

MITSuME 望遠鏡による GRB090426 の残光観測
およびその解析結果

遠藤瑛紀

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2010年 3月

要旨

ガンマ線バースト (GRB) は現在観測される天体现象のうち最も明るい爆発現象として知られている。また GRB は X 線、紫外線、可視光線、赤外線、電波などの様々な波長帯の残光を伴うことも知られており、この残光を観測することで GRB 自体の物理や初期宇宙の様子などを研究することが可能である。

我々は GRB の可視光残光を山梨県明野にある明野望遠鏡を用いて観測、解析を行っている。また岡山天体物理観測所の可視光、赤外線望遠鏡で得られたデータと合わせて GRB 残光の解析を進めている。

今回、本論文で扱う GRB は 2009 年 4 月 26 日に発生した GRB090426 である。この GRB は岡山天体物理観測所にある 50cm 可視光望遠鏡によって長時間観測に成功した。

この GRB の解析にあたっては、まず参照星の等級を正確に求めることを目指し、明野観測所の光学系における System 変換係数を測定することから始めた。この係数を用いた上で参照星を測光し、さらに GRB の等級を求めることで他の研究機関で得られた結果と比較することが可能となった。

この補正を行った上で GRB090426 の光度曲線を書くと 2 回の折れ曲がりが見られ、減光の様子が通常の GRB のモデルから考えられるものと異なる振る舞いであることがわかった。この結果から我々は、この GRB では 2 つのジェット成分が観測されたと考えた。

目次

第1章	ガンマ線バースト	6
1.1	ガンマ線バーストとは	6
1.1.1	ガンマ線バーストの残光	7
1.1.2	GRB030329	8
1.1.3	GRBと初期宇宙探査	9
1.1.4	GRBの観測体制	11
1.2	GRBの放射機構	12
1.2.1	Fireballモデル	12
1.2.2	cooling break	12
1.2.3	jet break	13
第2章	MITSuME望遠鏡	15
2.1	MITSuME望遠鏡とは	15
2.2	明野50cm望遠鏡	15
2.2.1	望遠鏡、ドームの仕様	16
2.2.2	検出器	16
2.2.3	ネットワーク	18
2.2.4	監視システム	19
2.2.5	自動観測システム	21
2.2.6	自動解析システム	21
第3章	解析手法	22
3.1	バイアス	22
3.2	ダークフレーム	23
3.3	フラットフィールド	24
3.4	画像の重ね合わせ	25
3.5	測光	25

第 4 章	参照星の測光	28
4.1	システム変換係数	28
4.1.1	色変換係数の導出	29
4.1.2	大気減光係数	32
4.2	参照星の測光	32
第 5 章	GRB090426	38
5.1	MITSuME 望遠鏡による観測	38
5.2	GRB090426 の測光	38
5.3	光度曲線	40
5.4	議論	42
5.4.1	光度曲線の折れ曲がり	42
5.4.2	可視光線と X 線の比較	43
第 6 章	結論	51
付録 A	参照星の等級	52
A.1	参照星の測光結果	52
A.2	参照星のカタログ値	52
付録 B	フォーカス値に関する問題点	54
B.1	概要	54
B.2	Focus 値	54
B.3	問題となっている事柄	54
B.4	調査	55
B.4.1	自動解析と手動解析	55
B.4.2	副鏡の振動の影響	57
B.4.3	aperture 変化	58
B.4.4	望遠鏡の導入方向	59
B.5	今後の課題	59

目 次

1.1	GRB の分布図	6
1.2	GRB970228 の X 線残光と可視光残光	7
1.3	GRB030329 のスペクトル	8
1.4	宇宙の歴史	9
1.5	GRB090423 のスペクトル	10
1.6	星生成率と赤方偏移の関係	11
1.7	Fireball モデルの概念図	12
1.8	synchrotron-shock モデル	13
1.9	GRB990510 の光度曲線	14
2.1	MITSuME 望遠鏡	16
2.2	残光観測の流れ	18
2.3	MITSuME 望遠鏡のフィルター	19
2.4	3 色同時撮像カメラ	19
2.5	東工大 明野間のネットワーク	20
3.1	ダークフレーム	23
3.2	フラットフレーム	24
3.3	観測で得られる画像とリダクションを施した画像	25
3.4	重ね合わせる前の画像と重ね合わせた後の画像	26
3.5	aperturephotmetry の概念図	27
4.1	12 月 14 日の観測データ	30
4.2	色変換係数の決定のためのプロット	31
4.3	1 月 20 日の sky background の変動	33
4.4	1 月 20 日の観測データ	34
4.5	大気減光係数、ゼロ点の決定のためのプロット	35
4.6	GRB090426 と参照星の位置関係	37

5.1	BAT で得られた光度曲線	39
5.2	GRB090426 の elevation	40
5.3	GRB090426 観測中の sky background 変化	40
5.4	GRB090426 の光度曲線	42
5.5	可視光と X 線の光度曲線の比較	43
5.6	折れ曲がりがないと仮定したときのフィッティング結果	44
5.7	折れ曲がり が 1 回あったと仮定したときのフィッティング結果	45
5.8	折れ曲がり が 2 回あったと仮定したときのフィッティング結果	46
5.9	1 月 20 日に観測した GRB090426 の発生領域	47
5.10	図 5.9 の限界等級	48
5.11	Antonelli et al. より引用した光度曲線	49
5.12	2 成分のジェットの見え方のイメージ	49
5.13	2 成分ジェットモデルの光度曲線	50
B.1	フォーカス値の変化	56
B.2	自動解析と手動解析の比較	57
B.3	副鏡の振動とフォーカス値	57
B.4	(左)4 つの FWHM 値の平均値 vs フォーカス値 (右)aperture vs フォーカス値	58

表 目 次

2.1	明野望遠鏡の仕様	17
2.2	CCD カメラの仕様	17
4.1	色変換係数を求める際に用いた標準星	29
4.2	1月20日に観測を行った標準星	33
4.3	明野望遠鏡のシステム変換係数	36
4.4	参照星の等級	36
5.1	岡山の観測データ	39
5.2	明野の観測データ	39
5.3	GRB090426 の等級変化	41
5.4	AB 等級で表した各バンドの Vega の等級	42
5.5	折れ曲がりがないと仮定したときのべきの指数と χ^2 、自由度	44
5.6	~260 秒で折れ曲がりを見せたと仮定したときのべきの指数と χ^2 、自由度	45
5.7	~260 秒と~2000 秒で折れ曲がりを見せたと仮定したときのインデックス	46
A.1	高度 ~65° の時の参照星の等級	52
A.2	高度 ~72° の時の参照星の等級	52
A.3	高度 ~81° の時の参照星の等級	52
A.4	GSC2.3 のカタログ値と、これより算出した g' バンドの等級	53
B.1	自動解析と手動解析の比較	57
B.2	9/16 Focus1 temperature=291.7	58
B.3	9/20 Focus2 temperature=291.8	58

第1章 ガンマ線バースト

1.1 ガンマ線バーストとは

ガンマ線バースト (gamma-ray burst : GRB) とは、高エネルギーのガンマ線が宇宙のある一点から放射される現象である。継続時間は数秒から数十秒と短い、フラックスが 1cm^2 あたり 100 count 以上となり、爆発した瞬間には全天で最も明るい γ 線放射源となることで知られている。

GRB は 1967 年に打ち上げられたアメリカの核実験監視衛星 Vela により思いがけず発見された (Klevesadel, Strong & Olson 1973)。その後、1991 年に打ち上げられたコンプトンガンマ線天文台 (CGRO) の BATSE (Burst And Transient Experiment) 検出器によって、発生頻度が全天で 1 日 1 回程度、発生位置は全天球上で等方的に分布している事が分かった (Meegan et al. 1992)。

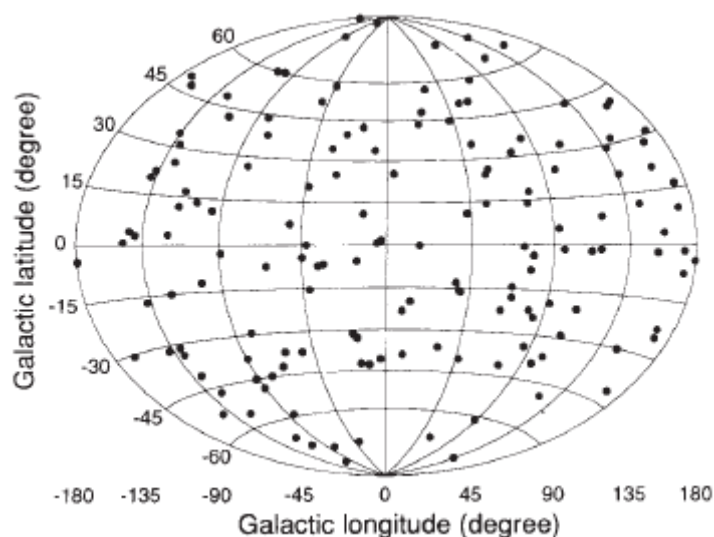


図 1.1: 銀河座標系で描かれたバーストの分布図。等方的にバーストが発生していることが分かる (Meegan et al. 1992)

1.1.1 ガンマ線バーストの残光

1997年、イタリアとオランダは共同開発をした X 線ガンマ線天文衛星 BeppoSAX を打ち上げた。この衛星に搭載された X 線望遠鏡により、バースト発生後数日にわたって継続する X 線残光が初めて発見された (Costa et al. 1997)。さらに、地上望遠鏡を用いた追観測によって、GRB に関連した可視光残光の存在も明らかになった。(Paradijs et al. 1997)。このバースト発見から半年後、ハッブル宇宙望遠鏡によってバーストの残光があっ

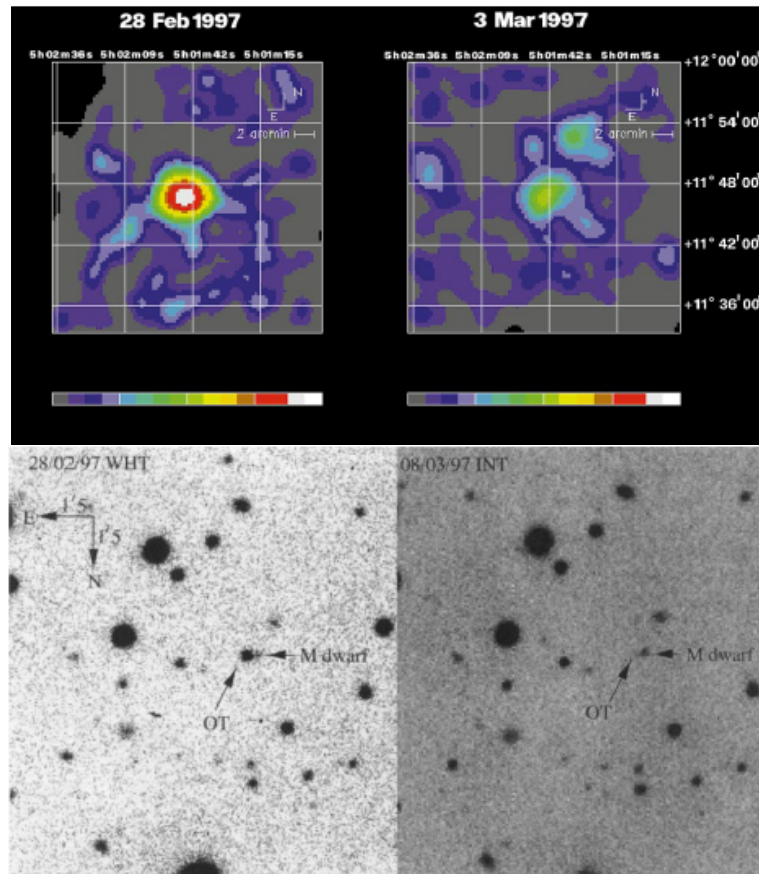


図 1.2: GRB970228 の残光を観測した結果。左上：発生直後の X 線残光と右上：発生から 3 日後の X 線残光 (Costa et al. 1997)。発生直後と比較して減光している様子が分かる。左下：発生直後の可視光残光と右下：発生から 8 日後の可視光残光 (Paradijs et al. 1997)。8 日後には残光が検出できない水準まで減光している

た領域の観測が行われ、残光付近に淡く広がった銀河が発見された。残光の位置と銀河中心がずれていたことから、GRB は活動銀河核起源ではなく銀河に付随する恒星の爆発現象であると考えられる。また、X 線残光の発見以後、可視光残光の分光観測によって赤方偏移が測られ、GRB は数十から百億光年以上の宇宙論的距離で起こる現象であることが

分かった。

1.1.2 GRB030329

BeppoSAX による観測から、残光観測が GRB を探る上で非常に有効な手段であることが示された。しかし、残光は時間とともに急激に減光するためバースト発生直後より望遠鏡をバーストに向けて追観測を行う必要がある。

日本、アメリカ、フランスが共同で開発した HETE-2 (High Energy Transient Explorer-2) 衛星は GRB の発生を常に監視しており、GRB の即時位置決めとインターネットを用いた全世界への位置速報を目的とした衛星である。

この HETE-2 によって発見された GRB030329 の可視光残光の最大光度は 13 等級に達

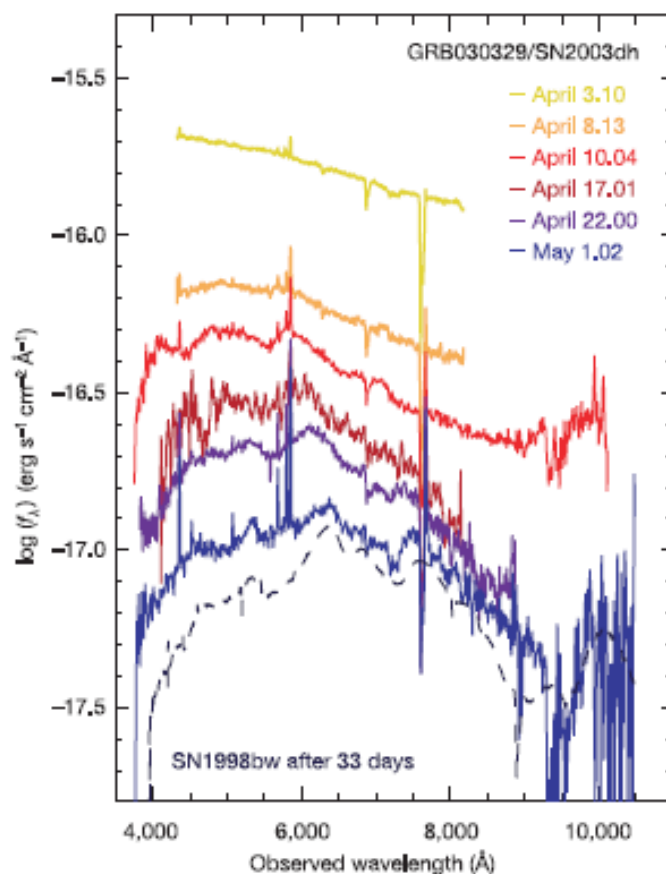


図 1.3: GRB030329 のスペクトル。分光観測を 2003 年 4 月 3 日から 5 月 1 日までの間に 6 回行っている。4 月 3 日の時点ではスペクトルがべき関数の形になっており、これは残光のスペクトルとして典型的な形である。一方、時間が経過するにつれてスペクトルの形が超新星である SN1998bw に似るように変化している様子が分かる (Hjorth et al. 2003)。

した。HjorthらはVLT(Very Large Telescope)を用いて1か月間、6回にわたる分光観測を行った(Hjorth et al. 2003)。その結果、GRB残光の典型的なスペクトルであるべき型から徐々にIc型の超新星の特徴を示すスペクトルを示すようになった。このことから、GRBと超新星に関連性があることが確実となった。

現在、GRBの発生については、太陽の数十倍の質量をもつ大質量星がその一生を終えブラックホールが生まれると発生すると考えられている¹。

1.1.3 GRBと初期宇宙探査

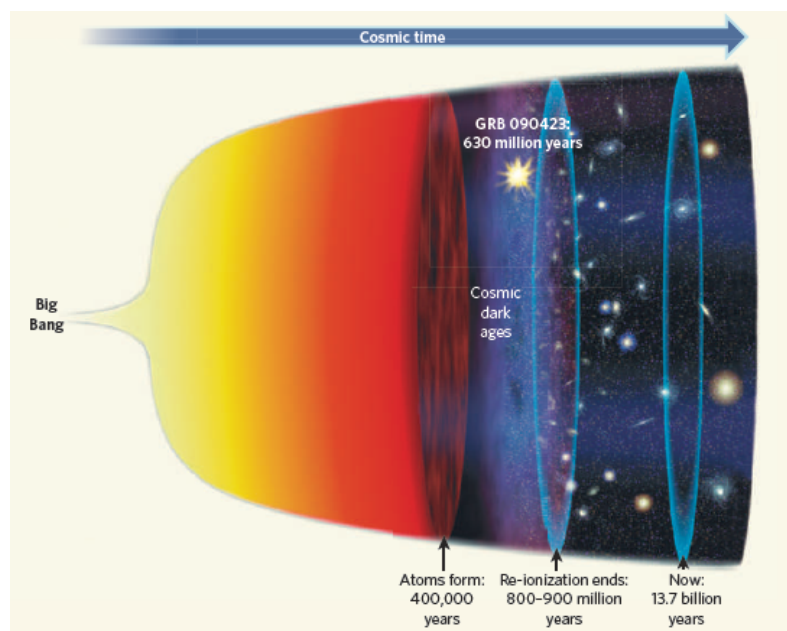


図 1.4: 宇宙の歴史を表した図。ビッグバン後宇宙は膨張しながら急速に冷えていった。ビッグバンから40万年後、電子と陽子が結合し宇宙は中性化した。一方これまでの遠方銀河やクエーサーの研究より、8億～9億年後には宇宙は再電離している事が分かっている。しかしこの再電離の過程はよく分かっていない。GRBを研究することで今まで謎とされてきた宇宙再電離の過程を知ることができる可能性が示唆された。(Zhang 2009)

前節で述べたように、近年の観測からGRBと恒星の重力崩壊が関連している事が分かった。この事は、遠方で発生したGRBの検出出来れば初期宇宙において恒星がすでに

¹一般に継続時間 > 2 秒の物を long GRB、継続時間 < 2 秒の物を short GRB と呼ぶ。long GRB の発生源は上記の超新星爆発と考えられているが、short GRB に関してははっきりとは分かっていない。有力な候補として中性子星やブラックホール同士の合体やマグネターのフレアなどが考えられている

存在したと言えることを表している。GRBの発生率は恒星の生成率に比例すると考えられるため、GRBが発生した赤方偏移とその個数の分布を調べることで星生成率の変化を知ることができる。図1.6に数値解析によって見積もられた高赤方偏移の宇宙における恒星の生成率を載せる。この図によると、宇宙最初期の第III種族の恒星の誕生は $16 < z < 20$ の星生成率のピークに対応し、第II種族の恒星の誕生は $2 < z < 10$ の間に形成されたと考えられている。

GRB以前に遠方宇宙を探るのに有効な手段はクエーサーと銀河であった。観測史上最遠の銀河は赤方偏移が6.96である。2009年4月23日に発生したGRB090423は赤方偏移が8.1(Salvaterra et al. 2009)と観測史上最も遠いGRBである。従って、これまで観測が不可能であった領域もGRBを用いることで観測、研究が可能であることが実際に示された。

またGRBの残光を分光観測することで各時代の電離度の測定や金属合成の歴史の解明が可能となる。赤方偏移した水素のLyman- α 吸収線の形状からその時代の水素ガス電離度が見積もられ、残光のスペクトルにみられる吸収線から重元素量が見積もられる。このような分光観測で、宇宙における合成がどのように行われてきたかを知ることができ、吸収線の分布を調べることで宇宙の大規模構造の探査も可能と期待されている。

