

CTA 大型望遠鏡カメラの設計

掃部 寛隆 (甲南大学大学院 自然科学研究科 宇宙粒子研究室)

Abstract

活動銀河中心核や超新星残骸をはじめ、宇宙における高エネルギー現象はガンマ線の放射を伴う。このガンマ線を高精度で測定することは、宇宙の高エネルギー現象の解明だけでなく、ガンマ線が伝搬する宇宙空間の測定につながる。宇宙から飛来するガンマ線は地球大気と相互作用を起こし空気シャワーを生成する。空気シャワー中の荷電粒子はチェレンコフ光と呼ばれる紫外線を前方に放射する。このチェレンコフ光を集光しガンマ線を観測する装置が大気チェレンコフ望遠鏡である。CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は大、中、小口径 3 種類の大気チェレンコフ望遠鏡を南北両半球に合計約 100 台設置し、ガンマ線の高精度観測を行う国際共同実験である。この計画で合計 8 台建設する大口径望遠鏡は直径 23m のパラボラ鏡を搭載し、観測可能なガンマ線のエネルギーを 20GeV まで下げることを目指している。このエネルギー領域はこれまで人工衛星でしか測定できなかったが、これを地上に展開した望遠鏡アレイで観測することにより、巨大な検出面積を実現する。この大口径望遠鏡の焦点面に搭載するカメラにはガンマ線を低エネルギーまで観測するために高い性能が要求される。そのため検出器は浜松ホトニクスと共同で開発した 40 口径光電子増倍管 (PMT) R11920-100 を採用している。この PMT はチェレンコフ光に対して高感度になるように設計され、紫外線に対する量子効率が 40 % をこえている。この PMT を 1855 本並べて全体で 2.3m 口径の焦点面検出器にしている。ピクセルサイズは 0.1 度で、全体で 4.5 度の視野になる。各 PMT からの信号は後段の高速回路により処理される。信号処理の時間分解能は 3ns である。空間的かつ時間的に固まった信号が検出されると、その情報が周辺の望遠鏡に送られる。同時に複数の望遠鏡で信号が検出されたとき、ガンマ線が検出されたと判断しデータを収集する。このとき信号は 1GHz の高速サンプリングでデジタル変換される。本講演では CTA 大口径望遠鏡カメラ設計について報告する。

1 Introduction

[1]

近年の高エネルギー宇宙観測により、激しく活動する高エネルギー天体現象の解明が進んでいる。特に 2008 年に打ち上げられたフェルミ天文衛星は 0.1 ~ 30GeV 領域のガンマ線を高精度観測している。この観測により 1800 を超えるガンマ線源が発見され、高エネルギー宇宙物理が大きく発展した。一方、数 10GeV から数 10TeV 領域のガンマ線観測は、地上に設置したチェレンコフ望遠鏡により行われている。このエネルギー領域は複数の大口径望遠鏡を組み合わせた観測により急速に発展しており、約 100 個の多種多様な高エネルギー天体が発見されている。このエネルギー領域の感度を 1 桁以上向上し高精度観測を行うため、CTA 計画が国際協力のもとに進められている (図 1)。特にそのカメラには高い性能が要求されている。このカメラの設計について報告する。

2 CTA 計画概要

CTA 計画は南北両半球に複数の口径のチェレンコフ望遠鏡を建設し、全天で高エネルギーガンマ線を観測する計画である。望遠鏡の仕様を図 2 に示す。この中で、大型望遠鏡は 23 m 口径のパラボラ鏡を備え、観測所の中央に 4 台を 100 m 四方の正方形に配置する予定である。この大口径望遠鏡を中心として、南半球は中小口径の望遠鏡 95 台を 3km×3 km の範囲に、北半球は中口径望遠鏡 15 台を 1 km×1 km の範囲に建設する。このチェレンコフ望遠鏡アレイにより 20GeV から数 10TeV までの広いエネルギー領域のガンマ線を巨大な検出面積で観測する。このエネルギー領域はフェルミ天文衛星の観測領域とも重

