重力波対応天体フォローアップ観測のための 全天ガンマ線監視装置の検討

田中晃司

広島大学 理学研究科 物理科学専攻

M166024

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

主查 深澤 泰司 副查 山本 一博

2018年2月9日

概 要

宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) の中でも、継続時間が短いショート GRB は、重力波 対応天体の信号の有力な候補の一つであると言われている。ショート GRB と重力波天体との対応を明らか にするためには、広い視野を持ち、重力波と同時に観測できる唯一の波長であるガンマ線によって精度良 い位置決定を行うことで、多波長でのフォローアップ観測を行うことが重要である。GRB の位置決定を目 指す研究の一つとして、ガンマ線検出器を搭載した超小型 GRB 観測衛星 GRBCubeSat を複数打ち上げ、 全天観測を行うプロジェクトが計画されている。また、将来計画されている太陽観測ミッションに搭載予 定の軟ガンマ線検出器 (SGD) は、アクティブシールドとして主検出器を取り囲む Bi4Ge3O12(BGO) シン チレータを GRB 観測装置としても利用可能である。これらの全天ガンマ線監視装置に求められる項目とし て特に重要なものが、エネルギースレッショルド及び位置決定精度である。エネルギースレッショルドは、 アクティブシールド型では主検出部のバックグラウンド低減という観点から検討する必要がある。エネル ギースレッショルドが低ければ、ガンマ線バーストの SN 比がよくなり、位置決定精度の向上につながる。 位置決定精度は、効率のよいフォローアップ観測のために数分角以上の精度を持つ衛星が求められている。 GRBCubeSat プロジェクトでは複数の衛星の GRB 検出時刻の時間差を利用した位置決定を目指している。 距離の離れた2つの衛星がGRBを検出した場合、それぞれの衛星の検出時刻の差からGRBの到来方向を 円弧状に制限することができる。さらに組み合わせを増やし円弧を重ねることで、精度のよい位置決定を 目指す。本研究では、検出器のガンマ線応答を再現したシミュレータを開発し、到来時間差による位置決定 能力の評価を行った。その結果、到来時間差をミリ秒の時間分解能で計測することで、到来方向を一意に定 めることができた。これまでの研究で確立したパラメータフィットのアルゴリズムを適応することで、明る いバーストであれば目標である 10 分角程度の精度で定めることに成功した。

目 次

第1章	序論	5
1.1	重力波	5
1.2	重力波対応天体	6
1.3	ガンマ線バースト	8
第2章	ガンマ線バースト観測装置	11
2.1	これまでのガンマ線バースト観測	11
2.2	現在用いられている GRB 位置決定手法..................................	12
2.3	超小型 GRB 観測衛星 GRBCubeSat	16
	2.3.1 GRBCubeSat における GRB 位置決定方法	17
	2.3.2 目標とする GRB 位置決定精度	18
2.4	本研究の目的	19
第3章	GRBCubeSat の GRB 観測応答	20
3.1	エネルギー応答	20
3.2	角度応答	21
3.3	検出時間差を利用した GRB 位置決定能力の検証手順	21
	3.3.1 検出器のガンマ線応答を取り込んだシミュレータの開発	22
	3.3.2 各衛星の位置情報及び姿勢情報の導出	22
	3.3.3 複数の衛星に対するライトカーブシミュレーション	22
	3.3.4 相互相関関数を用いた GRB 検出時間差の導出	23
	3.3.5 複数の衛星の検出時間差を用いた方向制限	23
第4章	GRBCubeSat の GRB 位置決定能力の検証	25
4.1	検出器のエネルギー応答を取り込んだモンテカルロシミュレータの開発	25
	4.1.1 Geant4	25
	4.1.2 実験セットアップ	28
	4.1.3 シミュレーション条件	30
	4.1.4 実験結果とシミュレーション結果の比較	32
	4.1.5 考察	33
4.2	角度応答データベースの作成....................................	34
	4.2.1 シミュレーション条件	35
	4.2.2 結果・考察	38
4.3	衛星軌道シミュレーション	38

	4.3.1 衛星座標情報	38
	4.3.2 衛星姿勢情報	43
4.4	ライトカーブシミュレーション	44
4.5	相互相関関数を利用した時間差導出.................................	45
4.6	検出時間差を利用した GRB 位置決定	45
	4.6.1 円弧による入射方向制限	45
	4.6.2 χ^2 fitting による位置決定	47
第5章	まとめ	49
5.1	まとめ	49
5.2	今後の課題	49

図目次

1.1	2015 年 9 月 14 日に検出された重力波 GW150914 の信号。別の場所で観測された 2 つの信	
	号および予測値の波形が一致している。[1]	6
1.2	コンパクト連星の重力波放出のイメージ図 [1]	8
1.3	HETE-2 でとらえたガンマ線バーストのライトカーブ。横軸は時間、縦軸はガンマ線での強	
	度を示す。[6]	9
1.4	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 [7]。2秒を境に大きく2種類	
	に分けられることがわかる。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
1.5	ロング・ガンマ線バーストの発生源モデル	10
1.6	ショート・ガンマ線バーストの発生源モデル	10
1.7	GRB 910601 のスペクトル [8]	10
2.1	CALET-CAL の構造 [13]	13
2.2	Fermi-LAT の構造 [14]	13
2.3	Swift-XRT の構造 [16]	13
2.4	典型的なコーデットマスクの概念図1...................................	14
2.5	典型的なコーデットマスクの概念図2.................................	14
2.6	MAXI の概念図 [19]	14
2.7	Swift-BAT の概念図 [20]	15
2.8	Suzaku-HXD/WAM 断面図 [17]。水色が WAM 検出部を示す。	16
2.9	Hitomi-SGD 断面図 [18]。水色の部分が全天監視用の検出器ユニットである。	16
2.10	超小型 GRB 観測衛星の概念図 [22]	17
2.11	これまでの GRB 観測衛星の位置決定精度および視野角 [23]	18
2.12	GW170817 における重力波観測結果の誤差中(赤い範囲)に含まれる対応候補銀河(黒点)	
	$[24] \ldots \ldots$	19
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	20
3.2	すざく HXD-WAM の角度応答 [25]	21
3.3	GRBCubeSat における GRB 位置決定能力の検証手順	22
3.4	tringulation 法による GRB 入射方向制限の概念図	24
3.5	IPN による GRB171102 の入射方向制限結果。複数の衛星よる制限を重ね、黒い枠の範囲内	
	に到来方向を制限している。....................................	24
4.1	Geant4 の主なクラスと構造	26
4.2	Action クラスの構造	27

4.3	実験セットアップの概略図1..................................	28
4.4	実験セットアップの概略図2..................................	29
4.5	実際の検出器の写真。Al が主成分の金属箱の中に固定している。	29
4.6	検出器と線源の配置	30
4.7	シミュレーションの様子	32
4.8	実験データ (黒線) とシミュレーションデータ (赤線) の比較	33
4.9	反応位置の違いによる MPPC 受光面への入射光成分の割合の違い	34
4.10	コリメート実験のスペクトル比較。MPPC に近い position8 にコリメートした場合は、他の	
	場所にコリメートした場合に比べ光量が高い。................	34
4.11	コリメート実験セットアップの概念図..................................	34
4.12	シミュレーションの様子	35
4.13	シミュレータにおける座標と検出器 ID の定義	35
4.14	シミュレータにおける水平角と天頂角の定義	36
4.15	逆関数法の図解。F(x) は1に規格化された累積分布関数 [28]	36
4.16	逆関数法によって得られた仮想 GRB のエネルギースペクトル	37
4.17	天頂角 90°、水平角 90° から仮想 GRB を入射させた場合の検出器 ID=0 のカウントスペク	
	トル	37
4.18	それぞれの検出器の角度ごとの検出効率カラーマップ。横軸が水平角、縦軸が天頂角、カラー	
	はカウント数	38
4.19	各パラメータの定義。衛星軌道面が黄色、基準面がグレーで描かれている。今回のような地	
	球周回軌道の場合、基準面は地球の赤道面である。	40
4.20	sun orientation における軸のとり方。黄色のベクトルは衛星から太陽方向、緑のベクトルは	
	地球中心から衛星方向のものである。..............................	41
4.21	zenith orientation における軸のとり方。黄色のベクトルは衛星から太陽方向、緑のベクトル	
	は地球中心から衛星方向のものである.................................	41
4.22	衛星軌道シミュレーションの結果 1[29]	42
4.23	衛星軌道シミュレーションの結果 2[29]	42
4.24	GRB120323507 のライトカーブ	45
4.25	GRB150819440 のライトカーブ	45
4.26	円弧による GRB120323507 の到来方向制限結果。(RA.Dec)=(45.0346±0.0727692,45.1865±	
	0.1194)	47
4.27	円弧による GRB150819440の到来方向制限結果。(RA.Dec)=(45.0434±0.0450216, 45.0559±	
	0.0460601)	47
4.28	χ^2 fitting による GRB120323507 の位置決定結果。(RA.Dec)=(44.9824±0.11,45.1212±0.19)	48
4.29	χ^2 fitting による GRB150819440 の位置決定結果。(RA.Dec)=(44.9857 \pm 0.07, 45.0028 \pm 0.07)	48

第1章 序論

1.1 重力波

重力波とは、質量を持った物質が動いた際に生じる時空のゆがみである。1916年にアインシュタインが 発表した一般相対論に基づいてその存在が予言され、1974年には高密度かつ大質量のパルサー連星系であ る PSR B1913+16の連星公転周期が短くなっていることを発見し、その周期短縮変化が重力波放射による エネルギー損失を仮定した場合の予測と誤差1%程度で合致することから、間接的にその存在が証明された。 しかし、直接観測には重力波と物質の非常に微小な相互作用を捉える必要があり、困難を極めた。世界中で 重力波望遠鏡の感度を向上させる努力が進められた。代表的な重力波観測計画として、米国のLIGOや欧州 の Virgo などがあり、日本では KAGRA 計画(大型低音重力波望遠鏡計画)が進められている。KAGRA 計画では、検出器を地下 200 m 以深という極めて地面振動が少なく、温度・湿度の安定な環境に設置し、ま た -253°C という超低温まで冷却することで熱雑音を低減することによる感度向上で世界最高性能を達成 し、重力波の直接観測を目指している。そのような中、2015年9月にLIGOをはじめとした研究グループ によって巨大ブラックホール同士の合体によって生じた重力波の直接観測に成功した (図 1.1)。



