

超高エネルギーガンマ線観測の現状と CTA の見る宇宙

岩村 由樹 (東京大学 宇宙線研究所)

Abstract

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、100 台近くの大気チェレンコフ望遠鏡からなるガンマ線天文台を建設し、20GeV から 100TeV という超高エネルギー (VHE) ガンマ線領域での宇宙観測を行う国際共同プロジェクトである。VHE ガンマ線の天体観測では、ガンマ線が地球大気と相互作用する過程で生じるチェレンコフ光を地上の望遠鏡で検出する手法が用いられる。いま世界では H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS といった大気チェレンコフ望遠鏡が稼働しており、超新星残骸や活動銀河核など銀河系内外に 160 を超える VHE ガンマ線源が発見・観測されている。

CTA では大規模な望遠鏡群を建設することにより、感度を既存の望遠鏡の 10 倍に押し上げるとともに高い角度分解能を実現する。また口径 4m から 23m にわたる大中小 3 通りのサイズの望遠鏡を設置することで、観測可能なエネルギー領域も拡大する。これらの性能向上の結果として新たに 1000 以上の VHE ガンマ線天体の発見が期待されており、さらには天体観測にとどまらず宇宙線の起源やダークマターの対消滅、ローレンツ不変性の破れなどをも探ることができるため、CTA が完成した暁には様々な面から人類の物理学への理解が推し進められるに違いない。本レビューではこうした CTA 計画の概要と CTA で狙える天体について、既存の大気チェレンコフ望遠鏡と比較しつつ紹介する。

1 大気チェレンコフ望遠鏡

宇宙観測に用いられる電磁波の中で最もエネルギーの高い (波長の短い) 領域は超高エネルギー (VHE) ガンマ線と呼ばれ、その値は数十 GeV から TeV スケールにまで及ぶ。この領域の観測には大気チェレンコフ望遠鏡が用いられる。ガンマ線は地球大気に入射すると相互作用により次々と電子、陽電子、光子を生成し、これらはシャワーのように地上に降り注ぐ。ここで作られた電子と陽電子は大気中を光速に近い速度で動くためにチェレンコフ光を放射する。大気チェレンコフ望遠鏡ではこのシャワーの発したチェレンコフ光を複数の望遠鏡で立体視 (ステレオ観測) して、シャワーの三次元的なイメージを得ることで元のガンマ線の到来方向やエネルギーを見積もることが出来る。1989 年に Whipple 望遠鏡でカニ星雲からのガンマ線が観測されて以来、様々な高エネルギー天体現象がこの手法により観測されてきた。現在では口径十メートルを超える望遠鏡数台からなる大気チェレンコフ望遠鏡が世界 3 か所で稼働している (図 1)。



図 1: 現行の大気チェレンコフ望遠鏡。上から MAGIC(17m×2、カナリー諸島)、VERITAS(12m×4、アリゾナ)、H.E.S.S.(12m×4+28m×1、ナミビア)

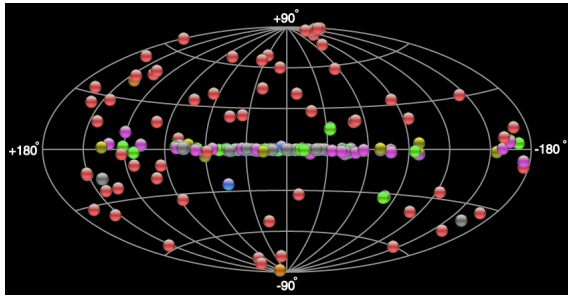


図 2: VHE ガンマ線スカイマップ (TeVCat)。各色は天体の種類を表す (赤: AGN, 緑: SNR, 桃: PWN, 黄: 連星, 橙: 星形成銀河, 青: その他の同定済天体, 灰: 未同定)。現在 160 以上の天体が発見されている。