なり、衛星から超高エネルギー領域までエネルギー領域を包括的に観測することになる。

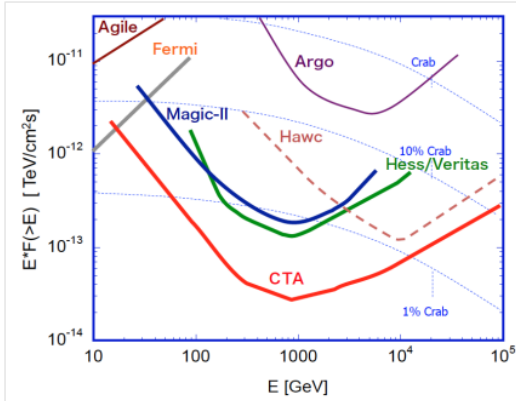


図 1: CTA の目標感度曲線。MAGIC や HESS 計画など現在可動しているチェレンコフ望遠鏡の感度とくらべ一桁上昇を目標としている

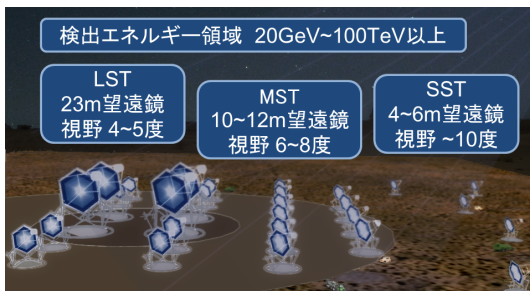


図 2: 大中小 3 種類の大気チェレンコフ望遠鏡の概略

3 大口径望遠鏡カメラ

大口径望遠鏡は 20GeV から 1000GeV までの低エネルギー領域に感度がある。またガンマ線バーストなど突発現象に対応するため、全天 20 秒以内に巡回できる設計になっている。また 23m 口径の望遠鏡は天文ドームに格納することができず、風雨にさらされた状態に置かれる。このため 180 km/h の暴風に耐え、50 km/h の風の中でも観測できるように設計されている。したがって全ての部品に軽量化と十分な強度が必要で、さらに 30 年以上安定して稼働できる耐久性も要求される。また大口径望遠鏡は、低エネルギーガンマ線により生じた空気シャワーが上空

で発する微弱なチェレンコフ光を検出するため、400 m² 以上の反射鏡、高い光検出効率、高精度な光学系、高速データ処理回路、安定したカメラ動作環境と正確なモニタリング、夜光の軽減や電気的なノイズからのシールドングなどが必要である。これらの要求仕様を満たすように大口径望遠鏡カメラの設計・開発を行っている。[2]

この大口径望遠鏡のカメラは以下に示す階層構成になっている。

- 光検出器として量子効率の高い光電子増倍管 R11920-100-20 を浜松ホトニクス社と共同開発した。光電子増倍管(以下 PMT)には集光鏡と高電圧電源、前置増幅器が取り付けられ、1 画素を構成している。
- 光検出器 7 本を束ね PMT モジュールとしている。各光検出器は 3 厚のアルミ板の上に固定されており、さらにスローコントロールボードに接続されている。
- PMT モジュールはフロントエンド読み出し回路 Dragon ボード(以下 DB)に接続されている。さらに DB はバックプレーンボード(以下 BP)に接続されている。この 7 本の光検出器とデータ処理回路を合わせてクラスターと呼んでいる。クラスターがトリガーを始めデータ収集系の基本的な構成要素になっている。
- 265 個のクラスター、すなわち 1855 本の光検出器により焦点面検出器が構成されている。各クラスターはクラスターホルダーに装着される。クラスターホルダーは冷却装置を兼ねている。
- 焦点面検出器は密閉式のカメラボックスに格納される。カメラボックスの窓は紫外線透過アクリルが装着され、窓の前にシャッターが設置されている。カメラボックス内には電源やイーサネットスイッチ等も格納される。

