

令和元年6月14日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05381

研究課題名(和文)非ブレイザー活動銀河核の超高エネルギーガンマ線放射領域及び放射機構の研究

研究課題名(英文) Study of very high energy gamma-ray emission region and emission mechanism in non-blazar active galactic nuclei

研究代表者

西嶋 恭司 (Nishijima, Kyoshi)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：40202238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：活動銀河核の中心には超大質量ブラックホールが存在すると考えられており、極限状態における激しい物理現象が生起している。そのうち高速のジェットが我々の方に向いている活動銀河核(ブレイザー)から超高エネルギーのガンマ線が放射されていることが知られているが、近年電波銀河などの非ブレイザー活動銀河核からも超高エネルギーガンマ線が観測され、その放射機構が謎となっている。そこで本研究では電波銀河M87からの超高エネルギーガンマ線を観測し、ガンマ線の放射領域と放射機構を探ることを目的とした。その結果、M87からの超高エネルギーガンマ線の観測に成功し、その放射領域と放射モデルのヒントを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、超大質量ブラックホール周辺の極限状態における天体物理現象の解明に、超高エネルギーガンマ線の観測から迫ろうとするものである。その内容は、宇宙線物理学としての宇宙線の起源、プラズマ物理学としての荷電粒子と磁場の相互作用による加速機構、素粒子物理学としての粒子相互作用の素過程、高エネルギー宇宙物理学としての天体物理現象の解明、天文学としての銀河の共進化、宇宙論としての宇宙の進化等、極めて幅広い分野の基礎的研究に関係する成果であり、人類の知見を広めることに少なからず貢献している。

研究成果の概要(英文)：It is generally accepted that there are super-massive black holes in the center of active galactic nuclei (AGNs) and extremely violent astrophysical phenomena occur around there. Blazars, whose relativistic jets point toward us, are known to be one of the very high energy gamma-ray sources. However, recently, very high energy gamma rays from non-blazar AGNs are observed unexpectedly, and the emission mechanism is still a mystery. So we aim to localize the emission region of very high energy gamma rays in radio galaxies and to study the emission mechanisms by observing radio galaxy M 87 with the Imaging atmospheric Cherenkov Telescope, MAGIC. Then, we successfully observed very high energy gamma rays from M 87, and we constrained the size of the emission region got a clue of the emission mechanism.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 活動銀河核 超高エネルギーガンマ線 電波銀河 超大質量ブラックホール 相対論的ジェット M87 マルチメッセンジャー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

### 1. 研究開始当初の背景

活動銀河核は、母銀河の中心にある超巨大質量ブラックホールへの質量膠着により解放された莫大なエネルギーにより強く輝いていて、その多くは強力な相対論的ジェットを持っている。活動銀河核のジェットからの放射は、電波から高エネルギーガンマ線に至る幅広いエネルギー領域で非常に激しく時間変動する非熱的放射で特徴づけられる。特に、超高エネルギーガンマ線を放射する活動銀河核のほとんどは、ジェットが我々の視線方向を向いていると考えられるブレイザーで、エネルギー分布に2つのピークを持つことが特徴である。これらの超高エネルギーガンマ線 (TeV) ブレイザーは、すでに20年以上にわたって研究が続けられてきたが、例えば、超高エネルギーガンマ線がどこから放射されているのか？その放射メカニズムはいかなるものか？短い時間変動（フレアー）の原因は何か？など、最も基本的な点で未だに答えを見出せないでいる。活動銀河核ジェットは、内部あるいは外部衝撃波で粒子を加速して高エネルギー放射をしていると考えられている。しかしながら、特に高エネルギー側のピークに対しては、相対論的電子によりシンクロトロン光子が逆コンプトン散乱される SSC

(synchrotron self-Compton) モデル(例えば Jones, F.C., et al., 1974, ApJ, 188, 353)、ジェット外部からの光子が逆コンプトン散乱される EC (external Compton) モデル(例えば Sikora, M., et al. 1994, ApJ, 421, 153)、高エネルギー陽子が周囲の光子場やガスと相互作用した結果放出された光子であるとするハドロニックモデル(例えば Mannheim, H., 2000, A&A, 269, 67)などさまざまなモデルが提案されており、加速されている粒子がレプトンかハドロンかすらまだ十分な見解の一致は見られていない。また、内部衝撃波で加速されているならば、明るい活動銀河核ではガンマ線は広輝線領域の光子と相互作用して出て来れないはずなのに実際には観測されていることなど、謎が多い。

