

Swift/BAT と Suzaku/WAM を用いた サブミリ/ミリ波残光検出 GRB の特性調査

榎本 淳一 (埼玉大学大学院 理工学研究科)

Abstract

ガンマ線バースト (GRB) は、宇宙のある一点から膨大な量のガンマ線が突発的に放出される宇宙最大規模の爆発現象である。放射時間は数ミリ秒から数百秒程度で、その放射エネルギーは 10^{51} – 10^{53} erg にも達する。GRB には、ガンマ線放射のあとに数時間から数日にかけてゆっくりと減光していく X 線や電波の放射が付随することがあり、これを残光と呼んでいる。なかでも他の波長に比べ観測例の少ないサブミリ波/ミリ波による残光の観測は、GRB の未解決問題に取り組む上で重要な手段である。Sub-Millimeter Array (SMA) は素早いフォローアップによってリバースショックの観測に成功し、X 線および可視光残光の時間進化がシンクロトロン自己逆コンプトンによる放射で説明できることを明らかにした (Urata et al. 2014)。また偏光観測から、低温の熱的電子を考慮した GRB 総放出エネルギーが推定でき、親星の質量に制限を付けることも可能となる (Toma et al. 2008)。サブミリ波によるさらなる詳細なフォローアップ観測を行うためには、現在の望遠鏡における検出可能条件の特定が必要である。例えば、サブミリ波で 1-2% の偏光を捉えるには、ALMA でも数ミリ Jy 以上の明るいイベントが要求される。ALMA はすでに偏光観測も可能であり、電波残光を伴う GRB の特徴を分析しフォローアップ観測の方針を立てるのは急務である。そこで本研究では、サブミリ波観測の方針を定める基盤として、サブミリ波/ミリ波残光が付随する GRB の特性を系統的に調べた。サブミリ波/ミリ波でのフォローアップ観測がなされている GRB うち、21 個をサンプルとして選び出し解析を行った。解析は Swift/BAT と Suzaku/WAM の観測データを用いて広帯域スペクトルを求め、プロンプト放射の特性と多波長における残光の特性、プロンプト放射のガンマ線 Fluence と X 線および可視光残光の明るさの関係、GRB 観測において経験的によく知られている Amati 相関 $E_{\text{peak}} - E_{\text{iso}}$ や、Ghirlanda 相関 $E_{\text{peak}} - E_{\gamma}$ 相関上での振る舞いを調べた。本発表では、これらの詳細な解析方法と結果について報告する。

1 Introduction

ガンマ線バースト (GRB) とは、宇宙の一点から膨大な量のガンマ線が放出される宇宙最大規模の爆発現象である。明るい γ 線、X 線、可視光、および cm 波の GRB 残光観測は、GRB が宇宙論的遠方における大質量星の爆発で発生することを示す (e.g.; Stanek et al. 2003) など、GRB の物理に対する理解を深めてきた。さらに、宇宙再電離時代の GRB ($z \sim 8$; Tanvir et al. 2009) も発見され、質量推定がメジャートピックである第一世代星と GRB 親星の関連も示唆された。しかし、可視光リバースショック成分の消失、残光の放射機構、親星の質量推定のような未解決問題も依然として存在する。

特にサブミリ波観測は、上記の未解決問題に取り

組む上で重要な手段の一つである。Sub-Millimeter Array (SMA) は素早いフォローアップによってリバースショックの観測に成功し、X 線および可視光残光の時間進化がシンクロトロン自己逆コンプトンによる放射で説明できることが示された (Urata et al. 2014)。

これらの観測に加えて、Toma et al. (2008) では、サブミリ/ミリ波偏光観測は低温の熱的電子を考慮した GRB 総放出エネルギー推定の鍵となると予想されている。一般に可視光残光ではファラデー効果が弱く、隠れた電子成分の調査に用いるのは難しい。また、VLA の帯域はファラデー効果に打ち勝つシンクロトロン自己吸収を受けるため、吸収が弱いサブミリ波での観測は重要となる。

