

荷電粒子天文学の開闢— The Pierre Auger 計画による 最高エネルギー宇宙線観測



山本 常夏

〈甲南大学理工学部 〒658-8501 神戸市東灘区岡本 8-9-1〉

e-mail: tokonatu@konan-u.ac.jp

宇宙で最もエネルギーの高い粒子を最高エネルギー宇宙線と呼ぶ。この小さな粒子には宇宙の莫大な高エネルギー現象とその伝播過程の情報が詰め込まれている。この未知なる粒子の起源を解明するためアルゼンチンにある草原で the Pierre Auger 計画が進められている。最近この計画の観測結果がいくつか発表された。この結果、最高エネルギー宇宙線のスペクトラムに折れ曲がりが見られ、さらに到来方向分布に異方性が発見された。この計画と結果について詳述する。

1. はじめに

一昨年大リーグを見に家族と米国シカゴにあるホワイトソックスの球場にいった。野球にはあまり興味がなかったが、イチローなど日本人選手も多く出場していてそれなりに楽しかった。グラウンドでは選手たちが激しい熱戦を繰り広げ、その様子がたくさんの照明灯により照らし出されていた。彼らの活動源はグラウンドの周りにいる観客の熱気だろう。宇宙観測は野球観戦によく似ている。宇宙観測において、われわれ物理学者はさしずめ外野席でピーナッツを食べながら観戦している観客のようなものだ。望遠鏡をのぞくと豆粒のような選手たちが動き回っている。この中にはブラックホールや超新星などスター選手がいて、宇宙背景放射と呼ばれる熱気の中で活躍している。われわれはまだルールをよく理解していない。望遠鏡をのぞきながら選手たちの活動の中に何か法則を見つけようとしている。時どきホームランが飛んできてびっくりする。このホームランボール

は最高エネルギー宇宙線と呼ばれている。実のところ、野球観戦中に飛んで来るホームランボールと最高エネルギー宇宙線の運動エネルギー（約 10^{20} eV）はだいたい同じだ。小さな粒子の中にどうやってこれだけのエネルギーを詰め込んだのか？ 宇宙線の加速源：宇宙のホームランバッターを探すのが私の研究テーマだ。

2. 宇宙線観測実験

宇宙線が発見されたのは 1912 年に V. F. Hess が気球に乗って電磁放射を測定したのが最初だとされている。今から約 100 年前のことで日本は大正元年である。彼は上空に行くと電磁放射の強度が増すことを発見し、さらに太陽活動と逆相関があることが明らかにされた。宇宙線が宇宙から来ていることが示されたのである。それ以来宇宙線はさまざまところで観測され研究されてきた。その研究は素粒子の発見から天文学まで幅広い。

1938 年フランスの物理学者 Pierre Auger により空気シャワー現象が発見された。高エネルギー

宇宙線が地球大気に突入し、空気分子と相互作用を起こすことにより、光と粒子のシャワーを形成して地上に降りそそぐ現象だ。この発見により高エネルギー宇宙線の観測が可能になった。1962年には J. Linsley により米国にあるボルカノ・ランチと呼ばれる空気シャワー観測所で最初の最高エネルギー宇宙線が検出された。宇宙のホームランボール：最高エネルギー宇宙線の存在が示されたのである。この2年後に宇宙背景放射 (CMB) が発見されている。さらに2年後の1966年米国コーネル大学にいた Greisen (グレイセン) が「宇宙線スペクトラムに終わり？」という題の論文を発表した¹⁾。この論文のアブストラクトにこう書かれている。「宇宙線のスペクトラムは 10^{20} eV まで測定されており、さらに 10^{21} から 10^{22} eV まで測定する多くの実験が開発または計画されている。」この状況は現在もあまり変わっていない。彼はこの論文で最高エネルギー宇宙線は CMB と相互作用するため 30 億光年程度しか伝播できず、地球に届く時にはフラックスが急激に減少すると予言している。約 10^{-3} eV の CMB 光子は最高エネルギー宇宙線の静止系から見ると 10^8 eV の高エネルギー光子になる。このため宇宙線が陽子なら光パイオン生成によりエネルギーを奪うのだ。宇宙線が原子核でも光核破砕反応を起こす。ホームランボールが空気抵抗で失速し場外まで届かないのとよく似ている。この効果は複数の物理学者により同時に予言され、その名前を取って Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) 効果と呼ばれている。以来この GZK 効果検出をめぐるさまざまな実験による論争が 40 年間続くことになる。

