

高阻止能シンチレータと位置検出型光電子増倍管  
を用いた宇宙ガンマ線イメージャーの開発

富永慎弥

M1479018

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻  
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2004年2月10日

## 概要

天体现象の解明において、X線・ガンマ線領域での天文観測は非常に重要な手段の一つである。また、超新星残骸やパルサーの磁場構造、ブラックホール周辺の降着円盤の構造、活動銀河核の物質分布等を明らかにするために偏光観測が重要な役割を果たすと期待されている。

我々は、高エネルギー光子に対して高い阻止能を持つシンチレータとして近年注目されているBGO・GSOと、近年メタルパッケージ化により小型化がなされてきた位置検出型光電子増倍管(PMT)を組み合わせた位置検出型シンチレーション検出器の開発を行っている。この検出器は小型化・軽量化・単純化が可能であり、ガンマ線コンプトンカメラへの応用が考えられている。現在、コンプトンカメラの散乱体としてシリコンストリップとCdTe(テルル化カドミウム)が考えられている。本研究では、浜松ホトニクス社製のコンパクトな位置検出型PMTであるH7546:64chPMTと、数種類の高阻止能シンチレータ、また様々な形状のシンチレータとを組み合わせた検出器を構成し、その検出器の性能評価を行い、散乱体と組み合わせることにより期待できる、コンプトン散乱の運動学を利用したガンマ線イメージャーの開発を目的としている。またこの検出器は、散乱体としてPD(フォトダイオード)を用いることにより、コンプトンカメラの、より高エネルギー側のガンマ線(MeV領域)に対する吸収体部分としての応用も考えている。

そこでまず、64chPMTからの信号を読み出すためのシステムを自ら構築した。次に、この検出器をガンマ線イメージャーとして利用するためには、検出器で落としたエネルギーとその位置を知る必要があるため、64chPMTと結晶シンチレータとを組み合わせた検出器の位置分解能の測定を行った。64chPMTに取り付けるシンチレータとしては、単一の結晶を一つ付ける方法と、細かい結晶をアレイ状に並べるという方法がある。まず、単一型の結晶として24mm×24mm×5mmのGSOを用い、64chPMTと組み合わせた検出器を構成し、 $\alpha$ 線をコリメートして照射することにより位置分解能を測定した。さらに、GSOの形状を変化させ、そのときの位置分解能の変化を調べた結果、その形状により位置分解能が大きく異なることが分かった。また、この検出器で位置検出ができることを確認したので、散乱体にアレイ状のPDを用いることにより、ガンマ線イメージャーとしての可能性を調べた。

もう一つの、細かい結晶をアレイ状に並べる方法として、4.5mm×4.5mm×19mmのYAPを16個並べたYAParrayと、64chPMTとを組み合わせて検出器を構成した。この検出器は、ガンマ線を入射させたときのパルスハイト分布が非常に悪く、エネルギー分解能も非常に悪いという結果を得た。しかし、シンチレータ内で起こるコンプトン散乱を利用することにより、偏光を検出できる可能性を持っている。そこで、この検出器のModulation factorを測定することにより偏光測定を行ったところ、わずかながら偏光を検出することができた。

# 目次

第1章	序論	7
1.1	X線ガンマ線天文学	7
1.2	X線ガンマ線による偏光観測	8
第2章	宇宙ガンマ線用位置検出型シンチレーション検出器	9
2.1	シンチレーション検出器	9
2.1.1	シンチレータ	9
2.1.2	光電子増倍管 (PMT : Photomultiplier Tube)	11
2.2	フォトダイオード (PD : photodiode)	12
2.3	位置検出型シンチレーション検出器	13
2.3.1	位置検出型光電子増倍管	14
2.3.2	浜松ホトニクス社製 H7546(64chPMT)	15
2.4	ガンマ線イメージャー	19
2.4.1	コンプトンカメラ	19
2.4.2	位置検出型シンチレーション検出器の必要性	20
2.4.3	位置検出型シンチレーション検出器の構成案	20
2.5	8chPMT を用いた位置検出型シンチレーション検出器	21
2.5.1	8chPMT : 浜松ホトニクス社製 5900-00-C8	21
2.5.2	8chPMT を用いた研究結果	21
2.6	本研究の目的	23
第3章	シンチレータ + 64chPMT 検出器による位置分解能の測定	25
3.1	シンチレータ + 64chPMT 検出器の読み出しシステム	25
3.1.1	PCI-6071E	26
3.1.2	LabVIEW ソフトウェア	26
3.1.3	64chPMT の読み出しシステムの流れ	26
3.2	64chPMT の Calibration	29
3.3	GSO シンチレータ一つを用いた場合の $\alpha$ 線による位置分解能の測定	31
3.3.1	セットアップ	31
3.3.2	位置検出の方法と入射位置と検出位置のリニアリティの測定	31
3.4	GSO の形状と位置分解能の関係	35
3.4.1	使用した GSO の形状と位置分解能の関係の $\alpha$ 線による測定	35
3.4.2	ガンマ線における位置分解能の測定	38
3.4.3	位置検出能力を利用したエネルギー分解能の向上	39

3.4.4	GSO シンチレータを用いたときのまとめ . . . . .	41
3.5	YAParray を用いたときの光量とエネルギー分解能及び位置分解能 . . . . .	41
3.5.1	YAParray . . . . .	42
3.5.2	YAP の光量とエネルギー分解能 . . . . .	42
3.5.3	YAParray を用いた場合の $\alpha$ 線における位置検出 . . . . .	44
3.5.4	YAParray にガンマ線を入射したときの位置検出 . . . . .	45
3.6	まとめ . . . . .	46
第 4 章	PDarray + 64chPMT によるガンマ線イメージング . . . . .	48
4.1	ガンマ線イメージングセットアップ . . . . .	48
4.2	イメージング能力の考察 . . . . .	50
4.2.1	イメージングの方法 . . . . .	50
4.2.2	角分解能の見積もり . . . . .	50
4.2.3	実際の測定結果 . . . . .	52
4.3	まとめ . . . . .	54
第 5 章	YAParray + 64chPMT 検出器による偏光の測定 . . . . .	56
5.1	コンプトン散乱による偏光の発生とその検出原理 . . . . .	56
5.1.1	Modulation factor . . . . .	57
5.2	偏光測定セットアップ . . . . .	58
5.2.1	コンプトン散乱イベントの判別方法 . . . . .	59
5.3	YAParray + 64chPMT 検出器の Modulation factor . . . . .	61
5.4	偏光測定のまとめ . . . . .	66
第 6 章	まとめ . . . . .	67

# 表 目 次

2.1	一般的なシンチレータとその特徴 . . . . .	11
2.2	ダイノード別特性例 . . . . .	15
2.3	64chPMT の仕様 . . . . .	17
2.4	64chPMT の特性 (25 の時) . . . . .	17
3.1	PCI-6071E の特徴 . . . . .	26
3.2	GSO の形状と位置分解能の関係 . . . . .	38
3.3	穴の位置と各穴における $\alpha$ 線検出位置のピーク座標 . . . . .	45
3.4	64chPMT 及び 8chPMT と 24mm×24mm×5mm の GSO を組み合わせた 検出器における位置分解能とエネルギー分解能の比較 . . . . .	46
4.1	角分解能の見積もりにおける各パラメータの値 . . . . .	52
4.2	光電面の各領域毎の角分解能 . . . . .	54
5.1	$^{133}\text{Ba}$ を用いたときの Modulation factor . . . . .	63
5.2	$^{133}\text{Ba}$ を用いたときのスケーラによるカウントレート [count/sec] . . . . .	63
5.3	$^{137}\text{Cs}$ を用いたときの Modulation factor . . . . .	65
5.4	$^{137}\text{Cs}$ を用いたときのスケーラによるカウントレート [count/sec] . . . . .	65
5.5	本実験の偏光測定によるバッググラウンドのカウントレート [count/sec] . . . . .	65

# 目 次

2.1	一般的な PMT の構造	12
2.2	半導体。A : pn 接合、B : 順方向に電圧印加、C : 逆方向に電圧印加。	12
2.3	PD における放射線検出原理	13
2.4	いろいろな PMT の構造	14
2.5	64chPMT の構造 (単位 : mm)	15
2.6	64chPMT のアノード構造	16
2.7	64chPMT のゲインスペック	16
2.8	64chPMT のブリーダ回路	18
2.9	コンプトンカメラの概念図	19
2.10	8chPMT の構造及びクロスプレートアノード構造 (単位 : mm)	21
2.11	ガンマ線の実際の検出位置 (左上 : $^{109}\text{Cd}$ (88keV) 右上 : $^{122}\text{Co}$ (122keV) 左下 : $^{133}\text{Ba}$ (356keV) 右下 : $^{137}\text{Cs}$ (662keV))	22
2.12	各エネルギー毎の位置分解能	22
2.13	分割領域数による 662keV 光電吸収ピークでのエネルギー分解能の推移	23
3.1	64chPMT の読み出し系セットアップ	28
3.2	64chPMT と Preamp 基板とのインターフェース基板	28
3.3	Preamp 実装用プリント基板のレイアウトと配線図	29
3.4	アノード 61、53、45、37、29、21、13、5 におけるピーク値の変化。縦軸: ピーク値、横軸:測定位置。	30
3.5	アノードのゲイン表、外側の数字は 64chPMT のアノード番号	30
3.6	64cPMT のスペックシートによる各アノードのゲインと Calibration により求められた相対ゲイン比の相関	30
3.7	コリメータ 1	31
3.8	64chPMT のアノードの位置座標とコリメータの穴との位置関係	31
3.9	放射線の入射位置とシンチレーション光の分布	32
3.10	$\alpha$ 線を入射したときのダイノードのスペクトル (log 表示)	33
3.11	$\alpha$ 線を入射したときの各アノードにおけるスペクトル (ただし、右上の一つはダイノードのスペクトルである)	33
3.12	リニアリティ補正前の $\alpha$ 線の検出位置、縦軸・横軸は任意の座標	34
3.13	リニアリティ補正後の $\alpha$ 線の検出位置、縦軸・横軸共に単位は mm	34
3.14	コリメータの穴の位置と検出位置のリニアリティ : x 軸方向成分	34
3.15	コリメータの穴の位置と検出位置のリニアリティ : y 軸方向成分	34

3.16	x 軸方向における $\alpha$ 線の入射位置による位置分解能の変化 (横軸: 位置、縦軸: 位置分解能)	35
3.17	使用した GSO の形状の種類	36
3.18	64chPMT に GSO を取り付け $\alpha$ 線を光電面の真ん中に入射させたときの検出位置 (リニアリティ補正前)	36
3.19	図 3.18 を y 軸方向から射影した図	36
3.20	10mm×10mm×10mmGSO を 4 つ並べる	37
3.21	コリメータ 2 (穴径:1mm、穴間隔:2.5mm、外寸はコリメータ 1 と同じ)	37
3.22	図 3.20 の GSO を取り付けたときの $\alpha$ 線の検出位置 (リニアリティ補正前) 縦軸・横軸は任意の座標	37
3.23	図 3.20 の GSO を取り付けたときの $\alpha$ 線の検出位置 (リニアリティ補正後) 縦軸・横軸は共に単位は mm	37
3.24	10mm×10mm×10mmGSO の場合のコリメータの穴の位置と検出位置のリニアリティ: x 軸方向成分	38
3.25	10mm×10mm×10mmGSO の場合のコリメータの穴の位置と検出位置のリニアリティ: y 軸方向成分	38
3.26	ガンマ線における位置分解能測定のセットアップ	39
3.27	GSO にガンマ線をコリメートして入射させたときの検出位置	39
3.28	ガンマ線のエネルギーと検出位置の位置分解能の関係	39
3.29	領域を分割していきエネルギースペクトルの補正を行なったときのエネルギー分解能の推移	40
3.30	補正を行なわなかったときのスペクトル ( $^{137}\text{Cs}$ (662keV))	40
3.31	領域を 25 分割し、補正を行なった場合のスペクトル ( $^{137}\text{Cs}$ (662keV))	40
3.32	結晶の形状と位置分解能の関係	41
3.33	4.5mm×4.5mm×19mm の YAP を 4×4 の計 16 個並べた YAParray	42
3.34	YAParray に付けた ID	42
3.35	YAP と PMT を組み合わせたセットアップ	42
3.36	24mm×24mm×19mm の YAP で $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$ を同時に当てたときのスペクトル	43
3.37	YAP1piece に、切り出す前の YAP と同様に $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$ を同時に当てたときのスペクトル	43
3.38	24mm×24mm×19mm の YAP に $\alpha$ 線と $^{137}\text{Cs}$ (662keV) を同時に入射したときのスペクトル	44
3.39	YAP1piece に $\alpha$ 線のみ入射させたときのスペクトル	44
3.40	$\alpha$ 線を入射させた位置	44
3.41	$\alpha$ 線の検出位置	44
3.42	YAParray + 64chPMT 検出器のセットアップ	45
3.43	YAParray の全面にガンマ線を照射したときの検出位置	46
3.44	コリメータを使って YAP6 にガンマ線を入射させたときの検出位置	46
4.1	PDarray + 64chPMT 検出器によるイメージングセットアップ	49
4.2	散乱体に用いた 3×3 の計 9ch の PD からなる PDarray	49

4.3	イメージングデータ集録の全体の流れ	49
4.4	イメージングデータ集録のタイミングチャート	50
4.5	コリメータ通過後のガンマ線の経路	51
4.6	662keV のガンマ線を PDarray に入射させたときの、PD 各チャンネルにおけるエネルギースペクトル (横軸: エネルギー [keV]、縦軸: カウント数)	53
4.7	PDarray で散乱されたガンマ線の 64chPMT におけるダイノードのエネルギースペクトル (横軸: エネルギー [keV]、縦軸: カウント数)	53
4.8	イメージング測定によって得られた $\theta$ の分布	54
4.9	Area1 の領域における $\theta$ の分布	54
4.10	Area2 の領域における $\theta$ の分布	54
4.11	Area3 の領域における $\theta$ の分布	54
5.1	光子のコンプトン散乱による散乱方向と偏光方向の関係	57
5.2	偏光測定セットアップ	59
5.3	プラスチックシンチレータと YAParray のコインシデンスをとるためのセットアップ	59
5.4	左図: YAParray + 64chPMT 検出器によるコンプトン散乱イベント判別方法の概念図。右図: 検出イベント二次元プロット、二重丸で挟まれた部分がコンプトン散乱イベント。	60
5.5	バックグラウンドイベントの検出位置の二次元プロット	60
5.6	$^{137}\text{Cs}$ イベント (太線) に対するバックグラウンドイベント (細線) の重ね合わせ	60
5.7	偏光ガンマ線 ( $^{133}\text{Ba}$ ) を YAParray(YAP10) に入射させたときのイベント検出位置の分布図。左図: x 方向に偏光したガンマ線を入射。右図: y 方向に変更したガンマ線を入射。	62
5.8	コンプトン散乱イベントにおいて、横軸に回転角度、縦軸にカウント数をとった図 ( $^{133}\text{Ba}$ )。サインカーブでフィッティングが施してある。	62
5.9	図 5.8 を検出効率で割った図。サインカーブでフィッティングが施してある。	63
5.10	偏光ガンマ線 ( $^{137}\text{Cs}$ ) を YAParray(YAP10) に入射させたときのイベント検出位置の分布図。左図: x 方向に偏光したガンマ線を入射。右図: y 方向に変更したガンマ線を入射。	64
5.11	コンプトン散乱イベントにおいて、横軸に角度、縦軸にカウント数をとった図 ( $^{137}\text{Cs}$ )。サインカーブでフィッティングが施してある。	64
5.12	図 5.11 を検出効率で割った図。サインカーブでフィッティングが施してある。	65

# 第1章 序論

## 1.1 X線ガンマ線天文学

天文学の研究対象は長い間、可視光で見える天体に限られてきた。しかし、20世紀半ば、レーダー技術の発展を背景に電波天文学が誕生し、宇宙背景放射やクエーサーが発見された。さらに人工衛星によって、地上では観測が難しいX線や赤外線を宇宙空間でとらえるようになり、これらの目に見えない波長領域で輝く星や銀河が続々と見つかった。

こうした中、1967年核実験を監視する米国の軍事衛星が、宇宙で起こるガンマ線の爆発現象「ガンマ線バースト」をとらえた。これがガンマ線天文学の始まりである。X線と同様、ガンマ線は大気で遮られるため、天文衛星を使う観測が中心となった。しかしそれでも検出は難しく、最初のうちは20個程度のガンマ線天体しか見つからなかった。

1991年に米国のコンプトン衛星が活動をはじめてから状況が大きく変わった。コンプトンには総重量が約2トンに達する超大型のガンマ線検出器などが搭載された。これにより一挙に約270個のガンマ線天体が見つかったり、ガンマ線が描き出す宇宙の全体像が浮かび上がった。

これまでに見つかったガンマ線天体の約半数は、電波や可視光などの他の波長領域では見えず、正体がかめていない。宇宙最大の爆発現象と言われるガンマ線バーストについては、最近はかなり研究が進み、その起源が遠方銀河内で起こる極超新生という説が有力になってきており、2000年に打ち上げられたHETE-2衛星の活躍が目立つが、多くの謎が残っている。そして、ガンマ線領域での観測で大きな成果を上げたコンプトン衛星も、2000年大気圏に突入し消滅した。

現在、米日伊仏瑞共同で開発されている次世代ガンマ線天文衛星であるGLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) が、2007年に打ち上げ予定されている。GLASTは、入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを同時に決定することができる電子陽電子対生成型ガンマ線検出器を搭載しており、そのエネルギー範囲(20MeV~300GeV)、視野(2.5str以上)、点源位置決定精度(30秒角~5分角)の全てがこれまでの観測衛星と比べて大きく改善されているので、長期的な観測で得られる検出感度は今までのガンマ線天文衛星の50~100倍に達すると予測されている。これにより観測される高エネルギー天体の数が飛躍的に増えると考えられる。また、日本でもX線天文衛星であるAstro-E2が2005年打ち上げ予定である。Astro-E2にはX線望遠鏡(XRT)や高分解能X線分光器(XRS)などが搭載されるが、その中の一つであるHXD2検出器のアンチ検出器では、ガンマ線バーストやトランジェント天体の観測を目的としている。GLASTでは20MeV~300GeV、HXD2で数10keV~700MeVのエネルギー領域をカバーすることになるが、広視野撮像型の全天モニター計画において100keV~数MeVのエネルギー領域がエネルギーギャップになりつつある。そこでこのエネルギー領域の観測を目的とした検出器として、GLASTの検出器

にも使われているシリコンストリップなどを用いたガンマ線コンプトンカメラの開発が各国で行なわれている。

日本でも、NeXT衛星搭載を目的としたシリコンストリップやテルル化カドミウム(CdTe)を用いたコンプトンカメラの開発が盛んに行なわれている。

## 1.2 X線ガンマ線による偏光観測

電波、赤外線、可視光といった波長領域では、偏光観測が通常の観測手段として確立し、多くの観測成果があがっている。X線の波長領域でも、超新星残骸やパルサーの磁場構造、ブラックホール周辺の降着円盤の構造、活動銀河核の物質分布等を明らかにするために、偏光観測が重要な役割を果たすと期待されている。しかし、実際には1970年代にカニ星雲からのX線偏光が検出されて以来、20年以上その観測成果がない状態が続いている。このような状況の原因の一つとして、効率の良いX線偏光計がなかったことがあげられる。この間、角度分布や時間変動、エネルギースペクトルの測定においてX線天文学の観測機器は飛躍的な進歩をとげ、様々な成果をあげている。そしてそれらのさらなる進歩が期待される一方で、それに伴う問題も出てくる可能性がある。このような状況で、X線ガンマ線天文学の新しい局面としての偏光観測、またそれを可能にする精度のよい偏光検出器の開発が期待されている。

## 第2章 宇宙ガンマ線用位置検出型シンチレーション検出器

硬 X 線・ガンマ線領域の天体観測には、主としてシンチレーション検出器が用いられてきた。本章では、このシンチレーション検出器に着いて述べ、さらに、近年小型化がなされてきた位置検出型光電子増倍管と、高阻止能シンチレータとを組み合わせた位置検出型シンチレーション検出器についても述べる。

### 2.1 シンチレーション検出器

シンチレーション検出器は、ガンマ線と相互作用を起こしシンチレーション光を発生するシンチレータと、発生したシンチレーション光を電気的なパルス信号に変換する光検出部とを組み合わせた検出器である。シンチレータでは、ガンマ線が落としたエネルギーに比例した数の特定波長の光子を放出し、光検出部ではその光数に比例した電子数を出力する。つまり、ガンマ線がその全てのエネルギーをシンチレータに落としたとき、その入射ガンマ線のエネルギーに比例した電気信号を得ることが可能となる。光検出部には光電子増倍管 (PMT : Photomultiplier Tube) やフォトダイオード (PD) が用いられる。

#### 2.1.1 シンチレータ

放射線が入射したときに短い減衰時間をもった蛍光 (可視光) を発する物質をシンチレータといい、この発光現象をシンチレーション、発生する光をシンチレーション光という。ガンマ線の場合、シンチレータとの以下の三つの相互作用によりシンチレータ内に自由電子が発生し、この電子がシンチレータ内の束縛電子を励起することによりシンチレーション光を発する。

#### ガンマ線と物質の相互作用

##### 1. 光電吸収

低エネルギーのガンマ線 (500keV) において支配的な相互作用。光電吸収過程では、入射したガンマ線が吸収物質原子と相互作用して完全に消失する。このとき、ガンマ線のエネルギーが K 殻電子の結合エネルギーより十分大きいときは、K 殻電子と相互作用を行ない、この K 殻電子を光電子として放出する確率がもっとも大きい。この相互作用によって生ずる光電子は次のようなエネルギー  $E_{e^-}$  を持つ。

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

ここで、 $E_b$  は光電子が最初に存在した殻の結合エネルギーである。この相互作用では、光電子とともに束縛殻に一つの空孔を持つ吸収物質のイオンを作る。この空孔は物質中の自由電子の捕獲や原子内の他の殻の電子の再配列により直ちに満たされる。よって、1個あるいはそれ以上の特性 X 線も生成される。この特性 X 線は最初に発生した場所のすぐ近くで結合力のそれほど強くない殻と光電吸収作用して再吸収される場合がほとんどである。しかし、この特性 X 線が検出器の外に逃げ出した場合は検出器に影響を与えることになる。光電吸収による全エネルギー吸収事象は、ガンマ線エネルギーの正確な情報を持つ線スペクトルを形成するためにもっとも重要な相互作用である。

## 2. コンプトン散乱

ガンマ線のエネルギーが 100keV から数 MeV のとき支配的な相互作用で、自由電子によるガンマ線格子の散乱事象である。コンプトン散乱については §5.1 で詳しく述べる。

## 3. 電子対生成

入射ガンマ線のエネルギーが電子の静止質量 ( 511keV ) の 2 倍、すなわち 1.02MeV を越えると、原子核のクーロン場との相互作用で電子陽電子対を生成し、ガンマ線は消滅する。原子核当たりの電子対生成の確率は、近似的に吸収物質の原子番号の 2 乗に従って変化する。

代表的なシンチレータには、NaI、CsI、BGO、GSO、YAP などの無機シンチレータ、プラスチックシンチレータである有機シンチレータ、液体シンチレータなどがある。X 線ガンマ線領域の天体観測に用いられるのは無機シンチレータであり、その特徴としては、発光効率が高い、吸収係数が高い ( 光電効果の割合が大きい ) ことなどが挙げられる。