すでに述べたように、これまで超高エネルギーガンマ線で検出される活動銀河核はほとんどがブレイザーであるが、最近例外として、電波銀河 M 87、Cen A、NGC 1275、IC 310 からの超高エネルギーガンマ線が検出されている (Aharonian et al., 2003, A&A, 403, L1, Aharonian et al., 2009, ApJ, 695, L40, Aleksić et al., 2012, A&A, 539, L2, Aleksić et al. 2014, Science, 346, 1080)。これらの非ブレイザー天体は、相対的にジェットの視野角が大きくてドップラーブーストも弱く、これまでの標準的なブレイザーシナリオでは超高エネルギーガンマ線放射を説明することができない。さらに、M87 や IC 310 では非常に短い時間で変動する超高エネルギーガンマ線放射が観測されており (Aharonian et al., 2006, Science, 314, 1424, Aleksić et al., 2014, Science, 346, 1080)、特に、我々 MAGIC チームが観測した、電波銀河 IC 310 からの超高エネルギーガンマ線フレアーの極めて短い時間変動 (4.8 分以下：前ページ図) は、放射領域が中心ブラックホールのサイズよりも小さいことを示唆しており、既存の理論モデルでは説明不可能である。これに対し、ブラックホール磁気圏における電磁カスケード機構 (例えば Neronov & Aharonian, 2007, ApJ, 671, 85)、磁気リコネクションにより生成されるミニジェットモデル (Giannios et al., 2010, MNRAS, 402, 1649)、赤色巨星とジェットの衝突モデル (例えば Barkov et al., 2012, ApJ, 755, 170) など、様々な粒子加速/ガンマ線放射機構が提案されているが、これらを検証する十分な超高エネルギーガンマ線の観測データが得られていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、MAGIC 大気チェレンコフ望遠鏡により非ブレイザー活動銀河核からの超高エネルギーガンマ線フレアーを観測し、その放射領域を特定すること、放射メカニズムに関するモデルを検証することを目的とする。大気チェレンコフ望遠鏡の角度分解能は活動銀河核のサイ

ズよりはるかに大きいため超高エネルギーガンマ線だけで放射領域を特定するのは難しい。しかしながら非ブレーザー活動銀河核は、ジェットの向きと視線方向が30度程度以上開いているため、VLBI電波観測によってジェットの根元の詳細な構造を見ることができる。例えば、NGC 1275 (3C 84) は、2007年にsub-pcスケールの新しいジェット成分が現れ、核から離れつつ少なくとも2012年まで増光が続いたことが報告されている (Nagai et al., 2010, Publ. Astron. Soc. Japan, 62, L11、Nagai et al., 2012, MNRAS, 423, L122、Chida et al., 2015, arXiv:1505.01575)。それと時を同じくしてFermi-LATチームは、NGC 1275からのガンマ線を、以前のEGRETの上限値の7倍のフラックスで2008年に検出したと報告しており (Abdo et al., 2009, ApJ, 699, 31)、強度変動を強く示唆している。新しいジェット成分については、我々の研究から、超巨大質量ブラックホールから1pc以内に新しく生まれた進化の初期段階のホットスポット/電波ローブである可能性が考えられ (Chida et al., 2015, arXiv:1505.01575)、ガンマ線放射との関連が強く示唆される。このように、VLBI電波観測の詳細なイメージとその変化を、超高エネルギーガンマ線強度の時間変動と比較することにより、超高エネルギーガンマ線の放射領域を特定する。また、変動の時間スケール及び電波からX線に至る多波長スペクトルとその時間変動より、放射モデルの検証を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 電波銀河M87の観測と解析