日本では昔から宇宙線観測が盛んだ。高い山の上で太陽から飛んでくる粒子を観測したり、地下にもぐってミューオンやニュートリノを検出して

いる。荷電粒子が大気中で発する蛍光を使い、空気シャワーを立体的に測定する大気蛍光望遠鏡の開拓研究も日本で行われている²⁾。3年前まで山梨県明野村で最高エネルギー宇宙線を観測する実験が行われていた。明野ジャイアント空気シャワーアレイ (AGASA) と名づけられたこの検出器は 100 km^2 の大きさで、つい最近まで世界最大の検出面積を誇っていた。1980-90年代はこの AGASA をはじめ米国ユタ州にある HiRes や英国の Haverah Park それにロシアの Yakutsk など多くの宇宙線観測所が一番高いエネルギーの宇宙線を捕まえようと競った時代であった。この結果 10^{20} eV を超えるエネルギーをもった宇宙線の存在が確認された。当時 AGASA の解析にあたった手嶋政廣氏はこれらの宇宙線を“スーパー GZK 宇宙線”と名づけた。しかし AGASA の検出面積でも十分な統計精度が得られず、GZK 効果の有無に結論を出すことはできなかった。英リーズ大の Alan Watson は1990年に行われた講演でこの状況を見事に予言している³⁾。「残念ながらこのエネルギー領域の結果は10年前とあまり変わっていない。 $1,000 \text{ km}^2$ の大きさの検出器がなければ10年経っても変わらないだろう。必要な物はやる気とお金と忍耐である*1。」これを聞いたシカゴ大のノーベル賞物理学者 Jim Cronin が Alan にこう訴えた。「あなたはもっと野心的になるべきだ。 $5,000 \text{ km}^2$ の宇宙線観測装置を建設しよう!!*2」こうして the Pierre Auger (ピエール・オージェ) 計画が始まった。一連の経緯を見るとこの Auger 計画が強い科学的動機に基づいて始められたことがわかる。彼らは直ちに提案書をもって世界中を回り物理学者たちを説得した。日本にも何回か訪問している。彼らの熱意に押され、シカゴ郊外にあるフェルミラボが参加を表明

*1 Watson A. A., 1990, European Cosmic Ray Symp. Review Talk, “All that is needed is dedication, money and patience; otherwise a reviewer writing ten years from now will not be able to draw many different conclusion.”

*2 Cronin J., 1991, Proc. of 22th International Cosmic Ray Conference: “You’re not nearly ambitious enough, we should build $5,000 \text{ km}^2$.”

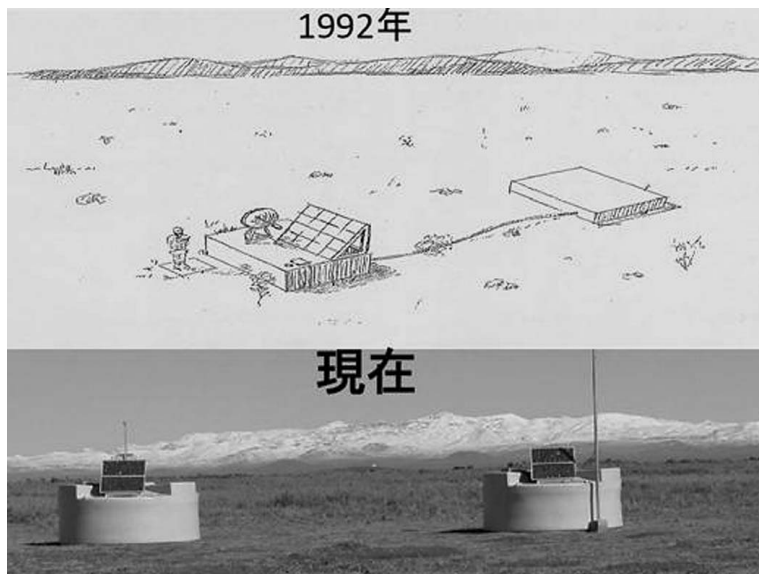


図1 上図は Auger 計画の最初の提案書にある概略図。太陽電池で電力を供給しアンテナを使って通信をする方式が描かれている。下図は現在アルゼンチンの草原に設置されている検出器。後ろにアンデス山脈が写っている。

