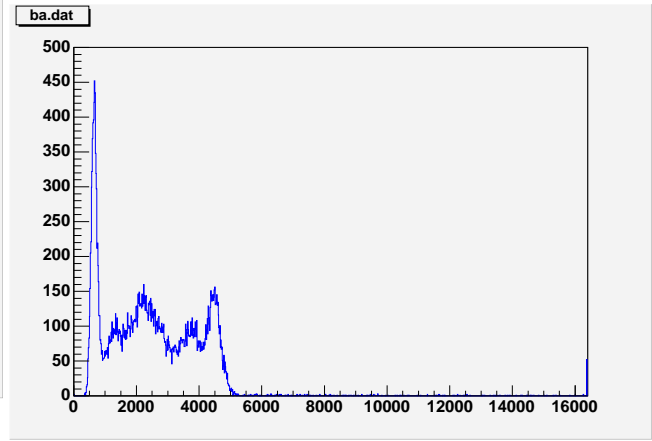
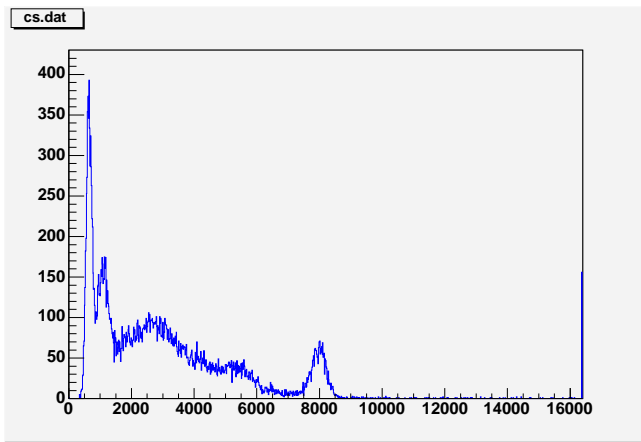


図 6.5: PDA + CsI(Tl) アレイ (19,11) ピクセル
 ^{137}Cs スペクトラム
 エネルギー分解能 7.7% @662keV(FWHM)
 横軸 ADC channel

図 6.6: PDA + CsI(Tl) アレイ (19,11) ピクセル
 ^{133}Ba スペクトラム

6.3 400chCsI(Tl) + 400chPDA による γ 線測定および性能評価

set up

DAQ は前章 図 5.16 と同じ構成で恒温槽内は 25 度に設定した。
 そしてシンチレータ側から約 20cm 離れた点から、全面に対して照射を行った。また基板の裏側からの照射も行った。

エネルギースペクトル及びエネルギー分解能

^{137}Cs 、 ^{133}Ba を照射した時に得られたスペクトルである。、図 6.5、図 6.6 がそれぞれ
 またエネルギー分解能は 7.7% @662keV(FWHM) となっている。

図 6.7 に代表的な素子における 122keV から 1275keV のエネルギー分解能を表した。
 ダイナミックレンジは 100keV ~ 1300keV まで確認出来ているが、122keV におけるエネルギー分解能が相対的に大きい。これは今回の PDA 計測回路における回路ノイズが、2.5keV ~ 3keV (Si 等価) 程度である。そして今 CsI(Tl) からの発光量を $2000 \sim 3000 \text{ photons} / 100 \text{ keV} = 7.5 \sim 11 \text{ keV (Si 等価)} / 100 \text{ keV}$ と荒くみつもると、100keV 付近ではノイズがエネルギー分解能が与える影響が 20% ~ 40% 程度になり、ノイズが統計的揺らぎと同等な影響を与えてくるためと考えられる。

そして 400ch の各ピクセルにおける、 ^{137}Cs の 662keV 光電吸収ピークの ADC 値と、エネルギー分解能の分布を表したものが fig 6.8 である。662keV 光電吸収ピークの値に 10% 程度のバラツキが生じているがこれはばらつきの大きさや分布等より素子と接着剤、結晶間の関係が一番大きな影響を与えていると思われる。またエネルギー分解能は平均 8% (FWHM) @662keV と十分な性能が得られている。エネルギー分解能とピーク ADC 値には相関が見られる。これは集光状況がエネルギー分解能に大きな影響を与えているもしくはシグナルの大きさが減り S/N 比悪くなるのが原因だと思われる。とくに図 6.8 中の中央よりやや上側のエリアは全体的に集光量が小さく、エネルギー分解能も悪いため、このエリアは接着状況がやや悪い可能性がある。また集光量の平均値は 17800 photons となっており 1pixel のみで測定した時に比べると 1/3 分程度に減っている。これは接着剤の厚みの部分による光の拡散及び吸収の影響

