

ASTRO-H搭載SGDのBGOシールドを用いた
ガンマ線バースト観測能力の評価

田中晃司

広島大学 理学部 物理科学科

B123105

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

指導教員 深沢 泰司

主査 大野 雅功

副査 杉立 徹

2016年2月10日

概要

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙最大の爆発現象であるが、特に継続時間が2秒以下のショート GRB に対しては、未だ謎が多く、短時間にできるだけ多くの光子を検出できる観測装置が求められる。次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出装置 SGD に用いられる 25 個の BGO シンチレータは巨大な幾何学面積を持つため、主検出器のシールドとしてだけではなく、GRB 検出器としても力を発揮する。ただし、全天からやってくる GRB のデータから物理情報を正しく引き出すには、GRB の発生方向を知ることが重要である。そこで本研究ではこの SGD の BGO シールドの GRB 観測能力を Geant4 によるモンテカルロシミュレーションによって評価した。シミュレータで考慮する物理素過程を検証し、さらにエネルギー分解能等の実測で得られるパラメータを取り入れることでガンマ線応答を精度よく再現することに成功した。このシミュレータを用いて GRB のシミュレーションを行ったのが図である。この角度応答を全ての BGO に対して計算し、実際の GRB 発生時に期待される各 BGO のガンマ線検出数と比較することで、明るいバーストであれば SGD 単体で 5° 程度の精度で方向決定できることがわかった。

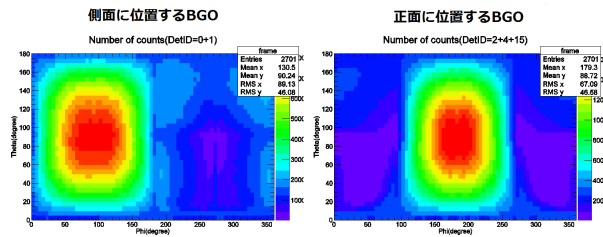


図 1: BGO が GRB を検出できる方向。縦軸に天頂角方向、横軸に水平角方向をとっている。

目次

第 1 章	ガンマ線バースト	5
第 2 章	ガンマ線バースト観測装置	8
2.1	代表的なガンマ線バースト観測装置	8
2.2	軟ガンマ線検出装置 SGD	12
2.3	本研究の目的	14
第 3 章	SGD のガンマ線バースト観測応答	15
3.1	エネルギー応答	15
3.2	角度応答	15
3.3	ガンマ線バースト観測応答の構築手順	16
3.4	BGO シールドで目指す GRB 観測精度	17
第 4 章	SGD の BGO シールドのモンテカルロシミュレータの開発	18
4.1	Geant4 とは	18
4.2	Geant4 の構造と実装した機能	18
4.2.1	DetectorConstruction	19
4.2.2	PhysicsList	20
4.2.3	PrimaryGeneratorAction	20
4.2.4	RunAction	22
4.2.5	EventAction	22
4.2.6	SteppingAction	24
4.3	Geant4 内部で使用する物理の確認	25
4.3.1	実験セットアップ	26
4.3.2	実験による検出効率の測定	26
4.3.3	シミュレーションによる検出効率測定	27
4.3.4	シミュレーションと実験結果の比較	29
4.4	SGD ジオメトリを用いたエネルギー応答の再現	29
4.4.1	必要な実測パラメータ	29
4.4.2	実験セットアップ	31
4.4.3	シミュレーション結果と実験結果の比較	31

第 5 章	SGD BGO シールドを用いたガンマ線バースト観測応答の検証	33
5.1	ガンマ線バースト観測能力の検証手順	33
5.2	ガンマ線バースト発生方向決定手順の構築	34
5.2.1	検出効率データベースの構築	34
5.2.2	各検出器における GRB 検出数解析	38
5.2.3	方向決定に用いる検出器の選別	39
5.2.4	各検出器同士のカウント比とデータベースの比較	40
5.2.5	複数の検出器での方向制限	42
5.3	SGD BGO シールドを用いた GRB の方向決定能力の検証	44
5.3.1	シミュレーション結果	44
5.3.2	考察・結果	48
5.4	まとめと今後の課題	49
5.4.1	まとめ	49
5.4.2	今後の課題	49

目次

1	BGO が GRB を検出できる方向。縦軸に天頂角方向、横軸に水平角方向をとっている。 . . .	1
1.1	BATSE Trigger 1085 のライトカーブ	5
1.2	BATSE で得られたガンマ線バーストの継続時間毎の発生頻度 [2]。2 秒を境に大きく 2 種類に分けられることがわかる。	6
1.3	ロング・ガンマ線バーストの発生源モデル	6
1.4	ショート・ガンマ線バーストの発生源モデル	6
1.5	GRB 910601 のスペクトル [3]	7
2.1	各ガンマ線検出装置の観測エネルギー帯と有効面積 [4]	8
2.2	BATSE で得られたガンマ線バーストの空間分布 [6]	10
2.3	BeppoSAX で捉えた GRB970228 の X 線残光。左がガンマ線バースト発生 8 時間後、右が 2 日後。 [7]	10
2.4	典型的なコーデットマスクの概念図 1	11
2.5	典型的なコーデットマスクの概念図 2	11
2.6	SGD BGO アクティブシールドの概観	14
2.7	SGD 断面図 [11]	14
3.1	1 cm ³ CsI シンチレータに 662 keV の単色ガンマ線を入射させたときの応答スペクトル	15
3.2	すざく HXD-WAM の角度応答 [12]	16
4.1	Geant4 の主なクラスと構造	19
4.2	本節で再現する実験セットアップ。アルミ製の箱に囲われた Si フォトダイオードに ²⁴¹ Am をあてスペクトルを取得する。	19
4.3	図 4.2 の再現図。Si フォトダイオード、アルミ製の箱、線源を覆う円柱型のプラスチックタブレットのジオメトリを作成した。	20
4.4	線源から Si フォトダイオードに向かって直線にガンマ線を放射した場合	21
4.5	線源からガンマ線が等方的に放射された場合。本節の実験の再現にはこちらを用いた	21
4.6	Action クラスの構造	22
4.7	0 番のイベント情報 (左) と 1 番のイベント情報 (右)	23
4.8	シミュレーションで得られたエネルギーデポジット	24
4.9	横軸のエネルギーを keV から ch に変換したもの (EPI)	24
4.10	EPI を分解能でなませたもの (EPHA)	24
4.11	実験データとシミュレーションデータの比較	25

4.12	実験セットアップ	26
4.13	EMStandard での検出効率と光電吸収確率	28
4.14	EMLiverMore(蛍光 X 線生成過程オン)での検出効率と光電吸収確率	28
4.15	EMLivermore(蛍光 X 線生成過程オフ)での検出効率と光電吸収確率	28
4.16	シミュレーション結果と実験結果の比較	29
4.17	SGD 単体のジオメトリ	30
4.18	SGD 低温キャリブレーション試験の様子 [15]	31
4.19	実験セットアップ再現ジオメトリ	31
4.20	BGO の位置	32
4.21	線源に近い場所に位置する BGO のスペクトル	32
4.22	線源から遠い場所に位置する BGO のスペクトル	32
5.1	θ , ϕ のとり方	34
5.2	SGD 全体をカバーする十分な太さをもったビーム	35
5.3	逆関数法の図解。F(x) は 1 に規格化された累積分布関数 [16]	36
5.4	逆関数法によって得られた仮想ガンマ線バーストのスペクトル	36
5.5	BGO の位置による角度応答の違い 1。横軸に水平角、縦軸に天頂角をとっている。	37
5.6	BGO の位置による角度応答の違い 2	38
5.7	peak flux ごとのガンマ線バーストの頻度分布	39
5.8	$(\theta, \phi)=(135^\circ, 135^\circ)$ から放射された peak flux 10 (photons/cm ² /s) の模擬ガンマ線バーストのエネルギースペクトル	39
5.9	BGO の形状と名称	40
5.10	検出器 ID15 と 18 の検出数の比のカラーマップ	41
5.11	検出器 ID15 と 18 で検出した擬似ガンマ線バーストの検出数の比をカラーマップ上に描いたもの。点線は比の値、実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。	42
5.12	6 通りの検出器の組み合わせの等高線	43
5.13	模擬ガンマ線バースト到来方向制限の図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。	43
5.14	模擬ガンマ線バースト到来方向制限の図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。	43
5.15	シミュレーション 1 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線	44
5.16	シミュレーション 1 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。	45
5.17	シミュレーション 1 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。	45
5.18	シミュレーション 2 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線	45
5.19	シミュレーション 2 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。	46
5.20	シミュレーション 2 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。	46
5.21	シミュレーション 3 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線	46
5.22	シミュレーション 3 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。	47
5.23	シミュレーション 3 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。	47
5.24	シミュレーション 4 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線	47
5.25	シミュレーション 4 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。	48
5.26	シミュレーション 4 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。	48

第1章 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストとは、一日に数回観測される宇宙最大の爆発現象である。宇宙のあらゆる方向のある一点から非常に強い強度のガンマ線が数 ms から数 100s にわたって観測され、比較的高い頻度で起こる現象ながら、1967年の発見以降その正体は謎に包まれており、未だその放射メカニズムも明らかにはなっていない。

図 1.1 はガンマ線バーストの典型的なライトカーブである。ガンマ線バーストは図 1.2 のようにその継続時間が数十秒の長さのもの、0.1 秒程度の短いもので大きく 2 つに分けられ、前者はロング・ガンマ線バースト、後者はショート・ガンマ線バーストとよばれている。それぞれの発生源モデルを図 1.3 と図 1.4 に示す。ロング・ガンマ線バーストは太陽の 40 倍以上の質量を持つ大質量星の超新星爆発が起源と考えられており、実際にいくつかのガンマ線バーストからは、超新星が関係しているという証拠がみついている。一方、ショート・ガンマ線バーストの起源は中性子星、あるいはブラックホールの合体と考えられているが、まだ明らかにはなっていない。中性子星やブラックホールからなるコンパクト連星は、距離を縮めて合体に向かう際、大量のニュートリノと重力波を放射すると考えられており、数多く存在する重力波源の中でも最も有望視されている。以上のことから、もしショート・ガンマ線バーストの起源がコンパクト連星であるならば、重力波天文学の視点からも大きな意味を持っている。[1]

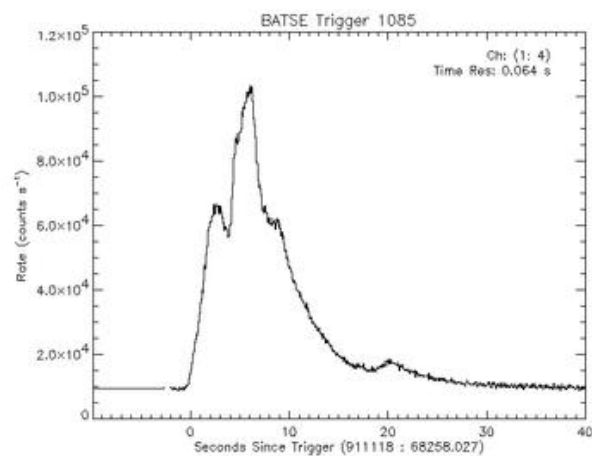


図 1.1: BATSE Trigger 1085 のライトカーブ

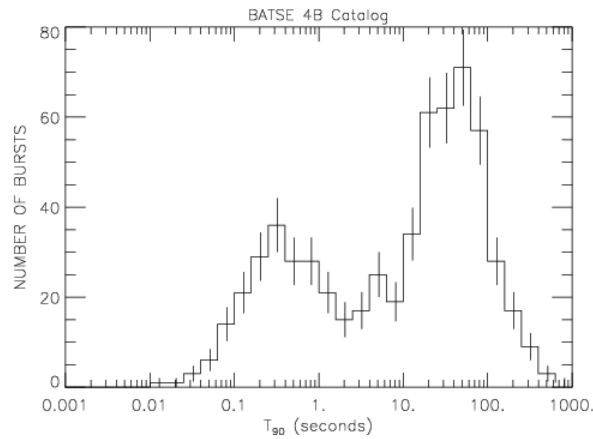


図 1.2: BATSE で得られたガンマ線バーストの継続時間毎の発生頻度 [2]。2 秒を境に大きく 2 種類に分けられることがわかる。

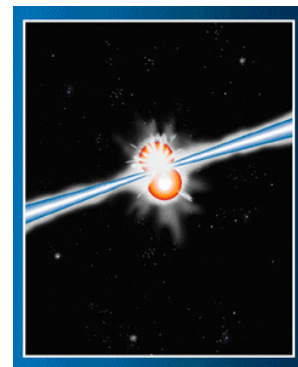
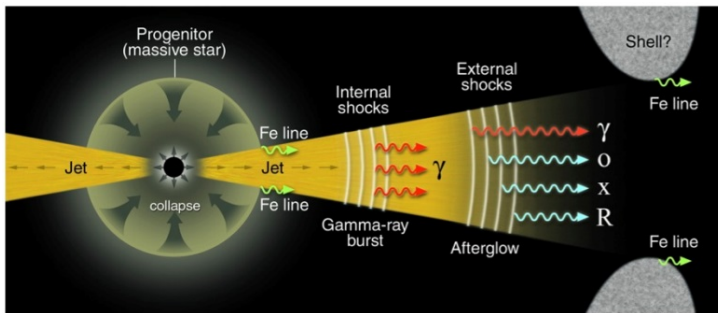


図 1.3: ロング・ガンマ線バーストの発生源モデル

図 1.4: ショート・ガンマ線バーストの発生源モデル

図 1.5 はガンマ線バーストの典型的な放射エネルギースペクトルである。数 100keV から数 MeV 付近の折れ曲がりをもつ非熱的放射のように見えるが、熱的放射スペクトルでも説明できるとする研究もあり、この折れ曲がりの振る舞いを調べることでガンマ線放射メカニズムに迫ることができると考えられ、重要である。

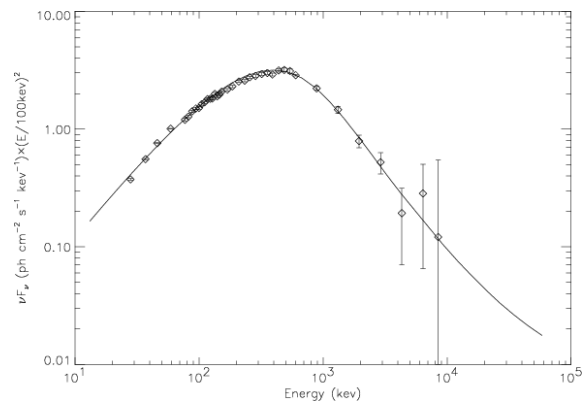


図 1.5: GRB 910601 のスペクトル [3]

しかし、ショート・ガンマ線バーストは平均的なバーストの継続時間が0.3秒と非常に短く、統計の良い観測データを得ることが難しく、ロングガンマ線バーストに比べ、そのスペクトルの詳細等、よく分かっていないことが多い。したがって、ショートガンマ線バーストのさらなる解明のためには数100keVから数MeVの領域で、短時間にできるだけ多くの光子を観測できる観測装置が重要である。

第2章 ガンマ線バースト観測装置

2.1 代表的なガンマ線バースト観測装置

前章で述べた通り、ガンマ線バーストは1960年代の発見以来、様々な観測装置により精力的に観測が行われてきた。ここでは、ガンマ線観測装置のうち、代表的なものを列挙する。表 2.1、2.2 に各ガンマ線バースト観測装置の仕様を、図 2.1 にその有効面積と観測エネルギー領域のグラフを示す。

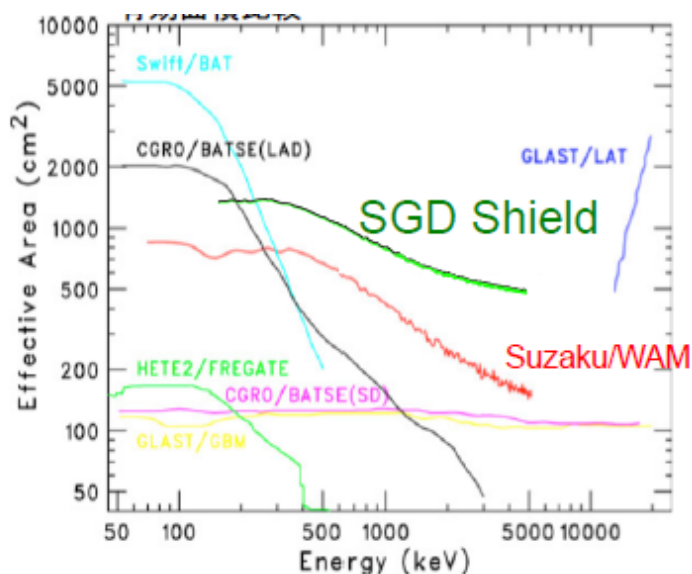


図 2.1: 各ガンマ線検出装置の観測エネルギー帯と有効面積 [4]

CGRO 搭載 BATSE

ガンマ線バーストは1960年代には発見されていたが、その正体は謎であった。突発現象であるためにガンマ線源の位置同定が難しく、近傍で起こる現象であるかまたはたまた遠方の現象なのかさえ分かっていなかった。そんな中、ガンマ線バースト研究に一石を投じたのが CGRO 搭載 BATSE である。

1991年に打ち上げられた CGRO 衛星に搭載された BATSE は、数多くのガンマ線バースト現象を観測し、近年のガンマ線バーストの理解に大きく貢献した。NaI シンチレータで作られた大面積バースト検出を目的とした LAD(Large Area Telescope) とスペクトル取得を目的とした SD(Sensitive Detector) を一組として衛星上の八面体の各面に配置することで全天観測が可能となった。この面毎の検出数の比をとることでガンマ線バーストの位置を同定した結果、ガンマ線バーストの空間分布が一様であることが分かった(図 2.2)。もしガンマ線バーストが我々の銀河内でおこっていれば、その分布は銀画面に集中するはずである。よってこの結果は、ガンマ線バーストが銀河外に起源を持つこ