し、つづいてフランス、ドイツ、スペイン、イタリアなどさまざまな国が参加し議論が行われた。最終的にヨーロッパ、南米、北米など 17 カ国が参加した国際共同実験に成長した。アジアからはベトナムのみの参加となっている。

検出器は鉛板をプラスチックシンチレーターで挟んだレッドバーガーという方式が提案されていたが、対案として Haverah Park で用いられていた水チェレンコフ検出器という方式も挙げられた。これは $10\text{ m}^2 \times 1.2\text{ m}$ の円柱のプラスチックタンクに水を入れ、その水の中で荷電粒子が発するチェレンコフ光を測定する設計だった。シンチレーターが荷電粒子の数を測定するのに対し、この検出器は粒子のエネルギーを測定する。そこで両方の検出器を AGASA の中に二つずつ置き性能を比較した。その結果水チェレンコフ検出器が選ばれることとなった。計画当初の概略図と現在使われている検出器の写真を図 1 に示す。比べてみると検出器は多少違うが、背景の山が驚くほどそっくりだ。この山は Auger 計画がいかに一貫し

た開発と研究を続けてきたかを象徴していると思う。この地表検出器アレイの周りに、大気蛍光望遠鏡を置き宇宙線を多角的に観測する方法が提案された。望遠鏡と地表検出器で同じ宇宙線を観測し系統誤差を減らす考えだ。こうして計画の設計が進められていった。

この Auger 計画の目的は「最高エネルギー宇宙線を前例のない統計量と精度で測定する」ことであり、その概念は①巨大検出面積、②地表検出器アレイと望遠鏡を組み合わせたハイブリッド観測、③南北両半球を使った全天探索、④これらを実現するための国際協力である。当初南北両半球に 1 カ所ずつ同時に観測所を建設する予定であったが、米国の予算当局の提案を受け、まず南米アルゼンチンに建設し、その結果を見てから北半球に二つめの観測所を建設することになった。1999 年かくして巨大空気シャワーアレイ：南 Auger 観測所の建設が始まり、今年 2008 年に完成した。この観測所の概略を図 2 に示す。観測所は端から端まで約 60 km ある六角形で、 $3,000\text{ km}^2$ の領域に

