

TALE 実験用地表検出器の DAQ エレクトロニクスの開発

後藤 昂司 (大阪市立大学大学院 理学研究科)

Abstract

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が起こす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していること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電荷に比例して強くなり、あるエネルギー領域では鉄の存在比が大きい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碎すると考えられているため、銀河外起源の宇宙線は陽子が支配的である。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陽子への遷移によるものだと考えられている。この宇宙線の組成の移り変わりを実験によって明かにするために、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 Energy Extension) 実験が進行中である。この TALE 実験で使われる地表検出器の DAQ エレクトロニクスとその開発の要点、現状について報告する。

1 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) アレイを設置した、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実験である。

図 1 は TA 実験の外観である。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 km^2 である。FD ステーションは SD 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 FD ステーションに 12 台または 14 台の望遠鏡が設置され、全 38 台の望遠鏡で SD アレイ上空を観測している。TA 実験は 2つの異なる検出器で空気シャワーを同時に観測するハイブリッド観測実験である。

図 2 は Monte Carlo Simulation で予想される平均 X_{max} と TA 実験の 2つの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 X_{max} である。 $10^{19.9}\text{eV}$ の点は 1 イベントしか無いためエラーバー

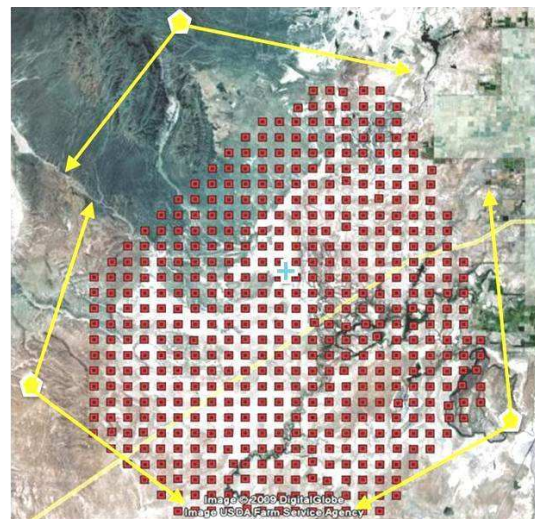


図 1: TA 実験の外観。SD アレイを 3つの FD ステーションが取り囲んでいる。

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。ここで平均 X_{max} とは粒子の縦方向発

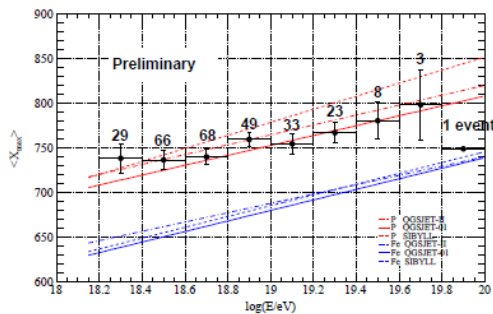


図 2: Monte Carlo Simulation で予想される平均 Xmax と TA 実験の Black Rock ステーションと Long Ridge ステーションのステレオイベントを解析して求められた平均 Xmax。10^{19.9}eV の点は 1 イベントしか無いためエラーバーが付いておらず、統計的優位性は他の点と比べて非常に小さい。[2]

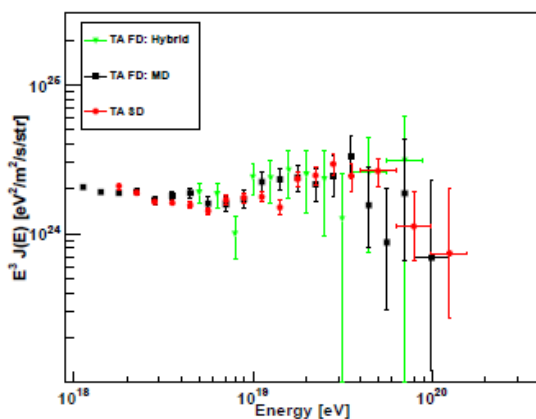


図 3: TA 実験によって観測されたエネルギースペクトル。緑の点は SD と Middle Drum ステーションによるハイブリッド解析。黒い点は Middle Drum ステーションのみによる解析。赤い点は SD のみによる解析。[3]

達深さの平均である。赤いラインは一次宇宙線が陽子の時の平均 Xmax、青いラインは一次宇宙線が鉄の時の平均 Xmax のラインである。点線と実線の違いはモデルによる違いである。ここから、一次宇宙線の組成が 10^{18.2}eV から 10^{19.8}eV の領域で陽子と

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}eV と 10^{19.7}eV で折れ曲がりの構造がみられる。この二つのことから、10¹⁸eV から 10²⁰eV の領域では一次宇宙線の組成が陽子で、どの距離でも均一に宇宙線源があって、どの線源もどこまでも加速できるとすると、10^{18.7}eV と 10^{19.7}eV での折れ曲がり構造は陽子と宇宙背景放射による電子対生成と π^0 生成で、図 3 の様なスペクトルになっているというモデルが支持される。

