

大型シンチレータ検出器の
光量増加と実用性向上を目指した
反射材の改良と性能評価

Improvement and evaluation of reflectors of large scintillators
for better performance and handling

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
馬場・中澤研究室
清野愛海

平成30年3月18日

概要

自然界ではX線やガンマ線を放射する様々な高エネルギー現象が起きている。宇宙空間ではブラックホール周辺や超新星爆発の残骸、銀河団などがX線・ガンマ線で明るく輝いており、地球上でも最近になって雷雲や雷放電から強いガンマ線が放射されることがわかってきた。宇宙の高エネルギー現象を探るX線衛星「すざく」や「ひとみ」の硬X線検出器・軟ガンマ線検出器では、大型の結晶シンチレータで主検出器を囲んで反同時計数をとることで、宇宙線などに由来するバックグラウンドを下げるのが極めて重要となっている。またFermi衛星では、GeVガンマ線のカロリメータとして大型のCsI(Tl)シンチレータも多数搭載されており、ガンマ線バーストの現象を探るために、MeVガンマ線の検出効率に優れるシンチレータも別途搭載されている。地上における雷雲ガンマ線観測でも、微小な信号を検出するため大型のシンチレータが必要となる。

これらのシンチレータからの信号を読み出すには光センサーを用いるが、蛍光光子を光センサーに集めるため、多くの場合シンチレータを反射材で囲んでいる。この反射材として、ゴアテックスシートやESR (Enhanced Specular Reflector) フィルムが広く用いられてきた。ただし、ゴアテックスは柔らかく厚みのある素材で一定の空間を必要とする上に使用の際に変形や破損が起きることがあり、ESRは短波長側で急激に反射率が低下するという問題点がある。本論文では、次世代の硬X線観測衛星FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) への適用や、雷雲ガンマ線検出器の大量生産に向け、検出光量の増加と制作負担の軽減を目指し、新たな反射材の性能評価を行った。

新たな反射材として、UV多層膜コーティングを施したESR (UV強化ESR) と片面が粘着性を持つESR (粘着ESR) を使用した。前者は光量改善、後者は制作の簡素化を目指すものである。予備測定として、ゴアテックス2重、ESR2重、ESR2重+ゴアテックスの組み合わせで検出光量や位置依存性の測定を行なった。シンチレータは $100 \times 70 \times 20\text{mm}^3$ のCsI(Tl)、 $180 \times 72 \times 20\text{mm}^3$ と $142 \times 120 \times 30\text{mm}^3$ のBGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)、 $22 \times 22 \times 13\text{mm}^3$ のPWO (PbWO_4) を用いた。

粘着ESRの測定から、検出光量はゴアテックス2重を用いた場合の～10%減で収まり、冬季の日本海岸などのように高湿度の環境で、わずかながら潮解性のあるCsI(Tl)結晶を用いる際の対策として製造にメリットがあることが確認できた。UV強化ESRの測定では、ゴアテックスを用いらずにESR2重+ゴアテックスと同様の最高性能が得られることが確認され、結晶周囲に空間を確保できないなどゴアテックスの性質が問題になる場合に代用できることがわかった。

目次

第1章	X線・ガンマ線の観測	1
1.1	宇宙を観測するX線衛星	1
1.2	雷雲ガンマ線検出器	2
1.3	本論文の位置づけ	3
第2章	シンチレータと反射材	5
2.1	シンチレータ	5
2.1.1	シンチレータの特性	5
2.1.2	無機シンチレータ	5
2.1.3	代表的な無機シンチレータの例	7
2.2	光電子増倍管	9
2.3	反射材	11
2.4	シンチレータにおける光収集効率の先行研究	15
2.5	実験計画	16
第3章	従来 of 標準的な反射材の性能評価	18
3.1	概要と目的	18
3.2	実験セットアップ	18
3.2.1	シンチレータ	18
3.2.2	PMT	19
3.2.3	機構セットアップ	20
3.2.4	電氣的セットアップ	21
3.2.5	反射材	22
3.2.6	ガンマ線の照射	24
3.3	測定結果	24
3.3.1	得られたガンマ線スペクトル	24
3.3.2	検出光量	26
3.3.3	位置依存性	28
3.4	まとめ	30
第4章	実用性向上を目指した測定	31
4.1	概要と目的	31

4.2	実験セットアップ	31
4.2.1	反射材	31
4.3	粘着 ESR で発生した問題	33
4.4	測定結果	34
4.4.1	検出光量	34
4.4.2	位置依存性	36
4.5	まとめと考察	37
第 5 章	光量増加を目指した測定	39
5.1	概要と目的	39
5.2	実験セットアップ	39
5.2.1	シンチレータ	39
5.2.2	セットアップ	41
5.2.3	反射材	42
5.2.4	ガンマ線の照射	43
5.3	測定結果	44
5.3.1	PWO のガンマ線スペクトル	44
5.3.2	検出光量	45
5.3.3	位置依存性	47
5.4	まとめと考察	48
第 6 章	反射材についての考察	49
6.1	測定結果のまとめ	49
6.2	反射材の性能	51
6.2.1	ESR とゴアテックス	51
6.2.2	粘着 ESR と UV 強化 ESR	54
第 7 章	まとめ	56
付 録 A	Preamplifier の妥当性の確認	58
付 録 B	CsI(Tl) シンチレータの研磨前の測定	59
付 録 C	NaI(Tl) シンチレータによる PMT の時間安定性評価	61
付 録 D	環境放射線量を使った安定性の確認	63
付 録 E	シンチレータのゲインとエネルギー分解能	64
付 録 F	CsI(Tl) シンチレータを用いた雷雲ガンマ線検出器	66

目次

1.1	FORCE衛星の硬X線検出器設計図 [7]	2
1.2	2016年に設置された雷雲ガンマ線検出器 [10]	3
2.1	結晶シンチレータ内のエネルギー準位	6
2.2	無機シンチレータの温度特性と蛍光波長特性	8
2.3	光電子増倍管の断面図 [13]	9
2.4	PMTの放射感度と量子効率 [15]	10
2.5	E11807の回路図 [15]	11
2.6	ゴアテックスの反射率	12
2.7	ゴアテックスとESRの写真	13
2.8	ESRとUV強化ESRの反射率 [20]	13
2.9	ゴアテックスとESRの写真	14
2.10	結晶内で発生した光子が全反射を繰り返し無限ループする様子	16
3.1	CsI(Tl)とBGOシンチレータの写真	19
3.2	実験に用いたPMT R11265U-200の写真	19
3.3	CsI(Tl)シンチレータを用いた測定の設定アップの写真	20
3.4	読み出し系のブロックダイアグラム	21
3.5	オシロスコープで得られた波形の例	22
3.6	用いた反射材の図面	23
3.7	CsI(Tl)の場合のガンマ線線源の照射位置	24
3.8	反射材としてゴアテックス2重を用いたCsI(Tl)に ^{137}Cs を照射して得られたスペクトルの一例	25
3.9	^{137}Cs を照射したBGOシンチレータの662 keVピーク値の時間変化	26
3.10	シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの662 keVと1.46 MeVピークの較正曲線	27
3.11	シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの662 keVと1.46 MeVピークのADC Channelとエネルギー分解能の関係	27
3.12	シンチレータに線源 ^{137}Cs の位置を変えて照射した場合の照射位置と662 keVピークのADC Channelの関係	29
3.13	ゴアテックス2重を基準とした場合の反射材の種類による光量増減率	30

4.1	粘着 ESR の図面	32
4.2	おもて粘着 ESR を貼った BGO の写真	32
4.3	粘着 ESR を剥がした後の CsI(Tl) の写真	33
4.4	シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線	34
4.5	シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの ADC Channel とエネルギー分解能の関係	35
4.6	CsI(Tl) シンチレータにおけるゴアテックス 2 重を基準とした場合 の反射材の種類による光量増減率	38
4.7	BGO シンチレータにおけるゴアテックス 2 重を基準とした場合の 反射材の種類による光量増減率	38
5.1	PWO の蛍光波長のグラフ	40
5.2	A-type BGO と PWO の写真	40
5.3	A-type BGO 用に作成したジグ	41
5.4	用いた反射材の図面	42
5.5	CsI(Tl) の場合のガンマ線線源の照射位置	43
5.6	PWO シンチレータのスペクトル	44
5.7	PWO のエネルギー較正のグラフ	45
5.8	CsI(Tl) に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピーク の較正曲線と、ピーク Channel とエネルギー分解能との関係	45
5.9	ゴアテックス 2 重を基準とした場合の反射材の種類による光量増減率	48
6.1	ESR の透過率と反射率のグラフ	51
6.2	ESR で反射される蛍光の概念図	53
6.3	粘着 ESR をシンチレータに貼った写真	55
A.1	用いた Preamplifier の回路図 [28]	58
C.1	NaI(Tl) に ^{137}Cs を照射したときに得られたスペクトルの例	61
C.2	^{137}Cs を照射した NaI(Tl) シンチレータの検出光量の時間変化	62
E.1	BGO #1 に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピーク の較正曲線と、ピーク Channel とエネルギー分解能との関係	64
E.2	BGO #2 に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピーク の較正曲線と、ピーク Channel とエネルギー分解能との関係	65
E.3	A-type BGO に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線と、ピーク Channel とエネルギー分解能との関係	65
F.1	用いた CsI(Tl) シンチレータの写真	66

表 目 次

2.1	代表的な無機シンチレータの特性 [12]	7
2.2	R11265U-200 の特性 [14]	10
2.3	反射材の特性	11
2.4	反射材の利用	12
2.5	新たに用いた反射材の一覧	15
3.1	用いた結晶シンチレータの基本情報	18
3.2	EJ-560 シリコンラバーの性能 [26]	21
3.3	結晶に用いた反射材の組み合わせ一覧	22
3.4	反射材をまいたシンチレータの検出光量	28
3.5	シンチレータにおける ^{137}Cs 線源の位置に依る最大光量差	29
4.1	結晶に用いた反射材の組み合わせ一覧	31
4.2	反射材をまいたシンチレータのそれぞれの検出光量	35
4.3	シンチレータにおける ^{137}Cs 線源の位置に依る最大光量差	36
5.1	新たに加えたシンチレータの基本情報	39
5.2	用いたシンチレータのセットアップ	41
5.3	結晶に用いた反射材の組み合わせ一覧	42
5.4	反射材をまいたシンチレータのそれぞれの検出光量	46
5.5	シンチレータにおける ^{137}Cs 線源の位置に依る最大光量差	47
6.1	ゴアテックス 2 重を基準とした場合のシンチレータの反射材の違い による検出光量の増減率	50
6.2	反射材をまいた BGO #2 の検出光量	52
B.1	反射材をまいた研磨前 CsI(Tl) の検出光量	59
B.2	研磨前 CsI(Tl) における ^{137}Cs 線源の位置に依る最大光量差	59
D.1	位置依存性測定中の 1.46 MeV ピークのカウントレート	63
F.1	CsI(Tl) の 662 keV ピーク Channel と位置依存性に依る最大光量差	67

第1章 X線・ガンマ線の観測

我々の研究室では、宇宙や地球上で起こる高エネルギー現象の探索のために検出器を作っている。以下では宇宙と地上でのそれぞれの観測について述べる。

1.1 宇宙を観測する X 線衛星

宇宙では、可視光の 1000 倍以上のエネルギーをもつ X 線やガンマ線を放射する様々な高エネルギー現象が起きている。宇宙からの X 線やガンマ線は地球の大気によって吸収されてしまうため、地上からの観測は困難である。そのため、宇宙 X 線・ガンマ線は人工衛星に搭載された検出器を用いて観測される。

これまで日本では、1993 年に打ち上げられた X 線衛星「あすか」[1] などによって、10 keV 以下の軟 X 線帯域における宇宙現象を観測してきた。さらに広いエネルギー帯域で高い感度の観測を行うために、2005 年打ち上げの「すざく」衛星 [2] からは軟 X 線望遠鏡に加え硬 X 線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) [3] を搭載した。HXD では、60–600 keV を担当する GSO ($\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$) シンチレータの上に、2 mm 厚のシリコン PIN ダイオードを置いて 15–60 keV を担当させ、シリコン素子を「透過型」として用いる日本独自のハイブリッド構成が確立された。「透過型」の検出部を導入することで、広い範囲のエネルギーをコンパクトな検出器素子でカバーすることが可能となった。加えて、視野方向以外を徹底して囲む、井戸型のアクティブシールドと組み合わせることで低バックグラウンドの検出器がコンパクトに実現された。アクティブシールドには大型のシンチレータが用いられており、主検出器を囲んで反同時計数をとることで、宇宙線などに由来するバックグラウンドを下げる重要な役割を果たしている。その後 2016 年に打ち上げられた「ひとみ」衛星 [4] では、アクティブシールドの手法を継承しつつ、多層のシリコン両面ストリップ検出器 (DSSD) とテルル化カドミウム (CdTe) の両面ストリップ検出器 (CdTe-DSD) を組み合わせた硬 X 線撮像分光器 (HXI; Hard X-ray Imager) [5] が実現され、5–80 keV の広帯域を高感度で観測することが可能になった。また 60–600 keV を担当する軟ガンマ線検出器 (SGD; Soft Gamma-ray Detector) も搭載された。

現在、次世代の X 線衛星である *FORCE* (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) の研究開発が行われている。この広帯域 X 線撮像検出器 (WHXI; Wideband Hybrid X-ray Imager) は、「すざく」「ひとみ」衛星のハイブ

リッド型検出器をさらに発展させたものである。ミラーを改良することで角分解能を $15''$ と HXI の ~ 8 倍に改善し、さらに DSSD の代わりに SOI 技術 [6] を用いた CMOS ピクセル検出器 (SOIPIX) を用いることで 1–80 keV の広いエネルギー帯域でアクティブシールドを組み合わせた低バックグラウンド観測を実現する。これにより、「ひとみ」衛星の HXI よりも 1 桁高い感度を実現する。アクティブシールドには「すぎく」「ひとみ」衛星と同様に BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) シンチレータが使われる予定である。WHXI の概念図を図 1.1 に示す。FORCE 衛星は、塵やガスに埋もれている活動銀河核 (AGN) や、中間質量ブラックホール、孤立系として存在する恒星質量ブラックホールのような、現在観測が難しいブラックホールを発見することを主な目的としている。これによって、AGN と母銀河の共進化の解明などを目指しており、宇宙のさらなる謎に迫ることができるだろう。

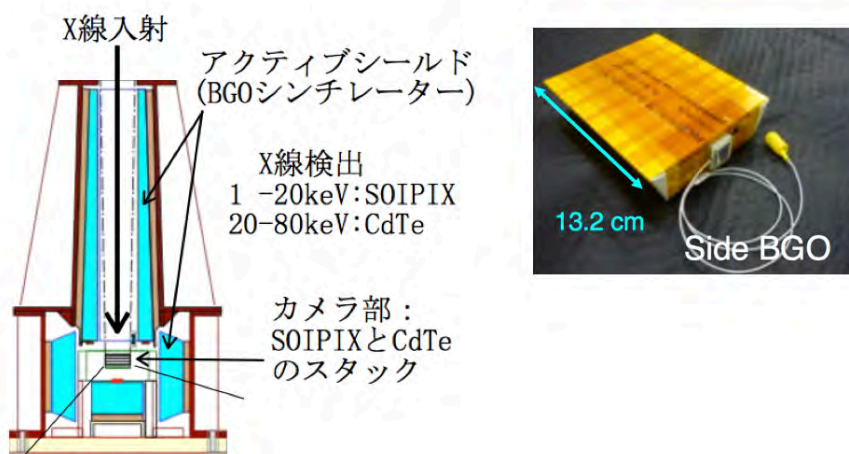


図 1.1: FORCE 衛星の硬 X 線検出器設計図 [7]

1.2 雷雲ガンマ線検出器

宇宙から降りそそぐ宇宙線は、ブラックホールや超新星残骸のような特殊な環境で高エネルギーまで加速されて作られると考えられている。この加速粒子がどのように加速されているか、加速現場がどうなっているのかはまだあまりわかっていない。一方で、荷電粒子の加速現象は地球上の雷雲中でも起きていることがわかってきた。これは、宇宙で起きているような粒子加速を地上で測定することができる唯一の事例として、とても興味深い研究対象である。

当研究室では、雷雲で加速された電子が大気分子と衝突することで生じるガンマ線を観測することで、雷雲中の加速器の構造と加速原理の解明を目指している

[8]。このガンマ線を測定するためには、少量の光でも感知できるように検出効率の高い大型のシンチレータが用いられている。冬の北陸の日本海沿岸は強力な雷雲が発生しやすく、世界的にも数少ない恵まれた観測場所であるため、当研究室では柏崎市、金沢市などに検出器を設置してきた。これにより、ガンマ線が雷雲からビーム状に放射されていることや、ショートバースト・ロングバーストという発生継続時間の異なる2種類の現象が起きていることがわかってきた。さらに、ガンマ線が大気中の分子と光核反応を起こし、高速中性子や陽電子が大量に発生している現象も発見された [9]。

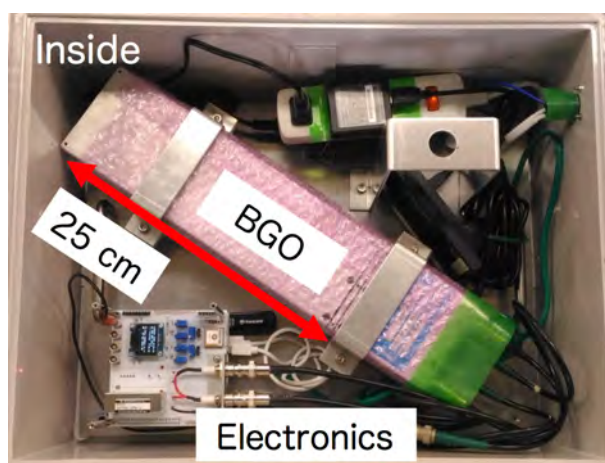


図 1.2: 2016 年に設置された雷雲ガンマ線検出器 [10]

これまでの観測では、潮解性がなく安定な BGO シンチレータが使用されてきた (図 1.2)。今後、ガンマ線の到来方向や発生源の高度などの情報をさらに正確に得るため、複数ヶ所にわたっていくつも検出器を置く必要があり、より安価な CsI(Tl) シンチレータの方が適している。ただし、CsI(Tl) はわずかに潮解性をもつため、雷雲観測のような湿気の多い場所に対して策を講じる必要がある。湿気対策として、密封アルミケースに入れたり、乾燥剤を大量に用いることが考えられるが、これらはコストがかかるため大量生産には向いていない。そのため、別の策で対応できることが望ましい。

1.3 本論文の位置づけ

本論文は、次世代 X 線衛星 *FORCE* のアクティブシールド部分や、雷雲からのガンマ線観測に用いられる大型シンチレータ検出器において、検出光量を増やすこと、その制作負担・コストを軽減することを目的としている。このふたつを実現するために、結晶シンチレータを覆う反射材に着目した。ガンマ線が入射した

ときにシンチレータ内で発生する蛍光を光センサーに集める必要があるため、結晶の外へ透過した蛍光を反射して逃げ出さないようにする反射材は、検出光量を左右する重要な要素のひとつである。反射材の研究は長年行われてきており、現在は「すざく」、「ひとみ」衛星のHXDやHXIのアクティブシールド部分に用いられていた、ゴアテックスシートやESR (Enhanced Specular Reflector) フィルムが主流となっている。しかし、ゴアテックスシートは柔らかく厚みのある素材で一定の空間を必要とする上に使用の際に変形や破損が起きることがあり、ESRは短波長側で急激に反射率が低下するという問題点がある。

本論文では、X線衛星のアクティブシールドに用いられるBGOシンチレータと、雷雲ガンマ線検出器として使用する予定のCsI(Tl)シンチレータの2つのシンチレータに対して、制作負担・コストの軽減を目指したものと、検出光量の増加を目指したものである2種類の新たな反射材を用い、複数種類の反射材の組み合わせで測定を行った。BGO, CsI(Tl)シンチレータそれぞれにおいて、検出光量や位置依存性、エネルギー分解能を調べるとともに、反射材の施工方法についても考察した。さらに、検出光量の増加がどのような要因によって生じているのかを議論する。

第2章 シンチレータと反射材

2.1 シンチレータ

2.1.1 シンチレータの特性

高エネルギー光子（硬 X 線、ガンマ線）や荷電粒子が蛍光物質を通過すると、物質中の電子を励起または電離させ、この電子が基底状態に戻るときに、エネルギーの一部が可視光や紫外線となって放出される。この現象をシンチレーション、このような物質をシンチレータという。発生した蛍光の光子数が、入射した放射線のエネルギーに比例するという性質を利用して、入射粒子のエネルギーを測定することができる。シンチレータを利用したスペクトル検出は、非常に古くから行われてきた放射線測定法であり、現在も広く用いられている。

シンチレータは主に、有機結晶・プラスチック・有機液体などを材質とする有機シンチレータと、無機結晶を用いた無機シンチレータに分けられる。有機シンチレータは発光効率が低いが、放射線に対する応答が速い（ ~ 3 ns）ものの炭素を主成分とするため 10 keV 以上の光子を光電吸収で全吸収できないため、荷電粒子や中性子の検出に用いられる。無機シンチレータは、有機シンチレータに比べて応答が遅い（ ~ 200 ns）が発光量が多く、入射エネルギーに対する出力の線形性がよい。さらに構成物質の原子番号が大きく密度が高いため数百 keV のガンマ線でも全吸収してそのエネルギーを測ることができ、大型のものを制作できることから、ガンマ線の測定に適している。本論文ではガンマ線を観測対象としているため、無機シンチレータを用いた。

2.1.2 無機シンチレータ

無機シンチレータのシンチレーション過程は、結晶格子内の電子のエネルギー状態によって説明される。無機シンチレータを含め半導体結晶内では一般に、電子は図 2.1 のようなエネルギー帯を持っている。低エネルギー側が原子に束縛された価電子帯で、高エネルギー側が自由に動き回れる伝導帯である。価電子帯と伝導帯の間は禁制帯と呼ばれるエネルギーギャップがあり、純粋な単結晶の場合には電子はこのギャップ中に存在することができない。

このような結晶にガンマ線が入射すると、光电吸収やコンプトン散乱が起こる。電離した電子は結晶内を動き回り、この過程でエネルギーを与えられた原子ではまた、価電子帯にある電子が伝導帯へと励起される。励起エネルギーが低い場合に、電子と正孔がクーロン力で緩く束縛された状態が作られ、電子が脱励起して価電子帯に落ち込むときにエネルギーが光子として放出される。しかし多くの結晶の場合、励起した電子が光子を放出して価電子帯へ遷移することは稀である。また、このとき放出される光子のエネルギーは禁制帯の幅のエネルギーだが、このエネルギー幅は大きいため可視光ではなく紫外線に現れ、自己吸収が激しいため外まで放射されない。

そこでCsIやNaI、GSOなど多くの無機シンチレータでは、結晶に微量の活性剤（不純物）が添加されている。これにより、図2.1のように禁制帯の間に不純物のエネルギー準位が形成される。励起された電子はこの不純物準位に捕まり、脱励起する際に可視光帯域の蛍光が発生する。そのエネルギーは禁制帯よりも小さいため、吸収を受けず結晶中を通過できるようになる。このように不純物を添加することで、蛍光を結晶外に取り出すことが可能になる。BGOではバンド構造が異なるため、不純物なしでシンチレーション光を放射する [11]。

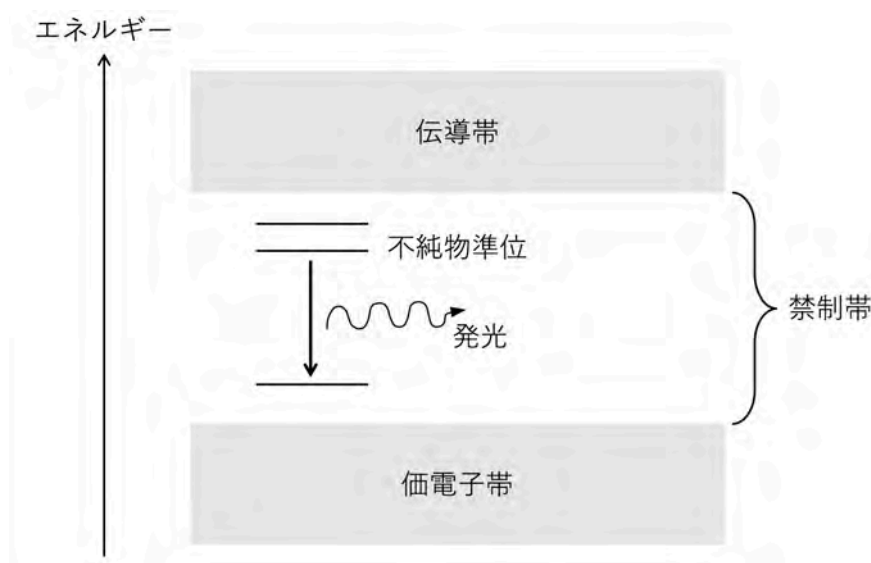


図 2.1: 結晶シンチレータ内のエネルギー準位

理想的な無機シンチレータに求める性能として、以下の点が挙げられる。

- 放射線と相互作用する断面積が大きい。このため結晶の原子番号が大きく、密度が大きい方が良い。
- 放射線のエネルギーがシンチレーション光へ変換される効率が高く多くのシンチレーション光を生み出す。

