かなた 望遠鏡を用いた X 線フレアを伴う ガンマ線バースト残光の時間変動スペクトルの研究

## 広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文研究室

M074360 上原 岳士

主查: 深澤 泰司 副查: 杉立 徹

2009年2月10日

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst;GRB) とは宇宙で最大の爆発現象であり、10<sup>-2~2</sup> 秒 の間ガンマ線パルスを複数出す。その後も残光としてX線から電波までの多波長にわたり 放射が観測され、残光光度は時間の冪乗 (冪指数は~-1)で減光する(後に normal 減光と 呼ばれる)。GRB の起源は、ほぼ光速で放出された電子・陽電子プラズマの塊がその速度 差のため互いが衝突合体し(内部)衝撃波を起こすことで、ガンマ線が放射されると考え られている。またその後、合体した塊が星間物質と衝突し(外部)衝撃波を起こすことで、 X線から電波域で残光が観測されると考えられている。2004年以降、GRB 観測専用衛星 Swift によって多くの GRB の初期残光が従来の描像とは異なる振舞を示すことが明らか になった。特に、約半数の残光でX線フレアが観測されることが明らかになった。これら 新たに観測された振舞の起源は未だわかっていない。X線フレアを内部衝撃波起源と考え る理論が現在は有力だが、その理論を検証するためにはフレア時の多波長観測が必要であ る。しかし、そのような観測例は依然少ない。そのため、X線フレアの3割程度にあたる 振幅の大きなものに対しては内部衝撃波理論が支持されているが、残りの7割以上を占め る弱いフレアの起源については、外部衝撃波起源と考える理論を排除しきれていない。

2007年11月12日と2008年5月6日に*Swift*衛星がとらえたGRB 071112CとGRB 080506 をかなた望遠鏡とTRISPEC 検出器を用いて、赤外2バンドと可視1バンドの同時観測に 成功した。これらのX線残光にはGRB 071112Cでは弱いX線フレア、GRB 080506では 変動の遅いX線フレアが観測された。他観測所で得られた公開データも用いることで、近 赤外~X線までにおいてX線フレア前後から密な観測データを得ることができた。

まず、normal 減光(後期残光)では、外部衝撃波モデルでよく説明できるとされていたが、初めて得られた可視赤外線データにより、GRB 071112CではX線成分に超過成分や、GRB 080506 では外部衝撃波モデルの細かいパラメータの調整の可能性を示した。

次に、X線フレアでは、先行研究によると、GRB 071112C と GRB 080506 のような振幅の小さいまたは変動の遅いX線フレアは外部衝撃波でも説明が可能とされる。今回新たに得た赤外~紫外線のデータを含めると、GRB 071112C と GRB 080506 のX線域ではX線フレア時に3倍と15倍増光、一方、赤外~紫外線では有意な変動はなく、変動振幅の上限は35% と 29% である。また、X線のスペクトルは通常の減光期、フレア増光期とフレア減光期とを比べると冪指数が GRB 071112C では -0.83±0.04、-0.34±0.15 そして -0.62±0.06、GRB 080506 では -1.08±-0.10、-0.84<sup>+0.15</sup>/-0.16、そして -1.46<sup>+0.11</sup>/-0.12 と有意に変動している。一方、それに対して近赤外~紫外線域のスペクトルの冪指数はGRB 071112C では -0.14±0.09、-0.15±0.09、そして -0.15±0.09、GRB 080506 では全て -0.74±0.05 であり全く変動していない。外部衝撃波由来ならば、X線の変動と同期して可視赤外線域でも変動するはずである。従って、このX線フレアは外部衝撃波由来ではなく内部衝撃波由来である可能性が高い。

本研究によって、強いX線フレアと同様、弱いX線フレアの起源も内部衝撃波であることが強く示唆された。

目 次

第1章	序論	6
1.1	研究の背景	6
	1.1.1 ガンマ線バーストの研究の歴史	6
1.2	GRB 残光の放射メカニズム..............................	11
	1.2.1 fireball から内・外部衝撃波モデル	11
	1.2.2 外部衝撃波モデルのスペクトルと光度曲線	11
	1.2.3 外部衝撃波モデルの減光指数とスペクトル指数の関係	14
	1.2.4 X線フレアの起源	17
1.3	GRB 母銀河	20
	1.3.1 既知銀河のダスト吸収則	20
	1.3.2 GRB 残光と外部衝撃波を用いた GRB 母銀河の研究	22
	1.3.3 GRB 母銀河の視線方向の水素柱密度 N <sub>H</sub> の不定性	23
1.4	本研究の目的....................................	24
第2章	本研究で用いる GRB 観測機器	25
2.1	かなた望遠鏡...................................	25
	2.1.1 基本性能	25
	2.1.2 TRISPEC	26
2.2	Swift 衛星	28
	2.2.1 BAT	29
	2.2.2 XRT	29
	2.2.3 UVOT	30
労っ辛	CDB 071112C	22
<b>おう</b> 早 ○ 1		<b>33</b>
3.1		33
	3.1.1 かんに呈退現による観測	33
2.2		35
3.2		30
3.3	近赤外~ X線の Spectral Energy Distribution (SED)	39
		39
		40
2.4	3.3.3 可視亦外線 SED と GRB 母銀河の吸収補止	41
3.4		44
	5.4.1         X 緑の 順 光 指 数 と 人 へ ク ト ル 指 数	44
	<b>3.4.2</b> 標準的な減尤期の亦外線~ X 線までの SED の時間変化	44
	3.4.3 GRB までの視線万回の水素重推定	46
	3.4.4 X線フレアの近亦外線からX線までの振舞	47
3.5	GRB 071112C まとめ	53

第4章	GRB 080506	54
4.1	観測	54
	4.1.1 かなた望遠鏡による観測	54
	4.1.2 XRT	55
4.2	光度曲線の様子とフィッティング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	56
	4.2.1 X線スペクトル	59
	4.2.2 近赤外線—紫外線域 SED の作成	60
	4.2.3 GRB 母銀河とダスト吸収曲線	61
4.3	議論	64
	4.3.1 X線の減光指数とスペクトル指数	64
	4.3.2 外部衝撃波モデルと光度曲線スペクトルの関係	64
	4.3.3 X線フレアの近赤外線からX線までの振舞	64
4.4	GRB 080506 まとめ	66
第5章	本研究のまとめと課題	67
5.1	本研究のまとめ...................................	67
5.2	課題	67

# 表目次

1.1	減光の振舞の時間のべきの指数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
1.2	減光指数とスペクトル指数の関係	15
1.3	GRB 071112C に用いた可視赤外線減光補正量	21
2.1	望遠鏡の仕様....................................	26
2.2	TRISPEC の性能の概要	26
2.3	TRISPEC の等級から Flux Density (mJy) への変換式	27
2.4	Swift 衛星 BAT 検出器と他の衛星の検出器との比較	29
2.5	Swift 衛星 XRT 検出器の概要	30
2.6	UVOTの基本性能	31
2.7	UVOT の等級から count rate、count rate からフラックスへ変換	31
3.1	GRB 071112C の解析に用いたデータ。	34
3.2	GRB 071112C 残光の期間名	37
3.3	GRB 071112C 残光の減光指数	38
3.4	GRB 071112C 残光 X 線のスペクトル指数	40
3.5	GRB 071112C に用いた可視赤外線減光補正量	42
3.6	GRB 071112C の 6 期間の近赤外線 ~ 紫外線 SED を powerlaw でフィットし	
	たときのスペクトル指数 $\beta_{0}$ 。	43
4.1	GRB 080506 の解析に用いたデータ。	55
4.2	GRB 080506 残光の期間名	57
4.3	GRB 080506 残光の減光指数	57
4.4	GRB 080506 残光 X 線のスペクトル指数	59
4.5	GRB 080506 の 6 期間の近赤外線 ~ 紫外線 SED を powerlaw でフィットした	
	ときのスペクトル指数 $\beta_{0}$ 。	62



1.1	GRB の光度曲線	7
1.2	1974年4月14日と27日のGRBの2keV-5.1MeVのスペクトル	7
1.3	BATSE の発見:GRB が等方的に分布	8
1.4	GRB の継続時間 T <sub>90</sub> の頻度分布	8
1.5	Hardness ratio と継続時間 T <sub>90</sub> の関係	8
1.6	GRB の赤方偏移の分布	9
1.7	最初の三時間の GRB 残光の X 線光度曲線	9
1.8	最初の三時間の GRB 残光の X 線光度曲線の概念図	10
1.9	fireball から内・外部衝撃波モデルの概念図...............	11
1.10	外部衝撃波 モデルのスペクトルと光度曲線.............	13
1.11	外部衝撃波 モデルが再現した光度曲線	14
1.12	外部衝撃波モデルの減光指数とスペクトル指数の関係........	16
1.13	外部衝撃波モデルの減光指数とスペクトル指数の関係........	16
1.14	考えられているX線フレアの起源	17
1.15	残光中に変動が起こったときの模式図と変動の起源の選別図	18
1.16	X 線フレアの起源と時間幅比・増光フラックス比関係........	19
1.17	GRB 母銀河のイメージ	20
1.18	よく知られている銀河のダスト吸収曲線	21
1.19	GRB 残光と外部衝撃波を用いた GRB 母銀河ダストの吸収曲線	22
1.20	GRB 母銀河の視線方向の水素量推定	23
2.1	天文台ドーム....................................	25
2.2	かなた望遠鏡...................................	25
2.3	TRISPECの光路と二枚のダイアロックミラー	27
2.4	Swift 概念図	28
2.5	Swift による GRB の観測の流れ	28
2.6	UVOT のそれぞれのフィルターの波長領域と感度	32
3.1	GRB 071112C 発生前と発生後の可視のイメージ	33
3.2	GRB 071112C $\mathcal{O}$ XRT/Windowed Timing $\succeq$ Photon Counting mode $\mathcal{O} \prec \prec \neg \checkmark$	35
3.3	GRB 071112C 残光の赤外線から X 線までの光度曲線	36
3.4	GRB 071112C 残光の X 線光度曲線のフィット	37
3.5	近赤外線—紫外線域全バンドの GRB 071112C 光度曲線のフィット	38
3.6	二成分吸収 powerlaw model でフィットした GRB 071112C のX線スペクトル	39
3.7	GRB 071112C の光度曲線のフィット結果から作成した 6 期間の SED	41
3.8	ダスト吸収を補正する前後 GRB 071112C の可視赤外線 SED	43
3.9	GRB 071112C の赤外 ~ X 線までの SED	45
3.10	X-ray Break 期での GRB 母銀河のダスト吸収モデルが天の川とした SED .	46

3.11	GRB 071112C の紫外線 ~ X 線までの SED	47
3.12	X 線フレア起源とその時間幅比・増光フラックス比関係	48
3.13	fast cooling で $v_0 < v'_c$ のときのX線フレアと残光の外部衝撃波モデル SED	49
3.14	fast cooling で $v'_c < v_0$ のときのX線フレアと残光の外部衝撃波モデル SED	51
3.15	fast と slow cooling の境界条件のときの X 線フレアと残光の外部衝撃波モ	
	デル SED	51
3.16	slow coolingのときのX線フレアと残光の外部衝撃波モデルの SED	52
41	GRB 080506 発生前と発生後の可視のイメージ	54
4.2	GRB 080506 $\mathcal{O}$ XRT/Windowed Timing $\mathcal{E}$ Photon Counting mode $\mathcal{O}\mathcal{I} \times -\tilde{\mathcal{I}}$	55
4.3	GRB 080506 残光の赤外線からX線までの光度曲線	56
4.4	GRB 080506 残光のX線光度曲線後期の powerlaw フィット	57
4.5	GRB 080506 残光の可視赤外線光度曲線の broken powerlaw フィット	58
4.6	二成分吸収 powerlaw model でフィットした GRB 080506 のX線スペクトル	59
4.7	GRB 080506の光度曲線のフィット結果から作成した 6 期間の SED	60
4.8	ダスト吸収を補正した GRB 080506 の可視赤外線 SED	62
4.9	GRB 071112C の赤外 ~ X 線までの SED	63
4.10	GRB 080506 母銀河と既知銀河のダスト吸収曲線	65

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 ガンマ線バーストの研究の歴史

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst, 以下 GRB) とは突然、天球のある一点から 0.01— 300 秒にわたり他の天体の 100 倍以上の明るさ (Flux =  $10^{-6}$  erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>) のガンマ線が 多数のパルス状に到来する (図 1.1)。そのガンマ線のエネルギーは 250 keV 程度を極大に もち数 keV ~ 数 MeV であり、スペクトルは非熱的な放射である (図 1.2)。

GRBは1日あたり約1個の頻度で発生し、等方的に分布している(図1.3)。GRBの継続時間は長いものと短いものの二つに分かれ、図1.4はGRBのT90(バーストのフォトンの90%が入る時間)毎の個数分布である。2秒を境にして2つの分布に分かれ、2秒以下のものを short GRB、2秒以上のものを long GRB と呼ぶ。また図1.5は、Hardness ratioと継続時間の関係を示したものであり、縦軸は100-300 keVのカウント数を 50-100 keVのカウント数で割ったもの、横軸はT90である。これは short GRBのスペクトルが高エネルギー側で、long GRBが低エネルギー側の傾向にあることがわかる。従って、long GRB と short GRB は起源が違うと言われており、short GRBの起源は中性子星と中性子連星、またはブラックホールと中性子星の連星の合体が最も有力ではある。以後、本論文では long GRB のみについて述べる。

long GRB は数秒から長いもので数 100 秒間ガンマ線で明るく輝くが、その後に、X線~ 電波まで残光として輝いており、時間の冪乗(ベキ指数~-1)で減光していることが観測され た。GRB 後のフォローアップ観測の必要性がわかったため、GRB Coordinate Network(GCN) のような GRB 発生のアラートをインターネットで全世界に発信する体制を構築された。 その結果、たくさんのフォローアップ観測に成功し、その残光から long GRB は宇宙論的 な距離 (100 臆光年)に存在する銀河に付随することが明らかになった。また、 long GRB の発生した銀河に Ic 型超新星が観測されたことから、 long GRB の起源は初期宇宙に生ま れた大質量星の重力崩壊が最も有力である。この重力崩壊によって火の玉 (fireball)が発生 して相対論的にり熱膨張し、運動エネルギーに変えられ、電子・陽電子プラズマの多数の 塊がほぼ光速まで加速される。それらの塊の速度差のため互いが衝突合体し (内部) 衝撃 波を起こすことで、ガンマ線が放射されると考えられている。またその後、合体した塊が 星間物質と衝突し (外部) 衝撃波を起こすことで、X 線から電波域で残光が観測されると 考えられている。

long GRB はブラックホールの誕生に伴う現象とも言われており、また、その明るさと宇宙論的な距離で起こることを利用して、初期宇宙の解明のてがかりにも期待されている。



図 1.1: GRB の光度曲線。横軸が GRB 発生後の時間、縦軸がガンマ線のカウンレートである。ガンマ線 帯域で激しい時間変動をし、多数のパルスがある。



図 1.2: 1974 年 4 月 14 日と 27 日の GRB の 2 keV-5.1 MeV のスペクトル (Metzger et al. 1974, Trombka et al. 1974)。横軸がエネルギー (keV)、縦軸が Flux Density(photon cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> keV<sup>-1</sup>) 250 keV 程度に折れ 曲がりがある。



図 1.3: BATSE が観測した GRB の発生場所を銀河座標で示したもの。GRB が等方的に分布しているのがわかる。





図 1.5: Hardness ratio と継続時間 T<sub>90</sub>の関係

図 1.4: 継続時間 T<sub>90</sub> の頻度分布

#### GRB 発生後三時間以内の初期残光

しかしながら、Swift 衛星が打ち上がって以来、光度曲線において外部衝撃波由来では 説明できない観測結果が示された (図 1.7)。減光の振舞いは、時間の経過とともに急な減 光(以下 steep decay)、平らな減光(以下 shallow decay)、そして従来(Swift 衛星以前)知ら れていた減光(以下 normal decay)を示し、図 1.8 のような光度曲線の折れ曲りが観測され た。特に、約半数の残光で図 1.7 の 500 秒あたりに見えるような X 線フレアを伴っている ことが明らかになった。それぞれのフラックスの減光の様子は、時間のべき乗で表され、 典型的なべき指数を表 1.1 で示す。また、steep decay は GRB のガンマ線の放射(プロンプ ト放射)と関係があることが予想されるなか、shallow decay や X 線フレアが起る原因は確 立されていない。

これらは、「2006年度上原卒業論文」で詳細に説明してある。



図 1.6: GRB の赤方偏移の分布。横軸赤方偏移、縦軸その数を赤方偏移の順に足し合わせて、全 GRB で 割った数。赤実線は Swift 以降の 148 の GRB、青実線は Swift 以前は 44 の GRB を用いている (2008 年 12 月までのデータ)。

光度曲線の振舞い	時間のべきの指数
急な減光	-3~ -5
傾らかな減光	-0.5~ -1.0
普通の減光	-1~ -1.5

表 1.1: X 線の光度曲線の概念図に示した減光の振舞と減光時間のべき指数。



図 1.7: GRB 発生から最初の三時間の残光の X 線光度曲線。縦軸フラックス、横軸時間の指数表示である。 従来の予想では、時間の冪指数 ~ -1 で減光するだけであった。従って、GRB 発生後約 300 秒後までの残光 初期の急な減光 (steep decay)、500 秒後の X 線フレア、そして 5000 秒後までの平らな減光 (shallow decay) はまったく予想できていなかった。



図 1.8: GRB 発生から最初の三時間の残光の X 線光度曲線の概念図。縦軸フラックス、横軸時間の対数表示である。予測できていなかった急な減光 (steep decay)、緩やかな減光 (shallw decay)、そして X 線フレアを示す。

### 1.2 GRB 残光の放射メカニズム

この節では、GRB 残光の放射メカニズムの理論的解釈について述べる。

### **1.2.1** fireball から内・外部衝撃波モデル

GRBの残光の観測的特徴を説明するため、さまざまな理論モデルが提唱されている。そのなかでも最も有力なモデルの一つが最初に正体不明のエネルギーの塊 (fireball)が生まれ、加速断熱膨張を開始すると述べた fireball モデル (Sari et al. 38, 37; Piran 35) である。図 1.9 に fireball モデルの概念図を示す。



図 1.9: fireball から内・外部衝撃波モデルの概念図。相対論的な速度で放出された複数の電子・陽電子プラ ズマの球殻状の塊 (シェル) がお互いの速度差のため衝突合体し (内部) 衝撃波を起こしガンマ線を放射 (プ ロンプト放射) し、その合体したシェルが星間物質 (ISM) に衝突し (外部) 衝撃波を起こし"残光"として電 波から X 線まで放射すると考えられている。

fireball モデルでは膨大なエネルギー *E* が小さな半径  $R_0$  で開放されたとする。ここで、 観測結果よりプロンプト放射の時間変動  $\Delta t \sim 10 \text{ ms}$  以下なので、 $R_0 \sim 10^7 \text{ cm}$  (=  $c\Delta t$ ) とな リ、エネルギー  $E \sim L_{\gamma}\Delta t \sim 10^{49} \text{ erg}$  と求まる。このエネルギーの塊は熱圧力により加速膨 張し、光速に近い相対論的な速度の電子・陽電子プラズマの球殻状の塊 (シェル) が様々な 速度 (ローレンツ因子  $\Gamma \sim$  数 100) で何度も噴きだされる。ここまでが"fireball モデル"で ある。

