

活動銀河核とX線連星の偏光観測による
ブラックホールジェットの観測的研究

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

M143065 神田 優花

主査：植村 誠 副査：大川 正典

2016年2月10日

概要

活動銀河核とは、銀河中心に超巨大ブラックホールが存在し強い放射が見られる天体である。ブラックホールの重力の影響により複雑な構造を持ち、その1つとして光に近い速度まで加速されたプラズマが噴出するジェットと呼ばれる現象がある。また、ブラックホール X 線連星はブラックホールと恒星が連星系を成している天体であり、活動銀河核と同様にジェットが存在すると考えられている。今回は、広島大学かなた望遠鏡で観測された偏光を用いてそれぞれの天体のジェットについて研究した。

活動銀河核では、ジェットを視線方向から見ていると考えられているブレーザー天体についてフレア固有の可視偏光方位角と電波干渉計画像で見るジェット方向との相関を調べた。ブレーザー天体の光度変化はタイムスケールが短く変動が激しいという特徴があり、さらにフレアには決まった定義などがないため、客観的にフレアを判断することが難しい。そのため、今回は $\ell 1$ トレンドフィルターとウェーブレットの2通りの方法を用いてフレア検出を試みた。トレンドフィルターでは、観測点に対していくつかの折れ曲がりを持った直線で表すことにより、全体のトレンドやその構造変換点を見ることができる。ウェーブレットでは、基底関数の波形の重ね合わせで関数を表現することができる。これらの方法を用いて各天体ごとにフレアを検出し、静穏期成分を差し引くことでフレア固有の偏光方位角を求めた。さらに、求めた偏光方位角と電波ジェット方向の角度差の分布を調べた結果、どこかの角度差に偏りは見られず、統計的には一様分布と区別がつかない結果となった。さらに、ブレーザー天体を FSRQ と BL Lac に分類した結果や、1天体毎に調べた結果でも同様に有意な分布の偏りは見られなかった。これより、ブレーザーのフレアの偏光方位角はジェットの方向には依らず、様々な方向を向くことが示唆される。

X 線連星 GRS 1915+105 の偏光観測を 2014 年 5 月 30 日、7 月 23 日に行い、それぞれ $4.5 \pm 0.8\%$, $16.3 \pm 8.2\%$ という偏光度を得た。2つの偏光値は有意に異なるが、両方の値とも天体固有の偏光を調べるためには星間偏光を分離する必要がある。そこで周辺天体の偏光値と比較を行い、得られた偏光が天体固有のものか星間偏光かを調べたが、周辺天体の偏光のばらつきが大きく、今回は有意な天体固有の偏光を確認することはできなかった。また、V 4641 Sgr は可視光で増光が確認された 2014 年 1 月と 2015 年 8 月に可視・近赤外で偏光観測を行った。しかし、ブレーザーで見られるような数十%ほどの大きな偏光値は得られなかった。フレア成分で SED を作成するとシンクロトロン放射を意味する傾きの小さいスペクトルが得られたが、今回は偏光の変動が小さいため降着円盤からの放射を観測していたと考えられる。

目次

第1章 序章	7
1.1 ジェット天体	7
1.2 ブレーザー	7
1.2.1 活動銀河核	7
1.2.2 ブレーザーについて	8
1.2.3 放射モデル	10
1.2.4 ブレーザーの先行研究	11
1.3 X線連星	13
1.3.1 X線連星について	13
1.3.2 V4641 Sgr	13
1.3.3 GRS 1915+105	14
1.4 本研究の目的	15
第2章 かなた望遠鏡と電波望遠鏡	16
2.1 かなた望遠鏡について	16
2.1.1 概要	16
2.1.2 TRISPEC	17
2.1.3 HOWPol	18
2.1.4 HONIR	19
2.2 観測	19
2.2.1 偏光とストークスパラメーター	20
2.2.2 ストークスパラメーターの測定	20
2.2.3 画像の一次処理	22
2.2.4 測光	23
2.3 電波望遠鏡について	24
第3章 ブレーザー天体に対する解析方法	25
3.1 ℓ_1 トレンドフィルター	25
3.1.1 ℓ_1 トレンドフィルターについて	25
3.1.2トレンドフィルターのグループ化	25
3.2 ウェーブレット	27

第 4 章	結果	28
4.1	ブレーザー天体	28
4.1.1	対象天体	28
4.1.2	ℓ_1 トレンドフィルターを用いた解析	29
4.1.3	ウェーブレットを用いた解析	31
4.2	X線連星	32
4.2.1	GRS1915+105	32
4.2.2	V4641 Sgr	33
第 5 章	考察	38
5.1	ブレーザー天体	38
5.2	X線連星	44
5.2.1	GRS 1915+105	44
5.2.2	V4641 Sgr	46
第 6 章	まとめ	47
第 7 章	付録	48
7.1	ℓ_1 トレンドフィルターの解析結果	48
7.2	ウェーブレットの解析結果	57

目 次

1.1	活動銀河核の想像図	7
1.2	超光速現象の幾何学	8
1.3	ジェットの方向と偏光方位角との相関	11
1.4	3C 371 のフレア検出	12
1.5	フレア規模と偏光方位角の相関	12
1.6	X 線連星の想像図	13
1.7	V4641 Sgr の光度曲線	14
1.8	GRS 1915+105 の偏光観測	14
2.1	かなた望遠鏡	17
2.2	TRISPEC	18
2.3	HOWPol	18
2.4	HONIR	19
2.5	偏光観測の概念図	21
2.6	アパーチャー測光概念図	23
2.7	VLBA アンテナ	24
3.1	1999 年から 2007 年までの株価指数とトレンドフィルターをかけた結果 (青線)	25
3.2	ブレーザー天体 PKS 1510-089 に対するトレンドフィルター (左) と group 化したトレンド フィルター (右)	26
3.3	リッカー関数	27
3.4	ブレーザー天体 1ES1959+650 の光度曲線 (上) とウェーブレット解析の結果 (下)	27
4.1	3C 454.3 のトレンドフィルター解析の図	29
4.2	フレア規模のヒストグラム	30
4.3	I,Q,U の変動の求め方	30
4.4	3C 454.3 のウェーブレット解析の図	31
4.5	フレア規模のヒストグラム	32
4.6	H バンドの QU 平面	32
4.7	電波ジェットと偏光方位角の相関 (赤:5/30, 青:7/23)[22]	32
4.8	2014 年に観測された可視近赤外線光度曲線	33
4.9	2015 年に観測された可視域の光度曲線	33
4.10	可視近赤外線の SED	34
4.11	2014/3/22 の QU 平面	35

4.12	2014/3/27 の QU 平面	35
4.13	2015/3/29 の QU 平面	36
4.14	2015/4/25 の QU 平面	36
4.15	I バンドの QU 平面	37
4.16	R バンドの QU 平面	37
5.1	3C 454.3 の電波干渉計画像	38
5.2	トレンドフィルター (上) とウェーブレット (下) のフレア規模と角度差のグラフ	39
5.3	トレンドフィルターの角度差ごとのフレア数	40
5.4	ウェーブレットの角度差ごとのフレア数	40
5.5	FSRQ(上),BL Lac(下) ごとのトレンドフィルターのフレア規模と角度差のグラフ	40
5.6	FSRQ(上),BL Lac(下) ごとのウェーブレットのフレア規模と角度差のグラフ	40
5.7	トレンドフィルターの λ 依存性	41
5.8	ウェーブレットのタイムスケール依存性	42
5.9	トレンドフィルターのフレア規模依存性	43
5.10	ウェーブレットのフレア規模依存性	43
5.11	GRS 1915+105 と周辺天体の偏光マップ [25]	45
5.12	2 色図 (J-H,H-Ks)	45
5.13	GRS 1915+105 と周辺天体の偏光マップ (右:遠方、左近傍)	45
5.14	V4641 Sgr と周辺天体の偏光マップ	46
7.1	1ES 0806+524 のトレンドフィルター解析の図	48
7.2	1ES 2344+514 のトレンドフィルター解析の図	48
7.3	1H 0323 のトレンドフィルター解析の図	49
7.4	3C 273 のトレンドフィルター解析の図	49
7.5	3C 279 のトレンドフィルター解析の図	49
7.6	3C 371 のトレンドフィルター解析の図	50
7.7	3C 454.3 のトレンドフィルター解析の図	50
7.8	3C 66A のトレンドフィルター解析の図	50
7.9	CTA102 のトレンドフィルター解析の図	51
7.10	AO 0235+164 のトレンドフィルター解析の図	51
7.11	BL Lac のトレンドフィルター解析の図	51
7.12	Mkn501 のトレンドフィルター解析の図	52
7.13	OJ 287 のトレンドフィルター解析の図	52
7.14	OJ 49 のトレンドフィルター解析の図	52
7.15	ON 231 のトレンドフィルター解析の図	53
7.16	ON 325 のトレンドフィルター解析の図	53
7.17	PKS 0048-097 のトレンドフィルター解析の図	53
7.18	PKS 0422+004 のトレンドフィルター解析の図	54
7.19	PKS 0754+100 のトレンドフィルター解析の図	54

7.20	PKS 1502+106 のトレンドフィルター解析の図	54
7.21	PKS 1510-089 のトレンドフィルター解析の図	55
7.22	PKS 1749+096 のトレンドフィルター解析の図	55
7.23	PKS 2155-304 のトレンドフィルター解析の図	55
7.24	RX J1542.8+612 のトレンドフィルター解析の図	56
7.25	S2 0109+224 のトレンドフィルター解析の図	56
7.26	S5 0716+714 のトレンドフィルター解析の図	56
7.27	S5 1803+784 のトレンドフィルター解析の図	57
7.28	1ES 0806+524 のウェーブレット解析の図	57
7.29	1H 0323 のウェーブレット解析の図	58
7.30	3C 273 のウェーブレット解析の図	58
7.31	3C 279 のウェーブレット解析の図	59
7.32	3C 371 のウェーブレット解析の図	59
7.33	3C 454.3 のウェーブレット解析の図	60
7.34	3C 66A のウェーブレット解析の図	60
7.35	CTA102 のウェーブレット解析の図	61
7.36	AO 0235+164 のウェーブレット解析の図	61
7.37	BL Lac のウェーブレット解析の図	62
7.38	Mkn501 のウェーブレット解析の図	62
7.39	OJ 287 のウェーブレット解析の図	63
7.40	OJ 49 のウェーブレット解析の図	63
7.41	ON 231 のウェーブレット解析の図	64
7.42	ON 325 のウェーブレット解析の図	64
7.43	PKS 0048-097 のウェーブレット解析の図	65
7.44	PKS 0422+004 のウェーブレット解析の図	65
7.45	PKS 0754+100 のウェーブレット解析の図	66
7.46	PKS 1502+106 のウェーブレット解析の図	66
7.47	PKS 1510-089 のウェーブレット解析の図	67
7.48	PKS 1749+096 のウェーブレット解析の図	67
7.49	PKS 2155-304 のウェーブレット解析の図	68
7.50	RX J1542.8+612 のウェーブレット解析の図	68
7.51	S2 0109+224 のウェーブレット解析の図	69
7.52	S5 0716+714 のウェーブレット解析の図	69
7.53	S5 1803+784 のウェーブレット解析の図	70

表 目 次

1.1	活動銀河核ジェットの物理量	8
2.1	かなた望遠鏡の性能、仕様 [8]	16
2.2	TRISPEC の仕様	17
2.3	HOWPol の仕様	18
2.4	HONIR の仕様	19
2.5	世界の主な電波望遠鏡	24
4.1	かなた望遠鏡で観測している全ブレイザー天体リスト	28
4.2	2014 年に観測された偏光値	35
4.3	2015 年に観測された偏光値	36
4.4	2015 年に観測された偏光値	37
5.1	パラメーター依存の KS 検定の結果 (トレンドフィルター)	41
5.2	パラメーター依存の KS 検定の結果 (ウェーブレット)	42
5.3	フレア規模依存の KS 検定の結果 (トレンドフィルター)	43
5.4	パラメーター依存の KS 検定の結果 (ウェーブレット)	43

第1章 序章

1.1 ジェット天体

ジェットとは、中心天体から双方に細く長く伸びるプラズマの流れである。このジェットは原始星や超巨大ブラックホールの影響で生じるとされ、X線連星や活動銀河核などの天体でみることができる。大きさは恒星サイズから銀河サイズまで幅広く、プラズマの速度は光速の数%と高速まで加速されている。しかし、どのように加速されるのか、一方向に絞られた流れになる機構などまだ多くが解明されていない。今回は、中心天体がブラックホールである活動銀河核、ブラックホールX線連星でみられるジェットについて、天体スケールに依らない普遍的な知見を得ることを最終的な目標として、偏光観測を中心とした研究を行った。本章では各天体の説明と本研究の背景、目的を記す。

1.2 ブレーザー

1.2.1 活動銀河核

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei:AGN) とは、中心核の超巨大ブラックホールから銀河全体に匹敵するような強い放射がみられる天体である。図 1.1 は、活動銀河核の想像図である。図にあるように、ブラックホールの重力により降着円盤やトーラス、ジェットなど複雑な構造を持つ。放射は、電波からX線まで幅広く観測することができ、可視光や紫外線では様々な電離度のイオンや原子からの輝線スペクトルを示すという特徴がある。

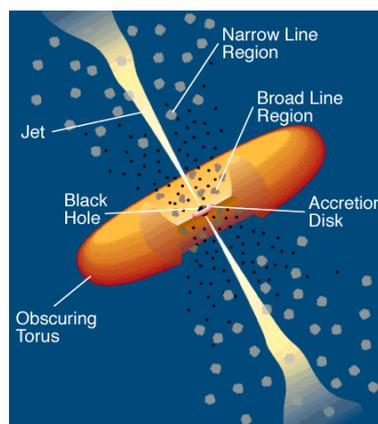


図 1.1: 活動銀河核の想像図 [1]

具体的には、活動銀河核の中心には質量が $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ (M_{\odot} : 太陽質量) の超巨大ブラックホールがあり、降着円盤や広輝線領域がその周囲に存在する。さらに、その周りには光学的に厚いガスやダストがドーナツ状の遮蔽体 (トーラス) を形成している。

1.2.2 ブレーザーについて

スペクトル中に強い輝線や吸収線が存在しない BL Lac 天体と可視光と電波で激しい変光を示す FSRQ の2種類の天体を合わせてブレーザーと呼ぶ。ブレーザーは電波強度が非常に強く、可視光での激しい時間変動、強い偏光を示す。連続光が非常に強いことにより電離ガスから放射される輝線がほとんど見られないという特徴を持つ。また、ブレーザーは、活動銀河核のジェットを視線方向から見ていると考えられている。以下にジェットの典型的な物理量を載せる。

サイズ	速度	角度	ビーミング因子	ローレンツ因子
pc~Mpc	$\sim 0.999c$	$\sim 1^{\circ}$	~ 10	~ 10

表 1.1: 活動銀河核ジェットの物理量

ジェットは角度 $\sim 1^{\circ}$ のごく狭い方向に放射が集中しており、ブラックホールが存在すると思われる領域から2本のジェットが反対方向に伸びている。

ジェットを正面から観測すると超光速現象という相対論的效果が起こる。超光速現象とは、活動銀河核の明るく見える点の見かけ上の速度が光速を大きく超えている現象である。以下に超光速現象について述べる。

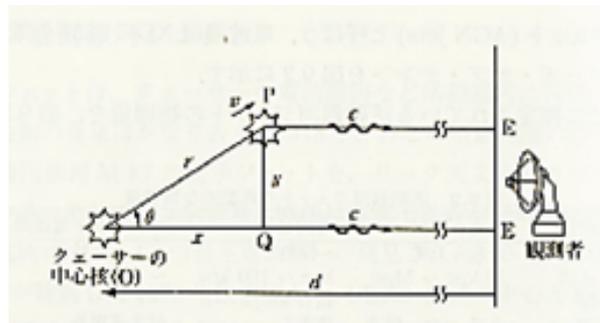


図 1.2: 超光速現象の幾何学 [2]

図 1.2 のようにクェーサーの中心核が点 O にあり、そこから距離 d の位置に観測者がいると考える。時刻 $t = 0$ で明るく輝く放射源が点 O から観測者の視線方向に対して θ の方向に速度 v で飛び出したとする。この瞬間に放射源から発した光が観測者に届く時間 t_1 は、 $t_1 = \frac{d}{c}$ である。また、点 P の位置にいる放射源から発した光が観測者に届く時刻 t_2 は、放射源が点 O から点 P までの距離 r を移動するのに掛かる時間と、光が点 P から観測者までの距離 $d - x$ を進むのに掛かる時間の和なので、

$$t_2 = \frac{r}{v} + \frac{d - r \cos \theta}{c}$$

となる。

観測者からは、時刻 t_1 と時刻 t_2 の間に放射原画 y の距離移動したと見えるので、見かけ上の速度 u は以下ようになる。

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

今は、角度 θ が小さく、速度 v が高速に近い場合を考えているので見かけの速度 u は、高速を超えて見える現象が起こる。

さらに相対論的な速度を持ったジェットを正面から観測すると、放射強度が大きく増幅されることがある。この現象を相対論的ビーミング効果と呼ぶ。再び、図 1.2 のような状況を考える。この時、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} と放射源の経過時間 Δt_s の関係は、

$$\Delta t_{obs} = \frac{\Delta t_s}{\delta}$$

となる。ここで、 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 $\Gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ から

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

と表せる。これは時間の短縮度合を示す指標となる。よって、電磁波の振動数を ν_s とすると、ドップラー効果により観測される振動数 ν_{obs} が

$$\nu_{obs} = \delta \nu_s$$

と静止系での振動数より高い値となる。また、相対論的ビーミング効果による見かけの明るさを考える。放射源の運動方向に対して角度 θ の方向に進む電磁波があるとすると、そのローレンツ変換は

$$\cos \theta_s = \frac{\cos \theta_{obs} - \beta}{1 - \beta \cos \theta_{obs}}$$

であり、

$$\Delta \cos \theta_{obs} = \delta^{-2} \Delta \cos \theta_s$$

となる。観測者から見ると、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。よって放射が等方的な場合は、実際の光度 L_{ν_s} 、観測される光度 $L_{\nu_{obs}}$ 、プランク定数 h を用いて

$$\begin{aligned} \frac{L_{\nu_s}}{h\nu_s} \Delta\nu_s \Delta t_s 2\pi \Delta \cos \theta_s &= 4\pi d^2 \frac{L_{\nu_{obs}}}{h\nu_{obs}} \Delta\nu_{obs} \Delta t_{obs} 2\pi \Delta \cos \theta_{obs} \\ \nu_{obs} L_{\nu_{obs}} &= \delta^4 \frac{\nu_s L_{\nu_s}}{4\pi d^2} \end{aligned}$$

となる。上の式の左辺は放射エネルギーを表しているの、実際の放射エネルギーの δ^4 倍明るく観測される。例えば、典型的なジェットでは $\delta \sim 10$ の値を取るの、 10^4 倍明るく見える。しかし、観測者とは反対方向に出ているジェットは 10^4 倍暗く見えるので実際には、一方向のジェットしか観測されないこともある。これによりレーザーでは短期間で激しい光度変動がみられ、ジェットからの放射が卓越しているの、降着円盤や輝線放射領域からの放射を圧倒する。よってジェットの構造や放射機構を探るのにレーザーが適した天体であることが分かる。

1.2.3 放射モデル

前述の通り、レーザーはジェット起源の放射が観測される。このジェットからの放射は、電波からガンマ線までの帯域の中で大きな2つのピークを持つ。電波から紫外/X線の領域をLE成分 (Low energy Component)、X線からガンマ線までをHE成分 (High energy Component) と呼ぶ。LE成分は光速に近い速度で運動する電子が磁場中で曲げられることによるシンクロトロン放射、HE成分は低エネルギーの光子が高エネルギー電子によって叩き上げられる逆コンプトン散乱と考えられている。ここでは、偏光と大きく関係するシンクロトロン放射について簡単に説明する。

シンクロトロン放射

高エネルギーの電子が磁場の中を運動するとき、ローレンツ力によって磁場と電子の進行方向に対して垂直に曲げられる。この加速によって電子から発生する光子をシンクロトロン放射という。磁場 $B[G]$ 中で相対論的な速さで運動する電子一つから放射される光量 $P(\omega, \gamma)$ は以下のように表せる。(単位時間、単位周波数あたり)

$$P(\omega, \gamma) = \frac{\sqrt{3}e^3 B \sin \alpha}{2\pi m_e c^2} F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \quad [\text{erg/s/Hz}] \quad (1.1)$$

ここで e 、 m_e はそれぞれ電子の電荷と質量であり、 α は磁場と電子の速度ベクトルのなす角度を示す。 $F(x)$ は

$$F(x) = x \int_x^\infty K_{\frac{5}{3}} d\eta \quad (1.2)$$

という5/3次の修正ベッセル関数の積分、 ω_c は

$$\omega_c = \frac{\gamma^2 e B \sin \alpha}{2m_e c} \quad (1.3)$$

という臨界周波数である。また、シンクロトロン放射では偏光も観測される。磁力線をらせん運動する電子を軌道面上から見ると直線偏光を示し、軌道面から離れていくと楕円偏光となる。

式(1.1)の放射エネルギーのうち、磁場の向きに平行な成分を $P_{\parallel}(\omega, \gamma)$ 、垂直な成分を $P_{\perp}(\omega, \gamma)$ とすると以下のように書ける。

$$P_{\parallel}(\omega, \gamma) = \frac{\sqrt{3}e^3 B \sin \alpha}{4\pi m_e c^2} \left[F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) - G\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right] \quad (1.4)$$

$$P_{\perp}(\omega, \gamma) = \frac{\sqrt{3}e^3 B \sin \alpha}{4\pi m_e c^2} \left[F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) + G\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right] \quad (1.5)$$

ここで、 $G(x) = xK_{2/3}$ の2/3次の修正ベッセル関数である。また、偏光度 $\Pi(\omega, \gamma)$ は以下のように表せる。

$$\Pi(\omega, \gamma) = \frac{P_{\perp} - P_{\parallel}}{P_{\perp} + P_{\parallel}} = \frac{G(x)}{F(x)} \quad (1.6)$$

さらに、冪 p で表せる電子の分布を仮定した場合、偏光度は以下のように表せる。

$$\Pi = \frac{p+1}{p+\frac{7}{3}} \quad (1.7)$$

偏光は電子軌道面方向となるので、 α は様々な値をとると仮定すると、電子の平均的な運動方向に垂直な磁場の成分を見積もることができる。実際には、ジェットの幾何学的構造やシンクロトロン放射の冪などが複雑に関係しており、磁場が不均一となるので計算で求めた値より小さい値が観測される。

1.2.4 ブレーザーの先行研究

可視光の偏光方位角は磁場の方向に垂直であると考えられるため、電波ジェットの方法と比較することで、ジェット内の磁場構造を考えることができ、理論モデルの検証が可能になる。もし観測される偏光方位角が特定の方向に偏っているとすると、ジェット内の磁場の向きが揃っていることが示唆される。特に、ジェットの方法に対して磁場が垂直方向や平行方向に揃っていれば、磁気流体シミュレーションによる研究に重要な知見を与えることができる。逆に観測される偏光方位角に特定の偏りがなく一様に分布する場合は、ジェット内で磁場が様々な方向を向いていることを示唆する。その物理描像としては、放射源の進行方向がランダムに変わったり、らせん状の磁場構造などが考えられる。このように、フレア成分の偏光方位角と電波ジェットの方法の関係を調べることでジェット内の磁場構造を考える上で重要になる。

ジェットの方向と可視光の偏光方位角との相関はこれまでも研究されてきた。伊藤 亮介 2013 年度博士論文 [3] では東広島天文台かなた望遠鏡やガンマ線望遠鏡 Fermi などの多波長観測で 3C 66A, Mrk 421, CTA 102, PMN J0948+0022 の 4 つの天体について大きな増光が見られた期間での偏光方位角とジェットの方向の相関を調べた。この研究では、アウトバースト期間の観測からその前後の観測を差し引くことにより、アウトバースト固有の偏光成分を抽出し、電波ジェットの方法と比較している。図 1.3 は 4 天体の電波干渉計画像に可視光アウトバーストの偏光方位角を図示したものである。

