

「かなた」望遠鏡を用いたブレーザーの可視 近赤外偏光モニター観測



笹田 真人

〈広島大学理学研究科物理科学専攻 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: sasada@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp

活動銀河核の一種であるブレーザーはジェットを真正面から観測していると考えられています。私たちは東広島天文台「かなた」望遠鏡を用いて約40ものブレーザーを可視近赤外測光偏光モニターすることによってブレーザーの光度と色、また偏光の挙動を長期、短期のタイムスケールで系統的に調べました。その結果、ブレーザーシーケンスによって光度変動振幅、色変化、偏光度、偏光変動振幅が系統的に異なること、ブレーザーが活動的なときに偏光ベクトルが回転することや、光度と共に偏光度が上昇するといった特徴的な偏光の変化をとらえました。これらのことから光度変動とジェットの磁場構造の変化には密接な関係があることが示唆されました。

1. 活動銀河核ジェット

私たちが住んでいる太陽系は天の川銀河に所属しています。これら銀河の中心には巨大質量ブラックホールが存在していると考えられています。この巨大ブラックホールの重力の影響により周囲の物質は吸い寄せられ、その結果中心付近が明るく輝きます。銀河の中にはこの中心核が銀河全体に匹敵するほど明るいものもあります。このような現象を活動銀河核と呼びます。中心の巨大質量ブラックホールの重力の影響で活動銀河核は複雑な構造をもちます。その一例としてジェット、降着円盤、分子トラスなどがあります。図1にブラックホール、降着円盤、ジェットの模式図を示しました¹⁾。降着円盤とジェットは垂直であると考えられています。このような構造のため、視線方向の角度によって観測される活動銀河核の種類が異なると考えられています。

活動銀河核のジェットは、細く絞られたプラズマの噴流と考えられています。ジェット中のプラズマは光速に近い速度で噴出されており、ジェッ

トの大きさはメガパーセクスケール（数百万光年）に達するものもあります。しかし、ジェットの加速、収束機構やその莫大なエネルギーの起源などについてはまだ詳細にはわかっていません。このジェットの加速、収束機構に磁場が大きく影響していると考えられていますが、磁場構造などは未解明です。ジェットの磁場構造を知ることにより、ジェットの加速や収束機構などの謎の解明につながると考えられます。

図1で示したように、ブレーザーはジェットを真正面から観測している系であると考えられています。光速度で動くジェットの相対論的效果によってブレーザーはジェットからの放射が卓越します。このため、ブレーザーを観測することによりジェットの構造の理解につながります。ブレーザーの観測的特徴に、①激しい光度変動、②電波からガンマ線に至る広帯域放射、③高い偏光度とその変動が挙げられます。

ブレーザーの光度変動は数分から数カ月、そして年にわたるさまざまな変動タイムスケールをもち、変動振幅も激しく、ときには100倍以上光度

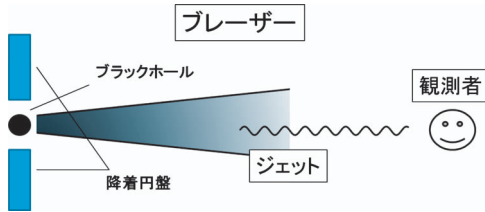


図1 ブレイザーの模式図。ブラックホール付近から発生したジェットを真正面から観測しています。

が変化する場合もあります（例えば OJ 287 の 12 年周期変動²⁾）。またブレイザーは電波からガンマ線まで広帯域の電磁波を放射しており、ガンマ線観測衛星である Fermi 衛星では主要な観測ターゲットの一つとなっています。ブレイザーの放射成分は主に二つあり、電波から可視、X 線の低エネルギー帯域ではシンクロトロン放射、X 線からガンマ線の高エネルギー帯域では逆コンプトン散乱放射が卓越していると考えられています。低エネルギー帯域で卓越するシンクロトロン放射は高い偏光度を示すことが期待され、実際ブレイザーは電波から可視光で高い偏光度を示します³⁾。

