

チェレンコフ望遠鏡カメラモジュールに向けた MPPC の性能評価

名古屋大学 CR 研 M1 日高直哉

1. 解像型大気チェレンコフ望遠鏡を用いた高エネルギーガンマ線の観測

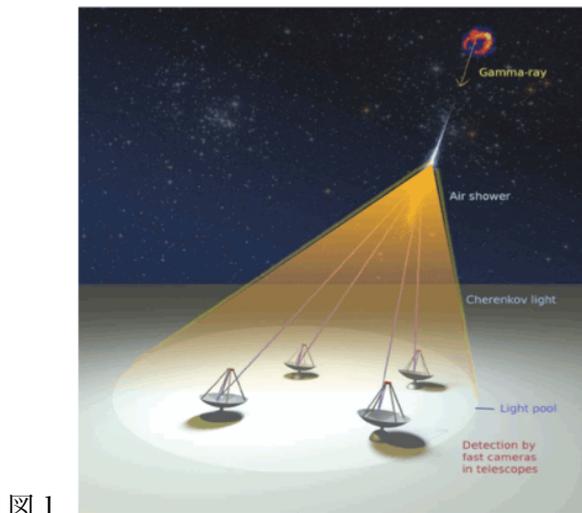


図 1

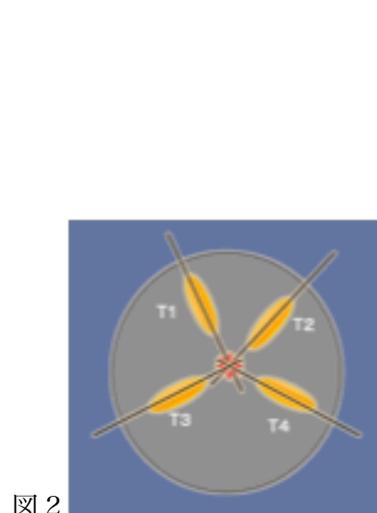


図 2

宇宙から飛来するガンマ線は大気中で相互作用をし、大量の電子陽電子を生成する電磁シャワーを形成する。このような電子・陽電子の速度は、空気中の光速度を超えるため、チェレンコフ光を放射する。解像型大気チェレンコフ望遠鏡は、この光を検出することにより、ガンマ線由来の電磁シャワーを観測する(図 1)。複数の望遠鏡でのシャワーのイメージから、電磁シャワーの起源となったガンマ線のエネルギーや、到来方向といった情報を得ることが出来る(図 2)。

これまで MAGIC, H.E.S.S., VERITAS などの解像型大気チェレンコフ望遠鏡によって、我々が観測できるガンマ線のエネルギーは TeV 領域にまで広がった。解像型チェレンコフ望遠鏡、Fermi 衛星などの活躍により近年のガンマ線天文学は大きく発展し、宇宙線の起源、宇宙での非熱的過程、活動銀河核やガンマ線バーストの相対論的ジェット、銀河間空間を満たす赤外・可視領域背景放射等の問題が徐々に解き明かされつつある。

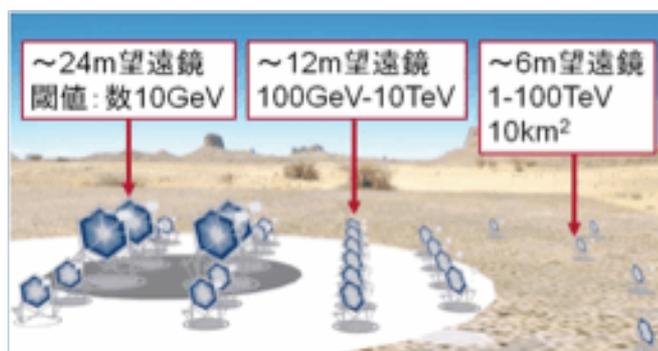


図3

解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を用いたガンマ線観測の決定版として、現在、CTA(Cherenkov Telescope Array)計画が進められている。