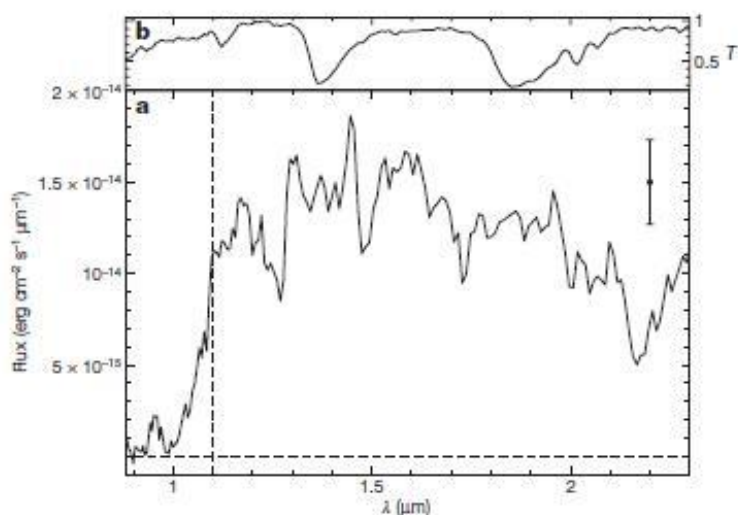


図 1.5: GRB090423 のスペクトル (a) と観測した計器の大気透過率 (b)。波長が $1.1\mu\text{m}$ の所にブレイクがあるが、透過率のグラフより計器の透過率が小さいためのブレイクではないことがわかる。したがってこのブレイクは銀河間空間に存在する水素による吸収によるものと考えられ、この GRB の赤方偏移が 8.1 と見積もられた。(Salvaterra et al. 2009)

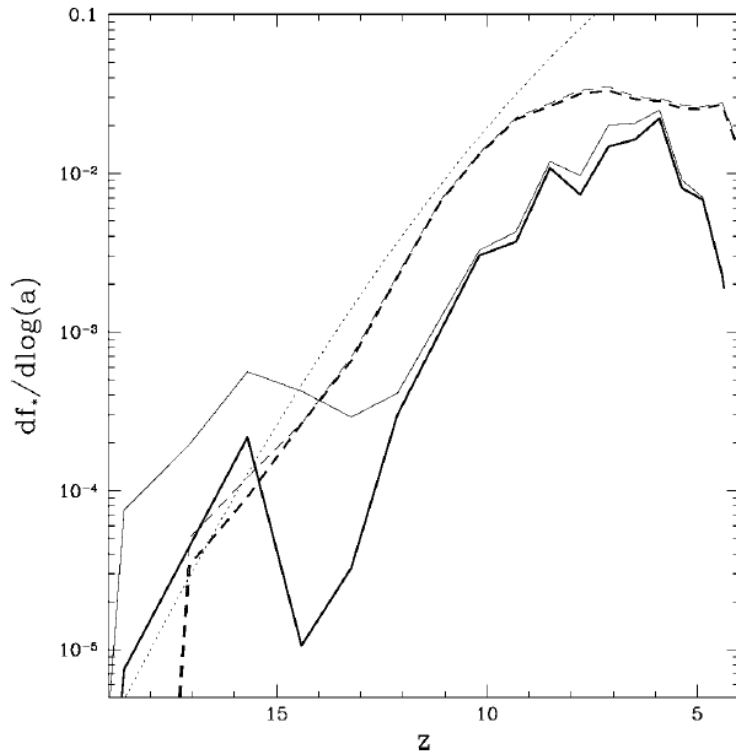


図 1.6: 初期宇宙における星生成率 (Ostriker & Gnedin 1996)

1.1.4 GRB の観測体制

2004 年に、ガンマ線バーストの観測を目的とした衛星 Swift が打ち上げられた。この衛星に搭載されている検出器は、BAT (Burst Alert Telescope)、XRT (X-Ray Telescope)、UVOT (Ultraviolet/Optical Telescope) である。Swift 衛星は BAT で GRB を検出すると、およそ 3 分角の精度で位置を特定し、計算結果を GCN (GRB Coordinate Network) へと速報する。同時に、高速で姿勢制御を行い、XRT と UVOT を GRB の方向へ向け残光を追観測し、結果を GCN に送信する。

我々が観測に用いている MITSuME 望遠鏡を含め、地上の望遠鏡による GRB の残光観測は GRB 観測衛星が特定した GRB の位置情報を、GCN を通じて取得することから始まる。残光は急激に減光するので、これらの望遠鏡は位置情報を受け取ると自動的に GRB の方向に向け残光観測を開始するように設計されている物が多い。

1.2 GRBの放射機構

1.2.1 Fireballモデル

現在、GRBの放射機構として標準的なモデルと考えられているものはFireballモデルである。このモデルの概要は次のようなものである：放射源からLorentz因子 $\Gamma \gg 1$ の相対論的速度で運動するシェルが放射される。このときそれぞれのシェルは様々なLorentz因子で運動するため、シェル間で衝突する。この衝突により衝撃波 (internal shock wave) が生じ、衝撃波によって電子が加速される。この加速された電子がシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱によってガンマ線を放出する (Rees et al. 1994)。さらにこれらのシェルがバースト周辺の物質と衝突し再び衝撃波を生ずる (external shock)。この衝撃波によって電子が加速され、シンクロトロン放射によってエネルギーを放出する。これが残光として観測される (Sari, Piran and Narayan 1997)。

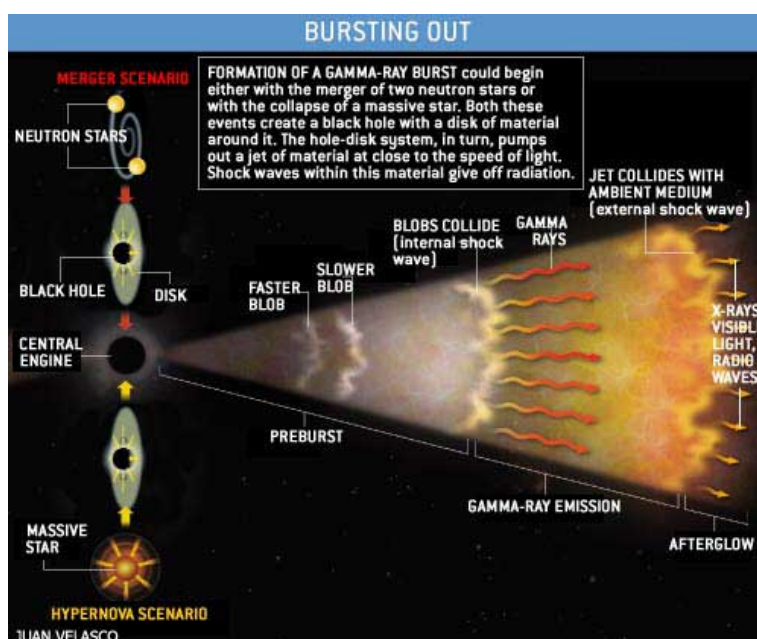


図 1.7: Fireball モデルの概念図。(http://particulas.cnea.gov.ar/experiments/lago/grb/より引用)

1.2.2 cooling break

Fireballモデルより期待されるスペクトルと光度曲線を図 1.8 に載せる。このスペクトルはべき関数で分布している電子よりシンクロトロン放射によって残光が放出されたとし

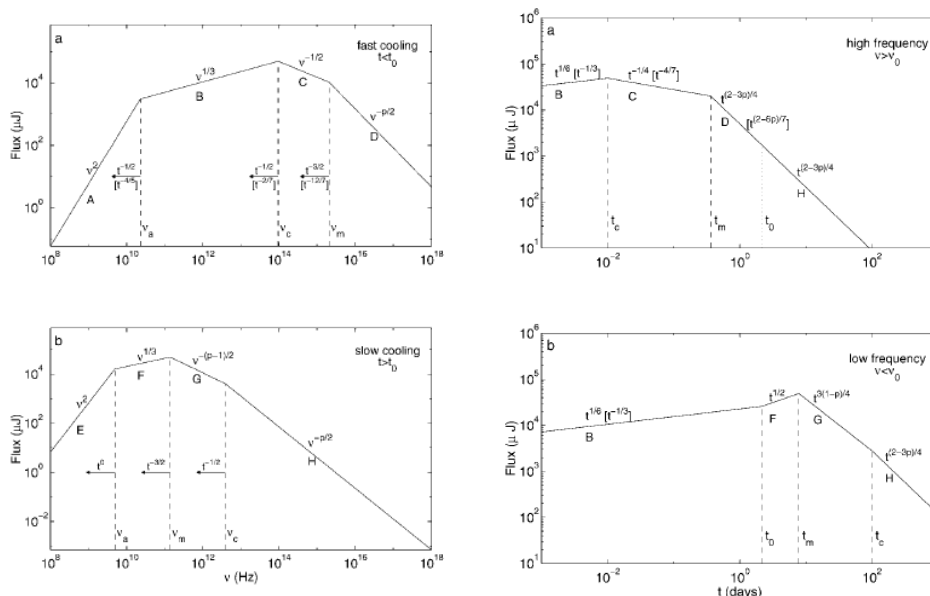


図 1.8: エネルギー分布がべき関数に従う電子よりシンクロトロン放射されるという GRB 残光モデルによるスペクトル (左図) と光度曲線 (右図)。 ν_a は自己吸収振動数、 ν_c はクーリング振動数、 ν_m は衝撃波によって加速された電子のうち Lorentz 因子が最小のものによる放射の振動数を表す。左上は $\nu_c < \nu_m$ の場合 (Fast cooling)、左下は $\nu_c > \nu_m$ の場合 (Slow cooling)。右上は高周波の場合の光度曲線、右下は低周波の場合の光度曲線を表す。図中の大文字アルファベットはスペクトルで示されている領域と同じ領域を示している。(Sari,Piran& Narayan 1997)

た時のスペクトルである (Sari,Piran and Narayan 1997)。複数の波長で残光を観測するとべきが変化する点 (図中 ν_a, ν_m, ν_c) が通過するタイミングが波長ごとに異なり、このことが光度曲線上で折れ曲がりのタイミングの違いとして現れる。

1.2.3 jet break

バースト源から放出されるシェルは等方的ではなくビーム状に絞られて放射されたと考えられている。 $\zeta_m > 1/\Gamma_0$ (ここでバーストの開き角を ζ_m 、初期の Lorentz 因子を Γ_0 とする) の時、Lorentz 因子は距離のべきに従って減衰していく。ところが、シェルが減速しその Lorentz 因子の逆数が ζ_m を上回ると減衰が指数関数的になる (Rhoads 1999)。これはジェットの開き角が $\zeta \sim \zeta_m + 1/\Gamma$ で評価され、 $\Gamma \sim 1/\zeta_m$ を超えるとジェットの広がりが急激に大きくなりそれまでの減速中よりはるかに多くの物質と相互作用するので急激な減光が生じる。

生じる原因が幾何学的な理由によるため、jet break は複数の波長で同時に観測されることが期待される。GRB990510 ではこの折れ曲がり実際に観測された (Harrison et al. 1999)。

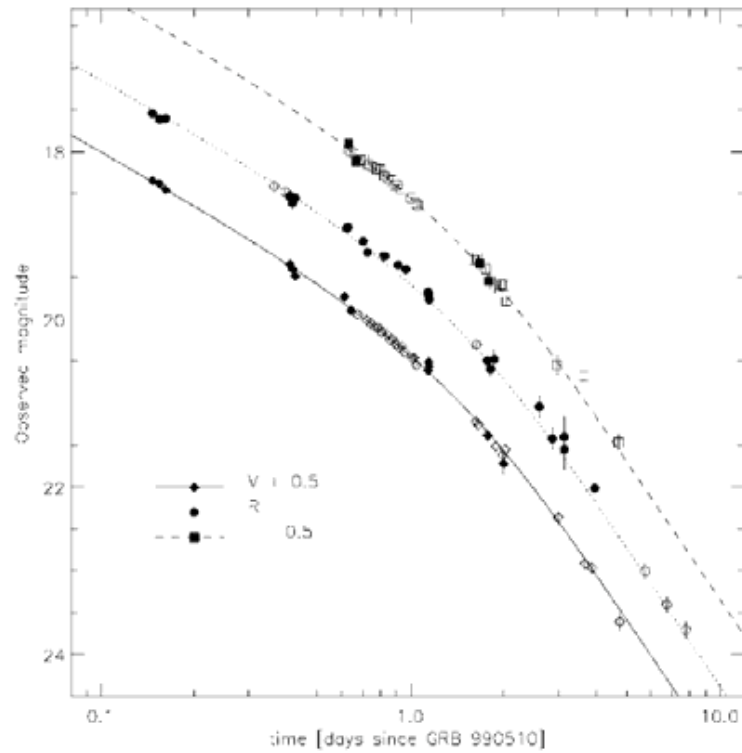


図 1.9: GRB990510 の光度曲線。検出から 1.2 日後に異なる波長で同時の折れ曲がり観測された (Harrison et al. 1999)

第2章 MITSuME望遠鏡

2.1 MITSuME望遠鏡とは

我々は、ガンマ線バーストの早期可視光残光の観測による GRB の放射機構の解明と、GRB を用いた初期宇宙の探査を行うために、MITSuME(Multicolor Imaging Telescopes for Surveys and Monstrous Explosion) 望遠鏡を設置した(谷津修論 2005)。MITSuME 望遠鏡とは、東京大学宇宙線研究所明野キャンパスに設置された口径 50cm の可視光望遠鏡、国立天文台岡山天体物理観測所に設置された口径 50cm の可視光望遠鏡、91cm の近赤外線望遠鏡の総称で、これらの望遠鏡を使用し、GRB 残光を広い波長帯に渡って同時に測光を行う事を目的としている。明野と岡山の 50cm 望遠鏡によって g' 、R、I の 3 つのバンド、岡山の 91cm 望遠鏡によって Z、J、H、K の 4 つのバンドをカバーしている(図 2.3)。これにより、減光の様子を多波長観測で追うことが可能となり、バーストの放射プロセスを解明することを目指す。また、銀河間空間水素によって生じる、短波長側のカットオフ(Lyman α ブレーク)を利用して、GRB の赤方偏移を見積もることも目的である。我々が高赤方偏移であると見積もった GRB については、すばる望遠鏡にフィードバックし詳細な分光観測を行う。GRB を発生直後から残光観測するため、MITSuME 望遠鏡は GCN より GRB の位置速報を受信し、自動的に観測を開始する(下川辺修論、2007)。また、我々が同定した GRB の位置情報や解析結果を GRB 残光が明るいうちにフィードバックさせるため、観測データを自動的に解析するシステムも開発されている(石村修論 2008、森卒論 2008)。

2.2 明野 50cm 望遠鏡

東工大が開発、運用を担当し、本研究でも使用した明野 50cm 可視光望遠鏡についてまとめる。



図 2.1: MITSuME 望遠鏡。3つの望遠鏡のうち、我々は明野望遠鏡の開発、運用を担当している。大きな特徴として3色同時撮像機能と自動観測機能を持っていることが挙げられる。また東工大と明野望遠鏡はADSLで繋がっておりリモート観測が可能となっている。

2.2.1 望遠鏡、ドームの仕様

望遠鏡の口径は50cmであり、28分の視野角を持つ。これにより、GRBの座標の誤差が大きい場合でも視野の中にGRBの座標を入れることが可能である。最速 $3^\circ/\text{sec}$ の高速導入によってGRBの位置速報に敏速に対応することが可能である。

ドームは半径2mの半球型で、最速40秒で1回転することが可能である。望遠鏡架台制御PCによって、ドームのスリットと望遠鏡の指向方向が同期する。

2.2.2 検出器

明野望遠鏡にはApogee社製Alta U6のCCDが3台設置され、ダイクロイックミラーで g' バンド(SDSS)、 R_c 、 I_c バンド(Johnson-Cousins)に分けられた光を撮像する。異なる標準システムを採用した理由として、「広い帯域をカバーするため」「夜光の影響を小さくするため」の2つがある(下川辺氏2009年研究室内ミーティング発表資料)。以前に採用していたVバンドを g' バンドに変更することによって、検出効率の向上を実現した。

所在地	山梨県北杜市明野町東京大学宇宙線研究所付属明野観測所
座標	北緯 35.7866° 東経 138.4806° 標高 900m
光学系	
形式	カセグレン型反射望遠鏡
有効直径	500mm
副鏡口径	160mm
焦点距離	3000mm
口径比	F6
有効視野	28'
観測波長	400-950 nm
合焦方法	副鏡の電動移動
架台	
形式	フォーク式赤道儀
最大駆動速度	3°/sec

表 2.1: 明野望遠鏡の仕様

CCD	Kodac KAF-1001E
Array size	1024 × 1024
Pixel size	24 μ m × 24 μ m
Imaging area	24.58mm × 24.58mm
Linear Full Well	550,000e ⁻
Digital resolution	16 bit
Exposure time	20msec - 183min
Cooling	ペルチェ素子 + 送風による冷却
PC Interface	USE2.0

表 2.2: 明野に設置された CCD カメラ、Alta U6 の仕様

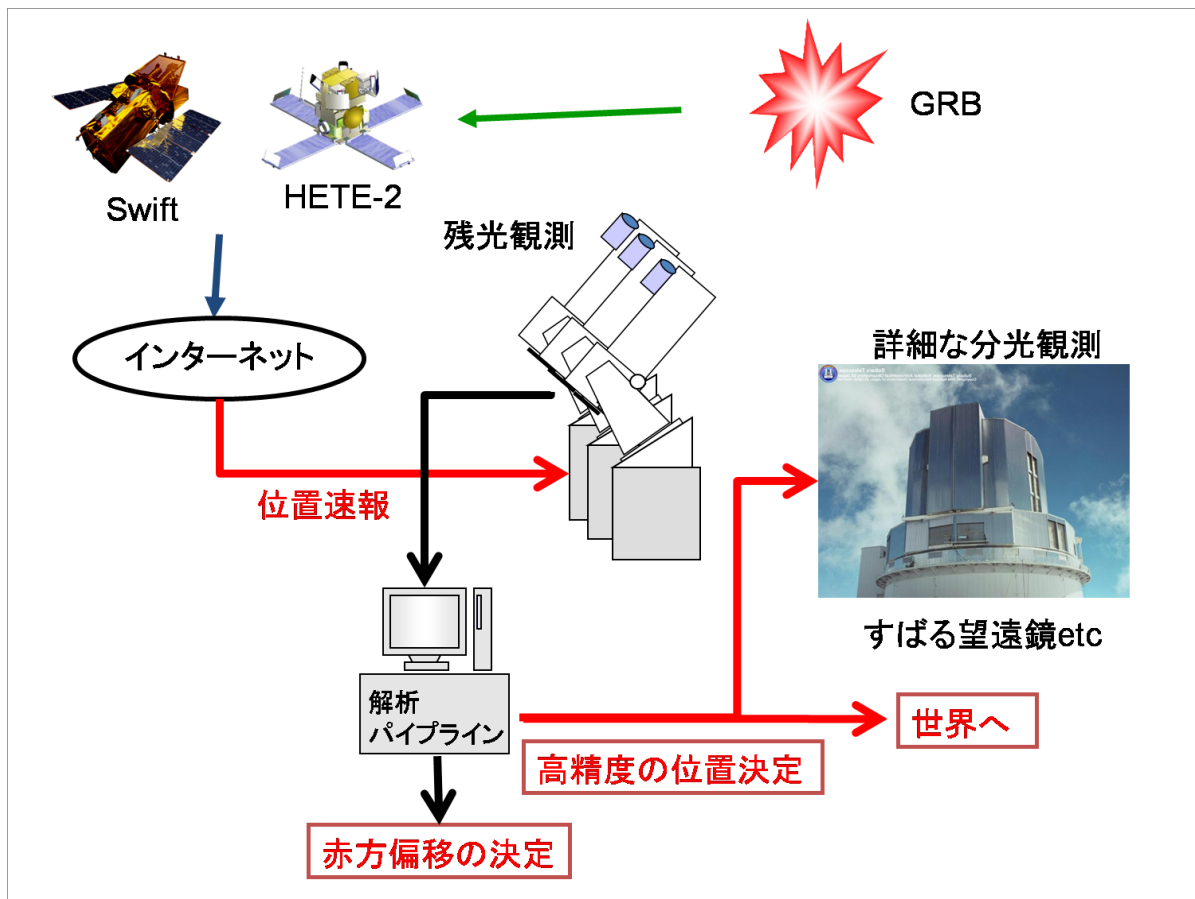


図 2.2: 残光観測の大まかな流れを示した図。GRB 観測衛星よりインターネットを介して GRB の座標を送ると、明野望遠鏡は自動的に GRB の方向を向いて撮像を開始する。観測終了後は解析パイプラインを通し、GRB の同定を行った後、結果をすばる望遠鏡にフィードバックし、より詳細な分光観測を行う

