

テレスコープアレイ実験による 最高エネルギー宇宙線の探索

有働 慈治*

Search for the Ultra High Energy Cosmic Rays with the Telescope Array Experiment

Shigeharu, UDO*

1 宇宙線

宇宙線とは地球の外から到来する放射線の総称で、陽子やヘリウム (α 線) などの原子核が主な成分だが、広義には γ 線やニュートリノを含めることもある。宇宙線なるものの存在が初めて確認されたのは二十世紀初頭のことで、オーストリアの物理学者ヘスが箔検電器によってその存在を明らかにした。それから 100 年あまり経った今でも、我々の修士論文の多くは“1912 年ヘスが、”と書き出されている。ヘスは後に、宇宙線の発見によってノーベル物理学賞を受賞している。その後の様々な観測により、宇宙線が地磁気によって跳ね返される 10^9 eV から 10^{20} eV に及ぶ広いエネルギー領域にわたって地球に飛来していることが分かかって来た。人類が加速器によって原子核に与えられる最大のエネルギーは現在でも $\sim 10^{13}$ eV であり、宇宙線観測は素粒子理論の検証実験という側面も持っている。

宇宙線実験において実際に観測される“宇宙線”は、必ずしも宇宙空間から飛来する原子核そのものではなく、大きく一次宇宙線と二次宇宙線とに分けられる。一次宇宙線は宇宙からやってくる宇宙線そのものであり、人工衛星、気球などによって、地球に到達する直前に観測されている。これらの一次宇宙線が地球大気に突入すると、大気中の原子・分子と核相互作用、または電磁相互作用を起こして様々な二次粒子を作る。これが二次宇宙線で、無数に増殖した二次宇宙線粒子がシャワーのように地表に降り注ぐ現象を空気シャワーと呼ぶ。空気シャワー現象は地表に設置した荷電粒子検出器群 (アレイと呼ばれる) やチェレンコフ望遠鏡などで観測される。二次宇宙線からは一次宇宙線の情報の多くが失われてしまうが、衛星などによる一次宇宙線の直接観測に比べて大面積化や長時間の観測が

容易なこと、また前述のように素粒子物理学としての関心もあり、相補的に観測が進められている。

そもそも宇宙線のような高エネルギー粒子が「どこで」「どのように」加速され、どんな経路を辿って地球へとやってきたのかは、宇宙線発見当初から現在に至るまで謎のままである。近年では、国際宇宙ステーションの利用など、一次宇宙線観測の大面積化・高性能化によって $\sim 10^{12}$ eV の領域で詳細なエネルギースペクトルが測定できるようになってきたこと、また、X 線天文学の延長としての γ 線天文学によって宇宙線加速源の探索・観測が数多く行われるようになったことから、銀河系内に起源を持つ宇宙線の加速機構については詳細な議論がなされている。

あるエネルギーを持った宇宙線の起源が銀河系内であるか系外であるかの判断は、銀河系内の磁場の強さによる。銀河磁場はおおよそ $3 \mu\text{G}$ 程度と推測されており、 10^{18} eV 程度のエネルギーを持った宇宙線のラーモア半径は数百 pc となる。これは銀河円盤の厚みとほぼ同程度なので、これよりも低いエネルギーの宇宙線は磁場によって銀河円盤内に捕らえられることになる。地球で観測される宇宙線は、このようにして銀河系内を旅してきたものであり、そのため一様等方に飛来するように観測される。逆に、 10^{18} eV よりも高いエネルギーの宇宙線が銀河系内で生み出された場合、その宇宙線は加速源からまっすぐにやってくるはずである。しかしながら、現在までの観測ではそのような異方性 (非等方性) は確認されておらず、 10^{18} eV を超える宇宙線の起源は銀河系外であると考えられている。

宇宙線のエネルギースペクトルは $10^9 \sim 10^{20}$ eV にわたっておおよそ E^{-3} の冪で滑らかに繋がっている。スペクトルが冪関数で表せるということは、宇宙線が非熱的な加速によって作られていることを示している。

*特別助手 物理学教室
Research associate, Institute of Physics

もし宇宙線の起源が 10^{18} eV を境に銀河系内から系外に変わっているならば、加速機構が異なることも予想され、その場合は当然スペクトルの冪も変化するはずである。図1に示すように、 10^{15} eV 付近に Knee(膝)、 $10^{18}\sim 10^{19}$ eV 付近には Ankle(踵)と呼ばれる微かな折れ曲がりが見られるが、明確に冪が変わる程ではない。このように滑らかに繋がったスペクトルも、宇宙線をめぐる大きな謎の一つである。

