かなた望遠鏡を用いた可視近赤外偏光観測 によるブレーザー天体の光度、色、偏光の 相関の研究

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M080489

池尻 祐輝

主查:川端弘治 副查:杉立徹

20010年2月10日

概 要

ブレーザーは活動銀河核の一種で、ジェットと呼ばれる光速に近い速度のプラズマ噴流 が視線方向に向いている天体だと考えられている。相対論的ビーミング効果によってこの ジェットからの放射は強められ、したがってブレーザーはジェットを観測するのに適した 天体である。ブレーザーは電波から γ線まで広い波長域で放射が観測され、また放射強 度は激しく時間変化する。この放射はシンクロトロン放射による低エネルギー成分と、逆 コンプトン散乱による高エネルギー成分の2成分がある。低エネルギー成分は電波から X 線で観測され、強い偏光を示す。この偏光を観測することでジェットの磁場構造の情報が 得られる。しかし、これまで可視領域における偏光観測の例は少なく、ジェットの磁場構 造や放射の変動機構については未だ統一的な理解が得られていない。そこでこれらの問題 を解決するため、本研究では多数のブレーザーを長期間観測し、普遍的な観測的特徴の確 立を目標とした。観測は1.5m かなた望遠鏡を用いて、2008 年から 2009 年の間に 42 個の ブレーザーを多色偏光モニター観測し、光度、色、偏光の相関関係について調査した。

ブレーザーの光度と色について、明るいほど色が青くなるという傾向がこれまでいく つか報告されている。しかし、中には明るいほど赤くなるという傾向を示す天体や、そも そも相関関係がみられないという先行研究もあり、普遍的な傾向は確立されてはいない。 我々の観測では2つの天体(3C 454.3, PKS 1510-089)で、明るいほど色が赤くなる傾向 がそれぞれの暗い状態において観測された。この色の振る舞いはそれらの天体において、 暗い状態では降着円盤の成分の寄与が強くなることを示唆する。これらの時期を除くと、 全 42 天体中 26 天体が明るいほど色が青くなるという傾向を示した。10 夜以上観測した 天体ではこの傾向を示す天体の割合は約 81%に達する。よって我々はこの傾向はブレー ザーにおいて普遍的な特徴であると結論する。一方で、光度と偏光度に有意な相関が見ら れたのは 11 天体であり、光度と色の関係に比べて、相関が弱かった。また我々は各天体 における変動の激しさも調査した結果、絶対等級が暗い天体ほど、光度、色、偏光度の変 動が小さいということが分かった。これらの結果は、数日から数週間にわたる短時間変動 の要因が内部衝撃波によることを示唆する。

目 次

第1章	序論	7
1.1	活動銀河核	7
	1.1.1 活動銀河核の種類	7
	1.1.2 活動銀河核の統一モデル	10
	1.1.3 ジェット	12
1.2	ブレーザー	15
	1.2.1 ブレーザーの種別	16
	1.2.2 ブレーザーシークエンス	17
	1.2.3 変動機構	18
1.3	ブレーザーについての先行研究	19
	1.3.1 光度と色の相関	19
	1.3.2 光度と偏光の相関	22
	1.3.3 光度と偏光方位角	23
	1.3.4 これまでの問題と課題	24
1.4	Fermi衛星と「かなた」望遠鏡によるブレーザーキャンペーン	24
1.5	本研究の目的	25
第2章	観測	26
2.1	偏光観測	26
	2.1.1 偏光の基本原理	26
2.2	使用した観測装置...............................	27
	2.2.1 かなた望遠鏡	27
	2.2.2 TRISPEC	28
2.3	観測天体	30
2.4	解析	30
	2.4.1 画像の一次処理	30
	2.4.2 測光	33

第3章	観測結果	36
3.1	光度、色の相関	36
	3.1.1 V等級と色 $(V - J)$ の相関係数	36
	3.1.2 V,J 等級の変動の激しさと天体種別・光度との関係	41
	3.1.3 各波長帯間における変動の時間差	42
3.2	光度と偏光度の相関	43
	3.2.1 V 等級と偏光度の相関係数	43
	3.2.2 V 等級と偏光度の相関関数	47
3.3	偏光方位角の系統的な変化...............................	48
	3.3.1 偏光方位角の補正	48
	3.3.2 各天体の挙動	50
第4章	議論	55
4.1	2つの変動成分	55
4.2	光度変動の要因	55
4.3	光度と色に相関のなかった天体	57
4.4	熱的放射の示唆・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
4.5	磁場構造の示唆・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
第5章	まとめ	60
付録A	観測結果	62

表目次

2.1	かなた望遠鏡の仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
2.2	TRISPEC 各バンドの仕様	29
2.3	観測天体リスト	31
2.4	比較星リスト	34
2.5	比較星の測光に用いた天体リスト	35

図目次

1.1	可視光から紫外線における 700 以上のクエーサーのスペクトルの平均	8
1.2	2型セイファート銀河 NGC 1667 とライナー NGC 1052	10
1.3	活動銀河核の統一モデル	11
1.4	電波銀河 NGC 6251 の電波ローブとジェット	12
1.5	超光速運動の幾何学・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
1.6	ブレーザー 3C 66A の SED	15
1.7	X 線 (0.5-2.0keV) vs 電波フラックス (1.4GHz)	16
1.8	ブレーザーシークエンス	17
1.9	BL Lac の色等級図 $(R vs V - R)$	20
1.10	3C 454.3 の光度変化と色変化	21
1.11	3C 345 の光度 (<i>R</i>)、偏光度、偏光方位角	22
1.12	BL Lac の X 線、可視のフラックス、偏光方位角、偏光度の時間変動	23
1.13	偏光ベクトルの回転から示唆されるジェットの構造	23
0.1		00
2.1		28
2.2	かなに望遠鏡のカセクレン焦点に取り付けられた TRISPEC	29
2.3	取得した画像が受ける寄与 (川端哲也, 2009)	32
3.1	3C 371 の光度と色	37
3.2	3C 454.3 の光度と色	38
3.3	PG 1553+113 の色-等級図	38
3.4	PKS 0048-097とH 1722+119の光度と色	39
3.5	PKS 1502+106 の光度と色	40
3.6	絶対等級に対する $\Delta V/\Delta(V-J)$	41
3.7	絶対等級に対する (V – J)の変動幅	42
3.8	BL Lac における各波長帯間の相関関数	43
3.9	AO 0235+164 の光度、偏光度	44
3.10	Mis V1436 の光度、偏光度	45
3.11	OJ 49 の光度、偏光度	46
3.12	絶対等級の平均に対する偏光度の最大値	47

3.13	BL Lac の V 等級と偏光度の相関関数	48
3.14	Mis V1436のV等級と偏光度(JD 2455120)	49
3.15	PKS 1510-089 の偏光方位角	51
3.16	Marscher による PKS 1510-089 の観測結果	52
3.17	3C 66A の偏光方位角	53
3.18	PKS 1502+106 の偏光方位角	54
3.19	PKS 1502+106 の光度曲線	54
41	内部衝撃波とビーミング因子による SED の変化の違い	56
4.2	Mis V1436とS5 1803+784の色-等級図	50 58
7.2		00
A.1	Mis V1436	62
A.2	PKS 0215+015	63
A.3	QSO 0324+341	63
A.4	QSO 0454-234	64
A.5	OJ 49	64
A.6	QSO 0948+002	65
A.7	3C 273	65
A.8	QSO 1239+044	66
A.9	3C 279	66
A.10	PKS 1502+106	67
A.11	PKS 1510–089	67
A.12	3C 454.3	68
A.13	1ES 0323+022	68
A.14	$1 ES 0647 + 250 \dots \dots$	69
A.15	$1 ES 0806 + 524 \dots \dots$	69
A.16	Mrk 421	70
A.17	ON 325	70
A.18	PG 1553+113	71
A.19	Н 1722+119	71
A.20	1ES 1959+650	72
A.21	PKS 2155–304	72
A.22	1ES 2344+514	73
A.23	PKS 0048–097	73
A.24	S2 0109+224	74
A.25	3C 66A	74
A.26	PKS 0422+004	75

	75
$28 \text{ PKS } 0754 + 100 \dots \dots$	76
29 OJ 287	76
30 ON 231	77
31 Mrk 501	77
$1.32 \text{ PKS } 1749 + 096 \dots \dots$	78
33 3C 371	78
$34 \text{ AO } 0235 + 164 \dots \dots$	79
$35 S5 1803 + 784 \ldots \ldots$	79
36 BL Lac	80
37 OQ 530	80
38 PKS 1222+216	81
$1.39 \text{ RX J}1542.8+612 \dots \dots$	81
$.40 \text{ S4 } 0954+65 \dots \dots$	82
41 3EG 1052+571	82
	83

第1章 序論

1.1 活動銀河核

この宇宙にはさまざまな銀河が存在しており、なかには数十億光年という遠方にあるに も関わらず、電波からγ線までの広い波長帯で非常に明るく輝いている銀河がある。これ らの銀河は中心部に活動銀河核という非常に明るい領域を持っている。この核が銀河全 体の光度を上回るほど明るいため、遠方にあるにも関わらず観測することが可能になる。 これほど明るく輝く活動銀河核の放射機構を解明しようと、これまで様々な波長帯で観 測、研究がされてきた。今日では、活動銀河核は太陽の100万倍から10億倍の質量を持 つ、超巨大ブラックホールを含んでいると考えられている。ブラックホールの周囲には、 降着円盤や亜光速のジェットが存在していると考えられており、それらの詳細な構造等に ついては未だ謎が多い。

1.1.1 活動銀河核の種類

活動銀河核はその観測的特徴からいくつかのグループに分けられる。ここでは、それらの中から代表的なものを挙げる。

クエーサー

活動銀河核の中でももっとも明るい種がクエーサーである。最初のクエーサーは電波 で発見され、しばらくは謎の電波源とされていたが、そのうちスペクトル観測等から非常 に遠方にある銀河であると判明した。非常に遠方、かつ中心核が明るいため、付随する母 銀河の構造は見えず、ほとんど点源のように見えたことから、Quasi-Stellar Radio Source を略してクエーサー (quasar) と呼ぶようになった。クエーサーの可視光から紫外線にか けての典型的なスペクトルは図 1.1 のように表され、幅の狭い輝線と幅の広い輝線が見 られる。クエーサーの約1割程度は強い電波源であり、そのスペクトルの放射強度 F_{ν} は $F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$ で表される。数 GHz の振動数でのスペクトルの傾きが $\alpha > 0.5$ のクエーサーは SSRQ(Steep Spectrum radio-loud quasar)、 $\alpha < 0.5$ のクエーサーはFSRQ(Flat Spectram radio-loud quasar)とそれぞれ呼ばれる。なかでもFSRQ は電波と可視光で激しい光度変



図 1.1: 可視光から紫外線における 700 以上のクエーサーのスペクトルの平均 (Francis et al., 1991)

動を示すため、OVV(Optically Violent Variable) クエーサーとも呼ばれ、その変動幅は1 日で 0.1 等級に達することもある。また、FSRQ は数%の高い偏光度も示す。

セイファート銀河

セイファート銀河は近傍宇宙ではもっとも数が多い活動銀河核である。セイファート銀河は絶対等級 $M_{\rm B} > -23^1$ で定義され、さらに1型(Sy1)と2型(Sy2)とに分けられる。1 型セイファート銀河はクエーサーと似たスペクトルを持っており、幅の広い輝線と狭い輝線の両方が見られる。一方、図 1.2のように2型セイファート銀河には幅の狭い輝線しかみられない。セイファート銀河はX線から遠赤外線領域までは強い連続光放射をしているが、サブミリ波から電波にかけての放射は弱い。また、それらの連続光は高い偏光を示す。

BL Lac 天体

BL Lac 天体の代表として BL Lac がある。当初は変光星と考えられていたが、後に電 波源であることが確認され、クエーサーと似た性質を持つことが分かった。クエーサーと 違い、強い輝線や吸収線は見られないが、強い電波放射、激しい光度変動、高い偏光度を 示す点で FSRQ と似ているため、両者を合わせブレーザー (blazar) と呼ばれる。

ライナー

ライナー (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region galaxy: LINER)のスペクトル は低電離輝線が比較的強いという点を除いて、2型セイファート銀河に似ている。図 1.2 は典型的なライナーのスペクトルである。2型セイファート銀河と同様、幅の狭い輝線し か見られないのが分かる。そのため超低光度のセイファート銀河であるとも言えるが、実 際にはその起源についてはまだよく分かってはいない。近傍銀河の 20-30%がライナーで あることが分かっている。

電波銀河

セイファート銀河が電波領域において放射が弱いのに対して、電波銀河は、セイファート銀河の100倍から1000倍の強度の電波の放射が観測される。可視スペクトルの特徴は セイファート銀河に似ており、幅の広い輝線を持つもの(broad line radio galaxy: BLRG) と狭い輝線のみを持つもの(narrow line radio galaxy: NLRG)とに分けられる。NLRG は

 $^{^{-1}}z < 0.1$ では、これより明るい天体でもセイファート銀河に分類される場合もある。

さらに低光度のファナロフ・ライリィI型 (Fanaroff-Riley type I: FRI) と高光度のファナ ロフ・ライリィII型 (Fanaroff-Riley type II: FRII) に分けられる。また、電波銀河の特徴 として、銀河全体を上回るようなスケールの大きさの電波ジェット、電波ローブ、そして 中心にあるコアと呼ばれる構造がある。



図 1.2: 2型セイファート銀河 NGC 1667(上) とライナー NGC 1052(下) (Ho et al., 1993)

1.1.2 活動銀河核の統一モデル

前節では代表的な活動銀河核の観測的特徴を紹介した。それらは各種類ごとに異なる 特徴が観測されるが、活動銀河核の統一モデルではその原因は観測する方向の違いである と考えられている。

統一モデルで考えられている描像を図 1.3 に示す。活動銀河核は中心に超大質量ブラックホールがあり、その周囲に降着円盤が存在する。降着円盤からの放射によって幅の広い



