# 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

川添哲志 広島大学理学部物理学科 u0972008 素粒子実験・高エネルギー宇宙学研究室

2001年2月9日

目 次

<b>第1章</b> 1.1 1.2	序論 硬 X 線・軟 線領域における天体観測	<b>2</b> 2 3
第2章	硬 X 線・軟 線検出器	<b>5</b>
2.1	シンチレーション検出器	5
2.2	井戸型フォスイッチカウンタ	8
2.3	シンチレーターの内在バックグラウンド	10
2.4	本研究の目的	10
第3章	新型光電子増倍管の性能評価	12
3.1	新型光電子増倍管................................	12
3.2	実験方法....................................	13
3.3	エネルギー分解能の測定	16
3.4	追加宝験	19
0.1	2.4.1 宝駼结里	20
3.5		20
0.0		20
第4章	シンチレーター部の改良	21
4.1	主検出部での波形弁別の原理	21
4.2	slowout-fastout 二次元図の取得方法と結果	22
4.3	シミュレーションによる最適化の研究	26
第5章	まとめと今後への課題	32

## 第1章 序論

宇宙に生起する現象の中には、高エネルギーの粒子や光子が大きく関与するもの が多く見られる。それらの現象には、一般に、それに特有な波長領域の電磁波、例 えば、電波、赤外、X線、線などの放射が伴っている。このような、電磁波放 射を伴う天体現象から観測的に得ることができる指標は、放射のスペクトル(連続 スペクトル、輝線・吸収スペクトル)、時間変動、イメージ、偏光である。連続ス ペクトルからは温度、磁場、電離度、などの物理量が得られ、吸収・輝線スペク トルからは、温度、化学成分、活動性の高さを知ることができる。また、時間変 動からは活動の周期、イメージからは空間的な情報が得られ、これらの情報の総 合的な解析により様々な天体現象を解明することができる。現在では、ほとんど の波長領域における電磁波が観測の対象となっており、様々な方法、原理で観測 が行われ天体現象の解明が進んでいる。

### 1.1 硬 X 線・軟 線領域における天体観測

多波長天体観測の進歩と共に多くの天体現象において X 線・線放射を伴う重要な現象が存在することが明らかになり、 X 線・線領域における天体観測は今や、天体現象の解明において非常に重要な手段の一つといえる。

X 線領域 (数 keV)の観測は主として鉄までの元素の原子状態や数 100 keV 程度 の熱放射を明らかにし、硬 X 線・軟 線領域 (数 10 keV から数 keV)では、高エ ネルギー天体の非熱的な放射や高温の熱放射を見ることができる。

X線・線領域での放射の素過程は実に数多く、その過程と起源となる天体の 例を挙げると、超高温ガスからの熱放射(白色矮星、銀河間ガス)、非熱的制動放 射(太陽・星のフレア)、シンクロトロン放射(Crab型超新星残骸、BL Lac天体)、 超相対論的電子による逆コンプトン散乱(銀河団、SNR、銀河吸収成分)、サイク ロトロン共鳴(X線パルサー、線バースト)などである。言うまでもなく、装置 の感度の向上にともなってX線・線領域で観測することができる天体現象は将 来的に増えて行くことが期待され、また多くの天体現象が解明されるであろう。

実際に、近年の観測技術の進歩は著しく、0.5-10 keVのX線領域は日本のASCA 衛星に代表されるようにX線用のCCDの開発により観測の感度を飛躍的に向上 させ、また GeV 領域に於いても CGRO 衛星 EGRET などにより、AGN (活動銀 河核)が数多く発見されている。しかし、硬X線・軟線領域では感度の良い検出 器開発が難しく、大きな発展がないまま残されてきた。

この領域で観測が進められて来なかった主な理由は、バックグラウンドが対象 天体からの信号を圧倒してしまうためである。数100 keV になると、本来信号と なるべき観測対象からの硬 X 線も検出器でコンプトン散乱する確率が多く、全エ ネルギーを検出器に与える確率が低いため低エネルギーにおけるバックグラウン ドとなってしまう。また、検出器に内在したり、宇宙線など外来粒子による検出器 自体の放射化によるバックグラウンドも高感度観測を目指すとき大きな障害とな る。そのため、この領域では観測対象に向けて取得したスペクトルと、観測対象 が無いと思われる方向を向けて取得したスペクトルの差を信号と見なす方法が取 られてきた。しかし、この方法では検出器の有効面積を増やし、観測時間を上げ、 差引きの統計誤差を上げることで感度を向上させることになり、検出器のが重く なったり長時間の観測が必要になったりするなど問題が多い。

このような問題点を克服し、硬 X 線・軟 線領域における高感度、広帯域観測 をめざし開発されたものが Astro-E 衛星搭載硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector:HXD) である。本研究の目的はこの HXD の検出部に注目しさらなる低バック グラウンド化を目指すことにある。

## 1.2 Astro-E 衛星搭載 HXD 検出器

Astro-E 衛星は ASCA 衛星の後継機として開発された、日本で5番目の X 線天 文衛星である。Astro-E 衛星には 0.5-12 keV 程度の X 線観測を行う、X 線マイク ロカロリーメーター (XRS),X 線 CCD カメラ (XIS), そして 10-700 keV 程度の硬 X 線・軟 線の観測のための硬 X 線検出器 (HXD)の三つの検出器が搭載された。 2000 年 2 月に行われた打ち上げは、予定した軌道に載せることができずに失敗に 終ってしまったが、Astro-E で目指した高感度・高分解能、広帯域スペクトル観 測 (0.4 keV-700 keV) は、米国のチャンドラ衛星、欧州のニュートン衛星の上がっ た現在でもなお、重要だといえる。特に、硬 X 線検出器 (HXD 検出器) は井戸型 フォスイッチカウンタという日本で生まれた技術を用いて、これまで技術的に困難 とされてきた硬 X 線・軟 線領域での高感度観測をかつてないレベルで実現した。

高感度を得るためには有効面積を増やすことと低バックグラウンド化の2つの 方法があるが、HXD は井戸型フォスイッチ構造をとることで対象天体外からの放 射、検出器自体のバックグラウンドを抑える方法を用いている。



図 1.1: HXD の感度

## 第2章 硬X線・軟 線検出器

本章では、シンチレーション検出器の基本的な原理、そして井戸型フォスイッチ カウンタによるバックグラウンドの除去の方法について述べる。さらに、本研究 のテーマである HXD のさらなる低バックグラウンド化について具体的な方法、原 理を示す。

