

高エネルギーガンマ線観測から迫る 相対論的ジェットの姿



林 田 将 明

〈千葉大学理学研究院附属ハドロン宇宙国際研究センター 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33〉

e-mail: masaaki.hayashida@gmail.com

活動銀河核の中心から相対論的ジェットを地球方向に吹き出している天体は「ブレーザー」と呼ばれる。「宇宙の巨大な加速器」とも言われており、高エネルギーガンマ線源として最も数の多い天体種族となっている。相対論的ジェットの形成過程は長年の謎であったが、最近のシミュレーション研究の進展により、磁気駆動ジェットが主流になりつつある。一方で、ガンマ線観測から解釈されるジェットは「物質運動エネルギー優勢」の状態を示し、磁気駆動ジェット形成理論の描像とは必ずしも一致しない。今回、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡がブレーザー 3C 279 から 2013 年と 2015 年に観測した歴史的な明るいガンマ線の増光現象を題材に、ジェット内の加速機構やジェット形成理論との関係について、高エネルギーガンマ線観測の側面から論じる。

1. ブレーザー天体：活動銀河核からの相対論的ジェット

宇宙に無数にある銀河の中心にはそれぞれに超巨大ブラックホールが存在すると考えられているが、銀河の中には銀河全体の明るさよりも明るく輝く『活動銀河核』を持つものが存在する。さらに一部の中心核にはその超巨大ブラックホールをエネルギー源として中心から相対論的なプラズマ流を上下に吹き出している天体も存在する。このプラズマ流こそが「相対論的ジェット」と呼ばれるもので、ジェット本体は光速の 99.5% 以上（ローレンツ因子： $\Gamma > 10$ ）の速さにも達していると考えられている。特に、そのジェットが地球（観測者）の方向を向くと『相対論的ビーミングの効果』が現れる¹⁾。その効果の大きさは『ビーミング因子： δ 』で表現され、簡単にはジェットのローレンツ因子と同じ値 $\delta \sim \Gamma$ と近似できる。この効果に

より見掛けの時間は $1/\delta$ 短くなりエネルギーは δ 倍される一方、見掛けの光度は最大 δ^4 倍も強調される。つまり $\Gamma \sim \delta = 10$ のときに、最大 10,000 倍も強調された明るさで観測されることになる。このようにジェットからの放射が卓越した天体は『ブレーザー』と呼ばれている。観測的な特徴として、放射は激しい変動を示し偏光しており、また、電波源としてハードなスペクトル指数をもつ明るい天体となる。これらの性質から、観測されている放射は「非熱的放射」であり、ジェット内で加速された荷電粒子起源であることを示唆している。相対論的ジェットは「宇宙の巨大な加速器」として、 10^{20} eV (eV: 電子ボルト) にも達する最高エネルギー宇宙線起源の第一候補天体と長らく言われてきた。実際に 1991 年には TeV*¹⁾ に達するガンマ線放射が確認され²⁾、ジェット内の高エネルギー荷電粒子の存在は確実なものとなった。

*¹⁾ ガンマ線（光）をエネルギーで表現するときの単位。TeV（テラ eV）= 10^{12} eV, GeV（ギガ eV）= 10^9 eV, MeV（メガ eV）= 10^6 eV となる。

その後のガンマ線観測衛星や地上チェレンコフ望遠鏡の発展により、このブレイザー天体は現在、高エネルギーガンマ線を放出する一番数の多い種族の天体になっている³⁾。つまり宇宙で一番激しく活動するエネルギーッシュな天体なのである。

2. 相対論的ジェットとその未解決問題

図1はブレイザーの典型的なスペクトルエネルギー分布 (SED) の例を示している⁴⁾。ブレイザーは電波から最高 TeV に達するガンマ線まで非常に広い帯域で放射が見られ、その SED の形には特徴的な二つの山が現れる。一つ目の低エネルギー側の山はピークが遠赤外から軟 X 線の範囲内に位置するものであり、その起源はジェット内で加速された高エネルギー電子によるシンクロトロン放射である。一方、高エネルギー側の山は MeV-GeV ガンマ線帯域内でピークを示し、高エネルギー電子による逆コンプトン散乱か高エネルギー陽子が生成したパイ中間子の崩壊により現れるガンマ線放射が起源と主に考えられている。

