

# 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

中本 達也

広島大学 理学部 物理科学科

u1079054

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

平成14年4月1日

## 概要

MeV 領域のガンマ線は宇宙の高エネルギー現象の解明にとっては必要不可欠な観測領域であるにもかかわらずコンプトン散乱による検出が支配的であるため、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を精度良く決定できず、性能の良い検出器が開発されてこなかった。

本研究では、高阻止能結晶シンチレータ GSO, BGO と高い量子効率をもつフォトダイオードを組み合わせ、MeV 領域での性能の良いガンマ線検出器の可能性を探った。この組み合わせは従来の NaI と光電子増倍管の組合せに比べて検出器をかなりコンパクトにできるため、検出器の自由度が大きくなって性能の良いガンマ線検出器につながる可能性がある。測定の結果、エネルギー分解能で従来主流である結晶シンチレータと光電子増倍管との組み合わせを上回ることはできなかったが、改良次第では上回る可能性があることがわかった。

また、GSO, BGO シンチレータとフォトダイオードを用いた MeV 領域の次世代ガンマ線検出器として期待される多重コンプトンカメラの有効性を Geant4 でシミュレーションし、MeV 領域でこの検出器が確かに感度が良いことがわかった。

# 目次

第1章	序論	6
第2章	結晶シンチレータを用いたガンマ線検出器	7
2.1	結晶シンチレータ	7
2.2	フォトダイオード	8
2.3	光電子増倍管とフォトダイオード	9
2.4	半導体検出器のノイズ	9
2.5	エネルギー分解能	12
2.6	本研究の目的	12
第3章	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	14
3.1	GSO/BGO シンチレータ	14
3.1.1	GSO( $Gd_2SiO_4$ ) シンチレータ	14
3.1.2	BGO( $Bi_4Ge_3O_{12}$ ) シンチレータ	14
3.2	フォトダイオード SPL PD typeA	16
3.3	電荷有感型前置増幅器	16
3.4	フォトダイオードの分解能の測定	20
3.4.1	実験のセットアップ	20
3.4.2	測定	21
3.4.3	測定結果	21
3.5	GSO、BGO の発光を光電子像倍管で読み出す実験	24
3.5.1	測定のセットアップ	24
3.5.2	測定に用いる結晶の決定	24
3.5.3	測定	25
3.5.4	測定結果	25
3.6	GSO、BGO の発光をフォトダイオードで読み出す実験	33
3.6.1	接着剤と反射剤	33
3.6.2	実験のセットアップ	33
3.6.3	測定	34
3.6.4	パルスハイト	34
3.6.5	エネルギー分解能	35
3.7	考察	43
第4章	ガンマ線コンプトンカメラの有効性のシミュレーション	44
4.1	ガンマ線コンプトンカメラ	44
4.2	Geant4 によるシミュレーションとジオメトリ	44
4.2.1	Geant4	44

4.2.2	ジオメトリ	46
4.3	イベントの種類と有効イベントの選択	46
4.3.1	イベントの種類	46
4.3.2	有効イベントの選別	48
4.4	反応確率の検証	48
4.5	検出効率のシミュレーション	51
4.6	考察	58
<b>第 5 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>59</b>

# 表 目 次

2.1	放射線検出のためのシンチレータ特性比較 . . . . .	8
3.1	フォトダイオード SPL PD typeA の特性 . . . . .	16
3.2	電荷有感型前置増幅器 CP580H のパラメータ . . . . .	19
3.3	フォトダイオード単体での測定に用いたモジュールとその設定値 . . . . .	20
3.4	光電子増倍管でのエネルギー分解能の測定に用いたモジュール . . . . .	24
3.5	各結晶に対するピーク ( $^{137}\text{Cs}$ : 662keV) の位置 (ADCchannel) . . . . .	25
3.6	PMT で測定した場合の光量の相対値 . . . . .	26
3.7	各接着剤、反射剤に対するピーク ( $^{137}\text{Cs}$ : 662keV) の位置とエネルギー分解能 . . . . .	33
3.8	PD で測定した場合の光量の相対値 . . . . .	34
3.9	光電子増倍管とフォトダイオードで測定した場合の 20 /-30 と BGO/GSO の比 . . . . .	35
4.1	図 4.3 左図で散乱体に Si 1.0mm、外壁に GSO 10mm を設置した場合の各相互作用の反応確率のシミュレーション値と理論値 . . . . .	49
4.2	図 4.3 右図で散乱体に Si 0.4mm, CdTe 2.0mm、外壁に GSO 20mm を設置した場合の各相互作用の反応確率のシミュレーション値と理論値 . . . . .	50
4.3	図 4.3 右図で散乱体に Si 0.4mm, CdTe 2.0mm、外壁に BGO 20mm を設置した場合の各相互作用の反応確率のシミュレーション値と理論値 . . . . .	50
4.4	図 4.3 の左図のジオメトリの散乱体と外壁の物質と厚さと入射エネルギー . . . . .	51
4.5	図 4.3 の右図のジオメトリの散乱体と外壁の物質と厚さと入射エネルギー . . . . .	51

# 目 次

2.1	左図 (A)pn 接合、中央図 (B) 順方向に電圧を印加、右図 (C) 逆方向に電圧を印加 . . . . .	8
2.2	フォトダイオードの放射線検出原理 . . . . .	9
2.3	結晶シンチレータの蛍光をフォトダイオードで読み出す際の測定に用いた回路系 セットアップ . . . . .	10
2.4	測定の際のフォトダイオードと CSA の回路図 . . . . .	10
2.5	半導体検出器系の雑音に対する等価回路 . . . . .	11
3.1	GSO : Ce の蛍光出力に及ぼす Ce 濃度の影響 . . . . .	15
3.2	各種 Ce 濃度を含む GSO の光透過率 . . . . .	15
3.3	GSO の室温近傍における蛍光出力の温度依存性 . . . . .	15
3.4	GSO:Ce と BGO のエネルギースペクトル (1987 年当時) . . . . .	15
3.5	BGO と他結晶の発光強度の温度依存性 . . . . .	15
3.6	BGO と他結晶の波長による発光の相対強度 . . . . .	15
3.7	フォトダイオード SPL PD typeA の量子効率の波長依存性 . . . . .	17
3.8	フォトダイオード SPL PD typeA の図面 . . . . .	17
3.9	CP580H の内部構成のブロック図 . . . . .	18
3.10	カタログに載っている CP580H の入力容量に対する雑音特性量 (左図) と相対出力 波高値量 (右図) . . . . .	18
3.11	CP580H で実際に測定した容量勾配 (左図) の線形性 (右図) のグラフ . . . . .	19
3.12	フォトダイオード単体での測定に用いた回路系のブロック図 . . . . .	20
3.13	フォトダイオード単体で検出した $^{109}\text{Cd}$ (左図) と $^{133}\text{Ba}$ (右図) のスペクトル。上から 恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。 . . . .	22
3.14	フォトダイオードに硬 X 線を照射した時のエネルギーとパルスハイトの相関 . . . . .	23
3.15	フォトダイオードに硬 X 線を照射した時のエネルギー分解能 . . . . .	23
3.16	光電子増倍管でのエネルギー分解能の測定に用いた回路系のブロック図 . . . . .	24
3.17	GSO からの蛍光を光電子増倍管で検出した $^{137}\text{Cs}$ (左図) と $^{22}\text{Na}$ (中図) と $^{88}\text{Y}$ (右図) のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。 . . . .	27
3.18	BGO からの蛍光を光電子増倍管で検出した $^{137}\text{Cs}$ (左図) と $^{22}\text{Na}$ (中図) と $^{88}\text{Y}$ (右 図) のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸 は count 数、横軸は channel。 . . . .	28
3.19	NaI, CsI からの蛍光を恒温槽が 20 の時に測定したスペクトル。左図が NaI で右 図が CsI、上から $^{137}\text{Cs}$ , $^{22}\text{Na}$ , $^{88}\text{Y}$ のスペクトル。縦軸は count 数、横軸は channel。 . . . .	29
3.20	GSO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関 . . . . .	30
3.21	BGO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関 . . . . .	30
3.22	NaI, CsI からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関 . . . . .	31
3.23	GSO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギー分解能 . . . . .	31

3.24	BGO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギー分解能 . . . . .	32
3.25	NaI, CsI からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギー分解能 . . . . .	32
3.26	GSO からの蛍光をフォトダイオードで検出した <sup>137</sup> Cs(左図)と <sup>22</sup> Na(中図)と <sup>88</sup> Y(右図)のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。 . . . . .	36
3.27	BGO からの蛍光をフォトダイオードで検出した <sup>137</sup> Cs(左図)と <sup>22</sup> Na(中図)と <sup>88</sup> Y(右図)のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。 . . . . .	37
3.28	CsI からの蛍光を恒温槽で 20 にしてフォトダイオードで検出した <sup>137</sup> Cs(左図)と <sup>22</sup> Na(中図)と <sup>88</sup> Y(右図)のスペクトル。縦軸は count 数、横軸は channel。 . . . . .	38
3.29	GSO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関 . . . . .	38
3.30	BGO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関 . . . . .	39
3.31	CsI からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関	39
3.32	GSO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギー分解能 . . . . .	40
3.33	BGO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギー分解能 . . . . .	40
3.34	CsI からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギー分解能 . . . . .	41
3.35	-30 での (3.2) 式から求めた理論値とフォトダイオードと光電子増倍管で読み出した実測値の比較 . . . . .	42
4.1	NaI(ヨウ化ナトリウム) の各ガンマ線相互作用のエネルギー依存性 . . . . .	45
4.2	多重コンプトンカメラの原理。散乱場所でのデポジットエネルギーと位置がわかると、入射ガンマ線の方向がコーン状に制限でき、複数のガンマ線についてコーンの交点を求めることにより、ガンマ線の到来方向を決定できる。また、それぞれガンマ線の入射エネルギーもわかる。 . . . . .	46
4.3	今回のシミュレーションに用いたジオメトリ。50keV ~ 1MeV のエネルギー領域を目的にしたもの (左図) と 50keV ~ 5MeV のエネルギー領域を目的にしたもの (右図)	47
4.4	各イベントに対する grade . . . . .	49
4.5	図 4.3 の左図のジオメトリを表 4.4 のように設定してシミュレートした結果。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸は各イベントの割合 (%) . . . . .	53
4.6	図 4.3 の左図のジオメトリを表 4.4 のように設定してシミュレートした結果。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸は各イベントの割合 (%) . . . . .	54
4.7	図 4.5, 図 4.6 の各測定における有効イベント (grade200 ~ 198) の割合 . . . . .	55
4.8	図 4.3 の右図のジオメトリを表 4.5 のように設定してシミュレートした結果。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸は各イベントの割合 (%) . . . . .	56
4.9	図 4.8 の各測定における有効イベント (grade200 ~ 198) の割合。エネルギー 3MeV で上から外壁が BGO 20mm, GSO 40mm, BGO 40mm, GSO 20mm, CdTe 2.0mm	57

# 第1章 序論

宇宙で起こる現象には、高エネルギーの粒子や光子が大きく関与するのものが多く見られる。一般にそれらの現象には特有な波長領域の電磁波(電波, 赤外線, X線, ガンマ線)の放射が伴っている。このような、天体現象の電磁波放射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、輝線・吸収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る。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になっており、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。

近年ガンマ線天文衛星の活躍により数多くの高エネルギー天体が発見され、ガンマ線天体物理学は急速に発展しつつある。ガンマ線天体物理学の観測において重要な相互作用は、シンクロトロン放射、非熱的制動放射、高エネルギー電子と光子の相互作用による逆コンプトン散乱などがある。これらの相互作用は高エネルギー天体において加速された粒子が放射していると考えられ、宇宙の高エネルギー現象の解明に非常に重要な手段になっている。

## 第2章 結晶シンチレータを用いたガンマ線検出器

### 2.1 結晶シンチレータ

結晶シンチレータとは放射線を吸収した時に、そのエネルギーにほぼ比例した数のシンチレーション光が発生することを利用したエネルギー計測装置である。放射線が蛍光体に当たると、多数の励起分子を生じ、励起分子が基底状態に戻る際に光を放出する。この光のことをシンチレーション光 (scintillation) という。

結晶シンチレータ内で電子は離散的なエネルギー帯しか持ちえない。電子が格子上の位置に束縛されている荷電子帯、結晶内を自由に移動するのに足る十分なエネルギーを持っている伝導帯、これらの間に禁制帯といわれるエネルギーギャップがあり、純粋な結晶では電子は禁制帯には存在しえない。エネルギーを吸収すると価電子帯中の定常位置から禁止ギャップを越えて電子が伝導帯へと移行する。純粋な結晶中で電子が光子を放出して荷電子帯に戻る場合、このギャップの幅では光子のエネルギーが大き過ぎて可視光にならない。そこで、可視光の放出率を高めるために、無機シンチレータに通常少量の不純物を添加する。活性化物質 (activator) と呼ばれるこれらの不純物は結晶格子内に特別な位置を作り、純粋な結晶の正常なエネルギー帯の構造を少し変形させる。その結果、禁止ギャップ内に荷電子帯への電子の遷移が可能な新しいエネルギー状態を形成する。このエネルギーは全禁止エネルギーギャップ幅よりも小さいため、この遷移は可視光を発生する。光電効果などで生じた電子は、結晶シンチレーター内で次々と電子正孔対を作る。活性化物質の電離エネルギーは通常の格子の位置のそれよりも小さいので正孔は素早く活性化物質の位置へ移動してそれを電離する。また、電子は結晶中を自由に移動して電離された活性化物質にあうまで動く。不純物にあうと、電子は独自の励起エネルギーをもつ中性の不純物準位を形成する。形成された不純物の状態が基底状態への遷移が可能である場合には、この遷移は非常に早く起こり、それに対応した光子を放出する。適切な活性化物質を選んだ場合、この遷移で放出される光子は可視光になる。

結晶シンチレーターの特徴は、検出媒体が固体であり阻止能が大きいという点である。固体の密度は気体の密度と比べると約 1000 倍大きいので、ガスを使った比例計数管などに比べ小さな体積で放射線を止めることが利点である。

理想的なシンチレーション材料が持つべき性質として次のようなものがある。

- 放射エネルギーの蛍光への変換効率 (蛍光効率) が高い
- 蛍光に対する透明度が高い
- 蛍光の減衰時間が短い
- 蛍光の波長分布が光電子増倍管などの検出器の分光度特性に適合している

蛍光効率が高いとシンチレータの発光強度 (発光量) が高くなる。透明度が高いと光電子増倍管などの検出器への蛍光到達量が増えるため、集光効率が高くなる。また蛍光の減衰時間が短いと、時間分解能が高くなるので高線量率の放射線が計数できる。さらに、蛍光の波長分布が光電子増倍管などの検出器分光度特性に適合していると、光子が効率よく光電子に変換できるので高い量

表 2.1: 放射線検出のためのシンチレータ特性比較

特性	NaI:Tl	CsI:Tl	BGO	GSO
実効原子番号	50	54	74	59
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.67	4.51	7.13	6.71
最大発光波長 (nm)	410	565	480	430
蛍光出力 (相対値)	100	45	12	20
エネルギー分解能 ( <sup>137</sup> Cs662keV : %)	9	7.5	11	10
蛍光減衰時間 (ns)	230	1000	300	60
吸収係数 (511keV : cm <sup>-1</sup> )	0.34	0.41	0.955	0.674

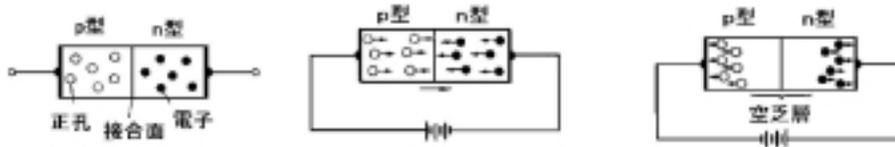


図 2.1: 左 (A)pn 接合、中央 (B) 順方向に電圧を印加、右 (C) 逆方向に電圧を印加

子効率を得られる。主なシンチレータの特性を表 2.1 にまとめた。NaI, CsI は古くから使われてきた結晶シンチレータであるのに対し、BGO, GSO は比較的最近使用され始めた結晶シンチレータである。表 2.1 を見てわかるとおり、BGO, GSO は NaI, CsI に比べて蛍光出力は小さいが阻止能が大きいのが特徴と言える。よって、高エネルギーの放射線を検出したい場合には BGO, GSO が使用される。BGO, GSO の使用例としては Astro-E 衛星の HXD 検出器があげられる。HXD 検出器は 10~700keV 程度の硬 X 線、軟ガンマ線を観測を目的としている。

## 2.2 フォトダイオード

p 型半導体 (ホール濃度が高い) と n 型半導体 (電子濃度が高い) を接合させると (図 2.1(A))、pn 方向と np 方向とで異なる電気抵抗が見られる。図 2.1(B) のように p 型に正、n 型に負の電圧をかけると、正孔と電子はお互いの方向へ移動する。正孔と電子は両電極から次々に供給されるので、電流は継続して流れる。これとは逆に、図 2.1(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の存在しない領域が広がる。これを空乏層と呼ぶ。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。

フォトダイオードは図 2.1(C) のように、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、空乏層が生じるので電流は流れない。ところが図 2.2 のように、空乏層に可視光、あるいは放射線が入射すると、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。この電子正孔対を逆バイアス電圧による電界により電極に集め信号となる。フォトダイオード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、失われた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  $E$  がわかる。シリコンの場合、空乏層中で生じるキャリア対の数は  $n_e = \frac{E(\text{eV})}{3.65\text{eV}}$  となる。

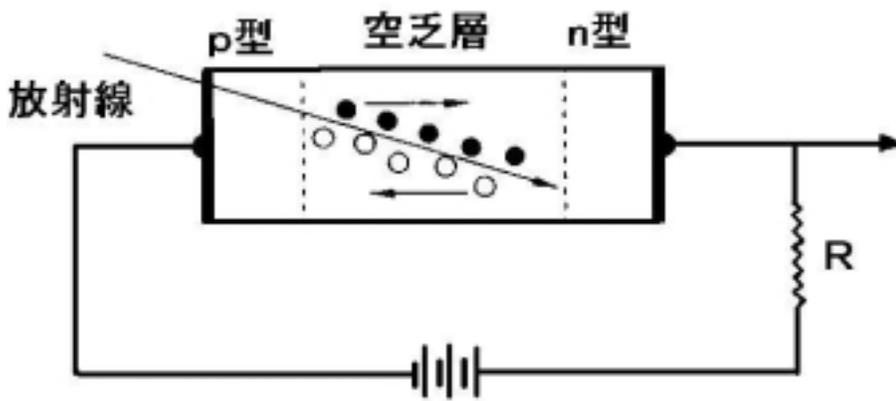


図 2.2: フォトダイオードの放射線検出原理

## 2.3 光電子増倍管とフォトダイオード

光電子増倍管はシンチレータと組み合わせて使う最も一般的な光検出器である。しかしながら、半導体ダイオードの開発の最近の進歩により、フォトダイオード ( photodiode ) が数 10MeV 以上の高エネルギーの放射線については光電子増倍管の代わりに新たに使われるようになってきた。一般にフォトダイオードは、光電子増倍管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、寸法が小さく更に頑丈であるなどの利点がある。また、フォトダイオードは磁場の影響を受けないので、磁場が存在するため光電子増倍管が使用できない実験ではその代わりに使われている。フォトダイオード内では電荷が移動する距離は比較的小さいため、その時間的応答は通常的光電子増倍管と同程度である。そこでフォトダイオードは同時計数その他のタイミングを取る場合に好適である。

典型的なシンチレーション光に対応する光子は 3 ~ 4 eV のエネルギーを持つので、バンド幅が 1 ~ 2eV 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。可視光から電氣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。変換は通常的光陰極のように表面から電荷キャリアを逃げ出せることの必要性に束縛されないので、この過程の量子効率は ~ 80 % まで高められる。この値は光電子増倍管よりも数倍大きい。しかし、フォトダイオード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光子は数千個しか生成されないため、得られる電荷パルスの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、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が最大の問題となる。光電子増倍管は通常 ~1000V の印加電圧が必要であるのに対して、フォトダイオードでは数十ないし数百V の印加電圧で十分である。

## 2.4 半導体検出器のノイズ

結晶シンチレータの蛍光をフォトダイオードで読み出す際に用いる回路系セットアップを図 2.3 に、実際の測定におけるフォトダイオードと CSA の回路図を図 2.4 に示す。フォトダイオードからの信号は、電荷有感型前置増幅器 (Charge Sensitive Amplifier: CSA), 波形整形アンプを通ったあと、ADC に入力される。今回の測定では PIN 型 Si 検出器、CSA および整形アンプの雑音に対

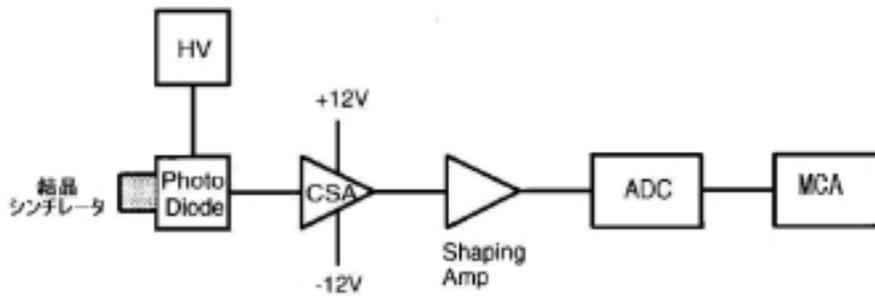


図 2.3: 結晶シンチレータの蛍光をフォトダイオードで読み出す際の測定に用いた回路系セットアップ

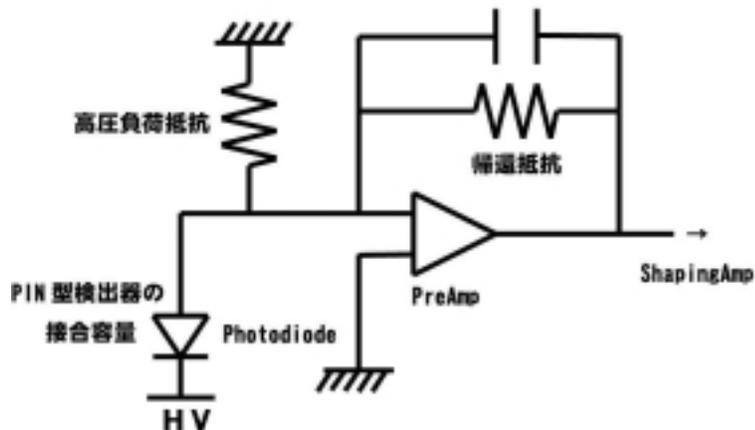


図 2.4: 測定の際のフォトダイオードと CSA の回路図

する等価回路が図 2.5 になるので、この時の雑音を考察する。

$I_s$ ; X線による信号電流

$C_{in}$ ; 等価入力容量 (PIN 検出器の接合容量、ケーブル、初段 FET の入力容量)

$R_p$ ; 等価並列抵抗 (帰還抵抗、高圧負荷抵抗)

$I_{in}$ ; 回路全体のリーク電流 (PIN 検出器、CSA の初段 FET のリーク電流)

$R_s$ ; 等価直列抵抗 ( $\equiv A/g_m$ ,  $A$ ; 0.5~0.7 程度の定数,  $g_m$ ; 初段 FET の相互コン

ダクタンス)

$V_{1/f}$ ; 雑音による電圧源

$C_{1/f}$ ;  $1/f$  雑音の大きさを表す比例係数

半導体検出器のエネルギー分解能は、発生する電子正孔対の統計ゆらぎによってではなく、初段電気回路系の雑音によって支配される。ここで、初段電気回路系とは半導体検出器から CSA までを指す。一般に雑音は抵抗で発生する熱雑音、キャリアのゆらぎによって発生するショット雑音、およびパワースペクトルが  $1/f$  に比例する特徴を持つ  $1/f$  雑音の和になる。

