

極高エネルギー宇宙線観測プロジェクト テレスコープアレイ実験の最新結果

山崎 勝也

大阪市立大学大学院理学研究科、〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138

概要

宇宙線は発見から 100 年の間様々な方法で観測・研究されてきたが、極高エネルギー宇宙線領域では解決すべき重要な課題が未だ残されている。テレスコープアレイ実験は北半球最大の有効検出面積を有する極高エネルギー観測実験であり、2008 年 3 月から収集されているデータを使ってこの課題の解決に迫る。本講演ではテレスコープアレイ実験によって得られた極高エネルギー宇宙線の化学組成と到来方向、エネルギースペクトルの最新結果を報告する。

1 極高エネルギー宇宙線

宇宙線の 1912 年の V.F.Hess による発見から現在までの 100 年間様々な方法で宇宙線観測が行われ、その結果これまでに観測された宇宙線は 10^8 eV から 10^{20} eV 以上と非常に広いエネルギー範囲に及ぶ。図 1 にこれまでに観測された宇宙線のエネルギースペクトルを示す。10 桁を超える幅広いエネルギーで宇宙線のスペクトルが描かれている。様々なエネルギーをもつ宇宙線の中でも 10^{19} eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線は極高エネルギー宇宙線と呼ばれている。近年加速器技術の発達によって Large Hadron Collider (LHC) では陽子を実験室系に換算して 10^{17} eV まで加速することができるようになった。しかし、極高エネルギー宇宙線はそれより 2 桁以上大きなエネルギーを持っており、この様に高エネルギーな粒子の相互作用に関する研究は極高エネルギー宇宙線観測によってのみ実現される。また、極高エネルギー宇宙線はその化

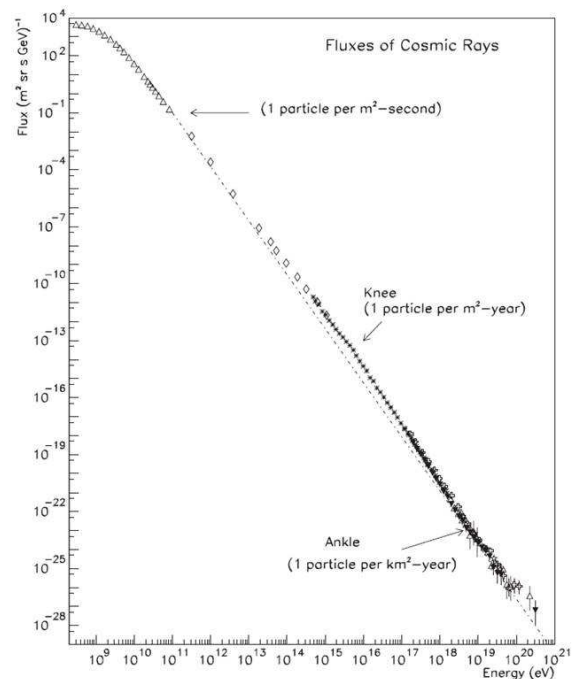


図 1 宇宙線のエネルギースペクトル。

学組成や加速機構、伝播途中で受ける相互作用など未だ完全な理解に至っていないことは多く、解決すべき大きな課題の一つである。

極高エネルギー宇宙線について我々が理解すべき最も基本的な事は、何が・どこから・どのようにして到来しているのか、である。

極高エネルギー宇宙線の研究では、何が来ているのかを知るために最も有効な手段は大気蛍光法による宇宙線空気シャワー観測である。大気中での空気シャワー中の粒子数が最大となる大気深さ X_{max} は、一次宇宙線の粒子種と関係している。従って、宇宙線の工

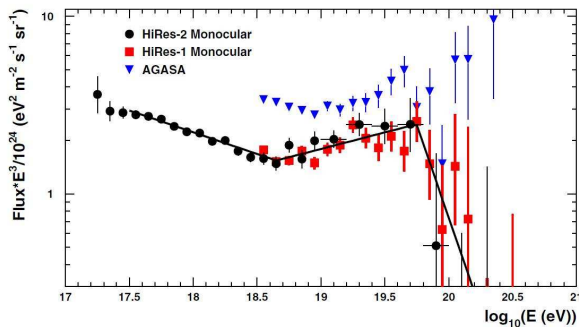


図2 High Resolution Fly's Eye(HiRes) と Akeno Giant Air Shower Array(AGASA) のエネルギースペクトルの構造を見易くするために E^3 を掛けた図 [2].