ブレイザーはシンクロトロン放射が卓越するため、銀河などからの輝線成分が弱められます。そのため輝線の見え方によって分類され、輝線がほとんど埋もれて見えないブレイザーを BL Lac 型天体、輝線が見えるブレイザーを Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ) と呼びます。またシンクロトロン成分のピーク周波数は個々のブレイザーで異なり、このピーク周波数の違いによって分類することができます。ピークが X 線帯域にある場合は High-energy peaked BL Lac (HBL)、可視光帯域にある場合には Intermediate-energy peaked BL Lac (IBL)、そして赤外帯域にある場合には Low-energy peaked BL Lac (LBL) 天体と呼ばれます。また FSRQ は赤外にシンクロトロン放射のピークをもつものがほとんどです。こうした傾向はブレイザーシーケンスと呼ばれます。

2. 偏 光

2.1 偏光とは

電磁波は電場と磁場によって構成される「横波」であり、電場ないし磁場の振動方向の分布の偏りを偏光と呼びます。電場ベクトルと磁場ベクトルは互いに直交しており、通常は電場ベクトルの向きを偏光の向きとして採用します。ある単一波長の電磁波は、電場ベクトルの軌跡が楕円を描く楕円偏光で表すことができますが、楕円偏光は、直線偏光成分（軌跡が直線）と円偏光成分（軌跡が真円）のベクトル和として考えることもできます。

通常観測される光は、さまざまな電磁波を一緒にしたものです。個々の電磁波が偏光していても、その偏り具合が完全にランダムだと、ベクトル和を取ることによって、キャンセルされ、無偏光になります。一方、個々の光の偏光方向に何らかの偏りがあると、完全にはキャンセルされずに、光の一部が偏光した状態になります。これを部分偏光と呼んでいます。このとき、観測された光は何%が直線偏光しており、何%が円偏光しており、残りは無偏光であるといったように考えることができます。ここでは、直線偏光の強さを偏光度 P 、偏光している方向を偏光方位角 θ として定義します。光すべてがある方向に直線偏光している場合には $P=100\%$ 、一方で全く偏りがない場合には $P=0\%$ 、つまり無偏光であるということになります。以下では主に直線偏光のみを扱いますので、単に偏光と呼ぶ場合は直線偏光のことを指すと考えてください。

偏光はこのように強さと方向（角度）の二つの次元で表すことができますが、このままではベクトル的に扱うことができないので、不便な場合があります。そこで、ベクトル的に扱うことができる記述方法として、直線偏光をストークスパラメーター、 Q, U で表す方法があります。この Q, U は独立であり、 QU 平面という二次元平面上で表

すこともできます。ストークスパラメーターは、偏光度 P と偏光方位角 θ との間に

$$Q = P \cos 2\theta$$

$$U = P \sin 2\theta$$

という関係をもっています。これから、 QU 平面状に図示したベクトルと P と θ との関係が推察できます。

2.2 シンクロトロン放射における偏光

ジェット内では相対論的なプラズマが存在しているため、シンクロトロン放射を起こします。シンクロトロン放射は相対論的な荷電粒子が磁場によってローレンツ力を受け、磁場の周りを回転するとき放射されます。

ブレーザーは可視光帯域においてシンクロトロン放射を行います。一般にシンクロトロン放射は偏光することが知られています。磁場に荷電粒子一つが巻きついてシンクロトロン放射する場合、一般に楕円偏光を示します。ただし、速度ベクトルが等方的に分布する荷電粒子群が、ある方向の磁場と相互作用してシンクロトロン放射する場合、円偏光成分はキャンセルされ、強度が $1/\gamma$ になります (γ はローレンツ因子 $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ です。ここで v は粒子の速度、 c は光速を表しています)。速度が等方的に分布していることから、対称性により直線偏光成分も磁場に垂直な方向の偏光成分のみが残ります。その結果シンクロトロン放射は磁場に垂直な方向に直線偏光します。つまりシンクロトロン放射を偏光で観測することにより磁場構造の情報を得ることができます。

2.3 実際の可視偏光観測

ブレーザーの研究において偏光観測は有効な手法であるため、過去さまざまな偏光観測が実施されました。電波帯域における VLBI の偏光観測が実施され、ジェットの構造が詳細にわかってきました。しかし、電波放射はジェットの根元から比較的遠い場所で発生しているため、ブラックホール近辺のジェットの磁場構造を知るためには、根元付近から放射されていると考えられている可視