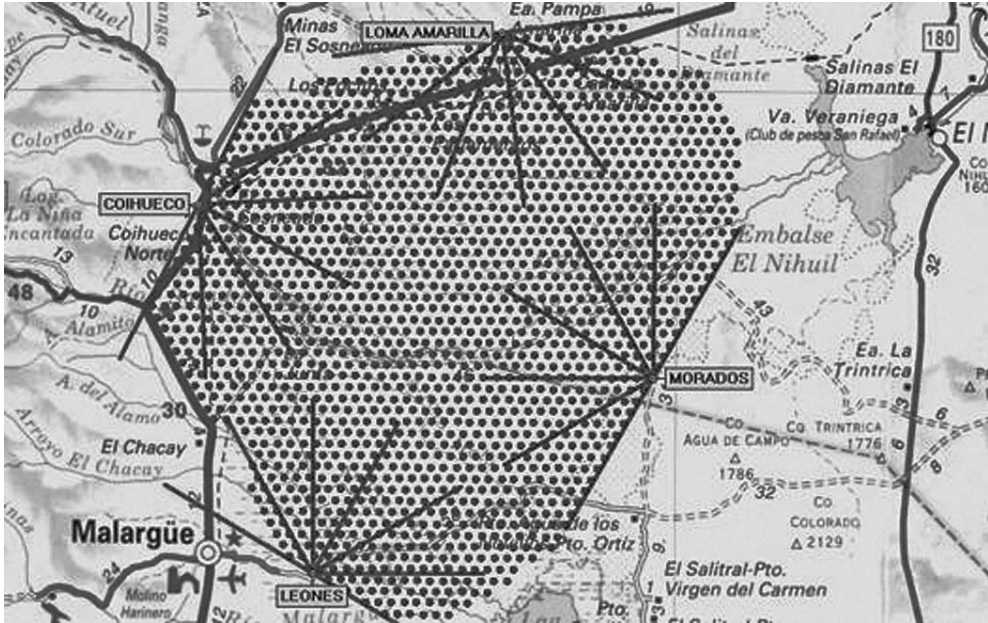


図2 南 Auger 観測所概略図. 点で地表検出器, 線で大気蛍光望遠鏡の視野を示している. 3,000 km² の領域に 1,600 個の検出器を並べ, 4 か所に 6 台ずつ設置した望遠鏡がその上の大気を監視している.

1,600 個の検出器を並べている. この広さは東京ドームの 23 万倍, 大阪府の 1.5 倍より少し広いくらいである. 当初の計画 (5,000 km²) より小さいが AGASA の約 30 倍あり, この領域にある 300 億トンの地球大気を使った世界最大の検出器である. これは宇宙を観測する外野席というより, 科学者と技術者が活躍する球場だ. この計画に参加している科学者は博士号をもっている者だけで 370 人を超える. 370 人の博士が毎日「宇宙線はどこからくるのだろうか?」と考えているのだ. 平和な話だ. ちなみにこの数は日本のプロ野球の 1 軍登録選手の数より少し多い. そして今なお増え続けている.

筆者は幸運にも 2002 年から 2007 年までの 5 年間シカゴ大でポスドクとしてこの計画に参加する機会を得た³⁾. 仕事は Auger 観測所から送られてくるデータの解析である. このデータの解析は大リーグの観戦よりはるかに興奮するものだった. 筆者は当時 GZK 効果を信じず 10²⁰ eV を超える

エネルギーをもったスーパー GZK 宇宙線がたくさん観測されるだろうと考えていた. このエネルギー領域の宇宙線を解析すれば新しい宇宙が姿を現すことを信じて疑わなかったのだ. 毎日送られてくるデータを解析し大きな空気シャワーを探した. そのデータを天球図にプロットして部屋に貼っていた. その天球図は大きな空気シャワーが観測されるたびに更新された. ところが実験が進み 2005 年の終わりごろある不安が頭に浮かんだ. それは前から感じていたことだった. 観測された宇宙線のスペクトラムが GZK 効果の予測とよく似ているのだ. つまりスーパー GZK 宇宙線が思ったより少ないのだ. それはとても受け入れることのできないことだった. まだ統計も少なかったし, はっきりしたことが言える状況ではなかったが, 昼食の最中に Jim Cronin にこう trying してみた. 「大きなエネルギーの宇宙線が考えていたように観測されていませんが, どう思いますか?」彼はこう答えた. 「ありのまま解析すればいいの

だ。」筆者はありのまま解析を続けたが、この不安は2006年の夏ごろに疑いようのない事実になってしまった。

ちょうどそのころ観測されたエネルギーの高い宇宙線と近傍の活動銀河中心核 (AGN) の方向に相関がありそうだという結果が出始めていた。統計的には有意ではなかったが、とても興味深い結果であった。約100年の宇宙線研究の末、ようやく宇宙のホームランバッター：宇宙線の加速源が姿を現したのだ。この結果を外部の論文に不正に引用されないように緘口令が布かれた。会議のたびに秘密を守るようにと堅く注意され、Auger計画のすべての内部ウェブページのパスワードを変える念の入れようだった。370人の科学者が夜にバーで口を滑らせることを防げるのか、といった議論が本気で行われた。その一方でarXivプレプリントサーバーの論文検索システムでAGNとかUHECRとかいう言葉の検索回数が急上昇した。その数はAuger計画内の人数をはるかに超えていた。こういう形で噂が数値化されるのはすごいことだと感心した。何度も解析がやり直されパラ

