

JEM-EUSO ミッションのフロントエンド低消費電力高密度実装 ASIC の性能評価

甲南大学大学院自然科学研究科
修士1年 吉田賢司

概要

SPACIROC は、地球全体を検出器とする大気蛍光望遠鏡『JEM-EUSO』用に設計されたフロントエンド ASIC である。単光子計測 (Single Photon Counting)、1pe(photoelectron) から 1500pe の範囲のダイナミックレンジを備え、ASIC の 1ch あたり 1mW 以下という低消費電力で動作する特徴を持つ。64ch のマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) からの信号を読み出す。MAPMT から入力された photon の信号は、それぞれの光子の信号に対してカウントを行う単光子計測モード単電子計測モードと MAPMT からの入力電荷をパルス時間幅に変換する電荷積分モード (KI mode) の 2 つの方法で計測を行う。ここでは単電子計測モードについての性能評価について報告する。

1 Introduction

現在、極限エネルギー宇宙線観測ミッション『JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module) 計画』が進行している。宇宙線のエネルギースペクトルには、 10^{19} eV を超えるエネルギーを持った宇宙線は宇宙背景放射との相互作用によりエネルギーを失うため、上限が存在すると理論的には考えられていた。しかし 1990 年代前半に 10^{20} eV を超えるエネルギーを持った宇宙線が観測されたことにより、その起源と上限の有無が注目された。

極限エネルギー宇宙線観測ミッション『JEM-EUSO 計画』には世界 13ヶ国の 75 機関が参画し、それぞれの機関で開発を分担して計画を進めている。JEM-EUSO 計画では、口径約 2.5m、視野角約 60 度の超広視野望遠鏡を国際宇宙ステーション (ISS) に搭載

して地球大気中での極限エネルギー宇宙線が引き起こす空気シャワー現象による微弱な光を観測する。

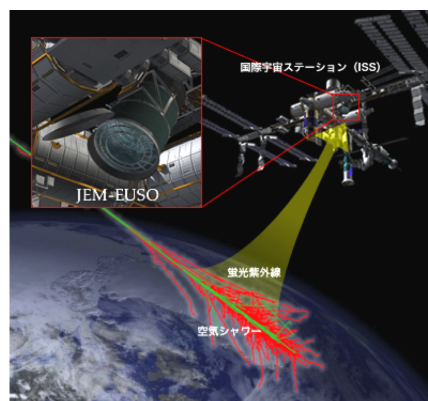


図 1: JEM-EUSO 望遠鏡の観測イメージ

宇宙から到来する粒子は地球大気の子核と相互作用をすることで、主に電子・陽電子・ γ 線からなる空気シャワーを形

成する。

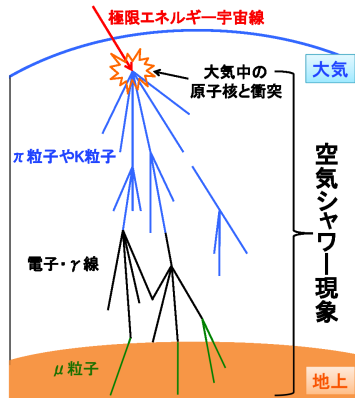


図 2: 空気シャワー現象の発達イメージ図

JEM-EUSO 望遠鏡はこの空気シャワーから放射される蛍光紫外線と、地表に反射したチェレンコフ光を $2.5\mu\text{s}$ 間隔で撮像し空気シャワーの発達を 3 次元的に再構築することで、角度分解能約 1° の精度で極限エネルギー宇宙線の到来方向を、おおよそ 20% の精度でエネルギーを決定する。

2 JEM-EUSO 望遠鏡の焦点面検出器

JEM-EUSO 望遠鏡の焦点面は約 5000 本の、64 チャンネルの MAPMT (マルチアノード光電子増倍管) で覆われた直径約 2.35m の曲面の形をしており、 2×2 個の MAPMT から成る EC (Elementary Cells) を 3×3 個並べてできる焦点面 PDM (Photo-Detector Module) を約 137 個並べて構成される。

