

MITSuME 望遠鏡パトロール観測システムの開発

案西 由希

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科 河合研究室

学籍番号 03_27764

2008年 2月 27日

要旨

我々は、山梨県明野にある MITSuME 望遠鏡を使って、GRB(ガンマ線バースト) という、宇宙で最も明るい爆発現象に伴う可視残光を観測してきた。この可視残光を観測することは、GRB のメカニズムの解明や宇宙の初期構造を理解する上でとても重要である。

GRB は突発的に発生するため、Swift などの衛星が全天をモニターしており、GRB を検出した場合、その位置情報をインターネットを通して発信している。MITSuME 望遠鏡では、この情報をもとに自動で GRB の可視残光を観測することに成功してきた。

しかし、衛星が GRB を検出した場合に送られてくる GRB のアラートは、週に 1,2 例であり、2007 年に送られてきたアラート数は 144 例である。そのうち明野望遠鏡で実際に観測した GRB は 17 例にすぎない。そのため、週の半分以上は他の天体を観測可能である。これまでは GRB を観測していない間は、キャリブレーション用のデータや、AGN (活動銀河核) などを手動で観測してきた。しかし、手動での観測にはマンパワーが必要となし、ヒューマンエラーも起こりやすく、効率的な運用ではない。

今回、GRB 観測時以外も望遠鏡を効率よく運用し、AGN など GRB 以外の天体を観測するために、天体リストをもとにスケジュールを組み、自動観測するためのパトロール観測システムを導入した。

このシステムを導入することで、一晩に 10 天体以上の観測に成功した。観測した 10 天体以上のデータをすべて手動で解析することは、少人数で運営している MITSuME 望遠鏡チームにとって大きな負担である。そこで、観測したデータから最適なフレームを選択し、解析・測光、光度変化のグラフ作成を自動で行う機能を追加した。

本論文では、パトロール観測システムの概要と構成について説明し、システム導入後の観測結果について述べる。

目次

第1章	はじめに	10
1.1	ガンマ線バーストとMITSuMEプロジェクト	10
1.1.1	ガンマ線バースト	10
1.1.2	ガンマ線バースト観測衛星とGCNアラート	10
1.1.3	MITSuME望遠鏡	12
1.2	活動銀河核とは	15
1.2.1	AGNの種類	15
第2章	パトロール観測システム	17
2.1	システム導入前の状況	17
2.2	システム導入後に期待される成果	18
2.2.1	多波長観測	18
2.3	システムの概要	20
2.4	パトロール観測の流れ	23
2.4.1	観測天体の決定	24
2.4.2	雨天時の処理	27
2.4.3	曇りの判定と曇り時の処理	27
2.4.4	GRB自動観測	28
第3章	天体リスト作成インタフェース	31
3.1	登録天体検索	31
3.2	登録天体詳細情報	32
3.3	登録天体の新規追加	33
3.4	観測予定表示画面	34
3.5	天体リストファイル作成画面	35

第 4 章	解析・測光・光度曲線の作成	37
4.1	依存ソフトウェア	38
4.2	FITS	38
4.3	フレームの選別	39
4.3.1	WCSMATCH による選別	40
4.3.2	BG-LEVEL による選別	43
4.4	ダークフレームの作成	45
4.5	フラットフレームの作成	46
4.6	リダクションと重ね合わせ	46
4.7	相対測光	48
4.8	光度曲線の作成	50
第 5 章	パトロール観測結果	52
5.1	観測天体の選択	52
5.2	観測日数	54
5.3	解析天体	55
5.4	光度曲線	56
5.5	まとめ	61
第 6 章	まとめと今後	62
付録 A	参照星	63
A.1	1ES0120+340	63
A.2	3C66A	64
A.3	AO0235+16	64
A.4	PKS0403-132	65
A.5	1ES0647+250	66
A.6	S50716+71	67
A.7	PKS0735+178	68
A.8	OI287	68
A.9	PKS0754+100	69
A.10	1ES0806+524	70
A.11	S50836+71	70

A.12 OJ287	71
A.13 S40954+65	72
A.14 1ES1011+496	72
A.15 1ES1028+511	73
A.16 Mkn180	74
A.17 RGBJ1136+676	74
A.18 4C49.22	75
A.19 TON599	76
A.20 ON325	76
A.21 1ES1218+304	77
A.22 3C273	78
A.23 3C279	78
A.24 PG1424+240	79
A.25 3C336	80
A.26 3C345	80
A.27 3C371	81
付録B 測光範囲	82
B.1 AO0235+16	82
B.2 PKS0735+178	82
B.3 1ES1218+304	83
付録C 3C454.3の観測	84
C.1 明野望遠鏡の観測データ	84
C.2 Suzaku衛星の観測データ	85

目 次

1.1	BATSE による GRB の天球分布図	11
1.2	BeppoSax 衛星が検出した GRB970228 の X 線残光	11
1.3	ハッブル望遠鏡による GRB970228 の可視残光	11
1.4	GCN の概念図	12
1.5	可視残光の自動観測の流れ	12
1.6	明野望遠鏡	13
1.7	波長帯域と透過率	13
1.8	3 色同時撮像カメラ	14
2.1	ブレーザーのスペクトル	18
2.2	GLAST 衛星の予想図	19
2.3	パトロール観測システム構成図	21
2.4	1 晩の自動観測の流れ	23
2.5	ディザリングの概念図	26
2.6	ディザリングパターンの種類	26
3.1	検索画面	32
3.2	登録天体詳細情報	33
3.3	新規追加画面	34
3.4	観測予定画面	35
3.5	登録データによる天体リストファイル作成画面	36
4.1	FITS 画像	39
4.2	08/02/01 の全観測フレーム	40
4.3	08/02/01 の 20.5 時 ~24.5 時の観測フレーム	41
4.4	WCSMATCH による選別	42
4.5	08/02/01 の BG-LEVEL が平坦な部分のフレーム	43
4.6	08/02/01 の解析に使うフレーム	44

4.7	ダークフレーム	45
4.8	フラットフレーム	46
4.9	フレームの重ね合わせ	48
4.10	aperture photometry の概念図	49
4.11	1ES0806+524 の光度曲線 (横軸日付)	51
4.12	1ES0806+524 の光度曲線 (横軸 MJD)	51
5.1	1ES0120+340 の光度曲線	56
5.2	3C66A の光度曲線	56
5.3	AO0235+16 の光度曲線	57
5.4	PKS0403-132 の光度曲線	57
5.5	1ES0647+250 の光度曲線	57
5.6	S50716+71 の光度曲線	57
5.7	OI287 の光度曲線	57
5.8	PKS0754+100 の光度曲線	57
5.9	1ES0806+524 の光度曲線	58
5.10	S50836+71 の光度曲線	58
5.11	OJ287 の光度曲線	58
5.12	S40954+65 の光度曲線	58
5.13	1ES1011+496 の光度曲線	58
5.14	1ES1028+511 の光度曲線	58
5.15	Mkn180 の光度曲線	59
5.16	RGBJ1136+676 の光度曲線	59
5.17	4C49.22 の光度曲線	59
5.18	TON599 の光度曲線	59
5.19	ON325 の光度曲線	59
5.20	1ES1218+304 の光度曲線	59
5.21	3C273 の光度曲線	60
5.22	3C279 の光度曲線	60
5.23	PG1424+240 の光度曲線	60
5.24	3C336 の光度曲線	60
5.25	3C345 の光度曲線	60

5.26 3C371 の光度曲線	60
A.1 1ES0120+340 と参照星の画像	63
A.2 3C66A と参照星の画像	64
A.3 AO0235+16 と参照星の画像	64
A.4 PKS0403-132 と参照星の画像	65
A.5 1ES0647+250 と参照星の画像	66
A.6 S50716+71 と参照星の画像	67
A.7 PKS0735+178 と参照星の画像	68
A.8 OI287 と参照星の画像	68
A.9 PKS0754+100 と参照星の画像	69
A.10 1ES0806+524 と参照星の画像	70
A.11 S50836+71 と参照星の画像	70
A.12 OJ287 と参照星の画像	71
A.13 S40954+65 と参照星の画像	72
A.14 1ES1011+496 の参照星の画像	72
A.15 1ES1028+511 と参照星の画像	73
A.16 Mkn180 と参照星の画像	74
A.17 RGBJ1136+676 と参照星の画像	74
A.18 4C49.22 と参照星の画像	75
A.19 TON599 と参照星の画像	76
A.20 ON325 と参照星の画像	76
A.21 1ES1218+304 と参照星の画像	77
A.22 3C273 と参照星の画像	78
A.23 3C279 と参照星の画像	78
A.24 PG1424+240 と参照星の画像	79
A.25 3C336 と参照星の画像	80
A.26 3C345 と参照星の画像	80
A.27 3C371 と参照星の画像	81
B.1 AO0235+16 の測光範囲	82
B.2 PKS0735+178 の測光範囲	83
B.3 1ES1218+304 の測光範囲	83

C.1	3C454.3 の光度曲線 (明野望遠鏡のデータ)	84
C.2	Suzaku 衛星の概観	85
C.3	3C454.3 のスペクトル (Suzaku 衛星によるデータ)	86
C.4	3C454.3 の光度曲線 (Suzaku 衛星によるデータ)	86

表 目 次

1.1	明野 50 cm 望遠鏡の仕様	13
1.2	CCD カメラ Alta U6 の仕様	14
1.3	g , I_c , R_c の有効中心波長と透過曲線の半値幅	15
2.1	GLAST の概要	19
2.2	MAXI に搭載予定の検出器	20
2.3	スケジュール観測システムの構成	22
2.4	スケジュール天体リストの構成	25
2.5	気象データファイルの構成	28
2.6	GCN データファイルの構成	30
5.1	優先観測リスト	52
5.2	観測日数リスト	54
5.3	解析天体リスト	55
A.1	1ES0120+340 と参照星の座標	63
A.2	3C66A と参照星の座標	64
A.3	AO0235+16 と参照星の座標	65
A.4	PKS0403-132 と参照星の座標	65
A.5	1ES0647+250 と参照星の座標	66
A.6	S50716+71 と参照星の座標	67
A.7	PKS0735+178 と参照星の座標	68
A.8	OI287 と参照星の座標	69
A.9	PKS0754+100 と参照星の座標	69
A.10	1ES0806+524 と参照星の座標	70
A.11	S50836+71 と参照星の座標	71
A.12	OJ287 と参照星の座標	71
A.13	S40954+65 と参照星の座標	72

A.14 1ES1011+496 と参照星の座標	73
A.15 1ES1028+511 と参照星の座標	73
A.16 Mkn180 と参照星の座標	74
A.17 RGBJ1136+676 と参照星の座標	75
A.18 4C49.22 と参照星の座標	75
A.19 TON599 と参照星の座標	76
A.20 ON325 と参照星の座標	77
A.21 1ES1218+304 と参照星の座標	77
A.22 3C273 と参照星の座標	78
A.23 3C279 と参照星の座標	79
A.24 PG1424+240 と参照星の座標	79
A.25 3C336 と参照星の座標	80
A.26 3C345 と参照星の座標	81
A.27 3C371 と参照星の座標	81
B.1 AO0235+16 Aperture Parameters	82
B.2 PKS0735+178 Aperture Parameters	82
B.3 1ES1218+304 Aperture Parameters	83
C.1 Suzaku 衛星の検出器	85

第1章 はじめに

1.1 ガンマ線バーストとMITSuMEプロジェクト

1.1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst: GRB) は宇宙のある一点から数 keV~ 数 MeV のエネルギーをもつ X 線・ γ 線が爆発的に放射される現象で、宇宙でもっとも規模の大きい爆発現象である。GRB の継続時間は平均的には数秒 ~ 数十秒ほどと非常に短い、そのフラックスは 1cm^2 あたり 100 counts 以上にもなる。

GRB は 1960 年代に核実験監視衛星 Vela によって予期せず発見された (Klebesadel, Strong & Olson 1973) が、その後 30 年ほど正体は謎のままであった。1991 年に打ち上げられたコンプトンガンマ線天文衛星に搭載された 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、全天球で等方的な分布をしていることが明らかになった (Meegan et al., 1992: 図 1.1)。1997 年、イタリア・オランダの X 線・ γ 線に観測衛星 BeppoSAX によって、GRB 発生後数日にわたって継続する X 線残光が発見され (Costa et al., 1997: 図 1.2)、その後地上望遠鏡で可視光域の残光も発見された (van Paradijs et al., 1997: 図 1.3)。HETE-2 衛星によって 2003 年に発見された GRB030329 の残光スペクトルに超新星起源の成分が観測され、GRB の起源が、数 ~ 数十億光年先の銀河で起こる大質量星が爆発し、ブラックホールになるときに発生することが確実視されている。

1.1.2 ガンマ線バースト観測衛星と GCN アラート

GRB の残光は時間とともに急激に暗くなるため、発生直後から追観測する必要がある。この要求に応えるため、衛星が GRB を捉えると、その発生位置を衛星上で計算し、位置情報をインターネットで世界中に通報する、GRB 位置情報ネットワーク (the Gamma ray burst Coordinate Network: GCN) が構築されている (図 1.4)。この GCN アラートによって、世界中で可視光残光による GRB の研究が進展した。

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

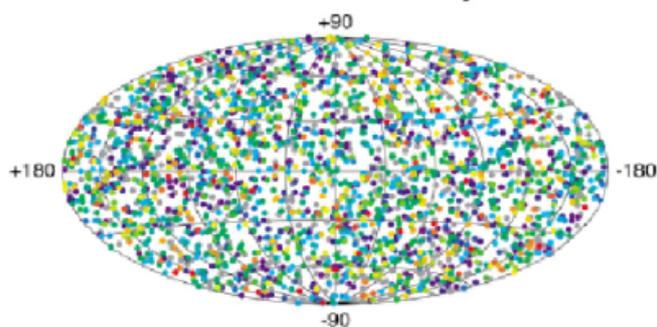


図 1.1: BATSE (CGRO) によるガンマ線バースト 2403 個の天球分布図。全天球で平均的な分布をしていることがわかる。

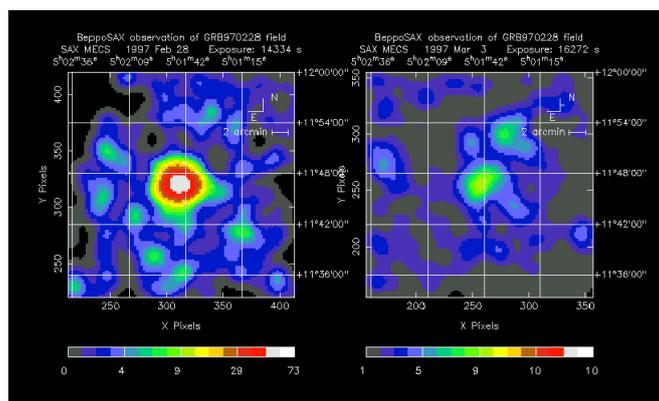


図 1.2: BeppoSax 衛星によって発見されたガンマ線バースト GRB970228 の X 線残光。左側が GRB 発生約 8 時間後、右側が GRB 発生約 3 日後。X 線残光が減光していることがわかる。

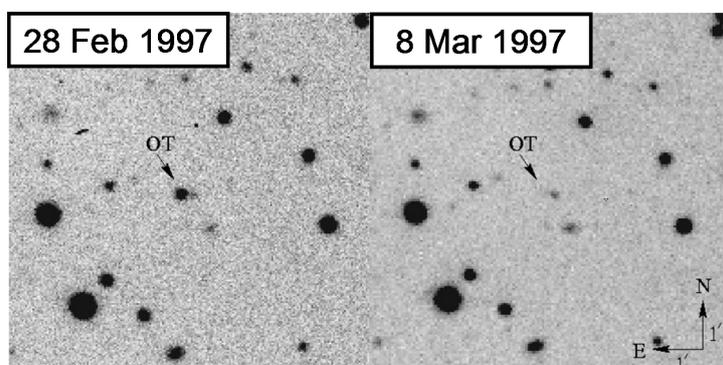


図 1.3: ハッブル望遠鏡による GRB970228 の可視残光。左側が GRB 発生約 21 時間後、右側が GRB 発生約 9 日後。可視残光が減光していることがわかる。

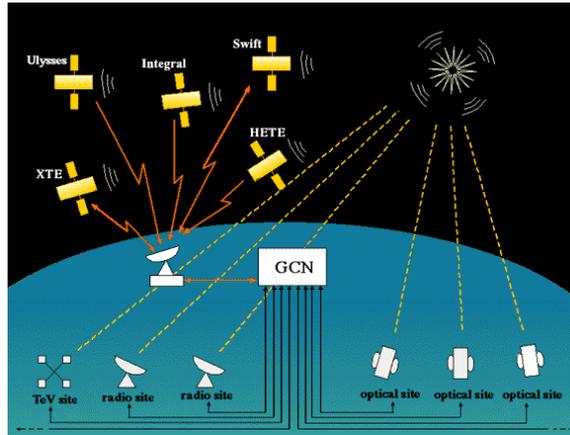


図 1.4: GCN の概念図

1.1.3 MITSuME 望遠鏡

GRB の早期可視残光を観測することは、GRB の放射機構の解明や、GRB をプローブとする初期宇宙探査にとって重要である。MITSuME 望遠鏡は、GRB の可視残光を追観測するために、東大宇宙線研明野観測所の可視 50 cm 望遠鏡、国立天文台岡山天体物理観測所の可視 50 cm 望遠鏡と赤外 91 cm 望遠鏡の 3 台の総称である。東工大では、明野観測所の可視 50 cm 望遠鏡の開発を運営を担当している。3 台の望遠鏡により、 g , r , i , Z , J , H , K (図 1.7) にわたる多波長観測が可能である。GRB 発生直後から可視残光を観測するため、GCN アラートを受信すると、その GCN で送られてきた位置情報をもとに自動観測が行われている (図 1.5)。

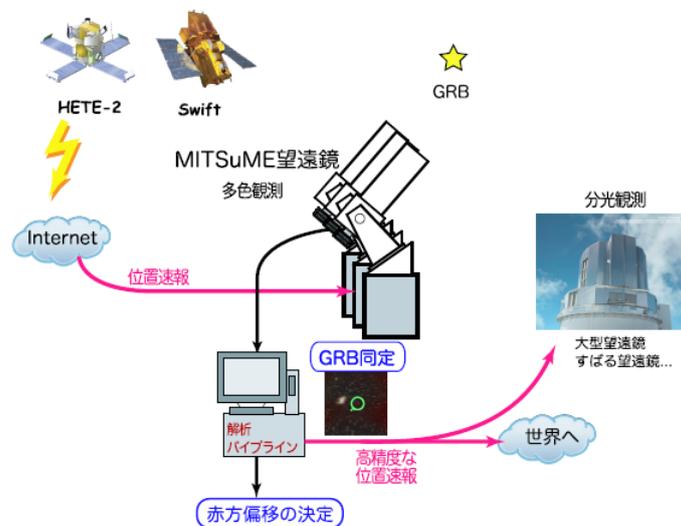


図 1.5: 可視残光の自動観測の流れ。衛星からの位置速報によって GRB を自動観測し、高精度な位置情報を決定する。



図 1.6: 明野望遠鏡

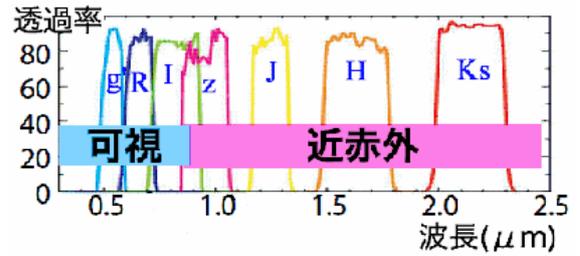


図 1.7: 波長帯域と透過率

我々が運営している明野 50 cm 望遠鏡 (図 1.6) は、口径 50 cm、視野 28 分角 × 28 分角で、*g*, *R*, *I* バンドの 3 色の CCD カメラ (図 1.8) を持ち、3 色同時撮像が可能である。望遠鏡の仕様を表 1.1 に示す。

設置位置	
所在地	山梨県北杜市明野町 東京大学宇宙線研究所附属明野観測所
座標	東経 138.4806° , 北緯 35.7866° , 高度 900 m
光学式	
形式	カセグレン型反射望遠鏡
有効直径	500 mm
副鏡口径	160 mm
焦点距離	3000 mm
口径比	F6
有効視野	28 分角
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
駆動速度	最大 3° /sec
ドーム	
形状	半径 2 m, 半球型
1 回転時間	最速 40 sec

表 1.1: 明野 50 cm 望遠鏡の仕様

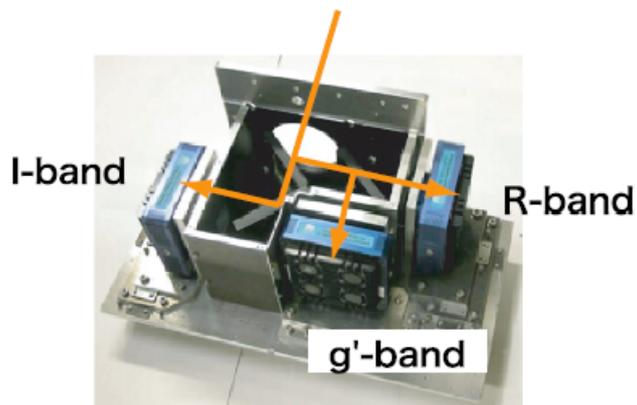


図 1.8: 3 色同時撮像カメラ。内部の 2 枚のダイクロックミラーで望遠鏡から入射した光束を 3 方向に分ける。分割された光は各バンドのフィルターを通過し、CCD カメラに入射する。

望遠鏡から入射した光をダイクロックミラーで 3 つの光線に分割し、 g' バンド (SDSS) , R_c , I_c バンド (John-Cousins) フィルターを通して各 CCD カメラに入射させることで、3 色同時撮像を行うことができる。各バンドの有効中心波長と半値幅を表 1.3 に示す。CCD カメラは Apogee 社製の Alta U6 である。仕様を 1.2 に示す。

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	550,000 e^-
Digital Resolution	16 bit
Exposure Time	20msec - 183min
Cooling	ペルチェ素子 + 送風による冷却 (外気温-50)
PC Interface	USB 2.0

表 1.2: CCD カメラ Alta U6 の仕様

システム	バンド	有効中心波長 [Å]	透過曲線	FWHM [Å]
SDSS	<i>g'</i>	4858		1297
Johnson	Ic	8785		1706
Jhonson	Rc	6930		2096

表 1.3: *g'*, Ic, Rc の有効中心波長と透過曲線の半値幅

1.2 活動銀河核とは

活動銀河核 (Active Galaxy Nuclei: AGN) は銀河中心の狭い領域から、銀河全体と同程度もしくはそれ以上のエネルギーを放出している天体である。その放射光度は $\sim 10^{38-48}$ erg/s にもなる。電波や X 線領域で「非」星起源の放射を出しており、数日から数百日のタイムスケールで急激に放射光度が変化する。AGN の中心には超大質量ブラックホールが存在し、その周辺に降着円盤が形成されていると考えられている。降着円盤から物質が落ち込むときに、物質の重力エネルギーが解放され、大量のエネルギーが放射されていると考えられている。

AGN は 1943 年に Carl Seyfert によって初めて観測され、Seyfert はいくつかの銀河が非常に明るい中心核をもつことを発見した。この銀河は幅の広い輝線を持ち、現在ではセイファート銀河という AGN の 1 種類に分類されている。

1.2.1 AGN の種類

AGN の中には軸方向にジェットが噴き出しているものもあり、輝線の幅や、電波領域の放射強度によって複数の種類に分けられている。

現在、AGN には次のような種類がある。

- セイファート銀河 (Seyfert galaxy)
- 電波銀河 (radio galaxy)
- クェーサー (quasar)
- ブレーザー (blazar)

セイファート銀河

コンパクトで明るい中心核を持ち、幅の広い輝線スペクトルを示す。電波領域ではそれほど明るくなく、比較的近傍の宇宙にある。スペクトルの輝線が広いものと狭いもの両方あるものがI型、狭いものしか存在しないものがII型に分類される。

銀河中心に近く、放射物質のガス雲が激しく運動している領域では、ドップラ効果で光の波長が変化し、幅の広い輝線が出る。この領域をBLR (Broad Line Region) という。逆に、銀河中心から離れているためにガス雲の運動が激しくなく、幅が比較的狭い輝線を出している領域をNLR (Narrow Line Region) という。

電波銀河

通常銀河に比べて非常に強い電波を放出しており、電波ジェットを持つものもある。セイファート銀河と同じように、輝線の幅で、広いものがI型、狭いものがII型に分けられる。

クェーサー

1963年に、Martin Schmidtによって初めて同定されたAGNである。Schmidtは3C273の水素のスペクトル線が大きな赤方偏移を示すことを発見した。非常に離れた距離にありながら極めて明るく輝いているために、恒星のような点光源に見える天体 (quasi-stellar object) を略して、Quasar、QSOと呼ばれる。

ブレイザー

AGNの中には中心核から銀河の回転軸にほぼ平行な双方向に細長い構造を持つものがあり、これをジェットと呼んでいる。ジェットはプラズマの噴流で、速度は光速近くまである。このジェットを真正面から観測していると考えられているのがブレイザーである。ジェットによるべき型の強い放射機構に埋もれて輝線がほとんど見えない。ブレイザーの中には、きわめて明るく、強い輝線をもたないBL Lac銀河 (BL Lac galaxy) が含まれる。

第2章 パトロール観測システム

2.1 システム導入前の状況

GRBは突発的に起るため、すべてのGRBを衛星が検出できるわけではない。さらに地上での追観測では天候や、GRBの高度によって、観測できる割合は大きく下がる。衛星が検出するGRBの個数を年約150個、晴れている割合を5割、観測できる高度にある割合を5割とすると、観測できるのは年に約40個、週に1回程度である。2007年にSWIFT衛星が検出したGRBの数は144例 [14] であるが、このうち明野望遠鏡で観測できたのは17例 [3] である。

