

活動銀河核ジェットの偏光観測データを用いた
新しい可視化技術による磁場構造の研究

広島大学 理学研究科 物理科学専攻
高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室

M175058

HUANG RUOCHEN

主査：植村 誠 副査：石川 健一

2019 年 2 月 8 日

概要

銀河の中には、銀河中心部の狭い領域から銀河全体を凌駕するようなエネルギーを放射しているものがある。このような活動性を表す銀河中心領域のことを活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼ばれる。AGN の一部が銀河面の両側に数万～数十万パーセクに渡るジェットと呼ばれるプラズマの噴射を持っている。ジェットのほぼ真正面から見ていると考えられる天体がブレイザーである。相対論的ビーミング効果によりジェットの放射が極めて明るく見え、降着円盤や輝線領域からの放射に比べ卓越する。そのため、ブレイザーはジェットの物理を研究するのに最適な対象である。相対論的速度を持つ電子がジェットの磁場の中で運動する時ローレンツ力を受け、運動軌道が曲げられシンクロトロン放射を放ち、その偏光が観測される。ジェットの収束機構や構造、発生機構、及び加速機構など解明されていない点も多くある。それらの謎を解くために、多くの観測と研究が行われて来た。特に偏光の方向はジェットの磁場の方向と垂直になることから、東広島天文台を含む多くの観測機関で偏光観測が盛んに行われた。しかし、光度、偏光度、偏光方位角、色及びそれぞれの誤差に時間を加えた多次元データの解析が難しいのも事実である。多次元データに潜む構造を認知し、各パラメータ間の相関研究を行うために、TimeTubes という可視化技術が開発された。前述の多次元データを三次元のチューブで時系列順に繋ぐ事によって、時間に沿って簡単に相関関係を確認することを実現した。本研究では、TimeTubes を使って新しい解析及び研究手法の確立を目的とする。特に、偏光方向が回転する現象はジェット内の螺旋磁場構造やジェット全体の形状を知る上で以前から注目されているが、従来の解析手法では複数の偏光放射源が存在する場合に、回転現象が検出されない可能性がある。そこで、ブレイザー 3C 454.3 のデータを TimeTubes で解析したところ、これまで認識されていなかった偏光の回転現象が検出された。検出した偏光の回転の回転中心を修正して、偏光方位角を計算し直した結果、偏光方向が 20 日間で約 230 度、ほぼ一定の変化率で回転したことが判った。

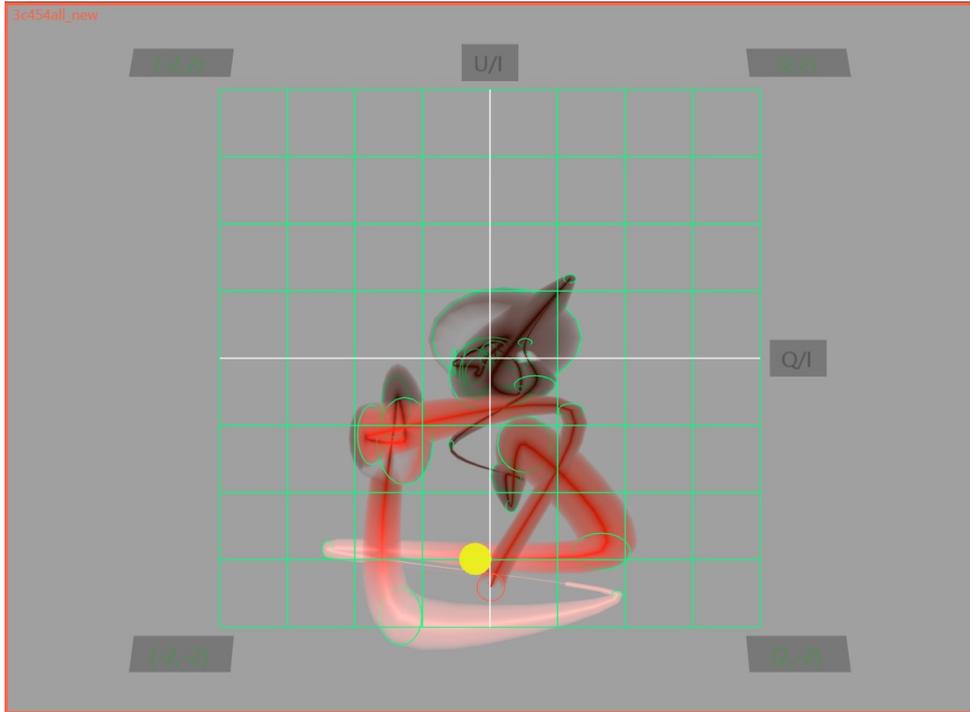


図 1: TimeTubes による回転の抽出。(Q/I, U/I) 平面で見る時系列順に繋いだデータのチューブ。黄色ポイントが回転中心。

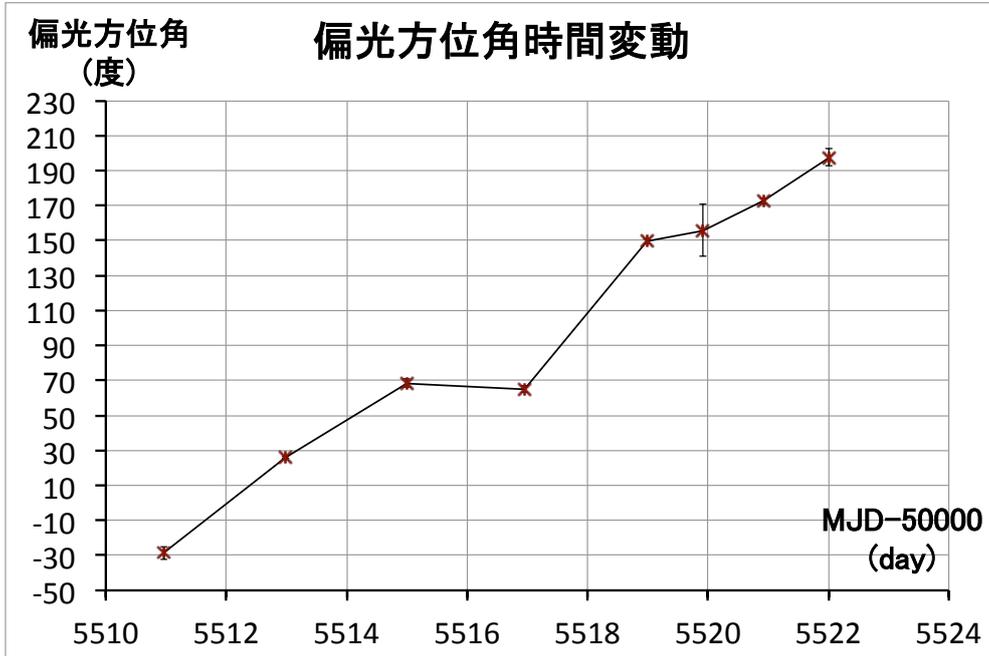


図 2: 回転中心を修正し, 再計算した偏光方位角の時間変動。横軸が MJD 時間、縦軸が偏光方位角の度数。偏光方位角が 20 日間で約 230 度、ほぼ一定の変化率で回転。

目次

第 1 章	序論	4
1.1	活動銀河核とブレイザー	4
1.1.1	活動銀河核	4
1.1.2	ブレイザー	8
1.2	偏光及び偏光方位角の回転	16
1.3	研究目的	21
第 2 章	データと解析	24
2.1	かなた望遠鏡及び解析に使ったデータ	24
2.2	本研究で用いるデータ	26
2.3	TimeTubes	27
第 3 章	結果	31
3.1	データ	31
3.2	回転検出と補正	32
3.3	結果	33
第 4 章	考察	40
4.1	三つの回転の比較	40
4.2	先行研究との比較	41
4.3	ランダムな変動から偏光回転が検出される可能性	45
4.4	TimeTubes の偏光回転の検出方法	48
4.5	TimeTubes の偏光回転の有意性	48
第 5 章	まとめ	50

第1章 序論

1.1 活動銀河核とブレーザー

1.1.1 活動銀河核

銀河の中には、銀河中心部の狭い領域から銀河全体を凌駕するようなエネルギーを放射しているものがある。その放射は電波から γ 線までと多波長に渡る。このような活動性を表す銀河中心領域のことが活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼ばれる。ホスト銀河のサイズが10,000パーセクあるのに対して、AGN領域が10パーセク程度しかなく非常にコンパクトと言える [3]。

AGNには様々な種類があるが、基本的には銀河核に存在する巨大ブラックホールに由来する活動性であると理解されている [1]。その巨大ブラックホールの質量が太陽質量の $10^6 \sim 10^9$ 倍にも達すると言われている [4][2]。本節ではまず様々な種類のAGNを紹介する。そしてAGNの統一モデルを説明する。

セイファート銀河

AGNを持つ銀河の一種がセイファート銀河である。1943年、セイファート (C.Seyfert) によって発見された。特徴的なのは、可視光から紫外線領域に渡る青い連続光スペクトルを示すことと、プラズマから生じる様々な原子・イオンからの輝線スペクトルが見えることである。セイファート銀河は渦巻銀河、特に早期型渦巻銀河であることが多いが、楕円銀河であるものも存在する [1]。

セイファート銀河の可視・紫外領域の輝線スペクトルを詳しく見ると、輝線の幅が広いものと狭いものがあるのが分かる。幅の広い輝線だと数 $1,000 \text{ km s}^{-1}$ から時には 1 万 km s^{-1} を超える半値幅を持つ。輝線の幅が狭いものだと、数 100 km s^{-1} の半値幅しか持てないものもある。1974年、E.Khachikian と D.Weedman は、前者をI型セイファート銀河、後者をII型セイファート銀河と分類した [1]。

電波銀河

同程度の可視光光度を持つセイファート銀河に比べて100倍から1,000倍も強い電波を放射しているAGNがある。このような電波を強く放射しているAGNが電波銀河と呼ばれる。また、電波強度以外のスペクトルの特徴はほぼセイファート銀河と同じであり、同様に広輝線型 (I型) と狭輝線型 (II型) に分けることができる。セイファート銀河との異なる点として、電波域での放射強度以外に、電波銀河のほとんどが楕円銀河であることが挙げられる [1]。

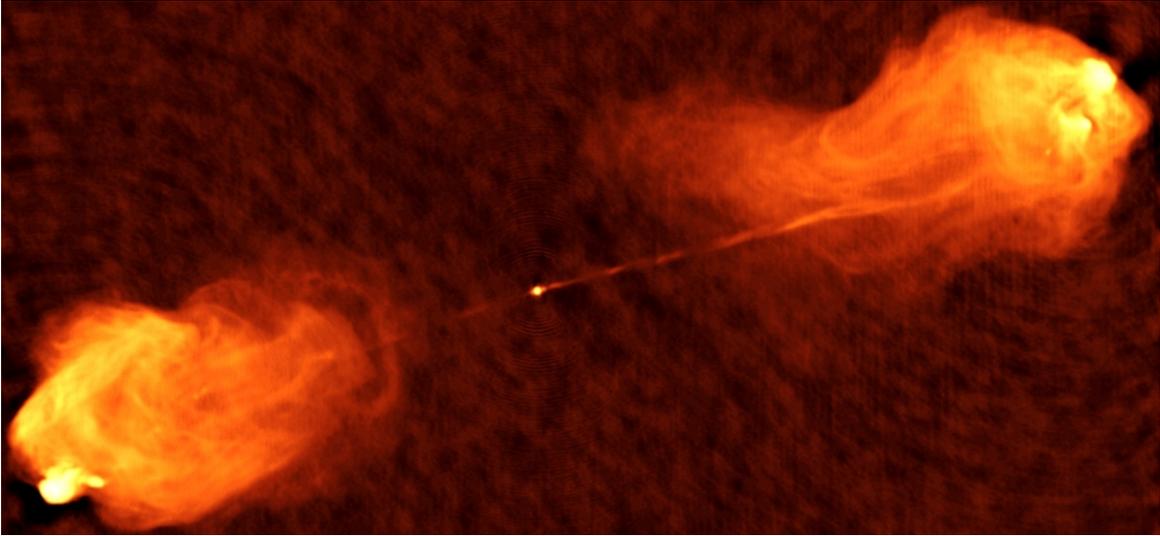


図 1.1: 電波銀河 はくちょう座 A

電波銀河の構造上の特徴は図 1.1 で説明する。図 1.1 はアメリカ国立電波天文台の VLA 電波干渉計望遠鏡により撮像した電波銀河はくちょう座 A(3C 405) のイメージである。中心部にある明るい点状のものがホスト銀河の中心核に対応したコアという電波構造である。左右に細長く伸びる構造が電波ジェットと呼ばれ、15 万パーセクにも及ぶ。一般的に電波ジェットが数万～数十万パーセク [1] というスケールを持つと言われ、ホスト銀河のスケール (一万パーセク程度 [3]) を遙かに超える。ジェットの先にはプラズマの流れが銀河間ガスでせき止められ、風船状に膨らんだ電波ローブと呼ばれる構造も存在する。

クェーサー

クェーサー (quasar) は、空間分解できないような恒星状に見える電波天体という意味の Quasi-Stellar Radio Source を略したものである。クェーサーは電波源として発見されたものの、可視光、紫外線探査により電波を強く放射していないクェーサーも多数発見された。このような電波放射が弱いクェーサーがクェーサー全体の約 9 割を占めている。クェーサーのスペクトルは I 型セイファート銀河若しくは広輝線電波銀河とよく似ている。クェーサーはセイファート銀河や電波銀河よりさらに明るい AGN である。クェーサーが渦巻銀河や楕円銀河の中心部に存在し、セイファート銀河や電波銀河と変わらないことが分かってきた。絶対等級が -23 等より明るいものをクェーサーと分類する提案 (1983, M.Schmidt と R.F.Green) もあるが、厳密に適用されていない [1]。

クェーサーの連続光は変光及び偏光を表すものが多い。光度が大きいほど変光のタイムスケールが長い傾向があるが、とかげ座 BL 型天体 (BL Lac) のような一日以下の短いタイムスケールで変光する例外も存在する。さらに、BL Lac の連続光に時には 20% をも超える強い直線偏光成分が検出される。またスペクトル中に輝線がほとんど見えない点が通常のクェーサーと大きく異なる。BL Lac と良く似た天体として、激しい変光を見せる可視激変光クェーサーや連続光の偏光が

強い高偏光クエーサーもあるが、これらのスペクトル中には輝線が見える [1]。BL Lac, 可視激変光クエーサー, 高偏光クエーサーに加えフラットスペクトル電波クエーサー (FSRQ) をまとめてブレーザーと呼んでいる [2]。

ライナー

クエーサーと逆に中心核の光度が低く、ホスト銀河に埋もれてしまっている AGN も存在する。電離度の低い輝線が通常の星生成銀河に比べ強いものの、電離度の高い輝線はセイファート銀河に比べ弱いスペクトルを示す。輝線の幅は数 100 km s^{-1} 以上あり、セイファート銀河のような AGN の特徴を示す。このような銀河を、1980 年、T.M.Heckman が Low-Ionization Nuclear Emission-line Regions(低電離中心核輝線領域) の頭文字をとって LINER(ライナー) と名付けた [1]。

AGN の統一モデル

前述通り、AGN の中心に太陽の 10^6 から 10^9 倍の質量を持つ巨大ブラックホールが存在する。AGN は、この巨大ブラックホールへの物質降着によって形成される降着円盤からのエネルギー放射によって説明できる。しかし、これまで紹介したように複数ある AGN タイプが、観測上では共通した性質も有れば、異なる性質も同時に観測されている。これらの観測事実をうまく説明できたのが AGN 統一モデルである。

図 1.2[1] は AGN 統一モデルの概念図である。図示の通り中央にある黒い点がブラックホールを表している。その外側に降着円盤があり、物質の降着とエネルギーの解放が行われる。これらを合わせて AGN の降着から莫大なエネルギーを放出メカニズムのことを AGN エンジンと呼ぶ [4]。さらに AGN エンジンの外周にドーナツ状に囲んでいるのがトーラスというガスで出来た吸収体である。AGN エンジン付近に高速運動しているガスが分布しており、電離されたガスが出す輝線がドップラー効果のためスペクトル上で幅広く観測されたと考えられる。この領域が広輝線領域若しくは Broad Line Region と呼ばれる。頭文字を取って BLR と略するときもある。電離紫外光がトーラスの開口方向のみ出ることが可能なため、図示の電離コーンという領域がトーラスの開口角によって定められる。電離コーン範囲内で AGN エンジンから離れる領域のガス運動速度が広輝線領域と比べ低速のため、電離ガスから出る輝線のスペクトル上での幅も狭くなる。この領域のことを狭輝線領域若しくは Narrow Line Region と呼び、略して NLR とも呼ばれる。

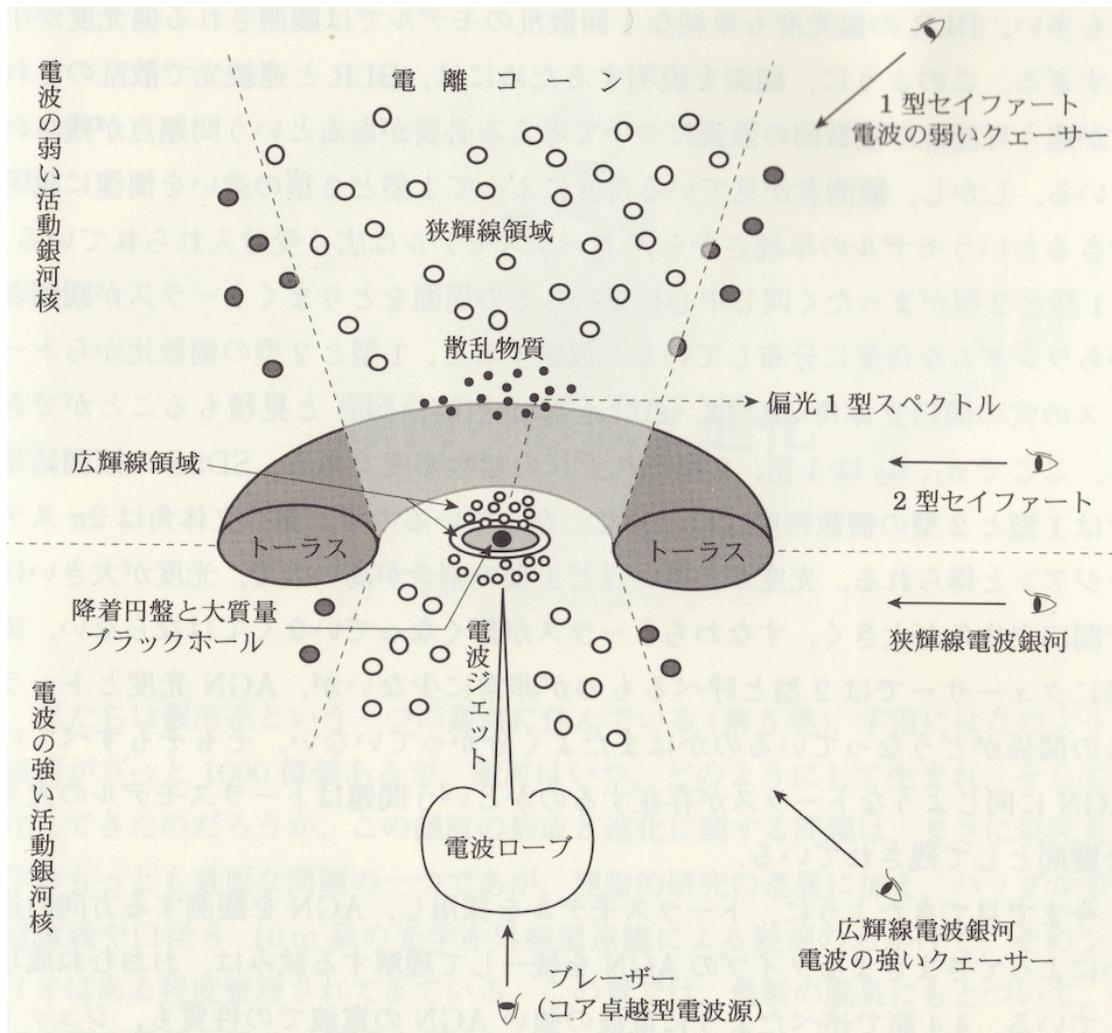


図 1.2: AGN 統一モデルの概念図 [1]