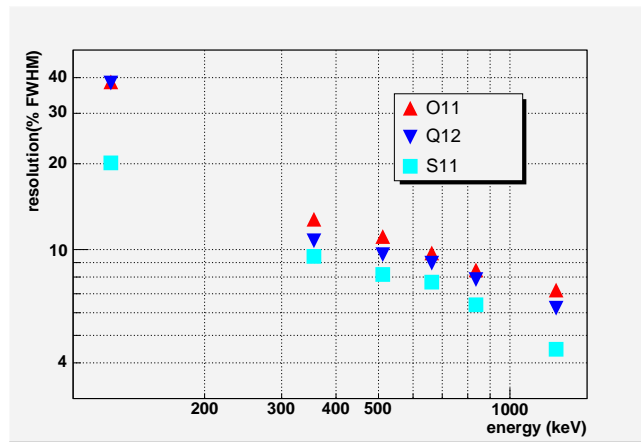


図 6.7: ピクセル O11、Q10、S11 における各エネルギーにおけるエネルギー分解能

測定方法	検出光電子数 @ 662keV N_p	光電子数揺らぎ (FWHM) $2.35\sigma_{pe}/N_p$	予想回路ノイズ (FWHM) $2.35\sigma_{noise}/N_p$	$2.35\sqrt{\sigma_{int}^2 + \sigma_{trans}^2}/N_p$	測定分解能 @ 662keV
アレイ接着時 PDA	17800	1.8%	3.8%	$X_1\%$	8%
1 ピクセル接着時 PDA	61000	1.0%	1.1%	$X_2\%$	7.1%
1 ピクセル PMT	(4100)*	(3.7%)	< 1%**	$X_3\%$	7.7%

表 6.1: CsI(Tl) シンチレータ検出器の諸要素のエネルギー分解への寄与

*:PDA 接着時の光量 × PMT 量子効率 (6%)/PDA 量子効率 (90%) の計算で予測。

** :ノイズレベルは十分小さいと仮定。

響だと思われる。この影響によってエネルギー分解能が7%から8%に悪くなっていると思われる。

6.4 CsI(Tl) + Si(PDA) におけるエネルギー分解能の諸要因

今回の PDA を用いて CsI(Tl) からのシンチレータ光を測定により検出された光電子の数と分解能がまた前章より電氣的ノイズの予想値がわかっている。これらの値を利用し CsI(Tl) シンチレータにおけるエネルギー分解能の諸要因について Section 2.5.3 の式 (2.4) にそって、考察する。

まず PDA における回路ノイズを $2.35\sigma_{noise} = 2.5keV(FWHMSi \text{ 等価}) = 685photoelectrons$ とする。そして、検出光子数および測定したエネルギー分解能をまとめた表が6.1 である。ただし、PMT を用いた際の光電子数は、PDA で測定された Max の光電子数に PDA の量子効率と光電面の量子効率を考慮して計算した値で、実験値ではない。また下二段は全く同じ CsI(Tl) 結晶を使用している。

この表 6.1 中の X_1 、 X_2 、 X_3 を式 (2.4) により計算すると、

$$X_1 = 6.8\%$$

$$X_2 = 6.9\%$$

$$X_3 = 6.8\%$$

となる。この計算により今回用いた CsI(Tl) 結晶 ($4.5 \times 4.5 \times 20mm^3$) 結晶においては $\sigma_{int}^2 + \sigma_{trans}^2$ というシンチレータの内部要因 (不純物や非線形性) と光輸送揺らぎがエネルギー分解能に大きな影響を与え

