


CTA大口径ガンマ線望遠鏡で解き明かす高エネルギー-激動宇宙と暗黒物質

	研究代表者	東京大学・宇宙線研究所・教授 窪 秀利 (くぼ ひでとし)	研究者番号:40300868
	研究課題情報	課題番号: 23H05430 キーワード: 宇宙ガンマ線、ブラックホール、宇宙線、暗黒物質探索	研究期間: 2023年度~2027年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

● 研究の全体像

本研究の大目的は、高エネルギー宇宙現象・宇宙線起源および暗黒物質の正体を解明することである。本研究で第一に、次世代地上ガンマ線望遠鏡 (CTA-LST) を建設し、現行の望遠鏡 MAGIC との共同観測により、ガンマ線検出感度を向上させる。第二に、高エネルギー天体 (ブラックホール天体や中性子星など) の観測、重力波・ニュートリノ対応天体探査によって、高エネルギー天体の放射・粒子加速機構および宇宙線の起源解明を目指すとともに、急速に発展しているマルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。また、ガンマ線観測から、赤外線・可視光背景放射を求め、星形成史を明らかにする。さらに、暗黒物質の質量 1 - 10 テラ電子ボルト領域で、対消滅断面積に対して感度を向上させ、宇宙初期に凍結したと考えられる残存量の断面積を下回る感度を達成し、暗黒物質対消滅ガンマ線探索に挑む。

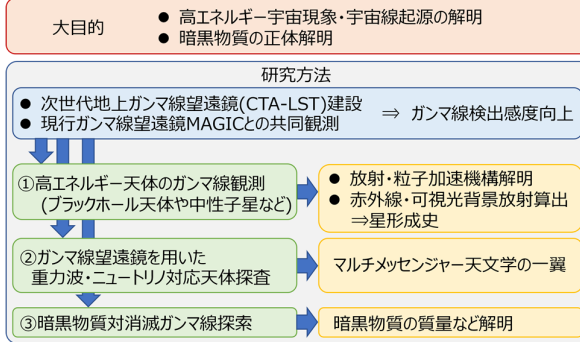


図1 研究の全体像

● 国際宇宙ガンマ線天文台CTA計画

宇宙から、人工加速器のエネルギーを遥かに超える10の20乗電子ボルトに達する粒子線 (宇宙線) が飛来しているが、発見以来100年経った今でも、その起源が解明されていない。起源候補として、巨大ブラックホールを持つガンマ線放射天体などが有力視されているが、放射機構すらも解明されていない部分が多い。また、暗黒物質は、宇宙観測の結果から存在が示唆され、宇宙のエネルギー組成の約3割を占めていると言われており、人工加速器を使った探索も続けられているが正体が分かっていない。

本研究代表者らは、可視光の1兆倍であるテラ電子ボルト (TeV) のエネルギーを持つ宇宙ガンマ線の観測によって、上記の問いに挑み続けている。宇宙TeVガンマ線観測は、2000年代に入って稼働した地上ガンマ線望遠鏡により飛躍的に発展し、現在の検出天体数は200を越えた (図2)。さらに発展させるべく、日米欧25か国1500名以上が結集し、大気チレンコフ光検出型ガンマ線望遠鏡の世界唯一の次世代天文台であるCherenkov Telescope Array (CTA) 計画が進められている。この計画で大 (口径23m) 中 (12m) 小 (6m) の3種の望遠鏡を南 (チリ)・北半球 (スペイン) の各サイトに、計約60台と13台を並べ、従来より一桁拡張したエネルギー範囲 (20ギガ電子ボルトGeVから300 TeV) で、従来より一桁高い感度と、3倍高い

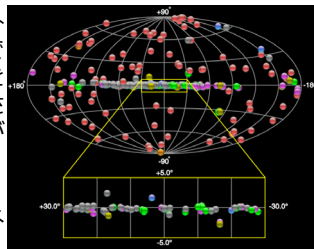


図2 TeV領域のエネルギーを持つガンマ線が検出された天体。色は天体種族を表す。詳しくは、<http://tevcat.uchicago.edu/>。



図3 本研究の活動拠点である、スペイン・ラパルマ島におけるCTA大口径望遠鏡 (LST) 4基アレイ建設計画 (完成予想図) と稼働中のMAGIC望遠鏡2基。

角度分解能 (10 TeVで2分角) で宇宙ガンマ線を観測する国際協力実験である。CTA天文台の稼働により、1000個以上の天体検出が予想される。日本からは約120名がCTA計画に参加し、最も低いエネルギー閾値 (20 GeV) を持ち、遠方宇宙を見通せる大口径23m望遠鏡 (LST) 4基アレイの建設を主導している。欧州グループとの国際共同で、初号基をスペイン・カナリア諸島ラパルマ島に建設し、2021年に科学観測を開始した (図4)。

