

宇宙からの放射線 — 発見から 100 年の歴史、そして彼らが人類に 教えてくれたこと —

藤井 俊博 (大阪市立大学 D2)

2011 年 8 月 1 - 4 日, 第 41 回天文・天体物理若手 夏の学校

概要

1912 年、V.F.Hess によって宇宙から来る放射線 (宇宙線) が発見された。この発見をきっかけとし、宇宙線を測定する実験が世界各地で始まった。まず飛翔体を用いた直接観測から始まり、その後、宇宙線が地球大気と相互作用し生成される大量の 2 次粒子 (空気シャワー現象) を利用した観測も行われ、近年では 10^{20} eV という、最新の加速器で到達可能なエネルギーよりも遥かに高いエネルギーを持った宇宙線が観測されている。本論文では発見から約 100 年にわたる宇宙線観測の歴史と測定結果をレビューし、今後明らかになると期待される物理や宇宙現象、宇宙線観測による次世代の天文学、さらには将来計画について議論する。

1 宇宙線観測の歴史

1912 年、V.F.Hess は気球を使い高度 5 km までの放射線量を測定し、高度が高くなるにつれて放射線量が増加することを発見した。この発見により宇宙から放射線が入射していることが明らかになった。宇宙空間に起源を持つ高エネルギーの放射線は宇宙線と呼ばれ、1936 年、宇宙線の発見により V.F.Hess はノーベル賞を受賞した。

1930 年には地磁気を用いた東西効果から、宇宙線がガンマ線などの中性粒子ではなく荷電粒子であることが発見され、1932 年には霧箱を使った写真の中に電子線が増殖する現象が発見され、シャワーと名付けられた。その後、1937 年には透過性の強い μ 中間子 (ミューオン)、1947 年には原子核乾板 (エマルジョンチェンバー) を使い π 中間子 (パイオン) が発見された。1941 年には気球を使い、宇宙線の成分を測定し大部分が正の電荷を持った陽子であることが発見され、1948 年には陽子以外にも、ヘリウム、ホウ素、炭素や鉄といった多くの種類の宇宙線が発見された。これらの業績から、1949 年には π 中間子の予言により湯川秀樹が、1950 年には原子核乾板の開発と中間子の発見により C.F.Powell がそれぞれノーベル賞を受賞した。

1945 年頃から、ガイガーミュラー計数管、シンチレーション検出器、チェレンコフ検出器を使ったエネルギースペクトルの測定が始まった。そして、測定で得られたスペクトルが $dN/dE \propto E^{-\gamma}$ のべき関数となっていることが明らかになった。その後も宇宙線のエネルギースペクトルの測定は続けられ、1958 年には $\sim 10^{15}$ eV までのエネルギースペクトル、1962 年には 12 km^2 のシンチレーション検出器アレイによって $\sim 10^{20}$ eV の宇宙線が観測された。

10^{20} eV のエネルギーを持つ宇宙線が観測されたことで、このエネルギーの宇宙線は宇宙背景放射と相互作用しパイオンを生成しエネルギーを大きく失うため、比較的近傍からしか到来せず、スペクトルが現象するということが予言された。この 10^{20} eV 付近で到来頻度が急激に減少することを、理論を提唱した K. Greisen, G. Zatsepin, V. Kuzumin らの頭文字を取って、GZK カットオフと名付けられた。さらに 1977 年には、1949 年に E. Fermi によって提唱された宇宙線加速モデルを改良した、衝撃波加速による統計加速モデルが発案され、理論からもべき関数が記述された。