メーターを固定し、それをプレスクリプション (処方箋) という形で明文化した。この文章に従い解析を続け統計的に有意になったら論文にして公表するという申し合わせが行われた。有意性は建設が進むに従い急激に増し2007年春には公表できるレベルに達していた。しかしこの年の7月にメキシコで行われた宇宙線国際会議のプロシーディング提出に間に合わなかったので、秋まで秘密を抱えることになってしまった。その間も有意性は上がり続け、等方的な分布を99%以上の確度で否定できるレベルに達した。この結果により宇宙線観測は新たな時代に突入した。

3. 観測結果

こうして最近南 Auger 計画から結果が次々と発表されている。そのすべてをここで羅列することはできないが、主な結果を以下に挙げる (図3)。

- $10^{18.5}$ eV 付近でスペクトラムがハードになっている。これはオージェ計画以前の実験で見えていたものを確認したことになる。このスペクト

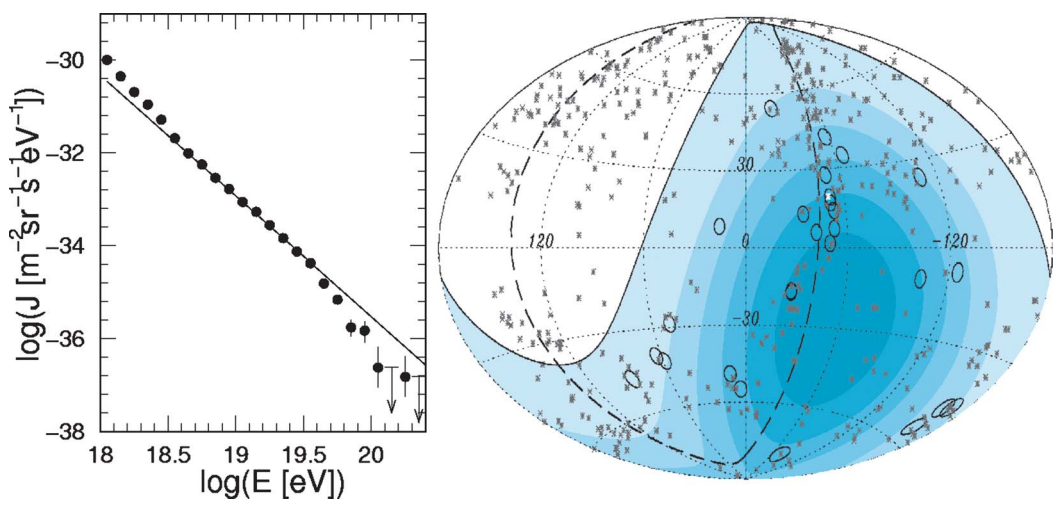


図3 左図は南 Auger 観測所により測定された宇宙線スペクトラム。比較のためべきが -2.6 のべき関数を直線で示している。右図は観測された27個の最高エネルギー宇宙線到来方向。銀河座標系で中心が銀河中心、*は約2.5億光年以内にある近傍のAGN。 5.7×10^{19} eV以上の最高エネルギー宇宙線到来方向を半径3.1度の○で示している。点線は超銀河面、濃い青の部分ほど観測時間が長い。

ラムブレイクの原因には **CMB** の影響とする説と宇宙線の起源が銀河系内から系外へ遷移しているのが見えているとする説がある。今後このエネルギー領域を精密に測定することは銀河系内宇宙線と最高エネルギー宇宙線の研究の両方にとって重要な意味をもつ⁴⁾。

- 前に述べたように $10^{19.5}$ eV 付近でスペクトラムがソフトになっている。これが **GZK** 効果など **CMB** の影響なのか加速領域での限界が見えているのか、これから解明が進んでいくはずだ。
- 高エネルギーニュートリノも高エネルギー光子もまだ検出されていない^{5), 6)}。
- 空気シャワー中に含まれるミュオン量のシミュレーションから期待される量と比べて少なかった。最高エネルギー領域の相互作用を見直さなければならない⁷⁾。
- すでに述べたように、観測された 27 個の最高エネルギー宇宙線の到来方向分布に異方性が確認された⁸⁾。