このように、明野望遠鏡では週の半分以上でGRB以外の天体を観測することが可能である。これまでは、望遠鏡の開発期間であったため、GRB観測時以外には、キャリブレーション用のデータを手動で撮ることが多く、X線連星系SS433を始めGRB以外の天体を手動で観測したのは数回にとどまる。

開発期間が終了し、運用期間に移行するにあたり、キャリブレーション用の観測が少なくなったため、AGNなどGRB以外の天体の観測を増やすことができるようになった。また、常にGRBを観測できる状態にしておくために、空き時間に他天体を観測し、望遠鏡の状態をチェックすることも重要である。

このような背景があり、今回の研究では、

- GRB観測時以外での望遠鏡の稼働率をあげる
- 観測を自動化し、手動観測のときより多数の天体を観測する
- 観測したデータを自動解析し光度変化をチェックする

ことを目的に、パトロール観測システムの開発を行った。

2.2 システム導入後に期待される成果

MITSuME 望遠鏡の3色同時撮像による可視光のデータは多波長観測のキャンペーンに貢献することが期待できる。実際、2006年のX線連星系SS433と、2007年のブレーザー3C454.3の多波長観測キャンペーンに参加し手動で観測を行った。

2.2.1 多波長観測

天体の放射機構を解明するには、電波からX線・ γ 線にわたる広い波長での観測が必要である。AGNの1種であるブレーザーのスペクトルでは、可視光域とX線・ γ 線域に2つのピークがあり、可視光域のピークはシンクロトロン放射によるもの、一方、X線・ γ 線域のピークは逆コンプトン散乱によるものというように、波長によって、対応する放射機構が異なる。2つの放射機構の関連性をみるためには、低エネルギー側と高エネルギー側の両方の観測が必要となる。

MITSuME 望遠鏡でこのような天体を可視光観測することで、X線や γ 線衛星との多波長観測に貢献できる。

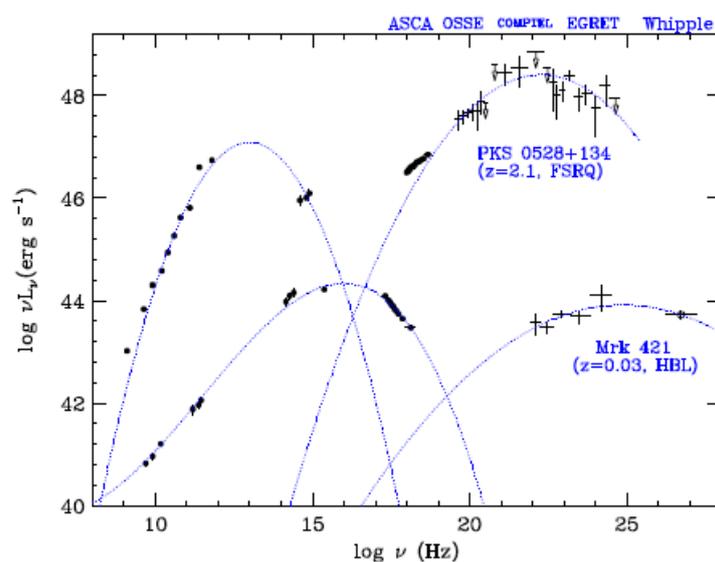


図 2.1: ブレーザー天体 Mrk421 と PKS 0528+134 の多波長スペクトル。両天体とも、低エネルギー側と高エネルギー側にピークを持つことがわかる。

2008年打ち上げ予定の γ 線観測衛星GLASTや、X線監視装置MAXIは全天のモニター観測を行う。同じ天体をMITSuME望遠鏡でも観測することができれば、可視光と γ 線、可視光とX線などの多波長観測が可能である。また、GLAST衛星打ち上げ後は多波長観

測のキャンペーンが増えるため、これらの衛星が打ちあがる前に、同時観測が出来る環境を整えておくことが重要となる。

GLAST

GLAST (The Gamma Ray Large Area Space Telescope) (図 2.2) は 2008 年 5 月に打ち上げ予定の 線天文衛星であり、米国スタンフォード大学を中心に、日本 (広島大、宇宙研、東工大)、イタリア、フランス、スウェーデンなどの国際共同プロジェクトである。1990 年代に活躍した CGRO 衛星搭載 EGRET 検出器の後継であり、50 MeV~300 GeV のエネルギー範囲の観測が可能である。LAT (Large Area Telescope) 検出器と GBM (GLAST Burst Monitor) 検出器 (表 2.1) を搭載し、大質量ブラックホール、中性子星の合体、ジェット、GRB の観測を目的としている。GLAST に搭載予定の検出器は、入射ガンマ線の方角とエネルギーを同時に決定することができ、数分角の空間分解能を誇る。常時全天の約 20% を視野に入れているため、GRB のような突発天体を検出直後から観測できる。

検出器	LAT (Large Area Telescope) , GBM (GLAST Burst Monitor)
有効面積	11,000 cm ²
視野	2 sr
観測エネルギー範囲	20 MeV ~ 300 GeV
エネルギー分解能	10 %
空間分解能	3.5° (@ 100 MeV), 0.15° > 10 GeV

表 2.1: GLAST の概要



図 2.2: 2008 年 5 月打ち上げ予定の 線観測衛星 GLAST の予想図

MAXI

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は2008年に国際宇宙ステーションに搭載予定の全天 X 線監視装置である。理化学研究所、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、青山学院大、大阪大、東工大、日本大学などの共同研究プロジェクトとして進められている。6台の Gas Slit Camera (GSC) と2台の Solid-state Slit Camera (SSC) の2種類の X 線検出器 (表 2.2) が搭載され、GSC で2~30keV、SSC で0.5~10keV のエネルギー範囲の観測が可能である。

全天にわたる X 線源の強度変化の監視を行い、中性子星やブラックホールの連星系、活動銀河核の長期的な監視と、突発的な X 線天体现象の早期発見を目的としている。宇宙ステーションの周回運動によって、約 90 分で全天をサーベイでき、連続的な全天監視が可能である。

	GSC(Gas Slit Camera)	SSC(Solid-state Slit Camera)
検出器	比例計数管	X 線 CCD
全面積	5,340 cm ²	200 cm ²
視野	160° × 1.5° × 2 方向	90° × 1.5° × 2 方向
観測エネルギー範囲	2~30 keV	0.5~10 keV
エネルギー分解能	18 % (@ 6 keV)	2 % (@ 6 keV)
位置分解能	1.5 mm (@ 6 keV)	24 μm

表 2.2: MAXI に搭載予定の検出器

2.3 システムの概要

パトロール観測システムの構成図を図 2.3 に示す。

明野望遠鏡でパトロール観測を行うために、岡山の MITSuME 望遠鏡に実装されている、自動でスケジュール観測を行うプログラム (ObsSuperVisor) を移植した。

明野望遠鏡には、岡山にはない自動解析パイプライン (下川辺 修士論文, 2007) があるため、移植した ObsSuperVisor とのインタフェースを新たに追加した。さらに、GRB の自動観測の導入速度を上げるため、これまでは、GCN アラートの情報をファイルでやり取りしていたが、直接通信を行うためにソケット通信に改良した。

つまり、明野望遠鏡のパトロール観測システムは、移植した岡山のシステムに

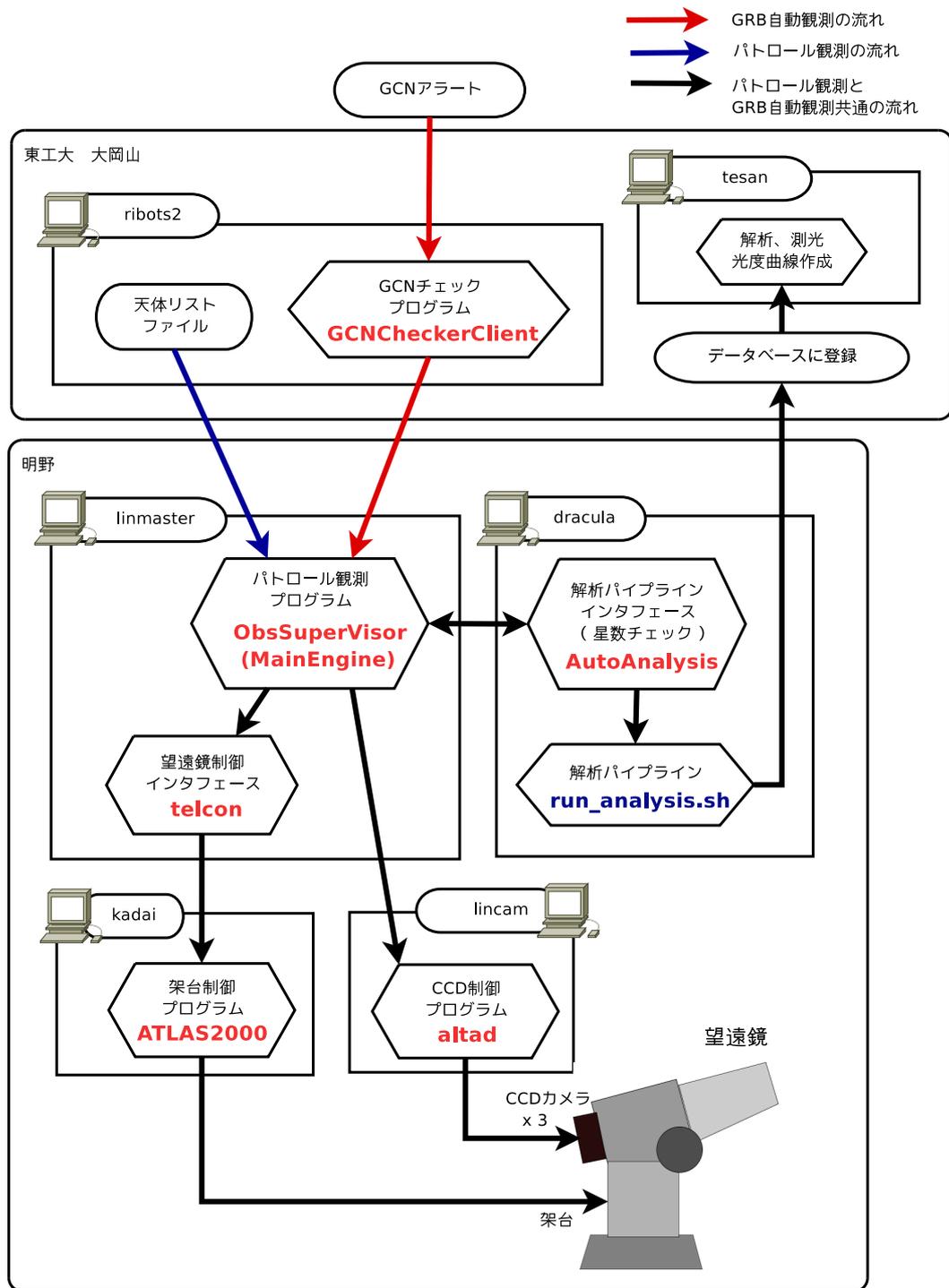


図 2.3: パトロール観測システム構成図。赤線は GRB 自動観測の流れ、青線はスケジュールモード観測システムの流れ、黒線は両方共通の流れである。

- 自動解析パイプラインへのインタフェース (AutoAnalysis)
- GCN アラートを受信している PC とのインタフェース (GCNCheckerClient)

- 観測天体のリストを編集するための web ページ (3章で述べる)
- 撮像データの解析・測光・光度曲線の作成機能 (4章で述べる)

が追加され、観測スケジュールの作成、パトロール観測、自動解析、GRB 自動観測を統括したシステムになっている。

明野望遠鏡を制御するシステムは大きく分けて表 2.3 の 6 個のプログラムから構成される。観測スケジュールを組み、自動観測を行う ObsSuperVisor は 30 以上の Java クラスからなるプログラムである。ソケット通信用や、天体の位置計算用など、機能ごとにクラスが分かれている。ObsSuperVisor から呼び出された MainEngine クラスが、telcon を通じて ATLAS2000 にコマンドを送り、望遠鏡を観測天体に向けたり、ドームの開閉、キャップの開閉を行う。また、altad にソケット通信でコマンドを送り、撮像を行う。撮像したデータに対して AutoAnalysis が自動解析パイプラインを呼び出し、データから抽出された天体数で曇かどうか判断し、MainEngine に判断結果を送る。GCNCheckerClient が GCN アラートによって生成されるファイルを監視しており、GCN アラートファイルが更新された場合、その GRB のデータを MainEngine に送り GRB の自動観測モードに移行する。

プログラム	PC	機能
ObsSuperVisor	linmaster	システム全体を統括する
(MainEngine	linmater	望遠鏡を制御する、ObsSuperVisor から呼び出される)
telcon	linmaster	ATLAS2000 と MainEngine の間のインタフェース
altad	lincam	CCD を制御し撮像する
ATLAS2000	kadai	架台を制御し望遠鏡を動かす
AutoAnalysis	dracula	自動解析へのインタフェース、星数をチェックし曇か判断する
GCNCheckerClient	ribots2	新しい GCN アラートが来ているかチェックする

表 2.3: スケジュール観測システムの構成

2.4 パトロール観測の流れ

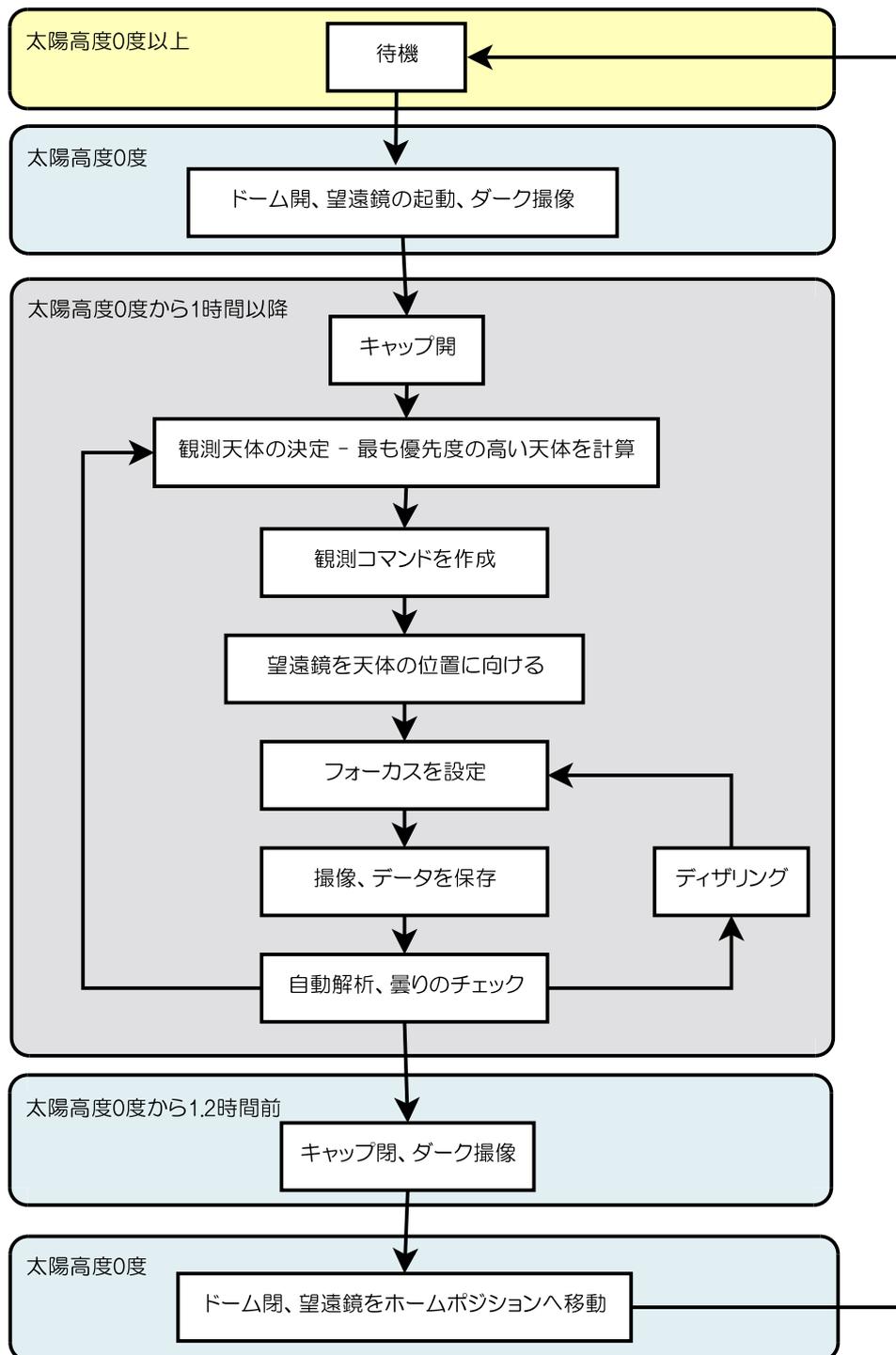


図 2.4: 1 晩の自動観測の流れ

図 2.4 にパトロール観測の流れを示す。太陽高度が 0 度未満になると、トワイライトモードをスタートする。トワイライトモードでは、ドームを開き、ダークフレームを撮像する。ダークフレームについては、4 章で説明する。現在ダークフレームは 60s 秒露出と 30

秒露出で撮像しているが、任意の露出時間を設定可能である。トワイライトモードから1時間経つとスケジュールモードをスタートし、キャップを開く。スケジュールモードでは現時刻でもっとも優先度の高い天体を計算し、その天体を観測する。撮像枚数や露出時間はあらかじめ天体リストに記述されている。設定された撮像枚数を全て撮り終わると、その時刻で再度、もっとも優先度の高い天体を計算し、その天体を観測する。これを太陽高度が0度になる1.2時間前まで繰り返す。太陽高度が0度になる1.2時間前にダウンモードをスタートする。ダウンモードでは、キャップを閉じてダークフレームを撮像する。太陽高度が0度になるとドームを閉じ、トラッキングをストップし、望遠鏡をホームポジションに移動し、待機モードになる。

2.4.1 観測天体の決定

観測天体はスケジュール天体リストのなかから、現時刻で最も優先度の高い天体を計算し決定する。以下にスケジュール天体リストの構成を示す。

スケジュール天体リスト - varstar.dat

観測する天体の名前、赤経 (Ra)、赤緯 (Dec)、重要度、露出時間、観測枚数、デザインパターンが書込まれた天体リストファイル。このなかから、もっとも優先度の高い天体を計算し、自動観測する。このファイルは、ribots2上の天体リスト管理用データベースから作成される。天体リスト管理用データベースについては次章で説明する。

スケジュール天体リストファイル varstar.dat

```
#NEWFORMAT
#####
#name epoch ra          dec          mura mudec pr    exp m_no m_set d_pat
#####
0J287 2000 08:54:48.90 20:06:31.00 0.0 0.0 100.0 60 1 1 1
3C66A 2000 02:22:39.60 43:02:08.00 0.0 0.0 100.0 60 1 1 1
...
```

要素名	説明
name	天体名、撮像データのヘッダに書き込まれる
epoch	Epoch
ra	赤経 [hms]
dec	赤緯 [dms]
mura	相対運動、通常は 0.0
mudec	相対運動、通常は 0.0
pr	重要度
exp	露出時間
m_no	各ディザリング位置で撮像する枚数
m_set	ディザリングセットの最大数
d_pat	ディザリングパターン 1: $3 \times 3 = 9$ 枚 2: $2 \times 2 = 4$ 枚

表 2.4: スケジュール天体リストの構成

ディザリングパターンと撮像枚数

ディザリングとは、1回の撮像ごとに観測領域を数十秒角程度ずらしながら観測する方法である (図 2.5)。これを行うことで、CCD チップ上の欠陥ピクセルの影響を除去することや、望遠鏡のトラッキングの影響で画像上に現れるパターンを軽減することができる。トラッキングとは、地球の自転によって観測天体が天球上を動くので、それに合わせて望遠鏡が動くことである。

パトロール観測システムでは 30 秒角ずつずらしてディザリングを行う。観測対象天体の座標を中心に 9 点を巡回しながら撮像するパターンと、観測対象天体の座標を左下に 4 点を巡回しながら撮像するパターンの 2 種類設定できる (図 2.6)。

さらに、ディザリングの各点で撮像する枚数 (`m_no`) も指定できる。例として、ディザリングのパターンを 9 点、各点での撮像枚数を 2 枚とすると、観測対象天体を中心にした位置で 2 枚撮像し、上に 30 秒角移動し 2 枚撮像する。次の点に移動して 2 点撮像し、これを 9 点で行い、1 セットで 18 枚撮像する。

このディザリング 1 セットを 1 晩で最大何回行うか (`m_set`) を設定でき、そのセット数以上はその天体を撮像しない。

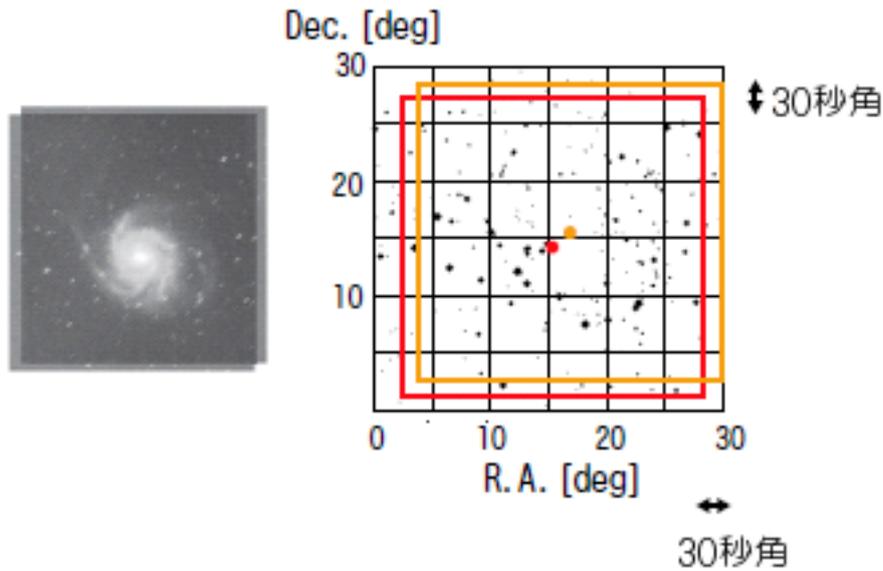


図 2.5: ディザリングの概念図。左側:ディザリングを行って撮像した2枚のデータを重ね合わせたもの。右側:観測領域をカタログ上に示したもの。

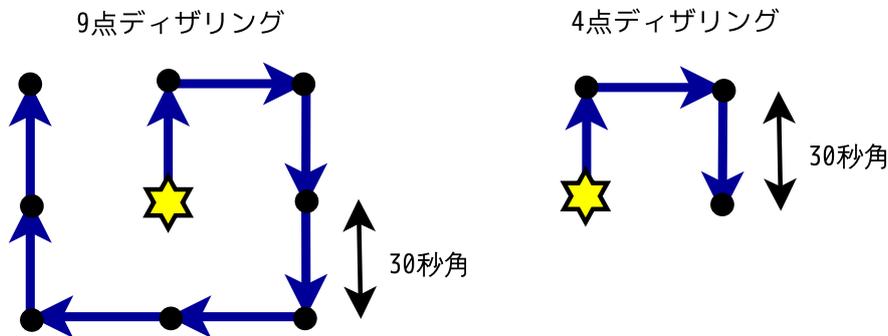


図 2.6: ディザリングパターンの種類。左が9点ディザリング。右が4点ディザリング。それぞれの黒点で撮像する。

優先度の計算式

優先度で決める上で重要となるのが、天体の高度、月との離角である。高度が低いと、大気による吸収が大きくなり、街の光の影響で全体のカウント値が上がってしまう。また、月の近くでは、月の光の影響で全体のカウント値が上がってしまう。全体のカウント値が大きいと、天体のカウント値に対するバックグラウンドが大きくなり、データの質が落ちてしまう。そのため、優先度の計算式は、高度が高く、月から離れた天体の優先度が高くなるようにしなければならない。パトロール観測システムでは以下の式で優先度を計算している。

$$mV = pr \times elev + 2.0 \times pr \times \sqrt{md} \quad (2.4.1)$$

ここで、 mV が優先度、 $elev$ が天体の高度 [degree]、 md が月との離角 [degree]、 pr が設定されている重要度である。

2.4.2 雨天時の処理

雨や風速が強い場合、ドームを閉じて望遠鏡を保護しなければならない。そのため、雨滴センサーや気象モニターからのデータを、随時ファイルに書き出している (rain.out, weather.out)。ObsSuperVisor がそのファイルを読み込み、対応した処理を行う。雨が降っている場合、またはドーム内湿度が限界値よりも大きい場合、または風速が限界値よりも大きい場合を BadWeather として検知し、ドームを閉じ望遠鏡をストップする。ドーム内湿度および風速の限界値は外部設定ファイルで設定し、現時点では限界湿度が 95.0 BadWeather の状態から戻って 15 分後にドームを開け、望遠鏡をスタートし、パトロール観測を再開する。以下に気象データファイル (weather.out) と雨滴データファイル (rain.out) のファイル形式を示す。

気象データファイル - weather.out

```
Time:2008/01/21 21:38
Inside Temperature: 1.1 Celcius
Telescope Temperature: 0.2 Celcius
Inside Humidity: 0 %
Pressure: 0 millibar
Wind Speed: 0 m/s
Wind Direction: 270
```

雨滴データファイル - rain.out

```
2008-01-21 13:23:41.999
1=0
```

```
1=0 not rain
1=1 rain
```

2.4.3 曇りの判定と曇り時の処理

曇り時に観測したデータは解析に使えないため、観測データから「曇り」と判断した場合は観測を一時ストップしている。曇りと判定する方法として、自動解析パイプラインの

要素	説明
Time	日時
Inside Temperature	ドーム内温度
Tlescope Temperature	鏡筒温度
Inside Humidity	ドーム内湿度
Pressure	気圧
Wind Speed	風速
Wind Direction	風向