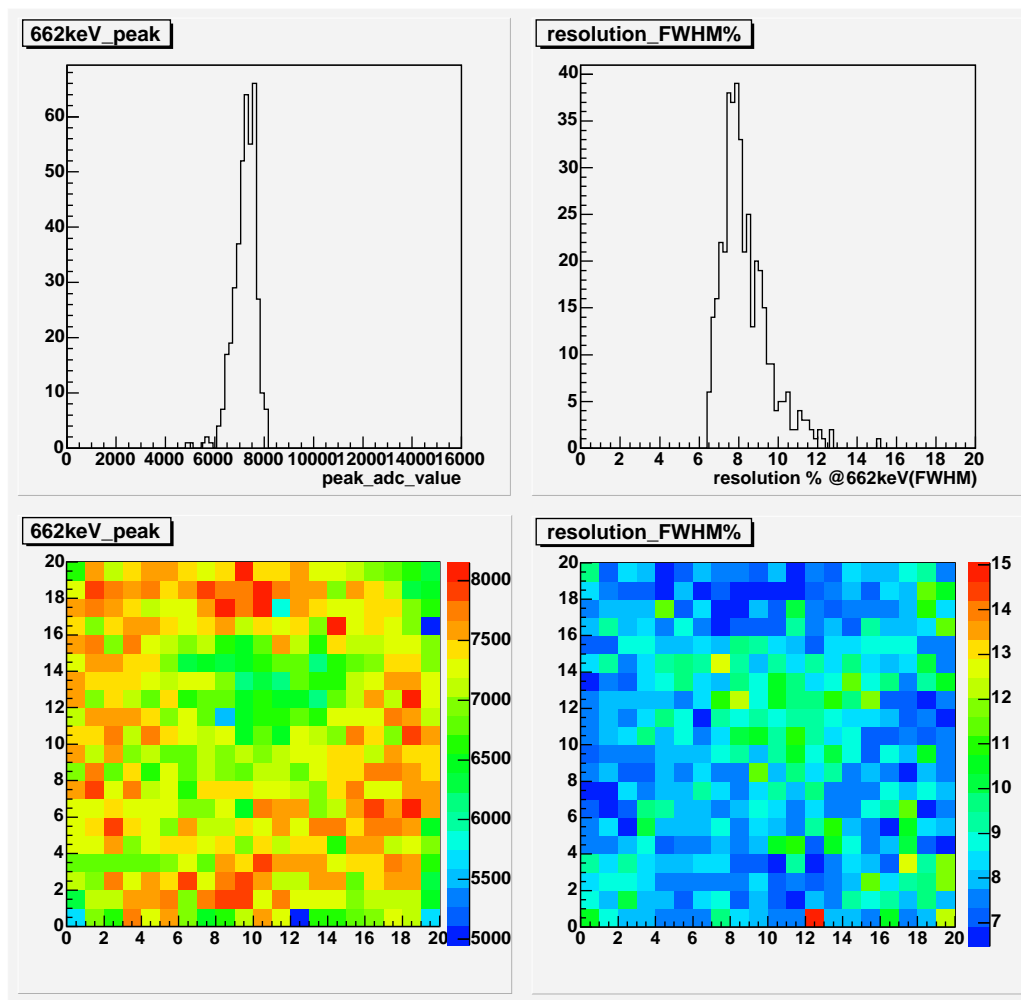


図 6.8: (左) 各ピクセルにおける 662keV ピークの ADC 値分佈 (右) 各ピクセルにおけるエネルギー分解能 (FWHM)@662keV

ていることがわかる。

また、PDA における光量とエネルギー分解能には相関関係があるが、これは、今回製作した PDA 読みだし CsI(Tl) ピクセルシンチレータにおいては光量のロスはあるものの Section 6.1 の 4×4 試験用アレイでみられたようなエネルギー分解能が 10%を越えるような BAD PIXEL は 1 割程度であった。位置敏感型 PDA 読みだし CsI(Tl) カロリーメーターを作成出来た。

6.5 γ 線カメラとしての今後の課題・開発

読みだし回路の開発

エネルギー分解能および位置分解能を満足し 10cm 角クラスという大きな Si PIN 読みだしシンチレータを製作し評価を完了したが、位置敏感型 γ 線カロリーメーターとして利用するには 400ch を同時に読みだすことが可能な CSA (Charge Sensitive Amp) 回路が必要である。

現在のところ IDE 社の VA チップなどが有力である。

位置分解能の向上 有効面積の増大

今回製作した PDA は 5mm pitch で素子要素が Si 面および結晶面がともに 4.5mm 角であるため、位置分解能 \sim 5mm(FWHM) で有効面積約 70%となっている。

位置分解能向上にはピクセルピッチの細分化が不可欠であるが、各ピクセルウエハからの電荷読みだしを行うための、パターンを確保しないとイケないため、ピクセル間の不感領域が増大してしまう。またシンチレータ間反射材が占める面積が大きくなるため、有効面積は小さくなってしまう。一方で現在図 2.16 で表しているような背面読みだし型の素子も開発されてきており、これを利用することでさらなる位置分解能の向上が期待できる。

エネルギー分解能の向上

今回に実験でエネルギー分解能に大きく寄与しているのはシンチレータの内部要因及び光伝達プロセスである。そしてその次が電気回路ノイズである。エネルギー分解能向上のためにはこの二つを改善することが必要である。しかし、現状の PIN 型フォトダイオードではノイズが大きいことから大発光量のシンチレータ程有利であること有感波長領域が 400 nm 程度であることなどから、CsI(Tl) のエネルギー分解能がもっともよい。

このためエネルギー分解能の向上には半導体素子の低ノイズ化が必要になる。すでに SDD により CsI(Tl) で非常に高いエネルギー分解能を得ており、SDD のアレイ化による利用が期待される。

もう一つのアプローチは非常に S/N 比がよくなってきたアパランシェフォトダイオードのアレイ化などが期待される。

第IV部

まとめ

第7章 まとめ

7.1 大面積 GSO-PSA カメラの実現

本論文においてはコンプトンカメラの吸収体検出器としての位置敏感型スペクトロメータの開発を行った。この吸収体検出器を将来的に 50cm 立方クラスの高ガス散乱体を囲い、数百 keV～数 MeV の散乱 γ 線を数 mm 程度の精度で捕えることを要求される。さらに宇宙環境での動作のために低電力でかつ放射線耐性や振動にも強いものが要求されている。

このような条件を満たすことができるようなモデルとして高密度・高 Z であり、放射線耐性にも強い GSO 結晶をピクセルアレイ化したものに省不感エリアのマルチアノード PMT(6mm ピッチ 64 ピクセル 5cm 角) を組み合わせこれを約 82%の充填率で敷き詰め続けることによって、大面積化が可能なピクセルシンチレータアレイ (PSA) モジュールを製作した。これにより 16cm 角 572 ピクセル (1 結晶ピクセル 6mm 角 \times 13mm) の試作機を製作した。このとき 80keV～1300keV 程度の γ 線をエネルギー分解能は 10～13%(FWHM@662keV) で測定できた。さらに位置分解能(6mm) も全有効面積において確認し、ピクセル化により、ピクセル内に光りを閉じ込めることによって、検出器内の同時ヒットイベントの除去が可能になることも示せた。なおこの GSO-PSA モジュールは抵抗チェーンにより低電力化がおこなわれており気球試験観測用次世代コンプトンカメラ (10cm クラス) の吸収体検出器として採用されている。また 3mm ピッチの 16 \times GSO-PSA も製作し H8500 を用い、5cm 角で 14 \times 14 の領域での利用も確認し、3mm 角 PSA の有用性を確認した。今後は ASIC 回路の開発により低電力で全ピクセルを個別に読みだしヒット情報を処理することにより、より高い精度で高エネルギーな γ 線を検出するシステムを構築することが必要となる。

