

テレスコープアレイ実験

— 最高エネルギー宇宙線で宇宙極高現象を探る —

東京大学宇宙線研究所

佐川 宏行

hsagawa@icrr.u-tokyo.ac.jp

大阪市立大学大学院理学研究科

荻尾 彰一

sogio@sci.osaka-cu.ac.jp

東京工業大学大学院理工学研究科

常定 芳基

tsunesada@cr.phys.titech.ac.jp

2013年(平成25年)12月9日

1 はじめに

宇宙線は宇宙空間を飛び交っている高エネルギーの粒子である。これまで観測された宇宙線の最高エネルギーは 10^{20} eV 程度である。宇宙線はどこまで高エネルギーになれるか。 10^{20} eV ものエネルギーまで宇宙線を加速しうる宇宙現象は何か。最高エネルギー宇宙線はどんな粒子で、どこから来るか。これらの謎に迫る国際共同実験テレスコープアレイ (Telescope Array: TA) [1] が 2008 年に本格的に稼働した。本稿では TA 実験の概要、5 年間の観測の結果および今後の展望について述べる。

2 これまでの背景

宇宙線の主成分は陽子および原子核である。一般に宇宙線という場合はエネルギーが 1 GeV 以上のものをさすが、その範囲は 10 桁以上におよぶ。エネルギーが 10^{18} eV (1 EeV) を超える宇宙線は超高エネルギー宇宙線 (Ultra-High Energy Cosmic Ray: UHECR) とよばれ、これまでに 10^{20} eV を超える高エネルギーの宇宙線が観測されている¹。それほど高いエネルギーまで粒子を加速できるメカニズムはこれまでに知られていないが、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei: AGN) やガンマ線バーストなど、宇宙でもっとも激しい天体現象と関連しているであろうと考えられる。

ただし、宇宙は最高エネルギー領域の宇宙線に対して透明ではなく、地球で観測されることは実は考えにくい。1965年に宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation: CMB 放射) が発見されてほどなく地球で観測される宇宙線のエネルギーに上限があるという予言がなされた [2]。CMB 放射は実験室系では 10^{-3} eV 程度の光子であるが、高いエネルギーの宇宙線からは高エネルギーのガンマ線に見える。宇宙線のエネルギーが $4 \sim 6 \times 10^{19}$ eV を超えると、陽子宇宙線は光子との相互作用によって π 中間子を生成して 20% ほどのエネルギーを失い、宇宙線強度の急激な減少があらわれると期待される。これが GZK 限界または GZK カットオフ (Greisen-Zatsepin-Kuzmin cutoff) の予言である。

10^{20} eV 以上の宇宙線の到来頻度は、カットオフがないとしても面積 100 km^2 の領域に一年に一個程度である。カットオフの存在を観測的に証明するには、有効検出面積が大きい装置で長時間の観測を行う必要がある。

このエネルギー領域において統計的にある程度まとまった観測データを初めて集めたのは日本の AGASA 実験 (Akeno Giant Air Shower Array, 1991-2004) であった。AGASA は約 100 km^2 の領域 (山手線を覆うくらいの面積) に 111 台のプラスチックシンチレーション検出器を配置した「地表検出器アレイ (Surface Detector: SD)」による実験で、宇宙線が大気中に入射した際に発生する空気シャワーに含まれる電子やミュオンなどの荷電粒子を直接地表でとらえて宇宙線を検出した。入射一次宇宙線のエネルギーは、地表に到達する空気シャ

¹これまで人工の加速器で作り出した最高のエネルギーは、CERN の LHC による 4×10^{12} eV (4 TeV)。

ワーの粒子数を調べることによって決定できる。13年間の観測で GZK 限界の予想に反して、 10^{20} eV を超える宇宙線を 11 例観測した [3]。

これに対し AGASA に匹敵する検出面積をもつ宇宙線観測実験としてアメリカのユタ州で始まったのが、High-resolution Fly's Eye 実験 (HiRes, 1997-2006) であった。HiRes は、空気シャワーが大気中を通過したときに発生する微弱な蛍光をとらえる「大気蛍光検出器 (Fluorescence Detector: FD)」である。この検出方法では、大気蛍光の発生量が空気シャワー中の荷電粒子のエネルギー損失に比例することを利用して一次宇宙線のエネルギーを決定する。HiRes は、GZK 限界の予想通りのエネルギーにカットオフがありそうだという結果を 2001 年ごろから発表し、GZK カットオフを発見したという最終結果を 2008 年に発表した [4]。

AGASA と HiRes によるエネルギースペクトル測定結果を図 1 に示す²。両グループの結果は、 $10^{19.7}$ eV 以下においてその形状が一致しているが、それ以上のエネルギーで GZK カットオフがあるのかないかで大きな論争をもたらした。

3 TA 実験装置

HiRes と AGASA でどちらが正しいかはさらに別の実験による検証を待たざるを得なかった。そこで始まった大型宇宙線観測実験が、欧米中心の Pierre Auger 実験 (Auger, 2004-) [5] と、日米韓露ベルギーによる TA 実験である。どちらの実験も、地表検出器アレイと大気蛍光検出器の両方を備えた「ハイブリッド実験」である。Auger ではアルゼンチンの平原地帯に SD として 1600 台の水チェレンコフ検出器を面積約 3000km² の領域に並べ、その周り四カ所に FD ステーションを建設して合計 24 台の FD を展開した。TA は米国ユタ州ソルトレークシティ南方約 200 km の標高 1400 m の砂漠地帯にあり、図 2 に示すように約 700km² (琵琶湖に匹敵する面積) に SD として 507 台のプラスチックシンチレーション検出器を並べ [6]、その周り三カ所に FD ステーションを建設してそれぞれ 12 台、12 台、14 台の FD を設置した [7]。二カ所の FD ステーションと各 12 台の望遠鏡は TA のために新規に建設され、残り一カ所の 14 台の FD は HiRes 実験で使用した FD の移設再利用であり、TA は AGASA と HiRes の後継であるといつてよい。