表 2.5: 気象データファイルの構成

結果を使用している。撮像したデータは自動解析パイプラインを通過し、データベースに登録される。その際に星像が検出され、この検出数が設定値より少ない場合は曇りと判断し、ObsSuperVisor に「NOSTAR」を返し、多い場合は晴れと判断し、「STAR」を返す。ObsSuperVisor は送られてきたコマンドが「NOSTART」の場合、望遠鏡を 10 分間ストップし、その後再スタートする。現在は曇りと判定する g' バンドの星数は 50 個に設定しているが、今後曇りの基準のよって変更する予定である。

2.4.4 GRB 自動観測

MITSuME 望遠鏡は GRB の可視残光を観測するために作られた望遠鏡なので、GRB 以外の天体を観測中に GCN アラートを受け取った場合、即座に GRB の観測に移行しなければならない。GCN アラート受信 PC (ribots2) では、GCN アラートを受け取ると、その GCN のデータのファイル (gcn.call.data) が生成される。これまではこのデータファイルを明野に送っていたが、今回、GRB 自動観測の導入速度を上げるため、ソケット通信に改良した。現在では、この GCN データファイルから赤経、赤緯を読み出し、そのデータをソケット通信で明野に送っている。明野側のパトロール観測システムは、受け取った GRB のデータを、優先度が一番高くなるように、重要度を高くして天体リストに追加する。他天体を撮像中であれば中止し、GRB のデータが追加された天体リストを読み込んで GRB の観測に移行する。現在の GCN データファイルの形式には GRB の発生時刻がないため、GRB の発生時刻、衛星が GCN アラートを送った時刻が追加される予定である。

GCN データファイル - gcn_call.data

```
NOTICE_DATE 1198850000
NOTICE_TYPE 67
SN          1
GRB_RA      90.1307
GRB_DEC     65.9831
GRB_ERR     0.090
GRB_TIME    14461
RATE_SIG    6.00
IMAGE_SIG   0.00
COMMENTS    SWIFT GRB XRT_pos
SOLN_STATUS 0
```

キーワード

NOTICE_DATE	大岡山で GCN を受け取った時刻。1970/01/01 00:00:00 UTC からの経過秒
NOTICE_TYPE	GCN のパケット番号。GRB を検出した衛星、検出器によってことなる。 現在使用している番号 Swift BAT による位置情報 : 61 Swift XRT による位置情報 : 67 INTEGRAL による位置情報 : 55
SN	各日に起った GRB のシリアル番号
GRB_RA	GRB の赤経 [degree]
GRB_DEC	GRB の赤緯 [degree]
GRB_ERR	エラーサークルの半径 [arcmin]
GRB_TIME	バースト発生日 [TJD]
RATE_SIG	GRB 検出した rate trigger の S/N
IMAGE_SIG	GRB 検出した image trigger の S/N
COMMENTS	GRB を検出した衛星・検出器名
SOLN_STATUS	検出されたソースの種類番号。衛星・検出器で異なる。

表 2.6: GCN データファイルの構成

第3章 天体リスト作成インタフェース

パトロール観測で観測天体を指定する天体リストファイルは、天体情報が羅列されたテキストファイルなので、どのような天体がリストに載っているのかわかりにくく、重要度が高く設定されている天体がどれなのか探るのが大変である。また、直接ファイルを編集すると、記述ミスや天体の重複を行ってしまう可能性がある。

どのような天体が天体リストに登録されており、その天体の重要度や撮像枚数などの設定値を簡単に検索できることは、観測天体を変更する上で作業の軽減につながる。さらに、直接ファイルを編集せずに、web ページ上から登録データの編集作業を行うことで、登録するデータの値や形式をチェックでき、誤った形式のデータの登録を防止できる。

この要求に答えるために SQLite [15] という簡易データベースに天体を登録し、検索・更新・追加・観測予定リストを表示する web インタフェースを作成した。

SQLite とは、組込み式 SQL データベースエンジンで、MySQL や PostgreSQL などの大部分のデータベースと大きく異なり、普通のディスクファイルに直接読み書きをする。そのため、ファイルをコピー・移動するだけで、他の PC 上でそのデータベースを読み書きすることができる。一般的なデータベースよりは、検索機能のあるファイル処理に近く、もともとファイルで処理していた天体リストの編集に適している。

3.1 登録天体検索

天体リストにどのような天体が登録されているのか、その天体の撮像枚数や重要度が検索できれば、天体の登録データを変更するときや、新たに天体を追加するときに、非常に便利である。

図 3.1 のページでは、登録されている天体を、名前、赤経 (Ra)、赤緯 (Dec)、種類で検索することができる。表示順は、名前順、赤経順、重要度順から選択でき、観測しない天体を表示させないこともできる。表示されたリストの名前をクリックすると、詳細情報 (図 3.2) を見ることができる。

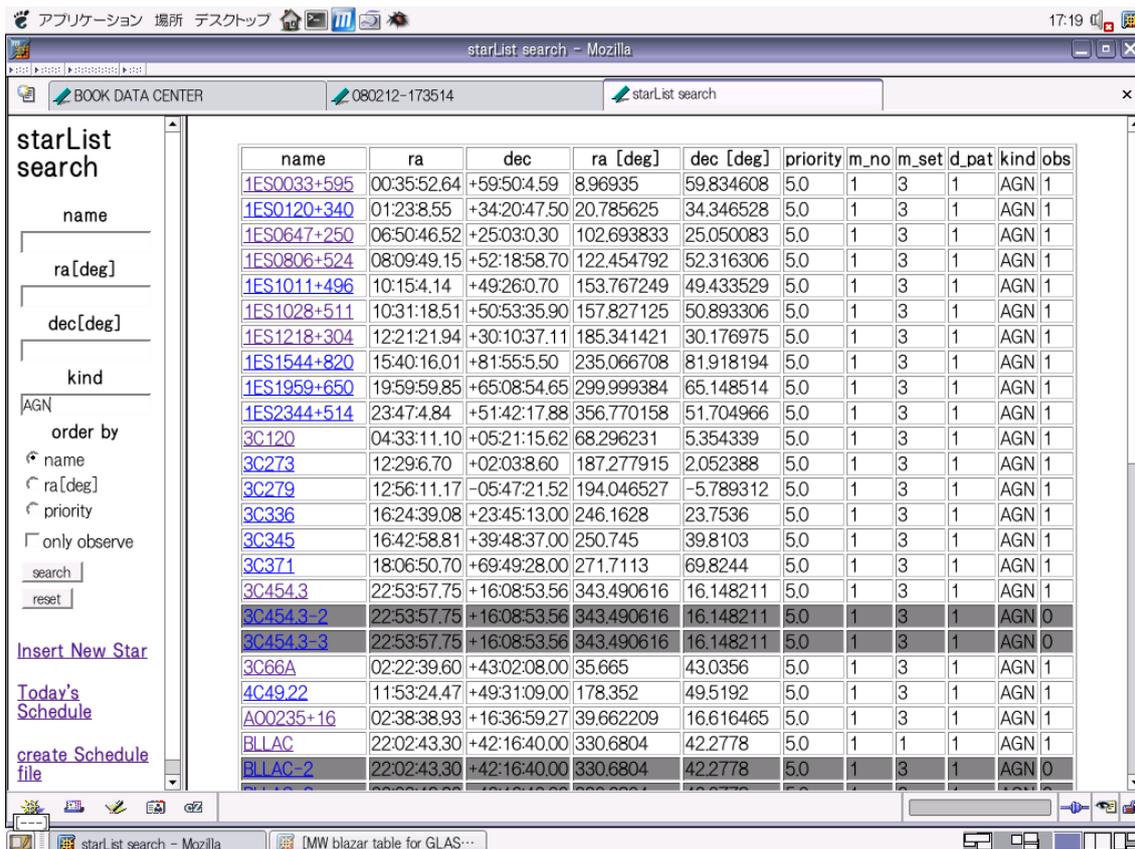


図 3.1: 検索画面

3.2 登録天体詳細情報

登録天体の情報に加え、その天体が今晚の何時にどの高度にあるのかがわかれば、観測できるかどうか分かる。そのため、図 3.2 のページでは、天体の観測データに加え、今晚の高度グラフが表示される。これにより、この天体が観測可能かどうか一目で分かる。また、DSS (The STScI Digitalized Sky Survey) から取得した画像も表示され、撮像したデータと比較するのに便利である。

登録天体観測データとして、名前 (Name)、Epoch(epoch)、赤経 (Ra[hms] と Ra[deg])、赤緯 (Dec[dms] と Dec[deg])、重要度 (priority)、露出時間 (exp time)、各ディザリング点での撮像枚数 (m_no)、撮像セット数 (m_set)、ディザリングパターン (d_pat)、観測するかどうか (observe)、種類 (kind)、観測場所 (Site) が表示される。

このページから、重要度 (priority)、撮像枚数 (m_no, m_set)、ディザリングパターン (d_pat)、観測するかどうか (observe)、天体の種類 (kind) を変更することができる。登録データ変更時には、すべての項目のデータが入力されているかチェックし、空のデータがあった場合、変更せずにデータの入力を促す。

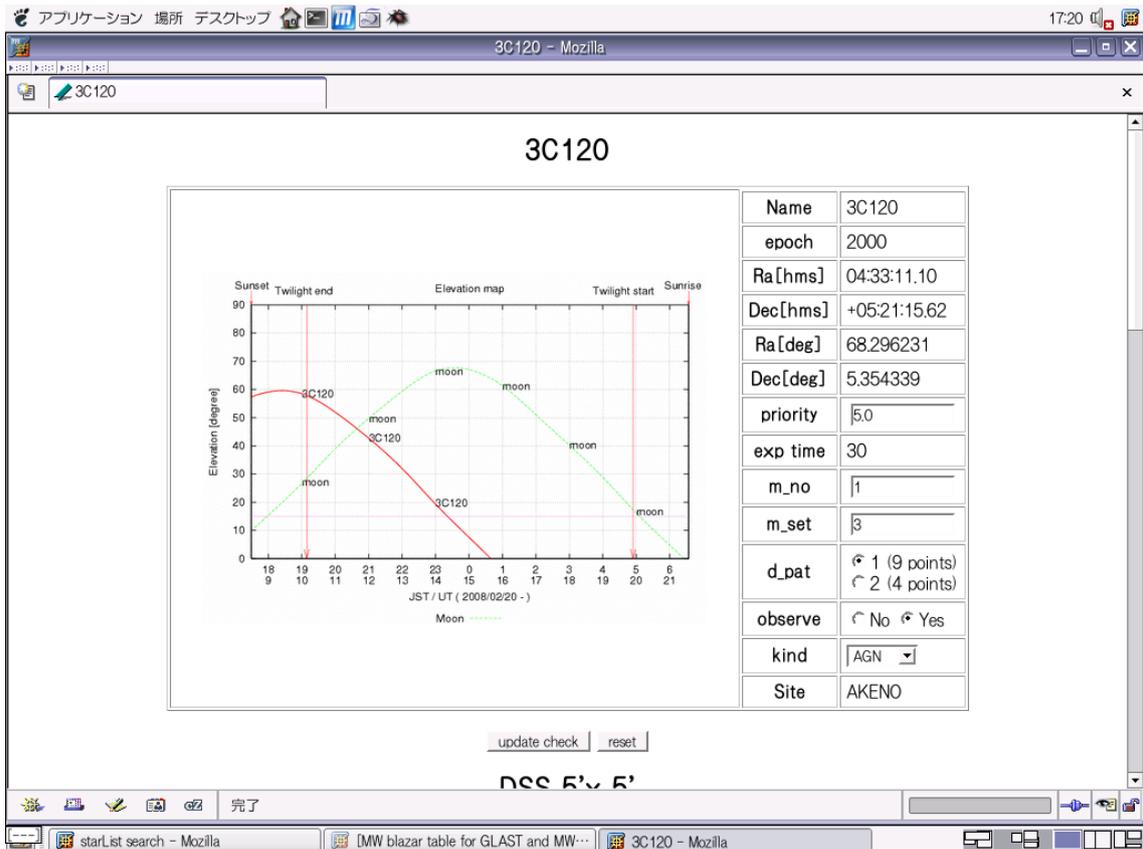


図 3.2: 登録天体詳細情報

3.3 登録天体の新規追加

登録されていない天体を観測するには、新たに天体を登録しなければならない。登録するデータとして名前 (Name)、Epoch(epoch)、赤経 (Ra[hms] もしくは Ra[degree])、赤緯 (Dec[dms] もしくは Dec[degree])、重要度 (priority)、各ディザリング点での撮像枚数 (m_no)、撮像セット数 (m_set)、ディザリングパターン (d_pat)、観測するかどうか (observe)、種類 (kind) を入力しなければならない。Ra と Dec は [hms,dms] と [degree] のどちらの単位からでも登録でき、入力されなかった方のデータは自動的に計算されて登録される。

登録する前に、入力されたデータが正しい形式になっているかチェックすることが必要である。特に天体の位置情報の赤経、赤緯が正しくないと、望遠鏡が変な方向に向いてしまう危険性がある。そのため、図 3.3 のページでは、赤経、赤緯が [hms,dms] または [degree] の形式になっているかチェックし、値の範囲もチェックする。値が正しく無い場合は登録せずに、値の再入力を促す。また、すべての項目が入力されているかもチェックする。

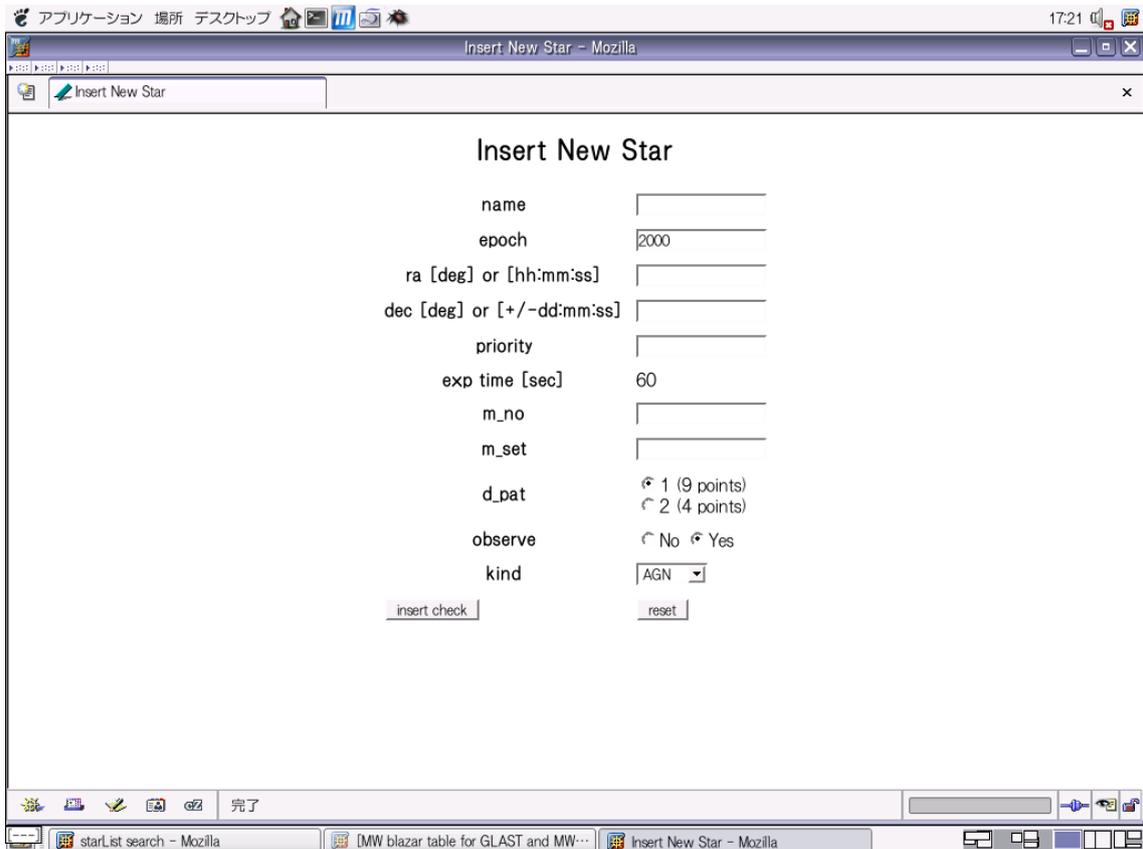


図 3.3: 新規追加画面

3.4 観測予定表示画面

その日の夜の観測スケジュールがわかれば、1晩でおよそ何天体観測するのか、何時にどの天体が観測されるのかがわかる。特に、観測したい天体がある場合に、その天体が観測されるのかどうかチェックできる。重要度が低くて観測されない場合は、このページをチェックしながら重要度を変更していけば、観測したい天体を優先的に観測するスケジュールを作ることができる。そのため、図 3.4 のページでは、パトロール観測システム内と同じ優先度の計算式で天体リストのデータを計算し、その晩の観測スケジュールを表示する。

GRB が発生した場合には、天体リスト管理用データベースにも自動的に GRB のリストが追加されるので、その時点で観測スケジュールが変更される。このスケジュールは毎日 15:15 に観測メンバーにメールで配信される。

jst	ut	name	ra	dec	ra [deg]	dec [deg]	priority	m_no	m_set	d_pat	kind
19:22:57	10:22:57	GRB080219-2	23:43:41.256	+12:10:28.92	355.9219	12.1747	30.0	1	100	1	GRB
19:31:57	10:31:57	FES0647+250	06:50:46.52	+25:03:0.30	102.693833	25.050083	5.0	1	3	1	AGN
19:40:57	10:40:57	FES0647+250	06:50:46.52	+25:03:0.30	102.693833	25.050083	5.0	1	3	1	AGN
19:49:57	10:49:57	FES0647+250	06:50:46.52	+25:03:0.30	102.693833	25.050083	5.0	1	3	1	AGN
19:58:57	10:58:57	QJ287	07:55:37.03	+25:42:39.00	118.9043	25.7108	5.0	1	3	1	AGN
20:07:57	11:07:57	QJ287	07:55:37.03	+25:42:39.00	118.9043	25.7108	5.0	1	3	1	AGN
20:16:57	11:16:57	QJ287	07:55:37.03	+25:42:39.00	118.9043	25.7108	5.0	1	3	1	AGN
20:25:57	11:25:57	PKS0735+178	07:38:07.39	+17:42:19.00	114.5308071	17.7052772	5.0	1	3	1	AGN
20:34:57	11:34:57	PKS0735+178	07:38:07.39	+17:42:19.00	114.5308071	17.7052772	5.0	1	3	1	AGN
20:43:57	11:43:57	PKS0735+178	07:38:07.39	+17:42:19.00	114.5308071	17.7052772	5.0	1	3	1	AGN
20:52:57	11:52:57	FES0806+524	08:09:49.15	+52:18:58.70	122.454792	52.316306	5.0	1	3	1	AGN
21:01:57	12:01:57	FES0806+524	08:09:49.15	+52:18:58.70	122.454792	52.316306	5.0	1	3	1	AGN
21:10:57	12:10:57	FES0806+524	08:09:49.15	+52:18:58.70	122.454792	52.316306	5.0	1	3	1	AGN
21:19:57	12:19:57	NGC2770	09:09:33.79	+33:07:25.20	137.3907917	33.1236667	5.0	1	3	1	SN
21:28:57	12:28:57	NGC2770	09:09:33.79	+33:07:25.20	137.3907917	33.1236667	5.0	1	3	1	SN
21:37:57	12:37:57	NGC2770	09:09:33.79	+33:07:25.20	137.3907917	33.1236667	5.0	1	3	1	SN
21:46:57	12:46:57	NGC1275	03:19:48.10	+41:30:42.00	49.9504	41.5117	5.0	1	3	1	AGN
21:51:27	12:51:27	NGC1275	03:19:48.10	+41:30:42.00	49.9504	41.5117	5.0	1	3	1	AGN
21:55:57	12:55:57	TON599	11:59:31.80	+29:14:44.00	179.8825	29.2456	5.0	1	3	1	AGN
22:04:57	13:04:57	TON599	11:59:31.80	+29:14:44.00	179.8825	29.2456	5.0	1	3	1	AGN
22:13:57	13:13:57	TON599	11:59:31.80	+29:14:44.00	179.8825	29.2456	5.0	1	3	1	AGN
22:22:57	13:22:57	ONG325	12:17:52.08	+30:07:0.63	184.467008	30.116843	5.0	1	3	1	AGN
22:31:57	13:31:57	ONG325	12:17:52.08	+30:07:0.63	184.467008	30.116843	5.0	1	3	1	AGN
22:40:57	13:40:57	Mkn180	11:36:26.40	+70:09:27.00	174.11	70.1575	5.0	1	3	1	AGN

図 3.4: 観測予定画面

3.5 天体リストファイル作成画面

図 3.5 のページでは、現在の登録データから、実際にスケジューラが読み込むファイルを作成することができる。毎日 15:00 に自動的に登録データから天体リストファイル (varstar.dat) が作成され、明野にある、パトロール観測を行う PC (linmaster) に送られるが、登録データを変更してすぐに送ることもできる。送られた天体リストファイルは毎日 16:00 に再読み込みされ、それまでに変更された登録データでパトロール観測を行う。天体リストの形式は岡山も同じなので、このページから天体リストをダウンロードし、岡山で使うこともできる。

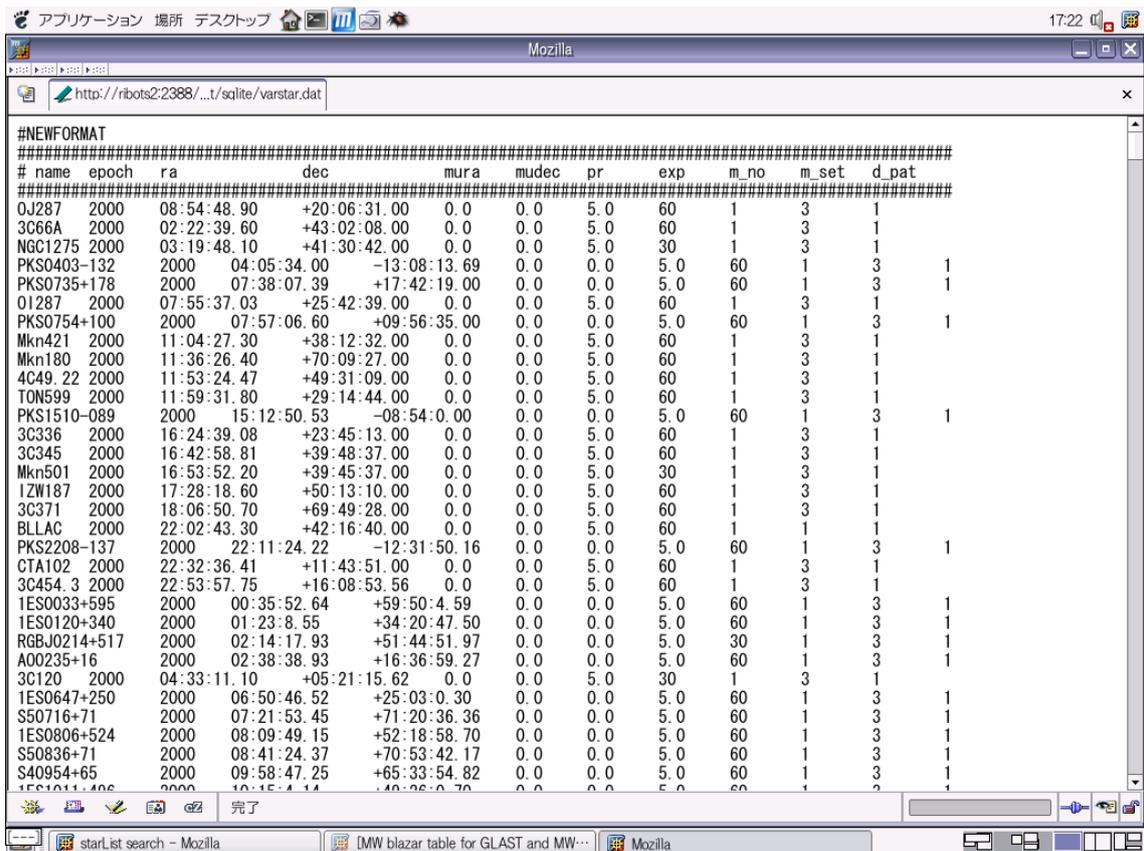


図 3.5: 登録データによる天体リストファイル作成画面

第4章 解析・測光・光度曲線の作成

一晩中撮像した場合、データ数はおよそ1800フレームにもなり、観測天体も十数個になる。これらのデータをすべて手動で解析するのは大変な上、時間がかかってしまう。天体の観測データは、晴れていれば毎日撮ることができるため、観測したデータを即座に解析することが重要である。そのため、自動で解析・測光・光度曲線の作成を行うことができれば、解析にかかる時間を大幅に短縮することができる。

撮像したデータを解析し、光度曲線を作成するまでには以下のような流れで、複数の処理を行わなければならない。

1. フレームを選別し、解析するフレームのリストを作る
2. フレームを観測天体ごとのディレクトリに分ける
3. ダークフレームの作成
4. フラットフレームの作成
5. リダクション
6. 重ね合わせ
7. 相対測光
8. 光度曲線の作成

個々の処理については後述する。以後、上記の処理をまとめて自動解析と呼ぶ。

このうち、ダークの作成、フラットの作成、リダクション、重ね合わせ、相対測光については自動解析システムの高度化(石村 修士論文, 2008)として実現されている。今回、いままで人の目で行ってきたフレームの選別を自動で行うアルゴリズムを開発し、自動解析システムと組み合わせて、観測データから光度曲線の作成までを一気に自動で行うソフトウェアを開発した。

