

Swift衛星BAT検出器の応答関数の高エネルギー帯域への拡張

恩田香織

平成19年2月4日

概要

ガンマ線バースト（GRB）は、宇宙論的距離にある天体から 1044 J もの莫大なエネルギーが数ミリ秒～数百秒の短い時間に放射される現象である。GRB の放射のピーク (Ep) は数十～数百 keV 以上にあり、その光度と強く相関していることが知られている。GRB の物理を調べる上で Ep は鍵を握ると考えられる。2004 年に打ち上げられた Swift 衛星に搭載されている検出器 Burst Alert Telescope (BAT) は鉛のタイルを並べた Coded Aperture Mask と CdZnTe 半導体検出器で構成され、15–150keV のエネルギー帯域で全天の 1/6 を監視し、GRB の発生を待ち受けている。GRB から光子スペクトルを調べるには、通常、検出器に写る mask のパターンの照射部から影部の引き算を行う。150keV 以上の光子は mask の鉛を通過してしまうので、この mask 法ではスペクトル解析ができない。これは Ep を系統的に調べるには問題となる。本研究では mask 法によらず検出器の感度上限値である 350keV までの応答関数を構築した。BAT の応答関数は計算機上に忠実に再現した衛星の数値モデルを構築し、CdZnTe 検出器の電荷輸送特性をとりこんで、モンテカルロシミュレーションを行って算出する。本研究ではまず、これまで用いられていた地上実験に加え、軌道上の較正観測の結果もふまえて、電荷輸送特性を見直し、応答関数全体の改良を行った。次に、シミュレーションを最適化するため、衛星全体に十分に光子が照射するための光子の生成面積とエネルギー範囲の応答関数に及ぼす影響について評価した。その結果、検出器中心から 150cm 離れたところまで光子を生成すれば、衛星本体や Mask で散乱された光子も応答に含むこと、700keV 以下の光子はコンプトン散乱などにより 350keV 以下の検出帯域に影響することを明らかにした。以上の手続きをふまえ、新たにシミュレーションで求めた応答関数が正しいかどうか確かめるため、すぐ衛星 WAM 検出器や Wind 衛星 Konus 検出器で同時観測に成功した 6 つの GRB データを用いて比較をおこない、その結果、新しい応答関数を用いた高エネルギー領域のスペクトルは 5 % 以内の系統誤差で一致することを確かめた。これによって、BAT による Ep 計測の可能性を大幅に高めることができた。

目 次

第 1 章 ガンマ線バースト (GRB) 研究の歴史	3
1.1 ガンマ線バーストとは	3
1.2 Fireball Model	6
1.3 E_{peak} - E_{iso} relation	9
1.3.1 Band Function	9
1.3.2 E_{peak} - E_{iso} relation (Amati's relation)	9
第 2 章 Swift 衛星搭載 Burst Alert Telescope	12
2.1 Swift 衛星の観測	12
2.1.1 Swift 衛星の全体像、観測のながれ	12
2.1.2 XRT	14
2.1.3 UVOT	14
2.2 Burst Alert Telescope	16
2.2.1 Mask weighted 法	18
2.2.2 CdZnTe 検出器	18
2.2.3 CdZnTe の性能と電子の $\mu\tau$ (移動度と寿命の積)	19
2.2.4 CdTe/CdZnTe のスペクトル構造	21
2.2.5 $\mu\tau$ モデル	23
2.3 SwiMM (Swift Mass Model)	23
2.3.1 エネルギー応答関数	23
2.3.2 数値モデルによる応答関数	23
2.3.3 Swift Mass Model	24
2.3.4 物理素過程	24
第 3 章 応答関数の高エネルギー帯域への拡張	27
3.1 Mask weighted 法の弱点	27
3.2 Mask weighted 法を用いないスペクトル取得と応答関数	27
3.3 SwiMM の mass model と $\mu\tau$ モデルの改良	27
第 4 章 シミュレーション時のパラメーターの最適化	29
4.1 光子生成領域	29
4.2 生成光子のエネルギー帯域	33
4.3 まとめ	38
第 5 章 他衛星のデータを用いた相互較正実験	39
5.1 GRB を観測する衛星	39
5.1.1 すざく WAM 検出器	39
5.1.2 Konus/Wind	39
5.2 BAT,konus,WAN 相互較正	41

5.2.1	GRB 051221A	42
5.2.2	GRB 060117	45
5.2.3	GRB 060502a	48
5.2.4	GRB 060813	51
5.2.5	GRB 060814	54
5.2.6	GRB 051008	57
5.3	まとめ	60
第 6 章	Mask weighted 法によるスペクトルと Mask weighted 法によらないスペクトルの相互較正実験	61
6.1	解析方法とフィットするモデル	61
6.2	スペクトル解析	62
6.2.1	GRB 051221A	62
6.2.2	GRB 051008	65
6.2.3	GRB 060117	68
6.2.4	GRB060813	71
6.3	まとめ	74
第 7 章	まとめと今後の課題	75

第1章 ガンマ線バースト（GRB）研究の歴史

1.1 ガンマ線バーストとは

ガンマ線バーストとは、宇宙のある一点から数百キロ電子ボルト (eV) のエネルギーを持つガンマ線が数ミリ秒から数百秒の短い間に放射される現象のことである。最初の発見は 1969 年、アメリカ合衆国の核実験監視衛星 VERA によって太陽以外の宇宙から謎のガンマ線が突然的に観測されたことによる [17]。

GRB は全天のどこで、いつ発生するか予測できず、また現象の継続時間が短いことにより観測が難しく、発見から何年たっても、天体の同定につながる結果が得られなかった。さらにはガンマ線は大気中で吸収されてしまうので、地上で観測するには不可能である。よって衛星を打ち上げて観測しなければならず、観測装置も限られてしまうため、なかなか系統的な探査が進まなかった。

最初に系統的な探査によってブレークスルーを成し遂げたのは Burst And Transient Source Explorer (BATSE) である [24]。1991 年にアメリカが打ち上げた Compton Gamma-ray Observatory (CGRO) に搭載された BATSE 検出器は 9 年間に渡って 2704 個の GRB 観測を行い、GRB の発生場所は等方的に分布していることを明らかにした(図 1.1)。銀河面などある部分に集中していないということは、ごくごく地球近傍か宇宙論的遠方であるといえる。この結果により GRB までの距離の選択肢は絞られてきた。

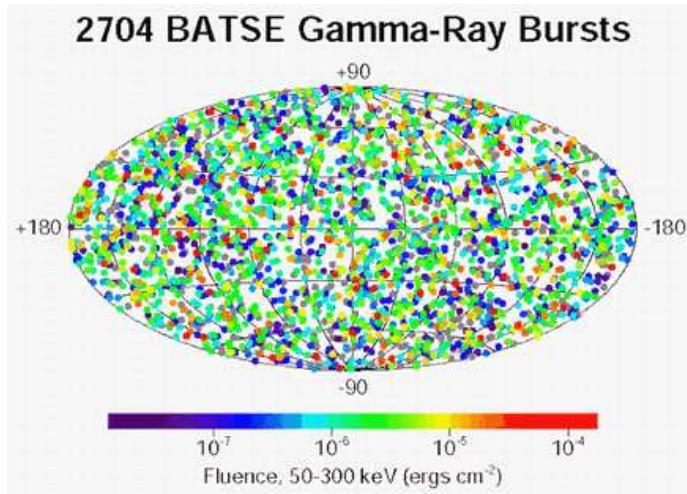


図 1.1: BATSE 検出器が位置決定した 2074 個の GRB を銀河座標にプロットしたもの。色は明るさを表わしている。全天に万遍なく分布していることがわかった。

そして 1997 年、イタリアとオランダの衛星である *BeppeSAX* によって GRB までの距離を特定できる決定的な観測がなされた。GRB が発生した方向に X 線で輝く”残光”現象を発見したのである [19] (図 1.2)。同じ場所を可視光や電波の望遠鏡で観測したところ、これらの波長の長い帯域でも減光する点源が確認され、それが系外銀河に附随していることがわかった。分光観測の結果、母銀河は $z = 0.8$ 程度の宇宙論的遠方であることがわかった。距離がわかったことで実際の放射エネルギーを算出できるようになり、 $10^{53}\sim10^{55}$ erg というビッグバン以降の宇宙で最大の爆発

現象であることがわかった。残光の継続時間は GRB 本体に比べ長いため、長時間の観測が可能になり、詳細な位置決定ができるようになった。しかしながら *BeppoSAX* は GRB 発生から 6~8 時間程度かかるから、ようやく地上に通報される。残光はべき乗で減光してしまったため、*BeppoSAX* の通報後の観測では手遅れである場合も多かった。

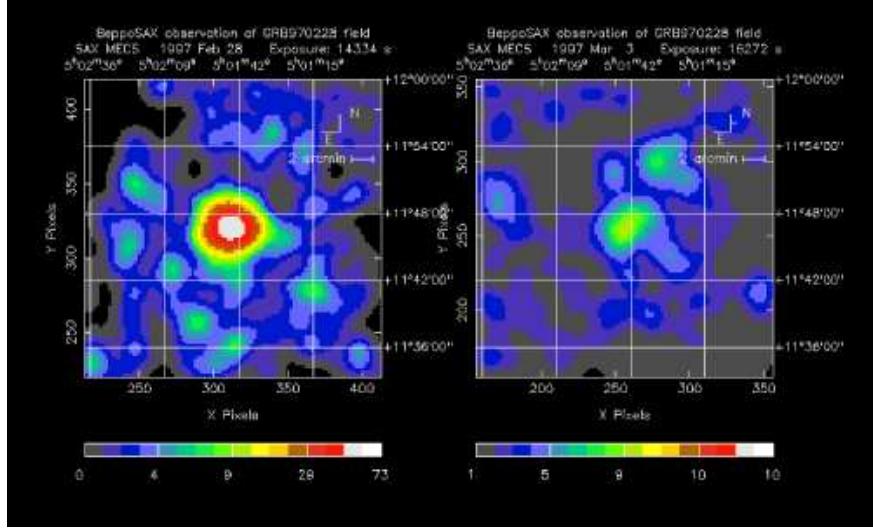


図 1.2: *Beppo SAX* が観測した *GRB 970228* の *X* 線残光。左が発生後 8 時間後、右が発生後 3.5 日後の画像。

2000 年に日本、アメリカ、フランスの共同開発でうちあげられた GRB 専門衛星 *HETE-2* 衛星 (High Energy Transient Explorer)[21] [9] は衛星上で GRB 発生から 10 秒程度で位置を決定し、地上にそれを速報することができるようになった。*HETE-2* 衛星は宇宙線の影響が少ない赤道軌道をとっていることで衛星の観測効率がよく、これまで XXX 個もの GRB を位置速報を流してきた。また常に半太陽方向を観測していることで、地上の可視光望遠鏡による追観測にとって有利である。2003 年、*HETE-2* が観測した GRB は可視光望遠鏡で残光観測をしたところ、超新星のスペクトルや光変化によく似た特徴を示した[22] (図 1.3)。これにより、30 年以上謎であった GRB の正体が超新星爆発であるとはじめてわかったのである。

GRB は銀河やブラックホール、恒星などの天体とは違い、一瞬で明るくなつて、たちまち暗くなってしまう。比較的長時間観測できる残光でもべき乗で暗くなつていく。地上での可視光望遠鏡や電波望遠鏡などによる追観測には GRB を検出した衛星からのすばやい報告が重要になってくる。そこで世界中の GRB 研究者が GCN (GRB Coordinates Network) に参加し、(1)GRB を検出した衛星がその位置や GRB のを速報する。(2)e-mail などでその情報を受けとり、追観測をおこなう。また、その結果を GCN に伝える。ということをおこなっている。昨今の GRB 観測衛星が短時間で GRB の位置を速報できるようになったことと、追観測の地上の望遠鏡の GCN への応答が早くなってきたことにより、早いものだと GRB 発生から数十秒後からの観測が可能になつていて、新しい観測結果も次々にでている。

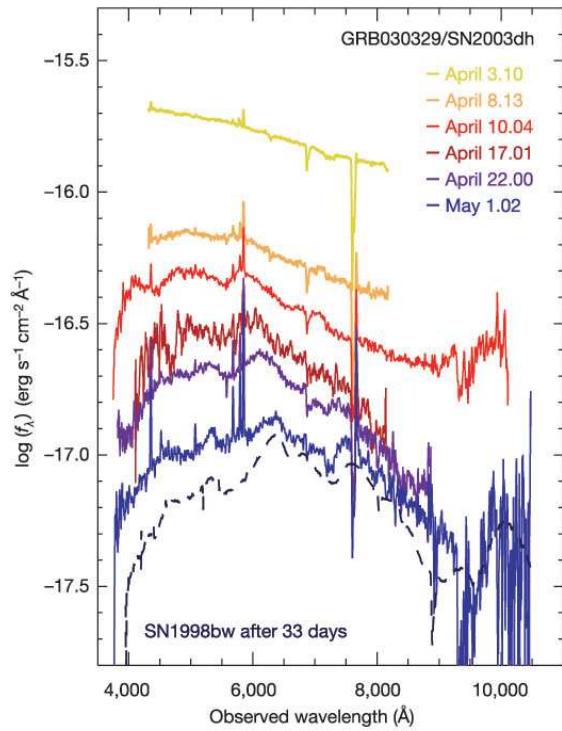


図 1.3: GRB 030329 の可視光スペクトル。

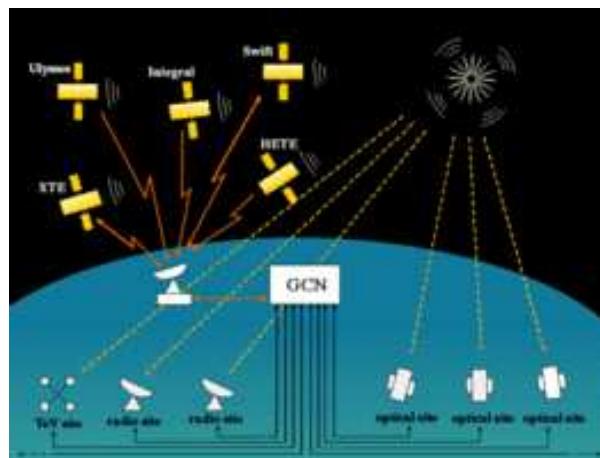


図 1.4: GCN ネットワークの概略図

1.2 Fireball Model

GRBの現象を記述するモデルとして、もっとも一般的なものはFireball Modelとよばれるものがある。これはローレンツ因子 $\gamma \sim 100$ もの相対論的速度のプラズマシェルが放出され、それらが互いに衝突して衝撃波(内部衝撃波)を形成、これによる粒子加速によってGRBが発生する。さらにそれらの放出物質と星間物質が衝突して(外部)衝撃波をつくることで残光が発生すると説明されている(図1.5)。

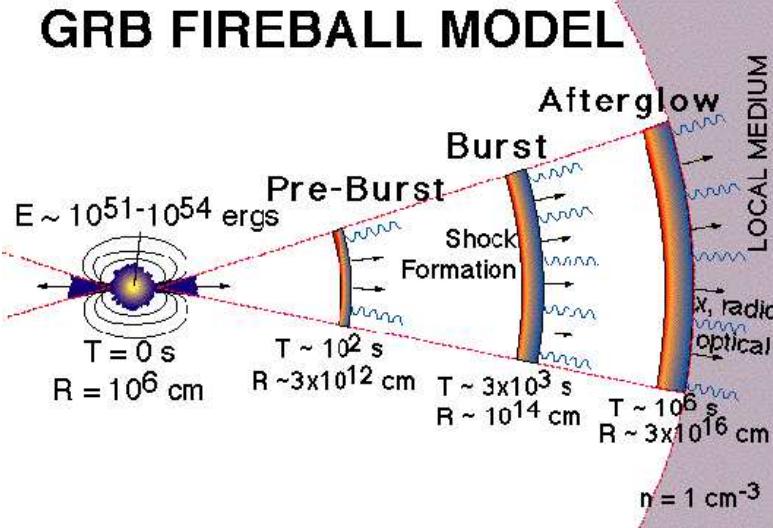


図 1.5: Fireball Model の概観図

GRBの放射はシンクロトロン放射によると考えられている。シンクロトロン放射を決定する物理量は磁場の強さと、電子のエネルギー分布である。また、シンクロトロン光子のエネルギーは電子のローレンツ因子 γ_e と磁場の強さに依存している。放射している系の光子がローレンツ因子 γ_E で観測者方向に進んでいるので、観測される光子は青方偏移して見える。

ローレンツ因子が γ_e である電子による放射において、観測される特徴的な光子のエネルギーは

$$(h\nu_{syn})_{obs} = \frac{hq_eB}{m_e c^2} \gamma^2 \gamma_E \quad (1.1)$$

である[14]。一方その放射強度(パワー)は放射の起こる系で

$$P_{syn} = \frac{4}{3} \sigma_T c U_B \gamma^2 \quad (1.2)$$

である。ここで、 $\sigma_T = 8\pi r_0/3$ でこれはトムソン散乱断面積で、 $U_B = B^2/8\pi$ は磁気エネルギー密度である。すなわち放射の起こる系での電子の冷却時間は、 $\gamma_e m_e c^2/P$ と書ける。観測者の系では γ_E を考慮して

$$t_{syn} = \frac{3m_e c}{4\sigma_T U_B \gamma_e} \frac{1}{\gamma_E} \quad (1.3)$$

となる。以上式(2.1)と式(2.3)から

$$t_{syn}(\nu) = \frac{3}{\sigma_T} \sqrt{\frac{2\pi cm_e q_e}{B^3 \gamma_E \nu}} \quad (1.4)$$

となる。この式より $t_{syn} \propto \nu^{-1/2}$ であることがわかる。

エネルギー $\gamma_e m_e c^2$ を持つ一個の電子によるシンクロトロン放射のスペクトルは、相対論的ビーミングによって変調されたサイクロトロン放射のフーリエスペクトル表わされる。振動数 $\nu_e \equiv \nu(\gamma_e)$ (式(2.1))になるまでは $F_\nu \propto \nu^{1/3}$ となり、この値よりも大きい振動数になると、指数関数的に減衰する。このときシンクロトロン放射のピークは

$$P_{\nu, \text{max}} \sim \frac{P(\gamma_e)}{\nu_e} = \frac{m_e c^2 \sigma_T}{3q_e} \gamma_E B \quad (1.5)$$

となる。ある時刻に一個の電子が持つエネルギーは $E(t) = m_e c^2 \gamma_e(t)$ である。この電子からは

$$P = -\frac{dE}{Dt} = -m_e c^2 \frac{d\gamma_e}{dt} \quad (1.6)$$

のパワーで放射をしてエネルギーを失っていく。式(2.2)より

$$\frac{d\gamma_e}{dt} = -\frac{4\sigma_T U_B \gamma^2(t) \gamma_E}{3m_e c} \quad (1.7)$$

であるので、これを積分することで解析的に $\gamma_e(t)$ の時間発展を知ることができる。初期状態の電子のローレンツ因子を $\gamma_e(0)$ として積分すると

$$\frac{1}{\gamma_e(t)} = \frac{1}{\gamma_c(t)} + \frac{1}{\gamma_e(0)} \quad (1.8)$$

で表わされる。ここで

$$\gamma_c(t) = \frac{3m_e c}{4\sigma_T U_B \gamma_E t} \quad (1.9)$$

である。このパラメータ γ_c と γ_e の大小関係により、電子の冷却のされ方がきまる。はじめ $\gamma_e > \gamma_c$ である電子は、時間 t の間にエネルギーを失い、 γ_c 程度になる。一方 $\gamma_e < \gamma_c$ の電子は、時間 t の間には放射による冷却は効かずにはほぼ γ_e 程度のエネルギーから大きく減衰することはない。電子がエネルギーを失うにつれ、シンクロトロン放射の振動数は $\nu_{\text{syn}} \propto \gamma^2(t)$ で時間と共に変化する。したがって 1 個の電子の $\mu_c < \mu < \mu_e$ におけるスペクトルは $\propto \nu^{-1/2}$ である。

電子のローレンツ因子の分布の中で最小のローレンツ因子を γ_m とすると、 $\gamma_c < \gamma_m$ のときは、すべての電子は急激に冷却される。このような状態を fast cooling とよぶ。 $\gamma_m < \gamma_c$ のときは電子のローレンツ因子が γ_c より大きいものだけが急激に冷却され、 γ_c よりも小さいものは冷却を受けない。このような状態を slow cooling とよぶ。

一個の電子により作られるスペクトルに電子のエネルギー分布 $\propto \gamma_e^{-p}$ をかけて積分を行なうと、観測されるスペクトルが得られる。観測されているような broken power law (reffer) のスペクトルは、最小のローレンツ因子をもつ電子から発せられる $\nu_{\text{syn}}(\gamma_m)$ 付近で折れ曲がると考えられる。高いエネルギーを持った電子はいつでも急速に冷却されるため

$$F_\nu = N[\gamma(\nu)] m_e c^2 \gamma(\nu) \frac{d\gamma}{d\nu} \propto \nu^{-p/2} \quad (1.10)$$

をみたす。ここで $\gamma(\nu)$ は、振動数 ν のシンクロトロン放射を行なう電子のもつローレンツ因子で、 $N[\gamma(\nu)]$ は $\gamma(\nu)$ を持った電子の個数である。また、十分低いエネルギーを持つ電子に対しては冷却は効かず

$$F_\nu \propto \nu^{-1/3} \quad (1.11)$$

となる。これらの中間に分布する電子については fast cooling 及び slow cooling の両方を考慮する必要がある。slow cooling の場合のスペクトルは

$$F_\nu = N[\gamma(\nu)] P[\gamma(\nu)] \frac{d\gamma}{d\nu} \propto \nu^{-(p-1)/2} \quad (1.12)$$

である。fast cooling の時は、 $\nu(\gamma_c)$ から $\nu(\gamma_e)$ の間は

$$F_\nu \propto \nu^{-1/2} \quad (1.13)$$

である [14]。これらの接続条件から、以下のようなスペクトルが得られる。

$\gamma_c < \gamma_m$ の fast cooling の時は

$$F_\nu \propto \begin{cases} (\frac{\nu}{\nu_c})^{1/3} F_{\nu,max}, & \nu_c > \nu \\ (\frac{\nu}{\nu_c})^{1/2} F_{\nu,max}, & \nu_m > \nu > \nu_c \\ (\frac{\nu_m}{\nu_c})^{-1/2} (\frac{\nu}{\nu_m})^{-p/2} F_{\nu,max}, & \nu > \nu_m \end{cases} \quad (1.14)$$

となる。ここで $\nu_m \equiv \nu_{syn}(\gamma_m)$ は、電子のエネルギー分布において最小のローレンツ因子を持つ電子から放射されるシンクロトロン振動数である。また $F_{\nu,max} \equiv N_e P_{\nu,max} / 4\pi D^2$ は、GRB 発生源からの距離 D の地点での peak flux である。

$\gamma_c > \gamma_m$ の slow cooling の時は

$$F_\nu \propto \begin{cases} (\frac{\nu}{\nu_m})^{1/3} F_{\nu,max}, & \nu_m > \nu \\ (\frac{\nu}{\nu_m})^{-(p-1)/2} F_{\nu,max}, & \nu_c > \nu > \nu_m \\ (\frac{\nu_c}{\nu_m})^{-(p-1)/2} (\frac{\nu}{\nu_c})^{-p/2} F_{\nu,max}, & \nu > \nu_c \end{cases} \quad (1.15)$$

となる (図 1.6)[23] [3][4]

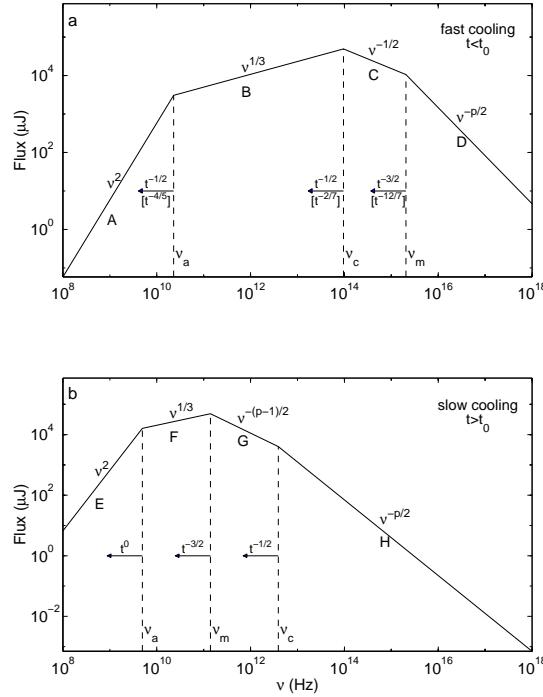


図 1.6: 電子のエネルギー分布が power law の時のシンクロトロン放射によってつくられるスペクトル。上が fast cooling のとき、下が slow cooling のときのスペクトル。

1.3 E_{peak} – E_{iso} relation

1.3.1 Band Function

GRB のプロンプト放射での詳細なスペクトルの研究は, *BATSE*によって初めて行なわれた。まず *BATSE*が検出した GRB の中から 30keV–1MeV の帯域内で fluence が $4 \times 10^{-5} \text{ erg s cm}^{-2}$ 以上のもの、または 50keV–300keV の帯域内で peak flux が $10 \text{ photons rmcm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上のもの、合計 156 個の GRB を選んだ。つぎにそれらをいくつかの時間帯で区切り、5500 個のスペクトル解析をし、Band function[25] でモデルフィッティングした。この Band function というモデルは経験的に得られたもので以下のように表わされる。

$$E < (\alpha - \beta)E_{\text{peak}}/(2 + \alpha) \equiv E_{\text{break}}$$

このとき

$$f_{GRB}(E) = A(E/100)^{\alpha} \text{rmexp}(-E(2 + \alpha)/E_{\text{peak}})$$

また

$$E \geq (\alpha - \beta)E_{\text{peak}}/(2 + \alpha)$$

このとき

$$f(E) = A(\alpha - \beta)E_{\text{peak}}/[100(2 + \alpha)]^{\alpha-\beta} \text{exp}(\beta - \alpha)(E/100)^{\beta} \quad (1.16)$$

ここで、4つのモデルパラメータは

1. 振幅 A [photons $\text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{keV}^{-1}$]
2. 低エネルギー側のスペクトルの光子指数 α
3. 高エネルギー側のスペクトルの光子指数 β
4. νF_{ν} の次元のスペクトルにおいてピークとなる時のエネルギーを E_{peak}

とする。図 1.7、1.8、1.9、は、それぞれのパラメータの分布を表わしている。この結果、プロンプト放射のスペクトルには一定の型があるといえる。特に E_{break} は 250keV を中心に上下 2 倍の間に分布しており、100 – 500keV の帯域の観測が重要であることがわかる。

