

CTA 計画における小口径望遠鏡搭載検出器の応答の較正手法

佐藤 雄太 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA) は、20 GeV から 300 TeV にわたるエネルギー範囲で超高エネルギーガンマ線を観測するための国際的な次世代望遠鏡計画である。CTA では大・中・小の異なる口径の大気チェレンコフ光望遠鏡を 100 台規模で設置し、広大な有効面積を確保することで、従来のガンマ線望遠鏡に比べて 1 桁高い検出感度の実現を目指す。さらに、TeV 以上のエネルギー領域における暗黒物質の間接探索では、CTA のみが検出可能性のある感度に達し、既存の加速器を初めとした直接観測実験の感度限界を凌駕する。我々は複数ある小口径望遠鏡の設計のうち、Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT) の焦点面検出器を開発している。GCT では、副鏡の採用による短焦点距離化により、焦点面上での画像を縮小することで、カメラの小型化と製造費用の低減を可能にした。これにより、数十台の望遠鏡を設置することが可能となり、広大な有効面積が確保できる。GCT の焦点面カメラには多ピクセルの半導体光検出器と小型の波形記録回路を用いることで、従来の光電子増倍管に比べて小型で多チャンネルの読み出し、高い光検出効率の達成が可能になる。検出器に用いる半導体光検出器は、出荷時には暗電流の電圧依存性などの基本特性しか測定されていない。そのため、全てのピクセル(約 7 万)についてゲイン特性と飽和特性を測定する必要がある。多数の検出器を効率的に較正するため、カメラモジュールに組み込み、電子回路の特性込みでこれらの較正を行う。CTA および GCT の紹介と、半導体光検出器の較正方法について報告する。

1 ガンマ線による宇宙線研究

1.1 ガンマ線観測による宇宙線研究の意義

宇宙線は、宇宙空間を飛び交っている高エネルギー粒子である。主成分は陽子であり、他の原子核や電子なども含まれている。1912 年に Hess が宇宙線を発見後、精力的に宇宙線の観測と研究は進められてきた。ところが、これらの粒子の加速現場と加速機構については、いまだ不明な点が多い。宇宙線の加速現場を明らかにする上での障壁は、宇宙線が銀河間空間や星間空間の磁場によって進行方向を曲げられてしまうことである。 10^{19} eV 以上の宇宙線に関しては、宇宙線陽子の場合、充分加速され磁場の影響はほとんど受けず到来方向を決定できるが、より低エネルギーの宇宙線や鉄原子核の場合は、磁場の影響を受けてしまう。

しかし、宇宙線と星間ガスの相互作用によって放出されるガンマ線を観測することで、加速天体中もしくはその近傍での宇宙線スペクトルに関する情報を得ることができる。ただし、宇宙線電子によるコ

ンプトン散乱や制動放射によってもガンマ線が放射されるため、ガンマ線の起源を区別する必要がある。そのため、核子起源と電子起源のガンマ線から期待されるスペクトルと観測結果の整合性を検証することで起源を特定する。特に、数 TeV を超えるような very-high-energy (VHE) ガンマ線は、ほとんどの場合は電子起源では強く抑制されるため、ガンマ線起源の識別に有効である。さらに、銀河中心に存在すると考えられている暗黒物質の対消滅ガンマ線の有意な検出などのように、統計量の不足や検出器感度の限界により、既存の観測機器では知り得なかった基礎物理を CTA の VHE ガンマ線観測によって明らかにすることが期待されている。

1.2 VHE ガンマ線の観測手法

高エネルギー天体が放出した VHE ガンマ線の到来頻度は小さいので、人工衛星や気球のような地上設置型ではない検出器では、十分な有効面積の確保が困難である。そこで提案されたのが、図 1 に示さ

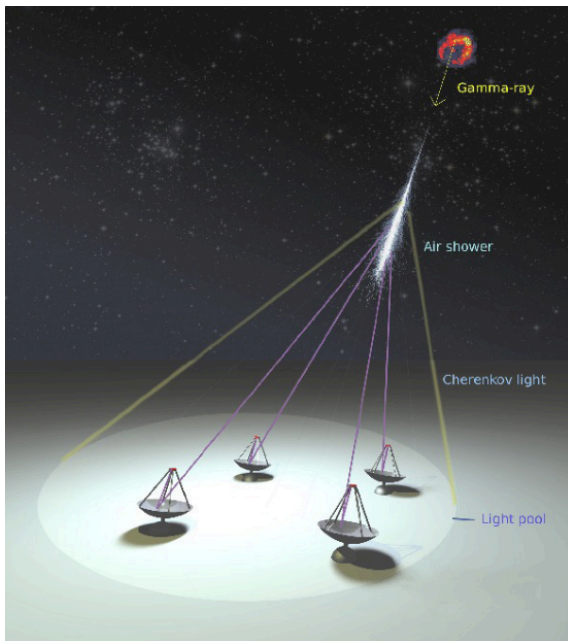


図 1: チェレンコフ光が、VHE ガンマ線の生成する電磁シャワーによって放出される様子の模式図。放出されたチェレンコフ光を地上望遠鏡によって観測する (H.J.Völk and K.Bernlöhr 2009)

