

フェルミ衛星による活動銀河ジェット観測の新展開

片岡 淳

〈早稲田大学理工学術院総合研究所 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1〉

e-mail: kataoka.jun@waseda.jp

深沢 泰司

〈広島大学大学院理学研究科 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: fukazawa@hep01.hep1.hiroshima.u.ac.jp

Lukasz STAWARZ・佐藤 理江

〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: stawarz@astro.isas.jaxa.jp e-mail: rsato@astro.isas.jaxa.jp

林田 将明

〈SLAC 国立加速器研究所 Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Road, Menlo Park, CA 94025, USA〉

e-mail: mahaya@slac.stanford.edu

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

ガンマ線天体の約半数を占める活動銀河核（ブレイザー天体）は、激しい時間変動と非熱的放射を特徴とします。フェルミ衛星の優れた感度と広い視野は、静穏時においてもブレイザーの無バイアス探査を可能とし、偏光観測などの新しい情報とあわせ、ジェットの構造や加速機構に新たな知見をもたらしました。ジェットと視線方向がずれていると考えられる電波銀河からもガンマ線放射が続々と発見され、活動銀河核の統一描像に今後大きな進展が見込まれます。さらに、ケンタウルス座 A に付随する巨大「ガンマ線」ローブ（大きさ 200 万光年）の発見は、最高エネルギー宇宙線との関連や乱流磁場による加速機構の解明に重要な手がかりを与えることが期待されます。

1. 革命前夜：ガンマ線ブレイザーの発見

活動銀河核は宇宙で最も明るい（エネルギー放射の大きい）天体の一つで、その膨大な電磁放射の源は、中心にある巨大ブラックホールへの質量降着と考えられています。電波銀河のほとんどは放射と同程度、あるいはそれ以上のエネルギーを

粒子ビーム（ジェット）として放出し、その距離は長いもので数百万光年（典型的な銀河サイズの約 100 倍）にも及びます。活動銀河ジェットの発見は 1910 年代にまでさかのぼりますが、ブラックホール近傍からなぜ粒子が噴き出すのか（生成機構）、そもそもジェットを構成する粒子は何か（粒子組成）、どのように細いノズルのような形状を保つのか（コリメート機構）、基本的な物理が未

解決のままです¹⁾。超新星残骸が銀河系内宇宙線の有力な加速源であるのに対し、活動銀河ジェットは系外宇宙線加速の重要な候補天体の一つです²⁾。とくに近年、地上のオージェ (Auger) 実験は最高エネルギー宇宙線の到来方向が一様でなく、近傍の活動銀河核の分布と相関がある可能性を示しました³⁾。宇宙の巨大加速器として、活動銀河核の理解は大きな注目を集めつつあります。

ガンマ線観測に目を向けると、1990年代にコンプトン衛星 (CGRO: Compton Gamma-Ray Observatory) 衛星に搭載された EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) 検出器は 271 もの MeV-GeV ガンマ線天体を発見し、そのうち 66 個がジェットをもつ活動銀河核でした⁴⁾。(近年の EGRET 再解析で、さらに数個が同定されています⁵⁾)。興味深いことに、ほぼすべてがブレーザーと呼ばれる特異な天体で、いわゆる「普通の」電波銀河は、われわれの最も近傍にあるケンタウルス座 A (Cen A: 距離 約 1,200 万光年) が辛うじて検出されたか? という際どい状況です。ブレーザーは激しい時間変動と強い非熱的放射を特徴とし、粒子ビームがちょうどわれわれの視線方向を向く特殊な状況をもつ天体と考えられます⁶⁾。EGRET による最大のブレイクスルーは、活動銀河の中でも 1% に満たないマイナーな種族が、ガンマ線で最もメジャーな放射源であることの「発見」でした。電波からガンマ線まで 20 桁にわたる多波長観測が企画され、さまざまな種類のブレーザー天体が、統一的な描像で理解されることがわかってきました⁶⁾。その反面、EGRET の感度では多くのブレーザーを激しい増光中 (フレア) にしかとらえられず、またスペクトル構造や時間変化など、ジェットの物理に迫る手がかりを得ることは困難でした。