光での偏光観測が必要となります。そのため、可視光帯域でのさまざまな偏光観測が行われてきました。Smith らはブレーザーが明るくなったときに偏光度が増大することを報告し⁴⁾、一方で Moore らは観測されるブレーザーの偏光は QU 平面上においてランダムな変化をすると主張しました⁵⁾。これら二つの主張は全く対立しており、偏光の変化は複雑であることを示しています。近年 Villforth らはブレーザー OJ 287 を長期間偏光モニター観測し、観測される偏光ベクトルには少なくとも長期的と短期的に変動する二つの成分が存在することを報告しました。これは観測される偏光はさまざまな領域から生ずる偏光の重ね合わせを見ていることを表しています⁶⁾。

観測される偏光は複雑に変化するため、偏光の連続的なモニター観測が求められます。また偏光の変動するタイムスケールは1日以内から年スケールまでさまざまであり、長期間観測する必要があります。しかし可視偏光観測が可能な望遠鏡は世界的に見ても希少であり観測が困難となっています。一方で偏光観測装置をもつような大望遠鏡は観測時間が限られるため、長期間のモニター観測には不向きでした。そのためブレーザーの長期で連続的な偏光モニター観測は今までほとんど行われてきませんでした。

3. 「かなた」望遠鏡によるブレーザー観測

「かなた」望遠鏡は広島大学が国立天文台より譲り受けた望遠鏡で、2006年から観測が開始され⁷⁾、突発・変動天体に特化した観測を行ってきました。2008年のFermiガンマ線衛星の打ち上げに先立ち、Fermi衛星で主要ターゲットとなるブレーザーについて、私たちは観測時間の大部分を使用して、長期間のモニター観測を実行してきました。ブレーザーの観測に用いた検出器であるTRISPECは名古屋大学のZ研で開発された装置であり、可視1バンド、近赤外2バンドでの同時

偏光撮像観測を行うことができます^{8),9)}。私たちは2007年にブレーザー数天体の試験観測を行い、2008年7月から1年間かけて東広島天文台の全観測時間の90%近くの観測時間を費やしてブレーザーの集中モニター観測を実施しました。この集中モニター観測は44天体ものブレーザーを連続的に1年という長期間にわたって観測することにより、ブレーザー変動の系統的な特徴を調べることを目的として行われました。こうして得られたブレーザーの可視偏光観測データは、世界的に見てもまれな質と量をもつものとなりました。以降ではこの集中観測で得られた結果とそれによりわかかってきたブレーザーの変動の特徴を記します。

4. ブレーザー変動の系統的特徴

ブレーザーの特徴である光度、スペクトル形状、偏光の変動は観測した44天体のほとんどで見ることができました。変動が大きい天体では、光度が10倍以上変化するものも存在しました。光度変動の例として、数カ月増光状態が続くようなアウトバーストや、数日で増減光するフレアなどの特徴的な変動が見られました。また、偏光が大きく変化する天体も存在し、40%を超えるような偏光度を示す天体もありました。

44天体の光度と偏光度の変動の挙動を見てみると、天体によって変動の大きさが異なり、ブレーザーシーケンスに沿った傾向があることがわかってきたため、各天体の光度と偏光度の変動の大きさとシンクロトン放射のピーク周波数を比較しました。光度と偏光度の変動振幅について、各天体のシンクロトンピーク周波数との相関を取ると、ピーク周波数が高い天体は光度と偏光度の振幅が共に低く、ピーク周波数が低い天体では変動の振幅が大きいという結果になりました。図2は各天体のピーク周波数に対する光度、偏光度振幅の相関図を表しています。シンクロトンピーク周波数の13.5付近に振幅の小さいブレーザー3C 273が存在しています。3C 273のスペクトル

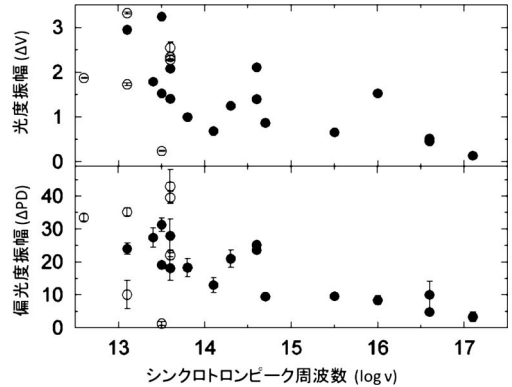


図2 モニターしたブレーザーのシンクロトン放射のピーク周波数に対する光度振幅（上）と偏光度振幅（下）。光度と偏光度の振幅は等級と偏光度の最大値と最小値の差を用いています。黒丸はBL Lac天体を、白丸はFSRQを表しています。