このモデルが吸収体であるトーラスの存在と見込み角度の違いによってセイファート銀河の I 型と II 型の違いを簡潔に説明できる。I 型はトーラス開口方向から AGN を見ているため広輝線領域も狭輝線領域も共に観測されるが、II 型はトーラスを横方向から見ているため、狭輝線領域のみが観測される。しかし、一部の II 型セイファート銀河の偏光分光観測を行うと、偏光スペクトルの中に幅の広い輝線を検出されたのも事実である (例: NGC 1068 の偏光分光観測、R. Antonucci & J.S. Miller) [1]。図 1.2 に描いた様に広輝線領域と狭輝線領域の間に自由電子が散乱物質として広がっている。本来トーラスに遮られるはずの広輝線領域からの光が散乱物質に当たり、トムソン散乱による反射光として観測されると考えられる。これもまた統一モデルを強く支持する観測事実となる。

一枚の図に二種類の構造を示すために図 1.2 の真ん中で横方向に点線を引いてあるが、上下の違いは電波ジェット及び電波ローブ構造を持つか否かのみである。電波ジェット及び電波ローブが主な電波源であるため、それを持たない上半分の様な AGN が電波放射の弱い AGN の構造を表している。逆に電波ジェット及び電波ローブ構造を持つ下半分の様な AGN が電波放射の強い AGN

の構造概念図である。下半分の様な構造を横方向つまりジェットに垂直の方向から見ると狭輝線電波銀河として観測される。特にジェットに近い方向から見るとコア卓越の電波源、ブレーザーとして観測される。ブレーザーについて次の 1.1.2 節で詳しく説明する。

AGN エンジン、トーラス及び電離ガスが AGN の基本構造となり、さらに電波ジェット及び電波ローブ構造の有無が加わる。こういった統一構造を元に、観測角度及によって様々なタイプの AGN として観測されるというのが AGN 統一モデルの考え方である [1]。表 1.1 が AGN の各構造のスケールをまとめたものである [3]。 R_s はブラックホールのシュワルツシルト半径のことで、静止ブラックホールの場合質量に比例する。また、 M_\odot が太陽質量を意味する。

表 1.1: AGN の典型的なスケール

要素名	スケール (パーセク)
ブラックホール	10^{-4} (R_s for $10^9 M_\odot$)
降着円盤	0.01
広輝線領域	1
トーラス	10
狭輝線領域	1,000
ホスト銀河	10,000
電波ジェット	150,000

1.1.2 ブレーザー

AGN の統一モデル及び図 1.2 の紹介でも触れたが、ジェットをほぼ真正面から見ていると考えられる天体がブレーザーである。相対論的効果 (後の段落で説明する) によりジェットの放射が極めて明るく、他の成分 (降着円盤や可視輝線領域からの放射) に比べ卓越する [2]。つまりブレーザーから観測される光がほぼジェットのみ依存すると考えてよい。そのため、ブレーザーはジェットの加速機構や収束機構などジェットの物理を研究するのに最適な対象である。ブレーザー (本質はブレーザーが持つジェット) は速い激しい光度変動と強い偏光を特徴とする。

光度変動

ブレーザーはどの波長帯でも光度の時間変動を表す。その時間変動のタイムスケールが様々である。数ヶ月以上に渡る長時間変動 [5] もあれば、数時間以内の短時間変動 [6] もある。特にガンマ線領域では、10 分以下のタイムスケールで起こる光度変動 [7] も報告されている。このような観測事実が放射領域が今まで考えられて来たよりも狭いであることを示唆しており、議論を呼んでいる。光度変動のタイムスケールの他に変動幅が大きいこともブレーザーの特徴である。可視光領域において、数ヶ月の間でマグニチュード 4 等級以上の変動も観測された [8]。

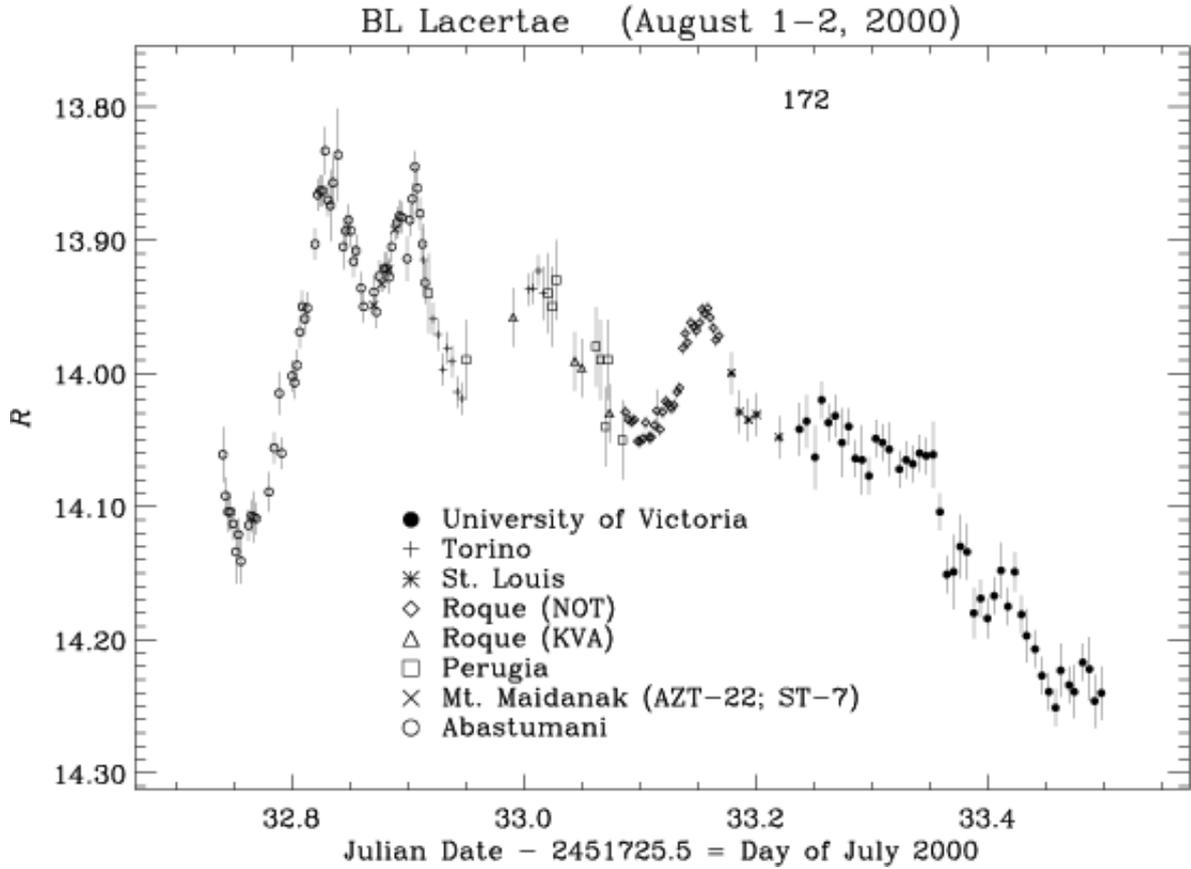


図 1.3: BL Lac の光度変動 [9]。横軸は日数、縦軸が R バンドのマグニチュード等級。

図 1.3 が 2000 年 8 月 1 日から 2 日の間で撮ったとかげ座 BL 型天体 (BL Lac) の R バンドの光度変動曲線である [9]。約 0.6 日の間に、0.5 等級程の光度変動を見せた。活動期に入ったブレーザーが非常に短時間変動を示す観測例もある。

図 1.4 が 3C 454.3 の 2007 年 12 月の活動期での B,V,R,I バンドの光度変動曲線である [10]。V,R,I バンドは僅か 1.5 時間の間でマグニチュード 1 等級程度の増光を示した。R バンドはその後に 1 時間でマグニチュード 1 等級以上の減光も観測された。

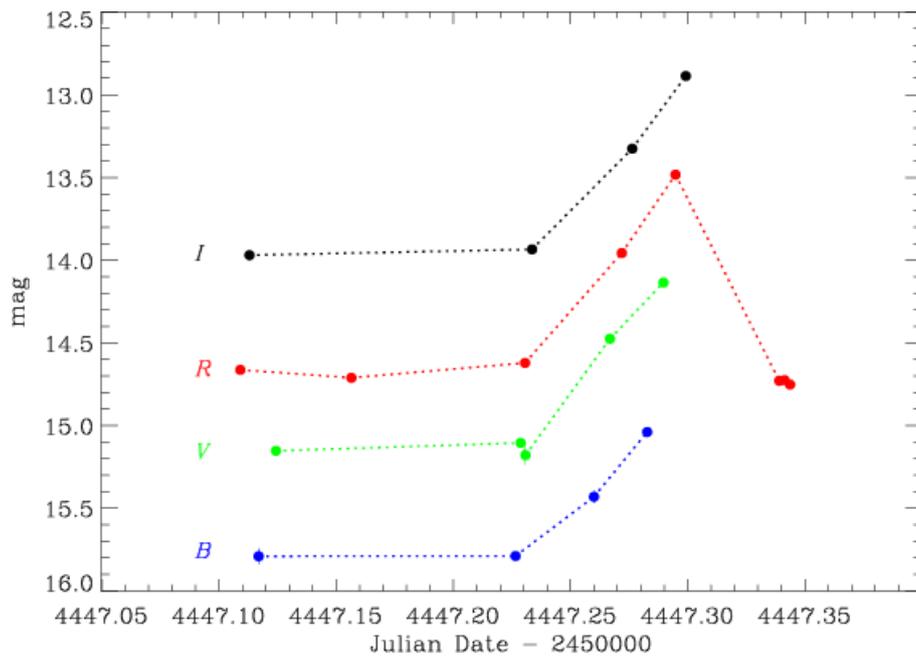


図 1.4: 3C 454.3 の活動期での短時間光度変動 [10]。横軸は日数、縦軸がマグニチュード等級。

偏光

ブレーザーのもう一つの特徴は強い偏光を持つことである。図 1.5 がブレーザー天体 BL Lac に多波長モニタリング観測を行なった結果である [18]。上からそれぞれ γ 線光度、 γ 線光子指数、可視光の光度、 γ 線と可視光の光度の比、偏光度、偏光方位角の時間変動を示している。偏光度のパネル通りに、偏光度が 10 % 付近またはそれ以上で、高い時が 30 % を超えている。このように高い偏光度を持ち、時には偏光方位角の回転が観測されるのもブレーザーの特徴である。相対論的速度を持つ電子がジェットの中の磁場の中で運動する時ローレンツ力を受け、運動軌道が曲げられる時にシンクロトロン放射をする。そのシンクロトロン放射の偏光が観測されている。このように偏光観測より磁場構造への示唆を行う研究が行われていることが 1.2 節で述べる。

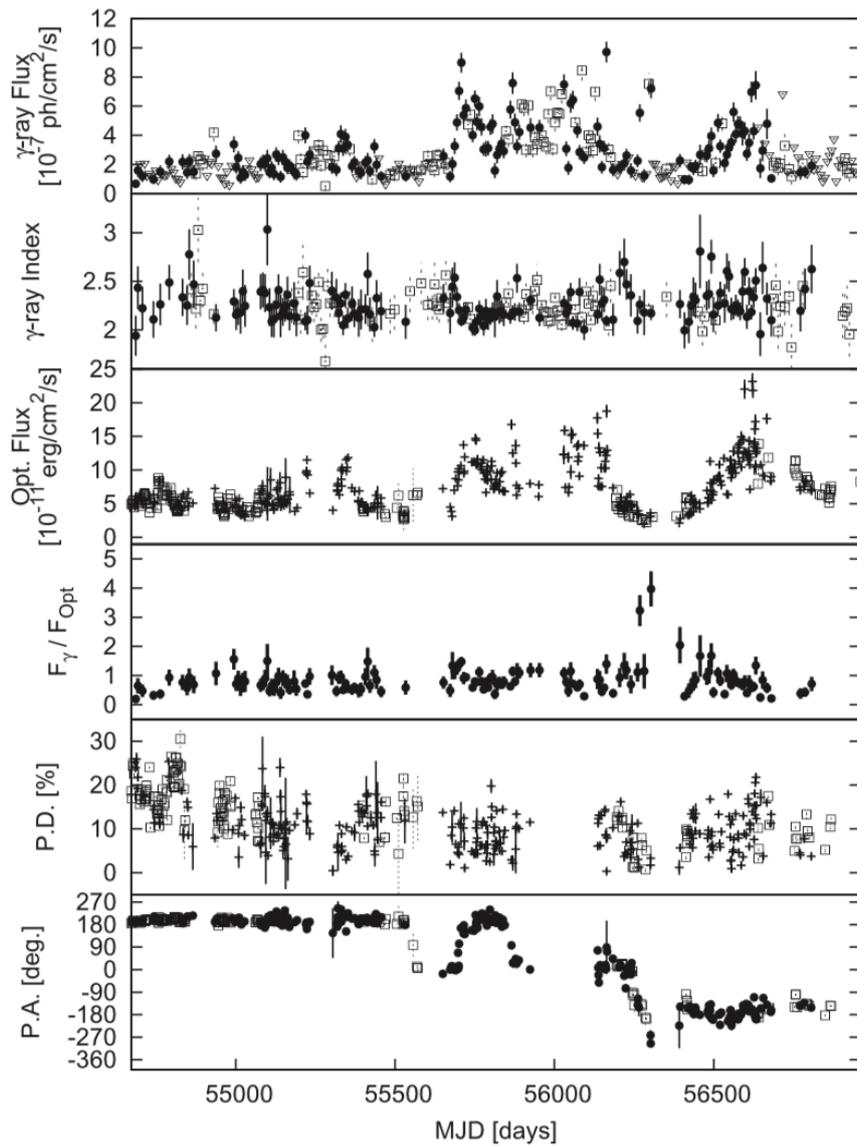


図 1.5: ブレーザー天体 BL Lac に多波長モニタリング観測で撮れた各パラメータの時間変動 [18]。横軸は MJD 時間、縦軸は上からそれぞれ γ 線光度、 γ 線光子指数、可視光の光度、 γ 線と可視光の光度の比、偏光度、偏光方位角。

SED

SED はスペクトルエネルギー分布、Spectral Energy Distribution の略である。周波数毎に放射エネルギーの分布を表すものである。図 1.6 は代表的なブレーザー天体の SED である。ブレーザーの SED は二つの連続成分から構成されている。電波から紫外線・X 線領域までを低エネルギー成分 (Low Energy component; LE 成分) と呼ぶ。一方、X 線領域からガンマ線領域までの高

エネルギー成分 (High Energy component; HE 成分) とする。LE 成分はシンクロトロン放射由来のものと考えられる。べき型のスペクトルに加え、電波から可視にかけての強い偏光がその証である。HE 成分は逆コンプトン散乱による放射と思われる。逆コンプトン散乱と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、高エネルギーの光子になる現象である。

ブレーザーは BL Lac 型天体と FSRQ の 2 種類に分けられると 1.1.1 節で述べた。FSRQ は BL Lac 型天体よりも遠方に存在する為、宇宙の初期に存在したと考えられている。BL Lac 型天体のスペクトルは吸収線や輝線が殆どなく、滑らかなスペクトルである。また、SED の極大が LE 成分にある場合もあれば、HE 成分にある場合もある。

BL Lac 型天体に対して、FSRQ のスペクトルには輝線が見られるのが特徴である。電波領域では平らなスペクトルになる。シンクロトロン放射由来の LE 成分の極大が赤外線域よりも短い周波数領域にある。SED 全体の極大が HE 成分にあることが多い。図 1.6 の Mrk 421 が BL Lac 型天体で、PKS 0528+134 が FSRQ である。

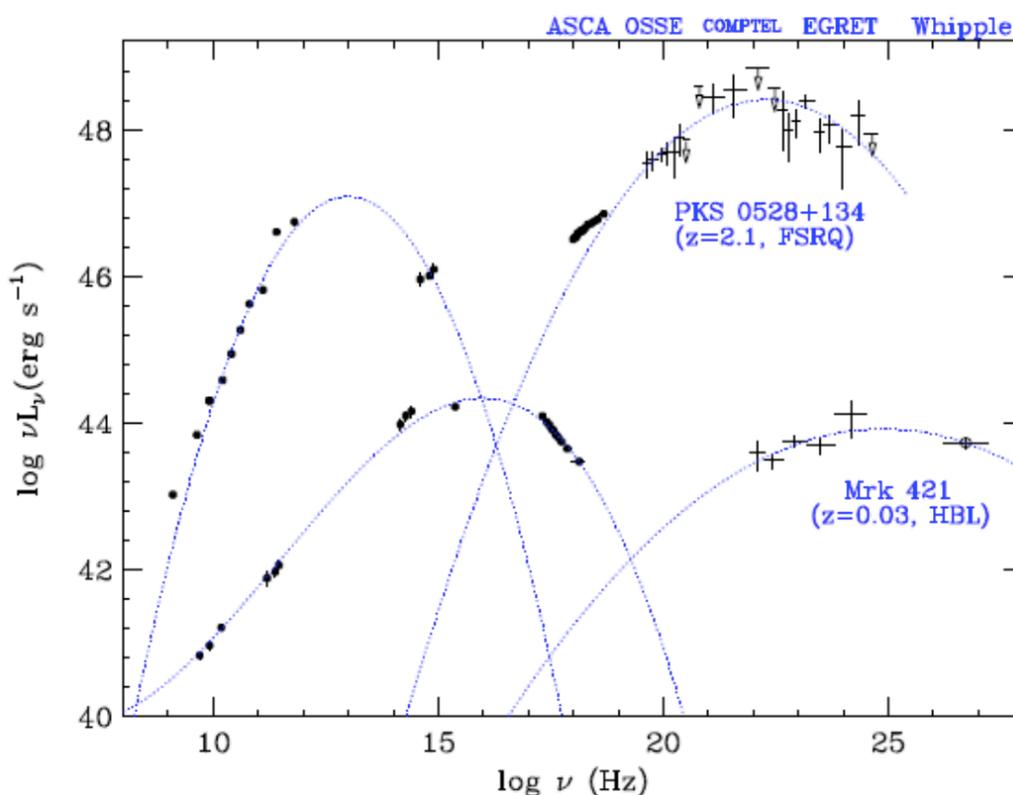


図 1.6: 代表的なブレーザーの SED。横軸は周波数、縦軸はエネルギーフラックス。BL Lac 型の例 : Mrk 421 ; FSRQ の例 : PKS 0528+134[11]。

シンクロトロン放射

速度を持つ電子が磁場の中でローレンツ力を受け、運動軌道が速度垂直方向に曲げられる。高エネルギーの電子が加速度によって速度方向に発生する光子のことをシンクロトロン放射と呼ぶ。

ローレンツ因子 γ を持つ電子が磁場 $B[G]$ の中で運動する時、単一電子から放射される単位時間単位周波数あたりの光量 $P(\nu, \gamma)$ は以下の式 1.1 ように表される [12]。

$$P(\nu, \gamma) = \frac{\sqrt{3}e^3 B \sin \alpha}{2\pi m_e c^2} F\left(\frac{\nu}{\nu_c}\right) \quad [ergs^{-1}Hz^{-1}] \quad (1.1)$$

ここで、 e, m_e はそれぞれ電子の電荷、質量であり、 α は磁場と電子の速度ベクトルのなす角である。なお、 α は自然中のプラズマでは一様に分布しているとされ、電子の集団の平均を考えることで、 α は式から消えることが多い。