²AGASA は HiRes よりエネルギーを高めに測定している傾向が見られたので、AGASA のエネルギーを 25% 下げてプロットした。これは二つの実験の手法の違いによるエネルギーの系統誤差によると解釈されている。AGASA のような地表検出器アレイによる観測では、未知のエネルギー領域における宇宙線と大気中の原子核との相互作用が関係するので、地表レベルに到達する粒子の数によるエネルギー決定の誤差は大きいと考えられる。一方、HiRes のような大気蛍光法による宇宙線のエネルギー決定は、大気蛍光の発生量が空気シャワー中の荷電粒子のエネルギー損失だけで決まるというカロリメトリ (熱量計の原理) によるので、原子核相互作用やシャワー現象の詳細にはあ

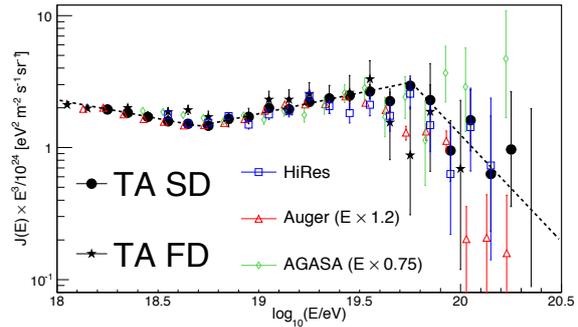


図 1 UHECR のエネルギースペクトル。横軸はエネルギー E の常用対数、縦軸は宇宙線のスペクトル、つまり強度 [宇宙線数/エネルギー/面積/時間/立体角] に E^3 をかけたもの。宇宙線のスペクトル $J(E)$ は E^{-3} にほぼ比例して減少するので、 $E^3 J(E)$ 形で表すとスペクトルの微細構造や異なる実験結果の差異が分かりやすい。● (黒丸) は TA SD による preliminary な結果 [8] で、破線は SD のスペクトルを二カ所の折れ曲がりをもつ三本の power-law でフィットしたものである。★ (星印) は TA FD による結果 [9]。AGASA [3]、HiRes [4]、Auger [10] による結果は白抜きの印で表示した。なお実験ごとにエネルギースケールの違いがあることを考慮し、AGASA は -25% 、Auger は $+20\%$ だけエネルギーをシフトした。(なお 2013 年の宇宙線国際会議 [11] で Auger はエネルギースケールを更新し、TA との違いは 10% 程度であった。)

3.1 大気蛍光望遠鏡

南東のサイトを Black Rock Mesa (BRM)、南西のサイトを Long Ridge (LR)、北のサイトを Middle Drum (MD) と呼び、それぞれ約 30 km 離れている。図 3 に BRM サイトの FD ステーションを示した。BRM と LR のステーションにはそれぞれ 12 台の反射望遠鏡を 6 列 2 段に配置し、仰角方向に 3° から 33° 、アレイの中央に向かって方位角方向に 108° をカバーする。各望遠鏡は、18 枚の六角形のセグメント鏡から構成される約 6.8 m² の球面鏡である。空気シャワーの像は、 16×16 本の PMT で構成されるカメラによって検出する。それぞれの PMT は約 1° の視野をもつ。

PMT からの信号はプリアンプで 50 倍に増幅したあとで、約 25 m 長のケーブルを通して信号検出・デジタル化モジュールに送る。そこで整形フィルタを通したあとで 12 ビット・40 MHz FADC でデジタル化する。実際には 4 ビン分を足して 10 MHz で使用する。

TA では PMT のゲインの較正、カメラの一様性の測定、大気モニタおよび後述する電子加速器によるエネルギーの end-to-end の FD 較正を行う。

各カメラには、波長が 337.1 nm の窒素レーザを窒素で充填させた散乱箱に通して、そのレーリ散乱で絶対較正した二本あるいは三本の PMT を取り付けした。較正した PMT の表面には長期安定性を見るために YAP パル

まり左右されない利点がある。

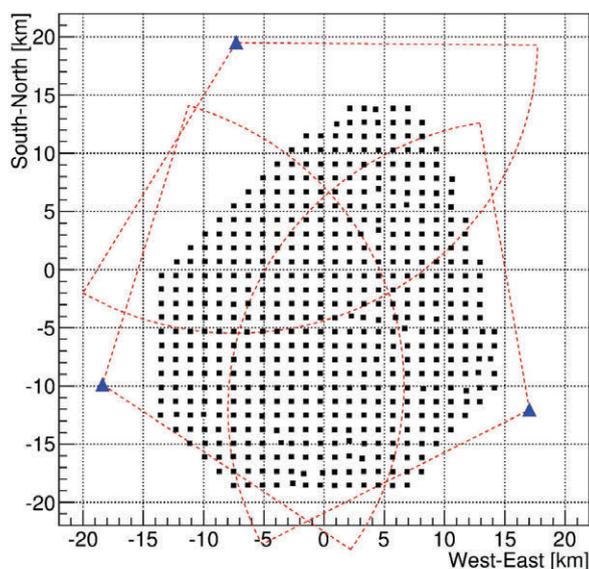


図2 TAの配置図。四角印はSDを、三カ所の三角印はFDステーションを表す。各FDの視野は図中の方位角方向の扇形で表した。

サを取付けた。望遠鏡ごとにゼノンフラッシュをカメラに照射して相対的に1%程度の精度でPMTのゲインを調整している。カメラ上で二次元的に相対的な一様性を測定するためにUV LEDを取り付けたX-Yスキャナを用いて4 mmステップでPMTのゲインを測定した。