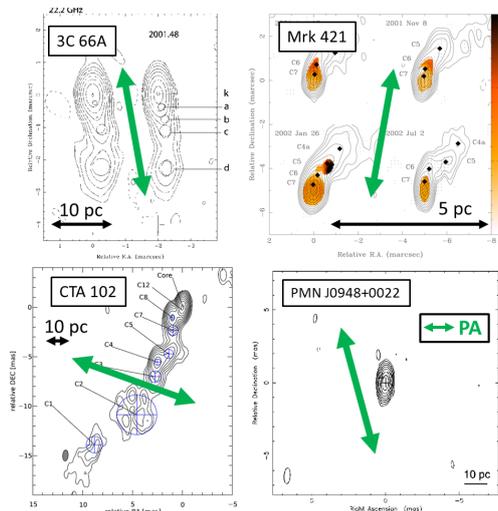


図 1.3: ジェット方向と偏光方位角との相関 [3]

ここでは CTA 102 のみジェットに垂直な偏光方位角を持ち、残りの 3 天体がジェットに平行な偏光方位角を持つという結果であった。しかし、この研究で扱われた天体数は 4 つであり、ジェットの方向と可視偏光方位角の相関を系統的に評価するためには天体数をさらに増やす必要がある。

神田 優花 2013 年度卒業論文 [4] では広島大学かなた望遠鏡でこれまで観測されてきた約 40 天体のブレーザーを対象として、フレア固有の偏光方位角を抽出し、電波ジェットの方法と比較する解析を行った。ここでは、偏光値全体から値が大きくずれている点を抜き出し、検証した。その結果、32 天体中 8 天体から 16 件のフレアを見つけ出すことができた。

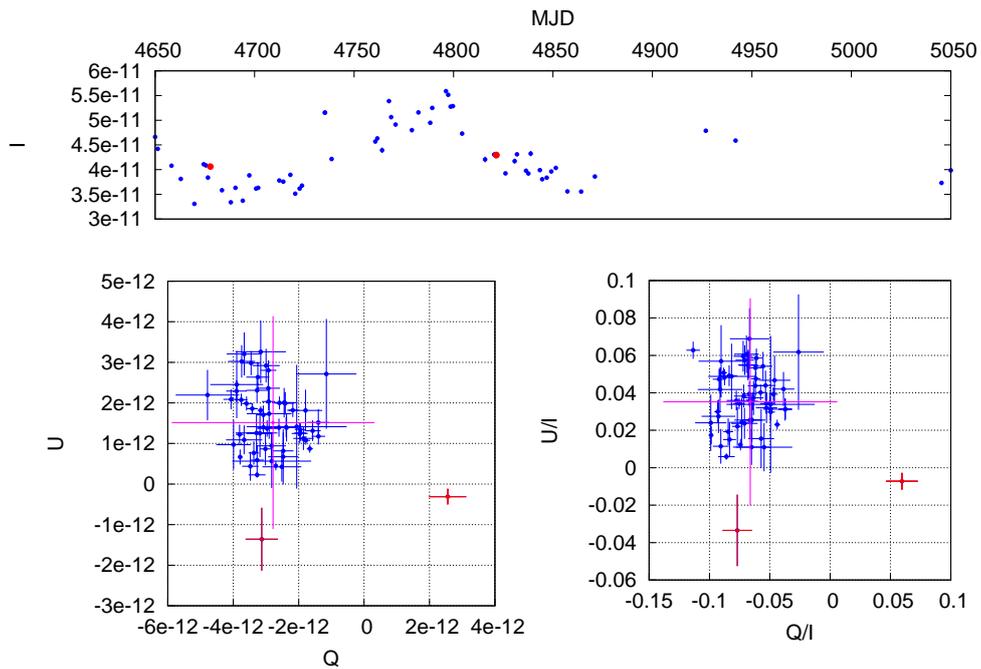


図 1.4: 3C 371 のフレア検出 (青点：観測点、赤点：フレア、赤線：データのばらつき)[4]

図 1.4 は上が光度曲線、左下が QU 平面、右下が Q/I, U/I 平面を示しており、青点が観測データ、赤点が検出したフレア、赤線がデータのばらつきを表している。ここでは、偏光パラメーター QU のばらつきを調べ、 3σ 以上離れているデータをフレアとしている。このようにして検出したフレアに対してフレアの規模と、縦軸が電波ジェット方向と偏光方位角の差の相関を求めた結果が図 1.5 である。

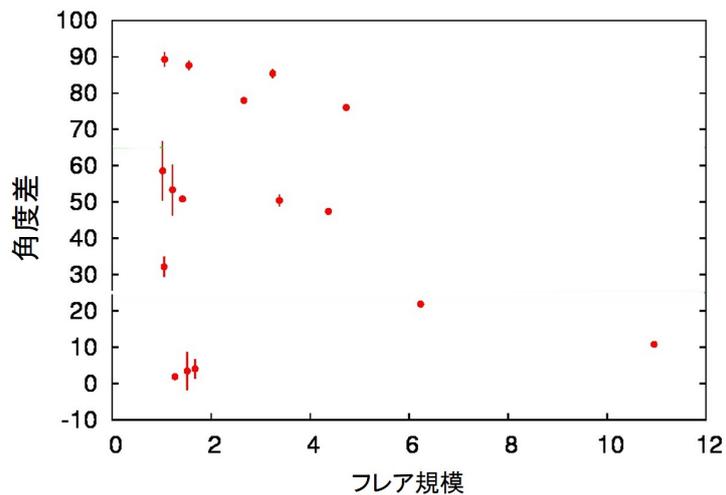


図 1.5: フレア規模と偏光方位角の相関 [4]

図 1.5 では、フレアの規模が大きいと電波ジェット方向に偏光方位角が揃う傾向がみられた。しかし、フレア検出に不定性が大きいことや、小規模のフレアが検出できていないこと、見つけ出したフレアの数が少ないという課題が生じた。

1.3 X 線連星

1.3.1 X 線連星について

ブラックホール X 線連星とは、恒星質量ブラックホールと恒星が互いの重力で作用しあって連星系を成している天体である。図 1.6 は、X 線連星の想像図である。恒星の質量の大きさによって HMXB(High Mass X-ray Binary) と LMXB(Low Mass X-ray Binary) に分類される。この 2 つの大きな違いは質量降着の方法である。HMXB では、主に恒星からの恒星風によってブラックホールに質量降着するのに対し、LMXB では、ラグランジュ点を通過した後に降着円盤を形成する。一部の天体では、電波領域でジェットからの放射が観測されているが、可視域での寄与についてはまだ分かっていない。可視光域でジェットの光度が推定できれば、電波域と合わせてジェットの総エネルギーを見る守ることができ、AGN ジェットとの比較が可能となる。もし、可視域でもジェットからの放射が観測されるとすると、ブレイザーと同様にシンクロトロン放射を起源とする高い偏光がみられる可能性がある。しかし、可視光や近赤外線域では降着円盤や恒星の寄与が卓越しているため、シンクロトロン成分の寄与は小さい。そのため、ジェット成分とそれ以外との成分分離が必要となる。さらに、観測される偏光にも、シンクロトロン成分の他に、星間偏光や散乱による偏光が考えられるため、それらとの切り離しも必要となる。



図 1.6: X 線連星の想像図 [5]

1.3.2 V4641 Sgr

V4641 Sgr は、距離約 10 kpc にある LMXB のブラックホール X 線連星である。軌道周期は 2.8 日で、それに伴って伴星由来の光度が変化する特徴がある。図 1.7 は過去に観測された V4641 Sgr の光度曲線である。1999 年に急激に明るくなり、一番明るい時には約 8 等にまで増光した。それ以降も、数年ごとに増光を繰り返していることが観測されている。さらに、2014 年 1 月と 2015 年 8 月に X 線で活動的になり、私達の観測によって可視域でも同時に活動的になっていることが分かった。今回は、上記の期間を含めた可視・近赤外偏光データにジェット成分が含まれているのかを調べた。

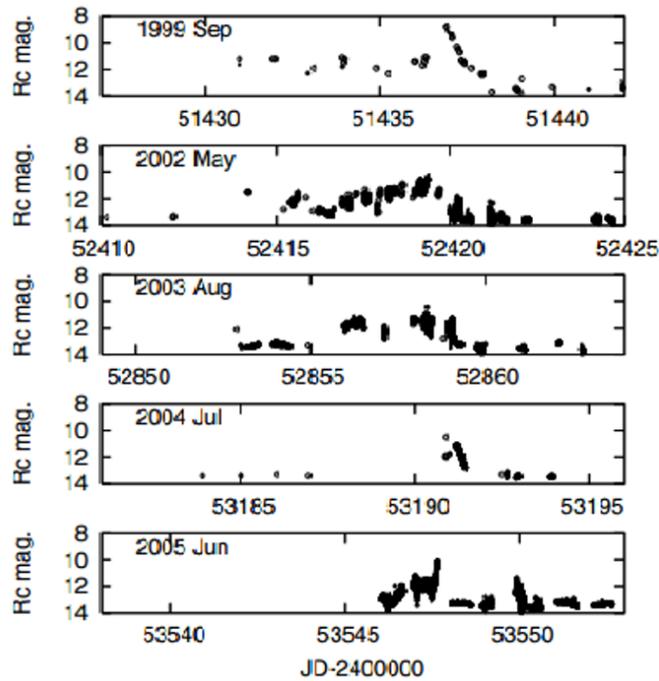


図 1.7: V4641 Sgr の光度曲線 [6]

1.3.3 GRS 1915+105

GRS 1915+105 は、距離 12.5 kpc にある LMXB のブラックホール X 線連星である。この天体は電波観測によりジェットを持つことが確認されている。図 1.8 は、2004 年に近赤外線での偏光観測が行われたときの波長ごとの偏光度を示している。このときは、観測された偏光値は星間偏光によるものと考えられ、ジェットからの偏光は見られなかった。今回は、近赤外線での偏光の時間変動を観測し、得られた偏光値が星間偏光によるものなのか天体固有のものなのかを調べた。検出された偏光が星間偏光のみであれば時間変動はしないため、偏光の時間変動を検証することで、天体固有の偏光と星間偏光とを分離することができる。

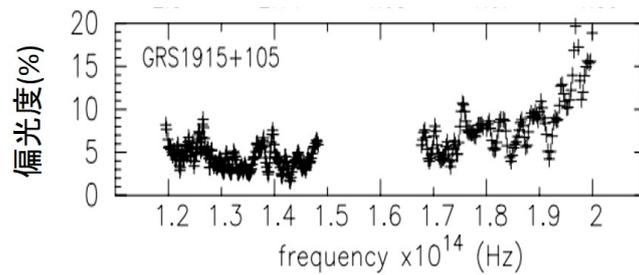


図 1.8: GRS 1915+105 の偏光観測 [7]

1.4 本研究の目的

前述の通り、ブレーザーやブラックホール X 線連星を可視・近赤外で観測することで、ジェット由来の放射を観測することができる。ブレーザーについては、広島大学かなた望遠鏡で長期に渡って観測が行われており、卒業論文ではブレーザー 42 天体フレア成分の可視光偏光方位角と電波干渉計画像で見るジェットの方向の相関を調べた。しかし、フレア検出に不安定性が大きいことや、系統的な結果を得るには検出されたフレアの数が少ないので、今回はトレンドフィルターとウェーブレットの 2 通りの方法でフレアの検出を試みる。さらに、活動銀河核ジェットの磁場構造についても考察していく。また、X 線連星では過去に近赤外で偏光観測が行われた GRS 1915+105 と、可視で活動的になったことが確認された V4641 Sgr について、偏光観測を行った。そして、得られた偏光値について、ジェット由来のものなのか、星間偏光によるものか検証を行う。

第2章 かなた望遠鏡と電波望遠鏡

本章では、観測や解析に用いた装置、解析方法、また、偏光観測の原理を述べている。

2.1 かなた望遠鏡について

2.1.1 概要

かなた望遠鏡は、2006年から現在の東広島天文台ドームに設置された反射型望遠鏡である。[8] 主鏡の直径は1.5mであり、超新星や活動銀河核の観測が活動的に行われている。また、 γ 線バーストなどの突発天体を観測するために、機動性に優れており、方位 $5^\circ/\text{sec}$ 、高度 $2^\circ/\text{sec}$ という1.5m望遠鏡の中で世界最速の駆動速度を持つ。かなた望遠鏡には、2011年まで TRISPEC、現在 HOWPol, HONIR, 高速カメラという3つの観測装置が設置されており、可視から近赤外までの観測が可能である。かなた望遠鏡の性能、仕様を表2.1に、望遠鏡の全体像を図2.1に示す。

光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡	有効径 1,540 mm / 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 秒角/mm ナスミス 11.25 秒角/mm
視野	直径 15 分角
分解能	1" FWHM
架台	経緯台 最大角速度 方位軸まわり 5 度/秒 高度軸まわり 2 度/秒
総重量	約 17 トン
搭載可能重量	カセグレン焦点 500kg ナスミス焦点 1,000kg

表 2.1: かなた望遠鏡の性能、仕様 [8]



図 2.1: かなた望遠鏡 [9]

2.1.2 TRISPEC

TRISPEC(Triple Range Imager and SPEctrograph : TRISPEC) は、名古屋大学 Z 研で開発された可視近赤外同時偏光撮像分光装置で、同時に 3 チャンネル (可視 1、近赤外 2) での観測が可能であり、撮像、分光、偏光撮像、偏光分光の 4 つの観測モードを備える。[10] このような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。2006 年から 2011 年まで 6 年間運用されていた。TRISPEC の仕様を表 2.2 に、全体像を図 2.2 に示す。

	OPT	IR1	IR2
検出器	CCD(512 × 512)	InSb(256 × 256)	InSb(256 × 256)
視野	7.0' × 7.0' × 1	7.0' × 7.0' × 1	7.0' × 7.0' × 1
ピクセルスケール	0.82"/pixel	1.65"/pixel	1.65"/pixel
フィルター	<i>B, V, R, I</i>	<i>J, H</i>	<i>K_s, K, H₂</i>
限界等級*	18.5	16.8	15.1

表 2.2: TRISPEC の仕様 (*10 分露出で 10 σ)[10]

2.1.3 HOWPol

HOWPol(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) は、広島大学グループを中心に開発した観測装置である。[11] 突発天体の観測に対応するため、かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付けられている。広視野撮像モード、偏光撮像、分光モードを搭載している。HOWPol の仕様を表 2.3 に、全体像を図 2.3 に示す。

波長域	可視 450nm - 1100nm
観測モードと視野	撮像: 15 分角 広視野偏光撮像:7 分 × 7 分 狭視野偏光撮像:15 分 × 1 分 広視野偏光撮像:2.3 秒 × 15 分
フィルター グリズム ウォラストンプリズム	B,V,R,I,z'+Y, 偏光フィルター (青/赤), 減光フィルター 低分散 (420/mm,R=400) 広視野用ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム 狭視野用ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム シングルウォラストンプリズム
CCD	完全空欠型 CCD 2k-4k × 2 (浜松ホトニクス天文台)、 空欠層の厚さ 200 μ m
限界等級	撮像:R=19.2mag(10 分露出、測光精度 0.02mag) 偏光撮像:R=16.0mag(10 分露出、偏光誤差 0.2%)

表 2.3: HOWPol の仕様 [11]



図 2.2: TRISPEC[9]

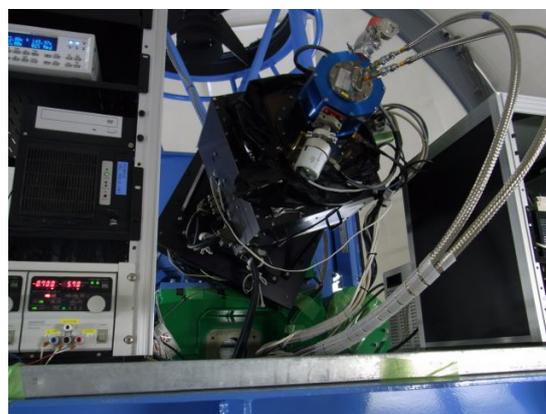


図 2.3: HOWPol[9]

2.1.4 HONIR

HONIR(Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera) は、TRISPEC の運用停止後になた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられている。[12] 可視、近赤外の同時観測が可能であり、撮像、分光、偏光撮像、偏光分光の4つの観測モードを備える。HONIRの仕様を表2.4に、全体像を図2.4に示す。

	OPT	IR
波長域	0.5-1.0	1.45-2.40
検出器	CCD	HgCdTe(VIRGO)
視野	10分角	10分角
ピクセルスケール	0.29"/pixel	0.29"/pixel
フィルター	<i>B, V, R, I, Y</i>	<i>Y, J, H, K_s</i>

表 2.4: HONIR の仕様 [12]



図 2.4: HONIR[9]

2.2 観測

観測されて得られたデータは、撮像、偏光、どちらの場合にも画像の一次処理、測光をしなければならない。ここでは、偏光の基本的な原理と一次処理、測光について述べる。また、画像解析には可視光画像解析ソフト IRAF(Image Reduction and Analysis Facility) を使用している。

2.2.1 偏光とストークスパラメーター

光(電磁波)は電場と磁場が互いに直交しながら伝わる波であり、電場が振動している向きを偏光方向と呼ぶ。また、電場ベクトルと光の伝播ベクトルの作る平面(振動面)の分布によって光は偏光とそうでない光とに分けられる。様々な振動面が混ざり合っている光は自然光であり、振動面が特定の方向に偏った光は偏光した光となる。Z方向に進行する電磁波の振動数を ν 、X方向、Y方向の振動をそれぞれ ϵ_x 、 ϵ_y 、X方向とY方向の波の位相差を δ とすると、一般に電磁波の電場は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} E_x &= \epsilon_x(t) \cos(2\pi\nu t) \\ E_y &= \epsilon_y(t) \cos(2\pi\nu t + \delta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

位相差 δ がないか、 ϵ_x 、 ϵ_y が0の時、直線偏光であり、位相差 $\delta = -90^\circ, +90^\circ$ の時は円偏光である。それ以外では楕円偏光となる。

偏光について述べる際に重要となるストークスパラメーターについて述べる。ストークスパラメーターとは、1852年にストークスが導入した4つの値(I,Q,U,V)である。偏光とはベクトルであり、計算するにはベクトル的に扱う必要があるが、このストークスパラメーターは加算性があり、計算が容易にできる。ある値 a の時間平均を $\langle a \rangle$ と定義すると、それぞれのパラメーターは以下のように書ける。

$$\begin{aligned} I &= \langle \epsilon_x^2 \rangle + \langle \epsilon_y^2 \rangle \\ Q &= \langle \epsilon_x^2 \rangle - \langle \epsilon_y^2 \rangle \\ U &= 2\langle \epsilon_x \epsilon_y \cos \delta \rangle \\ V &= 2\langle \epsilon_x \epsilon_y \sin \delta \rangle \end{aligned}$$

ここで、 I は総光量、 Q, U は直線偏光、 V は円偏光に関するパラメーターである。TRISPEC, HOWPol, HONIRでは、観測できるのが直線偏光のみとなるので、以降は直線偏光について述べる。レーザーでは円偏光は非常に小さいことが知られており、ここでは $V = 0$ とする。これらのパラメーターを用いて偏光度 P と偏光方位角 θ は以下のように表せる。

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2.2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (2.3)$$

2.2.2 ストークスパラメーターの測定

実際に、天体の光を観測し、どのようにストークスパラメーターを測定するのかを以下で説明する。

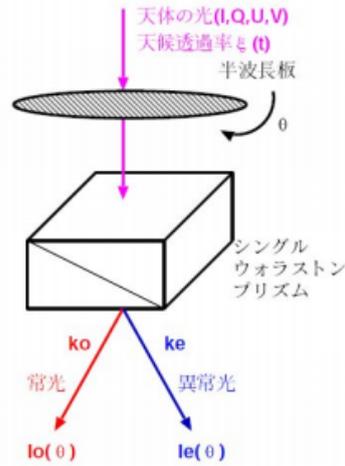


図 2.5: 偏光観測の概念図

図 2.5 は、天体からの光がウオラストンプリズムに入射し、そこで分割される様子を表している。天体からの光は大気である程度吸収される。この吸収量を $\xi(t)$ とおく。その後、光は望遠鏡に入り、角度 θ だけ回転した半波長板を通過し、ウオラストンプリズムに入った時に常光と異常光に分けられる。プリズムによって分けられた光は、ある効率 k_o, k_e で減光される。そして検出器で検出される光の強度 $I_o(\theta), I_e(\theta)$ は以下のように書くことができる。

$$I_o(\theta) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \cos 4\theta + \frac{U}{I} \sin 4\theta \right\} k_o \xi(t)$$

$$I_e(\theta) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \cos 4\theta - \frac{U}{I} \sin 4\theta \right\} k_e \xi(t)$$

ここで、角度 θ は $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ で観測するので、それぞれの光の強度は以下ようになる。

$$I_o(0^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_o \xi(t_{0^\circ})$$

$$I_e(0^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{0^\circ})$$

$$I_o(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{22.5^\circ})$$

$$I_e(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{22.5^\circ})$$

$$I_o(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_o \xi(t_{45^\circ})$$

$$I_e(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{45^\circ})$$

$$I_o(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{67.5^\circ})$$

$$I_e(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{67.5^\circ})$$

0°,45° の式、22.5°,67.5° の式からそれぞれ ξ を打ち消す。

$$\begin{aligned}\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} &= \left(\frac{1-Q/I}{1+Q/I}\right) \frac{k_e}{k_o} \\ \frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)} &= \left(\frac{1+Q/I}{1-Q/I}\right) \frac{k_e}{k_o} \\ \frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} &= \left(\frac{1-U/I}{1+U/I}\right) \frac{k_e}{k_o} \\ \frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)} &= \left(\frac{1+U/I}{1-U/I}\right) \frac{k_e}{k_o}\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}a_1 &= \sqrt{\frac{I_e(0^\circ)/I_o(0^\circ)}{I_e(45^\circ)/I_o(45^\circ)}} \\ a_2 &= \sqrt{\frac{I_e(22.5^\circ)/I_o(22.5^\circ)}{I_e(67.5^\circ)/I_o(67.5^\circ)}}\end{aligned}$$

と、 a_1, a_2 をおくと、

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{1-Q/I}{1+Q/I} \\ a_2 &= \frac{1-U/I}{1+U/I}\end{aligned}$$

と表すことができる。これより光度とストークスパラメーターは以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned}I &= \sum_{\theta} (I_o(\theta) + I_e(\theta)) \\ \frac{Q}{I} &= \frac{1-a_1}{1+a_1} \\ \frac{U}{I} &= \frac{1-a_2}{1+a_2}\end{aligned}$$

このように、4つの角度で測定することで、ストークスパラメーター Q, U を大気の影響 ξ やプリズムによる減光 k_o, k_e に関係なく求めることができる。

2.2.3 画像の一次処理

観測で得られた生画像にはノイズや感度差があり、そのままデータを解析しても正しい結果が得られない。したがって、一次処理を行いこれらを差し引く必要がある。具体的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の電圧により生じるバイアスがある、よって光を受けない状態でも画像に一定量のカウンタ値が含まれ、これをダークフレームと呼ぶ。また、CCD 上のピクセルごとの感度ムラや、天体の光の集光差、光学部品のゴミなどの影響を取り除くのがフラット割りである。これには、ドームに取り付けられたフラット板に一樣な強さの光を宛てた画像を撮像し、バイアス引きをした画像から割る必要がある。以上で一次処理は完了となる。

2.2.4 測光

一次処理の後、測光を行う。ここでは、アパーチャー測光と PSF 測光について簡単に説明する。

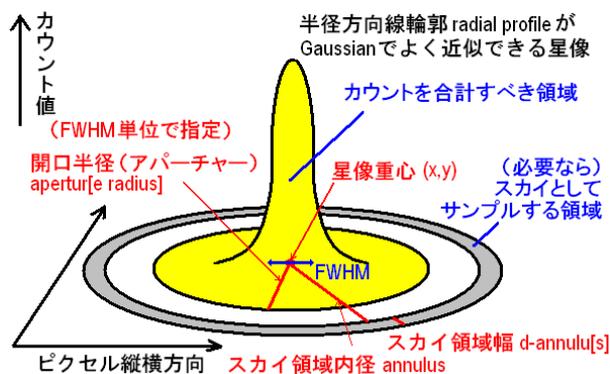


図 2.6: アパーチャー測光概念図 [13]

・アパーチャー測光 (図 2.6)

アパーチャー測光とは、オブジェクトを中心としたある円内に含まれるピクセルのカウント値を積分し、フラックスから明るさを見積もることである。これにより背景光の寄与を小さくすることができる。カウントを求める円の大きさをアパーチャーサイズ (開口半径) と呼び、オブジェクトの半値幅の 2~3 倍とすることが多い。さらに、同様にオブジェクトを中心としたドーナツ状の領域を考え、この領域でのカウントの平均値をスカイ値とし、局所的なスカイを評価してそれを差し引く。

