



記載の記事は宇宙線研究所ホームページ (<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/cat-icrr/>) からでも御覧になれます。

CONTENTS		
LHC 時代における超対称性標準模型	伊部 昌宏	1
テレスコープアレイ (TA) 実験の最近の結果	佐川 宏行	5
人事異動		13
ICRR-Seminar		13
ICRR-Report		13

研究紹介

LHC 時代における超対称性標準模型

伊 部 昌 宏

【東京大学宇宙線研究所】

はじめに

素粒子標準模型はその根幹である W 及び Z ボゾンの発見以降およそ30年に渡って数多くの非常に厳密な加速器実験による検証に耐えて来た。標準模型の残された最も重要な予言であるヒッグスボゾンは現時点では未発見ではあるが、現在稼働中の LHC 実験によって非常に近い将来発見されることが強く期待されている。

一方で近年の宇宙観測の発展によって現在の宇宙のエネルギーの大部分は未知の暗黒物質及び暗黒エネルギーによって占められていることが明らかになって来ている。それらの未知の物質は標準模型には含まれていないことから標準模型を超えた理論の存在が示唆されている。

また、素粒子標準模型には後述の理論的考察から不満足な点があり、標準模型を補完するさまざまな

模型が考案されている。その中でも特に超対称性を持つ様に拡張されたいわゆる超対称性標準模型は最も有力な模型の一つであると考えられている。

時空の対称性としての超対称性

もちろん標準模型を超える模型がどのような模型であるのかを決定することは実験的検証を持ってしてのみ可能である。しかしながら、超対称性はそれ自体が非常に特別な対称性であることを述べておく。超対称性は単に新しい素粒子模型が持ち得る対称性であるということ以上に深淵な意味を持つ対称性なのである。

では超対称性はどう特別なのだろうか？そもそも超対称性はボゾンとフェルミオンの入れ替えに対応する対称性である。ボゾンとフェルミオンは異なるスピンを持つ、即ち空間回転対称性に対して異なった振る舞いをする。従って、それらを結びつける超

対称性は必然的に時空の対称性であるローレンツ対称性と非可換であるということになる。つまり超対称性は拡張された時空の対称性ということが出来る。従って、超対称性の発見はローレンツ対称性の発見に匹敵する発見と考えることが出来る [1]。

階層性問題と超対称性

上述の様に超対称性は非常に普遍的な時空の対称性ではあるのだが、それだけでは単に理論的な可能性の一つに過ぎない。では超対称標準模型がなぜ標準模型を補完する最も有力な候補の一つと考えられているのだろうか？

理論的な側面からみた標準模型の最も不満足な点はそれが基づいているゲージ理論の構造である。標準模型では自然界の重力を除く3つの力である強い、弱い、電磁相互作用が3つのゲージ対称性による相互作用として記述されている。しかしながら、それぞれが独立のゲージ理論であるため、理論には3つ独立の結合定数が必要となる。このことは、素粒子理論の究極の目標といえる相互作用の統一的理解という観点からすると不満足である。

この不満足な点を解消する非常に魅力的なアイデアとして大統一理論が考案されている。大統一理論では3つの独立なゲージ対称性がより大きな1つのゲージ対称性に埋め埋め込まれる。ゲージ対称性が1つに統一された結果、3つの独立のゲージ結合定数も1つのゲージ結合定数に統一されることになる。

大統一理論は一見すると標準模型の観測と矛盾している。標準理論の強い、弱い、電磁相互作用の(より正確には弱い相互作用と電弱相互作用は互いに混ざっている)3つのゲージ結合定数 g_3, g_2, g_1 を現在の実験のエネルギースケールで観測すると、 $g_3 > g_2 > g_1$ となって異なっており統一理論で期待される $g_3 = g_2 = g_1$ は満たされていない。しかしここで注意しなければならないことは、ゲージ結合定数は繰り込み群の効果によって測定エネルギースケールと共に変化していくという点である。そして非常

に興味深いことに標準模型に基づいて g_3, g_2, g_1 を高エネルギー領域に外挿していくと g_3 が最も早く小さくなっていき、 g_2 がそれに次いで小さくなり、 g_1 はむしろ大きくなっていくことが分かる。つまり現在の実験のエネルギースケールで $g_3 > g_2 > g_1$ だった3つの結合定数が高エネルギー領域では互いに近づいて行くことが期待され、高いエネルギー領域において大統一理論が実現されていることが示唆されているのである。

図1に標準模型における3つの結合定数のエネルギー依存性を示す。現在の実験のエネルギースケール(100GeV程度)において $g_3 > g_2 > g_1$ であった結合定数が遥かに高いエネルギースケール(10^{14-15} GeV)ではそれぞれ近い値になることが分かる。このことから大統一理論が高いエネルギースケール(10^{14-15} GeV)において存在することが強く期待されている。

このように大統一理論が非常に高いエネルギースケールで実現されているという可能性が観測されたゲージ結合定数の値と繰り込み効果によって支持されているということは標準模型を超える物理についての非常に重要なヒントになっていると考えられている。しかしながら、標準模型よりも基本的な模型がW及びZボゾンの質量スケールよりも遥かに高いエネルギー領域に存在すると次の様な困難が生じる。大統一理論が高いエネルギーで実現しているということはそのゲージ対称性が標準理論の3つのゲージ対称性に破れている必要がある。それに伴い、統一理論におけるW及びZボゾンに対応する非常に重い粒子の存在が予言される。これは統一理論の立場から見ると、観測されているW及びZボゾンの質量を説明するためには理論に非常に小さいパラメータ

$$M_{W,Z}^2 / M_{GUT}^2 \sim 10^{-26} \ll 1$$

が必要になることを意味する (M_{GUT}^2 は統一理論の質量スケール)。場の量子理論では、一般に、あるパラメータの大きさはそのパラメータを零にとった極限で新しい対称性が現れる場合以外ではあまり小さくならない。そのため、W及びZボゾンの質量を説明するための小さなパラメータを説明するには何らかの対称性が必要となる。しかしながらそのような対称性は標準模型には存在しない。これが標準理論と統一理論の間のゲージ階層性問題と呼ばれる問題である。

この問題は、標準模型が超対称性をもつように拡張することによって解決することが出来る。超対称標準模型においては、超対称性が完全に成り立って

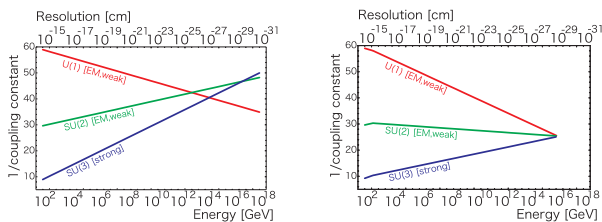


図1：ゲージ結合定数(の逆数)のエネルギー依存性。
 (左) 標準模型 (右) 超対称標準模型。ゲージ結合定数は高エネルギー領域で互いに近づいて行く。特に超対称標準模型では非常に良く一致する。

いる極限でW及びZボゾンの質量が零となるので、統一理論の質量スケールに比べて非常に小さいことを自然に説明出来ることになる。

では具体的にはどのように標準模型は超対称化されるのだろうか？先にも述べた様に超対称性はボゾンとフェルミオンの入れ替えに対応する対称性である。よって例えば電子に対してスピン0をもつ超対称対とよばれる新粒子、超対称粒子、を新たに理論に導入する必要がある。その他にも、クォークやゲージ粒子等標準模型を構成する粒子それぞれにスピンが1/2異なる超対称粒子を導入することで超対称標準模型を実現することが出来る。

