

線衛星 GLAST と X 線衛星 Suzaku/WAM
によるガンマ線バースト
同時観測における検出感度評価

花畑 義隆

広島大学理学部物理科学科

B044326

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

主査:片桐秀明 副査:石川健一

2008年2月29日

概要

本研究の目的は、ガンマ線バースト (Gamma-ray bursts; GRB) の GeV 付近のスペクトルに折れ曲がり (カットオフ) が存在する場合、 γ 線天文衛星 GLAST のみでの観測と比較し、X 線天文衛星「すざく」搭載 WAM 検出器で同時観測を行った場合に、どの程度カットオフの検出感度が向上するかをシミュレーションにより定量的に評価することである。

GRB とは、1 日に数個程度発生し、ガンマ線を放射する天体現象である。放射時間が 10ms~1000s、放射のピークを 250keV 付近にもつ。GRB のガンマ線放射を説明する有力な理論が内部衝撃波モデルである。爆発によって生じたシェルのローレンツ因子 Γ によっては、GeV 以上のガンマ線は、電子・陽電子対生成をおこし放射領域から出てこれないため、GeV 領域でのスペクトルにカットオフが生じると予想される [1]。もし、カットオフのエネルギーが決まると Γ に厳しい制限をつけることができ、放射機構の解明につながる。これまで、EGRET によって GeV 領域の観測がなされていたが、デッドタイムが 100ms と大きかったために、GeV 以上でフラックスに大きな不定性があった。しかし、2008 年度中打ち上げ予定の γ 線衛星 GLAST の LAT では、デッドタイムが $20\mu\text{s}$ と短く、カットオフの有無を判断することが可能であると期待されている。

カットオフの有無は、GRB のべき型スペクトルからのずれにより判断するため、べき指数の精度良い決定が必要である。しかし、LAT のエネルギー範囲では光子数の統計がよい特に明るい GRB でしかべき指数が精度良く決まらない。そこで、GLAST に加え、検出できる有効面積が 1MeV で世界最大の WAM を用いて同時観測を行うことで、暗い GRB でもべき指数を精度良く決定でき、系統的なカットオフの研究ができる。本研究では、GLAST と WAM の同時観測を行うことで GLAST での観測より、様々な GRB に対するカットオフの検出感度が、どの程度向上するかをシミュレーションにより定量的に調べた。

この結果、同時観測を行った場合では、カットオフのエネルギーが小さいほど検出感度が向上し、フィッティングによるカットオフのエネルギーの誤差が小さくなり、カットオフのエネルギーを決める不定パラメータである、 Γ 、 E_{sh} をより制限できることが分かった。

目次

第1章 序章	2
第2章 ガンマ線バーストについて	3
2.1 ガンマ線バーストとは	3
2.2 ガンマ線バーストの物理機構	4
2.2.1 GRBの観測と理論の矛盾点	4
2.2.2 相対論的運動	4
2.2.3 火の玉モデル	5
2.2.4 プロンプト放射のスペクトル	7
2.3 GLAST衛星で期待されるGRBのサイエンス	7
2.3.1 従来観測での問題点	7
2.3.2 GLASTで観測を行う意義	9
第3章 GLAST衛星および「すざく」衛星	12
3.1 次世代ガンマ線天文衛星GLAST	12
3.1.1 概要	12
3.1.2 LAT検出器	12
3.1.3 GBM検出器 [16]	16
3.2 X線天文衛星「すざく衛星」 [25] [26]	19
3.2.1 概要	19
3.2.2 広帯域全天モニタ (WAM)	21
第4章 GRBに対するGLASTとWAMの感度評価	24
4.1 GBMとWAMを用いた高エネルギーべき指数の決定精度の評価	24
4.1.1 シミュレーションと解析の方法	25
4.1.2 べき指数 β の決定精度の評価	27
4.2 LAT検出器の感度評価	33
4.2.1 Science Tools	33
4.2.2 シミュレーション方法	36
4.2.3 解析方法	38
4.2.4 検出感度の評価	41
4.3 カットオフの検出感度評価	43
4.3.1 シミュレーションと解析方法	43
4.3.2 カットオフの検出感度と誤差の評価	46
4.3.3 現在のLATのレスポンスでのカットオフの検出感度と誤差の評価	53
第5章 まとめと今後の課題	61

第1章 序章

宇宙には、様々な高エネルギーの天体現象が存在する。その中で最も激しい爆発現象がガンマ線バースト (Gamma ray burst:GRB) である。GRB は全天で一様に 1 日に数個程度発生し、ガンマ線の放射時間が 10ms~1000s と短く、放射のピークを 250keV 付近にもつ天体現象である。その光度は 10^{51} erg/s にまで達する。この観測される放射を説明する有力な理論モデルが内部衝撃波モデルである。これによると、正体不明の高温の火の玉からローレンツ因子 $\Gamma \geq 100$ の相対論的な速度で陽子が球殻状 (シェル) に放出される。それらは速度差をもっているため、シェル同士が衝突し衝撃波を形成する。衝撃波面付近では、電子が不規則磁場中で統計加速を受け、100MeV 程度の高エネルギーに達する。高エネルギー電子は磁場中でシンクロトロン放射を起こし、ガンマ線が放出される。しかし、シェルの静止系で見たとき、2 個のガンマ線光子のエネルギーの和が電子と陽電子の静止質量の和より大きい場合、衝突によって電子・陽電子の対生成が起こる。光子密度が高いとガンマ線は出てこられない。これを我々の静止系で観測すると GeV 領域でのスペクトルに折れ曲がり (カットオフ) が生じると予想されている。カットオフが生じるエネルギーは Γ に依存するため、カットオフが観測されると Γ の値に厳しい制限をつけることができる [1]。よってカットオフの観測は、GRB 中で起こっている物理現象の解明につながるであろうと考えられている。

これまでも、1991 年に打ち上げられた CGRO 衛星に搭載された EGRET 検出器により観測がなされ、GeV ガンマ線が検出された。しかし、EGRET はスパークチェンバーを用いていたため、デッドタイムが 100ms と大きく、得られたスペクトルには大きな不定性があり、カットオフの確かな証拠は得られていない。このカットオフを検出することができるかと期待されているのが、2008 年度中打ち上げ予定の γ 線天文衛星 GLAST である。GLAST に搭載されて LAT 検出器は EGRET に比べて数十倍の感度をもち、デッドタイムが $26.5\mu\text{s}$ と非常に小さい。ただし、GLAST のみでは光子統計が低く暗い GRB でカットオフの有無を決定するのは難しいと考えられる。カットオフの有無を判断するには、GRB のべき型スペクトルからのずれを見ることが重要である。しかし、GLAST のみで観測した場合、光子統計がよい GRB でしかべき指数が精度良く決定できない。そこで、1MeV で光子の検出有効面積が世界最大の X 線天文衛星「すざく」搭載 WAM 検出器を用いることでべき指数の精度を上げることができる。これにより、暗い GRB でも LAT の領域でカットオフの有無が判断できる。このことから、今まで不明であった GeV でのスペクトルを明らかにすることができる。

本研究では、GLAST と WAM 検出器を用いて GRB の同時観測を行った場合、GLAST のみでの観測に比べ、どの程度カットオフの検出感度が向上するかシミュレーションを用いて定量的に評価した。第 4 章では、まず、WAM で検出された GRB のデータを用いて検出角度を変えてシミュレーションを行い、GLAST のみでの観測と WAM を加えたときでべき指数の決定精度がどの程度向上するかを調べた。次に、LAT で有意に検出できるのはどのような GRB かを調べるために様々なパラメータの GRB をシミュレーションし、検出感度の評価を行った。最後に、LAT のスペクトルにカットオフを入れてシミュレーションを行い、有意にカットオフを検出できるか調べた。

第2章 ガンマ線バーストについて

2.1 ガンマ線バーストとは

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) とは、短い時間に非常に強いガンマ線を放射する天体現象のことである。1967年にアメリカが大気圏外での核実験を監視するために打ち上げた軍事衛星 VELA によって偶然に発見されたが、突発的に起こる現象であることに加え、短い時間しか輝かないため、ガンマ線が到来する方向を決定することが困難であった。そのため対応する天体を同定することができず、天文学的研究が遅れた。1990年代に入ると、CGRO 衛星に搭載された BATSE 検出器の観測によって、発生頻度が1日に数個程度で、観測により到来方向は全天一様に分布していることが分かった。また、ガンマ線が放射される (プロンプト放射と呼ぶ) 継続時間は、0.1~1000 秒と様々であるが、図 2.1 のように 2 秒を境にして二山の分布があることが分かった。これより継続時間が 2 秒よりも短いものを short GRB、2 秒よりも長いものを long GRB というように区別されている。さらに、GRB の光度曲線は、図 2.1 のように多種多様で激しい変動をみせるものもあり、共通の特徴が見られず典型的なパターンは存在しない。

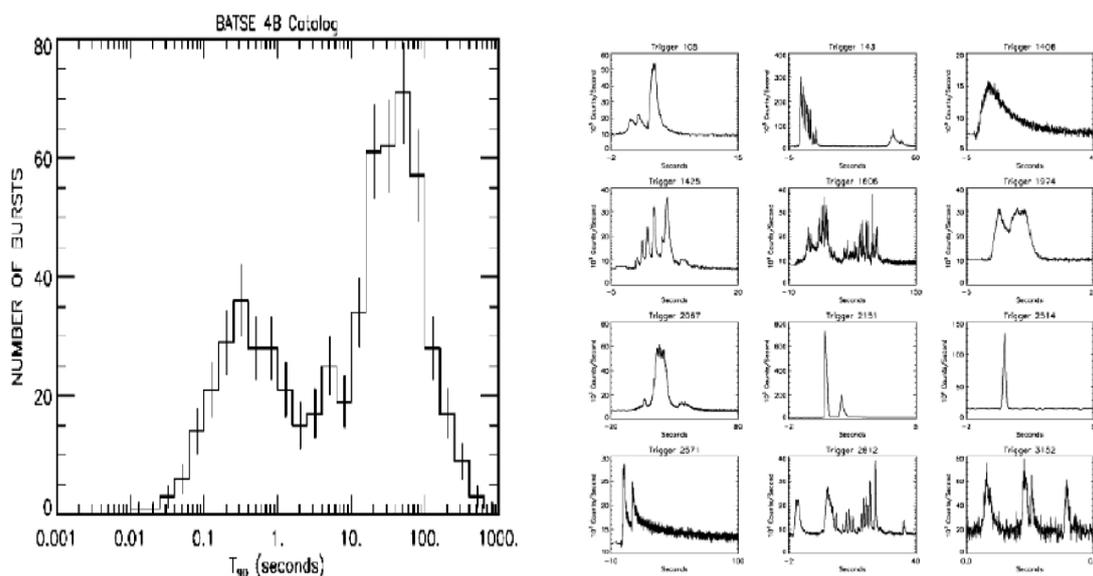


図 2.1: 左図:BATSE で観測された GRB の継続時間の分布 [5]、右図:BATSE で観測された様々な GRB の光度曲線 (縦軸は光子数/秒、横軸は時間)[6]

1990 年代後半になると、ガンマ線と X 線の両方の検出器を搭載したイタリアの BeppoSAX 衛星が打ち上げられた。1997 年 5 月 8 日に検出された GRB から、ガンマ線から遅れて、数時間から数日に渡る X 線 (残光) が観測され、これにより詳細な位置が決定された。この位置情報をもとにして、て Keck 望遠鏡が観測したところ、可視光のスペクトルに鉄の吸収線が発見され、これにより赤方偏移 z が測定され、宇宙論的な距離で起こって

いることが分かった。距離が分かると、放射されるエネルギーを概算することができる。単純に計算をすると 10^{52} erg 程度になるが、銀河の 10^8 個もの明るさである。したがって GRB は宇宙最大の爆発現象であることがわかる。また、2003 年 3 月 29 日にガンマ線探査衛星 HETE-2 によって観測された GRB030329 は、これに対応する天体が可視光でも見付かり、光度曲線が超新星のものと良く似ていることがわかり、可視光のスペクトルから、超新星と同じ特徴を示すことが発見された。このことからガンマ線バーストの発生源は超新星に由来するものだと考えられているが、すべての GRB から残光が観測されていないので、その正体は不明のままである。

2.2 ガンマ線バーストの物理機構

2.2.1 GRB の観測と理論の矛盾点

2.1 で述べたように、GRB は宇宙で最も激しく明るい爆発現象である。このような爆発が起こるのは、相対論的なジェットで加速された電子が磁場によって曲げられ、シンクロトロン放射をするためであると考えられているが、以下に述べるように問題点がある。

GRB は宇宙論的な距離で発生しているので、距離 d は

$$d \sim (100 \text{ 億年}) \times (\text{光速}) \sim 10^{28} \text{ cm.}$$

である。GRB の典型的なフラックス f は、 $f \sim 10^{-6} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ なので、等方的に放射していると仮定すると、明るさ L_γ は、

$$L_\gamma = 4\pi d^2 f \sim 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$$

となる。観測されている、ガンマ線フラックスの変動時間はおおよそ $\Delta t \sim 10 \text{ ms}$ なので、単純には放射領域のサイズは R は、 $R \sim c\Delta t \sim 3 \times 10^6 (\Delta t / 10 \text{ ms}) [\text{m}]$ と見積ることができる。その間に放射されるガンマ線のエネルギーは $\sim L_\gamma \Delta t \sim 10^{49} \text{ erg}$ である。2 個のガンマ線光子のエネルギーの和が、 1.02 MeV よりも大きいときにガンマ線光子同士は衝突し合うことにより、電子・陽電子対生成 ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$) を起こすことがある。ガンマ線のエネルギーが十分に高く対生成することができる割合を f_p とする。対生成を起こすエネルギー付近では反応断面積がトムソン断面積 σ 程度なるので、電子の静止質量エネルギーを $m_e c^2$ とすると、全反応断面積は $\sigma_T f_p L_\gamma \Delta t / m_e c^2$ になる。その光学的厚み $\tau_{\gamma\gamma}$ は、対生成の全断面積と放射領域の半径の 2 乗との比なので、

$$\tau_{\gamma\gamma} \sim \frac{\sigma_T f_p L_\gamma \Delta t}{R^2 m_e c^2} \sim 10^{14} f_p \left(\frac{L_\gamma}{10^{51} \text{ erg/s}} \right) \left(\frac{\Delta t}{10 \text{ ms}} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

となり、非常に大きくなる。このためガンマ線が対生成を起こして出てこらなくなる。これはコンパクトネス問題と呼ばれており、次に述べる相対論的運動によって解決できる。

2.2.2 相対論的運動

- 放射体が観測者に向ってくると、光子のエネルギーがローレンツ因子 $\Gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ だけ青方偏移することにより、高くなる。

観測されるガンマ線の光子数スペクトルは $N(E) dE \propto E^{\beta_B} dE$ である。放射体が静止している系で見ると対生成の条件は、電子の質量を m_e 、それぞれの電子のエネルギーを E'_1 、 E'_2 すると、 $E'_1 E'_2 > (m_e c^2)^2$ である。これを我々の静止系でみると、ローレンツ変換により $E_1 E_2 > \Gamma (m_e c^2)^2$ となる。したがって、 $E_1 > \Gamma (m_e c^2)^2 / E_2 \propto \Gamma^2$ となる。ガンマ線の対生成できる割合 f_p は、 $f_p \propto \int_{E_1} N(E) dE \propto E_1^{\beta_B + 1} \propto \Gamma^{2(\beta_B + 1)}$ になる。

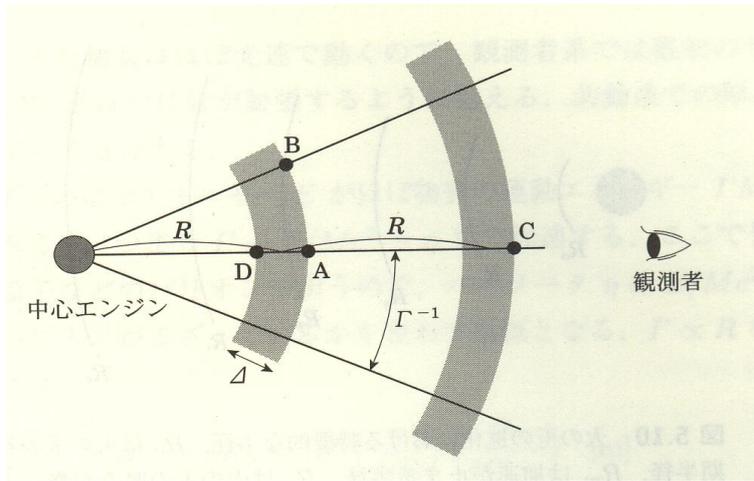


図 2.2: 観測者と相対論的な放射体と中心エンジンの幾何学的関係

- 放射領域のサイズ R が Γ^2 倍程で大きくてもよい。

図 2.2 のように、中心からローレンツ因子 Γ で放射体が放出され、点 A から点 C まで距離 R の領域で光ったとする。相対論的ビーミングの効果によって放射は放射体の進方向に $\sim \Gamma^{-1}$ 程度の角度に絞られ、観測者は放射体の前面の $\sim \Gamma^{-1}$ の領域しか見えない。これより、距離 R の点 A、点 B から出た光でも到着時間のばらつきは $\Delta t \sim R/c$ でなく、図 2.2 の点 A と点 B の行路差による、 $\Delta t \sim R/c\Gamma^2$ 程度にしかならない。これは、角度分散時間と呼ばれており、表面の曲率に依存する。

また、点 A から出た光が観測者に届くのに要する時間は、点 C からの観測者までの距離を d とすると、 $\frac{R+d}{c}$ となる。続いて、放射体が A から C まで進む時間のに要する時間は、放射体の速度を v 、慣例的に $\beta c (\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\Gamma^2}})$ と表すと、 $\frac{R}{\beta c}$ となり、C から観測者に届くまでの時間は $\frac{d}{c}$ となる。したがって、C から出る光が観測者に届くまでの時間は、 $\frac{R}{\beta c} + \frac{d}{c}$ となる。よって、A から出た光と C から出た光の到着時間の差 Δt は、

$$\Delta t = \left(\frac{R}{\beta c} + \frac{d}{c} \right) - \frac{R+d}{c} = \frac{R}{\beta c} (1 - \beta)$$

となる。ここで、 $\Gamma \gg 1$ 、 $\beta \sim 1$ なので、

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\Gamma^2}} \sim 1 - \frac{1}{2\Gamma^2} \text{ となり、}$$

$$\Delta t \approx \frac{R}{2\Gamma^2 c} \text{ となる。よって、} R \sim 2\Gamma^2 c \Delta t \text{ となる。}$$

これら二つの相対論的效果を式 2.1 にとりいれると、光学的厚みは、 $\Gamma^{2(\beta_B+1)} \times \Gamma^{-4} \sim \Gamma^{-6}$ 倍になる。 $\Gamma > 100$ であれば、 $\tau_{\gamma\gamma} < 1$ となり、ガンマ線が出てくることが可能になる。つまり、ガンマ線バーストは光速の 99.99% 以上の速度を持つ相対論的な爆発現象であると考えられる。

2.2.3 火の玉モデル

2.2.1 より、GRB は、相対論的に運動している物体から放射されているということが分かった。物体を相対論的な速度まで加速する機構として考えられているのが火の玉モデルである。このモデルでは、最初に正体不明の物体 (火の玉) が生まれ、加速膨張を開始するとされる。中心天体から、相対論的な速度の粒子が様々な速度を持った球殻 (シェル) 状に何度も噴き出される。そのシェル同士がお互いに激しくぶつかり合体することにより

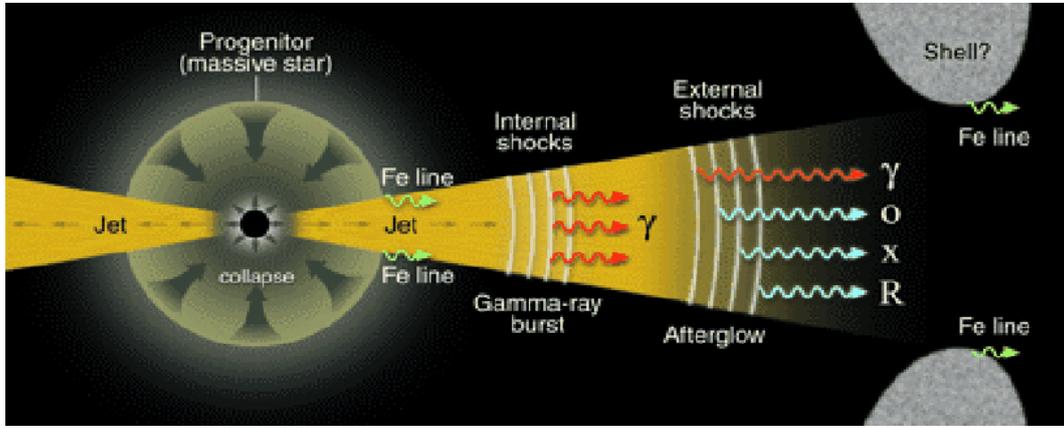


図 2.3: 火の玉モデルの概念図

内部衝撃波を形成する。この衝撃波が頻繁に形成されるとすると、現在観測されている GRB の光度曲線を再現することが可能である。衝撃波によって、電子・陽電子プラズマがシェル内に磁場に反射され続けることによって加速され(フェルミ加速)、磁場によってシンクロトロン放射する。シェルのローレンツ因子 Γ の質量 m_r が、速度の遅いローレンツ因子 $\Gamma_s (< \Gamma_r)$ の質量 m_s に衝突して、ローレンツ因子 Γ_m の一つの質量 m_m のシェルになったとする。エネルギーと質量保存より、

$$\begin{aligned} \Gamma_\gamma M_\gamma c^2 + \Gamma_s m_m c^2 &= \Gamma_m \{ (m_\gamma + m_m) c^2 + E_m \} \\ \sqrt{\Gamma_\gamma^2 - 1} m_r + \gamma \sqrt{\Gamma_s^2 - 1} m_s &= \sqrt{\Gamma_m^2 - 1} (m_\gamma + m_s + E_m/c^2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

が成り立つ。ここで、 E_m は衝突によって解放される内部のエネルギーで、この一部が観測される放射になる。上の式を解くと、

$$\Gamma_m = \frac{m_r \Gamma_r + m_s \Gamma_s}{\sqrt{m_r^2 + m_s^2 + 2m_r m_s \Gamma_{rs}}} \quad (2.3)$$

$$Em/c^2 = \sqrt{m_r^2 + m_s^2 + 2m_r m_s \Gamma_{rs}} - m_r - m_s \quad (2.4)$$

が得られる。ここで、 $\Gamma_{rs} = \Gamma_r \Gamma_s - \sqrt{\Gamma_r^2 - 1} \sqrt{\Gamma_s^2 - 1}$ は、 m_r からみた m_s のローレンツ因子である。エネルギーの変換効率は、

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_r + m_s \Gamma_m}{m_r \Gamma_r + m_s \Gamma_s} \quad (2.5)$$

で与えられる。内部衝撃波では、 $\Gamma_r > \Gamma \gg 1$ なので、式 2.2 より衝突後は、

$$\Gamma_m \simeq \sqrt{\frac{m_r \Gamma_r + m_s \Gamma_s}{m_r/\Gamma_r + m_s/\Gamma_s}} \quad (2.6)$$

である。等質量 $m_r = m_s$ の場合、エネルギー変換効率は、 $\varepsilon = 1 - 2\sqrt{\Gamma_r \Gamma_s} (\Gamma_r + \Gamma_s)$ となるので、物質の Γ の比が大きいほどエネルギー変換効率が大きくなる事が分かる。このようにして、運動エネルギーが放射エネルギーに変換される。この放射エネルギーは、シェルの静止系で見るとおよそ 3keV 程度であるが、我々が観測するのはこれが $\Gamma \sim 100$ で青方偏移したものであり、300keV 程度となる。これは、観測されている GRB の放射のピークに近い値である。

2.2.4 プロンプト放射のスペクトル

GRBのプロンプト放射は、約250keVにピークを持つべき関数のでよく表されることが観測から明らかになっており、この経験的なモデルは、Band関数(D.Band et al.)と呼ばれる。スペクトルの概要を図2.4に示す。

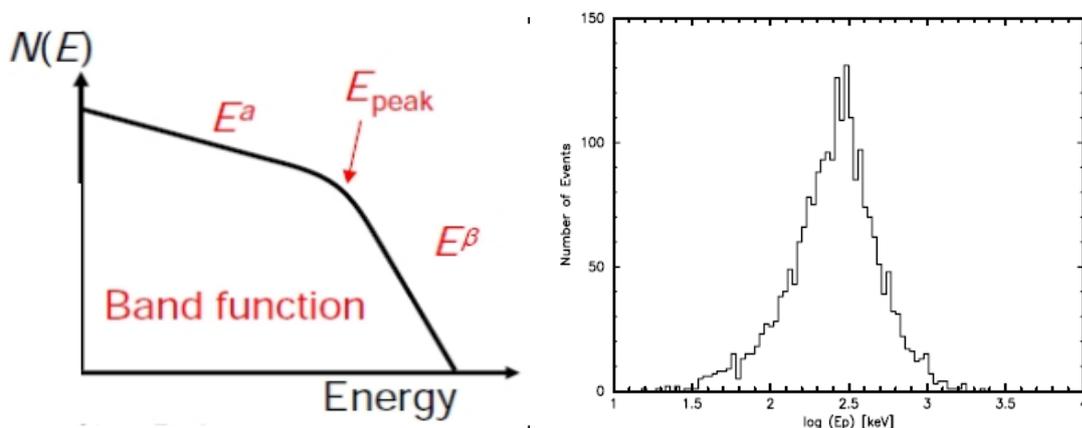


図 2.4: 左図:Band 関数 [7]、右図:BATSE で観測された E_p の分布 [20](横軸がエネルギーの対数、縦軸が GRB の個数)