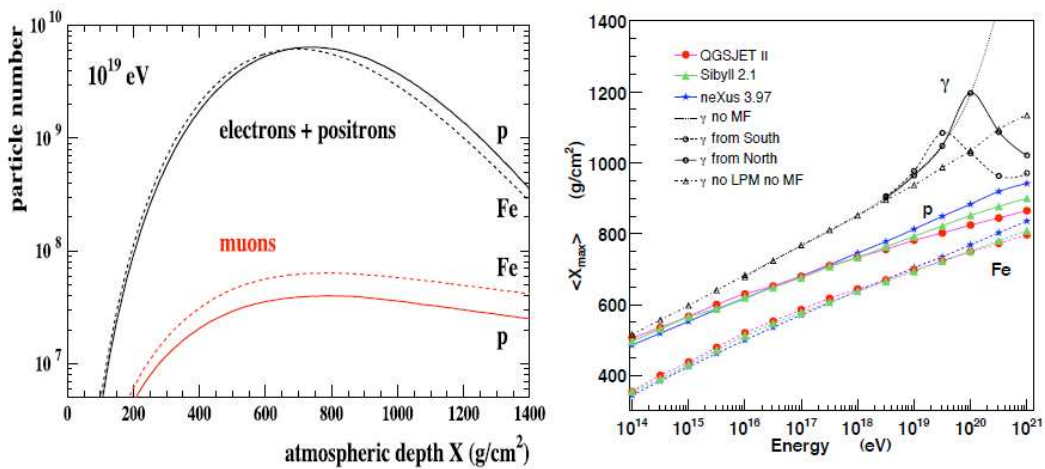


図 1 左図：宇宙線から生成される空気シャワー中の荷電粒子数の増減（縦方向発達）。右図：異なる質量組成での、荷電粒子数が最大値となる大気深さ (X_{max}) の平均値。 X_{max} を使うことで質量組成を測定することができる。

1979 年には地表検出器アレイ型の明野空気シャワー観測装置 (Akeno) の稼働が開始され、1981 年には Fly's Eye 実験が開始し、空気シャワーの大気蛍光望遠鏡による測定手法が確立された。さらに 1990 年には当時世界最大の 100 km² の有効検出面積を持つ、明野広域空気シャワー観測装置 (AGASA) が稼働開始され、1994 年には High Resolution Fly's Eye (HiRes) 実験も開始された。

また、2004 年には地表検出器アレイと大気蛍光法を組み合わせた 3000 km² の有効検出面積をもつ Pierre Auger Observatory (Auger) が南半球で観測を開始し、2007 年には同じタイプの 700 km² の有効検出面積を持つ Telescope Array Experiment (TA) が北半球で観測を開始し、現在も宇宙線の定常観測を続けている。

そして 2011 年現在、宇宙線発見から約 100 年の間に有効検出面積が飛躍的に向上し、到来頻度が少ない 10¹⁹ eV 以上の宇宙線も豊富な統計量で測定可能になった。この領域の宇宙線の精密測定結果が公表されつつあるが、依然として宇宙線の起源は明らかになっていない。

次章からは、宇宙線の観測手法について説明し、エネルギースペクトルや質量組成の最新の測定結果、宇宙線の起源モデル、宇宙線を用いた次世代の天文学、さらには将来計画について議論する。

2 空気シャワー事象、観測手法

高エネルギーの宇宙線は大気中の窒素分子などと相互作用を繰り返し、多数の粒子群となって地表に到達する。この現象を空気シャワーと呼ぶ。図 1 の左図は、10¹⁹ eV の宇宙線が大気と相互作用を経て、粒子数がどのように変化していくかをモンテカルロシミュレーションより求めたものである。この図で、粒子数が最大値になったときの深さを X_{max} と呼び、図 1 の右図は、 X_{max} の平均値をエネルギーと質量組成ごとにシミュレーションから求めた図である。同じエネルギーでも質量組成が陽子か鉄、またはガンマ線であるかによって平均的な X_{max} が異なることがわかる。この X_{max} が質量組成ごとに違うことを利用し、宇宙線の質量組成の測定が行われる。

空気シャワーの観測手法は大きくわけて、地表検出器アレイと大気蛍光望遠鏡とよばれる 2 種類の方法がある (図 2)。大気蛍光望遠鏡は、空気シャワーによって励起された窒素分子からの蛍光発光を撮像する。大気蛍光望遠鏡は粒子数の増減をカロリメトリックに測定でき、さらには X_{max} を測定できる特徴を持つが、月のない晴れた夜

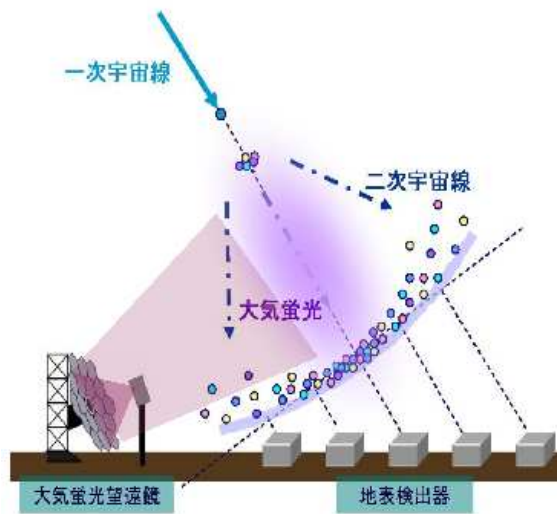


図 2 空気シャワーの観測手法のイメージ図。大気中の蛍光発光を撮像する大気蛍光望遠鏡と、地表に到達した粒子を測定する地表検出器アレイの 2 種類の方法がある。到来する宇宙線をこの 2 種類の観測機器によって測定することをハイブリッド観測と呼ぶ。