MAPMT は地球大気からの光子を捕らえ、光陰極で光電子に変換し、電荷信号をアノードとダイノードから出力する。この MAPMT から出力された電荷信号は次の段階のデジタルエレクトロニクスで処理で

きるようにフロントエンド ASIC でデジタル信号に変換する。

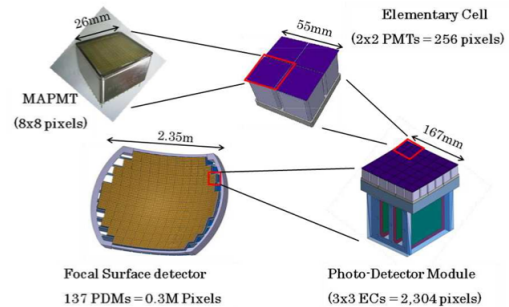


図 3: JEM-EUSO 望遠鏡の焦点面検出器

3 フロントエンド ASIC : SPACIROC

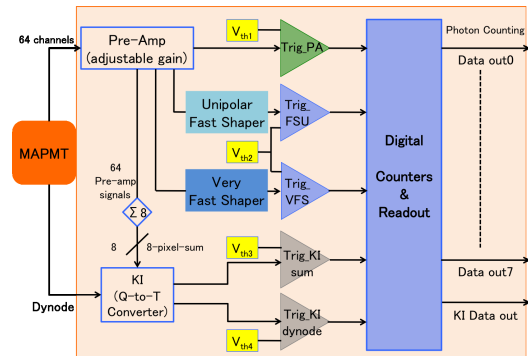


図 4: SPACIROC ブロック図

SPACIROC は LAL、理研、JAXA/ISAS、甲南大で共同開発を進めている。

SPACIROC (Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating ReadOut Chip) は 2 つのアナログブロックと 1 つのデジタルブロックから成る。一方のアナログブロックは Photon Counting mode (単電子計測モード) というパートに繋がれ、もう

一方のアナログブロックはKI modeと呼ばれる電荷-時間変換モードに繋がれる。

Photon Counting mode では 1pe (photoelectron)~30pe の範囲をカバーし、KI mode では約 15pe~1500pe の範囲をカバーする。64 チャンネルのブロックがあり、プリアンプされた信号を判別し、トリガーパルスとして送り出す。その 64 チャンネルは、それぞれが 1 つのプリアンプと 2 つの Shaper から構成されている。それぞれのトリガーの特徴は以下のようなものである。

- Trig_pa : プリアンプから直接来た信号のトリガーを行う。
- Trig_FSU : Unipolar Fast Shaper から来た信号のトリガーを行う。
- Trig_VFS : Very Fast Shaper から来た信号のトリガーを行う。

64本のMAPMTのアノードから出力される信号は初めにプリアンプに送られ、その後 preamp, FSU, VFS の 3 つのコンパレータに送られる。これらのコンパレータは試験用に設けたものであり、最終的なバージョンでは最適な 1 つのコンパレータが採用される予定である。

それぞれのコンパレータから出力された信号は GTU(Gate Time Unit) と呼ばれる time unit で $2.5\mu\text{s}$ 間隔で counter によってデータ収集が行われる。counter の読み出しはオーバーヘッドを軽減するために 8 つのシリアルリンクで出力される。

KI mode においては、プリアンプを通った信号が隣り合った 8 つのチャンネル毎に積分される。これを 1 つの信号として捉え、8 つの積分された信号が電荷-時間変換を行う KI に送られる。この 8 つの信号と MAPMT のダイノードから直接出力された信号を KI

に送り、処理を行い、counter に出力される。KI のデータについても Photon Counting 同様にシリアルリンクで出力される。

3.1 要求値

JEM-EUSO 望遠鏡は宇宙空間の限られた電力の下で運用されるため、ASIC の 1 チャンネルあたり 1mW という消費電力で動作することが必要とされている。SPACIROC は 100% のトリガー効率を達成するために、アナログ処理モードの運用中に 1000 以上のダイナミックレンジを持ち、1 チャンネルあたり 1mW 以下の消費電力が求められる。