図 1.1: 2015 年 9 月 14 日に検出された重力波 GW150914 の信号。別の場所で観測された 2 つの信号および 予測値の波形が一致している。[1]

重力波は巨大質量を持った物質が光速に近い速度で動いた際に強く発生するといわれており、ブラック ホールや中性子星等のコンパクト天体の連星の合体や、超新星爆発などがその発生源といわれている。

重力波天文学は遠い宇宙の物理の理解や宇宙誕生の起源を解明する手がかりとして近年特に注目を集め ている。これまでの天文観測において主に行われてきた電磁波による観測とは別方面のアプローチである ため、現在の宇宙物理学に対し補完的な見方を提供し、また新たな知見をもたらすことが期待されている。

1.2 重力波対応天体

現在、重力波対応天体の候補として、以下のものが挙げられる。

重力崩壊型超新星

超新星とは、大質量の恒星が、その一生を終える際に起こす爆発である。超新星はそのスペクトルに よって分類されており、水素の吸収線が見られないものを I 型、見られるものを II 型としている。さ らに I 型の中でも、珪素の吸収線が見られるものを Ia 型、ヘリウムの吸収線が見られるものは Ib 型、 珪素とヘリウムのどちらの吸収線も見られないものは Ic 型と分類される。

このうち、II 型超新星および Ib 型、Ic 型超新星は、重力崩壊型超新星といわれている。恒星は内部 で核融合反応を繰り返すことによって得られるエネルギーで温度を維持し、重力に対抗するだけの圧 力を生み出している。核融合反応は水素やヘリウムといった軽元素をより重い元素に変換し、星の構 造を変化させる。このような恒星の進化の果てに、核融合反応をしなくなった星は徐々に冷えていく が、その際に重力を支え、力学平衡を保つのが電子の縮退圧である。太陽質量のおよそ 10 倍以上の質 量をもつ恒星では、核融合反応を繰り返すことによって、中心に鉄の核ができる。この鉄の核がが質 量を増し、チャンドラセカール質量程度の臨界質量を上回ると、電子の縮退圧によって星の重力を支 えることができなくなり、急激な重力崩壊をおこし、外層の爆発的な膨張にいたる。このように、大 質量の物質が光に近い速度で激しく変化することで重力波は発生するが、重力波の発生源としての超 新星を考える際、爆発する天体が球対称からどれほどずれているかが重要となってくる。なぜなら、 球対称な物質がつくる重力場は、物体の外では全質量が中心に集まっている仮定とした場合の重力場 に等しくなり、中心からの距離による物質分布をいくら変えようとも重力場が変化しないために、重 力波も発生しないためである。重力波を最も効率的に放出する超新星爆発のモデルとしては、中心部 に形成される中性子物質のかたまりが自転のために平たい円盤になり、いくつかのかたまりに分裂し た後、重力波を放出して合体し、中性子星になるというシナリオが考えられている。はじめは球対称 でも、途中から非対称となり、各部分から放出される重力波が打ち消し合うことがないために、大量 の重力波が放出されると考えられている [2]。このように、重力崩壊型超新星爆発では、星の大部分が 吹き飛ぶが、ほぼ中性子からできた中性子星が残るとされている。さらに大質量星の重力崩壊の際に はブラックホールが形成される場合もある。また、超新星爆発の際には強力なガンマ線を放射し、後 述するロングガンマ線バーストの発生源とも言われている。

コンパクト連星の合体

重力崩壊型超新星の後に形成された2つの中性子星およびブラックホールから成る連星の合体は、数 ある重力波対応天体の候補の中でも最も確実な重力波の発生源とされている。連星系を成している 2 つの中性子星は、互いの重力にとって引き寄せられながら回転しており、図 1.2 のように重力波を放 出しながら徐々に近づいている。距離が近づくにつれ重力波の強度は大きく、周波数も高くなってい く。長い時間をかけて近づいた2つの中性子星はついに衝突し、超新星爆発において発生が予測され る重力波に匹敵する非常に強力な重力波を放つ。衝突直後は激しく振動するものの、やがて振動が静 まると周辺の物質が次第に中心に落ち込み、衝突後1000分の3秒ほどでブラックホールが形成され ていく。このようなプロセスを経た重力波は、前半は「さえずり」と呼ばれる特徴的な激しい波形で、 後半はブラックホールに固有の準固有振動と呼ばれるゆっくりとした減衰振動を示す [2]。2017 年 8 月17日にはLIGOおよび欧州のVirgoによって、連星中性子星の合体によって発せられた重力波が 初めて検出された。この GW170817 では、早い中性子捕獲反応である γ プロセスで作られた元素が 放射性崩壊を起こし、そのエネルギーが電磁波となって放射される「キロノバ」という現象が確認さ れた。このことから、中性子星の合体で γ プロセスが起こる証拠を観測的にとらえたものと言える。 さらに、GW170817の到来から約2秒後にはガンマ線が検出されており、その到来方向は重力波の ものと矛盾しないものであった。これが後述するショートガンマ線バーストであるかは議論中である が、もしそうであれば、謎に包まれてきたショートガンマ線バーストの起源の解明に大きく近づく。 一方で、ブラックホールが連星系を成すケースは中性子星の連星に比べ非常に稀であるとされていた が重力波の検出によって数多く見つかったのはブラックホール連星であった。実際に、重力波の初め ての直接観測観測に成功した GW150914 はブラックホールの連星であった。この連星系では、それぞ

れが光に近い超高速度で接近し、2物体間の距離がわずか数百キロメートルと、非常に近い距離で互いに回転していたことがわかった。これほどの近距離を2物体が合体することなく接近できるのは、

2つの物体がブラックホールであることが有力な説である。さらなる研究により、この2つのブラッ クホールの質量はそれぞれ太陽質量の約 36 倍と約 29 倍であることがわかった [3]。このような巨大 質量のブラックホールの生成および連星を成す過程は未だ不明な点が多く、重力波観測による謎の解 明に期待がかかっている。



図 1.2: コンパクト連星の重力波放出のイメージ図 [1]

パルサー

パルサーとは、パルス状に電磁波を発生する天体を指し、その正体は高速で回転する中性子星と考え られている。半径 10km 程度の大きさのパルサーの表面に 1mm 程度の山があると、自転にともなっ て重力波が発生する。パルサーからの重力波検出によって、中性子星の外郭の固さや状態方程式につ いて制限が得られると期待される [4]。

低質量 X 線連星

低質量 X 線連星は、低質量の主系列星とコンパクト星からなる連星系を指し、そのうち重力波を出す ものとして主星が中性子星であるものが考えられている。伴星からのガスが中性子星に落ち込み、降 着円盤と呼ばれる円盤が形成される。この円盤が摩擦によって高温になり、X 線を放射する。この降 着物質が中性子星に非対称的な回転や振動をさせることで、対称性が失われ、重力波が発生すると考 えられている [4]。

原始重力波

原始重力波とは、宇宙誕生直後の爆発的加速膨張であるインフレーションの時期に生成された重力波 である。インフレーション理論では時空を記述している計量自身が量子力学による不確定性原理の効 果により揺らいでいると予言されており、これに起因する時空自身の揺らぎを原始重力波という。原 始重力波の検出は、インフレーション理論が強く支持する証拠であるとともに、そのエネルギース ケールや時期を決めるという観点からも重要である [5]。

1.3 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 100 s 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 1.3 はガンマ線バーストのライトカーブの例である。激しい時間変動を繰り返すものから、継続時間 が短いものまで様々である。ガンマ線バーストはその継続時間が数十秒の長さのものと、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 (図 1.4)。それぞれの発生源モデルを図 1.5 と図 1.6 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かっている。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。



図 1.3: HETE-2 でとらえたガンマ線バーストのライトカーブ。横軸は時間、縦軸はガンマ線での強度を示す。[6]



図 1.4: 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 [7]。 2 秒を境に大きく 2 種類に分け られることがわかる。



図 1.5: ロング・ガンマ線バーストの発生源モデル 図 1.6: ショート・ガンマ線バーストの発生源モデル

図 1.7 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 1.7: GRB 910601 のスペクトル [8]

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 ないことが多い。ガンマ線バーストの発生後、徐々に弱くなりながらも一週間近く観測可能な残光が残る。 この残光は一般的に X 線で始まり、紫外線、可視光、赤外線、電波へと波長帯を移行しながら暗くなって いく。残光による長時間の観測はそのガンマ線バーストの発生位置及び放射メカニズムの解明のために非常 に重要である。

2015年の初検出以降、次々と重力波が検出されている。しかし、重力波望遠鏡による位置決定は、1台 で数百平方度、2台でも数十平方度、KAGRA が動いても10平方度程度の不定性があり対応天体の同定が 難しい。そのため、電磁波による同定が必要である。特に重力波対応天体候補として有力なガンマ線バース トから重力波が検出できれば、ショートガンマ線バーストの正体の解明にもつながる。

第2章 ガンマ線バースト観測装置

2.1 これまでのガンマ線バースト観測

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って精力的に観測が 行われてきた。1991年に打ち上げられた CGRO 衛星に搭載された BATSE では、数多くのガンマ線バース ト現象を観測し、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。この結果は、ガンマ線バース トが銀河外に起源を持つことを示唆している。1996年に打ち上げられた Beppo-SAX は、ガンマ線バース ト発生後の残光を発見した。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。その結果、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 10⁵³ 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。2000年に打ち上げられた HETE-2 では、地上へのガンマ線バーストの 素早い位置情報の伝達という特徴をいかして残光の詳細なフォローアップ観測が進み、べき型スペクトルか 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 Ic 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。

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、高い位置決定精度をもつことが特徴である。また、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。

