

空気シャワー観測装置の性能向上のための地表水チェレンコフ光検出器の開発

日大生産工 ○塩見 昌司

1 はじめに

宇宙線は 1912 年に、オーストリアの Hess により発見されたが、その起源及び加速機構は未だ謎のままである。この謎に、現行の空気シャワー観測装置の方向決定精度を上げることにより迫りたいと考えている。本報告では地表水チェレンコフ光検出器と現行装置との連動による方向決定精度の向上の可能性と、その実証実験のための実験について紹介する。

2 学術的背景と目的

宇宙線は、宇宙から降り注ぐ高エネルギー粒子であり、主に陽子・ヘリウム等の原子核からなる。これら宇宙線の全粒子エネルギースペクトルは E^γ と冪指数で表現され、 $10^{14} \sim 10^{15}$ eV (knee 領域) で変化している。knee 領域以下の宇宙線は銀河系内の超新星残骸や分子雲による衝撃波によって加速され、スペクトル変化は各原子核の加速限界の違いによると思われるが、確定するまでには至っていない。

宇宙線の起源、加速機構の謎を解く鍵の一つは、星間磁場によって曲げられず、方向の情報を失わない中性粒子の観測にある。加速現場近傍で周辺物質との相互作用により生成した π^0 起源のガンマ線を観測出来れば加速現場の同定に繋がる。しかしガンマ線は高速電子からも生成されるため、観測されたガンマ線は原子核起源であると決定できてはいない。 π^0 起源のガンマ線の冪はバックグラウンド (BG) 宇宙線の冪 -2.7 より硬く、 -2.2 近くが期待され、スペクトルが伸びていれば数 100 TeV 領域が最も良い観測領域となりうるが、低頻度な故未知の観測領域となっている。標高 4300 m に展開しているチベット空気シャワー観測装置 (Tibet-III) (図 1) は、約 800 台のシンチレーション検出器 (SD) (図 3 内左) を 7.5 m 間隔の基盤目上に配置した有効面積約 40,000 m^2 の、SD による空気シャワー観測装置としては唯一 TeV ガンマ線天体の観測に成功

している装置である。100 TeV の宇宙線に対し、エネルギー分解能 70~150 TeV・方向決定精度 0.2 度の性能を有する。この装置の内側に、BG となる原子核起源の宇宙線を 99 %以上除去するために設置された、有効面積 3,320 m^2 の、土洩 2 m、水深 1.5 m の水チェレンコフ光観測型ミューオン検出器群 (MD) (図 1) が、2014年3月より Tibet-III との連動観測を開始した。これにより 100 TeV 領域のガンマ線感度の 1 桁以上の向上が見込め、世界初の数 100 TeV ガンマ線の観測を期待している^{1),2)} (図 2)。

MD により装置のガンマ線検出感度は飛躍的に向上するが、方向決定精度は基本的に変わらない。定常的あるいはフレア的ガンマ線天体の観測等、加速限界や陽子加速現場の同定等に重要な 10 TeV 以上の領域において、さらなる感度向上と放射領域の特定のためには、方向決定精度の向上は重要である。単純には Tibet-III の装置密度を 4 倍にすれば 2 倍の精度の向上が見込まれるが、それには膨大な費用がかかる。そこで、より安価に装置性能を高める方法として、地表上に新たに水チェレンコフ光検出器 (WP) を縁に設置し、連動させる手法の有効性を検討している。シミュレーションと実証実験からその可能性を検討することが本研究の目的である。



図 1 MD (イメージ) と Tibet-III

3 地表水チェレンコフ検出器

Tibet-III 使用 0.5 m^2 SD (図 3 左) は、粒子数 1~1500 粒子まで精密に検出できる。また、検出器上に厚さ 5 mm の鉛を置くことで、荷電粒子のみならず電子対創生によるガンマ線成分も 1~2 割検出できる。このような工夫等で SD を用いた空気シャワー観測装置としては世界最高の性

Development of Surface Water Cherenkov Detector for improvement of the performance of the Air Shower Array