2. フェルミ衛星による活動銀河核の観測

2008 年 6 月、満を持してフェルミ・ガンマ線宇

宙望遠鏡 (フェルミ衛星) が打ち上げられました。主検出部である Large Area Telescope (LAT) は EGRET 検出器の約 6 倍の有効面積、広い視野 (全天の約 1/5)、さらには優れた角度分解能 (1 GeV で 0.8 度) をもち、20 MeV から 300 GeV の広いエネルギー帯で全天サーベイを行います⁷⁾。これにより、極めて高い精度でガンマ線源の位置を決定できるだけでなく、いつ・どこでフレアが起きるかわからないブレーザーのような天体は、常に動向を監視することも可能となります。フェルミ衛星は 11 カ月で 700 を超える活動銀河核を検出し、すでに EGRET が 10 年間に発見した個数の 10 倍を越す勢いです⁸⁾。当初の予想どおり、ほとんどがブレーザー (正確には BL Lac 天体と Flat Spectrum Radio QSO; FSRQ) でしたが、一方で電波銀河や特殊なセイファート銀河、またスターバースト銀河⁹⁾など、これまで知られていない“ニューフェイス”も登場しました。フェルミ衛星の検出したガンマ線天体の詳細や内訳については、本号の深沢による解説をご参照ください。

超新星残骸やパルサー、X線連星、ガンマ線バースト、また拡散ガンマ線や宇宙線電子スペクトルに至るまで、すでに LAT チームによって多数の論文が発表されています¹⁰⁾⁻¹⁴⁾。活動銀河核も同様で、とくに NGC 1275, 3C279, Cen A の電波ローブに関する研究成果は日・米で同時に記者発表を行い、さらに最近では日本の「すざく」衛星と連携した同時観測が続々と新しい成果を生みつつあります。そのすべての論文において日本人研究者 (片岡, 深沢, 林田, 佐藤), および新設された JAXA Top Young Fellow で招聘された研究員 (Stawarz) が論文責任者として解析・執筆をリードしたことは特筆すべきです。以下ではフェルミ衛星によって見えてきた活動銀河ジェットの新しい描像について、ダイジェストで紹介いたします。

2.1 ブレーザーの「無バイアス」多波長観測

フェルミ衛星による活動銀河核の研究は、3C

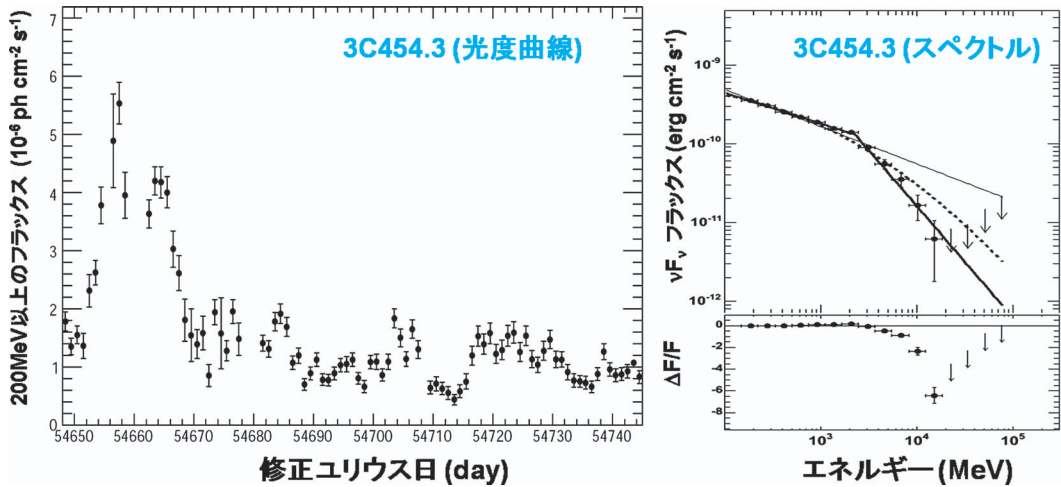


図1 (左) LATによるブレイザー天体3C454.4の光度曲線。2008年7月1日より3カ月分の観測。(右) 同天体のガンマ線スペクトル。2 GeV付近に明確な折れ曲がりが見える¹⁶⁾。