HETE-2やSwiftによる残光のフォローアップ観測によって、GRBの正体に迫る研究は飛躍的に発展したが、肝心のガンマ線放射メカニズムを調べるために必要な高感度かつ広帯域のガンマ線スペクトル観測はBATSE以降進んでこなかった。そのような中、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)の機能の一つである広帯域全天モニター (Wide-band All-sky Monitor; WAM)がある。HXD は主検出器を巨大な BGO(Bi₄Ge₃O₁₂)シンチレータで取り囲み、アクティブシールドとして視野外から入射する荷電粒子や自身の放射化で生じるバックグラウンドを反同時計数により極限まで低減する。このアクティブシールドは全天を見渡す配置をしており、広い視野を持つ。さらに BGO シンチレータの高いガンマ線阻止能によりガンマ線バーストの特徴的なスペクトル構造を広帯域で感度良く観測することができる。このアクティブシールドを広帯域全天モニター (WAM)として利用することで、1000を超えるガンマ線バーストの観測に成功した。特に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。また、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 [9]、ガンマ線放射機構にも言及した。

Fermi 宇宙ガンマ線望遠鏡 (Fermi 衛星) は 2008 年に打ち上げられたガンマ線観測衛星で、Large Area Tele-

scope(LAT) と Gamma-ray Burst Monitor(GBM) の 2 つのガンマ線検出器が搭載されている。20 MeV か ら 300 GeVGeV の高エネルギーガンマ線を観測する LAT と、8 keV から 20 MeV を観測する GBM が連 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、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、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 keV-MeV 領域で折れ曲がる単純な Band 関数というスペクト ル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 [10]。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 [11]。

SGD は 2016 年に打ち上げられたひとみ衛星に搭載された、軟ガンマ線検出装置であるすざく HXD と 同様に、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目指した。ひとみ衛星 は姿勢制御系の不具合により短期での運用終了となったが、SGD では 1 つの GRB がうかっており、同衛 生に搭載された硬 X 線撮像検出器 (HXI) の BGO シールドとあわせて 72 個のユニットの光子数のカウント 比を用いることで、目標である 5° 程度の位置決定に成功した。

Swift 衛星及び Fermi 衛星は現在も運用中であるが、どちらも打ち上げからすでに 10 年以上が経過して おり、継続性が懸念される。今後の重力波天文学の推進を見据えた、高い位置決定精度を持つガンマ線観測 衛星の開発が望まれる。

2.2 現在用いられている GRB 位置決定手法

前節で述べたように、ガンマ線バースト観測はこれまで精力的に進められてきたが、今後は重力波天文 学を見据え、ガンマ線バーストの精度良い位置決定を継続して行っていくことが重要である。そこで本節で は、これまで行われてきた代表できなガンマ線バースト位置決定手法について述べ、重力波天体同定のた めの最適な位置決定手法について言及する。

チャージトラッキング法

ガンマ線や荷電粒子が検出器内で起こす制動放射や電子陽電子対生成のカスケードシャワーの飛跡から ガンマ線や荷電粒子の到来方向を決定し、シンチレータなどでエネルギーを測定する手法である。国際宇 宙ステーションに搭載され、高エネルギーガンマ線や宇宙船の起源を探る CALET(CAlorimetric Electron Telescope) 計画に搭載されたカロリメーター CALET-CAL(図 2.1) では、シンチレーションファ イバーや無機シンチレーターで軌跡及びエネルギーを計測し、Fermi-LAT(図 2.2) や、AGILE では、 半導体ストリップ検出器で軌跡を計測し、シンチレーターで総エネルギーを測定する。精度良く電子 陽電子対の飛跡を追うことのできる GeV~TeV 領域の高エネルギーのガンマ線を、比較的大きな視 野で測定することが可能という特徴をもつ。典型的な位置決定精度は数分角であり、重力は対応天体 探査には向かない。



図 2.1: CALET-CAL の構造 [13]



図 2.2: Fermi-LAT の構造 [14]

望遠鏡イメージング

図 2.3 の Swift 衛星の XRT(X-ray Telescope) で使用されている手法である。光を屈折させて結像さ せる可視望遠鏡とはことなり、屈折率が1 に近い X 線の場合は全反射を利用して結像させる。結像さ せることにより、空間分解能、つまり位置決定精度は秒角レベルと、現在の位置決定方法の中では最 も高精度な位置決定が可能である。一方で、望遠鏡で集光させることから、全天に対する瞬間視野は 約 1% 以下と非常に限られる。また、典型的な GRB のエネルギー帯である数 100 keV 以上のエネル ギー領域では集光できないという欠点がある。したがって、X 線望遠鏡で重力波対応天体を狙うため には、予めガンマ線で分角程度に位置を絞っておく必要がある。



図 2.3: Swift-XRT の構造 [16]

コーデッドマスク (スリット)+イメージセンサによるイメージング

コーデッドマスクとは、図 2.4、図 2.5 のような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の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、強度分布を求める位置特定方法である。





図 2.4: 典型的なコーデットマスクの概念図 1

図 2.5: 典型的なコーデットマスクの概念図 2

図 2.6 の MAXI(Monitor of All-sky X-ray Image: 全天 X 線監視装置) は2種類の位置検出器をもつ スリットカメラで ISS(国際宇宙ステーション) の一周で全天のイメージ観測をすることを狙ったもの である。図 2.7 はコーデッドマスクが用いられている Swift 衛星 BAT 検出器の構造図である。BAT の観測可能エネルギー範囲は 15-150 keV と、硬 X 線から軟ガンマ線の範囲で使用可能な手法である。 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の穴の大きさと検出器の幾何学的距 離、および検出器の位置分解能で決定する。全天に対する瞬間視野は約 20% と検出器の向いている 方向からのバーストでなければ位置特定はできないが、はっきりとしたパターンを示す十分なイベン ト量があれば位置決定精度は数分角に及ぶ。



図 2.6: MAXI の概念図 [19]



図 2.7: Swift-BAT の概念図 [20]

count rate 法

図 2.8 の Suzaku-WAM や、図 2.9 の Hitomi-SGD のように複数の検出部が異なる方向を向いている 場合に用いられる、検出器の光子カウント数を利用した位置決定方法である。シミュレーションに よって検出器のあらゆる角度からのガンマ線応答から予測される各検出部のガンマ線検出数を導出 し、実際の検出光子数のカウント数と比較して尤もらしい天体位置を χ^2 最小化によって評価するこ とで、GRB の到来方向を制限することができる。この方法による位置決定精度は検出部の配置や数、 幾何学面積によって大きく変化するが、GRB に対して高い阻止能をもった検出部が複数あれば衛星 の大きさにかかわらず使用できる。できる限り全天方向をカバーする配置をし、幾何学面積の大きな ユニットを多数配置するほど、位置決定精度の向上が見込まれるが、衛星の積載量による制限がかか る。シンチレータには BATSE は NaI、Fermi-GBM は NaI と Bi₄Ge₃O₁₂ (BGO)、Suzaku-WAM や Hitomi-SGD は BGO シンチレータを採用しており、おおよそ硬 X 線から軟ガンマ線の帯域で用いら れるが、シンチレータ結晶次第でより高いエネルギー範囲においても使用可能な手法である。統計誤 差は光子統計で決まるため、明るいバーストであれば数度以下の精度も到達可能であるが、系統誤差 の影響により、数度の決定精度を超えることができず、検出器のユニットの数が少ないと一意に定ま らない場合もある。しかし、全天に対する瞬間視野は約 50%~100% と単一衛星で行える位置決定と しては最も視野が広くとれる位置決定方法である。





図 2.8: Suzaku-HXD/WAM 断面図 [17]。水色が図 2.9: Hitomi-SGD 断面図 [18]。水色の部分が全天WAM 検出部を示す。監視用の検出器ユニットである。

triangulation 法 (Interplanetary Network(IPN))

triangulation 法とは、複数検出器の検出時間差を利用した三角法による位置決定方法である。離れ た場所に複数の検出器が存在する場合、各々の検出器が GRB を検出した時刻の時間差を利用するこ とで、GRB の到来方向を制限する方法である。2つの検出器の距離および検出時間差がわかると、 GRB の入射方向を円弧上に制限でき、組み合わせを増やすことで円弧を増やし、より制限をかけて いくことで一意に定めることができる。各検出器の距離が遠く、検出時間差が正確である程、より精 密な位置決定を行うことができる。IPN とは離れた場所にある様々なガンマ線観測器のデータを用い て、天体の解析を目的とする国際協力プロジェクトである。INTEGRAL(INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) 衛星のうち、視野の広い INTEGRAL-SPI-ACS 等、単体で位置決定能力 を持たないものを含め多数の国際衛星が参加しているが、それぞれ別のミッションのデータを用いて いることもあって時刻決定精度には限界があり、その位置決定精度は数度である。十分に距離が離れ た複数の検出器が必要になるが、瞬間視野は約約 50%~100% と全天をカバーでき、検出器間に十分 な距離、もしくは精密な時間差検出が可能であれば、同じく全天監視に向く count rate 法以上の精度 も見込める。詳しくは 3.3.5 節で述べる。

以上のように、ガンマ線バーストの位置決定手法は患側エネルギー範囲や検出手法によって様々なもの が存在するが、現状で最も位置決定に貢献している Swift-BAT 検出器では、視野が限られてしまい、重力 波と同時に観測できる機会が限られるというい欠点がある。一方、count rate 法や triangulation 法は、現 状の位置決定精度はやや劣るものの、ほぼ全天をカバーできる上、ガンマ線バーストのエネルギーが最も 効率よく放射される keV~MeV 領域において感度が良いという利点を持つため、位置決定精度を向上させ ることで、今後の重力波対応天体同定において極めて重要な役割を持つことが期待される。

2.3 超小型 GRB 観測衛星 GRBCubeSat

GRBCubeSat とは、広島大学とハンガリーの研究チームが共同で進めている、ガンマ線バースト位置決定を目的としたプロジェクトである。図 2.10 のような超小型衛星を地球上空に複数打ち上げることによっ

