

テレスコープアレイ実験における低エネルギー拡張計画

後藤 昂司

大阪市立大学 理学研究科 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138

概要

テレスコープアレイ (TA) 実験は、米国ユタ州で稼働中の北半球最大の宇宙線観測実験であり、 $10^{18.2}\text{eV}$ から $10^{19.8}\text{eV}$ 付近で宇宙線の組成が陽子であるという結果を報告している。さらに $10^{18.7}\text{eV}$ と $10^{19.7}\text{eV}$ のところで宇宙線のエネルギースペクトルに折れ曲がりの構造がみられ、これらの折れ曲がり構造はそれぞれ、陽子と宇宙背景放射による電子対生成によるエネルギー損失と π^0 生成によるエネルギー損失によって作られると考えられている。また、他のいくつかの実験から 10^{18}eV より低いエネルギーで宇宙線の組成が鉄から陽子に変化しているという結果も出ており [1]、これは宇宙線起源が銀河系内から銀河系外への遷移を示していると期待される。なぜならば、銀河系内起源の加速として最も確からしいと思われているショック加速モデルによれば、磁場による閉じ込め効果は原子核の核子数に比例して高くなり、さらに原子核の存在比を考慮すると銀河系内において最も高エネルギーまで加速される原子核は、核子数が大きく安定な鉄だと考えられているためである。さらに銀河系外起源の鉄は長い伝搬距離のため地球に到達するまでに銀河間の光子と相互作用して核破砕すると考えられている。そのため、 10^{16}eV から 10^{18}eV にかけての宇宙線の組成の移り変わりは、銀河系内の鉄から銀河系外のプロトンへの遷移によるものだと考えられている。その宇宙線の組成の移り変わりを実験によって明らかにするために、地表検出器アレイと大気蛍光望遠鏡によるハイブリッド観測を行っている TA 実験をさらに低エネルギーに拡張する TALE(TA Low Extension) 実験について報告する。



図1 TA 実験の Middle Drum ステーション (左) と地表検出器 (右)

1 宇宙線

宇宙に存在する高エネルギーの放射線は宇宙線と呼ばれ、 10^8eV から 10^{20}eV を超える広い範囲で観測されている。その中で、 10^{19}eV 以上の宇宙線は極高エネルギー宇宙線と呼ばれ、単一の粒子としては現在の宇宙で最も高い運動エネルギーを持つ。したがって、この極高エネルギー宇宙線は爆発的な天体現象や現在の宇宙に残された初期宇宙の痕跡粒子を起源に持つと推定され、この起源を解明することは宇宙物理学の大きな課題のひとつである。

宇宙線が大気に入射すると、大気中の原子核と相互作用して二次粒子を生成し、さらにそれらの二次粒子も粒子生成を行なう。この過程をくり返し一次宇宙線が結果的に大量の二次粒子群となる現象を空気シャワー現象と呼ぶ。

宇宙線のフラックスはほぼ E^{-3} で減少するので、 $10^9\text{eV} \sim 10^{20}\text{eV}$ のエネルギー領域ではフラックスの変化は 10^{30} にもなる。フラックスの大きい 10^{14}eV 以下の低エネルギー宇宙線は、気球や人工衛星などの飛翔体に搭載された観測装置によって直接観測され

る。しかしエネルギーが 10^{14} eV 以上の高エネルギー宇宙線は到来頻度が少ないため、観測には大きな検出面積と長い露光時間が必要であり、そのため飛翔体搭載検出器によって直接観測をすることは難しい。そこで、高エネルギー宇宙線に対しては一次宇宙線が大気と相互作用してできる空気シャワーを検出するという間接測定が行われている。