$F(x)$ は

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

という 5/3 次の修正ベッセル関数 $K_{5/3}$ で表される関数である。

ν_c は臨界周波数と呼ばれるものであり、

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

と表される。

ブレーザーで観測されるシンクロトロン放射は、様々な γ を持った電子の集団からのシンクロトロン放射の総和であると考えられている。ローレンツ因子 γ における電子数密度 $N_e(\gamma)$ は冪函数

$$N_e(\gamma) = K_e \gamma^{-p} \quad (1.4)$$

で表す。 K_e を電子標準因子、 p を電子スペクトル因子とする。

電子のエネルギー範囲を γ_{min} から γ_{max} とするとき、全波長でのシンクロトロン放射強度 $P_{tot}(\nu)$ は単一電子から放射される単位時間単位周波数あたりの光量 $P(\nu, \gamma)$ と電子数密度 $N_e(\gamma)$ の積の積分である。

$$P_{tot}(\nu) = \int_{\gamma_{min}}^{\gamma_{max}} P(\nu, \gamma) N_e(\gamma) d\gamma \quad (1.5)$$

式 1.5 が SED の LE 成分を表す式である。

相対論的ビーミング

図 1.7 が 1988 年ハッブル望遠鏡の広視野カメラで撮った電波銀河 M 87 の画像である。銀河面の両側に出ていると思われるジェットが片方しか見えていない。これは相対論的速度の運動で、運動方向によって見かけの明るさが大きく変化するからである。

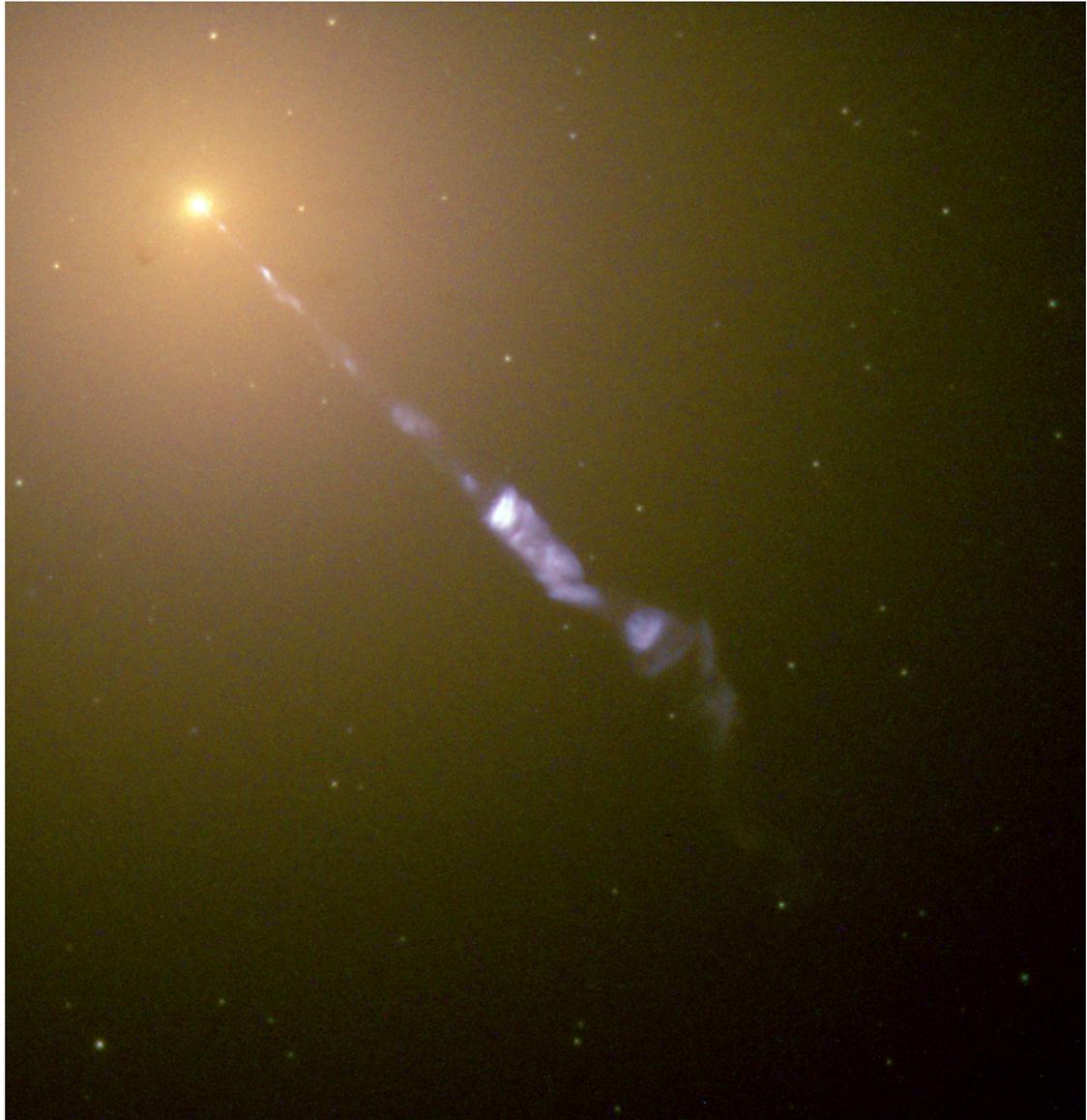


図 1.7: ハッブル望遠鏡で撮った電波銀河 M 87 とその電波ジェット

ブレーザーの観測では、ジェットの放射が極めて明るく観測され、他の成分 (降着円盤や可視輝線領域からの放射) に比べ卓越することが既に述べた。このような光速に近い速度で動く光源が出した光が相対論的效果によって運動方向に集中することをビーミング効果と呼ぶ。その理論を特殊相対論を使ってこの節で説明する [2]。

ジェット中で明るく輝くコンパクトな領域をノットと呼ぶ。ノットは視線方向に対し角度 θ を成す向きに、速度 $V = \beta c$ で動いているとする。 $\beta = \frac{V}{c}$ で、ローレンツ因子 Γ を

$$\Gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1.6)$$

と定義する。また、 δ をビーミング因子と呼び、式 1.7 のように定義する。

$$\delta \equiv \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)} \quad (1.7)$$

ノットが相対論的速度を持っているので、 V が c に近い時 β が 1 に近似する。さらにノットの進行方向と視線方向が近い時 $\cos \theta \approx 1$ になると考える。式 1.7 により、この時の δ が大きくなる。特殊相対論は時間遅れの効果がある。ノットの固有系と実験室系 (観測者系) での経過時間をそれぞれ Δt_s と Δt_{ob} とする時

$$\Delta t_{ob} = \frac{\Delta t_s}{\delta} \quad (1.8)$$

が成り立つ。ノットの明るさが時間変動した時、時間遅れの効果により、観測者は δ 倍短い時間での変動が観測されることになる。ノットから出る電磁波の振動数を ν_s 、観測される見かけ上の振動数 ν_{ob} が

$$\nu_{ob} = \delta \nu_s \quad (1.9)$$

になり、ノットの進行方向に近い角度から観測すると、 δ 倍高振動数の電磁波として観測される。

次に見かけの明るさを考えるために、ノットの運動方向に対して角度 χ の向きに進む電磁波があるとすると。進行方向のローレンツ変換は

$$\cos \chi_s = \frac{\cos \chi_{ob} - \beta}{1 - \beta \cos \chi_{ob}} \quad (1.10)$$

である。視線方向に向く電磁波とノットになす角 $\chi_{ob} = \theta$ なので、式 1.6 と式 1.7 を用いて

$$\Delta \cos \chi_{ob} = \delta^{-2} \Delta \cos \chi_s \quad (1.11)$$

が得られる。ノットの固有系で一定の立体角に放射された電磁波は実験室系で見るとノットの進行方向近くでは δ^2 倍小さい立体角で放射しているように見える。式 1.11 は電磁波が光源の進行方向に集中することを意味する。ノット固有系では、光が光源から等方的に放射すると仮定する。観測者と光源の距離を d と、本来の光度と観測される光度をそれぞれ L_{ν_s} と $S_{\nu_{ob}}$ と置く。光子の数は両方の系で一致するので

$$\frac{L_{\nu_s}}{h\nu_s} \Delta \nu_s \Delta t_s 2\pi \Delta \cos \theta_s = 4\pi d^2 \frac{S_{\nu_{ob}}}{h\nu_{ob}} \Delta \nu_{ob} \Delta t_{ob} 2\pi \Delta \cos \theta_{ob} \quad (1.12)$$

が成り立つ。ここで h はプランク定数である。したがって

$$\nu_{ob} S_{\nu_{ob}} = \delta^4 \frac{\nu_s L_{\nu_s}}{4\pi d^2} \quad (1.13)$$

が得られる。左辺が観測される輝度を表す式である。見かけ上では振動数の対数あたりの光度が δ^4 倍明るく見えることを意味する。これが観測者側に向く相対論的電波ジェットが卓越する原因だと考えられる。同様に、反対側に向くジェットが δ^4 倍暗く見える [2]。

例えば、 $\Gamma = 10$ (V がおよそ光速の 99.5% に達する) という相対論的速度で運動するノットを正面から観測することを考える。式 1.13 によると、その明るさが 10^4 倍明るく見える。一方、カウンタージェット (反対側のジェット) が同じ状況下では 10^4 倍暗く見える。そのコントラストが 10^8 に達することになる。図 1.7 に片方のジェットしか映っていないのが上記の原因だと考えられる。理論を支持する観測事実とも言える。

1.2 偏光及び偏光方位角の回転

ブレーザー天体の偏光観測が盛んにされて来た。その観測データから偏光方位角の回転を解析し、ジェットの磁場構造を調べる研究が行われた。

BL Lac の観測から提案された螺旋磁場構造を持つジェット

2008年、Marscher, Alan P., et al. は BL Lac の観測及び解析結果を報告した。図 1.8 は四つの観測量の時間変動をまとめたものである。上からそれぞれ 2–10 Kev 領域 X 線の光度、可視光 R バンドの光度、可視光の偏光方位角、偏光度の時間変動である。2005 年 8 月直後、可視光のフレアとともに偏光方位角が連続的に 180 度以上変動を見せた。これを偏光方位角の一方向への回転と解釈された。これを根拠に Marscher, Alan P., et al. がジェットの内部に図 1.9 の様な螺旋磁場構造があるのではないかと考えた。横軸の R_s は Schwarzschild 半径であり、 R_g を単位に中心巨大ブラックホールからの距離を表している [13]。この描像によると、ノットが螺旋状分布の磁場に沿って移動し、ノットが回転しながら進むことで、観測される偏光方位角が変わったと考えられる。このモデルの場合、偏光方位角の回転方向が今回の観測結果のように常に同じ方向になるはずである。この螺旋磁場モデルが話題を呼んだが、それ以後 BL Lac には同現象が観測されなかった。

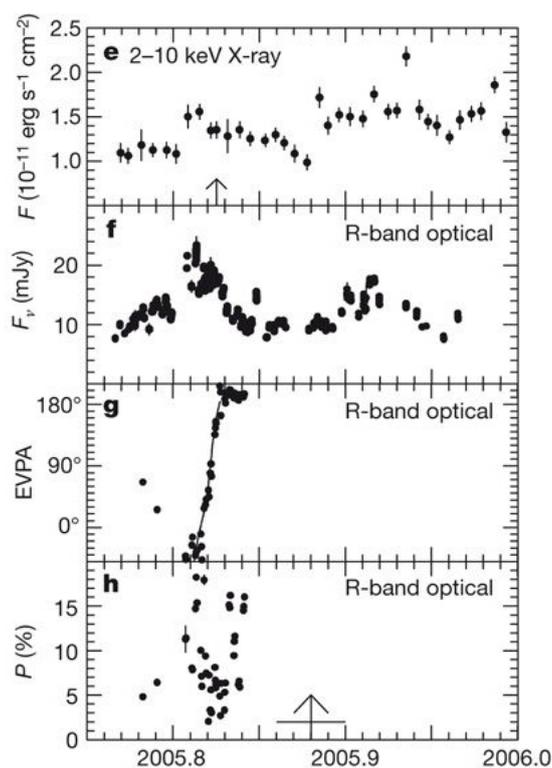


図 1.8: BL Lac で観測された時間変動 [13]。横軸は時間、縦軸は上からそれぞれ X 線及び可視光の光度、偏光方位角、偏光度。

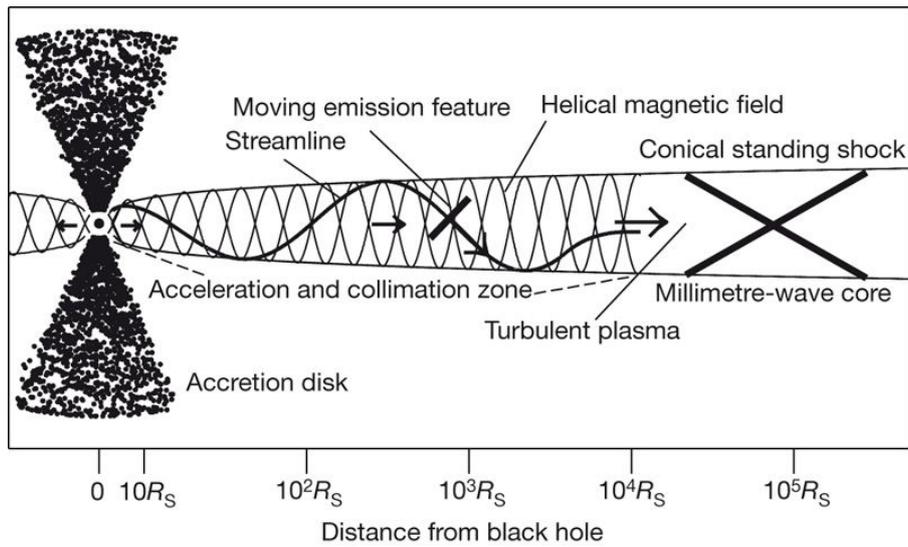


図 1.9: 偏光方位角の回転から推測されたジェットのスピン磁場構造 [13]。横軸は中心巨大ブラックホールからの距離。Rs は Schwarzschild 半径。

3C 279 で観測された両方の方向に回転する偏光方位角

図 1.10 は FSRQ 天体 3C 279 の 2008 年 7 月 3 日から 1 年間の多波長観測の結果である。上からそれぞれ、 γ 線領域の光度、光子指数、x 線領域の光度、可視光各バンドの光度、偏光度、偏光方位角、近赤外線各バンドの光度、電波各領域の光度の時間変動である。点線で区切った部分が活動期の様子である。 γ 線領域の減光と同時に、偏光方位角の劇的変化が観測された。これは γ 線と偏光が同じ領域から放射していることの証拠として捉えられた。また、偏光方位角が両方の方向へと回転したため、放射領域に非軸対称の幾何学構造を持つことが求められる。著者たちはこの観測結果を説明するために、中心ブラックホールからおよそ $10^5 R_s$ 距離のところまでジェットが曲がったと提案した [14]。

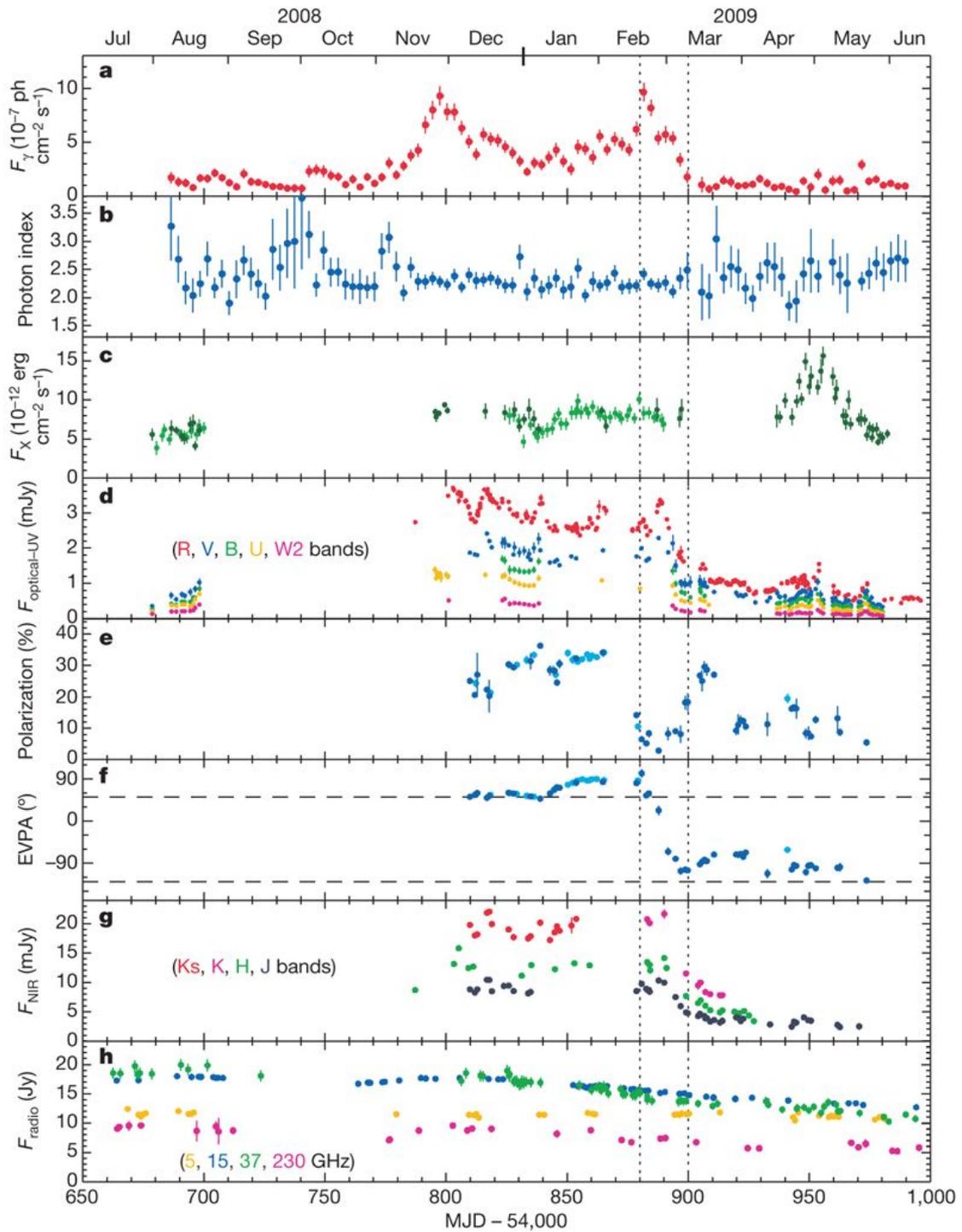


図 1.10: ブレーザー天体 3C 279 の多波長観測による各パラメータの時間変動。横軸は修正 MJD 時間、縦軸は上からそれぞれ、 γ 線領域の光度、光子指数、x 線領域の光度、可視光各バンドの光度、偏光度、偏光方位角、近赤外線各バンドの光度、電波各領域の光度 [14]。

偏光方位角の回転が天体固有の特徴である証拠

RoboPol はギリシャの 1.3 メートル望遠鏡を用いたブレーザーの偏光観測プロジェクトである。ブレーザーの観測で偏光方位角の回転を検出し、それを根拠にジェットのパラメータを推測するのが一般的であるが、観測された偏光方位角の回転がジェット固有なのか、それともランダムに動いた偶然の結果なのかと常に考える必要がある。RoboPol チームは 2016 年に、これまで 3 年間の観測で偏光方位角の回転が観測されたイベントに対し統計解析を行った。図 1.12 が一部の観測事例である。上からそれぞれ偏光度、偏光方位角、R バンド光度の時間変動である。なお、偏光方位角の回転が発生している期間のデータが黒丸でプロットされている。図 1.11 がブレーザーの種類ごとに、偏光の回転が観測された天体とそうでない天体の分布を表すグラフである。シンクロトロン放射のピーク周波数が可視領域と比べ、より低いか (Low Synchrotron Peak; LSP), 可視領域にあるか (Intermediate Synchrotron Peak; ISP), より高いか (High Synchrotron Peak; HSP) によって三つのグループに分けられている。もし偏光方位角の回転がランダムに動いた偶然の結果なら、どのグループでも同じ割合で偏光方位角の回転現象を持つブレーザーが存在するはずである。しかし、統計結果を見ると、LSP グループだけに偏光方位角の回転がよく観測されることが一目瞭然であった。このことを偏光方位角の回転が一部のブレーザーの特徴であり、天体固有の現象であると結論付けた [15]。