サブミリ波によるさらなる詳細なフォローアップ観測を行うためには、現在の望遠鏡における検出可

能条件の特定が必要である。cm 波において Chandra & Frail (2012) で検証されたように、検出可能条件とプロンプト γ 線 フルーエンス、総エネルギーなど、いくつかの物理的なパラメータの間には相関がある。サンプルは多くないがサブミリ波の統計的または検出可能条件を探る研究は、さらなるフォローアップの手助けとなり得る。例えば、サブミリ波で 1-2% の偏光を捉えるには、ALMA でも数ミリ Jy 以上の明るさが必要である。ALMA はすでに偏光観測も可能であり、電波残光を伴う GRB の特徴を分析しフォローアップ観測の方針を立てるのは急務である。

そこで本研究では、サブミリ波フォローアップのある 21 個の GRB に対して、観測方針の基盤としてプロンプト放射の特性を求めることに焦点を当てる。スペクトルのピークエネルギー E_{peak} 、等方的な総放射エネルギー E_{iso} をより正確に求めるために Suzaku/WAM を用い、Swift/BAT と合わせて広帯域スペクトルフィッティングを行った。また、サブミリ波検出可能条件とその他のバンドの残光との相関を調べるため多波長の残光データを集めた。

2 submm/mm Afterglow Samples

今回の調査に用いた 21 個の GRB サンプルは、GCN および出版された論文を基に選別した。ALMA の観測条件も考慮し、Swift が検出した後のイベントを選別した。サブミリ/ミリ波残光の未検出の基準に関しては、GRB 発生後の 10 日間で 7mJy に満たないものを未検出とした。

また、スペクトルピークエネルギー E_{peak} および等方放射を仮定した総放射エネルギー E_{iso} に、より制限を付けるために Swift/BAT と Suzaku/WAM による同時観測イベントを選んだ。これらの値を得ることで、 $E_{\text{peak}}^{\text{src}} - E_{\text{iso}}$ と $E_{\text{peak}}^{\text{src}} - E_{\gamma}$ の関係を推定できる (Ghirilanda et al. 2007)。

3 Analysis

Suzaku/Wide-band All-Sky Monitor(WAM; Yamaoka et al. 2009) は、Suzaku に搭載されている Hard X-ray Detector(Takahashi et al. 2007) のシール

ドである。50-5000keV のエネルギー帯域をカバーし、 E_{peak} を決定できる強力な GRB 検出器である。さらに、Swift/BAT との同時フィットによってより E_{peak} に制限をつけることができる。

BAT のデータ処理は、HEADAS version 6.1.4 に含まれる標準的な BAT 解析ツールを用いて行った。**bat-grbproduct** でプロセスし直し、**batbinevt** で時間平均スペクトル、**batdrngen** でレスポンスを生成した。時間領域は、両検出器で得られた $T90$ をカバーしていること、またライトカーブの形状から決定した。平均スペクトルに対する系統誤差は、**batphasyserr** で求めた。WAM の関しても、HEADAS の **hxdmkwamspec** で時間平均スペクトルを求めた。バックグラウンドは多項式フィッティングによって推定される (Sugita et al)。レスポンスは、Monte-Carlo response generator を使用した (Ohno et al. 2008)。

スペクトル解析には、XSPEC version 12.8.1 を用い、power-law(PL)、power-law with exponential cut-off(CPL)、Band function(Band) の 3 つのモデルを適用した。同時フィットの際に、BAT の normalization factor を 1 とし、WAM はフリーパラメータとした。15-5000keV の広帯域フィットにより、21 個の GRB のうち 16 個の GRB の $E_{\text{peak}}^{\text{obs}}$ を有意に求めることができた。

CPL と Band における GRB 静止系での νF_{ν} スペクトルのピーク $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ は、式 $E_{\text{peak}}^{\text{src}} = E_{\text{peak}}^{\text{obs}(1+z)}$ より得られる。ここで z は赤方偏移値である。また、等方放射エネルギー E_{iso} は、宇宙論パラメータ $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0.27$, $\Omega_{\Lambda} = 0.73$ を仮定して見積った。

4 Properties of Prompt Emission

図 1 は、光子指数 α 、 νF_{ν} スペクトルピーク (観測者系) E_{peak} 、フルーエンス (15-150keV) のプロットである。 α -Fluence 図に示した点線は、シンクロトロンショックモデル (1988) が要求する α の範囲 $-3/2 < \alpha < -2/3$ である。図 2 でこの下限を下回る PL の α が 2 つあることが分かる。