エネルギー毎に X_{max} 分布をとることであるエネルギーでの化学組成を調べることができる。

宇宙線がどこから来ているのかは到来方向から調べることが最も直接的な手段である。宇宙線のほとんどは荷電粒子であるために宇宙空間に存在する磁場に曲げられるが、 10^{20} eV の陽子が 50 Mpc の距離を伝播してきた場合を考えると、到来方向は直進してきた場合に比べて数度しか曲がらない。従って宇宙線の到来方向は宇宙線源の方向と相関する。

極高エネルギー宇宙線は 10^{19} eV 以上という非常に大きなエネルギーを持っているために磁場によってほとんど曲げられることなく地球に到来する [1].

宇宙線がどのようにして地球まで来ているかという情報はエネルギースペクトルの構造を詳細に調べることで明らかにされる。図 2 に 10^{17} eV 以上のスペクトルを構造を見易くするために E^3 を掛けたものを示す。 10^{19} eV 付近に見られるへこみは Ankle と呼ばれ、 10^{20} eV 付近には Cutoff が見られる。Ankle 周辺では観測される宇宙線が銀河系内起源から銀河系外起源へと遷移しているとする考え方や、1 次宇宙線が陽子の場合は宇宙背景放射との相互作用によって電子・陽電子対生成が起きていることが原因とする考え方などがある。また、Cutoff は宇宙線の加速限界だとする考え方や、宇宙背景放射との相互作用によってパイ粒子生成が起きているとする考え方などがある。これらはスペクトル構造と宇宙線の化学組成を合わせて調べることでより詳しく理解することができる。

2 テレスコープアレイ実験

テレスコープアレイ実験 [3] はアメリカ合衆国ユタ州に設置された北半球最大の極高エネルギー宇宙線観測実験であり、2008 年 3 月から定常観測を行っている。観測装置は、シンチレーターを用いて空気シャワーを観測する 507 台の地表検出器 (図 3) と大気蛍光法を用いて空気シャワーを観測する 38 台の大気蛍光望遠鏡 (図 4) を有するハイブリッド観測装置である。地表検出器は 1.2 km 間隔で設置され、有効検出面積は約 700 km^2 であり、これらの地表検出器の周囲 3 箇所に大気蛍光望遠鏡が設置されている (図 5)。

地表検出器は 24 時間 365 日天候に関係なく観測可能なので、高統計な宇宙線観測を行うことができる。対して大気蛍光望遠鏡は月のない晴れた夜のみ観測可能なので地表検出器に比べて観測効率は劣るが、大気をカロリメーターとして空気シャワーのエネルギーを測定することができるためエネルギーの決定精度が高い。また、空気シャワーの縦方向発達を観測することができるため、前述した粒子種の特定に有効な X_{max} の推定という点で有利である。テレスコープアレイ実験はこれら 2 つを組み合わせることで高精度・高統計を実現する。