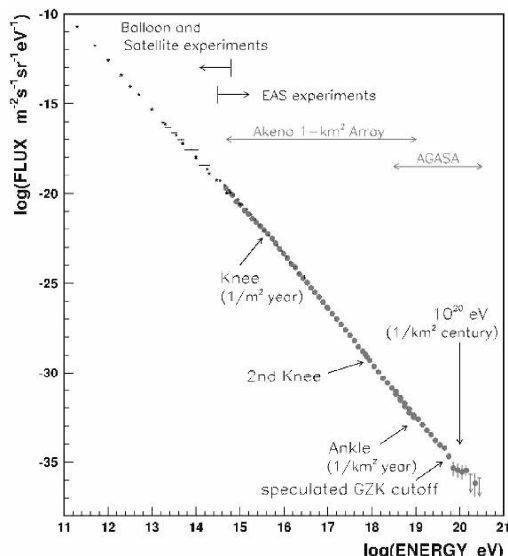


図 1: 地磁気カットオフ以降の宇宙線エネルギースペクトル。

2 最高エネルギー宇宙線と GZK カットオフ

広範なエネルギーにわたって観測される宇宙線であるが、その到来頻度はエネルギーの 3 乗に比例して減少しており、図 1 中に示されているように、 10^{20} eV では 1 km^2 あたり 100 年に 1 イベントという低頻度になってしまう。従って観測例も少なく、低エネルギー領域に比べて統計誤差も大きくなっている。観測の難しい領域ではあるが、現在までに観測された中で最も高いエネルギーとされるものが 10^{20} eV のオーダーであることから、この領域を最高エネルギー領域と呼び、 100 km^2 を越える大型の空気シャワーアレイによる観測が進められている。

1966 年、宇宙線エネルギースペクトルの上限に関する論文が発表された[1] [2]。 10^{20} eV 領域の宇宙線を考えると、 2.7K の宇宙背景輻射光子は相対論的には(宇宙線の静止座標系では) $\sim 10^8$ eV の高エネルギーγ線と等価となる。宇宙線粒子が陽子であるとして、

背景輻射光子との π 中間子光生成の平均自由行程は、光子密度 550 cm^{-3} の仮定の下におよそ 3 Mpc と予想された。これは銀河間の距離スケール($\sim 10 \text{ Mpc}$)より少し小さい程度であり、銀河系外を起源と考えた場合、最高エネルギー宇宙線が我々の銀河に到達するまでに衝突を起こす可能性は非常に高い。1 回の反応で陽子は $1/10$ 程度のエネルギーを失うとされ、また反応の断面積は 3×10^{19} eV 以下では十分に小さい。つまり、 10^{20} eV 以上の宇宙線は 10^{19} eV 程度にエネルギーを失った後に地球へ到達する。これを、提唱した 3 人(Greisen, Zatsepin, Kuz'min) の名をとって GZK カットオフと呼ぶ。

3 AGASA, HiRes からハイブリッド観測へ

1998 年、日本の大型空気シャワーアレイ実験 AGASA(Akeno Giant Air Shower Array) は、 10^{20} eV を超える最高エネルギー宇宙線が $1 \text{ event}/100 \text{ km}^2/\text{year}$ の頻度で観測され、GZK カットオフの予想に反してエネルギースペクトルが延びているとする論文を発表した[3]。また、2000 年には $10^{19.6}$ eV 以上の宇宙線の中で、 2.5° 以内の同一方向から 2 イベントないしは 3 イベントが到来していると考えられる 6 組を報告している[4]。銀河磁場による曲がりがないという最高エネルギー宇宙線の性質から、複数の事例の到来方向に加速源があると考えるのは自然であるが、10 年近く経った現在でも AGASA の示す方向に電磁波(電波〜γ線)で同定できる天体は見つかっていない。

AGASA から数年遅れて 2004 年、アメリカ・ユタ州で大気蛍光法によって最高エネルギー宇宙線を観測していた HiRes(High Resolution Fly's Eye)実験は、AGASA とは逆に GZK カットオフを再現するエネルギースペクトルを発表した[5]。図 2 に示されるように、GZK カットオフが予想される 5×10^{19} eV 以上で AGASA とは異なる振る舞いを見せている。両者の到来頻度の絶対値のずれは $\sim 25\%$ で、二つの実験があげているエネルギーの系統誤差($\sim 20\%$) にほぼ等しい。仮にどちらかのエネルギースケールを 25% ずらすと、 10^{20} eV 以上での差異は残るが、到来頻度の絶対値はおおよそ一致する。このことから、両者の観測方法、特にエネルギー決定に系統的なずれがある可能性が高いが、どちらがより正しい結果を示しているのかを判断することは難しい。

HiRes 実験で用いられている大気蛍光法は、前身である Fly's Eye 実験によって確立された。大気蛍光法

では、大気中で発生した宇宙線空気シャワー中の電子が窒素分子を励起することで発せられる微かな蛍光によって宇宙線を検出する。この大気蛍光は二次粒子から等方に発せられるため、広視野・高感度の望遠鏡を用い、空気シャワーを真横から観測する方法がとられる。AGASAのように、二次粒子そのものを地表に設置した装置で検出する地表検出器アレイと比べて、

