

# 論文内容の要旨

論文題目：

**An Observational Study of Rapid Gamma-ray Variability in the Brightest Blazar Flares**

(最も明るいブレーザーのフレア時における短時間変動の観測的研究)

齊藤新也

相対論的ジェットは、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) に伴って観測される最も激しい高エネルギー現象のひとつである。AGNのおよそ10%は、細く絞られたプラズマ流 (ジェット) が光速近い速度で中心から吹き出している様子が電波観測により捉えられている。この激しい活動性を支える莫大なエネルギーは、太陽の数百万倍以上の質量をもつ大質量ブラックホールの重力ポテンシャルに物質が降着することで供給される。

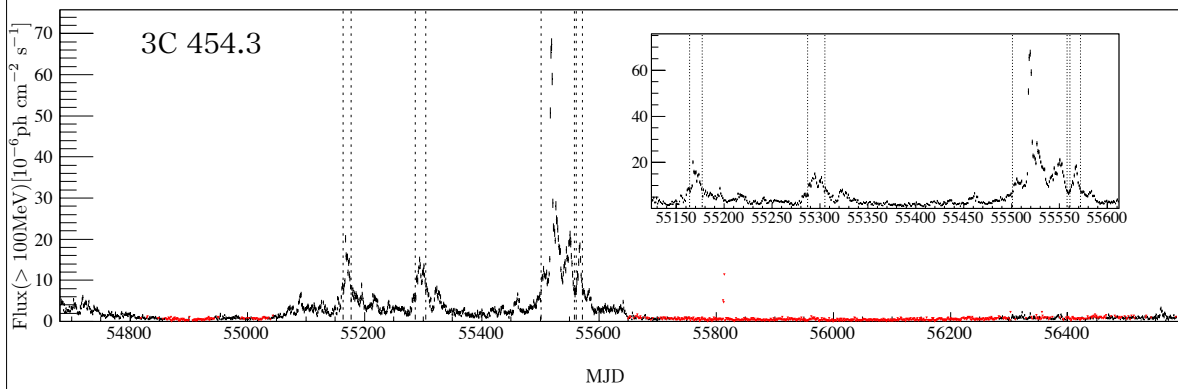
活動銀河核ジェットは、「ブレーザー」という種族のAGNにおいて最も顕著に観測することができる。ブレーザーとはジェットが地球方向 (視線方向) に噴出しているAGNを指し、相対論的ジェットがビーミングの効果により強められて観測されるため、ジェットを調べるうえで最適なターゲットとなる。ブレーザーの中でとくに明るいジェットを持つ種族がflat spectrum radio quasar (FSRQ) である。FSRQはジェットの全電磁放射エネルギーの大部分をGeVガンマ線として放射しており、相対論的電子が広輝線領域 (Broad Line Region; BLR) の光子を逆コンプトン散乱によって叩き上げることによる放射を観測していると考えられている。FSRQの放射光度は数十年から1時間程度までのさまざまな時間スケールで変動を示し、短い時間スケールの変動は、キロパーセクにおよぶ長大なジェットの内部のごく小さな領域から大部分の放射が起こっていると示唆する。

ジェットにおける放射領域の位置を知ることはジェット内の粒子加速およびAGN全体のエネルギー収支をひも解く上で極めて重要であるが、長年の謎となってきた。電波と可視偏光を組み合わせた観測では中心ブラックホールから10 - 20パーセクの位置で (Marscher et al. 2010)、また、電波からガンマ線にわたる多波長スペクトルからは中心ごく近傍  $\sim 0.01$  パーセクで放射が起こっている

(Ghisellini 2010) などの研究があり、大きな食い違いが生じている。

観測的に評価した放射位置が大きく食い違う要因として、長期間積分したデータを用いる従来の多波長観測の手法が挙げられる。現在の多波長同時観測ではおもに数日間以上積分したデータをもとに結果が解釈されており、これより短いスケールの時間変動は見過ごされてきた。X線、可視光などでは実際に、数時間、場合によっては数十分スケールの変動が観測されているため、数日積分のデータは短い変動をもつ要素の重ね合わせとなる可能性がある。また天候や衛星軌道といった個々の帯域の装置の運用上の制約から、多波長完全同時の連続したデータを得ることが困難となっている。