1.3.2 E_{peak} – E_{iso} relation (Amati's relation)

*Beppo SAX*で検出され、赤方偏移が求められた 12 個の GRB についてスペクトルの研究を行なった[26]。時間平均したスペクトル(赤方偏移は補整する)を求めたところ、1keV–10MeV の帯域内でソースフレームから得られた E_{peak} と等方的等量のエネルギーの間には相関がみられることがわかった(図 1.10)。

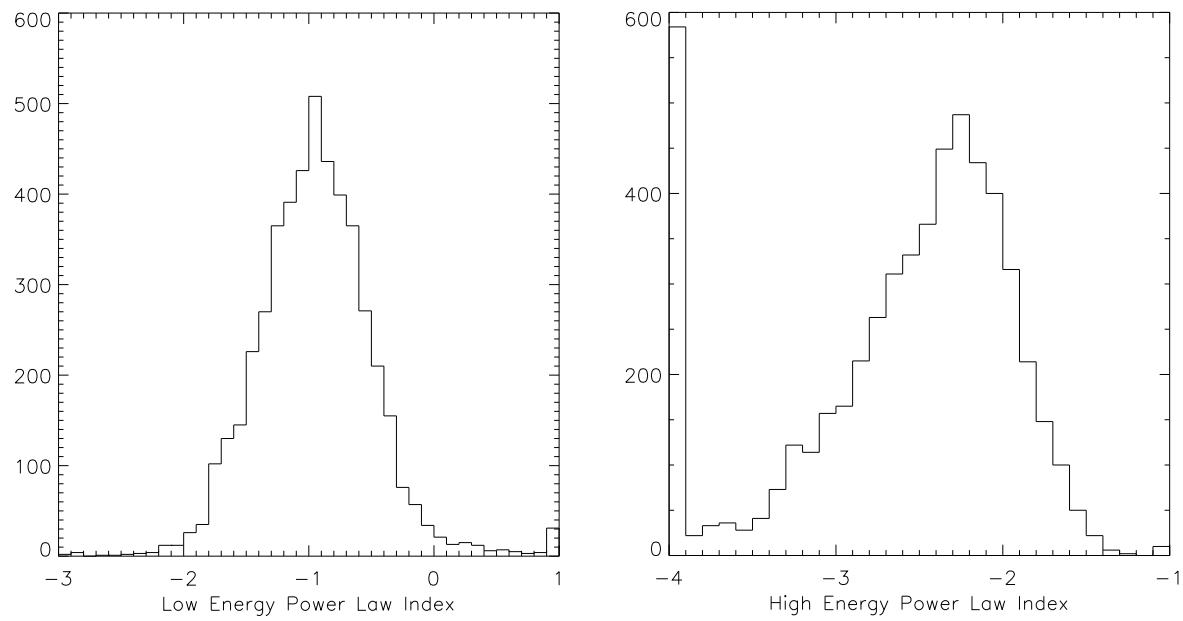


図 1.7: BATSE が観測した GRB の低エネルギー側
のスペクトルの光子指数 α の分布

図 1.8: BATSE が観測した GRB の高エネルギー側
のスペクトルの光子指数 β の分布

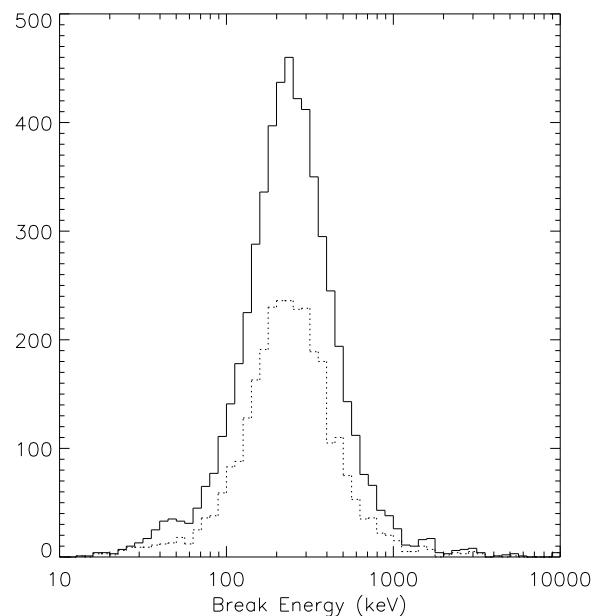


図 1.9: BATSE が観測した GRB の E_{break} の分布

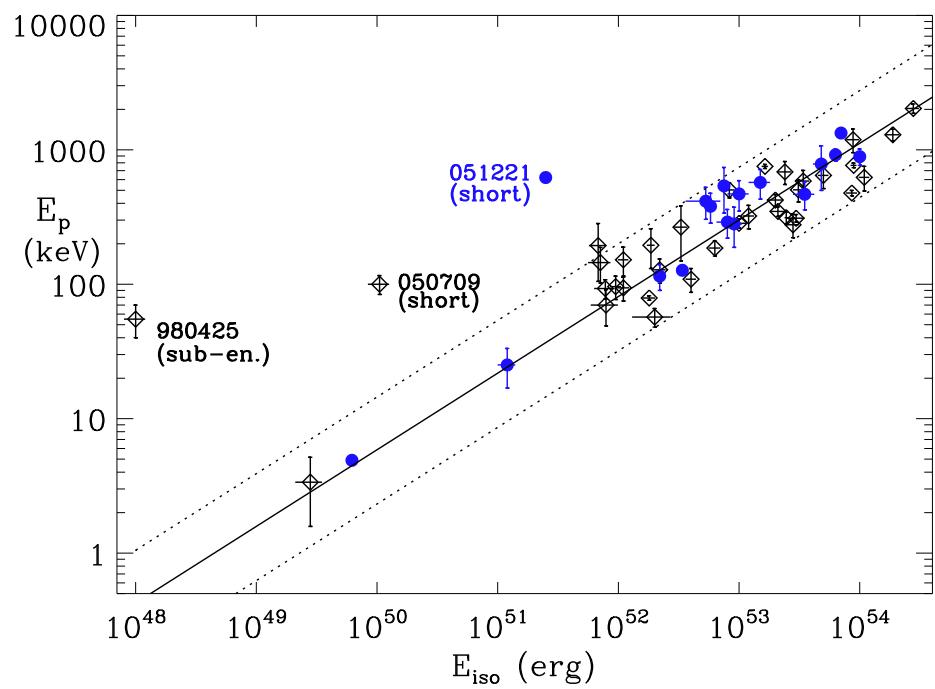


図 1.10: Amati's relation[27]

第2章 Swift衛星搭載Burst Alert Telescope

2.1 Swift衛星の観測

2.1.1 Swift衛星の全体像、観測のながれ

2004年10月に打ち上げられた *Swift* は、米英伊独仏日で共同開発された GRB 観測衛星である(2.1、表 2.4)。この衛星は、軌道上で GRB を検知し、到来方向を計算し自律的に衛星自身を到来方向に振り向け多波長の狭視野望遠鏡で GRB 残光を観測する画期的な衛星である。BATSE の 5 倍以上の感度で観測することにより、年間に 100 個を超える GRB の位置決定をおこなっている。*Swift* に搭載されている検出器は BAT(Burst Alert Telescope)、XRT(X-Ray Telescope)、UVOT(Ultraviolet and Optical Telescope) の 3 つである。まず BAT が全天の 1/6 を覆う、約 $120^\circ \times 90^\circ$ の広視野を硬 X 線帯域でモニターし、GRB を検出、その位置を決定する。その位置を 10 秒以内に 1~4 分角の精度で決め、速報すると共に、衛星の姿勢を制御してその方向に向ける。その後 XRT が撮像観測をおこない、5 秒角で位置決定、UVOT も撮像、分光観測をおこない、0.12 秒角で位置を特定する。



図 2.1: Swift衛星 (NASA/GSFC)

表 2.1: *Swift* 衛星の概要

軌道	600 km
軌道上寿命	7 年
打上げ年月日	2004 年 10 月 20 日
ランチャー	Delta II
Spacecraft partner	Spectrum Astro
回頭時間	75 秒以内に 50°

2.1.2 XRT

XRT[28] は、BAT による GRB 位置決定から 100 秒程度後からに 5 秒角の精度で残光をとらえ、残光の撮像、分光観測をしている。XRT は斜入射型の多重反射鏡を持つ X 線反射鏡と X 線 CCD カメラで構成されている。XRT は 1.5 keV のとき 110 cm^2 の有効面積と一辺 23 分角の視野をもち、0.2 – 10 keV のエネルギー帯域を観測できる。CCD カメラは 600×602 pixels のチップで構成されていて、エネルギー分解能は 10 keVにおいては $\sim 190 \text{ eV}$ 、0.1 keVにおいては $\sim 50 \text{ eV}$ である。

XRT には 3 つの読みだしモードがある。image mode は 1 ピクセルあたりに受け渡した総エネルギーを計算するために統一したイメージを作製し、分光はできない。よって観測した天体の位置を決めるためだけに使われる。timing mode は位置情報は犠牲にして、CCD 読みだしを高速にし高時間分解能での分光観測が実現できるようにしている。photon-counting mode では入射位置と光子のエネルギーをすべて読みだすので全スペクトルと位置情報をすべて利用できる。

望遠鏡	JET-X Wolter I
焦点距離	3.5 m
有効面積	110 cm^2 @ 1.5 keV
望遠鏡の PSF	18 arcsec HPD @ 1.5 keV
検出器	EEV CCD-22, 600×602 pixels
検出器の観測内容	Imaging, Timing, and Photon-counting
検出器の構成	40×40 micron pixels
ピクセルスケール	2.36 arcsec/pixel
エネルギー帯域	0.2-10 keV
感度	$2 \times 10^{-14} \text{ ergcm}^{-2} \text{s}^{-1}$ in 104 seconds

表 2.2: XRT の概要



図 2.2: X-Ray Telescope : 鏡筒とミラー (NASA/GSFC)

2.1.3 UVOT

GRB 由来の可視光残光は指数およそ $-1 \sim -2$ のべき型で減光してしまつたため、GRB 発生後、早い時間帯での観測が必要である。UVOT[29] は GRB 観測衛星に搭載された始めての可視光望遠鏡で、BAT による GRB の位置決定から 100 秒以内の可視光残光の観測が可能である。UVOT で使われている望遠鏡は、口径 30cm のリッチャー・クレチャン型反射望遠鏡で 17 分露出で 24 級の感度がある。UVOT が Swift に搭載されることで、1 つの衛星が GRB の検出から残光

観測を一手におこなうことができるようになった。また、地球大気に邪魔されないで観測できることで、感度は地上の口径 4m の望遠鏡に匹敵する。

BAT が GRB を検出すると、UVOT は自身で露出時間と使用するフィルターを決定する。最初に撮られた画像はすぐに地上に送られ、アーカイブデータから定常天体と一致する天体か否かをしらべる。検出した GRB の Z~1 のとき、それぞれちがったフィルター観測の結果をもちいて、多色測光による赤方偏移の計測を行なうことができる。



図 2.3: UVOT (NASA/GSFC)

焦点比	12.7
口径	30cm
検出器	Intensified CCD
検出器の観測内容	Photon counting
視野	17 x 17 arcmin
検出器の構成	2048 x 2048 pixels
望遠鏡の PSF	2.0 arcsec @ 350 nm
波長帯域	170-650 nm
観測帯域の種類	6
感度	B = 24 in white light in 1000 s
ピクセルスケール	0.48 arcsec
スペクトル分解能	$\lambda/\Delta\lambda \sim 200$ @400nm
検出器の検出上限等級	V = 7.4 mag
時間分解能	11 ms

表 2.3: UVOT の概要

2.2 Burst Alert Telescope

BAT[30]は高感度、広視野の検出器で、GRBを検出し数秒で4分角以内の精度で位置決定する。そして衛星をGRBの方向へ回頭させて観測するか、あるいはそのままの姿勢で観測するのがいいのかを、GRBの太陽や月との位置関係や明るさなど観測の価値から判断し、回頭させることになれば衛星にその方向を知らせる(表2.4)。

BATには2種類の観測モードがある。GRBがトリガされたときのみに使われるbstモードと、普段の待機状態で全天サーベイを行なっているときのsurveyモードである。bstモードは光子情報をすべて読みだすことによってGRBの位置とスペクトルのデータをとり、surveyモードでは、指定された積分時間ごとのスペクトル情報のみを読みだすことで長い時間スケールでの硬X線サーベイのデータを取りだすことができる。

図5.1が示すように、BATは大きく4つの部分で構成されている。まず3万個余りのCZT素子が敷きつめられている検出部のディテクターアレイ(Detector Array)があり、その上方にCoded Aperture Mask(次節)が設置されている。BATの側面には各器機の電源を供給するPCB(Power Converter Box)、そしてCoded Maskのイメージ再合成(次節)のためのフーリエ計算をおこなうIPE(Image Processor Electronics)が搭載されている。ディテクターアレイ部の温度を一定に保つため、ヒートパイプが張りめぐらされている。また、maskとディテクターアレイの空間にはノイズ源となる宇宙線の入射を減少させるためにGraded-Zとよばれる、プロトアクチニウム、タンタル、すず、銅で構成された多層の遮蔽金属で覆われている。

Aperture	Coded mask
検出面積	5200 cm ²
検出器	CdZnTe
検出器の観測内容	Photon counting
視野	1.4 sr (partially-coded)
検出器の構成	256 modules of 128 elements
検出器素子のサイズ	4 mm x 4 mm x 2mm
検出器のPSF	17 arcmin
エネルギー帯域	15–150 keV

表2.4: BATの概要

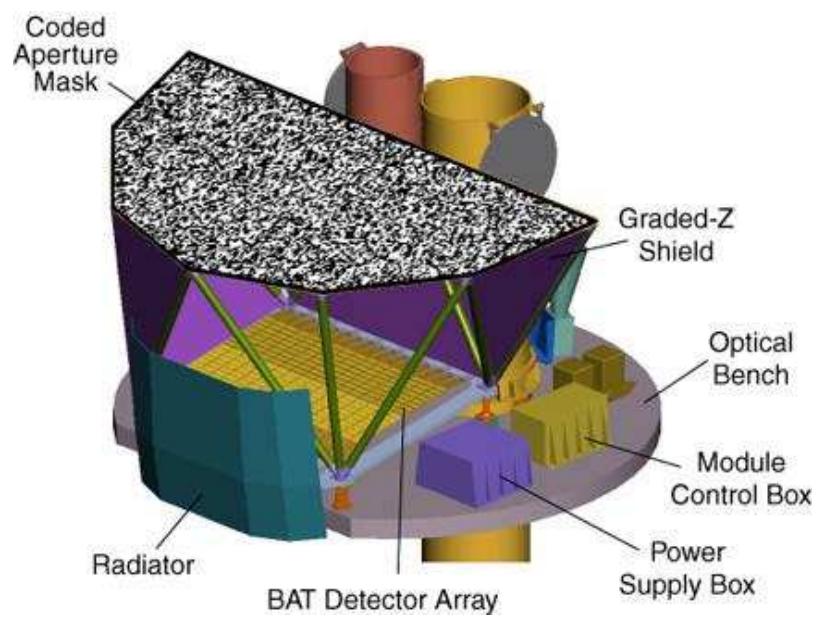


図 2.4: BAT 検出器 (NASA/GSFC)

2.2.1 Mask weighted 法

10keV を超えるような硬 X 線、ガンマ線は金属による全反射臨界角が非常に小さく、10keV 以下の X 線望遠鏡のように反射鏡を使った撮像観測は非常にむずかしい。そこで硬 X 線、ガンマ線のイメージを撮るには coded aperture mask(図 2.5) という、ある決まったパターンで穴のあいたマスクを使った画像合成法がよく用いられる。BAT で用いられた coded aperture mask は、54000 枚の鉛タイル ($5 \times 5 \times 1\text{mm}$) を、”D” の字の形をした、およそ $240 \times 100 \times 5\text{ cm}$ の軽量な合成ハニカムパネルの上に決められたパターンに従って列べらたもので、検出器の面から 1m 上方に設置されている。mask は 50% の鉛タイルと 50% の空隙とが完全にランダムな模様になるように設計されている。光子が入射するとマスクによって遮られた部分が CZT の受光面にマスクのパターンに基づいた影をつくる。この影のパターンとマスクの相関をとり、機上の計算機で画像の合成をおこなう。

このマスクを使うことによって、GRB の位置が決められるだけでなくスペクトルを取得することもできる。GRB でマスクが照らされるとき、開口部を通過した光子が直接検出器に当った部分をフォアグラウンドにできる。一方、GRB 以外の天体からの光子や宇宙線、衛星構体からの 2 次 X 線やコンプトン散乱して光子が鉛タイルの影になった部分の検出器にもあたるので、それをバックグラウンドとすればその差バックグラウンドは mask パターンによらず、一様に当たるので、フォアグラウンドにあたるピクセルのデータとの差をとることで、特定の GRB から来た放射のみを取りだし、そのスペクトルを作ることができる。



図 2.5: Coded perture mask (NASA/GSFC)

2.2.2 CdZnTe 検出器

BAT の検出部には 32768 個の $4 \times 4 \times 2\text{ mm}$ の CdZnTe(CZT) 半導体素子が使われている。これらは 2048 個の CZT を 1 つの単位とする 16 個の「ブロック」に分けられ、組み上げ前の較正、検査にはこのブロック単位で行なわれた。さらにブロックは 256 個の CZT を単位とする 8 つのディテクターモジュールにわけられる。このディテクターモジュールごとに読みだし回路が備えられるが、内部には 128 個の CZT ごとに分割され、バイアス電圧供給用、フロント回路基板が取り付けられている。さらにはディテクターモジュールは 2 つのサンドイッチとよばれる部分(図 2.6)からなり、サンドイッチには 16×8 に 128 個の CZT が並んでいる。

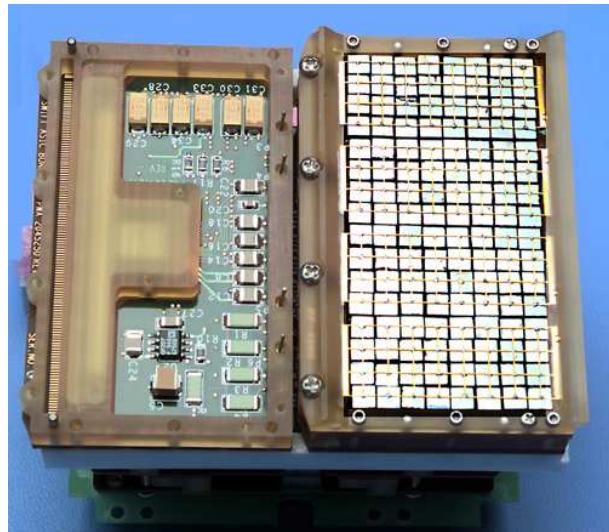


図 2.6: 検出部 サンドウィッチ (NASA/GSFC)

2.2.3 CdZnTe の性能と電子の $\mu\tau$ (移動度と寿命の積)

これまで硬X線を検出するための半導体検出器としては、シリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)が代表的であった。しかし、Siは原子番号が小さいため阻止能が小さく、硬X線検出には不向きである。Geは原子番号が大きいため阻止能は高く、高エネルギー分解能を得られるが、バンドギャップが小さいため、冷却が不可欠であり、衛星に搭載するのに大きなリソースを必要とする。そこで阻止能が高く、かつ、動作条件がゆるやかな半導体検出器が望まれていた。

テルル化カドミウム(CdTe)半導体素子はII-VI族の化合物半導体であり、大きな原子番号をもっている。さらに物質の密度も $6.02[\text{g}/\text{cm}^3]$ と高いので、硬X線に対する検出効率がとても高い。もう1つの大きな特徴は、バンドギャップが 1.52eV と他の半導体検出器と比べて高いことである。そのためリーク電流が低く抑えることができ、常温でも動作が可能である。

CdTeのCdの10%ほどをZnに置きかえた CdZnTe(CZT) 半導体は CdTe よりさらに広いバンドギャップを持ち、さらにリーク電流を抑えることができるので、結果として高いバイアス電圧をかけられ、電荷収集効率の向上、エネルギー分解能の向上が期待できる。しかし、CdTeよりもホールの移動度と寿命が小さく、収集効率が悪いため、入射X線に対する応答が低エネルギー側に広がってしまうという弱点を持つ。また CZT の結晶の製法上の問題から多結晶となり CZT 検出器中の素子が均一でなく、場所ごとに性能にばらつきができるため、素子ごとに応答を評価する必要がある。

一般に光電吸収やコンプトン散乱など入射光子は、そのエネルギーを半導体中の価電子に与える。この結果電子はバンドギャップを飛び越えて伝導帯にあがり、同時に価電子帯には、電子がいた隙間である正孔ができる。このとき半導体に電場をかけておくと、この1対の電子と正孔はそれぞれ逆方向に移動して、電極に電荷を誘起する。これを信号として読むことで入射光子のエネルギーを知ることができる。よって入射光子のエネルギーは電子と正孔の和を使って入射光子のエネルギーを計測している。しかし CZT 半導体検出器のではその低い電荷輸送特性のため、検出器内で生成された正孔の多くが半導体内を移動している間に無くなるため、十分な電荷を誘起できない場合が少なくない。実際入射した光子のエネルギーよりも低く読みだされてしまうことになるため、エネルギー分布がガウス関数からずれ、低いエネルギー側にテイルをひく(図 2.7) この現象を定量的に表わすために、電荷の移動度 μ と平均寿命 τ を用いる。

電荷 Q_0 のキャリアが発生してから時刻 t が経過した後の電荷 $Q(t)$ は、そのキャリアの平均

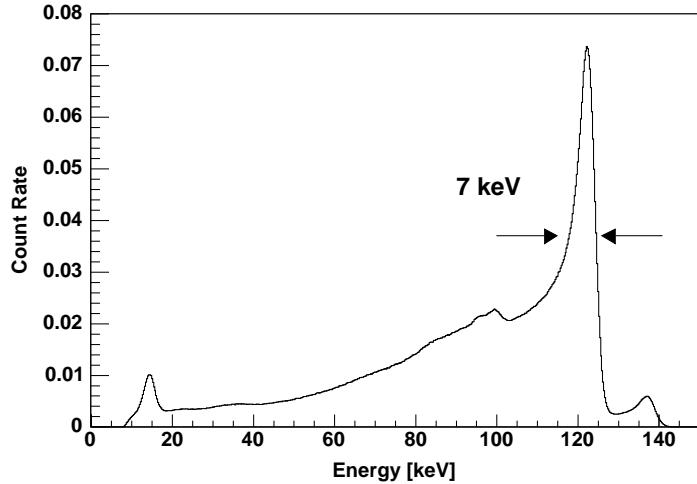


図 2.7: 32000 個の CdZnTe に ^{57}Co を照射したときのスペクトル。

寿命を τ とすると、

$$Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau} \quad (2.1)$$

と表わされる。検出器のキャリアの速度 v は、キャリアの移動度 μ と半導体の電場 E によって、

$$v = \mu E \quad (2.2)$$

と表わされる。経過時間 t がこのキャリア速度によって、相互作用してから移動した位置 x の関係は $x = vt$ であるので式 2.1 は

$$Q(t) = Q_0 e^{-x/\mu\tau E} \quad (2.3)$$

となる。この式は電子と正孔どちらにもあてはまり、この 2 つの電荷の足し合わせが、電極に誘起される全電荷となる。この一様電場中での電荷輸送特性については Hacht[31] によって導かれており、

$$Q = eN_0 \left[\frac{(\mu\tau)_e E}{z} \left(1 - \exp \left[\frac{x-z}{(\mu\tau)_e E} \right] \right) + \frac{(\mu\tau)_h E}{z} \left(1 - \exp \left[\frac{-x}{(\mu\tau)_h E} \right] \right) \right] \quad (2.4)$$

と表わされる。ここで $(\mu\tau)_e$ は電子の移動度と寿命の積、 $(\mu\tau)_h$ はホールの移動度の寿命の積、 N_0 は最初に発生したキャリア数、 z は検出器の電場方向の深さである。よってこの式 3.4 は深さ方向によって収集できるキャリアが指数関数的に減るということを示している。CZT の $(\mu\tau)_h$ は CdTe のそれよりも 2 枝小さいために、テイルを引きやすく、複雑なエネルギー応答関数を作りだす原因となっている [35]。

2.2.4 CdTe/CdZnTe のスペクトル構造

図 2.9 は、一定の $(\mu\tau)$ で、バイアス電圧が 100V、150V、200V の 3 種類のスペクトルを重ねてある。スペクトルがバイアス電圧によって変化していることがわかる。これは電荷収集効率がバイアス電圧に依存しているためである。図 2.8 のように、電荷収集の効率はバイアス電圧が高くなるほど全体的に上がるため、テイルが小さくなり、ピークの位置があがる。しかしバイアス電圧を高くし過ぎると、リーク電流が大きくなってしまうため、エネルギー分解能が悪くなる。両者の兼ね合いが必要である。

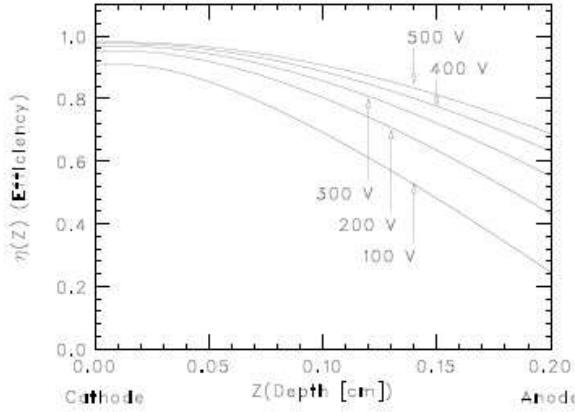


図 2.8: 電荷収集効率のバイアス電圧による変化。100–500 keV のバイアス電圧を 2mm 厚の素子に印加したときのもの。

図 2.10、2.11 は、 $\mu\tau$ の値を変化させたときのスペクトルの変化を表わしている。図 2.10 は、 $(\mu\tau)_h$ の値を一定にし、 $(\mu\tau)_e$ の値を変えた場合のスペクトルで、ピークチャンネルが $(\mu\tau)_e$ に依存していることがわかる。図 2.11 は逆に $(\mu\tau)_e$ の値を一定にし、 $(\mu\tau)_h$ の値を変えた場合のスペクトルで、テイル構造が $(\mu\tau)_h$ に依存していることがわかる。BAT の応答関数をつくる上では、非対角成分として、この電荷移送特性を取りこむ必要がある。