3.1 光検出器

鏡により反射され焦点面に集光されたチェレンコフ光は、焦点面に置かれた集光鏡により PMT の

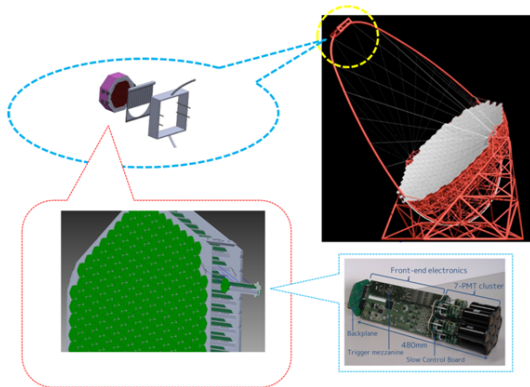


図 3: 大口径望遠鏡の階層図

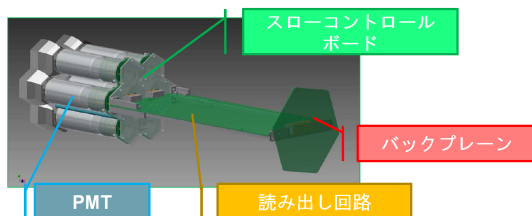


図 4: PMT クラスターの概略図

管面へ導かれる。図 5 にこの集光鏡のプロトタイプの写真を示す。集光鏡は対辺 50 mm の六角形になっており、焦点面に隙間なく並べられている。光電子増倍管 R11920-100-20 はチェレンコフ望遠鏡用に開発されており、高い量子効率が特徴である。量子効率は波長 400nm の光に対して、最大 45 % を達成しており、微弱なチェレンコフ光を効率よく検出できるようになっている。それぞれの PMT には小型の高電圧回路が取り付けられており、各画素毎に増幅率を調節できる。さらに超低電力低ノイズ前置増幅器が取り付けられている。

3.2 PMT モジュール

光検出器 7 本を 3 mm 厚のアルミ板に固定し PMT モジュールにしている。PMT モジュールの制作精度は光学系の精度に直接影響するため、0.5 mm 以下の精度で組み立てられるように設計されている。光検出器とアルミ板の間には、各光検出器を制御するスローコントロールボード（以下 SCB）が挿入されている。このボードは光検出器と後段の読み出し回



図 5: 各光検出器に取り付けられる集光鏡のプロトタイプ。鏡から反射されて来た光を光電子増倍管の管面へ導く。

路のインターフェースになっており、これによりそれぞれのパーツの開発を独立して行うことができる。

3.3 クラスタ

PMT モジュールは読み出し回路 DB に接続される。DB はメインアンプ、高速サンプリング回路（DRS4 チップ）、アナログデジタル変換回路、トリガー回路、イーサネット回路、電圧制御回路、制御用 FPGA などからなる。これらをまとめてクラスタと呼んでいる。ここで処理された信号は、後段の BP により近くのクラスタへ送られ、さらに中央の制御サーバーに送られる。そこで処理されてトリガー信号が返された時、信号がデジタル化される。サンプリング速度は 1GHz である。

3.4 焦点面検出器

クラスタはクラスタホルダーに装着される。クラスタホルダーは 25mm 厚のアルミ板、レール、3mm 厚のアルミ板からなり、265 個のクラスタを装着した状態で 3G の加速度に耐える強度を持っている。クラスタホルダーはカメラの冷却システムを兼ねている。カメラ全体で消費される熱は 6kW におよび、そこで発生する熱を効率的にカメラ外に運び出すことは、安定した観測に欠かせない。その為、クラスタホルダーの中は常に空気を循環させ、その