4.1 依存ソフトウェア

観測データから光度曲線を作成するには、その間に行われる自動解析で使用しているソフトウェアが実行可能な環境でなければならない。以下に、自動解析で使用されるソフトウェアを列挙する。

スクリプト言語: Perl 自動解析システムの開発言語。実行環境は GNU/Linux の標準ソフトウェアとして提供されている。

IRAF(The Image Reduction and Analysis Facility NOAO(the National Optical Astronomy Observatory) で開発されている天文解析用のソフトウェアパッケージ。光赤外分野の標準的ソフトウェアで、FITS ファイルの解析に使用する。

SExtractor TERAPIX が公開している画像から天体を検出するソフトウェア。観測したデータから天体の等級を得るのに使用している。

atFunctions 天体の座標計算のためのライブラリ。

WCSTOOLS FITS 形式の WCS 情報を操作するツール。プログラム集とライブラリ集からなる

USNO-B 1.0 U.S.Naval Observatory [17] で公開されている恒星情報カタログ。Iバンドの相対測光に使用している。

NOMAD United States Naval Observatory Flagstaff Station [18] で公開されている恒星情報カタログ。g' と R バンドの相対測光に使用している。

gnuplot 2次元もしくは3次元のグラフを作成するためのコマンドラインアプリケーションソフトウェアである。http://www.gnuplot.info で公開されているフリーウェアである。

4.2 FITS

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である。ASCII テキストで書かれたヘッダ部分とバイナリデータ部分からなっている。ヘッダ部分には、観測時刻、天球座標、露出時間などの観測時の情報が保存され、バイナリデータ部分には2次元イメージが保存される。フレームの

選別では、ヘッダ部分に書かれた WCSMATCH と BG-LEVEL という値を利用している。2次元イメージ部分には、天体を撮像した有効領域 (1024 × 1024 pixels) と、オーバースキャン領域 (50 × 1024 pixels) がある (図 4.1)。オーバースキャン領域は、CCD の電荷を読み出した直後に、電荷の無いはずのところも電荷転送を行いつつ読み出した部分である。

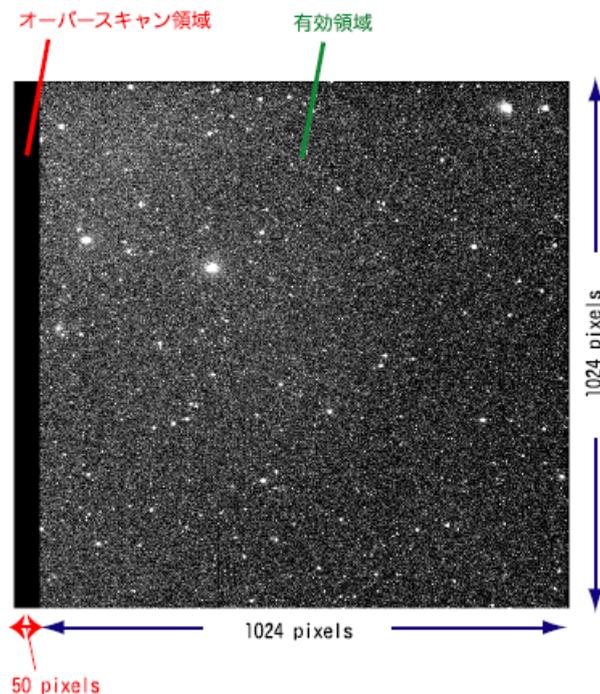


図 4.1: 天体を撮像したデータ部分の有効領域と、オーバースキャン領域からなる。

4.3 フレームの選別

観測データの中には、曇りのものや、太陽の高度が十分低いものが含まれている。そのようなデータを解析リストの含めた場合、S/N 比が小さくなり、正しい等級が得られない場合がある。そのため、解析するデータとしてふさわしくないデータを除く必要がある。これまでは、人の目で見てデータを除いていたが、1バンドあたり 600 枚のフレームをすべてチェックすることは時間がかかり、解析にかかる時間を伸ばす要因になっていた。この時間を短くするために、解析にふさわしくないデータの条件を決め、その条件にあてはまるフレームを自動で除くソフトウェアを開発した。

自動で解析を行うため、解析するデータ数を多くするよりも、確実に良いフレームだけを選択するようにし、自動で解析が行われない天体データについては、再度手動で解析を

するかどうか観測者の判断に任せることにした。そのため、解析するデータ選択の条件を厳しくしている。

解析にふさわしくないデータとは雲がかかってしまったフレームや太陽の高度が十分低くなく、空が十分暗くなっていないフレームであり、これらの判断に使う値として、フレームの WCSMATCH と BG-LEVEL がある。WCSMATCH とは、画像データの星が恒星カタログと一致した数である。BG-LEVEL とは星がない領域のスカイバックグラウンドレベルである。

図 4.2 は 08/02/01 に観測した全フレームの BG-LEVEL である。太陽高度が上がったことによって、29.5 時から BG-LEVEL が急激に上昇していることがわかる。

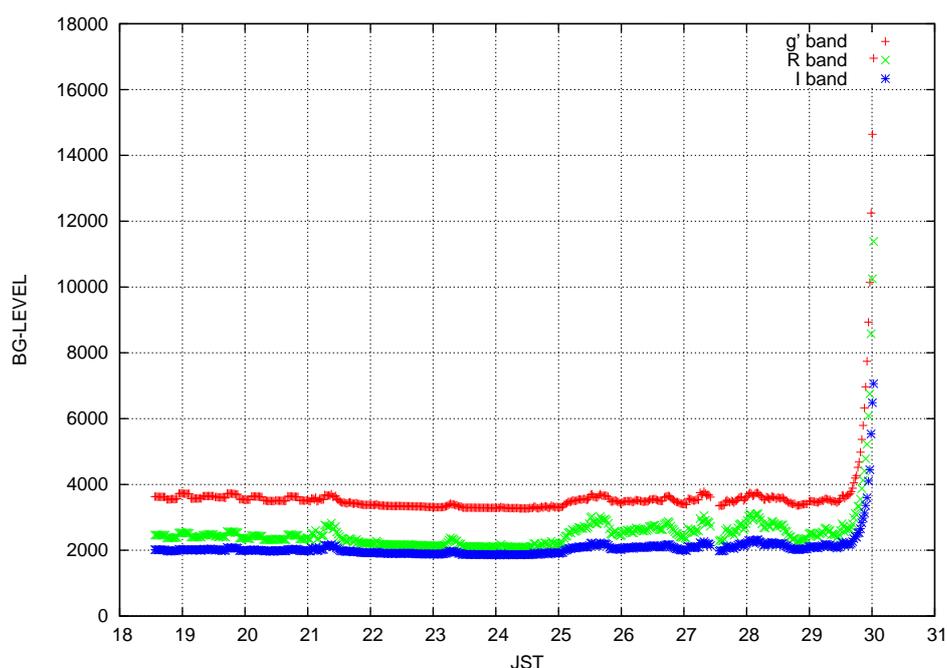


図 4.2: 08/02/01 の全観測フレームの BG-LEVEL。太陽の高度が上がって来たことによって、29.5 時以降のフレームの BG-LEVEL が急上昇しているのがわかる。

図 4.3 は 08/02/01 に観測した全フレームの 20.9 時 ~24.5 時のフレームの BG-LEVEL である。21.4 時付近と、23.3 時付近で BG-LEVEL がベースラインからはずれていることがわかる。

4.3.1 WCSMATCH による選別

WCSMATCH とは、画像データから抽出した明るい 50 個の星像のうち、恒星カタログと一致した星の数である。一致した星像とカタログの位置から、そのフレームの赤道座標

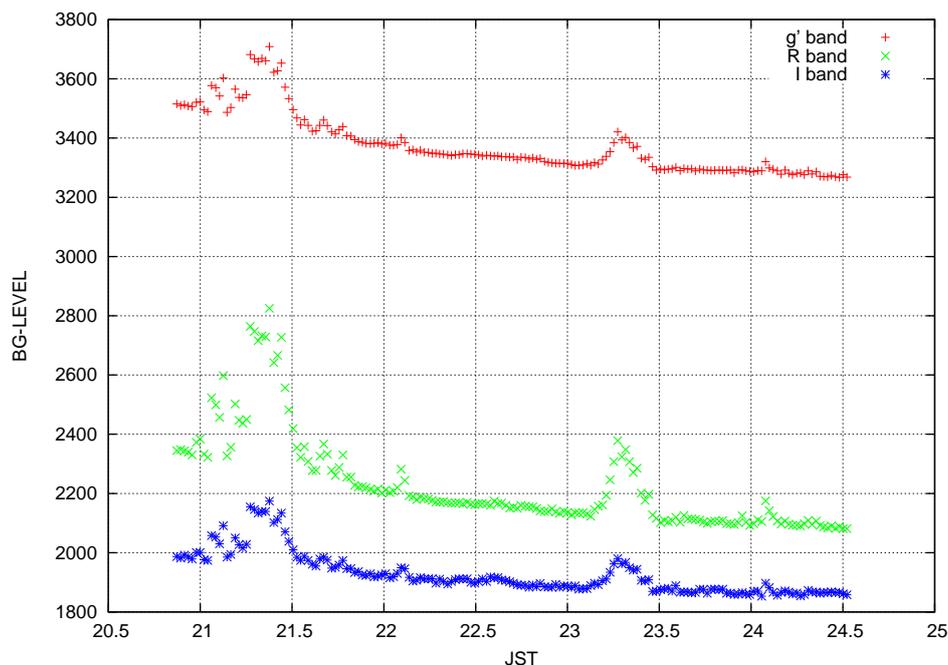


図 4.3: 08/02/01 の全観測フレームの BG-LEVEL。20.9 時 ~24.5 時のフレームの BG-LEVEL がベースラインからはずれていることがわかる。

を決めている。雲がかかり、星像が見えないデータでは、WCSMATCH が小さくなることがわかっている（下川辺 修士論文）。WCSMATCH が小さいフレームは、画像の赤道座標が正しく決められていない可能性があり、解析に使うデータとしてふさわしくない。WCSMATCH が 15 程度あれば、正しく赤道座標が決められるが、20 より小さいフレームでは雲がかかっている可能性が高く、確実に雲のかかっていないデータのみ残すため、条件として WCSMATCH が 25 未満のフレームを除くこととした。

図 4.4 は 08/02/01 に観測した g' バンドのフレームの BG-LEVEL と WCSMATCH である。WCSMATCH が下がっているフレームでは、BG-LEVEL が上がっていることがわかる。中の図は、WCSMATCH が 25 未満のフレームを除いた場合の BG-LEVEL である。BG-LEVEL がベースラインから外れているものの一部しか除かれていないのがわかる。

このように、WCSMATCH による選別だけで、悪いフレームがすべて除かれるわけではない。明るい天体が少ない場合、カタログと比較するために画像から抽出した星像が必ずしも天体とは限らないからである。欠陥ピクセルや宇宙線など、天体以外の星像に似た像がカタログの位置と一致して、WCSMATCH が高くなっているフレームがある。これらのフレームを除くために BG-LEVEL を利用する。

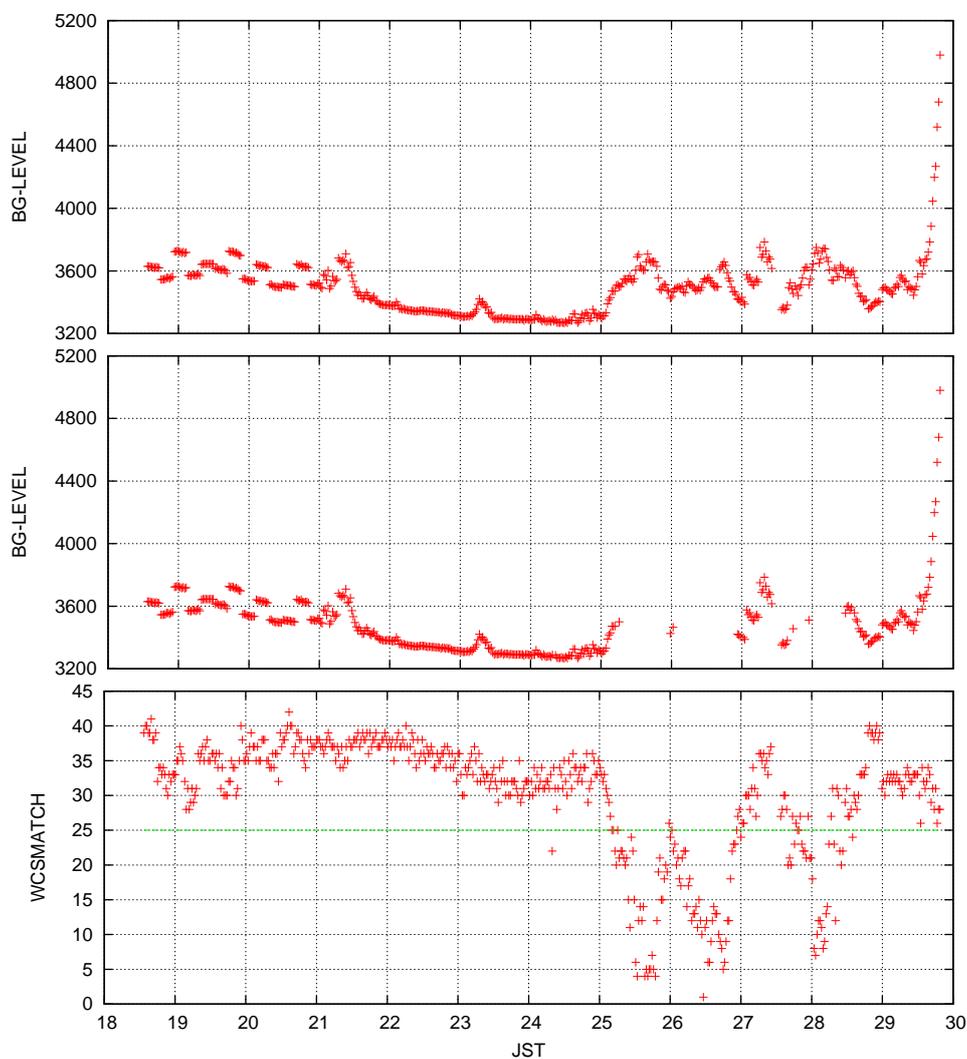


図 4.4: 08/02/01 の g バンドのフレーム。WCSMATCH が下がっているフレームで、BG-LEVEL が上がっていることがわかる。WCSMATCH が 25 未満のフレームを除くことで、BG-LEVEL が上がっているフレームの一部を除くことができることがわかる。上:全観測フレームの BG-LEVEL。中:WCSMATCH が 25 未満のフレームを除いたフレームの BG-LEVEL。下:全観測フレームの WCSMATCH

4.3.2 BG-LEVEL による選別

BG-LEVEL とは、FITS 画像の有効領域内のピクセルのカウント値の最頻値である。つまり、星像のないスカイバックグラウンドレベルと見ることができる。雲がかかったフレームは夜光が雲に反射し、晴れているフレームよりも BG-LEVEL が上昇することがわかっている。また、夜明け前に太陽の高度があがってくると、BG-LEVEL が急上昇することがわかっている。そのため、まず、BG-LEVEL が急激に下降または上昇しているフレームを除く処理を行った。

時間軸に沿ってフレームの BG-LEVEL を走査し、その傾きが 100 以上のものを除く方法をとった。傾きが 100 以上としたのには、BG-LEVEL のベースラインには幅があり、その誤差内のフレームを残すようにするためである。

図 4.5 は BG-LEVEL が急激に上昇または下降しているフレームを除いた場合の BG-LEVEL である。明け方に太陽の高度が上昇してきたことによって、BG-LEVEL が急上昇している 29.5 時以降のフレームが除かれているのがわかる。

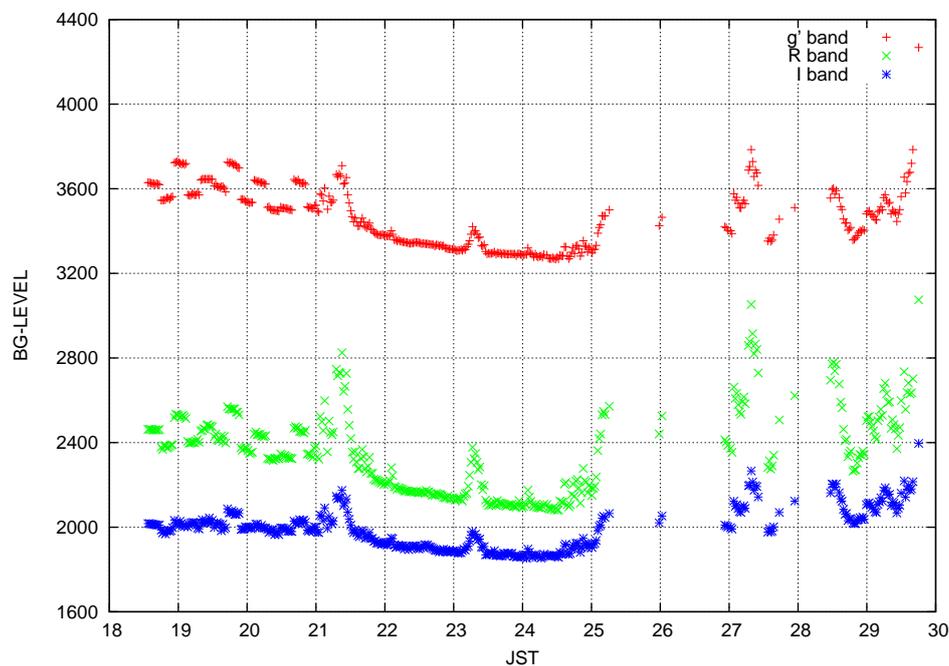


図 4.5: 08/02/01 の BG-LEVEL が 25 以上で、かつ BG-LEVEL が急激に上昇もしくは下降しているフレームを除いたフレームの BG-LEVEL。明け方に太陽の高度が上昇してきたことによって、BG-LEVEL が急激に上昇していた 29.5 時以降のデータが除かれているのがわかる。

次に、BG-LEVEL が各天体ごとのベースラインからはずれているフレームを除く処理を行った。時間軸に沿って BG-LEVEL を走査していき、その時点での BG-LEVEL の最

小値からのずれが 15 より大きいものを除くようにした。同じ作業を時間軸の反対側からも行い、重複したフレームを除いた。

ベースラインの走査は天体ごとに行わなければならない。観測天体の高度や銀河面との距離によって、ベースラインの BG-LEVEL が異なるからである。

観測したデータから天体の等級を得るためには、同じ天体のフレームを重ね合わせて S/N 比を上げたフレームを作る必要がある。また、重ね合わせるフレーム数が少ないと、フラットフレームが作れない場合がある。そのため、良いフレームが 5 枚未満の天体は、質のよいフレームが出来ない可能性があるため、その天体は解析しないようリストから除くこととした。

図 4.6 はベースラインから外れたフレームを除き、残ったフレームが 5 枚未満の天体のフレームも除いたものである。BG-LEVEL がベースラインからはずれていた、21.4 時付近や 23.3 時付近の山が除かれているのがわかる。

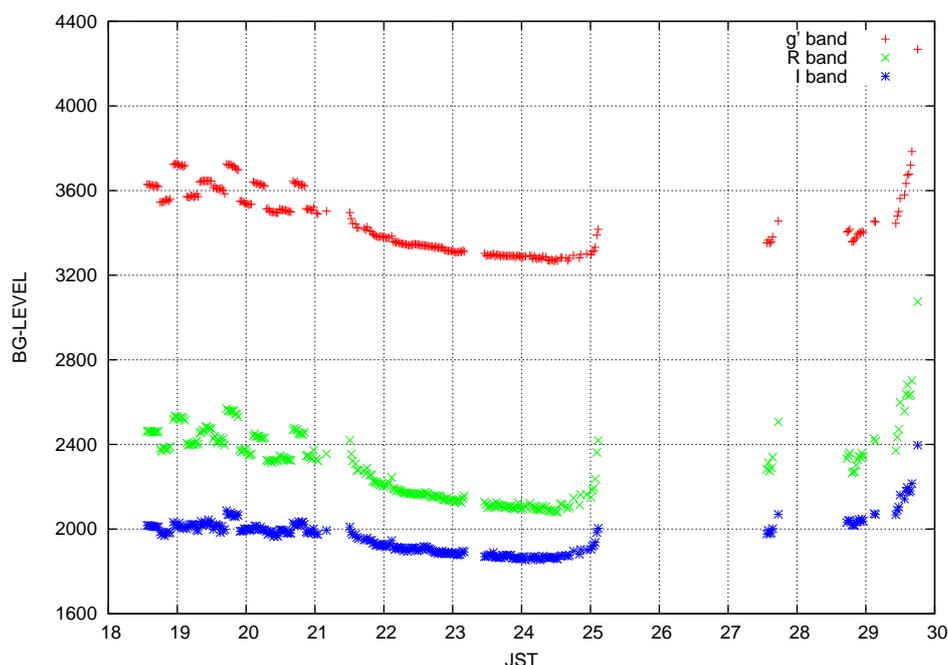


図 4.6: 08/02/01 の解析に使うフレームの BG-LEVEL。BG-LEVEL が各天体のベースラインからはずれているフレームを除いたもの。18.5 時 ~ 21 時のデータの BG-LEVEL が 9 フレームずつずれているのは、9 フレームごとに観測天体が異なるため、高度や銀河面付近かどうかなどで、ベースラインの BG-LEVEL が異なるためである。BG-LEVEL がベースラインからはずれている、21.4 時付近や 23.3 時付近のフレームが除かれているのがわかる。

まとめると、解析しないフレームの除く処理は

1. WCSMATCH が 25 未満のフレーム
2. BG-LEVEL が急激に下降または上昇しているフレーム
3. BG-LEVEL が各天体ごとのベースラインからはずれているフレーム
4. 1.2.3. に当てはまらないフレームが 5 枚未満の天体のフレーム

の流れで行う。

4.4 ダークフレームの作成

CCD には、シャッターを閉じた状態でも暗電流 (dark current) が流れている。この暗電流によって発生する電荷がダークである。天体を観測したフレームにもこのダーク成分が含まれているので、それを除かなければならない。そのために、ダーク成分のみのフレームを作成する必要がある。ダーク画像は日が沈んだ後と夜明け前にパトロール観測システムで自動的に撮像される。統計を上げるために、同じ露出時間のダーク画像を 10 枚程度重ね合わせてダークフレームを作成する。

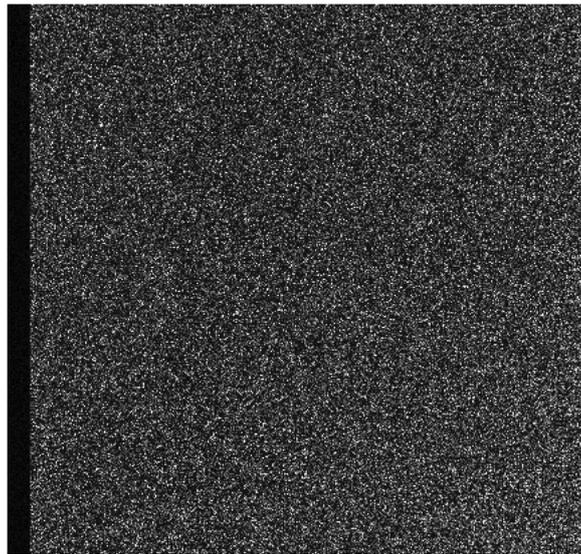


図 4.7: ダークフレーム画像。白い方がカウント値が高い。シャッターを閉じて撮像していても、カウント値が 0 になっていないのがわかる。

4.5 フラットフレームの作成

CCDの1つ1つのピクセルは感度が一様ではないので、天体を観測したフレームの各ピクセル値の感度ムラを補正しなければならない。そのための、ピクセルごとの感度ムラ情報を持った画像がフラットフレームである。観測するときにディザリングしているため、明るい天体の部分をマスクし、画像のx座標、y座標を揃えて重ね合わせ、中央値をとると、星の成分が取れてスカイバックグラウンド成分が残る。この残った成分を規格化し、フラットフレームとしている。なぜなら、夜空からのスカイバックグラウンドが一様だと仮定すると、このフラットフレームが持つムラは、ピクセルごとの感度ムラとみることができからである。このフラットフレームで天体を観測したフレームを割れば、感度ムラを補正することができる。