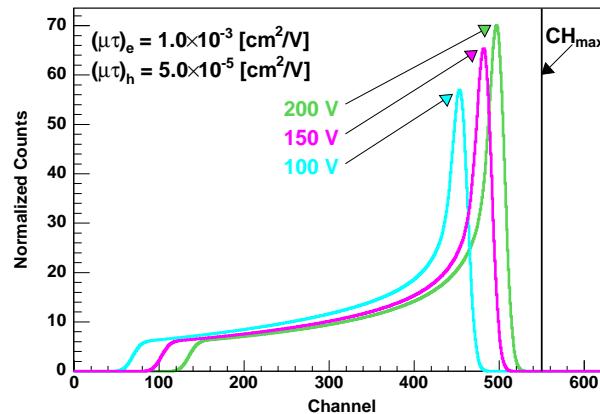


図 2.9: バイアス電圧を 100V、150V、200V に変えたときのスペクトル。 $\mu\tau$ は固定している。バイアス電圧が下がるほど、テイル構造が顕著になる。

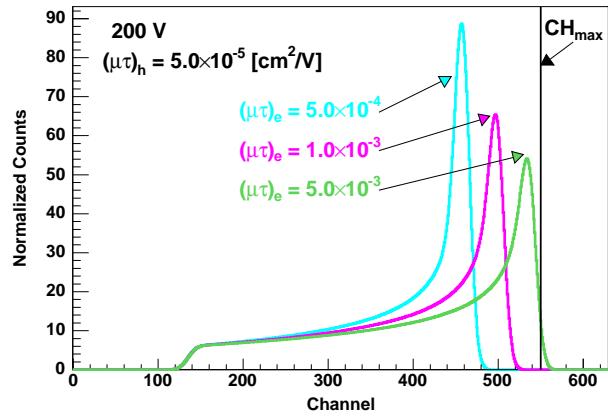


図 2.10: $(\mu\tau)_h$ を固定し、 $(\mu\tau)_e$ の値を変えた時のスペクトル。 $(\mu\tau)_e$ が大きくなるにつれ、ピークチャンネルが上昇する。

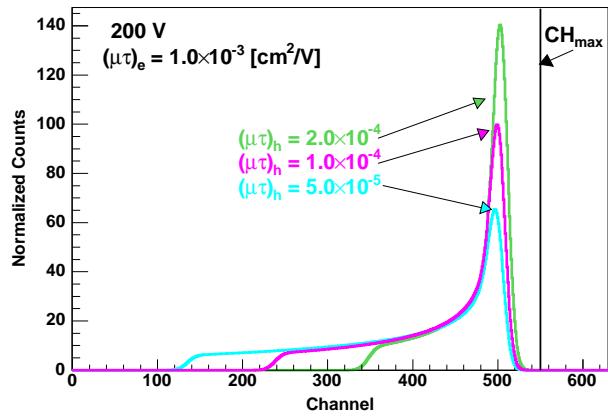


図 2.11: $(\mu\tau)_e$ を固定し、 $(\mu\tau)_h$ の値を変えた時のスペクトル。 $(\mu\tau)_h$ が減少するにつれ、テイル構造が大きくなる。

2.2.5 $\mu\tau$ モデル

素子の $\mu\tau$ 積を測定するために最もよく使われるのは、 α 線を素子に入射し、パルスの立ち上がり時間から移動度を、出力波高から $\mu\tau$ をもとめる方法である。 α 線を用いた手法は簡便だが、 α 粒子は、CdTe 中での平均自由行程が $10\mu\text{m}$ と非常に短いので、 α 粒子を入射させると検出器表面のごく近傍で全エネルギーをキャリアに変換してしまい、検出器表面の特性に影響を受けるおそれがある。そこで、宇宙研の佐藤らが、Hecht 方程式から解析的にエネルギー応答をモデル化し、X 線スペクトルから素子を直接評価する新しい手法を開発した [6]。佐藤らは、光子が相互作用をおこした位置や CdTe/CZT の低い電荷輸送という過程を考慮し、エネルギー応答をモデル化した。スペクトルに当てはめることによって、キャリアの $\mu\tau$ 積などの各パラメータをフィッティングによって決定する。

2.3 SwiMM (Swift Mass Model)

2.3.1 エネルギー応答関数

ある単色エネルギーの光子が入射したとき、あるひとつの値のパルスハイトを返すのが理想的な検出器である。しかし実際は単色エネルギーの光子を入射させても、検出器で得られるパルスハイトは検出器固有の確率分布にしたがって広く分布する。この検出器から得られるパルスハイトの確率分布を応答関数とよぶ。検出器中に解放されたエネルギーに対する信号応答については、2.2 で述べたが、ここでは検出器に入射するまでの過程に注目して検討をおこなう。

BAT が観測する硬 X 線の領域において応答を考える際、重要な物理過程は光電吸収とコンプトン散乱がある。さらにこれらに加えて電子陽電子対生成と放射化過程を考慮する必要がある。とりわけコンプトン散乱はこの領域において支配的な過程であるが、光子の経路によって複数に分岐するので、解析的に導くことはできない。そこで、コンプトン散乱を見積もるには検出器とその周辺の物質配置を考慮したモンテカルロ法による数値計算でシミュレーションするのが一般的である。

[7][1]

2.3.2 数値モデルによる応答関数

計算機によるモンテカルロシミュレーションは陽子、中性子、電子、ガンマ線、パイ粒子、ミュー粒子などの素粒子が物質中で起こす複雑なふるまいや反応を正確に再現するために、高エネルギー物理や宇宙線の研究、原子核の実験などの分野で広くもちいられている。

数値モデルによって検出器の応答関数を求めるとき、理想的には応答関数を決定するパラメータ空間の全ての点で測定して求めるあらゆるエネルギー、入射位置、入射角度の光子を用いて測定する必要があるが、現実的には不可能であるので確実にはグリッドで十分なパラメータ空間を埋めたのち、補間して用いることになる。

Swift で用いているシミュレーションツールは Geant4 (Geometry and Tracking version 4) とする。Geant4 は CERN と KEK を中心とした日本のグループが中心となり、さらに高エネルギー物理実験以外の宇宙物理を行なっている研究者なども参加して開発しているツールで、オブジェクト指向のプログラミング言語である C++ を採用している。現在このツールで $250\text{eV} - \text{TeV}$ 領域までの物理過程が実装されていて、物質中の光子や電子の輸送過程を計算することができる。また、最大の特長はジオメトリの再現を詳細に、しかも簡単に行なうことができる。Geant4 を使うには 3 つの項目を定義しなければならない。それは、「適用する物理過程」、「mass model」、「シ

ミュレーション内での相互作用の情報の収集方法」である。

2.3.3 Swift Mass Model

Swift Mass Model は BAT のエネルギー応答を正確に再現するために Geant4 ベースでつくられている。計算機上にジオメトリや質量成分ができるだけ忠実にかつ詳細に作ることで検出器の光電吸収によるこのモデルには XRT、UVOT、スタートラッカー、あるいは衛星本体、更にはもっと細かいモデルとして、太陽遮蔽壁、ラジエーターなどの周辺装置も含まれている。

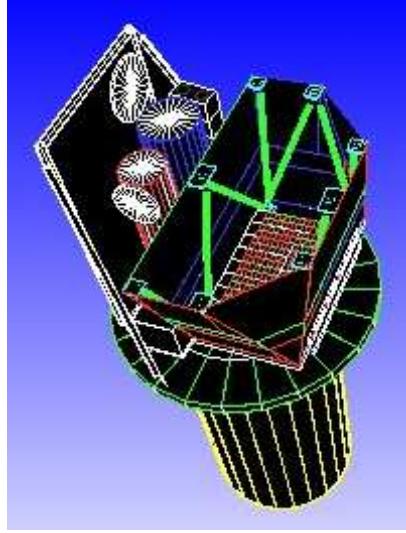


図 2.12: BAT のジオメトリ (佐藤悟朗氏 「The Extreme Universe in the Suzaku era」 ポスター発表より引用)

2.3.4 物理素過程

SwiMM では以下の 3 つの物理素過程を取り入れた。それぞれの適応エネルギー範囲は光電効果は～数 100keV、コンプトン散乱は 100keV 程度～数 MeV、電子陽電子対生成は 5～10MeV である。この研究の目的には十分である。

1. 光電効果

原子の軌道電子はそれぞれの軌道によって固有のポテンシャルエネルギーで原子核に結合している。2 つのエネルギー準位の差に等しいエネルギーをもつ光子が電子に当たったとき、その電子は光子のエネルギーをもらってエネルギー準位があがる。これを共鳴吸収とよぶ。もし、光子が大きなエネルギーを持っていて、電子が存在する準位からはじきだされて、原子がイオン化してしまうと、これは光電効果とよばれる。はじき出された電子は

$$T = h\nu - I \quad (2.5)$$

で与えられるエネルギーをもつ。ここで、 I はイオン化に要するエネルギーで、原子番号 Z の原子の主量子数 n のエネルギー準位については

$$I \approx \frac{Z^2}{2n^2} \left(\frac{1}{137} \right) mc^2 \quad (2.6)$$

である。

光子のエネルギーとその光子が物質中で吸収される割合との関係は、図 2.13 のようになる。光子のエネルギーを 0 からどんどん上げていくと、そのエネルギーは最初は外殻の電子をより高い準位にあげるために使われるが、エネルギーが十分高くなつて M 殻 ($n=3$)、L 殻 ($n=2$)、K 殻 ($n=1$) などの電子の結合エネルギーに達すると光子は吸収されて、物質は電離される。

2. コンプトン散乱

光子のエネルギー $h\nu$ が電子の結合エネルギーより大きく、電子の質量エネルギー 511 keV よりずっと小さい時に光子が原子に当たつた場合、光子のエネルギーは変化せずに光子の進む方向が変わる。この散乱をトムソン散乱という。光子のエネルギーが電子の静止質量エネルギーに対し無視できなくなつくると、散乱によって光子と電子の間に、エネルギーのやりとりが起こる。これをコンプトン散乱とよぶ。散乱の角度 θ と散乱前後の振動数 ν_i 、 ν_s との関係は、エネルギーと運動の保存則から

$$\frac{1}{\nu_s} - \frac{1}{\nu_i} = \frac{h}{mc^2}(1 - \cos \theta) \quad (2.7)$$

である。電子 1 個あたり、偏りのない光子が角度 θ 方向の立体角 $d\Omega$ に散乱される断面積はクライン-仁科の式によつて

$$d\sigma = \frac{r_e^2 \nu_i^2}{2 \nu_s^2} \left(\frac{\nu_i}{\nu_s} + \frac{\nu_s}{\nu_i} - \sin^2 \theta \right) d\Omega \quad (2.8)$$

と与えられる。これを全散乱角について積分した全断面積は、 $h\nu \gg mc^2$ では

$$\sigma = \sigma_T \frac{3}{8} \frac{mc^2}{h\nu} \left[\log \frac{2h\nu}{mc^2} + \frac{1}{2} \right] \quad (2.9)$$

となる。

3. 電子陽電子対生成

光子のエネルギーが電子の静止質量エネルギーの 2 倍以上になると、電子と陽電子がペアで生成される現象がある。これを電子-陽電子対生成といつ。電子対ができる様子を図に示す。この図では、負のエネルギー状態にぎっしり詰まつてゐた電子の 1 個が $2mc^2$ 以上のエネルギーの光子を吸収して正のエネルギー状態に移り、抜けたあと負状態 1 個の正孔ができる。これが陽電子にみえるといつ形であらわしている。

[11][12]

(この章全体にわたつて [2][6][5] [8][10][13])

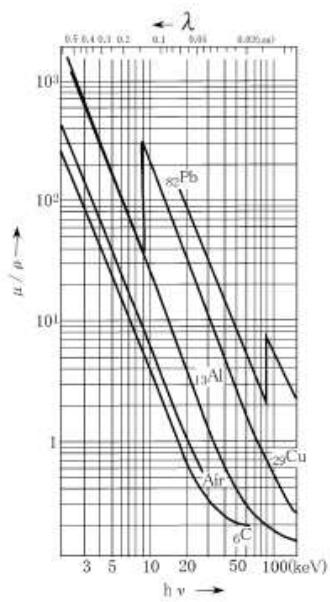


図 2.13: それぞれの物質の波長と吸収の関係。横軸エネルギー、縦軸吸収係数

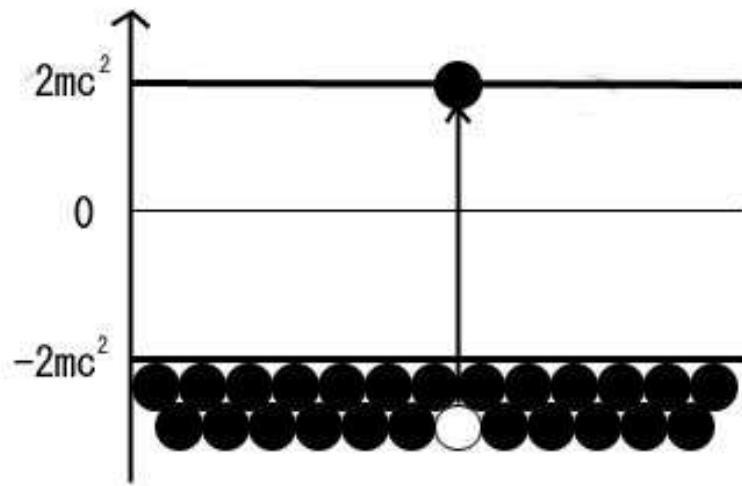


図 2.14: $2mc^2$ 以上のエネルギーを持ったガンマ線が負エネルギー状態にぎっしり詰まっている電子を正エネルギーまでたたき出し、陰陽 1 対の電子ができる様子

第3章 応答関数の高エネルギー帯域への拡張

3.1 Mask weighted 法の弱点

Mask weighted 法によるスペクトル取得は 2.2.1 で説明したがこの方法には大きな欠点がある。それは 150 keV 以上の光子が入射するとマスクの鉛タイルを透過してしまうため、検出器上のマスクによる ON/OFF の差がなくなり、GRB 光子も差し引かれてしまう。検出器は 350 keV までの光子のエネルギーを計測できるので、この高エネルギー帯域の光子情報を活かせるようになれば、Swift 衛星で観測される GRB の E_{peak} がより多く決まるようになるなど、GRB の物理を解くうえで重要な情報を引出しやすくなると期待されている。

3.2 Mask weighted 法を用いないスペクトル取得と応答関数

BAT で取得している 150keV 以上のデータを利用してスペクトルを得るために、Coded Mask を利用して行なっていたバックグラウンドを引く作業を別の方法で実現しなければならない。もっとも一般的で簡単な方法は GRB などのイベントがある前と後の時間帯のデータをイベント中のデータから引くというものである。そこでこのイベント前後のデータをバックグラウンドとして取り除き、そのデータを使って SwiMM を用いたモンテカルロシミュレーションで求めた検出器の応答関数によるスペクトルを導出することにした。

3.3 SwiMM の mass model と $\mu\tau$ モデルの改良

現在提供されている DRM は、地上実験と地上実験を模した数値モデルを比較することで求めた $\mu\tau$ を使っている。 $\mu\tau$ はコンプトン散乱と似たふるまいをするので、この区別が難しい。実際、当初用いていた、応答関数をシミュレーションによって作製するための Detector Response Matrix(DRM) では、軌道上で得られた 80 keV 以上の応答関数に不定性が残っていた。この結果システムティックエラーが 80 keV 以上において 4% 以上ついてしまい、取得したスペクトルの E_{peak} やが判定しにくくなっていた。

この状況を受けてまず、地上実験で用いた数値モデルのジオメトリを見なおした。すなわち、地上キャリブレーションの際に無視していた線源のタブレットのプラスチックについて再評価する。また同時に実験に使用していたプラスチック製の定規も加え、これらの光子の散乱を計算に加えることにした。結果、およそ 120keV 以下のスペクトルにコンプトン散乱の影響が予想された。

従来のモデルでは、これらのプラスチックによる散乱を無視していたので実験で得られた 120 keV 以下のデータをほとんど $(\mu\tau)_h$ の小ささによるものと過小評価していた可能性が示唆されることになる。そこで地上実験で得られたスペクトルを説明できる範囲で $\mu\tau$ をパラメータとして変化させ、軌道上で得られた標準光源天体である「かに星雲」のスペクトルを使って評価する。

具体的には以下である。これまでの $(\mu\tau)_h$ の値に 1.0 から 2.5 まで掛けた値で新たな $(\mu\tau)_h$ を SwiMM に適用して応答関数をそれぞれ作成し、これまで観測されたデータの中からかに星雲を観測したデータでスペクトルを作り、それに作成した応答関数による power law モデルをフィット

する。かに星雲の 1 keV における単位時間、あたりの光子数は 10.0[counts/sec/keV]、光子指数は 2.15 であることされているので、そのパラメータをあてはめたときのモデルでフィットしたときに、どの応答関数によるモデルがいちばんかに星雲のデータをよく合うがどうか調査した。その結果得られた 1.8 という定数を $\mu\tau$ に掛けてそれを用いてシミュレーションし、スペクトルを求めたところ、ほぼ完璧にキャリブレーションで得られたスペクトルと一致した。またこの修正をおこなうことで、各入射角にわたって補整を必要とせずスペクトルを再現できることがわかった。今後のエネルギー帯域の拡張の試みでは、ここで再評価された $\mu\tau$ を使用することにする。

第4章 シミュレーション時のパラメーターの最適化

4.1 光子生成領域

SwiMMにおいて、シミュレーションをおこなうとき、”photon generator”で光子を生成する領域の面積を指定する。さまざまなジオメトリのシミュレーションにおいて、各々の想定する光子を照射領域を設定することができる。今回は衛星に GRB からの光子が衛星全体に照射されたとき直接検出器にあたる光子だけでなく、まわりの物質に当って散乱された光子が検出器にあたることも考慮にいれて、どれだけの生成面積があれば充分か、逆に衛星からどれだけの離れた位置からだと光子を生成しても衛星のどこにも当らなくなってしまうのかを調べた。

方法としては、光子生成領域を通常の正方形ではなく、その真中をくりぬいた、いわば枠型の領域で光子を単位面積あたりの個数と同じにして生成する。その枠の中心を BAT の中心(座標中心)と同じにし、幅 10cm の枠を一辺 20cm ずつ大きくしていって、検出光子を積分して、光子の増加の割り合いを調べた。実際にはあらゆる場所で GRB は発生するので、*Swift* 衛星の直上からだけでなく、さまざまな方向から光子が照射されることになる。そこで光子の照射方向を BAT の座標系から見ていくつか角度を変えて、上記の実験を行なった。角度を変えることで Coded Mask や衛星本体によって散乱される光子の成分が変化すると考えられるからである。

図 4.2 は横軸が光子生成領域の枠の中心からの距離、縦軸は BAT 全体の検出光子数を 100%としたときの光子数である。生成領域枠から直接光子が検出器に当るのは図 4.3、4.4 のとおり中心から 55cm 程度までである。その部分と図 4.2 の折れ曲がりが一致している。よってそれ以上の光子は散乱成分が主である。照射方向が $\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$ から大きくずれるほど。散乱成分による検出光子の割合の増加する。図 4.2 から、シミュレーションを行なうときは光子生成領域を一辺 300cm 程度にすると、角度によらず検出器に入る直入射、散乱光子をほぼすべて再現できることがわかった。光子生成のこの領域におさめることで、計算時間の短縮につながると結論できる。

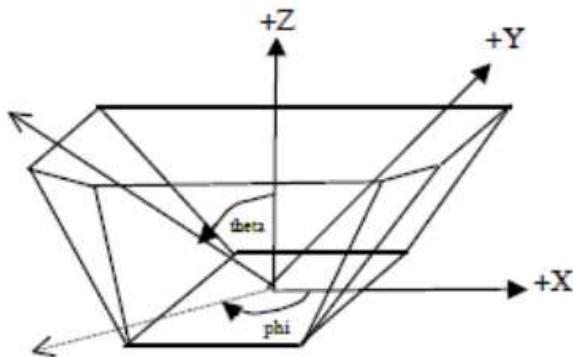


図 4.1: シミュレーションにもちいる BAT の座標系。Y 軸から上下方向に theta、X 軸から時計まわりに phi と定義

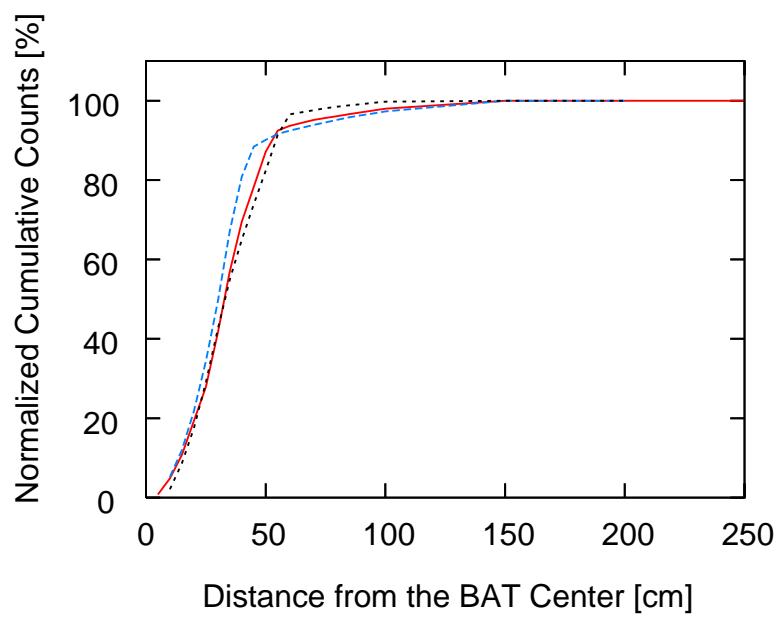


図 4.2: 幅 5cm の光子生成領域の”枠”から生成された光子を検出器がカウントする。“枠”を中心から 5cm ずつ大きくしていき、それまでのカウントの積分値を求める。横軸は”枠”的外辺から中心までの距離で、縦軸はカウントの上昇が止まったところを 100%としたときのカウントの割合。黒線が直上 ($\theta=0^\circ \phi=0^\circ$) から、赤線が $\theta=30^\circ \phi=270^\circ$ から、青線が $\theta=45^\circ \phi=0^\circ$ から光子を生成させたときのプロット

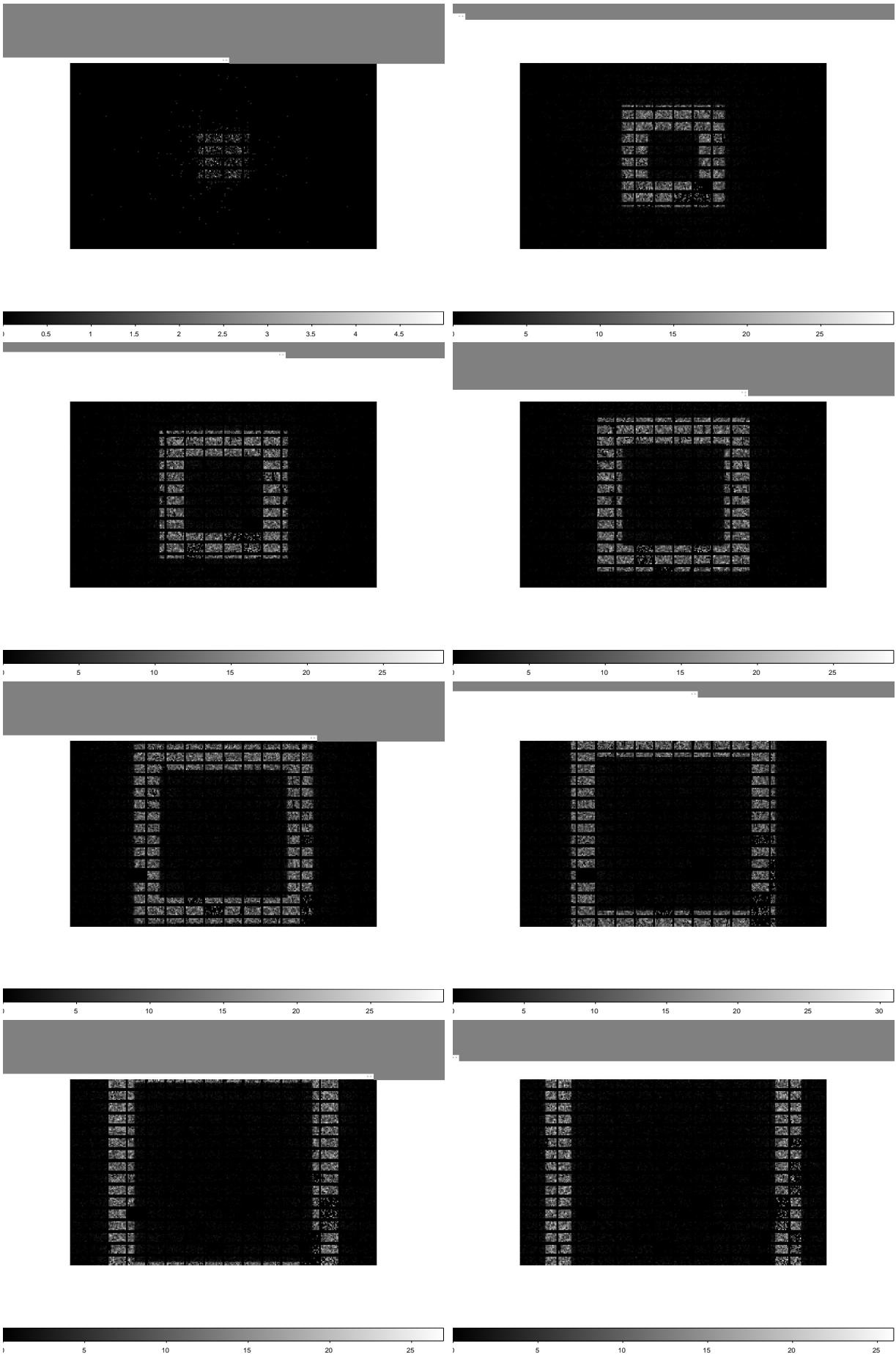


図 4.3: 検出器に光子が照射されたときの画像。左上の図から幅 10cm の光子生成領域の”枠”を中心から 5cm づつ大きくしている。白い部分は”枠”から直射した部分