2.2.3 ネットワーク

東工大-明野間のネットワークについてまとめる。ネットワークの模式図を載せたので合わせて参照いただきたい(図 2.5)。明野と東工大は3回線の ADSL で繋がっている。東工大側で ADSL モデムと直接繋がっている PC は 'okalin' である。一方明野側では 'linmaster' という PC が ADSL と繋がっており、この PC で明野のシステムを統括している。明野には 'linmaster' の他に CCD を制御する 'lincam'、気象情報を取得する 'wincam'、望遠鏡を制御する 'kadai' があり、これら 4 つの PC で 1 つのネットワークを構成している。また、ドームに隣接する建物には解析用 PC の 'dracula' がネットワークに繋がっている。

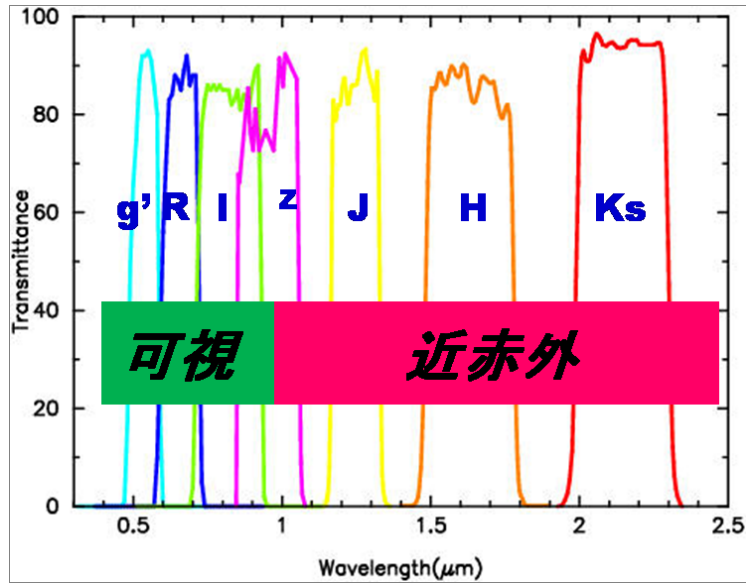


図 2.3: MITSuME 望遠鏡で用いているフィルターの波長帯

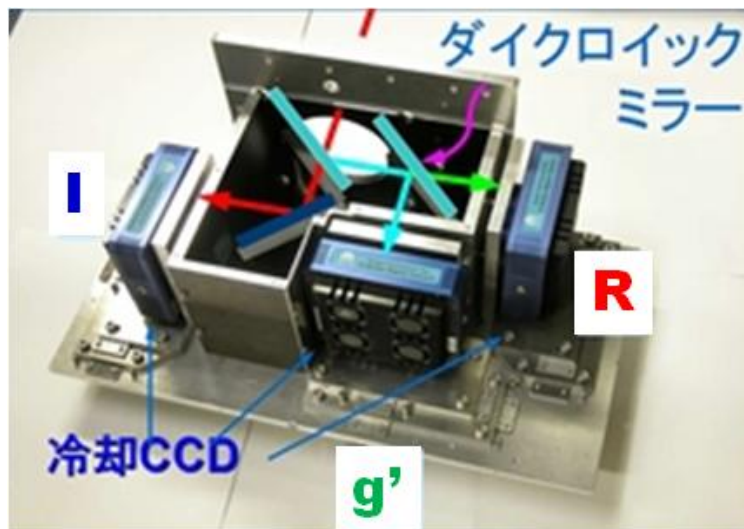


図 2.4: 明野で用いている 3 色同時撮像カメラ。入射した光をダイクロイックミラー (図中水色) で分光しカメラの前のフィルターで g' 、 R_c 、 I_c の波長帯の光を通し撮像する。

2.2.4 監視システム

明野望遠鏡は通常観測を無人、自動で行っている。またキャリブレーション用の観測やある特定の天体の観測も明野に行かなくとも東工大から望遠鏡を遠隔操作することで実行することが可能である。このような遠隔からの観測では現地の情報は限られたものしか得られず、些細なことが原因で大きな問題に発展する可能性があり、遠隔地である事から

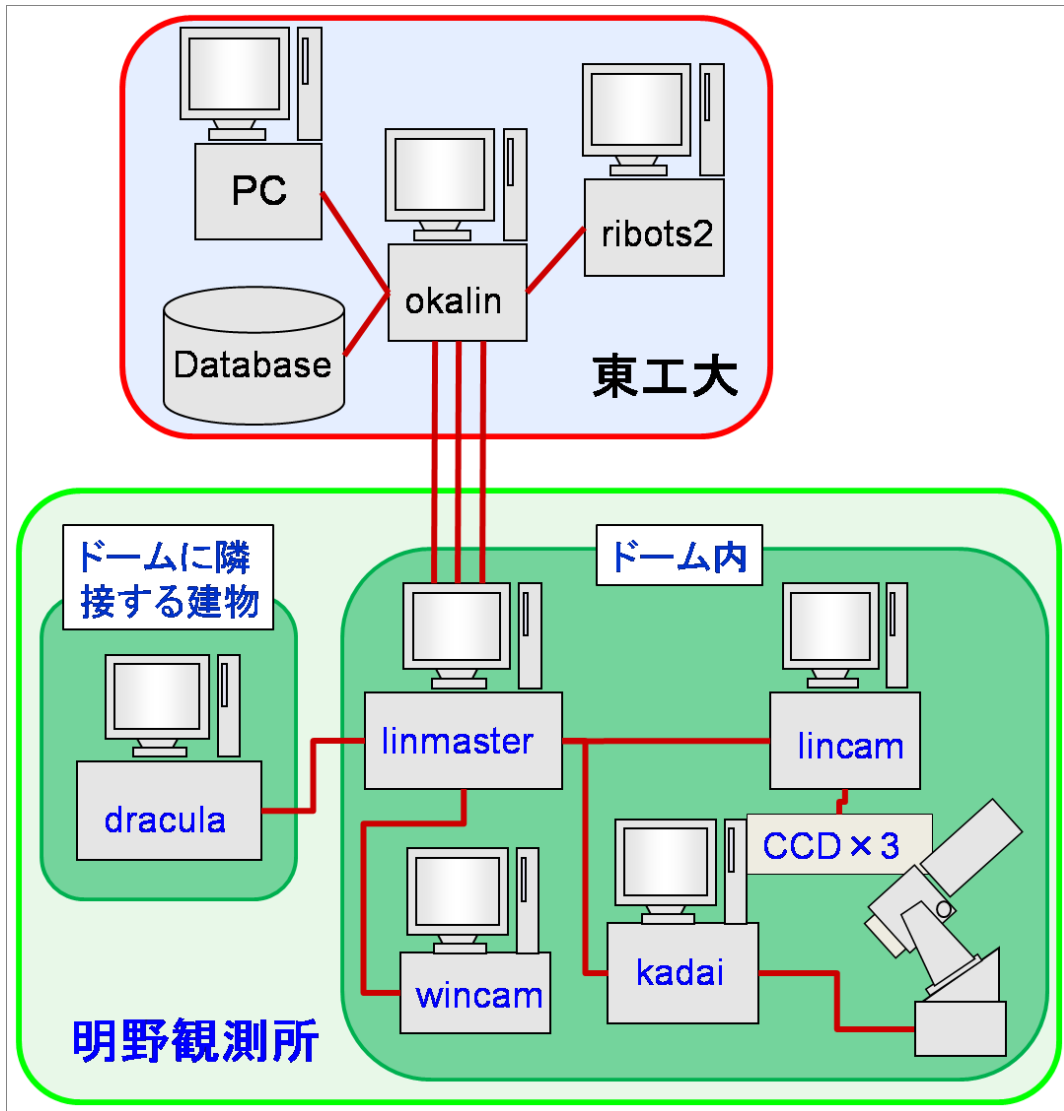


図 2.5: 東工大ー明野のネットワークを模式的に表した図。東工大の ‘okalin’ と明野の ‘linmaster’ が 3 本の ADSL で繋がっている。

迅速な復旧作業も困難である。このため我々は事故を未然に防ぐため、監視システムを作成している。

異常の有無を監視するため、ドーム内に 3 台、ドーム外に 1 台のカメラを設置している。また望遠鏡の鏡筒部分にもカメラを設置し、望遠鏡の指向方向の天候の様子を見ることができるようになっている。ドーム内への雨の浸入を防ぐためにドームの外側には雨滴センサーを設置し、雨が降った場合は自動でドームが閉まるようになっている (佐藤卒論 2002)。

明野と東工大にある PC には定期的に Linux の ping コマンドを送信し、応答がない場合はメールで通信が遮断された事が分かるようになっている。これによってネットワークの

切断、動作していないPCがないかを常に監視している。

2.2.5 自動観測システム

我々は通常の観測、およびGRBの観測を無人、自動で行っている

GRB 観測

GRBが発生すると、その旨を告げるGCNを東工大のPC‘ribots2’で受け取り、その情報を‘okalin’を介して明野の‘linmaster’に送信する。‘linmaster’が情報を受信すると‘kadai’、‘lincam’に命令を送り、自動的にGRBの観測が開始される。

通常観測

MITSuME望遠鏡はGRBの観測を目的として開発された望遠鏡であるが、GRBはいつ、どこで発生するかわからない。我々はGRBが発生していない時間を利用してAGN (Active Galactic Nuclei) などの他の天体を観測している。これには「天体の高度」「天体と月との離角」「前回の観測からのタイムスパン」などから観測の優先度を計算し、この優先度をもとに観測スケジュールを作成する。スケジュール作成後はGRB観測と同様、情報を‘linmaster’で受信し、望遠鏡、CCDを自動で制御し観測を自動で開始する。

2.2.6 自動解析システム

GRBの画像であっても通常観測の画像であっても、得られた画像は解析用PCの‘dracula’に送信され、解析処理が行われる。

行われる処理はスカイレベルの見積もり、画像中の恒星から求めたPSF (Point Spread Function) FWHM (Full Width at Half Maximum) の平均値の算出、WCS (World Coordinates System) の書き込み、ゼロ点の決定、リダクション、重ね合わせ、新天体の検出、天体および参照星の測光を得られた画像に対して行う (谷津修論 2005、下川辺修論 2007、石村修論 2008、森卒論 2008)。

解析を終えた画像は順次東工大へと転送され、データベースに登録される。

第3章 解析手法

天体の観測が終了したら得られた画像を解析する必要がある。GRBの残光の観測結果から画像を解析し光度曲線を作成するためには以下の手順を踏む必要がある。

1. バイアス値を引く
2. ダークフレームを引く
3. フラットフィールドで規格化
4. 画像を重ね合わせる
5. 測光をする
6. 光度曲線を作成する

このうち、1~3までの処理をまとめてリダクションと呼ぶ。この章ではすべての得られた画像に対して行うリダクション、および重ね合わせ、測光についてまとめる。

3.1 バイアス

図3.3の左側に観測によって取得されたFITS (Flexible Image Transport System) 画像を載せる。FITSとは天体のイメージデータ、天体スペクトルのデータなど天文分野で使われる汎用のファイルフォーマットのことであり、イメージ部分と観測時の様々な情報が書かれたヘッダー部分からなる。イメージ部分は天体を撮像した有効領域 $[xmin:xmax,ymin:ymax]=[51:1074,1:1024]$ とオーバースキャン領域 $[xmin:xmax,ymin:ymax]=[1:50,1:1024]$ からなる。このオーバースキャン領域はCCDの電荷を読み出した直後に、電荷が無いはずの領域を電荷転送を行いつつ読み出した部分である。バイアスとはCCDが読み出した電荷を電圧に変え、AD変換する際に与えるゲタのようなものである。我々はバイアス値としてオーバースキャン領域の平均値を画像全体のカウント値から引くことでこの‘ゲタ’の影響を

取り除いている。この平均値はヘッダーの 'PEDLEVEL' に書き込まれているのでこれを読み、画像全体から引きオーバーキャン領域を切り取れば「バイアス値を引く」工程は完了である。なお、この引き算には IRAF の 'imarith' コマンド、切り取りには IRAF の 'imcopy' コマンドを使用している。

3.2 ダークフレーム

CCD にはシャッターを閉じた状態でも暗電流 (ダークカレント) と呼ばれる電荷が発生する。これは電子の熱励起によって生じるものである。この暗電流による影響は CCD の温度と露出時間に依存する。そこでダーク成分のみのフレームを作るために、我々はオブジェクト画像の撮像時と同じ露出時間でシャッターを閉じたまま撮像するダーク画像を 10 枚程度用意し、バイアスを引いた上で重ね合わせる。これは統計を上げるためである。重ね合わせには 'imarith' を用いる。このようにして作られたダークフレームをオブジェクト画像から引くことでダーク成分を除くことができる。

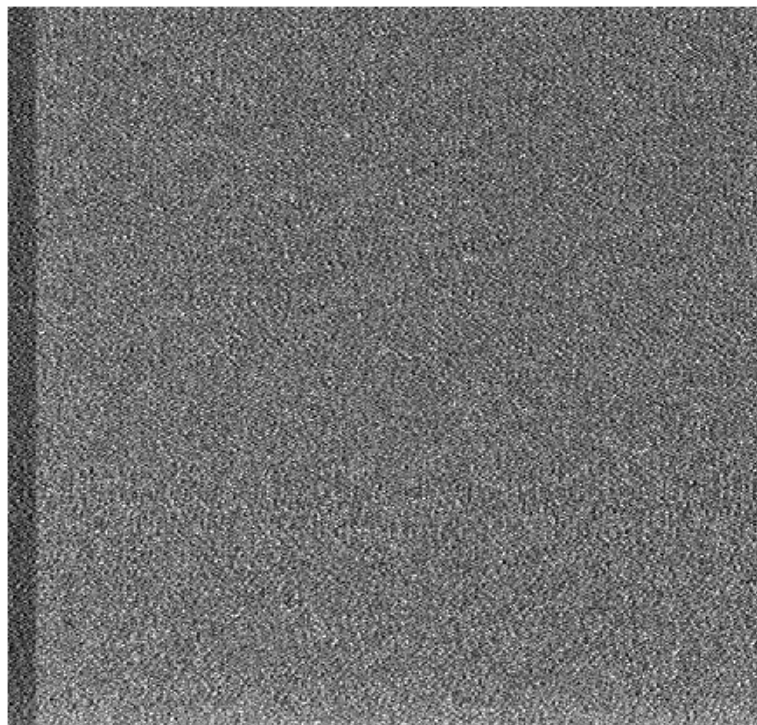


図 3.1: ダーク画像の例。シャッターを閉じた状態でもカウント値が 0 になっていない事が分かる。白い箇所ほどカウントが高い。なお画像左のやや暗くなっている部分はバイアスである。

3.3 フラットフィールド

CCDの感度はピクセルごとに異なっているため、このための補正が必要になる。この補正はピクセルの感度ムラの情報を持っている画像を用意し、それでオブジェクト画像を割ればよい。この割り算には‘`imarith`’を用いる。このムラの情報を持ったフラットフィールド画像は次のようにして得られる。

我々は天体観測を行う際にディザリングを行っている(下川辺修論 2007)。重ね合わせの際に恒星同士が重なるようにするとオブジェクト画像になる。一方、CCDの xy 座標が重なるようにし規格化するとピクセルごとの情報を持つ画像ができ、これをフラット画像としている。しかし、そのまま重ねると画像内に明るい恒星があった場合や恒星が多い領域を撮像した場合、その影響が残ってしまうため明るい天体にマスクをし、その上で重ね合わせる。このマスクの処理にはIRAFの‘`objmasks`’コマンドを使用する。さらに各ピクセルごとに中央値を取ると恒星の成分が消え望遠鏡が一様な光を受けた場合の画像を得ることができる。この上で規格化を行うとフラットフィールド画像が得られる(図 3.2)。

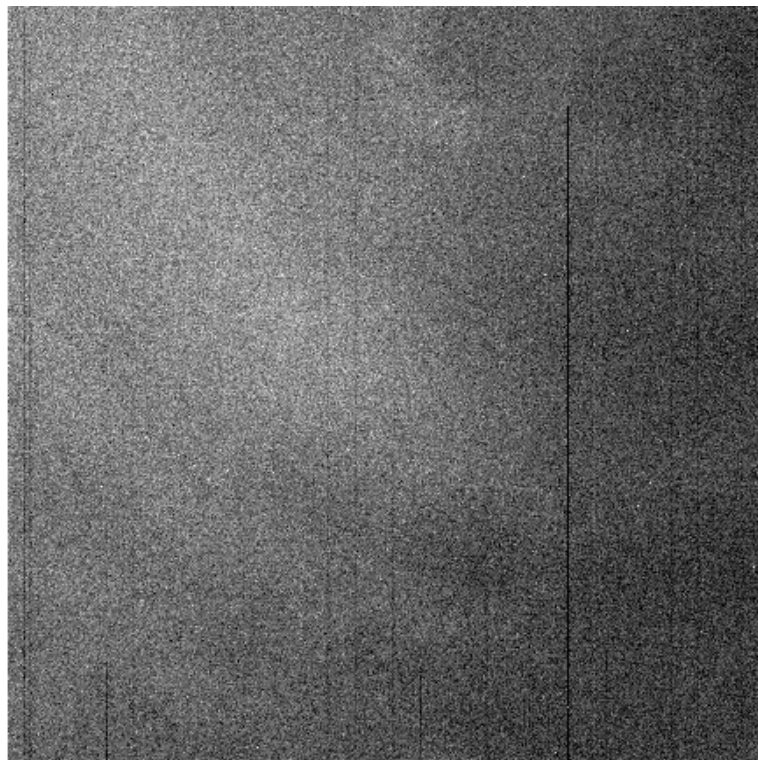


図 3.2: フラットフィールド画像の例

3.4 画像の重ね合わせ

リダクション処理までを終えた画像のカウント値は恒星からのシグナルと夜光の成分から成っている。さらに S/N 比を上げるために画像を赤道座標系で重ね合わせる。S/N 比とは検出されたシグナルのノイズに対する比のことで、この値が小さいとシグナルがノイズに埋もれてしまうことになる。

なお、すべての解析で画像を重ね合わせるわけではないが、GRB の残光を測光する場合、S/N 比を上げて残光を検出できる段階まで画像の重ね合わせを行ってから測光を行うことが多い。