7.2 大面積半導体検出器の性能評価

H8500 を用いた GSO-PSA カメラの開発と同時に衛星搭載に非常に有利である半導体検出器を用いた PSA カメラの製作を行っており世界最大級の面積 (100cm² で 400 ピクセル (4.5mm ピクセルが 5mm ピッチ)) となる PIN 型 Si フォトダイオードアレイ (PINSiPDA) と CsI(Tl) アレイを組み合わせた、半導体よみだし PSA を作成しエネルギー分解能の評価をおこなった。電氣的試験・X 線による試験により、回路ノイズは 2～4keV(Si 等価 FWHM) 程度と見積もることができそして CsI(Tl) の接着によりエネルギー分解能は平均 8.0%@662keV であった。これにより、半導体検出器において 10cm 角という手頃なサイズの PSA モジュールが製作可能となった。そしてアナログ集積回路の導入による PSA カメラとしての動作は今後の課題である。

7.3 将来の位置敏感型スペクトロメータの開発。

今回、モジュール化に成功し、実用化した GSO(PSA) カメラを半導体でよみだすことが、宇宙空間に置くシンチレータ検出器のひとつの理想形である。しかし現在の PIN 型半導体検出器では S/N 比が悪く、青領域の発光がメインで全体の発光量のすくない GSO や BGO 等が利用できない。そこで最近開

発がすすんできている低ノイズなシリコンドリフト検出器と青感度化による利用やアパランシェフォトダイオードのアレイ化が有力視されている。また使用する結晶も近年 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ や $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ のような大発光量かつ減衰時間が非常に短いシンチレータ結晶も開発されてきており、GSO や BGO と同等の Z および密度をもち、大発光量である物質の開発も期待される。将来的にはこのような新しいデバイス・結晶を用いた大面積位置敏感型スペクトロメータの開発がのぞまれる。

Appendix A

A.1 半導体検出器における電気ノイズ

A.1.1 ノイズの起源

ジョンソン雑音 (熱ノイズ)

電圧がかかっていなくても一様な温度 T 中の抵抗体内部の伝導電子の運動はあり、その際抵抗に流れる電流 i の平均値は 0 だがその自乗平均値は $\overline{i^2}$ で 0 ではない。よってここで電力が消費されており、その値は $R\overline{i^2}$ である。このときの $\overline{i^2}$ には 10MHz 付近までの広い周波数帯でエネルギー密度がほぼ一定である。このような雑音を white noise (白色雑音とよぶ) 短絡されている場合 R の抵抗に $\overline{i^2} = \frac{4k_B T \Delta f}{R}$ となる電流が流れており開放されている場合 $\overline{v^2} = 4k_B T \Delta f R$ となる電圧が生じている。

ジョンソン雑音は雑音のない抵抗に等価ノイズ電圧源 $\sqrt{\overline{v^2}}$ を直列に加えた電圧源表現もしくは並列につないだ電流源 $\sqrt{\overline{i^2}}$ で置き換えられる。またその他の外来製のホワイトノイズなど、系外からのホワイトノイズはそれに等価な熱雑音を発生する抵抗に置き換えることも可能。

ショットノイズ

半導体素子などリーク電流が存在するところに生じるノイズ。リーク電流の統計的な揺らぎが、ノイズとなる。典型的な半導体の PN 接合の場合 $N_I(f) \simeq 2\alpha e I \frac{\sin \omega \tau_d / 2}{(\omega \tau_d / 2)^2}$ で高周波にならないかぎり $N_I(f) \simeq 2\alpha e I$ とあらわせる。ショットノイズも白色ノイズ

1/f ノイズ

半導体特有のノイズ。不純物等により存在すると思われる。

$$N_I(f) \simeq \frac{\alpha I^2}{f N \ln \tau_{max} / \tau_{min}} \propto \frac{1}{f}$$

電流性ノイズ ジョンソン雑音。入力にたいして並列につながっている抵抗が電流性雑音 $\overline{i^2} = \frac{4k_B T \Delta f}{R}$ となる。

R は R_{det} : 検出器の表面及び内部抵抗

R_{bias} : バイアス電源の負荷抵抗

R_f : 帰還抵抗

R_{other} : 基板の内部抵抗や表面抵抗

の合成抵抗である

ショットノイズ。半導体部。平均的なリーク電流を I_{L} とすると、 $N_I(f) \simeq 2eI$ (簡単のため $\alpha = 1$)
リーク電流 I_0 は I_{det} : 検出器のノイズ

