

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号 : 12601  
研究種目 : 特別推進研究  
研究期間 : 2012 ~ 2016  
課題番号 : 24000004  
研究課題名 (和文) 高エネルギーガンマ線による極限宇宙の研究  
研究課題名 (英文) Study of the Extreme Universe with High Energy Gamma Rays  
研究代表者  
手嶋 政廣 (TESHIMA, Masahiro)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号 : 40197778  
交付決定額 (研究期間全体) (直接経費) : 414,500,000 円

研究成果の概要 (和文) : MAGIC 望遠鏡、フェルミガンマ線衛星を使い高エネルギーガンマ線による極限宇宙の研究を進めた。その成果は多岐にわたり、銀河宇宙線の起源、パルサーからの高エネルギーガンマ線放射、超大質量ブラックホール周辺での高エネルギー現象、高エネルギーガンマ線の吸収から銀河間空間の可視赤外背景放射の観測を進め、暗黒物質の対消滅からのガンマ線を探索し、暗黒物質の対消滅断面積に上限値をつけた。また、将来のガンマ線天文学のさらなる発展のため、23m 口径の CTA 大口径望遠鏡の開発研究を進めた。日本、ドイツ、スペイン、イタリア、フランスを主要国として国際共同で開発研究を進め、2016 年より 1 号基建設を CTA 北サイトであるラパルマで開始した。日本は、主鏡部分の、分割鏡、アクチュエーター、Active Mirror Control、またカメラ部分である光電子増倍管、高圧電源、プリアンプ、GHz 読み出し回路の設計製作を担当した。種々の品質管理テストの後、ラパルマに輸送を完了しており、すでに完成したコンクリート土台の上に望遠鏡構造が建設されるのを待っている段階である。2017 年度中の完成、ファーストライトを目指している。

研究成果の概要 (英文) : The study of the Extreme Universe with high energy gamma rays has been carried out using the MAGIC telescopes and the Fermi gamma ray satellite. Many topics, the Origin of high energy cosmic rays, pulsed gamma ray emission from pulsars, high energy phenomena around super massive black holes, Extragalactic Background Light using the absorption of gamma rays from distant Active Galactic Nuclei, Dark Matter annihilation in dwarf galaxies have been studied extensively. For the further development of high energy gamma ray astronomy, we have promoted the development and research work for the 23m diameter CTA Large Size Telescope (LST) within the framework of an international collaboration where the major countries are Japan, Germany, Spain, Italy and France. We have started the construction of the first LST in summer 2016, and will complete it in FY 2017. Japan has responsibilities on the design, development and production of segmented mirrors, actuators and active mirror control system, and also photo-sensors, HVs, pre-amplifiers, GHz sampling readout electronics. We have finished mass production of the photo-sensors and shipped them to La Palma. We are now waiting to install them after the construction of the telescope structure. We are aiming to have the first light with the first LST in 2017.

研究分野 : 数物系科学

キーワード : 宇宙線、ガンマ線、高エネルギー、超新星残骸、ブラックホール

### 1. 研究開始当初の背景

地上でチェレンコフ望遠鏡を使い TeV ガンマ線を観測する技術が確立し、新しい世代のチェレンコフ望遠鏡 HESS, MAGIC, VERITAS によりこの分野は新たな天文学の一つとなった。多種、多様な高エネルギーガンマ線源が銀河系内、銀河系外に 100 以上発見され、宇宙線の起源、宇宙での非熱的過程、活動銀河の相対論的ジェット、銀河空間を満たす可視・赤外領域背景放射等の問題が徐々に解き明かされつつある。一方 GeV 領域では Fermi ガンマ線衛星が 2008 年に打ち上げられ、銀河系内外に、1800 の源を同定するとともに、多くの極めて興味深い発見が続いていた。

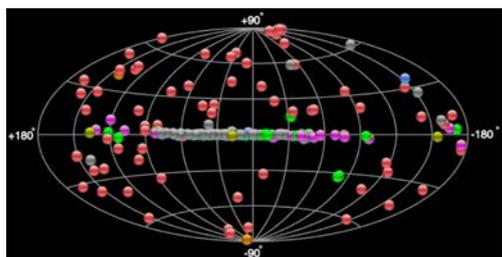


図1 高エネルギーガンマ線天体 (198 天体、2017年5月)