TeV 領域というエネルギーの高いガンマ線を生成できるのは主にダイナミックな天体現象であり、活動銀河核 (AGN) や超新星残骸 (SNR)、パルサー星雲 (PWN) などが挙げられる。大気チェレンコフ望遠鏡によって現在までに 160 を超える VHE ガンマ線源が発見されており (図 2)、天体の構造やその内部での粒子加速機構の理解が進められている。

2 次世代望遠鏡 CTA

VHE ガンマ線の天体観測は他波長に比して歴史が浅く、発展の途上である。現行の大気チェレンコフ望遠鏡では様々な成果が挙げられてはいるものの、観測の精度が足りずに解明できない謎も多く残されている。そこで約 30 か国の協力の下、新たに大規模なガンマ線天文台 CTA を南北 2 つのサイトに建設するプロジェクトが進行中である。

CTA では図 3 のように大きさの異なる望遠鏡をアレイ状に配置する。台数を増やすことで、1 つのシャワーイベントをより多くの望遠鏡 (平均 6 台、これは現行の望遠鏡の 3 倍にあたる) でステレオ観測できる。これによりバックグラウンドの分離の精度が上がり感度が向上するとともに、角度分解能も上がる。

また、異なるサイズの望遠鏡を建設するのは観測エネルギー領域を広げるためである。最も大きな LST (Large-Sized Telescope) は口径 23m で、微弱なチェレンコフ光も検出できるため低エネルギー側 (20GeV~1TeV) において感度が良く、銀河系外

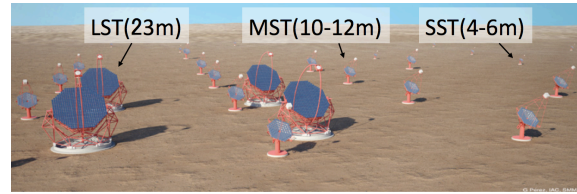


図 3: CTA 完成予想図。大中小 3 通りの望遠鏡が配置される。

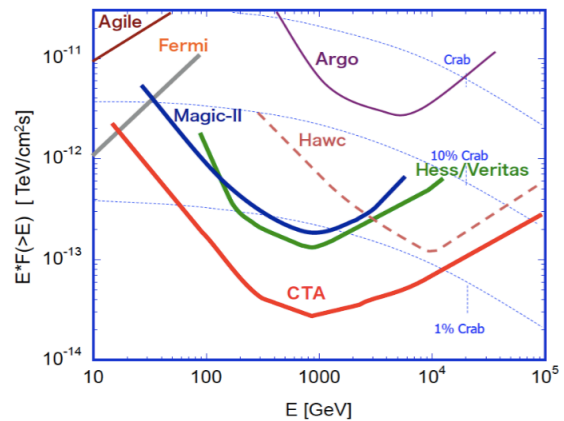


図 4: CTA とその他のガンマ線望遠鏡の感度曲線 (CTA-Japan Consortium 2014)。広いエネルギー領域で感度を凡そ 1 桁向上している。

の天体観測に用いられる。そして LST の周りには ~12m の MST を、次いで ~6m の SST を更に広範囲に配置する。これらは観測の有効面積を広げることで、より到来頻度の少ない高エネルギー側 (MST: 100GeV~10TeV, SST: 10TeV~数百 TeV) のガンマ線を捉えられる。MST のエネルギー領域は銀河面のディープサーベイに、SST の領域は銀河系内由来の高エネルギー宇宙線観測にそれぞれ威力を発揮する。このように大中小の望遠鏡で観測するエネルギー領域を分担し、全体として図 4 のように 4 桁に渡る広いエネルギー領域をカバーできるため、CTA では天文学と物理学双方の多種多様な研究を進めることができる。

以上の計画の骨子に加えて望遠鏡装置自体にも様々な改良が施されることで、CTA は大気チェレンコフ望遠鏡の観測精度を格段に向上する。例として銀河面サーベイ観測における H.E.S.S. との比較を図 5 に示す。図のようにより多くの VHE ガンマ線源を高