口径17mの大気チェレンコフ望遠鏡MAGICを用いて、電波銀河M87を超高エネルギーガンマ線でモニター観測した。観測時間は、2017年1月1日から6月25日の期間に60夜82.7時間、2018年1月10日から6月18日の間に19夜39.8時間、計122.5時間であった。天頂角範囲は $5^\circ$ から $50^\circ$ で、このうち月明下の観測が計21夜あった。月明下のデータを有効利用するため、月光による夜光レベルに応じて、モンテカルロシミュレーション及び標準光源と考えられるCrabの観測データを用いて、解析パラメータを最適化する作業を行なった。その結果、月光下の観測データでも、フラックスに対する系統誤差を10%程度に抑えることができた。また、本解析では天頂角が35度より小さいイベントのみを選んだ。これにより、観測条件が良い良質なデータを選別した後の有効観測時間として76.5時間分のデータを解析した。この天体は2017年より毎年4月に世界中で多波長同時観測キャンペーンが行われ、TeVガンマ線領域の大気チェレンコフ望遠鏡としては、MAGIC以外にH.E.S.S.、VERITAS、GeVガンマ線ではFermiガンマ線天文衛星、X線ではSwift衛星、電波VLBIとしてEHT、GMVA+ALMAが参加している。本研究の観測の一部は、そのキャンペーン期間中のものである。

#### (2) VLBI電波イメージとの比較

非ブレーザー活動銀河核は、ジェットと視線のなす角度が比較的大きいため、VLBI電波観測で内側のジェットを分解することにより、活動銀河核の超高エネルギーガンマ線の放射領域を特定できる可能性がある。例えばM87の場合、VLBI観測から電波コアは超巨大質量ブラックホールから $\sim 20 R_s$  (Schwarzschild半径)にあるとの報告がある (Hada et al., 2011, Nature, 477, 185)。当初の計画では、KaVA (KVN and VERA Array)やEHTによる複数波長でのVLBI電波観測による詳細なイメージとその変化を、超高エネルギーガンマ線の変動と比較することにより、超高エネルギーガンマ線の放射領域を特定する予定であったが、電波観測データの解析の遅れにより、十分な比較ができなかった。

#### 4. 研究成果

##### (1) M87 からの超高エネルギーガンマ線観測結果

① 平均の積分フラックス：2017年の全期間の観測から、M87 方向から  $5.4\sigma$  のガンマ線信号を検出し、350 GeV 以上の平均積分フラックスとして  $(1.71 \pm 0.32) \times 10^{-12} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を得た。日毎のフラックス変動を調べたが、統計が十分でなく、ほとんどの日が上限値となってしまう。このことより、この期間の M87 は、少なくとも大きなフラックスの増加がない静穏期にあったと言える。2018年の観測では、 $8.4\sigma$  のガンマ線信号を検出した(図1)。その平均積分フラックスは、 $(1.65 \pm 0.28) \times 10^{-12} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  と計算され、2017年の結果と一致した。

② フラックスの時間変動：図2は、2018年に観測された M87 からの超高エネルギーガンマ線フラックスの日変化を表している。一部の点を除き上限値となっているが、MJD58223から増光のヒントが確認できる。

③ 微分エネルギースペクトル：およそ 100 GeV から 10 TeV の間で得られた微分エネルギースペクトルを図3に示す。冪函数を仮定した場合のべき  $\Gamma$  は  $-2.56 \pm 0.13$  と得られた。

##### (2) M87 の超高エネルギーガンマ線放射領域

先に述べたように、MJD58223 から増光のヒントが得られている。残念ながら MAGIC では天候の悪化によりその後の観測ができなかったが、その間、他の大気チェレンコフ望遠鏡が観測しており、図4に示すような光度変化を得ている。それによると、MAGIC の光度変化に連続して大きくフラックスが上昇していることがわかる。この結果から、フラックスのダブリングタイムとして  $1.2 \times 10^5 \text{s}$  を得て、放射領域のサイズを  $3.6 \times 10^{15} \delta \text{cm}$  以下と制限できた。ここで  $\delta$  はビーミングファクタで、M87 の場合には 2-5 程度と知られている (Wang and Zhou, 2009, MNRAS, 395, 301)。中心にある超大質量ブラックホールの質量を  $6.5 \times 10^9$  太陽質量とすると (EHT Collaboration, 2019, ApJL, 875, L1) そのシュワルツシルト半径は  $\sim 2 \times 10^{15} \text{cm}$  となるので、M87 からの超高エネルギーガンマ線は、10 倍のシュワルツシルト半径より内側で放射されていることがわかった。元々の計画では、EHT による波長 1.3 mm の VLBI 観測データを用いて、超高エネルギーガ

