

修士論文
モンテカルロ計算による Suzaku/WAM 単独での
ガンマ線バースト解析手法の確立

埼玉大学大学院 理工学研究科 博士前期課程
物理機能系専攻 物理学コース
田代・寺田研究室

藤沼 洸

平成 28 年 2 月 5 日

概要

X線天文衛星「すざく」に搭載されている広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor: WAM) は、全天のほぼ半分の視野を持ち、硬 X 線帯域で大きな有効面積 (800 cm^2 at 100 keV) を持つため、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst: GRB) をはじめとする突発天体を年間 230 イベントあまり検出する。しかし、WAM 単独では到来方向を制限する機構を持たず、天体の位置の決定ができない。このため、光子の到来方向に依存する応答関数が作成できず、スペクトル解析できるイベントは他衛星によって位置決定された約 15% の GRB に限られる。残りのイベントを WAM 単独で解析するためには、他衛星による位置情報なしにおよその位置を推定し、エネルギー応答関数を作成する手法を確立しなければいけない。また、それによるエネルギー応答関数の系統誤差を把握しておくことが重要である。それにより残りの約 9 割の GRB を解析することが可能となる。そこで我々は、まず Geant4 ツールキットを用いて計算機上に衛星全体の物質と幾何学的配置を再現したマスモデルを作成、10 - 5000 keV 帯域の光子との相互作用を計算するモンテカルロシミュレーションを行うことによって、全天から降り注ぐ光子に対する WAM の 4 面のそれぞれの計数率を入射角度ごとに詳細に調べた。この結果を、実際の観測結果と比較する事で WAM 単独で到来方向を推定する方法を開発した。この方法を検証するために、他衛星の観測により到来方向が既知の 32 の GRB について、このシミュレーションツールを用いて推定した到来方向と比較した。その結果、物質量が多い冷媒タンクがある方向を除けば、両者の方位角方向の差分の平均は約 7° の精度であった。さらに、推定した到来方向で応答関数を作成、スペクトル解析を行い、その結果を他衛星によって決定された到来方向で作成した応答関数による評価と比較した。GRB によく合うモデルである Band Function がベストフィットモデルである場合の結果を比較すると、系統誤差はそれぞれ、低エネルギー側の光子指数に約 11%、高エネルギー側の光子指数に約 3%、べきが折れ曲がるエネルギーに約 16%、フラックスに約 17% と評価された。この手法を適用することによって、新たに 1000 イベントあまりの GRB をスペクトル解析できる可能性を示した。

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	ガンマ線バーストとその位置決定	3
2.1	ガンマ線バースト概要	3
2.2	ガンマ線バーストの位置決定	8
2.2.1	CGRO/BATSE	9
2.2.2	BeppoSax/GRBM	10
2.2.3	Interplanetary Network: IPN	12
第 3 章	観測機器	13
3.1	すざく衛星	13
3.2	硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector: HXD)	13
3.3	広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor: WAM)	14
3.3.1	WAM の構造	16
3.3.2	Transient data Processing Unit(TPU)	16
3.3.3	検出実績	18
3.3.4	WAM の GRB 位置決定能力の検証	19
第 4 章	WAM のエネルギー応答関数	21
4.1	エネルギー応答関数	21
4.2	Geant4 ツールキット概要	22
4.3	WAM のエネルギー応答関数	23
4.3.1	Suzaku マスモデル	24
4.3.2	地上較正試験	24
4.3.3	機上較正試験	26
4.3.4	WAM エネルギー応答関数の不定性	27
第 5 章	位置決定方法の開発	28
5.1	モンテカルロシミュレーションによる角度応答データベース構築	28
5.1.1	ジオメトリ	28
5.1.2	入射光子の定義	29
5.1.3	物理素過程	29
5.1.4	検出アルゴリズム	29

5.1.5	シミュレーション結果	30
5.2	位置決定方法	31
5.2.1	実測値の各面のカウント数	32
5.2.2	データベースの各面のカウント数	32
5.2.3	χ^2 法による実測値とシミュレーションの比較	32
5.3	一例:GRB140306A	32
第 6 章	開発した位置決定方法の精度検証	36
6.1	位置に関する評価	36
6.1.1	位置決定精度	36
6.1.2	位置決定誤差	37
6.2	エネルギー応答関数に関する評価	38
6.2.1	評価方法 1:有効面積による比較	39
6.2.2	評価方法 2:実データスペクトル解析による比較	40
6.3	考察	42
第 7 章	まとめ	46
付 録 A	モンテカルロシミュレーションツールキットの精度	49
付 録 B	32GRB の位置決定結果	52
付 録 C	スペクトル解析結果	55

表 目 次

2.1	BATSE の基本性能	9
2.2	GRBM の基本性能	11
3.1	HXD 基本性能	15
3.2	WAM 基本性能 (Yamaoka et al. 2009)	15
3.3	WAM のエネルギーとバンドの対応	17
3.4	TRN データと BST データ	17
3.5	WAM の 10 年間の突発天体の観測実績	19
5.1	GRB140306A の WAM/WANTI 各面のカウント数	33
5.2	GRB140306A における明るい面のカウント比	33
5.3	GRB140306A の位置決定結果	35
6.1	位置決定精度	37
6.2	スペクトル解析の系統誤差	42
6.3	エネルギー応答関数の不定性	44
B.1	位置決定結果	52
C.1	スペクトル解析結果	55

目 次

2.1	GRB 火の玉モデル	3
2.2	T90 分布 (Paciesas et al. 1999)	4
2.3	Hardness ratio(Kouveliotou et al. 1993)	4
2.4	GRB030329/SN2003dh スペクトル (Hjorth et al. 2003)	5
2.5	多様な光度曲線	6
2.6	GRB911127 のスペクトル (Band et al. 1993)	6
2.7	Band Function のパラメータ分布 (Preece et al.2000)	6
2.8	GRB の全天分布 (Paciesas et al. 1999)	7
2.9	BeppoSax/MECS による X 線残光の初検出 (Costa et al. 1997)	7
2.10	カウント比による光子の到来方向推定の概念図	8
2.11	外観図。左:CGRO 衛星。右:BATSE(Fishman et al. 1985)	9
2.12	BeppoSax 衛星の外観図と搭載されている科学機器	11
2.13	IPN によるガンマ線バースト光子の到来方向の制限 (http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/)	12
3.1	HXD 概略図 (Yamaoka et al)	14
3.2	Well Unit の概略図 (Takahashi et al. 2007)	14
3.3	全天モニターの有効面積	15
3.4	WAM センサー部の部品 (Yamaoka et al. 2009)	16
3.5	WAM 角度定義 (Ohno et al. 2005)	16
3.6	TPU での処理のながれ	18
3.7	検出した GRB 総数 (赤) とそのうち GCN 投稿されたイベント数 (緑)。	19
3.8	地上較正試験による WAM のカウント比の ϕ 方向依存性	20
4.1	単色光が入射した時の検出器応答の概念図	22
4.2	HXD 511 keV ガンマ線に対する吸収率 (Terada et al. 2005)	24
4.3	すぎくマスモデル	24
4.4	WAM マスモデル	24
4.5	光量位置依存性 (Ohno et al. 2005)	25
4.6	BGO 結晶のシンチレーション光量の非線形性 (Ohno et al. 2005)	26
4.7	WAM スキャンスペクトル	26
4.8	面の正面からの離角に対する相対的規格化因子 (Yamaoka et al. 2009)	27
5.1	モデルスペクトル	29

5.2	シミュレーションによる WAM 各面における相対検出効率	31
5.3	WANTI の相対検出効率	31
5.4	GRB140306A の WAM 光度曲線 (左) と WANTI の光度曲線 (右)	33
5.5	WAM 各面における検出効率の比	34
5.6	GRB140306A の位置決定した時の χ^2 マップ	34
5.7	GRB140306A の χ^2 の θ 、 ϕ 依存性	35
6.1	位置決定と使用した GRB の入射角分布	37
6.2	LocWAM における χ^2 の分布	38
6.3	推定位置の誤差の評価	39
6.4	有効面積による比較	39
6.5	離角に対するパラメータ比	41
6.6	離角に対するパラメータ比	42
6.7	有効面積の θ 方向に対する比較	44
A.1	Geant4 シミュレーションと NIST データベースの比較	51

第1章 はじめに

1967年、ソ連の核実験監視衛星 VELA は、謎のガンマ線を検出した (Klebesadel et al. 1973)。冷戦中であつたため、核実験の可能性が疑われたがその存在は機密情報として、1973年まで公開されることはなかった。のちにそれは、宇宙のある一点から突如ガンマ線が大量に降り注ぐガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) という天体現象であることがわかつた。現在では GRB はビックバン以降の宇宙最大規模の爆発現象であると考えられており、宇宙遠方からランダムかつ等方的に発生しており 1 日 1 回程度観測されている。GRB の正体や発生機構については、初検出以降半世紀近く経過した現在でも完全な説明はされてはいないが、超大質量星が一生の最後に起こす超新星爆発に付随するものであると考えられている。また、このことから重力波との同期検出が期待されることや、高赤方偏移で発生した GRB を観測できれば宇宙初期の状態を知ることがかりになることから、宇宙の進化を探る宇宙論を検証するためにも重要な天体現象である。

これまでに GRB という天体の謎を解明するべく、多くの GRB に特化した衛星が打ち上げられた。GRB は全天のどこから発生するのかもわからないため、それらの検出器の多くは、X 線やガンマ線光子に対する有効面積を大きくし、かつ広い視野を持つように設計され、発生を待ち構えるという手法が取られてきた。そのため、指向性の強い検出器とは異なり、光子の到来方向を制限する機能を持たない。コンプトンガンマ線衛星 (Compton Gamma-Ray Observatory: CGRO) に搭載されている Burst And Transient Source Experiment (BATSE, Fishman et al. 1998) も全天を監視できる視野を持つ検出器であつたが、光子の到来方向を制限する機構を持たなかつた。そのため、BATSE は複数ある検出器 Unit のカウント比を利用するという手法によって、GRB の位置を決定することを可能にした。それによって、BATSE は GRB が全天から一様に発生していることを示すなど多くの成果を上げた。

ガンマ線による初期放射に続いて、GRB には X 線や可視光電波での残光放射が存在することが確認されてから、GRB の位置決定をすることがより重要となっている (Costa et al. 1997)。初期放射の即時通報から、地上の可視光望遠鏡や他波長でのフォローアップ観測を行うことによって、ガンマ線帯域では見られないスペクトル構造が得られ、発生源との距離を示す赤方偏移を調べることができるようになった。また、それにより衛星の天球上の位置として GRB を捉えるだけでなく、空間的な位置を決定できることになった。残光の観測は、GRB が宇宙論的遠方で発生しているという事実に加えて、その発生機構に関する様々な情報をもたらすこととなった。その残光観測を行うためにも、GRB 初期放射の位置決定は非常に重要である。

天文衛星に搭載されている検出器で GRB 初期放射の位置決定を行うためには、大きく 3 種類の手法がとられてきた。1 つ目は BATSE のように複数の検出器を利用して、GRB に照らされた検出器のカウント比を調べる方法である。2 つ目は、符号化マスクという特殊な光学系を用いること

によって光子の到来方向を決定する方法である。代表的な検出器として、Swift 衛星に搭載されている Burst Alert Telescope(BAT) がある。符号化マスクとは、X 線が透過しない金属板にランダムに入射口をあけたものを検出面の上に配置したものを指し、検出面とマスクのパターンとの相互相関をとることで光子の入射角度を決定することが可能となる。そして、複数の衛星間の距離とガンマ線光子が到達する時間差を利用した InterPlanetary Network(IPN) がある。

本研究では、2005 年に打ち上げられた Suzaku 衛星に搭載されている広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor: WAM) について、BATSE の方法と同様に各面のカウント比を利用して GRB 位置決定方法の開発を行った。以下に本論文の構成を述べる。第 2 章にガンマ線バースト概要とこれまで行われてきた GRB の位置 を決定する手法について述べる。第 3 章に本研究の観測機器である Suzaku 衛星、WAM について述べる。第 4 章では、WAM のエネルギー応答関数の作成方法とそれらの較正結果と共に、本研究でも用いるモンテカルロシミュレーションツールキットである Geant4 について概説する。第 5 章で本研究の位置決定方法の説明、第 6 章で位置決定によるエネルギー応答関数の不定性を評価する。

第2章 ガンマ線バーストとその位置決定

2.1 ガンマ線バースト概要

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) とは Big Bang 以降宇宙最大規模の爆発現象であり、遠方宇宙において数秒間で $10^{51}-54$ erg ものエネルギーを放出する。GRB は 1967 年、ソ連の核実験監視衛星 Vela によって初めて検出された (Klebesadel et al. 1973)。核実験の可能性が疑われたが、また冷戦中であったため、その存在は機密事項として扱われた。1973 年に公表されたことにより、宇宙には大量のガンマ線を放射する天体があると認められるとともに、その正体や発生機構は現在に至るまで謎が多い。その後 GRB の観測を行うための衛星が次々と打ち上げられ、CGRO、BeppoSax(Boella et al. 1997)、HETE-2(Ricker et al. 2003)、Swift(Gehrels et al. 2004)、Fermi(Meegan et al. 2009) などが挙げられる。以下に、GRB に関する観測的事実と推論される GRB のモデルについて述べる。

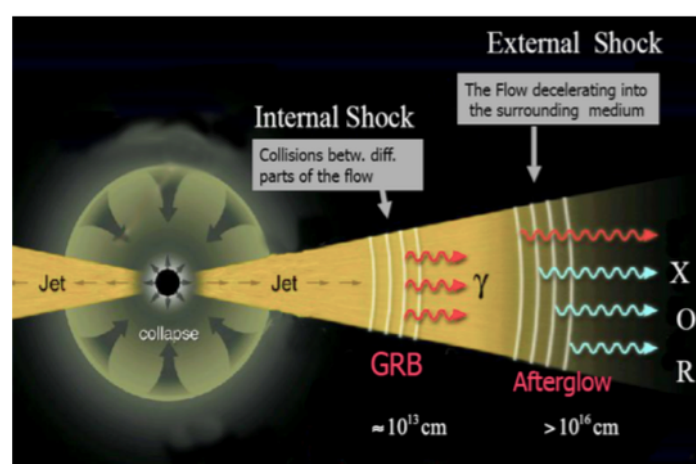


図 2.1: GRB 火の玉モデル

GRB の発生機構として広く受け入れられているモデルとして相対論的火の玉モデルがある (Rees et al. 1992)。図 2.1 にこのモデルの想像図を示す。このモデルでは、その継続時間と観測される総エネルギー量からコンパクトな領域に膨大なエネルギーが詰め込まれた熱的なプラズマが中心にあり、ローレンツファクターが 100 にもなる物質流を吐き出していると考えられている。吹き出した相対論的速度を持つ物質流は、同様に吹き出した速度が異なる物質流と衝突して衝撃波を形成する。ガンマ線光子は、その衝撃波面で発生した乱流磁場に電子が巻きつき、シンクロトロン放射によって放射されていると考えられている。またガンマ線というエネルギーまでに加速されるために、Fermi 加速が提案されている。Fermi 加速とは、乱流磁場やアルフベン波によって完全

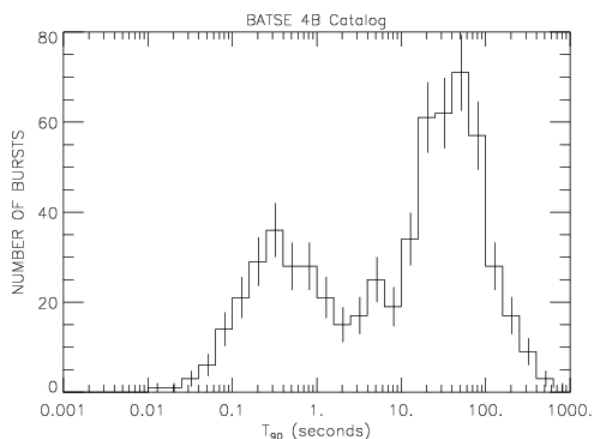


図 2.2: T90 分布 (Paciesas et al. 1999)

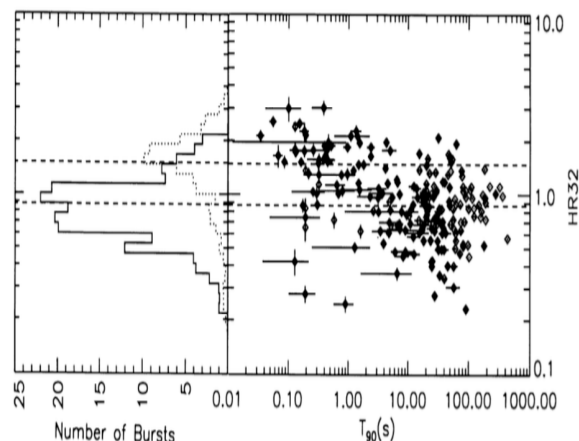


図 2.3: Hardness ratio(Kouveliotou et al. 1993)

弾性散乱され衝撃波面を何度も往復することによって、効率よく高エネルギーまで加速される機構である。そして、Fermi 加速された電子からのシンクロtron放射によるガンマ線を我々は GRB として観測する。このシンクロtron放射がつくる光子スペクトルは、エネルギーのべき乗になり観測の事実と一致することからも、このモデルが受け入れられている。また、物質流が星間ガス (Inner Stellar Medium: ISM) などと衝撃波面を形成し、それによって加速された粒子からの電磁波が観測される。それは残光と呼ばれる。

観測された GRB の継続時間には T90 という値が用いられる。T90 とは、バックグラウンドを引いた後の初期放射のカウント数を、トリガーした時間から累積したものからはじめとおわりを除いた 5% から 95% までの放射が行われた時間のことである。これを用いることによって、解析者によるバイアスがほぼ除去された継続時間を求めることができる。図 2.2 に BATSE で観測された GRB の T90 分布、図 2.3 に Hardness ratio と呼ばれる低エネルギー側と高エネルギー側のフラックス比と T90 の相関を示す。T90 の分布は、2 秒を境に 0.2 秒と 50 秒程度にピークを持つふたやま構造を示している。したがって、継続時間が短い GRB と長い GRB はそれぞれショート GRB、ロング GRB と呼ばれる。また低エネルギー側と高エネルギー側のフラックスの比である Hardness ratio は、ショートとロング GRB で異なる分布を示していることがわかる。このことから、それぞれの GRB は異なる起源を持つと考えられている。

ロング GRB の起源としては、超大質量星が寿命を迎えた時に生じる超新星爆発に付随するイベントであると考えられている。それを支持する観測事実も存在し、1998 年 4 月 25 日に発生した GRB980425 の残光と超新星爆発 SN1998bw の同期が見られたことである (Galama et al. 1998)。GRB980425 の初期放射は BeppoSax の Gamma-Ray Burst Monitor (GRBM, Frontera, et al. 1992) によって検出され、すぐさま同衛星搭載の Wide Field Cameras (WFCs) などによる追観測が行われ位置が決定された。それによって X 線、可視光、電波の帯域で残光が発見され、スペクトルの特徴から赤方偏移も求められた。さらに GRB の予想される可視光残光では見られないようなふるまいをする可視光の放射が検出され、そのスペクトルと位置から非常に明るい超新星爆発 SN1998bw であると同定された。これは GRB が超新星爆発に付随するものであることを示唆しているが、誤差の大きさや GRB の明るさが予想される値より小さいことから疑問符が投

げられた。しかし、GRB030329 と SN2003dh の発見によって確実視されることになる (Hjorth et al. 2003)。GRB030329 は HETE-2 によって検出され、VLT の追観測によって残光の検出と赤方偏移が決定された。図 2.4 に示したのは、数日後に得られた可視光スペクトルであり、その特徴は SN1998bw とよく似ており超新星爆発からの放射であることを示していた。

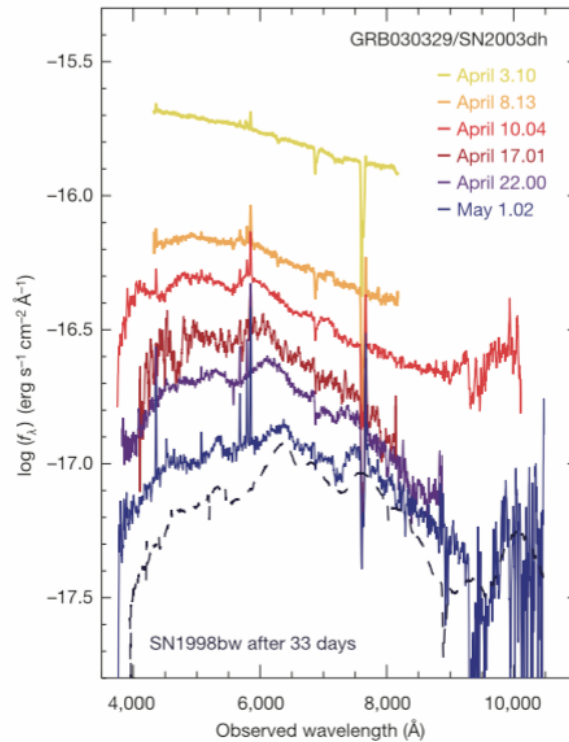


図 2.4: GRB030329/SN2003dh スペクトル (Hjorth et al. 2003)

またショート GRB の起源は、コンパクト星同士の合体が起源であると考えられている。その確実な観測的証拠はまだないが、コンパクト星の合体では、その衝突の間に特徴的な重力波を放出すると考えられており、ショート GRB 初期放射との同期観測が有力な証拠になると考えられ、日本の大型低温重力波検出器 KAGRA や Vergo, LIGO といった重力波検出器による成果が期待される。

図 2.5 に示すように初期放射における光度曲線は、イベントごとに異なる多様な振る舞いを示す。それは電子が加速される状況の複雑さや物質流の幾何学的構造など様々な要因に左右されるためであり、そのため統一されたモデルを構築するのは非常に難しい。

GRB からの初期放射は主にガンマ線帯域で観測され、そのスペクトルの多くは Band Function とよばれる 2 つのべき関数を指数関数で滑らかにつなぐような関数で表すことができると報告されている (Band et al. 1993)。

$$A(E) = \begin{cases} K \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) & E < (\alpha - \beta)E_0 \\ K \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}} \right)^{\alpha - \beta} \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta \exp(\beta - \alpha) & E > (\alpha - \beta)E_0 \end{cases} \quad (2.1)$$

α は低エネルギー側の光子指数、 β は高エネルギー側の光子指数、 E_0 はスペクトルのべきが折れ曲がるエネルギー (keV)、 K は 1 keV における規格化因子 ($\text{photons keV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を示す。ま

た、単位エネルギーあたりの放射強度を示す νF_ν スペクトルにおいて、その放射量がピークになるエネルギーを E_{peak} という。 E_{peak} は $E_{\text{peak}} = (2 + \alpha)E_0$ という関係を持つ。 νF_ν スペクトルの方が、天体の物理をよく反映していることから、 E_{peak} がよく用いられる。

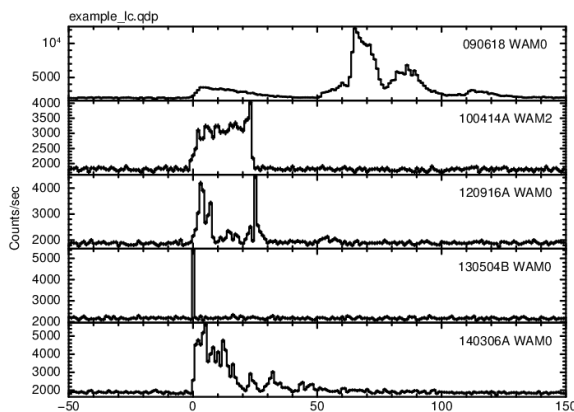


図 2.5: 多様な振る舞いを示す光度曲線

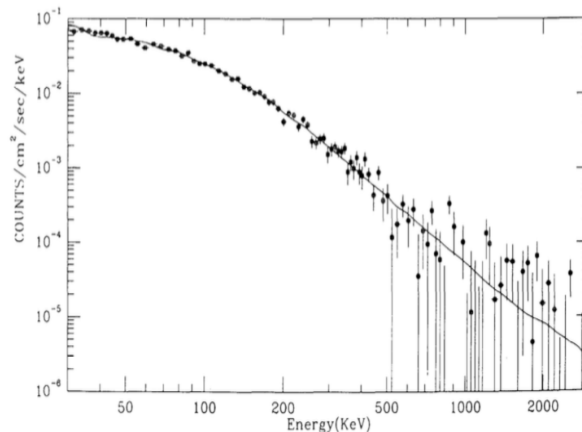


図 2.6: BATSE で観測された GRB911227 のスペクトル (Band et al. 1993)。Band Function により良く合う。

Band Function は多くの GRB に共通して見られる光子スペクトルであり、そのパラメータもそれぞれあるピークをもった分布になる。図 2.7 に示すのは、CGRO 衛星搭載の BATSE によって検出された GRB のスペクトル解析の結果、Band Function のパラメータの分布であり、 $\alpha, \beta, E_{\text{peak}}$ はそれぞれ -1.0、-2.25、250 keV にピークをもつことがわかる (Preece et al. 2000)。従って、GRB は共通の物理を背景とした放射がなされていると考えられる。また、Band Function や powerlaw は非熱的放射だが、べき関数に黒体放射という熱的成分を加えたモデルでもよく fit できると報告されている。これは衝撃波面におけるシンクロトロン放射だけでなく、相対論的火の玉モデルにおける光球からの熱的放射が見えていると解釈される。熱的成分が確かに存在する場合、GRB のモデルにさらなる制限をかけることができるだろう。