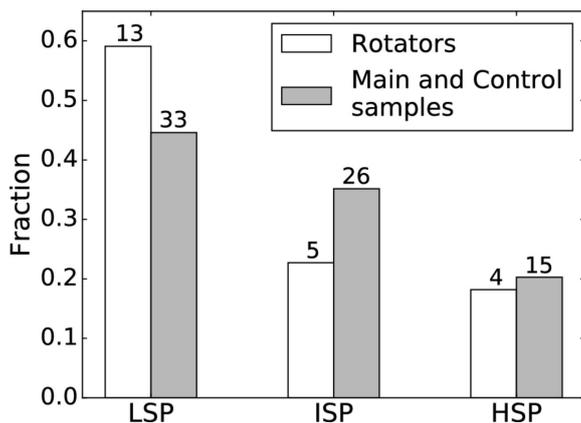


図 1.11: 偏光方位角回転現象の有無によるグループごとの統計結果 [15]

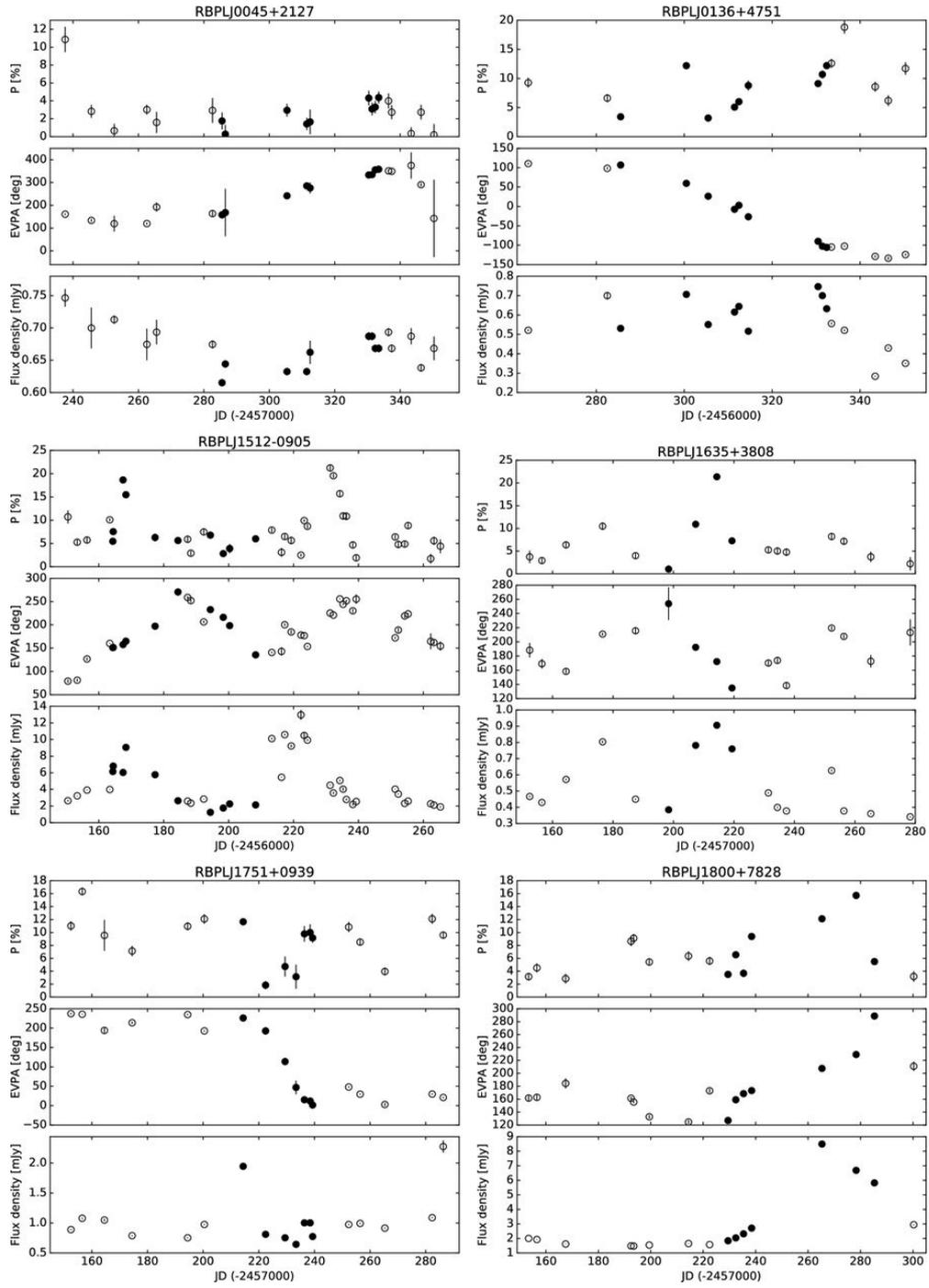


図 1.12: RoboPol チームが解析した偏光方位角の回転が観測された事例の一部 [15]。天体ごとパネルグラフで時間変動を示す。横軸は修正 JD 時間、縦軸は上から偏光度、偏光方位角、光度。

1.3 研究目的

ブレーザーの偏光解析で出会う難所

1.2 節で紹介した様に偏光方位角の回転からジェット内部の磁場構造や、ジェットの幾何学構造を推測することができる。一方向への回転の場合、螺旋状の磁場に沿ってノットが運動する可能性が高いが、回転方向の変化が発生している場合、ジェット自体が曲がっていることなどより複雑な構造が考えられる。また、RoboPol の統計結果によると、少なくともランダム運動の偶然結果ではなく、有意性を持つ偏光方位角の回転が存在すると言える。ランダム運動が偏光方位角の回転に見えることを完全に避けられないが、偏光方位角の回転を調べるのが依然として重要な研究手段である。この背景を踏まえて、今まで偏光方位角の回転現象が複数回観測されたブレーザー天体を研究対象にした方が有意性の高い回転現象を発見しやすいであろう。

従来の解析手法では、図 1.12 の様に偏光方位角の時間変動を見て回転が発生したかどうかを判断するのが一般的である。しかし、この場合、QU 平面の原点を回転中心としない回転を検出することが難しい。

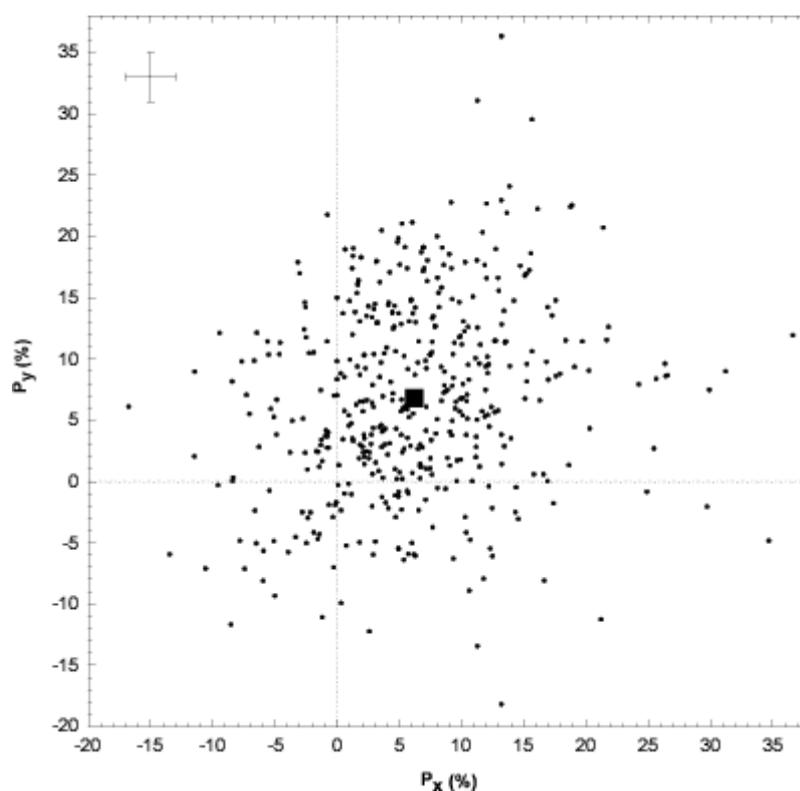


図 1.13: BL Lac の 1969 年～1991 年の偏光ストークスパラメータの QU 平面での分布。四角ポイントが平均中心であり、QU 平面の原点から離れている。[16]

図 1.13 は BL Lac の 1969 年～1991 年の偏光ストークスパラメータを QU 平面にプロットしたものである。四角ポイントが平均中心であり、QU 平面の原点から離れているのが分かる。このように、ブレイザーでは天体によっては常に高い偏光度を持つ。また、偏光ストークスパラメータの分布が、天体によっては QU 平面の原点から離れた領域に集中していることもある。偏光方位角の回転中心が QU 原点付近に無い場合、偏光方位角の時間変動グラフだけでは読み取ることが出来なくて、天体の偏光ストークスパラメータが QU 平面上での動きを時系列で調べる必要があるが、集中しているプロット点からパターンを識別し、回転を探するには限界がある。例えば図 1.14 が FSRQ 天体 3C 454.3 の過去の偏光ストークスパラメータを QU 平面上にプロットしたものである。このようにデータが大規模になると搜索自体が容易じゃなくなり、解析が困難になる。この問題を解決するため、新しい可視化技術が偏光研究を続ける上に必要となってくる。

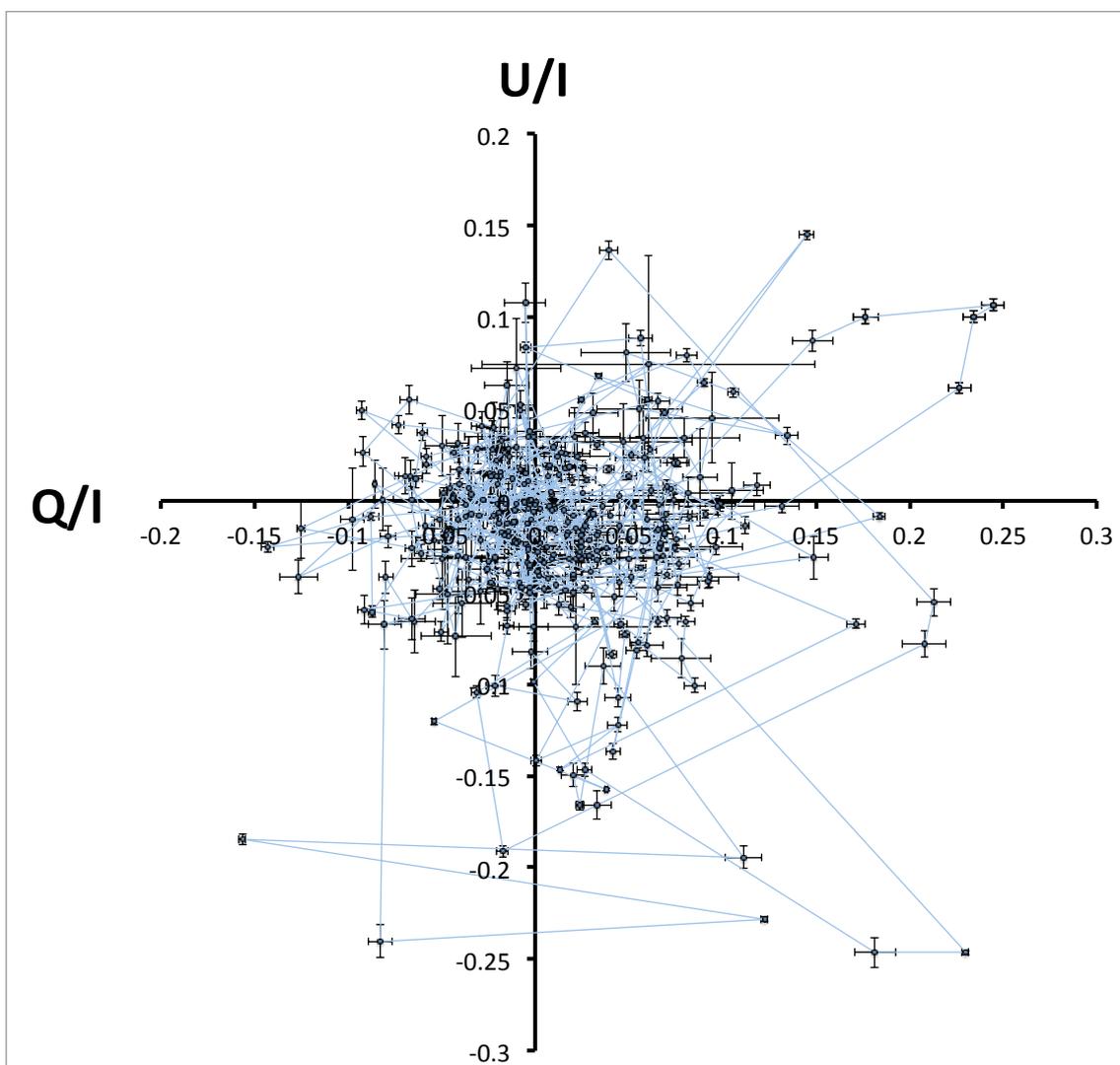


図 1.14: FSRQ 天体 3C 454.3 の過去およそ 6 年間の偏光方位角のデータ

目的と論文構成

一般的にレーザーの偏光解析では、光度、偏光度、偏光方位角、色及びそれぞれの誤差に時間を加えた多次元データを扱う。膨大な多次元データに潜む構造を認知し、各パラメータ間の相関研究を行うには上記のような難点がある。特に、偏光方向が回転中心がQU平面の原点から大きくずれている場合、回転現象が検出されず見逃される可能性がある。より効率的に正確な解析を行えるように、TimeTubesという可視化技術が開発された。この多次元データを三次元のチューブで時系列順に繋ぐ事によって、時間に沿って簡単に相関関係を確認することを実現した。本研究では、TimeTubesを使って新しい解析及び研究手法の確立を目的とする。

2章では本研究で扱うレーザー 3C 454.3 のデータ及びその観測装置と TimeTubes の説明をする。3章では TimeTubes を用いて偏光の回転を探索した結果と、検出された偏光回転の特徴を述べる。4章では今まで 3C 454.3 で検出されてきた偏光回転も合わせた考察と、TimeTubes による偏光回転の検出法について考察する。5章で本論文をまとめる。

第2章 データと解析

2.1 かなた望遠鏡及び解析に使ったデータ

かなた望遠鏡



図 2.1: 広島大学かなた望遠鏡正面写真 [17]

写真 2.1 が広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台の基盤をなす光学赤外線望遠鏡「かなた」である。また、図 2.2 に各部品の名称や望遠鏡寸法を記載した模式図である。この望遠鏡は、もともと大学共同利用機関である国立天文台がその三鷹キャンパス内(東京都)に「赤外シミュレータ」という名前で建設・所有し、主にすばる望遠鏡(1999年竣工)の観測装置の試験に活躍してきた。広島大学は、この望遠鏡を、観測環境および利便性に優れた東広島市東南部の山頂部へ2006年に移設し、望遠鏡制御系の改良、新しい観測装置の開発を進め、活用してきた [17]。

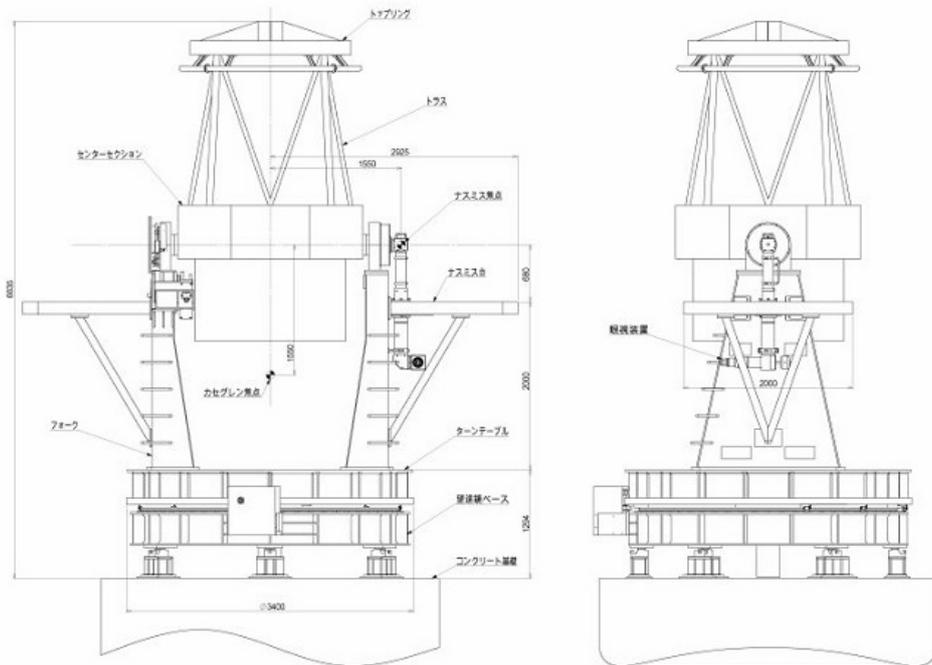


図 2.2: 広島大学かなた望遠鏡外観模式図 [17]

かなた望遠鏡の諸元を表 2.1 にまとめた。かなた望遠鏡の主鏡の有効径は 1.5m で、大学が国内に所有する望遠鏡として最大級になり、高い集光力を持つ。さらに、方位速度 5 度/秒、高度速度 2 度/秒という世界的にも優れた駆動性能を持つ。この駆動性能は口径 1.5m クラスの望遠鏡としては世界最高水準である。この強みを活かして、X線やガンマ線で天体を観測する人工衛星と連携し、フォローアップ観測も行われている。大学付属施設であるため、同一天体を長期に渡って密に観測できることが大きな強みである。他大学が持つ望遠鏡と大学間連携も組み、大学望遠鏡ならではの、特徴あるユニークな観測研究を推進している。

表 2.1: かなた望遠鏡主な諸元 [17]

項目	仕様
光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	1500mm
主鏡材	ULE(Ultra Low Expansion; 超低膨張) ガラス
合成 F 値と焦点距離 f	$F/12.2$ $f = 18,300\text{mm}$
視野	直径 15 分角
焦点面スケール	11.271 秒角/mm
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 1000kg

可視赤外線同時撮像分光器 TRISPEC

TRISPEC は Triple Range Imager and SPEC trograph の略である。文字通り、可視及び赤外線合計三つの波長域に分けて撮像と分光を同時に行える観測装置である [19]。2006 年から 2013 年までかなた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられた。かなた望遠鏡に設置してから主力装置として観測に用いられたが、検出器制御部分の故障により 2011 年 7 月に運用を停止し、2013 年 12 月に望遠鏡から取り外された。

1 露出型偏光撮像装置 HOWPol

HOWPol は広島大学が独自に開発した 1 露出型偏光撮像装置である [20]。かなた望遠鏡の第一ナスミス焦点に設置され、2008 年冬より現在まで観測に用いられている。この装置は、一回の露出で直線偏光パラメータの導出が可能な偏光素子を実装されている [17]。