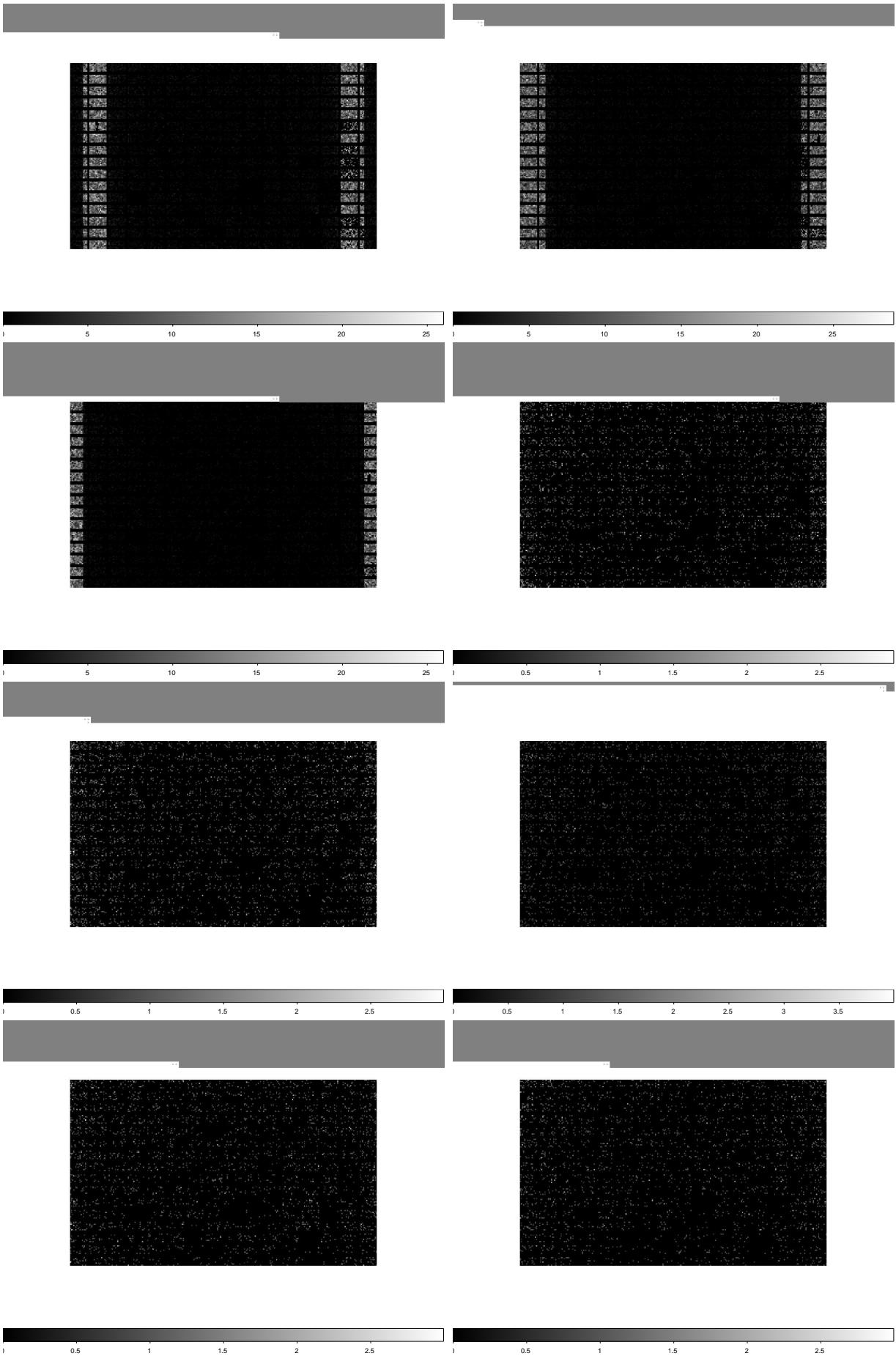


図 4.4: 検出器に光子が照射されたときの画像。左上の図は中心から 45cm(外辺) の枠。そこから 5cm づつ大きくする。中心から外辺 60cm のところで、直入射¹⁰防がなくなった。

4.2 生成光子のエネルギー帯域

この論文では 30 keV から 350 keV の応答関数の構築を目的としている。シミュレーションを行うときにそのエネルギー帯域の光子を生成することが必要なのは言うまでもないが、その帯域以上のエネルギーを持つ光子が衛星や検出器に照射されたときもコンプトン散乱によってエネルギーを失い、再び検出器に作用して 30–350 keV の応答関数に影響するようになる。しかし照射された光子の持っているエネルギーが高すぎると物質と相互作用してエネルギーを失ってもまだ十分な透過力持っているので 30–350 keV の応答関数には影響しない。そこで、シミュレーションを行なうときに生成する光子のエネルギー帯域はどこまで高い値まで必要かを調査した。

調査方法として、下限値を 15 keV とし、上限を 400 keV, 500 keV... と 100 keV おきに 1 meV まで、それから 1 MeV, 2 MeV, 3 MeV までとし、それぞれのエネルギー帯域の応答関数をシミュレーションで作成した。その際、まずは、光子が散乱される割合が小さい場合を考えるために、入射角が直上 ($\theta = 0^\circ \phi = 0^\circ$) から傾きが小さい GRB 060813 の BAT 検出時の入射角を用い、生成する光子のエネルギーのスペクトルは power law で、べきを 0.0 とした。

次に、シミュレーションででき上がった 15 keV–3 MeV の光子情報と応答関数ファイル、実際に GRB 060813 で取得したバックグラウンドデータを用いて、べき 1.0 の power law、flux $5.5 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}^2$ 、継続時間 10 秒の光子データを擬似的に作成した。これまでさまざまな衛星で観測した GRB のスペクトルは power law か、 E_{peak} をもつものかである。これまで観測された power law のスペクトルをもつ GRB でハードなものは、光子指数 1.0 ほどである（検出器の検出限界もあるので、更に高エネルギー側では E_{peak} が存在するのかもしれない）。最近の GRB で E_{peak} をもつスペクトルのハードなものは、 α が 1.04、 E_{peak} が 2.4 MeV である [36]。これらより、今回の擬似イベントデータの光子指数も 1.0 にしておくことで、実際に起こりうる高エネルギー側の光子の影響を十分考慮にいれた。この擬似光子データとエネルギー上限を下げてシミュレーションで作成した 9 個の応答関数を使って、べき 1.0 の power law をモデルフィットしたとき、そのモデルの光子指数がどのような値になるか、更にはどこまでエネルギー帯域の小さい応答関数を適用すると、光子指数が 1.0 から明らかに解離してしまうか調べた。

その結果、700 keV 以下の光子だと 350 keV 以下のスペクトルに影響を及ぼしていることがわかった。15 keV–700 keV 以上のエネルギーをもつ光子でできた応答関数を用いて擬似データにモデルフィットした時の光子指数のエラーを含んだ値は、ほぼ一定であったが、15 keV–600 keV 以下の応答関数を用いてモデルフィットした際はそれまでの光子指数の値とは明らかな差がみられ、700 keV から 600 keV になるところでモデルフィット時の光子指数のエラーを含んだ値が 10% 以上急激に小さくなつた。（図 4.5）。これは高エネルギーの光子をより多く含むスペクトルに低エネルギーの光子のみで生成された応答関数を合わせるとき、応答関数はハードになる、つまり光子指数を小さくしないといけなくなるからである。

視覚的に確認するため、それぞれのエネルギー帯域のシミュレーションで作成したデータで 15 keV–3 MeV のようにすべて擬似イベントデータを作り、各々の応答関数を適用し、モデルフィットした。そのプロット一覧が図 4.6、4.7、4.8 である。高エネルギー側のノーマリゼーションが 0.7 keV と 0.6 keV を境に急激に小さくなっているのがわかる。これは高エネルギーの光子が少なくなったおかげで、散乱されてエネルギーを失い、スペクトルに影響する光子のカウントも少なくなったためである。高エネルギー光子の散乱後の光子は、スペクトルの低エネルギー側にはほとんど影響しないが、高エネルギー側ほど影響が大きいので右側にいくほど、急激に落ち込む。

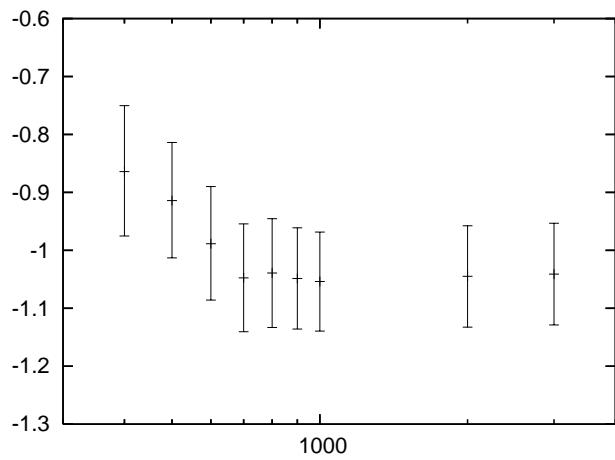


図 4.5: 応答関数を作成する時に生成した光子のエネルギー帯域と、それぞれをモデルフィットしたときの光子指数の値。光子指数の値は 1σ の誤差をつけた時の最大値と最小値である。

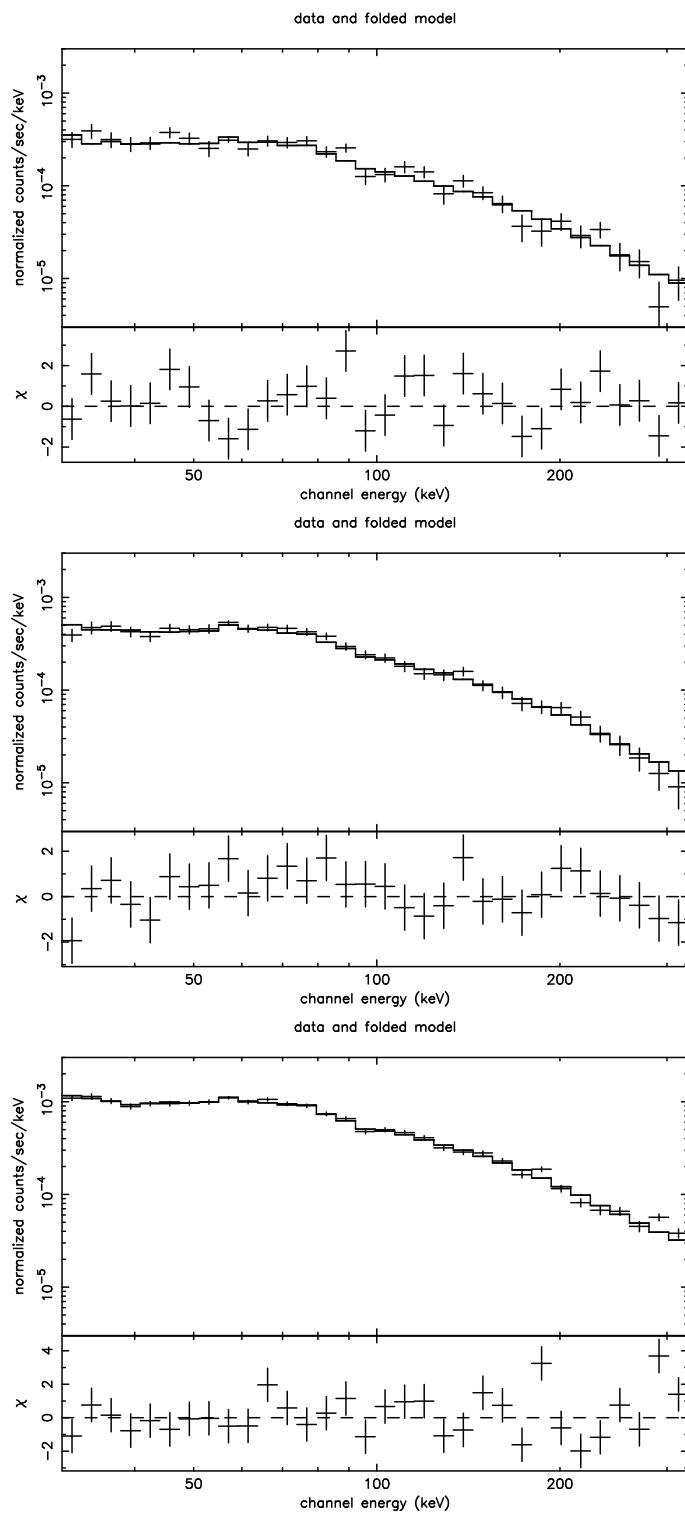


図 4.6: 上から 3 MeV, 2 MeV, 1 MeV の擬似データとモデルフィット

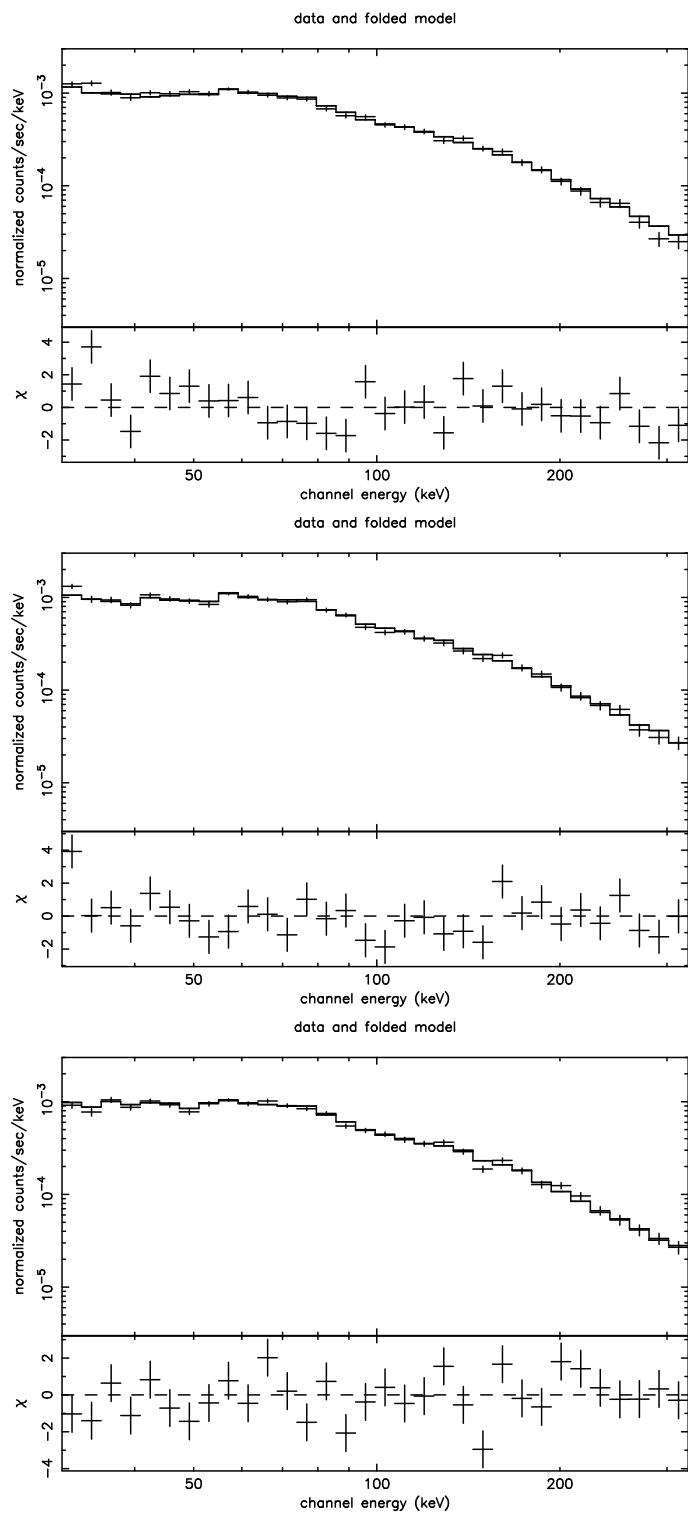


図 4.7: 上から 900 keV, 800 keV, 700 keV の擬似データとモデルフィット

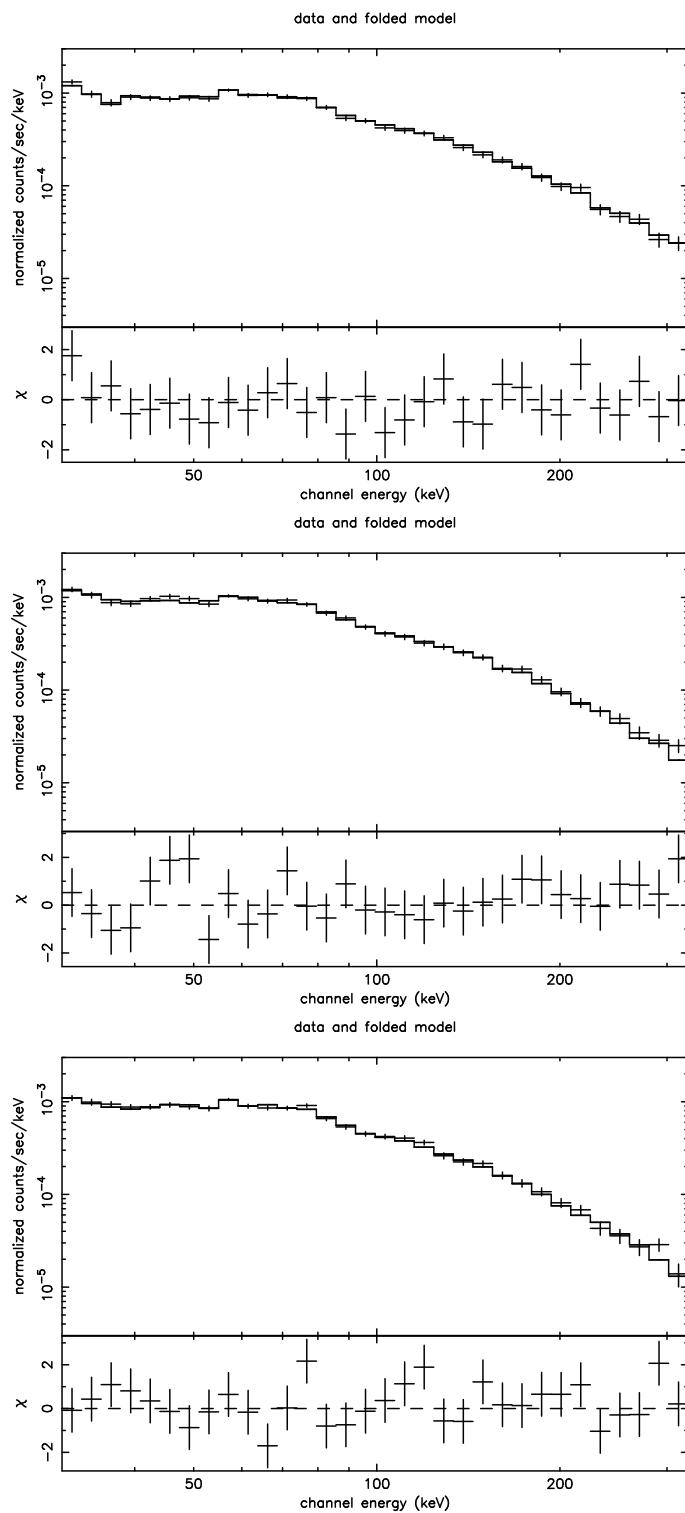


図 4.8: 上から 500 keV, 400 keV, 300 keV の擬似データとモデルフィット

4.3 まとめ

シミュレーション時に適用するパラメータの最適化をおこなった。衛星全体にまんべんな照射され、かつ、どこにも当たらない無駄な光子を大量に生成しないための光子の生成領域の最適な大きさを調査した。その結果、mask の 5m 上方の場合、一辺が 300cm の正方形から光子をふらせたらよいということがわかった。また、350 keV までのスペクトルを作成するための応答関数を構築するとき、どこまで高エネルギーの光子がスペクトルに影響するかを調べた結果、700 keV 以上の光子は、350 keV までのスペクトルには影響を無視しても問題ないということがわかった。よって、シミュレーションで応答関数を構築するときは、最低でも 700 keV までの光子を生成しなくてはいけないということである。

第5章 他衛星のデータを用いた相互較正実験

BATにおいて新しいシミュレーションによる応答関数を用いたスペクトルが正しい振る舞いをしているかどうか確認するため、Swift以外のGRBを観測している衛星で得られたスペクトルと比較する。特に、今回新しく拡張した高エネルギー領域のスペクトルの比較に適した広帯域を観測するすぐ衛星搭載WAM検出器と、Wind衛星搭載のKonus検出器のスペクトルを使った。

5.1 GRBを観測する衛星

5.1.1 すぐ WAM 検出器

2005年7月に打ち上がったすぐ衛星に搭載された硬X線検出器(HXD)の四方を取り囲むアクティブシールドの外周結晶はWide-band All-sky Monitor(WAM) [32][33][34]として全天モニターを行なっている。WAMはBGO結晶であり、4面それぞれが独立に作動している。BGO結晶は有効原子番号や比重が他の無機シンチレーターに比べて高く、阻止能が高いのが特徴である。エネルギー帯域は50 keV – 5 MeVの広帯域で、かつ、100 keVにおいて 800cm^2 もの大有効面積を誇る。

WAMのデータにはTRNデータとGRBデータの2つの種類がある。普段は時間分解能1秒、エネルギーチャンネル55chのTRNデータで全天をモニターしていて、GRBなどの突発天体のトリガがかかったときにGRBモードに切り替わり、エネルギーチャンネル4ch、1/64秒という高時間分解能での光度曲線データも取得できる。

すぐ衛星が取得したデータは1日に5回の地上との交信のときにのみ受け取ることができるので、SwiftやHETEのようにGRBの直後に速報を送ることはできない。しかし、次に紹介するKonus/WINDや他の太陽系内を回っている複数の衛星と連携し、衛星間のトリガ時間の差からGRBの位置を決定するIPN(Interplanetary Gamma-Ray Burst Timing Network)[16]に参加している。

他にもWAMは荷電粒子モニタを行なうことで、検出器の劣化を防ぐため、荷電粒子帯などによるカウントレートの急激な上昇を検知し検出器の高圧電源の供給をとめる機能ための信号を出す機能がある。

5.1.2 Konus/Wind

1994年に打ち上がったWIND衛星は主に太陽風の研究のための衛星で衛星自身が20秒周期で自転している。Konus検出器はロシアが開発した検出器をアメリカの衛星に載せるといった形で冷戦終結以来初めて米露共同開発を行なった検出器である。Konus[15]は2つのセンサーで構成されていて、衛星の上部と下部に回転軸に沿って設置されている。2つのセンサーは等方角で感度を持つので、2つのセンサーの相対的なカウントレートで回転軸から数度以内であれば検出天体の位置決定ができる。センサー部はソビエト時代に運用に成功しているCOSMOS、VENERA、MIRといったミッションで使われたもののコピーである。KonusではNaIシンチレーター検出器となり、 200cm^2 の面積をもち、シールド部は鉛とすずである。

この検出器は GRB、Soft Gamma-ray Repeaters (SGRs)、太陽フレア、その他のトランジエント天体を 10keV – 10MeV までの超広帯域で継続してモニターしている。エネルギー分解能は 200keVにおいて 15eV である。時間分解能は通常は 64msec. であるが、特に明るく輝いた天体を検出したときには 2msec. の高時間分解能で観測する。

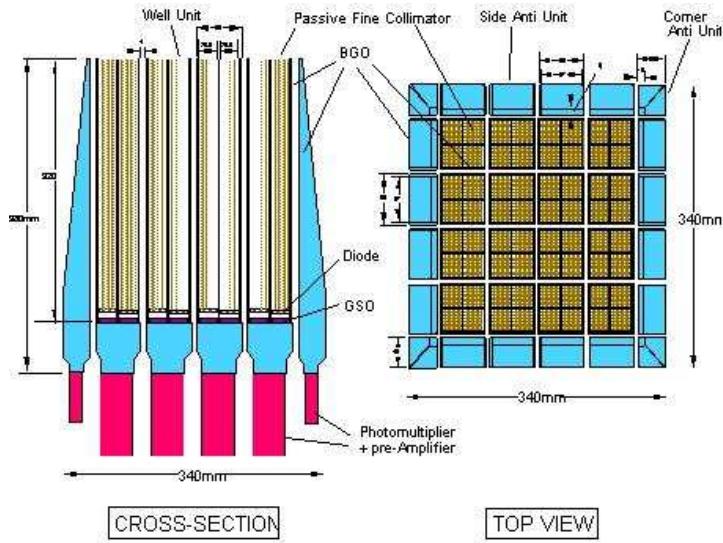


図 5.1: HXD 検出器を取り囲む WAM 検出器(青色部)



図 5.2: Wind 衛星

5.2 BAT,konus,WAN 相互較正

新しい応答関数によるスペクトルが正しいふるまいをしているかどうかを調べた。前述の WAM 検出器、Konus 検出器、そして BAT で同時観測し、かつ明るかった、GRB 051008、GRB 051221A、GRB 060117、GRB 060502A、GRB 060813、GRB 060814 の 6 つの GRB についてそれぞれの検出器で得られたスペクトルを比較し、さらに各々のスペクトルを一緒に表示して同じパラメータで同時フィッティングを行なった。その結果で、統計的にどれだけフィッティング結果が一致しているかどうかを確かめた。ちなみに、新スペクトルに用いた応答関数はシミュレーション時に生成した光子の数が十分ではなく、統計的なばらつきが無視できないため、5%の系統誤差を含んでいる。

以下がフィッティングに用いたモデルである。

- Powerlaw

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\Gamma} \quad (5.1)$$

- Cutoff powerlaw

$$\frac{dN}{dE} \propto E^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_{\text{cut}}}\right) \quad (5.2)$$

- Band function (grbm) (2.3.1 参照)

$$\frac{dN}{dE} \propto \begin{cases} E^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_{\text{cut}}}\right) & \text{for } E < (\alpha - \beta)E_{\text{cut}} \\ E^\beta & \text{for } E > (\alpha - \beta)E_{\text{cut}} \end{cases} \quad (5.3)$$

ここで、上式の E_{cut} は、縦軸が F_ν の次元でのスペクトルの折れ曲がりを表わしている。 E_{peak} は νF_ν の次元でのスペクトルでは、ピークエネルギーを指すので $E_{\text{peak}} = (2 - \alpha)E_{\text{cut}}$ である。

5.2.1 GRB 051221A

このイベントではどの検出器でも観測できる領域に E_{peak} があるので、単体のスペクトル同士でもパラメータにはらつきはなく Band function でフィッティングした場合によく合っていて、一致した結果をみている。同時フィッティングにおいても同様に、Band function で特に一致している。(KW : Konus/Wind)