間にしか観測できず、年間の約 10% 程度しか観測できない。一方で地表検出器アレイは、一定の間隔で検出器を並べ地表での空気シャワー粒子を観測する。Xmax を直接測定できないが 24 時間定常観測可能であり豊富な統計量で宇宙線を測定できる利点を持つ。

近年、上記の 2 種類の観測手法を組み合わせたハイブリッド観測とよばれる手法が用いられ、お互いの長所を生かしたより高精度な解析が可能となっている。

3 エネルギースペクトル

図 3 は、宇宙線発見から約 100 年の間に観測されたエネルギースペクトルの測定結果である。 10^9 eV から 10^{20} eV にわたる幅広いエネルギーで $dN/dE \propto E^{-\gamma}$ のべき乗のスペクトルを持つことがわかる。 10^{15} eV 付近の Knee と呼ばれる領域で、べき係数が変わっており、起源が変わった証拠として考えられている。また、エネルギースペクトルはエネルギーが増加するにつれて到来頻度が減少し、 10^{19} eV になると 1 年 100 km^2 あたりに 1 粒子しか地球に到来しない。しかし、そのエネルギーは世界最大の加速器 LHC で到達できる 1 粒子あたりの最大加速エネルギーよりも 7 桁も大きい。

図 4 の左図は、図 3 のエネルギースペクトルの 10^{17} eV 以上の極高エネルギー領域に、エネルギーの 3 乗をかけてべきの変化を見やすくした図である。測定の困難さからそれぞれの結果ごとに大きな系統誤差が存在してしまっており、図 4 の右図は、すべての結果が重なるようにエネルギーを任意にシフトさせたものである。これを見ると、どの結果でも $10^{18.5}$ eV あたりに凹みがあることが分かる。この凹みの原因としては、銀河系内から系外への起源の遷移、組成の変化や宇宙背景放射との電子対生成などが考えられている。さらには 10^{20} eV 付近での頻度減少が、GZK 限界や宇宙線の加速限界などによるものと考えられているが、統一的理解は現在のところまだ見つかっていない。