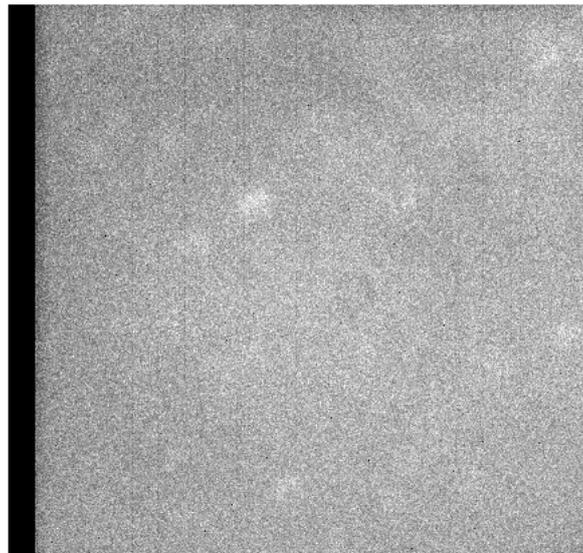


図 4.8: フラットフレーム画像。ピクセルごとのムラが出ているのがわかる。

4.6 リダクションと重ね合わせ

リダクションとは撮像した生のデータから、ノイズなどを除いて、夜空からの成分のみのデータを作る処理である。生データの各ピクセルのカウント値には、バイアス成分 (BIAS)、ダーク成分 (DARK)、天体からの成分 (SIGNAL)、スカイバックグラウンド成分 (SKY) が含まれている。つまり、以下のような式であらわすことができる。

$$COUNT = FLAT \cdot (SIGNAL + SKY) + DARK + BIAS \quad (4.6.1)$$

ここで FLAT は各ピクセルのムラである。この中から SIGNAL を取り出すために以下の処理を行う。

バイアスを引く

バイアスとは、CCD が読み出した電荷を AD 変換する際に付加されるゲタの部分である。この値を見積もるために、図 4.1 のオーバースキャン領域の平均値を使う。このバイアスを引いた後のカウント値は以下のようになる。

$$COUNT = FLAT \cdot (SIGNAL + SKY) + DARK \quad (4.6.2)$$

ダークを引く

作成したダークフレームを引くことで、カウント値は以下のようになる。

$$COUNT = FLAT \cdot (SIGNAL + SKY) \quad (4.6.3)$$

フラットフレームで割る

各ピクセルのムラを補正するために、作成したフラットフレームで割るとカウント値は以下のようになる。

$$COUNT = SIGNAL + SKY \quad (4.6.4)$$

画像を重ね合わせる

欠陥ピクセルの値をまわりの値で補完し、複数枚の画像を赤道座標系で重ね合わせて 1 枚の画像にする。この処理により S/N 比を上げる。n 枚の画像を重ね合わせると、カウント値は以下のようになる。

$$COUNT = COUNT_{single} \cdot n \quad (4.6.5)$$

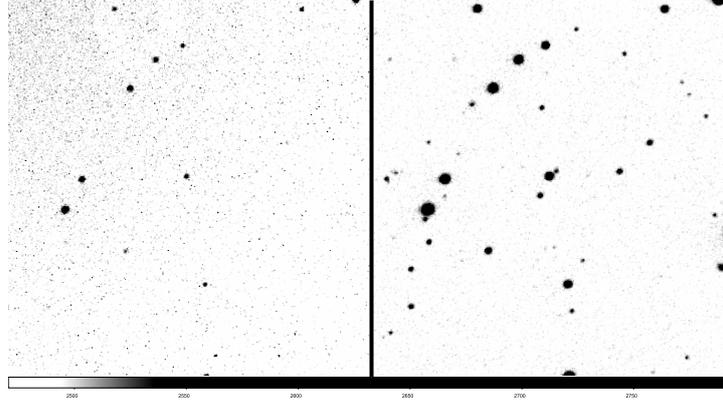


図 4.9: 左:重ね合わせる前のフレーム。右:101 枚の画像を重ね合わせたフレーム。重ね合わせる前と比べて S/N 比が上がり、左では見えなかった星が、右では見えているのがわかる。

4.7 相対測光

相対測光とは、基準となる星 (以後 参照星と呼ぶ) の等級をカタログから取得し、そのカタログ等級と測光した等級の差から、観測天体の等級を見積もる方法である。参照星の等級は、 g バンド、 R バンドは NOMAD カタログ [18] から、 I バンドは USNO-B1.0 カタログ [17] から得る。

観測データから測光し、天体の等級を得るためには、スカイバックグラウンドを引いて、天体からのシグナルのみを取り出さなければならない。そのための方法として aperture photometry がある。aperture photometry とは、天体部分のスカイバックグラウンドをその周りの星がない領域から見積もる方法である。図 4.10 は aperture photometry の概念図である。

天体の周りの星がない領域 (Annulus) のカウント値を、天体のある領域 (Aperture) の大きさで規格化し、Aperture 領域のカウント値から引くことで、スカイバックグラウンド成分を除くことができる。

つまり、Aperture 領域の総カウント数を SUM [counts]、面積を $AREA$ [pixel]、Annulus 領域の単位ピクセルあたりのカウント数を $MSKY$ [counts/pixel] とすると、シグナル ($SIGNAL$) は以下の式で求められる。

$$SIGNAL = SUM - AREA \cdot MSKY [counts] \quad (4.7.1)$$

$SIGNAL$ の計算の不確定性は、カウント値の統計的なゆらぎと、バックグラウンドの統計的なゆらぎが寄与する。そのため、 $SIGNAL$ の不確定性である $NOISE$ は、以下の

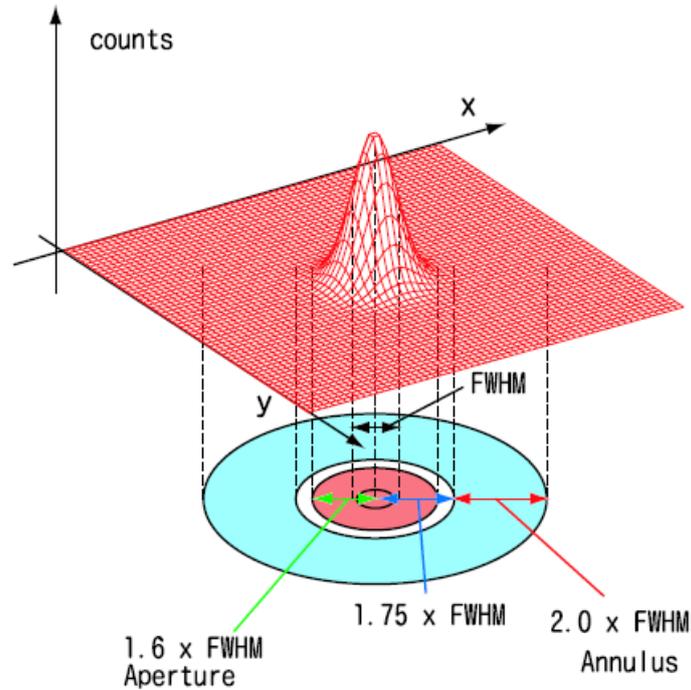


図 4.10: aperture photometry の概念図。

式で求められる。

$$NOISE = \sqrt{\frac{SIGNAL}{GAIN} + AREA \cdot STDEV^2 + \frac{AREA^2 \cdot STDEV^2}{NSKY}} \quad (4.7.2)$$

ここで、 $GAIN$ [electrons/ADU] は CCD のゲイン、 $NSKY$ [pixel] は Annulus 領域の面積、 $STDEV$ [counts] は Annulus 領域で求められたバックグラウンドのゆらぎである。

上記の $SIGNAL$ と $NOISE$ から、機械等級 MAG_{inst} とそのエラー $MERR_{inst}$ を以下の式で求められる。機械等級とは CCD のカウント値を基準とした等級で、CCD によって異なる。

$$MAG_{inst} = -2.5 \log_{10}(SIGNAL) + 2.5 \log_{10}(EXPTIME) \quad (4.7.3)$$

$$MERR_{inst} = 1.0857 \cdot \frac{NOISE}{SIGNAL} \quad (4.7.4)$$

$EXPTIME$ は画像の露出時間である。

実際の等級を求めるためには、機械等級での 0 等級が、実際の等級の何等級になるのかを求めなければならない。それがゼロ点である。パトロール観測システムでは、あらかじめ 3~6 個の参照星を決めておき、それぞれの参照星から得たゼロ点の加重平均を取って

いる。各参照星のカタログ等級 $MAG_{catalog}$ とエラー $MERR_{catalog}$ 、機械等級 MAG_{ref} とエラー $MERR_{ref}$ から、ゼロ点 $ZMAG$ とエラー $ZERR$ は以下の式で得られる。

$$ZMAG_i = MAG_{catalog_i} - MAG_{ref_i} \quad (4.7.5)$$

$$ZERR_i^2 = MERR_{catalog_i}^2 + MERR_{ref_i}^2 \quad (4.7.6)$$

各ゼロ点から等級 MAG および等級エラー $MERR$ は以下の式で得られる。

$$MAG = MAG_{inst} + \frac{\sum_{i=1}^n ZMAG_i / ZERR_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / ZERR_i^2} \quad (4.7.7)$$

$$MERR^2 = \sqrt{MERR_{inst}^2 + \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1 / ZERR_i^2}} \quad (4.7.8)$$

得られた天体の等級データおよび等級エラーを、日付、MJD、FITS ファイル名と共に、各天体の等級データファイルに書き込む。以下に等級データファイルの例を示す。

```
TON599-G-mag.dat
080206 54502.698127 TON599-G.fits 16.843 0.043 16.686 0.041\
17.204 0.055 16.386 0.035
080207 54503.700347 TON599-G.fits 17.294 0.036 16.714 0.027\
17.113 0.033 16.396 0.023
080212 54508.651341 TON599-G.fits 17.505 0.037 16.713 0.025\
17.121 0.031 16.394 0.022
080213 54509.651626 TON599-G.fits 17.204 0.030 16.707 0.024\
17.133 0.029 16.385 0.022
```

4.8 光度曲線の作成

各天体の等級データファイルから、横軸が日付で縦軸が等級のグラフと、横軸が MJD で縦軸が等級のグラフを作成する。グラフの作成には `gnuplot` を使う。

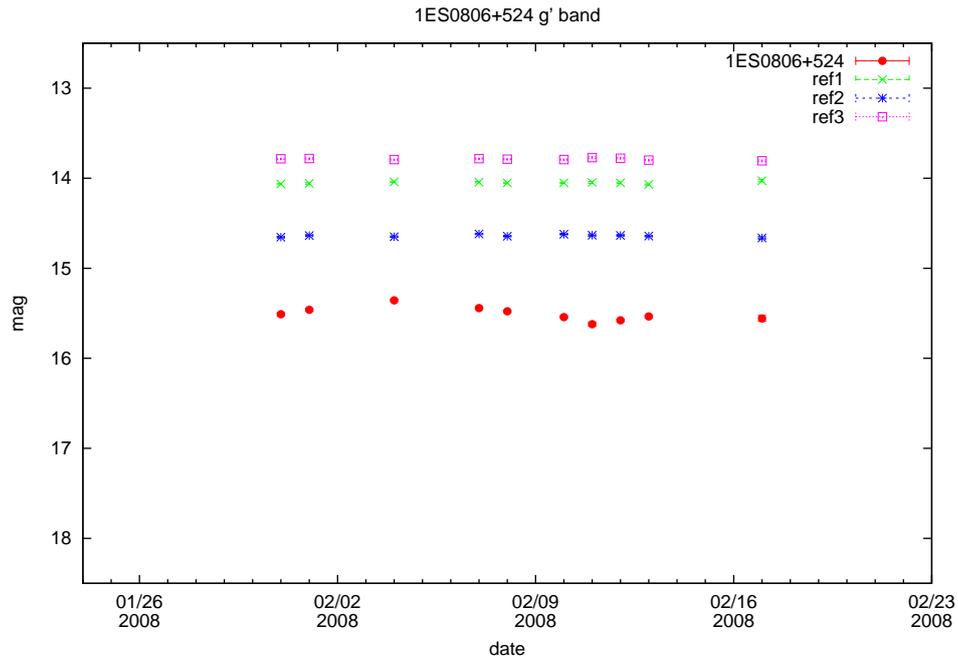


図 4.11: 1ES0806+524 の g' バンドの光度曲線。横軸が日付、縦軸が等級。赤丸が 1ES0806+524、それ以外が参照星の等級である。

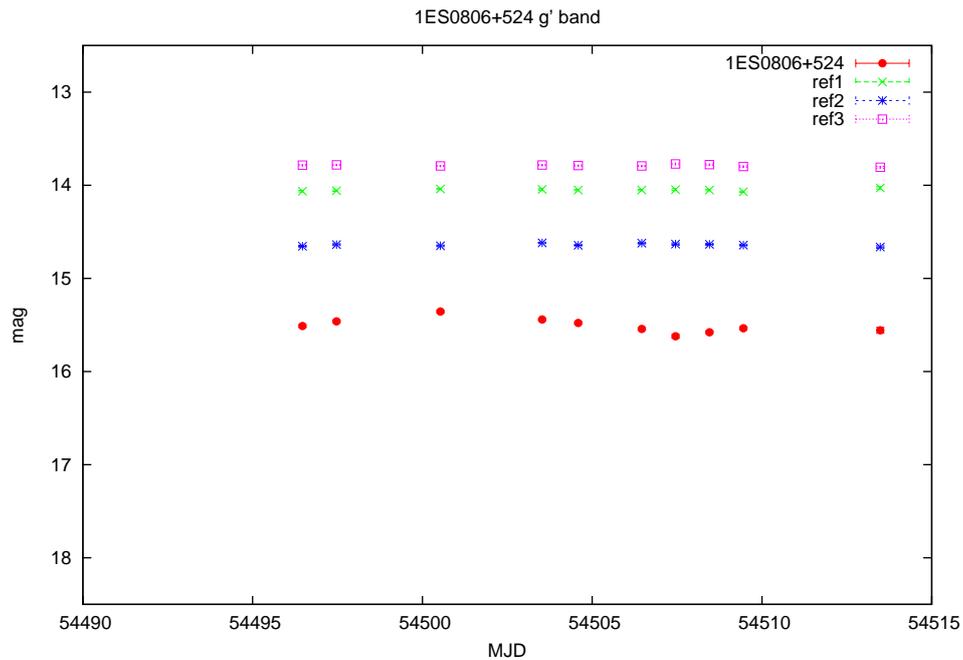


図 4.12: 1ES0806+524 の g' バンドの光度曲線。横軸が MJD、縦軸が等級。赤丸が 1ES0806+524、それ以外が参照星の等級である。

第5章 パトロール観測結果

5.1 観測天体の選択

パトロール観測システムを導入するにあたり、自動観測・自動解析が正しく行われるかどうか、選んだ参照星が相対測光に使えるものかどうか、実際に観測して検証した。

観測および解析の対象天体は約 30 天体とした。観測対象を制限した理由は、参照星を用いた相対測光を行っているため、参照星をあらかじめ決める手間を軽減するためである。また、GLAST 衛星が打ち上がった後の多波長観測のために、GLAST 衛星がモニター予定の AGN150 天体 [20] のうち、39 天体を選び観測対象とした。選ぶ基準として、R バンドの AGN の観測結果である、フィンランドの Tuorla 観測所の 1.03m 望遠鏡と、スペインのカナリア諸島 La Palma の KVA 観測所の 35cm 望遠鏡の観測リスト [21] に載っているものを参考にした。

観測対象天体は重要度を他の天体よりも高くすることで、優先的に観測するようにした。また、1月に起こった超新星 NGC2770 も観測リストに登録し、パトロール観測中に起こった GRB の自動観測も行った。

以下に観測リストを示す。

表 5.1: 優先観測リスト

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	Ra[deg]	Dec[deg]	
1ES0033+595	00:35:52.64	+59:50:4.59	8.96935	59.834608	TeV BL Lac
1ES0120+340	01:23:08.55	+34:20:47.5	20.785625	34.346528	TeV BL Lac
RGBJ0214+51	02:14:17.93	+51:44:51.9	33.574716	51.747769	TeV BL Lac
3C66A	02:22:39.60	+43:02:08.0	35.665	43.0356	TeV BL Lac
AO0235+16	02:38:38.93	+16:36:59.2	39.662209	16.616465	BL Lac
PKS0403-132	04:05:34.00	-13:08:13.6	61.391681	-13.137136	
3C120	04:33:11.10	+05:21:15.6	68.296231	5.354339	AGN

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	Ra[deg]	Dec[deg]	
1ES0647+250	06:50:46.52	+25:03:0.30	102.693833	25.050083	TeV BL Lac
S50716+71	07:21:53.45	+71:20:36.3	110.472702	71.343434	BL Lac
PKS0735+178	07:38:07.39	+17:42:19.0	114.530807	17.7052772	BL Lac
OI287	07:55:37.03	+25:42:39.0	118.9043	25.7108	
PKS0754+100	07:57:06.60	+09:56:35.0	119.2775	9.9431	
1ES0806+524	08:09:49.15	+52:18:58.7	122.454792	52.316306	TeV BL Lac
S50836+71	08:41:24.37	+70:53:42.1	130.351522	70.895048	
OJ287	08:54:48.90	+20:06:31.0	133.7038	20.1086	TeV BL Lac
S40954+65	09:58:47.25	+65:33:54.8	149.696855	65.565227	TeV BL Lac
1ES1011+496	10:15:04.14	+49:26:0.70	153.767249	49.433529	TeV BL Lac
1ES1028+511	10:31:18.51	+50:53:35.9	157.827125	50.893306	TeV BL Lac
Mkn421	11:04:27.30	+38:12:32.0	166.1137	38.2089	TeV BL Lac
Mkn180	11:36:26.40	+70:09:27.0	174.11	70.1575	TeV BL Lac
RGBJ1136+67	11:36:26.41	+70:09:27.3	174.110035	70.157585	TeV BL Lac
4C49.22	11:53:24.47	+49:31:09.0	178.352	49.5192	
TON599	11:59:31.80	+29:14:44.0	179.8825	29.2456	
ON325	12:17:52.08	+30:07:0.63	184.467008	30.116843	TeV BL Lac
1ES1218+304	12:21:21.94	+30:10:37.1	185.341421	30.176975	TeV BL Lac
3C273	12:29:06.70	+02:03:8.60	187.277915	2.052388	BL Lac
3C279	12:56:11.17	-05:47:21.5	194.046527	-5.789312	BL Lac
PG1424+240	14:27:00.39	+23:48:0.04	216.751632	23.80001	TeV BL Lac
PKS1510-089	15:12:50.53	-08:54:0.00	228.2105	-8.9	
1ES1544+820	15:40:16.01	+81:55:5.50	235.066708	81.918194	TeV BL Lac
3C336	16:24:39.08	+23:45:13.0	246.1628	23.7536	
3C345	16:42:58.81	+39:48:37.0	250.745	39.8103	
Mkn501	16:53:52.20	+39:45:37.0	253.4675	39.7603	TeV BL Lac
3C371	18:06:50.70	+69:49:28.0	271.7113	69.8244	
1ES1959+650	19:59:59.85	+65:08:54.6	299.999384	65.148514	TeV BL Lac
PKS2155-304	21:58:52.07	-30:13:32.1	329.716938	-30.225588	BL Lac
BLLAC	22:02:43.30	+42:16:40.0	330.6804	42.2778	TeV BL Lac

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	Ra[deg]	Dec[deg]	
CTA102	22:32:36.41	+11:43:51.0	338.1517	11.7308	
3C454.3	22:53:57.75	+16:08:53.5	343.490616	16.148211	TeV BL Lac
1ES2344+514	23:47:04.84	+51:42:17.8	356.770158	51.704966	TeV BL Lac

5.2 観測日数

観測した天体数には上記の観測リストの他に GRB と、1月に発生した超新星 NGC27770 が含まれる。2/7までは1天体の最大撮像枚数を9枚にしていたため、天体数が多くなっている。2/8以降は、最大撮像枚数を27枚に増やしたので、天体数が減っているが、重ね合わせるフレームが増えた分データの質は向上している。晴れの日には10天体以上の観測に成功している。フレームの選別を行い、解析できた天体が解析天体数である。曇りの日は観測した天体に対して、解析できた天体数が少ないことがわかる。一方、晴れの日では、観測した天体の8割から9割を解析できていることがわかる。このことから、解析フレームの選別で、曇りの日は多くのフレームが外され、晴れの日はほとんどのフレームが選択されていることがわかり、フレームの自動選別で天候を反映できていると言える。

表 5.2: 観測日数リスト

Date	天体数	解析天体数	天気	
08/01/24	16	0	曇り	WCSMATCH が小さい
08/01/25	3	1	晴れときどき曇り	
08/01/26	—	0	雨	
08/01/27	1	1	晴れ	
08/01/28	—	0	雪	
08/01/29	6	0	曇り	WCSMATCH が小さい
08/01/30	25	16	晴れ	
08/01/31	26	23	晴れ	
08/02/01	26	15	晴れ	
08/02/02	—	0	雪	

Date	天体数	解析天体数	天気	
08/02/03	—	0	雪	
08/02/04	21	17	晴れ	
08/02/05	37	5	曇りのち晴れ	GRB を観測
08/02/06	36	23	晴れ	
08/02/07	29	22	晴れ	
08/02/08	12	12	晴れ	GRB を観測
08/02/09	—	0	雨	
08/02/10	15	11	晴れ	GRB を観測
08/02/11	11	10	晴れ	
08/02/12	17	14	晴れ	GRB を観測
08/02/13	23	22	晴れ	
08/02/14	6	4	晴れ	低空観測テストを実施

5.3 解析天体

各観測日の解析できた天体を表 5.3 に示す。表の天体は赤経の順番になっている。地球の公転によって、観測できる天体の赤経は大きくなっていく。そのため、1/30 に比べ、2/13 では赤経の小さい天体が観測されていないのがわかる。

表 5.3: 解析天体リスト

Name	1/25	1/27	1/30	1/31	2/1	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8	2/10	2/11	2/12	2/13	2/14
1ES0120+340			○		○										
RGBJ0214+51				○											
3C66A			○	○	○						○				
AO0235+16	○		○	○	○										
PKS0403-132										○					
3C120			○	○	○	○			○	○					
1ES0647+250		○	○	○	○				○	○	○	○	○		
S50716+71					○	○			○	○					
PKS0735+178				○	○	○				○		○		○	
OI287									○	○		○	○	○	○
PKS0754+100									○	○		○	○	○	
1ES0806+524				○	○	○			○	○	○	○	○		

Name	1/25	1/27	1/30	1/31	2/1	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8	2/10	2/11	2/12	2/13	2/14
S50836+71			○	○		○	○	○	○			○	○		
OJ287				○	○	○		○	○	○	○	○			○
S40954+65			○	○	○	○		○	○				○	○	
1ES1011+496			○	○		○		○	○		○	○	○	○	
1ES1028+511			○			○			○		○	○	○		
Mkn180			○	○		○		○	○						○
RGBJ1136+67			○	○	○	○		○							
4C49.22									○		○		○	○	
TON599								○					○	○	
ON325			○	○		○	○	○	○		○		○	○	
1ES1218+304			○	○		○	○	○	○				○	○	
3C273			○	○		○		○							○
3C279				○		○		○							○
PG1424+240			○	○		○		○	○				○	○	
3C336								○							○
3C345								○							○
3C371								○							○