現在の空気シャワーの観測方法は大きく分けて、地表粒子検出器アレイによる観測法と大気蛍光法の2種類がある。地表検出器は、多数の粒子検出器を地表にアレイ状に配置することで、空気シャワー粒子を検出する。空気シャワーは薄いパンケーキ状の粒子群(シャワー平面)を形成して地表に到来するので、各検出器への粒子の到着時間差から空気シャワーの到来方向を求められるのである。また、一次宇宙線のエネルギーは、各検出器で検出された粒子数密度から空気シャワー全体での横方向分布と全粒子数を推定することで得られる。一方、大気蛍光法は、空気シャワー粒子の電離損失の一部が光に変換されることを利用するものである。高エネルギーの荷電粒子が大気中を通過すると、その軌跡の近傍にある窒素などの大気分子は励起され、これらの励起された大気分子から蛍光が発せられる。すなわち、大気は宇宙線に対してシンチレーターとして働く。これを光学望遠鏡で集光し光センサーカメラで撮像することで、空気シャワーを観測する。

2 テレスコープアレイ実験

テレスコープアレイ (TA) 実験は、米国ユタ州に大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) と地表検出器 (Surface Detector, SD) アレイを設置し、極高エネルギー宇宙線の空気シャワーを観測する北半球最大の極高エネルギー宇宙線観測装置である。

SD アレイは 1.2 km 間隔で並べられた 507 台のプラスチックシンチレーション検出器からなり、検出面積は約 700 km² である。FD ステーションはアレイ周辺の 3ヶ所に約 35 km 間隔で設置されている。1つのステーションに 12 台または 14 台の望遠鏡が設置され、全部で 38 台である。SD アレイ上空を FD の視野で覆い、到来する宇宙線を 2つの異なる検出

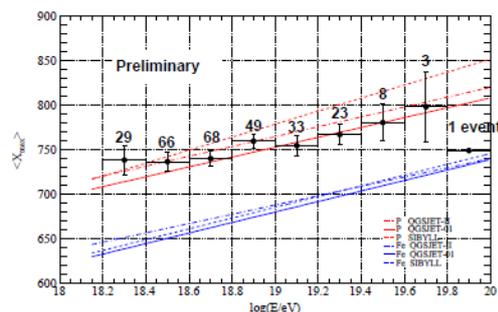


図2 Monte Carlo Simulation で予想される平均 Xmax と TA 実験の Black Rock ステーションと Long Ridge ステーションのステレオイベントを解析して求められた平均 Xmax。 $10^{19.9}$ eV の点は 1 イベントしか無いためエラーバーが付いておらず、統計的優位性は他の点と比べて非常に小さい。[2]

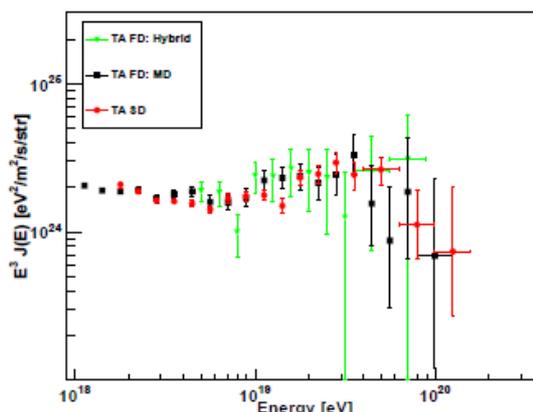


図3 TA 実験によって観測されたエネルギースペクトル。緑の点は SD と Middle Drum ステーションによるハイブリッド解析。黒い点は Middle Drum ステーションのみによる解析。赤い点は SD のみによる解析。[3]

器で観測することが可能である。

図2は Monte Carlo Simulation で予想される平均 Xmax と TA 実験の Black Rock ステーションと Long Ridge ステーションのステレオイベントを解析して求められた平均 Xmax である。 $10^{19.9}$ eV の点は 1 イベントしか無いためエラーバーが付いておらず、統計的有意性は他の点と比べて非常に小さい。赤いラインは一次宇宙線が陽子の時の平均 Xmax、青いラインは一

