

## CTA 大口径望遠鏡に向けた波形サンプリング回路の開発

土屋 優悟 (京都大学大学院 理学研究科)

### Abstract

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は次世代の大規模地上望遠鏡群の国際共同建設計画である。大、中、小口径の合計 100 台近くの望遠鏡を配置することによって 20GeV から 100TeV 以上の超高エネルギーガンマ線の観測を、これまでの 10 倍の感度で観測することを目指す。高エネルギーガンマ線が大気を通することで放出されるチェレンコフ光を鏡で集光し、大口径望遠鏡では集光面の PMT によって検出を行う。この信号と夜光ノイズを効率的に分離して観測するためには GHz での波形読み出しが求められている。また、大口径望遠鏡のカメラは光電子増倍管 (PMT:Photomultiplier Tube)2000 本近いチャンネルから構成されるためカメラの全体での発熱量を抑えるために低消費電力であることも求められる。そこで日本グループは、イタリアのグループと協力しアナログメモリの ASIC である DRS4(Domino Ring Sampler version4) を用いて 1-2GHz(可変) の高速サンプリングを行い、約 2W/channel である低消費電力の大口径望遠鏡搭載用波形読み出し回路を開発した。これまでに、トリガ生成回路などと組み合わせての波形サンプリング等の基本的な動作が確認されている。現在さらなる改良が重ねられており、今回開発中の新たな回路ではより大口径望遠鏡への搭載を意識した形で改良が行われている。本講演ではこれらの回路の構成と開発状況について発表する。

## 1 CTA 計画

### 1.1 大気チェレンコフ望遠鏡

高エネルギーガンマ線は地球大気に入射すると大気中の原子核の電場で電子・陽電子対生成し、それらは制動放射を起こしたガンマ線を放射する。この過程の繰り返しにより多数の電子・陽電子対を生成する(空気シャワー)。このシャワーの発達は対生成の繰り返しのうちに粒子のエネルギーが反応の閾値より低くなるまで続く。こうしてできた電子・陽電子が十分なエネルギーを持つ場合、大気中における光速より速く運動し、チェレンコフ光を放射する。この光を地上に置いた反射鏡で集光して捕らえ、天体より飛来する高エネルギーガンマ線を検出するのが大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT:Imaging Air Cherenkov Telescope) である。

空気シャワーからのチェレンコフ光子は地上で半径 150m ほどの円形の範囲内でほぼ一様に分布する。したがって、この範囲内に望遠鏡を配置して複数の望遠鏡で空気シャワーを観測する「ステレオ観測」を実施することで、ガンマ線到来方向の決定精度やエ

ネルギー分解能などの望遠鏡の性能をさらに向上させることができる。(図 1) バックグラウンドとなる

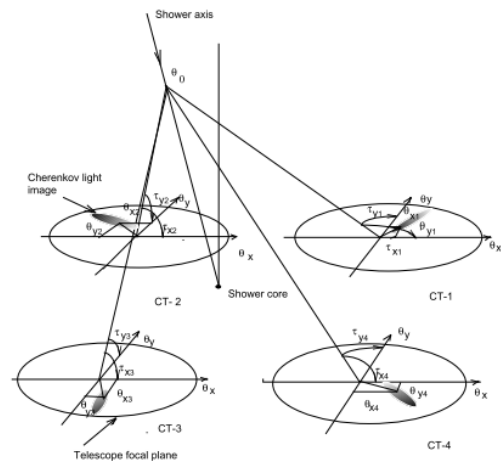


図 1: ステレオ観測模式図 (F. A. Aharonian and A. K. Konopelko. 1997)

宇宙線陽子と天体からのガンマ線のシャワーイメージの形状には違いがあるため、この手法を用いてより正確なシャワーの再構成を行うことで、天体から

のガンマ線を効果的に区別して観測することができる。

## 1.2 CTA

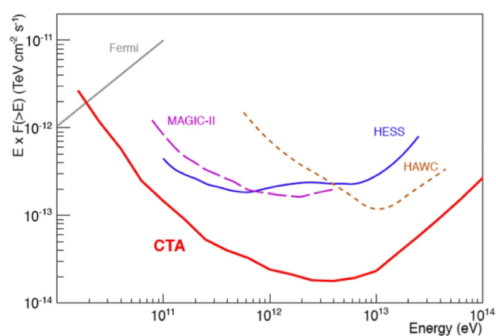


図 2: モンテカルロシミュレーションによる CTA の 50 時間観測で達成される感度.Fermi と HAWC は 1 年間の観測による感度。

1989 年の Whipple 望遠鏡による Crab Nebula からのガンマ線検出に端を発して高エネルギーガンマ線観測の主流となった大気チェレンコフ望遠鏡は、現在では H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS が稼働中であり、これまでにおよそ 150 の超高エネルギーガンマ線天体 (100GeV 以上) が検出されている (<http://tevcat.uchicago.edu/>)。これらに続く次世代の大気チェレンコフ望遠鏡として計画されているのが CTA(Cherenkov Telescope Array) 計画である。CTA 計画は日米欧 27 カ国の国際協力の下で進められており、南北の 2 箇所に大、中、小口径の合計 100 台近くの望遠鏡を 3-10km<sup>2</sup> の領域に敷き詰めて建設することで大幅に有効面積を広げ、20GeV から 100TeV 以上の超高エネルギーガンマ線の観測を、現行の望遠鏡の 10 倍の感度で観測することを目指す。