この関数は、単位時間、単位面積、単エネルギーあたりに検出される光子の数を $\phi(E)$ とすると、

$$\phi(E) \begin{cases} A \left(\frac{E}{100 \text{keV}} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) & ((\alpha - \beta)E_0 \geq E) \\ A \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{keV}} \right)^{(\beta - \alpha)} \exp\left(-\frac{E}{100 \text{keV}}\right)^\beta & ((\alpha - \beta)E_0 \leq E) \end{cases} \quad (2.7)$$

ここでは、 E は光子のエネルギーで、 α 、 β はスペクトルの形を決定するべき指数、 A は全体の規格化定数であり、 E_0 は、スペクトルのべきが折れ曲がるエネルギーである。また、GRB の明るさを表すために重要なパラメータは、flux を放射の継続時間で積分した fluence という値である。

式 2.7 より、光子指数が $\alpha \geq -2$ かつ $\beta < -2$ のとき、 $E_p = E_0 \times (2 + \alpha)$ により求めることができるエネルギーは、エネルギー帯域あたり放射されるエネルギーのピークを与えることから、このエネルギーをピークエネルギーと呼ばれる。ピークエネルギーは、BATSE の観測によって、300keV 付近に集中することが知られている。

2.3 GLAST 衛星で期待される GRB のサイエンス

2.3.1 従来の観測での問題点

これまで、GRB の観測は主に MeV 領域までしか行われておらず、GeV 以上での観測はほとんどなされていなかった。このため、高エネルギー側のスペクトルが得られず、放射が延びているのかわからなかった。

GeV 領域での観測は、1991 年に打ち上げられた CGRO 衛星に搭載された EGRET 検出器によるもので、1994 年 2 月 17 日に発生した非常に明るい GRB940217(図 2.5) では、180 秒間のプロンプト放射で 50MeV 以上の光子が 10 個検出され、GeV 領域でも検出された。また、その他にも数例であるが GeV 領域で光子が検出された。図 2.6 は、EGRET のトリ

ガーがかかってから 200 秒間に 50MeV 以上の光子が検出された 5 つの GRB のスペクトルを足し合わせたものである。この図から高エネルギー側まで放射が延びていて、さらに超過成分らしきものが見てとれる。しかし、EGERT はスパークチェンバーを用いていたため、デッドタイムが 100ms と非常に大きく、正確なフラックスの値を記録することができなかった。また、GeV 領域で検出された光子の数は 10 個にも満たないということもあり、このスペクトルは大きな不定性が残るものであった。このことをきっかけに様々な可能性が示唆された。GeV の領域のスペクトルは光子が加速された電子に散乱される逆コンプトン散乱によって超過成分が生じるというモデルや、ガンマ線の電子・陽電子対生成により折れ曲がり (カットオフ) が生じるというモデルなどが提唱されたが、確かな証拠が得られなかったため決着をつけることができなかった。

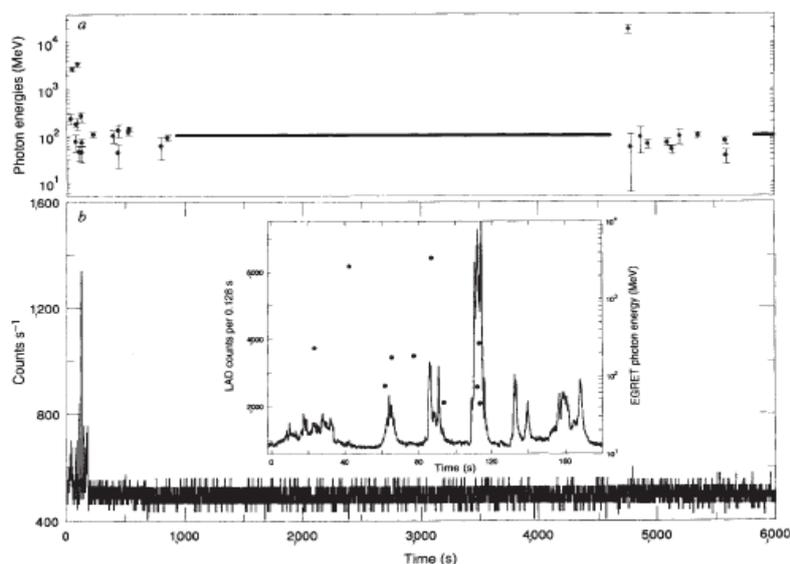


図 2.5: 上図:GRB940217 で検出された光子のエネルギー、下図:光度曲線 [8]

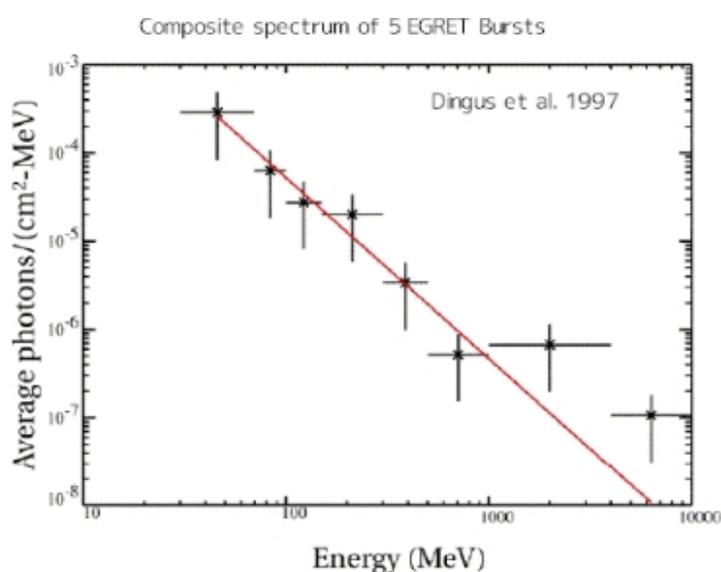


図 2.6: EGRET で検出された高エネルギーの放射をもつ 5 つの GRB の平均スペクトル [9]

2.3.2 GLASTで観測を行う意義

EGRETでは、検出器のデッドタイムが大きいことや、光子を検出できる有効面積が小さいことなどにより GeV 領域での感度が低かった。これに対して、2008 年度中に打ち上げ予定の GLAST 衛星では、搭載されている LAT 検出器は、EGRET に比べてデッドタイムが $20\mu\text{s}$ と非常に小さい。また、受光面積が大きいため EGRET の 5 倍以上の有効面積がある。さらに、EGRET はスパークチェンバーを用いていたためトリガー検出器が必要で、これにより視野が狭められていたが、LAT ではセルフトリガー機能を備えているため 4 倍以上の広い視野が実現できる。これにより多くの GRB で GeV 領域のプロンプト放射を観測することが可能になり、その物理機構の解明につながると期待されている。観測により得られると予想される GeV 領域でのスペクトルとその放射機構についての例を以下に 3 つ述べる。

対生成によるカットオフ

GRB の発生源から放出されたシェルが衝突し合い、その中で電子が磁場に曲げられシンクロトロン放射で発生したガンマ線同士が相互作用した場合、両者のエネルギーの和が 1.02MeV 以上であれば、電子・陽電子の対生成が可能となる。式 2.1 より $\Gamma \sim 100$ のときガンマ線フラックスの変動時間 $\Delta t \sim 10\text{ms}$ の間に放出されるエネルギーが $\sim L_\gamma \Delta t \sim 10^{51}\text{erg}$ より高くなると $\tau_{\gamma\gamma} > 1$ になり対生成によってガンマ線が出てこられなくなる。このため、図 2.7 の様に GeV 領域でスペクトルにカットオフが生じると考えられている。カットオフのおよそのエネルギー E_{cut} は、光度曲線のパルスの時間幅を Δt 、一つのパルスから放出される光子の等方的なエネルギーを E_{sh} とすると、式 (2.8)(Asano&Inoue 2007)[1] によって求めることができる。

$$E_{cut} \simeq 10^9 \left(\frac{\Gamma}{100}\right)^4 \left(\frac{E_{sh}}{10^{51}\text{erg}}\right)^{-0.5} \left(\frac{\Delta t}{1\text{s}}\right)^{1.3} \text{eV} \quad (2.8)$$

観測により E_{cut} 、 Δt が分かるので、 L を求めることができる場合、 $L = E_{sh}/\Delta t$ より E_{sh} が求まり、 Γ の値を求めることができる。これにより、いままで $\Gamma \geq 100$ と言われていたがその大きさは決まっていなかったため、制限をつけることが可能になる。

逆コンプトン散乱による超過成分

電子が光子のエネルギーや電子の静止質量よりも非常に高いとき、電子が光子を散乱することによって、光子のエネルギーが高くなる逆コンプトン散乱が起こる。これによって、図 2.7 の様に GeV 領域で超過成分が見られる。シェルの中での磁場のエネルギー密度を U_b 、磁場の強さを B 、磁場の強さを表す係数を f_b 、加速された電子のエネルギー密度を U_e とすると、 $U_B = \frac{B^2}{8\pi} = f_b U_e$ と表される。 Γ の値が大きくなると、超過成分が見られる位置が高エネルギー側へと変化する。また、磁場が大きいと逆コンプトンされた光子がクーリングによってエネルギーを失うため、超過成分の fluence が小さくなる。もし超過成分が観測されると、そのエネルギー帯によって Γ の大きさが分かり、さらに磁場の強さを知ることができる。これによってシェルの衝突による内部衝撃波の放射機構が解明できると考えられている。

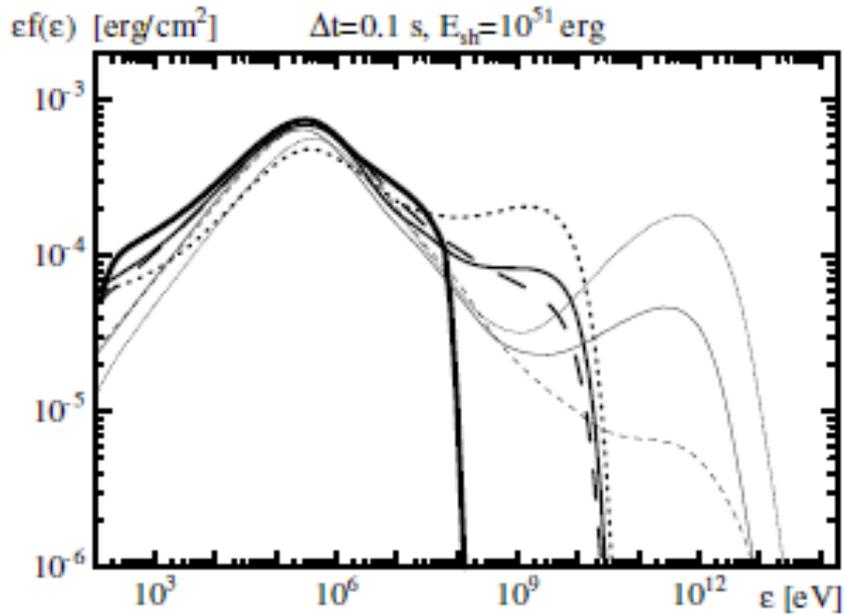


図 2.7: 予想されるカットオフと逆コンプトン散乱の νF_ν スペクトル。 $\Delta t = 0.1\text{s}$ 、 $E_{sh}=10^{51}\text{erg}$ のときに、 Γ と f_b の値を変化させたもの。7本の線の内、最も太い実線は $\Gamma=100$ 、 $f_b=1.0$ 。太さが中間の線は $\Gamma=300$ で、最も細い線は $\Gamma=1000$ のときである。 $\Gamma=300$ 、 1000 のそれぞれの実線より縦軸の放射強度が高いところに位置する点線が $f_b=0.1$ の場合で、低いところに位置する破線が $f_b=30$ の場合である。 [1]

陽子シンクロトロン放射による隆起

GRBの高エネルギー放射の可能性として、超高エネルギーの陽子によるシンクロトロン放射がある。陽子からのシンクロトロン放射は電子の場合に比べてはるかに弱いだが、粒子の加速効率の点から考えると、電磁放射によってエネルギーを失わずに高エネルギーまで加速することができる。シェルの内部で加速された陽子のシンクロトロン放射は、磁場が強く電子の逆コンプトン散乱の寄与が小さいときに表れる。このことは図2.8のスペクトルで GeV 付近に小さな隆起として見られ、これが観測されると粒子の加速機構の解明につながると考えられている。また、GRBからのこのような放射は高エネルギー宇宙線の一つとして考えられており、宇宙線起源の研究にも役立つと期待されている。

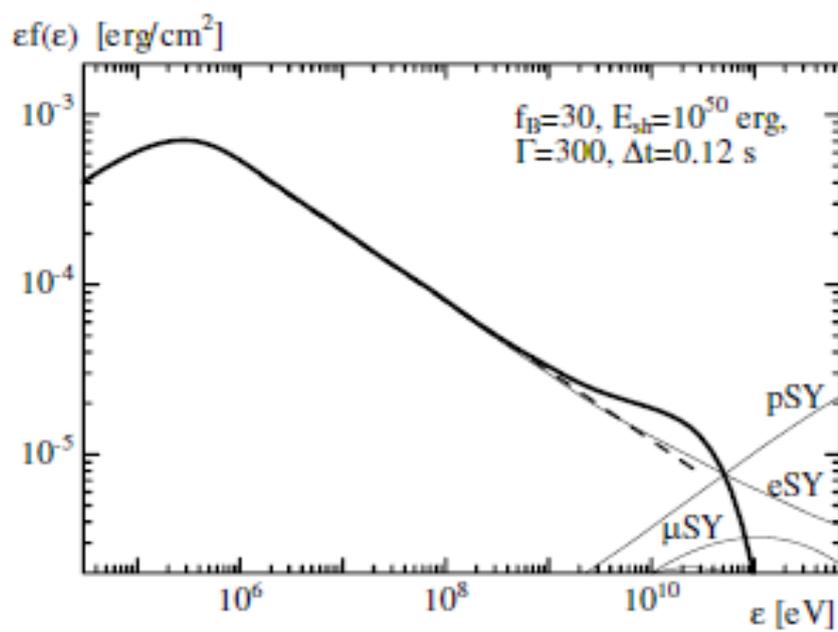


図 2.8: 予想される隆起の νF_ν スペクトル。 $\Delta t = 0.12$ s、 $E_{sh} = 10^{50}$ erg、 $\Gamma=300$ 、 $f_b=30$ のときのものであり、10GeV 付近に隆起が見られる。 [1]

第3章 GLAST衛星および「すざく」衛星

本研究では、GRBの観測に有効な検出器を搭載した、 γ 線天文衛星GLAST衛星とX線天文衛星「すざく」を用いる。GLASTには、LAT(Large Area Telescope)検出器とGBM(GLAST Burst Monitor)検出器が搭載されており、従来の検出器よりも広大な視野と幅広いエネルギー帯域で観測することが可能である。「すざく」には、WAM(Wide-Band All-Sky Monitor)検出器が搭載されており、広大な視野と1MeVでの光子の検出有効面積が世界最大を誇る。カットオフの有無は判断するにはべき型スペクトルからのずれを見ることが重要である。しかしGLASTのみの観測では、光子統計がよいGRBでしかべき指数を精度良く決定できない。しかし、2つの衛星を用いることで、統計精度のよいスペクトルを取得することができ、べき指数の決定精度を向上させることができ、暗いGRBでもLATの領域でカットオフの有無を判断できる。3.1ではGLAST衛星について、3.2では「すざく」衛星について詳細を述べる。

3.1 次世代ガンマ線天文衛星GLAST

3.1.1 概要

GLAST(Gamma-ray Large Area Space Telescope)は、2008年度中に打ち上げ予定の宇宙ガンマ線衛星で、アメリカ、日本、イタリア、フランス、スウェーデンなどによる国際協力のもと開発されている。主検出器であるLAT(Large Area Telescope)は、20MeV~300GeVのエネルギー領域で、CGRO衛星に搭載されたEGRET検出器に比べ、数十倍の感度を持っている。これにより、ブラックホール、活動銀河核(AGN)、GRB、宇宙線の起源、超新星残骸など様々な現象解明の手がかりが得られる。また補助検出器として、GBM(GLAST Burst Monitor)が搭載されており、8keV~30MeVのエネルギー領域で観測ができる。これにより、LATでは観測することができない低エネルギー側のスペクトルを取得でき、LATの視野外で発生した突発天体の位置を決定することもできる。特にGRBに対しては、LATとGBMを組み合わせることにより、8桁の幅広いエネルギー領域でスペクトルを取得することが可能となる。これにより、GRBの放射機構として主に考えられているシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱による放射などを見ることができるとされている。

3.1.2 LAT検出器

GLAST衛星の主な検出器である、LAT(Large Area Telescope)は電子陽電子対生成型 γ 線検出器である。これは γ 線が入射したときに発生する電子・陽電子の飛跡をとらえることにより γ 線を検出するというものである。LATの性能を表3.1に示す。また、LATの有効面積のエネルギー依存性を図3.2、LATの角度分解能のエネルギー依存性を3.3に示す。

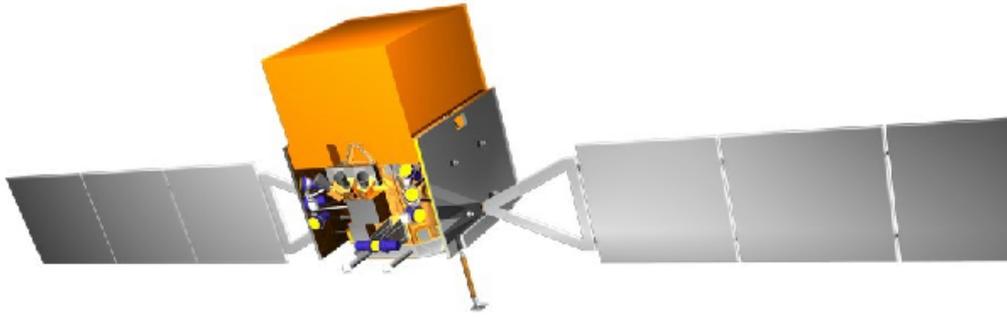


図 3.1: 次世代 γ 線衛星 GLAST

EGRET と比較した場合の LAT の主な特徴は以下の二つである。

一つ目の特徴は、EGRET に比べて数十倍以上の高い検出感度を持つことである。この高感度を実現している主な理由は三つある。一つ目は、検出器が巨大化し受光面積が大きくなったことにより、有効面積が EGRET の 5 倍以上になったことである。

二つ目は EGRET の約 4 倍以上の視野である。EGRET では、飛跡検出のためにスパークチェンバーを用いていたために、検出器の下にトリガー検出器が必要であった。このため、検出器全体が縦長の形状になってしまい視野を狭めていた。LAT では飛跡検出器にトリガー機能を備えているため、トリガー検出器を必要としない。これらの理由により視野が大きくなり、実効的な観測時間が増加することになる。三つ目の理由は、角度分解能の向上である。これにより、点源であればバックグラウンドを抑えることができる。

二つ目の特徴は、GRB のような突発現象の観測に有利なことである。LAT は常に全天の約 20% をモニターしているため、発生直前からの観測が可能である。また、デッドタイムが $27\mu\text{s}$ と小さいため、バースト現象でもデータの取りこぼしがなくなることである。

	GLAST(LAT)	EGRET
エネルギーバンド	20 MeV - 300 GeV	20 MeV - 30 GeV
有効面積	$\sim 9000\text{cm}^2$ at (1-10GeV)	1500m^2
Field of View	$> 2\text{sr}$	0.5sr
角度分解能	3.2° (100MeV) 0.1° (10GeV)	5.8° (100MeV)
エネルギー分解能	6% at 10GeV	10%
1 イベントデッドタイム	$26.5 \mu\text{s}$	100ms
点源位置決定精度	$< 0.4'$	$15'$
点源感度	$4 \times 10^{-9}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$10^{-7}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

表 3.1: GLAST(LAT) と EGRET の性能比較表 [11][12]

LAT は飛跡を検出するトラッカー (TKR)、エネルギーを測定するカロリメータ (CAL)、バックグラウンドとなる荷電粒子を識別する反同時計数検出器 (ACD) の三つから構成されている。以下に、モジュールおよび三つの検出器の詳細を記す。

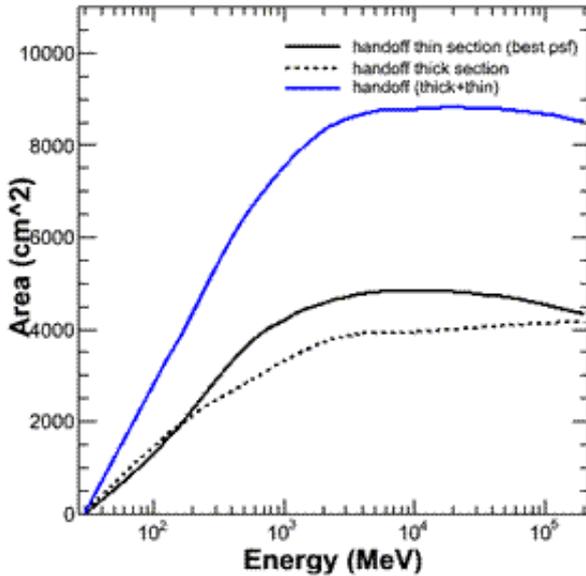


図 3.2: LAT の有効面積のエネルギー依存性 [13]

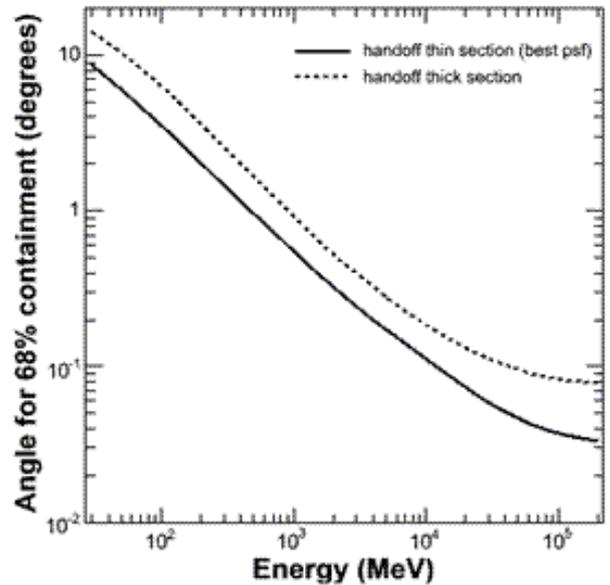


図 3.3: LAT の角度分解能のエネルギー依存性 [13]

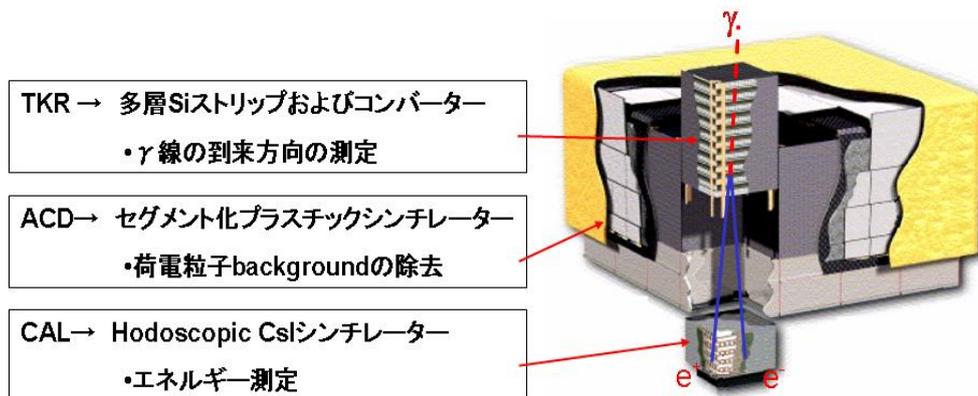


図 3.4: LAT 検出器の構成 [10]

LAT モジュール

LAT は TKR、CAL、ACD からなるモジュールを 4×4 に並べて配置している。モジュール化することにより二つの利点がある。一つ目は、不感時間を減らせることである。これは、直接関係ないモジュールのイベントにトリガーにかからないようにできるためである。二つめは、製作や動作テストが簡単なことである。もし一つの製作に失敗しても一つだけ作り直せばよい。また、モジュール単位ならテスト用に予備を作ることが簡単である。

TKR

トラッカーは飛跡検出器である。19 層のトレイがあり、その中に 18 層のシリコンストリップ型検出器と薄いタングステンシートの重ね合わせで構成されている。ただし、タングステンが入っているのは、上から 12 の薄い層と、その下に 4 つの厚い層だけである。ガンマ線の到来方向の決定方法は、入射したガンマ線をタングステンシートで対生成さ

せ、電子・陽電子に変換し、この飛跡をシリコンストリップ検出器で検出するというものである。さらに、天体からのガンマ線と荷電粒子を飛跡の形状で区別することができる。228 μm ピッチのシリコンストリップ検出器を用いることで、高空間分解能を実現することができる。またシリコンストリップ検出器は、放射線耐性が強く、高いトリガーレートに耐えられ、低電力で高速読み出しが可能である。これにより、衛星での過酷な環境や制限された条件に耐えることができる。

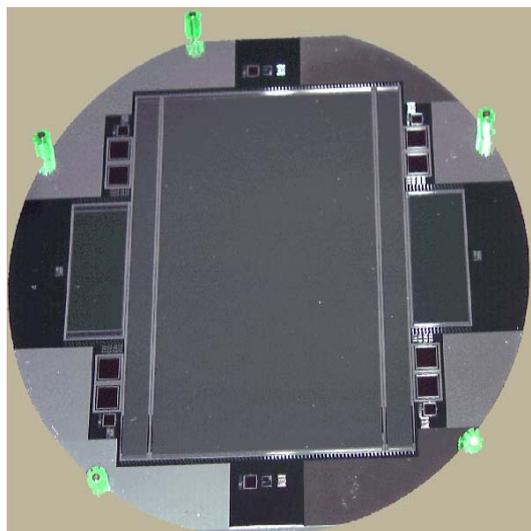


図 3.5: シリコンストリップ検出器 [14]

カロリメータ (CAL)

