

CTA 計画における大口径望遠鏡用焦点面検出器 較正のための試験系の開発

埼玉大学大学院 理工学研究科 修士一年
上野 遥

小山志勇、寺田幸功 (埼玉大理工)、栗根悠介、窪秀利、今野裕介、林田将明 (京大理)、梅原克典、片桐秀明 (茨城大理)、大岡秀行、齋藤浩二、手嶋政廣、中嶋大輔 (東大宇宙線研)、奥村暁、渋谷明伸、田島宏康、日高直哉 (名古屋 STE 研)、折戸玲子、菅原隆希 (徳島大総科)、株木重人 (東海大医)、櫛田淳子、小谷一仁、西嶋恭司、門叶冬樹 (東海大理)、郡司 修一、萩原亮太 (山形大理)、佐々木浩人、山本常夏 (甲南大)、高橋弘充、深沢泰司、水野恒史 (広大理)、田中駿也、千川道幸 (近畿大理)、中森健之 (早大理工)、馬場彩、吉田篤正 (青学大理工)、Razmik Mirzoyan、Olaf Reimann、David Fink、Thomas Schweizer (Max-Planck-Inst. fuer Phys.)、他 CTA-Japan Consortium

(1) ガンマ線バースト

高エネルギー宇宙物理学における興味深い天体として、ガンマ線バーストが挙げられる。ガンマ線バーストは、ビックバンを除いて宇宙で最も激しい爆発現象である。これまでに数十 KeV から MeV 領域において～20 秒で起こる「即時放射」が観測されているが、その放射機構は解明されていない。有力視されているのが、大質量星が寿命を迎えて崩壊するときに放出するジェットの中で衝撃波が形成され、そこで莫大なエネルギーを解放するという理論である。しかし、この理論では観測と合わないところも多い。即時放射は Fermi 衛星でも観測されていて、GeV 以上のエネルギーでも検出されていることがわかっている (図 1)。GeV 領域の観測において、 > 50 GeV ではガンマ線バーストで放射されたガンマ線が系外銀河背景光によって吸収されてしまうので、 < 50 GeV で統計の良い観測を行うことによって、これまでの理論に修正を加えることができるなど、ガンマ線バーストの即時放射を詳しく解明できると期待される。統計の良い観測には、より大きな検出器が必要となるが、Fermi 衛星のような宇宙望遠鏡では限界がある。より高エネルギーなガンマ線観測をより統計よく行うことができる手段とされているのが、地上からのガンマ線観測である。

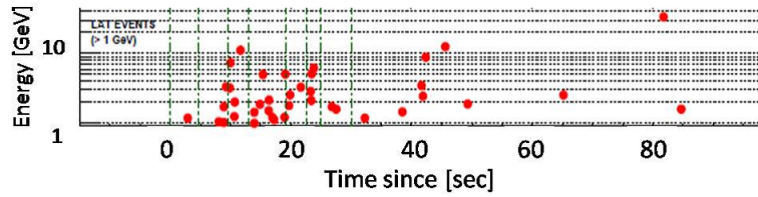


図 1: Fermi 衛星で検出した 1 GeV 以上の光子。Abdo et al. 2009, ApJ, 706, L308 から引用。

(2) ガンマ線の観測方法

宇宙にあるガンマ線源から放出されたガンマ線が地球大気に突入すると、大気中の原子核と相互作用して電子・陽電子対生成を起こす。ここでできた電子(陽電子)は制動放射を起こしてガンマ線を放射し、このガンマ線がまた電子・陽電子生成を起こすというように、カスケード的な反応を起こして電磁シャワーを形成する。電磁シャワーの電子(陽電子)は、空気中の光速よりも速く運動し、このときチェレンコフ光を放射する。このチェレンコフ光を複数の地上チェレンコフ望遠鏡で観測する。つまり、地上チェレンコフ望遠鏡によって大気を検出器としたガンマ線の間接的な観測が可能となる。今までには、MAGIC, VERITAS, H.E.S.S., CANGAROO 望遠鏡が建設され、地上のガンマ線観測に成功している。これらの望遠鏡の次世代の地上チェレンコフ望遠鏡を建設する計画が CTA(Cherenkov Telescope Array) である。

(3) CTA 計画

CTA 計画とは、ヨーロッパ・アメリカ・日本を中心とした 27 カ国が共同した国際プロジェクトである (<http://www.cta-observatory.jp/>)。2020 年からの完全運用開始を予定している。観測エネルギー領域のそれぞれ異なる大口径 (23 m)、中口径 (12 m)、小口径 (6 m) の望遠鏡群を配置することによって、20 GeV から 100 TeV といった広いエネルギー領域を、従来の 10 倍程度の感度で観測することが可能となる。日本が主に関わっているのが大口径望遠鏡 (Large Size Telescope: LST) の開発である。LST の仕様は表 1 の通りである。LST の低エネルギー閾値が 20 GeV であり、また Fermi 衛星の一万倍である有効面積をもつために、(1) で述べたガンマ線バーストにおける観測に適している。さらに、180 度回転するのに 20 秒という高速な導入速度により、ガンマ線バーストの即時放射が起きてから ~20 秒の内に観測を開始できる。LST を用いればガンマ線バースト観測に期待ができる。埼玉大学は LST のカメラに使用される光電子増倍管の試験を主に行っている。