#### 2.1 シンチレーション検出器

硬X線・軟 線領域(数10 keV-数100 keV)の天体観測は、シンチレーターと光 電子増倍管を組み合わせた、シンチレーション検出器が主として用いられる。シ ンチレーション検出器は、放射線のシンチレーターへの入射に伴う発光を光電子 増倍管によって電気的パルスに変換し、その出力パルスの波高値と計数率を測定 することで、放射線のエネルギー分布とその線量を知ることができるものである。

ここでは、シンチレーション検出器を硬X線・軟 線検出器として用いる場合 に重要なシンチレーター・光電子増倍管の諸特性について述べる。

シンチレーター

シンチレーターとは、放射線が入射したときに短い減衰時間を持った蛍光(可視光)を発する物質の事であり、この発光現象のことをシンチレーション、光のことをシンチレーション光と言う。

線の場合、シンチレーターとの相互作用、(光電効果、コンプトン効果、電子 対生成)によって、シンチレーター内に自由電子が発生し、この電子がシンチレー ターの束縛電子を励起することでシンチレーション光を発する。

シンチレーターと 線の相互作用は、シンチレーターの種類や形状と 線のエ ネルギーによって、その確率が異なる。そのため、測定する 線のエネルギー領 域に対し、全エネルギーをシンチレーターの軌道電子に与える光電効果の寄与が 大きくなるシンチレーターを選別し利用することが求められる。

シンチレーターの代表的なものは、NaI(Tl)、CsI、BGO、GSOなどの無機シン チレーター、プラスチックシンチレーターや液体シンチレーターのような有機シ ンチレーターなどがある。X線・線領域の天体観測に用いられるのは無機シン チレーターであり、その特徴としては発光効率、吸収係数が高い(光電効果の割合 が大きい) ことがなどがあげられる。そのため、 シンチレーション発光による光 子数のゆらぎが小さく良いエネルギー分解能が得られ、X 線・ 線領域の観測に 適している。

また、シンチレーターを選別する際、シンチレーター自体の内在バックグラウ ンドや宇宙空間での放射化によるバックグラウンドも考慮にいれる必要がある。 硬X線検出器(HXD)にはGSO、BGOの二種類のシンチレーターが使われてい る。BGO(Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>1</sub>2)は蛍光出力がNaIの12%しかないという欠点があるが、 実効原子番号が大きく無機シンチレーターの中でも特に放射線吸収率が大きい。 GSO(Gd<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)はCeを添加したもので吸収率が比較的高く、BGOに比べ蛍光出 力が大きい。さらに蛍光減衰時間が非常に短いという特徴がある。YAPは内在バッ クグラウンドが小さく良質なシンチレーターだが放射線吸収率が低いという欠点 がある。無機シンチレーターのうち現在実用されている一般的なシンチレーター とその特徴を表 2.1 に示す。

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

表 2.1: シンチレーターと特性

光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管とは、放射線入射による極めて微弱なシンチレーションパルスの 光信号を、電気的パルスに変換する装置である。図2.1に示すように、光電子増倍 管は、ガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面、電子増倍部より構成さ れている。

光電子増倍管に入射した光子は以下に示す過程を経て電気信号として出力される。

1. 入射窓を透過する。

- 2. 光電面内の電子を励起し、真空中に放出する。(光電効果)
- 3. 光電子は収束電極で第一ダイノード上に収束され、二次増倍された後、引続 く各ダイノードで二次電子放出を繰り返す。

4. 最終ダイノードより放出された二次電子群は陽極 (アノード)より取り出される。



図 2.1: PMT の構造

光電子増倍管からの出力は以上の過程により、光電面で生まれる光電子の10<sup>6</sup>~10<sup>8</sup> 倍に増倍される。また、光電子増倍管の性能の指標として量子効率がよく使われ る。量子効率とは光電面に入射した光子が光電効果を起こし光電子が生まれる確 率であり、一般に~25%の値をとる。

シンチレーション検出器による放射線エネルギー測定

放射線 (線)の測定に際し、シンチレーション光の損失を防ぐため、シンチ レーターは光学カップリング材 (シリコンオイルあるいはシリコングリース)を使っ て光電子増倍管の光電面に密着させる。また、シンチレーターをゴアテックスな どの反射材で覆うことも、同様の効果がある。

光電子増倍管により電気信号に変換された放射線入射に伴う信号は前置増幅 器 (PreAmp)でさらに電圧信号へと変換・増幅される。高エネルギー計測を目 的とする場合はここで電荷有感型増幅器(チャージアンプ)が一般に用いられる。 そして、整形増幅器によってガウス分布型の信号に整形され、ADC(アナログ-デ ジタル変換器)でデジタル化することでコンピュータ上において入射した放射線の エネルギー分布をヒストグラムとして得ることができる。

エネルギー分解能

放射線スペクトルのライン成分を観測・測定するとき、近接したエネルギーピー クを区別する能力をエネルギー分解能という。一般に検出器のエネルギー分解能 としてエネルギーピークの最高値の半分の高さにおける分布の幅(半値幅)をピー クの中央の値で割ったものを使い、百分率で表す。シンチレーション検出器にお いて 線のエネルギーがある程度大きくなりシンチレーターの発光光子数が大き くなると、光電効果のエネルギーピークの形状はガウス分布となり、その場合エ ネルギー分解能はピークでのエネルギーEと半値幅 $2.35 \times \sqrt{E}$ により

$$R(\mathbf{\mathfrak{S}}\mathbf{\mathfrak{R}}\mathbf{\mathfrak{k}}) = \frac{2.35 \times \sqrt{N}}{N} \times 100 \tag{2.1}$$

で与えられる。

#### 2.2 井戸型フォスイッチカウンタ

一般に、2種類の異なったシンチレーターを光学的に結合して1本の光電子増倍 管と組み合わせたものをフォスイッチ検出器 (phoswich detector) という。シンチ レーターには発光減衰時間の速いものと遅いものがをが選ばれるので、光電子増 倍管からの出力信号は2つの異なる形状の波形をもつことになる。すなわち、この 波形の違いを用いることで、シンチレーターの片方で起こった事象と両方で起こっ た事象とを弁別することが可能となる。HXDの井戸型フォスイッチカウンタは主 検出部のシンチレーターとして GSO を、それを取り囲むシールド部分に BGO を もちいてフォスイッチ構造をとっている (図 2.2)。



図 2.2: 井戸型フォスイッチカウンタ

視野外からの放射線はBGOに吸収されて減衰時間の遅い信号として出力され、 対象天体からの放射はGSOによる速い信号として出力される。そして、その信号 波形の形状の違いからバックグラウンドであるBGOによる信号を除去すること で、低バックグラウンドを可能にする。また、従来フォスイッチ検出器のシンチ レーターとして減衰時間が異なるNaIとCsIが用いられていたが、NaI・CsIは荷 電粒子により放射化されたヨウ素のバックグラウンドが高いため、感度を上げる ことを阻んでしまう。それに対しHXDでは、放射化成分が少なくよいエネルギー 分解能をもつGSOを主検出部に、また阻止能が高いBGOをシールド部に用いて 低バックグラウンド化を図っている。 波形分別法