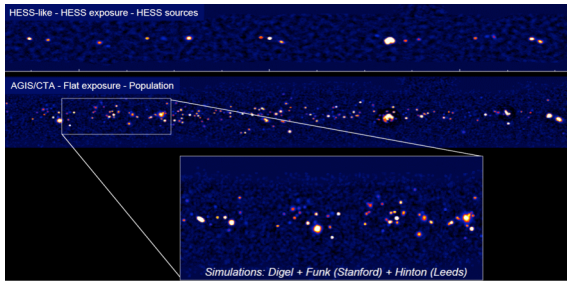


図 5: 銀河面サーベイの銀河中心方向 (CTA-Japan Consortium 2014)。上は H.E.S.S. での観測結果、中央は CTA についてのシミュレーション、下はそのズームアップ。CTA ではより多数の天体がより詳細に観測される。

い分解能で観測できることがシミュレーションでも明確に示されており、また北半球と南半球の両方に建設することによって CTA では全天を観測できるため、これまで 160 程度であった VHE ガンマ線源の数は 1000 を超えると予測されている。

3 CTA の観測例

3.1 活動銀河核 (AGN) のフレア

AGN は銀河中心のブラックホールを囲む降着円盤を通じてガスが解放する重力エネルギーで輝いており、上下には相対論的ジェットを噴射している (図 6)。非熱的放射が優勢な AGN は強い電波が観測されることから電波銀河と呼ばれ、このうちジェットを真正面から観測しているものはブレイザーと呼ばれる。ブレイザーは電波からガンマ線という広い波長帯において、ジェットの非熱的放射で明るく輝いて見える。

ブレイザーは数分から数日という短時間のフレアを発する。持続時間 (Δt) は因果律によりおおよそ光が天体を横切る時間に等しいとすると、天体のスケール (l) に対し

$$\Delta t \sim \frac{l}{c} \quad (1)$$

と表されるので、フレアはブラックホール近傍という小さな領域での物理状態を反映していると考えられる。現行の望遠鏡は時間分解能が数分のため細か

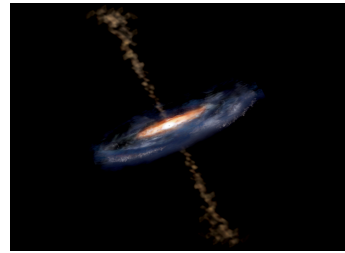


図 6: AGN のイメージ図 (CTA-Japan Consortium 2014)。ジェットが視線方向を向いている時にはブレイザーとして観測される。

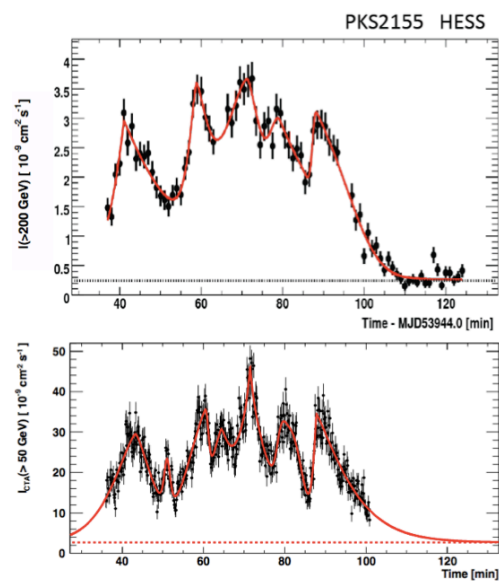


図 7: PKS2155 の 2006 年に発生したフレアの光度曲線。上は H.E.S.S. での観測結果 (CTA-Japan Consortium 2014)、下は同じフレアを CTA で見た場合のシミュレーション (H. Sol et al. 2013)。時間分解能の向上により、AGN の細かい構造を調べられる。

い変動を見ることが出来ないが、CTA は感度が向上するため図 7 のように 10 秒スケールでの解析が可能となり、より細かいジェット構造を調べられる。

3.2 超新星残骸 (SNR) の粒子加速

宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギー粒子である宇宙線は 1912 年の発見以来、現在までにその組成 (陽子、電子、光子など) やエネルギースペクトル等