加速された複数のシェルがお互い激しく衝突し合体して、(内部)衝撃波を発生させる。 この衝撃波によって電子・陽電子プラズマがシェル内の磁場に反射され続け(フェルミ)加 速されて、シンクロトロン放射する。この放射がGRBとして観測されるガンマ線(プロ ンプト放射)を生みだすと考えられている。ここまでが"内部衝撃波モデル"である。

そして、その合体したシェルが周囲の星間物質に衝突することにより(外部)衝撃波が 発生し、同じように電子・陽電子プラズマが加速され、シンクロトロン放射する。この放 射が、プロンプト放射後に"残光"として電波からX線までの放射を生み出すと考えられて いる。

### 1.2.2 外部衝撃波モデルのスペクトルと光度曲線

この小区分では、外部衝撃波モデルが予測する電波からX線までのスペクトルと光度曲線について概要を述べる。

外部衝撃波により、一様な星間物質中で加速された電子のエネルギー分布は $(N(E) \propto E^{-p})$ であると考えられる。ここで、その分布で電子の最小エネルギーを $\gamma_m$ とする。また、シンクロトロン放射することにより電子の持つエネルギーは損失される。損失が電子のエネ

ルギーに対して無視できるかできないかの境界エネルギーを $\gamma_c$ とすると、その損失はエネルギーに依存していて、 $\gamma_c$ よりも高エネルギーの電子は損失が大きく電子のスペクトルが $E^{-(p+1)}$ に折れ曲がる。

このような電子からのシンクロトロン放射と cooling を受けていない電子からのシンク ロトロン放射のスペクトルは異なる。 $\gamma_m \ge \gamma_c$ のエネルギーを持つ電子がシンクロトロン 放射するスペクトルの最大強度の振動数を $v_m \ge v_c$ する。ある周波数以下では電子が放射 した光がすぐに周辺の電子にシンクロトロン吸収さされるので急激な減光をする。その ような周波数を自己吸収周波数 $v_a$ とする。これらの周波数は時間とともに低周波数へと 動く。

GRB 発生直後は,  $v_c < v_m$  であり, fast cooling と呼ばれる. 典型的に GRB 発生後 100 秒 を過ぎると,  $v_c > v_m$  となり, slow cooling と呼ばれる。以降, slow cooling での振舞いを見ていく。GRB の初期値として,総エネルギー *E* とし,そのうち  $\eta_e 0.1$ 、 $\eta_B = 0.01$  の割合 が電子,磁場に与えられるとする. さらに,GRB の周辺の星間物質が密度 n = 1/cm<sup>3</sup> で一様に分布しているとするとすると、各周波数は以下のような時間依存を示す。

$$v_m \propto t^{-3/2} \epsilon_B^{1/2} \epsilon_e^2 E^{1/2}$$
 (1.1)

$$v_c \propto t^{-1/2} \epsilon_B^{-3/2} n_1^{-1} E^{-1/2}$$
 (1.2)

$$\nu_a \propto \epsilon_B^{1/5} \epsilon_e^{-1} E^{1/5} \tag{1.3}$$

$$F_{\nu} = F_{\nu,max} \times \frac{(\nu_a/\nu_m)^{1/3}(\nu/\nu_a)^2}{(\nu/\nu_m)^{1/3}} \qquad (\nu < \nu_a) (\nu_a < \nu < \nu_m) (\nu_m < \nu < \nu_c) (\nu_c/\nu_m)^{-(p-1)/2} (\nu/\nu_c)^{-p/2} (\nu_c < \nu)$$
(1.4)

となり、図 1.10 の 左図の 下よう になる。 F<sub>v,max</sub> は、

$$F_{\nu,\max} \propto \epsilon_B^{1/2} n^{3/2} \Gamma^2 R^3 \tag{1.5}$$

と表され、磁場へのエネルギー変換効率( $\epsilon_B = 0.01$ )と電子へのエネルギー変換効率( $\epsilon_e = 0.1$ ) は一定、星間物質の密度分布一様である (n = 1/*cm*<sup>3</sup>)、バルクローレンツファクター $\Gamma \propto t^{-3/8}$ 外部衝撃波の半径  $R \propto \Gamma^{-2/3}$  であり、 $\Gamma^2 R^3$  は一定である。従って、全周波数で最大のフラックス  $F_{v,\max}$  は一定である。

以上ここまでは、「2006年度上原卒業論文」と「2006年度岡崎卒業論文」で詳細に説明 してある。



図 1.10: 外部衝撃波 モデルのスペクトルと光度曲線: 左の図は上が fast cooling と呼ばれる GRB 初期の時 間帯の縦軸フラックス密度 ( $\mu$ Jy) で横軸振動数 (Hz) のスペクトルである ( $Jy = 1 \times 10^{-23}$  erg/sec/cm<sup>2</sup>/Hz)。時 間が経過すると、下の slow cooling と呼ばれるスペクトルになる。典型的な周波数  $\nu_m$ 、 cooling 周波数  $\nu_c$ 、 そして自己吸収周波数  $\nu_a$  が時間の経過とともに低周波数側に向かう。右の図の下は外部衝撃波が予測する スペクトルの時間変動と、それに伴う光度曲線である。X 線、可視光、そして電波の周波数をそれぞれ  $\nu_X$ 、  $\nu_o$ 、そして $\nu_R$  とおいた。また、縦軸はフラックス密度、横軸は振動数 (Hz) である。(1) ~ (4) は代表的な時刻 でのスペクトルで、時間が経過とともにスペクトルの最大値  $F_{\nu,max}$  は変動せず矢印の向きにスペクトルが 低周波数側に移る。(5) の時刻 (約一日後) はジェットブレイク (ジェットが急に横に拡がり始める) したとき で、ここで初めて  $F_{\nu,max}$  が下がり始める。上の三つの小さいグラフは代表的な波長での光度曲線を表して いる。横軸は時間 (日) であり、右から X 線、可視光、そして電波である。

### 1.2.3 外部衝撃波モデルの減光指数とスペクトル指数の関係

外部衝撃波モデルは減光指数  $\alpha$  とスペクトル指数  $\beta$  が 1 対 1 の関係であることを予測している。この小区分では、様々な条件でのこの  $\alpha - \beta$  関係をまとめる。

例えば、slow cooling で*v<sub>c</sub>* < *v* の時で星間物質が一様な密度なところで衝撃波が起きた 場合の条件では、式 1.4 に式 1.1、1.2、1.3、1.5 を代入すると、

$$F_{\nu} \propto t^{-(3p-2)/4} \nu^{-p/2}$$
 (1.6)

と求めることができる。

このように他の場合でも代入すれば以下の図 1.11 のような光度曲線を得ることができる。fast cooling から slow cooling に移行する時刻  $t_0$  とし、図 1.10 の右スペクトル青線  $(v_c(t_0) = v_m(t_0))$ のように fast、slow cooling の境界のときの振動数  $v_0$  とすると、図 1.11 の 左図は  $v > v_0$ 、右図は  $v < v_0$ の振動数の光度曲線である。さまざまな条件の場合の  $\alpha \ge \beta$ の組合せを表 1.2 にまとめる。



図 1.11: 外部衝撃波モデルが再現した光度曲線。縦軸フラックス密度 ( $\mu$ Jy)、横軸時間 (日) である。左図は振動数が $v > v_0$ 、右図は $v < v_0$ のときの光度曲線である。

 $\alpha = 1.5\beta$ は $v_m < v < v_c(v$ は観測波長)のときで星間物質が一様な密度の場合を示す。 $\alpha = 1.5\beta + 0.5$ は $v_m < v < v_c$ のときで星風的な分布の場合を示す。 $\alpha = 1.5\beta - 0.5$ は $v > v_c$ でのときで GRB の周辺環境の星間物質が一様な密度と星風的な分布 (GRB を中心に距離の二乗で密度が薄くなる)の両方の場合を示す。

この α—β 関係と、観測されたデータを比較して、外部衝撃波モデルを検証したのが、 図 1.12 と図 1.13 である。図 1.12 は、左が可視域データ、右が X 線データである。両方の 図の直線上が外部衝撃波モデルを満たす条件である。可視域のデータは星間物質の吸収に よる不定性が残るためこの図をそのまま信用することはできない。X 線はその不定性がな いため、X 線データのみであれば、おおかた外部衝撃波モデルでよく説明できることがわ かる。

また、得られた減光指数  $\alpha$  とスペクトル指数  $\beta$  を表 1.2 に当てはめることで、放射電子のエネルギースペクトルのベキ p の値を求めることもできる。GRB 残光の典型的な値は p > 2 であり、このことき電子の最小のローレンツファクターからシェルのバルクローレンツファクター  $\Gamma$  を求めることができる。p < 2 の場合は、 $\Gamma$  は簡単には求まらない。p < 2 のときは  $\alpha$  と $\beta$  の関係も少し異なり、それらを考慮して  $\alpha$ — $\beta$  の理論的関係式を示したのが図 1.13 である。X線データから得られた  $\alpha$  と $\beta$  を用いてプロットしている。ほとんどのデータが実線上にのっていることから、p > 2 であることがわかる。

	$oldsymbol{eta}$	$\alpha \ (p > 2, \ p \sim 2.3)$	lpha(eta)	$\alpha \ (1$	lpha(eta)
ISM, slow cooling					
$ \nu < \nu_a \\ \nu_a < \nu < \nu_m \\ \nu_m < \nu < \nu_c \\ \nu > \nu_c $	$\begin{array}{c}2\\\frac{1}{3}\\-\frac{p-1}{2}\\-\frac{p}{2}\end{array}$	$\frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} \sim -1.0$ $\frac{\frac{3(1-p)}{2-3p}}{\frac{2-3p}{4}} \sim -1.2$	$\alpha = \frac{3\beta}{2}$ $\alpha = \frac{3\beta}{2}$ $\alpha = \frac{3\beta+1}{2}$	$\frac{\frac{17p-26}{16(p-1)} \sim -0.06}{\frac{p+2}{8(p-1)} \sim 0.9} \\ -\frac{\frac{3(p+2)}{8(p-1)} \sim -0.7}{-\frac{3p+10}{16} \sim -0.9}$	$\alpha = \frac{3(2\beta - 3)}{\alpha}$ $\alpha = \frac{3\beta - 5}{8}$
ISM, fast cooling					
$ \nu < \nu_a \\ \nu_a < \nu < \nu_c \\ \nu_c < \nu < \nu_m \\ \nu > \nu_m $	$\begin{array}{c}2\\\frac{1}{3}\\-\frac{1}{2}\\-\frac{p}{2}\end{array}$	$\begin{array}{c} 1 \\ \frac{1}{6} \\ -\frac{1}{4} \\ \frac{2-3p}{4} \sim -1.2 \end{array}$	$\alpha = \frac{\beta}{2}$ $\alpha = \frac{\beta}{2}$ $\alpha = \frac{3\beta+1}{2}$	$\begin{matrix} 1 \\ \frac{1}{6} \\ -\frac{1}{4} \\ -\frac{3p+10}{16} \sim -0.9 \end{matrix}$	$\alpha = \frac{\beta}{2}$ $\alpha = \frac{\beta}{2}$ $\alpha = \frac{3\beta - 5}{8}$
Wind, slow cooling					
$ \nu < \nu_a  \nu_a < \nu < \nu_m  \nu_m < \nu < \nu_c  \nu > \nu_c $	$\begin{array}{c}2\\-\frac{1}{3}\\-\frac{p-1}{2}\\-\frac{p}{2}\end{array}$	$\begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ \frac{1-3p}{4} \sim -1.5 \\ \frac{2-3p}{4} \sim -1.2 \end{array}$	$\alpha = \frac{3\beta - 1}{2}$ $\alpha = \frac{3\beta - 1}{2}$ $\alpha = \frac{3\beta + 1}{2}$	$\frac{\frac{13p-18}{8(p-1)}}{\frac{5(2-p)}{12(p-1)}} \sim 0.4$ $-\frac{p+8}{8} \sim -1.2$ $-\frac{p+6}{8} \sim -0.9$	$\alpha = \frac{2\beta - 9}{8}$ $\alpha = \frac{\beta - 3}{4}$
Wind, fast cooling					
$ \nu < \nu_a  \nu_a < \nu < \nu_c  \nu_c < \nu < \nu_m  \nu > \nu_m $	$2 \\ \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{p}{2}$	$2 \\ -\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{4} \\ \frac{2-3p}{4} \sim -1.2$	$\alpha = -\frac{\beta+1}{2}$ $\alpha = -\frac{\beta+1}{2}$ $\alpha = \frac{3\beta+1}{2}$	$2 \\ -\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{4} \\ -\frac{p+6}{8} \sim -0.9$	$ \begin{aligned} \alpha &= -\frac{\beta+1}{2} \\ \alpha &= -\frac{\beta+1}{2} \\ \alpha &= \frac{\beta-3}{4} \end{aligned} $
Jet, slow cooling					
$ \nu < \nu_a \\ \nu_a < \nu < \nu_m \\ \nu_m < \nu < \nu_c \\ \nu > \nu_c $	$\begin{array}{c}2\\\frac{1}{3}\\-\frac{p-1}{2}\\-\frac{p}{2}\end{array}$	$0 \\ -\frac{1}{3} \\ -p \sim -2.3 \\ -p \sim -2.3$	$\alpha = 2\beta - 1$ $\alpha = 2\beta - 1$ $\alpha = 2\beta$	$\frac{\frac{3(p-2)}{4(p-1)}}{\frac{8-5p}{6(p-1)}} \sim -0.8$ $\frac{-\frac{p+6}{4}}{-\frac{p+6}{4}} \sim -1.9$ $-\frac{\frac{p+6}{4}}{-\frac{p+6}{4}} \sim -1.9$	$\alpha = \frac{2\beta - 7}{\alpha}$ $\alpha = \frac{\beta - 3}{2}$

表 1.2: 減光指数、スペクトル指数、そして放射電子のエネルギースペクトルのベキ p の関係 (47)。ISM とは GRB の周辺環境の星間物質が一様な密度の場合。Wind とは星風的な分布 (GRB を中心に距離の二乗 で密度が薄くなる)の場合。Jet とはバルクローレンツファクターが小さくなり、ジェットブレイク (ジェットが急に横に拡がり始める)した後の場合。また、ここでの  $\alpha \ge \beta$  は、 $F \propto t^{-\alpha}v^{-\beta}$ で示しており、これまで の説明とは符号が反対になっているので注意。



図 1.12: 外部衝撃波モデルの減光指数とスペクトル指数の関係 (27)。縦軸はそれぞれ可視域とX線の減光 指数  $\alpha$ 、横軸はスペクトル指数  $\beta$  である。直線 S1 は  $\alpha = 1.5\beta - 0.5$  の線であり、 $v_c < v(v$  はそれぞれ左図では 可視域、右図ではX線の振動数) のときで、GRB の周辺環境の星間物質が一様な密度と星風的な分布 (GRB を中心に距離の二乗で密度が薄くなる) の両方の場合を示す。S2a は  $\alpha = 1.5\beta$  の線であり、 $v_m < v < v_c$  のと きで、星間物質が一様な密度の場合を示す。S2b は  $\alpha = 1.5\beta + 0.5$  の線であり、 $v_m < v < v_c$  のときで、星風 的な分布の場合を示す。



図 1.13: 外部衝撃波モデルの減光指数とスペクトル指数の関係 (24)。縦軸はX線の減光指数  $\alpha$ 、横軸はス ペクトル指数  $\beta$  である。(1) は  $v > v_c$  or  $v_m$  の場合。(2) は  $v_m < v < v_c$  のときで GRB の周辺環境の星間物 質が一様な密度の場合。(3) は  $v_m < v < v_c$  のときで星風的な分布 (GRB を中心に距離の二乗で密度が薄く なる) の場合。(4) は  $v > v_c$  のときでジェットブレイク (ジェットが急に横に拡がり始める) 後の場合。(5) は  $v_m < v < v_c$  のときでジェットブレイク後の場合。実線は放射電子のエネルギースペクトルのベキ p > 2、破線は p < 2 のときである。

### 1.2.4 X線フレアの起源

本小区分では、X線フレアの起源の候補と現在までの研究について述べる。X線フレア とは、残光中に急にフレアが観測されることである。このような振舞を説明するためのモ デルは外部衝撃波由来のものと内部衝撃波由来のものと大別される(図 1.14)。外部衝撃波 由来のモデルは三つあり、シェルと衝突する星間物質の密度が不均一の場合(density)、複 数のジェットが星間物質と衝突する場合(patchy)、そしてシェルの一部が遅れて外部衝撃 波を起こした場合(refresh)である。これらは外部衝撃波なので、§1.2.2で説明したように X線~電波まで放出する。内部衝撃波由来である場合は、GRB 母天体から二個以上の電 子・陽電子のシェルが遅れて放出され、その速度差のため衝突合体を起こしX線を放射す ると考えられている。



図 1.14:考えられているX線フレアの起源。図左ピンクに示すように外部衝撃波由来のモデルは三つあ り、シェルと衝突する星間物質の密度が不均一の場合(density)、複数のジェットが星間物質と衝突する場合 (patchy)、そしてシェルの一部が遅れて外部衝撃波を起こした場合(refresh)である。図右青に示すように、 内部衝撃波由来である場合は、GRB 母天体から二個以上の電子・陽電子の塊が遅れて放出され、その速度 差のため衝突合体を起こす場合。

外部衝撃波は星間物質中に衝撃波を起こすため、衝撃波が比較的大きく、また消えに くいとされている。そのため、時間幅/ピーク時刻 ( $\Delta t/t_{peak}$ ) がより小さく、ピークフラッ クスの変動比 ( $\Delta F/F$ ) がより大きなものほど、外部衝撃波では説明できないと考えられて いる。これに着目した (13) は、残光光度曲線の突如表れる変動の放射機構を特定する図 1.15 右を提案した。その図 1.15 右は、図 1.15 左に示すように横軸がフレアの  $\Delta T/T_{peak}$ 、 縦軸がフレアの  $\Delta F/F$  である。図 1.15 右の各線よりも矢印方向にあれば、それらの起源と 予測される。線 (a) は光度曲線がフレアでなく"くぼみ (Dips)"であり観測視線方向が GRB ジェット方向と一致 (on axis)、破線 (a) は Dips で観測視線方向が GRB のジェット方向と 不一致 (off axis) のときである。フレアの起源が、線 (b) と破線 (b) は、シェルと衝突する 星間物質の密度の不均一の外部衝撃波由来 (density) のときであり、それぞれ on axis と off axis である。線 (c) と線 (d) は複数のジェット (patchy) 由来と放出されたシェルの一部が遅 れて外部衝撃波を起こした (refresh) 場合で共に on axis と off axis の差はない。これら各線 よりも矢印方向にない場合は、内部衝撃波由来であることを示す。

(5) が行ったように、現在までの観測では X 線での観測が中心であるため、 X 線フレアの起源を探るのには図 1.15 を用いるが最も適していた。図 1.16 は、観測された X 線データを図 1.15 にプロットしたものである。その結果、外部衝撃波で説明できる条件  $(\Delta F/F < \Delta t/t_{peak} \times 10^{1.4} \text{ or } \Delta t/t_{peak} < 0.4;$ 緑色で示しているところ)から、外れるものが強い X 線フレアなど 2 割程はある。しかし、弱い X 線フレアでは外部衝撃波由来で説明でき