空気シャワーによって生成されたUV蛍光はFDまでの伝播通路に沿って散乱され損失する。波長355 nmのNd:YAGレーザとそれと同じ向きに据え付けた望遠鏡からなるLIDARシステムによって、射出したレーザの後方散乱光を望遠鏡で受光し、レーザの経路に沿った大気の消散係数を求めた。また赤外線CCDカメラを設置して夜空の温度を測定し雲をモニタする。

中央レーザ装置(CLF)はUVレーザと光学系からなり、三つのFDステーションから等距離にある。そこからパルスレーザを垂直に射出し、同時にすべてのFDステーションで観測し、大気モニタを行う。

従来、望遠鏡の感度較正の基本は、PMTの量子効率や大気発光効率など関連する要素を測定して積み上げることであった。このような方式ですべてのパラメータを測定して管理するのは困難な仕事であり、系統的な誤差が大きくなる可能性がある。TAでは観測現場に小型電子線形加速器(Electron Light Source: ELS)を設置し、電子ビームを射出してそれにとまう大気蛍光を測定して、end-to-endのFD較正を行うことを考案した[12]。これはFDステーションの前方100 mの位置から上空に向かって 10^9 個の電子ビーム(40 MeV)を射出するもので、エネルギーの分かったシャワーを作り出す装置と考えればよい。荷電粒子の大気中の通過、大気の発光、

減衰、そして検出器による測定と記録までを制御下で行うことができ、観測された蛍光信号とGEANTシミュレーションから期待される蛍光信号との比較によって絶対較正を行う。ELSの設計および製作は高エネルギー加速器研究機構(KEK)の加速器施設のスタッフとの共同研究によって行われた。2009年にBRMサイトに設置し、2010年に電子ビームからの大気蛍光をFDによって撮像することに成功した。現在FDの較正を進めており、最初のpreliminaryな結果を2013年の宇宙線国際会議で発表した[12]。



図3 BRMサイトの大気蛍光望遠鏡ステーション

3.2 地表粒子検出器

SDアレイは1.2 km間隔で碁盤目状に配置された507台のカウンタ(図4)で構成される。カウンタは、厚さが1.2 cmで面積が 3 m^2 のプラスチックシンチレータを上下二層重ねた構造で、シンチレータの表面の溝に一層ごとに直径1 mmのWLSファイバを2 cm間隔で張っている。各層ごとにファイバの両端を束ねてPMT管面にグリースで接触させる。二つの層からの信号を別々のPMTに送ることによって、ミュオン信号を使ってお互いの較正ができる。また二層のコインシデンスを取ることによってノイズを落として信号を取得することができる。砂漠地帯には既存の通信システムや電源はないので、各SDが無線LAN通信システムで通信塔に情報を送り、電力供給用のソーラーパネルシステムをもつ。

PMTからの信号は12ビットで50 MHzサンプリングのFADCで連続的にデジタル化する。0.3 MIP (Minimum Ionizing Particle)以上の信号を記録した際にGlobal Positioning System (GPS)のタイムスタンプを記録する。GPSの時間分解能は20 ns以下である。PMTの信号が3 MIP以上の時にその測定器のトリガーリストに記録する。トリガーリストは一秒に一回無線LANによって通信塔にあるDAQ HOSTに送る。隣り合う三台以上のカウンタからの信号が、 $8 \mu\text{s}$ 内にあるという

条件を課して空気シャワーイベントを同定し、0.3 MIP 以上のデータをもつ SD に波形データを HOST へ送るように指示する。通信には 2.4 GHz の無線送受信機を使用する。データは一旦通信塔に設置した産業用 PC に蓄える。通信塔にあるデータの送信、領域間トリガーの送信、あるいは FD から SD へのトリガー（ハイブリッドトリガー）の送信は、タワー間あるいはタワーと FD ステーション間の 5.8 GHz の通信系で行う。空気シャワートリガー効率是一次宇宙線の入射角が天頂角で 45° 以内の場合に 10^{19} eV 以上で 100% である。



図 4 フィールドに設置された地表粒子検出器

4 TA の最近の結果

以下では、主に稼働開始してから 5 年間に蓄積した TA データを用いた結果について述べる。

4.1 エネルギースペクトル

TA の SD および FD によるエネルギースペクトルの測定結果を図 1 に示した [8, 9]。FD と SD によるスペクトルはよい一致を示し³、かつ HiRes の結果とはエネルギースケールおよび形状も一致している。結果からは以下のことがいえる。

まず、宇宙線のエネルギースペクトルは $10^{18.6} \sim 10^{19.0}$ eV あたりでいったん傾きがゆるやかになる⁴。これまでのすべての実験でこの構造が見られたことから、その存在は観測的に確立したといえる。ただし、その起源はまだ分かっておらず、1) ankle を境に、低エネルギーでは銀河系内を起源とする宇宙線が優勢であるが、ankle 以上の宇宙線は銀河系外から到来している、

³TA においても、SD は FD に比べてエネルギーを高く評価してしまう (+27%) という、AGASA と HiRes において見られたのと同様の傾向が再現された。これは今後克服すべき課題である。なおここでは SD のスペクトルは FD によるカロリメトリを信用して 1/1.27 だけエネルギーをスケールしている。

⁴このスペクトルの構造を、人の足首にたとえて ankle と呼ぶ。

結果としてスペクトルの形状が異なるという解釈と、2) 銀河外を起源とする宇宙線が CMB 光子と相互作用して電子対生成を起し、エネルギーを失った結果としてへこみ (dip) が見えているという解釈が有力である⁵。