・PSF 測光

点源の光は広がりを持っており、大気の流れの状態によって変化する。この広がりを PSF(Point Spread Function) と呼び、視野内のいくつかの明るい星について PSF モデルをフィッティングして PSF を決定する。この PSF をオブジェクトに対して適用することで更に精度の良い結果が得られる。本研究では、PSF 測光を用いた。

2.3 電波望遠鏡について



図 2.7: ニューメキシコ州にある VLBA アンテナ [14]

電波は、波長が遠赤外線よりも長い電磁波のことである。しかし、数十 m より長い波長の電波は地球の電離層を通過するときに吸収されるので、地上望遠鏡で観測できるのはメートル波からサブミリ波にかけてとなる。電波はカール・ジャンスキーによって 1931 年に発見され、その後、1937 年に宇宙からの電波を受信する目的で初めての電波望遠鏡が作られた。図 2.7 は VLBA (Very Long Baseline Array: 超長基線アレイ) アンテナの一つであるニューメキシコ州にある電波望遠鏡の全体像である。

電波望遠鏡は、単一アンテナ電波望遠鏡と複数のアンテナ・受信機を結合する電波干渉計とに分類される。表 2.5 には、世界にある主な地上電波望遠鏡を示した。

	単一アンテナ電波望遠鏡	電波干渉計	VLBI
メートル波・センチ波	Arecibo 望遠鏡, Effelsberg, GBT	VLA, GMRT	VLBA, VERA
ミリ波・サブミリ波	LMT, 野辺山, IRAM, JCMT	ALMA, SMA	

表 2.5: 世界の主な電波望遠鏡 [15]

単一アンテナ電波望遠鏡とは、最も基本的な電波望遠鏡で一つの望遠鏡で観測されている。それに対して、電波干渉計では、複数のアンテナを用いており、解像力を向上させるために作られた。

天体から得られる電波は主に、電離ガスからの熱的放射、高エネルギー電子が磁場中でらせん運動することで発生する非熱的電波 (シンクロトロン放射)、星間ガス中の原子、分子が発する線スペクトル電波の 3 種類である。電波望遠鏡では、このような天体からの電波をアンテナで受信し、低雑音受信機で検出やスペクトル解析を行う。これにより、基本的には天体の電波強度分布 (マップ) が得られる。マップから天体の温度分布や密度分布が分かり、さらに、線スペクトルの情報やドップラー効果を加えることでガス中の原子、分子の種類やガスの運動についても分かる。また、偏波の観測からは磁力線の構造についての情報が得られる。

今回の研究では、VLBA の公開画像を用いた。VLBA とは、アメリカ国立電波天文台が運用する電波望遠鏡である。アメリカ国土全体に設置された 10 台のアンテナからなり、VLBI によって観測されている。

第3章 ブレーザー天体に対する解析方法

3.1 ℓ_1 トレンドフィルター

3.1.1 ℓ_1 トレンドフィルターについて

ℓ_1 トレンドフィルターとは時系列データの2次微分の1次 (ℓ_1) ノルムを罰則項とし、以下の式を最小にする x_i ($i = 1 - n$) を求める方法である。[16]

$$\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 + \lambda \sum_{i=2}^{n-1} |x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}| \quad (3.1)$$

ここで、 y_i は観測データ、 x_i は式 (3.1) を最小にするために求める値である。 ℓ_1 トレンドフィルターを用いることで、データをできるだけ少ない折れ曲がりを持った直線で表すことができる。 λ は変数であり、用いるデータに対して最適な値を選択する必要がある。値が大きいとトレンドフィルターの折れ曲がりの数が多くなり、逆に値が小さいと折れ曲がりの数が少なくなる。また、 $\lambda \sim 0$ のときには y_i に近い値をとる。図 3.1 は、1999 年から 2007 年までの株価指数に対して ℓ_1 トレンドフィルターを用いた結果である。この時、 $\lambda=100$ である。図 3.1 を見て分かるように ℓ_1 trend filter をかけることで、高周波成分も混じった元データから全体のトレンドやそのトレンドの転換点を抽出することができている。

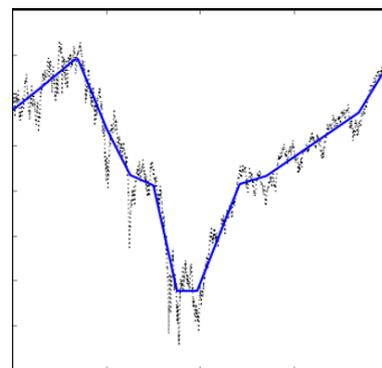


図 3.1: 1999 年から 2007 年までの株価指数とトレンドフィルターをかけた結果 (青線)[17]

3.1.2 トレンドフィルターのグループ化

ブレーザー天体のデータでは、測定値 y_i の誤差 σ_i を考慮する必要があるため、式 (3.1) を誤差を含めた式に変更した。

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - x_i}{\sigma_i} \right)^2 + \lambda \sum_{i=2}^{n-1} |x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}| \quad (3.2)$$

またデータは、天候や観測できる時間に限りがあるため、非等間隔な結果になる。そのため、 ℓ_1 トレンドフィルターを非等間隔なデータに対応するように以下のような変更を行った。

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - x_i}{\sigma_i} \right)^2 + \lambda \sum_{i=2}^{n-1} \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} - \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right| \quad (3.3)$$

ここで、 t は観測日を表す。さらに、ブレーザー天体では光度の変化が小さくても偏光パラメーターが大きく変化することが考えられる。このようなデータもフレア点として検出したいので光度変化に加えて偏光パラメーター Q, U の変化も加味できるようにグループ化を行った。非等間隔データの2次微分をとる演算子を D と置くと以下のように書ける。

$$I'' = D * I, Q'' = D * Q, U'' = D * U$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - x_i}{\sigma_i} \right)^2 + \lambda \sum \sqrt{I''_i^2 + Q''_i^2 + U''_i^2} \quad (3.4)$$

この式の変更を行うことによって、式 (3.1) では得られなかったフレアを検出することが出来た。具体的な例を以下に示す。ブレーザー天体 PKS 1510-089 に対して左の図が従来のトレンドフィルター、右の図がグループ化を行ったトレンドフィルターの結果である。黒点が観測データ、それに対するトレンドフィルターの結果が青線、そしてフレアとして検出されたデータが赤点である。左の図ではフレア検出されたデータ点が最も明るい点からずれているのに対し、右の図では偏光パラメーター Q の大きな変化の影響で最も明るい点をフレアとして検出することが出来た。

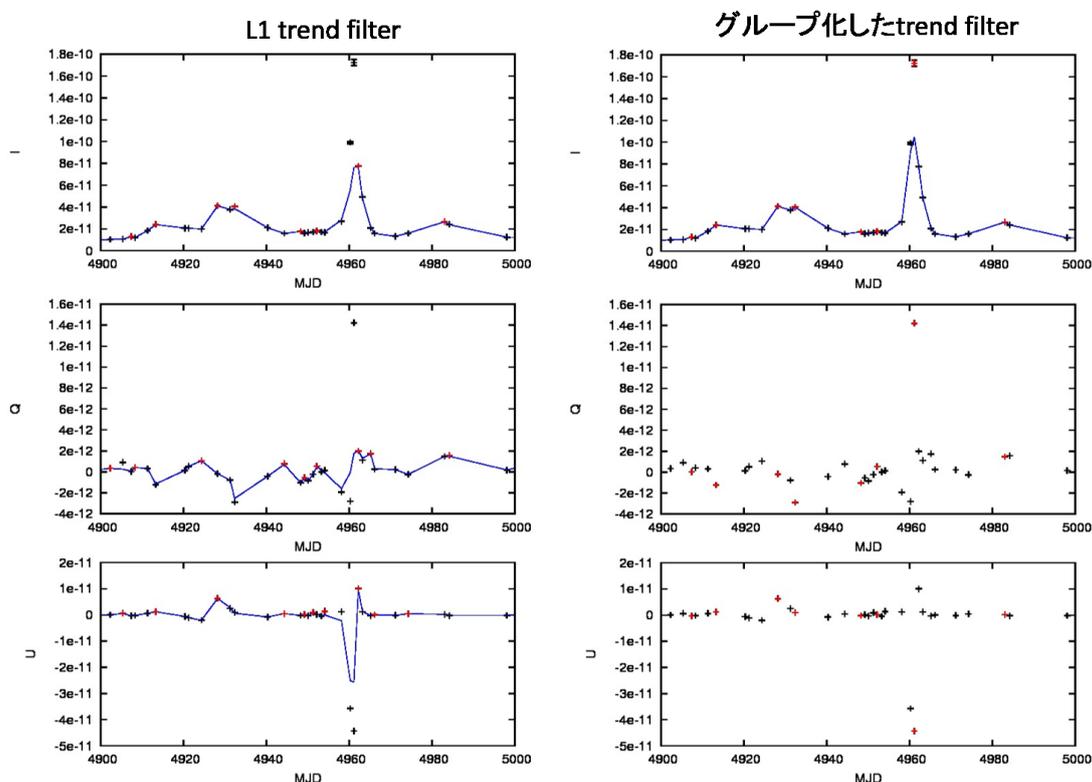


図 3.2: ブレーザー天体 PKS 1510-089 に対するトレンドフィルター (左) と group 化したトレンドフィルター (右)

3.2 ウェーブレット

ウェーブレットでは、基底関数と呼ばれる波形の重ねあわせで関数を表現する。今回、基底関数は式 (3.5) に示すリック関数を用いた。観測データを $f(x)$ とすると、ウェーブレット変換は式 (3.6) に示した通りである。

$$\psi = \left(\frac{2}{\pi^{1/4}\sqrt{3a}}\right)\left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)\exp\left(\frac{-x^2}{a^2}\right) \quad (3.5)$$

$$A(a, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(x)\psi(x - t|a)dx \quad (3.6)$$

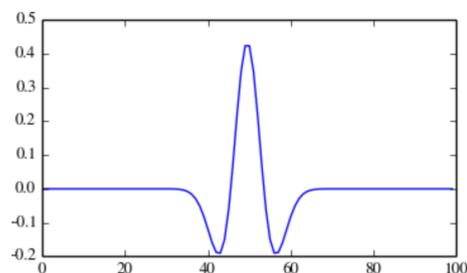


図 3.3: リッカー関数 [18]

変数 a を大きくすると、図 3.3 の波形の timescale の幅が大きくなり反対に a を小さくすると timescale の幅が小さくなる。このように、基底関数を拡大縮小、平行移動をすることで A の値が変化する。ブレーザー天体の解析では、天候や観測できる時間が限られているため、非等間隔なデータが得られる。一方、ウェーブレットは等間隔なデータに対応した方法であるため、観測データがない日に対して 0 を入れて等間隔なデータとした。また、例としてブレーザー天体 1ES 1959+650 に対してウェーブレットを用いた結果を図 3.4 に示す。上の図は約 7 年分の光度曲線であり、下の図はウェーブレットをかけた結果を scalogram で表している。横軸が時間、縦軸が timescale を表す。下図で赤色の部分はフレアの極大に対応しており、timescale が大きいほど長い期間のトレンド、小さいほど短い期間のトレンドを表していることが分かる。そのため、天体ごとに最適な timescale の値を決める必要がある。

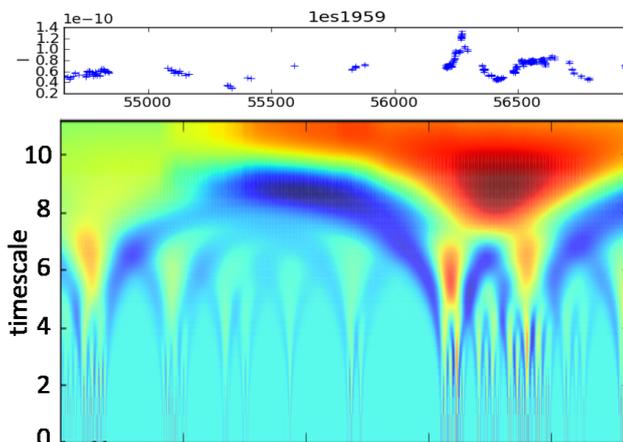


図 3.4: ブレーザー天体 1ES1959+650 の光度曲線 (上) とウェーブレット解析の結果 (下)

第4章 結果

4.1 ブレーザー天体

4.1.1 対象天体

今回、東広島天文台かなた望遠鏡で2008年から2015年まで約8年間観測されたブレーザー天体のデータを用いた。対象となるブレーザー天体はFSRQが13天体、BL Lacが29天体の合計42天体である。表4.1はそれらの一覧をFSRQ, BL Lacの型と共に示している。

天体名	class	天体名	class	天体名	class
*QSO J0324+3410	FSRQ	*PKS 1502+106	FSRQ	*3C 371	BL Lac
4C 14.23	FSRQ	*3C 454.3	FSRQ	*3C 66A	BL Lac
PKS1222+216	FSRQ	*PKS 0754+100	BL Lac	PG 1553+113	BL Lac
3EG J1236+0457	FSRQ	*BL Lac	BL Lac	*ON 325	BL Lac
*3C 279	FSRQ	QSO J0948+0022	FSRQ	*PKS 0422+004	BL Lac
*PKS 0215+015	FSRQ	*S4 0954+65	BL Lac	*H1722+119	BL Lac
*QSO 0454-234	FSRQ	*S5 1803+784	BL Lac	*PKS 2155-304	BL Lac
*PKS 1510-089	FSRQ	*RX J1542.8+612	BL Lac	*1ES 2344+514	BL Lac
*PKS 1749+096	BL Lac	*OQ 530	BL Lac	*1ES 0806+524	BL Lac
*OJ 287	BL Lac	*PKS 0048-097	BL Lac	*Mrk 421	BL Lac
*3C 273	FSRQ	*ON 231	BL Lac	1ES 1959+650	BL Lac
*AO 0235+164	BL Lac	*S2 0109+224	BL Lac	Mrk 501	BL Lac
*OJ 49	BL Lac	*S5 0716+714	BL Lac	1ES 0647+250	BL Lac
*Mis V 1436	FSRQ	3EG 1052+571	BL Lac	1ES 0323+022	BL Lac

表 4.1: かなた望遠鏡で観測している全ブレーザー天体リスト [19]

また、電波領域のVLBIデータはMOJAVE(Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments) Program Homepage[20]にあるものを用いた。電波領域データのアーカイブの中で、MOJAVE Program Homepageには多数の活動銀河核のデータを提示しており、さらに時間変動が激しい特徴がある活動銀河核に対して、頻繁に観測が行われていたためMOJAVEのデータを用いた。表4.1の中でMOJAVE Program Homepageにデータがない天体やかなた望遠鏡での観測が数回しか行われていない天体を除くとFSRQが9天体, BL Lacが23天体の合計32天体となった。(表4.1の天体名の横に*を付けた天体) これらの天体に対してそれぞれトレンドフィルター、ウェーブレット解析を用いて光度曲線からフレア成分を見つけ出した。

4.1.2 $l1$ トレンドフィルターを用いた解析

3.1章で述べたトレンドフィルターを用いて光度曲線の構造変換点を求めた。変数 λ は、確実なフレアを同定しつつ、明らかなノイズを同定しないような適切な値を各天体ごとに用いている。例として、図4.1に3C 454.3に対してトレンドフィルターを用いた結果を載せる。上から光度、偏光パラメータ Q, U の時間変化を表している。黒点が観測データ、青線がトレンドフィルターの結果、赤点が検出されたフレアを示している。フレアは、抽出されたトレンドが極大値になっており、前後30日以内に観測点があるデータと定義した。この作業を全32天体に対し行い、全部で300個のフレアを検出することができた。解析した全天体の光度曲線と抽出されたトレンド、および同定されたフレアは7.1節に載せている。

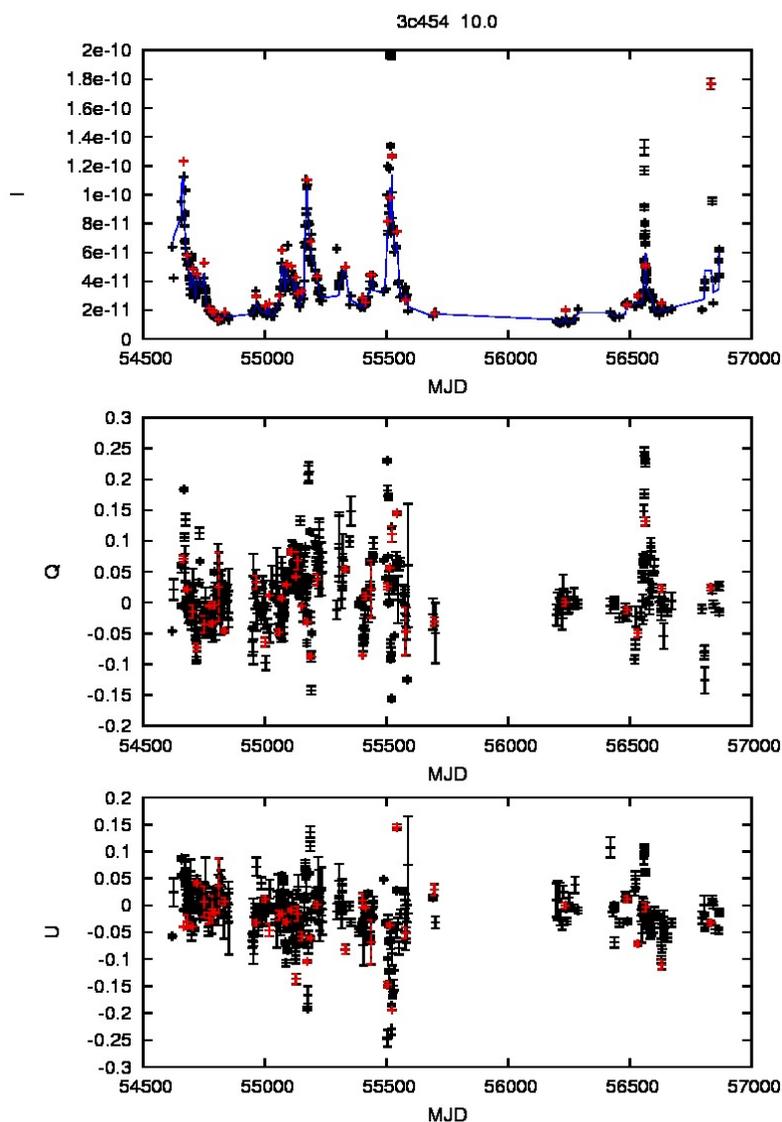


図 4.1: 3c 454.3 のトレンドフィルター解析の例

検出したフレアについて、フレア規模とフレアの数に関する相関を調べた。図 4.2 は、検出されたフレア規模に対してそのフレアの数、それぞれ対数スケールで示している。ここで、フレアの規模はフレアの光度を 4.1.3 章で求めた静穏期成分で割ることで求めている。図を見て分かるように、規模の小さなフレアは数が多く、規模が大きくなるほど数が少なく、およそべき乗の分布になっていることが分かる。このような分布は、従来のブレーザーでよく知られた関係 [21] と矛盾しない。

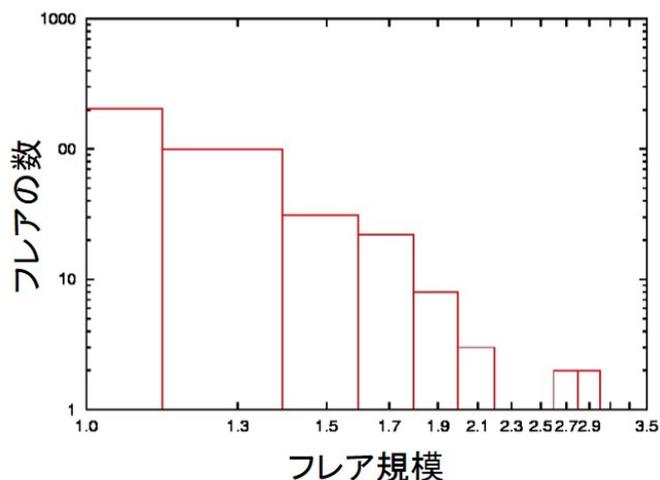


図 4.2: フレア規模のヒストグラム

検出したフレアに対して図 4.3 のようにフレア固有の偏光方位角を求めた。フレアの前でトレンドが極小になる点を見つけ出し、2点を直線で結ぶことで静穏時の成分を推定した。そして、観測データから静穏期成分を差し引くことで、フレア固有の光度 ΔI を求めた。同様に、偏光パラメーター Q, U に対しても光度曲線と同期間を静穏期とし、それぞれ $\Delta Q, \Delta U$ を求めた。さらに、式 (4.1) によってフレア固有の偏光方位角 $\Delta\theta$ を求めた。

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\Delta U}{\Delta Q}\right) \quad (4.1)$$

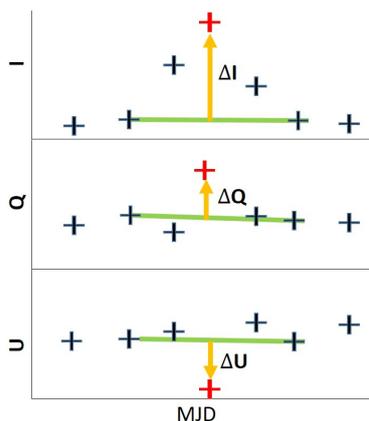


図 4.3: I, Q, U の変動の求め方

4.1.3 ウェーブレットを用いた解析

3.2章で述べたウェーブレット解析を用いて光度曲線に対して周波数解析を行った。タイムスケールを天体ごとに適当な値に設定した。例として、図 4.4 に 3C 454.3 に対してウェーブレット関数を行った結果を載せる。上から、光度曲線、ウェーブレット解析で得られたカラーマップ、timescale $2^4 = 16$ 日の強度を抜き出した図を表している。フレアは下のグラフで極大になっている点と最も近い観測点で且つ前後 30 日以内に観測されているデータと定義した。これにより全部で 256 個のフレアを検出することができた。解析した全天体の光度曲線と抽出されたトレンド、および同定されたフレアは 7.2 節に載せている。

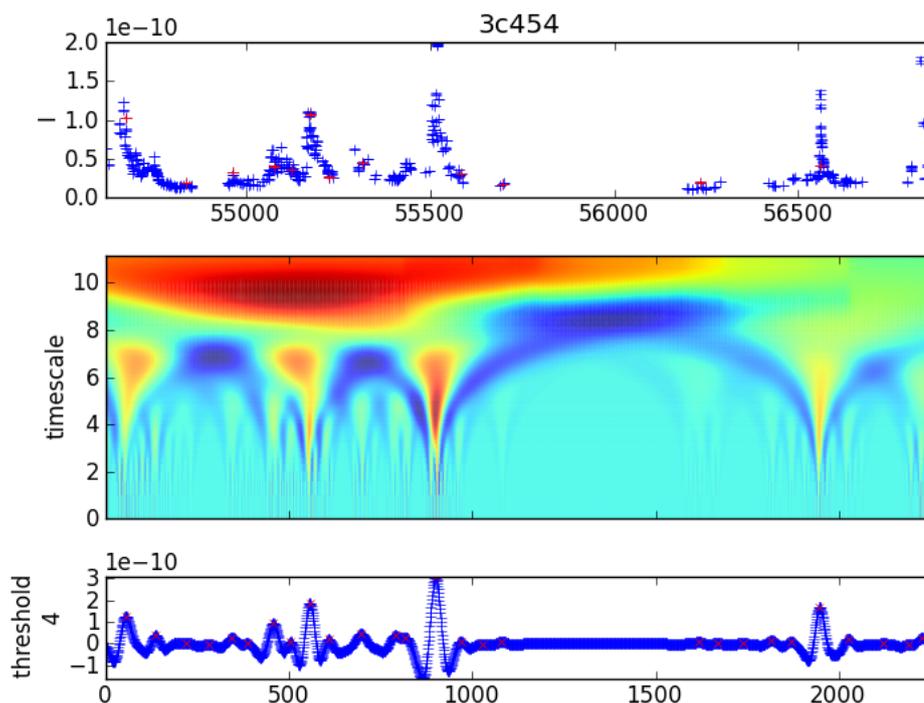


図 4.4: 3C 454.3 のウェーブレット解析の例

また、トレンドフィルターと同様にフレア固有の偏光方位角を求めた。ウェーブレットでは、図 4.4 の下のグラフでフレア前後に谷となっている点に最も近いデータ 2 点を直線で結ぶことで静穏期成分とした。そして、観測データから静穏期成分を差し引くことで求めた値 $\Delta I, \Delta Q, \Delta U$ から式 (4.1) を用いてフレア固有の偏光方位角を求めた。