- 1ヶ所に設置した装置で、広範囲を観測できる
- 空気シャワーの縦方向発達が観測できる

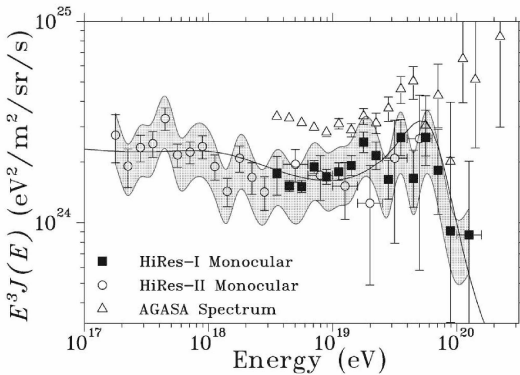


図2: HiRes 実験によって発表された $10^{17} \sim 10^{21}$ eV の宇宙線エネルギースペクトル。暮の変化が分かりやすくなるよう、縦軸にはエネルギーの3乗がかけられている。紗のかかった領域は系統誤差を表す。

- 一次宇宙線エネルギーの見積りにシミュレーション依存が少ない

などの利点がある。反面、

- 月のない晴れた夜しか観測できない
- 蛍光の発光効率に不定性がある
- 蛍光減衰量は大気透明度に左右されやすい

といった点では地表検出器アレイに劣る。

AGASA と HiRes の不一致は単に二つの実験の齟齬というだけではなく、GZK カットオフの有無によって素粒子論・宇宙論にまで大きな影響を及ぼす話題となった。仮に AGASA の観測結果が正しいとして、宇宙背景輻射の存在、銀河系近傍に加速源が見つからないことを説明するために次のような可能性が考えられている。

- ビッグバンの生き残りの超重粒子の崩壊[6]
- 超高エネルギーニュートリノから生成されたウィークボゾン(Z^0)の崩壊[7]
- 超高エネルギー領域での特殊相対論(ローレンツ変換)の破れ[8]

いずれも俄かには受け容れがたいものであるが、これらの説が2, 3年のうちに続々と提案されたことが、AGASA の観測結果が驚きをもって迎えられたことを物語っている。

これらの素粒子論・宇宙論的な興味も尽きないが、まずは実験的な不一致を解消し、GZK カットオフの在否に決着をつけなければならない。そのために計画されたより大規模な実験が、南半球で行われている Pierre Auger 実験と、北半球で行われている TA (Telescope Array) 実験である。どちらも大規模地表検出器アレイと大気蛍光望遠鏡の両方を備えており、一つの空気シャワーを二つの装置で同時に観測することによって AGASA と HiRes の差異を明らかにしようとしている。その規模は、Auger が 3000km^2 、TA で 700km^2 とされており、どちらも AGASA の有効面積 (100km^2 ; 最高エネルギー宇宙線を年間に1例検出できる大きさ)を上回っている。Auger 実験は2008年の完成を前に、一部の検出器を用いた観測で既に AGASA の3倍のデータを取得し、解析結果を発表している。エネルギースペクトルについては HiRes 同様 $10^{19.5}\text{eV}$ から先で到来頻度が減少するようなスペクトルを公表している[9]が、到来頻度の絶対値は HiRes よりも20%程度低い。また、 $6 \times 10^{19}\text{eV}$ 以上の宇宙線到来方向について、AGN (Active Galactic Nuclei: 活動銀河核)と相関が見られると報告したが[10]、統計量が増えるにつれて相関は弱くなっているようだ。

4 テレスコープアレイ実験

テレスコープアレイ (Telescope Array: TA) 実験は、AGASA, HiRes の結果を受けて日本とアメリカの研究者の協力の下に2004年に建設が開始された。先行する Auger 実験との大きな違いは、地表検出器アレイに AGASA と同じプラスチックシンチレーターを用いていること、HiRes 実験と同じ大気状態を期待できるアメリカ・ユタ州を実験地に選んだことである。更に、HiRes 実験で実際に使用されていた大気蛍光望遠鏡をそのまま移設し、新たに製作した望遠鏡と同時に観測しているため、TA 実験と HiRes 実験の比較が可能となっている。

大気蛍光望遠鏡は HiRes 実験からの移設も含め、2007 年末に全数が完成し観測を開始した。地表検出器アレイも、2008 年春にほぼ全数の設置が完了し大気蛍光望遠鏡とのハイブリッド観測を続けている。

4.1 地表検出器アレイ

4.1.1 検出器

TA 実験の地表検出器アレイは、507 台の検出器をおよそ 700km²の領域に 1.2 km の格子状に配置したものである(図 3)。各検出器は 3m²のプラスチックシンチレーター二層からなり、シンチレーター上に 2cm 間隔で波長変換ファイバーを這わせることによって効率的に光を光電子増倍管(PMT)に集めている。データ

