

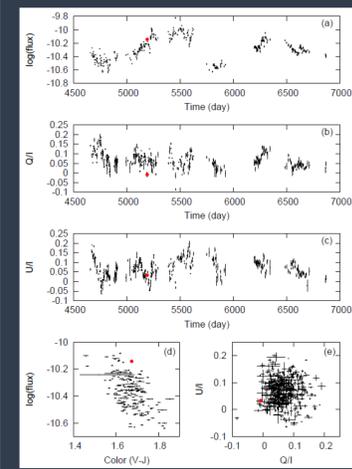
# ブレーザーで観測される偏光の時間変動の 3 次元可視化

植村誠 (広島大学), 伊藤亮介 (東京工業大学), Longyin Xu, 中山雅紀, Hsiang-Yun Wu (慶應義塾大学), 渡辺一帆 (豊橋技術科学大学), 高橋成雄 (会津大学), 藤代一成 (慶應義塾大学)

活動銀河核のうち、ジェットが観測者の方向を向き、ビーミング効果によってジェットからの放射が卓越して観測される天体はブレーザーと呼ばれる。ブレーザーではシンクロトロン放射に起因した高い偏光が観測され、ジェットの磁場構造を知る上で重要である。一方、ブレーザーの光度は激しく変動することが知られ、それに付随して偏光も変動する。偏光の時間変動から光度変動の機構の手がかりを得ることができる。しかし、観測される偏光は複数の偏光放射源の重ね合わせであることが多く、その場合、偏光度・偏光方位角の時間変化ではなく、2次元のストークス Q, U 平面上の時間変化を調べる必要がある。ここで問題となるのは、データ量の増加に伴い、2次元平面上の変動と光度やその他の測定量の時系列データを相関を目で見るのが困難なことである。そこで我々は、2次元平面上に時間軸を加えた3次元空間内で天体の偏光変動をチューブとして可視化するツール "TimeTubes" を開発した。チューブの中心を観測された Q, U、チューブの半径をそれぞれの測定誤差、チューブの色を天体の光度と色に充てることで、6次元の量を1つの画面で見ることができる。我々は広島大学が望遠鏡で取得したブレーザーの偏光データにこのツールを用いた。その結果、偏光角の回転、特に中心が Q, U の原点から外れた回転現象や、フレアの偏光角が特定の範囲に偏る傾向などが認識しやすくなることを確認した。特にブレーザー PKS 1749+096では、偏光角の回転とフレア極大の偏光角の偏りが同時に見られ、さらにフレアの偏光角が電波ジェットの方向に平行であることがわかった。この結果は、放射源が視線方向に動く時にビーミング効果を最も強く受け、明るく観測されることを示唆している。

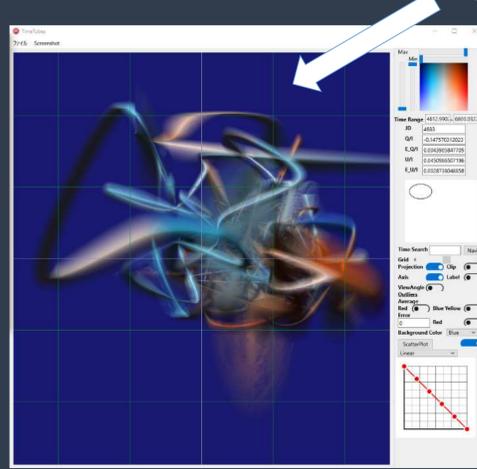
## 従来手法と問題点

## TimeTubesの主な機能



従来手法  
→ Q U 平面上の散布図、及び光度曲線等の時系列表示。

- 問題点
1. Q U 平面(2D)上での天体の「軌跡」を追うことが難しい。
  2. Q U 平面上の軌跡と他の量の相関を見ることが難しい。これらはデータが増えれば増えるほど困難さが増す。



