

超高エネルギーガンマ線天文学の現状と将来

手嶋 政 廣

〈東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: masahiro.teshima@gmail.com



超高エネルギーガンマ線による宇宙の研究は、近年大きく進展し天文学の新たな一分野を形成した。これらの研究をさらに飛躍的に発展すべく、日米欧の国際共同により、従来の装置の10倍の感度と広い光子エネルギー領域を観測できる超高エネルギーガンマ線観測施設チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) の建設への準備を進めている。最高エネルギー光子といえる TeV 領域宇宙ガンマ線を観測し、極限的宇宙の姿を明らかにする。超新星残骸、超巨大ブラックホール周辺、ガンマ線バーストでの高エネルギー粒子の加速/生成機構の研究、宇宙における星・銀河の形成史の研究、さらには宇宙を満たす暗黒物質の探索、究極の物理理論である量子重力理論の検証を行う。

1. はじめに

宇宙はさまざまな高エネルギー現象に満ちており、非熱の高エネルギー粒子を伴うさまざまな天文現象が観測されている。それらの中には短時間の激しい時間変動を示すものやバースト的な爆発現象もある。近年、人類の高エネルギー宇宙を見る目は、衛星による X 線、GeV 領域ガンマ線衛星、さらに地上チェレンコフ望遠鏡による TeV 領域ガンマ線にまで広がり、激しく変動する極限状態にある宇宙の姿を明らかにしてきた。TeV ガンマ線は現在、電波からガンマ線に至る電磁波を用いた人類の宇宙観測における高エネルギーフロンティアといえる。また、過去の例に倣えば、新しい観測は常に新しい謎を生み出してきている。宇宙には現在の装置の感度不足によりまだ発見されていない未知の高エネルギー現象が多く存在するであろう。また、宇宙線の起源、加速、伝播など、長年の謎として残されている重要な問題もある。こうした問題に観測的に迫るには、高感度な装置により数多くの天体を観測することが必要であり、高エネルギー宇宙現象の普遍性・法則性の

研究が必要不可欠である。さらに、高エネルギー宇宙の観測は、超高密度物質、ブラックホールなどの極限時空、超高エネルギー宇宙線や暗黒物質粒子の対消滅ガンマ線の探索など、宇宙論や基礎物理学の発展に重大な貢献をもたらす可能性がある。こうした重要な科学的課題に迫るため、われわれはさらに高感度・高性能の Cherenkov Telescope Array (CTA) の準備研究を進めている。

100 GeV (10^{10} eV) から 10 TeV (10^{13} eV) にわたる超高エネルギーガンマ線による天体観測は、大気チェレンコフ光を用いたいわゆる地上チェレンコフ望遠鏡によって行われる。地上チェレンコフ望遠鏡による超高エネルギーガンマ線天文学の歴史は、1989年の Whipple 望遠鏡によるカニ星雲からのガンマ線検出¹⁾に始まるが、その後の技術的発展に伴い、現在では、ステレオ観測、高感度光センサー、超高速電子回路などのハイテク技術をベースにする新しい世代の地上ガンマ線望遠鏡 H.E.S.S.²⁾、MAGIC³⁾、VERITAS⁴⁾が、超高エネルギーガンマ線天文学を牽引している。現在、銀河系内、銀河系外に、多種多様な 100 を超える超高エネルギーガンマ線源が発見されている⁶⁾。ま

た、その天体数のみならず、近傍の明るい天体に関しては、観測の高精度化が進み、天体での物理現象をより詳細に研究することが可能になってきた。

図2には107の超高エネルギー天体が天球図に示されている。現在、銀河系内、系外にそれぞれ

61天体、46天体が観測されている。銀河系内では、銀河面に沿って銀緯で数度の範囲に多くの天体が集まっている。銀河系内の超高エネルギーガンマ線源は、パルサー星雲(19)、ガンマ線連星(4)、超新星残骸(10)、銀河中心(1)、パルサー(1: Crab Pulsar)、散開星団(1: Westerlund-2)、Wolf-Rayet(1: W20)、未同定天体(24)と区分できる。

銀河系外では、Blazar(38)、Flat Spectrum 電波銀河(2: 3C279, PKS1222)、電波銀河(5: M-87,



図1 上から、北半球の MAGIC 望遠鏡 (2×17 m, ラパルマ・カナリヤ諸島)³⁾, VERITAS 望遠鏡 (4×12 m, アリゾナ・米国)⁴⁾, 南半球の H.E.S.S. 望遠鏡 (4×12 m, ナミビア)²⁾, CANGAROO 望遠鏡 (4×9 m, ウーメラ・オーストラリア)⁵⁾. (表紙)