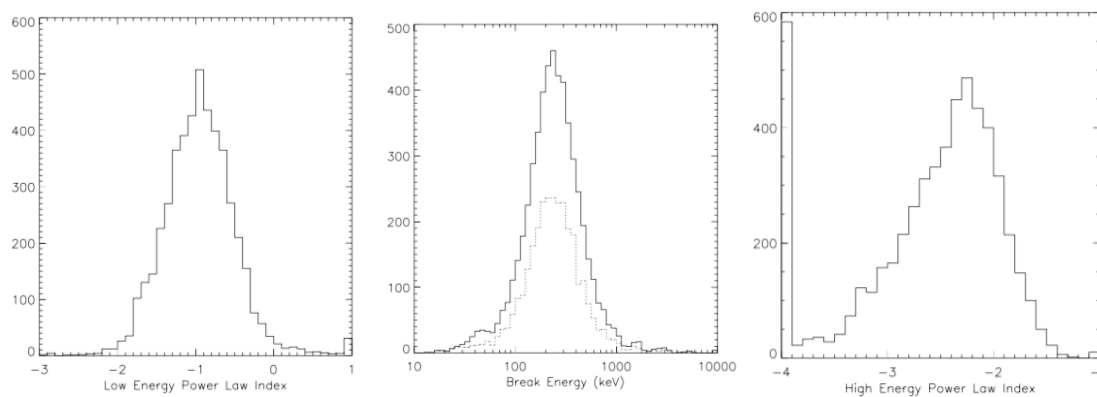


図 2.7: Band Function のパラメータ分布。左から $\alpha, \beta, E_{\text{peak}}$ (Preece et al. 2000)

図 2.8 は BATSE が観測した 1637 イベントの全天分布である。これは、GRB は全天のランダムな方向から一様に、さらにその明るさにも依存せずに発生することを示している。

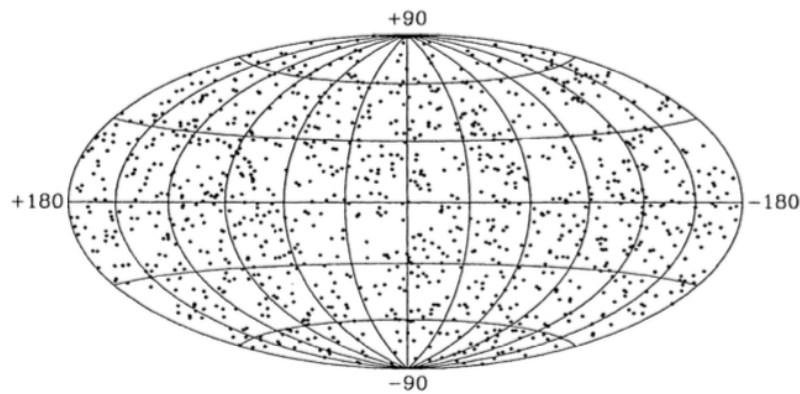


図 2.8: BATSE で観測された 1637 イベントの全天分布 (Paciesas et al. 1999)

相対論的火花の玉モデルの枠組みの中では、セントラルエンジンから吹き出された相対論的ジェット流は、初期放射後に星間ガス (Inner Stellar Medium: ISM) などと衝撃波面を形成し、それによって加速された粒子から電磁波が放射されると考えられている。それを残光と呼ぶ。初期放射とは異なり、観測される電磁波は、電波、可視光、X 線と幅広く、タイムスケールは数日間と長い。この幅広い帯域で放射を行う機構はまだ明らかではないが、スペクトルの形などからシンクロトン放射によるものと考えられている。これは、ISM との衝突によって前方衝撃波 (Forward Shock: FS) と後方衝撃波 (Reverse Shock: RS) が形成され、それぞれの衝撃波面でシンクロトン放射が生じると考えられている。その際、RS では主に X 線、可視光の放射が見られ、FS では電波、可視光が放射されると現在は考えられている。

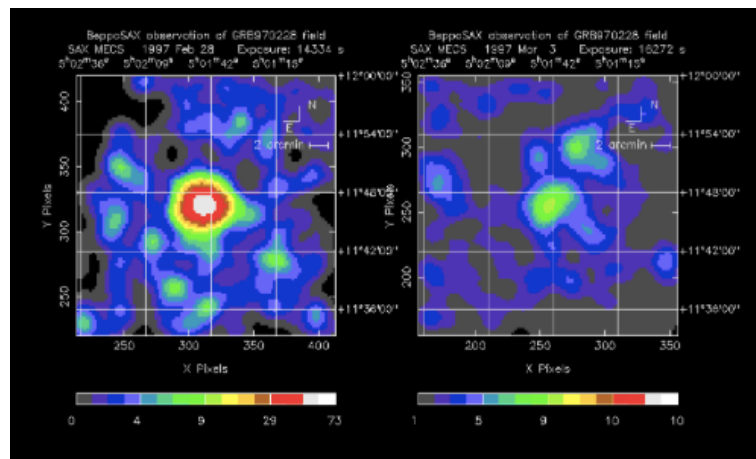


図 2.9: BeppoSax/MECS による X 線残光の様子。GRB970228 検出から 8 時間後 (左) と 3 日後 (右) の残光。 (Costa et al. 1997)

初めて残光が観測されたのは、1997 年 2 月 28 日に BeppoSax が検出した GRB980228 の発生した位置から放射された X 線である (Costa et al. 1997)。BeppoSax/GRBM による GRB970228 の検出、そして位置決定後、8 時間後から同衛星搭載の Narrow Field Instruments (NFIs) がその方向の観測を始めたところ、X 線で輝く天体が発見された。さらなる観測で、その天体は数日かけてべき関数に従って減光する様子がみられ、また可視光での放射も確認された。BeppoSax の観測

によって得られた残光の様子を図 2.9 に示す。

また残光の観測によって、初期放射では見られない特徴的な構造がスペクトルに現れるため、赤方偏移が同定できるようになった。これまで観測された GRB の多くは赤方偏移 $z \sim 1$ 以上の遠方で発生していることが示された。このように残光の発見は、人類が GRB に対する理解をさらに深めるきっかけとなった。

2.2 ガンマ線バーストの位置決定

GRB は全天からランダムに発生するため、それまでの指向性の強い検出器では検出が困難であった。そのため、GRB 観測に特化した検出器の多くは X 線ガンマ線の有効面積を大きくして、ほぼ全天に対して視野を持つように設計され、その発生を待ち構えるという手法が取られてきた。しかし、視野を制限しないように設計された検出器では、光子の到来方向を判断することができないため、GRB の発生位置を決定するために工夫が必要になる。Swift/BAT や INTEGRAL/IBIS(Winkler et al. 2003, Ubertini et al. 2003) のように符号化マスクという特殊な光学系を用いて GRB の位置を判断できる検出器も存在するが、そのような光子の入射方向を制限する機能を持たない検出器で行われてきた GRB 位置決定手法について述べていく。その多くは、図 2.10 に示すように、複数の検出器の幾何学的構造または配置を利用してカウント比から光子の入射方向を推定するというものである。検出器の検出効率のエネルギー依存性を無視すると、検出器によるカウント数は入射光子の方向 θ から見込む面積に比例するため、角度に対して $\cos \theta$ の依存性をもつ。例えば図 2.10 左のように 90 度配置が異なる検出器があると光子の入射角度 θ に対して各検出器のカウント数は図 2.10 右のようになる。検出器 1 のカウント数は、正面からの入射である入射方向 1 で最大となり、角度に応じて減少する。一方、検出器 2 のカウント数は検出器 1 とは逆の応答をする。したがって、カウント比は $\tan \theta$ の依存性を持つことになり、カウント比から入射方向を求めることができる。例えば、カウント比が 1 であれば、入射方向 2 のような検出器 1,2 の中間からの入射であると言える。これを利用した検出器について概説した後、複数の衛星を利用した位置決定方法についても述べる。

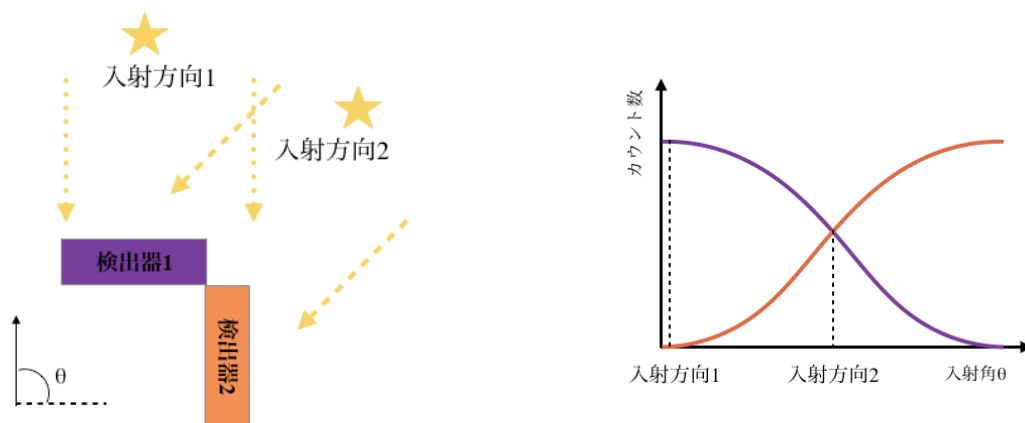


図 2.10: カウント比による光子の到来方向推定の概念図

2.2.1 CGRO/BATSE

Compton Gamma-Ray Observatory(CGRO)はGRBの研究を主目的として製作され1991年4月5日に打ち上げられ2000年まで運用された。CGRO衛星には、Burst And Transient Source Experiment(BASTE)、Oriented Scintillation Spectrometer Experiment(OSSE)、the Imaging Compton Telescope (COMPTEL)、そしてthe Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET) という4つの検出器が搭載された。そのなかでもBATSEは、20 keV - 10 MeVのエネルギー帯域で全天を監視しており、ガンマ線バーストなどの突発天体を検出する。BATSEは、Large Area Detector(LAD)とSpectroscopy Detector(SD)という2種類の検出器のペア8組で構成されている。それぞれがコンプトン衛星の隅に配置されているため、BASTEには視野を妨げるものがなく全天に対して感度を持つ。CGRO衛星とBATSEの外観図と特性をそれぞれ図2.11、表2.1に示す。

表 2.1: BATSE の基本性能

項目	LAD	SD
物質	NaI(Tl)	NaI(Tl)
感度帯域	20 keV – 1.9 MeV	10 keV – 100 MeV
エネルギー分解能	27 % @ 88 keV	27 % 88 keV
時間分解能	2 ミリ秒	2 ミリ秒
幾何学的面積	2025 cm ²	127 cm ²

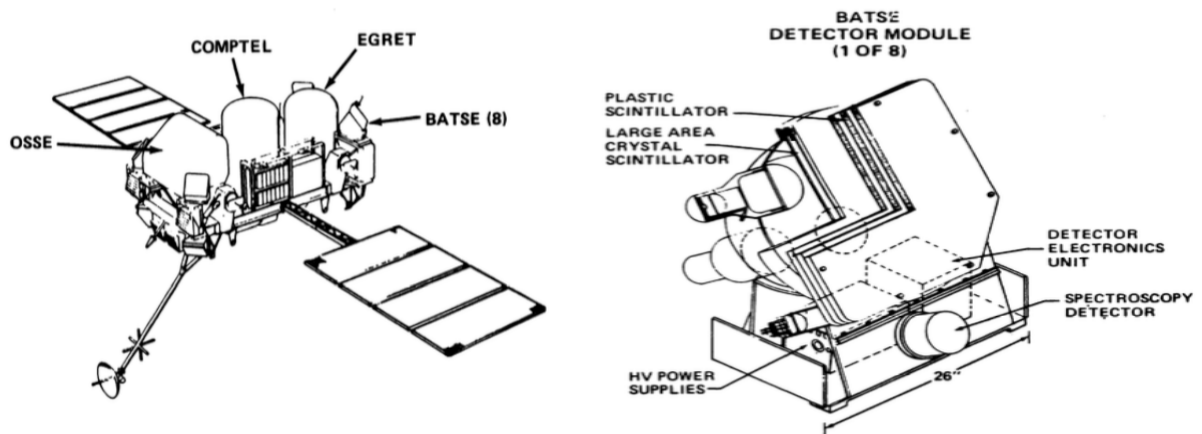


図 2.11: 外観図。左:CGRO 衛星。右:BATSE(Fishman et al. 1985)

BASTEにおいてGRBの位置を決定するのは、巨大な幾何学的面積で光子を検出するLADを利用して行われる。LADのセンサーは直径50.8 cm、厚さ1.27 cmの厚いNaI(Tl)シンチレーションカウンタであり、荷電粒子からセンサーを守るためにプラスチックシンチレータに覆われている。LADの有効面積は、線源への視野角に対してcos関数のように振る舞う。したがって、GRBによって最もよく照らされた3つの検出器の比を利用してその入射方向を独自に決定することが可能となる。最終的なGRBの位置は、モンテカルロシミュレーションによってモデル化された各面のカウント比と実測カウント比を χ^2 アルゴリズムで比較して、それが最小値を示す角度とする。この方法のパラメータは、バーストの位置を示す角度、フラックス、スペクトルをpower-law

と仮定した時の光子指数の3つである。これらのパラメータは検出器の応答関数にまとめ、バーストのスペクトルを仮定すればカウント数 $C_i^d(\beta)$ が決定できるので、以下のように表せる。

$$C_i^d(\beta) = \int_0^\infty R_i^d(E, \theta, \phi) f(E, A, \alpha) dE$$

ここで、 R_i^d は角度 (θ, ϕ) から入射したエネルギー E を持った光子のに対する応答関数を示し、センサー $d(0,1,2,...,8)$ のチャンネル $i(1,2,3,...)$ を表す。 f は GRB のスペクトルを仮定したものである。また、 α はスペクトルの光子指数、 A は 10 keV 以上の帯域における全フラックス、そして $\beta \equiv (A, \alpha, \theta, \phi)$ は仮定した GRB のパラメータを示す。このモデルとバックグラウンドを引いた後の実測カウント数を χ^2 法により、GRB をよく検出していた3つの検出器に対して各エネルギーチャンネル毎に比較する。観測した GRB のカウント数を $\tilde{C}_i^d$ 、その統計誤差を $\sigma_{i,d}^2$ とすると、次の式が最小となるパラメータ β を求める。その時の (θ, ϕ) をその GRB の到来方向とする。

$$\chi^2(\beta) = \sum_{i,d} \frac{[\tilde{C}_i^d - C_i^d(\beta)]^2}{\sigma_{i,d}^2}$$

この位置決定における系統誤差は約 4° 、GRB の明るさに依存する統計誤差は、検出限界の明るさのイベントで約 13° であった (Fishman et al. 1994)。

2.2.2 BeppoSax/GRBM

イタリアの衛星 BeppoSax は 1996 年 4 月 30 日に打ち上げられ、上空 600 Km、傾角 3.9° の周回軌道に投入された。BeppoSax はこの軌道を周回することによって、地上基地の上空を 11 分ごとに通過するため、データのダウンロードや GRB を検出した際の姿勢制御指示や GRB 検出の即時通報を行える点で有利であった。

図 2.12 に BeppoSax には示すように、大きく分けて Narrow Field Instruments(NFIs) と Wide Field Cameras(WFCs) の2種類の科学機器が搭載されている。NFIs は全て同じ方向に視野を持ち、Low Energy Concentrator Spectrometer(LECS)、Medium Energy Concentrator Spectrometer(MECS)、High Pressure Gas Scintillation Proportional Counter(HPGSPC)、そして Phoswich Detection System(PDS) に分けられる。WFC は符号化マスクの機能を備えており、2つの検出器で反対方向をそれぞれ観測している。

PDS の4面を囲むように配置された CsI(Na) シンチレーションカウンターは、PDS の反同時計数検出器 (Lateral Shields: LSs) の役割を持つ。さらに、LSs は1面の幾何学面積が 1136 cm^2 と大きく、40 - 700 keV のエネルギー帯域を持つ非撮像型の検出器 Gamma-Ray Burst Monitor(GBRM) として GRB の全天モニターを行うために利用される。また、符号化マスクを備え GRB 位置決定が可能である WFSs の視野が $20^\circ \times 20^\circ$ であるのに対して、GBRM は全天に対して視野を持つ。ただし、その代わりに光子の到来方向を判断する機能を持たない。BeppoSax に搭載されている検出器の基本性能を表 2.2 示す。

BeppoSax 搭載 GRBM による GRB 位置決定方法も、各面のカウント数と応答関数を比較することでなされる。まず、GBRM のエネルギー応答関数は、MCNP(Monte Carlo N-Particle) シミュレーションツールキットを利用して各角度、各エネルギーステップで 5×10^6 の平行光を入射させ、

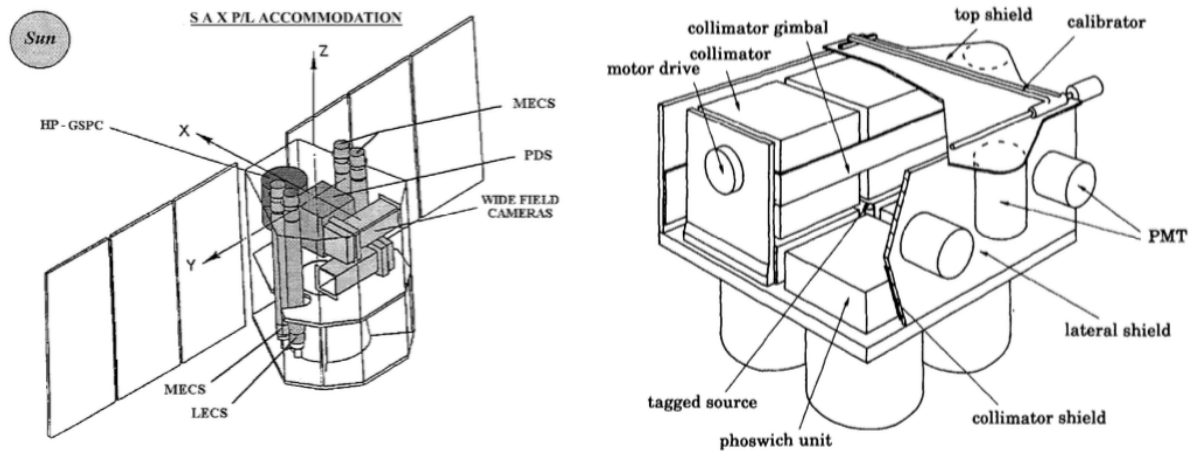


図 2.12: 外観図。左:BeppoSax に搭載されている科学機器 (Boella et al. 1997)。右:PDS(Frontera et al. 1992)

表 2.2: GRBM の基本性能

検出器	GRBM
エネルギー帯域	40 - 700 keV
視野	全天
有効面積	500 cm ² @ 300 keV
エネルギー分解能	30(E/100) ^{-0.4} %
時間分解能	1 秒

40 - 700 keV の帯域で GRBM が検出するカウント数 $N_i^{GRBM}(E_j, \theta_m, \phi_l)$ を計算することによって求められる。ここで、 i は GRBM の Unit($i=1,2,3,4$)、 E_j は入射光子エネルギー ($j=1,2,\dots,10$)、そして入射角度 (θ_m, ϕ_l) ($m = 1,2,\dots,36$ 、 $l = 1,2,\dots,16$) を表す。初期入射角度、エネルギーステップは、以下のように分割している。PDS を中心とする天球に対して、方位角方向 $0^\circ < \phi < 360^\circ$ を 36 分割、天頂角方向 $-70^\circ < \theta < +80^\circ$ を 16 分割する。光子のエネルギーを 30 - 1000 keV を対数で 11 ステップに分ける。GRB のスペクトルが光子指数 α_k のべき関数 $N(E) \propto E^{-\alpha_k}$ と仮定して、角度 (θ_m, ϕ_l) から入射したとすると、40 - 700 keV の帯域で Unit i の GRBM が検出するカウント数は次の式で表せる。

$$C_i^k(\theta_m, \phi_l) = \sum_{j=1}^7 \Delta E_j E_j^{-\alpha_k} N_i^{GRBM}(E_j, \theta_m, \phi_l)$$

光子指数 α_k は 1.0, 1.5, 2.0 ($k = 1, 2, 3$) を仮定する。

これを利用して、GRB の位置として最もよく推定される角度は、次の χ^2 を最小にすると考えられる。

$$\chi_k^2(\theta_m, \phi_l) = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{(\sigma^2)_i^k} (n_i - \frac{n C_i^k(\theta_m, \phi_l)}{C^k(\theta_m, \phi_l)})^2$$

n_i は Unit i の GRBM の実測 GRB カウント数、 $(\sigma^2)_i^k$ は $n_i + C_i^k(\theta_m, \phi_l)$ の分散であり、 $n = \sum_i n_i$ 、 $C^k(\theta_m, \phi_l) = \sum_i C_i^k(\theta_m, \phi_l)$ となる。

シミュレーションにおいて光子の入射角度は $10^\circ \times 10^\circ$ ごとに分割して設定しているため、bicubic スプライン関数で補間を行い、もっとも χ^2 が小さい角度を GRB の位置とする。

2.2.3 Interplanetary Network: IPN

複数の衛星を利用して三角測量法によって GRB の位置を求める手法を InterPlanetary Network(IPN) という。IPN は 1990 年に Ulysses 衛星の打ち上げと同時に開始され、現在では Suzaku を含めた 27 台の衛星が IPN に参加している。そのため常時全天を監視しているようなミッションであると言える。

IPN での GRB 位置決定方法は、衛星の軌道上位置、その間の光子の到来時間差を利用することである。ある 2 台の衛星、S1 と S2 を考えた時、S1 から見て S2 と GRB とのなす角を θ 、到来時間差を δt 、そして衛星間距離を D とすると、GRB の位置として考えられる方向は $\delta\theta$ の範囲に制限できる。位置決定の概略図を図 2.13 に示す。

$$\Delta\theta = \frac{c\Delta t}{D\sin\theta}$$

δt は同じエネルギーバンドでの時間差であることに注意する。これによって、天球上の $\delta\theta$ の幅を持つ円弧を描けることになる。これを 3 衛星間で計算できれば GRB の位置は 2 点に求めることができる。さらに、地球の位置や各検出器への入射角から 1 点に制限をつけることが可能となる。

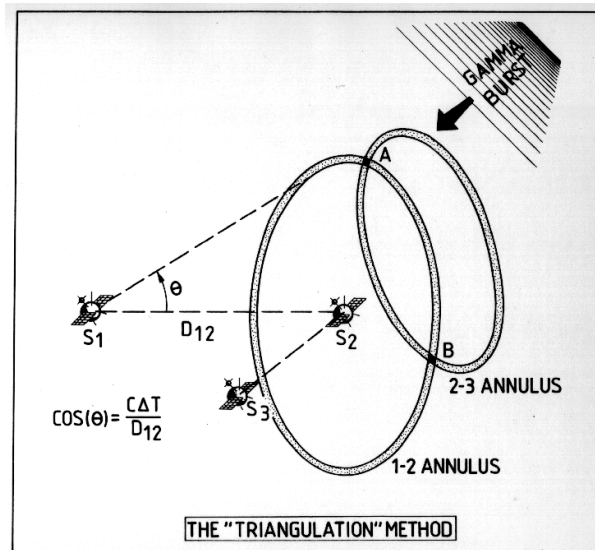


図 2.13: IPN によるガンマ線バースト光子の到来方向の制限 (<http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/>)

