

短時間ガンマ線バーストの X 線領域の解析

加川 保昭 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

ショートガンマ線バースト (SGRB) には、2 秒以下のプロンプト放射の直後に Extended Emission (E.E.) と呼ばれる ~100 秒続く軟 X 線の放射を伴うものが観測されているが、詳しい物理現象は未解明である。本研究では、*Swift* 衛星に搭載された、0.3-10 keV の X 線に感度を持つ XRT 検出器で観測された比較的明るい 8 つの SGRB のデータの統計的な解析を行った。時分割したスペクトルからは黒体放射よりもべき乗則のモデルがよりよく合う非熱的な放射モデルが支持された。Fitting の結果から、E.E. の光子指数は時間に対して急激に軟化し、エネルギーフラックスの減光には急激に暗くなる指数関数的な成分が見られるものがあつた。この軟化と減光の関係から、E.E. は幾何学的に一律ではなく、外側が暗い構造を持っていることが示唆された。

1 Introduction

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts: GRB) は、数ミリ秒 ~ 数 100 秒の短時間に 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線放出として解放する宇宙最大の爆発現象である。GRB はガンマ線として輝いている時間が 2 秒以上である Long GRB (LGRB) と、2 秒に満たない Short GRB (SGRB) の 2 種類に分類される。LGRB は大質量星が崩壊しブラックホールが形成されるときにジェットが放射され、物質流同士の衝突による内部衝撃波によって加速された電子が磁場に巻き、シンクロトロン放射として輝くと考えられている。SGRB は中性子連星の衝突・合体時にブラックホール・ジェットが形成され、LGRB と同様な過程で放射しているのではないかと考えられている。

SGRB には、2 秒以下のプロンプト放射の直後に Extended Emission (E.E.) と呼ばれる ~100 秒まで続く軟 X 線の放射を伴うものが観測されている (Norris & Bonnell 2006) が詳しい発生機構は未解明である。

また、SGRB の発生起源として考えられている中性子星連星の衝突・合体は、重力波の発生起源の有力な候補とも考えられている。したがって、SGRB の物理現象について理解することは将来の重力波天文学の創成につながる重要な課題である。

2 Observations

2.1 Data Selection

Swift 衛星 (2004-) の BAT 検出器、XRT 検出器で観測された SGRB の観測データの解析を行った。GRB の継続時間として T_{90} と呼ばれる、観測された全光子の 90% を含む時間がよく評価される。BAT の観測データから $T_{90} < 2$ sec の 79 イベントと、 $T_{90} > 2$ sec であるが、GCN サーキュラーにより SGRB に見られるプロンプト放射を持つと報告された 13 イベントの計 92 イベントをデータ解析の候補とした。これらのイベントの XRT での観測開始時のフラックスが 2-10 keV の帯域で 10^{-11} erg cm⁻²s⁻¹ より明るい、GRB 050724, 051221A, 060313, 070714B, 080503, 090510, 100702A, 120804A の 8 つのイベントを採用した。

2.2 BAT lightcurve

図 1 に BAT で観測された 8 つの SGRB の光度曲線のうちの一例を示す。大きい図は 128 ミリ秒で binning した、15-150 keV 帯の光度曲線で、SGRB のプロンプト放射を見るため、中の小さい図は 8 秒で binning した 15-25 keV 帯の光度曲線で、E.E. を見るためのものである。

図 1 のように SGRB のプロンプト放射の直後に E.E. が見られるようなイベントは GRB 050724, 070714B, 080503 の 3 つであり、あとの 5 つのイベントではプロンプト放射の直後には X 線の大きな変動は見られなかった。