- 結晶が蛍光波長に対して透明であり内部吸収や散乱が少ない。
- シンチレーション光の発生量が放射線のエネルギーに対して広帯域で比例する。
- 放射線に対しての反応が早く、短時間で減衰する。
- 扱いやすく、潮解性が強くない。
- 均質で大きな結晶を製造できる。

これらの要求を満たすように、結晶の種類を選ぶ必要がある。

2.1.3 代表的な無機シンチレータの例

表 2.1: 代表的な無機シンチレータの特性 [12]

シンチレータ	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO	GSO	PWO	LaBr ₃ (Ce)
密度 (g cm ⁻³)	3.67	4.51	7.13	6.71	8.28	3.86
屈折率	1.85	1.8	2.15	1.85	2.16	1.95
蛍光減衰時間 (ns)	230	1000	300	30-60	6	25
蛍光効率*	100	45	20	25	1	160
ピーク発光波長 (nm)	410	560	480	440	440	340
放射距離 (cm)	2.9	1.86	1.11	1.38	0.92	3.0
潮解性	あり	若干あり	なし	なし	なし	あり

* NaI(Tl) を 100 とした

代表的な無機シンチレータの特性を表 2.1 に示した。これらのシンチレータは用途によって使い分けられ、以下のような特徴をもつ。

- NaI(Tl) は 1948 年に発見された最初の実用的な無機シンチレータである。大型の単結晶が製作でき、安価で加工しやすく、光変換効率も高い。ただし機械衝撃・熱衝撃に弱く、潮解性をもつという欠点があるため、アルミパッケージなどに封入されたものを用いる。現在もっとも多く使用されている。
- CsI(Tl) は、NaI よりも丈夫で密度が高く、ガンマ線の検出効率がよい。大型の単結晶が製造でき、安価で加工性がよいが、水溶性であるため若干の潮解があり、注意が必要である。温度依存性が小さいが、蛍光減衰時間は長い。潮解性対策を施せば、雷雲ガンマ線検出器として適している。
- BGO; Bi₄Ge₃O₁₂ は、潮解性がなく加工しやすい安定した結晶であり、Bi という重元素を含み密度が高いため、光電吸収の効率がよいという特徴をもつ。また自己吸収がないため、活性化物質を添加する必要がなく、大型で一様な

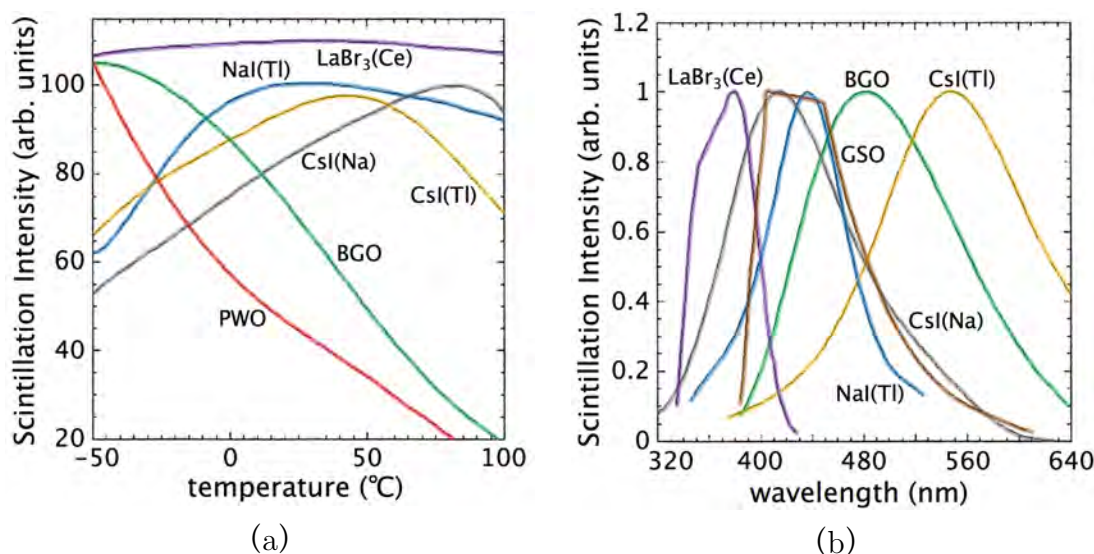


図 2.2: (a) 無機シンチレータのシンチレーション光の強度（相対値）の温度依存性、(b) 無機シンチレータのシンチレーション光の強度（相対値）に対する蛍光波長特性 [12]。NaI(Tl) を青、CsI(Tl) を黄、CsI(Na) を黒、BGO を緑、GSO を茶、PWO を赤、LaBr₃(Ce) を紫で表示してある。

結晶を作ることができる。このため宇宙観測で特に大型の結晶を要するケースで広く利用されており、「すぎく」「ひとみ」衛星のアクティブシールド検出器として搭載され実績を残している。当研究室では雷雲ガンマ線検出器としても用いている。一方で、他のシンチレータに比べると蛍光効率が低く、 $-0.8\%/^{\circ}\text{C}$ と一定レベルの温度依存性をもつ。また屈折率が大きいいため、シンチレーション光の読み出しに注意が必要である。

- GSO; $\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$ は、比較的原子番号が大きく密度も高いため、ガンマ線の検出効率が高い。また蛍光減衰時間が短く、温度依存性も小さい。化学的にも安定で加工性も良いので、「すぎく」衛星の硬 X 線検出器として用いられた実績がある。ただし大型の結晶は作ることができない。
- PWO; PbWO_4 は、原子番号と密度が大きいことが特徴である。また、同様の高検出効率を持つ BGO と比較して、蛍光減衰時間が非常に短い。しかし、蛍光効率がかなり小さいため、高エネルギー電子、ガンマ線観測のためのシャワー粒子検出器として主に利用される。温度依存性も $-1.3\%/^{\circ}\text{C}$ と大きいため、使用の際には注意が必要である。BGO と同じく屈折率も大きい。
- LaBr₃(Ce) は、比較的最近実用化されたシンチレータである。蛍光効率がよく、温度依存性もほとんどない。現在のシンチレータの中でもっともエネルギー分解能がよく ($< 3\% @ 662\text{ keV}$) 蛍光減衰時間が非常に短い。ただし

潮解性が強く、高価で加工が難しい。内在する自然放射性物質による放射線 (^{138}La の 1.436 MeV など) が非常に大きく無視できない。

それぞれのシンチレータの温度特性と発光特性のグラフをそれぞれ図 2.2 (a) と図 2.2 (b) に示した。

2.2 光電子増倍管

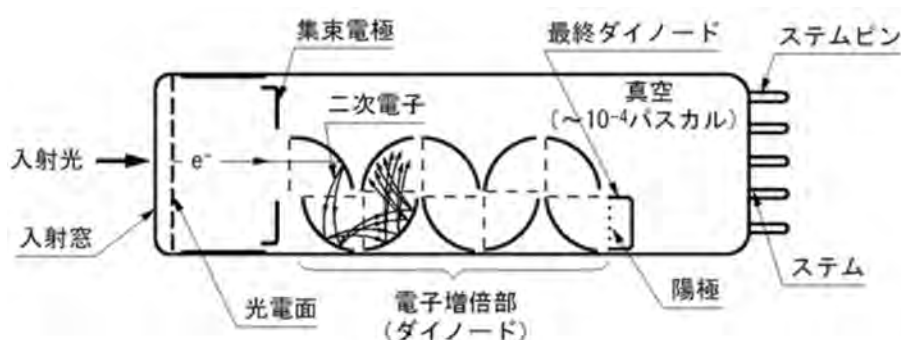


図 2.3: 光電子増倍管の断面図 [13]

シンチレータで発生した蛍光は、電気信号に変換して読み出す必要がある。本論文では光検出器として特に光電子増倍管について述べる。光電子増倍管 (PMT; Photo Multiplier Tube) は、図 2.3 に示すようにガラスで密閉された真空管であり、入射窓・光電面・集束電極・電子増倍部にあたる多段ダイノード・陽極で構成される [13]。PMT に入射した可視光は、光電面で光電効果により吸収され、光電子増倍管内の真空空間に光電子を放出する。光電面から出た n 個の光電子は光電陰極と第 1 ダイノードの間の電位差で加速され、集束電極によって収集されて第 1 ダイノードに入射、 nR_1 個の二次電子を放出する (R_i は第 i ダイノードでの二次電子放出確率)。この二次電子はさらにダイノード間の電位差によって加速されて nR_1R_2 個の電子になる。これを繰り返す、第 m ダイノードで $nR_1R_2\dots R_m$ 個の電子が放出され、陽極に集められ電荷パルスとして取り出される。

本研究で用いた浜松ホトニクス社製の R11265U-200 は、表 2.2 のような特性をもつ [14]。特に光電面にはウルトラバイアルカリ (UBA) が用いられており、図 2.4 の赤点線のように 350 nm で最大 43% の量子効率が得られ、シンチレータの発光波長ピークを含む < 600 nm で高い感度を持つ [15]。

R11265U-200 の駆動と読み出しには、浜松ホトニクス社製の D 型ソケットアセンブリ E11807 を用いた。その回路図を図 2.5 に示す [15]。外部から印加した負の高電圧を光電面に与えるとともに、内部の抵抗はしごで高電圧を分割し、各ダイ

表 2.2: R11265U-200 の特性 [14]

受光面サイズ	23 × 23 mm ²
波長範囲	300–650 nm
波長ピーク	400 nm
光電面の種類	ウルトラバイアルカリ (UBA)
入射窓の材質	ホウケイ酸ガラス
ダイノード構造	メタルチャンネル
ダイノード段数	12
最大電圧	1000 V
増幅率 @900 V	1.2 × 10 ⁶

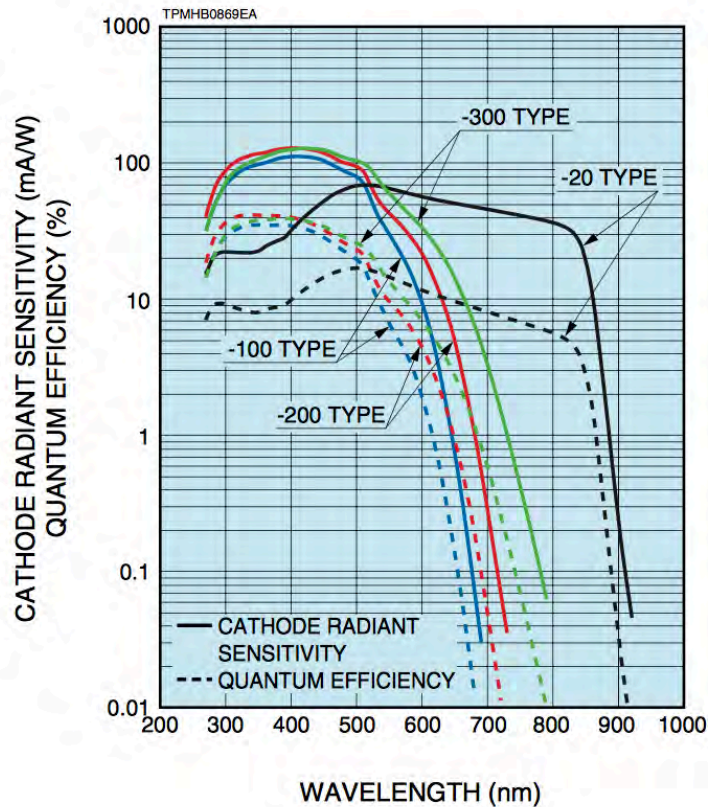


図 2.4: PMT の放射感度と量子効率のグラフ [15]。実線が陰極放射感度、点線が量子効率である。色は光電面の種類を表しており、黒が ERMA (Extended red multialkali)、青が SBA (Super bialkali)、赤が UBA (Ultra bialkali)、緑が EGBA (Extended green bialkali) である。

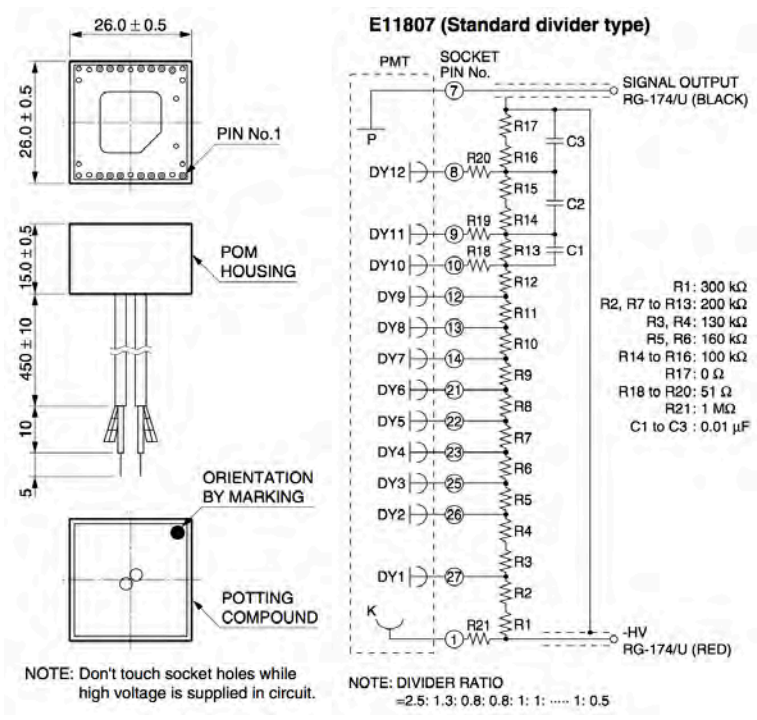


図 2.5: E11807 の回路図 [15]

ノードに与えている。陽極はグラウンド電位に保たれ、信号は電流 (DC) でもパルス (AC) でも読み出すことができる。

2.3 反射材

現在おもに用いられている反射材は、ゴアテックスシートと ESR (Enhanced Specular Reflector) フィルムである。これらの特性を表 2.3 にまとめる。

表 2.3: 反射材の特性

反射材	ゴアテックス	ESR
材質	多孔質テフロン	ポリエステル系樹脂 (多層膜構造)
厚み	0.25 mm	65 μm
反射	乱反射	鏡面反射
反射率	~ 98% (1 mm 厚)	> 98%

ゴアテックスは、WL ゴア & アソシエイツ社製の防水透湿性素材であり、柔らかくて扱いやすいが、使用時に変形したり破れたりするという欠点がある [16]。フッ

素分子と炭素分子を含む線状ポリマーであるポリテトラフルオロエチレン (PTFE) という素材を延伸加工することで開発された多孔質構造材料からできている。この素材は、十分な厚み (1 mm 程度、用いたゴアテックスで約 4 重) であれば 98% 以上の反射率をもつことが知られている [17]。反射率のグラフを図 2.6 に示した [18]。写真を図 2.7 (a) に示す。

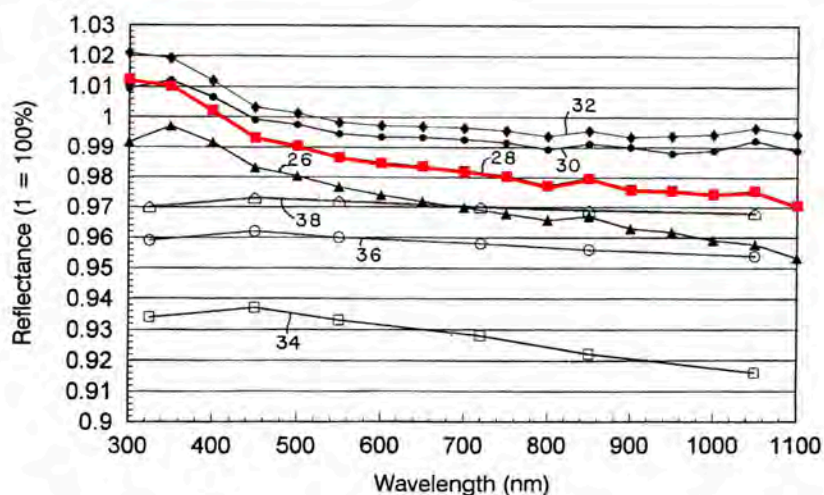


図 2.6: ゴアテックスの反射率。番号はゴアテックスの厚みの違いであり、No.26 が 0.5 mm 厚、No.28 (赤線) が 1.0 mm 厚、No.30 が 2.2 mm 厚、No.32 が 3.4 mm 厚である。No.34, 36, 38 は以前のタイプの製品である [18]。

ESR は住友スリーエム株式会社が製造している反射フィルムであり、丈夫で加工しやすく、広波長帯域にわたり高い反射率をもつ [19]。図 2.8 に示すように、400 nm 以下の波長帯域で急激に反射率が低下するという難点がある [20]。おもて裏があり、おもて面側を結晶面に用いる。図 2.7 (b) のように、おもて面には保護フィルムに 3M の文字が書かれている。

表 2.4: 反射材の利用

X 線衛星	反射材
すぎく	ゴアテックス 2 重
ひとみ	ESR + ゴアテックス

これらは、X 線衛星の硬 X 線検出器のアクティブシールドの反射材として、表 2.4 のように利用されてきた実績がある。今回はさらに、ESR を改良を加えた新たな反射材も使用した。新たに用いた反射材について表 2.5 にまとめてある。

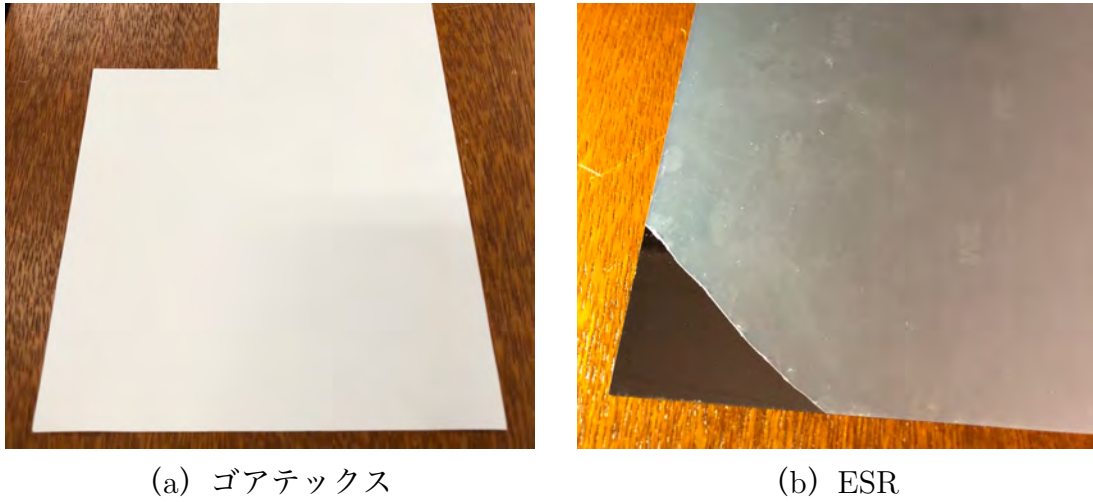


図 2.7: (a) ゴアテックスと (b) 保護フィルムを一部剥がした状態の ESR の写真

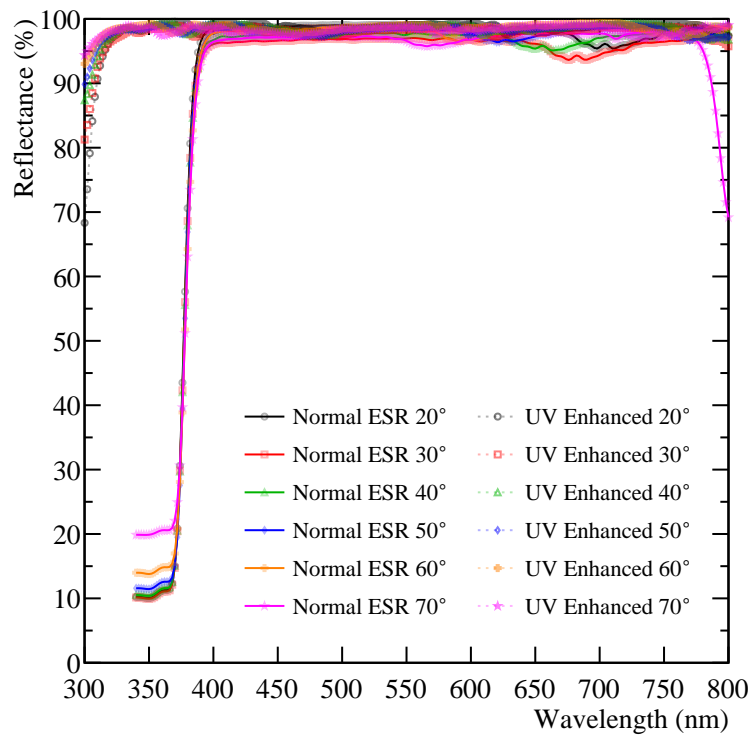
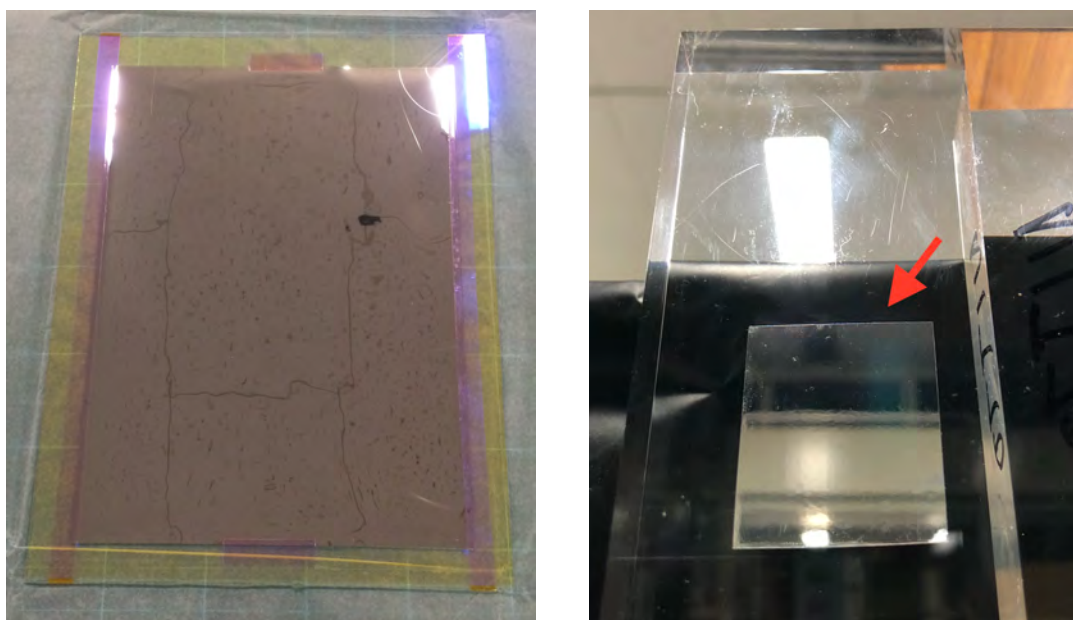


図 2.8: ESR (Normal ESR) と UV 強化 ESR (UV Enhanced) の反射率 [20]。実線が ESR、点線が UV 強化 ESR であり、線の色は入射角の違いを表す。

図 2.9 (a) の UV 強化 ESR は、ESR のおもて面に SiO_2 と Ta_2O_5 による 54 層の UV 多層膜コーティングを施したものである [21]。これによって ESR の苦手とす

る短波長側の反射率が格段に向上し（図 2.8）、検出光量の増加が見込める。まだ検出器に使われた実績はないが、有望な反射材である。ただし UV コーティング面は傷つきやすく、切ったり折ったりして割れてしまった部分は反射率が低下してしまうので、取り扱う際には注意が必要である。



(a) UV 強化 ESR

(b) 市販粘着 ESR

図 2.9: (a) ガラス板に固定されている UV 強化 ESR、(b) 市販粘着 ESR をアクリル板に貼ったときの粘着面側からの写真

粘着 ESR は ESR に粘着材を付けたものであり、結晶に密着するため安定性があり、潮解性のある結晶を使用する際に有効である。結晶との間に空気の層ができないことから、結晶から出る光子の臨界角が大きくなり全反射する数が減ってしまうために、PMT に集光される光が少なくなる可能性がある。本論文では表 2.5 に示したように 3 つの粘着 ESR を用いた。1 つめは ESR の裏面に粘着テープがついた市販品（住友スリーエム株式会社の ESR-PT）であり、アクリル板に貼った様子を図 2.9 (b) に示す。本来は粘着面でない側を反射に用いるものであるが、シンチレータに接着して潮解性を防いだり機械強度を一部負担させる可能性を探るため、あえてその粘着面をシンチレータ側に貼るアイデアである。2 つめは通常の ESR のおもて面に粘着剤をつけた粘着 ESR（以下「おもて粘着 ESR」と呼ぶ）、3 つめは UV 強化 ESR のおもてコーティング面に同様の粘着剤をつけた粘着 ESR（以下「UV おもて粘着 ESR」と呼ぶ）である。この際用いた粘着剤は、日東電工株式会社製の LUCIACS® CS986 シリーズの光学用透明粘着シートである。この粘着剤は透明性に優れ、光照射・高温高湿での環境下でも使用が可能である。さらにアウトガスによる気泡発生抑制と段差追従性を両立する [22]。ESR の反射率