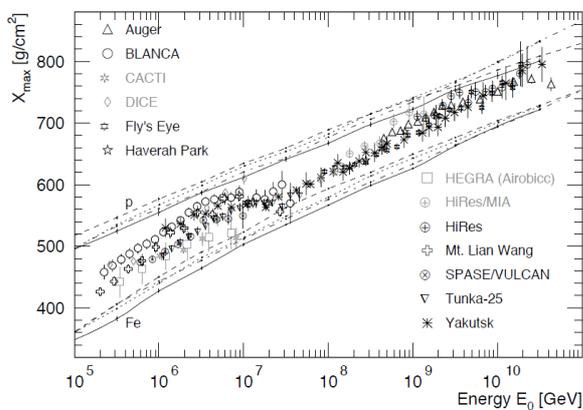


図4 いくつかの実験によって測定された平均 Xmax[1]

次宇宙線が鉄の時の平均 Xmax のラインである。ここから、一次宇宙線の組成が $10^{18.2}\text{eV}$ から $10^{19.8}\text{eV}$ の領域でプロトンと一致していることが分かる。さらに図3のTA実験のハイブリッド解析といくつかの実験で測定されたエネルギースペクトルで、 $10^{18.7}\text{eV}$ と $10^{19.7}\text{eV}$ で折れ曲がりの構造がみられる。この二つのことから、 10^{18}eV から 10^{20}eV の領域では一次宇宙線の組成がプロトンで、どの距離でもまんべんなく宇宙線源があって、どの線源もどこまでも加速できるとすると、 $10^{18.7}\text{eV}$ と $10^{19.7}\text{eV}$ での折れ曲がり構造はプロトンと宇宙背景放射による電子対生成と π^0 生成で、このようなスペクトルになっているというモデルが支持される。

さらに図4はいくつかの実験によって測定された平均 Xmax である。これから 10^{16}eV から 10^{18}eV にかけて宇宙線の組成が鉄からプロトンに遷移しているのが分かる。これは宇宙線起源が銀河系内から銀河系外への移り変わりがこの遷移に現れているのではないかと考えられている。なぜならば、銀河系内起源の加速として最も確からしいと思われているショック加速モデルによれば、磁場による閉じ込め効果は原子核の核子数に比例して高くなり、さらに原子核の存在比を考慮すると銀河系内において最も高エネルギーまで加速される原子核は、核子数が大きく安定な鉄だと考えられているためである。さらに銀河系外起源の鉄は長い伝搬距離のため地球に到達するまでに銀河間の光子と相互作用して核破砕すると考えられている。そのた

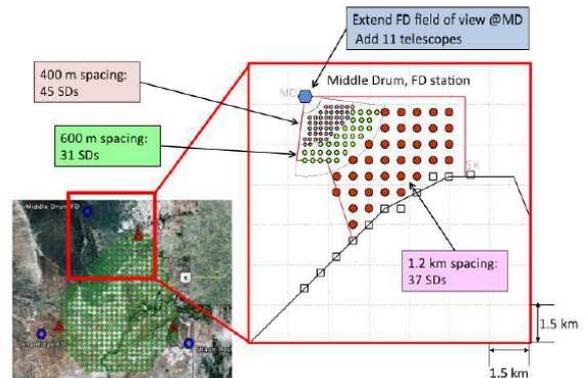


図5 TALE 実験の位置

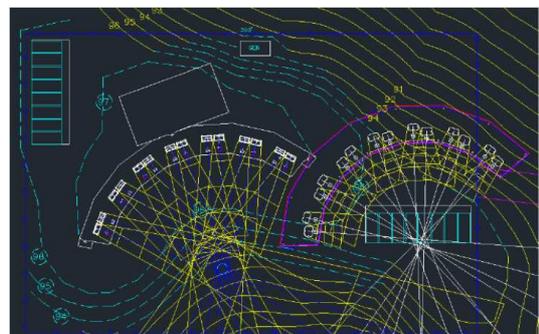


図6 左が Middle Drum ステーション。右が新たに建設する TALE 用のステーション

め、 10^{16}eV から 10^{18}eV にかけての宇宙線の組成の移り変わりは、銀河系内の鉄から銀河系外のプロトンへの遷移によるものだと考えられている。しかしこの 10^{17}eV 付近のエネルギーの宇宙線は、極高エネルギー領域を観測している TA や Auger に比べると、観測の系統誤差が大きく、詳しい観測結果は出ていない。