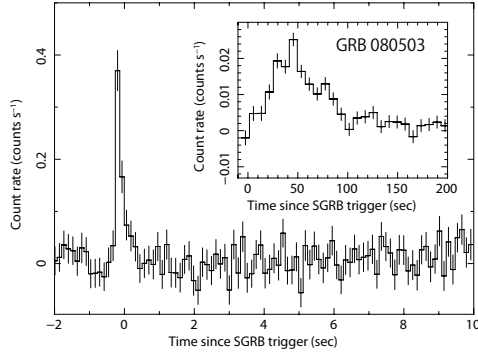


図 1: GRB 080503 の BAT での光度曲線

3 Results

3.1 Spectral Analyses of XRT data

次に XRT による観測データに対し、1 ビン当たり統計的に同じだけの光子数が含まれる様に時分割し、各々の時間間隔でのスペクトルに対してモデル Fit を行った。Fitting に用いた銀河系の内外の吸収を考慮したべき乗則のモデル式

$$N(E) = e^{-(N_H^{gal} + N_H^{ext})\sigma(E)} \times K \left(\frac{E}{1 \text{ keV}} \right)^{-\Gamma} \quad (1)$$

と黒体放射のモデル式

$$N(E) = e^{-(N_H^{gal} + N_H^{ext})\sigma(E)} \times \left(\frac{K \times 8.0525 E^2 dE}{(kT)^4 [e^{(E/kT)} - 1]} \right) \quad (2)$$

を示す。ここで、 $N(E)$ は単位時間当たり単位面積、単位時間、単位エネルギー当りの光子数 ($\text{counts cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{keV}^{-1}$)、 N_H^{gal} と N_H^{ext} はそれぞれ銀河系内と系外の水素原子の柱密度 (10^{22} cm^{-2})、 $\sigma(E)$ は光電吸収断面積 (cm^2)、 Γ は Photon Index、 kT は温度 (keV)、 K は規格化定数である。

図 2 に GRB 080503 の時分割したスペクトルに対して Fitting を行った結果を示す。図 2 から黒体放射のモデルは図の低エネルギー側と高エネルギー側で

外れているが、べき乗則のモデルでは全体としてより良く合っているように見られる。

また、図 3 に GRB 080503 の時分割したスペクトルの各々に対して Fitting を行う事で得られる reduced χ^2 を SGRB のトリガーからの時間変化としてプロットしたものである。図 3 から、reduced χ^2 はべき乗則は 1 の周りに、黒体放射は 2~4 の周りでばらついていることがわかる。

これらの結果から、観測された SGRB のトリガーから ~100 秒後の X 線のスペクトルは、べき乗則で良く記述でき、黒体放射は適さないと言える。

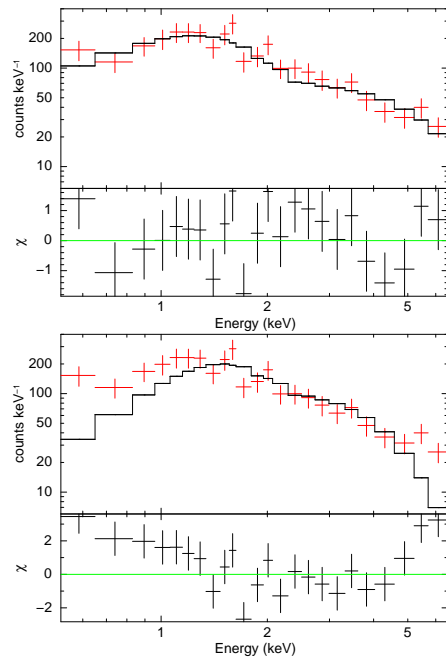


図 2: 時分割したスペクトルへの Fitting 結果 (上:べき乗則 下:黒体放射)