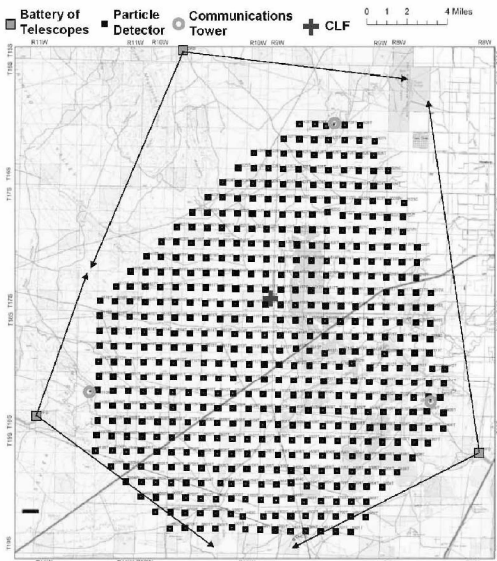


図 3: TA 実験サイト俯瞰図。小さな黒四角は地表検出器、その周囲には 3ヶ所(北、南東、南西)の大気蛍光望遠鏡ステーションがある。望遠鏡ステーションの少し内側、地表検出器アレイの縁の丸印はコミュニケーションタワーを示す。

収集には無線 LAN を使い、PMT やエレクトロニクスに必要な電力は全て太陽電池によって賄われ、日中の余剰電力はバッテリーに蓄えられ、夜間の動作電力になる。

各検出器は個別のトリガーによって 0.3MIP (Minimum Ionization Particle: 物質中での電離損失が最小の状態にある粒子、またはその電離損失量) 以上の信号を検知すると、PMT の波形を FADC によって記録する。個別トリガーの頻度は 750Hz にのぼり、後述するシャワートリガーのために一時保存される他、検出器のキャリブレーションデータとしても使われる。個別トリガーの中で 3MIP 以上の信号を検知した検出器は、無線 LAN を通じてコミュニケーションタワ

ーと呼ばれるホスト・エレクトロニクスにそのトリガーのタイムスタンプを送る。コミュニケーションタワーはアレイ全体で 3ヶ所に設置されており、それぞれが 100~200 台の検出器からトリガーのリストを受け取り、“隣接する 3 台” が 8 μ s 以内に信号を検知した場合に空気シャワーと判断する。3MIP トリガーは 20 Hz, 空気シャワートリガーは 0.01Hz 程度で、トリガー効率は 10^{18.7} eV 以上で 100% である[11]。図 4 はユタ州の砂漠に設置された地表検出器である。左側手前から右奥に向かって数台の検出器が整然と並んでいる様子がわかる。



図 4: 南から北へと並ぶ地表検出器。黒く格子模様が入ったように見えるのはソーラーパネルで、シンチレーターは暗箱に入れられてテーブルの天板の位置に置かれている。検出器右側のポールに取り付けられた無線 LAN アンテナはコミュニケーションタワーの方向を向いている。

地表検出器にはプラスチックシンチレーターの他に Auger 実験にも採用されている水チェレンコフ検出器が良く使われる。空気シャワー粒子を平面で検出するプラスチックシンチレーターに比べ、背の高いタンクを使う水チェレンコフ検出器は、天頂角の大きな空気シャワーに対しても高い感度を維持できるという利点がある。しかし、体積の大きさ故に、空気シャワー中の電磁成分(電子や γ 線など)による信号に比べて、高エネルギー μ 粒子からの信号を強く検知してしまう。空気シャワー中で μ 粒子に分配されるエネルギー量は核相互作用や一次宇宙線の核種に依存するため、電磁成分に強い感度を持つプラスチックシンチレーターに比べてエネルギー決定が困難である。そのため、Auger 実験では大気蛍光望遠鏡によってのみ一次宇宙

線のエネルギーを決定しており、AGASA と HiRes のエネルギースケールの違いについて、本質的な理解を得られないと思われる。また、一次宇宙線が γ 線であった場合には μ 粒子はほとんど発生しないため、エネルギーの見積もりには電磁成分に感度の高いシンチレーターが有利である。

4.1.2 モンテカルロ・シミュレーション

水チェレンコフ検出器であれプラスチックシンチレーターであれ、地表検出器アレイによるエネルギー決定にはシミュレーションが不可欠である。空気シャワー中の二次粒子の約 90%は電磁成分と考えられており、これらの粒子は臨界エネルギー(それ以上他の粒子と反応せず、増殖に寄与しなくなるエネルギー)になるまで制動輻射と電子対生成によってエネルギーを失い、増殖していく。その過程は計算によってよく再現できることが知られている。しかし、空気シャワー中には電磁成分に比べて寿命が長く、高いエネルギーを保持したまま地表に到達する μ 粒子や、稀には核子も存在する。これらの粒子がどのくらい生成されるかは確率的に決まるため、モンテカルロ・シミュレーションによってたくさんの仮想空気シャワーを生成し、観測量から統計的にエネルギーを推定する。