4 試験方法

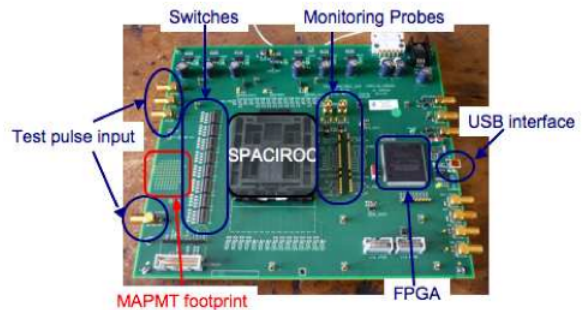


図 5: SPACIROC テストボード

試験には図 5 に示したテストボードを用いて試験を行った。このテストボードには、テストパルスを入力するためのコネクタと MAPMT を接続するためのコネクタ (図 5 中の footprint)、各チャンネルを ON/OFF にするためのスイッチ、FPGA、モニターピン、PC 接続用の USB コネクタ、SPACIROC ソケット等が備えられている。テストパルス入力用コネクタとスイッチの間には 10pF の

コンデンサがついており、これにより電圧入力パルスを電荷入力パルスに変換できる。

5 試験

今回は SPACIROC の Photon Counting mode での性能評価を行った。

5.1 1pe の判別

まず初めに SPACIROC への入力電荷が 1pe 相当 ($\cong 0.08\text{pC}$) になるように Function Generator の入力電圧を調整し、1pe 相当の信号と pedestal 値との差異を確認する実験を行った。図 6 がその結果のグラフである。

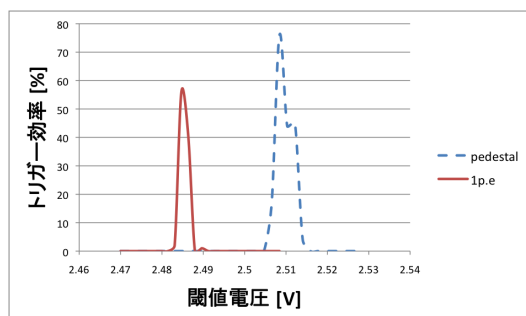


図 6: 閾値電圧に対する微分トリガー効率

図 6 は横軸に閾値電圧、縦軸にトリガー効率の微分値をとったものである。図中の実線で示されているグラフが 1pe 相当の信号であり、破線で示されているグラフが pedestal である。この時の 1pe の標準偏差は $\sigma \cong 0.002\text{V}$ であり、1pe と pedestal との中央値の差は 0.025V であることから S/N 比は 12.1 となった。この結果から、1pe の信号と pedestal との区別が十分に可能である事が分かる。

5.2 pedestal の分布

次に、64 チャンネルそれぞれの pedestal の分布の測定を行った。図 7 がその結果のグラフである。

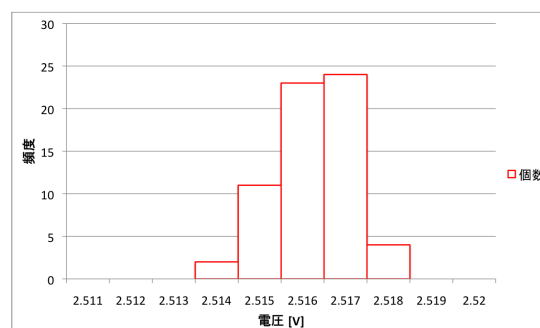


図 7: Pedestal の分布

図 7 から、pedestal は 4mV 程度の範囲で安定している事を確認した。標準偏差は $\sigma \cong 0.002$ であった。

6 結論・今後

今回は Photon Counting についての性能評価を行った。また、消費電力は ASIC の 1ch あたり約 1mW であった。今後は KI mode についての性能評価を行う。

参考文献

- [1] H.Miyamoto et al. , 32nd International Cosmic Ray Conference, ID 0775
- [2] Salleh Ahmad et al. , SPACIROC (Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating ReadOut Chip
- [3] Y.Kawasaki et al. , 32nd International Cosmic Ray Conference, ID 0472