カロリメータは、入射した荷電粒子のエネルギー測定を行うものである。トラッカーの下に位置していて、CsI(Tl) シンチレータのアレイで構成されている。トラッカー部で生成された電子・陽電子がカロリメータに入射すると、シンチレータ中で電磁カスケードが起こる。これによって生じた蛍光をフォトダイオードで検出することにより、エネルギーの測定を行う。また、シンチレータをセグメント化することにより、電磁シャワーの三次元構造をとらえることが可能となっている。これにより、飛跡の決定精度が向上し、シャワーの構造から 100GeV 以上の吸収できないガンマ線のエネルギーも推定可能となる。これにより、検出できるエネルギーの上限が EGRET の検出限界である 30GeV から 300GeV まで向上した。

Anti-coincidence Detector(ACD)

ADCは、トラッカーを覆う 89 枚のセグメント化されたシンチレータである。光ファイバーを介して光電子増倍管により荷電粒子の信号を読み出す。反同時計数によって 99.97%以上荷電粒子のバックグラウンドの除去ができる。また、セグメント化により、高エネルギーガンマ線 self-veto の影響を無くすことができる。self-veto とは、カロリメータで生成される電磁カスケードから放射されるガンマ線の一部 (backsplash という) が ACD で検出で検出されることにより、バックグラウンドとみなされ、天体からの信号が除去されてしまうことである。セグメント化により、ADC の信号から backplash か、バックグラウンドかを識別することが可能となる。これにより、高エネルギー側の感度が向上した。

3.1.3 GBM 検出器 [16]

GBM 検出器の特徴

GBM(GLAST Busrt Monitor) は、ガンマ線バーストをモニターするために搭載されている。図 3.6 のように LAT の両側に取り付けられていて、12 個の NaI シンチレーション検出器と 2 個の BGO シンチレーション検出器から構成されている。表 3.2 に GBM の性能を示す。

主な特徴として、9.5str の広大な視野を持ち、全天の約 75% をカバーでき、8keV~30MeV の領域を観測することができる。また、GRB のおよその発生位置を即座に決定することができるので、LAT の視野外で起こった場合には、LAT に位置情報を送り、その方向に向けることが可能である。GBM の高エネルギー側は LAT の低エネルギー側と重複する。これにより、GRB の放射を幅広いエネルギー帯域で連続して見ることができる。[16]

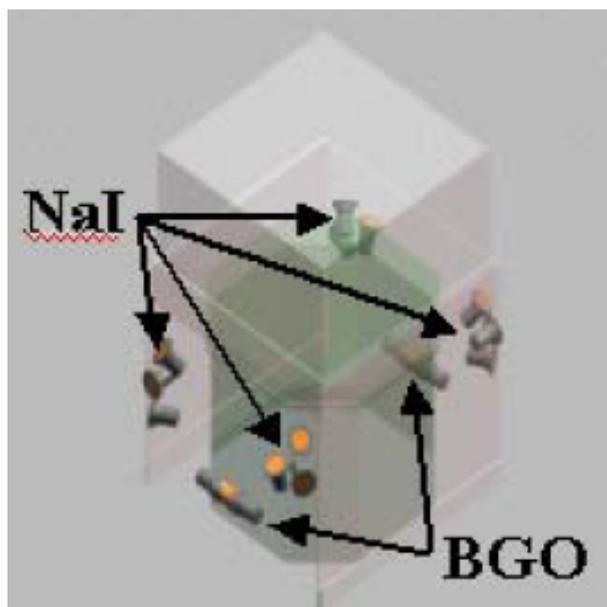


図 3.6: GBM 検出器の配置 [15]

NaI シンチレーション検出器

NaI シンチレーション検出器は、図 3.6 のように 1ヶ所に 3 つずつ角度を変えて、4カ所に計 12 個配置されている。これにより広い視野を獲得し、8keV~1MeV のエネルギー領域をカバーすることができる。図 3.7 に構造を示す。

NaI シンチレータは、直径 127mm、厚さ 127mm の円盤状になっている。NaI シンチレータは潮解性があるため、Al で周囲を覆うことで、外気との接触を防ぐのと同時に集光率を高めている。入射した X 線やガンマ線を NaI でシンチレーション光に変換し、光電子増倍管によって増幅し読み出すようになっている。光電子増倍管は磁場に対して弱いので、ミューメタルで覆うことにより磁場を防いでいる。さらに、BATSE よりも低いエネルギー領域の X 線まで検出するために、入射窓として原子番号が小さい厚さ 0.25mm のベリリウムのシートを配置されている。

表 3.2: GBM 検出器の性能 [17]

	GBM
エネルギーバンド	8 keV - 1 MeV (NaI), 150keV - 30 MeV (BGO)
個数	12 (NaI), 2 (BGO)
有効面積	126cm ² (NaI), 126m ² (BGO)
Field of View	9.5 sr
エネルギー分解能	< 12%
デッドタイム	< 2 μ s
衛星上解析での GRB の位置決定精度	< 15° (1.8 s), < 5° (5 s)
地上解析での GRB の位置決定精度	< 3° (1 day)
衛星上解析での GRB に対する感度	~0.71 count/s (50~300keV)
地上解析での GRB に対する感度	~0.4 count/s (50~300keV)

GRB を検出した場合、1ヶ所に配置された 3 つの NaI のうち、2 つのカウントレートがスレッシュホールドを上回るとトリガーがかかるようになっている。また、3 つの NaI のカウントレートを比較することで、GRB の位置を即座に決定することができる。

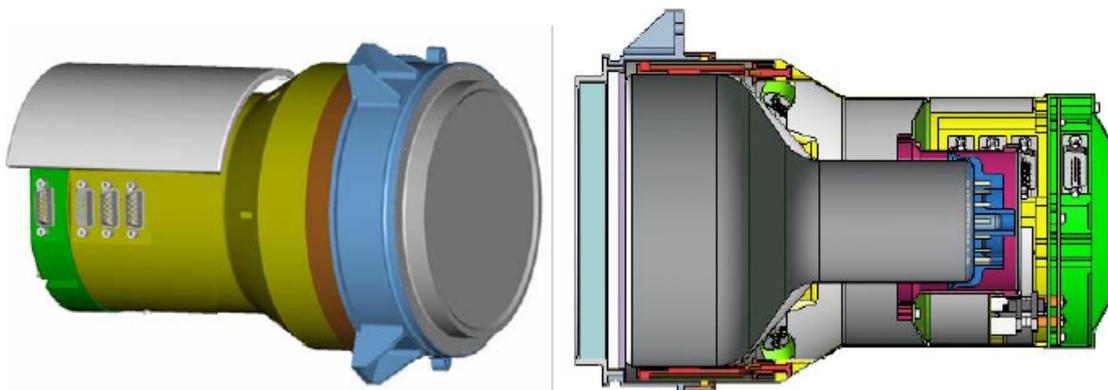


図 3.7: NaI シンチレーション検出器の構造

BGO シンチレーション検出器

BGO シンチレーション検出器は、GBM の高エネルギー側の検出器で、図 3.6 のように LAT 検出器の両側に 2 つ配置されている。これにより 4π 近い視野を 150keV~30MeV の領域で観測することができる。図 3.8 に構造を示す。BGO シンチレータは、直径直径 127mm、長さ 127mm の円筒形をしている。BGO は、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) で周囲が覆われている。これにより、集光性が高まり、BGO ユニットの機器を安定化できる。両端に光電子増倍管には、円形の結晶窓が取り付けられており、シンチレーション光の集光性を高めている。また、片方の光電子増倍管が壊れたり劣化しても、もう一方のみで読み出すことが可能である。光電子増倍管の信号は足し合わされてサブシステムである DPU (Digital-Processing Unit) という検出された光子のカウントレートを計算する装置へと送られる。

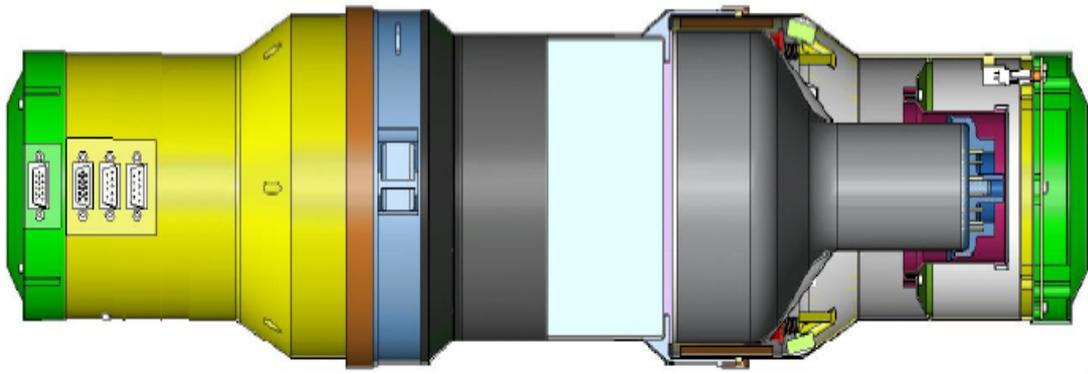


図 3.8: BGO シンチレーション検出器の構造

サブシステム

サブシステムは、DPU(The Digital-Processing Unit)、HVPS(High Voltage Power Supply) と LVPS(Low Voltage Power Supply) の三つからなる。サブシステムの概要を図 3.10 に示す。DPU は、検出器からの信号を処理するユニットである。NaI と BGO についている光電子増倍管から送られてくるアナログ信号をデジタル信号に変換する。DPU のソフトウェアは、検出器から送られてくるカウントレートがスレッシュホールドを越えているかを判定できる。もし、スレッシュホールドを越えた場合は、バーストの発生を知らせる警報が作成され、地上や LAT へと送られる。また、NaI からのカウントレートを計算することにより、バーストが発生したおおまかな位置を特定でき、LAT へと位置情報が送られ、LAT を発生方向に向かせることができる。HVPS は、それぞれの検出器の光電子増倍管に電力を供給し、LVPS はそれぞれの検出器の電子機器に電力を供給する。

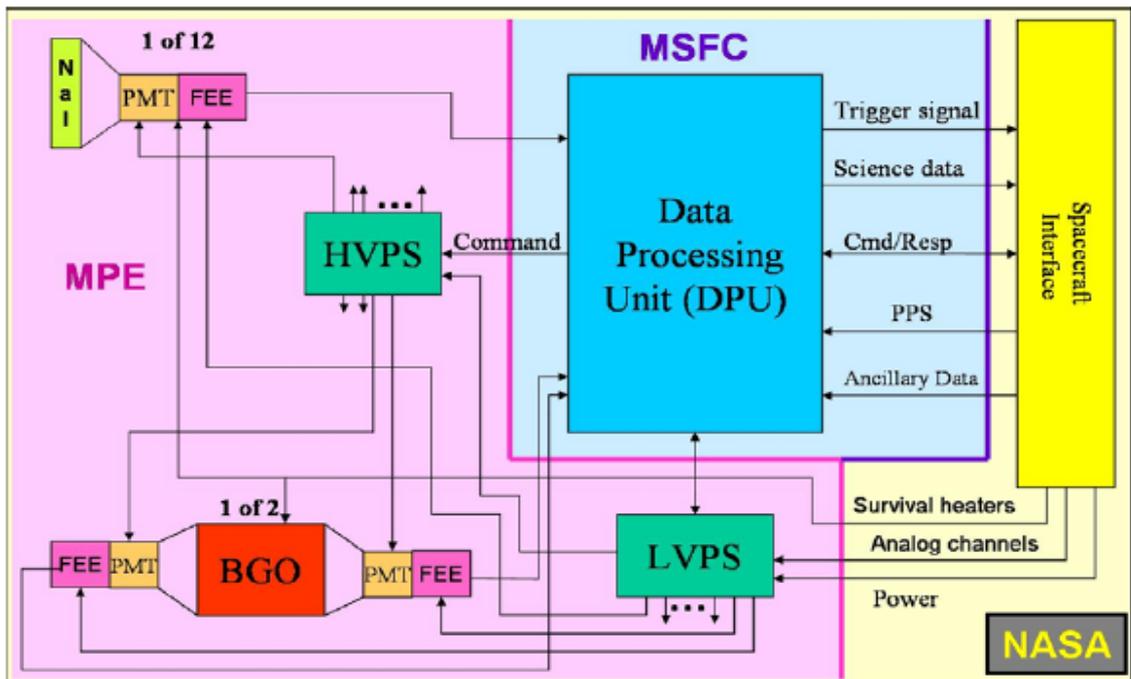


図 3.9: GBM 検出器のサブシステムのブロック図

GRB に発生に伴う動作

GBM は GRB を検出する前後で以下に述べる 3 つの動作を行う。

一つ目は、バーストを判定し、トリガーをかけることである。NaI シンチレータのカウントレートがスレッシュホールドを越え、天体からのカウントレートがバックグラウンドのカウントレートに対して、標準偏差の 5.5 倍を越えたときにトリガーがかかる。

二つ目は、バーストの位置を決定することである。これは三つのステージで決定精度がそれぞれ異なり、後のステージほど向上する。一つ目は、衛星上で DPU により 1.8 秒以内に 15 度以内で決定され、LAT のトリガーとして用いられる。二つ目は地上へ転送されることにより自動で計算され、5 秒以内に 5 度以内で決定される。三つ目は、地上で手動で計算され、一日以内に 3 度以内で決定される。

三つ目の動作は、三つの光度曲線と一つのスペクトル、計四つのデータをを出力することである。一つ目の光度曲線は、連続した光度曲線で 128 チャンネルで 8.2 秒の時間分解能がある。二つ目は、8 チャンネルで 0.256 秒の時間分解能がある。三つ目は、トリガーした後の光度曲線で 128 チャンネルで 2μ 秒の時間分解能がある。四つ目は、位置の情報と衛星上で決定されたおおよそのスペクトルである。

3.2 X 線天文衛星「すざく衛星」[25] [26]

3.2.1 概要

X 線天文衛星「すざく」は、「あすか」に続く、日本で 5 番目の X 線天文衛星である。「すざく」は 2005 年 7 月に M-V ロケットによって打ち上げられ、現在順調に観測が行われている。高度は約 550km で赤道から約 31 度傾いた楕円軌道を取り、約 96 分で地球を 1 周する。

「すざく」に搭載されている観測機器は、軟 X 線反射鏡 (X-Ray Telescope; XRT) とその焦点面に置かれた 4 つの X 線 CCD カメラ (X-ray Imaging Spectrometer; XIS)、高分解能 X 線分光器 (X-ray Spectrometer; XRS) と硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD) から構成される。XIS は、X 線光子計数型の冷却 CCD カメラで、優れた位置分解能と高エネルギー分解によって、精度の良い分光と撮像が同時に行えることが特徴である。このことは、銀河団や超新星残骸などの天体の観測に対して大きな力を発揮する。XRS は、X 線入射に伴う素子の微弱な温度上昇から入射 X 線のエネルギーを極めて精度良く計ることができ、6eV という高エネルギー分解能を実現していた。これより、活動銀河核のブラックホール近傍から放射されると考えられている鉄輝線を非常に精度良く分光し、輝線放射領域の状態の解明が行えると期待されていた。しかし、XRS は冷却材が蒸発してしまったために、残念ながら観測不可能になってしまった。硬 X 線検出器 HXD-II は 10keV から 600keV という非常に広い軟ガンマ線領域を観測をすることができる。このように「すざく」は 0.5keV から 600keV までの非常に広いエネルギー領域をかつて無いほどの低バックグラウンドで観測することが可能である。「すざく」に搭載されている現在稼働中の検出器の概要を表 3.3 に示す。

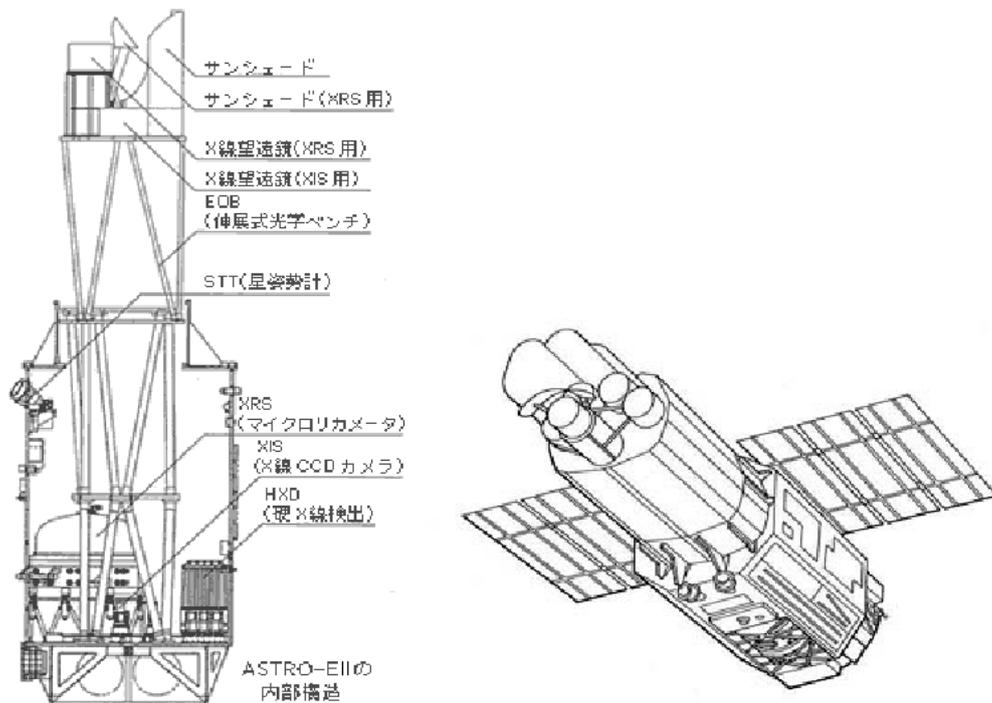


図 3.10: X 線天文衛星「すざく」

	XIS + XRT	HXD-II / Well	HXD-II / WAM
検出器	FI CCD x 3 BI CCD x 1	Si PIN ダイオード + GSO シンチレータ	BGO シンチレータ
視野	17.8' x 17.8'	34' x 34' (< 100 keV) 4.6° x 4.6° (> 100 keV)	~ 2π
エネルギー範囲	0.2 ~ 12 keV	10 ~ 700 keV	50 ~ 5000 keV
特徴	高エネルギー分解能 ~130eV @ 6keV	低バックグラウンド ~(1-5) × 10 ⁻⁵ s ⁻¹ cm ⁻¹ keV ⁻¹	全天モニタ

表 3.3: 「すざく」搭載検出器

硬 X 線検出器 HDX-II

「すざく」に搭載された硬 X 線検出器 HDX-II は 10keV から 700keV までの広範囲のエネルギー領域を観測できる。この領域は、熱制動放射や黒体放射などの熱的な放射からシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などの非熱的な放射が見え始める非常に重要な領域であるが、ガンマ線の相互作用としてコンプトン散乱が支配的である。そのため、ガンマ線の全エネルギーを測定することが難しく、バックグラウンドが非常に大きくなるため、有効な観測が行われなていなかった。しかし、HDX-II はバックグラウンドを極限まで抑える構造をしているため、数 100keV のエネルギー領域において、これまでのいかなる検出器よりも高い感度をもつ。

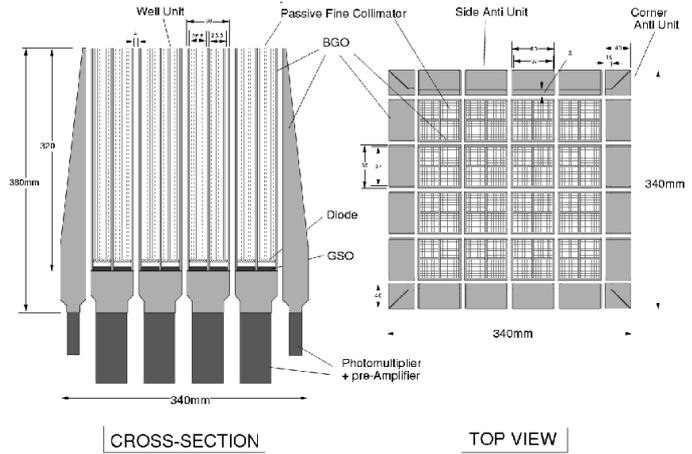


図 3.11: 硬 X 線検出器 HXD-II[18]

図 3.12: HXD-II の概要図

HXD-II センサ部

HXD-II の主な検出器は、中央に配置された 16 本の井戸型フォスウィッチ構造をもった Well 検出器である。フォスウィッチ構造とは異なる 2 種類のシンチレータを組み合わせたもので、HXD-II は BGO シンチレータと GSO シンチレータと組み合わせた検出器で、井戸型の構造を持った BGO は GSO に対して反同時計数をとることによって、コンプトン散乱などのバックグラウンドイベントを効率良く除去することができる。さらにフォスウィッチ構造の検出器を複数並べることで、視野外からの X 線の混入を防ぐための狭い視野を維持しながら大面積の検出器を実現した。この複眼構造は、隣り合うユニット間での反同時計数を取ることを可能にし、さらにバックグラウンドを軽減させることができる。また、井戸部には燐青銅で作られたパッシブなファインコリメータが挿入されており、低エネルギー側の視野をさらに狭めている。HXD-II の Well 検出器はこのようにバックグラウンドを極限までに抑える設計がなされている。その結果、従来の検出器に比べて数倍以上高い感度を実現している。

3.2.2 広帯域全天モニタ (WAM)

広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor; WAM) は、HXD-II の外側に、配置された BGO を用いたアクティブシールドである。WAM は厚い 20 本の BGO シンチレータにより構成されており、宇宙線から主検出器を守るアクティブシールドとしての役割を果たすと同時に、反同時計数にも参加することで、さらなるバックグラウンドの低減を実現しており、Anti 検出器とも呼ばれる。視野が広いことと阻止能の高い BGO 結晶で構成されていることから、全天を観測するトランジェントモニタや、MeV 領域にわたる GRB 検出器として用いることができる。また、広いエネルギー帯域 (50keV~5MeV) と 1MeV において現在稼働している検出器のなかでも世界最大の有効面積をもつ。

全天モニタという点で、WAM と同様の特徴をもつ BATSE の LAD と比較した場合、WAM は検出器の面積では 1100cm^2 と BATSE の 2025cm^2 には及ばないが、シンチレータに阻止能の高い BGO を用いることにより、高いエネルギー帯の数 100 ~ 数 MeV の領域で BATSE を凌ぐ有効面積を実現している。これにより、GRB のスペクトルや太陽フレアの観測において MeV 領域まで世界最高の感度を実現している。WAM の主な性能を表 3.4 に示す。

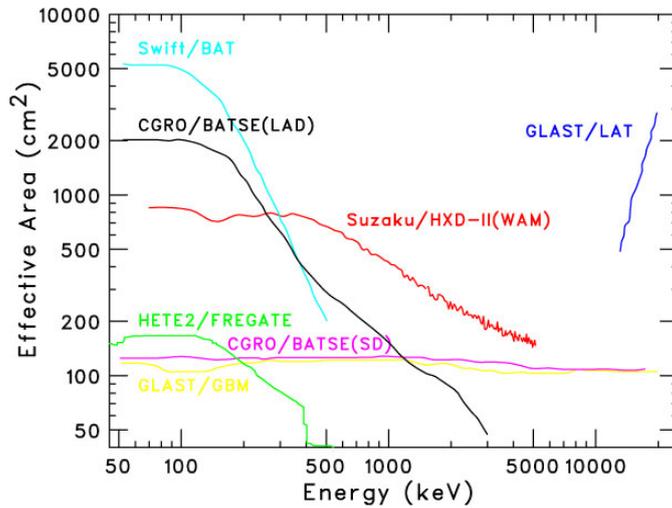


図 3.13: 最近の GRB 検出器の有効面積の比較

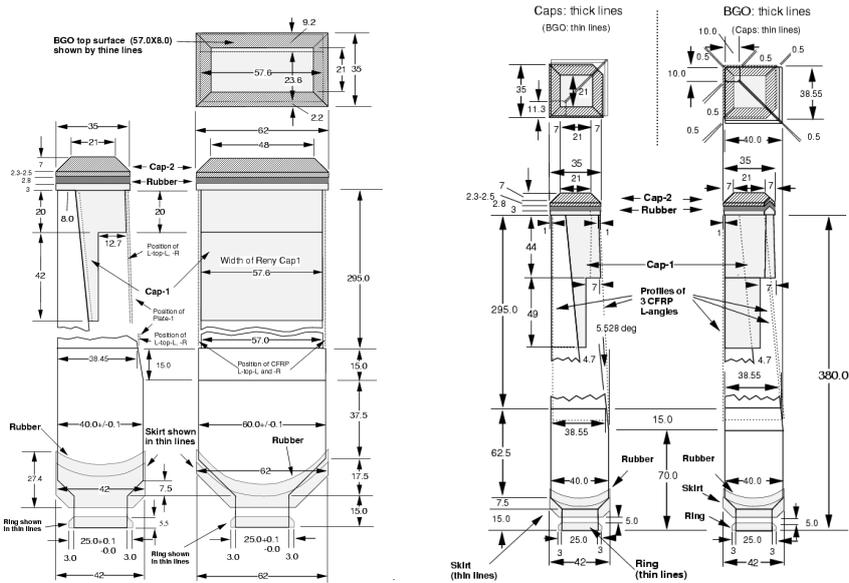


図 3.14: WAM ユニットの構造 (左: サイドカウンタ, 右: コーナーカウンタ)

WAM は GRB が発生した場合、衛星に搭載されているハードウェアによってトリガーをかけることができる。WAM のデータには、1 秒間隔で 55ch で取得する PH データ¹と 64 分の 1 秒間隔で 4ch で取得する TH データ²の 2 種類がある。通常は PH データを取得し採用しているが、GRB トリガーがかかるとそれに加えて TH データを取得し採用する。

GRB トリガーは、TH1(110~240keV) におけるバックグラウンドのポアソンゆらぎをモニターして判定する。具体的には、GRB のイベントが起こる直前 8 秒間のバックグラウンドのカウンタ数に対し、GRB 発生直後の 0.25 秒間、または 1 秒間のカウンタ数の標準偏差が 5.7σ を越えると、GRB トリガーがかかる。これにより、GRB 発生前の 8 秒から発生後 56 秒までの 64 秒間のデータを 64 分の 1 秒という高い時間分解能で得ることができる。