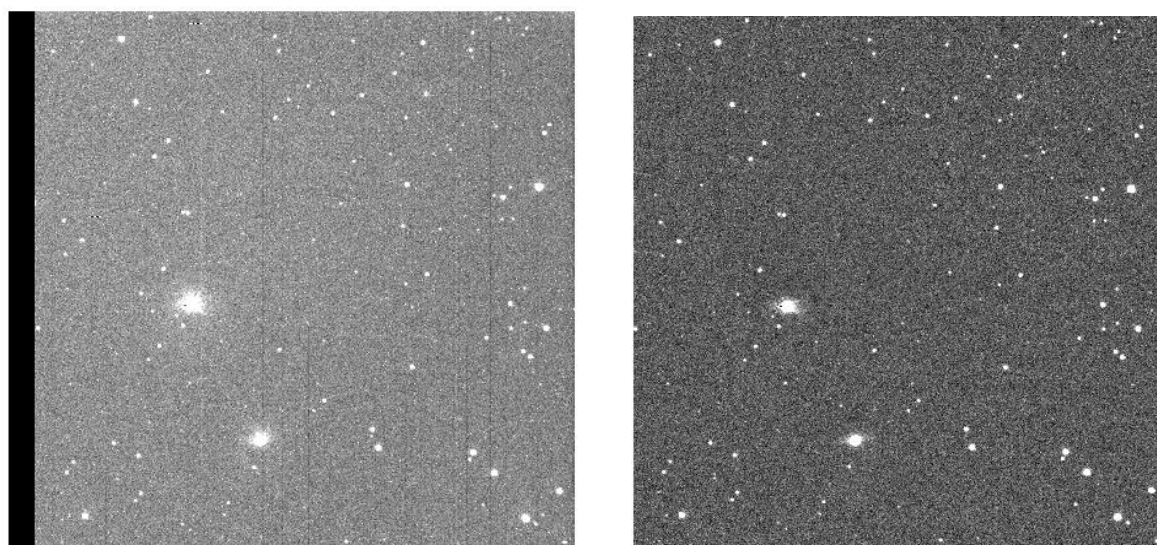


図 3.3: 左図：リダクション前の画像 右図：リダクション後の画像。眼でわかる変化として、例えば左の画像で見られる筋のような模様が右の画像では消えている。これはフラットフィールド画像によってムラが消去された結果である

3.5 測光

測光とは天体の明るさを測ることである。上述のとおり、リダクション、及び重ね合わせまで行われた画像のカウント値は天体からのシグナルだけでなく夜光の成分も含まれる。この夜光の成分を取り除くために我々は IRAF の ‘phot’ コマンドを使用した aperture photometry を行う。図 3.5 に aperture photometry の概念図を示す。

天体が有る領域 (Aperture) のカウント値から天体の無い領域 (Annulus) で評価したバックグラウンドを Aperture の面積に規格化して差し引くと、夜光成分を取り除く事ができる。Aperture 内のカウントの総計を Sum [counts]、面積を Area [pixel²]、天体からのシグナルを

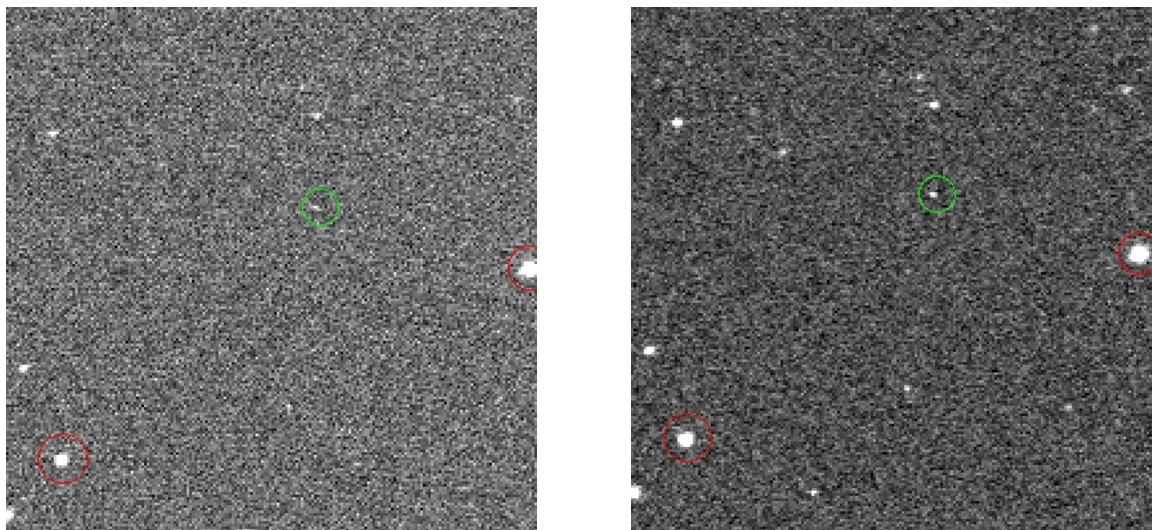


図 3.4: 左図：重ね合わせる前の画像 右図：重ね合わせた後の画像 赤い丸で囲った星は参照星 (詳細は第 4 章)、緑の丸で囲った星は GRB090426 を表す。重ね合わせる前はぼんやりとしか見えていないが、画像を重ねることではっきりと恒星が現れる事が分かる

Signal [counts]、Annulus 領域の単位ピクセルあたりのカウント数を Msky [counts/pixel²] とすると、

$$\text{Signal} = \text{Sum} - \text{Area} \cdot \text{Msky}[\text{counts}]$$

と表わすことができる。また、このような計算の測定の不確定性には、カウント自身の統計的揺らぎとバックグラウンドの統計的揺らぎの 2 つが寄与すると考えられる。したがって、Signal の不確定性は

$$\text{Noise} = \sqrt{\frac{\text{Signal}}{\text{Gain}} + \text{Area} \cdot \text{Stdev}^2 + \frac{\text{Area}}{\text{Nsky}} \cdot \text{Stdev}^2}$$

と表わせる。ここで Gain [electrons/ADC] は CCD のゲイン (入力電荷と CCD の出力カウントの比)、Stdev [count] は Annulus 領域での Sky background の揺らぎの大きさ、Nsky [pixel²] は Annulus の面積を表す。

一般に天体の明るさは「等級」を用いて表される。そこで得られたカウント値を等級に変換しなければいけないが、‘phot’ では次のような計算を行ってこの変換が行われる。

$$\text{Magnitude} = \text{Zmag} - 2.5 \times \log_{10}[\text{Signal}] + 2.5 \times \log_{10}[\text{Itime}]$$

$$\text{Magerr} = 1.0857 \times \frac{\text{Noise}}{\text{Signal}}$$

ここで、Zmag はゼロ点、Itime は露光時間を表す。

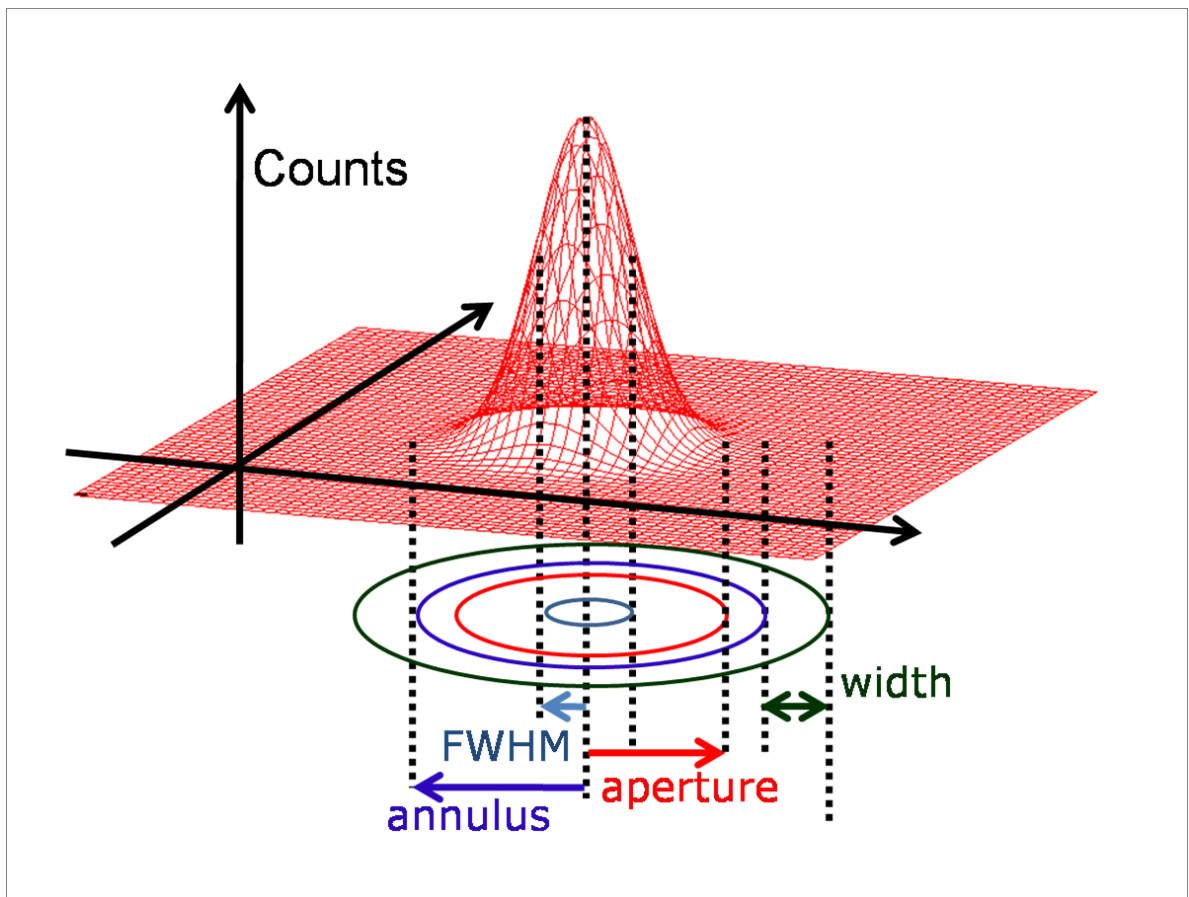


図 3.5: aperture photometry の概念図。我々は FWHM 値を基準に測光パラメータを決めている。通常、aperture を FWHM の 1.6 倍、annulus を FWHM の 1.75 倍、width を FWHM の 2.0 倍としている。aperture 内の全カウントから、内径が annulus 値で幅が width の円環領域で見積もった sky background を引いて、星からのシグナルを測定する

第4章 参照星の測光

この章では、GRB090426 を測光する前の準備として行った参照星の測光についてまとめる。GRB090426 が生じた領域は MITSuME 標準星カタログ (柳澤顕史 2005) に掲載されている標準星が存在しない領域である。GRB090426 を測光するためには、まず標準星の解析を行い、その結果を使用し GRB090426 との相対測光で用いる参照星の測光を行う。さらに次章で GRB090426 の解析を行う事とする。

4.1 システム変換係数

恒星の等級が登録されているカタログは多数あり、今回の解析で用いる参照星の等級も登録されているカタログもある。ところが、観測所ごとに使用する検出器や光学系の透過率、環境などが異なるため、カタログに掲載されている等級と明野で得られるデータによって見積もられる等級が全く等しくなるとは限らない。そのため、明野で見積もられた等級を、標準システムで得られた等級へ変換する式を求める必要がある。

機械等級とカタログ等級の変換式は以下のように与えられる。

$$g_{inst} = g_{cat} + k_g F(z) + C_g (G_{cat} - R_{cat}) + Z_g \quad (4.1)$$

$$R_{inst} = R_{cat} + k_R F(z) + C_R (R_{cat} - I_{cat}) + Z_R \quad (4.2)$$

$$I_{inst} = I_{cat} + k_I F(z) + C_I (R_{cat} - I_{cat}) + Z_I \quad (4.3)$$

ここで、 g_{inst} 、 R_{inst} 、 I_{inst} は各々のバンドで得られた機械等級、 g_{cat} 、 R_{cat} 、 I_{cat} はカタログに記載された等級を表す。また、 C_g 、 C_R 、 C_I はバンドごとの色変換係数で本来通すべき波長以外の光をどれだけ通してしまっているかを表すものであり、この値が大きいとフィルターが通すべき波長以外の光を多く通してしまっていることを表す。さらに、 $F(z)$ は天頂からの離角が z の時の Airmass、 k_g 、 k_R 、 k_I はバンドごとの大気吸収係数を表す。大気吸収係数とは、星からの光が大気によってどれだけ吸収、散乱されてしまうかを表す量であり、波長が短いほどこの量は大きくなる。 Z_g 、 Z_R 、 Z_I はバンドごとのゼロ点である。

4.1.1 色変換係数の導出

色変換係数、大気減光係数ともに谷津修論 (2005) に記載されている解析手順に従って解析を行った。色変換係数を求めるには次のようにすればよい。式 (1)(2)(3) より、天頂からの離角が一定であれば大気減光の項は定数としてしまってよいので、機械等級 $vs(g_{cat} - R_{cat})$ or $(R_{cat} - I_{cat})$ のプロットを一次関数でフィッティングし、その傾きをみればよい。

色変換係数を求める為に表 4.1 の標準星を用いた。これらは MITSuME 標準星に掲載されているものであり、カタログ値は改訂 Landolt カタログのものである。

観測は 2009 年 12 月 14 日に明野望遠鏡を用いて行った。それぞれの星が属する天域がほ

name	RA	DEC	g'	Rc	Ic	$g'-Rc$	Rc-Ic
SA93-317	01:54:37.73	+00:43:00.5	11.754	11.253	10.955	0.501	0.298
SA93-333	01:55:05.22	+00:45:42.5	12.393	11.542	11.120	0.851	0.422
SA94-242	02:57:21.24	+00:18:38.9	11.818	11.550	11.366	0.268	0.184
SA94-251	02:57:46.98	+00:16:02.7	11.782	10.545	9.958	1.237	0.587
SA94-702	02:58:13.37	+01:10:54.3	12.275	10.838	10.165	1.437	0.673
SA95-190	03:53:13.24	+00:16:22.8	12.719	12.432	12.212	0.287	0.220
SA95-218	03:54:49.95	+00:10:08.5	12.401	11.698	11.328	0.703	0.370
SA95-132	03:54:51.67	+00:05:21.5	12.246	11.805	11.518	0.441	0.287
SA95-149	03:55:44.44	+00:07:02.8	11.701	10.064	9.253	1.637	0.811
SA95-236	03:56:13.34	+00:08:47.0	11.826	11.071	10.660	0.755	0.411

表 4.1: 色変換係数を求める際に用いた標準星

ぼ南中する時刻に撮像した。赤緯もほぼ近い値となっているので AIRMASS は一定とみなせるはずである。実際に AIRMASS は 1.216 ~ 1.268 の間であった。したがって、これらの天体は大気の影響を等しく受けていると考えられるため、この観測では大気減光の影響を考えなくてよい。得られたデータより作ったプロットを図 4.1 に載せた。またこのデータからバラつきが大きなもの、誤差が大きなものなどを外しフィッティングを行ったプロットを図 4.2 に載せた。

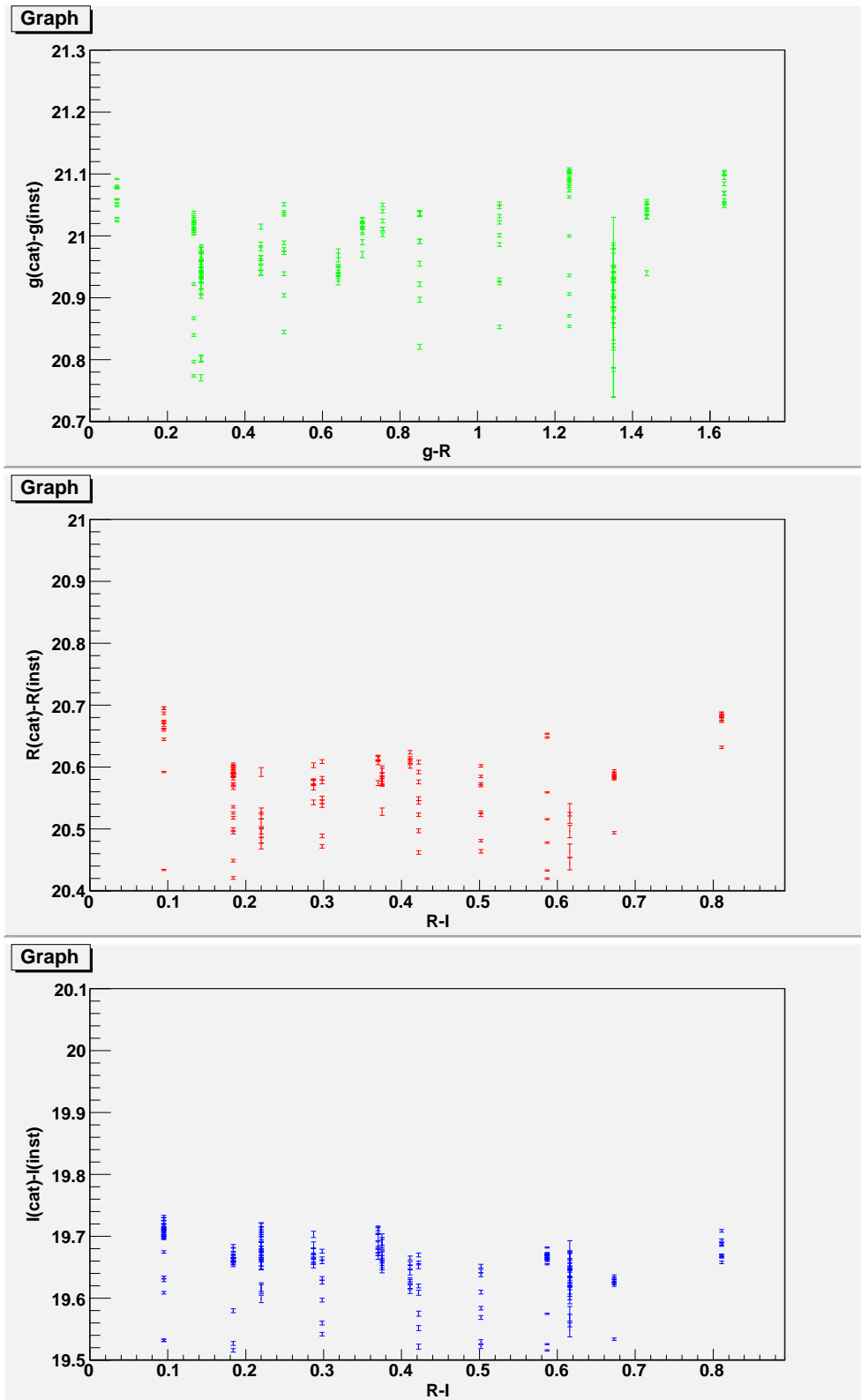


図 4.1: 12月14日の観測データ。縦軸が(カタログ等級 - 機械等級)を表し、横軸が $g' - R_c$ もしくは $R_c - I_c$ のカタログ等級の差を表す。バンドは上から g' 、 R_c 、 I_c である