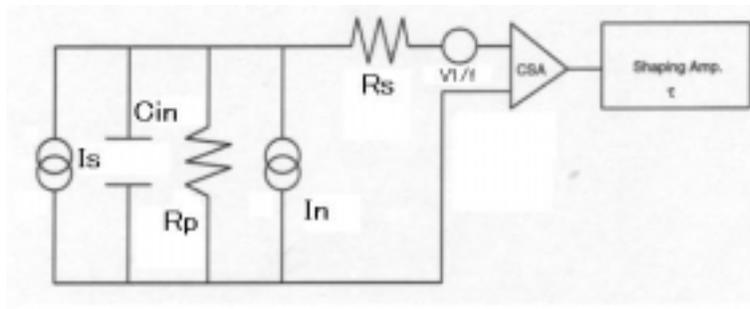


図 2.5: 半導体検出器系の雑音に対する等価回路

全電圧のパワースペクトル  $\overline{V_{noise}^2}/df$  は

$$\frac{\overline{V_{noise}^2}}{df} = \frac{4k_B T}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_B T R_s + \frac{C_{1/f}}{f} \quad [V^2/Hz] \quad (2.1)$$

となる。この式において、第 1 項と第 3 項がそれぞれ  $R_p$ ,  $R_s$  による熱雑音、第 2 項が  $I_n$  によるショット雑音、第 4 項が  $1/f$  雑音の和になる。エネルギーは電荷量で計るので、等価雑音電荷  $\Delta E_{RMS}^2$  (Equivalent Noise Charge:ENC) で表せば

$$\frac{\overline{\Delta E_{rms}^2}}{df} = \frac{4k_B T}{\omega^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2} + 4k_B T R_s C_{in}^2 + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} \quad [C^2/Hz] \quad (2.2)$$

となる。この式を見ればわかるように、初段回路の雑音強度は周波数特性を持つのでフィルターをかけて波形整形を行なうことによって S/N を最適化することができる。例えばガウシアン整形を行なった場合

$$\overline{\Delta E_{rms}^2} = \left( \frac{4k_B T}{R_p} + 2qI_n \right) \cdot A_1 \tau_s + 4k_B T R_s C_{in}^2 \cdot \frac{A_2}{\tau_s} + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} \cdot A_3 \quad [C^2] \quad (2.3)$$

となる。ここで、 $A_1 A_2 A_3$  は波形整形回路のフィルター特性で決まる係数であり、理想的なガウス整形 (CR-RC<sup>n</sup>,  $n \rightarrow$  ) に対しては、 $(A_1, A_2, A_3) = (0.6267, 0.6267, 0.5)$  である。 $\tau_s$  は波形整形アンプの時定数である。第 1 項と第 2 項がそれぞれ、 $\tau_s, 1/\tau_s$  という特性を持つため  $\overline{\Delta E_{rms}^2}$  を最小にする  $\tau_s$  が存在するはずである。その最適値を  $\tau_{opt}$  とすると

$$\tau_{opt} = \sqrt{\frac{4k_B T R_s C_{in}^2 A_2}{(4k_B T R_p^{-1} + 2qI_n) \cdot A_1}} \quad (2.4)$$

となる。(2.4) 式の雑音の単位を等価雑音電荷ではなく半導体検出器のエネルギー分解能に換算した場合、 $T = 270K$  において

$$\text{第 1 項} \simeq (3.0 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.65 \cdot I_n) \cdot \tau_s \quad [keV^2] \quad (2.5)$$

$$\text{第 2 項} \simeq (2.1 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g_m}) / \tau_s \quad [keV^2] \quad (2.6)$$

となる。ここで雑音の原因のわかりにくい第 3 項を用いずに近似した。今回測定に用いた CSA の  $R_p$  は  $\sim 1.2G\Omega$  なので第 1 項はほぼ  $I_n$  が支配する。第 1 項を電流性雑音、第 2 項を容量性雑音と呼ぶ。それぞれのパラメータの単位は、 $R_p(G\Omega)$ ,  $I_n(nA)$ ,  $\tau_s(\mu sec)$ ,  $C_{in}(pF)$ ,  $g_m(mS)$  である。

## 2.5 エネルギー分解能

結晶シンチレータの発光をフォトダイオードで読み出した場合、検出器で作られるシンチレーション光子の数のポアソンゆらぎだけを考えればエネルギー分解能は、光電子増倍管に比べて約半分になる。しかし半導体検出器では放射線によって作られた情報キャリア（電子と正孔）が、増幅されることなく初段増幅器に入る。このため、電気的に扱う信号レベルが光電子増倍管などに比べて小さい。よって、半導体検出器では電器回路系の雑音がエネルギー分解能に大きな影響を及ぼす。ゆえに、フォトダイオードを用いて結晶シンチレータを読み出した場合、エネルギー分解能はシンチレーション光子のポアソンゆらぎに起因する成分と、電気回路系雑音に起因する成分との競合になる。

一方、結晶シンチレータを光電子増倍管で読み出した場合、光電子を増幅するので電気回路系雑音の成分の寄与は小さくなり、エネルギー分解能への影響はポアソンゆらぎの成分だけとなる。

電気回路系雑音  $\sqrt{\langle \Delta E_{rms}^2 \rangle}$  がエネルギー分解能に与える影響は、エネルギーを  $E$  とすると

$$\text{エネルギー分解能}_{elec} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\sqrt{\langle \Delta E_{rms}^2 \rangle}}{E} \propto \frac{a}{E} \quad (2.7)$$

となる。放射線が結晶シンチレータに当たるとシンチレーション光子が生成される。このシンチレーション光子の生成がポアソン過程であると仮定する。この仮定をした場合、平均として総数  $N$  個のシンチレーション光子が生成されたとき ( $N = tE$ )、光子の発生数の統計的変動の標準偏差  $\sigma$  は  $\sqrt{N}$  になる。しかし、フォトダイオードや光電子増倍管でシンチレーション光子が光電子に変換される際に損失があるので、標準偏差はそれぞれの量子効率  $\varepsilon$  をかけて  $\sigma = \sqrt{\varepsilon N}$  となる。エネルギー分解能は標準偏差よりむしろピークの半値幅 (full width at half maximum; FWHM) で定義される。ガウス分布を仮定すると  $FWHM = 2.355\sigma$  となる。よって、ピークの半値幅がガンマ線光子エネルギーの平方根に比例することに注目すると、平均パルス波高はガンマ線エネルギーに直接的に比例するのでシンチレーション光子のポアソンゆらぎに起因するエネルギー分解能は

$$\text{エネルギー分解能}_{poisson} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.355\sqrt{\varepsilon N}}{\varepsilon N} = \frac{2.355}{\sqrt{\varepsilon t}} \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{b}{\sqrt{E}} \quad (2.8)$$

$FWHM$  : 全エネルギーピークの半値幅

$H_0$  : このピークに対応する平均パルス波高

となる。エネルギー分解能はこの2成分の2乗平均和と考えられるので

$$\text{エネルギー分解能} = \frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\frac{a^2}{E^2} + \frac{b^2}{E}} \quad (2.9)$$

となる。このため、エネルギー  $E$  が高い領域ではシンチレーション光子のポアソンゆらぎが、エネルギー  $E$  が低い領域では電気回路系雑音が支配的になると予想される。

## 2.6 本研究の目的

MeV 領域のガンマ線は宇宙の高エネルギー現象の解明にとっては必要不可欠な観測領域である。電子による制動放射や逆コンプトン散乱成分を観測しやすく、このエネルギーバンドには  $^{57}\text{Co}$ (122keV)、 $^7\text{Be}$ (478keV)、 $^{56}\text{Co}$ (847keV)、511keV となどのラインが存在し、重要な情報を含

んでいる。今現在 100keV 以下は光電効果を、10MeV 以上では電子陽電子対生成を利用した感度の良い検出器が開発されてきている。しかし、MeV 領域ではコンプトン散乱するイベントが多いため、ガンマ線のエネルギーや到来方向を測定しにくい、反応率が低いといったことにより性能の良い検出器が開発されてこなかった。

本研究の目的は、新たに高阻止能結晶シンチレータ GSO, BGO を使い、これらの青いシンチレーション光に対して量子効率の良いフォトダイオードを組み合わせることにより、MeV 領域で性能の良いガンマ線検出器になりうるかどうかを基礎実験により探ることにある。フォトダイオードを用いると、光電子増倍管を用いるよりもコンパクトでエネルギー分解能の向上が期待される。しかし、フォトダイオードは検出した信号を増幅しないので電気回路系の雑音に信号が埋もれてしまう可能性もある。そこで第 3 章では、ガンマ線を結晶シンチレータに当ててその発光を光電子増倍管とフォトダイオードで読みだし、エネルギー分解能がどのように振舞うかを実測した。

第 4 章では、シンチレータとフォトダイオードを用いた検出器の例として、MeV 領域の次世代ガンマ線検出器として期待される多重コンプトンカメラの有効性を Geant4 でシミュレーションした。多重コンプトンカメラとはシリコンストリップ検出器を多数重ねその周りをシンチレータで囲んだ検出器であり、多層の検出器の中でガンマ線が複数回反応を起こしたような事象を使うと、ガンマ線のエネルギーや到来方向、偏光を知ることができる(多重コンプトン法)。この多重コンプトンカメラにより、100keV~数 MeV 領域の宇宙軟線を高感度広視野撮像によってモニター観測し、軟ガンマ線放射の全天マップ、天体強度モニターを行い、同時に明るい天体やガンマ線バーストの偏光測定を行うことができると期待されている。

# 第3章 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

結晶シンチレータ GSO とフォトダイオードの組合せは大西ら [1] によってすでに測定されている。今回の測定では、フォトダイオードは大西らが用いていたのよりも性能が良く、新たに BGO を用いて測定した。

## 3.1 GSO/BGO シンチレータ

結晶シンチレータには色々な種類がある。今回の測定は高エネルギーのガンマ線の検出を目的としており、§2.1 で述べたように阻止能に優れた GSO, BGO を用いることにする。今回用いた両結晶シンチレータの大きさは  $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$  の立方形の形をしており、フォトダイオードの受光面の大きさと同じである。

### 3.1.1 GSO( $\text{Gd}_2\text{SiO}_4$ ) シンチレータ

GSO は Ce を含まない場合は蛍光を発しないが、 $\text{CeO}_2$  を 0.1mol % 添加すると発光し始める。図 3.1 に示すように蛍光出力は  $\text{CeO}_2$  濃度が 0.6mol % のときに最大値を示し、濃度がこれを超えると減少する傾向を示す。代表的な組成の GSO:Ce についての光透過スペクトルを測定し、図 3.2 に示す。図 3.2 には  $\text{CeO}_2$  を 0.5mol % 含む GSO の紫外線励起による発光スペクトルを併せて記入している。発光ピークは  $350\text{nm} \sim 550\text{nm}$  にあり、出力が最大値を示す波長は  $430\text{nm}$  である。GSO:Ce の光透過スペクトルは  $380\text{nm} \sim 420\text{nm}$  近傍に吸収端があり、Ce の濃度が多くなると吸収端は長波長側に移行する。発光ピーク波長  $430\text{nm}$  での GSO の透過率は約 80 % であり、Ce 濃度とともに小さくなる。GSO の蛍光減衰時間特性は  $60\text{ns}$  であり、BGO の  $300\text{ns}$  に比べて極めて速い。光量は NaI におよばないが BGO の 2 倍程度であり、図 3.3 のように温度に依存する。光電子増倍管で取得した GSO:Ce の代表的なエネルギースペクトルを BGO と対比したのを図 3.4 に示す。横軸のチャンネル数は蛍光出力に相当する。 $^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$  による光電ピークの出力は BGO に対して GSO:Ce は約 1.7 倍あり、エネルギー分解能 (fwhm) は 1987 年時では 10 % であったが現在では 7 % 程度まで改良が進んでいる。

### 3.1.2 BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) シンチレータ

BGO は 1970 年代後半から使用され始め、この結晶の応用が急速に進んできた。BGO の主な特徴はビスマスの大きな原子番号 (83) と大きな比重 ( $7.3\text{g}/\text{cm}^3$ ) である。この特徴により他の結晶シンチレータに比べて単位体積当たりの吸収確率が大きくなっている。しかし、BGO の蛍光出力は比較的低く、NaI に比べて 10~20 % ぐらいである。BGO はシンチレーション過程を促進するための微量の活性化物質を添加する必要がない純粋な無機シンチレータである。この場合、蛍光は活性化物質の代わりに結晶の主成分である  $\text{Bi}^{3+}$  イオンの光学的遷移を伴っている。 $\text{Bi}^{3+}$  の光吸収

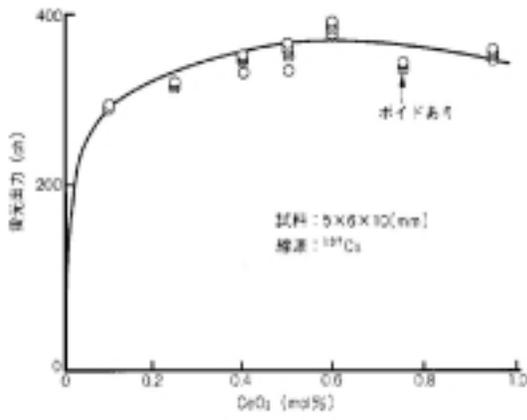


図 3.1: GSO : Ce の蛍光出力に及ぼす Ce 濃度の影響

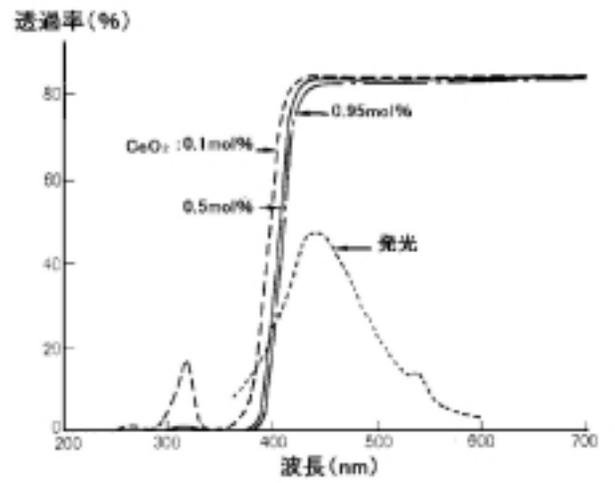


図 3.2: 各種 Ce 濃度を含む GSO の光透過率

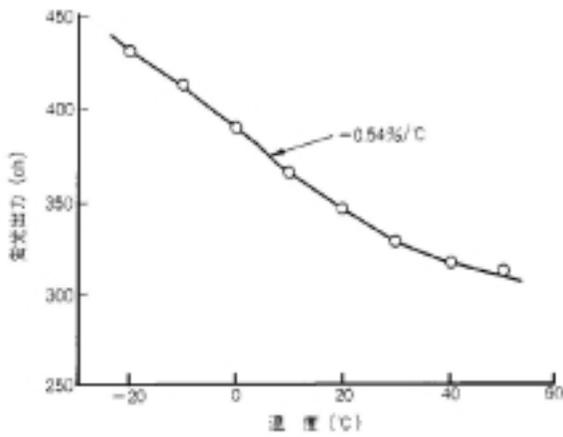


図 3.3: GSO の室温近傍における蛍光出力の温度依存性

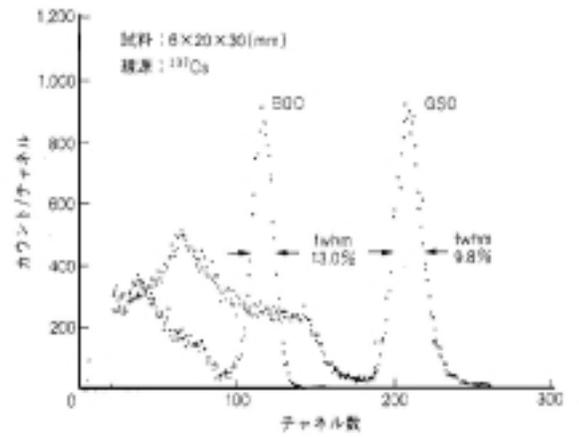


図 3.4: GSO:Ce と BGO のエネルギースペクトル(1987年当時)

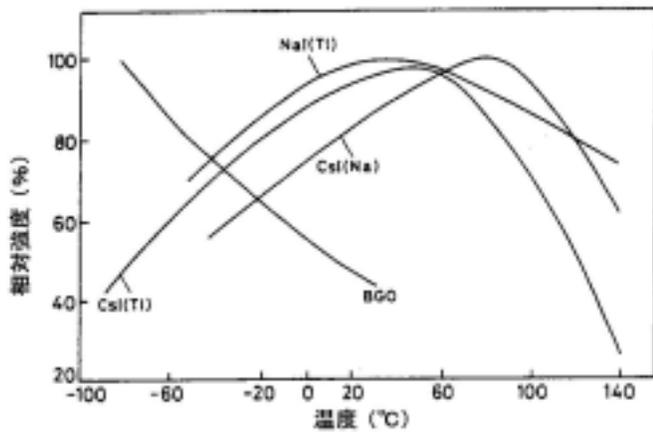


図 3.5: BGO と他結晶の発光強度の温度依存性

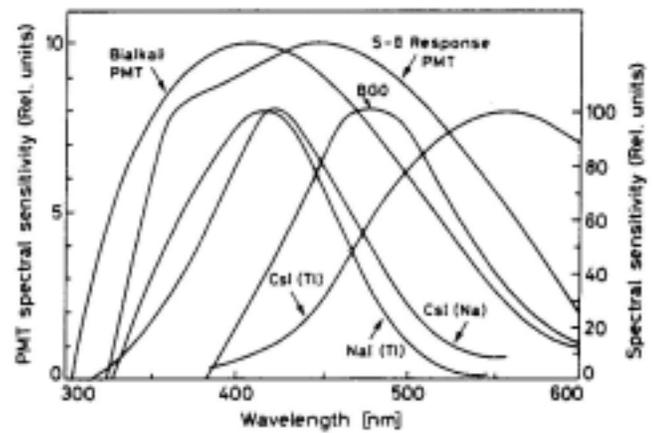


図 3.6: BGO と他結晶の波長による発光の相対強度

表 3.1: フォトダイオード SPL PD typeA の特性

最大印加 (逆バイアス) 電圧	100V
動作温度	0~ +60 度
保存温度	0~ +80 度
感度波長範囲	320 ~ 1100 nm
最大感度波長	960 nm
受光感度 ( $\lambda = 420$ nm)	280 mA/W
暗電流 (逆バイアス電圧 = 70V)	2 nA
端子間容量 (逆バイアス電圧 = 70V)	15 pF

スペクトルと放出スペクトル間にはストークスシフト (Stokes shift) と呼ばれる相当大的なシフトがあるのでシンチレーション光の自己吸収は少ししか起こらず、大きな寸法の結晶でもその発光に対して透明度を保っている。シンチレーション効率率は結晶の純度に強く依存しており、GSO と同様に光出力は温度を下げると増加する。この様子を図 3.5 に、波長による発光の強度を他結晶と比較したものを図 3.6 に示した。

### 3.2 フォトダイオード SPL PD typeA

エネルギー分解能を良くするためにフォトダイオードは、GSO, BGO の最大蛍光波長付近で量子効率の高いものを使用する必要がある。逆バイアス電圧をかけたときの端子間容量やリーク電流も、エネルギー分解能に影響を及ぼす値なので注意が必要である。今回の測定では、浜松フォトニクス株式会社に特注して製造したシリコン PIN フォトダイオード SPL PD typeA を用いた。このフォトダイオードの主な特性を表 3.1 に、量子効率の波長依存性のグラフを図 3.7 に、図面を図 3.8 に示す。図 3.7 より、GSO, BGO の最大蛍光波長 430nm, 480nm 付近では、量子効率が 80 % を超えており今回の測定に最適である。

### 3.3 電荷有感型前置増幅器

電荷有感型前置増幅器 (Charge Sensitive Amplifier ; CSA) は、入力電荷信号を積分して、電圧信号に変換する増幅器である。CSA の入力段には、高い入力インピーダンスで増幅を行える FET ( Field Effect Transister ; 電界効果トランジスタ ) を用いる。CSA の雑音への影響で問題になるのは、最初に信号増幅を行う初段 FET であるため、相互コンダクタンスの高い FET を使うことが重要である。

今回の測定では、CSA はクリアパルス株式会社製の Model CP580H を用いた。CP580H の内部構成のブロック図を図 3.9 に、入力容量に対する雑音特性と相対出力波高値を図 3.10 に、主なパラメータを表 3.2 に示した。CP580H は図 3.9 のように 3 つのブロックから構成されている。1 つめのブロックに電荷電圧変換回路 (電荷増幅器) でここでの CSA、その後段にはパイルアップを除去するための微分回路、および電圧増幅器が設けられている。はじめ CP580H は負荷電圧とフォトダイオードからの信号を読み出す線が同じだったが、配線を変えて図 2.4 のように別々にした。CP580H と同型で今回測定に用いる CSA とは違う CSA を用いて、実際に測定した容量勾配と線形性のグラフを図 3.11 に示す。容量勾配は 18eV/pC で表 3.2 の値とほぼ同じであり、線形性

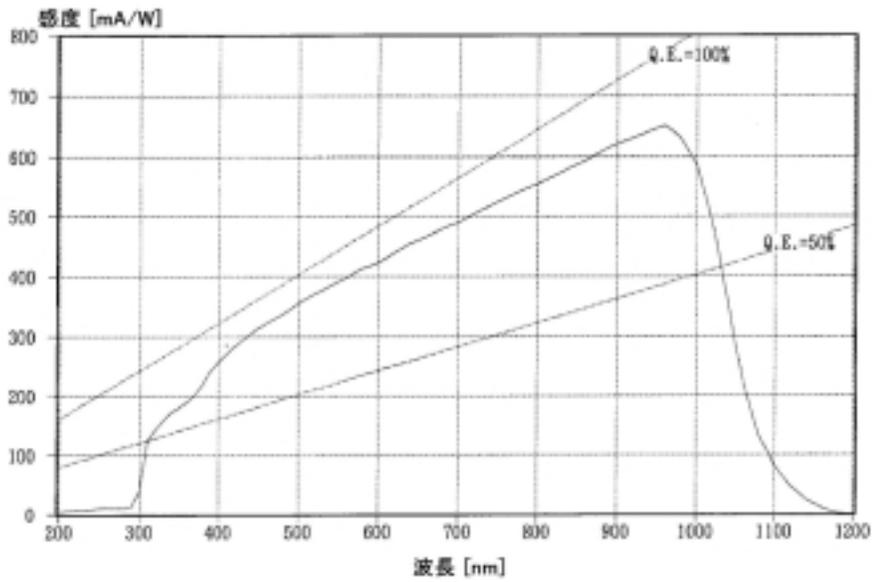


図 3.7: フォトダイオード SPL PD typeA の量子効率の波長依存性

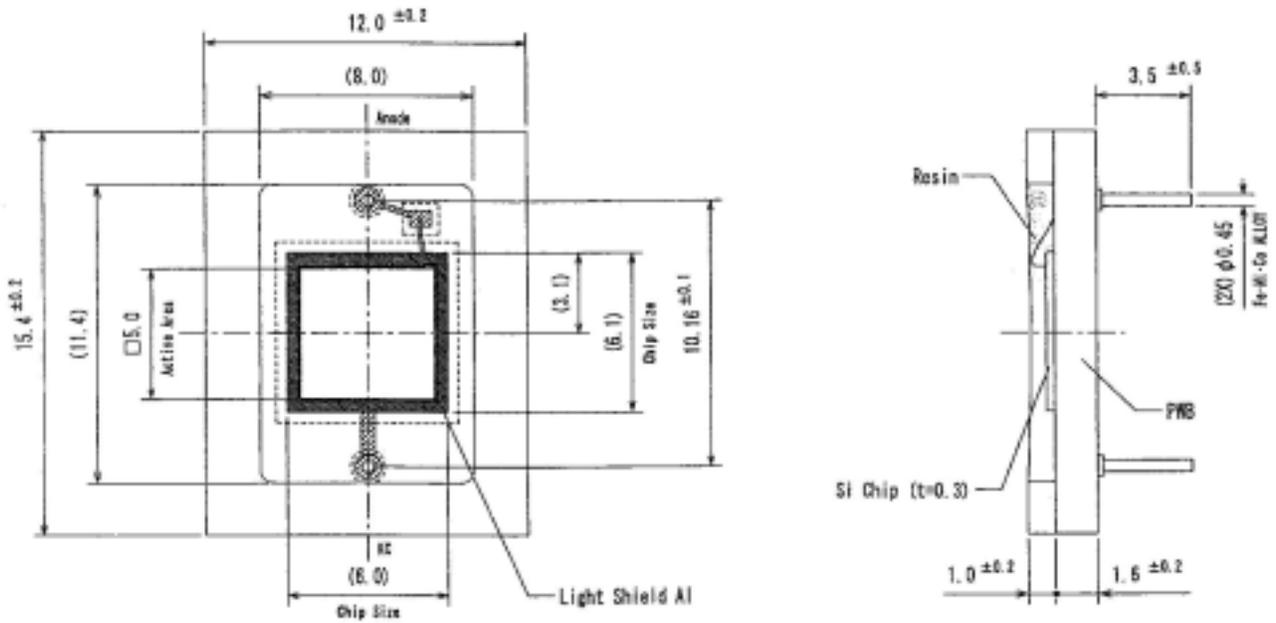


図 3.8: フォトダイオード SPL PD typeA の図面

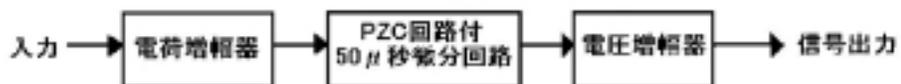


図 3.9: CP580H の内部構成のブロック図

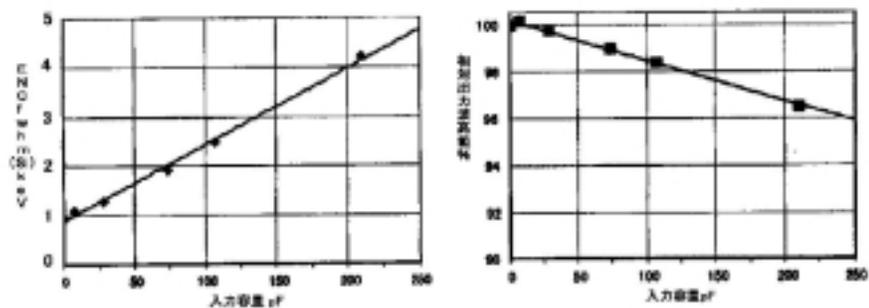


図 3.10: カタログに載っている CP580H の入力容量に対する雑音特性量 (左) と相対出力波高値量 (右)

