

可視光偏光方位角と電波干渉計画像の相関から探る
活動銀河核ジェットの磁場構造

広島大学理学部物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室
B105913 神田 優花

指導教官：深澤 泰司

主査：植村 誠

副査：両角 卓也

2014年2月10日

概要

活動銀河核とは、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見られる天体である。また、ブラックホールの重力の影響で様々な構造を持っており、その一つとして光に近い速度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。今回は、ジェットを正面から見ているとされるブレイザーに注目し、広島大学かなた望遠鏡で測定された可視光偏光方位角と、海外の電波干渉計で測定されたジェット方向との相関を探った。先行研究でも同様の研究がされてきたが、今回はアウトバースト固有の偏光方位角を求め、さらにデータ数を増やすことで相関関係の普遍性を検証できると考えた。対象天体は全部で36天体あり、その中でストークスパラメーター Q, U が大きく変動しているデータ点を探しだすと16件見つかった。それらの点に対して定常的に変動する成分を差し引くことでアウトバースト固有の偏光方位角を求め、電波ジェット方向と比較した。また、偏光方位角とジェット方向との角度差から理論モデルを基にジェット内部の磁場構造を考察した。さらに、角度差とアウトバーストの規模の関係を検証すると、アウトバーストの変動が大きい時にはジェット方向と偏光方位角が平行になる傾向が見られた。

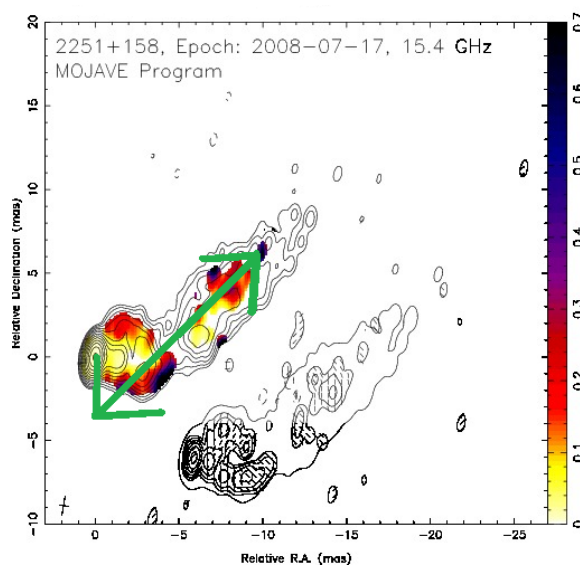


図 1: ブレイザー 3C 454.3 の電波干渉計画像 (等高線) と可視偏光方位角 (実線)

目次

第 1 章 序章	6
1.1 ブレーザー	6
1.1.1 活動銀河核	6
1.1.2 ブレーザーについて	8
1.1.3 放射モデル	10
1.2 ブレーザーと磁場、偏光の関係	12
1.2.1 ジェットと磁場	12
1.2.2 ジェットと偏光	13
1.2.3 超長基線電波干渉法 (Very Long Baseline Interferometry: VLBI)	14
1.2.4 先行研究	15
1.3 本研究の目的	17
第 2 章 かなた望遠鏡と電波望遠鏡	18
2.1 かなた望遠鏡について	18
2.1.1 概要	18
2.1.2 TRISPEC	19
2.1.3 HOWPol	19
2.2 観測	20
2.2.1 偏光	20
2.2.2 画像の一次処理	22
2.2.3 測光	22
2.3 電波望遠鏡について	23
第 3 章 ブレーザー天体の偏光の解析	24
3.1 対象天体	24
3.2 アウトバーストの検出	25
3.2.1 全期間を通じた QU 平面上の外れ値検出によるフレア定義	25
3.2.2 短期間での偏光フラックスの外れ値検出によるフレア定義	28
3.3 アウトバーストの偏光成分の抽出	33
3.3.1 QU 平面から検出したアウトバーストの解析	33
3.3.2 短期間の偏光フラックス変動から検出したアウトバーストの解析	38

第 4 章 考察	43
4.1 アウトバースト成分の可視光偏光方位角と電波ジェットの方法の相関関係	45
4.2 アウトバーストの規模との関係	46
第 5 章 まとめ	48

目次

1	ブレイザー 3C 454.3 の電波干渉計画像と可視偏光方位角	1
1.1	活動銀河核の想像図	6
1.2	AGN 統一モデル	8
1.3	超光速現象の幾何学	9
1.4	ブレイザー天体の SED	10
1.5	シンクロトロン放射の概略図	11
1.6	電磁流体シュミレーション	12
1.7	shock-in-jet モデルの模式図	13
1.8	MHD モデル (磁場がジェットと平行)	13
1.9	MHD モデル (磁場が回転)	13
1.10	shock-in-jet モデル	14
1.11	電波干渉計の模式図	14
1.12	3C 454.3 の電波干渉計画像	14
1.13	クエーサーの角度差ごとのヒストグラム	15
1.14	AO 0235+164 の偏光度とフラックス、偏光方位角の関係	16
1.15	ジェットの方向と偏光方位角との相関	17
2.1	かなた望遠鏡	19
2.2	TRISPEC	20
2.3	HOWPol	20
2.4	Q/I,U/I 平面	21
2.5	アパーチャー測光概念図	22
2.6	VLBA アンテナ	23
3.1	PKS 0048-097 のライトカーブと QU 平面	25
3.2	Mis V 1436 のアウトバースト	26
3.3	3C 371 のアウトバースト (1)	27
3.4	3C 454.3 のアウトバースト (1)	27
3.5	PKS1510-089 のアウトバースト	28
3.6	PKS 0048-097 のライトカーブと P.F. の図	29
3.7	3C 273 のアウトバースト	30
3.8	3C 371 のアウトバースト (2)	30
3.9	3C 454.3 のアウトバースト (2)	31

3.10	BL Lac のアウトバースト	31
3.11	S2 0109+22 のアウトバースト	32
3.12	S5 0716+714 のアウトバースト	32
3.13	AO 0235+164 のアウトバースト	33
3.14	QU 平面のデータ点の変動	33
3.15	Q, U の変動の求め方	34
3.16	3C 454.3 の 1 つ目のアウトバーストの成分分離	35
3.17	3C 454.3 の 2 つ目のアウトバーストの成分分離	35
3.18	3C 371 1 つ目のアウトバーストの成分分離	36
3.19	3C 371 2 つ目のアウトバーストの成分分離	36
3.20	PKS 1510-089 のアウトバーストの成分分離	37
3.21	3C 273 のアウトバーストの成分分離	38
3.22	3C 371 の 3 つ目のアウトバーストの成分分離	39
3.23	3C 454.3 の 3 つ目のアウトバーストの成分分離	39
3.24	BL Lac のアウトバーストの成分分離	40
3.25	S5 0716+714 の 1 つ目のアウトバーストの成分分離	40
3.26	S5 0716+714 の 2 つ目のアウトバーストの成分分離	41
3.27	S2 0109+22 の成分分離	41
3.28	AO 0235+164 の成分分離	42
4.1	3C 371 の VLBI 画像と偏光方位角 (1)	43
4.2	3C 371 の VLBI 画像と偏光方位角 (2)	43
4.3	3C 454.3 の VLBI 画像と偏光方位角 (1)	44
4.4	3C 454.3 の VLBI 画像と偏光方位角 (2)	44
4.5	3C 273 の VLBI 画像と偏光方位角	44
4.6	PKS 1510-089 の VLBI 画像と偏光方位角	44
4.7	AO 0235+164 の VLBI 画像と偏光方位角	45
4.8	BL Lac の VLBI 画像と偏光方位角	45
4.9	S5 0716+714 の VLBI 画像と偏光方位角	45
4.10	S2 0109+22 の VLBI 画像と偏光方位角	45
4.11	アウトバーストの大きさに対するジェット方向の相関	47

表 目 次

1.1	活動銀河核ジェットの物理量	8
1.2	AO 0235+164 の偏光度と偏光方位角	16
2.1	かなた望遠鏡の性能、仕様	18
2.2	TRISPEC の仕様	19
2.3	HOWPol の仕様	20
2.4	世界の主な電波望遠鏡	23
3.1	かなた望遠鏡で観測している全ブレイザー天体リスト	24
3.2	条件ごとの探し出した天体名	29
3.3	アウトバースト成分の偏光方位角 (1)	37
3.4	アウトバースト成分の偏光方位角 (2)	42
4.1	電波干渉計画像と可視偏光方位角との相関	46

第1章 序章

1.1 ブレーザー

1.1.1 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見られる天体であり、そのブラックホールにガスなどの物質が降着して重力エネルギーを解放し強い放射が発生している。この重力の影響で降着円盤やトーラス、ジェットなど複雑な構造を持つ。(図 1.1) また、AGN は電波から X 線までの広い波長域での放射に加え、可視光や紫外線などで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。

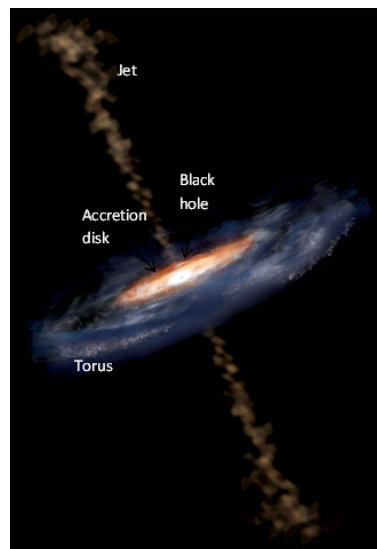


図 1.1: 活動銀河核の想像図 [1]

この AGN は、研究の歴史的な経緯や発見の手段などの違いで様々な種類に分けられている。以下では、その名称と主な性質を述べる。

・クエーサー (Quasar)

AGN の中でもっとも明るい種類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、光学写真に星のように写っていたので "準恒星状電波源 (quasi-stellar radio sources) " と名付けられ、そこからクエーサーとなった。クエーサーでは、銀河全体の放射量の 100 ~ 1000 倍のエネルギーを銀河中心領域から放射している。クエーサーの 9 割は電波が弱いクエーサーであり、残りの 1 割は強い電波源として観測される。

電波の放射機構はシンクロトロン放射であり、そのスペクトルは単位振動数あたりの放射強度を F_ν とすると $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ である。数 GHz の振動数でのスペクトルの傾き α が 0.5 よりも大きいクェーサーを SSRQ (steep spectrum radio-loud quasar) と呼び、 α が 0.5 よりも小さいクェーサーを FSRQ (flat spectrum radio-loud quasar) と呼ぶ。

- ・ブレイザー (Blazar)

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イザーと呼ぶ。ブレイ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。また、放射するエネルギーはクェーサーと同程度となる。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。

- ・電波銀河 (Radio galaxy)

電波ジェットを持つ AGN を電波銀河と呼び、電波ジェットの長さは数 100kpc から 1Mpc にまで及ぶ。放射エネルギーでは多くがクェーサーより少し暗い。一般的に電波ジェットの先端部はローブ状に広がっており、ローブの先端が明るく見えたり、ローブの中に高温領域を持つものは FR II 型と呼ばれている。一方で、先端部に行くほど暗くなっているものを FR I 型と呼ぶ。

- ・セイファート銀河核 (Seyfert Nuclei)

セイファート銀河は光度がクェーサーより 2~3 桁暗く電波が弱い AGN である。初めて近傍の AGN の系統的な研究をしたセイファートから名付けられた。可視光の輝線スペクトルの特徴から 1 型と 2 型の 2 種類に分類される。全体の 80% が 2 型であり、幅の狭い輝線しか見られないという特徴がある。それに対し、1 型は幅の広い輝線と、狭い輝線のどちらも見られる。

- ・ライナー (LINER)

ライナーはセイファート銀河よりさらにエネルギー放射の弱い AGN であり、低電離銀河中心核放射領域 (low-ionization nuclear emission-line region) の略称である。近傍で観測される銀河の約 1/3 はこのライナーである。

- ・スターバースト銀河 (Starburst galaxies)

銀河中心核周辺で活発な星形成を行なっている銀河をスターバースト銀河と呼ぶ。スターバーストとは、太陽の 10 倍以上の質量を持つ星が一年に約 1 万個から 10 万個生成される現象である。近傍の渦巻銀河の約 1 割はこのスターバースト銀河だとされている。また、スターバースト銀河は晩期型の渦巻銀河に多く、逆にセイファート銀河は早期型の渦巻銀河に多いとされる。

また上述のすべての種類の AGN をまとめて、幅の広い輝線と幅の狭い輝線の両方が存在するスペクトルをもつ天体を 1 型活動銀河核、幅の狭い輝線のみが存在するスペクトルを持つ天体を 2 型活動銀河核と呼ぶこともある。しかし 2 型活動銀河核には幅の広い輝線を出す領域が存在しないという事ではなく、AGN の観測する方向によって異なるという活動銀河核の統一モデルが考えられている。この統一モデルの描像を図 1.2 に示す。

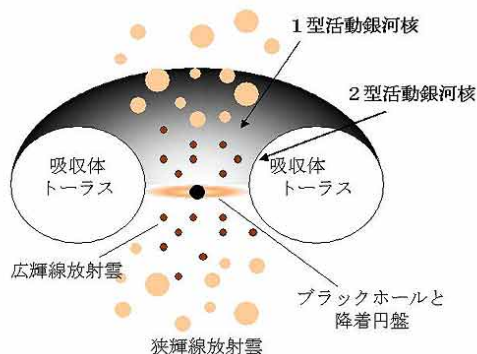


図 1.2: AGN 統一モデル [2]

具体的には、活動銀河核の中心には質量が $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ 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。降着円盤からの放射では、幅の広い輝線を出す領域 (broad line region: BLR) が電離、励起される。この BLR が直接見える、つまり円盤のほぼ真上から見ている天体が 1 型活動銀河核であり、狭い輝線しか観測されない 2 型活動銀河核は BLR からの放射が見えないので円盤をほぼ真横から見ているとされる。幅の狭い輝線を出す領域 (narrow line region: NLR) は 1 型と 2 型両方で観測できるため、外側に存在すると考えられる。さらに、ジェットを伴うか伴わないかで電波銀河かそれ以外かに分類される。また、ブレイザーはジェットを正面から見ていると考えられている。

1.1.2 ブレイザーについて

ブレイザーは、前述の通り活動銀河核のジェットを正面から見ていると考えられている。このジェットとは、ブラックホールの近くから光速に近い速度で放出されるプラズマの流れであり、電波からガンマ線までの全ての波長で放射している。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。しかし実際にジェットがどのようにして生成され、細長い範囲に集中して光速に近い速度まで加速されるのか解明されていない。現在もジェットについての研究が熱心に行われている。

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効果が起こる。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。

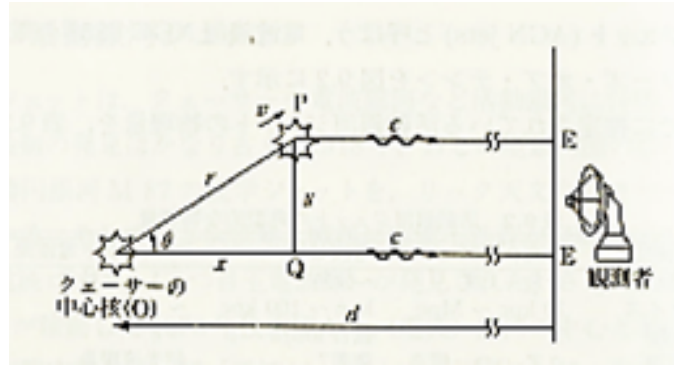


図 1.3: 超光速現象の幾何学 [3]

図 1.3 のようにレーザーの中心核が点 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角度 θ の方向に速度 v で飛び出たとする。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、 $t_1 = d/c$ 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 の間に放射源が 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 が光速に近い場合を考えているので見かけの速度 u は光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 1.3 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

