テレスコープアレイ実験

荻尾彰一、 多米田裕一郎、他テレスコープアレイグループ
東京工業大学大学院、他

1. 最高エネルギー宇宙線

AGASA(Akeno Giant Air Shower Array) による観測は、最高エネルギー宇宙線について 2 つの大きな問題を提起している。その第一は、理論的な限界よりもはるかに大きいエネルギーの宇宙線が観測されていることである [1](Fig.1.)。10^{20} eV 以上の宇宙線陽子は宇宙背景放射 (CMBR) とパイオン生成を伴う相互作用をして、エネルギーを失う (GZK 限界 [2])。宇宙線が陽子より重い原子核の場合でも、銀河間空間の赤外放射や CMBR との核光分解反応のため長距離の伝播はできない。50 Mpc 以遠の源から飛来する 10^{20} eV 以上の宇宙線はこれらの反応によって遮断されるため、最高エネルギー宇宙線源が宇宙空間に一様に分布しているとすると地球で観測されるエネルギースペクトルには 10^{20} eV に鋭いカットオフができると推定される。しかし AGASA によって観測されたエネルギースペクトルは GZK 限界を超えて、高いエネルギーにむかって続いている。

第二に、これらの宇宙線は等方的に到来し、一部は点源から放射されているように見えることである。AGASA の観測した $10^{19.6}$ eV 以上の宇宙線 59 事象の到来方向はほぼ等方的に分布しており、また、既知の天体の方向との明らかな相関は見られない。しかし 2.5° 以内に 2 事象以上重なった doublet、triplet などのクラスター事象が計 6 例見つかっている [3]。AGASA の角度分解能が 1.6° であることを考慮すると、これらクラスター事象は同一の点源から放射されたものと考えて矛盾はない。さらに、doublet/triplet 事象の方向分布は、銀河面や超銀河面などとの相関はなく、等方的である。

宇宙空間に存在するプラズマ衝撃波との相互作用によって加速される宇宙線

pp. 1–6 ©2002 by Universal Academy Press, Inc.

Fig.1. AGASA 及び HiRes による最高エネルギー領域での宇宙線のエネルギースペクトル。曲線は、一様等方なソース分布を仮定した場合のエネルギースペクトル [1][5]。

では、加速領域への封じ込め条件 (粒子のラーモア半径が加速領域のサイズより小さい) からエネルギーの上限が決まる。さらに、加速中の放射や衝突によるエネルギー損失を考慮すると、10^{20} eV 以上の宇宙線の加速源は銀河の電波ローブ、活動銀河核、銀河団、ガンマ線バーストなどの巨大なエネルギーを放射している活動的な天体に限られる。従って最高エネルギー宇宙線の到来方向には 50 Mpc 以内に電磁波でも明るく輝く超高エネルギー天体が同定されるはずであるが、AGASA の 10^{20} eV を超える事象と doublet/triplet の方向には、探索の範囲を 100 Mpc に拡げてもこのような天体は見つからない。

もし、100 Mpc 以遠の天体から、陽子や原子核を核種とする最高エネルギー宇宙線が到来しているのなら、GZK 限界を予言する特殊相対論が高エネルギー領域で破れている可能性がある。また、核種がガンマ線であった場合には、ビッグバン初期に生成されたとされる超重粒子や宇宙紐の崩壊による可能性などもある。いずれにせよ、GZK 限界を超える宇宙線の存在を確立するこ

とは、標準的な理論を越える物理の手がかりとなる [4]。

一方 HiRes グループは 2003 年 8 月に最高エネルギー領域におけるエネルギースペクトルを発表した [5](Fig.1.)。この測定によると 10^{20} eV を超える宇宙線は 2 事象であり、スペクトラムは GZK 限界の存在と矛盾しない。しかし HiRes、AGASA のエネルギー測定の系統誤差はそれぞれ、21%、18%と大きい。現時点では GZK 限界の存否について決定的とは言えず、今後、確定的な結果を得るためには、観測事象数の増加とエネルギー測定の系統誤差の改善が必須である。

2. テレスコープアレイ実験

テレスコープアレイは、空気シャワーアレイと大気蛍光望遠鏡の 2 つの異なるタイプの装置を同じ場所に設置するハイブリッド観測装置で、アメリカ合衆国のユタ州南部ミラード郡を中心とする砂漠地帯 (平均標高は 1400m) に設置される (Fig.2.)。