I_G : 初段 FET のノイズ

I_{other} :電極と基板の間で発生するリーク電流

これらの和であるが、ほとんどが I_{det} であり他の寄与は小さい。

電圧性ノイズ (直列成分) アンプ部分の影響。おもに初段FETにおける Drain 電流のゆらぎ。Drain 電流 I_{DS} のゆらぎがショットノイズであるとする、その電流ノイズパワーは $2eI_{DS}$ これが相互インダクタンス g_m を通じて電圧揺らぎとなる。電圧ノイズパワーは

$$\frac{2eI_{DS}}{g_m^2}$$

トランジスタの場合 $g_m = \frac{eI}{kT}$ なので

$$\frac{2eI_{DS}}{g_m^2} = 4kT \left(\frac{0.5}{g_m}\right) \text{ とかけ、直列等価雑音抵抗 } R_s \text{ を}$$

$$R_s = \frac{0.5}{g_m}$$

とかけるが、実際は熱雑音の影響もあり、右辺の分子の係数は 0.5~0.7 ぐらゐの不定性がある。

並列な容量と抵抗での値を使えば、電流性ノイズの表現に変えられる。この電圧性ノイズのパワースペクトルはその等価直列抵抗を R_s とすると $N_V = 4k_B T \Delta f R_s$ 電流性ノイズのパワースペクトルに変換

すると $N_{I'} = |C_{in}(i\omega + \frac{1}{C_{in}R_p})|^2 N_V(f)$

入力部における全ノイズパワー (ノイズ電流の自乗平均) は $N(f) = N_I + N_V C_{in}^2 (\omega^2 + \frac{1}{\tau_{in}^2})$

$$N(f) = \left(\frac{4kT}{R_p} + 2eI_0\right) + 4kTR_s C_{in}^2 (\omega^2 + \frac{1}{\tau_{in}^2})$$

R_s でもっとも大きい成分は初段の FET ソース、ドレイン間を流れる電流の揺らぎによるもの。これをショットノイズとし電流が I_D 、相互インダクタンスを g_m とすると、FET ゲート入力部に表れる電圧ノイズパワーは

$2eI_D 1g_m^2$ とかけトランジスタの場合 $g_m = \frac{1}{r_e} = \frac{eI}{kT}$ であるから

$$\frac{2eI_D}{g_m^2} = 4kT \left(\frac{0.5}{g_m}\right)$$

なので $R_s = \frac{0.5}{g_m}$ 入力容量 C_{in} としては

$$C_{in} \simeq C_{det} + C_{other}$$

と検出部による項と回路の浮遊容量や、FET 入力部の容量等を含む項の和でかける。

ノイズフィルター (Shaping Amp) PreAmp 出力を波形整形することでノイズをカットして S/N 比を向上することが出来る。PreAmp 入力から波形整形アンプ出力を通過する、電気信号 (ノイズ) を考える。PreAmp 入力に i_{in} という電流が流れたとき、波形整形出力からは v_{out} という電圧出力がでたとする。いま入力インピーダンス、出力インピーダンス、アンプゲイン、feedback 抵抗、などの影響をすべてひっくるめて、 v_{out} が応答関数 $h(t)$ を用いて

$$v_{in}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) i_{in}(\tau) d\tau$$

とかける。

上式の両辺に $\exp i\omega t$ をかけて t 積分することにより、フーリエ成分表示ができて、

$$V_{out}(\omega) = H(\omega) I_{in}(\omega)$$

とかける。これより出力電圧の自乗平均は

$$N_{out}(f) = |V_{out}(\omega)|^2 = |H(\omega)|^2 |I_{in}(\omega)|^2 = |H(\omega)|^2 N_{in}(f) \text{ これを全周波数積分すると出力電圧の自乗平均が求められる。 } v_{rms}^2 = \int_0^{\infty} |H(\omega)|^2 N_{in}(f) df$$

この式に電流性ノイズのパワーを代入すると、 $v_{rms}^2 = \left(\frac{4kT}{R_p} + eI_0\right) \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 df + 4kTR_s C_{in}^2 \int_{-\infty}^{\infty} (\omega^2 + \frac{1}{\tau_{in}^2}) |H(\omega)|^2 df$

となる。そして parseval の定理を、用いると

$$v_{rms}^2 = \left(\frac{2kT}{R_p} + 2eI_0\right) \int_{-\infty}^{\infty} [h(t)]^2 dt + 2kTR_s C_{in}^2 \int_{-\infty}^{\infty} ([h'(t)]^2 + \frac{1}{\tau_{in}^2} [h(t)]^2) dt \text{ ここで入力電流が}$$

パルスのデルタ関数的に表されるとする。すると入力電流は

$$i_{in} \simeq Q\delta(t)$$

とかける。ここで Q は入力電荷量。このときの出力電圧 $h(t)$ の定義より $v_{out}(t) = Qh(t)$ となり、 $\omega(t) = h(t)/h_{max}$ と最大値が 1 となるような関数 (ω) を用いると等価雑音電荷 Q_{ENC}^2 が、 $Q_{rms}^2 = (\frac{2kT}{R_p} + 2eI_0) \int_{-\infty}^{\infty} [\omega(t)]^2 dt + 2kTR_S C_{in}^2 \int_{-\infty}^{\infty} ([\omega'(t)]^2 + \frac{1}{\tau_{in}^2} [\omega(t)]^2) dt$ 今 τ_{in} が Shaping time の時定数 (τ) より十分短いときで、ガウシアン整形をしたとすると、上式は $Q_{rms}^2 = 1.253(\frac{2kT}{R_p} + 2eI_0)\tau + 1.253(2kTR_S C_{in}^2 \frac{1}{\tau})$ となる。