は高エネルギー側まで十分良い。

表 3.2: 電荷有感型前置増幅器 CP580H のパラメータ

電荷電圧変換係数	約 2V/pC
負荷帰還定数	抵抗 5GΩ, コンデンサ 0.5pF
減衰時定数	約 2.5msec
有効出力範囲 (電荷増幅器)	± 4V
微分時定数	約 70μ sec
電圧増幅率	×11
有効出力範囲 (CSA 全体)	± 8V
出力インピーダンス	50Ω
雑音特性	約 0.93keV(Si 換算) FWHM@0pF
雑音特性	約 3.0keV(Si 換算) FWHM@100pF
容量勾配	約 20eV(Si 換算) FWHM/pF
最大印加電圧	±500V
検出器バイアス抵抗	1GΩ

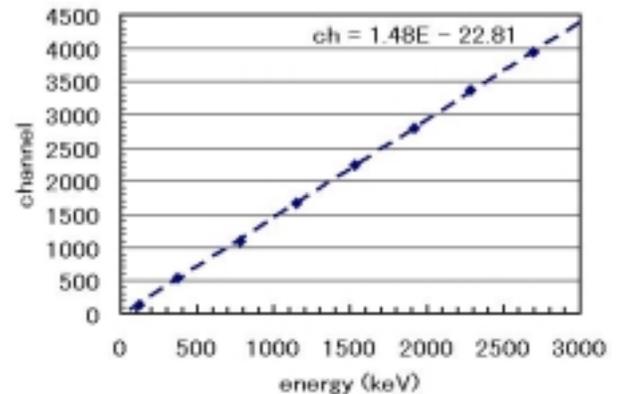
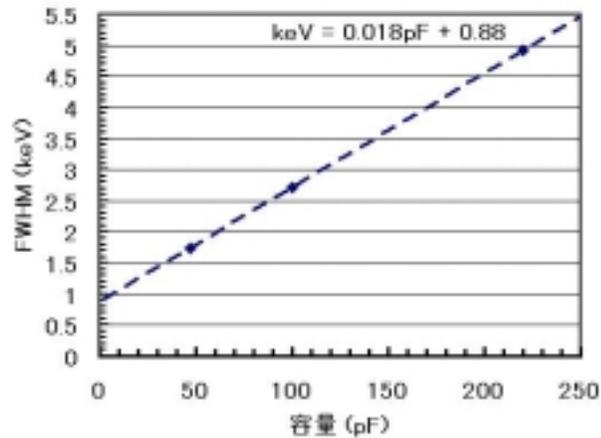


図 3.11: CP580H で実際に測定した容量勾配 (左) と線形性 (右) のグラフ

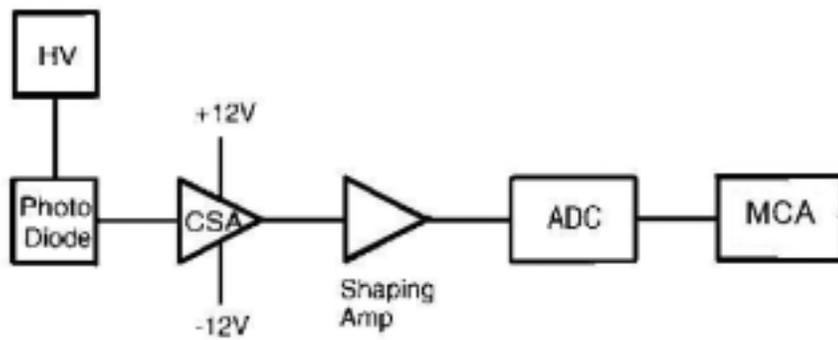


図 3.12: フォトダイオード単体での測定に用いた回路系のブロック図

表 3.3: フォトダイオード単体での測定に用いたモジュールとその設定値

	形式	設定値
高圧電源	クリアパルス MODEL E6625	40V
フォトダイオード	浜松ホトニクス SPL PD typeA	逆バイアス 40V
CSA	クリアパルス CP580H	
Shaping Amp	ORTEC MODEL 571	Shaping time $2\mu\text{s}$
ADC	Labo 2201A	

### 3.4 フォトダイオードの分解能の測定

結晶シンチレータとフォトダイオードの組合せで測定する前に、まずフォトダイオード単体のエネルギー分解能を知りたい。よって、フォトダイオードを X 線検出器として測定を行う。フォトダイオード単体で測定した場合、入射される放射線のエネルギーが低く情報キャリアを増幅しないためエネルギー分解能は電気回路系雑音の影響を大きく受ける。§2.4 で述べたように、電気回路系雑音はフォトダイオードのリーク電流からくるショット雑音や、フォトダイオードの入力容量からくる熱雑音、用いた CSA の性能、回路系セットアップによる雑音、および実験環境に固有な雑音がある。フォトダイオード単体で測定することにより、エネルギー分解能の電気回路系雑音の部分を実測することができる。

#### 3.4.1 実験のセットアップ

測定に用いた回路系のブロック図を図 3.12 に示す。フォトダイオードからの信号は、§3.3 で述べた CSA、Shaping Amp を通ったあと ADC に入力される。ADC でデジタル信号に変換された後、MCA に取り込まれる。表 3.3 に使用した測定回路を示す。遮光と電氣的な遮蔽を兼ねてアルミ飲料缶を途中で切断してその中にフォトダイオードを入れ、アルミホイルで覆った。

### 3.4.2 測定

図 3.12 のセットアップを用い、恒温槽で 20 , -20 , -30 にして測定した。-20 , -30 に冷却して測定した理由は、常温ではフォトダイオードのリーク電流に起因する電氣的雑音が圧倒的に大きく、フォトダイオードの性能を十分に出せないことと、低温では §3.1 で述べたように GSO, BGO の光量が増えるからである。フォトダイオードに照射する硬 X 線は、 $^{133}\text{Ba}$  の 31keV, 81keV のラインと  $^{109}\text{Cd}$  の 22keV のラインを用いた。

### 3.4.3 測定結果

図 3.13 にこの測定で得られた  $^{133}\text{Ba}$ (右図) と  $^{109}\text{Cd}$ (左図) のスペクトルを示す。図 3.13 より、20 よりも-20 , -30 のほうが明らかにエネルギー分解能が良いことがわかる。測定された-20 時のスペクトルから、エネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{ch})$  との相関は図 3.14 のようになった。 $^{133}\text{Ba}$  のスペクトルには左端に Ag の K- ラインが、 $^{109}\text{Cd}$  のスペクトルには 23keV ラインの右に K- ラインが見えている。このラインは X 線がフォトダイオードの中に使われている Ag に反応したものだと思われる。フォトダイオードは温度によってパルスハイトが変わることがないので 20 , -30 のエネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{ch})$  との相関も-20 の時とほぼ同じである。 $E$  と  $p$  の相関は

$$p = 33.98 \times E - 48.53 \quad (3.1)$$

のように 1 次関数で表現でき、パルスハイトの線形性は十分良い。図 3.15 にエネルギー分解能の測定結果を示す。20 で測定した場合エネルギー分解能は  $\sim 2.1\text{keV}$  だったが、冷却して-20 , -30 で測定した場合エネルギー分解能は  $\sim 1.7\text{keV}$  に向上され、冷却したほうがフォトダイオードの性能を発揮できることがわかった。

§2.4, 2.5 を参考にエネルギー分解能を考察してみる。まず電流性雑音は  $\tau_s$  は  $2\mu\text{s}$ 、 $I_n$  は 20 で  $2\text{nA}$ 、-20 , -30 ではほとんど流れないので (2.5) 式より、20 では  $2.6\text{keV}^2$ 、-20 , -30 では無視できる。容量性雑音は、(2.6) 式を用いずに図 3.10 と比較してやるとフォトダイオードの端子間容量が  $15\text{pF}$  ぐらいなので、雑音は  $1.2\text{keV}$  となる。また、シリコンはだいたい  $3.65\text{eV}$  ごとに一個の電子正孔対を作るのでポアソンゆらぎに起因する分解能は (2.8) 式より、放射線のエネルギーが  $30\text{keV}$  の場合、 $0.8\text{keV}$  ぐらいになる。これらを合わせると (2.9) 式より、エネルギー分解能は 20 で  $\sim 2.1\text{keV}$ 、-20 , -30 で  $\sim 1.4\text{keV}$  になる。実測値と比べるとだいたい近いので、良く雑音を落せていると言える。

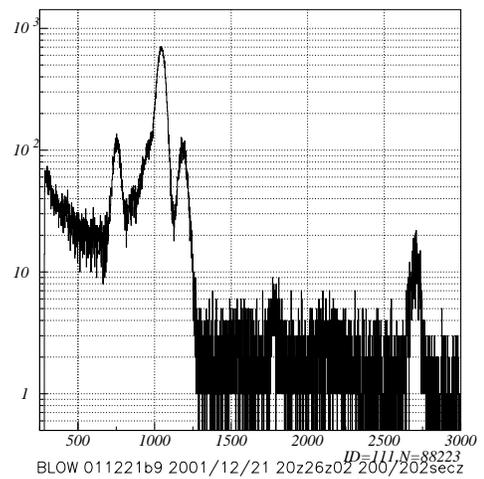
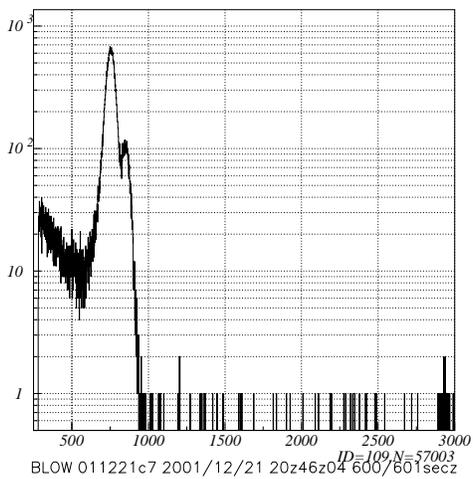
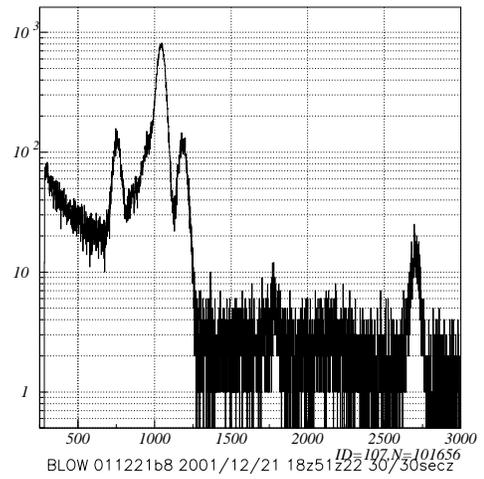
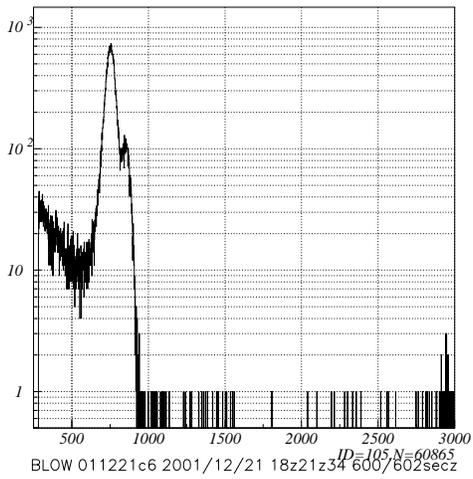
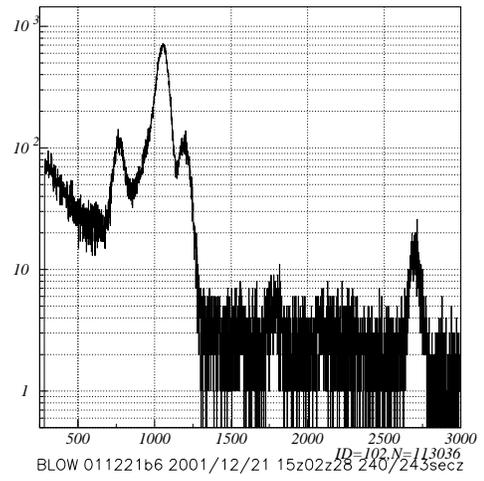
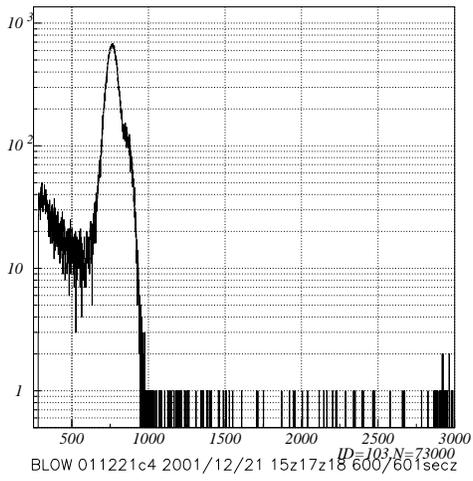


図 3.13: フォトダイオード単体で検出した  $^{109}\text{Cd}$ (左) と  $^{133}\text{Ba}$ (右) のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。

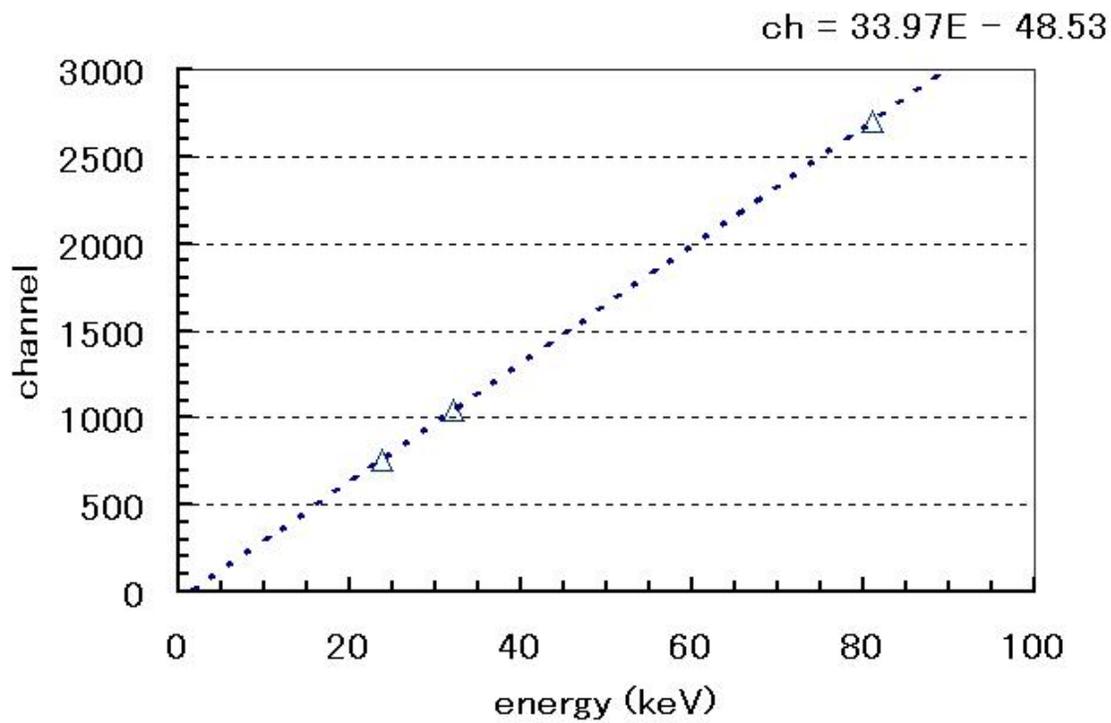


図 3.14: フォトダイオードに硬 X 線を照射した時のエネルギーとパルスハイトの相関

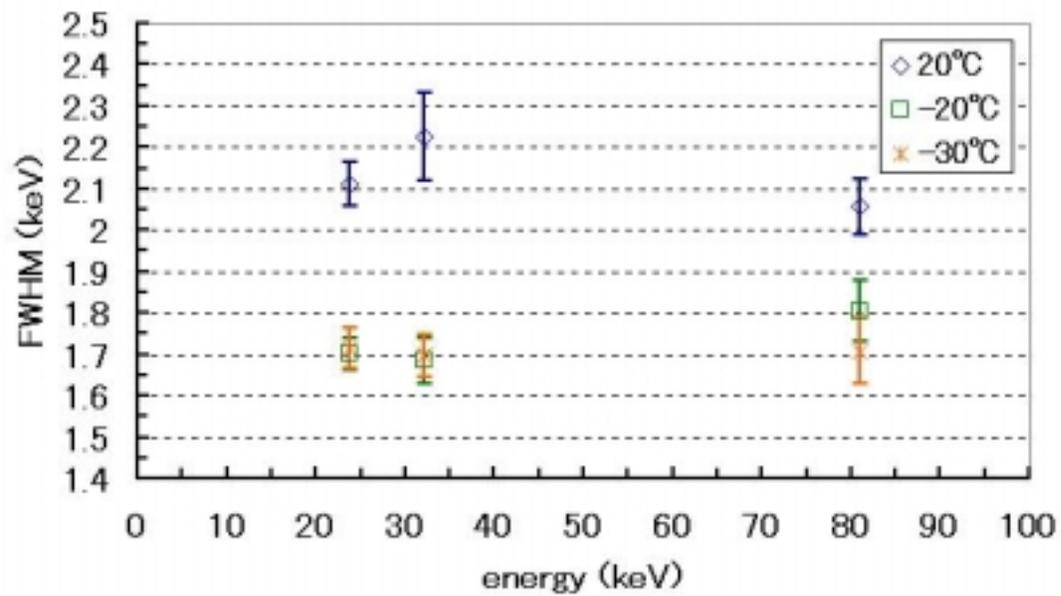


図 3.15: フォトダイオードに硬 X 線を照射した時のエネルギー分解能

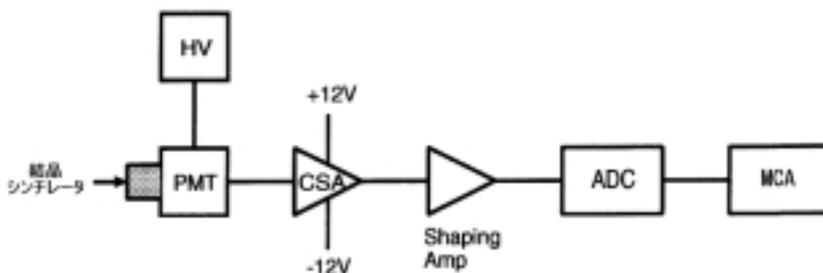


図 3.16: 光電子増倍管でのエネルギー分解能の測定に用いた回路系のブロック図

表 3.4: 光電子増倍管でのエネルギー分解能の測定に用いたモジュール

	形式	設定値
光電子増倍管	浜松ホトニクス R1847	
高圧電源	ORTEC Model 556	700V
CSA	クリアパルス CP2869	
Shaping Amp	ORTEC MODEL 571	Shaping time $2\mu\text{s}$
ADC	Labo 2201A	

### 3.5 GSO、BGO の発光を光電子像倍管で読み出す実験

結晶シンチレータの蛍光を光電子増倍管で読み出す実験を行った。この実験は、従来から X 線やガンマ線検出で最もよく行われる手法であり、用いる結晶の特性や性能を評価するのに最適である。今回の測定では GSO、BGO の他に、比較のため従来主流である NaI、CsI も測定した。

#### 3.5.1 測定のセットアップ

光電子増倍管は浜松ホトニクス株式会社 R1847 型を用いた。GSO、BGO、NaI、CsI は信越化学の KE-108 により光電子増倍管と接着し、蛍光を逃さないために白いテープシールを内側に巻いた蓋をかぶせた。遮光のために全体を黒いビニールシートで覆い、磁場を遮断するために光電子増倍管の増幅部に磁気シールドを巻いた。光電子増倍管からの信号はダイノードから取り出され、CSA および Shaping Amp を通った後 ADC に入力される。図 3.16 に測定に用いた回路系のブロック図を、表 3.4 に使用したモジュールと設定値を示す。

#### 3.5.2 測定に用いる結晶の決定

手元に GSO は 7 個、BGO は 9 個の結晶があるので、今回の測定に最適な結晶を選ぶための測定を行う。§2.5 で見たとおり、結晶シンチレータで生成されるシンチレーション光子の数がエネルギー分解能に影響を及ぼす。シンチレーション光子の数、すなわち測定されるパルス波高が大きいほうがエネルギー分解能が良くなるので、それを今回の測定に使う結晶に選ぶ。

図 3.16 のセットアップを用い、恒温槽で 20 にして測定した。線源は  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のライ

表 3.5: 各結晶に対するピーク ( $^{137}\text{Cs}$ : 662keV) の位置 (ADCchannel)

番号	peak channel	
	GSO	BGO
1	678	724
2	840	722
3	664	736
4	856	737
5	804	701
6	763	711
7	826	732
8	-	709
9	-	740

ンを測定に用いた。その結果を表 3.5 に示す。ピークの位置が大きいほうがパルス波高が大きいので、GSO は 4 番、BGO は 9 番の結晶を用いることにした。

