

Cherenkov Telescope Array 計画大口径望遠鏡用光電子増倍管の開発

永吉勤 埼玉大学理工学研究科物理機能系専攻

Abstract

2015 年より建設が予定されている Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画において大口径望遠鏡に搭載される光検出器には光電子増倍管 (PMT) が採用される。PMT は浜松ホトニクス社を共同開発を行っており、現在は設計段階から量産体制へと移行しつつある。第一弾の量産分として、1000 本の PMT が納品されており、我々はこれらの性能評価を進めている。

CTA の光検出器に対する性能要求として、標準動作ゲイン 4×10^4 、パルス幅 3.0 ns 以下、量子効率 35% 以上、時間分解能 1.3 ns 以下、アフタパルス発生確率 0.02% 以下、という要求値が課せられており、これを量産型 PMT 満たしているかを試験する必要がある。またアフタパルスとは、入射光の検出後数マイクロ秒にわたって発生する疑似信号であり、本来の信号と全く同じ波形のため後段の電子学でノイズとして判別することが難しい。そのためアフタパルスの発生確率はガンマ線イベントに対するエネルギー閾値を劣化させる重大な要因となるため、特に慎重に評価しなければならない。

今回我々は量産型 PMT のアフタパルス発生確率に重点をおいて性能評価試験を行い、その結果アフタパルス発生確率は想定される動作状態においては要求値を満たしている事を確認出来た。本講演では PMT の開発状況と上記の性能評価試験について報告を行う。

1 CTA 計画

ガンマ線領域での宇宙線観測は、宇宙線起源と予想される超新星残骸や活動銀河核での量子加速、対消滅ガンマ線からのダークマター探査など高エネルギー分野での重要な位置にある。Cherenkov Telescope Array 計画ではこのようなガンマ線源を 1000 以上発見、系統研究が期待される。

1.1 ガンマ線の観測

ガンマ線が大気に入射した場合、電子陽電子対生成を起こす。そして生成された電子と陽電子が制動放射によりガンマ線を放射し、放出されたガンマ線は再び対生成を誘起する。この過程の繰り返しによって、雪崩的に増加した二次電子が地表に降り注ぐ空気シャワーと呼ばれる現象が発生する。このシャワー中の電子陽電子が大気中の光速を超えた場合、チェレンコフ光を放出する。このチェレンコフ光を地上で捕える望遠鏡をチェレンコフ望遠鏡という。複数のチェレンコフ望遠鏡で捕えたチェレンコフ光のイメージからシュミレーションにより空気シャワーを

再構成し、元のガンマ線の到来方向、エネルギーを測定することが出来る。

一方で、陽子などのハドロンも大気に入射した際に空気シャワー (ハドロンシャワー) を起こす。空気シャワーの 99% はこのハドロンシャワーであるため、ガンマ線シャワーを観測するにはハドロンシャワーとの分離が必要である。ハドロンシャワーはガ

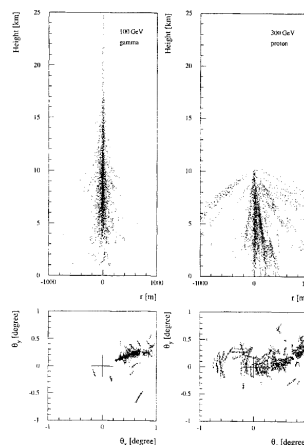


図 1: ガンマ線 (左) とハドロン (右) のシャワーの縦方向の発達 (上) と焦点面カメラにおけるチェレンコフ光子の分布 (下)?