5 Properties of Multi-wavelength Afterglow

図 3 は、GRB 発生から 11 時間後の可視光残光等級と X 線フラックスの分布を表している。サブミリ波残光検出 GRB のサンプル数は少ないものの、サブミリ波を検出した GRB に明るい可視光残光が多いことが分かる。これは、可視光とサブミリ波が同じシンクロトロン放射機構を共有していることを示唆する結果である。

6 Discussion

BAT と WAM を用いた 15-5000keV の広帯域フィットによって、サブミリ波検出 GRB も含めた 21 個の GRB についてスペクトル特性を求めることができた。

図 1 において光子指数 α は、その平均値と標準偏差が CPL:(-1.0, 0.3)、Band:(-1.2, 0.2) であり $-3/2 < \alpha < 2/3$ の範囲内に収まっているが、2つの PL モデルが下限値を下回っている。BAT と WAM での同時フィットにおいて似たケースが Krimm et al. (2009) で報告されており、GRB のフラックスが小さい場合、WAM の感度では高エネルギー側の光子指数 β が決まらないため、正確な Band の α が求まらなかったことが示唆されている。また、各モデルの E_{peak} の平均と標準偏差は CPL:(2.6,0.3)、Band:(2.0,0.3)、all:(2.4,0.4) であり、CPL のほうが Band よりも高い。この点も Krimm et al. (2009) で指摘されており、CPL がベストフィットのとき、Band でも再現できることから、 E_{peak} 以上のエネルギーに対して WAM のセンサーの感度不足が支持される。したがって、上記の 2つの PL の点を除けば全ての点が理論的要求の範囲内に収まるため、GRB プロンプトのガンマ線光子はシンクロトロン放射によって作られると考えが支持される。

図 3 ではそれぞれ、フルーエンスと X 線残光は正の相関、フルーエンスと可視残光は負の相関があるように見える。この結果は、残光の明るさは GRB 総エネルギーに比例しその比率によって決まると言える。しかし可視残光の図では、GRB090709A は相関から外れ非常に暗いところに位置するものがあることも分かる。

GRB 観測において経験的によく知られている Amati 相関 $E_{\text{peak}}^{\text{XRC}} - E_{\text{iso}}$ を図 5 に示した。 $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ は GRB の静止系における νF_{ν} ピークエネルギー、 E_{iso} は等方放射の総エネルギーである (Amati (2006), Krimm et al. (2009))。この図において、黒い実線は $E_{\text{peak}} = 173 \times E_{\text{iso}}^{0.51}$ であり、青い部分がログスケールでの偏差である。また、バーストをジェットと仮定したとき、得られた E_{iso} とジェットブレイクの時間から、ジェットのオープンアングルと視準軸補正をした E_{γ} を求めた。これを基に、 $E_{\text{peak}}^{\text{src}} - E_{\gamma}$ を図 5 に示した。これらの図からはサブミリ検出 GRB と未検出 GRB で有意な差みられなかった。

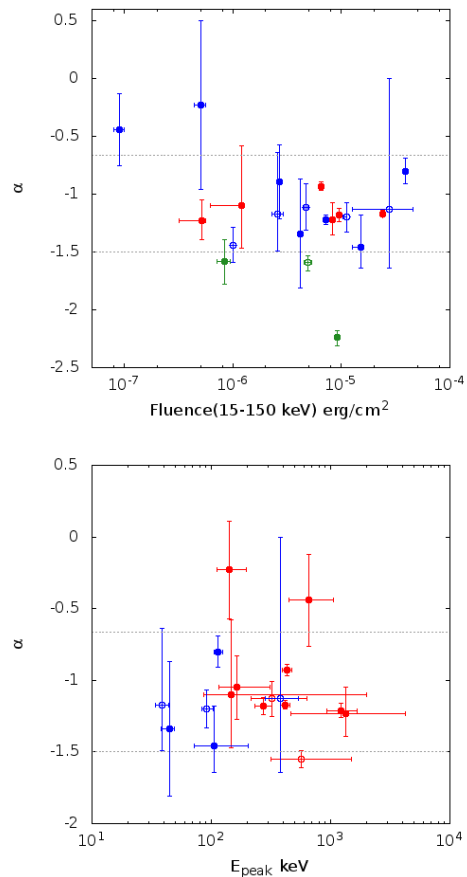


図 1: α , E_{peak} の散布図。塗りつぶされていない点はサブミリ波残光検出 GRB であり、塗りつぶされた点は未検出である。各点の色は、緑: PL、赤: CPL、青: Band を表している。