可視近赤外線同時カメラ HONIR

TRISPEC の後継機として広島大学宇宙科学センターが独自に開発しているものである。最大で可視 1 チャンネルと近赤外線 2 チャンネルの 3 チャンネルで同時に観測が可能な世界的にも珍しい機能を有する。2011 年に 2 チャンネルの撮像モードで運用を始めた。その後、2014 年までに分光モード、偏光撮像／偏光分光モードが立ち上がっている。2019 年 3 月現在、可視 1 チャンネルと近赤外線 1 チャンネルの 2 チャンネルで運用されている [17]。

2.2 本研究で用いるデータ

2008 年 8 月から 2014 年 12 月までおよそ 6 年間に渡って、かなた望遠鏡を用いて、FSRQ 天体 3C 454.3 の可視光及び近赤外線の偏光観測を行われた。TRISPEC を用いて 2008 年 7 月から 2010

年2月までV、J、およびKsバンドの測光および偏光観測を行い、HOWPolを用いて2008年7月から2014年12月までのVおよびRCバンド測光および偏光測定観測を行った[18]。本研究ではこれらのデータを用いた。

偏光度 PD と偏光方位角 PA は線偏光についてのストークスパラメータ I, Q, U と以下の関係にある。

$$PD = \sqrt{\frac{Q^2}{I} + \frac{U^2}{I}} \quad (2.1)$$

$$PA = 0.5 \arctan \frac{U}{Q} \quad (2.2)$$

偏光度と偏光方位角は光源が単一の場合は直感的にわかりやすいが、光源が複数成分存在する場合は加算性があるストークスパラメータが使われることもある。特に横軸に Q (Q/I)、縦軸に U (U/I) で表示する QU 平面がよく使われる。偏光の回転は偏光方位角の増加や減少として定義され、同時に QU 平面上での回転としても観測される。

本研究で使う可視光の観測は波長 550 nm 付近に感度を持つ V バンド、近赤外線観測は $1.2 \mu\text{m}$ 付近に感度を持つ J バンドを用いている。それぞれのバンドでの光子フラックスを f_V, f_J とした時、それぞれの等級 m_V, m_J は

$$m_V = -2.5 \log f_V + C_V \quad (2.3)$$

$$m_J = -2.5 \log f_J + C_J \quad (2.4)$$

で定義される。この時、それぞれのバンドの等級差 $m_V - m_J$ は色指数 $V - J$ と呼ばれる。等級の定義からわかるように、色指数はスペクトルの傾きを表す。色指数は値が小さいほど短波長側のフラックスが強い、ハードなスペクトルになり、値が大きいほど長波長側のフラックスが強い、ソフトなスペクトルになる。

2.3 TimeTubes

解析に使うレーザーのデータは、一般的に光度、偏光度、偏光方位角、色及びそれぞれの誤差に時間を加えた多次元データである。さらに長期間に渡る観測だと、データ数が数百点を超えることがある。1.3節で触れたが、膨大な多次元データの解析では、漏れがあったり、偏った結果になる可能性が十分ある。ここで新しい可視化技術をレーザーの解析への適用が必要である。このニーズに応えるため、慶應義塾大学と広島大学は2015年より共同研究を行い、それによってTimeTubesという解析をサポートするソフトが開発された。前述の多次元データを三次元のチューブで繋ぐ事によって、時間に沿って簡単に相関関係を確認することを実現した。

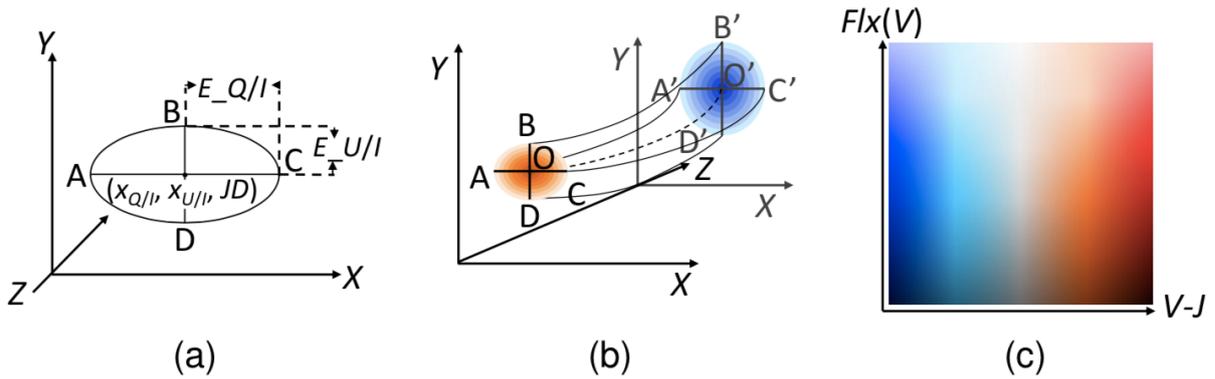


図 2.3: TimeTubes 実際の視覚効果:(a) 偏光ストークスパラメータ及びその誤差を楕円として表現する。(b) 異なる時刻の楕円を時系列で繋ぐ。(c) カラーマップの例。[21]

以下、文献 [21] に従って、TimeTubes について紹介する。図 2.3 が TimeTubes 実際の視覚効果を示した図である。左側の (a) は一つのデータ点を楕円として三次元空間にプロットしたものである。X と Y がそれぞれ偏光ストークスパラメータの U/I と Q/I に相当する。XY 平面が QU 平面となり、楕円の中心が該当データの QU 平面上での位置になる。また楕円の X 軸方向と Y 軸方向の半軸の長がそれぞれ U/I と Q/I の誤差を表している。こうして四つのパラメータを楕円を使うことによって直感的に見やすく表現できている。最後に Z 軸を時間軸となり、時系列でデータを繋いで行く。図 2.3 の (b) が二つの時刻のデータを繋いだ様子を示している。二つの楕円を Catmull-Rom スプライン曲線で繋いでいる。Catmull-Rom スプライン曲線は制御点を必要とせず、全ての点を通る曲線である。こうする事で、異なる時刻のデータが一つのチューブで繋ぎ三次元区間で視覚化を実現した。(b) の二つのデータにそれぞれ赤色と青色と半透明の着色があり、これは該当時刻の天体データのカラー及光度を表すものである。(c) がカラーマップの一例である。横軸 $V - J$ での位置が V バンドと J バンドでの明るさによって決まる天体の色であり、左側が青く、右側が赤いことになる。また、縦軸が光度で上に行くほど天体が明るいことを意味する。このように色と明暗を付けた楕円をチューブ状に繋いで、三次元空間で視覚化する事で、偏光ストークスパラメータ及びその誤差 (QU 平面上で見る偏光方位角)、天体光度、色指数を時系列に沿って確認でき、より効率よく解析を行うことを実現した。

図 2.4 はブレイザー 3c 454.3 のデータを TimeTubes にて表示した例である。斜めの角度から見ると全データが時系列に沿って繋いでいるのが良く分かる。緑の方眼紙がカレント時刻を表している。縁部分が緑色で色付きた楕円達が各データ点である。データを眺める角度や色と明暗の閾値範囲など細部のことが目的に合わせて設定可能である。

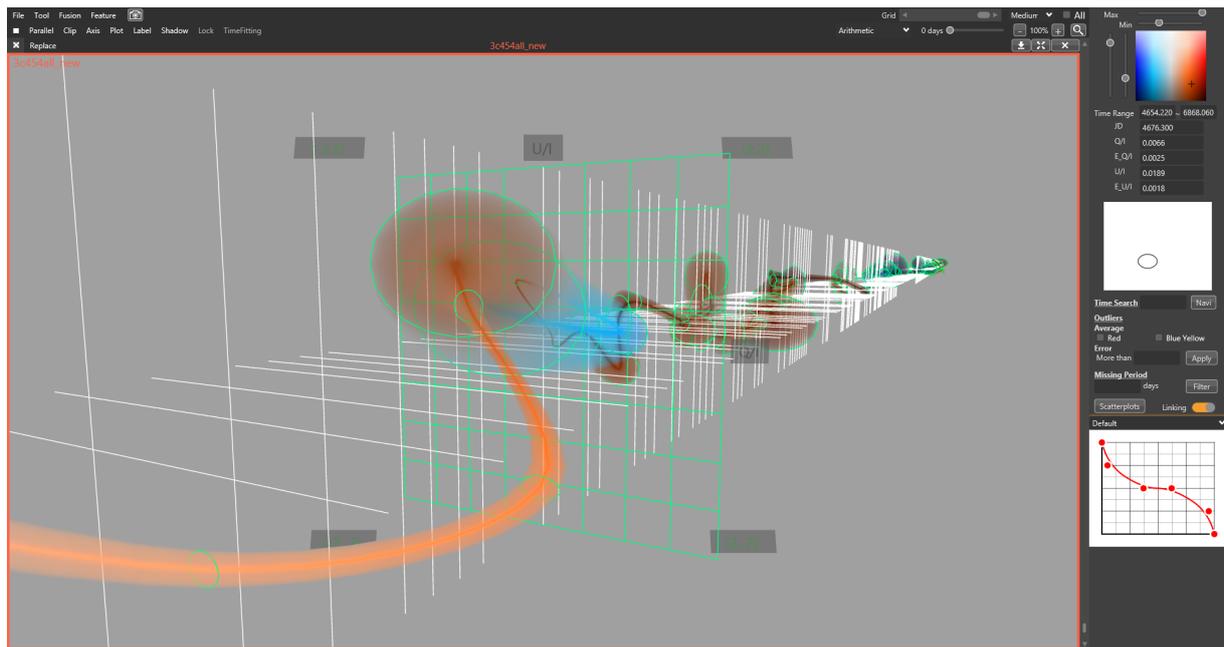


図 2.4: TimeTubes 操作画面の一例 [21]

偏光方位角の回転中心は QU 平面の原点付近にあるとは限らない [16]。TimeTubes には回転中心の位置に関係なく回転を検出する機能が備えている。以下で、現在の TimeTubes に実装されている偏光の回転を検出するアルゴリズムを説明する。

1. まず、目的に合わせて回転が発生すると思われる時間帯の長さを設定する。各観測時刻から指定された時間間隔が TimeTubes の検索期間になる。デフォルト値は 20~30 日になっており、これは過去のブレイザー関係の研究報告 [23] に従った経験値である。
2. 次に、TimeTubes が各時間間隔に含まれる Q/I と U/I の加重平均と標準偏差を計算する。求めた加重平均を該当時間間隔の回転中心とし、このように回転の中心を定義することで、回転中心が QU 平面の原点付近にない場合も検出することが可能となる。平均を求める時、各時間間隔の始点と終点が異常値に当たると影響を受けやすいので、正規分布で加重をかける事によって避けられる。この加重関数も考え方に合わせて設定可能であり、デフォルトは $\sigma = 3$ の正規分布に設定しているが、フラットにすることも可能である。
3. 第 3 ステップとして、TimeTubes が求めた加重平均を該当時間間隔の回転中心とする。時間間隔ごとに、各データ (x, y) を求めた回転中心を原点として極座標 (r, θ) に変換する。該当時間間隔の標準偏差が全データの標準偏差と比べ、より大きい場合回転が起こり得ると認識する。
4. 最後に、 θ を用いて該当時間間隔の合計回転角度を計算する。予め設定した合計回転角度閾値 (デフォルト値は 270 度) よりも大きい場合、該当時間間隔を検索結果として表示する。

隣接する2データの間での回転角度は極座標の θ の差で決まる。しかし、 $\theta \in [0, 2\pi]$ の制限があるため、隣接するデータが第1と第4象限にある場合、回転方向に制限した上で計算する必要がある。 θ の差が π より大きい場合、回転方向を指数平滑法 [22] による観測点の予測値を用いて判断する。指数平滑法は、平滑化された時系列データの予測をするのに適している。ある時刻の回転方向の判断を行いたい時、その時刻より前のデータを使う。該當時刻から時間的に近い観測データを遠いデータよりも大きい加重をかけ、該當時刻のデータを予測する。該當時刻の θ の観測値が指数平滑法による予測値より π 以上大きい時は時計回りと判断し、 $-\pi$ より小さい時は反時計回りと判断する。

第3章 結果

3.1 データ

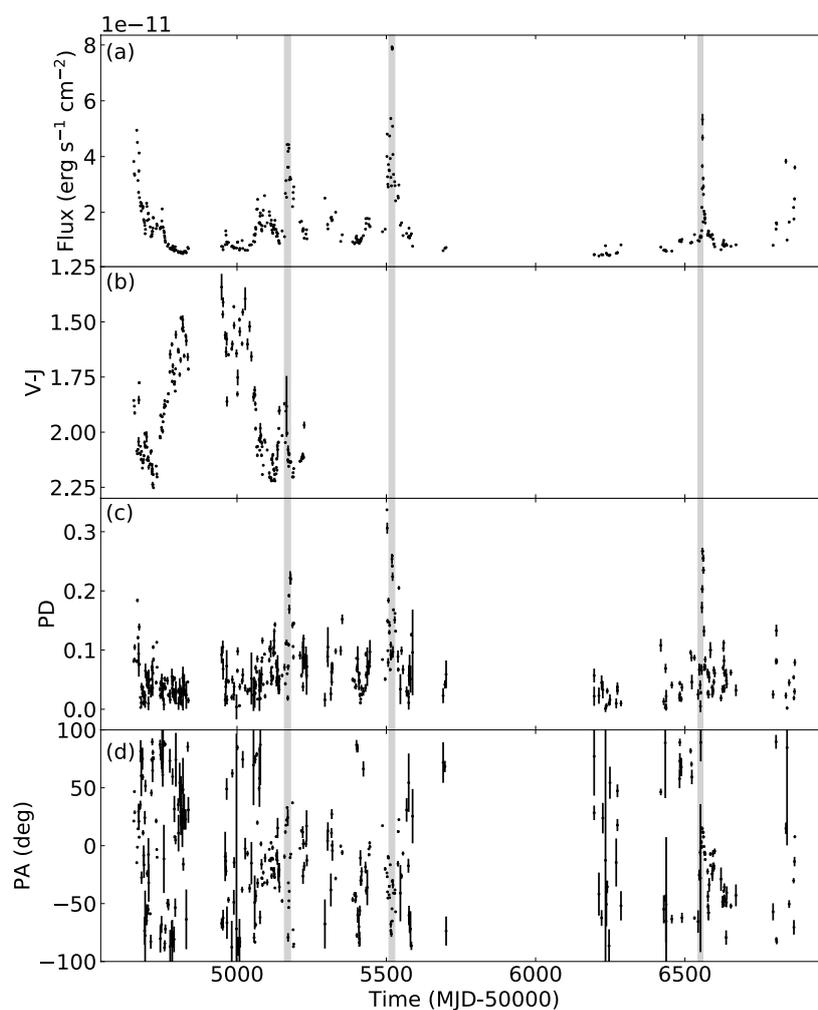


図 3.1: 本研究で用いるデータの時間変動。横軸は修正 MJD 時間、縦軸は上から (a) 光度曲線、(b) 色指数 ($V - J$)、(c) 偏光度 (PD)、(d) 偏光方位角 (PA)。色指数 ($V - J$) は MJD 55224 までしかデータがない。

表 3.1 に本研究で用いるデータをまとめた。また、図 3.1 は本研究で用いる全データの時間変動である。上から (a) 光度曲線、(b) 色指数 ($V - J$)、(c) 偏光度 (PD)、(d) 偏光方位角 (PA) である。ただし、色指数 ($V - J$) は MJD 55224 までしかデータがない。パネル (a) からわかるように、観測期間のごく初期と末期を含めて、大規模なフレアが 5 つ起こっている。灰色の領域で示されているのが TimeTubes によって検出された 3 つの偏光の回転期間である。

表 3.1: 本研究で用いるデータの詳細情報

天体名	3C 454.3
MJD days	54,654.22~56,868.06
期間	2008 年 7 月~2014 年 12 月、計 6 年 5 ヶ月間
観測装置	かなた望遠鏡 TRISPEC 及び HOWPol
バンド	V バンド、J バンド (MJD 55224 まで)
データ点数	354 点

3.2 回転検出と補正

2.3 節で紹介したように、($Q/I, U/I$) 平面で偏光の回転を検出するためには、搜索する期間、回転による偏光方位角の変化量の下限值、回転中心の定義に用いる重み関数のパラメーターを設定する必要がある。本研究では、以下の手順で解析を行なった。

1. 3C 454.3 について、先行研究 [23] では 10~30 日程度の期間の偏光の回転が報告されていた。また、偏光方位角の変化量は小さすぎるとランダムな変動と見分けられず、先行研究 [23] でも 200 度程度以上の変化量が報告されていた。これを踏まえて、本研究ではまず搜索期間を 10~30 日、偏光方位角の変化量の下限値を 180 度、重み関数は標準偏差 5 の正規分布を用いて、偏光の回転現象の候補を TimeTubes で検出する。検出した三つの偏光の回転現象について詳しい情報を表 3.2 にまとめた。また、その結果がそれぞれ図 3.2, 図 3.4, 図 3.6 である。本論文では回転の開始時刻が MJD 55159, 55509, 56544 のものをそれぞれ回転 1、回転 2、回転 3、と呼ぶ。
2. 次に、TimeTubes を用いて抽出された偏光回転の前後のデータを確認し、回転現象が起きている期間を再度決定する。
3. 更新された回転期間内の Q, U の平均値 Q_c, U_c を求め、それを回転中心と定義し、 $Q' = Q - Q_c, U' = U - U_c$ のように補正されたストークスパラメータ Q', U' を計算する。
4. Q', U' を用いて補正された偏光方位角 $PA' = 0.5 \arctan(U'/Q')$ を計算する。同様に、補正された偏光度を $PD' = \sqrt{(Q'^2 + U'^2)}/I$ とする。ここで、 PD' は本来は Q', U' に対応する $I' = I - I_c$ を用いて正規化すべきだが、 I_c は未知なので、ここでは I_c が時間変化しないという仮定のもと、 I で正規化する。したがって、 PD' はその相対的な変化は議論できるが、絶対値は系統誤差が大きいことに注意が必要である。

表 3.2: TimeTubes を利用した偏光方位角の検索結果

	回転 1	回転 2	回転 3
開始時刻 MJD(days)	55159.010	55509.050	56544.220
回転期間 (days)	20	19	16
グレゴリオ暦時間	2009 年 12 月	2010 年 11 月	2013 年 9 月
回転中心 ($Q/I, U/I$)	(0.0574, -0.0227)	(-0.0090, -0.1244)	(0.0649, 0.0082)
回転直径	(0.2732, 0.2718)	(0.2650, 0.2108)	(0.2702, 0.1591)
回転方向	反時計回り	反時計回り	反時計回り
回転角度 (度)	342	1079	190
データ点数	12	14	12