Atsushi SHIOMI

能を有し、10 TeV ガンマ線の到来方向を 0.5 度程度の誤差で決定できている。

水チェレンコフ光検出器は SD と異なり空気シャワー 2 次粒子中の電子陽電子の 8 倍程度多い 2 次ガンマ線成分にも感度がある。これは 1.6 MeV 以上のガンマ線が水中で 50 cm も通過すると電子対創生を起こし、チェレンコフ光を発するためであり、Tibet-III の SD と較べても電磁成分で 4.7 倍感度がよいことになる。また大面積化が安価にできる利点を持つ。そのため空気シャワー中心から離れて設置しても観測可能な 2 次粒子が十分存在する (図 4, 5)。水チェレンコフ光検出器は深さ 2 m に 2 m 間隔に置かれた光電子増倍管を用いた場合、光子入射時間が最大 1.5 m 近く変わりうるが、シャワー中心から離れた位置でも多数の 2 次粒子を検出することが可能なため、方向精度が上がるのが予想される。この利点を生かし、現行装置と連動させ、方向決定精度の向上を目指す。

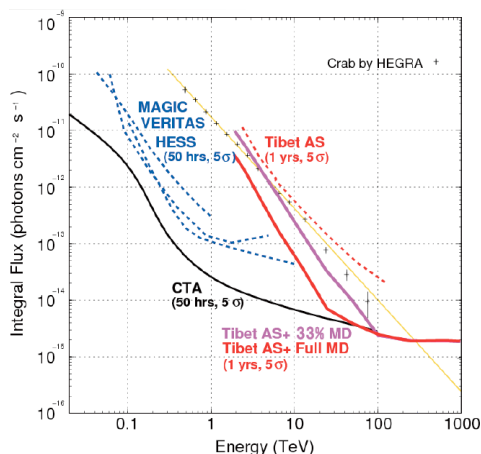


図2 ガンマ線点源検出予想感度
赤線の上が現行 MD の予想感度曲線。

4 今後について

プロトタイプを作成し、実証実験によりタイミング・光量・ノイズ量等基本パラメータをチェック・決定し、装置形状・配置の最適化をシミュレーションにて行い、十分な性能の装置の可能性とその価格について検討していく予定である。

[謝辞] 本研究は JSPS 科研費 15K05108 の助成をうけたものです。

[参考文献]

- 1) T.K. Sako, et al., “Exploration of a 100 TeV gamma-ray northern sky using the Tibet

air-shower array combined with an underground water-Cherenkov muondetector array”, Astropart. Phys., 32, (2009) p.177-184
2) M. Amenomori, et al., “The TIBET AS+MD Project; progress report”, Proc. In ICRC2015, (2015)

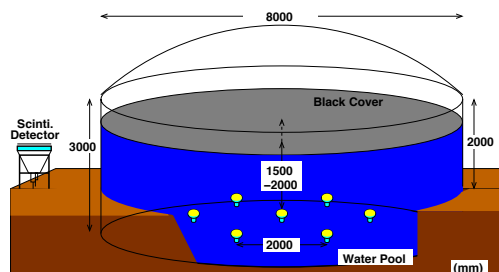


図3 SD と WP (イメージ図)

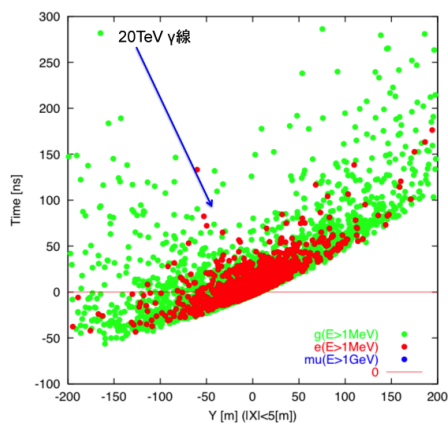


図4 シャワー中心を含む 10 m の帯内の空気シャワー 2 次粒子分布
横軸は中心からの距離、縦軸は粒子入射時間。赤が電子陽電子、緑がガンマ線

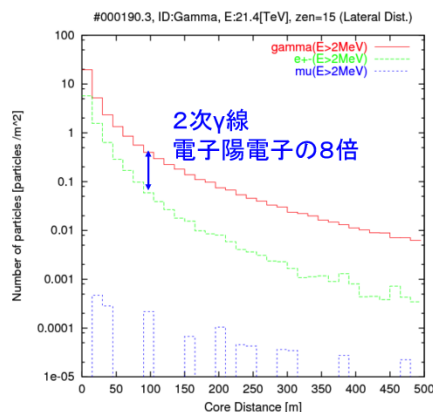


図5 2 次粒子の横分布

シャワー中心から 100 m の位置で、電子成分が 8 倍のガンマ線が存在