図 1.3: 活動銀河核の統一モデル (柴田一成 et al., 1999) より

輝線を出す領域 (broad line region: BLR) が電離、励起される。この BLR が直接見える ような、円盤がほぼ真上に近い方向から観測される天体が1型活動銀河核と考えられる。 狭い輝線しか観測されない2型活動銀河核では、BLR からの光が何らかの物質に隠され て直接観測できず、輝線は主に反射光が我々の方向へ到来して形成されていると解釈でき る。BLR を遮る物質はダスト雲である可能性が高いとされ、輝線を出す領域 (narrow line region: NLR) はこのダスト雲よりも外側にあると考えられている。ダスト雲は図 1.3 中 の分子トーラスのような構造を持っていると考えられているが、トーラス状ではなく、小 さな雲の集合帯であるとする説 (Krolik & Begelman, 1988) や、シェル状であるとする説 (Ohsuga & Umemura, 1999) もある。いずれにせよ統一モデルでは、2型活動銀河核は円 盤をほぼ真横に近い方向から観測することで BLR が見えない天体だと考えられている。

また、ジェットを正面から見る方向で観測される天体では、相対論的効果によりジェットからの放射成分が増幅され、降着円盤や BLR からの放射は相対的に弱くなる。ジェットからの放射はシンクロトロン放射であると考えられており、スペクトルは自己吸収のあるシンクロトロン放射の重ね合わせとなる。よって電波領域でスペクトルの勾配が小さい BL Lac 天体や FSRQ、すなわちブレーザーは、そのようなジェットを真正面から観測した天体だと考えられている。

1.1.3 ジェット

活動銀河核からは降着円盤と垂直に双方へ、光速に近い速度でジェットが噴出している。 このジェットは非常に細く収束されており、100万光年以上もの距離まで噴出されている。 最初のジェット構造は1918年に楕円銀河 M 87 で発見された (Curtis, 1918)。その後電波 観測が発展していくと、分解能が高い観測が可能になり、電波ローブやそれと銀河中心を 結ぶ電波ビーム (ジェット)が発見された。



図 1.4: 電波銀河 NGC 6251 の電波ローブとジェット (Bridle & Perley, 1984)

図 1.4 は電波銀河 NGC 6251 の電波観測の結果である。最上段の図がもっとも広域で、 中心の NGC 6251 から離れた領域に電波ローブがある。下段の図ほど拡大されており、細 く長いジェットの構造が続いているのが分かる。最上段と最下段の縮尺の違いは 100 万倍 に及ぶ。これら非常に細く長く噴出されたジェットを進行方向から観測すると、以下のような様々な相対論的効果が起こる。

超光速運動

超光速運動とは活動銀河核ジェットにおいて、明るく見えている点の見かけの速度が光 速を大きく越えているように見える現象である。この現象は活動銀河核がほぼ視線方向へ 向けて、光速に近い速度でジェットを放出していることにより起こる。



図 1.5: 超光速運動の幾何学 (柴田一成 et al., 1999) より

図 1.5 のように観測者から距離 d の位置 O にクエーサーがある場合を考える。t = 0の時、このクエーサーと観測者に対して角度 θ の方向に、ノットと呼ばれる明るく輝く 雲が速度 v で飛び出したとする。この瞬間の光が観測者に届く時刻 t_1 は光速 cを用いて $t_1 = d/c$ と表される。また、Pの位置まで来たノットから出た光が観測者に届く時刻 t_2 は ノットが OP 間 r を移動する時間と P から出た光が観測者に届く時間の和なので、

$$t_{2} = \frac{r}{v} + \frac{d-x}{c} = \frac{r}{v} + \frac{d-r\cos\theta}{c}$$
(1.1)

となる。観測者からみると、 t_1 から t_2 の間にノットが $y(= r \cos \theta)$ の距離を移動したよう に見えるので、見かけの速度 u は

$$u = \frac{y}{t_2 - t_1} = \frac{v \sin \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \tag{1.2}$$

となり、角度 θ が小さく、速度vが光速に近いほどノットの見かけの速度uは光速を大きく越えて見える。

活動銀河核のジェットは双方向に噴出しているはずだが、超光速運動が観測されるよう な天体では、一方向のジェットしか観測されない場合が多い。この要因のひとつに相対論 的ビーミング効果がある。相対論的ビーミング効果とは、相対論的な速度を持ったジェッ トを正面から観測した時、その放射強度が大きく増幅される現象である。今、活動銀河核 から、相対論的速度を持ったノットが視線方向に対して角度 θ で飛び出したとする。特殊 相対論の時間の遅れの効果から、観測者側での時間間隔 Δt_{obs} に対し、ノット側の経過時 間 Δt_s との関係は

$$\Delta t_{\rm obs} = \frac{\Delta t_{\rm s}}{\delta} \tag{1.3}$$

(1.4)

となる。 δ はビーミング因子と呼ばれ、 $\beta \equiv v/c$ とローレンツ因子 $\Gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ を用いて

$$\delta \equiv \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)} \tag{1.5}$$

と表される。これは時間の短縮度合を示す指標となる。例えばノットの明るさが時間変動したならば、本来よりδ倍短い時間変動が観測される。これは電磁波の振動数のドップ ラー効果となり、ジェットの正面近くから観測することで、

$$\nu_{\rm obs} = \delta \nu_{\rm s} \tag{1.6}$$

で表されるように、本来の振動数 ν_{s} より高い振動数 ν_{obs} の電磁波が観測される。

次に見かけの明るさを求めるために、ノットの運動方向に対して角度 χ の向きに進む 電磁波を考える。電磁波の進行方向のローレンツ変換は

$$\cos \chi_{\rm s} = \frac{\cos \chi_{\rm obs} - \beta}{1 - \beta \cos \chi_{\rm obs}} \tag{1.7}$$

となる。また、 $\chi_{\rm obs} = \theta$ なので、

$$\Delta \cos \chi_{\rm obs} = \delta^{-2} \Delta \cos \chi_{\rm s} \tag{1.8}$$

と表される。観測者から見ると、ノットの放射が δ^2 小さい立体角に見え、電磁波は運動方向に集中する。光子の数は両方の系で等しいので、ノットが等方的な放射をした場合、観測者と天体との距離 d、プランク定数 h、本来の光度 L_{ν_s} 、観測される光度 $S_{\nu_{obs}}$ を用いた

$$\frac{L_{\nu_{\rm s}}}{h\nu_{\rm s}}\Delta\nu_{\rm s}\Delta t_{\rm s}2\pi\Delta\cos\theta_{\rm s} = 4\pi d^2 \frac{S_{\nu_{\rm obs}}}{h\nu_{\rm obs}}\Delta\nu_{\rm obs}\Delta t_{\rm obs}2\pi\Delta\cos\theta_{\rm obs}$$
(1.9)

が成り立つ。これより

$$\nu_{\rm obs}S_{\nu_{\rm obs}} = \delta^4 \frac{\nu_{\rm s}L_{\nu_{\rm s}}}{4\pi d^2} \tag{1.10}$$

が導かれる。左辺は放射エネルギーを表すので、本来の放射エネルギーの δ^4 倍明るく見 えることを意味する。たとえば $\Gamma = 10$ という相対論的速度で運動するノットを正面から 観測すると、その放射エネルギーは 10^4 倍の明るさで観測される。さらに反対側のジェッ トは 10^4 倍暗くなり、コントラストは 10^8 に達するため、こちら側に向いていないジェッ トの観測は困難となる。

したがって、ブレーザーは相対論的ジェットからの放射を観測するのに適した天体であ り、ジェットの構造や放射機構の研究のためにこれまでよく観測されてきた。次節ではブ レーザーの観測的特徴や変動機構について述べる。





図 1.6: ブレーザー 3C 66A の SED (Joshi & Böttcher, 2007)

ブレーザーは活動銀河核の一種である。前述したとおり、よく似たスペクトルを持つ BL Lac 天体と FSRQ とを合わせ、ブレーザーと呼ぶ。図 1.3 のように、相対論的ジェッ トをほぼ正面から観測している。放射は電波から 線までの非常に幅広い波長帯で観測され、様々なタイムスケールでの激しい光度変動を示す。

ブレーザーのスペクトルエネルギー分布 (Spectral Energy Distribution: SED) は図 1.6 のような低エネルギー成分と高エネルギー成分の二種類で構成される。低エネルギー側の 放射成分では、ジェット中の相対論的電子によるシンクロトロン放射が支配的と考えられ ている。高エネルギー側の放射成分は、電子による逆コンプトン散乱が支配的と考えられ ているが詳細な部分は未だ解明されていない。

1.2.1 ブレーザーの種別



図 1.7: X 線 (0.5-2.0keV) vs 電波フラックス (1.4GHz) (Abdo et al., 2009)。小さな点は BZCAT カタログに掲載されているすべてのブレーザー。黒丸、白丸、三角形、星はそれ ぞれ *Fermi* の明るい FSRQ、BL Lac 天体、分類不明なブレーザー、電波銀河。

BL Lac 天体は、シンクロトロン放射のピーク位置によって Low-energy-peaked BL Lac object (LBL)、Intermediate-energy-peaked BL Lac object (IBL)、High-energy-peaked BL Lac object (HBL)の3種類に分類される。よって、電波領域に放射のピークが存在する FSRQ も合わせて、ブレーザーは FSRQ、LBL、IBL、HBL の4種に分類される。

典型的には、シンクロトロン放射成分の極大波長が可視-赤外領域に対して低いものが LBL、高いものがHBL、可視-赤外領域にあるものがIBLと分類される。従来の研究では 電波や可視光の観測だけからシンクロトロン放射の極大波長を推測し、天体が分類されて いた (Padovani & Giommi 1995; Urry & Padovani 1995; Sambruna et al. 1996)。しかし、 可視光の観測だけでは正確な極大波長の推測が困難であり、また電波と可視光観測を同時 に行うことも困難で、正確に分類できない可能性がある。最近、Abdo et al. (2009)は同 時性の高い電波 (1.4GHz)とX線 (0.5-2.0keV) 観測のデータ (BZCAT カタログ; Massaro et al. 2009)を用いて、その強度比によって天体を分類する方法を提案した。図 1.7 は Fermi 衛星が観測した AGN のX線と電波の強度が示されている。図中の小さな点は BZCAT カ タログに掲載されているすべてのブレーザーである。黒丸、白丸、三角形、星はそれぞれ Fermiで観測された明るい FSRQ、BL Lac 天体、分類不明なブレーザー、電波銀河を示 している。Abdo et al. (2009)は図中の直線を用いて HBL、IBL、LBL の分類を定義し、 既存の分類とほぼ一致することも確認した。本論文ではこの Abdo et al. (2009)の分類を 採用する。

1.2.2 ブレーザーシークエンス



図 1.8: ブレーザーシークエンス (Fossati et al., 1998)

Fossati et al. (1998) は 126 個のブレーザーのデータを解析し、電波から γ 線までの個々の SED を調査した。図 1.8 は全てのブレーザーの SED を電波強度で分類し、それぞれを 平均したものである。彼らはこの調査で以下の発見をした。

- シンクロトロン放射成分のピークエネルギーは光度に反相関する。
- γ線が明るくなり、可視域のスペクトルがよりソフトになると、X線のスペクトル はよりハードになる。
- シンクロトロン放射成分と逆コンプトン散乱成分のピークエネルギーは相関する。
- 電波領域で明るくなると、シンクロトロン放射成分のピーク強度に対する逆コンプトン散乱成分のピーク強度の割合が大きくなる。

これらの結果から、彼らはブレーザーのSEDには個体差があるように見えるが、統一さ れた形状が存在するという可能性を主張した。もっとも単純な変数として光度が決定す れば、SED全体が描けるというものである。この傾向はブレーザーシークエンスと呼ば れる。ブレーザーシークエンスの可能性を主張する研究は他にもあるが (Ghisellini et al. 1998; Donato et al. 2001)、天体サンプルが少ないために、この傾向の真偽については未 だ議論が続いている (Padovani et al., 2007)。最近では、Sambruna et al. (2010) が Fermi 衛星のデータを用いて、ブレーザーシークエンスの存在を支持する結果を報告した。

1.2.3 変動機構

ブレーザーの特徴の一つとして激しい光度変動が挙げられる。その変動機構としてい くつかの理論モデルが提唱されているが、未だに特定はされていない。ここでは代表的な ものとして、内部衝撃波モデルとビーミング因子の変動モデルについて説明する。

内部衝撃波モデル

ブラックホール付近で生成された相対論的流れは時間変動しており、それらのローレン ツ因子も時間とともに変化していると考えることは妥当である。速度に違いがあるという ことは流れ同士の衝突もありうる。このように流れ中の非一様性によって発生する衝撃波 を内部衝撃波という。流れの簡単な例として、シェル等が考えられる。異なる速度のシェ ル同士が衝突し、衝撃波を発生するというものである。この衝撃波での一次フェルミ加速 により粒子が加速される。その加速された粒子がシンクロトロン放射を行い、光度変動す るというのが内部衝撃波モデルである。このモデルでは、衝撃波によって放射領域にエネ ルギーが注入される。注入されたエネルギーはシンクロトロン放射をする電子に与えら れ、結果として高エネルギー電子の数が増加する。高エネルギー電子からは相対的に波長 の短い光が放射されるため、特に光学的に薄い領域では増光と共に天体は青く変化する。

ビーミング因子の変動モデル

ビーミング因子、すなわちジェットのみかけの速度の変化で光度が変動するモデルも考 えられる。見かけの速度が変動すると、1.1.3 で述べた相対論的ビーミングの効果も変化 し、結果として光度が変動したように見える。この場合、光の振動数の変化よりも光度の 変化の方がビーミング因子に強く依存するため、光度変化に付随する色の変化は小さい (式 1.6 および 1.10)。特に、光学的に薄くスペクトルが単純なべき関数で表わされる領域 では色の変化は起きないと予想される。

1.3 ブレーザーについての先行研究

1.3.1 光度と色の相関

これまでブレーザーの変動機構は色変化とともによく研究されてきた。Carini et al. (1992) は天体が明るくなるほど、色が青くなるという傾向を BL Lac と OJ 287 という天 体から発見した。また、図 1.9 で見られるように、Clements & Carini (2001) も BL Lac でこ の傾向を観測した。この傾向は" bluer-when-brighter" と呼ばれる。Ghisellini et al. (1997) は S5 0716+71 を約 5ヶ月間観測し、暗い時期になった時に、明るいほど色が青くなる傾向 を発見した。この天体については他にも、明るい時期に数日からそれ以下のタイムスケー ルの変動に対して bluer-when-brighter が確認されている (Wu et al. 2007; Sasada et al. 2008)。Villata et al. (2002) と Villata et al. (2004) では bluer-when-brighter が BL Lac の短時間変動の中でのみ見られ、長期間の変動では有意には見られなかったと報告した。 Raiteri et al. (2001) は AO 0235+164 の多波長観測を 4 年間行い、bluer-when-brighter の 傾向を発見した。