図 1.15: 左:残光中に変動が起こったときの模式図。右:起源の選別図。横軸が左図に示すような変動の  $\Delta T/T_{peak}$ 。縦軸が変動の  $\Delta F/F$ 。各線よりも矢印方向にあれば、それらの起源と予測される。線(a) は光度 曲線がフレアでなく"くぼみ (Dips)"であり観測視線方向が GRB ジェット方向と一致 (on axis)、破線 (a) は Dips(a) で観測視線方向が GRB のジェット方向と不一致 (off axis) のときである。フレアの起源が、線 (b) と破線 (b) はシェルと衝突する星間物質の密度の不均一の外部衝撃波由来 (density) のときであり、それぞ れ on axis と off axis である。線 (c) と (d) は複数のジェット (patchy) 由来と放出されたシェルの一部が遅れ て外部衝撃波を起こした (refresh) 場合で on axis と off axis の差はない。これら各線よりも矢印方向にない 場合は、内部衝撃波由来であることを示す。

る条件を満たしていた。従って、X線フレアの起源が内部衝撃波由来であることは、確定 できない。



図 1.16: X線フレアの起源と時間幅比・増光フラックス比関係 (5)。、観測された X線データを図 1.15 にプロットしたものである。横軸はフレア時間幅/ピーク時刻。縦軸はフレアのピークフラックスの変動比。黒丸は今までの観測された X線フレアを伴う GRB。2 割程は外部衝撃波では説明できる条件 ( $\Delta F/F < \Delta t/t_{peak} \times 10^{1.4}$  or  $\Delta t/t_{peak} < 0.4$ ;緑色で示しているところ)を満たせず内部衝撃波由来が有力である。7 割以上を占める弱いフレアの起源については、外部衝撃波由来で説明できる条件を満たしていた。

## 1.3 GRB 母銀河

極超新星と関係している可能性のある GRB 母銀河は GRB が起こるということから、星 生成が活発であると考えられている。(10)は GRB 母銀河が超新星の母銀河より統計的に 暗いことを明らかにし、より小さな銀河であることを示した。また、(41)は近傍の GRB 母銀河の吸収線から金属量を直接観測を行い、その母銀河は低金属であることを示した。



図 1.17: GRB 母銀河のイメージ (10)。十は GRB の起きた場所を示す。

これらの性質に影響を受ける観測量がある。銀河ダストの吸収則である。天体から放射 された可視紫外線域とソフトX線域はこの吸収則に従い減光する。特に、GRB は我々の 銀河とGRB 母銀河の二つから主に吸収を受ける。我々の銀河ダストの吸収は(39)で非常 に良く見積もられている。しかし、宇宙論的距離にある母銀河の性質は不定性が多いた め、ダストの組成とダストによる吸収曲線がわからない。そこで、よくわかっている三つ の銀河から求めたダストの性質を仮定して可視域が受けた吸収の補正に用いる。本節で は、これら三種類の補正について述べる。また、外部衝撃波モデルで非常に良く再現でき る GRB を用いた GRB 母銀河ダストの研究も紹介する。最後に、GRB のX線と可視域の スペクトルを用いたその母銀河ダストの組成の研究について紹介する。

### 1.3.1 既知銀河のダスト吸収則

本小区分では、GRB からの光が受け銀河系外ダストによる吸収を補正するために用いるモデルについて述べる。そのモデルは最もよくダストの性質が調べられている天の川銀河 (MW)、大マゼラン星雲 (LMC)、そして小マゼラン星雲 (SMC)の観測値に基づいたモデルである。可視域スペクトルの水素の Lya 線の深さで見積もった各銀河で視線方向の水

素柱密度  $N_{\rm H}^{ext}$  と可視域の V バンドでの吸収量  $A_V$  との関係 (表 1.3)、また  $A_V$  と各波長での 吸収量  $A_\lambda$  の関係 (吸収曲線:図 1.18) がそれぞれある。X 線のスペクトルから得られた  $N_{\rm H}^{ext}$  を用いて、 $A_V$  を求め、次にそれから  $A_\lambda$  を求め、それぞれのバンドでの吸収分の補正が行 える。図 1.18 の吸収曲線が示すように MW と LMC には 2175Å にバンプがある。2175Å のバンプ吸収帯の原因として有機性炭素と非晶質ケイ酸塩に富んだダストが有力である。

観測した GRB の可視域のスペクトルは LMC、MW の吸収曲線のような 2175Å(図 1.18 参照)の構造を持っていない方が圧倒的に多い ((21) が報告したようにバンプをもつ例も ある。)。従って、GRB 母銀河ダスト吸収則は SMC モデルが最も有力である (22)。また、 SMC がもっとも金属量が少ないため、初期宇宙の環境と一致する。

モデル名	モデルの説明	$N_{\rm H}^{ext}/A_V$
天の川	天の川銀河のダストの吸収則	$1.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
LMC	大マゼラン星雲の銀河ダストの吸収則	$7.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
SMC	小マゼラン星雲の銀河ダストの吸収則	$1.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$

表 1.3: GRB 071112C に用いた可視赤外線減光補正量。



図 1.18: よく知られている銀河のダスト吸収曲線。三つの吸収曲線は赤外線ほど吸収をうけず、紫外線になるほど吸収は大きくなる。天の川とLMC は 1/λ = 4.5(= 2175Å) に構造がある。

### 1.3.2 GRB 残光と外部衝撃波を用いた GRB 母銀河の研究

宇宙論的距離に存在する GRB 母銀河の性質を直接求めることは非常に難しい。そこで、 (23) は GRB 残光と外部衝撃波モデルを用いて、ダストによる吸収曲線を得る方法を提案 した。

まず、残光後期は外部衝撃波モデルでよく再現できると仮定する。そして、GRB 残光 でX線と可視域の残光の減光係数が等しいものを選ぶ(図1.19左上)。外部衝撃波モデル ではスペクトルがX線から可視域まで single powerlaw であることを予言する(図1.19右 上)。実際の観測では、可視域は吸収を受けているため、予言された powerlaw よりも減光 している(図1.19左下)。この減光分を各波長で求めることで、ダストによる吸収曲線(図 1.19右下)を得る。その結果、得られた吸収曲線は、既知の銀河のダストの吸収曲線とは 異なり、ダストの性質はより低金属でサイズが大きい必要があることをを示していた。



図 1.19: GRB 残光と外部衝撃波を用いた GRB 母銀河ダストの吸収曲線。まず、外部衝撃波モデルを仮定 する。図左上の光度曲線のように、X線と可視域光度曲線の減光係数が等しい残光がある。このような振舞 をする残光のスペクトルの動きは、次のような外部衝撃波モデルで説明可能である。図右上のスペクトルの ように、減光前は青色のスペクトルで、そのスペクトルは時間の経過と共に低周波数側へ並行移動し赤色 スペクトルまで移動する。X線と可視域の減光の量はこのとき等しくなる。従って、X線と可視域の減光係 数が等しいとき、X線~可視域スペクトルは single powerlaw である。しかし、図左したのように観測され る可視域はダストによる吸収を受けるため、X線スペペクトルから予測される powerlaw よりも減光してい る。この予測される powerlaw と観測された可視域のデータとの差分(赤斜線)が母銀河ダストによる吸収量 である。この吸収量を図右下のように表示することで、母銀河ダストの吸収曲線を得ることができる(23)。

1.3.3 GRB 母銀河の視線方向の水素柱密度 N<sub>H</sub> の不定性



図 1.20: GRB 母銀河の視線方向の水素量推定 (44)。横軸は GRB 周辺の組成を太陽組成と仮定して X 線から求めた視線方向の水素柱密度  $N_{\rm H,X}$ 。縦軸は可視域スペクトルの水素の Ly $\alpha$  線の深さで見積もった  $N_{\rm H,O}^{ext}$  GRB の周辺の組成を Z、太陽組成を  $Z_{\odot}$  としたとき、緑線は上から  $Z/Z_{\odot} = 0.1$ 、1、そして 10 のときである。

§1.3.1 で説明したように、X線から得られた GRB 母銀河の水素柱密度  $N_{\rm H}^{ext}$  を用いて、 可視域がダストにより受けた吸収量を補正する。しかし、Watson et al. (44) は、GRB 母 銀河の水素柱密度  $N_{\rm H}^{ext}$  についてX線のスペクトルから得た  $N_{\rm H,X}^{ext}$  と可視スペクトルから得 た水素の Lya 線の深さで見積もった  $N_{\rm H,O}^{ext}$  が系統的に異なり、X線から得た  $N_{\rm H,X}^{ext}$  の方が 大きい傾向を示した (図 1.20)。この要因は、X線から  $N_{\rm H,X}^{ext}$  を求めるとき、GRB 母銀河の ダストの組成を太陽と同じだと仮定したことである。つまり、Watson et al. (44) の結果は GRB 周辺の組成は太陽組成よりも金属量が大きいことを示唆する。宇宙論的距離にある 天体は非常に暗く、可視でスペクトルを得るには非常に困難なため観測例が少ない。この ような研究は始まったばかりで、結果が変わる可能性はあるが、GRB の可視域の補正に 大きく係わり、今後の研究では非常に重要である。

## 1.4 本研究の目的

現状の観測では、Swift 衛星や GCN の構築など、地上の望遠鏡でも即時観測ができる ようになった。しかし、Swift 衛星の紫外線~可視領域の検出器である UVOT は口径が 30 cm であり複数の波長を同時に観測できず効率が悪く、それらの波長域は星間減光を受 けやすい。また、地上の可視観測は GRB 発生後即時に赤外線まで含む多色で同時に時間 に密な観測は少ない。つまり、得られるデータはX線と可視域では1バンドか多色でも時 間分解能の悪い観測ばかりである。そのため、X線フレアは急で大きな変動をするものは 外部衝撃波モデルでは説明できないことを示せたが、7割以上の弱く変動の遅いX線フレ アでは外部衝撃波でも説明可能であり起源がわからない。また、初期残光ではX線成分に 別成分や細かなパラメータの調整の必要性を言われ始めたが、限られた観測データのみで は後期残光では単純な外部衝撃波モデルで説明できている。

そこで、我々は広島大学かなた望遠鏡を用いて GRB 発生後 60 秒以内に赤外線まで含む 多色で同時に時間に密な観測を行うシステムを構築した (2006 年上原卒業論文)。そして、 このシステムと Swift 衛星のデータを合わせ、世界で初めて残光初期から X線 ~ 赤外線ま での SED の細かな時間変動を得ることで、7 割を占める弱く変動の遅い X線フレアの起 源と後期残光でも外部衝撃波モデルの細かいパラメータの調整の有無の解明をする。

# 第2章 本研究で用いるGRB観測機器

本章では、観測に用いたかなた望遠鏡とTRISPEC検出器、そして*Swift*衛星検出器について述べる。

### 2.1 かなた望遠鏡

この望遠鏡は、もともと国立天文台がその三鷹キャンパス内(東京都)に「赤外シミュ レータ」として保有していた。この赤外シミュレータは国立天文台ハワイ観測所にある 大型光学赤外線望遠鏡「すばる」で使用する観測装置の開発・評価をする目的で建設され たものである。しかし、すばるの第一期観測装置開発がすべて終了し、数年前からシュミ レータとしての役割が減ってきていることも考慮され、突発天体現象の観測へ活用する計 画を提案した広島大学に移管された。そして、全国的にも高い水準のシーイング環境を有 した位置(福成寺地区)に新しい天文台(図 2.1)を設け、2006 年 5 月に移設された。

### 2.1.1 基本性能

望遠鏡の集光力を決める主鏡の有効径は 1.5 m (図 2.2) である。これが大きいほど、限 界等級が下がる。国内に設置されている望遠鏡としてはかなた望遠鏡は3番目の大きさを 誇る。すばる望遠鏡などの世界的な大望遠鏡に比べると、大きさの点では劣るが、自分た ちで大学付属の望遠鏡として占有的に使用できることは、大望遠鏡では困難なことで、か なた望遠鏡の特徴である。また、大学が国内に所有する望遠鏡では最も大きい望遠鏡にな る。駆動速度は5度/sec で 1.5 m クラスで世界最高クラスである。カセグレン焦点と、ナ スミス焦点2つであわせて3つの焦点があり、それぞれの焦点に検出器をつける。この望 遠鏡での観測の目的は、衛星からの通報を受けて、高エネルギー突発天体観測を行うこと である。具体的にはガンマ線バースト専用衛星 Swift やガンマ線衛星 Fermi 衛星などが 天体を検出したときに発信するアラートから天体の座標を取得する。そして、アラート受 信後なるべく早く即時観測する。表 2.1 にかなた望遠鏡の性能と特徴の概要をまとめる。



図 2.1: 天文台ドーム



図 2.2: かなた望遠鏡

光学系	Ritchey-Chretien 光学系				
主鏡	有効径 1500 mm				
	主鏡のF比 F=2.0				
焦点モード	カセグレン焦点1つ				
	ナスミス焦点2つ				
	合成 F 比 カセグレン、ナスミス共に F = 12.2				
	焦点距離 18,300mm				
星像の分解能	1' 'FWHM				
視野	15'φ				
最大駆動速度	5° /sec 以上				
最大加速度	0.5° / sec <sup>2</sup> 以上				
架台の方式	経緯台方式				

#### 表 2.1: 望遠鏡の仕様

#### **2.1.2 TRISPEC**

可視・赤外偏光分光撮像装置 Triple Range Imager and SPECtrograph (TRISPEC) はカセ グレン焦点に取り付けれている。これは、名古屋大学佐藤研 (Z研) で開発されたものであ リ、TRISPEC は、図 2.3 のように二枚のダイクロイックミラーを用いて OPT、IR1、そし て IR2 の 3 チャンネルで撮れる。例えば、0.45-0.90  $\mu$ m、0.90-1.85  $\mu$ m、1.85-2.50  $\mu$ m の  $V, J, K_s$  の 3 バンドの組合せで観測可能で同時にデータを取得する事ができる。観測モー ドは撮像、グリズムによる分光、ウォラストンプリズムによる偏光観測が可能である。ま た、撮像・偏光撮像・分光・偏光分光の4つのモードを観測中に切り換え可能になってい る。3 バンド同時に観測できることによって、広い波長領域の時間変化がわかり、GRB の 標準的な外部衝撃波モデルのシンクロトロン放射しているならば、光度曲線は先に短波長 側にピークが現れ、その後に長波長側に現れることが確認できる。TRISPEC の性能の概 略を表 2.2 にまとめる。最後に、多波長のデータを扱うには各バンドで得た等級を、Flux density(Jy = 1 ×10<sup>-23</sup> erg/sec/cm<sup>2</sup>/Hz) に変換する必要がある。表 2.3 に変換式をまとめる。

観測可能波長	$0.45 - 2.25  \mu m$
	_, _, '
倪野	7' × 7'
<i>R<sub>C</sub></i> ハンド(植分時間:123s)	18.7 寺級(S/N=10)
1 バッド (碁公時間,120。)	16.1 笙奶 (S/NI-10)
J ハノド (慎力时间,1208)	10.1 守叙(5/11=10)
<i>K</i> <sub>s</sub> バンド (積分時間:120s)	14.7 等級 (S/N=10)
J ハント (積分時間:120s) K <sub>s</sub> バンド (積分時間:120s)	16.1 等級 (S/N=10) 14.7 等級 (S/N=10)

表 2.2: TRISPEC の性能の概要



図 2.3: TRISPEC の光路と二枚のダイアロックミラー

バンド	中心波長 (µm)	M 等級 (mag) から Flux Density (mJy) への変換式
V	0.55	$10^{-0.4 \times M} \times 4.959 \times 10^{6}$
$R_C$	0.65	$10^{-0.4 \times M} \times 2.940 \times 10^{6}$
J	1.25	$10^{-0.4 \times M} \times 1.736 \times 10^{6}$
Ks	2.16	$10^{-0.4 \times M} \times 0.6937 \times 10^{6}$

表 2.3: TRISPEC の等級から Flux Density (mJy) への変換式。Flux Density [mJy] (Jy =  $1 \times 10^{-23}$  erg/sec/cm<sup>2</sup>/Hz)。

## 2.2 Swift 衛星

Swift 衛星は、2004 年 11 月 24 日にデルタ II ロケットにより、ケネディ宇宙基地から打 ち上げられた。この衛星は、GRB の観測専用衛星で、バースト速報望遠鏡(Burst Alert Telescope: BAT) X線望遠鏡(X-ray Telescope:XRT) UV 可視光望遠鏡(Ultra-Violet/ Optical Telescope:UVOT)の3種類の検出器を搭載する(図 2.4)。図 2.5 のように、GRB を BAT の持つ 1.33 stradian(half coded)という広い視野で常時監視し、バースト発生とと もにその位置を 1-4 分角で自動決定し、この位置情報を元に、20 秒から 70 秒以内に衛星 全体をバースト源に向ける。共に搭載されている XRT、UVOT の X線、光、紫外線の望 遠鏡を用いて観測を行い最終的には、90 秒以内にバースト源の位置を 0.3-2.5 秒角という 極めて高い分解能で決定することができる。これにより、バースト検出後約 1 分から、数 時間後あるいは数日後まで観測を続けることができ、GRB 後の初期から長期にいたる残 光の変化を追うことができる。Swift 衛星は、GRB の位置を、正確に与えると同時に、紫 外線から、X 線、そしてガンマ線にいたる範囲で、スペクトルがどのように変化していく かを調べて、GRB の正体や、その周りの環境を探る。米英伊を中心とした国際ミッショ ンである。日本からは、ISAS/JAXA、埼玉大学、東大が、BAT 検出器チームに加わって いる。また、取得したデータは、直ちに全世界の研究者に公開される。



図 2.4: Swift 概念図



図 2.5: Swift による GRB の観測の流れ<sup>1</sup>

### 2.2.1 BAT

BAT の検出器面には、 $4 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$ の大きさの CdZnTe 半導体素子が 32,768 個敷き詰められており(全体で 5,200 cm<sup>2</sup> の面積)、各素子が一つ一つのピクセルとして働く。その視野は全天の6分の一である。その結果、年に100 個の GRB を検出できている。検出器面の1m上方には、 $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^2$ の大きさの鉛タイルを敷き詰めて作られたコーディドマスクというものが位置する。このコーディドマスクの影のパターンを撮像することによって、GRB の位置決定や分光観測を行うことができる。BAT と今までの他衛星との比較を表 2.4 にまとめる。

衛星	検出器	幾何学 面積 (cm)	感度 (erg cm <sup>-</sup> 2 s <sup>-1</sup> )	視野角 (str)	エネルギー バンド (keV)	・軌道上 ブロセス	Autonomous Rapid Slewing	追観測 までの 時間	GRB位置 同定数
CGRO	BASTE	2025		π	50-300	X	Х	-	$\sim$ 2700
BeppoSAX	WEC	650	4×10 -9	0.123	1.8-28	X	X	6-8時間	$\sim$ 10/year
HETE2	WXM	213.6	8×10 -9	0.802	2.0-25	0	X	1-100分	$\sim$ 30/year
	BAT	5200	10 <b>-8</b>	1.33	15-150	0	0	20-75秒	$\sim$ 100/year
Swift	XRT	110cm <sup>2</sup>	2×10 <sup>-14</sup>	24×25分角	0.3-10	0	-		$\sim$ 100/year
	UVOT	710cm 2	限界等級	17×17分角	170-600	0	3 <u>56</u> 3		$\sim$ 100/year
			B=24(1000s)		(nm)				