から考えると、より蛍光を反射するのは UV おもて粘着 ESR、おもて粘着 ESR、市販粘着 ESR の順であると考えられる。結晶に粘着剤と ESR を施工する作業は、ジーテック株式会社に外注した。施行作業に 1-2 週間を要するため、時間の都合上自分で作業を行なったものもある。

表 2.5: 新たに用いた反射材の一覧

反射材	本論文中での呼称
UV 強化 ESR	UV 強化 ESR
粘着 ESR	市販粘着 ESR
市販品 (ESR 裏面 + 粘着テープ)	おもて粘着 ESR
ESR おもて面 + 粘着剤	UV おもて粘着 ESR
UV 強化 ESR おもて面 + 粘着剤	

以上のゴアテックス、ESR、UV 強化 ESR、粘着 ESR の 4 種類の反射材を組み合わせて、シンチレータの測定実験を行なった。

2.4 シンチレータにおける光収集効率の先行研究

当研究室ではこれまで、笹野修論 (2012) [11] および笹野ら (NIM 2013) [23] により、BGO シンチレータからの光収集の特性について研究がなされている。BGO は可視光に対し、 $n_1 = 2.15$ という高い屈折率をもつ。スネルの法則から、

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

が成り立つため、結晶内部から空气中 ($n_2 = 1$) にシンチレーション光が出ていく臨界角は $\theta_2 = 90^\circ$ のときで

$$\sin \theta_1 = \frac{1}{2.15} = 0.465\dots = 27.7^\circ \quad (2.2)$$

である。また、PMT と結晶の間に用いたシリコンラバーの屈折率は $n_3 = 1.43$ である (表 3.2) ため、結晶内からシリコンシートに入射する臨界角は同様に計算すると $\theta_1 = 41.7^\circ$ となる。そのため結晶表面では全反射が起こりやすく、 θ_1 よりも小さい入射角で入射した光子だけが結晶の外に出ることができる。一方、図 2.10 のように結晶内で何度も全反射を繰り返し、無限ループに陥ってしまう光子も多くある。このような光子はやがて結晶内部で自己吸収されてしまう。したがって BGO シンチレータの集光率を改善するためには、BGO 結晶の外に光子を導き出し、さらにそれらを PMT に集光することが必要となる。

奥山修論 (2009) [24] や [11] などでは、検出できる光子の数を増やしエネルギー分解能を良くすることを目的として、結晶の形状、大きさ、表面処理がシンチレー

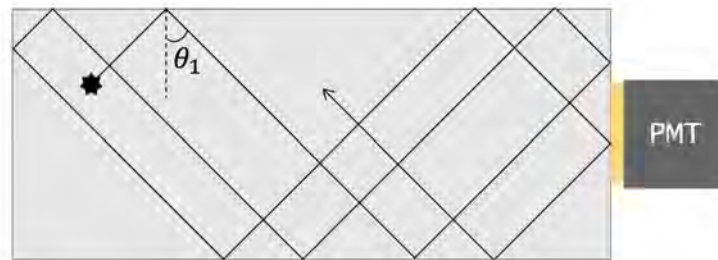


図 2.10: 結晶内で発生した光子が全反射を繰り返し無限ループする様子

タの集光効率にどのように影響を及ぼすかを、実験やシミュレーションを通して解明してきた。この結果、集光率の向上には以下の点が重要であることがわかっている。

- 結晶と光検出器をつなぐ光学インターフェースの屈折率を大きくすることで、結晶との臨界角を大きくすること。
- 結晶をつつむ反射材の反射率ができる限り 1.0 に近いこと。反射材は、光を鏡面反射させるものと乱反射させるものがあるが集光率はどちらの場合でも大差はない。
- 無限ループに近い状態の光子が途中で自己吸収されないよう、結晶は高い透明度を持つこと。
- 立方体結晶の場合、もっとも面積の小さい面に光検出器の受光面を取り付ける方がよいこと。とくに、その結晶面の面積に対する受光面の相対面積が大きいことが重要である。
- 無限ループに入った光子が脱出できるよう、表面は完全な鏡面でなく、ある程度の乱れをもつほうが有効である。

2.5 実験計画

本論文の目的は、次世代 X 線衛星 *FORCE* のアクティブシールド部分や、雷雲からのガンマ線測定に用いられる大型シンチレータ検出器において、より微弱な信号の検出のために検出光量を増やすこと、その制作負担・コストを軽減することである。*FORCE* のアクティブシールド部分に適した BGO、雷雲からのガンマ線測定に用いられる大型シンチレータ検出器に適した CsI(Tl) について、従来の反射材と新たな反射材を用いた測定を行う。さらに新たな反射材である UV 強化 ESR

の反射率強化が顕著に見られると考えられる、短波長側に蛍光波長ピークのある (図 5.1) PWO の光量測定実験を行う。

まず、予備測定として従来の反射材であるゴアテックスと ESR を用いた実験を行なった。温度依存性が小さく扱いやすい CsI(Tl) 結晶の測定から始め、実験セットアップや反射材の取り扱いに慣れつつ実験を進め、BGO 結晶でも同様の測定を行った。次に、制作負担・コストの軽減を目的とした粘着 ESR について、同様の CsI(Tl) と BGO を用いて測定を行なった。一方、検出光量の増加を目指した UV 強化 ESR については、CsI(Tl)、BGO での測定を行ったのち、さらに実際に「ひとみ」衛星の軟ガンマ線検出器のアクティブシールドに用いられたものと同サイズの BGO を用いた測定を行なった。これにより、実際にアクティブシールドとして用いた場合の反射材の効能を調べた。最後に、UV 強化 ESR の効果を見るため PWO 結晶での光量測定を行なった。

第3章 従来の標準的な反射材の性能評価

3.1 概要と目的

この章では、従来の反射材であるゴアテックスと ESR を用いた場合の測定について述べる。「すぎく」、「ひとみ」衛星で用いられた反射材の組み合わせ（表 2.4）を参考にし、CsI(Tl) と BGO シンチレータを用いて測定を行なった。この測定結果を基準とすることで、次章からは新たな反射材を用いた場合の測定結果について議論する。

3.2 実験セットアップ

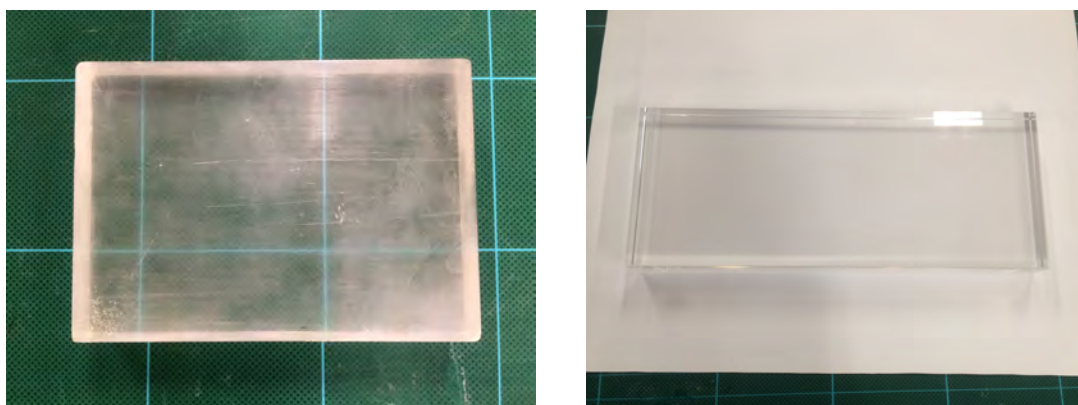
3.2.1 シンチレータ

今回の実験で用いた結晶シンチレータの基本情報を表 3.1、写真を図 3.1 に示す。CsI(Tl) シンチレータについては、§4.3 で述べる問題が生じたため、研磨する前での測定は途中で中断されてしまった。その後ジーテック株式会社に研磨を依頼し、全面研磨を行なったのちに測定を行なった。結果は研磨後のみを表示している（研磨前については付録 B 参照）。

BGO シンチレータはロシアのニコラエフ無機化学研究所 (NIIC) [27] から購入したものである。全面が光学研磨されており、割れにくくするために辺の部分は全て 1 mm 程度削られて面取りされている。また、BGO の吸収長は [11] から > 4 m だとわかっている。

表 3.1: 用いた結晶シンチレータの基本情報

シンチレータ	CsI(Tl)	BGO #1
大きさ (mm ³)	100 × 70 × 20	120 × 72 × 20
表面処理	全面研磨	全面鏡面研磨



(a) CsI(Tl)

(b) BGO

図 3.1: (a) 研磨後の CsI(Tl) と (b) BGO シンチレータの写真

3.2.2 PMT

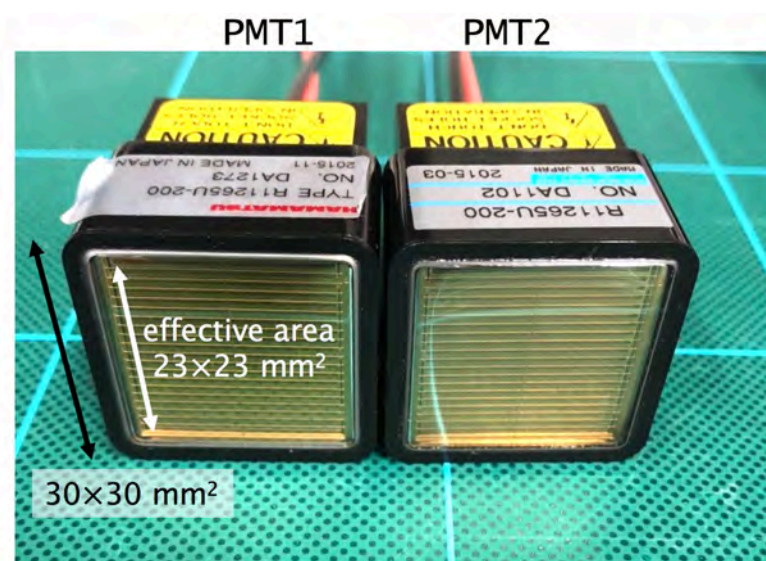


図 3.2: 実験に用いた PMT R11265U-200 の写真

シンチレータからの光読み出しには、§2.2で示した浜松ホトニクス社製の R11265U-200 を用いた。実験に用いた PMT を図 3.2 に示す。CsI(Tl) に用いた PMT が PMT1 (左)、BGO に用いたものが PMT2 (右) である。予備実験として、これらの PMT に対し温度依存性が低い NaI(Tl) シンチレータ (応用光研工業株式会社 (OKEN) 製、スタンダード型 2B4 [25]; $12.7\phi \times 25.4 \text{ mm}^3$) を用いて増幅率の時間安定性を確認した (付録 C 参照)。 ^{137}Cs 線源の 662 keV 輝線を用い、10 分間の測定を連続して

60 回行った結果、ピーク位置の変動は PMT1 が $\sim 0.5\%$ 、PMT2 が $\sim 0.9\%$ とどちらも安定していた。またこのとき、662 keV でのエネルギー分解能は $\Delta E/E \sim 8\%$ (FWHM) であった。

3.2.3 機構セットアップ

シンチレータに PMT を取り付けたセットアップの様子を図 3.3 に写真で示す。PMT の大きさ (30 mm) よりも CsI(Tl) と BGO の高さ (20 mm) の方が小さいため、5 mm 厚のアクリル板でジグを作成して受光面がシンチレータ側面に合うように高さを調節した。PMT の取り付け位置は §2.4 から、もっとも面積の小さい面とした。また、予備測定としてアクリル板をそのまま用いた場合と表面をゴアテックスシートで覆った場合で測定を行なったところ、ゴアテックスシートがある場合の方が検出光量が 8% 程度増加したことから、アクリル板表面にはゴアテックスシートが貼ってある。

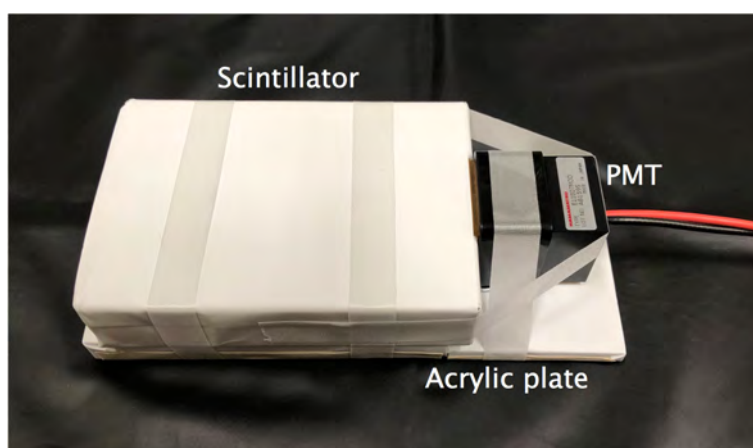


図 3.3: CsI(Tl) シンチレータを用いた測定のセットアップの写真

シンチレータと PMT の接合部には、 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ で 1 mm 厚の EJ-560 シリコンラバー (Eljen Technology 社製) を用いている。このシリコンラバーの仕様を表 3.2 に示す [26]。[24] や [11] では、オプティカルグリース (OKEN 6262A) を用いていたが、測定性の再現性は 10% peak to peak 程度であった。今回はシリコンラバーを用いることで、後述のように再現性は大きく改善した。PMT とシンチレータは布テープを用いて固定しており、この系を遮光のためにブラックシートで 2 重に覆った。CsI(Tl) は室温でほぼ温度依存性がないため、そのまま室内 ($25\text{--}28^\circ\text{C}$) で測定を行なった。一方 BGO には温度依存性がある (図 2.2 (a)) ため、この系を恒温槽に入れ、実験中は温度を 25.0°C に設定した。

表 3.2: EJ-560 シリコンラバーの性能 [26]

大きさ	$25 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$
密度	1.03 g/cm^3
硬さ (HS)	16 – 24
屈折率	1.43
対応温度	$-40 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$

3.2.4 電氣的セットアップ

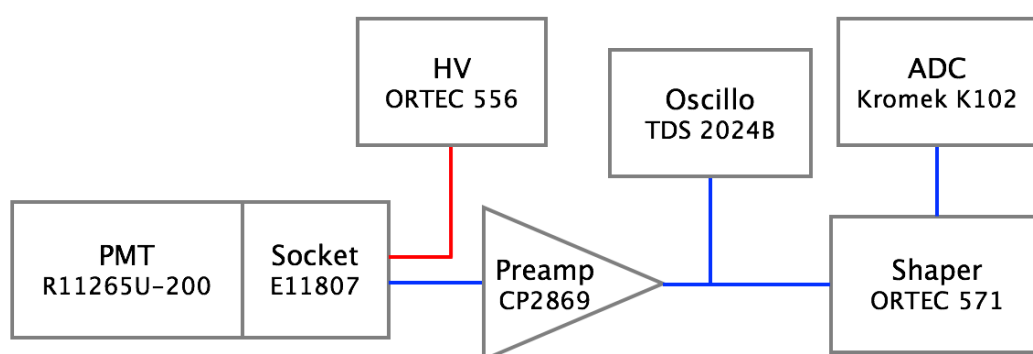


図 3.4: 読み出し系のブロックダイアグラム。赤線はHV、青線は信号線を示す。

PMT 以下の読み出し系は図 3.4 のようなセットアップとなっている。電荷有感型増幅器 (Preamplifier) はクリアパルス社製の電荷積分アンプ CP2869 を用いた [28]。静電容量 $C = 100 \text{ pF}$ 、抵抗 $R = 150 \text{ k}\Omega$ なので時定数 $\tau = 15 \mu\text{s}$ である。CsI(Tl) の蛍光減衰時間は $1 \mu\text{s}$ であるので、これは十分に蛍光を貯められていない可能性がある。これについては付録 A に詳しく記載する。整形アンプ (Shaping Amplifier) は ORTEC 社製の ORTEC571 を使い、時定数は $2 \mu\text{s}$ 、ゲインは 50 倍とした。出力は Kromek 社製の 4kch マルチチャンネルアナライザである K102 の ADC を使用した。この ADC は正極性パルス入力で最大入力電圧は $+5 \text{ V}$ 、ADC ゲインは 4096 ch である。PMT への印加電圧 (HV) は ORTEC 社製の ORTEC556 を使い、この ADC レンジに検出したいピークが入るように、電圧の大きさは出力レンジに CsI(Tl) では -600 V 、BGO #1 では -700 V に設定した。

オシロスコープは、Tektronix 社の TDS 2024B を使い、実験中 Preamplifier からの出力を見られるように T 字に分岐させて繋いだ。このオシロスコープの電源を長時間の測定中に切ったところ、比較的大きなゲインの変動 (10 時間で $\sim 5\%$) が見られた。これはオシロスコープの電源を切ると回路の状態が変わってしまう

ためだと思われるが、原因は不明である。そのため実験中は常に電源を入れたままの状態にしてある。図 3.5 はオシロスコープで確認した波形の一例である。

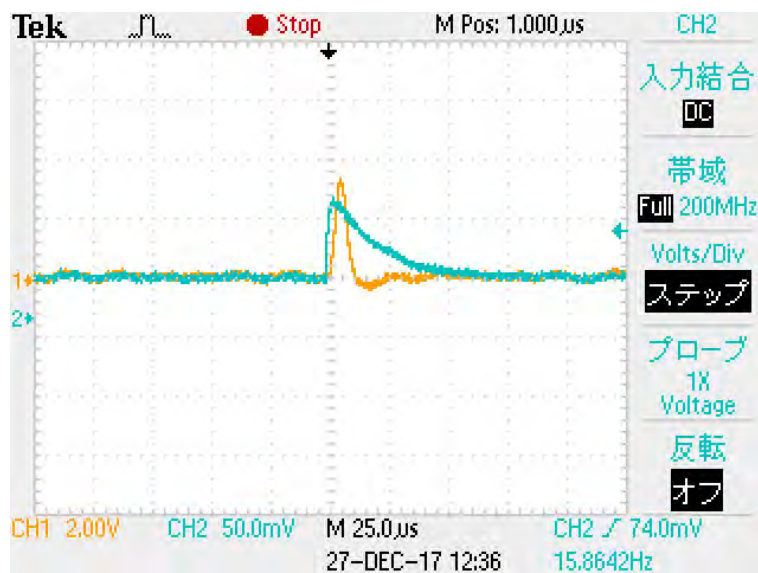


図 3.5: オシロスコープで得られた波形の例。 ^{137}Cs 線源を照射したときの 662 keV ピークが見えている。黄 (CH1) は Shaping Amplifier からの出力、緑 (CH2) は Preamplifier からの出力である。

3.2.5 反射材

用いた反射材は表 3.3 である。左から順に、結晶側 (内側) に用いた反射材を記している。(イ) はゴアテックスを 2 重にしたもので、「すぎく」衛星で用いられたものである。(ロ) はゴアテックスを ESR に変えたものである。(ハ) は (ロ) の外側にゴアテックスを追加したものである。「ひとみ」衛星では ESR とゴアを組み合わせで使用しており、これは打ち上げ当時もっとも反射率の良い組み合わせとされていたためである。

表 3.3: 結晶に用いた反射材の組み合わせ一覧

	反射材の組み合わせ	備考
(イ)	ゴアテックス 2 重	「すぎく」HXD 標準
(ロ)	ESR 2 重	
(ハ)	ESR 2 重+ゴアテックス	「ひとみ」HXI/SGD 標準

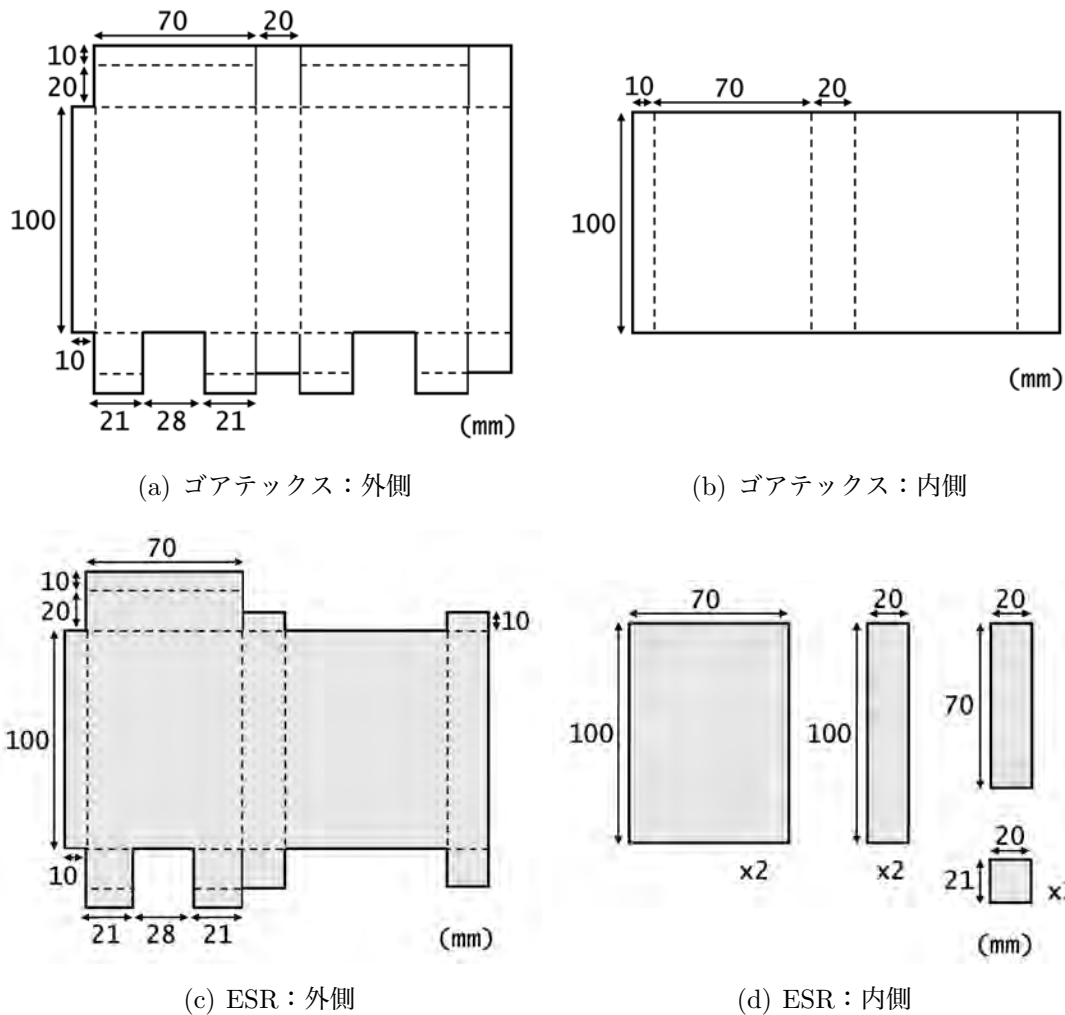


図 3.6: 用いた反射材の図面。(a) はもっとも外側にまいたゴアテックス、(b) はゴア 2 重の場合に内側にまいたゴアテックス、(c) は外側にまいた ESR、(d) は内側に入れた ESR である。表示した反射材の縦横の長さは、それぞれ ± 1 mm 以内の誤差をもつ。

反射材はそれぞれ図 3.6 の展開図のように切った。点線は折り目であり、直角に折った。表示している長さは CsI(Tl) に用いたときのものだが、BGO でも同様の形とした。PMT の受光面を取り付ける面は、シリコンラバーの大きさが 25×25 mm² なので、それぞれの反射材において 26–28 mm の幅が空くようにした。ぎりぎりまで覆うよりも集光率は低下してしまうと考えられるが、反射材を巻いた際に PMT 取り付け面として空けた位置が若干ずれてしまい、シリコンラバーが結晶に密着できなくなってしまうため、余裕を持たせている。

3.2.6 ガンマ線の照射

本実験では 662 keV のガンマ線を放射する放射線源 ^{137}Cs を用いた。光量測定では、図 3.7 (a) のようにシンチレータから 15 cm 離れた位置に 40.7 kBq (1997 年 7 月 9 日時点、 ^{137}Cs の半減期 30.1 年) の ^{137}Cs を置いた。また、結晶の光量の位置依存性を測定する際には放射能強度の弱い 3.75 kBq (1997 年 9 月 1 日時点) の ^{137}Cs を用いた。 ^{137}Cs の位置は、CsI(Tl) の場合には図 3.7 (b) のように線源位置を $x=0, 50, 100$ mm の 3 点、BGO でも同様に $x=0, 60, 120$ mm の 3 点で測定を行なった。コリメータは使用していない。実験系の時間依存性を考慮して、0 mm の点は、測定開始時と測定終了時で 2 回測定した。