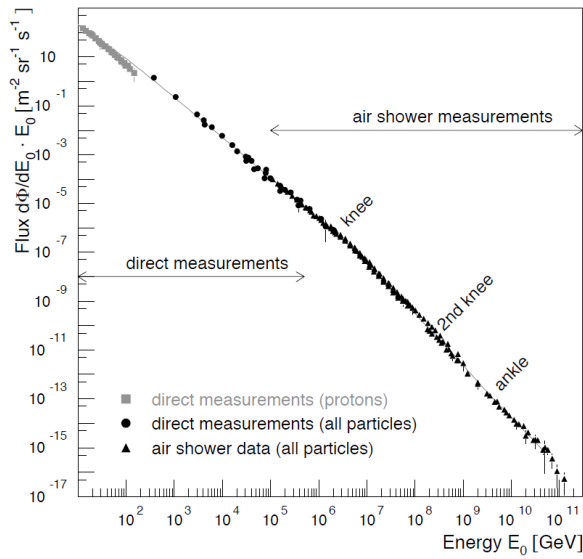


図3 宇宙線のエネルギースペクトル。

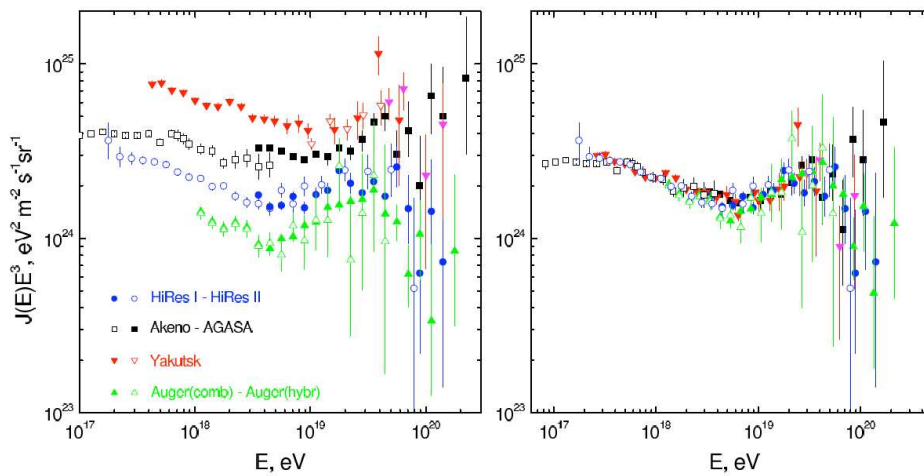


図4 左図: 図3 にエネルギーの3乗をかけてべき係数の変化を見やすくした、極高エネルギー領域での宇宙線のエネルギースペクトル。右図: 左図のスペクトルに任意の定数をかけ重なるようにエネルギーをスケールしたもの。

4 加速機構、起源モデル

1977年に提唱された衝撃波統計加速モデルとは粒子が衝撃波によって複数回加速されるモデルであり、このモデルから観測された $dN/dE \propto E^\gamma$ のべき乗のエネルギースペクトルが理論からも再現された。この衝撃波統計加速モデルで $Z \times 10^{14}$ eV (Z : 原子番号) まで加速され、Knee 領域のべき係数の変化の原因と考えられている。しかし、それ以上エネルギーでの加速機構は候補天体はあるものの、まだ結論は出ていない。

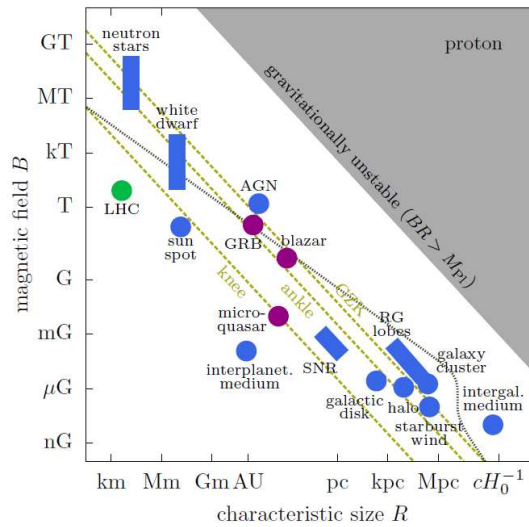


図 5 宇宙線加速の起源となる候補天体を、横軸が天体のスケール、縦軸が天体の強度磁場について表した”Hillas plot”と呼ばれている図。Knee は 10^{15} eV、Ankle は $10^{18.5}$ eV、GZK は $10^{19.5}$ eV のエネルギーを表す。

図 4 は、極高エネルギー領域の宇宙線加速の起源となる候補天体を、横軸が天体のスケール、縦軸が天体の強度磁場について表した、Hillas plot と呼ばれている図である。加速されるエネルギーの上限は、荷電粒子が磁場で曲げられる半径と天体のスケールによって決まる。この図に中の Knee は 10^{15} eV、Ankle は $10^{18.5}$ eV、GZK は $10^{19.5}$ eV の加速エネルギーを表す。銀河系内の起源候補天体としては、超新星爆発、パルサーなどがあり、銀河系外の極高エネルギー宇宙線の起源としては、活動銀河核 (AGN)、ガンマ線バースト (GRB)、電波銀河、銀河団や衝突銀河などが考えられている。

5 質量組成

図 6 は 10^{14} eV からの宇宙線の質量組成の測定結果を表した図である。上下の直線はそれぞれ、陽子、鉄の最大発達深さの平均値であり、プロットは各実験の測定結果である。これらの結果から、 10^{16} eV 付近で組成が重くなり、 10^{18} eV 付近でまた組成が軽くなっていることがわかる。エネルギースペクトルと比較することで、起源の変化や宇宙空間での伝播、加速機構について明らかにすることができる。

図 7 は、極高エネルギー領域の質量組成の図である。 6×10^{19} eV 以上での質量組成が重いか軽いかによってエネルギースペクトルの解釈が異なる。陽子の場合を考えると、宇宙背景放射との相互作用によりパイオン生成を経てエネルギーを失う GZK 機構によって 10^{20} eV でカットオフが生じると予測される。さらに陽子は磁場で曲げられにくいいため、到来方向と既知の天体とが相関を持つ可能性が高くなり、粒子線天文学が可能となる。