3 TALE 実験

そこで 10^{17}eV 付近のエネルギーの宇宙線を観測し、 10^{16}eV から 10^{18}eV にかけて宇宙線の組成の変化を明らかにするために TA Low Extension (TALE) 実験が進められている。TALE 実験では図5で示された位置に新たに SD と FD を建設する。

TA 実験では SD を 1.2km 間隔で並べて、 $10^{18.2}\text{eV}$ 以上のエネルギーを観測しているが、TALE 計画では

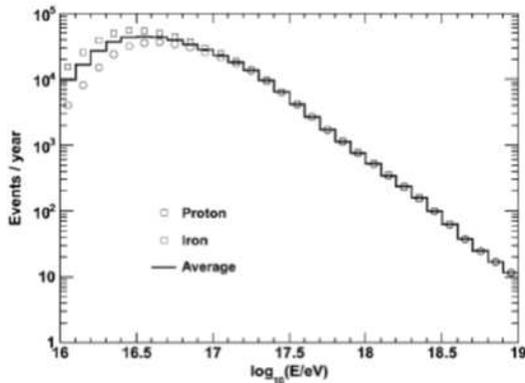


図7 TALE 実験で予想されるエネルギー毎のイベント数

より短い、400m, 600m 間隔で 3 m^2 の検出器を並べる。400m 間隔では $3 \times 10^{16} \text{ eV}$ から、600m 間隔では 10^{17} eV から、宇宙線を再構成することができる。並べられる SD は、TA 実験で使用されている SD と同様のプラスチックシンチレーター検出器を使用し、イベント数増加に対応したエレクトロニクスを用いる。さらに低エネルギー用に改良された大気蛍光望遠鏡とのハイブリッド観測を行うため、図5のような配置になっている。この配置で 10^{16} eV 以上の宇宙線が年間約 50000 イベントが検出される (図7)。

TALE 計画では新たに 14 台の望遠鏡を Middle Drum ステーションの隣に設置する (図6)。低いエネルギーの宇宙線はより上空で大気蛍光を起こすので、TA 実験の望遠鏡は仰角 3° から 31° を向いているが、TALE 計画では仰角 31° から 59° を向いて観測を行う。

この SD、FD のハイブリッド観測によって 10^{17} eV からの質量組成を測定する。そして TA とあわせて 10^{17} eV から 10^{20} eV を越えるエネルギー領域でのスペクトル、質量組成を測定でき、宇宙線の加速機構や銀河系内外への起源の遷移を明らかにできるだろう。TALE 実験は既に定常観測にむけた検出器の増設、建設が進められており、2014 年から観測開始予定である。

謝辞

TALE 実験はテレスコープアレイ実験の次期計画です。今回、グループを代表して講演する機会を与えていただきました、テレスコープアレイ実験に関わる全てのコラボレーターの皆様に深く感謝致します。また、第42回天文・天体物理若手夏の学校を開催するにあたり、補助金をご支援して下さった宇宙線研究者会議 (CRC) に深く感謝致します。さらには、夏の学校の準備、管理、運営に携わった事務局スタッフをはじめとする全ての人たちに感謝致します。

参考文献

- [1] J. Blumer et al., *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 63 (2009) 293
- [2] Y. Tameda et al., 32nd International Cosmic RAY Conference, Beijing 2011 **2** 246-249
- [3] H. Sagawa et al., AIP Conf. Prof. 1367, pp.17-22 ; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3528708>
- [4] D. Ikeda et al., 32nd International Cosmic RAY Conference, Beijing 2011 **2** 238-241
- [5] Telescope Array Experiment, <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>, *The Telescope Array Project Design Report* (2000)