表 2.1: 最近のガンマ線バースト検出器の性能 [5]

	BATSE	BeppoSAX(WFC)	HETE-2(FREGATE/WXCM/SXC)
Detector Type	NaI	NaI,CsI	NaI/PC/CCD CdZnTe
Energy Range	30 - 2000 keV(LAD) / 5 - 20 MeV(SD)	1.5-28 keV	6-400 keV/2-25 keV
Detector Area	2025cm ² (LAD)/127cm ² (SD)	140cm ²	160 cm ² /80 cm ² /7.4 cm ²
Anguler Resolution	5°	5 '	-/10 ' /3"
Field of View	all sky	20°×20°	3.0 str
Time Resolution	2 ms(minimum)	0.25 ms(minimum)	6.4 μs/256 μs /1.2 s
Energy Channel	4-256 ch	31 ch	256 ch/32 ch/
GRB Localization method	角度毎の強度比	コーデッドマスク	コーデッドマスク
Obserbation period	1991-2000	1996-2002	2000-2008
Collaboration	米	伊 蘭	米 仏 印 日

表 2.2: 最近のガンマ線バースト検出器の性能 (続き)

	Swift BAT	Suzaku WAM	Fermi LAT/GBM	SGD Shield
Detector Type	CdZnTe	BGO	Tower /Nai, BGO	BGO
Energy Range	15 - 150 keV	50 keV - 5 MeV	20 MeV - 300 GeV / 10 keV - 25 MeV	150 keV - 5 MeV
Detector Area	5200cm ²	800 cm ²	8000cm ²	800cm ²
Anguler Resolution	4 '	5°	0.15° / 5°	3°
Field of View	1.4 str	all sky	2.0str / all sky	all sky
Time Resolution	100 μs	16 ms/0.5 s	10 μs/2 μs	16ms
Energy Channel	80 ch	4 ch/64ch	- /128 ch	32ch
GRB Localization method	コーデッドマスク	角度ごとの強度比	角度ごとの強度比 (for GBM)	角度ごとの強度比
Obserbation period	2004-ongoing	2005-2015	2007-ongoing	2016-
Collaboration	米 英 伊 日	日 米	米 伊 仏 日	日 米

とを示唆している。しかし BATSE のこの方法によるガンマ線バーストの位置同定は角度分解能が悪く、正確な位置までは特定できなかった。

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

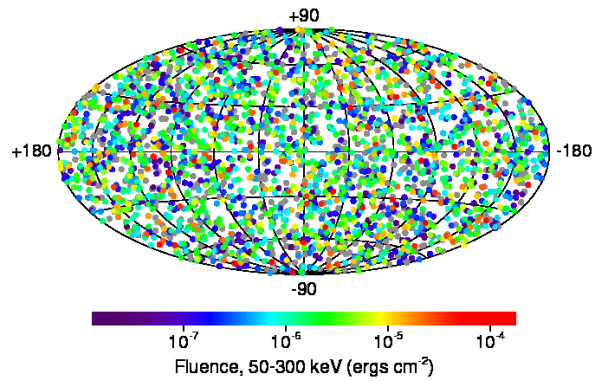


図 2.2: BATSE で得られたガンマ線バーストの空間分布 [6]

BeppoSAX

1996年に打ち上げられた Beppo-SAX は、ガンマ線バースト発生後も、X線で長時間輝くことを発見した。これは後に残光として知られる現象である。残光とはガンマ線バースト発生後、数日かけてX線、可視光、電波でゆっくりと減光していく現象で、時間を追うごとに明るく輝く波長域が変化していく特徴をもっている。図 2.3 は BeppoSAX で捉えた X線領域での残光の様子である。地上でガンマ線を直接観測することは不可能だが、この残光は発生位置さえわかれば地上での精密な追観測が可能である。これによって可視光の分光観測が可能となり、赤方変異を求めることでガンマ線バーストの距離を求めることができるようになった。その地球からの距離は数十から数百億光年と、非常に遠方の銀河で起こっていることが明らかとなった。距離がわかったことで総エネルギーを推測することが可能となった。そのエネルギーは約 10^{53} erg と莫大なものであり、ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象であると言われている。

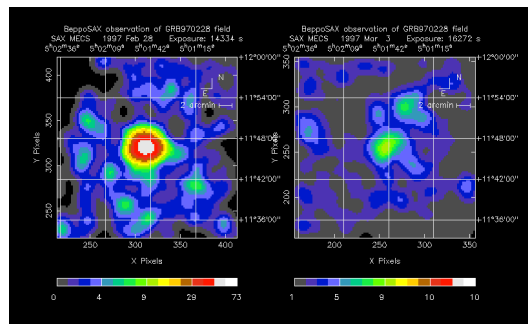


図 2.3: BeppoSAX で捉えた GRB970228 の X線残光。左がガンマ線バースト発生 8 時間後、右が 2 日後。 [7]

HETE-2

HETE-2は2000年に日本、アメリカ、フランスが共同で打ち上げた小型宇宙望遠鏡である。最大の特徴は、地上へのガンマ線バーストの位置情報の伝達の速さである。Beppo-SAXが発生から約6~8時間後の通報だったのに対し、HETE-2は約10秒で地上の望遠鏡にその位置情報を流せるようになった。ガンマ線領域で継続時間の短いバーストの位置を速く知ることができれば、残光の追観測によってより多くの情報を得ることにつながるため、位置情報の早期通知はガンマ線バースト観測において重要な観点である。HETE-2は図2.4、図2.5のようなコーデッドマスクと呼ばれる特定のパターンをもったマスクを通したガンマ線の強度分布から入射角度を特定することで、単体で10分角という分解能でガンマ線バーストの位置を決定することができ、さらに軌道に沿った地上のいたるところにバースト検出の通知のための通信局を配置することで、この早期通知の機能を実現した。これによってX線や可視光、電波領域での残光のフォローアップ観測がなされ、また、地上からの詳細な追観測によって、ベキ型スペクトルから段々と構造を持ったスペクトルが現れる様子が発見された。この構造がc型超新星爆発と一致していたことから、ガンマ線バーストの正体が超新星爆発に関連しているという大きな証拠が得られた。

Swift BAT

2004年に打ち上げられたSwift衛星に搭載されたBAT(Burst Alert Telescope)検出器は高感度・高視野で、検出器面にCdZnTe検出器を用いているのが特徴である。CdZnTeは、NaIシンチレータに勝る高い検出効率、半導体検出器ならではの高い位置分解能をもつ。HETE-2同様コーデッドマスクによる決定方法を採用している。コーデッドマスクとは、入射ガンマ線に対して特定のパターンを持たせて通過させるマスクをつけることで、マスクを通すことにより強度分布パターンが変わったガンマ線を位置分解能を持った検出器で検出し、強度分布が求める位置特定方法である。コーデッドマスクによるガンマ線バースト方向決定精度はマスクと検出器の幾何学配置で決定し、BATSEで採用された面ごとの検出数の比をとる方法と比べ格段に方向決定精度が良く、明るいバーストでは1-3分角の精度での位置決定を実現している。また、Swift衛星は他にX線望遠鏡、紫外・可視光望遠鏡を搭載しており、単体で多波長にわたっての残光観測が可能である。Swiftは継続時間が短く、観測が難しかったショートガンマ線バーストのX線残光を世界で初めて発見し、その発生場所の特定に成功した。その位置が活発な星形成がおこなわれている銀河ではなかったことから、中性子星やブラックホールの合体が起源であるという仮説を支持する結果が得られた。

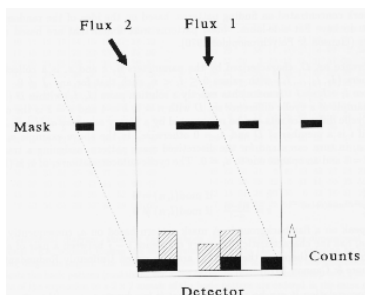


図 2.4: 典型的なコーデッドマスクの概念図 1

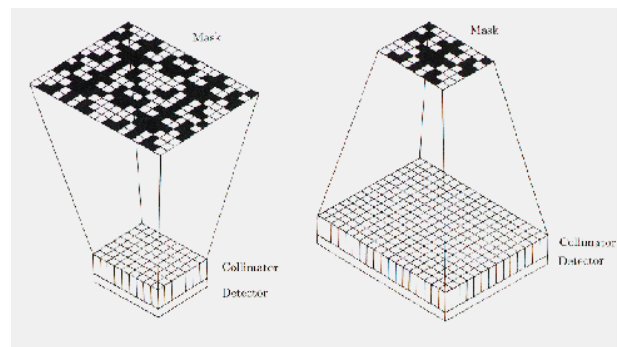


図 2.5: 典型的なコーデッドマスクの概念図 2

すざく HXD/WAM

2005年に打ち上げられたすざく衛星に搭載されたガンマ線バースト観測機器として、硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector ; HXD) と、その機能の一つとして広帯域全天モニター (Wide-band All-sky Monitor) がある。硬 X 線検出器 HXD は 10-600 keV という非常に広範囲なエネルギー領域の広い有効面積を有し、井戸型センサーを BGO 反同時計数検出器が囲うことで宇宙線などのバックグラウンド除去を可能にした。また、この反同時計数検出器は視野外からくるガンマ線や荷電粒子から主検出器を守るアクティブシールドとしての役割だけでなく、1つの側面で 800 cm^2 と大きな面積を持ち、各側面にあるため視野が制限されておらず、さらに原子番号の大きい $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) で構成されているという特徴を活かし、広帯域全天モニター WAM と呼ばれる機能を有する。WAM はそれまでのガンマ線バースト観測衛星と比べて MeV 領域に広い有効面積を持っており、50-5000 keV のエネルギー領域をカバーする。その大きな検出面積によって、ショートガンマ線バーストの詳細なスペクトルデータの取得が可能となり、ロングガンマ線バーストとのスペクトルの違いの議論をさらにすすめることが出来た。ショートガンマ線バーストはスペクトルが硬いという傾向をより確かなものとし [8]、ガンマ線放射機構にも言及した。WAM は BATSE と同様に全天をカバーしている複数の BGO が様々な方向を向いている構造を活かして、検出数の比をとることでのガンマ線バーストの位置同定を目指したが、検出器の数が少ないことや、向いている方向が限られていることから一意に定めることはまだ十分には行えていない。

Fermi LAT/GBM

Fermi 衛星は 2008 年に打ち上げられたガンマ線観測衛星で、ガンマ線検出器として大面積望遠鏡 LAT とガンマ線バーストモニター GBM の 2 つが搭載された。このバーストモニターは NaI と BGO シンチレータが組み合わさって構成されており、10 keV-25 MeV の広いエネルギー領域をカバーしている。有効面積はすざく WAM に比べ小さいものの、GeV 領域をカバーする主検出器である LAT と連携することで、7 桁にも及ぶエネルギー範囲でガンマ線を捉えることができる。これによって GeV 領域に及ぶ高いエネルギーをもった光子の振る舞いが明らかとなった。まず、高エネルギーガンマ線の放射の発生時刻は低エネルギーガンマ線に比べ遅れることが判明した。また、高エネルギーガンマ線の放射が、X 線や可視光による残光で見られるように 100 秒以上もの間継続していることがわかった。さらに、今までのガンマ線観測衛星で得られていたガンマ線バーストのスペクトルは keV-MeV 領域で折れ曲がる Band 関数で表されることがわかっていたが、Fermi 衛星によるさらに高エネルギー帯での観測によって、100 MeV 以上で明らかに Band 関数とは異なる別成分が存在するガンマ線バーストも発見された [9]。以上のことから、Fermi 衛星によるガンマ線バーストの新たな特徴の発見は、従来考えられてきた単純な Band 関数というモデルを考えなおす必要があることを再認識させ、高エネルギー光子の放射メカニズムに新たな制限をかけることにつながった。また、高エネルギーガンマ線と低エネルギーガンマ線の到来時間差をこれまでにない精度、エネルギー範囲で測定することで、量子重力理論に対して厳しい制限を与えることに成功し、基礎物理学の分野にも大きな影響をもたらした [10]。

2.2 軟ガンマ線検出装置 SGD

SGD は 2016 年打ち上げ予定の ASTRO-H に搭載される、軟ガンマ線検出装置である。その構造はコンプトンカメラと BGO アクティブシールドでできている。主検出部である狭視野のコンプトンカメラはピ

クセル構造の Si 半導体を 40 枚積層した多層構造になっており、さらにその横をピクセル構造の CdTe 半導体検出器が囲う形となっている。Si 中でコンプトン散乱された光子を CdTe で吸収することで入射光子の反応位置とエネルギーを測定することで、コンプトン運動学を利用してガンマ線の到来方向を制限することができる。さらに、パッシブなコリメータにより、10 keV 以下において視野を $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ に絞り、アクティブシールドにより高エネルギー側でも視野を制限することで、徹底的なバックグラウンド除去を行い、60 keV-600 keV という広いエネルギー領域での過去最高感度の観測を実現する。

アクティブシールドは 25 個の BGO で構成されている。BGO は原子番号や比重が大きく、高い阻止能を持ち、また強度が高く、潮解性がないことや従来の無機シンチレータに比べ加工がしやすいことも特徴の一つである。このアクティブシールドに光検出器であるアバランシェフォトダイオード (APD) と組み合わせることで、BGO シンチレータとしてガンマ線領域に有効面積を持ったガンマ線検出器としての役割も担う。

BGO シールドでは 16ms ごとにスペクトル情報を取得しており、通常時は常に上書きを続けながら 336 ブロック ($16 \text{ ms} \times 336 \text{ blocks} = 5.376 \text{ s}$) 分を記録に残す。ガンマ線バースト判定回路により突発的なレート上昇が検出されると、その時点から 4 秒分の書き込みを行った後、更新を停止する機能がある。この機能によって突発天体現象の情報が発生時点から前 1.376 s と発生後 4 s の計 5.376 秒分のデータが保存される。このガンマ線バーストデータは、主にショートガンマ線バーストに代表される非常に継続時間の短い突発天体現象に用いられる。ただし、この時間分解能の良いスペクトルデータは、データサイズの制限から、25 個の BGO のうち、12 個の BGO からしか取得できない。そこで、これとは別に時間分解能は 4 秒と低いが、すべての BGO からバースト発生後およそ 512 秒のデータを取得することで、ショートガンマ線バーストだけではなく、ロングガンマ線バーストや太陽フレア等、継続時間の長い天体現象にも対応している [4]。表 2.3 に SGD のデータを示す。

表 2.3: SGD のデータ [4]

	ガンマ線バーストデータ	モニタデータ
時間分解能	16 ms	4 s
スペクトルチャンネル	32 ch	128 ch
時間範囲	-1.376 ~ 4.0 s	0 ~ 512.0 s

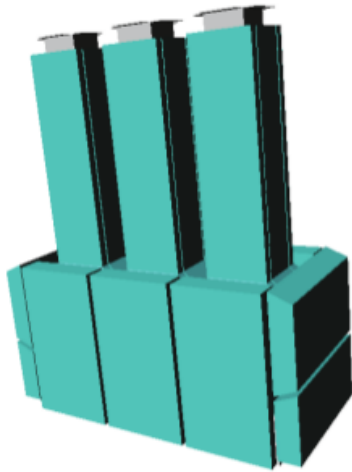


図 2.6: SGD BGO アクティブシールドの概観

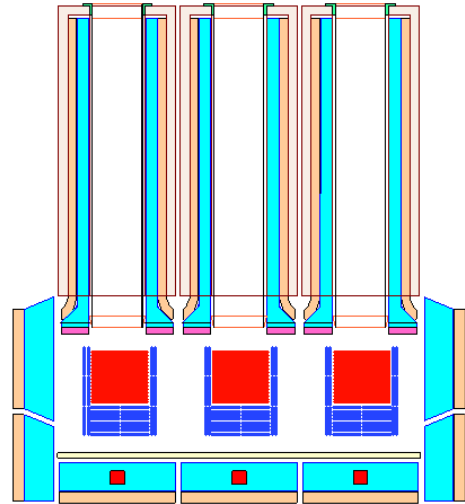


図 2.7: SGD 断面図 [11]

2.3 本研究の目的

次期 X 線観測衛星である ASTRO-H に搭載される軟ガンマ線検出装置 SGD に用いられている 25 個の BGO は、主検出器であるコンプトンカメラのバックグラウンドを抑えるシールドとしての役割だけでなく、ガンマ線バースト検出器としても大きな力を発揮する。しかし、ガンマ線バーストは全天のあらゆる場所で観測される天体现象なので、詳細なデータ取得のためには到来方向を知ることが極めて重要である。本研究では SGD における BGO シールドのモンテカルロシミュレータを開発し、ガンマ線バースト観測能力、特に位置決定能力について検証する。

第3章 SGDのガンマ線バースト観測応答

3.1 エネルギー応答

天体観測において、検出器を用いてデータを取得する場合、何の操作も加えなければ検出器固有の変換を受けたパルスハイトが得られる。よって、検出器のデータを解析するためには、これを元の天体信号に戻すための変換(応答関数)が必要となる。理想的には、ある単色のガンマ線が検出器に入射した時、ある一つの値のパルスハイトが返ってくるのが望ましい。しかし実際に我々が受けとるのは、入射ガンマ線が単色の場合であっても、検出器固有の確率分布や検出器内での様々な物理素過程に従った複数のパルスハイトとなる。このような入射ガンマ線に対するパルスハイトの確率分布をエネルギー応答と呼ぶ。図 3.1 は 1 cm^3 の CsI シンチレータに 662 keV の単色ガンマ線を当てた場合の応答スペクトルである。このように、元々単色のガンマ線が入射した場合でも、光電吸収によってすべてのエネルギーが吸収されたイベントやコンプトン散乱によってエネルギーを落としたイベントが、CsI シンチレータの分解能でなまされて、複雑なパルスハイトスペクトルとして観測されることが分かる。このように、エネルギー応答を再現できる応答関数がなければデータを正しく解析することはできないため、応答関数の構築は天体を解析するうえで非常に重要である。