第3章 観測機器

3.1 すざく衛星

「すざく」は「はくちょう」、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」につづく、日本の5番目のX線天文衛星であり、2005年7月10日、日本の内之浦宇宙センターから打ち上げられた (Mitsuda et al. 2007)。「すざく」はX線分光器 (X-Ray Spectrometer: XRS: Kelley et al. 2007)、X線撮像検出器 (X-Ray Imaging Spectrometer: XIS: Koyama et al. 2007)、硬X線検出器 (Hard X-ray Detector: HXD: Takahashi et al. 2007, Kokubun et al. 2007) という3つの検出器を搭載しており、銀河団やブラックホールなどの天体をこれまでにない高感度、広帯域同時観測という利点を生かして、宇宙の進化を解き明かすために運用された。宇宙最大規模の構造である銀河団の合体やその形成進化や、活動銀河核の中心でガスに埋もれたブラックホールを発見するなどの成果をあげた。ただし、XRSについては打ち上げ直後にアクシデントに見舞われ、液体ヘリウムを消失してしまったため観測不可能になってしまっている。「すざく」は2014年8月頃からバッテリーの劣化に伴い電力不足に陥ってしまったため、日照角がよくなる条件の時のみ観測を行う運用が続けられていたが、2015年8月、当初の科学目標継続運用期間である2年を大幅に延長して続けられた約10年の運用が終了した。

3.2 硬X線検出器 (Hard X-ray Detector: HXD)

HXDは徹底的な反同時計数により、この帯域でそれまでにない高感度を達成していた検出器である。HXDの外周を囲むシンチレーション結晶は、反同時計数を行うためのアクティブシールドであるとともに、「すざく」の第4の検出器として積極的に利用され、広帯域全天モニター (Wide-band All-sky Monitor: WAM: Yamaoka et al. 2007) と呼ばれる。以下に、HXDとWAMの詳細を述べる。

HXDは、高バックグラウンド除去能力を有する非撮像型の高感度硬X線検出器であり、 4×4 の複眼構造からなる井戸型フォスウィッチカウンター (Well Unit) と、その外周を囲む20本のアクティブシールド部 (Anti Unit) で構成されている。Well Unitは、BGO結晶からなる井戸部 (Well) の底にSi半導体検出器 (PIN検出器) と $\text{Ge}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$ (GSO) 結晶シンチレーションカウンターが順に配置された構造になっている。さらに井戸型部分の最底部にはPMTが接着されたBGO (Bottom) があり、これらをGSOとのフォスウィッチカウンターとして機能させている。これらWell UnitのBGO部分 (Well, Bottom) とGSOを合わせてWANTIと呼ぶ。HXDの概略図を図3.1、Well Unitの構造を図3.2に示す。

HXDの特徴として、徹底的なバックグラウンド除去による高感度観測が可能であるという点があ

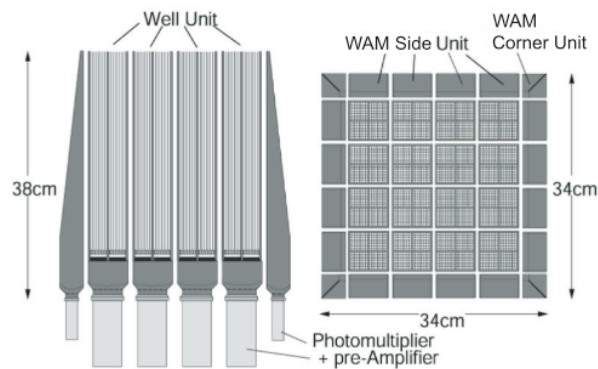


図 3.1: HXD 概略図 (Yamaoka et al)

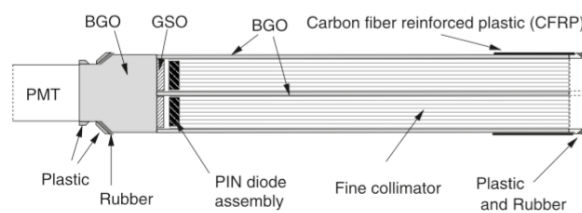


図 3.2: Well Unit の概略図 (Takahashi et al. 2007)

げられる。HXD の高感度観測は、複眼的に配置された Well Unit 間同士の反同時計数、外周を囲む Anti unit のシールド機能、そして視野を絞るという三段階によって実現される。まず井戸型の形状の底に主検出部を配置することに加えて、井戸をファインコリメータによって仕切ることによって視野を制限する。視野を絞ることによって、対象天体以外からの漏れ込みを防ぐことができる。ファインコリメータはパッシブであるが、素材にリン青銅を採用することによって、エネルギーによって透過する光子数を変えることができる。そのため、10 – 100 keV の低エネルギー光子にはファインコリメータが見えるため、さらに視野が制限され $0.56^\circ \times 0.56^\circ$ を達成する。視野外から降り注ぐ宇宙線由来のバックグラウンドに関しては、Anti Unit のシールド機能によって排除している。それでも防ぎきれないイベントについても、シールド部をアクティブにすることによって、Well Unit と Anti Unit の両方で検出されればそれを視野外から入射した光子のコンプトンイベントであると判断して除去することができる。さらにこれを複数の Well Unit 間で検出した場合についても適用している。表 3.1 に HXD の基本性能を示す。

3.3 広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor: WAM)

HXD の Anti Unit は、HXD 検出器を劣化させたりバックグラウンドの原因となる宇宙線から検出器を守るシールド、または反同時計数検出器として重要な役割を担う。しかし、そのガンマ線阻止能力の高さや、広い視野を生かして積極的に一つの検出器として利用しており、広帯域全天モニター (Wide-band All-sky Monitor: WAM) と呼ばれる。WAM は 1 つの面で 800 cm^2 という幾何学面積を持ち、原子番号の大きい物質を使用しているため、特に $\sim \text{MeV}$ 帯域において他の全天モニターと比較しても広い有効面積を持つ。図 3.3 に WAM と他の検出器の有効面積を示

表 3.1: HXD 基本性能

エネルギー帯域	10 – 600 keV
エネルギー分解能	~ 9%(FWHM) @ 662 keV ~ 3.0 keV(FWHM) @ 10 – 40keV
有効面積	160 cm ² (< 30 keV) 330 cm ² (> 40 keV)
視野	0°.56 × 0°.56 (< 100 keV) 4°.6 × 4°.6 (> 200 keV)
バックグラウンドレート	~ (1 – 5) × 10 ⁻⁵ c sec ⁻¹ cm ⁻² keV ⁻¹
時間分解能	61 μsec

す。また、HXD を囲むように配置された WAM は全天のほぼ半分に対して感度を持つ。そのため、GRB や太陽フレア、軟ガンマ線リピーターといった突発天体を年間 230 イベントあまり検出してきた。表 3.2 に WAM の基本性能を示す。

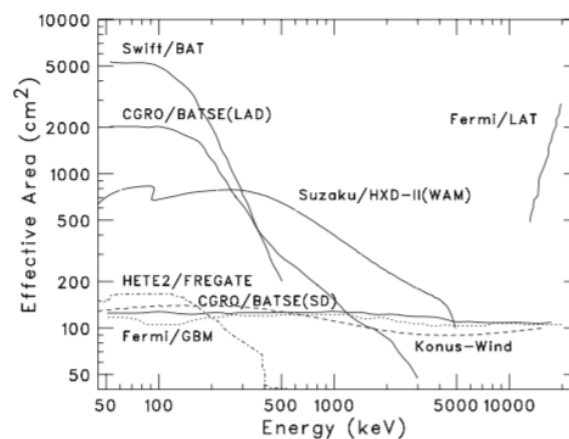


図 3.3: 全天モニターの有効面積

表 3.2: WAM 基本性能 (Yamaoka et al. 2009)

センサー物質	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)
エネルギー帯域	50 – 5000 keV *
視野	~ 2 π str
幾何学面積	800 cm ²
有効面積	400 cm ² @ 1 MeV
エネルギー分解能	~ 30% @ 662keV
時間分解能	1/64 s (バースト前後 64 秒間) 1 s (常時)

* ゲイン変動あり

3.3.1 WAM の構造

WAM は HXD の外周に並べられた 4 隅の Anti Unit を除く 16 本の厚さ 4.0 cm の BGO 結晶によって構成される。各面 4 つの Unit の信号はひとつのアナログデジタル変換回路 (Transient data Processing Unit: TPU) によってたし合わされ、1 つの検出器のように振る舞う。そのため、4 つの面はそれぞれ WAM0、WAM1、WAM2、WAM3 と呼ばれる。WAM の BGO 結晶は、高さ 38 cm、幅 5.7 cm、厚さが平均 2.6 cm となっており先端の方が薄くなる形状をしている。これは、Well Unit の主検出部からみて同等の厚さを持つように設計されたためである。シンチレーション光を PMT まで運ぶために反射材として、結晶表面に BaSO_4 を塗布してある。WAM のセンサー部の部品の詳細を図 3.4 に示す。また、HXD の中心を原点として、HXD の開口部方向を $\theta = 0^\circ$ 、底面方向を $\theta = 180^\circ$ とする。そして、各面の正面方向をそれぞれ WAM0 ($\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$)、WAM1 ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$)、WAM2 ($\theta = 90^\circ, \phi = 270^\circ$)、WAM0 ($\theta = 90^\circ, \phi = 180^\circ$) とする (Yamaoka et al., 2009)。

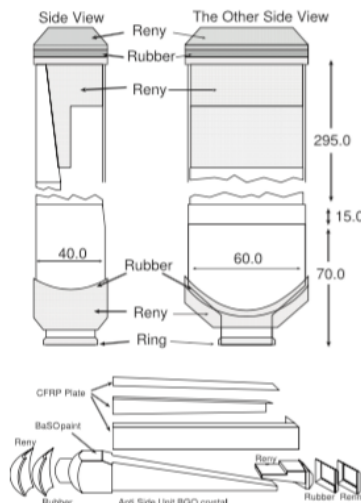


図 3.4: WAM センサー部の部品 (Yamaoka et al. 2009)

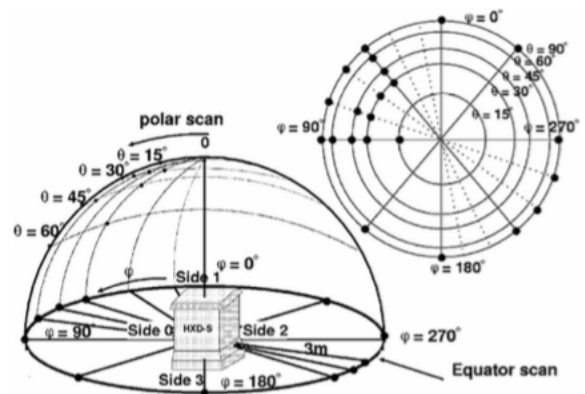


図 3.5: WAM 角度定義 (Ohno et al. 2005)

3.3.2 Transient data Processing Unit(TPU)

TPU は WAM の電気信号処理回路であり、各 Unit からの反同時信号 (hit pattern) の生成と信号の波高値の ADC 変換を行う。図 3.6 に処理の流れを示す。hit pattern は HXD の PIN と GSO の反同時計数が判断され、機上バックグラウンド除去処理を行うのに使用される。ADC 変換された信号はヒストグラムとして蓄積され、スペクトル解析や時系列解析をするために使用される。スペクトル解析に使用されるのは、pulse height history(PH) とよばれその波高値に応じて 55 チャンネルに分けられる。time history(TH) データは時系列解析をする際に用いられ 4 チャンネルに分けられる。これらのデータの積分時間は 1.0 秒であり TRN データとよばれ、常時保持される。表 3.3 にデータのバンドとエネルギーの対応を示す。

表 3.3: WAM のエネルギーとバンドの対応

バンド		エネルギー範囲 *
TH0	PH 2-3	50 - 110 keV
TH1	PH 4-7	110 - 240 keV
TH2	PH 8-16	240 - 520 keV
TH3	PH 17-54	520 - 5000 keV

* 対応するエネルギー範囲は観測時期によって変動する。

TPU では TRN データの他に、より時間分解能が良い BST データを生成することができる。これはバックグラウンドの揺らぎより充分統計的優位に急激なカウントレートの上昇が見られた時にトリガーがかかる。そのトリガーがかかる条件は以下の式で表される。

$$S\Delta t - Bg\Delta t > \sigma\sqrt{Bg\Delta t}$$

ここで、 S はある時刻における全カウントレート、その時刻より前の 8 秒間積分したカウントレートを Bg 、 Δt はサンプリングする時間間隔、 σ が優位度である。4 つの面のうち一つでも、設定された優位度以上の上昇があった場合に BST データを生成する。BST モードでは TH データは 1/64 秒、PH データは 0.5 秒の時間分解能を持つ。TRN モードと BST モードの持つ値を表 3.4 に示す。

表 3.4: TRN データと BST データ

データ	チャンネル数	時間分解能	時間範囲
BST	TH	4	64 秒 (トリガー前 8 秒, 後 56 秒)
	PH	55	
TRN	TH	4	常時
	PH	55	

Suzaku 衛星は傾角 31° の低軌道で地球を周回するため、南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly: SAA) を 1 日に 10 回程度通過する。SAA とは、高エネルギーの荷電粒子が異常に滞留している領域のことを指す。通常太陽フレアや宇宙線由来の荷電粒子は、地球磁場に巻きつきヴァンアレン帯を形成する。地球においては地軸と磁軸が傾いているために、それが南大西洋上空において高度数 100km にまで落ち込むことで、SAA が形成される。Suzaku 衛星が SAA を通過する際、高エネルギーの荷電粒子が BGO 結晶に入射し相互作用すると、大量のシンチレーション光が発生するため、PMT を劣化させる要因となる。そのため、Suzaku 衛星が SAA を通過する際には自動的に高電圧を落とすようなシステムが組み込まれている。

WAM のエネルギー帯域は、BGO 結晶に接続する PMT のゲインに依存する。しかし、PMT の経年劣化は防ぐことがほぼ不可能であるため、打ち上げ後も各 Unit の PMT のゲインをモニタリングする必要がある。SAA を通過すると周りの物質が放射化してしまい、それによる電子陽電子対消滅によって生じる 511 keV 放射が見られる。打ち上げ当初はこの 511 keV ラインが ADC チャ

表 3.5: WAM の 10 年間の突発天体の観測実績

天体	観測数
GRB	1284
SGR/AXP	329
太陽フレア	746
計	2359

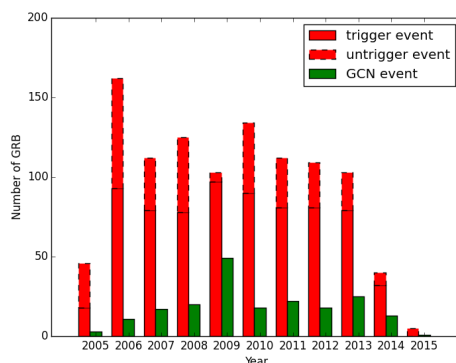


図 3.7: 検出した GRB 総数 (赤) とそのうち GCN 投稿されたイベント数 (緑)。

Untrigger データや、他衛星との同期が見られないイベントが多いため、光度曲線や検出した面などの特徴から経験的にその種類のイベントであると思われるものも含む。WAM がスペクトル解析できるイベントは、他衛星によって突発天体の位置が決定されている必要がある。そのため、最終的にスペクトル解析されている GRB の数は全検出数の約 15% である 197 イベントにとどまる。

3.3.4 WAM の GRB 位置決定能力の検証

WAM のカウント比を利用して GRB の位置を決定しようとする試みは既に行われており、位置がよく決定されている 51 の GRB を用いて検証したところ、その精度は $5^\circ - 10^\circ$ であると報告されている。ただし、この study では θ 方向を全く考慮していない。

この方法では、BGO 結晶が薄い板であることに加え、周りの物質による吸収や散乱がないという仮定のもと、カウント比が光子の入射角度 ϕ の関数 $\tan \phi$ で近似できることを利用した。カウント比は GRB のバックグラウンドを差し引いた後の 200 keV 以上の帯域のカウント数を使用し、GRB によって明るく照らされた 2 つの面の比を求める。図 3.8 にカウント比の入射角度 (ϕ) 依存性を示す。 $\phi = 220^\circ - 320^\circ$ を除いて、ほぼすべての GRB についてカウント比が $\tan \phi$ の依存性に従っていることがわかる。またモンテカルロシミュレーションと RI ビーム実験での結果との比較もされており、単純な $\tan \phi$ の依存性には従わない複雑な角度応答を持つこと示している。このことから、WAM の角度応答を調べるためにはモンテカルロシミュレーションまたは実験で求めなければいけないと考えられる。この研究において、その精度は約 5° 程度ではあるが、IPN によって推定される 2 方向のうちの一方に制限をつけることは十分可能であるという結果になった。

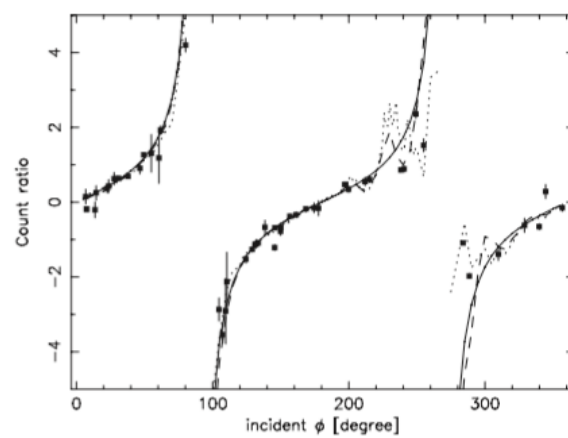


図 3.8: WAM のカウント比の ϕ 方向依存性。実線: $\tan \phi$ 、破線: 地上較正試験結果、点線: シミュレーション結果

第4章 WAMのエネルギー応答関数

4.1 エネルギー応答関数

天体からの信号を正しく評価するためには、検出器の応答をできるだけ正確に把握することが重要である。検出器が受け取った天体からの信号はパルスハイト空間において出力されるが、それは検出器固有の変換を吸収したものであり、我々が必要とするのは天体からの光子スペクトルである。そこで、実際の検出器応答を模擬し、その間の変換を行うのがエネルギー応答関数である。センサー内で起きる各相互作用の確率や角度応答、ゲイン補正、パルスハイトからエネルギーへの変換など様々な検出器応答を詳細に把握して、取得したパルスハイト空間のカウント数分布から天体からの光子スペクトルに戻すことが重要である。

一般的に、エネルギーを M ビン、パルスハイトが N チャンネルとしたとき、エネルギー応答関数はエネルギーとパルスハイトの $M \times N$ の行列で表される。したがって、我々が得られる検出器からのデータは、天体からの光子スペクトル $f(E_i)$ とエネルギー応答関数 $R(E_i, PH_j)$ の重ね合わせによって決定されるパルスハイト分布 $PH_{\text{detect},j}$ となる。

$$PH_{\text{detect},j} = \sum_i R(E_i, PH_j) f(E_i)$$

理想的な検出器であれば、行列は対角成分のみで表され、エネルギーとパルスハイトの変換は一意に決定できる。つまり、エネルギー応答関数の逆関数を取得したパルスハイト分布に演算することで、天体からの光子スペクトルを決定できる。しかし、実際の検出器では、仮にエネルギー E_i の単色光が検出器に入射した場合でも、全ての光子がそのエネルギーに対応するパルスハイト PH_j として読み出されるとは限らない。単色光が入射した時の、シンチレーションカウンタのパルスハイト分布の概念図を図 4.1 に示す。このように光子の全エネルギーを失う光電吸収によるピークの他に、一部のエネルギーのみ失うコンプトン散乱による連続部、コンプトンエッジによって応答が複雑化しパルスハイト分布が広がってしまう。この他にも、電子陽電子対生成や、原子内の電子が殻遷移することによる K 輝線など様々な相互作用が起こり得る。それらは物質の散乱断面積や幾何学的構造によって決定されるため、検出器固有の応答となる。また、実際には信号のポアソン揺らぎや把握しきれない検出器応答により非対角成分にも広がることになる。このような場合は、光子スペクトルの自由度 i が多い為、応答関数の逆行列を演算することによって光子スペクトルを決定するのは困難となる。そのため、光子スペクトルモデルを仮定し、エネルギー応答関数を演算することで予想されるカウント数スペクトルを求め、それを観測結果と χ^2 法によって比較するという統計的手法を利用することによって、我々は天体からの光子スペクトルを推定している。したがって、天体からの信号を正しく評価できるかどうかは、エネルギー応答関数の再現性の精度によることになる。また、非対角成分の広がりや検出器のエネルギー分解能や系統

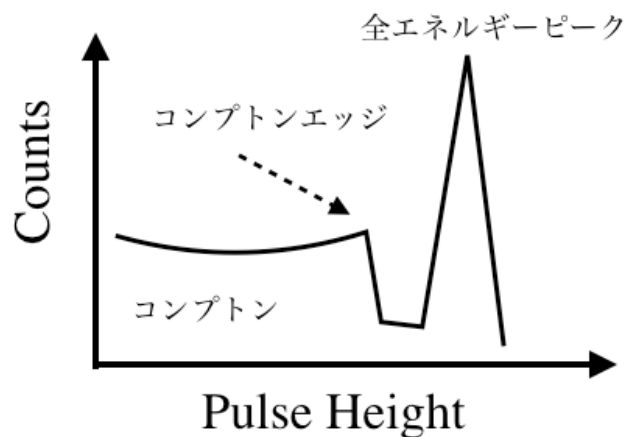


図 4.1: 単色光が入射した時の検出器応答の概念図

誤差として理解される。

エネルギー応答関数の構築には、本物の検出器や衛星を用いてあらゆる実験を行うことが理想である。しかし、実際には時間や予算、実験場の確保といった制約があり困難な場合が多い。そのため、モンテカルロシミュレーションを用いた手法が有効となる。

4.2 Geant4 ツールキット概要

モンテカルロシミュレーションとは、ある確率分布に従う乱数を用いて繰り返し試行することによって事象を再現することである。物理学において粒子の振る舞いは確率によって決定されるため、検出器の応答を調べるためにモンテカルロ法による数値計算が有効となる。現代科学の発展とともに検出器の大型化や複雑化が進み、その実験で起こりうる事象をあらかじめ解析的に求めることは困難だが、それらの制限を受けることなく、また柔軟に計算機上で実験を試行できるという利点を持つのがモンテカルロシミュレーションである。

Geant4 とは、物質と粒子の相互作用をシミュレーションするモンテカルロシミュレーションツールキットである (Agostinelli et al. 2003, Allison et al. 2006)。このツールキットは、高エネルギー物理学の加速器実験を行う欧州原子核研究機構 (CERN) を中心に開発され、現在では宇宙物理学、重粒子線治療などの医療分野、DNA への放射線による影響を調べる遺伝子分野への応用へと広がっている。使用できる粒子のエネルギーも加速器実験で行われるような高エネルギーだけでなく、 $\sim \text{eV}$ といった低エネルギー側にまで対応できるパッケージが提供されている。また、現在最新のものが Version.10.2 までが提供されている。

Geant4 はオブジェクト指向プログラミング言語である C++ で記述されており、シミュレーションの計算方法など詳細な内部構造の全てを把握していない初心者でも簡単なシミュレーションを始められるように設計されている。特に使用者は以下の 4 つを定義すればシミュレーションを行うことができる。また Geant4 開発者側で用意していない事象を扱うための実装も可能であり、シミュレータの開発に対して自由度が非常に高いことが Geant4 があらゆる科学分野で採用される理由のひとつである。

物理過程の定義

実施するシミュレーションにおいて考慮すべき粒子と物質の相互作用を設定する。Geant4では素粒子物理学や原子核物理学などの実験で得られた結果をもとに作成された物理モデルを多数用意しており、電磁相互作用、ハドロン相互作用、光学光子過程、崩壊過程、光・レプトンのハドロン相互作用、相互作用のパラメータ表現、粒子輸送過程に分けられる。Geant4は広範囲のエネルギーを扱えるが、これらのモデルはそれぞれ適用できるエネルギー範囲が限定されているため、使用者は自身の目的に合わせて必要なモデルを選択、または拡張実装する必要がある。

Geometry の定義

大きさや形状、構成物質、配置の仕方など粒子と相互作用する物質の定義を行う。単体だけでなく化合物、混合物、同位体元素などの性質に加えて、固体、液体、気体、そしてそれらの温度や圧力など様々なパラメータに対して自由に設定することができる。さらに電磁場を設定することも可能である。正確なシミュレーション結果を得るためには、検出器だけでなくその他の実験環境をできるだけ正確に再現することが重要である。再現された計算機上のGeometryは、マスモデルと呼ばれる。