5.4 光度曲線

表 5.3 の天体の g' バンドの光度曲線を示す。赤丸が観測天体の等級、それ以外が参照星の等級である。

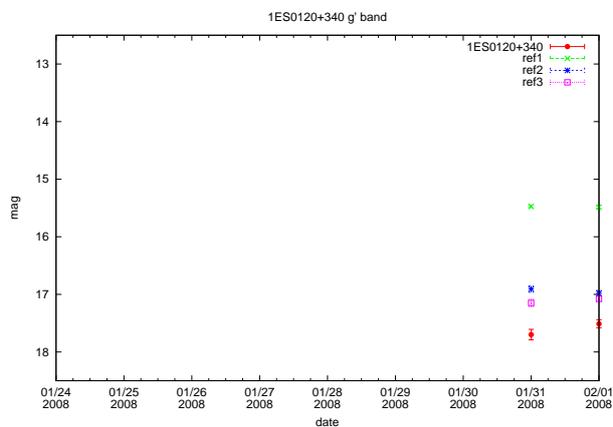


図 5.1: 1ES0120+340 の光度曲線

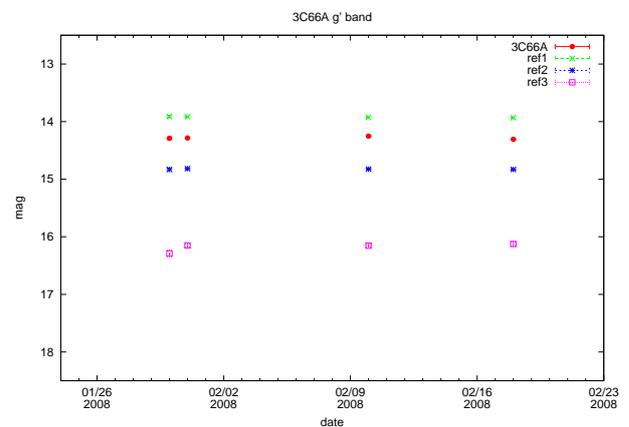


図 5.2: 3C66A の光度曲線

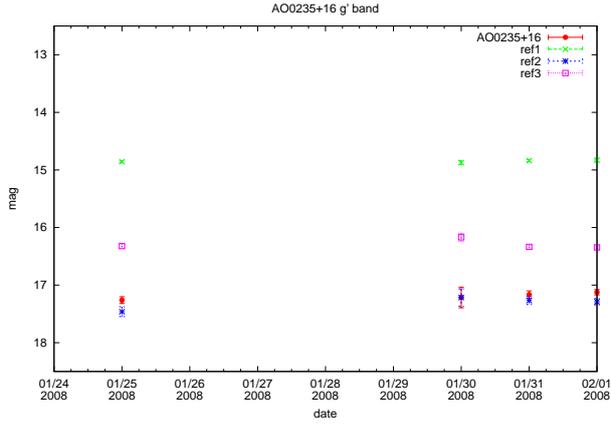


図 5.3: AO0235+16 の光度曲線

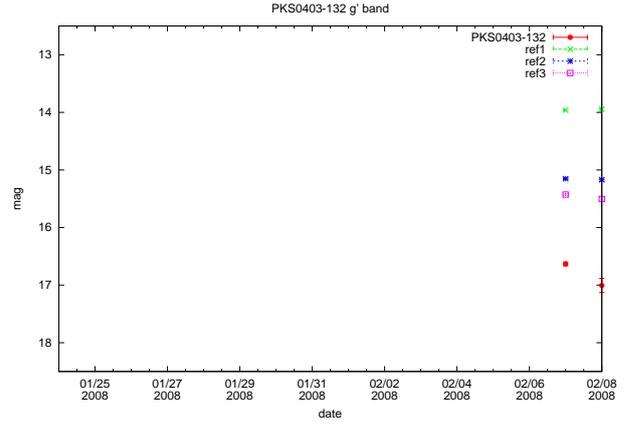


図 5.4: PKS0403-132 の光度曲線

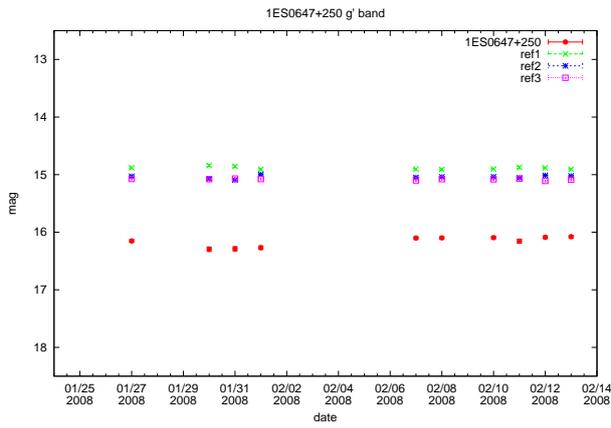


図 5.5: 1ES0647+250 の光度曲線

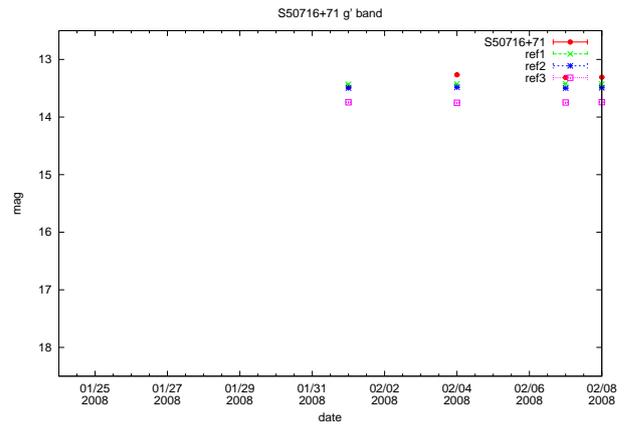


図 5.6: S50716+71 の光度曲線

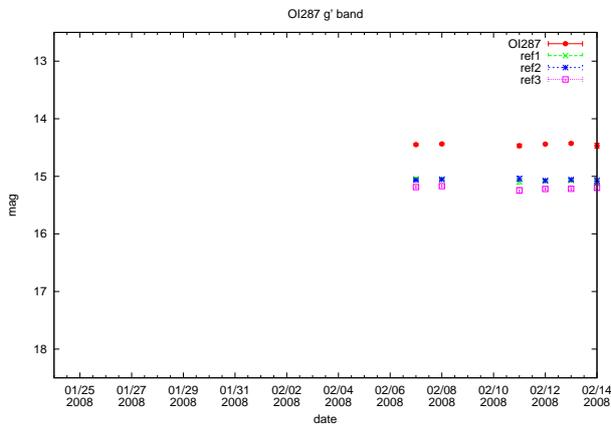


図 5.7: OI287 の光度曲線

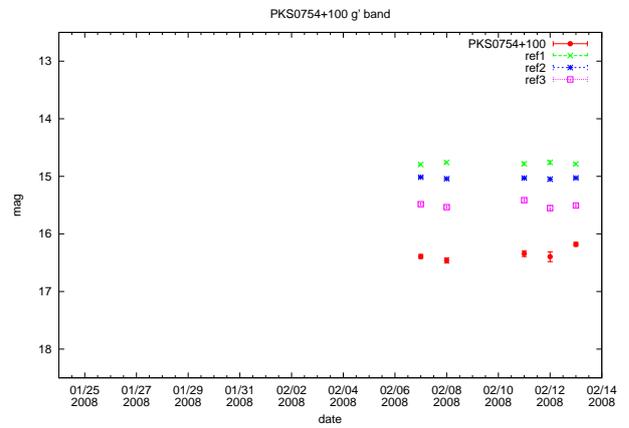


図 5.8: PKS0754+100 の光度曲線

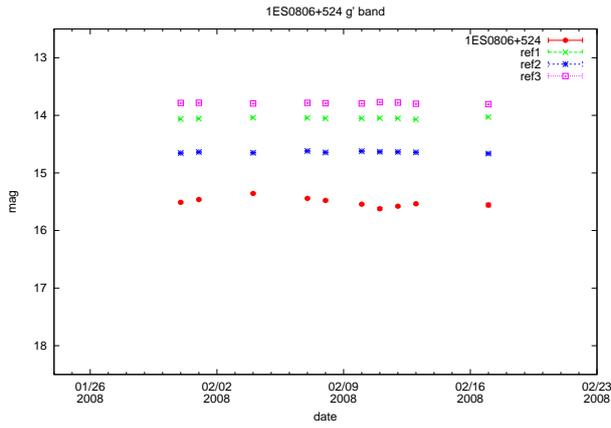


図 5.9: 1ES0806+524 の光度曲線

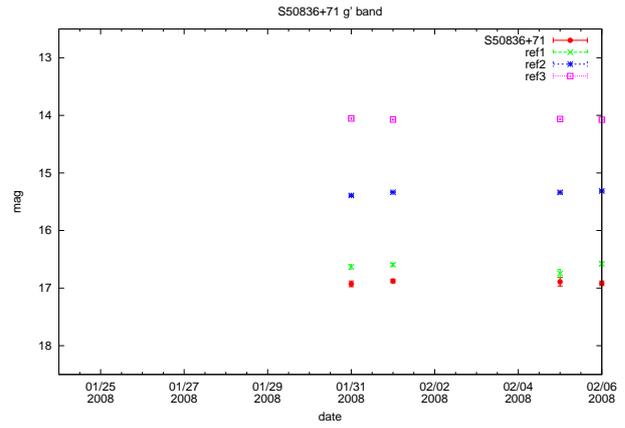


図 5.10: S50836+71 の光度曲線

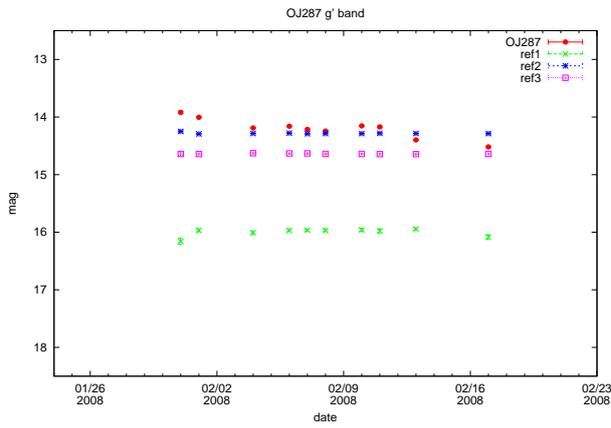


図 5.11: OJ287 の光度曲線

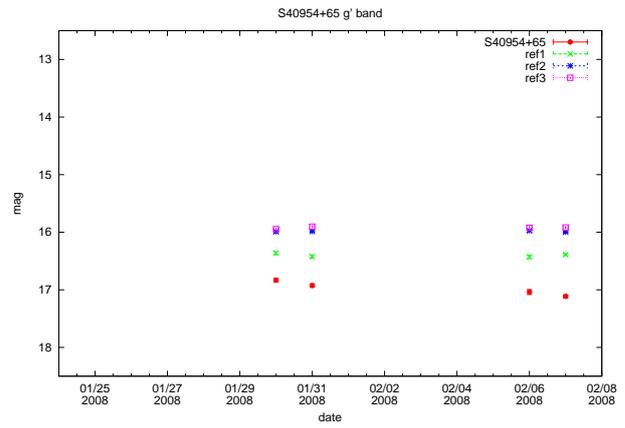


図 5.12: S40954+65 の光度曲線

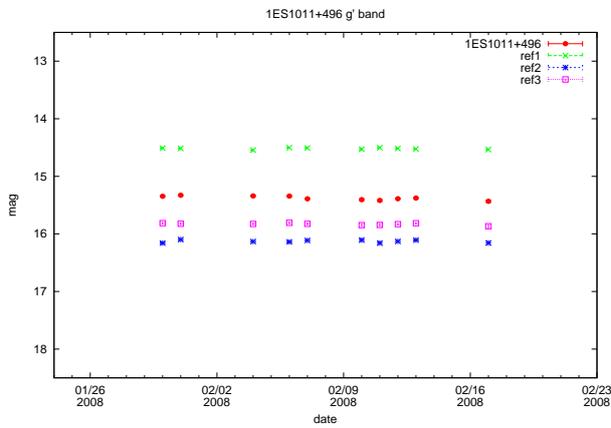


図 5.13: 1ES1011+496 の光度曲線

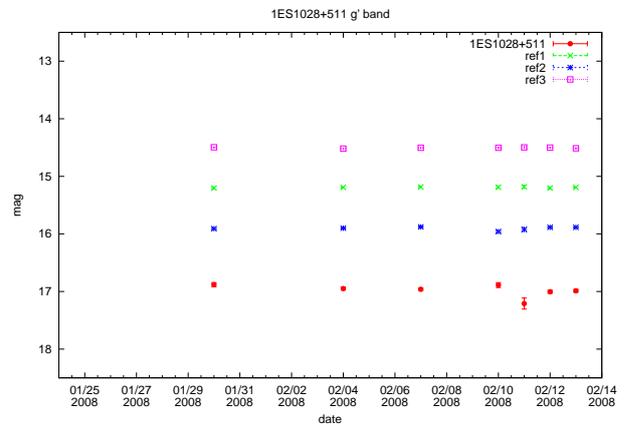


図 5.14: 1ES1028+511 の光度曲線

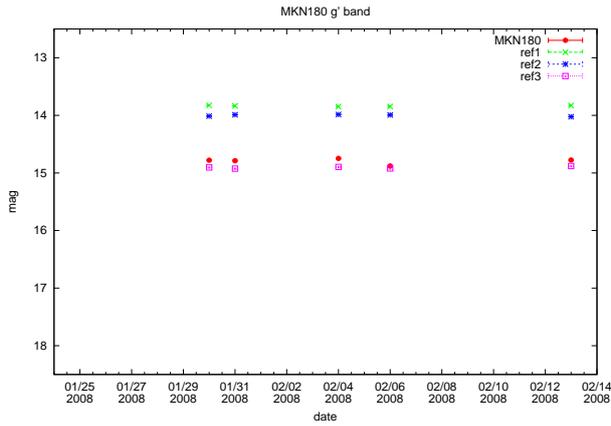


図 5.15: Mkn180 の光度曲線

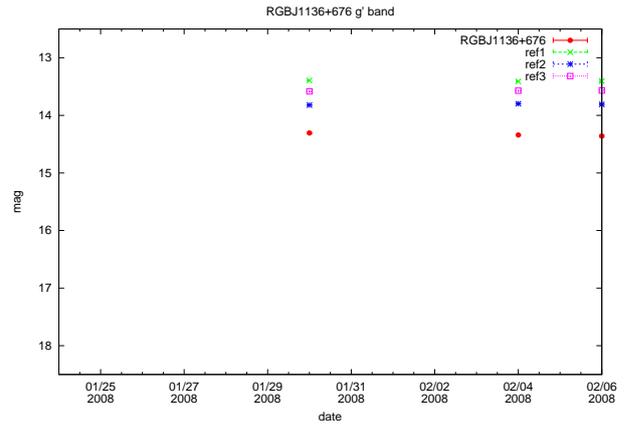


図 5.16: RGBJ1136+676 の光度曲線

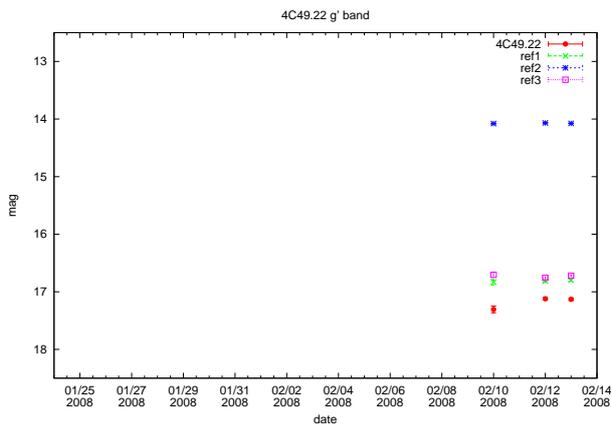


図 5.17: 4C49.22 の光度曲線

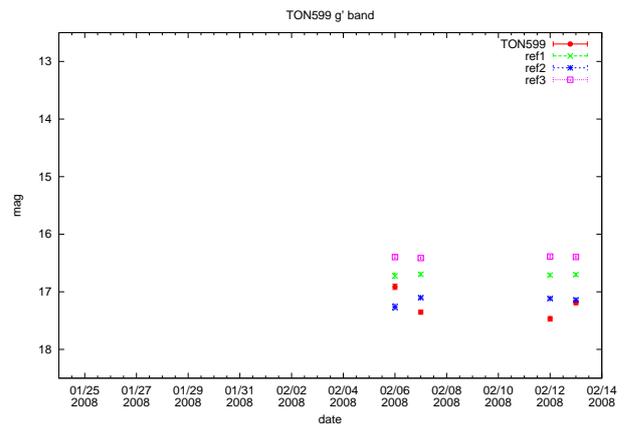


図 5.18: TON599 の光度曲線

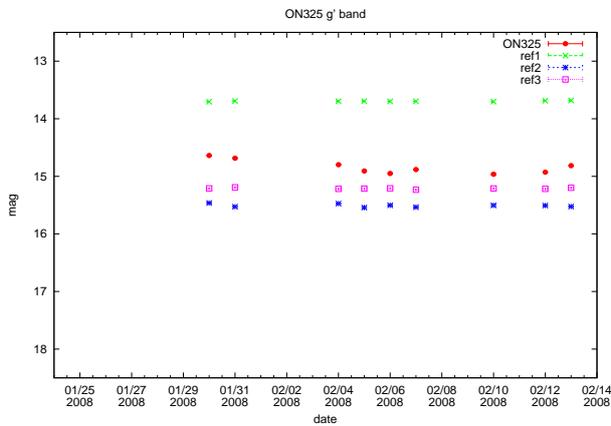


図 5.19: ON325 の光度曲線

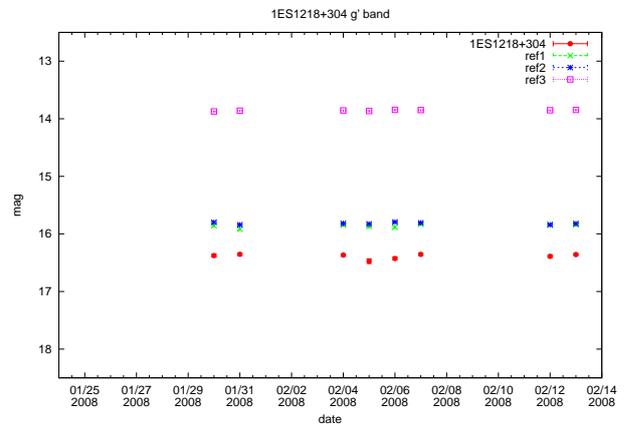


図 5.20: 1ES1218+304 の光度曲線

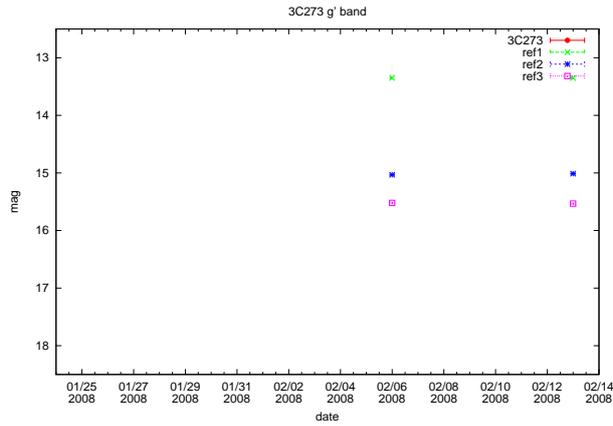


図 5.21: 3C273 の光度曲線

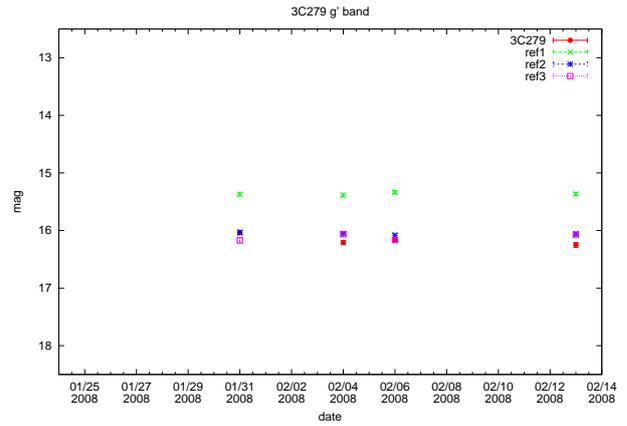


図 5.22: 3C279 の光度曲線

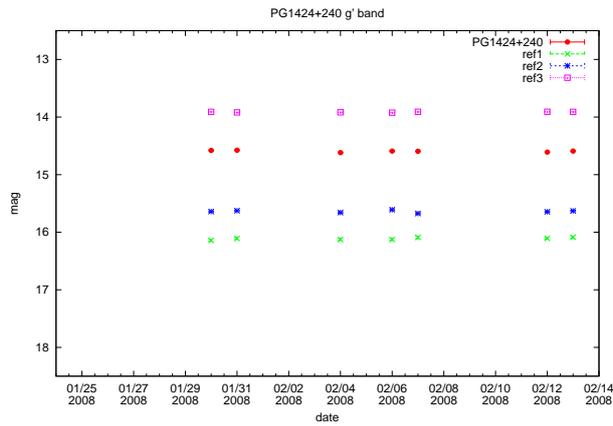


図 5.23: PG1424+240 の光度曲線

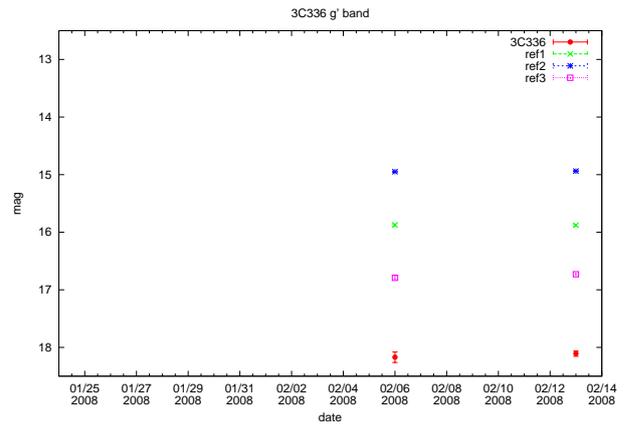


図 5.24: 3C336 の光度曲線

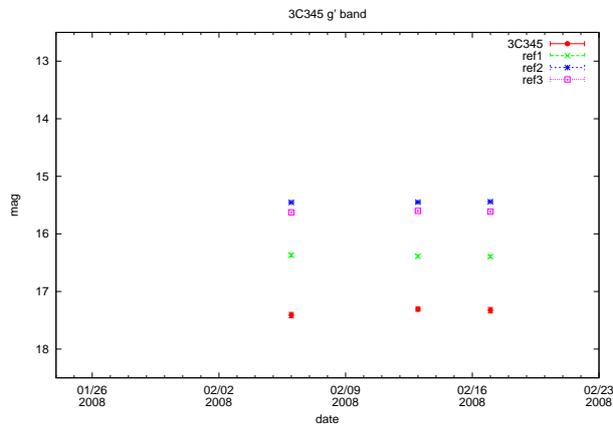


図 5.25: 3C345 の光度曲線

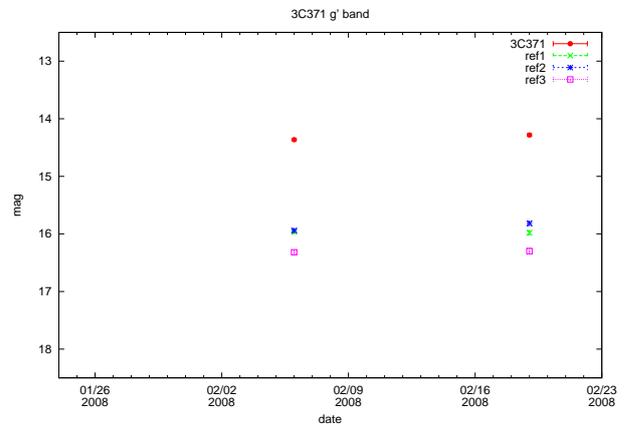


図 5.26: 3C371 の光度曲線

5.5 まとめ

今回の観測結果として、2週間の間、観測天体の光度は一定であったことがわかった。つまり、この期間にフレアなどの大幅な光度変化が起こらなかったことが言える。参照星の光度も一定であることから、基準として使える参照星を選択できていたこと、求めた観測対象天体の等級が正しいことがいえる。このことから、今回のパトロール観測の目的である、1晩あたりの観測天体の数を増やすこと、観測した天体の等級を自動で求めることに成功したといえる。

これによって、我々は多波長観測の環境を整えることができ、GLAST 打ち上げ後の多波長観測キャンペーンに参加することが容易になった。

さらに、今後もこのパトロール観測を続けることで、大幅な光度変化を検知することができ、それによって他の望遠鏡や、衛星にフレアの発生を通知することができる。

第6章 まとめと今後

本研究では、GRB 観測時間以外に、AGN などの天体を手動観測時よりもたくさん観測するために、天体リストファイルから、もっとも優先度の高い天体を計算し、自動で観測するパトロール観測システムを開発した。このパトロール観測システムの導入によって、1 晩あたり 10~20 以上の天体の観測に成功した。さらに、観測した天体の解析にかかる人的負担を軽減するために、自動で解析、測光し、得られた等級データの光度曲線を作成するソフトウェアを開発した。このソフトウェアにより、1 晩およそ 1800 フレームの観測データの解析、測光、光度グラフの作成を約 1 時間で行えるようになった。より効率的に観測天体リストを編集するために、天体リストを変更するための web ページを作成した。このページでは、登録されている天体の検索、登録データの変更、新規追加を行うことができ、天体リストに誤った形式のデータを登録しないようチェックできる。さらに、その晩の観測スケジュールを確認することができ、任意の天体を観測できるようにスケジュールを組むことができる。

今回、パトロール観測システム導入後 2 週間の観測では、光度の大幅な変化は観測されなかった。しかし、今後このシステムによって、フレアなど大きな光度変化を伴う現象を検知する日が必ずくると期待できる。

今後の課題としては、第 1 に作成した光度曲線から自動でフレアなどの光度変化を検出することである。現在は、作成されたグラフを 1 つ 1 つ目で見ても、光度が変化していないかどうかチェックしている。しかし、10 以上の天体に対し、目で満てグラフをチェックすることは効率的ではない。観測したデータから等級を得て、グラフ化するとき、前日との等級の変化をチェックして、自動でメールするように機能を高度化したいと思っている。第 2 に、観測天体の追加に伴う参照星の決定を容易にするソフトウェアの開発である。参照星の光度が変化していないかどうか、3 日から 5 日観測した結果からチェックする必要がある。観測データから、光度が変化していない参照星を検出するような機能を持つソフトウェアを開発したいと思っている。

さらに、光度グラフを web 上に公開し、MITSuME 望遠鏡のデータを還元してきたいと思っている。

付録A 参照星

A.1 1ES0120+340

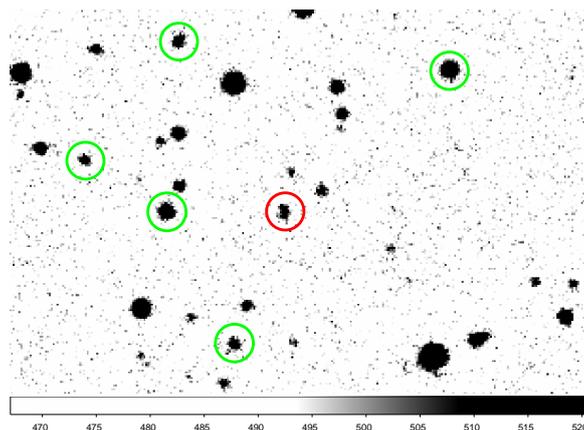


図 A.1: 1ES0120+340 近傍の g' band 画像。赤丸が 1ES0120+340、緑円が参照星。

表 A.1: 1ES0120+340 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	Gmag	Imag	Rmag	arcsec
1ES0120+340	01:23:08.55	+34:20:47.5				
ref1	01:23:16.795	+34:20:50.53	15.48	14.65	15.30	102.16
ref2	01:23:11.968	+34:18:57.41	16.69	15.05	15.22	117.95
ref3	01:23:16.128	+34:23:18.65	17.19	15.68	15.87	177.90
ref4	01:23:22.527	+34:21:33.98	17.03	15.92	16.35	179.22
ref5	01:22:57.246	+34:22:56.64	15.06	14.39	14.96	190.44

A.2 3C66A

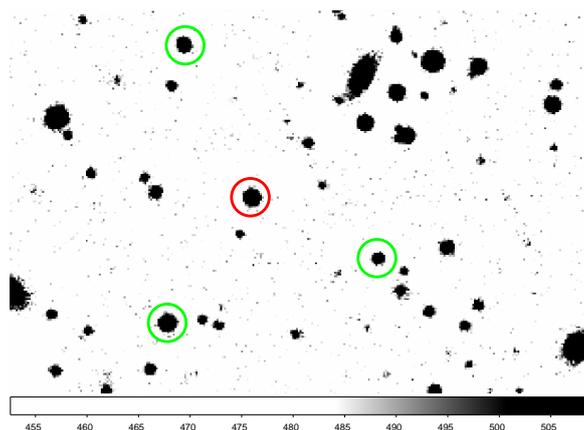


図 A.2: 3C66A 近傍の g' band 画像。赤丸が 3C66A、緑円が参照星。

表 A.2: 3C66A と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' mag	Imag	Rmag	arcsec
3C66A	02:22:39.612	+43:02:07.81	14.96	12.59	14.35	
ref1	02:22:46.117	+43:00:17.89	14.00	13.06	13.30	
ref2	02:22:45.137	+43:04:19.63	14.74	14.07	14.38	
ref3	02:22:29.659	+43:01:16.80	15.92	16.88	15.96	