れるような、VHE ガンマ線が地球大気に入射した際に生成する電磁シャワーから発生したチェレンコフ光を、地上から観測する手法である。

電磁シャワーは、ガンマ線や電子が大気中で電子・陽電子対生成や制動放射を繰り返すことで生成される。その際、電磁シャワー中の電子の速度が大気中の光速を超えるためチェレンコフ光を放射する。放出されたチェレンコフ光の波長は青色から紫外域を主とし、時間の広がりは数ナノ秒から数十ナノ秒である。

チェレンコフ望遠鏡の場合、昼間に励起された大気分子の蛍光による夜光がピクセルあたり数十 MHz の頻度になるため、それらを時間情報で排除できるよう高速の光検出器を配列することで、図 2 のような電磁シャワーの画像を取得する。このような画像で得られる電磁シャワーの向きからガンマ線の到来方向が予測できるが、図 2 のように複数の望遠鏡で同じシャワーを観測することで、ガンマ線の発生方向を決定できる。また、電磁シャワーから放射されるチェレンコフ光の総量から入射ガンマ線のエネル

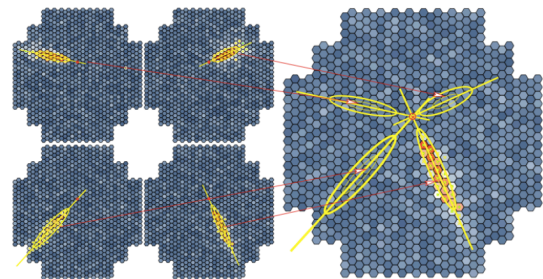


図 2: 1 つの電磁シャワーが生成するチェレンコフ光について、2 台以上の望遠鏡で観測を行うことで、それぞれの望遠鏡で得られた画像を解析し求められた電磁シャワーの軸の交点から到来方向を導出する。(H.J.Völk and K.Bernlöhr 2009)

ギーを推定する。

これまで、H.E.S.S. や VERITAS、MAGIC といった、解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope、IACT) の観測により 100 を超える VHE ガンマ線天体が発見され、この分野は大きく進歩した。現状の IACT による観測では、その検出感度の限界により、TeV 領域の宇宙線加速を行う超新星爆発は 10 個程度の発見にとどまっている。さらに、 5×10^{15} eV 近辺で、超新星残骸由来の陽子が加速限界を迎えているかどうか、該当するガンマ線のエネルギー帯域 ($\sim 10^{14}$ eV) での統計量が足りず、結論が出ていない。

2 CTA 計画について

Cherenkov Telescope Array (CTA) は VHE ガンマ線観測を目的とした国際共同開発中の次世代 IACT である。CTA は、20 GeV から 300 TeV 以上の広いエネルギー帯域で、今までの IACT よりも 10 倍以上の感度を実現することを目的としている (Actis et al. 2011、 Acharya et al. 2013)。感度の向上は、多数の望遠鏡の設置により有効面積を大きくしガンマ線検出数を増やすことと、同じ電磁シャワーをより多くの望遠鏡で観測することで角度分解能を上げ、点源におけるバックグラウンドとの相対的な SN 比を向上させることで可能となる。CTA のガンマ線観測によって、1000 以上の TeV ガンマ線源天体の検出が期待されている。

CTA では、低エネルギー帯域に感度を持つ大口径 (鏡直径 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) の 3 種類のチェレンコフ望遠鏡を配置することによって、図 3 に示すような感度を広いエネルギー帯域で達成する。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、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。

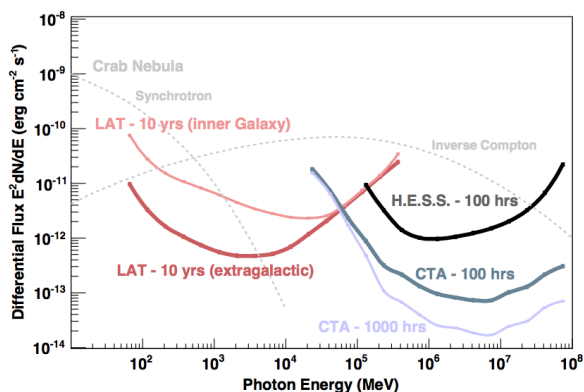


図 3: CTA、H.E.S.S. 望遠鏡 (IACT)、Fermi/LAT 検出器 (人工衛星) のガンマ線検出感度の比較 (S.Funk and J.A.Hinton (2012))