A.2 Shaping time 決定の予備実験

PDA の X 線照射による性能評価時の Shaping time は予想されるノイズ式から求めたが、実際に ORTEC571 の Shapingtime を変化させたときの結果が図 A.2 である。理論値と実験値の間に関数の形の違いが生じているがもっともノイズが低いのは $3\mu\text{sec}$ の時である。形の違いに付いては外部ノイズや $1/f$ ノイズ、また波形整形回路内での理想からのずれなどが考えられる。

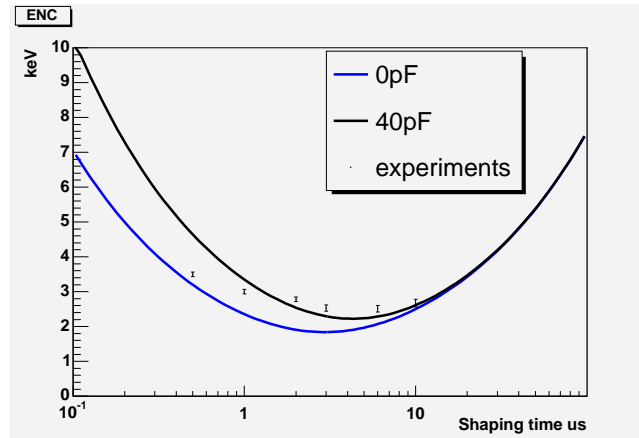


図 A.1: Shaping time とノイズの関係

点が実験値。黒線・青線は理論値。

A.3 低温における PDA および PDA + CsI(Tl) の性能

本章中では常温 (25 度) における PDA および CsI(Tl) の性能評価をおこなったが、雑音の式 (5.1) をみても分かるように半導体素子は冷却した方が雑音が減る。また図 A.2 のように低温にすると暗電流も劇的にへる。この低温における試験を Section 5.2、Section 6.1 のときと同様のセットアップをもちいて行った。まず X 線照射を行ったときに得られたスペクトルが図 A.3 であり、エネルギー分解能は 2.1keV (Si 等価 FWHM) @ 59.5keV となっている。リーク電流の減少と温度低下をもとに計算されるこのピクセルにおける回路ノイズは 2.0keV なので、矛盾していない結果であるといえる。

また $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 13\text{mm}$ 角の CsI(Tl) シンチレータを OKEN6262 でとりつけ、 γ 線を測定した。このとき取り付けした箇所は $350\mu\text{m}$ のガラスコーティングがしてある箇所であった。 ^{137}Cs を照射したときのスペクトラムが図 A.4、図 A.5 である。CsI(Tl) は温度低下に対して発光量が低下することがすでに報告されており [10]、今回のスペクトルはそれをよく表していて、約発光量が 20% 落ちてしまいその影響で S/N 比がおちエネルギー分解能に表れている (常温 7.5% 低温 8.6% どちらも FWHM (@ 662keV))。