#### 表 2.4: Swift 衛星 BAT 検出器と他の衛星の検出器との比較

### 2.2.2 XRT

XRT は BAT の広い視野から GRB の位置を同定したのち自動で視野内にターゲットを 入れるように衛星自身を1分程度で向けた後に活躍する X 線検出器である。X 線 CCD を 焦点面検出器として持ち、1 万秒の観測で 1 $\mu$ Crab ( $2 \times 10^{-14}$  erg/cm<sup>2</sup>/s)の X 線強度を持 つ天体を検出できる。GRB は、最初は非常に明るく、だんだん暗くなるので、明るさの 範囲が数桁にわたり、さらに速く時間変動するので、それらをカバーすために検出モー ドが三つある。第一は、Imaging Mode で非常に明るい点源の位置を決める。このモード でGRB を見つけ、すでに知られている星の地図と比較して GRB の位置を決定する。波 高値の情報はない。0.6 Crab の明るさまで観測しそれ以降は次に述べる Timing Mode に 移る。第二は、Timing Mode であり、CCD の二次元のうちの一次元情報だけをパルスハ イトとともに素早く読み出すことによって時間分解能をあげ、二つの光子を一つの光子と して間違って検出してしまう pile-up を防ぐ。1 m Crab まで観測しそれ以降は次に述べる Photon-counting Mode に移る。第三の、Photon-counting Mode は ス元位置とパルスハ イトを取得できる。そのフラックスの感度は $2 \times 10^{-14} ~ 2 \times 10^{-10}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> である。 以下に検出器の概要を以下の表 2.5 にまとめる。

有効面積	110 cm <sup>2</sup> @ 1.5keV		
解像度(PSF)	18 秒角 @ 1.5keV		
検出部	EEV CCD-22, 600 × 600 pikel		
検出 モード	Imaging, Timing, Photon-counting Mode		
検出素子	$40 \times 40$ micron pixels		
Pixel の大きさ	2.36 arcsec/pixel		
エネルギー領域	0.2-10keV		
感度	$2 \times 10^{-14}$ in $10^4$ seconds		

表 2.5: Swift 衛星 XRT 検出器の概要

#### 2.2.3 UVOT

UVOT は、XRT と同じく GRB の位置を衛星自身を向けた後に活躍する 30 cm 紫外線可 視光望遠鏡である。地上にある 30 cm 程度の望遠鏡では、空気による乱反射や、揺らぎ、 そして空の明るさによって 20 等級が観測限界である。しかし、UVOT は宇宙空間での観 測なので、それらの影響は受けない上に、天候にも左右されることはない。従って、1000 秒間の観測で 24 等の明るさの天体を検出することがきる。しかし、主力観測モードを制 御する装置に小隕石が衝突し、現在では 21 等が限界等級である。フィルター数は 6 で、 *U、B、V、uvw*1、*unw2、uvm2* がありフィルターを着けず観測するときをホワイトフィル ター white と呼ぶ。それぞれの感度と波長領域は図 2.6 に示す。UVOT の動作は GRB の位 置に向けられると、波長別の情報を得ることができ、様々なフィルターと積分時間を組み 合わせたプログラムで観測される。まず、始めに取られたイメージは地上の観測者が観測 に用いるために知らせる。次に、既知の星図カタログと比較して GRB を見つける。そし て、数時間後あるいは数日後まで観測を続けることができる。以下に検出器の概要を以下 の表 2.6 にまとめる。また、得られた等級から Flux に変換する式と値の一覧を表 2.7 にま とめる。

望遠鏡の種類	Modified Ritchey-Chretien		
焦点比	12.7		
検出器	Intensified CCD		
Detector Operation	Photon counting		
視野	17 × 17 arcmin		
Detection Element	$2048 \times 2048$ pixels		
Telescope PSF	2.0 arcsec @ 350 nm		
波長領域	170-650 nm		
フィルター数	6		
感度	B = 24 in white light in 1000 s		
Pixel の大きさ	0.48 arcsec		
/d (グリズム)	350		
Brightness limit	V = 7.4 mag		
Camera Speed	11 ms		

表 2.6: UVOT の基本性能

バンド	中心波長 (µm)	等級 →c/s の変換式	c/s →Flux (erg cm <sup>-2</sup> s Å <sup>-1</sup> )の変換値
V	0.54	$10^{0.4 \times (17.89 - mag)}$	$2.61 \times 10^{16}$
В	0.43	$10^{0.4 \times (19.11 - mag)}$	$1.47 \times 10^{16}$
U	0.35	$10^{0.4 \times (18.34 - mag)}$	$1.63 \times 10^{16}$
uvw1	0.26	$10^{0.4 \times (17.49 - mag)}$	$4.00 \times 10^{16}$
uvm2	0.22	$10^{0.4 \times (16.82 - mag)}$	$8.50 \times 10^{16}$
uvw2	0.20	$10^{0.4 \times (17.35 - mag)}$	$6.20 \times 10^{16}$
white	0.35	$10^{0.4 \times (20.29 - mag)}$	3.70×10 <sup>16</sup>

表 2.7: TRISPEC の等級 UVOT の等級 mag から count rate、count rate からフラックスへ変換。



図 2.6: UVOT のそれぞれのフィルターの波長領域と感度

# 第3章 GRB 071112C

本章では、2007年11月12日18時32分57秒(UT)にSwift衛星BAT検出器が検出した GRB 071112Cの観測及び解析結果を述べる。このGRBの位置は赤経:02h 36m 53s、赤 緯:+28D 22'50''±0.9秒角であり、かなた望遠鏡によるフォローアップ観測に成功した。 このGRBまでの距離は赤方偏移 0.823(15)と求められており、残光は赤外線からX線ま で14バンドで観測され、X線フレアも伴っていた。また、(14)によると、GRB 071112C の母銀河の明るさは $Rc = 24.5 \pm 0.5$ 等であり、非常に暗いため、以下の結果では残光に対 して無視できる(Jy = 1 ×10<sup>-23</sup> erg/sec/cm<sup>2</sup>/Hz)。

### 3.1 観測

今回解析に用いたデータは主要なものがかなた望遠鏡に取り付けられている TRISPEC、 Swift 衛星の XRT のデータであり、その他に、The Gamma ray bursts Coordinates Network (GCN) に報告された結果を引用した。それらを含めて GRB 071112C の解析に用い たデータを表 3.1 にまとめる。

### 3.1.1 かなた望遠鏡による観測



図 3.1: 左:GRB 071112C 発生前のアーカイブにより公開されているイメージ<sup>†</sup>右:GRB 071112C 発生後の TRISPEC V バンドのイメージ。GRB 発生前の左図の赤円の中には GRB はないが、GRB 発生後の右図赤 棒で示すようにかなた望遠鏡ではとらえている。

† http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss\_form

我々はかなた望遠鏡に TRISPEC を取り付けて、GRB 発生 324 秒後 (2007 年 11 月 12 日 18:36:21 UT) から約 80 分後まで観測を行った。V(0.55µm)、J(1.25µm)、そして K<sub>s</sub>(2.16µm) バンドを同時に撮像モードで 40 組のイメージを得た。そのなかの一枚を図 3.1 右に示す。図 3.1 左は GRB 071112C 発生前のアーカイブにより公開されているイメージである。発生後には図 3.1 右の赤棒と図左の赤円と比べると GRB 071112C がかなた望遠鏡によってとら

バンド	エネルギー帯 or 中心波長帯	望遠鏡	GCN Circular
X-ray	0.30—8.0 keV	Swift/XRT	(42)
uvw1	$0.25\mu\mathrm{m}$	UVOT	(32)
U	0.33 μm	UVOT	(32)
В	$0.42 \mu\mathrm{m}$	RTT150	(1)
В	$0.42 \mu\mathrm{m}$	UVOT	(32)
g'	$0.49 \mu\mathrm{m}$	MITSuME	(25)
$V^*$	0.53 μm	UVOT	(32)
V	$0.55 \mu\mathrm{m}$	ROTSE-III	(45)
V	$0.55 \mu\mathrm{m}$	KANATA	(43)
R	0.63 μm	TAROT	(19)
R	0.63 μm	RTT150	(1)
R	0.63 μm	Lulin	(4)
R	0.63 μm	Palomar	(30)
R	0.63 μm	Crin Vrh	(8)
R	0.63 μm	MAGNUM	(29)
R	0.63 μm	TAOS	(12)
$R_c$	$0.64 \mu\mathrm{m}$	MITSuME	(25)
$R_c$	$0.64 \mu\mathrm{m}$	Cassini	(11)
$R_c$	$0.64 \mu\mathrm{m}$	AAVSO	(40)
Ι	$0.80\mu\mathrm{m}$	MAGNUM	(29)
$I_c$	$0.78 \mu\mathrm{m}$	MITSuME	(25)
J	1.25 μm	KANATA	(43)
J	1.25 μm	MAGNUM	(29)
Н	1.65 μm	MAGNUM	(29)
Ks	2.16 µm	KANATA	(43)

表 3.1: GRB 071112C の解析に用いたデータ。
えられている。観測された画像を暗電流ノイズを取り除くために光を一切いれずに撮像した (ダーク) 画像を引き、検出器の各ピクセルごとの感度むらを取り除くために一様な光を 撮像した (フラット) 画像で割る。その画像を星像の明るさの分布を近似したモデル関数で フィッティングし、そのパラメータから天体の明るさを求める (PSF測光)。その値と明 るさの等級がわかっている標準星の値とを比べることで等級を決める (相対測光)。相対測 光に用いた比較星は V、J、そして  $K_s$  ではそれぞれ GSC2.3 02364145+2820533、2MASS ID 02364145+2820533、そして 2MASS ID 02364145+2820533 である。また、これらの統 計エラーはそれぞれ 0.28, 0.02, そして 0.02 mag であった。

## 3.1.2 XRT

XRT は 2007 年 11 月 12 日 18:34:27 UT(BAT 検出後 90 秒) から観測を始めた。我々は XRT のデータを HEASOFT package を用いて解析を行った。始めは pile-up を防ぐため CCD の一列のみを用いた Windowed Timing mode(WT) で観測し、GRB が暗くなってきたら、 Photon Counting mode (PC) で観測を行った。観測積分時間は、WT では 258 s、 PC では 933 ks である。光度曲線や、スペクトルを作成するには、GRB 領域の値から背景光の値 を差し引く必要がある。そこで、CCD の一列のみを用いた WT では、GRB 領域は 40″ ×170″、背景光領域はGRB 領域両端の 40″×170″ とした (図 3.2 左)。また、PC では GRB 領域は半径 40″ の円、背景光領域は内半径 192″ で外半径 231″ の円環部とした (図 3.2 右)。 得られた光度曲線は WT では 30 カウント、PC では 20 カウントでービンとなるようにビ ンまとめを行った。スペクトルは 20 カウントでービンとなるようにビンまとめを行った。



図 3.2: 左:GRB 071112C の XRT/Windowed Timing mode のイメージ。右:GRB 071112C の XRT/Photon Counting mode のイメージ。ともに緑線で囲った領域を GRB、黄線で囲った領域を背景光とした。



図 3.3: **GRB 071112**C 残光の赤外線から X 線までの光度曲線: 光度曲線が重ならないように、**Flux density** を 次のような値を掛けて上下に移動させている。(10<sup>0.5</sup>(**uvw1**), 10<sup>0.0</sup>(*U*), 10<sup>-0.5</sup>(*B*), 10<sup>-1.0</sup>(*g'*) 10<sup>-1.5</sup>(*V*\*(**UVOT**), 10<sup>-2.0</sup>(*V*) 10<sup>-2.5</sup>(*R*) 10<sup>-3.0</sup>(*R*<sub>C</sub>) 10<sup>-3.5</sup>(*I*, 10<sup>-4.0</sup>(*I*<sub>C</sub>) 10<sup>-4.5</sup>(*J*, 10<sup>-5.0</sup>(*H*), そして 10<sup>-5.5</sup>(*K*<sub>s</sub>))

各バンドで得られた光度曲線を図 3.3 に示す。波長の短い順に上から並べてあり、XRT のみX線である。図 3.3 が示すように、期間ごとに可視域とX線光度曲線の傾きが変わる。 光度曲線の減光の傾きが異なるときは、物理状態が異なる可能性が §1.2.2 で示す外部衝撃 波モデルから予測されている。従って、表 3.2 のように X線と可視赤外線の光度曲線の減 光の様子で区別して、それぞれ期間を定義した。

まず残光 X 線の光度曲線はトリガー後 0.45—1.27 ks に弱い X 線フレアを伴い、それを 取り除けば折れ曲がりのある時刻のべき型関数 (broken powerlaw) でほぼ再現できるよう に見える。そこで、X 線フレアを取り除き X 線の光度曲線を broken powerlaw でフィット した。その結果、折れ曲がりは 7.6± 0.7 ks にあり、トリガー後 0.08 — 12 ks では減光指 数  $-1.28 \pm 0.04$ 、12—60 ks までは減光指数  $-1.55 \pm 0.09$  で再現できた ( $\chi^2 = 105$  with 96 degree of freedom)。これらの結果を図 3.4 に示し、表 3.2 にまとめる。

一方、可視赤外線の光度曲線は 0.35 ks までは増光傾向を示し、それ以降はどのバンド も powerlaw で再現されるように見えるので、それぞれのバンドごとにフィットを行った ところ、エラーの範囲で減光指数の値は一致した。従って、どのバンドの光度曲線も同じ

期間名	GRB トリガー後の時間帯 (ks)	期間の特徴
"Optical Rise"	0.1 — 0.36	可視赤外線は増光、X線は normal decay
"Normal Decay"	0.37 — 0.45, 1.3 — 1.8	可視赤外線、X線ともに normal decay
"Flare Rise"	0.45 — 0.61	X 線フレアの増光、可視赤外線は noraml decay
"Flare Decay"	0.61 — 1.3	X線フレアの減光、可視赤外線は noraml decay
"X-ray Break"	12 — 578	X線は折れ曲がり以降、可視赤外線は noraml decay

表 3.2: GRB 071112C 残光の期間名



図 3.4: GRB 071112C 残光の×線光度曲線の broken powerlaw フィット。折れ曲がりは 7.6 ± 0.7 ks にあ り、トリガー後 0.08 — 12 ks では減光指数-1.28 ± 0.04、12—60 ks までは減光指数-1.55± 0.09 で再現でき た ( $\chi^2$  = 97 with 92 degree of freedom)。

べきで減光しており §1.2.2 で述べた GRB 外部衝撃波モデルの予測と合う。ここで、図 3.5 のように、同時に全バンドの光度曲線を同様にフィットを行った。このとき減光指数は全 バンドで共通とし、normalization は別々にした。その結果、減光指数は  $0.95 \pm 0.02$  ( $\chi^2 = 31$  with 44 degree of freedom) と求められた。これらを表 3.2 にまとめた。

期間名	GRB トリガー後の時間帯 (ks)	X 線の減光指数 $lpha_{ m X}$	可視赤外線の減光指数 $lpha_{ m O}$
"Optical Rise"	0.1 — 0.36	-1.28 ±0.04 *	—
"Normal Decay"	0.37 — 0.45, 1.3 — 1.8	-1.28 ±0.04 *	$-0.95 \pm 0.02$ <sup>†</sup>
"X-ray Break"	12 — 578	$-1.55 \pm 0.09$	$-0.95 \pm 0.02$ <sup>†</sup>

表 3.3: **GRB 071112**C 残光の減光指数。図 **3.4** のように X 線フレア期を除いて X 線光度曲線を折れ曲がり のある時間ベキ型指数でフィットを行った。図 **3.5** のように**"Optical Rise"**期を除き可視赤外線全帯域を同時に時間のベキ型指数でフィットを行った。 $\alpha_X \ge \alpha_0$  は、それぞれのフィット結果の減光指数である。\*  $\ge$  † はそれぞれ共通の値を示す。



図 3.5: 近赤外線—紫外線域全バンドの光度曲線のフィット。色の違いはバンドの違いである。減光指数は  $0.95 \pm 0.02$  ( $\chi^2$  = 31 with 44 degree of freedom) と求められた。

3.3 近赤外~X線の Spectral Energy Distribution (SED)
3.3.1 X線スペクトル



図 3.6: 二成分吸収 powerlaw model でフィットしたX線スペクトル。X線と可視域の光度曲線の傾きごと 6 期間のX線スペクトルを作成し、それらを我々の銀河ダストによる吸収量は固定、GRB の母銀河ダスト による吸収量はそれぞれ共通、そしてベキはそれぞれフリーでフィットを行った。色はそれぞれの期間に 対応している(黒:0.1 — 0.36 ks ("Optical Rise"期)、赤:0.37 — 0.45 ks ("Normal Decay"前期)、緑:0.45 — 0.61 ks ("Flare Rise"期)、青:0.61 — 1.3 ks (Flare Decay 期)、水色:1.3 — 1.8 ks ("Normal Decay"後期)、そ して紫:12 — 578 ks ("X-ray Break"期))。

本小区分では、X線スペクトルから、GRB 母銀河の視線方向の水素柱量と、ある時間 帯でのスペクトル指数の導出について述べる。まず、§1.2.2 で述べたように光度曲線の傾 きが変わるとスペクトルのベキも変わることは GRB の外部衝撃波モデルから予測されて いる (38)。そのため、0.3-8.0 keV の XRT スペクトルを 6 期間で切り分けて作成し、解析 を行った。どの期間の X線スペクトルも我々の銀河と GRB の母銀河のダストによる吸収 を受けた二成分吸収 powerlaw model(式 3.1) でフィットした。

$$A(E) = K \times exp[-N_{\rm H}^{gal}\sigma_{ph}(E)] \times exp[-N_{\rm H}^{ext}\sigma_{ph}(E(1+z)) \times (E/1keV)^{-\beta_{\rm X}}$$
(3.1)

E:エネルギー(keV)

- K:単位時間あたり、単位面積あたり、単位エネルギーあたりの入射光子数 (photons keV<sup>-1</sup> cm<sup>2</sup> 秒<sup>-1</sup> at 1keV)
- N<sup>gal</sup>: 我々の銀河の水素柱密度 (cm<sup>-2</sup>)
- *N*<sup>*ext*</sup>: GRB の母銀河の水素柱密度 (cm<sup>-2</sup>)

期間名	GRB トリガー後の時間帯 (ks)	$\beta_X$	$\chi^2$ / d.o.f
optical Rise	0.1 — 0.36	$-0.83 \pm 0.04$ *	445 / 207
Normal Decay	0.37 — 0.45	$-0.83 \pm 0.04$ *	445 / 207
Flare Rise	0.45 — 0.61	$-0.34 \pm 0.15$	34 / 28
Flare Decay	0.61 — 1.3	$-0.62 \pm 0.06$	148 / 87
Normal Decay	1.3 - 1.8	$-0.83 \pm 0.04$ *	445 / 207
X-ray Break	12 — 578	$-0.82 \begin{array}{c} +0.08 \\ -0.16 \end{array}$	46 / 29

表 3.4: **GRB 071112**C 残光 X 線のスペクトル指数。\*は共通にしてフィットして求めた。 $\beta_X$  は X 線スペクトル指数。

 $\sigma_{ph}$ :光電吸収断面積 (cm<sup>2</sup>)

GRB 視線方向の我々の銀河の水素柱量は  $N_{\rm H}^{gal} = 7.4 \times 10^{20}$ (7) と仮定し、GRB 母銀河の 水素柱量  $N_{\rm H}^{ext}$ はフリーパラメータとした。GRB の発生位置は高赤方偏移であるため、母 銀河のダストによる吸収量は赤方偏移 z を考慮している (式 3.1)。フィットしたところ、ど の期間の  $N_{\rm H}^{ext}$ もエラーの範囲で一致した。そこで、全ての期間のスペクトルを  $N_{\rm H}^{gal}$  は固 定、 $N_{\rm H}^{ext}$ はどの期間でも共通の値でフリー、ベキ $\beta_{\rm x}$ はそれぞれの期間でフリーになるよ うにフィットを行った。フィットした図を図 3.6 に示す。この図の色はそれぞれの時間帯 に対応している (黒:0.1 — 0.36 ks ("Optical Rise"期)、赤:0.37 — 0.45 ks ("Normal Decay" 前期)、緑:0.45 — 0.61 ks ("Flare Rise"期)、青:0.61 — 1.3 ks (Flare Decay 期)、水色:1.3 — 1.8 ks ("Normal Decay"後期)、そして紫:12 — 578 ks ("X-ray Break"期))。