て、全天をカバーし、相対時刻を GPS により精緻に合わせることで、triangulation 法を利用した分角ス ケールの位置決定精度を目指す。衛星本体のサイズはおよそ 340mm×100mm×100mm と天文衛星として は非常に小型ある。ガンマ線検出器には SiPM(Silicon Photomultiplier)の一種である MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)という光子計測デバイスとシンチレータを接合したものを搭載予定である。シンチレー タにはガンマ線に対し強い阻止能を持つ CsI シンチレータが検討されている [21]。CsI 結晶は潮解性を持つ ため湿度に十分注意する必要があるが、割れにくく衝撃に強いため、振動や環境変化の比較的大きい場所 で使用することが可能であるという利点を持つ。シンチレータサイズは 150mm×75mm×5mm のものを衛 星側面に 2 枚配置することが検討されており、この場合の有効面積は他の CubeSat プロジェクトと比較し ても最大級である。

2018 年 3 月に概念検討を完了させた後、2021 年までに 2 つの衛星によるデモンストレーションミッションを計画しており、2022 年には 10 を超える小型衛星の打ち上げを予定している。



図 2.10: 超小型 GRB 観測衛星の概念図 [22]

2.3.1 GRBCubeSat における GRB 位置決定方法

幾何学面積の大きいシンチレータを搭載した小型衛星を地球上空の軌道上に複数撃ち上げる本計画では、 検出時間差による GRB 位置決定が期待される。衛星軌道は地球上空の高度約 600km と、他の衛星に比べ 低軌道ではあるが、GPS を利用した精密な検出時間差導出によって高い位置決定精度を目指す。具体的な 位置決定方法は4章で述べる。また、衛星には幾何学面積の比較的大きいシンチレータを搭載するため、 count rate 法も併用できる。お互い相補的に制限し合うことで結果的に位置決定精度が向上する可能性にも 期待がかかる。

2.3.2 目標とする GRB 位置決定精度

図 2.11 はこれまでの主な GRB 観測衛星の位置決定精度と視野角である。これを見ると、2π str 以上の 広視野角をもち、数分角以上の高い位置決定精度を持つガンマ線検出器が存在しないことがわかる。重力 波対応天体の追観測において、最終的には地上の可視光望遠鏡によって対応する銀河を同定することが必 要であり、ガンマ線で精度良く位置を決定できるほど、その誤差範囲内に存在する候補銀河の数を絞るこ とができ、迅速な重力は対応天体の同定につながる。GW170817を例に上げると、ガンマ線に依る位置決 定精度が現在の count rate 法や triangulation 法の典型値である数度であった場合、候補銀河は数十にも及 ぶが、仮に数分角の精度で達成できた場合は、候補銀河は1つ程度にまで制限することができる (図 2.12)。 以上から、GRBCubeSat では、複数の衛星による全天観測を実現し、相対時刻を GPS により精緻に合わ せることで分角スケールの高い位置決定精度を目指す。



図 2.11: これまでの GRB 観測衛星の位置決定精度および視野角 [23]



図 2.12: GW170817 における重力波観測結果の誤差中(赤い範囲)に含まれる対応候補銀河(黒点)[24]

2.4 本研究の目的

本研究では、重力波対応天体の同定を目的とした全天ガンマ線監視装置である GRBCubeSat の GRB 位 置決定能力の評価を行う。具体的には、衛星に搭載される検出器のエネルギー応答を再現したモンテカルロ シミュレータを開発し、ガンマ線応答や衛星軌道を考慮して時間差をシミュレーションし、位置決定を行う アルゴリズムを開発する。このアルゴリズムを用いて、実際に検出した GRB に基づいたシミュレーション を行う。また、GRBCubeSat プロジェクトは具体的な衛星数や、シンチレータの配置を含めた衛星の幾何 学構造については試行段階にあるため、将来的に本研究で得られた結果を開発の指針とする。

第3章 GRBCubeSatのGRB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 cm³ 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、検出器のエネルギー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。

また、GRBCubeSat に用いる CsI シンチレータは小型衛星に採用されるものとしては非常に幾何学面 積が大きいため、ガンマ線の入射位置によって複雑なエネルギー応答が予想されることにも注意が必要で ある。



図 3.1: 1 cm³CsI 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 にすざく 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 [25]

3.3 検出時間差を利用した GRB 位置決定能力の検証手順

図 3.3 に GRBCubeSat における GRB 位置決定能力の検証の流れを示す。



図 3.3: GRBCubeSat における GRB 位置決定能力の検証手順

3.3.1 検出器のガンマ線応答を取り込んだシミュレータの開発

前節で述べたように、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。GRBCubeSatのガンマ線バースト位置決定能力能力の検証において用いる triangulation 法では、各々の衛星が検出した光子数を正しくカウントする必要があるため、これらの応答 を正確に再現する必要がある。そこで、GRBCubeSat で使用される MPPC+CsI シンチレータガンマ線応 答を正しく再現できるシミュレータを開発をした。本研究では Geant4 を用いて、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 [21] とシミュレーションで得られた結果の比較をし、応答を再現出来て いることを確認する。その後、開発したシミュレータを用いて検出器のあらゆる角度からの検出効率 (角度 応答)を調べ、以後のシミュレーションに取り込む。

3.3.2 各衛星の位置情報及び姿勢情報の導出

triangulation 法による GRB 位置の入射位置の制限には、2.2 節で示したように、各衛星でのガンマ線 バースト検出時間差および各衛星の距離の導出しなければならない。衛星間距離の導出のためには、ある時 刻における各衛星の座標情報が必要である。また、前項で導出した検出器の角度応答を適用するためには、 衛星に対してどの角度からガンマ線バーストが入射したのか知る必要があるため、衛生姿勢情報が重要で ある。本研究では、ハンガリーの研究チームから提供された衛星軌道シミュレーションテーブルを用いて、 指定した時刻での各衛星の座標情報および姿勢情報を取得し、各々の衛星間の距離を導出する。

3.3.3 複数の衛星に対するライトカーブシミュレーション

ガンマ線バーストの検出時間差の導出には、ライトカーブと呼ばれる、時刻ごとの光子検出数をプロットしたデータを用いる。各検出器で検出されたガンマ線バーストのライトカーブから検出時間差を測定するためには、相互相関関数を用いる。相互相関関数については次節で説明する。相互相関関数で決まる時刻差は、光子統計だけでなく、相関を取る関数の形状にも大きく依存すると思われるため、様々な形状のライトカーブに対して時刻差の決定精度を検証する必要がある。さらに、どのような時間分解能でデータを取

得するかに依存するため、実際の GRB ライトカーブを基に新たな仮想 GRB のライトカーブを作成する、 ライトカーブシミュレーションを行う必要がある。今回は、ライトカーブシミュレーションの基とする実際 の GRB として、Fermi 衛星の GBM 検出器で実際に検出した GRB サンプルから、最も明るい 2 例をピッ クアップした。この Fermi のライトカーブデータにおける各時間ビンに含まれる光子数から、姿勢情報と 角度応答マップを利用し、GRBCube で観測した場合の予想検出光子数を算出する。そしてその時間ビンに おいて、予想検出光子数分だけガンマ線の待ち時間分布に基づいた乱数を振り、各衛星距離から予想される 検出時刻差を考慮に入れて疑似イベントデータを作成する。この際、あるイベントとその次のイベントが 起こる時間間隔 (待ち時間) の分布はポアソン分布に従うものとして光子を振り直している。

3.3.4 相互相関関数を用いた GRB 検出時間差の導出

遠く離れた場所に存在する検出器の GRB の到来時間差を導出する方法として、相互相関関数を利用した。相互相関関数とは、2つの関数の類似度を定式化したものである。 $h(t) \ge x(t) \ge x(t)$ という2つの関数の相関を $z(\tau) \ge z(\tau)$ は以下のように表される。

$$z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)x(t+\tau)dt$$
(3.1)

これは、 $h(t) \ge x(t) \ge -\infty$ から ∞ の範囲において τ だけずらし乗算したものである。つまり、相互相 関関数とは、異なる2つの関数を少しずつずらしながら積をとる畳み込みと呼ばれる手法を用いることで 求まる。2つの関数が最も類似するとき相互相関関数は最も大きくなり、まったく重ならない場合は相互相 関関数は0となる。今回の場合、前節で導出した予想検出時間差を取り込んだライトカーブシミュレーショ ンデータに対して、この関数の畳み込みを行い、最も相関の得られた τ を、GRB の検出時間差 Δt とした。

3.3.5 複数の衛星の検出時間差を用いた方向制限

図 3.4 はある方向から GRB が到来した場合の衛星 1、2、3 を用いた方向制限を表した図である。ここま での手順で 2 つの衛星間の距離 d と、GRB の検出時間差 Δt を導出している。まず、衛星 1 と衛星 2 の 2 つを使った GRB を到来方向制限を考える。衛星 1 と衛星 2 の距離を d_{12} 、GRB 検出時間差を Δt_{12} 、衛星 1 と衛星 2 を結ぶ直線と、衛星 1 と GRB の到来方向を結ぶ直線とのなす角を θ_{12} とする。 θ_{12} は d_{12} 、 Δt_{12} 、 光速 c(GRB の速度)を用いて以下のように表せる。

$$\cos\theta_{12} = \frac{c\Delta t_{12}}{d_{12}} \tag{3.2}$$

つまり、2つの衛星間の距離と検出時間差がわかれば、衛星を結ぶ直線を中心とした円弧状に GRB の到来 方向を制限できる。衛星1と衛星2の組み合わせのみの場合 GRB 到来方向は円弧状に制限できたが、、さ らに衛星2と衛星3の2つにおいても同様の到来方向制限を行うと、その円弧がさらにもうひとつできる。 この2つの円弧が交わった交点が GRB の真の位置だと言える。円弧が2つの場合は交点が2つできる場合 があり、一意に定められないが、さらに衛星の組み合わせを増やし制限する円弧の数を増やせば、到来方向 を一意に定めることができる。図 3.5 はこの方法を用いた IPN でのガンマ線バースト到来方向制限結果の 一例である。



図 3.4: tringulation 法による GRB 入射方向制限の概念図



図 3.5: IPN による GRB171102 の入射方向制限結果。複数の衛星よる制限を重ね、黒い枠の範囲内に到来 方向を制限している。

さらに、もう一つの位置決定手法として、ひとみ衛星の SGD Shield の count rate 法による GRB 位置 決定において確立した χ^2 fitting と呼ばれる位置決定手法を、triangulation 法において適用する。