### 3.5.3 測定

図 3.16 のセットアップを用い、恒温槽で GSO, BGO は 20 °C, -20 °C, -30 °C に、NaI, CsI は 20 °C にして測定した。測定に用いた線源は、 $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のラインと  $^{22}\text{Na}$  の 511keV, 1275keV のラインと  $^{88}\text{Y}$  の 898keV, 1836keV のラインである。GSO, BGO, CsI は同ゲインで測定したが、NaI は光量が大きいので 1/2 のゲインで測定した。

### 3.5.4 測定結果

GSO, BGO, CsI を用いた測定で得られたスペクトルを図 3.17, 図 3.18, 図 3.19 に示す。BGO を用いた測定で得られたスペクトルでそれぞれの線源のピークの左に小さなピークが見られる、これは Bi の K エスケープピーク (ピークの ~80keV 前に現れる) である。GSO, BGO は温度が低くなるにつれてピークの位置が右によっていくことから光量が増加していることがわかる。特に BGO は光量の増加が大きい。GSO, BGO は NaI, CsI に比べてカウントが溜りやすく、阻止能が大きいことがわかる。図 3.17 より GSO を用いた測定でのエネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{channel})$  との相関を図 3.20 に、図 3.18 より BGO を用いた測定でのエネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{channel})$  との相関を図 3.21 に、図 3.19 より NaI, CsI を用いた測定でのエネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{channel})$  との相関を図 3.22 に示す。図 3.20 と図 3.21 と図 3.22 より、エネルギー  $E$  とパルスハイト  $p$  は 1 次関数で表現でき、パルスハイトの線形性は十分良い。これらのエネルギーとチャンネルの比から、光電子増倍管で測定される光量の相対値を求めたものを表 3.6 に示す。表 2.1 に比べて CsI, GSO, BGO の相対値が大きいのは、表 2.1 のデータは古く今回測定に用いている結晶は改良が加えられたもので性能が良くなっているからだと思われる。GSO, BGO は 20 °C の時に比べて -30 °C では光量がそれぞれ 1.23, 1.65 倍になっている。

GSO, BGO, NaI CsI で測定されたエネルギー分解能のグラフをそれぞれ図 3.23, 図 3.24, 図 3.25 に示す。光電子増倍管で測定されたエネルギー分解能は  $E^{-1/2}$  に比例すると思われるので、

表 3.6: PMT で測定した場合の光量の相対値

	NaI	CsI	GSO	BGO
20	100	71	45	24
-30	-	-	55	41

図に  $E^{-1/2}$  に比例する線をいれた。図よりエネルギー分解能は-30 の  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のラインで GSO は 6.3 %、BGO は 7.2 %に、20 の  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のラインで NaI は 9.0 %、CsI は 6.8 %になった。NaI はエネルギー分解能が悪かったが、その他の結晶は従来 of 測定結果と同じぐらいであり、用いている結晶は十分良い性能を持っていると言える。

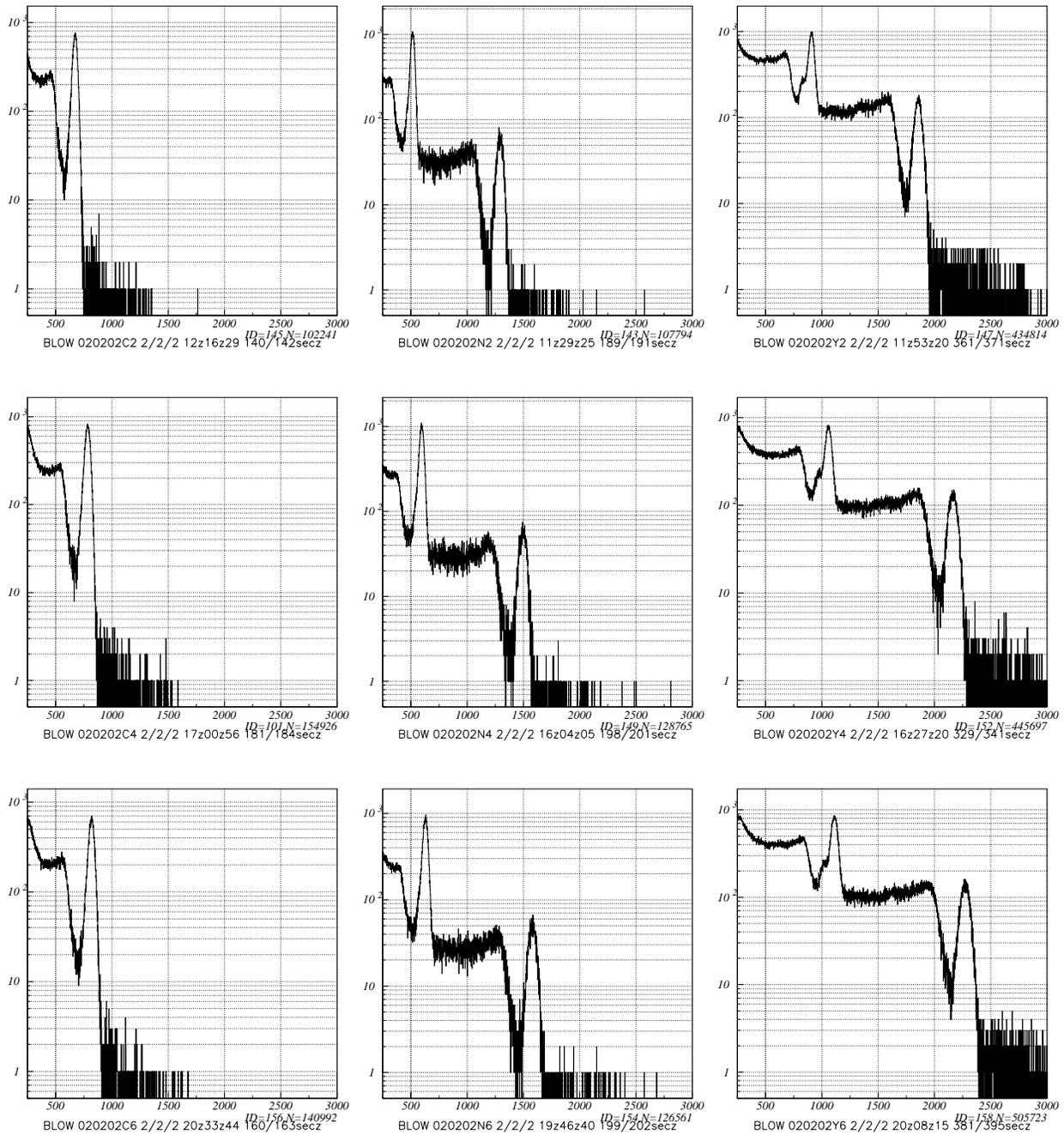


図 3.17: GSO からの蛍光を光電子増倍管で検出した  $^{137}\text{Cs}$ (左) と  $^{22}\text{Na}$ (中央) と  $^{88}\text{Y}$ (右) のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。

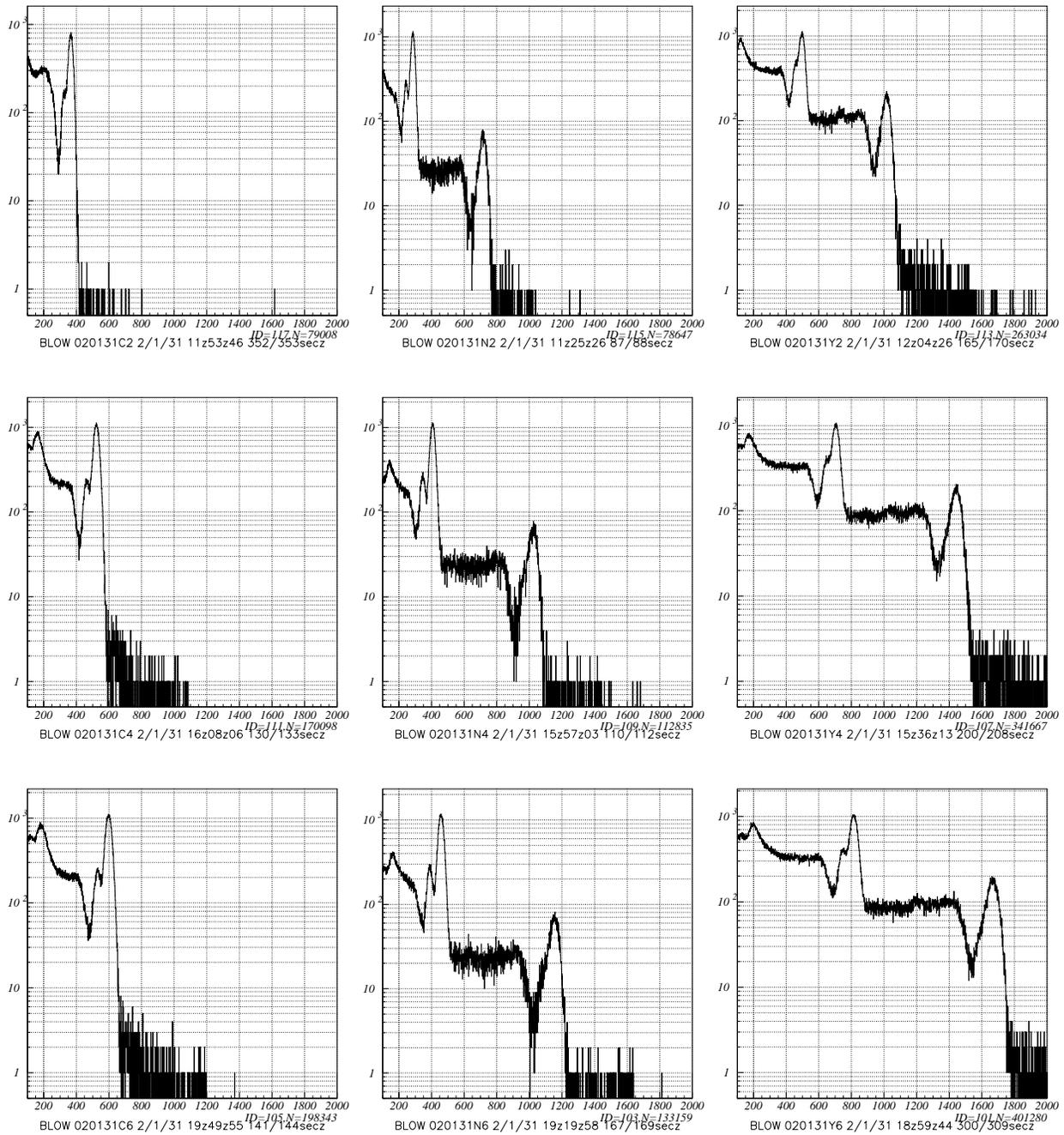


図 3.18: BGO からの蛍光を光電子増倍管で検出した  $^{137}\text{Cs}$ (左) と  $^{22}\text{Na}$ (中央) と  $^{88}\text{Y}$ (右) のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。

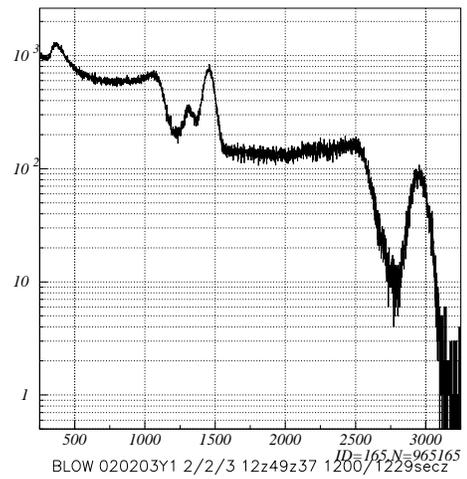
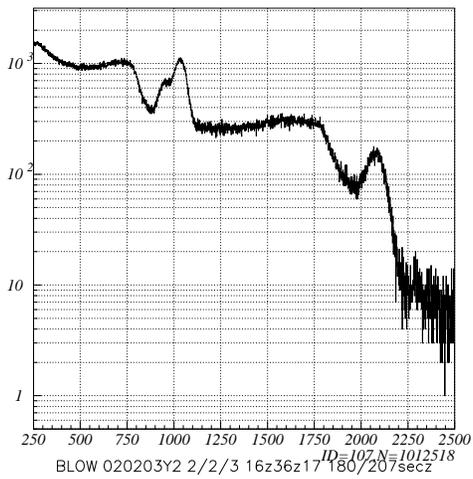
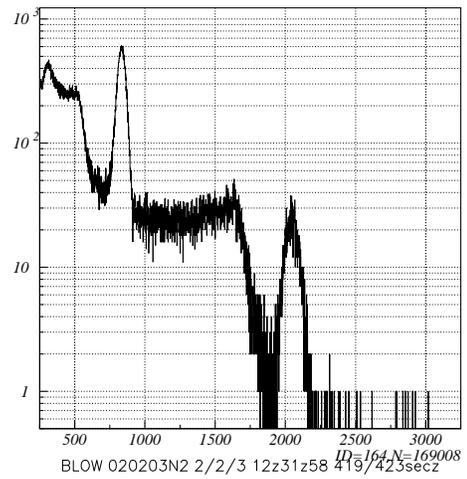
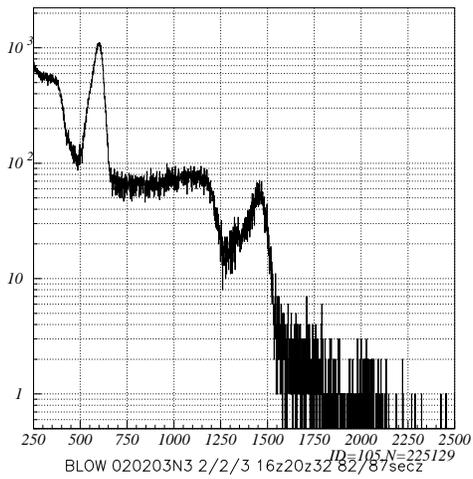
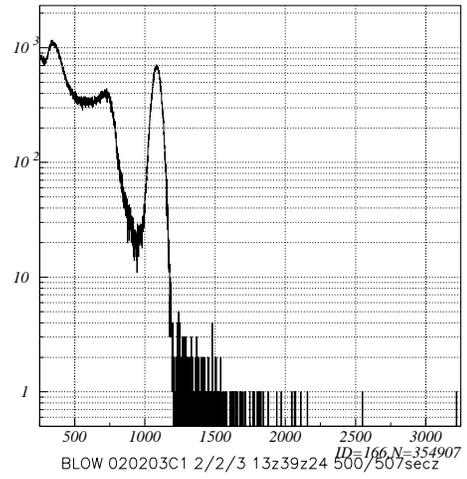
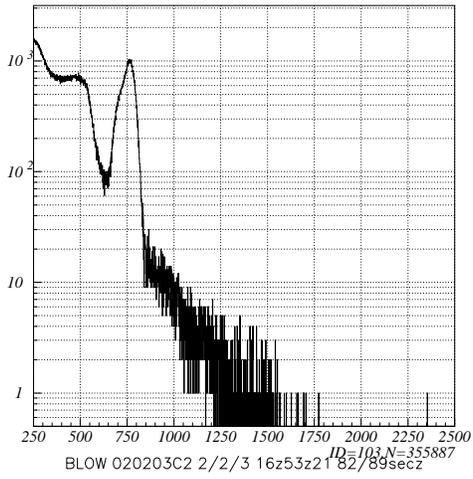


図 3.19: NaI, CsI からの蛍光を恒温槽が 20 の時に測定したスペクトル。(左) が NaI で (右) が CsI、上から  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{88}\text{Y}$  のスペクトル。縦軸は count 数、横軸は channel。