このように超対称粒子を導入することで標準模型は簡単に超対称化することができるのだが、導入された超対称粒子は未だ実験的に観測されていない。このことは超対称性がある程度破れており、超対称対がもとの標準模型の粒子たちよりも重いことを意味する。一方でW及びZボゾンの質量の“小ささ”を説明するためには超対称性はあまり大きく破れているわけには行かない。結果として、超対称対の質量はTeVスケール程度であることが期待されている。このエネルギースケールは今正にLHC実験が到達しているエネルギー領域である。このことから超対称性標準模型はLHCで発見される最も有力な候補の一つと考えられているのである。

超対称標準模型の検証

以上述べて来た様に超対称標準模型は非常に有力であるが、もちろん実験的な検証が必要である。上に述べた様に超対称粒子の質量はTeV程度であると期待されていることから、LHC実験で超対称粒子が直接的に発見される可能性は十分にある。特に、LHCはハドロンコライダーであるため、強い相互作用を持つ超対称粒子（クォークおよびグルーオンの超対称対）が大量に生成されることが期待されるからである。ただし、超対称標準模型には数多くのバリエーションが存在するため、具体的なシグナルはどのタイプの超対称標準模型かに依ることになる[2]。

例えば、多くのタイプの超対称標準模型には安定

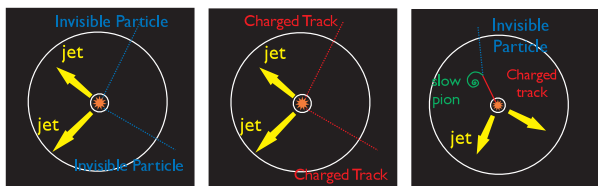


図2：超対称粒子生成イベントの概略図。

検出器の断面から見たもので、中心が加速器ビームの衝突点。

で中性な超対称粒子（ニュートラリーノ）が含まれている。そのような場合、LHCで生成されたクォークおよびグルーオンの超対称対は直ちに標準模型の粒子を放出しながら安定なニュートラリーノへと崩壊する。ニュートラリーノは中性でかつ強い相互作用を持たないのでLHCの検出器には掛からない。よってこのタイプの超対称標準模型における超対称粒子の生成過程はLHCにおいてはエネルギー運動量の非保存として検出されることになる（図2）。

一方別なタイプの超対称標準模型では、安定な中性粒子（この場合は重力子の超対称対グラヴィティーノがそれに相当する）を含むものの、グラヴィティーノへの崩壊寿命が長く電荷を持つ超寿命な超対称粒子が存在する場合がある。この場合、LHCで生成されたクォークおよびグルーオンの超対称対はその超寿命な電荷を持つ粒子へと崩壊することとなる。その荷電粒子の寿命が十分長い場合には超対称対生成のイベントは検出器に電荷の軌跡を残すことになる。従ってこのタイプの模型では超対称対の生成イベントを電荷の軌跡を探すことで見つけることが出来る。さらに電荷の軌跡からその準安定粒子の質量が直接観測出来るため、その背後に存在する模型の構造を詳細に調べることが出来る[3]。

この他にも、興味深い可能性として安定で中性な超対称粒子とそれより少しだけ重い荷電超対称粒子を持つ様な模型が存在する。この模型では荷電超対称粒子が準安定となるが、その準安定粒子の多くが検出器の中で崩壊する。そのためイベントとしては消失もしくは折れ曲がりのある電荷の軌跡が生じることとなり、非常に特徴的なシグナルとして検出されることとなる[4]。

このように超対称粒子の検出には模型ごとにさまざまな考察が必要では有るが、多くの有力な模型についてはLHCで数年ないし10年以内に検証可能であると考えられている。

ヒッグス粒子の質量と超対称標準模型

上で述べた様に超対称標準模型には様々なタイプが存在するが、それらの多くの模型に共通する予言は、ヒッグス粒子の質量である。超対称標準模型ではヒッグス粒子の質量がZボゾンの質量と比べてあまり重くなれないことが分かっている。多くの模型において、超対称粒子の質量スケールがTeV程度だとするとヒッグス粒子の質量は125-130 GeV以下に予言される。ある種の超対称標準模型ではさらに厳しい上限が予言される模型もある。

LHCでは、そのような質量領域のヒッグス粒子

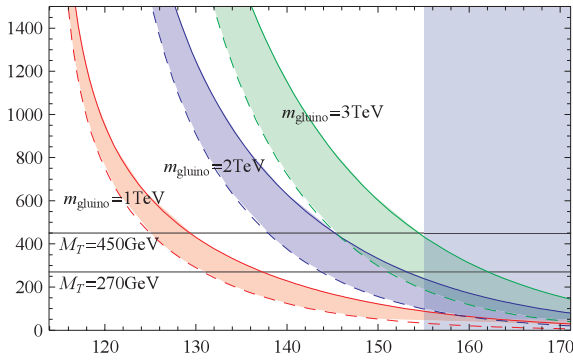


図3：超対称標準模型において重いヒッグスを説明するのに必要な余分な粒子の質量。横軸はヒッグス質量。それぞれのバンドはグルーオンの超対称対の質量が1 TeV、2 TeV、3 TeVの場合についてプロットしてある

の検出に必要なデータが間もなく集まることが期待されている。従って、ヒッグスの質量の測定結果からどのようなタイプの超対称標準理論は排除出来るかということを議論することが可能となる。

ではヒッグス粒子が上述の上限より重かった場合はどうであろうか？この場合、超対称標準模型には何らかの変更が必要となる。例えば、標準模型の粒子に超対称対を導入する以上に新しい粒子を加えたりすることでヒッグスの質量を上限以上にすることが可能である。逆に言えば、ヒッグス粒子の質量の測定を通して、超対称標準模型にさらに余分な粒子を加える必要があるかどうかをプロブ出来るということになる。図3に、ヒッグス粒子が上限より重かった場合、どのような質量の余分な粒子が必要かを解析した我々の最近の結果をのせる [5]。図からヒッグスが上限よりも重いほど軽い余分な粒子が必要になることが分かる。

このように、ヒッグスの質量は超対称性標準模型を考察して行く上で非常に重要な役割を果たす。近い将来決定されると期待されているヒッグス粒子の質量によっては今までに考えられてこなかったタイプの超対称標準模型が示唆されることになる可能性も十分に考えられる。

おわりに

以上述べて来た様に、超対称性は非常に普遍的な対称性であり、それに基づく超対称標準模型は、LHCによって検出可能な領域にあることが期待されている非常に有力なモデルである。そこには様々な

バリエーションが存在し、それぞれの場合で様々な考察を経て検証して行くことが必要である。

上で述べた様な実験的検証に加えて、超対称性理論には他にも様々な考察対象が存在する。まず挙げなければならない課題は宇宙論への影響である。例えば上述の中性で安定な粒子は暗黒物質の有力な候補であると考えられている。また、その他のビッグバン元素合成への影響から超対称標準模型にはさまざまな制限が課されている [6]。

また、超対称標準模型にさまざまなバリエーションが存在する理由は、モデルの構造が超対称性の破れの構造に依っていることに起因する。従って超対称標準理論の基本的な構造を理解する上で超対称性の破れの機構を理解することは非常に重要である。

そのような超対称性の破れは非常に高いエネルギースケールで起こっていることが期待されているため加速器実験等で直接検証することは将来にわたっても容易ではない。しかしながら、理論的考察および宇宙論的考察を重ねることで様々な制限を課すことが可能であり [7, 8]、現在も様々な考察をすすめている。

現在、素粒子理論はLHCの稼働や、さまざまな宇宙観測の結果から非常にエキサイティングな時代に突入しているといえる。その中で、標準模型を超える理論（特に超対称標準理論を中心に）を素粒子論、宇宙論、そして実験を組み合わせ考察し新しい理論モデルの構築に貢献して行きたいと考えている。

参考文献

- [1] 超対称性のテキストとして例えば、J. Wess, J. Bagger, Princeton, USA: Univ. Pr. (1992) 259 p.
- [2] レビューとして例えば、G. Weiglein et. al, Physics Report 426, 47-358 (2006).
- [3] M. Ibe, R. Kitano, JHEP 0708, 016 (2007).
- [4] M. Ibe, T. Moroi, T.T. Yanagida, Physics Letter, 355-360 (2007).
- [5] J.L. Evans, M. Ibe, T.T. Yanagida, [arXiv:1108.3437 [hep-ph]].
- [6] M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, Physical Review D71, 083502 (2005).
- [7] M. Ibe, Y. Shinbara, T. T. Yanagida, Physics Letter B 639, 534-540 (2006).
- [8] K. Hanaki, M. Ibe, Y. Ookouchi, C. S. Park, JHEP 1108, 044 (2011).