これら2つのアプローチによって、明るいバーストにおいて目標精度である数分~10分角程度の精度が 達成できるかを検証する。

第4章 GRBCubeSatのGRB 位置決定能力の 検証

4.1 検出器のエネルギー応答を取り込んだモンテカルロシミュレータの開発

3章で述べたように、GRBCubeSat により GRB の位置を triangulation 法により決定する際の位置決 定精度を評価するためには、GRB から放射された光子がどのような効率で GRBCubeSat によって検出さ れるかを知る必要がある。ここでは、Geant4 をベースに、検出器のエネルギー応答を取り込んだ光子検出 効率を見積もる。

4.1.1 Geant4

Geant4[26] 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。

衣 4.1: 本研究で使用した Geant4 と谷ナーノルのハーン	/ ∃]	~
-----------------------------------	-------	---

名称	内容	バージョン	
Geant4	Geant4 メインプログラム	10.1(Patch-02)	
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 [26]	

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粒子反応の再現をすることができる。以下では、今回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

DetectorConstruction

ジオメトリの構造を記述するクラス。まず、G4Box(箱型)、G4Tub(円柱型)、G4Sphere(球形)等で形 を指定し、LogicalVolumeで構成物質等や可視属性等を定義する。ジオメトリの位置や向きの情報等 の配置を記述する G4PVPlacement で親 Volume に対する相対位置でジオメトリの配置を指定する。

PhysicsList

シミュレーションで考慮する物理素過程を記述するクラス。物理素過程は、ガンマ線、電子陽電子、 陽子、重イオンなどといった光子や粒子毎に、光電吸収やコンプトン散乱、制動放射等を起こすかど うか設定することが可能であり、それぞれの物理素過程に対する反応断面積は別途データベースとし て与えられる。

PrimaryGeneratorAction

粒子の種類 (光子や電子等) やエネルギー、打ち出す方向等を決めるクラス。

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 4.2 に Action クラスの構造を示す。





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。今回はデー タ解析ソフトである ROOT を用いて、シミュレーション結果を出力するように EndOfRunAction で 設定した。 1 イベントごとに、

- 全イベントの中で何番目のイベントであるか
- 複数の検出器がある場合、そのイベントが最終的にどの検出器に Hit したか
- そのイベント中に粒子が合計何回 Hit したのか
- 検出器への総デポジットエネルギー
- エネルギー較正を考慮したパルスハイト値
- 検出器のエネルギー分解能で畳み込んだパルスハイト値

などの情報を記録し、ROOT ファイルに出力することで、記録した情報に基づいた任意の解析条件を 課してスペクトルを作成したり、総検出光子数の計算などを行えるようにした。

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パルスハイトチャンネルに変換し たり、分解能で畳み込むための関数を設定し、RunAction にこれらの結果の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。

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。

以上のクラスを取得したい情報に合わせて適宜書き換えることで、本研究における検出器のガンマ線応 答を再現できるシミュレータの開発を行う。今回は、GRBCubeSat で使用されるものと同サイズの CsI シ ンチレータ+MPPC のガンマ線検出器の応答を再現する。

4.1.2 実験セットアップ

実験セットアップを図 4.3 に示した。



図 4.3: 実験セットアップの概略図 1

まず 150mm×75mm×5mm の CsI シンチレータ (Amcrys M.CT/03-150.75.5) を光を外に逃さないための 反射フィルムである ESR(3M 社製) で接着面以外を覆い、裸の面を MPPC(浜松ホトニクス S13360-6050CS) にオプティカルラバーで光学接着をした。さらに、図 4.4 のように光漏れを防ぐ効果もあるバルカーテープ を巻きつけることで MPPC を固定している。この際、CsI シンチレータの厚みと MPPC の幅を合わせる ために、プラスチック製の板をスペーサーとしてシンチレータを挟みこむ形で配置している。



図 4.4: 実験セットアップの概略図 2



図 4.5: 実際の検出器の写真。Al が主成分の金属箱の中に固定している。

MPPC はソースメータ (KEITHLEY 2400) と前置増幅器 (CLEAR-PULSE 5028) に繋いだ。印加電圧は 53.4V で、これはメーカーによる推奨印加電圧を参考にしたものである。前置増幅器によって増幅された信号は シェーピングアンプ (ORTEC571) を通して波形整形され、MCA(Multi Channel Analyser(AMPTEK MCA8000A) によって AD 変換、ヒストグラム化され、PC に取り込まれる。シェーピングアンプによる波形整形には時 定数 1.0 μ s に設定した。薄い円筒状のタブレットに収められた ²⁴¹Am 線源とともに恒温槽に入れ 25°C に 保ち、スペクトルを取得した。図 4.6 のように CsI の中心に対して 198mm 離して配置し、測定時間 180 秒 でスペクトル取得をした。



図 4.6: 検出器と線源の配置

4.1.3 シミュレーション条件

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、CsIと MPPC の他には、散乱の影響が大きいと思われる Al を主成分とした金属箱 (線源とシンチレータの間に存在する箱の上部のみ:板状) と ESR(板状) である。

物理過程は粒子の電磁相互作用を低エネルギーまでカバーした物理過程モデルである EMLivermore を 使用した。具体的な物理素過程は、ガンマ線反応に対しては、光電吸収、レイリー散乱、コンプトン散乱、 電子陽電子対生成過程を考慮した。電子及び陽電子に対して、クーロン相互作用に依る多重散乱、電離、制 動放射を考慮し、特に陽電子に関しては対消滅過程も考慮している。シミュレータには、他にもプロトンや π 中間子、α粒子など様々な粒子に対する素過程を定義しているが、本研究では光子と電子陽電子の物理素 過程が重要となる。これら光子や電子陽電子の電磁相互作用に関わる物理素過程の反応断面積は、低エネ ルギー側まで考慮したテーブル (G4EMLOW6.48) を用いた。

線源のエネルギーは Table of Radioactive Isotopes の²⁴¹Am のエネルギー毎の放出割合 [27] のうち、放 出割合が 0.01%以上のエネルギーを取り込んだ。表 4.2 に取り込んだエネルギーと放出割合の一覧を示す。 放射方向はシンチレータの大きさに対して全体に十分あたるだけの角度をもたせ、シンチレータ方向に角 度を絞って等方放射させるように設定した。

エネルギー [keV]	放出割合 [%]
26.3448	2.4
33.1964	0.126
43.423	0.073
55.56	0.0181
59.5412	35.9
98.97	0.0203
102.98	0.0195
11.871	0.66
13.761	1.07
13.946	9.6
15.861	0.153
16.109	0.184
16.816	2.5
17.061	1.5
17.505	0.65
17.751	5.7
17.992	1.37
20.784	1.39
21.099	0.65
21.342	0.59
21.491	0.29
101.059	0.012

表 4.2: シミュレーションに取り込んだ 241 Am のエネルギーとその放出割合



図 4.7: シミュレーションの様子

4.1.4 実験結果とシミュレーション結果の比較

図 4.8 は実験によって得られたスペクトルとシミュレーションによって得られたスペクトルを比較した ものである。シミュレーションデータを実験と比較するために適応したエネルギー較正情報は、図 4.8 の実 験データに見られる、230ch 付近のピークを²⁴¹Am の 59.5 keV の光電吸収における全吸収ピーク、100 ch 付近のピークを 59.5keV が CsI シンチレータ表面付近で光電吸収された後、Cs の特性 X 線 (30 keV) が検 出器外に逃げ出した結果、29.5 keV にピークが現れるエスケープピークであるとして 2 点で較正した結果 を用いた。エネルギー分解能については、これらのピークのエネルギー分解能の実験値を測定し、

$$\delta E(E) \propto A \times E^{\alpha} \tag{4.1}$$

の関係になると仮定して、比例定数を求め、シミュレーションに適用した。シミュレーションにおけるイベ ント数は、実験に対して十分多く試行し、59.5 keV ピーク強度でスケールして比較している。



図 4.8: 実験データ (黒線) とシミュレーションデータ (赤線)の比較

図 4.8 から、220ch 付近や、100ch 付近の主なピーク構造は概ね再現できており、エネルギー較正の情報 はおおよそ正しく取り込まれていることが確認できる。400ch 以上ではシミュレーションが実測よりも1桁 ほどすくないが、これはバックグラウンドノイズを差し引いた際の引き残し、もしくは、近い時間に発生し た線源からの信号が重なることによって、本来よりも高いエネルギーで測定されてしまうパイルアップと呼 ばれる現象によりエネルギーが高く検出されてしまっているためであると考えられる。また、20-40ch 付近 の不一致は検出器の電気回路的な応答をシミュレーションが取り込めていないためである。これらの応答は 本実験特有の応答であり、本シミュレーションでは考慮しなくても良い。一方、ピーク構造は概ね再現でき ているものの、エネルギー分解能が実測よりも系統的に良い結果になってしまっている。以下でこの原因と 本シミュレーションへの影響について考察する。

4.1.5 考察

シミュレーションで得られたスペクトルが実験結果のエネルギー分解能を再現しきれなかった原因のひ とつとして、CsI シンチレータが幾何学的に大きいために、MPPC で集光されるシンチレーション光量が、 ガンマ線の入射位置に依存することが考えられる。図 4.9 に示すように、ガンマ線が MPPC から遠い位置 で反応した場合と近い位置で反応した場合で、発生したシンチレーション光がシンチレータ内で散乱され て MPPC に到達するまでのパスが大きく異なる。このため、反応場所によっては、シンチレータ内で散乱され て MPPC に到達するまでのパスが大きく異なる。このため、反応場所によっては、シンチレータから光が 逃げ出したり、途中で自己吸収されるなどして MPPC に集光されるシンチレーション光量がガンマ線の位 置によって変化することが考えられる。実際、²⁴¹Am をコリメートして CsI シンチレータ上のいくつかの 場所からガンマ線を照射し、光量が変化するか調べたのが図 4.10 である。このように、照射位置によって は 59.5 keV のパルスハイト値が変化しており、シンチレーション光量がガンマ線反応位置依存して変化し ていることがわかる。厳密にはこの光量の位置依存性をシミュレータに取り込む必要があり、今後の課題で あるが、図 4.8 に見られるようにその効果は 1%以下であり、本シミュレータ開発の目的であるガンマ線入 射方向に対する検出効率の相対的変化を調べる上では大きく影響しないと考えられる。以上から、本研究