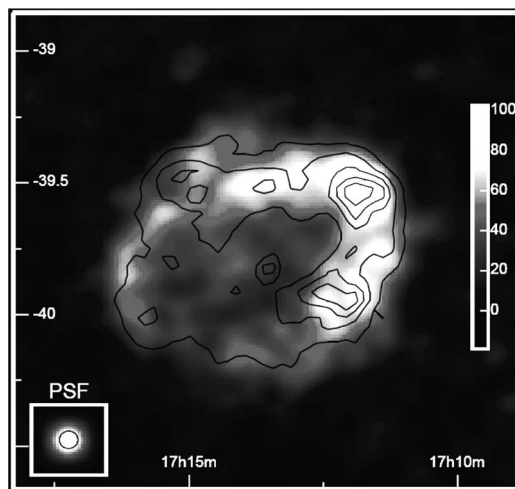


図3 H.E.S.S.によるRX J1713-3946の観測¹⁰⁾. グレースケールは超高エネルギーガンマ線強度。黒の等高線はX線強度を示す。

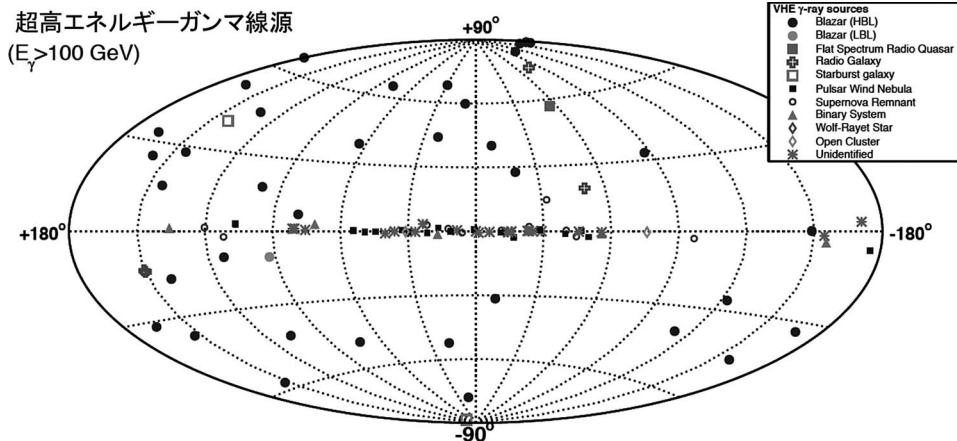


図2 超高エネルギーガンマ線 (>100 GeV) スカイマップ (銀河座標). 2011年1月現在, 107の超高エネルギーガンマ線源 (>100 GeV) が観測されている⁶⁾.

Cen-A, IC310, NGC1275, 3C66B), スターバースト銀河 (2: NGC253, M82) と区分でき, 最も遠い天体としては 3C279 ($z=0.536$), PKS1222+21 (4C+21.35, $z=0.432$) まで観測されている^{7), 8)}.

2. 銀河系内のガンマ線源

超新星残骸は果たして宇宙線源か?

図4には, いくつかの超新星残骸の GeV から 100 TeV にわたるエネルギースペクトルが示されている. 若い超新星残骸, Cas-A (0.3 kyr)⁹⁾, RX J 1713 (2 kyr)¹⁰⁾, IC443 (10 kyr)¹¹⁾ は TeV 領域までスペクトルが伸びていることがわかる. しかし, 10 kyr を超える中年の超新星残骸, W51C (30 kyr)¹²⁾, W44 (20 kyr)¹³⁾, IC443 (10 kyr)¹¹⁾ は, 急峻なスペクトルをもち, そのピークは GeV 領域にある. これらのガンマ線が陽子起源であり, 周囲のガスと衝突しその相互作用で作られた π^0 中間

子の崩壊からのものであると考えると, 年齢とともに超新星残骸で加速されている (トラップされている) 宇宙線のエネルギースペクトルが時間的に変化しているといえる. 高いエネルギーの宇宙線は超新星残骸が自由膨張から断熱膨張フェーズに移る頃に超新星残骸から逃げ出しているのかもしれない.

将来的には, より多くの超新星残骸を観測し, 宇宙線のスペクトルが時間とともにどのように変化しているか, また銀河宇宙線の最高エネルギーである knee 領域 (10^{15} eV) まで宇宙線を加速している天体を同定するとともに, さらに超新星残骸周辺の分子雲において脱出した高エネルギー宇宙線が相互作用している現場をおさえることが重要であろう. このような研究には高感度, 高角度分解能の CTA が必要不可欠であるとともに多波長での観測が必要である.

銀河内で最もポピュラーなパルサー星雲

すでに述べたように H.E.S.S. の銀河面サーベイでは多くのパルサー星雲が見つかった. パルサーからは高エネルギー電子, 陽電子のアウトフローが起こっており, これらがパルサー風となり周囲のガスと衝突しパルサー星雲を作る. 図5は H.E.S.S. による PSR J1826-1334 周辺の観測である¹⁵⁾. 1度程度広がった領域からの超高エネルギーガンマ線の放射がみられる. エネルギーバンドを三つに分けて, 濃いグレイ (200-800 GeV), グレイ (0.8-2.5 TeV), 白 (2.5 TeV 以上) とすると, エネルギーが低くなるにつれてその放射領域が広がっていることがわかる. 高エネルギー電子が外部に向かってシンクロトン放射で冷却しながら伝播していることがわかる.