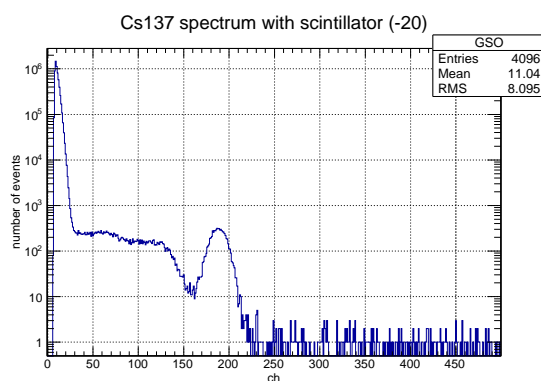


図 3.1: 1 cm^3 CsI シンチレータに 662 keV の単色ガンマ線を入射させたときの応答スペクトル

3.2 角度応答

ガンマ線が検出器に入射する際、入射角度によって検出効率やエネルギー応答が変化するため、得られる分布が変わってくる。例えば検出器の片側に粒子を遮蔽する壁があった場合、壁がある側から粒子を打ち込んだときの検出数は、遮蔽するものが何もない側から打ち込んだときの検出数にくらべはるかに小さい値となる。このような角度による検出効率の変化のパターンを角度応答と呼ぶ。例として図 3.2 にさぐく

HXD-WAM の角度応答を示す。この角度応答もエネルギー応答と同じく、正しく再現できなければ天体の真の明るさを知ることができないため、非常に重要である。また、ガンマ線の入射方向によって変わる検出効率のパターンからガンマ線入射角度を制限することができ、どこからガンマ線がやってきたか、すなわちガンマ線バーストの位置を決定する上でも角度応答は重要である。

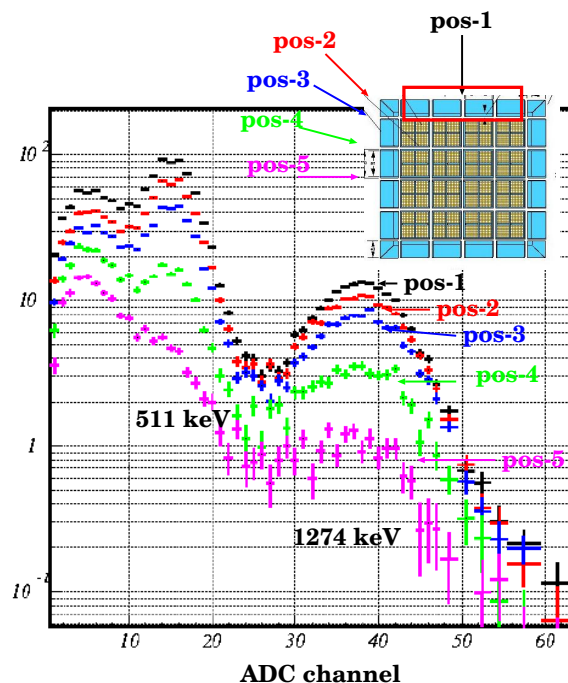


図 3.2: すざく HXD-WAM の角度応答 [12]

3.3 ガンマ線バースト観測応答の構築手順

ここまで述べたように、エネルギー応答や角度応答などの検出器応答を正しく再現できなければ天体観測を正しく行うことはできない。本研究における SGD の BGO シールドを用いたガンマ線バースト観測能力の検証においても、これら応答を正しく再現する必要がある。しかし SGD の BGO シールドは非常に巨大で複雑な構造を持つため、その応答も非常に複雑なものとなる。そこで、本研究では、BGO シールドの応答再現のためのモンテカルロシミュレータの開発をまずは行い、開発したシミュレータを用いてガンマ線バースト観測能力の検証を行うことにする。本研究では以下の手順で観測応答の測定を行った。

1. シミュレータの開発

1-1. シミュレータの立ち上げ、物理プロセスの確認

本研究では、モンテカルロシミュレーションのために、Geant4 を用いる。まず最初に Geant4 の基本構造や動作を理解するために、単純な構造のジオメトリの作成、単色のエネルギーを持った粒子の放射等を自分で設定できるようにする。その後、本研究で必要な機能をシミュレータに実装し、実験で得られた結果とシミュレーションで得られた結果の比較をする 4.2 節にて詳しく述べる。

1-2. シミュレーションで使用する物理過程の検証

シミュレーションで使用されている物理過程の設定を変え、結果が想定される物理に従っていることを検証し、本研究に最もあった物理過程の設定を把握する。4.3 節にて詳しく述べる。

1-3.SGD ジオメトリを用いたエネルギー応答の再現

ここまでで構築したシミュレータを実際に SGD に適用する。SGD ジオメトリにある 25 個の BGO シンチレータそれぞれが持つ固有のエネルギー応答を組み込み、実験で得られた結果と比較することで正しく再現できていることを確認する。4.4 節にて詳しく述べる。

2.SGD ジオメトリを用いた角度応答の作成とガンマ線バースト観測能力検証

SGD ジオメトリに対してガンマ線バーストを想定したビームをあらゆる方向から入射させ、面ごとの検出数の角度応答比 (=カウントマップ) を作成する。得られた角度応答を用いて、面毎の応答の比からガンマ線バーストの位置を決定する手順を確立し、SGD BGO シールドによる GRB 位置決定能力を検証する。5 章にて詳しく述べる。

3.4 BGO シールドで目指す GRB 観測精度

SGD の BGO シールドは、すざく衛星の WAM と同じタイプの検出器であるため、エネルギー応答精度は Suzaku-WAM と同様の 10 ~ 30% を目指す。角度応答は同様の手法を用いた Suzaku-WAM や Fermi GBM でのガンマ線バースト位置決定精度 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ を目指す

第4章 SGDのBGOシールドのモンテカルロシミュレータの開発

本研究ではSGD BGOシールドによるガンマ線バースト観測能力の検証をモンテカルロシミュレーションを用いて行う。シミュレータはGeant4をベースに開発しており、本節でGeant4の基本的な構造と本研究で組み込んだ機能、さらにシミュレータの検証について述べる。

4.1 Geant4とは

Geant4とは、様々な粒子(光子、電子、陽子等)が物質を通過する際に生じる相互作用過程を再現することができる大規模ソフトウェア・パッケージである。高エネルギー物理学や宇宙線、原子核実験のみならず、放射線医療、トモグラフィ、宇宙工学といった様々な分野でのシミュレーションに使用されている。最も大きな特徴として、ジオメトリの再現を簡単に行うことができることである。このため、衛星全体のような複雑なジオメトリもより詳細に再現することができ、物理過程の再現性もよいため、本研究のシミュレーションに適している。今回用いたGeant4と物理モデルのバージョン等を表4.1に示した。

表 4.1: 本研究で使用した Geant4 と各テーブルのバージョン

名称	内容	バージョン
Geant4	Geant4 メインプログラム	10.1(Patch-02)
CLHEP	高エネルギー物理における標準クラスライブラリ	2.2.0.4
EMLivermore	ローレンス・リバモア研究所のデータに基づいて、粒子の電磁相互作用を低エネルギーまでカバーしたモデル。	

4.2 Geant4の構造と実装した機能

Geant4は図4.1に示したように多数のクラスライブラリから構成されている。様々なクラスをユーザーの目的にあった記述をすることで再現することができる。以下では、今回の研究で扱った主なクラスを挙げる。

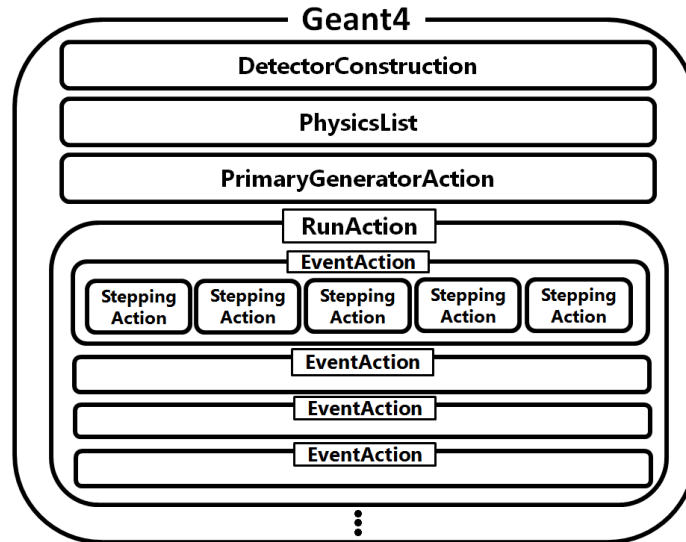


図 4.1: Geant4 の主なクラスと構造

また、本節では図 4.2 のように配置された Si フォトダイオードに、線源として ^{241}Am を用いてスペクトルを取得する実験の再現を例として、各クラス及び実装した機能について述べる。



図 4.2: 本節で再現する実験セットアップ。アルミ製の箱に囲われた Si フォトダイオードに ^{241}Am をあてスペクトルを取得する。

4.2.1 DetectorConstruction

ジオメトリの構造を記述するクラス。物体の定義には以下の 3 つのステップを必要とする。

Solid の定義

形状記述のためのクラスがあり、G4Box(箱型)、G4Tub(円柱型)、G4Sphere(球形)等で形を指定する。

LogicalVolume の定義

構成物質等や可視属性等は LogicalVolume で定義をする。

親 Volume に対する相対位置に配置

ジオメトリの位置や向き情報は G4PVPlacement に記述する。まず World という親 Volume を定義し、World に対する相対位置で置きたい場所を指定する。

図 4.3 に本節での実験セットアップを再現したジオメトリの画像を示す。

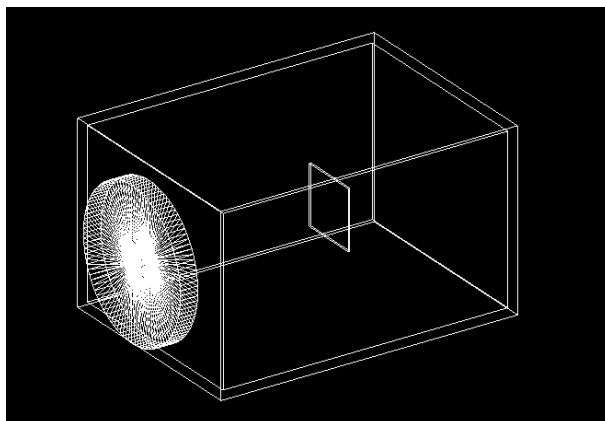


図 4.3: 図 4.2 の再現図。Si フォトダイオード、アルミ製の箱、線源を覆う円柱型のプラスチックタブレットのジオメトリを作成した。

4.2.2 PhysicsList

シミュレーションで行われる物理過程を定義するクラス。本研究のシミュレーションで用いる物理過程については 4.3 節にて詳しく検証を行う。

4.2.3 PrimaryGeneratorAction

入射粒子の設定を行うクラス。入射粒子の種類 (光子や電子等) やエネルギー、方向等を決める。まず、G4ParticleGun に粒子 1 発分の情報を設定する必要がある。以下に ParticleGun に書き込む代表的な情報の例を挙げる。

G4ParticleDefinition

粒子を定義するクラス。G4ParticleTable に粒子のリストがあり、particleName に粒子 (e-, photon 等) やガンマ線等を設定することで打ちたい粒子が打てるようになる。

SetParticleEnergy

打ち込む粒子の初期エネルギーを定義できる。単色光だけではなく、指数分布や power-law の形をとるエネルギー分布の粒子を打ち込むことも可能である。今回の実験では Table of Radioactive Isotopes の ^{241}Am のエネルギーごとの放出割合 [13] を取り入れ、この放出割合に従った乱数をあたえたガンマ線を発生させた。

SetParticlePosition

粒子の初期位置を定義できる。1点からだけではなく、幅を持たせて太さのあるビームを放射させることも可能である。

SetParticleMomentumDirection

粒子を放射する方向を定義できる。 $(0.,0.,1.)$ と設定すれば図 4.4 のように z 方向への直線ビームとなり、図 4.5 のように等方的に放射させたい場合には極座標形式で θ 、 ϕ を与え、 $0 \leq \theta \leq \pi$ 、 $0 \leq \phi \leq 2\pi$ の範囲で一様乱数をふることで全天方向にランダムに放射される。

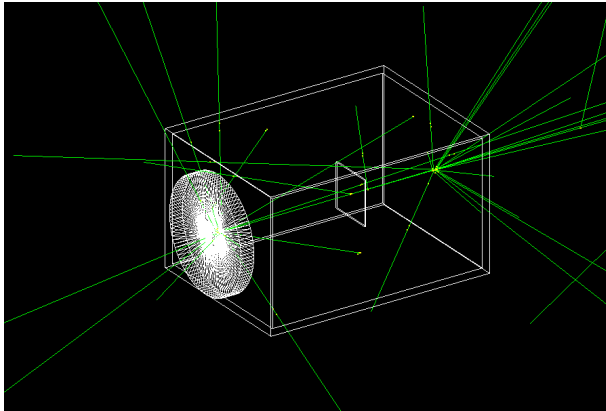


図 4.4: 線源から Si フォトダイオードに向かって直線にガンマ線を放射した場合

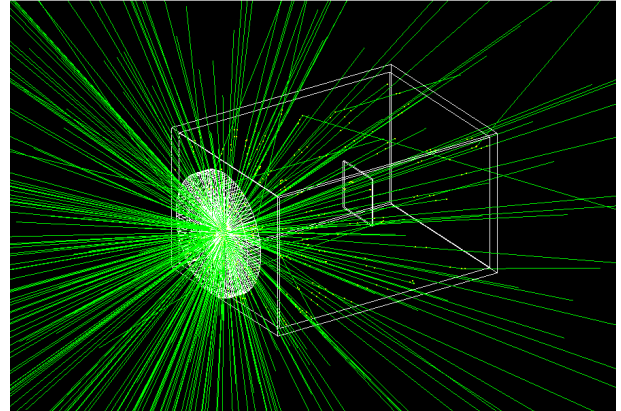


図 4.5: 線源からガンマ線が等方的に放射された場合。本節の実験の再現にはこちらを用いた

以上の3つが `geant4` における必須クラスであり、最低限これらがないとシミュレーションは行えない。以下の Action クラスはイベントの情報を扱うクラスである。図 4.6 に Action クラスの構造を示す。

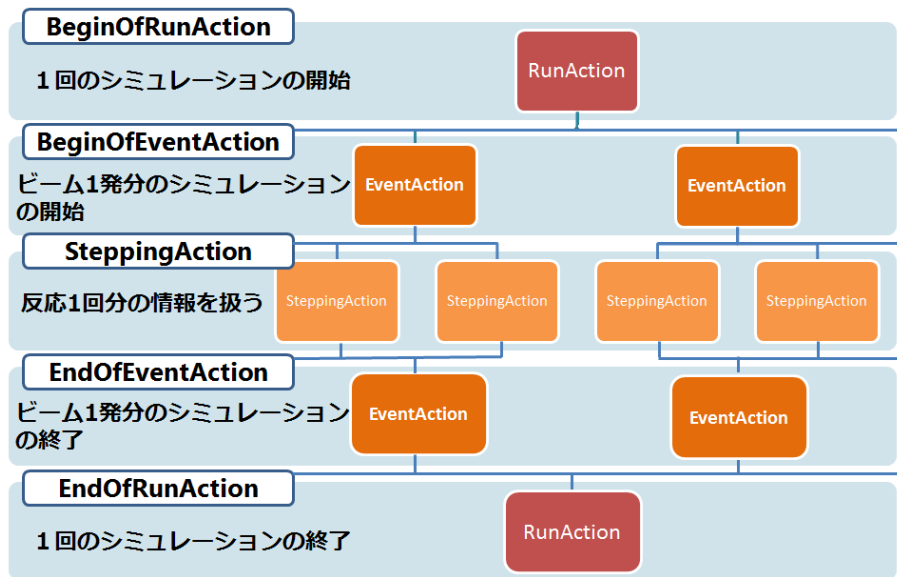


図 4.6: Action クラスの構造

4.2.4 RunAction

イベント全体 (粒子の打ち始めから打ち終わりまで) の情報を取り扱うクラス。イベント開始時の動作を BeginOfRunAction、全てのイベント終了時の動作を EndOfRunAction で設定できる。EndOfRunAction では以下のクラスで取りまとめた情報の出力方法を設定できる。今回はデータ解析ソフトである ROOT を用いて出力した。ROOT のツリー構造を利用することで、複数の条件をブランチに追加し、欲しい情報を取り出しやすくすることが可能となった。

4.2.5 EventAction

1 イベント (1 発の入射粒子が物質を通過する際に生じる全ての物理現象) ごとの情報を取り扱うクラス。イベント開始時の動作は BeginOfEventAction で設定でき、ここで変数の初期化をすることで次のイベントに前のイベントの情報を持ち越さずにデータを残すことができる。EndOfEventAction ではそのイベント中に起きた SteppingAction でのエネルギーデポジットを足しあげ、1 イベントの全エネルギーデポジットとして記録したり、さらにエネルギー情報を keV からパルスハイトチャンネルに変換したり、分解能でなまらせるための関数を設定し、RunAction にポインタを渡すことで欲しいデータを残すことができる。

例として図 4.7 に本節の実験の 0 番のイベント情報と 1 番のイベント情報を出力したものを示す。

=====> EVENT:0		=====> EVENT:1	
EventID	= 12186	EventID	= 28392
HitID	= 0	HitID	= 0
DetID	= 0	DetID	= 0
TotalHit	= 1	TotalHit	= 1
Edep	= 59.5412	Edep	= 17.6627
EPI	= 225.836	EPI	= 64.0331
EPHA	= 221.16	EPHA	= 67.1284

図 4.7: 0 番のイベント情報 (左) と 1 番のイベント情報 (右)

各ブランチの意味

EventID

全イベントの中で何番目のイベントであるかの情報。今回の実験では等方的に放射しており、さらに線源と検出器であるフォトダイオードの間にアルミ箱があるため、検出器で起こる初めてのイベント (0 番のイベント) であっても、全体から見れば 12186 番のイベントであるということがわかる。

