

次世代ガンマ線望遠鏡 CTA の概要と今後の展望

小島 拓実 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は約 100 台の大気チェレンコフ望遠鏡を用いて、20GeV から 100TeV 以上の領域の超高エネルギー (VHE) ガンマ線の観測を行う国際共同プロジェクトである。今日、大気チェレンコフ望遠鏡は H.E.S.S. や MAGIC、VERITAS などがあるが、CTA 計画では感度を既存のものより 1 桁向上させ、現状では観測されていない、あるいは理解されていない物理現象の発見、解明を目指す。期待される主な物理現象として、宇宙線の起源、粒子加速、ブラックホールから放出されるジェットの状態、宇宙の星形成史の探求や、ダークマター粒子の対消滅ガンマ線、ローレンツ不変性の破れの探索などを行う。4 桁に及ぶ広いエネルギーレンジで観測するために、大中小の 3 種類の口径の望遠鏡が用いられ、感度向上のために、様々な技術が開発されている。本レビューでは、CTA 計画の現状及び今後の展望について紹介する。

1 Introduction

超高エネルギー (VHE) ガンマ線は宇宙の高エネルギー現象を調べる上で重要なソースである。ガンマ線を地上で“見る”方法は、大気チェレンコフイメージングと空気シャワー観測である。前者に H.E.S.S. や MAGIC、VERITAS など活躍しており、後者には Milagro や Tibet AS-gamma、ARGO-YBJ などがある。また、宇宙での観測として Fermi や AGILE といった人工衛星が活躍している。しかし今日、高エネルギー現象のより深い解明のため、これまで以上の精度が求められている。

CTA はそれらの要求に答えると期待されている。宇宙から来たガンマ線は地球大気で対生成とチェレンコフ放射を繰り返す。それを観測することにより、一次ガンマ線を復元する。CTA は 50~100 の望遠鏡を北半球と南半球の 2ヶ所に設置することで、既存のガンマ線観測施設の解像度を大きく超え、また VHE ガンマ線に対する角度・エネルギー分解能も格段に向上すると期待される。

CTA は 2006 年に ESFRI 委員会で 1.5 億ユーロ (当時) の投資コストを備えたガンマ線天文学の研究基盤として提案された。1000 人を超える科学者、160 以上の研究機関、27 の国が参加し、CTA 完成後のツールの提供やデータ解析のサポートをする予定である。



図 1: CTA の完成予定図

2 CTA scope and concept

最新の地上チェレンコフ望遠鏡はガンマ線ソースの良い感度でのイメージングや分光などが可能で、150 以上の天体を見つけてきた。しかし、高エネルギーガンマ線 (TeV) は銀河系外背景放射 (EBL) との相互作用によって吸収されてしまうため、より遠くの天体を“見る”ためにはより低いエネルギー (数十 GeV) のガンマ線を観測しなければならない。地上でその観測をするためには、衛星が行っている 1m^2 程度の広さの検出器よりも遥かに大きな検出スペースが必要となる。大気チェレンコフ光を検出すると

きの有効範囲は 10^5m^2 程度となる。

前述した通り、地上でガンマ線を観測する方法は 2 種類ある。そのうち、空気シャワー観測は昼間も観測できるなど、観測時間に大きなアドバンテージがあるが、現在の感度では蟹星雲（最も強い VHE ガンマ線ソース）などの強いガンマ線ソースしか観測できない。そこで大気チェレンコフ望遠鏡群を用いる。大気チェレンコフ望遠鏡により、空気シャワー観測に比べて角度・エネルギー分解能が格段に改善される。

現在観測している施設は、内部の研究者のみがデータを解析できる。しかし、CTA ではデータを公開してより多くの研究者が解析を行えるようになり、様々な宇宙物理や基礎物理の発展に貢献するだろう。

CTA は 100GeV から 10TeV の範囲を最もよい感度で測定するが、 100GeV 以下、 10TeV 以上のエネルギーレンジも測定可能である。それを可能にする要因として、大中小の 3 種類の望遠鏡を 10km^2 にわたって設置することにある。

3 CTA の目指す物理

CTA は様々な物理現象の解明を目指している。

3.1 宇宙線

銀河系宇宙線の起源は主に超新星残骸 (SNR) であると Agile と Fermi の観測から分かっている。これは宇宙線が加速や伝播による相互作用でガンマ線を放出するからである。ガンマ線をより詳しく調べれば、宇宙線の組成や星形成との関係を理解できるだろう。CTA では現在のガンマ線望遠鏡より 1 桁以上感度が向上するため、宇宙線に関する理解が深まるだろう。