には紫外線領域に降着円盤起源と考えられる変動しない無偏光な熱的放射が存在し、その成分の影響により観測される変動振幅が小さくなってしまふと考えられます。

観測は可視光領域で固定しているため、ピーク周波数の違う天体を観測することは、ピーク周波数に対して観測帯域が異なることを表しています。言い換えると、ピーク周波数が高いHBL天体を可視光で観測する場合はシンクロトン放射の低いエネルギー帯域を、ピーク周波数が低いLBL天体やFSRQではシンクロトン放射エネルギーの高い帯域を観測することになります。シンクロトン放射エネルギーは放射する電子のエネルギーによるため、ピーク周波数が低い天体を観測することは、高いエネルギーの電子からの放射を観測していることになります。ピーク周波数が高くなるにつれて変動が小さくなるという結果から、低エネルギー電子からのシンクロトン放射の変動は高エネルギー電子からの放射の変動より小さくなることを示しています¹⁰⁾。

以下では光度、スペクトルの形状と偏光の挙動について詳細に述べます。

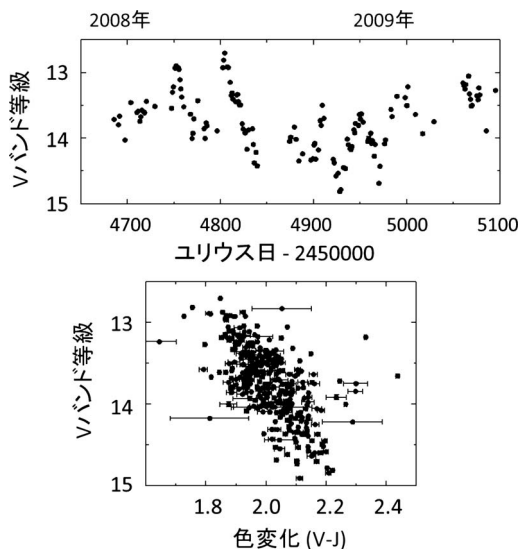


図3 ブレーザー S5 0716+714 の 2008 年から 2009 年の V バンドでの光度曲線 (上) と色等級図 (下)。光度曲線の横軸は日付, 縦軸は V バンドでの天体の等級を表しています。色等級図の横軸は V-J の色, 縦軸は V 等級を表しています。

5. 光度とスペクトルの挙動

図3はブレーザー S5 0716+714 の光度曲線と色等級図を表しています。2008年から2009年のモニター期間において S5 0716+714 は振幅2等の変動を示し、光度が激しく変化したことを表しています。また光度は常に変動しており、一定の光度を示すことはありませんでした。さらに周期的な変動もなくランダムに光度が変化しました。

ブレーザーは光度とともにスペクトルの形状も変化することが知られており、私たちの観測においてもほとんどの天体で色変化、つまりスペクトルの形状の変化が確認されました。図3の色等級図では各日にちでの等級(縦軸)と V-J の色等級(横軸)の相関図を表しています。V-J が 1.6 等から 2.5 等まで大きく変化していることがわかります。さらに図では色と光度の変化には相関があり、右肩下がりの傾向があります。これは天体の

光度が上昇すると色が青くなる、つまりスペクトルがハードになっていることを示します。このようなブレーザーの特徴は過去にも報告されており、今回同様の挙動を検出しました。さらに私たちは 44 天体のモニターデータを用いて、明るくなるとスペクトルがハードになるという特徴は、ブレーザーにおいてどれくらい一般性があるかを調べました。その結果、88%のブレーザーについてこの特徴が認められました。そのため、これはブレーザーに共通する特徴であると考えられます¹⁰⁾。