本研究では主に GSO、BGO、YAP シンチレータを用いている。これはこれらのシンチレータが、高エネルギー光子に対して高い阻止能を持ち、硬 X 線ガンマ線領域の観測に適しているからである。BGO は、蛍光出力が NaI の 12% しかないという欠点があるが、原子番号が大きく無機シンチレータの中でも特に放射線吸収率が大きい。また、GSO は BGO より蛍光時間が短く、蛍光出力が NaI の 20% と大きい。YAP シンチレータは阻止能は BGO や GSO に劣るが、蛍光時間が 30ns とさらに短く、蛍光出力が NaI の 40% と大きく信号がノイズに埋もれにくいという特徴がある。無機シンチレータのうち現在実用されている一般的なシンチレータとその特徴を表 2.1 に示す。

表 2.1: 一般的なシンチレータとその特徴

	NaI	CsI	BGO	GSO	YAP
蛍光時間 (ns)	230	1000	300	60	30
密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	3.67	4.51	7.13	6.71	5.52
蛍光出力 (NaI を 100 とする)	100	47	12	20	40
発光ピーク波長 (mm)	410	565	430	480	347
組成式	NaI	CsI	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	$\text{Gd}_2\text{SiO}_4$	$\text{YAlO}_3$
ガンマ線 100keV での平均自由行程 (cm)	0.226	0.147	0.045	0.084	0.687

### 2.1.2 光電子増倍管 (PMT : Photomultiplier Tube)

光電子増倍管 (以下 PMT) とは、極めて微弱なシンチレーションパルスの光信号をこれに対応する電気信号に変換する装置である。PMT の一般的な構造を図 2.1 に示す。図のように、PMT は光を電子に変換する光電陰極 (光電面)、集束電極、電子増倍部、電子を集める陽極 (アノード) を真空の容器に収めたものである。

光が光電面に入射すると、光電効果により光電面から真空中に光電子が放出される。放出された光電子は集束電極によってダイノードに導かれ、ダイノードに向かって加速された電子は次のダイノードと衝突することによって電子の数が増幅される。増幅された電子が、出力信号としてアノードに収集される。電子増倍部における増幅率は  $10^6 \sim 10^8$  であり、典型的なシンチレーションパルスは  $10^7 \sim 10^{10}$  個の電子となる。

PMT による電荷増幅は非常に比例性よく行なわれるので、極めて広い範囲にわたり最初の光電子の数に対する比例性を保った出力を出すといった利点がある。また、内部利得のない半導体検出器 (PD : フォトダイオード) と違い、ノイズに埋もれることなく微弱な信号を検出でき、最初の光パルスの時間的情報も多く残されていて、継続時間が非常に短い光パルスにさらされた典型的な PMT は 20 ~ 50ns の遅延時間を経て数 ns の時間幅の電子パルスを形成することができるといった特徴もある。

しかし、光電面に入射した光子全てが光電子として放出されるわけではなく、実際に光電面から放出される光電子は、入射光子の 10 ~ 20% にすぎない。この入射光子に対する放出される光電子の数の割合を量子効率 (quantum efficiency :  $QE$ ) といい、

$$QE = \frac{\text{発生する光電子の数}}{\text{入射した光子の数}} \quad (2.2)$$

で表される。

PMT の構造にはいくつかあり、従来はガラス管のものが主流であったが、近年では電子軌道シミュレーションと微細加工技術によって、極薄型の電極を形成し高精度で積層させ、ダイノード間を狭くしたメタルチャンネルダイノードを用いたメタルパッケージ化が進み、よりコンパクトなものが使われるようになってきた。本研究においても位置検出に適したメタルチャンネル型 PMT を用いている。

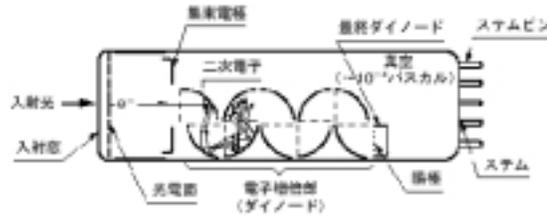


図 2.1: 一般的な PMT の構造

## 2.2 フォトダイオード (PD : photodiode)

PMT と同様に、光検出器としてフォトダイオード (PD : photodiode) が広く使用されるようになってきた。また、PD はシンチレータと組み合わせることによりシンチレーション検出器になり得る。p 型半導体 (ホール濃度高) と n 型半導体 (電子濃度高) を図 2.2 (A) のように接合させると、pn 方向と np 方向とで異なる電気抵抗が見られる。図 2.2 (B) のように p 型に正、n 型に負の電圧をかけると、正孔と電子ははお互いの方向に移動する。正孔と電子は両電極から供給され続けるので、電流は継続して流れることになる。これに対して、図 2.2 (C) のように、p 型に負、n 型に正の電圧をかけると正孔と電子は離れる方向へ引き付けられるため、pn 接合面にはキャリア (正孔、電子) が存在しない領域が広がる。この領域のことを空乏層という。空乏層は高抵抗の絶縁層なので、電流はほとんど流れない。

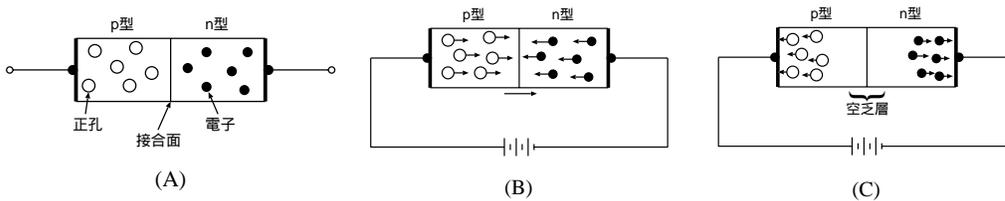


図 2.2: 半導体。A : pn 接合、B : 順方向に電圧印加、C : 逆方向に電圧印加。

PD は、pn 接合の両端に逆方向の電圧 (逆バイアス電圧) をかけると、空乏層が生じるため電流は流れないが、図 2.3 のように空乏層に可視光あるいは放射線が入射すると、PD 内で起こる相互作用により価電子帯の電子が伝導帯に励起され、価電子帯には正孔をつくる。この電子正孔対が逆バイアス電圧をかけることによる電場によって電極に集められ、信号となる。PD では、電流パルスの大きさ、言い換えると空乏層の中で生じたキャリア対の数が、放射線のエネルギーに比例するので、出力パルスの電荷量から入射放射線のエネルギー  $E$  が分かる。例として、シリコン (Si) の場合、空乏層中で生じるキャリア対の数は  $n_e = \frac{E(eV)}{3.65V}$  となる。

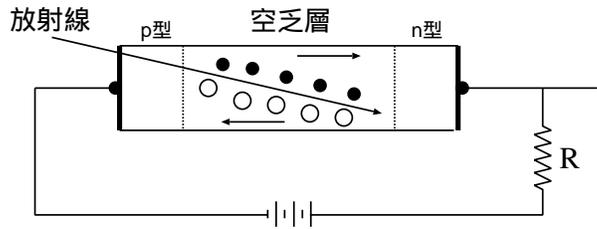


図 2.3: PD における放射線検出原理

PMT は、シンチレータと組み合わせて用いられる最も一般的な光検出器であるが、近年の PD の開発の進歩により、数 10MeV 以上の高エネルギーの放射線においては PMT の代わりに新たに利用されるようになってきた。一般に PD は、PMT に比べて量子効率が高いのでエネルギー分解能が良い、消費電力が少ない、寸法が小さく頑丈である、といった利点がある。また、PD は磁場の影響を受けないので、磁場が存在するため PMT が使用できない実験では、その代わりに PD が用いられている。PD 内では、電荷が移動する距離が比較的短いため、その時間的応答は通常 PMT と同程度である。

典型的なシンチレーション光に対応する光子は  $3 \sim 4\text{eV}$  のエネルギーを持つので、バンド幅が  $1 \sim 2\text{eV}$  の半導体中に電子正孔対を多数形成するのに十分である。可視光から電気的なキャリアへの変換過程は通常太陽電池の動作の基礎になっているものである。変換は通常 PMT の光電陰極のように、表面から電荷キャリアを逃げ出させることの必要性に束縛されないため、この過程の量子効率は  $60 \sim 80\%$  まで高められる。この値は PMT より数倍大きく、PD が強みとするところである。しかし、PD は内部利得がないため信号が極めて小さいままである。典型的なシンチレーション事象では可視光は数千個しか生成されないため、得られる電荷パルス大きさは電子電荷の  $10^4 \sim 10^5$  以下に限定される。このように信号の波高が小さいために、特に大面積の検出器や低エネルギーの放射線の場合に熱によって発生する電荷キャリア、すなわち暗電流による雑音 (ノイズ) が最大の問題となる。

近年では、PD 内で生成される少量の電荷を、半導体に高い電圧を印加して起こるなだれ過程 (avalanche process) によって増幅することを可能とした APD (avalanche photodiode) が、安定した性能を示してきており、注目を集めている。APD は、コンプトンカメラの吸収体部分の検出器の候補にあがっている。

### 2.3 位置検出型シンチレーション検出器

次節で述べる位置検出型 PMT と、結晶シンチレータを組み合わせることにより、位置検出型シンチレーション検出器を構成することができる。最近では、核医学における診断装置として位置検出型シンチレーション検出器を用いたガンマカメラや PET (POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY) カメラなどが開発、実用化されている。しかしながら、天体観測における宇宙関係のガンマ線検出器としてはまだ実用化されていない。そこでその応用として、観測している天体の位置を正確に決めるために用いられている Coded-Mask (暗号化されたマスク) の下に置かれる検出部、またコンプトンカメラの吸収部としても

考えられた。このような応用が考えられる位置検出型 PMT について述べる。

### 2.3.1 位置検出型光電子増倍管

図 2.4 に示すように、PMT にはいろいろな構造のものがある。我々がよく用いている PMT は、図 2.1 のようなボックス型で、入射する光子一個に対して一つの信号出力しかない。これに対して、位置検出型 PMT はマトリックス状またはリニア状に複数のアノード（信号出力電極）を持った PMT である。また、二層の直行したワイヤ状アノード（クロスワイヤアノード）、クロスプレートアノードを持った位置検出型 PMT もある。

位置検出型 PMT の特徴として、複数のアノードがあるということと同時に、電子増幅部におけるダイノード構造がある。その代表的なものが図 2.4 のメッシュ型とメタルチャンネルダイノード型の構造を持つ PMT である。メッシュ型のダイノードは、微細なメッシュ状の細線からなり、メッシュ上部に電子が当たると、メッシュ上に蒸着された二次電子増幅面より複数個の二次電子が放出され、さらに多くのメッシュダイノードにより  $10^6$  倍まで増幅される。本研究で用いた位置検出型 PMT は、図 2.4 にあるメタルチャンネルダイノード型の構造のダイノードを備えており、アノードが  $8 \times 8$  の計 64 個がマトリックス状に並んだマルチアノード型の光電子増倍管である。

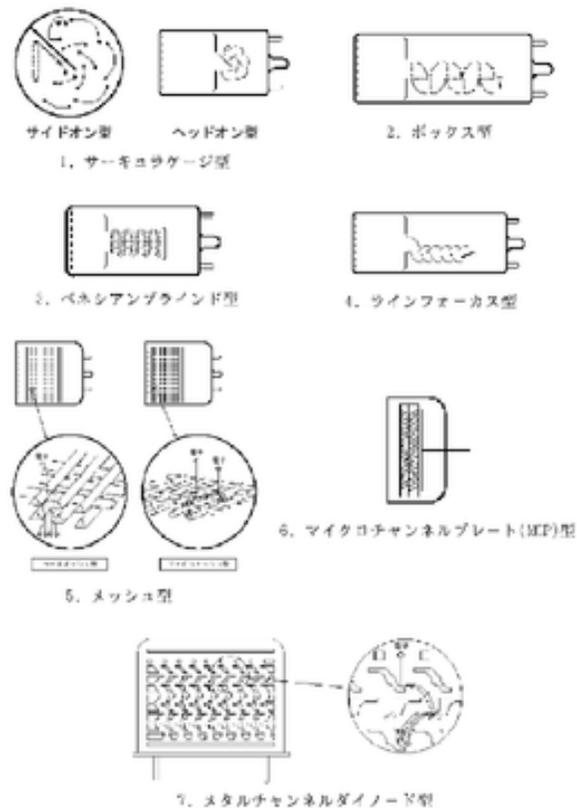


図 2.4: いろいろな PMT の構造

メッシュ型、メタルチャンネル型のダイノードはともに微細な構造をしており、ダイノード間の間隔が狭く各段間での二次電子の空間的広がりが小さいために位置検出に適している。また、ダイノード間の間隔が狭いので、高速応答が可能であり、ダイノードから放出された二次電子の電子軌道が、外部からの磁場の影響を受けにくいいため、高磁場中での使用が可能である。PMTの電気的特性はダイノードの種類だけでなく、光電面の大きさやフォーカス系によっても左右されるため一概には言えないが、ヘッドオン型PMTの各ダイノード構造別の大まかな特性を表2.2に示す。磁気特性は最も影響を受けやすい軸方向で、特性があまり変化しない上限値である。

表 2.2: ダイノード別特性例

	時間特性 上昇時間 [ns]	磁気特性 [mT]	収集 効率	特徴
サーキュラージュ	0.9 ~ 3.0	0.1		コンパクト、高速
ボックス	6 ~ 20	0.1		高収集効率
ラインフォーカス	0.7 ~ 3	0.1		高速、高リニアリティ
ベネシアンブライド	6 ~ 18	0.1		大口径に向く
ファインメッシュ	1.5 ~ 5.5	700 ~ 1200 以上		高磁場用、高リニアリティ
MCP	0.1 ~ 0.3	15 ~ 1200 以上		超高速
メタルチャンネル	0.65 ~ 1.5	1 ~ 20		コンパクト、高速

### 2.3.2 浜松ホトニクス社製 H7546(64chPMT)

本研究で用いている位置検出型PMTは、浜松ホトニクス社製のH7546である(以下64chPMTと呼ぶ)。64chPMTの構造を図2.5に示す。この64chPMTは、メタルチャンネルダイノード型のPMTで、信号出力電極であるアノードが、図2.6のように8×8の計64個がピクセル状に並んでいるのが特徴である。

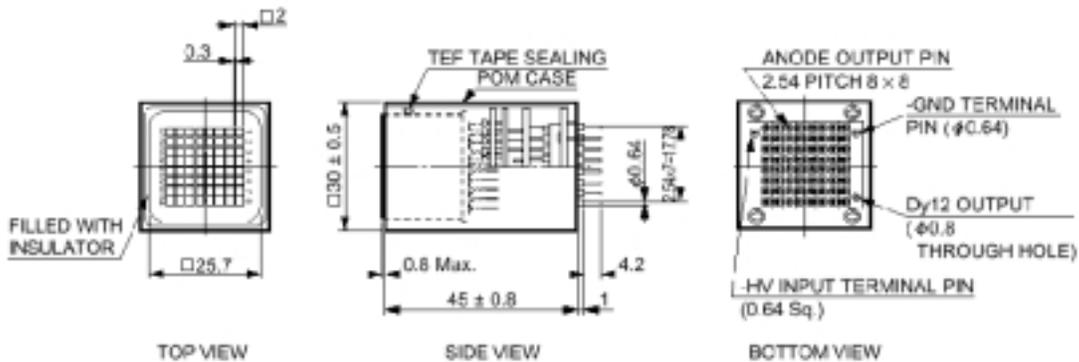


図 2.5: 64chPMT の構造 (単位 : mm)

図からわかるように、64chPMTは非常にコンパクトであり、メタルチャンネルダイノードの構造をとることで高速応答を実現している。この64chPMTの諸元及び特性を表2.3、表2.4に示す。マルチアノードタイプのPMTは主に多点計測を必要とする用途向けに開発された製品である。マルチアノード化は、1アノードが従来のPMT1本に相当することから、従来小さなPMTを何個も並べて測定していた用途（主に巨大な高エネルギー物理学実験、医療用核医学イメージング装置など）に対して、コストの削減に大きく寄与している。

しかし、64chPMTはマルチアノードであるために、光電面に光子が入射してダイノードで増幅された電子は各アノードに分配される。よって、一つのアノードで受け取る電子の数は増幅された電子の一部ということになる。つまり、分配された分、一つのアノードで検出される信号の波高は小さくなってしまうため、光電面に入射する光子の数は多い方が良い。そこで、64chPMTにBGOを取り付けたときにどれくらい低エネルギーのガンマ線まで使えるかを考えてみる。放射線計測ハンドブック（日刊工業社出版）より、BGOの全光収率は8200/MeV、64chPMTの量子効率が20%であることを考慮し、1アノードの立体角を0.14strとすると、1アノード当たりPMTの光電面で受けるシンチレーション光の数は、1MeVで $8200 \times 0.2 \times \frac{0.14}{4\pi} \sim 10$ 個である。PMTの1アノードは3個以上の光子があれば検出できるので、～数100keVが下限であると考えられる。

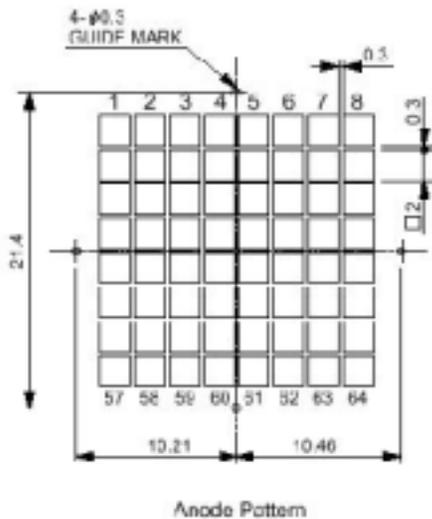


図 2.6: 64chPMT のアノード構造

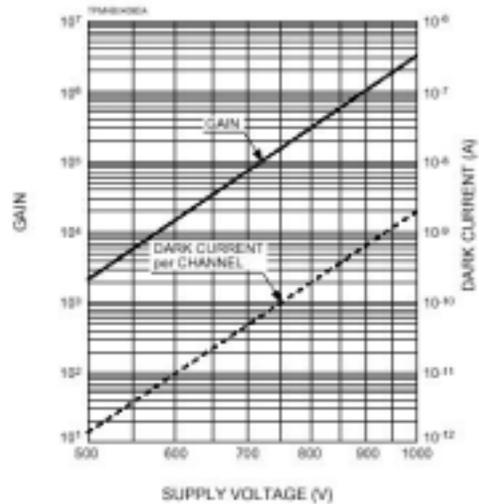


図 2.7: 64chPMT のゲインスペック

表 2.3: 64chPMT の諸元

Parameter		Description/Value	Unit
Spectral Response		300 to 650	nm
Wavelength of Maximum Response		420	nm
Photocathode	Material	Bialkali	-
	Minimum Effective Area	18.1 × 18.1	mm <sup>2</sup>
Window Material		Borosilicate	-
Dynode	Structure	Metal Channel Dynode	-
	Number of Stages	12	-
Anode Size		2 × 2	mm <sup>2</sup>
Weight		~ 65	g

表 2.4: 64chPMT の特性 (25 °C の時)

Parameter		Value(Typ.)	Unit
Cathode Sensitivity	Luminous(2856K)	70	μA/lm
	Blue(CS 5-58 filter)	8	μA/lm-b
Quantum Efficiency at 390nm		20	%
Anode Sensitivity	Luminous(2856K)	21	A/lm
Gain		3.0 × 10 <sup>5</sup>	-
Anode Dark Current per Channel(after 30min. storage in darkness)		0.2	nA
Time Response (per Channel)	Anode Pulse Rise Time	1.5	ns
	Transit Time Spread(FWHM)	0.3	ns
Pulse Linearity per Channel(±5 % Deviation)		0.6	mA
Cross-talk(with 1mm Optical Fiber)		2	%
Uniformity Among All Anodes		1:3	-

図 2.8 に 64chPMT のブリーダ回路 (浜松ホトニクス製) を示す。陰極と陽極の間を抵抗により分圧し、各電極に規定の電圧を与える回路を電圧分割回路、一般にブリーダ回路という。図からわかるように、64chPMT 用のブリーダは陽極接地型 (マイナス高圧用) である。また、各ダイノード間の抵抗値は 100kΩ で、これにより各ダイノードに電圧が分配される。ここで後段の抵抗値が大きくなっているのは、電子密度の高くなる後段の電圧を標準電圧配分より高くなるようにし、電極間の電位勾配を高めることにより、空間電荷の影響に打ち勝つためである。前段での電圧配分は光電子収集効率、時間特性、SN 比 (信号ノイズ比) を考慮して抵抗値の大きい抵抗が使用されている。陰極への入射光量を増加して出力電流を増加させた場合、入射光量と出力電流との関係は、ある電流値以上で直線性が失われる。実際にブリーダ抵抗 (R1~R15) に流れる電流は、ダイノードからブリーダ抵抗へ逆方向に流れ込むダイノード電流との差になる。つまり、ダイノード電流に

よるブリーダ電流の相殺、そしてそれに伴う電極間電圧の低下はダイノード電流の大きな後段になるほど顕著になる。このため最大直線出力はブリーダ電流の数十分の一になる。そこで、C1・C2・C3 のデカップリングコンデンサを最後の数段に接続して、パルス期間中 PMT に電荷を補給し、最終ダイノードと陽極間の電圧降下を抑制することにより直線性の改善を行っている。また、最終ダイノードとその前段のダイノードに、ダンピング抵抗 R16・R17・R18 を挿入することにより出力波形のリングングを軽減している。さらに、C4・R19 ではハイパスフィルターを作っている。

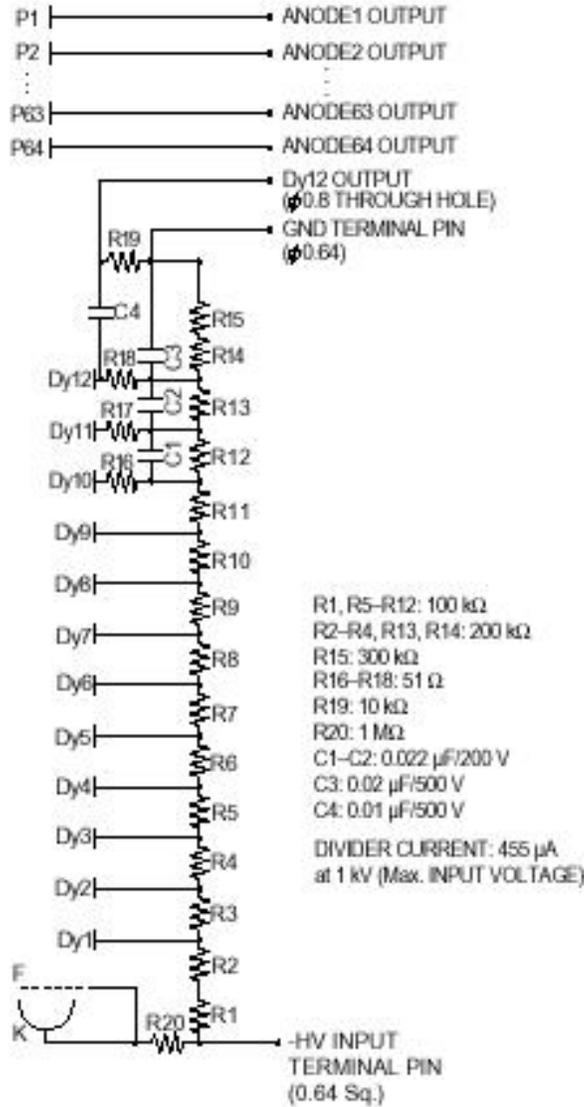


図 2.8: 64chPMT のブリーダ回路

## 2.4 ガンマ線イメージャー

0.5～10keVのX線領域では、日本の「あすか衛星」や欧米の「チャンドラ衛星」、「ニュートン衛星」などの活躍により、極めて感度の高く、遠方のくらい天体の観測が可能となっている。これに対して、集光のできないガンマ線領域では、このような感度を得ることは難しい。特に、コンプトン散乱が支配的な数10keV～数MeVのエネルギー領域においては、全エネルギーを検出器に与える確率が低い。よって、バックグラウンド除去、また観測対象からのガンマ線をとらえることは困難である。