その結果、GRB 母銀河の GRB 視線方向の水素柱量  $N_{\rm H}^{ext}$  は 7.9(±3.9)×10<sup>20</sup> cm<sup>-2</sup> となった。それぞれのスペクトル指数はX線光度曲線の折れ曲がり以前かつX線フレアもない減光期 ("Optical Rise"期と"Normal Decay"期) では $\beta_{\rm X}$  はエラーの範囲で一致していたため、同時にフィットを行い $\beta_{\rm X} = -0.83 \pm 0.04$ と求められた。X線フレア増光期のスペクトル指数は最もハードになり ( $\beta_{\rm X} = -0.34 \pm 0.15$ )、X線フレア減光期にはソフトに戻った ( $\beta_{\rm X} = -0.62 \pm 0.06$ )。X線光度曲線の折れ曲がり後 ("X-ray Break") はよりソフトになった ( $\beta_{\rm X} = -0.83 \pm 0.04, 0.82^{+0.08}_{-0.16}$ )。これらスペクトル指数を、表 3.4 にまとめる。

#### 3.3.2 近赤外線~紫外線域のSEDの作成

本小区分は近赤外線~紫外線域の光度曲線のフィッティング結果から、ある時刻のSpectral Energy Distribution (SED)の作成について述べる。世界のそれぞれの望遠鏡が異なる時間帯で観測しているため、任意の時刻 t<sub>0</sub>における各望遠鏡でのフラックスを直接求めることができない。従って、以下のようにして任意時刻 t<sub>0</sub>のフラックスを推定した。

§3.2 で行ったように、各波長域の光度曲線を同時に powerlaw でフィットし減光係数  $\alpha_0$  を得た。各バンドの normalization A は、t=1 s でのフラックスを表しているが、任意の時刻  $t_0$  でのフラックスを求める際には、normalization A とベキ  $\alpha_0$  の誤差がカップルして、 誤差伝搬を解くのに非常に複雑な共分散の式を用いなければならない。そのため、次のように任意の時刻  $t_0$  でのフラックスとその誤差を求めた。

フラックスを求めたい期間の時刻を  $t_0$  としたとき  $F = A(t/t_0)^{\alpha_0}$ の式を用いて、それぞれのバンド毎にフィットを行う。各バンド毎に得られたパラメータA とそのエラーをその 各バンドの時刻  $t_0$ のフラックスとそのエラーとした。それらのフラックスをバンド周波 数毎に表示することで、SED を得た。



図 3.7: GRB 071112C の光度曲線のフィット結果から作成した 6 期間の SED。黒は 0.1 ks、赤は 0.4 ks、緑 は 0.55 ks、青は 0.89 ks、水色は 1.4 ks、そして紫は 43 ks の時刻の SED である。それぞれ、"Optical Rise" 期、"Normal Decay"前期、"Flare Rise"期、"Flare Decay"期、"Normal Decay"後期、"X-ray Break"期の ログスケールでの時間帯の中央時刻である。

この手法を用いて、得たスペクトルを図 3.7 に表示する。これにより、6 つの時間帯での SED を得て時間変動を追うことが可能となった。上から時間の早い順になっており、黒 は 0.1 ks、赤は 0.4 ks、緑は 0.55 ks、青は 0.89 ks、水色は 1.4 ks、そして紫は 43 ks の時刻の SED である。それぞれ、"Optical Rise"期、"Normal Decay"前期、"Flare Rise"期、"Flare Decay"期、"Normal Decay"後期、"X-ray Break"期のログスケールでの時間帯の中央時刻である。縦軸は Flux Density [mJy] で表している (Jy = 1 ×10<sup>-23</sup> erg/sec/cm<sup>2</sup>/Hz)。

#### 3.3.3 可視赤外線 SED と GRB 母銀河の吸収補正

観測された GRB の SED は銀河系内・外ダストによる吸収を受けている。外部衝撃波モ デルの予測する多波長 SED と比較して議論するためにはそれらのダストの吸収を補正し、 多波長 SED を作成する必要がある。まず、X線スペクトルのダスト補正を行う。次に、可 視赤外線 SED をいくつかのダスト吸収モデルを用いて補正することについて述べる。最 後に、X線スペクトルと可視赤外線 SED を合わせて赤外~X線 SED を作成した。本小区 分ではこれらのことについて述べる。

#### X線スペクトルのダスト補正

§3.3.1 で得られた各時間帯のX線スペクトルは、銀河系内・外のダストにより吸収を受けている。X線スペクトルのフィット結果により得られている銀河系内・外の $N_{\rm H}^{gal}$  と $N_{\rm H}^{ext}$ の値を用いて、X線スペクトルを powelaw 成分だけに戻した。

モデル名	$N_{\rm H}^{ext}/A_V$	$A_V$
天の川	$1.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$	0.49
LMC	$7.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$	0.10
SMC	$1.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$	0.05

表 3.5: GRB 071112C に用いた可視赤外線減光補正量。

可視赤外線 SED のダスト補正

次に、可視赤外線のダストによる吸収補正を行う。銀河系内のダストによる吸収の補正 は、GRBの方向について値を文献値から引用して求める。そして、銀河系外の補正とし てはGRB母銀河のダストによる吸収がもっとも寄与している。しかし、母銀河の性質は よくわかっていないため、ダストの量や組成がわからない。そこで、それらがよくわかっ ている銀河三つの補正量を試し、妥当な補正量を考える。

銀河系内によるダストの減光  $A_V$  は、経験的に式 3.2 だけでおおまかに決まる事が知られている (2)。

$$R_V = \frac{A_V}{E(B-V)} \tag{3.2}$$

 $E(B-V) \equiv A_B - A_V$ は色超過(Color excess)と呼ばれ天体の位置により異なり、GRB 071112C ではE(B-V) = 0.162 等級を仮定した(39)。 $R_V$ の値は典型的な値 3.1(33)を用いた。このように $A_V = 0.5$ を得て、図 1.18の減光曲線 $A_\lambda/A_V$ から他のバンドの減光量を求め補正を行った(3)。

次に、GRB 母銀河のダストによる減光はX線スペクトルから得られた水素柱量  $N_{\rm H}^{ext}$  = 7.9(±3.9)10<sup>20</sup> と表 3.5 の値を用いて  $A_V$  を求めた。そして、系内と同様に減光曲線  $A_\lambda/A_V$  から他のバンドの減光量を求め補正を行った。図 3.8 は"Optical Rise"期の可視赤外線域 SED の減光量を補正した結果である。黒色四角は観測された生データ、緑色三角は天の 川、赤色十は LMC、そして青色丸は SMC を示している。さらに、緑色点線、赤色破線、そして青色一点破線は補正を行ったデータを powerlaw でフィットした結果である (色の対応は補正データと同じ)。それぞれの時間帯の生データ SED(図 3.7) に同様のことを行い、その結果を表 3.6 にまとめる。



図 3.8: ダスト吸収を補正する前後 GRB 071112C の可視赤外線 SED。観測した可視赤外線 SED を我々 の銀河による吸収の補正を行い、天の川、LMC、SMC モデルでダストによる減光量を補正し、それらを powerlaw でフィットを行った一例である。黒色四角は観測した補正前の SED である。緑色三角は天の川 モデルで、赤色十は LMC モデルで、そして青色円は SMC モデルで補正を行った SED である。緑色点線、 赤色破線、そして青色一点破線は補正した SED を powerlaw でフィットしたものである。色の対応は補正 データと同じである。

ダストモデル	天の川	LMC	SMC
期間	$(\chi^2 / \text{d.o.f})$	$(\chi^2/\text{d.o.f})$	$(\chi^2/\text{d.o.f})$
(a) "Optical Rise"	$-0.14 \pm 0.09$	$-0.45 \pm 0.09$	$-0.49 \pm 0.09$
	(12.7/8.0)	(8.2/8.0)	(7.9/8.0)
(b) "Normal Decay"前期	$-0.14\pm0.09$	$-0.45\pm0.09$	$-0.49\pm0.09$
	(12.7/8.0)	(8.2/8.0)	(7.9/8.0)
(c) "Flare Rise"	$-0.15 \pm 0.09$	$-0.46\pm0.09$	$-0.50\pm0.09$
	(15.1/9.0)	(10.5/9.0)	(10.2/9.0)
(d) "Flare Decay"	$-0.15\pm0.09$	$-0.46\pm0.09$	$-0.50\pm0.09$
	(15.1/9.0)	(10.5/9.0)	(10.2/9.0)
(e) "Normal Decay"後期	$-0.14\pm0.09$	$-0.45\pm0.09$	$-0.49\pm0.09$
	(12.7/8.0)	(8.2/8.0)	(7.9/8.0)
(f) "X-ray Break"	$-0.16\pm0.09$	$-0.50\pm0.09$	$-0.54\pm0.09$
	(17.3/9.0)	(12.9/9.0)	(12.6/9.0)

表 3.6: 図 3.9 の 6 期間の近赤外線~紫外線 SED を powerlaw でフィットしたときのスペクトル指数  $\beta_{0}$ 。 GRB 母銀河のダスト減光に対して天の川、LMC、SMC モデルを用い SED を補正し、それを powerlaw で フィットを行った。スペクトル指数はダストモデルでの違いは見られるが、時間帯での違いは見られない。

## 3.4 議論

本節では、まず、X線フレアのない標準的な残光の時間帯の様子と外部衝撃波モデルとの比較を行う。一つ目は光度曲線の減光指数αとスペクトル指数βの関係についてX線の データを用いて考察する。二つ目は母銀河ダストの補正を行った赤外~X線のSEDと外 部衝撃波モデルについてダストの不定性を考慮して考察する。

次に、X線フレア期の前後から赤外~X線までのデータを用いて弱いX線フレアの起源 を議論する。

#### 3.4.1 X線の減光指数とスペクトル指数

本小区分では、GRB 071112CのX線の光度曲線とスペクトルの傾きが、外部衝撃波モ デルで説明可能なのか議論する。

GRB 外部衝撃波モデルでは、GRB の周辺環境の星間物質が一様な密度か星風的な分布 (GRB を中心に距離の二乗で密度が薄くなる)かを仮定したときには GRB の光度曲線の減 光指数 α とスペクトル指数 β には各条件 (エネルギー帯、周辺環境など)毎に1対1の関係 (表 1.2) があることが知られている (46)。

GRB 外部衝撃波モデルによれば、 X 線の帯域  $v_X$  がクーリング周波数  $v_c$  よりも小さく、 典型的な周波数  $v'_m$  よりも大きい場合星間物質が一様な密度のとき  $a_X = 1.5\beta_X$  になること を予測する。"Optical Rise"—"Normal Decay"期は表 3.2 と表 3.4 に示すように、  $a_X/\beta_X =$  $1.53 \pm 0.05$  となり、 $a_X = 1.5\beta_X$  とエラーの範囲で一致する。従って、この二つの期間は外 部衝撃波モデルで説明可能であった。外部衝撃波モデルに従うため、光度曲線とスペクト ルから、放射電子のエネルギースペクトル指数 p を求めることができる。外部衝撃波モ デルから  $p = 1 - \frac{4}{3}a_X$  and/or  $p = 1 - 2\beta_X$  (Meszaros & Rees 28; Sari et al. 38) と予測される。 観測された  $a_X と \beta_X$  を用いると、 $a_X$  から求められると  $p = 2.71 \pm 0.05$ 、 $\beta_X$  から求められ ると  $p = 2.66 \pm 0.08$  であり、二つのエラーの範囲を満たすのは  $p = 2.70 \pm 0.03$  であった。 この結果は、p > 2 となっていて、GRB 残光の典型的な値であり、シェルのバルクローレ ンツファクターと比例関係であることを示す。p < 2 の場合は、電子の最小と最大のロー レンツファクター、そしてバルクローレンツファクターを三つ含む複雑な関係となってし まう。

"X-ray Break"期では、 $\alpha_X/\beta_x = 1.72^{+0.23}_{-0.12}$ となり、 $\alpha_X = 1.5\beta_X$ の線上には約 2 $\sigma$ 離れるが、 $\alpha_X = 1.5\beta_X + 0.5$ の線上にエラーの範囲で一致する。この結果は、星風的な分布かつ  $v'_m < v_X < v_c$ の場合であることを示す。このとき、放射電子のエネルギースペクトルのベキは  $p = \frac{1-4\alpha}{3}$  and/or  $p = 1 - 2\beta$ と表され、 $\alpha_X$  から求められると  $p = 2.4 \pm 0.12$ 、 $\beta_X$  から求められると  $p = 2.42 \pm 0.10$ であった。p > 2なので電子の最小のローレンツファクターがシェルのバルクローレンツファクターと比例することを示す。

#### 3.4.2 標準的な減光期の赤外線~X線までのSEDの時間変化

本小区分では、GRB 外部衝撃波モデルと、三つのダスト吸収モデルで補正した赤外~紫 外線とX線までの6期間のSED について議論する。まず、外部衝撃波モデルが予測する 赤外~X線までのスペクトルの形は、図1.10でも説明したように可視赤外線域とX線域 を single powerlaw か、その間に折れ曲がりのある broken powerlaw のどちらかである。ま た、クーリング周波数 v<sub>c</sub> が近赤外線域よりも低い場合、近赤外線からX線の SED は single



図 3.9: 赤外~X線までの SED。X線の各時間帯のスペクトル(図 3.6) とその各時間帯の中央時刻の赤外 ~紫外線の SED(図 3.7) を合わせてその各時間帯ごとに各パネルで示した。(a) は"Optical Rise"期、(b)、 (e) は"Normal Decay"期、(c) は"Flare Rise"期、(d) は"Flare Decay"期、そして(f) は"X-ray Break"以降の SED である。丸は赤外—紫外線で観測された生の値を示す。紫色点線、緑色破線、青色一点破線は可視域 のデータを系内ダストで受けた減光量を補正し、さらに既知の母銀河ダストモデル(天の川、LMC、そして SMC) で各補正を行い、それらを powerlaw でフィットした結果である。X線のスペクトルを式 3.1 でフィッ トした後、銀河系内・外のダストによる吸収量を戻したX線データを赤色十で、それを powerlaw でフィッ トした結果を赤色実線で表す。

powerlaw モデルで説明できる。一方で、クーリング周波数  $v_c$  が近赤外線域とX線の間に ある場合、その SED は可視域とX線の間に折れ曲がりを持つだけとなる。また、§1.3.1 でも述べたように、これまでの観測や理論で GRB 母銀河のダスト吸収は SMC モデルが もっとも自然とされている。

GRB 母銀河のダストによる吸収のモデル (天の川、LMC、そして SMC) で補正された 可視赤外線データを powerlaw でフィットした結果を点線、破線、そして一点破線で示す。 また、X線スペクトルを式 3.1 でフィットした後、銀河系内・外のダスト吸収分をもどし たデータを十で、それを powerlaw でフィットした結果を実線で示す。

GRB 母銀河のダスト吸収モデルがLMC・SMC の場合、パネル(a) では、可視赤外側の powerlaw モデル(破線・一点破線)とX線側の powerlaw モデル(直線)は赤外~X線の間 で交わらず、その前者の上にX線データがある。外部衝撃波モデルではこのようなスペ クトルの形は説明できない。パネル(b)、(e)、そして(f) では、赤外~X線の間で二つの powerlaw モデル(破線・一点破線と実線)が交わっている。これらの交点をクーリング周波 数 $v_c$ としたとき、GRB 残光のスペクトルは外部衝撃波モデルで説明できる。また、(b)、 (e)、そして(f) へと時間が経過するにつれて、 $v_c$ は低振動数側へと移動することも、外部 衝撃波モデルと一致する。

GRB 母銀河のダスト吸収モデルが天の川の場合、パネル(a)、(b)、そして(e)では、赤



図 3.10: "X-ray Break" 期での GRB 母銀河のダスト吸収モデルが天の川とした SED。青丸は吸収補正を 行った観測データ。青点線はそれを powerlaw でフィットした結果。赤十はダスト吸収量を戻した X線デー タ。赤実線は X線データの powerlaw 成分を可視域まで延長したもの。緑でマークした折れ線はこれらの条 件の SED を示し、赤外と紫外線域で折れ曲がりあることを示している。可視から紫外線の観測では両帯域 の間に折れ曲がりは存在しない。

外~X線の間でそれぞれの powerlaw モデルが交わっており、LMC と SMC の場合のパネ ル(a) ようなX線超過見られない。この交点をクーリング周波数 $v_c$  としたとき外部衝撃波 モデルで説明できる。また、(a)、(b)、そして (e) へと時間が経過するにつれて、 $v_c$  は低振 動数側へと移動することも、外部衝撃波モデルと一致する。図 3.10 の拡大図で示すよう にパネル(f) では、赤外~X線の間でそれぞれの powerlaw モデルが交わっており、この交 点を $v_c$  としたとき、 $v_c$  は赤外~紫外線の間にある。しかし、観測した生データの赤外~ 紫外線の間に折れ曲がりはない。

以上をまとめると、GRB 母銀河のダスト吸収モデルが LMC と SMC の場合、パネル (a) では GRB 外部衝撃波モデルが予想するスペクトル (図 1.10) と比べると X 線が超過し ている。吸収モデルが天の川モデルの場合、パネル (f) では赤外 ~ 紫外線の間に折れ曲 がりができてしまうが、観測した結果 (図 3.9 パネル (f) の丸) はそのような明確な折れ 曲がりは確認できない。外部衝撃波モデルが予測するこのような SED の条件を満たす ためには、GRB 071112C の母銀河の  $N_{\rm H}^{ext}/A_V$  が天の川モデルと LMC モデルの値との間  $(N_{\rm H}^{ext}/A_V \sim 3.8 \times 10^{21} {\rm cm}^{-2})$ とする必要がある。

### 3.4.3 GRB までの視線方向の水素量推定

Watson et al. (44) は、GRB 母銀河の水素柱量  $N_{\rm H}^{ext}$  について X 線のスペクトルから得た  $N_{\rm H,X}^{ext}$  と可視の Ly $\alpha$  線の深さで見積もった  $N_{\rm H,O}^{ext}$  が系統的に異なり、 X 線から得た  $N_{\rm H,X}^{ext}$  の 方が大きい傾向を示し、GRB 周辺の組成は太陽組成よりも金属量が大きいことを示唆した (§ 1.3.3)。

これまでの結果と議論では GRB 母銀河の組成は太陽組成と等しいと仮定し、X線スペクトルから得た  $N_{H,X}^{ext}$  は可視の Ly $\alpha$ 線の深さで見積る  $N_{H,O}^{ext}$  と等しいとして、可視赤外線域の吸収推定に使っていた。しかし、(44)の結果を受け、GRB 周辺の組成は太陽組成よりも金属量が大きいと仮定し、GRB 071112C の SED を再び議論する。



図 3.11: 赤外~X線までの SED。可視赤外線が銀河系外で受けた吸収の補正に用いる水素柱量を N<sup>ext</sup><sub>H,O</sub> = 0.1×N<sup>ext</sup><sub>H,X</sub> として見積り、この値を用いて可視赤外線域が系外で受けた吸収を補正した。各パネル、線、色 や印は図 3.9 と同様である。