図3 テレスコープアレイ実験地表検出器。

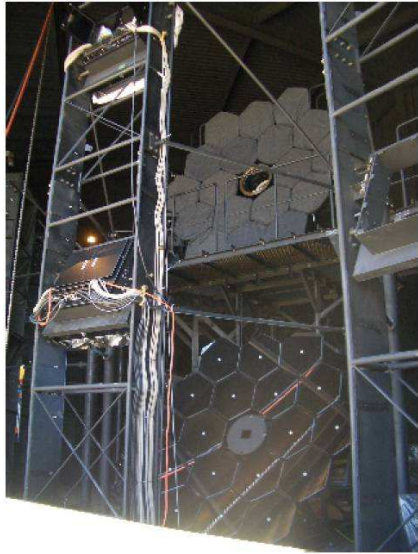


図4 テレスコープアレイ実験大気蛍光望遠鏡。

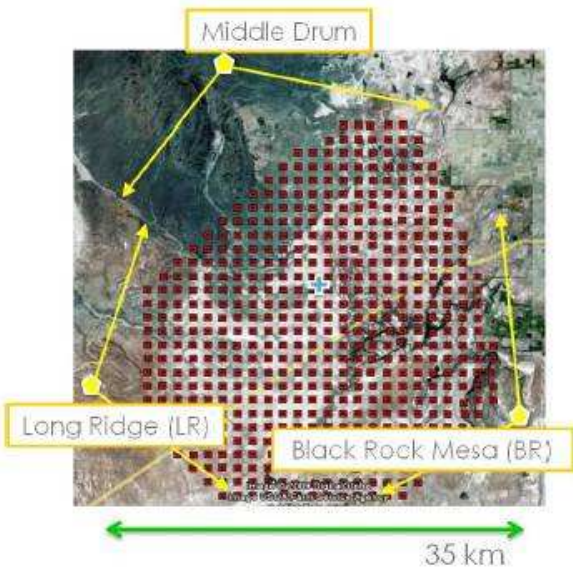


図5 テレスコープアレイ実験の観測装置配置図。図中の赤い四角形が地表検出器を示し、その周囲3箇所にある黄色の五角形が大気蛍光望遠鏡を集めたステーション (Middle Drum:14台、Black Rock Mesa:12台、Long Lidge:12台)。

3 最新結果

3.1 化学組成

図6にテレスコープアレイ実験の大気蛍光望遠鏡の内2つのステーション (計24台の望遠鏡) で得られた2007年11月から2010年9月までのデータを用いたステレオ解析による平均 X_{max} 解析結果を示す。横軸がエネルギーのベキで、縦軸がそのエネルギー領域での平均 X_{max} を表す。誤差棒と点で表されているのがテレスコープアレイ実験観測結果であり、線で表されているのは赤が陽子、青が鉄のシミュレーション結果である。この図からわかるようにテレスコープアレイ実験の最新結果は $10^{18.2} \sim 10^{19.8}$ eV の範囲で観測された平均 X_{max} は陽子と矛盾しない。

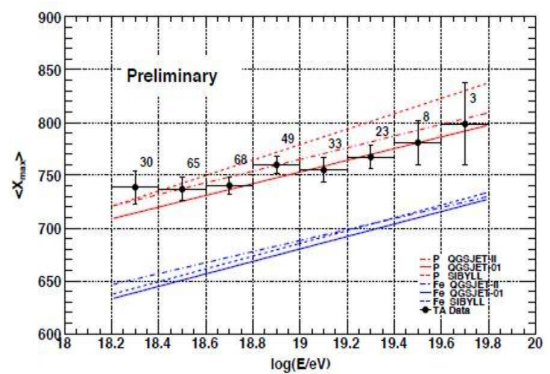


図6 テレスコープアレイ実験の化学組成解析結果。横軸はエネルギーのベキで、縦軸は平均 X_{max} 。線はシミュレーション結果を表しておりそれぞれ赤が陽子、青が鉄のシミュレーション結果である。各点の右上の数字はその点を計算するときに含まれたイベント数を示している。

比較のためにテレスコープアレイ実験と同様に大気蛍光望遠鏡を使った極高エネルギー宇宙線観測実験である Pierre Auger Observatory (PAO) と HiRes の結果を図7に示す。テレスコープアレイ実験と同じエネルギー範囲で見るとき、PAO が示した宇宙線の化学組成はエネルギーの増加に伴って陽子から鉄へと遷移しており、テレスコープアレイ実験の結果と矛盾する。一方 HiRes が示した化学組成は 10^{18} eV 以上のエネルギーで陽子であり、テレスコープアレイ実験の結果と

