

次世代ガンマ線観測装置のための高速波形記録集積回路

河島 孝則 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙に存在する高エネルギー粒子である宇宙線は、最高でおよそ 10^{20} eV のエネルギーのものが見つまっているが、その加速機構については未解明な部分が多い。ガンマ線の観測による高エネルギーの宇宙現象の研究は、そうした謎に迫る手段として期待されている。これまでも地上ガンマ線望遠鏡によるガンマ線の観測が行われてきたが、高エネルギーの宇宙現象についてより深い理解を得るためには、観測装置の更なる発展が必要となってきた。Cherenkov Telescope Array (CTA) は超高エネルギーのガンマ線観測を目的とした次世代地上ガンマ線望遠鏡であり、現行の地上ガンマ線望遠鏡に対して 10 倍の感度を持ち、観測可能エネルギー帯域を 20 GeV から 100 TeV まで広げた観測が可能となる。CTA では 100 台近い非常に多くの望遠鏡を用いるため、望遠鏡 1 台あたりの建設費用低減が必須であり、望遠鏡の焦点面に設置するカメラモジュールの小型化は、その費用低減に大きな役割を果たす。そこで、副鏡を持つ望遠鏡である Schwarzschild-Couder Telescope (SCT) の専用波形記録集積回路として、TeV Array Readout with GSa/s sampling and Event Trigger (TARGET) を我々は開発している。現在は TARGET5 を開発しており、集積回路に要求される性能、機能の多くの点を満たしている。今回はその TARGET5 の詳細を紹介し今後の開発予定を展望する。

1 ガンマ線観測による宇宙線研究

宇宙線は宇宙に存在する高エネルギー粒子で、最高でおよそ 10^{20} eV のエネルギーまで観測されている。しかし宇宙線を加速している天体やその加速機構、伝搬については未解明な部分が多い。宇宙線は荷電粒子であるため、主に銀河系内の乱流磁場の影響を受け、宇宙線の到来方向を観測するだけではその起源を決定することはできない。宇宙線と星間ガスの相互作用で放出されるガンマ線は磁場に影響を受けず直進できるため、粒子加速が起こっている天体やその加速機構、宇宙線の伝搬の研究などに有効な手段と考えられる。

2 超高エネルギーガンマ線観測

高エネルギー天体から放射される数十 GeV から TeV 領域の超高エネルギーガンマ線 (VHE ガンマ線) の到来頻度は小さく、人工衛星や気球では検出器の大きさが制限されるため、その観測は困難である。そこで提案されたのが、VHE ガンマ線が地球大気に入射した際に生ずる電磁シャワーから発生する

チェレンコフ光を地上から観測する Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT) である。現在では H.E.S.S. や MAGIC、VERITAS といった IACT の登場により 100 を超える VHE ガンマ線天体を発見するなど、この分野は大きく進歩した。しかし高エネルギーの宇宙現象をより深く理解するには更に感度が高く、広いエネルギー帯域での観測が求められている。

図 1 に示すように VHE ガンマ線は大気に入射すると電磁シャワーを生じ、 1° ほどの広がりを持つチェレンコフ光を発生させる。波長 300 nm 以下のチェレンコフ光は大気中で吸収されるため、300 nm から 600 nm の波長をいかに検出するかが重要となる。この光を、光電子増倍管をアレイ状に設置した焦点面カメラに望遠鏡の光学系で集光し、光電子増倍管によって電気信号へと変換する。こうして得られるチェレンコフ光のイメージは細長い形をしており、図 2 に示すように複数の望遠鏡でステレオ観測することで、その軸の交点からガンマ線の到来方向を決定できる。