HitID

その粒子の何回目の Hit であるかの情報。0 は最初の Hit であることを示している。

DetID

そのイベントがどの検出器で起こったのかという情報。今回の実験では検出器はフォトダイオード 1 つしか設定していないが、SGD のジオメトリでシミュレーションをする際には 25 個の BGO それぞれに DetID を割り振って、一つ一つの検出器で取得された情報を個別に見ることができる。

TotalHit

その粒子が計何回 Hit したのかという情報。この例では 0 番のイベント、1 番のイベントともに TotalHit が 1 なので、最初の Hit で検出器との反応が終わっていることがわかる。

Edep

この粒子が検出器で落としたエネルギー (図 4.8)。この例では、0 番のイベントでは最も放出割合の高い 59.5 keV の初期エネルギーを持った粒子が検出器で全エネルギーを落としており、1 番のイベントでは検出器で 17.6627 keV 分のエネルギーを落としたことがわかる。

EPI

Edep を keV から ch に変換したもの (図 4.9)。較正直線は放射強度の高い 17 keV、26.345 keV、59.5 keV のスペクトルのピークをガウスフィットし、そのピークの中心値の ch と対応させた三点較正によって求めた。

EPHA

EPHA を検出器の分解能でガウス分布状になましたもの (図 4.10)。分解能を表すパラメータ σ には実際に実験で得られた 59.5 keV のピークをガウスフィットして得られた値を用いた。

この中で Geant4 が標準的に出力する情報は Edep だけである。他の情報は、ユーザー自らがエネルギー分解能やチャンネルに対応させたエネルギー較正の式を設定することで追加実装できる。

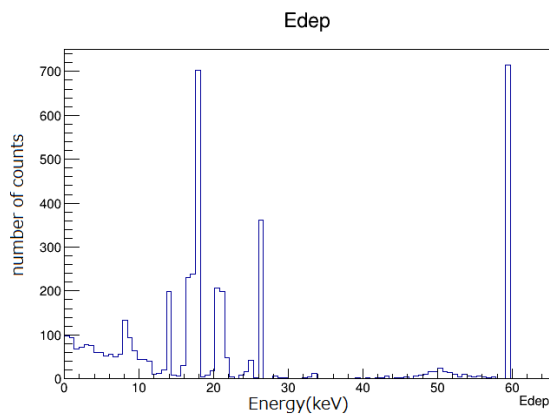


図 4.8: シミュレーションで得られたエネルギーデータ

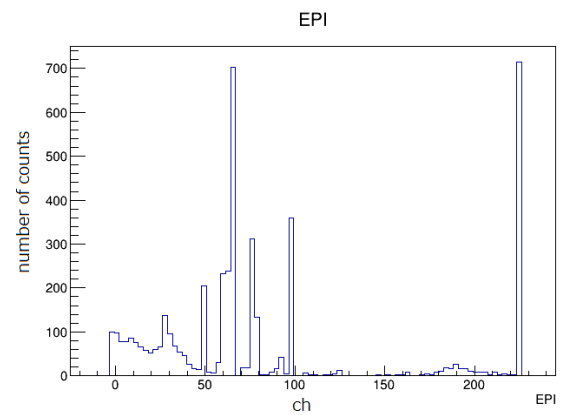


図 4.9: 横軸のエネルギーを keV から ch に変換したもの (EPI)

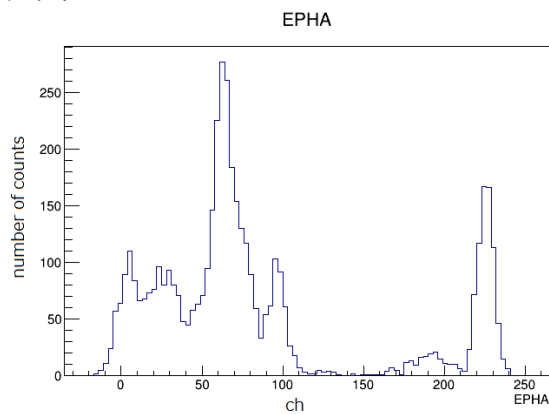


図 4.10: EPI を分解能でなませたもの (EPHA)

4.2.6 SteppingAction

粒子が物質中で起こした 1 反応ごとの情報を取り扱うクラス。1 反応でどれだけのエネルギーを落としたか、どういう反応を起こしたか (光電吸収やコンプトン散乱など) 等が記録され、ユーザーが追加で出力設定をすれば任意の情報を取り出すことができる。本研究では情報の欲しい検出器で反応が起きた際にその情報を記録し、最後に EndOfEventAction で処理できるようにした。

以上の実装したクラスに、実験で実測したエネルギー分解能、エネルギー較正データを取り入れ、得られたシミュレーションデータと実験結果を比較したものが図 4.11 である。

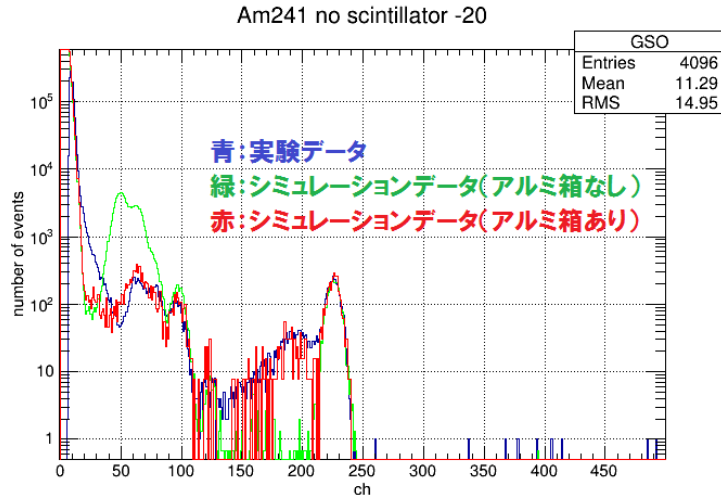


図 4.11: 実験データとシミュレーションデータの比較

まず、アルミ箱のジオメトリを作成せずにシミュレーションをしてみたところ、59.5 keV の光電吸収ピークの形はよくあった。このことから、エネルギー分解能及び較正直線の入力はうまくいっていることが確認できた。しかし、50 ch 付近で実験データよりイベント数が多く、逆に 140-210 ch 付近では実験データよりイベント数が少なかった。これは 50 ch 付近のエネルギーをもった粒子の一部はアルミ箱に吸収されており、また、140-210 ch 付近ではアルミ箱に散乱され少しエネルギーを落とした粒子が入射していると考えられる。

そこでアルミ箱のジオメトリを追加したところ、上記の問題は解消され実験データとほとんど一致する結果が得られた。これを踏まえて、線源、タブレット、アルミ箱、フォトダイオードの配置から散乱が起こりえる角度の範囲を求め、その散乱によって落とすエネルギー範囲を計算したところ、グラフの 182-225 ch の範囲に 1 回散乱、138-225 ch の範囲に 2 回散乱によってエネルギーを落とした粒子が現れることが分かった。この範囲は図の実験結果と一致する。以上によりジオメトリ再現の重要性、及びシミュレータに実装した機能が正しく動作し、実験データの再現ができることを確認した。

4.3 Geant4 内部で使用する物理の確認

Geant4 によるシミュレーションで起こる反応には、PhysicsList クラス内で定義した物理過程が使用される。この物理過程が再現したい実験に合っていないければ、正しい再現結果は得られない。したがって SGD の BGO シールドのシミュレーションを行う前に、使用される物理過程が正しいものであるかを確認する必要がある。本節では、 1 cm^3 の BGO に 1 keV から 1 MeV までの範囲で様々なエネルギーの粒子を入射させ、PhysicsList で定義する物理素過程を変えて検出効率を測定し、実際の実験結果や理論値と比べることで、それぞれの結果が想定される物理と矛盾していないかを確認し、実際に SGD ジオメトリで行うシミュレーションに使用する物理過程に問題がないかを確認する。ここで、検出効率とは、入射したガンマ線の数のうち全てのエネルギーを落とした数の割合のことで、3.2 節で述べたように、検出器の形状、ガンマ線の入射角度や入射位置、エネルギーなどに大きく依存し、重要な検出器応答の一つである。

4.3.1 実験セットアップ

実験セットアップを図 4.12 に示した。まず 1 cm^3 の立方体構造をした BGO シンチレータに光を外に逃さないためのテープ (日本バルカー工業株式会社製) で一面を覗いて覆い、裸の面をアバランシェフォトダイオード (浜松ホトニクス SiAPD S8664-1010) にオプティカルグリッド (株式会社タナック TSK5353) で光学接着をした。その後、アルミニウムが主成分である金属箱に BGO が接着された APD を固定し、高電圧電源と前置増幅器 (クリアパルス株式会社 580K 型) につないだ。APD には 336 V の高電圧を印加した。これは -20 下で APD の増幅率が 50 倍になる電圧の値である。この値は事前実験によって得られたものである。前置増幅器によって増幅された信号はシェイパー (ORTEC571) を通して波形整形され、pocketMCA (Multi Channel Analyser: AMPTEK 社 MCA8000D) によって AD 変換、ヒストグラム化され、PC に取り込まれる。シェイパーによる波形整形には時定数 $2.0 \mu\text{s}$ 、Coarse Gain 20 を用いた。BGO と APD が固定された金属箱と前置増幅器は結露による機械故障を防ぐためシリカゲルとともに密閉し、薄い円筒状のタブレットに収められた様々なエネルギーの線源と共に恒温槽に入れ、スペクトルを取得した。使用した線源は ^{241}Am 、 ^{57}Co 、 ^{137}Cs である。 ^{241}Am 、 ^{57}Co はシンチレータから 4 cm 離れた場所に、 ^{137}Cs は 12 cm 離れた場所に設置した。恒温槽は APD の暗電流によるノイズ軽減のため -20 に設定した。恒温槽内部には高さ合わせるための発泡スチロール等も置いていたが、本実験のシミュレーションのためのジオメトリとして作成したのは、BGO と APD の他には、線源を覆うタブレット、金属箱、恒温槽と、散乱の影響が大きいと思われる 3 つだけである。

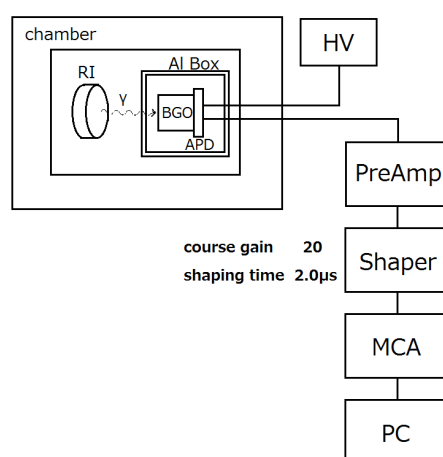


図 4.12: 実験セットアップ

4.3.2 実験による検出効率の測定

使用した線源は ^{241}Am 、 ^{57}Co 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs である。今回の実験で用いたそれぞれの核種の光子のエネルギーと放出割合を表 4.2 に示す。

先に述べた通り、検出効率を求めるには全エネルギーを落とした光子数を全入射光子数で割ればよい。光電ピークの面積はそのエネルギーを落とした光子数に等しいので、カウント数のピークをガウスフィット

表 4.2: 今回用いた線源の半減期、エネルギー、放出割合

核種	半減期	エネルギー (keV)	放出割合
^{241}Am	432.2 y	59.5 keV	35.9%
^{57}Co	271.8 d	122 keV	85.6%
^{22}Na	2.602 y	511 keV	89.8%×2
^{137}Cs	30.07 y	662 keV	85.1%

し積分することで求まる。しかし全入射光子数は、線源から四方八方にガンマ線が放射されていることから、厳密に求めるのが難しい。そこで今回は、線源を購入した当時のカタログ値を信用することで、半減期を考慮して現在の強度に換算し、またガンマ線が線源から完全に等方的に放射されているという仮定のもと検出効率をを求めることにした。今回の測定ではシンチレータと線源の距離 $d[\text{cm}]$ に比べシンチレータの面積 $A[\text{cm}^2]$ が十分小さいため、線源に対する立体角 Ω は $\Omega = A/4\pi d^2$ と近似できるものとする。検出されたガンマ線数 N_d はあるエネルギー E における検出効率を $\epsilon(E)$ 、測定時間を $t[\text{s}]$ 、現在の線源強度を $R[\text{Bq}]$ 、ガンマ線放出率を η とすると

$$N_d = R \times \eta \times \frac{A}{4\pi d^2} \times \epsilon(E) \times t \quad (4.1)$$

と表される。以上により実験での検出効率を求めることができる。

4.3.3 シミュレーションによる検出効率測定

今回、Geant4 で定義する物理過程として以下の 2 つのモデルを使用した。それぞれの名称とその内容を表 4.3 に示す。

表 4.3: 本研究で使用した物理モデル

名称	内容
EMStandard	低エネルギー側の計算を除いて粒子の電磁相互作用を再現する高エネルギー物理向けのモデル。
EMLivermore	ローレンス・リバモア研究所のデータに基づいて、粒子の電磁相互作用を低エネルギーまでカバーしたモデル。

今回、EMStandard と、EMLivermore の内部で蛍光 X 線生成過程を on にしたもの、そして蛍光 X 線生成過程を off にしたものの 3 つでシミュレーションをし、検出効率を測定して結果にどのような影響がでるか確認した。シミュレーションでは検出効率の他に、光電吸収で全エネルギーを落とした光子のみを数えて全入射光子数で割った光電吸収確率も見ることでどのような違いが現れるかの確認も行った。光電吸収をしたイベント情報のみ出力するには、先に述べたように SteppingAction で反応ごとに起こした反応名を出力するよう設定する必要がある。光電吸収を起こしたイベントのみでエネルギーデポジットを書き出せば、検出効率同様ピークをガウスフィットし面積を求めることで光電吸収によって全エネルギーを落とした光子数を求めることができる。

また、物質の質量反応係数がわかれば検出効率の理論値を求めることができる。エネルギー E のガンマ線に対する物質の質量反応係数を $\kappa(E)$ 、物質の厚さを d 、密度を ρ とすると、ガンマ線が物質を透過できずに吸収・散乱される確率 P は

$$P = 1 - \exp(-\kappa(E)\rho d)$$

で求めることができる。BGO の質量反応係数は、NIST のデータベース [14] を用いた。この節のシミュレーションでは、面積 1cm^2 、厚さ 1mm の BGO を用いている。結果は図 4.13、4.14、4.15 のようになった。

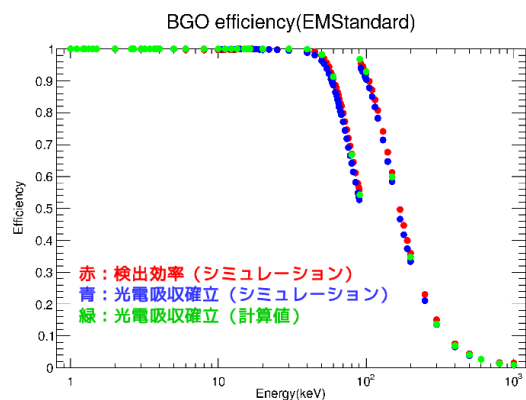


図 4.13: EMStandard での検出効率と光電吸収確率

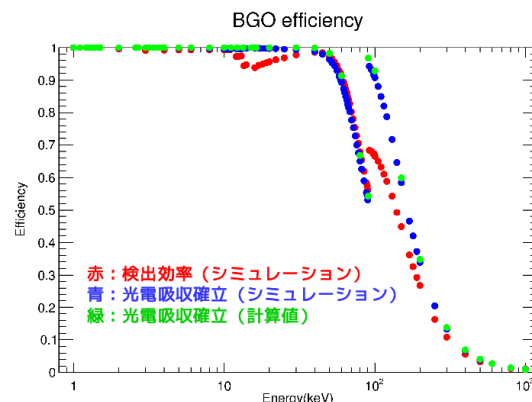


図 4.14: EMLiverMore(蛍光 X 線生成過程オン) での検出効率と光電吸収確率

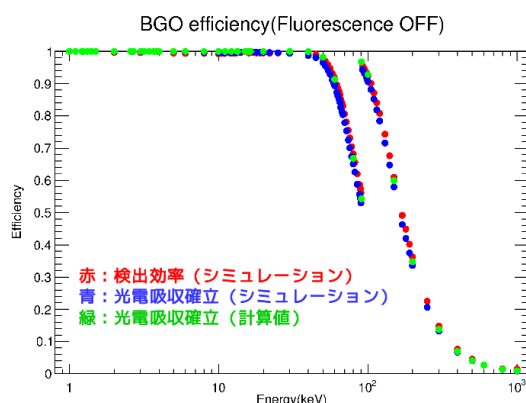


図 4.15: EMLivermore(蛍光 X 線生成過程オフ) での検出効率と光電吸収確率

どのグラフでも高エネルギー側では検出効率、光電吸収確率が下がってくる。これは入射粒子のエネルギーが高くなるほど、物質内で反応をおこさず透過しやすくなるからである。100keV 付近では、BGO の Bi の K 核の電子のエネルギー準位に相当するエネルギーであるため、入射粒子が Bi の K 殻電子をはじき飛ばし光電吸収確率が上がる。すると内殻に空きが生じた原子は安定化するためにより上の殻から電子が落ちてくる。この際、落ちてきた電子の元いたエネルギー準位と新しくしめたより安定な順位のエネルギー

の差分が蛍光 X 線として放射されるため、図 4.14 の蛍光 X 線生成過程をオンにしているものだけが物質表面でエスケープをおこし、検出効率が他に比べ上がりきっていない。15keV 付近では同様に Ge の K 殻でエスケープを起こしていることが確認できる。以上より EMLiverMore(蛍光 X 線生成過程オン) が最もよく低エネルギーの物理をよく再現できていることが確認できた。

