

空気シャワーモンテカルロシミュレーションによるCTAのデザイン研究と観測性能

稲田知大, 石尾一馬, 大石理子, 吉越貴紀 (東大宇宙線研), 池野祐平, 櫛田淳子, 西嶋恭司, 平井亘 (東海大理), 奥村暁 (名大 STE 研,MPIK), 片桐秀明, Dang Viet Tan, 吉田龍生 (茨城大理), 郡司修一 (山形大理), 齋藤隆之, 増田周 (京大理), 榊直人 (阪市大理), 永吉勤 (埼玉大理), 他 CTA-Japan Consortium

1. Abstract

次世代地上ガンマ線天文台 CTA (Cherenkov Telescope Array) は、解像型大気チェレンコフ望遠鏡およそ 100 基を南北 2 サイトに設置し、従来より桁深いガンマ線観測感度で全天を観測する野心的な計画である。口径が異なる3種類の望遠鏡を用いることで、CTA は稼働中の望遠鏡群より桁広い、20 GeV から 100 TeV 以上までのエネルギー領域をカバーする。未踏の規模を達成するためにシミュレーションを用いて望遠鏡配置・ハードウェア構成の最適化研究が不可欠である。CTA のモンテカルロ (MC) シミュレーションワークパッケージ (WP) は、ガンマ線および主要素が宇宙線原子核成分であるバックグラウンドに由来する空気シャワーモンテカルロシミュレーション事象を大量生産し、CTAの仕様を観測性能 (観測感度、角分解能、エネルギー分解能等) およびコストについて最適化するための調査を行ってきた。本講演ではその中間結果の紹介を行う。

2. Cherenkov Telescope Array

- 大中小の3種類の口径の異なる望遠鏡を百台近く並べた超高エネルギーガンマ線天文台計画
- 現在稼働している望遠鏡より感度を1桁向上、エネルギー領域を4桁に拡大(20GeV-100TeV以上)、南北のサイトで全天観測を行う。
- 参加者:31ヶ国から1000人を超える研究者
- 期待されるサイエンス:高エネルギー天体の物理、宇宙線の加速機構の探求、暗黒物質間接探索など

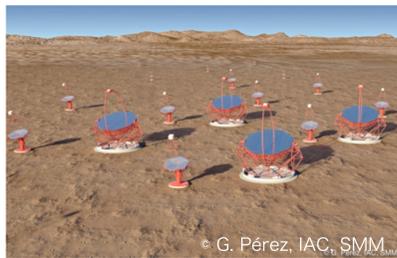


図1. CTA完成予定図

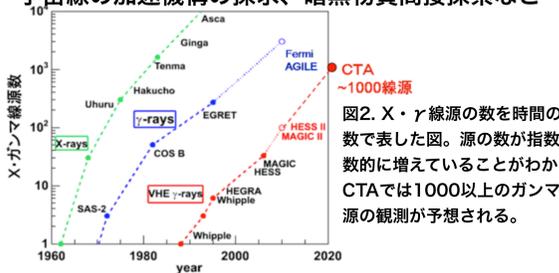


図2. X・γ線源の数を時間の関数で表した図。源の数が指数関数的に増えていることがわかる。CTAでは1000以上のガンマ線源の観測が予想される。

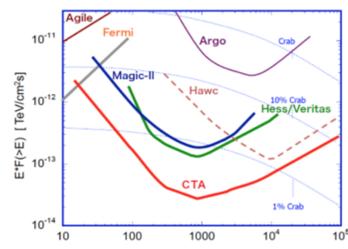


図3. CTAの目標積分感度曲線とMAGIC,HESS,VERITAS望遠鏡の達成感度

3. Imaging Atmospheric Cherenkov Technique

- 地球に入射したガンマ線は大気と相互作用を起こし空気シャワーを作る
- 空気シャワーの際に生じる電子は大気中でチェレンコフ放射と呼ばれる光を発する
- この光はシャワー軸に対して1°程度角度を持ち、地上には半径130mほどの光の円盤として到達する。地上で反射鏡を用いて集光し焦点部分のカメラで撮像する
- ひとつのシャワーを複数の望遠鏡で同時に観測することで三角測量を行い、シャワーの到来方向を精度よく求める手法をステレオ観測と呼び、現在広く用いられている

