

## CTA 計画に向けた大口径望遠鏡のトリガー開発・試験 および望遠鏡シミュレーション

増田 周 (京都大学大学院 理学研究科)、他 CTA-Japan Consortium

### Abstract

CTA(Cherenkov Telescope Array) 計画は、従来よりも桁良い感度で 20GeV から 100TeV を超える超高エネルギーガンマ線を全天観測するために大中小合わせておよそ 100 台の望遠鏡群を建設する計画である。CTA 計画は世界 27 カ国の研究者が参加しているプロジェクトで、その中で日本は主に大口径望遠鏡の開発に大きく貢献しており、我々は望遠鏡の焦点面光検出器である PMT(光電子増倍管) からの電気信号読み出しを決定するトリガー回路部分と信号読み出し回路部分を開発している。大口径望遠鏡(口径 23m) では数十 GeV から 1TeV 程度の低いエネルギーのガンマ線を感度良く観測し、GRB 等の突発的な現象や AGN、パルサー等の天体を低エネルギー領域で観測する。ガンマ線は大気で生成される空気シャワーからのチェレンコフ光を捉えることで間接的に観測される。その際にバックグラウンドである夜光と区別して、チェレンコフ光によるイベントを有効に取得するためのトリガー回路が必要とされる。我々は読み出し回路とトリガー回路を接続するためのバックプレーン回路を開発し、トリガー回路と組み合わせて動作するか検証した。この検証で、PMT 7 本一組のクラスタ 3 つをまたいだ通信が正常に行われることを確認した。さらにトリガー回路のパラメータを望遠鏡シミュレーションに組み込み、ガンマ線とバックグラウンドのトリガーレートとエネルギー閾値を確認することにより、回路の性能を検証した。このシミュレーションにより、単一望遠鏡でトリガー条件を 3 p.e. 以上の信号が 7 ピクセル以上隣り合う時とした場合、ガンマ線のエネルギー閾値が 50GeV 程度になることなどを確かめた。このことにより、望遠鏡の目標感度とエネルギー閾値を達成するための回路仕様を決めることが目標である。本講演ではトリガー回路の試験結果及びシミュレーション結果について発表する。

### 1 高エネルギーガンマ線天文学

現在ガンマ線天文学はまさに発展の時を迎えている。100MeV ~ 数 10GeV の領域では、Fermi 衛星が 1000 を超える天体を発見し、新発見が相次いでいる。そしてそれに続くように数 10GeV ~ 数 100TeV の領域でも次世代大気チェレンコフ望遠鏡群の建設計画である CTA 計画が進行している。CTA は、現在 100 個程度の天体しか検出されていないこの領域の天文学を劇的に推し進めるものと期待されている。

高エネルギーガンマ線観測の意義には、宇宙線起源の解明がある。現在に至るまでの宇宙線観測の結果、地球に降り注ぐ宇宙線のほとんどが陽子であることがわかっているが、起源の解明はされていない。なぜなら陽子は電荷を持っているため地球に到達するまでに星間磁場の影響を受けて曲がってしまい、起

源の方向の情報失ってしまうからである。

しかし加速源に関しては解明可能である。陽子の加速現場ではガンマ線が放出され、そのガンマ線は電荷を持っていないので地球まで直線的に届くので、これを地球で観測出来れば加速源の特定が可能になる。ただ地球に降り注ぐガンマ線の全てが陽子由来のガンマ線とは限らない。電子の加速現場でもガンマ線は放出されてしまう。地球に降り注ぐ宇宙線の起源解明にはもちろん陽子由来のガンマ線を観測する必要がある。陽子由来か電子由来かの判別は、ガンマ線のエネルギースペクトルを測定することによって出来る。図 1 のようにガンマ線の放出機構の違いによってスペクトルの形が明らかに異なるので、広いエネルギーレンジでガンマ線が観測でき、かつ高エネルギーでもサンプルを多く観測しプロットを増やすことが出来れば判別は可能なのである。以上の