特に最高エネルギー宇宙線の到来方向が **AGN** の方向と相関があることが確かめられたことが注目を集めている。この **AGN** は中心に活動的な巨大ブラックホールがある天体で、以前から最高エネルギー宇宙線源の有力候補に挙げられていた。特に近傍の電波で明るい **Centaurus A**, **Virgo A**, **Fornax A** は最有力候補だった。外野席にいてホームランが飛んできたら松井秀喜など強打者が打ったのだらうと想像するのは自然なことだ。実際最も近傍で最も電波で明るい **AGN: Centaurus A** の方向から最高エネルギー宇宙線が二つ観測されている。ところが **Virgo A** の方向からは今のところ一つも検出されていない。この **Virgo A** の周りには最も近傍の銀河団 **Virgo cluster** があり **AGN** も豊富にある。今後この方向から宇宙線が検出されるのか注目している。またこの異方性は普通の銀河の分布とも強い相関がある。**AGN** も普通の銀河もダークマターも、おそらくガンマ線バーストも、同じように宇宙の大規模構造にそっ

て分布している。したがって現在の統計では宇宙線源を特定することはできない。ホームランを打つのは強打者だけではない。バッターボックスに立つ者すべてにチャンスがあるのだ。

もちろん最高エネルギー宇宙線到来方向の異方性はいつか見えてくるだろうと考えられていた。しかしこんなに早くから見えてきたのは驚くべきことだった。その解釈としてわれわれは幸運だったとう説がある。つまり幸運にも最高エネルギー宇宙線が陽子で、しかも銀河系内外の磁場があまり強くなかった。おかげで宇宙線が地球まで直進できた。さらに幸運にも **GZK** 効果が効いて遠くの天体からの宇宙線が見えず、近傍の放射源の分布が見えてきたというものだ。実際この異方性を発表した論文にこれに近いことが書かれている。これに対する反論もでていて、議論が活発になっている。

さて、これらの結果をもとにこれから次の三つの問題が重要になると考えている。一つ目は最高エネルギー領域の相互作用である。最高エネルギー宇宙線の散乱断面積と相互作用過程を突き止めることは、この計画を発展させるためにも高エネルギー物理の発展のためにも重要だ。大型加速器 **LHC** を使い高エネルギー粒子の相互作用を測定する **LHCf** 計画⁹⁾などの実験も急速に発達しており、これから解明が大きく進むだろう。二つ目は宇宙線の加速と伝播の物理過程解明だ。加速源を突き止め、そこでのスペクトラムを測定し、加速機構とそこから地球までの磁場や光子場の状態を調べるのだ。そのためには今の 100 倍近い統計が必要になるだろう。われわれはさらに野心的になる必要に迫られている。三つ目は荷電粒子天文学を切り開くことである。二つ目とも関係しているが、最高エネルギー領域でみた全く新しい宇宙像がこれから姿を現すのだ。それにはニュートリノや多波長光、重力波などを合わせたマルチメッセンジャー観測が重要になる。

4. 結 論

Auger 計画により最高エネルギー宇宙線観測の検出感度はその起源が見えるレベルに達しつつある。エネルギースペクトラムの構造が確認され、到来方向分布が見えてきた。これによると Centaurs A の方向から二つの宇宙線が観測され、Virgo Cluster の方向からは今のところ観測されていない。この Virgo Cluster はちょっと気になる。この銀河団は北半球の空にあり南 Auger 観測所からは視野の端になる。また北半球で観測を行ってきた AGASA や HiRes のデータからはこのような異方性が確認できないという報告もある。南と北半球で宇宙線の見え方が違うのかもしれない。現在 Auger 計画では北半球に二つ目の観測所を建設する準備を進めている。これは南 Auger 観測所の 3 から 8 倍の観測所を米国コロラド州に建設し 20 年以上稼働することにより現在の 80 から 180 倍の統計精度で測定する計画になっている。さらに南 Auger 観測所を拡張しようという議論も行われている。この北 Auger 観測所は早くても 2010 年の建設開始を目指している。したがって当面の間、北半球唯一の観測手段は日本が中心になって進めている宇宙線望遠鏡 (TA) 計画のみである¹⁰⁾。このため TA 計画の結果に熱い注目が集まっている。この TA 計画や AGASA など、もともと日本は最高エネルギー宇宙線領域の研究が盛んだ。実験だけではなく理論研究でも重要な結果が出ている^{11), 12)}。例えば東大宇宙理論研究室では AGN の分布や宇宙の大規模構造、銀河間磁場を入れた宇宙線伝搬の詳細なシミュレーションが行われている。この研究は今回の南 Auger 観測所の結果をまさしく予言するもので