研究紹介

テレスコープアレイ (TA) 実験の最近の結果

佐川 宏 行

【東京大学宇宙線研究所】

1. はじめに

TA [1] 実験の目的は、最高エネルギー宇宙線のエネルギー、到来方向と組成を測定することにより、その起源を探り、宇宙の極高現象を解明することである。今回の記事では、2011年8月に北京で開かれた宇宙線国際会議においてTAグループが発表した結果を紹介する。

2. TA 実験の装置

TA はプラスチックシンチレータ地表粒子検出器 (SD) アレイと大気蛍光望遠鏡 (FD) からなる最高エネルギー宇宙線観測装置である。TA サイトは、ユタ州ソルトレイクシティの南方200kmの西部砂漠地帯 (北緯39.3度、西経112.9度、標高約1400m) に位置する。TA の建設は、主に科学研究補助金 (特定領域研究) 究費補助金 “最高エネルギー宇宙線の起源” (平成15年度～平成20年度) と米国国立科学財団 (NSF) の予算によって行われた。3つの大気蛍光望遠鏡ステーションすべてによる観測は2007年11月に開始した。2007年2月に地表粒子検出器アレイの主要な建設が終わり、2008年3月にフル稼働を開始した。TA は、米国、ロシア、韓国、日本との国際的な協力によって運用されている。現在日本側は科学研究費補助金 (特別推進研究) “最高エネルギー宇宙線で探る宇宙極限現象” (平成21年度～平成25年度) によって運用を行っている。

2.1 地表粒子検出器アレイ

507台のプラスチックシンチレータカウンタを約680km²の領域に1.2km 間隔で碁盤の目状に設置して、地表粒子検出器アレイを構成している。

カウンタは、1層の厚さが1.2cmでサイズが合計で3m²のプラスチックシンチレータ2層を上下に重ね合わせ、2層の間に1mm厚のステンレススチールの板を挟んで構成される。それぞれの層の溝には直径が1mmで長さが5mの104本の波長変換ファイバーが張られている。ファイバーの両端は束ねられ、それぞれの層からのシンチレーション光を

光電子増倍管に集光する。

各SDの電力はソーラーパネルとバッテリーによって供給される。各SDのエレキモジュールと通信塔に設置されたトリガー決定・データ収集用モジュールの間の通信は無線LANによって行われる。

2.2 大気蛍光望遠鏡

TAには3つのFDステーションがある。南東部と南西部のFDステーションは、それぞれBlack Rock Mesa (BRM) およびLong Ridge (LR) と呼ばれるサイトに位置し、日本側が新規に望遠鏡を建設した。北部のFDステーションはMiddle Drum (MD) と呼ばれるサイトに位置し、米国側が建設した。

BRMとLRの各FDステーションには、それぞれ12台の反射望遠鏡が設置された。地表粒子検出器アレイの中心の方向を向いて、仰角方向に3度から33度、方位角方向に108度の視野をもつ。

MDのステーションはHiRes-1望遠鏡を再利用して建設された。14台の反射望遠鏡で仰角方向に3度から31度、方位角方向に114度の視野をもつ。

大気モニターのために、3つのFDステーションから等距離 (約21キロ) に位置するところに中央レーザー施設 (Central Laser Facility: CLF) を建設した。標準光源としてレーザーを垂直射出して、その側方散乱を大気蛍光望遠鏡で観測して大気モニターを行う。

また大気モニターのためにBRMステーションにLIDAR (Light Detection And Ranging) システムを設置した。LIDARは、パルス状に射出するNd:YAGレーザーとその散乱光を受光する専用の望遠鏡から構成される。その後方散乱光を専用望遠鏡で受光し、消散係数を求める。

夜空の雲を監視するために、BRMステーションに赤外線CCDカメラ (AVIO TVS-600S) を設置し、FDの観測中に1時間ごとにデータを取得している。また、BRMステーションとLRステーションに魚眼レンズを付けたCCDカメラ (WAT-120N+) を設置し、ほぼ全天を1分毎に撮影している。

観測現場でend-to-endで大気蛍光望遠鏡のエネル

ギー較正をするために、小型電子線形加速器 (Electron Light Source : ELS) [2] を BRM FD サイトに設置した。ELS を用いて 40 MeV のエネルギーをもつ電子 10^9 個からなるビームを $1 \mu s$ の時間幅、0.5Hz の頻度で垂直射出する。FD ステーションから 100 メートル先から 1 パルスあたり合計 4×10^{16} eV のエネルギーを射出することになるので、10km 先の 4×10^{20} eV の空気シャワーに対応する。2010年 9月 3日に初めて ELS から大気中に電子ビームを射出し、その疑似空気シャワーを FD で撮像することに成功した。今後 GEANT シミュレーション [3] によって期待されるエネルギーと観測された大気蛍光信号を比較することによって大気蛍光望遠鏡の較正を行う。図 1 に電子ビームによる疑似シャワーの像を GEANT モンテカルロシミュレーションによる像とともに示す。

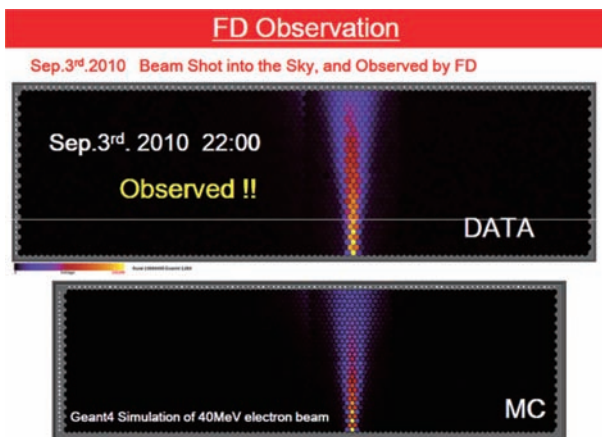


図 1 : 2010年 9月 3日に初めて BRM FD サイトで ELS から射出した電子ビームで発生した疑似シャワーによる大気蛍光を FD で取得した画像 (上) と GEANT モンテカルロシミュレーションによる画像 (下)。

2. 3 TA 観測の現状

図 2 に 2008年 3月 から 2011年 3月 までの期間における SD の稼働率を示す。測定器の保守や悪天候が原因で稼働率が減少する期間があり、平均稼働率は