ブレーザーにおける色変化の一般的振る舞いを確立しようと、複数のブレーザーについ て統計的な研究も行われてきた。Ghosh et al. (2000) は 15 のブレーザーを観測し、その うち 3C 66A、AO 0235+164、PKS 0735+178 の 3 天体が bluer-when-brighter を示し、他 の天体からは光度と色について有意な相関は得られなかったと報告した。Gu et al. (2006) は 8 つのブレーザーの色変化を調査し、そのうち 5 天体が bluer-when-brighter の傾向を 示すことを発見した。残りの 3 天体のうち、3C 345 は光度と色に有意な相関はなかった が、3C 454.3 と PKS 0420-01 で明るいほど色が赤くなる傾向が発見された。この傾向 は"redder-when-brighter" と呼ばれ、Raiteri et al. (2008) や Villata et al. (2006) らによっ ても 3C 454.3 で確認されている。図 1.10 は Raiteri et al. (2008) による観測結果で、上段 2枚の図はそれぞれ R 等級と色 B - R の時間変化を表しており、下段は色等級図である。 上段からも下段からも明るいほど色が赤くなるという傾向が分かる。このように、"bluerwhen-brighter"の傾向が観測される天体は数例知られているが、"redder-when-brighter" の傾向が観測される天体や、光度と色に相関が見られない天体もある。したがって、ブ レーザーの光度-色関係において普遍的な観測的特徴は未だ確立していない。



図 1.9: BL Lac の色等級図 (R vs V - R) (Clements & Carini, 2001)



図 1.10: 3C 454.3 の光度変化と色変化 (Raiteri et al., 2008)

ブレーザーの低エネルギー成分はシンクロトロン放射であるため、電波や可視光領域 において高い偏光度を示す。偏光は放射領域の磁場に依存するので、偏光観測をすること によりジェット内の磁場構造の解明につながる (e.g. Angel & Stockman 1980; Mead et al. 1990)。過去の可視光領域での偏光観測では偏光度の波長依存性等が研究されており、一 般に短波長側ほど偏光度が高い傾向にある (e.g. Kikuchi et al. 1976; Angel & Stockman 1980; Mead et al. 1990)。



図 1.11: 3C 345 の光度 (R)、偏光度、偏光方位角 (Smith et al., 1986)

光度と偏光度の相関についてもいくつか観測、研究されている。Smith et al. (1986)は 1983年から1984年まで、3C345という天体を1-3ヶ月おきに観測し、図1.11のような 結果を得た。上段から順に、R等級、偏光度、偏光方位角の時間変化を示している。観測 開始から光度が低くなるのに同期して偏光度が減少し、偏光方位角が増加したのが分か る。しかし、1984年からの後半部分では、光度があまり変化していないのに対して、偏 光度が若干減少しているように見え、光度と偏光度の関係が単純な正の相関だけでない可能性が示唆される。他の天体では、1997年にMrk 421の偏光度がアウトバーストに伴い~14%まで上昇した(Tosti et al., 1998)。また、AO 0235+164は2006年の大アウトバーストとともに偏光度が40%を越えるほど上昇した(Hagen-Thorn et al., 2008)。以上のように光度と偏光が相関して変動した例はあるものの、光度と色の例に比べると非常に少ない。一般的に、偏光の時間変動はほとんどのブレーザーで不規則なものであるという報告もある(Moore et al. 1982; Angel & Stockman 1980)。いずれにせよ、これまで可視領域における偏光観測そのものが少なく、議論が十分に出来ないため、時間変動や光度との相関など、偏光については未だ不明な点が多い。

1.3.3 光度と偏光方位角

偏光方位角について議論されている研究は偏光度よりもさらに少ない。しかし、近年少 しずつ新しい現象が観測され始めている。





図 1.13: 偏光ベクトルの回転から示唆される ジェットの構造 (Marscher et al., 2008)

図 1.12: BL Lac の X 線、可視のフラック ス、偏光方位角、偏光度の時間変動 (Marscher et al., 2008)

Marscher et al. (2008) は、2008 年に BL Lac の観測で増光とともに偏光ベクトルが連続 的に回転したと報告した。図 1.12 はその観測結果で、上段からそれぞれ X 線 (2-10keV)、 可視 *R* バンドでのフラックス、偏光方位角、偏光度の時間変化を示している (横軸の単位 は年)。2005.8 年から可視光の増光とともに偏光方位角が 180° 以上連続的に変動しており、 これを偏光ベクトルが回転したと解釈した。このことから彼らは図 1.13のような螺旋状の磁場構造を提案した。図中の R_sは Schwarzschild 半径である。この描像によると、ノットまたはシェルが螺旋状の磁場に沿って移動し、星間物質などと衝突して可視光等が放射されると考えられる。

可視領域においてこうした偏光ベクトルが回転した観測例はこれまで数件しかなく (Sillanpaa 1991; Qian 1993; Takalo et al. 1994; Efimov et al. 2002)、偏光ベクトルの回転や この Marscher のモデルについても未だ議論が続いている。

1.3.4 これまでの問題と課題

光度と色の関係については、これまで短期間、長期間ともに観測が行われてきたが、未 だに普遍的な傾向は確立されていない。この要因としては、サンプル不足と波長間隔が挙 げられる。普遍的な傾向を見出すためには、出来るだけ多くの天体で多くの観測点が必要 となる。また、色を観測するためには異なる波長の光度を比較するが、比較的近い波長の 光度を比較、議論している研究が多い。例えば、12 天体について有意な相関が見出せな かった Ghosh et al. (2000) は色を V - R で定義しており、観測点も 10 点以下と少ない。 Gu et al. (2006) は比較的観測点は充実しているが、色を V - I としている。よってより 多くの観測点をより広い波長帯で観測することが重要となる。

光度と偏光においては前述してあるとおり、観測そのものが少ない。また観測例があっても短期間であったり、密な観測でない場合がほとんどである。ブレーザーにおいて偏光 は光度と同じく激しい時間変動を示すので、より密で長期的な観測が求められる。

以上から、光度に伴う色や偏光の変動を議論するには、より広い波長帯での長期に渡る 密な観測で統計量を増やすことが重要な課題となる。

1.4 Fermi衛星と「かなた」望遠鏡によるブレーザーキャン ペーン

ブレーザーの高エネルギー成分は逆コンプトン散乱によるものと考えられているが、その種光子となる光子の起源は未だ分かってはいない。一般には低エネルギー成分のシンクロトロン放射で発生した光子が種光子となるSynchrotron Self Compton:SSCモデル、またはジェット外部からの光子が種光子となるExternal Radiation Compton:ERCモデルが有力だと言われている (Maraschi et al. 1992; Sikora et al. 1994)。The *Fermi* Gamma-ray Space Telescope は 2008 年 6 月に打ち上げられた γ 線観測衛星である。*Fermi* 衛星は、これまでブレーザーにおいて精度よい観測が出来なかった 30 MeV から 300 GeV までの広いエネルギー帯の γ 線スペクトルを精度よく測定することが出来る。

2006年、この Fermi衛星に合わせ可視近赤外領域で同時観測するためにかなた望遠鏡 は作られた。かなた望遠鏡は広島大学が所有する東広島天文台に設置されており、大学所 有の望遠鏡としては国内最大級である口径 1.5m の主鏡を持つ。かなたはもともと「赤外 シミュレータ」という名称で、国立天文台三鷹キャンパスに設置され、すばる望遠鏡に取 り付けられる観測装置の試験を行っていた。この赤外シミュレータが東広島天文台に移設 され、名称を「かなた」と改められた。大学所有であることから、学生による比較的自由 で機転の利く観測が可能である。また、東広島天文台は交通の便がよい立地で、定常観測 が比較的容易に行えるのも大きな利点である。かなた望遠鏡で低エネルギー成分、Fermi 衛星で高エネルギー成分の観測を同時に行うことにより、活動銀河核やジェットの機構に ついてさらなる理解が得られることが期待される。

1.5 本研究の目的

活動銀河核の統一モデルは考案されているものの、ブレーザーの観測的特徴は個体差が 大きいため、ジェットの構造や発生機構についての統一的な理解は未だ得られていない。 よってそれら個体差の大きい様々なブレーザーの変動を総括し、普遍的な傾向や法則性を 確立させることは、活動銀河核やジェットの本質的な性質や機構そのものを解明するうえ で非常に重要なことである。我々はかなた望遠鏡を使って40余りのブレーザーを多色偏 光観測し、可視近赤外領域においてこれまでにないほどの質と量のデータを得ることが出 来た。本研究では、可視光–近赤外線域におけるプレーザーの普遍的な観測的特徴を確立 することを目的とする。これによって将来、γ線と可視光の相関関係や、ジェットの構造 や時間変動の機構の研究へと発展することを可能にする。

第2章 観測

本章では、偏光観測の原理、観測に用いた装置、観測天体、解析方法等について述べる。今回行った観測方法や解析方法は笹田真人 (2009) に詳述されているものと同様のものを用いたので、ここでは簡潔に概略のみ述べる。

2.1 偏光観測

これまで世界的にみても観測例が少ない偏光情報は本観測の特色であり、また非常に重要な意味を持つ。ここでは可視光観測における偏光測定の原理を述べる。

2.1.1 偏光の基本原理

光は互いに直交する電場と磁場の横波である。電場ベクトルと光の伝搬ベクトルが成す 平面は振動面と呼ばれ、この振動面の分布により光は偏光とそうでない光に分けられる。 様々な振動面が混ざり合っている光は自然光、または偏光していない光と呼ばれる。これ に対して振動面の分布が一様でない光は偏光した光と呼ばれる。さらに偏光した光は、振 動面が常に一定な直線偏光、振動ベクトルが進行方向から見て円を描く円偏光、楕円を描 く楕円偏光とに分けられる。これらの光を記述するには、光の進行方向をz軸とした時に 電場 E の x,y 成分の振幅 ϵ_x, ϵ_y とそれらの位相差 δ が必要で、周波数 ν の電磁波は

$$E_x = \epsilon_x(t) \cos 2\pi\nu t \tag{2.1}$$

$$E_y = \epsilon_y(t)\cos 2(\pi\nu t + \nu) \tag{2.2}$$

と表される。 ϵ_x,ϵ_y が等しく $\delta = 90^\circ$ で円偏光、 ϵ_x,ϵ_y が等しい、またはどちらかが0で $\delta = 0^\circ$ または180°で直線偏光、そしてこれらの重ね合わせで楕円偏光になる。しかし、 これらの表現は一つの光子についての記述であり、現実の光のような無数の光子を扱うに は現実的ではない。そこで通常、偏光は(I,Q,U,V)の4つからなるストークスパラメータ で表される。それぞれ、I は総強度、Q,U は直線偏光成分、V は円偏光成分を表す。これ らストークスパラメータは電場ベクトル(E_x, E_y)を用いて、

$$I \equiv (E_x)^2 + (E_y)^2$$
 (2.3)

$$Q \equiv (E_x)^2 - (E_y)^2 = I \cos 2\beta \cos 2\theta \tag{2.4}$$

$$U \equiv 2E_x E_y \cos \delta = I \cos 2\beta \sin 2\theta \tag{2.5}$$

$$V \equiv 2E_x E_y \sin \delta = I \sin 2\beta \tag{2.6}$$

で定義され、これらを用いて様々な状態の偏光を表現できる。またストークスパラメー タは4つの成分で偏光を記述し、ベクトルとして加算的に扱うことができるため有用な考 え方である。偏光を表現するパラメータとして直線偏光度(P)、偏光方位角(θ)、あるい は円偏光度(P_e)を用いることも多い。それぞれストークスパラメータを用いて

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \tag{2.7}$$

$$\theta = \frac{1}{2}\arctan\frac{U}{Q} \tag{2.8}$$

$$P_e = \frac{V}{I} \tag{2.9}$$

と表される。今回の観測では直線偏光を観測したので、円偏光成分V = 0として考え、 今後は直線偏光度のことを単に偏光度と呼ぶことにする。

実際の可視光偏光観測では、特定の方向の偏光だけを通す光学素子を用いて偏光を測定 することが多い。ある方向に偏光した天体からの光を望遠鏡の焦点面に結像させ、様々な 偏光方向でそれぞれの光強度を測定する(測光する)ことによって、ストークスパラメー タ *I*,*Q*,*U* を計算する。偏光観測のための光学素子としては半波長板やウォラストンプリ ズムを用いることが多い。

以上のように、まず取得した画像から観測天体を測光し、ストークスパラメータ(I,Q,U)を求め、これらを用いて偏光度 P、偏光方位角 θ を式 2.7、2.8 から求める。

2.2 使用した観測装置

2.2.1 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡は口径 1.5m の可視近赤外反射望遠鏡で、広島大学宇宙科学センター附属 東広島天文台に設置されている。東広島天文台は 2004-2006 年にかけて行われたシーイン グ調査で典型的に 1.1 秒角という全国的にも優れたサイトである (千代延真吾, 2005)。か なた望遠鏡は *Fermi* とのブレーザーの共同観測以外にも、γ線バーストなどの突発天体の 即時観測による高エネルギー宇宙現象の解明も視野に入れ、製作された。よって機動性に も優れ、方位 5°/sec、光度 2°/sec 以上という、1.5m 望遠鏡としては世界最速の駆動速度 を持つ。かなた望遠鏡の性能、仕様を表 2.1 に示す。



図 2.1: 正面から見たかなた望遠鏡

2.1. 万なた主座近の江豚					
項目	仕様				
光学系	リッチー・クレティアン光学系				
主鏡	有効径 1540mm / 主鏡 F 比=2.0				
焦点モード	カセグレン焦点 (F/12.2)	ナスミス焦点 (F/12.2)			
焦点面スケール	カセグレン 11.25" 角/mm	ナスミス 11.25" 角/mm			
焦点距離	18501.7	7mm			
視野	15 分角				
架台	経緯台				
最大駆動速度	方位 5°/sec	高度 2°/sec			

表 2.1: かなた望遠鏡の仕様

2.2.2 TRISPEC

観測装置には、名古屋大 Z 研で開発された可視近赤外同時偏光撮像分光装置 (Triple Range Imager and SPECtrograph: TRISPEC) を用いた。TRISPEC は同時に 3 バンド