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

$$\nu_{obs} L_{\nu_{obs}} = \delta^4 \frac{\nu_s L_{\nu_s}}{4\pi d^2}$$

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 $\delta \sim 10$ の値を取るので 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。これによりブレーザーでは短期間での激しい光度変動が見られ、ジェットからの放射が卓越しているため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ブレーザーが適した天体であることが分かる。

1.1.3 放射モデル

図 1.4 に一般的なブレーザーの多波長スペクトル (Spectral Energy Distribution: SED) を載せる。

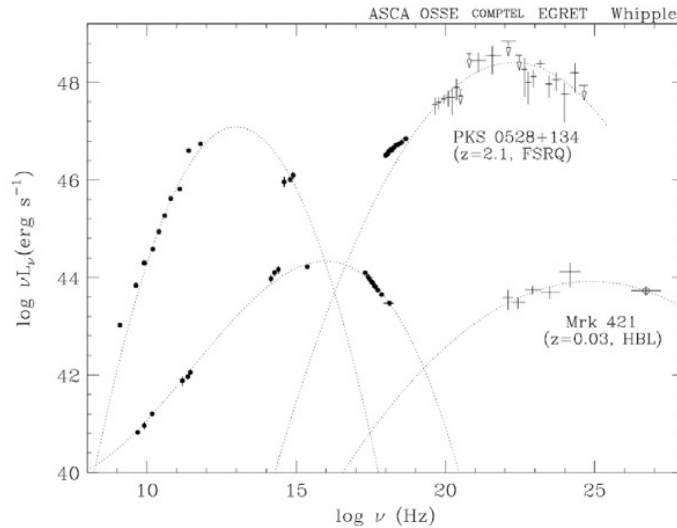


図 1.4: ブレーザー天体の SED[4]

前述の通り、ブレイ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、図 1.4 の通り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。(図 1.5)

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。

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

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

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。

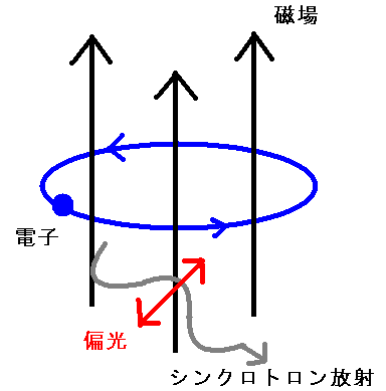


図 1.5: シンクロトロン放射の概略図

1.2 ブレーザーと磁場、偏光の関係

1.2.1 ジェットと磁場

ジェットは細長く収束されており、さらにこの構造が数 Mpc まで維持されている。このような構造を説明するために磁場の役割が重要であると考えられており、ジェット内の磁場構造を探ることで理論モデルを検証することができる。ここでは、活動銀河核のジェット周辺の磁場構造について電磁流体力学 (MHD) に基づいたジェット成分の理論モデルと時間変動を説明するための shock-in-jet モデルを簡単に説明する。

・電磁流体力学 (MHD) モデル

現在、活動銀河核ジェットの動力源の一つとして降着円盤が考えられており、加速機構として磁気圧が考えられている。それが電磁流体力学によるモデルであり、磁力線が貫いている降着円盤が回転することでブラックホールの周りに渦巻状の磁場構造が形成され、磁場の力が円盤と垂直に働くことでジェットが噴出すると考えられている。そのときの磁場成分について現在二つの向きが考えられている。一つ目はジェットの軸と平行に磁場成分があると考えられており、偏光方位角はジェットの方向と垂直になると考えられる。二つ目はジェット軸の周りを磁場成分がらせん状に回転すると考えられており、このらせん磁場に沿って放射領域が移動する場合は、偏光方位角も時間ごとに回転すると考えられる。また、二つの磁場成分が合わさったジェットの場所によって磁場の流れが変わるという考えもある。以下に、電磁流体数値シミュレーション (Shibata & Uchida 1990) の図を載せる。

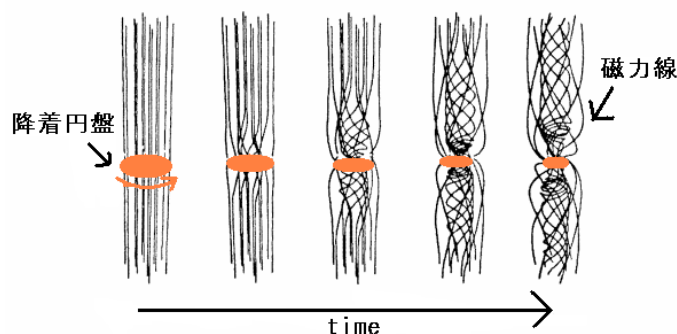


図 1.6: 電磁流体数値シミュレーション [5]

・shock-in-jet モデル

shock-in-jet モデルとは、ブランドフォードらによって理論的に計算されたモデルである。ブラックホールに周りの物質が落ち込んで一部はジェットとして放出される。放出されるプラズマの密度は完全に一様ではなく、密度の高いプラズマ塊が放出されたものをシェルと呼ぶ。シェルは、ジェットの中を相対論的な速度で移動しており速度の差によって他のシェルと衝突したり、他の物質と相互作用したりする。そして無衝突衝撃波が発生し、このショックにより磁場が圧縮される。圧縮された磁場は一様ランダムな磁場から二次平面に揃った磁場になる。すると、磁場が揃うことで偏光度も上昇する。つまり、磁場はジェットの方向と垂直方向となる。また、偏光方位角は磁場と垂直になるのでジェットの向きと平行になる。以下に、shock-in-jet モデル模式図を載せる。

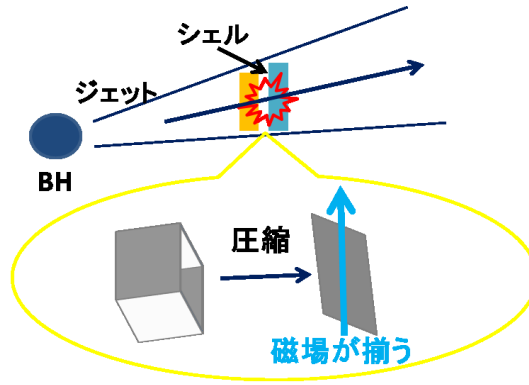


図 1.7: shock-in-jet モデルの模式図

1.2.2 ジェットと偏光

前述のようにジェット周辺の磁場構造によってジェットに対する磁場の向きが異なる。偏光の向きは磁場と垂直になるのでモデルによって偏光の向きが変わることになる。まず、MHD モデルのジェット軸に磁場成分が平行になるときは偏光の向きはジェットと垂直になると考えられる。また、磁場成分がらせん状に回転するときには偏光方位角も回転すると考えられる。さらに、shock-in-jet モデルではジェットと垂直な方向に磁場が揃う。つまりジェットの向きと偏光の向きが平行になると考えられる。以下に考えられる偏光方位角の向きを示した。今回は電波干渉計画像で見るジェットの方向と可視光偏光方位角を比較し、偏光方位角がジェットの向きと平行か垂直か、またはそれ以外の三つに当てはめて考察した。

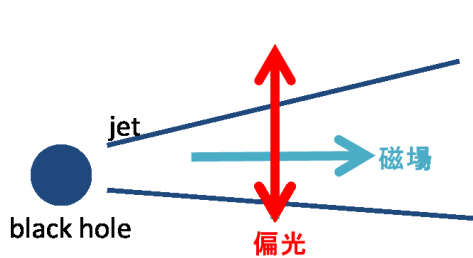


図 1.8: MHD モデル (磁場がジェットと平行)

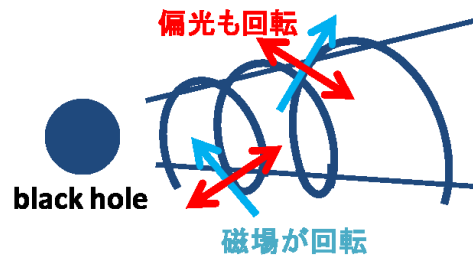


図 1.9: MHD モデル (磁場が回転)

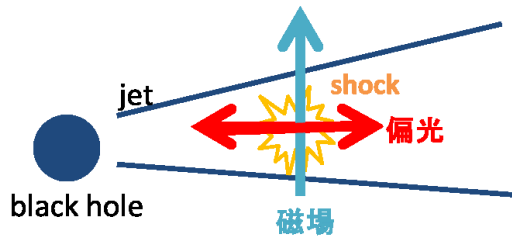


図 1.10: shock-in-jet モデル

1.2.3 超長基線電波干渉法 (Very Long Baseline Interferometry: VLBI)

VLBI とは、数十億光年先から放射される電波を、複数のアンテナで同時に受信しその到達時刻の差を精密に計測する技術である。(図 1.11)

この干渉法は、電波望遠鏡を 2 台以上同時に用いて 1 つの天体を観測しそれぞれの観測データを合成する観測設備であり VLBI でもこの技術が基となっている。電波望遠鏡の角度分解能はアンテナの直径を D 、電波の波長を L とすると $L/D[\text{rad}]$ と表せる。干渉計でも同様に、 D を複数のアンテナ間の距離と置き換えて表せるので広い範囲に電波望遠鏡を設置することで高い分解能が得られる。実際に、電波望遠鏡は世界中の様々な場所に設置されており、これにより活動銀河核の中心構造も観測できる。つまり、AGN のジェットの本質や AGN を取り巻くプラズマの構造を観測することができる。また、複数のジェットを観測できるのは電波観測のみである。図 1.12 は VLBA で観測されたブレイザー天体 3C 454.3 の電波干渉計画像である。また典型的な AGN はこれまで VLBI を使って数 pc (ブラックホール半径の $\sim 10^3$ 倍) 程度の分解能で観測されており、可視光の変動タイムスケールから可視光は $< 10\text{pc}$ から出ていることが分かっている。今回は VLBI では大局的なジェットの本質、可視光変動ではジェットの本質の構造をみることでジェットの構造をより詳しく知ることができると考えている。

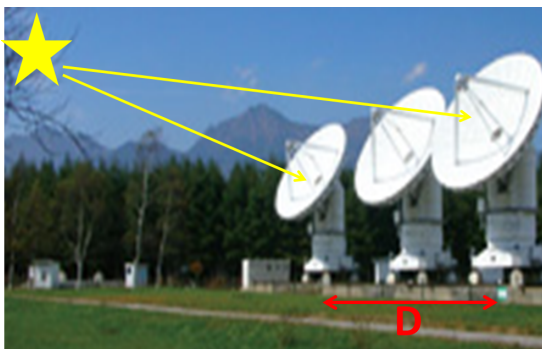


図 1.11: 電波干渉計の模式図 [6]

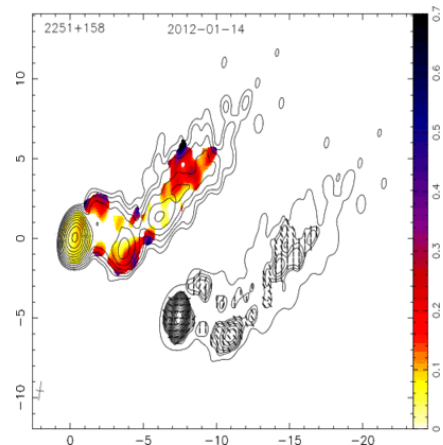


図 1.12: VLBA で得られたブレイザー天体 3C 454.3 の電波干渉計画像 [7]

1.2.4 先行研究

これまで述べてきたように、可視光で観測されるタイムスケールの短いアウトバースト現象を用いると、電波干渉計では分解することができないようなブラックホール近傍の情報を得ることができる。特に、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。

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。

Impey, et al. (1991)[8] では、クエーサーが 30 天体と BL Lac 11 天体において電波ジェットの方向と可視光の偏光方位角の関係が調べられた。その結果、クエーサーでは 30 天体中 60%の天体がジェットの方向に 20° 以内で角度が一致し、BL Lac 天体では 11 天体中ほぼ全ての 10 天体が 25° 以内で一致すると報告された。図 1.13 は、クエーサーの電波でのジェットの方向と可視偏光方位角との角度差 (10° ごと) の数を示している。

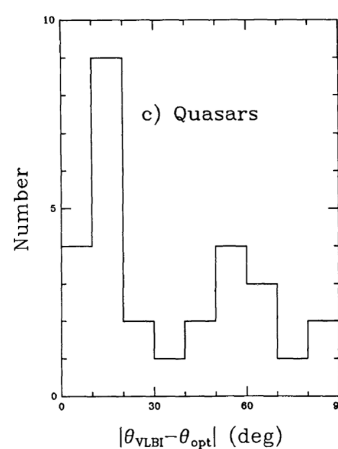


図 1.13: クエーサーの角度差ごとのヒストグラム [8]

しかし、彼らを用いた可視光の偏光方位角は観測値そのものであり、アウトバーストの変動成分のみを抽出したわけではない。例えば、Hagen-Thorn, et al.(2008)[9] では、ブレーザー AO 0235+164 の観測から、アウトバーストの時期のみ偏光方位角が電波ジェットの方向に近づくことを示した。表 1.2 は、偏光度が 30%を超えた時 (2006 年 12 月) の数時間スケールのアウトバーストの偏光度と偏光方位角の値である。また、図 1.14 の左の図は可視のフラックスに対する偏光度、右の図は偏光方位角に対する偏光度、点線がジェットの方向 (-15°) を表している。この図より増光時に偏光度が高くなるのが分かる。また偏光度が高いとき (20 ~ 30%程度)、ジェットの方向に偏光方位角の値が近づいているのが分かる。このように AO 0235+164 では数時間スケールのフレアの中で光度が高い時期ほど偏光方位角がジェット方向に平行になるという傾向が得られている。この結果は、アウトバースト成分と定常的な成分とは偏光の特性が異なり、両者を分離して議論する必要があることを意味している。

MJD	p(%)	Θ (deg)
54077.3307	32.7	149.5
54077.4282	27.7	152.2
54077.4433	25.9	153.8

表 1.2: 観測された高い偏光度と偏光方位角 [9]

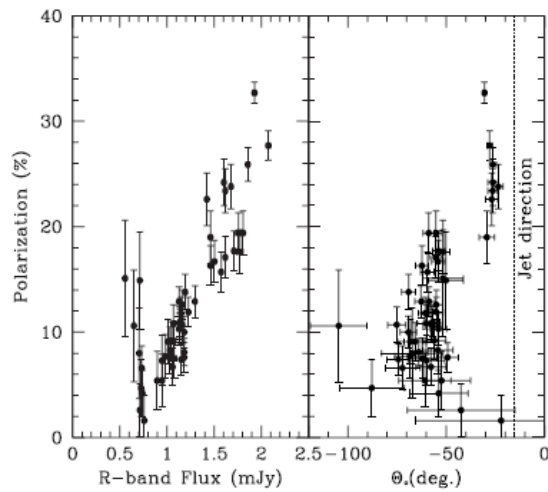


図 1.14: 偏光度とフラックス、偏光方位角の関係 [9]

そこで、伊藤 亮介 2013 年度博士論文 [10] 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法の相関を調べた。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、電波ジェットの方向と比較している。図 1.15 には 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。

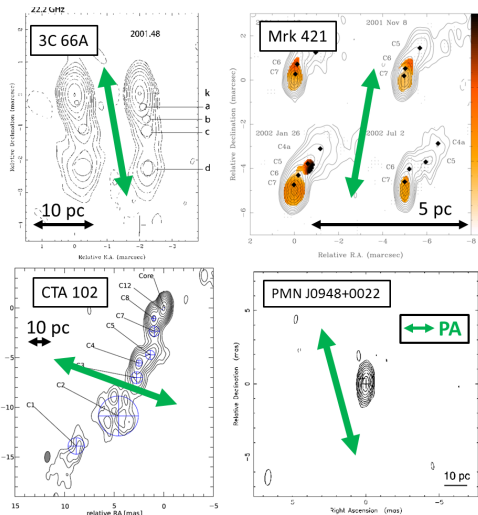


図 1.15: ジェット方向と偏光方位角との相関 [10]