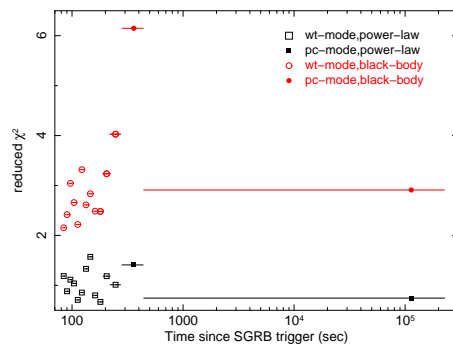


図 3: GRB 080503 の reduced χ^2 分布

3.2 Enerby Lightcurve and Photon Index Index

時分割したスペクトルに黒体放射で Fit して得られた、2-10 keV の帯域でのエネルギーフラックス F ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)、Photon Index Γ 、銀河系外の水素柱密度 N_H^{ext} をそれぞれの SGRB のトリガーを原点とした時間変化の例を図 4 に 2 つ示す。GRB 080503 のような Photon Index Γ の急激な軟化が 5 つのイベントで見られた。またフラックスの減光の仕方には GRB080503 の様に指数関数的に急激に暗くなる成分と GRB 090510 の様に単一のべき関数のように暗くなる成分の 2 種類が見られた。この Photon Index の軟化、急激な減光、また図 1 で調べた E.E. の有無についてそれぞれ表 1 にまとめた。E.E. が見られた GRB 050724, 070714B, 080503 にはスペクトルの軟化が見られ、このうち GRB 050724, 080503 には急激な減光が見られた。これらから、E.E. はスペクトルの軟化を持ち、急激な減光をもつものがあると考えられる。一方、GRB100702A は急激な減光、スペクトルの軟化は見えてたが BAT では E.E. が見られなかった。これは、BAT の X 線感度より E.E. が暗かったため検出できなかったと考えられる。

また、図 2 に急激な減光が見られた SGRB の光度曲線に対し、指数関数で Fitting した結果を示す。3 つの結果から、時定数はおおよそ 50-100 秒程度となることが分かる。

表 1: E.E., 急激な減光, スペクトルの軟化の有無

GRB	E.E.	rapid decay	spectral softening
050724	YES	YES	YES
051221A	NO	NO	NO
060313	NO	NO	YES
070714B	YES	NO	YES
080503	YES	YES	YES
090510	NO	NO	NO
100702A	NO	YES	YES
120804A	NO	NO	NO

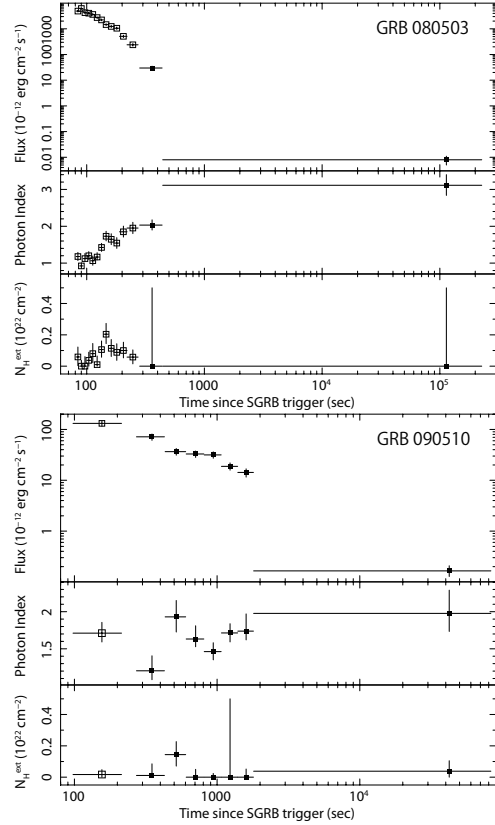


図 4: Flux, Photon Index, N_H^{ext} の時間変化

表 2: 光度曲線の急激な減光への指数関数 Fitting

GRB	time constant[sec]	d.o.f	reduced χ^2
050724	52.2 ± 0.9	19	4.3
080503	51.9 ± 1.3	11	1.7
100702A	91.1 ± 8.6	2	4.0