Watson et al. (44) の結果を見ると $N_{H,O}^{ext} = 0.1 \times N_{H,X}^{ext}$ の関係が合うように見える。(図 1.20 参照)。この関係と三つの銀河のダスト吸収モデルを用いて §4.2.3 と同様に可視赤外線が 受けた吸収を補正した。その結果、図 3.11 のようになり、三つのダスト吸収モデル(天の 川、LMC、SMC) で補正した可視赤外線を powerlaw でフィットした powerlaw モデルは三 つとも区別がつかないほど差がない。X線フレア期を除いた、パネル(a)、(b)、そして(e) では可視赤外線側の powerlaw モデルよりも X線のデータが超過している。このような振 舞は外部衝撃波モデルでは説明できず、(44)の関係を用いたときには従って X線域には別 成分の存在の可能性があることになる。

### 3.4.4 X線フレアの近赤外線からX線までの振舞

本小区分では、赤外線~紫外線とX線の光度曲線からX線フレアの起源について議論す る。まず、外部衝撃波は星間物質中に衝撃波を起こすため、衝撃波が比較的大きく、また 消えにくいとされている。そのため、X線フレアのような時間幅/ピーク時刻 ( $\Delta t/t_{peak}$ )が より小さく、ピークフラックスの変動比 ( $\Delta F/F$ )がより大きなものほど、外部衝撃波では 説明できないと考えられている (Ioka et al. 13; Chincarini et al. 5)。これに着目した関係図 が図 3.12 である。横軸はフレア時間幅/ピーク時刻。縦軸はフレアのピークフラックスの 変動比。黒丸は今までの観測されたX線フレアを伴うGRB。観測されたX線フレアは各 線よりも矢印方向にあれば、それらの起源と予測される。つまり、どの線よりも矢印方向 になければ、外部衝撃波由来ではなく内部衝撃波由来である可能性を示す。赤線は光度曲 線がフレアではなく"くぼみ (Dips(a))"であり観測視線方向がGRB ジェット方向と一致 (on axis)、赤破線は Dips(a) で観測視線方向が GRB のジェット方向と不一致 (off axis)、青線と



図 3.12: X線フレアの起源と時間幅比・増光フラックス比関係 (5)。横軸はフレア時間幅/ピーク時刻。縦 軸はフレアのピークフラックスの変動比。黒丸は今までの観測されたX線フレアを伴う GRB。赤丸は今回 観測した GRB 071112C と GRB 080506。観測されたX線フレアは各線よりも矢印方向にあれば、それらの 起源と予測される。赤線は光度曲線がフレアではなく"くぼみ (Dips(a))"であり観測視線方向が GRB ジェッ ト方向と一致 (on axis)、赤破線は Dips(a) で観測視線方向が GRB のジェット方向と不一致 (off axis) のとき である。フレアの起源が、青線と青破線は on axis と off axis ではシェルと衝突する星間物質の密度の不均 一の外部衝撃波由来 (density(b)) のときである。黒線 (c) と (d) は複数のジェット (patchy) 由来と放出され たシェルの一部が遅れて外部衝撃波を起こした (refresh) 場合で on axis と off axis の差はない (詳細 §1.2.4)。

青破線は on axis と off axis でフレアの起源が星間物質の密度の不均一由来 (density(b))、黒 線 (c) と (d) は複数のジェット (patchy) 由来と放出されたシェルの一部が遅れて外部衝撃波 を起こした (refresh) 場合で on axis と off axis の差はない。この図の結果では、X 線フレア の3割程度にあたる振幅の大きなものに対しては内部衝撃波理論が支持されているが、残 リの7割以上を占める弱いフレアの起源については、外部衝撃波由来で説明できる条件 ( $\Delta F/F < \Delta t/t_{peak} \times 10^{1.4}$  or  $\Delta t/t_{peak} < 0.4$ ) を満たしていた。

また、今回解析を行った GRB 071112C では、X線フレアの時間幅/ピーク時刻は $\Delta t/t_{peak} = 820/860、増光幅のフラックス比は \Delta F/F = 10/2.3 であった。この結果を図 3.12 にプロット すると、(c)density(off axis)の条件 (<math>\Delta F/F < \Delta t/t_{peak} \times 10^{1.4}$  と(d)refresh の条件  $\Delta t/t_{peak} < 0.4$ )を共に満たしている。つまり、GRB 071112C は外部衝撃波由来を排除できない。

次に、今回新たに得た赤外~紫外線のデータを含めX線フレア時の起源について考察す る。§1.2.2 でも述べたように、外部衝撃波由来ではX線~電波までの帯域をシンクロトロ ン放射することで説明している。従って、外部衝撃波由来であれば、X線の光度やスペク トルの形に変化があれば可視赤外線や電波にも変化がみられるはずである。(9)によれば、 X線フレアが外部衝撃波由来であるならば、X線と可視赤外線域の光度曲線の両方に変動 が観測されると報告もされている。

しかし、これまでの研究でこれらを定量的に判断していなかった。そこで、独自に外部 衝撃波モデルを計算し可視赤外線域とX線の二つのデータを用い定量的な考察を行う。残 光の標準的な slow coolingの減光時に、X線フレアとして別の領域で新たに外部衝撃波が 生じて放射された SED が重なるとする。新たに生じた外部衝撃波から放射される SED は fast cooling、fast と slow coolingの境界条件、そして slow cooling のどれかである。



図 3.13: fast cooling で  $v_0 < v'_c$  のときのX線フレアと残光の外部衝撃波モデル SED。横軸は振動数 (Hz)、 縦軸は Flux density (Jy) で、両対数ある。オレンジ色と緑色の線は外部衝撃波モデルが予測する標準的な残 光と fast cooling で  $v_0 < v'_c$  のときのX線フレアの SED である。標準的な残光は  $v_0 < v_X$  の間に折れ曲がり  $v_c$  が、X線フレア成分は  $v_X$  よりも低振動数側に折れ曲がり  $v'_c < v'_m$  を持つとする。可視域とX線域の振動 数は  $v_0 < v_X$  とする。標準的な残光の可視域とX線域での Flux density は  $F_{\text{normal,O}} < F_{\text{normal,X}}$  であり、X 線フレアの Flux density は  $F_{\text{flare,O}} < F_{\text{flare,X}}$  とする。p < p' は、標準的な残光とX線フレアの電子のスペク トル指数である。各振動数帯でのスペクルの振動数のべきは図に示す。

ここでは、X線フレア成分が外部衝撃波モデルの fast cooling で $v_0 < v'_c$ の条件で説明が可能か議論する。図 3.13 に、外部衝撃波モデルから予測できる二つの SED、標準的な残光成分 (オレンジ色) とX線フレア成分 (緑色)を示す。標準的な残光は $v_c$  に、X線フレア成分 (緑色)を示す。標準的な残光は $v_c$  に、X線フレア成分 (水 と v'\_m に折れ曲がりを持つ。可視域とX線域の振動数は $v_0 \ge v_X \ge$ する。標準的な残光の可視域とX線域での Flux density は  $F_{\text{normal,O}} \ge F_{\text{normal,X}} \ge 0$ 、X線フレアの電子のスペクトル指数である。ここで、 $F_{\text{normal,O}}$  で  $F_{\text{normal,X}}$ を表し、 $F_{\text{flare,O}}$ を表すと

$$F_{\text{normal,X}} = F_{\text{normal,O}} \left(\frac{\nu_c}{\nu_O}\right)^{-\frac{p-1}{2}} \left(\frac{\nu_X}{\nu_c}\right)^{-\frac{p}{2}}$$
(3.3)

$$F_{\text{flare,O}} = F_{\text{flare,X}} \left(\frac{\nu'_m}{\nu_X}\right)^{-\frac{p'}{2}} \left(\frac{\nu'_c}{\nu'_m}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\nu_O}{\nu'_c}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(3.4)

となる。

ここで、X線フレアのX線域と可視赤外線域の増光幅を $A \ge a \ge b$ 、この増光幅を用いて、X線域と可視赤外線域では標準的な残光期でのFlux density  $F_{normal,X} \ge F_{normal,O}$ から、X線フレア期のFlux density  $F_{flare,X} \ge F_{flare,O}$ を表すと

$$F_{\text{flare},X} = A \times F_{\text{normal},X} \tag{3.5}$$

となる。

この式 3.5 と式 3.6 に、式 3.3 と式 3.4 を代入しすると、*v<sub>c</sub>* を *v'<sub>c</sub>* と *v'<sub>m</sub>* の値で表すことが できる (式 3.7)。

$$v_c = \left(\frac{a}{A}\right)^2 10^{3(p-6p')+5} v_m'^{p'-1} v_c'^{5/3}$$
(3.7)

今回の観測結果では、図 3.3 に示すように、X線域ではX線フレア時に 3.5(=A) 倍増光、 一方、赤外~紫外線では有意な変動はなく、変動は7%以下 (=a) である。また、図 3.9 の X線側の powerlaw モデル (実線) のように、X線のスペクトルは通常の減光期とフレア減 光期では冪指数が -0.83 ± 0.04 と -0.62 ± 0.06 である (表 3.4)。一方、図 3.9 の可視赤外線 側の powerlaw モデル (点線、破線、一点破線)のように、近赤外~紫外線域のスペクトル の冪指数は -0.14 ± 0.09 と -0.15 ± 0.09 である (表 3.6)。今回、観測している帯域は可視域 とX線域で  $1.4 \times 10^{14} \sim 1.2 \times 10^{15}$  (Hz) と  $1.8 \times 10^{17} \sim 1.3 \times 10^{18}$  (Hz) であり、二つの振動数 の領域では折れ曲がりはなかった。また、可視域の光度曲線では GRB 後 0.2 ks から 630 ks まで折れ曲がりがなかった。つまり、この時間帯での  $v_c$  は外部衝撃波モデルより  $v_c \propto t^{-0.5}$ とされているので、50 分の 1 にまで低振動数側に移動する。このように、 $v_c$  の存在する 範囲は、630 ks までの観測データのある J バンドの周波数 ( $2.5 \times 10^{14}$  Hz) よりも 50 倍以 上で、X線の最低周波数以下である ( $v_0 = 1.3 \times 10^{16} \sim v_X = 1.8 \times 10^{17}$  Hz)。

これらの観測結果を表 1.2 の式を用いて  $p = 2\beta = 1.66 \ge p' = 2\beta' = 1.24 \ge x$ め、式 3.7 に代入したところ  $v'_m \ge v'_c$  の正の関数となり、 $v'_m \ge v'_c$  に最大の値  $1.8 \times 10^{17}$ (Hz) を代入した。その結果、 $v'_c < v'_m < 5v'_c$  の範囲のとき  $v_c < 3.1 \times 10^{17} \ge x$ り、 $v_0 \ge v_X$  の間に存在し条件を満たす。しかし、外部衝撃波モデルより  $v'_c \propto t^{-0.5} \ge v'_m \propto^{-1.5}$ である。フレアの減光継続時間 690 で  $v'_c$  は 0.03 倍、 $v'_m$  は 5.5×10<sup>-5</sup> 倍にまで移動し、その外部衝撃波を満たす条件の範囲を保てない。

従って、X線フレア成分を外部衝撃波モデルの fast cooling で  $v_0 < v'_c$ のときでは説明ができない。

X線フレア成分が fast cooling で  $v'_c < v_0$  のとき

ここでは、前回と同様に X 線フレア成分が外部衝撃波モデルの fast cooling で  $v'_c < v_0$  の ときで説明可能か議論する。図 3.14 に、外部衝撃波モデルから予測できる二つの SED、 普通の残光成分 (オレンジ色) と X 線フレア成分 (緑色) を示す。 $F_{\text{flare,X}}$  で  $F_{\text{flare,O}}$  を表すと

$$F_{\text{flare,O}} = F_{\text{flare,X}} \left(\frac{\nu'_m}{\nu_X}\right)^{-\frac{p'}{2}} \left(\frac{\nu_O}{\nu'_m}\right)^{-\frac{1}{2}}$$
(3.8)

となる。

式 3.5 と式 3.6 に、式 3.3 と式 3.8 に代入しすると、*v<sub>c</sub>* を *v'<sub>m</sub>* の値で表すことができる (式 3.9)。

$$\nu_c = \left(\frac{a}{A}\right)^2 10^{3(p-3p'+10)} \nu_m'^{p'-1} \tag{3.9}$$



図 3.14: fast cooling で  $v'_c < v_0$  のときの X 線フレアと残光の外部衝撃波モデル SED。オレンジ色と緑色の 線は外部衝撃波モデルが予測する標準的な残光と fast cooling で  $v'_c < v_0$  のときの X 線フレアの SED である。

前条件と同様に観測結果を式 3.9 に代入したところ  $v'_m$ の正の関数となり、 $v'_m$ の考えうる範囲  $1.2 \times 10^{15} \sim 1.8 \times 10^{17}$ (Hz)を代入した。その結果、 $1.2 \times 10^{24} < v_c < 3.6 \times 10^{24}$ となり、 $v_0$ と $v_X$ の間に存在せず標準的な残光の SED が赤外 ~ X線まで直線になってしまい矛盾する。従って、X線フレア成分を外部衝撃波モデルの fast cooling で $v'_c < v_0$ のときでは説明できない。

X線フレア成分が fast と slow cooling の境界条件のとき



図 3.15: fast と slow cooling の境界条件のときの X 線フレアと残光の外部衝撃波モデル SED。オレンジ色 と緑色の線は外部衝撃波モデルが予測する標準的な残光と fast と slow cooling の境界条件の X 線フレアの SED である。

ここでは、前回と同様にX線フレア成分が外部衝撃波モデルの fast と slow cooling の境

界条件で説明可能か議論する。図 3.15 に、外部衝撃波モデルから予測できる二つの SED、 普通の残光成分 (オレンジ色) とX線フレア成分 (緑色) を示す。*F*<sub>flare,X</sub> で *F*<sub>flare,O</sub> を表すと

$$F_{\text{flare,O}} = F_{\text{flare,X}} \left(\frac{\nu'_m}{\nu_X}\right)^{-\frac{p'}{2}} \left(\frac{\nu_O}{\nu'_m}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(3.10)

となる。

式 3.5 と式 3.6 に、式 3.3 と 3.10 を代入しすると、*v<sub>c</sub>* を *v'<sub>m</sub>* の値で表すことができる (式 3.11)。

$$v_c = \left(\frac{a}{A}\right)^2 10^{3(p-6p')+5} v_m'^{p'+2/3}$$
(3.11)

前条件と同様に観測結果を式 3.9 に代入したところ、 $v'_m$ の正の関数となり、 $v'_m$ を最大の 値  $1.8 \times 10^{17}$ (Hz)を代入した。その結果、 $v_c < 1.5 \times 10^{17}$ となり、 $v_O < v_c < v_X$  に存在でき 矛盾しない。しかし、fast と slow cooling の境界条件は一瞬の時間でしか成り立つことが できなず (詳細 §1.2.2)、フレアの減光の期間すべてを説明することはできない。従って、 X線フレア成分を外部衝撃波モデルの fast と slow cooling の境界条件のときでは説明でき ない。

X線フレア成分が slow cooling のとき



図 3.16: slow cooling のときのX線フレアと残光の外部衝撃波モデルの SED。オレンジ色と緑色の線は外部衝撃波モデルが予測する標準的な残光と slow cooling のX線フレアの SED である。

ここでは、前回と同様にX線フレア成分が外部衝撃波モデルの slow cooling の境界条件
 で説明可能か議論する。図 3.16 に、外部衝撃波モデルから予測できる二つの SED、普通の残光成分(オレンジ色)とX線フレア成分(緑色)を示す。F<sub>flare,X</sub> で F<sub>flare,O</sub> を表す。

$$F_{\text{flare,O}} = F_{\text{flare,X}} \left(\frac{\nu_c'}{\nu_X}\right)^{-\frac{p'}{2}} \left(\frac{\nu_O}{\nu_c'}\right)^{-\frac{p'-1}{2}}$$
(3.12)

この式 3.5 と式 3.6 に、式 3.3 と 3.12 を代入しすると、*v*<sup>'</sup><sub>c</sub>/*v*<sub>c</sub> の比を求めることができる (式 3.13)。

$$\nu_c = \left(\frac{a}{A}\right)^2 10^{3(p-p')} \nu'_c \tag{3.13}$$

前条件と同様に観測結果を式 3.13 に代入したところ、*v*<sup>'</sup><sub>m</sub> の正の関数となり、*v*<sup>'</sup><sub>m</sub> を最大の値 1.8×10<sup>17</sup>(Hz) を代入した。

その結果、 $v_c < 1.3 \times 10^{15}$ となり、 $v_O < v_c < v_X$ に存在できず矛盾する。従って、X線フレア成分を外部衝撃波モデルの slow cooling のときでは説明できない。

以上のことから、X線フレアは全条件の外部衝撃波では説明できず、内部衝撃波由来で ある可能性が高い。大質量星の崩壊と予測されているGRBのエンジンが1000s間活動し ていることを示唆する。

## 3.5 GRB 071112Cまとめ

今回、GRB 071112CをX線フレアが起こる前からかなた望遠鏡を用いて観測した。Swift/XRT のデータや GCN に報告された観測データも含めてX線フレア前から赤外~X線までの時 間に密な14 バンドの光度曲線と多色 SED を得ることに成功した。

X線フレアを除く標準的な減光を示すデータから、GRB 母銀河の $N_{\rm H}^{ext}/A_V$ 値が天の川 とLMCの間である場合に、SED上で紫外線とX線の間には折れ曲がり $v_c$ があり、外部衝 撃波モデルで説明できる。ダスト吸収則を最もGRB 母銀河と近いと予測されているSMC モデルと仮定すれば、X線の振舞が外部衝撃波モデルでは説明ができず、X線超過成分を 生じる別成分を必要とした。

または、X線と可視で見積もった水素柱量が異なる可能性(44)を仮定するならば、X線の振舞が外部衝撃波モデルでは説明ができず、X線超過成分を生じる別成分を必要とした。GRB残光の起源を解明するためには、ダストに吸収された可視赤外線域の正確な補正を行うことは必須である。従って、(44)のような研究をより統計的に行う必要がある。

最後に、X線データのみしか用いていないX線フレアの先行研究によると、GRB 071112C で観測されたX線フレアは変動が弱いため、外部衝撃波でも説明が可能とされる。今回 新たに得た赤外~紫外線のデータを含め、独自に外部衝撃波モデルを検証し、外部衝撃波 由来では説明ができないことを明らかにし内部衝撃波由来である可能性が高いことを示し た。従って、初めて、変動の遅いX線フレアでさえ内部衝撃波由来であることを示せた。 X線フレアを伴う約半数のGRB の本体が長寿命である可能性を示す。GRB 本体の活動を 解明する手がかりを増やすことができるかもしれない。

# 第4章 GRB 080506

本章では、2008 年 5 月 6 日 17 時 46 分 21 秒 (UT) に Swift 衛星 BAT 検出器が検出した GRB 080506 の観測及び解析結果を述べる。この GRB の位置は赤経: 21h 57m 41.83s、赤 緯: +38D 59' 04.9" ±1.5 秒角であり、かなた望遠鏡によるフォローアップ観測に成功した。 この GRB 母銀河は観測されず、GRB までの距離は不明である。

## 4.1 観測

今回解析に用いたデータは主要なものがかなた望遠鏡に取り付けられている TRISPEC、 Swfit 衛星の XRT により検出されたものであり、その他に、The Gamma ray bursts Coordinates Network(GCN) に報告されたものもある。それらを含めて GRB 080506 の解析に用 いたデータを表 4.1 にまとめる。