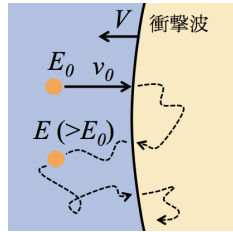


図 8: 衝撃波での粒子加速の概念図。衝撃波面を往復する度に粒子が加速される。

が次第に分かってきたが、未だにその起源や加速機構は解明されていない。その中で SNR はエネルギー 10^{15} eV 以下の宇宙線起源の有力候補である。SNR における宇宙線加速のモデルは、乱流磁場により軌道を乱された荷電粒子が SNR の衝撃波面を繰り返し往復し、その度に加速されて次第にエネルギーを得るといものである (図 8)。

衝撃波での粒子加速は 1 次元の Fermi 加速モデルで単純化して考えられる。衝撃波に入射する前の粒子は速度 v_0 、エネルギー E_0 、運動量 p_0 とし、衝撃波面の速度を $V (\ll v_0 < c)$ とすると、衝撃波の静止系では

$$E' = \gamma_v (E_0 + V p_0) \quad (2)$$

$$p' = \gamma_v \left(p_0 + \frac{V}{c^2} E_0 \right) \quad (3)$$

(ただしここで $\gamma_v = (1 - V^2/c^2)^{-1/2}$) である。衝撃波内で磁場により軌道が曲げられ、反対方向に粒子が出てくるとき、そのエネルギーと運動量は E' 、 $-p'$ となっている。再びローレンツ変換により観測者の系に戻ると、粒子のエネルギーは

$$\begin{aligned} E_1 &= \gamma_v [E' - V(-p')] \\ &= \gamma_v^2 E_0 \left(1 + \frac{2Vv_0}{c^2} + \left(\frac{V}{c} \right)^2 \right) \\ &\approx E_0 \left(1 + \frac{2Vv_0}{c^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。よって衝撃波面を一往復することで

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \approx \frac{2Vv_0}{c^2} \quad (5)$$

と速度に比例したエネルギーを得るため、粒子はこの往復を繰り返すことで急激に加速される。

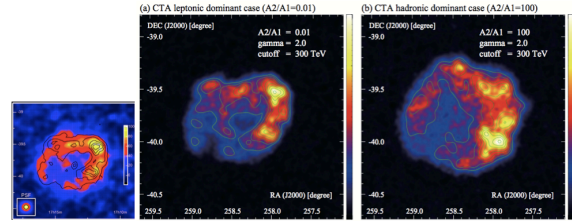


図 9: RX J1713.7-3946 の画像。左は H.E.S.S. での観測 (CTA-Japan Consortium 2014)、中央 (電子成分が主要の場合) と右 (陽子成分が主要の場合) は CTA のシミュレーション (CTA Construction Project 2015)。ガンマ線観測から粒子の種類が判断できる。

しかし加速した粒子が宇宙空間に拡散するプロセスや、 10^{15} eV という高エネルギーまで SNR で加速出来るのか、そもそも加速されているのは何の粒子なのかといった多くの点は未だ不明であり、CTA ではこれらの問題が深く研究される。例えば加速されている粒子の正体については、電子の場合と陽子の場合で VHE ガンマ線の強度分布が図 9 のように異なると考えられているため、加速されている粒子の割合が高分解能での画像観測から分かる。この他多くの未解明の問題についても観測から制限が与えられ、SNR の加速機構について理解が進むと期待される。

4 CTA 計画の展望

日本は LST の鏡と光電子増倍管、読み出し回路を担当しており、来年度のラパルマ島 (アフリカ北西、スペイン領カナリー諸島) での初号機建設に向けて準備を進めている最中である。現在各国で各装置の開発と製作が行われており、CTA は 2017 年の部分観測開始、2020 年のフル観測開始を目指している。

Reference

CTA Construction Project Science Case, 2015

CTA-Japan Consortium, 2014,
<http://www.cta-observatory.jp>

H. Sol et al, 2013, Astroparticle Physics Vol.43

TeVCat, Accessed June 30, 2015,
<http://tevcat.uchicago.edu>