最高エネルギー宇宙線による空気シャワーのシミュレーションには、大容量の HDD と高速な CPU が必要となる。空気シャワー中の二次粒子数は、 10^{20} eV の場合でおおよそ 10^{11} コであり、それら膨大な数の粒子一つ一つについてエネルギーなどの物理量を全て記録することは難しい。従来はモンテカルロ・シミュレーションに近似計算を混ぜ、例えば検出される粒子数だけを記録するなどの方法で簡易シミュレーションが行われていた。

TA 実験では、空気シャワーシミュレーションコード COSMOS [12] を用い、近年の高速な CPU を並列化することによって 10^{19} eV の空気シャワーシミュレーションを 10 日程度で生成することを可能とした。この方法によって、エネルギー、到来天頂角、一次宇宙線核種別に 100 例以上のシミュレーションを行い、空気シャワーの発達段階毎に二次粒子の物理量(粒子種別、エネルギー、距離、到来方向、到来遅延時間など)のデータベースを作成した。それとは別に、大量生成が可能な簡易シミュレーションから各粒子ではなくシャワー全体の情報(全粒子数など)のデータベースを用意し、この二つのデータベースから適宜、詳細な物理量を呼び出すことで“疑似”フルモンテカルロ・シミュレーションとし

て利用できる[13]。

モンテカルロ・シミュレーションによるエネルギー推定において、最も不定性が高い部分は核相互作用モデルである。現在、代表的なモデルがいくつか存在するが、いずれも加速器実験(10^{14} eV 程度)からの外挿であり、モデル毎の違いは高エネルギーになるにつれて大きくなる。これらのモデルを比較するために、異なる核相互作用モデルによる複数のデータベースを構築中である。

4.2 大気蛍光望遠鏡

4.2.1 検出器

大気蛍光法は大気をシンチレーターとした巨大な全吸収型カロリメータと考えることができる。空気シャワーの縦発達を観測でき、全発光量からエネルギーを見積もるために地表検出器アレイと比べてエネルギー決定精度が高いとされる。しかし、大気蛍光は非常に弱い光であるため、どれだけ集光力があるかが光学系の重要な性能のひとつである。TA 実験で新たに開発した大気蛍光望遠鏡は 40 km 遠方の 10^{18} eV の空気シャワーを検出できるよう設計された。

大気蛍光望遠鏡は広範囲を観測するために 12~14 台が 1 ヶ所に設置され、風雨をしのぐためのステーションと呼ばれる建物に収容されている。TA 実験では、地表検出器アレイの北西、南東、南西の 3 ヶ所にステーションが設置されている。それぞれは約 30km 離れており、 100° 以上の広い方位角を観測することで、地表検出器アレイで検出される空気シャワーを必ず 1 ヶ所以上のステーションで検出することができる。

北西の MD (Middle Drum) と呼ばれるステーションには、HiRes 実験で使用されていた望遠鏡がそのまま移設されている。MD ステーションに設置された 14 台の望遠鏡は 4 分割された直径 2 m の鏡と 256 本の PMT からなり、方位角 16° 、仰角 14° の視野をもっている。後述する他の 2 ヶ所のステーションと同程度の視野になるよう、7 列 2 段に配置されて $112^\circ \times 28^\circ$ を観測している[14]。南側の 2 つのステーションは BR (Black Rock) と LR (Long Ridge) と呼ばれ、日本で開発されたより大型の望遠鏡が 12 台ずつ設置されている。各望遠鏡の視野は方位角 18° 、仰角 15° で、これを 6 列 2 段に配置し、 $108^\circ \times 30^\circ$ の視野を観測している。反射鏡は 18 枚の分割鏡によって構成される直径 3m の球面鏡で、焦点面には六角形の光電面をもつ PMT 256 本を蜂の巣状に並べたカメラを設置してい

る。図 5 に BR ステーションの外観を示す。3つの開口部からそれぞれ 4 台の望遠鏡が夜空を観測している。ステーションは高さおよそ 10 m、開口部は 8 m 四方である。