次に、TA の結果では 5×10^{19} eV 付近でスペクトルの傾きが急になっており、AGASA よりはカットオフのある HiRes のスペクトルに近い。折れ曲がり位置以上のエネルギーの観測事象数は 26 で、スペクトルが折れ曲がることなくそのまま高エネルギー側にも伸びると仮定した場合の期待値は 68 である。このようなことが統計的ゆらぎによって偶然起こる確率をポアソン統計で計算すると 4.8×10^{-9} であり、ガウス統計に直せば有意度 (significance) で 5.7σ である。図 1 に示した Auger の結果 [10] でもスペクトルが急になっている。したがって、HiRes, Auger, および TA によって、UHECR のスペクトルには急激な強度減少を示す折れ曲がりが存在することが観測的に確立したといえる。

ただしスペクトルに折れ曲がりがあるからといって、ただちに GZK カットオフであると結論することはできない。GZK カットオフであることを確認するためには、少なくとも 1) 宇宙線の組成 (陽子・原子核混合比) を観測的に決定する、2) カットオフの位置の観測値と、宇宙線の組成から予測される位置が無矛盾である、3) カットオフ以上のエネルギーの宇宙線の到来方向分布に、とりわけ大きな異方性が見られる、などの検証が必要である。

1) にある、宇宙線の組成が何であるかという問題は、宇宙線の起源解明のために重要である。従来、UHECR は銀河外起源であり、その主成分は陽子であると考えられてきたが⁶、実験的検証が得られてはいない。宇宙線が陽子であるならばカットオフの位置は $(4 \sim 6) \times 10^{19}$ eV でなければならないが、もっと重い原子核であれば、カットオフの位置はローレンツ因子分だけ変わってくるし、その前に CMB 光子との光破砕相互作用によって壊れてしまう影響が現れるであろう。第 4.2 節で述べるように TA におけるこれまでの観測ではエネルギー 10^{19} eV 付近では宇宙線の主成分は陽子であるという結果が得られている。

また宇宙線の加速には何らかの上限があり、UHECR が生成されたときにはすでに折れ曲がりをもったスペクトルになっているということも考えられる。その場合の折れ曲がりの位置は GZK カットオフの場合の予測値に近い必要はない。これらを検証するのが 2) である。

⁵電子対生成は 10^{18} eV くらいから起り始めるが、電子の質量が軽いために宇宙線のエネルギー損失が小さく、 π 中間子生成のような急激な強度減少には至らない。

⁶宇宙線を加速するためには、宇宙線を閉じ込めておくための大きな領域と強い磁場の存在が必要条件である。UHECR が原子核であったとしても、銀河間空間を伝播する間に CMB 光子や赤外光子との相互作用によって壊れ、地球では結局陽子として観測されるのではないかと予測がなされてきた。

3) は、GZK カットオフであるならば宇宙線の起源天体は地球の比較的近傍（といっても数 10～100Mpc のスケール）になければならないという距離的な制限から導かれる。この宇宙は 100 Mpc 以下のスケールでは一様等方ではないので、カットオフ以上のエネルギーをもつ宇宙線の到来方向分布は、近傍宇宙の天体・質量分布を反映した異方性を示すと考えられる。

4.2 組成

宇宙線が大気に突入してできる空気シャワーは、大気中を伝播するにしたがって、はじめはその粒子数を増やし、ある高度で最大を迎えた後に減少に転ずる。TA など FD を用いる実験ではこの様子を観察することができる。空気シャワー中の粒子数が最大になる大気の深さを⁷を X_{\max} と表記する。エネルギーの高い宇宙線による空気シャワーほど、大気中の深いところまで突っ込んでくるので平均の X_{\max} は大きい。またエネルギーが同じ場合には、より重い原子核の作る空気シャワーの方が $\langle X_{\max} \rangle$ は小さくなる（高度は高くなる）。これは二つの理由による。まず質量数 A の大きい原子核は大気中の原子核との相互作用の断面積が大きいので ($\sigma \propto A^{2/3}$)、高い高度で最初の相互作用を起こす。また質量数 A でエネルギー E の原子核は、エネルギーが E/A の陽子が A 個集まったものとはほぼ等価なので、核子当たりのエネルギーが小さい分 $\langle X_{\max} \rangle$ は小さくなる。TA データを用いた $\langle X_{\max} \rangle$ の解析結果と、宇宙線の組成が 100% 陽子の場合、および 100% 鉄原子核の場合という二つの極端な場合の $\langle X_{\max} \rangle$ の期待値を図 5 に示す [13]。TA の結果からエネルギー $10^{18.2} \sim 10^{19.7}$ eV の宇宙線はほぼ陽子であるといえそうである。TA の結果は HiRes の結果とも一致している [14]。UHECR が陽子であるということは、 $10^{19.7}$ eV におけるスペクトルの折れ曲がり GZK カットオフであることの一つの証拠であるかもしれないが、この付近のエネルギーの組成は統計的にまだはっきりしておらず、現時点では結論を保留しておく。最近の Auger の結果では必ずしも陽子だけではないという結果も出されており [15]、今後の研究の進展が待たれる。

4.3 異方性

宇宙線の起源解明がむずかしいのは、宇宙線が荷電粒子であり、銀河系内および銀河系外の磁場によってその方向を曲げられてしまうためである。宇宙線のエネルギーが十分高ければ直進性が高いので、起源天体の方向の情報を保ったまま地球に到来すると考えられる。2007 年に Auger は、エネルギー 57 EeV 以上の宇宙線のうち

