

**広エネルギー領域の精密測定による超高エネルギー宇宙線の
源と伝播の統一的解釈**

**Study of origins and propagation of very high energy
cosmic rays with detailed measurements in the wide
energy range**

課題番号：19H05607

荻尾 彰一（OGIO Shoichi）

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

2018年度に完成したTALE実験ハイブリッド検出器を5年間運用しつつ、さらにそのハイブリッド感度を 10^{15} eVにまで下げて、このエネルギーから 10^{20} eVまでの5桁におよぶ広い範囲でのエネルギースペクトル、化学組成、到来方向分布を精密測定し、銀河系内起源/系外起源宇宙線を分離して、それぞれの宇宙線の源と宇宙空間伝播の統一的解釈に迫る。

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線、化学組成、宇宙線の起源、銀河系、銀河間空間、宇宙物理

1. 研究開始当初の背景

日米韓露比捷6カ国の国際共同実験「テレスコープアレイ実験（TA実験）」は米国ユタ州で北半球最大の宇宙線観測装置を2008年から運用している。

2018年には $10^{15.3}$ eV以上5桁におよぶ広い領域のエネルギースペクトルを発表し、多様な構造があることを示した。銀河系内起源宇宙線の卓越する 10^{17} eV以下の領域、系内起源宇宙線と系外起源宇宙線がせめぎ合う 10^{17} eVから 10^{19} eVの領域のスペクトルに現れる様々な構造は、系内起源天体の特徴・加速エネルギー限界、銀河磁場による宇宙線の閉じ込め・系外宇宙線の遮断、起源天体の宇宙論的進化、といった豊富な物理を反映している。

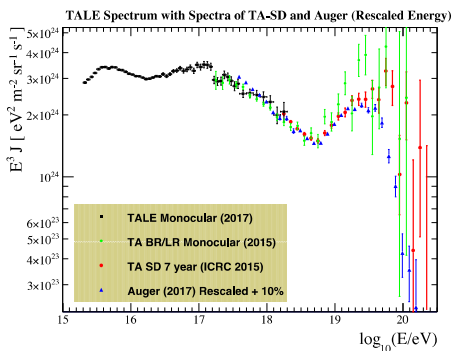


図1：TA実験とTALE実験FDにより観測されたエネルギースペクトル（フラックス× E^3 ）

2. 研究の目的

10^{15} eV以上の宇宙線に複雑に織り込まれた情報を解きほぐすためには、高精度で均質なエネルギースペクトル測定と化学組成測定を、同時にかつ広いエネルギー範囲で実施することが不可欠である。そこで本研究では、TALE実験ハイブリッド検出器による観測を5年間継続するとともに、さらにTALEハイブリッド感度を 10^{15} eVまで下げる。これによって、 10^{15} eV以上での系内成分スペクトル、系内成分の化学組成とそのエネルギー依存性、系外成分スペクトルなどを明らかにする。宇宙物理学的な意義としては、（1）銀河系外宇宙線源天体とその進化の解明、

（2）銀河間磁場の強さと構造に対する示唆、（3）宇宙線の遮蔽・閉じ込めの解明から、宇宙線・銀河磁場・銀河ハローを含めた多体系としての銀河系の物理、（4）銀河系内宇宙線源天体の解明、（5）粒子加速理論への寄与、などを挙げることができる。

3. 研究の方法

2018年度に完成したTALE実験ハイブリッド検出器を5年間継続運用する。さらに、これまでのTALE実験SD全く同じデザインの有効面積 3m^2 のプラスチックシンチレーターSDを新規に製作し（現在の予定では56台）、TALE実験サイトの中のTALE実験FD近傍に

200 m 間隔（一部 100 m 間隔）で設置する（最適化された配置案は図 2）。これによって、米国ユタ大学が設置した 10 台の FD と既設の 80 台の SD と合わせて面積 23 km² をカバーし、TALE 実験ハイブリッド検出器のエネルギーしきい値をさらに 1 桁下げて、10¹⁵ eV を達成する。

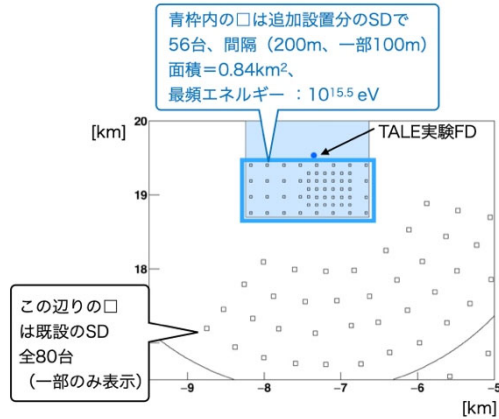


図 2 : TALE 実験 FD (青●)、SD (□) と追加 SD 設置点 (青枠内)

