

CTA 計画における大口径望遠鏡カメラ窓の促進耐光性試験

本橋 大輔 (茨城大学大学院 理工学研究科)

Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、口径の異なる大中小 3 種類の解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を設置することで、既存の望遠鏡に比べて 1 桁高感度で、非常に幅広いエネルギー領域 (20 GeV - 100 TeV 以上) をカバーすることを目指す国際共同実験計画である。この計画には現在 31ヶ国が参加しており、その中で日本グループは主に大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope ; LST) の開発に大きく関わっている。大口径望遠鏡は、高エネルギーガンマ線が大気中を通過するときの電磁カスケードにより発生するチェレンコフ光を鏡で集光し、焦点面にあるカメラで検出する。しかし、そのカメラは湿気やダストから守るために密閉性が要求されており、透明な窓で覆う必要がある。したがって、その窓は波長 400 nm 以下の紫外線も十分に透過することが要求される。しかし、望遠鏡は建設されると長期間に渡って太陽光や風雨などの気象環境に曝されることになるため、高い耐候性も同時に求められる。そこで太陽光の紫外線による影響に焦点を絞り、紫外線蛍光ランプを用いた促進耐光性試験により大口径望遠鏡カメラ窓の透過率変化を評価した。本講演ではこの測定について報告する。

1 Introduction

1.1 CTA 計画

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、口径の異なる大中小 3 種類の解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を 3-10 km² の領域に 100 台近く設置することで、既存の望遠鏡に比べて 1 桁高感度で、非常に幅広いエネルギー領域 (20 GeV - 100 TeV 以上) をカバーすることを目指す国際共同実験計画である。

地球に到来する高エネルギーガンマ線は、大気原子核と相互作用により、地上で直接観測することは出来ない。そこで、高エネルギーガンマ線が大気中を通過するときに発生する空気シャワーと呼ばれる大量の粒子群によるチェレンコフ光を検出することで、間接的に高エネルギーガンマ線を観測する仕組みの望遠鏡を大気チェレンコフ望遠鏡という。この望遠鏡は反射鏡を用いてチェレンコフ光を集め、焦点面に設置されたカメラでチェレンコフ光のイメージを捉える。大気チェレンコフではこれらのイメージの形状を解析し、ガンマ線由来のチェレンコフ光であるのか、宇宙線陽子由来のものであるのかを弁別する。

1.2 Cherenkov Radiation

地球に到来する高エネルギーガンマ線は、大気と相互作用することにより電子陽電子対生成を起こし、電子・陽電子を発生する。さらにそれらが大気原子核によって制動放射を起こし、ガンマ線を発生する。この反応は、ガンマ線のエネルギーが電子陽電子対生成が優位である約 83 MeV(地球大気) 以下になるまで繰り返し起こることで、雪崩的に粒子が生成され、空気シャワーが発達する。これを電磁カスケードシャワーという。また、宇宙線陽子と大気原子核との相互作用により生じた π 中間子が生成する空気シャワーをハドロンシャワーという (図 1)。

これらの過程で生成した荷電粒子の速度が大気中の光速を超えることによって、チェレンコフ光という光を円錐状に放射する。チェレンコフ光の波長分布は $1/\lambda^2$ に比例するスペクトル分布を持つが、大気中の酸素やオゾンによる吸収、レイリー散乱、ミー散乱により減衰を受け、地上ではおよそ 300 nm から 600 nm に分布した光となる (図 2)。

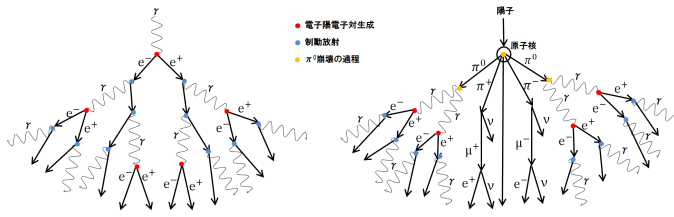


図 1: 電磁カスケードシャワー (左) とハドロンシャワー (右) の模式図 [3]

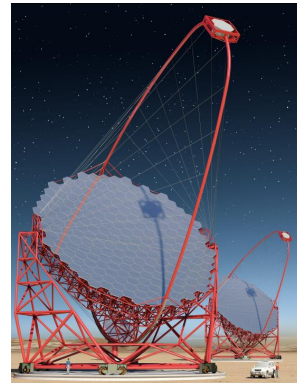


図 3: 大口径望遠鏡 [1]

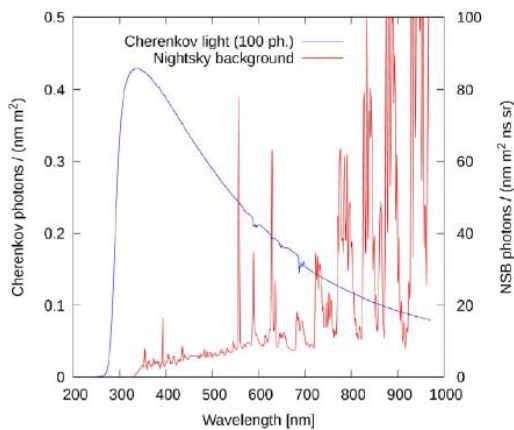


図 2: 地上に到達するチェレンコフ光のスペクトル (青) と夜光バックグラウンド (赤)[2]