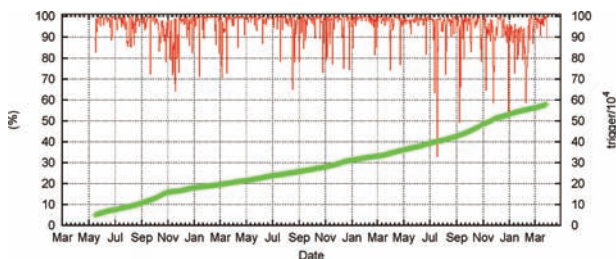


図 2 : 2008年 3月 から 2011年 3月 までの期間における SD の稼働率 (赤線) とトリガーされた空気シャワーイベントの積算数 (緑線)。

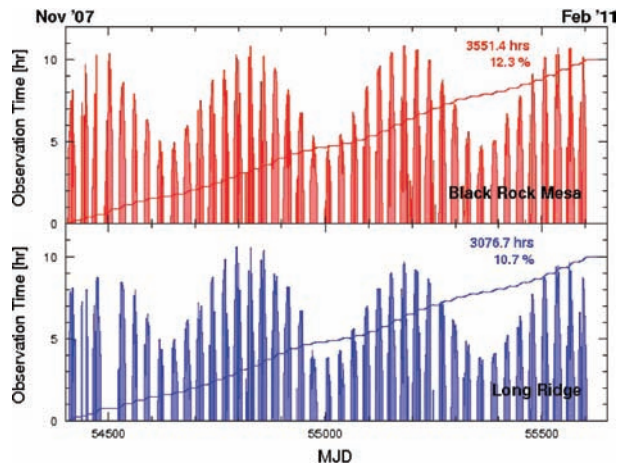


図 3 : 2007年 11月 から 2011年 2月 までの期間における FD の一晩あたりの観測時間と積算観測時間。上図が BRM サイトの観測時間で、下図が LR サイトの観測時間を示す。横軸は修正ユリウス日 (MJD) である。

約 95% であった。図 3 に 2007年 11月 から 2011年 2月 までの期間における BRM と LR の FD の観測時間を示す。月のない夜間に観測し、冬季の観測時間は、夏季に比べて長くなる。BRM サイト (LR サイト) の観測時間および稼働率は 3551時間 (3076時間) および 12.3% (10.7%) であった。

3. エネルギースペクトルの結果

Pierre Auger グループと HiRes グループは、大気蛍光望遠鏡によって決定されるエネルギースケールによってエネルギースペクトルを求め、GZK カットオフと一致する急激なフラックスの減少があるという結果を発表した [4, 5]。ここでは MD 単眼 FD 解析、ハイブリッド解析、および SD 解析による TA のエネルギースペクトルを紹介する。

3. 1 MD 単眼 FD 解析によるエネルギースペクトル

超高エネルギー宇宙線が大気中に入射してく空気シャワーを起こす過程において、空気シャワーは縦方向に発達していく。FD で取得した縦発達方向のプロファイルと光量からエネルギーを求める。TA の MD サイトには HiRes で使用した FD を移設した。FD の配置やトリガー条件の違いなど、最小限の変更を HiRes で使用した解析プログラムに加えて解析を行った。したがって、MD サイトで取得された FD データの解析によって、TA と HiRes の間で直接エネルギースペクトルの比較ができる。2007年 12月 から 2010年 12月 までの 3年間にわたって収集された MD のデータを用いて、単眼解析により pre-

liminary なエネルギースペクトルを求めた (図4)。MDの単眼解析によるエネルギースペクトルは、HiResのスペクトルとよく一致している。(MD FDデータの解析に関しては [6] を参照。)

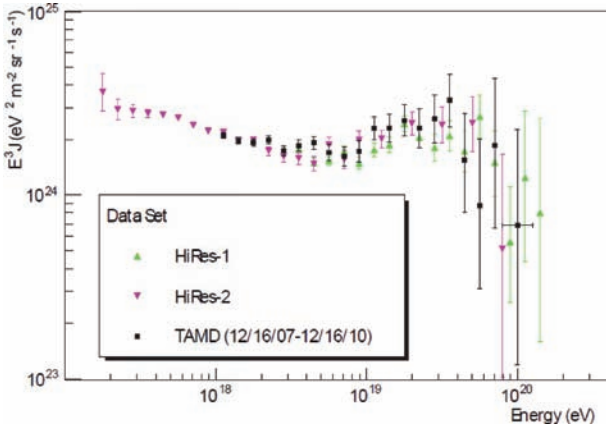


図4：大気蛍光望遠鏡の単眼解析によるエネルギースペクトル。HiRes望遠鏡を移設したTAのMDサイトのデータ (■) による preliminary なエネルギースペクトルをHiRes-1 (▲) とHiRes-2 (▼) のエネルギースペクトルとともに示す。

3.2 ハイブリッド解析によるエネルギースペクトル

FDとSD両方によって検出された事象(ハイブリッドイベント)に対して、FDとSDの情報それぞれを用いて再構築された結果を比較することができる。さらに、ハイブリッドイベントに対しては、FDとSDの両方の情報を使用して、FD単眼解析よりも空気シャワー事象の再構成を改善することができる。ここではSDの情報として、空気シャワーコア付近の1つのSDのタイミングを使用する。FDのデータのみを使用する場合、aperture(観測面積×立体角)は一次宇宙線のエネルギーに依存するが、ハイブリッド解析では、SDアレイのサイズによってTAの場合には 10^{19} eV以上のエネルギーでapertureが一定であるというメリットがあり、apertureの系統的誤差が小さくなる。2008年5月から2009年9月までの期間において、FD事象とSD事象のトリガー時間差が $200\mu\text{s}$ 未満であるという条件でハイブリッドイベント候補を探した。純粋な陽子に対してQGSJET-IIモデルを用いたモンテカルロシミュレーションコードCORSIKA[7]で空気シャワーのシミュレーションを行い、GEANT4を用いて検出器のシミュレーションを行った。全期間に対する較正值を用いて、イベントカット後の有効apertureを求める。ハイブリッド解析でのexposureは、 10^{19} eVで約 $6 \times 10^{15} \text{ m}^2 \text{ sr s}$ であった。再構成してイベント

カットした後、2242事象が残った。全系統的誤差は、エネルギーの測定に対して21%であった。

ハイブリッド解析による preliminary なエネルギースペクトルを図5に示す。この解析によるエネルギースペクトルは、TAで他の方法で測定されたスペクトルと一致している。(ハイブリッド解析に関しては [8] を参照。)

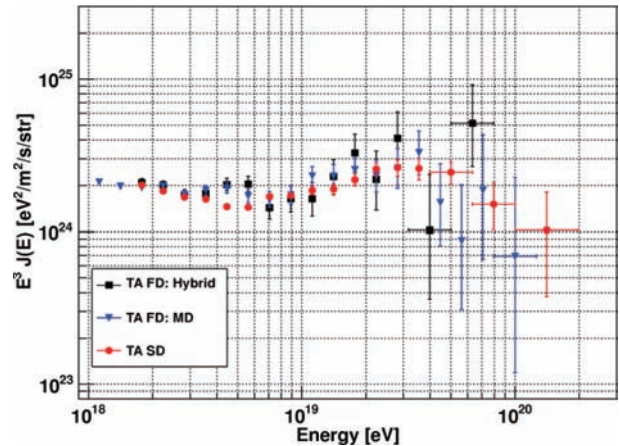


図5：ハイブリッド解析 (■)、MD単眼FD解析 (▼)、“FDエネルギーにスケールした”エネルギーを用いたSDデータ解析 (●)によるTAの preliminary なエネルギースペクトル。

3.3 SDのデータを用いたエネルギースペクトル

超高エネルギー宇宙線が大気中に入射して空気シャワーを起こす過程において、空気シャワーは横方向に広がりをもつ。SDアレイを用いて、地表に到達した粒子を観測する。

2008年5月から2011年5月までのSDデータを用いてエネルギースペクトルを測定した。そのexposureは約 $2700 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$ であった。

SDを用いた空気シャワーの再構成には、空気シャワーからの粒子の横方向の密度分布を決定するためのフィットとgeometryを決定するためのフィットの2種類がある。データを用いて求めたフィットパラメータを使ってモンテカルロデータに適用したフィッティングはデータと同じように合っている。