こうした中、このエネルギー領域で支配的なコンプトン散乱を利用した、撮像（イメージング）が可能な新しいガンマ線検出器であるコンプトンカメラの開発が盛んに行われている。我々も、ガンマ線イメージャーとしてシンチレータ、多チャンネルPMT及びシリコン検出器を用いた検出器の開発を行っている。

### 2.4.1 コンプトンカメラ

数10keV～数MeVのエネルギー領域におけるガンマ線観測においては、コンプトン散乱が支配的であり、ガンマ線と物質の相互作用の確率が光電吸収に比べて小さい。そのため、検出器に入射してきたガンマ線が検出器中の電子にエネルギーの一部を与え、その後散乱光子は検出器の外に逃げてしまうため、このエネルギー領域におけるガンマ線観測は難しい。しかし一方で、散乱された二次ガンマ線を独立に検出することにより、コンプトン散乱の運動学を用いて入射ガンマ線のエネルギーばかりでなく、その到来方向も決定することができる。この考えを元にされて開発されているのがコンプトンカメラである。図2.9にコンプトンカメラの原理を示す。

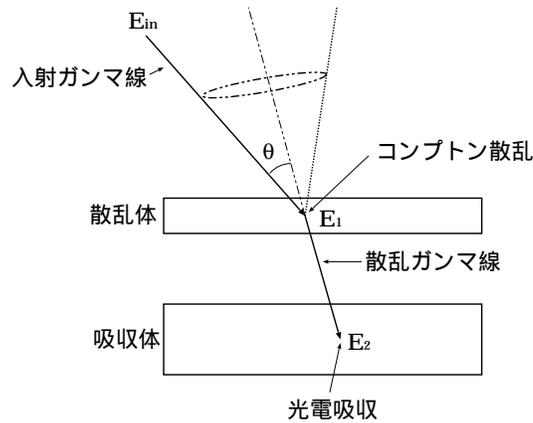


図 2.9: コンプトンカメラの概念図

図 2.9 のように 2 層（またはそれ以上）の位置検出型のガンマ線検出器があり、入射ガンマ線が 1 層目（散乱体）でコンプトン散乱を起こし、2 層目（吸収体）で光電吸収されたとする。入射ガンマ線のエネルギーを  $E_{in}$ 、散乱体におけるコンプトン散乱によるエネルギー損失を  $E_1$ 、吸収体における光電吸収されたエネルギーを  $E_2$  とすると、コンプトン散

乱の運動学より、図中の  $\theta$  が

$$\cos \theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2} \quad (2.3)$$

と表される。ここで、 $E_{in}=E_1+E_2$  である。これにより、入射ガンマ線光子の到来方向を頂角  $\theta$  を持つ円錐面上に制限することができる。これを複数のイベントにおいて行い、その円錐を重ね合わせることで、入射方向を決定することができる。図 2.9 と式 2.3 から分かるように、コンプトンカメラの角分解能は散乱体及び吸収体における位置分解能とエネルギー分解能によって決まる。つまり、散乱体に用いる検出器と吸収体に用いる検出器の位置分解能、エネルギー分解能によって、コンプトンカメラの性能が決定する。現在、散乱体として位置検出の非常に優れたシリコンストリップと、位置検出が優れ、高エネルギーの光子に対して比較的阻止能のある CdTe (テルル化カドミウム) が考えられており、NeXT 衛星に向けて開発が行われている。これらは優れたエネルギー分解能も示している。

我々はこれとは独立に、高阻止能シンチレータと位置検出型 PMT による位置検出型シンチレーション検出器を用いたガンマ線イメージャーの開発を行っている。

#### 2.4.2 位置検出型シンチレーション検出器の必要性

コンプトンカメラを構成する検出器としてシリコンストリップと CdTe が考えられている。しかし、CdTe は数 10keV ~ 数 MeV のエネルギーに領域における高エネルギー側では、その厚さにもよるが数 100keV で検出効率に限界がある。これに対して高阻止能シンチレータである GSO・BGO は、数 MeV 領域においてもある程度の検出効率を持っている。つまり、より高エネルギー側 (MeV 領域) のコンプトンカメラを構成するのに、位置検出型のシンチレーション検出器は有効であると考えられる。しかし、シンチレータはその加工技術により、ある程度厚さが大きくなるため、シリコンストリップや CdTe を用いた場合と比べ、コンパクト性に欠ける。また、シンチレータの厚さが大きいため、それらの放射化バックグラウンドが大きくなってしまふといった欠点も考えられる。位置検出型シンチレーション検出器を用いた場合の最も大きなデメリットとして、位置分解能・エネルギー分解能が悪いといったことがあげられる。

#### 2.4.3 位置検出型シンチレーション検出器の構成案

コンプトンカメラの構成として現在考えられているのは、シリコンストリップを多層に重ね、その下にさらに多層に重ねた CdTe を配置し、その回りを吸収体で囲むというモデルが考えられている。

我々は、より高エネルギー側のガンマ線をターゲットとしたコンプトンカメラの吸収体として、高阻止能シンチレータと位置検出型 PMT を組み合わせた位置検出型シンチレーション検出器を考える。位置検出型 PMT として用いるのは §2.3.2 で述べた 64chPMT である。高阻止能シンチレータとしては、GSO・BGO などが考えられる。これらのシンチレータは、従来用いられてきた NaI(Tl) や CsI(Tl) に比べてエネルギーに対する光量の線形性が良く、GSO シンチレータは NaI(Tl) の約 40% 程度の比較的大きな光量を発生する。また、有害性や潮解性がなく安定なために扱い易いといった利点がある。64chPMT と組

み合わせるシンチレータの種類・形状などは、その最適な組み合わせを模索するためにいろいろな研究が必要である。

## 2.5 8chPMT を用いた位置検出型シンチレーション検出器

64chPMT を用いた位置検出型シンチレーション検出器の開発に先立ち、8chPMT を用いた位置検出型シンチレーション検出器の実験が川本（広大理）によって行われた。ここでは、川本によって行われた 8chPMT を用いた研究結果について簡単に述べる。

### 2.5.1 8chPMT : 浜松ホトニクス社製 5900-00-C8

用いられた 8chPMT は、浜松ホトニクス社製の位置検出型 PMT-5900-00-C8 である。これは、64chPMT 同様メタルチャンネルダイノード型の PMT であるが、アノード部分が各軸 4ch で計 8ch のクロスプレートアノード構造をしている。8chPMT の構造とクロスアノードプレート構造を図 2.10 に示す。

### 2.5.2 8chPMT を用いた研究結果

#### $\alpha$ 線による位置分解能の測定

8chPMT に 24mm×24mm×5mm の GSO を取り付け、シンチレーション検出器を構成した。さらに、この GSO の上面に直径 1mm の穴の空いたアルミニウム製のコリメータを用いて、GSO の中心に  $\alpha$  線を入射させ、位置分解能を測定した。この結果、位置分解能が約 1.2mm という結果を得た。

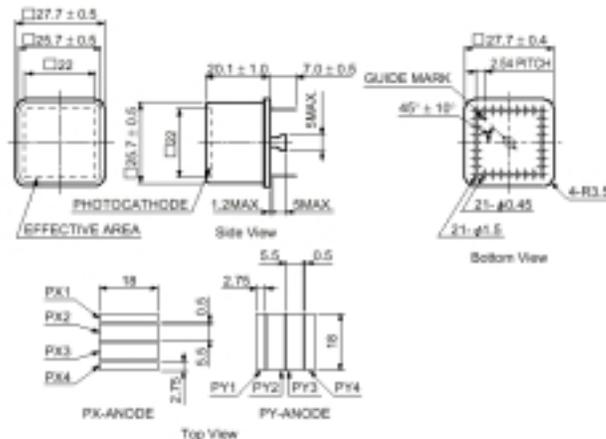


図 2.10: 8chPMT の構造及びクロスプレートアノード構造 (単位 : mm)

## ガンマ線に対する位置分解能のエネルギー依存

$\alpha$ 線の場合と同様に 8chPMT に  $24 \times 24 \text{mm} \times 5 \text{mm}$  の GSO を取り付け、直径 2mm の穴の空いた厚さ 5cm の鉛コリメータを用いて、GSO にガンマ線を入射させたときの位置分解能の測定を行った。実際の検出結果を図 2.11 に示す。ここでは、実際に得られる FWHM と、Geant4 シミュレータによるシミュレーションの結果とを比較することにより位置分解能を測定した。得られた各エネルギー毎の位置分解能を図 2.12 に示す。これより、位置分解能が入射ガンマ線のエネルギー  $E$  に対して  $E^{-\frac{1}{2}}$  に比例して良くなっていくのがわかる。 $^{137}\text{Cs}$  (662keV) のガンマ線においては、2.2mm という位置分解能を得た。

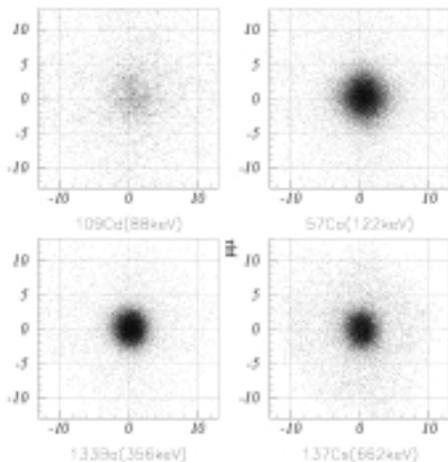


図 2.11: ガンマ線の実際の検出位置 (左上:  $^{109}\text{Cd}$  (88keV)、右上:  $^{122}\text{Co}$  (122keV)、左下:  $^{133}\text{Ba}$  (356keV)、右下:  $^{137}\text{Cs}$  (662keV))

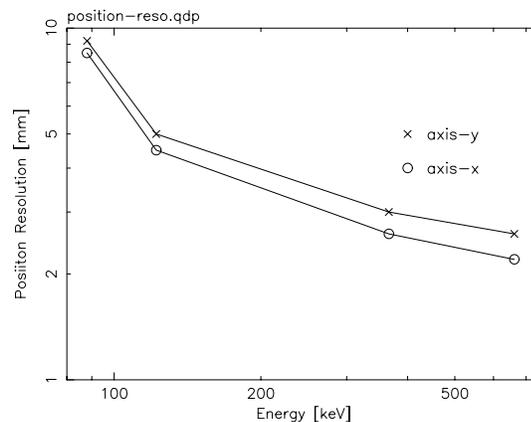


図 2.12: 各エネルギー毎の位置分解能

## 位置検出能力を用いたエネルギー分解能の向上

GSO ( $24 \text{mm} \times 24 \text{mm} \times 5 \text{mm}$ ) を取り付けた 8chPMT に  $^{137}\text{Cs}$  (662keV) を全面に入射させ、位置検出能力を利用して光電面を複数に分割して、それぞれの領域におけるエネルギースペクトルを比べると、662keV のピーク値が大きく変動する。そこで、ガンマ線をコリメートせずに GSO の全面に入射させたときのデータを用いて、エネルギースペクトルの補正を試みた結果、補正を行わなかった場合のエネルギー分解能 18% から、補正後 (5×5 分割) のエネルギー分解能 13% という、エネルギー分解能の向上を確認した。このときの分割領域数に対するエネルギー分解能の推移を図 2.13 に示す。

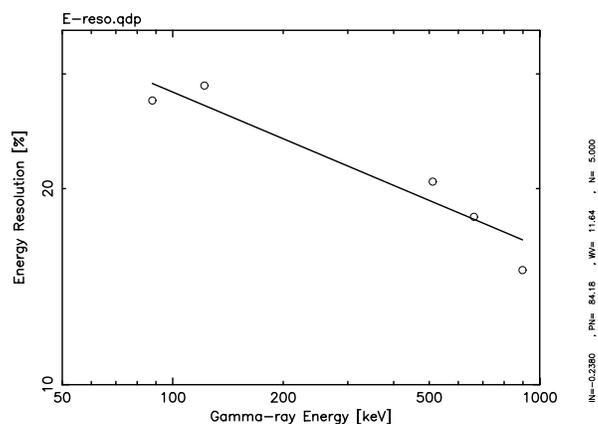


図 2.13: 分割領域数による 662keV 光電吸収ピークでのエネルギー分解能の推移

## BGO を用いた測定

GSO シンチレータの代わりに、BGO (24mm×24mm×10mm) を 8chPMT に取り付け検出器を構成し、GSO を用いた場合と同様に  $^{137}\text{Cs}$  を用いて位置分解能の測定、エネルギースペクトルの補正を行った。この結果、位置分解能において 6.6mm、エネルギー分解能 20% という値を得た。エネルギー分解能においては、補正を行ってもその向上は確認できなかった。この原因として、このエネルギー領域での位置分解能が悪いことに起因すると考えられる。また、位置分解能が悪い原因の一つとして、シンチレータの厚さが厚いということが考えられる。

## 2.6 本研究の目的

天体現象の解明には、X 線・ガンマ線領域での天体観測が重要な役割を担っている。しかし、数 10keV ~ 数 MeV のエネルギー領域においてはコンプトン散乱が支配的になり、感度の良い観測が困難になっている。特に 1~10MeV 領域が未開拓で、既知の天体数が数 10 個しかないという状況である。このエネルギー領域において観測を行なった検出器に、コンプトン衛星搭載の COMPTEL がある。しかし、COMPTEL の検出効率は ~1% と低く、全長が 1.7m×2.6m、重さが 1 トンと非常に大きく、有効面積も  $10\text{cm}^2 \sim 30\text{cm}^2$  と狭く、感度の良いものではなかった。我々は、このエネルギー領域で観測を行う検出器として検出効率が 5~10%、大きさが全長 0.5m、重さ 400kg、有効面積が  $100\text{cm}^2$ 、各分解能が数度のコンパクトで軽量、低バックグラウンドのコンプトンカメラの開発を目的としている。

そのために我々は、近年高阻止能シンチレータとして注目されている GSO・BGO と、メタルパッケージ化により小型化がなされてきた位置検出型 PMT とを組み合わせた位置検出型シンチレーション検出器の開発を行っている。§2.5.2 で述べた 8chPMT について行った実験を、64chPMT についても検証する。そこで、本研究ではまず、64chPMT からの信号 (アノード 64ch、ダイノード 1ch) を読み出すためのシステムの構築を行い、このシス

テムを用いることによりシンチレータ + 64chPMT 検出器の性能評価を行う。

次に、§2.4 で述べたコンプトンカメラの吸収体部分としての可能性を探るために、様々な形状、また数種類のシンチレータと 64chPMT とを組み合わせた検出器を構成し、その位置分解能・エネルギー分解能について調べる。さらに、実際に散乱体と組み合わせることによりイメージングを行い、その撮像能力を検証することを目的としている。具体的には、位置分解能 1mm @ 1MeV、エネルギー分解能 10% @ 1MeV を目指す。ここで、散乱体としては DSSD ( Double-sided Silicon Strip Detector : 両面シリコンストリップ検出器 ) を用いるのが最適であるが、64chPMT との同時読み出しが困難であるため、アレイ型の PD ( PDarray ) を用いることによりその代用とした。また、シンチレータをピクセル状に並べて 64chPMT と組み合わせることにより、シンチレータ内でのコンプトン散乱を利用した偏光検出器としての可能性についても調べる。

## 第3章 シンチレータ + 64chPMT 検出器による位置分解能の測定

我々は、§2.3.2 で述べた 64chPMT と高エネルギー光子に対して高い阻止能を持つ結晶シンチレータである BGO・GSO や YAP シンチレータと組み合わせた位置検出型シンチレーション検出器を構成した。この検出器は小型化・軽量化・単純化が可能である。

64chPMT は、アノードがピクセル状に並んだマルチアノード型の PMT であるため、組み合わせるシンチレータの形状として、極端に分けると二つの方法が考えられる。一つ目の方法として、64chPMT の光電面に細かい結晶シンチレータを並べるという方法がある。この場合、結晶をアノードの大きさまで小さくすることにより位置分解能を向上できるという利点があるが、反面、細かい結晶を作るのは難しく、結晶を細かくしてしまうと結晶内部の側面での光の反射による光子の減衰により、光収集率が悪くなるという欠点がある。またもう一つの方法として、64chPMT の光電面に一つの大きな結晶を取り付ける方法がある。この場合、位置分解能がそれほど良くならないという欠点があるが、結晶が大きいのので比較的簡単に作成することができ、光収集率も良いという利点を持っている。

§2.4.1 でも述べたように、コンプトンカメラに用いる検出器では、そのエネルギー分解能と位置分解能が重要になってくる。つまり、64chPMT とシンチレータの最適な組み合わせを模索する必要がある。そこで我々は、高阻止能シンチレータである GSO の形状を上であげた両極端な形状から、いくつか変化させ、64chPMT と組み合わせた検出器を構成し、それぞれの場合の位置分解能の違いについて考察した。シンチレータをピクセル状に並べる方法としては、4.5mm×4.5mm×19mm の YAP シンチレータを 4×4 計 16 個のアレイ状に並べ (YAParray) 64chPMT に取り付けた。これらの検出器においてその性能を調べることにより、コンプトンカメラへの応用を考える。

### 3.1 シンチレータ + 64chPMT 検出器の読み出しシステム

まず、64chPMT からデータを読み出し集録するための方法を述べる。§2.3.2 で述べたように、64chPMT からは一つのダイノード信号と、64 個のアノード信号が出力される。一般に多チャンネルの読み出しには VA チップが用いられる。本研究においても、当初 VA チップ・VA32C/TA32cg を用い、そのコントロール及びデータ集録を MCR11 で行なう予定であったが、MCR11 の不具合により断念せざるをえなかった。そこで我々は、64 個のプリアンプ用のプリント基板を、卒業研究で完全自作した結果を反映して設計し、業者 (光映電子) に発注して製作し、プリアンプは全て自作し、さらにそれをナショナルインスツルメンツ (NI) 社製の DAQdevice である PCI-6071E と組み合わせ、その制御に LabVIEW ソフトウェアを用いることにより 64chPMT からのデータ集録を行なった。

### 3.1.1 PCI-6071E

64chPMT からの信号処理には NI 社製の PCI-6071E を用いた。PCI-6071E の中には、一つの ADC と Multiplexer が入っており、64ch のアナログ入力を一つの ADC で AD 変換を行ない、デジタル信号として出力する。このため、PCI-6071E は ADC を一つしか使用しなくてよく、低コストであるという利点がある反面、1ch 当たりの AD 変換の時間は  $0.8\mu\text{s}$  という時間がかかるため、64ch 全てを読み出す場合、サンプル間で時間的ずれが生じるという欠点もある。PCI-6071E の主な特徴を表 3.1 に示す。

表 3.1: PCI-6071E の特徴

アナログ入力	アナログ出力	デジタルI/O	最大サンプリングレート	分解能
64ch	2ch	8ch	12MS/sec	12 ビット

### 3.1.2 LabVIEW ソフトウェア

PCI-6071E を制御するのが NI 社の LabVIEW ソフトウェアである。LabVIEW ( Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench : ラボラトリ仮想計測器エンジニアリングワークベンチ ) とは、グラフィカルプログラミング言語「G」をベースにした開発環境であり、多様なハードウェア通信が行なえるライブラリ関数が組み込まれている。LabVIEW の特徴として以下のようなことが挙げられる。

- 技術者や科学者、エンジニアにとって馴染みのある用語やアイコン、考え方を採用
- プログラミング操作はテキスト言語ではなく、グラフィカル言語で表されている
- データの集録、解析、表示、保存のための総合的なライブラリを備えている
- 従来のプログラム開発ツールも含まれており、プログラムの実行をグラフィック化することにより、プログラムの実行状態を確認できる
- プログラムをシングルステップで実行してデバッグや開発を簡略化することができる

LabVIEW のこのような特徴を生かし、計測システムやデータ集録システムのプログラムを短期間に完成することができる。また、計測システムの試作、設計、テスト、実装などに LabVIEW をしよすることで、システム開発時間を短縮し、生産性を向上させることができる。

### 3.1.3 64chPMT の読み出しシステムの流れ

64chPMT からの信号を読み出すために、これら PCI-6071E と LabVIEW ソフトウェアを用いて図 3.1 のような 64chPMT 用読み出しセットアップを構成した。データ集録の全体の流れを以下に示す。

1. まず、64chPMT を図 3.2 のようなインターフェース基板 ( クリアパルス CP3152N : 久保田 @ ISAS 設計 ) に取り付ける。
2. 次に、このインタフェース基板を使い 64chPMT に高圧電源 (  $\sim -1000\text{V}$  ) を供給し、ダイノード及び各アノードからの信号を取り出せるようにしている。
3. そして Preamp 用 OP アンプ ( LM6144 ) や抵抗、コンデンサ、また Discrri 用コンパレータ ( LM319N ) 等を実装したプリント基板に直接 64chPMT を立てる。このプリント基板のレイアウトと配線図を図 3.3 に示す。
4. Preamp に使用した抵抗・コンデンサは、ゲインを 5MeV のガンマ線に対して 5V、時定数を約  $300\mu\text{s}$  となるのを目安として、それぞれアノードでは  $50\text{M}\Omega$ 、 $5\text{pF}$ 、ダイノードでは  $25\text{M}\Omega$ 、 $33\text{pF}$  を使用した。また、OP アンプの output 側に  $0.01\mu\text{F}$ 、 $1\text{M}\Omega$  を取り付けグラウンドに落とすことにより、OP アンプのオフセットを取り除いた ( 図 3.1 下部 ) 。
5. 時定数を約  $300\mu\text{s}$  となるようにしたのは、PCI-6071E 内の ADC にアナログ信号を 64ch 入力した場合、1ch 当たりに必要な AD 変換の時間が  $0.8\mu\text{s}$  で、64ch の信号を AD 変換するのに約  $52\mu\text{s}$  の時間が必要となるため、この間の Preamp 出力の減衰の影響を極力少なくするためである。
6. これらの Preamp 出力、Discrri による Trigger 信号を PC 内の PCI-6071E に入力する。
7. Trigger 信号は、ダイノードの Preamp 出力と PCI-6071E からの DACout ( 定電圧 : これがダイノード信号のスレッシュホールドになる ) をコンパレータに入力し、その出力 Discrri 信号をワンショット IC:74LS123 を用いて約  $200\mu\text{s}$  の矩形波を生成する。これを Trigger 信号とする。
8. そしてこの PCI-6071E を LabVIEW ソフトウェアで制御することによりデータ集録を行なう。

64 個の Preamp は自作し、シェーピングは行なわず、図 3.1 の右上の波形のように、時定数を長くすることによりピークホールド・サンプルホールドの変わりとした ( ASCA 衛星 GIS 方式 )。こうすることにより、VA チップを使用した場合は不可能な、Preamp 出力や Discrri 信号を直接見ることができるといった利点がある。今後は、全てこの読み出しシステムを用いて 64chPMT からのデータ集録を行う。