454.3の大フレアからスタートしました。この天体は地球から70億光年($z=0.859$)の遠方にあるにもかかわらず、LATチームが最初に発表した“ファースト・ライト”(本格的な観測を開始してから4日分のデータのみで作成した画像)には、際立って明るく輝いています¹⁵⁾。3C454.3はFSRQと呼ばれるブレイザーの1種ですがEGRET観測時には1桁も暗い「地味」な天体で、誰もこの事態を予想しなかったことでしょう。図1(左)に2008年7月1日から約3カ月間、フェルミ衛星が観測した3C454.3のガンマ線光度曲線を示します¹⁶⁾。観測開始から巨大なフレアが二十日間ほど続いているますが、フェルミ衛星の強みはむしろフレアの収束した「後」にあると言えます。最も暗いとき(たとえばMJDで54,714[day]付近)には約1/10の明るさに減光していますが、3C454.3からの信号は確実に検出されています。つまり、フレア時だけでなく静穏時においても「ほぼ毎日」ブレイザーを検出し、無バイアスな観測が初めて可能となりました。

EGRETの時代には、ブレイザーの多波長観測はフレアをトリガーとすることが常識でした。さもなければ、ガンマ線の信号自体がとらえられな

かったためです。昨年行われた「すざく」衛星との同時観測ではあえて無作為なタイミングで多波長キャンペーンを開始し、静穏時におけるブレイザー天体五つ(PKS0208-512, Q0827+243, PKS1127-145, PKS1510-089, 3C454.3)の放射を決定しました¹⁷⁾。この結果、ジェットのもつ運動エネルギーの変化がブレイザーの活動性を決め、磁場や領域サイズなど、他の因子はあまり影響しないこと、またフレア時ほどバルク因子が大きいことが観測的に示唆されました。さらに、3C454.3など明るいブレイザー(FSRQ)のガンマ線スペクトルには、図1(右)に示すような特徴的な折れ曲がりが見えられました。折れ曲がり前後でべきが1以上も変わるため、放射冷却が原因とは考えにくい構造です。加速された電子そのものが何らかの原因で鋭い折れ曲がりをもつ¹⁶⁾、あるいは降着円盤/広輝線領域からの異なる光子が逆コンプトン散乱された結果、その足し合わせで折れ曲がりに見えるなど¹⁸⁾、いくつか説が提案されていますが、決定的ではありません。

2.2 可視偏光とガンマ線で探るジェットの構造

フェルミ衛星の全天探査にあわせ、電波・可視光、そしてX線帯域も含めた大規模な長期モニ

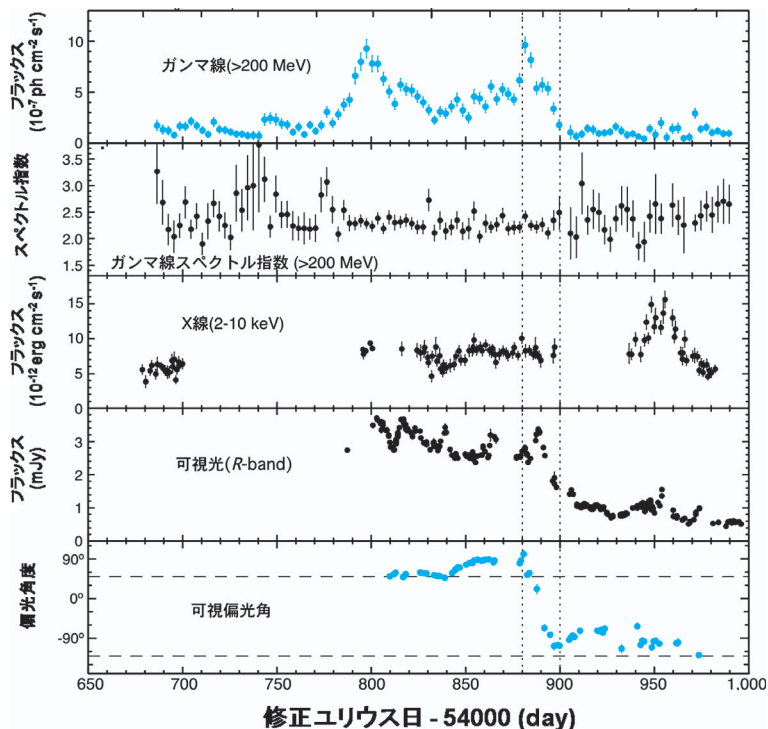


図2 プレーザー 3C279 の長期モニター観測結果の一部（全体の結果は文献 19 参照）. 上から、LAT によるガンマ線の光度曲線（1 枚目）、べき関数のスペクトル指数（2 枚目）、Swift 衛星 XRT 検出器と RXTE 衛星 PCA 検出器による X 線の光度曲線（3 枚目）、可視バンド (R-band) の光度曲線（4 枚目）、偏光角の時間変化（5 枚目）. 点線で挟まれるフレアの最中に、偏光角がほぼ反転していることがわかる.