エネルギーを測定するために空気シャワーのコアから800mの距離での荷電粒子数密度(S_{800})を使用する。モンテカルロシミュレーションを用いて一次宇宙線のエネルギーと S_{800} と天頂角の相関関係を求める。この関係を観測データの S_{800} の値に適用して、一次宇宙線のエネルギーの最初の推定に使用する。

次にハイブリッドイベントを使用して、FDエネルギーとSDエネルギーの比較を図6に示した。図

6は、SDエネルギーが、FDのエネルギーよりも27%大きいことを示している。TAでは、FDのエネルギースケールを用い、SDのエネルギーは、モンテカルロシミュレーションを用いた最初のエネルギー推定値を27%だけスケールする。

再構成の後、45度以下の天頂角に対して10997イベントが残った。モンテカルロシミュレーションから得られた有効apertureを使用して、各エネルギー区分のイベントの数からエネルギースペクトルを求める。TAの地表粒子検出器を用いたpreliminaryなエネルギースペクトルは前に挙げた図5に示されている。3つのエネルギー領域にpower law関数でフィットを行ったところ、 $10^{19.68}$ eVと $10^{18.69}$ eVにスペクトルの折れ曲がりが見られた。

$10^{19.68}$ eVで折れ曲がりがなく連続的にスペクトルが続く場合に期待されるイベント数は54.9であった。これに対して $10^{19.68}$ eV以上で観測されたイベント数は28であり、 3.9σ のsignificanceでGZK suppression [9, 10]の予想と一致するflux suppressionが見られた。(SD解析に関しては [11]を参照)

3つの異なる方法によってTA実験で得られたpreliminaryなエネルギースペクトルを他の実験のスペクトルとともに図7に示す。

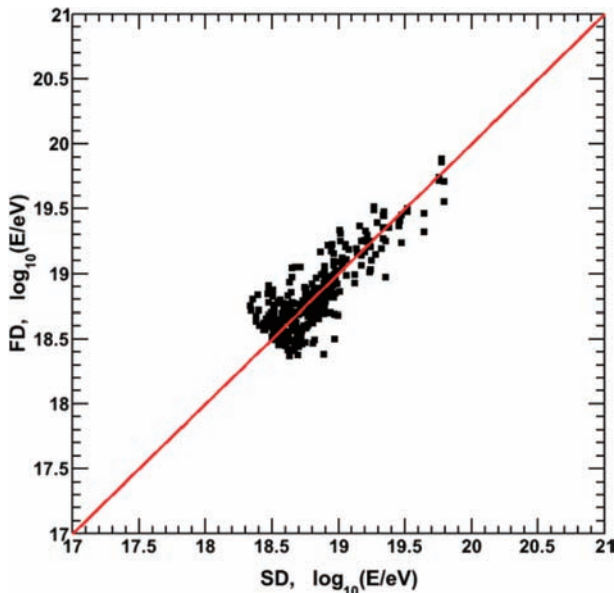


図6：ハイブリッドイベントに対して、縦軸にFDエネルギー (E_{FD}) の対数をと、横軸にSDエネルギー (E_{SD}) の対数をとって比較したpreliminaryな結果。横軸のSDエネルギー (E_{SD}) は S_{800} に対してモンテカルロシミュレーションを用いて求めたSDエネルギーを1.27で割った値である。赤線は、 $E_{SD} = E_{FD}$ に対応する。

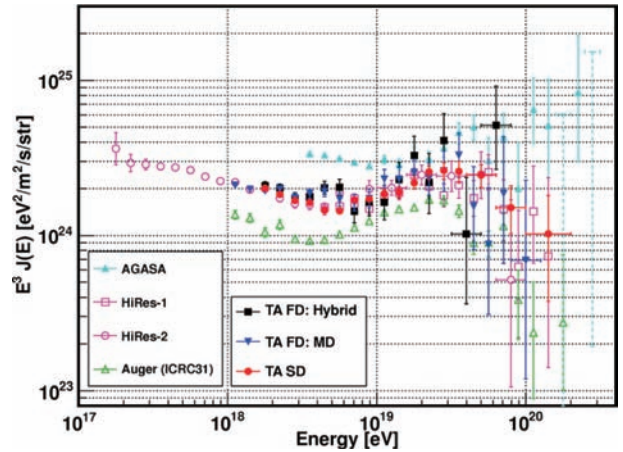


図7：他の実験のエネルギースペクトルとTAのpreliminaryなエネルギースペクトル。TAに対しては、ハイブリッド解析 (■)、MDサイトのデータを使った単眼FD解析 (▼)、SD解析 (●) によるエネルギースペクトルを示す。他の実験として、AGASA (▲)、HiRes-1 (□)、HiRes-2 (○)、Pierre Auger (△) のエネルギースペクトルを示す。水色の点線のバーは90%CLでのAGASAの上限を示す。

4. 空気シャワーの最大発達の深さ (X_{max}) を用いた質量組成の測定

超高エネルギー宇宙線の質量組成およびそのエネルギー依存性を測定することは、超高エネルギー宇宙線の起源および伝播の解明に重要である。宇宙線が大気原子核と相互作用する断面積は入射宇宙線の種類によって違うので、空気シャワーの縦方向発達に核種依存性がある。

極高エネルギー領域における組成に関して、Pierre Augerグループの結果が重い組成への変化を示唆している [12] のに対して、HiResの結果は陽子の組成と一致している [13]。

BRMとLRのFDステーションで同時観測して再構成したデータ (ステレオイベント) に対して、 X_{max} の分布を求めた。ステレオイベント再構成では宇宙線の到来方向が精度よく決まるので、空気シャワーの縦方向発達を詳しく調べることができる。そこで2007年11月から2010年9月までのデータを用いて、質量組成の解析を行った。

モンテカルロシミュレーションのデータは、陽子と鉄、およびQGSJET-01、QGSJET-IIとSIBYLLの相互作用のモデルを用いてCORSIKAによって生成された。測定された X_{max} の分布はFDの視野の制限から生成された X_{max} の分布とは違っている。この違いは、モデルに依存するため、観測データとモンテカルロシミュレーションのデータから再構成された X_{max} を同じ解析手順を適用して比較する。TA

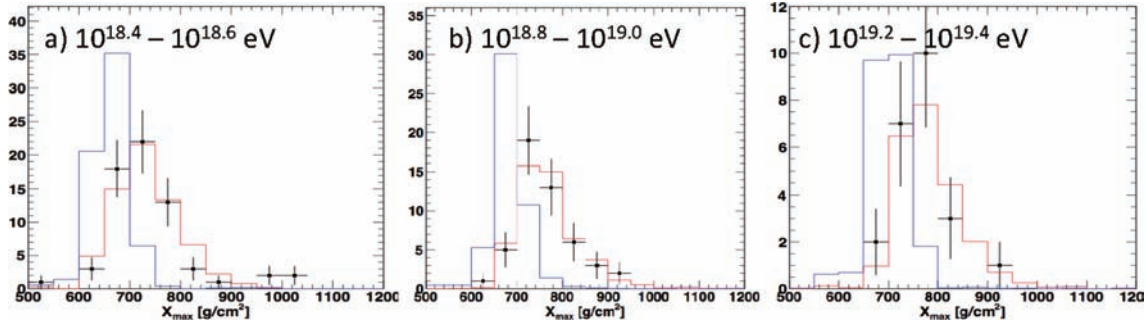


図8 : a) $10^{18.4}-10^{18.6}$ eV, b) $10^{18.8}-10^{19.0}$ eV, c) $10^{19.2}-10^{19.4}$ eV のエネルギー領域に対する再構成された X_{max} の分布。黒いデータ点は TA のステレオデータによる preliminary な分布である。ヒストグラムは、QGSJET-01 のハドロニック相互作用モデルで、赤色と青色は、それぞれ陽子と鉄の場合に期待される X_{max} 分布である。