4.3.4 シミュレーションと実験結果の比較

図 4.16 に面積 1cm^2 、厚さ 1cm の BGO でのシミュレーションから得られた結果と、4.3.1 のセットアップで行った実験から得られた結果を比較した図を示す。

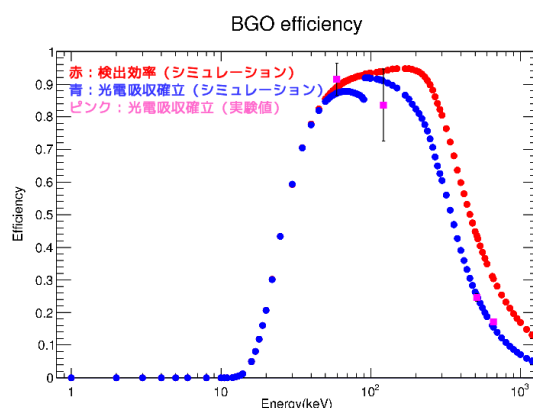


図 4.16: シミュレーション結果と実験結果の比較

図 4.16 を見ると、実験で測定した 4 つのエネルギーにおいて誤差の範囲内でシミュレーションと実験結果があっていることがわかる。これらの結果から、シミュレーションで用いる物理過程の設定として、低エネルギーの物理をよく再現できている EMLiverMore(蛍光 X 線生成過程オン) を使用して問題ないことが確認できた。

4.4 SGD ジオメトリを用いたエネルギー応答の再現

ここまででシミュレータへの必要な機能の実装、及び物理モデルの検証を行い、問題がないことが確認できた。そこで、開発したシミュレータを用いて、実際に SGD ジオメトリを再現、実測データを取り込むことで、SGD の BGO シールドのエネルギー応答が再現できるかどうか調べた。

4.4.1 必要な実測パラメータ

今回用いた SGD ジオメトリは ASTRO-H チームが作成したものを使用した (図 4.17)。

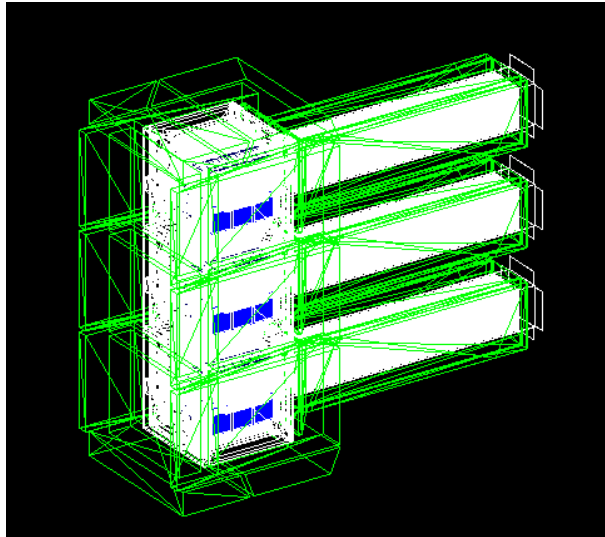


図 4.17: SGD 単体のジオメトリ

シミュレータに組み込む実測パラメータは、25 個の BGO それぞれの分解能とエネルギー較正直線のデータである。エネルギー分解能は、(1) エネルギーに依存しない成分 (ノイズが支配的)、(2) エネルギーの平方根に依存する成分 (統計ゆらぎ)、(3) エネルギーに比例する成分 (ゲインゆらぎ) の 3 つの成分で支配されている。(1) の成分を A 、(2) の成分を $B\sqrt{E}$ 、(3) の成分を CE とすると、あるエネルギー E に対する分解能を与える σ はこれらの二乗平均をつかって

$$\sigma^2 = A^2 + B^2(\sqrt{E})^2 + C^2 E^2$$

で与えられる。この 3 つのパラメータデータを Geant4 に組み込み、同じセットアップでシミュレーションを行って、スペクトルを取得し実験で得られた結果と比較することで、正しいシミュレータを構築できていることを確認する。

これらのパラメータは 2014 年 12 月および 2015 年 2 月に行われた SGD の低温キャリブレーション試験 (図 4.18) で行われた実験によって得られたものを用いた。この実験では SGD の天頂方向 1m 先にあった ^{137}Cs の 662 keV の単色ビームのスペクトルを取得して 25 個の BGO でそれぞれ異なる分解能とエネルギー較正直線のデータを得た。

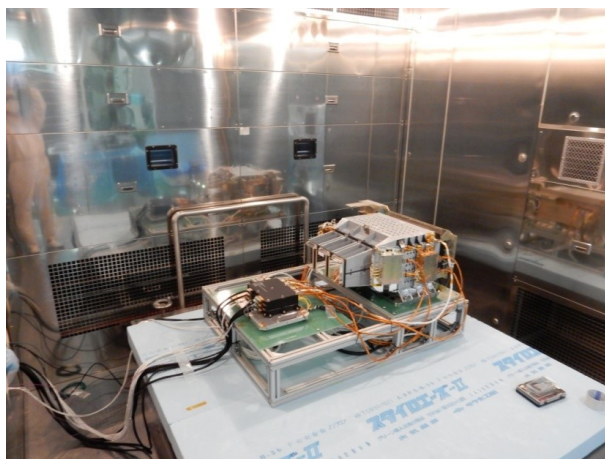


図 4.18: SGD 低温キャリブレーション試験の様子 [15]

4.4.2 実験セットアップ

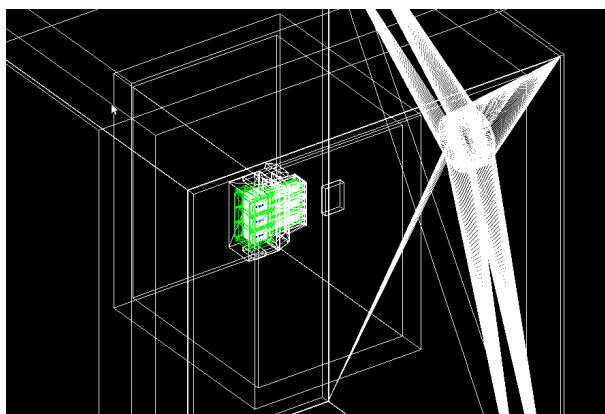


図 4.19: 実験セットアップ再現ジオメトリ

実験再現ジオメトリを図 4.19 に示す。SGD ジオメトリの他に、実験を行った部屋、フランジ付きの恒温槽、機材固定用の発泡スチロール、炭素繊維強化プラスチックで作られたハウジングも再現されている。 ^{137}Cs の 662 keV の単色光を SGD の天頂方向 1 m 先から等方的に放射させ、そのエネルギースペクトルを取得した。

4.4.3 シミュレーション結果と実験結果の比較

25 個の BGO に対しそれぞれ比較を行う。例として、線源に最も近い場所に位置する BGO(図 4.20 の赤い BGO) と一番遠い場所に位置する BGO(図 4.20 の黄色の BGO) が取得したスペクトルを図 4.21、4.22 に示す。

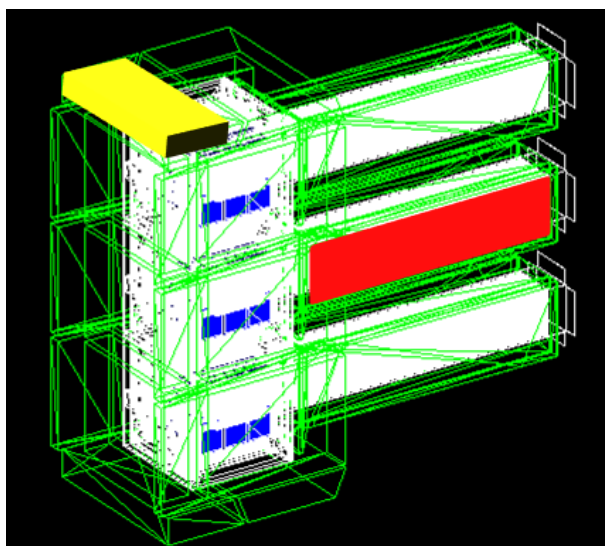


図 4.20: BGO の位置

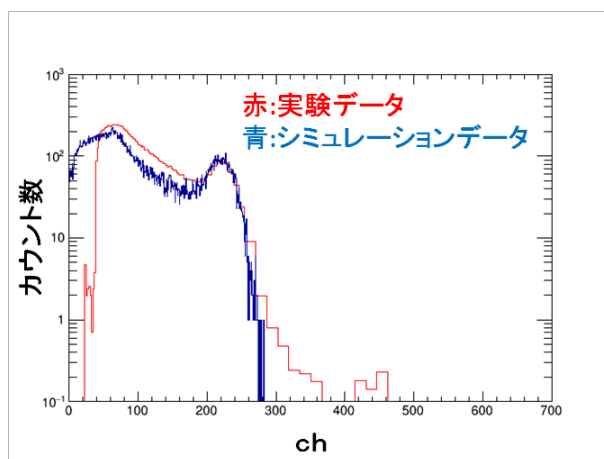


図 4.21: 線源に近い場所に位置する BGO のスペクトル

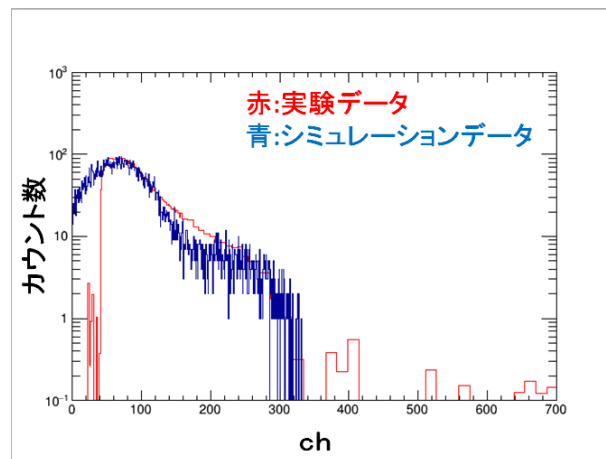


図 4.22: 線源から遠い場所に位置する BGO のスペクトル

線源近くに位置する BGO は遠くに位置する BGO に比べカウント数が多いことが確認できた。ピークから分解能の範囲で精度測定をしたところ、線源近くに位置する BGO の実験データとシミュレーションデータは、10%の精度で一致しており、スペクトルの再現ができていることがわかる。以上により以降のシミュレーションで用いるシミュレータが完成し、目標である 10%も達成していることが確認できた。

第5章 SGD BGO シールドを用いたガンマ線バースト観測応答の検証

ここまでの章で SGD のガンマ線バーストシミュレーションに使用するシミュレータの開発が完了した。本章ではこのシミュレータを用いて SGD BGO シールドのガンマ線バースト観測応答の検証を行う。

5.1 ガンマ線バースト観測能力の検証手順

本章ではガンマ線バースト観測能力のうち、ガンマ線バーストの位置決定能力に着目して検証する。ガンマ線バーストの発生位置が分からなければ、天体の真の明るさなどの詳細な情報が得られないため、ガンマ線検出装置の位置決定能力は重要な要素である。SGD BGO シールドでは BATSE や FermiGBM でも使われていた様々な方向を向いている複数の検出器の検出効率の比をとる方法での位置決定を目指す。また、SGD BGO シールドは、同じような構造をしている Suzaku-WAM に比べ、結晶が細かくセグメント化されているので、この方法による位置決定は有効になると期待される。

以下にガンマ線バースト観測能力の検証手順を示す。

(1) ガンマ線バースト発生方向による検出効率の違いをデータベース化する

3.2 で述べたように、入射方向の違いによって検出効率は異なる。複数の検出器が様々な方向を向いている場合、面ごとに検出しやすい方向が決まってくる。そこで、まずはガンマ線バーストを仮想したビームをあらゆる方向から SGD ジオメトリに当てることで、各 BGO の検出効率のデータベースを作成する。

(2) 実際に検出したガンマ線バーストのカウント数を各検出器について調べる

実際のガンマ線バーストを観測し、検出器ごとのカウント数を調べる。ただし、本研究では、SGD は運用開始前であり実際のガンマ線バーストの観測データは無いため、実際の明るさを模擬したシミュレーションで代用する。

(3) データベースと比較するための検出器の選別

様々な方向を向いている検出器が複数ある場合、全て検出器の検出効率の比をとってはいは膨大な組み合わせになってしまうため、適当に選別する必要がある。

(4) 検出器同士のカウント比とデータベースを比較

ガンマ線バーストの明るさは様々なので、各検出器のカウント数の絶対値もガンマ線バーストによって変わる。ただし、検出器同士で検出数の比をとれば、方向によってある決まった値になるはずである。それをデータベースと比較すれば、円弧状の等高線で到来方向を制限できるはずである。

(5) 様々な検出器のカウント比で円弧を描く

さらに比を取る検出器の組み合わせを増やして円弧を重ねていけば、その交点は一点に絞られていく。その一点がガンマ線バーストの到来方向である。

5.2 ガンマ線バースト発生方向決定手順の構築

前節で述べたように、検出効率のデータベースと、実際に検出したカウント数を比較することで、ガンマ線バーストの発生方向を決定することができる。本節では、実際に構築した SGD シミュレータを用いて、SGD BGO シールドによるガンマ線バースト発生方向決定の手順をまとめる。

5.2.1 検出効率データベースの構築

前章までで開発した SGD BGO シミュレータを用いて、ガンマ線バーストを仮想したビームを SGD ジオメトリに当てることで、BGO の検出強度比のデータベースを作成する。

図 5.1 のように SGD に対して天頂角方向に θ 、水平角方向に ϕ をとり、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 、 $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ の範囲で 5° 刻みで、図 5.2 のように SGD に対して十分な太さをもった仮想ガンマ線バーストビームを放射する。

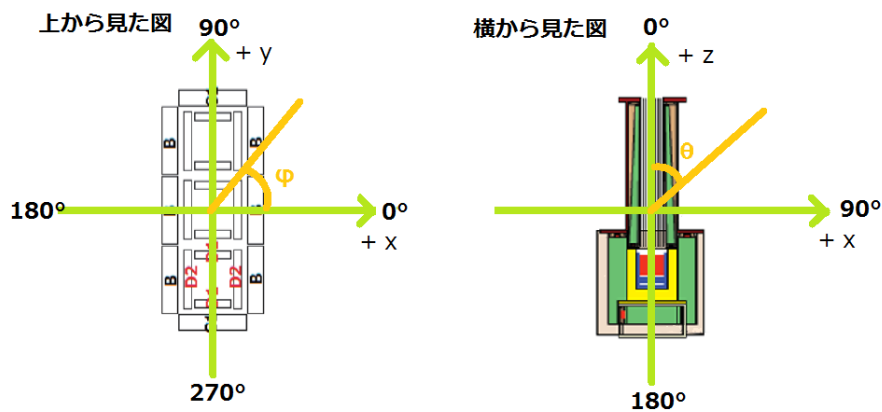


図 5.1: θ 、 ϕ のとり方

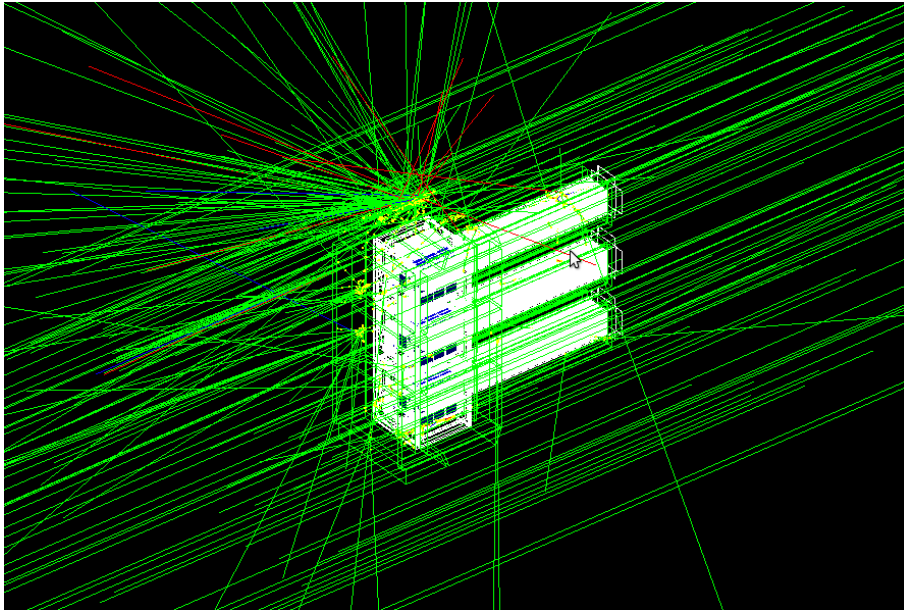


図 5.2: SGD 全体をカバーする十分な太さをもったビーム

ガンマ線バーストのエネルギー分布は、本来 Band 関数と呼ばれる 2 つのべき関数が指数関数によってつながったモデルが提唱されているが、今回は簡単のため、10 keV-300 keV はべき 1.5、300 keV-10 MeV まではべき 2.5 の 2 つのべき関数がつながった broken power-law のエネルギー分布で放射した。この broken power-law の分布の乱数を再現するために、逆関数法を使った。逆関数法とは、exponential や power-law といったある分布に従った乱数生成に用いられる方法である。図 5.3 に逆関数法の簡単な図解を示す。まず作成したい確率密度関数に対応する累積分布関数を作成する。次にこの累積密度関数が 1 に規格化させるよう規格化係数をかけ、その逆関数をとる。この逆関数に対して 0~1 の一様乱数をふることで、もとの関数に戻すと求めたい確率分布になるというものである。