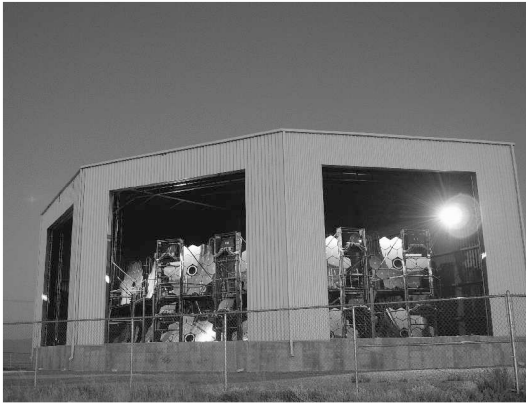


図 5: 観測前の BR ステーション。反射鏡と梯子状の架台に載せられたカメラが開口部から見えている。

各 PMT からの信号は FADC でデジタル化され、バックグラウンド光量の移動平均・標準偏差と比較することで光の入射を検知する。光を検知した PMT の情報は 1 カメラ毎にまとめられ、隣接する 5 本以上の PMT が空気シャワーらしき軌跡を構成しているかどうかの判定が行われる。もし軌跡が検出されれば、ステーション全体にトリガーが送られ、隣接するカメラでもデータが保存される。空気シャワーの軌跡が 2 つ (以上) のカメラにまたがっている場合には、カメラ周辺部で隣接する 4 本以上の PMT が判定基準となる。ステーション全体にトリガーを送るエレクトロニクスには GPS が組み込まれており、内部クロックと連携して全カメラを $2.5 \mu\text{s}$ 以内に同期させている。この GPS による同期は 3 ステーション全てで行われており、複数のステーションによる同時観測(ステレオ観測)を可能にしている。また、同じ精度の GPS が地表検出器にも搭載されており、ハイブリッド観測に役立てられている。

4.2.2 キャリブレーション

大気蛍光法は光学的な観測であるため、PMT で検出する光量がエネルギー決定精度に直接影響する。そのため、TA 実験では PMT ゲインの絶対較正と相対較正 [15]、大気による減衰量の見積り [16] および電子ビームを用いた蛍光発光量測定 [17] を行っている。

● PMT ゲイン較正

BR, LR ステーションの全 6144 本の PMT は二段階のゲイン較正によって感度を調整されている。

まず、絶対光量測定システム CRAYS (Calibration using RAYleigh Scattering) [18] によって、印加電圧とゲインの関係が測定された。CRAYS は波長 337.1nm の窒素レーザーを窒素ガスを充填した暗箱に通して、暗箱中のレイリー散乱光を PMT で検出するもので、レーザー強度とパッフルによる PMT 視野の調整によって入射光量を制御することができる。入射光量は 8% の精度で制御され、測定した 75 本の PMT の光電子 1 コあたりの FADC カウント値は、印加電圧の調整によって RMS 1% で揃えられた。

これら 75 本の PMT は、基準 PMT として 1 カメラに 3 本ずつが取り付けられている。基準 PMT 以外の PMT のゲインは、反射鏡中央に設置された一様光源 Xe フラッシュによって基準 PMT と同じゲインになるよう調整される。全 PMT のゲインは、Xe フラッシュの光源の一様性、幾何学的な補正も含めて 2% の精度で調整されている。

この他、基準 PMT の劣化などを発見するために、PMT 中央部に YAP (YAlO₃:Ce+241Am) と呼ばれる密封放射線源による定常光源が取り付けられ、観測中も常時モニターされている。また、Xe フラッシュでは PMT 光電面の積分値によってゲインが調整されているが、光電面の感度は必ずしも一様ではない。そこで光源に UV LED を用いた X-Y ステージを作成し、光電面の相対的な感度を 4mm 間隔で測定した。これらのキャリブレーションによって、全 PMT の出力が 3% 以内で安定していることが確認されている。

● 大気モニター

大気蛍光は大気シャワーから望遠鏡に届くまでに散乱され、光量を失う。光量の減衰は空気分子によるレイリー散乱と、塵や埃、エアロゾルによるミー散乱にわけて考えられる。このうち、レイリー散乱による減衰は、大気の大気温度分布などを考慮することで 5% 程度の精度で計算できる。温度分布は観測サイト近傍で打ち上げられているラジオゾンデのデータを利用し、極端な天候の日を除いた毎月の平均値からレイリー散乱の寄与を計算している。

大気透明度は大気蛍光の波長に近い紫外線レーザーを用いた LIDAR(Light Detection And Ranging)によって測定する。LIDAR は BR ステーションに設置されており、大気中に射出したレーザーの後方散乱光を小型の望遠鏡と PMT で受光し、距離毎の減衰の変化から微分的に大気透明度を導く。透明度の指標は消散係数 α と呼ばれ、指数関数で表される減衰量 $\exp(-\alpha R)$ の形で現れる。レイリー散乱による消散係数は地表付近ではおおよそ 0.06km^{-1} で、10km 遠方からの光は $\exp(-0.06 \times 10) \approx 54.9\%$ に減衰する。仮にミー散乱成分が 0.01km^{-1} だけ上乘せされたとすると減衰量は 49.7% となり、 5.2% の差が生じる。実際の α の値は高度によって変化するため、できるだけ精度良く高度の関数として求める必要がある。2007 年秋からの定常的な観測によって消散係数の分布が求められ、その最頻値は 0.09km^{-1} であった。