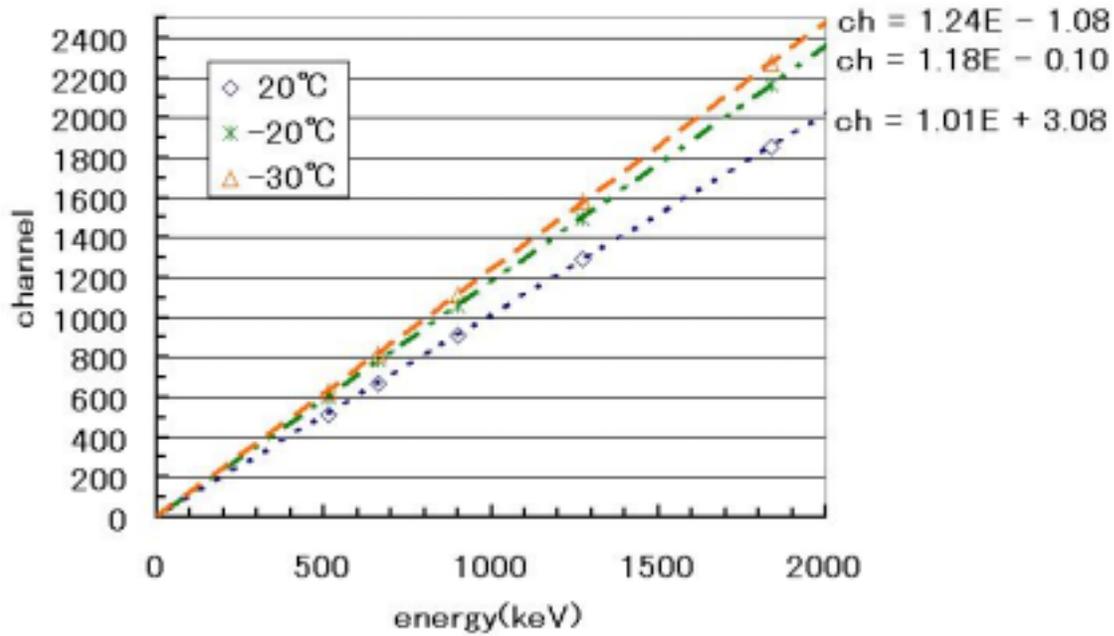


図 3.20: GSO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関

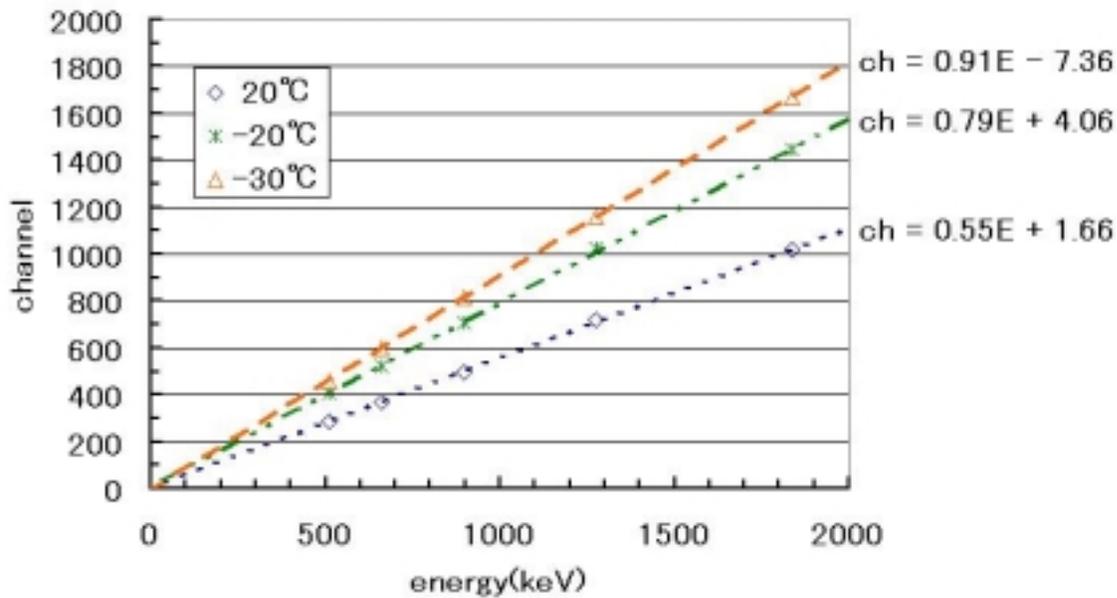


図 3.21: BGO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関

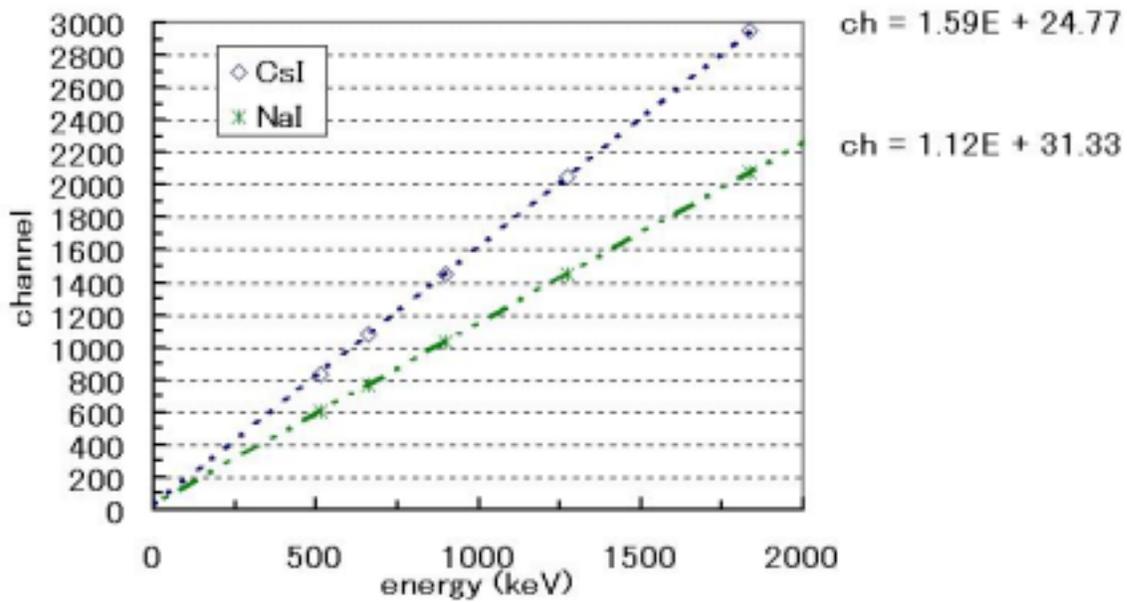


図 3.22: NaI, CsI からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関

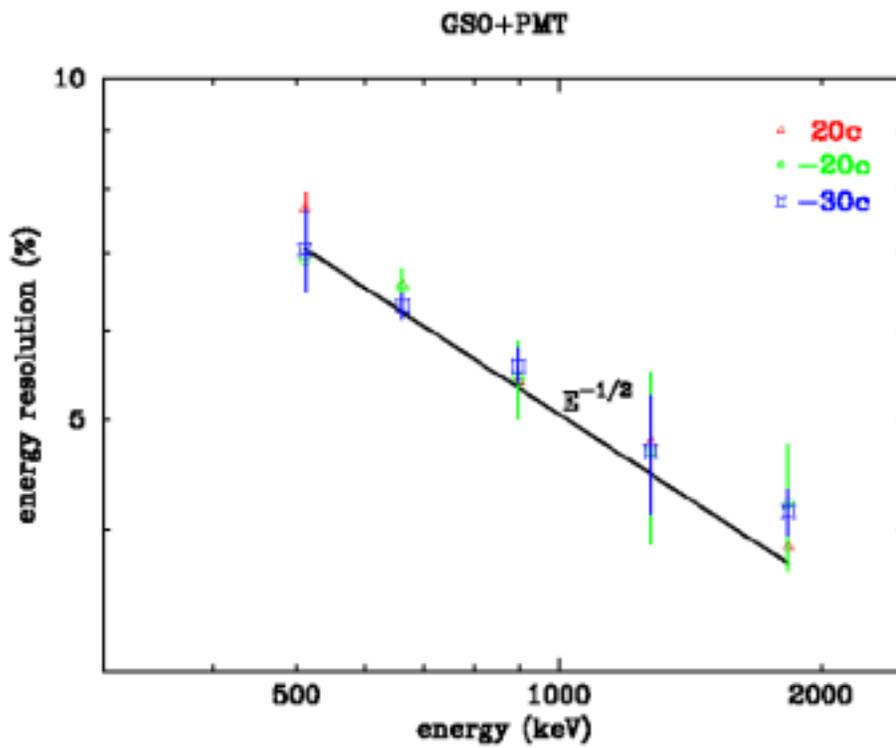


図 3.23: GSO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギー分解能

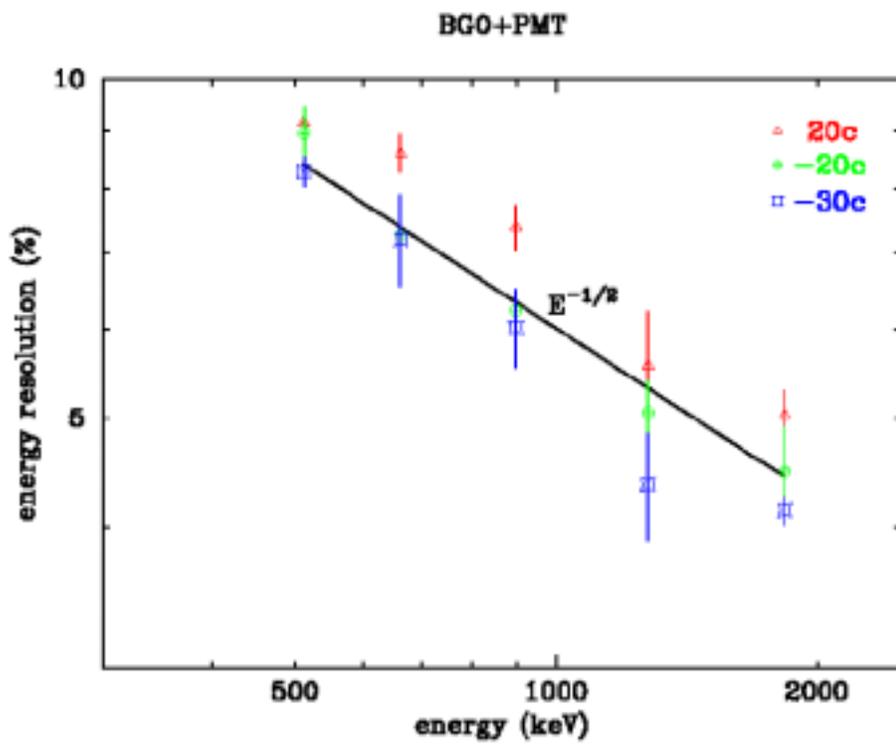


図 3.24: BGO からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギー分解能

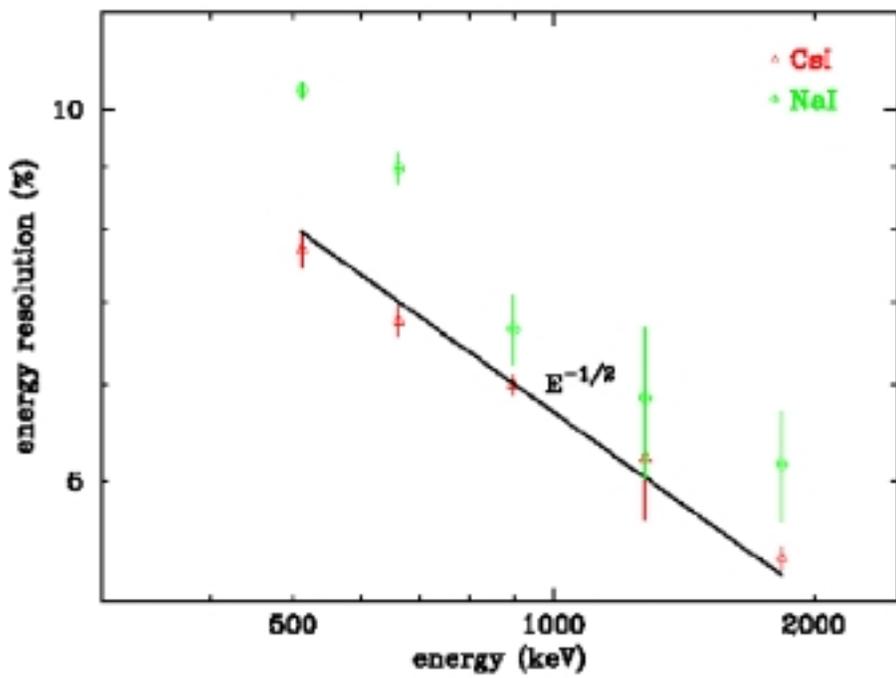


図 3.25: NaI, CsI からの蛍光を光電子増倍管で検出した時のエネルギー分解能

表 3.7: 各接着剤、反射剤に対するピーク ( $^{137}\text{Cs}$ : 662keV) の位置とエネルギー分解能

	peak channel	エネルギー分解能 (%)
KE-108 + 凝固剤	296	18.8
KE-108 + パルガーテープ	619	16.2
KE-108 + BaSO <sub>4</sub>	623	16.1
光学グリース + BaSO <sub>4</sub>	709	13.1

### 3.6 GSO, BGO の発光をフォトダイオードで読みだす実験

§3.4, §3.5 の実験によりフォトダイオードと GSO, BGO の特性がわかってきた。これらを踏まえた上で今回の測定を行う。また、比較のため CsI も測定する。

#### 3.6.1 接着剤と反射剤

結晶シンチレータとフォトダイオードを接着するにあたり、シンチレーション光子がフォトダイオードの受光面へ到達するまでにできるだけ損失を少なくすることが重要である。本実験を行う前に、どのように接着すればピーク波高値が大きくなるか測定を行った。各測定は図 2.3 のセットアップを用い、結晶シンチレータは GSO を用いて恒温槽で 20 °C にして測定した。結果を表 3.7 に示す。

まず接着剤 KE-108 に凝固剤を少量混ぜ、フォトダイオードと GSO を接着し固めた後、測定した。結果は、光量も少なくエネルギー分解能も悪かった。光量が少ないのは GSO の発光が逃げているためだと考えられたので、反射剤として特殊な白のパルガーテープを GSO に巻き、KE-108 を用いて接着し GSO とフォトダイオードを固定するために絶縁テープで止めて測定した。結果は、光量は凝固剤を使用したときに比べて 2 倍近く増えたが、エネルギー分解能は悪いままだった。KE-108 をつけた直後は時間の経過とともに光量が少なくなっていく。さらに、時間をおくと光量が大きくなった。これは、パルガーテープが KE-108 を吸収してしまい反射剤としての性能が落ちてしまったものと考えられる。パルガーテープはどうしても KE-108 を吸収してしまうので、BaSO<sub>4</sub> の白粉を反射剤として GSO に塗り、KE-108 を用いて接着し絶縁テープで GSO とフォトダイオードを固定して測定した。結果は、パルガーテープを反射剤にしたときとほぼ同じになった。パルガーテープと同様に KE-108 をつけた直後は、時間の経過とともに光量が少なくなっていく。これは BaSO<sub>4</sub> が KE-108 を吸収してしまっていると考えられるが、パルガーテープほど光量は落ちなかった。KE-108 は反射剤に吸収されてしまうので、接着剤に光学グリース (応用光研工業株式会社 6262A) を用いて接着し、絶縁テープで GSO とフォトダイオードを固定して測定した。結果は、光量、エネルギー分解能ともに KE-108 を使用していたときよりも良くなった。KE-108 と同様に、つけた直後は光量が少し落ちた、これも BaSO<sub>4</sub> が吸収してしまっているものと思われる。この結果から、本実験では光学グリース+BaSO<sub>4</sub> を使用することにした。

#### 3.6.2 実験のセットアップ

測定に用いた回路系のブロック図を図 2.3 に示すとおりである。§3.6.1 の結果より、GSO, BGO は反射剤として BaSO<sub>4</sub> の白粉を塗った。CsI は BaSO<sub>4</sub> の白粉を塗った場合、結晶が劣化してしまう可能性があったのでパルガーテープを巻いた。結晶は光学グリース (応用光研工業株式会社

表 3.8: PD で測定した場合の光量の相対値

	CsI	GSO	BGO
20	100	26	22
-30	-	31	34
PMT -30	-	78	57

6262A) によりフォトダイオードと接着し絶縁テープで固定した。測定に用いた回路は §3.3 と同じである。

### 3.6.3 測定

図 2.3 のセットアップを用い、恒温槽で GSO, BGO は 20 , -20 , -30 に CsI は 20 にして測定した。測定に用いた線源は  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のラインと  $^{22}\text{Na}$  の 511keV, 1275keV のラインと  $^{88}\text{Y}$  の 898keV, 1836keV のラインである。GSO, BGO はフォトダイオード単体で測定した時と同じゲインで、CsI は光量が大きかったために 1/4 のゲインで測定した。フォトダイオードの空乏層の厚さは  $\sim 200\mu\text{m}$  なので、これらの高エネルギーの放射線がフォトダイオードで検出される確率はシンチレータに比べて極めて低い。もしフォトダイオードで相互作用を起こしても、パルスハイトが大きく信号が飽和するのでスペクトルには影響しない。また、GSO と BGO をつけた状態でフォトダイオード単体の分解能を調べるため、裏側から  $^{133}\text{Ba}$  を当てて測定した。このような低エネルギー X 線は、GSO, BGO で光電吸収されてもエネルギーが低いため、実際には信号として取り出されず雑音に埋もれてしまう。

### 3.6.4 パルスハイト

GSO, BGO, CsI を用いた測定で得られたスペクトルをそれぞれ図 3.26, 図 3.27, 図 3.28 に示す。図 3.26 より GSO を用いた測定でのエネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{channel})$  との相関を図 3.29 に、図 3.27 より BGO を用いた測定でのエネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{channel})$  との相関を図 3.30 に、図 3.28 より CsI を用いた測定でのエネルギー  $E(\text{keV})$  とパルスハイト  $p(\text{channel})$  との相関を図 3.31 に示す。図 3.29 と図 3.30 と図 3.31 より、エネルギー  $E$  とパルスハイト  $p$  は 1 次関数で表現でき、パルスハイトの線形性は十分良い。

これらのエネルギーとチャンネルの比から、フォトダイオードで測定される光量の相対値を求めたものを表 3.8 に示す。光電子増倍管で測定したときと相対値が違うのは、フォトダイオードの量子効率を図 3.7 に示したように 450nm  $\sim$  750nm ぐらいがもっとも良く、図 3.6 にあるように発光スペクトルの波長域がこのあたりの BGO, CsI が相対的に大きくなっている。光電子増倍管とフォトダイオードで測定した場合の 20 /-30 と BGO/GSO の比を表 3.9 にまとめた。20 /-30 の比は光電子増倍管とフォトダイオードで同じくらいなので、温度による光量の増加は測定装置にあまり関係しないといえる。BGO/GSO の比はフォトダイオードで測定した場合大きく、-30 では BGO のほうが光量が大きくなっている。これは光電子増倍管とフォトダイオードの波長による量子効率の違いが関係していると考えられる。フォトダイオードで冷却して測定すると、BGO の測定される光量が GSO を超えるのはまだ他に報告はなく新しい発見である。

表 3.9: 光電子増倍管とフォトダイオードで測定した場合の 20 /-30 と BGO/GSO の比

		PMT	PD
20 /-30	GSO	1.23	1.17
	BGO	1.65	1.58
BGO/GSO	20	0.54	0.73
	-30	0.82	1.11

### 3.6.5 エネルギー分解能

GSO, BGO, CsI で測定されたエネルギー分解能をそれぞれ図 3.32, 図 3.33, 図 3.34 に示す。GSO, BGO 両図とも比較のため光電子増倍管を用いて-30 で測定した値と、エネルギー分解能が  $E^{-1}$  に比例すると考えられるので線をいれている。 $^{133}\text{Ba}$  で測定したフォトダイオード単体のエネルギー分解能は-20, -30 で、GSO が  $\sim 1.8\text{keV}$  とフォトダイオード単体で測定した時より少し悪くなったが、BGO は  $\sim 1.7\text{keV}$  と同じくらいだった。1MeV 以下では電気回路系雑音による  $E^{-1}$  に比例した成分の影響が大きい、1MeV を超えたあたりからポアソンゆらぎによる  $E^{-1/2}$  に比例した成分の影響が大きくなっていく。-30 のエネルギー分解能は、 $^{137}\text{Cs}:662\text{keV}$  のラインで GSO は 9.1 %、BGO は 8.7 %であったが、 $^{88}\text{Y}:1836\text{keV}$  のラインでは GSO は 4.2 %、BGO は 4.3 %になり、光電子増倍管で測定した値とほぼ同じくらいになった。また、光電子増倍管で測定した場合と違い、エネルギー分解能は GSO より BGO のほうが良くなった。CsI は図 3.34 にあるように光電子増倍管で測定した場合と同じくらいになり、 $^{137}\text{Cs}:662\text{keV}$  のラインで 7.2 %、 $^{88}\text{Y}:1836\text{keV}$  のラインで 4.7 %となった。エネルギー分解能は  $E^{-1/2}$  に比例しているように見え、下の (3.2) 式を用いて求めた理論値に比べると悪い。光量は十分大きかったので分解能が悪くなる原因として考えられるのが電気回路系雑音だが、 $E^{-1}$  に比例した成分の影響は見え、なぜエネルギー分解能は  $E^{-1/2}$  に比例しているのか今のところ不明である。

§3.4, 3.5 から今回測定されたエネルギー分解能を考察してみる。§3.5 では光電子増倍管で読み出したときのエネルギー分解能を求めた。この結果と (2.8) 式を使うとシンチレーション光子の数  $N$  がわかる。フォトダイオードの量子効率を図 3.6 からわかるので、ポアソンゆらぎに起因するエネルギー分解能の値がわかる。§3.4 では、-30 でフォトダイオード単体で測定した場合の理論値は  $\sim 1.4\text{keV}$  程度の分解能であることを確認した。測定により得られたスペクトルのパルスハイトの比から-30 で GSO は 30.9 倍、BGO は 27.8 倍違い雑音も同程度大きくなる。エネルギー分解能の理論値はフォトダイオード単体のエネルギーとパルスハイトの相関から求めた直線の傾きと、結晶シンチレータとフォトダイオードの組合せのエネルギーとパルスハイトの相関から求めた直線の傾きの比を  $s$  とすると

$$\frac{\Delta E}{E}(\%) = \sqrt{\left(\frac{s \cdot FWHM_{PD}(\text{keV})}{E(\text{keV})}\right)^2 + \left(\frac{(\frac{\Delta E}{E})_{PMT}(\%)}{\sqrt{\frac{\varepsilon_{PD}}{\varepsilon_{PMT}}}}\right)^2} \quad (3.2)$$

となる。(3.2) 式の理論値と-30 の測定値を図 3.35 に示す。理論値は 1MeV 以上になると光電子増倍管よりもエネルギー分解能が良くなっている。1MeV 以上ではフォトダイオードで測定した結果は理論値ほど良くなっていない。これはフォトダイオード、あるいはシンチレータ内で光量にばらつきがあるためではないかと思われる。また、(3.2) 式で電気回路系雑音に起因する  $FWHM_{PD}$  の影響が大きいためこれを下げてやれば 1MeV 以下の低エネルギー側でもっとエネル

ギ一分解能は良くなるはずである。

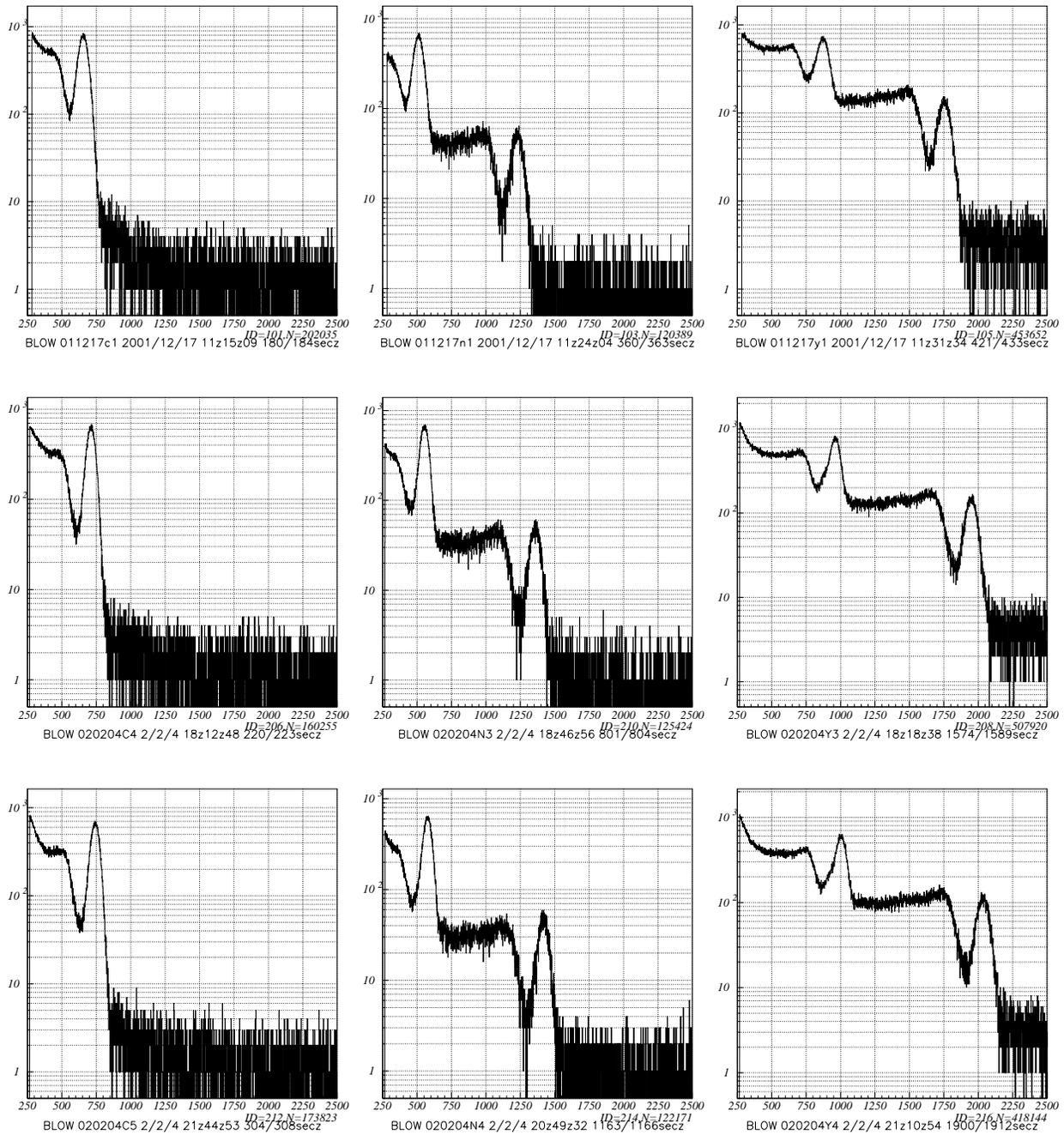


図 3.26: GSO から蛍光をフォトダイオードで検出した  $^{137}\text{Cs}$ (左) と  $^{22}\text{Na}$ (中央) と  $^{88}\text{Y}$ (右) のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。

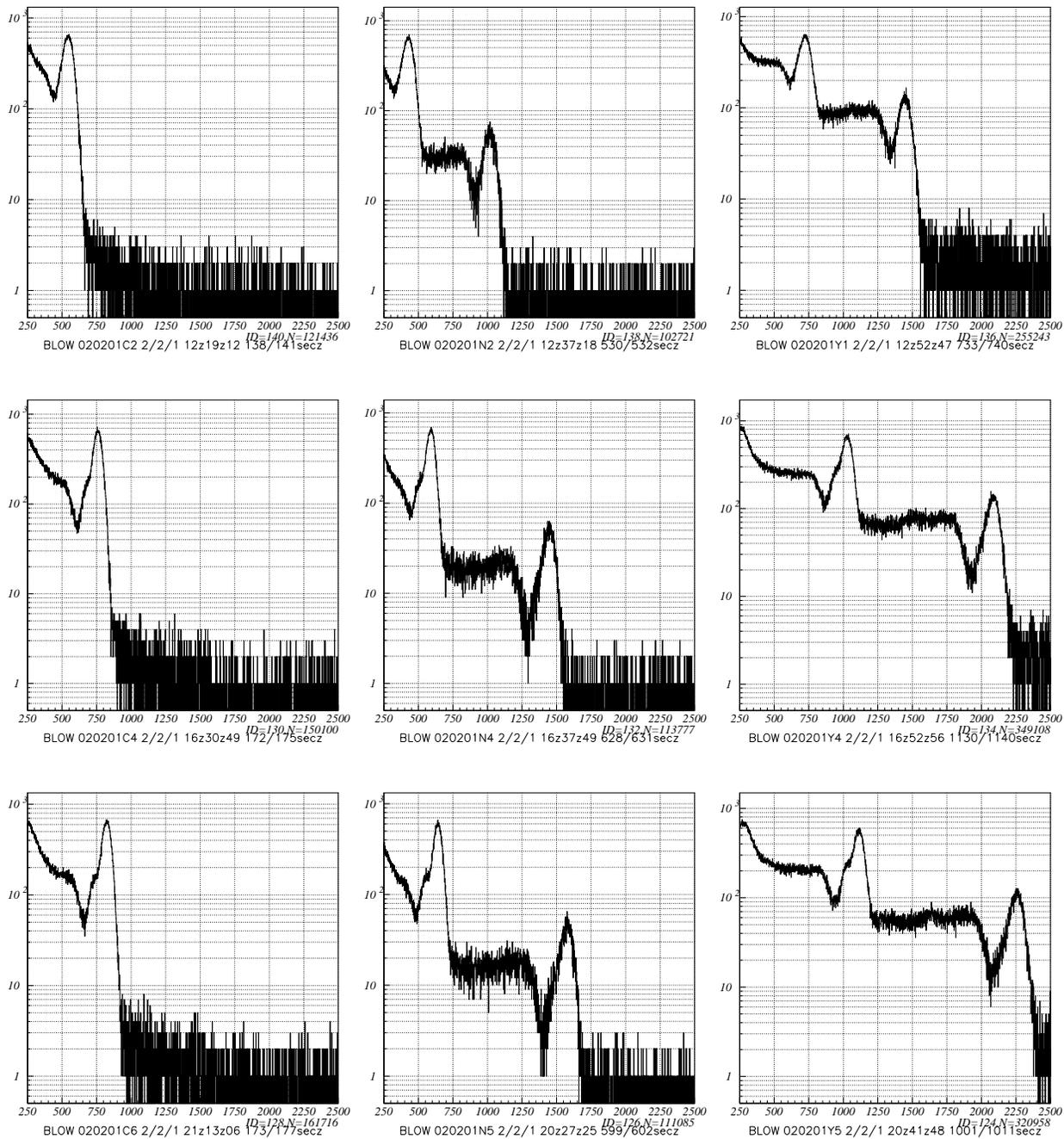


図 3.27: BGO からの蛍光をフォトダイオードで検出した  $^{137}\text{Cs}$ (左) と  $^{22}\text{Na}$ (中央) と  $^{88}\text{Y}$ (右) のスペクトル。上から恒温槽が 20 , -20 , -30 の時に測定したもの。縦軸は count 数、横軸は channel。