波形の形状の違いから信号の弁別を実行するのが波形分別回路である。HXDの 井戸型フォスイッチカウンタの光電子増倍管から得られる信号は次の4通りである。

1. GSO での光電効果によるもの

- 2. GSO でコンプトン散乱しで全エネルギーを落さず、そののち BGO で吸収さ れたもの
- 3. 視野外から入射し BGO でコンプトン散乱し GSO で光電吸収されたもの
- 4. 視野外から入射し BGO で光電吸収されたもの

このうち (1) 以外はバックグラウンドである。井戸型フォスイッチカウンタは GSO と BGO との波形の違いを利用して波形分別回路によりバックグラウンドと 対象天体からの信号とを分別する。

波形分別回路は2つの時定数の異なる波形整形回路からなり、光電子増倍管から 出力されたGSO 信号とBGO 信号とが混じりあったものを時定数の速い回路と時 定数の遅い回路に通し、その出力波高の大小からGSO によるものとBGO による ものとに分別する。速い時定数の整形回路の出力波高をAf、遅い時定数の整形回 路を通の出力波高をAsとすると、GSO は波形が速いのでAf = AsとなるがBGO は遅いためAf < Asとなる。

図 2.3:左は GSO と BGO との混ざりあった信号を波形弁別器に通し、時定数の 遅い整形回路からの出力 As を縦軸、速い整形回路出力 Af を横軸にとったもので ある。速い整形器からの出力が大きい、すなわち傾きが小さいのが GSO からの信 号であり、傾きが大きいのが BGO からの信号である。このうち GSO からの信号 のみを選び出すことで GSO で全エネルギーを落とした事象のみを得ることがで きる。



図 2.3: 波形弁別の様子:波形弁別により GSO の信号のみ取り出される (左)。右図 は波形弁別によるバックグラウンドの減少を示している。

## 2.3 シンチレーターの内在バックグラウンド

HXD は井戸型フォスイッチカウンタの波形弁別機能と同時計数機能によって様々 な要因によるバックグラウンドを除去しているが主検出部自身のシンチレーター 内在のバックグラウンドを低減させることはできない。井戸型フォスイッチカウン タの主検出部シンチレーターである GSO は内在バックグラウンドが比較的低いこ とが知られているが、(図 2.4) に示すように硬 X線・軟 線領域において放射化成 分による大きなピークが見られる。このシンチレーター内での放射がシンチレー ター内部で光電吸収されると井戸型フォスイッチカウンタでは取り除くことので きないバックグラウンドとなってしまう。

図 2.4: GSO (左) と YAP (右) のバックグラウンド

#### **2.4** 本研究の目的

シンチレーション検出器を応用したものである井戸型フォスイッチカウンタに 関して基本的な性質と超低バックグラウンドを可能にした機能について述べてき たが、HXDはAstro-E2への搭載に向け、今もなおその性能を向上させるべく研究 が続けられている。Astro-E2のプロジェクトは今現在、公式に決定されていない が近い将来の打ち上げが期待されている。Astro-E2にはAstro-EのHXDをその まま利用することも考えられるが、さらなる性能の向上の研究は必然であり、ま たHXDとほぼ同じ領域に感度を持つIntegral衛星の打ち上げが2002年に予定さ れていることからもさらなる好感度を目指す研究は不可欠である。そして早期の 打ち上げに対応できるように大きな構造上の改良を行うことなく性能の向上を達 する必要がある。そこで、本研究では井戸型フォスイッチカウンタでは取り除く ことのできないシンチレーターの内在バックグラウンドの影響を減少させ、さら なる低バックグラウンド化を目指し次の二つのことに取り組んだ。

#### 新型の光電子増倍管の性能評価

HXD で使用されている PMT に比べ量子効率を大きく向上させた PMT が開発 された。PMT の量子効率の上昇は光電面において 光子から光電子への変換がよ り効率良く行われることであり、それにより PMT より出力される信号の波高値の 統計的変動が小さくなり分解能の向上につながる。検出器において分解能が向上 することにより、エネルギースペクトルのライン成分の感度を上げることができ る。つまりバックグラウンドであるシンチレーター自身の放射化成分の光電ピー クと対象天体からのものと区別をより明確にすることができ低バックグラウンド 化につながる。

そこで実際に新型 PMT をもちいて放射線エネルギー測定を行い、従来の PMT との分解能を比較した。

主検出部のシンチレーターの改良

HXD において主検出部の内在バックグラウンドを減少させることが、大きな改 良を行うことなく低バックグラウンド化を目指す時、最も確実な方法である。本 研究では、今まで GSO(0.5cmt)のみであった主検出部に減衰時間の異なる複数の シンチレーターを用いて波形弁別による主検出部の低バックグラウンド化を目指 した。その方法の詳細は4章に記す。

## 第3章 新型光電子増倍管の性能評価

### 3.1 新型光電子增倍管

従来の光電子増倍管 (PMT) と比較し量子効率を大幅に向上させた PMT が開発 され実用化が検討されている。新型 PMT は光電面に改良を加えることにより、従 来のもので 25 %前後であった量子効率を 35 %に向上させたとの報告がなされて いる (浜松ホトニクス社 図 3.2)。従来の PMT の光電面には光電物質が面で塗られ ているが、新たに開発されたものでは細かい四角すいの突起が PMT 内部側に敷 き詰められておりそこに光電物質が塗られている。光電面の感度を向上させるに は単純に光電面物質の層を厚くすれば良いが、同時に発生した光電子の吸収も大 きくなってしまう。 そこで新型 PMT では光電物質の厚さは同じであり光電子の 吸収については従来のものと変わらないが、光電面を斜めにすることで PMT 面 に垂直に入射するシンチレーション光に対して実行的な厚さを大きくしている (図 3.1)。



図 3.1: 光電面の模式図:左が新型の光電面、右が従来のものを光電面に対し水平方向から見た様子を模式的に表したものである。PMTに対し垂直に入射する光に対し新型のほうが厚い

本実験では新型光電子増倍管 (R5800)を使用することで従来のものと比べ実際 にどの程度の性能の向上が得られるのかを実験的に評価した。光電子増倍管の性 能の指標としてエネルギー分解能をもちいた。量子効率の上昇は、光電面でシン チレーション光の入射に伴う光電子の数の増化を意味し、光電子数の統計的変動 を小さくするのでエネルギー分解能の値を小さくすると考えられる。