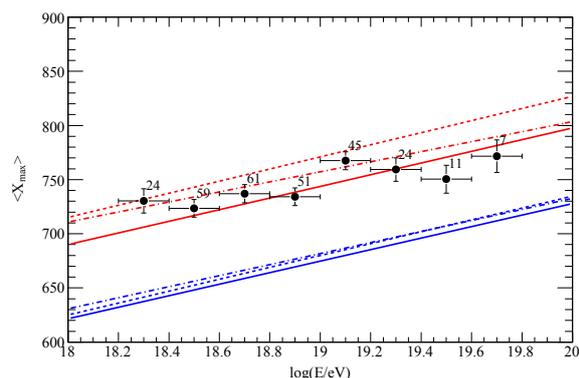


図 5 空気シャワーの平均的最大発達の大気深さ $\langle X_{\max} \rangle$ 。横軸は宇宙線のエネルギー E の常用対数、縦軸は空気シャワーの最大発達点における大気の深さを g/cm^2 単位で測ったもの。点は TA の FD ステレオ解析による preliminary な結果である。上のまとまった三本の線は宇宙線の組成が 100% 陽子の場合の期待値で、下のまとまった三本の線が鉄原子核の場合の期待値である。期待値の計算には、空気シャワーシミュレータ CORSIKA[16] を使い、点線、破線と実線ではそれぞれ SIBYLL, QGSJETII-03 と QGSJET01 という超高エネルギーハドロン相互作用モデルを使用している。縦軸の値 $\langle X_{\max} \rangle$ には、TA の FD の視野範囲が有限であることによるバイアスがデータおよび期待値ともに含まれる。

の 68% について、その到来方向から半径 3.1° の円内に AGN を見つけることができた」と発表し、「宇宙線の起源解明か」と一大センセーションとなった [17]。ここでは TA で観測された SD のデータを用い、AGN の方向との相関、宇宙の大規模構造 (Large Scale Structure: LSS) との相関および宇宙線同士の方角の相関 (autocorrelation) を調べた結果について述べる [18]。

4.3.1 AGN との相関

図 6 に TA でこれまでに観測された 57 EeV 以上で 45° より小さい天頂角をもつ宇宙線の到来方向を、AGN の位置とともに示す。AGN の分布は等方的ではないので、AGN が UHECR の起源として寄与しているならば両者の方向分布には相関が見られるはずである。42 事象のうち、AGN と相関しているのは 17 事象 (40%) である。一方、宇宙線の到来方向分布が等方的で、偶然に AGN の方向と一致して見える期待値は 10 事象 (24%) であり、観測結果が等方な場合に偶然起こる確率は 1.4% である。なお Auger ではその後の観測データの蓄積とともに 2007 年のときに比べて AGN との相関の見える確率は下がっており、現在では TA と同程度の相関になっている [19]。

4.3.2 LSS との相関

LSS との相関をみるために、2MASS の銀河の赤方偏移カタログ (XSCz) を用いた。このカタログは、2MASS

⁷大気の深さ X は大気の頂上でゼロ、海拔 0 m で約 $1100 \text{ g}/\text{cm}^2$ である。単位 g/cm^2 は幾何学的長さに質量密度をかけたものである。

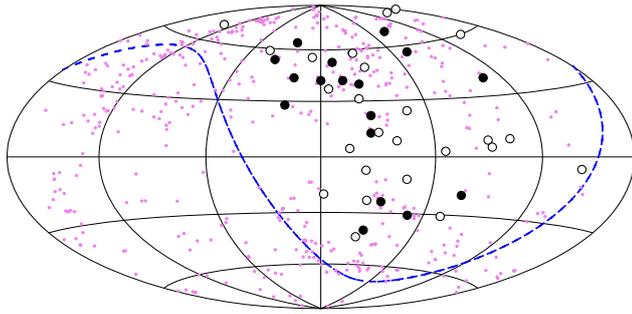


図 6 AGN の方向分布 (細かい点) と TA で観測した 57 EeV 以上の宇宙線の到来方向分布の preliminary な結果 (AGN と相関している事象が ●, 相関していない事象が ○) を銀河座標で表した。破線は TA の立地条件 (地理緯度で北緯 39°) による視野の境界である。

の photometric な測定あるいは分光学的な測定から導き出された赤方偏移をもつ 2MASS Extended Source カタログから導き出されている。5 Mpc から 250 Mpc までの距離で、12.5 未満の K バンド実視等級をもつ銀河を用いた。このカタログは、もっとも正確な三次元銀河分布の情報をもつ。UHECR が陽子であると仮定して、上記 LSS モデルで計算された 57 EeV 以上の宇宙線の天球上の到来頻度分布と TA で観測された天頂角が 55° 以下の宇宙線の到来方向分布を比較したところ、KS 検定の確率 (p 値) が 10% 程度であった。これに対して一様到来分布モデルと比較した場合の p 値は 0.1% 程度であった。

4.3.3 自己相関

UHECR 同士の到来方向に関する相関を自己相関という。40 EeV 以上の宇宙線に関して、2.5° の角度スケールでクラスタリングがあると AGASA で示唆されたが、HiRes の結果は一様到来分布モデルと一致していた。そこで 40 EeV と 57 EeV 以上のエネルギーをもつ天頂角が 55° 以下の TA の宇宙線事象に対して解析を行った。図 7 に、到来方向の開き角が、ある δ より小さい場合に、観測ペア数が一様到来分布モデルの期待値を超える確率を示した。小角度スケールでのクラスタリングはみられなかった。ただし 57 EeV の閾値に対して、20~30° の角度スケールで約 0.2~0.3% の $P(\delta)$ を示した。

5 将来計画および TA サイトでの共同研究

ここでは、部分的に稼働した低エネルギーへの拡張実験 (TALE), Auger との共同研究, 将来の大規模宇宙線観測装置へ向けた電波による宇宙線検出の R&D, 雷観測, および TA の 4 倍拡張計画 (TA×4) などについて述べる。