3 Gamma-ray Cherenkov Telescope

Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT) は、1 TeV から 300 TeV のエネルギー帯域を観測する小口径望遠鏡である。従来の Davies-Cotton 光学系を基本とした設計では、8 度以上の視野を確保するためには焦点距離の確保が、収差による像の歪みを抑えるために必要であるため、長焦点となり比較的大きなカメラが必要となる。しかし、GCT が採用する Schwarzschild-Couder 光学系 (SC 光学系) では、副鏡を用い焦点距離を短くできるためカメラの小型化が可能となる。カメラの小型化によって望遠鏡 1 台あたりの製造費用を低減でき、より多数の望遠鏡の設置と有効面積の大幅な拡大が実現できるようになった。

数 TeV 以上のガンマ線は、宇宙赤外線背景放射との相互作用による伝搬中の吸収が激しいため、その観測対象のほとんどは銀河系内のガンマ線源天体となる。そのため、GCT は、銀河面をより広く観測できる南半球に設置する予定である。

4 焦点面カメラ

GCT の焦点面カメラは、図 4 に示すような 64 画素を有するカメラモジュール 32 台から構成され、合計で 2048 画素を持つ。それぞれのモジュールは、望遠鏡で集光したチェレンコフ光を電荷に変換する光検出器、光検出器からの信号波形を連続した電圧値として記録する波形記録回路、光検出器からの信号の大きさからガンマ線事象を選別するトリガー回路、加えて、波形記録回路やトリガー回路を制御する Field-Programmable Gate Array などから成る。モジュール化することで、組み立て時の取り扱い、故障時の取り替えを容易にする。

空気シャワーからのチェレンコフ光を観測するにあたり、画素あたり数十 MHz の夜光が最大のバックグラウンドとなる。最短で数ナノ秒となるチェレンコフ光の信号から夜光バックグラウンドを効率的に除去するため、GHz 程度で波形を記録する必要があり、アナログメモリ方式の波形記録回路を採用している。

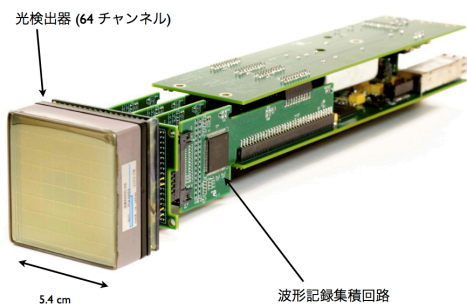


図 4: 焦点面カメラに用いるモジュールの試作機。光検出器部分と信号読み出し部分で構成されている (河島孝則 2015)。

ル読み出しのカメラモジュールによるカメラ製造コストの低減に加え、低いバイアス電圧、耐久性と信頼性の向上、高い光検出効率などが半導体検出器で実現される。

この半導体光検出器は、出荷時での暗電流の電圧依存性などの基本特性しか測定されていない。半導体光電子増倍素子のゲイン特性や飽和特性を温度などの稼働環境依存も含め較正する必要があるが、組み立てに必要な期間と較正の簡易化を考慮してカメラモジュールに組み込み後に較正する方針である。

ゲインと飽和特性を測定する際は、入射光子数とモジュールで記録される波形出力の関係を測定する必要がある。しかし、入射光子数を正確に見積もることは困難であるため、出力値のばらつきが入射光電子数の統計的揺らぎに起因すると仮定して、入射光子数を導出する。その際、半導体特有の、単一光電子が複数光電子として認識される現象 (クロストーク) の影響も考慮する必要がある。クロストークは、出力値のばらつきから入射光電子数を推定する際の障害となる。

シミュレーションでクロストークの影響を見積もり、補正方法を確立する方針である。

謝辞

宇宙線研究者会議及び、基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04)、国立天文台からのご支援に感謝いたします。

また、CTA 共同研究者の皆様様に深謝申し上げます。

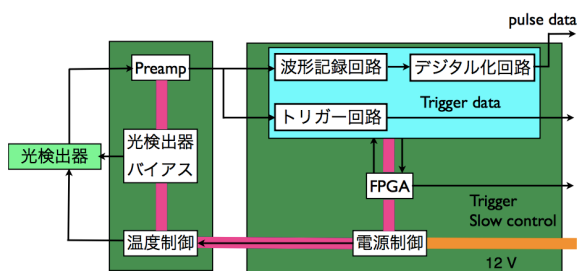


図 5: カメラモジュールの模式図。緑は基板、青は波形集積回路を示している (河島孝則 2015)。

Reference

H.J.Völk and K.Berndlöhr (2009) Experimental Astronomy 25 173-191

S.Funk and J.A.Hinton (2012) Astroparticle Physics 43 348-355

河島孝則 (2015) 名古屋大学修士論文

日高直哉 (2013) 名古屋大学修士論文

B.S.Acharya, et al. (2013) Astroparticle Physics 43 3-18

M.Actis, et al. (2011) Experimental Astromomy 32 193-316

5 光検出器の較正手法

GCT では、図 4、図 5 に示したモジュール試作機にをさらに改良し、マルチアノード PMT に代わって半導体検出器の採用を計画している。多チャネ