このようにして得られたスペクトルが図 5.4 である。

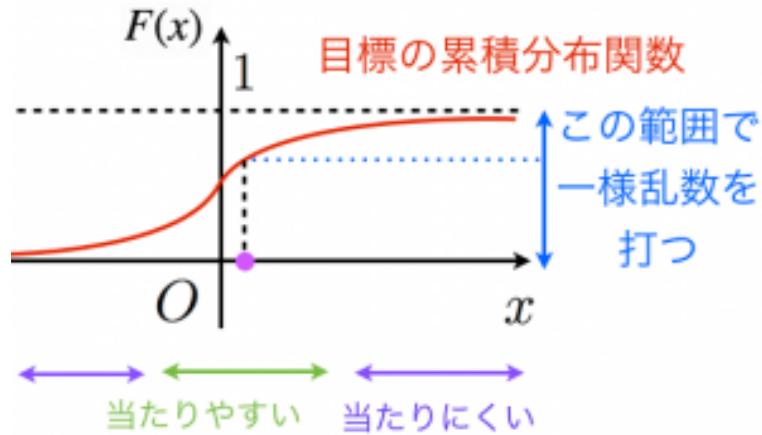


図 5.3: 逆関数法の図解。F(x) は 1 に規格化された累積分布関数 [16]

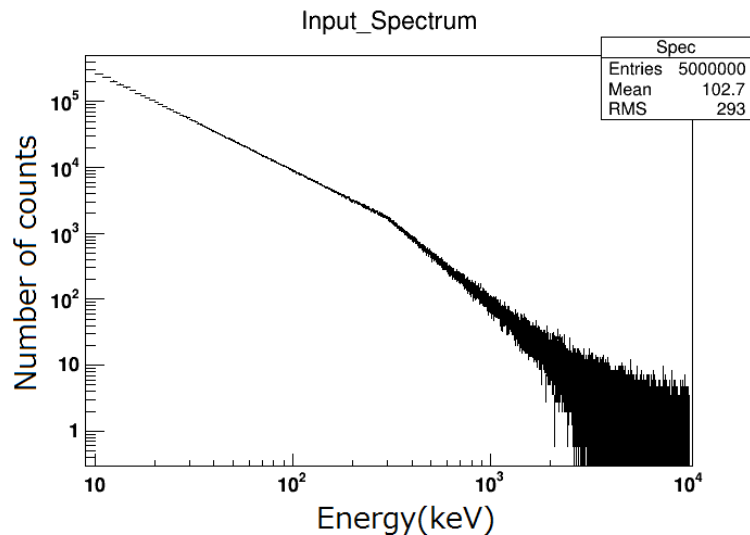


図 5.4: 逆関数法によって得られた仮想ガンマ線バーストのスペクトル

このスペクトルの 150 keV-5 MeV の範囲で積分したものを検出器のガンマ線検出数として、それぞれの検出器の角度応答を調べる。図 5.5 は 25 個の BGO の角度ごとのガンマ線検出数を 2 次元のカラーマップにしたものである。ただし元データは 5° 刻みなので、なめらかになるよう内挿されている。縦軸に天頂角 θ 、横軸に水平角 ϕ をとっている。赤い部分がその検出器でガンマ線を検出しやすい方向を表す。図 5.6 ではこの中から向いている方向、形状の異なる BGO を取り出しその角度応答の違いを確認した。紫と赤の BGO は形状こそ違うものの、向いている方面が同じであるため、同じような角度応答を示していることがわかる。黄色は $\phi = 90^\circ$ 方向に特に強い感度を持ち、検出器下部に位置しているために下方向 ($\theta \geq 90^\circ$) からのガンマ線も比較的多く検出できている。青の BGO は SGD の底面に位置しており、真下からのガンマ線に強い感度を持ち、逆に上方向 ($\theta \leq 90^\circ$) からのガンマ線はあまり検出できてない。総じて、各検出器の

正面からのガンマ線の検出効率が最も良く、裏側からのガンマ線はほとんど届かない。同じ面に位置する検出器はカラーマップも同じようなものが、対象方向にある検出器同士ではカラーマップも対照的なものが得られた。

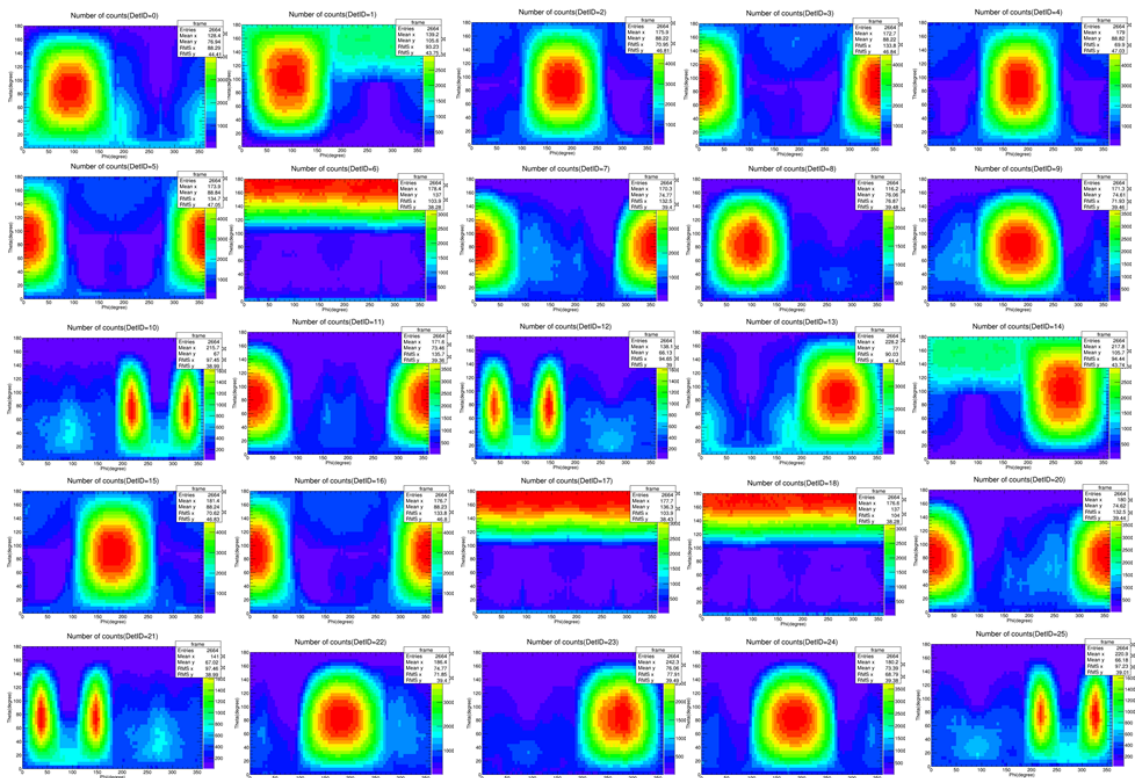


図 5.5: BGO の位置による角度応答の違い 1。横軸に水平角、縦軸に天頂角をとっている。

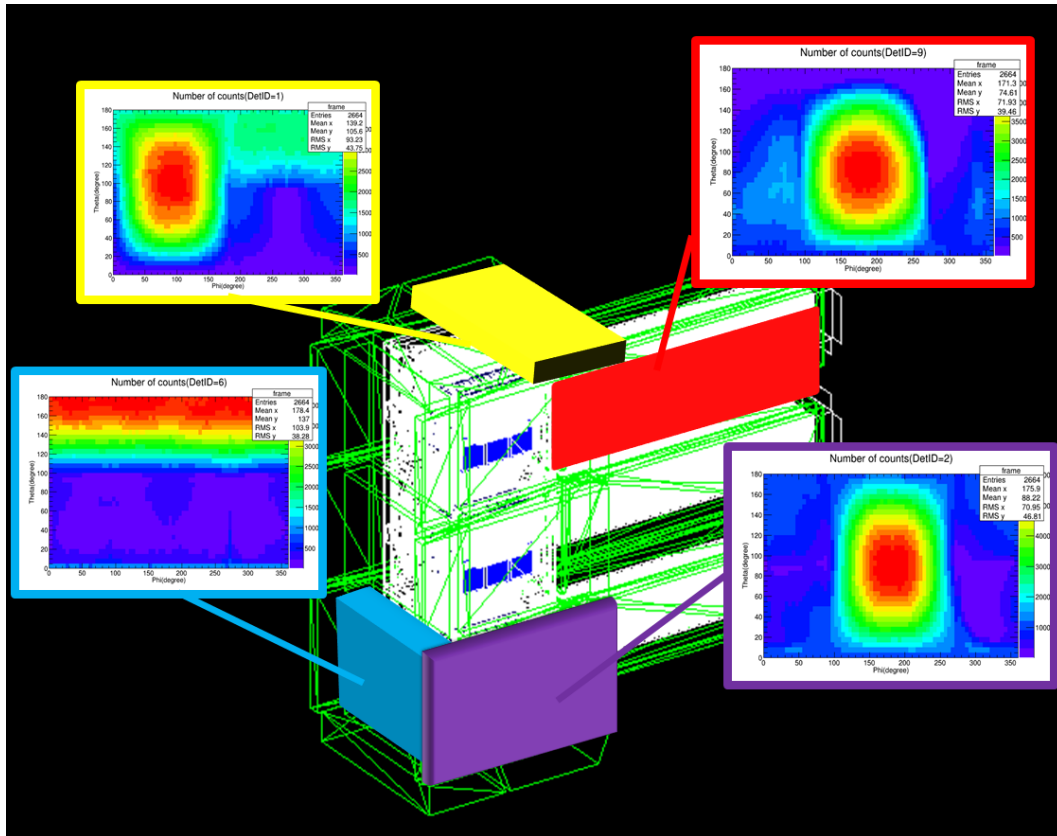


図 5.6: BGO の位置による角度応答の違い 2

5.2.2 各検出器における GRB 検出数解析

本来は実際に検出したガンマ線バーストの検出数の比をとるのが良いが、先に述べた通り、本研究時点では SGD は稼働しておらず生のガンマ線バースト観測データは無いため、今回はシミュレーションによって実際のガンマ線バーストと同程度の明るさを仮定したビームを適当な位置から放射し、得られた各検出器のカウント数の比を検出効率データベースでの検出器同士の比と重ねる方法で位置特定が可能であるか検証を行った。ガンマ線バーストの明るさの表し方にはいくつか種類があるが、今回は peak flux を用いた。peak flux (photons/cm²/s) とは 1 秒間にやってくる光子数を面積で割った値で、ライトカーブのピークでの明るさを表すのに用いられる。図 5.7 は Fermi-GBM のカタログ [17] をもとにした、peak flux ごとのガンマ線バーストの頻度分布である。これを踏まえ、本研究では、非常に明るい部類である peak flux が 10 (photons/cm²/s) の明るさを持ったガンマ線バーストと、比較的明るい部類の peak flux が 5 (photons/cm²/s) の明るさのガンマ線バーストに対してシミュレーションを行う。Fermi-GBM の結果から、それぞれ年間 14 個、56 個のガンマ線バーストが検出されると期待される。この 2 種類の模擬ガンマ線バーストのシミュレーションから、位置決定精度を比較し、角度応答を評価する。ガンマ線検出数はカラーマップ同様 150 keV-5 MeV の範囲で積分した値を用いた。また、上空で想定されるバックグラウンド 1 kHz を上空での判定回路と同じ条件である 8 秒積分を仮定し、エラーに組み込んだ。例として、図 5.8 に $(\theta, \phi) = (135^\circ, 135^\circ)$ から

放射された peak flux 10 (photons/cm²/s) の模擬ガンマ線バーストのエネルギースペクトルを、ガンマ線放射地点から近い面に位置する検出器で取得したものを示す。

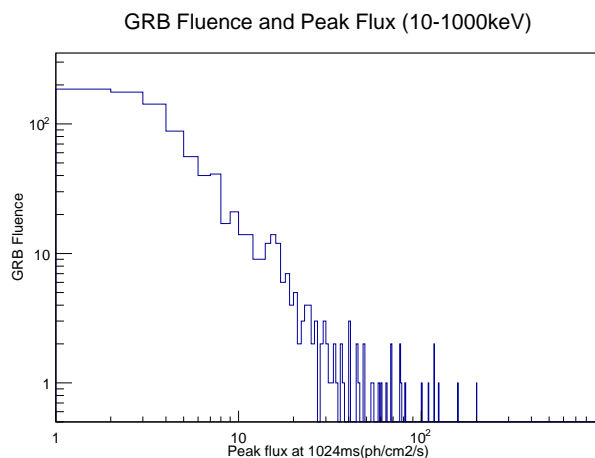


図 5.7: peak flux ごとのガンマ線バーストの頻度分布

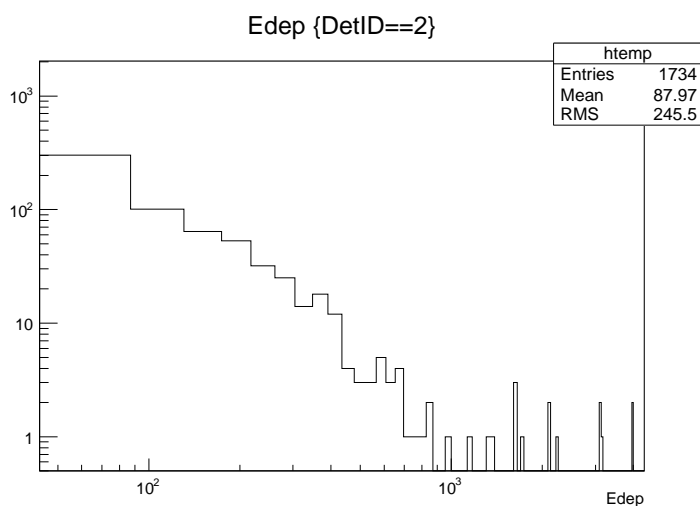


図 5.8: $(\theta, \phi)=(135^\circ, 135^\circ)$ から放射された peak flux 10 (photons/cm²/s) の模擬ガンマ線バーストのエネルギースペクトル

5.2.3 方向決定に用いる検出器の選別

ガンマ線バーストの方向決定するには、全部で 25 個ある検出器から 2 つを選んでカウント比を取る必要があるが、全ての組み合わせをとって必要のないなものを含んだ膨大なデータ量になってしまうため、いくつかの適切な組み合わせを選別する必要がある。本研究では最大で 4 つの検出器を用いた組み合わせからガンマ線バースト到来方向を制限する。図 5.9 にあるように、BGO はその形状で 5 種類に分けられる。まず、すべての種類 (D1、D2、A、B、C) からそれぞれ最も明るい検出器を選ぶ。そこから、最低

カウント数を満たしているものを選別する。今回は 20 を最低カウント数として設定した。この時点で 5 つ残った場合、D1、D2 から明るい方を選び出す。以上の選別に残った検出器の組み合わせすべてで等高線を描いていく。 $(\theta, \phi)=(135^\circ, 135^\circ)$ から放射された peak flux 10 (photons/cm²/s) の模擬ガンマ線バーストの場合、各 BGO のカウント数は表 5.1 のようになった。図 5.6 の色のついている BGO が各種類の検出器で最も明るかったもので、色と検出器 ID の対応はそれぞれ黄色が 0、赤が 9、紫が 15、青が 18 に対応する。

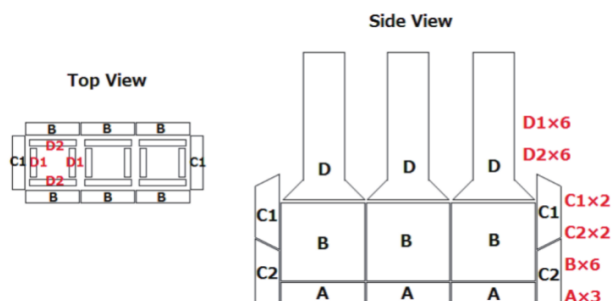


図 5.9: BGO の形状と名称

表 5.1: 各検出器の検出数。色付きは選別された 4 つの検出器

検出器 ID	検出数	検出器 ID	検出数	検出器 ID	検出数
0	235	9	240	18	249
1	220	10	14	19	NC
2	261	11	2	20	2
3	76	12	52	21	49
4	308	13	32	22	181
5	80	14	139	23	8
6	206	15	380	24	156
7	25	16	63	25	9
8	112	17	229		

5.2.4 各検出器同士のカウント比とデータベースの比較

選別した検出器での検出数の比を調べ、データベースでの比を比較をし、等高線を描いていく。例として、検出器 ID15 と 18 の比のカラーマップを図 5.10 に示す。このカラーマップに、 $(\theta, \phi)=(135^\circ, 135^\circ)$ から放射された peak flux 10 (photons/cm²/s) の模擬ガンマ線バーストの検出数の比を等高線のようにして描いたものが図 5.11 である。このときの検出数の比は 1.526 で、等高線を描くとこのような円弧の形を取り、この線の示す角度の範囲内にガンマ線到来方向が絞られる。

