

ガンマ線望遠鏡 CTA に用いる大口径望遠鏡用光電子増倍管の 磁場依存性の検証

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、次世代チェレンコフ望遠鏡を用いたガンマ線観測を目的とする、世界 28 ヵ国、約 1200 名以上が参加する国際共同計画である。望遠鏡は 2016 年に建設開始予定としている。CTA 計画では大中小の 3 つの異なる望遠鏡を複数建設することにより、20 GeV から 1000 TeV 帯域のガンマ線観測を従来よりも一桁高い感度で実現する。

CTA 日本グループは中でも口径 23 m の大口径望遠鏡の開発に貢献している。大口径望遠鏡の光検出器には一台につき 1855 本の光電子増倍管 (PMT) が配置される。PMT はチェレンコフ光を光電効果により受光し、電子増幅を行い電気信号として出力する。そして検出したチェレンコフ光の情報から、もとのガンマ線の強度や入射角を推定する。この上で 1000 光電子レベルの信号に対し 10 % 以下の精度で信号レベルを決定することが要求されている。したがって、PMT における電子の増幅率 (ゲイン) を正しく評価する必要がある。CTA 計画は地上でのガンマ線観測のため、PMT のゲインが地磁気により変化する恐れがある。この影響を防ぐために PMT には磁気シールドを巻いている。我々はこの磁気シールドの効果が要求を満たすものであるかを確かめる必要がある。

今回、我々は PMT に磁場をかけゲインの磁場依存性と、磁場による角度依存性を検証した。その結果、地磁気の 2 倍ほどの磁場中でもゲインの変化は 1 % 程度であり、CTA の要求値を満たしていることを確認した。本講演では上記の性能評価試験についての報告を行う。

1 地上におけるガンマ線の観測方法 2 Cherenkov Telescope Array 計画

高エネルギーガンマ線が地球大気に入射すると大気中の原子核との相互作用により、電子陽電子対生成を起こす。2 次的に生成された電子と陽電子は制動放射を起こしてガンマ線を生成し、さらにこのガンマ線が電子陽電子対生成を起こす。このように反応が連鎖的に生じることで電子のシャワー (空気シャワー) を形成する。このシャワー中での電子、陽電子の速度が空気中の光速度を超えて走ることでチェレンコフ光を放出する。このチェレンコフ光を地上のチェレンコフ望遠鏡で捉えることで、ガンマ線を間接的に観測することを可能にする。

従来の観測施設は H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS などがあり現在でも稼働中であり、これらに続く次世代計画として CTA 計画がある。

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、ヨーロッパ、アメリカ、日本を中心とした世界 28 ヵ国、約 1200 名以上が参加する国際共同計画である。南半球と北半球に 2 つのサイトを持ち、口径の異なる 3 種類の大きさの望遠鏡を 10 km² の領域に敷き詰め、従来の観測装置よりも 10 倍深い感度の達成を目指す。23 m 口径の Large-Sized Telescope (LST) は低エネルギー側 (20 GeV~1000 GeV)、12 m 口径の Medium-Sized Telescope (MST) は中エネルギー側 (100 GeV~10 TeV)、6 m 口径の Small-Sized Telescope (SST) は高エネルギー側 (1 TeV~100 TeV) を担っており、全体として 20 GeV から 100 TeV までのエネルギー領域が観測可能となる。2016 年に建設開始、2020 年には完全運用開始が予定されている。日本チームは主に大口径望遠鏡の開発に貢献してお

り、その仕様は表 1 の通りである。

口径	23 m
エネルギー帯域	20 GeV - 1000 GeV
カメラ直径	2.25 m
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光検出器には光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube:PMT) が採用されている。1 つの PMT と分圧回路、昇圧回路、プリアンプ回路を一組の PMT 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 クラスターとなる (図 1)。LST の

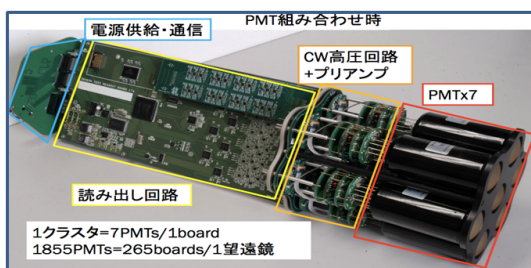


図 1: LST でのカメラクラスター (Hidetoshi,Kubo et al. 2013)

カメラ部にはこのクラスターが 265 個集まっており、LST 一台につき焦点面検出器は 1855 本の PMT で構成される。

図 2 は PMT の構造図である。チェレンコフ光が光電

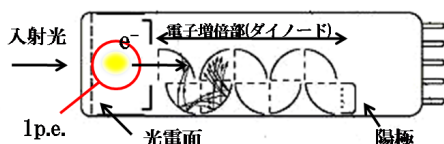


図 2: PMT の構造 (浜松ホトニクス株式会社 編集委員会 (1998))

面に入射すると、光電面内の電子を励起し光電子を

放出する。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る。各ダイノード間には印加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を放出を繰り返す。また、入射光により励起され光電面から放出される電子を光電子 (photo electron : 以下 p.e.) と呼ぶ。