ター観測が行われました. 図 2 に示すのは、プレーザー天体 3C279 ($z=0.536$) の 1 年にわたる多波長観測の成果です¹⁹. 広島大学の「かなた望遠鏡」を筆頭に、世界の 20 以上の望遠鏡が参加しました. 観測の中盤に、ガンマ線強度が約 10 倍も明るくなるフレアが二つ見られますが（1 枚目のパネル）、驚くべきことにフレア中にもスペクトル指数(べき)はほとんど変化していません(2 枚目). さらに興味深いのは可視光の観測結果で、ガンマ線と同期したフレアが見られますが(4 枚目)、フレアの最中に偏光角が約 180 度も回転していることがわかりました(5 枚目). これまで BL Lac 天体の X 線強度の変動やスペクトル変化から、プレーザーの放射はブラックホールの近傍約 0.01–0.1 光年で起こり、新しい電子の注入がフレアを引き起こすと考えられてきました. しか

し、今回の 3C 279 の観測結果をこの描像で理解することは難しく、むしろ遠方で緩やかに曲がるジェットに沿ってブロップ(放射領域)が運動し、視線方向となす角の変化が見かけ上の強度変動を引き起こす、と考えるのが自然に思われます.

ほかにも類例があるのかどうかは、非常に興味があるところですが、少なくともガンマ線のスペクトルがフレア中で変化「しない」ことは、他の FSRQ 天体でも同様な観測結果が得られつつあります. フレアに伴う偏光角の回転現象は BL Lac 天体でも観測されていますが、可視偏光を用いたジェットの内部診断そのものが新しいアプローチで、今後その解釈について議論が発展することでしょう. 一般に、FSRQ は BL Lac 天体に比べ時間変動のタイムスケールが遅いことが知られています. これは放射領域がブラックホールから遠い

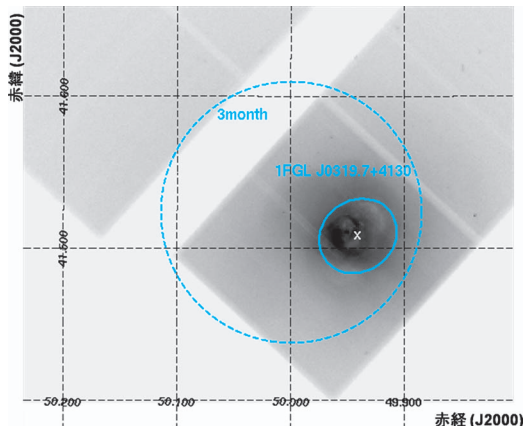


図3 LAT 検出器で決めたペルセウス銀河団/NGC 1275 方向にあるガンマ線源の位置 (白い×印). 点線は3カ月分のデータ, 実線は11カ月のデータ積分による95%の位置誤差円. 背景の画像はチャンドラ衛星による0.4-8.0 keVのX線画像²²⁾.

ことを意味すると思われますが、BL Lac 天体との違いはジェットのパワーによるものなのか、それとも加速機構を含め、何か根本的な違いがあるのか、今後も調査を続ける必要があります。

最後にもう一度、図2の3枚目のパネルを見て戴きたいと思います。これはX線強度の時間変動を示していますが、観測の終盤に大きなフレアが見られます [MJD54950 付近]。驚くべきことにX線のフレア時にガンマ線・可視光は極めて静穏で、大きな変動は見られません。ブレーザーの放射機構はわれわれが考えていたより相当に複雑で、少なくとも放射領域が“単一”で“一様”とする従来のモデルの多くは、単純化されすぎた仮定といえます。

2.3 電波銀河からのガンマ線：AGNの統一描像に向けて

電波銀河からのガンマ線放射の発見は、フェルミ衛星がもたらした重要な発見の一つです。観測開始から3カ月の時点で前述の Cen A と NGC 1275、二つの FR-I タイプの電波銀河がすでに 10σ 以上の有意度で検出され²⁰⁾、1年を経た現在、その数は未確定なものを含め10個前後にまで増えつ