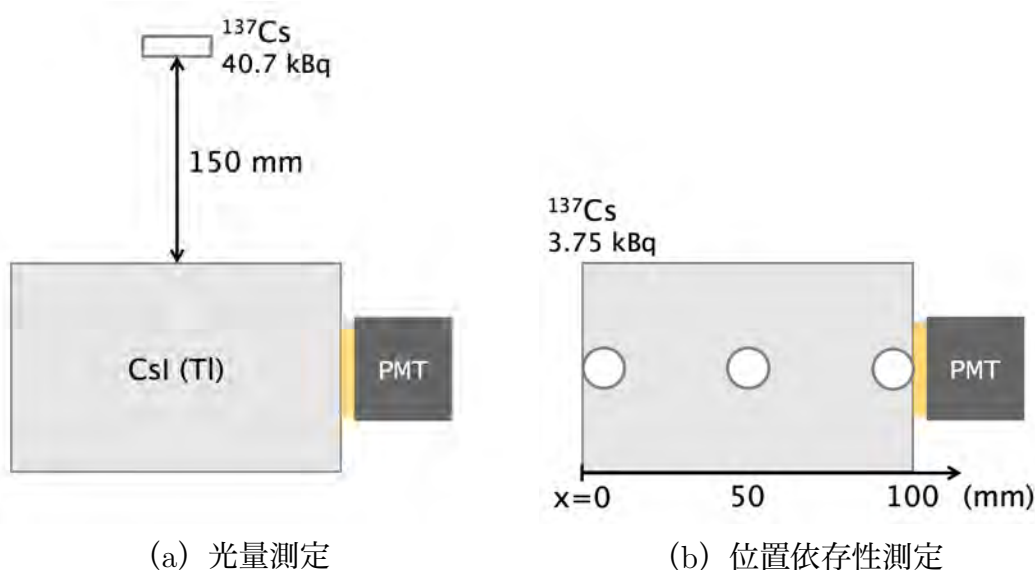


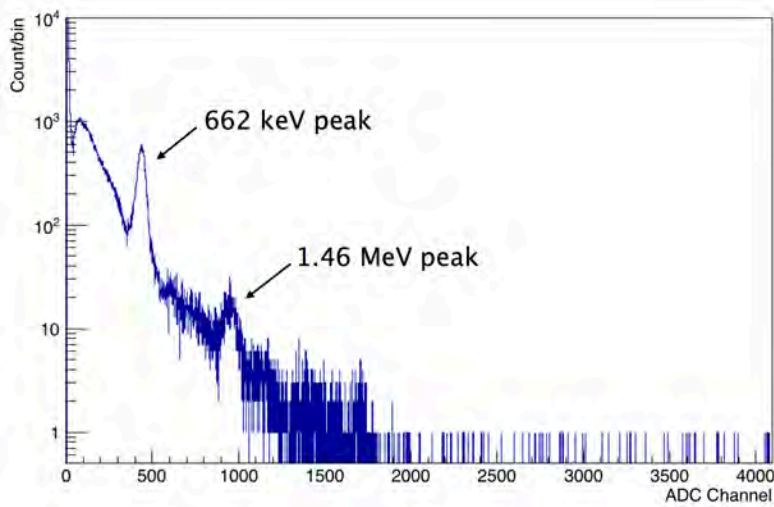
図 3.7: CsI(Tl) の場合のガンマ線線源の照射位置

3.3 測定結果

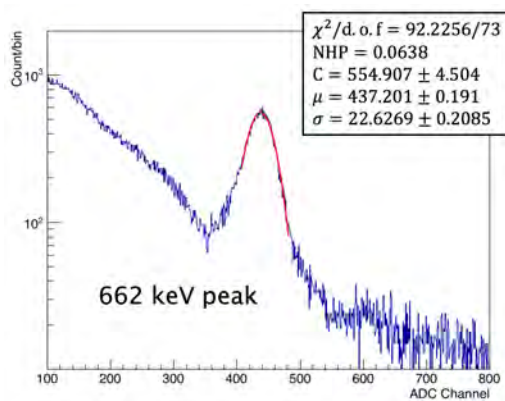
3.3.1 得られたガンマ線スペクトル

CsI(Tl) シンチレータに対し、測定の再現性を見るため同じ反射材の組み合わせで 4 回ずつ測定を行なった。測り直す際は、PMT とシリコンシートを外し、再び付け直してから同じセットアップで測定を行なった。各測定ごとに live time で 10 分間のスペクトルを取得した。

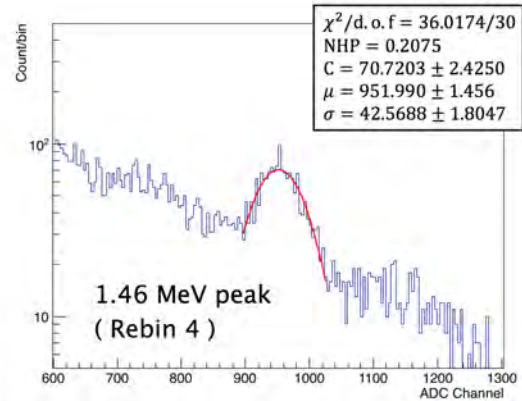
測定で得られたスペクトルの例を図 3.8 (a) に示す。これは図 3.7 (a) のように CsI(Tl) に ^{137}Cs 線源を照射したときの結果であり、反射材は (イ) ゴアテック ス 2 重を用いている。 ^{137}Cs からの 662 keV の光電吸収ピークと、環境放射能であ



(a)



(b)



(c)

図 3.8: 反射材としてゴアテックス 2 重を用いた CsI(Tl) に ^{137}Cs を照射して得られたスペクトルの一例。(a) は得られたスペクトルを横軸 ADC Channel、縦軸 Count/bin で表示している。(b) は 662 keV の輝線ピーク、(c) は 1.46 MeV の輝線ピークをそれぞれフィットしたものである。(c) は (a) のスペクトルを 4 ビンまとめて表示している。

る ^{40}K の 1.46 MeV のピークが検出できている。662 keV と 1.46 MeV のピークを gaussian のモデルでフィットしたものがそれぞれ図 3.8 (b)、(c) である。用いたモデルの式は x を Channel 数、 y をカウント数としたとき、

$$y = C \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

であり、 C は規格化定数、 μ はガウシアンを中心値、 σ は分散である。得られたパ

ラメータは図中に表示してあり、フィットがよく合っていることがわかる。また、

$$\text{FWHM} = 2C\sqrt{2\ln 2} \quad (3.2)$$

であるのでピークエネルギーにおけるエネルギー分解能は FWHM/μ で与えられる。このときの CsI(Tl) の 662 keV でのエネルギー分解能は $\sim 12\%$ 、1.46 MeV では $\sim 10.5\%$ であった。

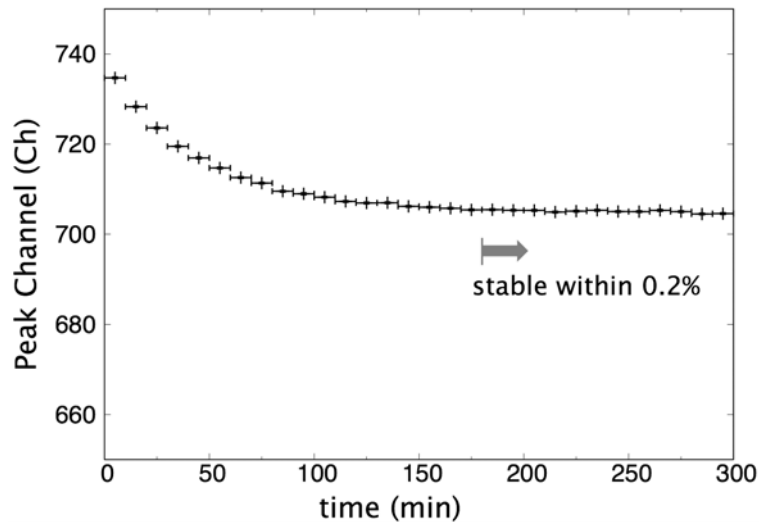


図 3.9: ^{137}Cs を照射した BGO シンチレータの 662 keV ピーク値の時間変化。4 回測定したうちの一例を表示している。

BGO シンチレータについては、恒温槽内に入れてから結晶の温度が 25.0°C に安定するまでに時間がかかるため、最初にどの程度の時間で安定するかを調べた。(イ) ゴアテックス 2 重の測定を、恒温槽に入れてから 10 分 \times 36 回 = 6 時間行った結果、3 時間経過以降では 662 keV のピーク位置の変動が $\sim 0.3\%$ 、1.46 MeV の変動が $\sim 0.5\%$ と安定していることがわかった。図 3.9 は得られた 662 keV のピーク位置の時間変化を表している。そのため、その後の測定は 10 分 \times 24 回 = 4 時間とし、解析に用いるスペクトルは 4 時間後 (24 回目) の測定結果とした。この測定を 1 セットとし、再現性を見るため 3-4 セットずつ測定を行なった。フィッティングは CsI(Tl) と同様に行い、このときの BGO のエネルギー分解能は 662 keV では $\sim 16\%$ 、1.46 MeV では $\sim 13\%$ であった。

3.3.2 検出光量

表 3.3 に示した反射材の組み合わせで、それぞれの検出光量を調べた。CsI(Tl) では同じ反射材の組み合わせで 4 回ずつ測定を行った結果、実験の再現性は 3.2%

csi/
 goa+goa/20170920_137Cs_HV600V_live10min*
 esr+esr/20170922_137Cs_HV600V_live10min*
 esr+esr+goa/20170921_137Cs_HV600V_live10min*

bgo/bgo#1/
 goa+goa/20170628*, 20170629*, 20170630*
 esr+esr/20170728*, 20170729*
 esr+esr+goa/20170711*, 20170712*, 20170718*

peak to peak であり、BGO では 4.7% peak to peak であった。これは一般にオプティカルグリースを用いた測定よりも再現性がよい。

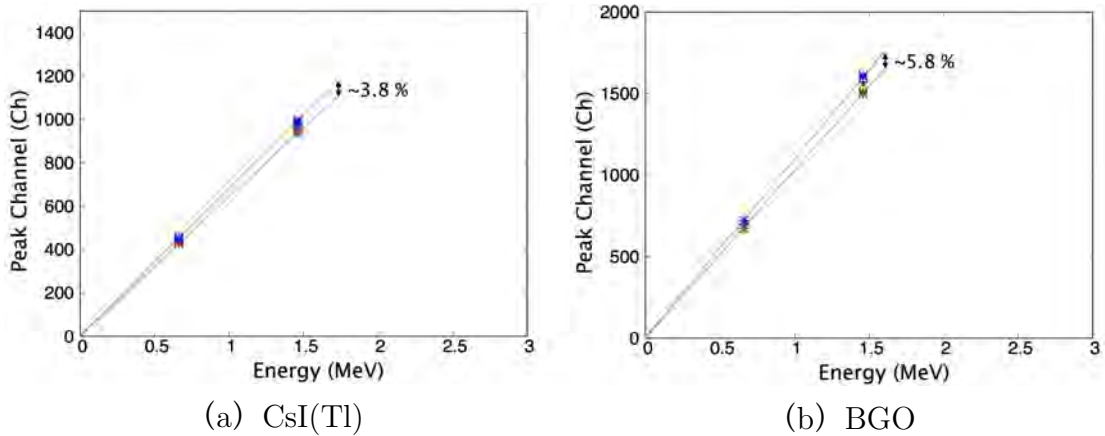


図 3.10: シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線。黒+が (イ) ゴアテックス 2 重、赤×が (ロ) ESR 2 重、青*が (ハ) ESR 2 重+ゴアテックスである。

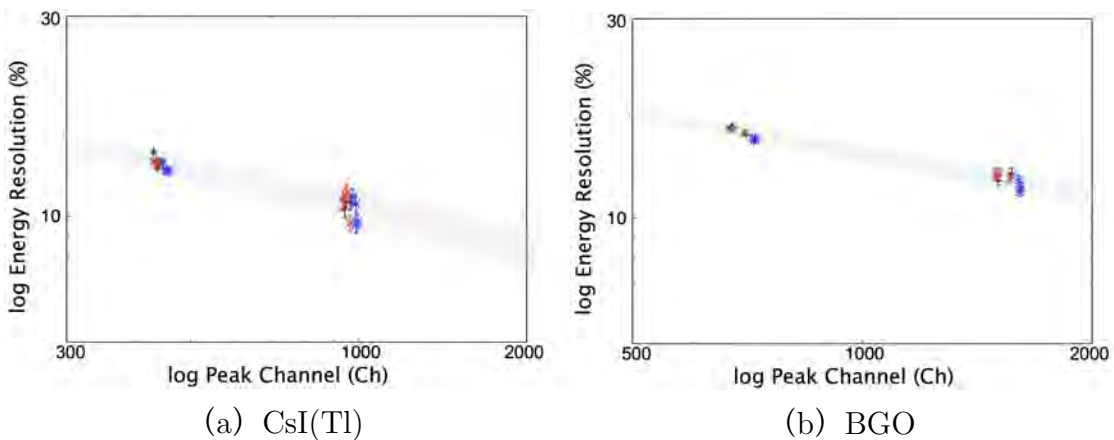


図 3.11: シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの ADC Channel とエネルギー分解能 (FWHM) の関係。対数表示してある。図中の灰色の領域は実験の再現性による系統誤差を示している。各印の色は図 3.10 と同じである。

図 3.10 は 662 keV と 1.46 MeV ピークのエネルギーと ADC Channel の関係を表したものである。それぞれの反射材の測定でエネルギーと ADC Channel は比例していることが確認できた。図 3.11 は 662 keV と 1.46 MeV ピークでの ADC Channel とエネルギー分解能の関係を対数で表したものである。全ての測定がグ

レーの誤差の範囲内でほぼ一直線上に乗っていることから、実験のセットアップに問題なく、反射材の組み合わせが異なること以外は同じ環境で測定が行われたことがわかる。

得られた検出光量は表 3.4 のようになった。CsI(Tl) と BGO のどちらにおいても、(イ) ゴアテックス 2 重と (ロ) ESR2 重での検出光量は誤差の範囲で一致した。また、(ハ) ESR2 重+ゴアはもっとも検出光量が高く、(イ) ゴアテックス 2 重に比べて CsI(Tl) では 3.9%、BGO では 6.0% の検出光量の増加が見られた。

表 3.4: 反射材をまいたシンチレータの検出光量

シンチレータ	反射材	662 keV ピーク値 * (ch)	1.46 MeV ピーク値 (ch)
CsI(Tl)	(イ)	435.735 ± 6.972 [†]	950.116 ± 14.252
	(ロ)	435.759 ± 6.972	951.002 ± 14.265
	(ハ)	452.651 ± 7.242	988.213 ± 14.823
BGO	(イ)	681.405 ± 16.354	1520.94 ± 36.50
	(ロ)	682.103 ± 16.370	1521.62 ± 36.52
	(ハ)	722.341 ± 17.336	1608.60 ± 38.61

* 3-4 回の測定の平均値を表示している。

† 誤差は系統誤差を表示している。CsI(Tl) では ±1.6%、BGO では ±2.4% とした。統計誤差は、系統誤差に比べて無視できるものだった。

3.3.3 位置依存性

それぞれの反射材において、図 3.7 (b) のように ¹³⁷Cs 線源の位置を変えることで、シンチレータの位置依存性についても調べた。位置依存性は、結晶内の透明度や結晶表面の滑らかさ、結晶の持つ性質によって決まると考えられる。結晶の透明度が高ければ、PMT から離れた位置に線源がある方が、PMT 受光面での入射角が小さくなるため蛍光が受光面に到達しやすい。反対に結晶が不透明であれば蛍光は吸収を受けるため、PMT に近い位置に線源がある方が光量が高くなると考えられる。また結晶表面が滑らかであるほど位置依存性は小さくなると考えられる。

結果を図 3.12 と表 B.2 に示す。CsI(Tl) の位置依存性は、反射材の種類に影響せずほとんど同じ傾向が見られ、図 3.12 (a) からわかるように PMT から離れた位置に線源がある方が検出光量が高かった。測定中に、位置に依存しない環境放射能である 1.46 MeV のピーク値の変動が ~1.4% と比較的大きかったため、位置依存性以外の変動を除くために 662 keV ピークの値は 1 回目の 0 mm で測定した 1.46 MeV ピークの値を基準として規格化している。表 B.2 から、ゴアテックスを用いた場合の方が位置依存性が小さくなっており、これはゴアテックス表面の反射

csi/
goa+goa/20170920_137Cs_HV600V_live10min*
esr+esr/20170923_137Cs_HV600V_live10min*
esr+esr+goa/20170921_137Cs_HV600V_live10min*

bgo/bgo#1/
goa+goa/20170703_137Cs_HV700V_line10min*
esr+esr/20170731_137Cs_HV700V_live10min*
esr+esr+goa/20170719_137Cs_HV700V_live10min*

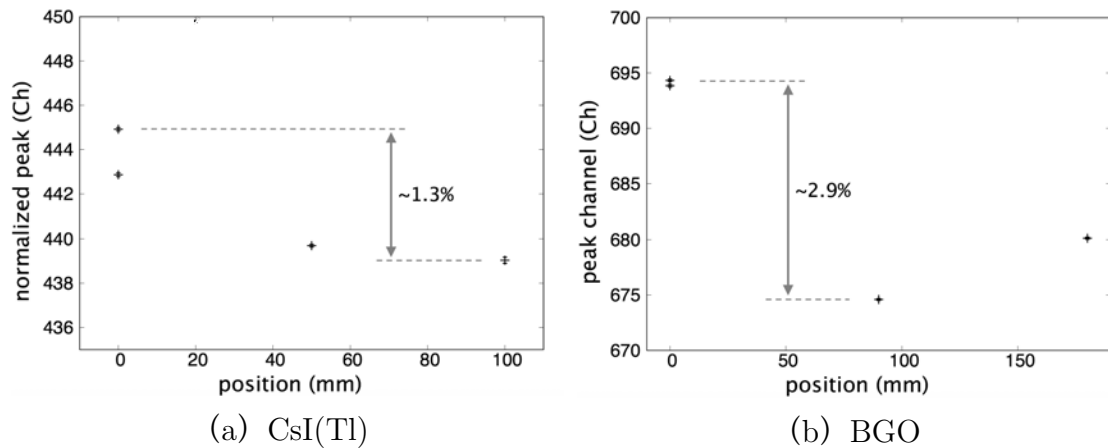


図 3.12: シンチレータに図 3.7 (b) のように線源 ^{137}Cs の位置を変えて照射した場合の照射位置と 662 keV ピークの ADC Channel の関係（ゴアテックス 2 重を用いた場合を表示）。(a) は CsI(Tl) の場合であり、662 keV ピークの Channel は位置に依存しない環境放射能である 1.46 MeV ピークの値で規格化してある。(b) は BGO である。

表 3.5: シンチレータにおける ^{137}Cs 線源の位置に依る最大光量差

シンチレータ	反射材	最大光量差 (%)
CsI(Tl)	(イ)	1.3
	(ロ)	1.6
	(ハ)	1.5
BGO	(イ)	2.9
	(ロ)	2.2
	(ハ)	2.4

が乱反射であるために位置の情報を失いやすいためであると考えられる。位置に依存する最大光量差はどの反射材を用いた場合でも $\sim 1.5\%$ と、CsI(Tl) の 662 keV でのエネルギー分解能 $\sim 13\%$ に対して小さいため、観測に用いる際の影響はほぼないと言える。また 662 keV ピークのエネルギー分解能の位置依存性については、PMT に近いほどエネルギー分解能が悪くなることがわかった。線源の位置が 0 mm のときには $\sim 10\%$ 、100 mm のときには $\sim 15\%$ であり、4 割程度の差があった。

BGO についても CsI(Tl) と同様に、図 3.12 (b) に示すように PMT から離れた位置に線源がある方が検出光量が高かった。測定中の 1.46 MeV ピークの時間変動は $< 0.5\%$ であったため、BGO に関しては 662 keV ピーク値の規格化は行っていない。CsI(Tl) とは逆に、ゴアテックスを用いた場合の方が位置依存性が大きかった。662 keV ピークのエネルギー分解能については位置による変化はほとんど

なく～15%であった。

確認のため、位置依存性測定中の1.46 MeVピークのカウントレートを求めたところ、測定内で一致していた。詳しくは付録Dで述べる。

3.4 まとめ

従来の反射材を用いて、CsI(Tl)とBGOシンチレータの測定を行なった結果を図3.13にまとめた。どちらのシンチレータの場合においても(イ)ゴアテックス2重と(ロ)ESR 2重の検出光量は誤差の範囲で一致した。さらに(ハ)ESR 2重+ゴアテックスの組み合わせは検出光量の増加が見られ、(イ)ゴアテックス2重と比較してCsI(Tl)では～3.9%、BGOでは～6.0%の増加率だった。今後は、(イ)ゴアテックス2重を基準として反射材について評価を行う。

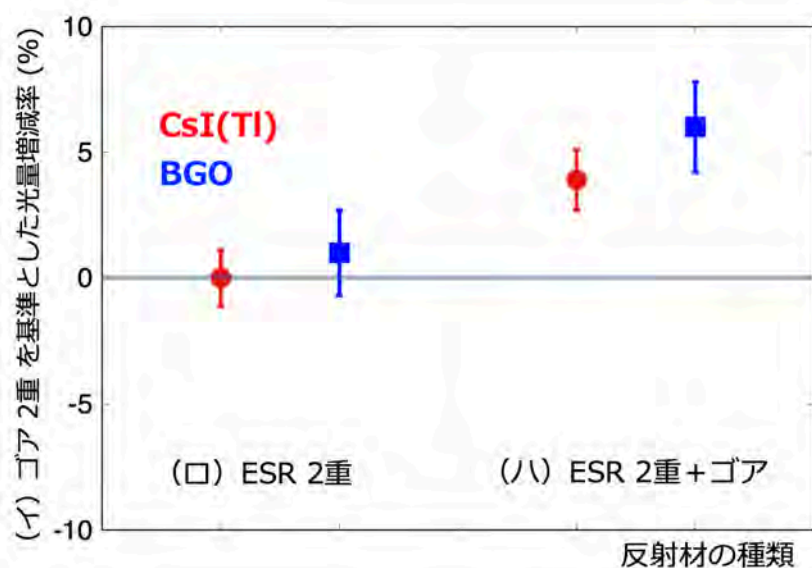


図 3.13: ゴアテックス2重を基準とした場合の反射材の種類による光量増減率。赤がCsI(Tl)、青がBGOである。エラーバーは系統誤差を表示している。

第4章 実用性向上を目指した測定

4.1 概要と目的

潮解性のある結晶は通常、アルミケースのような箱に密封して用いられる。しかし、これにはコストが多くかかるため、別の手段で解決することが望ましい。また、衛星に搭載する際には結晶シンチレータをしっかりと固定する必要があり、従来の反射材の場合には難しい点があった。これを低コストで実現するため、今回は結晶に密着することで潮解を防ぎ、安定性を保つ粘着 ESR に着目した。この粘着 ESR を用いた測定を、雷雲からのガンマ線観測として用いる CsI(Tl) シンチレータと、X線衛星のアクティブシールドとして用いられている BGO シンチレータで行う。

4.2 実験セットアップ

用いたシンチレータと基本的なセットアップは§3 と同じである。CsI(Tl) シンチレータについては、表面の状態が長期間経つと変化してしまうため、粘着 ESR を測定する直前に (イ) ゴアテックス 2 重を測定してその値を基準とした。

4.2.1 反射材

表 4.1: 結晶に用いた反射材の組み合わせ一覧

	反射材の組み合わせ
(ニ)	市販粘着 ESR + ESR + ゴアテックス
(ホ-1)	おもて粘着 ESR
(ホ-2)	おもて粘着 ESR + ESR
(ホ-3)	おもて粘着 ESR + ESR + ゴアテックス
(へ-1)	UV おもて粘着 ESR
(へ-2)	UV おもて粘着 ESR + ESR
(へ-3)	UV おもて粘着 ESR + ESR + ゴアテックス

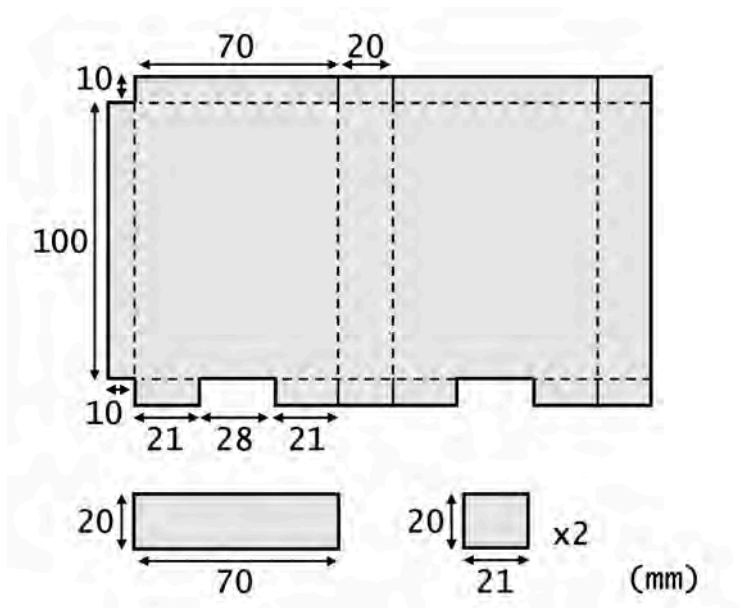


図 4.1: 用いた粘着 ESR の図面。表示した反射材の縦横の長さは、それぞれ ± 1 mm 以内の誤差をもつ。



図 4.2: おもて粘着 ESR を貼った BGO の写真。ジーテック株式会社に外注して施行作業をしてもらったもの。

用いた反射材の組み合わせは表 4.1 である。左に表記してあるものがより内側（結晶側）に用いたものである。粘着 ESR の場合は 1 枚で用いることができれば結晶に密着して反射材がずれたりすることがなく安定するので、2 重にせず 1 重での測定を（ホー 1）、（へー 1）で行なっている。粘着 ESR として結晶に貼った ESR