CTA は、図3のように、低エネルギー帯域に感度を持つ大口径(~24 m)、中間エネルギー帯域に感度を持つ中口径(~12 m)、高エネルギー帯域に感度を持つ小口径(~6 m)、三種類のチェレンコフ望遠鏡60台からなり、図4に示すように数10 GeV から100 TeV までの広いエネルギー範囲での観測を可能とし、銀河系内、銀河系外の高エネルギー天体を観測する。多数の望遠鏡を用いることで集光エリアの拡大と、ステレオ観測(1つのシャワーあたり平均6台)による角度分解能の向上が可能となり、従来の解像型大気チェレンコフ実験の10倍の感度向上が期待出来る。およそ1年の観測時間(有効観測時間1000時間)でTeVガンマ線領域で初めて全天の走査が可能で、10 mCrab(mCrabはかに星雲の1000分の1の強度)の感度で全天マップを作成する予定である。個々の興味深い天体に関しては、より長時間の観測により1 mCrabの感度で観測が可能である。CTAは2015年建設開始を予定しており、それに向けて世界各国で研究開発が進められている。

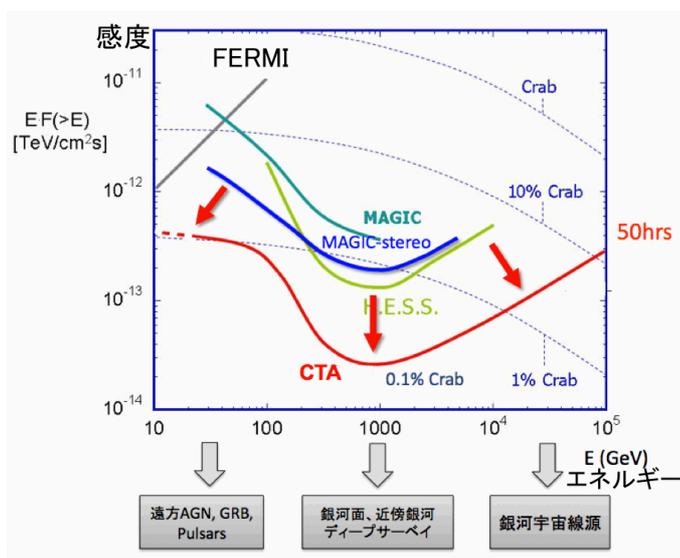


図4

2. 焦点面検出器に用いられる光検出器

解像型大気チェレンコフ望遠鏡は基本的には集光系と焦点面検出器で構成されており、チェレンコフ光をミラーで集光し、焦点面の光検出器で観測するという仕組みになっている。

光検出器はこれまでは光電子増倍管(PMT)を使用するのが一般的であり、複数の光電子増倍管をまとめてモジュール化して焦点面に取り付けられている。(図5)



図5

PMT の性能においては有効感度波長領域がチェレンコフ光の観測に適していること、またその領域での量子効率(入射光子のうち検出できる光子の割合)が高いことが重要となる。また、PMT では寿命の観点から低い動作電圧で稼働させる必要がある。CTA で求められる PMT の主な性能を表 1 に示す。

有感波長領域	300~600nm
感度	ピーク量子効率 35%以上
ダイナミックレンジ	1 光子識別可~5000 光子以上
アフターパルス	2×10^{-4} 以下
時間分解能	1.3ns 以下(TTS, 1p.e.(photoelectron))
パルス幅	2.5~3ns (FWHM)
寿命	10 年間でゲイン低下 20%

表 1

3. 新型光検出器 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)

現在、次世代光検出器として MPPC(Multi Pixel Photon Counter)が注目されている。これは小型の半導体検出器で、PMT とは異なる原理で動作するが、

PMT と同程度の増幅率で、高い検出効率を持つことが特徴である。本研究では、CTA の望遠鏡にも光検出器として MPPC を用いることを提案する。

MPPC は、光電面の各ピクセルが、ガイガーモード APD となっており (図 6)、各ピクセルにおいて出力は一定である。MPPC に入射する光子数に応じた励起ピクセルの出力の和が MPPC の出力信号となる。

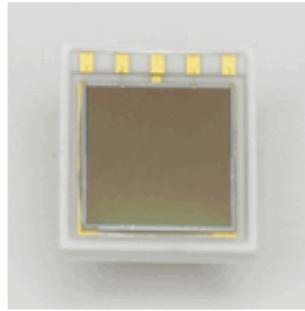
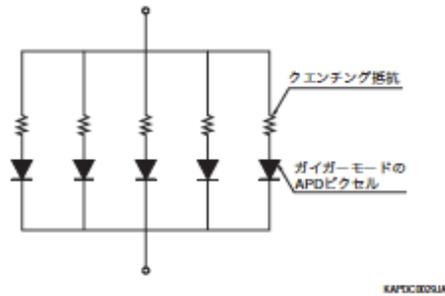