これまでの観測結果を放射モデルを用いて議論すると、ガンマ線は高エネルギー電子起源と考えて矛盾ない結果が得られている^{例えば5)}。ここから、磁場強度は 0.01-1 G 程度、ジェットのビーミング因子 $\delta \sim 10-30$ などのジェットの物理パラメータは求まるが、現状これらの値は放射のモデル曲線が観測データに合うようにパラメータを現象論的に与えただけのものがほとんどである。また、放射モデルの多くはジェットの構造をあまり考慮しておらず、放射モデルからはジェット内でのガンマ線の放射場所を特定するまでには至っていない。特に、図1で見られるようにブレイザーは高エネルギーガンマ線帯で一番明るく輝いており、「ガンマ線の放射場所」を特定することは「ジェットのエネルギー散逸の場所」を特定することと同義であり非常に重要な項目である。このガンマ線発生場所の論点は、ブラックホールから 0.1 パーセク以内のごく近傍 ($\sim 10^3$ 重力半径以下) か、数パーセク以上離れた比較的外側 ($\sim 10^{5-6}$ 重力半径程度) となる。この違いがガンマ線の放射起源やジェットの成長と形成過程にかかわってくる。ちなみにガンマ線ブレイザーの地球からの距離は近いものでも 100 メガパーセク以上離れており、撮像からジェット内のガンマ線放射位置をこの精度で直接決めることは角度分解能には優れないガンマ線観測では全くもって不可能である。

また、相対論的ジェットは「宇宙の巨大な加速器」と言われているにもかかわらず、実際に内部で起こっている加速のメカニズムの理解は乏しい。ジェット内部には衝撃波が存在し、衝撃波加速 (フェルミ一次加速) が働くと一般的に信じられている一方で、ジェット内に存在する衝撃波は相対論的な速度であるために磁場の向きが衝撃波面とほぼ平行になり、粒子が衝撃波面を往来できずにフェルミ一次加速は機能しにくいとも論じられており⁶⁾ 単純ではない。しかも観測面からは加速機構を選別するような議論には踏み込めておらず、現状、放射モデルにおいて考慮する親電子の

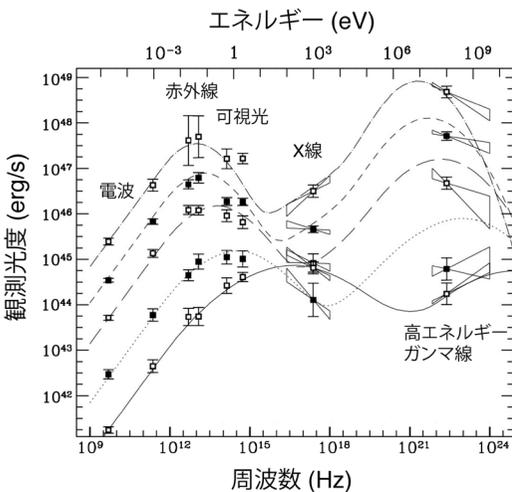


図1 電波から高エネルギーガンマ線までのブレイザーのスペクトルエネルギー分布。さまざまなブレイザーの典型例を示しているが、どれも二つ山をもつ構造を示す⁴⁾。

分布は観測データを再現できるように冪関数の形で“勝手に与えている”研究がほとんどである。

加えて「相対論的ジェットはどのように形成されるのか？」との根本的な問題でさえ未解決のままである。理論としては大別して、磁気力でジェットを駆動する『磁気駆動ジェットモデル』と、輻射力でジェットを駆動する『輻射駆動ジェットモデル』が挙げられる。さらに、なぜ相対論的ジェットは一部の活動銀河核にしか存在しないのか？何がジェット形成のきっかけとなるのか？などの多くの基本的な点が未知のままなのが実情である。

一方で、近年の観測装置の向上により徐々にこれらの問題に対する議論が観測面からも展開し始めた。本稿では、ジェットの放射エネルギーの大部分を占めている高エネルギーガンマ線に関して、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡の主検出器Large Area Telescope (LAT) (以下フェルミ衛星) によるブレーザー天体「3C 279」の最新の観測結果^{7), 8)}を題材に、ジェットのエネルギー成分、加速機構そしてジェットの形成理論に対して高エネルギーガンマ線観測の観点から切り込んでいく。

3. 高エネルギーガンマ線で見えた相対論的ジェット

3.1 フェルミ衛星が捉えたガンマ線フレア

フェルミ衛星は20 MeVから300 GeVを超えるガンマ線を観測する科学衛星である。2.4ステラジアンという広い観測視野をもち、約3時間(軌道2周分)で全天を観測することが可能であり、不規則に激しい変動を示すブレーザーのガンマ線放射のモニター観測には非常に適した性能を備えている。これまでフェルミ衛星が有意なガンマ線放射を検出したブレーザーはすでに1,500天体を超えるが⁵⁾、3C 279はその中でも明るく有名なブレーザーの一つである。実際、フェルミ衛星より前のガンマ線衛星『EGRETガンマ線望遠鏡』でも明るいガンマ線天体として知られていた⁹⁾。

3C 279は、赤方偏移(z) 0.536に位置し、中心ブラックホールの質量は $(3-8) \times 10^8$ 太陽質量(M_{\odot})と推定されている¹⁰⁾。

図2がフェルミ衛星が観測した100 MeV以上のガンマ線の約8年間の光度曲線である。2008年8月の科学観測開始以来、最初の1年はある程度の活動性が見られたが、その後約4年ほど比較的