は例として図4.1の展開図のように切った。ジーテック株式会社に外注したものと自分で粘着 ESR を貼る作業を行なったものがあるので多少反射材の貼り方が異なるが、光量差に大きく影響はしない程度だと考えられる。市販粘着 ESR はそのまま結晶に貼ることができるが、おもて粘着 ESR と UV おもて粘着 ESR では粘着剤を結晶に貼った後に ESR または UV 強化 ESR を貼るため2重の作業が必要となる。用意した粘着剤は0.2 mm と0.1 mm のものがあり、ジーテック株式会社では0.2 mm、自分で作業を行う場合には0.1 mm のものを用いた。粘着剤はPMT取り付け部分以外の結晶面に1面ずつ貼った。粘着 ESR を貼った BGO の写真を図4.2に示す。

4.3 粘着 ESR で発生した問題

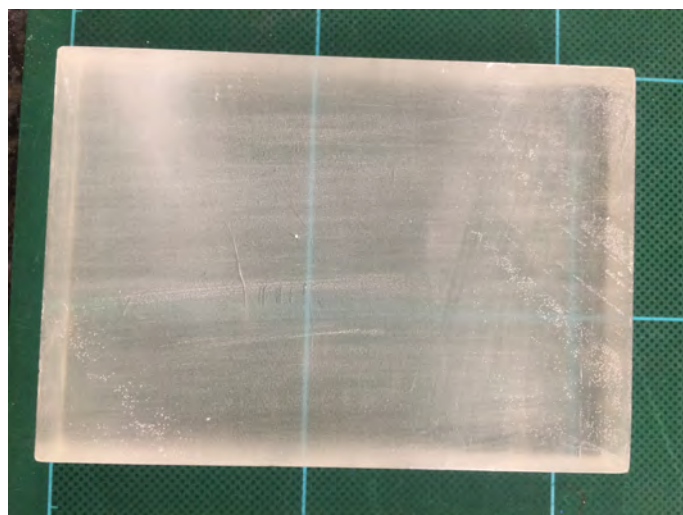


図 4.3: 粘着 ESR を剥がした後の CsI(Tl) の写真

CsI(Tl) に市販粘着 ESR を貼って測定を行なった後、CsI(Tl) から粘着 ESR を剥がそうと試みたが、結晶に粘着剤が残ってしまった。そのためイソプロピルアルコール (IPA) を用いて結晶表面を拭いたが、図4.3のように結晶に拭いた跡が残り白く濁ってしまった (IPA を用いたのは誤りであり、実際はメタノールを用いるべきであった)。また粘着剤もまだ残っていた。この状態で (イ) ゴアテックス2重を用いて光量測定を行なったところ、~8% 光量が減少していた。そのためジーテック株式会社に依頼し結晶表面を研磨してもらうことになった。

BGO については、かなり力を要するものの粘着 ESR はきれいに除去することができた。またおもて粘着 ESR よりも UV おもて粘着 ESR の方が剥がしづらいことがわかった。これは、UV 強化 ESR のコーティング面がガラス製のため、剥が

csi/
adesr/20170103_137Cs_HV600V_live10min*
adesr+esr/20170103_137Cs_HV600V_live10min*
adesr+esr+goa/20170104_137Cs_HV600V_live10min*

す際にすぐに割れてちぎれてしまうことが原因だと考えられる。以上から、粘着 ESR を用いる際には結晶によっては粘着剤が残ってしまうものや剥がしにくいものがあるため注意が必要であることがわかった。

bgo/bgo#1/
adesr/20171109*
adesr+esr/20171118*, 20171122*
adesr+esr+goa/20171116*, 20171117*
uvadesr/20171227*, 20171229*
uvadesr+esr/20171230*
unadesr+esr+goa/20171231*

4.4 測定結果

4.4.1 検出光量

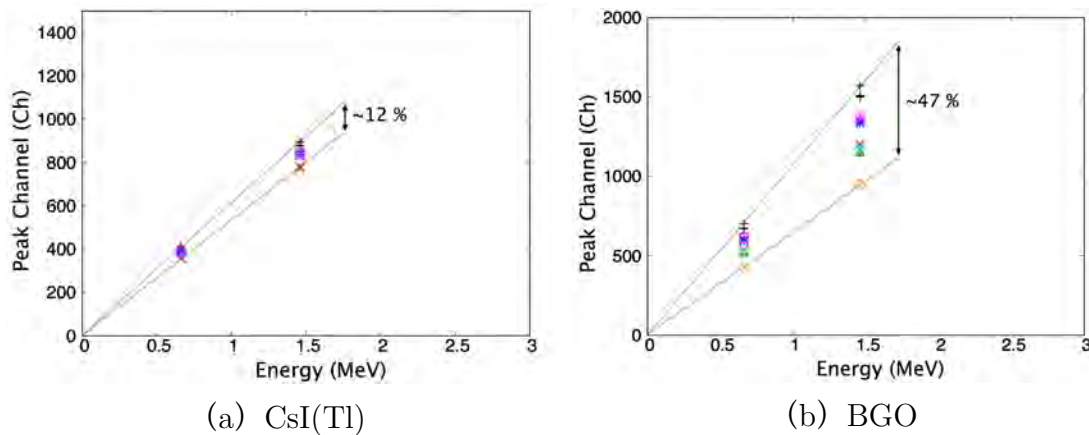


図 4.4: シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線。黒+が (イ) ゴアテックス 2重、赤×が (ホ-1) おもて粘着 ESR、青*が (ホ-2) おもて粘着 ESR + ESR、マゼンタ□が (ホ-3) おもて粘着 ESR + ESR + ゴアテックス、オレンジ○が (へ-1) UV おもて粘着 ESR、緑△が (へ-2) UV おもて粘着 ESR + ESR、ターコイズ▽が (へ-3) UV おもて粘着 ESR + ESR + ゴアテックスである。

表 4.1 に示した反射材の組み合わせで、それぞれの検出光量を調べた。同じ反射材の組み合わせで 2-3 回ずつ測定を行い、実験の再現性は CsI(Tl) では 2.8% peak to peak、BGO #1 では 1.6% peak to peak であった。図 4.2 はシンチレータにおける 662 keV と 1.46 MeV ピークのエネルギーと ADC Channel の関係を表したものである。それぞれの観測でエネルギーと ADC Channel は比例していることがわかり、比例定数のずれは CsI(Tl) で最大 ~12%、BGO で ~47% であった。図 4.5 は 662 keV と 1.46 MeV ピークでの ADC Channel とエネルギー分解能の関係を対数で表したものである。全ての測定がグレーの領域で示した誤差の範囲内ではほぼ一直線上に乗っていることから、実験のセットアップに問題なく、反射材の組み合わせが異なること以外は同じ環境で測定が行われたことがわかる。

測定で得られた検出光量を表 4.2 に示す。(イ) ゴアテックス 2重と比較すると、CsI(Tl) と BGO どちらにおいても想定どおり粘着 ESR を用いた場合は検出光量が

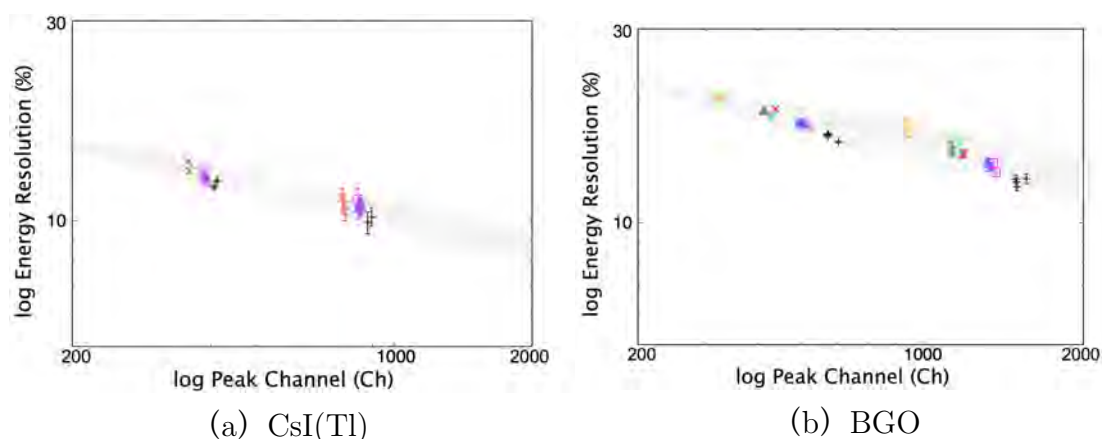


図 4.5: シンチレータに線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの ADC Channel とエネルギー分解能 (FWHM) の関係。対数表示してある。図中の灰色の領域は実験の再現性による系統誤差を示している。各印の色は図 4.2 と同じである。

表 4.2: 反射材をまいたシンチレータのそれぞれの検出光量

シンチレータ	反射材	662 keV ピーク値* (ch)	1.46 MeV ピーク値 (ch)
CsI(Tl)	(イ)	$409.372 \pm 5.731^\dagger$	886.651 ± 12.413
	(二) ‡	354.445 ± 4.962	769.018 ± 10.766
	(ホ-1)	363.329 ± 5.087	787.293 ± 11.022
	(ホ-2)	388.778 ± 5.443	843.144 ± 11.804
	(ホ-3)	386.869 ± 5.416	839.590 ± 11.754
BGO #1	(イ)	681.405 ± 16.354	1520.94 ± 36.50
	(二)	519.969 ± 4.160	1157.00 ± 9.256
	(ホ-1)	538.484 ± 4.308	1200.58 ± 9.60
	(ホ-2)	599.213 ± 4.794	1338.81 ± 10.71
	(ホ-3)	614.386 ± 4.915	1369.90 ± 10.96
	(ヘ-1)	423.488 ± 3.388	946.930 ± 7.575
	(ヘ-2)	512.320 ± 4.099	1143.23 ± 9.15
	(ヘ-3)	530.207 ± 4.242	1181.76 ± 9.45

* 2-3 回の測定の平均値を表示している。

† 誤差は系統誤差を表示している。CsI(Tl) では $\pm 1.4\%$ 、BGO では $\pm 0.8\%$ とした。統計誤差は、系統誤差に比べて無視できるものだった。

‡ (二) の測定結果のみ研磨前のものを表示している。

減少していることが確認された。また粘着 ESR のみで用いるよりも、外側に ESR やゴアテックスを追加したほうが光量は改善することがわかった。CsI(Tl) を用い

た場合では、(ホ-2) おもて粘着 ESR + ESR と (ホ-3) おもて粘着 ESR + ESR + ゴアテックスの光量は誤差の範囲で一致し、(イ) ゴアテックス 2 重に比べて 5% 程度の減少で収まることがわかった。市販粘着 ESR を用いた場合の光量は、付録 B に示した (イ) ゴアテックス 2 重と比較して 15% 減少しており、これはおもて粘着 ESR を単体で用いた場合よりも低い光量であった。

BGO を用いた場合でも、市販粘着 ESR を用いた場合がもっとも光量が低かった。(ホ-3) おもて粘着 ESR + ESR + ゴアテックスを用いた場合がもっとも光量が高く、(イ) ゴアテックス 2 重に比べて 10% 以内の減少に抑えられた。しかし、(ホ) おもて粘着 ESR を用いた 3 測定の方が (へ) UV おもて粘着 ESR よりも検出光量が高いことがわかり、予想に反する結果となった。

4.4.2 位置依存性

表 4.3: シンチレータにおける ^{137}Cs 線源の位置に依る最大光量差

シンチレータ	反射材	最大光量差 (%)
CsI(Tl)	(ニ)	2.8
	(ホ-1)	-1.7*
	(ホ-2)	-2.4
	(ホ-3)	-2.7
BGO #1	(ニ)	3.0
	(ホ-1)	2.2
	(ホ-2)	2.4
	(ホ-3)	2.4
	(へ-1)	2.6
	(へ-2)	2.4
	(へ-3)	2.5

* 線源が PMT に近い側にある方が検出光量が高かった結果をマイナスで表示している。

それぞれの反射材において、図 3.7 (b) のように ^{137}Cs 線源の位置を変えることで、シンチレータの位置依存性についても調べた。結果を表 4.3 に示す。CsI(Tl) の位置依存性は、反射材の種類に影響せずほとんど同じ傾向が見られたが、研磨してから時間が経ったものを使用したため、研磨前や研磨直後とは異なり、PMT に近い位置に線源がある方が検出光量が高かった。これは、CsI(Tl) の表面が若干の潮解性により研磨直後よりも曇ってしまったため、PMT から遠い側に置いた場合には途中で蛍光が吸収されてしまったためだと考えられる。位置に依存する最大光量差は 2-3% と、CsI(Tl) の 662 keV でのエネルギー分解能 ~ 13% に対して小

さいため、観測に用いる際の影響はほぼないと言える。662 keV ピークのエネルギー分解能の位置依存性については、PMT に近いほどエネルギー分解能が悪く、線源の位置が 0 mm のときには～11%、100 mm のときには～16% であり、4 割程度の差があった。

BGO の場合も反射材の種類に影響せずほとんど同じ傾向が見られ、PMT から離れた位置に線源がある方が検出光量が高かった。位置に依存する最大光量差は 2-3% 程度と、このときの BGO の 662 keV でのエネルギー分解能～18% に対して小さいため、観測に用いる際の影響はほぼないと言える。位置によるエネルギー分解能の変化はほとんどなかった。

4.5 まとめと考察

測定結果を図 4.6, 4.7 にまとめた。CsI(Tl) を用いた測定の結果、ゴアテックス 2 重と比較した検出光量は市販粘着 ESR を用いた場合には～15%、おもて粘着 ESR では～5% の減少で抑えられていることがわかった。これは十分に雷雲ガンマ線検出器として用いることができる性能だと考えられる。この結果に基づき、実際に $30 \times 5 \times 5 \text{ cm}^2$ のサイズの CsI(Tl) に、市販粘着 ESR とおもて粘着 ESR を反射材として用いたものを製造し、雷雲ガンマ線検出器として運用を行なった。そもそもの CsI(Tl) に性能のばらつき（外見や結晶の濁り、表面の凹凸など）が大きいいため、光量の定量的な評価は難しいものの、ESR を粘着させることによる光量の低下が 21% 以下であることが示された。また、実際に 2017 年夏の乗鞍岳山頂や、冬の柏崎市および金沢市での雷ガンマ線観測に実際に用いられ、大きな性能劣化が起きないことも確認された。詳しくは付録 F にまとめた。

BGO については、ゴアテックス 2 重と比較して市販粘着 ESR では～24% の光量減少が見られ、おもて粘着 ESR を用いた場合には～10% の減少で収まった。しかし UV おもて粘着 ESR を用いたときには、おもて粘着 ESR よりも大幅な光量の低下が見られた。これは UV おもて粘着 ESR を貼る際に、おもて粘着 ESR よりも多く気泡が入ってしまったなどの理由が考えられ、作業性の改善が求められる。光量低下の正確な原因はわかっていないため今後詳しく調べる必要がある。

作業性の課題について、具体的に以下のようにまとめることができる。まず粘着 ESR は気泡を入れずに貼ることが難しく、施行作業に時間がかかるという問題点がある。特に UV おもて粘着 ESR の場合には、保護シートが付いておらず折り目もつけられないためさらに貼ることが困難になる。また、結晶から粘着 ESR を剥がすことが難しいことにも注意が必要であった。さらに CsI(Tl) の場合には粘着剤が残ってしまう可能性があり、BGO ではきれいに剥がせるもののかかり力を要することがわかった。UV おもて粘着 ESR は剥がすのにも苦勞するため、粘着 ESR として用いるのにはあまり向いていないと考えられる。

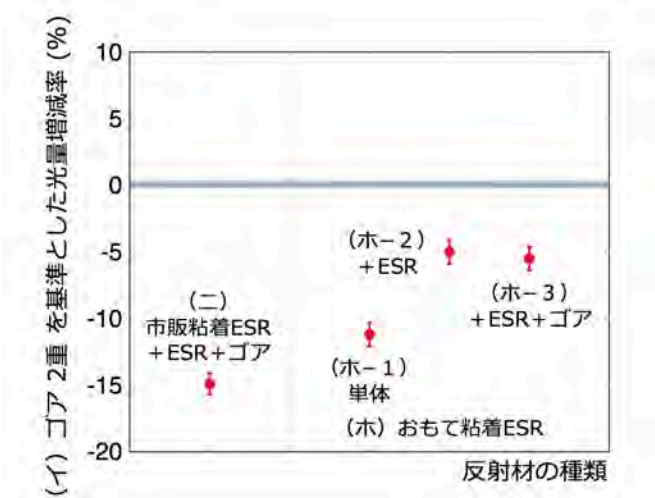


図 4.6: CsI(Tl) シンチレータにおける、ゴアテックス 2 重を基準とした場合の反射材の種類による光量増減率。エラーバーは系統誤差を表示している。

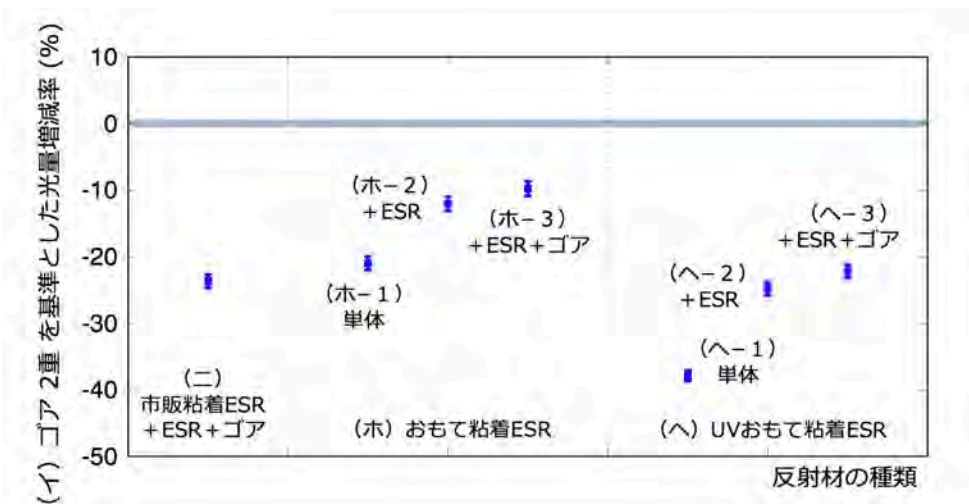


図 4.7: BGO シンチレータにおける、ゴアテックス 2 重を基準とした場合の反射材の種類による光量増減率。エラーバーは系統誤差を表示している。

粘着 ESR は結晶との間に空気が入らないため、潮解性対策として有効である。さらに粘着 ESR は一度貼れば自然に剥がれることはなく、長期の運用を行うことができる。また粘着 ESR の場合には反射材の中で結晶がずれたり揺れたりせず、非常に安定感があるので取り扱いがしやすい。コンパクトでもある。そのため、衛星をはじめとする様々な環境で適用できると考えられる。

第5章 光量増加を目指した測定

5.1 概要と目的

この章では、検出光量の増加を目指した実験を行う。検出光量が多ければ、より広いエネルギー帯域で信号を検出することができ、エネルギー分解能が向上することでスペクトルのより細かい構造を見ることができる。アクティブシールドとしては、バックグラウンドをさらに効率よく除去することができるようになる。さらに「ひとみ」衛星のアクティブシールドでは複数種類の反射材を用いているが、同程度の光量を実現できるより簡素な反射材を確立できれば、作業工程を減らしコストも抑えられる。また現状使用されているゴアテックスは、圧力に弱く押しつぶされて隙間を作ってしまったたり反射率が低下するという問題があり、数 mm の隙間を設ける必要が有るため、隙間なく結晶を並べる上で問題となりうる。そのため、今回は丈夫で厚みの小さい反射材である ESR の反射率をさらに向上させた UV 強化 ESR を用いた測定を行なった。

5.2 実験セットアップ

5.2.1 シンチレータ

この実験では、§3 で用いたシンチレータに加え、BGO #1 と同じサイズの BGO (BGO #2 とする)、さらに実際に「ひとみ」衛星のアクティブシールドとして用いられたものと同じ型の A-type BGO、最後に蛍光波長の短い PWO 結晶を用いた。新たに加わったシンチレータの情報は表 5.1 に示す。

表 5.1: 新たに加えたシンチレータの基本情報

シンチレータ	BGO #2	A-type BGO	PWO
大きさ (mm ³)	180 × 72 × 20	142 × 120 × 30	22 × 22 × 13
表面処理	全面鏡面研磨	全面鏡面研磨	全面研磨 (多少キズあり)
結晶 ID		astro-5.SGD A.12.10	

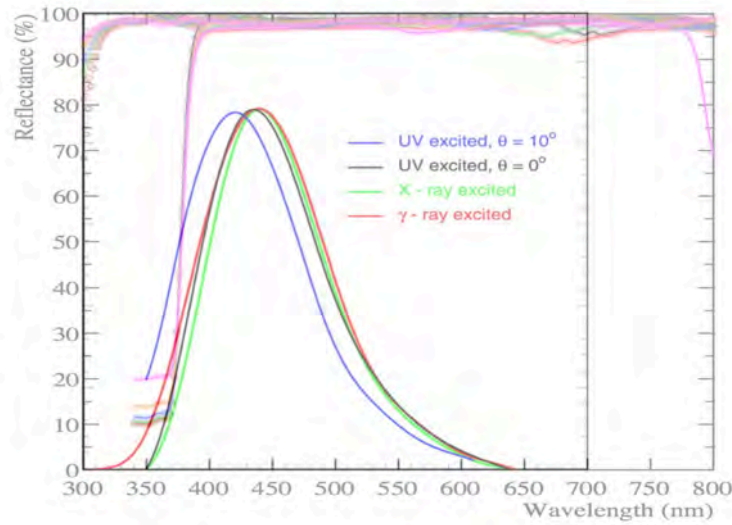
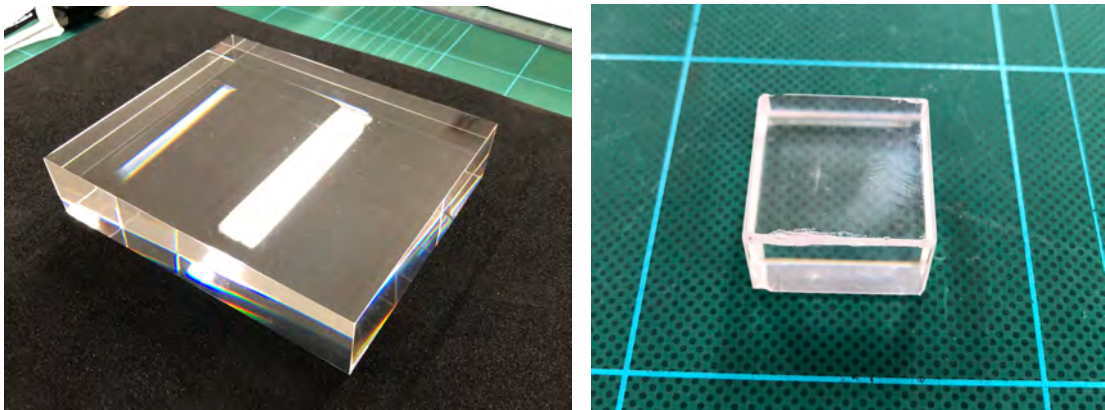


図 5.1: PWO の蛍光波長帯域と ESR、UV 強化 ESR の反射率のグラフ (図 2.8) を重ねて表示したもの。PWO の蛍光グラフの色の違いは図中に書いてあるように励起する光の違いである。今回はガンマ線を照射しているの赤い線に着目する。



(a) A-type BGO

(b) PWO

図 5.2: (a) A-type BGO、(b) PWO の写真

A-type BGO は 2012 年 5 月 15 日に木箱に封入され、NIIC から送られたものである。その後 OKEN でサイズ調整のため切削加工が行われ、全面が光学研磨された状態で納入された。2012 年 9 月 3 日に PI 光量チェックがされており、ゴアテックス 2 重を反射材とした測定で、その光量は標準的なものであることが確認されている。PWO はジーテック株式会社からサンプルとして購入したものである。図 5.1 からわかるように、PWO の蛍光波長は CsI(Tl) や BGO と比べて短波長側であり、UV 強化 ESR の効果が大きく見られると期待される。A-type BGO と PWO の