LIDAR と同様に紫外線レーザーを使用した CLF(Central Laser Facility) が実験サイト中央に設置されている。CLF は 3 つの大気蛍光望遠鏡ステーションからほぼ等距離となるような地点に設置され、垂直に射出したレーザーの側方散乱をすべてのステーションで観測する。ある高度(LIDAR での観測によれば $\sim 5\text{km}$) 以上ではレイリー散乱が支配的であるという仮定の下で、計算で求めたレイリー散乱量と実際に観測された光量との差がミー散乱による減衰を表すことになる。ここでの透明度の指標は VAOD(Vertical Aerosol Optical Depth) と呼ばれ、減衰量は $\exp(-\text{VAOD})$ で表される。ミー散乱の消散係数 α_{mie} との関係は $\text{VAOD}(R) = \int_0^R \alpha_{\text{mie}}(r) dr$ であり、一次元大気(大気状態が高さのみに依存する)と考えた場合には LIDAR によって求められた消散係数と比較することが可能である。CLF と同様の観測は HiRes 実験でも行われており、その際に求められた VAOD は高度 $2.5 \sim 3.5\text{km}$ で $0.034 \sim 0.036$ であった。TA 実験サイトでは 10% 程度の違いがあると予想される。現在、LIDAR は大気蛍光観測の開始前と終了直前に水平と垂直の消散係数を測定している。CLF は大気蛍光観測中、30 分毎にレーザーを射出し大気蛍光望遠鏡で観測している。

- 電子線形加速器
ELS (Electron Light Source) と呼ばれる小型

電子加速器を用いて、エネルギーの分かっている電子ビームを大気中に射出し、そこから発生する空気シャワーによる大気蛍光を大気蛍光望遠鏡で直接測定する。これによって、電子のエネルギーと蛍光光量、PMT 信号までの絶対較正を行う。これまでの大気蛍光観測では、別に測定された蛍光の発光効率を仮定し、更に鏡の反射率・PMT 感度などを積み重ねる必要があったが、ELS によって発光効率・望遠鏡感度などをまとめて較正することが可能となる。ELS は BR ステーションの正面、100 m 離れた場所に設置され、最大で $4 \times 10^7\text{eV}$ の電子ビームを射出できる。1 μs のパルス中には 10^9 コの電子が含まれ、これは $4 \times 10^{16}\text{eV}$ のエネルギー損失に相当し、10km 先の $4 \times 10^{20}\text{eV}$ と等価である。電磁成分のエネルギー損失はシミュレーションで良く再現できるため、実際に観測された光量と比較することで絶対較正ができる。ELS は高エネルギー加速器研究機構の協力によって製作され、現在は実験サイトに設置されて最終調整が行われている。

4.3 観測状況

TA 実験は、2008 年より地表検出器と大気蛍光望遠鏡によるハイブリッド観測を開始した。2007 年末から続けられている大気蛍光望遠鏡の観測時間は稼働率およそ 10% で 2000 時間を越えた。地表検出器の観測は 1 年半にわたって 96% 以上の稼働率を保ち、AGASA 実験の全観測量の $2/3$ に達しようとしている。

図 6 に、3 ヶ所の大気蛍光望遠鏡と地表検出器で観測された空気シャワーの例を示す。空気シャワーの中心は BR ステーションに近い領域で地表に到達しており、BR ステーションではっきりと大気蛍光イメージが捉えられている。MD, LR の両ステーションからはそれよりも 2 倍程遠いが、MD ステーションでは空気シャワーが 3 つのカメラの視野を横切っている様子がわかる。このようなハイブリッドイベントは、2008 年 5 月 \sim 2009 年 5 月の 1 年間で 2000 例以上が観測され、そのうち 200 例が 2 ヶ所以上の大気蛍光望遠鏡で観測されたステレオ・ハイブリッドイベントである [19]。