ような観測条件を満たせば、高エネルギーガンマ線観測は宇宙線起源の解明に近づくことが出来る。

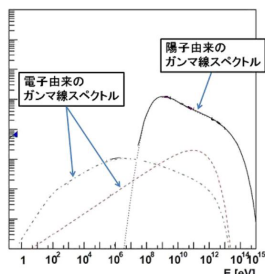


図 1: ガンマ線のエネルギースペクトルの例 (R.Hagiwara, 2012)

## 2 チェレンコフ望遠鏡

解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT, Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) は数十 GeV ~ 数十 TeV のガンマ線を高統計で検出する唯一の方法である。ここではその原理を説明する。

大気に高エネルギーのガンマ線や陽子等の宇宙線が入射すると、大気中の原子核と相互作用して二次粒子を生成する。生成された粒子はさらに反応して粒子を作り、大気中で粒子の生成がなだれのように起こる。これを空気シャワーと呼ぶ。(図 2)

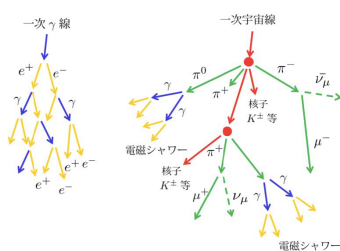


図 2: ガンマ線と陽子による空気シャワーのイメージ

ガンマ線による空気シャワーは、電磁カスケードによって起こる。まず入射した一次ガンマ線が大気中の原子核と相互作用して電子対生成を起こし、それにより発生した電子と陽電子は制動放射によって二次ガンマ線を作る。そしてこのガンマ線が再び電子・陽電子対生成を起こすという過程を繰り返して空

気シャワーが発達し、電子やガンマ線が指数関数的に増加する。これに対し、高エネルギーのハドロンも空気シャワーを形成するが、ガンマ線による空気シャワーの発達とは違いがある。その一つに発達高度の違いがある。ハドロンは放射長がガンマ線より長いので、最大発達高度がガンマ線のものより低い。もう一つの違いはシャワーの広がり方である。ハドロンの空気シャワーは二次粒子のパイオンによって横方向の運動量を持っていることでガンマ線のシャワーに比べて広がる。

次にチェレンコフ光について述べる。真空中での光速を  $c$  として媒質中の屈折率を  $n$  とすると、媒質中の光速は  $c/n$  となる。荷電粒子が媒質中での光速  $c/n$  を超える速さで運動すると光を放射する。これをチェレンコフ放射といい、その時に放射する光をチェレンコフ光という。10GeV 以上のガンマ線は大気中で電磁カスケードによる空気シャワーを生成する。この時に発生する電子が、主に可視から紫外の波長のチェレンコフ光を放射する。ガンマ線によるチェレンコフ光の地上における密度分布は、エネルギーが変化してもシャワー軸から約 130m 以内でほぼ一様であり、その密度は一次ガンマ線のエネルギーによる。これはチェレンコフ光の密度さえわかれば、その全てを捉えなくても一次ガンマ線のエネルギーがわかるということである。

そこで地上に望遠鏡を設置し、チェレンコフ光を通して高エネルギーガンマ線を観測するというのが大気チェレンコフ望遠鏡の原理である。小型の球面鏡を並べることで大口径の放物面鏡を作りチェレンコフ光を集光する。焦点面には光子を電気信号に変換する光検出器が並べてあり、入射光の角度に対応する位置の検出器に光が集まり信号を出す。空気シャワーからのチェレンコフ光は高度により放射角と視差が変わるため、光検出器のアレイに楕円上の信号を形成する。この信号の形状により、ガンマ線と陽子のシャワーを区別することが出来る。

## 3 CTA 計画

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画とは、既存の解像型チェレンコフ望遠鏡のいずれよりも規模の