4. これまでの成果

TALE 実験 SD アレイは故障による観測中断はあったものの、2019 年 9 月から現在まで定常観測を継続しており、平均稼働 SD75 台、イベントレートは毎分約 3 イベントで安定運用されており、2020 年度末までに当初予定を 7 倍超上回る 80 万イベント (モードエネルギー 10^{17.0} eV) を記録した。TALE 実験 FD は 2020 年 1 月までに当初予定を 5 倍超上回る 6 万以上のハイブリッドイベント (モードエネルギー 10^{16.9} eV) を収集した。

TALE 実験 FD のみの観測 (単眼観測) によるデータ解析結果として、化学組成決定の指標であるシャワー最大発達深さ「X_{max}」の測定結果を 2021 年に *Astrophysical Journal* に発表した。

TALE 実験 FD と SD によるハイブリッド観測のためのデータ解析プログラムの開発は完了しており、予備的解析結果を 2021 年春の日本物理学会で発表した (図 3)。

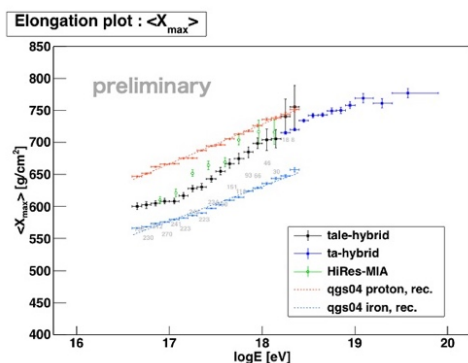


図 3 : 観測された平均 X_{max} (黒十字) とシミュレーションによる予想 (水色: 鉄原子核、赤: 陽子)。

図 1 と図 3 を総合すると、宇宙線の到来頻度のシャワーの平均 X_{max}、いずれも 10¹⁷eV で折れ曲がっていることがわかる。

TALE 実験 SD アレイのデータ解析プログラムの開発も完了しており、性能評価を含む予備的解析結果を 2021 年春の日本物理学会で発表した。

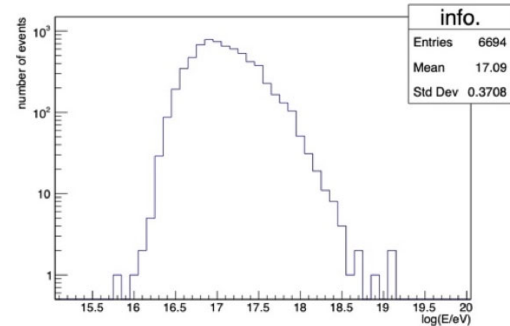


図 4 : TALE 実験 SD アレイによる 106 日分の観測データから求められた宇宙線の一次エネルギー分布

5. 今後の計画

新型コロナウイルス感染拡大の影響による研究遂行の遅れはあるが、2021 年度には地表検出器の製作、新規 SD 設置点の調査開始、新規 SD の設置を完了したい。同時に TALE 実験 FD、SD 両方の電源更新をすすめ、遅れを取り戻す予定を立てている。同時に成果公表を積極的に進め、2021 年 7 月に開催される第 37 回宇宙線国際会議をはじめ、国内外の研究集会で、エネルギースペクトル、化学組成、到来方向異方性についての予備的な解析結果を公表する予定である。

2022 年度末には、20 万ハイブリッド事象 (最頻エネルギー 10^{15.5} eV)、240 万 SD 事象 (最頻エネルギー 10^{15.5} eV) が期待される。2023 年半ばに開催が予定されている第 38 回宇宙線国際会議をはじめ、国内外の学会で公表する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

R.U. Abbasi, S. Ogio, M. Takeda, Y. Tameda, T. Tomida, S. Udo, et al., "The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode", *The Astrophysical Journal*, Vol. 909, pp.178-194, 2021

R.U. Abbasi, S. Ogio, M. Takeda, Y. Tameda, T. Tomida, S. Udo, et al., "Search for Large-scale Anisotropy on Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Experiment", *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 898, L28, 2020

7. ホームページ等

http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/tale.html