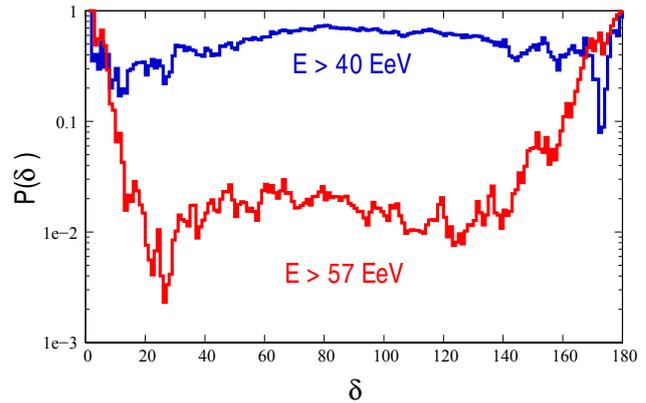


図 7 TA が観測した 57 EeV 以上の宇宙線事象に対して、到来方向の開き角が、ある δ より小さい場合に、観測ペア数が一様到来分布モデルの期待値を超える確率 $P(\delta)$ の preliminary な結果を示した。より小さい $P(\delta)$ の値は、一様到来分布からよりずれていることを表す。

5.1 TA Low-energy Extension (TALE)

われわれの銀河系の大きさと磁場の強さから、非常に高いエネルギーの宇宙線は主に銀河系外に起源があり、銀河系内宇宙線には高エネルギー限界があると考えられる。そこでスペクトル、質量組成、到来方向などに、その遷移がみられると期待される。TALE はこの遷移を突き止めることを第一の目的とする。

10^{18} eV を超える宇宙線は、銀河系外起源であるといわれている。広いエネルギー領域にわたってスペクトルと質量組成の変化を精度よく測定し、銀河系内宇宙線の寄与を切り分けて、銀河系外宇宙線の進化 (宇宙線発生源の密度と距離の関係など)、生成源の性質 (到来頻度の強度、スペクトルの傾き、エネルギー限界など) を導き出すことが TA+TALE の第二の目的である。

また TALE と TA のハイブリッド観測領域である $10^{16.5}$ eV から $10^{20.5}$ eV の重心系エネルギー下端は LHC の衝突エネルギーと重なり、TALE の宇宙線観測と LHC 実験の結果は外挿なしに同一エネルギーで比較ができる。LHC 実験による新しい測定が相互作用モデルに組み込まれれば、TALE などによる空気シャワー観測はモデルのテストとして非常に有用となる。特に 10^{17} eV での陽子・陽子あるいは陽子・原子核 (窒素など) 相互作用の全断面積や多重度が得られればさらに正確な X_{\max} のシミュレーションが可能になり、最高エネルギー宇宙線実験にとっても重要である。

さらに TALE のハイブリッド観測から X_{\max} でタグ付けされた異方性測定が可能になるかもしれない。

TALE は、TA に隣接して高仰角の FD と高密度の SD アレイを追加して (図 8), エネルギー閾値を $10^{16.5}$ eV まで下げ、エネルギースペクトルと宇宙線の質量組成を高精度で測定する計画である。

TALE FD ステーションは MD サイトにある TA FD

ステーションに隣接して設置され、TA FD の視野のさらに上、仰角 $31 \sim 59^\circ$ を観測する。これによって、より低いエネルギーの宇宙線(より高い高度で最大発達を迎える空気シャワー)の観測を行う。TALE FD は 2012 年 11 月に完成し、現在はデータを収集しつつ観測システムの調整を行っている。

TALE FD ステーションの前方には 102 台のシンチレータ検出器からなる高密度空気シャワーアレイを展開する。TALE FD ステーションから 3 km 以内では 10^{16} eV 台の宇宙線に感度をもたせるために 40 台の SD を 400 m 間隔で並べる。FD ステーションから 3~5 km の範囲では検出器 36 台を 600 m 間隔で並べ、 10^{17} eV 台の宇宙線に対して感度をもたせる。このような高密度配置部分と TA の SD アレイを接続するために 26 台の SD を、それらの中間に 1.2 km 間隔で配置する。TALE SD35 台分は 2013 年 4 月に設置した。今後残り約 60 台の SD の予算を得て配置する必要がある。

TALE SD アレイは FD とは独立して稼働しつつ、FD とのハイブリッド観測も行う。TALE SD アレイ単独での統計量は $10^{16.5}$ eV 以上で約 5 万事象/年、ハイブリッド観測で約 5 千事象/年の取得が期待される。

図 9 は FD と SD で同時に観測された空気シャワー事象の例である。TALE に関する詳しい情報は [20] を参照されたい。

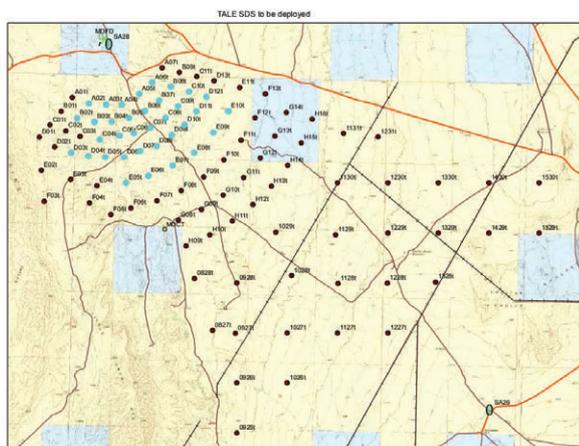


図 8 TALE の配置図。左上の TALE FD ステーションを中心に扇上に 400 m 間隔で 40 台、600 m 間隔で 36 台、さらに 1.2 km 間隔で 26 台の SD を配置する。