(可視1、近赤外2バンド)で撮像、分光、またそれら各々の偏光観測の計4モードでの観 測が可能である (Watanabe et al., 2005)。これら多色で同時に偏光観測が可能な装置は 世界的にも稀である。TRISPEC は2枚のダイクロイックミラーを用いて、かなたで集光 した光を0.45-0.9 μ m(OPT)、0.9-1.85 μ m(IR1)、1.85-2.5 μ m(IR2)の3つの波長帯に分割す る。分割したそれぞれの光はコリメータ系、フィルター、分散素子、カメラ系、2次元検 出素子等で検出、記録される。TRISPEC の詳細な仕様を表 2.2 に示す。今回の観測では、 $V(0.55\mu$ m)、 $J(1.2\mu$ m)、 $K_{s}(2.2\mu$ m) の3バンドを用いた。



図 2.2: かなた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられた TRISPEC

	OPT	IR1	IR2	
検出器	$CCD(512 \times 512)$	$\text{InSb}(256 \times 256)$	$\text{InSb}(256 \times 256)$	
視野	$7.0' \times 7.0' \times 1$	$7.0' \times 7.0' \times 1$	$7.0' \times 7.0' \times 1$	
ピクセルスケール	0.82"/pixel	1.65"/pixel	1.65"/pixel	
フィルター	B, V, R, I	J, H	$K_{\rm s}, K, H_2$	
限界等級*	18.5	16.8	15.1	

表 2.2: TRISPEC 各バンドの仕様 (*10 分露出で 10σ)

2.3 観測天体

2008 年 5 月から、我々は東広島天文台かなた望遠鏡と TRISPEC を用いて 41 個のブ レーザーを可視 V バンド、近赤外 J、K_s バンドで観測した。天体は" Extended list of 206 possible AGN/blazar targets for GLAST multifrequency analysis"¹から $R \leq 16$ のブレー ザーを選択した。このカタログから選択された天体は 30 天体であり、さらに Fermi 衛星 による γ 線フレア検出や、他天文台による可視フレアの検出の報告を受け、11 天体を追 加した。観測天体の一覧を表 2.3 に示す。

TRISPEC の観測では、半波長板とウォラストンプリズムを用いて偏光情報を得る。ま ず半波長板を(0°,22.5°,45.0°,67.5°)の状態に回転させる。それぞれの状態でウォラスト ンプリズムを用いて、天体からの光を常光と異常光に分割、CCDと赤外アレイの上に結 像した光を測定し、それぞれの光量の比によりストークスパラメータを得る。よって4回 の露出で1点の偏光情報が得られる。本観測では1つの天体に対して、1夜あたり4回の 露出を3セット、計12回の露出を行った。

2.4 解析

ここではかなた望遠鏡とTRISPECを用いて得られたデータの基本的な解析方法を述べる。

2.4.1 画像の一次処理

観測によって得られる画像は検出器によるノイズや、大気の揺らぎ等、さまざまな寄 与を受けた状態にあり、そのままでは正確な情報を引き出すことは出来ない。得られた 画像から正確な情報を引き出すには、このさまざまな寄与を取り除かなければならない。 具体的にノイズには、熱的に発生した電子によるダーク、CCD から電荷を読み出す際に 追加されるバイアス、そして大気から放射される夜光や街明かりからくるスカイがある。 ダークやスカイは露出時間に比例して増加するが、バイアスは露出時間には依存しない。 また、これらとは別に宇宙線が入射して非常に高いピクセル値を示す宇宙線イベントがあ る。CCD はピクセルにより感度にムラがあり、これにより画像のカウント値に偏りがで きる。この感度ムラをピクセルごとに規格化したものをフラットフレームという。図 2.3 は画像が受ける寄与を模式的に示したものである。

一般に、一次処理はダークフレーム差し引き、フラットフレームで割る、ディザリング 差し引きの順に処理される。

¹http://glastweb.pg.infn.it/blazar/

表 2.3: 観測天体リスト: (1) 天体名; (2) 種別 (*Abdo et al. 2009; Massaro et al. 2009 より); (3) 観測期間; (4) 観測夜数

object	$class^*$	observation period	n
(1)	(2)	(3)	(4)
Mis V1436	FSRQ	08 Dec.17 - 10 Jan.19	103
PKS 0215+015	FSRQ	08 Sep.09 - 09 Aug.25	6
QSO 0324 + 341	\mathbf{FSRQ}	08 Nov.20 - 09 Oct.14	2
QSO 0454-234	\mathbf{FSRQ}	08 Oct.17 - 09 Dec.16	53
OJ 49	\mathbf{FSRQ}	08 Oct.31 - 10 Jan.25	52
QSO 0948 + 002	\mathbf{FSRQ}	09 Mar.30 - 09 Apr.10	3
3C 273	\mathbf{FSRQ}	08 Dec.11 - 10 Jan.29	77
QSO 1239 + 044	\mathbf{FSRQ}	09 Jan.02 - 09 Jan.08	5
3C 279	\mathbf{FSRQ}	08 Dec.09 - 10 Jan.24	64
PKS 1502+106	\mathbf{FSRQ}	08 Aug.09 - 10 Jan.29	80
PKS 1510-089	\mathbf{FSRQ}	09 Jan.12 - 10 Jan.21	57
3C 454.3	\mathbf{FSRQ}	08 May27 - 10 Jan.28	262
1 ES 0323 + 022	HBL	08 Jul.25 - 10 Jan.28	24
1 ES 0647 + 250	HBL	08 Sep.09 - 10 Jan.29	7
1 ES 0806 + 524	HBL	08 Oct.30 - 10 Jan.31	18
Mrk 421	HBL	08 Jun.30 - 09 Mar.31	42
ON 325	HBL	08 May26 - 09 Dec.26	47
PG 1553+113	HBL	08 Jul.08 - 10 Jan.17	22
H 1722+119	HBL	08 Jul.11 - 09 Oct.17	28
1 ES 1959 + 650	HBL	08 Jul.07 - 09 Nov.28	53
PKS 2155-304	HBL	08 Jul.09 - 09 Dec.22	137
$1 ES \ 2344 + 514$	HBL	08 Jul.07 - 09 Oct.11	17
PKS 0048-097	IBL	08 Oct.02 - 09 Sep.23	46
$S2\ 0109+224$	IBL	08 Jul.31 - 09 Oct.29	74
3C 66A	IBL	08 Jul.09 - 10 Jan.31	227
PKS 0422+004	IBL	08 Sep.04 - 09 Nov.11	42
S5 0716 + 714	IBL	08 May26 - 10 Jan.31	242
PKS 0754+100	IBL	08 Nov.05 - 10 Jan.26	29
OJ 287	IBL	08 May26 - 10 Jan.31	174
ON 231	IBL	08 Dec. 16 - 10 Jan. 28	14
Mrk 501	IBL	08 May26 - 10 Jan.17	46
PKS 1749+096	IBL	08 Jul.18 - 09 Sep.10	78
3C 371	IBL	08 Jul.07 - 09 Dec.07	101
AO 0235+164	LBL	08 Aug.12 - 09 Jul.22	70
$S5\ 1803{+}784$	LBL	08 Jul.08 - 09 Oct.18	35
BL Lac	LBL	08 May26 - 10 Jan.28	196
OQ 530	unknown	08 Jul.15 - 08 Sep.10	3
PKS 1222+216	unknown	09 Apr.22 - 09 Apr.22	1
RX J1542.8 $+612$	unknown	09 May 13 - 10 Jan. 28	65
S4 0954 + 65	unknown	08 Dec.03 - 09 Dec.14	5
3EG 1052 + 571	unknown	08 Oct.31 - 09 Oct.13	3
4C 14.23	unknown	09 Oct.15 - 09 Dec.07	16



図 2.3: 取得した画像が受ける寄与 (川端哲也, 2009)

ダークフレーム

検出器に光を入れない状態で、天体を撮像した時間と同じ時間だけ露出してダークフ レームを得る。ダークフレームは天体の光もスカイの光も入ってこないので、ノイズのう ちダークとバイアスを含んだフレームとなる。取得した画像とダークフレームの差をとる ことで、ダークとバイアスが除去された画像ができる。

フラットフレーム

点光源ではなく一様光源を撮像すると、理想的には CCD の全ピクセルが同じカウント 値になる。しかし、実際には感度ムラによりそれぞれが異なったカウント値になる。これ を用いて各ピクセルの感度を見積り、規格化することでフラットフレームを作成する。か なたの場合、望遠鏡ドームにスクリーンが取り付けられており、ここに白熱灯を当て、そ れぞれのバンドフィルターを入れた状態で各フラットフレームの原型を取得する。規格化 して完成したフラットフレームで、取得した画像を割ることで CCD の感度ムラによる偏 りを補正できる。

スカイ差し引き

通常の可視光観測の場合は、ダークフレームとの差をとり、フラットフレームで割るこ とを一次処理とするが、近赤外観測の場合はスカイによる寄与が大きい。これを取り除く ため、ディザリングという手法を用いる。取得画像は非常に狭い範囲(7分角)なので、ス カイによるノイズが画像内で一様であるとして、アレイでの天体の位置を少し変えて撮像 する。この異なる位置に天体がある画像を差し引くと、スカイによるノイズを取り除くコ トができる。

2.4.2 測光

開口測光

ある決まった円内のピクセルのカウント値を積分し、そこから明るさを見積もるのが開 口測光である。一次処理のみでは除去しきれなかった背景光等の寄与を小さくするための 技法である。シーイングにも依存するが、典型的に天体像の重心を中心に半径 3-4 秒の円 内のカウント値を積分した。さらに天体のごく近くのスカイ、半径 6-8 秒、幅 3-4 秒の円 環領域から背景光をバックグラウンドとして計算し、差し引くことで天体以外からの寄与 を除去した。

相対測光

開口測光により、観測日当日の大気や背景光からの寄与は出来るだけ小さくできたが、 天体からの光量自体は大気や天気による影響を受け、測光するごとに総カウント値は異な る。そこで、等級が既知で変動しない天体を同じ視野内に撮像し、そのカウント値の比で 相対等級を見積もる相対測光を行った。この等級が既知の天体を比較星という。相対等級 *m* は観測天体のカウント値 *F*obs と比較星のカウント値 *F*comp を用いて

$$m = -2.5 \times \log_{10} \frac{F_{obs}}{F_{comp}} \tag{2.10}$$

で表される。この相対等級と比較星等級の和が観測天体の等級となる。

比較星

今回の観測で行った相対測光に用いた比較星の一覧を表 2.4 に示す。比較星は天体を撮像した画像に写っている近傍の恒星の中から、長期間有意な時間変動をしていないものを 選択した。同じ画像内の天体を選ぶことで、方向の違いによる大気吸収の微小な差を無視 できる。比較星の等級が信頼性の高いカタログにない場合は、比較星の等級を測定するた めに近傍にある等級が既知の恒星をかなた望遠鏡で測光し、相対測光することで比較星等 級を計算した。この比較星の測光に用いた星の一覧を表 2.5 に示す。 表 2.4: 比較星リスト: (1) 天体名、(2) 座標、(3)V等級、(4)J等級、(5) K_s 等級、(6)等級の 引用文献:V等級は[1]Skiff (2007), [2]Villata et al. (1998), [3]González-Pérez et al. (2001), [4]Adelman-McCarthy & et al. (2008), [5]Doroshenko et al. (2005), [6]Hog et al. (2000), J, K_s 等級は[7]Skrutskie et al. (2006)。ただし、*:V等級のみ本研究で測光。†: V, J, K_s 等 級全て同じ文献から引用。 $\ddagger U, J$ 等級を本研究で測光し、 K_s 等級は不明。)

object name	coordinate	V	J	Ks	refer.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Mis V1436	$01 \ 36 \ 42.49 \ +47 \ 51 \ 03.4$	14.035	12.223	11.922	*
PKS 0215+015	$02\ 17\ 49.22\ +01\ 48\ 28.0$	11.772	11.320	11.046	[6]
QSO 0324+341	$03 \ 24 \ 33.78 \ +34 \ 10 \ 53.7$	13.322	11.232	10.589	*
QSO 0454-234	04 57 00.74 -23 26 05.9	12.184	10.849	10.364	[6]
OJ 49	$08 \ 32 \ 00.74 \ +04 \ 32 \ 02.5$	13.550	12.475	12.189	[1]
QSO 0948+002	$09 \ 49 \ 10.19 \ +00 \ 21 \ 39.5$	14.944	13.500	13.139	[4]
3C 273	$12 \ 29 \ 08.34 \ +02 \ 00 \ 17.2$	12.718	11.345	10.924	[3]
QSO 1239+044	$12 \ 39 \ 30.11 \ +04 \ 39 \ 52.6$	14.095	12.942	12.638	[4]
3C 279	12 56 16.90 -05 50 43.0	13.660	12.377	11.974	*
PKS 1502+106	$15\ 04\ 36.51\ +10\ 28\ 47.0$	15.335	14.117	13.678	[4]
PKS 1510-089	15 12 53.19 -09 03 43.6	13.282	12.205	11.919	[3]†
3C 454.3	22 53 58.18 + 16 09 06.9	13.587	11.858	11.241	[3]†
1ES 0323+022	$03\ 26\ 13.42\ +02\ 24\ 06.1$	12.840	11.097	10.485	[1]
1 ES 0647 + 250	$06 \ 50 \ 40.57 \ +25 \ 03 \ 24.4$	12.740	12.053	11.771	*
1 ES 0806 + 524	$08 \ 09 \ 40.65 \ +52 \ 19 \ 17.2$	13.040	11.417	10.867	[1]
Mrk 421	$11\ 04\ 18.22\ +38\ 16\ 30.9$	15.570	14.453	14.106	[2]
ON 325	$12\ 17\ 44.51\ +30\ 09\ 43.6$	14.960	13.674	13.232	[1]
PG 1553+113	$15\ 55\ 52.28\ +11\ 13\ 18.3$	13.828	12.539	12.139	[5]
H 1722+119	$17\ 25\ 05.27\ +11\ 52\ 11.0$	13.210	11.308	10.710	[1]
1 ES 1959 + 650	$20 \ 00 \ 26.51 \ +65 \ 09 \ 26.4$	12.670	11.464	11.135	[2]
PKS 2155-304	21 59 02.47 -30 10 46.2	12.050	10.775	10.365	[1]
$1 ES \ 2344 + 514$	$23\ 47\ 02.24\ +51\ 43\ 17.6$	12.610	11.421	11.117	[1]
PKS 0048-097	00 50 47.23 -09 30 15.9	14.120	12.455	11.854	[1]
S2 0109+224	$01 \ 12 \ 03.28 \ +22 \ 43 \ 26.7$	12.510	11.245	10.886	[1]
3C 66A	$02 \ 22 \ 55.12 \ +43 \ 03 \ 15.5$	12.809	12.371	12.282	[3]
PKS 0422+004	$04 \ 24 \ 42.42 \ +00 \ 37 \ 10.8$	12.510	11.217	10.899	[1]
$S5\ 0716+714$	$07\ 21\ 52.18\ +71\ 18\ 16.1$	12.475	11.320	10.980	[3]
PKS 0754+100	$07 \ 57 \ 16.12 \ +09 \ 55 \ 47.8$	13.000	11.852	11.496	$[1]^{\dagger}$
OJ 287	08 54 59.01 + 20 02 57.1	13.986	12.811	12.445	[3]
ON 231	$12\ 21\ 33.67\ +28\ 13\ 04.0$	12.080	10.921	10.597	[1]
Mrk 501	$16\ 53\ 45.85\ +39\ 44\ 08.8$	12.598	10.935	10.399	[3]
PKS 1749+096	$17\ 51\ 37.28\ +09\ 39\ 07.1$	11.950	10.252	9.740	[1]
3C 371	$18 \ 06 \ 53.72 \ +69 \ 45 \ 37.4$	12.588	12.219	11.856	*
AO 0235+164	$02 \ 38 \ 32.31 \ +16 \ 35 \ 59.7$	12.720	11.248	10.711	[3]†
S5 1803+784	17 59 52.6 + 78 28 50.9	13.052	11.761	11.381	*
BL Lac	$22 \ 02 \ 45.45 \ +42 \ 16 \ 35.4$	12.938	9.817	8.811	$[3]^{+}$
OQ 530	$14 \ 19 \ 39.70 \ +54 \ 21 \ 55.0$	15.961	13.873	13.131	[4]
PKS 1222+216	$12 \ 24 \ 41.03 \ +21 \ 21 \ 26.5$	15.660	14.024	13.500	[1]
RX J1542.8+612	$15\ 42\ 40.48\ +61\ 30\ 21.1$	13.260	9.640		‡
S4 0954 + 658	$09 \ 58 \ 50.44 \ +65 \ 32 \ 09.1$	14.610	12.927	12.455	[1]
3EG 1052+571	$10\ 58\ 37.99\ +56\ 25\ 21.5$	11.752	10.531	10.207	[4]
表 2.5: 比較星の測光に用いた天体リスト :(1) 天体名; (2) 座標; (3)V 等級; (4)J 等級; (5) 引 用文献:[1]Hog et al. (2000), [2]Zacharias et al. (2009), [3]Zwitter et al. (2008), [4]McGimsey & Miller (1977), [5]Skiff (2007), [6]Adelman-McCarthy & et al. (2008), [7]Skrutskie et al. (2006)