図 3.2: 浜松ホトニクスでの量子効率の測定値。点線が量子効率、実線は光電面の 感度を示している。

理論的に量子効率の上昇に伴うエネルギー分解能の向上は次のように算出できる。光電面での光電子の生成がポアソン過程であるとしたとき、入射光子より生成される光電子の数の平均をNとすると統計的変動の標準偏差は $\sqrt{N}$ となる。従って、ガウス分布における半値幅は $2.35 \times \sqrt{N}$ で定義されるのでエネルギー分解能は

$$R(分解能) = \frac{2.35 \times \sqrt{N}}{N} \times 100$$

となる。新型光電子増倍管における量子効率は (図 3.2) に示すように 450nm 付 近で 35 %であり、従来型の 25 %に比べ約 1.4 倍になっている。よって新型光電子 増倍管の利用によりエネルギー分解能は  $\frac{1}{\sqrt{1.4}}=0.84$  倍になることが予想される。

#### 3.2 実験方法

新型光電子増倍管 (R5800:S/N.ZF9451)と従来の光電子増倍管 (R6231:S/N.jj4716) を用いて、GSO シンチレーター、BGO シンチレーターそれぞれについて 20 度と -20 度において <sup>57</sup>Co (122 keV)・<sup>137</sup>Cs (662 keV)・<sup>22</sup>Na (511 keV,1275 keV) でのエ ネルギースペクトルを取得し分解能を求め比較する。新型 PMT は光電面の直径が 2.5cm、従来の PMT (R6231) は HXD の井戸型フォスイッチカウンタに使用され ているものと同型であり光電面の直径 4.5cm である。、シンチレーターも形状は異 なるが HXD 同様の GSO・BGO を用いた。GSO・BGO の二種類を用いて測定す るのは、これらが HXD 搭載のシンチレーターであるという事と PMT の量子効率 は (図 3.2) に見るように波長によって異なるためである。温度を - 20 度に設定す る理由は本実験で使用したシンチレーター (GSO・BGO) はともに冷却することで シンチレーション光の光量が増えることが知られており、また宇宙空間での HXD の動作温度も - 20 度程度であるためである。測定する PMT とシンチレーターの 組合せをまとめると次のようである。

以下に示す PMT とシンチレーターの組合せについてそれぞれ線源<sup>60</sup>Co (122 keV)・ <sup>137</sup>Cs1 (622 keV)・<sup>22</sup>Na (511 keV,1275 keV)、温度 20 度・ - 20 度で測定した。

- 新型 PMT (R5100)+GSO
- **||P**MT(R6231)+GSO
- 新型 PMT +BGO
- IE PMT+BGO

シンチレーター

測定に際し、シンチレーターは結晶中で発生したシンチレーション光を効率よ く光電面に収光させるため反射材として反射率の良いシールテープで覆った。本来 反射材としてはゴアテックスを用いるのが一般的だが、使用したシンチレーター は(1.0 × 1.0 × 1.0 cm<sup>3</sup>)と小さいため厚さのあるゴアテックスの利用は技術的に 難しく、その点シールテープは薄く伸縮性を持つのでシンチレーターに密着し反 射材としての役割を十分に果たす。また光電子増倍管の光電面との光学カップリ ング材としてシリコンオイル(KE108)を用いた。同様に用いられる光学カップリ ング材としてシリコングリースもあるが、シリコンオイルの方が透過性に優れ分 解能の測定において精度の高い測定が可能になる。また光学カップリングの善し 悪しがエネルギー分解能に大きく影響するためシンチレーターの PMT への装着 は慎重に行った。

セットアップ

光電子増倍管は磁場の影響を避けるため側面を磁気シールドで覆い、さらにシ ンチレーション光以外の粒子の光電面への入射を防ぐために黒のビニールテープ を側面に巻き付けた。光電面にはシンチレーターを型取った蓋をかぶせシンチレー ション光の損失、シンチレーション光以外の光子の入射を防いだ。この方法により シンチレーターは光電面に強固に固定され、またシンチレーターの取り換えを効 率よく行えるという利点もある。シンチレーターを接着した光電子増倍管は恒温 槽内での安定性、測定の効率化を考え遮光された箱に光電面を上向きに固定した。

実験装置を図 3.3 に示す。データの取得は光電子増倍管の最終ダイオードからの電 気信号を前置増幅器 (PreAmp) で増幅し電圧信号に変換し、整形器 (ShapingAmp) を通し整形した信号の波高をアナログデジタル変換器 (ADC) で読みとる。ADC で はデジタル変換した信号を信号の波高に対応するチャンネル (全 4096 チャンネル) として出力する。今回使用した ADC は 4096 チャンネルで約 8V までの電圧に対 応しているため、PMT の高圧電源、ShapingAmp の増幅率 (gain) を調節すること で測定する線源のエネルギーピークが 4096 チャンネル内に入るようにした。デー タのヒストグラム化は ADC とネットワークで継れたコンピュータ上で MCA を用 いて行った

これらの回路については室温下に置かれている。シンチレーターを冷却する際、 シンチレーターは急激な冷却・加熱により結晶が崩壊してしまう恐れがあるため、 恒温槽でのシンチレーターの 20 度~ - 20 度の冷却または加熱は恒温槽の制御プ ログラムにより 3 時間ほどの時間をかけた。図 3.4 にアノード出力 (50 受け)、 PreAmp 出力、整形器出力をオシロスコープで見た様子を示す。



図 3.3: シンチレーション検出器による測定のブロック図



図 3.4: 左からアノードの出力波形、PreAmpの出力波形、整形器の出力波形

#### データ解析

PC 上において MCA で得られたヒストグラム (パルスハイトスペクトル) は解 析ソフト (DIS45) をもちいて解析した。スペクトルの縦軸はカウント数、横軸は チャンネル数である。エネルギー分解能としてスペクトルにおける光電ピークを 対称なガウス分布と一次関数の直線でフィットしたときに得られる sigma・ピーク のチャンネル を次式

$$R(分解能) = \frac{sigma \times 2.35}{peak \, \mathcal{O} \mathcal{F} \mathbf{v} \mathbf{v} \mathbf{\lambda} \mathbf{\mu}} \times 100 \tag{3.1}$$

に代入したときの値(R)を用いた。この時、エネルギーとチャンネルの対応関係 を知っておく必要があるので事前にその測定を行いoffsetを求めた。分解能を求め る際は光電ピークのチャンネル値にオフセットを考慮した値を用いた。測定デー タはシンチレーターの取り付け方(シールテープの捲き方・シリコンオイルの塗り 方)などの要因で大きく変動してしまうため、各組み合わせについて数回づつシン チレーターの取り付け - 測定の作業を繰り返し、安定していると思われるデータ、 ピークのチャンネルが5%の誤差内におさまっているデータのみを用いてそれぞ れの分解能を0.01の精度で算出した。そしてそれらを平均した値を最終の分解能 として用いた。