そこでは 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。また、これらの天体は CTA 102 が FSRQ、他の 3 天体が BL Lac に分類することもでき、Impey, et al.(1991)[8] が報告した、FSRQ よりも BL Lac のほうがジェットの方向と偏光方位角が平行になるという傾向とも一致している。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。広島大学かなた望遠鏡ではこれまで約 40 天体のブレーザーを観測してきたが、伊藤らが行ったような、アウトバースト固有の偏光方位角を抽出し、電波ジェットの方向と比較するような解析は未だ行われていない。ブレーザーは常に時間変動しており、振幅の大きいアウトバーストから定常成分を差し引くのは容易だが、振幅の小さなアウトバーストについてはその検出方法と定常成分の定義は自明でない。

1.3 本研究の目的

前述の通り、ブレーザーではジェット起源の放射が観測できる。ジェットには磁場が伴っており、加速された電子が磁力線に巻き付きながら高速に運動するときに偏光が生じる。電波や可視光では、この偏光も観測されている。広島大学かなた望遠鏡では長期に渡ってブレーザー天体の観測を行っており、偏光方位角と偏光度に大きな変動が見られる天体が存在する。先行研究ではブレーザー天体 4 天体に対してアウトバースト成分の可視光偏光方位角と電波干渉計画像で見えるジェットの方向の相関が調べられており、4 天体中 3 天体が相関が見られるという結果であった。しかし、系統的な結果を得るには天体数が少ないので今回は天体数を増やすことで相関関係の普遍性を調べる。さらに、そこから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。

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

かなた望遠鏡は口径 1.5 m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。東広島天文台が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[11])。かなた望遠鏡は *Fermi* とのブレイ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、制作された。よって、機動性に優れ、方位 $5^\circ/\text{sec}$ 、光度 $2^\circ/\text{sec}$ という 1.5 m望遠鏡としては世界最速級の駆動速度を持つ。かなた望遠鏡では現在、HOWPol、高速カメラ、HONIRの3つの観測装置が運用されている。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

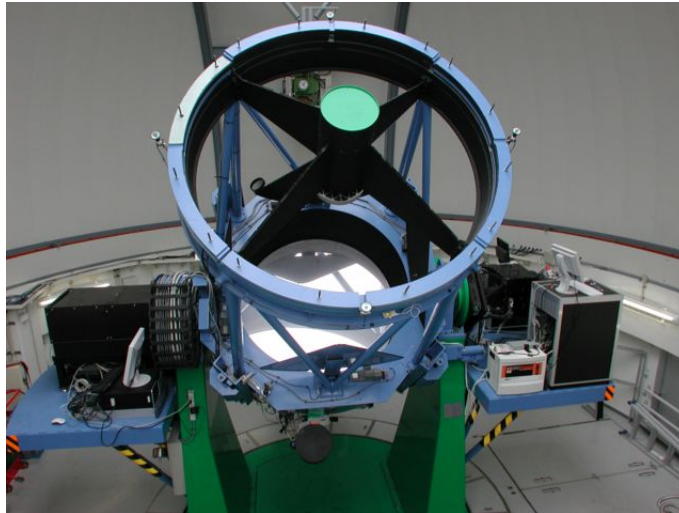


図 2.1: かなた望遠鏡 [12]

2.1.2 TRISPEC

今回の解析では、主に TRISPEC (Triple Range Imager and SPECTrograph : TRISPEC) という観測装置で得られたデータを用いた。これは、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。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。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 10σ)

2.1.3 HOWPol

HOWPol (一露出型可視広視野偏光撮像器) は広島大学グループを中心に開発した観測装置であり、一回の露出で直線偏光パラメーターの導出が可能となる。突発天体の観測のため常時設置が必要となり、そのため、かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付けている。広視野撮像モード、偏光撮像、分光のモードを搭載している。今回の解析では、TRISPEC に加えて HOWPol でのデータも用いている。HOWPol の仕様を表 2.3 に、全体像を図 2.3 に示す。

波長域 観測モードと視野	可視 450nm - 1100nm 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ケ (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



図 2.2: TRISPEC[12]

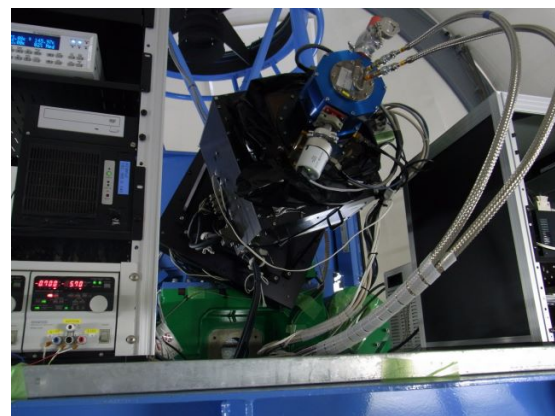


図 2.3: HOWPol[12]

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

光 (電磁波) は電場と磁場が互いに直行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。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。

$$E_x = \epsilon_x(t) \cos(2\pi\nu t)$$

$$E_y = \epsilon_y(t) \cos(2\pi\nu t + \delta)$$

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。

$$I = \langle \epsilon_x^2 \rangle + \langle \epsilon_y^2 \rangle$$

$$Q = \langle \epsilon_x^2 \rangle - \langle \epsilon_y^2 \rangle$$

$$U = 2(\epsilon_x \epsilon_y \cos \delta)$$

$$V = 2(\epsilon_x \epsilon_y \sin \delta)$$

ここでは、 I は総光量、 Q と 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 では、観測できるのが直線偏光のみとなるので、以下からは直線偏光について述べる。直線偏光のみを取り出す場合は、 V を I に組み入れて $V = 0$ として良い。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。

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \tag{2.1}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \tag{2.2}$$

また、 $Q/I, U/I$ を横軸、縦軸とした $Q/I, U/I$ 平面を図 2.4 に示す。

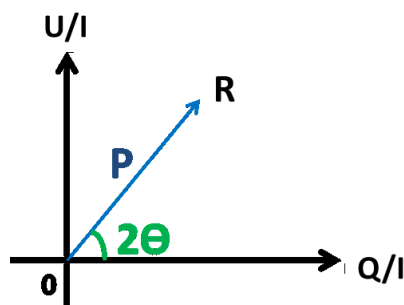


図 2.4: $Q/I, U/I$ 平面

このように $Q/I, U/I$ は互いに直行する座標系のパラメーターとみなすことができる。図 2.4 にあるように $Q/I, U/I$ 平面では線分 OR の長さが偏光度 P 、その線分と Q/I 軸とのなす角度が偏光方位角の 2 倍となる。

2.2.2 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ト値が含まれ、これをダークフレームと呼ぶ。取得した画像とダークフレームとの差をとることで、ダークとバイアスが除去された画像となる。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当てた画像を撮像し、バイアス引きをした画像から割る必要がある。以上で1次処理は完了となる。

2.2.3 測光

1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。

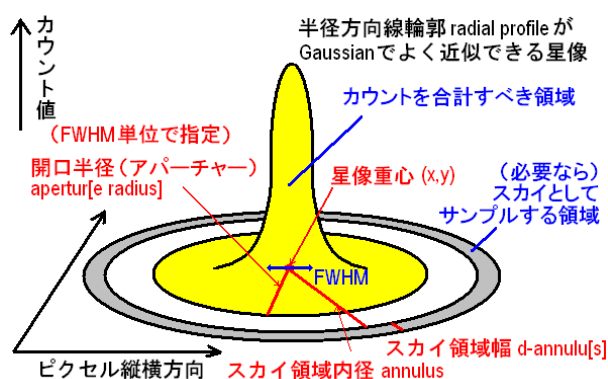


図 2.5: アパーチャー測光概念図 [13]

・アパーチャー (開口) 測光 (図 2.5)

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さらに精度の良い結果が得られる。

2.3 電波望遠鏡について



図 2.6: 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 2.6 は VLBA 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 2.4 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 2.4: 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 (Very Long Baseline Array: 超長基線アレイ) 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 ブレーザー天体の偏光の解析

3.1 対象天体

可視での偏光方位角と電波でのジェット方向をみるため、かなた望遠鏡で観測されており且つ VLBI で観測されている天体を探し出した。かなた望遠鏡でこれまで観測されてきたブレーザー天体は以下の表の通りである。FSRQ が 13 天体、BL Lac が 29 天体、合計 42 天体のデータがこれまでに得られている。

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 3.1: かなた望遠鏡で観測している全ブレーザー天体リスト [16]

VLBI のデータは MOJAVE(Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments) Program Homepage[7] にあるものを用いた。ここには VLBA の 15GHz で観測された電波干渉計画像があり、全体の 2/3 は 1994 年から 2002 年の間に観測されており、新しいデータでは 2013 年に観測されているものもある。その頻度は主に数ヶ月であり、中には 1 年以上観測されていない天体もある。表 3.1 の天体の中で MOJAVE Program Homepage にデータが置かれていない天体や、かなた望遠鏡で観測されたデータが数個しかない天体もあり、それらを除くと FSRQ が 9 天体、BL Lac が 23 天体、合計 32 天体となった。(表 3.1 の天体名の横に*を付けてした天体)

3.2 アウトバーストの検出

今回は、かなた望遠鏡で得られたおよそ三年分のデータを用いた。そのデータから上記でも述べたようにストークスパラメーター Q, U や、P.F.(Polarized Flux) を求め、さらにアウトバースト成分の偏光方位角を求めた。ブレーザーの時間変動はそのタイムスケールが数日から数年と幅広く、しかも観測データは天候や季節の影響で均一的な時系列データではない。そのため、観測データ中のフレア期間の定義は自明ではなく、何らかのしきい値を定めることでフレアを定義する必要がある。本論文では以下の二通りの方法でフレアを定義した。

3.2.1 全期間を通じた QU 平面上の外れ値検出によるフレア定義

ブレーザー天体のアウトバースト成分の偏光方位角を求めるため、ライトカーブと章 2.2.1 で述べたストークスパラメーター Q, U をそれぞれ縦軸、横軸にとった QU 平面と、 Q と U をそれぞれ光度 I で割った $Q/I, U/I$ の平面を同時に見られる図を作成した。例として PKS 0048-097 の図を以下に載せる。(図 3.1)

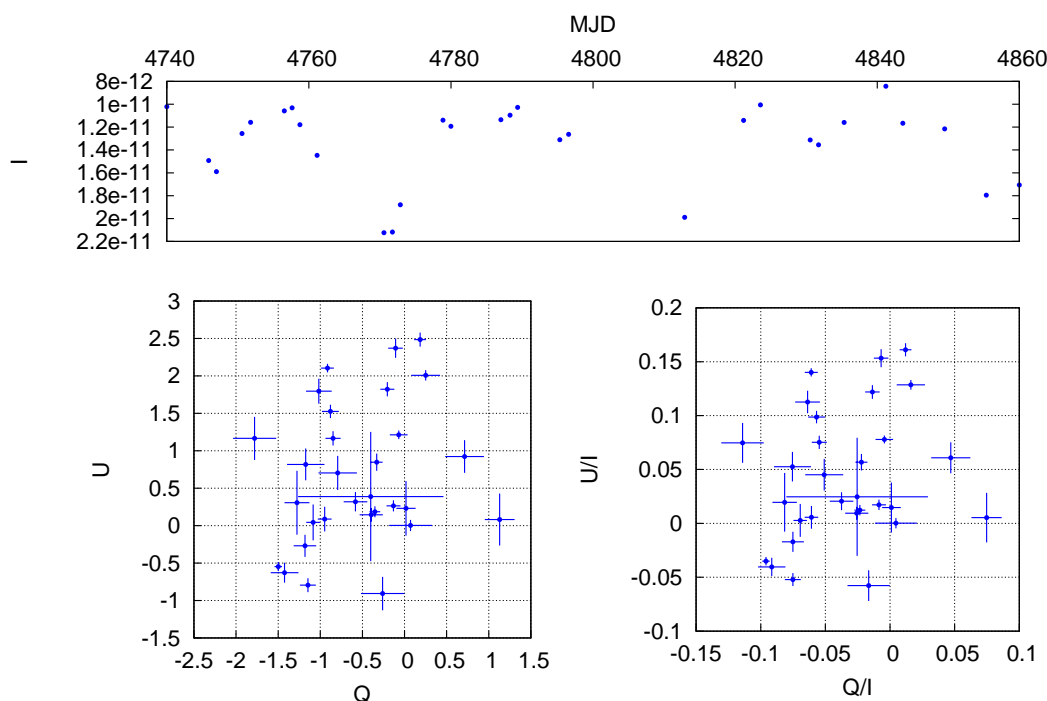


図 3.1: PKS 0048-097 のライトカーブ (上) と QU 平面 (下)

図 3.1 と同様に、全ての天体についても作成した。

この中から、アウトバースト成分の偏光方位角を探し出すために、 QU 平面もしくは $Q/I, U/I$ の平面上で全データ点のばらつきから大きく外れているものを探しだした。つまり、アウトバーストしているときに

Q か U かのどちらかが大きく変動していると考えた。今回は、大きく外れている点をばらつきから 3σ (σ : 標準偏差) 以上の点とした。

この条件で見つかった天体は、7天体あった。しかし、図 3.2 のように 3σ 以上の点 (赤) が見つかったが前後のデータ点が少なくアウトバースト成分が見られない天体もあった。本論文ではアウトバースト成分の偏光を議論するために、アウトバースト前後のデータからアウトバースト以外の成分を差し引く必要がある。図 3.2 のようなアウトバーストの場合、その直前のデータがないために解析ができない。

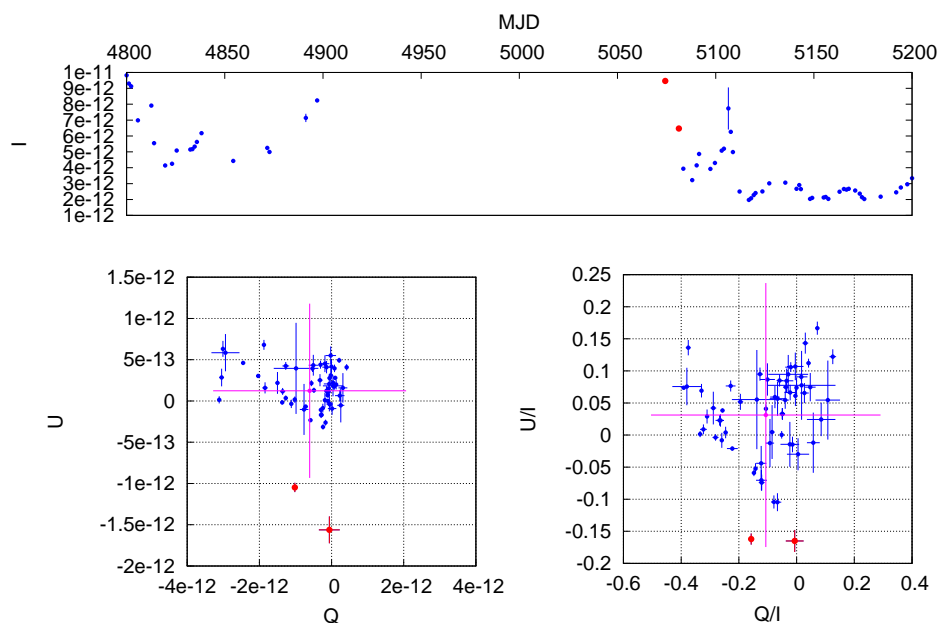


図 3.2: Mis V 1436 のアウトバースト。アウトバーストは赤点で示されている。

それらを除いて解析できると判断した天体は 3C 371, 3C 454.3, PKS1510-089, の 3 天体、 3σ 以上のデータ点は 6 個見つかった。以下に、その 3 天体のライトカーブ、QU 平面の図を載せる。この図の中の赤色の点が 3σ 以上の点、ピンク色の線が 3σ の範囲を表している。