object name	coordinate	V	J	refer.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MisV 1436	$01\ 36\ 15.40\ +47\ 53\ 49.5$	12.07		[1]
QSO 0324+341	$03\ 24\ 58.76\ +34\ 13\ 33.9$	9.49		[1]
3C 279	$12\ 56\ 14.47\ \textbf{-}05\ 46\ 47.6$	15.98		[2]
	$12\ 56\ 10.28\ \text{-}05\ 50\ 14.4$	15.42		[3]
$1 ES \ 0647 + 250$	$06\;50\;36.96\;+25\;03\;07.0$	12.23		[1]
3C 371	$18\ 06\ 42.68\ +69\ 46\ 10.4$	15.11		[4]
S5 1803+784	$18\ 00\ 33.29\ +78\ 28\ 35.4$	15.73		[5]
RX J1542.8 $+612$	$15\ 42\ 31.36\ +61\ 31\ 10.3$	15.369	13.939	[6][7]

第3章 観測結果

3.1 光度、色の相関

3.1.1 V 等級と色 (V – J) の相関係数

我々の観測で得られた光度曲線と色の変化の例を図 3.1 に示す。この図は 3C 371 の観測 結果を示している。図 3.1 から分かるように、この天体は V 等級で明るいほど、色 V - Jが青くなるという、いわゆる bluer-when-brighter の傾向を示した。我々は観測した全 42 天体について光度と色の相関係数を計算し、各々に対して t 検定を用いて、相関の有意性を 調べた。その結果、24 のブレーザーが全観測期間において有意な bluer-when-brighter を示 した。また、全観測期間において V 等級が明るいほど色が赤くなる redder-when-brighter の傾向を示した天体は 3C 454.3 と PKS 1502+106 の 2 天体であった。

図 3.2 は 3C 454.3 の光度曲線と色-等級図を示している。この天体は全観測期間におい て有意な redder-when-brighter を示したが、色-等級図を見ると、明るさによって異なる 傾向があり、 $V \sim 15$ よりも暗い時期に redder-when-brighter の傾向が現れているのが分 かる。逆にそれより明るい時期では有意な bluer-when-brighter が確認された。明るい状 態より暗い状態の方が多く観測されているので、redder-when-brighter の寄与が強く影響 し、全観測期間において解析すると redder-when-brighter が有意に検出されたものと考え られる。この 3C 454.3 も含め、本観測では 3 つのブレーザー (3C 454.3、PKS 1510-089、 PG 1553+113) で、redder-when-brighter の傾向がそれぞれの暗い状態において観測され た。PKS 1510-089 ではV = 15.5より暗い時期、明るい時期それぞれで、redder-whenbrighter、bluer-when-brighterの傾向が検出された。3C 454.3 と PKS 1510-089 の 2 天体 を合わせると、bluer-when-brighter を示す天体は26天体になる。またPG 1553+113 では V = 13.9より暗い時期では redder-when-brighter が検出されたが、それより明るい時期 では有意な bluer-when-brighter は検出されなかった。図 3.3 はこの天体の色-等級図であ る。V = 13.9を境に、より明るいものを黒丸、暗いものを白丸で示している。図からわか るように、暗い時期の redder-when-brighter の傾向は天体が明るくなると共に傾向が弱く なっている。この観測結果から、PG 1553+113 でも明るい時期には bluer-when-brighter の傾向が見られるが、我々の観測では明るい時期の観測が少ないため有意に検出できな かった可能性がある。



図 3.1: 3C 371 の V バンド光度曲線 (上)、V-Jの色変化 (中)、色-等級図 (下)。



図 3.2: 3C 454.3 の *V* バンド光度曲線 (上)、 *V* - *J* の色変化 (中)、色-等級図 (下)。

観測した天体のうち14天体はV等級と色V - Jに相関はなく、かつ暗い時期に明確な redder-when-brighterの傾向も見られなかった。しかしこれらのうち、大部分である10天 体は観測数が10夜以下と、観測点数が少ない。したがって、これらの天体では光度と色 が相関しないのではなく、本来弱い相関が存在しても観測点数が少ないために有意な検出 ができていない可能性がある。観測数が10夜以上で、光度と色に有意な相関がなかった 4天体はMis V1436、H 1722+119、PKS 0048-097、S5 1803+784 である。しかし、これ らの中でも期間ごとに区切ると、有意に bluer-when-brighter を示す天体がある。図 3.4 は PKS 0048-097 とH 1722+119 の等級と色の変化を示している。PKS 0048-097 は 2 つの 観測期間にまたがって観測しており、前半部分では有意な bluer-when-brighter を示した。 また、H 1722+119 は観測期間で区切っても有意な bluer-when-brighter は検出されなかっ たが、一つ一つのフレアについて見てみると、光度と色が相関して、明るくなると青くな る傾向が見られた。観測が不十分なことにより、長期変動成分の寄与を比較的強く受け、 全体として相関が検出されなかったと考えられる。他の2天体 (Mis V1436、S5 1803+784) は観測期間で分けても、有意な相関は示さなかった。



図 3.4: PKS 0048-097(左) とH 1722+119(右) のV バンド光度曲線 (上)、V - J の色変 化 (中)、色-等級図 (下)。

また PKS 1502+106 は全観測期間で解析すると redder-when-brighter を示したが、2008、2009、2010 年の3つの観測期間にまたがって観測しており、それぞれが色- 等級図上で異なる領域に位置している。図 3.5 はこの天体の光度曲線、色変化、色等級図であり、2008、2009、2010 年の観測点をそれぞれ黒丸、白丸、白四角で表わしている。これら3つの観測期間それぞれについて相関係数を計算すると、2008 年と2009 年の観測期間では有意な bluer-when-brighter を示した。2010 年の観測期間は常に暗い状態 V > 17.2 で、有意な bluer-when-brighter は示さなかった。

観測数が10夜以下の天体を除くと、有意な bluer-when-brighter を示す天体の割合は 26/32 となり、これは全天体の81%が有意な相関を示した事になる。上記のように、期 間ごとで bluer-when-brighter が有意に見られた天体も含めると、全天体の88%が bluerwhen-brighter を示したことになる。よって我々の観測によって、増光現象に付随して色 が青くなる変動はブレーザーに一般的な特徴であることが明らかになった。



図 3.5: PKS 1502+106のVバンド光度曲線 (上)、V-Jの色変化 (中)、色-等級図 (下)。 黒丸が 2008 年、白丸が 2009 年、白四角が 2010 年。

3.1.2 V, J 等級の変動の激しさと天体種別・光度との関係

この節では等級や色の変動振幅が天体種族や光度にどのように依存するかを述べる。 しかし、我々の観測期間は天体本来の変動振幅を決定するには十分長くはない。そこで bluer-when-brighterを示す天体の色-等級図において、その傾き $\Delta V/\Delta(V-J)$ を最小自 乗法を用いて一次関数でフィットする事で変動振幅を見積もった。 $\Delta V/\Delta(V-J)$ は色の 変化に対する光度変化の指標と考えられる。V 等級と色 V - J の変動幅は観測期間の長 さに強く依存するので、これは観測期間に影響を受けずに、変動幅を調査するのに適した 値であると言える。

図 3.6 は有意な bluer-when-brighter を示した天体の V バンド絶対等級に対する $\Delta V/\Delta(V-J)$ を示している。有意な相関を示した天体のうち S2 0109+224 は赤方偏移 z が不明なため ここでは除外している。また、3C 454.3 と PKS 1510-089 については、それぞれ redder-when-brighter の傾向を示す V = 15、15.5 よりも暗い時期は除外して、 $\Delta V/\Delta(V-J)$ を計算した。図 3.6 から、HBL は $\Delta V/\Delta(V-J)$ が小さく、FSRQ は $\Delta V/\Delta(V-J)$ が 大きい傾向が見られる。また、両者の中間天体である IBL では、絶対等級で明るいほど $\Delta V/\Delta(V-J)$ が大きくなる傾向も見られる。ブレーザーシークエンスが正しければ、こ の $\Delta V/\Delta(V-J)$ の傾向は高エネルギー電子の放射ほど激しく光度が変動することを示唆 する。また、FSRQ には $\Delta V/\Delta(V-J)$ の誤差が大きい天体が多い傾向にあり、これらは bluer-when-brighter を示す相関係数が比較的小さい。



図 3.6: 絶対等級に対する $\Delta V/\Delta(V-J)$

図 3.7 は赤方偏移 z が既知である 38 天体について、V バンドでの絶対等級と色 V = Jの変動幅の関係を示している。ここで示している色の変動幅は、観測された色指数の最

小値と最大値の差である。図中の印の大きさの違いは、観測数の違いを意味しており、30 夜より少ないものを小さい印、多いものを大きい印でそれぞれ示してある。この図から、 絶対等級で明るい天体では観測された色の変動幅のばらつきが大きいものの、絶対等級で 暗い天体では変動幅が小さい傾向があることが分かる。この傾向は観測数が30夜以下の ものを除いても見られる傾向である。よって、我々の観測は、HBLのような暗い天体は 光度、色共に変動が小さいという事を示唆する。



図 3.7: 絶対等級に対する (V – J) の変動幅

3.1.3 各波長帯間における変動の時間差

各波長帯間において変動に時間差がないか調べるため、 V, J, K_s , バンドの光度曲線間で 相関関数を計算した。通常の相関関数はデータ間隔が一定でないと正確な結果を得ること は出来ないので、今回は Edelson & Krolik (1988) の discrete correlation function を用い た。これは離散的で、かつ非等間隔に観測されたデータを扱えるのが特徴である。今、観 測日、観測値、誤差の3カラムからなるデータが2対あるとする。ある異なる対の観測値 (a_i, b_j) に対して、それぞれの観測誤差 (e_a, e_b) と観測値の平均値 (\bar{a}, \bar{b}) と標準偏差 (σ_a, σ_b) を用いた

$$UDCF_{ij} = \frac{(a_i - \overline{a})(b_j - b)}{\sqrt{(\sigma_a^2 - e_a^2)(\sigma_b^2 - e_b^2)}}$$
(3.1)

を UDCF とする。同じ時間間隔 ⁷ だけ隔てられたすべてのデータ対について UDCF を計 算し、平均値を取り、

$$DCF(\tau) = \frac{1}{M} UDCF_{ij} \tag{3.2}$$

を導出した。

図 3.8 は BL Lac について、V 等級とJ 等級 (左)、V 等級と K_s 等級の相関関数を計算 したものである。BL Lac は波長間の変動に有意な時間差はないことが分かる。他の天体 についても同様に相関関数を計算したが、V 等級に対するJ または K_s 等級の光度曲線が 有意な時間差を示した天体はなかった。また、各天体をフレアごとに調べた場合でも、色 の変動が光度曲線に明らかな時間差をもって相関している現象は見られなかった。



図 3.8: BL Lac における各波長帯間の相関関数。 E:V 等級とJ 等級。 A:V 等級と K_s 等級。

3.2 光度と偏光度の相関

3.2.1 V 等級と偏光度の相関係数

光度と色の相関関係と同様に、光度と偏光度についても調査を行った。例として図 3.9 は AO 0235+164の光度曲線と偏光度を示している。この図から、この天体は明るくなっ た時に偏光度も高くなるという傾向があると分かる。我々は、このような光度と偏光度の 有意な正の相関を、11天体で発見した。

図 3.10 は Mis V1436 の光度曲線と偏光度を示している。この天体も観測期間全体を 通して解析すると、光度と偏光度の間に有意な正の相関があるが、一方で、図下段より、