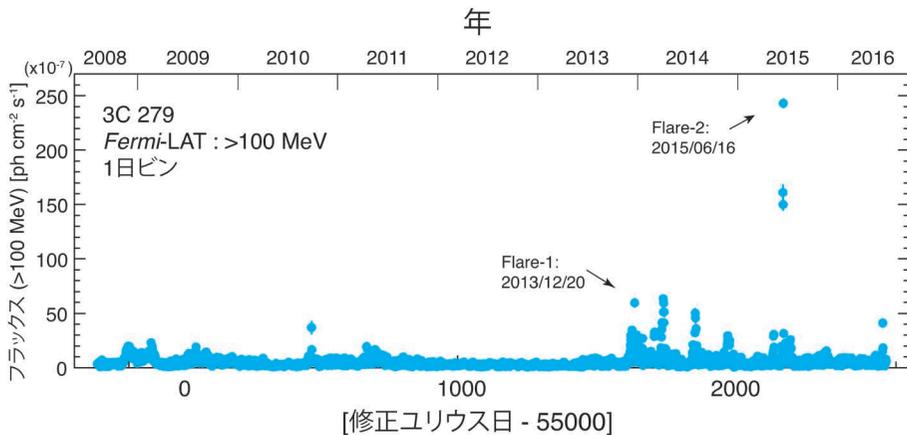


図2 フェルミ衛星 (Fermi-LAT) が測定した、2008年8月から2016年7月までの約8年間にわたる1日ごとの強度変化を表した3C 279の100 MeV以上のガンマ線の光度曲線。本稿で取り上げる2013年12月20日と2015年6月16日の増光現象 (Flare-1, Flare-2) をそれぞれ明示してある。

平穏な状態が続いていた。2013年後半から再び活動性が高まり、いくつかの増光（フレア）現象が確認できる。本稿ではこの最近の活動期に入って最初に起こった2013年12月のフレア（Flare-1）と2015月6月に起こった最大フレア（Flare-2）に焦点を当てる。

2013年12月のフレアからは三つの特徴的な様子が観測された。

- 1) 3時間程度で強度が2倍以上変動する速い強度変動が観測された。図3がそのときの約3時間ごとのガンマ線フラックスを表した光度曲線になるが、数時間のスケールで急激に放射が明るくなっているのがわかる。
- 2) このフレアはガンマ線帯でのみ観測された。多くのフレア現象では程度の違いはあるにせよ他のエネルギー帯でも増光が見られるが、このときはシンクロトロン放射起源である可視光にて同時の増光は見られなかった。
- 3) 光子指数が 1.7 ± 0.1 と非常にハードなガンマ線スペクトルを示した。図4にこのとき観測されたガンマ線スペクトル（青丸）とその他のいくつかの観測値¹¹⁾を比べると、通常観測されるのは2より大きい（ソフトな）指数

のべきであり、今回は異常にハードなべきが観測されたことになる。

3.2 ガンマ線の発生場所

観測された速い変動性は放射領域を一樣とするとその大きさが小さいことを意味する。放射が伝わる最大の速さは光の速度であることから、放射領域の大きさ（半径： r ）は変動時間スケール τ_{var} を用いて、

$$r < c\tau_{var}\delta/(1+z) \tag{1}$$

と推定できる。ここで c は光速、 δ は相対論的ビーミング効果のビーミング因子を表す。いま、 $\tau_{var} \sim 10,000$ 秒、 $\delta = 20$ とすると、 $r < 4 \times 10^{15}$ cmとなる。ここから開き角 θ_0 （ラジアン） $\sim 1/\Gamma \sim 1/\delta$ の円

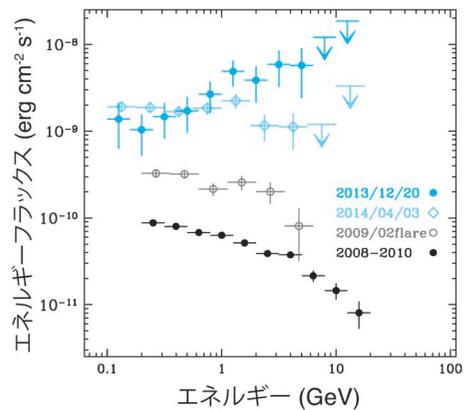


図4 フェルミ衛星により3C 279から観測されたガンマ線スペクトル（SED）。青丸が2013年12月20日に得られたハードなスペクトル。比較のために別のときの観測から得られたいくつかのスペクトルも載せる¹¹⁾。2013年12月のフレア以外はすべてが右下がりになっており、光子指数は「2」以上であることを示している。