本論文では、放射領域に制限を課す新たな手法として、激しいGeVガンマ線短時間変動に着目し、研究をおこなった。GeVガンマ線は観測されるFSRQからの放射エネルギーの大部分をになう帯域であり、この帯域での平常時の数倍にもおよぶような急激な時間変動の観測は、ジェットの活動にともなうエネルギー収支を理解するうえで鍵を握る。GeVガンマ線の領域で一日以下の変動を観測することは、2008年に打ち上げられたフェルミ衛星によって初めて可能になった。主検出器であるラット検出器 (Large Area Telescope; LAT) は、20 MeV - 300 GeV のガンマ線帯域において、かつてない優れた光子統計で全天観測をおこなっている。



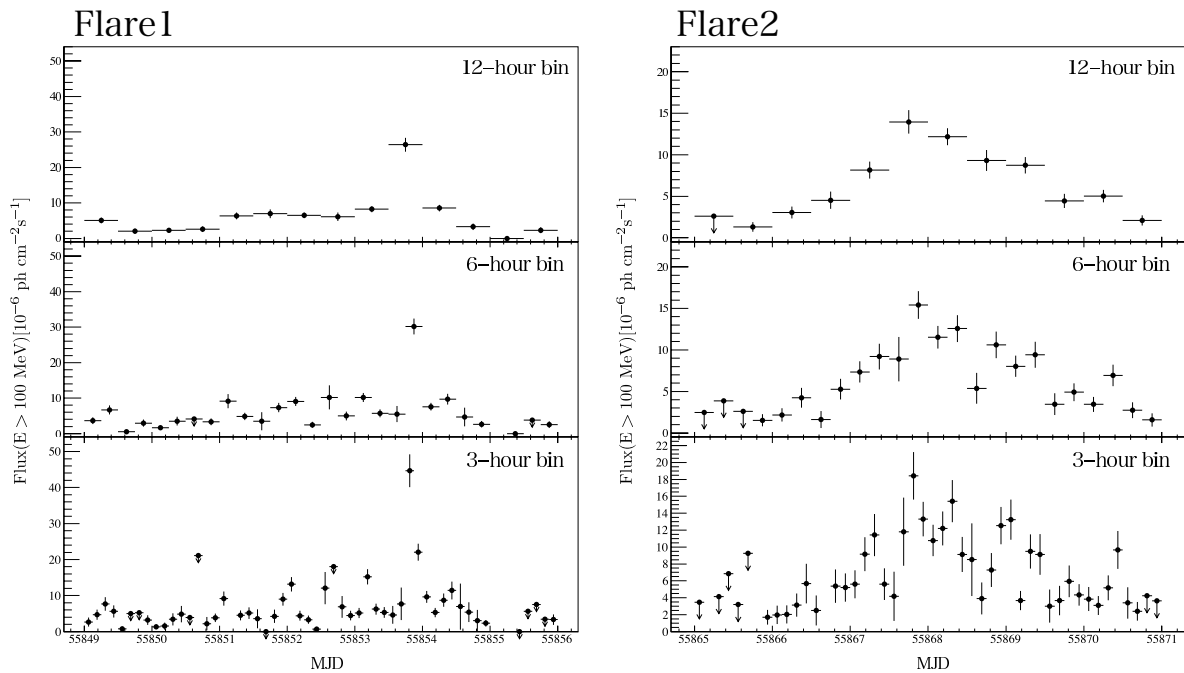
(図1) フェルミ衛星ラット検出器によって観測された、3C 454.3 の過去5年（2008年8月から2013年10月まで）の一日ビン光度曲線。本解析で定義したフレア期間を点線で示した。

本研究において我々は、LATが検出したFSRQのフレア時における時間変動を系統的に調べ、基礎過程にもとづく、観測結果のモデル化を通してジェット放射領域に制限を与えた。

第一に、我々は、短時間変動を調べるために、判定基準を明確にしたうえで、十分な光子統計を持つフレアを選定した。LATの過去5年分の全天観測データに基づき、LATが検出した1000天体あまりのブレイザーの光度曲線を解析し、100 MeV – 300 GeV の帯域での一日積分のフラックスピークが高い順に6つのFSRQを選定した。次にそれぞれのFSRQについて天体の活動サイクルに基づいたフレア期間の定義をおこない、最もフラックスの高いFSRQフレアを10イベント抽出した。抽出されたフレアの構成は、3C 454.3 のフレアが4つを占め、以下 PKS 1510-089 が3つ、4C 21.35 が2つ、3C 273 が1つである。これらのフレアはすべて一日積分の光子フラックスが  $8 \times 10^{-6}$  ph/cm<sup>2</sup>/s (100 MeV – 300 GeV) を超えるもので、数時間スケールの探査を可能にする光子統計を持つ。例として3C 454.3 の過去5年のライトカーブと、定義したフレア期間を図1に示す。