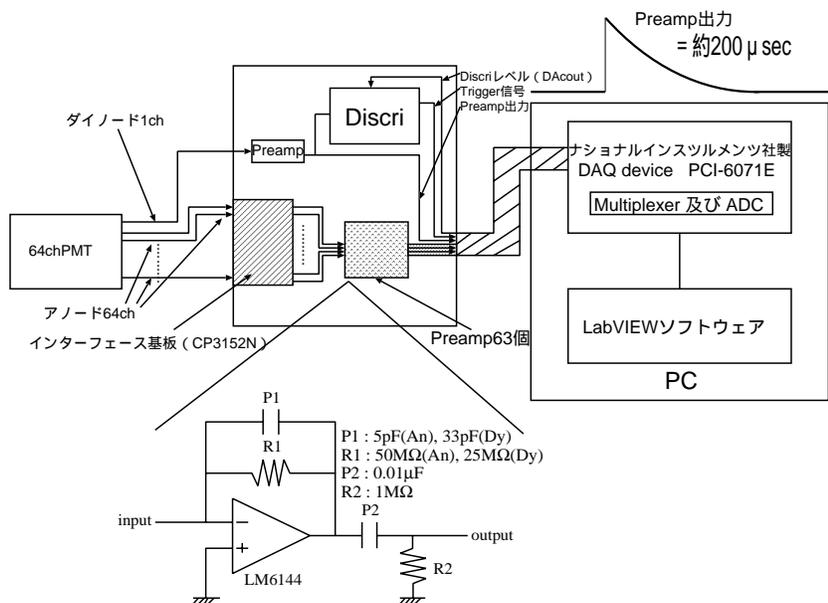


図 3.1: 64chPMT の読み出し系セットアップ

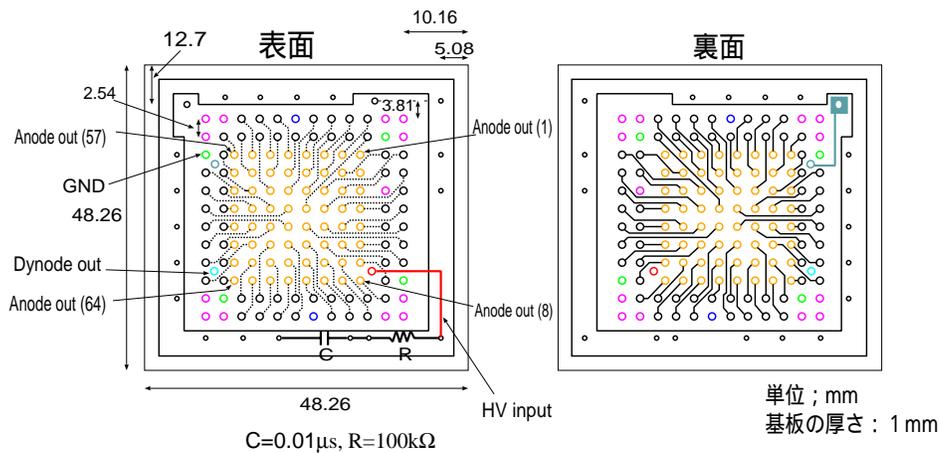


図 3.2: 64chPMT と Preamp 基板とのインターフェース基板

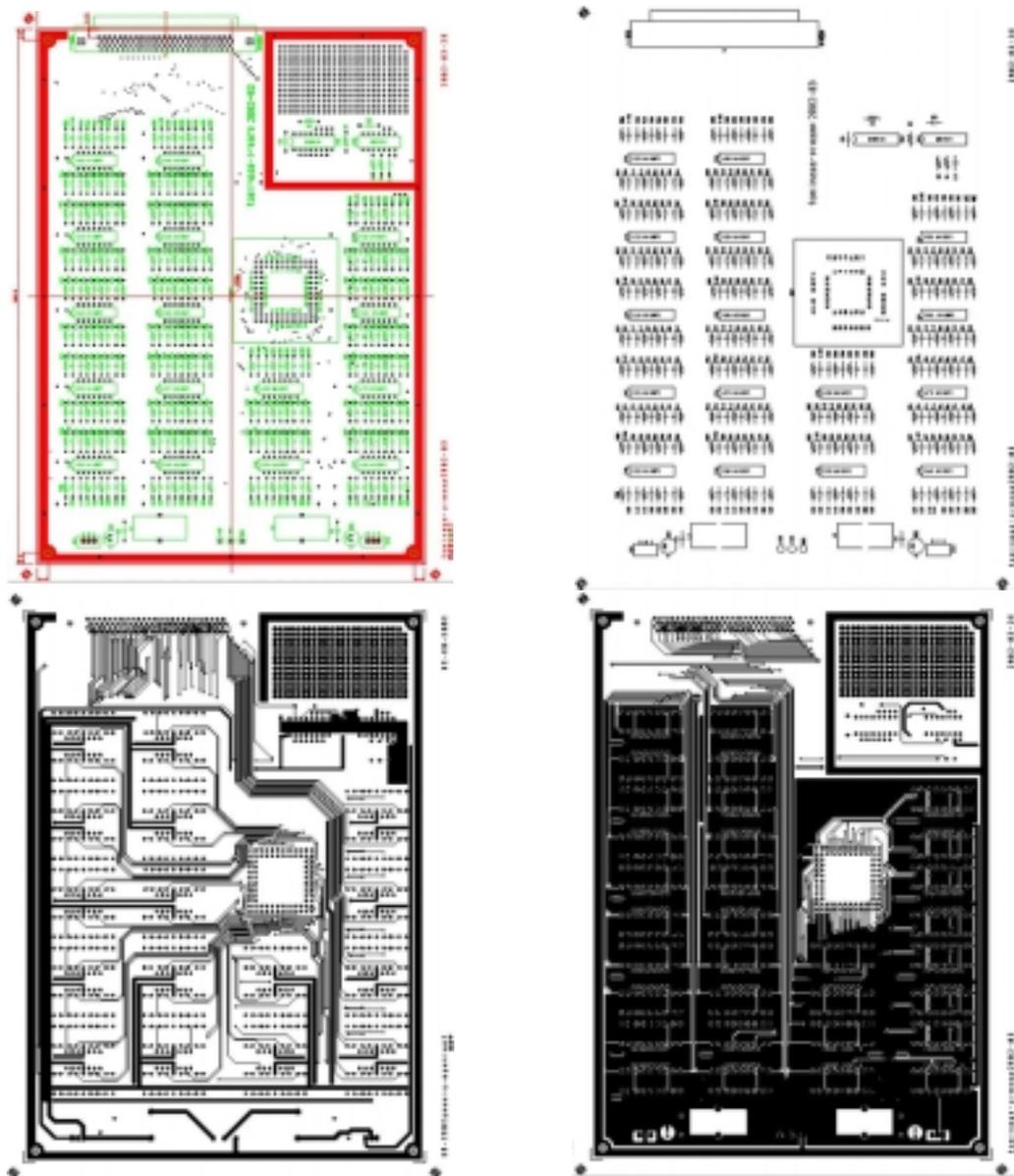


図 3.3: Preamp 実装用プリント基板のレイアウトと配線図

### 3.2 64chPMT の Calibration

64chPMT には 64ch のアノードがある。64chPMT はメタルチャンネルダイノード構造をしており、二次電子の空間的広がり小さいが、それぞれのアノードは別々に独立しているわけではなく隣のアノードの影響を受けるため、個々のゲインに違いが現れる。よって各アノードのゲイン補正 (Calibration) を行なう必要がある。

本来は LED を XY テーブルで精度良く移動させ、一つのアノード上に対して、各点におけるパルスハイトを求め、あるアノードに対してパルスハイトが最大となるところ

がアノード位置及びアノードゲインに相当する。しかし、今回は浜松ホトニクスによる64chPMTのスペックシートにより各アノードの位置が明らかであったので、簡単な方法として5mm×5mm×5mmのBGOを各アノードの真上にくるように2.3mm間隔で64点移動させ、 $^{137}\text{Cs}$  (662keV)を用いてガンマ線を入射させ、各点で得られるスペクトルの662keVのパルス高さを比較するという方法をとった。例として、ある列上の8本のアノードをスキャンしたときのピーク値の変化を図3.4に示す。ピーク値が最大になるところが、BGOとアノードの位置が一致したときである。

ゲイン補正は、各アノードで得られた最大のパルス高さを比較し、その値が一番大きかったアノード41を1として、各アノードの相対ゲイン比を求めた。図3.5にアノード41に対する各アノードの相対ゲイン比を示す。×印の付いているアノード1は、ダイアノード信号を処理しているため、アノード17は信号が出力されないため、故障していると考えられる。浜松ホトニクスによる64chPMTのスペックシートによる各アノードのゲインと、ここで測定した有効なアノードの相対ゲイン比との相関を取った図を図3.6に示す。二つとも相関しているが、個々に見ると一致していない。これは我々と浜松ホトニクスの測定方法の違いが原因であると考えられる。以下、アノード信号を取り扱ったデータ処理を行う場合は、常にこの相対ゲイン比を考慮する。

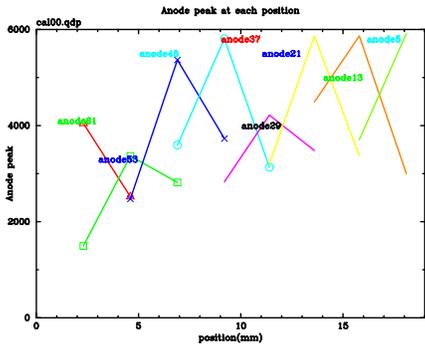


図 3.4: アノード 61、53、45、37、29、21、13、5 におけるピーク値の変化。縦軸:ピーク値、横軸:測定位置。

	57	49	41	33	25	17	9	1	
57	0.894	0.989	1.000	0.961	0.834	×	0.871	×	1
58	0.543	0.578	0.585	0.493	0.446	0.540	0.603	0.722	2
59	0.581	0.698	0.582	0.588	0.486	0.600	0.722	0.833	3
60	0.613	0.722	0.758	0.572	0.521	0.682	0.752	0.806	4
61	0.528	0.440	0.700	0.758	0.551	0.759	0.765	0.772	5
62	0.595	0.754	0.739	0.705	0.684	0.806	0.864	0.833	6
63	0.632	0.913	0.911	0.913	0.781	0.852	0.920	0.941	7
64	0.603	0.884	0.715	0.737	0.716	0.849	0.923	0.716	8
	64	56	48	40	32	24	16	8	

図 3.5: アノードのゲイン表、外側の数字は64chPMTのアノード番号

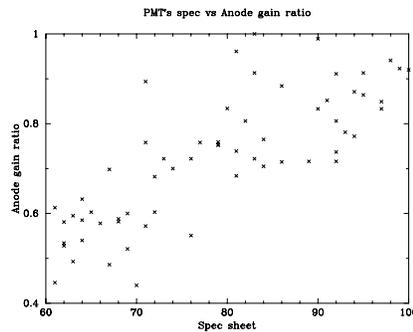


図 3.6: 64cPMTのスペックシートによる各アノードのゲインと Calibration により求められた相対ゲイン比の相関

### 3.3 GSO シンチレータ一つを用いた場合の $\alpha$ 線による位置分解能の測定

Calibration により 64chPMT の各アノードのゲイン補正を行なったので、64chPMT の特徴でもある位置検出能力について調べた。まずここでは、64chPMT に一つの GSO シンチレータを取り付け、検出器を構成し、非常に止まりやすい  $\alpha$  線を入射させ、入射位置と検出位置のリニアリティを測定し、位置分解能を調べた。

#### 3.3.1 セットアップ

まず、使用したシンチレータは 24mm×24mm×5mm の GSO である。この GSO に図 3.7 のようなコリメータ（アルミニウム製）を取り付け反射材を巻き、64chPMT との接着面に KE108 を塗り、取り付ける。そして  $\alpha$  線源をコリメータの各穴を通して GSO に入射する。このとき、二つ以上の穴に  $\alpha$  線が入射しないように、他の穴は塞いでおく。データの読み出しについては §3.1 で述べた通りである。

#### 3.3.2 位置検出の方法と入射位置と検出位置のリニアリティの測定

各イベント毎の 64 個（実質 62 個）のアノード出力の大きさを使って位置検出を行う。 $P_i$  を各アノードのパルスハイト、 $K_i$  を相対ゲイン比、 $\vec{x}_i$  を各アノードの位置（図 3.8 参照）とすると、各イベント毎のガンマ線の入射位置（検出位置） $\vec{X}$  を次式のように決める。検出位置決定には、式 3.1 のように各アノードの出力の二乗の重み平均をとるという方法を用いた。

$$\vec{X} = \frac{\sum_i (P_i/G_i)^2 \cdot \vec{x}_i}{\sum_i (P_i/G_i)^2} \quad (3.1)$$

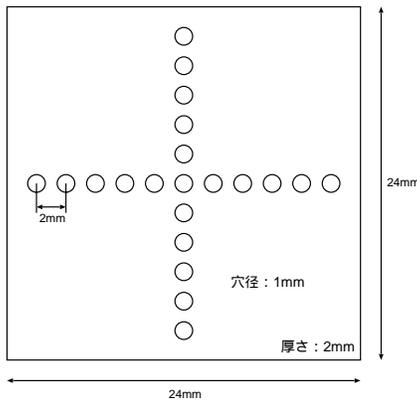


図 3.7: コリメータ 1

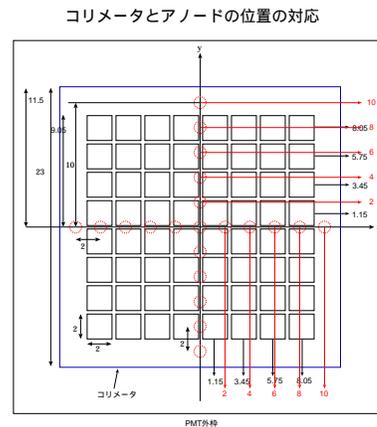


図 3.8: 64chPMT のアノードの位置座標とコリメータの穴との位置関係

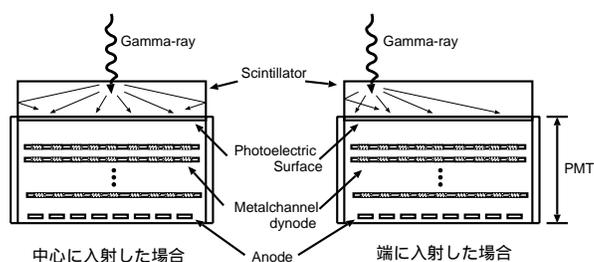


図 3.9: 放射線の入射位置とシンチレーション光の分布

図 3.7 を取り付けた GSO に、コリメータの各穴に  $\alpha$  線を入射させ、式 3.1 より検出位置を求めた。このときのダイノードのスペクトルと各アノードのスペクトルを図 3.10、図 3.11 にそれぞれ示す。また、コリメータを通して得られる検出位置を図 3.12 (アノード空間) に示す。これは、わかりやすくするために図 3.7 のコリメータの穴に、一つおきに入射させた場合だけを示している。図 3.12 を見ると、先述した通りコリメータの穴の位置より検出位置の方が真ん中の方に寄って検出されている。これは、64chPMT の有効面積が  $18.1\text{mm} \times 18.1\text{mm}$  しかなく、コリメータの端の方の穴は有効面積の外に出てしまい、本来外側で検出されるべき光が検出されず、内側のアノードのみ信号が出るため、重み平均を用いて位置決定を行うと、内側寄りになってしまうためである (図 3.9)。

そこで、これらの検出位置の実位置 (実際に  $\alpha$  線が入射した位置) における検出位置 (入射位置) を決定する必要がある。以下の方法により実空間における  $\alpha$  線の入射位置を決定した。

- まず、図 3.7 の各穴における位置分布をガウシアンでフィッティングすることにより、そのピークの位置を求める。
- 次に、そのピークの位置を横軸、入射  $\alpha$  線の位置 (コリメータの穴の位置) を縦軸にとったグラフを作成する。
- このグラフを五次関数でフィッティングを行う。この結果が図 3.14 (x 方向成分)、図 3.15 (y 方向成分) である。また、フィッティングにより得られた五次関数は次式のようになる。

$$X_{real}(x) = 1.64 \times 10^{-3} * x^5 - 2.22 \times 10^{-2} * x^3 + 1.37x + 0.54 \quad (3.2)$$

$$Y_{real}(y) = 2.67 \times 10^{-3} * y^5 - 4.51 \times 10^{-2} * y^3 + 1.57y + 0.86 \quad (3.3)$$

(ただし、 $x$ 、 $y$  はアノード空間における、 $X_{real}$ 、 $Y_{real}$  は対応する実空間での入射位置を表す)

- 求めた五次関数を用いて、図 3.12 における全イベントについて求めた位置を実位置に変換する。

以上により得られる実空間における  $\alpha$  線の検出位置は図 3.13 のようになる。ここで図 3.13 の端の方が広がっているのは、端の方では光の分布がゆがみ、位置分解が悪くなっているためである。

以上の方法を用いて、64chPMT に 24mm×24mm×5mm の GSO を取り付け、コリメータの真ん中の穴に  $\alpha$  線を入射させたときの半値幅 (位置分解能) を求めたところ、1.15mm という結果を得た。これは、24mm×24mm×5mm という大きな結晶シンチレータ一つを用いた、非常にシンプルな検出器に対して非常に良い結果と言える。また、x 軸方向における  $\alpha$  線の入射位置による位置分解能の変化を図 3.16 に示す。この位置分解能は、実空間に射影した入射位置を x 方向 (または y 方向) から射影し、ガウシアンでフィッティングを行い、そのフィッティングパラメータからフィッティングガウシアンの FWHM を求めることにより決定した。

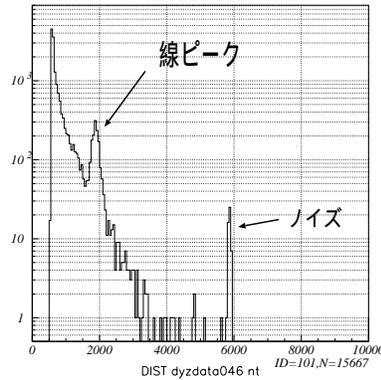


図 3.10:  $\alpha$  線を入射したときのダイノードのスペクトル (log 表示)

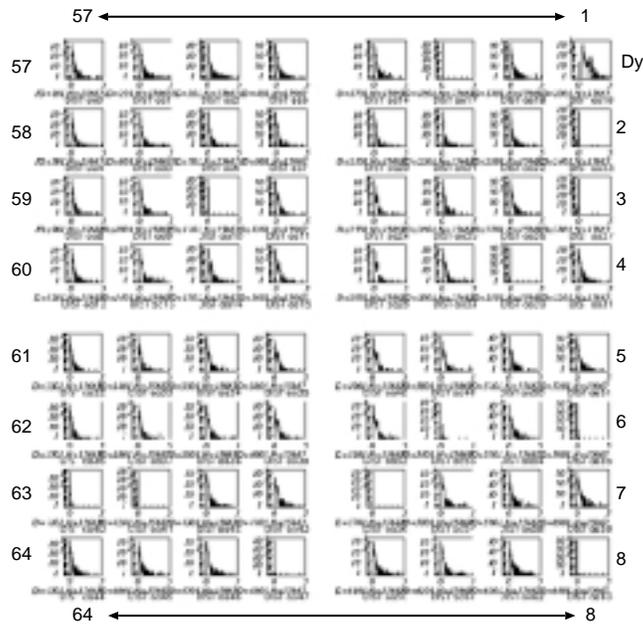


図 3.11:  $\alpha$  線を入射したときの各アノードにおけるスペクトル (ただし、右上の一つはダイノードのスペクトルである)

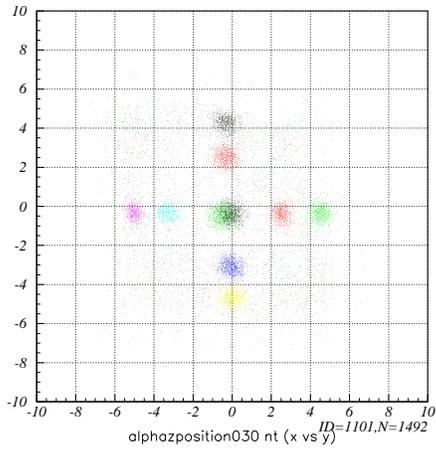


図 3.12: リニアリティ補正前の  $\alpha$  線の検出位置、縦軸・横軸は任意の座標

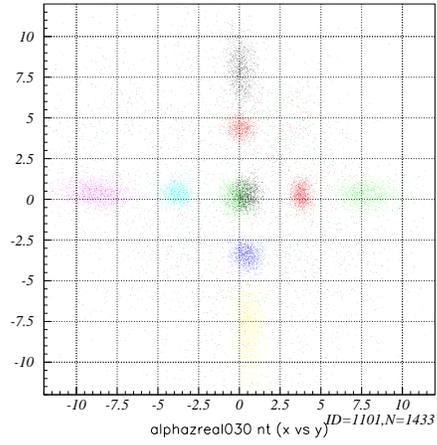


図 3.13: リニアリティ補正後の  $\alpha$  線の検出位置、縦軸・横軸共に単位は mm

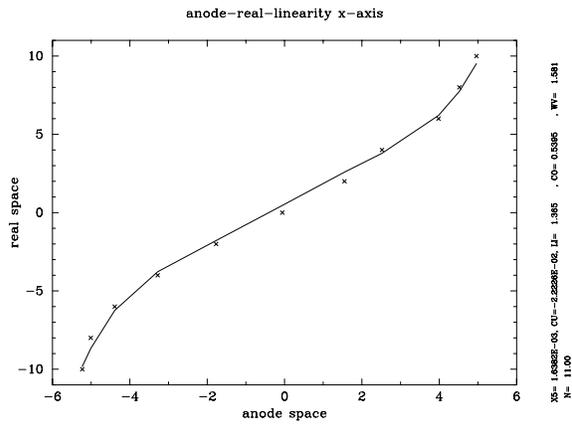


図 3.14: コリメータの穴の位置と検出位置のリニアリティ：x 軸方向成分

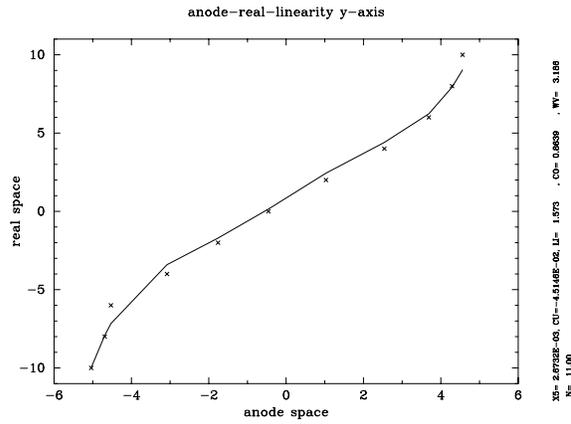


図 3.15: コリメータの穴の位置と検出位置のリニアリティ：y 軸方向成分

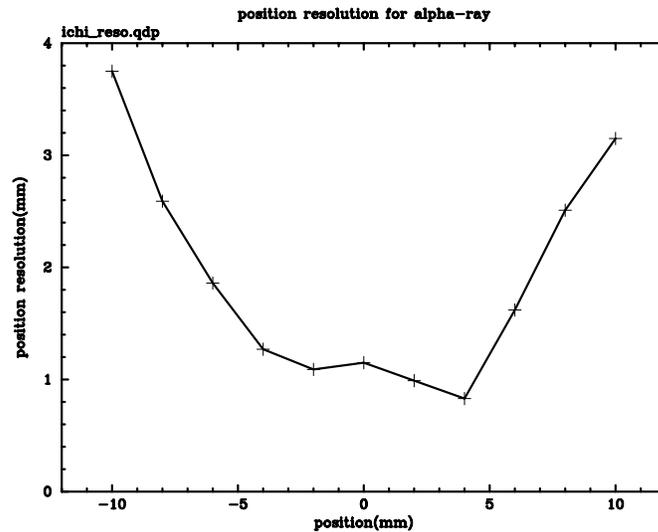


図 3.16: x 軸方向における  $\alpha$  線の入射位置による位置分解能の変化 (横軸: 位置、縦軸: 位置分解能)