CTA では角度分解能が現行の 6 分角から 2 分角に向上し, このような広がりをもった天体に関してより精密な測定が可能になる. また, X 線衛星すざく¹⁶⁾ と同等の角度分解能により, 各点での物理パラメーターの決定が可能になってくる.

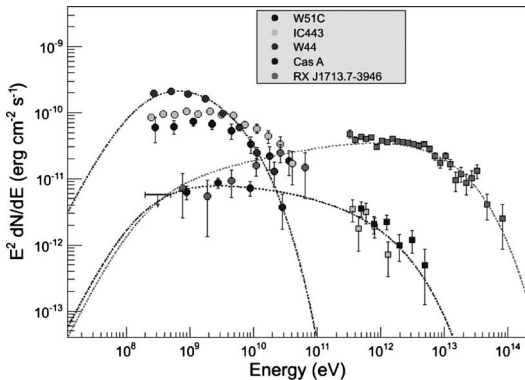


図4 多波長天文学: 超新星残骸の多波長 100 MeV-100 TeV エネルギースペクトル¹⁴⁾. 中年の超新星残骸, W51C (30 kyr), W44 (20 kyr), IC443 (10 kyr) は GeV 領域で非常に明るい. 比較的若い超新星残骸 Cas-A (0.3 kyr), RXJ 1713 (2 kyr), IC443 (10 kyr) では TeV 領域まで伸びている. CTA では, より多くの超新星残骸観測で, 異なる時期の超新星残骸の状態が観測できるようになる. また, CTA では, 30 GeV-300 GeV 領域でも高感度の測定が可能となり, GeV と TeV の間のエネルギーギャップを埋めることができる.



図5 HESS J1826-1334 (パルサー星雲)¹⁵⁾. 白い点がエネルギー源のパルサーの位置. 三つのエネルギーバンドごとにグレイの濃さを変えてガンマ線放射領域を示している. エネルギーが低くなるにつれてその放射領域が広がっていることがわかる. 高エネルギー電子がシンクロトロン放射で冷却をうけながら外部に広がっていることがわかる.

パルサーでのガンマ線放射はどこから？

MAGIC では特別なトリガーシステムを導入し、検出エネルギー閾値を 25 GeV まで下げることに成功した. この革新的な技術によりカニパルサーからのパルス成分の観測に成功した¹⁷⁾ (図6). 25 GeV での非常にクリアな信号の存在と、さらに 60 GeV までスペクトルが延びている可能性を示唆した. 従来、パルサーからのガンマ線放射がパルサーの極付近で起きているという polar gap と呼ばれるモデルと、極から離れた slot gap と呼ばれる領域、さらに光円柱に近い outer gap と呼ばれる領域で起きているというモデルが提唱されていた. しかし、25 GeV を超えるガンマ線が放射されているという事実から、パルサーの極付近で放射が起きているというモデルは棄却された. ガンマ線は極付近の $4-8 \times 10^{12}$ G という非常に強い磁場

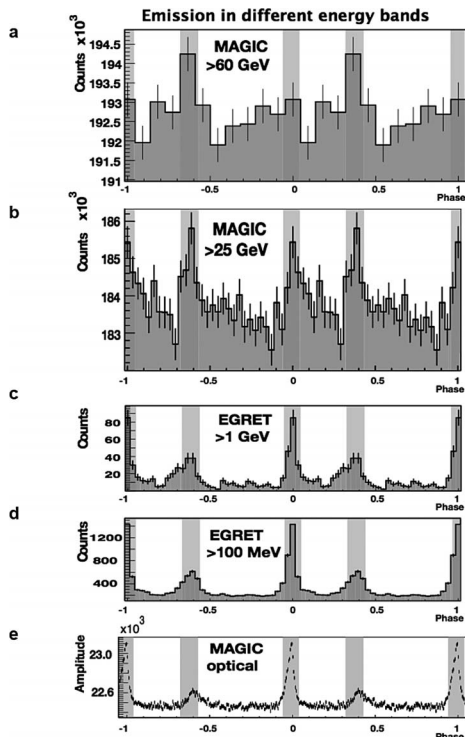


図6 MAGIC によるカニパルサーの超高エネルギーガンマ線観測. 25 GeV 以上のガンマ線の中に 33 ms の周期で変動する成分が検出された¹⁷⁾. その成分は 60 GeV まで延びているようであり、ガンマ線の放射領域がパルサーから遠い outer gap で起こっていることを明らかにした.

と相互作用し電子対生成を起こし吸収され、逃げ出すことができないからである. また、slot gap での加速では最高エネルギーがおおよそ数 GeV となり、MAGIC の観測を説明できない. 光円柱に近い outer gap でガンマ線が放出されているとするモデルが観測をよく説明する.