図 3.9: AO 0235+164のVバンド光度曲線(上)、偏光度(中)、等級に対する偏光度(下)。

Mis V1436 は光度が高くなった時に、高い偏光度を示す場合と低い偏光度を示す場合の両 方が観測された。変動を時系列で見ると、JD 2454900 から JD 2455000 までの観測空白 期間の前後の光度はほぼ同程度にも関わらず、偏光度は~10% と~30% と異なる。こう した例から、光度の変化には偏光度の変化を伴うものと伴わないものがあり、有意な正の 相関が検出された天体でも図 3.10のような単純な相関をしていないことがある。



図 3.10: Mis V1436 の V バンド光度曲線 (上)、偏光度 (中)、等級に対する偏光度 (下)。

また、5つの天体 (QSO 0454-234、OJ 49、ON 325、3C 66A、ON 231) は有意な逆相 関を示した。例として、図 3.11 は、OJ 49の光度曲線と偏光度を示している。これらの 天体の場合、明るいほど偏光度が低くなる。

§3.1.1 と同様に、10 夜以下の観測数の天体を除くと33 天体になる。そのうち、有意に 正の相関を示したものと、負の相関を示した天体の割合はそれぞれ33 %、15 %になった。 光度と色の相関に比べ、光度と偏光度の相関は弱いことが分かった。

全観測期間では有意な相関が検出されなかった天体でも、以下の天体では光度と偏光 度が相関する期間が存在した。PKS 1749+096は2008年から2009年の2つの期間にまた がって観測しており、全観測期間で考えると光度と偏光度は相関しないが、2009年のみ を解析すると光度と偏光度に有意な相関が見られた。2008年の観測では有意な相関は示



図 3.11: OJ 49 の V バンド光度曲線 (上)、偏光度 (中)、等級に対する偏光度 (下)。

さなかったが、JD 2454720から JD 2454760付近のフレアに付随して偏光度の増加が観測 された (図 A.32)。しかし、光度曲線では同様に見えるフレアでも別の期間では偏光度の 増加を伴わないフレアも存在し、そのため 2008年の観測期間全体で相関係数を計算する と有意な相関を示さない。また、OJ 287では JD 2455000以前、BL Lac では JD 2454900 以前の観測期間で、それぞれ偏光度が光度に対して逆相関を示した (図 A.29,A.36)。

前節と同様に、偏光度の変動振幅と天体種別との関係を調べるために、図 3.12 に赤方 偏移 z が既知の 38 天体について、V バンドでの絶対等級と各天体が示した偏光度の最大 値を示した。40%程度まで偏光度が増加するような天体でも、別の時期では 0–5%にまで 下がるので、観測された偏光度の最大値は、偏光度の変動振幅に相当する。ただし、前節 の色に関する議論と同様、観測された偏光度の最大値は観測期間の長さに依存する可能性 がある。図から分かるように、HBL のような絶対等級が暗い天体は偏光度も小さいまま であり、大きな偏光度の上昇は、絶対等級が明るい天体で観測された。この傾向は観測数 の多い天体だけでも確認できる。



図 3.12: 絶対等級の平均に対する偏光度の最大値。図はzが既知な天体のみ示してある。 図中の記号の大きさは観測夜数に依存しており、30夜未満を小さい記号、30夜以上を大 きい記号で示してある。

3.2.2 V 等級と偏光度の相関関数

偏光度についても、光度曲線と偏光度の変動に時間差がないか調べるため、両者の相関 関数を各波長帯間と同様に計算した。図 3.13 は BL Lac の V 等級と偏光度の相関関数で ある。BL Lac は V 等級と偏光度についても、変動に有意な時間差はないことが分かる。 他の天体についても同様に計算したが、光度と偏光度の間に有意な時間差をもって相関 した天体はなかった。しかし各天体をフレアごとに調べてみると、偏光度が先行して増加 し、その後光度が増加するという場合があった。図 3.14 は Mis V1436 の光度曲線と偏光 度の時間変化を示している。JD 2455120 からの可視光フレアに対して、偏光度が約5日 先行して極大になった。時間差のないフレアも存在しているので、全体で相関関数を計 算しても有意な時間差は検出されなかった。他にも PKS 1510-089 は JD 2454960 で1日 (図 A.11)、AO 0235+164 は JD 2454730 で4日 (図 A.34)、3C 454.3 は JD 2455180 で10 日 (図 A.12)、それぞれ時間差のあるフレアが観測された。また、3C 454.3 では光度が先 行して明るくなるフレアが観測された。



図 3.13: BL Lac のV 等級と偏光度の相関関数。

3.3 偏光方位角の系統的な変化

3.3.1 **偏光方位角の補正**

我々は偏光方位角について、2種類の補正を行った。これらの補正によって偏光方位角の回転のようなものが見えてきた天体や、偏光方位角についての新しい考え方の必要性が 出てきた。

角度の拡張

偏光方位角は通常、QU 平面の原点を中心に 0° から 180° の間で定義される。しかし、 例えばある時刻に観測した方位角 179° の偏光が、次の観測で方位角 1° に変化した場合、



図 3.14: Mis V1436 の V 等級と偏光度 (JD 2455120)。赤が等級、緑が偏光度を表わす。

マイナス方向に大きく変化したと考えるよりも 181° に変化した、と表記する方が自然で あろう。特にタイムスケールの長い系統的な変化を探る場合は、そのように偏光方位角を 補正して調べる必要がある。本研究ではこの補正として、ある観測日とその次の観測日の 変動が ±90° 以上である場合、得られた偏光方位角に ∓180° を加えて補正した。

原点の補正

ストークスパラメータ QU をそれぞれ横縦軸にとった QU 平面でみると、常に原点 (0,0) から離れた領域に点が集中している場合がある。例えば、BL Lac や OJ 287 の場合、全観 測天体の中でも特に長期間密に観測したが、QU 平面上でそれぞれ第1象限、第4象限に 集中している (図 A.36,A.29)。このような特徴と、偏光度と光度曲線の相関が弱いことか ら、我々のグループは数日のタイムスケールで光度曲線と相関して変動する偏光成分と、 より長い数ヵ月以上のタイムスケールで変動する偏光成分の2成分を考えるモデルを提案 した (Uemura et al., 2010)。OJ 287 と S2 0109+224 はこの2 成分で観測された偏光の時 間変動を説明できることが示された。このような天体があることを考慮して、本研究では 長期成分が観測期間中に大きく変動しないと仮定し、QU 値それぞれの平均値を長期成分 とした。ただし、平均値は単純な平均値ではなく、フレア等により突出した QU を除外し たものの平均値とした。具体的には QU 値それぞれの平均値をとり、 3σ 以上離れた点を 取り除く。残った点で再び平均値をとり、 3σ 以上離れた点を取り除く。こうして、デー タ点の数が減らなくなった時点での平均値を長期成分とし、そのQU値を原点として偏光 方位角を再定義した。

3.3.2 各天体の挙動

Marscher et al. (2008) は BL Lac を観測し、5日間で偏光方位角が240°連続的に変化し た現象を報告した。同様のタイムスケール、回転角度を持った現象は、我々の観測では検 出されなかった。一方で、前節の補正を行った結果、より長いタイムスケールの偏光方位 角の変動がいくつかの天体で見られた。ここでは特徴的な天体を数例挙げる。

長期間の連続的な方位角の変動例: PKS 1510-089

図 3.15 は PKS 1510-089 の偏光方位角の観測値、拡張値、原点補正値、QU 平面を表 わす。なお、原点補正値の偏光方位角も拡張したものを示している。観測から得られた偏 光方位角は一見ほぼ無秩序に変動しているように見えるが、角度を拡張することによって 偏光方位角が連続的に変化していたことが分かった。JD 2454880 付近から約 80 日間で約 700° 近く回転しているように見える。この天体は Marscher et al. (2010) も観測しており、 図 3.16 がその結果である。彼らは JD 2454910 から JD 2454960 までと、JD 2454990 か ら JD 2455000 までの 2 回、偏光方位角が回転したと主張した。偏光方位角において我々 の結果からもほぼ同様の結果が得られているが、JD 2454950 付近と JD 2454990 付近で 挙動が異なっている。JD 2454950 付近では Marscher et al. (2010) の観測点数が我々のも のより少なく、JD 2454990 付近では逆に我々の観測点数の方が少ない。偏光方位角を拡 張することで補正する際には、現象のタイムスケールに対して十分密に観測されないと、 誤った補正をする可能性がある。Marscher et al. (2010) と我々の結果が一部異なるのは、 その観測密度が原因だと考えられ、より観測密度の高い結果の方が信頼性が高い。

我々はさらに原点も補正したが、結果はほとんど変わらず、偏光方位角の連続的な変化が 見られた。これは得られたQU値のほとんどが原点近くの領域で変動しており、すなわち、 強い偏光を持った長期変動成分が存在していないことを示唆する。よって、この天体は長期 間に渡って偏光ベクトルが回転していることが強く示唆される。我々が観測した天体のう ち、PKS 1510-089のような長期間の連続的な方位角の変化は、他に 3C 454.3(図 A.12)、 S5 0716+714(図 A.27)、PKS 1749+096(図 A.32) でも見ることができる。これら 3 天体 の場合、QU の平均値を使って原点を補正すると方位角の連続的な変動は一部見られなく なる。ただし、いずれの天体も暗い時期には QU 平面の原点近くに観測点が集中しており、 以下で議論する 3C 66A のように 2 つの偏光成分を考えて原点の補正を行う必要性は低い と考えられる。このうち、PKS 1510-089を含み、3C 454.3 と PKS 1749+096 は、偏光方 位角の連続的な変動は大きな光度変動に付随しているという共通点をもつ。S5 0716+714 は図 A.27 から分かるように、方位角は長期間に渡り減少を続けているが、連続的にというよりもむしろ階段状に変化しているのが特徴である。



図 3.15: PKS 1510-089の偏光方位角。左上:観測された偏光方位角。左中:角度を拡張した偏光方位角。左下:原点を補正した偏光方位角。右上:ストークスパラメータQ,Uを用いた平面(QU平面)。右下:QU平面の原点付近の拡大図。図の緑の点はQUの平均値

長期変動成分の存在を示唆する例: 3C 66A

図 3.17 は 3C 66A の、偏光方位角の観測値、拡張値、原点補正値、QU 平面を表わす。 図 3.17 左中の JD 2454850 から短期間に約 200°連続的に変化しているように見えたのが、 原点を補正することで図左下のように見えなくなった。図 3.17 右の QU 平面から、ほと んどの偏光ベクトルが原点から離れた領域にあるのが分かる。したがって、観測された偏 光は 1 つの放射源からではなく、短時間変動する成分とほぼ時間変動しない成分 (図 3.17 右の緑点付近の成分) との 2 成分の合成であると考えられる (Hagen-Thorn et al. 2002; Uemura et al. 2010)。JD 2454850 付近で観測された偏光方位角の回転は同時期に偏光度 が減少しており (図 A.25)、この回転の時期に QU 平面の原点付近に天体がいたことを意 味している。2 成分モデルが正しい場合、JD 2454850 付近の回転現象は、実際には放射



図 3.16: Marscher による PKS 1510-089の観測結果 (Marscher et al., 2010)。上から順に R 等級、偏光度、偏光方位角。

源の磁場方向の回転ではなく、短時間変動成分の方位角が偶然QU平面の原点方向だったたのに見かけ上、回転が見られたと考えられる。



図 3.17: 3C 66A の偏光方位角。左上:観測された偏光方位角。左中:角度を拡張した偏光 方位角。左下:原点を補正した偏光方位角。右:QU 平面。図のみどりの点は QU の平均値

原点の補正方法が正しくない例: PKS 1502+106

図 3.18 は PKS 1502+106 の、偏光方位角の観測値、拡張値、原点補正値、QU 平面を 表わす。この天体でも 3C 66A と同様、観測して得られた偏光方位角では見られなかった 連続的な変化が、角度の拡張と原点の補正によって現れた。しかし、QU 平面上で見てみ ると、3C 66A ではこの平均値である補正した原点周辺に点が密集していたのに対して、 PKS 1502+106 の場合は密集していない。もし長期変動成分と短期変動成分の2成分が存 在するなら、長期成分の周辺に観測点が密集するはずである。したがって、このQU 平均 値を長期成分と考えるのは妥当ではない。図 A.10 からこの回転が見える時期は、光度が 高くフレアが観測された時期であり、QU 平面の第3象限に集中した観測点はこのフレア の偏光成分である。今回の観測では大部分がこのフレアの期間であり、その結果、観測期 間中の QU の平均点が原点から離れた値になった。そのフレアに付随した偏光成分は、方 位角に 40°程度の変動幅を持っており、それらが平均値を取り囲むような円環状に位置し たため、偏光方位角の大きな回転として図 3.18 左下のような結果になった。しかし上述 のように、このようにして計算された QU の平均値を長期成分と考えることは妥当性に欠 け、したがって図 3.18 左下のような観測結果の解釈は正しくないと考えられる。この例 は原点の補正による偏光方位角の再定義が必ずしも正しいというわけではなく、偏光方位

角が回転のような変動をした場合でも、光度やQU平面も同時に検証する必要があるということを示している。



図 3.18: PKS 1502+106の偏光方位角。左上:観測された偏光方位角。左中:角度を拡張した偏光方位角。左下:原点を補正した偏光方位角。右:QU 平面。図の白丸は QU の平均値



図 3.19: PKS 1502+106の光度曲線。偏光方位角が連続的に変化しているのは JD 2454900 から JD 2455000 までの区間。

第4章 議論

4.1 2つの変動成分

我々の観測では、光度-色の相関関係において、全観測期間では有意な相関が検出されない が、より短い期間ではbluer-when-brighterの傾向が検出される例が見られた (PKS 1502+106 と PKS 0048-097)。また、光度-偏光度の関係においても、フレアごとでは光度に付随し て偏光度が増加する減少が見られた (Mis V1436)。

Villata et al. (2002) と Villata et al. (2006) は BL Lac を観測し、短期間でのみ bluerwhen-brighter を検出したことから、短期間変動成分と長期間変動成分の少なくとも 2 つ の変動成分があると主張した。我々の観測した PKS 1502+106 や PKS 0048-097 の結果 は、彼らの結果とよく一致しており、2 つの変動成分の存在を支持する。また、偏光度に ついても、偏光度の変動を伴う光度変動と伴わない光度変動があり、このような多様性は 2 つの偏光成分を考えることで説明できるかもしれない。もし、光度に依存しない変動を するような別の偏光成分が存在するならば、たとえ光度に相関するような偏光が存在し たとしてもそれらに埋もれてしまう可能性がある。したがって偏光度が光度に相関する 例としない例が生じると考えられる。また、この描像を基にして、我々は観測した偏光か ら、光度に相関するものとしないものの 2 つに分離する方法を考案した (Uemura et al., 2010)。この方法を我々の観測結果に用いると、いくつかのブレーザーで偏光の振る舞い を 2 成分で説明する事が出来た (Uemura et al., 2010)。

以上のような色や偏光度の振る舞いから、ブレーザーの変動には数日から数週間で変動 する短期間変動成分と、数ヵ月から数年で変動する長期間変動成分の少なくとも2成分は 存在することが示唆される。それぞれの変動タイムスケールから、短期変動はより狭い、 すなわちブラックホールにより近いジェット上流の領域、長期変動はより広い、すなわち ジェットのより下流の領域からの放射を観測していると考えられる。

4.2 光度変動の要因

これまで色と光度の相関関係について、bluer-when-brighter の傾向が多いと主張はされてきたものの、いくつかのブレーザーで redder-when-brighter や無相関が報告されてきたため、一般的な関係性は未だ確立されていなかった (Gu et al. 2006; Villata et al.