大きい次世代の大気望遠鏡群建設計画であり、日米欧 27 カ国が参加している。現行の望遠鏡に対して感度を 10 倍に向上させ、観測可能なエネルギーを 20GeV ~ 100TeV まで広げることを目指している。南北 2 つのサイトに建設し、南側サイトには大口径 (直径 23m)4 台、中口径 (直径 12m)23 台、小口径 (直径 6m)32 台を配置する予定である。これにより有効面積を 1TeV で  $3 \times 10^6 \text{m}^2$  広げることができ、さらに全天の観測が可能になる。また、1 つのシャワーを平均 6 つの望遠鏡で捉えることができ、感度が  $10^{-14} \text{erg/cm}^2/\text{s}$ 、角度分解能が 2arcmin、エネルギー分解能が 1TeV 以上で 10%と、従来より格段に上昇すると見込まれている。口径の大きい望遠鏡は少ない台数で低いエネルギーのガンマ線からの少ないチェレンコフ光を効率的に捉える。口径の小さい望遠鏡では多くの台数を設置することで統計の少ない高エネルギーガンマ線の有効面積を稼ぐ。CTA は 2016 年建設開始、2018 年に部分的な稼働が始まり、2020 年に完成し全望遠鏡による観測が始まる予定である。現時点で日本グループが開発したエレクトロニクスは大口径望遠鏡に採用予定である。

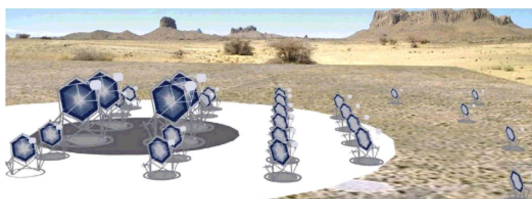


図 3: CTA 望遠鏡群の完成予想図

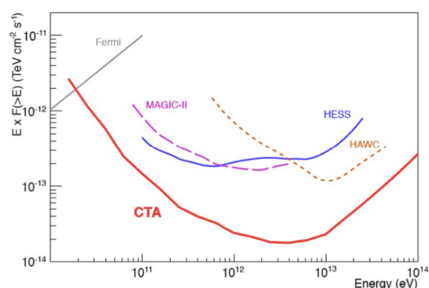


図 4: モンテカルロシミュレーションで計算された CTA の感度 (the CTA consortium. 2013)

## 4 トリガー回路

空気シャワーによるチェレンコフ光は 3ns 程度の間に固まった像としてカメラで捉えることができる。それに対しバックグラウンドである夜光によるイベントはランダムに発生する。夜光による不必要なトリガーを低減するために、隣り合ったカメラピクセルが信号を検出しているかを判断基準とすることができる。この判断を回路上で数十 ns 程度の速さで行うことを目的としてトリガー方式を開発している。また 100kHz のカメラトリガーに耐えうることも要求される。

PMT は 7 本で 1 クラスタとしてまとめられており、クラスタごとに 1 つの信号読み出し回路がつく。このクラスタごとに L0 トリガーと L1 トリガーの 2 種類のトリガーで信号を処理する。PMT からの信号を受けて L0 トリガー信号を生成した後、L0 トリガー信号は周りの 6 つのクラスタに分配される。周囲 6 クラスタと自クラスタ合わせて 7 クラスタ分の L0 トリガー信号を受け L1 トリガー生成回路がヒットパターンを判断し、信号が生成される。

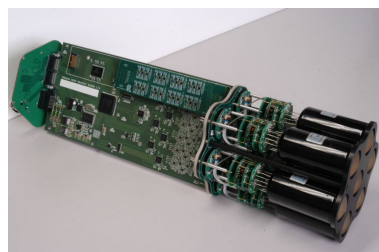


図 5: PMT、信号読み出しボードとバックプレーン

トリガー方式はドイツグループが開発したデジタルトリガー方式とスペイングループが開発したアナログトリガー方式の 2 種類がある。我々は独自に開発したバックプレーン基盤で読み出し回路とデジタルトリガー回路をつなぎ、3 クラスタを用いた PMT からの信号で正しく動作することを確認した。今後さらに、同期されたクロック信号を用いた動作試験、タイムスタンプを用いたイベントのナンバリング方法を開発していく。