3. 銀河系外の超高エネルギーガンマ線源

銀河系外の超高エネルギーガンマ線源としては、視線方向に相対論的なジェットをもつブレーザーが最もポピュラーである. 近年のチェレンコフ望遠鏡の高感度化に伴い、M87, Cen-A のよう

なジェットが必ずしも視線方向と一致しない電波銀河^{18), 19)}や、超新星爆発を頻繁に起こしている NGC253, M82 のようなスターバースト銀河^{20), 21)}と呼ばれる天体からも超高エネルギーガンマ線が観測され、観測対象も広がりをもち始めた。また、3C279, PKS1222 (4C +21.35) のような $z=0.5$ 前後の天体も観測され始め^{7), 8)}、観測の興行きも宇宙論的なスケールに広がりつつある。

図7には、一例として近傍のブレーザー Mrk 421 の多波長でのエネルギースペクトル²²⁾を示す。スペクトルは二こぶになっているが、これらは高エネルギー電子によるシンクロトロン放射と

逆コンプトン散乱からの成分である。活動銀河核からの相対論的なジェットの中で高エネルギー宇宙線(高エネルギー電子)が加速/生成されガンマ線が放出されていることがわかる。多くの近傍ブレーザーからのスペクトルは加速された高エネルギー電子がシンクロトロン放射を行うと同時に、再びそのシンクロトロン光子を逆コンプトンで叩き上げる SSC (Synchrotron Self-Compton) モデルでうまく説明できる。

また、興味深いのは数分のタイムスケールで速い変動を示すフレアが観測されていることである。図8に MAGIC による Mrk501, H.E.S.S. による PKS2155 のフレアを示す^{23), 24)}。活動銀河核から放出されたブロッブが中心のブラックホールのシュバルツシルド半径と同程度としても、数分を説明するにはブロッブがローレンツ因子 50 以上で視線方向に動いている必要があり、活動銀河核からのジェットの物理として興味深い。

また、これらの速い変化を示すフレアを使い、量子重力理論のテストができる。プランクスケール程度の量子的な揺らぎをもった真空中では、高いエネルギー(波長が短い)領域では、光速がエネルギー依存性をもつことが示唆されている。すなわち、すべての光子が同時に天体から放射されたとしても、高いエネルギーの光子はエネルギーに、またはその2乗に比例した、また伝

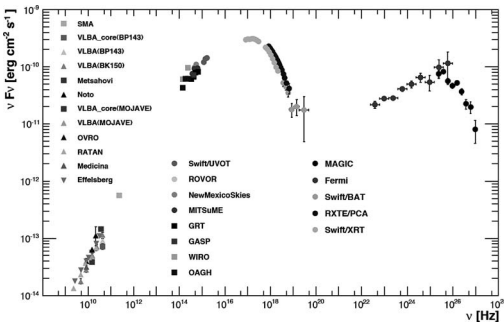


図7 多波長天文学: Mrk421 の多波長観測。ガンマ線領域は Fermi, MAGIC の観測。CTA は、Fermi ガンマ線衛星のデータとつなぐことにより、より遠方の暗い天体においてもこのようなシームレスなガンマ線スペクトルを5桁にわたり得ることができる。

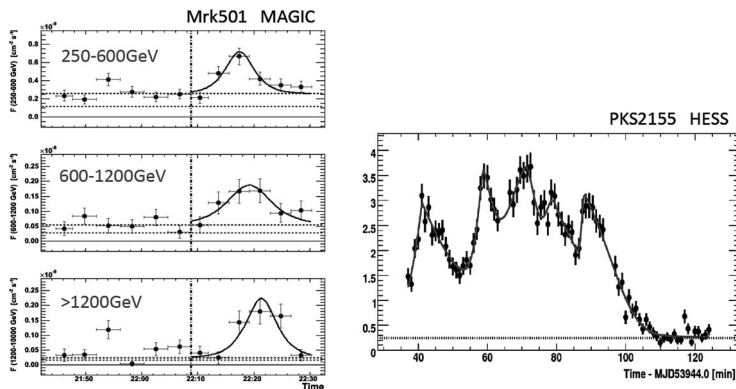


図8 Mrk501 (MAGIC)²³⁾, PKS2155 (H.E.S.S.)²⁴⁾ の非常に速いフレア。どちらも数分スケールの時間変動を示している。CTA では、このような巨大フレアでは数秒スケールまで迫ることができる。