ンマシャワーに比べて横への広がりが大きく、ガンマ線シャワーはコンパクトである (図 1 上)。このためハドロンシャワーを焦点面カメラで撮像した場合にシャワー像が拡散した像になるのに対して、ガンマ線シャワーのシャワー像は楕円形の像 (図 1 下) になる。この違いを利用し、チェレンコフ光の集光・撮像を行う事でガンマ線起源か、ハドロン起源かを判別することが出来る。

このガンマ線観測の手法は撮像型チェレンコフ望遠鏡によるステレオ観測と呼ばれ、10 GeV を超えるガンマ線観測において有効な手段となる。

1.2 Cherenkov Telescope Array 計画

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、複数のチェレンコフ望遠鏡を設置することで、従来よりも一桁高い感度かつ広いエネルギー領域でのガンマ線観測の実現を目指す、世界 25 カ国による国際共同実験計画である。

配置する望遠鏡の口径は 23 m, 12 m, 6 m の三種類あり、これを半径 10 km² に配置する。三種類の望遠鏡を配置することで観測可能領域は 20 GeV から 100 TeV と拡大され、MAGIC や H.E.S.S の感度が 1 TeV のエネルギーに対して ~10 mCrab であるのに対して、CTA では ~1 mCrab 程度と一桁以上の感度が向上する。エネルギー領域の拡大は三種類の望遠鏡がそれぞれ別々のエネルギー領域を観測することで実現する。口径が 23 m の望遠鏡が 20 GeV ~ 1 TeV, 12 m が 100 GeV ~ 10 TeV, 6 m が 1 TeV ~ 100 TeV をそれぞれ観測する。またより多くのチェレンコフの望遠鏡でステレオ観測することでより正確にガンマ線の到来方向や発生高度を決定し、精度の高いシャワーの再構成が可能になる。日本チームでは三種類の望遠鏡の内の大口径望遠鏡の開発を中心に CTA 計画に貢献している。

2 CTA 大口径望遠鏡

ガンマ線エネルギーの低くなることに比例してチェレンコフ光子の総数が減少するため 20 GeV から 1

TeV の低エネルギー領域をカバーする CTA の大口径望遠鏡の口径は 23 m となっている。また焦点面カメラのサイズは直径 2.5 m の大きさとなっている。焦点面カメラは 1855 本の光電子増倍管 (PMT) から構成され、夜光によるバックグラウンドを最小限に抑えるため、超高速エレクトロニクスにより積分時間を数ナノ秒まで短くしている。

2.1 光電子増倍管

光電子増倍管 (PMT) は、入射した光子が光電効果によって管内に電子を放射し、電子を増幅させて出力する光検出器である。

光子がガラス窓を通過し光電面に入射し光電効果

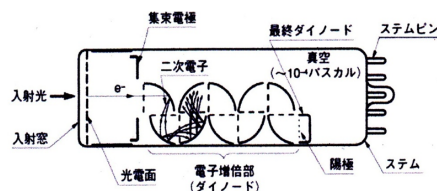


図 2: PMT の構造の概略

により、光電面内の電子を励起させ、光電子を放出する。放出された光電子は集束電極によってダイノード上に集束される。ダイノード間には数 100 V 程度の電圧がかかっており、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が放出され電子が増幅する。この様に一段目のダイノードによって増幅された二次電子は、同様にして後段のダイノードで増幅されていく。こうして増幅された電子は、陽極に集束していき、電流として出力される。PMT への印加電圧は、PMT 中の回路によって各ダイノードに決まった電圧比に分割されるため、ダイノードでの電子の増幅率はダイノード間にかけられた電圧によって決定する。