A.3 AO0235+16

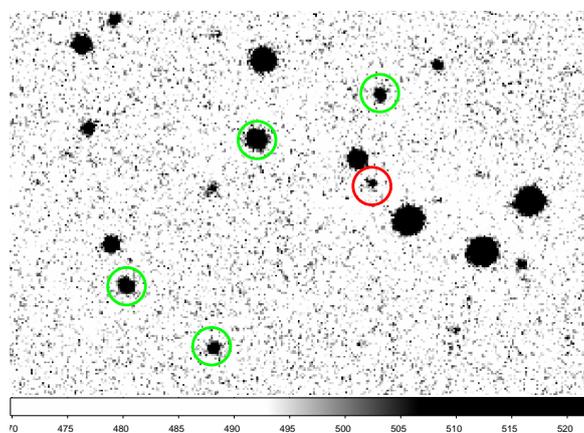


図 A.3: AO0235+16 近傍の g' band 画像。赤丸が AO0235+16、緑円が参照星。

表 A.3: AO0235+16 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
AO0235+16	02:38:38.93	+16:36:59.2				
ref1	02:38:38.528	+16:38:16.19	16.87	15.10	16.03	77.21
ref2	02:38:45.916	+16:37:35.78	14.88	14.03	14.56	106.86
ref3	02:38:48.265	+16:34:34.83	16.91	15.98	16.45	197.11
ref4	02:38:53.600	+16:35:27.76	16.18	15.33	15.74	229.84

A.4 PKS0403-132

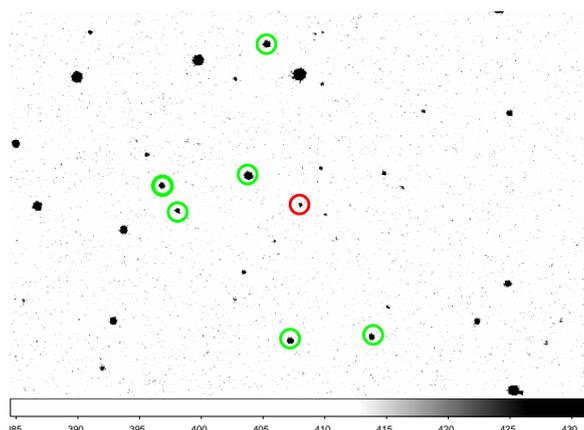


図 A.4: PKS0403-132 近傍の g' band 画像。赤丸が PKS0403-132、緑円が参照星。

表 A.4: PKS0403-132 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
PKS0403-132	04:05:34.000	-13:08:13.79				
ref1	04:05:40.193	-13:07:23.58	14.05	12.66	13.19	103.42
ref2	04:05:35.005	-13:12:08.42	14.93	14.18	14.48	
ref3	04:05:50.391	-13:07:42.95	15.33	14.63	15.23	
ref4	04:05:25.413	-13:11:59.88	15.61	15.12	15.19	
ref5	04:05:48.477	-13:08:26.11	16.07	13.86	14.86	
ref6	04:05:38.271	-13:03:35.34	14.65	13.73	13.94	

A.5 1ES0647+250

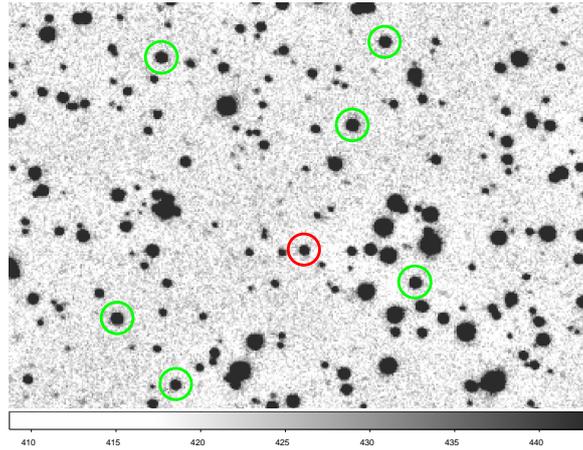


図 A.5: 1ES0647+250 近傍の g' band 画像。赤丸が 1ES0647+250、緑円が参照星。

表 A.5: 1ES0647+250 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' mag	Imag	Rmag	arcsec
1ES0647+250	06:50:46.52	+25:03:00.30				
ref1	06:50:42.959	+25:05:09.75	15.00	14.75	15.01	
ref2	06:50:38.076	+25:02:27.81	15.02	14.70	15.02	
ref3	06:51:00.559	+25:01:46.70	15.03	14.82	15.08	
ref4	06:50:57.469	+25:06:17.13	15.48	15.30	15.41	
ref5	06:50:40.596	+25:06:35.96	15.61	15.32	15.57	
ref6	06:50:56.056	+25:00:39.08	15.63	15.76	15.74	

A.6 S50716+71

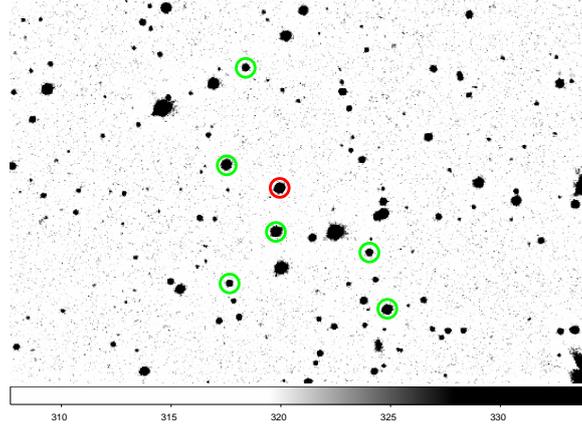


図 A.6: S50716+71 近傍の g' band 画像。赤丸が S50716+71、緑円が参照星。

表 A.6: S50716+71 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' /mag	Imag	Rmag	arcsec
S50716+71	07:21:53.390	+71:20:36.65				
ref1	07:21:54.311	+71:19:21.23	13.47	13.32	13.67	75.18
ref2	07:22:12.578	+71:21:15.19	13.53	13.39	13.78	99.66
ref3	07:21:13.954	+71:17:10.01	13.73	13.35	13.55	
ref4	07:22:06.395	+71:24:04.03	15.19	14.86	15.46	
ref5	07:21:20.753	+71:18:48.32	15.51	14.98	15.33	
ref6	07:22:10.576	+71:17:50.09	15.67	15.41	15.76	

A.7 PKS0735+178

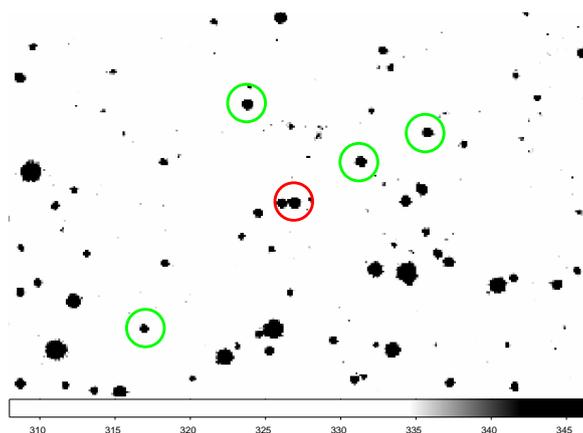


図 A.7: PKS0735+178 近傍の g' band 画像。赤丸が PKS0735+178、緑円が参照星。

表 A.7: PKS0735+178 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' mag	Imag	Rmag	arcsec
PKS0735+178	07:38:07.39	+17:42:19.00				
ref1	07:38:03.417	+17:42:55.79	16.05	15.70	15.89	79.70
ref2	07:38:10.265	+17:43:43.78	16.17	16.22	16.46	111.56
ref3	07:37:59.411	+17:43:21.68	16.35	16.12	16.41	140.36
ref4	07:38:16.335	+17:40:28.72	17.06	18.83	17.21	156.96

A.8 OI287

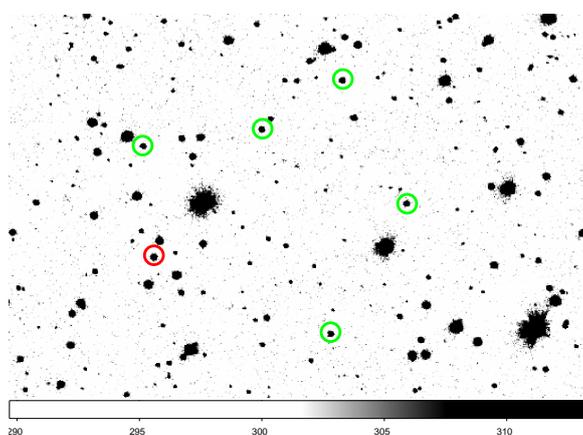


図 A.8: OI287 近傍の g' band 画像。赤丸が OI287、緑円が参照星。

表 A.8: OI287 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
OI287	07:55:51.555	+25:42:04.89				
ref1	07:55:27.866	+25:47:15.31	16.21	14.93	15.78	
ref2	07:55:19.494	+25:43:43.00	16.22	14.76	15.63	
ref3	07:55:38.063	+25:45:48.24	16.29	15.30	16.03	
ref4	07:55:53.113	+25:45:16.70	16.30	15.48	16.29	
ref5	07:55:28.911	+25:39:56.62	16.36	15.28	15.99	

A.9 PKS0754+100

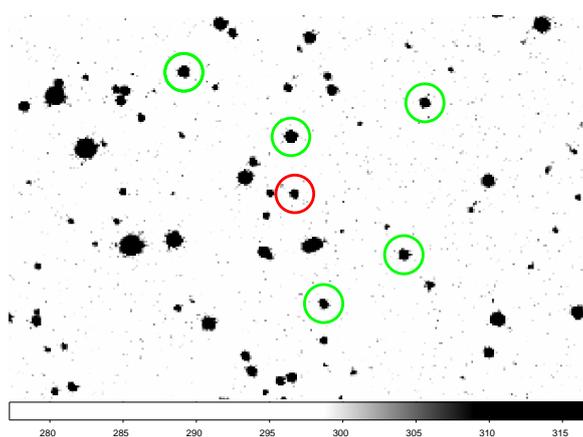


図 A.9: PKS0754+100 近傍の g' band 画像。赤丸が PKS0754+100、緑円が参照星。

表 A.9: PKS0754+100 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
PKS0754+100	07:57:06.637	+09:56:34.88	13.84	14.17	15.99	
ref1	07:57:06.905	+09:57:24.34	14.83	14.98	15.53	49.54
ref2	07:57:13.198	+09:58:19.22	14.99	14.93	15.48	142.70
ref3	07:57:00.230	+09:55:43.20	15.54	15.78	15.83	107.43
ref4	07:56:59.112	+09:57:55.41	15.81	15.83	16.21	136.76
ref5	07:57:04.873	+09:54:59.92	16.08	16.51	16.70	98.45

A.10 1ES0806+524

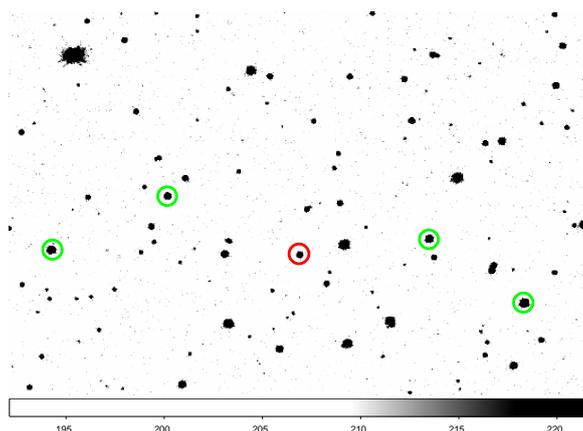


図 A.10: 1ES0806+524 近傍の g' band 画像。赤丸が 1ES0806+524、緑円が参照星。

表 A.10: 1ES0806+524 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' mag	Imag	Rmag	arcsec
1ES0806+524	08:09:49.203	+52:18:58.35				
ref1	08:09:24.907	+52:19:29.67	14.02	13.78	14.24	
ref2	08:10:14.128	+52:20:36.76	14.35	14.46	14.80	
ref3	08:10:35.793	+52:19:00.52	13.78	13.72	14.13	
ref4	08:09:06.797	+52:17:40.52	13.45	13.33	13.72	

A.11 S50836+71

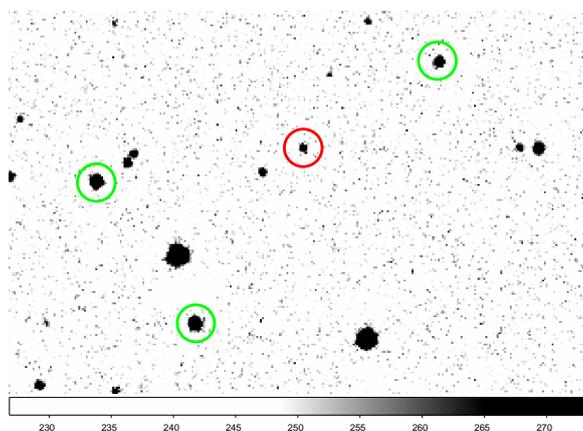


図 A.11: S50836+71 近傍の g' band 画像。赤丸が S50836+71、緑円が参照星。

表 A.11: S50836+71 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
S50836+71	08:41:24.333	+70:53:42.45				
ref1	08:41:42.557	+70:51:07.36	13.95	13.05	13.73	
ref2	08:41:00.798	+70:54:59.44	15.39	14.21	14.99	139.14
ref3	08:42:00.481	+70:53:08.82	14.06	18.61	13.79	180.43

A.12 OJ287

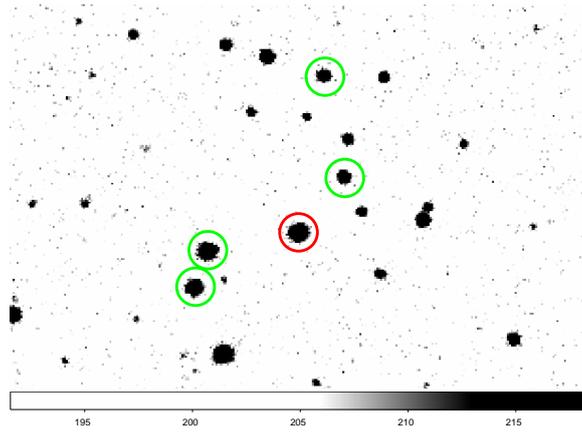


図 A.12: OJ287 近傍の g' band 画像。赤丸が OJ287、緑円が参照星。

表 A.12: OJ287 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
OJ287	08:54:48.878	+20:06:30.64				
ref1	08:54:46.117	+20:07:19.62	15.90	14.92	15.82	62.45
ref2	08:54:54.443	+20:06:13.67	14.31	13.91	14.61	79.98
ref3	08:54:55.195	+20:05:42.43	14.64	14.18	14.94	101.11
ref4	08:54:47.456	+20:08:47.16	15.86	15.62	16.09	137.67

A.13 S40954+65

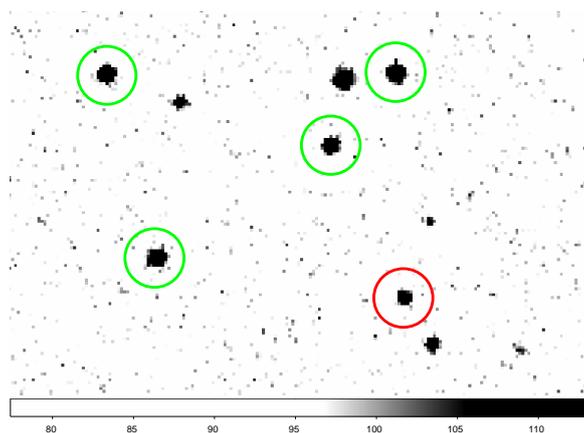


図 A.13: S40954+65 近傍の g' band 画像。赤丸が S40954+65、緑円が参照星。

表 A.13: S40954+65 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' mag	Imag	Rmag	arcsec
S40954+65	09:58:47.219	+65:33:55.78	17.06	14.43	16.53	
ref1	09:58:53.912	+65:35:18.72	16.45	15.43	15.54	93.54
ref2	09:58:48.325	+65:35:59.79	16.02	14.85	15.23	125.17
ref3	09:59:09.275	+65:34:14.77	15.90	13.16	14.41	138.10
ref4	09:59:14.090	+65:35:56.16	16.03	14.42	15.46	205.98

A.14 1ES1011+496

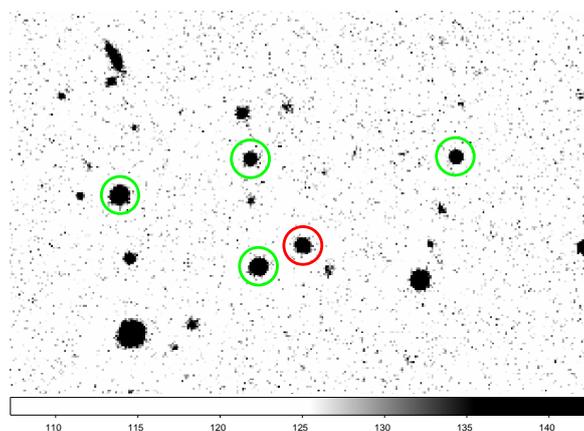


図 A.14: 1ES1011+496 近傍の g' band 画像。赤丸が 1ES1011+496、緑円が参照星。

表 A.14: 1ES1011+496 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
1ES1011+496	10:15:04.132	+49:26:00.87				
ref1	10:15:08.034	+49:25:42.33	14.55	13.23	13.55	42.20
ref2	10:15:08.888	+49:27:15.46	16.07	14.82	15.01	87.94
ref3	10:14:50.753	+49:27:19.99	15.71	18.69	15.09	152.75
ref4	10:15:20.373	+49:26:42.40	14.06	12.48	12.93	163.73

A.15 1ES1028+511

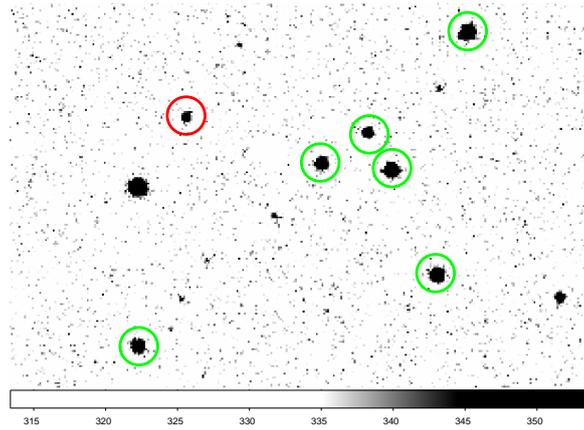


図 A.15: 1ES1028+511 近傍の g' band 画像。赤丸が 1ES1028+511、緑円が参照星。

表 A.15: 1ES1028+511 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
1ES1028+511	10:31:18.527	+50:53:36.21				
ref1	10:31:06.162	+50:52:57.49	15.27	14.16	14.69	123.00
ref2	10:31:02.021	+50:53:24.85	15.88	14.27	15.05	156.41
ref3	10:30:59.807	+50:52:53.06	14.50	13.50	14.12	182.09
ref4	10:31:22.586	+50:50:17.50	15.25	14.29	14.81	202.12
ref5	10:30:53.097	+50:54:53.03	14.29	13.42	13.67	252.46
ref6	10:30:55.568	+50:51:22.68	14.59	13.52	14.17	254.76

A.16 Mkn180

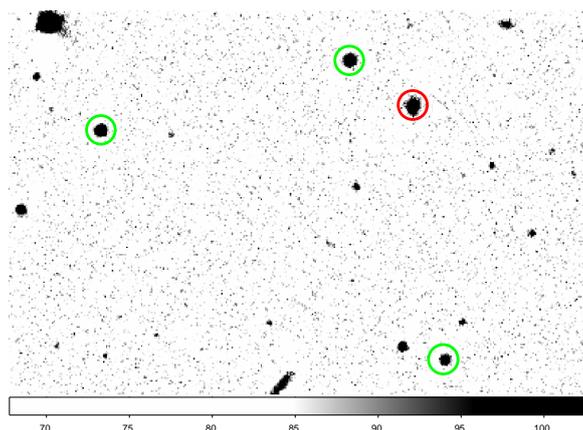


図 A.16: Mkn180 近傍の g' band 画像。赤丸が Mkn180、緑円が参照星。

表 A.16: Mkn180 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' mag	Imag	Rmag	arcsec
Mkn180	11:36:26.40	+70:09:27.0				
ref1	11:36:40.535	+70:10:15.76	13.82	13.22	13.44	86.91
ref2	11:37:34.739	+70:08:50.85	14.03	12.93	13.51	
ref3	11:36:18.269	+70:04:41.93	14.87	13.37	13.68	

A.17 RGBJ1136+676

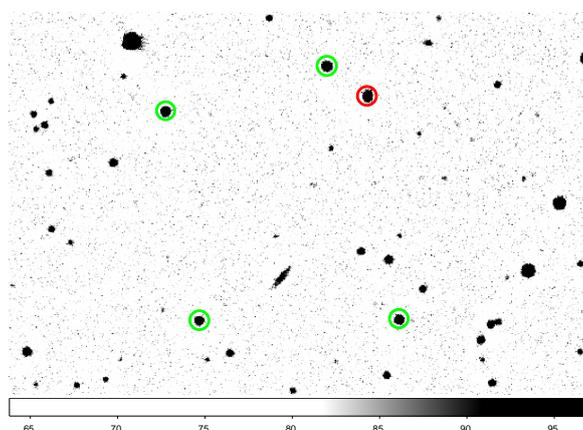


図 A.17: RGBJ1136+676 近傍の g' band 画像。赤丸が RGBJ1136+676、緑円が参照星。

表 A.17: RGBJ1136+676 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
RGBJ1136+676	11:36:26.41	+70:09:27.3				
ref1	11:36:40.535	+70:10:15.76	13.82	13.22	13.44	86.70
ref2	11:36:14.383	+70:02:58.41	14.19	13.30	13.94	
ref3	11:37:34.739	+70:08:50.85	14.03	12.93	13.51	
ref4	11:37:21.617	+70:02:48.83	14.46	13.44	13.92	

A.18 4C49.22

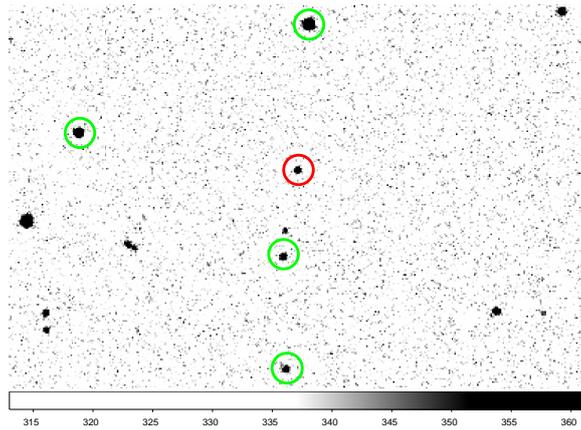


図 A.18: 4C49.22 近傍の g band 画像。赤丸が 4C49.22、緑円が参照星。

表 A.18: 4C49.22 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
4C49.22	11:53:24.454	+49:31:09.00				
ref1	11:53:25.953	+49:29:33.75	16.67	15.57	16.30	96.34
ref2	11:53:23.497	+49:33:49.00	14.06	12.76	13.71	160.28
ref3	11:53:25.404	+49:27:32.07	16.58	14.58	15.65	217.12
ref4	11:53:48.941	+49:31:46.28	15.22	13.89	14.87	241.17

A.19 TON599

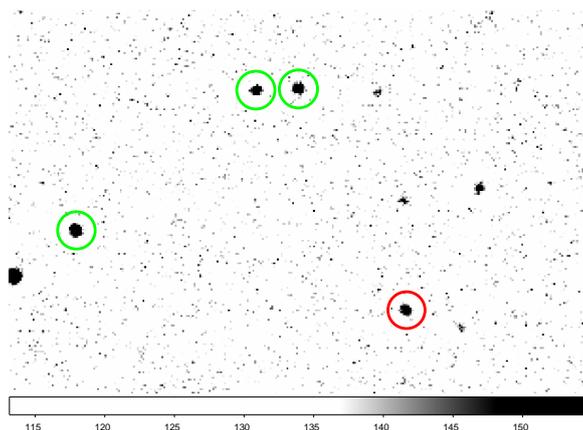


図 A.19: TON599 近傍の g' band 画像。赤丸が TON599、緑円が参照星。

表 A.19: TON599 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' mag	Imag	Rmag	arcsec
TON599	11:59:31.80	+29:14:44.0				
ref1	11:59:39.110	+29:17:54.90	16.59	15.88	16.41	213.52
ref2	11:59:41.916	+29:17:53.39	17.11	14.38	15.51	231.06
ref3	11:59:53.611	+29:15:49.41				

A.20 ON325

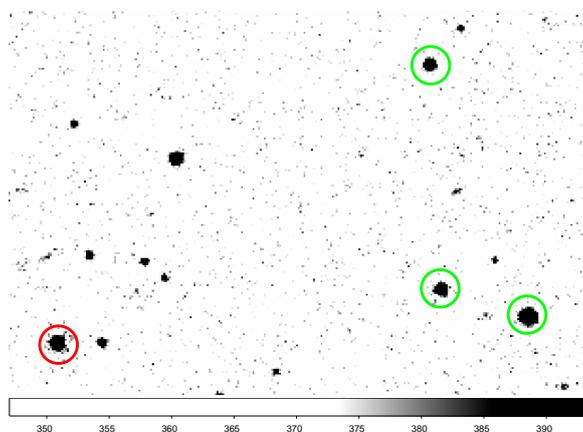


図 A.20: ON325 近傍の g' band 画像。赤丸が ON325、緑円が参照星。

表 A.20: ON325 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
ON325	12:17:52.077	+30:07:00.68	15.38	12.54	13.47	
ref1	12:17:20.891	+30:07:30.60	13.73	11.82	13.47	
ref2	12:17:26.670	+30:07:52.83	15.46	13.39	14.86	
ref3	12:17:27.664	+30:11:09.33	15.09	13.59	15.00	