6. 偏光ベクトルの回転

ブレーザーの中でも 3C 454.3 は特に有名な天体であり、毎年大増光を示すことが知られています。私たちも 2007 年からこの天体を偏光モニターしており、各年で光度が 10 倍以上増光するようなアウトバーストを検出しました。またこの天体は 2007 年から 2009 年まで毎年、偏光ベクトルの滑らかな回転が検出されました。特に 2009 年にはアウトバーストと完全に同期した偏光ベクトルの回転が見られ、2009 年の前半にもアウトバーストとは別の時期に回転が見られました。図4は 3C 454.3 の 2009 年の光度、偏光度、偏光方位角を示します。一番下のパネルは、偏光方位角が 180 度の不定性をもつことを考慮して、次に述べるように補正した偏光方位角の時間変化を表しています。補正方法は隣り合う 2 点間において 90 度を超える変化をした場合、180 度を足すまたは引いて 2 点間の差を 90 度以下になるようにする、というものです。補正の結果、二つの時期で回転しているのがわかります。この二つの回転の方向は異なり、1 日当たりの回転角度も異なります。集中モニターの観測データから、このような回転現象を示した天体はほかにも存在し、44 天体のうち 5 天体において偏光ベクトルの回転を検出することができました。そしてほとんどの天体が通常状態に比べ明るい状態のときに偏光ベクトルが回

転する傾向が見られました。しかし、44天体のうち5天体のみしか回転が見られなかったことから、この回転現象は比較的まれな現象であることがうかがえます。

このような回転現象は何を意味しているのでしょうか。偏光の向きは放射領域の磁場の向きに垂直であることから、近年この偏光ベクトルの回転現象からジェットの高場構造が議論されています。

Marscherらは、ブレイザー天体 BL Lacertae において、電波ノットの移動と TeV ガンマ線フレアに同期して、可視偏光ベクトルが滑らかに回転したことを報告し、磁場がらせん構造をしていると示唆しました。これはらせん磁場中を放射領域が移動すると、放射領域の磁場の向きが変化し、観測される偏光ベクトルが回転するという描像です¹¹⁾。

一方で、一つの天体で時計・反時計回りの両方の回転を示す天体も発見されました。Fermi チームを主体としたブレイザー 3C 279 の多波長連携観測には、広島大学「かなた」望遠鏡のチームも参加し、偏光モニター観測を実施しました。そしてアウトバーストが終了するときに偏光ベクトルの回転が検出され、この回転は過去に検出された偏光ベクトルの回転と逆方向の回転であることがわかりました。ジェット内の磁場構造が単純ならせん構造をしている場合において、両方向の回転は起こらないはずですが、そのため、偏光ベクトルの回転はジェットが湾曲することによって引き起こされる現象であることが主張されました^{12), 13)}。

今回の 3C 454.3 での偏光ベクトルの回転は両方向が見つかったため、少なくとも単純ならせん構造によって回転が引き起こされることは難しそうです。つまり、偏光ベクトルの回転はジェットの湾曲によって引き起こされている可能性が示唆されますが、単純に折れ曲がっているのみの場合、偏光ベクトルは 180 度までしか回転しません。しかし、2009 年のアウトバースト時の回転は偏光方位角が 400 度にわたり回転した可能性があ

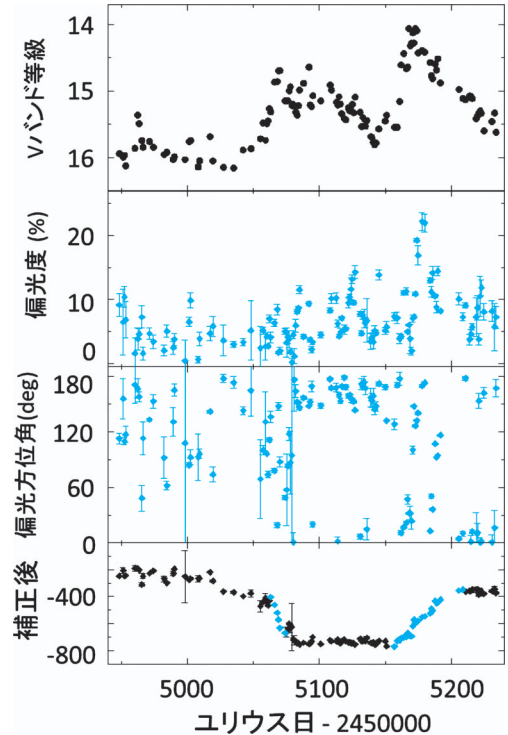


図4 3C 454.3 の 2009 年度の光度 (上), 偏光度 (中上), 偏光方位角 (中下), 補正後の偏光方位角 (下) を表しています。補正方法は本文を参照。