また、トレンドフィルターと同様にフレア規模とフレアの数との相関を調べた。図 4.5 のようにおおそべき乗の分布になっており、ウェーブレットで検出したフレアも従来のブレーザーでよく知られた関係 [21] と矛盾していない。

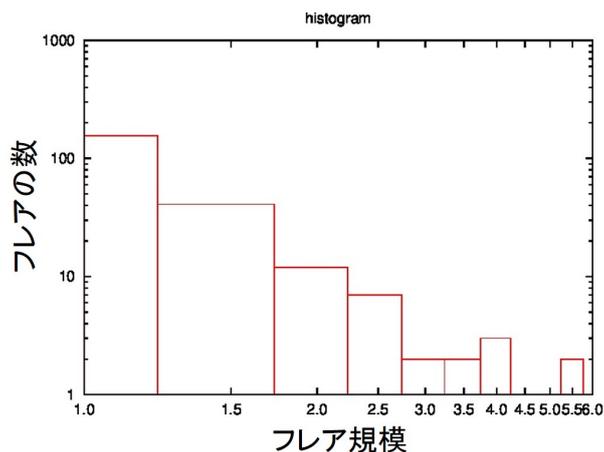


図 4.5: フレア規模のヒストグラム

4.2 X線連星

4.2.1 GRS1915+105

かなた望遠鏡 HONIR で 2014 年 5 月 30 日, 7 月 23 日に H バンドで偏光観測を実施した。図 4.6 は 2 日間の観測データを QU 平面で示している。偏光度はそれぞれ $4.5 \pm 0.8\%$, $16.3 \pm 8.2\%$ であり、偏光方位角と VLBI 画像のジェット方向を比較した結果は図 4.7 である。偏光パラメータの測定結果は、図 4.6 を見て分かるように、2 回の観測間で有意に異なる。そのため、得られた値が天体固有のものなのか検証する必要がある。

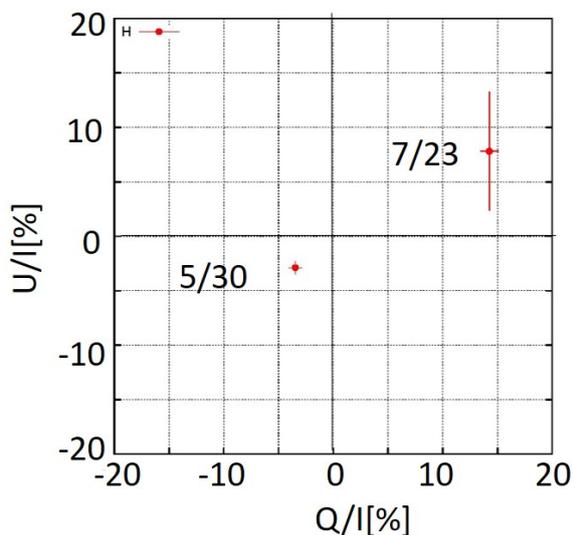


図 4.6: H バンドの QU 平面

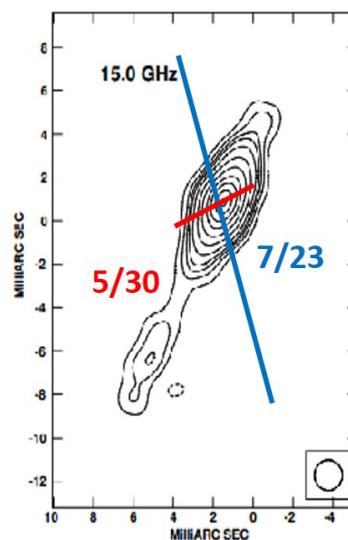


図 4.7: 電波ジェットと偏光方位角の相関 (赤:5/30, 青:7/23)[22]

4.2.2 V4641 Sgr

2014年にはHONIRで可視近赤外線、2015年にはHOWPolで可視域の偏光撮像観測を行った。図4.8は2014年に観測された光度曲線を示す。赤点は広島大学かなた望遠鏡で観測されたデータ、青点は大阪教育大学で観測されたデータ、緑線は伴星成分を表している。静穏時は伴星成分が起因であり、周期2.8日の楕円変光が観測されるため、この変動を考慮して天体の状態を考える必要がある。この図を見て分かるように、3月22日付近では、伴星成分よりも明らかに明るくなっており、増光していたことが分かる。また、図4.9は2015年に観測された光度曲線であり、ここでも増光していることが分かる。なお、Bバンドのみ静穏時よりも測定値が暗いのは、かなた望遠鏡の観測装置のフィルターと標準的な等級システムの系統誤差が含まれているためと考えられる。

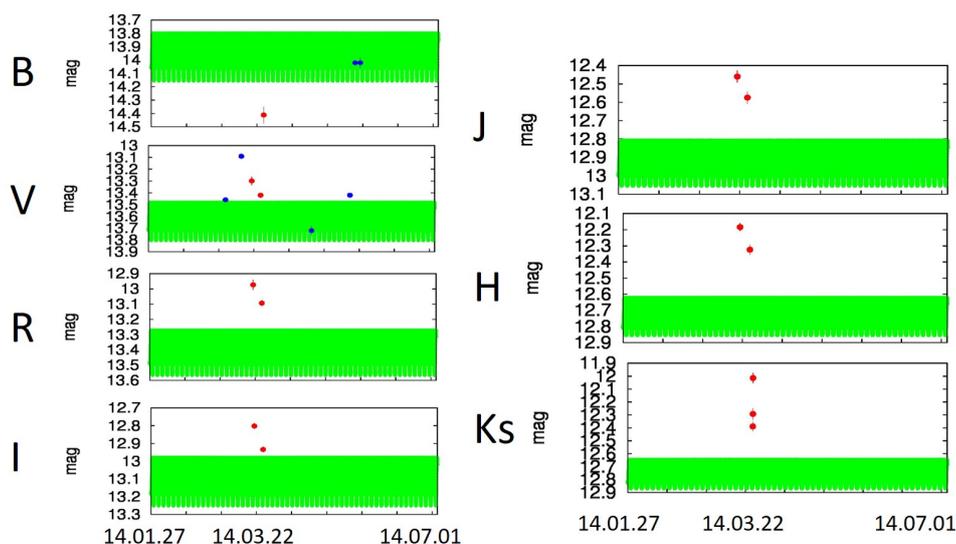


図 4.8: 2014 年に観測された可視近赤外線の光度曲線 (赤点:かなた望遠鏡、青点:大阪教育大学、緑線:伴星成分)

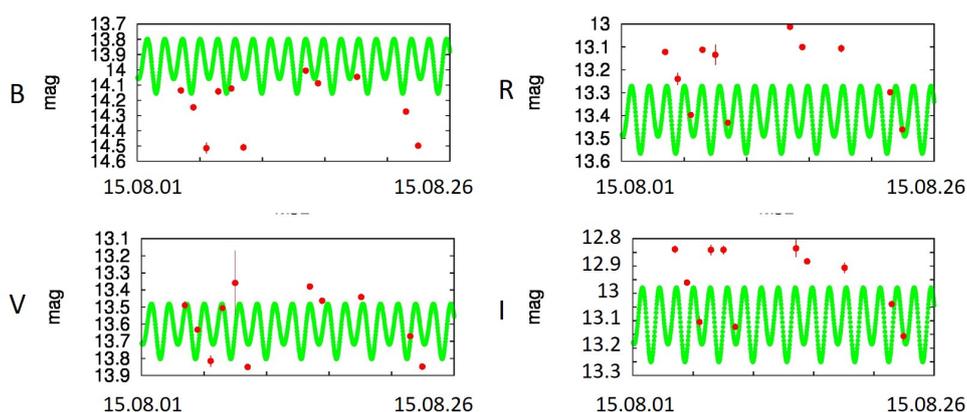


図 4.9: 2015 年に観測された可視域の光度曲線 (赤点:かなた望遠鏡、緑線:伴星成分)

2014年3月27日の可視近赤外線光度から伴星成分を差し引くことで、フレア成分を求めた。この値を用いて作成したSEDを図4.10に示す。横軸が周波数、縦軸がFlux densityを表しており、フレア成分のみを用いると、傾きが小さい(フラットな)スペクトルが得られた。

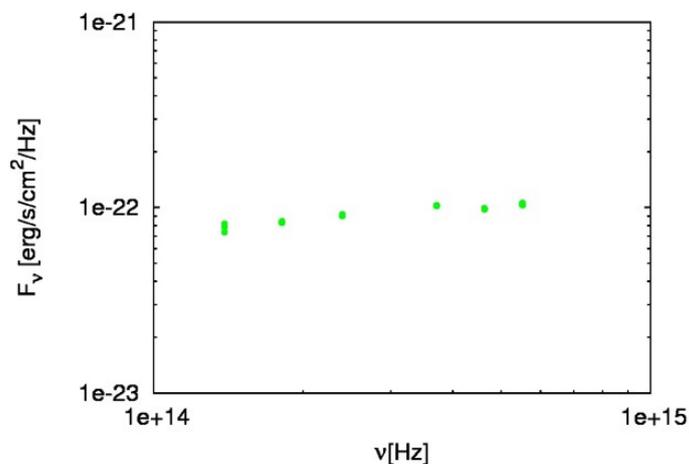


図 4.10: 可視近赤外線 SED

図4.11から図4.14は2014年,2015年にHONIRで観測された可視近赤外線データのQU平面である。得られた偏光度、偏光方位角を表4.2、表4.3に示す。2014年に観測された時は図4.8にあるように可視近赤外線増光しており、ジェット起源の放射だと仮定すると近赤外線で特に偏光値が大きくなると考えられる。一方で、図4.13,4.14は静穏期に観測された偏光データであり、2014年の偏光と比較すると、増光時にも大きな変化がないことが分かる。

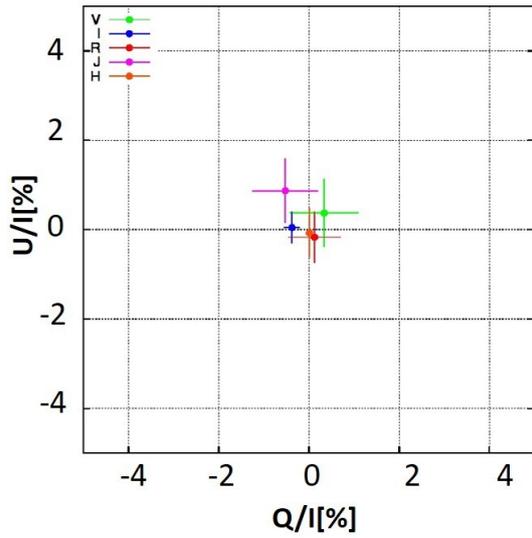


図 4.11: 2014/3/22 の QU 平面

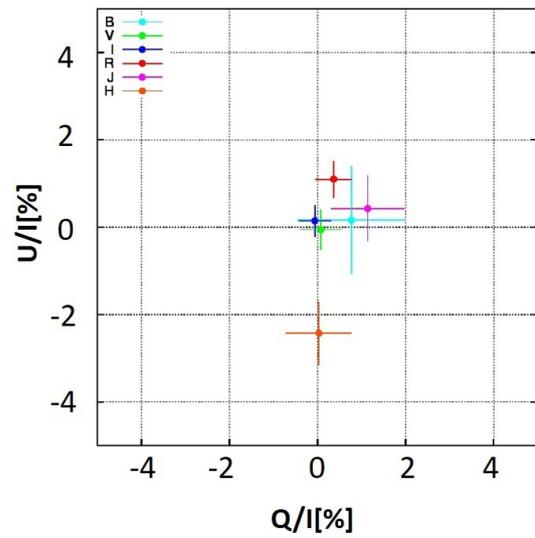


図 4.12: 2014/3/27 の QU 平面

日付	バンド	偏光度	偏光方位角
3/22	V	0.50 ± 0.15	23.8 ± 49.2
	R	0.79 ± 0.16	181.4 ± 23.7
	I	0.41 ± 0.068	62.4 ± 20.5
	J	0.68 ± 0.077	70.5 ± 39.4
	H	0.078 ± 0.013	319.5 ± 7.1
3/27	B	1.70 ± 1.7	28.8 ± 20.9
	V	0.01 ± 0.052	29.2 ± 20.9
	R	1.15 ± 0.16	35.7 ± 35.6
	I	0.01 ± 0.085	148.0 ± 15.2
	J	1.37 ± 0.12	51.8 ± 15.2
	H	2.45 ± 0.31	271.8 ± 15.2

表 4.2: 2014 年に観測された偏光値

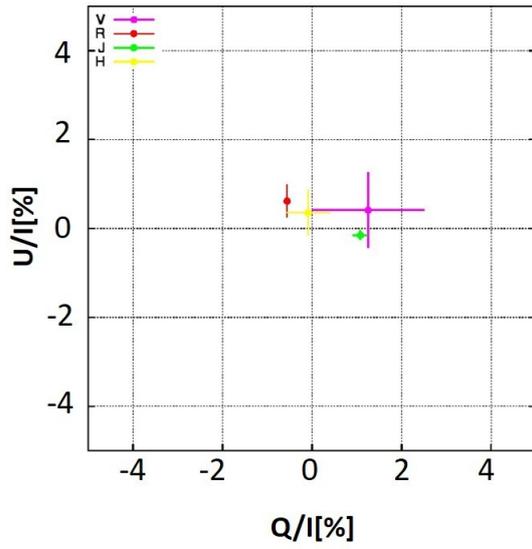


図 4.13: 2015/3/29 の QU 平面

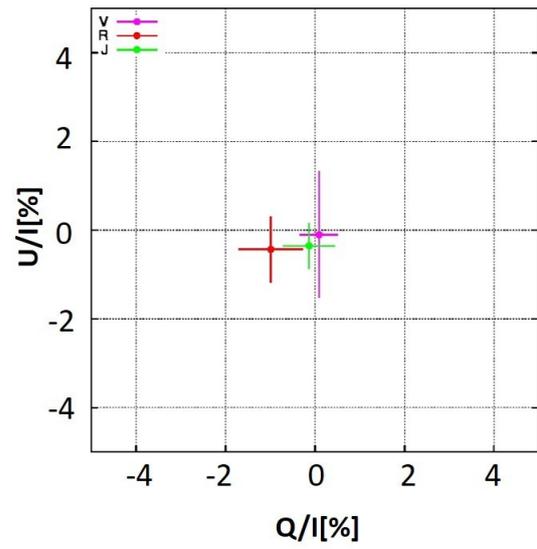


図 4.14: 2015/4/25 の QU 平面

日付	バンド	偏光度	偏光方位角
3/29	V	1.3 ± 0.51	9.1 ± 49.2
	R	0.83 ± 0.66	65.9 ± 23.7
	J	1.1 ± 0.77	356 ± 39.4
	H	0.37 ± 0.13	51.9 ± 7.1
4/25	V	0.14 ± 0.73	335.8 ± 20.9
	R	1.08 ± 1.17	281.8 ± 35.6
	J	0.38 ± 0.78	304.6 ± 15.2

表 4.3: 2015 年に観測された偏光値

また、2015年の増光時に HOWPol の R,I バンドで観測されたデータを図 4.14, 図 4.15 に、詳細な偏光値を表 4.4 に示す。ここでも、静穏期の偏光値と大きな変化は見られなかった。

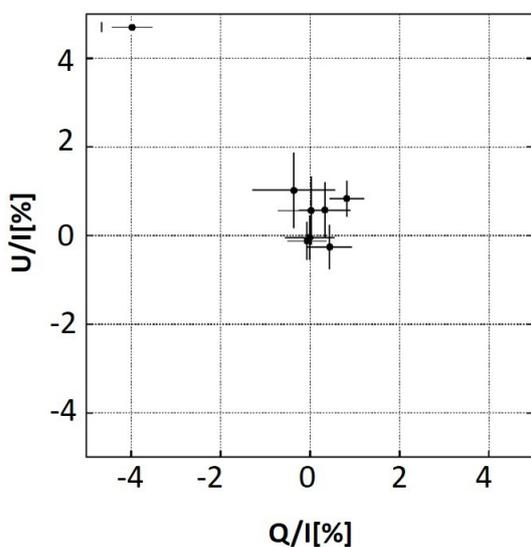


図 4.15: I バンドの QU 平面

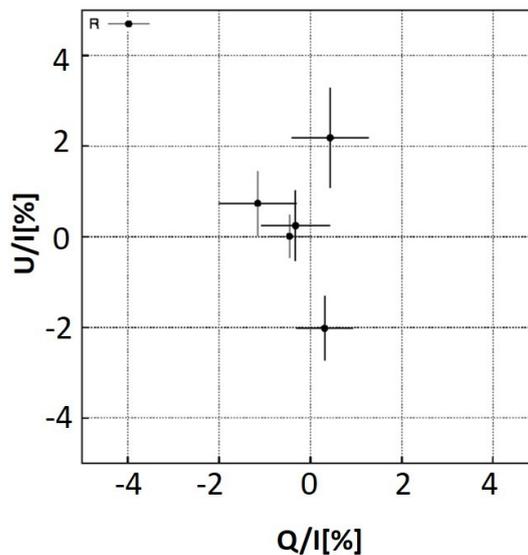


図 4.16: R バンドの QU 平面

バンド	日付	偏光度	偏光方位角
I	8/4	0.66 ± 0.51	30.0 ± 4.8
	8/5	1.17 ± 0.12	22.8 ± 4.3
	8/7	0.14 ± 0.13	300.9 ± 4.6
	8/14	0.56 ± 0.18	43.8 ± 7.5
	8/15	0.0045 ± 0.24	311.1 ± 5.9
	8/18	1.1 ± 0.82	54.8 ± 6.2
	8/23	0.51 ± 0.01	344.8 ± 4.8
R	8/6	0.41 ± 0.30	71.4 ± 7.2
	8/8	1.4 ± 0.60	73.7 ± 7.3
	8/9	0.45 ± 0.01	89.4 ± 5.2
	8/14	2.2 ± 0.11	39.4 ± 11.9
	8/23	2.1 ± 0.26	319.4 ± 9.1

表 4.4: 2015 年に観測された偏光値

第5章 考察

5.1 ブレーザー天体

4.1章で得られた ℓ_1 トレンドフィルター、ウェーブレットのフレア固有の偏光方位角と電波ジェット方向との相関を探る。図 5.1 はブレーザー天体 3C 454.3 の電波干渉計画像である。原点 (0,0) に天体の中心核があり、そこからジェットが出ているのが分かる。真上が偏光方位角の 0° であり、そこから反時計回りが偏光方位角の正の方向となる。図 5.1 では黄色の矢印で示した方向が電波ジェット方向であり、求めたフレア固有の偏光方位角の一例を緑色の矢印で示している。この2つの矢印の角度差を $0^\circ - 90^\circ$ で評価した。つまり、角度差が 0° に近づくほど電波ジェットに平行に、反対に 90° に近づくほど垂直になる。

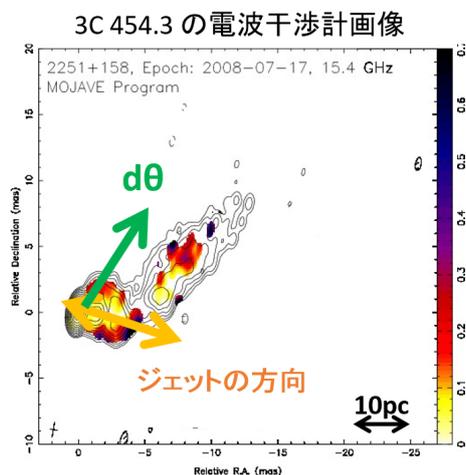


図 5.1: 3C 454.3 の電波干渉計画像 [24]

この作業をトレンドフィルター、ウェーブレットそれぞれで検出したフレアに対して行った。その結果を図 5.2 に示す。上がトレンドフィルター、下がウェーブレットの結果であり、それぞれ縦軸が求めた角度差、横軸がフレアの規模である。フレアの規模は、フレアの光度を 4.1.3 章で求めた静穏期成分で割ることで求めている。フレア規模が小さいデータは、測定誤差などフレア以外の原因が考えられるため、ジェット方向と偏光方位角との相関を考えるためには、ある程度大きなフレア規模を持ったデータに注目する必要がある。

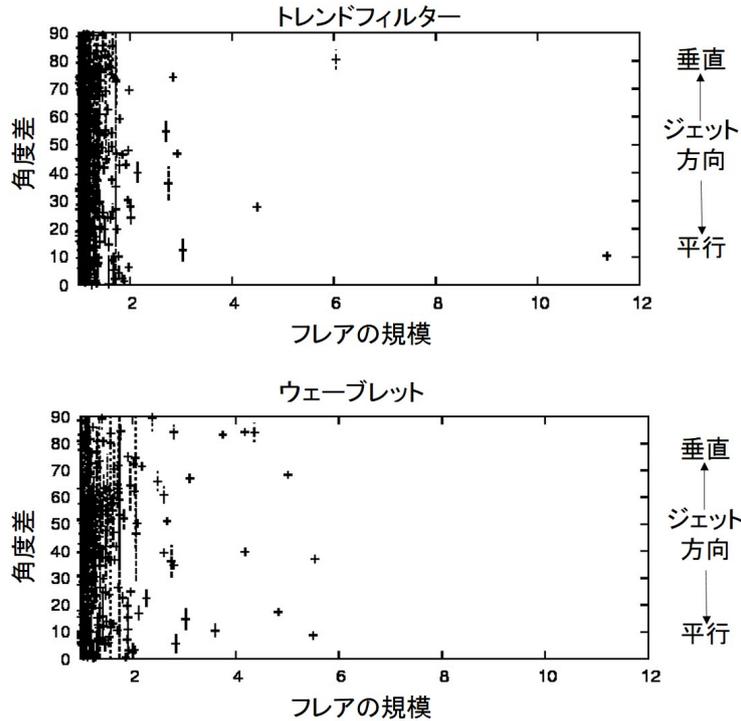


図 5.2: トレンドフィルター (上) とウェーブレット (下) のフレア規模と角度差のグラフ

トレンドフィルター、ウェーブレット共に特定の角度差に偏りは見られず、全体に一樣に分布した結果となった。さらに詳しくみるために角度差ごとのフレアの個数を求めた。図 5.3 がトレンドフィルターによる結果、図 5.4 がウェーブレットによる結果の図であり、それぞれ縦軸が角度差、横軸がフレア規模が 1.5 倍以上のフレアの個数を表している。2 つの図共に、角度差が全体的にばらついていることが分かる。2 つの分布の相違の検定である KS 検定を用いると、トレンドフィルターを使った結果ではデータのばらつきが一樣分布である確率が 65.3%、ウェーブレットが 88.8%であった。したがって、角度差の分布は一樣分布から有意に外れていないことが分かった。

また、ブレーザ天体を表 4.1 に示した FSRQ, BL Lac に分類し、再度ジェット方向との角度差の相関をみる。その結果を図 5.5, 5.6 に示す。トレンドフィルターを使った結果では、規模の大きなフレアの数が少ないためどこかの角度差に偏っているかどうかの判断は難しい。ウェーブレットを使った結果では、FSRQ, BL Lac 共に全体的にばらついているように見える。また、KS 検定でもトレンドフィルターが 65.3%、ウェーブレットが 88.8%とばらつきが一樣分布である確率が高いことから、このことに矛盾がないと考えられる。さらに天体毎に調べた場合でも有意な分布の偏りは見られなかった。