### 4.1.1 かなた望遠鏡による観測



図 4.1: 左:GRB 080506 発生前のアーカイブにより公開されているイメージ<sup>†</sup>右:GRB 080506 発生後の TRISPEC V バンドのイメージ。GRB 発生前の左図の赤円の中には GRB はないが、GRB 発生後の右図赤 棒で示すようにかなた望遠鏡ではとらえている。

† http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss\_form

我々はかなた望遠鏡に TRISPEC を取り付けて、GRB 発生 210 秒後 (2008 年 5 月 6 日 17:49:51 UT) から約 98 分後まで観測を行った。*R<sub>C</sub>*(0.65µm)、*J*(1.25µm)、そして *K<sub>s</sub>*(2.16µm) バンドを同時に撮像モードで 35 組のイメージを得た。そのなかの一枚を図 4.1 右に示す。図 4.1 左は GRB 080506 発生前のアーカイブにより公開されているイメージである。発生後には図 4.1 右の赤棒と図左の赤円と比べると GRB 080506 がかなた望遠鏡によってとらえられている。観測された画像を GRB 071112C のときと同様に処理し、等級を決める。相対測光に用いた比較星は、撮像した視野内の GRB 080506 近くのものを用いた。*R<sub>C</sub>* の比

バンド	エネルギー帯 or 中心波長帯	望遠鏡	GCN Circular
X-ray	0.30—8.0 keV	Swift/XRT	(34)
В	$0.42 \mu\mathrm{m}$	UVOT	(31)
V	0.53 μm	UVOT	(31)
R	$0.65 \mu\mathrm{m}$	ASU Ondrejov	(20)
R	$0.65 \mu\mathrm{m}$	NOT	(6)
R	$0.65 \mu\mathrm{m}$	Himalayan Chandra	(36)
$R_C$	$0.65 \mu\mathrm{m}$	KANATA	(18)
$R_C$	$0.65 \mu\mathrm{m}$	NAYUTA	(26)
$R_C$	$0.65 \mu\mathrm{m}$	Tautenburg	Kann et al. 17, 16
J	$1.25 \mu\mathrm{m}$	KANATA	(18)
Ks	2.16 µm	KANATA	(18)

較星には The United States Naval Observatory (USNO) カタログ B1.0、 $J \ge K_s$  の比較星に は 2MASS All-Sky カタログを用いた。また、それぞれのバンドの統計エラーは 0.01, 0.02, そして 0.08 mag であった。

## 4.1.2 XRT

XRTは2008年5月6日17:48:47 UT(BAT検出後146秒)から観測を始めた。GRB 071112C と同様に解析を行い、Windowed Timing mode(WT)のGRB 領域は40"×130"、背景光領 域はGRB 領域両端の40"×170"とした(図4.2左)。また、Photon Counting mode(PC)で はGRB 領域は半径50"の円、背景光領域は内半径100"で外半径226"の円環部とした (図4.2右)。得られた光度曲線はWTでは30カウント、PCでは40カウントでービンとな るようにビンまとめを行った。スペクトルは20カウントでービンとなるようにビンまと めを行った。



図 4.2: 左:GRB 080506 の XRT/Windowed Timing mode のイメージ。右:GRB 080506 の XRT/Photon Counting mode のイメージ。ともに緑線で囲った領域を GRB、黄線で囲った領域を背景光とした。

## 4.2 光度曲線の様子とフィッティング



図 4.3: GRB 080506 残光の赤外線から X 線までの光度曲線: 光度曲線が重ならないように、Flux density を次のような値を掛けて上下に移動させている。( $10^{-0.5}(B)$ 、  $10^{-1.0}(V^*(\text{UVOT}))$ 、 $10^{-1.5}(R)$ 、  $10^{-2.0}(R_C)$ 、  $10^{-2.5}(J)$ 、そして  $10^{-3.0}(K_s)$ )

各バンドで得られた光度曲線を図 4.3 に示す。波長の短い順に上から並べてあり、XRT のみX線である。GRB 071112C と同様にX線と可視赤外線の光度曲線の減光の様子で区 別して、それぞれ期間を定義した(表 4.2)。

まず残光 X 線の光度曲線はトリガー後 0.2 ks までジェットの内側で生じるとされるプロ ンプト放射が見え、次に 0.2—0.35 ks まで急な (steep) 減光を示した。0.3—1.5 ks に X 線 フレアを伴い、その後は、powerlaw でほぼ再現できるように見える。そこで、powerlaw でフィットしたところ、減光指数  $\alpha_X = -0.89 \pm 0.05$  で再現できた ( $\chi^2 = 30$  with 8 degree of freedom)。これらの結果を図 4.4 に示し、表 4.2 にまとめる。

一方、可視赤外線の光度曲線はどのバンドも 1.5 ks 付近で折れ曲がる broken powerlaw でほぼ再現できるように見える。そこで、図 4.5 のように、同時に全バンドの光度曲線 を同様にフィットを行った。このとき減光指数と折れ曲がり時刻は全バンドで共通とし、 normalization は別々にした。その結果、1.30 ± 0.00 ks に折れ曲がりがあり、それまでの 減光指数は  $-0.19\pm0.06$ 、それ以降は  $-0.83\pm0.03$  ( $\chi^2 = 38$  with 36 degree of freedom) と求 められた。これらを表 4.2 にまとめた。

期間名	GRB トリガー後の時間帯 (ks)	期間の特徴
"Promp Emission"	0.15 - 0.20	X線はプロンプト、可視赤外線は normal decay
"Steep Decay"	0.20 — 0.35	X 線は急な減光、可視赤外線は normal decay
"Flare Rise"	0.35 — 0.47	X 線フレアの増光、可視赤外線は noraml decay
"Flare Peak"	0.47 — 0.50	X線フレアのピーク、可視赤外線は noraml decay
"Flare Decay"	0.50 - 0.67	X 線フレアの減光、可視赤外線は noraml decay
"Normal Decay"	1.50 — 174	X線と可視赤外線共に noraml decay

表 4.2: GRB 080506 残光の期間名



図 4.4: GRB 080506 残光のX線光度曲線後期の powerlaw フィット。トリガー後 1.5—171 ks までの減光係 数-0.89 ± 0.05 で再現できた ( $\chi^2$  = 30 with 10 degree of freedom)。

期間名	X線の減光指数 $\alpha_{\rm X}$	可視赤外線の減光指数 $\alpha_{ m O}$
"Prompt Emission"	prompt like	$-0.19 \pm 0.06^{\dagger}$
"Steep Decay"	steep decay	$-0.19 \pm 0.06^{\dagger}$
"Normal Decay"	$-0.89 \pm 0.05$	$-0.83 \pm 0.03$

表 4.3: GRB 080506 残光の減光指数。図 4.4、図 4.5 のように X 線は残光後期を powerlaw、可視赤外線は、 全バンドを同時に broken powerlaw でフィットを行った。 $\alpha_X \ge \alpha_0$  はそれぞれのフィット結果の減光指数で ある。† はそれぞれ共通の値を示す。



図 4.5: GRB 080506 残光の可視赤外線光度曲線の broken powerlaw フィット。折れ曲がりは 1.3 ks にあ り、トリガー後 0.2—1.3 ks までの減光係数-0.19 ± 0.06、1.3—200 ks までの減光係数-0.83±0.03 で再現でき た ( $\chi^2$  = 38 with 36 degree of freedom)。

期間名	GRB トリガー後の時間帯 (ks)	$\beta_X$	$\chi^2$ / d.o.f
"Prompt emission"	0.15 - 0.20	$-0.40^{+5.10}_{-2.00}$	115 / 147
"Steep Decay"	0.20 - 0.35	$-1.08\pm0.10$	59 / 56
"Flare Rise"	0.35 — 0.47	$-0.84^{+0.15}_{-0.16}$	5/18
"Flare Peak"	0.47 — 0.50	$-0.99 \pm 0.13$	25 / 28
"Flare Decay"	0.50 - 0.67	$-1.46^{+0.11}_{-0.12}$	86 / 56
"Normal Decay"	1.50—147.20	$-1.35_{-0.18}^{+0.17}$	7/16

表 4.4: GRB 080506 残光 X 線のスペクトル指数。 $\beta_X$  は X 線スペクトル指数。

## 4.2.1 X線スペクトル



図 4.6: 二成分吸収 powerlaw model でフィットしたX線スペクトル。X線と可視域の光度曲線の傾きごと 6 期間のX線スペクトルを作成し、それらを我々の銀河ダストによる吸収量は固定、GRB の母銀河ダスト による吸収量はそれぞれ共通、そしてベキはそれぞれフリーでフィットを行った。色はそれぞれの期間に対 応している(黒:0.15 — 0.20 ks ("Prompt Emission"期)、赤:0.20 — 0.35 ks ("Steep Decay"前期)、緑:0.35 — 0.47 ks ("Flare Rise"期)、青:0.47 — 0.50 ks ("Flare Peak"期)、水色:0.50 — 0.67 ks ("Flare Decay"後期)、 そして紫:1.5 — 174.2 ks ("Normal Decay"期))。

本小区分では、GRB 071112C と同様にX線スペクトルから、ある時間帯でのスペクト ル指数の導出について述べる。XRT スペクトルを6期間で切り分けて作成し、解析を行っ た。どの期間のX線スペクトルも我々の銀河とGRB の母銀河のダストによる吸収を受け た二成分吸収 powerlaw model(式 3.1) でフィットした。GRB 080506 の母銀河の赤方偏移 が決定していないため、2008 年 12 月の時点での平均値 z = 2.27 とおいた (図 1.6)。GRB 視線方向の我々の銀河の水素柱量は $N_{\rm H}^{gal} = 1.66 \times 10^{21}$ (7) と仮定し、GRB 母銀河の水素柱 量 $N_{\rm H}^{ext}$ はフリーパラメータとした。GRB の発生位置は高赤方偏移であるため、母銀河の ダストによる吸収量は赤方偏移 zを考慮している (式 3.1)。フィットしたところ、どの期 間の  $N_{\rm H}^{ext}$  もエラーの範囲で一致した。そこで、全ての期間のスペクトルを  $N_{\rm H}^{gal}$  は固定、  $N_{\rm H}^{ext}$  はどの期間でも共通の値でフリー、ベキ $\beta_{\rm x}$  はそれぞれの期間でフリーになるように フィットを行った。フィットした図を図 4.6 に示す。この図の色はそれぞれの時間帯に対 応している。

その結果、GRB 母銀河の GRB 視線方向の水素柱量  $N_{\rm H}^{ext}$  は  $5.8^{+2.2}_{-2.1} \times 10^{21} {\rm cm}^{-2}$  となった。それぞれのスペクトル指数  $\beta_{\rm X}$  は"Prompt Emission"期  $-0.45^{+0.15}_{-0.16}$ 、"Steep Decay"期  $1.00^{+0.22}_{-0.33}$ 、"Flare Rise"期  $0.80^{+0.19}_{-0.30}$ 、"Flare Peak"期  $1.10^{+0.46}_{-0.64}$ 、"Flare Decay"期  $1.46^{+0.35}_{-0.42}$ 、そして"Normal Decat"期  $1.41^{+0.32}_{-0.40}$ となり、時間の経過とともにソフトになった。これらスペクトル指数を、表 4.4 にまとめる。

## 

## 4.2.2 近赤外線---紫外線域 SED の作成

図 4.7: GRB 080506の光度曲線のフィット結果から作成した 6 期間の SED。上から時間の早い順になっており、黒は 0.1 ks、赤は 0.26 ks、緑は 0.40 ks、青は 0.48 ks、水色は 0.57 ks、そして紫は 16.2 ks の時刻の SED である。それぞれ、"Prompt Emission"期、"Steep Decay"前期、"Flare Rise"期、"Flare Peak" 期、"Flare Decay"期、そして"Normal Decay"期、のログスケールでの時間帯の中央時刻である。縦軸は Flux Density [mJy] で表している (Jy = 1×10<sup>-23</sup> erg/sec/cm<sup>2</sup>/Hz)。

本節はGRB 071112Cと同様可視域の光度曲線のフィッティングから SED を作成すること について述べる。GRB 071112C の可視赤外線光度曲線は powerlaw であったが、GRB 080506 は broken powerlaw である。従って、GRB 071112C のときと同じようにして任意時刻 t<sub>0</sub> の フラックスを推定した。

§4.2 で行ったように、各波長域の光度曲線を同時に broken powerlaw でフィットし二つ の減光係数  $\alpha_{0,1}$ 、  $\alpha_{0,2}$  と折れ曲がる時刻  $t_b$  を得た。先に得た各バンドの normalization A は、t=1 s でのフラックスを表している。フラックスを求めたい期間の時刻を  $t_0$  としたと き A が  $t = t_b$  でのフラックスとなるように定義し、下の式を用いて、それぞれのバンド毎 にフィットを行う。各バンド毎に得られたパラメータA とそのエラーをその各バンドの時 刻  $t_0$  のフラックスとそのエラーとした。それらのフラックスをバンド周波数毎に表示す ることで、SED を得た。 • $t_0 \le t_b$  (任意の時刻が折れ曲がった時刻よりも小さいとき) · $t \le t_b$ 

$$F = A(t/t_0)^{\alpha_{0,1}}$$
(4.1)

 $\cdot t_b \leq t$ 

$$F = B(t/t_b)^{\alpha_{0,2}} \tag{4.2}$$

$$B = A(t_b/t_0)^{\alpha_{0,1}}$$
(4.3)

• $t_b \leq t_0$  (任意の時刻が折れ曲がった時刻よりも大きいとき) · $t \leq t_b$ 

$$F = B(t/t_h)^{\alpha_{0,1}} \tag{4.4}$$

$$B = A(t_b/t_0)^{\alpha_{0,2}}$$
(4.5)

 $\cdot t_b \leq t$ 

$$F = A(t/t_0)^{\alpha_{0,2}}$$
(4.6)

この手法を用いて、得たスペクトルを図4.7に表示する。

#### 4.2.3 GRB 母銀河とダスト吸収曲線

GRB 071112C と同様、X線スペクトルと可視赤外線 SED のダスト補正を行う。最後に、 X線スペクトルと可視赤外線 SED を合わせて赤外 ~ X線 SED を作成した (図 4.9)。本小 区分ではこれらのことについて述べる。

X線スペクトルのダスト補正

§4.2.1 で得られた各時間帯のX線スペクトルは、銀河系内・外のダストにより吸収を受けている。X線スペクトルのフィット結果により得られている銀河系内・外の $N_{\rm H}^{gal}$  と $N_{\rm H}^{ext}$ の値を用いて、X線スペクトルを powelaw 成分だけに戻した。

可視赤外線 SED のダスト補正

GRB 071112C と同様に可視赤外線域が受けたダストによる補正を行うためには、母銀河の視線方向の水素柱量  $N_{\rm H}^{ext}$  が必要である。今回、GRB 080506 の距離が求められていないため  $N_{\rm H}^{ext}$  がわからない。従って、正確な補正は行えない。しかし、補正量は時間変化しないため、SED の時間変化の有無を調べることはできる。そこで、 $N_{\rm H}^{ext}$  = 7.0×10<sup>21</sup> を仮定 (詳細 §4.2.1) し GRB 071112C と同様に三つのモデルで補正を行い powerlaw でフィットした。(図 4.8)。フィット結果を表 4.5 にまとめる。

![](_page_63_Figure_0.jpeg)

図 4.8: ダスト吸収を補正した GRB 080506 の可視赤外線 SED。観測した可視赤外線 SED を我々の銀河に よる吸収の補正を行い、天の川、LMC、SMC モデルでダストによる減光量を補正し、それらを powerlaw で フィットを行った一例である。黒色丸は観測した SED である。赤色三角は天の川モデルで、青色十は LMC モデルで、そして緑色四角は SMC モデルで補正を行った SED である。赤色破線、青色点線、そして緑色 一点破線は、補正した SED を powerlaw でフィットしたものである。色の対応は補正データと同じである。

ダストモデル	天の川	LMC	SMC
期間	$(\chi^2 / {\rm d.o.f})$	$(\chi^2/\text{d.o.f})$	$(\chi^2/\text{d.o.f})$
(a) "Prompt Emission"	$0.60 \pm 0.05$	$-0.59 \pm 0.05$	$-0.74 \pm 0.05$
	(46.2/4.0)	(4.1/4.0)	(3.5/4.0)
(b) "Steep Decay"	$0.60 \pm 0.05$	$-0.59 \pm 0.05$	$-0.74 \pm 0.05$
	(46.2/4.0)	(4.1/4.0)	(3.5/4.0)
(c) "Flare Rise"	$0.60 \pm 0.05$	$-0.59 \pm 0.05$	$-0.74 \pm 0.05$
	(46.2/4.0)	(4.1/4.0)	(3.5/4.0)
(d) "Flare Peak"	$0.60 \pm 0.05$	$-0.59 \pm 0.05$	$-0.74 \pm 0.05$
	(46.2/4.0)	(4.1/4.0)	(3.5/4.0)
(e) "Flare Decay"	$0.60 \pm 0.05$	$-0.59 \pm 0.05$	$-0.74 \pm 0.05$
	(46.2/4.0)	(4.1/4.0)	(3.5/4.0)
(f) "Normal Decay"	$0.60 \pm 0.05$	$-0.59 \pm 0.05$	$-0.74 \pm 0.05$
	(46.2/4.0)	(4.1/4.0)	(3.5/4.0)

表 4.5: 図 4.9 の 6 期間の近赤外線~紫外線 SED を powerlaw でフィットしたときのスペクトル指数  $\beta_{0}$ 。 GRB 母銀河のダスト減光に対して天の川、LMC、SMC モデルを用い SED を補正し、それを powerlaw で フィットを行った。スペクトル指数はダストモデルでの違いは見られるが、時間帯での違いは見られない。

![](_page_64_Figure_0.jpeg)

図 4.9: 赤外~X線までの SED。X線の各時間帯のスペクトル (図 4.6) とその各時間帯の中央時刻の赤 外~紫外線の SED(図 4.7) を合わせてその各時間帯ごとに各パネルで示した。(a) は"Prompt Emission" 期、(b) は"Steep Decay"期、(c) は"Flare Rise"期、(d) は"Flare Peak"期、(e) は"Flare decay"期、そして (f) は"Normal Decay"期の SED である。丸は赤外—紫外線で観測された生の値を示す。紫色点線、緑色破線、 青色一点破線は可視域のデータを系内ダストで受けた減光量を補正し、さらに既知の母銀河ダストモデル (天の川、LMC、そして SMC) で各補正を行い、それらを powerlaw でフィットした結果である。X線のス ペクトルを式 3.1 でフィットした後、銀河系内・外のダストによる吸収量を戻したX線データを赤色十で、 それを powerlaw でフィットした結果を赤色実線で表す。

## 4.3 議論

本節では、まず、X線フレアのない標準的な残光の時間帯の様子と外部衝撃波モデルとの比較を行う。一つ目は光度曲線の減光指数αとスペクトル指数βの関係についてX線の データを用いて考察する。二つ目は赤外~X線のSEDと外部衝撃波モデルを用いてGRB 母銀河ダストの性質に迫る。次に、X線フレア期の前後から赤外~X線までのデータを用 いて変動の遅いX線フレアの起源を議論する。