図 4.9:反応位置の違いによる MPPC 受光面への入射光成分の割合の違い



図 4.10: コリメート実験のスペクトル比較。MPPC に 近い position8 にコリメートした場合は、他の場所に コリメートした場合に比べ光量が高い。



図 4.11: コリメート実験セットアップの概念図

4.2 角度応答データベースの作成

ここまでで、GRBCube による GRB 位置決定能力を検証するためのエネルギー応答を再現したシミュ レータを開発した。GRB は全天のあらゆる方向から発生するため、検出器への光子入射方向も様々であり、 実際に観測される検出カウント数は GRB の入射方向に対して依存性を持つ。そこでこのシミュレータを用 いて、あらゆる条件で発生した GRB において位置決定能力を検証することができるように、様々な方向か ら入射した場合に想定される GRBCubeSat のガンマ線検出効率の角度応答データベースを作成する。

4.2.1 シミュレーション条件

図 4.12 は角度応答データベース作成のためのシミュレーションの様子である。2章で述べたように GR-BCubeSat における検出器配置は試行段階であるが、今回は暫定的に衛星の異なる2つ側面に配置した場合を仮定した。本来は、衛星本体のジオメトリも再現し、衛星からの吸収、散乱を考慮する必要があるが、同様に衛星バス設計も試行段階であるため、まずは検出器単体での応答を調べることとした。



図 4.12: シミュレーションの様子

図 4.13 のように 2 つの検出器それぞれ 0, 1 と番号付け、x、y、z 座標を定義した。また、水平角 ϕ と 天頂角 θ を図 4.14 のように定義した。



図 4.13: シミュレータにおける座標と検出器 ID の定義



図 4.14: シミュレータにおける水平角と天頂角の定義

このジオメトリに対し、仮想 GRB として、図 4.12 のように検出器全体を覆うよう十分な太さをもった平 行光のガンマ線をあらゆる方向から 5°刻みで照射することで、角度応答データベースを取得する。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 4.15 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の最大値が1 になるように規 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入射ガンマ線のエネルギースペクトルを図 4.16 に示す。



図 4.15: 逆関数法の図解。F(x) は1に規格化された累積分布関数 [28]



図 4.16: 逆関数法によって得られた仮想 GRB のエネルギースペクトル

このスペクトルを十分なイベント数検出器に入射させた結果得られた検出器のカウントスペクトルが図 4.17 である。このカウントスペクトルから現状達成している低ネルギースレッショルドである 10 keV から 5 MeV まで積分して得られたカウント数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 4.17: 天頂角 90°、水平角 90° から仮想 GRB を入射させた場合の検出器 ID=0 のカウントスペクトル

4.2.2 結果·考察

図 4.18 はシミュレーションによって得られた角度ごとの検出効率データである。縦軸に天頂角 θ、横軸 に水平角 φ をとっている。赤の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 4.18: それぞれの検出器の角度ごとの検出効率カラーマップ。横軸が水平角、縦軸が天頂角、カラーはカ ウント数

両検出器とも、平行光に対して 150 mm×75 mm の面が垂直に向く角度が最もカウント数が多く、検出 効率が良い。図 4.18 中の赤の楕円で囲った部分はカウント数が落ちているが、これはもう一方の検出器が ガンマ線到来方向と重なり、ガンマ線をとめてしまっている、いわゆる検出器の「影」が見えていることを 示している。その位置は想定されるものと矛盾がなく、衛星搭載を想定した検出器単体における角度応答が 得られた。

4.3 衛星軌道シミュレーション

ここまでで、あらゆる条件で発生した GRB において、GRBCubeSat で観測されるカウント数をシミュ レーションから想定する枠組みを確立した。次に必要になるのは、GRBCubeSat がどのような衛星軌道条 件を持って飛行していると、どの衛星が、どのような光子の入射角度で、それぞれどのような時間差で GRB を観測するのか、という情報である。本節ではハンガリーから提供された衛星軌道条件に基づいて、これら の情報を引き出す手順について述べる。

4.3.1 衛星座標情報

現在想定している軌道条件を、表 4.3 に示す。 各パラメータの説明は以下のとおりである。

Semi-major Axis

Semi-major Axis (半長径)は、衛星の楕円軌道において、地球の中心から地球に最も近づく近点と、 最も遠ざかる遠点の距離をそれぞれ足して2で割ったものを指す。

Eccentricity

離心率 (e) を指す。軌道の形を表す数字で、数字が0 に近いほど真円に近く、1 に近づくほど細長い 楕円となる。

Semi-major Axis	Eccentricity	Inclination	Argument	RAAN	True Anomaly
[km]		[deg]	of Perigee [deg]	[deg]	[deg]
				10	0
				10	120
				10	240
				325	0
6928.14	0	97.5976	0	325	120
(altitude 550)				325	240
				55	0
				55	120
				55	240

表 4.3: 衛星座標・衛星姿勢パラメータの例

Inclination

軌道傾斜角(i)を指す。地球の赤道面に対しての傾きを表す。

Argument of Perigee

昇降点からの楕円の向きを示す。図 4.19 中のω にあたる。

RAAN

Right Ascension of Ascending Node の略で、昇交点赤径 (Ω)を指す。昇交点とは、軌道が赤道面と 交わる2点のうち、南から北へ横切る地点のことである。RAAN は基準となる位置からこの昇交点 が、地球の自転軸を中心に何度まわったかを示す数字である。

True Anomaly

ある時刻においての衛星の位置を示す角度。図 4.19 中の ν にあたる。



図 4.19: 各パラメータの定義。衛星軌道面が黄色、基準面がグレーで描かれている。今回のような地球周 回軌道の場合、基準面は地球の赤道面である。

この条件を元に、ハンガリーの研究チームが主導となって衛星軌道シミュレーションを行った。衛星姿勢は太陽パネルが常に太陽方向を向く sun orientation と、太陽パネルが常に地球の反対側を向く zenith orientation の2つが考えられている。それぞれの場合の軸のとり方を図 4.20、図 4.21 に示す。



図 4.20: sun orientation における軸のとり方。黄色のベクトルは衛星から太陽方向、緑のベクトルは地球 中心から衛星方向のものである。



図 4.21: zenith orientation における軸のとり方。黄色のベクトルは衛星から太陽方向、緑のベクトルは地球中心から衛星方向のものである

これらの条件をもとに、ハンガリーの研究チームが主導となって衛星軌道シミュレーションは行った。 図 4.22、図 4.23 はこの条件のもとに 9 台の衛星を地球上空に打ち上げた場合の GRBCubeSat 衛星の軌 道シミュレーションの結果である。





図 4.22: 衛星軌道シミュレーションの結果 1[29]

図 4.23: 衛星軌道シミュレーションの結果 2[29]

以下は、ハンガリーから提供された衛星座標および衛星姿勢の各種パラメータを一部抜粋したものである。 zenith orientation の例であり、左から時刻、続いてカンマで区切られて順に緯度 [deg]、経度 [deg]、高度 [km]、 zenith 方向 (地球中心から衛星に向けたベクトル)の RightAscension(J2000)[deg]、Declination(J2000)[deg]、 太陽方向の RightAscension(J2000)[deg]、Declination(J2000)[deg]、yaw 角 (z 軸まわりの回転角)[deg]、pitch 角 (y 軸まわりの回転角)[deg]、role 角 (x 軸まわりの回転角)[deg] が列挙されている。2020 年 10 月 1 日 10:00 から 12:00 までの 1 分刻みで計算されており、この情報が 9 つの衛星分計算されている。 1 Oct 2020 10:00:00.000,-0.000,000,600.003000,0.000,-0.000,-172.287,-3.329,37.000,-90.000,0.000 1 Oct 2020 10:01:00.000,2.973,2.243,600.003000,2.243,2.973,-172.286,-3.329,180.000,-86.277,143.000 1 Oct 2020 10:02:00.000, 5.941, 4.498, 600.003000, 4.498, 5.941, -172.286, -3.330, 180.000, -82.553, 143.000 1 Oct 2020 10:03:00.000,8.900,6.777,600.003000,6.777,8.900,-172.285,-3.330,180.000,-78.830,143.000 $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 10:04:00.000, 11.845, 9.093, 600.003000, 9.093, 11.845, -172.284, -3.331, 180.000, -75.107, 143.000, -75.107, 145.000, -75.107, 145.000, -75.107, 145.000, -75.107, 145.000, -75.107, 145.000, -75.107, 145.000, -75.107, 145.000, -75.107, 145.000, -75.100, -75.000, -75.10$ $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 10:05:00.000, 14.771, 11.460, 600.003000, 11.460, 14.771, -172.283, -3.331, 180.000, -71.383, 143.000, -71.383, 143.000, -71.383, -71.$ $1 \hspace{0.1cm} \text{Oct} \hspace{0.1cm} 2020 \hspace{0.1cm} 10: 6: 00.000, 17.672, 13.891, 600.003000, 13.891, 17.672, -172.283, -3.331, 180.000, -67.660, 143.000, -67.660, 143.000, -67.660, 143.000, -67.660, -143.000, -67.60, -143.000, -67.660, -143.000, -67.660, -143.000, -7.660,$ $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 10:07:00.000, 20.542, 16.402, 600.003000, 16.402, 20.542, -172.282, -3.332, 180.000, -63.937, 143.000, -63.937, -63.000, -63.$ 1 Oct 2020 10:08:00.000,23.375,19.008,600.003000,19.008,23.375,-172.281,-3.332,180.000,-60.213,143.000 1 Oct 2020 10:09:00.000,26.162,21.727,600.003000,21.727,26.162,-172.280,-3.333,180.000,-56.490,143.000 1 Oct 2020 11:52:00.000,42.060,42.838,600.003000,42.838,42.060,-172.215,-3.361,180.000,-32.985,143.000 $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 11:53:00.000, 44.165, 47.046, 600.003000, 47.046, 44.165, -172.214, -3.362, 180.000, -29.262, 143.000, -29.262, 143.000, -29.262, 143.000, -29.262, -20.$ $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 11:54:00.000, 46.104, \\ 51.553, 600.003000, \\ 51.553, 46.104, \\ -172.213, \\ -3.362, \\ 180.000, \\ -25.539, \\ 143.000, \\ -25.000, \\ -2$ $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 11:55:00.000, 47.854, 56.371, 600.003000, 56.371, 47.854, -172.213, -3.363, 180.000, -21.815, 143.000, -21.815, 143.000, -21.815, -21.815, -21.8$ $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 11:56:00.000, 49.389, 61.505, 600.003000, 61.505, 49.389, -172.212, -3.363, 180.000, -18.092, 143.000, -18.092, 143.000, -18.092, 143.000, -18.092, -18.$ $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 11:57:00.000, \\ 50.683, \\ 66.942, \\ 600.003000, \\ 66.942, \\ 50.683, \\ -172.211, \\ -3.363, \\ 180.000, \\ -14.369, \\ 143.000, \\ -14.369$ 1 Oct 2020 11:58:00.000,51.711,72.655,600.003000,72.655,51.711,-172.210,-3.364,180.000,-10.645,143.000 1 Oct 2020 11:59:00.000,52.449,78.595,600.003000,78.595,52.449,-172.210,-3.364,180.000,-6.922,143.000 $1 \ \text{Oct} \ 2020 \ 12:00:00.000, \\ 52.882, \\ 84.695, \\ 600.003000, \\ 84.695, \\ 52.882, \\ -172.209, \\ -3.364, \\ 180.000, \\ -3.199, \\ 143.000, \\ -3.199, \\ -3$