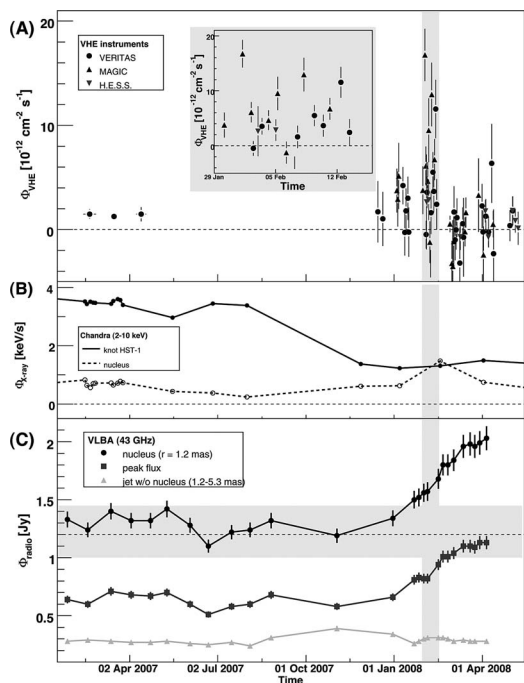


図9 M87の超高エネルギーガンマ線フレアー²⁵⁾。ガンマ線フレアーに伴い電波フレアーがゆっくりと数カ月にわたり立ち上がったのがわかる。

播距離に比例した遅れをもつと予測される。Mrk 501, PKS2155 の観測からはそれぞれ量子重力が有効になるエネルギースケールがおおよそ0.01, 0.03 プランク質量スケール以上であると制限された。CTA では、ガンマ線バーストからの数十 GeV 光子を測定することにより、量子重力の効果を数十プランク質量スケールまで調べることが可能となる。

電波銀河

チェレンコフ望遠鏡の高感度化に伴い M87, Cen-A, NGC1275, IC310 などの近傍の電波銀河からの超高エネルギーガンマ線が観測されている。図9には2008年1-2月に起こった M87 のガンマ線フレアー²⁵⁾のライトカーブを示す。MAGIC のアラートにより、VERITAS, H.E.S.S., さらには VLBA により集中的な観測が始められた。上のパネルが MAGIC, VERITAS, H.E.S.S. により観測

された超高エネルギーガンマ線。中央のパネル (B) が Chandra による X 線のライトカーブ、下のパネル (C) が VLBA による電波のライトカーブである。ガンマ線のフレアーに同期して、M87 コアでの X 線強度 (中央パネル破線) がわずかに上昇し、また電波強度がゆっくりと立ち上がっているのがわかる。

M87 は、VLBA により 30×60 シュバルツシルド半径 (0.21×0.43 ミリ秒角) のビームサイズでモニターされており、克明に活動銀河核からブロップが放出され、それに伴い電波強度が増大し始めた現場をとらえている。また、超高エネルギーガンマ線の巨大フレアーはおおよそ2週間にわたり観測されているが、電波は数カ月にわたって増加を示している。VLBA のイメージングにより、活動銀河核からブロップが放出されたとほぼ同時に、超高エネルギーガンマ線フレアーが起こったことがわかる。中心エンジンに極めて近い領域でガンマ線放射が起こっていることがわかる。

宇宙はガンマ線にどれだけ透明か？

宇宙は、ビッグバンのなごりの宇宙背景放射だけでなく、星光またはダストからの放射による赤外・可視領域の背景放射で満たされている。これらの背景放射は宇宙での星形成史を反映し、そのエネルギー密度は重要な量である。一方、超高エネルギーガンマ線はこれらの赤外・可視領域の宇宙背景放射と相互作用し電子対生成を起こす。超高エネルギーガンマ線の吸収量を測定することにより (具体的には吸収量の上限値を推定することにより)、天体から地球までの間に存在するターゲットの赤外・可視背景放射の柱密度の上限値がえられる。3C279 などの遠方のいくつかの天体について求められた赤外・可視背景放射エネルギー密度の H.E.S.S., MAGIC による上限値が図10にみられるように与えられている。Primack のモデル²⁶⁾は HST による Galaxy count から推定される背景放射の下限値とよく一致しているといえる。

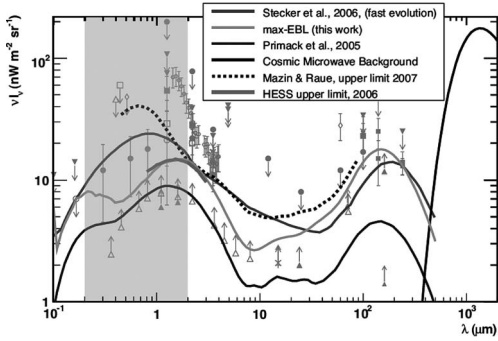


図10 赤外・可視領域背景放射⁷⁾. 下から二つ目の線が超高エネルギーガンマ線による上限値(0.2-2 μm 領域で有効). 背景放射の強度は Primack のモデル曲線(最も下の線)と下から2番目の線の間にあるといえる.

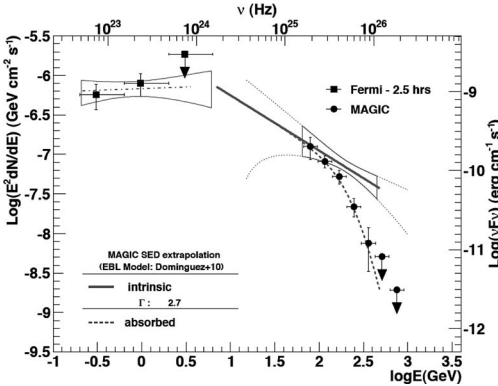


図11 PKS1222 ($z=0.432$) からのガンマ線エネルギー分布⁸⁾. Fermi データの外挿から 100 GeV 以上で急速に吸収の効果が見られる.