一方で鉄の場合だとすると、GZK 機構ではなく原子核破砕によって細分化されエネルギーを失い到来頻度が減少することが考えられる。また、鉄の場合は陽子に比べて磁場で曲げられやすいため、到来方向と天体との相関は見られず、粒子線による天文学は難しくなる。また鉄に遷移することが加速限界を示しているとする、このエネルギー以上の宇宙線は観測されないと予想される。

また、このエネルギー領域の宇宙線の質量組成はガンマ線やニュートリノといった他分野との測定結果にも影響してくる。なぜなら、もし GZK 機構によって宇宙線が宇宙背景放射と相互作用した場合、パイオン生成を経

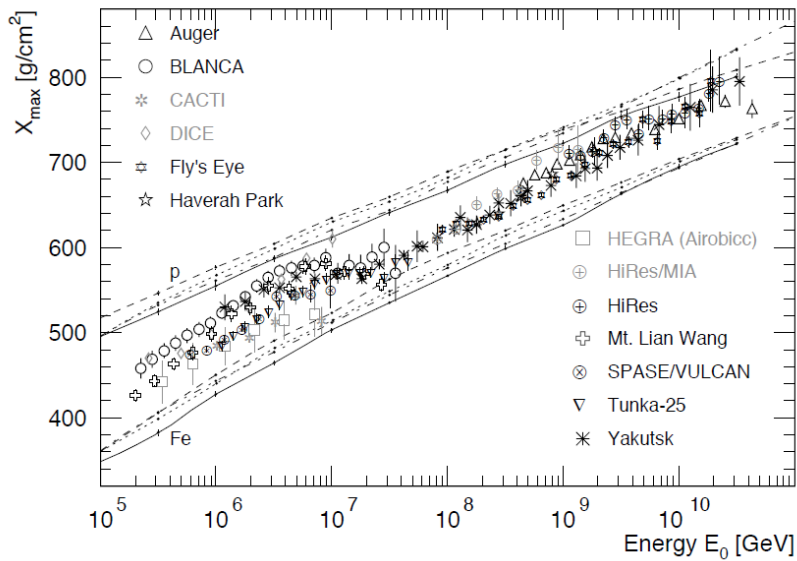


図 6 宇宙線の質量組成。

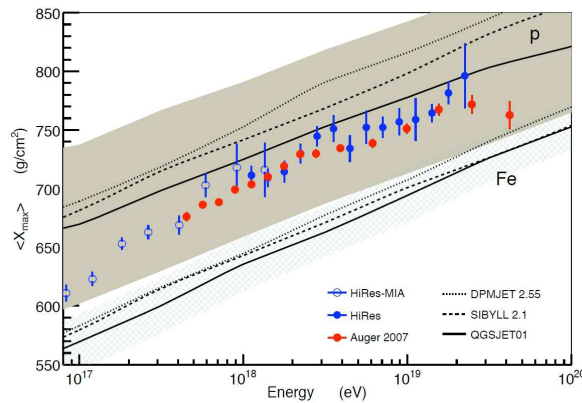


図 7 極高エネルギー領域における宇宙線の質量組成。

てニュートリノやガンマ線が生成されるためだ。それらの到来頻度は、ガンマ線観測衛星の Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡や、南極で稼働中のニュートリノ観測実験 (IceCube) で観測可能と考えられている。そのため、それらの観測結果と合わせることで宇宙現象をより理解することが可能となるだろう。

6 粒子線天文学

10^{19} eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線は銀河磁場によってほとんど曲げられることなく地球に入射する。そのため、仮に天体起源だとした場合、既知の天体との相関が期待され宇宙線を使った次世代の天文学 — 粒子線天文学 — が可能になると考えられている。図 8 は北半球で行われた HiRes 実験と南半球で観測中の Auger 実験による極高エネルギー宇宙線の到来方向と、75Mpc 以内の活動銀河核 (AGN) の方向を赤道座標で表したものであ

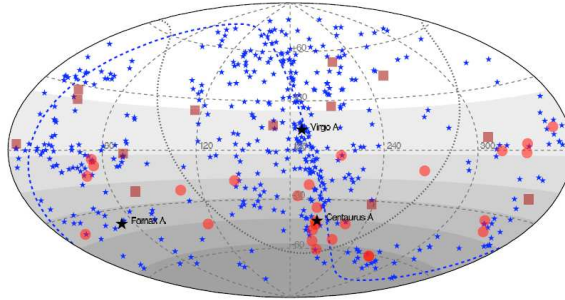


図8 北半球で行われた HiRes 実験と南半球で観測中の Auger 実験による極高エネルギー宇宙線の到来方向 (赤点) と、75Mpc 以内の活動銀河核 (AGN) の方向 (青点) を表した図。