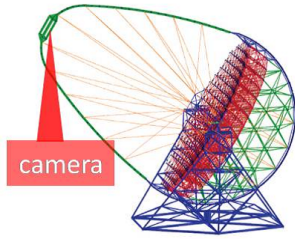


図 2: LST

口径	23 m
エネルギー領域	20 GeV – 1 TeV
視野	4.5 deg
有効面積	$> 10^4 \text{ m}^2 @ 30 \text{ GeV}$
導入速度	180 deg/20 sec
カメラ直径	2.25 m

表 1: LST 仕様

(4) 光電子増倍管

LST のカメラに搭載される高感度光検出器が光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube: PMT) である。採用しているのは、浜松ホトニクス製 1.5 インチ径の PMT である。図 3 はカメラの一部である。7 つの PMT と高圧回路とプリアンプ回路が一組となっていて、そのあとにエレクトロニクス部である読み出しボードへと続き、全体として 1 クラスターとなる。このクラスターが 265 個集まって直径 2.25 m のカメラとなる。LST 一台につき PMT は 1855 本必要となる。CTA で要求されている PMT の要求値を表 2 に示す。

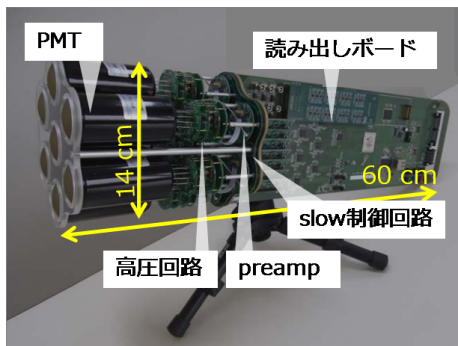


図 3: ミニカメラ

有効波長領域	300 – 600 nm
パルス幅	2.5 – 3 nsec (FWHM)
動作ゲイン	4×10^4
光量決定精度	$< 5 \%$
量子効率	$> 35 \%$ peak
アフターパルス率	$< 0.02 \%$

表 2: PMT 要求値

現在開発している PMT はこれらの要求値をほぼ満たしていて、デザインは決定されている。来年の 2 月頃 1000 本の PMT が納品される予定で、それまでに大量の PMT をキャリブレーションするのに適したシステムを確立する必要がある、これが本研究の目的となっている。

(5)PMT キャリブレーション

PMT のキャリブレーション項目、要求値および実験項目を表3に示す。今回実験を行ったのはパルス幅、動作ゲイン、光量決定精度である。

calibration 項目	要求値	実験項目	評価
パルス幅	2.5 – 3 nsec	高速パルス応答	--
動作ゲイン	4×10^4	HV- ゲイン測定	--
光量決定精度	< 5 %	温度に対するゲインの変化率	--
量子効率	> 35 %	量子効率測定	--
アフターパルス率	< 0.02 %	アフターパルス測定	--

表 3: PMT calibration 項目と要求値及び実験項目

(6) 実験と結果

実験を行うにあたって、まず PMT に当てる光源を光らせるための高速パルスジェネレータ (以下パルサー) を試作した。このパルサーは MAGIC 望遠鏡で開発されたものを踏襲して製作したものである。パルサーはクロック波形とトリガーを生成する駆動部と、駆動部で生成された波形を高速パルスに変換する高速パルス部に分かれている。製作したパルサーの動作試験結果は図4と図5のようになり、18 Hz から 1 kHz までの周波数を出力していると確認できた。MAGIC 望遠鏡のパルサーの仕様は 20 Hz-2 kHz なのでほぼ一致していると考えられ動作に問題はないと結論づけられる。CTA 用のパルサーは現在メーカーによる量産が済み、各大学での試験で用いられている。

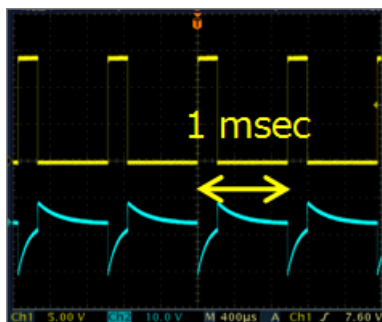


図 4: 駆動部のクロック信号 (黄色) とトリガー信号 (青色)