初期入射粒子の定義

シミュレーションにおける粒子の初期条件を記述する。設定可能なパラメータは入射粒子の種類、電荷、エネルギー、運動量、偏曲率、初期位置などあらゆる条件を試行することができる。またGeant4もスペクトル分布の設定などより複雑な条件を設定するためのクラスを用意しているが、使用者が自らコーディングすることによってさらに柔軟な初期条件の設定も可能である。

検出アルゴリズム

シミュレーションを行い必要な情報を抽出する条件や方法を記述する。シミュレーション中は相互作用により発生した二次粒子も含めて全ての粒子の飛跡を追跡するため、あらゆる情報の取得が可能である。ただし、Geant4は相互作用や粒子輸送を計算するだけであるため、検出アルゴリズムを記述するのは実際の検出器応答を詳細に理解して適切な方法を記述するように注意する必要がある。また、抽出できるのは損失エネルギーであるため、エネルギー分解能を考慮したりパルスハイトに変換するといった後段のアナログデジタル回路の処理を模擬する部分は使用者の仕事となる。これをDigitizationという。

4.3 WAM のエネルギー応答関数

WAMのエネルギー応答関数は、エネルギー分解能、Unitの形状、光量線形性、コンプトンイベントの影響などにより非常に複雑である。また、WAMはSuzaku衛星の内部に位置しており、入射してきた光子が衛星構体や他の検出器などによって散乱吸収されてしまう。図4.2は511 keVの光子を全天から入射させた時、周りの物質によって吸収される割合を調べた結果である(Terada et al. 2005)。このように、WAMは視野のほぼ全方向に対して他の物質の影響を受けており、角

度応答が複雑であるため、応答関数も入射角度によって大きく変化する。そのため、WAM でスペ

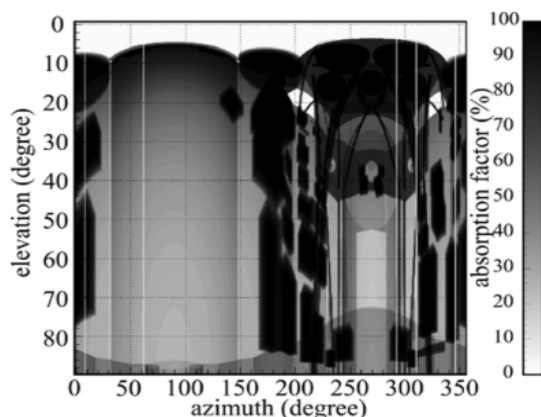


図 4.2: HXD 511 keV ガンマ線に対する吸収率 (Terada et al. 2005)

クトル解析するためには GRB の天球上の位置情報が必須であり、イベントごとにエネルギー応答関数を作成している。WAM の観測対象のひとつである GRB は全天からランダムに 1 日に 1 イベント程度発生する。それらに対してエネルギー応答関数を解析的に解いていくのは現実的な方法ではない。したがって、WAM チームはエネルギー応答関数を Geant4 ツールキットを利用したモンテカルロシミュレーションによって作成している (Ohno et al. 2005)。以下にその概略を述べる。

4.3.1 Suzaku マスモデル

Geant4 ツールキットをベースとした Suzaku マスモデルが構築されている (Ozaki et al. 2005, Terada et al. 2005)。このモデルは、衛星設計計画書を元に構築されており、衛星全体の質量やその幾何学的配置を再現している。

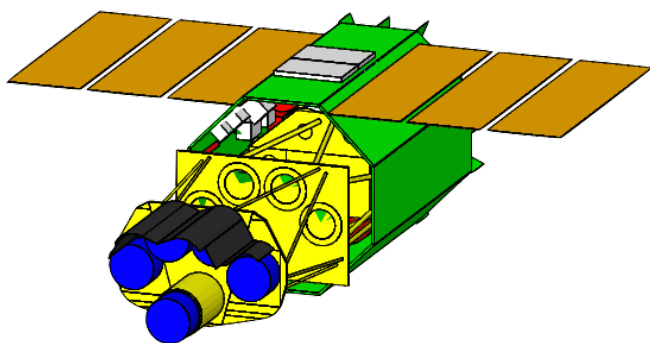


図 4.3: すざく マスモデル

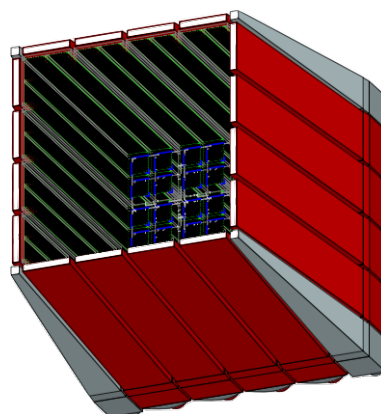


図 4.4: WAM マスモデル

4.3.2 地上校正試験

2003 年から 2004 年にかけて地上校正試験が実施されている。目的としては、各 Units の特性を理解すること、衛星に搭載する前後で角度応答の変動を評価することである。これらの試験の結

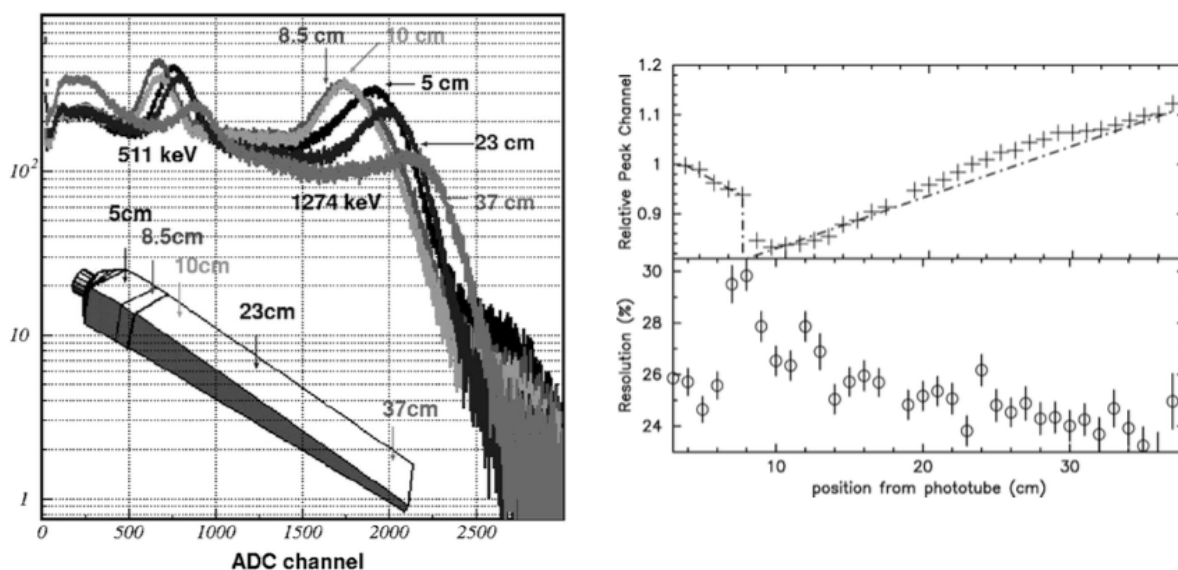


図 4.5: 光量位置依存性 (Ohno et al. 2005)

果は、Geant4 シミュレーションの Digitization の部分に反映させることでエネルギー応答関数構築に役立てられる。以下に実施された較正試験の結果を述べる。

Anti Unit は複雑な形状をしているため、BGO 結晶に入射したガンマ線の位置によって光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) に収集されるシンチレーション光がどの程度変化するのか調べる必要がある。²²Na からの 511 keV と 1274 keV を線源として、全 Unit に対して PMT から 5.0、8.5、10.0、23.0、37.0 cm の位置に線源を照射した。その結果を図 4.5 に示す。ピークチャンネルは PMT との接続面から 8.5 cm までは検出位置に対してほぼ一定だが、それより先端の方に光子が入射した場合、PMT からの距離に対して $\sim 1.25\% \text{ cm}^{-1}$ で徐々に上昇している。これは、WAM の複雑な構造によるものと、Unit の先端の方で放射されたシンチレーション光は PMT まで長い距離を進むためであると考えられている。同時にエネルギー分解能の測定も行われ、入射位置によって変わることが図 4.5 の下のパネルにあるような依存性を見せた。これはシンチレーション光の変化によるものであると考えられる。これによって得られた光量位置依存性は、以下の式で近似を行う。

$$LY(x, y, z) = \begin{cases} az + b & (8.5 \text{ cm} < z < 38.0 \text{ cm}) \\ c & (0 \text{ cm} < z < 8.5 \text{ cm}) \end{cases}$$

式における係数 a, b, c やエネルギー分解能の位置依存性を、較正試験結果として応答関数作成に取り込まれる。

シンチレーションカウンターでは、光子のエネルギー損失に応じてシンチレーション光を発する。理想的な検出器が存在し、全入射光子のエネルギーを検出器内に付与すれば、シンチレーション光量は入射光子エネルギーに完全に比例する。この性質は直線性と呼ばれる。しかし、物質の K 輝線周辺において光量の線型性が保たれず、非線形になることが知られている。WAM でも観測帯域の 91 keV に Bi 原子の K 輝線が存在しており、光量が非線形になると考えられる。それを確認するために、地上較正試験が行われた。図 4.6 は、⁵⁷Co を線源として 1 cm 立方の BGO 結晶

にガンマ線を照射した時の結果である。これにより、K 輝線周辺に明らかに非線形な構造がでることが確かめられた。

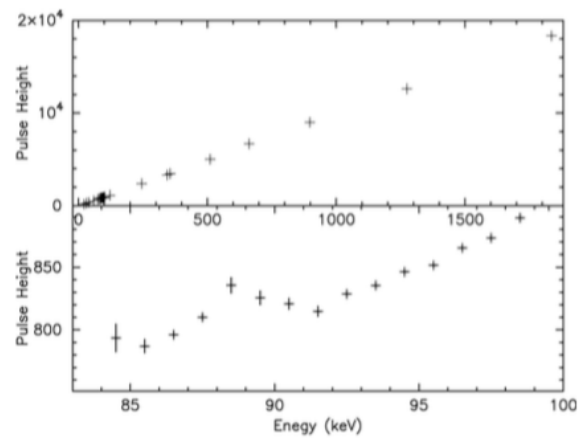


図 4.6: BGO 結晶のシンチレーション光量の非線形性 (Ohno et al. 2005)

4.3.3 機上校正試験

3.3.2 節で述べたように、WAM は SAA 通過直後にゲインスキャンを行い、511 keV ラインに対応する ADC チャンネルの変動をモニタリングしている。本来ならば放射化によるガンマ線は、検出器上で取り除ききれないバックグラウンドとなり正確な観測には邪魔なものである。しかし、WAM はそれを機上ゲイン校正に利用しており、打ち上げ直後 ADC15.5 チャンネルに対応していた対消滅 511 keV ラインの変動を評価している。図 4.7 に、ゲインスキャンによって得られたスペクトルを示す。12-13 付近にある盛り上がった構造が、511 keV ラインによるものである。SAA 通過後に必ず校正が行われ、観測日ごとにこの較正值を使用して応答関数のゲイン補正をしている。

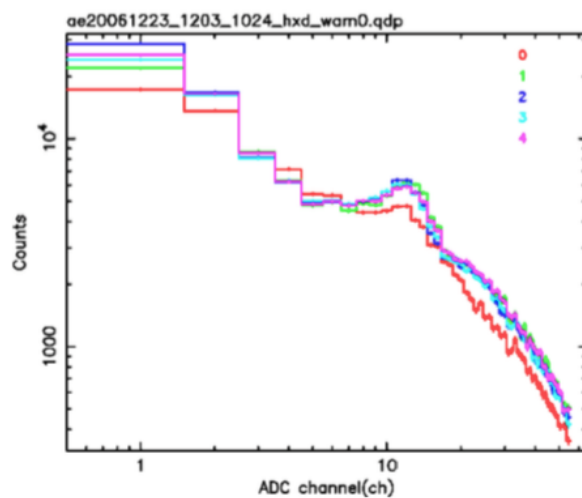


図 4.7: WAM スキャンスペクトル。色は Anti Unit の番号を示す。

4.3.4 WAM エネルギー応答関数の不定性

打ち上げ後、エネルギー応答関数のスペクトル再現性の不定性を評価するために、機上相互較正が行われた。WAM の観測するエネルギー帯域とほぼ同じ帯域で観測している Swift/Bat (Gehrels et al. 2004) と Konus-Wind (Aptekar et al. 1995) と同期観測された 24 の GRB に関するデータを交換した。3 衛星のスペクトルで同時 fit を行い、較正がよく行われている Konus-Wind の規格化因子を 1 としたときの WAM の相対的規格化因子を調べることによって、WAM のエネルギー応答関数の不定性を評価した (Sakamoto et al. 2009)。

図 4.8 にこの較正試験で用いられた 21 GRB の相対的規格化因子の入射角依存性を示す。これにより、WAM のエネルギー応答関数は 100 keV 以上の帯域において 10 – 40 % の不定性があることと、衛星構体などによる吸収の影響が最も少ない WAM0 が最も不定性が小さくなることがわかった。また、特に不定性が大きくなるのは、XRS の冷媒タンクが存在する WAM2 の正面方向 ($\theta \sim 225^\circ - 315^\circ$) と、WAM 各面の正面に対して 75° 以上の角度 (off-axis) であることが判明した。さらに、 ~ 120 keV 以下のエネルギービンに関しては、どの GRB についても不定性が 40% 以上存在する。この原因としては、BGO 結晶からのシンチレーション光の非線形性や、BGO 結晶を包む BaSO_4 と CFRP による吸収の再現性が悪いことが挙げられている。

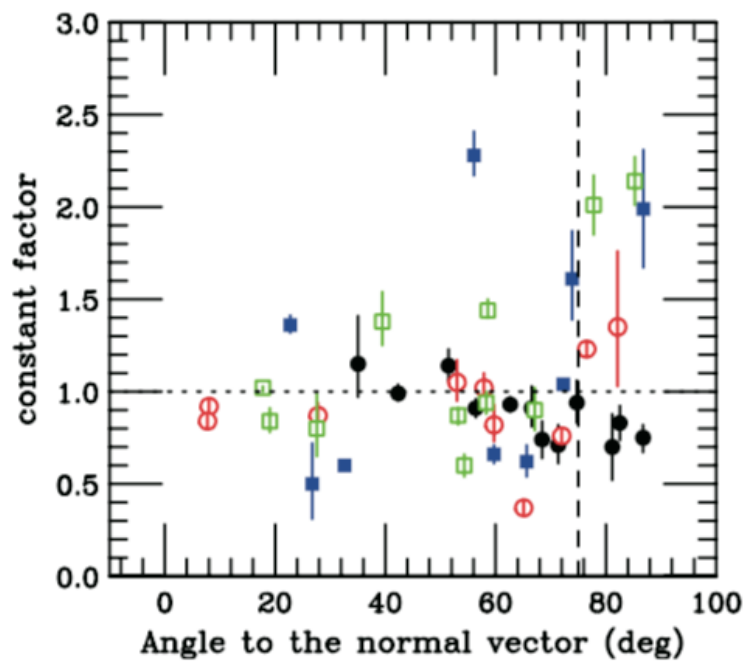


図 4.8: 面の正面からの離角に対する相対的規格化因子 (Yamaoka et al. 2009)

第5章 位置決定方法の開発

WAM 単独でのスペクトル解析をするためには、他衛星に頼らず WAM 単独での GRB の位置決定を可能にすることと、それによるエネルギー応答関数の不定性を評価する必要がある。本章ではまず、開発した GRB の位置決定方法について述べる。その方法の概要を述べた後、その 1 例として GRB140306A の結果を示す。

WAM 単独での GRB 位置決定は、各面のカウント比を実測値とシミュレーションで比較して χ^2 が最小となる角度を求めることによって行われる。これは、GRB によって明るく照らされた複数の検出器のカウント比を利用するというもので、CGRO 衛星搭載の BATSE などと同様の手法となる。WAM は 4 つの面からなりそれぞれが独立に計数可能であり、さらに HXD の底部 BGO 検出部である WANTI を加えた計 5 面を利用することができる。また、図 4.2 に示したように、WAM の視野では衛星構体や他検出器による吸収散乱の影響がうけるが、言い換えればそれを利用して光子の入射角を制限することもできると考えられる。そのため、まず Geant4 ベースのモンテカルロシミュレーションを行い、全天から入射する光子に対する角度応答を詳細に調べた。この結果を用いて、モンテカルロシミュレーションと実測値を比較することで、WAM における GRB の位置決定を行う。

5.1 モンテカルロシミュレーションによる角度応答データベース構築

Geant4 ツールキットを利用してモンテカルロシミュレーションにより衛星全体を含めた WAM の光子に対する角度応答のデータベースを構築する。使用した Geant4 のバージョンは Geant4.9.6 patch01 である。シミュレーションにおいて仮定した条件を以下に述べる。実際の観測では PMT のゲインが変動するため観測時期によってエネルギーレンジも変化するが、シミュレーションの段階ではそれを無視した。また、検出器の放射化による影響は全く考えない。

5.1.1 ジオメトリ

ジオメトリは、WAM のエネルギー応答関数を作成する際に使用しているものと同じマスモデルを利用した。このモデルは HXD だけでなく、Suzaku 衛星全体の質量やその分布を実験計画書を元に再現したものであり、実際の応答を再現するために使用するのに適している。HXD とともに Suzaku に搭載されている XRS を格納する冷媒タンクには、XRS を極低温下に維持するため液体ヘリウムが封入されていたが打ち上げ直後の事故により、漏れ出している事が分かっている。そのため、本研究で用いるマスモデルでは、冷媒タンクの中の液体ヘリウムが全て蒸発したと仮定してタンク内を真空にした。また、HXD の安定させるためのケースは CFRP という素材

を使用している設定であったが、実際は ZE41A-T5 というマグネシウム合金で構成されている事が判明したため、マスモデルの再現性を高めるために修正を加えた。修正したマグネシウム合金の組成は、密度 1.84g/cm^3 、Mg が 94%、Zn が 5%、Ce を 1% とした。光子の入射角度の定義は Yamaoka et al と同様に設定した。(図 3.5)

5.1.2 入射光子の定義

入射光子は、WAM を中心とした球面状のある点 (θ, ϕ) を乱数によって決定してから衛星全体に向かって入射させた。この試行を繰り返し行う事によって、WAM の全天から一様に光子が入射したという状況を再現した。この際、Geant4 の乱数生成関数を利用して全天一様になるように設定した。入射スペクトルは、多くの GRB の典型的なスペクトルである Band Function($\alpha = -1.0, \beta = -2.5, E_{\text{peak}} = 250 \text{ keV}$) を仮定し、エネルギー範囲は WANTI の LD 値と WAM の UD 値を考慮して 10 - 5000 keV にした。使用したモデルスペクトルを図 5.1 に示す。エネルギー分布の乱数発生の方法は、Band Function の確率分布に従う累積分布関数を 0 - 1 の乱数に対応させることによって再現した。

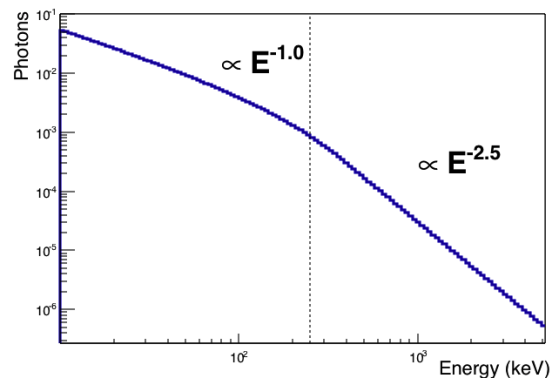


図 5.1: シミュレーションにおいて仮定したスペクトル

5.1.3 物理素過程

Geant4 開発者によって提供されている様々な PhysicsList のなかでも、 $\sim \text{eV}$ という低エネルギーから 100 GeV までのエネルギーを扱え、原子殻構造由来の蛍光などの物理素過程も反映される G4EmLivermore を使用した。WAM と光子との主な相互作用としては、光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成が挙げられるが、このエネルギー帯域でこれらの相互作用を再現するためには、この PhysicsList が最適でありその誤差は 1% 以下である。詳細は Appendix A に示す。

5.1.4 検出アルゴリズム

WAM または WANTI において、入射光子のエネルギー損失があったイベントを抽出した。ただし、一度の相互作用で入射光子の全エネルギーを検出器内で落とすとは限らないので、1Unit で

発生したイベントであれば損失エネルギーを全て足し合わせている。また、地上較正試験の結果から、光子と WAM の相互作用で発生したシンチレーション光が PMT まで届く光量は、入射した位置に依存することが確認されている。そのため、PMT からの距離も取得して、地上較正試験の結果をもとに補正を行う。それぞれの Unit における全損失エネルギーと距離を取得してから、以下に示す条件を満たすイベントを使用することにする。

- WAM: 損失エネルギーが $\sim 100 - 300$ keV (ch 3 - 6 に対応) であったイベント
- WANTI: Top 部 (Well 部)、Bottom 部、そして GSO における損失エネルギーがそれぞれ 40 keV, 20 keV, 10 keV を超えるイベント

WAM に関しては 100 keV 以下は WAM のレスポンスの不定性が大きく、300 keV 以上は SN 比が悪くなるため使用しないことにした。また、3 - 6 チャンネルに対応するエネルギー範囲は、観測時期によって異なることに注意する。WANTI は反同時計数用の検出器としてのみ機能するように設計されているため、粒子を検出したという情報しか取得する事が出来ない。つまりエネルギーチャンネルが区別されていない。そのため WANTI においては全エネルギー帯域の光度曲線を使用する。ただし、検出した部位によって PMT まで収集される光量が異なるため上記のような閾値を設定した。また 16 本ある Well Unit に接続する PMT のゲインにも個体差が存在すると考えられるが、本研究においてはそれを無視した。

5.1.5 シミュレーション結果

シミュレーションを実行した結果、光子の入射角度に対する WAM 各面の相対検出効率を図 5.2、WANTI の検出効率を 5.3 に示す。

図 5.2 は、面の正面から入射した光子を最もよく検出することを示している。例えば、図 5.2 左上が示しているのは、WAM0 は $(\theta, \phi) = (90^\circ, 90^\circ)$ が正面方向なので、その方向の検出効率が最も高い。WAM0 の反対側、つまり WAM2 の正面方向から来る光子は検出効率が低下することが見て取れる。また、原理的に面の中心から角度があると $\cos \theta$ または $\cos \phi$ に依存して検出効率は減少すると考えられる。そのため、天頂角 θ の極付近になると正面でも感度が悪いことがわかる。WAM0 に関してはこの傾向が見て取れるが、その他の面の検出効率はその依存性では説明できない部分もあり、他の物質による吸収が影響していると考えられる。WANTI の検出効率は HXD の視線方向からの入射光子に対してもっとも高い。その反対方向から光子の検出効率は、大きい BGO 結晶が配置されているにもかかわらず効率が悪い。これは HXD を格納するケースの素材が Mg 合金であるためだと考えられる。 $\theta = 30^\circ - 120^\circ$ 付近は、Anti Unit によって分厚くシールドされているために、検出効率がさらに減少している。また、WANTI の検出効率は WAM のものに比べて θ 方向に依存性を持っていることがわかった。どの面も $\theta = 225^\circ - 315^\circ$ において、最も効率が悪いのは物質量の多い XRS の冷媒タンクの影響であると考えられる。このシミュレーションによって、WAM、WANTI とともにその検出効率は光子の到来方向を強く反映していることが確かめられた。そして、GRB の典型的なスペクトルを持つ光子が入射したときの WAM の角度応答のデータベースを構築することができた。