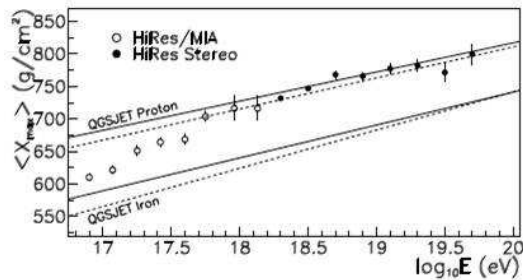
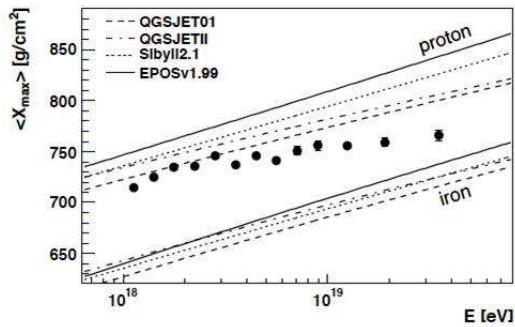


図7 PAOの化学組成解析結果(上)。HiResの化学組成解析結果(下)。 10^{18} eV以上のエネルギーでPAOの結果は鉄のシミュレーション結果に近づいているが、HiResの結果は陽子のままであることがわかる。[4][5]

矛盾しない。

3.2 到来方向

図8にテレスコープアレイ実験で2008年5月から2011年9月に観測された 57×10^{18} eV以上の宇宙線の到来方向と、Veron-Cetty Veron (VCV) カタログに載っているAGNの中で75 Mpc以内にあるAGNの位置との相関を解析した結果を示す[6]。図は銀河座標系で描かれており、点線で示されているのが超銀河面である。また黒点がAGNの位置を示しており、赤と青の丸は宇宙線の到来方向を示す。赤い丸は宇宙線の到来方向から 3.1° 以内に対応するAGNがあるイベント、青い丸は 3.1° 以内に対応するAGNがないイベントを示す。この解析で使用された全25イベント中11イベントが対応するAGNが存在した。一方、等方的に宇宙線が到来するとしたときのシミュレーション結果から計算される相関数の期待値は5.9イベントである。期待値が5.9イベントに対して11イベントの

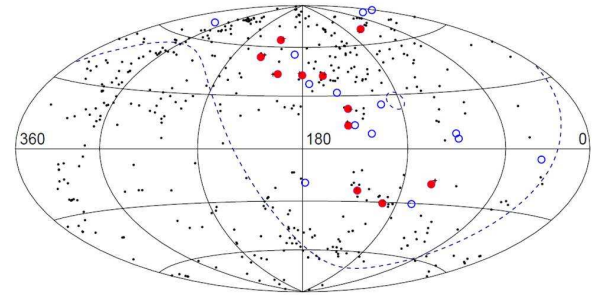


図8 VCVカタログに記載された < 75 Mpcの距離にあるAGNと 57×10^{18} eV以上の観測イベントの到来方向との相関解析結果[6]。銀河座標系で描かれており、点線で示されているのがテレスコープアレイ実験の地表検出器が見ることのできる領域の端を示している。また黒点がAGNの位置を示し、赤と青の丸は宇宙線の到来方向を示す。赤い丸は宇宙線の到来方向から 3.1° 以内に対応するAGNがあるイベント、青い丸は 3.1° 以内に対応するAGNがないイベントを示す。