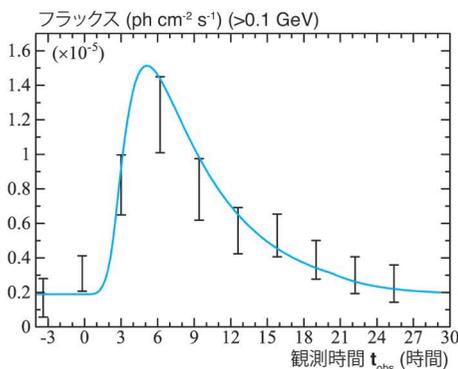


図3 2013年12月20日にフェルミ衛星で観測された、3C 279の約3時間（軌道2周）ごとの100 MeV以上の光度曲線。青線は乱流による統計加速モデルに基づいた放射モデルから得られた光度曲線モデル。

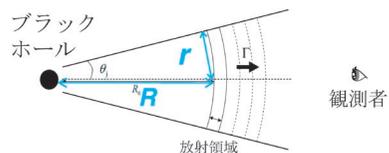


図5 円錐形のジェットの模式図と各パラメータの幾何学的な対応¹²⁾。

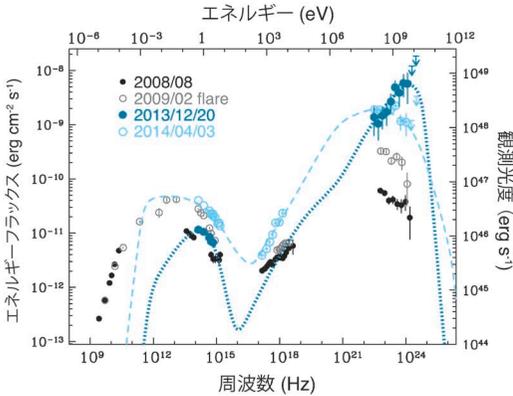


図6 それぞれ異なる時期に観測された3C 279の多波長SED. 青丸が2013年12月20日のフレア時の観測データで、比較のためにその他のいくつかのSED観測データを載せる¹¹⁾. 青点線が、電子起源の放射モデルを示している.

錐状のジェットを考えると、図5に示すように、放射領域のブラックホールからの距離 (R) は円錐状ジェットの断面が放射領域の大きさになる場所に対応するので、幾何学的に $R=r/\theta_0 \sim 10^{17} \text{ cm} < 0.1 \text{ パーセク}$ とおおよそ求まる。3C 279の中心ブラックホール質量を $5 \times 10^8 M_\odot$ とすると 10^3 重力半径程度に相当し、ブラックホール近傍でガンマ線が発生していることになる。また、電子の冷却時間の速さからも放射領域は広輝線領域内^{*2}にあると考えられるので¹³⁾、0.1パーセク以下との見積もりと一致する。

次に図6に示された多波長SEDを見てみよう。二つの山の高さを比べると高エネルギー側の山のほうが高く、特に今回のフレア(青丸点)は顕著でその差は3桁近くに達する。電子起源のモデルに基づく二つの山はそれぞれ同じ電子起因のシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱であることから、磁場エネルギー密度がジェットのエネルギーに対して非常に低く、ジェットのほとんどエ

ネルギーは物質(荷電粒子)が占めていると推定される¹⁴⁾。つまり、ガンマ線放射領域のジェットのエネルギー成分は「物質のエネルギー優勢の状態」であると言える。

4. ジェット内の粒子加速機構

観測された「非常にハードなガンマ線のべき」はジェット内の加速メカニズムの議論に対して一石を投じた結果である。図6の中に描かれている曲線は観測多波長SEDデータを記述した放射モデルである。観測されたハードなガンマ線スペクトルを再現できているが、この放射モデルで設定した親電子のスペクトルのべきは「1」となっている。

衝撃波加速により生成される粒子の分布はべき関数となり、標準的な環境ではそのべき指数が取り得る一番小さな(ハードな)値は「2」である。つまり、今回仮定した親電子のスペクトルは衝撃波加速では再現困難な値になっている。「2」よりハードな指数をもつべき関数の分布を生成可能な加速機構として、例えば「かに星雲」からの予想外のフレア現象をきっかけに高エネルギー天体にも応用が盛んに研究され始めた『磁気リコネクション』が候補に上がる¹⁵⁾。ただし磁気リコネクションでハードなべきを生成するのは磁化率が非常に高い(磁気エネルギーが占める割合が高い)環境が必要であり¹⁶⁾、今回われわれの観測が示唆する「物質エネルギー優勢」の環境において指数が「2」よりハードなべき分布を生成するのは容易ではない。

そこでわれわれは、ジェット内では実は乱流による統計加速(フェルミ二次加速)によって粒子が加速されているのではないかと考えた。相対論的プラズマでは音速が $c/\sqrt{3}$ で、乱流の速度は決して光速(c)に比べて遅くないと期待される。

*2 活動銀河中心核周り約0.1 pc程度に広がる比較的温度の高いガス雲で幅の広い(速度にして数千km/s)輝線を放出している領域。その外側には幅のより狭い輝線が放出される「狭輝線領域」が数パーセク程度まで広がる。広輝線領域の光子エネルギー密度は狭輝線領域と比べて2桁以上高いと見積もられている^{11,14)}。