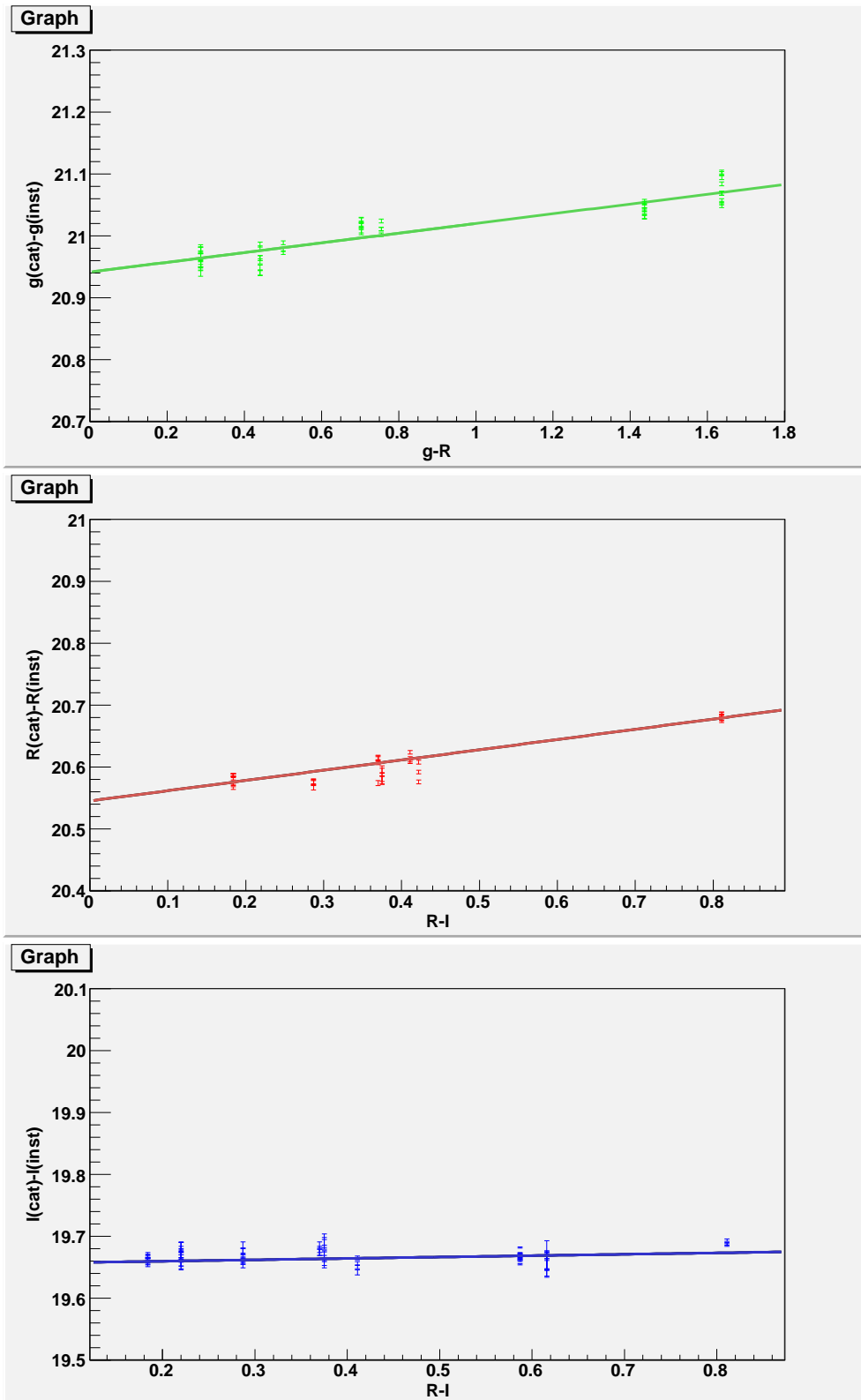


図 4.2: 色変換係数の決定のためのプロット。バンドは上から g' 、 R_c 、 I_c を表している。
各バンドとも青い星より赤い星を明るく測光する傾向がある

4.1.2 大気減光係数

次に大気減光係数 k とゼロ点 Z であるが、式 (1)(2)(3) を以下のように書きかえれば Airmass を横軸にとった一次関数の傾きが k 、 y 切片が Z を表すことがわかる。

$$g_{cat} - g_{inst} + C_g(G_{cat} - R_{cat}) = -k_g F(z) - Z_g \quad (4.4)$$

$$R_{cat} - R_{inst} + C_R(R_{cat} - R_{cat}) = -k_R F(z) - Z_R \quad (4.5)$$

$$I_{cat} - I_{inst} + C_I(R_{cat} - I_{cat}) = -k_I F(z) - Z_I \quad (4.6)$$

色変換係数を求める手順と同様、1 次関数でフィッティングを行い傾きと切片を求める。

大気減光係数を求めるための観測は 2010 年 1 月 20 日に明野望遠鏡を用いて行った。この観測では等級の AIRMASS 依存性を見るために様々な高度で観測を行っている。具体的には表 4.2 に掲載されている標準星を表の上から順に観測することを 1 セットとし、この観測を 3 セット行った。また、このような観測では大気の状態が変化しないように短時間で行う必要がある。今回の観測時間は 2:02:30 ~ 4:03:13 の間であった。図 4.3 に観測中の sky background の変化を表したプロットを載せた。この図を見ると sky background が変動しているが、これは様々な高度で観測した事による夜光の影響であり、大気の状態は安定していると考えてよい。観測結果を図 4.4、及びフィッティングの結果を図 4.5 に載せる。解析の結果から明野望遠鏡のシステム変換係数は表 4.3 のような値であると決定された。

4.2 参照星の測光

1 月 20 日の観測では標準星と同時に GRB090426 発生領域も観測を行った。このような同時観測では大気減光係数とゼロ点は標準星の領域と GRB090426 の領域で等しいものとしてよいと考えられる。したがって、前節で得られた結果をそのまま参照星の測光に用いる。

参照星として用いた恒星は GRB090426 のそばにある 2 つの恒星を選んだ (図 4.6 参照)。

測光の手順は解析手法の章で書いた通りの手順を踏む。大気減光係数を求めるときと同様、GRB090426 発生領域も 3 回撮像したので、得られた画像を重ね合わせ、各バンドとも 3 枚ずつ測光を行った。これらの測光結果は付録に載せた。これらの結果を見ると、ほぼ一致しているとみなしてよいと考えられる。

また、これらの参照星のカatalog等級を表??に載せる。ここで、カatalogナンバー、R1、

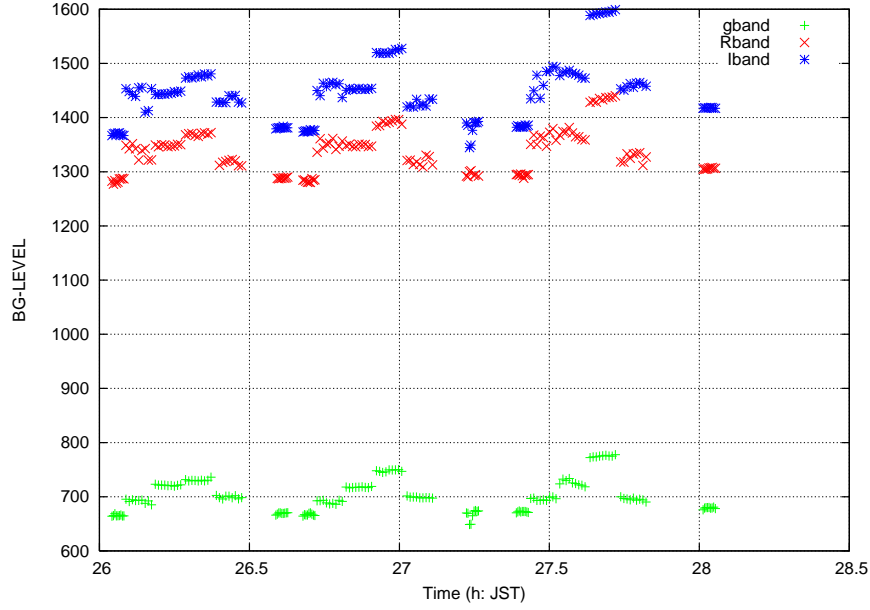


図 4.3: 1月20日の観測中の sky background の変動。値が上下しているが、これは高度が異なる天域を観測しているためである

name	Ra	Dec	g'	Rc	Ic
SA100-241	08:52:34.05	-00:39:48.8	10.136	10.061	9.976
SA100-280	08:53:35.47	-00:36:41.0	11.997	11.504	11.213
SA100-394	08:53:54.51	-00:32:22.0	11.988	10.679	10.043
SA101-315	09:54:51.28	-00:27:31.1	11.788	10.637	10.078
SA101-316	09:54:52.03	-00:18:34.4	11.747	11.259	10.968
G163-50	11:07:59.97	-05:09:26.0	12.989	13.144	13.216
G163-51	11:08:06.55	-05:13:46.9	13.275	11.492	10.133
GRBregion	12:36:17	+32:59:09			
SA99-438	07:55:54.26	-00:16:49.1	9.221	9.457	9.538
SA99-447	07:56:06.68	-00:20:42.3	9.285	9.449	9.490

表 4.2: 1月20日に観測を行った標準星。name、各バンドの等級は MITSuME 標準星カタログ (柳澤顕史 2005) に載っているものである。また、GRBregion は MITSuME 標準星カタログに載っていない領域であり、載せてある座標は GRB090426 の座標を示している

R2、N の値は USNO-B1.0、 g' の値は GSC2.3 の B と V の値から計算で出した。詳細は付録に載せたので合わせて参照いただきたい。

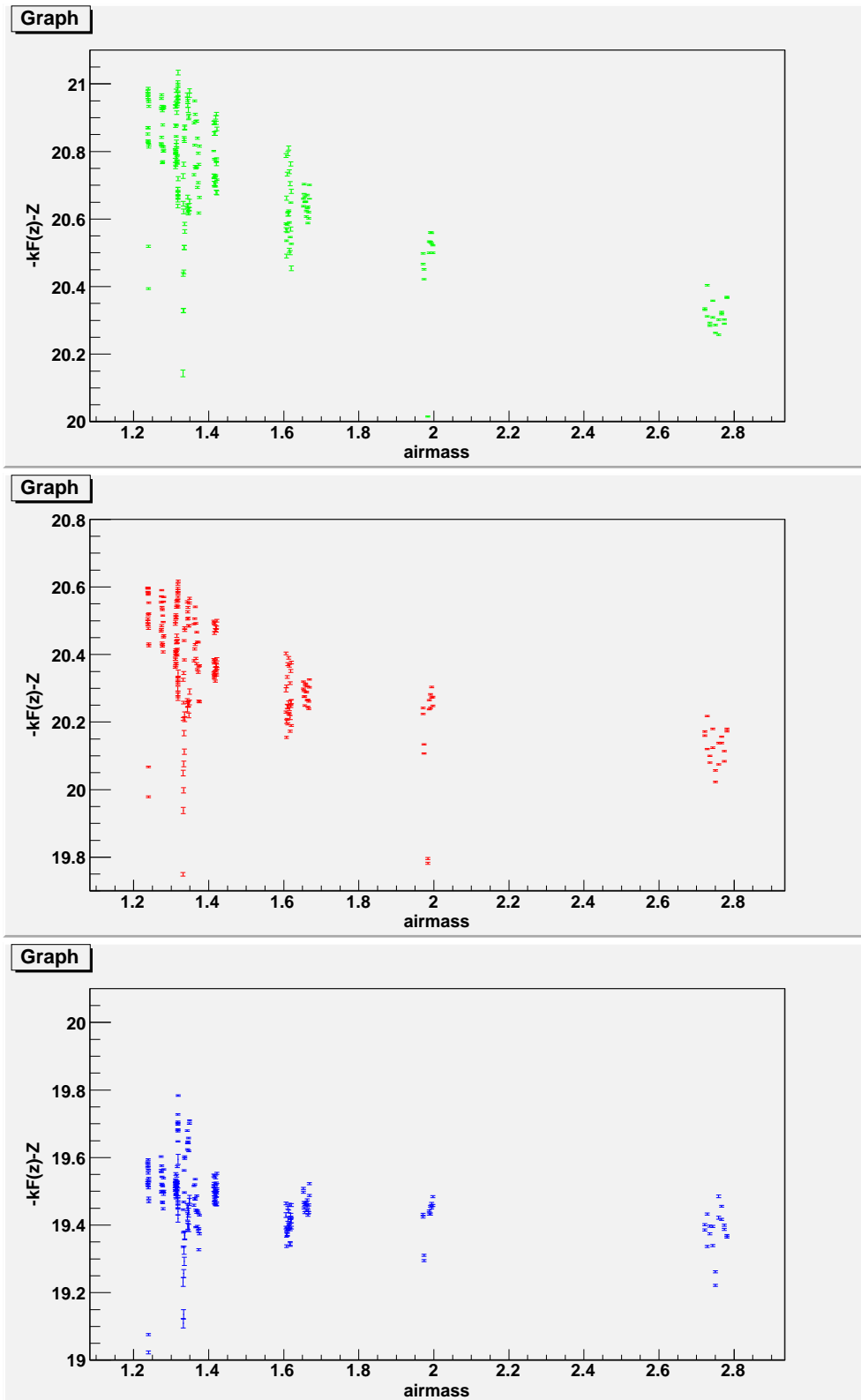


図 4.4: 1月20日の観測データ。縦軸は $-kF(z)-Z$ 、横軸はAIRMASSを表す。バンドは上から g' 、 R_c 、 I_c である

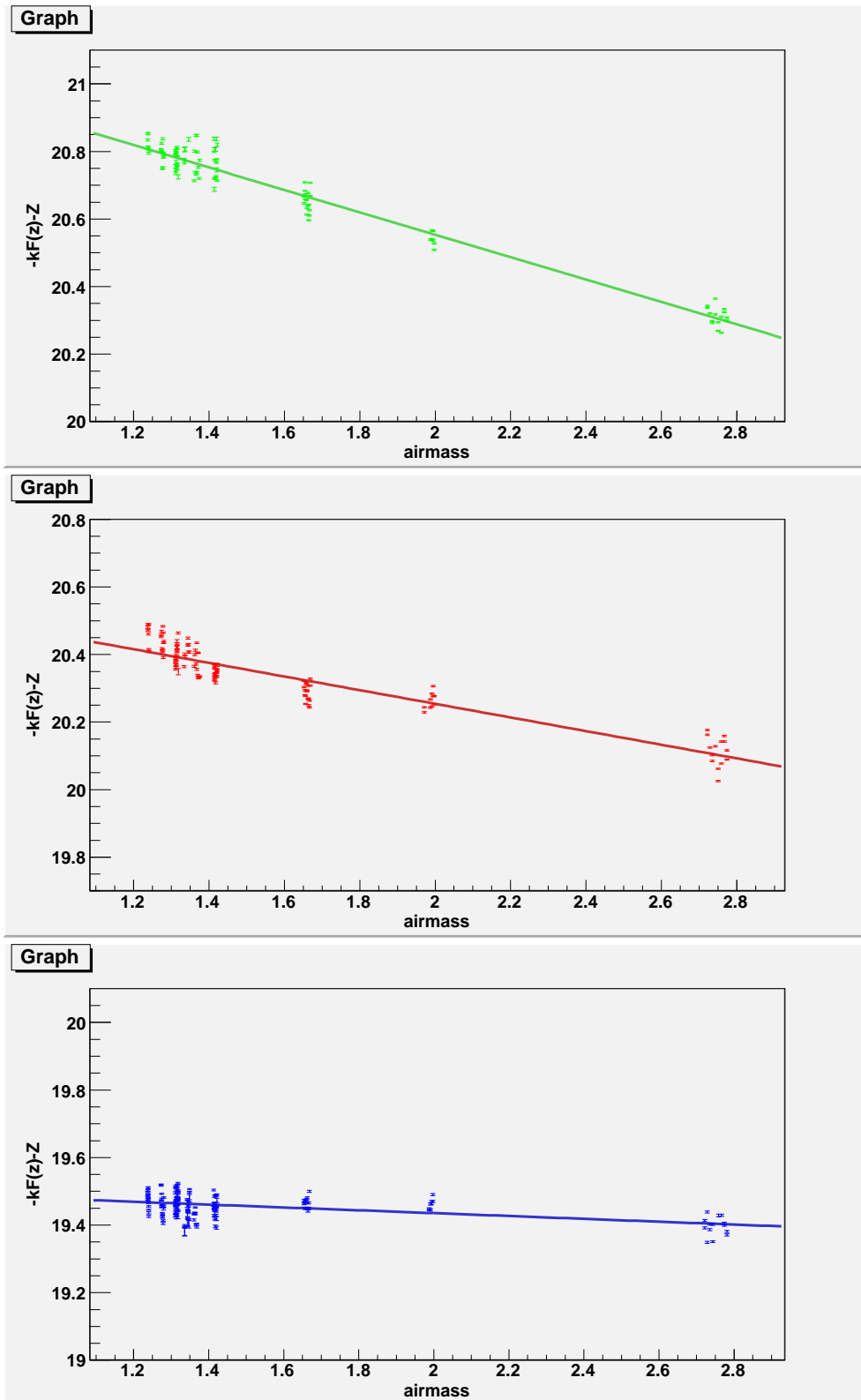


図 4.5: 大気減光係数、ゼロ点の決定のためのプロット。波長が短い g' が最も大気減光の影響を受け、 R_c 、 I_c の順に影響が小さくなるという期待通りの結果になっている

band	color	extinct	zero point
g'	0.078±0.001	0.332±0.004	21.22±0.008
Rc	0.165±0.002	0.202±0.004	20.66±0.008
Ic	0.022±0.002	0.042±0.006	19.52±0.009

表 4.3: 明野望遠鏡のシステム変換係数

次章の解析では測光値の平均を取ったもの (表 4.4 中の測光値) を参照星の等級として採用する。

		参照星 1	参照星 2
	Ra	12:36:29.7	12:36:08.3
	Dec	+32:56:45	+32:58:34
カタログ値	カタログナンバー	1229-0258049	1229-0257969
	Mag g'	15.27±0.377	14.62±0.378
	Mag R1	14.36	13.79
	Mag R2	14.82	13.88
	Mag N	14.38	13.35
測光値	g'	15.49±0.009	14.71±0.006
	Rc	14.83±0.009	13.86±0.005
	Ic	14.40±0.009	13.35±0.005

表 4.4: 参照星の等級

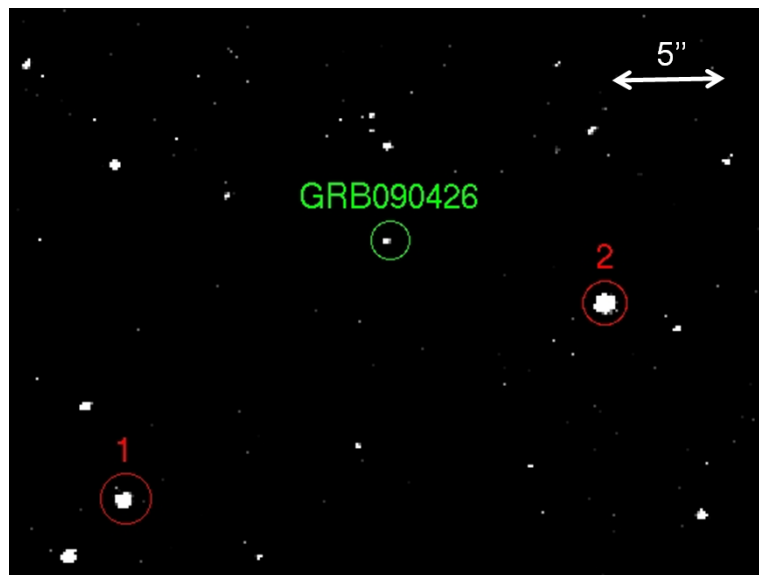


図 4.6: GRB090426 と参照星。赤印のそばの数字は表 4.4 の参照星の番号と対応している

第5章 GRB090426

本章では GRB090426 についてのまとめ、及び解析結果についてまとめる。GRB090426 は 2009 年 4 月 26 日の 12:48:47(UT) に Swift 衛星の BAT によって検出され、そのトリガーから 85 秒後に XRT によって GRB の位置が以下であると計算された。

$$Ra(J2000) = 12^h 36^m 17.77^s \quad (5.1)$$

$$Dec(J2000) = +32^\circ 59' 05.1'' \quad (5.2)$$

エラーサークルの大きさは 3.9'' であった (Cummings et al. 2009)。また fluence と peak photon flux は

$$\text{fluence} = (1.8 \pm 0.3) \times 10^{-7} (\text{erg}/\text{cm}^2) (15 - 150 \text{keV}) \quad (5.3)$$

$$\text{peak photon index} = 2.4 \pm 0.3 (\text{ph}/\text{cm}^2/\text{sec}) \quad (5.4)$$