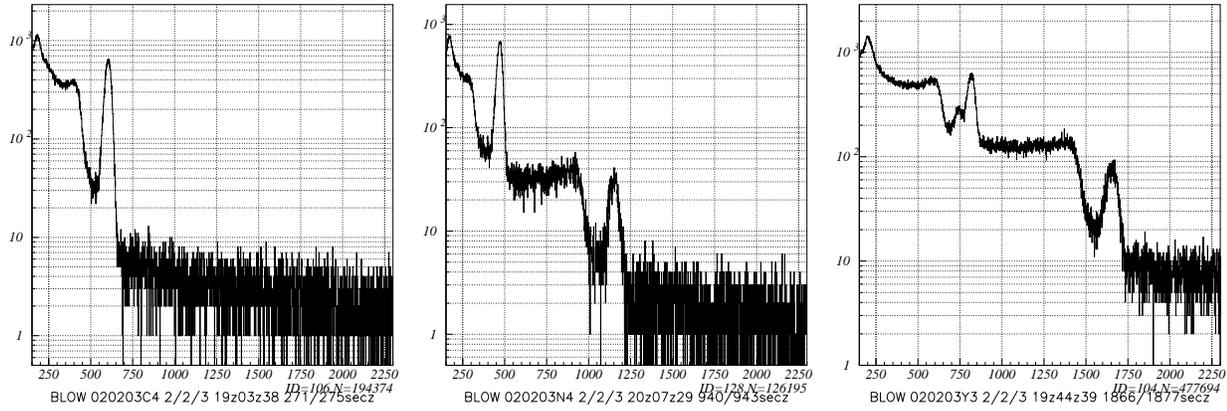


図 3.28: CsI からの蛍光を恒温槽で 20 °C にしてフォトダイオードで検出した  $^{137}\text{Cs}$ (左) と  $^{22}\text{Na}$ (中央) と  $^{88}\text{Y}$ (右) のスペクトル。縦軸は count 数、横軸は channel。

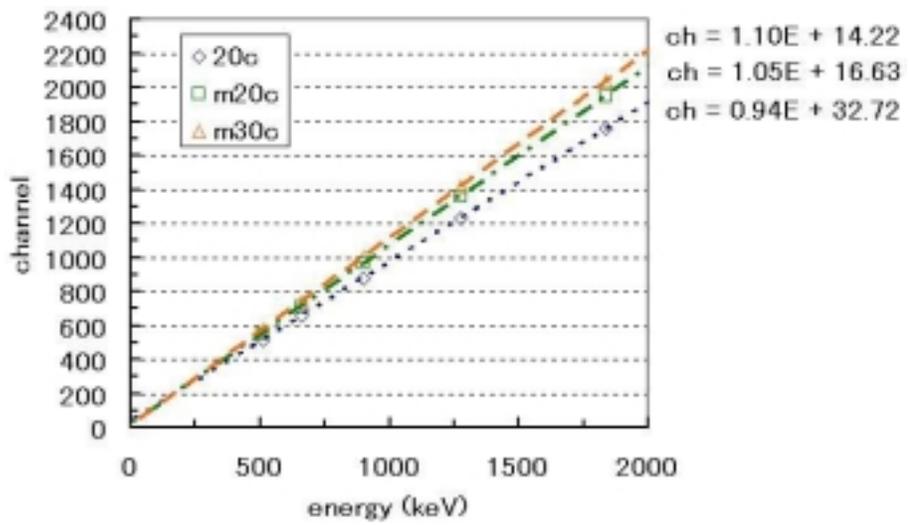


図 3.29: GSO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関

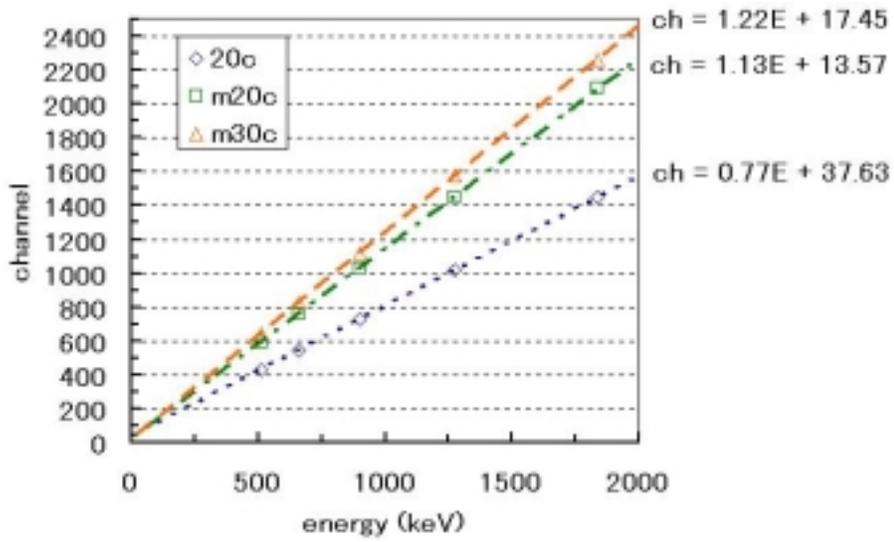


図 3.30: BGO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関

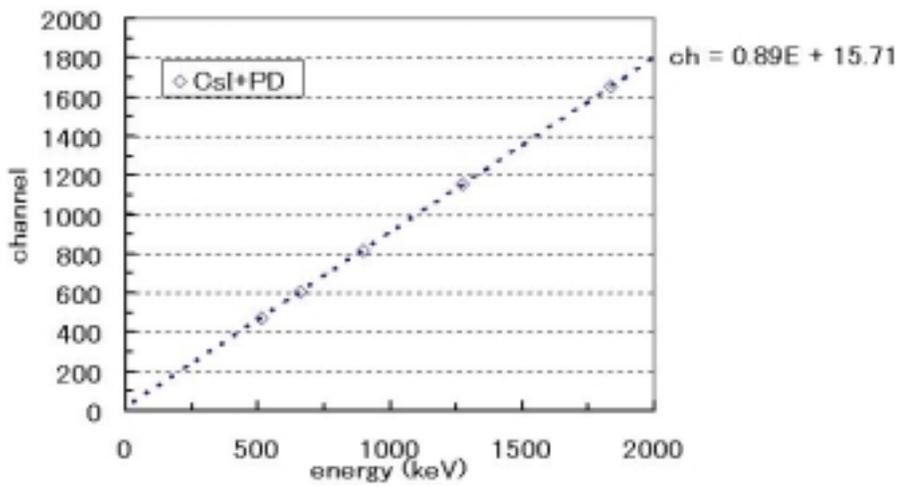


図 3.31: CsI からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギーとパルスハイトの相関

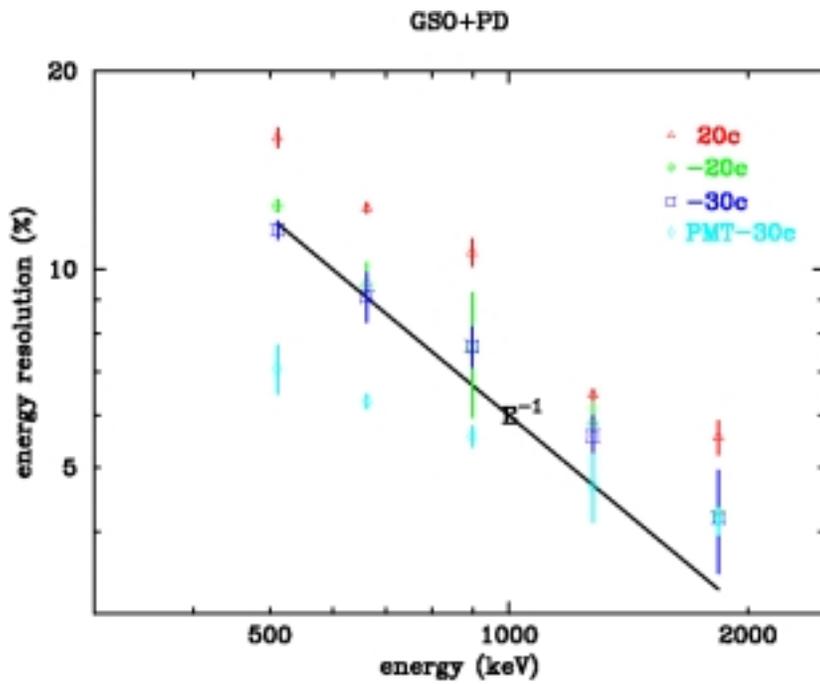


図 3.32: GSO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギー分解能

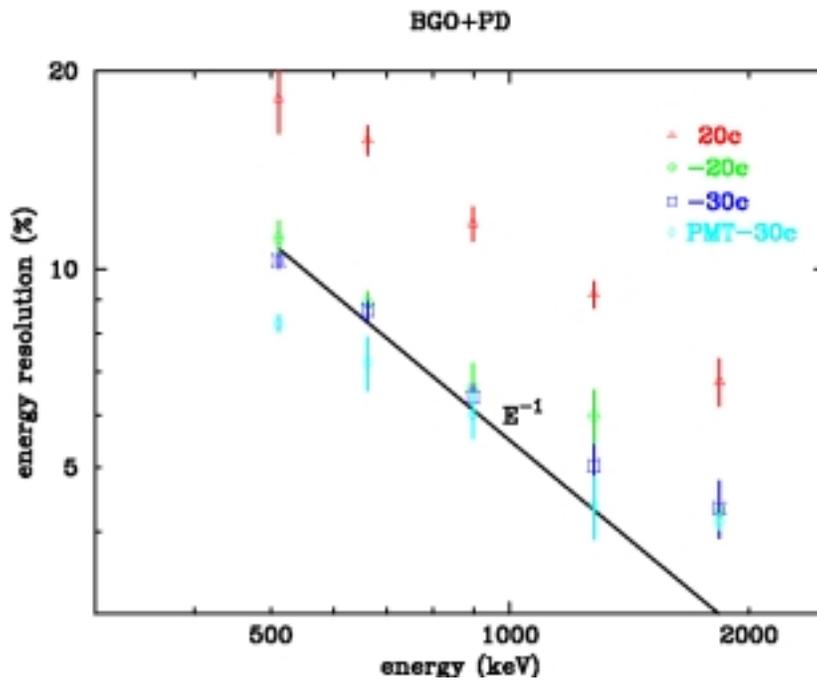


図 3.33: BGO からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギー分解能

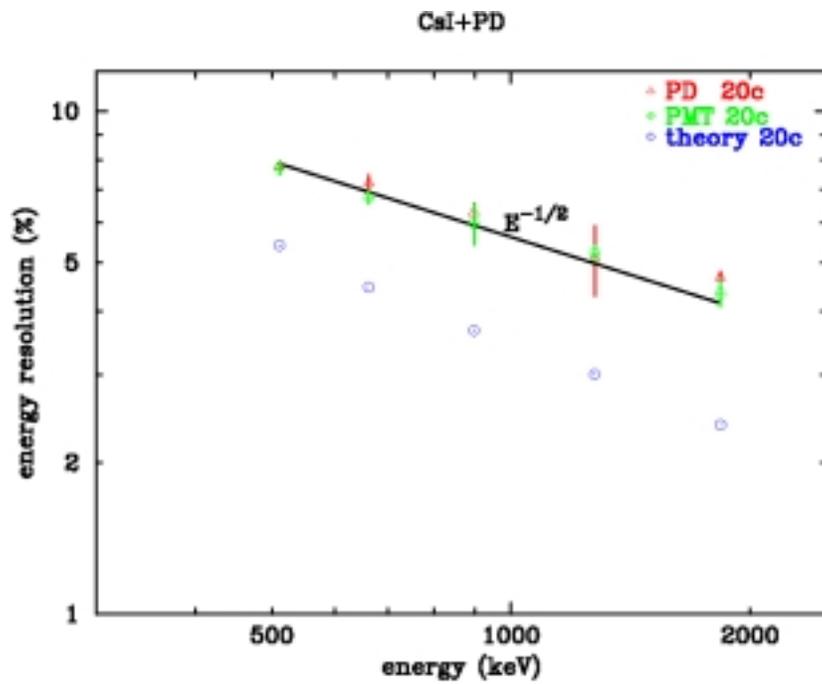


図 3.34: CsI からの蛍光をフォトダイオードで検出した時のエネルギー分解能

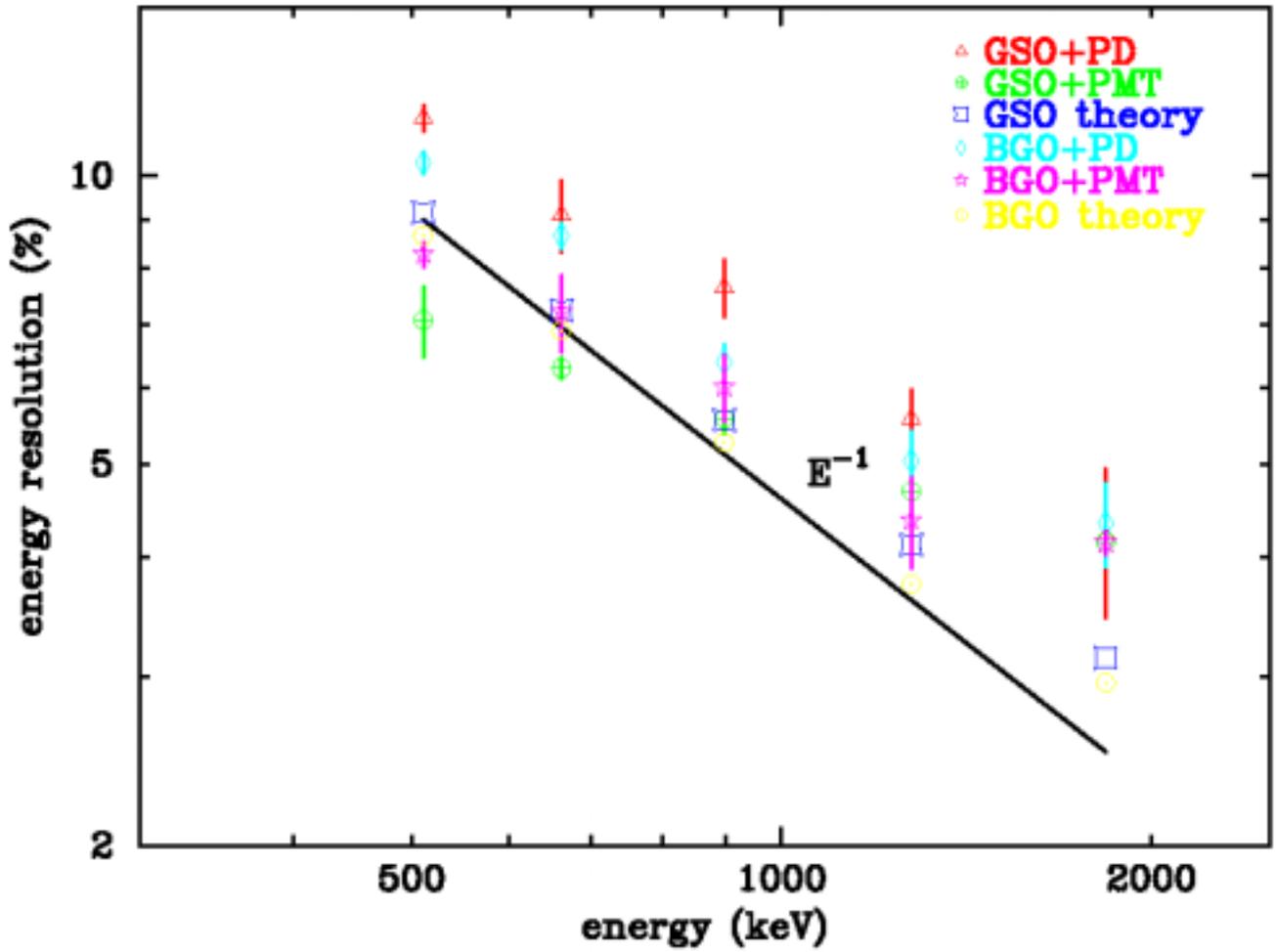


図 3.35: -30 での (3.2) 式から求めた理論値とフォトダイオードと光電子増倍管で読み出した実測値の比較

### 3.7 考察

今回の測定結果より、フォトダイオードで測定した場合常温ではエネルギー分解能は悪いものの、 $-20$  ぐらいまで冷やせば良い値になることがわかった。特に BGO は光電子増倍管の場合と違い $-30$  になると測定される光量とエネルギー分解能が GSO より良くなり、これは新しい発見である。また、 $^{88}\text{Y}$  の  $1836\text{keV}$  のラインではエネルギー分解能が光電子増倍管と同程度になった。理論的にはさらにエネルギー分解能は良くなるはずであり、 $1\text{MeV}$  以上で光電子増倍管より良くなる可能性がある。よって、高阻止能結晶シンチレータ GSO, BGO とフォトダイオードの組合せは光電子増倍管に比べて、コンパクトで MeV 領域のエネルギーに対して優れた検出器になる可能性を持っていると言える。

今後の課題のとしてエネルギー分解能を良くするためには次のことが挙げられる。

- GSO, BGO を冷却して測定すると、電気回路系雑音の中で容量性雑音の影響が大きくなる。性能の良い CSA を使うことより、容量性雑音を下げる。
- 電気回路系雑音は §2.4 での理論式で取り扱った他にも色々な要因があると思われる。配線やグラウンドを変えることにより、電気回路系雑音を下げる。
- 光量が増えればポアソンゆらぎに起因する雑音を下げることができる。そのためには、結晶シンチレータの改良により発光量を大きくする。発光した光子を多くフォトダイオードの受光面に届けるために反射剤と接着剤を工夫する。受光面に到達した光子を多く電子正孔対に変換するために、フォトダイオードの改良により量子効率を良くする。
- フォトダイオードあるいは結晶シンチレータ内に光量のばらつきがあると思われるので、光量の一様性を確かめる。

結晶シンチレータやフォトダイオードの改良は今後に期待する。今回測定に使用した CSA よりも性能が良いものがあるのでそれを使用し、配線やグラウンド、反射剤や接着剤を工夫することにより、 $1\text{MeV}$  以下で光電子増倍管を上回るエネルギー分解能を得る可能性を探りたい。また、CsI をフォトダイオードで測定した場合、なぜ予想よりも悪くエネルギー分解能が  $E^{-1/2}$  に比例したのかを解明していきたい。

# 第4章 ガンマ線コンプトンカメラの有効性のシミュレーション

結晶シンチレータとフォトダイオードを用いた、MeV 領域の次世代ガンマ線検出器として期待される多重コンプトンカメラの有効性を Geant4 でシミュレートした。多重コンプトンカメラは、多重コンプトン法によりガンマ線のエネルギーと到来方向を測定するものである。従来のガンマ線検出器の感度が～数%だったのに対して、コンプトンカメラのガンマ線に対する有効性を物質と粒子の相互作用シミュレーターである Geant4 を用いて確かめた。

## 4.1 ガンマ線コンプトンカメラ

100keV～5MeV の軟ガンマ線の領域は、光電吸収よりもコンプトン散乱が支配的である (図 4.1)。このため、従来の検出器では入射ガンマ線の検出効率が悪く、到来方向の決定が困難なためバックグラウンドの除去が難しく、MeV 領域の観測感度が上がらなかった。しかし、入射線のエネルギーと散乱位置がわかれば到来方向の決定が可能である。この原理を図 4.2 に示す。散乱ガンマ線を最後まで高精度で追跡することはこのエネルギー帯では困難であったが、技術の発達により 2 回以上の散乱も追跡できるようになってきている。さらに、最初の 3 回の散乱を追えば、かなりの効率で入射ガンマ線の情報を得ることができている (Kamae et al. 1987)。また、散乱方向の分布から入射ガンマ線の偏光の度合もわかる。ガンマ線コンプトンカメラはシリコンストリップ検出器を多数重ねそこで複数回散乱を起させ、エネルギーを知るために外側をシンチレータで覆い散乱ガンマ線を捕まえることにより検出効率を稼ぐ。散乱体にシリコンストリップを使用する利点はシンチレータに比べて、位置決定精度とエネルギー分解能が良く、低エネルギー側でコンプトン散乱の効率が良いからである。第 3 章での高阻止能結晶シンチレータとフォトダイオードの組み合わせで測定したが、この検出器は光電子増倍管よりもコンパクトでより良いエネルギー分解能が得られる可能性があるため、外側の壁に最適ではないかと期待されている。

## 4.2 Geant4 によるシミュレーションとジオメトリ

### 4.2.1 Geant4

高エネルギー・原子核実験などの分野において、容易に材質や形を組換え放射線と検出器の物理反応を予測できるシミュレーションは必要不可欠な要素である。Geant は高エネルギー粒子検出器をシミュレートするプログラムとして 1974 年に最初のバージョンが開発されて以来、世界各国で多くの研究者に利用されてきた。近年注目を集めているオブジェクト思考技術を用い、C++ 言語でかかれたのが Geant4(geometry and tracking) である。Geant4 は、CERN の主な LHC 実験や、SLAC の BABAR 実験で、本格的な使用が開始されるなど、現在標準となりつつある。

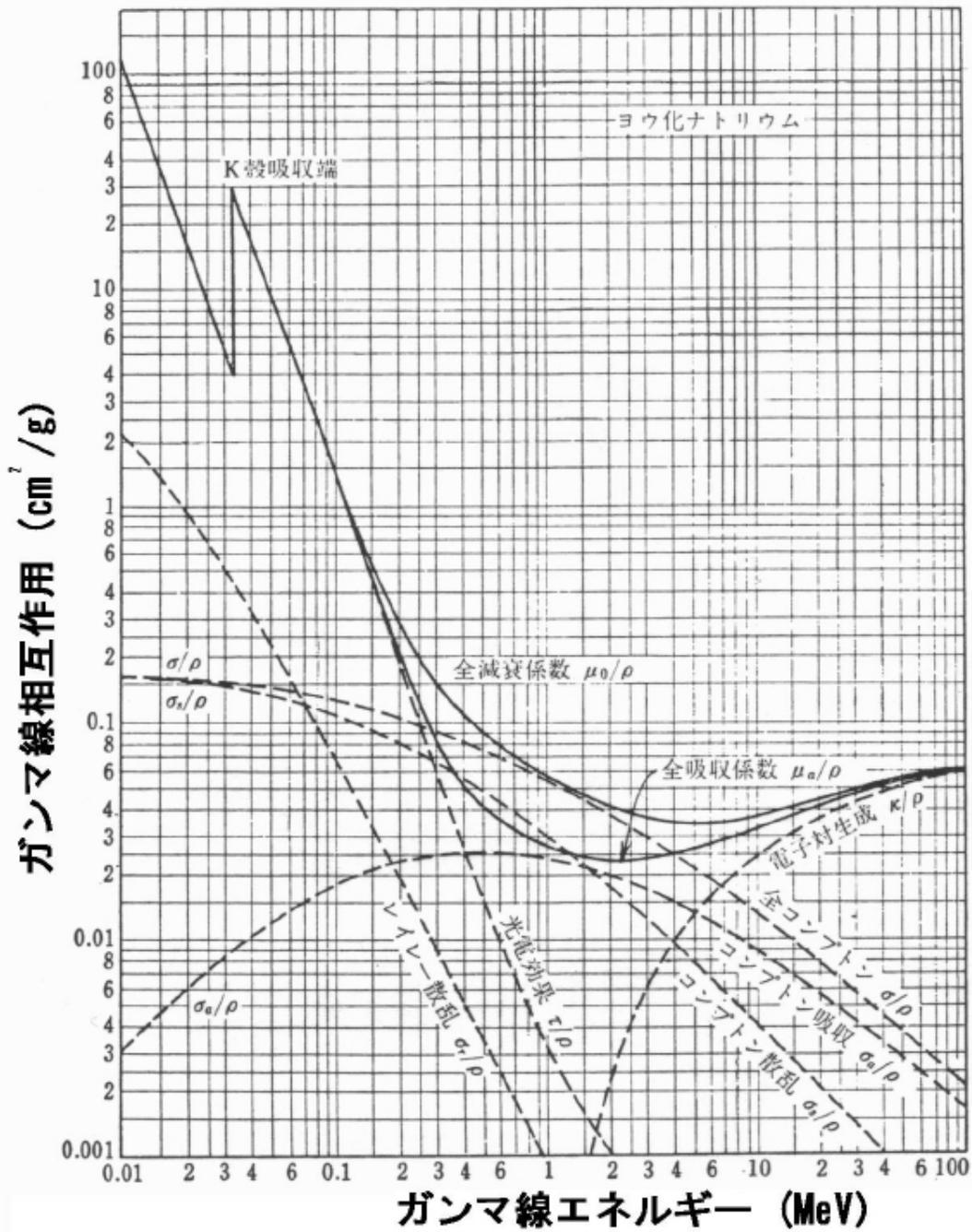


図 4.1: NaI(ヨウ化ナトリウム) の各ガンマ線相互作用のエネルギー依存性

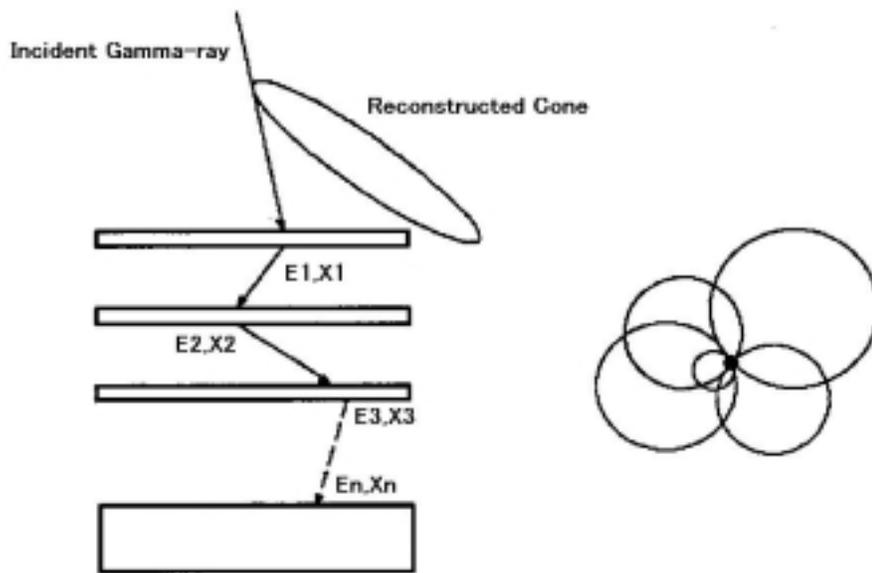


図 4.2: 多重コンプトンカメラの原理。散乱場所でのデポジットエネルギーと位置がわかると、入射ガンマ線の方向がコーン状に制限でき、複数のガンマ線についてコーンの交点を求めることにより、ガンマ線の到来方向を決定できる。