PMT は内部で電子が長い距離を走行するため、磁場に対して感度を持つと考えられる。CTA では LST におけるエネルギー閾値 20 GeV を達成する為に、Charge resolution 16 %@100p.e. (図 3) という要求があり、PMT の磁場感度はそれ以下である必要がある。PMT には磁場による影響を防ぐために磁気シールド (パーマロイ) を巻いているが、実際に CTA で運用する際に地磁気に対する影響を防ぐのに十分であり、上記の要求値を満たしているか確かめなければならない。そのため本研究では PMT の磁場依存性を調べ、その結果から地磁気による PMT からの出力電荷量の変化が CTA 要求値 16 %@100p.e. を満たし、かつ要求値に対して十分小さな値であるか検証した。

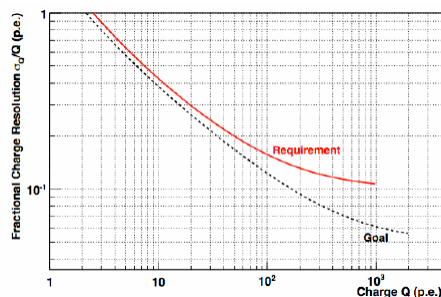


図 3: LST の Charge resolution に対する要求値 (Konrad Bernlohr. and German Herman. and Jim Hinton. 2012)

4 測定方法

実験のセットアップを図 4 に示す。PMT の周りにヘルムホルツコイルを設置して、PMT に磁場をかける。印加電圧の大きさは 1100V であり、このときのゲインは約 1.8×10^5 である。また、PMT に巻いている磁気シールドの厚みは 0.2mm である。

まず図 5 のように X,Y,Z 軸を定義する。X,Y 軸は

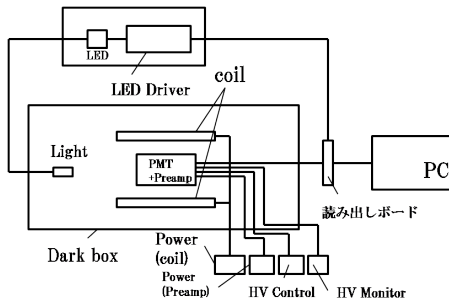


図 4: 磁場依存性測定の設定アップ図

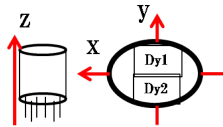


図 5: X,Y,Z 軸の定義

PMT の第一段、第二段ダイノードに対しそれぞれ垂直な方向に、Z 軸は PMT に対し平行な方向に定義する。磁場はそれぞれの軸に対して平行な方向にかける (図 6)。かける磁場の大きさは約 0.1 mT~0.4 mT の範囲で、約 0.1 mT 刻みで大きくして、各磁場中での出力される電荷量を測定した。

次に、PMT に対して図 7 のように X,Y,Z 軸に対す

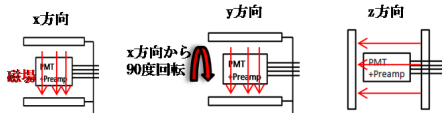


図 6: 各軸への磁場のかけ方

る 3次元極座標を考え、 θ, φ を定義する。X,Y,Z 方向の測定と同じく磁場の大きさを 0.1 mT から 0.4 mT まで変えて、各磁場に対してかける角度を 0° から 180° の範囲で 30° 刻みで変えて、電荷量を測定した。

5 結果

X,Y,Z 軸方向に磁場をかけた測定で得られた、電荷量のヒストグラムを図 8 に示す。1p.e. や 2p.e. 測定では電荷量の変化が小さく測定が難しいので、X,Y 方向は 110p.e.、Z 方向は 145p.e. で測定を行った。X,Y 方向は電荷の変化がほとんど無く、Z 方向では