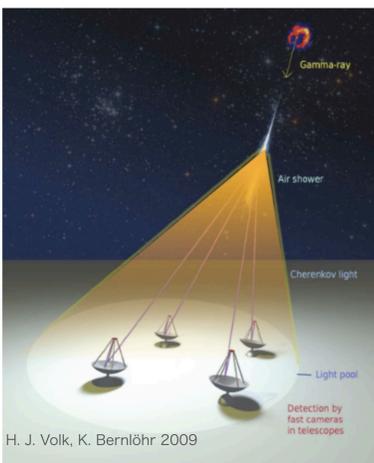


図4. ガンマ線地上観測の概念図

4. CTA MC Work Package

- 空気シャワーモンテカルロシミュレーション+解析手法の開発

- アレイ配置の最適化
- 望遠鏡パラメータの最適化

を物理目標と費用効率を考慮して行う

- Event Mass Production

計画の進行にしたがって、Event Mass Productionと呼ばれるシミュレーションデータの大量生産を行っている。現在までにProd-1,2の2回が行われており、Prod-2ではハードウェアパラメータのアップグレードおよびサイト候補地の比較を主に行い、アレイ配置の性能評価に対する主たる結果を得たのはProd-1であるので、今回はその結果に絞って紹介する。

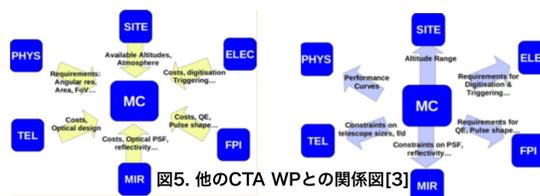


図5. 他のCTA WPとの関係図[3]

5. Method

- 各アレイ配置の違いが観測性能に対してどのような特徴を持つのかということ調べるのが目的
- シミュレーションの手法
- 空気シャワー発生シミュレーションソフトウェア (CORSIKA) を利用し、総シャワー数は $\sim 10^{11}$ events での大気チェレンコフ光分布を生成した。

- 検出器シミュレーションのソフトウェア (sim_telarray) にシャワーイベントの結果を渡し異なるアレイ配置に対してのresponseを生成する

	LST	MST	SST
口径	24.0m	12.3m	7.4m
反射鏡	Parabolic	Davies-Cotton	Davies-Cotton
焦点距離	31.2m	15.6m	11.2m
視野(直径)	5°	8°	10°
画素(直径)	0.09°	0.18°	0.25°

表1. 今回用いた主な望遠鏡のパラメータ[1]

The production-1 configuration

- 11の候補アレイを定義(北サイトは2つ)
- ほぼ等コスト
- super configuration
 - 275基の望遠鏡を重ね合わせてシミュレーションを行い、後でサブアレイとして取り出すことにより計算を効率化

データ解析手法

- Baseline analysis method
 - 焦点面カメラで撮像したチェレンコフ光像に対してHillas パラメータと呼ばれる二次のモーメントを計算し空気シャワーの特徴を得る
 - 得られたパラメータを用いてバックグラウンド(宇宙線原子核成分)との分離を行い、シャワーの到来方向の再構成、エネルギーの見積りを行う
- 異なった複数のデータ解析手法による観測性能の評価の比較も行っている[1]

	LST	MST	SST
A	3 (5°)	41 (8°)	-
B	5 (5°)	37 (8°)	-
C	-	29 (8°)	26 (10°)
D	-	41 (7.4°)	16 (10°)
E	4 (4.6°)	23 (8°)	32 (10°)
F	6 (4.8°)	29 (6.3°)	-
G	6 (5°)	9 (8°)	16 (10°)
H	-	25 (7°)	48 (10°)
I	3 (4.9°)	18 (8°)	56 (9°)
J	3 (4.9°)	30 (8°)	16 (9°)
K	5 (5°)	-	72 (9.5°)
NA	4 (5°)	17 (6°)	-
NB	3 (5°)	17 (6°)	8 (8°)

表2. 用いたアレイ配置[1]

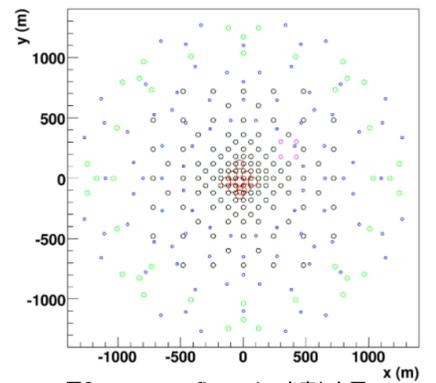
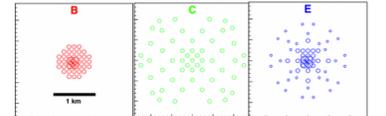