マウスホイールによる時刻の前進・後退、ドラッグによる角度の変更

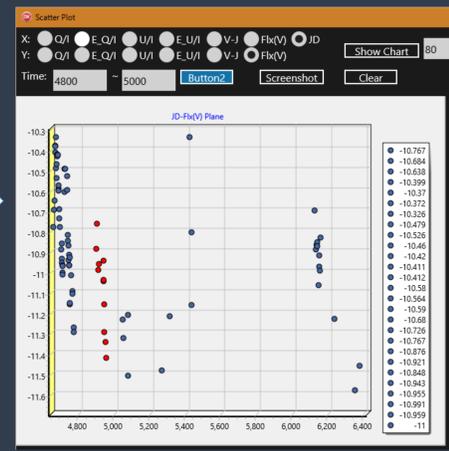
輝度、色のスケール調整

任意の時刻のデータの検索

通常の散布図 (光度曲線など) の表示

グリッド等、各種オプションの表示・非表示

tube の効果の調整



## Case 1: PKS 1749+096

BL Lac天体 (LBL),  $z=0.322$

Figure 1

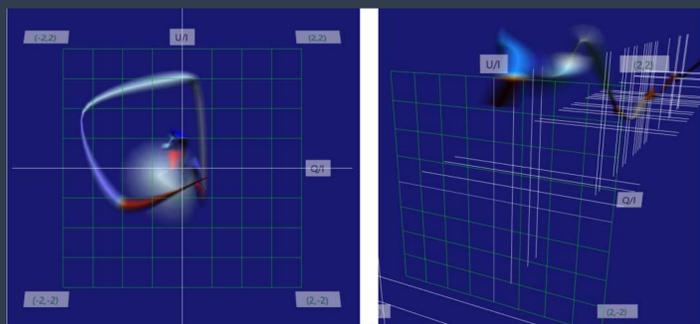


Figure 1 の左図はMJD 54675 付近のデータで、時計回りに偏光が回転している様子が見られる。Tubeの色は回転初期の赤黒い色から、青に変化し、U/Iが高いところで青白い色になった後、再び暗くなっている。これは、**回転初期には天体の色が赤く (V-Jが大きい)、光度が低い状態から、徐々に色が青く、光度が高い状態に遷移し、光度は U/Iが高い状態で極大をむかえ、その後暗くなったことを示唆している。**すなわち、この偏光の回転はフレアに付随していることがわかり、そのフレアはブレーザーで良く見られる "bluer-when-brighter" の色変化を伴っていることがわかる。

Figure 1 の右図は上記の回転現象から 60 日後付近のデータで、U/Iが高い位置で tube が明るくなっている状態が 2 つ見られる。これらも、2回のフレアの発生とそれに付随する偏光の変化を表している。左図の回転現象でも、**天体が明るい時期と U/Iが高い時期が一致し、この天体のフレアが特定の向きの偏光を好む可能性が示唆される。**

Figure 2: 上から、Vバンド光度曲線、Q/I, U/Iの時系列表示、QU平面。左が2008年、中央が2009年、右が2010年のデータ。同じ時期のデータをそれぞれの色のシンボルで表現している。QU平面ではフレアの極大の観測点だけ大きなシンボルで表示してある。左の2008年のデータ中の、赤、緑、橙が上のTimeTubesで表示しているデータに相当する。TimeTubesでも見られたように、フレアの極大が特定の偏光の向きに偏っていることが QU 平面からわかる。**2009年、2010年のデータでもフレアの極大が同じ傾向を持つことが確認できる。**

## 議論と今後

- ✓ TimeTubesは可視化ツールであるため、偏光の回転や光度と偏光度の相関、等、発見された特徴的な振る舞いの有意性は別途、統計的な検証が必要となる。
- ✓ 一方、従来はデータの一部を抜きだし、複数の図を作図して比較するしか手段がなかったのに対し、TimeTubesでは6次元の情報が1つのウィンドウで可視化されるため、その有用性は高い。今後、さらにデータ量が増加すると、TimeTubesはさらに必須のツールとなるだろう。
- ✓ TimeTubesは現在も継続中のプロジェクトであり、今後は TimeTubes view と通常の散布図を動的に繋ぐ機能の開発が予定されており、従来の可視化ツールとの比較がより容易になる。

## Case 2: 3C 454.3

FSRQ天体,  $z=0.859$

Figure 3

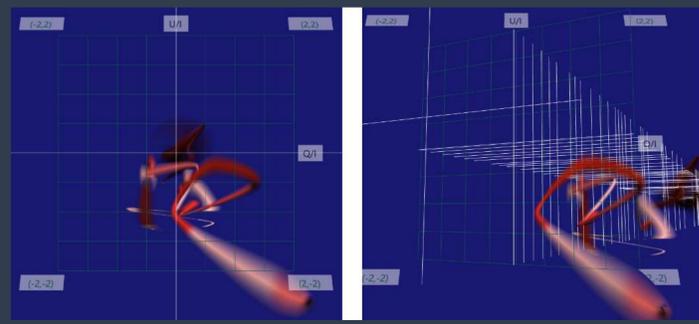


Figure 3: MJD55510付近のデータを異なる角度から見たもの。このデータでは色(V-J)のデータが無いので、光度の情報のみが反映されている。偏光は一見して複雑な時間変動の挙動を示しているが、いくつかのフレア (tubeが明るくなっている部分) が見られ、これらのフレア極大の偏光が反時計回りに回転しているように見える。