2.2 CTA 大口径望遠鏡光検出器用 PMT

大口径望遠鏡に使用される光電子増倍管は図 3 のように PMT 本体に高電圧電源と、プリアンプを合わせた一組の PMT ユニットとして使用される。光

電子増倍管の陽極から出力された電流は、プリアンプによって電圧信号として光電子増倍管ユニットから出力される。

CTA が PMT に要求する性能の一部を表 1 に示す。

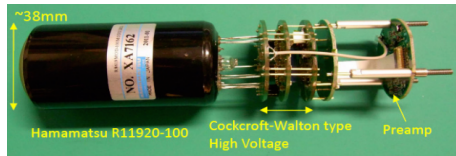


図 3: 高圧回路、Preamp 回路を含めた PMT ユニット

表 1: CTA の要求性能

標準動作ゲイン	~ 4 × 10 ⁴
量子効率	35 % 以上
時間分解能	1.3 ns 以下
アフタパルス	0.02 % 以下
パルス幅	2.5~3.0 ns

夜光からのアフタパルスの発生確率が高い場合、大口径望遠鏡のエネルギー閾値や数 10 GeV の低エネルギー帯域での感度や時間分解能を劣化させる原因となる。そのため本研究では PMT の性能要求のなかでもアフタパルス発生確率に重点を置き、性能評価試験を行った。また PMT のゲインは動作時間とともに減少するため、CTA の稼働を続けていく中で PMT への印加電圧を上げることが予想される。印加電圧を上げることでアフタパルス発生確率が要求値を超えてはならないので、アフタパルス発生確率の印加電圧依存性に対する依存性を調べた。

3 アフタパルスの評価測定

3.1 アフタパルス

PMT 内の残留ガスが電子の衝突によってイオン化し、このうちの正イオンが光電面まで戻るイオンフィードバックと呼ばれる現象により、アフタパルスが発生する。アフタパルスの発生時間は入射光のパルス後、数百ナノ秒から数マイクロ秒まで分布し、信号レベルは数 p.e. から大きいもので数十 p.e. まで

達する (1 p.e. は 1 個分の光電子 (photoelectron) を励起させる光量に相当する信号レベルのこと)。CTA 大口径望遠では、入射光のパルスが 1 p.e. あたり、4 p.e. 以上のアフタパルスの発生確率が 0.02 % 以下であることが要求されている。

本研究において、アフタパルスの発生確率は以下のように定義した。

$$R_{AP} \equiv \frac{1}{C_{\text{signal}}} \cdot \frac{N_{AP}}{N_{\text{Main}}} \left[\frac{\%}{\text{p.e.}} \right]$$

R_{AP} , C_{signal} , N_{AP} , N_{Main} はそれぞれアフタパルス発生確率、メインパルスの電荷量、アフタパルスのイベント数、メインパルスのイベント数である。メインパルスは入射光のパルスの事である。つまり R_{AP} は 1p.e. あたりのアフタパルスの発生確率である。

3.2 測定方法

アフタパルス測定のセットアップを図に示す。光

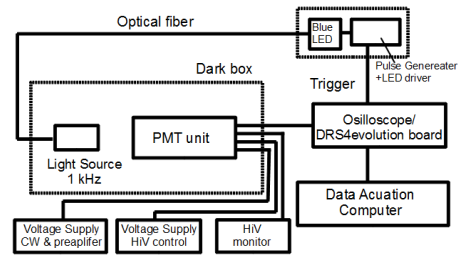


図 4: アフタパルス測定のセットアップ図

源には青色 LED を使い、pulse generator によって 1 kHz の頻度で LED driver が駆動し、10nsec 以下で発光が行われる。driver には kapstinsky 回路 (Kapustinsky, et. al.1985) を用いた。LED の光は光ファイバーを用いて暗箱の中へと伝え、PMT を照射する。また pulse generator からは LED の発光と同期したトリガー信号が出力される。このトリガー信号によって、LED 照射のたびに PMT から出力された波形データを 1 GHz のサンプリングレートで FLASH ADC で取得する。また直流電源によって高圧回路とプリアンプへの駆動電圧を供給し、別ラインの直流電源によって PMT への印加電圧のコントロールを行う。メインパルス後 2 μ s の範囲のイベントを 30

万回測定し R_{AP} を得た。

以上のセットアップで型番 NoZQ5851、ZQ5853、ZQ5861 の 3 本の PMT の R_{AP} を印加電圧 1000～1300 V の場合で測定した。設計上 1500 V までの印加が可能だが PMT への負荷を減らすために今回の上限を 1300 V までとした。