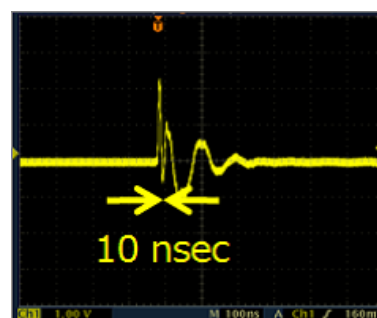


図 5: 高速パルス部の LED にかかる電圧信号

試作したパルサーを用いて、まず PMT パルス幅測定を行った。PMT に続く Pre-amp からの出力をオシロスコープで見た図が図6と図7である。図6では、1 p.e.(p.e.: photo electron) に相当する波形がとれていることが確認でき、これは後のゲイン測定で使われる。図7の 10 p.e. 相当の波形をみると半値幅が約 3 nsec であり、要求値を満たす事が分かった。

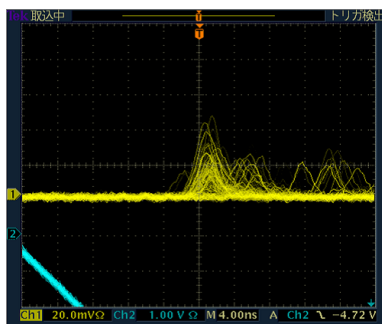


図 6: 1 p.e. 相当の波形

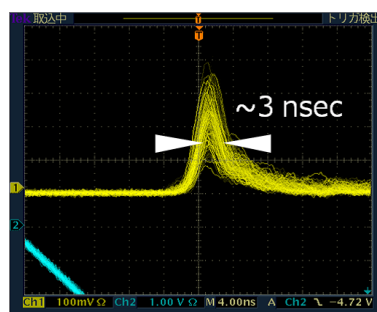


図 7: 10 p.e. 相当の波形

次に高電圧とゲインの関係を測定した。得られた結果は図 8 である。赤い線は動作ゲインの 4×10^4 である。今回の実験では 950 V から 1200 V までのゲインの線形性を確認することができた。しかし、動作ゲイン付近でのゲインの線形性を見なければならぬので、今後再測定の必要がある。

また、光量決定精度を見るために温度変化に対するゲインの変化率を測定した。950, 1000, 1100 V の各高電圧値において、20°C から 50°C まで 10°C 刻みで温度変化させたときのゲインの変化率を測定した。結果は図 9 であり、高電圧値によって差はあまりなく、どれも大体 $-1\%/^{\circ}\text{C}$ の変化率であった。LST では観測中のカメラ内の温度変化 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ を目標にしているため、この結果からゲインの変化率は $\pm 2\%$ に抑えられ、光量決定精度は $< 5\%$ に保たれる。

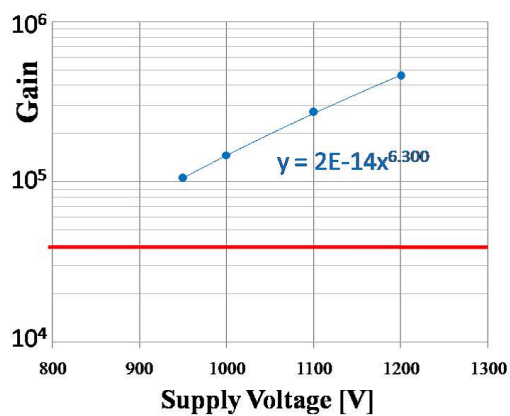


図 8: HV vs ゲイン

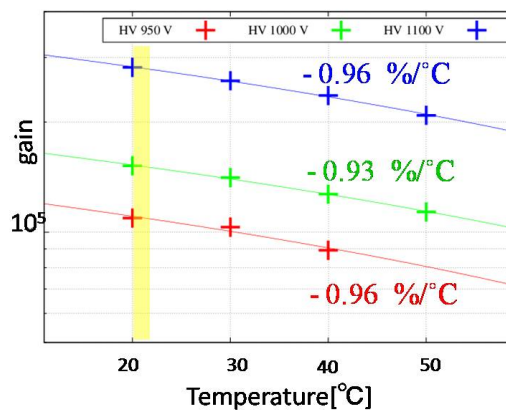


図 9: 温度変化に対するゲインの変化率

(7) まとめと今後

以上の実験結果を表4にまとめた。今回測定した中でパルス幅、光量決定精度は要求値を満たすことが確認できたが、動作ゲインについては 800 – 900 V でのゲインの再測定が必要である。今回は行っていない量子効率とアフターパルス率は、現在測定に向けて準備中である。今後は、2013年2月に1000本のPMTが納品される前にキャリブレーションシステムを確立することを目標として取り組んでいく。また、2013年からLSTのプロトタイプの実験が開始される予定である。

calibration 項目	要求値	実験項目	評価
パルス幅	2.5 – 3 nsec	高速パルス応答	OK
動作ゲイン	4×10^4	HV- ゲイン測定	再測定
光量決定精度	< 5 %	温度に対するゲインの変化率	OK
量子効率	> 35 %	量子効率測定	今後測定
アフターパルス率	< 0.02 %	アフターパルス測定	今後測定

表 4: 実験結果と評価