3.2 ブラックホール、ジェット、宇宙の星形成史

活動銀河核 (AGN) の中心には超大質量ブラックホールがあると考えられており、その中には相対論的ジェットを出すものも確認されている。しかしジェッ

トの加速機構や構造、粒子組成などはまだわかっていない。また、遠方にある強力なガンマ線天体にクエーサーがある。遠方からの VHE ガンマ線は EBL との相互作用によって吸収されてしまうが、この EBL の強度がわかれば、宇宙における銀河、星形成史を見積もることができる。CTA を用いて、AGN などのスペクトルを精度良く測定し、上記の問題の解明を目指す。

3.3 ダークマターとローレンツ不変性の破れ

ダークマターの候補の一つ、WIMP が対消滅をするときガンマ線を放出すると思われる。また、もう一つのダークマター候補であるアクシオンの探索、量子重力の影響、ローレンツ不変性の破れなど、基礎物理の範囲でも CTA は大きく貢献するだろう。

CTA は向上した感度と拡大したエネルギー範囲から、既知の天体現象のより深い解明や新たな天体現象の発見に貢献できる。この目標達成のため、CTA では VHE ガンマ線でもより遠くの天体現象を、短い時間スケールで観測する能力が求められている。

4 CTA に使われる望遠鏡

CTA では、以下の 3 つのエネルギーレンジに分けて、それぞれ大中小の望遠鏡を用いて測定する。

4.1 低エネルギー (100GeV 以下)

低いエネルギーのガンマ線はチェレンコフ光の広がり小さいため、検出器のエリアは小さくすることができるが、より多くの光子を集める必要がある。そのため 23m 口径の大型の望遠鏡を 4 台設置する予定である。このタイプの望遠鏡を Large-size telescope (LST) という。LST の設計は MAGIC に類似しており、使われるミラーは焦点距離 27.8m 、 4.5° の FoV、 0.1° のピクセルを持つ。

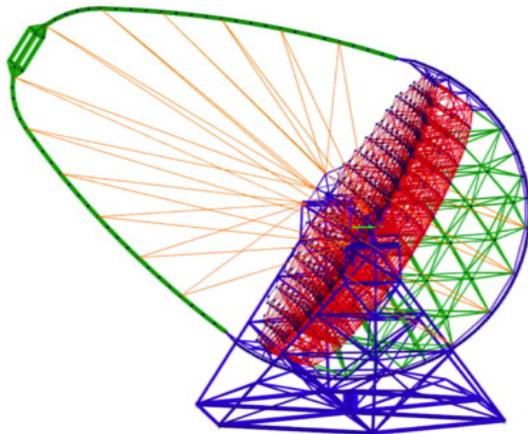


図 2: LST の模型図

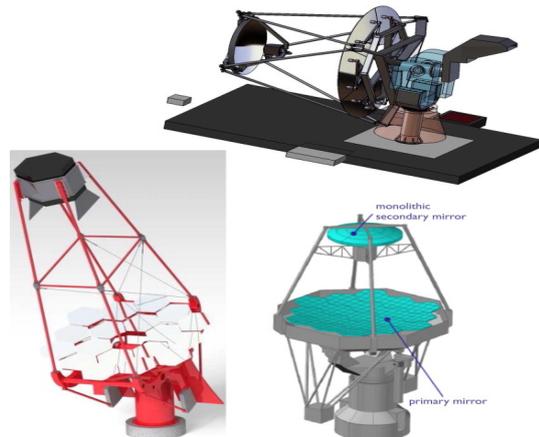


図 4: SST の模型図

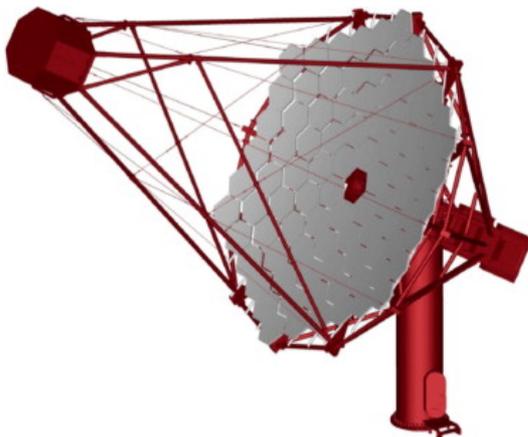


図 3: MST の模型図

4.2 中間のエネルギー (0.1~10TeV)

このエネルギー範囲は既存のガンマ線望遠鏡からその性質はよくわかっている。この範囲で使われる望遠鏡は現在活躍している望遠鏡に近い、12m 口径のものを使う。これを Mid-size telescope (MST) という。ただし、その数を格段に多くするので、解像度などはより良くなる。例えば 4 台の望遠鏡がある H.E.S.S. や VERITAS では解像度は決して低くはないが、検出エリアの大きさからチェレンコフ光の一部しか観測できないことも多い。CTA では望遠鏡の数を多くすることにより、今まで以上に高感度で観測できる。