写真を図 5.2 に示す。

5.2.2 セットアップ

基本的なセットアップは§3 と同様であり、用いた PMT、HV 設定値と恒温槽内で安定させるまでの時間はそれぞれのシンチレータで表 5.2 のようになっている。測定時間はすべての測定で 10 分間である。恒温槽内で安定させるまでの時間は BGO #1 では 4 時間としていたが、2 時間後でも実験の再現性の範囲内で安定しているのが確認されたため、BGO #2 と A-type BGO では 2 時間とした。PWO は結晶が小さいために温度安定に時間を要さないため、1 時間とした。

表 5.2: 用いたシンチレータのセットアップ

シンチレータ	CsI(Tl)	BGO #1	BGO #2	A-type BGO	PWO
用いた PMT	PMT1	PMT2	PMT2	PMT 2	PMT2
HV の強さ (V)	-600	-700	-700	-700	-900
恒温槽内での安定時間	なし	4 時間	2 時間	2 時間	1 時間

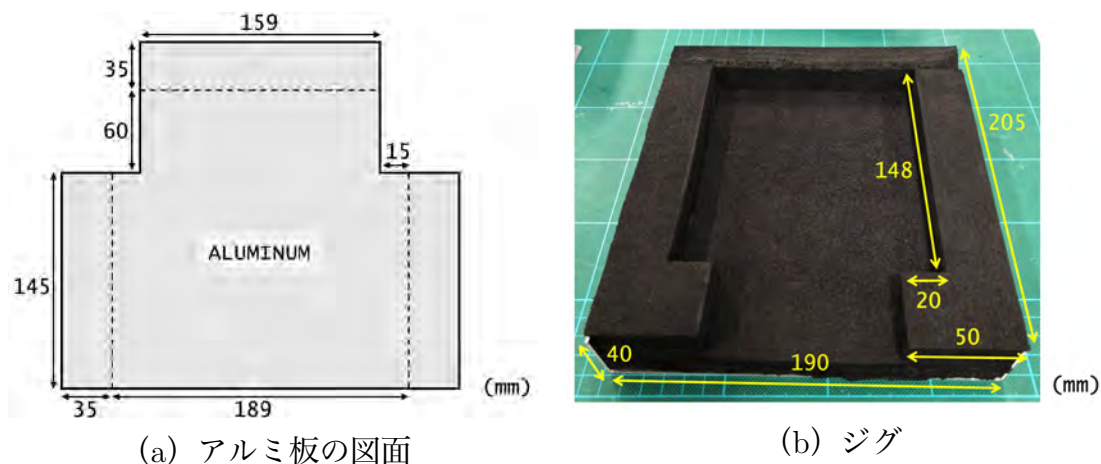


図 5.3: A-type BGO 用に作成したジグ。(a) は衝撃吸収マットの土台となるアルミ板の図面であり、(b) は完成したジグの写真である。表示した数値は全て ± 1 mm 以内の誤差を含む。

A-type BGO は大きくて重いため、クッション性があり結晶全体を覆えるジグを作成した。アルミ板の上に 2 cm 厚の黒い衝撃吸収マットを両面テープで固定し、BGO サイズよりも 0.5–1 cm 余裕をもたせたポケットにした。アルミ板の展開図と完成写真を図 5.3 に示す。

5.2.3 反射材

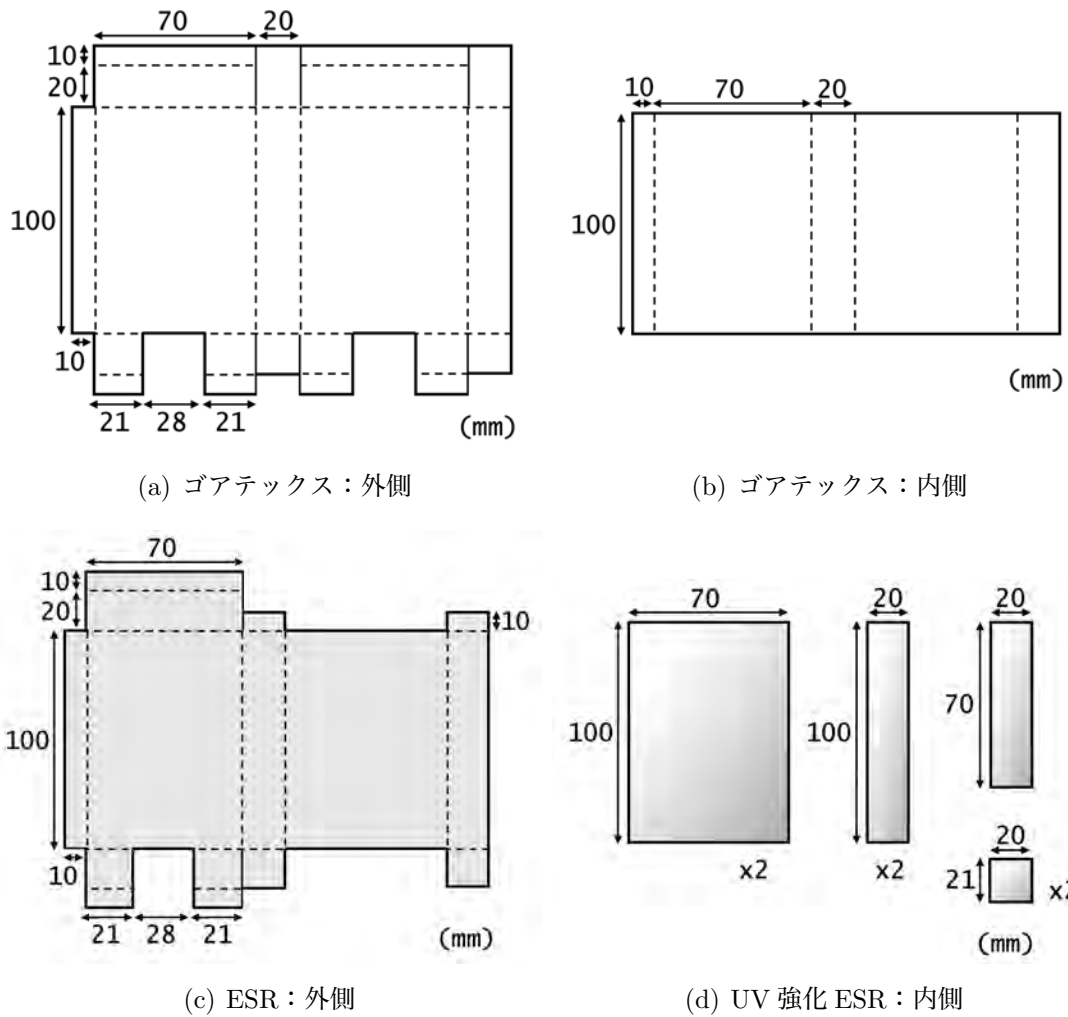


図 5.4: 用いた反射材の図面。(a) はもともと外側にまいたゴアテックス、(b) はゴア 2 重の場合に内側にまいたゴアテックス、(c) は外側にまいた ESR、(d) は内側に入れた UV 強化 ESR である。表示した反射材の縦横の長さは、それぞれ ± 1 mm 以内の誤差をもつ。

表 5.3: 結晶に用いた反射材の組み合わせ一覧

	反射材の組み合わせ
(ト)	UV 強化 ESR + ESR
(チ)	UV 強化 ESR + ESR + ゴアテックス

用いた反射材の組み合わせは表 5.3 である。CsI(Tl)、BGO #1、BGO #2、A-type BGO に用いた反射材はそれぞれ図 5.4 の展開図のように切った。サイズは CsI(Tl) の場合を示している。PMT の受光面を取り付ける面は、シリコンラバーの大きさが $25 \times 25 \text{ mm}^2$ なので、それぞれの反射材において $26\text{--}28 \text{ mm}^2$ の面積が空くようにした。PWO の場合には $22 \times 22 \text{ mm}^2$ の面を PMT 取り付け面とし、それ以外の部分は他のシンチレータと同じように反射材をまいた。

5.2.4 ガンマ線の照射

A-type BGO へのガンマ線の照射は図 5.5 のように行なった。これは y 方向に対しても結晶の幅が十分にあるため、位置依存性の有無を調べたかったからである。位置依存性の測定については、初めに $(x, y) = (0, 0), (71, 60), (142, 120), (142, 0), (0, 120)$ の計 5 箇所で行なったが、 y 方向のみでの違いはほぼ見られなかったため、以後の測定では $(x, y) = (0, 0), (71, 60), (142, 120)$ の 3 点についてのみ測定を行なった。PWO については、サイズが小さいため線源は離さずにつけておき、位置依存性は測定しなかった。

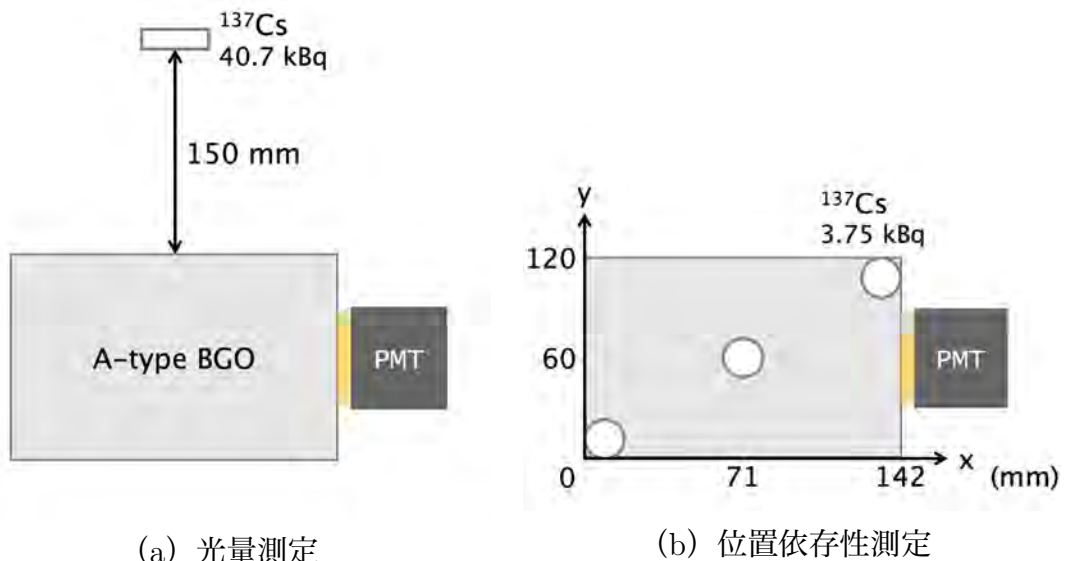
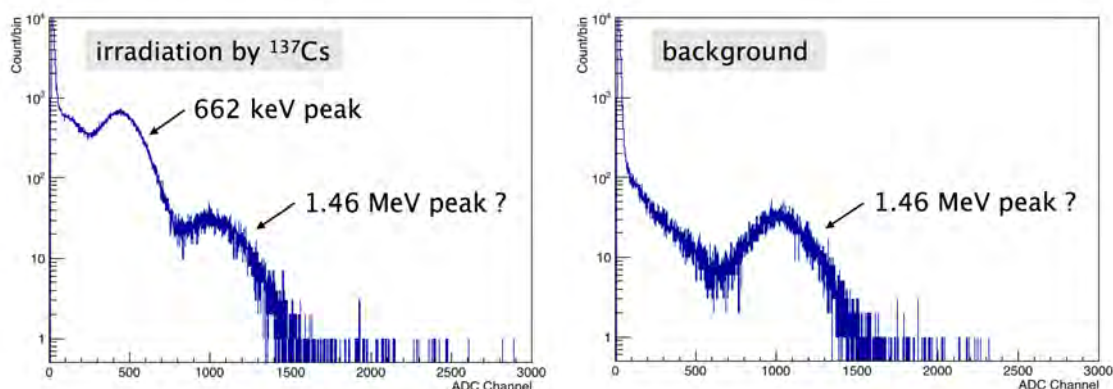


図 5.5: CsI(Tl) の場合のガンマ線線源の照射位置

5.3 測定結果

5.3.1 PWOのガンマ線スペクトル

PWOは図2.2からわかるように、室温(25.0°C)ではシンチレーション光への変換効率がBGOの半分程度と低いため、図5.6(a)のようにエネルギー分解能が悪く662 keVピークに1.46 MeVだと思われるピークが埋もれてしまっている。また図5.6(b)のように線源を当てずにバックグラウンドのスペクトルを見たところ、1.46 MeVだと思われるピークのみが見られた。



(a) ¹³⁷Csを照射した場合のスペクトル (b) バックグラウンドスペクトル

図5.6: PWOシンチレータに (a) ¹³⁷Csを照射したとき得られたスペクトルと (b) 線源を置かずに得られたバックグラウンドのスペクトル

まずエネルギー較正を行うことで、スペクトルに見られているピークが考えている輝線と合っているかどうか調べた。そのため¹³⁷Csだけではなく、²²Na線源も用いて511 keVと1.27 MeVのピークも取得し、4点でエネルギー較正を行なった。結果を図5.7に示す。4点が一本の直線上に乗っておらず、511 keVと662 keV、1.27 MeVと1.46 MeVがそれぞれ原点を通る同一直線上に乗っていた。図5.7には、511 keVと662 keVに合わせた直線を赤点線で示している。このとき1.27 MeVと1.46 MeVだと仮定したピークが高めに出ている。これは、環境放射能である²⁰⁸Tlの2.6 MeVなどの1.46 MeVよりも高い輝線が混じってしまったため、これらのピークが高めに出ていると考えられる。本測定では相対的な光量に着目しているため、PWOについては¹³⁷Csを照射したときの662 keVのピークの検出光量のみを使用した。

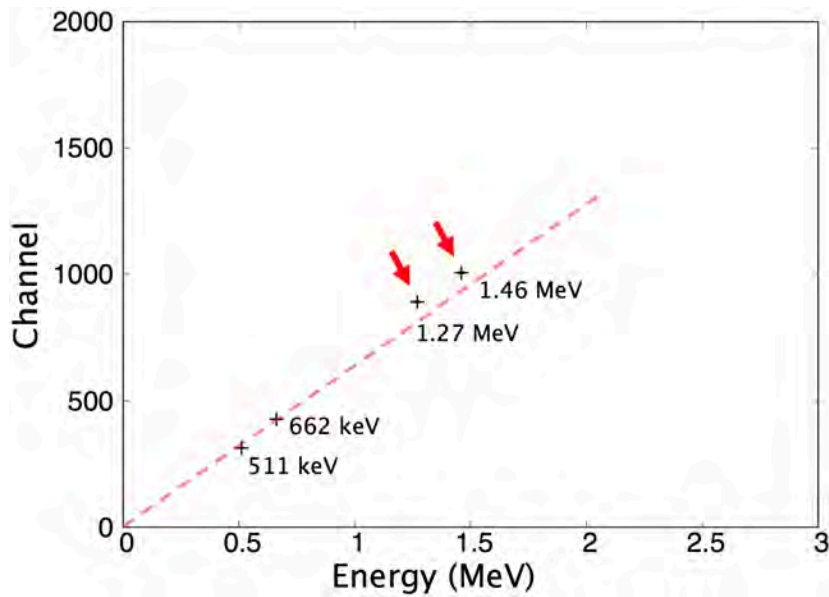
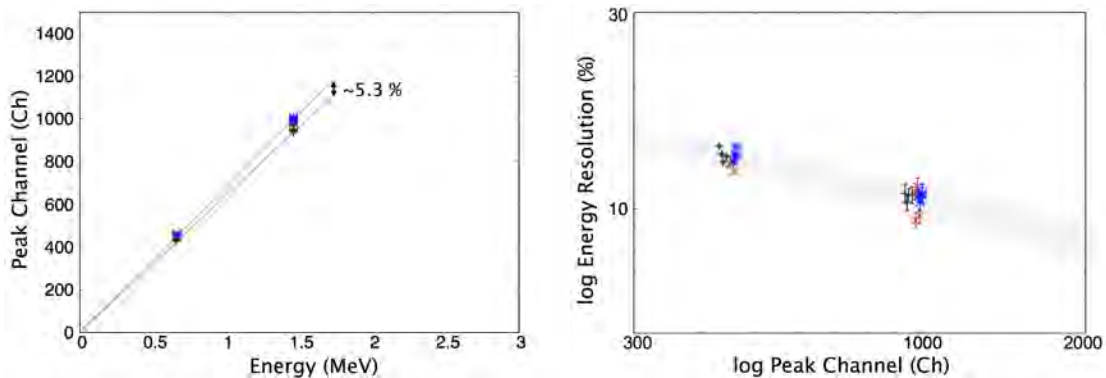


図 5.7: PWO のエネルギー較正のグラフ。赤点線は原点と 511 keV と 662 keV の 3 点を結んだ直線である。赤矢印は 1.27 MeV と 1.46 MeV がこの直線より上に出ていることを示している。

5.3.2 検出光量



(a) エネルギー較正曲線

(b) Channel とエネルギー分解能の関係

図 5.8: (a) CsI(Tl) に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線、(b) CsI(Tl) に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの ADC Channel とエネルギー分解能の関係を対数表示したもの。黒 + が (イ) ゴアテックス 2 重、赤 × が (ト) UV 強化 ESR + ESR、青 * が (チ) UV 強化 ESR + ESR + ゴアテックスである。

csi/
 uvesr+esr/20170924_137Cs_HV600V_live10min*
 uvesr+esr+goa/20170925_137Cs_HV600V_live10min*

45

pwo/
 uvesr+esr/20171217*
 uvesr+esr+goa/20171216*, 20171218*

bgo/bgo#1/
 uvesr+esr/20170725*, 20170726*, 20170727*
 uvesr+esr+goa/20170727*, 20170728*

bgo/bgo#2/
 uvesr+esr/20171106*, 20171107*

bgo/bgo_atype
 uvesr+esr/20171201*
 uvesr+esr+goa/20171204*

図 5.8 (a) は CsI(Tl) における 662 keV と 1.46 MeV ピークのエネルギーと ADC Channel の関係を表したものである。それぞれの観測でエネルギーと ADC Channel は比例していることがわかり、比例定数のずれは最大～5.3%であった。図 5.8 (b) は 662 keV と 1.46 MeV ピークでの ADC Channel とエネルギー分解能の関係を対数で表したものである。全ての測定がグレーの誤差の範囲内でほぼ一直線上に乗っていることから、実験のセットアップに問題なく、反射材の組み合わせが異なること以外は同じ環境で測定が行われたことがわかる。他のシンチレータについては付録 E で示す。

表 5.4: 反射材をまいたシンチレータのそれぞれの検出光量

シンチレータ	反射材	662 keV ピーク値* (ch)	1.46 MeV ピーク値 (ch)
CsI(Tl)	(イ)	435.735 ± 6.972 [†]	950.116 ± 14.252
	(ト)	452.180 ± 7.235	985.907 ± 14.789
	(チ)	459.310 ± 7.349	1001.03 ± 15.02
BGO #1	(イ)	681.405 ± 16.354	1520.94 ± 36.50
	(ト)	747.292 ± 16.440	1662.91 ± 39.91
	(チ)	731.651 ± 16.096	1628.54 ± 39.08
BGO #2	(イ)	683.425 ± 11.618	1521.57 ± 25.87
	(ト)	723.939 ± 12.307	1612.00 ± 27.40
	(チ)	測定なし	測定なし
A-type BGO	(イ)	548.807 ± 10.427	1228.62 ± 23.34
	(ト)	555.400 ± 10.553	1240.52 ± 23.57
	(チ)	603.662 ± 11.470	1346.95 ± 25.59
PWO	(イ)	329.454 ± 1.977	
	(ト)	327.133 ± 1.963	
	(チ)	322.543 ± 1.935	

* 2-4 回行なった測定の平均値を表示している。

[†] 誤差は系統誤差を表示しており、それぞれのシンチレータでの実験の再現性から CsI(Tl) では ±1.6%、BGO #1 では ±2.4%、BGO #2 では ±1.7%、A-type BGO では ±1.9%、PWO では ±0.6% とした。統計誤差は、系統誤差に比べて無視できるものだった。

それぞれの検出光量は表 5.4 のようになった。基準となる (イ) ゴアテックス 2 重でのピークの値はグレーで表示している。(イ) ゴアテックス 2 重と比較すると、CsI(Tl) と BGO においては (ト) UV 強化 ESR + ESR、(チ) UV 強化 ESR + ESR + ゴアテックスのどちらも全て光量が増加していた。また、CsI(Tl)、BGO #1、BGO #2 では (ト) と (チ) の検出光量は誤差の範囲で一致した。つまり UV 強化 ESR を用いた場合には、ゴアテックスを外側にまく必要がないということを示している。また、A-type BGO では BGO #1、#2 に比べてサイズが大きいため、シンチレーション光が反射する回数が増え反射材の反射率の影響が大きく効くと

考えられたが、(イ) ゴアテックス 2 重と (ト) UV 強化 ESR + ESR は光量が誤差の範囲で一致していた。ただし (チ) UV 強化 ESR + ESR + ゴアテックスでは ~9.5% と大幅な光量増加が見られた。PWO に関しても、図 5.1 から UV 強化 ESR の反射率向上に今回用いた他のシンチレータよりも影響を受けると考えたが、(イ) ゴアテックス 2 重と比較した場合には光量増加は見られなかった。

5.3.3 位置依存性

それぞれの反射材において、図 3.7 (b) や図 5.5 (b) のように ^{137}Cs 線源の位置を変えることで、シンチレータの位置依存性について調べた。結果を表 5.5 に示す。シンチレータの位置依存性は、反射材の種類に影響せずほとんど同じ傾向が見られ、BGO #2 以外は PMT から離れた位置に線源がある方が検出光量が高かった。ただし、ゴアテックスを用いた場合の方が位置依存性が小さくなっており、これはゴアテックス表面の反射が乱反射であるために位置の情報を失いやすいためであると考えられる。また位置に依存する最大光量差はどのシンチレータにおいても ~2% と、662 keV でのエネルギー分解能に対して小さいため、観測に用いる際の影響はほぼないと言える。

662 keV ピークのエネルギー分解能の位置依存性については、CsI(Tl) は PMT に近いほどエネルギー分解能が悪くなっており、4 割程度の差があった。BGO では結晶中央に線源を置いた場合に若干エネルギー分解能が良かったが、ほとんど位置依存性はなかった。

表 5.5: シンチレータにおける ^{137}Cs 線源の位置に依る最大光量差

シンチレータ	反射材	最大光量差 (%)
CsI(Tl)	(ト)	1.7
	(チ)	1.5
BGO #1	(ト)	2.2
	(チ)	1.7
BGO #2	(ト)	-1.5*
	(チ)	測定なし
A-type BGO	(ト)	2.1
	(チ)	1.9

* 線源が PMT に近い側にある方が検出光量が高かった結果をマイナスで表示している。

5.4 まとめと考察

測定結果を図 5.9 にまとめる。CsI(Tl) と BGO の 2 種類のシンチレータを用いて測定を行なった結果、UV 強化 ESR で検出光量が顕著に増加することは確認できなかった。これは、UV 強化 ESR で反射率が向上した波長帯域が $> 400 \text{ nm}$ である (図 2.8) のに対し、CsI(Tl) や BGO の蛍光波長帯域は短波長側で $\sim 380 \text{ nm}$ までしかない (図 2.2) ため、反射の効果を受けた蛍光が少なかったためだと考えられる。また BGO シンチレータをさらに大きいものにして反射材の効果の影響を大きくすること、蛍光波長帯域が $300\text{--}650 \text{ nm}$ (図 2.2) と UV 強化 ESR で向上した波長帯域により重なっている PWO を使うことで UV 強化 ESR の効果を見ること、という 2 つの面から測定を行ったが、A-type BGO と PWO のどちらの結晶でも顕著な光量増加は見られなかった。

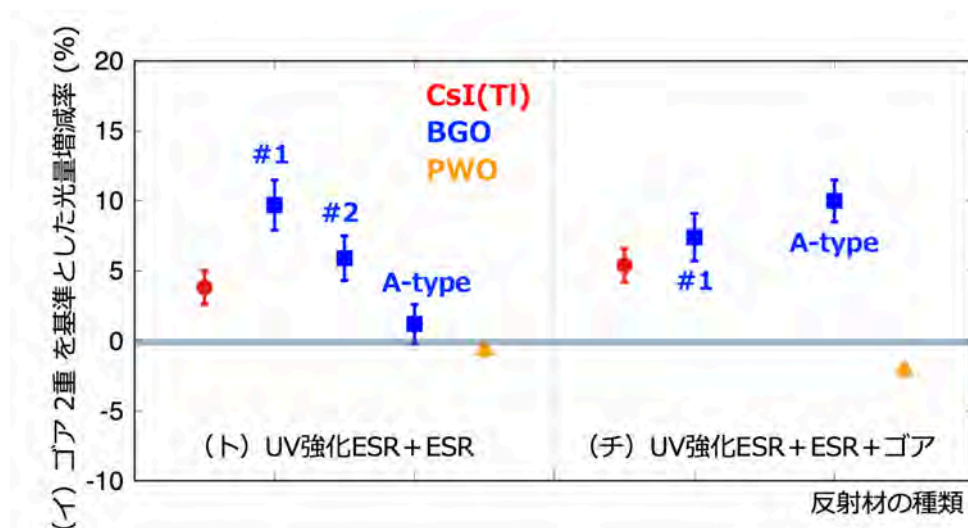


図 5.9: ゴアテックス 2 重を基準とした場合の反射材の種類による光量増減率。赤が CsI(Tl)、青が BGO、オレンジが PWO である。エラーバーは系統誤差を表示している。