宇宙線陽子によるハドロンシャワーもチェレンコフ光を生成するため、イメージングされたチェレンコフ光の広がりなどから電磁シャワーと区別する。

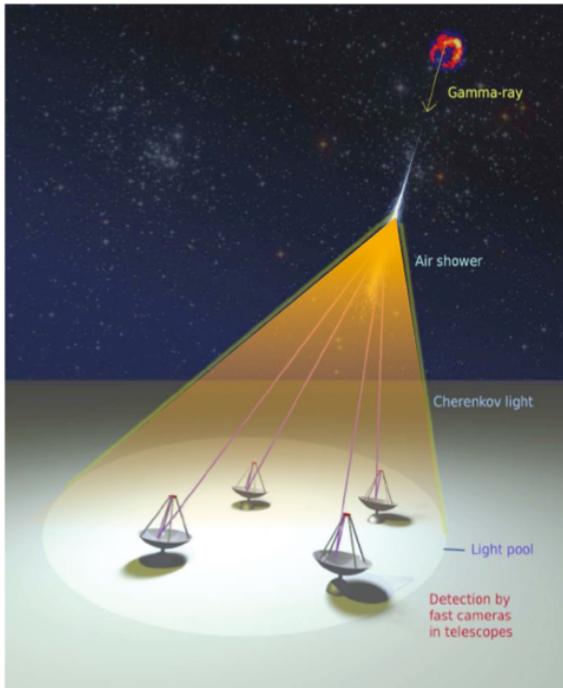


図 1: 高エネルギーガンマ線が電磁シャワーを起こし、チェレンコフ光を放出する (H. J. Völk and K. Bernlöhr, 2009)。

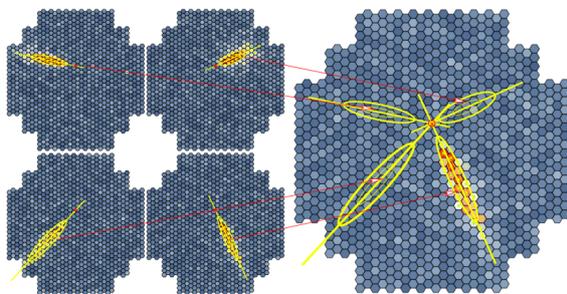


図 2: 複数の望遠鏡でシャワーをステレオ観測し、到来方向を決定する (H. J. Völk and K. Bernlöhr, 2009)。

3 CTA

3.1 CTA の概要

Cherenkov Telescope Array (CTA) は VHE ガンマ線観測を目的とした次世代の IACT である。CTA は今までの IACT よりも高感度で、広いエネルギー帯域でのガンマ線観測の実現を目的としている。感度の向上は、大量の望遠鏡の設置により有効面積を

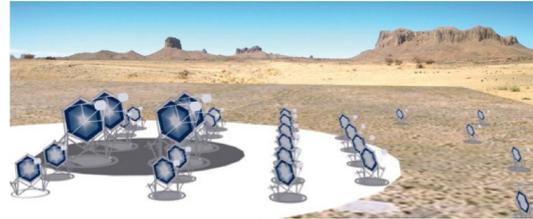


図 3: CTA のイメージ図。中央から LST、MST、SST の順で配置する (M. Actis et al. 2011)。

大きくしガンマ線検出数を増やすことと、一つのシャワーが作るチェレンコフ光をより多くの望遠鏡で観測し角度分解能を上げることで可能となる。これらにより現在稼働している IACT よりもガンマ線天体の検出感度が 10 倍ほど向上する。

CTA では図 3 に示す通り、低エネルギー帯域に感度を持つ大口径 (23 m)、中間エネルギー帯域に感度を持つ中口径 (12 m)、高エネルギー帯域に感度を持つ小口径 (~4 m) から成る 3 種類のチェレンコフ望遠鏡を配置することによって、20 GeV から 100 TeV 以上の広い観測エネルギー帯域を達成する。100 GeV 以下のエネルギー領域では Fermi 衛星のデータを利用することで、近傍の明るいガンマ線天体について 6 桁以上の連続したガンマ線エネルギースペクトルを得ることができる。

CTA のこうした観測は 1000 以上の TeV ガンマ線天体の検出や、高エネルギー天体の極限状況における物理、宇宙における星や銀河形成の進化、暗黒物質の探査、基礎物理の検証といった多くの面で成果を挙げると期待されている。

3.2 Schwarzschild-Couder 光学系

CTA の中で MST と SST は 30 台以上の設置を予定しており、望遠鏡一台あたりの費用低減が必要不可欠である。特に焦点面に設置するカメラの小型化は費用の低減に大きな役割を果たす。カメラ直径の小型化は望遠鏡の焦点距離を縮めることで可能になるため、MST と SST で副鏡を有する Schwarzschild-Couder 光学系 (SC 光学系) の採用を検討している。

また SC 光学系では副鏡を用いることで高い結像

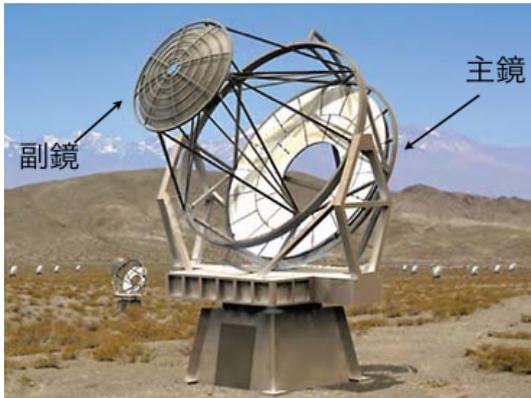


図 4: SC-MST の完成予想図

性能を得たまま視野を広げることが可能になり、例として SCT では視野 8° の範囲で 4 分角以下の結像性能を得る。視野の拡大は天体が密集する銀河面や全天でのサーベイ観測に有効である。また視野の拡大によって望遠鏡から離れた場所のガンマ線イベントのチェレンコフ光を視野に入れることができようになり、望遠鏡の間隔を大きくしてより広大な有効面積を得ることができるという利点もある。

3.3 SC-MST

SC 光学系を採用した MST である SC-MST は 100 GeV から 10 TeV のエネルギー領域の観測を目的としている。図 4 はその完成イメージである。10m の口径を持った望遠鏡で、36 台設置する予定となっている。

3.4 SC-SST

SC 光学系を採用した SST である SC-SST は最も高いエネルギー帯域である 1 TeV から 100 TeV の観測を目的としており、口径 4m の望遠鏡の開発が進められている。SST は銀河面を広く観測することを目的としており、南半球にのみ 32 台設置する予定である。