### 2. 研究の目的

(1) MAGIC チェレンコフ望遠鏡 (50GeV-10TeV) と Fermi ガンマ線衛星 (100MeV-100GeV) を使い、5桁にわたる広帯域 (100MeV-10TeV) で銀河内外の多くの極限的な天体を観測し、宇宙線加速、ガンマ線放射の現場を今までに無い精度で捉える。宇宙線の起源を解明し、そのグローバルピクチャーを得ることを目的とする。

(2) 高エネルギーガンマ線天文学の将来へ向け、CTA 計画の準備研究として、CTA 23m 大口径チェレンコフ望遠鏡プロトタイプを欧州グループと共同で建設し、高エネルギーガンマ線による観測領域を深宇宙まで広げる。

### 3. 研究の方法

(1) MAGIC チェレンコフ望遠鏡は口径 17m のチェレンコフ望遠鏡 2 台のステレオシステムであり、その大口径を生かし、>50GeV 領域で世界最高の感度を誇る。その低エネルギー閾値と高感度により、 $z \sim 0.5$  まで深宇宙の観測を行っている。現在、超低閾値アナログトリガーシステムをステレオシステムに組み込み、エネルギー閾値 30GeV を達成し、 $z \sim 1.0$  まで観測可能領域を広げる。

(2) 一方、Fermi ガンマ線衛星の感度は 100GeV まで延びているが、その観測エネルギーの上限は、統計 (イベント数) により決まる。Fermi グループでは解析プログラムの改良により、MAGIC チェレンコフ望遠鏡と Fermi ガンマ線衛星とのより良いオーバーラップ

を保証し、従来にない広帯域で、多種多様な天体をシームレスに観測できる。

(3) 本計画研究代表の手嶋は、過去、ドイツのマックスプランク物理学研究所にて MAGIC プロジェクトをスポークスマンとして中心的に推進してきた。また、広島大学の深澤は Fermi 日本グループの代表者として Fermi ガンマ線衛星実験を推進している。

(4) 将来へ向けて、日欧を中心とする国際共同研究により、ガンマ線宇宙物理の分野をさらに飛躍的に発展させ、かつ宇宙での極限的現象に関して明確な答えを出すため、次世代の究極的な高エネルギーガンマ線天文台 CTA (チェレンコフ望遠鏡アレイ計画) の準備研究が強力に進められている。CTA は北半球と南半球との二つの観測ステーションに、大、中、小口径の 3 種類のチェレンコフ望遠鏡を多数設置し、20GeV から 100TeV までの広帯域エネルギー領域で、銀河系内外の高エネルギー天体を高感度、高精度で観測するものである。CTA 準備研究では、ドイツのマックスプランク物理学研究所、スペイン、イタリア、フランスのグループと協力し CTA アレイの中心部に設置される 23m 口径の大型チェレンコフ望遠鏡プロトタイプのデザイン、製作を行う。我々日本グループは光センサー、データ読み出し回路、ミラーを担当する。望遠鏡構造、ドライブシステムは、マックスプランク物理学研究所、他の欧州グループが担当する。このプロトタイプは最初の大型望遠鏡として CTA サイトに設置され、総合的な試験の後、最初の科学的データを得ることを目標とする。

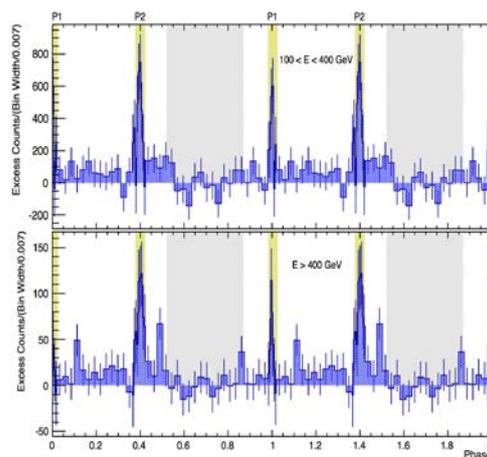
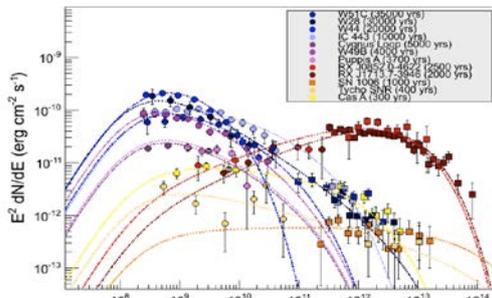