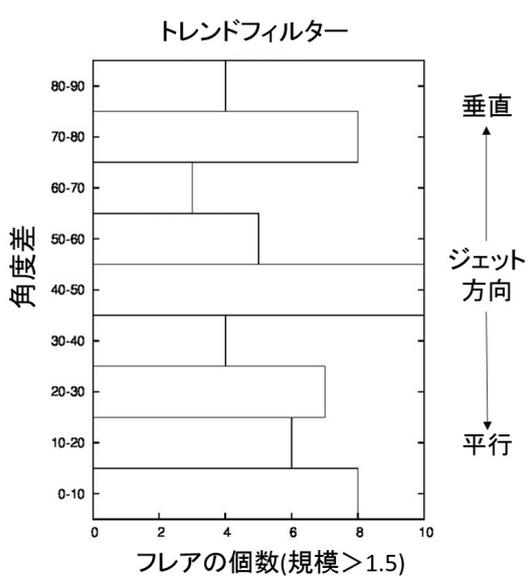


図 5.3: トレンドフィルターの角度差ごとのフレア数

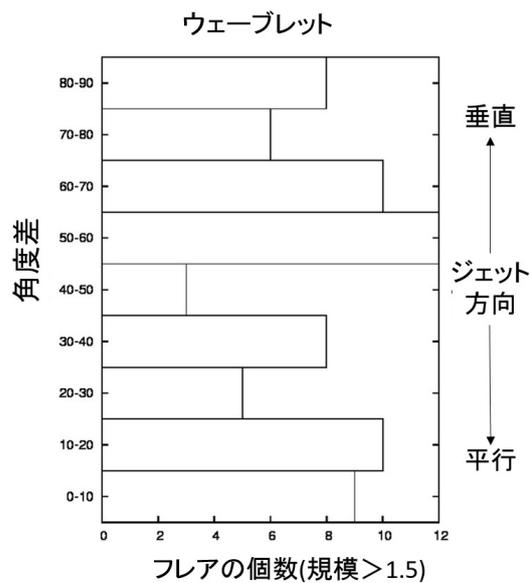


図 5.4: ウェーブレットの角度差ごとのフレア数

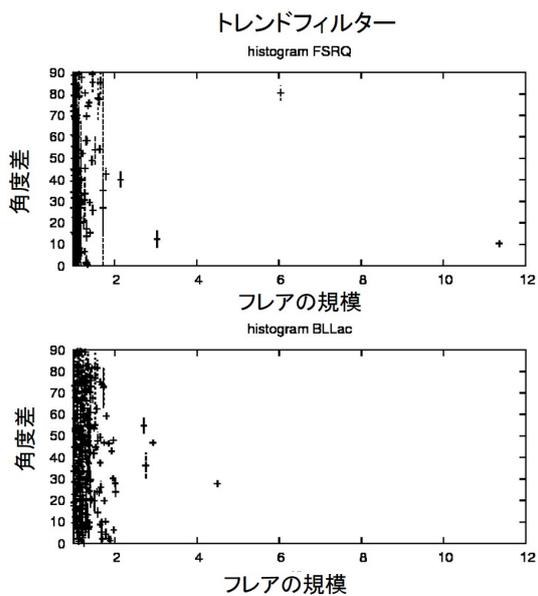


図 5.5: FSRQ(上),BL Lac(下) ごとのトレンドフィルターのフレア規模と角度差のグラフ

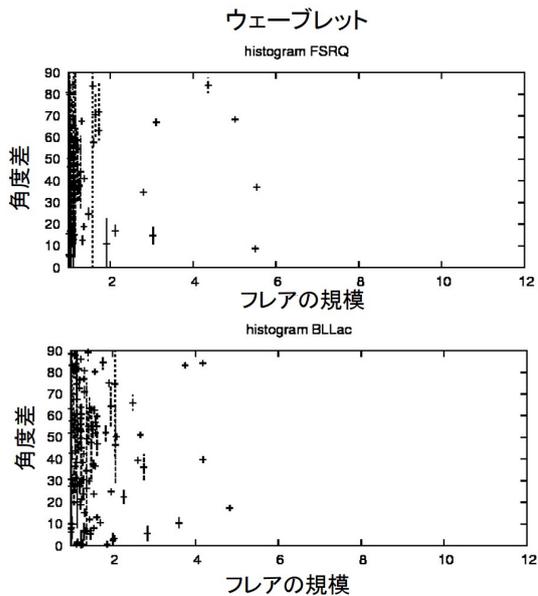


図 5.6: FSRQ(上),BL Lac(下) ごとのウェーブレットのフレア規模と角度差のグラフ

トレンドフィルターの λ 、ウェーブレットのタイムスケールは天体毎に適切な値を決めている。これらのパラメーターの値を少し小さくした結果と大きくした結果をそれぞれ求め、決定した値の結果とどのくらい変化があるか、パラメーターの依存性を調べた。以下の図 5.7 はトレンドフィルターの角度差ごとのフレアの数を示しており、中央が解析に用いた λ 、左が $\lambda \times 0.1$ 、右が $\lambda \times 10$ を使った結果である。図 5.8 はウェーブレットの角度差ごとのフレアの数であり、同様に中央が解析に用いたタイムスケール、左がタイムスケールの半分、右がタイムスケールの2倍を使った結果である。それぞれのパラメーターでKS検定を用いると表 5.1, 5.2 の結果となった。表から分かるように、いずれの場合にも観測された分布は一様分布から有意な差は見られなかった。これより、トレンドフィルター、ウェーブレット共にパラメータを少し変えた結果でも角度差に偏りは生じなかった。

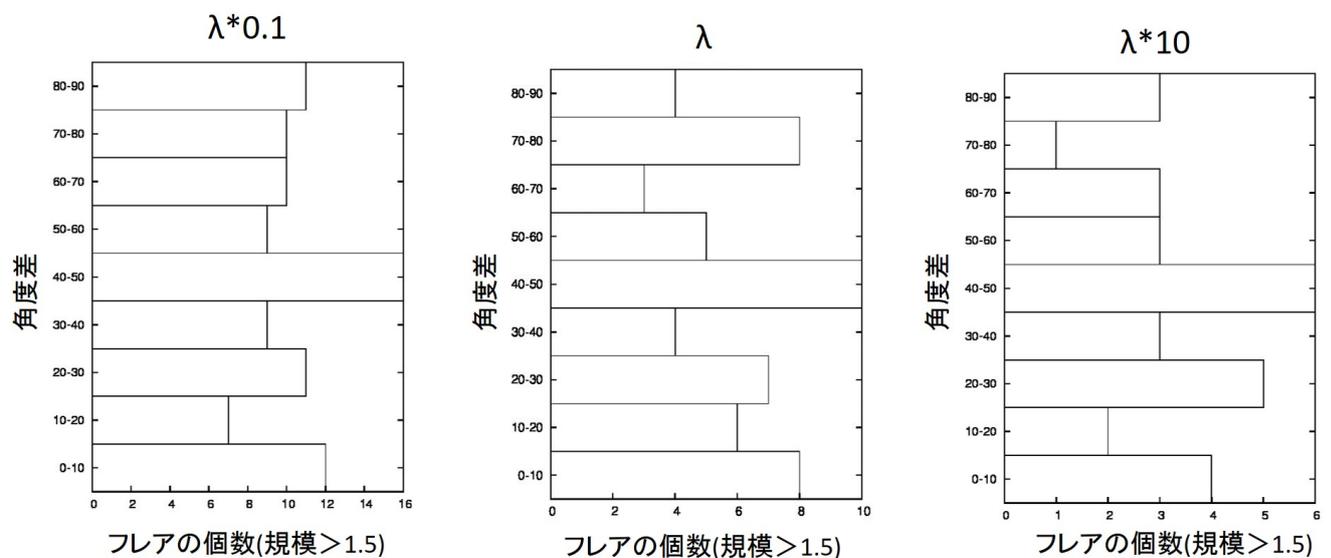


図 5.7: トレンドフィルターの λ の依存性

パラメーター	$\lambda \times 0.1$	λ	$\lambda \times 10$
KS 検定	97.9%	65.3%	61.5%

表 5.1: パラメーター依存の KS 検定の結果 (トレンドフィルター)

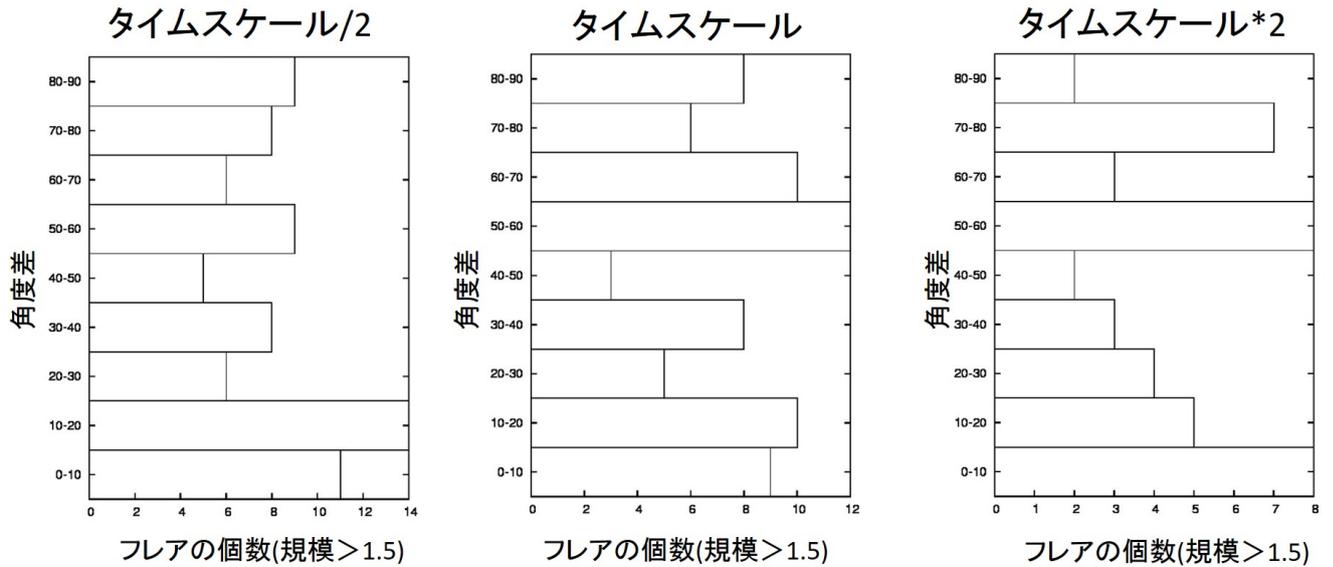


図 5.8: ウェーブレットのタイムスケール依存性

パラメーター	タイムスケール/2	タイムスケール	タイムスケール × 2
KS 検定	9.1%	88.8%	50.0%

表 5.2: パラメーター依存の KS 検定の結果 (ウェーブレット)

また、上記では測定誤差などフレア以外の原因を含まないようにフレア規模が 1.5 倍以上のデータを用いているが、フレア規模を 1.0 倍以上、2.0 倍以上としたときに結果に変化がないかを調べた。図 5.9, 5.10 はそれぞれトレンドフィルターとウェーブレットの角度差ごとのフレアの個数を表しており、中央が 1.5 倍以上、左が 1.0 倍以上、右が 2.0 倍以上のフレアのみを示している。条件の異なる 6 個の結果に対して KS 検定を使用すると、表 5.3, 5.4 のようになった。ここでも、上記と同様にどこかの角度差に偏りは見られなかった。以上より、解析に用いたパラメーターやフレア規模の最小値は結果には大きく影響を与えないことがわかる。

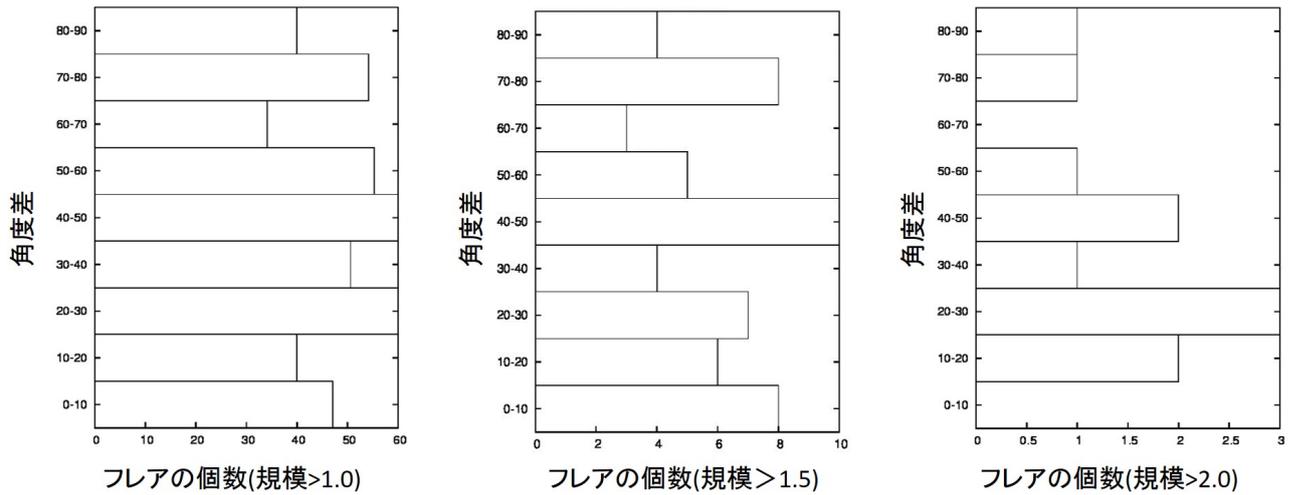


図 5.9: トレンドフィルターのフレア規模依存性

フレア規模	1.0	1.5	2.0
KS 検定	15.2%	65.3%	65.2%

表 5.3: フレア規模依存の KS 検定の結果 (トレンドフィルター)

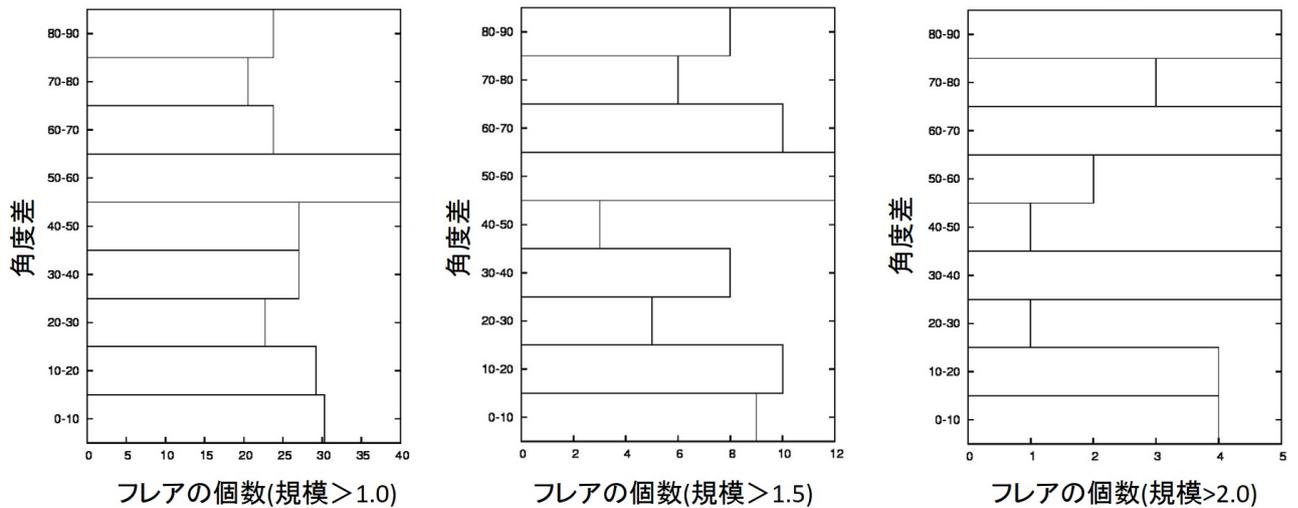


図 5.10: ウェーブレットのフレア規模依存性

フレア規模	1.0	1.5	2.0
KS 検定	43.9%	88.8%	82.3%

表 5.4: パラメーター依存の KS 検定の結果 (ウェーブレット)

今回、異なった2つの方法でジェットの方法に対するフレア固有の偏光方位角の分布を調べたが、ブレーザー全体に置いて天体毎、種類毎においても、特定の角度への有意な集中は見られなかった。従って、ブレーザーのフレアの偏光方位角はジェットの方法には依らず、様々な方向を向くことが示唆される。

ジェット全体の中で伝搬する衝撃波がフレアとして観測されるとすると、偏光の方向はジェット内の大局的な磁場の方向に揃うことが期待されるが、今回はそのような描像を支持しない結果となった。偏光方位角の分布に偏りが無いという事は、ジェット内の大局的な磁場ではなく、局所的な磁場構造がフレアを通して見えている可能性が考えられる。例えば、放射源がらせん状の磁場に沿って運動している場合、フレアが発生する位置に依存して偏光方位角がランダムに変化する可能性が考えられる。また、観測される偏光が大局的な磁場構造を反映している場合でも、ジェットが大きく折れ曲がるなど、放射源の進行方向が大きく変われば、観測される偏光方位角にばらつきが見られるかもしれない。ただし、観測されたような一様分布を再現するためには、ジェットが大きく、様々な方向に折れ曲がる必要があり、物理的には難しい。

5.2 X線連星

5.2.1 GRS 1915+105

4.2.1章で示したデータが天体固有のものなのか、星間偏光によるものか調べる。もし、星間偏光だとすると、GRS 1915+105だけでなく、周辺の天体も同じように偏光を受けていると考えられる。図5.11はHESS2000カタログを用いて、GRS 1915+105を中心として10度の範囲にある天体の偏光値を示した偏光マップである。原点にGRS 1915+105があり、直線の傾きが偏光方位角、長さが偏光度を表している。また、赤線が5月30日、青線が7月23日のデータを示す。周辺の天体は、黄色の矢印で示した銀河面方向に星間偏光を受け同じような偏光の値を示しているが、特に5月30日のGRS 1915+105は異なった値を持ち、固有の偏光を持っているように見える。

偏光マップには距離の情報がないため、銀河などにより偏光を受けた遠方天体か、比較的影響を受けていない近傍天体か判断できない。そこで詳しく調べるために周辺天体を距離で2つに分けて同様の検証を行った。図5.12は横軸H-Ks、縦軸J-Hを示した2色図である。それぞれの値は、近赤外のカタログ(2MASS)[25]を用いた。黒点が主系列星・巨星の典型的な値を示しており、黒線は、星間赤化の方向に伸ばした直線である。直線で値が大きくなるほど赤化量が大きくなり、距離が遠い天体ほど赤化量が大きくなるので、2つの直線間にある天体を赤化量によって2つに分割した。

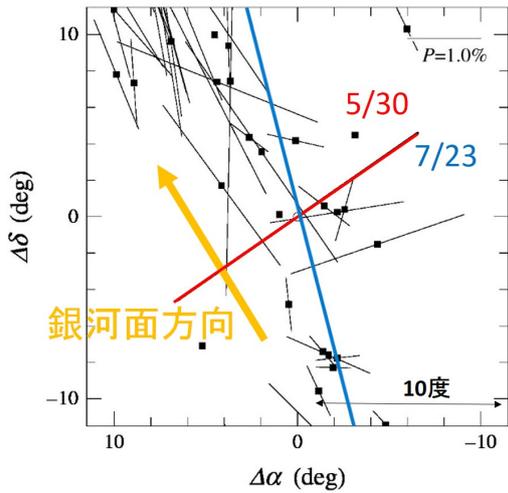


図 5.11: GRS 1915+105 と周辺天体の偏光マップ [25]

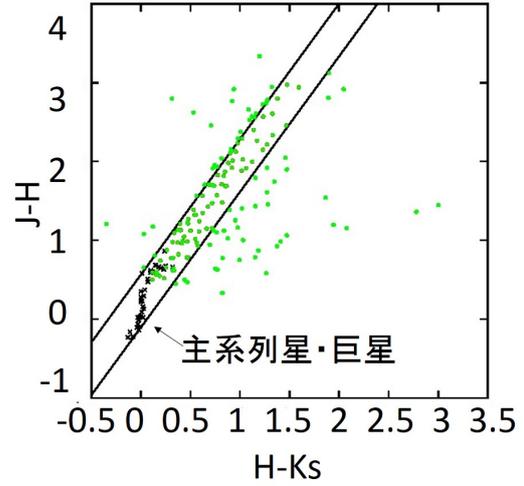


図 5.12: 2 色図 (J-H,H-Ks)

2 色図を用いて距離で 2 つに分割した周辺天体と GRS 1915+105 の偏光マップを図 5.13 に示す。右図が遠方天体、左図が近傍天体の結果である。ここでは、周辺天体の偏光値もカタログではなく、広島大学かなた望遠鏡で観測された値を用いている。さらに、図 5.11 は天体から 10 度の範囲にある天体を用いたが、図 5.13 は天体から 0.05 度の範囲とより狭い位置に存在する天体を見ている。図を見て分かるように、周辺天体の偏光の向きや大きさが様々である。そのため、得られた偏光が星間偏光によるものか天体固有のものは判断が難しい。一方で、2 回の観測で変動の兆候が見られるため、今後のさらなる観測によって時間変動を確立することで、固有偏光と星間偏光の分離を調べるのが重要である。

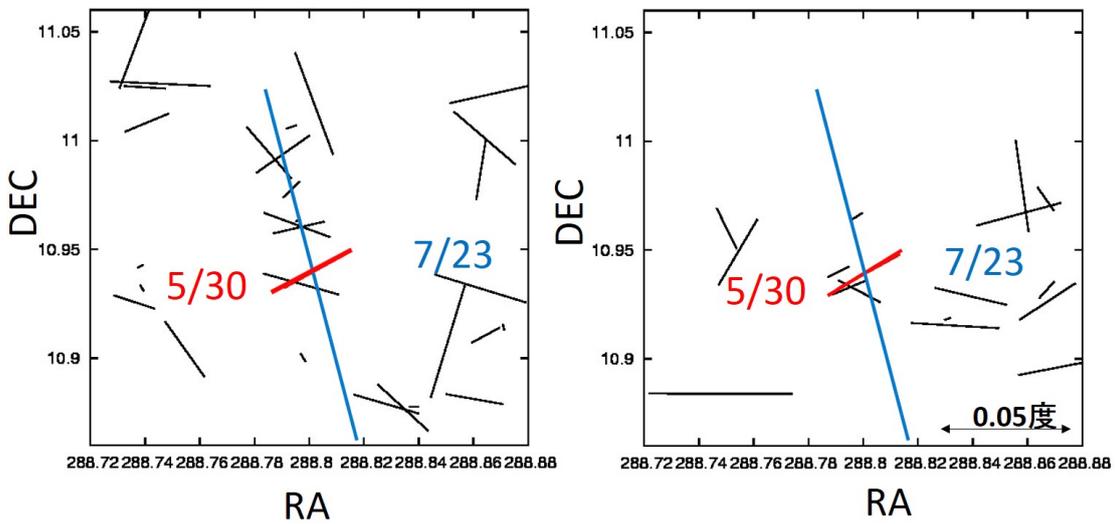


図 5.13: GRS 1915+105 と周辺天体の偏光マップ (右:遠方、左近傍)

5.2.2 V4641 Sgr

5.2.1 章でも用いた V4641 Sgr と周辺天体の偏光マップを図 5.14 に示した。V4641 Sgr の偏光値は B バンドから J バンドまでの平均値を用いており、赤丸で示す。円の大きさが偏光度を表している。図を見ると、周辺天体の偏光度と V4641 Sgr の偏光度がほとんど変わらないように見える。また、図 4.10 で示したフレア成分で作成した SED ではシンクロトロン放射を意味する傾きの小さいスペクトルが得られたが、今回は偏光の変動が小さいため降着円盤からの放射を観測していたと考えられる。

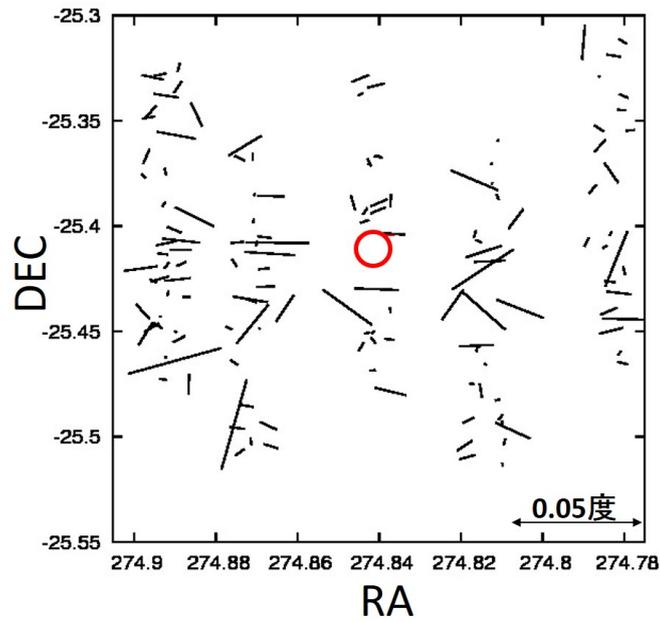


図 5.14: V4641 Sgr と周辺天体の偏光マップ

第6章 まとめ

今回、活動銀河核やブラックホール X 線連星のジェットを広島大学かなた望遠鏡で偏光観測を行った。

活動銀河核では、ジェットの磁場構造を探るため、レーザー天体の可視偏光方位角と電波干渉計画像のジェット方向の相関を求めた。また、レーザー天体の光度変化はタイムスケールが短く偏光が激しいという特徴があり、さらにフレアには決まった定義などがないため、客観的にフレアを判断することが難しい。そのため、 $\ell 1$ トレンドフィルターとウェーブレットの 2 通りを用いてフレア検出を異なった。広島大学かなた望遠鏡ではこれまで 42 天体が観測されており、その中で電波干渉計画像があるものを探すと 36 天体であった。各天体についてフレア検出を行い、フレア固有の偏光方位角と電波ジェット方向の角度差を求めた。その結果、どこかの角度差に偏りは見られず、統計的には一様分布と区別がつかない結果となった。さらに、レーザー天体を FSRQ と BL Lac に分類した結果や、1 天体毎に調べた結果でも同様に有意な分布の偏りは見られなかった。これより、レーザーのフレアの偏光方位角はジェット方向には依らず、様々な方向を向くことが示唆される。偏光方位角の分布に偏りがいないことは、ジェット内の大局的な磁場ではなく、局所的な磁場構造がフレアを通して見えている可能性が考えられる。