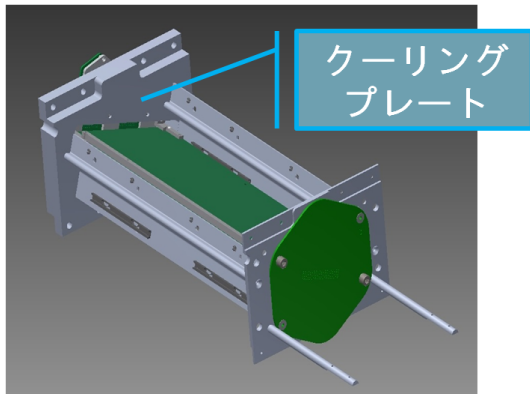


図 6: クラスターホルダに装着したクラスターの概略図。実際にはクラスターホルダは 265 個のクラスターを装着できる。

空気を水冷式の冷却器で冷やしている。また 25mm 厚のアルミ板の中も冷却水を循環させ、光検出器を含めて安定した温度で差動するように設計している。

3.5 カメラ

CTA は 100 台に及び望遠鏡を外気にさらした状態で同時に稼働させ、20 年以上にわたり観測を行う予定である。このため、それぞれの望遠鏡にかかる修理やメンテナンスの労力をできるだけ小さくしなければならない。このためカメラボックスは密閉式になっており、外気から完全に遮断されている。カメラボックスの窓には紫外透過アクリルが取り付けられ、さらにシャッターが装着されている。

3.6 設計

我々は主に PMT クラスターがカメラボックスに収まるように設計を行った。カメラボックスの長さは決まっており、その長さの条件のもと、SCB と DB の間のコネクタ間隔の設計、許容誤差 (tolerance) に基づいて PMT クラスター、クラスターホルダの縦方向長さの設計を行った。また DB と SCB までのコネクタ間隔も開ける必要があり、その間隔 [図 7 での connector, 12.5mm] も考慮し調節を行った。

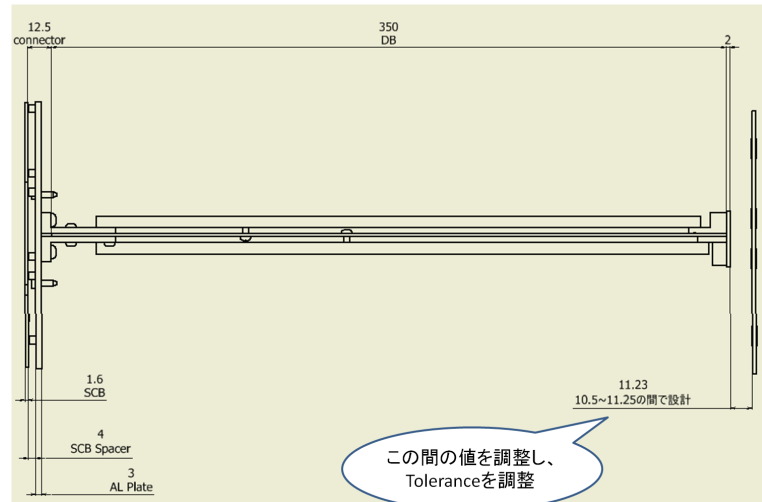


図 7: 縦方向への許容誤差の設計図。BP 手前で許容誤差を調節するように設計している。

3.7 今後の目的

大口径望遠鏡のカメラは現在設計がほぼ終わり、プロトタイプ制作・テストが進められている。現在、1つのクラスターによる、テストを行っており、8月には8個のクラスターによるテストを行う予定になっている。さらに32個程度のクラスターによるミニカメラを制作しテストを行った後、カメラ全体を組み上げる予定である。2015年にはカメラ全体を完成させキャリブレーションを行う。2016年前半に望遠鏡に装着、同年後半に観測を開始する計画になっている。

Reference

- [1] CTA Japan 「計画書」 CTA Japan 2010, 8 p1-4
- [2] 今野祐介著 「次世代ガンマ線天文台 CTA のためのアナログメモリ DRS 4 を用いた高速波形サンプリング回路の改良」 京都大学大学院修士論文 (未公開) 2012 3.2.2