選定した10フレアについて、光度曲線を作成し、フレア時における短い時間変動を系統的に解析した。光度曲線の各ビンにおおむね一定の露光時間を得つつできるだけ短い変動を探査するため、LATが全天をサーベイする時間に対応する、3時間ビンを選択した。光度曲線を解析した結果、PKS 1510-089 において3時間で6倍にも光子フラックスが増光する現象を発見した(図2左)。対応する典型的な変動の時間スケール(フラックスが2倍になるまでにかかる時間)は1時間程度と、AGNにおいてGeV帯域で観測されたなかでも最短の時間スケールの変動である(Saito et al. 2013)。フラックスからこの急激なフレア中の放射領域の光度を見積もると  $5 \times 10^{45}$  erg/s となり、他波長観測から求められている降着円盤光度(Kataoka et al. 2008, D’Ammando et al. 2009) に匹敵することが分かった。これはエディントン光度の約10%に相当し、莫大なエネルギーが1日以下のスケールでジェット内部で散逸し、GeVガンマ線として放射する様子が明らかになった。一方で、数日程度のスケールでは一見なめらかな一つのフレアに見える事象が、細かく時間分解することでいくつもの短時間フレアの重ね合わせに分解されることを明らかにした(図2右)。これにより、従来の解釈のよりどころとなっていた数日積分したデータが、実際にいくつものフレア成分の重ね合わせに基づいている危険性を指摘した。

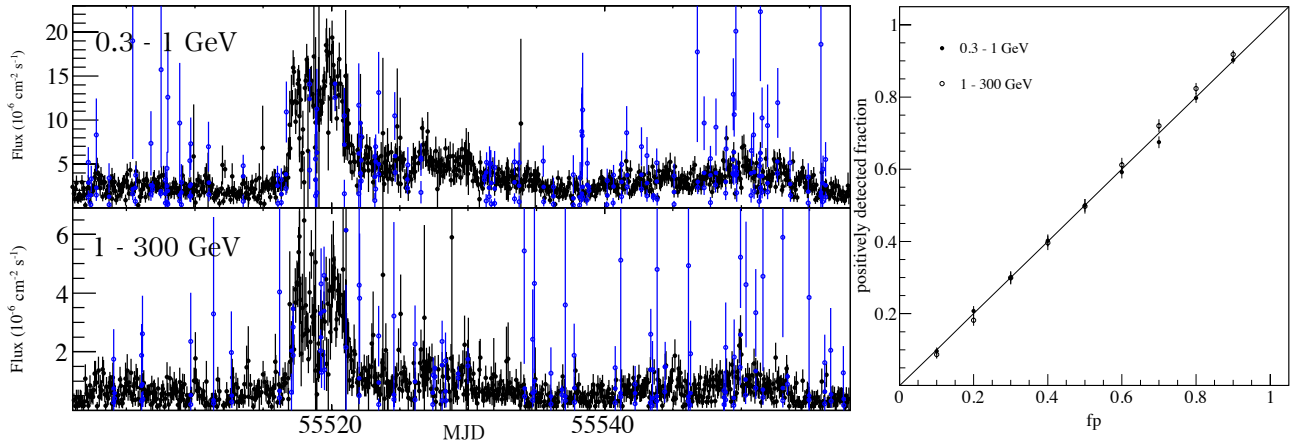
次に、数十分程度のさらに短い急激な変動がフレア時のFSRQにおいて存在するかを調べるために、ベイズ統計を導入して選定した10フレアを解析した。本研究で抽出した最も明るいフレアサンプルにおいてさえ、数十分以下の変動解析においては、光子統計の少なさが障害となる。LATが3時間で全天をサーベイする際、天体がLATの視野に入る時間は30分程度であり、明るいフレアであっても、検出される光子数はせいぜい数十個程度である。このような少ない統計のもとで変動を評価するために、ベイジアンブロックを導入した。この手法は個々の光子の到来時刻をもとに、ポアソン統計に基づきフラックスが変化したと考えられる時刻を探査するものである。はじめにベイジアンブロックの事前確率分布と、ランダムなイベントに対して誤って変動を検出する確率(false positive probability;



(図2) フェルミ衛星によって観測されたPKS1510-089のフレア時における光度曲線 (Saito et al. 2013) (左) 本研究で発見した急激な時間変動を示すフレア (右) 時間のビン幅を細かくしていくことで複数フレアの重ね合わせに分解されたフレア