X 線連星 GRS 1915+105 の偏光観測を 2014 年 5 月 30 日、7 月 23 日に行い、それぞれ $4.5 \pm 0.8\%$, $16.3 \pm 8.2\%$ という偏光度を得た。2 つの偏光値は有意に異なるが、両方の値とも天体固有の偏光を調べるためには星間偏光を分離する必要がある。そこで周辺天体の偏光値と比較を行い、得られた偏光が天体固有のものか星間偏光かを調べたが、周辺天体の偏光のばらつきが大きく、今回は有意な天体固有の偏光を確認することはできなかった。また、V 4641 Sgr は可視光で増光が確認された 2014 年 1 月と 2015 年 8 月に可視・近赤外で偏光観測を行った。しかし、レーザーで見られるような数十%ほどの大きな偏光値は得られなかった。フレア成分で SED を作成するとシンクロトロン放射を意味する傾きの小さいスペクトルが得られたが、今回は偏光の変動が小さいため降着円盤からの放射を観測していたと考えられる。

第7章 付録

4章で示した ℓ_1 トレンドフィルター、ウェーブレットを用いた結果を全天体について載せる。

7.1 ℓ_1 トレンドフィルターの解析結果

以下の図は、上から光度、偏光パラメーター Q, U の時間変化を表している。黒点が観測データ、青線がトレンドフィルターの結果、赤点が検出されたフレアを示している。