しかし、(ト) UV 強化 ESR + ESR の反射材の組み合わせにおいて (イ) ゴアテックス 2 重と同程度かそれ以上の検出光量を得ることができた。すなわち、ゴアテックスを反射材として用いることに適していない場合には UV 強化 ESR を代用することができることがわかった。また A-type BGO を除くシンチレータの場合には、(ト) UV 強化 ESR + ESR と (チ) UV 強化 ESR + ESR + ゴアテックスで光量差はほとんどなかったため、UV 強化 ESR を用いた場合にはゴアテックスがなくても十分にシンチレーション光を反射することができていると考えられる。今後は、より UV 強化 ESR についての性質を調べ、UV 強化 ESR による検出光量の増加が顕著に見られるような実験を行いたい。

第6章 反射材についての考察

6.1 測定結果のまとめ

§3, 4, 5で行なった測定結果を表6.1にまとめた。1行目は測定したシンチレータの種類、2行目は実験の再現性による系統誤差、3行目は(イ)ゴアテックス2重で得られた662 keVピークのChannel値である。4行目以降は、反射材における検出光量の増減率を、(イ)ゴアテックス2重を基準として表したものである。赤文字は(イ)ゴアテックス2重よりも光量が増加したものの、青文字は減少したものである。また、この表からわかることを以下に記す。

- CsI(Tl)、BGO #1、BGO #2 では(イ)ゴアテックス2重と(ロ)ESR 2重は誤差の範囲内で一致した。(ハ)ESR 2重+ゴアテックス、(ト)UV強化ESR + ESR、(チ)UV強化ESR + ESR +ゴアテックスは誤差の範囲で一致し、(イ)ゴアテックス2重と比較して4-9%程度光量が増加した。
- A-type BGO では(イ)ゴアテックス2重、(ハ)ESR 2重+ゴアテックス、(ト)UV強化ESR + ESRは誤差の範囲内で一致。(ロ)ESR2重はこれらよりも光量が低く、(チ)UV強化ESR + ESR +ゴアテックスでは高かった。
- PWOでは(イ)ゴアテックス2重と(ト)UV強化ESR + ESRは誤差の範囲で一致。その他の反射材を用いた場合にはこれらより光量が低かった。
- CsI(Tl)とBGO #1のどちらにおいても粘着ESRの中では(ホ-3)おもて粘着ESR + ESR +ゴアがもっとも検出光量が高く、(イ)ゴアテックス2重と比較して~10%の光量低下に収まった。外側にESRやゴアテックスを巻いた方が光量が増加した。市販粘着ESRを用いた場合がもっとも光量が低かった。

表 6.1: ゴアテックス 2 重を基準とした場合のシンチレータの反射材の違いによる検出光量の増減率

シンチレータ	CsI(Tl) 研磨前	CsI(Tl) 研磨後	BGO #1	BGO #2	A-type BGO	PWO
誤差の大きさ (%) *	±1.4	±1.6	±2.4	±1.7	±1.9	±0.6
(イ) ゴア 2 重の検出光量 (ch) †	416.521	435.735	681.405	683.425	548.807	329.454
(ロ) ESR 2 重		誤差の範囲内	誤差の範囲内	誤差の範囲内		
(ハ) ESR 2 重 + ゴア	+2.6%	+3.9%	+6.0%	+8.6%	-6.1%	-2.6%
(ニ) 市販粘着 ESR + ESR + ゴア	-15%				誤差の範囲内	
(ホ-1) おもて粘着 ESR		-11%	-21%			
(ホ-2) おもて粘着 ESR + ESR		-5.0%	-12%			
(ホ-3) おもて粘着 ESR + ESR + ゴア		-5.5%	-9.8%			
(ヘ-1) UV おもて粘着 ESR			-38%			
(ヘ-2) UV おもて粘着 ESR + ESR			-25%			
(ヘ-3) UV おもて粘着 ESR + ESR + ゴア			-22%			
(ト) UV 強化 ESR + ESR		+3.8%	+9.7%	+5.9%	誤差の範囲内	誤差の範囲内
(チ) UV 強化 ESR + ESR + ゴア	+4.7%	+5.4%	+7.4%	測定なし	+10%	-2.1%

* 誤差は系統誤差を表示している。統計誤差は、系統誤差に比べて無視できるものだった。

† 複数回の測定の平均値を表示している。

以上より、全ての結晶の測定で共通しているのは、まず (ロ) ESR 2重は (ハ) ESR 2重+ゴアテックスよりも光量が4-9%程度低い、つまりゴアテックスはESRの外側にまいても効果があるということである。これについては§6.2.1で考察する。次に、(ロ) ESR 2重と (ト) UV強化ESR + ESRを比較しても同様に (ロ) の光量が低いことであり、UV強化ESRは確かに反射材の性能が向上していることが確認できた。また、UV強化ESRを用いた場合ではゴアテックス2重を用いたとき以上の検出光量が確実に得られ、ゴアテックスをまく必要がないことがわかった。

6.2 反射材の性能

6.2.1 ESRとゴアテックス

§6.1から、(ロ) ESR 2重と (ハ) ESR 2重+ゴアテックスを比較するとPWO以外ではゴアテックスを外側にまいた方が検出光量が有意に高かった。これは、ESR +ゴアテックスが「ひとみ」衛星のHXI/SGDで用いられた理由である。しかし、図6.1 (a) と (b) からESRの短波長側の反射は自己吸収によって起こっているものであり、ESRを透過する蛍光はほとんどないことがわかった[20]。そのため、ESRの外側にゴアテックスをまくと検出光量が増加する原因を調査した。

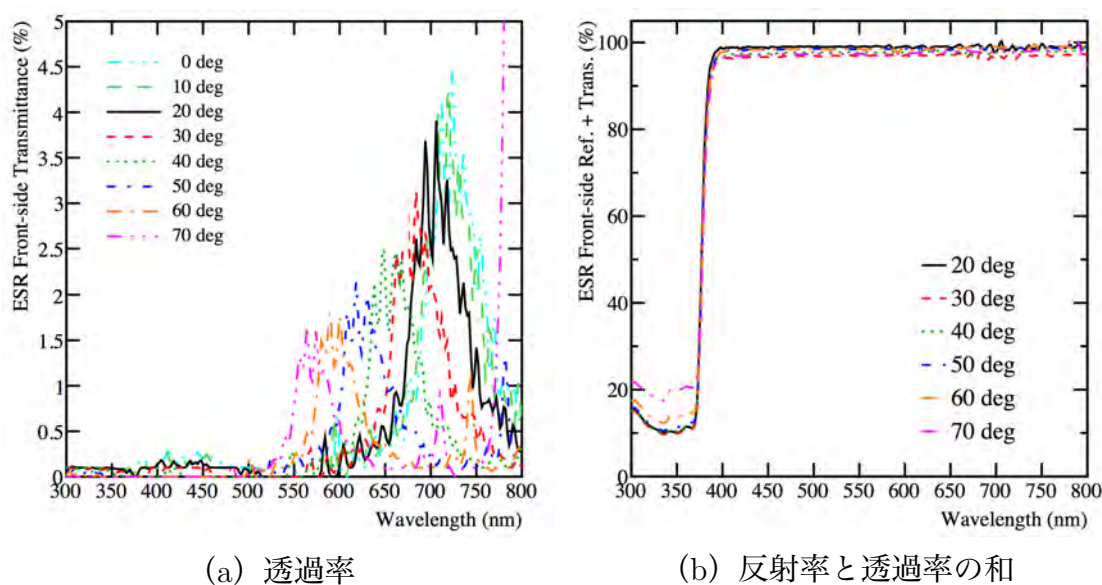


図 6.1: ESRにおける (a) 透過率と (b) 反射率と透過率の和のグラフ。色の違いは光の入射角の違いを表す [20]。

まずひとつの仮定として、実験を行う際に、反射材が結晶を覆っている面積が

変化していることが影響していると考えた。PMTの受光面部分に空けた部分に対して、結晶にまく反射材が少なければ、受光面部分の大きさは図面どおりに切った大きさとほぼ一致する。しかし、外側にまく反射材が増えると受光面部分として空けた位置が多少変化することでPMT受光面とその周囲の反射材の隙間が減少し、検出光量が増加すると考えられる。また、結晶の角の部分についても反射材でできるだけ覆っているが、反射材が重なることによってよりその部分が覆われて検出光量が増加することも考えられる。

そのため、図3.6(b)で用いた形のゴアテックスをESRの外側にまくことで検出光量が増加するかどうかを調べた。この形であればPMTの受光面部分に反射材は追加されず、結晶の角にも触れない。BGO #2でこの実験を行なった結果、この形のゴアテックスでも明らかな光量増加が確認され、ゴアテックスが蛍光を反射していることは確かであることがわかった。検出光量を表6.2に示す。

表 6.2: 反射材をまいた BGO #2 の検出光量

反射材	662 keV ピーク値* (ch)	光量増減率 (%) †	
ESR 2重	691.300 ± 11.752 [‡]	—	
ESR 2重+ゴア	742.057 ± 12.615	7.3	bgo/bgo#2/
ESR 2重+ゴア (4面のみ)	731.767 ± 12.440	5.9	esr+esr+goa4/*
ESR 2重+ESR (4面のみ)	723.705 ± 12.303	4.7	esr+esr+esr4/*

* 2-4 回行なった測定の実験の平均値を表示している。

† ESR 2重を基準とした場合の検出光量の増減率を示す。

‡ 誤差は系統誤差を表示しており、実験の再現性から ±1.7% とした。統計誤差は、系統誤差に比べて無視できるものだった。

さらにこの結果を受けて、先ほど用いたゴアテックスを同じ形のESRに変えて、ESRを3重にした実験を行なった。図6.1(b)と、BGOの蛍光波長帯域が380-650 nmであることから、< 400 nmでのESRの吸収に関わらず、2重のESRを透過した蛍光が外側の反射材によって反射されて結晶内に戻るために検出光量が増加したと考えられるからである。図6.1(a)から、透過する蛍光は全体の約3%だとすると、ESR 2重の場合にはESR 1重と比較して「内側ESRを透過 → 外側ESRで反射 → 内側ESRを透過」する蛍光があるため光量が増加すると考えられる。この蛍光増加の割合は、仮にESRの反射率を97%とすると $0.03 \times 0.97 \times 0.03 \times 100 = 0.09\%$ となる。また、この計算で考えると3重目で反射して結晶内に戻ってくる蛍光は0.00008%となる。ただし、BGO #1の粘着ESR測定実験では粘着ESR単体に比べて外側にESRをまいた場合では光量が10%以上増加している。そのため単純に反射率や透過率で光量の変化が説明できないことになる。

3重目をまいた場合の測定結果は表6.2に示すとおり、ゴアテックスの場合と誤差の範囲で一致しており、ゴアの代わりにESRを用いても良いことがわかった。つまり、< 400 nmでのESRの吸収による反射率の急激な低下による影響はBGO

の場合にはほとんど受けず、2重の ESR を透過した蛍光が外側の反射材によって反射されて結晶内に戻ることによって検出光量が増加したと考えられる。これについて図 6.2 のような説明を考え単純な見積もりをした。

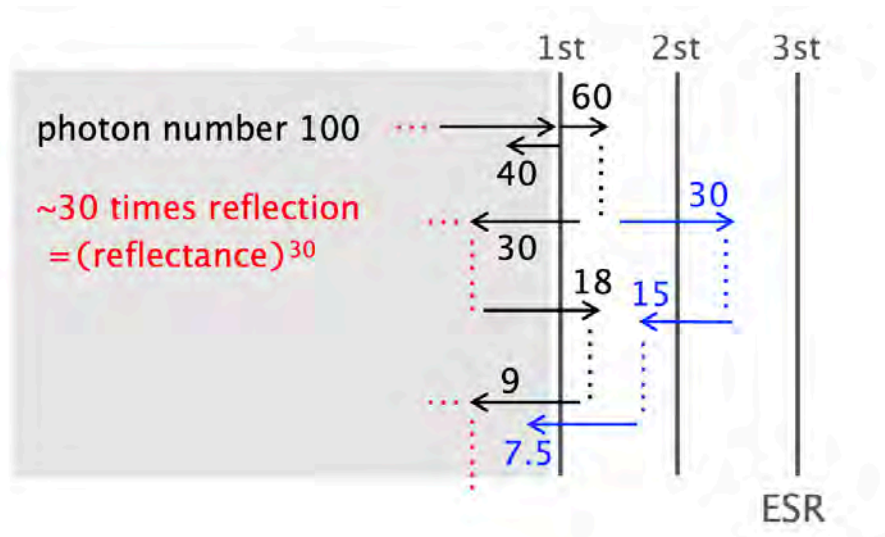


図 6.2: ESR で反射される蛍光の概念図

簡単のために全体の蛍光光子の数を 100 とする。また 1 回の結晶の表面に当たって反射される 1 ステップとし、蛍光が 1 ステップで PMT 受光面に当たる確率は、近似的に PMT 受光面面積/結晶の表面積とした。BGO #2 の場合では $23 \times 23 / (180 \times 72 + 72 \times 20 + 20 \times 180) = 0.03$ である。BGO は屈折率が高く結晶の外に光子が出にくい、吸収長も長いので結晶内での吸収の効果は無視することにする。このため、蛍光が PMT に入るまでに反射材で反射される回数はおおよそ 30 回となる。つまり 1 層目（もっとも内側の反射材）の反射率の 30 乗が、反射材を透過せずに PMT に入る光子の数になる。ESR の反射率を 97%、透過率を 0.5%、吸収率を 3.5% だと仮定すると、吸収された光子は等方的に再放射されるので反射率を 98.25%、透過率を 1.75% だと近似できる。1 層目の ESR で反射されて PMT に入る光子は $100 \times (0.97)^{30} \sim 40$ となる。残りは全て透過されると考えると、1 層目と 2 層目の ESR の間で光子は反射を繰り返す、1/2 の確率でどちらかの ESR を透過することになる。再び結晶内に戻った 30 個の光子のうち $(0.97)^{30} \times 100 \sim 40\%$ が PMT に入ることになり、60% はまた 1 層目の ESR を透過して同じことを繰り返す。

もし ESR が 1 重であった場合、PMT に入る光子の数は 40 個である。ESR が 2 重になった場合には、

$$100 \times 0.97^{30} + 100(1 - 0.97^{30}) \times 0.5 \times 0.97^{30} + 100(1 - 0.97^{30}) \times 0.5 \times (1 - 0.97^{30}) \times 0.5 \times 0.97^{30} + \dots \sim 56 \quad (6.1)$$

となる。実際は無限和の計算になるが、近似的に3次までの項を考慮している。これは ESR 1 重に比べて 30%程度光量が高くなっている。さらに、ESR を 3 重にした場合には

$$100(1 - 0.97^{30}) \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.97^{30} + \dots \sim 4 \quad (6.2)$$

の効果が足され、ESR 2 重に比べ 7%程度の光量増加となる。実際の測定値と比較してみると、このようにかなり単純化した計算でもオーダーでは合っていることがわかる。またここから、1層目に用いる反射材の反射率が極めて重要となり、その外側に用いる反射材は大きくは影響しないと考えられる。そのため、3層目にゴアテックスと ESR を用いた場合でほとんど差がなかったのだと考えられ、反射材を 3 重以上にすることで光量に数%程度の影響があると言える。

6.2.2 粘着 ESR と UV 強化 ESR

本論文では新たに粘着 ESR と UV 強化 ESR という 2 種類の反射材を用いた。これらを使用してみてわかった点を以下にまとめる。

粘着 ESR は気泡を入れずに貼る作業が難しく、結晶から剥がしづらいことが問題であった。CsI(Tl)のように剥がす際に薬品などを使用できない結晶の場合には特に注意が必要である。ただし、通常の ESR を貼る場合がもっとも作業がしやすく、2-3 時間程度でほとんど気泡がない状態で貼ることができた。市販粘着 ESR は ESR 側に粘着があるため図 4.1 のような形状に切ると 1 面ずつ貼るのが難しく、UV おもて粘着 ESR では保護シートが付いていないためこすって貼れず、折り目もつけられないために貼るのはかなり困難であった。それぞれの粘着 ESR をシンチレータに貼った様子を図 6.3 に示す。剥がす際にも、UV おもて粘着 ESR の場合には UV 面が割れてしまい、通常の ESR よりも剥がしにくかった。

検出光量の点からは、市販粘着 ESR がもっとも悪かった。これは用いられている粘着テープが一般的なもので吸収の効果があること、ESR の裏面が結晶側になってしまっていることが原因だと考えられる。もっとも光量が高かったのはおもて粘着 ESR を用いた場合で、UV おもて粘着 ESR の場合に光量が増加しなかったのは上記の作業性の問題から、気泡が入りムラができてしまったためだと考えられる。これにより、気泡が入ったことにより屈折率が小さい空気の領域ができ、粘着剤に入った蛍光が結晶に戻らず吸収されてしまいやすく、ムラができることで結晶内部からみた表面が白く濁って反射率が低下すると思われる。以上の点から、粘着 ESR には通常の ESR と光学用の粘着剤を用いた場合がもっとも適していると考えられる。

粘着 ESR の施行作業はジーテック株式会社に依頼した場合で結晶 1 本約 1 万円、期間は 1-2 週間程度を要した（自分で貼る場合でも通常の ESR であれば 2-3 時間程度で問題なく作業を行うことができる）。一方潮解性対策のためにアルミケース

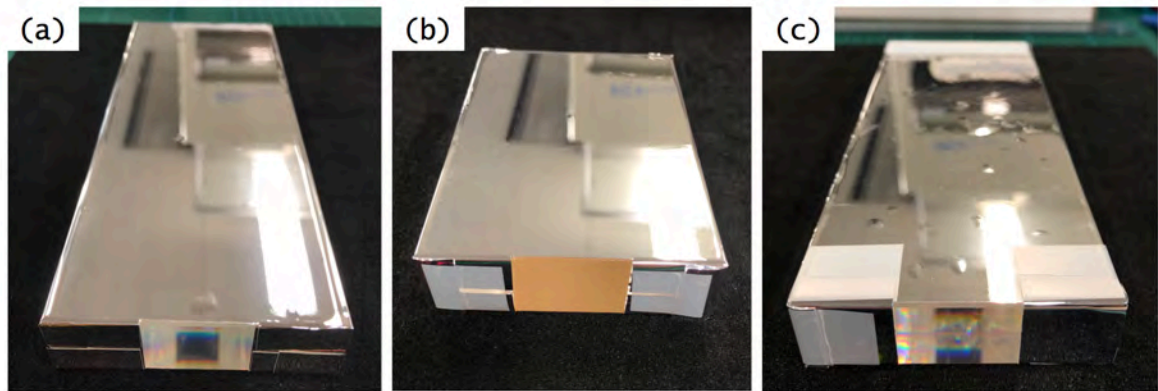


図 6.3: 粘着 ESR をシンチレータに貼った写真。(a) 市販粘着 ESR、(b) おもて粘着 ESR、(c) UV おもて粘着 ESR である。

に封入しようとする、費用は約 10 倍かかってしまう。よって粘着 ESR を用いた場合にはかなりコストを削減することができるため、雷雲ガンマ線実験のように検出器をできるだけ多く用いたい場合に大量生産が可能になる。宇宙で使う場合にはアウトガスの対策する必要があるが、対策も可能だと考えられる。また粘着 ESR を用いた場合には、結晶に反射材が密着するので安定感があり、しっかりと固定できるメリットがある。これにより機械強度も向上するので役に立つと考えられる。

UV 強化 ESR は、保護シートがないため長さを測ったり切ったりする作業時にゴム手袋が必ず必要となる。また UV コーティングを施す際の ESR の熱収縮・膨張のために、UV 面を外側にして ESR が反ってしまうため扱いにくく、扱いに慣れる必要がある。また表面が汚れたり傷つきやすく、それによる光量の変化も大きいので注意が必要であった。

UV 強化 ESR の場合は今回の実験では 4-10% 程度の光量増加しか見られず、劇的な改善はなかった。しかし ESR 2 重を用いた場合よりも UV 強化 ESR + ESR の場合の方が確実に光量が増加していることと、§6.2.1 での議論から、 $< 400 \text{ nm}$ の短波長側だけでなく広い波長帯域で ESR よりも反射率が向上しており、光量に影響を及ぼしていると考えられる。また、蛍光波長が短波長側の PWO では ESR よりもゴアテックスを用いた場合の方が検出光量が高かったが、これも UV 強化 ESR を用いることによってゴアテックスと同等の光量を得ることができた。このように今回用いた結晶において、現在使われているゴアテックスを使用しなくても、UV 強化 ESR を用いることで最大光量を出せることが確認された。そのため UV 強化 ESR はゴアテックスを使用するのが不向きであったり困難な場合に十分活用することができることがわかった。

第7章 まとめ

本修士論文では以下のことを行なった。

- シンチレータの反射材の変更による光量の増減を検証するため、3-4% peak to peak の精度で光量を測定できるセットアップを確立し、ゴアテックスと ESR および UV 帯域の反射率を強化した UV 強化 ESR を用いた複数種類の反射材を、CsI(Tl), BGO, PWO 結晶に適用した。
- 現在衛星などで主流となっている反射材であるゴアテックスと ESR を用いた測定を行なった。ゴアテックス 2 重と ESR 2 重を用いると、CsI(Tl) と BGO のどちらにおいても検出光量は誤差の範囲で一致した。ESR 2 重+ゴアテックスの組み合わせでは CsI(Tl) では ~3.9%、BGO では ~6.0% の光量増加が見られた。
- 市販粘着 ESR とおもて粘着 ESR を CsI(Tl) に用いた場合、ゴアテックス 2 重と比較した検出光量は 5-15% の減少で抑えられた。これは雷雲ガンマ線検出器に用いるのに十分な性能であったため、実際にこれらを結晶の潮解性対策として用いた運用を行い、成果も得られた。
- BGO に粘着 ESR を用いた場合のゴアテックス 2 重と比較した検出光量は、おもて粘着 ESR では ~10% の減少で収まったものの、UV おもて粘着 ESR を用いると大幅な減少が見られた。原因としては UV おもて粘着 ESR を貼る難しさのため、気泡が多く入ってしまったことが考えられるが、詳しくはまだ不明である。
- UV おもて粘着 ESR をはじめとして、粘着 ESR は気泡を入れずに結晶に貼ることが難しく、施工作業に時間がかかることが分かった。また剥がす際にも、CsI(Tl) では粘着剤が残ってしまう可能性があり、BGO ではきれいに剥がせるものの力を要する。UV おもて粘着 ESR はちぎれやすいため、特に剥がしにくく、粘着 ESR として用いるのには不向きだと考えられる。
- 粘着 ESR を用いると反射材の中で結晶がずれたり揺れたりせず、またコンパクトでもあるため、衛星をはじめとする様々な環境で適用できると思われる。
- UV 強化 ESR の性能評価のため CsI(Tl) とサイズの異なる BGO、さらに PWO を用いたところ、顕著な光量増加は見られなかった。しかし、UV 強化 ESR +

ESR の組み合わせでゴアテックス 2 重と同程度かそれ以上の光量が得られたため、ゴアテックスの代わりに UV 強化 ESR を用いることが可能だとわかった。

- ESR 2 重は ESR 2 重+ゴアテックスよりも光量が 4-9%程度低く、ゴアテックスは ESR の外側に用いても効果があるのが分かった。これはゴアテックスのおかげではなく、想定よりも透過する蛍光が多く、外側に反射材を追加することで結晶内に戻る蛍光が増えたためであると考えられる。
- 潮解性対策としての粘着 ESR の使用はアルミケースなどを用いるよりもかなりコスト削減になり、雷雲ガンマ線実験のように大量に検出器を必要とする場合にとっても有益である。

付録A Preamplifierの妥当性の確認

実験で用いたクリアパルス社製のPreamplifierの回路図を図A.1に示す[28]。使用していたCP2869 (#3)は、静電容量 $C = 100$ pF、抵抗 $R = 150$ k Ω なのでここから求められる時定数 $\tau = 15$ μ sである。CsI(Tl)の蛍光減衰時間は1 μ sであるので、これはPMTから出た電荷を十分に貯めきれていない可能性がある。しかし、実験室にすぐに使用できそうな長い時定数のPreamplifierがなかったため、今回は同じ型CP2869 (#4)のPreamplifierに変えた場合と比較した。

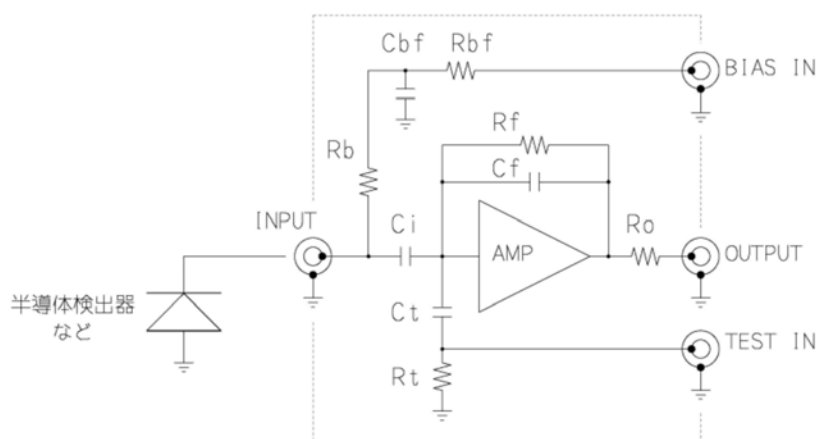


図 A.1: 用いた Preamplifier の回路図 [28]