図6. super configurationを表した図

赤:LST,黒&緑:MST,青:SSTに対応[2]



左から'compact','extended','balanced' 図7. アレイの例[2]

6. Results&Discussion

- 観測感度(図8)

- 定義:50時間の観測でガンマ線信号が5σ以上、10事象以上、バックグラウンドレベルの5%以上のすべてを満たすフラックスレベル

- 目標値に近い感度をほぼ全エネルギーにわたって達成

- 全エネルギーにおいて目標感度近くを達成しているのはbalanced array (EまたはI)である

- B(狭)は低エネルギー側で高感度、高角分解能

- C(粗)は高エネルギー側で高感度

- balanced arrayの感度を各望遠鏡毎に比較した(図9)

- 低エネルギー側ではLSTの効果が大きく、高エネルギー側ではSSTの効果が大きい

- balanced array Eの角分解能、エネルギー分解能は最良値に近く、バランスが取れている(図10,11)

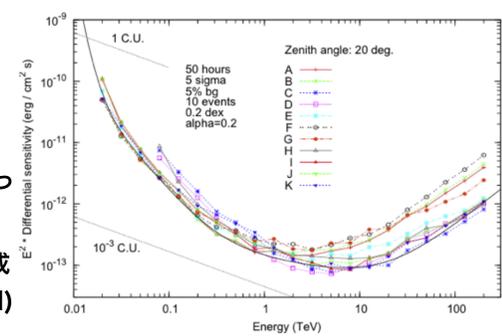


図8. 微分感度曲線[1]

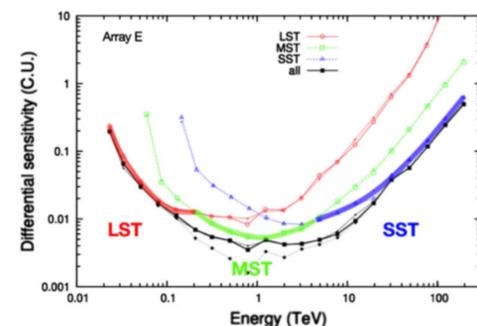


図9. 望遠鏡毎の微分感度曲線[4]

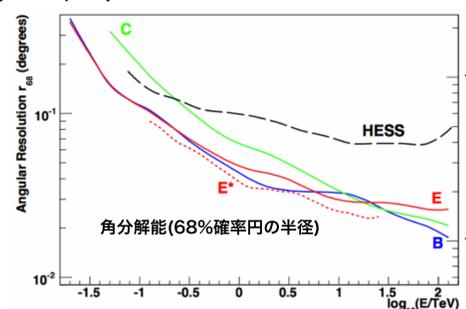


図10. アレイ毎の角分解能の比較[2]

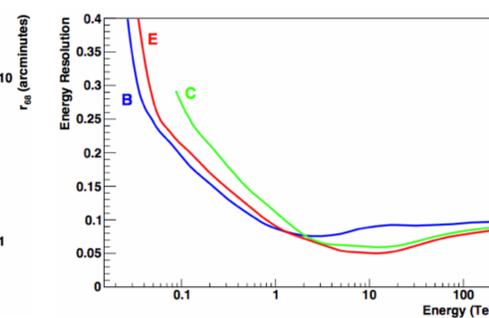


図11. アレイ毎のエネルギー分解能[2]

7. Conclusions&Outlook

- CTAの目標感度が約4桁のエネルギー範囲(20GeV-100TeV以上)において十分達成可能であることを示した
- 解析手法は現在開発中はあるが従来の方法でも十分要求を満たしている
- Prod-1,2の経験を基にハードウェアパラメータのアップデートを行ったProd-3が進行中であり、この結果からアレイ配置が最終決定される予定である

References

- [1]:K. Bernlöhr et al. /Astroparticle Physics 43 (2013) 171
- [2]:The CTA Consortium. /Experimental Astronomy 32 (2011)193
- [3]:CTA-Japan Consortium. /Cherenkov Telescope Array 計画書
- [4]:B.S. Acharya et al. /Astropart. Phys. 43 (2013) 3