WAM は巨大で、入射した光子の相互作用が複雑であることに加え、衛星の内側に位置するため、 γ 線の入射角度によって検出器の応答関数 (レスポンス) が大きく変化する。レスポ

¹TRN データとも呼ばれ、通常の観測で得られるデータのことである。

²BST データとも呼ばれ、トリガーがかかったときに得られるデータのことである。

検出器数	4 (WAM 0,1,2 and 3)
エネルギー範囲	50 ~ 5000 keV (54 channel + Overflow)
エネルギー分解能	30% @ 662 keV
有効面積	800 cm ² @ 100 keV , 400 cm ² @ 1 MeV
時間分解能	1/64 sec (ガンマ線バーストデータ) , 1 sec (モニタデータ)

表 3.4: WAM の性能

ンスを正しく知ることができないと、天体からのスペクトルを正確に解析することができない。WAMは、 γ 線の入射角度を単体ではまだ正確に決定することができない。そのため、GRBが発生した場合、IPN(Inter Planetary Network)とよばれる衛星間連携により、他衛星(Ulysees, Messenger, Mars-Odyssey, Konus-wind, INTEGRAL, Swift, AGILE, RHESSI)との同期をもとにして発生位置を特定する。2005年8月~2007年8月までの間でIPNにより同期があったGRBは293個で、このうち位置が決定されたのは112個である。

第4章 GRBに対するGLASTとWAMの感度評価

GRBのプロンプト放射のGeV領域のスペクトルには、第2章で述べたように、シェル中でガンマ線が電子・陽電子対生成をおこすことにより、カットオフがあると予想されており、カットオフのエネルギーを知ることで Γ の値に制限をつけることができ放射機構の解明につながると考えられている。EGRET検出器では、高エネルギー側での感度が低かったため、スペクトルを有意に得ることができず、高エネルギー側の放射がどのような状態にあるかを知ることができなかった。そのため本研究では、GLAST衛星と「すざく」衛星に搭載されているWAMでGRBを同時観測した場合、GLASTのみでの観測に比べどの程度カットオフの検出感度が向上するか、シミュレーションを用いて評価を行った。

今回のシミュレーションで用いたLAT検出器は、EGRETと比べて有効面積が非常に大きく、高エネルギー側での感度が優れているため、GeV領域でのプロンプト放射のスペクトルを得ることができる。カットオフの有無は、GRBの高エネルギー側のべき指数である β の値と、カットオフより高いエネルギー範囲のべき指数の値を比較し、そのずれを評価することによって判定できる。

しかし、LATのエネルギー領域では、低エネルギー側に比べてGRBからの光子数が少なく統計的なゆらぎが大きくなってしまいうので、非常に明るく光子数が多いGRBでしか高エネルギー側のべき指数である β の値を精度よく決定することができない。

そのため、 β の決定精度が悪いとカットオフを判別できるGRBの個数が減少してしまう。

そこで、本研究ではGRBの放射のピークがある低エネルギー側で β の値を精度よく決定し、LATのエネルギー領域でその値を用いてカットオフの判定を行うことにした。 β の値を決定するためには、GBM検出器だけでは、有効面積が小さく決定精度があまりよくないため、放射のピークに近い1MeVでの有効面積が現在稼働している検出器のなかで最大のWAM検出器を同時に用いて決定精度を向上させることにした。

今回のシミュレーションでは、まず、GBM単体に比べてWAMを加えることにより β の決定精度がどの程度向上するかを調べた。次に、LATがどのようなパラメータのGRBを有意に検出することができるか感度評価を行った。そして、その結果を用いることにより、カットオフがどの程度まで有意に検出できるか感度評価を行った。

4.1 GBMとWAMを用いた高エネルギーべき指数の決定精度の評価

ここでは、WAMで検出されたGRBのデータを用いてスペクトルをシミュレーションすることにより、GRBの高エネルギー側のべき指数である β の決定精度がGBM単体に

比べ、WAMを加えた場合、現実的にどの程度向上するかを評価した。

シミュレーションの手順は、まず GRB が検出される方向をシミュレーションし、入射するガンマ線の角度を決定する。次に、その角度に応じたレスポンスを用いて GBM と WAM の GRB のスペクトルをシミュレーションする。シミュレーションしたスペクトルを Band 関数でフィッティングし、GBM 単体と WAM を加えたときのエラーの範囲を求める。これをもとにして、 β の決定精度を評価する。

4.1.1 シミュレーションと解析の方法

GRB が検出される角度の決定

GRB は全天一様な方向で起こるので、これを考慮するために GRB からのガンマ線が検出器に様々な角度から入射したとして、検出される角度を乱数をふって決定し、得られた角度に応じた検出器のレスポンスを決定する。

GBM と WAM の座標を図 4.1,4.2 に示す。GBM は地球に対して常に同じ面を向けているので、地球に隠されてしまう角度が存在することと、視野が 9.5str であるので、立体角から検出可能な角度を計算すると $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ となる。

WAM は地球に対して常に違う面を向けて周回するため、地球によって隠され続ける面がないので、全ての角度から検出することが可能であるとした。ただし、 $\theta=0^\circ$ 、 180° は、図 4.2 から分かるように HXD 検出器の真上と真下にあたり、WAM がいないため検出不能であるとした。

また、 ϕ 方向はすべて検出可能であるので、 θ 方向は角度が大きくなるにつれて、その角度で検出できる立体角が大きくなる。どの θ の値でも、様々な ϕ の方向に同じだけ GRB が発生するとすると、 θ の値で乱数をふった場合、 θ が大きいと GRB の発生密度が低くなってしまふ。このことを考慮するために $\cos\theta$ の値を乱数でふり、それを θ に直して用いる。ここでは WAM で検出された GRB のスペクトルパラメータを用いて、それぞれの GRB パラメータにつき、100 個ずつ角度をシミュレーションした。

これにより、GRB が検出される角度が得られたので、スペクトルを作成する際に必要なレスポンスを決定できる。

GRB のスペクトルの作成

次に得られたレスポンスを用いて、GBM と WAM で GRB のスペクトルをシミュレーションした。シミュレーションには、X 線観測者が一般に使っている XSPEC のパッケージバージョン 11.3.2t を使用し、fakeit コマンドを用いた。シミュレーションに用いた GRB のスペクトルパラメータは、WAM が 2005 年 9 月 ~2007 年 1 月までに、WAM が検出した 49 個の GRB のスペクトルパラメータを用いる。 β の決定精度を重点的に調べたいので、Band 関数によってパラメータが決定されているものはそのまま Band 関数として用い、その他の関数でパラメータが決定されているものは、様々な仮定をおき Band 関数のパラメータに直して用いた。シミュレーションでは、入力パラメータは、 α 、 β 、 E_p 、100keV での規格化定数である。検出器のレスポンスとバックグラウンドのデータは、GBM では GLAST チームが公開している、BGO シンチレーション検出器と NaI シンチレーション検出器のものを用い、WAM は、時期によらずバックグラウンドが安定しているので、2005

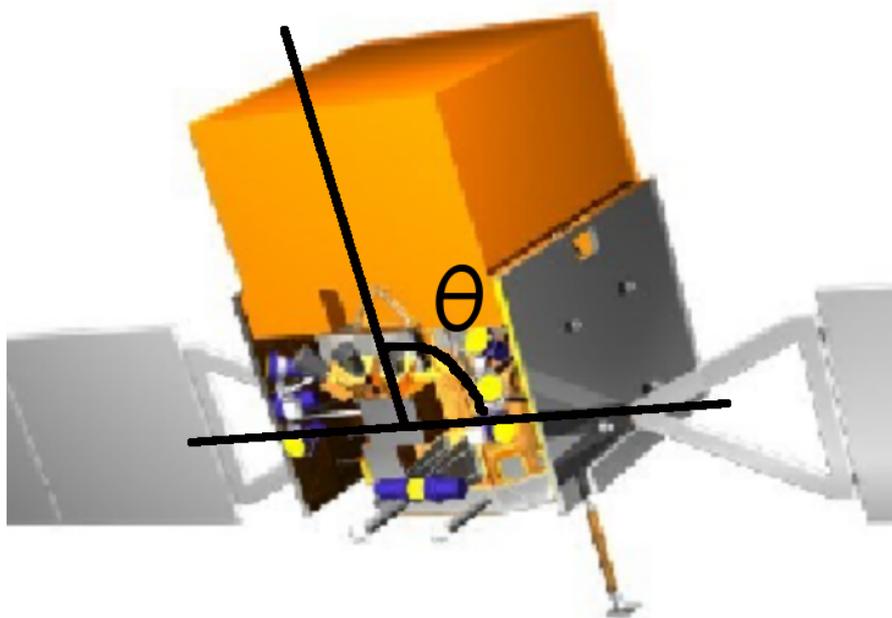


図 4.1: GBM 検出器の座標

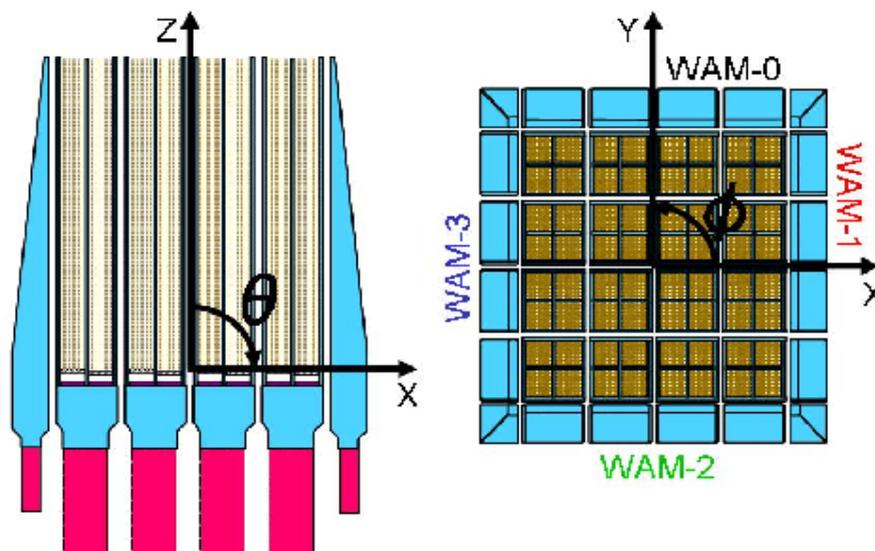


図 4.2: WAM 検出器の座標

年10月8日のSAA(南大西洋異常域-荷電粒子が多い)付近を周回していない時間帯のものをを用いた。シミュレーションの手順は、GRBのスペクトルを作る場合は、GBMとWAMのバックグラウンドのスペクトルファイルを読み込ませ、次にレスポンスファイルを読み込ませる。続いて、作成したいスペクトルのモデルを決定し、パラメータを入力する。最後にfakeitとコマンドを入力することで、組み込まれている乱数に応じて光子がふられたそれぞれの検出器のpha形式のスペクトルファイルが作成される。続いて、GRBの継続時間に合わせたバックグラウンドを作成するために同様の操作を繰り返すが、パラメータを入力する際に、スペクトルの規格化定数を0とした。

スペクトルのフィッティング

シミュレーションで得られたスペクトルをGBM単体の場合と、WAMを加えた場合でBand関数を用いてXSPECでフィッティングした。フィッティングの際に、それぞれのべき指数のエラー範囲を計算するが、 χ^2/dof の値が大きい場合には、計算された値の信頼度が落ちるため、2.00以下でしか計算しないようにし、計算されるエラーの範囲は、信頼度が90%となるようにした。また、エラー範囲の計算は、 $-\infty \sim \infty$ で行うことが望ましいが、この範囲で計算すると計算できずに終了してしまうので、 β のエラー範囲は初期設定の値である $-10 \sim 10$ として計算を行った。

決定精度の評価方法

β の決定精度は、 β_{-b}^{+a} の β をフィッティングで得た値、上限値側の誤差範囲a、下限値側の誤差範囲bとする。

4.1.2 べき指数 β の決定精度の評価

シミュレーションに用いた1つのGRBスペクトルパラメータに対して、それぞれ角度を変えて100個シミュレーションしたときの決定精度を評価した。

図4.3は、GRB051008でのGBMとGBM+WAMの場合での β の誤差範囲の比較を表したものであり、WAMを加えると予想通り誤差が小さくなり決定精度が向上していることが分かる。図4.4は、GBMが $\theta=60^\circ$ 、WAMが $\theta=90^\circ$ 、 $\phi=90^\circ$ で検出したときのスペクトルで、誤差はプラス側が $0.227 \rightarrow 0.191$ 、マイナス側が $0.533 \rightarrow 0.313$ と向上している。スペクトルからWAMが加わることにより、光子のカウント数が増えるため、統計がよくなるためであると考えられる。

図4.5は、GRB060223Aの β のGBMのみとWAMを加えたときでの誤差範囲を表したものであるが、検出角度によって、決定精度が向上せず、逆に悪くなっているものがあることが分かる。

図4.6は、前述のGRB051008と同じ角度で検出されたGRB060223Aのスペクトルである。表4.1にそれぞれのパラメータを示す。誤差範囲はプラス側が $0.264 \rightarrow 0.0990$ 、マイナス側が $0.514 \rightarrow 8.10$ となり、WAMを加えることによりマイナス側で悪くなっている。スペクトルから高エネルギー側ではGBMの誤差が大きく、WAMも同様にエラーが大きいが分かる。しかし、誤差が大きくてもWAMを加えることで光子の統計が増え、フィッ

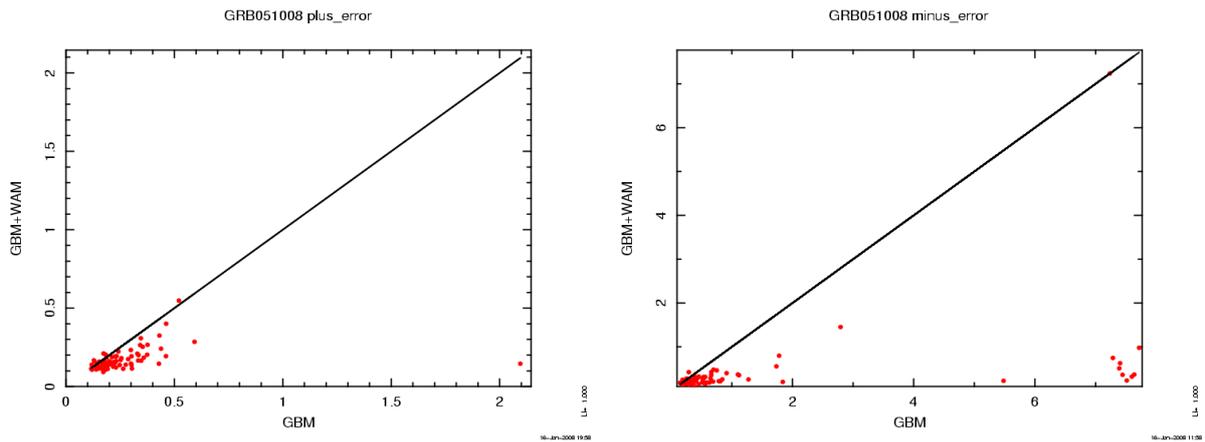


図 4.3: GRB051008 での GBM 検出器と GBM+WAM 検出器の β の誤差の比較 (上図: プラスの誤差、下図: マイナスの誤差、横軸は GBM のみでの値、縦軸は WAM を検出器を加えたときの値。直線は、 $y=x$ の直線)

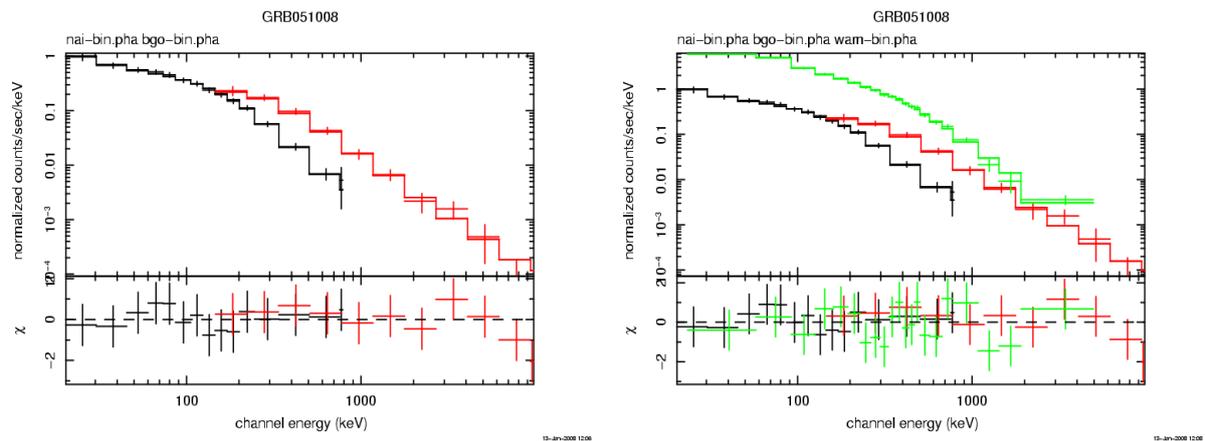


図 4.4: GRB051008 のスペクトル (左図: GBM 検出器、右図: GBM+WAM 検出器)。黒が NaI、赤が BGO、緑が WAM を表す。上図は単位時間、単位面積、単位エネルギーでのカウント数を表し、データはエラー付きで、その縦線はエラーを、モデルはヒストグラムで表わす。下図は、データとモデルの残差を表す。

ティングの結果が改善するはずであるので、予想と矛盾する。

	継続時間 (秒)	α	β	$E_p(\text{KeV})$	fluence erg/cm ²
051008	49	-0.97	-2.11	651	2.62
060223A	12	-1.15	-1.86	66	0.09

表 4.1: GRB051008 と GRB060223A のパラメータ

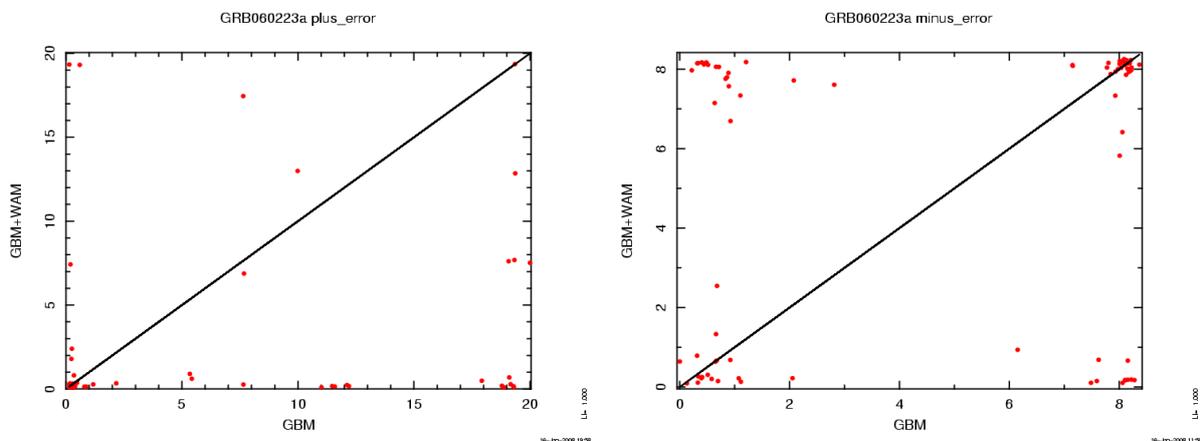


図 4.5: GRB060223A での GBM 検出器と GBM+WAM 検出器の β の誤差の比較 (左図: プラスの誤差、右図: マイナスの誤差、横軸は GBM のみでの値、縦軸は WAM を検出器を加えたときの値。直線は、 $y=x$ の直線)

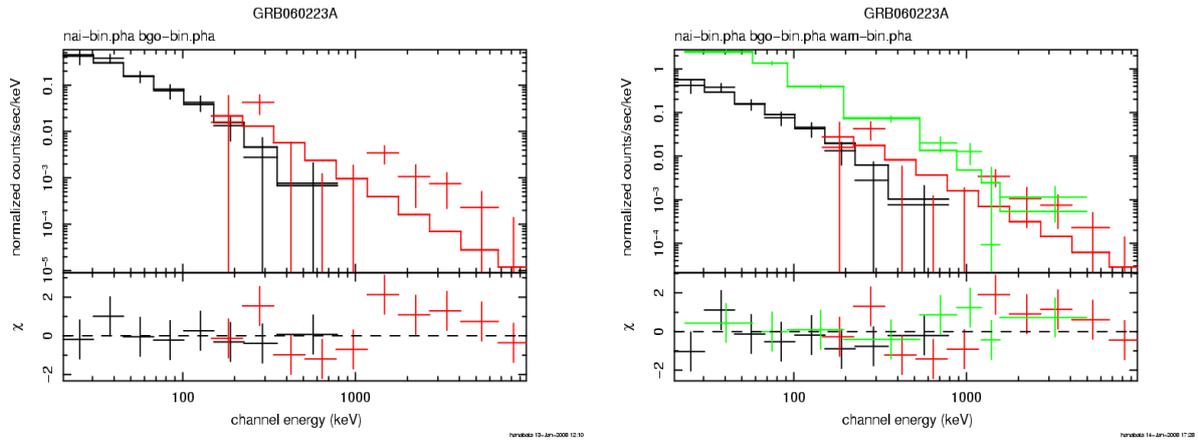


図 4.6: GRB060223A のスペクトル (左図:GBM のみでのスペクト、右図:WAM を加えたときのスペクトル)

以上より WAM を加えても β の決定精度が改善しないものがあることがわかった。以下では、この原因の考察を行う。

フィッティングによる β のばらつきを見るために、1つの GRB パラメータに対する検出角度を変えてシミュレーションした 100 個の β の標準偏差を計算した。WAM を加えたときの標準偏差が小さいもの上位 3 つの GRB と大きかった上位 3 つの GRB のパラメータと標準偏差をそれぞれ表 4.2、表 4.3 に示す。

GRB	継続時間 (秒)	α	β	Ep(keV)	fluence $\times 10^{-5} \text{erg/cm}^2$	標準偏差
061101	33	-1.00	-2.31	10	2.51	0.011
061028	50	-1.00	-2.29	10	1.60	0.012
070125	80	-0.80	-2.03	533	16.6	0.024

表 4.2: 標準偏差が小さい上位 3 つの GRB のパラメータ

GRB	継続時間 (秒)	α	β	Ep (keV)	fluence $\times 10^{-5} \text{erg/cm}^2$	標準偏差
060501	22	-1.06	-3.00	198	0.20	2.9
050904	200	-1.00	-2.23	149	0.79	2.8
060223A	12	-1.15	-1.86	66	0.09	2.5

表 4.3: 標準偏差が大きい上位 3 つの GRB のパラメータ

WAM のスペクトルを加えたときにフィッティングにより β の決定精度が落ちてしまう原因は、主に 3 つ考えられる。

1 つ目は、暗い GRB ではもともとの統計誤差が大きいので、誤差のバラツキが大きくなるためであり、これにより GBM のみと WAM を加えたときで β の値が違う場合がある。例として、フィッティングの結果が GBM のみの場合には β の値が下限値付近になっていて、WAM を加えた場合に β の値がシミュレーションで入力した値から離れていない値になっていて、両者ともに誤差の範囲が $-10 \sim 10$ と制限できないかそれに近い場合であ

る。このとき、GBMのみではマイナスの誤差が小さく、WAMを加えるとマイナスの誤差が大きくなる。

2つ目は、 α の値と β の値が近い場合、 α と β の区別をつけることができないため、 E_p がWAMの帯域に存在しないとして α だけの単一のべき型スペクトルとしてフィッティングされると、 β が存在しないことになり、 β の不定性が大きくなるためであると考えられる。GRB060223Aでは、 α の値と β の値が近いので誤差が大きくなったと考えられるが、標準偏差が大きくなっている他の2つには当てはまらない。一方標準偏差が小さいものでは、 α と β の値が離れて区別ができるため、フィッティングが精度よく行われたと考えられる。

3つ目は、 E_p が低すぎると、高エネルギー側に延びているのが α か β か区別をつけることができないので、べき指数 α のべき型スペクトルとしてフィッティングが行われると E_p が存在しなくなり、 β の値を決定することができないためであると考えられる。一方、べき指数 β のべき型スペクトルとしてフィッティングが行われると β の値が精度よく決定されると考えられる。しかし、標準偏差が大きいものは、 α と β の値が近いので、誤差が大きくなると考えられる。

以上の考察より、あまり暗いGRBでない限り、WAMを加えることで決定精度が良くなるということが分かった。

そこで全体の傾向を見るために、一つのGRBパラメータに対して角度を変えて100個シミュレーションしたものの誤差範囲の平均をプラス側とマイナス側それぞれとり、そのGRBの決定精度した。これを用いた全てのGRBパラメータに対して行い、プロットした。図4.7に示す。ただし、プラス側では $\beta > 0$ となってしまう、決定精度が負の値を取るものがあつたので、これを除外した。図よりWAMを加えることで β の決定精度がプラス側では約50%程度向上し、マイナス側では約30%程度向上することが分かった。