非相対論的な場合と異なり、二次加速でも今回観測された変動の時間スケールでの加速は難しくないと予想した。このアイデアを検証するため、浅野らにより構築された乱流による統計加速のコードを活用することにした¹²⁾。円錐形のジェット内を一定の厚さをもったシェル状の放射領域が下流に伝播する構造を定義し(図5参照)、時間発展の統計加速シミュレーションコードにより電子の分布を決定、その電子分布を元に放射冷却過程にはシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱を考慮した電子起源の放射モデルを用いた。ここで逆コンプトン散乱の種光子は広輝線領域の光子としている。その結果、観測されたハードなガンマ線スペクトルのみならず、図3に曲線で示されているように100 MeV以上の放射強度の変動の様子も再現することに成功した¹⁷⁾。フェルミ二次加速は衝撃波加速と比べると加速効率が悪いので無視できる効果との先入観をもたれがちだが、実際の計算で数時間で変動する光度曲線を再現できたことからブレーザーの放射を記述するのに十分な効率で電子を加速可能なことがわかる。

実はブレーザーで観測されている放射を説明するのに必要な電子の最高エネルギーはたかだか10 TeV程度で、そこまで効率的な加速は必要でないこと(極端に効率の良い加速「ボーム極限」の 10^{-4} 程度の効率で十分)は以前から指摘されていたこと¹⁸⁾、乱流による統計加速が機能していることも不思議なことではない。このわれわれの結果はジェット内の他の加速機構の存在を否定するものではないが、乱流による統計加速に基づいて生成された電子分布を用いて観測されたブレーザーの放射スペクトルと光度曲線両方とも再現できたのは初めてであり、非常に重要な成果だと考えている。

また、この乱流による統計加速に基づいた放射モデルから求めたそれぞれのエネルギー成分の

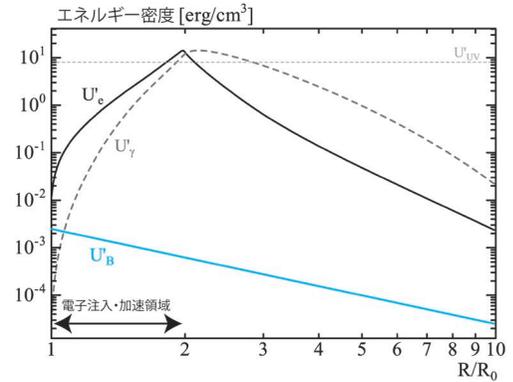


図7 2013年12月のフレアを記述した乱流による統計加速に基づいた放射モデルから導かれたエネルギー密度のそれぞれの成分の時間発展の様子。黒線が電子(U'_e)、青線が磁場(U'_B)、灰色の破線は放射されているガンマ線光子(U'_γ)、それぞれのエネルギー密度である。横軸はブラックホールからの距離(R)を放射領域(シェル)の始点(R_0)の距離で規格化したスケール。始点である $R/R_0=1$ から放射領域のシェルがジェット下流に伝播するモデルであり(図5も参照)、横軸は経過時間と等価になる。横軸(R/R_0): 1-2の範囲が電子の注入と加速が起きている領域である。

変化(時間発展)の様子を表したのが図7になる。加速領域の終端である $R=2R_0$ の位置にてガンマ線の放射密度(U'_γ)が最大になり、そこでの磁場のエネルギー密度(U'_B)と物質(電子)のエネルギー密度(U'_e)を比べると、 $U'_B/U'_e \sim 10^{-4}$ と極端な「物質エネルギー優勢」の環境になっていることが読み取れる。

5. ジェット形成理論とのかかわり

5.1 フェルミ衛星ブレーザー観測史上最速の分スケールのガンマ線強度変動

次に2015年6月に観測されたフレアを紹介する。このフレアは、図2にあるように、3C 279で観測された最大のフレアであり、100 MeV以上のガンマ線帯の1日の平均強度としても 2.4×10^{-5} ph

*3 100 MeV以上で最大のブレーザーのフレアは3C 454.3が2010年11月に記録した 6.6×10^{-5} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$ ¹⁹⁾。

$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達している. これは高エネルギー天体の「標準光源」である平穏時のカニ星雲のフラックスの約10倍であり, またフェルミ衛星の約8年間の観測の歴史において二番目に明るく輝いたブレーザーのフレアである³.