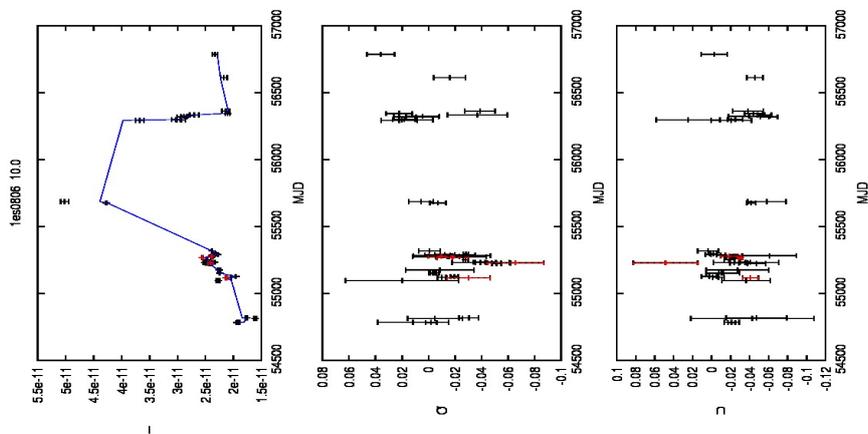


図 7.1: 1ES 0804+524 のトレンドフィルター解析の図

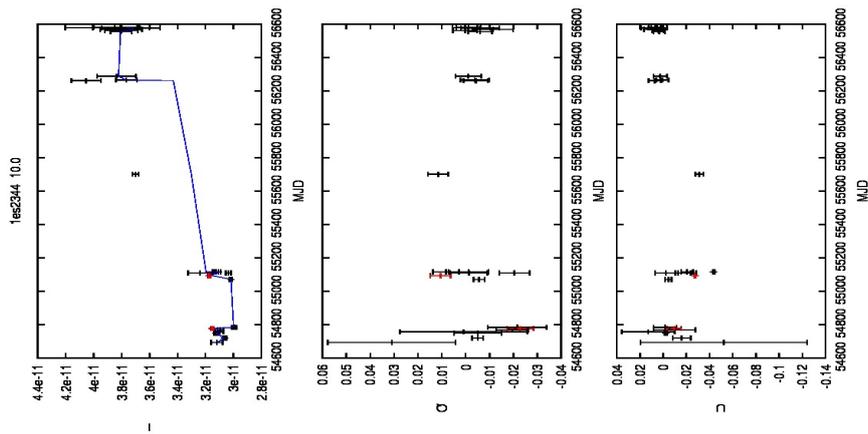


図 7.2: 1ES 2344+514 のトレンドフィルター解析の図

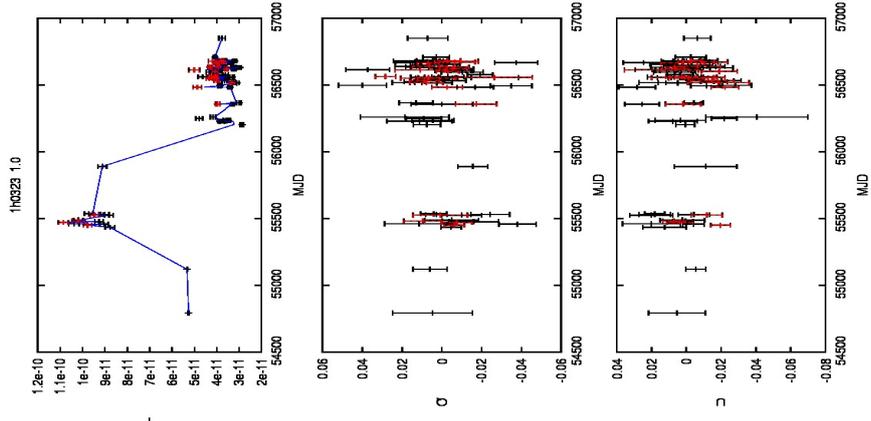


図 7.3: 1H 0323 のトレンドフィルター解析の図

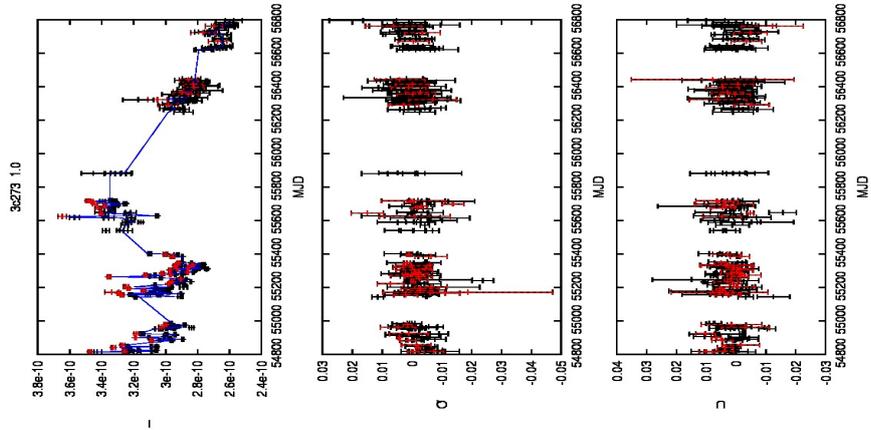


図 7.4: 3C 273 のトレンドフィルター解析の図

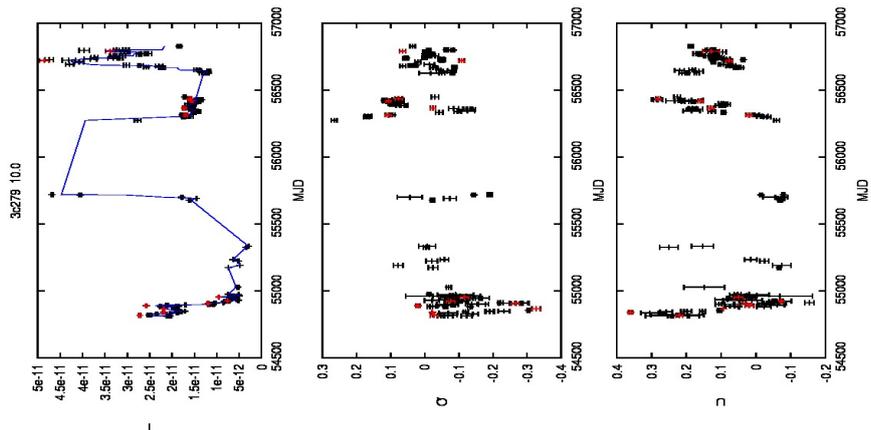


図 7.5: 3C 279 のトレンドフィルター解析の図

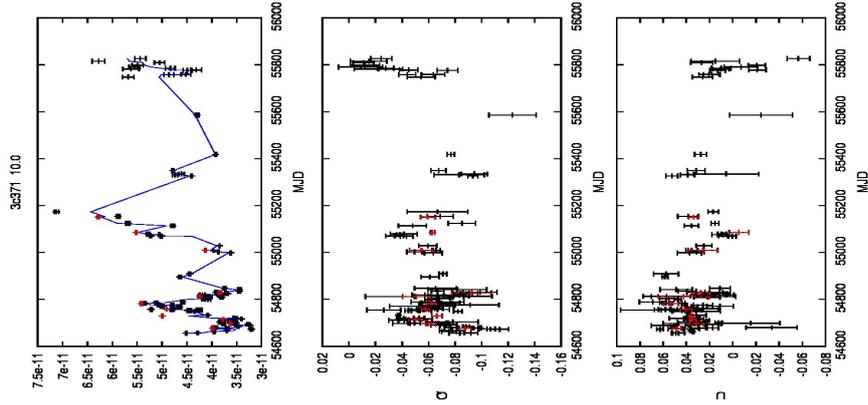


図 7.6: 3C 371 のトレンドフィルター解析の図

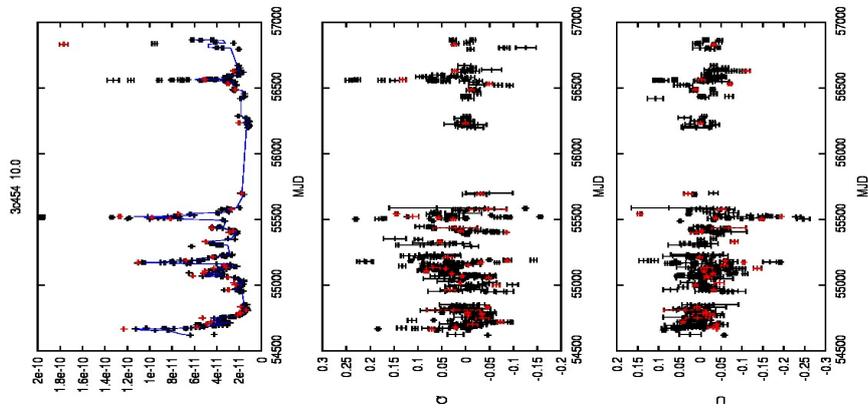


図 7.7: 3C 454.3 のトレンドフィルター解析の図

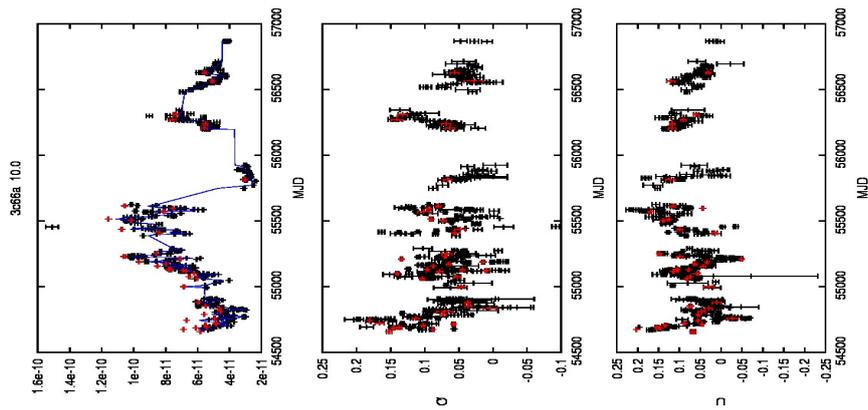


図 7.8: 3C 66A のトレンドフィルター解析の図

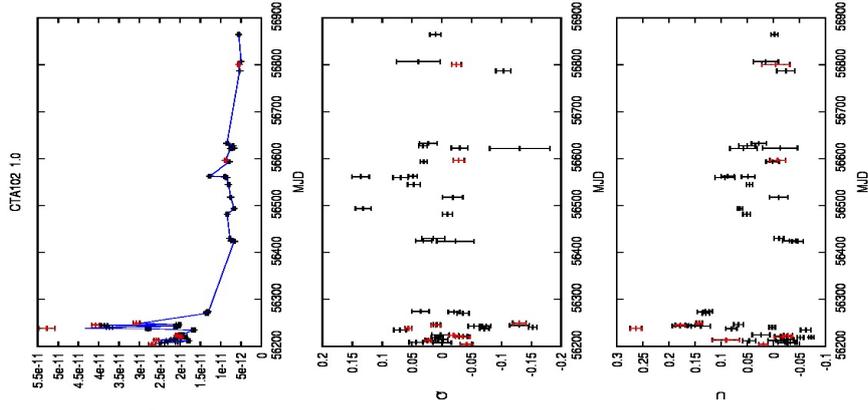


図 7.9: CTA102 のトレンドフィルター解析の図

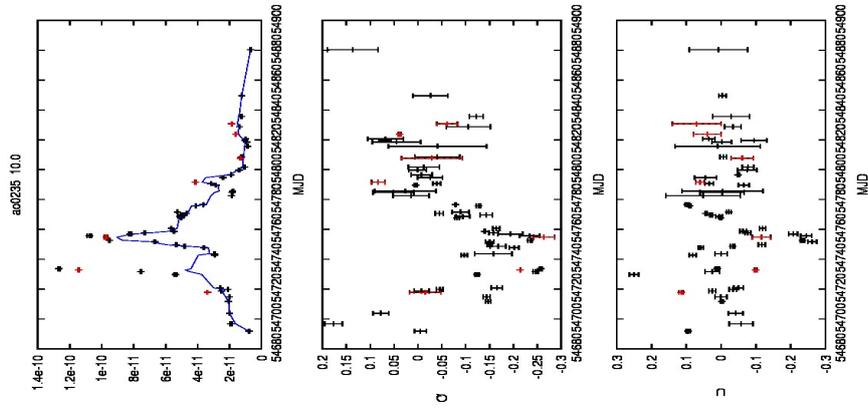


図 7.10: AO 0235+164 のトレンドフィルター解析の図

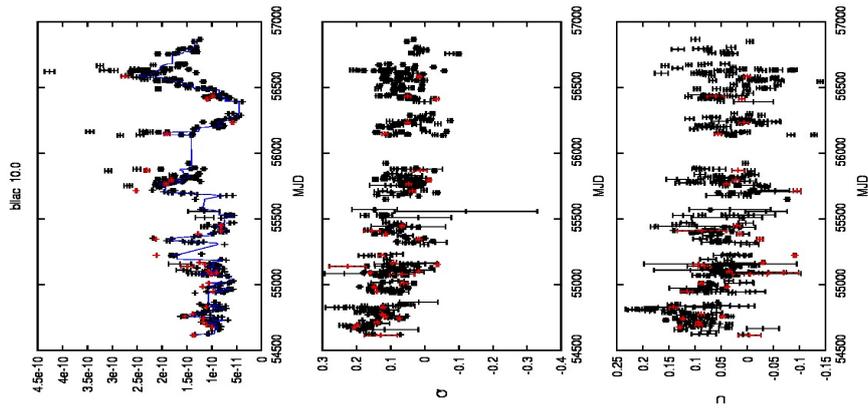


図 7.11: BL Lac のトレンドフィルター解析の図

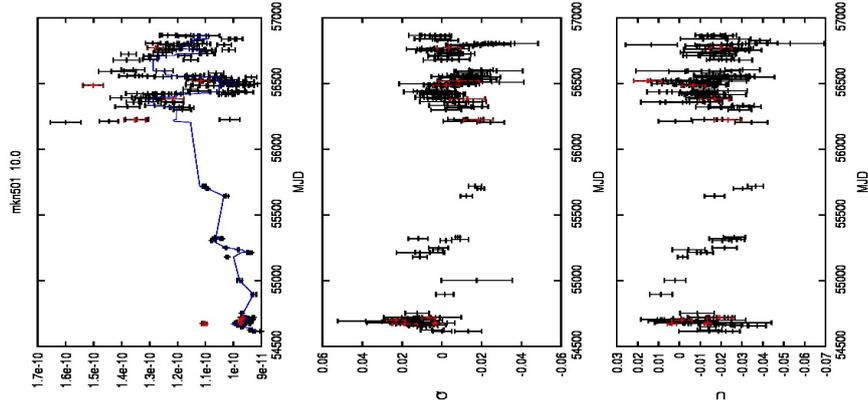


図 7.12: Mkn501 のトレンドフィルター解析の図

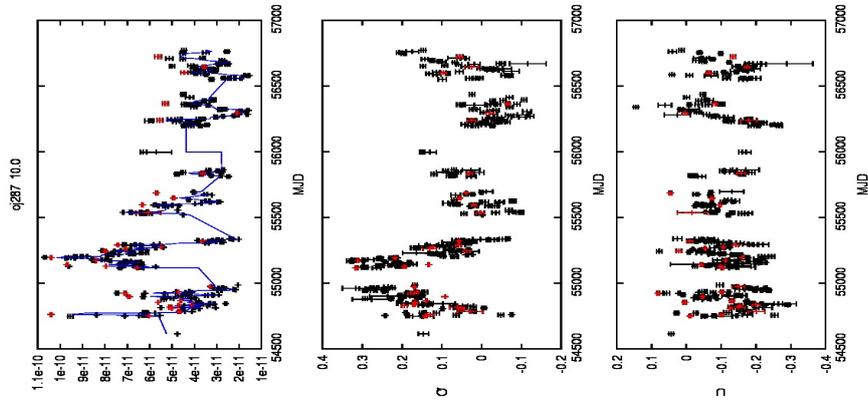


図 7.13: OJ 287 のトレンドフィルター解析の図

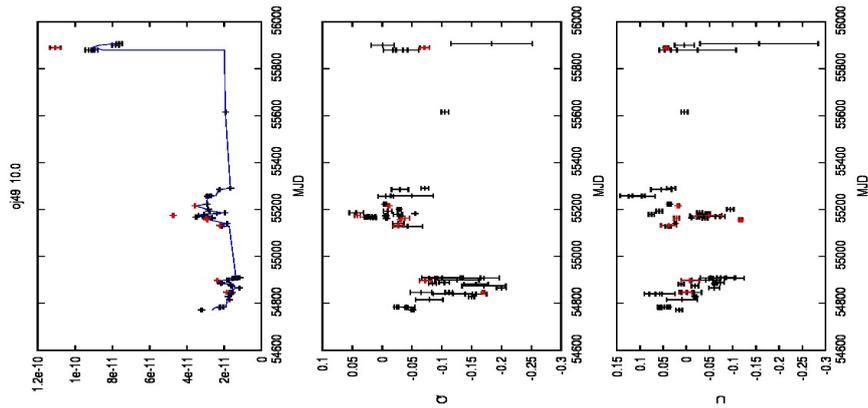


図 7.14: OJ 49 のトレンドフィルター解析の図

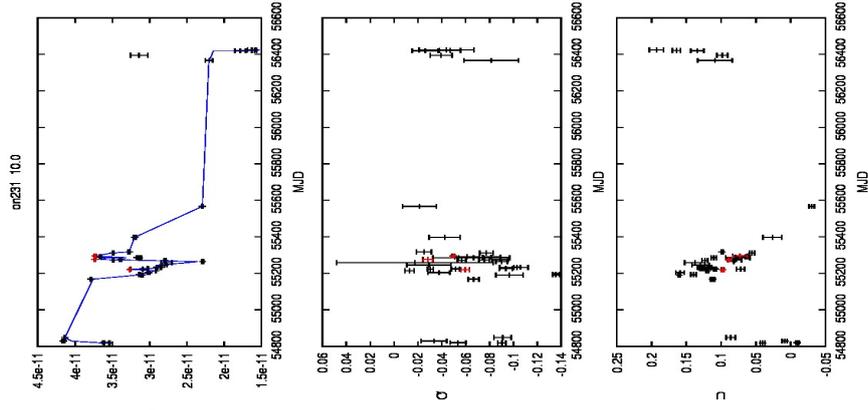


図 7.15: ON 231 のトレンドフィルター解析の図

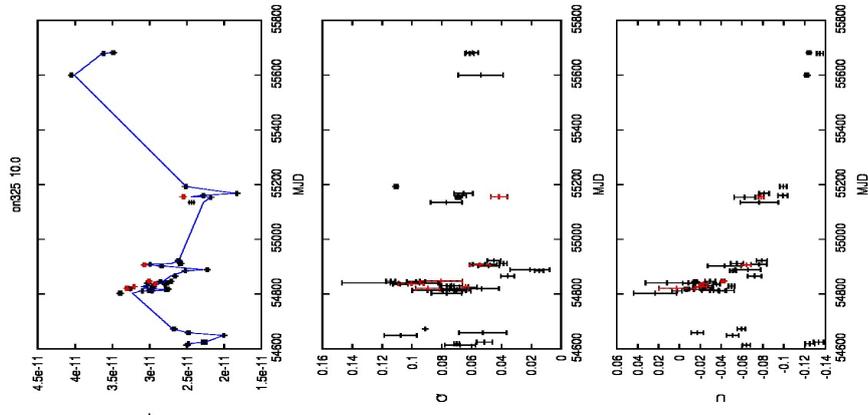


図 7.16: ON 325 のトレンドフィルター解析の図

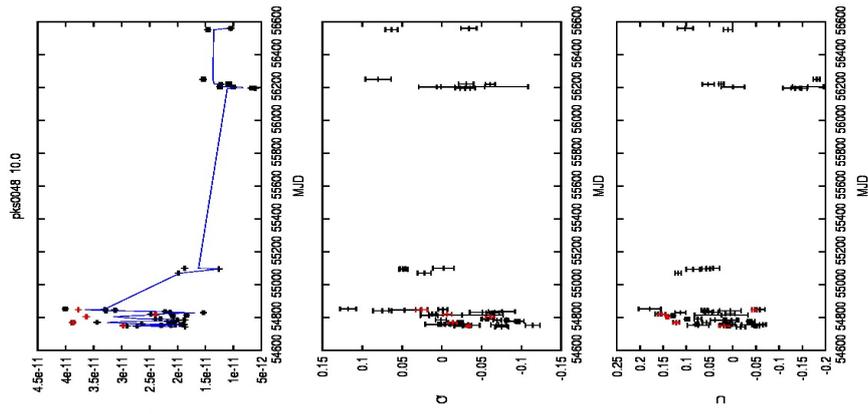


図 7.17: PKS 0048-097 のトレンドフィルター解析の図

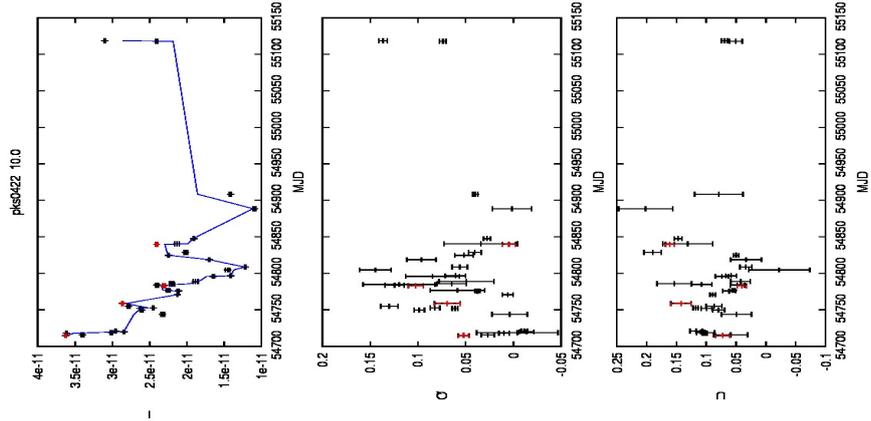


図 7.18: PKS 0422+004 のトレンドフィルター解析の図

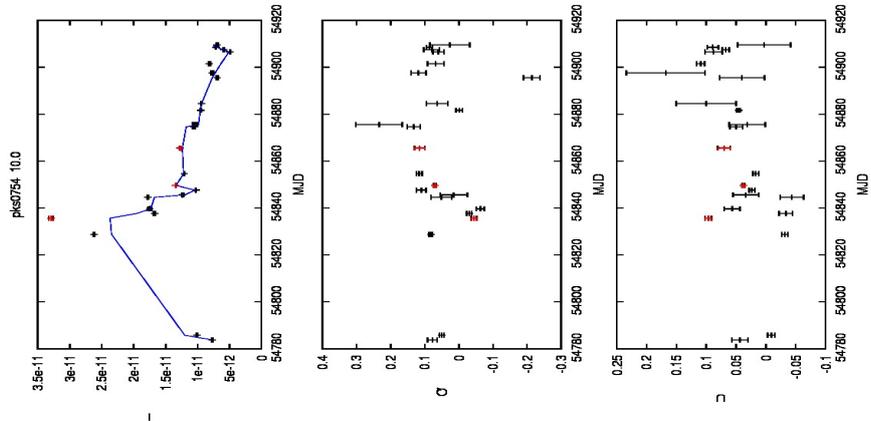


図 7.19: PKS 0754+100 のトレンドフィルター解析の図

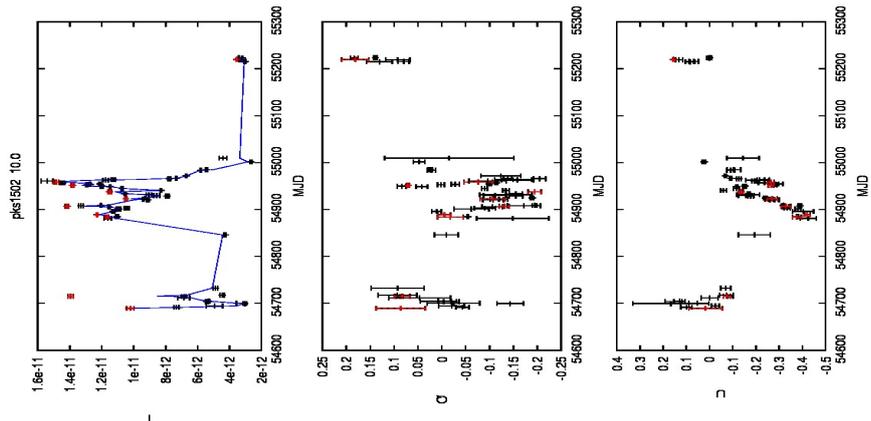


図 7.20: PKS 1502+106 のトレンドフィルター解析の図

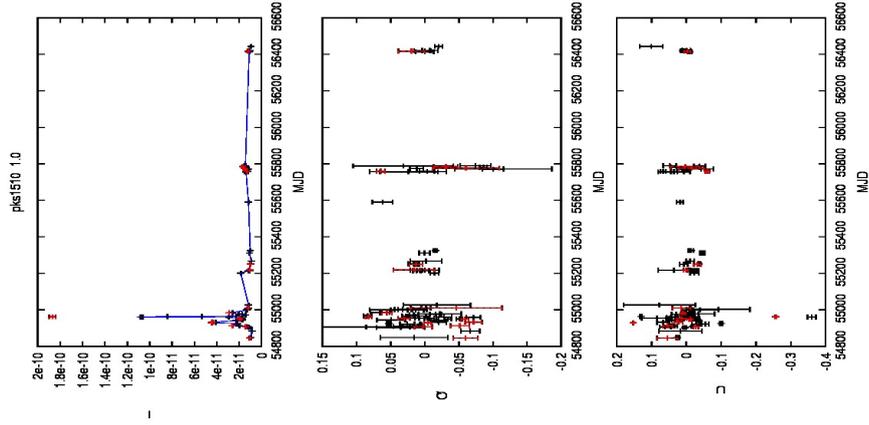


図 7.21: PKS 1510-089 のトレンドフィルター解析の図

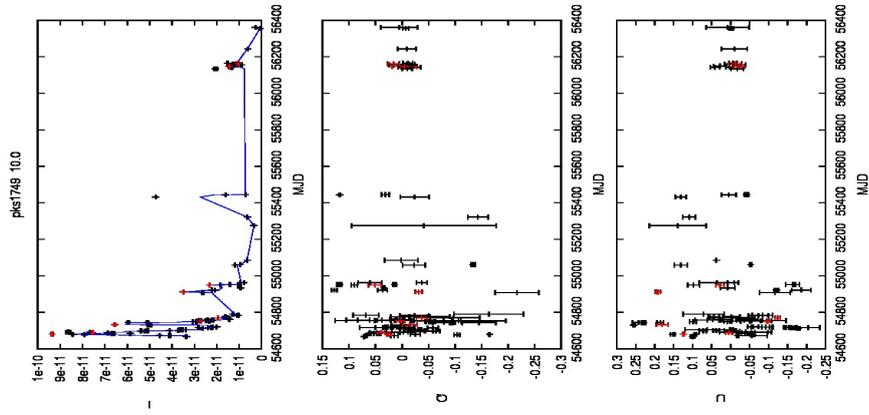


図 7.22: PKS 1749+096 のトレンドフィルター解析の図

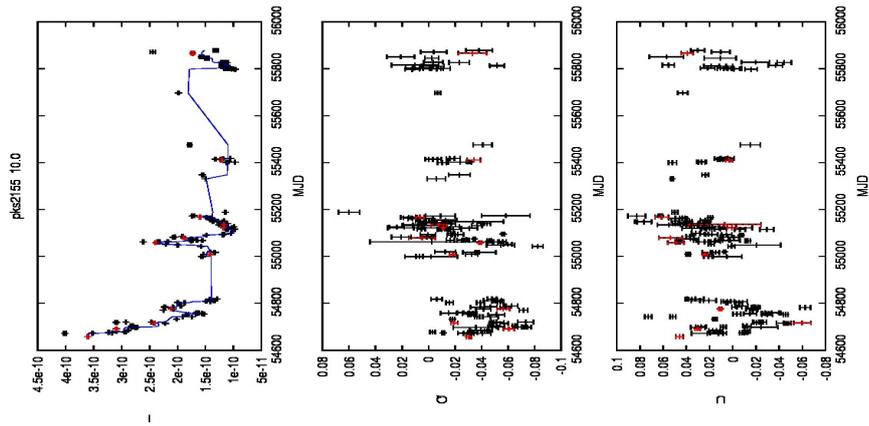


図 7.23: PKS 2155-304 のトレンドフィルター解析の図

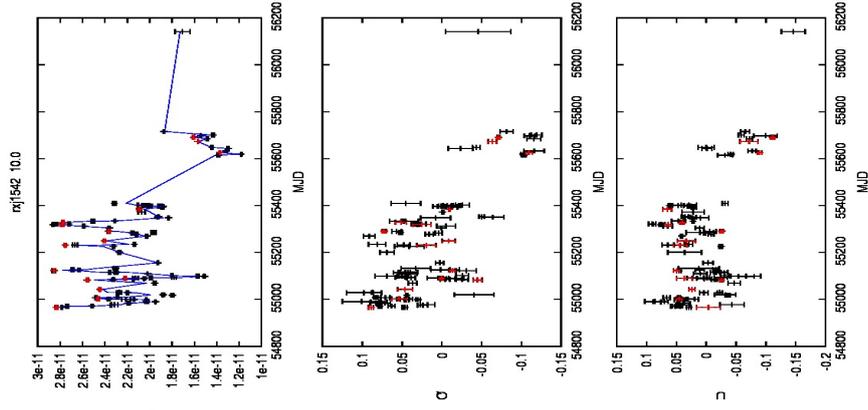


図 7.24: RX J1542.8+612 のトレンドフィルター解析の図

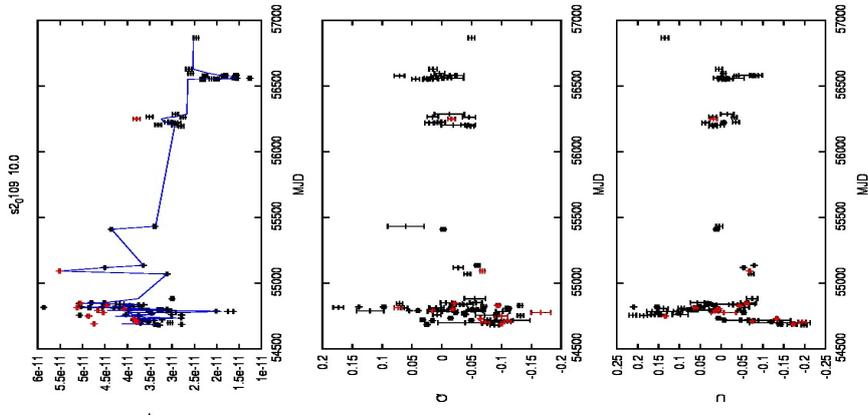


図 7.25: S2 0109+224 のトレンドフィルター解析の図

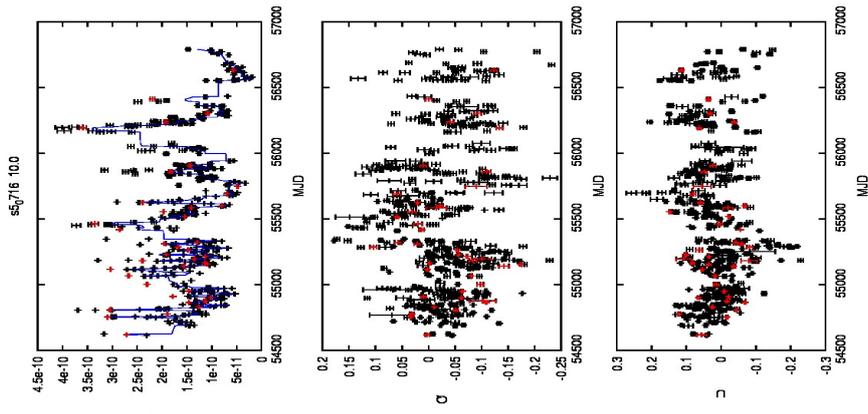


図 7.26: S5 0716+714 のトレンドフィルター解析の図

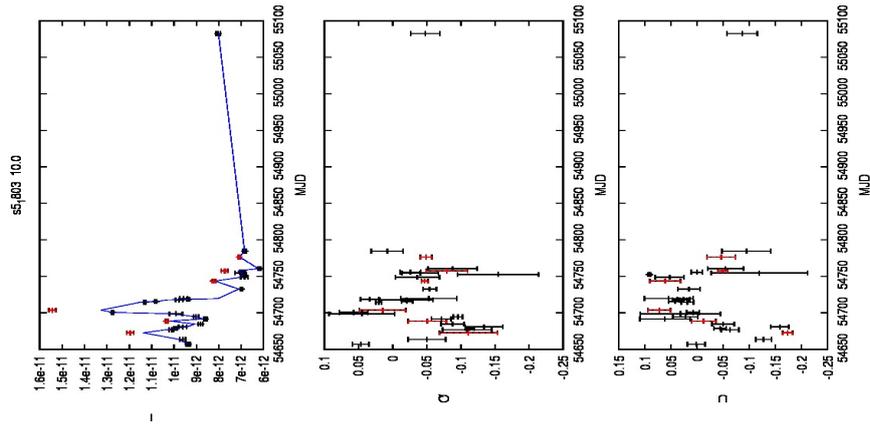


図 7.27: S5 1803+784 のトレンドフィルター解析の図

7.2 ウェーブレットの解析結果

以下は、上から光度曲線、ウェーブレット解析で得られたカラーマップ、天体ごとに適切なタイムスケールの強度を抜き出した図を表している。

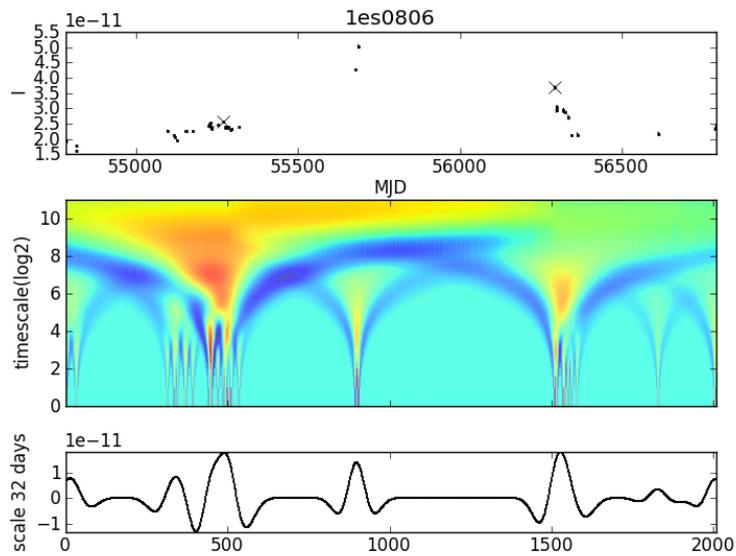


図 7.28: 1ES 0806+524 のウェーブレット解析の図

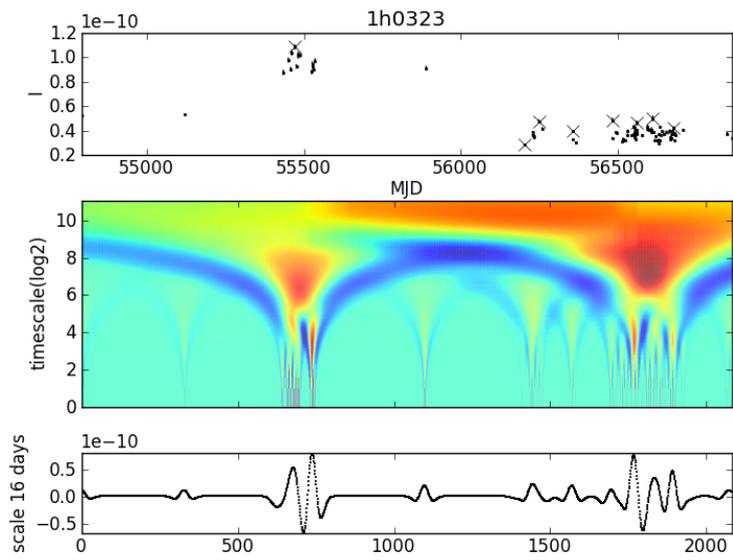


図 7.29: 1H 0323 のウェーブレット解析の図

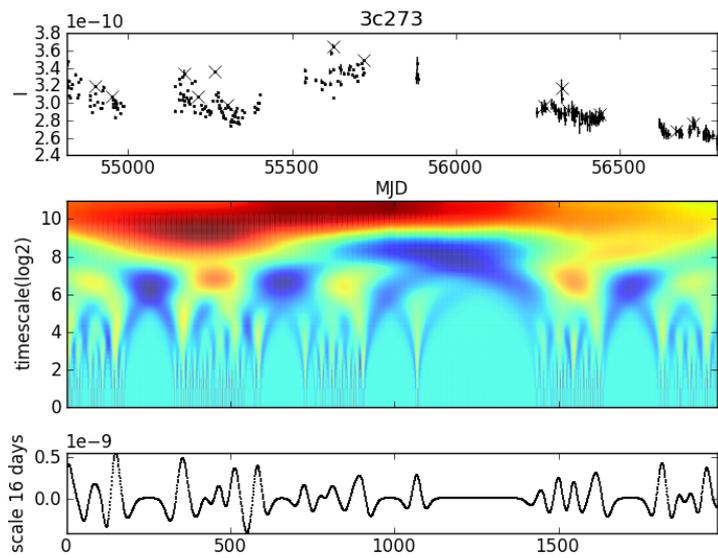


図 7.30: 3C 273 のウェーブレット解析の図

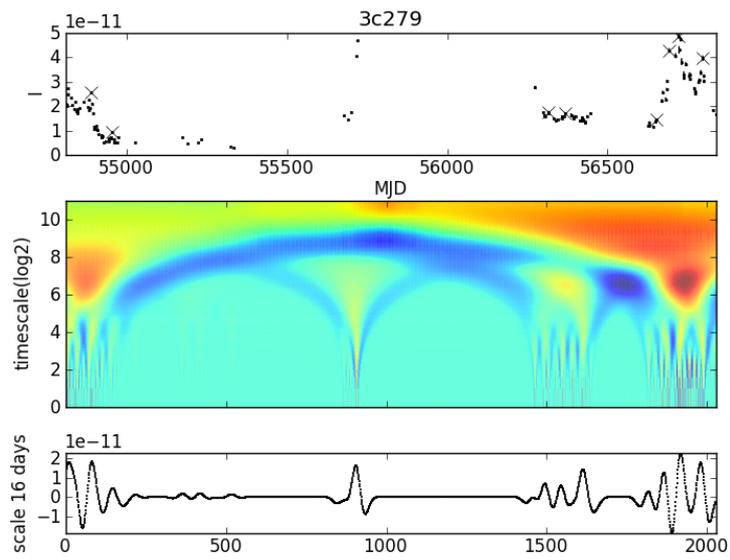


図 7.31: 3C 279 のウェーブレット解析の図

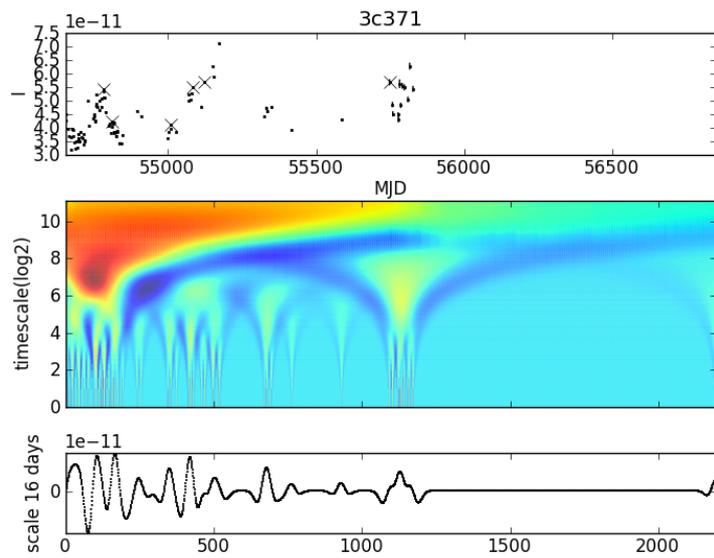


図 7.32: 3C 371 のウェーブレット解析の図

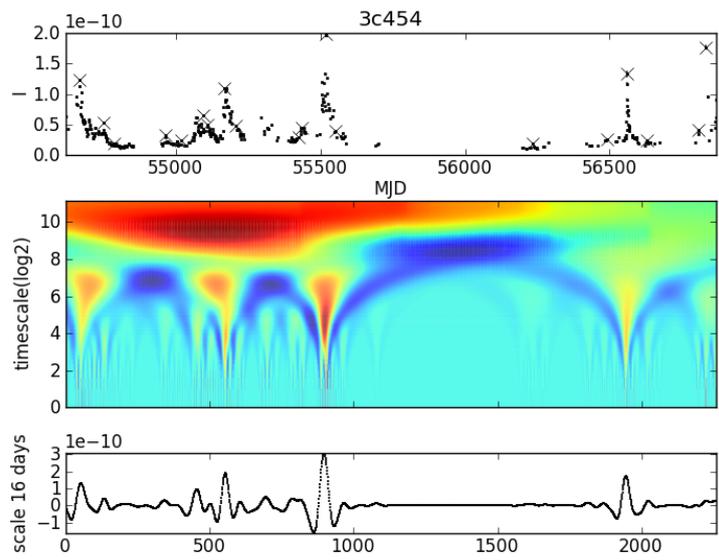


図 7.33: 3C 454.3 のウェーブレット解析の図

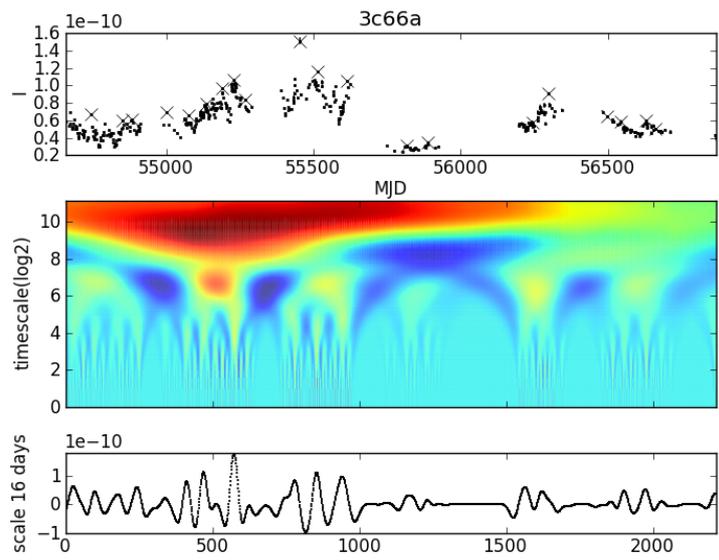


図 7.34: 3C 66A のウェーブレット解析の図

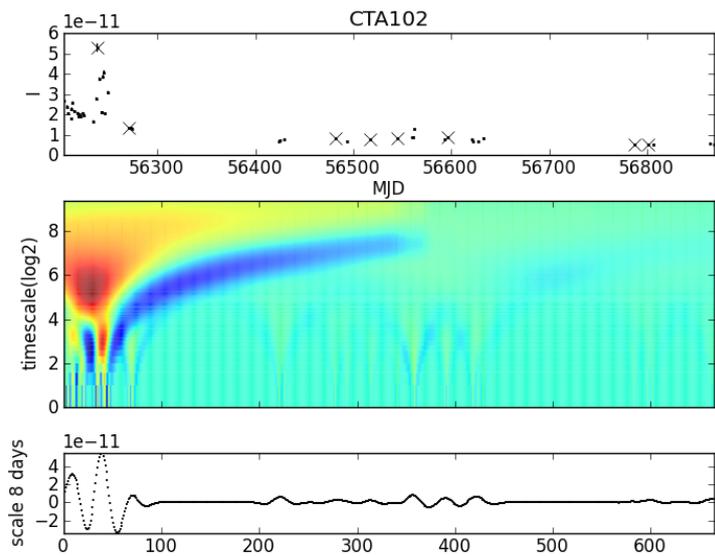


図 7.35: CTA102 のウェーブレット解析の図

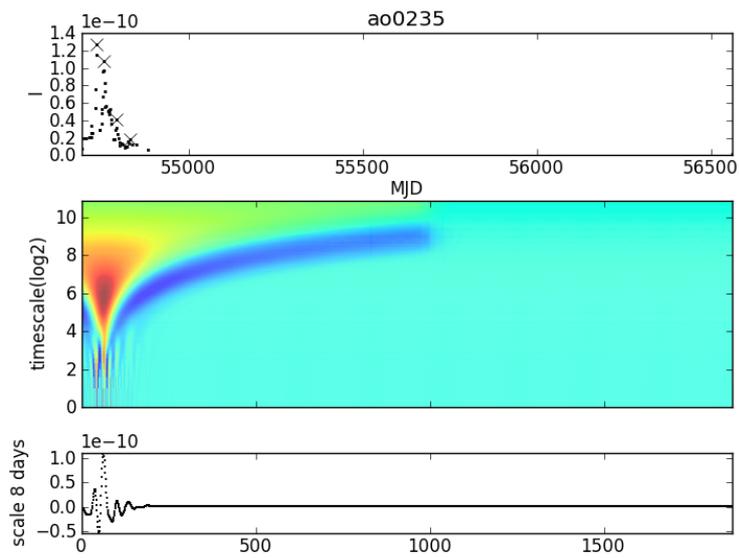


図 7.36: AO 0235+164 のウェーブレット解析の図

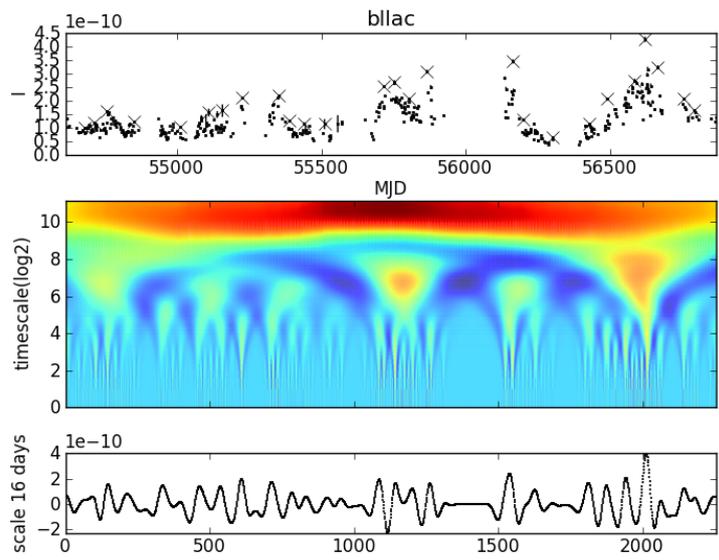


図 7.37: BL Lac のウェーブレット解析の図