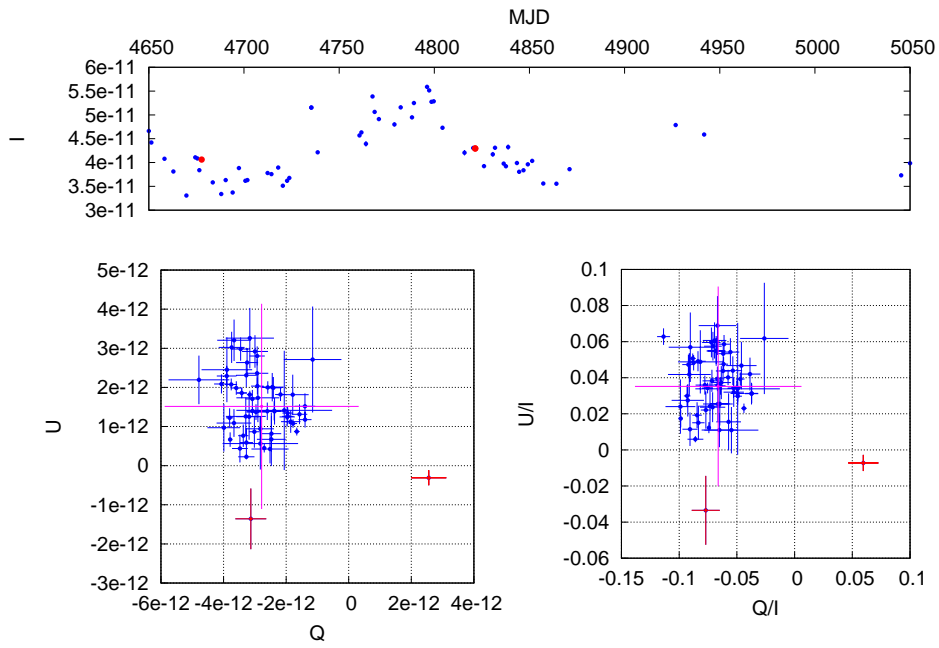


図 3.3: 3C 371 のアウトバースト (1)

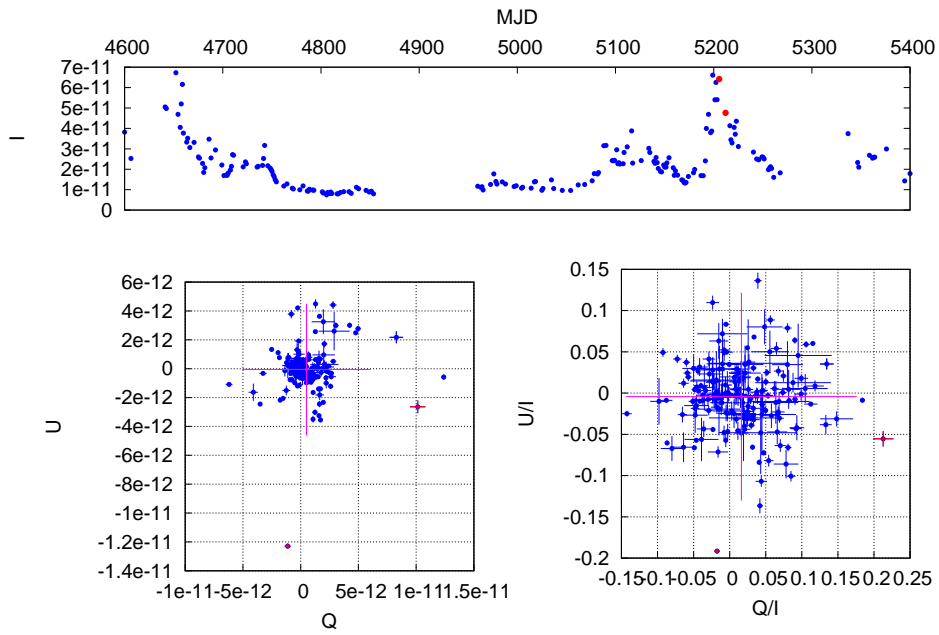


図 3.4: 3C 454.3 のアウトバースト (1)

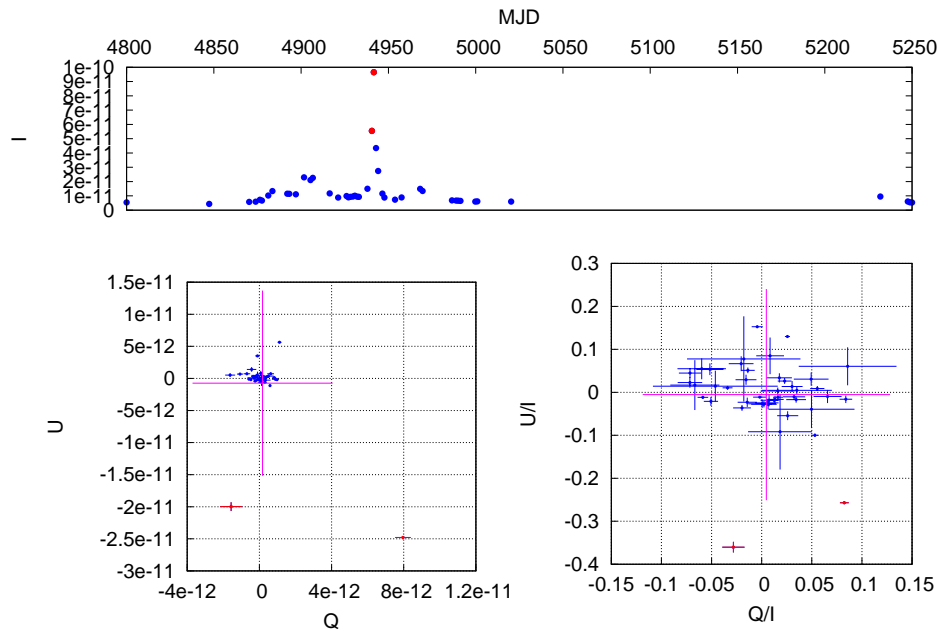


図 3.5: PKS1510-089 のアウトバースト

3.2.2 短期間での偏光フラックスの外れ値検出によるフレア定義

3.2.1 と同様に Q と U が大きく変動したデータ点を探し出すため、P.F.(Polarized Flux) の図を作成した。P.F. の定義は以下の通りである。

$$P.F. = \sqrt{Q^2 + U^2}$$

例として PKS 0048-097 の図を以下に載せる。(図 3.6)

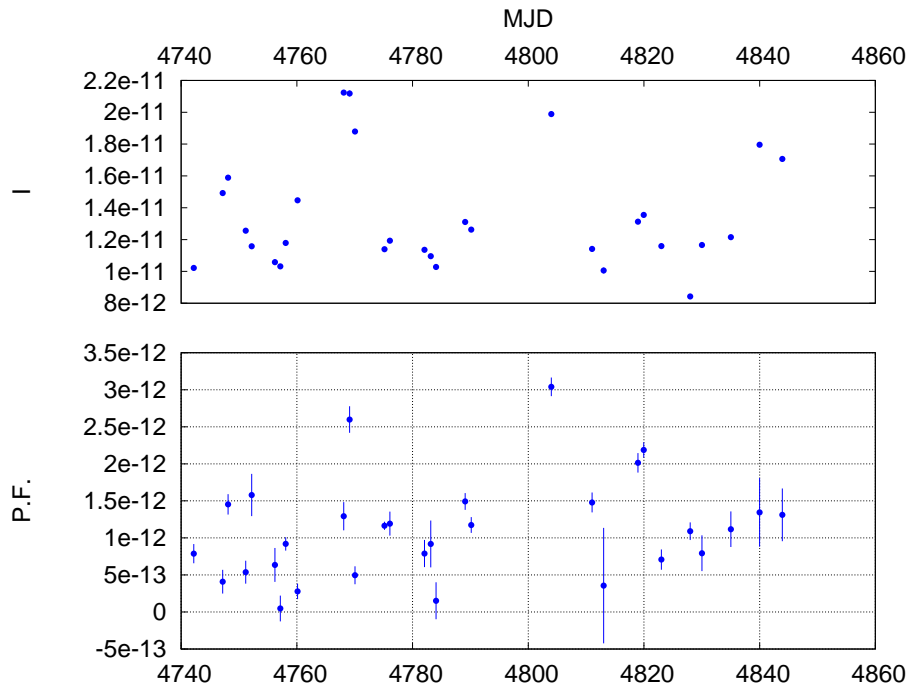


図 3.6: PKS 0048-097 のライトカーブ (上) と P.F. の図 (下)

この図で短期間で大きく変動している P.A. を探しだすため、ある期間 (30 日など) で区切り、さらにその中でばらつきが 3σ もしくは 2σ 以上のものを取り出した。以下にそれぞれの条件と、見つかった天体名を示す。(表 3.2)

ばらつき	期間 (日)	天体名
3σ	30	3C 454.3, BL Lac, S2 0109+22, S5 0716+714 AO 0235+164
3σ	40	3C 273
2σ	30	3C 371

表 3.2: 条件ごとの探し出した天体名

表 3.2 では前の方法で見つかったデータ点を除いており全部で 7 天体、データ点は 9 個見つかった。以下に、その 7 天体のライトカーブ、P.F. の図を載せる。この図の中で、赤色の点がこの方法で見つかったデータ点である。また、前の方法で見つかったデータ点は青色としている。

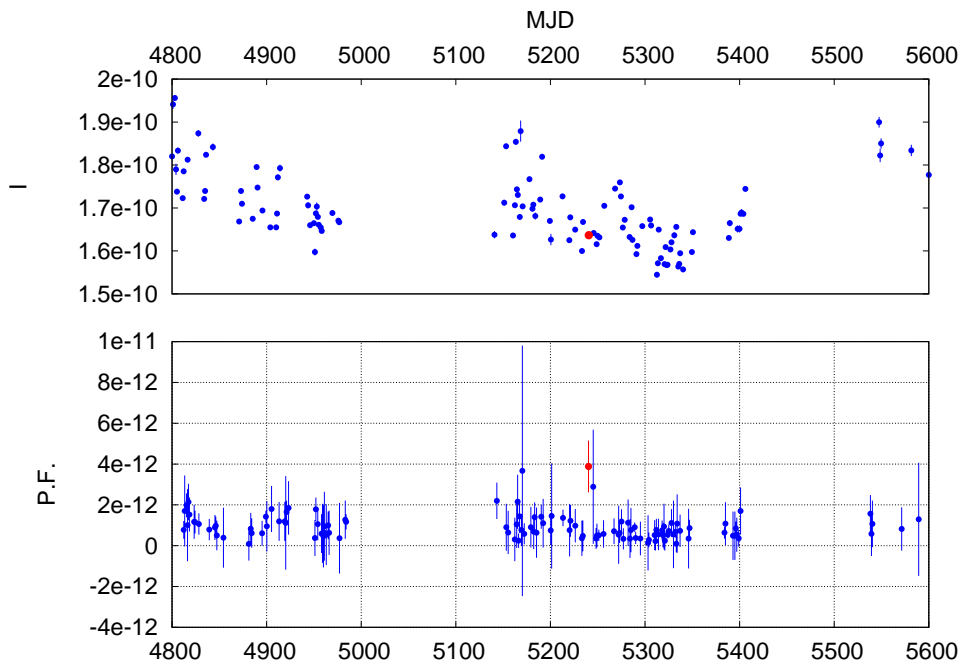


図 3.7: 3C 273 のアウトバースト。アウトバーストは赤点で示されている。

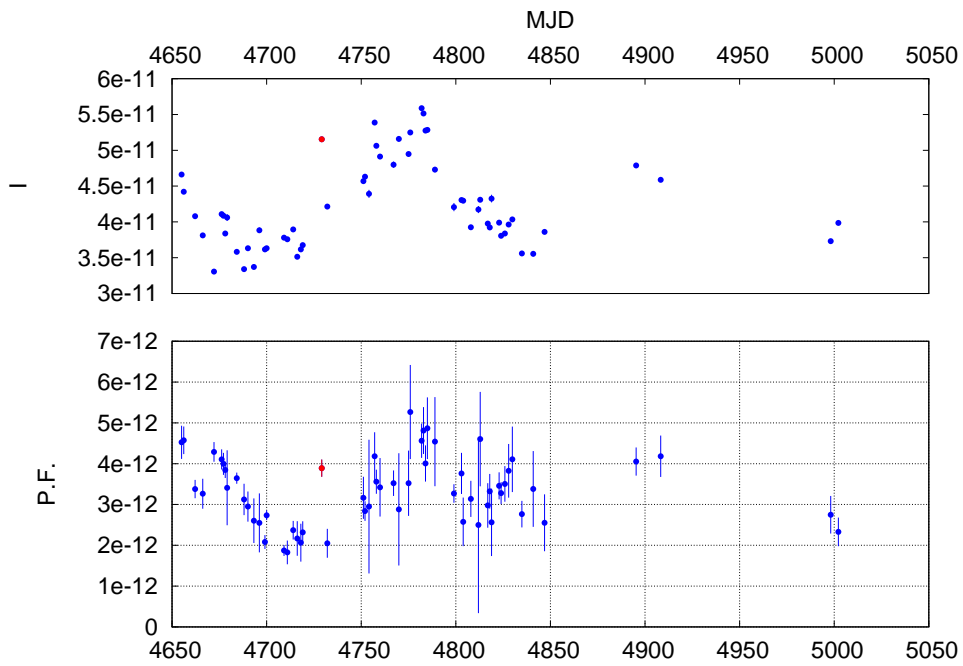


図 3.8: 3C 371 のアウトバースト (2)

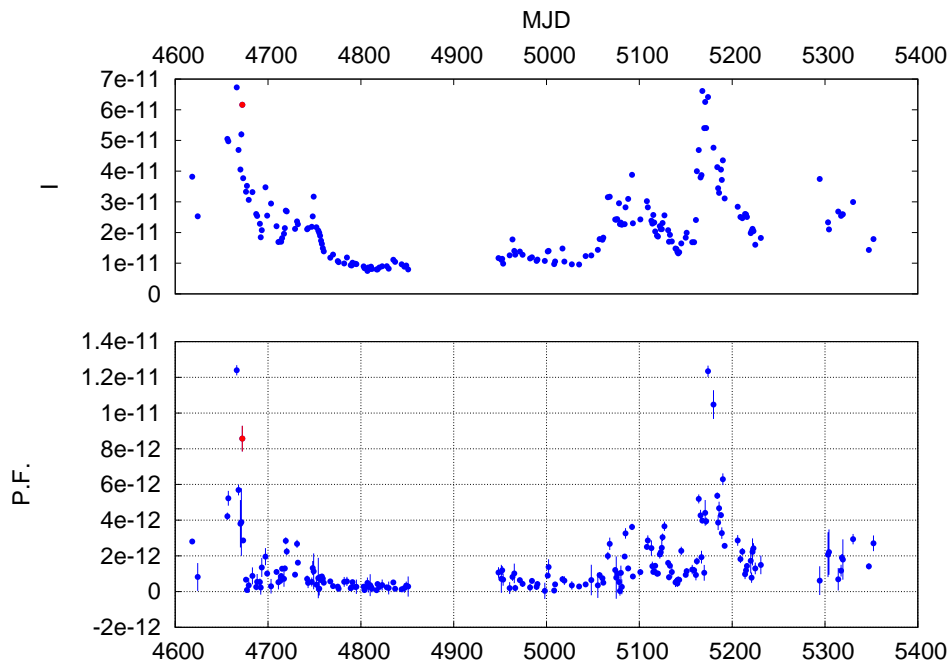


図 3.9: 3C 454.3 のアウトバースト (2)