ります (図4)。この場合、単純にジェットが折れ曲がっているのではなく、例えばジェット自身がらせん状になっている可能性も考えられます。

7. 光度と偏光度の変化の相関

特徴的な偏光の挙動は回転現象のみではありません。偏光度もまた時間とともに変動し、光度の変化と併せて特徴的な挙動を示しました。

図5はブレイザー PKS 1510-089 の光度、偏光度、偏光方位角の時間変化と大振幅フレア時の光度と偏光度の変化を表しています。図のように、20日以内で光度が10倍以上増光するような大振幅のフレアを検出しました。そしてこのフレアでは光度に伴って偏光度も大きく上昇しました。そして偏光度の最も高いときには38%と、通常状態

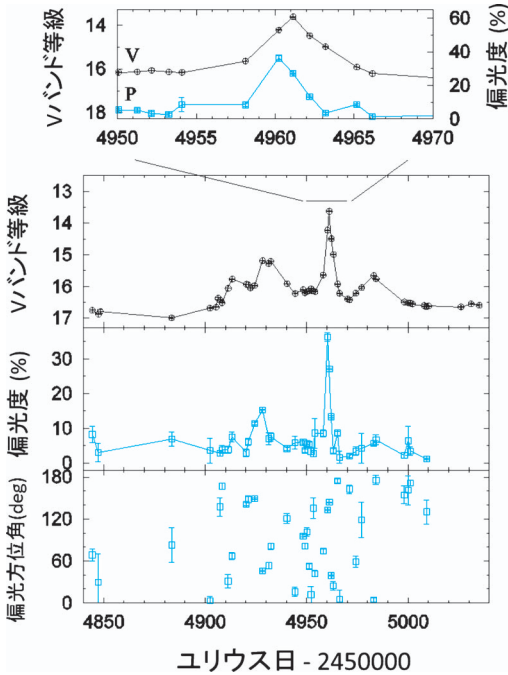


図5 PKS 1510-089の光度（中上）、偏光度（中下）、偏光方位角の時間変化（下）を表しています。上のパネルは大フレア時の光度と偏光度を拡大して表示しています。

の偏光度 (<5%) に比べ非常に高い値を示しました。また、偏光度のピークと光度のピークは一致しておらず、偏光度のピークが光度のピークに1日先行していたこともわかりました。このようなフレア中の光度と偏光度の相関はほかの天体においても観測することができました。ブレーザー AO 0235 + 164 も同様に20日以内のフレアに伴って偏光度が上昇する現象が確認されました。

このように PKS 1510-089 と AO 0235 + 164 の光度と偏光度は明らかな正の相関を示しました。そこでほかの天体についても同様に光度と偏光度について相関を調べてみると、30%の天体が正の相関を、12%の天体が負の相関を示し、それ以外の天体に有意な相関は見られませんでした。これにより、一般的にブレーザーの光度と偏光度にあらわな相関はないように見えます。しかし、上で述べたように二つの天体において大振幅のフレア

に伴って偏光度が上昇したことから、偏光は全くランダムに変化しているわけではないことがわかります。

二つの天体に関して20日以内で増減光するフレアに伴って偏光度が変化したことから、私たちはフレアにおいて光度と偏光度は普遍的に相関して変化するという仮説を立てました。そこで以下に述べるようにフレアを定義し、44天体の観測データについてフレアを検出し、この仮説を検証しました。フレアの定義はまず、光度曲線の隣り合う3点が山型となるものをピークとします。次にピークから±10日をフレア候補範囲とし、候補範囲において選ばれたピークが最も明るい場合、そのピークをフレアピークとし、候補範囲をフレア範囲と定義しました。

このフレアの定義を44天体のモニターデータについて適用してフレアを検出すると、全部で166個のフレアが検出されました。そのうち光度が2倍以上増光するような大フレアは28個あり、大フレアの光度と偏光度について相関を取ると正、負、有意な相関なしがそれぞれ13、5、10個となりました。相関が見られないフレアの中には観測点が少ないものも含まれ、相関が見られない原因の一つであると考えられます。図6は検出されたフレアのうち正、負の相関があるもの、有意な相関が見られないフレアの例を表しています。上から光度、偏光度、偏光方位角の時間変化とQU平面での変化を表しています。フレアの挙動をQU平面で見ると、正の相関を示したフレアと負の相関を示したフレアではどちらも起点と終点は一致しており、ある地点から行って帰ってくるという挙動を示していることがわかります。これは正負の相関は起点と終点の位置の違いによって引き起こされ、本質的な違いはないことを示しています。この起点の位置の違いは偏光ベクトルの長期的な変動成分によって引き起こされると考えられます。