4.3 高エネルギー (10TeV 以上)

このエネルギー範囲ではチェレンコフ光をどれだけ検出できたかが、感度を左右する主要因となる。一方、高エネルギーガンマ線からのチェレンコフ光は、他のエネルギー範囲に比べて光収率が大きい。以上の 2 つの点から 6m 口径の望遠鏡を 100~200m 間隔で設置する。この望遠鏡を Small-size telescope (SST) という。SST は単純に MST の小型化して設計すると、大きな FoV の必要性から、カメラに対するコストが高くなってしまふ。そこで従来の方法の他に、Secondary mirror を用いてチェレンコフ光を 2 回反射させ、検出範囲を小さくする方法などが考えられている。

5 CTA のパフォーマンス

CTA の望遠鏡群の配置は、有効エネルギー範囲の全域を感度よく観測するようにモンテカルロ (MC) シミュレーションから求められる。シミュレーションでは 5° FoV、0.09° ピクセルの口径 24m の望遠鏡 4 台と 8° FoV、0.18° ピクセルの口径 12m の望遠鏡 23 台、さらに 10° FoV、0.25° ピクセルの口径 7m の望遠鏡 32 台としている。図 5 は、それぞれの望遠鏡の感度である。

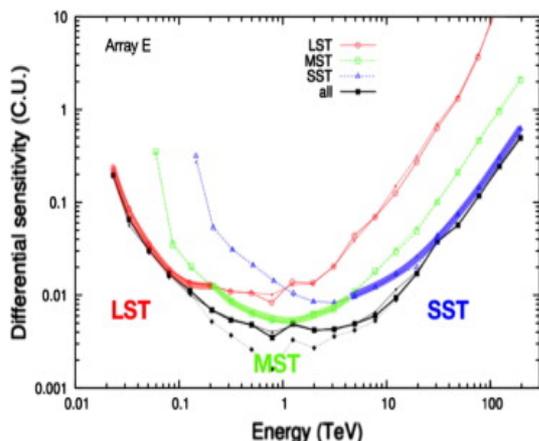


図 5: それぞれの望遠鏡の感度

6 CTA の観測施設

CTA は宇宙素粒子物理、宇宙物理、宇宙論、基礎物理など多くの分野の物理をカバーする。CTA はコミュニティに開かれた天文台として運営され、様々な分野の研究者を受け入れられるようになる。CTA 計画に参加していない国の研究者が使う場合については決定してはいないが、観測時間の数分の 1 が宇宙物理学コミュニティに公開されるだろう。また、CTA で観測されたすべてのデータはある期間を置いた後、すべて公開することを計画している。また、CTA の観測はプロポーザルを出した研究者ではなく、専門のオペレーターによって行われる。

6.1 観測所の構成

CTA の観測所は (1) サイエンスオペレーションセンター (全体を管理)、(2) 配列演算センター (望遠鏡や大気をモニターし、解析に必要な測定データや環境データを提供)、(3) サイエンスデータセンター (データや解析に必要なソフトウェアを提供) で構成される予定である。

6.2 プロポーザルの扱い

定期的にプロポーザルが募集され、評価・採択される。

6.3 観測所のオペレーション

観測所のオペレーションは望遠鏡の長期間の利用のため、ハードウェア及びソフトウェアのメンテナンスを行う。

6.4 データの配布

CTA で測定されたデータは解析に必要なツールと共に、ユーザーに提供される。また、一晩で測定されるであろう生データは数十 TB になり、計算機の性能の向上も要求される。すべてのデータは標準化された方法でアーカイブに保管され、公開される。

7 CTA の将来

CTA は VHE ガンマ線の世界的なプロジェクトである。5 つの大陸から 27 の国の科学者及びエンジニアが参加している。2006 年以来、ヨーロッパやアメリカで先進的に計画が進められ、日本も 2009 年に正式に参加し、計画に貢献している。今年中には望遠鏡のデザインが決定されるだろう。

CTA は北半球と南半球の 2ヶ所に設置されるが、場所はまだ決定していない。立地条件として、高度 1.5~4km 程度、約 10km²の平面、かつ天候ができるだけ快晴であることが求められる。候補地として、北半球はアリゾナ、メキシコ、チベット (中国)、インド、及びカナリア諸島、南半球はチリ、アルゼンチン、及びナミビアがある。CTA が設置される場所は 2013 年の内に決まり、2016 年には CTA の一部が動き始める予定である。あと数年で広帯域、高感度でガンマ線を観測できるようになり、CTA は宇宙物理の新しい分野を開拓するだろう。

Reference

the CTA consortium, Astroparticle Physics, "Introduction the CTA concept", Volume 43, p.3. 2013