

Cherenkov Telescope Array 計画の大口徑望遠鏡初号機に用いる光電子増倍管の較正試験結果

松岡 俊介 (埼玉大学大学院 理工学研究科)

Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは 20 GeV から 100 TeV 以上のガンマ線を地上の大気チェレンコフ望遠鏡を用いて従来より 10 倍以上の感度で観測する、29 カ国からなる国際共同計画である。CTA 計画では大中小 3 種類の口径からなる望遠鏡群を用いて観測を行い、日本は低エネルギー側の観測を担う大口徑望遠鏡 (Large-Sized Telescope : LST) の開発に貢献している。

LST の光検出器には光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube : PMT) が採用されており、望遠鏡一台につき 1855 本の PMT が取り付けられる。LST の低エネルギー閾値 20 GeV を達成するために PMT にはゲイン、パルス幅、アフターパルス発生確率などに対し要求があり、現在我々は全ての PMT に対しこれらの諸特性の調査を行っている。これらの結果は PMT を LST 初号機に取り付ける際の最適な配置を決定するためにも用いられる。本講演では較正試験の試験系及び、それら諸特性の結果について報告をする。

1 地上でのガンマ線観測

数 10 GeV 以上のガンマ線が大気に入射すると電子陽電子対生成を起こし、発生した電子対が制動放射でガンマ線を出すことで電子対の増殖が繰り返される。この現象は電磁シャワーと呼ばれる。発生した電子対が大気中の光速を超える速度を持つ時、チェレンコフ光を放射する。このチェレンコフ光を地上に配置したチェレンコフ望遠鏡で観測することで入射ガンマ線の情報を得る事が出来る。つまり大気そのものを検出器とすることで、間接的にガンマ線を観測する。

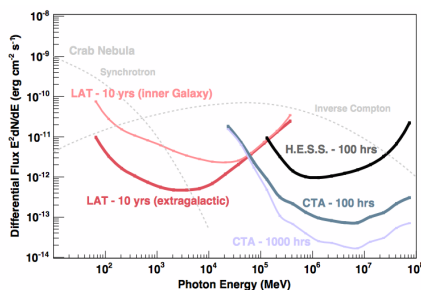


図 1: CTA で予想される感度曲線及び、現在稼働中の観測施設の感度曲線 [1]

従来の観測施設には H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS

などがあり、これらの観測施設より一桁高い感度と観測エネルギー帯域 20 GeV - 100 TeV での観測 (図 1) を目指す次世代ガンマ線天文台として Cherenkov Telescope Array (CTA) が現在進められている。

2 Cherenkov Telescope Array 計画

次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array は従来のチェレンコフ望遠鏡に比べ 10 倍以上の感度での観測を目指す、29 ヶ国 1200 名以上からなる国際共同計画である。CTA 計画では大中小の 3 種類の観測エネルギー帯域の異なる望遠鏡をおよそ 10km² のエリアに数十台並べることで高感度な観測を可能にする。また北半球と南半球に観測サイトを設ける事で全天を観測する。図 2 がその完成予想図である。

具体的な望遠鏡の種類は 23m 口径の Large-Sized Telescope (LST)、12m 口径の Medium-Sized Telescope (MST)、6m 口径の Small-Sized Telescope (SST) の 3 つである。LST の開発は日本チームが主導して行っており、2016 年の建設開始に向けて LST 初号機の開発が進められている。LST の諸元を表 1 に示す。



図 2: CTA の完成予想図 [2]

表 1: LST 仕様 (一部抜粋)

口径	23m
エネルギー帯域	20 GeV ~ 1000 GeV
カメラ直径	2.25m
カメラピクセル数	1855 本

3 光電子増倍管

大口径望遠鏡カメラ部分の検出器には浜松ホトニクス社製の光電子増倍管が採用されている (図 3)。1 つの PMT に分圧回路、昇圧回路、プリアンプ回路を取付けた物を Pixel Unit とし、7 つの Unit の後段にエレクトロニクス部である読み出し回路を接続し、全体として 1 つの PMT Module (図 4) となる。LST のカメラ部にはこの Module が 265 台搭載されており、LST 一台につき焦点面検出器は 1855 本の PMT で構成される。

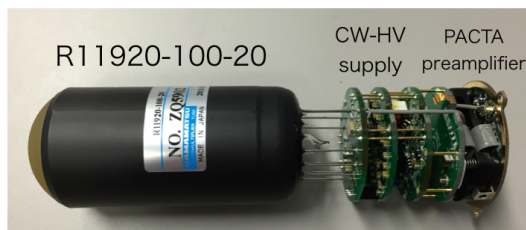


図 3: LST 用 PMT R11920-100-20

光子が PMT の光電面に入射すると、光電効果により電子が放出される。ここで入射光により光電面から放出される電子を光電子と呼ぶ。放出された光電子は収束電極により第一段ダイノードに収束され