表 5.1: GRB 051221A のスペクトル解析 パラメータ一覧

Detector	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
BAT	PL	$-1.44^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	36.9/29=1.27
	CPL	—	$-1.02^{+0.17}_{-0.18}$	—	$290.4^{+203.2}_{-92.5}$	17.4/28=0.62
	Band	—	$-1.01^{+0.17}_{-0.39}$	$-1.62 >$	$292.1^{+204.7}_{-105.4}$	17.4/27=0.65
KW	PL	$-1.41^{+0.07}_{-0.07}$	—	—	—	67.7/56=1.21
	CPL	—	$-1.13^{+0.16}_{-0.14}$	—	$452.9^{+378.2}_{-166.0}$	51.0/55=0.92
	Band	—	$-0.75^{+0.68}_{-0.39}$	$-1.84^{+0.14}_{-0.38}$	$202.4^{+207.4}_{-89.0}$	42/42=1.00
BAT & KW	PL	$-1.49^{+0.03}_{-0.03}$	—	—	—	128.9/88=1.46
	CPL	—	$-1.11^{+0.12}_{-0.11}$	—	$361.3^{+181.5}_{-102.5}$	71.5/86=0.83
	Band	—	$-0.92^{+0.28}_{-0.21}$	$-1.92^{+0.17}_{-0.52}$	$237.6^{+214.1}_{-103.9}$	68.9/86=0.80
BAT & KW &WAM	PL	$-1.45^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	141.5/106=1.33
	CPL	—	$-1.11^{+0.10}_{-0.10}$	—	$356.9^{+142.0}_{-86.9}$	90.8/106=0.86
	Band	—	$-0.91^{+0.27}_{-0.19}$	$-1.94^{+0.20}_{-0.49}$	$237.9^{+198.0}_{-99.5}$	87.2/105=0.83

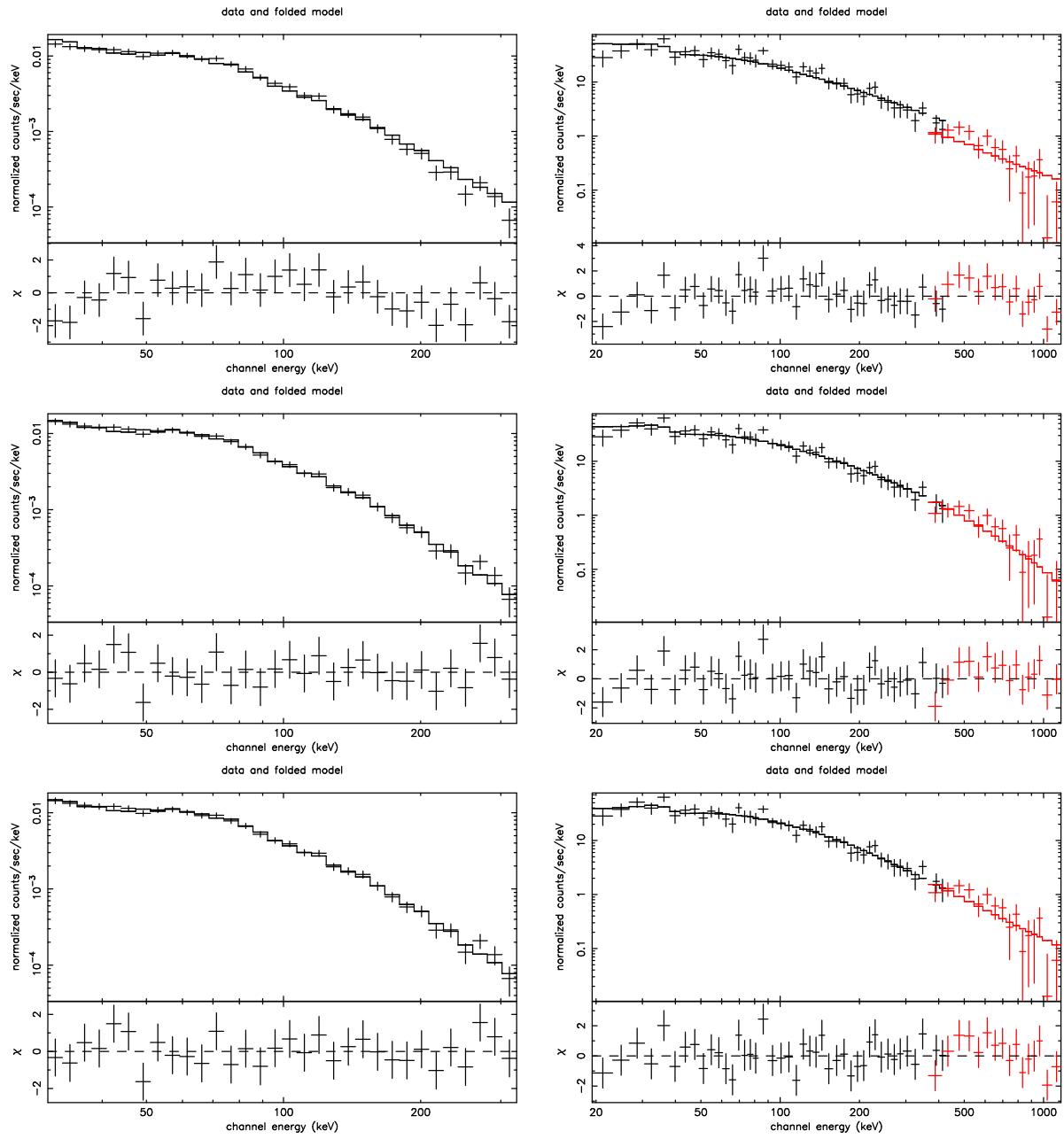


図 5.3: BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット

図 5.4: Konus のスペクトルとモデルプロット：上
ロット：上から power law、cutoff power law、から power law、cutoff power law、band function
band function

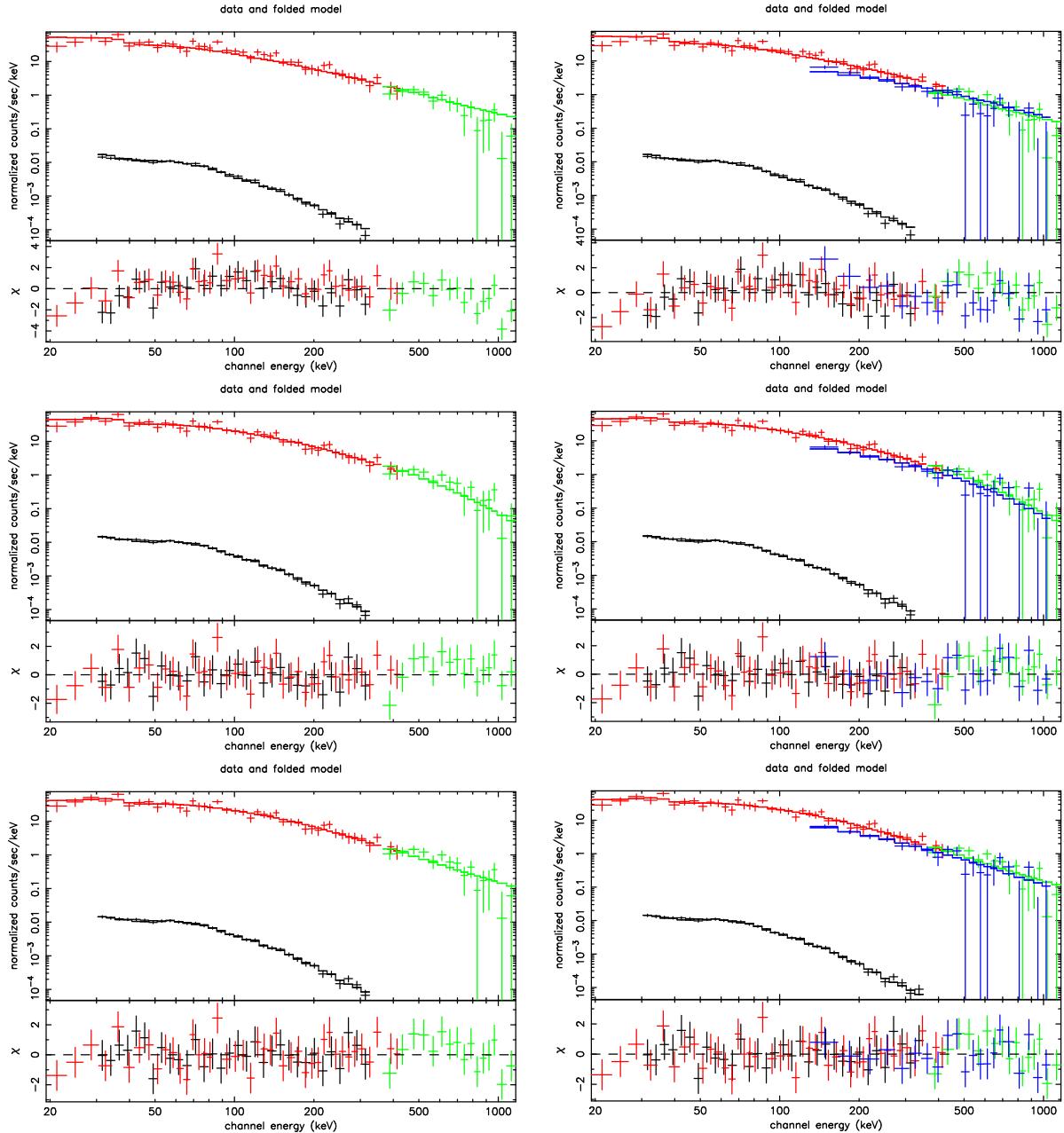


図 5.5: BAT -350keV & konus のスペクトルとモデルプロット：上から power law、cutoff power law、band function

図 5.6: BAT -350keV & konus & WAM のスペクトルとモデルプロット：上から power law、cutoff power law、band function

5.2.2 GRB 060117

GRB 051221A と同様に、低エネルギー側に E_{peak} があることにより単体スペクトルでの比較、BAT-Konus 同時フィッティング、どちらの結果も cutoff power law で一致した結果がえられた。このイベントは高エネルギー側の放射が少ないとみためか、統計が悪く、BAT-Konus-WAM の同時フィットではやや不定性がある。

表 5.2: GRB 060117 のスペクトル解析 パラメータ一覧

Detector	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
BAT	PL	$-2.16^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	48.1/29=1.66
	CPL	—	$-1.81^{+0.15}_{-0.15}$	—	$57.2^{+30.4}_{-13.4}$	29.9/28=1.07
	Band	—	$-0.86 <$	$-2.28^{+0.06}_{-0.06}$	$35.3^{+73.9}_{-11.2}$	51.8/53=0.98
KW	PL	-1.99^{+}_{-}	—	—	—	107.1/47=2.28
	CPL	—	$-1.52^{+0.13}_{-0.12}$	—	$96.3^{+35.9}_{-22.1}$	56.4/46=1.23
	Band	—	$-1.51^{+0.16}_{-0.14}$	$-2.47 >$	$93.7^{+47.1}_{-27.4}$	56.7/45=1.26
BAT & KW	PL	-2.09^{+}_{-}	—	—	—	191.8/79=2.43
	CPL	—	$-1.63^{+0.10}_{-0.09}$	—	$81.2^{+22.0}_{-15.2}$	114.9/89=1.29
	Band	—	$-1.57^{+0.22}_{-0.12}$	$-2.41 >$	$79.6^{+28.5}_{-30.8}$	101.5/77=1.32
BAT & KW & WAM	PL	-2.09^{+}_{-}	—	—	—	222.7/100=2.22
	CPL	—	$-1.76^{+0.08}_{-0.08}$	—	$81.0^{+24.3}_{-15.9}$	150.1/99=1.52
	Band	—	$-1.45^{+0.24}_{-0.19}$	$-2.35^{+0.08}_{-0.06}$	$123.4^{+85.9}_{-50.6}$	56.7/45=1.26

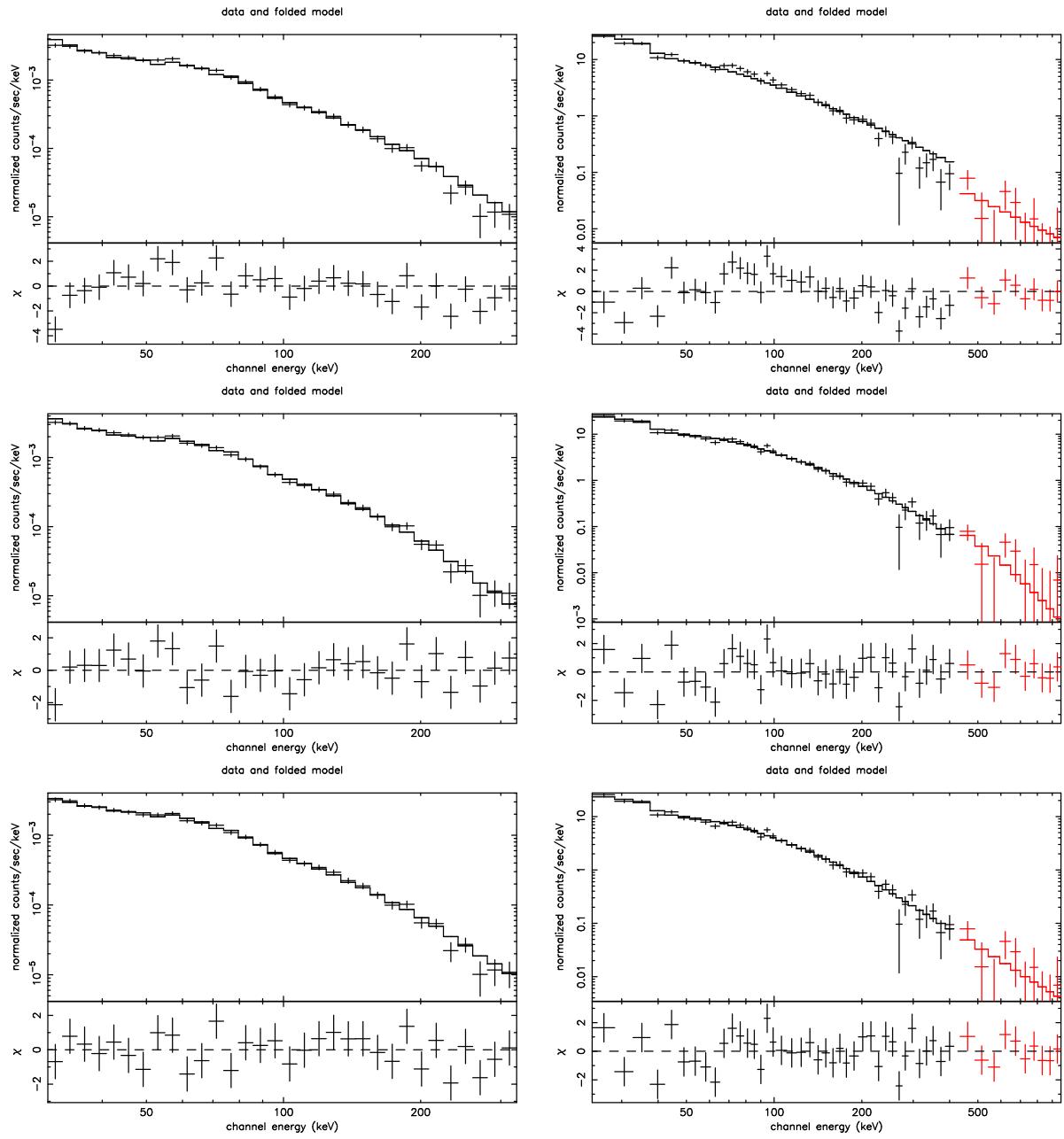


図 5.7: BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット : 上
ロット : 上から power law、 cutoff power law、 から power law、 cutoff power law、 band function
band function

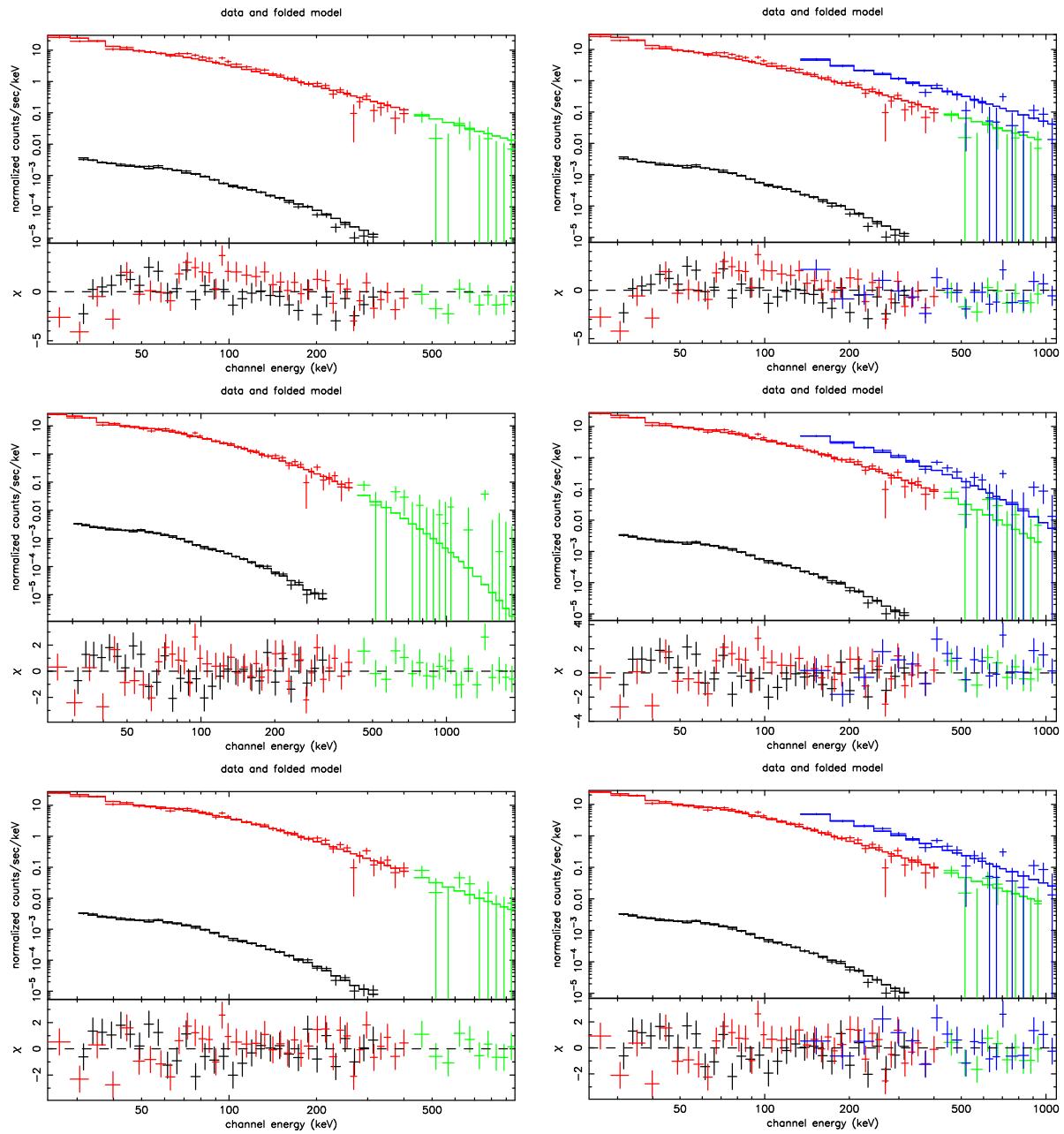


図 5.9: BAT -350keV & konus のスペクトルと
モデルプロット：上から power law、cutoff power
law、band function

図 5.10: BAT -350keV & konus & WAM の
スペクトルとモデルプロット：上から power law、
cutoff power law、band function

5.2.3 GRB 060502a

特に cutoff power lawにおいてすべてのパラメータで一致した結果になっている。高エネルギー側の統計が悪いイベントなので Band function で β が決まらないのはやむを得ない。

表 5.3: GRB 060502A のスペクトル解析 パラメータ一覧

Detector	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
BAT	PL	$-1.71^{+0.07}_{-0.06}$	—	—	—	51.9/29=1.79
	CPL	—	$-0.91^{+0.30}_{-0.34}$	—	$132.7^{+85.9}_{-42.6}$	25.7/28=0.92
	Band	—	$-0.75^{+0.39}_{-0.52}$	$-1.96 >$	$120.5^{+121.4}_{-97.4}$	25.4/27=0.94
KW	PL	$-1.68^{+0.11}_{-0.11}$	—	—	—	66.9/55=1.22
	CPL	—	$-1.04^{+0.35}_{-0.42}$	—	$138.2^{+59.6}_{-31.1})$	56.4/46=1.23
	Band	—	$-0.91^{+1.89}_{-0.56}$	$-1.75 >$	$117.2^{+40.2}_{-92.2}$	59.1/53=1.15
BAT & KW	PL	$-1.73^{+0.05}_{-0.05}$	—	—	—	130.2/88=1.48
	CPL	—	$-0.96^{+0.23}_{-0.26}$	—	$138.1^{+67.5}_{-35.6}$	86.3/86=1.00
	Band	—	$-0.95^{+0.30}_{-0.23}$	$-2.19 >$	$136.0^{+68.1}_{-66.0}$	87.2/86=1.01
BAT & KW &WAM	PL	$-1.75^{+0.05}_{-0.05}$	—	—	—	157.7/111=1.42
	CPL	—	$-0.89^{+0.26}_{-0.23}$	—	$125.1^{+49.1}_{-31.2}$	114.1/110=1.03
	Band	—	$-0.71^{+0.40}_{-0.30}$	$-2.29 >$	$113.0^{+56.0}_{-38.8}$	113.7/110=1.03

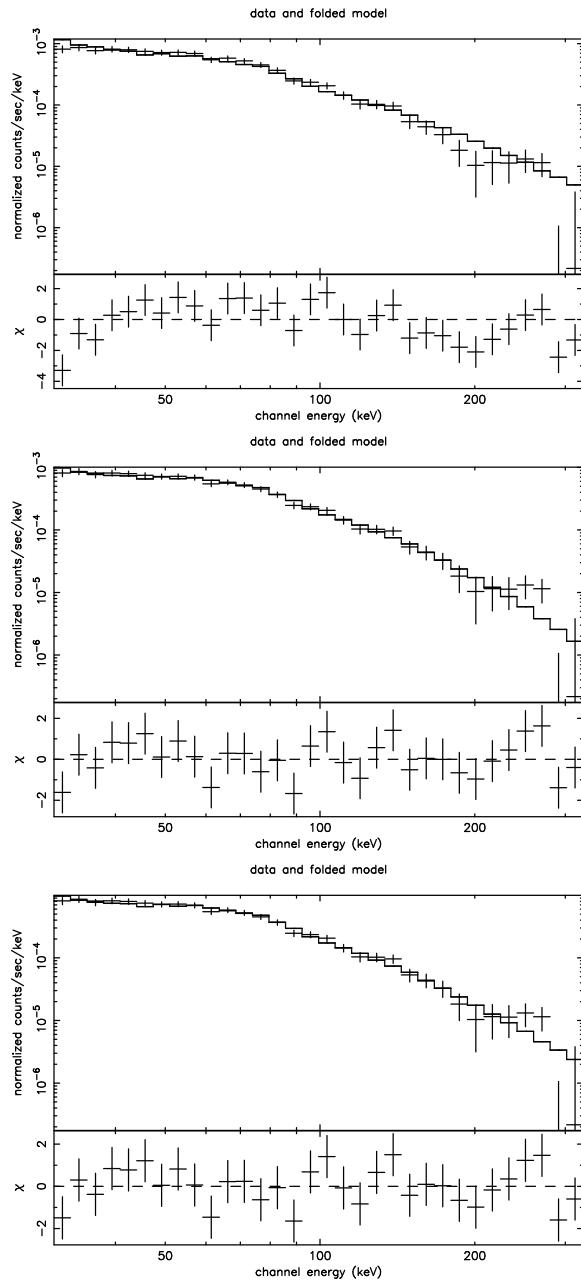


図 5.11: BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット
ロット : 上から power law、 cutoff power law、 上から power law、 cutoff power law、 band function
band function

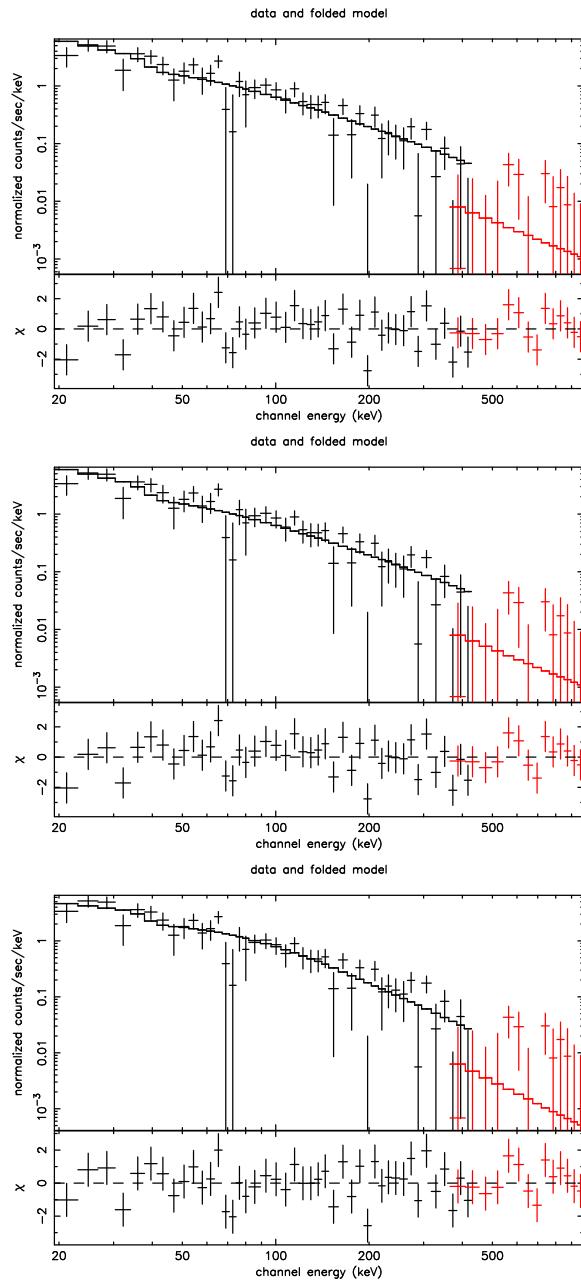


図 5.12: konus のスペクトルとモデルプロット :
ロット : 上から power law、 cutoff power law、 band function
band function