と求められ、標準的な強度を持つ GRB であることがわかった (Sato et al. 2009)。さらに Keck-I 望遠鏡による残光観測より赤方偏移が 2.61 と決定された (Levesque et al. 2009)。

5.1 MITSuME 望遠鏡による観測

表 5.1、5.2 に明野 50cm 望遠鏡と岡山 50cm 望遠鏡による GRB090426 の観測結果をまとめた。明野望遠鏡では観測体制の不備、及び天候に恵まれず、測光に用いることができるデータは短時間しか取ることができなかった。一方、岡山天体物理観測所では長時間にわたってこの GRB を観測することに成功した。また図 5.3 を見ると観測中は sky background の変動が小さく非常によい観測条件でデータを得ることができた事がわかる。したがって解析には主に岡山で得られたデータを用いていく。

5.2 GRB090426 の測光

GRB090426 の測光には次のような手法を取った。まず、3 章の解析手法に従って得られたデータのリダクションを行った。次にバースト後約 10 分後までのデータは画像一枚

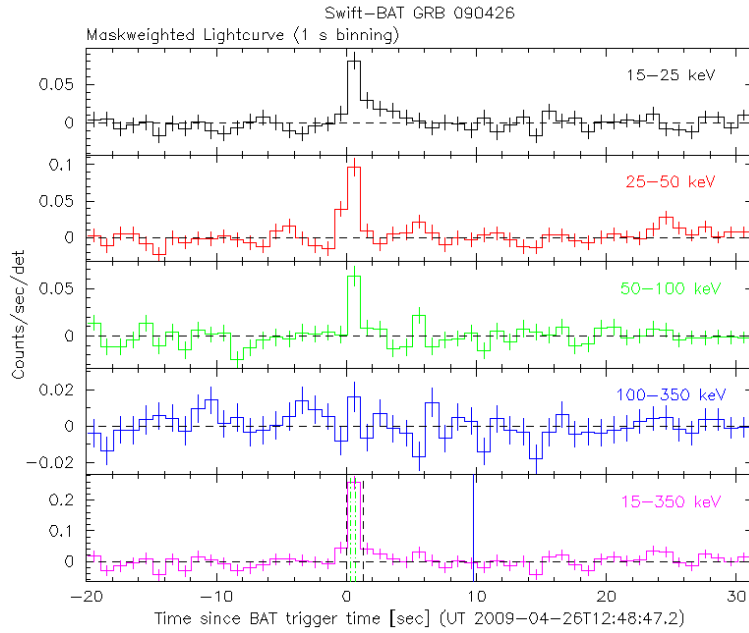


図 5.1: BAT によって得られた GRB090426 の光度曲線

観測日時、時間 (UT)	観測 fitsID	since trigger
4/26 12:51:00 ~ 19:23:49	480118 ~ 480440	133 ~ 23899

表 5.1: 岡山の観測データ

で、それ以降の画像は適宜重ね合わせを行い一枚の画像を作成した。それぞれの画像において GRB090426 と参照星を用いて相対測光を行い、この測光結果を前章で求めた参照星の測光結果からゼロ点の補正を行って GRB090426 の測光結果とした。

観測日時、時間 (UT)	観測 fitsID	since trigger
4/26 13:44:22 ~ 14:49:35	301133 ~ 301178	3335 ~ 7248
15:43:27 ~ 15:53:27	301256 ~ 301264	10481 ~ 11081
15:59:42 ~ 17:00:32	301274 ~ 301327	11456 ~ 15106
17:32:14 ~ 19:24:44	301355 ~ 301453	17007 ~ 23757

表 5.2: 明野の観測データ

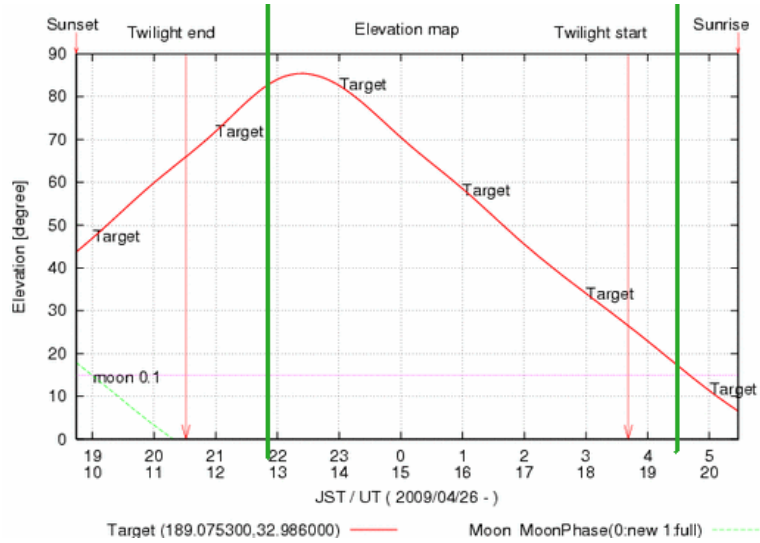


図 5.2: GRB090426 の観測中の高度変化。緑の線を引いた間が GRB を観測していた時間である。

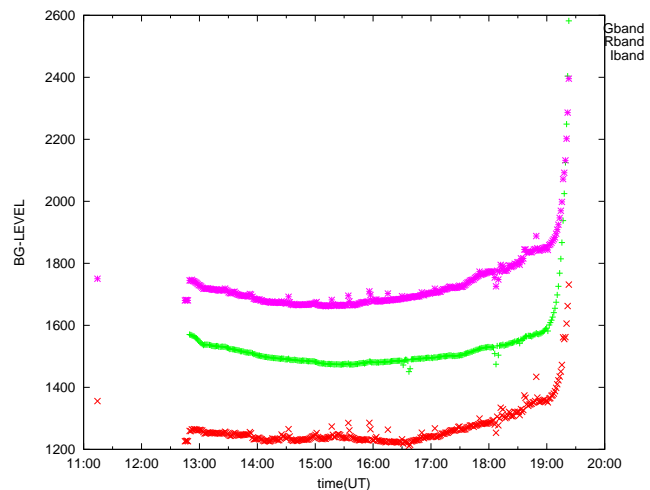


図 5.3: GRB090426 の観測中の sky background の変化。変動が小さく sky background は安定していたといえる

5.3 光度曲線

求められた等級をエネルギーフラックスに変換する。これは明るさを明確な物理量にし、他の観測所で得られた結果との比較をやすくするためである。我々が通常目にする等級は”Vega 等級”と呼ばれている。この等級からエネルギーフラックスを求めることは単純ではない。これに対し、エネルギーフラックスとの変換を明確に定義している単位系

since burst(sec)	Mag(g')	Mag(Rc)	Mag(Ic)
93±30	17.05±0.08	16.62±0.07	16.07±0.09
163±30	17.26±0.08	16.83±0.06	16.37±0.09
234±30	17.56±0.09	17.14±0.07	16.43±0.08
306±30	17.79±0.12	17.27±0.09	16.69±0.12
380±30	18.02±0.13	17.55±0.10	16.97±0.14
451±30	18.27±0.16	17.90±0.14	17.37±0.21
520±30	18.22±0.16	18.10±0.13	17.18±0.18
590±30	18.64±0.26	18.02±0.16	17.13±0.16
620±60	18.91±0.21	18.14±0.13	17.40±0.15
690±60	18.77±0.17	18.59±0.15	17.71±0.19
1025±120	19.53±0.24	18.81±0.14	17.99±0.15
1466±210	19.94±0.28	19.02±0.13	18.50±0.20
2107±300	20.07±0.28	19.43±0.24	18.83±0.27
3587±900	20.51±0.25	20.03±0.18	19.15±0.22
6096±960	20.54±0.22	20.20±0.20	19.53±0.27
11084±3090	21.33±0.31	20.77±0.24	19.79±0.26

表 5.3: GRB090426 の等級変化

として AB 等級がある。AB 等級は以下の式で定義される。

$$AB_{\nu} = -2.5 \log f_{\nu} (\text{ergss}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}) - 48.60 \quad (5.5)$$

ここで f_{ν} は単位周波数当たりのフラックスである。Fukugita et al.(1996) により標準測光システムと AB 等級の変換方法は報告されており、我々は標準システムで得られた等級をすでに計算済みである。この等級を AB 等級に変換するには、測定した等級に表 5.4 で示された AB 等級での Vega の明るさを加えればよい。この補正を行った GRB090426 の光度曲線を図 5.4 に載せた。

	g'	Rc	Ic
AB	-0.093	0.212	0.453

表 5.4: AB 等級で表した各バンドの Vega の等級

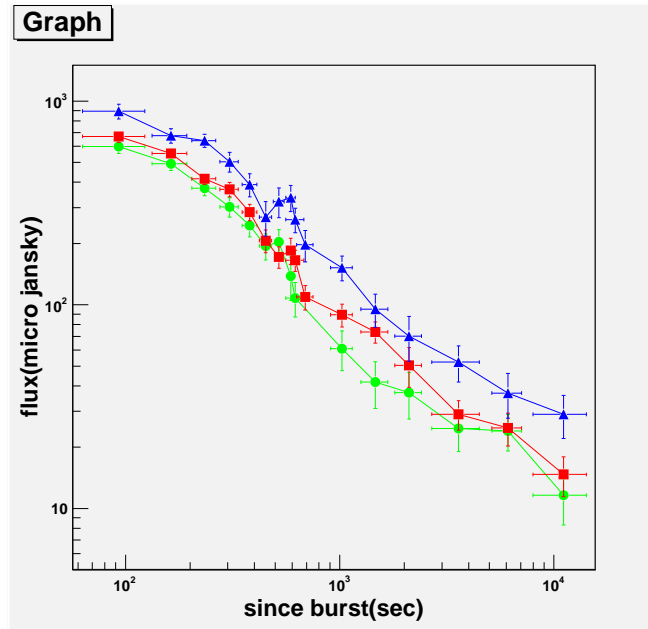


図 5.4: GRB090426 の光度曲線。丸が g' 、四角が Rc、三角が Ic を表す。

5.4 議論

5.4.1 光度曲線の折れ曲がり

GRB の残光は時間のべき乗で減衰していくことが知られている (Wijers et al. 1999 Fig.3, Fig.4)。本解析でも、次にべきのインデックス、つまり $Flux \propto t^{-\alpha}$ の式を仮定し、この α を求める事を行った。まず単一のべきで減衰していくと仮定した場合 (図 5.6 参照)、次に 280 秒で折れ曲がりを見せたと仮定した場合 (図 5.7 参照)、さらに 280 秒付近と 2000 秒付近で折れ曲がりを見せたと仮定した場合 (図 5.8 参照) の 3 つのパターンを考えた。それぞれの場合のインデックス、私が仮定した折れ曲がりのタイミング、 χ^2 検定の結果は表 5.5、5.6、5.7 の通りである。フィッティングを見てみると、折れ曲がりなかった場合はプロットが直線上に乗っておらず、折れ曲がりがあった場合に比べて χ^2 検定の結果が悪くなっているため、折れ曲がりなかったパターンはこの時点で棄却する。

5.4.2 可視光線と X 線の比較

Antonelli et al. (2009) によると、X 線の残光はバースト発生後 259 秒後に折れ曲がりがあり、その前後でのインデックスを $\alpha_1 = 0.20_{-0.02}^{+0.01}$ 、 $\alpha_2 = 1.04_{-0.08}^{+0.06}$ としている。また、発生後 7200 秒以降の R バンドのインデックスを $\alpha = 0.74 \pm 0.03$ と計算している。

X 線についての結果と我々の可視光線の結果について考えていく。まず、初めの ~260 秒以降の折れ曲がりについては、X 線、g'、R、I とともに減光が鋭くなり、なおかつ折れ曲がり後のインデックスが、大方一致している。

一方、後の ~2000 秒付近の折れ曲がりについて見てみる。まず、260 秒以降に折れ曲がりなかった (図 5.7 の場合) とすると、X 線が最も急なべきをもち、続いて g'、R、I と緩やかになっていく。ところが、プロットをみると 1000 ~ 2000 秒の間、および 10000 秒以降のプロットが合わず、かつ Antonelli の可視光における結果とも合わないように思える。

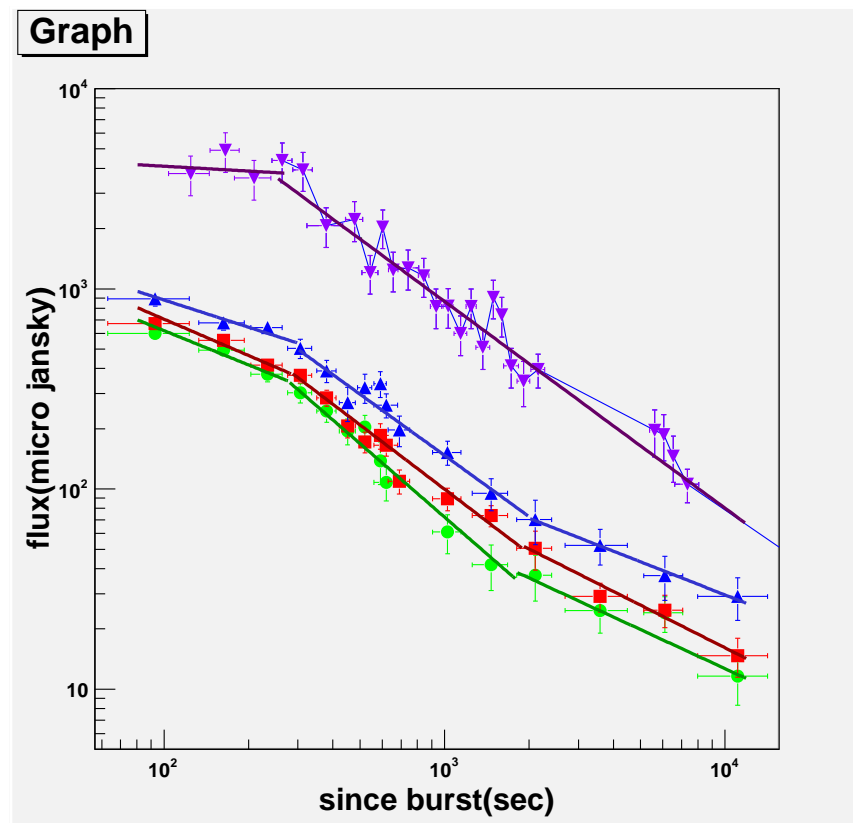


図 5.5: 可視光のプロットに X 線を追加したプロット。紫色のプロットが X 線を表す。X 線のデータは XRT で得られたデータを適当な大きさにスケールしてプロットした

band	α	$\chi^2/\text{d.o.f.}$
g'	0.975 ± 0.062	12.7/14
Rc	0.933 ± 0.051	11.0/14
Ic	0.874 ± 0.056	10.1/14

表 5.5: 折れ曲がりがないと仮定したときのべきの指数と χ^2 、自由度

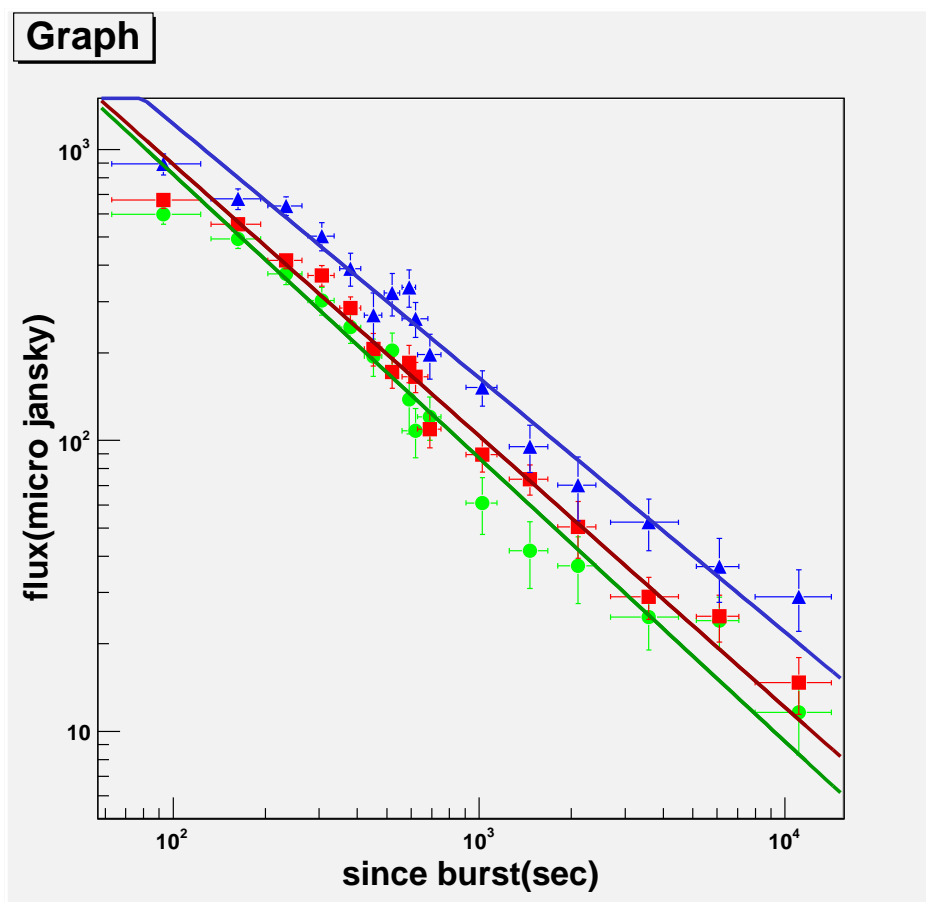


図 5.6: 折れ曲がりがないと仮定したときのフィッティング結果。丸が g'、四角が Rc、三角が Ic を表す。最初のプロット、及び 1000 秒 ~ 2000 秒、10000 秒以降のプロットが合っていない

band	α_1	$\chi^2(\alpha_1)/\text{d.o.f.}$	α_2	$\chi^2(\alpha_2)/\text{d.o.f.}$
g'	0.568 ± 0.278	0.328/1	0.988 ± 0.075	11.5/10
Rc	0.603 ± 0.273	0.396/1	0.941 ± 0.060	9.97/11
Ic	0.356 ± 0.171	0.334/1	0.889 ± 0.067	7.56/11