#### **4.3.1** X線の減光指数とスペクトル指数

本小区分では、GRB 071112C と同様に GRB 080506 の X 線の光度曲線とスペクトルの 傾きが、外部衝撃波モデルで説明可能なのか議論する。

"Normal Decay"期は表 4.2 と表 4.4 に示すように減光指数  $\alpha_X = -0.89 \pm 0.05$  とスペクト ル指数  $\beta_X = -1.35^{+0.17}_{-0.18}$  であり、エラーの範囲を考えても外部衝撃波モデルのどの条件にも 当てはめることはできない。

#### 4.3.2 外部衝撃波モデルと光度曲線スペクトルの関係

GRB 080506 の"Normal Decay"期ではX線と可視赤外線の減光係数が同じであった。従っ て、外部衝撃波モデルではスペクトルがX線から可視域まで single powerlaw であること を予言する(図 1.19 右上)。§1.3.2 で説明したように、GRB 080506 の赤外線~X線までの SED と外部衝撃波モデルを用いて、GRB 母銀河のダスト吸収曲線を作成した(図 4.10)。 GRB 080506 母銀河の吸収曲線は波長が長くなるほどダスト吸収を受けている。よく知ら れている銀河の吸収曲線のように本来ダストによる吸収は波長が長くなるほど受けない。 GRB 080506 の母銀河のダスト吸収曲線は物理的に矛盾している。従って、外部衝撃波が 予言した赤外線~X線までのスペクトルでは説明ができず、GRB 080506 は可視域とX線 との間に折れ曲がりがあることがわかった。さらに、時間と共にその折れ曲がりは低波長 側に移動せず、 $F_{\nu,max}$ は減ることを示せた。外部衝撃波モデルでは外部衝撃波を起こす電 子・陽電子の塊の運動エネルギーから電子エネルギーと磁場エネルギーへの変換効率 ( $\epsilon_e$ と $\epsilon_B$ ) が時間変化しないと仮定していた(§ 1.2.2)。しかし、今回の観測結果ではこれらの 小さなパラメータは時間変化することを示唆する。

#### **4.3.3** X線フレアの近赤外線からX線までの振舞

本小区分では、GRB 071112C と同様に赤外線~紫外線とX線の光度曲線とSED の時間 変動からX線フレアの起源について議論する。まず、X線光度曲線の振舞のみからX線フ レアの起源に迫る。X線フレアの時間幅/ピーク時刻は $\Delta t/t_{peak} = 350/475.4$ 、増光幅のフ ラックス比は $\Delta F/F = 35/2.3$ であった。この結果を図 3.12 にプロットすると、(d)refresh の条件 ( $\Delta t/t_{peak} < 0.4$ )を満たしている。つまり、GRB 080506 は外部衝撃波由来を排除で きない。

次に、今回新たに得た赤外~紫外線のデータを含めX線フレア時の起源について考察 する。X線域ではX線フレア時に15(= A) 倍増光、一方、赤外~紫外線では有意な変動は なく、変動は14%以下(= a) である。また、図4.9のX線側の powerlaw モデル(実線)の ように、X線のスペクトルは"Flare Decay"期と"Normal Decay"期の冪指数が-1.46<sup>+0.11</sup><sub>-0.12</sub>と

![](_page_66_Figure_0.jpeg)

図 4.10: GRB 080506 母銀河と既知銀河のダスト吸収曲線。赤丸、緑四角、そして青星は 天の川銀河、LMC、そして SMC ダストモデルである。赤十は外部衝撃波モデルを仮定し たときの GRB 080506 の吸収曲線である。

 $-1.35^{+0.17}_{-0.18}$ である (表 4.4)。一方、図 4.9 の可視赤外線側の powerlaw モデル (点線、破線、 一点破線) のように、近赤外 ~ 紫外線域のスペクトルの冪指数は両方  $-0.74 \pm 0.05$  である (表 4.5)。両帯域中の SED は折れ曲がりはなかった。今回、可視域の光度曲線では GRB 後 1.3 ks で折れ曲がりが観測されている。この折れ曲がったときにスペクトル上で可視域を  $v_c$  が横切ったと、外部衝撃波モデルから予測できる。従って、GRB 後 0.46 ks のフレアの ピーク時には  $v_c \sim 6.7 \times 10^{14}$  であることが予測できる。

これらの条件を、GRB 071112C のと同様にX線フレア成分が外部衝撃波モデルで説明 できるか議論する。このとき、仮定するX線フレア成分の SED の折れ曲がりを  $v'_c$  と  $v'_m$ し、X線域でスペクトルの折れ曲がりがないことから、両折れ曲がりは 2.19×10<sup>16</sup> 以下 である。

×線フレア成分が fast cooling で $v_0 < v'_c$ のときでは、 $p = 2\beta = 2.70 \ge p' = 2\beta' = 2.92 \ge x$ め、式 3.7 に代入したところ $v'_m \ge v'_c$ の正の関数となり、 $v'_m \ge v'_c$ に最大の値  $2.19 \times 10^{16}$ (Hz)を代入した。その結果、 $v'_c < v'_m < 3v'_c$ の範囲のとき $v_c \sim 6.7 \times 10^{14} \ge x$ り、 $v_0 \ge v_X$ の間に存在し条件を満たす。しかし、外部衝撃波モデルより $v'_c \propto t^{-0.5} \ge v'_m \propto^{-1.5}$ である。フレアの減光継続時間 230 後で $v'_c$ は 0.07 倍、 $v'_m$ は  $2.9 \times 10^{-4}$ 倍にまで移動し、その外部衝撃波を満たす条件の範囲を保てない。

X線フレア成分が fast cooling で  $v'_c < v_0$ のときでは、式 3.9 に代入したところ  $v'_m$ の 正の関数となり、 $v'_m$ の考えうる範囲  $1.2 \times 10^{15} \sim 2.19 \times 10^{16}$ (Hz)を代入した。その結果、  $5.1 \times 10^{36} < v_c < 2.2 \times 10^{39}$ となり、 $v_c \sim 6.7 \times 10^{14}$ 付近に存在せず、標準的な残光の SED が赤外 ~ X線まで直線になってしまい矛盾する。従って、X線フレア成分を外部衝撃波モ デルの fast cooling で  $v'_c < v_0$ のときでは説明できない。

X線フレア成分が fast と slow cooling の境界条件のときでは、式 3.9 に代入したところ、  $v'_m$ の正の関数となり、 $v'_m$ を最大の値 2.19×10<sup>16</sup>(Hz)を代入した。その結果、 $v_c < 1.2 \times 10^{15}$ となり、 $v_c ~ 6.7 \times 10^{14}$ に存在でき矛盾しない。しかし、fast と slow cooling の境界条件は ー瞬の時間でしか成り立つことができなず(詳細 §1.2.2)、フレアの減光の期間すべてを説明することはできない。従って、X線フレア成分を外部衝撃波モデルのfastとslow coolingの境界条件のときでは説明できない。

X線フレア成分が slow cooling のとき式 3.13 に代入したところ、 $v'_m$ の正の関数となり、  $v'_m$ を最大の値 2.19×10<sup>16</sup>(Hz)を代入した。その結果、 $v_c < 4.1 \times 10^{11}$ となり、 $v_c ~ 6.7 \times 10^{14}$ 付近に存在せず矛盾する。従って、X線フレア成分を外部衝撃波モデルの slow cooling のときでは説明できない。

以上のことから、X線フレアは全条件の外部衝撃波では説明できず、内部衝撃波由来で ある可能性が高い。大質量星の崩壊と予測されている GRB のエンジンが約 1000 s 間活動 していることを示唆する。

## 4.4 GRB 080506 まとめ

今回、GRB 071112C を X 線フレアが起こる前からかなた望遠鏡を用いた観測に成功した。*S wift*/XRT のデータや GCN に報告された観測データも含めて X 線フレア前から赤外 ~ X 線までの時間に密な 7 バンドの光度曲線と多色 SED を得ることに成功した。

残光後期を良く再現できていると思われている単純な外部衝撃波モデルでは小さなパラ メータは時間変化しないとしていた。しかし、初めてX線~赤外線までの密な観測によ り、単純な外部衝撃波モデルでは残光後期も説明できないことを明らかにし、小さなパラ メータの時間変化を加えれば説明できることを示した。

最後に、X線データのみしか用いていないX線フレアの先行研究によると、GRB 080506 で観測されたX線フレアは変動が遅いため、外部衝撃波でも説明が可能とされる。今回 新たに得た赤外~紫外線のデータを含め、独自に外部衝撃波モデルを検証し、外部衝撃波 由来では説明ができないことを明らかにし内部衝撃波由来である可能性が高いことを示 した。

従って、初めて、変動の遅いX線フレアでさえ内部衝撃波由来であることを示せた。X 線フレアを伴う約半数のGRBの本体が長寿命である可能性を示す。GRB本体の活動を解 明する手がかりを増やすことができるかもしれない。

## 第5章 本研究のまとめと課題

## 5.1 本研究のまとめ

本研究では、X線フレアが起こる前から GRB 071112C と GRB080506 をかなた望遠鏡 にTRISPEC 装置を取り付けて観測をおこなった。*Swift*/XRT のデータや GCN に報告さ れた観測データも含めてX線フレア前から赤外~X線までの時間に密な多バンドの光度 曲線と多色 SED を得ることに成功した。

初めて得られた可視赤外線データにより、外部衝撃波モデルでよく説明できるとされて いた後期残光もX線成分に超過成分や、外部衝撃波モデルの細かいパラメータの時間変動 の可能性を示した。

先行研究ではX線フレアの7割以上占める弱いまたは時間変動の遅いフレアは外部衝撃 波モデルでも説明できるとされていた。今回新たに得た赤外~紫外線のデータを含め、独 自に初めて外部衝撃波モデルを検証し、外部衝撃波由来では説明ができないことを明らか にし、内部衝撃波由来である可能性が高いことを示した。従って、初めて、弱いまたは時 間変動の遅いX線フレアでさえ内部衝撃波由来であることを示せた。X線フレアを伴う約 半数のGRBの本体が長寿命である可能性を示す。GRB本体の活動を解明する手がかりを 増やすことができるかもしれない。

## 5.2 課題

本研究で、独自に外部衝撃波モデルを研究し、変動が遅く弱いX線フレアの起源ではないことを示すことに成功したが、複雑な条件を用いている。これをより簡潔にし、今まで 観測されてきたX線フレアでも検証しやすいようにモデル計算を進める。

# 謝辞

本論文を執筆するにあたって、大杉先生には研究室に配属される前から専門書などを貸 して頂いたり、非常に充実した研究環境を提供くださり大変感謝しています。深沢先生に は、研究全般の物理的基礎、奨学金や学術振興会などの申請書類等、ゼミ、そして論文の 構成を細部にまでわたりご指導していただき深く感謝しています。植村先生には、研究の 相談事、発表方法、そして投稿論文の執筆での注意点などを細かく非常に丁寧にわかり やすく教えていただき、誠に感謝しています。川端先生には、可視観測の基礎、偏光の物 理、ダストの吸収、など休日でも時間を割いて引率して頂きありがとうございます。山崎 先生には、他研究室にも関わらず理論的な考察手法、GRB や SNR に関しての山のような 知識と常識、資料などもご提供くださりありがとうございました。水野先生には、同じ部 屋にいらっしゃるので、集中した研究をすることができ、また細かな質問にも受けてくだ さり、小部屋の恒星です。ひろたかさんには、研究の基本と手法を夜間、休日問わず、高 度な知識を高価な代価の引き換えに御指導していただきありがとうございます。三千臆円 はもう少しお待ち下さい。片桐先生には、粒子加速、SNR の研究、パソコンの管理、な ど片っ端から支えて下さりありがとうございます。山下先生には、コロキウムや研究会の 発表練習のときに、貴重な意見を頂きありがとうございます。

## 関連図書

- Burenin, R., Khamitov, I., Pavlinsky, M., Sunyaev, R., Eker, Z., Kiziloglu, U., Gogus, E., Bikmaev, I., & Sakhibullin, N. 2007, GRB Coordinates Network, 7066, 1
- [2] Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1988, ApJI, 329, L33
- [3] Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, ApJ, 345, 245
- [4] Chen, I. C., Huang, K. Y., & Urata, Y. 2007, GRB Coordinates Network, 7067, 1
- [5] Chincarini, G., Moretti, A., Romano, P., Falcone, A. D., Morris, D., Racusin, J., Campana, S., Covino, S., Guidorzi, C., Tagliaferri, G., Burrows, D. N., Pagani, C., Stroh, M., Grupe, D., Capalbi, M., Cusumano, G., Gehrels, N., Giommi, P., La Parola, V., Mangano, V., Mineo, T., Nousek, J. A., O'Brien, P. T., Page, K. L., Perri, M., Troja, E., Willingale, R., & Zhang, B. 2007, ApJ, 671, 1903
- [6] de Postigo Ugarte, A., Thoene, C. C., Fynbo, J. P. U., Leitet, E., & Trinchant, L. M. 2008, GRB Coordinates Network, 7690, 1
- [7] Dickey, J. M., & Lockman, F. J. 1990, ARA&A, 28, 215
- [8] Dintinjana, B., Maticic, S., Mikuz, H., & Skvarc, J. 2007, GRB Coordinates Network, 7078, 1
- [9] Fan, Y. Z., & Wei, D. M. 2005, MNRAS, 364, L42
- [10] Fruchter, A. S., Levan, A. J., Strolger, L., Vreeswijk, P. M., Thorsett, S. E., Bersier, D., Burud, I., Castro Cerón, J. M., Castro-Tirado, A. J., Conselice, C., Dahlen, T., Ferguson, H. C., Fynbo, J. P. U., Garnavich, P. M., Gibbons, R. A., Gorosabel, J., Gull, T. R., Hjorth, J., Holland, S. T., Kouveliotou, C., Levay, Z., Livio, M., Metzger, M. R., Nugent, P. E., Petro, L., Pian, E., Rhoads, J. E., Riess, A. G., Sahu, K. C., Smette, A., Tanvir, N. R., Wijers, R. A. M. J., & Woosley, S. E. 2006, Nature, 441, 463
- [11] Greco, G., Terra, F., Bartolini, C., Guarnieri, A., Piccioni, A., Pizzichini, G., Nanni, D., & Gualandi, R. 2007, GRB Coordinates Network, 7089, 1
- [12] Huang, K. Y., Schwamb, M. E., Wang, J. H., Wen, C. Y., & Survey, T. A. O. 2008, GRB Coordinates Network, 7334, 1
- [13] Ioka, K., Kobayashi, S., & Zhang, B. 2005, ApJ, 631, 429
- [14] Jakobsson, P., Fynbo, J. P. U., Malesani, D., Vreeswijk, P. M., Hjorth, J., Xu, D., & Sollerman, J. 2007, GRB Coordinates Network, 7088, 1

- [15] Jakobsson, P., Fynbo, J. P. U., Vreeswijk, P. M., Malesani, D., & Sollerman, J. 2007, GRB Coordinates Network, 7076, 1
- [16] Kann, D. A., Hoegner, C., & Ertel, S. 2008, GRB Coordinates Network, 7696, 1
- [17] —. 2008, GRB Coordinates Network, 7688, 1
- [18] Kawabata, K. S., Sasada, M., Uemura, M., Yamashita, T., Ohsugi, T., & Lundock, R. G. 2008, GRB Coordinates Network, 7686, 1
- [19] Klotz, A., Boer, M., & Atteia, J. L. 2007, GRB Coordinates Network, 7065, 1
- [20] Kocka, M., Nekola, M., Strobl, J., Hudec, R., Polasek, C., Jelinek, M., Kubanek, P., Munz, F., & de Postigo Ugarte, A. 2008, GRB Coordinates Network, 7689, 1
- [21] Krühler, T., Küpcü Yoldaş, A., Greiner, J., Clemens, C., McBreen, S., Primak, N., Savaglio, S., Yoldaş, A., Szokoly, G. P., & Klose, S. 2008, ApJ, 685, 376
- [22] Li, A., Liang, S. L., Kann, D. A., Wei, D. M., Klose, S., & Wang, Y. J. 2008, ApJ, 685, 1046
- [23] Li, Y., Li, A., & Wei, D. M. 2008, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 1065, American Institute of Physics Conference Series, 123–126
- [24] Liang, E.-W., Zhang, B.-B., & Zhang, B. 2007, ApJ, 670, 565
- [25] M. Yoshida, K. Yanagisawa, Y. S. S. N. H. T., & Kawai., N. 2007, GRB Coordinates Network, 7091, 1
- [26] Maeno, S., Naito, H., Narusawa, S., & Iizuka, R. 2008, GRB Coordinates Network, 7709, 1
- [27] Melandri, A., Mundell, C. G., Kobayashi, S., Guidorzi, C., Gomboc, A., Steele, I. A., Smith, R. J., Bersier, D., Mottram, C. J., Carter, D., Bode, M. F., O'Brien, P. T., Tanvir, N. R., Rol, E., & Chapman, R. 2008, ApJ, 686, 1209
- [28] Meszaros, P., & Rees, M. J. 1997, ApJl, 482, L29+
- [29] Minezaki, T., Price, P. A., Yoshii, Y., & Cowie, L. L. 2007, GRB Coordinates Network, 7135, 1
- [30] Nugent, P., & Bloom, J. S. 2007, GRB Coordinates Network, 7069, 1
- [31] Oates, S., & Baumgartner., W. 2008, GRB Coordinates Network, 7693, 1
- [32] Oates, S. R., & Stratta, G. 2007, GRB Coordinates Network, 7080, 1
- [33] O'Donnell, J. E. 1994, ApJ, 422, 158
- [34] Osborne, J. P., Beardmore, A. P., Evans, P. A., & Goad, M. R. 2008, GRB Coordinates Network, 7687, 1
- [35] Piran, T. 1999, Physics Reports, 314, 575
- [36] Sahu, D. K., Anupama, G. C., & Misra, K. 2008, GRB Coordinates Network, 7700, 1
- [37] Sari, R., Piran, T., & Halpern, J. P. 1999, ApJ, 519, L17
- [38] Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, ApJ, 497, L17
- [39] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, ApJ, 500, 525
- [40] Sposetti, S. 2007, GRB Coordinates Network, 7090, 1
- [41] Stanek, K. Z., Gnedin, O. Y., Beacom, J. F., Gould, A. P., Johnson, J. A., Kollmeier, J. A., Modjaz, M., Pinsonneault, M. H., Pogge, R., & Weinberg, D. H. 2006, Acta Astronomica, 56, 333
- [42] Stratta, G., Perri, M., & Burrows, D. N. 2007, GRB Coordinates Network, 7079, 1
- [43] Uemura, M., Sasada, M., Arai, A., & Uehara, T. 2007, GRB Coordinates Network, 7062,
- [44] Watson, D., Hjorth, J., Fynbo, J. P. U., Jakobsson, P., Foley, S., Sollerman, J., & Wijers, R. A. M. J. 2007, ApJl, 660, L101
- [45] Yuan, F., Rykoff, E. S., Rujopakarn, W., & Swan, H. 2007, GRB Coordinates Network, 7061, 1
- [46] Zhang, B., Fan, Y. Z., Dyks, J., Kobayashi, S., Mészáros, P., Burrows, D. N., Nousek, J. A., & Gehrels, N. 2006, ApJ, 642, 354
- [47] Zhang, B., & Mészáros, P. 2004, International Journal of Modern Physics A, 19, 2385
  - [] 上原 岳士「ガンマ線バースト多波長即時解析システムの構築とGRB061121の観測」 卒業論文、広島大学理学部物理科学科、2007年
  - [] 岡崎 紀幸「ガンマ線バースト残光の時間変動について」卒業論文、広島大学理学部 物理科学科、2007 年