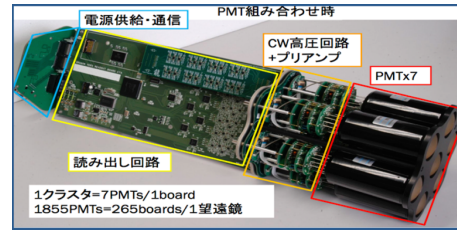


図 4: LST 用の PMT Module[3]

る。各ダイノードには電圧が印可されており、加速された電子がダイノードに衝突することで二次電子の放出を繰り返す。

また PMT の主要な諸特性としてアフターパルスと F ファクターがあり、以下でその概要について説明する。

- アフターパルス

PMT 内に残っている残留ガスと電子が衝突する事で、入射光由来の光電子の信号より遅れた疑似信号 (アフターパルス) が発生する。LST 運用の際はこのアフターパルスがエネルギー閾値を劣化させる要因になるため、アフターパルス発生確率は非常に重要なパラメータとなっている。

- F ファクター

$(S_{output}/N_{output})/(S_{input}/N_{input})$ で定義される値を F ファクターと呼び、これが 1 に近い PMT 程良い検出器である。F ファクターが重要になるのは望遠鏡に PMT を取付けた後である。N を入射光電子数、 μ をペDESTAL とシグナルのピークの差、 σ_0, σ_1 をそれぞれペDESTAL とシグナルの標準偏差とした時、以下の式が成り立ち、望遠鏡取付け後でも Gain Calibration が可能となる。

$$N = F^2 \frac{\mu^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \quad (1)$$

PMT は図 4 のように Module 単位で焦点面に取り付けられる。その際の PMT の組み合わせや、カメラ内の配置は PMT ごとのいくつかの諸特性を考慮して決定される。この諸特性は動作ゲインでの HV、パルス幅、量子効率、アフターパルス発生確率、F ファクターなどがある。また組み合わせや、配置決定以

外にも、モンテカルロシミュレーションによるガンマ線検出効率の研究を進めるにあたりこれら PMT の諸特性のパラメータは必要となる。これらの要請を満たすために、我々は LST 初号機用の PMT 約 2000 本について較正試験を行い、上記の諸特性の調査を行った。表 2 は LST 用 PMT への性能要求値である。

表 2: PMT に対する性能要求値 (一部抜粋)

パルス幅	平均 2.5~3ns[FWHM]
ピーク量子効率	平均 38 %
アフターパルス発生確率	0.02 % 以下@4p.e.
標準動作ゲイン	4×10^4

4 セットアップ

セットアップの模式図を図 5 に示す。測定の効率化のために 8 本同時測定を行っている。また 8 本のうち 2 本は Reference PMT として、常に測定を行っている。PMT に照射する光は Filter Wheel を使って、必要な光量を自動で調節出来るようになっている。PMT からのシグナルはアナログメモリの ASIC である DRS4 を用いて波形がサンプリングされ、ADC でデジタル変換されメイン PC へとデータが送られる。また 2000 本もの PMT を測定するにあたり長期的な試験が予想されるため、測定者の負担軽減、測定環境の統一、測定精度の向上及び可能な限りの人為的誤差の削減を実現するために、コンピューター制御による自動化された試験系を構築している。

図 6 は実際の暗箱内の様子である。左の二つの装置が Filter Wheel であり、ND フィルターの組み合わせを変えることで光量を調節している。右には PMT が 8 本並んでおり、手前の 2 に Reference PMT を設置している。

5 結果

図 7 から図 11 は較正試験より得られた、4 万ゲインでの HV、パルス幅、アフターパルス発生確率、過剰雑音係数 (F ファクター) の結果である。ただ QE

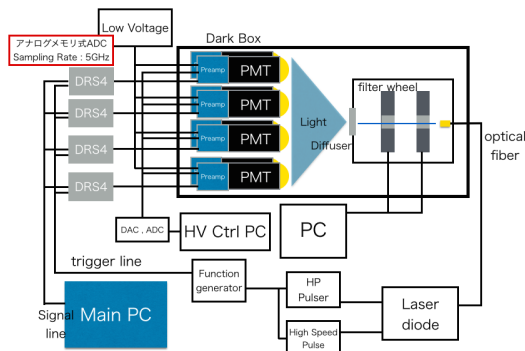


図 5: 試験系のセットアップ 模式図

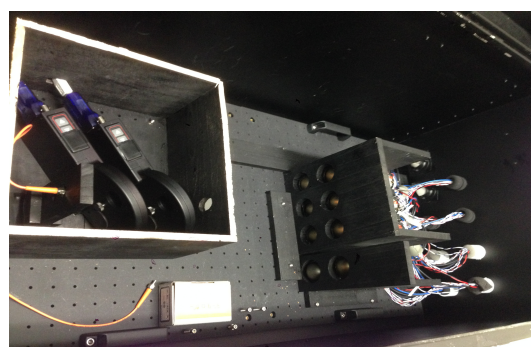


図 6: 暗箱内の様子

の測定は我々で行うのは困難なため、浜松ホトニクス側で測定した値を使っている。またこれらの結果は PMT 全数のものではなく、7 月 2 日時点で終了している 1649 本の測定結果についてのものである。