3.3 結果

回転 1

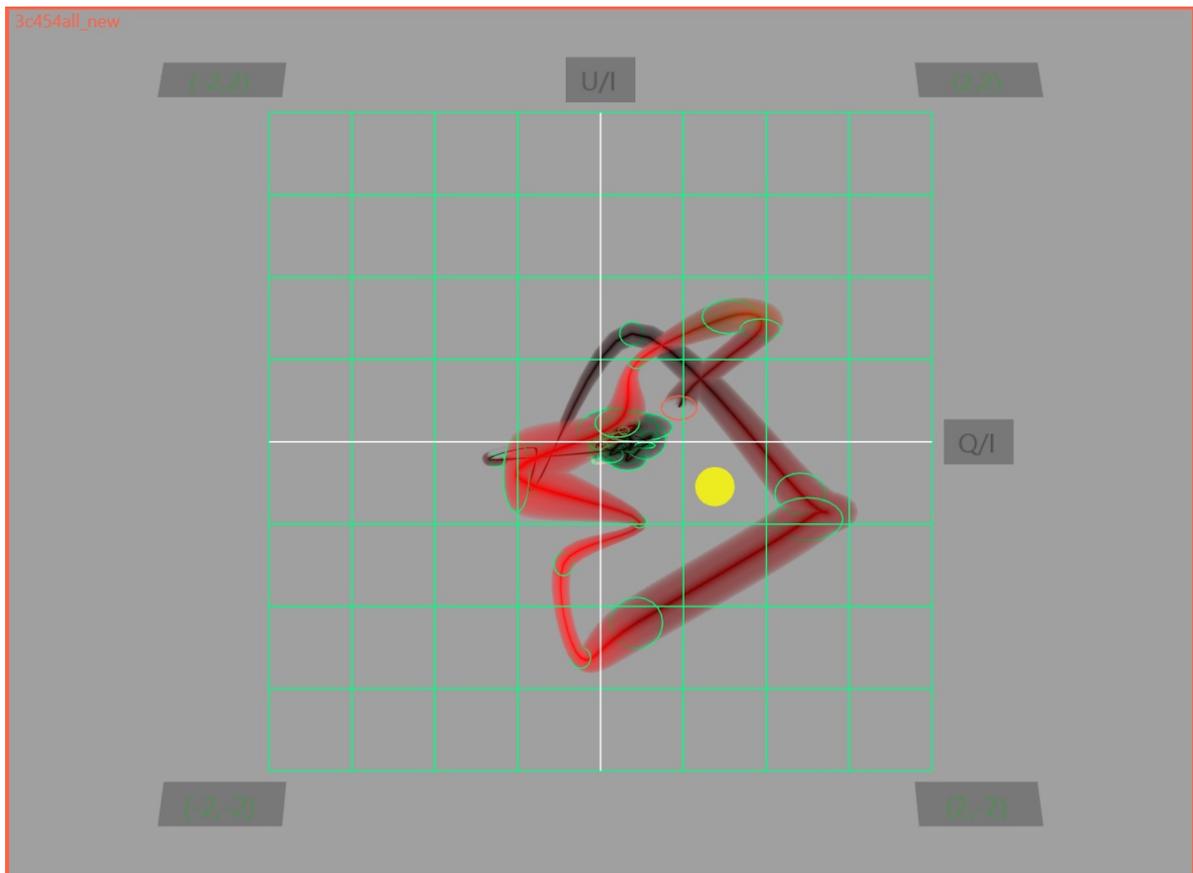


図 3.2: 3.2 節の手順 1 で検出した回転 1。偏光回転の期間は MJD 55159.010～55179.010 の 20 日間である。

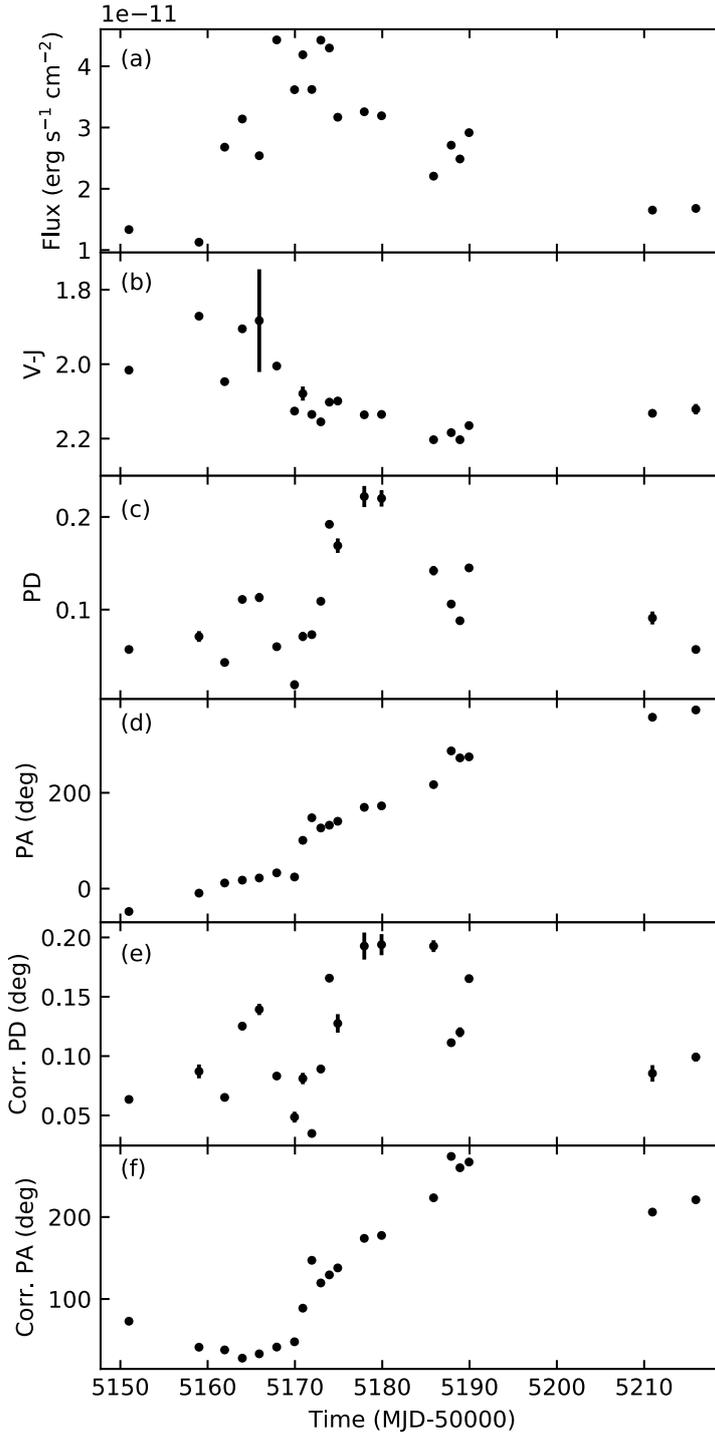


図 3.3: 図 3.2 の回転 1 付近の時間変動。横軸は修正 MJD 時間、縦軸は上から (a) 光度曲線、(b) 色指数 ($V - J$)、(c) 偏光度 (PD)、(d) 偏光方位角 (PA)、(e) 補正された偏光度 (PD')、(f) 補正された偏光方位角 (PA')。

図 3.3 は 3.2 節で述べたように補正をした回転 1 付近の時間変動である。パネル (a) からわかるように、この期間は大規模なフレアが発生している。偏光の回転が確かに発生していることがパネル (d) と (f) からわかる。補正前の偏光方位角の変化 (パネル (d)) でも回転が確認できるのは、この回転は回転中心が図 3.2 で示したように QU 平面の中心から大きくずれていないからである。パネル (f) から回転の期間は MJD 55163.97~55189.94 の約 26.0 日間であることがわかる。この期間が TimeTubes で推定された回転の期間と異なるのは、 Q/I , U/I ではなく、可算性のある Q , U で正しく補正したためと考えられる。回転期間中の偏光方位角の変化量は 239 度、回転率は 9.2 度/日と計算された。偏光が回転する期間は、天体が明るい状態 ($> 2.0 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) にある期間とほぼ一致する。TimeTubes によって検出された 3 つの偏光回転のうち、色指数 ($V - J$) の情報があるのはこの回転 1 だけだが、パネル (b) をみてわかるように、色はフレア初期が最も青く、フレア後期にかけて単調に赤く変化している。この変化は光度曲線と相関が低く、むしろ偏光方位角の回転と似ている。

回転 2

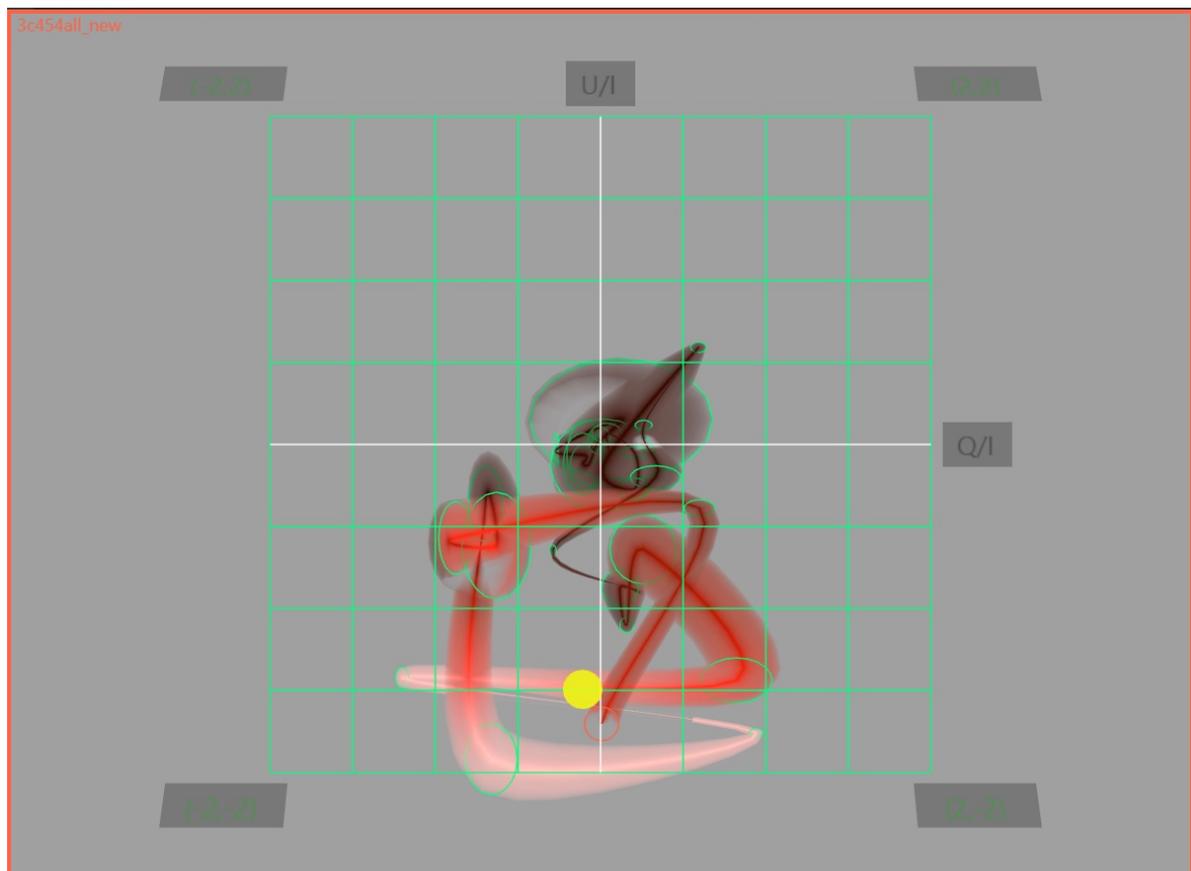


図 3.4: 3.2 節の手順 1 で検出した回転 2。偏光回転の期間は MJD 55509.050~55528.050 の 19 日間である。

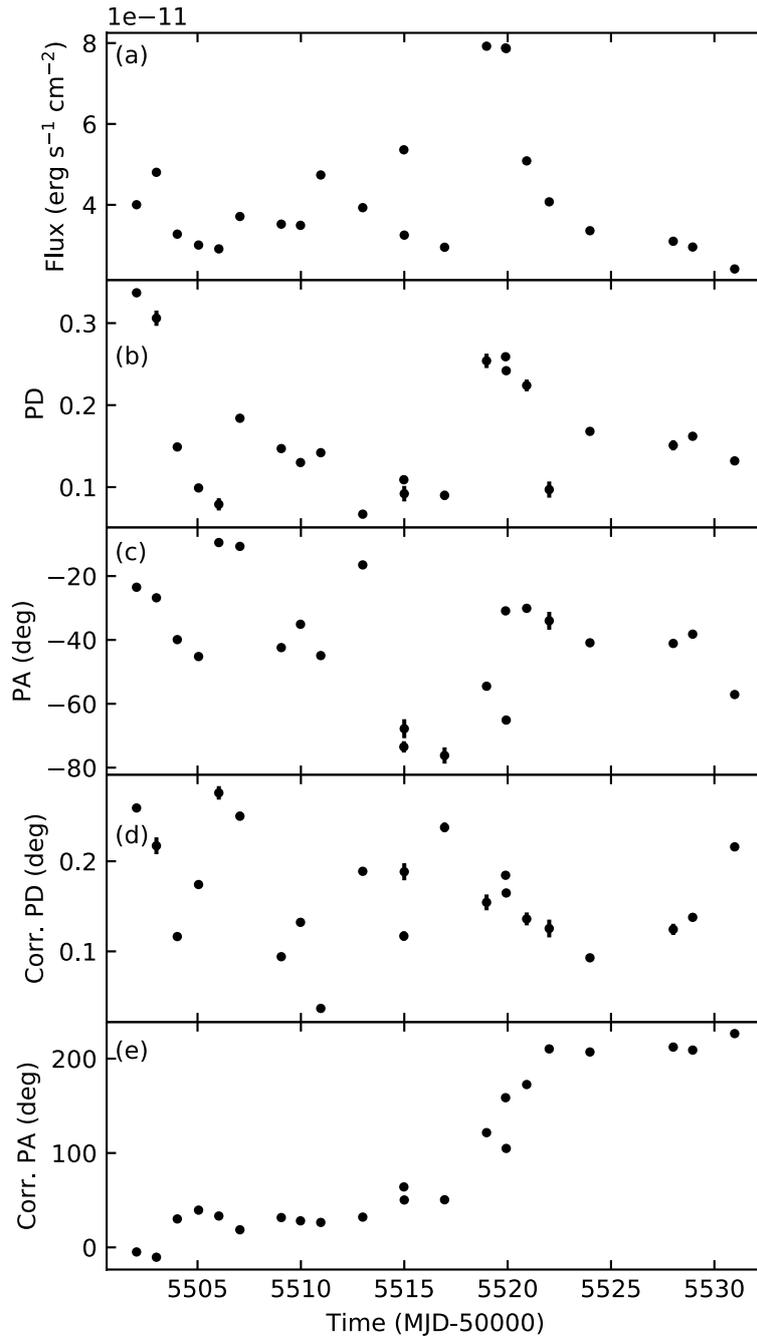


図 3.5: 図 3.4 の回転 2 の付近の時間変動。横軸は修正 MJD 時間、縦軸は上から (a) 光度曲線、(b) 偏光度 (PD)、(c) 偏光方位角 (PA)、(d) 補正された偏光度 (PD')、(e) 補正された偏光方位角 (PA')。

図 3.5 は 3.2 節で述べたように補正をした回転 2 付近の時間変動である。回転 1 と同様、パネル (a) からわかるように、この期間にも大規模なフレアが発生している。偏光の回転は補正前の偏光方位角の変化を示すパネル (c) では確認できないが、回転中心を補正したパネル (e) では確認できる。これは、この回転の中心が QU 平面の中心から大きくずれていることと一致する。パネ

ル(e)から回転の期間は MJD 55512.99~55522.01 の約9.0日間であることがわかる。この期間が TimeTubes で推定された回転の期間と異なるのは、回転1と同様の原因が考えられる。回転期間中の偏光方位角の変化量は178度、回転率は19.8度/日と計算された。偏光が回転している時期、天体は常に明るい状態 ($> 2.0 \times 10^{-11} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) にある。偏光の回転はパネル(a)で最も明るいフレアが発生する約6日前から始まっており、明るいフレアの終了と共に終わっている。この最も明るいフレア以外にも短時間の小規模なフレアが発生したことがパネル(a)からわかる。補正前の偏光度は明るいフレアに同期して上昇しているが、補正された偏光度はそのような相関関係が見られない。

回転3

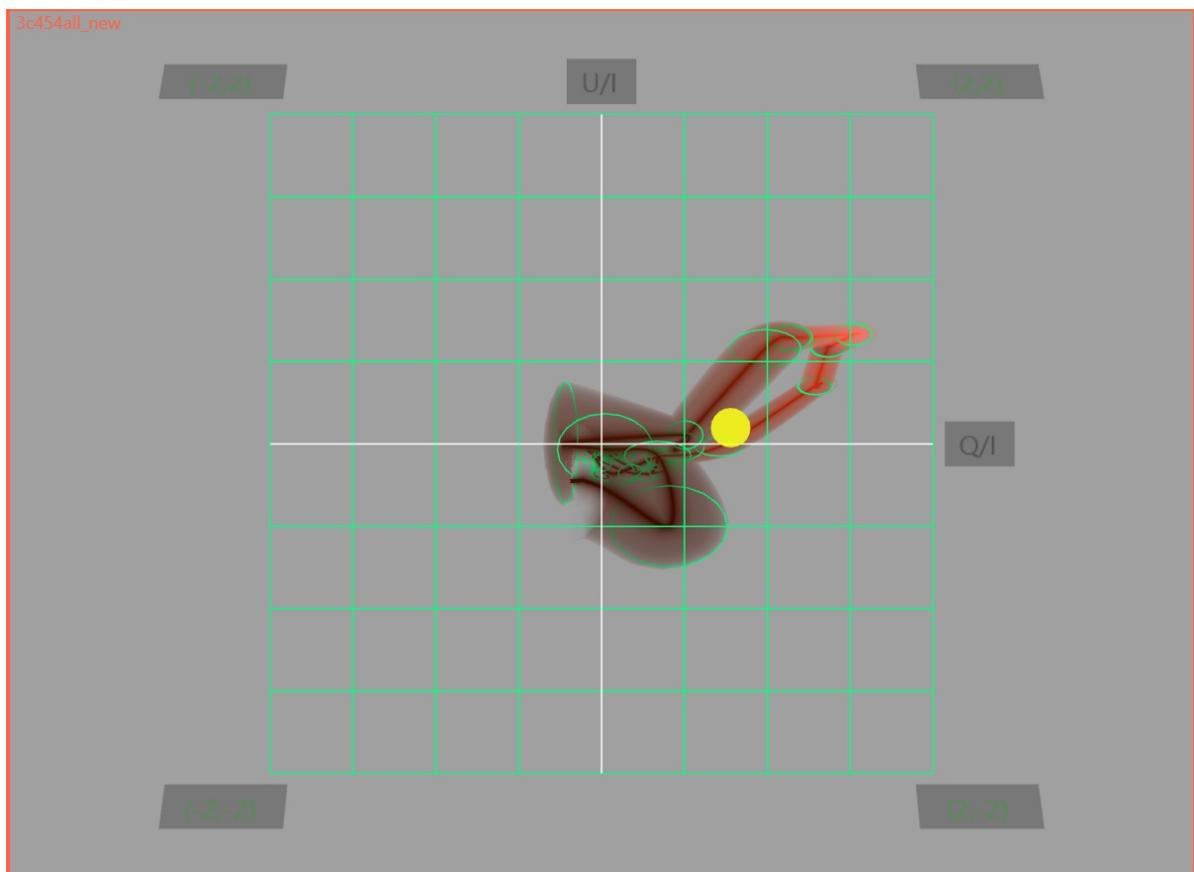


図 3.6: 3.2 節の手順1で検出した回転3。偏光回転の期間は MJD 56544.220~56560.220 の16日間である。

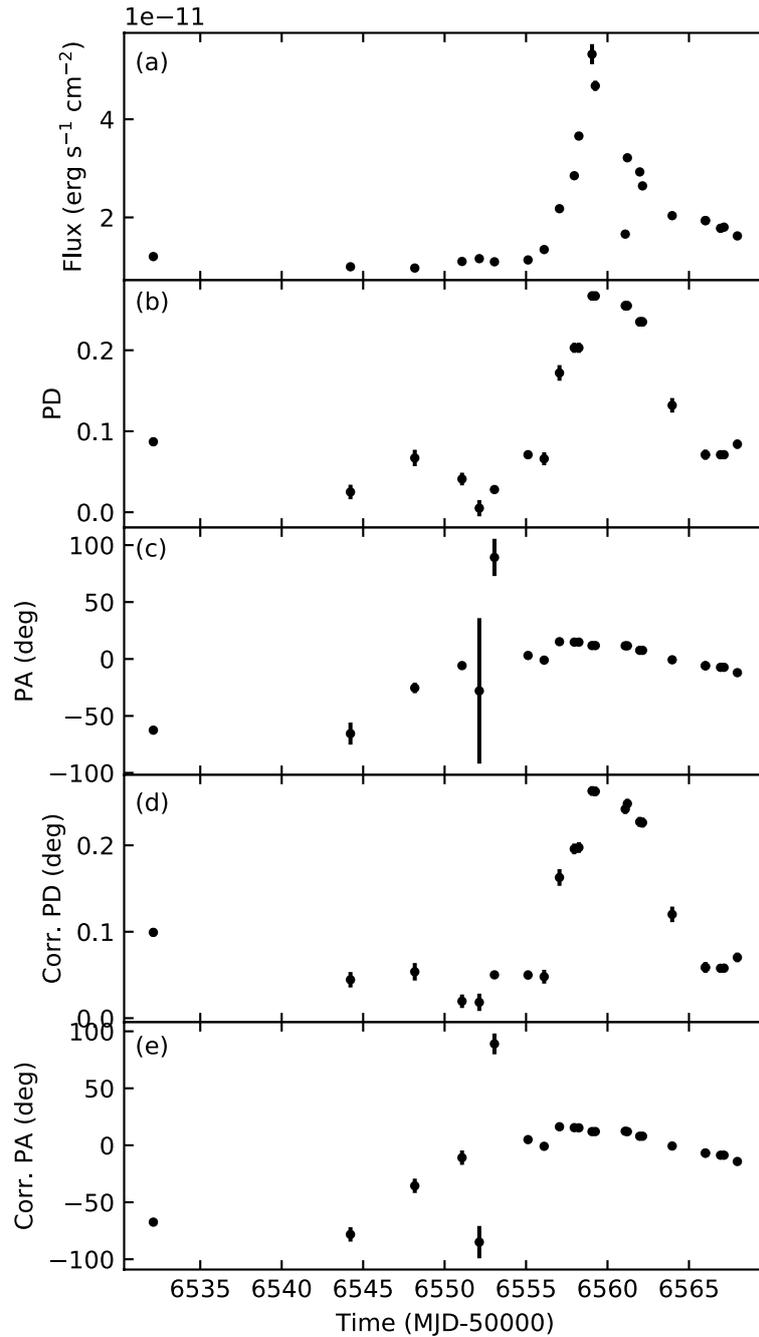


図 3.7: 図 3.6 の回転 3 の付近の時間変動。横軸は修正 MJD 時間、縦軸は上から (a) 光度曲線、(b) 偏光度 (PD)、(c) 偏光方位角 (PA)、(d) 補正された偏光度 (PD')、(e) 補正された偏光方位角 (PA')。