今回私たちが注目しているのはフレアに伴う偏

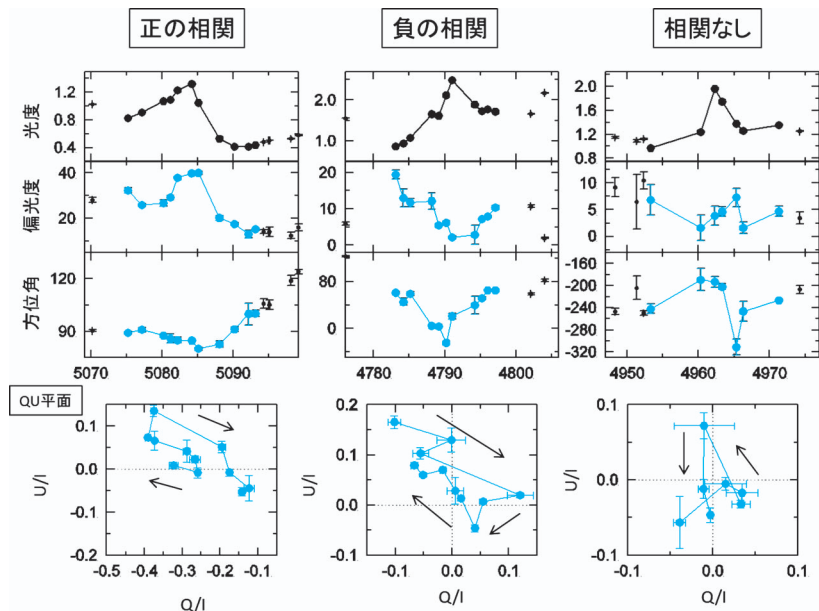


図6 光度振幅の大きなフレアにおける各相関を示したフレアの例。各パネルはそれぞれ光度（上）、偏光度（中上）、偏光方位角（中下）の時間変化とQU平面上での偏光ベクトルの変化（下）を表しています。光度と偏光度について左からそれぞれ正、負、有意な相関なしとなっています。矢印は時間による偏光ベクトルの推移を表しています。

光の変化です。そのため長期的な変動成分は今考えている短期間のフレアとは異なる成分であるため、長期的な変動成分を差し引いた短期的な変動成分のみを抽出する必要があります。フレア範囲である20日では長期的な変動成分はほとんど変化しないと仮定した場合、フレア範囲内において光度と偏光度の最大値と最小値の比あるいは差は、長期的な変動成分を含まない量となります。ここで光度比は最大値と最小値の比を、偏光度振幅は最大偏光度と最小偏光度の差を取ります。このようにして、フレアに伴う偏光の変動成分のみを抽出しました。

図7は検出された各フレアの光度比と偏光度振幅の相関図です。図からフレアの光度比と偏光度振幅には正の相関があることがわかります。さらに大フレアにおいては、偏光度の変化量も大きい一方で、発生頻度は小さく、検出されたフレアの数も少なくなっていることがわかります。一方、

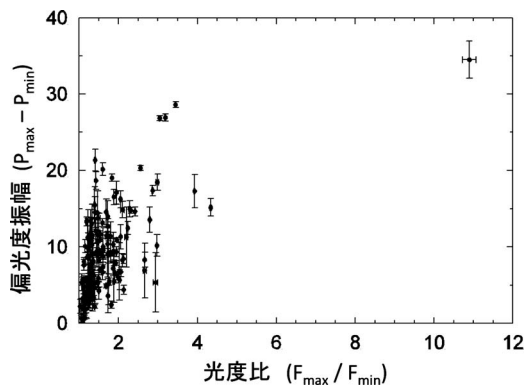


図7 フレアの光度比と偏光度振幅の相関図。

光度比が2倍以下であるような小さいフレア（小フレア）は発生頻度が大きく、検出されたフレアの大部分は小フレアとなりました。しかし、小フレアでは光度比と偏光度振幅の相関はあまりよくありませんでした。相関が悪い理由として次のような可能性が考えられます。小フレアの発生頻度は高いことから、光度曲線に現れないような小さ