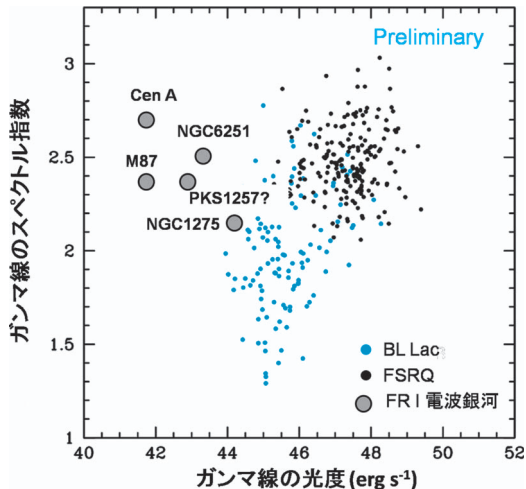


図4 LAT で検出されたブレーザー天体 (BL Lac: 青, FSRQ: 黒) と電波銀河 (灰色) のガンマ線光度、およびスペクトル指数の比較。

つあります。NGC1275 は有名なペルセウス銀河団に存在する巨大な楕円銀河で、電波ではペルセウス座 A (3C84) としてよく知られた天体です。EGRET では10年間の観測で、全く検出されませんでした。銀河団プラズマとジェットの相互作用による衝撃波加速、銀河団内でのダークマター対消滅など、全く新しいタイプのガンマ線天体である可能性もあり、多くの注目を集めました²¹⁾。しかし、もし同じ強度を保っていれば EGRET でも十分検出できるほどの明るさであり、少なくとも10年のタイムスケールで1桁程度ガンマ線が増光しないと観測事実を説明できません。つまり放射領域は10光年以下と小さく、したがって(銀河団のような広がった構造ではなく)電波銀河ジェットからの放射と結論されます。その後の観測で、実際に数カ月といった短い時間変動が検出され、またガンマ線源の中心も NGC1275 に極めてよく一致することがわかりました (図3)。²²⁾

活動銀河核の統一描像に従えば、電波銀河とブレーザーは本質的に同じ天体であり、ジェットを比較的横から見る場合に電波銀河、ほぼ真正面から見る天体がブレーザーと考えられます²³⁾。図4

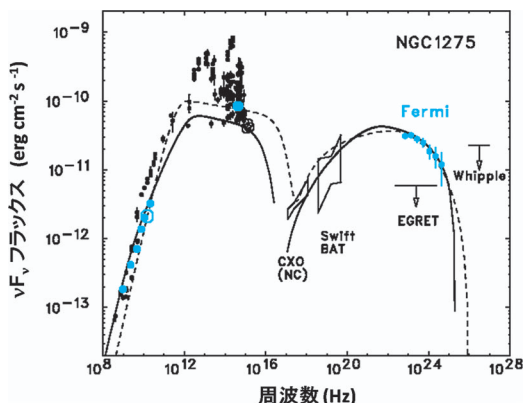


図5 NGC 1275 の多波長スペクトルと、シンクロトロン・自己コンプトンモデルによるフィット。青は同時観測によるデータ。磁場など物理量の詳細は文献 21 を参照。ビーミング因子が 2~3 (ブレイザーでは 10 程度) と小さい場合は、ブレイザーのパラメーターと酷似している。

はフェルミ衛星で検出された電波銀河の放射輝度・ガンマ線のスペクトル因子を、ブレイザー天体 (FSRQ, BL Lac) と比較したものです。電波銀河は輝度が小さく、またスペクトルが急であることはおおむね活動銀河核の統一描像を支持するよう見えます。図 5 に示すとおり、実際 NGC 1275 の多波長スペクトルは BL Lac 天体と驚くほど酷似し、低エネルギー側をシンクロトロン放射、高エネルギー側を同じ電子による逆コンプトン散乱とするシンクロトロン・自己コンプトンモデルで再現することが可能です²¹⁾。通常の BL Lac 天体よりもシンクロトロン放射、逆コンプトン放射のピーク周波数がそれぞれ 1 桁程度低く見えますが、これはジェットの見込む角の違い、つまりビーミング因子が小さいと解釈すると矛盾なく説明が可能です。しかしながら、NGC1275 の放射輝度は 10^{44} erg/s もあり、もしこれを「ジェットの真正面から」見ると、 10^{48} erg/s にも達するはずで、このような明るい BL Lac 天体はいまだ知られておらず、いわゆる“ブレイザー・シーケンス”⁶⁾とも一致しない結果です。活動銀河核の統一描像については、今後も詳細な調査が待たれます。