### 3.4 GSO の形状と位置分解能の関係

これまで、 $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 5\text{mm}$  の GSO を用いた場合の位置分解能を調べた。次に、この GSO の形状をいくつか変化させて位置分解能を測定し、その形状との関係を調べた。

#### 3.4.1 使用した GSO の形状と位置分解能の関係の $\alpha$ 線による測定

今回使用した GSO は、§3.3.2 でも使用した  $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 5\text{mm}$  のものを含む以下の四つである。

- $5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$  の GSO
- $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$  の GSO
- $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 2.5\text{mm}$  の GSO
- $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 5\text{mm}$  の GSO

また、これらの外形を図 3.17 に示す。各 GSO を 64chPMT の光電面に取り付け、図 3.7 のコリメータを用いて光電面の真ん中に  $\alpha$  線を入射させた。このときの各 GSO における  $\alpha$  線の検出位置を図 3.18 に示す。これを用いて、ここではまずリニアリティ補正前において図 3.18 を y 軸方向に射影したときの半値幅を比較した (図 3.19)。図 3.19 より、リニアリティ補正前においては小さい GSO 結晶を使用した方が半値幅が小さくなっており、一見位置分解能がよくなっているように見える。

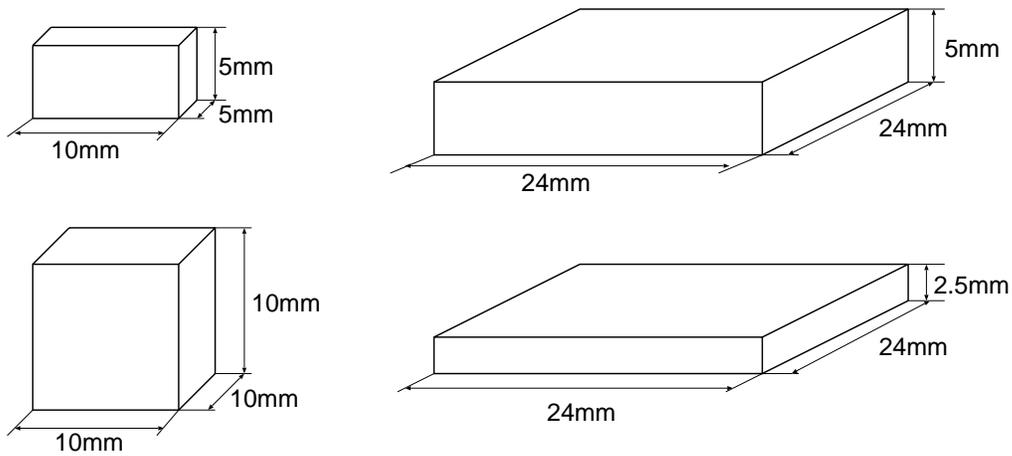


図 3.17: 使用した GSO の形状の種類

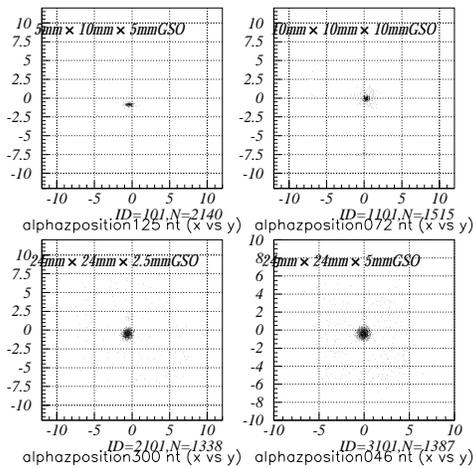


図 3.18: 64chPMT に GSO を取り付け  $\alpha$  線を光電面の真ん中に入射させたときの検出位置 (リニアリティ補正前)

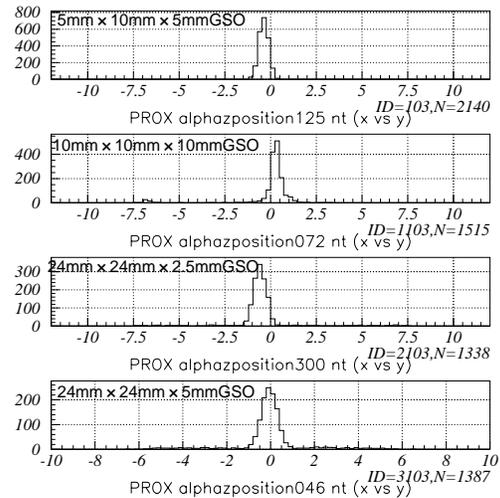


図 3.19: 図 3.18 を y 軸方向から射影した図

しかし、実空間における位置分解能を求める場合はリニアリティ補正を行わなければならない。24mm×24mm×2.5mm の GSO に関しては、前節の五次関数を用いてリニアリティ補正を行い位置分解能を求めたところ、0.82mm という結果を得た。これに対して 10mm×10mm×10mm の GSO について見ていく。5mm×10mm×5mm の GSO については、その形状からリニアリティ補正が難しいので無視する。

10mm×10mm×10mm の GSO を図 3.20 のように 4 つ並べる。このときそれぞれの GSO には反射材が巻かれてあり、シンチレーション光は隣の GSO に入射できないようになっている。この 4 つ並べた GSO に図 3.21 のようなコリメータ 2 をセットし、64chPMT に取り付ける。そして図 3.21 のコリメータ 2 の塗りつぶした部分とその間の穴にそれぞれ  $\alpha$  線を入射させる。そのときの  $\alpha$  線の検出位置が図 3.22 のようになった。ただし、ここではわかりやすくするために、図 3.21 の塗りつぶした穴に入射させた場合のみを示してい

る。図のように、4つとも非常に密集して検出された。これは、GSOの幅10mmに対する厚さ10mmというのが大きく、どの位置に $\alpha$ 線が入射しても、64chPMTの光電面において似たような光分布になるためと考えられる。そこでここでも前節と同様に、リニアリティ補正を行い位置分解能を求めてみる。ただし、ここではx軸方向、y軸方向それぞれ三点しか位置検出できないので、五次関数ではなく、一次関数でフィッティングすることにより実空間へ射影した。このときのコリメータの位置と検出位置のリニアリティの図を図3.24(x軸方向)、図3.25(y軸方向)に示す。その結果得られた実空間における検出位置が図3.23となる。これより半値幅(位置分解能)を求めたところ、3.05mmという結果を得た。これは、図からも明らかであるが、24mm×24mm×5mmのGSOを取り付けた場合と比べ、非常に悪くなっている。GSOの形状と位置分解能の関係を表3.2にまとめる。

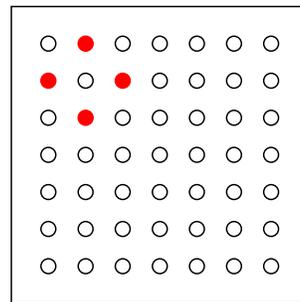
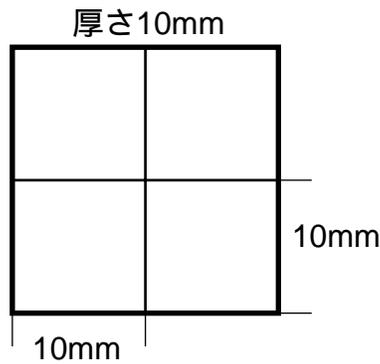


図 3.20: 10mm×10mm×10mmGSO を4つ並べる

図 3.21: コリメータ2 (穴径:1mm、穴間隔:2.5mm、外寸はコリメータ1と同じ)

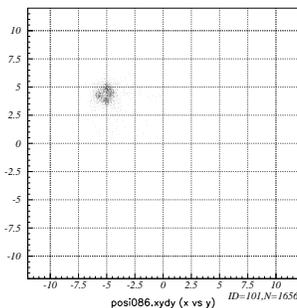


図 3.22: 図 3.20 の GSO を取り付けたときの $\alpha$ 線の検出位置(リニアリティ補正前) 縦軸・横軸は任意の座標

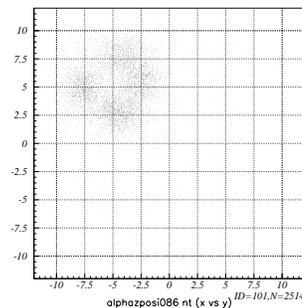


図 3.23: 図 3.20 の GSO を取り付けたときの $\alpha$ 線の検出位置(リニアリティ補正後) 縦軸・横軸は共に単位は mm

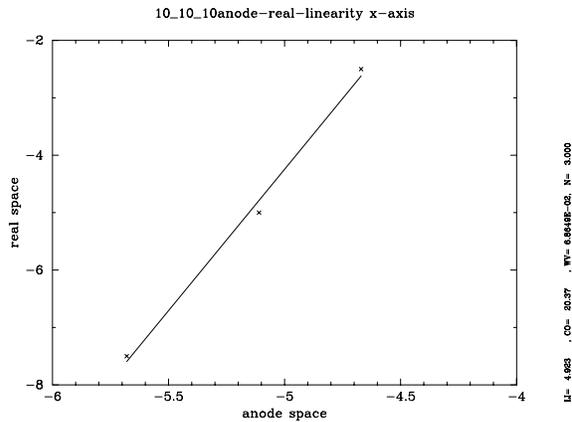


図 3.24: 10mm×10mm×10mmGSO の場合のコリメータの穴の位置と検出位置のリアリティ: x 軸方向成分

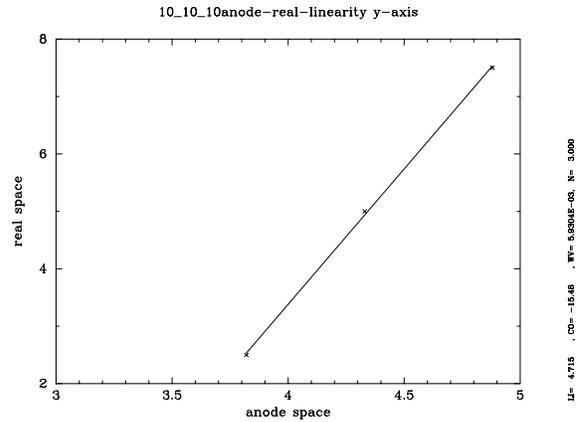


図 3.25: 10mm×10mm×10mmGSO の場合のコリメータの穴の位置と検出位置のリアリティ: y 軸方向成分

表 3.2: GSO の形状と位置分解能の関係

GSO の形状	24mm×24mm×5mm	24mm×24mm×2.5mm	10mm×10mm×10mm
位置分解能	1.15mm	0.82mm	3.05mm

### 3.4.2 ガンマ線における位置分解能の測定

これまで、 $\alpha$ 線を用いているいろいろな場合の位置分解能を調べてきた。次に、ガンマ線を照射した場合の位置分解能について調べてみる。ここで用いたシンチレータは、24mm×24mm×5mm の GSO である。

ガンマ線を GSO の一定領域に入射させるために、鉛のコリメータを用いる。図 3.26 のように、厚さ 5cm の鉛ブロックに直径 2mm の穴の空いた鉛コリメータを、64chPMT に取り付けた 24mm×24mm×5mm の GSO に密着させ、GSO の中心部分にのみガンマ線が入射するようなセットアップを組む。読み出し系については §3.1 で述べた通りである。今回用いたガンマ線源は、 $^{133}\text{Ba}$  (81keV、356keV)、 $^{57}\text{Co}$  (122keV)、 $^{22}\text{Na}$  (511keV)、 $^{137}\text{Cs}$  (662keV) である。

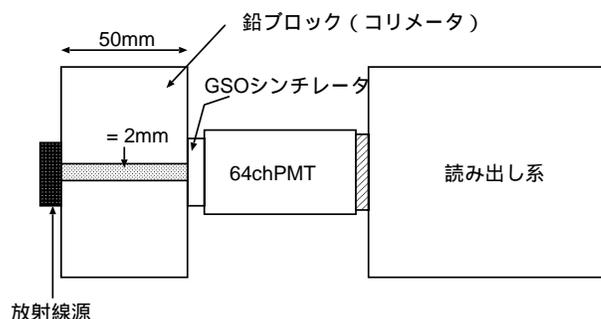


図 3.26: ガンマ線における位置分解能測定のセットアップ

実際に鉛コリメータを用いて GSO 表面にガンマ線を入射させたときの、検出位置を図 3.27 に示す。ガンマ線のエネルギーが大きくなると、鉛ブロックに対するガンマ線の透過確率が大きくなるので、高エネルギー側で位置分解能が悪くなる。ここでは 8chPMT で行なったのと同様に、Geant4 シミュレーションで得たガンマ線の入射位置分布と位置分解能でまなして実験データと比較し、 $\chi^2$  検定で検出器の位置分解能を求めた。これにより得られた、各エネルギーに対する位置分解能の変化を図 3.28 に示す。ここで 662keV のガンマ線における位置分解能が約 3.5mm となり、8chPMT を用いた場合に比べ若干悪くなった。この原因として、GSO (24mm×24mm) の大きさに比べて、8chPMT ではほぼ同じ大きさの光電面であったのに対し、64chPMT の光電面 (18.1mm×18.1mm) が少し小さいことが考えられる。

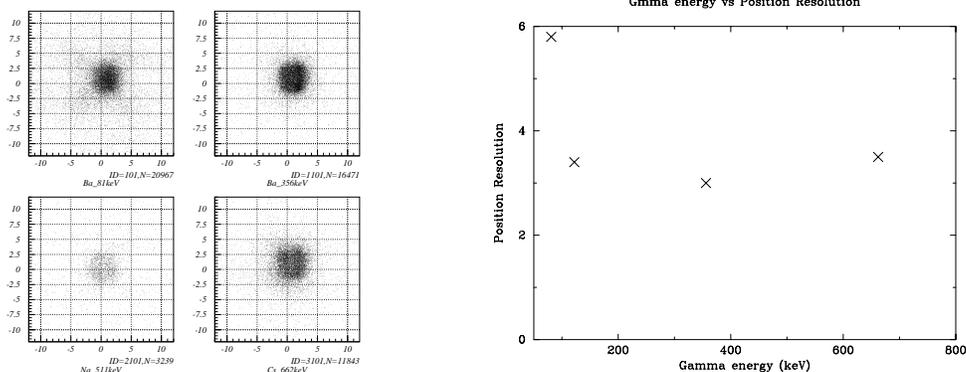


図 3.27: GSO にガンマ線をコリメートして入射させたときの検出位置  
図 3.28: ガンマ線のエネルギーと検出位置の位置分解能の関係

### 3.4.3 位置検出能力を利用したエネルギー分解能の向上

8chPMT と同様、64chPMT においてもガンマ線の入射によりダイノードから出力される信号は、その入射位置によってゲインに違いが現れる。そこで 8chPMT と同様に、その位置検出能力を利用してエネルギースペクトルの補正を行ない、エネルギー分解能の向

上を試みた。領域を0分割、4分割、9分割、16分割、25分割して補正を行なったときのエネルギー分解能の推移をプロットしたのが図3.29である。横軸が領域の分割数、縦軸が補正後のエネルギー分解能である。また、 $^{137}\text{Cs}$  (662keV)を照射したときの、分割しなかったときのスペクトル、25分割したときのスペクトルをそれぞれ図3.30、図3.31に示す。図からわかるように、領域を細かく区切っていくことによりエネルギー分解能が向上しているのがわかる。この結果、662keVのガンマ線において、補正前のエネルギー分解能18%から、補正後のエネルギー分解能14%という結果を得た。しかし、ある領域でエネルギー分解能が頭打ちになっている。これは、§3.4.2でも触れたように、GSOの大きさが64chPMTの光電面域に対して大きく、GSOの端の方ではエネルギー分解能が悪くなってしまうためと考えられる。

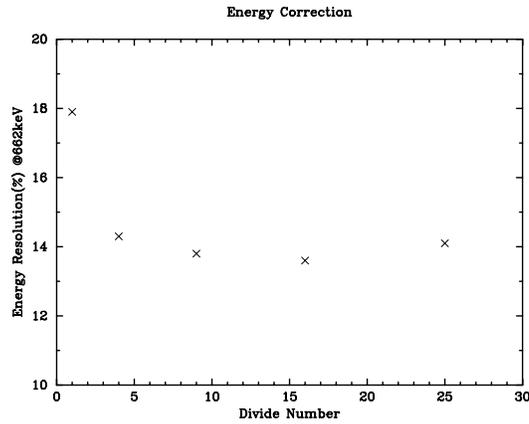


図 3.29: 領域を分割していきエネルギースペクトルの補正を行なったときのエネルギー分解能の推移

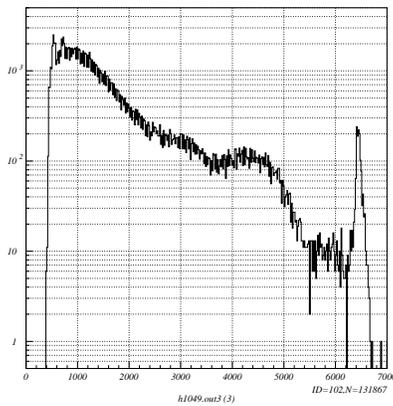


図 3.30: 補正を行なわなかったときのスペクトル ( $^{137}\text{Cs}$  (662keV))

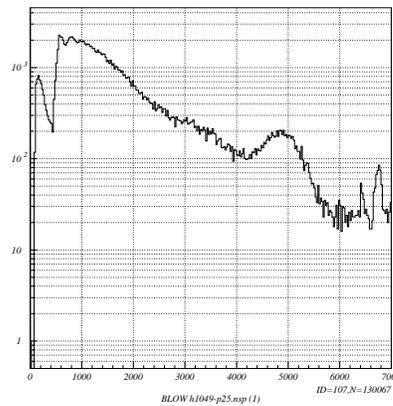


図 3.31: 領域を25分割し、補正を行なった場合のスペクトル ( $^{137}\text{Cs}$  (662keV))

### 3.4.4 GSO シンチレータを用いたときのまとめ

GSO の形状と位置分解能の関係を、結晶の「幅(横の長さ):厚さ」の比に着目した。使用した GSO (5mm×10mm×5mm の GSO は除く) におけるこの比は、10mm×10mm×10mm の GSO で 1:1、24mm×24mm×5mm の GSO で約 4:1、24mm×24mm×2.5mm の GSO で約 8:1 である。これらと位置分解能の関係を大まかにグラフにすると図 3.32 のようになる。以上のことより、一つの結晶シンチレータと 64chPMT の組み合わせにおいては、シンチレータの「幅:厚さ」の比が 2:1 より小さくなると位置分解能が悪くなり、位置検出には適さないと言える。逆に、「幅:厚さ」の比が大きくなると位置分解能が良くなる。しかし、シンチレータの厚さを薄くし過ぎると、ガンマ線がシンチレータと相互作用する確率が低くなり、都合が悪くなる。また、逆にシンチレータの幅をより小さくしていった場合、シンチレーション光がシンチレータの真下のアノードにのみ入射するようになり、検出位置が縮退してしまう。つまり、シンチレータの大きさをアノードの大きさまで小さくした場合、位置分解能はアノードの大きさで決まってしまう、それ以上シンチレータを小さくしても位置分解能の向上は望めないということになる。また、ガンマ線をコリメートして GSO の真ん中に入射させたとき、662keV のガンマ線において位置分解能が 3.5mm であることを確認した。さらに、その位置検出能力を利用してエネルギースペクトルの補正を行ない、662keV のガンマ線において 14% というエネルギー分解能を得た。

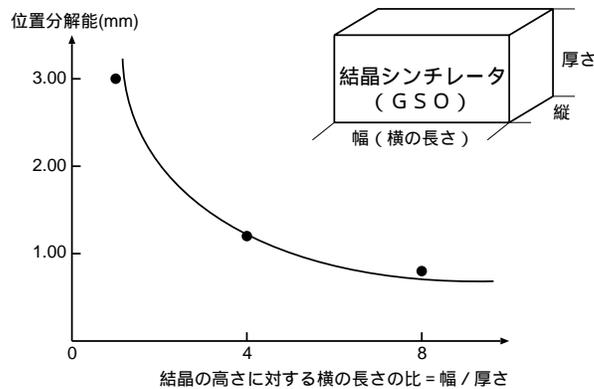


図 3.32: 結晶の形状と位置分解能の関係

### 3.5 YAParray を用いたときの光量とエネルギー分解能及び位置分解能

YAParray に用いている 4.5mm×4.5mm×19mm の YAP (以下 YAP1piece と呼ぶ) は、24mm×24mm×19mm の YAP から切り出したものである。ここでは、この切り出す前の YAP、切り出したあとの YAP の性能を比較し、アレイにした影響を調べた。また、位置検出型シンチレーション検出器において、ピクセル状シンチレータを並べて用いる方法として、図 3.33 のように YAP1iece を 4×4 の計 16 個アレイ状に並べ、YAParray を構成して 64chPMT に取り付ける。

### 3.5.1 YAParray

YAParray は、YAP1piece それぞれに反射材 VM2000 を巻き、16 個全体を接着材（セメダイン）で接着し、さらに安定させるためにバルカーテープを巻き付け、最後にシュリンクチューブで締めて固定した。つまり、それぞれの YAP1piece に巻かれた反射材によって、一つの YAP 内で発生したシンチレーション光は隣の YAP に侵入できないようになっている。また、扱いやすくするために YAParray には図 3.34 のように上から見たときの状態でそれぞれに ID をふった。

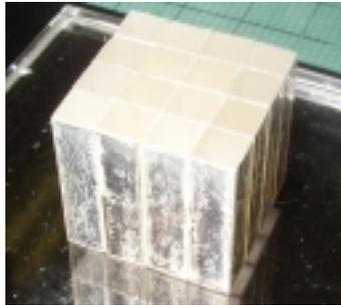


図 3.33: 4.5mm×4.5mm×19mm の YAP を 4×4 の計 16 個並べた YAParray

YAP4	YAP8	YAP12	YAP16
YAP3	YAP7	YAP11	YAP15
YAP2	YAP6	YAP10	YAP14
YAP1	YAP5	YAP9	YAP13

上面図

図 3.34: YAParray に付けた ID

### 3.5.2 YAP の光量とエネルギー分解能

YAP シンチレータを KE108 を用いて PMT (R1847 : 浜松ホトニクス) に取り付け、Preamp (CP2869 : クリアパルス) に入力し、Shaping Amp (ORTEC556) により整形したあと ADC (2201A : ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション) で AD 変換を行ない、Network MCA (LN-6400 : ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション) を使い、ノート PC でスペクトルを取得した。図 3.35 にその流れを示す。