5.2 共同研究

5.2.1 Auger との共同研究

2012 年 2 月に CERN で行われた UHECR2012 国際シンポジウム [21] において、この分野で初めて TA, Auger という枠を越えて実験間にまたがる国際ワーキンググループが組織された。データ解析手法や結果の比較、将

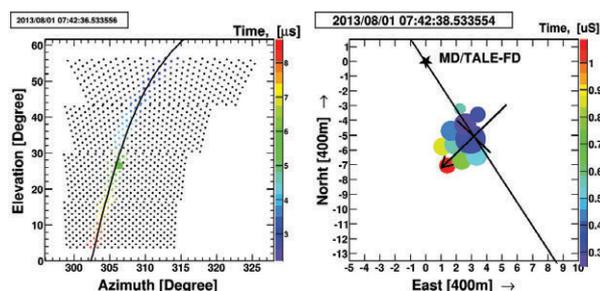


図 9 TALE で取得したハイブリッドデータ。左図は FD のカメラ上でのイメージで空気シャワーにそったフィット曲線を添える。右図は対応する SD データのマップ。

来計画について深く突っ込んだ議論がなされた。その後、Auger で開発した標準光源を TA サイトの FD で撮像すること、Auger のデータに合う ad hoc 組成モデルで生成した宇宙線空気シャワーを TA の解析プログラムで再構成すること、TA と Auger の 10^{19} eV 以上の事象をあわせた到来方向の全天解析、以上の三つの共同研究を行い、2013 年の宇宙線国際会議で共同発表を行った。

5.2.2 TARA (TA RAdar)

最高エネルギー領域の宇宙線の統計を上げて宇宙線源を詳細に研究するためには、格段に大きな観測装置が必要となってくるであろう。従来と同じ測定器で 100 倍サイズの観測装置を建設するのは予算的にむずかしい可能性がある。そこで 100% に近い稼働率で安価な新しい測定器技術を開発することが重要となってくる。FD には数カ所の地点で遠くから空気シャワーを観測するという利点があるが、稼働効率が 10% 程度しかない。最近宇宙線の空気シャワーから発生する電波の観測あるいは電波を送信して空気シャワーで反射すると期待される電波の観測の R&D が行われている。これまで流星に関しては電波エコー観測が実用化されている。TARA では、40 kW で 54.1 MHz の電波送信機を TA サイトの東側に設置し、かつ約 40 km 離れた西側の LR FD サイトに電波受信機を設置して、空気シャワーからの電波エコーを観測しようとしている。この R&D で、TA の FD あるいは SD で観測した空気シャワー事象と同期した TARA の電波エコー信号を探索している。

5.2.3 TA Lightning Mapping Array (TA LMA)

5 年間の TA SD データのシャワートリガー頻度をみたところ、1 ms 以内に 2 トリガーを超える場合 (バーストとよぶ) が 10 例あった。これが偶然起こる確率は 0.01% である。このうち 5 例を再構成することができ、同じバースト内の再構成された複数事象のコア位置は半径約 1 km 以内と近いものであった。また粒子の到来

時間解析から、通常の宇宙線の空気シャワーより低い高度で発生しているようにみえた。さらにほとんどが時間的および二次元的な雷の情報と一致していることが分かった [22]。そこで 2013 年 9 月に、Lightning Mapping Array という、60 MHz RF 放射を検出する受信機アレイを TA サイトに移設し、現在雷放電を三次元的かつ時間的に詳細に観測している。

5.3 将来計画

ここでは、TA の 4 倍拡張計画 (TA×4) [23] と前述した TALE よりさらに低エネルギーへの拡張計画 (NICHE) の提案について述べる。

5.3.1 TA の 4 倍拡張計画 (TA×4)

4.3 節で述べたように、最近の TA の結果では有意性が 3σ 程度の異方性の兆候がある。そこで現在の TA 地表検出器を 4 倍サイズに拡張し (TA×4)、有意性が確実な 5σ での異方性の観測を目指す計画を日本側で提案中である。活動銀河核など宇宙の極限状態の天体現象と宇宙線の到来方向の相関探索、エネルギースペクトルの詳細測定、質量組成の同定、超高エネルギー光子・ニュートリノ探索を行い、最高エネルギー宇宙線の発生・加速・伝播機構を探求し、近傍極限宇宙現象を解明する。500 台の地表検出器を新規製作し、57 EeV 付近以上の最高エネルギー領域の宇宙線に注目して、現在の TA より広い 2.1 km 間隔で設置して TA のサイズの 3 倍の拡張を行い、現 TA と合わせて合計で 4 倍サイズの宇宙線望遠鏡 (~3000 km²) を建設する (図 10)。本年度までに TA で得られるデータと合わせて、次の 5 年間で、TA を稼働しつつ、追加 SD の 2 年間の建設と 3 年間の観測で、現在の TA の 20 年分の SD データ (2013 年の宇宙線国際会議で発表した 5 年分のデータの 4 倍) を取得する。拡張 SD のエネルギースケールの確認とハイブリッド観測拡張のために、拡張 SD アレイを部分的にカバーする FD を HiRes 望遠鏡の再利用によって米国側の予算要求で実現する予定である。

5.3.2 Non-Imaging Cherenkov project (NICHE)

NICHE は、TALE SD アレイ内に、PMT を上に向けただけの簡単なチェレンコフカウンターアレイ (400 m 間隔の TALE SD の 21 台のところを含んで 200 m 間隔で 67 台) を設置する計画で、提案中である。宇宙線ごとにタイミングによるジオメトリの再構成、パルス高によるエネルギーの再構成、信号幅による X_{\max} の再構成を行い、 $10^{15.8}$ eV 程度⁸ から 10^{17} eV のエネルギー領域の宇宙線を観測する。