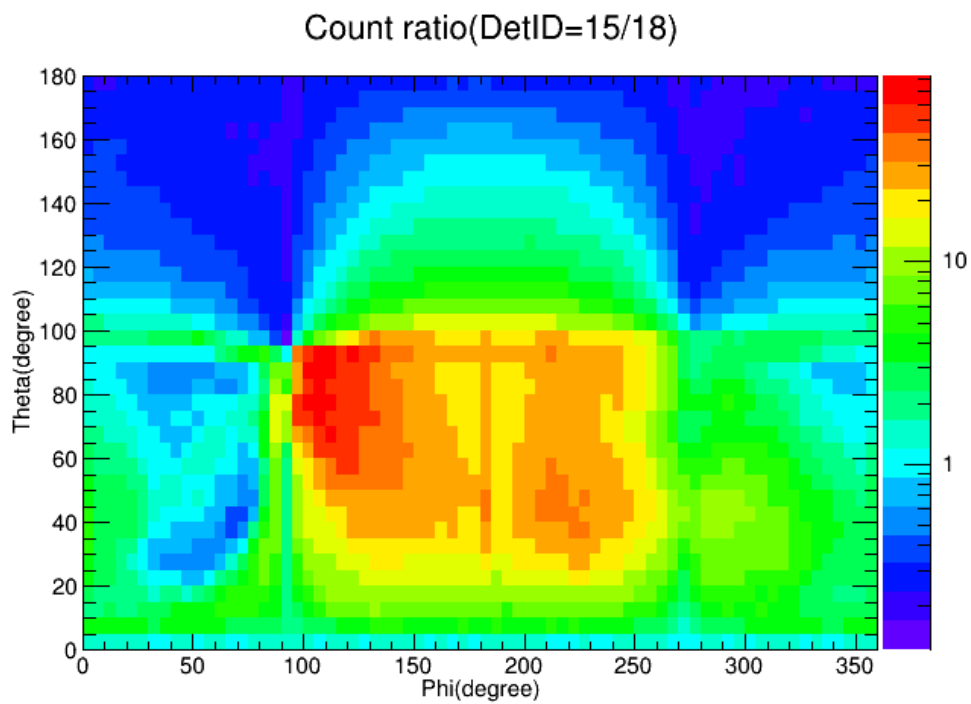


図 5.10: 検出器 ID15 と 18 の検出数の比のカラーマップ

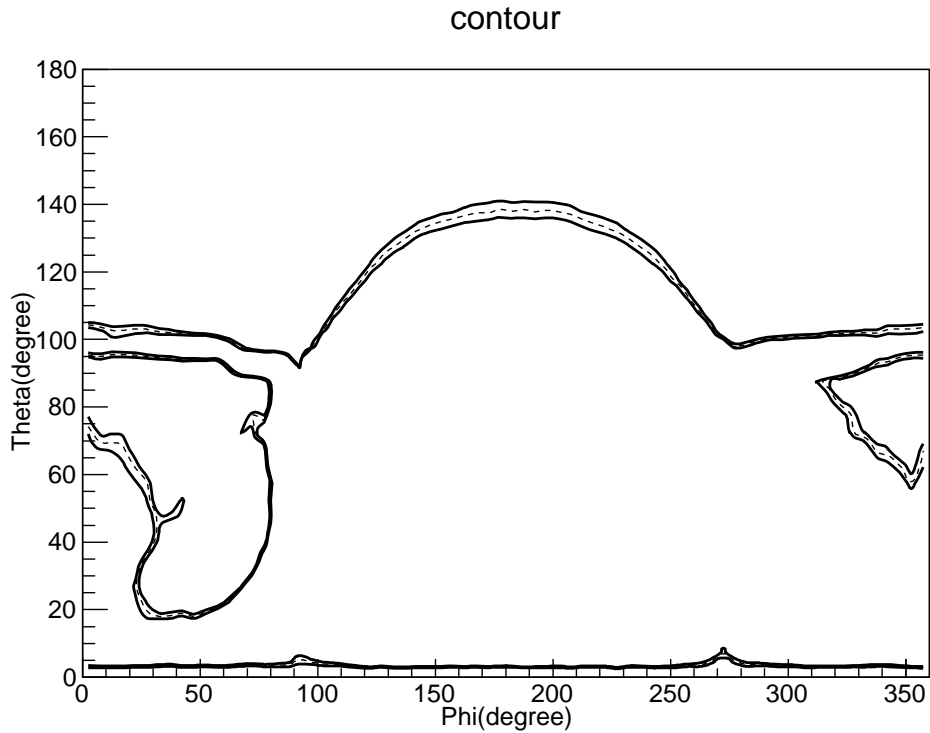


図 5.11: 検出器 ID15 と 18 で検出した擬似ガンマ線バーストの検出数の比をカラーマップ上に描いたもの。点線は比の値、実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。

5.2.5 複数の検出器での方向制限

5.2.4のステップを5.2.3で選別した全ての検出器の組み合わせについて行う。図5.13、図5.14は $(\theta, \phi) = (135^\circ, 135^\circ)$ から放射された peak flux 10 (photons/cm²/s) の模擬ガンマ線バーストの検出数の比の等高線を重ねたものである。検出器は図5.12の色付きのBGO 4つを選別しており、図5.12のように全部で6通りの組み合わせが作れる。

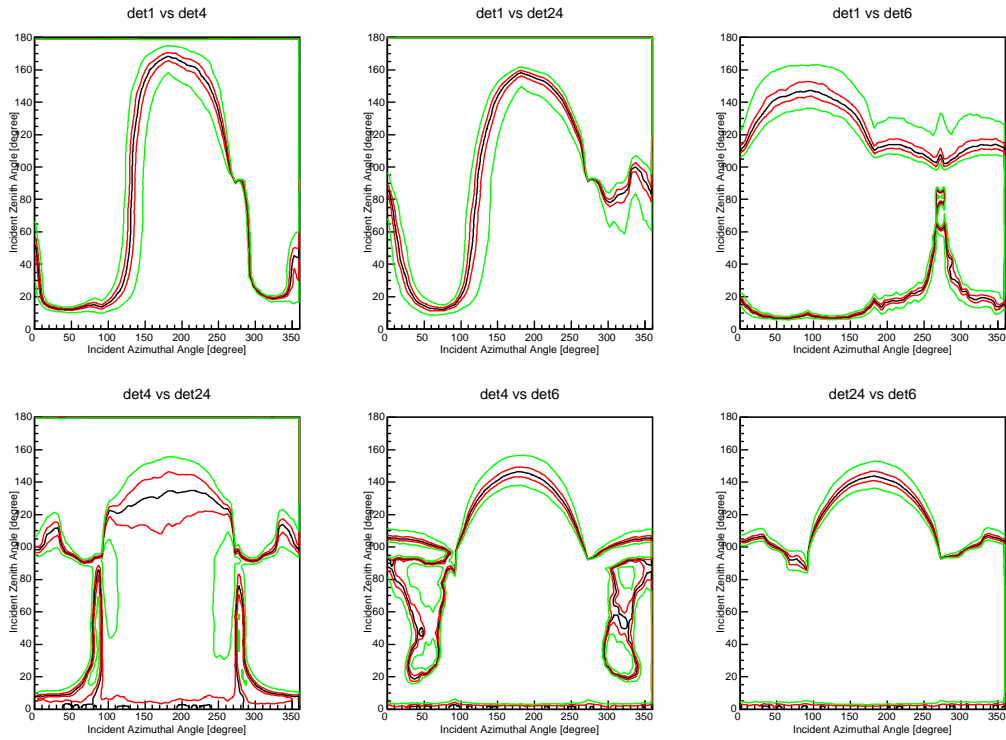


図 5.12: 6通りの検出器の組み合わせの等高線

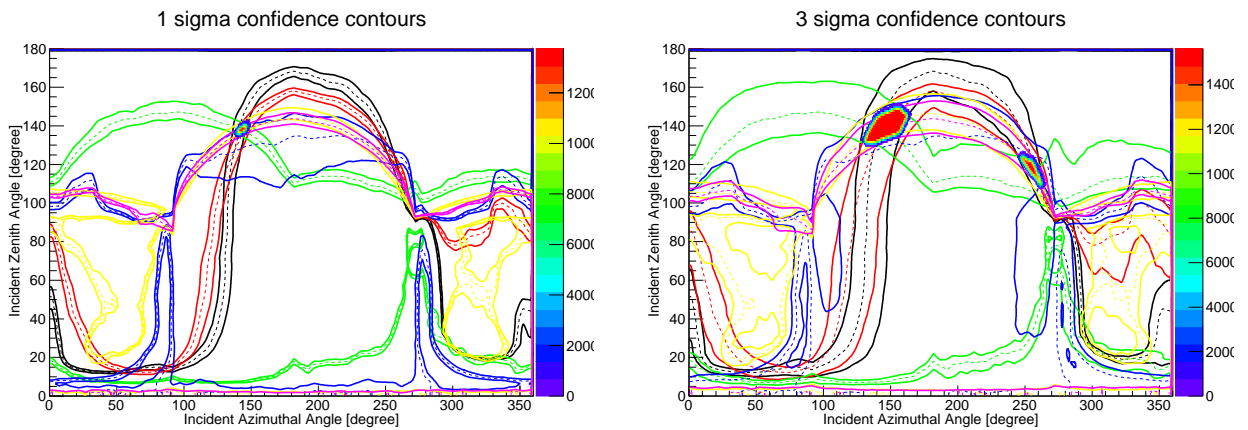


図 5.13: 模擬ガンマ線バースト到来方向制限の図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。

図 5.14: 模擬ガンマ線バースト到来方向制限の図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。

図 5.13 を見ると、 $\pm 1\sigma$ エラーであれば4つの検出器の組み合わせでガンマ線バースト到来方向は一意に定めることができ、うまく方向制限ができる手順を構築できた。さらに、この例では 1σ で 5° 程度で決まっているので、目標精度もおおよそ達成できていることがわかった。そこで、さらに様々な方向、明るさの条件でさらに調べ、SGD BGO シールドのガンマ線観測能力の評価を行う。

5.3 SGD BGO シールドを用いた GRB の方向決定能力の検証

本節では表 5.2 に示す条件の模擬ガンマ線バーストを放射し、前節で確立した手順を踏まえてシミュレーションを行う。

表 5.2: シミュレーション条件

シミュレーション	peak flux (photons/cm ² /s)	$\theta(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$
シミュレーション 1	10	15	15
シミュレーション 2	10	90	90
シミュレーション 3	10	145	100
シミュレーション 4	5	145	100

5.3.1 シミュレーション結果

シミュレーション 1

シミュレーション 1 は SGD 上方向からの peak flux 10 (photons/cm²/s) のガンマ線バーストを仮想している。結果を図 5.15、図 5.16、図 5.17 に示す。

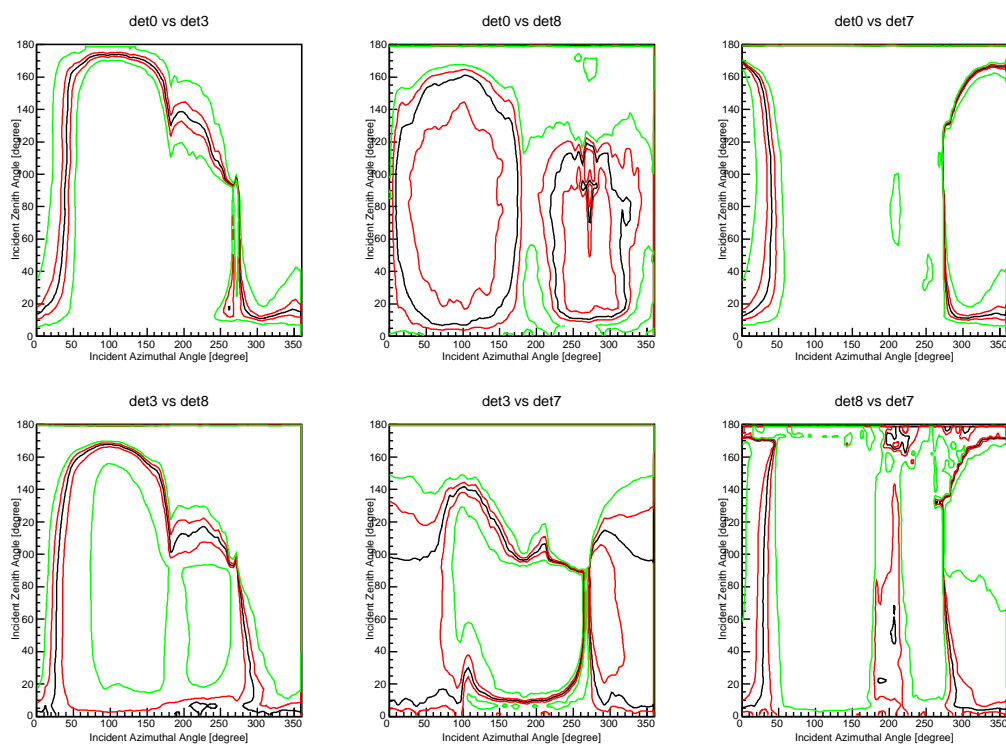


図 5.15: シミュレーション 1 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線

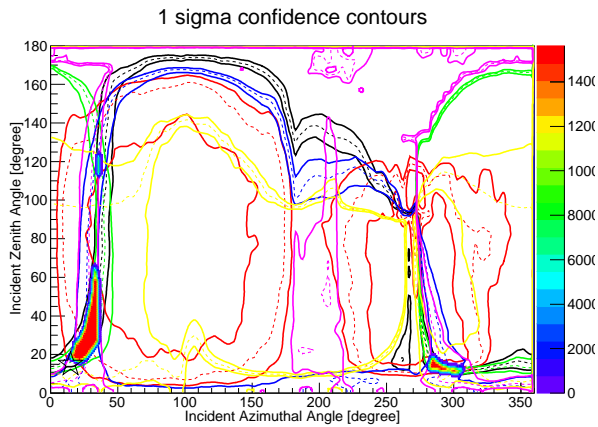


図 5.16: シミュレーション 1 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。

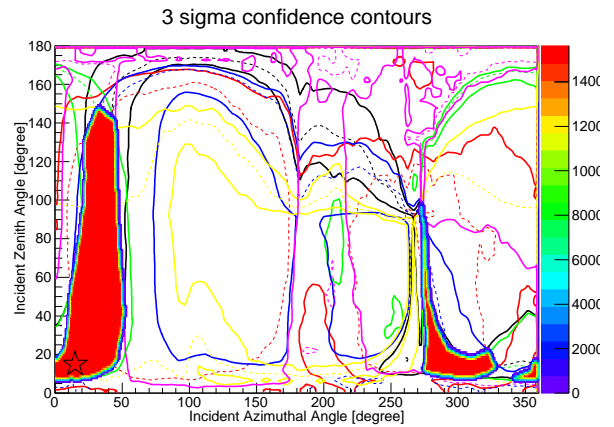


図 5.17: シミュレーション 1 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。

シミュレーション 2

シミュレーション 2 は SGD の真横からの peak flux 10 (photons/cm²/s) のガンマ線バーストを仮想している。結果を図 5.18、図 5.19、図 5.20 に示す。

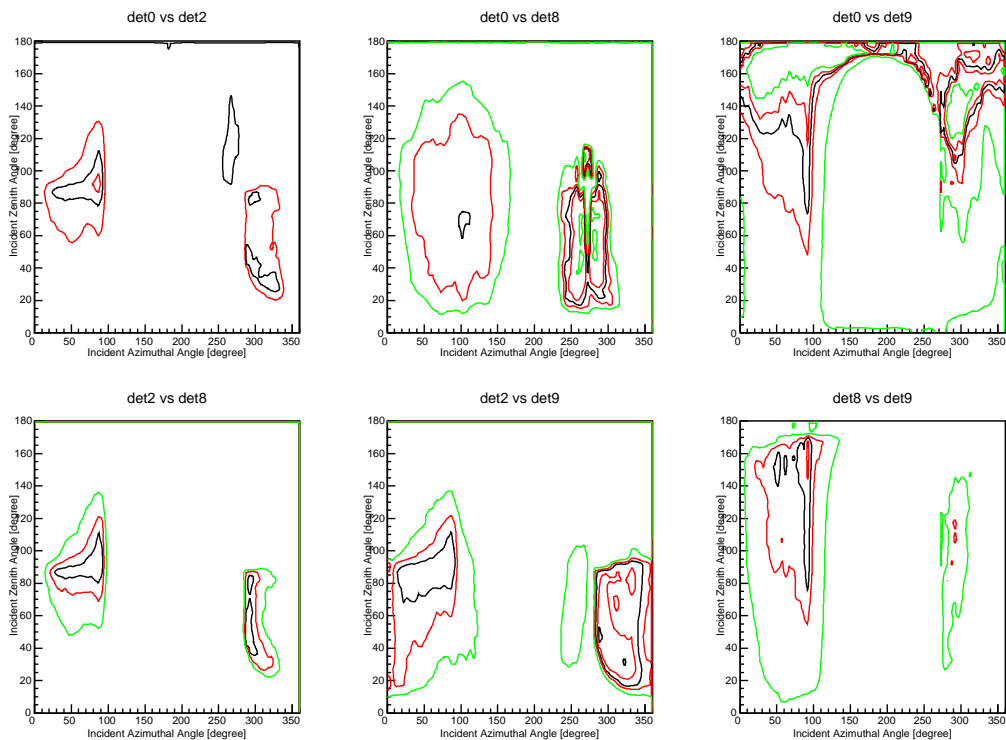


図 5.18: シミュレーション 2 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線

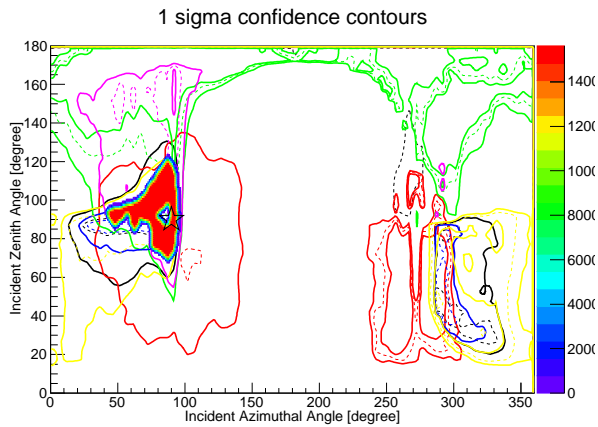


図 5.19: シミュレーション 2 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。

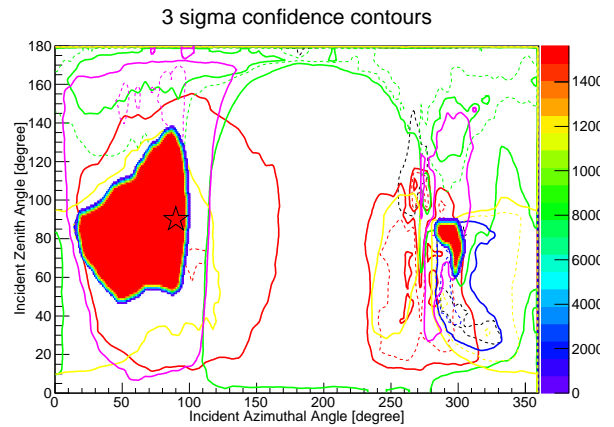


図 5.20: シミュレーション 2 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。

シミュレーション 3

シミュレーション 3 は SGD の下方向からの peak flux 10 (photons/cm²/s) のガンマ線バーストを仮想している。結果を図 5.21、図 5.22、図 5.23 に示す。