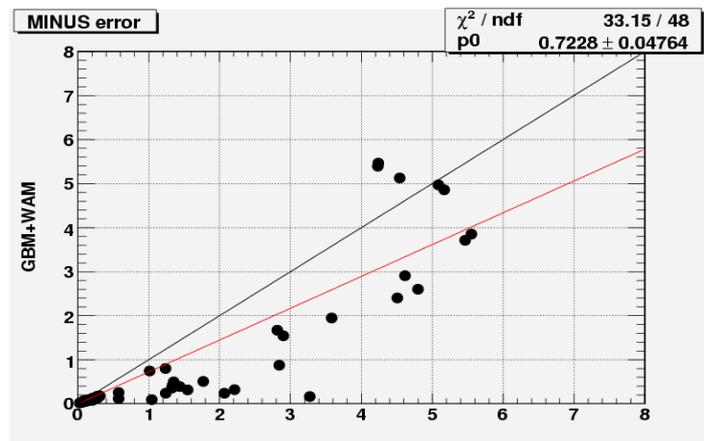
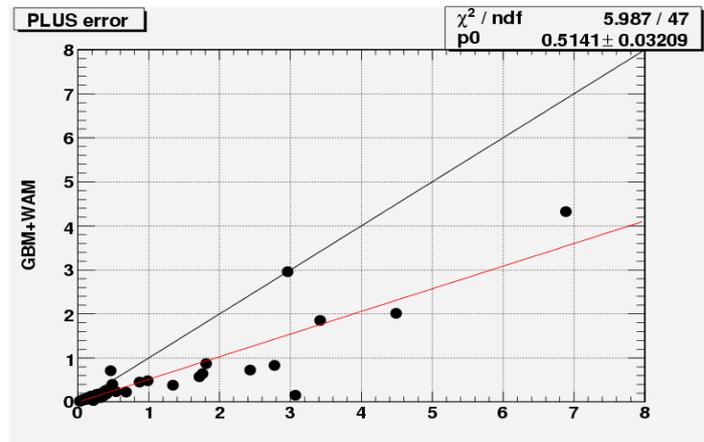


図 4.7: 全体の β の決定精度:左側がプラスの誤差範囲 a、右側がマイナスの誤差範囲 b。
 黒色の直線は $y = x$ の直線で、赤色の直線は傾きが k の $y = kx$ のフィッティング直線。
 (マイナス側が $k=0.5224$ 、プラス側が $k=0.7121$)

4.2 LAT 検出器の感度評価

ここでの目的は、LAT 検出器が有意に検出できる GRB を調べることにより、どのようなパラメータが検出感度に大きく依存するかを調べることと、検出可能な GRB を把握し、カットオフを入れたスペクトルをシミュレーションする際の GRB のパラメータの指標を得ることである。ここでは、LAT のスペクトルをシミュレーションする際に用いる解析ツールである Science Tools の詳細を述べ、次に Science Tools を用いたシミュレーション方法と解析方法を述べ、最後に検出感度の評価を行う。

4.2.1 Science Tools

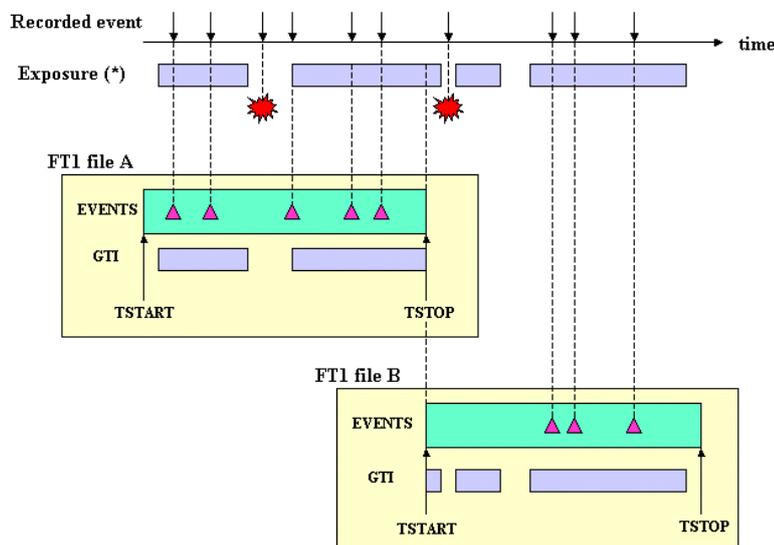
今回 LAT でのシミュレーションに用いたのは、GLAST 検出器用の解析ツール Science Tools である。これは、SLAC(Stanford Linear Accelerator Center) にて開発されており、様々な天体の解析が可能となっており、GRB を解析するためのツールも用意されている。ビーム試験によってガンマ線の入射に対する検出器の応答や、衛星の軌道上での動作情報などが考慮されたレスポンスが用意されているバージョン v9 を用いた。

Science Tools では、天体から得られる光子のイベントデータファイルと、衛星の情報を含んだ spacecraft ファイルを用いて解析を行う。本研究では、シミュレーションによってこれらのデータファイルを作成し、解析に用いる。これらのファイルは fits 形式で書かれており、Header Keyword や Colmun にデータに含まれる情報が書かれている。光子のイベントファイルには検出されたガンマ線のエネルギーや、検出対象の中心座標、検出領域などの情報がイベント毎に書かれている。Spacecraft ファイルには決められた時間毎の衛星の軌道や姿勢の情報が書かれている。

光子のイベントファイルは FT1 ファイルとも呼ばれる。今までの衛星ではこのファイルの Header Keyword には、観測開始と終了の時間が記録されていた。しかし、GLAST は常に全天を観測しているため、特定の天体に対する観測の開始・終了の切替えがはっきりとしない。そのため、GLAST では、以下のように定義している。図 4.8 は以下のルールを踏まえた簡略図である。

- 1.FT1 ファイルが含んでいるデータのセットの開始時間と終了時間を TSTART と TSTOP とする。
- 2.FT1 ファイルは TSTART・TSTOP で定義される時間の“ good ”とされるイベントをすべてを含んでいる。この good イベントは LAT が観測モードで記録したもので、level1 プロセスでのイベントデータとして認知されたものである。level1 については以下で説明する。
- 3.GTI extension は good time interval とよばれる時間が書かれている。この good time interval(GTI) はデータが有効である (good イベントである) と考えられる時間で、これは exposure の計算等に用いられる。

衛星から下ろされたそのままのデータは raw data と呼ばれる。このデータは、level 0, level 1 プロセスという過程を経て、解析に利用しやすい形に変換される。level 0 プロセスでは、衛星情報と検出器情報に分割される。これにより、raw data は level 0 data と呼ばれるデータファイルに変換される。続いて、level1 プロセスにより、検出器に含まれる相



(*) A filled box indicates a time interval during which the LAT instrument is turned on and in observation mode.

図 4.8: FT1 ファイルのイメージ図 [19]

相互作用の全ての情報を保持している level 0 data を用いて飛跡を再構成することによって相互作用粒子の特定、特性提示を行う。これにより、level 1 data に変換される。イベントの level 1 data にはイベント到来時間、測定されたエネルギー、またその粒子の種類を含んでいる。もう一方の level 1 data には検出器の観測時間や方向の履歴が含まれている。

GTI extension は good time interval とよばれる時間が書かれている。この good time interval(GTI) はデータが有効である (good イベントである) と考えられる時間で、これは exposure の計算等に用いられる。

衛星の情報を含む spacecraft data は FT2 ファイルとも呼ばれる。これには exposure(観測時間 × 有効面積) の計算に必要な情報が全て含まれる。以下にそのほかの FT2 ファイルの特徴を記す。

1. 現在の FT2 ファイルには姿勢と軌道の情報が含まれている。
2. FT2 ファイルには三つの異なるタイプの量が存在している。それは衛星のポジション、向いている方向、検出器の状態である。この内最初の二つは exposure の計算に必要で、三つ全てはイベントをフィルターにかけるのに便利な情報である。

図 4.9 は FT1、FT2 データが Science Tools でどのように使われるかを示した簡略図である。

Science Tools には様々なコマンドが用意されており、天体データのシミュレーションを含めたイベントデータのセレクション、任意のエネルギー幅で光子イベントをまとめたり、検出角度に応じたレスポンス関数の作成ができる。本研究でスペクトルの作成した際の手順を以下に述べる。

1. 天体及びバックグラウンドのシミュレーションを行う。
- 2.1 で得られたシミュレーションデータの必要な時間、領域、エネルギー範囲のセレクションを行う。

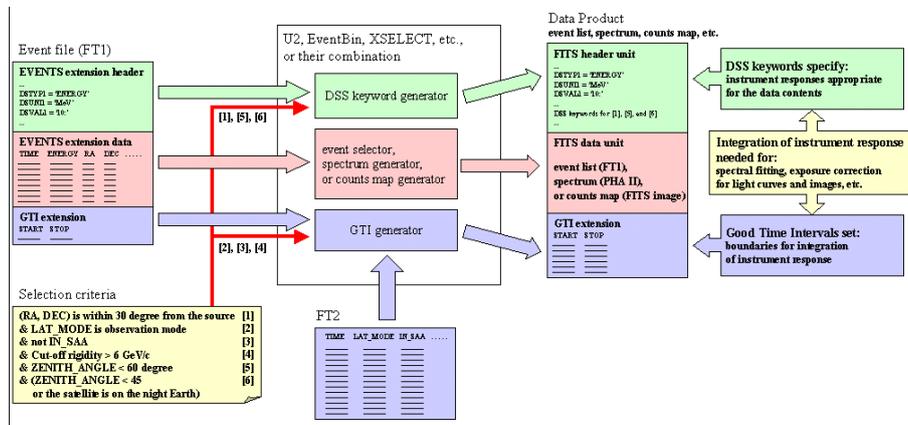


図 4.9: Science Tools での FT1&FT2 ファイルの使用過程 [19]

3. セレクションしたイベントデータからスペクトルを作成する。
 4. レスpons関数を作成する。
- 以下にこれらの手法に用いるコマンドについて説明する。

シミュレーションを行うには、コマンド'gtobssim'を用いる。コマンド実行の際には、情報が含まれた xml ファイル、シミュレーションの後に作られるファイルの名前、観測開始時間、観測時間、レスpons関数名、モンテカルロシミュレーションに用いる乱数を指定する。実行後、シミュレーションしたイベントファイルと spacecraft ファイルが'fits'形式ファイルとして作成される。

コマンド"gtobssim"を用いる際には、情報が含まれた天体やバックグラウンドの情報を書き込んだ'xml'形式ファイルが必要である。これには、天体名、エネルギーの単位、粒子名、天体から放射される粒子のエネルギー領域、スペクトルのパラメータ、天体の座標または検出器に光子が入射する角度の情報が書かれている。今回用いた xml ファイルを図 4.10 に示す。

コマンド'gtselect'を用いることで、シミュレーションしたイベントファイルのうち任意のエネルギー領域、空間領域、観測時間を切り出すことが可能となる。その際、入力するイベントデータ名、切り出す中心座標、その半径、観測開始時間と終了時間、エネルギー領域の最大値と最小値を MeV 単位で入力する必要がある。

コマンド'gtbin'を用いることで、セレクションしたイベントファイルからスペクトルを作成することが可能である。このコマンドの際、イベントファイル、作成するスペクトルファイル名、spacecraft ファイル、横軸を対数にするかどうかの指定、エネルギー領域の最大、最小値、分けるピン数を指定することで、'pha'という形式のファイルでスペクトルが作成される。

コマンド'gtrspgen'を用いることにより、レスponsを作成することができる。作成する際に、レスponsを計算する方法を GRB に対するものとし、スペクトルファイル、spacecraft ファイル、作成後のレスponsのファイル名、gtselect で切り出しを開始する時間、レスpons関数、横軸が対数であるかどうか、エネルギー領域の最小、最大値、ピ

```

<source_library title="Example_Sources">

  <source name="Extragalactic_diffuse">
    <spectrum escale="MeV">
      <SpectrumClass name="Isotropic"cd params="10.7, 2.1, 20., 2e5"/>
      <use_spectrum frame="galaxy"/>
    </spectrum>
  </source>

  <source name=" GRB ">
    <spectrum escale="MeV">
      <SpectrumClass name="GRBobsmanager" params="100, 10., 4.0e-6, 0.1
, -1.0, -2.25, 300, 1, 0, 0, 0, 0"/>
      <direction frame="glst" theta="0" phi="0"/>
    </spectrum>
  </source>

  <source name="GRB">
    <spectrum escale="MeV" >
      <SpectrumClass name="FileSpectrum"
      params="flux=0.,specFile=band_flux_wam.dat"/>
      <celestial_dir ra="30.18" dec="17.94 " />
    </spectrum>
  </source>
</source_library>

```

図 4.10: 上段が背景放射、中段が GRB、下段が任意のスペクトルを作成する xml ファイル。

ン数を指定する必要がある。

本研究では、これらのコマンドを使用し、GRB のスペクトルをシミュレーションした。その際に、必要とする乱数を『293049』とし、レスポンス関数を DC2 とした。

4.2.2 シミュレーション方法

今回のシミュレーションで用いたべき指数の値は、BASTE が検出した 156 個の GRB で Band 関数によりべき指数が決定されているものをもとに選んだ (図 4.11)。選び方は、典型的な GRB を考慮するためにそれぞれのパラメータにおいて、もっとも頻度が高いものを基準に選択した。 α 、 E_p は、それぞれ値のカウント数が少ない両側の値とピーク値を選び、 β は、カウント数が少ない両側の値とピーク値、さらに両側の値とピーク値との中間値を選んだ。fluence はエネルギー範囲が 20~2000keV のものを用い、LAT の領域では、典型的な明るさのものより明るいものしか検出することができないと考えたので、分布数のもっとも多い値を下限値とし、それより明るい値を選んだ (表 4.4)。

上で選択したべき指数を重複の無いようにランダムに組合せ、シミュレーションする GRB のべき指数の値とした。ただし、 α の値と β の値が同じ場合はシミュレーションすることができなかつたので除外した。また、GRB の継続時間は、平均的な値である 20 秒を用いた。

α	-0.50	-1.00	-1.50		
β	-1.50	-2.00	-2.25	-2.50	-3.00
$E_p(\text{keV})$	50	300	1000		
fluence(erg/cm ²)	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	

表 4.4: 選択したパラメータ

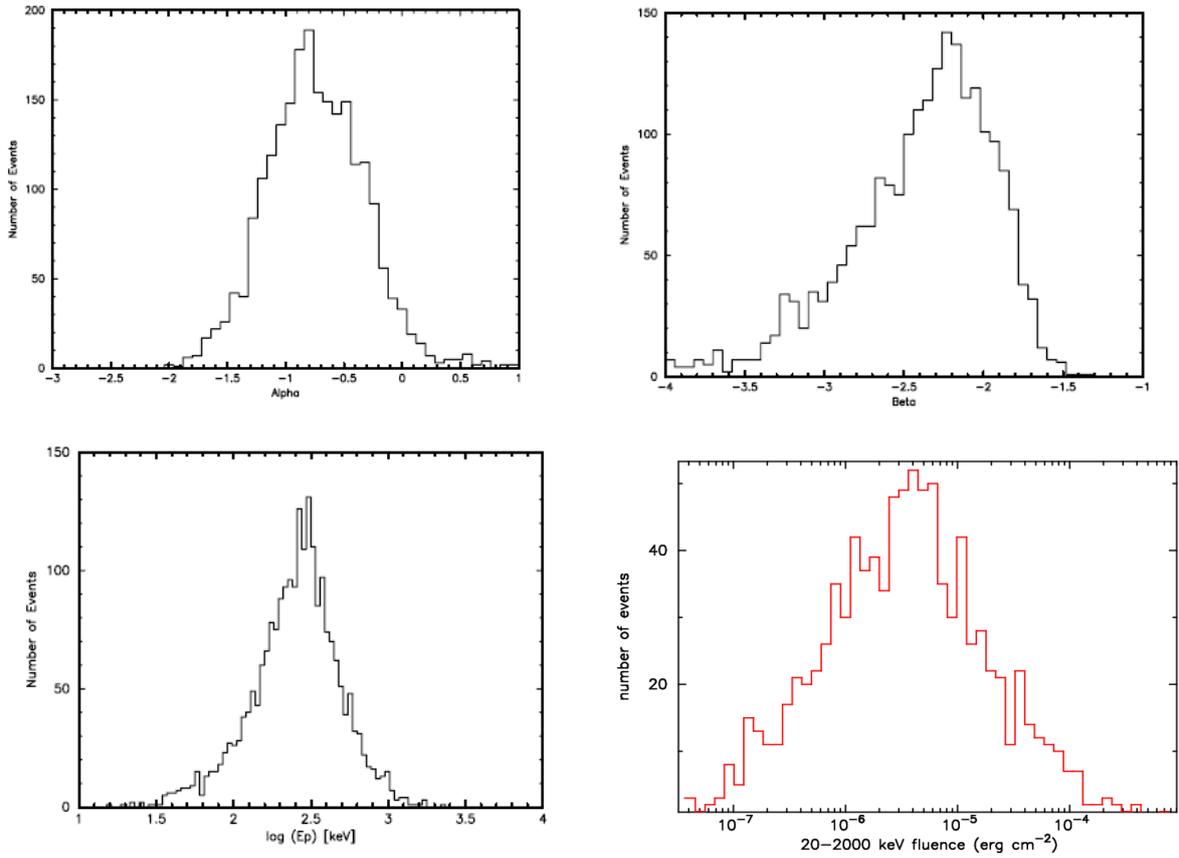


図 4.11: 左上図: α の分布図、右上図: β の分布図、左下図: E_p 分布図 [20]、右下図:fluence の分布図 [21]

シミュレーションは、背景放射の光子イベントと GRB の光子イベントをシミュレーションする。

背景放射は、活動銀河核 (AGN) などからの寄与を考慮するために、系外拡散放射モデルを用い、flux の強度は EGRET 検出器の観測で得られた値を用い、シミュレーション時間は 86400 秒とした。¹今回は、LAT が有意に検出できる GRB のパラメータを調べるので、ガンマ線の入射角度が最も良くなるように、常に LAT の真上で GRB が発生するように設定した。また、シミュレーション時間を 1300s とし、GRB の光子イベントの発生がシミュレーション開始から 1000 秒後とした。これは、実際の観測では GRB は残光を伴うことがあるので、バックグラウンドとして発生前後のスペクトルを用いることができないためである。

4.2.3 解析方法

シミュレーションによって得られた背景放射と GRB の光子イベントファイルから、GRB とバックグラウンドの fits ファイルを作成する。作成する fits ファイルは、図 4.12 のように GRB の場合は、GRB が発生している時間帯で切り取った、GRB の光子イベントと背景放射のイベントを重ね合わせたものである。バックグラウンドは、GRB が発生する前の時間帯で切り取った、GRB の光子イベントと背景放射のイベントを足し合わせたものである。

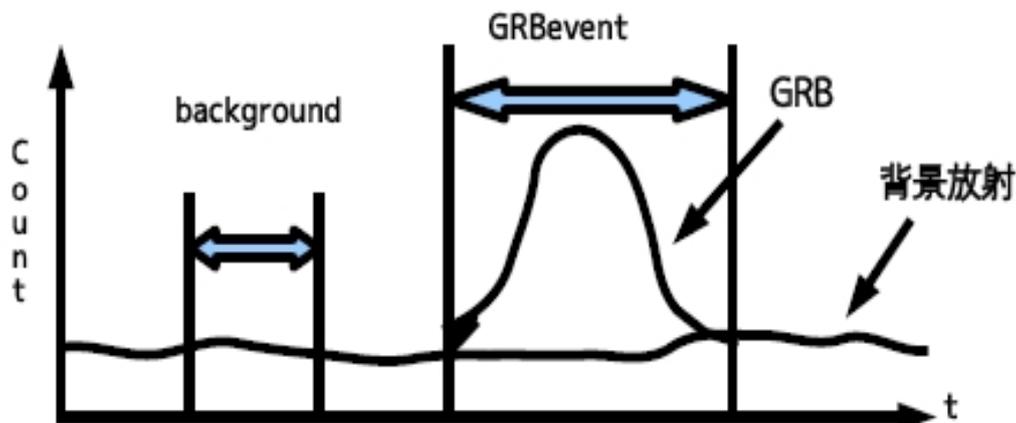


図 4.12: スペクトルの作成方法

fits ファイルを作成する手順を以下に示す。

1. GRB の fits ファイルの作成

コマンド”gtselect”を用い、まず背景放射のイベントファイルから GRB が起きている中心領域を低エネルギー側の角度分解能 (図 3.3) を考慮し、半径 10 度の立体角で切り取り、かつ GRB のイベントが発生している 20 秒を 30MeV~300GeV のエネルギー範囲で切り出す。次に GRB のイベントファイルも同様にして切り出す。切り

¹背景放射のシミュレーションを行うことにより、背景放射の光子イベントと LAT 検出器の軌道データが生成される。LAT の軌道データには、LAT 検出器が向いている座標が記述されているので、シミュレーションした時間内での LAT が向いている方向を把握することができる。これをもとに、GRB が発生する座標を指定することができる。

出したそれぞれの fits ファイルをコマンド”gtbin” を用いて足し合わせることによ、GRB の fits ファイルを作成する。

2. バックグラウンドの fits ファイルの作成

バックグラウンドは、実際の観測では GRB の残光の影響を受けることがあるので、これを考慮するために、まず背景放射のイベントファイルから GRB が起こっている中心領域を半径 10 度で、GRB のイベントが発生する直前の 500 秒を 30MeV~300GeV で切り出す。次に、GRB のイベントファイルも同様にして切り出し fits ファイルを作成する。

切り出したそれぞれの fits ファイルを足し合わせることにより、バックグラウンドの fits ファイルを作成する。

バックグラウンドの fits ファイルの光子数を、GRB が起きた時間でスケールすることによって得られた光子数をバックグラウンドの光子数とする。作成した GRB の fits ファイルの光子数からバックグラウンドの光子数を引いたものを GRB の光子数とし、光子数が 10 個以上あるもの有意に検出したとする。以下に、バックグラウンドの評価方法を述べる。

バックグラウンドの光子数を N_b 、GRB の光子数を N_{tot} とする。いま求める GRB による真の光子数を $g(N_{tot}, N_b)$ とすると、

$$g(N_{tot}, N_b) = N_{tot} - fN_b \quad (4.1)$$

ここで f は、 $\frac{\text{GRB の切取り時間}}{\text{背景放射の切取り時間}}$ で表される係数である。

ここで $g(N_{tot}, N_b)$ の二乗平均誤差 σ_g は、誤差伝搬により

$$\sigma_g^2 = \left(\frac{\partial g}{\partial N_{tot}}\right)^2 \sigma_{N_{tot}}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial N_b}\right)^2 \sigma_{N_b}^2 \quad (4.2)$$

より

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial N_{tot}}\right)^2 \sigma_{N_{tot}}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial N_b}\right)^2 \sigma_{N_b}^2} \quad (4.3)$$

$$= \sqrt{1^2 \sigma_{N_{tot}}^2 + (-f)^2 \sigma_{N_b}^2} \quad (4.4)$$

$$= \sqrt{N_{tot} + f^2 N_b} \quad (4.5)$$

となる。今回は光子数が 10 個のときが有意に検出されるとした。これは、式 4.5 より、 $10 \sim 3\sigma_g$ となり、統計的にみて 99.7% の確率で光子が検出されるためである。

今回作成したバックグラウンドの光子数は 1 個であったが、これは正しい光子数ではない。なぜならコマンド”gtselect” で指定した領域は切り取りに指定した時間内では変化しないためである。このことにより、LAT が観測しておらず光子を検出していない時間も指定した領域を切り取ることになるためである。実際の観測では LAT の観測している領域は時間と共に変化するため、gtselect で切り取ったバックグラウンドよりも数が多くなる。そのため以下の方法を用いてバックグラウンドの評価を行った。

シミュレーションにより得られた背景放射の光子数は、86400s で 11870 個であった。86400 秒には、SAA() 中にある時間も含まれており、86400 秒間常に LAT は背景放射を

受け続けていない。常に背景放射を受け続ける場合の光子数は最大2倍程度しか増えないと考えられるので、特別な考慮しないことにする。これは、光子数が桁で増えることがないことと、LATのデッドタイムが観測時間の $\sim 10\%$ 程度あるためである。86400sに光子が11870個あるので、立体角が10度の領域では20秒間に、 $11870 \times \frac{2\pi(1-\cos 10^\circ)}{4\pi} \times \frac{20}{86400} = 0.20$ 個、500秒間では $0.20 \times \frac{500}{20} = 5$ 個となる。この値を用いると、 $f = \frac{20}{500} = 0.02$ となり、 $(\frac{\partial g}{\partial N_{tot}})^2 \sigma_{N_{tot}}^2 = 1^2 \cdot \sigma_{N_{tot}}^2 = 10$ 、 $(\frac{\partial g}{\partial N_b})^2 \sigma_{N_b}^2 = (-f)^2 \sigma_{N_{tot}}^2 = 5$ となり、(4.5)式に代入すると、

$$\sigma_g = \sqrt{10 + (5 \times 0.02)^2} \quad (4.6)$$

$$= \sqrt{10 + 0.01} \quad (4.7)$$

$$\cong 3.1625 \quad (4.8)$$

となる。backgroundが0個のときの二乗平均誤差 σ_{10} は、 $\sigma_{10} = \sqrt{10} \cong 3.1622$ であり、 $\sigma_g \approx \sigma_{10}$ なので、backgroundの影響を無視できる。したがって、今回はGRBのfitsファイルに記録されている光子数を検出した光子数とする。

以上のようにして、GRBのイベントによる光子数が求められる。 α 、 β 、 E_p の値を固定したときに、fluenceだけを变化させ、それぞれのfluenceの値での光子数を、横軸fluence、縦軸photon event数としてプロットした。(図4.13)。fluenceと光子数は、比例関係にあるので $Y = aX$ の直線に乗ると仮定し、最小二乗法を用いて傾き a の値を決定する。 a の値を求めることにより、光子数が10個のときのfluenceがわかる。これより α 、 β 、 E_p の値をそれぞれ变化させたときの10photonになるfluenceを求めた。