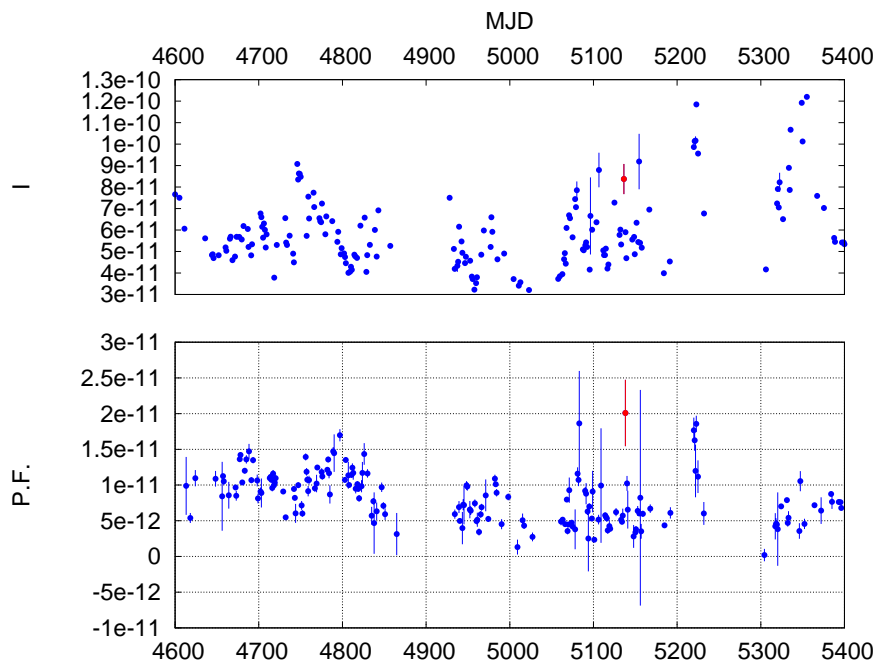


図 3.10: BL Lac のアウトバースト

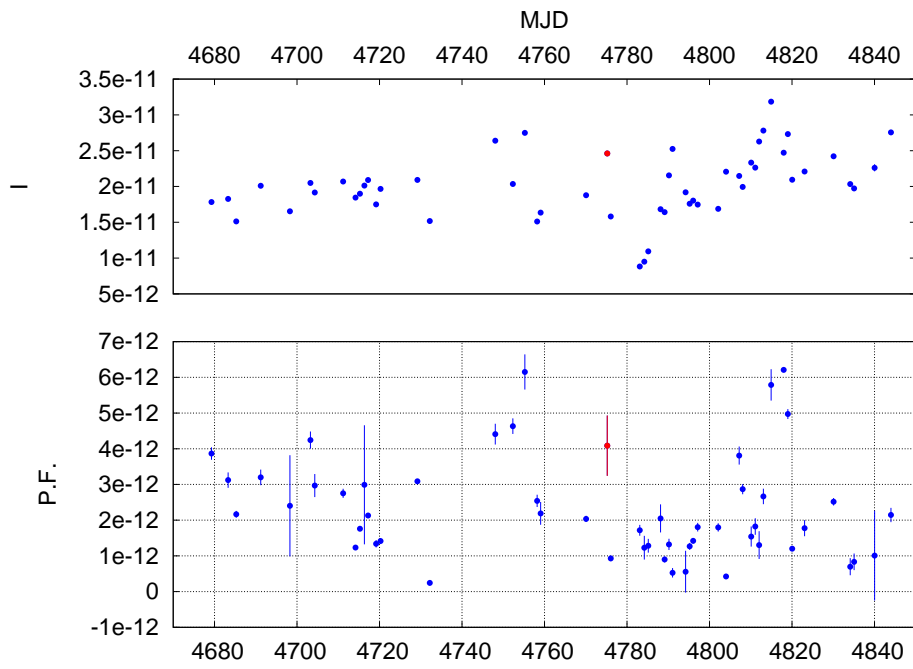


図 3.11: S2 0109+22 のアウトバースト

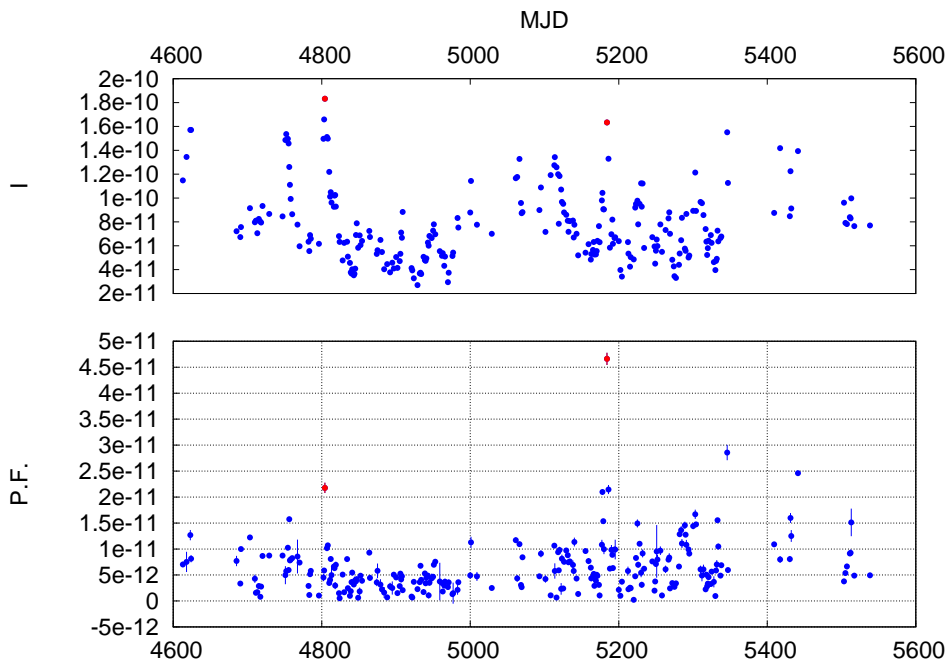


図 3.12: S5 0716+714 のアウトバースト

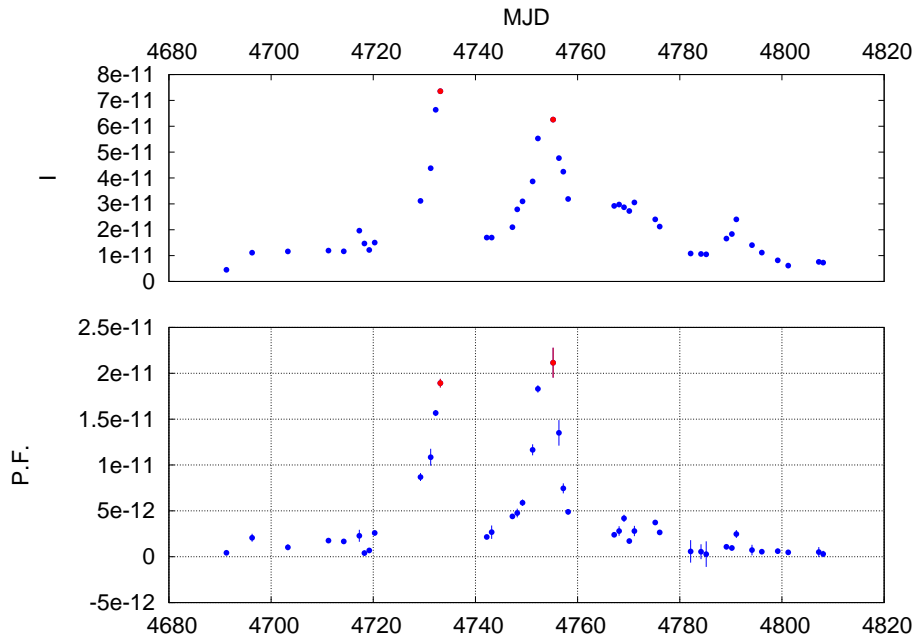


図 3.13: AO 0235+164 のアウトバースト

3.3 アウトバーストの偏光成分の抽出

3.2 章で述べた, アウトバースト成分が検出された全 8 天体について、それぞれのアウトバースト固有の偏光方位角を計算する。

3.3.1 QU 平面から検出したアウトバーストの解析

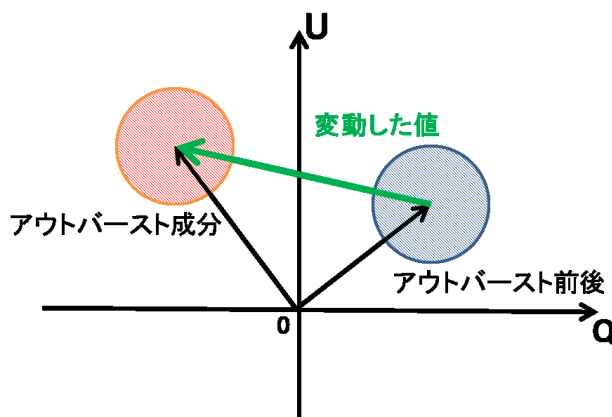


図 3.14: QU 平面のデータ点の変動

天体の Q, U 平面から、短期間での偏光の変動を求めるために原点からではなく図 3.14 のようにアウトバースト直前、直後からの Q, U の値を求めた。まずライトカーブ、 Q, U の時間変動の図を作成しアウトバースト成分はライトカーブを見て適当な期間を探し出した。そして図 3.15 のように Q, U でも同じ期間をアウトバースト成分とみなし、直前、直後のデータ点それぞれの平均を求め直線でフッティングした。その直線上の値と 3σ 以上で見つかった点とを差し引いた $\Delta Q, \Delta U$ から (3.1) 式のように偏光方位角を求めた。

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\Delta U}{\Delta Q}\right) \quad (3.1)$$

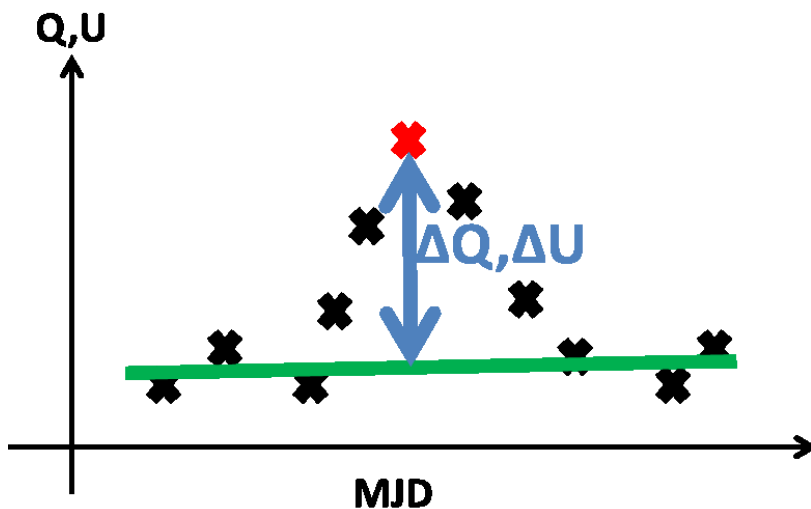


図 3.15: Q, U の変動の求め方 (3σ 以上の点:赤、フッティングした直線:緑、 Q, U の変動:青)

以下に、アウトバースト成分を含む期間を抜き出したライトカーブ、 Q, U の時間変化の図を載せた。赤色の点は 3σ 以上で見つかった点、緑色の先はフッティングした直線である。