他の 2 つの回転と同様、この期間にも大規模なフレアが発生している。偏光の回転が確かに発生していることがパネル (c) と (e) からわかる。しかし、MJD 56544.220 から偏光方位角が増加し、2 つの外れ値を挟んで、この増加傾向は MJD 56557 で止まり、以降、偏光方位角は緩やかに減少している。したがって、偏光の反時計回りの回転は MJD 56557 までであり、大規模なフレア

が発生する直前で終わっている。また、大規模なフレア中は偏光方位角は緩やかに減少している。実際、図 3.6 の $(Q/I, U/I)$ 平面でも大きなフレア前に検出されている反時計回りの回転と、フレア中の時計回りの回転が確認できる。したがって、回転の期間は MJD 56544.220~56557 の 13 日間と考えるのが妥当で、この期間、偏光方位角の変化量は 94 度、回転率は 7.3 度/日と計算された。偏光方位角の変化量と期間中のデータ数の点において、この回転 3 は他の 2 例と比べて規模が小さいものと言える。

第4章 考察

4.1 三つの回転の比較

図 3.3 と図 3.5 からわかるように、回転 1 と回転 2 にはその期間中に大規模なフレアを含む反時計回りの回転という共通点がある。いずれのフレアも単独のフレアではなく複数の小規模なフレアを伴うもので、1 つ 1 つのフレアのタイムスケールは 1 日から数日程度である。一方で、偏光回転の期間は回転 1 で 26 日間、回転 2 で 9 日間であり、短時間フレアよりも長いタイムスケールの現象である。したがって、偏光の回転を起こしている比較的長いタイムスケールを持った放射源と、短時間フレアは別の放射源を起源にしている可能性がある。しかし、フレアは偏光の回転を伴う傾向から考えると、二つの放射源が何らかのメカニズムで関連していることも考えられる。

一方、回転 3 は回転 1、2 と同じ反時計回りの回転現象だが、大規模なフレアを含まない点で性質が大きく異なる。また、期間中のデータ点数も少なく、回転の振幅も小さいことから、この回転はランダム変動の結果、偶然回転のように見えたかもしれない。一方、回転 3 直後の大規模フレアでも緩やかな偏光の回転が見られるが、このフレア時の偏光の変動を ($Q/I, U/I$) で確認するとほぼ同じ方位角方向に変動しており、これは短時間フレアの固有の偏光成分が見えているだけかもしれない。

4.2 先行研究との比較

2009年12月に発生した回転と本研究の回転1の比較

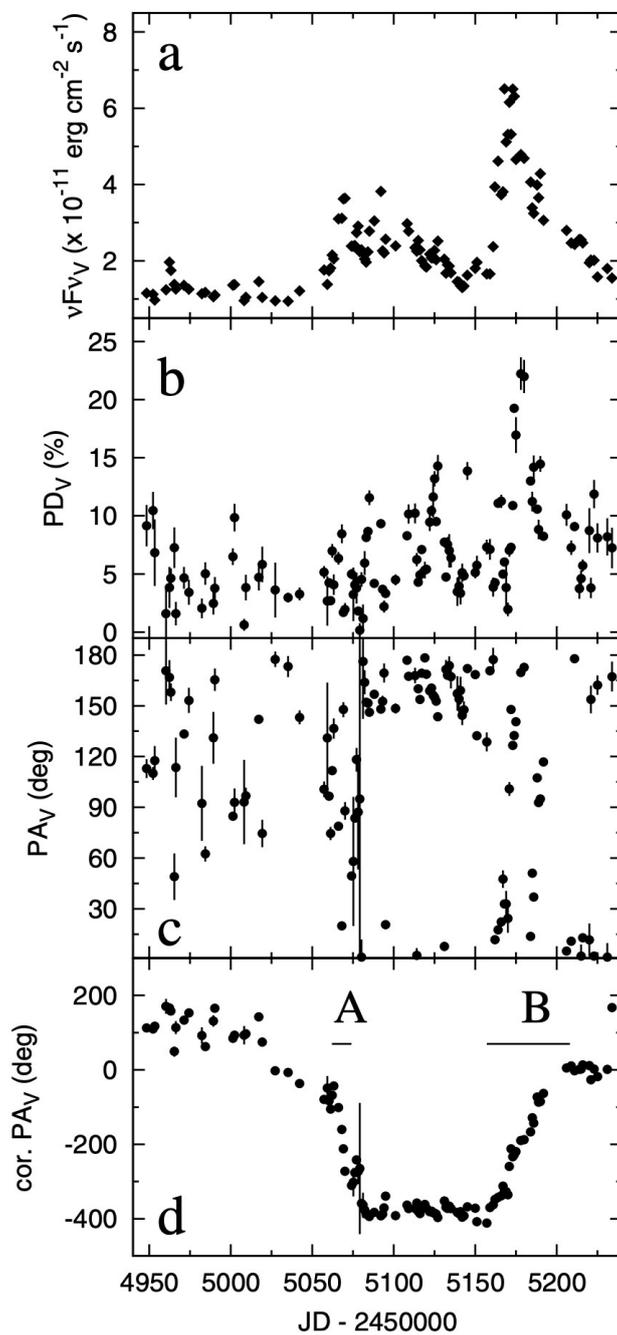


図 4.1: 先行研究 [23] で報告された 2009 年の二つの活動期間で各パラメータの時間変動。横軸は修正 JD 時間、縦軸は上からそれぞれ V バンドの光度、偏光度、偏光方位角の時間変動、修正を加えた偏光方位角。期間 A と B はそれぞれ、9 月と 12 月にあり、図 4.2 の回転 A と図 4.3 の回転 B。

2012年、Sasada らが 3C 454.3 の 2009 年に起こった偏光方位角の回転について報告した [23]。図 4.1 は先行研究 [23] で報告された活動期間を含む各パラメータの時間変動グラフである。一番下のパネルで図示したように 2009 年に 3C 454.3 が二回の偏光方位角の回転を見せた。期間 A は MJD55063~55074 の計 11 日で 240 度の時計回りの回転 (回転 A と呼ぶ) が発生し、回転率は -26.0 度/日と計算された。ここでマイナスが時計回り回転の回転方向を意味する。その後偏光方位角が約 83 日安定したのが分かる。期間 B は MJD55157~MJD55192 の計 35 日で 350 度の反時計回りの回転 (回転 B と呼ぶ) が発生したと報告し、回転率は 9.8 度/日と計算された。図 4.2 と図 4.3 はそれぞれ期間 A と期間 B に発生した回転を QU 平面で見た様子である。

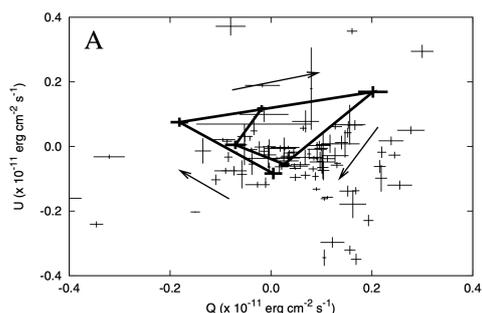


図 4.2: 先行研究 [23] で報告された QU 平面でみる偏光ストークスパラメータの時計回り方向への回転 (回転 A)。

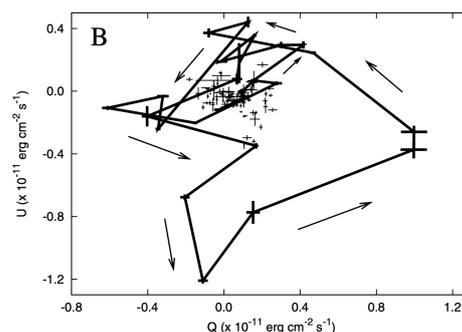


図 4.3: 先行研究 [23] で報告された当研究の回転 1 と同じ QU 平面でみる偏光ストークスパラメータの反時計回り回転 (回転 B)。

本研究では先行研究 [23] で報告された回転 A は TimeTubes の画面で図 4.4 のように確認できるが、検出することが出来なかった。2.3 節で紹介したように、TimeTubes で回転を検索する時、各時間間隔の標準偏差が全データの標準偏差と比べ、より大きい場合回転が起こり得ると認識する。これでは回転半径が大きいな回転しか検出できない可能性を生じる。図 4.2 の回転 A の回転半径が図 4.3 の回転 B (本研究の回転 1) と比べ、半分しかないのが分かる。これが原因で回転 A が検出出来なかったと思われる。

一方、回転 B が回転 1 として検出出来たものの、回転期間が MJD55159~MJD55179 の 20 日で、より短くなっている。かなた望遠鏡のみデータでは MJD55179 の次に観測したのが MJD55185 であり、6 日間の間隔がある。TimeTubes の Rotation Detection の条件を搜索期間を 5-30 日、偏光方位角の変化量の下限值を 100 度に設定し直せば、MJD55185 からのデータから 5 日間の回転が検出され、先行研究 [23] で報告されていた回転現象の後半と一致している。ただし、回転方向が逆の時計回りである。回転方向について、3.2 節で紹介したように補正を行う必要があり、TimeTubes の結果が参考程度にしかない。図 3.3 には TimeTubes では回転期間外とされた MJD55185~MJD55189 のデータを追加している。

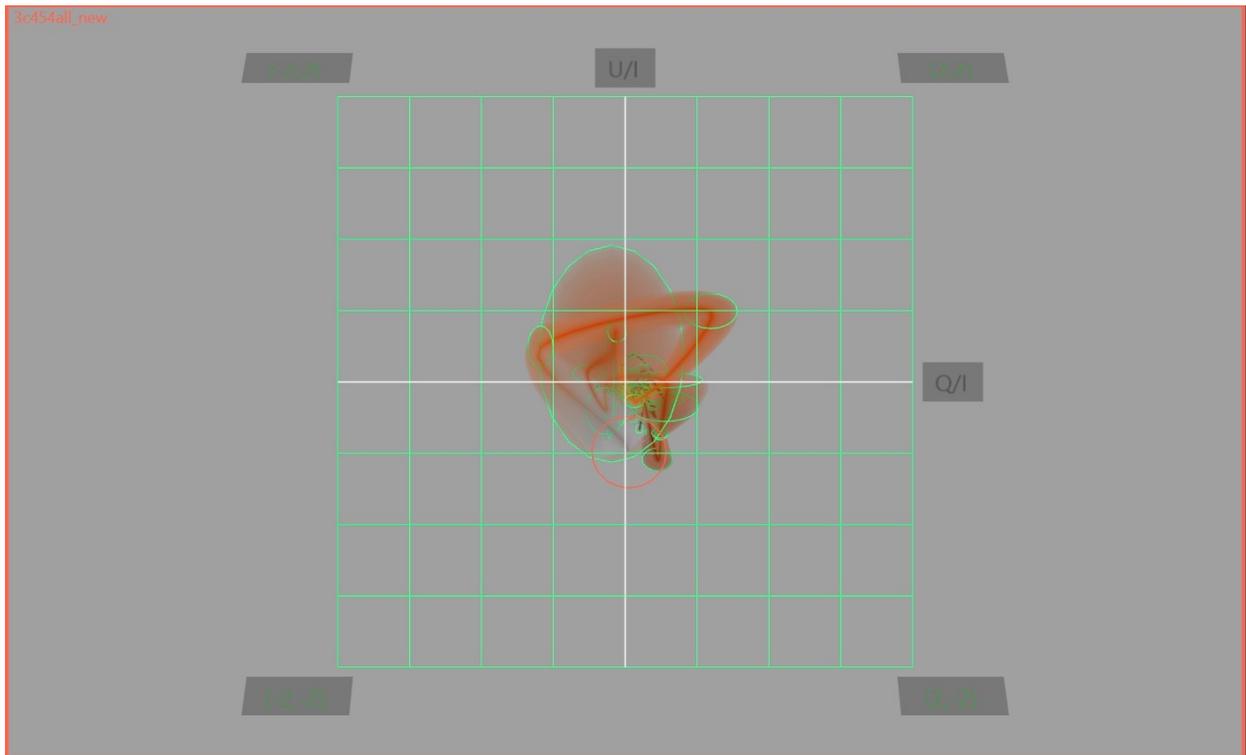


図 4.4: 先行研究 [23] で報告された回転 A に相当する回転現象

2010 年 11 月のフレアと回転 2 の関係

2010 年 11 月辺りの 3C 454.3 の活動について、先行研究 [24] で報告されている。図 4.5 は先行研究 [24] で報告された 3C 454.3 の 2010 年の活動期間における各パラメータの時間変動である。こちらの研究 [24] も同じくかなた望遠鏡の可視近赤外偏光データを扱っており、偏光について議論した。図 4.5 の上のパネルが示したように増光期間を詳しく調べ、二つのフレア (線を引いている時刻) に分けられた。V バンドと J バンドがどちらもフレアと共に偏光度の上昇が観測されたと報告した。またブレーザー天体で良く観測される「明るくなると色指数が赤くなる」現象も図 4.5 の上から 3 番目のパネルから読み取れる。

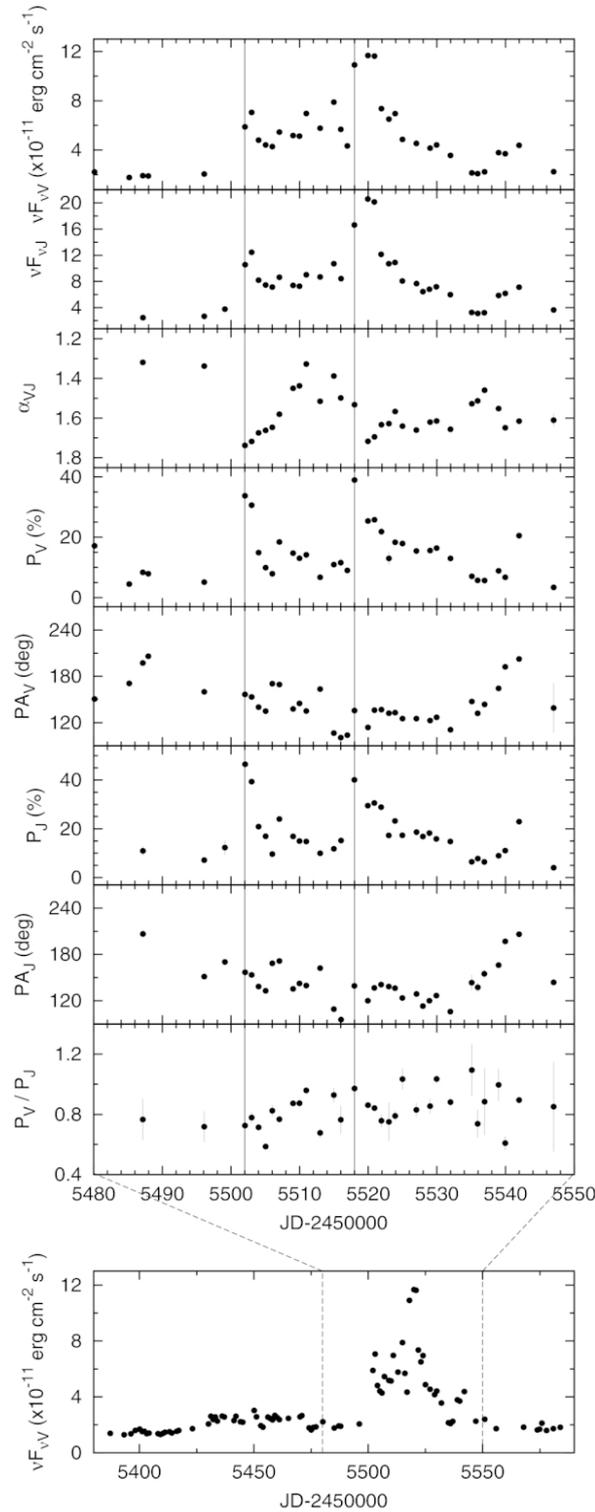


図 4.5: 先行研究 [24] で報告された 3C 454.3 の 2010 年活動期間における各パラメータの時間変動。横軸は修正 JD 時間、縦軸は上から下に、V バンドと J バンドの光度、V バンドと J バンドの間のスペクトル指数、V バンドと J バンドの偏光度及び偏光方位角、V バンドと J バンドの間の偏光度の比。実線は JD 2,455,502 及び JD 2,455,518 の 1 番目と 2 番目の急速増光を示している。一番下にある枠別のパネルは、2010 年のバーストの全期間中の V バンドの光度曲線を示している。

本研究では MJD 55509.050～55528.050 の 19 日間を回転 2 として TimeTubes で検出した。3.2 節で述べたように補正を行い、MJD 55512.99～55522.01 の約 9.0 日間を本回転期間とし、時間変動を図 3.5 にまとめた。しかし、先行研究 [24] の図 4.5 からは偏光方位角の回転現象が読み取れず、同活動期間内に偏光方位角の回転現象が発生してないと報告した。これは本研究の図 3.5 のパネル (c) で偏光方位角の回転が読み取れないのと同様、回転中心の修正がされてないのが原因だと考えられる。回転中心が QU 平面の原点ではない回転に対して、補正を行われていない偏光方位角の時間変動から回転現象が読み取れず、ジェット構造を理解するための重要なデータを見逃しやすい。回転を検出するには偏光方位角の時間変動のみならず、QU 平面でストークスパラメータの動きを時系列で追うことが必要なとき、TimeTubes が強力な解析サポーターとなる。

かつての回転現象との比較

FSRQ 天体 3C 454.3 は最も有名なブレーザー天体の一つとして、先行研究 [23] で報告された回転 A と回転 B の他、2005, 2007, 2008 年にも偏光方位角の回転現象が観測された [25] [26] [23]。かつての回転現象と本研究で検出した三つの回転の補正後の結果を表 4.1 にまとめた。ただし、2009 回転 B [23] が本研究回転 1 が同じ期間のイベントである。