表 5.6: ~260 秒で折れ曲がりを見せたと仮定したときのべきの指数と χ^2 、自由度

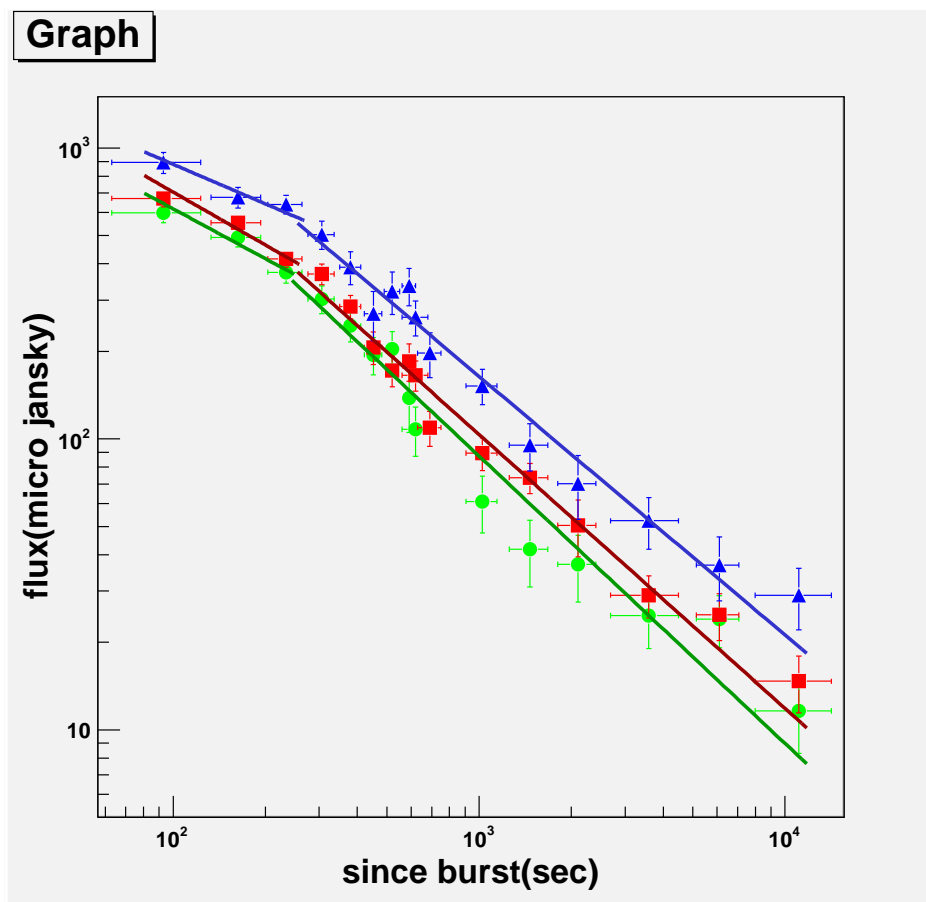


図 5.7: 折れ曲がりか1回あったと仮定したときのフィッティング結果。折れ曲がりなしを仮定した場合と同様、折れ曲がり以後でフィッティングと合っていない

band	α_2	$\chi^2(\alpha_2)/\text{d.o.f.}$	α_3	$\chi^2(\alpha_3)/\text{d.o.f.}$
g'	1.219 ± 0.173	3.459/6	0.648 ± 0.203	1.20/3
Rc	1.066 ± 0.120	1.492/5	0.707 ± 0.228	0.48/2
Ic	1.015 ± 0.137	2.22/6	0.548 ± 0.230	0.06/2

表 5.7: ~260 秒と~2000 秒で折れ曲がりを見せたと仮定したときのべきの指数と χ^2 、自由度。90~260 秒の間の指数と折れ曲がりのタイミングは表 5.6 の α_1 と同じであるので省略した

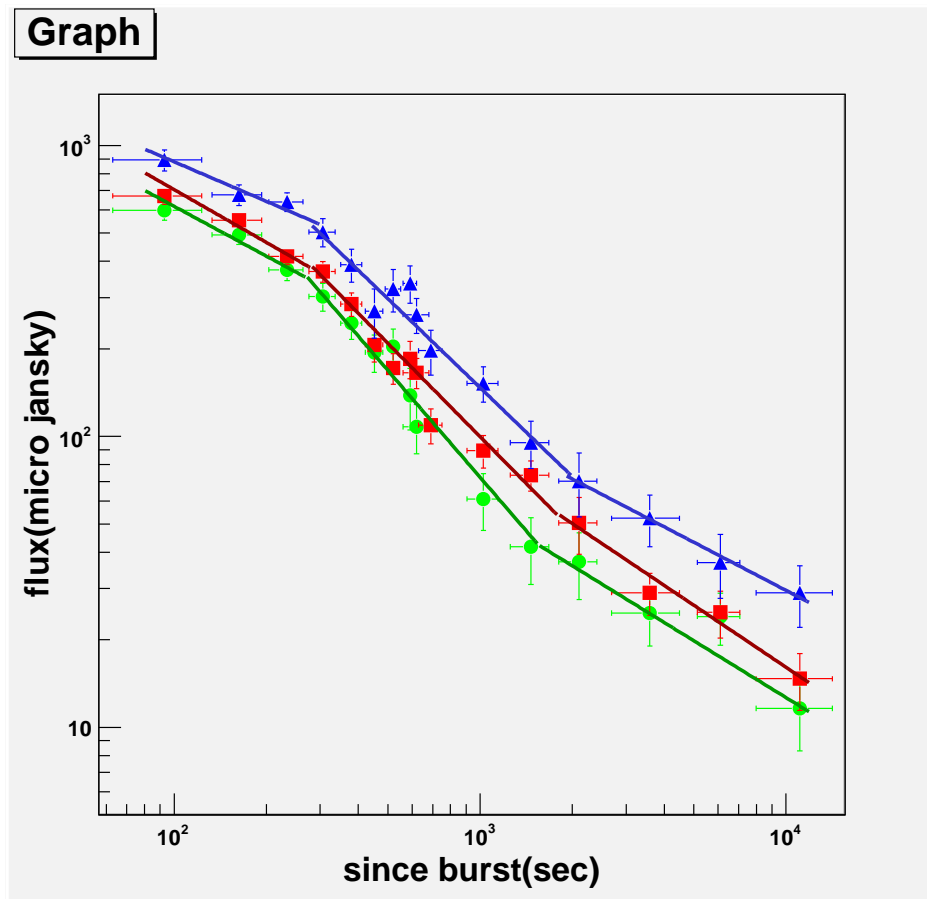


図 5.8: 折れ曲がりか2回あったと仮定したときのフィッティング結果

次に 1800 ~ 2000 秒の間に折れ曲がりがあった (図 5.8 の場合) とする。この場合「X 線では観測されていない」「減光のべきが緩やかになっている」という特徴を持っている。 χ^2 が改善し、折れ曲がり後のべきが Antonelli et al. 2009 の結果と一致している。この振る舞いについてさらに考察していく。

Host Galaxy の影響

GRB090426 の Host Galaxy によるフラックスが可視光で観測され、X 線では観測されなかったとする。この場合、折れ曲がり X 線では観測されず可視光のみでべきが緩むというシナリオが考えられる。そこで参照星の測光で得られた図 (図 5.9) を見てみる。もし GRB090426 の Host Galaxy が観測できれば、GRB とほぼ同じ位置に検出できることが期待される。だが、図 5.9 にはそれらしき天体は見られない。また、図 5.9 の限界等級を

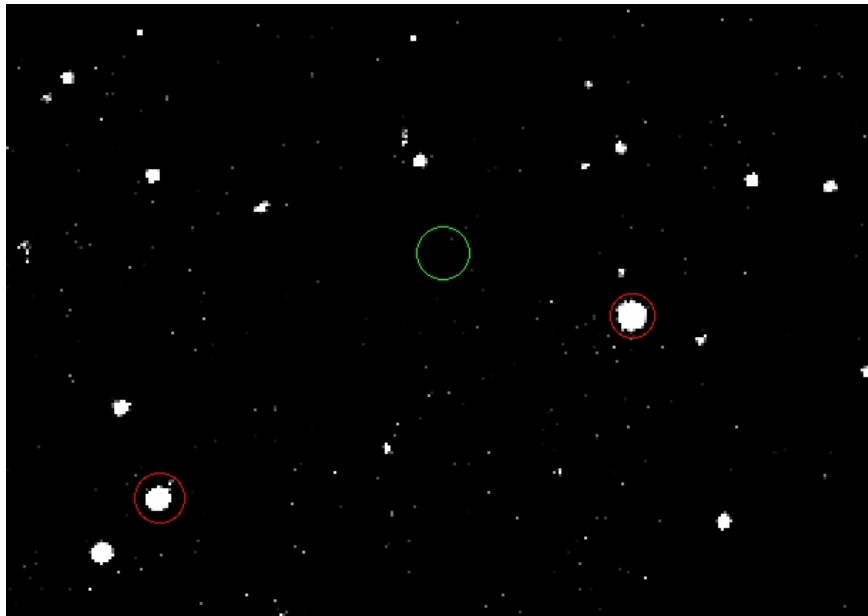


図 5.9: 1月20日に観測した GRB090426 の発生領域。緑印が GRB090426 の座標、赤印が参照星 (第4章参照) の座標である。GRB090426 の Host Galaxy が観測できれば緑印の所に写るはずだが、明野望遠鏡では検出することはできなかった

見積もってみると 19.67 等級と計算された。なお、この Host Galaxy については Antonelli et al. 2009 で報告されており、彼らのグループは「GRB 発生から 22 日後の R バンドの光度曲線がフラットになっており、この部分は Host Galaxy からのフラックスを観測している」と主張している (図 5.11)。この光度曲線を見ると R バンドでの等級にして Host

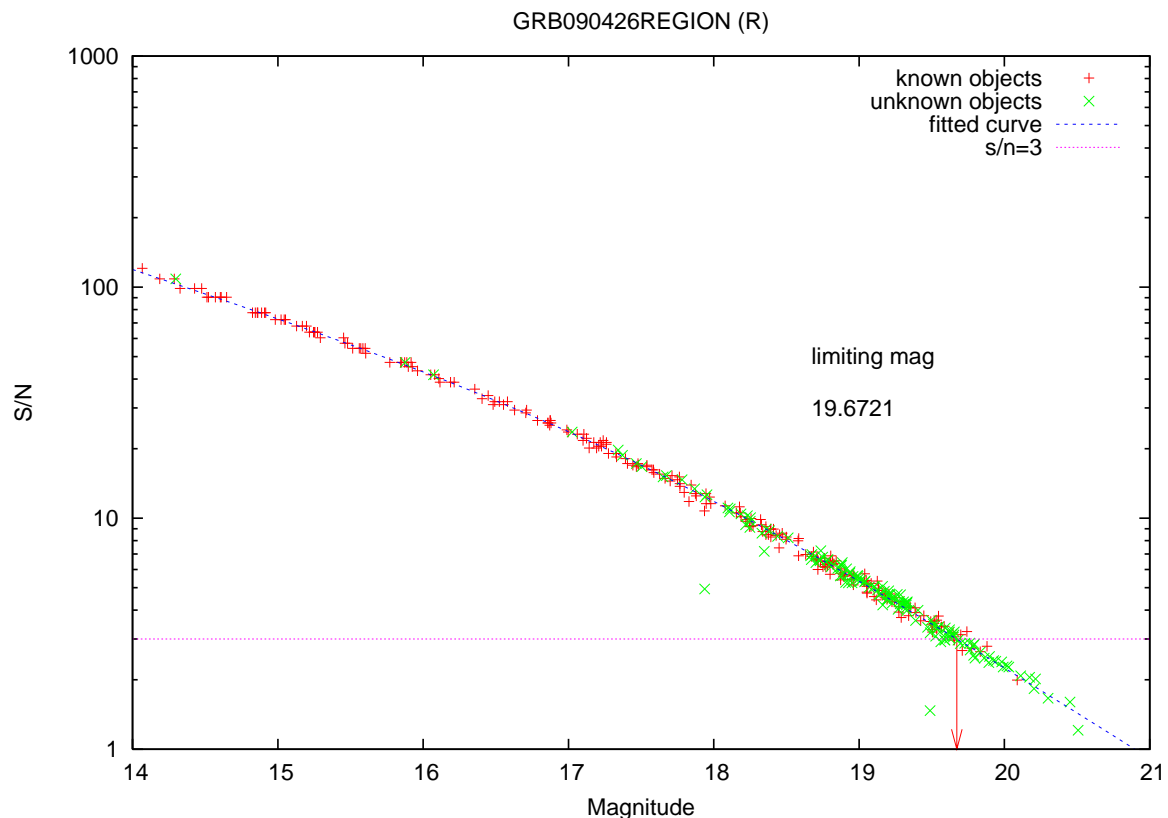


図 5.10: 図 5.9 の限界等級を見積もったもの。限界等級とはどの程度暗い星までが検出できたかを表すもので、我々は Signal to Noise ratio(S/N) が 3 となる等級を限界等級と定義している。図 5.9 の場合、19.67 等級までの星は検出可能であることが分かる

Galaxy は約 23 等級と考えられる。したがって Host Galaxy が影響して光度曲線のべきが小さくなったとは考えにくい。

2 成分のジェットの見測

第 1 章 2 節でも述べたように、現在の GRB の放射機構の標準的なモデルは Fire ball モデルである。このモデルでは一体になったジェット状のシェルと GRB 周辺の星間物質の相互作用によって残光が生じる。標準的なモデルの場合、減光のべきは大きくなるのが一般的である。ところが GRB090426 の光度曲線では減光のべきが緩くなっている。これは標準的なモデルとは合わない。そこで我々はこの残光のふるまいは 2 成分のジェットによるものであると考えた。具体的には

- Lorentz 因子が大きく、幅が小さいジェット (narrow jet)
- Lorentz 因子が小さく、幅が大きいジェット (wide jet)

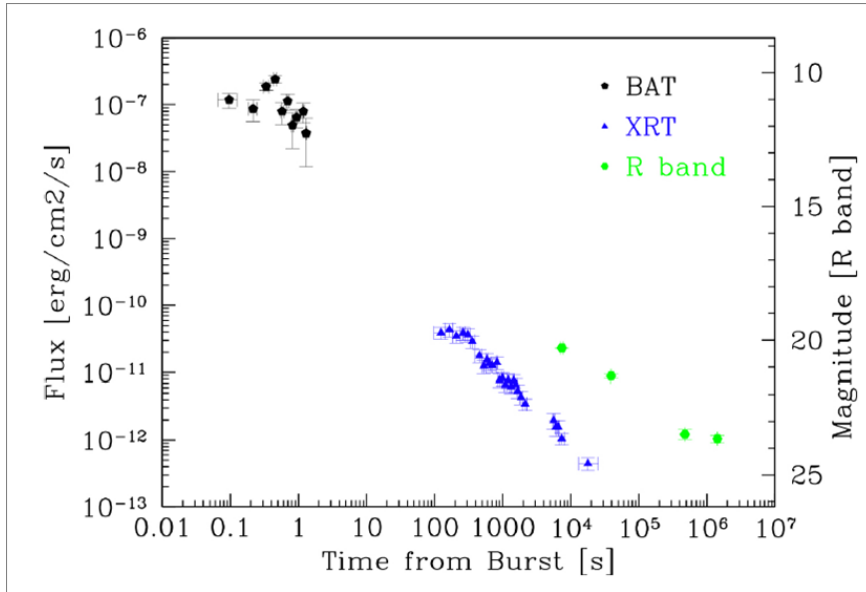


図 5.11: Antonelli et al. による光度曲線。R バンドのデータは最初の 1 点が Yunnan 観測所で得られたデータ (Mao et al. 2009) であり、残りの 3 点は TNG で得られたものである。発生から 22 日以降の R バンドの光度曲線がフラットになっている様子が分かる

の 2 つのコンポーネントからなるジェットによる残光を時間差を持って観測したというモデルである (イメージは図 5.12。Racusin et al. 2008 より引用)。このような GRB 残光を観測したと考えられる例として GRB991216 (Frail et al. 波長域は電波)、GRB080319B (Racusin et al. 波長域は X 線) などが報告されている。

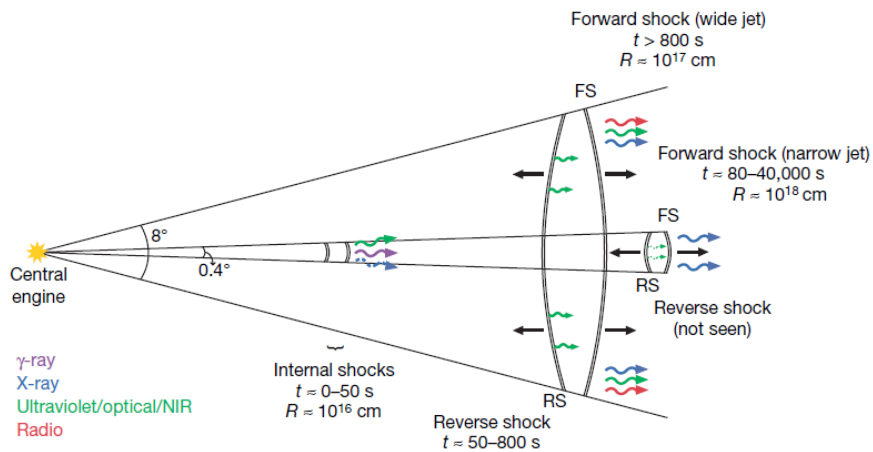


図 5.12: 異なる成分を持つジェットの観測のイメージ図

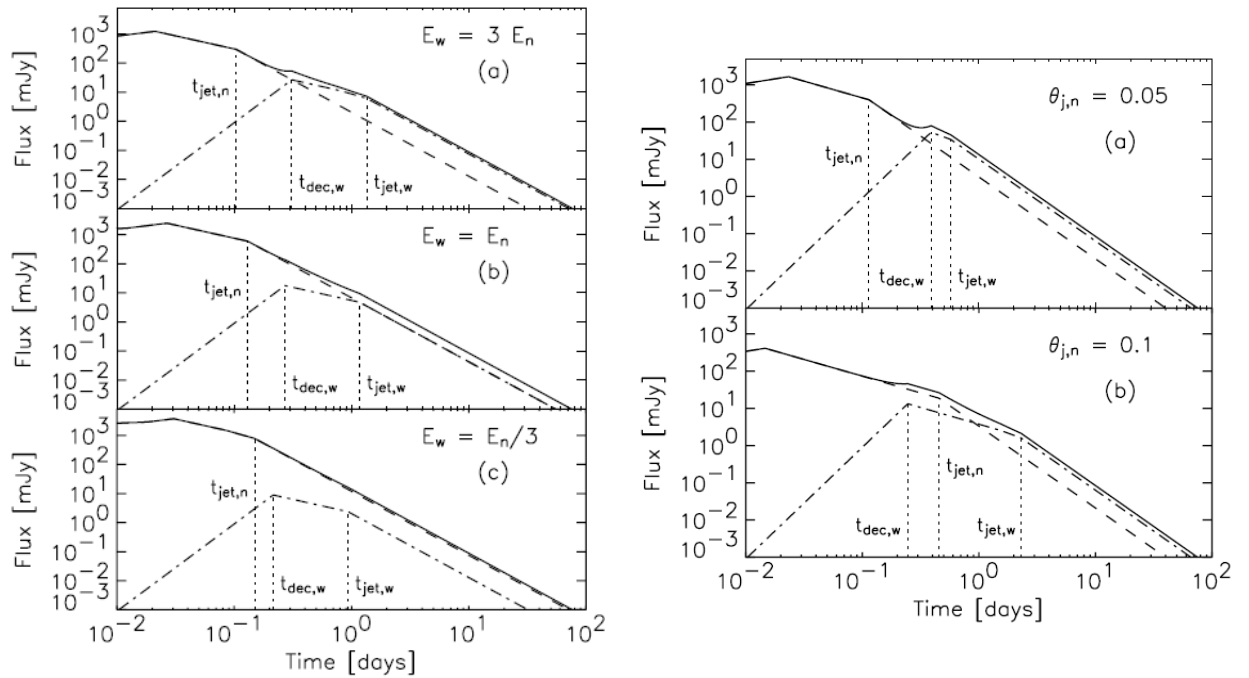


図 5.13: 2成分を持つジェットモデルから考えられる光度曲線。(左) narrow jet と wide jet のエネルギー比 (E_w/E_n) を変えた場合の光度曲線。ジェットの開き角 (θ_w, θ_n) などの他のパラメータは固定している。(右) E_w/E_n を 2、 θ_w/θ_n を 2 に固定し、 θ_n を変えた場合の曲線を描いている (Peng et al. 2005)

このモデルではまず narrow jet 成分による残光が検出され、そのあと遅れて wide jet 成分による残光が見られる。この時間差はこれらのジェットのエネルギー比やジェットの開き角などによって振る舞いが変わってくる (図 5.13 参照)。