図2 カニパルサーからのパルス信号。高エネルギー側はべき関数で TeV 領域まで延びている。

### 4. 研究成果

(1) カニパルサーからのエネルギースペクトルが TeV 領域まで伸びていることを発見する。従来のパルサー磁気圏での粒子加速モデルでは全く説明が不可能であり、光円柱の外側まで粒子加速領域が広がっていることがわかってきた。これがカニパルサーに特有のことであるのか、若いパルサーの特徴であるのか、さらに多くのパルサー観測が希求される。

(2) シェルタイプ超新星残骸が銀河宇宙線の起源であることを同定する。Fermi ガンマ線衛星、MAGIC、VERITAS で観測された超新星残骸 IC443, W51 ならびに Fermi で観測された超新星残骸 W44 のエネルギースペクトルが、 $\pi$ オンバンプを持ち、高エネルギー側でべき関数を示しており、これらシェルタイプ超新星残骸が宇宙線源であることが明確



となった。

図3 シェルタイプ超新星残骸からのガンマ線放射 ( Fermi, HESS, MAGIC, VERITAS ) (Compiled by S. Funk)。

(3) 超大質量ブラックホール磁気圏での粒子加速とおもわれる現象を発見。活動銀河核 IC443 から、分スケールの短時間で激しく変動するフレアーを発見する。単極誘導により極付近に高いポテンシャルが生成され、これに伴い生成された真空ギャップにより粒子加速がおこったと解釈される。

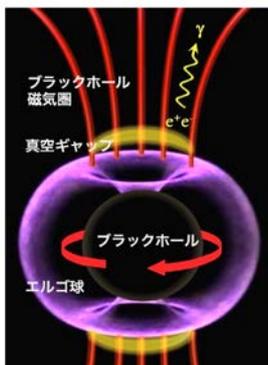


図4 IC443のファーストフレアーを説明する概念図。超大質量ブラックホールの極近傍に真空ギャップが生成され粒子が極めて早いスピードで加速される。

(4) 100GeV 光子が一般相対論に従っているこ

とを証明する。重力レンズ効果を受けて、11日遅れて到着した成分を観測する。高エネルギーガンマ線による宇宙観測を  $z=0.94$  まで深宇宙の観測距離を延ばす。

(5) CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡の主鏡部の開発研究を進める。2枚のガラスシートでハニカム構造を挟み込むサンドイッチ構造の  $2m^2$  の六角形分割鏡を開発する。主な仕様は、重量 50kg、焦点距離 28m、焦点スポットサイズ 1分角、5層コーティング、反射率 92%、屋外暴露時の反射率劣化 <1%/年である。高性能、高精度の分割鏡を超軽量構造で実現する。400 $m^2$  主鏡部の全重量をスペースフレーム構造部 10ton を含み、20ton に抑えることができた。

望遠鏡運転中の主鏡たわみを常時モニターし、各分割鏡の方向を 5 秒角以内で自動的に補正する Active Mirror Control システムを開発する。各分割鏡に CMOS カメラを設置し、レーザー光軸 (分割鏡の方向) を常時モニターし、アクチュエーターにより補正を行うシステムである。

これら光学エレメントを 1号基に必要とされる 200 ユニット (400 $m^2$  相当) を量産し、スペイン・ラパルマに輸送を完了する。

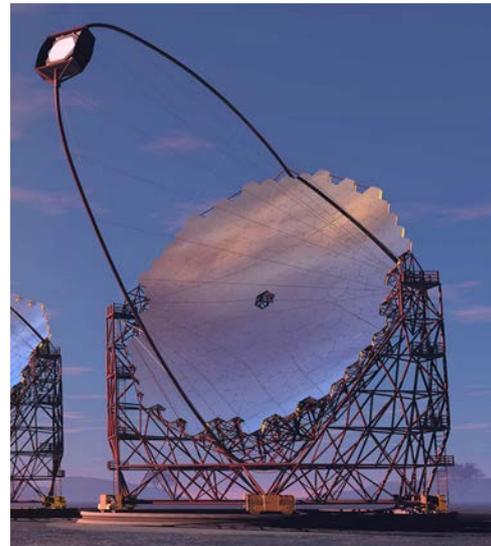


図5 口径 23m の CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡のイメージ図。主鏡は 200 枚の分割鏡からなる。