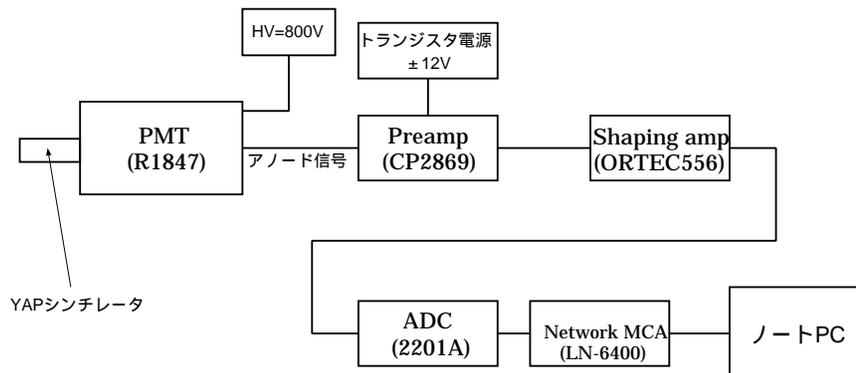


図 3.35: YAP と PMT を組み合わせたセットアップ

切り出す前の YAP を PMT に取り付け、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$  を同時に照射したときのスペクトルを図 3.36 に示す。このとき、 $^{137}\text{Cs}$  (662keV) のピークにおけるエネルギー分解能が 8.5% となった。次に、PMT に YAP1piece を取り付け、切り出す前の YAP と同様にスペクトルを取得した (図 3.37)。図 3.37 のように、YAP1piece では 662keV のピークを確認できなかった。そこで、24mm×24mm×19mm の YAP に  $\alpha$  線と  $^{137}\text{Cs}$  (662keV) を同時に入射させ、そのリニアリティから  $\alpha$  のエネルギーを見積もった。 $\alpha$  線と  $^{137}\text{Cs}$  (662keV) を同時に入射させたときのスペクトルを図 3.38 に示す。これにより、 $\alpha$  線のエネルギーが約 1.3MeV とわかったので、これより図 3.37 における 662keV の位置を見積もった。また、図 3.39 は YAP1piece に  $\alpha$  線のみを入射したときのスペクトルである。図 3.36 と図 3.37 からわかるように、YAP を切り出したことにより光量が約 20% 程度になっている。

ここで、論文 (Comparison of YAP and BGO for high-resolution PET Detectors M.Kapusta et al.) によると 3mm×3mm×20mm の形状をした YAP で、 $^{137}\text{Cs}$  (662keV) におけるエネルギー分解能が 7% という結果が得られている。つまり、4.5mm×4.5mm×19 の YAP においては、それと同等かそれ以上のエネルギー分解能を得ることが可能であると考えられる。しかし、実際は図 3.37 のように光電吸収ピークすら確認できなかった。これは、YAP1piece を切り出すときに結晶に何らかの負荷がかかり、その性質が変化してしまった可能性も考えられる。

以上のことより、ここで用いた YAParray は非常にエネルギー分解能が悪いため、位置検出用のシンチレータ、または偏光検出器用シンチレータとしてしか使えない。

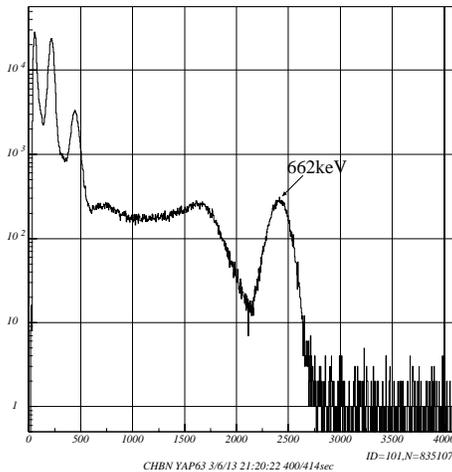


図 3.36: 24mm×24mm×19mm の YAP で  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$  を同時に当てたときのスペクトル

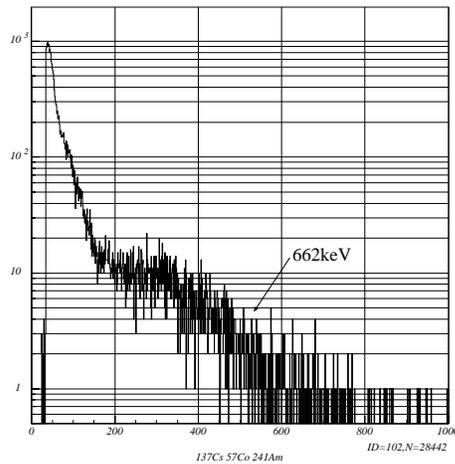


図 3.37: YAP1piece に、切り出す前の YAP と同様に  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$  を同時に当てたときのスペクトル

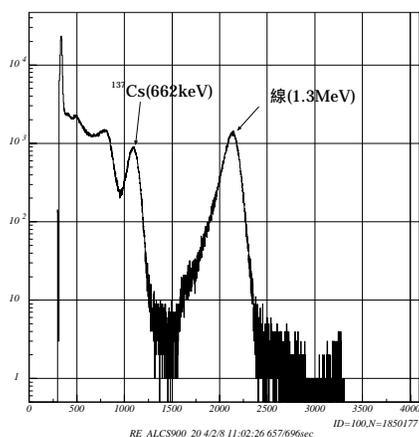


図 3.38: 24mm×24mm×19mm の YAP に α 線と <sup>137</sup>Cs (662keV) を同時に入射したときのスペクトル

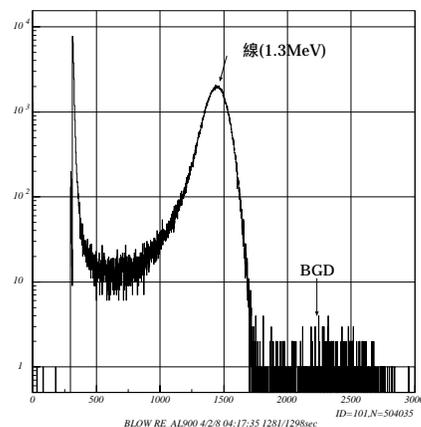


図 3.39: YAP1piece に α 線のみ入射させたときのスペクトル

### 3.5.3 YAParray を用いた場合の α 線における位置検出

§3.4 において、10mm×10mm×10mm の GSO を四つ並べてその一つの GSO の複数箇所に α 線を入射させ、位置分解能を測定したのと同様に、図 3.21 のコリメータを YAParray に上面に取り付け、YAP11 の四箇所（図 3.40 の丸印部分）に α 線を入射させ、位置検出能力を調べた。それぞれの穴に α 線を入射させ、検出位置を重ね合わせた図を図 3.41 に示す。図からわかるように、四つともほぼ同じ位置に検出された。どのくらい密集しているかを調べるために、それぞれの場合において、x 方向、y 方向から射影したヒストグラムにガウシアンフィッティングを行い、そのピーク位置の座標を求め、比較を行なった。このときの各穴の位置における検出位置のピーク座標を表 3.3 に示す。一番右の欄のポジションナンバーは、図 3.41 の穴の番号に対応する。これからわかるように、四つのピーク座標に大きな差はなく、YAP1piece のみにおける位置検出は難しいと言える。

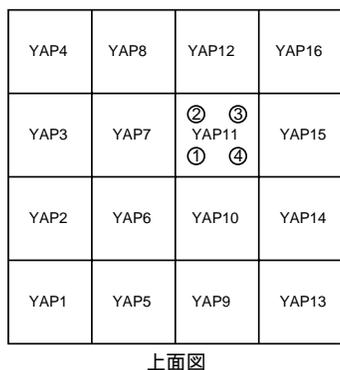


図 3.40: α 線を入射させた位置

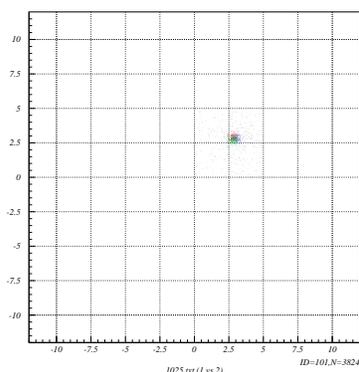


図 3.41: α 線の検出位置

表 3.3: 穴の位置と各穴における  $\alpha$  線検出位置のピーク座標

ポジションナンバー	x 座標 (単位は任意)	y 座標 (単位は任意)
1	$2.78 \pm 0.29e-2$	$2.75 \pm 0.27e-2$
2	$2.84 \pm 0.34e-2$	$2.96 \pm 0.31e-2$
3	$3.04 \pm 0.31e-2$	$2.80 \pm 0.27e-2$
4	$2.84 \pm 0.31e-2$	$2.71 \pm 0.29e-2$

### 3.5.4 YAParray にガンマ線を入射したときの位置検出

次に、YAParray にガンマ線を入射させたときの位置検出について調べる。まず、YAParray の全面に  $^{137}\text{Cs}$  (662keV) のガンマ線を入射させる。さらに、鉛コリメータ ( $\phi=2\text{mm}$ , 厚さ 50mm) を使って YAP6 のみに  $^{137}\text{Cs}$  (662keV) のガンマ線を入射させる。このときのセットアップを図 3.42 に示す。また、それぞれの場合のガンマ線検出位置を図 3.43、図 3.44 に示す。YAParray の全面にガンマ線を照射したとき、各 YAP で生成されるシンチレーション光が、隣の YAP に洩れることはことはないため、その検出位置は各 YAP 毎に縮退してしまい、図 3.43 のようになってしまう。図 3.44 において、一番濃くなっている部分がガンマ線の入射位置である。また、その周囲に微かに濃くなっている部分があるが、これはガンマ線が隣の YAP に洩れてしまい、それが検出されているためである。さらに、図 3.43、図 3.44 において、全体に分布して検出されているイベントがあるが、これはバックグラウンド及びコンプトン散乱が検出されていると考えられる。

上で述べたように、各 YAP に巻かれている反射材のため、YAP 内のシンチレーション光の拡散が制限され、検出位置は縮退してしまう。つまりこの場合、YAP の大きさによって位置分解能が決まってしまう。シンチレータの大きさをさらに小さく細長くすると、位置分解能の向上が見込めるが、今回用いた YAP シンチレータは、切り出す過程においてこの大きさが限界であったため、このサイズになった。しかし、64chPMT のアノードの大きさ (2mm×2mm) より小さくした場合は、それ以上の位置分解能の向上のは難しいといえる。

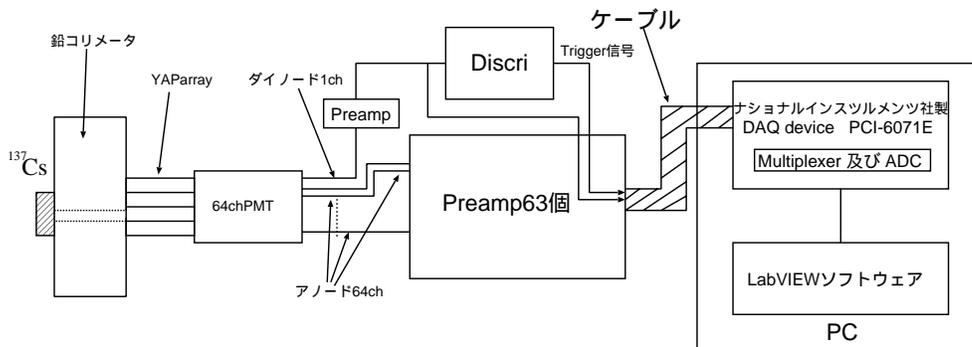


図 3.42: YAParray + 64chPMT 検出器のセットアップ

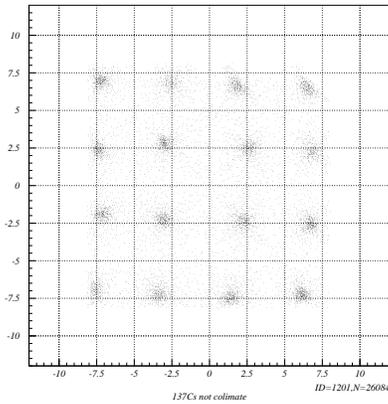


図 3.43: YAParray の全面にガンマ線を照射したときの検出位置

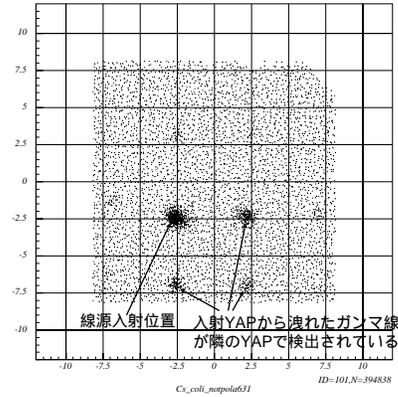


図 3.44: コリメータを使って YAP6 にガンマ線を入射させたときの検出位置

### 3.6 まとめ

64chPMT または 8chPMT と、いろいろな形状の結晶シンチレータとを組み合わせ、いくつかの位置検出型シンチレーション検出器を構成した。これらの検出器においてエネルギー分解能、位置分解能の測定を行いコンプトンカメラへの可能性を考察した。64chPMT 及び 8chPMT に、24mm×24mm×5mm の GSO を組み合わせた検出器における、ガンマ線をコリメートして入射させたときの位置分解能、GSO 全面にガンマ線を入射させその位置検出能力によりスペクトルの補正を施したときのエネルギー分解能をまとめて表 3.4 に示す。

表 3.4: 64chPMT 及び 8chPMT と 24mm×24mm×5mm の GSO を組み合わせた検出器における位置分解能とエネルギー分解能の比較

PMT type	位置分解能 (@ 662keV)	エネルギー分解能 (@ 662keV)
64chPMT	3.5mm	14%
8chPMT	2.2mm	14%

これを見る限りでは、64chPMT を用いた場合と 8chPMT を用いた場合において、エネルギー分解能は両者に違いはなく、位置分解能に関しては 8chPMT を用いた方が良いという結果を得た。これは、ここで用いた GSO が 64chPMT の光電面に対して大き過ぎたためと考えられる。よって、今のところ一体型のシンチレータとして 8chPMT と 64chPMT のどちらがよいかかわからないが、シンチレータの大きさを最適化、つまりアノードの有効範囲の大きさである (18.1mm×18.1mm) にすれば 64chPMT の方が良くなる可能性がある。また、ピクセル状のシンチレータとの応用を考えた場合、一つのアノードが 2mm×2mm の 64chPMT においてはシンチレータを 2mm×2mm まで小さくすることにより、位置分

解能を 2mm まで向上させることができるのに対して、クロスプレート型のアノードを持つ 8chPMT では、ピクセル状のシンチレータについてアノードの太さ 5mm より小さくしても無意味になる。

よって、64chPMT はシンチレータの大きさを最適化すれば良い位置分解能を得られる可能性があることと、ピクセル状のシンチレータへの応用が可能であることを考慮し、64chPMT と組み合わせた検出器をガンマ線イメージャーの吸収体部分としての応用を考える。

## 第4章 PDarray + 64chPMTによるガンマ線イメージング

§2.4.1 で述べたように、ガンマ線イメージングに用いる検出器はエネルギー分解能が良く、且つ位置分解能が良くなければならない。§3の結果より、ガンマ線イメージャー用の吸収体に 24mm×24mm×5mm の GSO と 64chPMT とを組み合わせた位置検出型シンチレーション検出器を、散乱体に PDarray を用いてガンマ線イメージャーを構成し、そのイメージング能力を調べた。

### 4.1 ガンマ線イメージングセットアップ

図 4.1 に PDarray + 64chPMT による、ガンマ線イメージングのセットアップを示す。図のように厚さ 50mm に  $\phi=6\text{mm}$  の穴の空いた鉛コリメータを通して散乱体である PDarray に  $^{137}\text{Cs}$  (662keV) のガンマ線を入射させる。PDarray で散乱されたガンマ線とその真下に置かれた 24mm×24mm×5mm の GSO が取り付けられた 64chPMT で検出する。64chPMT からのデータ読み出しは、§3.1 で述べた通りである。PDarray は、図 4.2 に示す 3×3 の計 9ch からなる PDarray (SPL PD typeB) の内の 4ch を使用する。PDarray からの信号は、4chPreamp (5005H : クリアパルス) に入力され、Shaping Amp によって整形される。ここで用いた Shaping Amp は Astro-E2 衛星搭載の HXD 半導体検出器用回路のテスト基板を用いた。この Shaping Amp 出力を 64chPMT の読み出しシステムに用いている PCI-6071E と同様、NI 社の DAQdevice である PCI-6024E (アナログ入力 16ch) に入力することにより、64chPMT からの信号処理と同様 LabVIEW ソフトウェアを用いてデータ取得を行う。また、PDarray でコンプトン散乱し、GSO で光電吸収するイベントを検出するために PDarray からの信号と 64chPMT からの信号のコインシデンスを取る。このとき、PCI-6071E と PCI-6024E を CB-68LP (DAQ I/F ボード : NI 社製) で繋ぐことにより、それぞれの DACdevice への Trigger 信号の入力を同期させる。図 4.3 にデータ集録の全体の流れを示す。また、このときのタイミングチャートを図 4.4 に示す。詳しくは青井卒論参照。

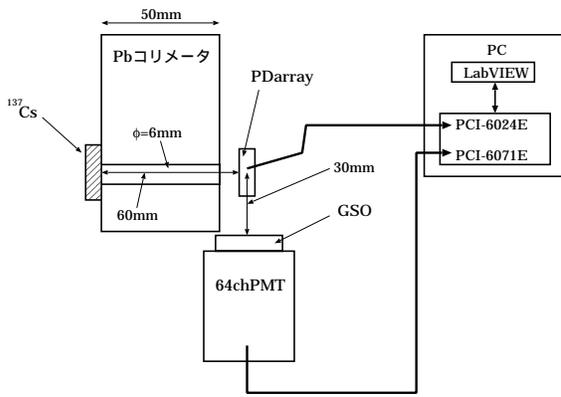


図 4.1: PDarray + 64chPMT 検出器によるイメージングセットアップ

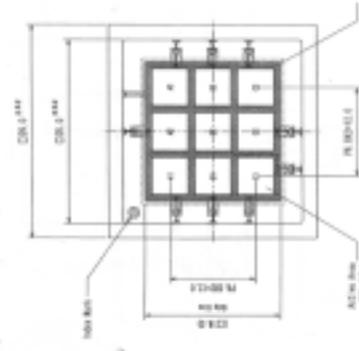


図 4.2: 散乱体に用いた3×3の計9chのPDからなるPDarray

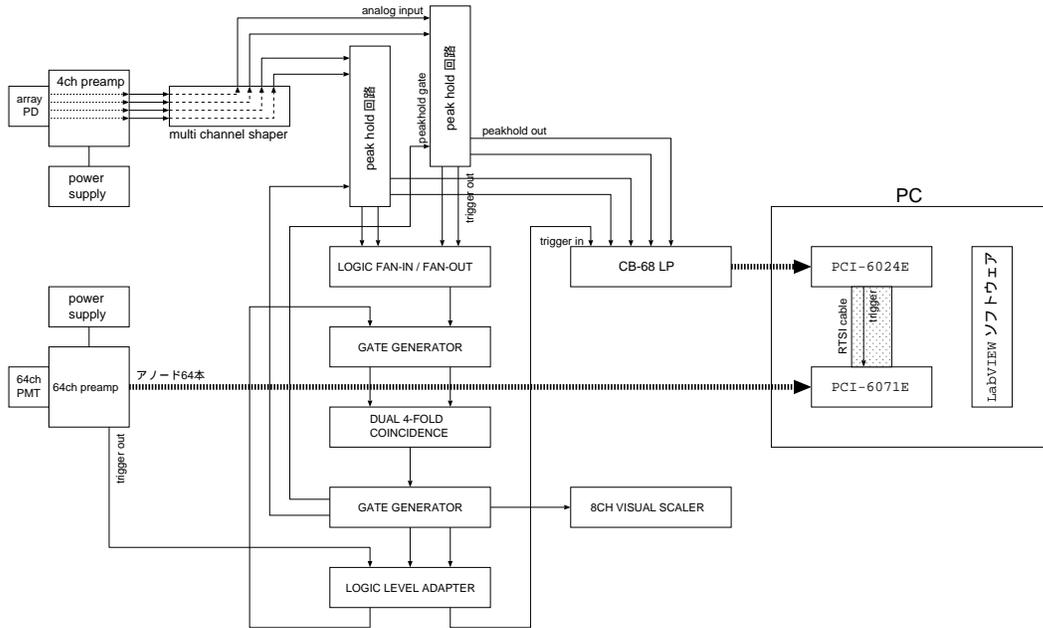


図 4.3: イメージングデータ集録の全体の流れ

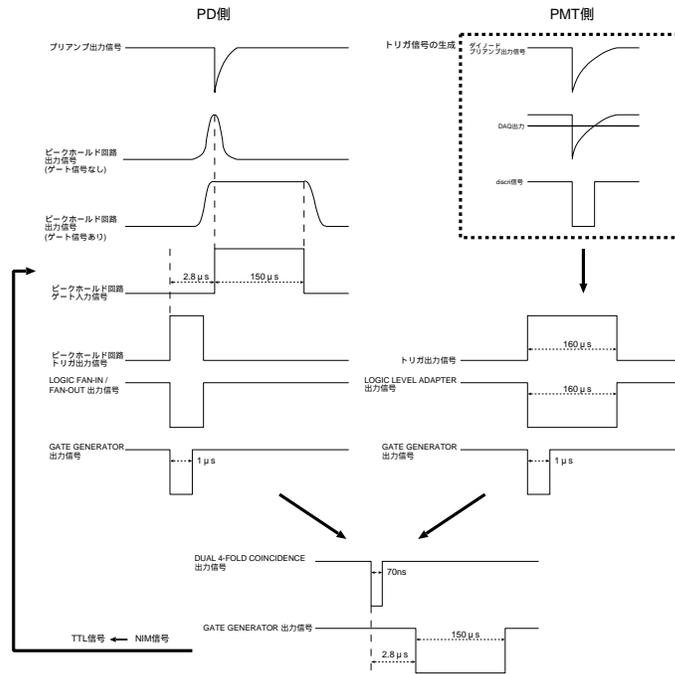


図 4.4: イメージングデータ集録のタイミングチャート

## 4.2 イメージング能力の考察

§2.4.1 の原理によって、散乱体 (PDarray) 及び吸収体 (GSO+64chPMT) におけるデポジットエネルギーと入射位置が分かると、入射ガンマ線のエネルギーと方向が分かる。ここでは、式 2.3 からコンプトン散乱による散乱光子の散乱角を PDarray、GSO で落としたエネルギーから理論的に求め、さらに PDarray 及び GSO (+64chPMT) における検出位置から幾何学的に求まる散乱角とを比較することにより構成したガンマ線イメージャーのイメージング能力を調べた。

### 4.2.1 イメージングの方法

図 4.1 より、散乱体である PDarray で入射ガンマ線の散乱時に落とすエネルギー、吸収体である GSO+64chPMT において散乱ガンマ線のエネルギーを知ることができる。また、それぞれの検出器は反応位置を決定できるため、§2.4.1 で述べた原理により検出器へ入射したガンマ線のコンプトン再構成を行なうことができる。

### 4.2.2 角分解能の見積もり

各分解能の見積もりは、本来 Geant4 などのシミュレータを用いて行なう必要があるが、ここでは PMT、PD のエネルギー分解能、位置分解能から簡単に見積もってみる。<sup>137</sup>Cs