### 3.3 エネルギー分解能の測定

パルスハイトスペクトルの取得と offset の決定

PC上で得られたスペクトルの例を図 3.5 に示す。これは <sup>137</sup>Cs (622 keV)を用い てGSO と新 PMT の組合せで高圧電源 1000V、ShapingAmp の gain を 100 × 0.8、 shaping time 0.2  $\mu$  s で測定したときのものである。新型 PMT の測定はすべてこの 設定で行った。旧 PMT は高圧電源 850V とし ShapingAmp の設定は新 PMT の場 合と同じである。 光電ピークとコンプトン散乱による連続成分が見える。他のシ ンチレーター・PMT の組み合わせについても相違はほとんど無い。ここから光電 ピークのみを切り出しガウス分布と一次関数の直線でフィットすることでピークに 対応するチャンネルと sigma を求めた。<sup>57</sup>Co (122 keV)・<sup>22</sup>Na (511 keV,1275 keV) についても同様である。そして、得られた 122keV 511keV 662keV 1275keV に対 応するチャンネルをエネルギー vs チャンネル数でプロットした。このエネルギー とチャンネル数の関係を一次関数でフィットしその切片を offset とした (図 3.6)。得 られた offset の値は全 4096 に対し、新型 PMT で - 10、従来型 PMT で - 22 であ リエネルギー分解能を算出する際、ピークのチャンネル値にこの値を考慮した。



図 3.5: GSO と新 PMT の組み合わせにより得られた <sup>137</sup>Cs のエネルギースペク トル



図 3.6: エネルギーとそれに対応するチャンネルを一次関数でフィットした様子

エネルギー分解能の導出と比較

以下に測定の結果を示す。図 3.7 は GSO を用いて温度 20 度、 - 20 度での各エ ネルギーにおける分解能をそれぞれの PMT についてプロットしたもの。図 3.8 は BGO を用いての温度 20 度、 - 20 度でのエネルギー分解能である。GSO・BGO の 光量は 20 度から - 20 度に冷却することでそれぞれ約 1.2 倍、1.5 倍となった。



図 3.7: GSO を用いての測定 左:20 度 右: - 20 度。



図 3.8: BGO を用いて測定 左:20 度 右: - 20 度

いずれにおいても新型 PMT による分解能の向上が見られる。高エネルギー物理 学ではエネルギー分解能の指標として  $^{137}Cs$  (662 keV) に対する値が利用されるの で、それを新型 PMT、従来の PMT について表 (hyou) にまとめた。()内は量子 効率の上昇から期待される分解能である。

表 3.1: <sup>137</sup>Cs (622 keV) でのエネルギー分解能 (%)。括弧内は量子効率の向上か ら予想される分解能

	GSO (20 <b>度</b> )	BGO (20 <b>度</b> )	GSO (-20 <b>度</b> )	BGO (-20 <b>度</b> )
新型 PMT	8.02 (6.93)	9.19(7.77)	7.70(6.64)	7.92(6.98)
従来 PMT	8.21	9.62	7.86	8.26

表に見るように、GSO (20 度)の測定において 0.19 %、BGO (20 度) で 0.33 %、 GSO (-20 度) で 0.04 %、BGO (-20 度) で 0.34 のエネルギー分解能の向上があっ た。特に BGO に対して向上が大きいのが目立つ。しかし、どの測定結果において も量子効率の 1.4 倍の上昇に伴う予想される分解能の向上は見られない。新 PMT の測定値に比べ特に GSO において分解能の向上が見られない。

### 3.4 追加実験

ここに、後に入手した新型 PMT (R6231:S/N.2743) と従来型 PMT (R6231:S/N.jj4761) の同タイプの PMT について <sup>137</sup>Cs (662 keV) におけるエネルギー分解能を比較し た結果を示す。

新型 PMT (R6231) は新型 PMT (R5800) と同様に改良が加えられている。測定の セットアップ、解析方法は先に述べた実験と同様であるが、本実験ではGSO、BGO の単体のシンチレーターについての測定に加え、HXD に用いられるボトム部図 3.3 を PMT に装着し実際の動作環境に近づけた状況での測定を行いエネルギー分解 能を比較した。

ボトム部は予めゴアテックスが包装された物を用いた。



図 3.9: HXD ボトム部

#### 3.4.1 実験結果

以下の表に単体シンチレーター (GSO、BGO:(1.0 × 1.0 × 1.0 *cm*<sup>3</sup>)、ボトム部 それぞれについての <sup>137</sup>Cs (662 keV) での新型 PMT と従来の PMT のエネルギー 分解能を示す。

表 3.2: 単体の GSO、BGO について 20 度、 - 20 度での分解能 (%)

	GSO (20 <b>度</b> )	BGO (20 <b>度</b> )	GSO (-20 <b>度</b> )	BGO (-20 <b>度</b> )
新型 PMT	8.21	9.62	7.86	8.26
従来 PMT	7.64	9.21	7.57	7.94

表 3.3: ボトム部の GSO、BGO について 20 度、 - 20 度での分解能 (%)

	GSO (20 <b>度</b> )	BGO (20 <b>度</b> )	GSO (-20 <b>度</b> )	BGO (-20 <b>度</b> )
新型 PMT	10.79	15.08	9.49	13.05
従来 PMT	10.53	15.12	9.71	12.19

表に見るように、単体のシンチレーターでの測定では新型 PMT (R5800)を用 いた時と同様に若干の分解能の向上がある。また、ボトム部を用いた場合は - 20 度での BGO でわずかな分解能の向上があったが、新型 PMT を用いることによる 分解能の向上はほとんど見られない。

### 3.5 今後の課題

新型 PMT の改良点は PMT の光電面に垂直に入射するシンチレーション光への 感度を上昇させたことにある。そこで単体のシンチレーターを直接 PMT に装着 して行なった測定で量子効率の上昇から予想される分解能の向上が得られなかっ たのは、垂直に入射するシンチレーション光以外のものが多く含まれ新型 PMT の 長所を生かしてない可能性が原因として考えられるが、追加実験でのボトム部を 用いての測定に見るように現時点においては新型 PMT による分解能の向上は得 られていない。しかし、新型 PMT (R6231)の測定は現在も進行中であり、今回は <sup>137</sup>Cs (662 keV)での測定しかできなかったが、今後他のエネルギー領域について の測定を行なう予定である。ボトム部の測定についてもここでは十分なデータが 得られていないため、同様に実験を行なう予定である。