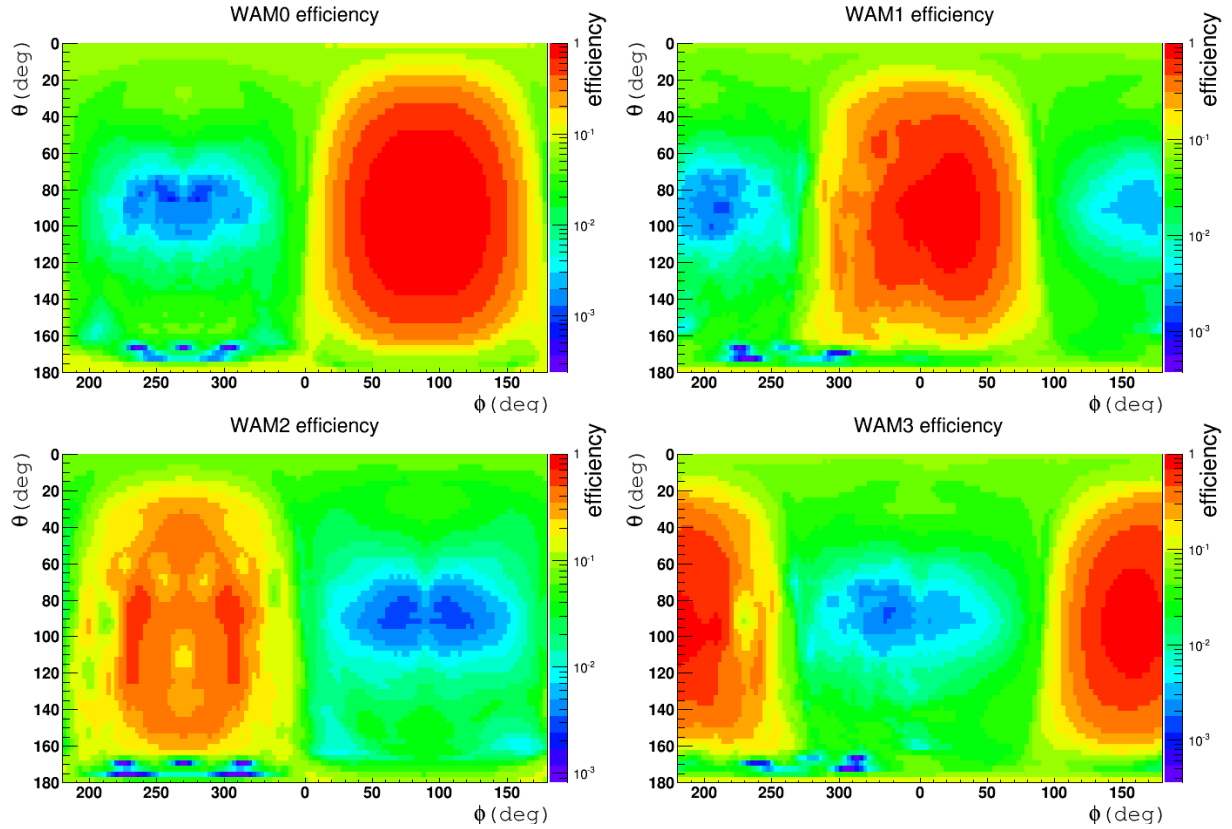


図 5.2: シミュレーションによる WAM 各面における相対検出効率。WAM0 の検出効率でスケールした。

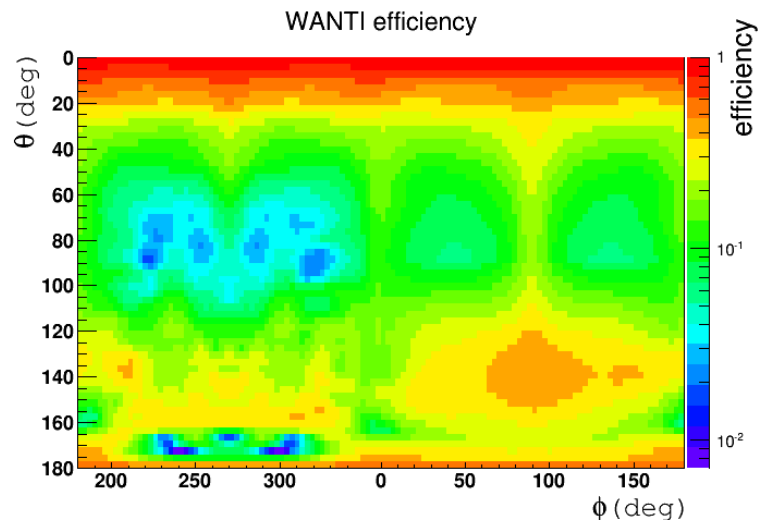


図 5.3: WANTI の相対検出効率

5.2 位置決定方法

前節でのシミュレーション結果を利用して位置決定を行う。WAM で観測された GRB の実測値とシミュレーションのカウント比が一致する入射角度をその GRB の位置とみなす。この方法においては、GRB の位置を 2 方向に絞ることができた。以下にその手順を述べる。

5.2.1 実測値の各面のカウント数

光度曲線から各面のカウント数を求める。WAMの光度曲線は100 – 300 keV 帯域にあたる3-6chを使用する。同様に WANTI についても全帯域の光度曲線からカウント数を求める。作成したライトカーブからバックグラウンドを引いた後、バースト領域を時間積分することによって各面のカウント数を求めた。バックグラウンドの推定の仕方は主に、バースト領域の前後100秒程度をバックグラウンドの領域として、そのカウント数の平均値をバックグラウンドとする前後平均で求めた。また、僅かながらも dead time の影響があるためその補正を加える必要がある。WAM に関しては、Suzaku チームにより提供されている解析ツール群 HEASOFT の hxdmkwamlc を利用した。WANTI は公式のプログラムは用意されていないため、自作したスクリプトによりライトカーブの作成と式3.1の計算による dead time の補正を行った。

5.2.2 データベースの各面のカウント数

シミュレーションによる角度応答のデータベース(図5.1)を利用する。データベース構築の際には、GRB 観測時期による gain の変動を考慮していないため、位置を求めたい GRB に応じた各面の検出効率の2次元マップを求め直す必要がある。ゲイン補正を行った後に、3-6ch のバンドで検出されたイベントを選択する。さらに実測値の統計数に比べて、十分大きいシミュレーションの統計数を得るために $3^\circ \times 3^\circ$ の bin まとめを行ってある。 θ 方向が極に近い角度においては、WAM の構造上検出効率が著しく減少するため統計数を得ることが難しいが、bin まとめにより同等以上になっている。

5.2.3 χ^2 法による実測値とシミュレーションの比較

実測値とシミュレーションのカウント比が等しくなる角度がその GRB の位置であると考えられる。実測値とデータベースの一致は、両者の χ^2 が最小となる角度 (θ, ϕ) を求めることによって評価される。そのためにまず次の2つについて χ^2 を計算する。(1)WAM の明るい2つの面のカウント比、(2)WAM の1番明るい面と WANTI のカウント比。シミュレーションのカウント比は、図5.2、図5.3から(1),(2)の条件で必要なものを利用して角度ごとに計算する。これらを用いて、(1),(2)それぞれ

$$\chi^2(\theta, \phi) = \left(\frac{R_{\text{Obs}} - R_{\text{Sim}}(\theta, \phi)}{\sigma_{\text{Obs}}} \right)^2$$

を計算する。 R_{Obs} は実測値のカウント比、 σ_{Obs} は実測カウント比の統計誤差であり信頼区間68%の値、 $R_{\text{Sim}}(\theta, \phi)$ はシミュレーションの角度 (θ, ϕ) におけるカウント比である。そして、(1)(2)の $\chi^2(\theta, \phi)$ の和を求め、それが最小となる角度 (θ, ϕ) をその GRB の位置とする。

5.3 一例:GRB140306A

一例として GRB140306A の位置決定結果を示す。この GRB は、2014年3月6日3時29分44.404秒に trigger されたイベントであり、WAM の他に FERMI(Fitzpatrick et al, GCN15935)、Konus-Wind(Golenetskii et al, GCN15939)でも検出されており、IPNでも決定されている (Golenetskii

et al., GCN15938)。GCN15935 では、赤緯 31.3 度、赤経+45.9 度で発生したイベントであると報告され、WAM への入射角へ変換すると $(\theta, \phi) = (48.43, 46.98)$ であった。図 5.4 に WAM のライトカーブを、各面の実測カウント数を求めたものを表 5.2 に示す。

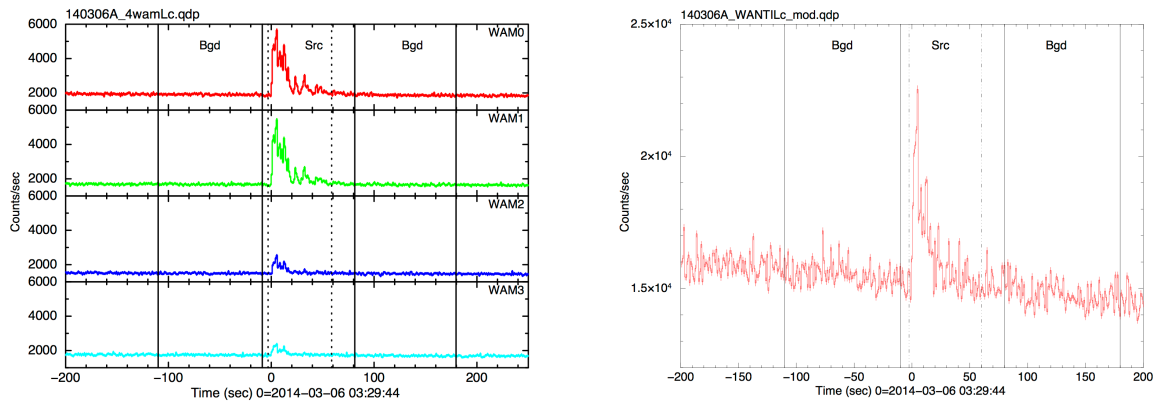


図 5.4: GRB140306A の WAM の光度曲線 (左) と WANTI の光度曲線 (右)。黒実線に間の領域がバックグラウンド、黒点線の間がソース領域

表 5.1: GRB140306A の WAM/WANTI 各面のカウント数

検出器	カウント数	1σ
WAM0	22465.3	262.7
WAM1	21088.1	252.0
WAM2	5311.52	203.1
WAM3	3550.93	213.4
WANTI	67180.2	1481.4

表 5.2: GRB140306A における WAM の明るい面のカウント比

	カウント比	誤差
WAM1/WAM0	0.938	0.015
WAM0/WANTI	0.334	0.008

このイベントの場合、WAM0 が最も明るく、WAM1 が二番目に明るく照らされていることがわかった。よって計算すべき χ^2 は、(1)WAM0 と WAM1 のカウント比、(2)WAM0 と WANTI のカウント比である。また、WAM の明るく照らされた面からこの GRB の入射角はおおよそ $\phi = 0^\circ - 90^\circ$ であると制限できる。そのため、次のステップからはこの角度範囲に限定して計算する。

シミュレーションのデータからこの GRB の観測時期に応じたゲイン補正を行い、上記 (1),(2) の角度ごとのカウント比を表す二次元マップを図 5.5 に示す。このマップの中から、実測カウント比に一致する角度を求める。

それぞれについて角度ごとに χ^2 を計算したものを図 5.6 に示す。図 5.6 左は (1) の χ^2 を計算した時に、この GRB の位置であると考えられる角度を示している。カウント比が 0.938 であることから、WAM0 と WAM1 の中間である $\phi = 45^\circ$ 付近の角度が χ^2 が小さくなっている、つまり、GRB の位置であると示されている。それと同時に、その他の角度でもこのカウント比を再現できることがわかる。これはモンテカルシミュレーションを行わなければ得ることのできなかった結果である。同様の計算を (2) についても行った結果が図 5.6 右であり、GRB のカウント比を良く再現できる角度があることがわかる。さらにその χ^2 の和を 2 次元プロットしたものが図 5.6 下に

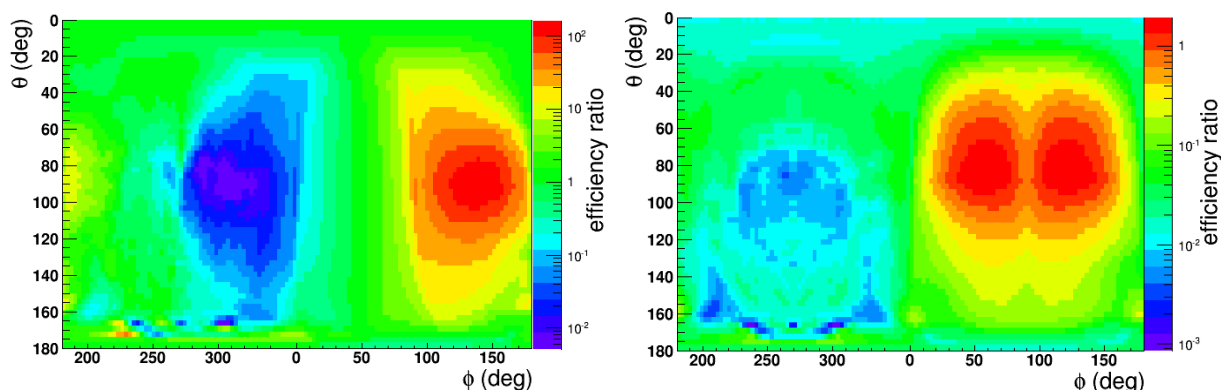


図 5.5: シミュレーション結果による WAM 各面における検出効率の比

なる。(1) と (2) の χ^2 が小さい領域が交わる角度付近において、他の角度に比べて明らかに値が小さくなる角度が2点できることが示された。このことから、この方法では GRB の位置が2方向に絞れるということになる。

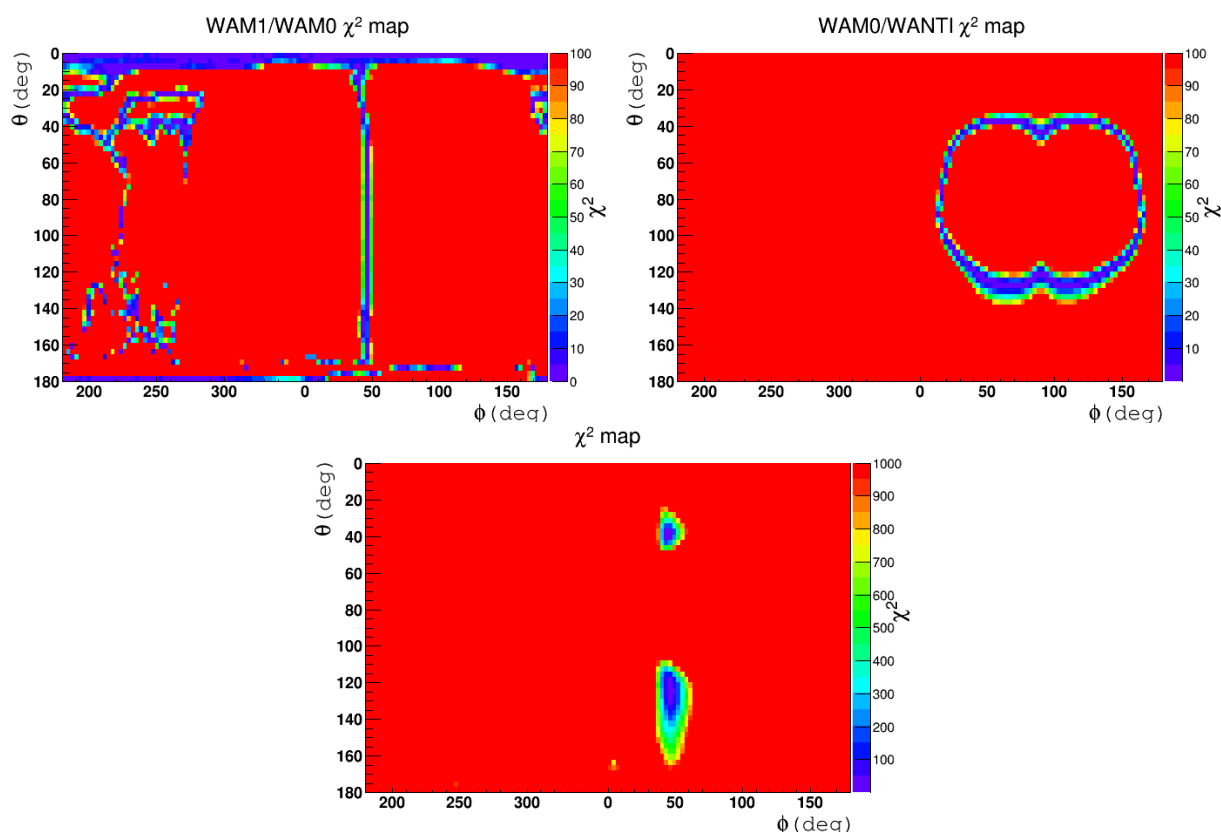
図 5.6: GRB140306A の位置決定した時の χ^2 マップ。左上：WAM の明るい2つの面の比較。右上：WAM の明るい面と WANTI の比較。下： χ^2 の和

図 5.6 の2次元プロットにおいて、 χ^2 が特に小さくなっている2つの方向について注目する。このプロットから、 χ^2 が最も小さくなる角度のみに注意を行い、 θ 方向 ϕ 方向それぞれに射影する。シミュレーションの角度応答のプロットは $3^\circ \times 3^\circ$ で bin まとめていたため、離散的な値でしか評価できない。そのため、本研究では3次のスプライン関数で補間を行い、 χ^2 の最小点を求めることにした。スプライン法によって関数化された χ^2 の θ 、 ϕ 依存性を図 5.7 に示す。

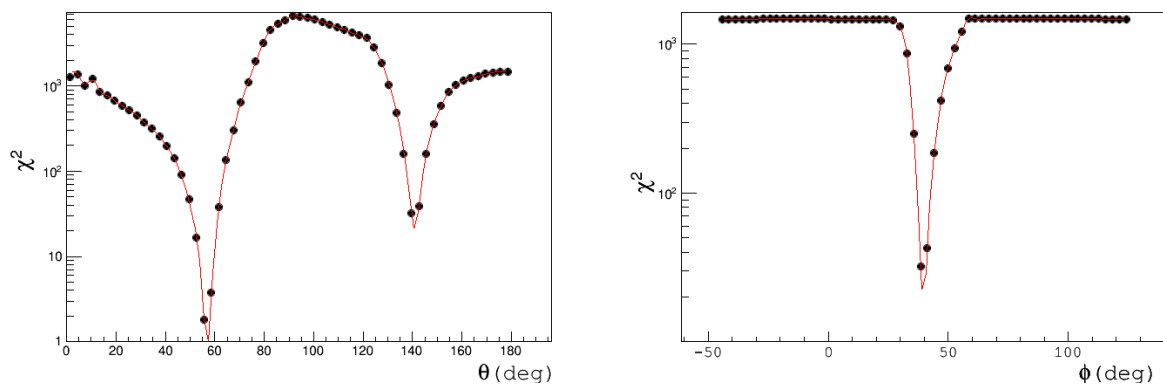


図 5.7: GRB140306A の χ^2 の θ , ϕ 依存性。黒点はデータ点、赤線は 3 次スプライン関数によってモデル化されたものを示す。

この最下点である角度を 2 交点それぞれについて求めた結果を表 5.3 に示す。ここでは、 χ^2 がより小さい方を位置決定 1 とした。この方法により独自決定した 2 つの位置のうち、一方は他衛星が決定した位置に近い方向を示すことができている。また 2 方向示されたのは、 $\theta = 90^\circ$ 付近を軸に線対称なエネルギー応答関数が同様の振る舞いをするためであると考えられる。

表 5.3: GRB140306A の位置決定結果

	位置決定 1	位置決定 2	他衛星決定位置
theta	56.74	140.85	48.43
phi	46.66	44.77	46.98
χ^2	1.82	32.13	-

第6章 開発した位置決定方法の精度検証

5章で述べた方法によりエネルギー応答関数を作成することが可能となった。しかし、本研究の目的は、WAM単独で観測されたGRBのスペクトル解析を行えるようにすることであるため、これらの位置決定によるエネルギー応答関数の不定性を評価する必要がある。それによって、位置未決定のイベントもエネルギー応答関数の系統誤差を考慮することでスペクトル解析が可能となる。本章ではエネルギー応答関数の不定性を2通りで検証した。また、エネルギー応答関数は現在使用されているGeant4ベースのエネルギー応答関数作成ツールを使用して作成している。

今後は、エネルギー応答関数を作成するために使用する位置と、その作成されたエネルギー応答関数を以下のように記述する。他衛星決定位置を Loc_{other} 、それにより作成されたエネルギー応答関数を Rsp_{other} 、また、開発した方法により決定された位置を Loc_{WAM} 、それにより作成されたエネルギー応答関数を Rsp_{WAM} とする。決定された2方向を区別する場合は、添字WAMの後に1,2をつけることとする。

6.1 位置に関する評価

まず、開発した位置決定方法の精度と誤差の評価を行う。

6.1.1 位置決定精度

この方法を用いて実際に2009年から2014年の間に観測されたGRBについて位置決定を行い、その精度を検証した。検証のために、The Gamma-ray Coordinates Network (GCN) に投稿されているWAMで観測されたGRBの中から、他衛星と同期観測され位置が決定されており、少なくともWAMの2つの面で検出されている32のGRBを使用した。これらはいずれも100 – 1000 keVの帯域で $4.32 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2}$ 以上の明るさを示したイベントである。 Loc_{WAM} と Loc_{other} の差分を図6.1に示す。ただし、 Loc_{WAM} は Loc_{other} に近い方のみを選択した。また、図6.1右は使用した32GRBの Loc_{other} のWAM天球上の分布であり、あらゆる入射角度に対して検証を行った事を示す。

Loc_{other} と Loc_{WAM} の θ 方向、 ϕ 方向それぞれの差分の平均を、WAMがもっとも明るく照らされた面別に表6.1に示す。2方向に定まった位置のうち、 Loc_{other} に近い位置のみを選択できた場合と遠い位置のみ選択した場合に分けて表示する。

θ 方向は2つの Loc_{WAM} から Loc_{other} に近い方のみを選択できれば約 13° 程度の精度であることがわかった。 ϕ 方向はWAM2を除けば約 7° 程度で決定できる。WAM2の精度が悪い原因の1つとして、WAM2の正面にある物質量の多いXRSの冷媒タンクマスモデルの再現性が十分でないこ

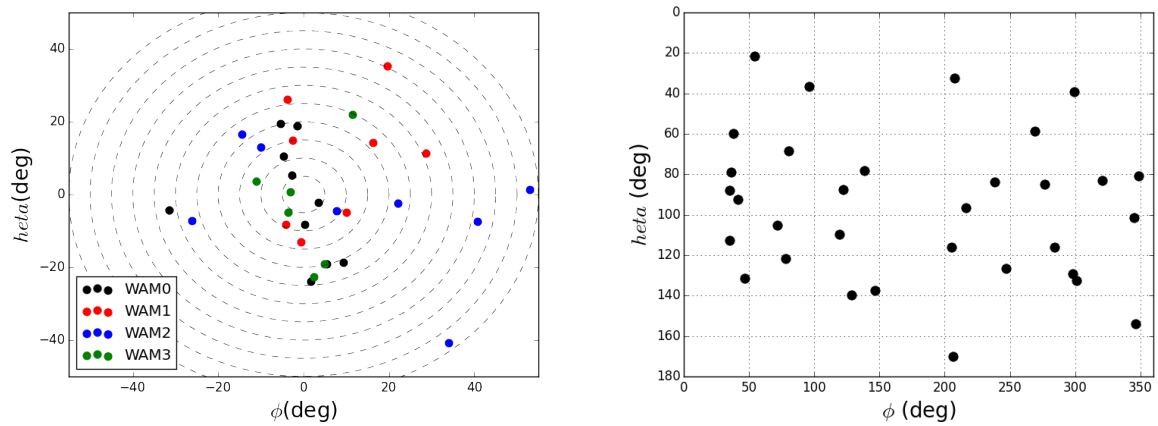


図 6.1: 右：他衛星決定位置との θ 方向と ϕ 方向の差分。原点を中心とする 5° 刻みの同心円を示してある。右；位置決定に使用した GRB の他衛星決定位置

表 6.1: 検証した 32GRB の Loc_{WAM} と $\text{Loc}_{\text{other}}$ の差分の平均

最も明るい面	θ の差分の平均		ϕ の差分の平均	
	$\text{Loc}_{\text{other}}$ に近い	$\text{Loc}_{\text{other}}$ から遠い	$\text{Loc}_{\text{other}}$ に近い	$\text{Loc}_{\text{other}}$ から遠い
WAM0(10GRB)	13.05°	68.36°	6.61°	6.92°
WAM1(8GRB)	16.00°	51.61°	10.70°	10.48°
WAM2(8GRB)	11.64°	87.00°	26.03°	23.37°
WAM3(6GRB)	12.19°	62.87°	6.09°	7.13°
32GRB	13.28°	67.81°	12.39°	11.96°

とが挙げられる。 ϕ 方向の精度は、 θ 方向を無視して WAM のカウント比が $\tan \phi$ に従うという仮定のもとで到来方向を決定する方法によって報告されている精度である約 $5^\circ - 10^\circ$ と同程度であるため、WAM の角度分解能の限界であると考えられる。各 GRB の位置決定結果は、Appendix B に示す。