(6) CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡の高感度撮像カメラの開発研究を進める。光センサーは量子効率 42%、TTS <1 ナノ秒、パルス幅 FWHM <3 ナノ秒の高性能な 1.5 インチドーム形状の窓をもつ光電子増倍管を浜松ホトニクスと開発する。また、省電力化のためコッククロフトウォルトン高圧回路、光電子増倍管スローコントロールボードを設計、製作する。読み出し回路は、PSI で開発された DRS4 チップを使い GHz サンプリグ、12bits 分解能で、ダブルゲインで広いダイナミックレンジを

覆い、デジタル化する超高速、高分解能、広ダイナミックレンジ、省電力(2W/ch)のDragonボードの開発研究を行う。1号基に必要とされる2000ch分の光電子増倍管、300枚のDragonボードを量産し、スペインに輸送を完了した。

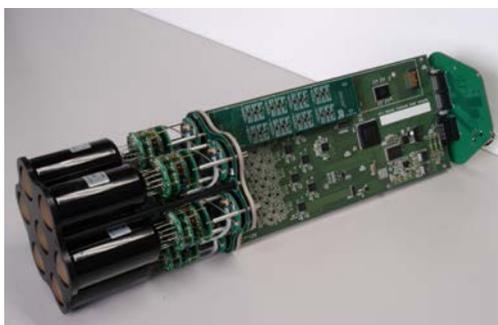


図6 光電子増倍管クラスターと GHz 読み出し回路

(7) 望遠鏡高速回転用ピーク電力供給装置の開発。ガンマ線バーストのフォローアップ観測では、衛星から座標位置をインターネットで受け、20秒でガンマ線バースト天体に望遠鏡を向けることを仕様としている。このために必要な電力はおよそ500キロワットと推定され、4基の望遠鏡で総電力2メガワットとなる。これを50キロワットの省電力で高速で回転するFlywheelに機械的なエネルギーとして蓄積し、フォローアップ観測時に一気に電力として開放する。小型のFlywheel2台を各望遠鏡ドライブのすぐ横に設置する分散型のシステムを設計し、現在製造中である。

(8) 大口径チェレンコフ望遠鏡の建設は2016年に開始し、2017年度内にファーストライトを目指し、急ピッチで建設を進めている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① Teraelectronvolt pulsed emission from the Crab Pulsar detected by MAGIC,  
S. Ansoldi, H. Kubo, M. Teshima et al., *Astro. & Astrophys.*, Vol 585, id.A133, 6 pp.(2015). 査読あり。

② Black hole lightning due to particle acceleration at subhorizon scales,

S. Ansoldi, H. Kubo, M. Teshima et al., *Science*, Vol 346, Issue 6213, pp. 1080-1084 (2014). 査読あり。

③ Detection of very high energy gamma-ray emission from the gravitationally lensed blazar QSO B0218+357 with the MAGIC telescopes, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 595, id.A98, 11 pp. (2016). 査読あり。

④ Prospects for Cherenkov Telescope Array Observations of the Young Supernova Remnant RX J1713.7-3946,  
F. Acero, K. Ioka, H. Kubo, R. Orito, M. Teshima, T. Yamamoto et al.,

*The Astrophysical Journal*, Volume 840, Issue 2, article id. 74, 14 pp. (2017). 査読あり。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

手嶋 政廣 (TESHIMA Masahiro)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号：40197778

### (2) 研究分担者

戸谷 友則 (TOTANI Tomonori)  
東京大学・理学系研究科・教授  
研究者番号：90321588

窪 秀利 (KUBO Hidetoshi)  
京都大学・理学系研究科・准教授  
研究者番号：40300868

井岡 邦仁 (IOKA Kunihito)  
京都大学・基礎物理学研究所・教授  
研究者番号：80402759

深沢 泰司 (FUKAZAWA Yasushi)  
広島大学・理学系研究科・教授  
研究者番号：60272457

山本 常夏 (YAMAMOTO Tokonatsu)  
甲南大学・理工学部・教授  
研究者番号：40454722

(  
折戸 玲子 (ORITO Reiko)  
徳島大学・大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部・講師  
研究者番号：80579417