(662keV) を用い、厚さ 50mm の鉛に空いた  $\phi=6\text{mm}$  の穴を通して PDarray にガンマ線を入射させイメージングを行った。図 4.5 にコリメータを通過したあとのガンマ線の経路を示す。式 2.3 より、PDarray 及び GSO におけるデポジットエネルギー  $E_1$ 、 $E_2$  から理論的に  $\theta_{theo}$  が求まる。ここで入射ガンマ線のエネルギーを  $E$  とすると、 $E=E_1+E_2$  である。また、それぞれのエネルギー分解能を  $\Delta E_1$ 、 $\Delta E_2$  とすると  $\theta_{theo}$  のゆらぎ  $\delta\theta_{theo}$  は、

$$\delta\theta_{theo} \sim \sqrt{\left(\frac{\Delta E_1}{E_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_2}{E_2}\right)^2} \quad (4.1)$$

と表される。また、PDarray 及び 64chPMT (+GSO) の位置検出能力より、PDarray においてコンプトン散乱した位置 (点  $O_{det}$ )、GSO で光電吸収した位置 (点  $P_{det}$ ) が分かるので、その位置よりジオメトリ的なガンマ線の散乱角  $\theta_{det}$  が分かる。ただし、PDarray は 1ch の受光面の大きさが  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、チャンネル間のギャップが  $1\text{mm}$  あり、ガンマ線の入射位置を各 PD 受光面の真ん中に完全に縮退させてしまったため、その位置分解能  $\Delta X_{PD}$  を  $\sim 5\text{mm}$  とした。64chPMT の位置分解能を  $\Delta X_{PMT}$  は §3.4.2 より  $\sim 4\text{mm}$  とする。このとき  $\theta_{det}$  のゆらぎ  $\delta\theta_{det}$  は、

$$\delta\theta_{det} \sim \sqrt{\left(\frac{\Delta X_{PD}}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X_{PMT}}{L_2}\right)^2} \quad (4.2)$$

と表される。ここで、 $\theta = \theta_{det} - \theta_{theo}$  とする。 $\theta_{theo}$  は、式 2.3 より理論的に求められ、散乱体及び吸収体で落としたエネルギーのみから計算できる。つまり、この理論的に求められる角度と、実際の検出器の観測位置から得られる角度  $\theta_{det}$  を比較することにより、検出器の検出精度を見積もることができる。しかし、散乱体及び吸収体で検出されるエネルギーも、その検出器のエネルギー分解能でゆらぐため、 $\theta$  の角分解能  $\Delta\theta$  は、

$$\Delta\theta \sim \sqrt{(\delta\theta_{det})^2 + (\delta\theta_{theo})^2} \quad (4.3)$$

となる。つまり、この角分解能  $\Delta\theta$  がガンマ線イメージャーの位置決定精度を表しており、この値が 0 に近いほど精度が良い。

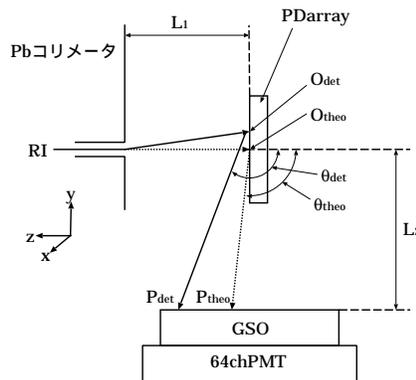


図 4.5: コリメータ通過後のガンマ線の経路

入射ガンマ線のエネルギーを  $E_{in}$  とすると、コンプトン散乱後のガンマ線のエネルギー  $E'$  は、

$$E' = \frac{E_{in}}{1 + \frac{E_{in}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (4.4)$$

で表される。ここで  $m_e c^2$  は電子静止のエネルギー (511keV) である。 $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のガンマ線が PDarray に入射したとき、90 °方向にコンプトン散乱したとすると、散乱ガンマ線のエネルギーは 288.4keV となる。つまり、PDarray に落としたエネルギーは 373.6keV となり、GSO で光電吸収されるガンマ線のエネルギーは 288.4keV ということとなる。しかし、実際は 90 °方向にのみ散乱されるわけではないので、PDarray と GSO で落としたエネルギーは広がりを持つ。さらに、式 4.1、式 4.2、式 4.3 より、PDarray において 90 °散乱する場合の  $\Delta\theta$  を計算する。前述の通り、入射ガンマ線が PDarray で落とすエネルギーは約 374keV でこのときのエネルギー分解能  $\Delta E_1$  を  $\sim 10\text{keV}$ 、GSO で光電吸収されるエネルギーは約 288keV でこのときのエネルギー分解能  $\Delta E_2$  は  $\sim 88\text{keV}$  である。また、PDarray の位置分解能は  $\sim 5\text{mm}$  で、散乱ガンマ線の GSO への入射範囲を全面にしたときの位置分解能を  $\sim 10\text{mm}$  としたとき、 $\Delta\theta \sim 27^\circ$  となった。さらに、それぞれの値をまとめたものを表 4.1 に示す。

表 4.1: 角分解能の見積もりにおける各パラメータの値

	$\frac{\Delta E_1}{E_1}$	$\frac{\Delta E_2}{E_2}$	$\delta\theta_{theo}$
$\theta_{theo}$	0.03	0.31	18 °
	$\frac{\Delta X_{PD}}{L_2}$	$\frac{\Delta X_{PMT}}{L_2}$	$\delta\theta_{det}$
$\theta_{det}$	0.17	0.33	21 °
$\Delta\theta$	-	-	27 °

### 4.2.3 実際の測定結果

実際のイメージング測定における PDarray、64chPMT におけるエネルギースペクトルを図 4.6、図 4.7 に示す。横軸の単位はエネルギー [keV] である。

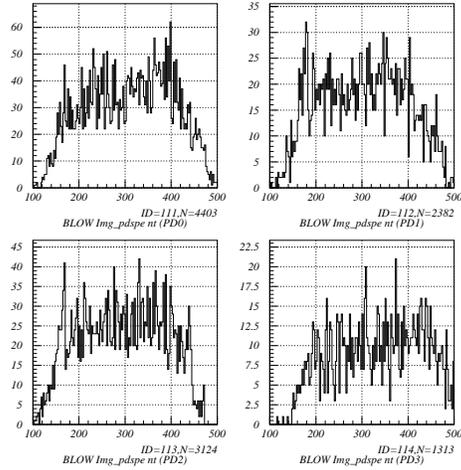


図 4.6: 662keV のガンマ線を PDarray に入射させたときの、PD 各チャンネルにおけるエネルギースペクトル (横軸: エネルギー [keV]、縦軸: カウント数)

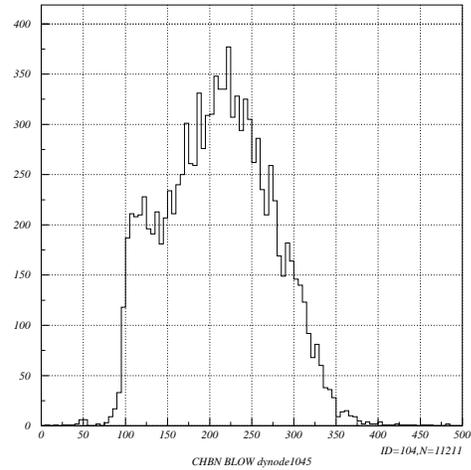


図 4.7: PDarray で散乱されたガンマ線の 64chPMT におけるダイノードのエネルギースペクトル (横軸: エネルギー [keV]、縦軸: カウント数)

また、測定の結果得られる PDarray および GSO におけるデポジットエネルギーと検出位置より  $\theta$  が求まる。この  $\theta$  の分布を図 4.8 に示す。この分布より角分解能 (FWHM) を求めると  $67^\circ$  という結果を得た。これは、PDarray の位置分解能が 5mm もあり、64ch-PMT においては光電面の端の方でエネルギー分解能、位置分解能が悪くなっているために、このような大きな値になってしまう。実際は散乱ガンマ線は  $90^\circ$  方向のみに散乱されるわけではないので  $\Delta\theta$  は大きくなる。次に、64chPMT の光電面のより狭い領域で検出されたイベントを抜き出しそのときの角分解能を調べた。抜き出した領域は、Area1 「 $-5\text{mm} \leq x \leq 5\text{mm}$  かつ  $-5\text{mm} \leq y \leq 5\text{mm}$ 」、Area2 「 $-3 \leq x \leq 3\text{mm}$  かつ  $-3\text{mm} \leq y \leq 3\text{mm}$ 」、Area3 「 $-2.5\text{mm} \leq x \leq 2.5\text{mm}$  かつ  $-2.5\text{mm} \leq y \leq 2.5\text{mm}$ 」の領域である。それぞれの場合の分布を図 4.9、図 4.10、図 4.11 に示す。また、光電面全面、Area1、Area2、Area3 の領域において求めた角分解能及び上と同じく計算より求めた  $\Delta\theta$  をまとめて表 4.2 に示す。領域を狭めていくにつれて角分解能がよくなっている。これは、GSO の端の方では位置分解能が悪くなっているためである。

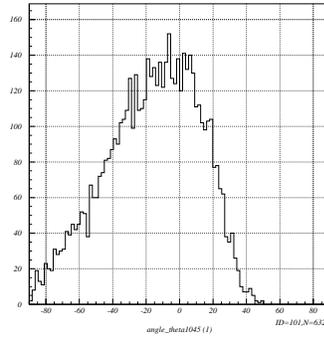


図 4.8: イメージング測定によって得られた  $\theta$  の分布

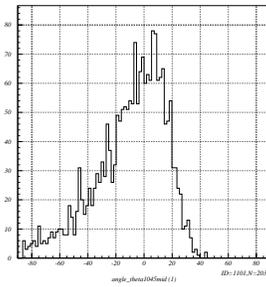


図 4.9: Area1 の領域における  $\theta$  の分布

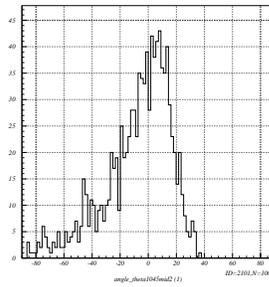


図 4.10: Area2 の領域における  $\theta$  の分布

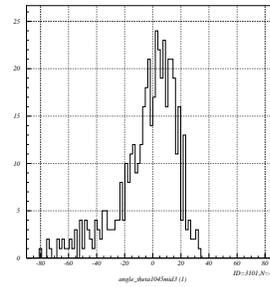


図 4.11: Area3 の領域における  $\theta$  の分布

表 4.2: 光電面の各領域毎の角分解能

	全面	Area1	Area2	Area3
測定結果	$67 \pm 3$ °	$43 \pm 3$ °	$34 \pm 3$ °	$29 \pm 2$ °
計算結果	$27 \pm 0.3$ °	$23 \pm 0.3$ °	$18 \pm 0.3$ °	$17 \pm 0.3$ °

### 4.3 まとめ

64chPMT に  $24\text{mm} \times 24 \times 5\text{mm}$  の GSO を取り付けた位置検出型シンチレーション検出器と、散乱体に PDarray を用いたガンマ線イメージャーを構成した。散乱体である PDarray に  $662\text{keV}$  のガンマ線を入射させ、この場合の検出器の角分解能を求めることにより、その性能について調べた。この結果、この PDarray + 64chPMT 検出器のガンマ線イメージャーにおいて  $67$  ° という角分解能を得た。この値は計算値と大きく異なるが、これは PDarray での散乱では  $90$  ° 散乱のみを考慮し、大雑把に計算したため、実際には前述の

通り検出器を再現したシミュレーションを行うことにより見積もる必要がある。この結果より、この検出器をガンマ線イメージャーとして用いるのは非常に難しいといえる。この原因として考えられるのは、まず散乱体に DSSD ではなく PDarray を用いたことにより、散乱体での位置分解能が非常に悪くなってしまったことがあげられる。また、64chPMT の光電面に対して GSO が大き過ぎたために、GSO の端の方では位置分解能及びエネルギー分解能が悪くなっていることがあげられる。その証拠に、GSO に入射したイベントの内、より内側のイベントに限って角分解能を求めたところ、領域を狭めるにつれて角分解能良くなっていくことを確認した。この場合有効面積が小さくなってしまいが、 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$  の有効面積で角分解能  $29^\circ$  という結果を得た。この結果は目指す性能に及ばないが、今回用いたガンマ線のエネルギーは  $662\text{keV}$  で、我々が目指す MeV 領域ではシンチレーション光量が多くなるため、位置分解能、エネルギー分解能の向上が期待され、角分解能はさらに良くなると考えられる。しかし、それでも角分解能数度という性能には及ばないと考えられるので、今後の課題としては散乱体にシリコンストリップ検出器を用い、吸収体においては 64chPMT に最適な GSO の形状をもう一度再考察する必要がある。

# 第5章 YAParray + 64chPMT検出器による偏光の測定

§3.5.1 において製作した YAParray と、64chPMT とを組み合わせ構成した検出器の YAParray 部に、実験室レベルで発生させた偏光ガンマ線を入射させ、YAP シンチレータレイでのコンプトン散乱を利用した偏光検出能力を測定する。実際には YAParray + 64chPMT 検出器の Modulation factor を求めることによりその偏光検出能力を推定する。

## 5.1 コンプトン散乱による偏光の発生とその検出原理

コンプトン散乱は、入射ガンマ線光子と吸収物質中の電子との衝突によって起こる。入射ガンマ線光子が電子との衝突により、最初の入射方向から角度  $\theta$  の方向に散乱し、電子は入射ガンマ線光子のエネルギーの一部を受け取り、反跳する。入射ガンマ線光子のエネルギーを  $h\nu$ 、散乱後の光子のエネルギー  $h\nu'$  は、

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (5.1)$$

で表される(式 4.4 参照)。この式より、散乱光子はどの角度にも散乱することが可能であり、電子に与えるエネルギーはゼロから入射ガンマ線光子のエネルギーに近い値までとることができる。 $h\nu \ll m_e c^2$  のとき、 $h\nu = h\nu'$  であり、弾性散乱であるトムソン散乱となる。実際の物質における散乱では、束縛電子の持つ運動量のため、 $\theta$  一定でも  $h\nu'$  の周りで広がったエネルギー分布となる。

散乱ガンマ線光子の散乱方向の角度分布は、無偏光の場合、次式の微分散乱断面積  $d\sigma_c/d\Omega$  に対する Klein-Nishina の式で与えられる。 $\theta$ 、 $\phi$  は図 5.1 に示す通りである。

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = r_e^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right)^2 \left( \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{(1 - \cos^2 \theta)[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]} \right) \quad (5.2)$$

ここで、 $\alpha = h\nu/m_e c^2$  ( $m_e c^2 = 511\text{keV}$ : 電子の静止質量)、 $r_e = e^2/4\pi m_e c^2$  (古典電子半径) である。 $\phi$  方向には等方的に散乱する。

一方、入射ガンマ線光子が 100% 直線偏光している場合は、散乱ガンマ線光子の角度  $\phi$  分布に偏光依存性が現れ、次式のように与えられる。

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \left( \frac{k_c}{k_0} \right)^2 \left( \frac{k_c}{k_0} + \frac{k_0}{k_c} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right) \quad (5.3)$$

ここで、 $k_0 = h\nu$ 、 $k_c = h\nu'$  である。コンプトン散乱の低エネルギー極限であるトムソン散乱は、 $k_c = k_0$  を代入したものになる。このことからわかるように、ガンマ線は入射波の偏光

方向と垂直な方向に散乱されやすいという性質がある。つまり、無偏光のガンマ線を散乱体に入射させると、ある方向に散乱されるものは、もともとの偏光方向が散乱方向と垂直なものが多いので、結果として偏光したガンマ線ということになる。この性質を利用すると、ガンマ線を散乱体に入射させる方向を変えることにより、偏光方向の異なる偏光ガンマ線を検出器に入射させることができる。

ここでは、コンプトン散乱を利用して発生した偏光ガンマ線を YAParray に入射させることにより、入射させた YPA1piece でさらにコンプトン散乱を起こしたイベントを選別し、その入射位置を中心とした角度毎のカウントを調べることで偏光検出を行う。

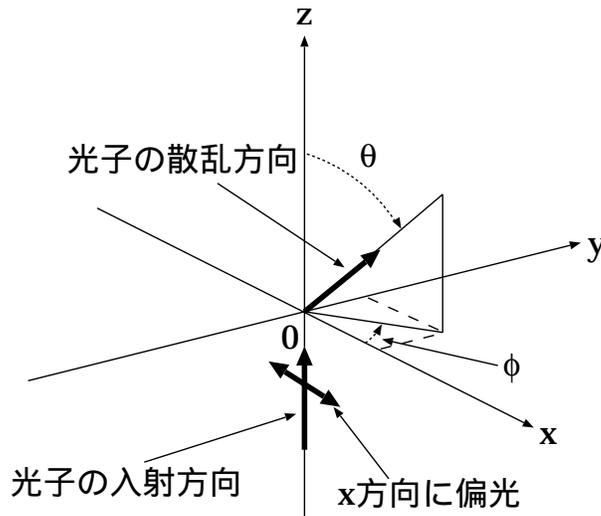


図 5.1: 光子のコンプトン散乱による散乱方向と偏光方向の関係

### 5.1.1 Modulation factor

偏光検出器の性能を表すのに用いられるパラメータとして Modulation factor がある。直線偏光の場合、偏光方向に垂直な電場ベクトルの強度を  $N_{\perp}$ 、偏光方向に平行な電場ベクトルの強度を  $N_{//}$ 、つまり散乱体において偏光方向と垂直な方向で検出されるカウント数を  $N_{\perp}$ 、偏光方向と平行な方向に検出されるカウント数を  $N_{//}$  としたとき、

$$R = \frac{N_{\perp} - N_{//}}{N_{\perp} + N_{//}} \quad (5.4)$$

$R$  は入射ガンマ線の偏光度に比例している。この  $R$  が Modulation と呼ばれることもある。Modulation factor  $M$  は、完全偏光したガンマ線が入射したときの  $R$  として定義される。 $M$  が求まると、偏光度  $P$  は、 $M$  と測定値  $R$  を用いて

$$P = \frac{R}{M} \quad (5.5)$$

で推定できる。 $M$ は1以下の値をとり、1に近いほど偏光検出能力が高いことを意味している。本研究では、YAParray + 64chPMT 検出器においていくつかの場合の Modulation factor  $R$  を求め、その偏光検出能力について調べる。

## 5.2 偏光測定セットアップ

YAParray + 64chPMT 検出器において偏光測定を行なうために、図 5.2 のようなセットアップを組んだ。厚さ 5cm の鉛に  $\phi=7\text{mm}$  の穴の開いた鉛コリメータを用い、 $^{133}\text{Ba}$  線源から散乱体に用いたプラスチックシンチレータ (サンゴバン ODJ 社製:BC-408、 $\phi=1\text{cm}$ 、 $h=2\text{cm}$ ) にガンマ線を入射する。このプラスチックシンチレータが散乱体の役目をし、偏光ガンマ線を生成する。生成された偏光ガンマ線はさらに厚さ 5mm、 $\phi=5\text{mm}$  の鉛コリメータを通して YAParray に入射する。 $^{133}\text{Ba}$  の 356keV のガンマ線をプラスチックシンチレータに入射すると、90 度方向の散乱において 146.2keV のエネルギーを落とし、さらに YAParray に入射してコンプトン散乱するとき 61.1keV のエネルギーを落とす。また、入射した YAP の隣の YAP でさらに光電吸収するとすると 148.7keV のエネルギーを落とす。

プラスチックシンチレータと YAParray が同時に反応した場合のみにデータを取得するようにし、バックグラウンドを軽減するために、プラスチックシンチレータを PMT (浜松ホトニクス社製) に取り付け、PMT からのアノード信号を利用し、64chPMT 側からの Trigger 信号とコインシデンスをとる方法を取った。そのセットアップを図 5.3 に示す。プラスチックシンチレータ付きの PMT のアノード信号は、まず Preamp を通して Discriminator に入力し Discrri 信号を生成する。ここで Discriminator のスレッシュホールドは約  $-30\text{mV}$  (約  $-70\text{keV}$  相当) である。次にこの Discrri 信号を Gate Generator に入力し、時定数を  $1\mu\text{s}$  としてその出力を Coincidence に入力する。また、64chPMT 側からは PCI-6071E に入力する Trigger 信号を用いる。この Trigger 信号は 64ch の信号を読むために  $350\mu\text{s}$  と時定数が長く設定されているので、Gate Generator に入力し  $1\mu\text{s}$  と時定数を短くして Coincidence に入力する。Coincidence 出力は再び Gate Generator に入力され、64ch 読み出し用に時定数が  $350\mu\text{s}$  となるようにする。そしてこれを PCI-6071E 用の Trigger 信号とする。これにより、PCI-6071E ではプラスチックシンチレータと YAParray が同時に反応したときのみデータ集録を行なうことになる。コインシデンスを取らなかった場合、64chPMT で検出されるのはプラスチックシンチレータで散乱された偏光ガンマ線だけでなく、宇宙線バックグラウンドや鉛で散乱されたガンマ線も同時に検出してしまい、バックグラウンドが増えてしまうことになる。また、このコインシデンス出力とプラスチックシンチレータ付きの PMT からの Discrri 信号、64chPMT からの Trigger 信号の三つをスケーラに入力し、それぞれのカウントレートも確認できるようにした。さらに、図 5.2 の鉛コリメータを YAParray に対して 90 度回転させ、偏光ガンマ線の偏光方向を 90 度変えた測定も行なった。

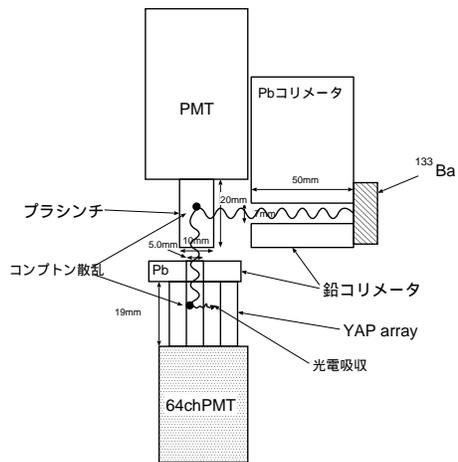


図 5.2: 偏光測定セットアップ

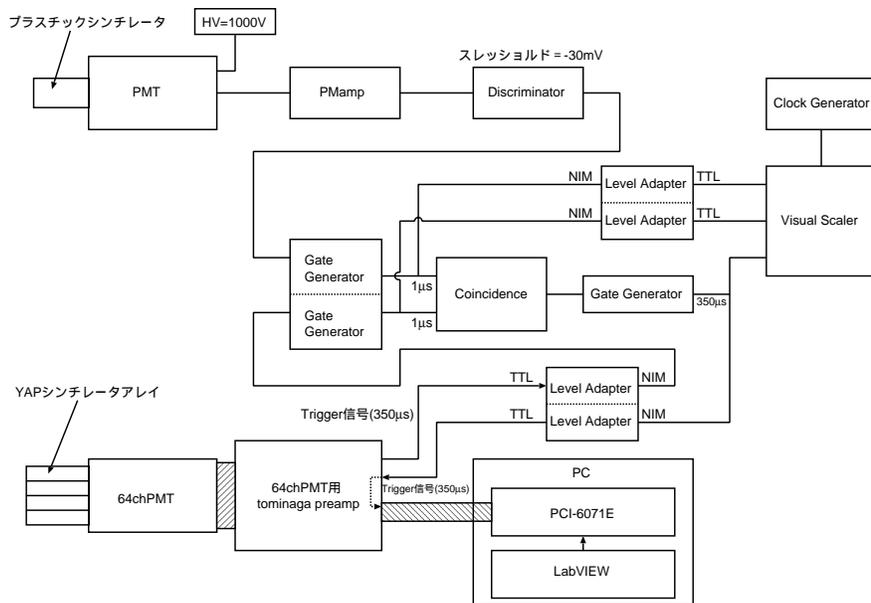


図 5.3: プラスチックシンチレータと YAParray のコインシデンスをとるためのセットアップ

### 5.2.1 コンプトン散乱イベントの判別方法

ここでは YAParray に入射したガンマ線のコンプトン散乱イベントを判別する方法を述べる。判別方法の概念図を図 5.4 に示す。図 5.4 の左図のように、YAP10 にガンマ線が入射してコンプトン散乱し、その隣の YAP6 で光電吸収されたとすると、YAP10 と YAP6