⁸ $10^{15.5}$ eV 付近にスペクトルの折れ曲がりが見られ、knee(ひざ)とよばれる。knee 以下のエネルギーの宇宙線は銀河系内の超新星残骸の衝撃波によって加速され、エネルギーが高くなるにつれ加速効率

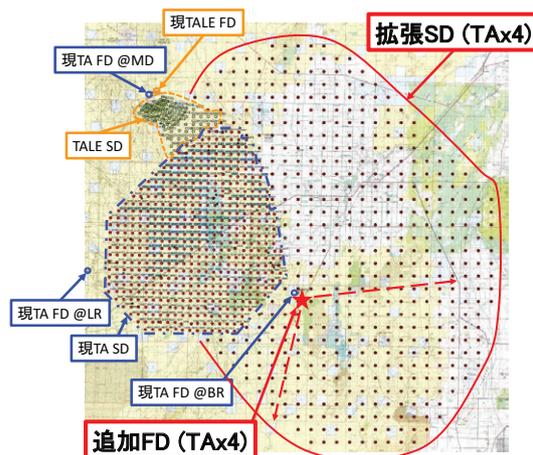


図 10 TA×4 の配置図。現 TA SD アレイ (一点破線) 東側の領域が、2.1km 間隔で設置される 500 台の拡張 SD アレイ (実線)。米国担当の追加 FD が * (星印) で、破線方向 (東南方向) がその視野である。図中左上の破線内が TALE 領域である。

6 まとめ

テレスコープアレイ実験は、最高エネルギー宇宙線の起源を探るべく、2008 年に本格稼働した。本稿では 5 年間の結果について述べた [24]。超高エネルギー宇宙線のスペクトルにおいて、 5.7×10^{19} eV 以上で、 5.7σ の有意度で GZK カットオフと矛盾しない強度の急激な減少を確認した。異方性に関しては、 3σ 程度でその兆候が見られている。結論を得るにはまだ統計が足りないので、TA SD を 4 倍にする計画 (TA×4) を提案中である。

$10^{16.5}$ eV 程度の低エネルギーへの拡張実験 (TALE) も部分的に稼働を開始し、さらに TALE SD の完成をめざしている。もしさらなる低エネルギー拡張計画 (NICHE) が認められれば、TALE, TA, TA×4 を合わせて、knee に迫る $10^{15.8}$ eV から最高エネルギー (~ $10^{20.5}$ eV) まで、およそ 5 桁にわたるエネルギー領域の宇宙線観測を、電子加速器 ELS によって一括絶対較正されたエネルギースケールで行うことができる。

南米アルゼンチンの Auger とは競合しつつも、エネルギースペクトルおよび質量組成にみられる食い違いの理解や異方性の全天解析などを共同研究で進めつつある。荷電粒子天文学を切り開くさらなる次世代の大型国際共同実験を行う議論も始まっている。

TA では将来に向けた開発実験などで TA 以外のグループも含めた TA サイトでの研究を受け入れている。宇宙線の電波による観測の開発や最近の雷観測などはその例である。

今 TA での物理が非常におもしろくなってきた。今後の展開に注目していただきたい。

の悪い軽い組成がなくなるのでスペクトルに折れ曲がりが見られるという説がある。

参考文献

- [1] 福島正己, 日本物理学会誌 **60** No.1 20 (2005).
- [2] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16** 748 (1966),
T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, JETP Lett. **4** 178
(1966).
- [3] M. Takeda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** 1163
(1998).
- [4] R. Abbasi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100** 101101
(2008).
- [5] J. Abraham *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **523** 50
(2004).
- [6] T. Abu-Zayyad *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A
689 87 (2012).
- [7] T. Abu-Zayyad *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A
676 54 (2012).
- [8] T. Abu-Zayyad *et al.*, Astrophys. J. Lett. **768** L1
(2013); D.R. Bergman, Intl. Cosmic Ray Conf.
221 (2013).
- [9] T. Abu-Zayyad *et al.*, Astropart. Phys. **39-40**
109 (2012).
- [10] J. Abraham *et al.*, Physics Lett. B **685** 239
(2010).
- [11] <http://www.cbpf.br/icrc2013/>
- [12] T. Shibata *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **597** 61
(2008); T. Shibata *et al.*, 33rd Intl. Cosmic Ray
Conf. 507 (2013).
- [13] Y. Tameda *et al.*, 33rd Intl. Cosmic Ray Conf.
512 (2013).
- [14] R. Abbasi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104** 161101
(2010).
- [15] J. Abraham *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104** 091101
(2010).
- [16] <http://www-ik.fzk.de/corsika/>
- [17] J. Abraham *et al.*, Science **318** 938 (2007).
- [18] T. Abu-Zayyad *et al.*, Astrophys. J. **757** 26
(2012); P. Tinyakov, 33rd Intl. Cosmic Ray Conf.
1033 (2013).
- [19] P. Abreu *et al.*, Astropart. Phys. **34** 314 (2010).
- [20] 荻尾彰一, 野中敏幸, ICRR ニュース No.85 4
(2013).
- [21] [http://www.epj-conferences.org/
index.php?option=com_toc&url/articles/
epjconf/abs/2013/14/contents/contents.html](http://www.epj-conferences.org/index.php?option=com_toc&url/articles/epjconf/abs/2013/14/contents/contents.html)
- [22] T. Okuda *et al.*, the 10th International Sym-
posium on Cosmology and Particle Astrophysics
(CosPA 2013).
- [23] H. Sagawa, 33rd Intl. Cosmic Ray Conf. 121
(2013).
- [24] 常定芳基, 荻尾彰一, 佐川宏行, 日本物理学会誌 **68**
No.10 670 (2013).