Figure 2

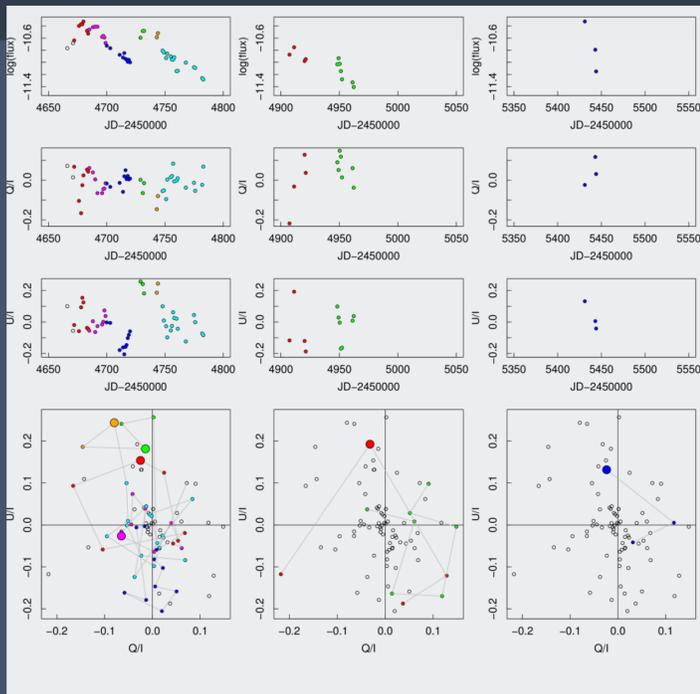


Figure 4

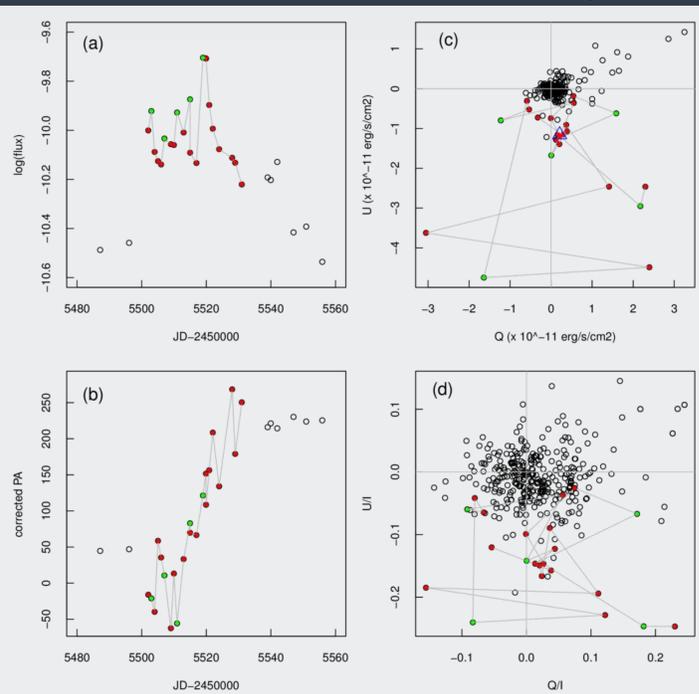


Figure 4: (a)Vバンド光度曲線、(b) 補正された偏光方位角の時間変化、(c) QU平面、(d) Q/U, U/I平面。それぞれ赤の観測点が平均的に明るい活動的な時期を、緑の点がその中で観測された短時間のフレアの極大を表している。パネル(d)が上のTimeTubesで表示していたデータの2次元表示に対応する。同様に、反時計回りの偏光の回転がフレア極大 (緑点) に見られる。パネル(c)の QU 平面を見ると、各フレアの極小時期は  $(Q,U)=(+0.21, -1.16)$  ( $10^{-11}$  erg/s/cm<sup>2</sup>) 付近に集中していることがわかる。すなわち、**この偏光成分が赤点で示される活動的な時期の偏光成分であり、短時間フレアはその周りを反時計回りに回転していると解釈できる。**パネル(b)はこの活動的な時期のQ,Uの中央値を原点に偏光方位角を再定義し、計算して得られた偏光方位角の時間変化である。各フレア毎のばらつきは大きい、全体として系統的な偏光の回転が見られる。