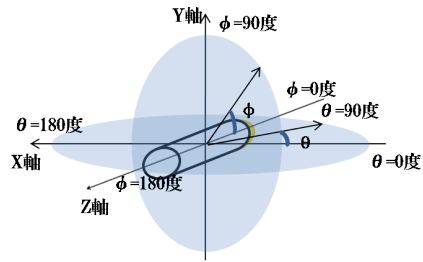


図 7: θ, φ の定義

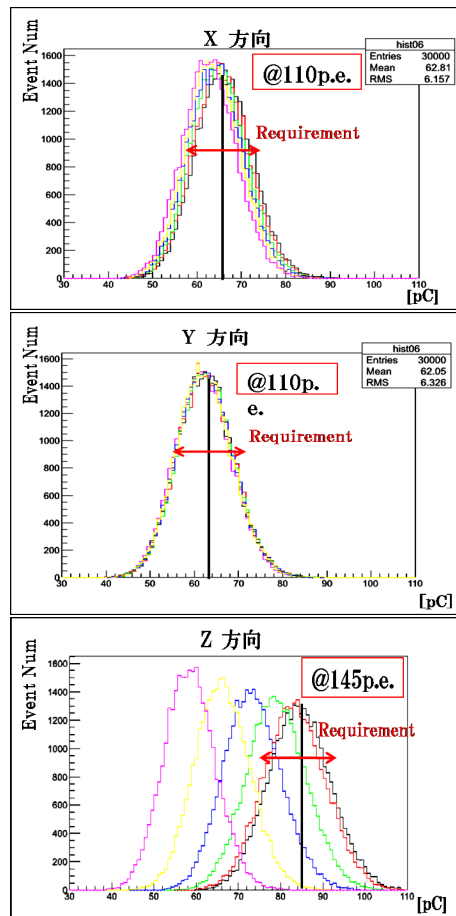


図 8: X,Y,Z 方向それぞれに磁場をかけた時に、出力された電荷量のヒストグラムを重ねたもの。磁場の大きさ [mT] は X,Y 方向で水色:0, 黒:0.12, 赤:0.15, 緑:0.21, 青:0.28, 黄:0.35, マゼンタ:0.42, Z 方向で水色:0, 黒:0.13, 赤:0.15, 緑:0.21, 青:0.27, 黄:0.33, マゼンタ:0.40 に対応している。

大きく変化する結果となった。X,Y 方向での要求値は 15%、Z 方向での要求値は 13% である。図 3 から、要求値は信号レベル (p.e.) に依存するので X,Y 方向と Z 方向では要求値が異なっている。図 9 は磁

場に対する相対的な電荷量をプロットした図である。Requirement 直線から、X,Y 方向では 0.42 mT まで、Z 方向は 0.21 mT までなら要求値を満たしていることが分かる。

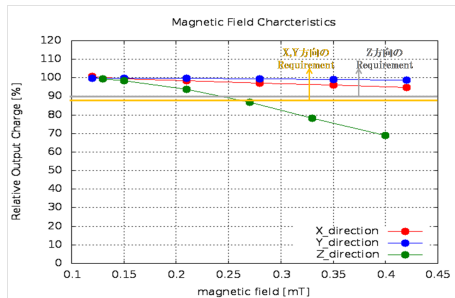


図 9: 横軸:磁場の大きさ [mT]、縦軸:磁場をかけた時に出力される電荷量を、磁場をかけていない時の電荷量で割った値 [%]。X(赤),Y(青),Z(緑) 方向に磁場をかけたときの測定結果である。X,Y 方向に対する Requirement 直線(黄)、Z 方向に対する Requirement 直線(灰)。

また、 θ, φ 方向に対する結果は図 10 である。同様

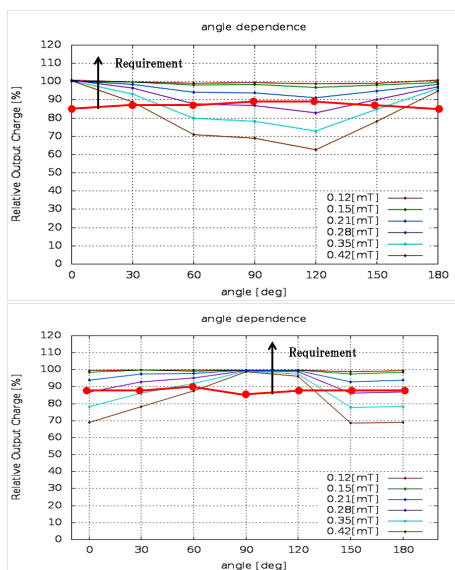


図 10: 磁場が一定の時の、PMT から出力される電荷量の角度依存性。赤:0.12[mT]、緑:0.15[mT]、青:0.21[mT]、紫:0.28[mT]、水色:0.35[mT]、茶:0.42[mT] に対応している。太い赤線は Requirement である。

に、全体として 0.21 mT までは Requirement を満たしている。

6 考察

測定結果から、要求値に対する地磁気による影響を推定する。図 10 から、どの角度でも要求値はおおよそ 10 % 程であり、今回の測定での磁場の最小値 0.12 mT の磁場中では、どの角度でも電荷の変化は 1 % 程である。実際の地磁気の大きさはおよそ 0.4~0.6 mT であり、測定の最小値である 0.12 mT の半分程である。そのため、地磁気による電荷の変化の上限値は 1 % 程であると考えられ、要求値 10 % に対し十分小さいと考えられる。以上より、PMT のオペレーションは地磁気に対し十分に要求値を満たし、かつ地磁気による影響は要求値に対して十分小さく、その影響は小さいと考えられる。

7 まとめ

本研究では、PMT の性能評価試験として磁場依存性を検証した。その結果から PMT のオペレーションは十分に要求値を満たしていることが確認でき、地磁気の影響による PMT からの出力電荷量の変化は 1 % 程であり、CTA での要求値に対して十分小さいという結論が得られた。

Reference

- [1] The CTA Consortium et al. 2013, "Introducing the CTA concept,". *Astroparticle Physics*, 43:3-18
- [2] Hidetoshi, Kubo et al. 2013, "Development of the Photomultiplier-Tube Readout System for the CTA Large Size Telescope,". arXiv:1307.3386
- [3] Konrad Bernlohr. and German Herman. and Jim Hinton. 2012, "Level B:CTA Sub-System Performance Requirements,".
- [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