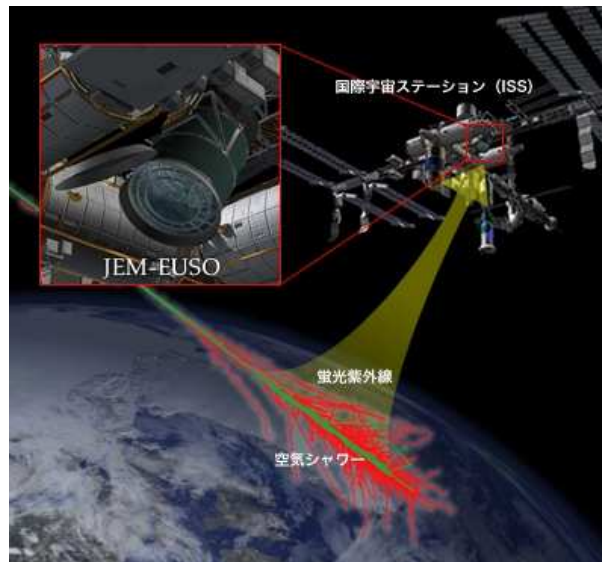


図9 JEM-EUSO 実験

る。到来方向が既知との天体との強い相関を示せば、宇宙線の起源解明と粒子線天文学が達成されるのだが、現在の統計量では有意な相関は見つかっていない。さらなる統計量を稼ぐため、北半球と南半球に建設された TA と Auger の2つの 1000 km^2 クラスの巨大な観測装置が、現在も宇宙線の定常観測を続けている。

7 将来計画

TA の将来計画としては、低いエネルギーへの拡張計画の TALE (Telescope Array Low Energy Extension) がある。TALE は現在の地表検出器アレイの間にさらに高密度で検出器を並べ、低いエネルギーからのスペクトルを測定する計画である。加えて高い仰角を観測できる大気蛍光望遠鏡を設置し、ハイブリッド観測によって 10^{17} eV からの質量組成を精度よく測定する。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 計画はすでに定常観測にむけた検出器の増設が予定されており、2014 年から観測開始予定である。

さらに、TA や Auger の地表検出器アレイをより広範囲に設置し、極高エネルギーの宇宙線の統計量を上げる

実験も考えられている。地表検出器を広げるメリットとしては、すでに動いている地表検出器を増設していくのでリスクが少なく、確実に宇宙線の統計量をあげることができる点がある。

地上で行う実験とは対照的に、宇宙空間から地上を観測する実験も計画されている。JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module) は国際宇宙ステーション (ISS) に設置された広視野大気蛍光望遠鏡を使い、宇宙から地上を観測することで巨大な有効検出面積で宇宙線を捉える実験である (図 9)。JEM-EUSO は、夜間しか観測できないことを考慮しても 100,000 km² という、Auger の 14 倍、TA の 50 倍の有効検出面積で 10²⁰ eV を超える宇宙線を北半球と南半球で観測できる。さらなる利点は、国際宇宙ステーションは 90 分で地球を一周するため、ひとつの検出器で宇宙線の全天観測が可能なところである。そして電波、可視光、赤外線、エックス線、ガンマ線といった多波長観測結果と宇宙線の観測結果を比較することで、起源天体を同定することが可能である。また、豊富な統計量により天体ごとのエネルギースペクトル測定を達成し、天体ごとにどのような現象が起きているかを解明する。しかし多くのメリットがある反面、宇宙からの大気蛍光望遠鏡観測は今まで行われたことがないため、リスク大きいことが懸念されている。その対策として、現在 TA サイトで地上でのテスト運用のための準備が始まっている。その後、気球による観測テストの後、国際宇宙ステーションで JEM-EUSO による観測が始まれば、高い統計量で粒子線天文学が実現でき、宇宙線の起源解明へと近づくだろう。

謝辞

第 41 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。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。

参考文献

- [1] J. Blumer et al., *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 63 (2009) 293
- [2] L. Alfredo Anchordoqui, 2011, arXiv:1104.0509
- [3] シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III —高エネルギー天文学
- [4] Telescope Array Experiment, <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>, *The Telescope Array Project Design Report* (2000)
- [5] Pierre Auger Observatory, <http://www.auger.org/>
- [6] JEM-EUSO, <http://jemeuso.riken.jp/>