以上が衛星軌道の情報である。これらに基づいて任意の時刻、任意の GRB 発生位置における情報を導出していく。今回は、2020-10-01 の 10:00:00 から 12:00:00 のフライトにおけるシミュレーションテーブルを使用し、提供された情報から、位置決定に必要な衛星間の距離や想定される時間差を導出した。

4.3.2 衛星姿勢情報

triangulation 法による GRB 位置決定のためには、まず第一に各衛星間の距離を導出する必要がある。 任意の時刻における緯度、経度、高度が提供されているため、直行座標に変換して、2点間の距離を計算 すればよい。ただし、緯度 λ 、経度 ϕ 、高度 h から直行座標 X、Y、Z に変換する際には、地球の楕円率を 考慮する必要がある。地球楕円の記述にはベッセル回転楕円体を採用する。この楕円体では赤道半径 a は a = 6377.39715500、地球離心率 e は e = 0.006674372230614 で記述される。

楕円の接線に垂直な線 (法線) に沿って北極と南極を結ぶ線と交わるまでの距離 (東西線曲率半径:N) は、 赤道半径 a、地球離心率 e、緯度 λ を用いて次の式で求められる。

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \tag{4.2}$$

以上を用いて直行座標に変換すると、つぎのような関係になる。

$$\mathbf{X} = (N+h)\cos\phi\,\cos\lambda\mathbf{Y} = (N+h)\cos\phi\,\sin\lambda\mathbf{Z} = \left(N\left(1-e^2\right)+h\right)\sin\phi\tag{4.3}$$

これを用いると、衛星1 (X1,Y1,Z1)と衛星2 (X2,Y2,Z2)の距離 D は

$$D = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$$
(4.4)

で導出できる。

次に、4.2 において作成した角度応答データベースの適用のために、各衛星が GRB に対してどのような 角度になっているのかを求める必要がある。これは衛星のある軸と GRB 方向との内積を求めることによっ て導出した。sun orientation の場合、図 4.20 の通り Sun RA と Sun Dec が z 軸方向なのでこれを基準軸と し、zenith orientataion の場合、常に進行方向と地球中心から衛星までのベクトル (zenith ベクトル) が常 に垂直であることを利用した。ただし、求めたい軸や入射する GRB の位置は天球座標の赤経、赤緯で与え られている一方、衛星座標に関しては緯度、経度で与えられているため、これを天球座標に変換する必要が ある。この変換のために、太陽がイギリスのグリニッジ天文台の子午線 (経度 0 度 0 分 0 秒) 上を通過する 時角であるグリニッジ恒星時を利用している。

協定世界時の西暦をY、月をM、日をD、時間をH、分をM、秒をSとすると、ユリウス日 JD は次のように変換できる。

$$MJD = [365.25Y] + [Y/400] - [Y/100] + [30.59(M-2)] + D + 1721088.5 + H/24 + M/1440 + S/86400 \quad (4.5)$$

ここで、[*x*] は床関数である。次に、NASA が導入した世界時 1968 年 5 月 24 日 0 時からの日数である TJD(Truncated Julian Days) を次の式で変換する。

$$TJD = JD - 2440000.5 \tag{4.6}$$

グリニッジ恒星時 GST は、

$$GST = 24 \times (0.671262 + 1.0027379094 \times TJD)$$
(4.7)

の小数点以下のみを使用する。

赤経 RA は経度 λ、及びグリニッジ恒星時 GST を用いると以下のように変換できる。

$$RA = \lambda + 15.0GST \tag{4.8}$$

GRB の入射方向が地球と重なっている場合は、観測できない場合を地没という。GRB が観測できる範囲にあるかを判断する必要がある。今回の場合、衛星から見た GRB の天頂角が > 105°のときを地没と定義した。

ここまでで、任意の時刻における各衛星間の距離 D および、各衛星に対する仮想 GRB 入射角が導出さ れた。GRB が検出できている衛星の中から、2つの衛星を結ぶベクトルと、衛星と GRB を結ぶベクトル で内積をとることで、cos θ が得られる。よって triangulation 法の式

$$\cos\theta = \frac{c\Delta t}{D} \tag{4.9}$$

から、想定される検出時間差 Δt が計算できる。

4.4 ライトカーブシミュレーション

実データの GRB ライトカーブを基に、前節で導出した想定される検出時間差及び検出器の角度応答を 考慮した検出効率を取り込み、新たなライトカーブを作成する。実データには Fermi-GBM の 3rd カタロ グから、明るいショートバーストを 2 例選んだ。図 4.24、図 4.25 はモデルとした fermi-GBM で検出した 実際の GRB のライトカーブである。これに対し時間分解能を1 ms に設定し、ポアソンの待ち時間分布に 従って新たに光子を振り直し複数回ライトカーブシミュレーションを行った。検出効率を取り込む際には、 Fermi-GBM の有効面積が平均的に 200 cm² であると仮定して、角度ごとの有効面積比から振り直す光子数 を補正する。color map 作成時に仮定した仮想 GRB ビームの太さは 400 cm²、入射させた光子数は 4000 個 なので、振り直す光子数 *x* は以下の式によって補正した。

このライトカーブシミュレーションでの仮想 GRB は時刻 2020 年 10 月 1 日 10:45:00 において (RA,Dec)=(45°,45°) から発生させ、以降ではこの仮想 GRB の位置決定を行っていく。



図 4.24: GRB120323507 のライトカーブ



図 4.25: GRB150819440 のライトカーブ

4.5 相互相関関数を利用した時間差導出

前節までで、想定時間差を考慮して新たなライトカーブが作成された。この新たに作成したそれぞれの 検出器において得られたライトカーブを関数として、畳み込みを行う。この相互相関関数のピークになる Δt が時間差となるが、相互相関関数はある決まった関数形で表すことが難しいため、最も値が大きなビン を求め、その前後5ビンについて重み付け平均したときのΔt の値をピークにおけるΔt とした。ここまで の手順を複数回試行し、その時の平均と標準偏差を最終的な時間差と誤差とする。今回、相互相関関数の計 算には、X 線天体時系列解析ソフトウェアパッケージである HEADAS-XRONOS に含まれる相互相関関数 計算アルゴリズム (crosscor) を利用した。表 4.4、4.5 は GRB を検出した 2 つの衛星の組み合わせ及びその 検出時間差である。

4.6 検出時間差を利用した GRB 位置決定

ここまでで衛星間の距離おとび検出時間差を導出し、triangulation 法による位置決定が可能となった。 今回は以下の2つの方法によって位置決定精度を見積もりを行った。

4.6.1 円弧による入射方向制限

triangulation 法の式 (3.2) によって、cosθが導出できるので、2つの検出器からは、天球座標において θの描く円弧上に入射位置を制限することができる。さらに検出器の組み合わせを増やすことで円弧を重ね

sati	sat2	delta I	error
2	3	0.00525765	0.00454856
2	5	-0.00712049	0.0010054
5	3	0.0142817	0.0030859
7	2	-0.0127901	0.000904273
7	3	0.0142417	0.00390133
7	5	0.00698034	0.0014248
7	8	-0.00600057	0.00154135
7	9	-0.00244933	0.00157829
8	2	-0.0106201	0.00173313
8	3	-0.0210685	0.00294426
8	5	-0.00375047	0.000603968
8	9	-0.006022	0.00364007
9	2	-0.0217895	0.00119921
9	3	-0.00303639	0.00339251
9	5	-0.0336306	0.000611011

表 4.4: GRB120323507 を検出した衛星の組み合わせと検出時間差 <u>sat1</u> sat2 deltaT error

表 4.5: GRB150819440 を検出した衛星の組み合わせと検出時間差

sat1	sat2	deltaT	error
2	3	0.00508303	0.00337329
2	5	-0.00783347	0.00026826
5	3	0.0193065	0.00364079
7	2	-0.0129305	0.000724399
7	3	0.0102512	0.00362389
7	5	0.0047034	0.000131333
7	8	-0.00861997	0.00187054
7	9	-0.00189737	0.00245533
8	2	-0.0107516	0.000218066
8	3	-0.0134676	0.0035188
8	5	-0.00384741	0.000226521
8	9	-0.00361524	0.0018987
9	2	-0.023879	0.00126518
9	3	-0.00267634	0.00291114
9	5	-0.03484	0.000466342

ていき、その交点が1つに定まれば、その方向が GRB が入射方向であることがわかる。9つの衛星のう ち、GRB を検出した衛星の中からできるかぎりの組み合わせを作る。この方法による (RA,Dec)=(45.45) から入射した仮想 GRB の位置決定結果が図 4.26、図 4.27 である。