4 Discussion

急激な減光とスペクトルの軟化の相関について調べる。単位面積、単位時間、単位周波数当りのエネルギーフラックス F_ν ($\text{keV cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$) を $F_\nu \propto t^{-\alpha} \nu^{-\beta}$ としたとき、相対論的な速度のジェットが一樣に瞬間的に光ることを想定した標準的なモデルを考えた場合の temporal index α と spectral index β には一般的に $\alpha = \beta + 2$ ($\beta = \Gamma - 1$) の関係がある (Kumar & Panaitescu 2000)。表 1 から急激な減光とスペクトルの軟化どちらも見られた GRB 050724, 080503, 100702A の α - β 関係を調べた。

GRB の変動や小さなフレアなどの影響によると考えられるエネルギーフラックスは図 4 上のように時間によっては増光している部分が見られる。これらの影響を避けつつ、急激な減光の基本的振る舞いを見るために、指数関数 $F \propto \exp(-t/\tau)$ (τ :時定数) で Fitting した結果を仮の光度曲線とし、元の光度曲線の各々の時間間隔でべき関数 $F \propto t^{-\alpha}$ で Fitting して α を見積もった。 β は、スペクトル解析で得た Γ から $\beta = \Gamma - 1$ で求めた。

これらから得られた GRB 050724, 080503, 100702 の α - β 関係を図 5 に示す。黒線は $\alpha = \beta + 2$ である。 α の誤差に、仮の光度曲線を用いずにフラックスを隣合う 3 点に対してべき関数で Fitting を行って見積もった α の平均的な 1σ の誤差 $\Delta\alpha = \pm 0.8$ を与えた。色のついた点線は、各々の SGRB の α - β を線形で Fitting した結果であるが、これらの傾きは $\alpha = \beta + 2$ の α の傾き 1 からは、 3σ 以上の信頼度で有意に外れていた。また、各々の SGRB は $\alpha = \beta + 2$ の線から左右にずれていることが見られ、 $\alpha < \beta + 2$ の領域 (黒線の左側) にある場合は、減光が進まず中心エンジンが活動を続けていることを示している。これは、E.E. が数 100 秒まで光っていることと矛盾しない。一方、 $\alpha > \beta + 2$ の領域 (黒線の右側) にある場合、減光が速く暗いことを示している。ジェットは相対論的ビーミングにより、観測者が見えるジェットの範囲はジェットの広がり角 $\theta_{jet} \sim 1/\Gamma$ である。時間が経つとジェットの速度が遅くなることでローレンツ因子 Γ が小さくなり、ジェットの外側が見えてくるが、この外側が暗いため、ジェットの広がり方は一様ではなく外側が暗い構造をもっていると考えられる。

5 Conclusion

XRT による SGRB の観測データの解析から以下のことが分かった。

1. SGRB 直後に見られる Extended Emission(E.E.) のスペクトルはべき乗則で良く記述でき、黒体放射は適さない。
2. 指数関数的な急激な減光は一般に E.E. によるものである。

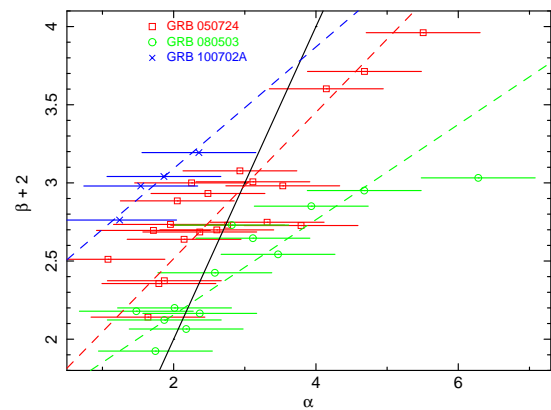


図 5: α - β 関係

3. 急激な減光は指数関数でよく記述でき、その時の時定数は 50-100 秒である。
4. α - β 関係から、E.E. は一様瞬間的なジェットモデルでは説明出来ず、外側が暗い構造をもっている。

Reference

- Norris, J. P., & Bonnell, J. T. 2006, ApJ, 643, 266
 Kumar, P. & Panaitescu, A. 2000, ApJ, 541, L51