のステレオデータに対する X_{max} の分布の例を QGSJET-01 モンテカルロシミュレーションのデータとともに図8に示す。観測されたデータの X_{max} の分布は、陽子のモンテカルロシミュレーションの分布とよく一致している。

$10^{18.2}$ eV から $10^{20.0}$ eV のエネルギー範囲における TA のデータに対するエネルギーと平均 X_{max} との関係をもンテカルロシミュレーションとともに図9に示した。TA のデータは、純粋な陽子の予測とよく一致している。(質量組成の解析に関しては [14] を参照。)

5. 超高エネルギーガンマ線の探索

これまで最高エネルギー宇宙線の起源の解釈としていくつかのモデルが提案された。AGN のような非常に活動的な領域で宇宙線が生成され、最高エネルギー宇宙線まで加速されている可能性がある (ボトムアップモデル)。最高エネルギー陽子宇宙線が GZK 過程を通して π^0 共鳴生成をし、その崩壊から、 10^{19} eV 付近のエネルギーをもつ超高エネルギーガン

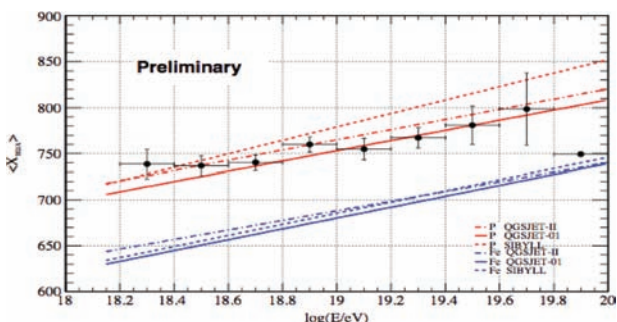


図9 : 宇宙線のエネルギーの関数として示した再構成された X_{max} の平均値。黒丸は preliminary な TA のステレオデータの結果である。赤線のセットは QGSJET-01 (実線)、QGSJET-II (一点破線) と SIBYLL (破線) のハドロニック相互作用モデルで純粋な陽子の場合に期待される関係である。青線のセットは、鉄の場合に期待される関係である。

マ線が生成されて地球で観測される可能性がある。また、 10^{19} eV 以上のエネルギーをもつ超高エネルギーガンマ線が、未知の超重粒子の崩壊によって生成される可能性もある (トップダウンモデル)。

10^{19} eV 以上のエネルギーをもつ超高エネルギーガンマ線が超高エネルギーハドロンよりも大気中深いところで相互作用することが期待される。その場合には、超高エネルギーガンマ線の地上付近の空気シャワーフロントの曲率は、ハドロンよりも大きくなり、ガンマ線とハドロンの識別ができると期待される。

2008年5月から2011年5月までに取得した SD データに対して空気シャワーフロントの曲率を求めて (図10)、 10^{19} eV、 $10^{19.5}$ eV および 10^{20} eV 以上のエネルギーをもつガンマ線の積分フラックスの 95%CL の上限値を他の実験の上限値とともに図11に示す [15]。

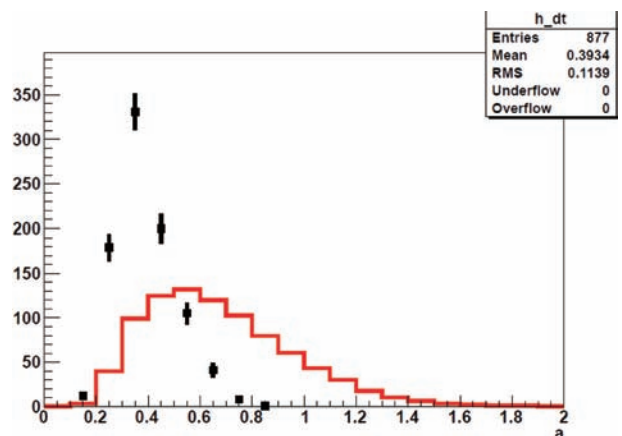


図10 : 天頂角が45度から60度までで、エネルギーが 10^{19} eV 以上の超高エネルギー宇宙線のシャワーフロントの曲率 (Linsley curvature パラメータ) の分布。黒印は TA データの preliminary な曲率分布である。ヒストグラムは、-2の冪指数をもつエネルギースペクトルで生成されたガンマ線の場合に期待される空気シャワーフロントの曲率の分布である。

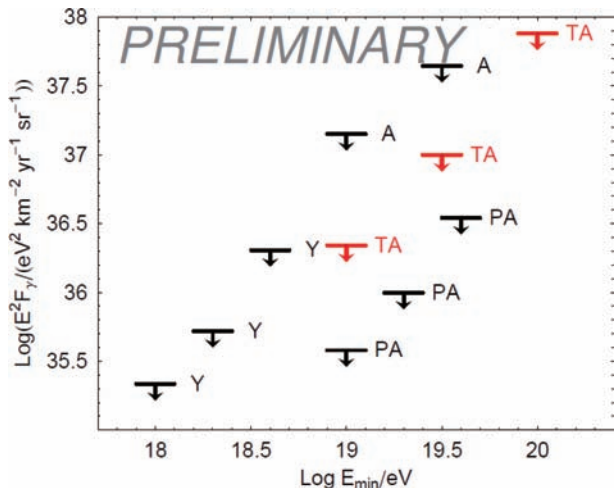


図11：超高エネルギーガンマ線の積分フラックスの95%CLの上限。赤印は、エネルギー閾値が 10^{19} eV、 $10^{19.5}$ eVおよび 10^{20} eVに対するTAのpreliminaryな上限値である。AはAGASA、PAはPierre Auger、YはYakutsk実験の上限値である。

6. 超高エネルギー宇宙線の到来方向

超高エネルギー宇宙線の起源を探索することはTAの重要な課題の一つである。2008年5月から2011年5月までにSDによって取得され、45度より小さい天頂角をもつ宇宙線データに基づいた超高エネルギー宇宙線を用いて、大規模構造 (Large-Scale Structure: LSS)、AGNとの相関、auto-correlationの解析を行った。

6.1 LSS との相関

LSS との相関に関し、Pierre Auger のデータを用いた異方性の結果が Kashti と Waxman によって議論された [16] が、HiRes のデータではその異方性は確認されなかった [17]。

TA は 2MASS の銀河の赤方偏移カタログ (XSCz) [18] を使用した。このカタログは、2MASS の photometric な測定あるいは分光学的な測定から導出された赤方偏移をもつ 2MASS Extended Source カ

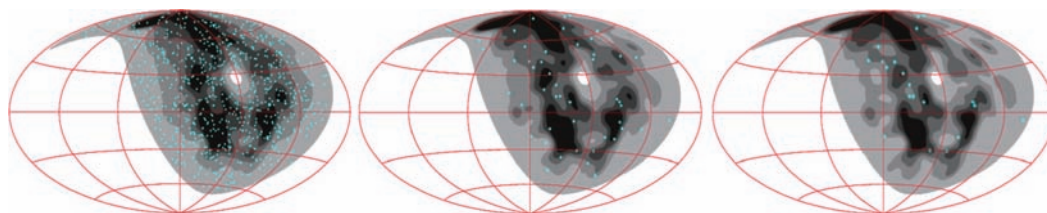


図12：TAのSDデータによる10EeV以上(左)、40EeV以上(中央)、57EeV以上(右)のエネルギーをもつ宇宙線の到来方向(水色のデータ点)とLSSのモデルから期待されるフラックスのスカイマップ。座標系は銀河座標系で、楕円の右端が銀河中心である。より濃い灰色の領域は、より大きなフラックスをもち、各領域は全フラックスの5分の1を含む。この図では、LSSモデルの分布を6度でsmearingしている。