今後の課題として、2つのジェットのエネルギーや開き角などを折れ曲がり時間や水素の柱密度などの観測事実から見積もり、モデルとの整合性を確かめていく必要がある。

第6章 結論

我々は2台の可視光望遠鏡と1台の近赤外線望遠鏡を用いて、GRBの残光を多色同時観測し、GRBの放射機構の解明を目指している。またGRBの赤方偏移を決定し、これを用いて初期宇宙の探査を行っている。

本研究ではまず明野50cm望遠鏡のSystem変換係数を求めるための観測を行った。この係数を求めたことにより明野の測光システムと標準的な測光システムとの変換式を求めることができた。

次に、岡山天体物理観測所で長時間にわたって観測することに成功したGRB090426の解析を行った。System変換係数を用いてGRB090426の測光を行ったことで、他の研究機関で得られた結果と比較することが可能となった。その結果、発生から約2000秒後の減光のべきはYunnan観測所、TNGの結果と一致することがわかったが、これより前の時間の減光のべきは異なるという振る舞いを見せることがわかった。この結果より、我々はこのGRBは2つの成分のジェットが時間差を持って観測されたと考えた。

今後の課題として、2つのジェットのエネルギーや開き角の比などを見積もり、モデルとの整合性を確かめていく必要がある。

付録 A 参照星の等級

A.1 参照星の測光結果

各高度での参照星の等級は以下のように得られた。

	g'	Rc	Ic
参照星 1	15.50 ± 0.015	14.82 ± 0.014	14.39 ± 0.016
参照星 2	14.71 ± 0.010	13.85 ± 0.009	13.35 ± 0.009

表 A.1: 高度 $\sim 65^\circ$ の時の参照星の等級

	g'	Rc	Ic
参照星 1	15.46 ± 0.015	14.82 ± 0.013	14.41 ± 0.016
参照星 2	14.70 ± 0.010	13.87 ± 0.009	13.36 ± 0.009

表 A.2: 高度 $\sim 72^\circ$ の時の参照星の等級

	g'	Rc	Ic
参照星 1	15.51 ± 0.015	14.85 ± 0.014	14.40 ± 0.017
参照星 2	14.73 ± 0.010	13.87 ± 0.009	13.35 ± 0.009

表 A.3: 高度 $\sim 81^\circ$ の時の参照星の等級

A.2 参照星のカタログ値

本文でも書いたように、GSC2.3 に載っている値は B バンドと V バンドである (表 A.4)。この 2 バンドの値から g' バンドへの変換式は Smith et al. 2002 に経験式が報告されてい

る。これによると、以下の式で変換される。

$$g' = V + 0.54(B - V) - 0.07 \quad (\text{A.1})$$

この式を用いて g' バンドの値を算出した。なお、エラーについては誤差伝播の法則から求めた。

	B	V	g'
参照星 1	15.62±0.412	15.02±0.337	15.27±0.377
参照星 2	15.12±0.412	14.18±0.338	14.62±0.378

表 A.4: GSC2.3 のカタログ値と、これより算出した g' バンドの等級

付録B フォーカス値に関する問題点

B.1 概要

天体を観測する際に、望遠鏡のフォーカスを合わせることは非常に重要である。適切なフォーカスで撮像しなかった場合、星像が大きく歪んでしまい、天候に恵まれても解析には適さないデータばかりとなってしまう。

我々は明野望遠鏡のフォーカスの値を決める際に、それは副鏡を支える金属の伸縮にのみ依存すると考え、鏡筒温度とフォーカス値は一次関数の関係にあるとしていた(石村修論 2008)。

実際に、温度がそれほど高くない時期はこのモデルでよく近似できていたが、ある温度を境に折れ曲がりを見せ、さらに日没直後に取ったフォーカス値は極端に小さい値になってしまい、このようになる原因もはっきりとさせることはできなかった。本研究とは直接の関係はないが、特に夏場において明野望遠鏡で観測をする際に問題となるのでここで私が行った調査を簡単にまとめておく。

B.2 Focus 値

まず、我々がどのようにフォーカス値を決定しているかを記す。

始めに、フォーカス値を 23mm にしておき撮像を行う。そこからこの値を徐々に小さくしそのたびに撮像し、22mm まで行う。各画像において星像の FWHM 値の平均値をとり、2 次関数でフィッティングを行い最小値を取るフォーカス値を Bestfocus と定義している。

B.3 問題となっている事柄

温度が高くなると熱膨張によって副鏡と主鏡間の距離が大きくなるので副鏡を主鏡側に近づける方向に動かす必要がある(この向きを focus 値の正の向きに取っている)。つまり、温度が高いとそれだけ Bestfocus は大きくなると考えられ、実際に温度がそれほど高

くない範囲ではこのモデルは正しいことが実測値によって裏付けられている。

しかし、図 B.1 のプロットにあるように比較的温度が高い時期になると以下のような問題が生じた。

- ある温度 (287K 付近) を境に Bestfocus 値が下がる傾向が見られる。
- 日没直後に取ったフォーカス値 (図 B.1 のプロットでは FOCUS1 がこれにあたる) はモデルとずれてしまい、特に 8 月、9 月は著しく小さな Bestfocus 値を取っている。

B.4 調査

この問題に対して、行った調査を以下に記す。

B.4.1 自動解析と手動解析

自動で出力している結果と、以下に示すような手法で求めたフォーカス値とで違いが生じるかを調べた。

解析手法

1. 画像内からなるべく中央に近い場所に位置している明るい星をピックアップ
2. この星の FWHM 値とフォーカス値をプロット
3. 2 次関数でフィッティング

結果

おおよそモデルと合っていると思われる日、著しく異なっている日の例を一つずつ取り、手動解析の結果とプロット、自動解析の結果を併記する。

結果より、それほど大きな違いは見られない。また他の日に関しても有意に値が変化しているデータは見られなかった。

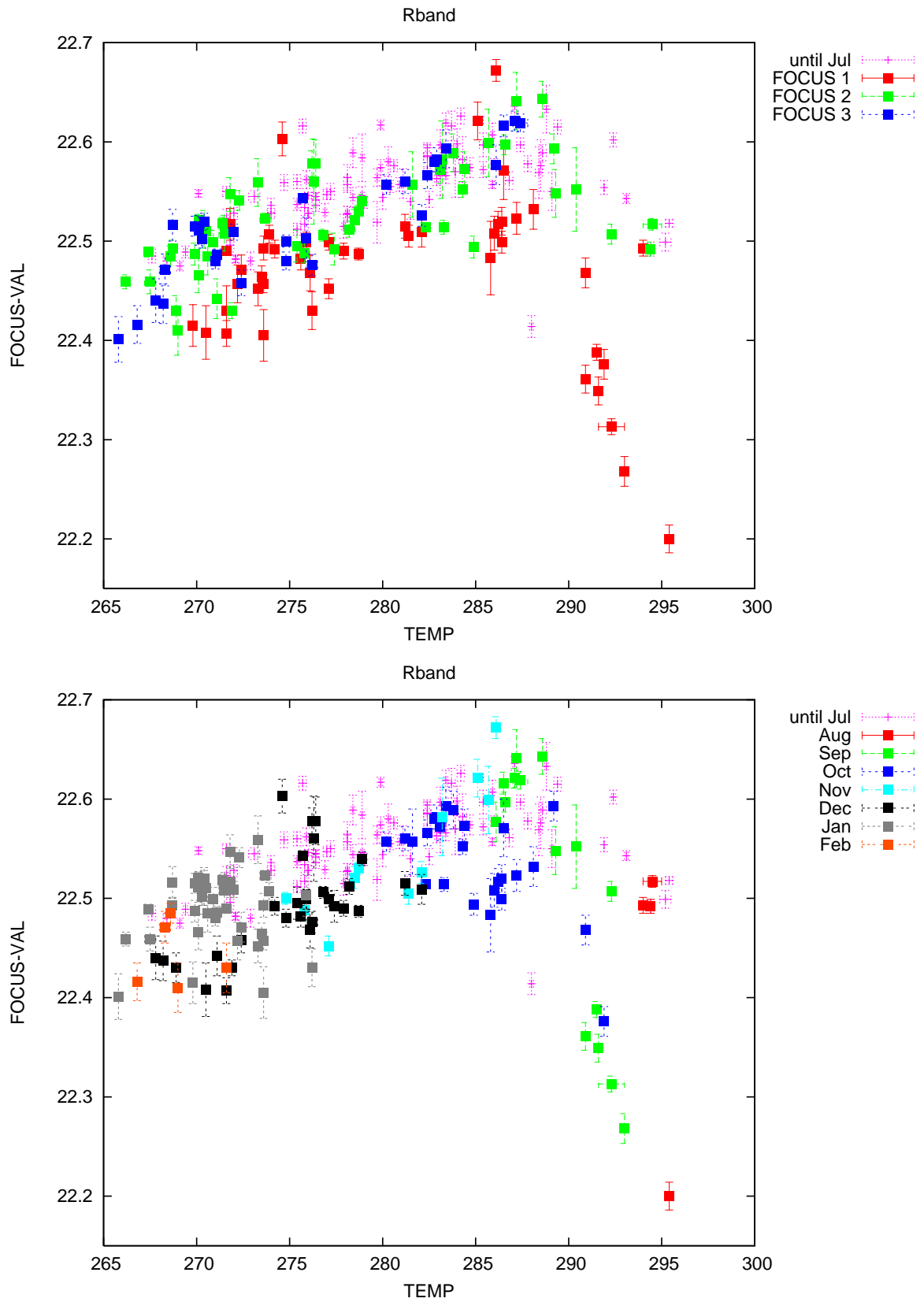


図 B.1: (上) 時間帯による変化 (FOCUS1:19 時頃、FOCUS2:0 時頃、FOCUS3:4 時頃) (下) 月ごとの変化: 例えば上図で緑かつ下図で青であれば、10月の真夜中に取られたデータを表す

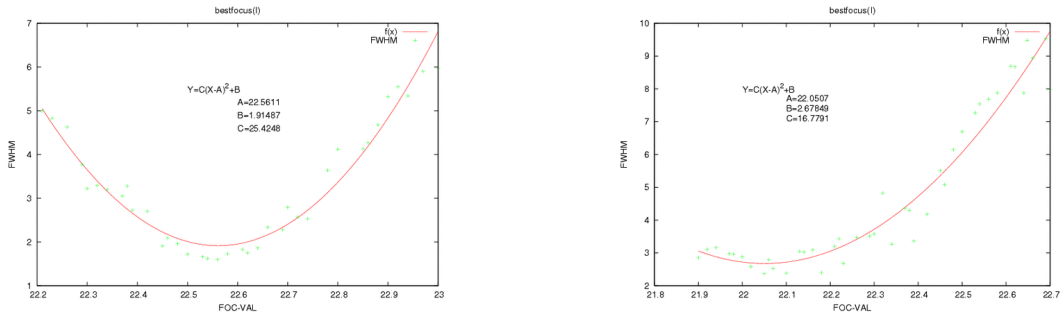


図 B.2: (左)5/26 focus2 (右)8/24 focus1。このグラフは自動解析により出力されたものである。

Date	temp	FWHM(手動)	FWHM(自動)
5/26 focus 2	288.6	22.56±0.01	22.54±0.01
8/24 focus 1	293.1	22.05±0.03	22.10±0.01

表 B.1: 自動解析と手動解析の比較

B.4.2 副鏡の振動の影響

フォーカスモデル用のデータは1frameあたり10秒の撮像を行っている。この時、副鏡が振動したまま撮像しているのではないかと議論になったので、同じFocus値に対し、3回撮像するようにした。

結果

ここでもモデルと合っていると考えられる日、異なっている日の一つずつ選び、回数ごと及び自動解析の結果を載せる。日付やバンドによっては曲線の開きが回数ごとで異な

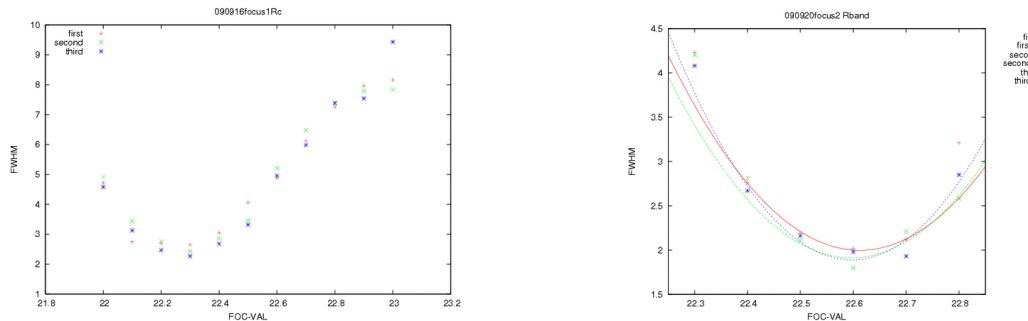


図 B.3: (左)9/16 focus1 (右)9/20 focus2

first	second	third	auto analysis
22.25±0.03	22.29±0.01	22.30±0.01	22.31±0.01

表 B.2: 9/16 Focus1 temperature=291.7

first	second	third	auto analysis
22.61±0.01	22.60±0.03	22.60±0.01	22.60±0.01

表 B.3: 9/20 Focus2 temperature=291.8

る場合もあるものの、2 次関数の軸の位置と自動解析の結果が大きく異なるようなデータはやはり見られなかった。

B.4.3 aperture 変化

画像中心付近の明るめの星を 4 つ適当にピックアップし、それらを aperture 半径を変えて測光を行った。flux が半分になる aperture をその星における FWHM と考え、以上をフォーカス値を変えながらデータを取った。用いたデータは 9/17 east(後述) の 3 回目の撮像で得られたものであり、結果はこれと比較する。

結果

今回のデータに対しては 2 次関数でのフィッティングを行っていないので定量的な事は言えないが、いずれのプロットも Focus 値が 22.5 付近で最も小さくなっているので、この手法でも有意な違いは見られなかった。

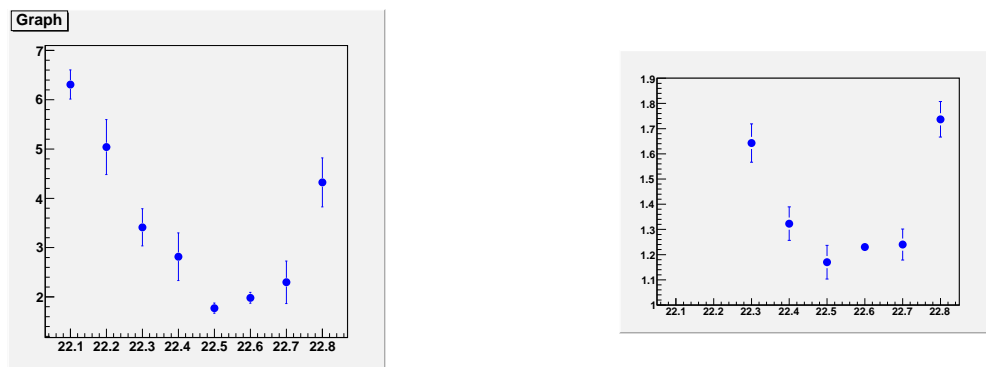


図 B.4: (左)4 つの FWHM 値の平均値 vs フォーカス値 (右)aperture vs フォーカス値

B.4.4 望遠鏡の導入方向

そのほかに、望遠鏡の導入方向によって違いが生じるかを調べるために

1. ある方向に 45 度望遠鏡を傾ける
2. 天頂付近に望遠鏡を向ける
3. 各 FOCUS 値に対して 3 回ずつ撮像

を東西南北の 4 方向に対して行った。

結果は方角による違いが現れたが、この 1 セットのみデータしか取っていないのでこの違いが有意なものであるか、たまたま生じたものであるかはわからない。

B.5 今後の課題

今回の調査でははっきりとした原因を突き止めることはできなかった。まだ調査が完了していない項目として

- 導入方向の違いは 1 晩のデータのみしか調べていないので、導入方向による違いが本当に存在するかをさらに調べる必要がある。
- 他の天候的な要因 (湿度など) との関連性があるのか
- 日没後、どのくらいの時間をおいて FOCUS1 の撮像を開始しているか。

などが挙げられる。いずれにせよ、早急な原因の解明と対策、フォーカスのモデル化が求められる。

関連図書

- [1] 石村拓人 修士論文 2008
- [2] 谷津陽一 修士論文 2005
- [3] 下川辺隆史 修士論文 2007
- [4] 森由希 卒業論文 2008
- [5] 下川辺隆史 2009年河合研究室ミーティング発表資料
- [6] 佐藤理江 卒業論文 2002
- [7] 柳澤顕史 MITSuME 標準星 2005
- [8] Klebesadel, Strong & Olson 1973, ApJ, 182, L85
- [9] Meegan et al. 1992, Nature, 355, 143
- [10] Costa et al. 1997, Nature, 387, 783
- [11] Paradijs et al. 1997, Nature, 386, 686
- [12] Hjorth et al. 2003, Nature, 423, 847
- [13] Yonetoku et al. 2004, ApJ, 609, 935
- [14] Ostriker & Gnedin 1996, ApJ, 472, L63
- [15] Salvaterra et al. 2009, Nature, 461, 1258
- [16] Zhang 2009, Nature, 461, 1221
- [17] Rees & Meszaros 1994, ApJ, 430, L93
- [18] Sari, Piran & Narayan 1998, ApJ, 497, L17

- [19] Rhoads 1999, ApJ, 525, 737
- [20] Harrison et al. 1999, ApJ, 523, L121
- [21] Schlegel, Finkveiner & Davis 1998, ApJ, 500, 525
- [22] Smith et al. 2002, AJ, 123, 2121
- [23] Monet et al. 2003, AJ, 125, 984
- [24] Cummings et al. 2009, GCN Circ., 9254
- [25] Xin et al. 2009, GCN Circ., 9255
- [26] D'Avanzo et al. 2009, GCN Circ., 9256
- [27] Osborne et al. 2009, GCN Circ., 9259
- [28] Guidorzi et al. 2009, GCN Circ., 9262
- [29] Sato et al. 2009, GCN Circ., 9263
- [30] Levesque et al. 2009, GCN Circ., 9264
- [31] Oates & Cummings 2009, GCN Circ., 9265
- [32] Yoshida et al. 2009, GCN Circ., 9266
- [33] Yoshida et al. 2009, GCN Circ., 9267
- [34] Olivares et al. 2009, GCN Circ., 9268
- [35] Thoene et al. 2009, GCN Circ., 9269
- [36] Ukwatta et al. 2009, GCN Circ., 9272
- [37] Mao et al. 2009, GCN Circ., 9285
- [38] Kinugasa et al. 2009, GCN Circ., 9292
- [39] Rumyantsev et al. 2009, GCN Circ., 9312
- [40] Wijers & Galama 1999, ApJ, 523, 177

- [41] Antonelli et al. 2009, arXiv:0911.0046
- [42] Levesque et al. 2009, MNRAS submitted(arXiv:0907.1661)
- [43] Peng, Konigl & Granot 2005, ApJ, 626, 966
- [44] Frail et al. 2000, ApJ, 538, L129
- [45] Racusin et al. 2008, Nature, 455, 183

謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方々にお世話になりました。指導教官の河合誠之先生には、ゼミやミーティングをはじめ、データの解析、解釈で行き詰った時に的確なアドバイスを頂きました。

谷津陽一助教には観測からデータの解析まで様々な教育をして頂きました。森由希氏、中嶋英也氏には望遠鏡の運用や観測方法、解析などを一から教えてくださり、相談にも乗って頂きました。ご協力いただきありがとうございます。

河合研究室、陣内研究室のメンバーには研究生活以外の面でもお世話になりました。楽しい研究室生活を過ごすことができた事に感謝しています。

最後に、本研究を支えてくださった皆様に感謝いたします。ありがとうございました。