図 4.26: 円弧による GRB120323507 の到来方向制 図 4.27: 円弧による GRB150819440 の到来方向制 限結果。(RA.Dec)=(45.0346±0.0727692, 45.1865± 限結果。(RA.Dec)=(45.0434±0.0450216, 45.0559± 0.1194)

0.0460601)

この方法による位置決定の結果、明るいバーストの場合は到来方向を一意に定めることに成功し、その 位置決定精度は目標である 10 分角(約 0.167°)以内を達成した。

4.6.2 χ^2 fitting による位置決定

これは Hitomi-SGD Shield の count rate 法による GRB 位置決定を行った際に確立した、フィッティン グによる位置決定である。仮想 GRB が検出できている検出器の中から、2つの検出器の組み合わせ全てに 対して検出時間差を求める。想定される時間差を model 関数、ライトカーブシミュレーションによって導 出した時間差を data 関数とし、以下の式で表される χ^2 が最小となる RA、Dec を求める方法である。

$$\chi^{2} = \sum_{\text{combination}}^{h} \left(\frac{\left((\text{norm} \times \text{model}_{\text{combination}}(\text{RA}, \text{Dec})) - \text{data}_{\text{combination}} \right)^{2}}{\text{error}^{2}} \right)$$
(4.11)

RA、Dec はそれぞれ 3° 刻みで全角度においての χ^2 を求め、最小となるおおよその RA、Dec を見積 もった後、そのRA、Decを初期値としてフィッティングを行い、ベストフィット値を求めた。ベストフィッ トの RA、Dec に対する $\Delta \chi^2$ を $\pm 3^\circ$ の範囲においてさらに 0.01° 刻みで計算し、 $\Delta \chi^2 = 2.30, 4.61, 9.21$ となる角度範囲をそれぞれ 1σ、2σ、3σ 誤差範囲として求めた [30]。図 4.28、図 4.29 に (RA,Dec)=(45,45) から入射した仮想 GRB の位置決定結果を示す。



図 4.28: χ^2 fitting による GRB120323507 の位置決定 図 4.29: χ^2 fitting による GRB150819440 の位置決定 結果。(RA.Dec)=(44.9824±0.11, 45.1212±0.19) 結果。(RA.Dec)=(44.9857±0.07, 45.0028±0.07)

この方法による GRB 位置決定の結果、前節の円弧による制限と同様、到来方向を一意に定めることに 成功し、位置決定精度は目標だった 10 分角 (約 0.167°) 程度を達成している。

第5章 まとめ

5.1 まとめ

重力波とは、巨大質量を持った物質が光速に近い速度で動いた際に強く発生する時空の歪みであり、2015 年の直接観測以降、遠い宇宙の物理や、宇宙誕生の起源を解明する手がかりとして注目を集めている。重力 波対応天体候補としては、主に超新星爆発やコンパクト星同士の合体が挙げられる。しかし、重力波のみに よる位置決定精度は10平方度程度の不定性があり、迅速な対応天体の同定は難しい。そこで、電磁波によ る同定が重要となってくる。特に重力波対応天体候補からの信号として有力なガンマ線バーストからの重 力波が検出できれば、ショートガンマ線バーストの正体解明にもつながる。ガンマ線バーストは全天のあ らゆる方向からランダムでやってくるため、重力波との同時観測には全天監視型のガンマ線検出器が向く。 我々は現在、重力波対応天体同定を目的とした全天監視ガンマ線検出器として、超小型衛星 GRBCubeSat の打ち上げ計画をハンガリーの研究チームと共同で進めている。本計画では、ガンマ線検出器を搭載した 多数の衛星が遠く離れた位置にあるため、ガンマ線バーストの検出時間差を利用した triangulation 法とよ ばれる位置決定手法が使用できる。本研究では、全天ガンマ線監視装置のガンマ線バースト位置決定能力 をシミュレーションによって検討し、GRBCubeSat 計画における検出器配置や衛星打ち上げ台数を決定す る際の指針とすることを目的としている。まずはじめに検出器のガンマ線応答を再現するモンテカルロシ ミュレータを開発し、検出器の持つ角度ごとの検出効率を調べた。次に、ハンガリーの研究チームから提供 された衛星座標情報および姿勢情報から、各衛星間の距離や想定される検出時間差を導出した。実際のガ ンマ線バーストを、導出した検出器の角度応答や想定される検出時間差を組み込んだ上でポアソン分布に 従った待ち時間関数によって光子を振り直し、新たなライトカーブを作成した。このシミュレーションライ トカーブを関数として畳み込みを行い、相互相関関数のピークになる値を検出時間差として triangulation 法に適用した。 $\cos \theta = c \Delta t / D$ を用いた円弧による方向制限と、フィッティングによってモデルとデータの 差が最小となる入射角度を探し出す χ² fitting 法による 2 つのアプローチで仮想ガンマ線バーストの位置決 定を行ったところ、どちらの方法でも入射方向を一意に定めることに成功し、明るいバーストにおいては目 標精度である 10 分角程度の精度で位置決定に成功した。

5.2 今後の課題

シミュレータについて

検出器のエネルギー応答の再現において、シンチレータの幾何学構造に起因する光量の反応位置依存性 が確認され、シミュレーションによる完全なエネルギー応答の再現には至らなかった。今後、光学的な問題 を取り込んだシミュレータの開発が求められる。 また、今回は試行段階ということで、単純な2枚のシンチレータジオメトリによる暫定的な衛星搭載検 出器の角度応答を用いたが、衛星の詳細な構造が決定次第、衛星ジオメトリを作成し、衛星本体による光子 の吸収・散乱の影響を含める必要がある。

方向決定について

位置決定精度に関して、今回はライトカーブ作成を10回試行し、その統計誤差を利用して時間差の誤 差を求めたが、より正確な精度を求めるにはさらに試行回数を増やす必要がある。

また、GRBCubeSat の検出器は一台の衛星に2つの異なる方向を向いたシンチレータを搭載するため、 count rate 法による制限も可能である。前述した衛星本体による光子散乱の影響を含めたジオメトリによる 角度応答データベースを作成すれば、count rate 法による到来方向制限をかけることによって、さらなる精 度の向上も期待される。

将来的には、本研究で確立した位置決定方法を様々な仮想 GRB に対して行い、仮想 GRB をモデルライ トカーブの形状、明るさ、継続時間等といったパラメータで分類し、それぞれのパラメータ毎の位置決定精 度導出しその相関を確認することで、GRBCubeSat 計画における衛星打ち上げ台数や、検出器配置決定の 指針とする。

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深沢先生、大野先生に深く感謝を申し上げます。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した。

関連図書

- [1] LIGO Caltech(https://www.ligo.caltech.edu/)
- [2] 藤本眞克,『重力波天文学への招待』,日本放送出版協会,1994
- [3] B.P. Abbott et al." Observation of Gravitational Waves from a binary black hole merger", (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), Phys. Rev. Lett. 116, 061102, 2016
- [4] 田越 秀行, 伊藤 洋介, 端山 和大, 2017, 重力波の観測とデータ解析, 日本物理学会誌 Vol.72, No.3, p158-p166
- [5] 山口昌英, 2017, 原始重力波とは何か?その検出がなぜ大事なのか?, 日本物理学会誌 Vol.72, No.3, p156-p157
- [6] 理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室 HETE-2 ホームページ (http://cosmic.riken.jp/hete_new/index.html)
- [7] "The Forth BARTSE Gamma-Ray Brust Catalog (Revised)", Paciesas, S. W. etal., 1999, ApJS, 122, 465
- [8] Schaefer, B. E., Palmer, D., Dingus, B. L., et al. 1998, ApJ, 492, 696
- [9] M. Ohno, et al., "Spectrap Properties of Prompt Emission of Four Short Gamma-Ray Bursts Observedby the Suzaku-WAM and the Konus-Wind", PASJ, 60S, 361, 2008
- [10] Ackermann, M. et al., "The First Fermi-LAT Gamma-ray Burst Catalog", ApJS, 209, 11, 2013
- [11] A. A. Abdo, et al., "A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects", Nature, 462, 331, 2009
- [12] SGD 実験計画書
- [13] CARET ホームページ 装置構造 (http://calet.jp/id28/)
- [14] The Fermi Large Area Telescope $\pi \Delta \sim \mathcal{V}$ The Fermi LAT instrument(http://www-glast.stanford.edu/instrument.html)
- [15] Space Science Data Center AGILE ページ (http://agile.asdc.asi.it/)
- [16] Mission Operations Center for Swift, XRT Technical Details (http://www.swift.psu.edu/xrt/techDescription.html)

- [17] 理化学研究所, "「すざく」 ファーストステップガイド 第 4.0.3 版" (http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep_web/node2.html)
- [18] Fukazawa Y. et al., "Soft Gamma-ray Detector(SGD) onboard the ASTRO-H mission", SPIE, 9144, 91442C, 2014
- [19] JAXA 全天 X 線監視装置 (MAXI) ページ (http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/maxi/)
- [20] National Aeronautics and Space Administration, Swift's Burst Alert Telescope (BAT) ページ (https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/bat_desc.html)
- [21] K. Torigoe et al., "Performance Study of Large CsI(Tl) Scintillator with MPPC Readout" in Prep
- [22] GRBCubeSat プロジェクト計画書
- [23] M. Ohno, "Monitoring of gamma-ray burst with a fleet of nanosatellites"(フェルミシンポジウム発 表資料)(2017)
- [24] Coulter, D.A. et al, "Swope Supernova Survey 2017a (SSS17a), the Optical Counterpart to a Gravitational Wave Source", astro-ph.HE, 1710.05452, 2017
- [25] 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"
- [26] CERN Geant4 (http://geant4.cern.ch/)
- [27] WWW Table of Radioactive Isotopes(http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp)
- [28] 逆関数法を用いた乱数生成の証明と例 (http://mathtrain.jp/invsampling)
- [29] N. Tarcai, "GRB Orbit Simulation" (GRBCubeSat 会議報告資料)(2017)
- [30] Y. Avni, "Energy Spectra of X-ray clusters of galaxies", ApJ, 210, 642, (1976)