2006; Raiteri et al. 2008)。我々の観測では、観測数が 10 夜以下の天体を除くと、観測 期間全体で有意な bluer-when-brighter を示した天体は全体の 75%であった。また我々の 観測においても 3 つのブレーザー (3C 454.3、PKS 1510-089、PG 1553+113) がそれぞ れ暗い時期に redder-when-brighter を有意に示した。しかし、これら 3 つのうち 2 つの ブレーザー (3C 454.3、PKS 1510-089) は明るい時期には bluer-when-brighter を示した。 PG 1553+113 については、明るい時期について統計量が足りないだけで、観測期間を延 ばせば bluer-when-brighter の傾向を示す可能性が高い。さらに、全体や明暗に区切って も有意な bluer-when-brighter を示さない天体でも PKS 1502+106 や PKS0048-097 のよ うに、短期間に区切ると bluer-when-brighter の傾向を示す天体も存在する。これらを含 めると、我々は約 88 %のプレーザーから bluer-when-brighter の傾向を検出した。よって、 bluer-when-brighter は、プレーザーの数日-数週間のタイムスケールの変動において一般 的な特徴であると考えられる。

Kirk et al. (1998) は bluer-when-beighter の傾向が見えるのは、フレア時になんらかの 機構によって放射領域に新たなエネルギーが注入されるからだと主張した。エネルギー注 入の結果、高いエネルギーを持った電子の数が増加し、短波長側のシンクロトロン放射の 光量が長波長側より増加し、色が青くなる。このエネルギー注入のきっかけとして、相対 論的速度を持ったシェル同士の内部衝突 (内部衝撃波モデル)が現在の有力な候補である (Marscher & Gear 1985; Marscher & Travis 1991; Qian et al. 1991)。また光度変動の要因 として、ジェットの見かけの速度が変動するビーミング因子の変動も挙げられる。この場 合、ビーミングされた放射領域からの放射は、§1.2.3 より、色の変化はあまりせず、ほぼ すべての波長に渡り変動する。



図 4.1: 内部衝撃波とビーミング因子による SED の変化の違い

今回の研究では、少なくとも短期間変動では bluer-when-brighter が普遍的であり、ほ

とんどのブレーザーが高エネルギー粒子の注入により光度変動していることを示唆する。 また、我々の観測ではLBLより、HBLの方が光度、色ともに変動が小さいという結果も 得られた。これは低エネルギー電子を起源とする放射の変動幅が、高エネルギー電子を 起源とする放射の変動幅より小さい事を意味する。図 4.1 は HBL と LBL それぞれの内部 衝撃波による SED の変化とビーミング因子による SED の変化の概略図である。図中の optical band は可視領域で観測される波長帯を表わしている。HBL の場合は内部衝撃波、 ビーミング因子どちらの変動をしてもほぼ同じように SED は変化するが、LBL の場合は 異なる。この図と我々の観測結果より、光度変動の要因はビーミング因子ではなく、内部 衝撃波によることが示唆される。以上から、今回の観測結果はブレーザーの短期変動の要 因としては内部衝撃波モデルを支持する。ただし、1年以上のタイムスケールを持つ長期 変動における光度と色の変動に対する機構については依然として不明で、今後の継続的な 観測が必要である。

4.3 光度と色に相関のなかった天体

観測夜数が10夜以上で、光度と色が有意に相関しなかったのは4天体 (Mis V1436、 H 1722+119、PKS 0048-097、S5 1803+784) であった。PKS 0048-097 とH 1722+119 については前述のとおり、短時間で光度と色が相関する傾向が見られた。Mis V1436と S5 1803+784 は、それぞれ暗い時期に、等級に対して色が不規則に変動するという特徴 が見られた。図 4.2 は Mis V1436 と S5 1803+784 の色-等級図を表わしている。図から それぞれV = 17, 16.4より暗い時期には、同じ光度でも大きく異なる色を示すという結 果が得られた。また、この挙動は他にQSO 0454-234 でも見られた。この結果から、暗 い時期における redder-when-brighter の傾向が示唆されるかもしれない。しかし、単純な redder-when-brighter の場合、色が青くなる時に光度が低くなるはずだが、特に Mis V1436 では最も青い時期では必ずしも最も暗くない。したがって、この結果を説明するためには 色が青く、かつ比較的明るい光源が必要であり、降着円盤からの熱的成分はそのような光 源の候補と考えられる。この暗い時期における色の挙動は、ジェットが卓越していた明る い時期から暗くなるにつれ、ジェットの成分と降着円盤からの熱的成分との割合が同程度 になり、降着円盤とジェット両成分の色変化の混合により不規則な振る舞いをしているた めかもしれない。高エネルギー粒子の注入が bluer-when-brighter によって示唆されるのに 対して、ビーミング因子による変化の場合、色変化を伴わない光度の変動が観測されるは ずである。bluer-when-brighter が見られた大多数のブレーザーの例外であるこれらの天体 でも、光度のみの変動は見られなかった。したがって少なくとも短時間変動においてビー ミング因子の変化で説明出来る変動現象は、我々の観測では明確には検出されなかった。



図 4.2: Mis V1436(左)とS5 1803+784(右)の色-等級図。

4.4 熱的放射の示唆

ブレーザーは中心に超巨大ブラックホールを含んでおり、その周囲に形成された降着 円盤からの熱的放射"big blue bump"の存在が、いくつかのブレーザーで示唆されている (e.g. Hagen-Thorn & Yakovleva 1994; Pian et al. 1999)。通常、ブレーザーは可視領域で はシンクロトロン放射が卓越していると考えられているが、シンクロトロン放射が弱くな ると、この熱的放射の寄与が大きくなる。big blue bump はシンクロトロン放射よりも高 エネルギー側にピークを持つため、シンクロトロン放射が弱いほど、青くなる。つまり明 るいほど赤い、という redder-when-brighter を示すようになる。シンクロトロン放射と熱 的放射の強度比は天体により異なり、redder-when-brighter が観測される天体とされない 天体があると考えられているが、その割合は分かっていない。

我々の観測では3天体 (3C 454.3、PKS 1510-089、PG 1553+133) で暗い時期に redderwhen-brighter の傾向が観測された。3C 454.3 はこれまでも redder-when-brighter は観測 されていたが、PKS 1510-089 と PG 1553+133 は我々の観測で初めてこの傾向を確認し た。これらは暗い状態において熱的放射の寄与が大きくなり、redder-when-brighter の傾 向が観測されたと考えられる。

天体が暗い状態における redder-when-brighter の普遍性は、我々の観測が十分に長くな いため依然よく分かっていない。bluer-when-brighter を示したブレーザーのうち、4天体、 PKS 0422+004(Sitko et al., 1983)、S5 0716+714(Raiteri et al., 2003)、PKS 0754+100(Cellone et al., 2007)、PKS 1749+096(Craine et al., 1975) は本観測期間中にそれらの天体で過去に 知られている最も暗い状態が観測された。これらの天体では、暗い時期でも redder-whenbrighter の傾向は見られなかった。残りの 18 天体は、今回我々が観測した状態よりもさら に暗い時期が過去に観測されている。よってこれらもさらに暗い状態になれば、3C 454.3、 PKS 1510-089、PG 1553+113 のような redder-when-brighter を示す可能性はあり、今 後の観測でこれまで希少な観測例であった redder-when-brighter の普遍性の解明が期待さ れる。

4.5 磁場構造の示唆

ブレーザーの色や偏光度の変動は2成分の合成が観測されるという考えに基づき、偏 光をQU平面上で長期変動と短期変動の2つの成分に分け、偏光方位角について原点の補 正を行った結果、偏光方位角の回転が現れた天体があった。PKS 1510-089 については、 長期変動成分を持たないと考えられ、偏光方位角の連続的な回転が観測されたことから Marscher et al. (2008) や Marscher et al. (2010)の放射領域の磁場がらせん状に回転して いるという考えを支持する結果となった。しかし3C 66A は、長期変動成分を持っており、 PKS 1502+106 は、QU平面上でフレアに伴った大きな動きを見せた。このように、単純 に長期変動を定義出来ない場合もある。いずれにせよ、偏光の議論は偏光度、偏光方位角 のみで議論すると誤った結果を生じてしまう可能性もあり、光度、QU平面も考慮する必 要がある。

第5章 まとめ

我々はかなた望遠鏡を用いて、42のブレーザーに対し、可視・近赤外領域で偏光撮像 観測を行った。観測結果を以下にまとめる。

- 10 夜以上観測されたブレーザーの約 88 %が、bluer-when-brighter の傾向を有意に示した。
- 3天体では暗い時期にredder-when-brighterの傾向が見られた。ただし、これらも明るい時期には bluer-when-brighter を示した。
- PKS 1502+106 や PKS 0048-097 のように、ある観測期間のみ bluer-when-brighter を示す天体があった。なかでも PKS 1502+106 は 3 つの観測期間それぞれで bluerwhen-brighter を示し、全体では示さなかった。
- HBLのような絶対等級で暗いブレーザーは明るいブレーザーに対して、光度、色、 偏光度いずれも変動の振幅が小さかった。
- 10 夜以上観測されたブレーザーの中では光度と偏光度に正の相関を示すブレーザーは 11 個 (33 %) であった。また、Mis V1436 のように偏光度の増加を伴うフレアと伴わないフレアが見られた。
- 変動成分が2成分あるという仮定のもと、偏光方位角を補正すると、PKS 1510-089
 では偏光ベクトルの長期的な回転が見られた。また、逆に3C 66A では回転が見えなくなった。

以上から、我々の観測でブレーザーにおける光度の短期変動では、bluer-when-brighter が一般的な傾向であることを確認した。また、それら光度変動の要因はビーミング因子の 変化によるものではなく、内部衝撃波であることを示唆する。PKS 1502+106やMis V1436 のような天体の振る舞いは、ブレーザーの変動に長期成分と短期成分の2成分が存在する という考えを支持する。長期成分と短期成分はその変動タイムスケールから、それぞれ ジェットの下流領域、上流領域からの放射を観測していると考えられる。

偏光方位角の補正からは、新たに偏光ベクトルの回転が見られ、放射領域の磁場構造が らせん状であるという考えを支持するものとなった。また、偏光度、偏光方位角のみでの 議論は誤りを生じる可能性があり、光度や QU 平面も同時に議論する必要性があることが分かった。

付 録 A 観測結果

本研究で観測した全 42 天体の結果を示す。図左パネルは上から順に V 等級、色V = J、 偏光度、偏光方位角、 $\S3.3.1$ より角度を拡張した偏光方位角である。中パネルは上が V 等 級と色 V = J の色-等級図、下が V 等級と偏光度の関係、右パネルは上が QU 平面 (%表 示)、下が QU 平面 (フラックス表示)を示している。



🛛 A.1: Mis V1436



⊠ A.3: QSO 0324+341



🛛 A.5: OJ 49



🛛 A.7: 3C 273



🛛 A.9: 3C 279



🗷 A.11: PKS 1510-089



🛛 A.12: 3C 454.3



🛛 A.13: 1ES 0323+022



🗷 A.15: 1ES 0806+524



🛛 A.17: ON 325


🛛 A.19: H 1722+119



🗷 A.21: PKS 2155-304



🗷 A.23: PKS 0048-097



🛛 A.24: S2 0109+224



🗷 A.25: 3C 66A



🛛 A.27: S5 0716+714



🕱 A.29: OJ 287



🗷 A.31: Mrk 501



🗷 A.32: PKS 1749+096



🛛 A.33: 3C 371



🛛 A.34: AO 0235+164



🛛 A.35: S5 1803+784



🛛 A.37: OQ 530



🛛 A.39: RX J1542.8+612



🗷 A.41: 3EG 1052+571



🕱 A.42: 4C 14.23

謝辞

本研究を行うにあたって力となっていただいた全ての方に感謝いたします。

まず、指導教官であった植村さんに感謝いたします。M1から天文台での観測を始める のに、可視観測の右も左も分からなかった僕に親切、丁寧に分かりやすく教えてくださり 本当に助かりました。ブレーザーの解析を進めていくうえで、理解も作業も本当に遅かっ た僕に最後まで分かりやすく指導をしていただき、論文という形まで持っていくチャンス をいただけたことは感謝してもしきれません。それでいて、普段の打ち解けやすいその独 特な雰囲気は、僕のこれからの生き方の参考にしたいと思います。愛娘さんの将来を楽し みにしておきます。ありがとうございました。

川端さんには偏光についてや、観測における望遠鏡や装置の扱いについて教わりました。殺人的なスケジュールをこなし、かつ学生からの信頼も厚い川端さんの人望はさすが!!と思わせてくれます。我々が天文台での観測を安心してスムーズに出来たのも川端さんのおかげです。川端さんに本気で説教されて、次の日には覚えていないという事件は僕の人生史に残るぐらい衝撃的でした。お酒はほどほどに ・・ と言いたいところですが、僕も人のことはあまり言えないので何も言いません。また飲みましょう。ありがとうございました。

深沢先生には4年生の時から御世話になりました。卒業研究の実験の面倒からはじま り、M1から天文台で観測がしたいというワガママを聞いてくださり、可視チームへ加わ れました。一時的とはいえ実験と観測の同時進行という無茶を許してくださった事には本 当に感謝しています。また、お酒を飲むたびに無礼な態度をとってしまいすみませんでし た。ただもっと仲良くなりたい一心でしたことです。これからは大人なコミュニケーショ ンを身に付けたいと思います。ありがとうございました。