あった。今後このシミュレーションと実験結果を比較することにより宇宙線加速源の解明が進むだろう。

最高エネルギー宇宙線の観測は長年にわたる地表検出器開発により発展してきた。長い間外野席にいて、いつかバックネット近くのアリーナ席で観戦したいと思うのは無理もないことである。現在、国際宇宙ステーションに大気蛍光望遠鏡を設置する JEM-EUSO 計画が理研や甲南大学などにより進められている¹³⁾。実現すれば広大な領域を観測することができ、宇宙線観測は新たな可能性を手に入れることになる。

最後に異方性結果の論文を作成するにあたり Auger 計画内部でちょっとした議論があったので紹介しておく。この議論は科学的結果を発表するたびに行われ、高エネルギー物理学と天文学の文化の違いに起因すると考えられる。先に述べたように異方性の結果をまとめるにあたり、その論文に結果の解釈が書かれた。自分たちの観測結果に最初の解釈を与えるのは当然の権利であり、発表後にこの分野で行われる議論にある程度の筋道をつけることは必要なことだというのが大方の意見だった。これに反対するグループがあった。彼らの主張はこうだ。「実験と理論の論文は明確に分けられるべきである。実験の論文で重要なことは“正しい”ということだ。正しく実験をし、慎重に解析し、正確に報告することが最も重視される。理論の論文は違う。正しいかどうかは重要でなく、むしろ間違っていてもいい。重要なのは“アイデア”である。この二つを一つの論文にすると読者が混乱する。」確かに野球記者の書く試合結果の記事と評論家の書く解説記事は分れていたほうがいい。宇宙観測と野球観戦はよく似ている。

参考文献

- 1) Greisen K., 1966, Phys. Rev. Lett. 16, 748
- 2) 菅 浩一, 棚橋五郎, 1969, Proc. of 11th International Cosmic Ray Conference
- 3) 山本常夏, 2007, 物理学会誌 62, 197
- 4) Yamamoto T. [Pierre Auger Collaboration], 2007, Proc. of the 30th International Cosmic Ray Conference, (arXiv:0707.2638)
- 5) Pierre Auger Collaboration, submitted to Phys. Rev. Lett. (arXiv:0712.1909)
- 6) Pierre Auger Collaboration, submitted to Astropart. Phys. (arXiv:0712.1147)
- 7) Engel R. [Pierre Auger Collaboration], 2007, Proc. of the 30th International Cosmic Ray Conference (arXiv: 0706.1921)
- 8) Pierre Auger Collaboration, 2007, Sci. 318, 938 (arXiv: 0711.2256v1, arXiv:0712.2843)
- 9) <http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf>
- 10) <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 11) Inoue S., et al., Phys. Rev. D, in press (arXiv:0701167)
- 12) Takami H., et al., 2006, Astrophys. J 639, 803 (arXiv: astro-ph/0506203v2)
- 13) <http://jemeuso.riken.jp/jp/index.html>

Opening a New Astronomy through Charged Particles—Observation of the Ultra-High Energy Cosmic Rays by the Pierre Auger Observatory

Tokonatsu YAMAMOTO

Faculty of Science and Engineering, Konan University, 8-9-1 Okamoto, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo 658-8501, Japan

Abstract: The highest energy particles in the Universe are called Ultra-High-Energy Cosmic Rays (UHECRs). These particles should bring enormous information of the high-energy phenomenon in the Universe. To reveal mysteries of the UHECRs, the Pierre Auger observatory has been constructed. Recent results from this project indicate the arrival direction of the UHECR correlates to the direction of the Active Galactic Nucleus. In this report, we describe this observatory and discuss new image of the Universe through UHECRs.