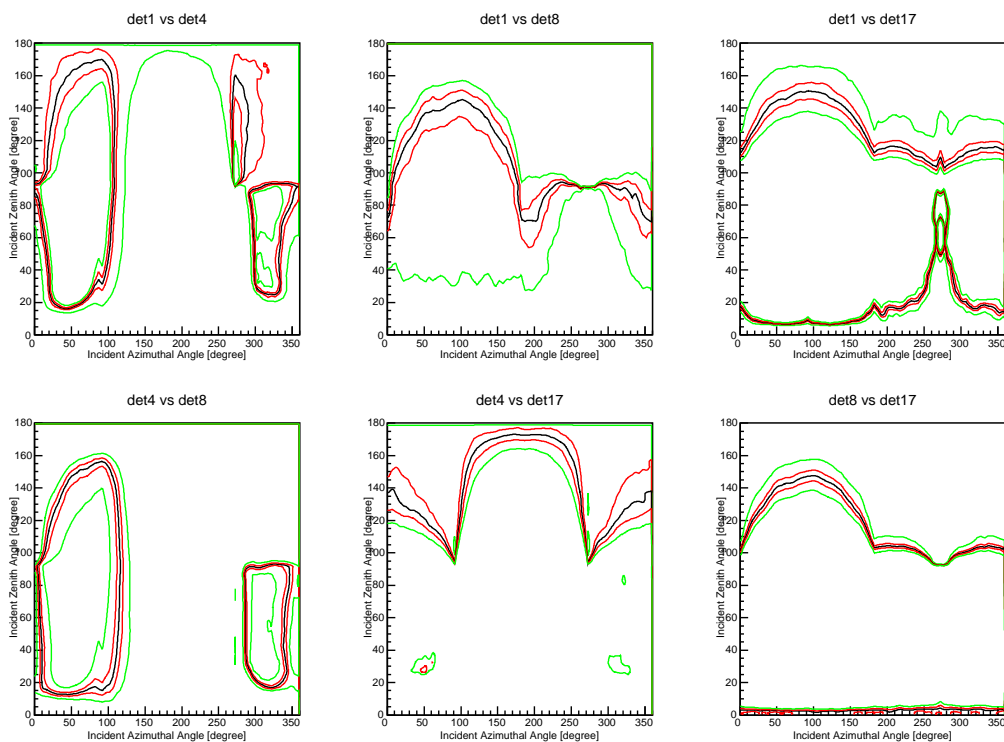


図 5.21: シミュレーション 3 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線

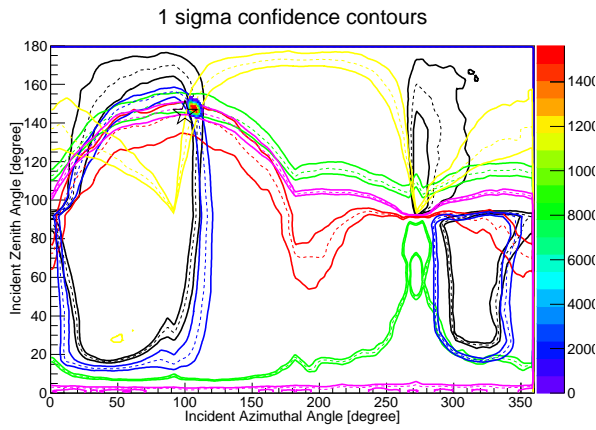


図 5.22: シミュレーション 3 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。

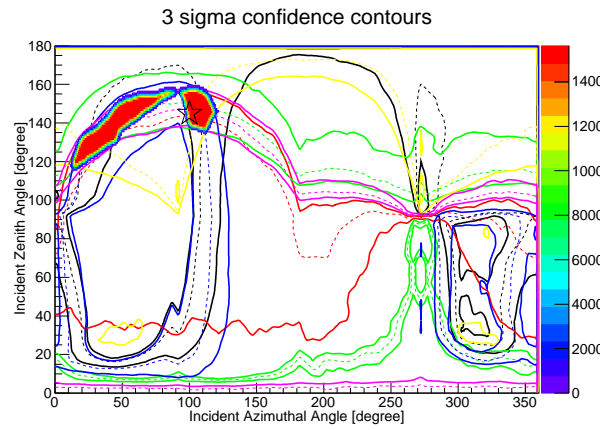


図 5.23: シミュレーション 3 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。

シミュレーション 4

シミュレーション 4 はシミュレーション 3 の peak flux を 5 (photons/cm²/s) にしたガンマ線バーストを仮想している。結果を図 5.24、図 5.25、図 5.26 に示す。

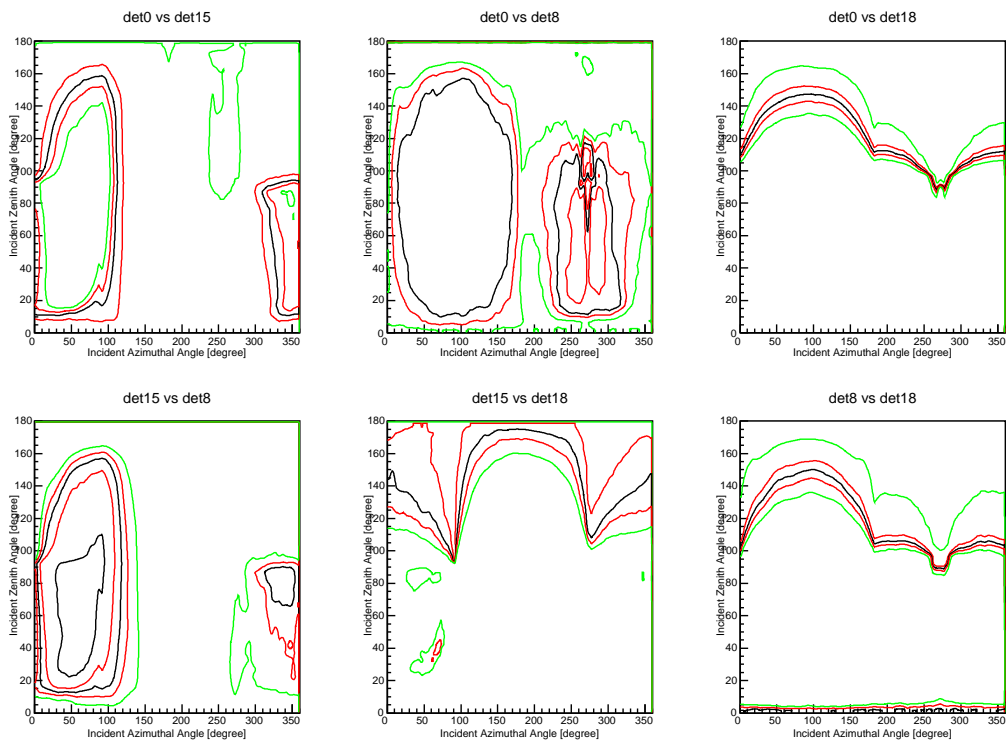


図 5.24: シミュレーション 4 の 6 通りの検出器の組み合わせの等高線

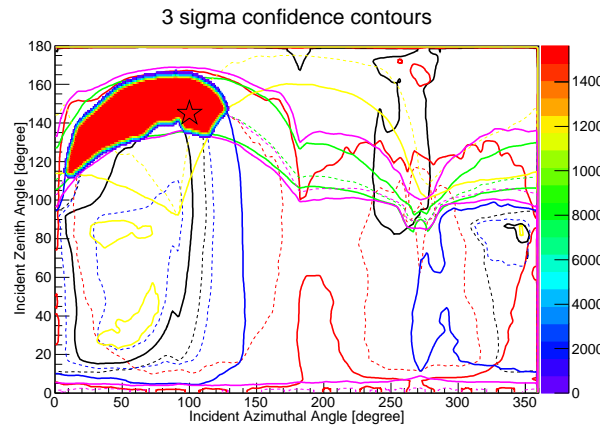
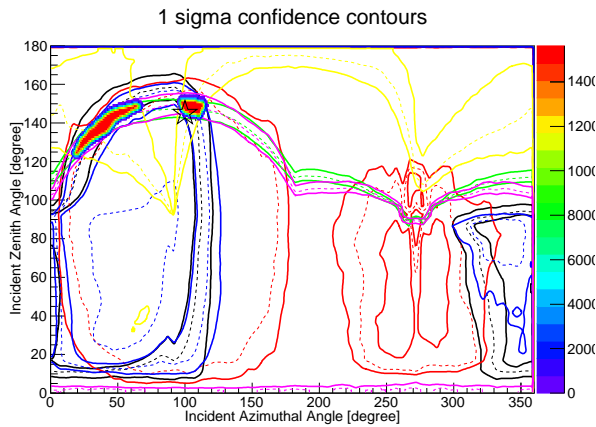


図 5.25: シミュレーション 4 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 1\sigma$ エラーを表す。

図 5.26: シミュレーション 4 の模擬ガンマ線バースト方向制限図。実線は $\pm 3\sigma$ エラーを表す。

5.3.2 考察・結果

表 5.3 に行った 4 つのシミュレーションの結果をまとめた。

表 5.3: シミュレーション結果。赤字が実際に入射した角度を含む範囲。

	条件			結果 (1σ)		結果 (3σ)	
	peak flux (photons/cm ² /s)	$\theta(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$
シミュレーション 1	10	15	15	19(-10, +49)	21(-8, +18)	8(-2, +142)	0(0, +54)
				15(-6, +53)	285(-5, +24)	11(-5, +139)	297(-26, +34)
				116(-4, +10)	36(-23, +3)	10(-4, +140)	355(-15, +5)
シミュレーション 2	10	90	90	72(-4, +52)	87(-46, +11)	51(-4, +88)	47(-31, +54)
シミュレーション 3	10	145	100	147(-4, +7)	108(-6, +6)	69(-22, +70)	299(-16, +7)
シミュレーション 4	5	145	100	126(-4, +29)	21(-5, +49)	121(-5, +39)	17(-5, +105)
				146(-24, +9)	110(-15, +8)	116(-4, +52)	11(-4, +119)

シミュレーション 1 とシミュレーション 3 を比較すると、シミュレーション 1 は 3 に比べて精度が落ちている。これは、SGD BGO シールドはその構造上、ちょうど真上を向いている BGO が無いため、ガンマ線が天頂方向から到来したガンマ線バーストは下方向から来た場合に比べて位置決定精度が悪くなるためである。また、シミュレーション 2 から、真横から来た場合も到来方向に水平な BGO の有効面積が小さくなるため、斜めからの放射の場合に比べてやや精度が落ちる。さらに、シミュレーション 3 とシミュレーション 4 を比較すると、位置決定精度の良い下方向からのガンマ線バーストであっても、peak flux が 5 (photons/cm²/s) になった場合は到来方向を一意に定めることは難しい。これ以上暗いガンマ線バーストの場合、最低カウント数を下回る検出器の数が増え、3 つの検出器しか選別ができずに 3 本の等高線のみで制限されるため、到来方向を一意に決めることは更に難しくなってくる。しかし、明るいガンマ線バースト

ト、特に SGD 下方面からバーストに対しては、精度 5° 程度での方向決定が可能であることがわかった。

5.4 まとめと今後の課題

5.4.1 まとめ

ガンマ線バーストは発生天体や放射メカニズム等、未だ謎の多い天体现象である。今まで様々なガンマ線バースト観測装置が打ち上がっており、ASTRO-H に搭載される軟ガンマ線検出装置 SGD もそのうちの一つである。SGD の BGO シールドは、その巨大な有効面積と、継続時間の短い突発天体に対する高い性能から、ガンマ線バーストの解明に向けて期待されている。また、ガンマ線バーストの到来方向がわかれば地上での追観測が可能となり、より詳細なデータの取得につながるため、角度応答は検出器の性能の評価も際して非常に重要な要素である。本研究では SGD の 25 個の BGO シールドのガンマ線バースト観測能力、特に位置決定能力について、モンテカルロシミュレーションによる検証により評価を行った。まずはベースとなるシミュレーションツール Geant4 の構造を理解し、ジオメトリの作成、粒子放射、取り出したい情報の追加設定等を行えるようになり、内部で正しい物理過程が使用されているかを実験結果と比較することで確認した。これを踏まえて SGD の低温キャリアレーション試験で得られた各 BGO の分解能とエネルギー較正直線の実測パラメータをシミュレータに組み込み、エネルギースペクトルを取得して実験結果と比較をしたところ、10%の精度でエネルギー応答を再現できていることが確認できた。以上で SGD ジオメトリに適応したシミュレータを開発することに成功した。さらに、開発したシミュレータを用いて、SGD のあらゆる方向からガンマ線バーストを仮想したビームを入射させ、25 個の BGO それぞれの角度応答のデータベースを作成した。これを利用して、様々な面を向いた検出器の検出効率の比をとることでガンマ線バースト到来方向の制限をかけることが可能である。実際のガンマ線バーストを模擬したビームで到来方向の制限をかけたところ、peak flux $10 \text{ (photons/cm}^2\text{/s)}$ の明るいガンマ線バーストに関しては目標である 5° の精度で位置決定をすることができた。

5.4.2 今後の課題

エネルギー応答について

本研究中は SGD が稼働前ということで実際の天体データを扱うことはなかったが、今後 SGD が稼働し天体データの取得が行なわれるようになれば、解析のためにより精密なエネルギー応答関数を構築する必要がある。今後の課題として実際の天体データの解析に適したエネルギー応答関数の見直しとその精度の評価を行う。

方向決定について

方向決定についても同様に、SGD の稼働後に取得された実際のガンマ線バーストのデータを用いて位置決定能力の評価を行う。まずは他衛星で既に発生位置が特定されたバーストのデータを使って位置決定を行い、比較することでその妥当性と系統誤差の見積りを行う。

- 衛星ジオメトリの追加

本研究ではSGD単体のジオメトリでのデータベース作成・位置決定を行った。しかし実際にはSGDはASTRO-H衛星の側面に2つ取り付けられているため、衛星との設置面の検出効率は著しく悪くなることが考えられる。これを踏まえて、シミュレータに衛星のジオメトリを追加し、本実験で確立した手法を用いて衛星全体を含めたガンマ線バースト観測応答を評価する。

- Band関数を使ったシミュレーション

今回は簡単のため、2つのべき関数がつながったbroken power-lawのエネルギー分布を持った仮想ガンマ線バーストでデータベースを作成した。しかし実際のガンマ線バーストのエネルギー分布は、2つのべき関数が指数関数でつなげたBand関数で表されるとされている。より精密なデータベースの作成のためにはBand関数を組み込む必要がある。

- マップ作成時のスペクトルと、実際のスペクトルの違いによる系統誤差の評価

カラーマップ作成時の仮想ガンマ線バーストスペクトルと実際のスペクトルでは差異がある。この系統誤差がどの程度効いてくるのか、またどのようにすれば抑えられるかを検討する。

- マップの統計量、角度ステップ検討

本研究で作成した検出効率のカラーマップには、実際のガンマ線バーストの明るさを考慮すれば十分に多い統計量をとったものではあるが、さらに統計を増やすことでより正確な位置決定が行えるようになる。また、本研究では 5° きざみで角度をとったが、さらに細かく角度をとることで精度の上昇が見込めるか検討する。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、ご指導して下さった指導教官の大野先生、深沢先生に感謝を申し上げます。特に、大野先生には何度も御心労をおかけし誠に申し訳ありませんでした。いつも変わらず優しく教えてくださり、日々の心の支えとなっておりました。本当にありがとうございました。

その他、研究室の皆様にも様々な形でお世話になりました。ありがとうございます。

また、SGD ジオメトリは、一戸 (ISAS) 様、小高 (SLAC/ISAS) 様らによって開発されたものを使用させていただきました。ありがとうございます。

最後に、関わった全ての人々に深く感謝を申し上げます。ありがとうございました。

関連図書

- [1] 日本物理学会, 『ニュートリノと重力波』, 裳華房, 1997
- [2] "The Forth BARTSE Gamma-Ray Brust Catalog (Revised)", Paciesas, S. W. et al., 1999, ApJS, 122, 465
- [3] Schaefer, B. E., Palmer, D., Dingus, B. L., et al. 1998, ApJ, 492, 696
- [4] SGD 実験計画書
- [5] 大野 雅功 「Astro-E2 衛星搭載 ガンマ線バーストモニタの信号処理回路の開発と応答関数の構築」修士論文、2003 年
- [6] NSSTC Gamma-Ray Astrophysics BATSE(<http://www.batse.msfc.nasa.gov/index.html>)
- [7] Costa et al., Nature, 387, 783 (1997)
- [8] "Spectrap Properties of Prompt Emission of Four Short Gamma-Ray Bursts Observed by the Suzaku-WAM and the Konus-Wind", Ohno, M. et al., 2008, PASJ, 60S, 361
- [9] "The First Fermi-LAT Gamma-ray Burst Catalog", Ackermann, M. et al., 2013, ApJS, 209, 11
- [10] "A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects", A. A. Abdo, et al., 2009, Nature, 462, 331
- [11] Fukazawa Y. et al., "Soft Gamma-ray Detector(SGD) onboard the ASTRO-H mission", SPIE, 9144, 91442C (2014)
- [12] M. Ohno et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 6, p.2758-2764,2005 "Preflight Calibration and Performance of the Astro-E2/HXD-II Wide-Band All-sky Monitor"
- [13] WWW Table of Radioactive Isotopes(<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp>)
- [14] XCOM: Photon Cross Sections Database(<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>)
- [15] JAXA ASTRO-H ホームページ (<http://astro-h.isas.jaxa.jp/>)
- [16] 逆関数法を用いた乱数生成の証明と例 (<http://mathtrain.jp/invsampling>)
- [17] "The second Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Four Years", Kienlin, A et al., 2014, ApJs, 211, 12