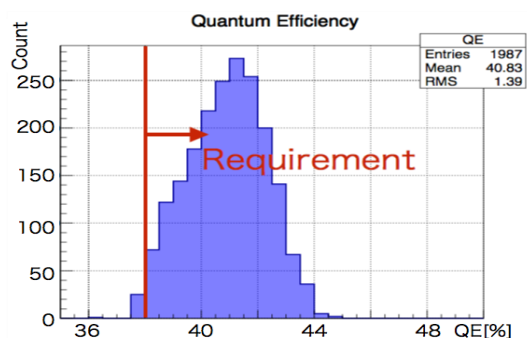


図 7: 量子効率

パルス幅、QE については要求値であるパルス幅平均 2.5~3ns、ピーク量子効率平均 38 % 以上を満たしている。アフターパルス発生確率も約 99 % の PMT が要求値である発生確率 0.02 % を満たしているとい

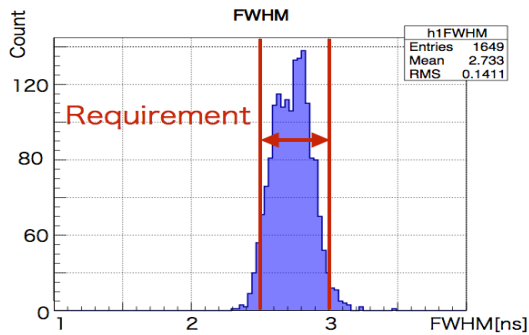


図 8: パルス幅

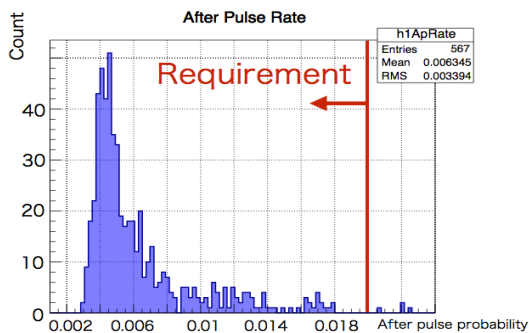


図 9: アフターパルス発生確率

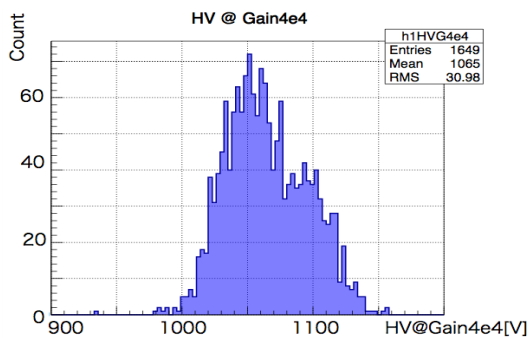


図 10: 4 万ゲインでの HV

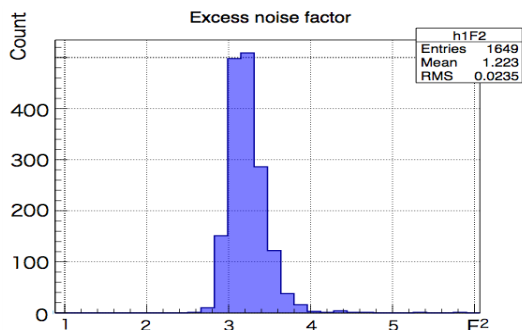


図 11: F ファクター

う結果が得られた。ただアフターパルスについては 2013 年 3 月以前に製造された PMT を主に測定対象にしているため、他の結果と比べ測定本数が少なくなっている。また運用ゲイン (4 万) での HV 値は平均で 1065V、標準偏差は約 31V であり、F ファクターは平均 1.22 という結果が得られた。

6 今後

現在までに 1649 本の PMT の較正試験が終了している。現在は一日あたり約 60 本の測定が可能であるため、今後も引き続き較正試験を進め、約 1 週間で全数の較正試験が終了する予定である。今後は得られた PMT の諸特性をもとに、カメラ内の PMT の最適な配置を決定する必要がある。また、PMT Module による試験も控えており LST 初号機建設に向け、試験を開始するための準備を行う予定である。

Reference

- [1] S.Funka and J.A.Hinton, 2012, arXiv:1205.0832
- [2] Cta-Home-Page.
<https://portal.cta-observatory.org/Pages/Home.aspx>.
- [3] H. Kubo et al. 2013, arXiv:1307.3386
- [4] 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会 (1998) 「光電子増倍管-その基礎と応用-」 浜松ホトニクス株式会社