■ Dark current vs. ambient temperature

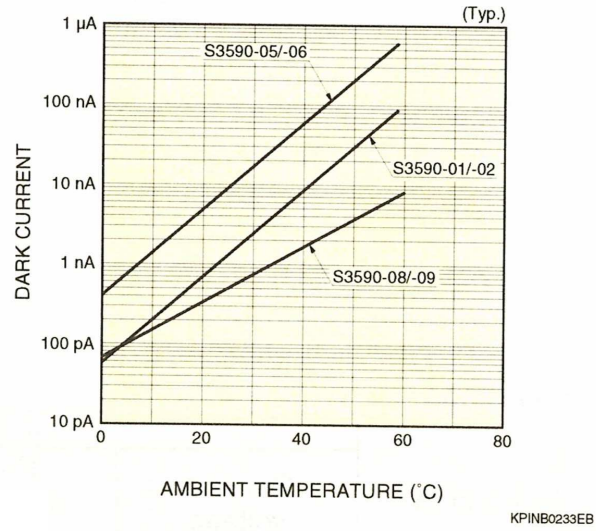


図 A.2: 温度とリーク電流の関係

点が実験値。黒線・青線は理論値。

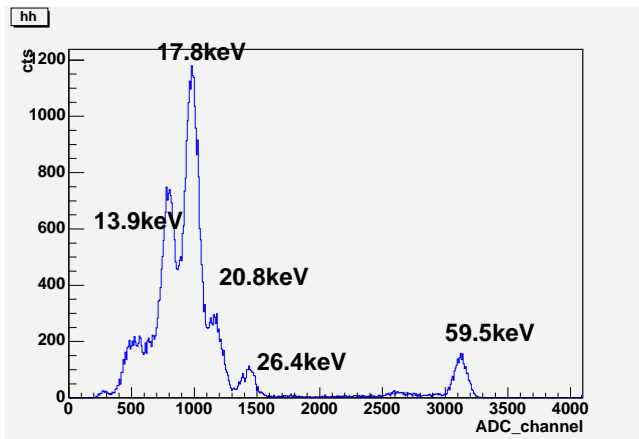


図 A.3: 低温での ^{241}Am スペクトラム

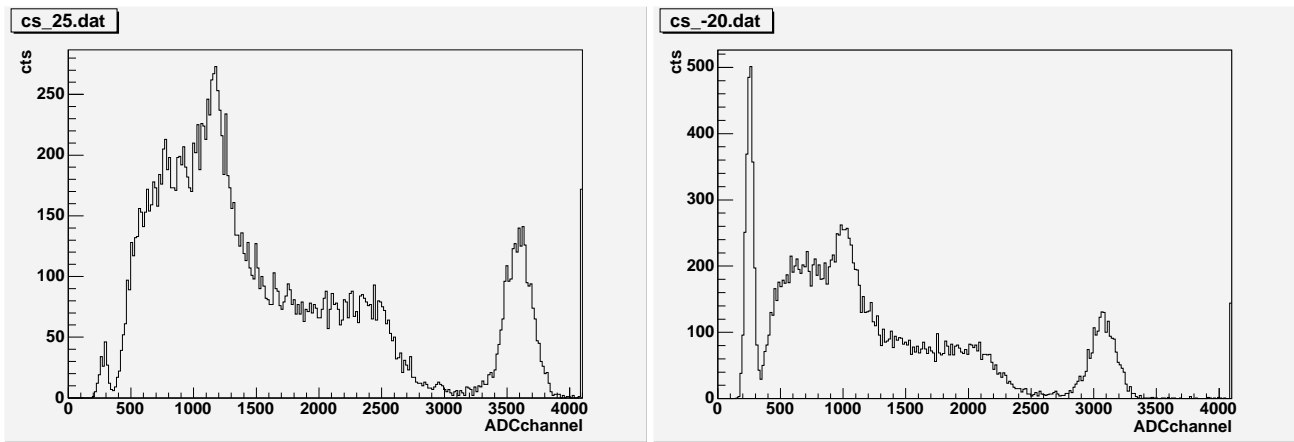


図 A.4: 常温での 4mm 角 CsI(Tl)+APD(1pixel) の ^{137}Cs スペクトラム
 図 A.5: 低温での 4mm 角 CsI(Tl)+APD(1pixel) の ^{137}Cs スペクトラム

A.4 クリアパルス社製 VA ヘッドアンプを用いた測定。

FPPMT H8500 の読みだし用にクリアパルス社で VA を用いたヘッドアンプが開発中である。VA チップ (IDEAS ASA) という内部の 32ch の前置増幅器および波形整形アンプからデジタル化回路までついた CMOS チップをもちいている。このモジュールを用いて、CsI(Tl) の結晶を用いた 1 ピクセル測定試験が共同実験者の関谷氏の手で行われている。実験は H8500 のアノードピクセルの真上に CsI(Tl) $6 \times 6 \times 13 \text{mm}^3$ の結晶をとりつけ、 γ 線を照射した。ヘッドアンプからの 64ch の出力結果の重心分布をとり、発光中心点をもとめていくと図 A.7 のように一点に集まった画像が得られる。また各 ch 毎にスペクトルを描くと図 A.8 となる。(発光中心点付近の 9ch) 図 A.8 は中心のピクセルが光っている時でも左右上下のピクセルにピークが生じており弱い光が入っていることがわかる。これは H8500 のガラス面においてシンチレーション光がひろがっていることを示している。この値はおおよそ中心のピクセルの発光量の約 30% 程度となっている。なお H8500 と CsI(Tl) 結晶アレイとクリアパルス社製ヘッドアンプを組み合わせた実験については [22] にかかっている。