#### 4.2.2 ジオメトリ

ガンマ線コンプトンカメラは内側に多層の散乱体とそれを覆う外壁という構造になっている。散乱体にはシリコンストリップ検出器の Si と、Si より阻止能の大きい半導体検出器 CdTe を使用し、外壁には GSO, BGO シンチレータと CdTe を使用し Geant4 で図 4.3 のような 2 つのジオメトリを構築した。1 つめ (左) は 50keV ~ 1MeV のエネルギー領域でのシミュレーションを目的としており、内側に 20 枚の Si または CdTe( $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times t_s$ ) を 10mm 間隔で並べ、その外側を 10mm づつ離して、四方と底を厚さ  $t_o$ mm の 5 枚の GSO, BGO、または CdTe で覆った。2 つめ (右) は 50keV ~ 5MeV の広いエネルギー領域でのシミュレーションを目的としており、内側上部に Si( $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times t_{s1}$ ) を 15 枚、内側下部に CdTe( $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times t_{s2}$ ) を 15 枚を 10mm 間隔で並べた。その外側を半導体検出器から 10mm づつ離して、四方と底を厚さ  $t_o$ mm の 5 枚の GSO, BGO、または CdTe で覆った。このように散乱体に Si と CdTe を並べたのは、低エネルギー側では Si でコンプトン散乱を、高エネルギー側では阻止能の大きい CdTe でコンプトン散乱を起こさせるようにして、広いエネルギー領域をカバーするためである。

### 4.3 イベントの種類と有効イベントの選択

#### 4.3.1 イベントの種類

散乱体と外壁で起こる相互作用は光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の 3 つがある。ガンマ線コンプトンカメラにおいて重要な相互作用は、コンプトン散乱と光電効果である。理想的なイベントは散乱体で 1~3 回コンプトン散乱したあと、そのまま散乱体で光電効果を起こし止まるイベントである。しかし、MeV 領域のエネルギーになってくると散乱体で光電効果を起こす

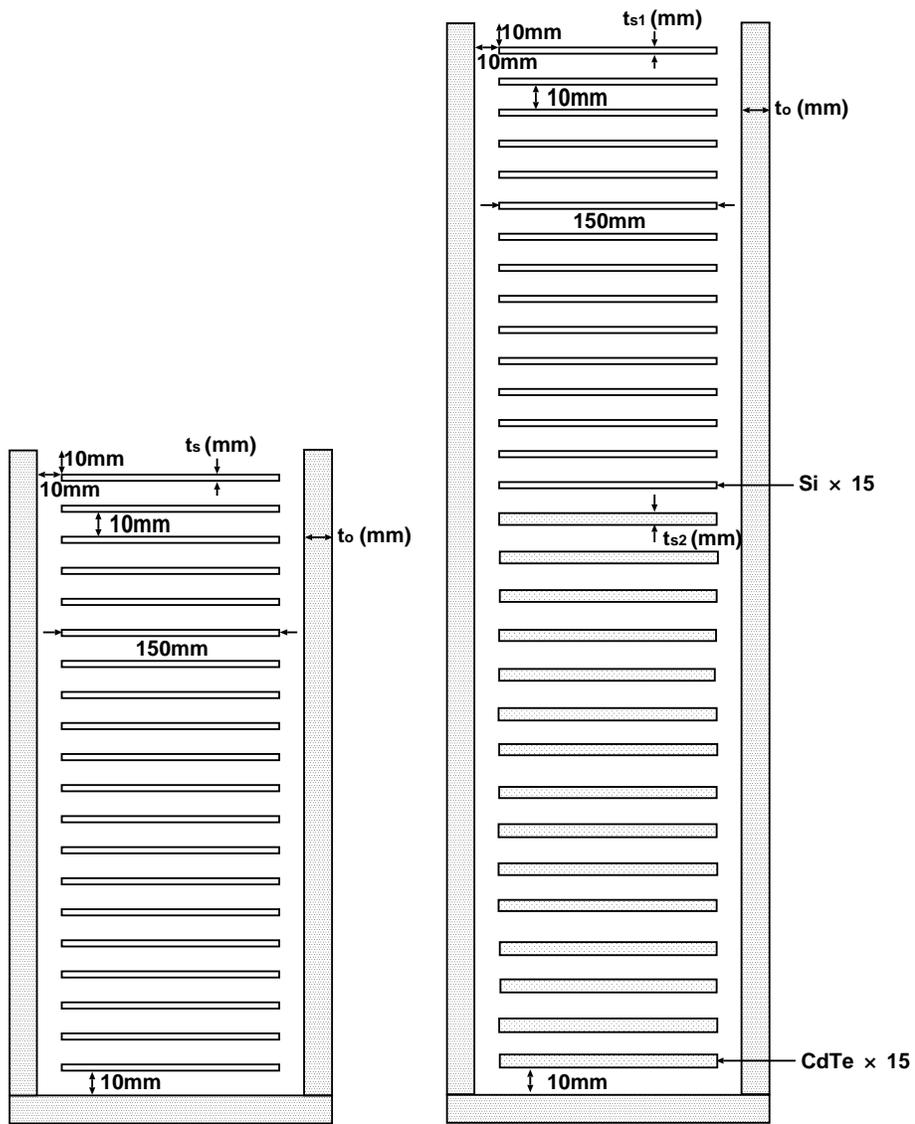


図 4.3: 今回のシミュレーションに用いたジオメトリ。50keV ~ 1MeV のエネルギー領域を目的にしたもの (左) と 50keV ~ 5MeV のエネルギー領域を目的にしたもの (右)

確率は小さくなる。よって、阻止能の大きい物質を外壁にし、ここで光電効果を起こして止まるようにする。今回のシミュレーションで外壁に GSO, BGO を使うが、これは散乱体に使う Si や CdTe に比べてエネルギー分解能や位置精度が悪くなり、外壁に CdTe を使った場合も散乱体とは違い装置が大きくなるのでエネルギー分解能や位置精度が悪くなり、入射線の到来方向の決定精度が悪くなる。また、最終的に散乱体と外壁で止まらなかったイベントは、3 回以上コンプトン散乱をしていれば到来方向はわかるが、2 回散乱以下のものはわからなくなる。コンプトン散乱する回数が増えると多重コンプトン法で到来方向を調べるのが難しくなる。1.02MeV 以上のエネルギーになると電子陽電子対生成が起こりやすいため、エネルギーはわかるが到来方向がわからなくなる。そのため、これら 3 つのイベントはあまり有効ではない。

### 4.3.2 有効イベントの選別

有効なイベントを区別するために、各イベントにランクをつけることにする。4.3.1 節を参考にして下に挙げるように grade をつけた。

- 何も相互作用を起こさなかった場合、または 2 回以内の相互作用が起こり散乱体や外壁を通過した場合、または電子陽電子対生成を起こして散乱体や外壁を通過した場合  $\Rightarrow$  grade 0
- 光電効果 1 回のみを起こして散乱体や外壁で止まった場合、または電子陽電子対生成を起こして散乱体や外壁で止まった場合  $\Rightarrow$  grade 1
- 2 回以上の相互作用を起こし散乱体や外壁で止まった場合、ただし相互作用の回数  $n$  が  $n \geq 5$  の場合  $-(n-4)$ 、外壁で相互作用した回数が  $m$  の場合  $-m \Rightarrow$  grade  $200-m-(n-4)$
- 3 回以上の相互作用を起こし散乱体や外壁を通過した場合、ただし相互作用の回数  $n$  が  $n \geq 5$  の場合  $-(n-4)$ 、外壁で相互作用した回数が  $m$  の場合  $-m \Rightarrow$  grade  $100-m-(n-4)$

各イベントに対する grade をまとめたものを図 4.4 に示す。§4.3.1 で書いたように、コンプトン散乱の回数が多い場合や外壁で相互作用した場合はイベントの有効度がさがるので、 $m$  と  $n$  を用いて区別した。理想的なイベントは grade200 になり、grade198 までを有効なイベントとした。grade100 以下は、到来方向とエネルギーの決定精度が悪くなるためあまり有効なイベントではない。grade1 はエネルギーだけわかるイベントで、grade0 は両方わからず全く知らないイベントである。

## 4.4 反応確率の検証

シミュレーションの中でガンマ線の各相互作用が正しい頻度で起こっているか確認するため、Geant4 で使われている各物質の相互作用の mean free path から反応確率を求め、それをシミュレーション値と比較した。散乱体の反応確率  $I$  は物質の mean free path を  $\mu_s$ 、厚さを  $t_s$  とすると

$$I = 1 - \exp\left(-\frac{t_s}{\mu_s}\right) \quad (4.1)$$

となる。光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の mean free path を  $\mu_p, \mu_c, \mu_{cv}$  とすると、それぞれの反応確率  $I_{phot}, I_{comp}, I_{conv}$  は

$$I_{phot} = \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{cv}}\right)t_s\right)\right) \left(\frac{\frac{1}{\mu_p}}{\frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{cv}}}\right) \quad (4.2)$$

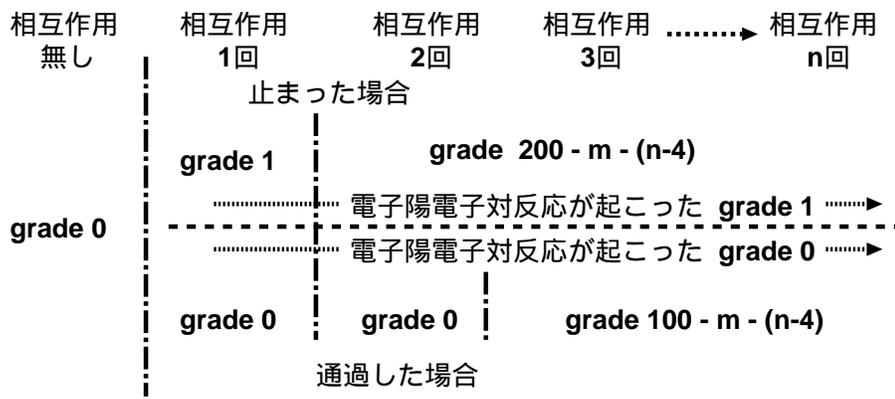


図 4.4: 各イベントに対する grade

表 4.1: 図 4.3 左図で散乱体に Si 1.0mm、外壁に GSO 10mm を設置した場合の各相互作用の反応確率のシミュレーション値と理論値 (%)

		Si	GSO
100keV	光電効果	814 (8.1 %)	4307 (43.4 %)
	コンプトン散乱	4671 (46.2 %)	208 (2.3 %)
200keV	光電効果	105 (1.0 %)	39.4 (40.0 %)
	コンプトン散乱	4283 (42.5 %)	1353 (12.9 %)

$$I_{comp} = \left( 1 - \exp \left( - \left( \frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{cv}} \right) t_s \right) \right) \left( \frac{\frac{1}{\mu_c}}{\frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{cv}}} \right) \quad (4.3)$$

$$I_{cv} = \left( 1 - \exp \left( - \left( \frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{cv}} \right) t_s \right) \right) \left( \frac{\frac{1}{\mu_{cv}}}{\frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{cv}}} \right) \quad (4.4)$$

となる。ここで  $\mu_s = \frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{cv}}$  とする。図 4.3 の左図のジオメトリを考えた場合、下壁で光電効果を起こす確率  $I_{o,phot}$  は、20 体の散乱体を通過しなければならないので、散乱体と下壁の mean free path を  $\mu_s, \mu_o$  とすると

$$I_{o,phot} = \exp \left( - \frac{20t_s}{\mu_s} \right) \left( 1 - \exp \left( - \frac{t_o}{\mu_o} \right) \right) \left( \frac{\frac{1}{\mu_{o,phot}}}{\frac{1}{\mu_o}} \right) \quad (4.5)$$

となる。これらの理論値と実際にシミュレーションした値を比べる。図 4.3 のジオメトリ左図は散乱体を Si 1.0mm、外壁を GSO 10mm にし、ジオメトリ右図は散乱体を Si 0.4mm、CdTe 2.0mm、外壁を GSO 20mm、BGO 20mm にし、いろいろなエネルギーのガンマ線を 10,000 発ずつ入射させてシミュレーション値と理論値を比べたものを表 4.1, 4.2, 4.3 に示す。各欄の左の数字がシミュレーションで各イベントの最初に起こった相互作用の数、右の括弧が上式を用いて求めた理論値である。表 4.1, 4.2, 4.3 を見ると、シミュレーション値と理論値はほぼ一致しており、各相互作用の頻度に問題ないといえる。

表 4.2: 図 4.3 右図で散乱体に Si 0.4mm, CdTe 2.0mm、外壁に GSO 20mm を設置した場合の各相互作用の反応確率のシミュレーション値と理論値 (%)

		Si	CdTe	GSO
100keV	光電効果	297 (3.1 %)	7322 (73.5 %)	4 (0.0 %)
	コンプトン散乱	1837 (17.8 %)	540 (5.5 %)	0 (0.0 %)
1MeV	光電効果	0 (0.0 %)	355 (3.4 %)	184 (1.8 %)
	コンプトン散乱	836 (8.6 %)	5345 (54.3 %)	1757 (17.1 %)
5MeV	光電効果	0 (0.0 %)	35 (0.3 %)	0 (0.2 %)
	コンプトン散乱	362 (3.4 %)	2794 (26.1 %)	1129 (11.9 %)
	電子陽電子対生成	82 (0.7 %)	1615 (17.6 %)	837 (7.9 %)

表 4.3: 図 4.3 右図で散乱体に Si 0.4mm, CdTe 2.0mm、外壁に BGO 20mm を設置した場合の各相互作用の反応確率のシミュレーション値と理論値 (%)

		Si	CdTe	BGO
100keV	光電効果	324 (3.1 %)	7418 (73.5 %)	4 (0.0 %)
	コンプトン散乱	1728 (17.8 %)	525 (5.5 %)	0 (0.0 %)
1MeV	光電効果	1 (0.0 %)	343 (3.4 %)	381 (4.0 %)
	コンプトン散乱	855 (8.6 %)	5423 (54.3 %)	1738 (16.7 %)
5MeV	光電効果	0 (0.0 %)	51 (0.3 %)	70 (0.5 %)
	コンプトン散乱	298 (3.4 %)	2704 (26.1 %)	998 (11.9 %)
	電子陽電子対生成	86 (0.7 %)	1813 (17.6 %)	828 (9.7 %)

表 4.4: 図 4.3 の左図のジオメトリの散乱体と外壁の物質と厚さ、入射エネルギーは 50keV ~ 1MeV

散乱体 厚さ $t_s$	外壁 厚さ $t_o$
Si 1.0mm	GSO 10mm
"	GSO 20mm
Si 0.4mm	GSO 10mm
"	GSO 20mm
Si 0.4mm	BGO 10mm
"	BGO 20mm
CdTe 0.4mm	GSO 10mm
"	GSO 20mm
CdTe 1.0mm	GSO 10mm
Si 1.0mm	CdTe 2.0mm

表 4.5: 図 4.3 の右図のジオメトリの散乱体と外壁の物質と厚さ、入射エネルギーは 50keV ~ 5MeV

散乱体 厚さ $t_{s1}, t_{s2}$	外壁厚さ $t_o$
Si 0.4mm CdTe2.0mm	CdTe 2.0mm
Si 0.4mm CdTe2.0mm	GSO 20mm
Si 0.4mm CdTe2.0mm	GSO 40mm
Si 0.4mm CdTe2.0mm	BGO 20mm
Si 0.4mm CdTe2.0mm	GSO 40mm

## 4.5 検出効率のシミュレーション

図 4.3 のジオメトリを用い、散乱体と外壁の物質と厚さを表 4.4 あるいは表 4.5 に示したとおりに設置し、各エネルギーにつき 1000 発ずつガンマ線を入射してシミュレーションを行った。

図 4.3 の左図のジオメトリを表 4.4 のように設定し、入射エネルギーは 50keV ~ 1MeV の範囲でシミュレーションした。結果を図 4.5, 図 4.6 に示す。図 4.5, 図 4.6 で grade 197 以下と grade 100 以下はイベント数が少なかったのが載せてない。これらを見ると以下のことがわかる。

- 外壁の GSO は 10mm よりも 20mm のほうが、grade 199, 198 の割合が高エネルギー側で大きい。
- 散乱体で Si 1.0mm と Si 0.4mm を比べると、Si 0.4mm は grade 200 ~ 198 の割合が小さく grade 0, 1 の割合が大きいことより、Si で相互作用するイベントが少ない。
- 散乱体で CdTe 0.4mm と CdTe 1.0mm を比べると、CdTe 1.0mm は低エネルギー側では光電吸収がよく起こっているが、高エネルギー側では散乱をよく止めている。
- 散乱体の物質で Si と CdTe を比べると、CdTe は grade 199, 198 の割合が小さく grade 200, 1 の割合が大きいので、入射ガンマ線が CdTe で止まる割合が大きいこと、特に低エネルギー側でコンプトン散乱を起こさずに光電吸収されるイベントが多い。

- 外壁で GSO, BGO と CdTe を比べると、CdTe は高エネルギー側で grade 199, 198, 1 の割合が小さく入射ガンマ線は止まらず通過してしまう。
- 外壁で GSO と BGO を比べると、BGO のほうが阻止能が大きいはずなのに grade 0 の割合が GSO より大きい。これは狭い領域で相互作用が連続で起こると検出器はそれを判別することができない。今回シミュレーションに用いたプログラムは外壁で 20mm 四方の領域に連続で相互作用が起こると、最初に起こった相互作用だけを認識するようにしている。BGO の場合は阻止能が大きいので狭い領域でコンプトン散乱を起こした後、光電効果を起して止まるイベントの割合が大きく、プログラムではコンプトン散乱 1 回と認識される。§4.3.2 の条件以外のイベントは全て grade 0 になるようにしているのので、このイベントは grade 0 となり割合が大きくなったと考えられる。

grade200 ~ 198 を有効イベントとし、各シミュレーションにおけるその割合を図 4.7 に示す。この結果より、300keV 以上のエネルギー帯では CdTe 1.0mm GSO 10mm が有効イベント数の割合が大きいが、Si 1.0mm GSO 20mm がどのエネルギーでも 20 ~ 40 % あり感度は十分良いことがわかった。散乱体を使用した Si と CdTe を比べると 200keV を境に、Si の場合は感度が低エネルギー側で良く高エネルギー側で悪いのに対して、CdTe は感度が低エネルギー側ではかなり悪く、高エネルギー側は良いと阻止能の違いがでた。

先程の結果のとおり、散乱体が Si か CdTe の一種類の場合は感度の良いエネルギー帯に偏りがでてしまう。そこで今回のシミュレーションは Si と CdTe の両方の特性を活かした図 4.3 の右図のジオメトリを表 4.5 のように設定し、入射エネルギーは 50keV ~ 5MeV の範囲でシミュレートした。その結果を図 4.8 に示す。この結果から以下のことがわかる。

- 散乱体 Si 0.4mm, CdTe 2.0mm で外壁を GSO 20mm から 40mm に厚くすると grade 200 ~ 198, 1 の割合が大きくなり、grade 0,  $\leq 100$  の割合が小さくなることより、外壁でガンマ線をよく止めている。
- 散乱体 Si 0.4mm, CdTe 2.0mm で外壁を BGO 20mm から 40mm に厚くすると grade < 198, 1 の割合が大きくなり、grade 0,  $\leq 100$  の割合が小さくなることより、外壁でガンマ線をよく止めている。
- 外壁を GSO から CdTe にした場合、grade0, grade $\leq 100$  の割合が大きく、その他の grade の割合が小さく止まるイベントが少ない。
- 1MeV 付近から減少していた grade 1 の割合が増加してしていくことより、電子陽電子対生成を起こして止まるイベントが増えていく。
- 2MeV 付近から grade < 198 の割合が増加していくことより、5 回以上コンプトン散乱したり散乱体ではなく外壁でコンプトン散乱する回数が多い。

grade200 ~ 198 を有効イベントとし、各シミュレーションにおけるその割合を図 4.9 に示す。エネルギーが ~ 0.2MeV まではだいたい同じだが、それを過ぎると外壁によって違ってくる。外壁が CdTe の場合、有効イベントの割合が GSO, BGO に比べて小さく 2MeV 以上のエネルギーになるとほとんどなくなる。外壁が GSO の場合、~ 0.4MeV まではだいたい同じだがそれ以上のエネルギーになると幅が厚い 40mm のほうが有効イベントの割合が大きい。逆に外壁が BGO の場合、0.4MeV まではだいたい同じだがそれ以上のエネルギーになると幅が薄い 20mm のほうが有効イベントの割合が大きい。これは BGO は阻止能が大きいので、厚くなると底にある BGO でコン