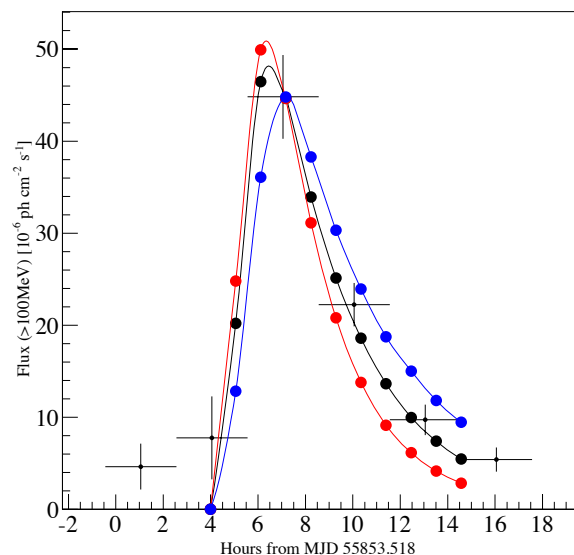
fp) を、数値シミュレーションによって対応づけた。次に、FSRQがLATの一軌道ごとの露光時間 (~30分) のうちに時間変動を示すかどうかを調べるために、選定したフレアの個々の露光に対してベイジアンブロックを適用した (図3左)。フレア中の全軌道のうち変動が検出された軌道の割合を評価し、これを fp と比較することで、フレア中に一軌道ごとの露光時間以下、すなわち数十分以下の変動が見られるかどうかを評価した。選定した10フレアに対して解析した結果、PKS 1510-089の1フレアについて十分程度の変動が示唆された一方、他の9フレアについては変動を検出した軌道の割合が fp と無矛盾であり、数十分以下の変動は有意に検出されなかった (図3右)。

最後に、本研究で発見されたFSRQのフレア時におけるGeVガンマ線の激しい時間変動のプロファイル (図2左) に基づいて、GeVガンマ線の放射領域の位置の特定を試みた。従来の議論では、短い時間スケールの変動を作り出すために、円錐型ジェットの根元付近に小さな放射領域を仮定していた。しかし、ブラックホールごく近傍では相対論的電子が高密度なBLR光子場による急激な冷却を受けるため、期待される冷却時間が数分程度となり、観測されるフレアの減衰時間よりもはるかに短くなってしまふという問題があった。本研究ではジェットの進行方向に沿った内部衝撃波による粒子加速を考えると、フレアの増光時間を、衝撃波によって相対論的電子が放射場に注入される時間スケールとして説明し、ブラックホール近傍を仮定せずとも急激な増光を作り出せることを示した。さらに、衝撃波の速度がジェットの断面において一様な場合でも、視線方向からの見込み角から計算されるドップラー因子の違いによって、ジェットの端の成分が遅れて観測される効果を取り込んだ。これによりフレアの減衰時間が有意に遅延することを明らかにした。以上の単純な内部衝撃波モデルでフレアの時間プロファイルの説明するとともに、相対論的電子の冷却時間にBLR光子場の密度が反映されることを利用して、ガンマ線放射領域の中心からの距離を特定した。結果、PKS 1510-089の場合、フレアが単一の内部衝撃波に起因するとして、電磁放射エネルギーの大部分は中心ブラックホールから0.2パーセク程度の位置で、また、ジェットの軸方向に0.1pc程度伸びた衝撃波領域から放射されることをつきとめた (図4)。



(図3) (左) LATが観測した3C 454.3のフレア時における光度曲線。黒：LATの1軌道の露光ごとにビンで区切って求めたフラックス 青：各軌道にベイジアンブロックを適用した結果変動が検出された軌道のフラックス (右) 事前確率分布  $f_p$  と変動が検出された軌道の割合との相関

本研究において我々は、フェルミ衛星のデータを極限まで時間分解して解析をおこない、FSRQのGeVガンマ線フラックスが1時間程度の短時間で変動することを世界で初めて明らかにした。さらに、このような短時間フレアのプロファイルを単純な内部衝撃波モデルで説明することに成功した。PKS 1510-089のフレア時においては、ジェットの大部分の運動エネルギーが、中心ブラックホールから0.2パーセク程度の領域で放射に変換されていることを特定し、長年の謎であったジェットの放射領域の位置に大きな制限を課した。



(図4) PKS1510-089の短時間変動のモデリング結果。放射領域の位置を変化させてシミュレーションをおこなった。放射領域の中心からの距離は、赤：0.1パーセク、黒：0.2パーセク、青：0.3パーセク。