相関が偶然起こる確率は $\sim 2\%$ であり、AGNとの相関は統計的には有意とは言えない。

3.3 エネルギースペクトル

図9にテレスコープアレイ実験の地表検出器で得られた2008年5月から2011年4月までのデータを使用したエネルギースペクトルと関連する研究グループが発表したスペクトルを重ね描きしたものを示す[7]。テレスコープアレイ実験の結果はHiResの結果と誤差の範囲内で一致している。また、図中の実線はテレスコープアレイ実験の結果を二つの折れ曲がりがあるベキでフィットしたもので、 $10^{18.7}$ eVと $10^{19.7}$ eVにそれぞれAnkleとCutoffが見られる。Cutoffの有意度を計算するために、 $10^{19.7}$ eVに折れ曲がりがなくスペクトルがそのまま伸びていた場合に期待される $10^{19.7}$ eV以上のイベント数と実イベントの数を比較する。折れ曲がりがない場合に期待される $10^{19.7}$ eV以上のイベント数は54.9イベントであるのに対して、観測された実イベントは28イベントであった。この結果からPoisson統計で計算されるCutoffの有意度は $\sum_{i=0}^{28} \text{Poisson}(\mu = 54.9; i) = 4.75 \times 10^{-5}$ となり、Cutoffの有意度は 3.9σ であった。

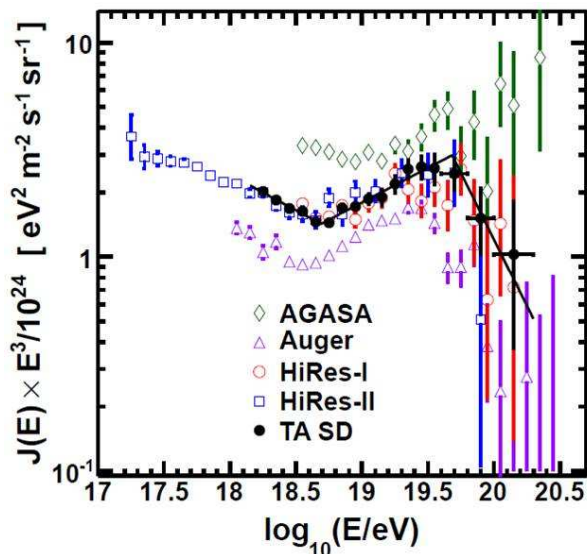


図9 地表検出器で得られたエネルギースペクトル。黒い点がテレスコープアレイ実験の結果で、図中にはAGASA、HiRes、PAOのスペクトルが一緒に描かれている [7]。また、実線はテレスコープアレイ実験の結果を二つの折れ曲がりがあるべき乗関数でフィットしたもの。

4 まとめ

2008年から定常観測を行っているテレスコープアレイ実験で収集された約3年分のデータを使って、極高エネルギー宇宙線の化学組成と到来方向及びエネルギースペクトルの解析を行った。化学組成解析の結果 $10^{18.2} \sim 10^{19.8}$ eV のエネルギー範囲では1次宇宙線の化学組成がエネルギーに依らず陽子と矛盾しないことがわかった。また、 57×10^{18} eV 以上の宇宙線を使った到来方向解析の結果、VCV カタログに載っているAGNと関連するイベントは解析に使われた全25イベント中11イベントで、これが偶然起こる確率は $\sim 2\%$ と統計的に有意な相関は得られなかった。エネルギースペクトルの解析結果では、 $10^{18.7}$ eV と $10^{19.7}$ eV の2箇所に折れ曲がり検出された。2つの折れ曲がりの内 $10^{19.7}$ eV にあるCutoffの有意度は 3.9σ であった。

謝辞

ここで発表した結果はテレスコープアレイ実験の全共同研究者による研究成果です。今回これらの成果をグループを代表して講演する機会を与えてくださったテレスコープアレイグループの方々に深く感謝致します。また、第42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くださった宇宙線研究者会議(CRC)に深く感謝致します。

参考文献

- [1] J. W. Cronin., *Nuclear Physics B(Proc. Suppl.)*, vol. 138 (2005) pp. 465-491
- [2] R. U. Abbasi et al., *Physical Review Letters*, vol. 100 (2008) 101101
- [3] Telescope Array Experiment, *The Telescope Array Project Design Report*, <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>, (2000)
- [4] J. Abraham et al., *Physical Review Letters*, vol. 104 (2010) 091101
- [5] R. U. Abbasi et al., *arXiv*, (2009) 0910.4184v1
- [6] T. Abu-Zayyad et al., *arXiv*, (2012) 1205.5984v1
- [7] T. Abu-Zayyad et al., *arXiv*, (2012) 1205.5067v1