大杉先生は宇宙科学センター長として、天文台の環境改善に協力していただきました。 我々が便利な天文台生活が出来たのも大杉先生のバックアップがあったからです。ひろた かさんには公私ともに御世話になりました。Fermi グループとのパイプ役となり、常に天 文台を気にかけていただき、いくつものフォローアップ観測がスムーズに出来ました。言 わずもがな底知れない体力の持ち主ですが、僕は本当に富士山で一回ひろたかさんにや られると思いました。ですが、ひろたかさんがいなかったらこの研究室はここまで楽しく て、仲の良い研究室にはならなかったんじゃないかと思います。ご結婚の際はぜひ御一報 ください。水野さんは同じ小部屋の住人として、また学生実験についてもいろいろアドバ イスをいただきました。修論モードに入ってからは、うるさかったりキムチの匂いで御迷 惑をおかけしたかもしれません。広島を離れても僕はカープを応援します。片桐さんには 学生実験の T.A. で御世話になりました。準備不足や手際の悪さで御迷惑をおかけしまし た。ですが、この学生実験のおかげで教育の大変さとおもしろさを感じられました。また お子さんと会いたいものです。

ブレーザー研究の先輩でもある D1 笹田さんにも大変御世話になりました。まるで一つ 上とは思えない程の知識量で、いったい何本の論文を読んだんだ!?と M1 ながら仰天して ました。それを見習って僕も論文を読んだりしましたが、いつも「ケツ論文読め!!」と言 われるぐらいまったく足元にも及びませんでした。ワシントンの件では御迷惑をおかけし ました。完全に僕のワガママでしたが、快く譲ってくださり本当に感謝しています。電話 越しのジャンケンは面白かったです。結婚されてちょっとはSっ気が柔かくなるのを期待 しておきます。毎日、共に天文台で過ごした山中さん。もしかしたらこの大学院生活で、 一番長く一緒に過ごしたのはこの人なのでは、と思うほど顔を合わせていました(文面だ け見ると気持ち悪い)。公私ともにいろんな話をしましたが、非常に合理的な考え方の持 ち主で、ネガティブな部分をのぞけば、植村さんに近しいものを感じました。天文台の BGM としての youtube 大会は忘れられませんね。ジェネレーションギャップはそれほど ないですよ(多分)。M2に入ってからでしたが、伊藤くん。一人多波長はものすごい負担 だと思いますが、昼も夜も乗り切るその体力には驚きです。これからの天文台の支配者と なることを期待しています。そして M1 のこまっちゃん、確か高速カメラやってたよなぁ、 と思ったら HONIR やってて、次は HOWPol もやってる装置マスターですね。その技術 は必ずや就活に活きてくると思うのでがんばってください。くれぐれも妄想と現実の境界 だけはしっかりと持っといて。そして京産大へ行かれた新井さんからもたくさん可視観測 について教わりました。植村さん、新井さん、山中さん、関西人はなぜこんなにもおもし ろいのですかね。

また小部屋のみなさまにも感謝です。おさむさんはもはやこの研究室のボスですね。今 の小部屋の雰囲気があるのはおさむさんのおかげだと思います。おそらく来年度以降も御 世話になると思いますのでよろしくお願いします。上原さんはどんな時でも笑っていて、 周りを明るい雰囲気に出来る、かと言って研究も人一倍やっている、そんな姿は結構僕の 目指す姿だったりします。次こそ皆既日食見に行きましょう。M1のさばは2年の時から の縁で、しばらくは久々感でした。いつも言っている「ケツさん、俺はやりますよ!!」に 期待しています。同じくM1のほんちゃんは、意外と真面目で驚きました。あまり気負い し過ぎず、楽にいこうや。バイク買ったら自慢するわ。4年のもちおはすごい努力家で朝 から夜までがんばっていて、後ろにいる僕も少なからず感化されてました。同じちび(で ぶ)同士、男を磨いていきましょう。よねちゃんは果てしなく気の利く男で、僕もぜひ見 習いたいです。要領よく卒論をこなしていくのが印象的でした。どこまでひろたかさんに 着いていけるか期待しています。 大部屋の D1 西野さんは実験をやっていた頃にいろいろ御世話になりました。僕は未だ に西野さんの運動神経に納得出来ません。M1 道津くんは僕の知る限り唯一のミールカー ド所持者です。断られてもめげずにお昼ごはんの招集がんばってください。4年生のおっ くんは学生実験の時に見てましたが、高エネ研に来る気配は微塵もなかったので驚きま した。僕が引き入れたってことにしといてください。おねがいします(マジで)。高野くん はあまり研究室にいなかった割に、いる時の存在感が抜群でした。やっぱり男は身長なん かな。原尾くんは途中からだったのであまり話が出来ませんでしたが、おそらく植村さん と話が合うんじゃないかと思います。なぜかは本人に聞いてみてください。ぱっくんは夏 の学校の発表が忘れられません。兵役免れたらいいですね。なんとか韓国に行ってみた かったです。大杉部屋の安田さんとは音楽の話が多かったです。いろいろ CD を借りまし たが、自分の趣味がマニアックなのは自覚してください。またいいのがあったら教えてく ださい。お茶部屋の高橋さんにはパソコンのトラブルなんかで助けてもらいました。これ ほど linux に精通した人もいないんじゃないか、と素人ながら思いました。

また、同期のさっきー、花畑、林、平木、まっちゃん、(たく)。なんだかんだでやはり 同期の存在は大きいです。さっきーのアクティブさには心底驚かされました。多分僕の発 言でイライラしたこともあったかと思います。この場を借りてごめんなさい。途中から装 置開発になって、接点が減ってしまったけど、もっといろいろ話したかったです。花畑は 文句を言いつつも常に学校にいてしっかりやってるそのギャップがおもしろいし、素直に すごいと思います。たまに出てくるおもしろワードと尾崎スタイルが完全に僕のツボでし た。林は静かながら実は内に熱いものを秘めていて驚きました。自分は要領が悪いと言っ てましたが、まったくそんなことはないと思います。朝早い、夜遅いの超努力家で、博士 の研究にも期待しています。平木は2 浪と聞いた時には目ん玉が飛び出るぐらい驚きま した。僕は認めません。あと、スベッた空気を感じ取る練習をしておいてください。まっ ちゃんがまさか卒業しないなんて思いませんでした。でも日本一周を実行するそのバイタ リティは尊敬に値します。ディズニーランドに就職出来たらいいね。

この他にも卒業されていった先輩や、友人、なにより家族、数え切れない人達の理解 と支えで3年間やってこれました。少し遅いですが、これから社会へ出て荒波に揉まれま す。この研究室で得た経験や知識はこれからの人生で間違いなく糧となると信じていま す。本当に多くのことを学び、あまりにも多くのものを得ました。ありがとうございまし た。感謝の気持ちはこんな紙切れには書ききれませんが、ほんの一握りでも伝わってくれ れば幸いです。最後に高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室の今後のより一層の発 展を心からお祈りしています。

> 2009 年度修了生 池尻祐輝

86

関連図書

- Abdo, A. A., et al. 2009, ApJ, 700, 597
- Adelman-McCarthy, J. K., & et al. 2008, VizieR Online Data Catalog, 2282, 0
- Angel, J. R. P., & Stockman, H. S. 1980, ARA&A, 18, 321
- Bridle, A. H., & Perley, R. A. 1984, ARA&A, 22, 319
- Carini, M. T., Miller, H. R., Noble, J. C., & Goodrich, B. D. 1992, AJ, 104, 15
- Cellone, S. A., Romero, G. E., & Araudo, A. T. 2007, MNRAS, 374, 357
- Clements, S. D., & Carini, M. T. 2001, AJ, 121, 90
- Craine, E. R., Johnson, K., & Tapia, S. 1975, PASP, 87, 123
- Curtis, H. D. 1918, Publications of Lick Observatory, 13, 31
- Donato, D., Ghisellini, G., Tagliaferri, G., & Fossati, G. 2001, A&A, 375, 739
- Doroshenko, V. T., Sergeev, S. G., Merkulova, N. I., Sergeeva, E. A., Golubinsky, Y. V., Pronik, V. I., & Okhmat, N. N. 2005, Ap, 48, 304
- Edelson, R. A., & Krolik, J. H. 1988, ApJ, 333, 646
- Efimov, Y. S., Shakhovskoy, N. M., Takalo, L. O., & Sillanpää, A. 2002, A&A, 381, 408
- Fossati, G., Maraschi, L., Celotti, A., Comastri, A., & Ghisellini, G. 1998, MNRAS, 299, 433
- Francis, P. J., Hewett, P. C., Foltz, C. B., Chaffee, F. H., Weymann, R. J., & Morris, S. L. 1991, ApJ, 373, 465
- Ghisellini, G., Celotti, A., Fossati, G., Maraschi, L., & Comastri, A. 1998, MNRAS, 301, 451

- Ghisellini, G., et al. 1997, A&A, 327, 61
- Ghosh, K. K., Ramsey, B. D., Sadun, A. C., & Soundararajaperumal, S. 2000, ApJS, 127, 11
- González-Pérez, J. N., Kidger, M. R., & Martín-Luis, F. 2001, AJ, 122, 2055
- Gu, M. F., Lee, C., Pak, S., Yim, H. S., & Fletcher, A. B. 2006, A&A, 450, 39
- Hagen-Thorn, V. A., Larionov, V. M., Jorstad, S. G., Arkharov, A. A., Hagen-Thorn, E. I., Efimova, N. V., Larionova, L. V., & Marscher, A. P. 2008, ApJ, 672, 40
- Hagen-Thorn, V. A., Larionova, E. G., Jorstad, S. G., Björnsson, C., & Larionov, V. M. 2002, A&A, 385, 55
- Hagen-Thorn, V. A., & Yakovleva, V. A. 1994, MNRAS, 269, 1069
- Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 1993, ApJ, 417, 63
- Hog, E., et al. 2000, VizieR Online Data Catalog, 1259, 0
- Joshi, M., & Böttcher, M. 2007, ApJ, 662, 884
- Kikuchi, S., Mikami, Y., Konno, M., & Inoue, M. 1976, PASJ, 28, 117
- Kirk, J. G., Rieger, F. M., & Mastichiadis, A. 1998, A&A, 333, 452
- Krolik, J. H., & Begelman, M. C. 1988, ApJ, 329, 702
- Maraschi, L., Ghisellini, G., & Celotti, A. 1992, ApJ, 397, L5
- Marscher, A. P., & Gear, W. K. 1985, ApJ, 298, 114
- Marscher, A. P., & Travis, J. P. 1991, in Variability of Active Galactic Nuclei, ed. H. R. Miller & P. J. Wiita, 153
- Marscher, A. P., et al. 2008, Nature, 452, 966
- —. 2010, ArXiv e-prints 1001.2574
- Massaro, E., Giommi, P., Leto, C., Marchegiani, P., Maselli, A., Perri, M., Piranomonte, S., & Sclavi, S. 2009, A&A, 495, 691
- McGimsey, B. Q., & Miller, H. R. 1977, AJ, 82, 453

- Mead, A. R. G., Ballard, K. R., Brand, P. W. J. L., Hough, J. H., Brindle, C., & Bailey, J. A. 1990, A&AS, 83, 183
- Moore, R. L., et al. 1982, ApJ, 260, 415
- Ohsuga, K., & Umemura, M. 1999, ApJ, 521, L13
- Padovani, P., & Giommi, P. 1995, ApJ, 444, 567
- Padovani, P., Giommi, P., Landt, H., & Perlman, E. S. 2007, ApJ, 662, 182
- Pian, E., et al. 1999, ApJ, 521, 112
- Qian, S. 1993, Chinese Astronomy and Astrophysics, 17, 229
- Qian, S. J., Quirrenbach, A., Witzel, A., Krichbaum, T. P., Hummel, C. A., & Zensus, J. A. 1991, A&A, 241, 15
- Raiteri, C. M., et al. 2001, A&A, 377, 396
- —. 2003, A&A, 402, 151
- —. 2008, A&A, 491, 755
- Sambruna, R. M., Maraschi, L., & Urry, C. M. 1996, ApJ, 463, 444
- Sambruna, R. M., et al. 2010, ApJ, 710, 24
- Sasada, M., et al. 2008, PASJ, 60, L37
- Sikora, M., Begelman, M. C., & Rees, M. J. 1994, ApJ, 421, 153
- Sillanpaa, A. 1991, A&A, 247, 11
- Sitko, M. L., Stein, W. A., Zhang, Y., & Wisniewski, W. Z. 1983, PASP, 95, 724
- Skiff, B. A. 2007, VizieR Online Data Catalog, 2277, 0
- Skrutskie, M. F., et al. 2006, AJ, 131, 1163
- Smith, P. S., Balonek, T. J., Heckert, P. A., & Elston, R. 1986, ApJ, 305, 484
- Takalo, L. O., Sillanpaeae, A., Nilsson, K., Kidger, M., & de Diego, J. A. 1994, A&AS, 104, 115

Tosti, G., et al. 1998, A&A, 339, 41

Uemura, M., et al. 2010, PASJ, 62, 1

Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, PASP, 107, 803

Villata, M., Raiteri, C. M., Lanteri, L., Sobrito, G., & Cavallone, M. 1998, A&AS, 130, 305

Villata, M., et al. 2002, A&A, 390, 407

—. 2004, A&A, 421, 103

-. 2006, A&A, 453, 817

Watanabe, M., et al. 2005, PASP, 117, 870

Wu, J., Zhou, X., & Ma, J. 2007, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 373, The Central Engine of Active Galactic Nuclei, ed. L. C. Ho & J.-W. Wang, 199

Zacharias, N., et al. 2009, VizieR Online Data Catalog, 1315, 0

Zwitter, T., et al. 2008, AJ, 136, 421

笹田真人. 2009, かなた望遠鏡を用いた可視近赤外偏光観測におけるブレーザー天体の変 動機構の研究

柴田一成, 福江純, 松元亮治, & 嶺重慎. 1999, 活動する宇宙 (裳華房)

千代延真吾. 2005, 広島大学 1.5m 望遠鏡移設地シーイングのモニター装置開発と測定

川端哲也. 2009, 美星天文台 101cm 望遠鏡 IRAF による分光データ整約のすすめ