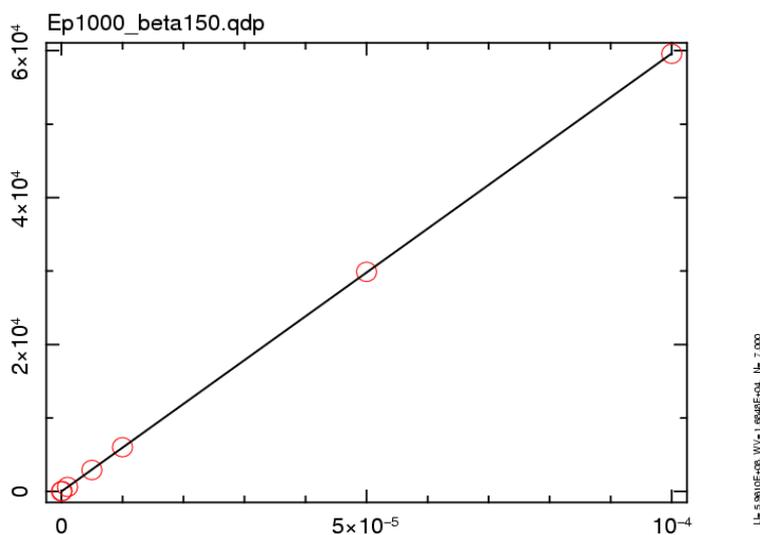


図 4.13: $\alpha=-1.00, \beta=-1.50, E_p=1000\text{keV}$ のときの photon イベント数と fluence の関係

4.2.4 検出感度の評価

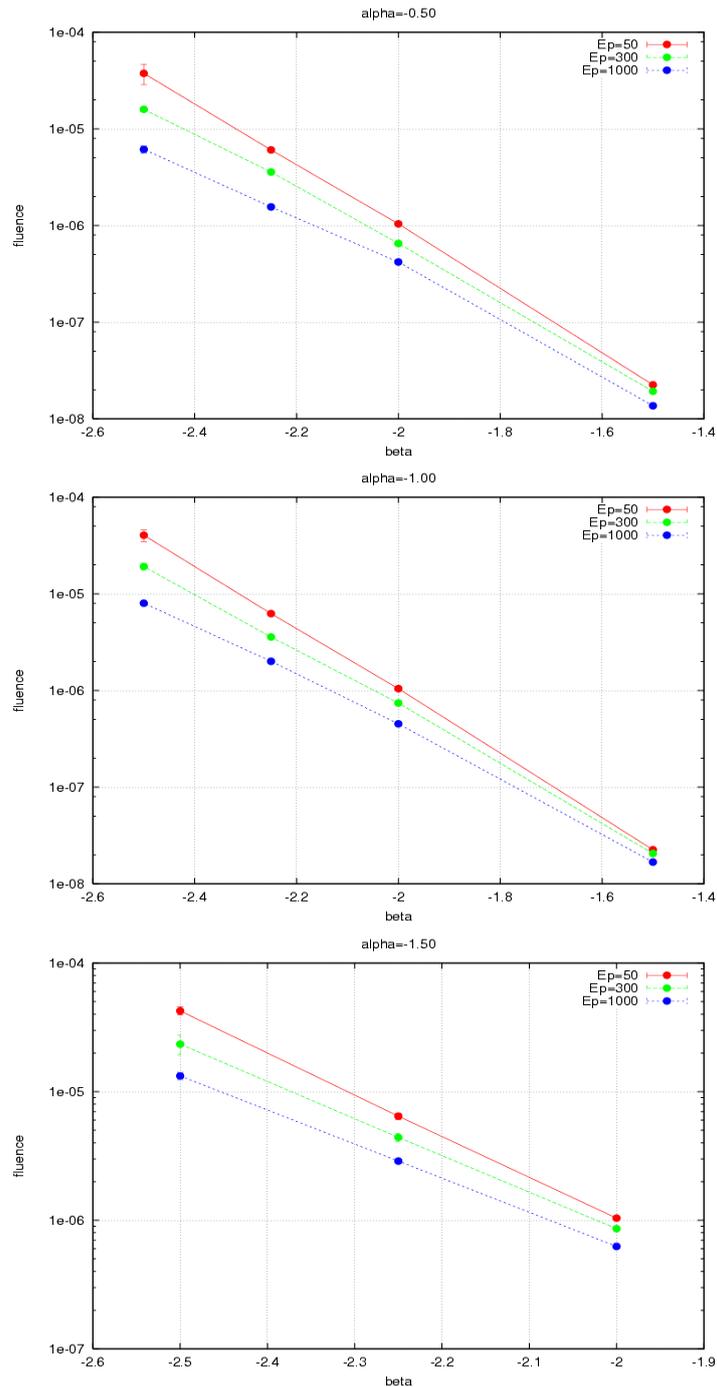


図 4.14: べき指数 α を固定し、 E_p を変化させたときの fluence と β の関係

図 4.14 の上段, 中段, 下段の図はそれぞれ, α を $-0.50, -1.00, -1.50$ に固定し, E_p を $50, 300, 1000 \text{ keV}$ と変化させたときのものである。

この図より, α が同じでも E_p が変化することによって, 10 個検出できる fluence の値は, β が同じ値のときでも最大 5 倍程度変化するが, β の値が変化することによって, fluence の値が 3 桁程度変化することがわかる。

図 4.15 の上段、中段、下段の図はそれぞれ、 E_p を 50、300、1000keV に固定して、 α

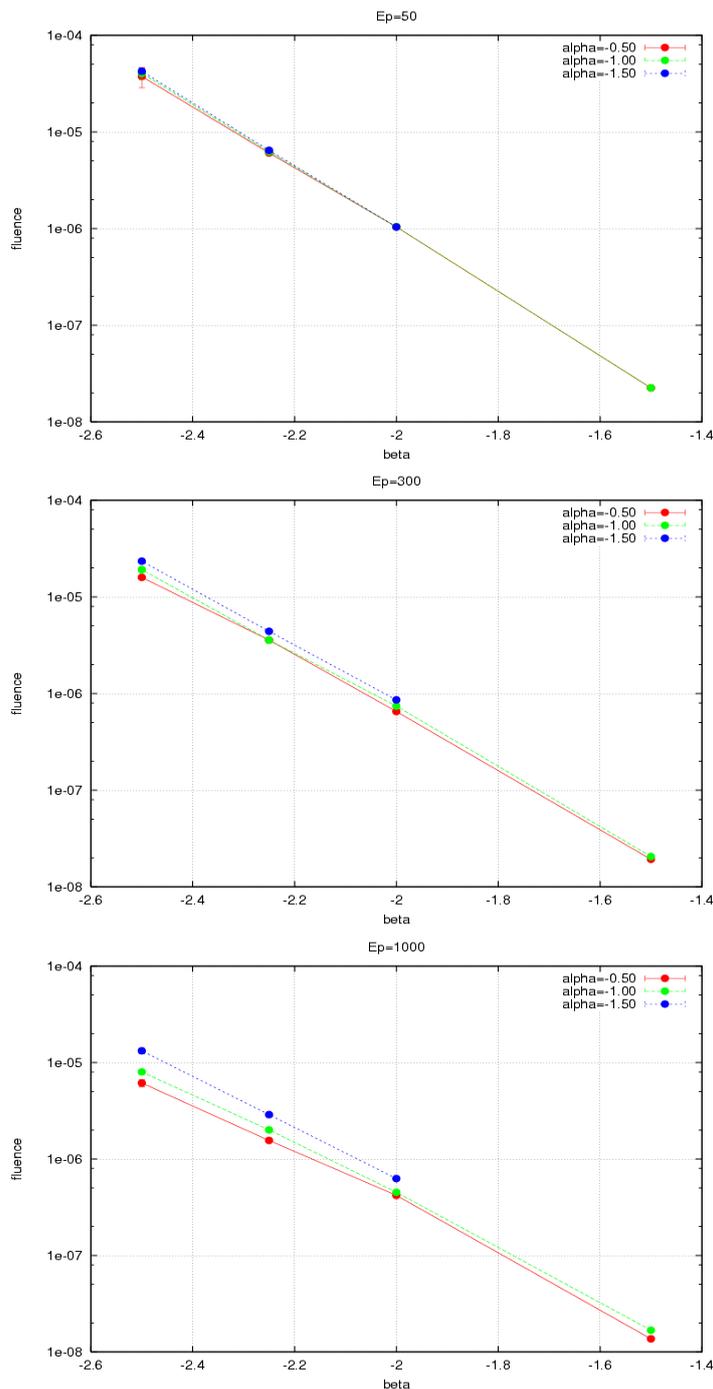


図 4.15: べき指数 E_p を固定し、 α を変化させたときの fluence と β の関係

を -0.50, -1.00, -1.50 と変化させたときに、光子が 10 個検出できる β と fluence の値の関係を表わした図である。

これより、 E_p が同じでも α が変化することによって、光子 10 個検出できる fluence の値は、 β が同じ値のときに最大 2 倍程度変化するが、 β の値が変化することによって、fluence の値が 3 桁程度変化することが分かる。

以上の結果により、LAT 検出器で有意に検出できる GRB は、 α や E_p の値にはあまり依存せず、fluence や β の値に大きく依存することがわかった。このことから、カットオフを入れたスペクトルをシミュレーションする際に、LAT で有意にスペクトルを描くことができる GRB のパラメータの指標が得ることができた。

4.3 カットオフの検出感度評価

ここでは、GRB の発生源から放出されたシェルの内部で、ガンマ線が対生成することにより生じるカットオフの検出感度の評価を行った。そのためにまず、シミュレーションによって得られたスペクトルがモデルを再現できているかを調べた。次に LAT のスペクトルにカットオフのモデルを加えシミュレーションを行い、GLAST のみでのスペクトルのフィッティングと WAM を加えたときのフィッティングにより得られた結果を用いて F 検定を行い、カットオフが存在することに対する有意水準を評価した。

4.3.1 シミュレーションと解析方法

ここでは、今回用いた Science Tools のスペクトルの再現性と LAT でのカットオフスペクトルのシミュレーション方法について述べる。

スペクトルの再現性

まず始めに、Science Tools によりシミュレーションした LAT のスペクトルがシミュレーションに用いたモデルを再現しているかを調べた。これは、Science Tools が開発の途上にあるため、バグが存在する可能性があるためである。カットオフのモデルスペクトルを仮定してシミュレーションを行い、得られたスペクトルと仮定したモデルを重ね、その比を見ることにより再現性を確かめた。図 4.16 にカットオフのモデルスペクトルとシミュレーションで得られたスペクトルの差を、明るさが異なる 2 例示す。これより、仮定したモデルとシミュレーションしたスペクトルが異なっており、統計誤差よりも有意なずれが生じ正しく再現できていないことが分かる。

これは XSPEC で描いているモデルスペクトルが、今回のシミュレーションで仮定したモデルスペクトルと異なっている可能性が考えられる。これを確かめるために、次の 2 つの方法で確かめた。1 つ目は XSPEC でモデルスペクトルを描き、そのモデルスペクトルのフラックス値を用いて Science Tools でシミュレーションを行い、モデルスペクトルとシミュレーションしたスペクトルの差を比較する方法である。2 つ目は、自分で作成したモデルスペクトルを XSPEC で再現することができるローカルモデルとの比較である。モデルスペクトルのフラックス値を用いることでローカルモデルを作成できるので、Science Tools でシミュレーションしたもののカットオフモデルと同じモデルを再現することができる。図 4.17 にそれぞれモデルスペクトルとシミュレーションしたスペクトルとの差を示す。図 4.17 よりどちらでも差があることが分かり、シミュレーションで得られたスペクトルには不定性があることが分かる。このことを系統誤差と考えることにし、図 4.16 のスペクトルの比よりシミュレーションされたモデルには 3% の誤差があり、これを系統誤差として今後の解析に加えることとした。

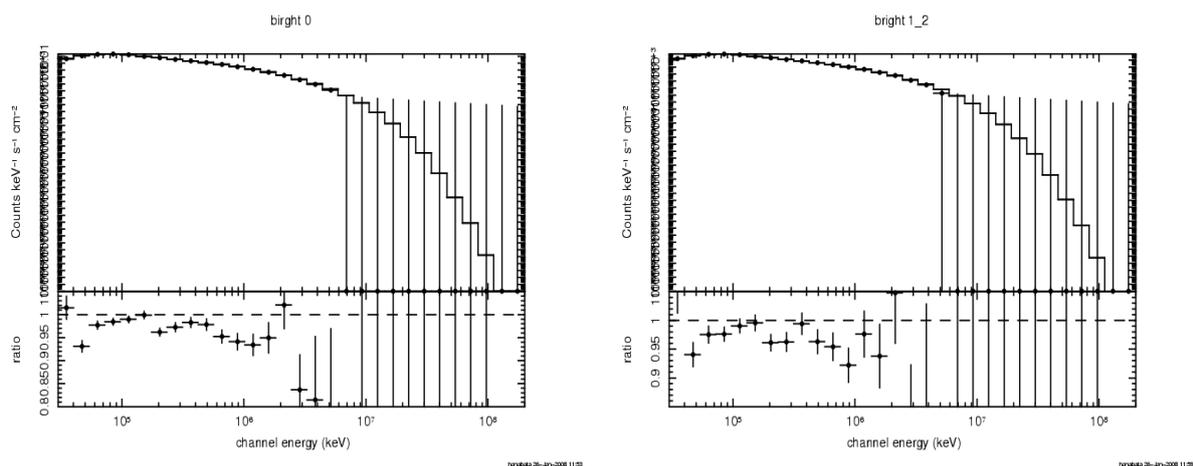


図 4.16: カットオフを仮定したモデルとシミュレーションしたスペクトルとの差。上段: スペクトル; 下段: 2つのスペクトルの比 (図 4.17 も同様)。エラーバー付きの点がシミュレーションにより得られたスペクトル。ヒストグラムがモデルスペクトル。

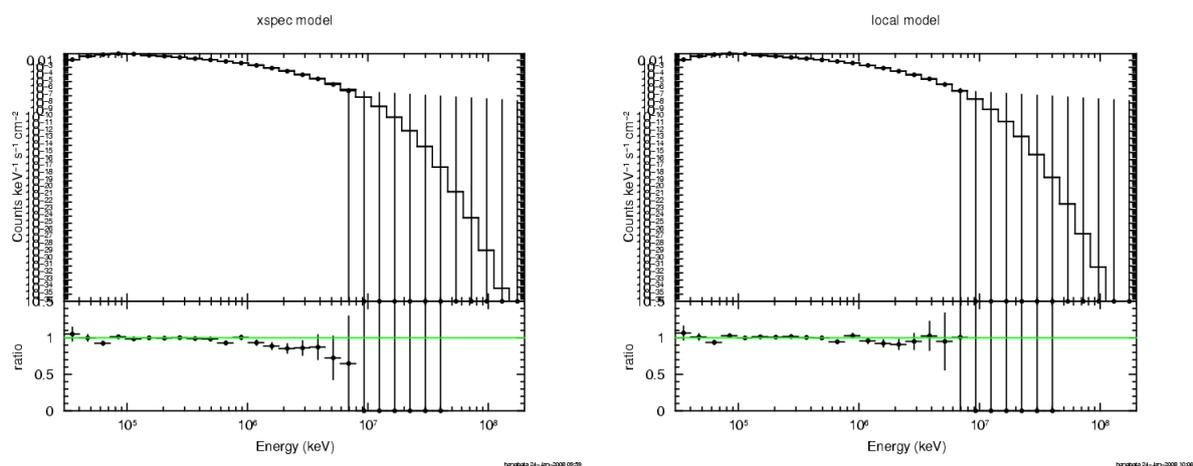


図 4.17: 左図:XSPEC のモデルスペクトルとそのフラックス値を使ってシミュレーションしたスペクトルの差。右図:XSPEC のローカルモデルとシミュレーションしたスペクトルの差。

シミュレーション方法

シミュレーションを行うために、まずカットオフスペクトルのモデルを決定した。LATでのスペクトルにカットオフを加えるために、Band 関数 (式 2.7) に指数関数を掛け合わせたモデルを用いた。 E_{cut} はカットオフのエネルギーである。式を以下に示す。

$$A \left(\frac{(\alpha - \beta) E_0}{100 \text{keV}} \right)^{(\beta - \alpha)} \exp\left(-\frac{E}{100 \text{keV}}\right)^\beta \times \exp\left(-\frac{E}{E_{cut}}\right) \quad (4.9)$$

今回のシミュレーションでは、 E_{cut} は 100MeV、1GeV、10GeV の 3 つの値を用い、それぞれに対して、4.1 節で用いた GRB のパラメータを使ってカットオフスペクトルのフラックスを計算した。

次に 4.1 節で行ったように、一つの GRB パラメータに対して検出角度を 100 個ずつ変化させてシミュレーションを行った。LAT の検出角度は、4.1 の GBM と同じ検出角度で、その検出角度でのスペクトルを作成するために、xml ファイルの中で与える GRB の発生位置を赤道座標の赤緯を変更した。

解析方法

まず、シミュレーションにより得られた光子のイベントファイルからスペクトルを作成した。次にカットオフのスペクトルを、GLAST のみと GLAST に WAM 加えた場合それぞれに対し、Band 関数とカットオフのモデルでフィッティングを行った。そしてその結果を用いて F 検定を行った。

コマンド "gtobssim" で得られた光子イベントファイルをコマンド "gtselect" で発生した位置、時間、エネルギー幅で切り取る。このとき、LAT の低エネルギー側での角度分解能を考慮して、半径 10 度の立体角で切り取った。そして、gtbin で bin まとめを行い、スペクトルファイルを作成する。²最後にコマンド "gtrspgen" でスペクトルファイルと軌道データを読み込ませレスポンスを作成する。これにより検出角度を考慮したスペクトルが作成できる。

フィッティングでは χ^2 の値によって、モデルとの比較を行うためには、LAT のスペクトルの光子統計が良いことが必要である。これを考慮するために、光子数が 20 個以上あるデータだけを選択し、さらに光子統計を上げるために、光子が一つのスペクトルの bin に 20 個以上入るように bin をまとめた。次に XSPEC でデータを読み込ませたあとに、コマンド "ignore bad" を用いて、光子統計が悪い bin を無視した。

フィッティングを行う際にモデルの不定性を考慮するために 3% の系統誤差を加えた。次に Band 関数とカットオフモデルそれぞれフィッティングを行った。このときパラメータの初期値を 4.1 で得られた値を用いた。

フィッティングを行った後で、F 検定を用いて GLAST のみのスペクトルと WAM を加えたときのスペクトルでそれぞれ、Band 関数に比べカットオフモデルの χ^2 の値が向上する信頼度水準を調べた。これは、LAT のスペクトルの bin 数が少なく、低エネルギー側の bin 数が多いため Band 関数でフィッティングした場合、LAT のスペクトルでモデルとの残差 χ が大きくても、結果として χ^2/dof (dof:自由度) の値がほとんど変わらず、カットオフが有意に検出できているかが分からないためである。F 検定とは、二つのモデルの分散

²ここでは述べた理由によりバックグラウンドは考慮していない。

が等しいかを検定する方法である。ここでは、Band 関数とカットオフモデルが等分散であると仮説を立てる。XSPEC のコマンド”ftest”を用いて、Band 関数でフィッティングしたときのたときの χ^2 と自由度、カットオフモデルでフィッティングしたときの χ^2 と自由度を用いて計算を行い、Band 関数とカットオフモデルが等しい分散であるという仮説を何%の有意水準で棄却することができないかを調べた。

次にカットオフのエネルギーの誤差範囲を 90%の信頼度水準で計算を行った。このときの誤差を計算できる範囲を $10^{-4} \sim 10^9$ keV の範囲とし、カットオフの誤差の評価の際に用いる値は、計算により得られた $E_{cut}^{+a}_{-b}$ ($a, b > 0$) の $a+b$ を用いた。

4.3.2 カットオフの検出感度と誤差の評価

検出感度の評価

F 検定の結果より、F 検定を行うことができた GRB でのカットオフと Band 関数が等分散であると仮説を棄却できる有意水準の分布を図 4.18 に示す。また、F 検定を行うことができた個数と、有意水準が 5%以下、1%以下であるものの個数、fluence の大きさ毎の有意水準が 5%以下の個数を表 4.5 に示す。

表 4.5 より、 E_{cut} 値が小さいほど、カットオフの検出率が向上することが分かる。 E_{cut} が大きいほど、棄却率が 5%以下の比率が減少するのは、 E_{cut} までにフラックスが落ちてしまい、カットオフのスペクトルを有意に得ることができないため、フィッティングによって Band 関数での χ^2 の値に比べてカットオフモデルでの χ^2 が大きく向上しないためであると考えられる。

fluence の値ごとのカットオフの検出個数を見ると E_{cut} が 100MeV では、fluence が小さくなるにつれて、検出率が向上しているのがわかり、1GeV と 10GeV では fluence が 1.0×10^{-5} erg/cm² より大きい場合では、fluence が小さくなるにつれて検出率が向上することが分かる。このことは、WAMを加えることで暗い GRB、つまりより遠くで発生している GRB の情報を得ることができる可能性があると考えられる。

	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM
E_{cut}	100MeV		1GeV		10GeV	
F 検定を行った GRB の総数	206		522		499	
有意水準 5%以下	109	123 (13±15)	172	179 (4±11)	93	93 (0)
有意水準 1%以下	87	99 (14±17)	143	146 (2±12)	55	56 (2±19)
fluence(erg/cm ²)						
5.0×10 ⁻⁵ 以上	36	35 (-3±23)	46	46 (0)	40	39 (-3±21)
5.0×10 ⁻⁵ 未満	73	88 (21±19)	126	133 (6±13)	53	54 (2±19)
1.0×10 ⁻⁵ 未満	32	39 (21±29)	63	68 (8±15)	21	23 (10±11)
5.0×10 ⁻⁶ 未満	24	30 (25±34)	43	45 (5±22)	8	7 (-13±45)

表 4.5: F 検定を行うことができた光子数 20 個以上の GRB の個数と、有意水準が 5%、1%以下の個数、fluence の大きさ毎の有意水準が 5%以下になる個数。表中の () は、(WAM+GLAST の個数 - GLAST のみの個数)/GLAST のみの個数の比率%。

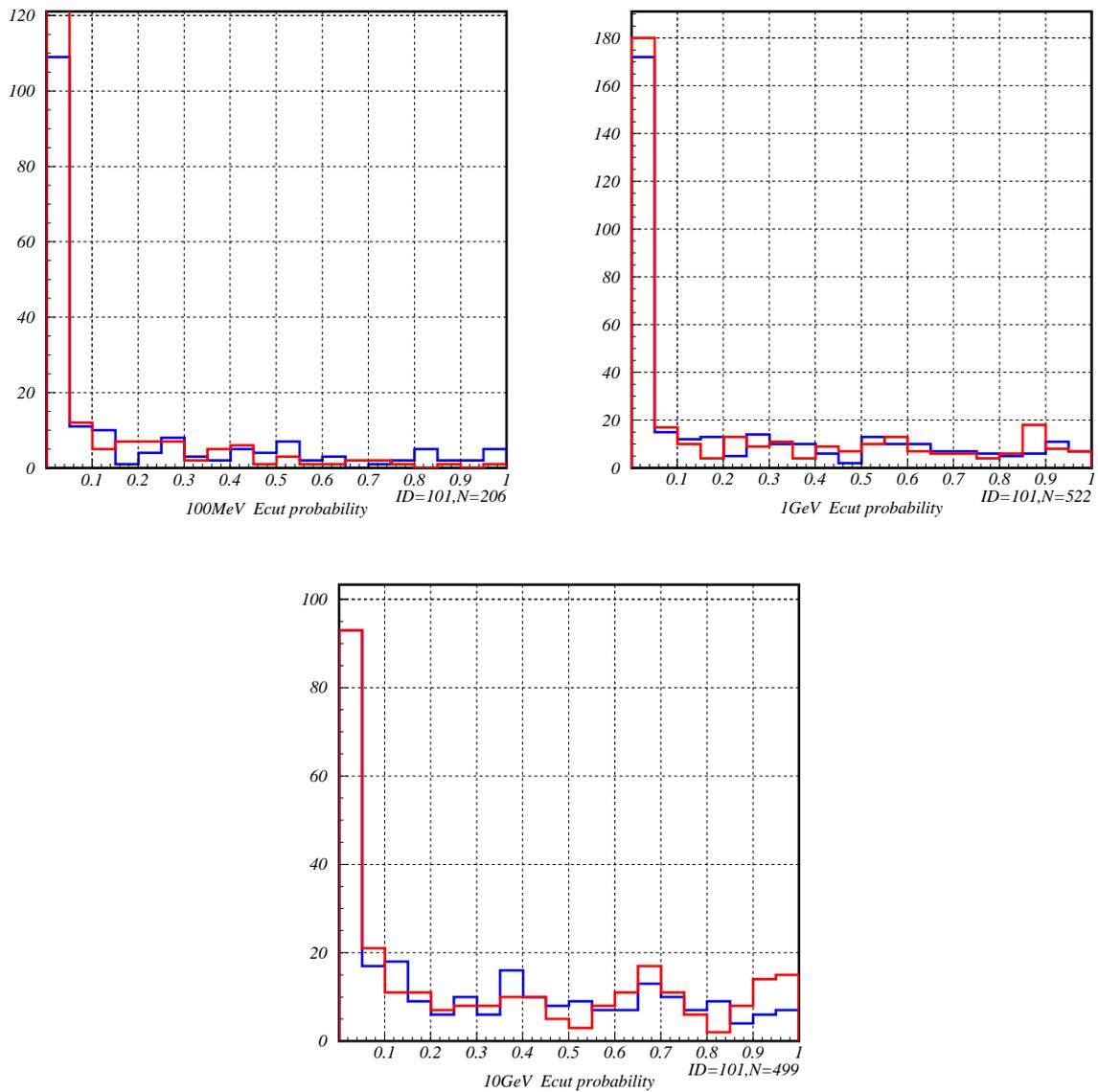


図 4.18: Band 関数とカットオフモデルが等分散であることを棄却する有意水準の分布: 左上図: 100MeV、右上図 1GeV、10GeV。青色が GLAST のみ、赤色が WAM を加えた場合で、横軸は有意水準、縦軸は個数。