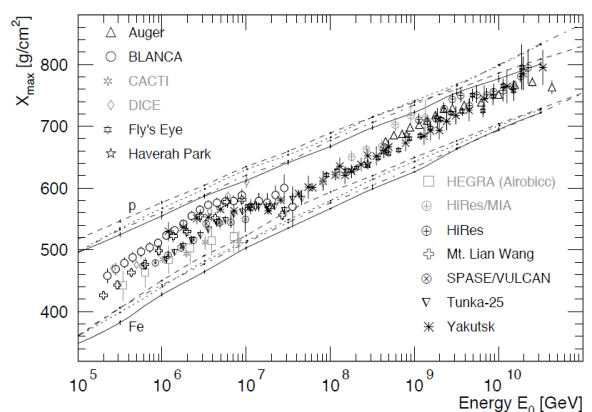


図 4: これまでの実験によって測定された平均 Xmax[1]

さらに図 4 はこれまでの実験によって測定された平均 Xmax である。この図から 10^{16.5}eV から 10^{18.5}eV にかけて宇宙線の組成がエネルギーの増加に伴って鉄から陽子に遷移しているのが分かる。これは宇宙線起源の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電荷に比例して強くなり、あるエネルギーでは鉄の存在比が大きい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おり、10¹⁶eV 以上のエネルギーの銀河外起源の宇宙線は、陽子が支配的になる。そのため、10¹⁶eV から 10¹⁸eV 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陽子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。

2 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 Energy 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。

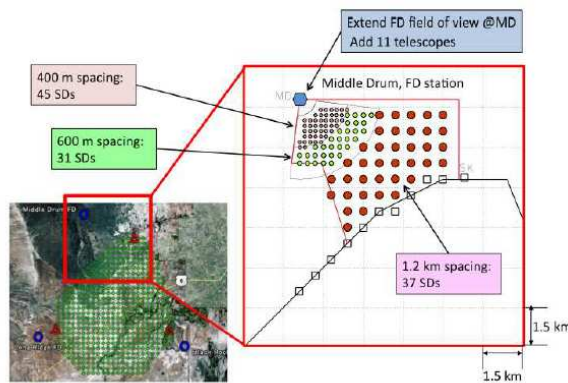


図 5: TALE 実験の位置



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

TA 実験では SD を 1.2km 間隔で並べて、 $10^{18.2}$ eV

以上のエネルギーを観測しているが、TALE 計画では 1.2km 間隔に加え、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 3×10^{16} eV から、600m 間隔では 10^{17} eV から、宇宙線を観測することができる。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、トリガーレート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。

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し (図 6)、現在試験観測を継続している。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。

TALE 実験の地表検出器については TA 実験で使用しているものを基本的には流用するが、一部のエレクトロニクス用パーツに生産が終了しているものがあるため、新規パーツを用いたエレクトロニクスの開発が必要である。

3 無線 LAN モジュール関連の改良

上記のように TALE 計画のために新規エレクトロニクスの開発が必要である。中でも現行の地表検出器で使用している無線 LAN モジュールは生産が終了しており、新しい無線 LAN モジュールを選別し交換しなければならない。また現行のファームウェア (図 7) において無線 LAN モジュールは FPGA や CPU と通信をしており、新規無線 LAN モジュールに合った FPGA と CPU の改良が必要である。

新規無線 LAN モジュールは複数の候補機の中から、送信出力が高いこと、インターフェイスが複雑

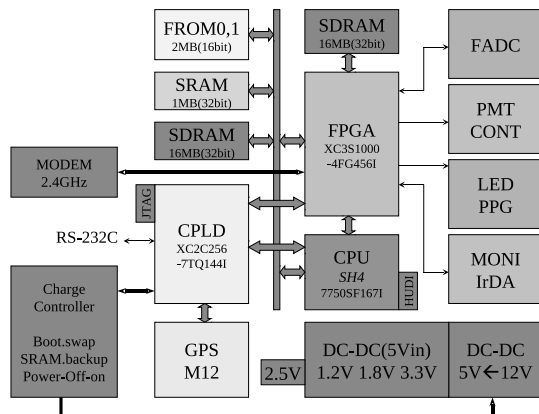


図 7: TA 実験で使用している地表検出器のファームウェア

でないことを基準に設け、実験地であるユタ州にて通信テストを行った。その結果最も条件を満たしていた Wivicom 社の WVCWB-R-022(図 8) を交換候補として採用した。

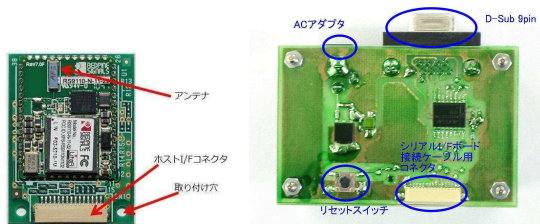


図 8: (左)Wivicom 社の WVCWB-R-02 (右) インターフェイスボード

このモジュールのインターフェイスにはすでに RS232C が実装されている。しかし、現行の電子工学において無線 LAN モジュールと直接データ通信を行っている FPGA のインターフェイスは RS232C とは異なる規格のため、FPGA 側のインターフェイスをシリアル通信に対応させる改良を行っている。現在、テスト用ボードで FPGA のシリアル通信の動作テストを行っており、今後は地表検出器で使用される電子工学ボードで動作テストを行う予定である。

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 43 回天文・天体物理若手夏の学校を開催するにあたり、補助金をご支援くだ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。

Reference

- [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)