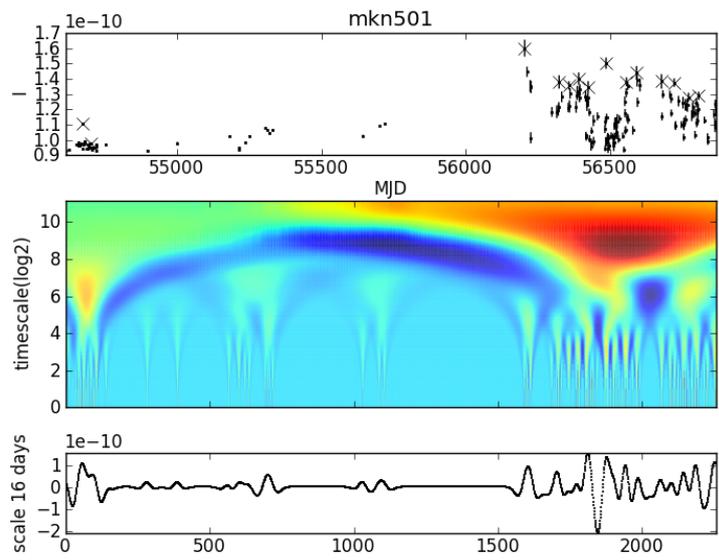


図 7.38: Mkn501 のウェーブレット解析の図

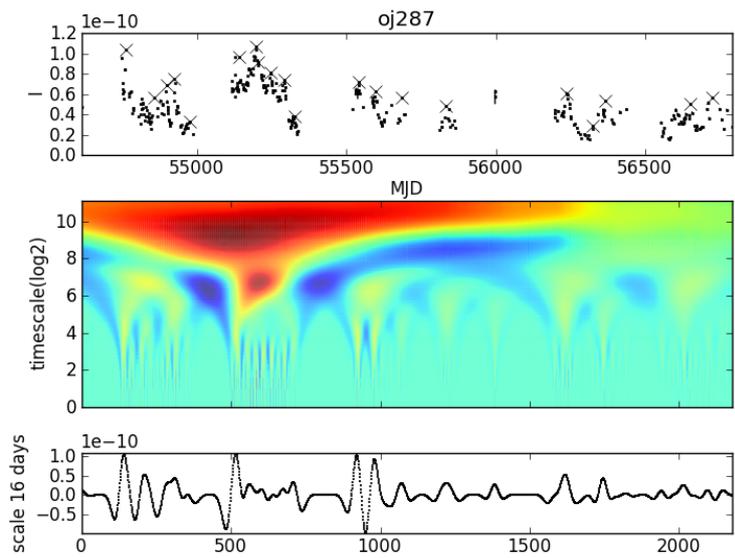


図 7.39: OJ 287 のウェーブレット解析の図

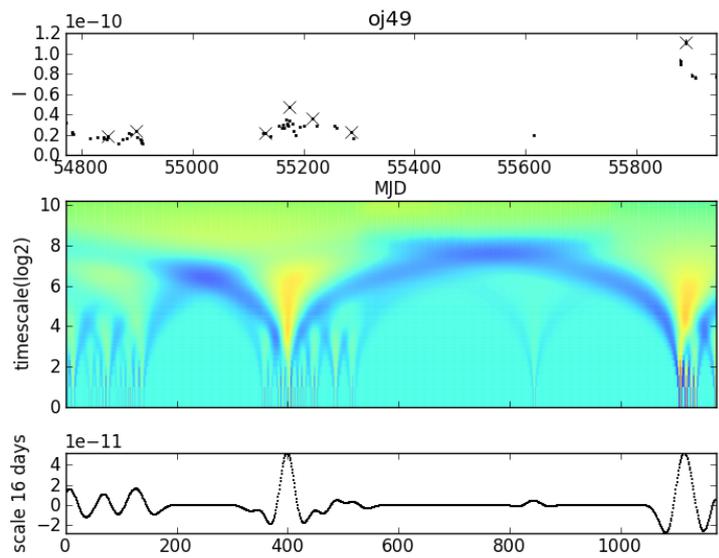


図 7.40: OJ 49 のウェーブレット解析の図

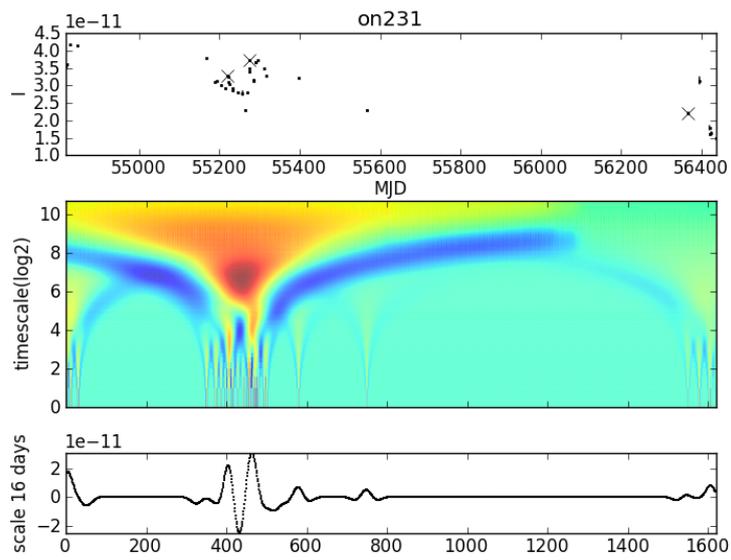


図 7.41: ON 231 のウェーブレット解析の図

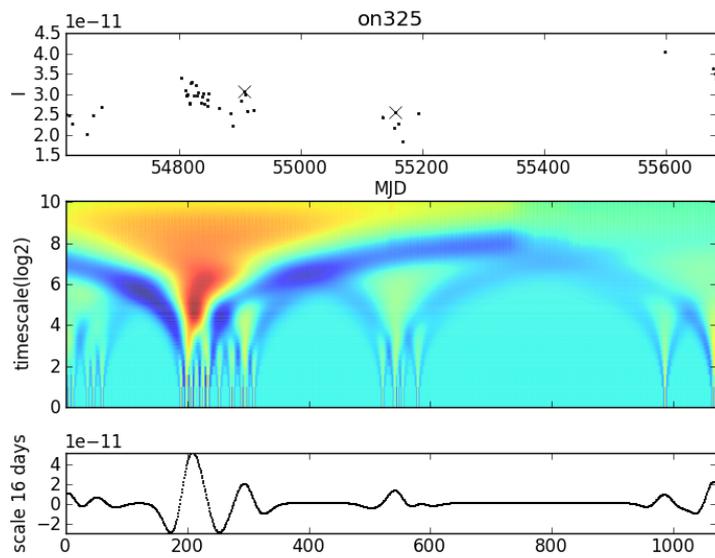


図 7.42: ON 325 のウェーブレット解析の図

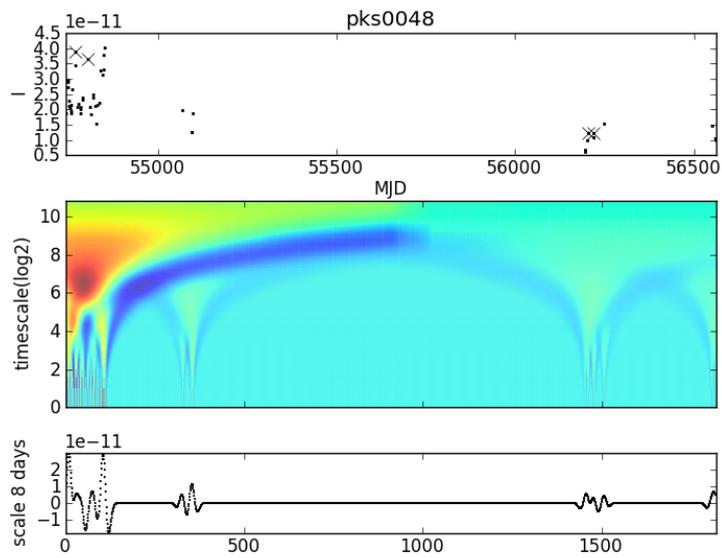


図 7.43: PKS 0048-097 のウェーブレット解析の図

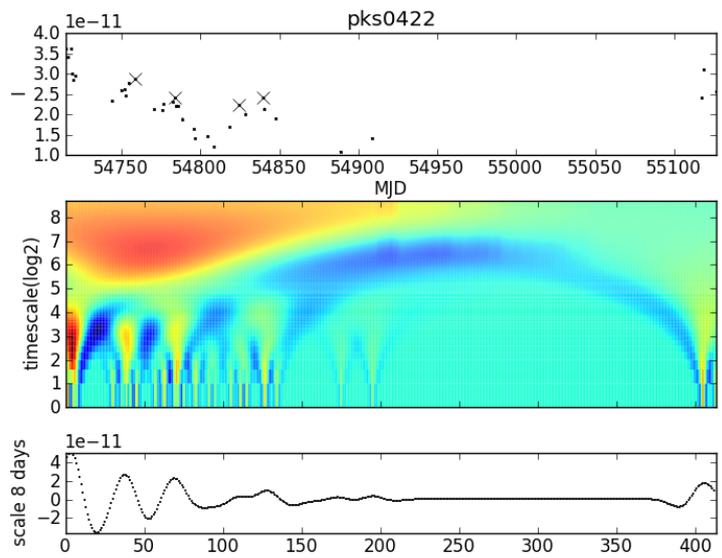


図 7.44: PKS 0422+004 のウェーブレット解析の図

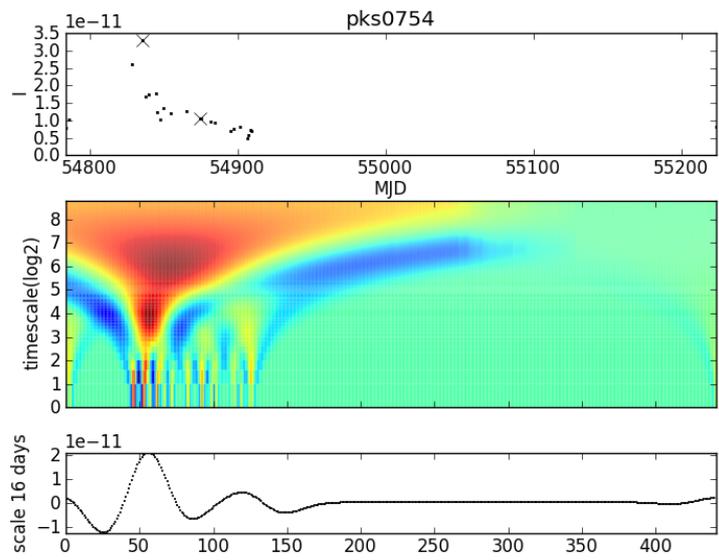


図 7.45: PKS 0754+100 のウェーブレット解析の図

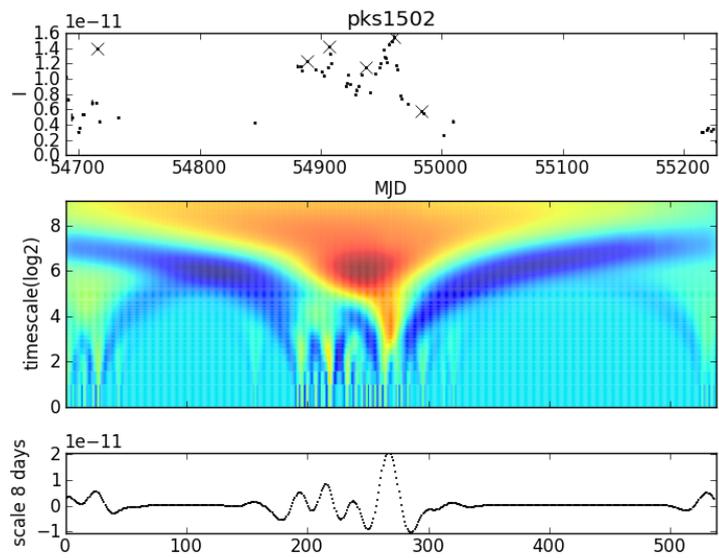


図 7.46: PKS 1502+106 のウェーブレット解析の図

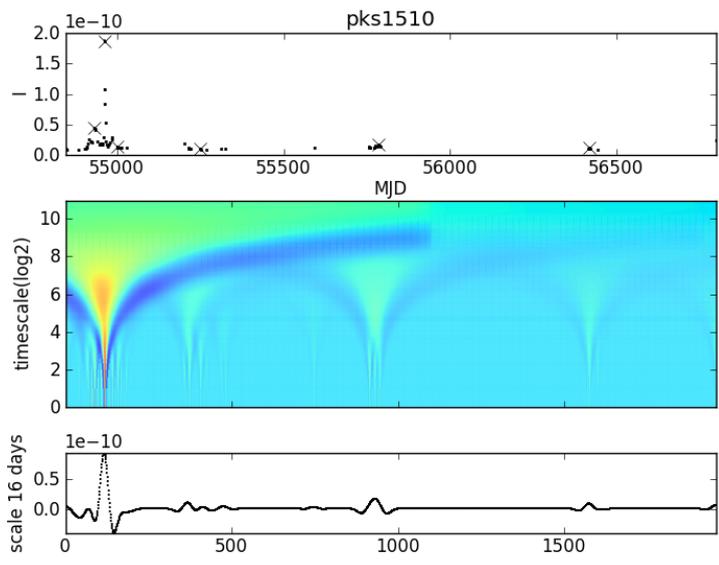


図 7.47: PKS 1510-089 のウェーブレット解析の図

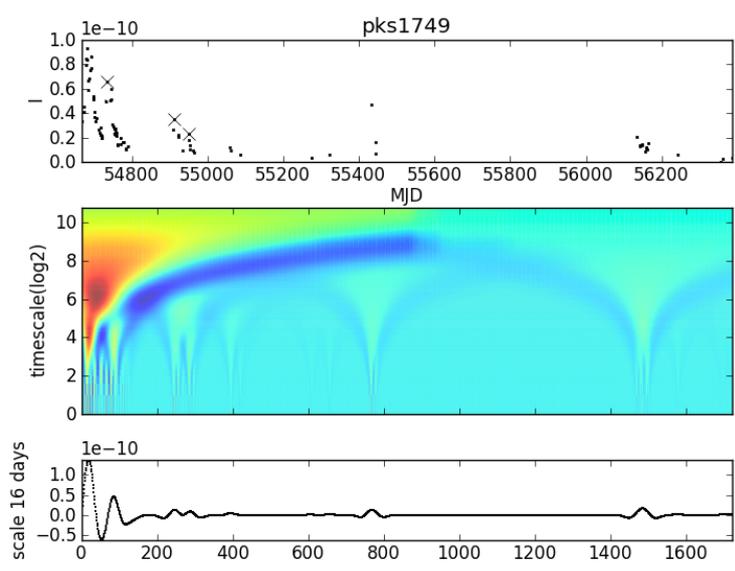


図 7.48: PKS 1749+096 のウェーブレット解析の図

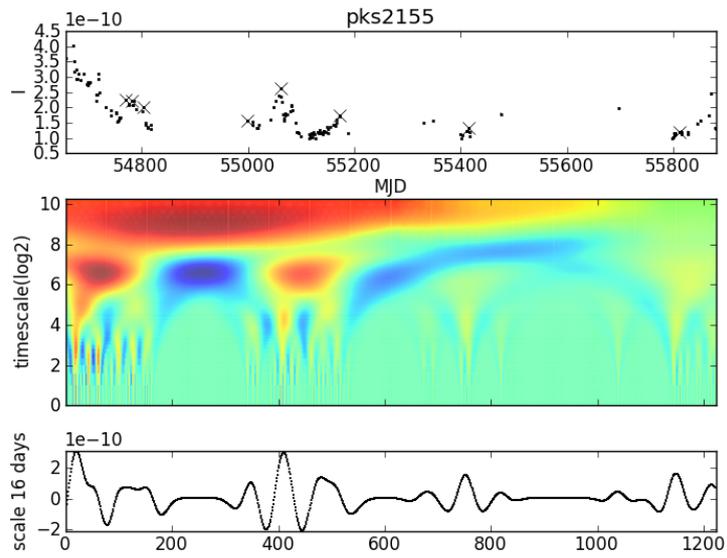


図 7.49: PKS 2155-304 のウェーブレット解析の図

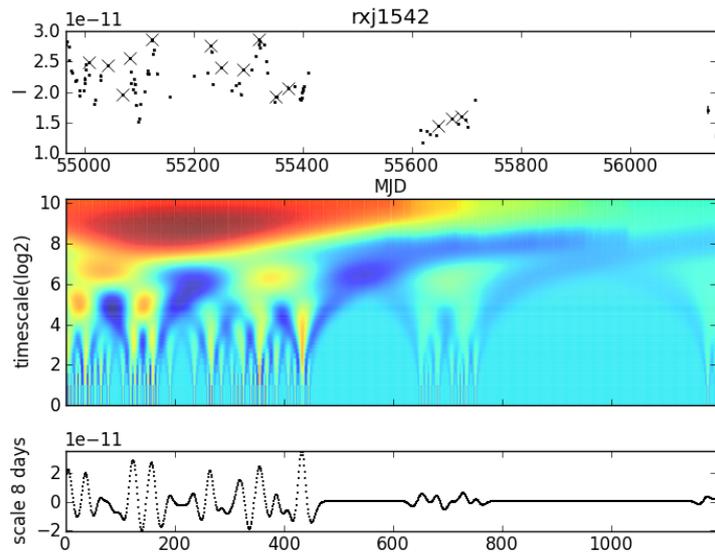


図 7.50: RX J1542.8+612 のウェーブレット解析の図

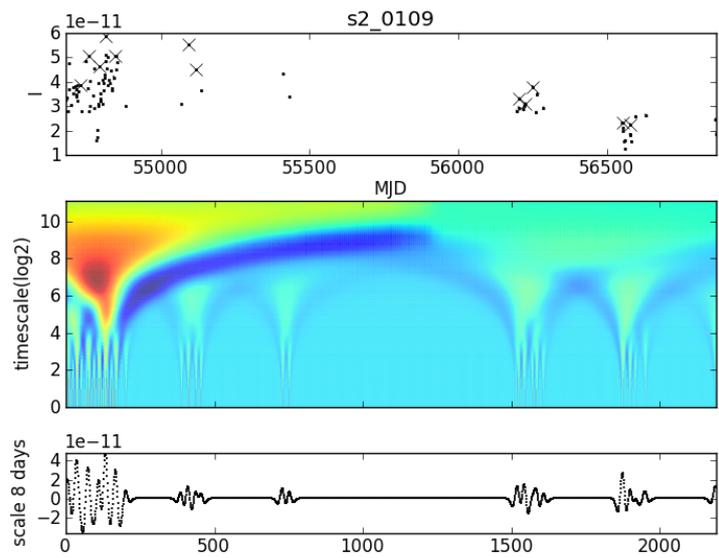


図 7.51: S2 0109+224 のウェーブレット解析の図

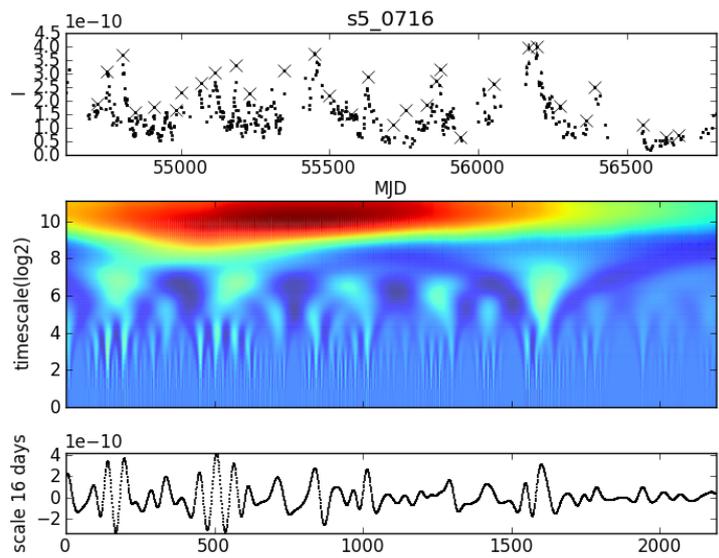


図 7.52: S5 0716+714 のウェーブレット解析の図

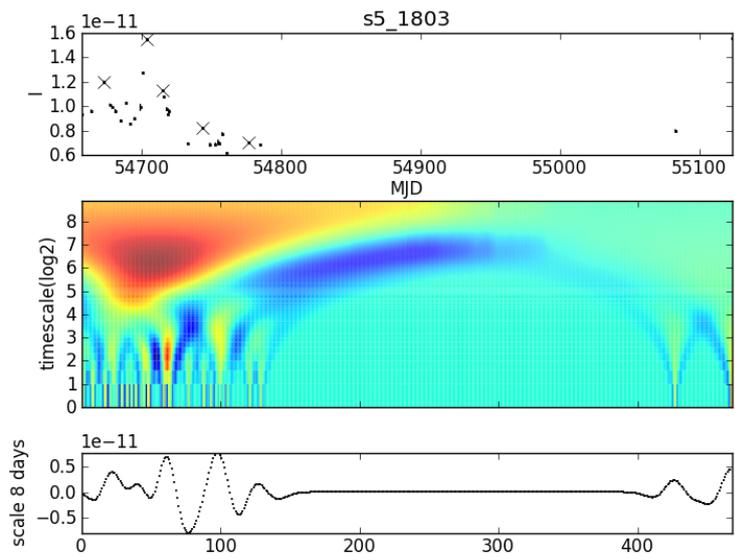


図 7.53: S5 1803+784 のウェーブレット解析の図

謝辞

本論文を作成するにあたり、広島大学経済学部の山田宏さんには大変お世話になりました。活動銀河核のフレア検出に用いたトレンドフィルターを経済の分野で用いられている方で、トレンドフィルター始めるときに資料をいただいたり、貴重なお時間を割いて私の研究についてお話を聞いてくださり、有益なコメントをたくさん頂きました。また、国立天文台の本間希樹さんには活動銀河核の解析にウェーブレットが適しているのではないかという意見を下さり、ウェーブレットの解析方法など教えてくださいました。大阪教育大学の松本桂さんをはじめ学生の皆さんには、V4641 Sgr の観測をして頂き、とても重要なデータとなりました。さらに、解析する際にも質問をさせて頂きましたが、とても丁寧に対応して頂きました。皆様のおかげで、より良い研究を行えたと思っています。ありがとうございました。また、指導教官である植村先生には大変お世話になりました。研究について丁寧に指導して下さい、とても感謝しています。ありがとうございました。さらに、深澤先生をはじめ研究室の皆様には、研究についてだけでなく様々な面で研究生生活を支えてくださいました。皆様には大変お世話になりました。ありがとうございました。

関連図書

- [1] Urry, et al., 1995 PASP, 107, 803
- [2] 柴田一成, 福江純, 松元亮治, & 嶺重慎, 1999, 活動する宇宙 (裳華房)
- [3] 伊藤 亮介 2013 修士論文
- [4] 神田 優花 2013 卒業論文
- [5] <http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/blackholes.html>
- [6] M.Uemura, et al., 2007, IAUS, 238, 465
- [7] Shahbaz, et al., 2008 ApJ, 672, 510
- [8] 千代延真吾 2005 卒業論文
- [9] 東広島天文台 web site
- [10] Watanabe, et al., 2005, PASP, 117, 870
- [11] Kawabata, et al., 2008, SPIE, 7014, 4
- [12] Akitaya, et al., 2004, SPIE, 9147, 4
- [13] 高木 勝俊 2012 卒業論文
- [14] <http://www.vlba.nrao.edu/sites/PICS/pietown.jpg>
- [15] 谷口義明, 2013, 新・天文学事典 (講談社)
- [16] Kim, Koh, Boyd, and Gorinevsky, 2009, SIAM review 51, 2, pp.339-360
- [17] S.J.Kim,K.Koh,S.Bpyd,D.Gorinvsky, et al., 2009
- [18] <http://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.signal.ricker.html>
- [19] ikejiri, et al. 2011, PASJ, 63, 639
- [20] <http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/index.html>
- [21] Kataoka.er al.,2001, ApJ, 560, 659
- [22] Ribo.M, et al., 2004, evn, conf,111

[23] Kimura, et al., 2016, natur, 529, 54

[24] <http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/index.html>

[25] www.ipac.caltech.edu/2mass/