0.2 μm から 3 μm の領域では背景放射は図2の一番下の線と二番目の線との間にあるといえる. CTA では $z < 2.5$ の活動銀河核, $z < 6$ のガンマ線バーストが観測されると予想され, 宇宙初期の星・銀河形成に重要な制限をつけることができる.

4. CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画

現在のチェレンコフ望遠鏡は極めて限られた予算・規模で建設されており, 空気チェレンコフ技術のすべてのポテンシャルを使いきっていない.

これまでに確立された技術と経験をもとに, さらに空気チェレンコフ技術を発展させ, 飛躍的に性能を向上させる余地が残っている. その観点から, これまでこの分野をリードしてきた H.E.S.S. と MAGIC の2グループが中心となり, 大規模チェレンコフ望遠鏡アレイ, Cerenkov Telescope Array (CTA) 計画^{27), 28)}を提案してきた. CTA は, 大中小数十のチェレンコフ望遠鏡群の設置により, 感度を一桁向上 (1 mCrab $\sim 10^{-14}$ erg s⁻¹ cm⁻² を達成) するとともに, 観測可能なエネルギー領域を 20 GeV-100 TeV と拡大し, 高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に発展させるものである. この計画が実現すれば, 1,000 以上の超高エネルギーガンマ線天体の発見が期待される.

単に天体数だけでなく, CTA から得られる科学的成果は銀河系内外のさまざまな高エネルギー天体, 宇宙線や星間物理, 可視赤外宇宙背景放射と銀河形成進化, さらに暗黒物質や量子重力理論の検証などの基礎物理に至るまで広がりをもつ. CTA はそれだけの高いサイエンスポテンシャルと, 豊富な経験, 実績に裏打ちされた高い技術, そして実現可能性をもちあわせる. 建設予算は, プロジェクト全体でおよそ 200 億円であり, 期待できる多くの成果を考えれば, コストパフォーマンスは非常に高いといえる. 日本グループとしては予算的に全体の 20% の貢献を目指している.

チェレンコフ光イメージにより, ガンマ線シャワーとハドロンシャワーを分離するというアイデアは 1985 年に Hillas により提案され²⁹⁾, Whipple 望遠鏡は, このイメージングチェレンコフ技術を最初に採用し, 1989 年にカニ星雲からのガンマ線検出に成功した¹⁾. CTA では, 一つのシャワーをより多くの望遠鏡でステレオ観測することにより(いろいろな位置からチェレンコフ光のイメージすなわち角度分布を観測することにより) ガンマ線と宇宙線シャワーの分離度を向上し, またエネルギー・角度分解能を上げることができる.

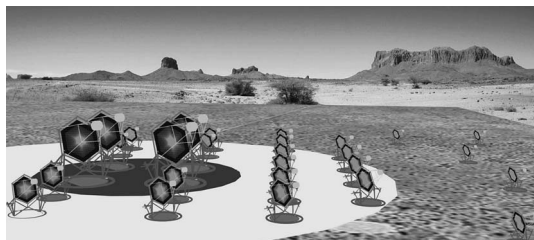


図 12 CTA の想像図. 大口径 (~23 m), 中口径 (~12 m), 小口径 (~6 m) のチェレンコフ望遠鏡群からなるアレイ. 20 GeV から 100 TeV のエネルギー領域で宇宙からの高エネルギーガンマ線を高精度で測定する.

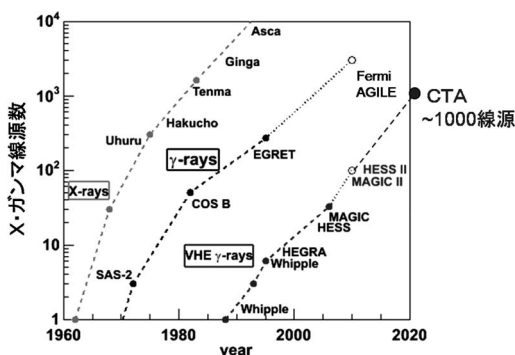


図 13 X線源, ガンマ線源, 超高エネルギーガンマ線源の数を時間の関数として示したもの. 2010年現在, およそ 100 の超高エネルギーガンマ線源が観測されている. 源の数が指数関数的に増えていることがわかる. CTA では, 1,000 を超える超高エネルギーガンマ線源が観測されると期待される.

また, 3種類の大, 中, 小口径望遠鏡を中央から順に外に向かって設置することにより, 20 GeV から 100 TeV という4桁にわたる広いエネルギーバンドでの観測が可能となる. さらに Fermi 衛星¹⁴⁾のデータと合わせれば, シームレスな6桁を超えるガンマ線エネルギースペクトルを得ることができる.