カットオフの誤差の評価

次に E_{cut} の誤差について評価を行った。ここでは、F 検定で有意水準が GLAST のみと WAM を加えたときでともに 5% 以下になるデータを用いての E_{cut} の誤差の比較を行った。図 4.19 に E_{cut} の大きさに分けた分布を示す。全体的に GLAST のみでカットオフの誤差が大きいものは WAM をくわえることにより誤差の範囲が小さくなり、改善される傾向にあることがわかる。図 4.20 は、WAM を加えることで、 $E_{cut}=1\text{GeV}$ での誤差の範囲が大きくなってしまった GRB のスペクトルである。この図から LAT のスペクトルが 1GeV まで達しておらず、カットオフが見えていないことが分かり、カットオフのエネルギーが決まらないため、誤差が大きくなってしまったと考えられる。

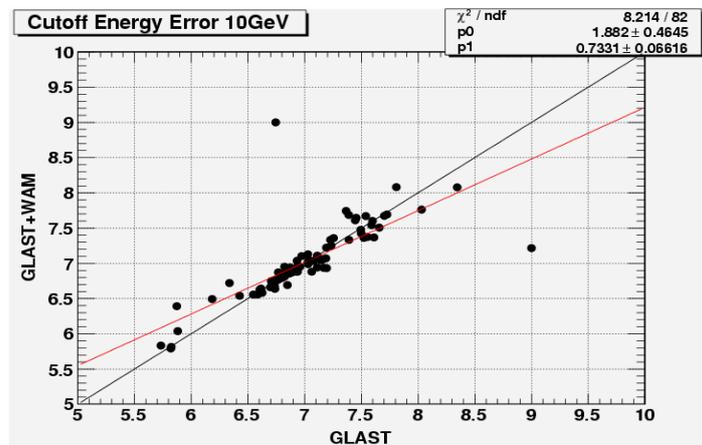
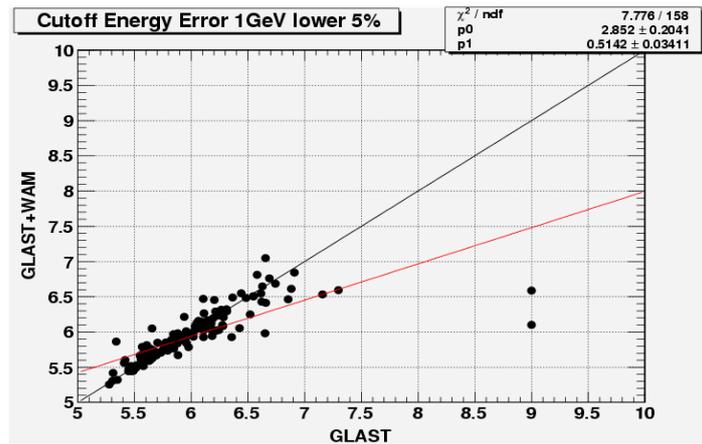
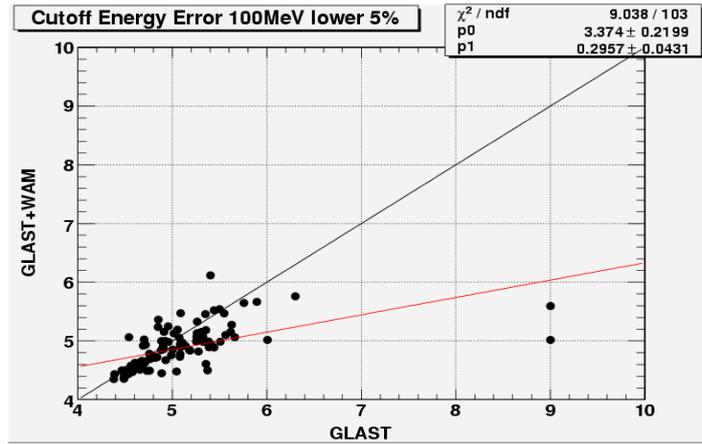


図 4.19: GLAST のみと WAM と加えたときで共に有意水準が 5% 以下の GRB の E_{cut} の誤差の分布。上段:100MeV、中段:1GeV、下段:10GeV の場合。横軸は GLAST のみでの誤差範囲、縦軸は WAM を加えたときの誤差範囲で、それぞれエネルギー (keV) の対数をとったもの。

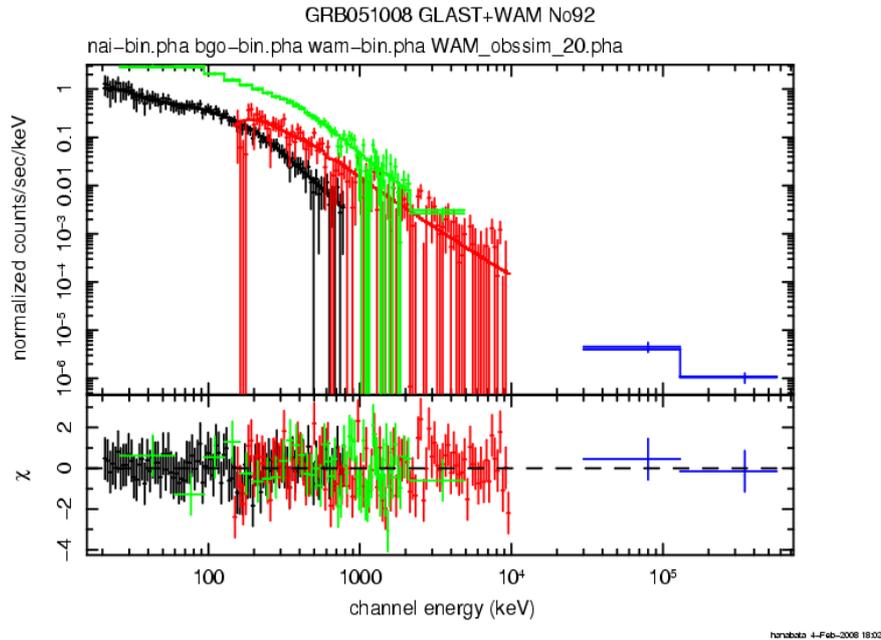


図 4.20: E_{cut} の誤差範囲が大きくなっている $E_{cut}=1\text{GeV}$ の GRB のスペクトル。黒色:NaI、赤色 GBM、緑色 WAM、青色 LAT のスペクトル。

誤差の分布を詳しく見るために GLAST のみと WAM を加えたときでともに有意水準が 5% 以下になるものを用いてヒストグラムを作成した (図 4.21)。図 4.21 より、値が誤差の計算範囲の上限になってしまっているものがあることが分かる。この GRB について調べてみたが、 χ^2/dof の値が明らかに大きくなっているものは見られず、フィッティングが正しく行われていた。この GRB を考慮に入れたものと除外したもので、 E_{cut} の誤差の平均値を計算した。これを表 4.6 に示す。表 4.6 より WAM を加えたときで確かに誤差の平均値が小さくなっていることが確認できる。

	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM
E_{cut}	100MeV		1GeV		10GeV	
個数	105		160		84	
E_{cut} の誤差の 平均値 1(GeV)	19.2	0.112	13.9	1.21	29.2	28.4
E_{cut} の誤差の 平均値 2(GeV)	0.158	0.112(29)	1.42	1.21(15)	17.5	16.7(5)

表 4.6: カットオフの有意水準がともに 5% 以下の個数 と 誤差が計算範囲の上限になっているものを含めたものでの E_{cut} の誤差の平均値 1、除外したものの平均値 2。() 内の数は、GLAST のみでの平均値と WAM を加えたときの平均値の比率%。

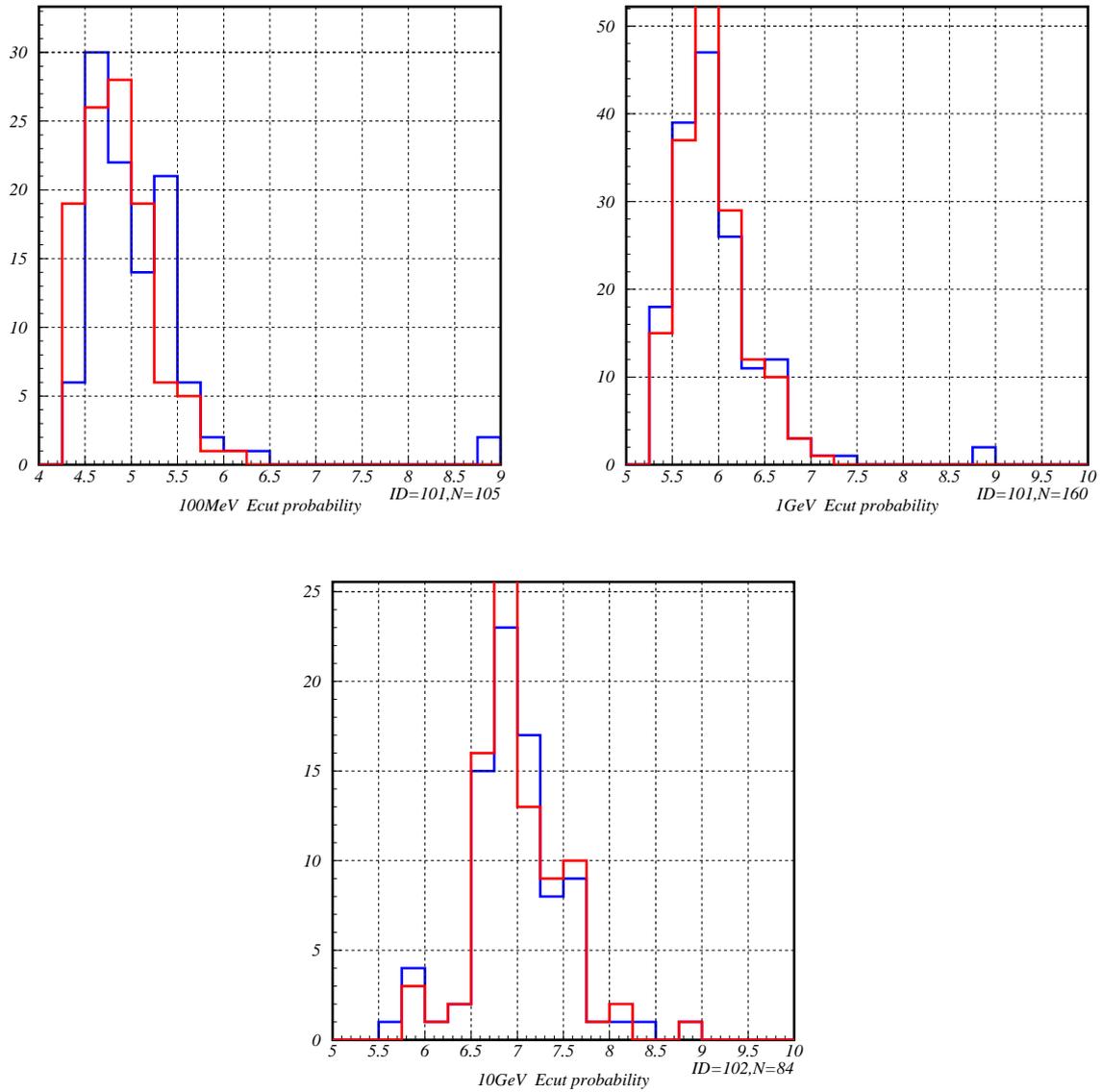


図 4.21: 有意水準が5%で E_{cut} の誤差の比較。左上図:100MeV、右上図1GeV、下図10GeV の場合。青色が GLAST のみ、赤色が WAM を加えた場合で、横軸はエネルギー (keV) 対数をとった値、縦軸は個数

式 2.8 より、 E_{sh} 、 Γ を不定パラメータとし、 $\Delta t=0.1s$ と仮定すると、観測により E_{cut} の値と誤差が分かると E_{sh} 、 Γ の値を制限することができる。このことから、GLAST のみでの観測より WAM と同時観測した場合には、 E_{cut} の誤差が小さくなっているため、より E_{sh} 、 Γ の取り得る値の範囲を制限することができる。ここで、 Γ の値の範囲は、2.3.2 で述べたように相対論的運動を考えると下限値が 100、また上限値は内部衝撃波モデルの放射領域の最大値 [22] を考慮すると 1000 となる。また E_{sh} の値の範囲は、GRB が等方的に放射する光子のエネルギー E_{tot} の平均的な値が 10^{53}erg であり、 $E_{tot}=NE_{sh}$ (N:観測されるパルス数) であることから、 $10^{50} \sim 10^{52} \text{erg}$ と仮定する。図 4.22 にシミュレーションにより得られた E_{cut} の値の範囲と、先に述べた Γ 、 E_{sh} の条件より、GLAST のみと WAM を加えた観測で E_{cut} が 100MeV、1GeV、10GeV それぞれの場合の E_{sh} 、 Γ の取り得る範囲を示す。

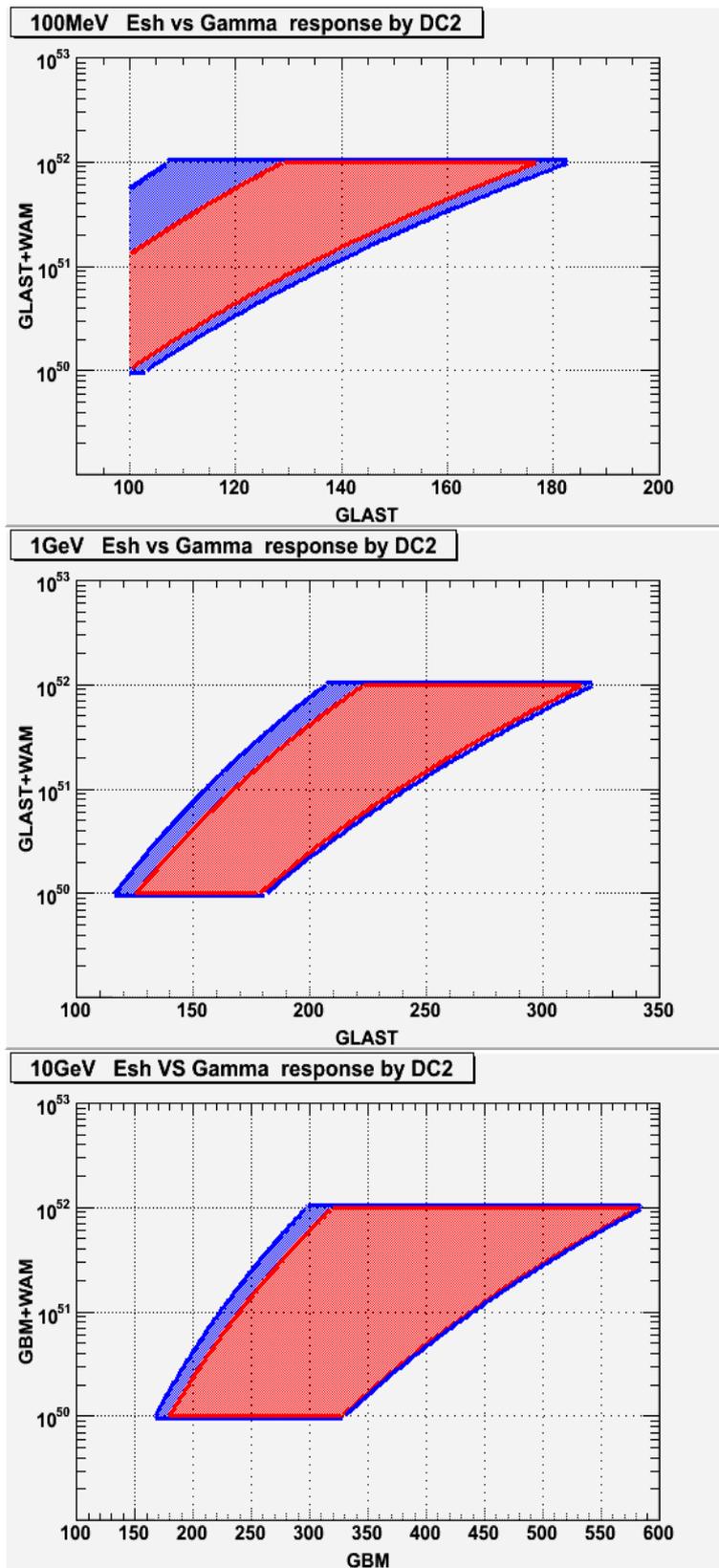


図 4.22: GLAST のみでの観測と WAM と同時観測を行った場合の Γ と E_{sh} が取り得る値の範囲の比較。上段:100MeV、中段:1GeV、下段:10GeV の場合。青線で囲まれている領域は GLAST のみでの観測で制限できる値の範囲、赤線で囲まれている領域は、WAM と同時観測を行った場合に制限できる値の範囲である。横軸は Γ 、縦軸は E_{sh} 。

以上の結果より、GRBのスペクトルにカットオフが存在すると、今回シミュレーションした4900個中で、表4.7より、GLASTのみでの観測で E_{cut} が100MeVでは約4%、1GeVでは約11%、10GeVでは約10%スペクトルが取得できる。このうちWAMを加えることで、カットオフとBand関数が等分散であるという仮説の有意水準を5%以下にできる割合はGLASTよりも100MeVで13%、1GeVで4%向上することが分かった。

このことからGRBのスペクトルにカットオフが存在する場合の1年間の検出感度を求める。今回のシミュレーションでは、WAMの視野は 4π あることにしていたが、実際の視野は 2π である。またWAMが1年間に検出するGRBの個数は100個程度であるので、今回のシミュレーションにおいては、年間200個程度となる。今回は、4900個のGRBをシミュレーションしたので、これはWAMの24.5年間分のデータに相当する。したがって、表4.7より1年間でLATでスペクトルを取得することができる個数は、 E_{cut} が100MeVで8個程度、1GeVで21個程度、10GeVで20個程度である。このうちGLASTのみとWAMを加えたときでは、カットオフの検出個数はほぼ同じであるが、ともに有意水準が5%以下になる個数は E_{cut} が100MeVで4個程度、1GeVで7個程度、10GeVで3個程度となり、WAMを加えることにより検出感度が向上することが分かった。

	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM
E_{cut}	100MeV		1GeV		10GeV	
スペクトルが取得できた個数(ア)	206	(4±0.3)	522	(11±0.5)	499	(10±0.5)
有意水準が5%以下になる個数(イ)	109	123 (13±15)	172	179 (4±11)	93	93 (0)
有意水準がともに5%以下の個数	105		160		84	
1年間にLATでスペクトルが取得できる個数	8		21		20	
1年間に有意水準が5%以下になる個数	4	5	7	7	4	4
1年間で有意水準がともに5%以下の個数	4		7		3	

表 4.7: 今回のシミュレーション結果。(ア)内の数はシミュレーションした4900個との比率。(イ)内の数は(WAM+GLASTの個数 - GLASTのみの個数)/GLASTのみの個数の比率%。

さらにWAMを用いることで、ともに有意水準が5%以下のGRBに対して、平均的にはカットオフの誤差範囲をより限定できることがわかり、 Γ 、 E_{sh} の値をより制限できることが分かった。

しかし、実際の観測ではLATでスペクトルを得ることができる個数は増えるので、カットオフの検出感度は向上する可能性がある。これは、今回LATでスペクトルをシミュレーションする際に用いていたレスポンス関数DC2はバージョンが古いいため、現在の最新版であるPass5_v0_transientに比べて100MeV付近での光子の検出率が2倍程度低いことがわかっているからである。次節でPass5_v0_transientを用いたシミュレーションでカットオフの検出感度について述べる。

4.3.3 現在のLATのレスポンスでのカットオフの検出感度と誤差の評価

前節で述べたように、現在のLATのレスポンス関数Pass5_v0_transientはDC2に比べて、100MeV付近での光子の検出数が2倍程度多くなる。ここでは、Pass5_v0_transientを

用いて、カットオフの検出感度と E_{cut} の誤差の評価を行う。

DC2 と Pass5_v0_transient の比較

まず、DC2 レスポンスを用いた場合のスペクトルと Pass5_v0_transient レスポンスを用いてそれぞれ同じ角度で検出された同じ GRB パラメータのスペクトルを比較する。図 4.23 に $E_{cut}=1\text{GeV}$ で、GRB070125 ($\alpha=-0.80$, $\beta=-2.03$, $E_p=553\text{keV}$, fluence= $1.6\times 10^{-4}\text{erg/cm}^2$, 継続時間 80 秒) の場合の両者のスペクトルを示す。図より、Pass5_v0_transient を用いることで、確かに 100MeV 付近での光子の統計が良くなっていることが分かる。

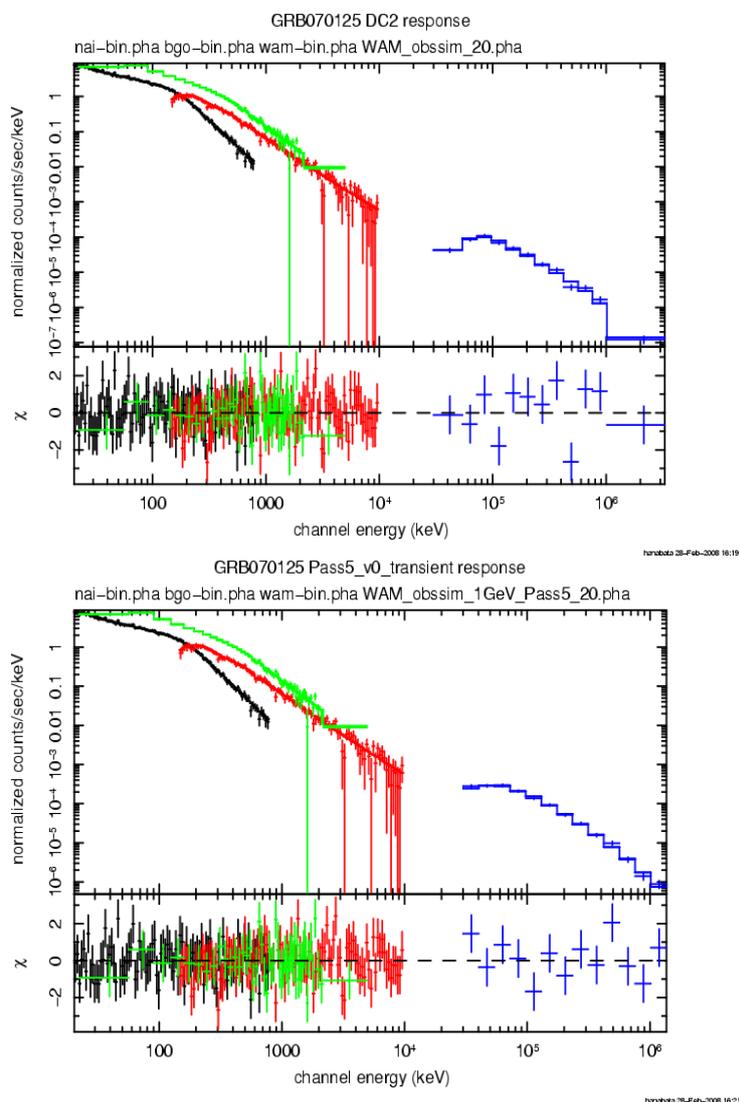


図 4.23: $E_{cut}=1\text{GeV}$ の場合。上図: GRB070125 を DC2 レスポンスを用いてシミュレーションした場合のスペクトル。下図: Pass5_v0_transient レスポンスを用いた場合のスペクトル。黒 NaI、赤 BGO、緑 WAM、青 LAT のスペクトル。

検出感度の評価

F 検定の結果より、F 検定を行うことができた GRB でのカットオフと Band 関数が等分散であるという仮説を棄却する有意水準の分布を図 4.24 に示す。また、F 検定を行うこと

ができた個数と、有意水準が5%以下、1%以下であるものの個数、fluenceの大きさ毎の有意水準が5%以下の個数を表4.8に示す。

表4.8より、DC2に比べてF検定を行うことができた数が増加していることが分かる。また、 E_{cut} が100MeVと1GeVの場合は、DC2を用いた場合に比べて、有意水準が5%以下になる個数が増加するが、10GeVでは減少することが分かる。

fluenceの値ごとの検出個数をみると E_{cut} が100MeVでは、fluenceが小さくなるにつれて検出感度が向上しているのが分かるが、1GeV、10GeVではWAMを加えても検出感度が向上していないことが分かる。

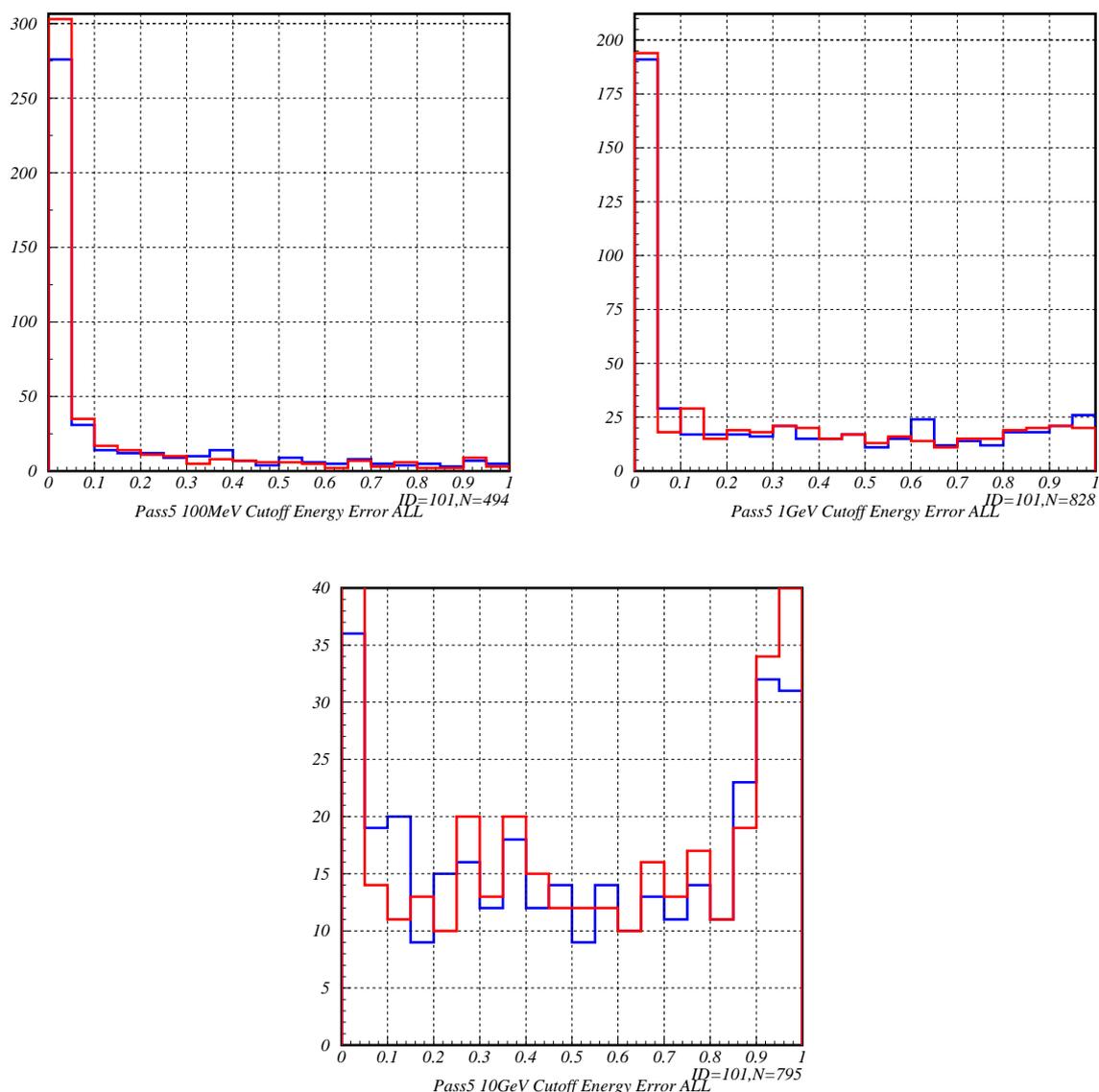


図4.24: Band関数とカットオフモデルが等分散であることを棄却する有意水準の分布:左上図:100MeV、右上図1GeV、10GeV。青色がGLASTのみ、赤色がWAMを加えた場合で、横軸は有意水準、縦軸は個数。