5 最高エネルギー宇宙線観測の今後

近年、 γ 線天文学の発展によって銀河系近傍に宇宙線加速源が次々と発見され、宇宙線加速のメカニズム

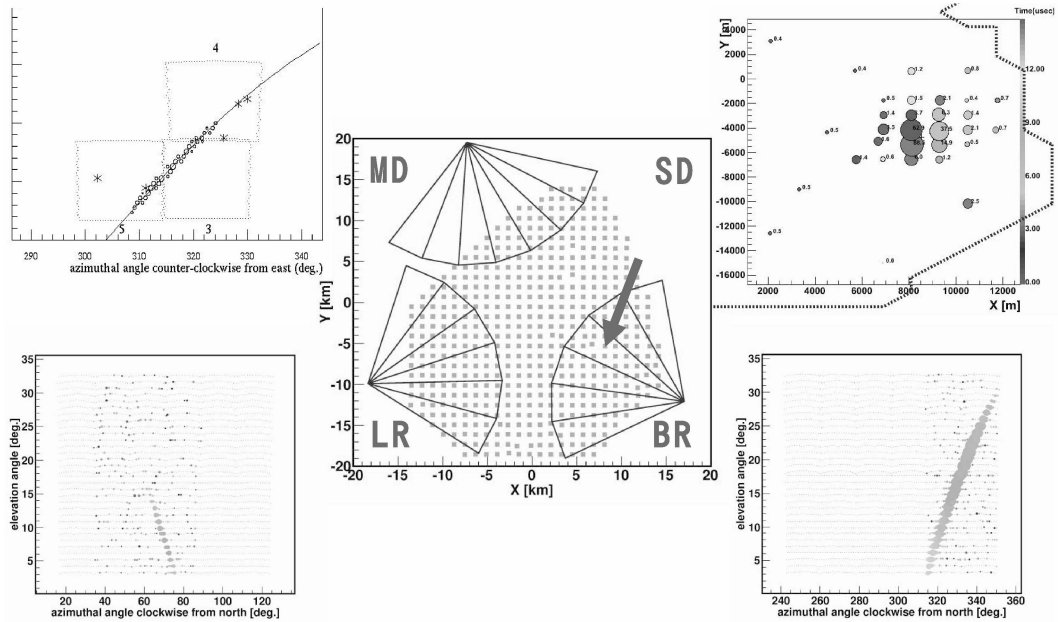


図 6: 2008 年 10 月に観測されたトリプル・ハイブリッドイベント. 中央の図は実験サイトの俯瞰図で, 図中の矢印は空気シャワーの地表到達点と到来方向の方位角を表している. 右上は地表検出器のイベント・ディスプレイで, 円の大きさは各検出器の検出粒子数に比例している. 点線は検出器アレイの縁を表す. 右下と左側の 2 つの図は, それぞれ BR, MD, LR の大気蛍光望遠鏡で捉えられた空気シャワーのイメージである.

についても徐々に解明されつつある. しかし, 観測されている高エネルギー γ 線は $\sim 10^{12}$ eV までの領域で, これらの観測から予想される粒子加速では超高エネルギースペクトルを説明できない. GZK カットオフ問題から始まった最高エネルギー宇宙線観測であるが, 銀河磁場による曲がりが無視できるという特徴から, γ 線天文学の先の超高エネルギー宇宙粒子線天文学としての可能性も含んでいる.

また, Auger 実験が発表しているエネルギースペクトルは $10^{19.5}$ eV での冪の変化を示唆しているが, 10^{20} eV を越える宇宙線の存在は否定していない. つまり, GZK カットオフが正しいとしても, スペクトルはさらに高いエネルギー領域に続いており, そこから宇宙線化学組成などの情報が得られるはずである. 同時に, 十分な統計量によって少し低い Ankle 領域のスペクトルを詳細に調べることも, 宇宙線加速の謎に近づく鍵のひとつかも知れない.

現在稼働中の Auger 実験と TA 実験は, それぞれ南半球と北半球を観測しており, 銀河系外からの宇宙線を観測する上では相補的と言える. Auger 実験では北天を観測する北 Auger 計画が進められている. TA 実験では, Ankle 領域よりも低い 3×10^{16} eV から 10^{18} eV

を狙う TALE (Telescope Array Low Energy extension) を計画している [20]. その他にも, 新たな試みとして, 空気シャワーが発する大気蛍光を宇宙から観測する JEM-EUSO 計画 [21] が進行中である. JEM-EUSO 計画は地上の検出器を凌駕する $200,000\text{km}^2$ の領域を観測でき, 圧倒的な統計量による GZK カットオフ問題以後の宇宙粒子線天文学を目的としている. 今後 5 年の間にはこれらの実験によって GZK カットオフ問題が決着し, 宇宙粒子線天文学によって最高エネルギー領域での物理過程の理解が深まることが期待される.

参考文献

[1] Greisen, K., Physical Review Letters, 16, 748, (1966)
 [2] Zatsepin, G. T. and Kuz'min, V. A., Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 4, 78, (1966)
 [3] Takeda, M. et al., Physical Review Letters, 81, 1163, (1998)
 [4] Uchihori, Y. et al., Astroparticle Physics, 13, 151, (2000)
 [5] Abbasi, R. U. et al., Physical Review Letters,

- 92,151101, (2004)
- [6] Kuzmin, V. and Tkachev, I., *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 68(1998), p.271
- [7] Weiler, T.J., *Astroparticle Physics*, 3, 303, (1999)
- [8] Sato, H. and Tati, T., *Progr. Theor. Phys.*, 47,1788, (1972)
- [9] Yamamoto, T. et al., in *Proc. of the 30th ICRC*,4, 335, (2007)
- [10] Abraham, J. et al., *Science*, 318, 938, (2007)
- [11] Nonaka, T. et al., in *Proc. of the 31st ICRC*,(2009)
- [12] Kasahara, K., <http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/>
- [13] Kido, E. et al., in *Proc. of the 31st ICRC*, (2009)
- [14] Jui, C.C.H. et al., in *Proc. of the 31st ICRC*,(2009)
- [15] Tokuno, H. et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 601, 364, (2009)
- [16] Tomida, T. et al., in *Proc. of the 31st ICRC*,(2009)
- [17] Shibata, T. et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 597, 61, (2008)
- [18] Kawana, S. et al., in *Proc. of the 31st ICRC*,(2009)
- [19] Ikeda, D. et al., in *Proc. of the 31st ICRC*, (2009)
- [20] Matthews, J.N. et al., in *Proc. of the 31st ICRC*,(2009)
- [21] <http://jemeuso.riken.jp/>