表 4.1: かつての回転現象と本研究で検出した三つの回転の補正後の結果との比較

イベント	回転率 (度・day ⁻¹)	総変化量 (度)	回転期間 (days)	回転日数 (days)
2005[25] [26]	8.7	–	–	–
2007[25] [26]	22.0	130	54333～54338	5
2008[23]	-27.0	300	54680～54691	11
2009 回転 A [23]	-26.0	270	55063～55074	11
2009 回転 B [23]	9.8	350	55157～55192	35
2009 回転 1	9.2	239	55163.97～55189.94	26
2010 回転 2	19.8	178	55512.99～55522.01	9
2013 回転 3	7.3	94	56544.220～56557	13

これまでのいずれの回転現象も天体が明るくなる時に付随している。また、回転の方向は正・負両方が報告されている。正の回転（反時計回りの回転）の頻度が高いが、回転率が負の方向（時計回り方向）より遅い傾向も読み取れる。この傾向は今後の観測での確認が重要となる。

4.3 ランダムな変動から偏光回転が検出される可能性

ブレーザーの偏光研究で、観測された偏光方位角の回転がジェット固有なのか、それともランダムに動いた偶然の結果なのかについて深く注意を払う必要がある。ランダムに動く場合、とある時刻から次の時刻へ、偏光方位角が時計回りになるか、反時計回りになるか、それぞれ $\frac{1}{2}$ の確率で

あると考える。偏光方位角が 10 回の観測で連続同じ方向へ変動する確率は $(\frac{1}{2})^{10} \times 2$ と計算される。ここでは、反時計回りと時計回りの二つの状況を合わせて考える。本研究で扱う 3C 454.3 のデータは MJD54654.22~56868.06 の計 2213.84 日ある。2000 日と近似して、上記の確率で 2000 日の間で検出される回転現象の期待値は単純に $(\frac{1}{2})^{10} \times 2 \times 2000 = 3.9$ で約 4 回である。本研究で、実データから回転を合計 3 つ検出した。ランダムな動きによる偶然結果としても確率的に可能な数である。ランダムな動きかどうか検証するため、人工生成したランダムデータを用いて、TimeTubes で回転検出を行なった。

ランダムデータの生成

ランダムな変動として、最近 AGN の不規則な変動のモデルとして注目されている Damped Random Walk (DRW) モデルを用いる。このモデルは、ランダムウォークに加えて、変動があるタイムスケールで指数関数的に減衰する成分が加わっている。Uemura et al. (2019) [27] では 3C 454.3 の偏光の時間変動に DRW モデルを適応し、減衰タイムスケールが 3 日であることを示した。そこで、3C 454.3 の Q/I と U/I の変動を模した人工データとして、減衰タイムスケールが 3 日の DRW モデルを用いて生成した。その際、人工データの時刻は 3C 454.3 のデータの実際の観測時刻を用いた。回転の有無のみが検証対象なので、生成するランダムデータの Q/I と U/I 以外の光度や色には無意味な値を入れている。また、偏光方位角の動き方向に対する検証であり、 Q/I と U/I の変動の大きさ (QU 平面では回転半径、偏光度として反映する) についても無意味な値を与えている。

ランダムデータの検索結果

上記通りに生成したランダムデータを 30 組を持って TimeTubes で回転検出を行なった。検出の関連するパラメーターは 3.2 節で述べたのと同じ設定にしている。その結果、一サンプルに対して平均 8.2 個の回転が検出された。検出した回転現象が一番少なかったサンプルでは 4 個検出され、一番多かったサンプルは 11 個検出された。しかし、2.3 節で説明した TimeTubes の回転検出のアルゴリズムから想像されたように、回転ではなく、ただ分散が大きいだけのデータ群も、回転として検出されることがあり得る。図 4.6 に一部の例を示している。また、そのような偏光の回転が実際はおきていないケースを除き、ランダムな変動から偶然、偏光の回転が発生しているケースのみを数えると、1 サンプル平均 2.3 個あった。例として図 4.7 に一部を示した。

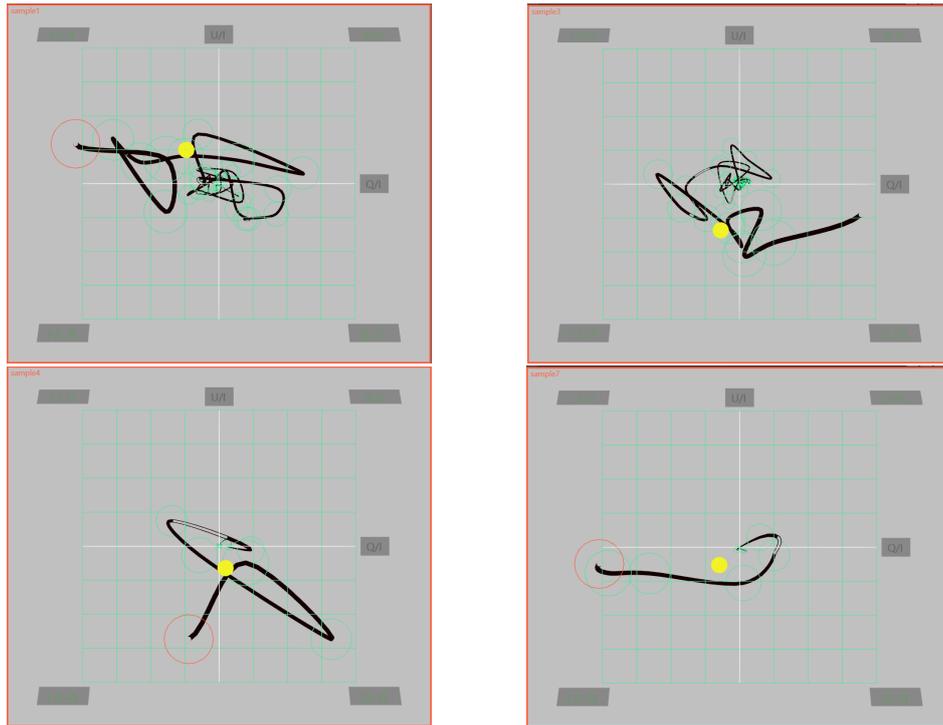


図 4.6: 人工生成したランダムデータを TimeTubes で回転検出を行なったとき、ただ分散が大きいだけのデータ群が回転として検出される例。

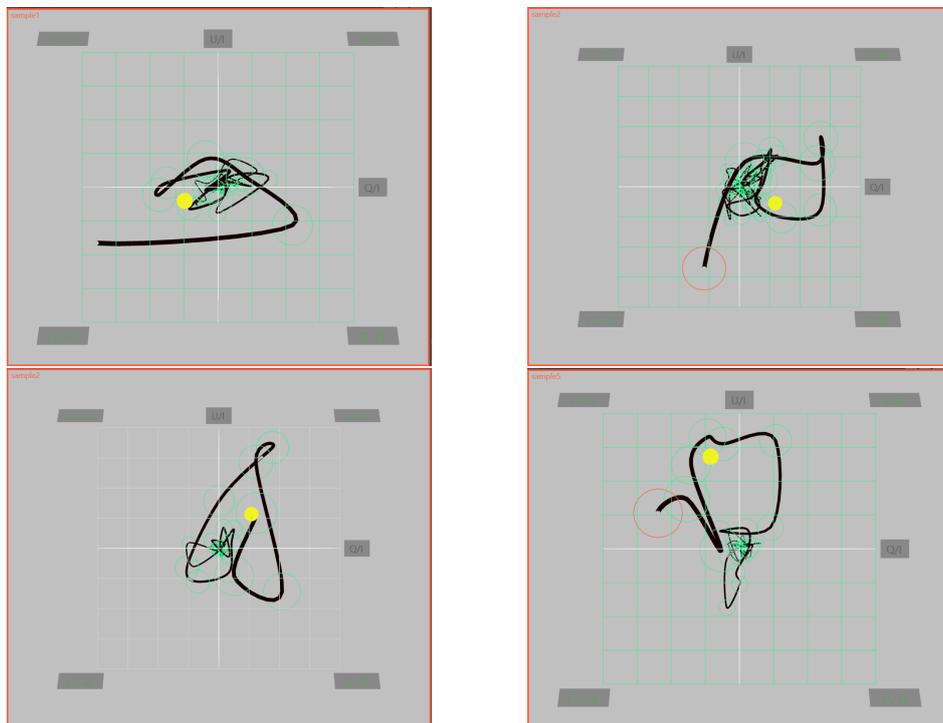


図 4.7: 人工生成したランダムデータを TimeTubes で回転検出を行なったとき、回転として検出される例。

4.4 TimeTubes の偏光回転の検出方法

2.3 節で紹介したように、現在の TimeTubes の検出方法では、まず Q/I , U/I が大きく変動する (QU 平面上での分散が大きい) 期間を候補として選択し、その後、原点を補正された偏光方位角の変化量を計算し、閾値に達した回転を抽出する。図 3.1 からわかるように、TimeTubes によって検出された 3 つの偏光の回転現象は、いずれも大規模なフレアの前後で起きっている。これは、大規模なフレアは偏光の回転を伴う傾向にあることを示唆している。図 3.1 の偏光度のパネル (c) を見るとわかるように、大規模なフレアはいずれも大きな偏光度の上昇を伴っている。このことは、大規模なフレアでは Q/I , U/I が大きく変動していることを意味する。したがって、それらのフレアは TimeTubes によって偏光回転の候補となりやすいことがわかる。一方で、小規模なフレアでは Q/I , U/I の変動量が大きくなくても偏光方位角が回転する可能性はあり、現在はそのような偏光回転の現象は見過ごされているかもしれない。今後はそのような Q/I , U/I の変動の小さな偏光回転を検出するアルゴリズムの開発が望まれる。

また、人工生成したランダムデータを TimeTubes で回転検出を行なった結果、TimeTubes は補正偏光方位角のランダムの分散 (例えば QU 平面での大きな往復) と回転による分散を区別することができなくて、分散の大きいデータ群を回転と認識する誤検出がある。これを回避するために新たな検出アルゴリズムが望まれる。

4.5 TimeTubes の偏光回転の有意性

回転現象が検出された時、ランダム運動との判別が重要である。今回 TimeTubes で検出した 3 つの回転について、いずれの回転期間でも表 3.2 にまとめたように 10 点以上のデータ点が含まれている。ただし、回転 3 だけに大規模なフレアを含まない、フレアの前に発生している点で性質が大きく異なることに注意が必要である。また、偶然結果の場合、回転以外の要素、例えば光度などとは無関係であるはずだが、今回の回転 1 と回転 2 では大規模なフレアが伴っている。さらに偏光方位角の回転と同じ期間帯で偏光度の上昇も見られる。回転 3 の期間の直後にも同じ傾向が見られ、偏光方位角が回転 3 と逆方向の時計回りが続いた。回転 2 の結果と先行研究 [23] で報告された回転現象ともほぼ一致していると言える。これらのことを踏まえて、今回検出した回転 1 と回転 2 が共にランダムな変動によるものではなく、天体放射源の系統的な変化によるものである可能性が高いと考えられる。回転 3 の性質が大きく異なり、データ点数も少ないため判断し難いのである。今回の検出で、回転期間を 10~30 日に設定したが、短期間の回転を目標にする時、検出期間を短く設定し、データ点数も少なくなることが想定できる。この場合、ランダム結果との判別がさらに注意が必要である。

また、人工生成したランダムデータの検出結果から示されたように、ランダムデータにも確率的に回転が二つ以上存在する。本研究で 3C 454.3 の実データから 3 回の回転しか検出されず、そのうち回転 3 の有意性が不確定である。数的にはランダムデータの結果と同程度である。 Q/I , U/I の変化だけでは、それらがランダムな変化から偶然生じた変動であることを否定できない。しかし、いずれの回転でも大きなフレアが付随しているという特徴から、全てがランダムではないと

考える。今後の解析でも Q/I , U/I の変化のみではなく、回転以外のフレアや偏光度などに合わせて解析する必要がある。

第5章 まとめ

本研究は TimeTubes を FSRQ 天体 3C 454.3 のデータに実用し、今まで気付かれなかった回転現象を見つけることに成功した。

2008 年 8 月から 2014 年 12 月までおよそ 6 年間でかなた望遠鏡を用いて FSRQ 天体 3C 454.3 の可視光及び近赤外線のパラメータ観測が行われた。観測装置は二つあり、TRISPEC を用いて 2008 年 7 月から 2010 年 2 月まで V、J、および K_s バンドの測光および偏光観測を行い、HOWPol を用いて 2008 年 7 月から 2014 年 12 月までの V および RC バンド測光および偏光測定観測を行った。本研究はこれらのデータを用いた。

TimeTubes でデータ全体から偏光方位角回転の抽出を行なった。その後、抽出した三つの回転を前後のデータを含めて確認し、補正計算をした。TimeTubes での検出結果が参考として信用できるレベルであった。結果として、今まで気付かれなかった回転現象を見つけることに成功した。

解析結果と先行研究を比べ、検出出来なかった回転も存在した。このように実際に存在する回転を検出できなかった原因が、TimeTubes の回転検出アルゴリズムにあると考える。各期間内のデータの分散と全データの分散の大小を比べることによって回転の有無を判断すると、変動量の小さい回転が見逃されやすい。

また、回転の有意性を判別するために、ランダムデータを人工生成し、TimeTubes で同じ設定で回転抽出を行なった。その結果、TimeTubes の現在の回転検出アルゴリズムでは、ただ分散が大きいだけのデータ群も、回転として検出されることがある。このような検出ミス回避のためにさらなる複雑なアルゴリズムが求められる。回転を含まない検出結果を除いても平均一サンプルで 2.3 個の回転が検出され、3C 454.3 の実データと同程度であった。それらがランダムな変化から偶然生じた変動であることを否定できない。しかし、いずれの回転でも大きなフレアが付随しているという特徴から、全てがランダムではないと考える。今後の解析でも Q/I , U/I の変化のみではなく、回転以外のフレアや偏光度などに合わせて解析する必要がある。

TimeTubes を使った解析と一般的な解析と比べ、一番優れたのが見やすさであると実感した。光度、偏光度、偏光方位角、色及びそれぞれの誤差に時間を加えた多次元データを三次元のチューブで繋ぐ事によって、時間に沿って簡単に相関関係を確認することを実現した。また、見たい時刻のデータだけが正面に表示されるので、データ量が多くても前後のデータがパターン識別の邪魔になりにくい。そのため、偏光方向の回転を探すとき、偏光方位角の時間変動ではなく、QU 平面でもより簡単に行うことができる。この解析スタイルでは、偏光回転の中心が QU 平面の原点からずれた回転に対して特に有効である。

ブレーザー 3C 454.3 に関して、大規模なフレア現象には偏光の回転が付随する傾向があることがわかった。このとき、偏光の回転は数日間継続する最も大きなフレアにのみ付随するのではなく、その周辺の 10~30 日程度の活動的な時期も含めて偏光方向が継続的に回転する傾向にある。

これは、偏光回転の起源となる放射源が各フレアの放射源よりも大きいことを示唆する。

謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教官の植村先生に大変お世話になりました。心よりお礼を申し上げます。無知な自分に、ブレーザーやジェットに関して基礎知識から懇切丁寧に教えていただきました。さらに分野関連の知識を取り組むために論文勉強会まで開いていただき、本当に感謝しております。解析及び論文の作成においても、たくさんの協力と指導を頂きました。いつも迅速且つ丁寧な添削をしてくださいます、大変助かりました。本当にありがとうございます。

研究室の他の先生方と学生の皆さまに、研究と論文作成に集中できるように、良い環境を整えてくれただけでなく、質問がある時いつも親切に教えてもらいました。一緒に過ごした2年間で、たくさんの思い出をできまして、出会って良かったです。

最後に、学業に専念できるように支えてくれた家族と張雨薇さんにお礼を言わなければなりません。あなた達がいつも支えてくれたからこそ今の私があります。いつもそばにいてくれて本当にありがとうございます。

参考文献

- [1] シリーズ現代の天文学, 4 銀河 I—銀河と宇宙の階層構造
谷口義明・岡村定矩・祖父江義明 日本評論社
- [2] シリーズ現代の天文学, 8 ブラックホールと高エネルギー現象
小山勝二・嶺重慎 日本評論社
- [3] Introduction to High-Energy Astrophysics
Stephan Rosswog・Marcus Bruggen CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- [4] ピーターソン 活動銀河核—巨大ブラックホールが引き起こす AGN 現象のすべて
Bradley M. Peterson 丸善株式会社
- [5] OJ 287 - Binary pair of supermassive black holes
Sillanpaa, A., et al., 1988, ApJ, 325, 628.
- [6] Rapid Variability in S5 0716+714 Across the Electromagnetic Spectrum
Wagner, S. J., et al., 1996, AJ, 111, 2187.
- [7] An Exceptional Very High Energy Gamma-Ray Flare of PKS 2155-304
Aharonian, F., et al., 2007, ApJ, 664, 71.
- [8] Optical and radio variability of the BL Lacertae object AO 0235+16: A possible 5-6 year periodicity
Raiteri, C. M., et al., 2001, A&A, 377, 396.
- [9] The WEBT BL Lacertae Campaign 2000
Villata, M., et al., 2002, A&A, 390, 407.
- [10] The high activity of 3C 454.3 in autumn 2007. Monitoring by the WEBT during the AGILE detection
Raiteri, C. M., et al., 2008, A&A, 485, 17.
- [11] Kubo.H. 1997, ph.D thesis University of Tokyo.
- [12] Kataoka Jun 1999, ph.D thesis University of Tokyo.
- [13] The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to- γ -ray outburst
Marscher, Alan P., et al., 2008, Natur, 452, 966.

- [14] A change in the optical polarization associated with a γ -ray flare in the blazar 3C279
Abdo, A. A., et al., 2010, *Natur*, 463, 919.
- [15] RoboPol: do optical polarization rotations occur in all blazars?
Blinov, D., et al., 2016, *MNRAS*, 462, 1775.
- [16] Analysis of the long-term polarization behaviour of BL Lac
V. A. Hagen-Thorn, et al., 2002, *A&A*, 385, 55.
- [17] 広島大学宇宙科学センターホームページ
<https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc>
- [18] Systematic Study of Gamma-ray-bright Blazars with Optical Polarization and Gamma-Ray Variability
Itoh, Ryosuke, et al., 2016, *ApJ*, 833, 771.
- [19] TRISPEC: A Simultaneous Optical and Near-Infrared Imager, Spectrograph, and Polarimeter
Watanabe, Makoto, et al., 2005, *PASP*, 117, 870.
- [20] Wide-field one-shot optical polarimeter: HOWPol
Kawabata, et al., 2008, *Proc. SPIE*, 7014, 70144.
- [21] TimeTubes: Automatic Extraction of Observable Blazar Features from Long-Term, Multi-Dimensional Datasets
Naoko Sawada, et al.
- [22] Exponentialsmoothingforpredictingdemand
R.G.Brown et al., 1956, InArthur D. Little Inc.
- [23] Multi-Wavelength Photometric and Polarimetric Observations of the Outburst of 3C 454.3 in 2009 December
Sasada, et al., 2012, *PASJ*, 64, 58.
- [24] Extremely High Polarization in the 2010 Outburst of Blazar 3C 454.3
Sasada, et al., 2014, *ApJ*, 784, 141.
- [25] Flaring Behavior of the Quasar 3C 454.3 Across the Electromagnetic Spectrum
Jorstad, et al., 2010, *ApJ*, 715, 362.
- [26] Multiband Photopolarimetric Monitoring of an Outburst of the Blazar 3C 454.3 in 2007
Sasada, et al., 2010, *PASJ*, 62, 645.
- [27] Feature extraction and classification of the temporal variation of blazars
Uemura, M., et al., (2019), *PASJ*, in prep.