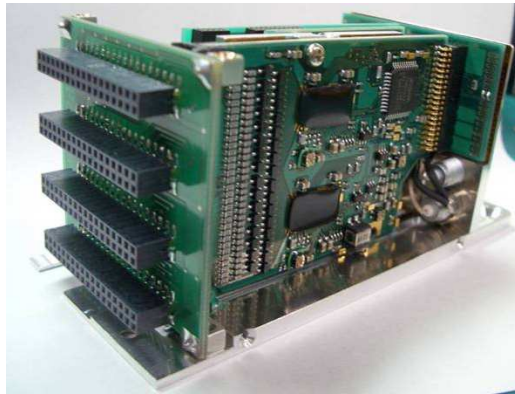


図 A.6: 写真:CP80068

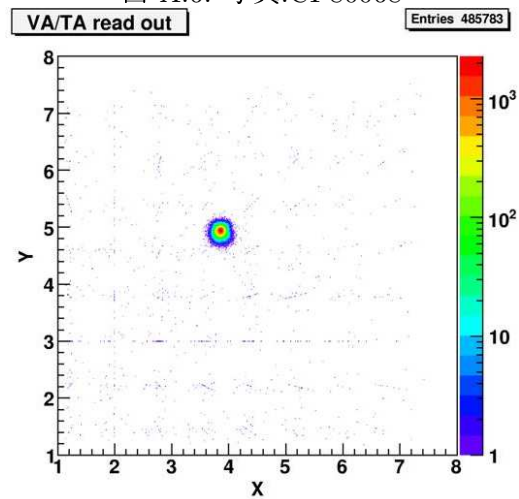


図 A.7: CsI(Tl) 1本での測定

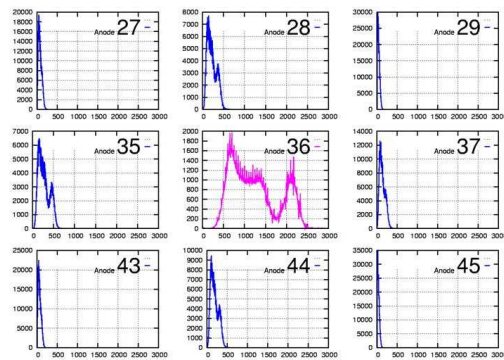


図 A.8: 最高ヒット点の周囲のピクセルのスペクトル

謝辞

まず、本修士論文作成に関連し御指導・御協力いただいたすべての方に感謝いたします。あらためて、指導教官の谷森教授の御指導には深く感動いたしました。また窪助手にはほとんどなにからなにまで提供して頂いて感謝しております。そして身内助手にはこまごまとしたことを中心にお世話になりました。同グループの服部さんをはじめ小野君、兵藤君、東んの同学年の人々には普段からちょこちょここと研究生生活を支えてくれたことに感謝いたします。また現神戸大PDの折戸さんおよび現ICRR助手の関谷さんには本修士論文の実験の先駆けをして頂いたおかげで、内容には困りませんでした。また岡田さんにもいろいろとネタを提供して頂き感謝しております。ICRRの竹田さんと早稲田の永吉さんにはほとんど本修士論文には関連しなかったような気がしますが、もしここを読んでいるならばそれだけで感謝いたします。また高田さん・上野君・株木さんには、このような修士論文を書く時間を頂き非常に感謝しています。土屋さんにもとてもお世話になり非常に助かったのでとても感謝しております。カンガルーグループ及びX線グループの人々にもなにかと遊んでいただき感謝しております。また、WES社の柳田様には結晶関係で物的にも知恵的にも非常にお世話になりました。また岡本様をはじめとする浜松ホトニクス社のSi-PIN-PDA開発および結晶接着チームにも多大な協力を頂きました。

最後になりましたが、こうして元気に修士論文をかけるような体に生み、育てて頂いた両親に感謝いたします。

関連図書

- [1] <http://physics.nist.gov/PhysRefData>
- [2] "Development of an electron-tracking Compton telescope with a gaseous time projection chamber and a scintillation camera for application to MeV gamma-ray astrophysics" Reiko Orito, Doctoral Thesis, Kyoto University, Jan, 2005.
- [3] 「Introduction to scintillators」 Masaaki Kobayashi, Proceedings of KEK-RCNP International School and Mini-workshop for Scintillating Crystals and thier Application in Particle and Nuclear Physics.
- [4] Birks "The Theory and Practice of Scintillation Counting" (1964) PERGAMON PRESS
- [5] G.F.Knoll:" 放射線計測ハンドブック 第3版 日刊工業新聞社 (2001)
- [6] 穂坂 順也「液体 Xe を用いた暗黒物質探索実験におけるバックグラウンドの研究」 <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/pub/master/Hosaka-m.pdf>
- [7] Alessandro Curioni "Laboratory and Baloon Flight Performance of the Liquid Xenon Gamma Ray Imaging Telescope (LXeGRIT)"
- [8] H.Grassmann et al., Nucl. Inst. Meth. Res A., 323, 228(1985)
- [9] I.Holl et al., IEEE Trans. Nucl Sci, 105, 1, 35(1988)
- [10] John D. Valentine et al., IEEE Trans. Nucl Sci, 40, 4, (1993)
- [11] C.Fiorini et al., Nucl. Inst. Meth. Res A 395, 409(1998)
- [12] R.S.Raghavan . Phys. Rev. Letters 78(1997),3618
- [13] <http://jp.hamamatsu.com>
- [14] I.Brivitch et al., Nucl. Inst. Meth A., 523, 535(2004)
- [15] W.Mengesha et al, IEEE Trans Nucl,Sci,NS-45(1998) 456
- [16] R.Pani et al., Nucl. Inst Meth A., 54, 527(2004)
- [17] H.Tawara Proceedings of the Second International Workshop on EGS, 8-12 August 2000, KEK Proceedings 200-20 pp.152-160
- [18] N.Inadama et al., IEEE Trans. Nucl. Sci.,51,1,58,(200 4); IEEE Trans. Nucl. Sci.,52,1,15,(2005);
- [19] K.Kurashige et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 45, 3, 522 (1998)

- [20] Hitachi chemical technical report No.44 13 (2005-1), Printed in Japan, <http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/report/>;
- [21] <http://jp.hamamatsu.com>
- [22] H.Sekiya Nucl. 'Studies of the performance of different front-end systems for flat-panel multi-anode PMTs with CsI(Tl) scintillator arrays' Nucl. Inst. Meth A, in press