また、32GRB についても同様に $\theta = 90^\circ$ を軸に線対称となる 2 位置に χ^2 が小さくなる角度を示すことがわかった。2 つの位置に χ^2 の差はあるものの、本研究ではこれらを同等に扱うことにした。それは、図 6.2 に示すように 2 方向の χ^2 が同様の分布を示し、また $\text{Loc}_{\text{other}}$ に近い方向の χ^2 の平均値が 16.25、遠い角度の χ^2 の平均値が 14.06 となり差がないためである。

6.1.2 位置決定誤差

この位置決定方法における位置の系統誤差 $\text{Sys}_{68\%}$ は各イベントの統計誤差の平均値 Stat_{ave} 、離角の分布の標準偏差 1σ の値 $\text{Total}_{68\%}$ を用いて次の計算によって求められる (Pendleton et al. 1999)。

$$(\text{Sys}_{68\%})^2 = (\text{Total}_{68\%})^2 - (\text{Stat}_{\text{ave}})^2$$

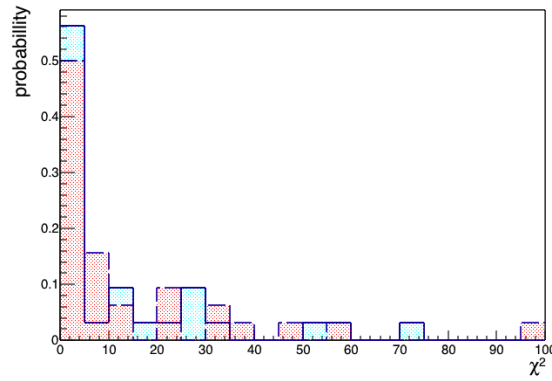


図 6.2: LocWAM における χ^2 の分布。青が近い。赤の点線が遠い

また、統計誤差は次のように定義した。ここで、 θ 、 ϕ はそれぞれ推定した位置の天頂角と方位角である。

$$\begin{aligned}\sigma_{stat} &= \sqrt{\delta\theta\delta\phi\cos\theta} \\ \delta\theta &= \sqrt{\Delta\chi^2 C_{\theta\theta}} \\ \delta\phi &= \sqrt{\Delta\chi^2 C_{\phi\phi}}\end{aligned}$$

自由度 2 の 68%信頼区間に値する $\Delta\chi^2 = 2.30$ 、 $C_{\theta\theta}$ 、 $C_{\phi\phi}$ はヘッセ行列の対角成分である (Press et al. 1986)。ヘッセ行列は χ^2 を θ, ϕ の関数として表した時の 2 階微分を行列で表したものである。よって対角成分 $C_{\theta\theta}, C_{\phi\phi}$ はそれぞれ θ, ϕ についての 2 階微分を示す。本研究では図 5.7 で示したデータ点を 3 次のスプライン関数でモデル化したものを利用して、 χ^2 が最小となる角度でヘッセ行列を求めた。上式により計算された各 GRB の統計誤差を図 6.3 左に示す。カウント数が多いほど、統計誤差が小さくなることが確かめられた。これにより求められた統計誤差の平均値は $\text{Stat}_{\text{ave}} = 0.51^\circ$ であった。

次に離角が正規分布すると仮定したときの標準偏差 1σ を求める。離角の分布は自由度 2 を持つため、図 6.1 左のように中心からの同心円を考え、単一円環にあるイベント数を数える必要があることに注意する。それをその円環の面積で割り頻度分布にしたものを図 6.3 右に示す。この分布から求められた離角の標準偏差は $\text{Total}_{68\%} = 14.02^\circ$ であった。

これにより推定した位置には、

$$\text{Sys}_{68\%} = \sqrt{(14.02^\circ)^2 - (0.51^\circ)^2} = 14.01^\circ$$

の系統誤差があると求められた。この位置決定方法では系統誤差が支配的であり、それは 14° であることがわかった。この系統誤差の計算には $\text{Loc}_{\text{other}}$ に近い方向のみを用いて計算していることに注意する。

6.2 エネルギー応答関数に関する評価

位置決定由来のエネルギー応答関数の不定性の評価を行い理解しておくことで、WAM 単独でのスペクトル解析が可能となる。本節では、この位置決定方法を用いることによる不定性を 2 通りの方法で評価した。

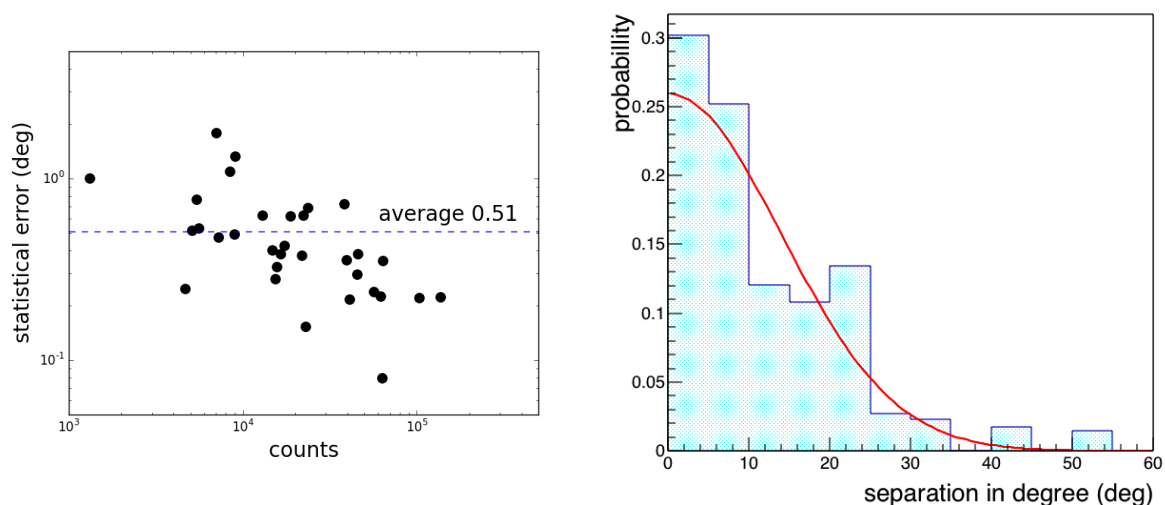


図 6.3: 左:最も明るい面のカウント数に対する計算された統計誤差の分布。右: 離角の分布。赤線は正規分布 (中心値=0 で fix)

6.2.1 評価方法 1:有効面積による比較

位置決定誤差の範囲でエネルギー応答関数の評価をその中心 Loc_{WAM} のものと比較した。これは Sec6.1.2 で求められた系統誤差 14.01° によるエネルギー応答関数の不定性を評価することに対応する。系統誤差が正規分布すると仮定して、その系統誤差の範囲内におけるエネルギー応答関数の不定性を評価する。200 keV における有効面積を、 Loc_{WAM} を中心とした半径 14° の円の中の 256 点と Loc_{WAM} を比較した。256 点は中心から θ 方向、 ϕ 方向にそれぞれ $\pm 1^\circ$ ずつ移動して 14° まで抽出した。なお、エネルギー応答関数の作成には WAM チームが構築したエネルギー応答関数作成ツールを使用し、200 keV における有効面積の比を、32GRB について調べ頻度分布にしたものを図 6.4 に示す。また、200 keV を選択した理由としては、光子が最も不定性が少ない

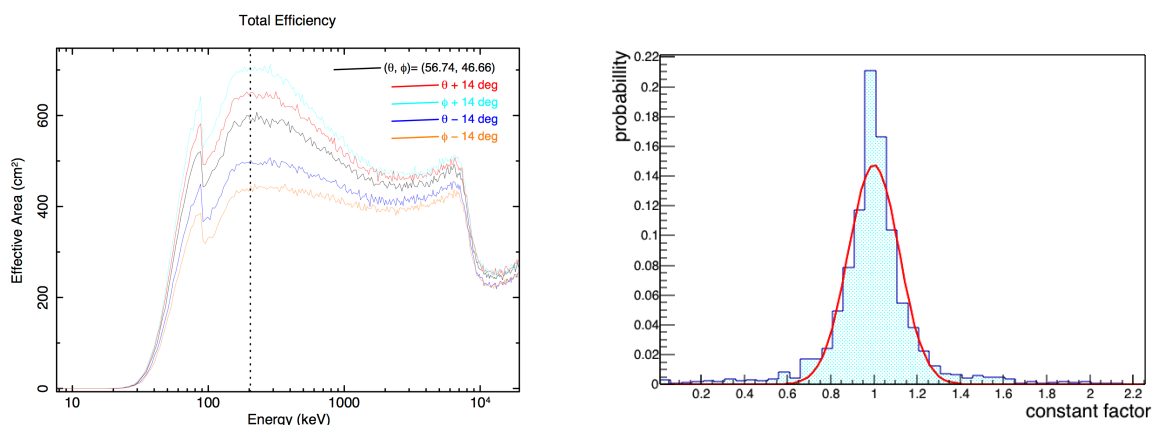


図 6.4: 左; 有効面積の比較、右: 有効面積比の分布

WAM0 の正面である $(\theta, \phi) = (90^\circ, 90^\circ)$ から入射した場合、WAM0 の有効面積が最大になるためである。得られた頻度分布を正規分布でフィットして標準偏差 1sigma を系統誤差するとき、それは 11.7% であることがわかった。

6.2.2 評価方法 2:実データスペクトル解析による比較

Loc_{other} と Loc_{WAM} で、それぞれ応答関数 R_{Sp_{other}} と R_{Sp_{WAM}} を作成、実データを用いてスペクトル解析を行い、その評価を比較した。これは Sec6.1.1 で検証した WAM 位置決定方法の精度によるエネルギー応答関数の不定性を調べることに対応しており、Loc_{other} と Loc_{WAM1}、または Loc_{other} と Loc_{WAM2} という 1 対 1 の誤差を評価している。スペクトルを切り出す時間範囲や bin まとめの仕方は 1 イベントに対して同じ条件を設定して、エネルギー応答関数のみを変更してスペクトル解析を行った。バックグラウンドの推定の仕方はイベントに応じて、前後平均または多項式近似による手法を採用した。多項式近似はバックグラウンドレートを 4 次式で近似したモデルをソース領域に内挿することでバックグラウンド推定を行うものであり、WAM チームによって作成されたスクリプトを使用した。また WAM の GRB スペクトル解析をする際は、特に明るいイベントに対してエネルギー応答関数自体の系統誤差が GRB の信号の統計誤差に比べて無視できなることに注意する必要がある (Sakamoto et al. 2009)。しかし、決定位置の誤差によるエネルギー応答関数の誤差を統一的に評価するために、全ての GRB に対して系統誤差を考慮せず解析を行う。そのため、スペクトルモデルと GRB の実測値の一致の良さを示す χ^2 が大きく評価されたイベントもあるが、そのなかでもベストフィットモデルを採用してその評価を比較した。なお、エネルギー応答関数の作成には WAM チームが構築したエネルギー応答関数作成ツールを使用した。スペクトル解析に使用するモデルは以下の 3 つである。

Band Function(式 1.1)

Powerlaw with exponential cutoff

$$A(E) = K E^{\alpha} \exp(-E/\beta) \quad (6.1)$$

Powerlaw

$$A(E) = K E^{-\alpha} \quad (6.2)$$

α は光子指数、 β はべきが折れ曲がるエネルギー (keV)、 K は規格化因子 (photons keV⁻¹ s⁻¹ cm⁻²) である。

スペクトル解析の結果、最もフィットがよくあったモデルごとに、パラメーターやフラックスの誤差が何%あるのか調べた。3 つのモデルのうちベストフィットモデルが Band Function であった 18GRB の R_{Sp_{other}} と R_{Sp_{WAM}} による評価の比と離角との分布を図 6.5 に示す。図 6.5 より、位置決定方法により得られた 2 方向のうち、Loc_{other} に近い位置と遠い位置の選択によってスペクトル解析の結果が大きく変わることはないことがわかる。GRB ごとのスペクトル解析結果の詳細は AppendixC に示す。また、Loc_{other} と Loc_{WAM} の差分が大きくなったとしても、それに応じて誤差が大きくなる傾向は見られない。したがって、位置決定において示された GRB の位置である 2 点は、エネルギー応答関数の振る舞いが同様であることが確かめられた。さらに χ^2 についても 2 点の評価が大きく異なることはなく、エネルギー応答関数を作成する際の GRB 位置情報はどちらを使用しても良いと言える。

ただし、GRB131014A のフラックスの誤差が特に大きい理由は、WAM への入射角が悪い条件であったからであると考えられる。Yamaoka et al では、エネルギー応答関数の不定性が大きく

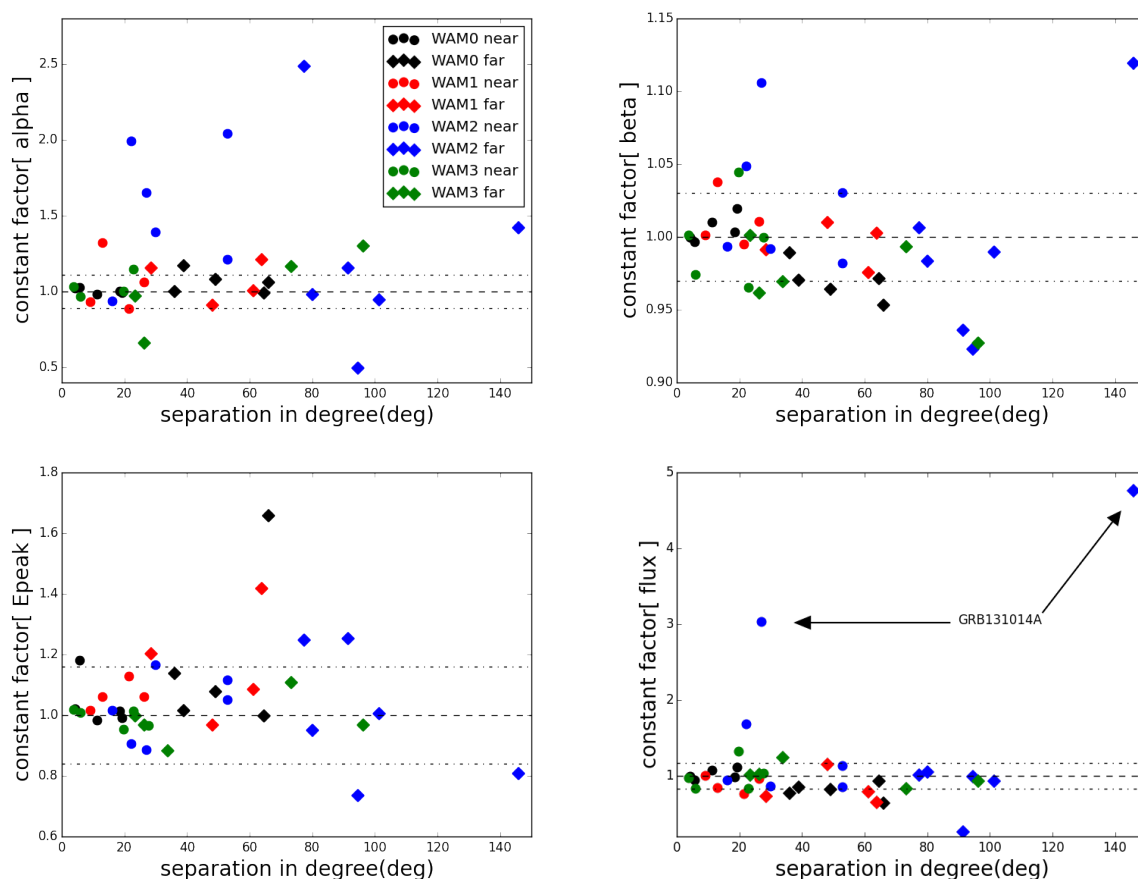


図 6.5: 横軸は離角 (deg)、縦軸は各パラメータの誤差。点線は系統誤差 1σ の値を示す。左上: α 、右上: β 、左下: E_{peak} 、右下:Flux

なる方向は off-axis(WAM 各面の正面から約 70° 以上) と WAM2 方向であると報告されている。GRB131014A の本来の入射角は $(\theta, \phi) = (9.61^\circ, 206.49^\circ)$ であり、本研究で決定された位置は $(\theta, \phi) = (16.84^\circ, 232.64^\circ)$ 、 $(153.62^\circ, 229.43^\circ)$ であった。エネルギー応答関数の不定性が大きくなる条件を 2 つ満たしたイベントであるため、評価が大きくことになったと考えられる。その他に主に誤差が大きい評価となったのは WAM2 方向のイベントが多いことが判る。同様に CutoffPowerlaw でスペクトルをよく再現できた場合を図 6.6 に示す。

これらの分布において 68% のイベントがその値以内になる誤差をそのパラメータの系統誤差とする (図点線)。求めた各パラメータの系統誤差を表 6.2 に示す。この結果により WAM 単独で位置決定を行いスペクトル解析をする時に、各モデルのパラメータごとにこの系統誤差を考慮すればよい。ただし、ベストフィットが powerlaw である場合については、さらに系統的な解析を進めてより確かな系統誤差を見積もる必要がある。

本研究では位置決定のシミュレーションにおいて入射光子のスペクトルを Band Function と仮定したため、32GRB のうちベストフィットモデルが Band Function であった 18GRB を用いてエネルギー応答関数の不定性を評価することにする。これにより、実データをスペクトル解析することによって不定性を評価した場合、100 - 1000 keV 帯域のフラックスで 17.8% であった。

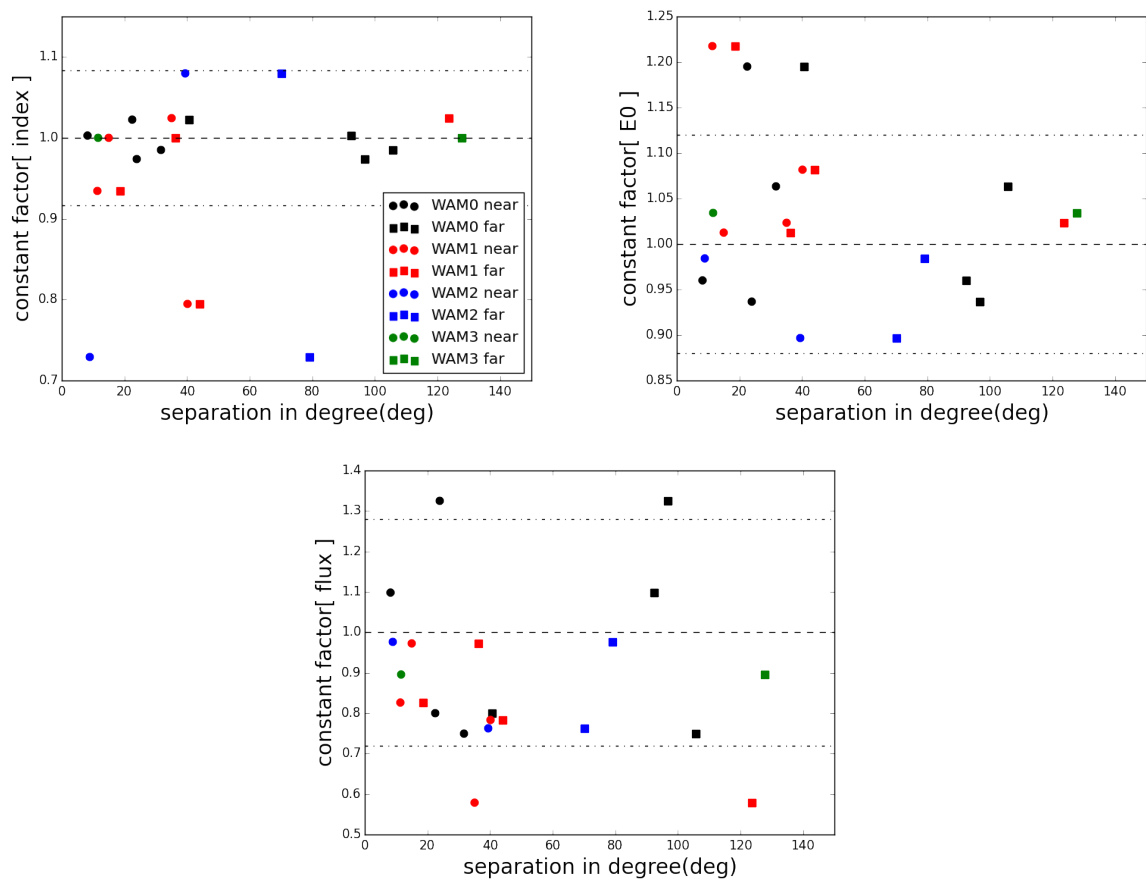


図 6.6: 横軸は離角、縦軸は各パラメータの誤差。点線は系統誤差 1σ の値を示す。左上:index、右上: E_0 、下:Flux

表 6.2: スペクトル解析の系統誤差

パラメーター モデル	光子指数	べきが折れ曲がるエネルギー	100 – 1000 keV フラックス
Band Function(18GRB)	11.3% / 3.18% [†]	16.9%	17.8%
Power-law with exponential cutoff(13GRB)	8.3%	12.3%	28.1%
Power-law(1GRB) [§]	6.68%	—	280%

[†] 低エネルギー側の光子指数/高エネルギー側の光子指数

[§] 1 イベントのみであったため平均で評価

6.3 考察

誤差の要因について考察する。まず、 θ 方向の精度が悪い理由として、WANTI の応答再現不足が考えられる。図 5.6 に示すように WAM のみでは θ 方向に対する感度がほぼないため、制限をつけるために本研究では WANTI を使用することにした。Well Unit の井戸部、底部、GSO からなる WANTI は、光子が相互作用した場所によって PMT まで届く光量が異なるため、それぞれに

対して異なる損失エネルギーの閾値を設定することによって、光量位置依存性の補正を行っている。しかし、16本ある Well Unit の1本ずつの個性や、HXD オペレーションによって観測時期ごとに異なる閾値の変動を取り込めていない。また、その閾値は Top 部で 40 keV、Bottom 部分で 20 keV、GSO で 10 keV という WAM に比べて低エネルギー側の光子まで拾っている。Yamaoka et al(2009) では、WAM のエネルギー応答関数の低エネルギー側の不定性が大きい要因として、BGO 結晶に塗布してある BaSO₄ の再現性が悪いと述べている。WANTI も同様の構造であるため、WANTI では Band Function スペクトルの光子の大多数を占める低エネルギー光子まで使用しなければいけないことによる不定性が大きくなっていると考えられる。さらに、16本の井戸と底部にある大きい結晶という複雑な形状をしているため、WAM の光量検出位置依存性のように、同じ Well 部にヒットしてもその位置によって光量に変化することも考えられる。これらの不定性が θ 方向の精度が悪い大きな要因であると考え、今後その影響を評価していく必要があるだろう。

位置決定、スペクトル解析ともに特に誤差が大きかったのは、WAM2 方向から入射してきたイベントであることがわかっている。Yamaoka et al でも報告されているように、WAM2 はエネルギー応答関数の再現性が悪い。その理由として、WAM2 方向にある XRS の冷媒タンクの内部構造が簡略化されていることによるマスモデルの再現性不足があげられる。また、打ち上げ初期の2年間は、固体ヘリウムが徐々に減っていくため、完全な質量分布の再現は困難である。そのため、本研究ではその期間のイベントは精度検証には用いなかった。

GRB131014A と同様に off-axis のイベントに関して、Loc_{other} と Loc_{WAM} の差分の大小に関わらず、エネルギー応答関数の系統誤差が大きくなる傾向が見られた。これは、 θ 方向が極付近になるほど有効面積が著しく変化するためであると考えられる。単純な θ 方向、 ϕ 方向のみの誤差では正確な評価はできないが、GRB の位置の θ 成分が極付近であれば θ 方向の誤差によって有効面積が大きく変化し、 θ 成分が 90° 付近であれば ϕ 方向の誤差による変動が支配的になると考えられる。これに対して、本研究では ϕ 方向の精度はよく θ 方向は精度が悪いため、特に極付近での θ 成分の誤差がエネルギー応答関数の系統誤差に大きく現れると考えられる。 ϕ 方向がほぼ同じであった GRB121122A と GRB131014A の2イベントについて、 θ 方向の違いによる有効面積の比較を図 6.7 に示す。2 イベントともに、WAM2 が最も明るく照らされたイベントであり、それぞれの Loc_{WAM} は $(\theta, \phi) = (128.5^\circ, 228.8^\circ)$ 、 $(16.84^\circ, 232.6^\circ)$ であると求められた。図 6.7 は、それぞれの R_{spWAM} とその $\theta \pm 14^\circ$ での有効面積を示しており、その有効面積比はそれぞれ最大 0.89、3.74 であった。極付近が入射角度である GRB131014A の方が明らかに θ 方向の誤差を強く反映していることが確かめられた。