3. 巨大「ガンマ線ローブ」の発見

再三登場する Cen A ですが、最近フェルミ衛星で驚くべき発見がありました。これまで述べてきたブレイザーや電波銀河の放射は、暗にブラックホールの近傍、距離にして 0.01-0.1 光年の「内側の」ジェットを想定してきました。一方で、活動銀河核のジェットは、その終端構造であるホットスポット、さらにそこから流れ出したプラズマが作るローブと呼ばれる雲のような構造を形成します²⁴⁾。とくに Cen A は 200 万光年にもわたる巨大な電波ローブをもつことが知られており、その大きさは銀河本体の 50 倍にも及びます。地球から見た長手方向のローブのサイズは約 10 度ですから、満月の実に 20 倍の大きさになります。これまで、日本の「あすか」衛星、「すざく」衛星を中心とした観測から複数の電波銀河のローブから X 線放射が見つかっていますが²⁵⁾、これらはシンクロトロン放射で電波を放射する電子が、宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱で叩き上げた結果と考えられています。今回フェルミ衛星で初めて、Cen A の巨大電波ローブから、広がったガンマ線放射が見つかりました²⁶⁾。図 6 に示すのがフェルミ衛星の画像で、真ん中の明るい点源が中心核付近のジェットによるガンマ線放射、北側と南側に伸びた構造がローブからの放射です。

X 線と同様に、ガンマ線ローブも宇宙マイクロ波背景放射の叩き上げと考えられますが²⁴⁾、その意味するところははるかに深遠で重要です。なぜなら、X 線は 100 MeV から 1 GeV 程度の、比較的エネルギーの低い電子からの放射であり、これらの電子は放射冷却することなく、ローブ全体に広がることができます。つまり、いったんジェットで加速された電子がホットスポットから染み出し、その後ゆっくりとローブ全体にまで行き渡ったと考えるのが自然です。一方で、ガンマ線を出す電子のエネルギーは 100 GeV から 1 TeV と極めて高く、ローブ全体に広がりきる前に放射で冷

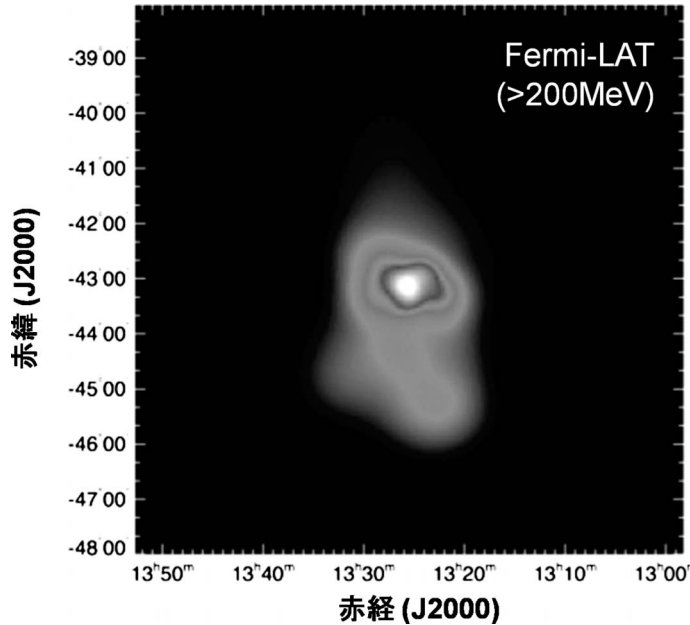


図6 LATで検出されたケンタウルス座Aの巨大ガンマ線ローブ。真ん中の明るい点源が中心核付近のジェットによるガンマ線放射，北側と南側に伸びた構造がローブからの放射。

えきってしまうはずですが、つまり、高エネルギー電子が一樣に存在することは、ローブの中でも電子は着々と加速され続けていることを意味します。巨大な、しかも目立った衝撃波のない場所で粒子はどのように加速されるのでしょうか？超新星残骸などで見られる通常の衝撃波加速ではなく、むしろ乱れた磁場を媒体とした統計加速を連想させます。Augerによる最高エネルギー宇宙線の到来方向がCen A付近にクラスタリングしていることも指摘されており³⁾、今後ますます注目を集める天体といえます。