1.4 Entrance Window

大口径望遠鏡の焦点面カメラは、湿気やダストから守るために密閉性が要求されており、カメラの入口 (焦点面側) は透明な窓で覆う必要がある。1.1 で述べたように、地上に到達するチェレンコフ光はおよそ 300 nm から 600 nm に分布した光となる。したがって、その窓は波長 400 nm 以下の紫外線も十分に透過することが要求される。また、大口径望遠鏡の焦点面カメラ入口を覆うためには、2.5 m 以上の大きさが必要となる。現在、十分な大きさの製品が製造可能な UV 透過型アクリル板として、「三菱レイヨン」製の「アクリライト®」が候補に挙げられている (図 4)。この製品の一番の特長として、全光線透過率 93% という無機ガラスを凌ぐ透過性があるという点が挙げられる。

1.3 Large-Sized Telescope(LST)

CTA 計画における大中小の 3 種類の望遠鏡のうち、日本グループは主に大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope ; LST) の開発に大きく関わっている。大口径望遠鏡はカーボンファイバーチューブによるスペースフレーム構造の土台に、1.51 m 分割球面鏡を約 200 枚組み合わせ合わせた口径 23 m の放物面型複合鏡、焦点面には光電子増倍管 (Photomultiplier Tube ; PMT) を取り付けられた構造となっている (図 3)。

反射鏡によって集光されたチェレンコフ光は、焦点面に搭載された高性能光検出器で構成されるカメラにより撮像される。大口径望遠鏡の焦点面カメラは 1855 本の光電子増倍管によって構成され、直径は 2.25 m にもなる。



図 4: 直径 1.3 m、8 mm 厚の「アクリライト®」を球型に加工したもの [1]

「アクリライト®」などのアクリル板は主にポリメチルメタクリレート (Polymethylmetacrylate ; PMMA) という物質から構成されている。紫外線照射による PMMA の劣化は様々な論文などで報告され

ているが、照射後に透過率が回復するという報告もされている。波長 253.7 nm の UV ライトを PMMA 光ファイバーに照射すると透過率は低下するが、照射から数日経過すると、初期値の数分の一まで透過率が回復するという内容である [4]。図 5 では、60 分間 UV 照射を行った PMMA 光ファイバーの照射直後の透過率は、未照射の 15% 程度まで低下しているが、その後 75 時間で約 50% 程度まで回復している。これらの結果より「アクリライト®」も紫外線に対してこのような振る舞いを見せる可能性があるため、透過率を測定する際には、注意しなければならないと考えられる。

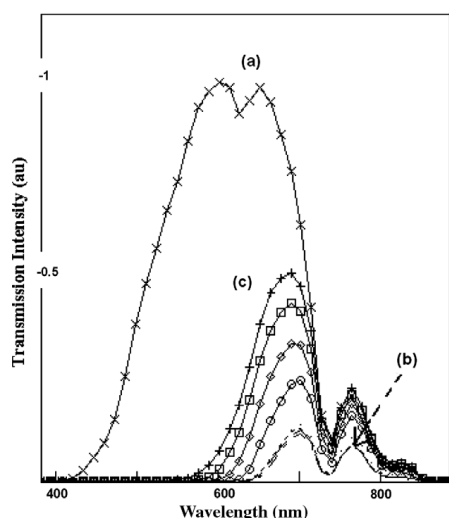


図 5: 60 分間 UV 照射した PMMA 光ファイバーの透過率回復
(a) 未照射 (b) 照射直後 (c) 照射から 75 時間後) [4]

2 Methods

CTA 計画における大口径望遠鏡カメラ窓に対する太陽光 (特に紫外線) の影響を調査するにあたって、屋外に曝露した場合と比較が可能な、再現性の高い促進耐光性試験を行う必要がある。地上に到達する太陽放射の紫外線は、大気 (オゾン、酸素) による吸収によって、主に UV-A (315 - 400 nm) であると推定することができる。再現性の高い試験を行うための重要な点は、ランプのスペクトルが太陽放射のスペクトルに似ていることである。

2.1 促進耐光性試験に用いるランプの選定

促進耐光性試験機を制作するにあたって、一般的に促進耐光性試験に用いられている以下の一般に促進耐光性試験で用いられている紫外線カーボンアークランプ、キセノンアークランプ、紫外線蛍光ランプ、メタルハライドランプの 4 つのランプを選定の対象として調査した。