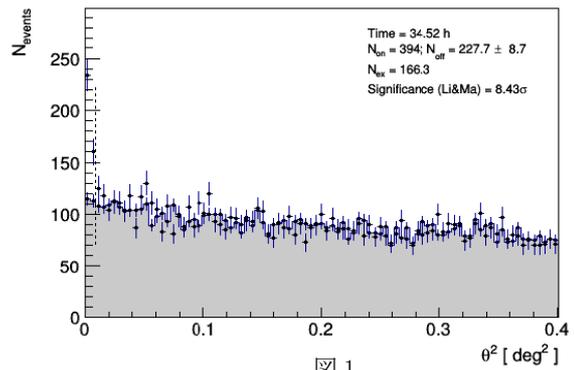


図 1

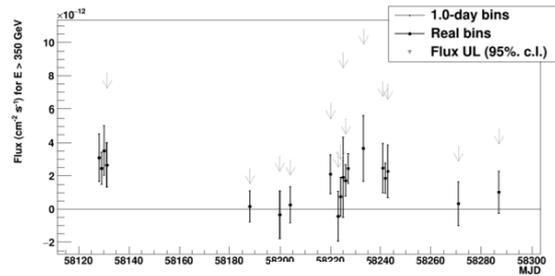


図 2

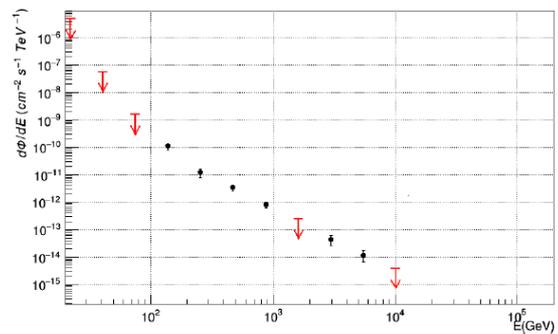


図 3

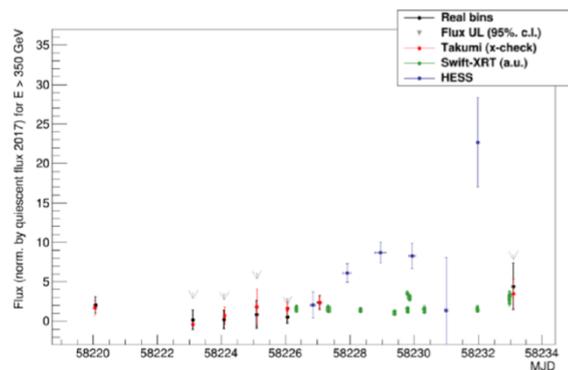


図 4

ンマ線の変動と相関を取ることで、シュワルツシルト半径の5倍まで迫れるはずであったが、既に述べたように、EHTの解析の遅れにより現時点でデータを手に入れている。

### (3) M87のガンマ線放射モデル

Fermi-LATの10年分のデータを解析して、スペクトルエネルギー分布(SED)を求め、MAGICによる観測データを重ねて描いたものを図5に示す。青がFermi-LATのデータでべきは $-2.03 \pm 0.03$ 、赤がMAGICの結果で、明らかに折れ曲がりが見られる。このSEDを多波長のデータで1ゾーンSSCモデルでフィットした結果を図6に示す。それぞれ観測期間が異なるが、GeV領域とTeV領域のガンマ線スペクトルを同時に説明するのは困難であることがわかる。その代わりに、このSEDは、GeV領域のガンマ線やX線はspineからの放射、TeV領域の超高エネルギーガンマ線はlayerからの放射とするSpine-Layerモデル(Tavecchio and Fhisellini, 2014, 443, 1224)で説明できることがわかった。