4. おわりに

フェルミ衛星LAT検出器は、打ち上げ後1年で700を超える活動銀河核からの放射をとらえ、続々と新しい成果を上げつつあります。これまで十分研究されてきたブレーザー天体に関しても、フレア現象に偏ったこれまでの解釈・理論を再度検証する必要があるようです。3C279の観測で

は、可視光・ガンマ線の長期モニター観測の有効性、とくに可視偏光を用いた新しいアプローチが提案されました。これらはジェット内部の構造や磁場、放射領域の特定に新しいメスを入れることになるでしょう。電波銀河に関しては、今後さらにサンプル数を増やし、時間変動・スペクトルの両面からブレーザー天体との比較検証が待たれます。紙面の関係で触れませんでした。一部のセイファート銀河からもガンマ線放射が検出されており、これらは活動銀河核の統一描像にも一石を投ずると期待されます。最後に、Cen Aの巨大ガンマ線ローブの発見は、全く新しいカテゴリーに属する加速天体の発見であり、非効率と信じられてきた2次的な統計加速が、実は宇宙線加速の重要な担い手であることを示唆するのかもしれない。今後もフェルミ衛星により、活動銀河核の新たな素顔が明らかになると期待されます。

参考文献

- 1) Harris D. E., Krawczynski H., 2006, *ARA&A* 44, 463
- 2) Hillas A. M., 1984, *ARA&A* 22, 425
- 3) The Pierre Auger Collaboration, 2007, *Science* 318, 938
- 4) Hartman R. C., et al., 1999, *ApJS* 123, 79
- 5) Casandjian J.-M., Grenier I. A., 2008, *A&A* 489, 849
- 6) 片岡 淳, 高橋忠幸, 谷畑千春, 窪 秀利, 2002, *天文月報* 95, 373
- 7) 釜江常好, 大杉 節, 2010, *天文月報* 103, 314
- 8) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ* 715, 429
- 9) 内山泰伸, Fermi-LAT Collaboration, 2010, *天文月報* 103, 374
- 10) 片桐英明, 内山泰伸, 釜江常好, 田島宏康, 田中孝明, 山崎 了, Fermi-LAT Collaboration, 2010, *天文月報* 103, 438
- 11) 中森健之, 河合誠之, 金井義和, 高橋弘充, Fermi-LAT Collaboration, 2010, *天文月報* 103, 324
- 12) 田中孝明, 河合誠之, 高橋弘充, 内山泰伸 Fermi-LAT Collaboration, 2010, *天文月報* 103, 430
- 13) 水野恒史, Fermi-LAT Collaboration, 2010, *天文月報* 103, 366
- 14) 大野雅功, 浅野勝晃, 田島宏康, 当真賢二, Fermi-LAT Collaboration, 2010, *天文月報* 103, 315
- 15) http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/26aug_firstlight/
- 16) Abdo A. A. et al., 2010, *ApJ* 699, 817
- 17) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ* 716, 835
- 18) Finke J. D., Dermer C. D., 2010, *ApJ* 714, L303
- 19) Abdo A. A., et al., 2010, *Nature* 463, 919
- 20) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ* 700, 597
- 21) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ* 699, 31
- 22) Kataoka J., et al., 2010, *ApJ* 715, 554
- 23) 片岡 淳, 2005, *天文月報* 98, 680
- 24) Kataoka J., Stawarz L., 2005, *ApJ* 622, 797
- 25) 田代 信, 磯部直樹, 2004, *天文月報* 97, 400
- 26) Fermi-LAT Collaboration, 2010, *Science* 328 725

Recent Highlights from AGN Observations with Fermi-LAT

Jun KATAOKA

Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

Yasushi FUKAZAWA

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

Lukasz STAWARZ and Rie SATO

Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3-1-1 Yoshino-dai, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

Masaaki HAYASHIDA

Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Road, Menlo Park, CA 94025, USA

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

Abstract: About a half of gamma-ray sources detected with the Fermi-LAT are blazars, a sub-category of AGN characterized with rapid time variability and non-thermal emission. Thanks to excellent sensitivity and wide field-of-view, the Fermi-LAT enables for the first time a non-bias survey of blazars even in their quiescent state. Simultaneous monitoring of the optical polarization also provides brand-new knowledge on internal structure and particle acceleration in the jet. The gamma-ray emission from about 10 radio galaxies have been discovered to date, providing new challenges to the unification theory of the AGN. Detection of gamma-ray emission from giant radio lobes in Centaurus A may suggest a possible association with the highest energy cosmic-ray and importance of turbulent acceleration in the intergalactic space.