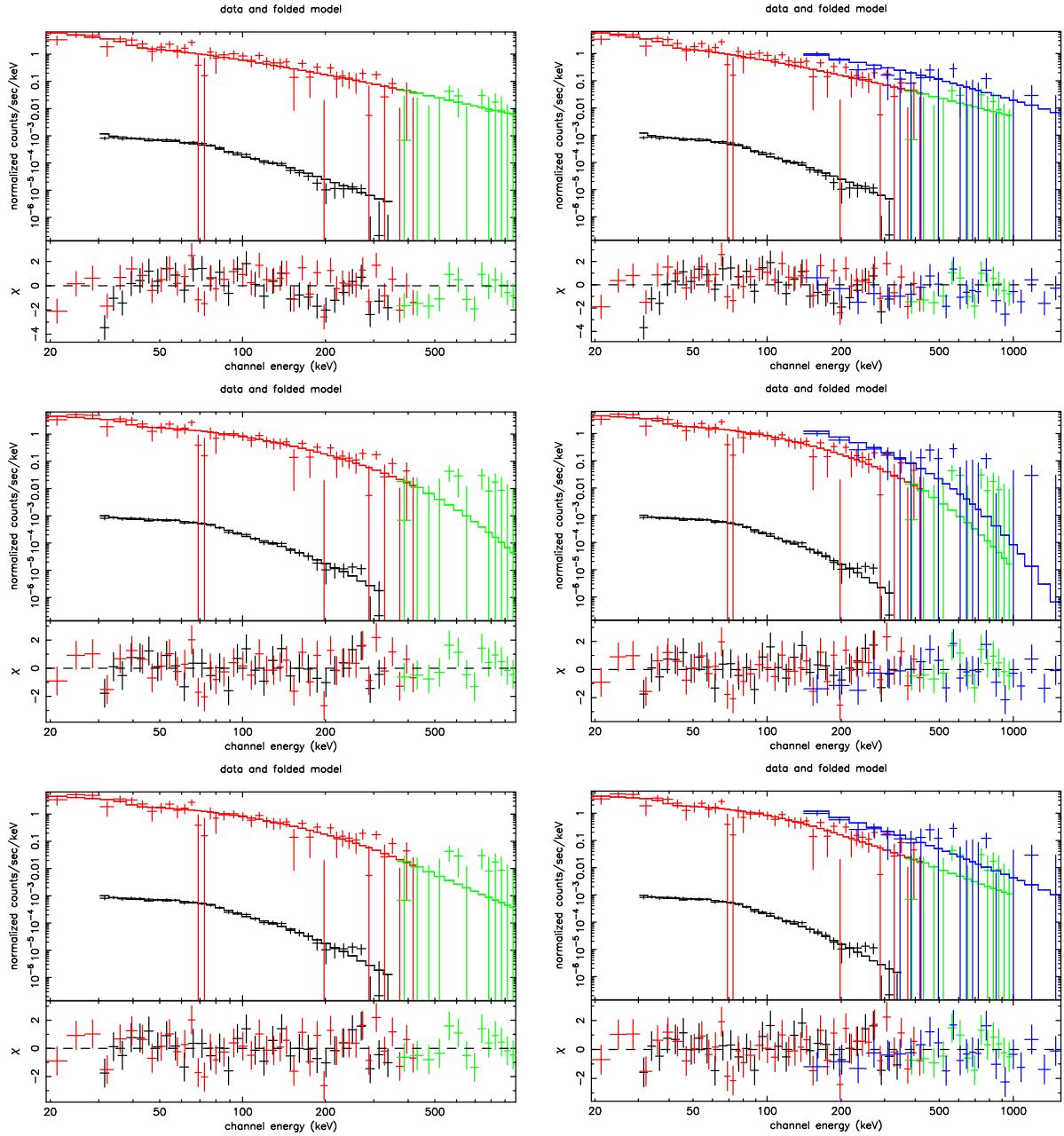


図 5.13: BAT -350keV & konus のスペクトルと
モデルプロット: 上から power law、cutoff power

図 5.14: BAT -350keV & konus & WAM のス
ペクトルとモデルプロット: 上から power law、
cutoff power law、band function

5.2.4 GRB 060813

どれも、折れ曲がりをもつ典型的なスペクトルであるといえる。BAT の 350keV までの帯域だけでは、 β をきっちり決めるにはいたらなかったが、Konus や同時フィッティングでは Band function で最もよく合い、パラメータも一致している。

表 5.4: GRB 060813 のスペクトル解析 パラメータ一覧

Detector	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
BAT	PL	-1.56 ⁺ ₋	—	—	—	147.6/30=4.92
	CPL	—	-0.85 ^{+0.12} _{-0.12}	—	209.3 ^{+45.9} _{-33.8}	27.4/29=0.95
	Band	—	-0.84 ^{+0.12} _{-0.13}	-2.06>	206.0 ^{+46.1} _{-33.5}	26.9/27=1.00
KW	PL	-3.13 ⁺ ₋	—	—	—	277.7/48=5.79
	CPL	—	-0.55 ^{+0.13} _{-0.12}	—	208.8 ^{+34.2} _{-27.7}	60.5/47=1.29
	Band	—	-0.54 ^{+0.15} _{-0.13}	-3.05 ^{+0.63} _{-1.60}	195.6 ^{+34.6} _{-33.1}	57.1/46=1.24
BAT & KW	PL	-1.57 ⁺ ₋	—	—	—	547.9/81=6.76
	CPL	—	-0.75 ^{+0.08} _{-0.08}	—	208.9 ^{+26.1} _{-22.3}	107.4/80=1.34
	Band	—	-0.66 ^{+0.12} _{-0.10}	-2.64 ^{+0.27} _{-0.52}	190.4 ^{+31.8} _{-28.7}	99.7/78=1.28
BAT & KW &WAM	PL	-1.59 ⁺ ₋	—	—	—	961.2/108=8.90
	CPL	—	-0.81 ^{+0.06} _{-0.07}	—	233.0 ^{+22.8} _{-20.3}	162.8/17.7=1.66
	Band	—	-0.75 ^{+0.09} _{-0.08}	-2.75 ^{+0.24} _{-0.57}	215.8 ^{+28.9} _{-26.1}	161.4/105=1.54

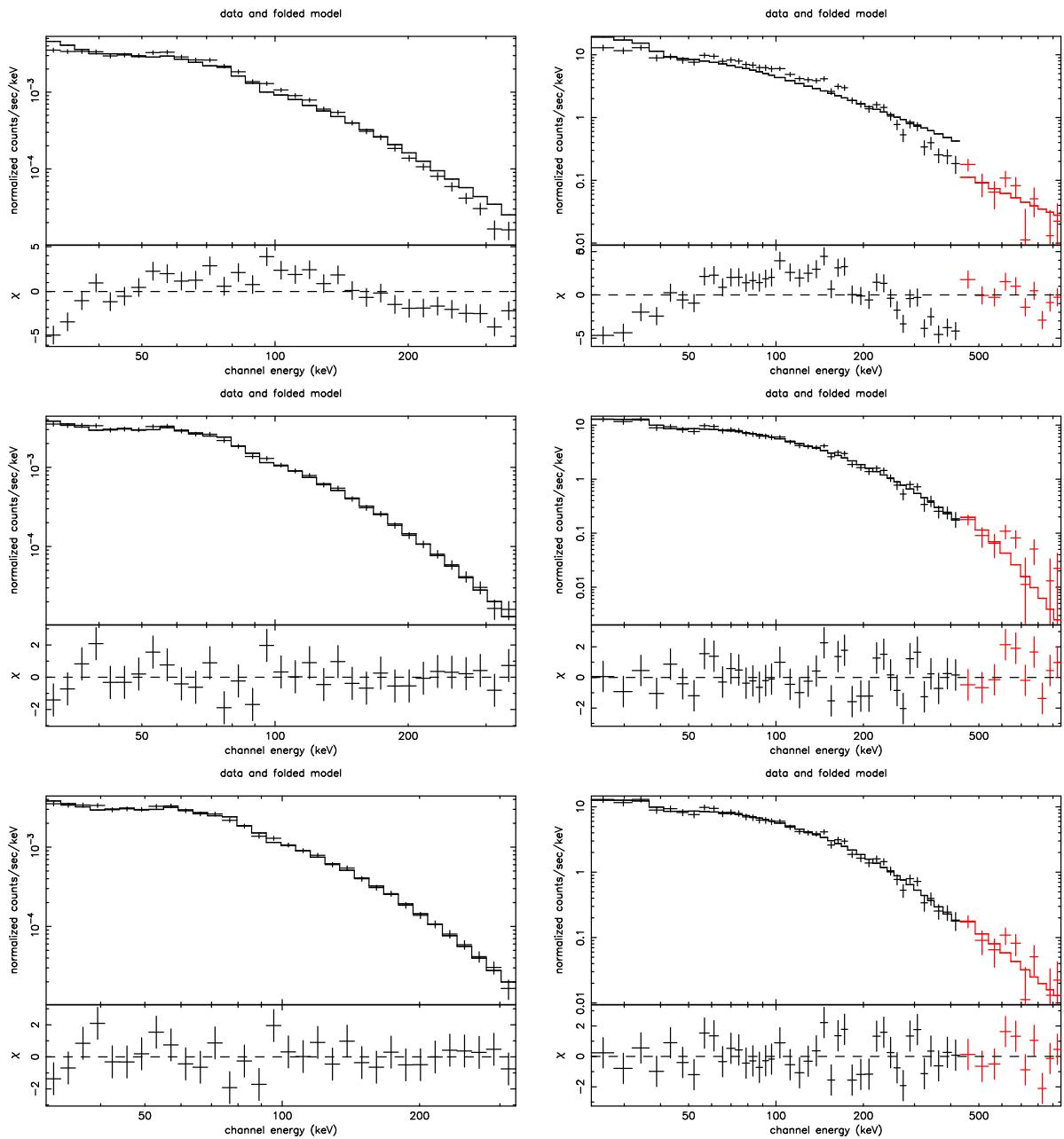


図 5.15: BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット
ロット : 上から power law、 cutoff power law、 上から power law、 cutoff power law、 band function
band function

図 5.16: konus のスペクトルとモデルプロット :
上から power law、 cutoff power law、 band function

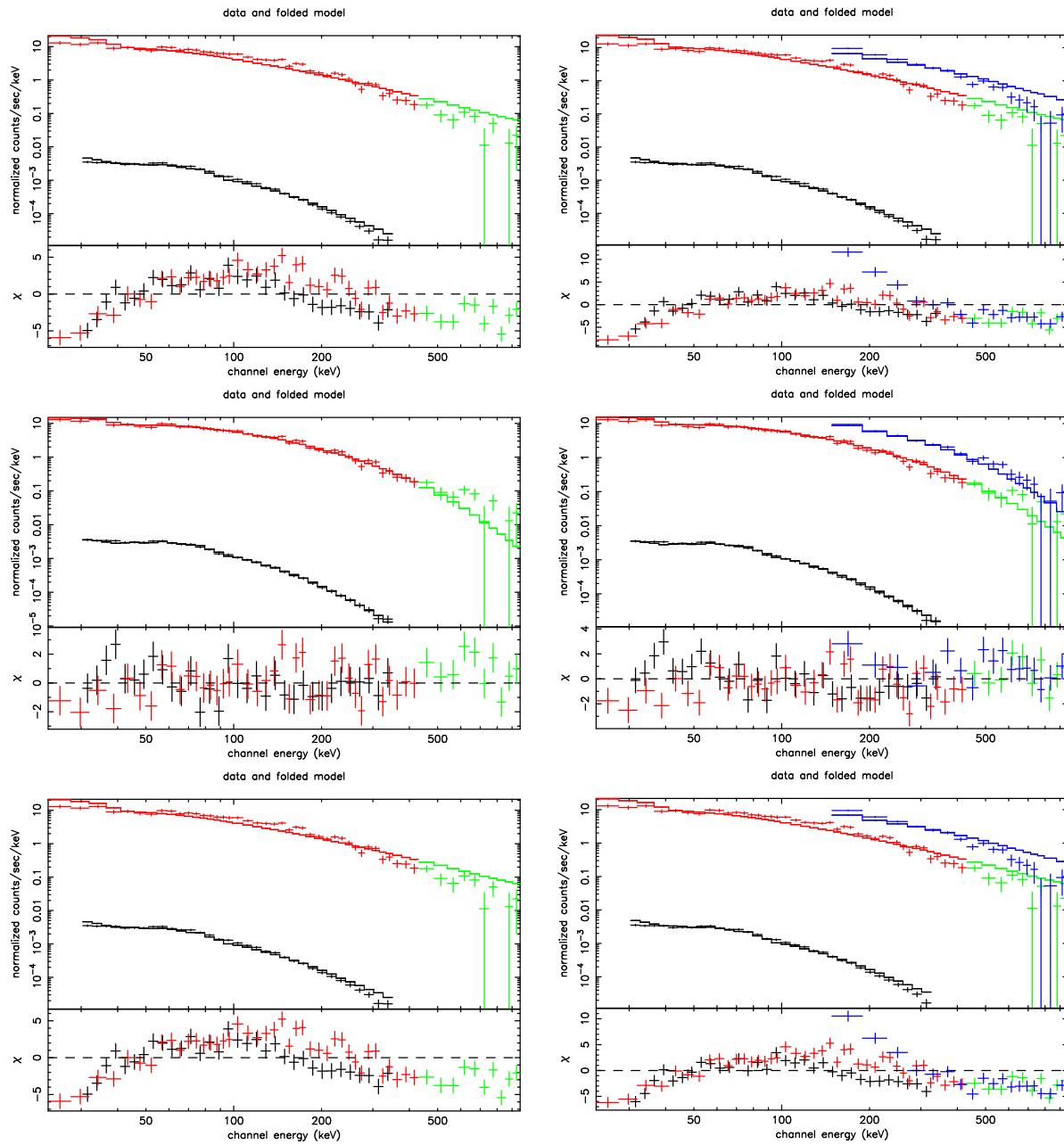


図 5.17: BAT -350keV & konus のスペクトルと
モデルプロット: 上から power law、cutoff power

図 5.18: BAT -350keV & konus & WAM の
スペクトルとモデルプロット: 上から power law、
cutoff power law、band function

5.2.5 GRB 060814

このイベントは Konus でも 400keV 程度までしか観測されていない。BAT と Konus の joint フィットの結果は cutoff power law で一致しているが、BAT 単体のスペクトルと Konus 単体のスペクトルを比べて、結果が合わなかった。これは BAT 側に何か不定性があるのか否か、これからの課題として検証したい。

表 5.5: GRB 060814 のスペクトル解析 パラメータ一覧

Detector	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
BAT	PL	$-1.75^{+0.03}_{-0.03}$	—	—	—	$29.6/29=1.02$
	CPL	—	$-1.66^{+0.11}_{-0.07}$	—	$549.9 <$	$27.1/29=0.94$
	Band	—	—	—	—	—
KW	PL	$-1.70^{+0.05}_{-0.05}$	—	—	—	$66.8/41=1.63$
	CPL	—	$-1.18^{+0.17}_{-0.18}$	—	$223.6^{+80.7}_{-39.7}$	$26/39=0.69$
	Band	—	$-1.14^{+0.26}_{-0.20}$	$-2.21 >$	$205.9^{+97.8}_{-63.3}$	$26.1/38=0.70$
BAT & KW	PL	$-1.74^{+0.03}_{-0.03}$	—	—	—	$99.7/74=1.35$
	CPL	—	$-1.58^{+0.06}_{-0.09}$	—	$313.0^{+117.9}_{-107.1}$	$90.1/73=1.23$
	Band	—	$-0.81^{+1.01}_{-0.53}$	$-1.79^{+0.04}_{-0.05}$	$68.8^{+300.6}_{-39.2}$	$88.7/72=1.23$

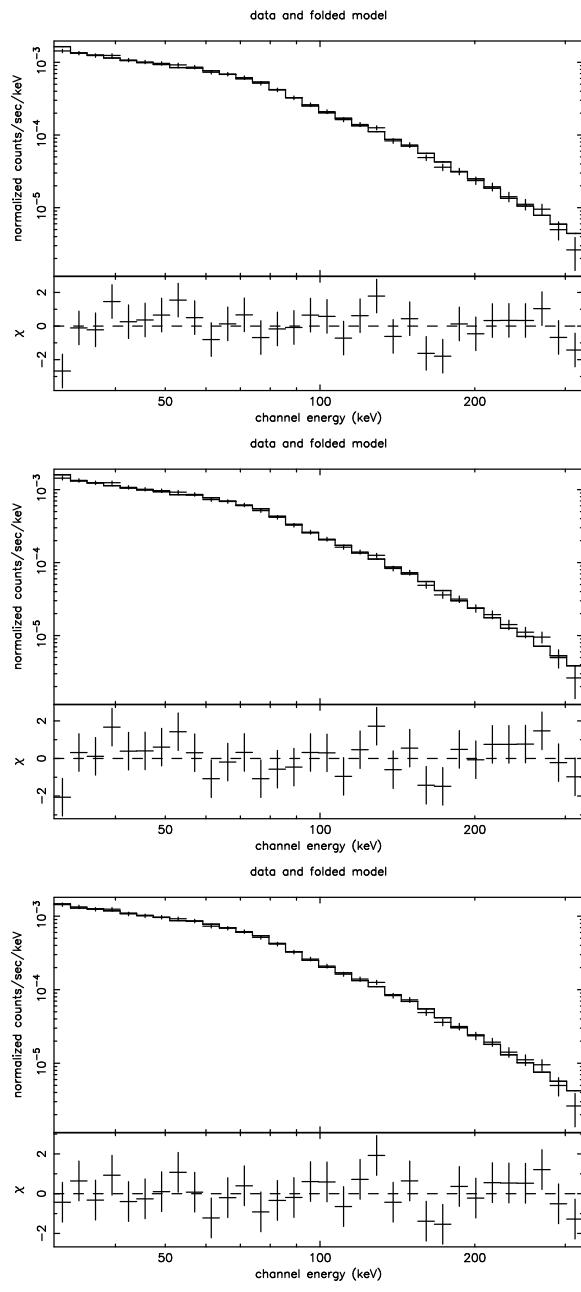


図 5.19: BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット
ロット：上から power law、cutoff power law、
band function

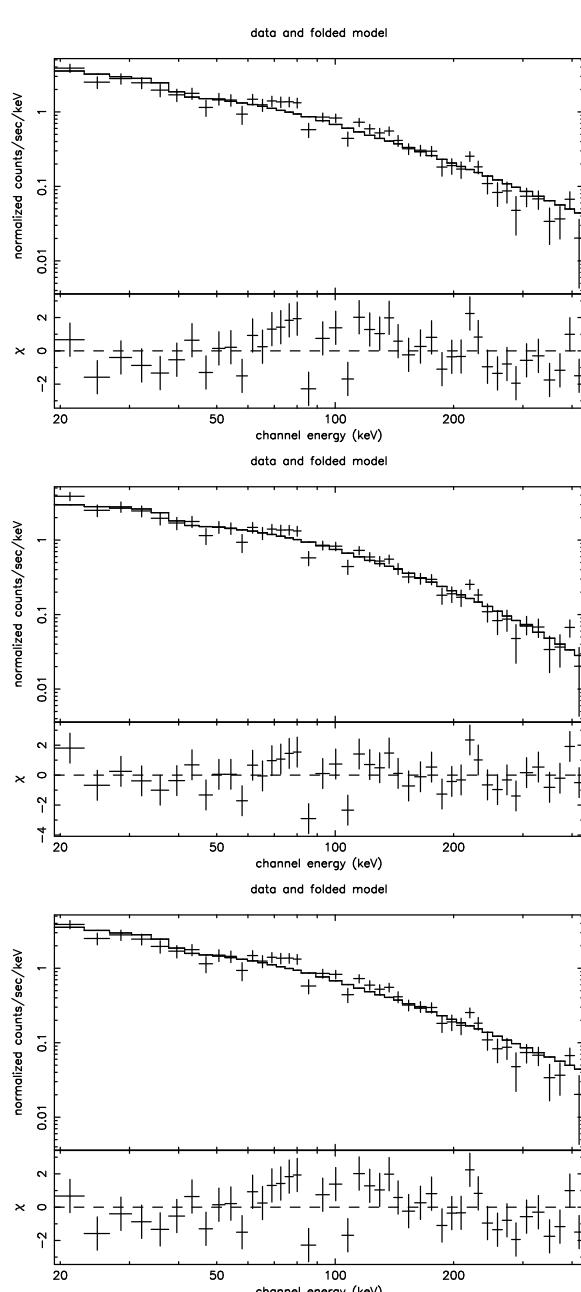


図 5.20: konus のスペクトルとモデルプロット：
上から power law、cutoff power law
band function

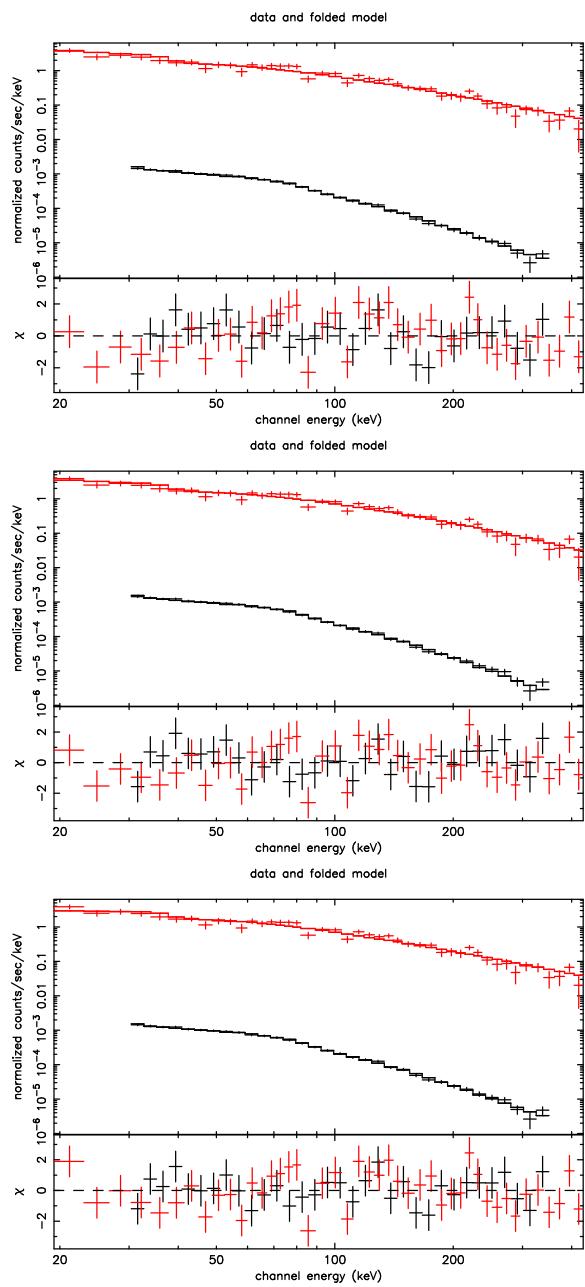


図 5.21: BAT -350keV & konus のスペクトルと
モデルプロット: 上から power law、cutoff power
law、band function

5.2.6 GRB 051008

E_{peak} が 500keV 以上のところにあるので、BAT 単体のスペクトルとその他のスペクトルを比べることは難しいが、同時フィッティングの結果を見ると、cutoff power law や band function の α の値よく合っていると言える。

表 5.6: GRB 051008 のスペクトル解析 パラメータ一覧

Detector	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
BAT	PL	$-1.10^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	25.7/29=0.89
	CPL	—	$-1.04^{+0.11}_{-0.04}$	—	$974.1 <$	25.9/28=0.92
	Band	—	—	—	—	—
KW	PL	$-1.24^{+0.05}_{-0.05}$	—	—	—	62.8/52=1.21
	CPL	—	$-0.89^{+0.14}_{-0.16}$	—	$534.6^{+355.4}_{-165.4}$	40.9/51=0.80
	Band	—	$-0.89^{+0.08}_{-0.15}$	XXX	$571.0^{+356.5}_{-117.2}$	40.9/49=0.84
BAT & KW	PL	$-1.20^{+0.03}_{-0.03}$	—	—	—	163.3/84=1.94
	CPL	—	$-0.87^{+0.08}_{-0.08}$	—	$663.0^{+209.6}_{-138.2}$	84.6/83=1.02
	Band	—	$-0.92^{+0.03}_{-0.08}$	$-1.83 >$	$830.7^{+249.3}_{-97.2}$	81.4/80=1.02
BAT & KW & WAM	PL	-1.25^{+}_{-}	—	—	—	260.7/107=2.44
	CPL	—	$-0.95^{+0.06}_{-0.05}$	—	$888.3^{+161.7}_{-146.4}$	99.5/104=0.96
	Band	—	$-0.95^{+0.05}_{-0.06}$	XXX	$892.7^{+157.3}_{-183.2}$	99.7/105=0.95

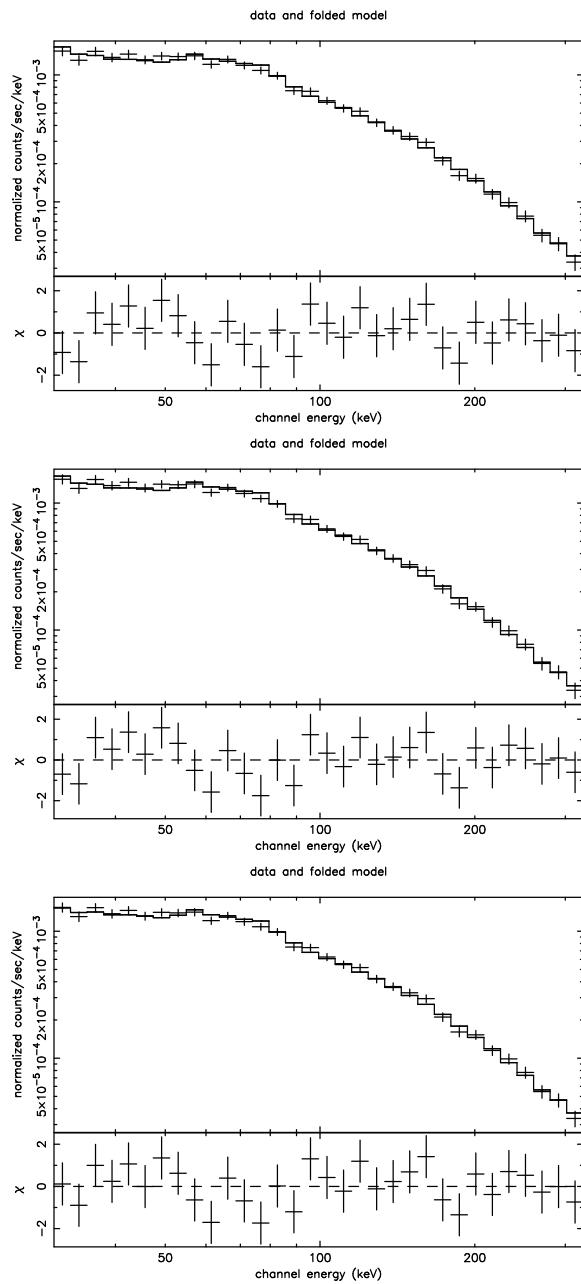


図 5.22: BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット
ロット : 上から power law、cutoff power law、上から power law、cutoff power law、band function band function