4 結果と考察

PMT3 本の測定結果を図 5 に示す。それぞれの PMT の 4p.e. 以上の R_{AP} は型番、高

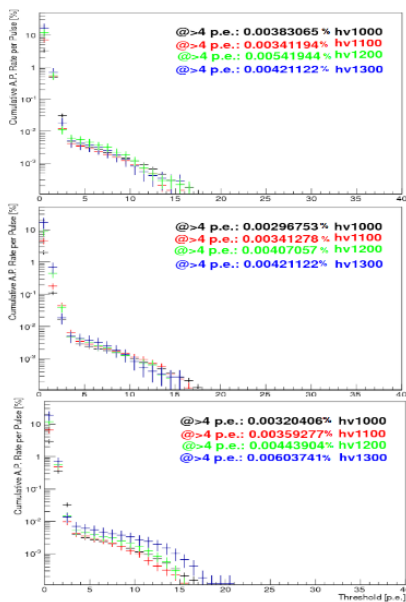


図 5: 縦軸は R_{AP} [%] であり、横軸はアフタパルス電荷に対する閾値である。三つのグラフはそれぞれ ZQ5851(上)、ZQ5853(中)、ZQ5861(下) の測定結果である。またプロットされた黒、赤、緑、青の点はそれぞれ印加電圧が 1000 V、1100 V、1200 V、1300 V のときの場合である。

電圧によらず要求値の 0.02 % 以下を十分に満たす結果となった。印加電圧に対する R_{AP} の依存性は、印加電圧の上昇に伴って R_{AP} が増加する傾向に見えるが、誤差の範囲で一致しているため頭には見えない。そこで印加電圧 1500 V での R_{AP} を値を調べるため、PMT ごとの測定結果を一次関数でフィッティングした。図 6 に各 PMT のフィッティングした直線と 4p.e. 以上の R_{AP} を示す。

このときの印加電圧に対する R_{AP} の依存性は、 $(4.27 \pm 4.04) \times 10^{-6}$ [%/V](ZQ5851)、 $(4.56 \pm 0.61) \times$

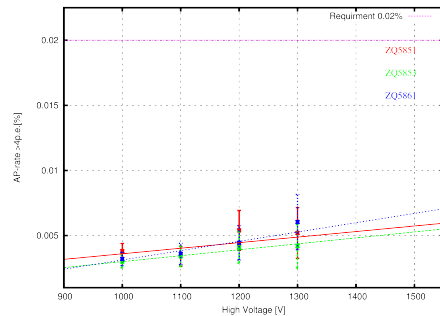


図 6: 縦軸は要求基準となる 4p.e. 以上の R_{AP} [%] であり、横軸は印加電圧 [V] である。赤、緑、青の点と線はそれぞれ ZQ5851、ZQ5853、ZQ5861、ZQ5861 の測定結果と一次関数でフィッティング結果である。またエラーバーの大きさはそれぞれの測定での統計誤差である。

10^{-6} [%/V](ZQ5853)、 $(7.15 \pm 1.79) \times 10^{-6}$ [%/V](ZQ5861) となる。またそれぞれの型番での印加電圧 1500 V で予想される R_{AP} は以上ようになる。

$$\text{ZQ5851 : } R_{AP} = (0.00574 \pm 0.0104) \text{ [%/V]}$$

$$\text{ZQ5853 : } R_{AP} = (0.00528 \pm 0.0016) \text{ [%/V]}$$

$$\text{ZQ5861 : } R_{AP} = (0.00671 \pm 0.0046) \text{ [%/V]}$$

どの型番の PMT も印加電圧 1500 V において R_{AP} の値は 0.02 % 以下であることが分かる。以上より今回の測定では量産型 PMT の R_{AP} は予想される動作環境において常に要求値を満たしていると結論が得られた。

5 まとめ

本研究では CTA の PMT への性能要求の内、アフタパルスに注目し、量産型 PMT の性能評価試験を行った。測定の結果量産型 PMT はアフタパルスに関しての予想される印加電圧においては要求値を十分に満たしている事が分かった。

今後はアフタパルス以外にも PMT に要求される性能、パルス幅、量子効率についての測定を進めていく。

Reference

Aharonian et al. 1997, *Astropart. Phys.*, 6, 343
 The CTA Consortium et al. 2010, *Experimental Astronomy*, 32:193-316
 Kapustinsky, et al., 1985, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*241 612-613