2015 年の建設開始に向けて CTA-Japan は大口径望遠鏡 (Large Size Telescope, LST) の開発を中心として貢献しているが、本講演では CTA-Japan の取り組んでいる回路開発について紹介する。

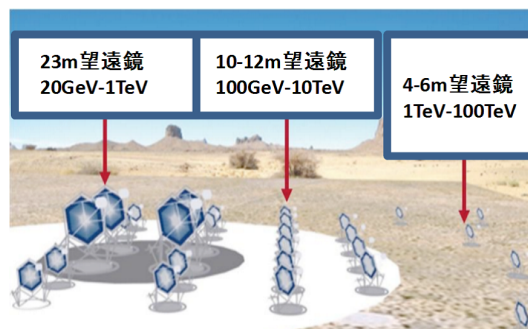


図 3: CTA 完成予想図

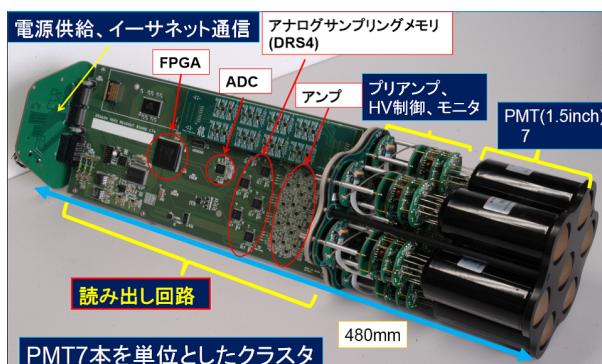


図 4: PMT クラスタ

## 2 読み出し回路

### 2.1 読み出し回路への要求

大口径望遠鏡 (LST: Large Size Telescope) で検出を行う PMT にはガンマ線観測に必要な空気シャワーからのチェレンコフ光だけでなくノイズとなる夜光も入射する。この夜光の PMT での観測レートは、銀河面を向いたときには最大で 400 MHz (Y. Konno, 2013) (1 photo-electron 相当) と考えられている。それに対し、ガンマ線を一次粒子とした空気シャワーから放出されるチェレンコフ光は、望遠鏡に到達時に 2-3nsec 程度の広がりしかもたないため、PMT 信号を読み取る際にはサンプリングレートを高くしてチェレンコフ光による信号を含む短い時間のみを利用して光量を求めることが夜行の影響を抑えることに効果的である。2-3nsec に広がりを持つチェレンコフ光による信号の波形情報を得るためには、1-2GHz のサンプリングレートでの波形記録が要求される。ま

た、1つのLSTには1885本のPMTとそれに対する読み出し回路が使用されるため、回路の消費電力による発熱を抑え、安定に動作する温度に調整することを求められる。そのため消費電力は2W/ch以下であることが要求されている。その他にも0.2-1000phe以上のダイナミックレンジ、300MHz(-3dB)以上の帯域幅、トリガレート10kHzで5%以下のデッドタイム、2μsec以上の波形記憶メモリ深さなどが求められている。

## 2.2 読み出し回路の構成

LST読み出し回路ではスイスのPaul Scherrer Instituteが開発したアナログメモリのASICであるDRS4を採用している。DRS4には入力が8チャンネルあり、それぞれに対して順次電圧情報を記録するためのキャパシタが1024個ある。サンプリング速度は0.7-5GHzで可変であり、消費電力は2GHzサンプリング時にチャンネルあたり17.5mWとなっており回路に要求される高速サンプリング及び低消費電力を実現している。

このアナログメモリ DRS4を用いた読み出し回路及び周辺回路のブロック図を図5に示す。

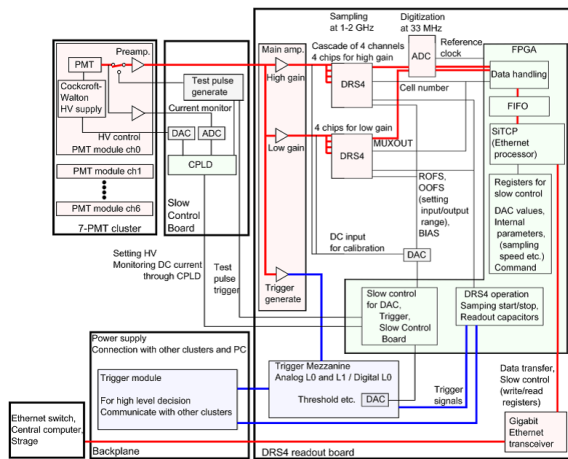


図 5: 周辺回路を含めた読み出し回路のブロック図 (Y.Konno. 2013)