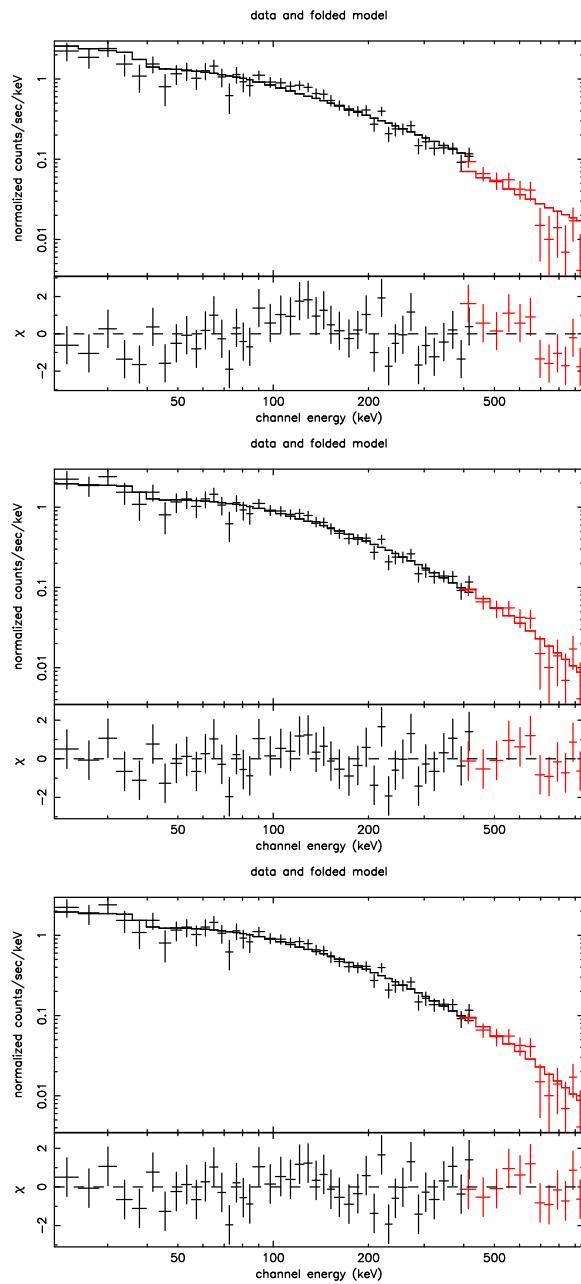


図 5.23: konus のスペクトルとモデルプロット :
ロット : 上から power law、cutoff power law、上から power law、cutoff power law、band function band function

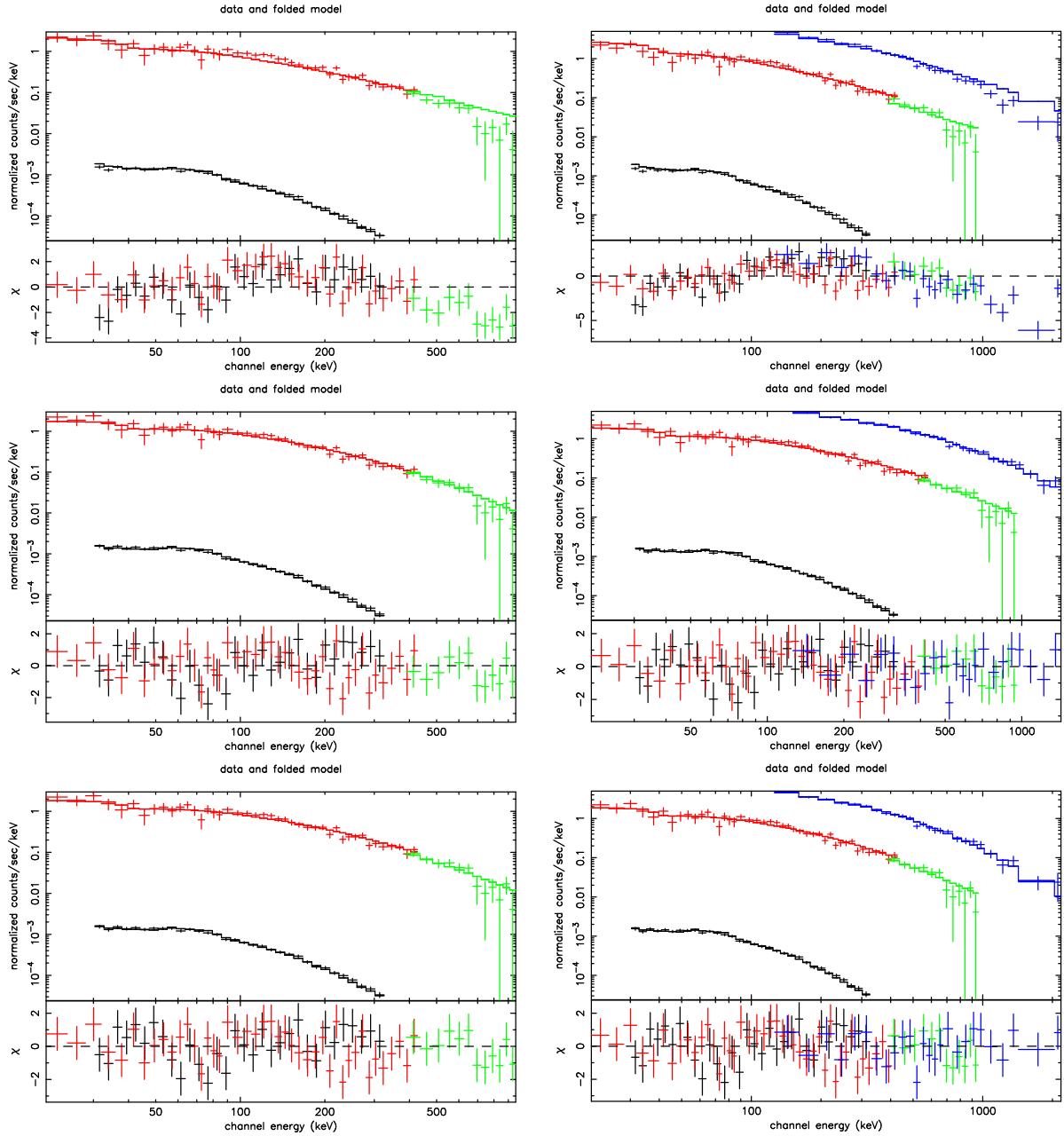


図 5.24: BAT -350keV & konus のスペクトルと
モデルプロット : 上から power law、cutoff power
law、band function

図 5.25: BAT -350keV & konus & WAM のスペクトルと
モデルプロット : 上から power law、
cutoff power law、band function

5.3 まとめ

シミュレーションで作成した応答関数が正しい振る舞いをしているか確認するため、BAT、Konus、WAM の 3 つの検出器で同時に観測し、明るく輝いた GRB 6つについてスペクトル解析をおこない、結果を比較した。その結果は、どの GRB についても 5% 以内の系統誤差で一致することを確かめた。新たな 350keV までのスペクトルと konus の結果を比較しても、観測できるエネルギー帯域の関係で、BAT によって band function の β が決まりにくいという面はあるが、 E_{peak} の決定精度はエラーの範囲内で合い、系統的にどちらかが大きな値になるなどの傾向もみられなかった。エラーのつき方も差はなかった。今回の 6 つの GRB のデータだけを見れば、少なくとも 200keV 程度までは E_{peak} が他の超広帯域の検出器と同じ精度で決まることがわかった。このことにより、BAT のこれまでのスペクトルと比べ 200keV のエネルギー帯域を拡張し、 E_{peak} 計測の可能性を大幅に高めることができる。

第6章 Mask weighted 法によるスペクトルと Mask weighted 法によらないスペクトル の相互較正実験

前章までに述べたように、SwiMM を用いたモンテカルロシミュレーションで求めた検出器の応答関数によるスペクトルは、これまでより 200 keV 高エネルギー側まで伸びた、350 keV までである。

この章では、これまで mask 法で観測してきた 150 keV までの安定したスペクトルと、新応答関数を用いたスペクトルを同時に解析して、一致するかを調べた。さらにはエネルギー帯域が拡張されたことで、150 keV まででは見えなかったスペクトルの振る舞いが見えるようになつていなか。とくに power law にしかみえなかつたスペクトルに E_{peak} が判明するかどうか解析を行なつた。

6.1 解析方法とフィットするモデル

まず mask 法で得られたスペクトル単体、新スペクトル単体それぞれで 6 章で用いた「power law」「cutoff power law」「band function」の 3 つのモデルでフィッティングを行ない、結果を比較した。そして、mask 法スペクトルと新スペクトルを一緒に表示して同じパラメータで同時フィッティングを行なつた。その結果で、統計的にどれだけフィッティング結果が一致しているかどうかを確かめた。ここでも 5% の系統誤差を含んでいる。

6.2 スペクトル解析

6.2.1 GRB 051221A

このGRBではmask方のスペクトルではpower lawのみでしか合わなかったが、新スペクトルではcutoff power lawでフィットした結果 E_{peak} が判明し、band functionでフィットした時も β に幅はあるが、power lawよりフィッティングの結果はよい。Konus/Windのスペクトルを見ても、Band functionがベストフィットである。のことより、これまでのmask法では決まらなかった E_{peak} が、拡張された新スペクトルではKonusの結果を矛盾しない値を与えている。

表 6.1: GRB 051221A のスペクトル解析 パラメータ一覧

	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
$\sim 150\text{keV}$	PL	$-1.39^{+0.07}_{-0.07}$	—	—	—	$51.7/55=0.94$
	CPL	—	$-1.37^{+0.13}_{-0.07}$	—	$225.4 <$	$52.8/53=0.98$
	Band	—	—	—	—	—
$\sim 350\text{keV}$	PL	$-1.44^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	$36.9/29=1.27$
	CPL	—	$-1.02^{+0.17}_{-0.18}$	—	$290.4^{+203.2}_{-92.5}$	$17.4/28=0.62$
	Band	—	$-1.01^{+0.17}_{-0.39}$	$-1.62 >$	$292.1^{+204.7}_{-105.4}$	$17.4/27=0.65$
joint	PL	$-1.42^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	$89.9/87=1.0$
	CPL	—	$-1.24^{+0.10}_{-0.09}$	—	$280.0 <$	$77.1/86=0.90$
	Band	—	$-1.23^{+0.09}_{-0.10}$	$-2.74 >$	$283.2 <$	$77.1/85=0.98$
Konus	PL	$-1.41^{+0.07}_{-0.07}$	—	—	—	$67.7/56=1.21$
	CPL	—	$-1.13^{+0.16}_{-0.14}$	—	$452.9^{+378.2}_{-160.0})$	$51.0/55=0.92$
	Band	—	$-0.89^{+0.99}_{-0.37}$	$-1.57 >$	$241.0^{+736.6}_{-189.7}$	$50.6/54=0.94$

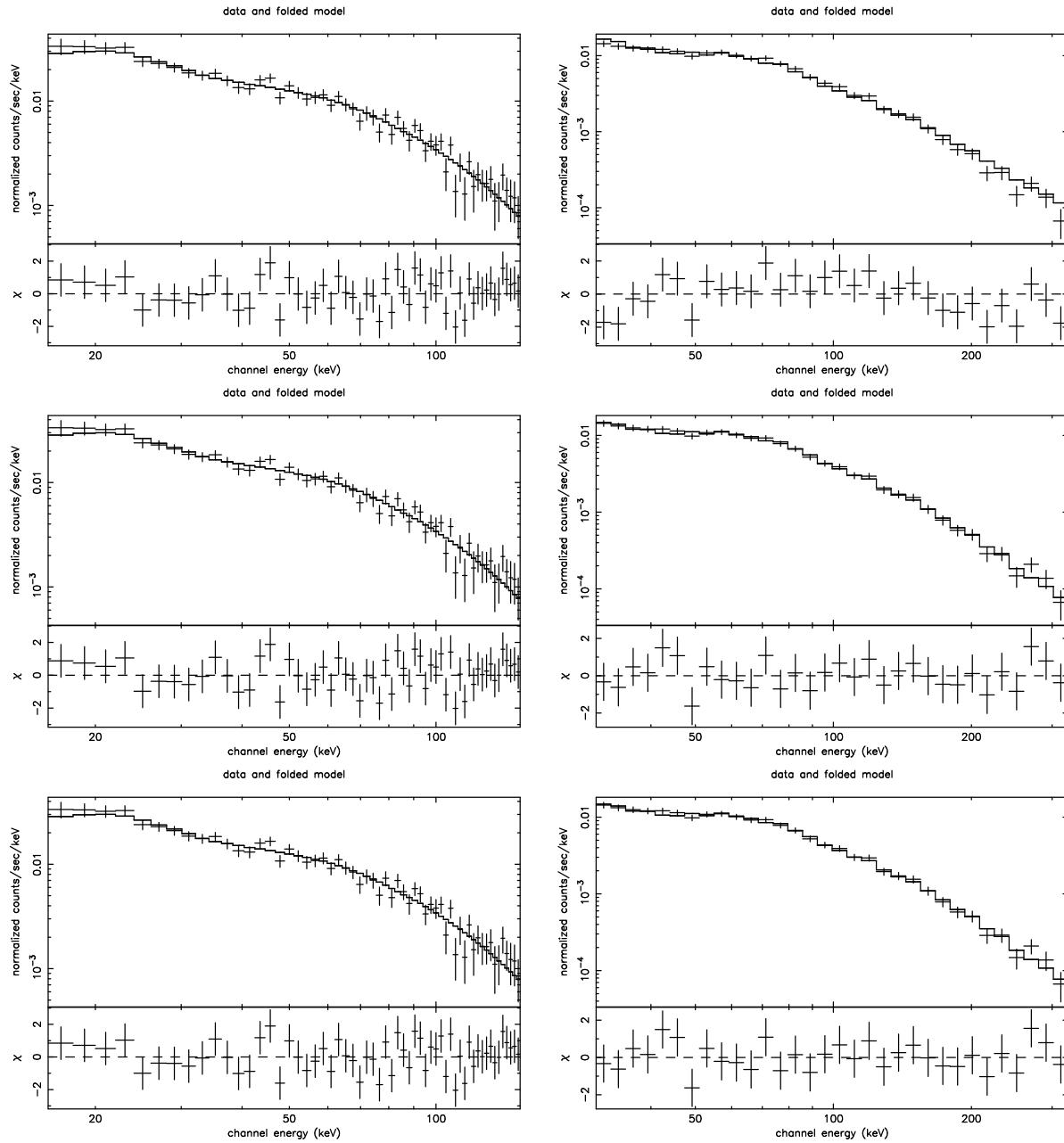


図 6.1: BAT -150keV のスペクトルとモデルプロット
図 6.2: BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット
ロット : 上から power law、 cutoff power law、 ロット : 上から power law、 cutoff power law、
band function band function

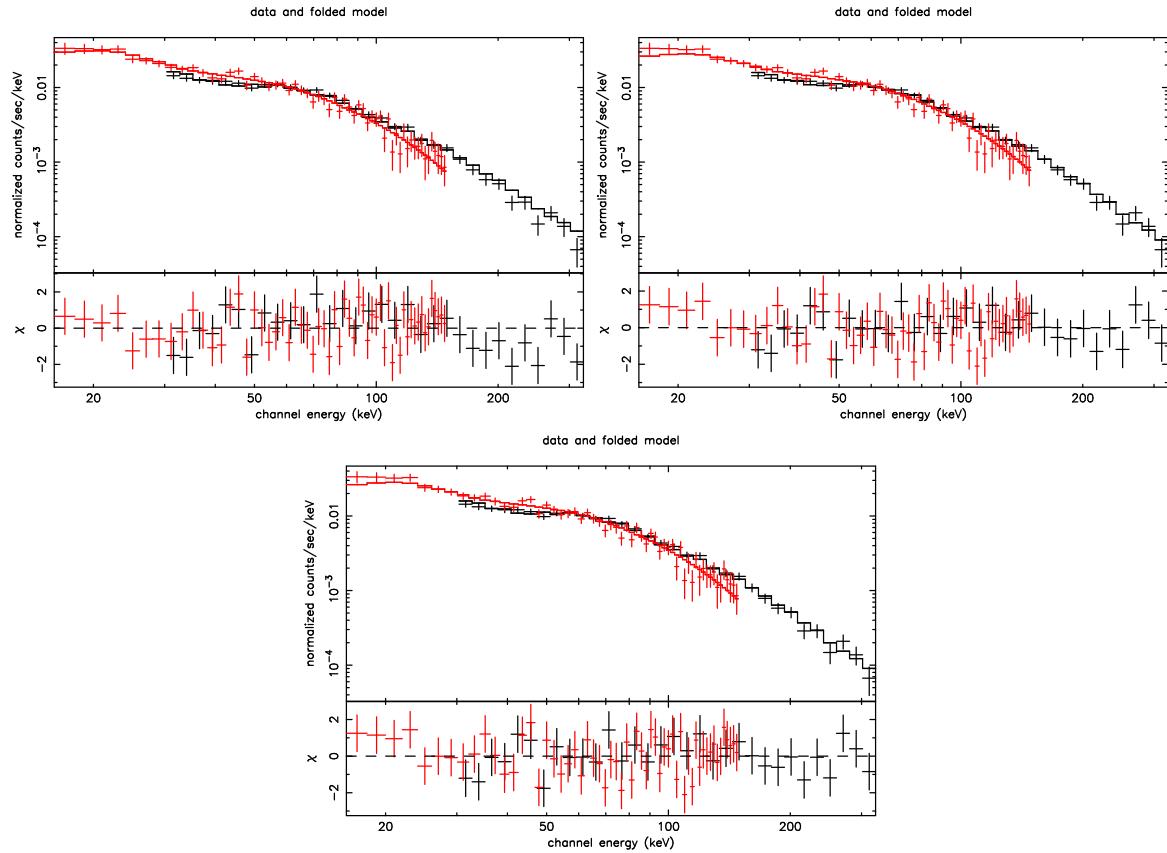


図 6.3: BAT -150keV & BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット：左上から power law、cutoff power law、band function

6.2.2 GRB 051008

Konus/Wind のスペクトル解析結果によると、 E_{peak} が 800keV 周辺にある。BAT ではその帯域は観測できないため、BAT の 2 種類のスペクトルに cutoff power law と band function は合わなかった。Konus/Wind の結果を参照すれば、BAT で観測できる帯域は単純な power law で表わされる。実際、mask 法のスペクトルでも新スペクトルでも、べき 1.1 程度の power law でよく合っている。

表 6.2: GRB 051008 のスペクトル解析 パラメータ一覧

	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
$\sim 150\text{keV}$	PL	$-1.03^{+3.43}_{-0.06}$	—	—	—	$46.7/55=0.85$
	CPL	—	$-0.68^{+0.25}_{-0.24}$	—	$238.0^{+465.0}_{-98.6}$	$40.3/54=0.75$
	Band	—	-1.00^{\pm}	-2.74^{\pm}	72.9^{\pm}	—
$\sim 350\text{keV}$	PL	$-1.10^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	$25.7/29=0.89$
	CPL	—	$-1.04^{+0.11}_{-0.04}$	—	$974.1 <$	$25.9/28=0.92$
	Band	—	—	—	—	—
joint	PL	$-1.08^{+0.03}_{-0.03}$	—	—	—	$74.7/87=0.94$
	CPL	—	$-1.01^{+0.08}_{-0.05}$	—	$922.4 <$	—
	Band	—	$-1.01^{+0.39}_{-0.17}$	$-5.34^{+3.71}_{-4.66}$	$292.1^{+204.7}_{-105.4}$	$51.8/53=0.98$
Konus	PL	$-1.24^{+0.05}_{-0.05}$	—	—	—	$62.8/52=1.21$
	CPL	—	$-0.89^{+0.14}_{-0.16}$	—	$888.3^{+161.7}_{-146.4}$	$40.9/51=0.80$
	Band	—	$-0.89^{+0.08}_{-0.15}$	XXX	$892.7^{+157.3}_{-183.2}$	$40.9/49=0.84$

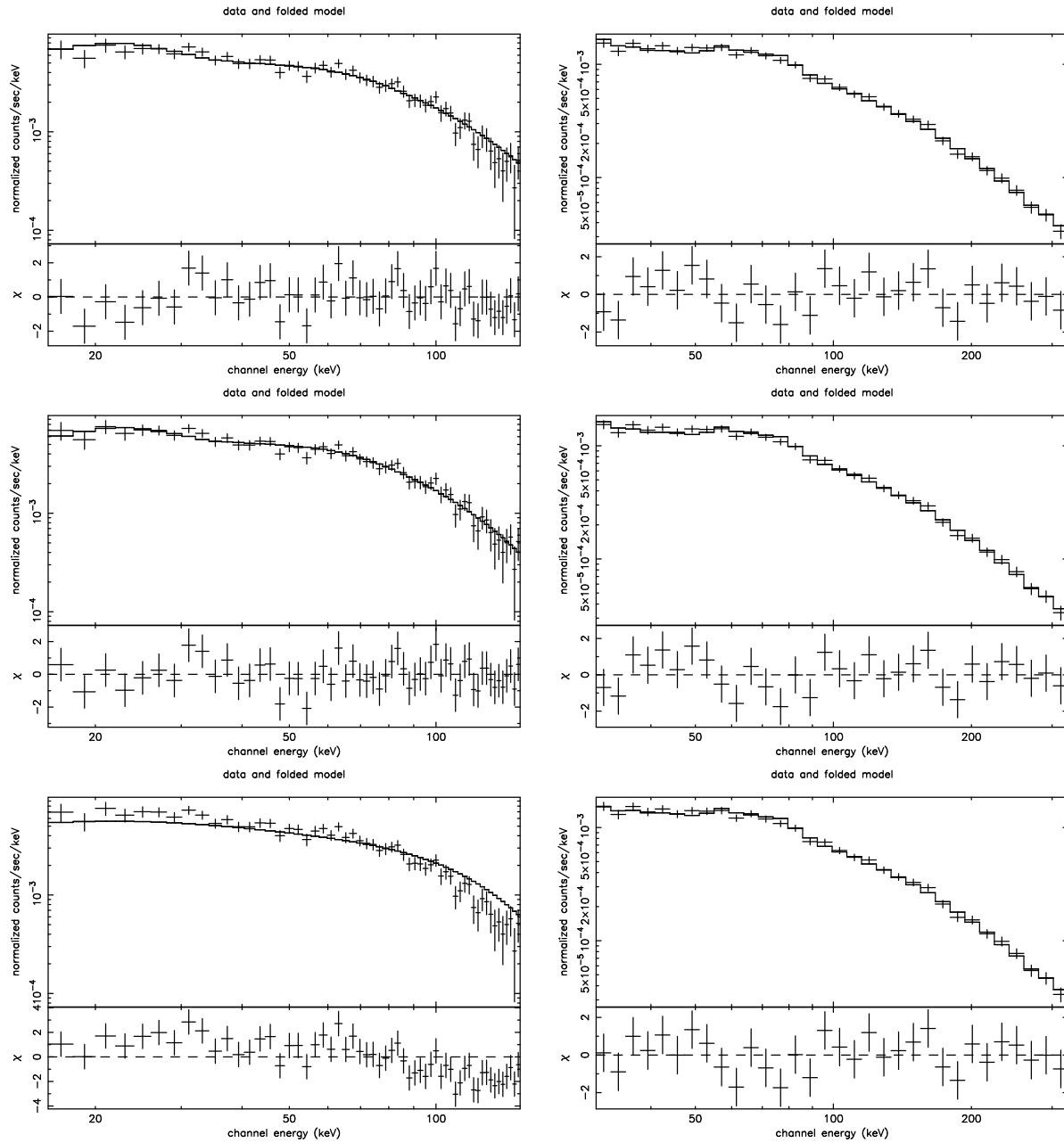


図 6.4: BAT -150keV のスペクトルとモデルプロット
 ロット : 上から power law、 cutoff power law、 ロット : 上から power law、 cutoff power law、
 band function

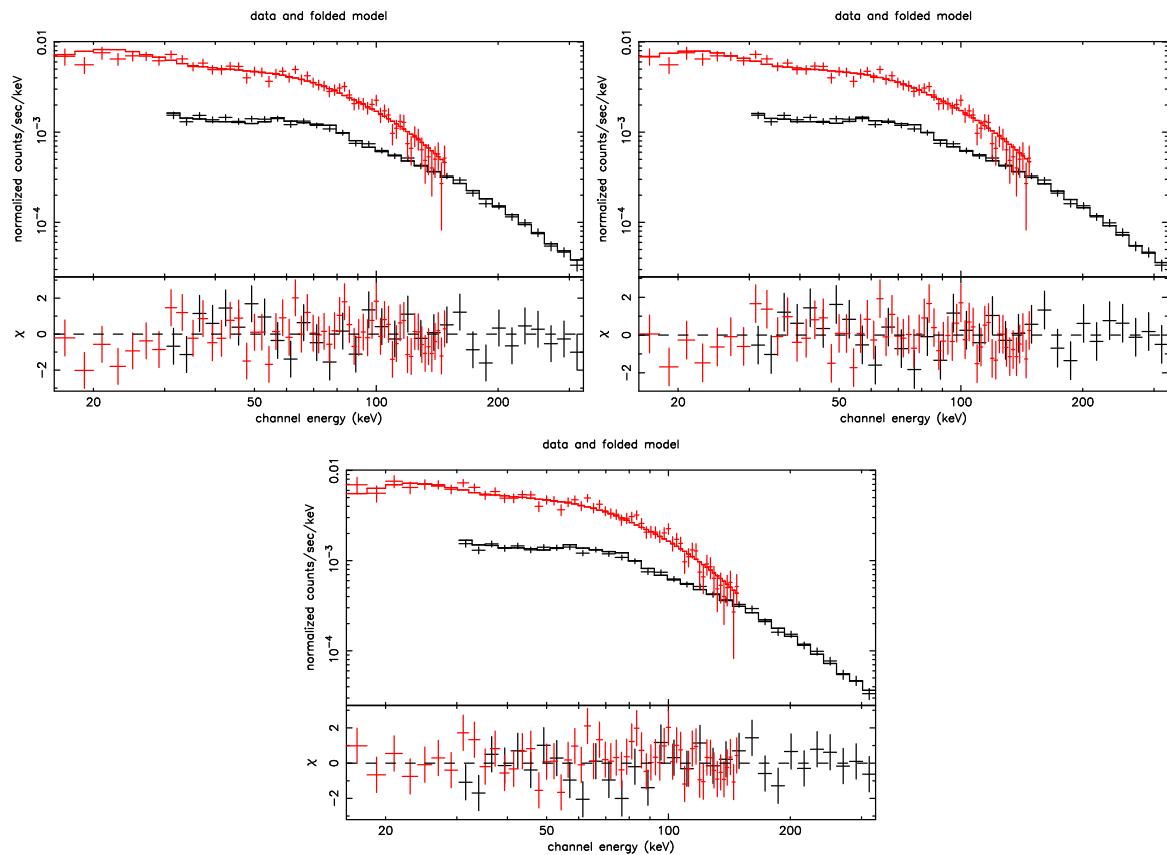


図 6.6: BAT -150keV & BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット：左上から power law、
cutoff power law、band function