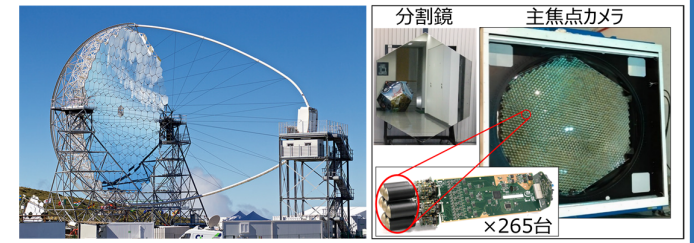


図4 スペイン・ラパルマ島に設置されたCTA大口径望遠鏡LST初号基 (左)、日本グループが開発・量産した分割鏡と主焦点カメラの光センサ・読み出し回路 (右)

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

● CTA大口径望遠鏡 (LST) 4基アレイの建設・運用

すでに科学観測を開始しているLST初号基 (図4) の運用と並行して、日本が中心となって開発したLSTカメラおよび分割鏡の担当者を現地へ派遣し、LST 2-4号基の建設を完了させ運用開始し、稼働中のMAGIC望遠鏡との同時観測・相互較正を行う。

● 高エネルギー天体の観測-極限天体で起こる高エネルギー-激動現象と宇宙線起源解明に向けて-

【活動銀河核 (AGN)】 太陽質量1千万倍以上の巨大ブラックホールを持つ天体である活動銀河核で、宇宙線の主成分である陽子の加速の証拠が見つかったが、2例のみであり更なる観測が必要である。LSTによるAGNの数秒~数分の変動観測で (図5)、宇宙線候補の加速陽子の寄与や加速電子のエネルギー分布時間発展を求め、加速機構や宇宙線起源への寄与を明らかにする。

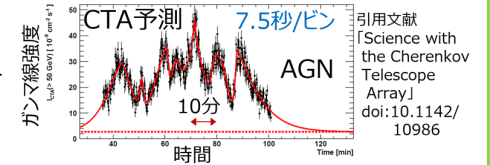


図5 CTAでAGNを観測した場合の強度変動シミュレーション

【ガンマ線バースト (GRB)】 太陽一生分のエネルギーをわずか数秒で放出し、ブラックホールが誕生する天体である (図6)。現在のTeVガンマ線検出数は5つのみである。LSTのGRB観測限界は約120億光年先まで広がる。ガンマ線観測から、電子加速や宇宙線候補の陽子の寄与などを明らかにする。また、超新星爆発起源のみならず、重力波源となる中性子連星合体起源であるGRBも観測対象とする。



図6 ガンマ線バースト想像図

【重力波及び高エネルギーニュートリノ源の対応天体】

宇宙ニュートリノ観測や重力波観測のアラートをを受け、LSTはマルチメッセンジャー天文学の一翼を担い、対応天体特定や現象解明を行う。

【超新星残骸】 銀河系内宇宙線の起源の有力候補である。LSTによる高解像度γ線画像と電波観測に

よるガス量から、加速粒子エネルギー最大値や宇宙線量を求め、宇宙線起源への寄与を明らかにする。

【中性子星】 LSTにより高統計パルス波形を得て、放射領域及び粒子加速機構に対して制限を付ける。

● 暗黒物質探索

本研究では暗黒物質が、候補であるWIMP (弱い相互作用をする重い粒子) として、暗黒物質が対消滅して発生するガンマ線を探索し (図7)、暗黒物質の正体を探る。

本研究で、LSTを用いて天の川銀河中心領域を観測する。人工加速器では探れない領域となってくる、暗黒物質質量1-10 TeV領域で、従来より良い感度、かつ理論予想値 (宇宙初期に熱的平衡状態から外れて、密度が凍結して残存し、現在の暗黒物質量を自然に説明できる断面積) を下回る感度を初めて達成できる (図7)。

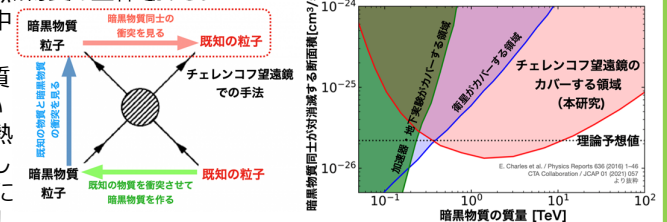


図7 暗黒物質の探索手法 (左) と対消滅断面積の探索領域 (右)。稲田大氏作図。 <https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/13105/>