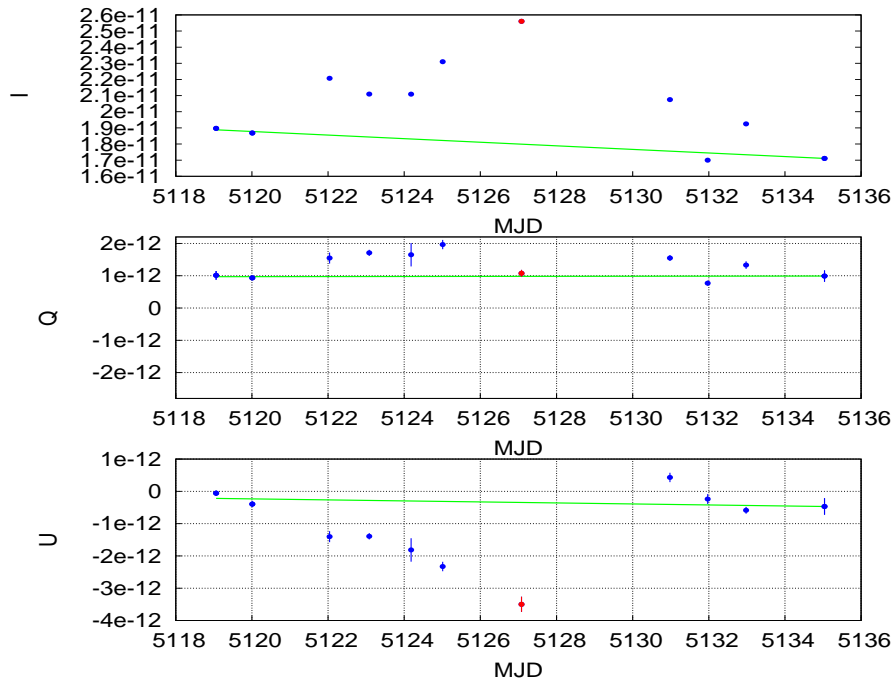


図 3.16: 3C 454.3 の 1 つ目のアウトバーストの成分分離

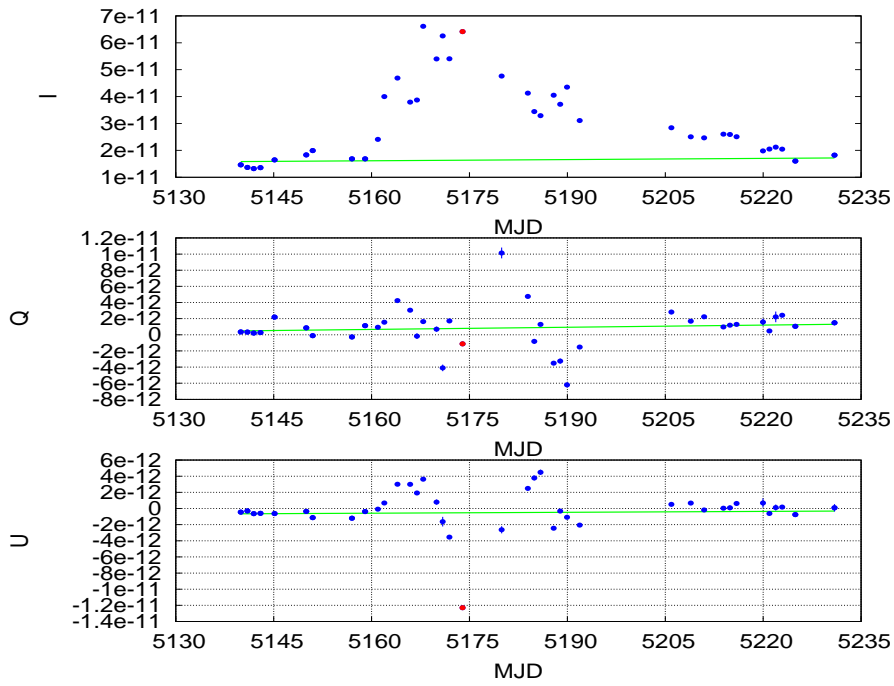


図 3.17: 3C 454.3 の 2 つ目のアウトバーストの成分分離

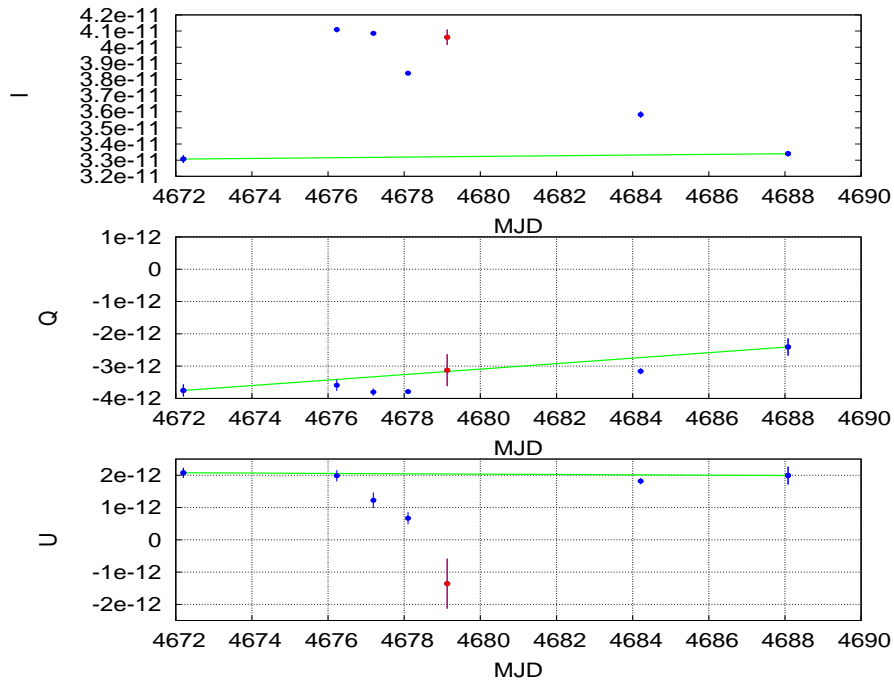


図 3.18: 3C 371 1 つ目のアウトバーストの成分分離

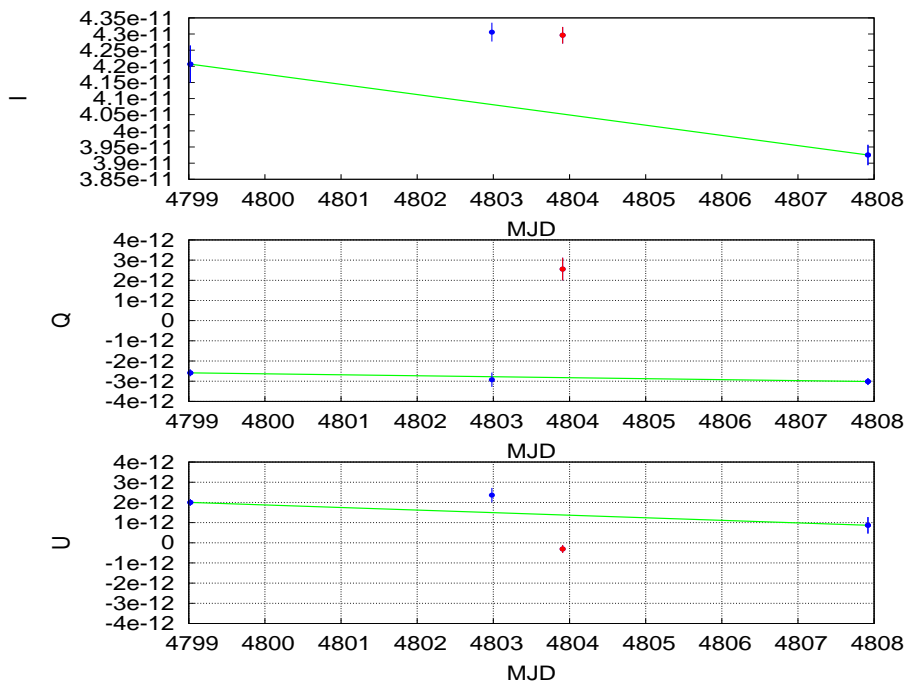


図 3.19: 3C 371 2 つ目のアウトバーストの成分分離

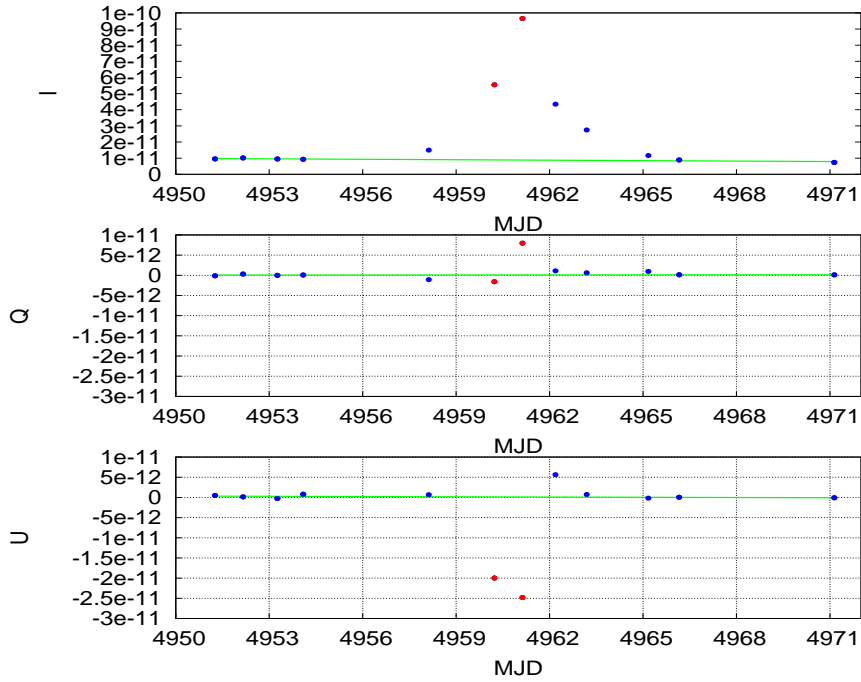


図 3.20: PKS 1510-089 のアウトバーストの成分分離

また、式 (3.1) で求めた偏光方位角及び、観測された偏光方位角の値そのものを表 3.3 に示した。1 つの天体でアウトバーストが複数あるものは日付順になっている。3C 371 については偏光方位角の値が観測値そのものとアウトバースト成分のものとは大きく異なっている。これは図 3.3 から分かるように常に有意な偏光を持っており、定常的もしくは長期的に変動する成分の存在が示唆される。よって、そのような成分を差し引くことでアウトバースト成分の正しい偏光方位角が計算できたと考えられる。

天体名	観測された偏光方位角 [deg]	求めた偏光方位角 [deg]	日付
3C 454.3	143.5	135.9	2009.10.23
	132.4	132.4	2009.12.8
3C 371	135.3	101.7	2008.8.1
	49.9	70.5	2008.12.2
	171.3	176.5	2008.12.3
PKS 1510-089	132.6	132.8	2009.5.9
	143.8	143.9	2009.5.10

表 3.3: アウトバースト成分の偏光方位角 (1)

3.3.2 短期間の偏光フラックス変動から検出したアウトバーストの解析

QU平面での解析と同様に、ライトカーブ、 Q, U の時間変化の図を作成しアウトバースト成分の偏光方位角を求めた。以下に、その図と求めた天体ごとの偏光方位角、観測された偏光方位角を表 3.4 に示した。また 3C 454.3 については偏光方位角の値が観測値そのものとアウトバースト成分では大きく異なっている。これは前述した 3C 371 と同様に観測値そのものでは正しくなく、式 (3.1) でも求めたようにアウトバースト成分の正しい偏光方位角が計算できたと考えられる。