なフレアが常に存在します。そして検出できる小フレアが発生した場合、他のフレアの影響によって偏光の変化が埋もれてしまい、小フレアでの相関は悪くなると考えられます。

フレアの光度比と偏光度振幅に正の相関があることから、フレアに伴って偏光ベクトルも変化することを意味しています。さらに大フレアにおいて34%も偏光度が変化したことから、フレアは偏光度の高い固有の偏光ベクトルをもつことを示します。このことから、フレアが発生したときの放射領域の磁場は揃っていることが示唆されます。ブレーザーの変動機構はいまだわかっていませんが、有力な説の一つとして衝撃波による粒子加速によって光度が変動する説が提唱されています。これは中心領域からプラズマの塊（ブロッブ）が噴出し、ブロッブ同士が衝突することにより衝撃波が発生し、それによって加速された荷電粒子がシンクロトロン放射をするというモデルです。この場合、衝撃波によって磁場が圧縮され、衝撃波の進行方向に垂直な方向に磁場の向きが揃います¹⁴⁾。これによって、観測される偏光は高くなると考えることができます。

8. 終わりに

私たちの観測からブレーザーの光度変動と磁場、言い換えると偏光とは密接なかわりがあることがわかってきました。ブレーザーのような変動天体を研究する場合、長期間でのモニター観測は必須になってきます。Fermi 衛星に加え、2010年には全天 X 線監視装置 MAXI が打ち上がり、X 線、ガンマ線帯域での高感度の全天モニターが行われている現在、ブレーザーの変動機構の解明は重要な研究テーマとなっています。そのため大望遠鏡では難しいモニター観測を中小望遠鏡で行い、その変動機構を研究することは重要であり、必要不可欠であると言えます。

謝 辞

本稿の内容は、筆者の広島大学大学院博士論文をもとに執筆しました。指導教員である広島大学の植村誠准教授には観測、解析から議論まで多岐にわたってお世話になりました。また同大学の深澤泰司教授にはブレーザーを研究するきっかけをいただき、さらに研究についての多くの助言をいただきました。同じく広島大学の川端弘治准教授には、偏光の基礎知識から研究方法まで助言をいただきました。またデータを取得するに至り、東広島天文台関係者の皆様、観測データの取得を行った学生の皆様、また名古屋大学の佐藤修二教授をはじめ、使用した TRISPEC 開発関係者の皆様にも多大なる助力をいただきました。この場をお借りして、感謝を申し上げます。筆者は特別研究員として日本学術振興会より支援を受けています。

参考文献

- 1) Urry C. M., Padovani P., 1995, PASP 107, 803
- 2) Sillanpää A., et al., 1996, A&A 305, L17
- 3) Jorstad S. G., et al., 2007, AJ 134, 799
- 4) Smith P. S., Balonek T. J., Heckert P. A., Elston R., 1986, ApJ 305, 484
- 5) Moore R. L., et al., 1982, ApJ 260, 415
- 6) Villforth C., et al., 2010, MNRAS 402, 2087
- 7) 大杉 節, 2011, 天文月報 104, 530
- 8) 佐藤修二, 2009, 天文月報 102, 267
- 9) Watanabe M., et al., 2005, PASP 117, 870
- 10) Ikejiri Y., et al., 2011, PASJ 63, 639
- 11) Marscher A. P., et al., 2008, Nature 452, 966
- 12) Abdo A. A., et al., 2010, Nature 463, 919
- 13) 片岡 淳, 深沢泰司, Stawrz L., 佐藤理恵, 林田将明, Fermi LAT Collaboration, 2010, 天文月報 103, 486
- 14) Laing R. A., 1980, MNRAS 193, 439

Multi-band Photopolarimetric Study of Variations in Blazars Using the *Kanata* Telescope

Mahito SASADA

Department of Physical Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: Blazars are a subclass of the active galactic nuclei, in which a relativistic jet is viewed at a small angle to the line of sight. We performed the multi-band photopolarimetric monitorings in the optical and near-infrared bands of about 40 blazars using the *Kanata* telescope at the Higashi-Hiroshima Observatory in order to study the behaviors of the light curves, temporal variations of the colors and the polarizations. In our monitoring, there are differences between the peak frequencies of the synchrotron radiation and the amplitudes of the flux, color and polarization among blazars. Blazars also showed the violent variability which amplitude was more than 10 times. During these large amplitude variations, the polarization vectors showed the intriguing features like rotation events and positive correlation between the flux and the polarization degree. These features indicate that the flux is correlated with the polarization vector, and thus, there is a significant correlation between the flux variability and the magnetic field structure in the jet.