20 GeV から 200 GeV 領域では, 遠方の活動銀河核, ガンマ線バースト, 赤外・可視背景放射, そしてパルサーの研究が重要なテーマとなる. 200 GeV-10 TeV 領域では, 銀河面, 近傍銀河のディープサーベイ, 10 TeV を超えるエネルギー

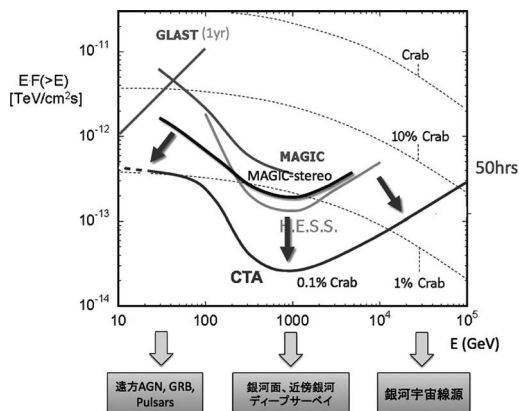


図 14 CTA の目標感度曲線と, MAGIC, MAGIC-Stereo, H.E.S.S. の達成感度曲線.

領域では銀河宇宙線の起源, 伝播が, それぞれ重要な研究テーマとなる. CTA はその観測エネルギーバンドを拡げることにより, 銀河内宇宙線源から遠方の活動銀河核, ガンマ線バーストまで, 多種多様な天体, 物理現象の研究を可能とする.

CTA では, 1,000 を超える既知タイプのガンマ線天体が発見されると予測される. また, 新しいタイプの天体もその感度の向上に伴い発見されるであろう. 特にエネルギー閾値を 20-30 GeV まで下げることにより, 宇宙論的な距離にある多くの天体が観測可能になるとともに, ガンマ線バーストの観測が可能となる.

日本グループは, アレイの中心に配置される大口径チェレンコフ望遠鏡への貢献を目指して準備研究を進めている. 大口径望遠鏡は 20 GeV から 1,000 GeV の低エネルギー領域をカバーする. 鏡の総面積は, 十分なチェレンコフ光量を得るために, 400 m² 以上が必要である. また, それぞれの光学エレメントに, 高反射率, 高集光効率, 高量子効率が要求される. 日本グループは, この大口径望遠鏡に搭載する光センサー (光電子増倍管), 超高速読み出し回路, 分割鏡の開発・試作を進めている.

大口径望遠鏡では, ガンマ線バースト等の種々のトランジェントな現象をとらえるために, 高速

回転により瞬時に源を視野内にとらえることが要求される。現在、ベースラインデザインとして、マックスプランク物理学研究所（ミュンヘン）のグループが、MAGIC 望遠鏡の経験をもとに 23 m 口径の大口径望遠鏡を提案しており、その詳細デザインが進められている。構造はカーボンファイバー・チューブによるスペースフレーム構造であり、軽量でかつ剛性を高めるデザインとなっている。ガンマ線バーストの追観測を可能にするため総重量をおよそ 50 トンと軽量化し、20 秒で 180 度回転が可能である。

CTA は、ヨーロッパの物理天文分野の将来プロジェクト計画の中で非常に高い評価を得ている。EU の ESFRI (European Strategy Forum for Research Infrastructure)³⁰⁾、ASPERA (Astroparticle Physics Network)³¹⁾、ASTRONET (Astronomy and Astrophysics Network)³²⁾ の三つの組織から出されているロードマップにおいて、重要な研究計

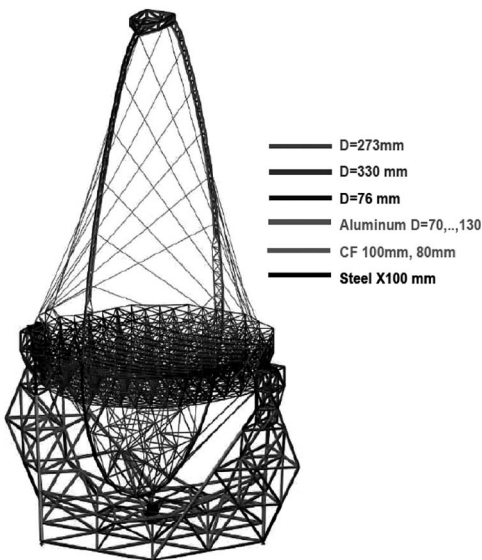


図 15 マックスプランク物理学研究所（ミュンヘン）と MERO TSK との設計による 23 m 大口径望遠鏡。カーボンファイバー・チューブによるスペースフレーム構造。総重量 50 トン。

画として高いプライオリティーで推薦されている。最近発表された米国での Astronomy and Astrophysics に関する Decadal Survey の報告³³⁾においても、重要な地上大型計画として、CTA が、LSST (Large Synoptic Survey Telescope), GMST (Giant Segmented Mirror Telescope) とともに強い推薦を受けている。