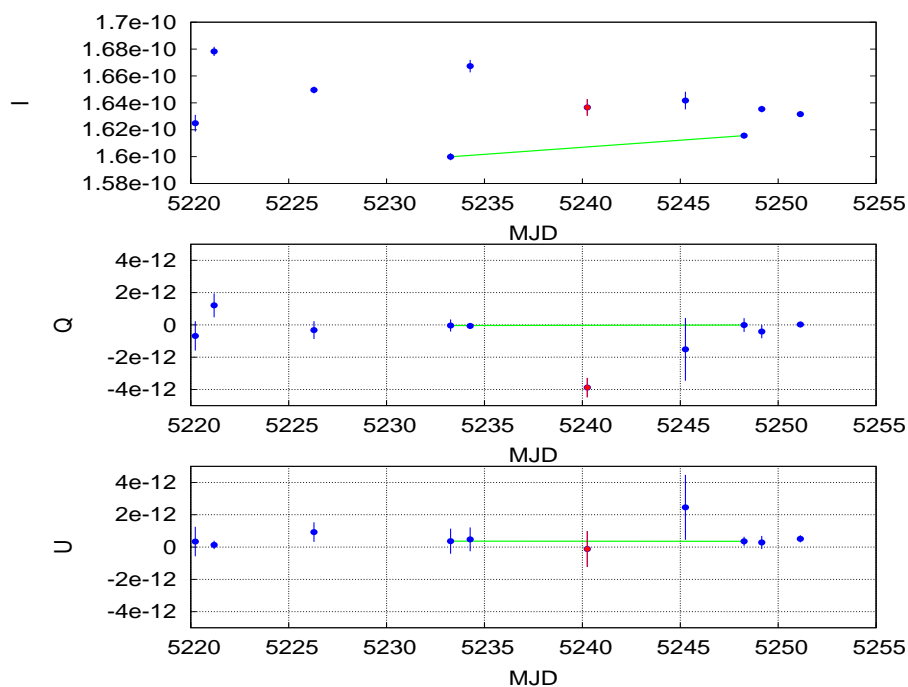


図 3.21: 3C 273 のアウトバーストの成分分離

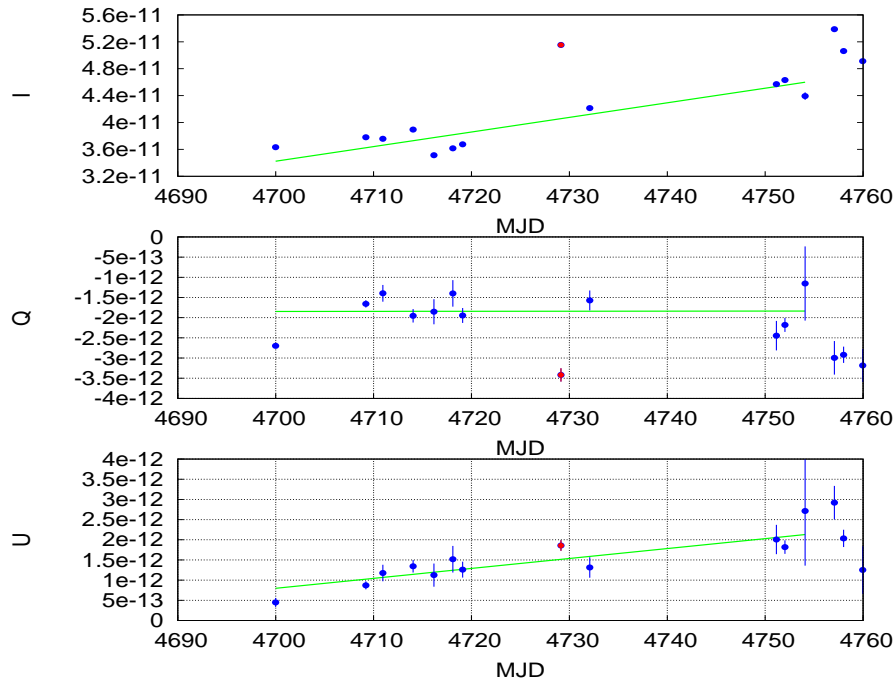


図 3.22: 3C 371 の 3 つ目のアウトバーストの成分分離

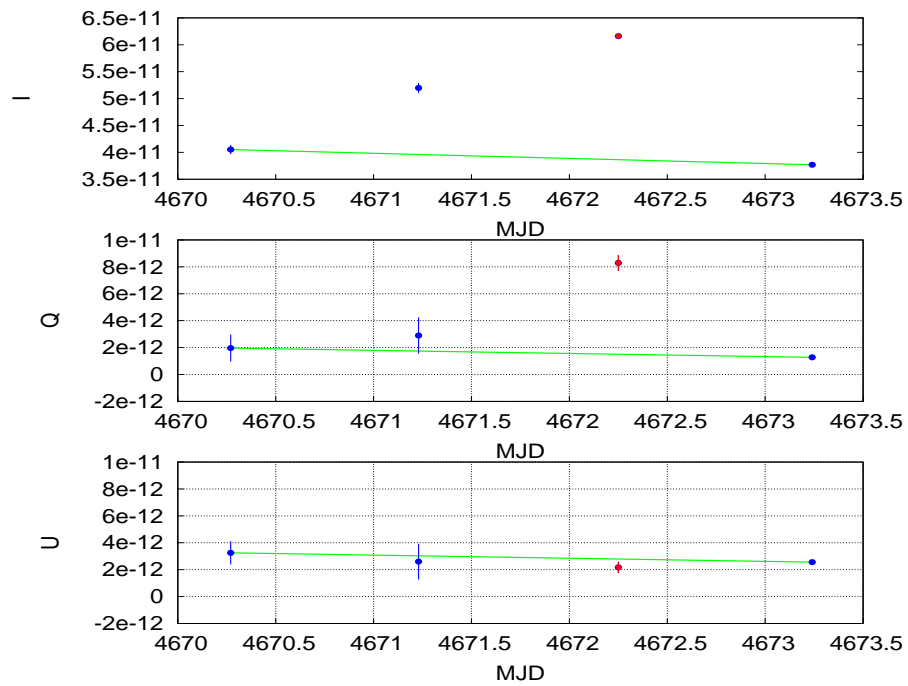


図 3.23: 3C 454.3 の 3 つ目のアウトバーストの成分分離

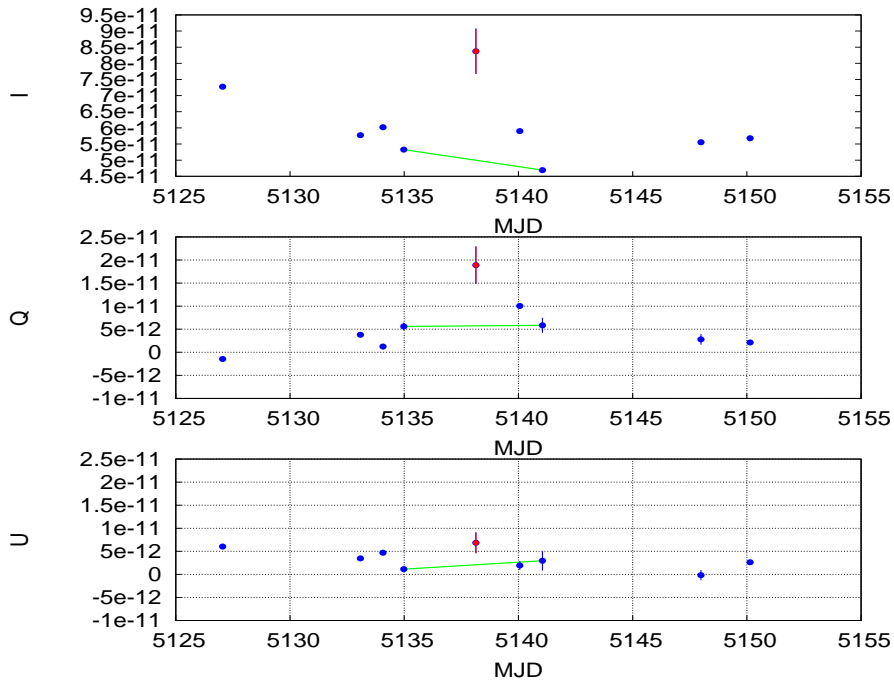


図 3.24: BL Lac のアウトバーストの成分分離

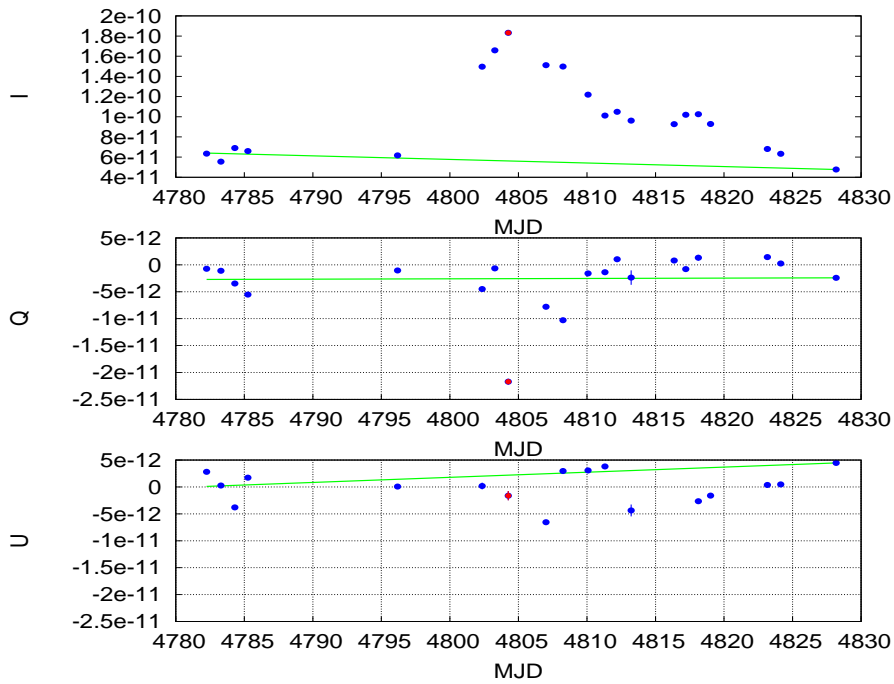


図 3.25: S5 0716+714 の 1 つ目のアウトバーストの成分分離

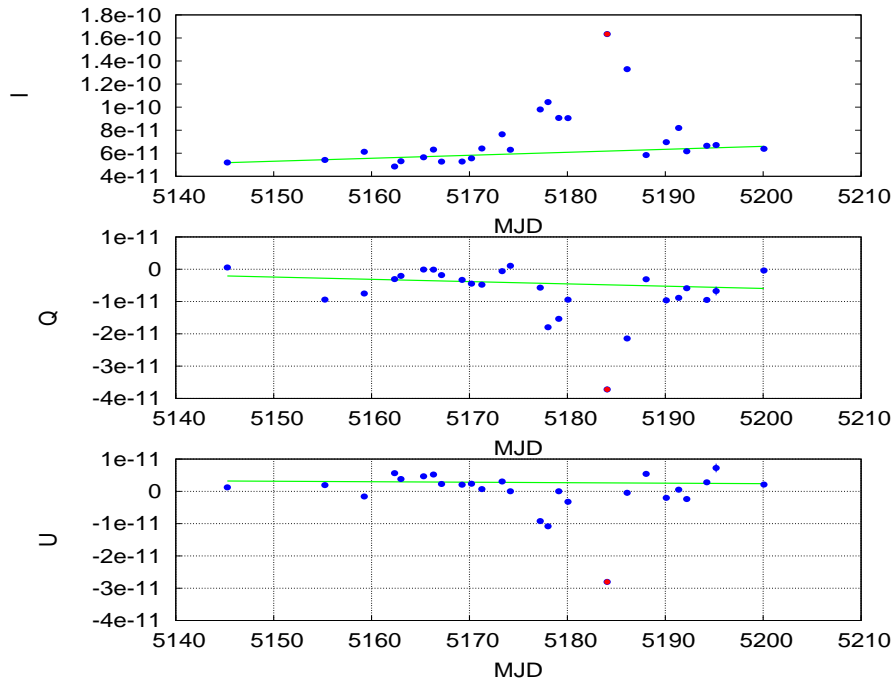


図 3.26: S5 0716+714 の 2 目目のアウトバーストの成分分離

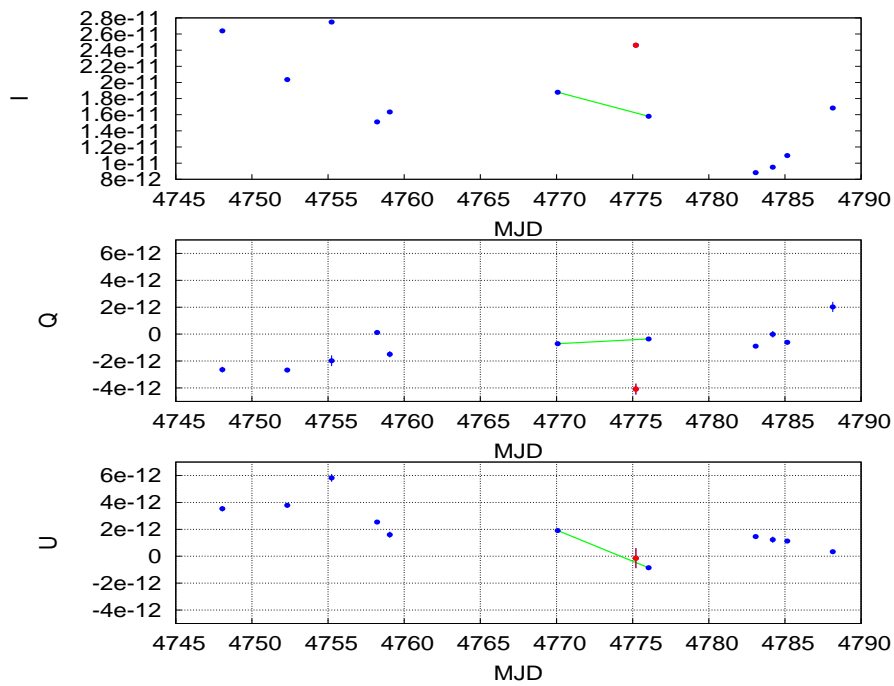


図 3.27: S2 0109+22 の成分分離

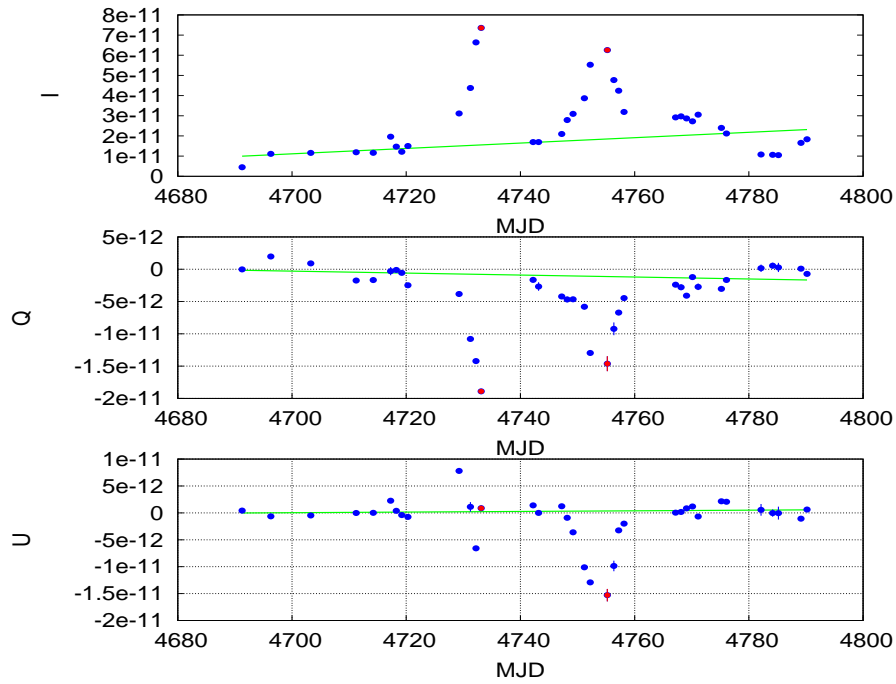


図 3.28: AO 0235+164 の成分分離

天体名	観測された偏光方位角 [deg]	求めた偏光方位角	日付
3C 273	90.9	93.6	2010.2.13
3C 371	75.7	83.7	2008.9.20
3C 454.3	7.4	177.4	2008.7.25
BL Lac	9.96	9.95	2009.11.3
S2 0109+22	91.0	87.5	2008.11.5
S5 0716+714	92.1	95.4	2008.12.4
	108.5	112.0	2008.12.19
AO 0235+164	88.68	88.97	2008.9.24
	113.1	114.6	2008.10.16

表 3.4: アウトバースト成分の偏光方位角 (2)

第4章 考察

第3章で求めた全8天体中のアウトバースト16件の偏光方位角について、電波ジェットと比較して議論する。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すると以下の図4.1~4.10のようになった。電波干渉計画像では横軸、縦軸の原点が天体の中心を示しており、その真上が偏光方位角の0°と対応している。そこから反時計回りが偏光方位角の正の方向となる。また、一つの天体にアウトバーストが複数ある場合は日付の早いものから緑色、黄色、青色、ピンク色としている。

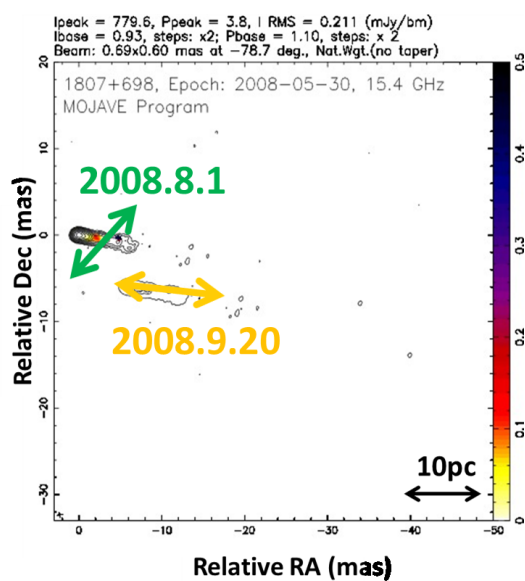


図 4.1: 3C 371 の VLBI 画像と偏光方位角 (1)

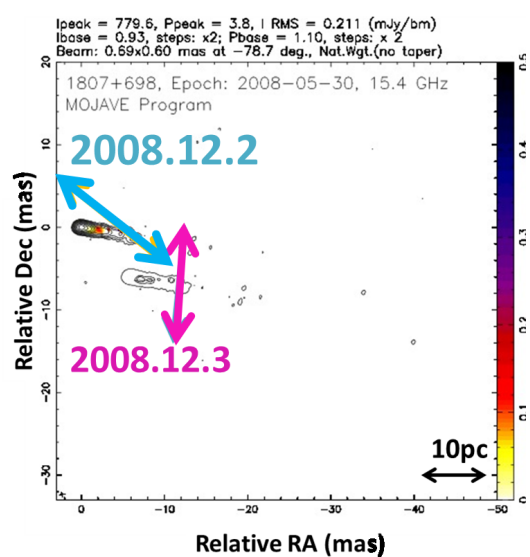


図 4.2: 3C 371 の VLBI 画像と偏光方位角 (2)

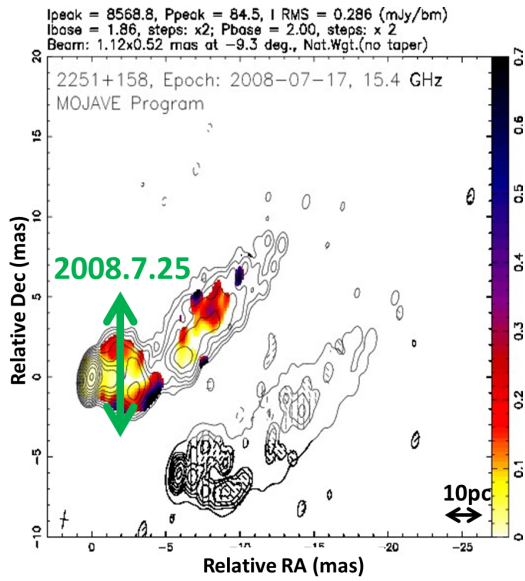


図 4.3: 3C 454.3 の VLBI 画像と偏光方位角 (1)

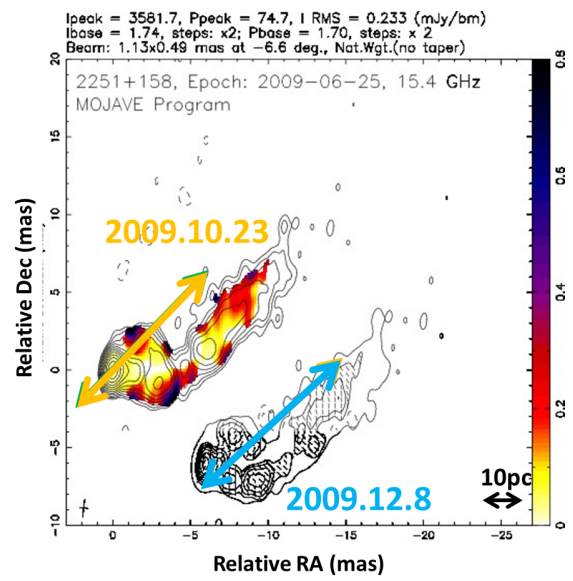


図 4.4: 3C 454.3 の VLBI 画像と偏光方位角 (2)