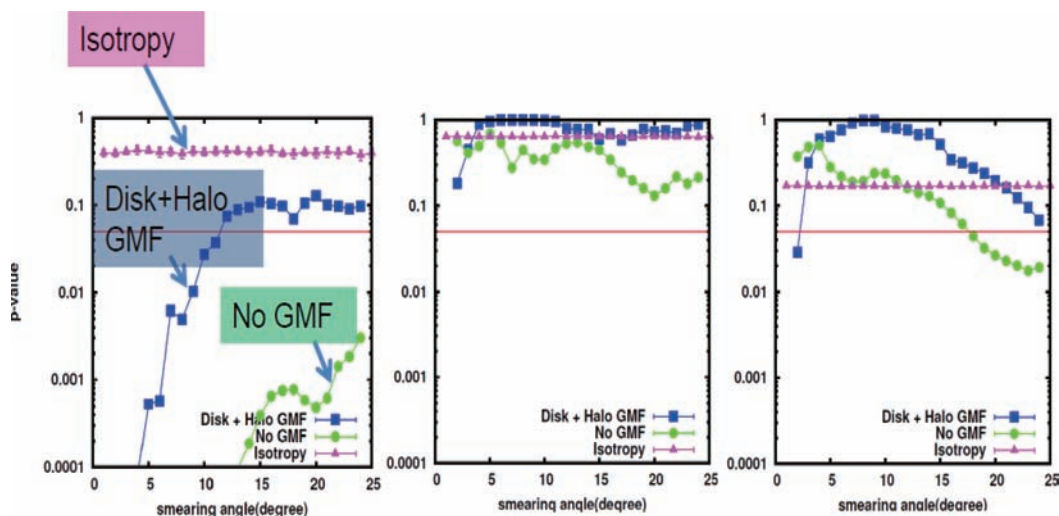


図13：Smearing angle を関数とした宇宙線の到来方向とモデルとの適合度(確率)。左図は10EeV以上、中央の図は40EeV以上、右図は57EeV以上のエネルギーをもつ宇宙線の場合である。桃色の線は等方的なモデル、緑線は銀河磁場なしのLSSモデル、青線はハローとディスクの銀河磁場ありのLSSモデルに対する確率である。

カタログ (XSC) から導き出されている。5Mpc から 250Mpc 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、最も正確な 3次元銀河分布の情報をもつ。超高エネルギー宇宙線が陽子であり、銀河系と銀河系外磁場の効果は Gaussian で smear された角度で近似されると仮定する。10EeV、40EeV および 57EeV のエネルギーの閾値に対して、以上を仮定して計算されたフラックスのマップを図12に示す。KS 検定の確率 (p 値) が 0.05 より小さい場合に、2つの分布が 95%CL で互換性がないとする。10EeV、40EeV および 57EeV に対する p 値を smearing angle の関数として図13に示した。40EeV、57EeV 以上では LSS モデルと一致し、10EeV 以上の場合は、強いハロー成分をもつ銀河磁場がある LSS モデルと一致している。等方的なモデルとはどのエネルギー閾値でも一致している [19]。

6.2 AGN との相関

Pierre Auger グループは 57EeV 以上のエネルギーをもつ超高エネルギー宇宙線の到来方向と近傍の AGN の方向が 3.1度未満で相関があると報告した [20]。しかし、HiRes グループは相関関係を確認できなかった [21]。AGN の仮説をテストするために、Veron 2006カタログ [22] にある近傍 (赤方偏移 z が 0.018 以下) の AGN の位置と TA の SD で観測した宇宙線の到来方向と比較した。AGN と宇宙線の到来方向の分離角度が 3.1度以内の宇宙線の数と観測した宇宙線の数の関係を図14に示した。TA の preliminary な結果は等方的なモデルと一致している [23]。

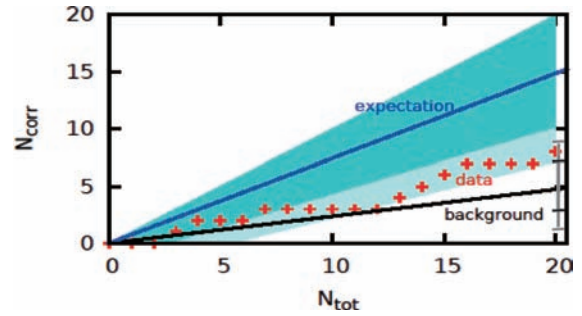


図14：到来方向が AGN の位置と 3.1度以内の相関がある TA で観測された 57EeV 以上のエネルギーをもつ宇宙線の数。横軸は観測されたイベント数を時系列で示し、縦軸は AGN と相関関係があるイベント数を時系列で示す。赤十字印は、TA の preliminary な結果である。黒線は等方的なモデルからの期待値で、青線は Pierre Auger グループの結果 [20] からの予測である。青緑色の部分は 1σ の領域で、水色の部分は 2σ の領域である。

6.3 auto-correlation

超高エネルギー宇宙線の到来方向に関しては、2.5度の角度スケールにおいてクラスタリングがあると AGASA 実験で示唆された [24, 25]。一方、HiRes の結果は等方的なモデルと一致している [26]。そこで 40EeV と 57EeV 以上のエネルギーをもつ TA のイベントに対して解析を行った。

図15に立体角で規格化された 40EeV および 50EeV 以上のエネルギーをもつ任意の 2つの宇宙線の分離角度の分布を示す。2.5度未満のペアの数は、40EeV 以上のエネルギーをもつイベントに対して、1.1組が等方的なモデルから期待されるのに対して、観測データではゼロであった。以上より、小さなスケール

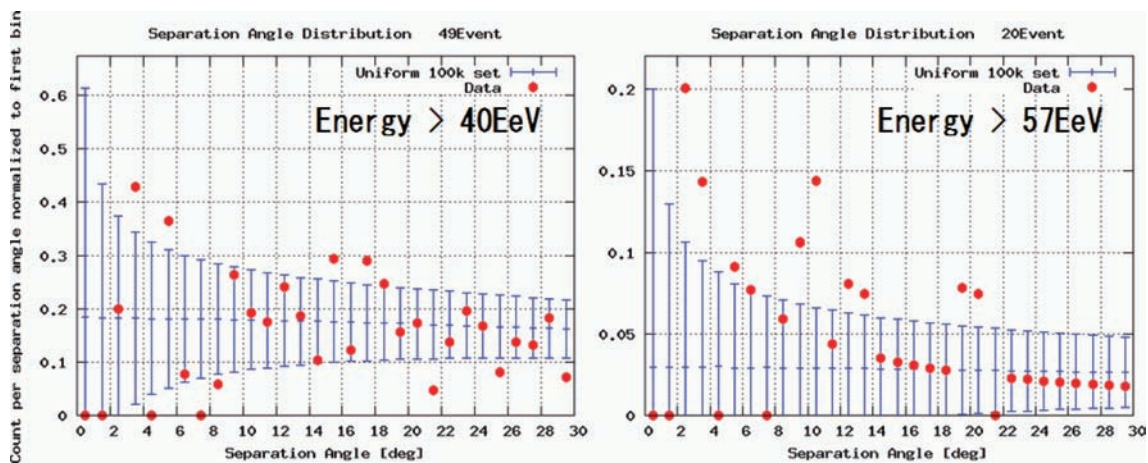


図15：40 EeV 以上 (左) および 50EeV 以上 (右) のエネルギーをもつ宇宙線に対して、任意の 2つの宇宙線に対する分離角度の分布。縦軸は立体角で規格化している。赤印が TA で観測されたデータによる preliminary な結果で、青印は等方的なモデルに対応する。誤差棒は 68%CL でのポアソン上限と下限を表す。