6.2.3 GRB 060117

このGRBでは、100keV以下の比較的低エネルギー側で E_{peak} が決まっている。BATにおいても、mask法のスペクトルでも観測できるエネルギーである。

ここで、前出の2つのイベントでもわずかに見られた傾向であるが、mask法のスペクトルと新スペクトルを比べたときに、ややmask法のスペクトルがハードで、新スペクトルがソフトになる傾向がはっきりとわかる。このGRBでは、2つのBATのスペクトルのcutoff power lawの α と E_{peak} の値を比べるとよくわかる。

表 6.3: GRB 060117 のスペクトル解析 パラメータ一覧

	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
$\sim 150\text{keV}$	PL	$-1.88^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	$53.0/55=0.96$
	CPL	—	$-1.48^{+0.20}_{-0.20}$	—	$73.8^{+67.0}_{-24.7}$	$40.3/54=0.75$
	Band	—	$-1.27^{+0.07}_{-0.06}$	$-2.11^{+0.19}_{-0.12}$	$61.0^{+7.3}_{-7.0}$	$38.7/53=0.73$
$\sim 350\text{keV}$	PL	$-2.16^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	$48.1/29=1.66$
	CPL	—	$-1.81^{+0.15}_{-0.15}$	—	$57.2^{+30.4}_{-13.4}$	$29.9/28=1.07$
	Band	—	$-0.86 <$	$-2.28^{+0.06}_{-0.06}$	$35.3^{+73.9}_{-11.2}$	$51.8/53=0.98$
joint	PL	$-2.05^{+0.03}_{-0.03}$	—	—	—	$165.2/87=1.90$
	CPL	—	$-1.62^{+0.09}_{-0.09}$	—	$74.9^{+5.9}_{-7.6}$	$76.7/86=0.89$
	Band	—	$-1.22^{+0.29}_{-0.35}$	$-2.32^{+0.19}_{-0.09}$	$56.4^{+49.5}_{-33.5}$	$70.6/85=0.83$
Konus	PL	-1.99^{+}_{-}	—	—	—	$107.1/47=2.28$
	CPL	—	$-1.52^{+0.13}_{-0.12}$	—	$96.3^{+35.9}_{-22.1}$	$56.4/46=1.23$
	Band	—	$-1.51^{+0.16}_{-0.14}$	$-2.47 >$	$93.7^{+47.1}_{-27.4}$	$56.7/45=1.26$

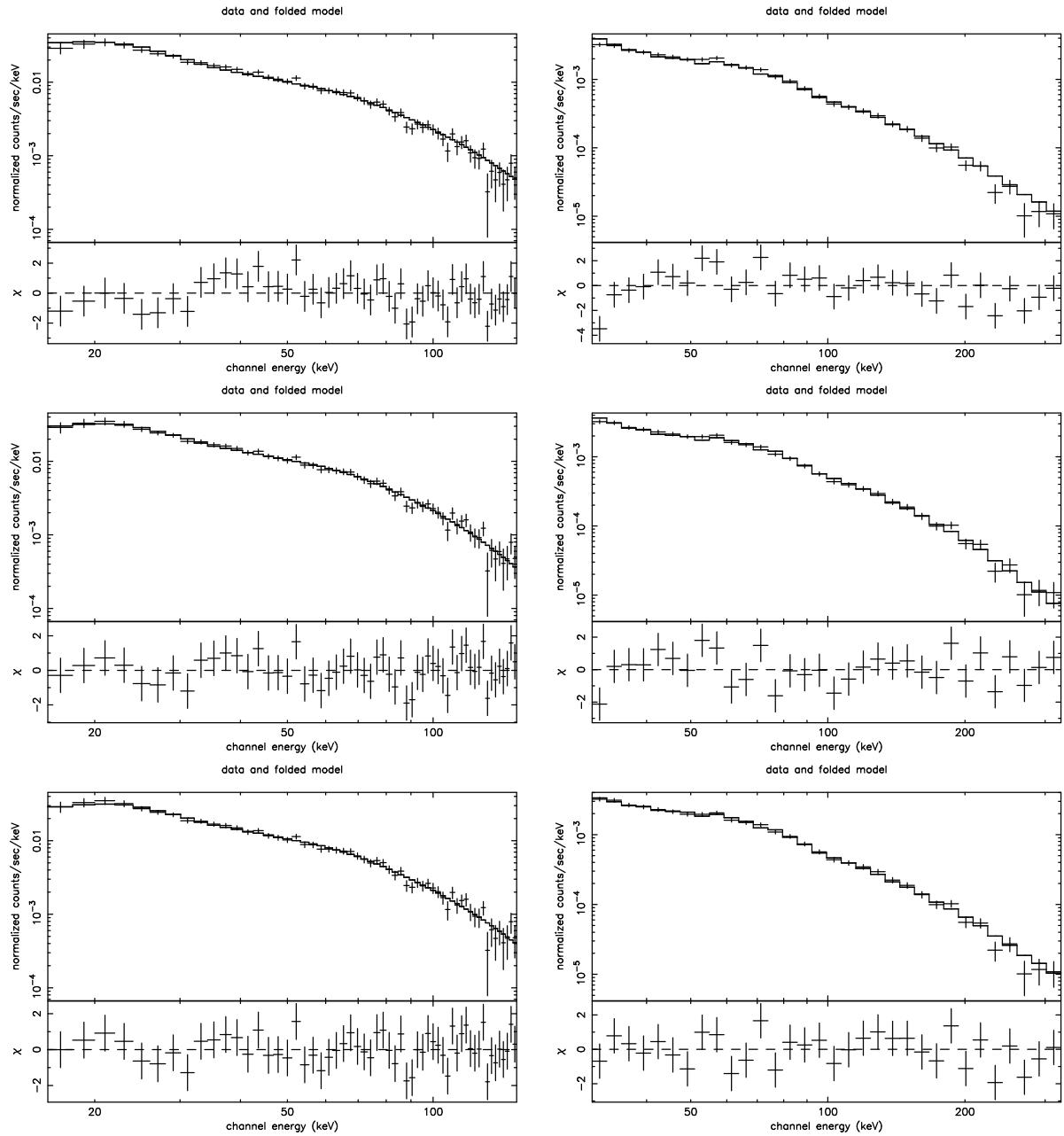


図 6.7: BAT -150keV のスペクトルとモデルプロット
 ロット : 上から power law、 cutoff power law、 ロット : 上から power law、 cutoff power law、
 band function

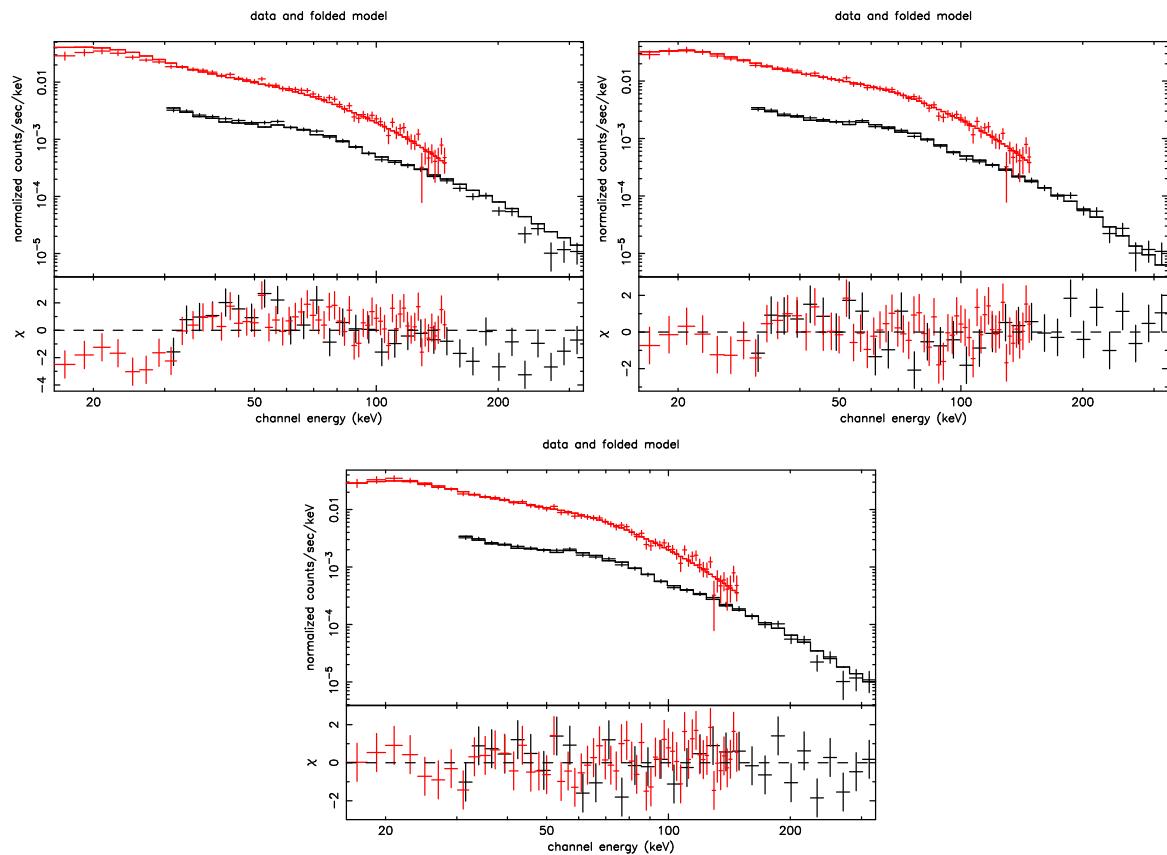


図 6.9: BAT -150keV & BAT -350keV のスペクトルとモデルプロット：左上から power law、cutoff power law、band function

6.2.4 GRB060813

mask 法のスペクトルを見る限りでは、power law でフィットできるスペクトルであるともいえるが、エネルギー帯域を伸ばしてみると、power law では全く合わない。cut off power law でよくフィットでき、 E_{peak} を持つスペクトルであるとはっきりわかる。まさに、新スペクトルだから検出できた E_{peak} である。新スペクトルの結果は Konus/Wind とよく一致している。

このような GRB が他衛星では検出されず *Swift*/BAT のみで検出されても、エネルギー帯域を拡張することで E_{peak} を決定することができる。

表 6.4: GRB 060813 のスペクトル解析 パラメータ一覧

	model	$-\Gamma$	α	β	E_{peak}	chi2/dof=rchi2
$\sim 150\text{keV}$	PL	$-1.94^{+0.04}_{-0.07}$	—	—	—	$54.1/55=0.98$
	CPL	—	$-0.72^{+0.19}_{-0.20}$	—	$235.1^{+105.0}_{-45.3}$	$34.5/53=0.65$
	Band	—	$-0.72^{+0.18}_{-0.18}$	$-2.07 >$	$180.6^{+113.0}_{-51.8}$	$51.8/53=0.98$
$\sim 350\text{keV}$	PL	$-1.56^{+0.04}_{-0.04}$	—	—	—	$147.6/30=4.92$
	CPL	—	$-0.85^{+0.12}_{-0.12}$	—	$209.3^{+45.9}_{-33.8}$	$27.4/29=0.95$
	Band	—	$-0.84^{+0.12}_{-0.13}$	$-2.06 >$	$206.0^{+46.1}_{-33.5}$	$26.9/27=1.00$
joint	PL	-1.56^+	—	—	—	$241.7/86=2.81$
	CPL	—	$-0.79^{+0.04}_{-0.04}$	—	$198.6^{+26.7}_{-22.1}$	$62.5/86=0.73$
	Band	—	$-0.74^{+0.12}_{-0.14}$	$-2.21 >$	$206.0^{+46.1}_{-33.5}$	$94.8/85=1.12$
Konus	PL	-3.13^+	—	—	—	$277.7/48=5.79$
	CPL	—	$-0.55^{+0.13}_{-0.12}$	—	$208.8^{+34.2}_{-27.7}$	$60.5/47=1.29$
	Band	—	$-0.54^{+0.15}_{-0.13}$	$-3.05^{+0.63}_{-1.60}$	$195.6^{+34.6}_{-33.1}$	$57.1/46=1.24$

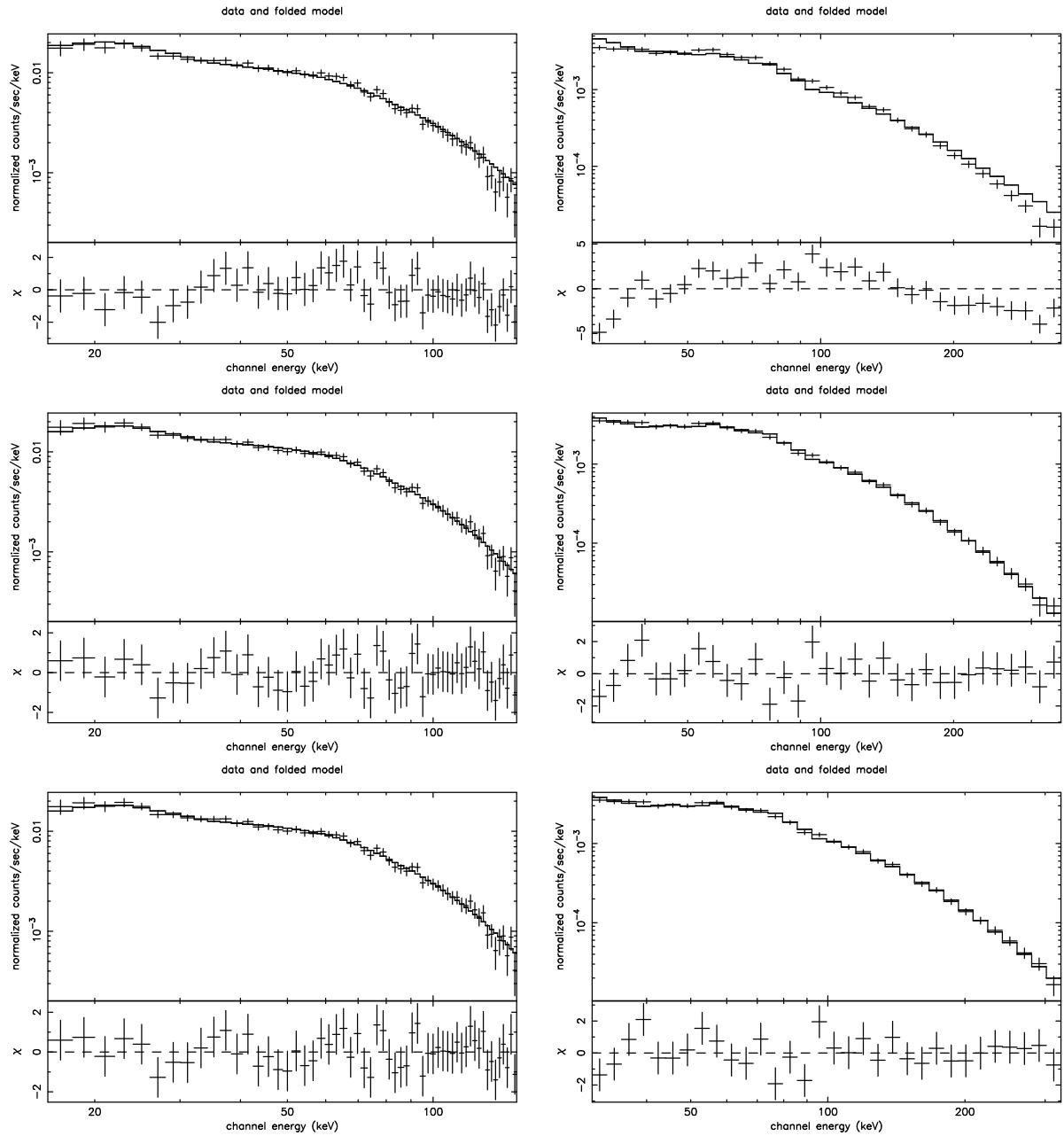


図 6.10: BAT -150keV のスペクトルとモデルプロット
 ロット : 上から power law、 cutoff power law、 ロット : 上から power law、 cutoff power law、
 band function

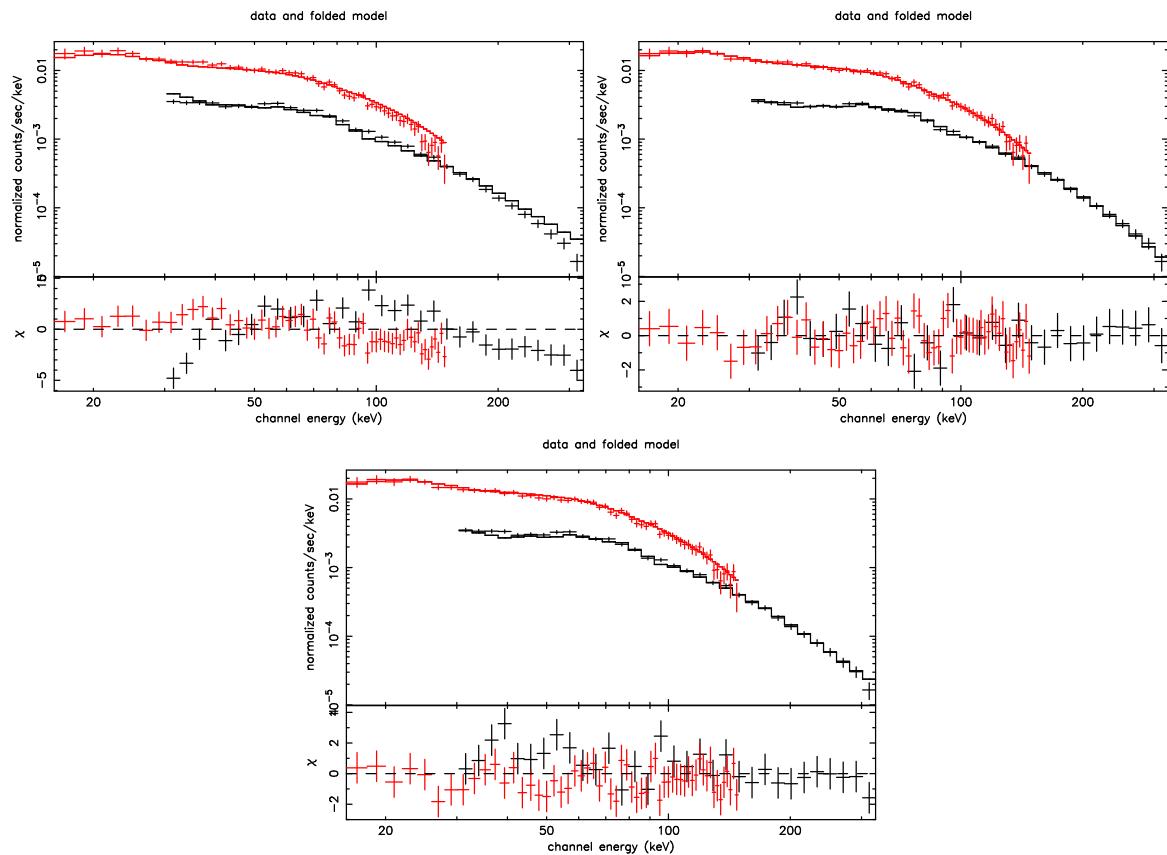


図 6.12: BAT -150keV & BAT -350keV のスペクトルと
モデルプロット : 左上から power law、cutoff power law、band function

6.3 まとめ

4つのGRBについて、maskを用いたこれまでの取得方法で得られた150 keVまでのスペクトルと、シミュレーションで構築した応答関数を用いた350 keVまでのスペクトルをモデルフィッティングをし、比較した。その結果、5%以内の系統誤差で一致した。さらに2つのスペクトルを比べると、今回の場合、150 keVまでのスペクトルでは検知されなかった E_{peak} が、350 keVまでのスペクトルでは2つ検知された。BATのみが検出したGRBでも E_{peak} が決定できる可能性を実証した

第7章　まとめと今後の課題

Swift衛星搭載のBAT(Burst Alert Telescope)検出器では、これまで15–150keVのエネルギー帯域でGRBのスペクトルを取得できたが、GRB発生の物理を知る上で重要な E_{peak} を観測するためには、できるだけ広いエネルギー帯域のスペクトルを観察することが必要である。そこで、モンテカルロシミュレーションで検出器の応答関数を求め、それを用いて350keVまでのスペクトルを作成することにした。

まず、当初用いられていたDRM(Detector Response Matrix)では80keV以上の応答関数に不確定性が残っていたため、数値モデルのジオメトリを見なおし、 $\mu\tau$ の値を再評価することによって、この不確定性をなくした。

次に、SwiMMによるシミュレーションをおこなう時、限られた時間と計算機の能力を考慮に入れながら、かつ、正しい結果を得るために、シミュレーション時に適用するパラメータの最適化を行なった。生成する光子のエネルギーについては、700keV以下だと350keVまでのスペクトルに影響を及ぼすことがわかった。よって応答関数を作成するときは、少なくとも700keVまでの光子を生成する必要がある。また、光子の生成領域はmaskから5m離れたところでは、一辺300cmの正方形から光子を生成すれば、角度によらず検出器に入る直入射、散乱光子をほぼすべて再現できることがわかった。これからの課題としては、光子生成領域の角度を変えるとき、どれだけの角度の差があると応答関数として明らかな違いが生じるのかを調査することである。

以上をもとに、構築された応答関数が正しい振る舞いをしているかどうか調べるために、Konus検出器とWAM検出器、そしてBATで同時に観測されたGRBを用いて、そのスペクトルにモデルフィッティングを行ない、比較した。その結果どのGRBのスペクトルについても5%以内の系統誤差で一致した。新たな350keVまでのスペクトルとkonusの結果を比較しても、観測できるエネルギー帯域の関係で、BATによってband functionの β が決まりにくいという面はあるが、 E_{peak} の決定精度はエラーの範囲内で合い、系統的にどちらかが大きな値になるなどの傾向もみられなかった。エラーのつき方も差はなかった。今回の6つのGRBのデータだけを見れば、少なくとも200keV程度までは E_{peak} が他の超広帯域の検出器と同じ精度で決まることがわかった。

さらに350keVまで拡張したスペクトルの解析を行なった結果、4つのGRBのうち2つについてあらたに E_{peak} が判明した。BATSEの E_{break} の分布を参照すると、この200keVの差が重要であることは確実である。これによって、BATでのみ検出されたGRBでも E_{peak} が決定できるGRBが増える。これからの課題は、150keVまでのスペクトルと350keVまでのスペクトルでは、同じGRBにおいて、前者がハードで後者がソフトになる傾向がわずかだが見られることである。この原因について定常天体のかに星雲を使った解析をおこない、調査する。

関連図書

- [1] 磯部直樹 「宇宙硬X線検出器のエネルギー応答の測定とレスポンス関数の構築」 修士論文、東京大学、1999
- [2] 渡辺伸 「テルル化カドミウム(CdTe)半導体を用いた硬X線・ガンマ線撮像用ピクセル検出器の開発 修士論文、東京大学、2001
- [3] 高木亮 「ガンマ線バースト」 修士論文、東京大学、2000
- [4] 米徳大輔 「ガンマ線バーストに伴うX線残光と鉄輝線の観測」 修士論文、東京工業大学、2001
- [5] 鈴木雅也 「Swift衛星搭載BATの地上較正実験とエネルギー応答」 修士論文、埼玉大学、2003
- [6] 佐藤悟朗 「宇宙硬X線、 γ 線検出用CdTe/CdZnTe半導体検出器の開発と特性評価」 修士論文、東京大学、2002
- [7] 大野雅功 「Astro-E2衛星搭載ガンマ線バーストモニタの信号処理回路の開発と応答関数の構築」 修士論文、広島大学、2004
- [8] Suzuki, M., 2006, PhD thesis, Saitama University
- [9] Sakamoto, T., 2004, PhD theis, Tokyo Institute of Technology
- [10] Sato, G., 2006, PhD thesis, University of Tokyo
- [11] 小田稔 「宇宙線」 裳華房 1960年
- [12] 和田正信 「放射の物理」 共立出版 1982年
- [13] Glenn F. Knoll (訳:木村逸郎、阪井英次) 「放射線計測ハンドブック」 日刊工業新聞社 1997年
- [14] George B. Rybicki & Alan P. lightman 「Radiative Processes in Astrophysics」 WILEY INTERSCIENCE 1979
- [15] http://www-sopof.gsfc.nasa.gov/istp/wind/wind_inst.html
- [16] <http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/index.html>
- [17] Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. 1973, ApJ, 182,L85[Vela]
- [18] G.J.Fixhman, et at., "BATSE: The Burst and Transient Source Experiment on the Gamma Ray Observatory", Proc., GRO Science Workshop, pp.2-39, GSFC(1989a)
- [19] Costa, E., et al. 1997, Nature, 387, 783
- [20] van Paradijs, J., et al 1997, Nature, 386, 686
- [21] Shirasaki, Y., et al. 2000, Advances in Space Research, 25, 893

- [22] Stanek, K. Z., et al. 2003, ApJl, 591, L17
- [23] Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, ApJl, 497, L17
- [24] Preece, R. D., Briggs, M. S., Mallozzi, R. S., Pendleton, G. N., Paciesas, W. S., & Band, D. L. 2000, ApJS, 126, 19
- [25] Band, D., et al. 1993, ApJ, 413, 281
- [26] Amati, L., et al. 2002, AAp, 390, 81
- [27] Amati, L. 2006, MMRAS, 372, 233
- [28] Burrows, D. N., et al. 2005, Space Science Reviews, 120, 165(XRT)
- [29] Roming, P. W. A., et al. 2005, Space Science Reviews, 120, 95 (UVOT)
- [30] Barthelmy, S. D., et al. 2005, apjl, 635, L133
- [31] K. Hecht., Zum Mechanismus des Lichtelekrischen Primastomes in isolierenden Kristallen. *Zeits. Phys.*, Vol.77, p.235, 1932.
- [32] K. Yamaoka et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005
- [33] M. Ohno et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005
- [34] Y. Terada et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol 52, no. 4., p.902-909, 2005
- [35] G. Sato et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol.49, no. 3., 2002
- [36] Krimm, H. A., et al. 2006, ApJ, 648, 1117