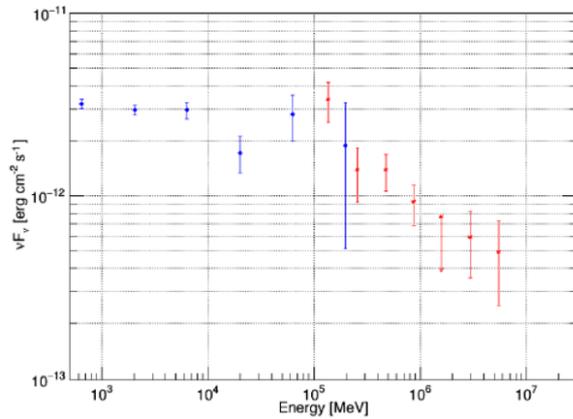


図5

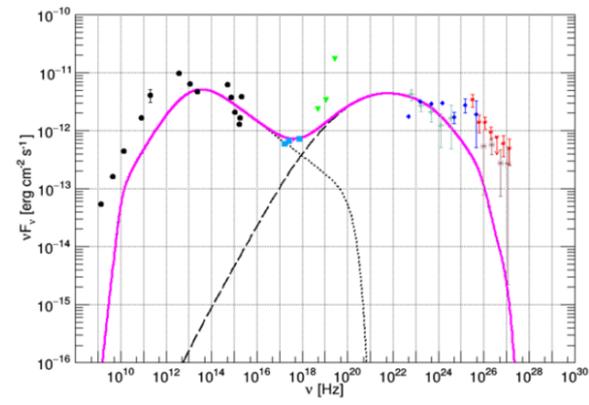


図6

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計23件)

- ① M. L. Ahnen, J. Kushida, E Lindfors, K. Nishijima, S. Tsujimoto, 他 MAGIC Collaboration, Multi-wavelength characterization of the blazar S5 0716+714 during an unprecedented outburst phase, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 619, 2018, A45.  
[10.1051/0004-6361/201832677](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832677)
- ② S. Ansoldi, J. Kushida, K. Nishijima, S. Tsujimoto, D. Glawion, 他 MAGIC Collaboration, Gamma-ray flaring activity of NGC 1275 in 2016-2017 measured by MAGIC, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 617, 2018, A91.  
[10.1051/0004-6361/201832895](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832895)
- ③ M. L. Ahnen, P. Colin, J. Kushida, K. Nishijima, 他 MAGIC Collaboration, Performance of the MAGIC telescopes under moonlight, *Astroparticle Physics*, 査読有, 94, 2017, 29-41.  
[10.1016/j.astropartphys.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.08.001)
- ④ M. L. Ahnen, D. E. Glawion, K. Kodani, J. Kushida, K. Nishijima, 他 MAGIC Collaboration, First multi-wavelength campaign on the gamma-ray-loud active galaxy IC 310, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 603, 2017, A25.  
[10.1051/0004-6361/201630347](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630347)
- ⑤ M. L. Ahnen, P. Colin, K. Kodani, J. Kushida, K. Nishijima, 他 MAGIC Collaboration, Deep observation of the NGC 1275 region with MAGIC: search of diffuse gamma-ray emission from cosmic rays in the Perseus cluster, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 589, 2016, A33.  
[10.1051/0004-6361/201527846](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527846)

[学会発表] (計16件)

- ① 梶原侑貴、榎田淳子、西嶋恭司、他 MAGIC Collaboration、MAGIC 報告 68 : BL Lac 型天体 S5 0716+714 の超高エネルギーガンマ線フレア解析、日本物理学会第 74 回年次大会 (2019)
- ② 井上進、榎田淳子、西嶋恭司、他 MAGIC Collaboration、MAGIC 報告 65 : ブレーザー-TXS 0506+056 のマルチメッセンジャー観測とブレーザーにおける高エネルギーニュートリノ放射・宇宙線加速、日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018)
- ③ 浅野勝晃、西嶋恭司、榎田淳子、他 MAGIC Collaboration、MAGIC のガンマ線観測に基づく電波銀河 M87 コアの多波長放射モデル、日本天文学会 2017 年秋季大会 (2017)
- ④ 深見哲志、榎田淳子、西嶋恭司、他 MAGIC Collaboration、MAGIC 報告 64 : MAGIC 望遠鏡による明るい月光下での GRB160821B の観測、日本物理学会第 73 回年次大会 (2017)
- ⑤ 林田将明、榎田淳子、西嶋恭司、他 MAGIC Collaboration、MAGIC 報告 59 : Extreme high-frequency BL Lac 天体候補 RXJ1136. 5+6737 からの TeV ガンマ線の発見とその放射起源、日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 榎田淳子

ローマ字氏名 : (KUSHIDA, Junko)

所属研究機関名 : 東海大学

部局名 : 理学部

職名 : 教授

研究者番号 (8 桁) : 80366020

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 紀基樹

ローマ字氏名 : (KINO, Motoki)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。