ルでの有意な auto-correlation は見つからなかった [23]。

7. 展望

今後小型電子加速器 (ELS) を使った大気蛍光望遠鏡の end-to-end の絶対的なエネルギー較正を行うことによって、10% 程度以下の系統的誤差で空気シャワーのエネルギーを測定し、超高エネルギー宇宙線のスペクトルを決定する。

超高エネルギー宇宙線のエネルギースケール、組成、異方性に関して、TA グループと Pierre Auger グループの結果の食い違いを理解する必要がある。Pierre Auger グループとも議論していき、2012年2月に開かれる第2回超高エネルギー宇宙線国際会議 (UHECR2012) においてさらに理解を深める。

将来の大規模超高エネルギー宇宙線観測所に向けて、SD あるいは FD による拡張の検討に加えて、電波技術による超高エネルギー宇宙線の検出が広く注目を集めている。空気シャワーからの電波エコーの検出に関しては、送信機と受信機を TA サイトに設置し R&D を開始した [27]。空気シャワーが誘起した自由電子が中性の原子と衝突する際の制動放射による電波の検出に関しても、この秋に TA サイトにおいてまず ELS を使用した R & D を行う予定である [28]。

10^{17} eV 以下のエネルギー領域への TA の低エネルギー拡張 (TALE) 計画 [29] では、“second knee” を含む 10^{17} eV から 10^{18} eV 付近のエネルギー領域での宇宙線の起源が我々の銀河から銀河系外へ遷移しているかどうかを調べる。そのために宇宙線の組成とエネルギースペクトルの変化や異方性の測定を行う。また、LHCf 実験で、7 TeV+7 TeV の陽子同士の衝突実験では、一方の陽子の静止系で他方の陽子のエネルギーが 10^{17} eV であり、 10^{17} eV のエネルギーをもつ陽子宇宙線と比較できる。TA+TALE プロジェクトによって、超高エネルギー宇宙線に関する包括的な研究が $10^{16.5}$ eV から $10^{20.5}$ eV にわたる広いエネルギー範囲で可能となる。

今後 TA のデータ量を増やし、エネルギースペクトル、超高エネルギーガンマ線と超高エネルギーニュートリノを含む組成の解析、到来方向の異方性の解析より、超高エネルギー宇宙線の起源を探求し、宇宙の極高現象を解明する。

参考文献

[1] H. Kawai et al. (Telescope array Collaboration), Nucl. Phys. B Proc. Suppl., 2008, 175-176, 221-

226; H. Kawai et al. (Telescope Array Collaboration), J. Phys. Soc. Jpn, Suppl. A 79 (2009), 108; H. Sagawa for the Telescope Array Collaboration, Proc. 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland (2009).

- [2] T. Shibata et al., Nucl. Instr. and Meth. A 597 (2008) 61-66.
- [3] S. Agostinelli et al., Nucl. Instr. and Meth. A 506 (2003) 250.
- [4] R.U. Abbasi et al. (HiRes Collaboration), Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 101101.
- [5] J. Abraham et al. (Pierre Auger Collaboration), Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 061101.
- [6] D. Rodoriguez, Ph.D. thesis, University of Utah (2011).
- [7] Heck, D. et al., Report FZKA (1998) 6019.
- [8] D. Ikeda, Ph.D. thesis, University of Tokyo (2010).
- [9] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16, 748 (1966).
- [10] G.T. Zatsepin and V.A. Kuz' min, JETP Lett. 4, 78 (1966) [Pis' ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 4, 114 (1966)].
- [11] D. Ivanov et al. (Telescope Array Collaboration), Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).
- [12] J. Abraham et al (Pierre Auger Collaboration), Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 09110.
- [13] R.U. Abbasi et al. (HiRes Collaboration), Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 161101.
- [14] Y. Tameda, Ph.D. thesis, Tokyo Institute of Technology, 2010; Y. Tameda et al. (Telescope Array Collaboration), Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).
- [15] G. Rubtsov et al. (Telescope Array Collaboration), Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).
- [16] T. Kashti and E. Waxman, JCAP 05 (2008) 006.
- [17] R.U. Abbasi et al. (HiRes Collaboration) Astrophys. J. Lett. 71 B (2010) 64.
- [18] T. Jaretto, arXiv: astro-ph/0405069.
- [19] P. Tinyakov et al. (Telescope Array Collaboration), Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).
- [20] J. Abraham et al. (Pierre Auger Collaboration), Science 318 (2007) 939; J. Abraham et al. (Pierre Auger Collaboration), Astropart. Phys. 29 (2008).
- [21] R.U. Abbasi et al. (HiRes Collaboration), As-

tropart. Phys. 30 (2008) 175–179.

[22] M.P. Veron-Cetty and P. Veron, Astron. Astrophys. 455 (2006) 773.

[23] I. Tkachev et al. (Telescope Array Collaboration), Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).

[24] N. Hayashida et al., Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 78.

[25] M. Takeda et al. Phys. Soc. Jpn (Suppl.) 70 (2001) 15.

[26] R.U. Abbasi et al., Astrophys. J., 610 (2004) 73.

[27] J. Belz et al., Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).

[28] K. Kuramoto et al., Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).

[29] G. Thomson et al., Proc. of 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China (2011).

人 事 異 動

発令日	氏名	異動内容	職
H23. 11. 1	坂井 亜紀子	新規採用	技術補佐員

ICRR-Seminar 2011年度

2011年10月19日(水) 宮原ひろ子 (宇宙線研究所)
 “宇宙線が気候変動および気象現象に及ぼす影響について”

2011年10月12日(水) Sergey Ostapchenko (Norwegian University for Science and Technology)
 “Interaction models: ultrahigh energy cosmic rays and LHC data”

2011年8月31日(水) 鳥居祥二 (早稲田大学理工学術院)
 “CALET Project: Astrophysical Mission for Japanese Experiment Module (Kibo) at the ISS”

ICRR-Report 2011年度

ICRR-Report-592-2011-9
 “Non-Gaussianity from Curvatons Revisited”
 Masahiro Kawasaki, Takeshi Kobayashi, and Fuminobu Takahashi.

ICRR-Report-593-2011-10
 “Isocurvature perturbations in extra radiation”
 Masahiro Kawasaki, Koichi Miyamoto, and Kazunori Nakayama.

ICRR-Report-594-2011-11

“Weak lensing of CMB by cosmic (super-)strings”
 Daisuke Yamauchi, Keitaro Takahashi, Yuuiti Sendou, and Chul-Moon Yoo.
 ICRR-Report-595-2011-12
 “Full-sky lensing reconstruction of gradient and curl modes from CMB maps”
 Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi, and Atsushi Taruya.
 ICRR-Report-596-2011-13
 “Multi-field open inflation model and multi-field dynamics in tunneling”
 Kazuyuki Sugimura, Daisuke Yamauchi, and Misao Sasaki.
 ICRR-Report-597-2011-14
 “Prospects for determination of thermal history after inflation with future gravitational wave detectors”
 Sachiko Kuroyanagi, Kazunori Nakayama, and Shun Saito.
 ICRR-Report-598-2011-15
 “The GeV-scale dark matter with B-L asymmetry”
 Masahiro Ibe, Shigeki Matsumoto, and Tsutomu T. Yanagida.
 ICRR-Report-599-2011-16
 “Non-Anomalous Discrete R-symmetry Decees Three Generations”
 Jason L. Evans, Masahiro Ibe, John Kehayias, and Tsutomu T. Yanagida.

No.78

2011年12月15日

東京大学宇宙線研究所

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5
TEL (04)7136-3143又は04-7136-5148
編集委員 伊藤英男