さらにこのときはモニター観測の速報結果により前日に天体が明るくなり始めたことに気づき, フェルミLATチーム内で即座に行動を起こしTarget of Opportunity (ToO) 観測を提案した. このToO観測によりフェルミ衛星の検出器方向を3C 279側になるべく多くの時間向けて運用することで通常時より密にこの天体を観測することができた. 通常は全天を軌道2周でカバーする観測運用なので, 光度曲線は2軌道(約3時間)ごとで記述するのが検出イベント数の統計的にも最短の時間スケールとなる. 一方, 今回はToO観測運用時に非常に高いフラックスを観測したこと

により, 1軌道ごとのみならずさらに軌道よりも短い時間で分解した光度曲線を導出できるほどのガンマ線イベントの検出に成功した. その光度曲線を図8に示す. 特に, 最大フラックスを示した二つの軌道に対しては3分間隔と2分間隔の光度曲線も作成した. このような短い時間間隔でもフラックスは絶えず変動しており, 例えば「軌道A」の2分間隔の光度曲線に対して統計検定(χ^2 検定)すると, 「変動なし」との帰無仮説に対してその確率は0.00047しかない. 放射強度の分スケールの変動性をフェルミ衛星のブレーザー観測から得られたのは今回が初めて, つまり100 MeV帯でのブレーザー史上最速の変動性の発見である.

この結果から読み取れるジェットの姿を考察する. 今回のフレアの変動の時間スケールを5分とすると, 式(1)から放射領域の大きさは $\sim 5 \times 10^{14}(\delta/50)\text{cm}$ と求まる. さらに δ の下限值を与えることができる. これは放射領域があまりに小さいと,

- 1) 放射領域の光子密度が高くなり電子-陽電子生成が起こりガンマ線が放出されない.
- 2) シンクロトロン自己コンプトン散乱の放射成分が卓越し観測されたX線フラックスを超えてしまう.

との矛盾が生じる. これら为了避免するためある程度大きな δ が必要となる¹³. これらの条件からそれぞれ $\delta > 25$, $\delta > 50$ が導かれ, 両者を満たすためには $\delta > 50$ となる. そこで先ほどと同様に開き角 $\theta_0 \sim 1/\delta$ の円錐状のジェットを考えると, ガンマ線放射領域の位置はブラックホールから距離でたかだか $\sim 10^{14}\text{cm} \sim 100$ 重力半径と求まる. この時観測された見掛けのガンマ線光度は $\sim 10^{49}\text{erg s}^{-1}$ に達している一方, シンクロトロン放射の光度は $\sim 10^{47}\text{erg s}^{-1}$ 程度であり2桁も低い. これらの結果は相対論的ジェットが100重力半径というブラックホール近傍でも「物質エネルギー優勢」の状態であることを示している. しかも, ガンマ線

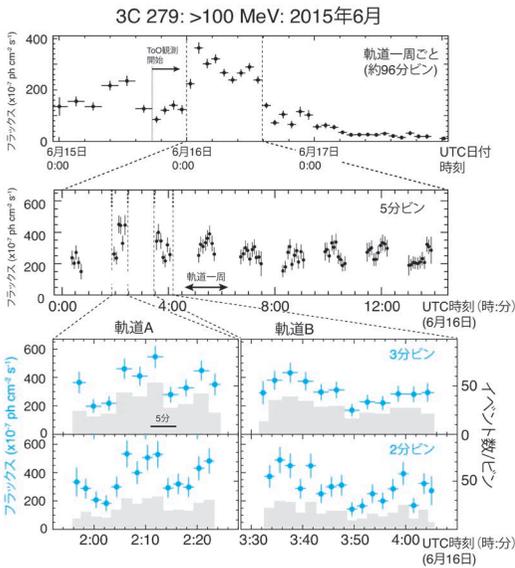


図8 2015年6月16日に観測された3C 279の100 MeV以上の光度曲線. 一番上は軌道1周ごとの時間間隔だが, 真ん中と下のグラフは, 1軌道内をそれぞれ5, 3, 2分ごとに時間分解した光度曲線になっている. 下のグラフの灰色のヒストグラムはそれぞれの時間ビンで検出されたガンマ線光子のイベント数(右軸)を表している.

の見掛けの光度にジェット開口角 ($\sim 1/\Gamma$) を用いて補正したジェットの真の放射光度 ($\sim 4 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) が天体のエディントン光度の10%近くに匹敵する明るさで光っていることになり、膨大なエネルギーが散逸している場所となっている。

5.2 ガンマ線観測結果と磁気駆動ジェット形成理論との関係

このガンマ線観測から得られたジェットの描像と現在主流のジェットの形成理論とを比較すると、興味深い事実が浮かび上がる。まず、現在主流となっている形成理論は、例えば回転するブラックホールから磁気エネルギーを取り出す『Blandford-Znajek機構』²⁰⁾ に代表される磁気駆動ジェットモデルであり、実際に磁気流体シミュレーションによってジェット形成に成功し^(例えば²¹⁾) 盛んに研究が行われている。磁気駆動ジェットモデルに基づくジェット根元の環境は磁場エネルギー優勢でなければならない。一方、われわれのガンマ線の結果からはガンマ線放射領域ではジェットは物質エネルギー優勢な状態であることを示唆する。したがってこのガンマ線観測から得られた解釈と磁気駆動ジェット形成理論を両立させるには、磁気エネルギーで駆動されたジェットは、100重力半径程度の距離までに十分に成長し加速 ($\Gamma > 50$ ~ 光速の99.98%以上) され、磁場エネルギーの