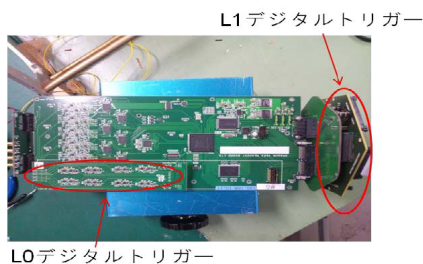


図 6: 読み出しボードとデジタルトリガー

## 5 望遠鏡シミュレーション

トリガーで用いられているロジックを望遠鏡に適用したときの性能を確認するためにモンテカルロ・シミュレーションを行った。シミュレーションプログラムには粒子シャワーシミュレーションプログラムと望遠鏡シミュレーションプログラムを組み合わせたものを使う。

シャワー生成のプログラムとして CORSIKA (COsmic Ray Simulations for KASCADE) を用いる。これはガンマ線や陽子などの宇宙線が地球大気に突入した時に発生する粒子シャワーとそこから発生するチェレンコフ光をモンテカルロ法を用いてシミュレートするプログラムである。また CORSIKA で生成されたチェレンコフ光の量、位置情報、時間情報は sim\_telarray という望遠鏡シミュレーションプログラムに渡される。sim\_telarray は鏡の反射、光検出器の性能、回路の性能、トリガーロジック、望遠鏡トリガー決定を考慮した上で、シミュレートするプログラムである。

このシミュレーションにより、単一望遠鏡でのガンマ線やその他のバックグラウンドのトリガーレートとエネルギー閾値を確認した。単一望遠鏡でトリガー条件を 3 p.e. 以上の信号が 7 ピクセル以上隣り合う時とした場合、全体のトリガーレートが約 100Hz、ガンマ線のエネルギー閾値が 50GeV 程度になることなどがわかった。様々なトリガー条件でシミュレートした結果が図 7, 図 8 である。色の違いは隣り合うピクセル数を表す。(赤:2, 紫:3, 緑:4, 濃紫:5, 青:6, 黄:7) さらに 4 台の望遠鏡を使ったシミュレーションを行い、イメージパラメータや到来時間解析を含めた性能の計算を行なっていく。

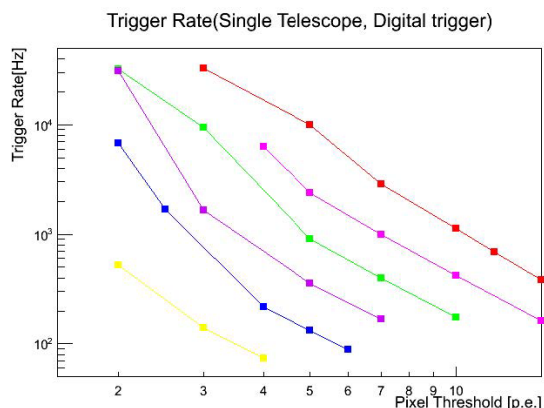


図 7: 全体のトリガーレート (Y.Awane. 2012)

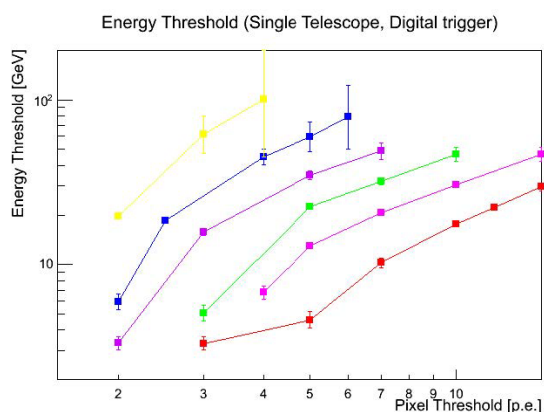


図 8: エネルギー閾値 (Y.Awane. 2012)

## Reference

- Y.Awane. "次世代チェレンコフガンマ線望遠鏡計画 CTA におけるトリガー回路の開発". Master's thesis, Kyoto University, 2012.
- R.Hagiwara. "Cherenkov Telescope Array 計画実現に向けた回路開発・評価". Master's thesis, Yamagata University, 2012.
- the CTA consortium, Experimental Astronomy, "Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy", Volume 32, p.193, 2011
- the CTA consortium, Astroparticle Physics, "Introducing the CTA concept", Volume 43, p.3, 2013