PMT7本に対し読み出し回路1枚が接続され、信号がプリアンプを通して入力される。入力信号はメインアンプでHigh/Low Gainの信号とトリガ生成用の

信号の3つに出力される。ここでゲインをHigh/Low二つに分けることによって広いダイナミックレンジという要求を実現している。High/Low Gain出力はDRS4でサンプリングされた後ADCによってデジタル変換され、最終的にGigabit Ethernetでデータ転送される。

読み出し回路の周りには、PMTのコッククロフト・ウォルトン回路(CW回路)の高圧設定やテストパルス生成などの機能を持つスローコントロールボード、読み出し回路への電源供給やトリガ(L1)回路との接続などの機能を持つバックプレーン、トリガ(L0)生成回路といった回路が接続される。

## 2.3 現在の読み出し回路

最初に作成された読み出し回路 version1 で DRS4 による波形サンプリングと Ethernet によるデータ転送の基本的な動作が確認された後、冷却系実装ためのレイアウトや量産のためのコストダウンといった、より大口望遠鏡への搭載を意識した形で改良が行われており version3 までの基板が開発されている。version3 基板ではそれまでカードとして接続されていたメインアンプを読み出し回路基板内に取り込むなどの大きな変更点に加えられた。

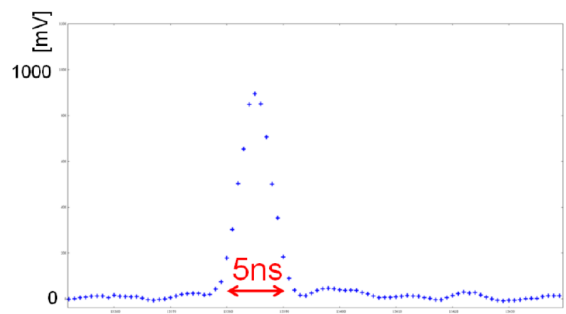


図 6: PMT 信号の波形 (2GS/s)

## 3 今後の開発予定

現在は望遠鏡搭載モデルとなる予定の version4 回路の製作を進めている。今回の改良では他国のグ

ループが開発中の回路との共通化が求められているため、読み出し回路に別途接続されていたバックプレーン上の電源供給系を回路内に統合し、version3 ではバックプレーンを介して接続されていたトリガ(L1)回路を読み出し回路に直結できるようにすることや、入力電圧をこれまでの12Vから24Vにするなどの変更が加えられる。今後、これらの新しい電源供給系の試験を行っていく予定である。

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

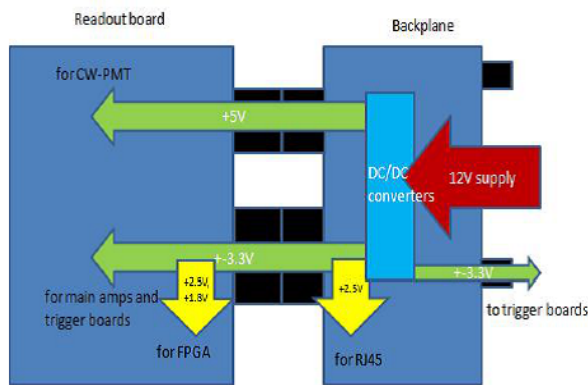


図 7: version3 での電源供給系

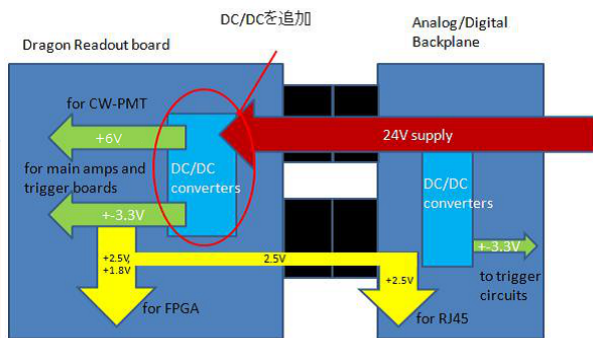


図 8: version4 での電源供給系

## Reference

F. A. Aharonian and A. K. Konopelko, "Stereo Imaging of VHE Gamma-Ray Sources", 1997, ArXivAstrophysics e-prints

Y.Konno, Master Thesis Kyoto University, 2013.