両方のシンチレータが光ることになる。§3.3.2で述べた通り、ガンマ線の検出器への入射位置は各アノード出力の重みの二乗平均により決定しているため、コンプトン散乱イベントはこの二乗平均により YAP と YAP の間で検出されることになり、ガンマ線の入射位置とはずれることになる。右図は、実際に YAP10 に無偏光のガンマ線 ( $^{137}\text{Cs}$ -662keV) を入射させたときのイベント検出位置を二次元プロットした図である。つまり、右図の二重丸で挟まれた部分の円の中心から放射状に伸びているイベントがコンプトン散乱イベントとなる。図 5.5 にバックグラウンドの図を示す。この図では上記のようなコンプトン散乱は確認できない。また、図 5.6 に  $^{137}\text{Cs}$  のイベントの x 方向射影とバックグラウンドの x 方向射影を重ねた図を示す。この図より、バックグラウンドは  $^{138}\text{Cs}$  イベントに対して十分小さいということがわかる。

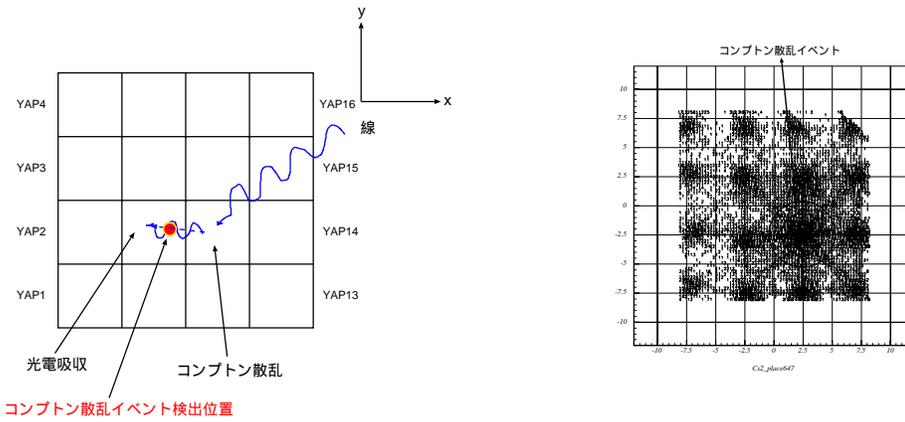


図 5.4: 左図: YAParray + 64chPMT 検出器によるコンプトン散乱イベント判別方法の概念図。右図: 検出イベント二次元プロット、二重丸で挟まれた部分がコンプトン散乱イベント。

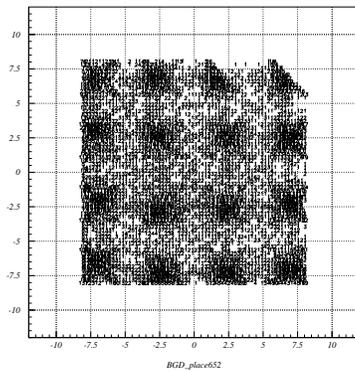


図 5.5: バックグラウンドイベントの検出位置の二次元プロット

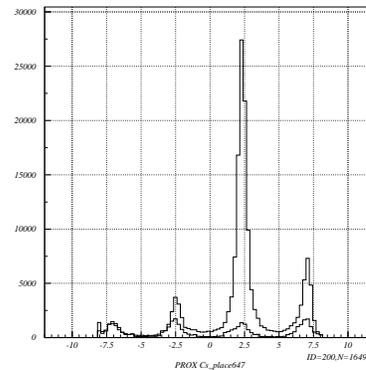


図 5.6:  $^{137}\text{Cs}$  イベント (太線) に対するバックグラウンドイベント (細線) の重ね合わせ

### 5.3 YAParray + 64chPMT 検出器の Modulation factor

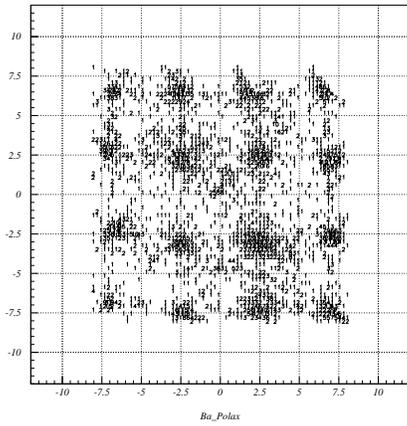
前述のセットアップにより、YAParray の YAP10 に  $^{133}\text{Ba}$  を使って偏光ガンマ線を入射させたときのイベント検出位置の二次元分布図を図 5.7 に示す。入射位置以外で検出されているのはバックグラウンドである。これより、前節のコンプトン散乱イベント検出方法により、コンプトン散乱イベントを分別し、偏光ガンマ線入射位置を中心として輪切りにした部分を、横軸にその回転角度、縦軸にカウント数をとった図を図 5.8 に示す。さらにこの図にはサインカーブでフィッティングが施されている。ただし、これには無偏光イベントも含まれているため、無偏光のガンマ線 ( $^{133}\text{Ba}$  : 356keV) を入射させたときの検出効率で割ってやることにより、Modulation 事象を抜き出す。この結果を図 5.9 に示す。

図 5.9 のサインカーブのフィッティングパラメータより、x 方向偏光ガンマ線、y 方向偏光ガンマ線それぞれの場合において Modulation factor を求めると、表 5.1 のようになった。また、このときのスケーラの値より、コインシデンス、プラスチックシンチレータに入射した放射線、YAParray に入射した放射線のカウントレートも表 5.2 に示す。

同様に  $^{137}\text{Cs}$  線源を用いて偏光ガンマ線を発生させ、YAParray に入射させたときのイベント検出位置の分布図を図 5.10 に、コンプトン散乱イベントの角度分布の図を図 5.11 に、図 5.11 を検出効率で割ったものを図 5.12 に、フィッティングパラメータによる Modulation factor を表 5.3 に示す。ただし、 $^{137}\text{Cs}$  を用いて偏光測定を行なった場合、図 5.11 のように x 方向偏光、y 方向偏光ともに約  $45^\circ$  おきにカウント数が大きくなっている。これは §5.2.1 でも述べた通り、コンプトン散乱イベントの検出位置は、隣り合う YAP の間に検出されるためである。これは  $^{133}\text{Ba}$  においても同様であるが、 $^{137}\text{Cs}$  を用いた方がガンマ線のエネルギーが大きく、YAP10 でコンプトン散乱してすぐ隣の YAP で光電吸収されると同様に、YAP 一つ隔てた YAP で光電吸収される割合が大きくなり、その分 YAP の間で検出されるイベントが増えるためと考えられる。図 5.12 は、図 5.9 と同様に  $^{133}\text{Ba}$  (356keV) の無偏光ガンマ線を入射させたときの検出効率で割ったものである。これは、 $^{137}\text{Cs}$  (662keV) のガンマ線がプラスチックシンチレータで散乱し、YAParray に入射するときのエネルギーが約 300keV となるためである。

また、 $^{133}\text{Ba}$  の場合と同様に、コインシデンス、プラスチックシンチレータ、YAParray におけるカウントレートを表 5.4 に示す。さらに、この偏光測定におけるバックグラウンドのカウントレートを表 5.5 に示す。

x 方向に偏光したガンマ線



y 方向に偏光したガンマ線

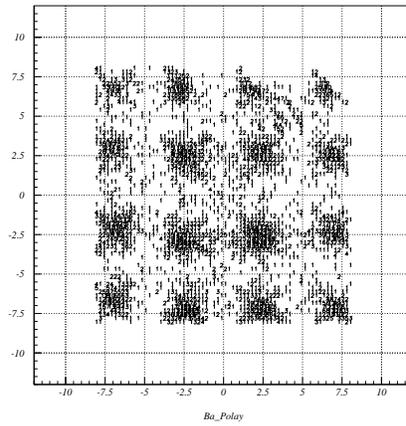
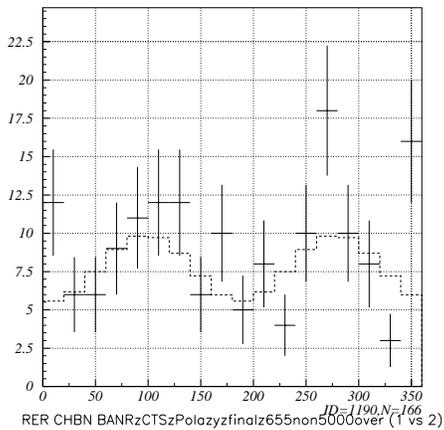


図 5.7: 偏光ガンマ線 ( $^{133}\text{Ba}$ ) を YAParray(YAP10) に入射させたときのイベント検出位置の分布図。左図: x 方向に偏光したガンマ線を入射。右図: y 方向に変更したガンマ線を入射。

x 方向に偏光したガンマ線



y 方向に偏光したガンマ線

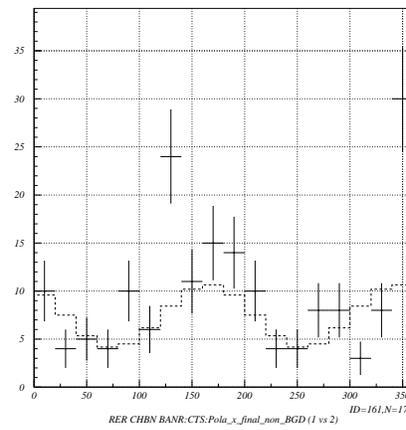
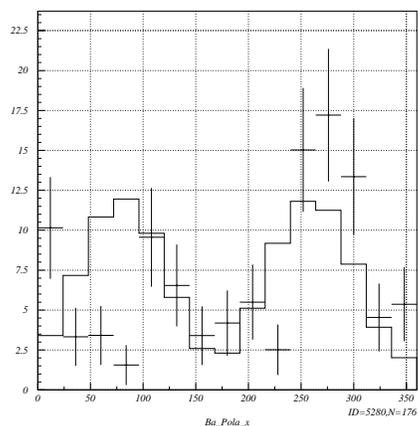


図 5.8: コンプトン散乱イベントにおいて、横軸に回転角度、縦軸にカウント数をとった図 ( $^{133}\text{Ba}$ )。サインカーブでフィッティングが施してある。

x 方向に偏光したガンマ線



y 方向に偏光したガンマ線

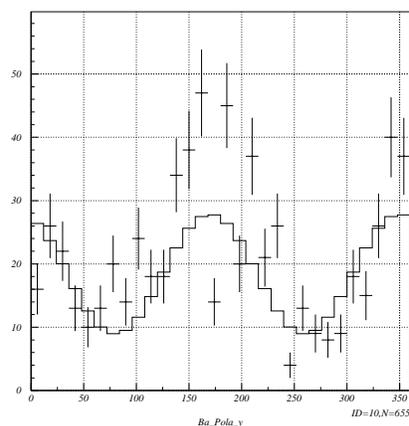


図 5.9: 図 5.8 を検出効率で割った図。サインカーブでフィッティングが施してある。

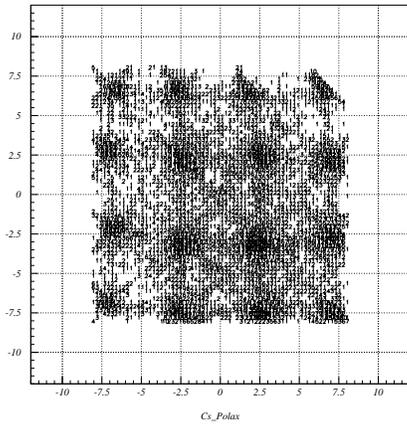
表 5.1:  $^{133}\text{Ba}$  を用いたときの Modulation factor

	x 方向偏光ガンマ線入射	y 方向偏光ガンマ線入射
Modulation factor	$28 \pm 19\%$	$45 \pm 24\%$

表 5.2:  $^{133}\text{Ba}$  を用いたときのスケラによるカウントレート [count/sec]

	x 方向偏光ガンマ線入射	y 方向偏光ガンマ線入射
コインシデンス	0.059	0.057
プラスチックシンチレータ	74.56	65.66
YAParray	72.43	86.54

x 方向に偏光したガンマ線



y 方向に偏光したガンマ線

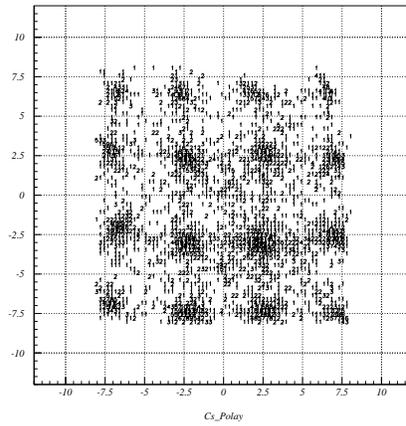
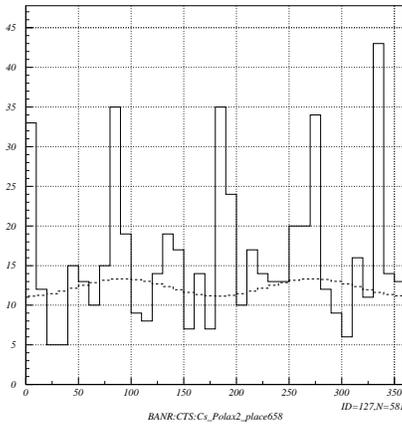


図 5.10: 偏光ガンマ線 ( $^{137}\text{Cs}$ ) を YAParray(YAP10) に入射させたときのイベント検出位置の分布図。左図: x 方向に偏光したガンマ線を入射。右図: y 方向に変更したガンマ線を入射。

x 方向に偏光したガンマ線



y 方向に偏光したガンマ線

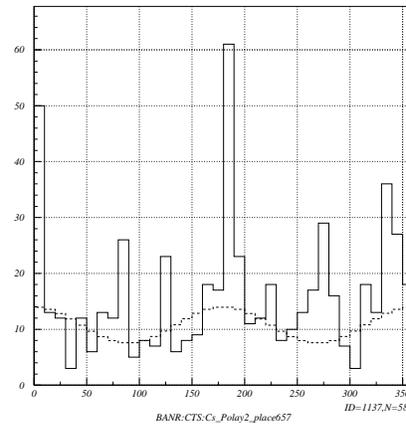
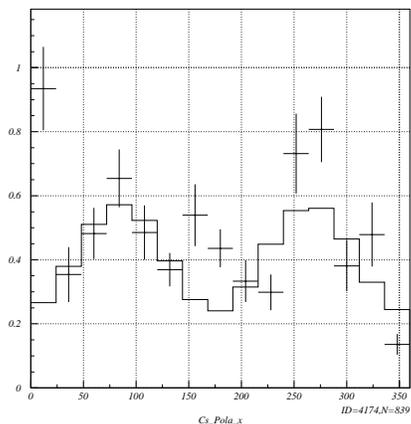


図 5.11: コンプトン散乱イベントにおいて、横軸に角度、縦軸にカウント数をとった図 ( $^{137}\text{Cs}$ )。サインカーブでフィッティングが施してある。

x 方向に偏光したガンマ線



y 方向に偏光したガンマ線

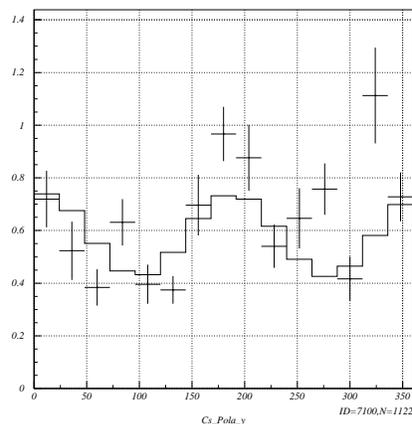


図 5.12: 図 5.11 を検出効率で割った図。サインカーブでフィッティングが施してある。

表 5.3:  $^{137}\text{Cs}$  を用いたときの Modulation factor

	x 方向偏光ガンマ線入射	y 方向偏光ガンマ線入射
Modulation factor	$9 \pm 8\%$	$30 \pm 12\%$

表 5.4:  $^{137}\text{Cs}$  を用いたときのスケラによるカウントレート [count/sec]

	x 方向偏光ガンマ線入射	y 方向偏光ガンマ線入射
コインシデンス	0.146	0.121
プラスチックシンチレータ	141.78	142.06
YAParray	72.43	60.82

表 5.5: 本実験の偏光測定によるバックグラウンドのカウントレート [count/sec]

	BGD のカウントレート
コインシデンス	0.025
プラスチックシンチレータ	6.02
YAParray	11.26

## 5.4 偏光測定のみとめ

4.5mm×4.5mm×19mm の YAP をアレイ状に並べ YAParray を形成し、64chPMT と組み合わせることにより偏光検出器を構成した。偏光測定では、ガンマ線をプラスチックシンチレータで散乱させ、YAParray に入射した偏光ガンマ線のコンプトン散乱イベントを判別することにより行なった。これにより YAParray + 64chPMT 検出器において表 5.1、5.3 のような Modulation factor を得た。この性能では、全天で最も明るい天体現象であるガンマ線バーストの 30% 偏光が観測できるかどうかという程度である。また、この値はコンプトンカメラの Modulation factor には遠く及ばない。ただし、輪切りに抜き出したコンプトン散乱イベント中の Modulation factor の計算に用いる  $N_{\perp}$ 、 $N_{//}$  の割合により求めた検出効率は、10% 前後と良い値を得ることができた。

YAParray + 64chPMT 検出器において偏光測定が可能であることが確認できたので、今後はバックグラウンドのさらなる低下をはかり、コンプトン散乱イベントの判別方法の最適化を行ない、Modulation factor のさらなる向上を目指す必要がある。

## 第6章 まとめ

我々は、高阻止能シンチレータと 64chPMT とを組み合わせた位置検出型シンチレーション検出器を構成し、散乱体と組み合わせることによりコンプトンカメラの原理を利用したガンマ線イメージャーの開発を行っている。コンプトンカメラの吸収体としてエネルギー分解能、位置分解能が良い検出器が必要である。そこでまず、64chPMT にいろいろな形状の高阻止能シンチレータを取り付け、その性能を調べて構成する検出器の最適化を行なった。GSO シンチレータの形状を変化させた場合、また YAP シンチレータをピクセル状に並べた場合についてエネルギー分解能及び位置分解能を測定したところ、 $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 4\text{mm}$  の GSO を用いた場合において位置分解能  $3.5\text{mm}$  ( $@ 662\text{keV}$ )、エネルギー分解能  $14\%$  ( $@ 662\text{keV}$ ) という結果を得た。この結果は、川本によって行なわれた 8chPMT と組み合わせで構成した検出器と同程度の性能であり、両者に大きな違いは見られなかった。これは、64chPMT の光電面が 8chPMT の光電面に対して小さいため、シンチレータの形状をその大きさに合わせ、さらに最適化することにより性能の向上が期待できる。また、64chPMT は、8chPMT では困難なピクセル状シンチレータとの組み合わせた検出器への応用の可能性も期待できる。これらを考慮して、 $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 5\text{mm}$  の GSO と 64chPMT を組み合わせた検出器を、ガンマ線イメージャーの吸収体として用いて、ガンマ線イメージングを行なった。

散乱体に PDarray を用いて、GSO と 64chPMT を組み合わせた検出器を吸収体とし、ガンマ線イメージャーを構成した。この検出器の性能を表す角分解能を測定したところ、 $29^\circ$  という結果を得た。これは、コンプトンカメラの性能として我々が目指す、MeV 領域において数度という目標にはまだ及ばない。よって今後は、散乱体、吸収体のさらなるエネルギー分解能、位置分解能の向上を目指す必要がある。そのためには位置分解能、エネルギー分解能の非常にすぐれたシリコンストリップ検出器 (DSSD) を散乱体として用い、吸収体である GSO+64chPMT においては、GSO の形状を 64chPMT の有効面積に適した形状への最適化を図る必要がある。これにより MeV 領域における角分解能  $\sim 5^\circ$  を目指す。

また、YAParray+64chPMT 検出器を用いることにより、わずかではあるが偏光を検出することができた。しかし、実用化にはほど遠い性能なので、今後はバックグラウンドのさらなる除去とコンプトン散乱イベントの判別方法の最適化を行う必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、お世話になった方々にこの場を借りてお礼申し上げます。特にたくさんの御指導、御協力をいただいた大杉節先生、深沢泰司先生に深く感謝申し上げます。また、研究室のみなさま、本当にありがとうございました。そして、実験器具等の発注や事務手続きをしていただいた上原さん、石井さんに深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] GLENN F. KNOLL, 木村逸郎 坂井英次訳, 「放射線計測ハンドブック 第2版」, 日刊工業新聞社, 1991.
- [2] 「光電子増倍管 -その基礎と応用-」, 浜松ホトニクス株式会社, 1993.
- [3] 川添哲志, 「宇宙硬 X 線観測用シンチレーション検出器の低バックグラウンド化の研究」, 広島大学卒業論文, 2001.
- [4] 渡辺伸 (ISAS), 「テルル化カドミウム (CdTe) 半導体を用いた硬 X 線・ガンマ線撮像用ピクセル検出器の開発」, 東京大学修士論文, 2001.
- [5] 「DAQ 6023E/6024E/6025E User Manual」, NATIONAL INSTRUMENTS, 2000.
- [6] 湯山俊夫. 「デジタル IC 回路の設計 実験で学ぶ TTL,C-MOS の応用テクニック」, CQ 出版社, 1996.
- [7] 「LabVIEW クイックスタートガイド」, NATIONAL INSTRUMENTS, 1999.
- [8] 「LabVIEW データ集録ベーシックマニュアル」, NATIONAL INSTRUMENTS, 1998.
- [9] 川本和弘, 「GSO,BGO を用いた小型の位置検出型宇宙 線用シンチレーション検出器の開発」, 広島大学修士論文, 2003.
- [10] 青井俊浩, 「64ch 光電子増倍管とアレイ型フォトダイオードを用いたガンマ線検出器のノイズ特性」, 広島大学卒業論文, 2004.
- [11] 三谷烈史, 「高分解能 CdTe アレイ検出器の開発と宇宙観測用ガンマ線イメージャーへの応用」, 東京大学修士論文, 2003.
- [12] 宇野進吾, 「宇宙硬 X 線撮像用低ノイズ両面シリコンストリップ検出器の開発」, 広島大学修士論文, 2003.
- [13] 堀川貴子, 「偏光 X 線ビームラインの較正とガス比例計数管偏光計の開発」, 大阪大学修士論文, 2002.
- [14] 中本達也, 「高阻止能結晶シンチレータとフォトダイオードを用いたガンマ線検出器の開発」, 広島大学卒業論文, 2002.
- [15] 河本卓也, 「実験室における偏光硬 X 線の発生」, 広島大学卒業論文, 2003.

- [16] 中嶋雄介, 「ガス検出器を利用した X 線偏光計の開発」, 大阪大学修士論文, 2003.
- [17] M.Kapusta, J.Pawelke, M.Moszyński, "Comparison of YAP and BGO for high-resolution PET detectors", 1997.
- [18] 宇田川眞行, 永井克彦, 星野公三 編, 「物理学基礎実験 第 2 版」1999.