本研究では、2通りの方法によりエネルギー応答関数の不定性を評価した。1つ目は、Loc_{WAM} の系統誤差に対応するエネルギー応答関数の不定性である。Loc_{other} が Loc_{WAM} を中心として正規分布すると仮定して、その標準偏差約 14° の中からサンプルを抽出して比較した。しかし、実際はこの誤差の領域が円状に分布するとは限らず、決定精度に由来する歪んだ分布になると考えられる。本来は、これらの効果を考慮した領域のなかで有効面積を比較することで、系統誤差を評価する必要がある。本研究ではそれらの影響を無視したため、偶発的に誤差が大きくなることも小さくなることもなく、平均的な評価になったと考えられる。また、同様のことを 32GRB に

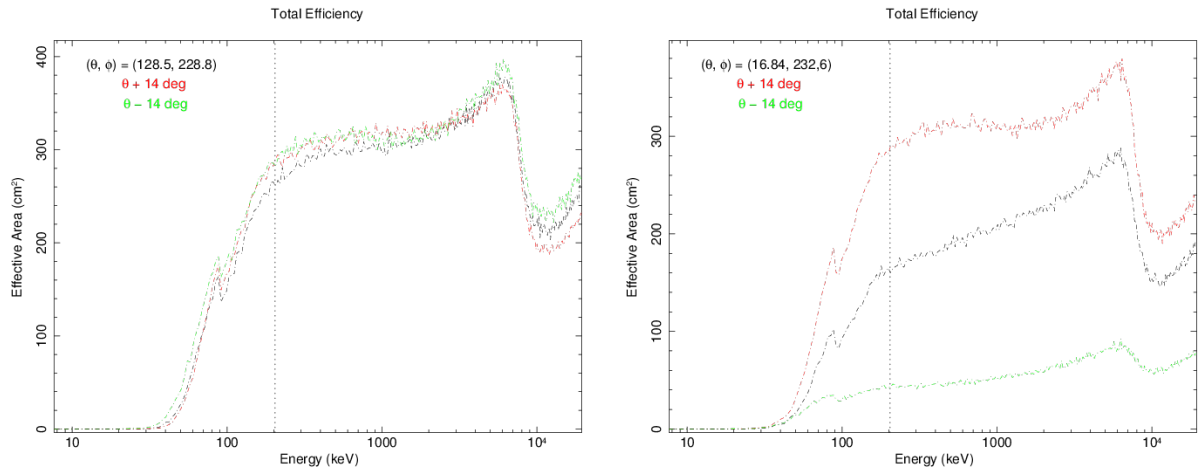


図 6.7: 面の正面と極付近における有効面積の比較。左:GRB121122A。右:GRB131014A

ついて行った上で不定性を求めているため、極付近であれば θ 方向の誤差を、 $\theta = 90^\circ$ 付近では ϕ 方向の誤差を強く反映する、といった効果も全て平均化されることとなる。2つ目は、 R_{spOther} と R_{spWAM} で実データを用いてスペクトル解析した結果を比較することによって不定性を求めた。これは実際に本手法を用いて決定された位置を使用しているため、より現実的な評価ではあるが、サンプル数が少ないため十分に信頼できる値とは言えない。また、評価方法 1 に比べて不定性が大きくなってしまったのは、スペクトル解析をしているためパラメータや 100 - 1000 keV 帯域を積分することによる誤差の伝播があると考えられる。このような違いが、2通りの評価方法の不定性が異なった原因であると考えられる。したがって、WAM の位置決定におけるエネルギー応答関数の不定性は 10 - 20 %程度であると考えられる。

これまで検証した項目の対応についてまとめると、表 6.3 のようになる。

表 6.3: 位置決定誤差に対するエネルギー応答関数の不定性

位置	比較	参照	位置決定の精度	エネルギー応答関数の不定性
真値と WAM の				
既知	エネルギー応答関数	Yamaoka et al. 2009	-	10 - 40%
未知	WAM 応答推定誤差	Sec6.1.1/Sec6.2.1	14°	12%
未知	WAM 応答推定誤差	Sec6.1.2/Sec6.2.2	$12^\circ - 13^\circ^\dagger$	$18\%^\S$
真値と WAM の				
未知	エネルギー応答関数	this section	-	15 - 45 %

[†] 他衛星決定位置に近い方向のみ示す

[§] Band Function でよく一致した時の flux に対する系統誤差

Yamaoka et al(2009) で報告されたエネルギー応答関数の不定性 10 - 40%は、他衛星の相互較正の結果得られた値である。つまり、他衛星のスペクトル解析結果との間の不定性を示す。本研究によって得られたエネルギー応答関数の不定性は、 R_{spOther} と R_{spWAM} の間の不定性であるため、最終的な WAM 単独でのスペクトル解析におけるエネルギー応答関数の不定性は、15 - 45 %程度

と見積もられる。

$$\text{他衛星スペクトル解析結果} \xrightarrow[\text{Yamaoka et al(2009)}]{10-40\%} \text{Rsp}_{\text{other}} \xrightarrow[10-20\%]{} \text{Rsp}_{\text{WAM}}$$

本研究の位置決定精度や不定性を良くするためには、マスモデルの再現性の向上、WANTIの校正試験結果を利用してより現実的な応答の再現、そして、シミュレーションの仮定の最適化が考えられる。本研究では、入射光子のスペクトルを典型的なGRBスペクトルであるBand Functionのみを仮定してデータベースを構築した。実際には、イベントごとにパラメータのみならず、モデルも変わってくるため、powerlawやcutoff powerlawを入射スペクトルとして同様のシミュレーションを行い、またあらゆるパラメータについてもシミュレーションを行った結果をデータベースとして、その中から最適解を求めていくべきであると考え。また、このモデルスペクトルの仮定の最適化を行わなかったために、評価方法2においてベストフィットモデルがBand Functionであるときに比べて、他のモデルのパラメータは系統誤差が大きくなった理由の一つであると考えられる。

最後に、本研究で評価したパラメータごとの系統誤差が、実際にスペクトル解析する際にGRBの信号の統計誤差と比較して、大きいのか小さいのか把握しておくことが重要である。そのために、GRB120916Aのスペクトル解析を行いパラメータの統計誤差を調べた。GRB120916A($1.17 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2}$)のベストフィットモデルはBand Functionであり、そのパラメーターとそれに対する統計誤差は、 $\alpha = -0.64^{+70\%}_{-48.9\%}$ 、 $\beta = -2.55^{+11.0\%}_{-40.6\%}$ 、 $E_{\text{peak}} = 315^{+18.7\%}_{-15.7\%} \text{ keV}$ 、100 - 1000 keVのフラックスが $4.05^{+1.96\%}_{-7.29\%} \times 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。このような暗いイベントの場合は、6.2.1節で求めたエネルギー応答関数の系統誤差はフラックスを除いて、統計誤差と比べて大きくはないことがわかる。

系統誤差を考慮すればWAM単独でのGRBのスペクトル解析をしても問題ないといえる。ただしWAM2方向とoff-axisについてはより不定性が高いことに注意する必要がある。また、本研究の位置決定方法の検証のために使用したGRBの明るさ(100 - 1000 keV帯域で $4.32 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2}$ 以上)より暗いGRBについては、その不定性を詳細に調べる必要がある。

第7章 まとめ

我々は Geant4 ベースのモンテカルシミュレーションを利用することで WAM 単独で GRB の天球上の位置を決定する方法を開発し、その精度やエネルギー応答関数の不定性を評価することによって、スペクトル解析手法を確立した。その位置決定に関する精度または誤差と、エネルギー応答関数に関する不定性は以下のように評価された。

- WAM 単独で GRB の位置を 2 方向にまで絞り込むことが可能となった。その位置決定精度は真の位置に近い方向を選択できた場合、 θ 方向は約 13° 、 ϕ 方向は WAM2 方向を除けば約 7° 程度である。また、系統誤差として約 14° を含む。
- 開発した位置決定方法によるエネルギー応答関数の不定性は 10 - 20%程度であると見積もられる。
- 位置決定精度やエネルギー応答関数の不定性が大きい方向は、主に WAM2 方向と off-axis であるとわかっている。
- Yamaoka et al(2009) の結果と合わせて、WAM 単独でのスペクトル解析の不定性は 15 - 45 %程度である。

これによって、まだスペクトル解析されていない約 1000 イベントの GRB についてスペクトル解析できる可能性を示した。

参考文献

- [1] Agostinelli, S., et al. 2003, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 506, 250
- [2] Aptekar, R. L., et al. 1995, *Space Science Reviews*, 71, 265
- [3] Band, D., et al. 1993, *Astrophysical Journal*, 413, 281
- [4] Boella, G., et al. 1997a, *Astronomy & Astrophysics*, 122, 327
- [5] Connaughton, V., et al. 2015, *Astrophysical Journal*, 216, 32
- [6] Costa, E., et al. 1997, *Nature*, 387, 783
- [7] Fishman, G. J., et al. 1985, *ICRC*, 1985, 3, 343
- [8] Fishman, G. J., et al. 1994, *Astrophysical Journal*, 92, 229
- [9] Fishman, G. J., et al. 1998, *IAUS*, 188, 159
- [10] Fitzpatrick, G., et al. 2014, *The Gamma – ray Coordinates Network*, 15935
- [11] Frontera, F., et al. 1992, *Nuovo Cimento C*, 5, 867
- [12] Galama, T. J., et al. 1998, *Nature*, 39, 670
- [13] Gehrels, N., et al. 2004, *Astrophysical Journal*, 611, 1005
- [14] Golenetskii, S., et al. 2014, *The Gamma – ray Coordinates Network*, 15938
- [15] Golenetskii, S., et al. 2014, *The Gamma – ray Coordinates Network*, 15939
- [16] Pendleton, G. N., et al. 1999, *Astrophysical Journal*, 512 362
- [17] Hjorth, J., et al. 2003, *Nature*, 423, 847
- [18] Kelley, R. L., et al. 2007, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59, 77
- [19] Klebesadel, R. W., et al. 1973, *Astrophysical Journal*, 182, 85
- [20] Kokubun, M., et al. 2007, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59, 53
- [21] Kouveliotou, C., et al. 1993, *Astrophysical Journal*, 413, 101
- [22] Meegan, C., et al. 2009, *Astrophysical Journal*, 702, 791

- [23] Mitsuda, K., et al. 2007, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59, 1
- [24] Ohno, M., et al. 2005, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 52, 2758
- [25] Ozaki, M., et al. 2005, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 53, 1310
- [26] Paciesas, W. S., et al. 1999, *Astrophysical Journal*, 122, 465
- [27] Preece, R. D., et al. 2000, *Astrophysical Journal*, 126, 19
- [28] Press, W. H., et al. 1986, *Numerical Recipes (New York : Cambridge Univ.)*
- [29] Rees, M. J., et al. 1992, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 258, 41
- [30] Ricker, G. B., et al. 2003, *AIP Conference Proceedings*, 662, 3
- [31] Sakamoto, T., et al. 2009, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63, 215
- [32] Takahashi, T., et al. 2007, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59, 35
- [33] Terada, Y., et al. 2005, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 52, 902
- [34] Ubertini, P., et al. 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 411, 131
- [35] Winkler, C., et al. 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 411, 349
- [36] Yamaoka, K., et al. 2009, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, 35

付 録 A モンテカルロシミュレーションツール キットの精度

本研究で Geant4 の物理素過程を定義するために用いたのは G4EmLivermorePhysicsList である。これは Geant4 の本来の利用目的であった大型加速器実験で考慮されるべき物理素過程を含んだ標準電磁相互作用パッケージよりも、低エネルギー側の相互作用をシミュレートできるパッケージであり、その扱えるエネルギーの下限値は 100 eV まで拡張されている。このエネルギー帯域では原子のもつ電子殻の構造によって生じる蛍光が非常に重要であるため、その散乱断面積を利用している。扱える相互作用は、光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成、レイリー散乱、電離、蛍光などが含まれる。

Geant4 では原子の性質を考慮した散乱断面積を計算するために以下のデータベースを利用している。

- EPDL97 (Evaluated Photons Data Library)
- EEDL (Evaluated Electrons Data Library)
- EADL (Evaluated Atomic Data Library)

Geant4 のシミュレーションにおいて、各相互作用の散乱断面積は上記のデータベースを用いて計算するが、入射エネルギーに対してデータベースは離散的な値であるために、以下の式で補間することによって、あらゆるエネルギーに対する散乱断面積を求めている。

$$\log(\sigma(E)) = \frac{\log(\sigma_1)\log(E_2/E) + \log(\sigma_2)\log(E/E_1)}{\log(E_2/E_1)}$$

ここで、 E_1, E_2 は入射エネルギー E に最も近い上下のエネルギー、 σ_1, σ_2 はその時の散乱断面積である。そして、入射エネルギー E に対して原子番号 i の物質中で生じる相互作用の平均自由行程 λ は次のように書ける。

$$\lambda = \frac{1}{\sum_i \sigma_i(E) n_i}$$

計算された平均自由行程を用いて、シミュレーションにおける最小構成要素であるステップの幅を決定している。

ガンマ線光子が物質中で起こす相互作用は光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成が主である。物質に入射した光子が相互作用せず透過する数は、物質の厚さに応じて指数関数的に減少する。光子数 I_0 のビームを厚み x cm の物質に入射させたとき、相互作用をせずに透過する光子数 I は次のように書ける。

$$I = I_0 \exp^{-\mu x} = I_0 \exp^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x} = I_0 \exp^{-\frac{x}{\lambda}} = I_0 \exp^{-\rho \sigma x}$$

μ は線減衰係数、 ρ は物質の密度、 λ は平均自由行程、 σ は散乱断面積であり各相互作用の和で与えられる。

$$\sigma = \sigma_{\text{photoAbs}} + \sigma_{\text{compton}} + \sigma_{\text{pair}}$$

本研究において Geant4 の G4EmLivermorePhysicsList を利用しているが、そのデータベースやシミュレーションの計算がどの程度正しいのか把握しておくことが大切である。そのため、簡単なシミュレーションを行い得られた相互作用確率を The National Institute of Standards and Technology (NIST) が提供する光子と物質の相互作用データベースである XCOM と比較した。シミュレーションの条件は以下のように設定した。

Geometry の定義 1 cm^3 の BGO 結晶

初期入射光子の定義 光子を 50 - 5000 keV のあるエネルギー幅で 10^6 発づつ入射

物理素過程の定義 G4EmLivermorePhysicsList

検出アルゴリズム BGO 結晶内で起きた最初に発生した相互作用を数え上げる。それを 10^6 で割る。

NIST から $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (密度 $\rho = 7.13 \text{ g cm}^{-3}$) の質量減衰係数を調べ以下のように計算する。

- 全相互作用確率 : $1 - \exp(-7.13 \text{ g/cm}^3 \times \text{全質量減衰係数} \times 1\text{cm})$
- 各相互作用確率 : 全相互作用確率 $\times$ 各相互作用質量減衰係数 $\times$ 全質量減衰係数

シミュレーションと NIST データベースを比較したものを図 A.1 に示す。

試行したエネルギーにわたってどの相互作用も数 % の誤差で NIST データベースと一致していることがわかる。また全相互作用確率での比較においては、その誤差は 1% 以下である。つまり、Geant4 によるシミュレーションは実際の相互作用をよく再現できていると言える。

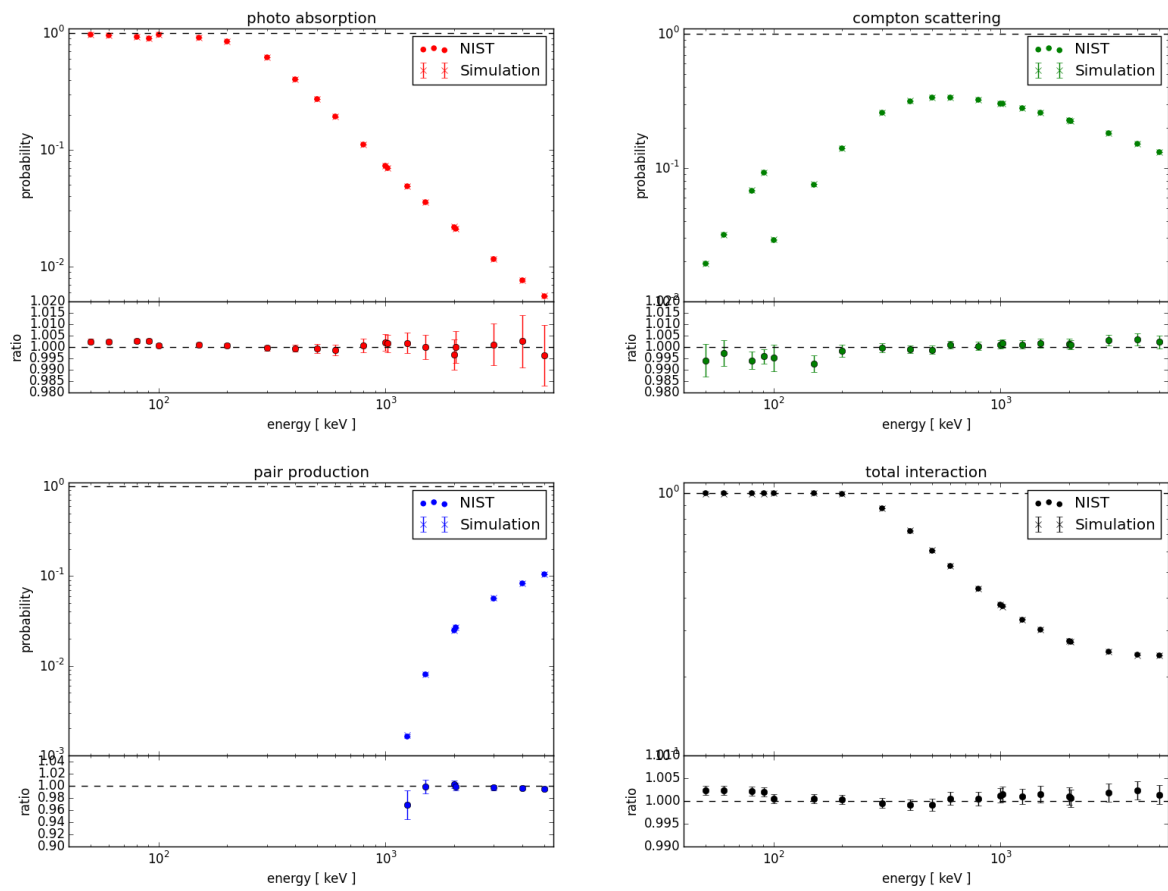


図 A.1: Geant4シミュレーションと NIST データベースとの相互作用確率の比較。左上:光電効果。右上:コンプトン散乱。左下:電子陽電子対生成。右下:全相互作用確率。パネルの上は、シミュレーションと NIST データベースから計算されたそれぞれの相互作用確率、パネル下はその比を示す。

付 録 B 32GRB の位置決定結果

開発した位置決定方法の精度を 32 の GRB で検証した際の各 GRB の他衛星決定位置と独自に決定した位置、そしてその誤差を示す。項目 WAM は、GRB にもっとも明るく照らされた面の番号である。 χ^2 は実測値とシミュレーションの比較の結果、その一致の良さを示す。

表 B.1: 位置決定結果

GRB	WAM	他衛星決定位置 (θ, ϕ)	推定位置 (θ, ϕ)	誤差 ($\Delta\theta, \Delta\phi$)	χ^2
090301A	0	(92.43 , 122.7)	(128.5 , 122.8)	(36.11 , 0.074)	5.144
			(73.77 , 124.2)	(18.66 , 1.475)	25.11
090618	0	(40.14 , 129.2)	(137 , 129.8)	(96.88 , 0.621)	30.83
			(64.05 , 127.4)	(23.92 , 1.726)	1.446
090623	2	(50.58 , 298.4)	(129.6 , 296.3)	(78.98 , 2.079)	0.884
			(55.25 , 290.6)	(4.674 , 7.751)	0.007
090829A	2	(53.19 , 247.4)	(132.6 , 237.9)	(79.44 , 9.503)	2.965
			(55.59 , 225.2)	(2.403 , 22.17)	0.416
090902B	3	(147.5 , 207.7)	(144 , 218.7)	(3.563 , 11.09)	55.95
			(21 , 225.6)	(126.5 , 17.95)	0.810
090926A	3	(63.6 , 205.5)	(136.9 , 209.2)	(73.33 , 3.706)	10.97
			(62.91 , 208.6)	(0.685 , 3.075)	116.3
100322A	0	(111.5 , 80.82)	(130.2 , 71.39)	(18.75 , 9.43)	7.041
			(72.06 , 68.27)	(39.41 , 12.56)	12.59
100324B	1	(120.1 , 38.28)	(133.1 , 38.73)	(13.06 , 0.456)	14.44
			(71.89 , 37.81)	(48.19 , 0.467)	5.170
100414A	2	(94.7 , 277.2)	(13.7 , 234.5)	(80.99 , 42.71)	0.780
			(135.5 , 243.3)	(40.78 , 33.98)	22.29
100423A	1	(99.09 , 348.9)	(138.3 , 328.9)	(39.2 , 19.96)	3.868
			(63.94 , 329.2)	(35.15 , 19.62)	2.239
100606A	2	(47.38 , 301.6)	(148 , 313.8)	(100.6 , 12.17)	0.613
			(34.55 , 311.5)	(12.82 , 9.953)	0.310

表 B.1: 位置決定結果 (続き)

GRB	WAM	他衛星決定位置 (θ, ϕ)	推定位置 (θ, ϕ)	誤差 ($\Delta\theta, \Delta\phi$)	χ^2
100707A	2	(140.6 , 299.4)	(139.3 , 246.4)	(1.313 , 53.05)	25.94
			(58.07 , 253.2)	(82.53 , 46.22)	7.475
100724B	0	(70.05 , 119.5)	(135.9 , 125.4)	(65.81 , 5.984)	46.74
			(64.85 , 122.2)	(5.2 , 2.718)	29.79
110422A	0	(158.4 , 54.8)	(138.9 , 60.1)	(19.46 , 5.301)	4.459
			(60.15 , 64.46)	(98.26 , 9.662)	1.524
110428A	0	(58.16 , 78.29)	(122.6 , 74.92)	(64.45 , 3.376)	3.99
			(77.33 , 72.8)	(19.17 , 5.498)	14.86
110709B	3	(42.49 , 146.9)	(138.5 , 140.7)	(96.03 , 6.176)	3.171
			(61.7 , 142)	(19.21 , 4.941)	0.501
110715A	3	(83.07 , 216.5)	(109.4 , 215.3)	(26.3 , 1.188)	1.144
			(88.09 , 220)	(5.023 , 3.509)	0.087
110731A	3	(95.99 , 238.9)	(127.8 , 228.1)	(31.76 , 10.79)	0.133
			(74.04 , 227.4)	(21.95 , 11.52)	34.5
110815A	3	(101.6 , 138.9)	(124.3 , 136.5)	(22.77 , 2.442)	0.529
			(78.26 , 136)	(23.29 , 2.981)	5.614
110825A	1	(26.06 , 346.9)	(14.82 , 318.1)	(11.24 , 28.76)	2.272
			(146.3 , 313.5)	(120.2 , 33.34)	1.733
111215B	1	(91.83 , 35.28)	(128 , 37.06)	(36.12 , 1.774)	0.962
			(76.94 , 37.81)	(14.89 , 2.526)	1.313
120916A	0	(87.25 , 41.92)	(125.9 , 46.53)	(38.61 , 4.611)	0.538
			(76.82 , 46.61)	(10.43 , 4.691)	0.046
121122A	2	(121 , 269.7)	(128.5 , 228.8)	(7.43 , 40.86)	1.601
			(67.54 , 231.1)	(53.5 , 38.62)	1.848
130502B	1	(67.25 , 35.66)	(128.4 , 39.23)	(61.19 , 3.567)	22.94
			(75.61 , 39.74)	(8.364 , 4.072)	50.65
130504B	0	(143.2 , 96.52)	(147.6 , 127.9)	(4.431 , 31.35)	0.606
			(40.21 , 120.9)	(103 , 24.42)	0.129
130505A	1	(78.2 , 345.7)	(139.8 , 329.5)	(61.63 , 16.2)	39.77
			(63.96 , 329.4)	(14.24 , 16.36)	71.12
130518A	1	(101 , 36.68)	(129.3 , 40.97)	(28.3 , 4.291)	20.32
			(74.88 , 40.47)	(26.11 , 3.79)	15.94