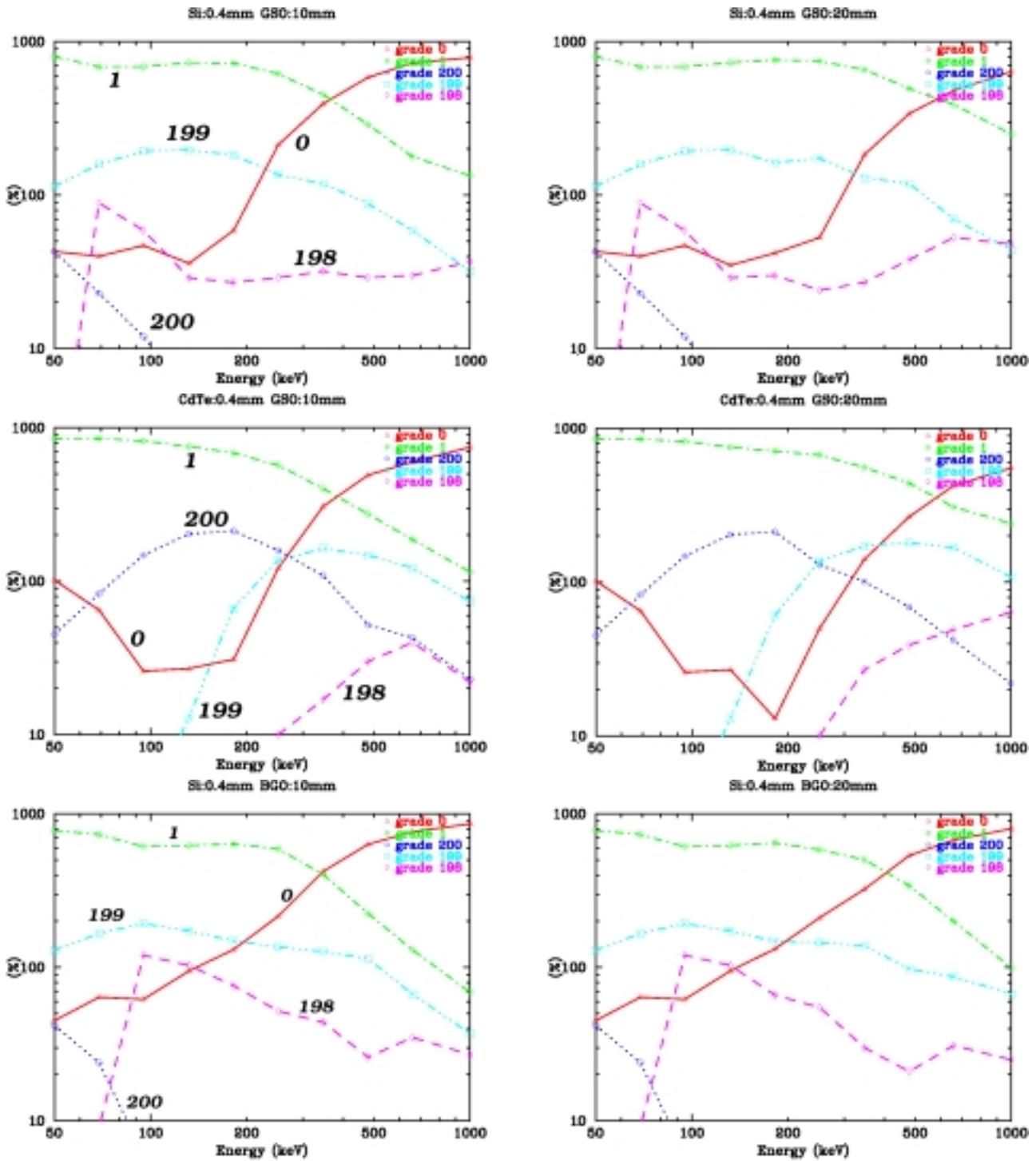


図 4.5: 図 4.3 の左図のジオメトリを表 4.4 のように設定してシミュレートした結果。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸は各イベントの割合 (%)

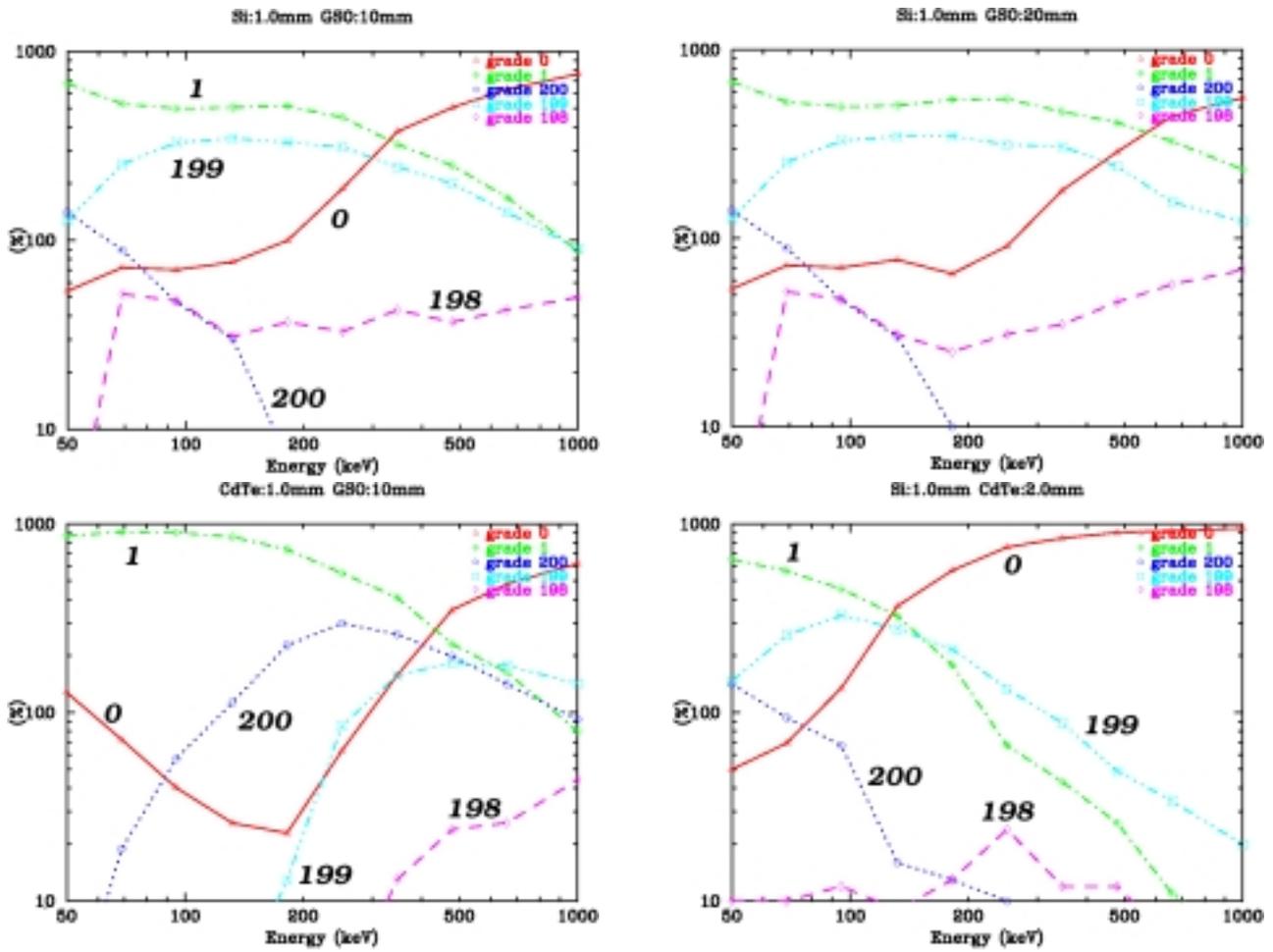


図 4.6: 図 4.3 の左図のジオメトリを表 4.4 のように設定してシミュレートした結果。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸は各イベントの割合 (%)

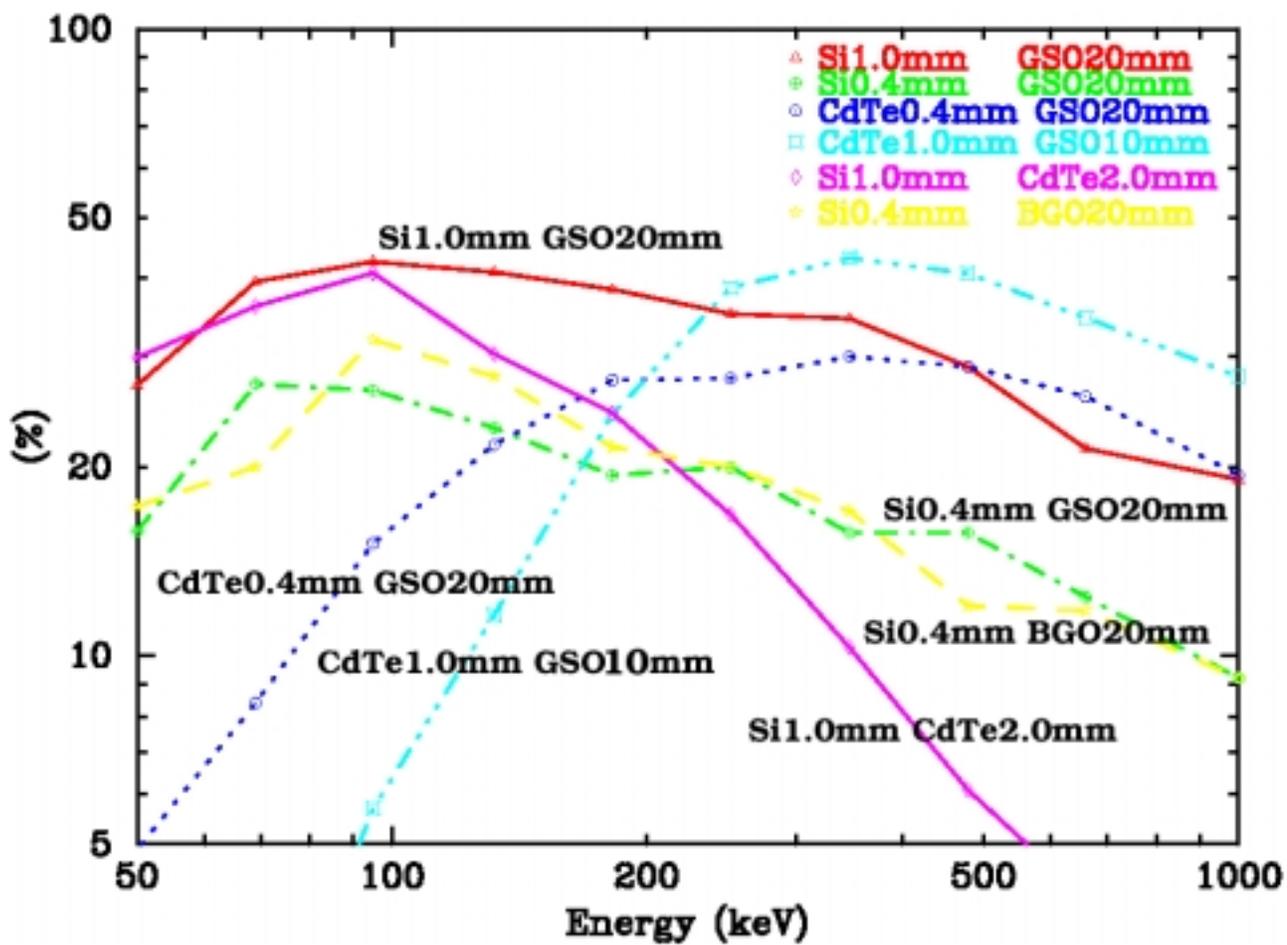


図 4.7: 図 4.5, 図 4.6 の各測定における有効イベント (grade200 ~ 198) の割合

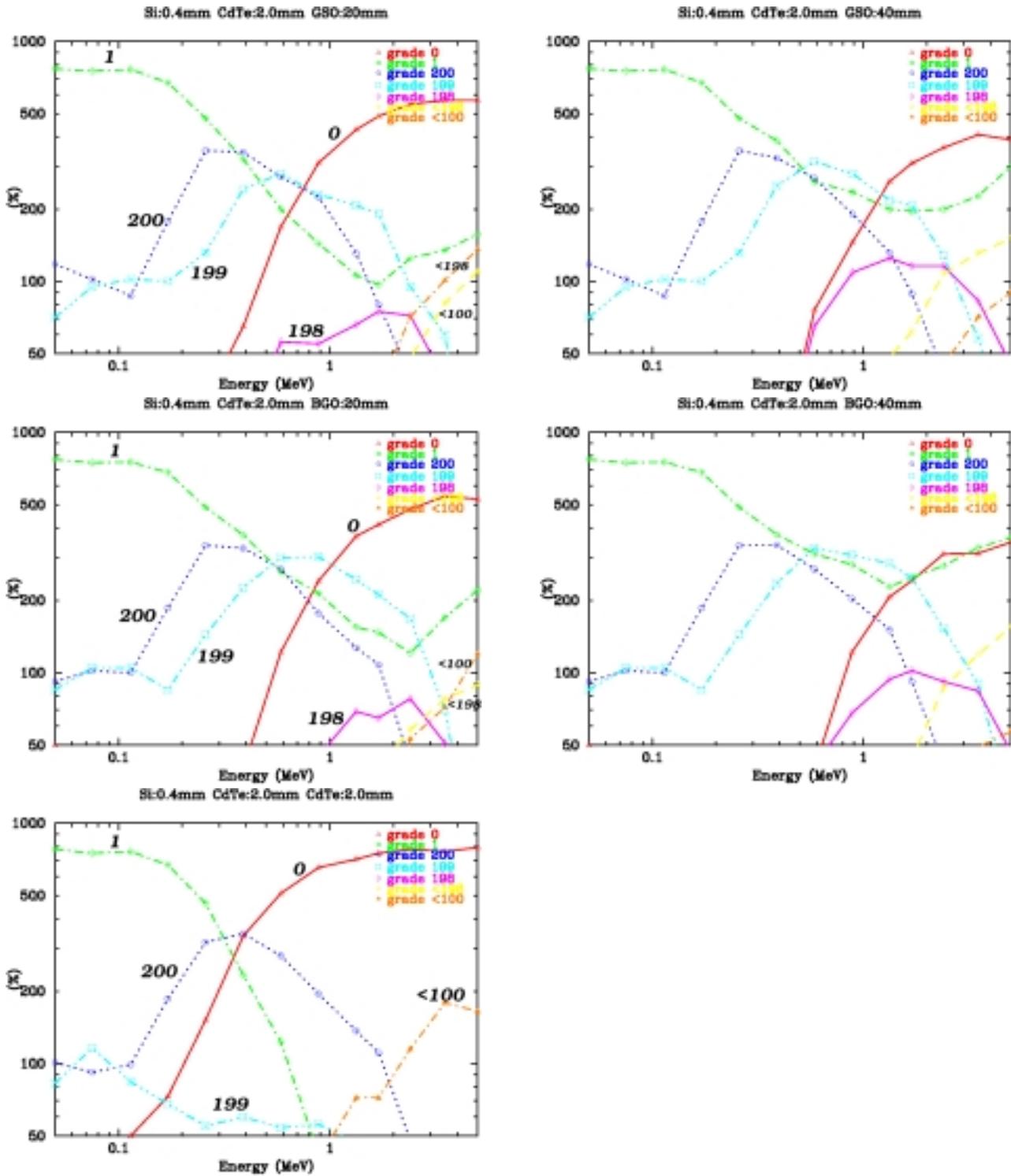


図 4.8: 図 4.3 の右図のジオメトリを表 4.5 のように設定してシミュレートした結果。横軸はエネルギー (MeV)、縦軸は各イベントの割合 (%)

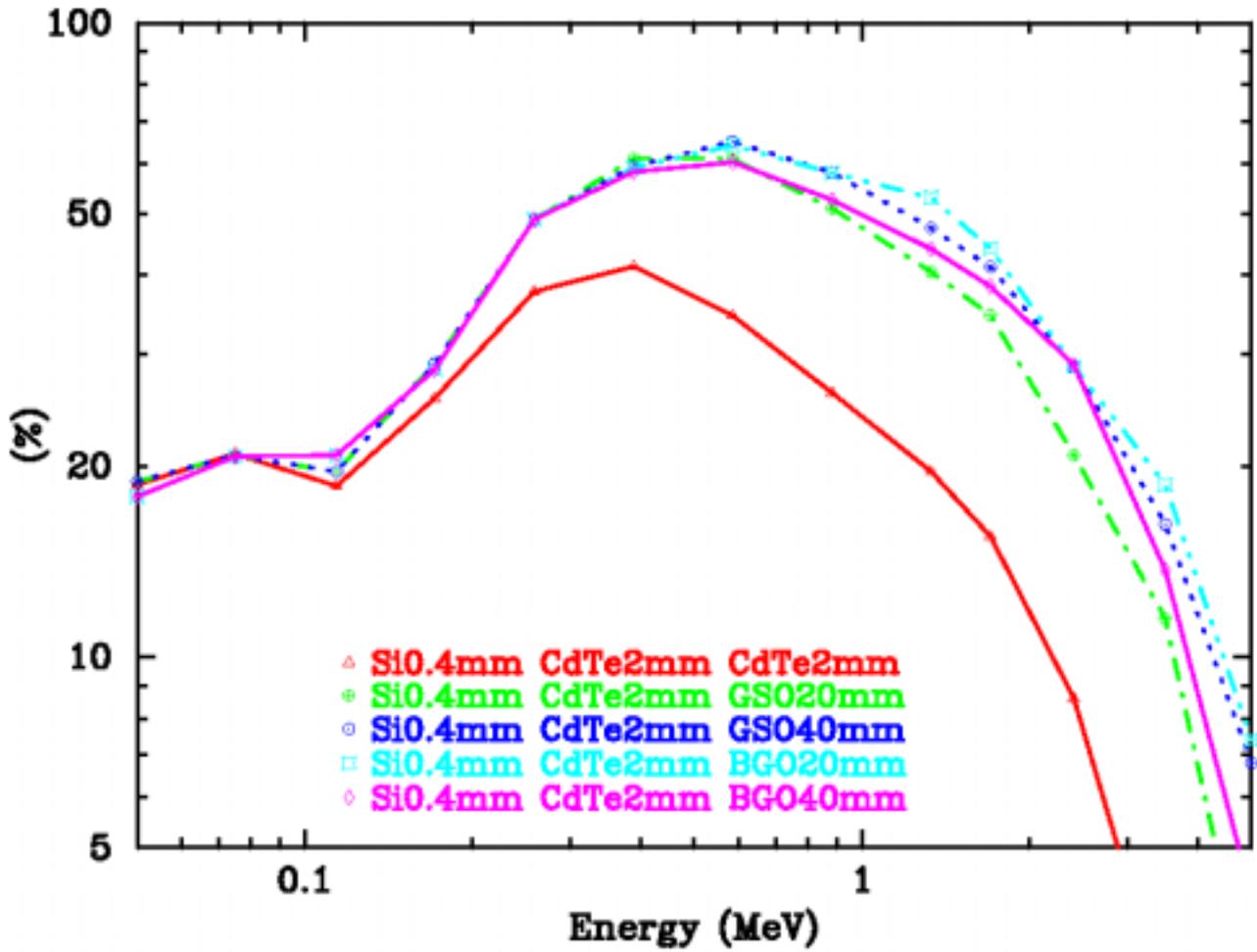


図 4.9: 図 4.8 の各測定における有効イベント (grade200~198) の割合。エネルギー 3MeV で上から外壁が BGO 20mm, GSO 40mm, BGO 40mm, GSO 20mm, CdTe 2.0mm

プトン散乱せずに光電効果を起こして止まってしまうためと考えられる。散乱体 Si 0.4mm, CdTe 2.0mm 外壁 BGO 20mm が一番有効イベントの割合が大きくなった。

## 4.6 考察

散乱体は Si または CdTe を単一に 20 枚並べた場合、Si は高エネルギー側で散乱せず、CdTe は低エネルギー側で光電効果が支配的になるといったように、入射エネルギーに対しての有効イベントの割合に偏りがでてしまう。Si を上部に 15 枚、CdTe を下部に 15 枚並べた場合だと、低エネルギー側は Si で高エネルギー側は CdTe で散乱するのでどのエネルギーでも対応できる。有効イベントの割合は Si, CdTe, GSO は共に厚いほうが良いのに対して、BGO は逆に阻止能が大きすぎるために、コンプトン散乱せずに光電効果を起こしてしまうため有効イベントの割合は小さくなると思われる。今回の測定では散乱体に Si 0.4mm, CdTe 2.0mm、外壁に BGO 20mm の組合せが一番有効イベントの割合が良かった。Si を 0.4mm から 1.0mm にすると低エネルギー側でもっと有効イベントの割合が良くなると思われるが、今現在 Si ストリップの厚さは 0.4mm までしか開発されていない。同じく、CdTe 2.0mm も製造が難しく現在開発中であり今後に期待したい。GSO は厚くしていくと光量が落ちるという問題があり、製作にコストもかかる。これに対して BGO は厚くしても GSO ほど光量が落ちずコストが低い。ガンマ線コンプトンカメラが MeV 領域のエネルギーに対しての有効性を探るためにシミュレートしてきたが、3MeV までのエネルギー領域で散乱体に Si と CdTe を、外壁に GSO, BGO を使用した場合は有効イベントが 20 % 以上、最大 60 % あり、コンプトンカメラは MeV 領域のエネルギーに十分な感度があり従来の検出器が ~ 数 % だったのに比べて優れたガンマ線検出器になる可能性があると言える。

## 第5章 まとめ

本研究の目的は、高阻止能結晶シンチレータ GSO, BGO を用い、これらの青いシンチレーション光に対して量子効率の良いフォトダイオードを組み合わせることにより、MeV 領域で性能の良いガンマ線検出器になるかどうかを探ることにある。MeV 領域でのガンマ線検出は現在結晶シンチレータと光電子増倍管の組合せが主流であるが、フォトダイオードは光電子増倍管に比べて量子効率が大変良くエネルギー分解能の向上が期待された。

第3章では、高阻止能結晶シンチレータ GSO, BGO とフォトダイオードを組み合わせ測定した。測定の結果、 $^{88}\text{Y}$  の 1836keV のラインでフォトダイオードと光電子増倍管のエネルギー分解能が同程度になった。理論的には MeV 領域でエネルギー分解能が光電子増倍管を上回る可能性を見出した。また、フォトダイオードで冷却して測定した場合に BGO の測定される光量が GSO を上回るという新たな発見があった。

第4章では、シンチレータとフォトダイオードを用いた検出器の例として、MeV 領域の次世代ガンマ線検出器として期待される多重コンプトンカメラの有効性を Geant4 を用いてシミュレートした。その結果、散乱体は Si を上部に 15 枚、CdTe を下部に 15 枚を設置したジオメトリがどのエネルギー帯にも感度が良く、外壁には GSO は厚い 40mm が、それに対して BGO は 20mm のほうが感度が良くなった。この組合せで 3MeV までのエネルギー領域で 20 % 以上の有効イベントがあり、ガンマ線検出器としてコンプトンカメラは MeV 領域で十分な感度があり、従来の検出器が ~ 数% だったのに対して優れたガンマ線検出器になる可能性があることがわかった。

これらの結果から、高阻止能結晶シンチレータ GSO, BGO とフォトダイオードの組合せたガンマ線検出器は、MeV 領域のエネルギーに対して優れた検出器になる可能性を持っていると言える。また、ガンマ線コンプトンカメラは MeV 領域のエネルギーに十分な感度があり、外壁には分解能が良く感度も良い BGO とフォトダイオードの組合せに期待が持てる。

## 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教授、深沢泰司助教授に深く感謝いたします。また、本研究を進めるに際して御協力いただいた宇野進吾氏、大戸彰三氏、川添哲志氏に深く感謝します。さらに、実験その他の面におきまして御協力と激励をいただきました広島大学高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室の皆様感謝いたします。

# 参考文献

- [1] 大西呂尚 「修士論文 結晶シンチレータとフォトダイオードを用いた宇宙 線検出器の基礎実験」 (東京大学 2000)
- [2] T.Kamae 「A New Method to Measure Energy, Direction, and Polarization of Gamma-rays」 (1987)
- [3] 宇野進吾 「宇宙ガンマ線検出器気球実験用 Active Target の開発」 (広島大学 2000)
- [4] 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 2000)
- [5] 石橋浩之 など 「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)
- [6] GLENN F. KNOLL 木村逸郎 阪井英次 訳 「放射線計測ハンドブック 第2版」 日刊工業新聞社
- [7] 大塚徳勝 「Q & A 放射線物理」 共立出版株式会社
- [8] W.R.Leo 「Techniques for Nucleus and Particle Physics Experiments」 SpringerVerlag
- [9] 浜松ホトニクス株式会社 「型名 SPL PD typeA, B 仕様書」
- [10] クリアパルス株式会社 「580H 型 電荷有感型前置増幅器 取扱説明書」