	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM
E_{cut}	100MeV		1GeV		10GeV	
F 検定を行った GRB の総数 (ア)	494 (140±20)		828 (59±9)		795 (59±9)	
有意水準 5%以下	277	303 (9±9)	191	194 (2±10)	36	42 (17±26)
有意水準 1%以下	232	255 (10±10)	160	159 (0±11)	23	18 (-22±25)
fluence(erg/cm ²) 5.0×10 ⁻⁵ 以上	99	100 (1±14)	61	62 (2±18)	11	13 (20±48)
5.0×10 ⁻⁵ 未満	178	203 (14±12)	130	132 (2±13)	25	29 (16±32)
1.0×10 ⁻⁵ 未満	96	114 (19±16)	62	62 (0)	12	12 (0)
5.0×10 ⁻⁶ 未満	59	77 (30±23)	38	40 (5±24)	3	3 (0)

表 4.8: F 検定を行うことができた光子数 20 個以上の GRB の個数と、有意水準が 5%、1%以下の個数、fluence の大きさ毎の有意水準が 5%以下になる個数。表中の (ア) 内の数は DC2 との比率%、() 内の数は (WAM+GLAST の個数 - GLAST のみの個数)/GLAST のみの個数の比率%。

カットオフの誤差の評価

ここでは、有意水準が GLAST のみでの場合と WAM を加えたときでともに 5%以下になるデータを用いて E_{cut} の誤差の比較を行った。図 4.25 に E_{cut} の大きさで分けた分布を示す。図より GLAST のみでは、 E_{cut} の誤差が大きいものでも WAM を加えることで小さくなっており、ほぼ改善される傾向にあることが分かる。

誤差の分布を詳しく見るために GLAST のみと WAM を加えたときでともに有意水準が 5%以下になるものを用いてヒストグラムを作成した(図 4.26)。DC2 の場合と同様に、値が誤差の計算範囲の上限になってしまっている GRB を考慮に入れたものと除外したもので、 E_{cut} の誤差の平均値を計算した。これを表 4.9 に示す。表 4.9 より WAM を加えたときで確かに誤差の平均値が小さくなっていることが確認できる。

ただし、Pass5_v0_transient の場合と DC2 の場合で単純に誤差を比較することはできない。これは、DC2 の場合は、光子の統計が少なかったために全体的にフィッティングによる E_{cut} の値が実際にシミュレーションに用いた E_{cut} の値よりも小さくなり、誤差の範囲が小さく計算される可能性があり、Pass5_v0_transient の場合では、光子の統計が良くなるためフィッティングによる E_{cut} の値がシミュレーションした値に近く、DC2 に比べて大きな値になるため、誤差の範囲が大きくなる可能性があるためである。

次に、不定パラメータ Γ 、 E_{sh} の取り得る値の範囲を 4.3.2 と同様の条件で、GLAST のみと WAM を加えた観測で E_{cut} が 100MeV、1GeV、10GeV それぞれの場合について図 4.27 に示す。

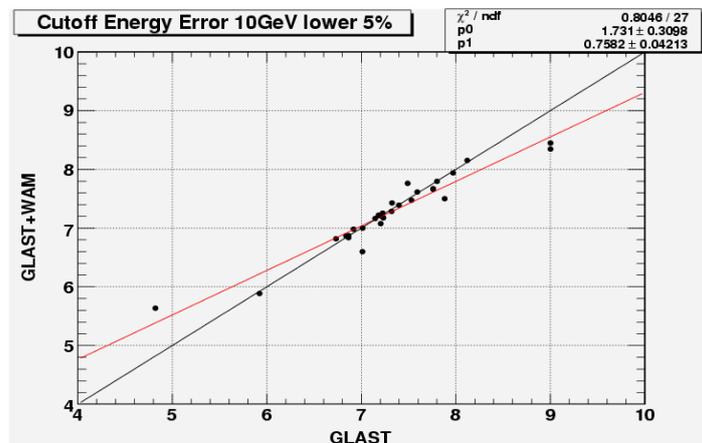
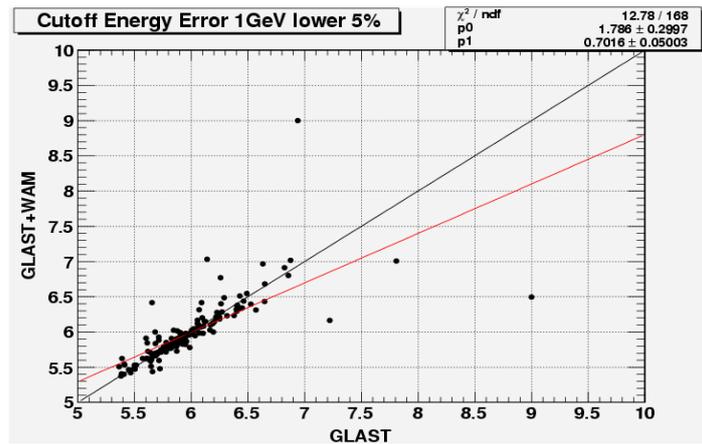
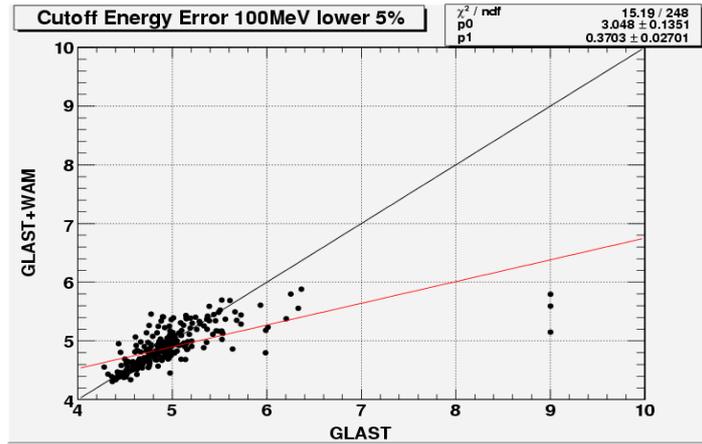


図 4.25: GLAST のみと WAM と加えたときで共に有意水準が 5% 以下の GRB の E_{cut} の誤差の分布。上段:100MeV、中段:1GeV、下段:10GeV の場合。横軸は GLAST のみでの誤差範囲、縦軸は WAM を加えたときの誤差範囲で、それぞれエネルギー (keV) の対数をとったもの。

	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM
E_{cut}	100MeV		1GeV		10GeV	
個数 (ア)	250 (56±28)		170 (62±11)		29(-65±7)	
E_{cut} の誤差の 平均値 1(GeV)	12.1	0.106	7.52	7.21	96.6	43.5
E_{cut} の誤差の 平均値 2(GeV)	0.144	0.102(29)	1.61	1.32(18)	29.6	28.0(5)

表 4.9: カットオフの有意水準がともに5%以下の個数と誤差が計算範囲の上限になっているものを含めたものでの E_{cut} の誤差の平均値 1、除外したものの平均値 2。(ア)内の数はDC2より増加した個数の比率%、()内の数は、GLASTのみでの平均値とWAMを加えたときの平均値の比率。

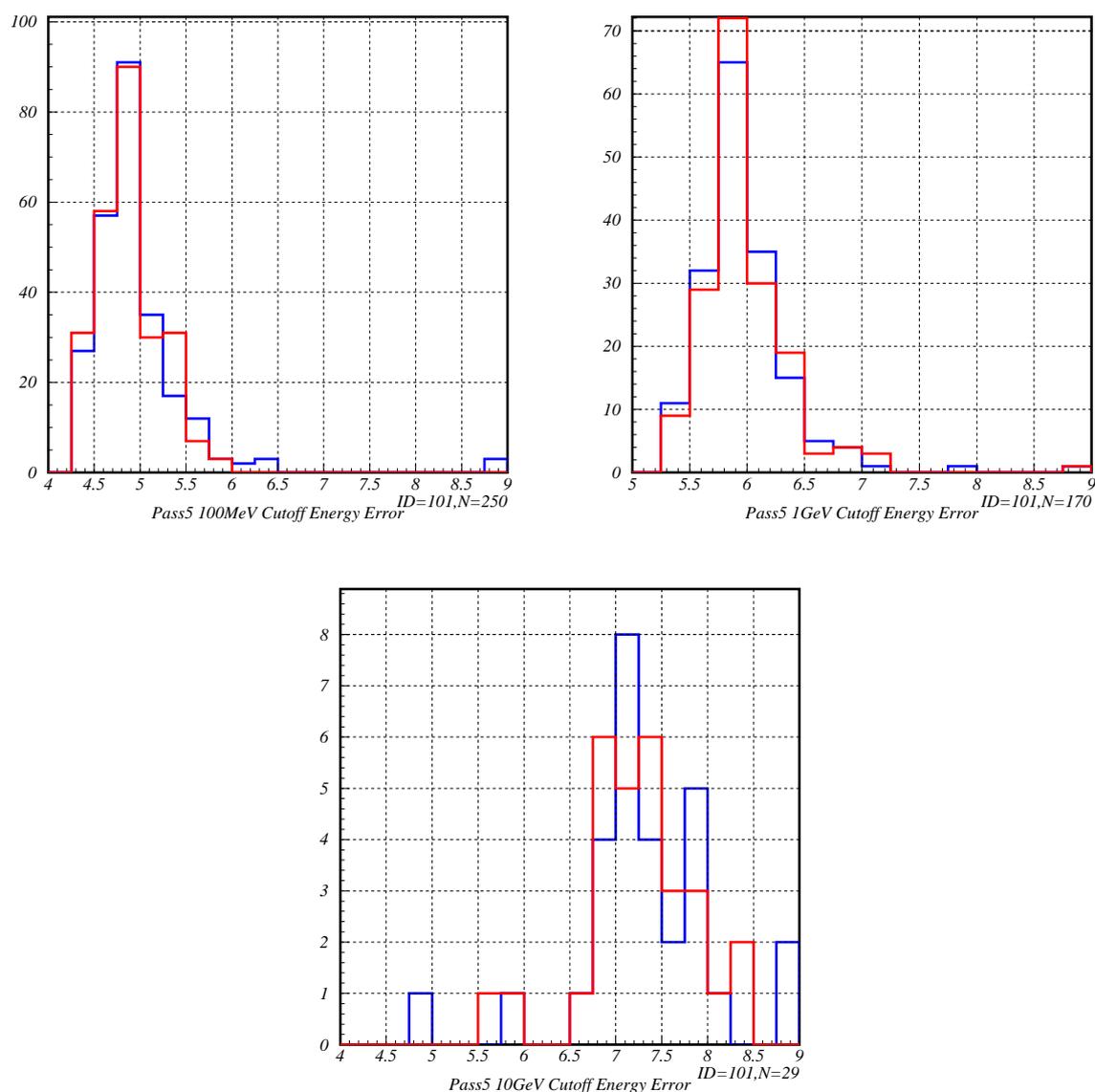


図 4.26: 有意水準が5%で E_{cut} の誤差の比較。左上図:100MeV、右上図1GeV、下図10GeVの場合。青色がGLASTのみ、赤色がWAMを加えた場合で、横軸はエネルギー (keV) 対数をとった値、縦軸は個数

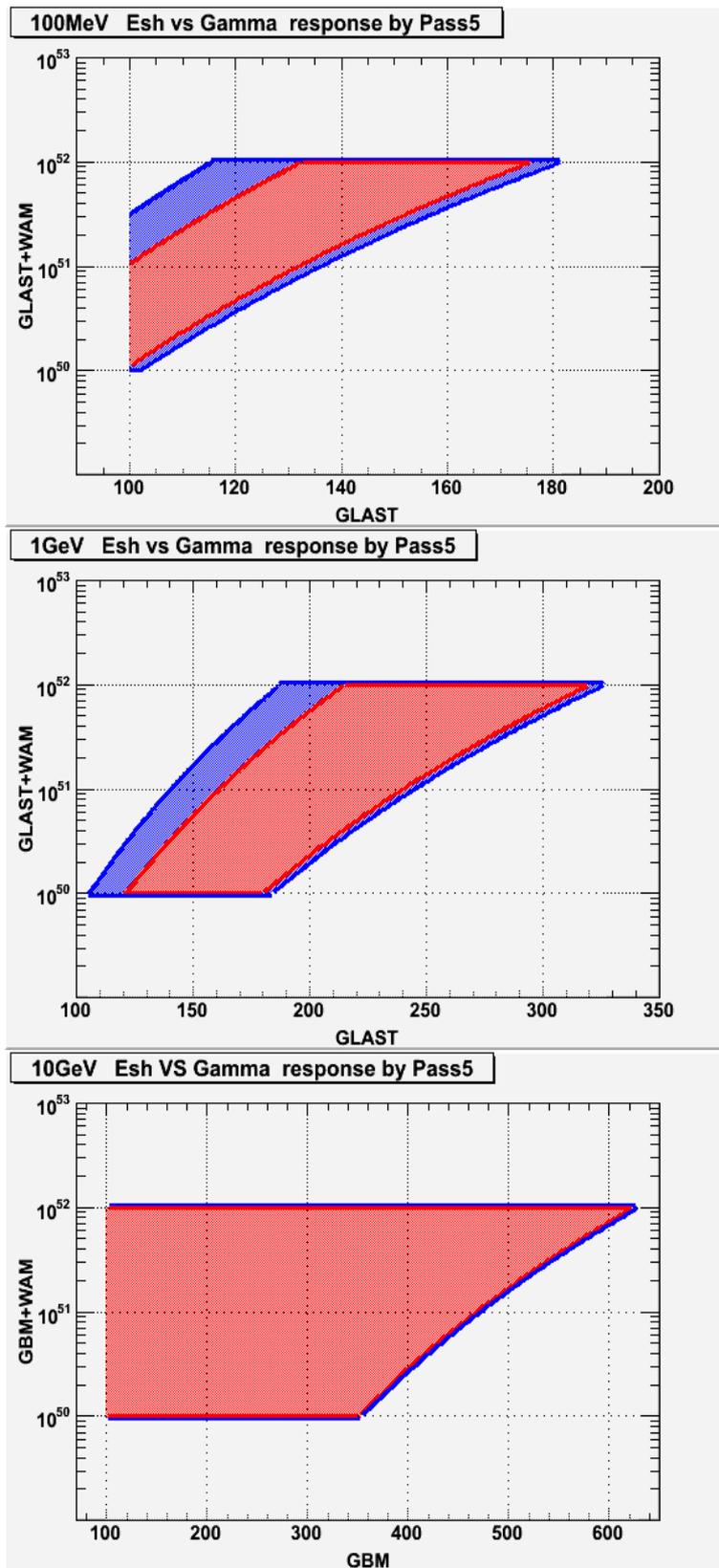


図 4.27: GLAST のみでの観測と WAM と同時観測を行った場合の Γ と E_{sh} が取り得る値の範囲の比較。上段:100MeV、中段:1GeV、下段:10GeV の場合。青線で囲まれている領域は GLAST のみでの観測で制限できる値の範囲、赤線で囲まれている領域は、WAM と同時観測を行った場合に制限できる値の範囲である。横軸は Γ 、縦軸は E_{sh} 。

以上の結果より、現在の LAT のレスポンス Pass5_v0_transient では、GRB のスペクトルにカットオフが存在する場合には、DC2 に比べスペクトルを取得できる個数が E_{cut} が 100MeV では 140%、1GeV では 59%、10GeV では 59%増加することが分かり、カットオフを検出できる個数が 100MeV、1GeV では増加し、10GeV では減少することが分かった。

表 4.10 よりシミュレーションした 4900 個中では、GLAST のみでの観測で E_{cut} が 100MeV では約 10%、1GeV では約 17%、10GeV では約 16%スペクトルが取得できる。このうち WAM を加えることで、カットオフと Band 関数が等分散であるという仮説の有意水準を 5%以下にできる割合は GLAST よりも 100MeV で 9%、1GeV で 2%、10GeV で 17%向上することが分かった。さらに、 E_{cut} が小さいほどカットオフを検出できる個数が増加することが分かった。

このことから 4.3.2 と同様に GRB のスペクトルにカットオフが存在する場合の 1 年間の検出感度を求めるとして、表 4.10 より 1 年間で LAT でスペクトルを取得することができる個数は、 E_{cut} が 100MeV で 20 個程度、1GeV で 34 個程度、10GeV で 32 個程度である。このうち GLAST のみと WAM を加えたときでは、カットオフの検出個数はほぼ同じであるが、ともに有意水準が 5%以下になる個数は 100MeV で 10 個程度、1GeV で 7 個程度、10GeV で 1 個程度となり、WAM を加えることにより検出感度が向上することが分かった。

	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM	GLAST	+WAM
E_{cut}	100MeV		1GeV		10GeV	
スペクトルが取得できた個数 (ア)	494	(10±0.5)	828	(17±0.6)	795	(16±0.6)
有意水準が 5%以下になる個数 (イ)	277	303 (9±9)	191	194 (2±10)	36	42 (17±26)
有意水準がともに 5%以下の個数	250		170		29	
1 年間に LAT でスペクトルが取得できる個数	20		34		32	
1 年間に有意水準が 5%以下になる個数	11	12	8	8	2	2
1 年間で有意水準がともに 5%以下の個数	10		7		1	

表 4.10: 今回のシミュレーション結果。(ア) 内の数はシミュレーションした 4900 個との比率。(イ) 内の数は (WAM+GLAST の個数 - GLAST のみの個数)/GLAST のみの個数の比率%。

第5章 まとめと今後の課題

本研究では、GLASTとWAMで同時観測を行った場合、GeV領域でのカットオフの検出感度がGLASTのみと比較するとどの程度向上するかシミュレーションを用いて評価を行った。カットオフの判断に必要なのが、べき型のスペクトルからのずれを見ることなので、べき指数の決定精度が重要になる。そのため今回はまず、GRBを検出角度を変えてシミュレーションを行い、GBMのみでの観測とWAMを加えた場合で比較しべき指数の決定精度を評価した。次に、LATで有意に検出できるGRBがどのパラメータに依存するか調べるために、様々なパラメータのGRBをシミュレーションし評価した。そして、LATのスペクトルにカットオフを入れてシミュレーションを行い、フィッティングの結果を用いてF検定を行い、カットオフの検出感度を定量的に評価した。

シミュレーションの結果より、まずべき指数の決定精度は、WAMを加えることによりプラス側では約50%向上し、マイナス側では約30%向上することが分かった。しかし、個々に分けて調べるとけてみると、予想に反して、逆に精度が落ちてしまうものがあったが、それらは暗いGRBであった。次に、LATのエネルギー範囲で最低10光子検出されるGRBのパラメータは、 α の値を固定し、 E_p を変化させてみると、fluenceは E_p によって最大5倍程度変化するが、 β の値により3桁程度変化することが分かった。また E_p の値を固定し α を変化させるとfluenceは最大2倍程度変化するが、 β の値によって3桁程度変化することが分かった。これより、LATで有意に検出できるGRBのパラメータは、主に β やfluenceに依存していることが分かった。そして、カットオフの検出感度は、DC2レスポンスを用いた場合、F検定の結果よりGLASTのみでの観測に比べてWAMと同時観測を行った場合、カットオフとバンド関数が等分散であるという仮説を棄却できる有意水準が5%以下になるGRBの個数は、100MeVで13%、1GeVで4%、10GeVで0%向上し、有意水準が1%以下では100MeVで14%、1GeVで2%、10GeVで2%向上することがわかった。これに加え、有意水準が5%以下のカットオフのエネルギーの誤差は、WAMを加えることにより100MeVで29%、1GeVで15%、10GeVで5%向上することがわかった。また現在のPass5_v0_transientレスポンスを用いた場合、GLASTのみでの観測に比べてWAMと同時観測を行った場合、有意水準が5%以下になるGRBの個数は、100MeVで9%、1GeVで2%、10GeVで17%向上し、有意水準が1%以下では100MeVで10%向上し、1GeVで0%、10GeVで22%落ちてしまうという結果になった。これに加え、有意水準が5%以下のカットオフのエネルギーの誤差は、WAMを加えることにより100MeVで29%、1GeVで18%、10GeVで5%向上することが分かった。さらに、 E_{cut} が小さいほどカットオフを検出できる個数が増加することが分かった。

今後の課題としては、暗いGRBにおいて、GBMのみでのスペクトルのフィッティング結果に比べて、GBMのスペクトルとWAMのスペクトルで同時にフィッティングを行ったときの結果の方が β の決定精度が落ちてしまう原因を解明することである。これには、個々のフィッティングの結果を詳細に調べることが必要である。

謝辞

本論文を作成するにあたり、色々と丁寧に御指導して下さった、大杉先生、深澤先生、片桐先生、水野先生に深く感謝致します。特に本研究を行うために、基本的な知識を始めとし、解析方法や考察の仕方などの様々な助言や、今の自分に一番大切な論理的に物事を捉え考えるということを教えて下さった片桐先生に心からお礼を申し上げます。また、ガンマ線バーストについての知識を教えて下さった大野さん、上原さん、GLASTやScience Toolsについて教えて下さった吉田さん、プログラミングについての知識や処理方法を教えて頂いた高橋さんには、非常に感謝しています。また、他研究室にも関わらず天体の理論的な知識を教えて下さった山崎先生に感謝します。そして、研究室の方々には色々と楽しませて頂いたり、落ち込んでいるときに励まして頂いたり、気晴しをさせて頂いたり本当にありがとうございました。最後に、御世話をして下さい下さった事務の方々に感謝します。

参考文献

- [1] Katsuaki Asano & Susumu Inoue, 2007, ApJ, 671, 645A
- [2] 大野雅功 2003 年度 修士論文 (広島大学)
- [3] 上原岳士 2006 年度 卒業論文 (広島大学)
- [4] 吉田広明 2006 年度 卒業論文 (広島大学)
- [5] BATSE Gamma-Ray Burst Research
<http://gammaray.msfc.nasa.gov/batse/grb>
- [6] High Energy Astrophysics
<http://www.oulu.fi/astromy/astrophysics/pr/head.html>
- [7] 東京大学宇宙線研究所
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/morim/Presentations/Swift.pdf>
- [8] Hurley K et al., 1994 Nature 372 652
- [9] Dingus B, Catelli j R adn Schneid E j 1998 Gamma Ray Burst 4th Huntsville Symposium(AIP Conf. Proc. 428) ed C A Meegan, R D Preece and T M Koshut (New York: AIP) p349
- [10] NASA GLAST Homepage
<http://glast.gsfc.nasa.gov/public/instruments.html>
- [11] Alessandro De Angelis Professor of Experimental Physics
<http://www.fisica.uniud.it/deangeli/test/g4stanford2002.ppt>
- [12] Michelson, Peter F. 2007, AIPC, 921, 8M

- [13] GLAST LAT Performance
http://www-glast.slac.stanford.edu/software/IS/glast_lat_performance.htm
- [14] 広島大学 高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室
<http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/research/silicon02.jpg>
- [15] Meegan, Charles et al., 2007, AIPC, 921, 13M
- [16] von Kienlin, Andreas et al., 2004, SPIE, 5488, 763V
- [17] GLAST Burst Monitor
<http://f64.nsstc.nasa.gov/gbm/instrument/description/character.html>
- [18] すざくホームページ <http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/>
- [19] Guidelines for Science Tools Design
http://glast.gsfc.nasa.gov/ssc/dev/fits_def/definitionFT1.html
- [20] 坂本貴紀 2003 年度 博士論文 (東京工業大学)
'Spectral Characteristics of X-Ray Flashes and X-Ray Rich Gamma-Ray Bursts Observed by HETE-2. T.Sakamoto.' 2003
- [21] BATSE 4B GRB Catalog: Peak Flux and Fluence Table
http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/4b/4br_flux.html
- [22] Mészáros, P. & Rees, M. J. 2000, ApJ, 530, 292
- [23] '天文学の 20 世紀 「科学朝日」 編' 朝日新聞社
- [24] 木舟 正 '宇宙高エネルギー粒子の物理学' 培風館
- [25] '科学衛星 Astro-E2 実験計画書'(第 1 分冊)
宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究本部データセンター
- [26] '科学衛星 Astro-E2 実験計画書'(第 2 分冊)
宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究本部データセンター