## 第4章 シンチレーター部の改良

#### 4.1 主検出部での波形弁別の原理

主検出部の波形弁別によってシンチレーターの内在バックグラウンドを減少さ せる方法について説明する。主検出部として二つの減衰時間の異なるシンチレー ターを重ねた構造(図4.1)を考えると図に示すように低エネルギーの 線は上のシ ンチレーターで吸収され、ある程度高いエネルギーのものは上と下のシンチレー ターで吸収される。一方内在バックグラウンドは上下のシンチレーターで一様に 発生する。この時、上下それぞれのシンチレーターでの事象を減衰時間の違いに より弁別し、上のシンチレーターの事象のみを取り出すと下のシンチレーターの 内在バックグラウンドは除去され、内在バックグラウンドは半分になる。よって 低エネルギーの 線に対する内在バックグラウンドとの比が下がり検出器の感度 を向上させる。



図 4.1: 主検出部の波形弁別

この方法を実現させるためには、減衰時間の異なるシンチレーターが必要であ り、それぞれのシンチレーターでの阻止能、また実際に波形弁別がどれほどのエ ネルギーで可能であるか といった情報を知っておく必要がある。この方法により、 これまでのシールド部 (BGO) と主検出部 (GSO) の信号を弁別し、視野外からの 放射や主検出部におけるコンプトン散乱によるバックグラウンドを除去するとい う井戸型フォスイッチカウンタのバックグラウンド除去機能は拡張され、さらな る低バックグラウンド化が期待できる。 主検出部のシンチレーター

この方法によるHXDの低バックグラウンド化を図るとき、主検出部に用いるシンチレーターに求められる条件は第一に波形弁別が可能であることであり、また放射化成分が少ないものが望ましい。

GSO は結晶中に含まれる Ce の混入率 (ドープ率)の違いにより、シンチレーション光の減衰時間が異なることが知られており、本研究では Ce のドープ率の違う GSO (Ce:0.3mol) と GSO (Ce:0.5mol)、放射化成分の少ないシンチレーターと して知られている YAP を用意した。これらのシンチレーターが波形弁別回路に よって弁別可能ならば先に示した原理による低バックグラウンド化を可能にする と考えられる。

これらのシンチレーターについて、その信号を波形弁別回路での速い時定数の回路に通した出力(fastout)と遅い時定数に通した出力(slowout)の2次元図は得られておらず。YAPとGSO(Ce:0.3mol・0.5mol)の三種類のシンチレーターについてデータを取得することを当面の目的とした。そしてこの内二つの組合せが弁別可能であるかどうか、また実際にどれほどのエネルギー域において弁別が可能なのかを検証した。

#### 4.2 slowout-fastout 二次元図の取得方法と結果

セットアップ

測定に用いた PMT は R6231(S/N.JJ4716)であり、シンチレーターとして GSO (Ce0.3)、 GSO (Ce0.5)、YAP、BGO を用いた。以下のような組合せを一つの PMT に装着 し、それぞれにおける 2 次元図を取得した。シンチレーターは PMT の光電面に重 ねるのではなく、すべてのシンチレーターが PMT に密着するように装着した。

- GSO (Ce0.3:1 × 1 ×  $1cm^3$ )+GSO (Ce0.5:1 × 1 ×  $1cm^3$ )+BGO (1 × 1 ×  $1cm^3$ )
- GSO (Ce0.5:1  $\times$  1  $\times$  1*cm*<sup>3</sup>)+YAP (2.4  $\times$  2.4  $\times$  1*cm*<sup>3</sup>)+BGO (1  $\times$  1  $\times$  1*cm*<sup>3</sup>)

シンチレーターによっては冷却によってシンチレーション光の減衰時間が変化 することが知られているので 20 度と - 20 度による測定を行った。放射線源とし て<sup>137</sup>Cs (662keV)を用いた。測定に用いるシンチレーター・PMTの取り扱いにつ いては前章で述べた方法と同じである。

2次元図の取得のためのセットアップを図に示す。データ取得系には CAMAC、 VME を用いた。PMT の最終ダイノード信号を前置増幅器 (PreAmp) で増幅・電 圧変換したものを波形弁別器 (Pulse Shape Discriminator) に通す。Pulse Shape Discriminator 中には時定数の速い回路と時定数の遅い回路が組み込まれており、 出力として整形された時定数の速い回路を通した信号 (fast.out)、時定数の遅い回路を通した信号 (slow.out) が得られる。この二つの信号をADC でアナログ-デジタル変換し、PC 上で slow-fast の二次元図を取得した。一方アノード信号は前置増幅器によって増幅・電圧変換され Discriminator によりあるしきい値以上の信号を矩形信号に変換しゲート発生器 (GateGenerator) でゲートが生成される。このゲート信号がADC に入った時に AD 変換をかけるようにした。ADC は信号の AD 変換に多少の時間を要し、処理中に次の信号が ADC に入ると ADC は正常に動作しないため、INTERRUPT REGISTER(INT REG)、OUTOUT REGISTER(OUT REG) によって ADC が処理中であることを示す veto 信号を作り次のイベントに対する ADC ゲートの作成を禁止した。SCALOR は信号の計数を行い、COINCIDENSE、CLOCK GENERATER(clock G) によって処理中のデッドタイムを知ることができる。CAMAC で取得された ADC 値 (slow,fast)、Interrupt 信号、SCALOR 情報 は VME によって読み出され PC 上でデータを得る。データの読み出しのためのソフトとして UNIDAQ-V2.3 を用いた。

前実験と同様に PMT とそれを囲む箱以外の回路系は室温下である。またすべての測定で高電圧値は 850V とした。



図 4.2: slow-fast 二次元図取得のためのセットアップ

#### 実験結果

得られたそれぞれの組み合わせによる slow-fast の 2 次元図を示す。すべての図 において両軸はチャンネルであり横軸に fast-out、縦軸に slow-out のチャンネルを とっている。図中に見える光電ピークは <sup>137</sup>Cs の 662keV によるものである。また 表 4.1 にそれぞれのシンチレーターに対する 20 度、 - 20 度での傾きとピークにお けるそれぞれの線の幅広()を示す。

GSO (Ce:0.3mol) とGSO (Ce:0.5mol)

どちらも温度による傾きの変化は小さい。低エネルギー領域においては二つの シンチレーターからの信号は混ざってしまっている。20度~-20度の冷却により GSO (Ce:0.3mol) で光量が 1.18 倍、GSO (Ce:0.5mol) で 1.24 倍に増加した。



図 4.3: 20 度 (左)・-20 度 (右) における GSO (Ce:0.3mol)、GSO (Ce:0.5mol)、 BGO の slow-fast2 次元図。傾きの大きいほうから BGO、GSO (Ce:0.3mol)、 GSO (Ce:0.5mol)。