大部分を物質の運動エネルギーへと変換していなければならない。図9にこのガンマ線観測結果からの解釈と磁気駆動ジェットモデルとの関係性を模式図としてまとめた。

ところが、磁気駆動によるジェットの成長は急激に進むものではなく、(詳細は外圧などの周辺環境によるが) 例えば単純な見積り²²⁾ ではブラックホールからの距離 R 、その天体の重力半径 r_g として、 $\Gamma \sim (R/r_g)^{1/3}$ 程度の成長速度であり、 $\Gamma \sim 50$ 程度まで成長するには最低 10^{5-6} 重力半径程度は必要となる。つまり、今回得られたガンマ線観測結果から解釈されたジェットの姿は現状の磁気駆動ジェットの形成理論モデルでは説明できない描像であり、ジェットの形成過程の理解にはさらなる研究が必要であることを示している。

6. 今後の展開

相対論的ジェットの研究の今後の展開として、観測そして理論の両側面から取り組むことで、「整合的な」ジェットの姿を見つけ出すことが課題であろう。この目的のためには、他の波長の観測結果も重要である。例えば最近のミリ波による長基線電波干渉計による観測からは、10重力半径程度の根元では磁場エネルギー優勢を示唆する結果が得られており²³⁾、その点においては磁気駆動ジェットとの整合性が見られている。ジェットの

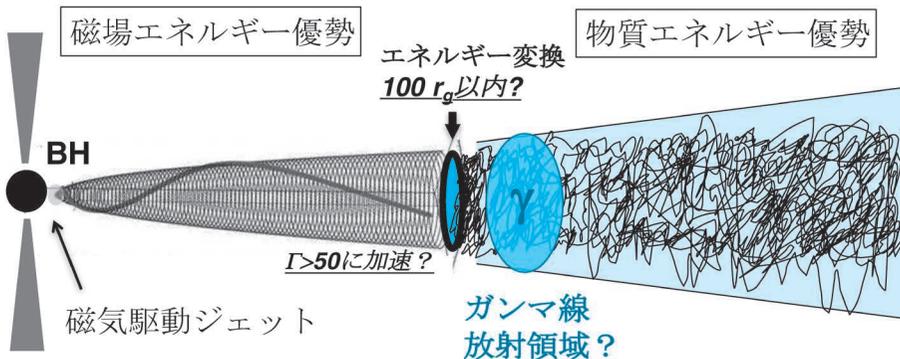


図9 今回得られた高エネルギーガンマ線観測結果から解釈される相対論的ジェットの描像と磁気駆動ジェットモデルとの関係を簡単に示した模式図。

真の姿を理解するためには自分の分野のみを盲目的に研究するのではなく、さまざまな波長での観測結果を多角的に検証し合いそれらを理論モデルと突き合わせていく多分野交流こそが今後必要な研究スタイルだと考えている。

その点においても今回のガンマ線の解釈はいくつかの仮定に基づいており、それらの正当性の検証が必要である。その一つがジェットの形状であり、今回は円錐形を仮定していたが、長基線電波干渉計の観測からはむしろ双曲線型を支持する結果も得られている²⁴⁾。さらには、ジェットが成長した先端で再び狭まっていく『リ・コリメーションジェット』の考え方もあり²⁵⁾、小さい放射領域でもブラックホール遠方に存在することができのかもしれない。ただしその場合は、大量のエネルギーを散逸させずにどのように遠方のコンパクトな領域まで運ぶのか、という新たな問題が生じる。

ほかにも、ガンマ線の放射起源に関しては現在主流の逆コンプトン散乱を前提に議論を進めてきたが、今回観測された増光現象は特殊なフレアであるため通常とは異なる放射起源である可能性も十分にありうる。例えば、もし今回のガンマ線フレアが電子または陽子のシンクロトロン放射起源であると考えるとどちらもキロガウス以上の磁場強度が必要となり、結果「磁場エネルギー優勢」の環境からガンマ線が発生しているとの帰結が得られる。突飛なアイデアに聞こえるかもしれないが、前者の電子起源に関して例えば「カニ星雲のガンマ線フレア」は、GeV近くまで達する電子シンクロトロン放射が突如出現した結果と解釈されており²⁶⁾、ブレーザーでも同様な現象が起こっていると考えても不思議ではない。また後者は 10^{17} eV以上まで伸びる陽子が存在すると成り立つモデルであり²⁷⁾、陽子起源のガンマ線放射の確立は長年探していた銀河系外の宇宙線起源の証拠ともなる。