A.21 1ES1218+304

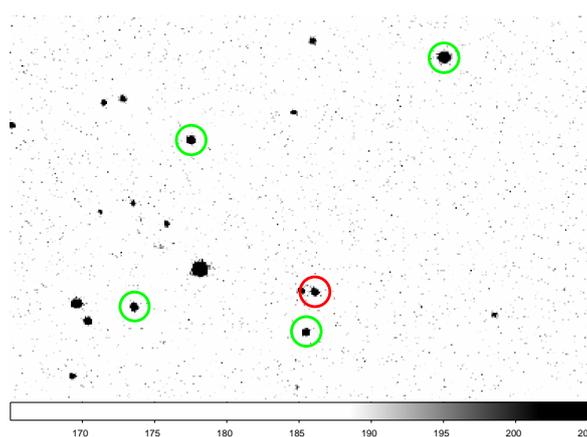


図 A.21: 1ES1218+304 近傍の g' band 画像。赤丸が 1ES1218+304、緑円が参照星。

表 A.21: 1ES1218+304 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
1ES1218+304	12:21:21.943	+30:10:37.15	15.31	13.80	14.93	
ref1	12:21:22.620	+30:09:53.49	16.22	14.14	15.43	44.50
ref2	12:21:37.058	+30:10:18.25	15.55	17.42	15.52	196.94
ref3	12:21:32.504	+30:13:21.59	15.68	14.35	15.50	214.03
ref4	12:21:11.372	+30:14:55.61	13.91	12.35	13.65	

A.22 3C273

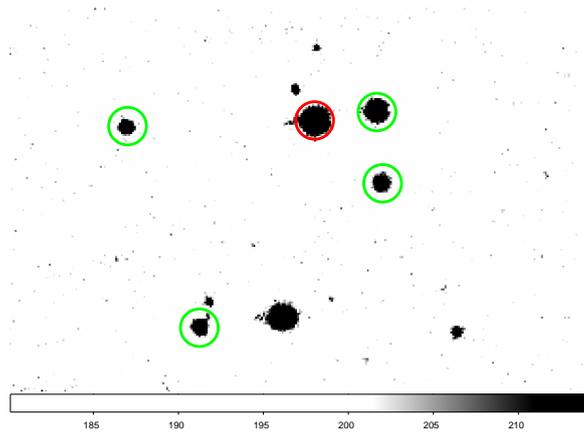


図 A.22: 3C273 近傍の g' band 画像。赤丸が 3C273、緑円が参照星。

表 A.22: 3C273 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' /mag	Imag	Rmag	arcsec
3C273	12:29:06.694	+02:03:08.63				
ref1	12:29:03.198	+02:03:18.57	13.47	12.76	13.42	53.43
ref2	12:29:02.834	+02:02:16.12	14.77	13.52	14.22	78.18
ref3	12:29:17.520	+02:03:01.51	15.27	14.37	14.84	162.36
ref4	12:29:13.161	+02:00:09.22	14.91	13.98	14.56	203.86

A.23 3C279

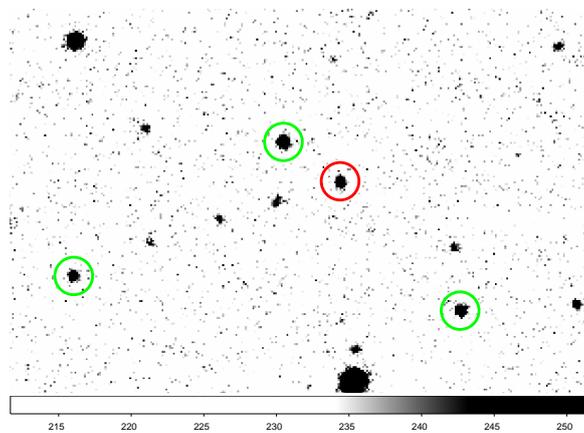


図 A.23: 3C279 近傍の g' band 画像。赤丸が 3C279、緑円が参照星。

表 A.23: 3C279 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
3C279	12:56:11.170	-05:47:21.51				
ref1	12:56:14.469	-05:46:47.63	15.49	14.80	15.43	59.76
ref2	12:56:04.150	-05:49:11.31	15.79	14.54	15.60	151.77
ref3	12:56:26.524	-05:48:45.78	16.06	15.59	16.15	244.14

A.24 PG1424+240

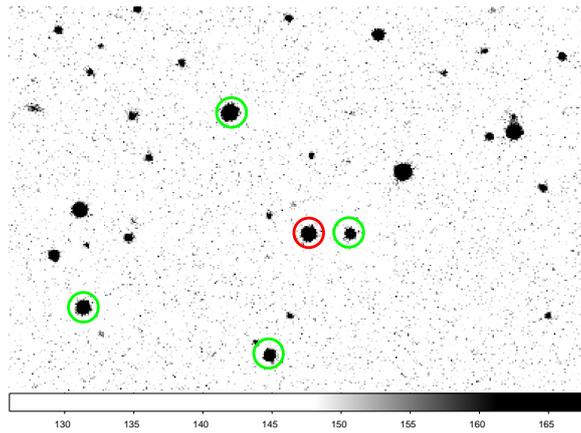


図 A.24: PG1424+240 近傍の g' band 画像。赤丸が PG1424+240、緑円が参照星。

表 A.24: PG1424+240 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
PG1424+240	14:27:00.392	+23:48:00.02				
ref1	14:26:57.066	+23:48:01.23	15.96	15.18	15.30	45.64
ref2	14:27:03.384	+23:45:46.87	15.52	14.27	14.55	139.37
ref3	14:27:06.798	+23:50:12.18	13.96	12.80	13.13	158.73
ref4	14:27:18.224	+23:46:36.45				

A.25 3C336

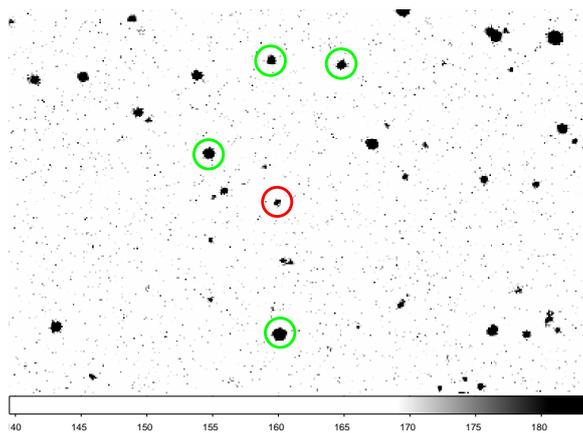


図 A.25: 3C336 近傍の g' band 画像。赤丸が 3C336、緑円が参照星。

表 A.25: 3C336 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g' /mag	Imag	Rmag	arcsec
3C336	16:24:39.08	+23:45:13.0				
ref1	16:24:44.616	+23:46:05.03	15.82	14.78	15.49	92.10
ref2	16:24:38.762	+23:42:45.45	15.01	13.82	14.61	147.61
ref3	16:24:39.713	+23:47:49.81	16.56	15.53	16.21	157.05
ref4	16:24:34.033	+23:47:45.80	16.71	15.01	15.89	167.77

A.26 3C345

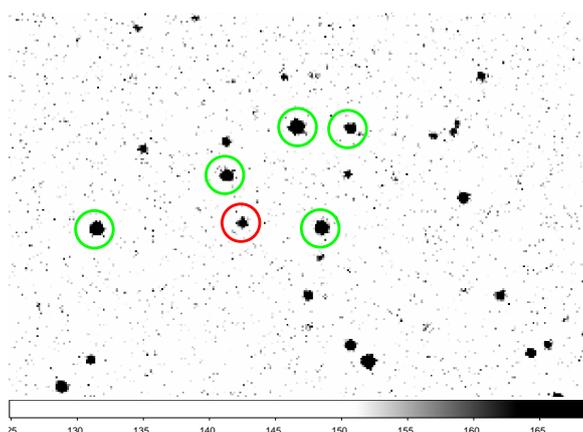


図 A.26: 3C345 近傍の g' band 画像。赤丸が 3C345、緑円が参照星。

表 A.26: 3C345 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
3C345	16:42:58.805	+39:48:37.03				
ref1	16:43:00.077	+39:49:18.14	16.39	16.04	16.30	43.65
ref2	16:42:52.880	+39:48:33.66	15.45	13.54	14.80	68.42
ref3	16:43:09.714	+39:48:29.93	15.48	14.69	15.51	125.85
ref4	16:42:54.846	+39:50:00.59	15.30	14.53	14.96	

A.27 3C371

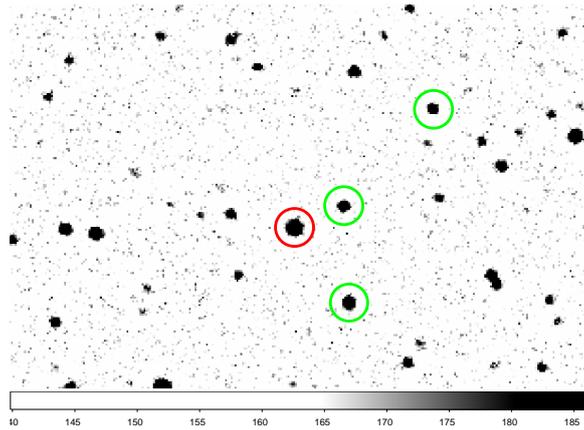


図 A.27: 3C371 近傍の g/ band 画像。赤丸が 3C371、緑円が参照星。

表 A.27: 3C371 と参照星の座標

Name	Ra[hms]	Dec[dms]	g/mag	Imag	Rmag	arcsec
3C371	18:06:50.669	+69:49:28.34	14.55	10.44	11.39	
ref1	18:06:42.522	+69:49:48.22	16.29	15.42	15.81	46.89
ref2	18:06:41.297	+69:48:24.06	15.27	18.53	12.53	80.35
ref3	18:06:27.919	+69:51:13.62	16.62	18.74	16.19	158.20

付録B 測光範囲

B.1 AO0235+16

表 B.1: AO0235+16 Aperture Parameters

apperture	annulus	dannulus
4.0	5.0	3.0

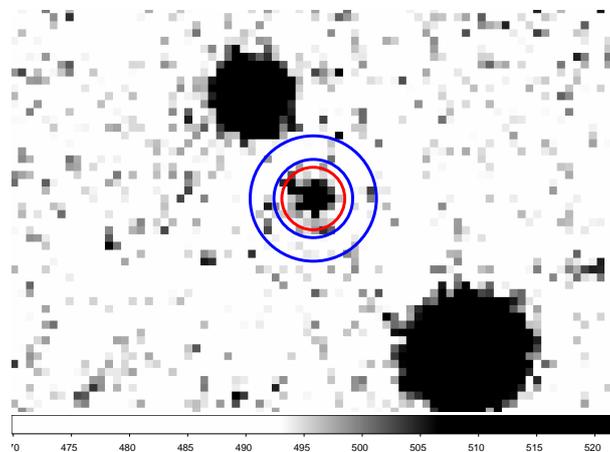


図 B.1: AO0235+16 の測光範囲。赤丸が aperture 範囲。内側の青円から外側の青円までが annulus 範囲。

B.2 PKS0735+178

表 B.2: PKS0735+178 Aperture Parameters

apperture	annulus	dannulus
3.4	3.5	0.8

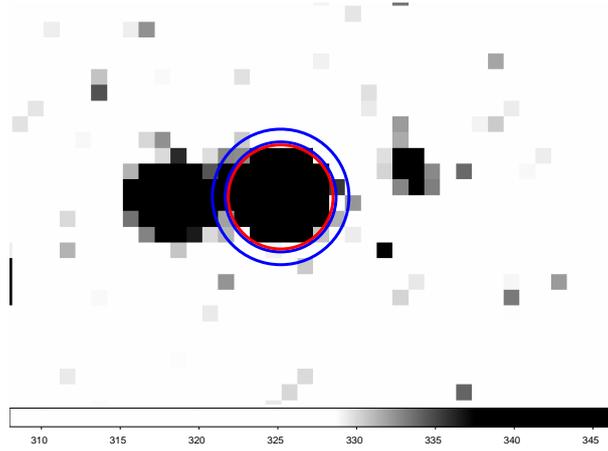


図 B.2: PKS0735+178 の測光範囲。赤丸が aperture 範囲。内側の青円から外側の青円までが annulus 範囲。

B.3 1ES1218+304

表 B.3: 1ES1218+304 Aperture Parameters

aperture	annulus	dannulus
3.5	4.5	1.5

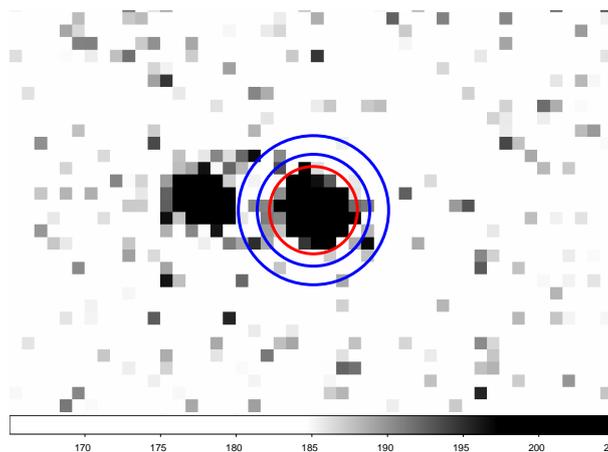


図 B.3: 1ES1218+304 の測光範囲。赤丸が aperture 範囲。内側の青円から外側の青円までが annulus 範囲。

付録C 3C454.3の観測

明野望遠鏡で、2007年11月22日から12月6日まで、フレアを起こしたブレーザー3C454.3を手動で観測・解析した。さらに、12月5日から12月6日にかけて、X線観測衛星Suzakuでも3C454.3を観測した。この明野望遠鏡とSuzaku衛星での、可視光とX線の多波長観測の解析結果を示す。

C.1 明野望遠鏡の観測データ

図C.1は明野望遠鏡での2007年11月22日から12月6日までの、3C454.3の g' バンドの光度曲線である。3つの参照星の光度が一定であるのに対し、3C454.3の光度が大きく変化しているのがわかる。

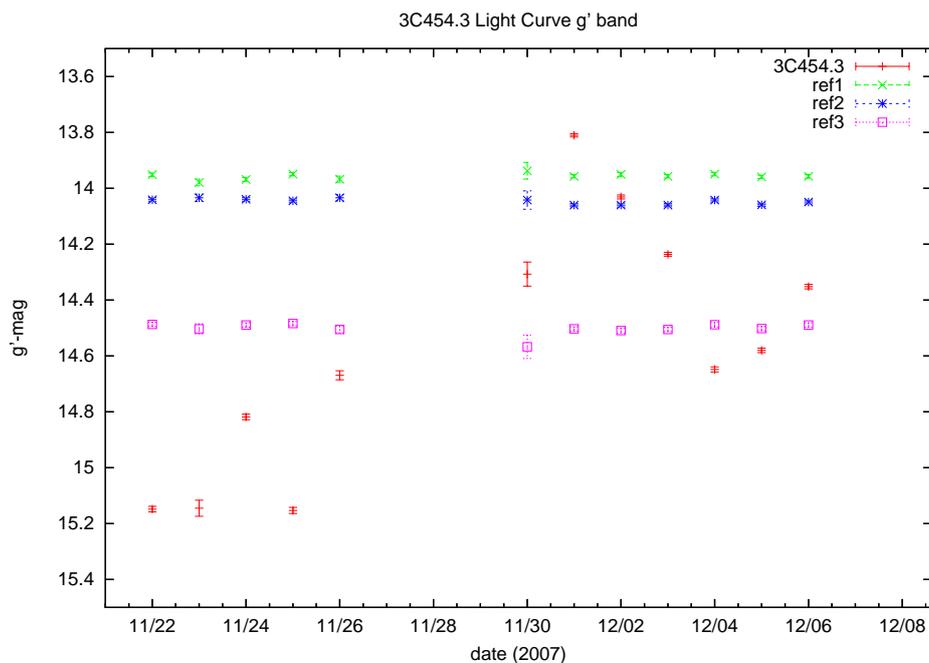


図 C.1: 3C454.3 の g' バンドの光度グラフ。3つの参照星の光度が一定であるのに対し、3C454.3の光度が大きく変化しているのがわかる。

C.2 Suzaku 衛星の観測データ

Suzaku 衛星は日本で 5 番目の X 線天文衛星である。4 つの軟 X 線検出器 XIS と、1 つの硬 X 線検出器 HXD で、10 keV ~ 700 keV までの非常に広いエネルギー範囲を観測できる。検出器の仕様を表 C.1 に示す。

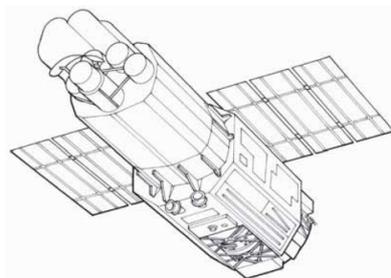


図 C.2: Suzaku 衛星の概観

検出器	XIS	HXD
有効面積	340 cm^2 (FI) 390 cm^2 (BI) @ 1.5 keV 350 cm^2 (FI) 100 cm^2 (BI) @ 8 keV	~ 160 cm^2 @ 20 keV ~ 260 cm^2 @ 100 keV
視野	17'.8 × 17'.8	34' × 34' (\lesssim 100 keV) 4 °.5 × 4 °.5 (\gtrsim 100 keV)
エネルギー帯域	0.2 ~ 12 keV	10 ~ 600 keV (PIN 10 ~ 60 keV) (GSO 30 ~ 600 keV)
エネルギー分解能	~ 130 eV @ 6 keV	PIN ~ 3 keV (FWHM) GSO 7.6/ $\sqrt{E_{MeV}}$ % (FWHM)
時間分解能	8 s (Normal mode) 7.8 ms (P-Sum mode)	61 μ s

表 C.1: Suzaku 衛星の検出器

Suzaku 衛星は、2007 年 12 月 5 日から 12 月 6 日にかけて、3C454.3 を 40ksec 観測した。図 C.3 は XIS0、XIS1、XIS3、HXD(PIN) のスペクトルである。低エネルギー側のスペクトルが XIS によるもの、高エネルギー側のスペクトルが HXD(PIN) によるものである。

図 C.4 は XIS と HXD(PIN) の光度曲線である。上が XIS (0.4~10 keV) によるもの、下が PIN (12~60 keV) によるものである。

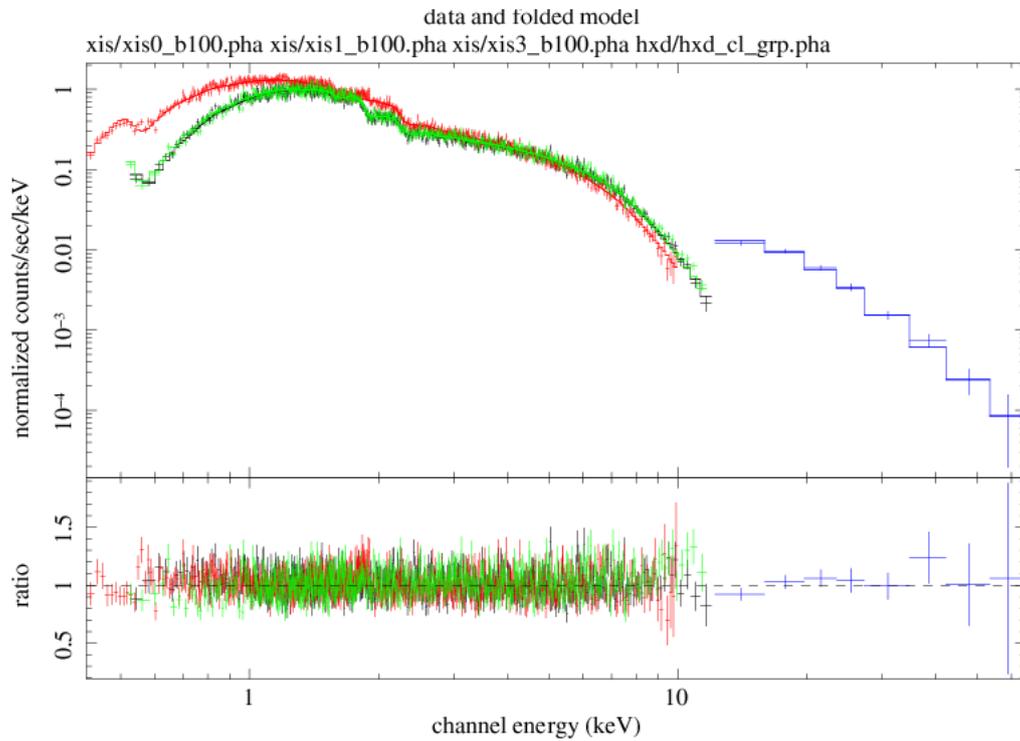


図 C.3: Suzaku 衛星の観測した 3C454.3 のスペクトル

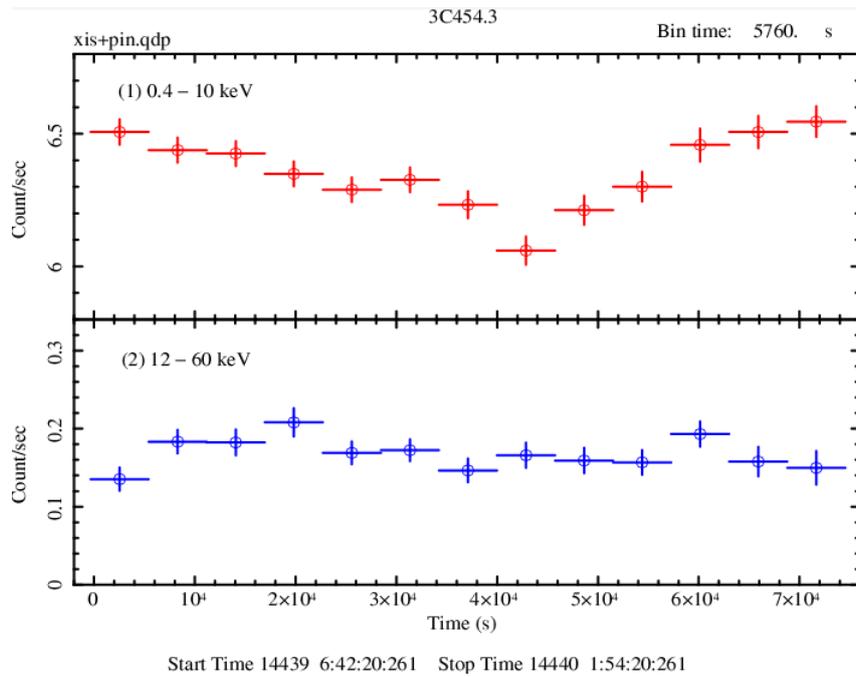


図 C.4: Suzaku 衛星の観測した 3C454.3 の光度曲線

関連図書

- [1] 下川辺 隆史、修士論文「ガンマ線バースト残光望遠鏡の自動観測システムおよび解析パイプラインの開発」 東京工業大学 (2007)
- [2] 谷津 陽一、修士論文「ガンマ線バースト観測用 50cm 望遠鏡の性能評価と改良」 東京工業大学 (2004)
- [3] 石村 拓人、修士論文「MITSuME 望遠鏡の自動観測・解析システムの高度化と観測」 東京工業大学 (2007)
- [4] 田中 識史、卒業論文「全天 X 線監視装置 MAXI のコリメータ特性試験」 東京工業大学 (2005)
- [5] 上原 岳士、卒業論文「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」 広島大学 (2006)
- [6] 横尾 武夫「新・宇宙を解く」 恒星社
- [7] 「すざく」ヘルプデスク、「すざく」ファーストステップガイド 第 3.03 版」 (2007)
- [8] Klebesadel, Strong & Olson., 1973, ApJ 182, L85
- [9] Meegan et al., 1992
- [10] Costa et al., 1997 Nature 387, 783
- [11] van Paradijjs et al., 1997, Nature 386, 686
- [12] Fukugita, Shimasaku, Ichikawa., 1995, PASP 107, 945
- [13] GLAST 衛星 NASA の公式ホームページ <http://glast.gsfc.nasa.gov/>
- [14] Swift 衛星が検出し、GCN アラート送った GRB のリスト
http://gcn.gsfc.nasa.gov/swift_grbs.html

- [15] 簡易データベース SQLite 公式ホームページ <http://www.sqlite.org/>
- [16] The STScI Digitized Sky Survey http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form
- [17] U.S.Naval Observatory, USNO-B1.0 Catalog <http://www.usno.navy.mil/>
- [18] United States Naval Observatory Flagstaff Station <http://www.nofs.navy.mil/>
- [19] gnuplot 公式ホームページ <http://www.gnuplot.info/>
- [20] GLAST 衛星でのモニター予定 AGN/blazar リスト <http://glastweb.pg.infn.it/blazar/>
- [21] R-filter lightcurves were obtained using 1.03 m telescope at Tuorla Observatory, Finland, and the 35cm telescope at the KVA observatory on La Palma, Canary islands, Spain. <http://users.utu.fi/kani/1m/>

謝辞

本研究を進めるにあたって、たくさんの方々にお世話になりました。河合先生には、このような研究テーマを与えていただき感謝しております。吉田様にはスケジューラのベースとなるプログラムを提供していただきました。下川辺さんにはスケジューラの構成や望遠鏡とのインタフェースなどで、相談にのっていただきました。石村さんには、測光の方法についてご教授いただきましたし、自動測光部分の相談にのっていただき、貴重なアドバイスをいただきました。工藤さんには AGN の観測を手伝っていただきました。河合研、渡辺研の皆様、あたたかい雰囲気の研究室をありがとうございました。

そして、夫には帰りが遅くなる日や、土曜日に息子の面倒を見ていただきました。また、時に相談にのっていただき、いいアドバイスをたくさんいただきました。本当にありがとうございました。