- 紫外線カーボンアークランプ

紫外線領域の放射が全体の 80% 以上を占めるので、降雨のない耐光性試験によく用いられている。しかし、358nm、368nm、415nm をピークとして、極端に偏ったスペクトルのため、太陽放射スペクトルとは全く異なる放射スペクトルであり、屋外曝露の再現という点では適していない。

- キセノンアークランプ

希ガスであるキセノンガス中でアーク放電させ、励起されたガスが基底状態に戻るときに発光する光が、地表での太陽放射スペクトルに似ていることを利用したものである。放射スペクトルが地上に到達する太陽放射スペクトルに似ているので、屋外曝露との相関性、再現性に優れている。

- 紫外線蛍光ランプ

通称ブラックライトとして安価に市販されている。放射スペクトルは、太陽紫外線のなかで主に地上に届く UV-A (315-400 nm) 領域と、わずかに可視光領域が含まれている。

- メタルハライドランプ

封入された水銀と各種金属のハロゲン化物を含む蒸気中でアーク放電させる、水銀ランプの一種である。封入される各金属の輝線が数多く見られるため強度としては、非常に大きいランプであるが、物質の組成が複雑であるので、同じランプであっても放射スペクトルのばらつきは避けられない。

以上から、太陽放射のスペクトルに似ていること、実験室での扱いやすさを考慮した結果、紫外線蛍光ランプを用いることを決定した。本試験では日立製

FL20S・BL-B(20 W) を 2 本使用した簡易的な促進耐光性試験機を制作した (図 6、図 7)。

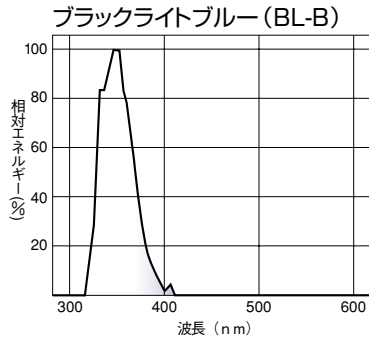


図 6: 紫外線蛍光ランプの放射スペクトル [5]

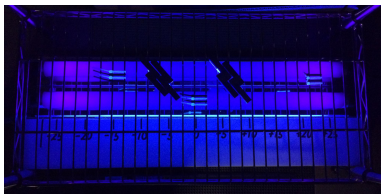


図 7: 促進耐光性試験の様子

3 Results and Discussion

紫外線を照射していない「アクリライト®」サンプル (50 × 50 × 8 mm) の透過率変化を示す。透過率は日本分光製の紫外可視近赤外分光光度計 V-570 (東京大学物性研究所) を用いて測定している。このサンプルは紫外線照射をしていないので、透過率変化は測定日によるばらつきであると考えられる。図 8 より 150604 のデータを除けば、350 nm 付近では 1% 以内の誤差で測定が出来ていることが分かる。150604 のデータに関しては何らかの装置の問題が起きたと考えられるが、茨城県工業技術センターの分光光度計を用いるなどして原因を調査中である。また、複数の分光光度計を用いて測定する場合、リファレンスを用意するなどしてキャリブレーションを行うことで同様の結果が得られるのではないかと想定される (通常、透過率測定ではリファレンスには何も置かない状態でキャリブレーションを行う)。

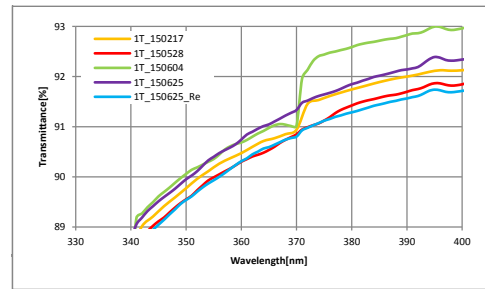


図 8: サンプル (紫外線未照射) の透過率変化 (350 nm 付近)

Re は同日の再測定

4 Conclusion

屋外曝露に対して再現性の高い試験を行うため、一般的に促進耐光性試験で用いられているランプの中から紫外線蛍光ランプを選定し、試験機を制作した。また、分光光度計を用いた「アクリライト®」の透過率測定では、誤差 1% 以内での測定が可能であることが分かった。現在、「アクリライト®」の促進耐光性試験を続行中である。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

また、茨城県工業技術センターの測定へのご協力に感謝いたします。

Reference

- [1] CTA-Japan 計画書、東京大学宇宙線研究所、2014
- [2] LST-TDR(Technical Design Report)、2015
- [3] 馬場浩則、修士論文「次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA 計画における大口径望遠鏡の分割鏡の集光性能評価の研究」、茨城大学、2014
- [4] J.M. Taguenang, A. Kassu, P.B. Ruffin, C. Brantley, E. Edwards, & A. Sharma, "Reversible UV degradation of PMMA plastic optical fibers", Optics Communications, 281, 2089-2092, 2008
- [5] 日立アプライアンス株式会社 HP、ブラックライトブルー BL-B
<http://www.lighting.hitachi-ap.co.jp/lighting/>