また高エネルギーガンマ線の新しい観測装置と

してCherenkov Telescope Array計画が進んでおり²⁸⁾、チェレンコフ望遠鏡群で20 GeVから数百TeVのエネルギー領域を現在の装置より1桁以上高い感度での観測することを目指している。これにより現在数十個しかないTeVブレーザーが数百天体以上見つかるかと予想されている。

さらに電磁波だけでなく、IceCubeという南極の氷の中で稼動中のニュートリノ観測装置が宇宙から飛来した数十TeVを超えるニュートリノイベントを数十例検出しており²⁹⁾、到来方向に有意な異方性は見られないことから銀河系外由来を示唆している³⁰⁾。しかしその起源天体は不明であり、起源特定のために現在分野を超えて精力的に研究が進められている。もし当初の予想どおりにジェットがその起源だとしたら「宇宙線の起源」の問題の解決へ大きく前進する可能性がある。このニュートリノ観測もIceCube-Gen2³¹⁾や電波を用いたARAといった拡張プロジェクトが検討されている。相対論的ジェットは『マルチメッセンジャー天文学』のトピックとしても注目を集めている天体であり、今後まだまだ面白い結果が生まれ新たな展開が待ち受けているであろう。

謝 辞

本稿の科学的な内容は筆者が主導した投稿論文^{7), 8), 11), 17)}に基づくものである。東大宇宙線研究所の浅野勝晃氏には、日常的に多種多様な議論に付き合っていたきたいへん感謝している。また、フェルミ衛星打ち上げ時から世話になっているSLAC国立加速器研究所のGreg Madjeski氏、ポーランドCAMKのKrzysztof Nalewajko氏にも感謝を述べたい。フェルミ・ガンマ線宇宙線望遠鏡は国際共同プロジェクトとして運用され、日本もFermi-LAT Collaborationの正式メンバーとして参加している。そして、この執筆の機会を与えていただき、原稿執筆にも貴重なコメントをいただいた馬場彩さん、ありがとうございました。

参考文献

- 1) Blandford R. D., Königl A., 1979, ApJ 232, 34
- 2) Punch M., et al., 1992, Nature 358, 477
- 3) Acero F., et al. (*Fermi*-LAT Collaboration), 2015, ApJS 218, 23
- 4) Fossati G., et al., 1998, MNRAS 299, 433
- 5) Ghisellini G., et al., 2010, MNRAS 402, 497
- 6) Kirk J. G., Heavens A. F., 1989, MNRAS 239, 995
- 7) Ackermann M., et al. (*Fermi*-LAT Collaboration), 2016, ApJ 824, L20
- 8) Hayashida M., et al., 2015, ApJ 807, 79
- 9) Wehrle A. E., et al., 1998, ApJ 497, 178
- 10) Nilsson K., et al., 2009, A&A 505, 601
- 11) Hayashida M., et al., 2012, ApJ 754, 114
- 12) Asano K., et al., 2014, ApJ 780, 64
- 13) Nalewajko K., et al., 2014, ApJ 789, 161
- 14) Sikora M., et al., 2009, ApJ 704, 38
- 15) Cerutti B., et al., 2012, ApJ 754, L33
- 16) Sironi L., Spitkovsky A., 2014, ApJ 783, L21
- 17) Asano K., Hayashida M., 2015, ApJ 808, L18
- 18) Inoue S., Takahara F., 1996, ApJ 463, 555
- 19) Abdo A. A., et al. (*Fermi*-LAT Collaboration), 2011, ApJ 733, L26
- 20) Blandford R. D., Znajek R. L., 1977, MNRAS 179, 433
- 21) McKinney J. C., Blandford R. D., 2009, MNRAS 394, L126
- 22) Drenkhahn G., 2002, A&A 387, 714
- 23) Kino M., et al., 2015, ApJ 803, 30
- 24) Asada K., Nakamura M., 2012, ApJ 745, L28
- 25) Mizuno Y., et al., 2015, ApJ 809, 38
- 26) Abdo A. A., et al. (*Fermi*-LAT Collaboration), 2011, Science 331, 739
- 27) Aharonian F. A., 2000, NewA 5, 377
- 28) <https://www.cta-observatory.org>
- 29) Aartsen M. G., et al. (IceCube Collaboration), 2014, PRL 113, 101101
- 30) Aartsen M. G., et al. (IceCube Collaboration), 2016, ApJ 833, 3
- 31) IceCube-Gen2 Collaboration, arXiv:1412.5106

High-Energy Gamma-Ray Observations to Reveal the Fundamental Questions of Relativistic Jets

Masaaki HAYASHIDA

ICEHAB, Graduate School of Science, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Abstract: Blazars are the most energetic active galactic nuclei possessing relativistic jets, and the most dominant source in high-energy gamma-ray bands. *Fermi* Gamma-ray Space Telescope detected historically maximum gamma-ray flares above 100 MeV from a blazar 3C 279 by its main detector Large Area Telescope in 2013 and 2015. Based on the gamma-ray observational results, we discuss acceleration mechanisms in the jets and the current theories of jet formation.