GSO (Ce:0.5mol)とYAP

20度の測定では低エネルギー領域(100keV付近)での弁別が可能であると考えられる。冷却することによって YAPの減衰時間が遅くなり(傾きが大きくなる)、 - 20度では GSO より傾きが大きくなっている。



図 4.4: 左: 20度における GSO (Ce:0.5mol)、YAP、BGO。傾きの大きいほうから BGO、GSO (Ce:0.5mol)、YAP。右: - 20度。傾きの大きい方から BGO、YAP、 GSO (Ce:0.5mol)

	GSO $(0.3 \text{mol})$	GSO $(0.5 \text{mol})$	YAP
傾き (20度)	1.04	0.98	0.91
(- 20 <b>度</b> )	1.07	1.00	1.06
ピークで直線の幅 (ch) (20 度)	244	221	177
(-20度)	283	278	303

表 4.1: 20 度、 - 20 度での二次元上での傾きと広がり

以上のことから、 - 20 度では BGO、YAP、GSO (0.3mol)、GSO (0.5mol)の 順に傾きが大きいことが分かる。HXDの主検出部で利用するシンチレーターとし てはシールド部に BGO が使われていることから、2 次元上で BGO から離れてい ることが望ましく、主検出部のシンチレーターはその傾きの違いが大きい方が良 い。よって、主検出部のシンチレーターとして YAP と GSO (0.5mol)、あるいは GSO (0.3mol) と GSO (0.5mol)の組合せが有効であると考えられる。 GSO (0.5mol) と GSO (0.3mol)、YAP と GSO (0.3mol) の信号がどれほどのエ ネルギー域で弁別可能であるかについて、各エネルギーで上のシンチレーターの 信号を切り出した時の下のシンチレーターのイベントの混ざる割合を測定にて得 られた 2 次元上での傾きと広がりをもとに乱数をふりシミュレーションによって 求めた (図 4.5)。YAP と GAO (Ce:0.5)の組合せは GSO (0.5mol) と GSO (0.3mol) の組合せよりも低エネルギー領域において下のシンチレーターのバックグラウン ドの混入率が低い。



図 4.5: 左:YAP とGSO (0.3mol)。右:GSO (0.5mol) とGSO (0.3mol)

## 4.3 シミュレーションによる最適化の研究

測定によって得られた結果より、HXD の - 20 度での動作を考慮し、波形弁別 の可能なシンチレーターの組合せとして GSO (Ce:0.5mol) と GSO (Ce:0.3mol)、 GSO (Ce:0.5mol) と YAP が有力であることが分かった。しかし、実際に、主検出 部に二種類のシンチレーターを重ねて低バックグラウンド化を図ることを考えた とき、前にも述べたようにそれぞれのシンチレーターの阻止能を考慮し、そこでの 波形弁別の能力を考慮する必要がある。主検出部に重ねた二つのシンチレーター のうち上のものが吸収するエネルギー領域で波形弁別が可能でなければ主検出部 の内在バックグラウンドの低減にはつながらない。阻止能はシンチレーターを厚 くすることで向上し、より高いエネルギーの放射線を測定できるようになるが同 時にシンチレーターの体積が増え内在バックグラウンドも増加してしまう。

考慮すべき点をまとめると次のようになる。

- 1. シンチレーターの吸収率 (種類・厚さ)
- 2. シンチレーターの内在バックグラウンド
- 3. 複数のシンチレーターの信号が波形弁別可能であるエネルギー域

これらの総合的な評価により、最もバックグラウンドを低くするシンチレーター の種類・厚さの組合せをを求めた。方法としては、まず数種類のシンチレーター の種類と厚さのパターンについて、各パターンにおいての各シンチレーターの吸 収率、内在バックグラウンドにより感度を求めることで最も感度の良い組合せを 選び出した。そしてシミュレーションによって各エネルギー域で実際にどの程度 波形弁別が可能であるかを調べ考察した。

ー般に感度 S (E) $cm^{-2}s^{-1}keV^{-1}$ はあるエネルギー (E)keVを中心としたエネル ギー範囲 ( $\Delta E$ )keVの中に入るバックグラウンド  $B(E)cm^{-2}s^{-1}keV^{-1}$ できまり

$$S(E) = \frac{3}{\eta(E)} \sqrt{\frac{2B(E)}{A\Delta ET(s)}}$$

で与えられる。ここで $\eta(E)$ はエネルギーEにおける検出器のフルピーク効率(吸収率)、 $A(cm^2)$ は検出器の面積、T(s)は観測時間である。AにはHXDの検出部の面積( $330cm^2$ )を、観測時間は(100000s)として、この式に吸収率、シンチレーターの内在バックグラウンドを代入することで感度が求まる。本研究で扱っている検出器では上のシンチレーターでの事象を切り出したときに、弁別できず下のシンチレーターから漏れこんで来るバックグラウンドも考慮する必要があり、上のシンチレーターでの感度は各Eにおける下からの漏れ込みを $f(B_T)$ として

$$S_{\perp}(E) = \frac{3}{\eta_{\perp}(E)} \sqrt{\frac{2(B_{\perp}(E) + fB_{\top}(E))}{A\Delta ET}}$$
(4.1)

となる。また、上下のシンチレーターでは

$$S_{\pm \mathsf{F}}(E) = \frac{3}{\eta_{\pm}(E) + \eta_{\mathsf{F}}(E)} \sqrt{\frac{2(B_{\pm}(E) + B_{\mathsf{F}}(E))}{A\Delta ET}}$$
(4.2)

となる。この  $f(B_{\mathbb{F}})$  の値として図 4.5 を近似したものを用いた。吸収率につい ては高エネルギー検出器のシミュレーターとして知られている Geant4 の中の光 電効果の断面積テーブルにより求めた。HXD の主検出 部のシンチレーターの上 には Si 検出器 (2mmt) が置かれているので Si による吸収も考慮した。図 4.6 に厚 さが 0.25cm の GSO、1.5cm の YAP に対する吸収率  $\eta(E)$  を示す。内在バックグ ラウンドとして、GSO、YAP は軌道上での放射化を考慮したバックグラウンドの スペクトルがモデル化されており、本研究では計算の簡略化のため図 4.7 のよう に  $80keV \sim 400keV$  の範囲で 20 点程取り出すことで近似して感度の算出に用いた 。GSO のバックグラウンドに関する研究は進んでいるが、YAP に関してはあまり 研究が進んでおらず近似したスペクトルには多少の不定性があると思われる。ま た参考にした資料によると HXD のアクティブシールドの効果により 100keV ~ 300keVのエネルギー領域で一桁程度連続成分を除去することが可能であり、近似 した YAP のバックグラウンドもこの効果を考慮し資料にあるスペクトルを近似し たものを $\frac{1}{4}$ にした値を用いた。YAP の場合ここで近似した値より改善されると考えて良い。