CTA は、過去 3 年間の Design Study のフェーズを経て、2010 年 10 月より Preparatory Phase に入っている。この Preparatory Phase の目的は、装置の要求、仕様を明確化し、すぐにでも建設が開始できるレベルまでプロジェクトを準備することである。それぞれのエレメントのプロトタイプ、さらに望遠鏡本体のフルプロトタイプのステップが必要不可欠なステップである。このプロトタイプでの日本の積極的な参加が、後々の建設での役割分担、将来の CTA 運用時の時間配分に大きく影響を与えると考えられる。

国内組織としては、宇宙理論、X 線、ガンマ線、宇宙線などの分野から 60 名近い研究者が集まり全く新たな組織 CTA-Japan コンソーシアムを結成し、昨年度より CTA の正式グループとして活動を開始している。メンバーも 30 代の若手が多く、非常に頼もしい限りである。

高エネルギー宇宙ガンマ線の研究はすさまじいスピードで進んでいる。これは学問の自然な発展といえるが、いまや全世界的な流れで高エネルギー宇宙ガンマ線の実験規模、装置性能をさらに次のステップへと（CTA へと）高めようとしている。その性能とサイエンスポテンシャルにおいて CTA を超える計画は次の 10-20 年間出てくることはないと思われ。Victor Hess から始まる長い宇宙線研究の歴史の中で、日本の宇宙線研究はかなめかなめで重要でかつ目に見える貢献を行ってきたが、その長い歴史の中で重要な 1 ページを作るであろう CTA 計画に、日本グループが主要なメンバーとして参加、貢献することを是非支援していただきたいと思う。

参考文献

- 1) Weekes T., et al., 1089, ApJ 342, 379
- 2) HESS: <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>
- 3) MAGIC: <http://magic.mppmu.mpg.de/>
- 4) VERITAS: <http://veritas.sao.arizona.edu/>
- 5) CANGAROO: <http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 6) <http://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/> and <http://tevcat.uchicago.edu/>
- 7) MAGIC Collaboration, 2008, Science 320, 1752
- 8) MAGIC Collaboration, 2011, ApJ Lett. 730, L8
- 9) MAGIC Collaboration, 2007, A&A 474, 937
- 10) HESS Collaboration, 2007, Nature 432, 75
- 11) MAGIC Collaboration, 2007, ApJ Lett. 664, L87
- 12) Abdo A., et al., 2009, ApJ Lett. 706, L1
- 13) Abdo A., et al., 2010, Science 327, 1103
- 14) Funk S., private communication
- 15) HESS Collaboration, 2005, Science 307, 1938
- 16) Suzaku: <http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/index.html.ja>
- 17) MAGIC Collaboration, 2008, Science, 322, 1221
- 18) HESS Collaboration, 2006, Science 314, 1424.
- 19) HESS Collaboration, 2009, ApJ 695, L40
- 20) HESS Collaboration, 2009, Science 326, 1080
- 21) VERITAS Collaboration, 2009, Nature 472, 770
- 22) Panequeb D., private communication
- 23) MAGIC Collaboration, 2007, ApJ 669, 862
- 24) HESS Collaboration, 2007, ApJ 664, L71
- 25) VERITAS, VLBA, HESS, MAGIC Collaborations, 2009, Science 325, 444
- 26) Primack J. R., et al., 2005, in High Energy Gamma Ray Astronomy, Vol. 745, AIP Conference Series, p. 23
- 27) Design Concept for CTA: arXiv:1008.3703
- 28) <http://cta.scpphys.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- 29) Hillas M., 1985, Proc. 19th ICRC (La Jolla), 3, 445
- 30) ESFRI Roadmap: http://ec.europa.eu/research/infrastructures/index_en.cfm?pg=esfri-roadmap§ion=update-2008
- 31) ASPERA Roadmap: http://www.aspera-eu.org/images/stories/roadmap/aspera_roadmap.pdf
- 32) ASTRONET Roadmap: <http://www.astronet-eu.org/IMG/pdf/Astronet-Book.pdf>
- 33) US Decadal Survey: http://sites.nationalacademies.org/BPA/BPA_049810

Status of Very High Energy Gamma Ray Astronomy and Future Prospects

Masahiro TESHIMA

Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, Kashiwa-noha 5-1-5, Kashiwa-shi, Chiba 277-8582, Japan

Abstract: Very High Energy (VHE) Gamma Ray Astronomy has made a great progress during the past few years and has been recognized as a new field of astronomy and astrophysics. To make further significant progress in this field, the new ground-based VHE gamma ray observatory CTA is in its design study phase within a framework of an international collaboration with members from Japan, US and EU. CTA will offer us a 10 times better sensitivity than currently existing telescopes with a wider energy coverage, and will show us many interesting features of the extreme Universe through the observation of VHE gamma rays, which are the highest energy photons in the Universe.