図 6



MPPC と PMT の性能を下の表 2 に示す。

表 2

	MPPC	PMT
検出効率(最大)	70%	35%
大きさ	~10 mm ²	Φ34 mm(CTA)
動作電圧	70 V	1 kV
ダークノイズ	10 ⁵ ~10 ⁶ cps	10 ⁴ cps
増幅率	10 ⁶	4×10 ⁴ (CTA)

MPPC の検出効率は PMT における量子効率と同様で、入射光子に対する検出光子の割合である。

4. 検出効率の詳細な比較

PMT と MPPC の実効的な検出効率を比較するには、波長ごとの検出効率と、観測するチェレンコフ光のスペクトルを考慮する必要がある。

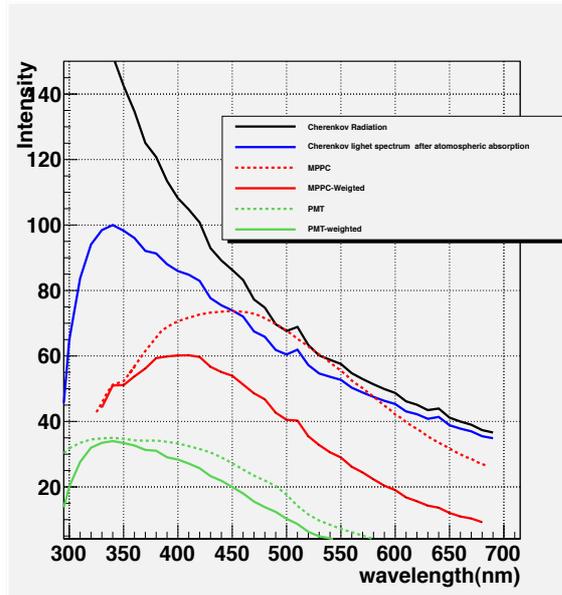


図 7

図 7 のグラフは、MPPC と PMT の検出効率について、チェレンコフ放射のスペクトルで重み付けしたものである。縦軸が強度、横軸が光の波長となっており、各線はそれぞれ

黒: チェレンコフ放射スペクトル

青: 大気での減衰も含めたチェレンコフ放射スペクトル

赤点線: MPPC の検出効率(カタログより)

赤: チェレンコフ放射で重み付けした MPPC の検出効率(青×赤点)

緑点線: PMT の検出効率(CTA の測定)

緑: チェレンコフ放射で重み付けした PMT の検出効率(青×緑点)

に対応する。赤と緑を比較すると、全体において MPPC の方が PMT よりも検出効率が高いことがわかる。全体での検出効率の平均は、

MPPC: 49% (330~660nm)

PMT: 22%(270~690nm)

となり、MPPC が PMT の 2 倍以上の検出効率を持つことがわかる。

5. 具体的な性能向上

光検出器の検出効率向上による CTA での性能向上の一つとして、まずエネルギー領域の拡大が挙げられる。検出効率向上によって、チェレンコフ光に対する応答信号が大きくなることで、より少ない光を観測することが可能になる。

入射光はガンマ線のエネルギーに比例するため、結果として有効観測エネルギーの閾値を下げることができ、より低いエネルギーのガンマ線の観測が可能となる。低いエネルギーのガンマ線観測では、銀河系外を伝播するガンマ線の吸収(銀河間空間を満たす可視光領域背景放射との電子対生成によるガンマ線吸収)の影響を軽減でき、深宇宙まで観測可能領域が広がる。

一方、光検出器の検出効率向上することにより、同じエネルギー閾値にしたまま望遠鏡のミラーを小さくすることが可能である。この場合は、望遠鏡一台あたりのコストが減少するため、望遠鏡の数を増加させることが可能となり、その結果感度の向上に寄与する。

6. 実用性の評価に向けて

上記のように、MPPCによる検出効率の向上によりCTAで性能向上が見込める。今後はその性能を定量的に評価する予定である。特に、波長毎にMPPCとPMTの検出効率を同じ測定系で実測し、その全体性能比較の精度を向上させる。また、クロストークやアフターパルスなどの測定を行い、その実用上での影響を考察する。その他にも、時間応答、時間分解能、温度依存性などの評価も行う予定である。

さらに、CTA用に開発されている読み出しモジュールを使って、読み出しにおけるノイズなどの影響も含めた実用性の評価もしていく予定である。