表 B.1: 位置決定結果 (続き)

GRB	WAM	他衛星決定位置 (θ, ϕ)	推定位置 (θ, ϕ)	誤差 ($\Delta\theta, \Delta\phi$)	χ^2
130606B	2	(63.66 , 284.3)	(139.6 , 297.1)	(75.96 , 12.78)	0.317
			(47.14 , 298.7)	(16.52 , 14.4)	10.14
131014A	2	(9.612 , 206.5)	(153.6 , 229.4)	(144 , 22.93)	99.01
			(16.84 , 232.6)	(7.231 , 26.15)	1.669
131229A	1	(96.6 , 321)	(101.6 , 311)	(5.022 , 10.08)	2.35
			(78.52 , 316.8)	(18.08 , 4.245)	2.307
140306A	0	(48.44 , 46.98)	(140.9 , 44.77)	(92.42 , 2.213)	32.13
			(56.74 , 46.66)	(8.298 , 0.3208)	1.82
140308A	0	(74.63 , 72.02)	(123.4 , 66.29)	(48.77 , 5.731)	7.112
			(76.87 , 68.39)	(2.238 , 3.628)	4.841

付 録 C スペクトル解析結果

他衛星決定位置と独自決定位置の 2 方向でエネルギー応答関数を作成しスペクトル解析をした結果を示す。項目 WAM は、GRB によって最も明るく照らされた面の番号である。

表 C.1: スペクトル解析結果

GRBname	WAM	位置 (θ, ϕ)	α	β	E_{peak} (keV)	flux (photons cm ⁻² s ⁻¹)
090301A	0	(92.43,122.69)	$-1.19^{+0.08}_{-0.09}$	$-3.03^{+0.80}_{-0.33}$	$618.76^{+42.38}_{-48.70}$	$3.51^{+0.07}_{-0.04}$
		(73.77,124.16)	$-1.19^{+0.08}_{-0.09}$	$-3.02^{+0.77}_{-0.32}$	$611.69^{+41.03}_{-47.84}$	$3.60^{+0.05}_{-0.03}$
		(128.54,122.76)	$-1.19^{+0.08}_{-0.09}$	$-3.06^{+0.67}_{-0.30}$	$543.69^{+30.35}_{-35.07}$	$4.54^{+0.08}_{-0.05}$
090618	0	(40.13,129.15)	$1.20^{+0.22}_{-0.21}$	—	$313.49^{+28.10}_{-21.16}$	$2.27^{+0.06}_{-0.08}$
		(64.05,127.42)	$1.23^{+0.22}_{-0.20}$	—	$334.55^{+27.25}_{-21.14}$	$1.71^{+0.06}_{-0.06}$
		(137.01,129.77)	$1.23^{+0.22}_{-0.21}$	—	$300.76^{+31.47}_{-22.99}$	$2.51^{+0.1}_{-0.13}$
090623	2	(50.57,298.35)	$0.65^{+0.27}_{-0.24}$	—	$508.57^{+73.43}_{-103.96}$	$0.88^{+0.07}_{-0.03}$
		(55.24,290.60)	$0.90^{+0.26}_{-0.23}$	—	$516.87^{+82.74}_{-123.21}$	$0.90^{+0.06}_{-0.03}$
		(129.55,296.28)	$0.82^{+0.27}_{-0.24}$	—	$518.30^{+78.77}_{-116.16}$	$0.84^{+0.09}_{-0.04}$
090829A	2	(53.18,247.40)	$-0.96^{+0.21}_{-0.26}$	$-2.60^{+0.66}_{-0.21}$	$312.21^{+37}_{-49.19}$	$2.34^{+0.08}_{-0.05}$
		(55.59,225.24)	$-0.48^{+0.21}_{-0.27}$	$-2.48^{+0.36}_{-0.20}$	$345.42^{+40.80}_{-46.50}$	$1.39^{+0.08}_{-0.01}$
		(132.62,237.90)	$-0.98^{+0.22}_{-0.24}$	$-2.64^{+1.28}_{-0.24}$	$328.83^{+38.55}_{-56.11}$	$2.23^{+0.12}_{-0.04}$
090902B	3	(147.54,207.65)	$0.68^{+0.07}_{-0.06}$	—	$781.10^{+36.65}_{-40.54}$	$5.42^{+0.07}_{-0.05}$
		(143.97,218.74)	$0.68^{+0.07}_{-0.07}$	—	$755.17^{+34.05}_{-37.19}$	$6.04^{+0.08}_{-0.06}$
		(20.99,225.61)	$0.73^{+0.07}_{-0.07}$	—	$701.45^{+29.28}_{-32.07}$	$9.65^{+0.13}_{-0.11}$
090926A	3	(63.59,205.51)	$-1.09^{+0.10}_{-0.11}$	$-2.81^{+0.15}_{-0.11}$	$428.32^{+14.86}_{-15.31}$	$12.05^{+0.2}_{-0.16}$
		(62.91,208.59)	$-1.06^{+0.10}_{-0.12}$	$-2.81^{+0.14}_{-0.20}$	$421.40^{+14.50}_{-14.94}$	$12.45^{+0.22}_{-0.14}$
		(136.92,209.22)	$-0.93^{+0.12}_{-0.14}$	$-2.83^{+0.12}_{-0.09}$	$386.51^{+11.27}_{-11.45}$	$14.48^{+0.23}_{-0.26}$
100322A	0	(111.47,80.82)	$1.40^{+0.07}_{-0.07}$	—	$733.26^{+85.68}_{-108.43}$	$1.19^{+0.02}_{-0.01}$
		(130.22,71.39)	$1.37^{+0.08}_{-0.08}$	—	$613.55^{+58.52}_{-75.90}$	$1.49^{+0.02}_{-0.02}$
		(72.06,68.26)	$1.39^{+0.07}_{-0.07}$	—	$746.35^{+87.51}_{-111.10}$	$1.16^{+0.01}_{-0.01}$
100324B	1	(120.08,38.27)	$-0.37^{+0.09}_{-0.11}$	$-3.31^{+6.68}_{-0.53}$	$461.68^{+31.27}_{-30.62}$	$3.04^{+0.05}_{-0.05}$
		(133.14,38.73)	$-0.28^{+0.11}_{-0.13}$	$-3.20^{+2.09}_{-0.44}$	$435.04^{+30.49}_{-28.96}$	$3.61^{+0.08}_{-0.04}$
		(71.89,37.80)	$-0.41^{+0.09}_{-0.11}$	$-3.28^{+6.71}_{-0.55}$	$476.68^{+34.17}_{-33.80}$	$2.65^{+0.04}_{-0.03}$

表 C.1: スペクトル解析結果 (続き)

GRB	WAM	位置 (θ, ϕ)	α	β	E_{peak} (keV)	flux (photons cm ⁻² s ⁻¹)
100414A	2	(94.69,277.23)	$-0.82^{+0.14}_{-0.16}$	$-3.45^{+1.19}_{-0.46}$	$656.79^{+41.73}_{-46.31}$	$3.74^{+0.12}_{-0.08}$
		(135.47,243.26)	$-0.67^{+0.15}_{-0.17}$	$-3.52^{+1.24}_{-0.47}$	$626.17^{+36.09}_{-38.78}$	$4.39^{+0.15}_{-0.09}$
		(13.70,234.53)	$-0.71^{+0.17}_{-0.19}$	$-3.69^{+1.25}_{-0.46}$	$524.28^{+25.41}_{-25.70}$	$14.23^{+0.62}_{-0.38}$
100423A	1	(99.09,348.85)	$0.35^{+0.24}_{-0.22}$	—	$754.96^{+89.42}_{-119.43}$	$0.80^{+0.06}_{-0.04}$
		(63.94,329.22)	$0.44^{+0.24}_{-0.22}$	—	$697.76^{+77.58}_{-104.37}$	$1.03^{+0.08}_{-0.03}$
		(138.28,328.89)	$0.27^{+0.26}_{-0.23}$	—	$644.87^{+61.61}_{-78.79}$	$1.21^{+0.07}_{-0.05}$
100606A	2	(47.37,301.58)	$-0.62^{+0.17}_{-0.22}$	$-2.85^{+7.14}_{-0.56}$	$865.72^{+185.20}_{-227.98}$	$1.32^{+0.12}_{-0.05}$
		(34.55,311.53)	$-0.66^{+0.18}_{-0.23}$	$-2.87^{+17.12}_{-0.56}$	$852.46^{+179.84}_{-289.14}$	$1.41^{+0.02}_{-0.02}$
		(148.02,313.75)	$-0.66^{+0.19}_{-0.24}$	$-2.88^{+17.11}_{-0.57}$	$862.32^{+177.67}_{-242.92}$	$1.42^{+0.01}_{-0.01}$
100707A	2	(140.60,299.426)	$-0.82^{+0.57}_{-1.59}$	$-2.26^{+0.17}_{-0.08}$	$316.59^{+76.73}_{-107.20}$	$7.42^{+0.58}_{-0.08}$
		(139.29,246.37)	$-1.66^{+0.13}_{-6.66}$	$-2.45^{+0.43}_{-0.33}$	$431.36^{191.01}_{-101.20}$	$7.47^{+0.11}_{-0.30}$
		(58.06,253.21)	$-0.40^{+2.19}_{-0.40}$	$-2.19^{+0.14}_{-0.07}$	$283.78^{+118.74}_{-39.53}$	$6.56^{+1.41}_{-0.05}$
100724B	0	(70.05,119.46)	$-1.44^{+0.05}_{-0.07}$	$-2.01^{+0.06}_{-0.05}$	$928.44^{+142.58}_{-71.49}$	$2.67^{+0.06}_{-0.01}$
		(64.85,122.18)	$-1.40^{+0.07}_{-0.09}$	$-2.02^{+0.05}_{-0.04}$	$787.42^{+107.00}_{-146.77}$	$2.86^{+0.07}_{-0.02}$
		(135.86,125.44)	$-1.35^{+0.09}_{-0.11}$	$-2.11^{+0.04}_{-0.03}$	$560.24^{+50.50}_{-60.86}$	$4.16^{+0.10}_{-0.03}$
110422A	0	(158.40,54.79)	$2.79^{+0.11}_{-0.11}$	—	—	$3.71^{+0.16}_{-0.11}$
		(138.94,60.09)	$2.73^{+0.11}_{-0.12}$	—	—	$1.73^{+1.27}_{-0.03}$
		(60.15,64.45)	$2.64^{+0.11}_{-0.12}$	—	—	$1.13^{+0.29}_{-0.01}$
110428A	0	(58.15,78.29)	$-0.31^{+0.18}_{-0.22}$	$-3.29^{+0.50}_{-0.27}$	$221.54^{+8.50}_{-7.92}$	$4.44^{+0.09}_{-0.07}$
		(77.32,72.79)	$-0.32^{+0.18}_{-0.22}$	$-3.23^{+0.48}_{-0.26}$	$223.60^{+8.97}_{-8.42}$	$4.01^{+0.09}_{-0.06}$
		(122.60,74.91)	$-0.31^{+0.17}_{-0.20}$	$-3.39^{+0.55}_{-0.29}$	$222.19^{+7.78}_{-7.25}$	$4.77^{+0.10}_{-0.06}$
110709B	3	(42.48,146.91)	$-0.83^{+0.85}_{-1.50}$	$-4.21^{+5.78}_{-1.56}$	$279.59^{+107.87}_{-43.34}$	$0.83^{+0.05}_{-0.00}$
		(61.70,141.97)	$-0.83^{+0.84}_{-1.81}$	$-4.03^{+5.96}_{-1.49}$	$293.58^{+95.61}_{-43.96}$	$0.63^{+0.63}_{-660.87}$
		(138.52,140.73)	$-0.64^{+0.88}_{-1.37}$	$-4.54^{+5.45}_{-1.79}$	$288.93^{+79.34}_{-38.1}$	$0.89^{+0.07}_{-0.00}$
110715A	3	(83.07,216.47)	$-0.27^{+0.64}_{-0.61}$	$-3.19^{+6.80}_{-0.33}$	$187.67^{+12.51}_{-13.72}$	$4.30^{+0.48}_{-0.14}$
		(88.09,219.98)	$-0.28^{+0.47}_{-0.58}$	$-3.27^{+6.72}_{-0.35}$	$186.22^{+11.19}_{-12.23}$	$5.15^{+0.31}_{-0.18}$
		(109.36,215.28)	$-0.42^{+0.47}_{-0.53}$	$-3.31^{+6.68}_{-0.40}$	$193.95^{+11.67}_{-14.33}$	$4.20^{+0.25}_{-0.14}$
110731A	3	(95.98,238.91)	$0.13^{+0.59}_{-0.89}$	$-2.76^{+0.68}_{-0.24}$	$267.02^{+35.73}_{-43.04}$	$5.32^{+0.63}_{-0.10}$
		(74.04,227.39)	$-0.35^{+0.49}_{-0.87}$	$-2.76^{+7.23}_{-0.31}$	$276.82^{+47.95}_{-55.47}$	$5.18^{+0.35}_{-0.11}$
		(127.75,228.11)	$-0.23^{+0.461}_{-0.78}$	$-2.85^{+7.14}_{-0.36}$	$302.44^{+49.33}_{-53.38}$	$4.29^{+0.26}_{-0.10}$

表 C.1: スペクトル解析結果 (続き)

GRB	WAM	位置 (θ, ϕ)	α	β	E_{peak} (keV)	flux (photons cm ⁻² s ⁻¹)
110815A	3	(101.55,138.94)	$-0.35^{+0.14}_{-0.17}$	$-2.78^{+0.26}_{-0.17}$	$327.50^{+20.31}_{-20.51}$	$3.59^{+0.06}_{-0.03}$
		(124.32,136.50)	$-0.31^{+0.14}_{-0.17}$	$-2.88^{+0.27}_{-0.17}$	$323.48^{+17.95}_{-17.84}$	$4.34^{+0.05}_{-0.05}$
		(78.26,135.96)	$-0.36^{+0.14}_{-0.17}$	$-2.77^{+0.26}_{-0.17}$	$328.40^{+20.78}_{-20.94}$	$3.56^{+0.06}_{-0.03}$
110825A	1	(26.06,346.86)	$1.45^{+0.35}_{-0.29}$	—	$276.53^{+69.61}_{-44.11}$	$5.73^{+0.18}_{-0.32}$
		(14.82,318.11)	$1.42^{+0.35}_{-0.30}$	—	$270.30^{+64.51}_{-41.28}$	$9.90^{+0.37}_{-0.63}$
		(146.28,313.52)	$1.40^{+0.34}_{-0.29}$	—	$307.40^{+55.88}_{-46.39}$	$4.26^{+0.23}_{-0.23}$
111215B	1	(91.82,35.28)	$1.15^{+0.14}_{-0.12}$	—	$473.60^{+60.46}_{-86.25}$	$0.73^{+0.02}_{-0.01}$
		(76.93,37.81)	$1.15^{+0.14}_{-0.12}$	—	$467.57^{+58.84}_{-83.81}$	$0.75^{+0.03}_{-0.01}$
		(127.95,37.05)	$1.08^{+0.14}_{-0.13}$	—	$425.39^{+44.78}_{-60.17}$	$0.95^{+0.03}_{-0.01}$
120916A	0	(87.24,41.91)	$-0.64^{+0.31}_{-0.46}$	$-2.55^{+1.03}_{-0.28}$	$315.40^{+49.60}_{-59.02}$	$0.95^{+0.06}_{-0.01}$
		(76.81,46.60)	$-0.66^{+0.31}_{-0.45}$	$-2.52^{+1.04}_{-0.24}$	$321.14^{+52.29}_{-62.45}$	$0.89^{+0.07}_{-0.02}$
		(125.86,46.52)	$-0.55^{+0.32}_{-0.45}$	$-2.63^{+0.99}_{-0.29}$	$310.94^{+44.12}_{-50.51}$	$1.13^{+0.08}_{-0.02}$
121122A	2	(121.04,269.68)	$1.58^{+0.51}_{-0.37}$	—	$139.67^{+84.82}_{-59.96}$	$2.63^{+0.08}_{-1.33}$
		(128.47,228.82)	$1.46^{+0.52}_{-0.44}$	—	$155.78^{+108.86}_{-48.87}$	$3.46^{+0.10}_{-0.88}$
		(67.54,231.06)	$1.33^{+0.51}_{-0.43}$	—	$211.38^{+82.08}_{-38.59}$	$1.64^{+0.07}_{-0.11}$
130502B	1	(67.24,35.66)	$-1.16^{+0.16}_{-0.19}$	$-3.01^{+0.40}_{-0.21}$	$376.35^{+15.89}_{-15.91}$	$4.54^{+0.14}_{-0.11}$
		(75.61,39.73)	$-1.25^{+0.15}_{-0.18}$	$-3.01^{+0.44}_{-0.22}$	$370.47^{+17.56}_{-16.86}$	$4.53^{+0.10}_{-0.15}$
		(128.43,39.22)	$-1.16^{+0.17}_{-0.20}$	$-3.09^{+0.38}_{-0.21}$	$346.94^{+16.39}_{-14.56}$	$5.74^{+0.20}_{-0.18}$
130504B	0	(143.16,96.52)	$0.26^{+0.12}_{-0.10}$	—	$1297.79^{+120.95}_{-129.19}$	$6.40^{+0.30}_{-0.25}$
		(147.59,127.87)	$0.27^{+0.12}_{-0.11}$	—	$1220.13^{+112}_{-120.05}$	$8.54^{+0.33}_{-0.29}$
		(40.20,120.93)	$0.28^{+0.11}_{-0.10}$	—	$1336.11^{+125.84}_{-134.25}$	$5.88^{+0.31}_{-0.25}$
130505A	1	(78.20,345.73)	$-0.84^{+0.04}_{-0.09}$	$-2.26^{+0.05}_{-0.05}$	$984.49^{+68.73}_{-4736.97}$	$8.94^{+0.2}_{-0.10}$
		(63.96,329.37)	$-0.95^{+0.08}_{-0.09}$	$-2.28^{+0.05}_{-0.05}$	$872.78^{+63.1}_{-70.62}$	$11.72^{+0.27}_{-0.15}$
		(139.83,329.52)	$-0.69^{+0.12}_{-0.13}$	$-2.26^{+0.04}_{-0.03}$	$694.87^{+41.64}_{-45.29}$	$13.69^{+0.32}_{-0.21}$
130518A	1	(100.98,36.67)	$-0.94^{+0.05}_{-0.06}$	$-2.40^{+0.2}_{-0.09}$	$578.97^{+36.91}_{-38.91}$	$3.78^{+0.03}_{-0.02}$
		(74.87,40.46)	$-0.89^{+0.06}_{-0.07}$	$-2.38^{+0.10}_{-0.08}$	$545.83^{+36.20}_{-37.63}$	$3.93^{+0.04}_{-0.02}$
		(129.28,40.96)	$-0.82^{+0.06}_{-0.07}$	$-2.42^{+0.09}_{-0.07}$	$481.41^{+27.70}_{-28.48}$	$5.15^{+0.05}_{-0.03}$
130606B	2	(63.65,284.29)	$-1.11^{+0.19}_{-0.30}$	$-2.05^{+0.05}_{-0.05}$	$531.91^{+104.13}_{-123.12}$	$3.80^{+0.23}_{-0.05}$
		(47.13,298.70)	$-0.79^{+0.26}_{-0.47}$	$-2.07^{+0.05}_{-0.04}$	$457.00^{+81.49}_{-83.95}$	$4.42^{+0.27}_{-0.05}$
		(139.61,297.07)	$-0.44^{+0.35}_{-0.86}$	$-2.04^{+0.05}_{-0.04}$	$426.57^{+88.14}_{-77.06}$	$3.75^{+0.42}_{-0.04}$

表 C.1: スペクトル解析結果 (続き)

GRB	WAM	位置 (θ, ϕ)	α	β	E_{peak} (keV)	flux (photons cm ⁻² s ⁻¹)
131014A	2	(9.61,206.49)	$-1.06^{+0.36}_{-0.57}$	$-3.12^{+0.29}_{-0.16}$	$246.78^{+26.89}_{-15.91}$	$101.8^{+2.29}_{-5.4}$
		(16.84,232.64)	$-0.64^{+0.48}_{-0.78}$	$-2.82^{+0.18}_{-0.12}$	$278.57^{+16.55}_{-15.25}$	$33.65^{+1.44}_{-1.16}$
		(153.61,229.43)	$-0.74^{+0.43}_{-0.64}$	$-2.78^{+0.26}_{-0.13}$	$305.74^{+21.16}_{-21.26}$	$21.26^{+0.67}_{-0.51}$
131229A	1	(96.59,321.04)	$1.45^{+0.45}_{-0.38}$	—	$323.14^{+141.06}_{-65.34}$	$4.35^{+0.21}_{-0.65}$
		(101.62,310.96)	$1.55^{+0.46}_{-0.39}$	—	$265.40^{+187.25}_{-78.22}$	$5.26^{+0.43}_{-1.33}$
		(78.51,316.80)	$1.47^{+0.47}_{-0.39}$	—	$312.15^{+161.03}_{-68.17}$	$4.30^{+0.31}_{-0.69}$
140306A	0	(48.43,46.98)	$0.92^{+0.03}_{-0.03}$	—	$1412.33^{+105.07}_{-109.51}$	$1.42^{+0.03}_{-0.01}$
		(56.73,46.65)	$0.91^{+0.03}_{-0.03}$	—	$1471.65^{+109.57}_{-115.49}$	$1.30^{+0.02}_{-0.02}$
		(140.85,44.76)	$0.90^{+0.04}_{-0.03}$	—	$1228.98^{+87.05}_{-92.41}$	$2.00^{+0.03}_{-0.03}$
140308A	0	(74.63,72.01)	$-0.87^{+0.09}_{-0.11}$	$-2.03^{+0.09}_{-0.07}$	$363.01^{+39.74}_{-43.85}$	$1.09^{+0.03}_{-0.01}$
		(76.86,68.39)	$-0.86^{+0.09}_{-0.11}$	$-2.03^{+0.09}_{-0.07}$	$355.51^{+38.38}_{-42.69}$	$1.10^{+0.02}_{-0.01}$
		(123.40,66.28)	$-0.81^{+0.09}_{-0.11}$	$-2.10^{+0.09}_{-0.07}$	$336.56^{+31.96}_{-34.55}$	$1.32^{+0.02}_{-0.01}$

謝辞

この修士論文を書くにあたりご指導、ご協力いただいた全ての方々に心から感謝いたします。研究室配属された学部4年生のときから、田代先生と寺田先生には大変お世話になりました。私は卒業研究のころからのこの研究に携わってきましたが、大変恵まれていたと感じております。とてもやりがいのある研究テーマを与えられたこと、両先生ともWAMに関わっていたこと、田代先生には特にガンマ線バーストに関するご指摘を頂いたこと、寺田先生にはGeant4によるシミュレーションについて多くのご助言を頂いた事など、感謝するばかりです。また、本研究を進めるにあたり安田様のご協力が大変大きかったと感じております。安田さんには、Geant4だけでなく、WAM、ガンマ線バースト、その他解析方法やプログラミング、そして本研究の進め方など、大学院生活の知恵のほとんどを教えていただいたような気がします。さらに、名古屋大学の山岡さんには、位置決定方法の改善方法や学会に出る際に多くのご指摘を頂きました。広島大学の大野さんには、WANTIに関する重要なご指摘を頂いたり、無理言って調べ物をしていただいたこともありました。私は本当に恵まれており、3年間かかりましたがなんとかやり遂げることができました。この方々のお力添えがあったからこそできたものです。本当にありがとうございました。3年間過ごした研究室の生活はとても楽しかったです。榎本とはガンマ線バースト自主勉強会をして、結局よくわからなかったりして、私がFREDで修士論文を書こうとしていたときに勉強会で様々なことを教えていただいて、大変勉強になりました。逆に特に力になれなくて申し訳ないです。久保田とは飲み会でよく話した記憶があります。特に教授の前では話せないような***な話が多かったですね。なぜか僕のこと見透かされてるのがすごい嫌でした。中谷の仕事の早さにはいつも驚かされました。中谷には酷いことばかり言って申し訳なかったとちょっとだけ思っています。僕とはセンスが異なるみたいですね。松岡とはなんだかんだ6年間一緒にいることになってしまいました。松岡がいてくれなければ何回逮捕されていたことか。これからも飲みに行きましょう。この同期との思い出として特にM2の夏の学校は一生忘れないでしょう。最後になりましたが、大学院生活、本研究のほとんどは私の家族の支援によるものです。私へのご理解とご支援に感謝いたします。大変ありがとうございました。

平成28年2月5日 藤沼 洸