オシロスコープの波形はどちらも図3.5のように、ゲインは同程度であり時定数はどちらも25 μ s程度であった。時定数 τ が蛍光減衰時間 Δt よりも十分長い場合、PMTから出た電荷が十分に貯まるのでプリアンプの出力電圧の大きさは $A \Delta t / \tau$ となる。一方電荷が貯まり切る前に放出されてしまうと、プリアンプの出力の高さは $A(1 - e^{-\Delta t / \tau})$ となる。よって今回用いたプリアンプでは、CsI(Tl)の場合には2%程度のロスがあると考えられる。

付録B CsI(Tl) シンチレータの 研磨前の測定

100 × 70 × 20 cm の CsI(Tl) を研磨する前に行なった測定について記す。実験セットアップは§3 と同様である。測定時間は1回5分間であり、同じ反射材の組み合わせで3回ずつ測定を行なった。用いた反射材の組み合わせは（イ）ゴアテックス2重、（ハ）ESR 2重+ゴアテックス、（ニ）市販粘着 ESR + ESR + ゴアテックス、（チ）UV 強化 ESR + ESR + ゴアテックスである。それぞれの反射材で PMT を付け直して3回ずつ測定を行なった。測定した検出光量を表 B.1、位置依存性を表??に示す。

表 B.1: 反射材をまいた研磨前 CsI(Tl) の検出光量

反射材	662 keV ピーク値* (ch)	1.46 MeV ピーク値 (ch)
(イ)	416.521 ± 5.831 [†]	909.034 ± 12.726
(ハ)	427.267 ± 5.982	935.408 ± 13.095
(ニ)	354.445 ± 4.962	769.018 ± 10.766
(チ)	436.184 ± 6.107	951.018 ± 13.314

* 3回の測定の平均値を表示している。

[†] 誤差は系統誤差を表示しており、±1.4% とした。統計誤差は、系統誤差に比べて無視できるものだった。

表 B.2: 研磨前 CsI(Tl) における ¹³⁷Cs 線源の位置に依る最大光量差

反射材	最大光量差 (%)
(イ)	3.3
(ハ)	4.0
(ニ)	2.8
(チ)	5.6

研磨前の CsI(Tl) の検出光量は、研磨後と比較すると ~ 5% 検出光量は低かった。反射材ごとの違いは研磨後の振る舞いと矛盾せず、（イ）ゴアテックス2重を基準にすると（ハ）ESR 2重+ゴアテックス、（チ）UV 強化 ESR + ESR + ゴア

テックスでは3-5%の光量増加が見られた。位置依存性についても研磨後と同じくPMTから離れた位置に線源があるほうが検出光量が高かった。ただし、研磨後よりも位置に依る光量差がどの反射材においても大きかった。よって、研磨することによって表面の透明度が増すことにより、吸収される蛍光の数が減って検出光量が増加すること、また結晶中に長くいられる蛍光が増えることによって位置依存性が小さくなると考えられる。

付録C NaI(Tl)シンチレータによるPMTの時間安定性評価

^{137}Cs を照射したNaI(Tl)シンチレータの検出光量を測定し、PMTの増幅率の時間安定性を確認した。用いたNaI(Tl)シンチレータは応用光研工業株式会社製のスタンダード型2B4 [25]であり、サイズは $12.7\phi \times 25.4 \text{ mm}^3$ である。HVは -600 V とし、温度 25.0°C に設定した恒温槽内で測定を行なった。

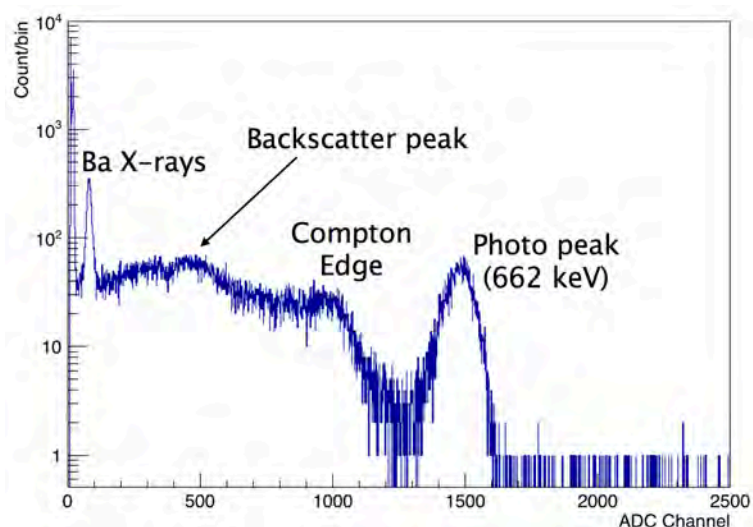


図 C.1: NaI(Tl) に ^{137}Cs を照射したときに得られたスペクトルの例

得られたスペクトルの一例を図 C.1 に示す。PMT1 と PMT2 の 662 keV でのエネルギー分解能はそれぞれ $\sim 7.3\%$ と $\sim 7.9\%$ であった。図 C.2 は、10 分間の測定を連続で 60 回行ったときの測定結果である。それぞれの測定で得られた 662 keV ピークを、ガウシアンでフィッティングしたときの最大ピーク値を縦軸にとった。PMT1 は CsI(Tl) シンチレータを測定するのに用いたもの、PMT2 は BGO と PWO シンチレータを測定するのに用いたものである。測定時間中において、PMT1, 2 の増幅率の変動はそれぞれ $\sim 0.5\%$, $\sim 0.9\%$ 以内であり、どちらも十分な時間安定性があることが確認できた。PMT2 に関しては、1 時間経過後 (6 回目の測定以降) は $\sim 0.2\%$ の変動であり、1 時間以上経過してから取得したスペクトルを用いている

BGO と PWO シンチレータを使用した実験では、PMT の変動の影響はほとんどないと考えられる。

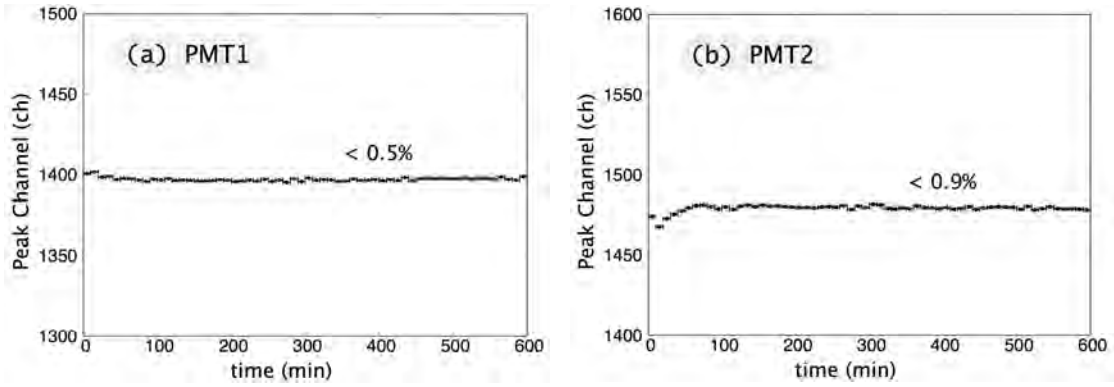


図 C.2: ^{137}Cs を照射した NaI(Tl) シンチレータの検出光量の時間変化。(a) は PMT1、(b) は PMT2 の結果である。

付録D 環境放射線量を使った安定性の確認

§3.3.3, 4.4.2, 5.3.3で行なった位置依存性測定では、環境放射能である⁴⁰の1.46 MeVピークのカウントレートを計算することによって、測定中のゲイン安定性を調べた。ピークのカウントレートはガウシアンで近似できる。ガウシアンは式3.1で表されるので、これを積分すると面積が得られ

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} y dx = \sqrt{2\pi} C \sigma \quad (\text{D.1})$$

となる。フィッティングから得られた値を用いてこの面積を求めたものを表D.1に示す。この結果は一例であり、§3.3.3のCsI(Tl)とBGO #1の(イ)ゴアテックス2重を反射材としたときのものである。表D.1からわかるように、測定中に1.46 MeVピークのカウントレートは誤差の範囲内で一致しており、実験の安定性が確認された。

表 D.1: 位置依存性測定中の 1.46 MeV ピークのカウントレート

	CsI(Tl)	BGO #1
1回目 (0 mm*)	$(1.98 \pm 0.11^\dagger) \times 10^3$	$(6.99 \pm 0.22) \times 10^3$
2回目 (50 mm, 90 mm)	$(1.95 \pm 0.11) \times 10^3$	$(6.74 \pm 0.23) \times 10^3$
3回目 (100 mm, 180 mm)	$(1.84 \pm 0.11) \times 10^3$	$(6.55 \pm 0.22) \times 10^3$
4回目 (0 mm)	$(1.84 \pm 0.12) \times 10^3$	$(6.84 \pm 0.20) \times 10^3$

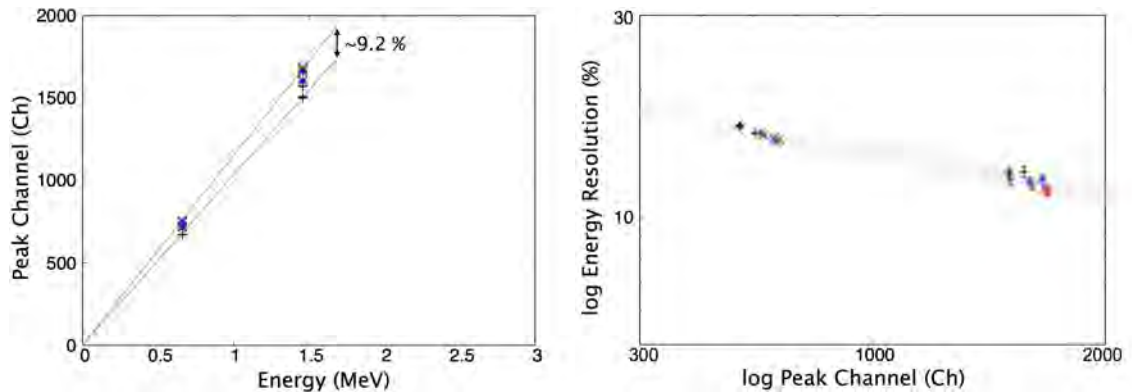
* 括弧内は図3.7 (b) のように照射した¹³⁷Cs線源の位置を示している。2, 3回目では左側がCsI(Tl)、右側がBGOの場合の位置である。

† 誤差はフィッティングパラメータにつく 1σ の統計誤差を伝搬させたものである。

またこの計算方法で、PWOを用いたときの1.46 MeVピークのカウントレートを求めたところ、BGO #1で検出したカウントレートのおよそ2倍になった。用いたPWO結晶はBGO #1と比較してかなり小さいものであったため、ここからもPWOの1.46 MeVだと思われるピークには別の成分が混じっていることがわかる。

付録E シンチレータのゲインとエネルギー分解能

§5で測定したシンチレータのエネルギー較正グラフと、エネルギー分解能と ADC Channel の関係を示す。図 E.1 が BGO #1、図 E.2 が BGO #2、図 E.3 が A-type BGO である。



(a) エネルギー較正曲線

(b) Channel とエネルギー分解能の関係

図 E.1: (a) BGO #1 に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線、(b) BGO #1 に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの ADC Channel とエネルギー分解能の関係を対数表示したもの。黒+が (イ) ゴアテックス2重、赤×が (ト) UV強化 ESR + ESR、青*が (チ) UV強化 ESR + ESR + ゴアテックスである。

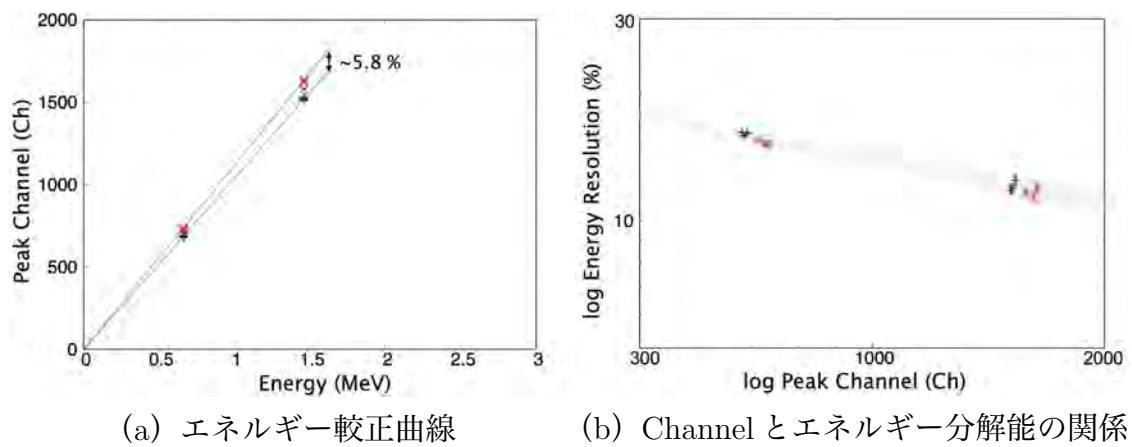


図 E.2: (a) BGO #2 に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線、(b) BGO #2 に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの ADC Channel とエネルギー分解能の関係を対数表示したもの。各印の色は図 E.1 と同じである。

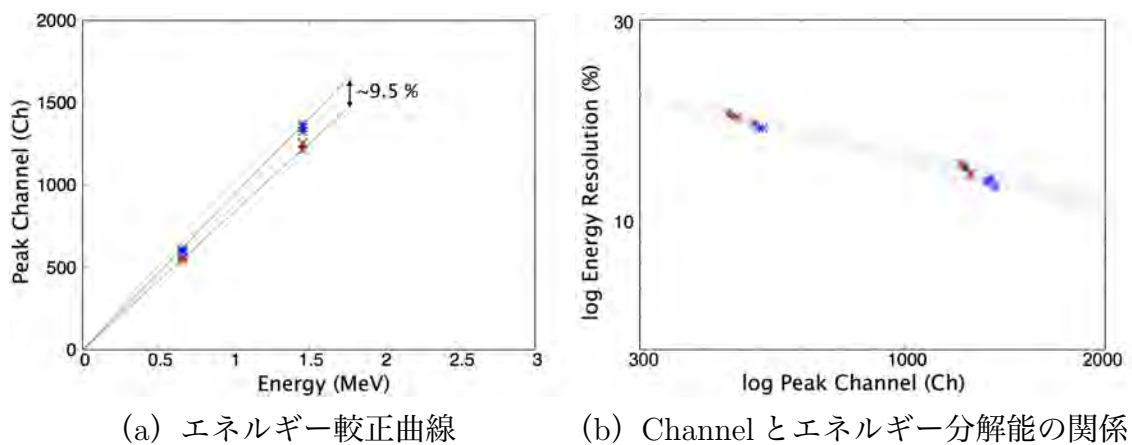


図 E.3: (a) A-type BGO に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの較正曲線、(b) A-type BGO に線源 ^{137}Cs を照射したときの 662 keV と 1.46 MeV ピークの ADC Channel とエネルギー分解能の関係を対数表示したもの。各印の色は図 E.1 と同じである。

付録F CsI(Tl) シンチレータを用いた雷雲ガンマ線検出器

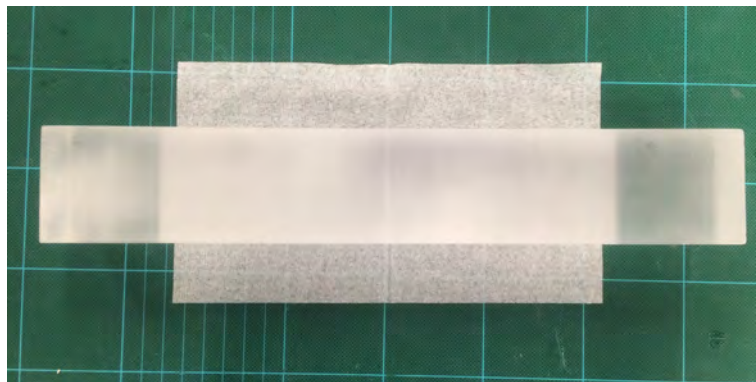


図 F.1: 用いた CsI(Tl) シンチレータの写真。これと同様の形のものを 6 本使用した。

雷雲ガンマ線検出器として実際に用いた $30 \times 5 \times 5$ cm の大きさの CsI(Tl) で測定を行なった結果を示す (測定は当研究室の松元が行なった)。この CsI(Tl) は CLEO II という加速器実験に使われたものを再利用しており、No.1-6 の計 6 本の CsI(Tl) を使用した。そのうちの 1 本の写真を図 F.1 に示す。ゴアテックス 2 重での測定を行なった後、そのうち 3 本 (No.1, 2, 3) に市販粘着 ESR、残りの 3 本 (No.4, 5, 6) におもて粘着 ESR を貼った。粘着 ESR を貼る作業はジーテック株式会社に外注した。

得られた 662 keV のピーク Channel の値を表 F.1 に示す。ゴアテックス 2 重を用いた場合と比較した光量の増減率は、おもて粘着 ESR の場合には光量増加が見られたものもあり、もっとも光量が低下したものでも 13% 減に抑えられた。市販粘着 ESR の方が光量の低下は全体的に大きく、2-21% 減であった。このように、同じ反射材を用いた場合でも結晶によってかなり検出光量の変化に差があることがわかった。また全体の傾向としては市販粘着 ESR よりも、おもて粘着 ESR を用いたほうが検出光量は大きいことがわかった。線源の位置に依る最大光量差は表 F.1 から、結晶による個性が大きく、粘着 ESR の種類に関係なく差があった。

表 F.1: CsI(Tl) の 662 keV ピーク Channel と位置依存性に依る最大光量差

CsI(Tl) No. *	ゴア 2 重 (ch)	粘着 ESR (ch)	増減率 † (%)	位置依存性 ‡ (%)
No.1	525	515 ± 21	-2	2.5
No.2	~ 600	~ 500	-17	18
No.3	771	612 ± 28	-21	9.7
No.4	437	598 ± 27	+37	11
No.5	687	~ 600	-13	14
No.6	471	539 ± 14	+14	3.0

* No.1-3 が市販粘着 ESR、No.4-6 がおもて粘着 ESR を反射材として用いた。

† ゴアテックス 2 重を基準としたときの粘着 ESR での検出光量の増減率を表している。

‡ 粘着 ESR を用いた場合の位置依存性測定によって得られた検出光量の最大光量差を表している。

この 6 本を雷雲ガンマ線検出器として実装し、そのうち 3 セットの検出器は 2017 年秋に柏崎・金沢に設置され、問題なく運用を行なっている。2017 年 12 月 5 日には雷雲ガンマ線のイベントであるロングバーストを検出することに成功した。

謝辞

私が大学3年生のとき初めてこの研究室を訪れたときの、中澤先生の熱いまなざしは今でも忘れられません。この研究室に出会えたおかげで、自分のやりたいことがこの2年間思い切りできたと思っています。実験について何ひとつ知らないまま実験系の研究室に来て、授業もゼミもミーティングも置いて行かれないようにするので必死でした。たくさんの迷惑や心配をおかけしたと思います。その中で丁寧に何度も教えてくださり、根気強く私を引っ張ってしてくれた先生方と先輩方には感謝の気持ちでいっぱいです。

指導教官である馬場先生は、いつも明るく声をかけてくださり、優しい言葉に励まされました。馬場先生がいると研究室がとても賑やかになって、毎日楽しく研究することができました。中澤先生には、研究の面白さや奥深さをいつも教えてもらっています。解析や実験について、一から優しく、熱のこもった指導をしてくださって、本当にありがとうございました。研究のこと以外でも先生に教えてもらったことがいっぱいあります。名古屋大学に行っても、ずっと熱い中澤先生でいてください。

ジーテック株式会社の本多さんや作業員の皆様には、粘着ESRの施工作業をはじめとして、シンチレータに関して、たくさんのご協力をしていただきました。ジーテックを訪れた際には、会社内を丁寧に案内してくださって、とても貴重な経験になりました。名古屋大学の奥村先生や山形大学の郡司先生には、反射材や実験について教えていただいたり助言をしていただき、とても勉強になりました。特に奥村先生からいただいた資料は修論執筆にあたり大変参考になるものでした。貴重な資料を快く回覧していただき、心から感謝いたします。

そして、何よりこの2年間ずっと心の支えになってくれた同期の鈴木くん。私が疑問に思ったことを真剣に一緒になって考えてくれて、アドバイスをくれて、何度も何度も助けてもらいました。研究で辛いときも、そばにいて支え合えたからこそ、こんなに楽しくて充実した研究生活を送ることができたのだと思います。同期になれて本当に良かったです。いつもありがとう。

この研究室での経験を活かして、来年からも頑張っていきます。皆様、本当にありがとうございました。

2018年1月22日
清野 愛海

参考文献

- [1] Tanaka, Y., Inoue, H., and Holt, S. S. 1994, “The X-ray astronomy satellite ASCA”, PASJ, 46, L37
- [2] Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, “The X-Ray Observatory Suzaku”, PASJ, 59, S1
- [3] Takahashi, T., Abe, K., Endo, M., et al. 2007, “Hard X-Ray Detector (HXD) on Board Suzaku”, PASJ, 59, 35
- [4] Takahashi, T., Mitsuda, K., Kelley, R., et al. 2014, “The ASTRO-H X-ray Astronomy Satellite”, Proceedings of SPIE, 9144, 914425
- [5] Sato, G., Kokubun, M., Nakazawa, K., et al. 2014, “The Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H Mission”, Proceedings of SPIE, 9144, 914427
- [6] Tsuru, T. G., Matsumura, H., Takeda, A., et al. 2014, “The ASTRO-H X-ray Astronomy Satellite”, Proceedings of SPIE, 9144, 914412
- [7] 平成 29 年度戦略的基礎開発予算（理学分）[キー技術開発経費] 提案書
- [8] “THUNDERCLOUD PROJECT”, <https://www.thdr.info>
- [9] Enoto, T., Wada, Y., Furuta, Y., et al. 2017, “Photonuclear reactions triggered by lightning discharge” Nature 551, 481–484
- [10] 和田有希, “雷雲ガンマ線の多地点観測プロジェクト:可搬型検出器の開発と 2016 年度冬季の観測成果”, 日本地球惑星科学連合 2017 年合同大会
- [11] 笹野理, 2012, “ASTRO-H 衛星に向けた BGO シンチレータの APD 読み出しとその集光効率”, 修士学位論文, 東京大学
- [12] 槇野文命, 2013, 「宇宙放射線の観測」, JAXA
- [13] “光電面技術”, 浜松ホトニクス株式会社, <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/index.html>
- [14] “光電子増倍管 (PMT) ”, 浜松ホトニクス株式会社

- [15] “R11265U SERIES/H11934 SERIES” 製品カタログ, 浜松ホトニクス株式会社
- [16] WL ゴア&アソシエイツ社, <https://www.gore.co.jp>
- [17] Victor R. Weidner and Jack J. Hsia, 1981, “Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder,” J. Opt. Soc. Am. 71, 856–861
- [18] McGregor, G.L., Minor, R.B. and Hannon, G.E. 1999, “Light reflectant surface for luminaires”, US Patent 5,892,621
- [19] 住友スリーエム株式会社, <http://www.mmm.co.jp/display/>
- [20] 奥村暁, 2017, “ESR の反射率測定”
- [21] Okumura, A., Ono S., Tanaka, S., et al. 2015, “Prototyping of Hexagonal Light Concentrators for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array”, 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015), 34, 952
- [22] “光学用透明粘着シート LUCIACS® CS986 シリーズ”, 日東電工株式会社, <https://www.nitto.com/jp/ja/products/group/optical/structure/011/>
- [23] Sasano, M., Nishioka, H., Okuyama, S., et al. 2013, “Geometry dependence of the light collection efficiency of BGO crystal scintillators read out by avalanche photo diodes”, NIM 715, 105–111
- [24] 奥山翔, 2009, “宇宙ガンマ線イメージャに向けた高屈折率結晶シンチレータの蛍光収集法の開発”, 修士学位論文, 東京大学
- [25] “NaI(Tl) シンチレータ”, 応用光研工業株式会社, http://www.oken.co.jp/web_oken/Sin_jp.htm
- [26] “SILICONE RUBBER OPTICAL INTERFACE EJ-560” データシート, Eljen Technology 社, <http://www.eljentechnology.com/products/accessories/ej-560>
- [27] Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, <http://store.niic.nsc.ru/en/products/materials/bgo/>
- [28] “前置増幅器”, クリアパルス株式会社, <http://www.clearpulse.co.jp/document/jpn/plistB.pdf>