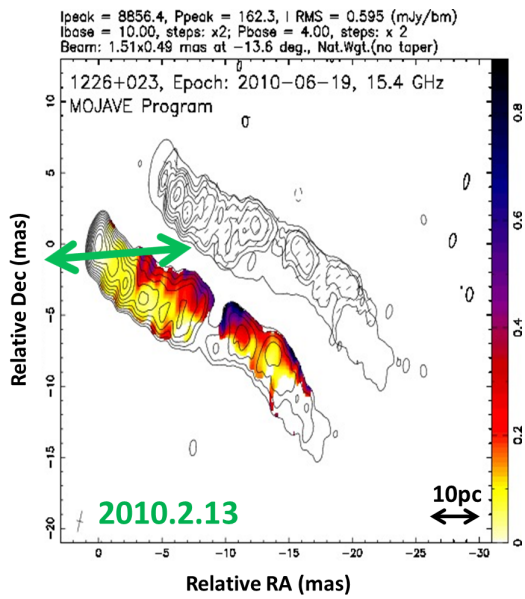


図 4.5: 3C 273 の VLBI 画像と偏光方位角

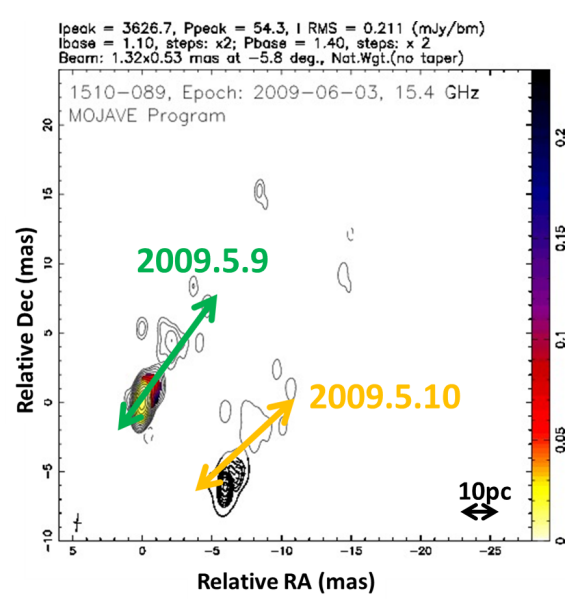


図 4.6: PKS 1510-089 の VLBI 画像と偏光方位角

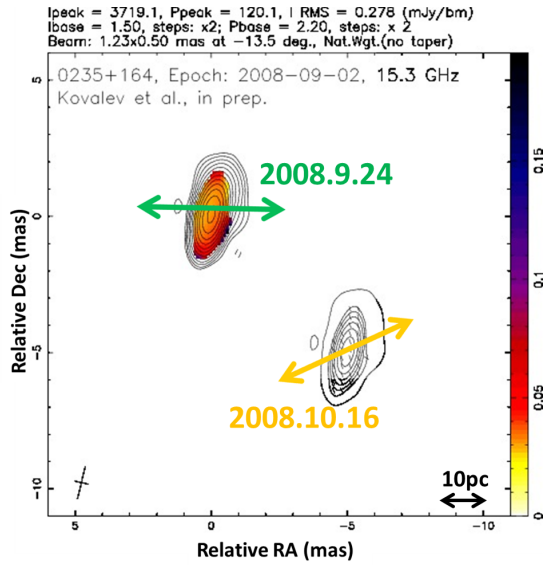


図 4.7: AO 0235+164 の VLBI 画像と偏光方位角

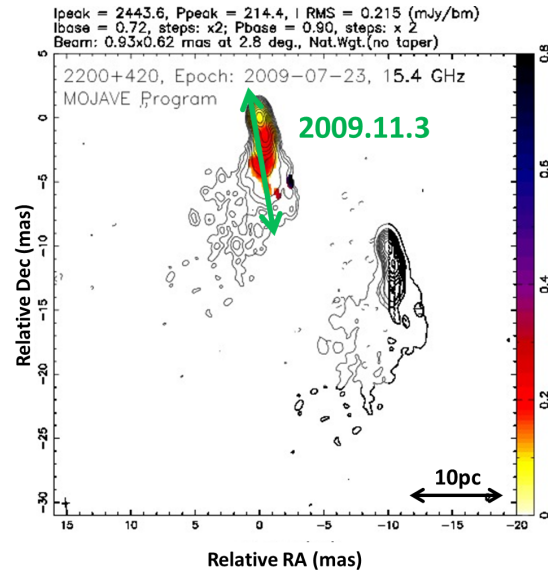


図 4.8: BL Lac の VLBI 画像と偏光方位角

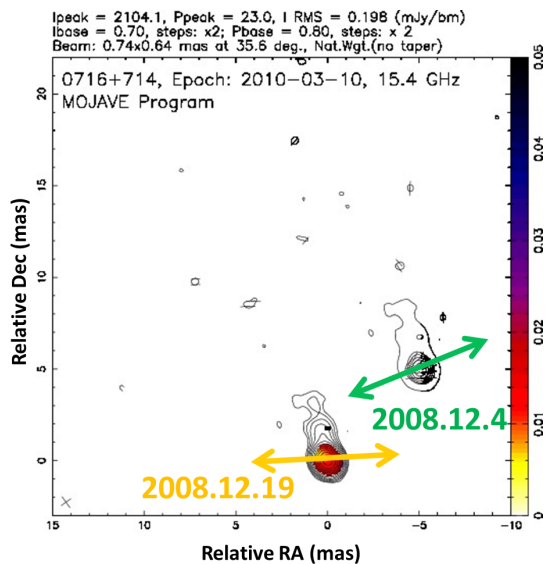


図 4.9: S5 0716+714 の VLBI 画像と偏光方位角

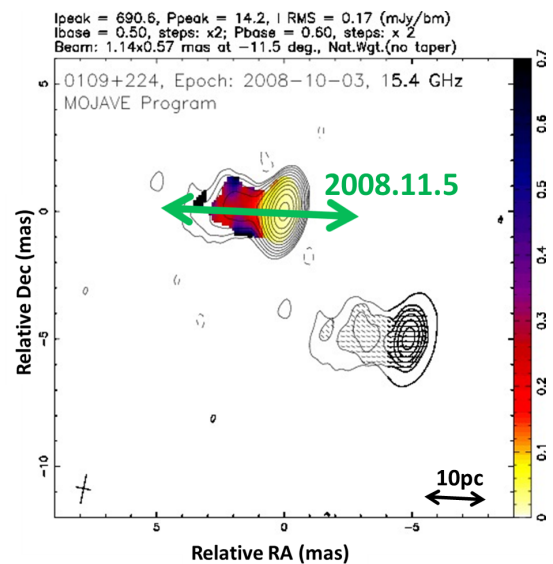


図 4.10: S2 0109+22 の VLBI 画像と偏光方位角

4.1 アウトバースト成分の可視光偏光方位角と電波ジェットの方法の相関関係

可視偏光方位角と電波干渉計画像のジェット方向との相関をより詳しくみるために電波干渉計画像からジェット構造が伸びている方向を測定した。電波干渉計画像のデータそのものは公開されていないため、方

向は図に分度器を用いて目視で測定した。図 4.1~4.10 から分かるように、本研究で扱うほぼ全ての天体もジェット構造は十分長く明確に検出されているため、目視による測定の誤差はせいぜい数度程度だと考えられる。また、AO 0235+164 の電波干渉計画像 (図 4.7) では目視でジェット構造をみる事ができなかったため、Jorstad et al.2001;Priner et al.2006[17] と同様の角度 (165°) を用いた。Lister et al.2013[18] では、ジェットの方向が一部の天体で数年周期で変動するとされているが、AO 0235+164 についてはほとんどジェットの方向に変化がないと思われるので 2006 年のデータを用いても問題ないと判断した。また、他の天体についてはアウトバーストに最も近い日にちの電波干渉計画像を使用しているため、ジェットの方向は大きく変化していないと考えられる。そして、測定した値と前章で述べた可視偏光方位角との差分を求めた。

電波ジェットの方角 θ_{jet} は 0° から 360° の範囲の値をとり、可視光偏光方位角 $\theta_{pol.}$ は 0° から 180° の範囲の値をとる。よって角度差を求めるときには、 $\theta_{pol.}$ か $\theta_{pol.}$ を 180° 回転させた方向の最も小さい差をとり $0^\circ < \Delta\theta < 90^\circ$ の範囲になるように計算した。また先行研究 [8] と同様に測定したジェット方向の 25° 以内であれば平行と判断した。そして角度差が 25° 以内は平行、 65° 以上は垂直、それ以外と分けることができた。その分類とそれぞれの角度差を表 4.1 に示した。

平行			垂直			それ以外		
天体名	角度差	日付	天体名	角度差	日付	天体名	角度差	日付
PKS 1510-089	10.8	2009.5.9	S5 0716+714	85.4	2008.12.4	3C 454.3	50.9	2009.10.23
PKS 1510-089	21.9	2009.5.10	S5 0716+714	78.0	2009.12.19	3C 454.3	47.4	2009.12.8
BL Lac	4.1	2009.11.3	3C 454.3	87.6	2008.7.25	3C 371	53.3	2008.8.1
S2 0109+22	3.4	2008.11.5	3C 371	89.3	2008.12.3	3C 371	32.1	2008.12.2
3C 371	1.9	2008.9.20	AO 0235+164	76.0	2008.9.24	3C273	26.8	2010.2.13
						AO 0235+164	50.4	2008.10.16

表 4.1: 電波干渉計画像と可視偏光方位角との相関

ジェットの方向と可視偏光方位角とが平行なアウトバーストは 16 件中 5 件あった。これらは 1.2.2 のように磁場の向きがジェット方向と垂直であると考えられる。つまり shock-in-jet のような磁場構造を考えることができ、短期成分が相対論的速度を持ったシェル同士の衝突によって起こっていると考えられる。また、ジェットの方向と可視偏光方位角とが垂直になっているアウトバーストは 16 件中 5 件であった。これは、磁場がジェット方向と平行になっていると考えられる。3C 371 の 2008 年 12 月のアウトバーストでは 1 日で偏光方位角が約 60 度変化しており、放射領域の磁場の方向が大きく変化したことが分かる。また、別の 2008 年 8 月のアウトバーストの偏光方位角も大きく異なる値になっている。これはらせん磁場に沿って放射領域が移動するシナリオで説明することができるかもしれない。

4.2 アウトバーストの規模との関係

次にアウトバーストの規模と角度差の関係を調べた。表 4.1 を見ると同じ天体であってもアウトバーストごとに偏光方位角が大きく異なることが分かる。これから、ジェットの方向と偏光方位角との相関にはアウトバーストの大きさに関係していると考えた。アウトバーストの規模は、アウトバースト前後を近似し

た直線から求めた。つまりアウトバースト時のフラックスを I_{out} 、時刻を t_{out} 、前後から近似した直線を $I_{\text{quies}}(t)$ としたとき、アウトバーストの規模を $\Delta I = I_{\text{out}}/I_{\text{quies}}(t_{\text{out}})$ として計算した。以下の図は角度差とアウトバーストの規模の関係を表している。緑色の線はそれぞれ 25° と 65° を示しており、下の線より小さい $\Delta\theta$ を持つ点は平行、上の線より大きい $\Delta\theta$ を持つ点は垂直、2本の線の間にある点はそれ以外を表している。

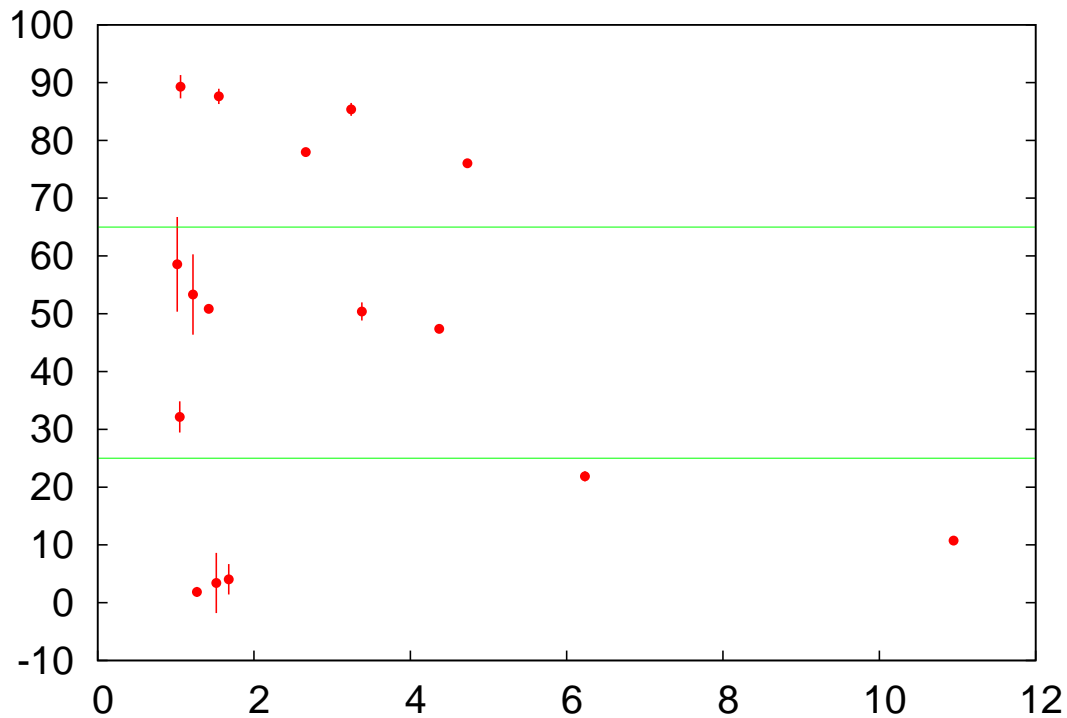


図 4.11: アウトバーストの大きさに対するジェット方向の相関

この図では光度変動の大きい2つの点ではジェット方向と可視偏光方位角が平行になっている。それに対して、変動が小さいところではジェット方向と可視偏光方位角が平行のデータもあればそれ以外のデータも多く見られる。これは光度変動が1~2倍と小さいので、アウトバースト成分以外、例えば測定ノイズなどのデータ点も含まれていると考えられる。つまり、十分に大きな光度変動を示すアウトバーストであればジェット方向と可視偏光方位角とに相関が見られ、これは先行研究 [9] とも一致する結果となった。

この研究では、変動が小さいところではアウトバースト成分以外のデータ点が含まれていると考えられるので、このアウトバーストが本当の現象かノイズなのか確かめる必要がある。また、アウトバーストの変動が大きいとジェット方向と偏光方位角が平行になる傾向が見られたが、さらに規模が大きいアウトバースト成分の数を増やすことで、この考察の蓋然性を高めることができる。

第5章 まとめ

今回は、活動銀河核ジェットの高場構造を探るためレーザー天体の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。高場は観測することができないので可視光の偏光方位角が高場の方向に垂直となるという特徴から、電波ジェットの方向と比較することでジェットの磁場構造を推定した。

先行研究でも同様にジェットの方向と可視光の偏光方位角との相関は研究されてきたが、今回は定常的に変動する成分を差し引くことでアウトバースト成分の正しい偏光方位角を求め、さらにデータ数を増やすことで系統的な検証ができると考えた。

広島大学かなた望遠鏡ではこれまで約 40 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。全天体についてストークスパラメータ Q, U が大きく変動しているデータ点を QU 平面と P.F. の図から探し出した。探し出したデータは全部で 16 件であり、短期間での偏光の変動を求めるためにアウトバースト前後からの Q, U の変動成分を抽出し、そこから偏光方位角を計算した。その値と電波干渉計画像のジェット方向と比較し、平行、垂直、それ以外の 3 種類に分類した。さらに、ジェット方向と偏光方位角の関係から理論モデルを基に高場構造を考察した。

また、ジェット方向と偏光方位角の角度差とアウトバーストの規模の関係を検証すると、変動が大きい時にはジェットと偏光方位角が平行となったが、変動が小さい時にはアウトバースト成分以外のデータ点が含まれている可能性があり、垂直やそれ以外のデータも多く見られる。

今後は、変動が小さいときのアウトバーストが本当の現象かノイズなのか確かめる必要があるとともに、変動が大きいときのデータ数を増やすことでこの考察の蓋然性を高めることができると考えられる。

謝辞

はじめに、指導教官の深澤先生にお礼を述べたいと思います。この研究室に入ってから今まで大変お世話になりました。植村先生には文章を書くのが苦手な私の卒業論文の添削を丁寧にしていただき、研究に関してたくさんのことを教えて頂きました。伊藤さんには何も分からなかった私に観測方法や解析の仕方などたくさんのことを教えて頂きました。本当に感謝しています。秋田谷さん、田中さん、河口さんにはブレイザーミーティングで大変お世話になりました。ありがとうございました。またこの他にも研究室の皆様のご協力で卒業論文を書くことができました。ありがとうございました。

関連図書

- [1] <http://obspsc23.phyast.dur.ac.uk/images/agnunification.png>
- [2] <http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.251/GIF251/034.jpg>
- [3] 柴田一成, 福江純, 松元亮治, & 嶺重慎, 1999, 活動する宇宙 (裳華房)
- [4] H. Kubo, T. Takahashi, G. Madejski, M. Tashiro, F. Makino, S. Inoue & F. Takahara 1998 ApJ 504,693
- [5] S.koide et al. 1998, Shibata&Uchida 1986、 1990
- [6] http://www.nhao.jp/tsumu/Research/Intr_interferometry/interferometer.html
- [7] <http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/index.html>
- [8] C.D.Impey, C.R.Lawrence & S.Tapia et al. 1991
- [9] V. A. Hagen-Thorn, V. M. Larionov, S. G. Jorstad,A. A. Arkharov, E. I. Hagen-Thorn, N. V. Efimova, L. V. Larionova & A. P. Marscher et al. 2008
- [10] 伊藤 亮介 2013 修士論文
- [11] 千代延真吾 2005 卒業論文
- [12] 東広島天文台 web site
- [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] ikejiri, et al. 2011
- [17] Jorstad et al. 2001;Priner et al. 2006
- [18] M. L. Lister, M. F. Aller, H. D. Aller, D. C. Homan,K. I. Kellermann, Y. Y. Kovalev,A. B. Pushkarev, J. L. Richards, E. Ros & T. Savolainen et al. 2013