図 4.6: 左:Si0.2cm が上にある場合の GSO0.25cm の吸収確率。右: YAP1.5cm。



図 4.7: 左は GSO のバックグラウンドの近似、右は YAP

#### 感度によるシンチレーターの組合せの決定

#### GSO (0.3mol) とGSO (0.5mol)の組合せ

GSO (0.3mol) と GSO (0.5mol) の組合せについて、2次元上で信号が BGO から より離れている GSO (0.5mol)を上に置いて上のシンチレーターを様々な値に変化 させた時の 100 keV における感度を図 4.8:左に示した。図より、上のシンチレー ターは 0.2cm ほどの厚さをとることで最も良い感度を得られることが分かる。右 の図は上のシンチレーターの厚さを 0.2cm に固定し、下のシンチレーターの厚さ を変化させた時の上のシンチレーターでの感度 (100 keV)、上下のシンチレーター での感度 (300 keV)を示している。従来の HXD の感度は 100keV で、300keV であ ることを考えると、下のシンチレーターを薄くすることで低エネルギー域で、厚 くすることで高エネルギー域において感度が良くなることが分かる。図 4.9 に上の シンチレーターを GSO (0.3mol)0.2cm、下を GSO (0.5mol)0.3cm とした時の各エ ネルギーにおける感度を示した。この場合、低エネルギー域での感度の向上が得 られ、高エネルギー域については従来と変わらない感度を得ることができる。



図 4.8: 左:上の GSO (0.5mol)の厚さを変えた時の 100keV での感度。縦軸:感度、 横軸:上の GSO の厚さである。 印は下の GSO を 0cm、 0.25cm、 0.4cm とし た時のものである。

右: 上の GSO (0.5mol) を 0.2cm に固定し、下の GSO (0.3mol) の厚さを変えた時の、 : 上の GSO の感度 (100keV)、 :上下の GSO 両方での感度 (300keV)。ここで縦軸:感度、横軸:下の GSO の厚さである。



図 4.9: 上 GSO (0.3mol)0.2cm + 下 GSO (0.5mol)0.3cm。 :上 GSO (0.3mol)0.2cm、 上下での感度(従来の感度)。縦軸:感度、横軸:エネ ルギー。

#### YAPとGSO (0.5mol)の組合せ

YAP と GSO (0.5mol) の組合せで、上のシンチレーター YAP の厚さを変化させ た時の 100 keV での感度を図 4.10 左に示す。YAP は GSO にくらべ吸収確率が低 く、1.25cm ほどで最も感度が良くなった。右は上のシンチレーターを YAP1.25cm とし下のシンチレーターである GSO (0.5mol) の厚さを変た時の上のシンチレー ター (100keV)、上下のシンチレーター (300keV) における感度である。図 4.11 に 上の YAP を 1.25cm、下の GSO を 0.25cm とした時の感度を示す。低エネルギー 域で感度の向上が見られる。



図 4.10: 左:YAP の厚さを変えた時の 100keV での感度。縦軸:感度、横軸:YAP の 厚さである。 印は GSO を 0.25cm、 0cm。右:YAP を 1.25cm に固定し、下の GSO の厚さを変えた時の、 :YAP の感度 (100keV)、 :両方での感度 (300keV)。 ここで縦軸:感度、横軸:下の GSO の厚さである。



図 4.11: YAP1.25+GSO0.25 (0.5mol)。 :従来の感度、 :上下での感度、\*: YAP1.25cm での感度、縦軸:感度、横軸:エネルギーである。

まとめ

感度から考え主検出部のシンチレーターの組合せとして今回試したパターンのうちYAPとGSO (Ce:0.5mol)の組合せでそれぞれの厚さをYAP1.25cm + GSO0.25cm、Csのドープの違うGSOの組合せで、GSO (0.5mol)0.2cm + GSO (0.3mol)0.3cmとすることで100keV付近において従来の感度を上昇させた。低エネルギー側の感度の向上のためにこの方法を用いることは効果的である。

ただし、本研究で算出した感度はシンチレーターの内在バックグラウンドの近 似による不定性に多少依存しており、あくまでもシンチレーターの組合せを評価 する際の指標として用いたものである。また、今回は100keV付近の感度の向上を 評価の基準とし、様々な厚さについてシミュレートしたが、ターゲットとするエ ネルギー域によってシンチレーターの厚さの再評価が必要である。

## 第5章 まとめと今後への課題

本研究でAstro-E2への搭載を視野にいれたHXDの早期的な性能の向上のための改 良点を実験的に評価し、HXDのさらなる低バックグラウンド化への可能性を示す ことができた。新型PMTに関しては、さらなる詳細な測定が必要であるが、主検 出部の改良による検出器の低バックグラウンド化については大きな成果を得た。主 検出部の波形弁別を可能にするシンチレーターの組合せYAPとGSO(Ce:0.5mol)、 GSO(0.5mol)とGSO(0.3mol)を確認したことはこの方法による低バックグラウン ド化を研究する上で非常に重要である。これまであまり使われて来なかったYAP の利用が低バックグラウンド化へ向け有用であることも明らかになった。今後この 研究を続けていく上で課題となることはさらに詳細なシンチレーターの内在バック グラウンドなどのデータを考慮した感度の算出、主検出部に用いるシンチレーター の最適化である。また、実際のHXDの構造を考慮した測定も必要である。HXD のさらなる性能の向上のため、今後も様々な方法を研究していく必要がある。 謝辞

本論文を執筆するにあたり、御指導頂きました大杉節先生、深沢泰司先生にこ の場をかりて深く感謝致します。また、的確な助言を頂いた水野恒史さん、研究 室の先輩方有難うございました。様々な面で私を支えてくれた畦地康弘君、宇野 進吾君、佐藤葉子さんに心よりお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1. GLENN F, KNOLL 放射線ハンドブック 日刊工業出版社 1982
- 2. 浜松ホトニクス社 光電子増倍管 浜松ホトニクス社 1993
- 3. 石橋浩之、石井満 放射線検出器 1986
- 4. 石井満 酸化物シンチレータの製造とその応用
- 5. H.Suzuki,T.A.Tombreiio,C.L.Melcher The role of gadolinium in the scintillation processes of cerium-doped gadolinium oxyorthosilicate NIM A 346 (1994)
- 6. 石橋浩之、秋山清吉、石井満、高木正一 線検出用 Ce 付活 Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(GSO:Ce) シンチレータの開発 日立化成テクニカルレポート NO.8 (1987-1)