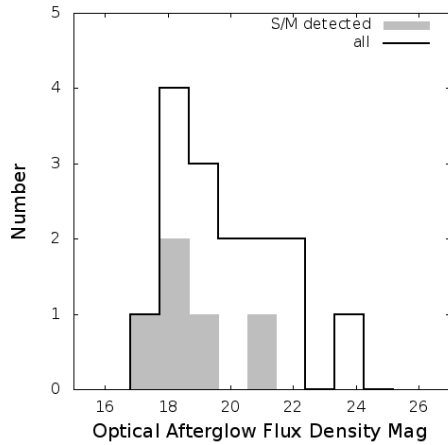


図 2: GRB 可視残光の等級の分布図。実線は全ての GRB 残光を、灰色はサブミリ/ミリ波残光検出 GRB を表す。

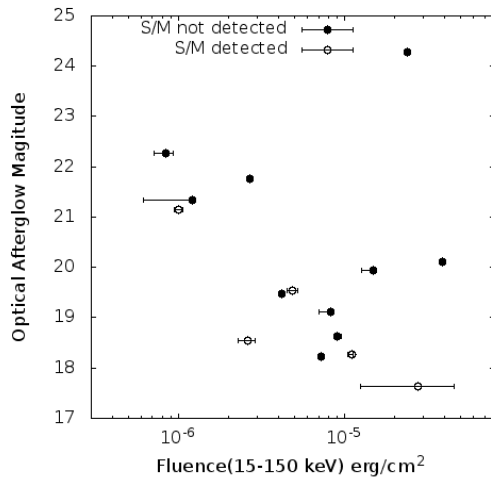


図 3: 可視残光等級、プロンプト放射 Fluence の分布図。白の点はサブミリ波残光検出 GRB を、黒の点は未検出 GRB を表す。

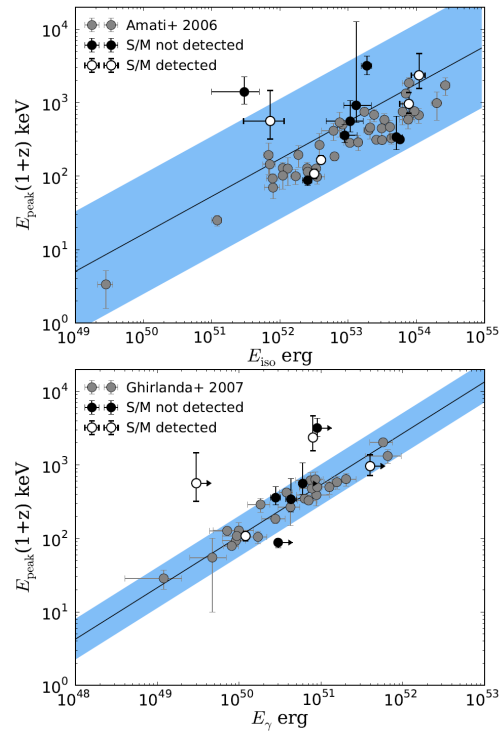


図 4: $E_{\text{peak}}^{\text{src}} - E_{\text{iso}}$ (Amati et al. (2006)), $E_{\text{peak}}^{\text{src}} - E_{\gamma}$ (Ghirlanda et al. (2007)). 灰色の点がこれらを表す。また、白の点はサブミリ波残光検出 GRB を、黒の点は未検出 GRB を表す。青い領域はログスケールでの 3σ の範囲を表す。

Reference

- Urata et al. 2014
- Toma et al. 2008
- Urata et al. 2013
- Stanek et al. 2003
- Tanvir et al. 2009
- Ghirilanda et al. 2007