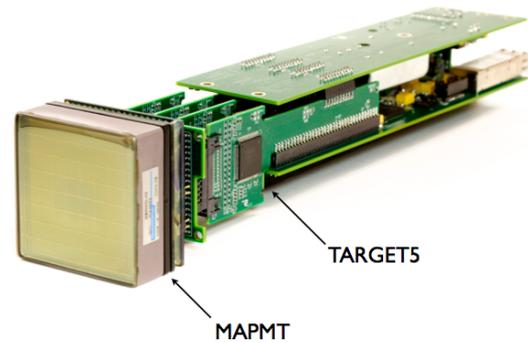


図 5: 光検出器としてマルチアノード型光電子増倍管 (MAPMT) と波形記録集積回路である TARGET5 を用いて試作したカメラモジュール

4 焦点面カメラ

4.1 焦点面カメラの構成

焦点面カメラは図 5 に示す通り光検出器と信号処理回路からなるカメラモジュールから構成されている。SC-MST では 221 個、SC-SST では 32 個のカメラモジュールを使用し、それぞれ約 8° と 8.6° の視野を確保する。光検出器で光電変換した信号を波形記録集積回路で記録し、デジタル値に変換して読み出す。

光検出器は、約 6 mm 角の画素をモジュールあたり 8×8 に配列している。各画素の大きさは、SC-MST では約 0.06° 、SC-SST では 0.18° に対応する。

4.2 光検出器

焦点面カメラに用いる光検出器として 64 チャンネルのマルチアノード型光電子増倍管 (MAPMT) を採用することでカメラ全体の小型化、軽量化、費用低減を達成する。また、光検出効率を向上させるため半導体光検出器を用いたカメラも開発中である。

4.3 波形記録集積回路への要求

SCT の焦点面カメラで光電変換した信号を読み出す専用の集積回路として、我々は現在 TeV Array

Readout with GSa/s sampling and Event Trigger (TARGET)を開発している (Bechtol et al.2011)。望遠鏡で受光したチェレンコフ光は数ナノ秒から数十ナノ秒しか広がりを持たないため、1GHz程度のサンプリング¹速度 (1GSa/s) が要求される。またチャンネル一つあたりの製作費用を20ドル以下に抑えるために一つのチップで多くのチャンネルを波形記録する機能と、数kmの広さで配置された望遠鏡同士でトリガーの同期を取るための8 μ s以上のバッファの深さが必要である。その他にも要求としてイベントあたり100 μ s以下の読み出し時間や、1mV以下の雑音と1V以上のダイナミックレンジ等の性能も挙げられる。

初期型の試作回路であるTARGET1を始めとして製作と試験、改良を何度か繰り返しており、最新のものとしてTARGET5を製作した。

4.4 TARGET 5

TARGET5は16の入力チャンネルを備えており、4個のTARGET5を用いることで、64チャンネルのMAPMTを読み出すことが可能となる。各々のチャンネルは16,384のキャパシタを持っており、入力された波形の電圧を記録する。これによって1GSa/sでは、およそ16 μ sの波形記録ができるため、その時間内でトリガーの同期が可能となる。TARGETでは内部と外部の両方からトリガーが可能で、トリガー信号が送られるとキャパシタに記録した電圧をデジタル化し、データを出力する。

TARGET5の基礎性能を測定した結果、0.2から1.4GSa/sでのサンプリングが可能であること、クロストークが1%以下であること、400MHzまでのバンド幅を持っていること、およそ1mVの雑音と1V以上の有効ダイナミックレンジがあることなど、多くの項目で要求を満たしていることを確認している。またTARGET5を用いたカメラモジュールも試作し、総合試験を実施中である。

¹光検出器の出力波形の電圧値を毎秒10⁹回の頻度で記録すること。

5 今後の開発

TARGET5の改良版としてTARGET7を開発する予定である。TARGET7ではトリガー回路を改良し、より小さい信号でもトリガーできるように増幅回路を最適化する。また、バッファの深さを若干減らし、その分の面積をデジタル化回路の改良に充てる。これによって入力電圧と出力デジタル値の間の直線性を改善し、ダイナミックレンジを2V以上に広げる予定である。

Reference

- H. J. Völk and K. Bernlöhr, “Imaging very high energy gamma-ray telescopes”, *Experimental Astronomy* 25 (2009) 173–191
- M. Actis et al., “Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy”, *Experimental Astronomy* 32 (2011) 193–316
- B. S. Acharya et al., “Introducing the CTA concept”, *Astroparticle Physics* 43 (2013) 3–18
- K. Bechtol et al., “TARGET: A multi-channel digitizer chip for very-high-energy gamma-ray telescopes”, *Astroparticle Physics* 36 (2012) 156–165
- 日高直哉 “大気チェレンコフ望遠鏡のための半導体光検出器PPDの性能評価” 名古屋大学修士論文 2013
- CTA-Japan コンソーシアム “Cherenkov Telescope Array 計画” 2010
- V. Vassiliev et al., “Wide field aplanatic two-mirror telescope for ground-based γ -ray astronomy”, *Astroparticle Physics* 28(2007) 10–12 Apr 2007