Fig.2. 空気シャワーアレイ地表検出器 (緑：菱形)、望遠鏡ステーション (紫：五角形) および通信用アンテナ鉄塔 (黄色：十字) の配置予定図。

2.1. 空気シャワーアレイ

空気シャワーアレイは、地上に配置された多数の粒子検出器で、地上に到来する空気シャワー粒子を検出する装置である。観測した粒子数とその横方向粒子数密度分布、検出器への到来時間の測定から、空気シャワーシミュレーションを援用して一次宇宙線のエネルギーと到来方向を決定する。従ってシミュレーションや一次宇宙線核種の違いによるエネルギー推定の系統誤差が避けられない。しかし、観測が昼夜、天候などに依らず長期間の安定連続観測が可能であるという大きなメリットがある。地上検出器としてシンチレーション検出器を用いた AGASA、水チェレンコフ検出器を用いた Haverah Park array などが最高エネルギー領域の代表的な空気シャワーアレイとして挙げられる。

テレスコープアレイの空気シャワーアレイは、面積 $3m^2$ のシンチレータを持つ検出器 576 台からなる。検出器は 1.2km の正方形グリッド上に配置され、空気シャワーアレイ全体でカバーする総面積は 829 km^2 となる。

Fig.3. テレスコープアレイ用地表検出器のプロトタイプ

入射天頂角 30° 以内の $10^{18.5}$ eV の陽子でほぼ 100%観測できるようにトリガー条件を設定し、ヒットする検出器数も平均 12 台と、AGASA の検出効率を実現する。

2.2. 大気蛍光望遠鏡

大気蛍光望遠鏡は、空気シャワー中の荷電粒子による励起で大気分子が放射する紫外シンチレーション光 (大気蛍光) を大型光学系により観測する装置である。これは、大気をシンチレーターとする巨大な全吸収型カロリーメータであり、エネルギーをシミュレーションに依存することなく決定できる。さらに、到来方向をステレオ観測によって幾何学的に決定でき、シャワーの縦方向発達を観測することができるというメリットもある。しかし、大気の発光効率、大気中での紫外光の散乱・吸収、鏡の反射率、フィルターの吸収率、光電子増倍管の量子効率など、管理すべき補正量が多く、観測が晴天の夜に限られる。Fly's Eye、HiRes 等がこのタイプの観測装置である。

Fig.4. テレスコープアレイ用大気蛍光望遠鏡

テレスコープアレイでは、大気蛍光観測ステーションが空気シャワーアレイの周囲 3 ヶ所に、お互いの距離が約 40km になるよう配置される。1 つのステーションには 12 台の望遠鏡が格納される。1 台の望遠鏡の鏡面は、18 枚の球面鏡からなる口径 3.3m の合成鏡で、焦点には 256 本の PMT からなる大気

蛍光カメラが取り付けられている。1 本の PMT の視野は六角形で直径約 1° である。1 ステーションで水平方向 108°、上下方向 3° − 33° の範囲を見ることになる。各ステーションは空気シャワーアレイの上空をほぼ完全にカバーしており、2 つ以上のステーションでステレオ観測する。

3. まとめ

テレスコープアレイ実験は、同時観測によって地表での全粒子数から縦方向発達曲線のスケール補正が行えること、地表での粒子数と大気蛍光量の比較によって大気による減光の補正の精度が向上すること、縦方向発達についての情報が得られることから横方向分布からのエネルギー推定法を実験的に評価することができる、などの利点がある。このようにテレスコープアレイ実験では、ハイブリッド観測によって検出器相互のエネルギー較正を行い、エネルギー決定の系統誤差を 10% 以下に抑えることを目標としている。

結果としてハイブリッド観測の年間検出事象数は 10^{19} eV 以上が 80 事象、10^{20} eV 以上は 1 事象である。空気シャワーアレイだけの年間検出事象数は 10^{19} eV 以上が 700 事象、10^{20} eV 以上は 9 事象、と期待され、AGASA の 9 年分に相当する事象を 1 年で観測することになる。

空気シャワーアレイは 2005 年度末には全て設置を終えて、稼動開始する予定である。大気蛍光望遠鏡は 1 年後の 2006 年度末には全てのステーションの設置、調整が終了して、最高エネルギー宇宙線の存在の確立を目指すべく、空気シャワーアレイとのハイブリッド観測が開始される予定である。

References

[1] M. Takeda et al., 1998, Phys. Rev. Lett., **81**, 1163

[2] K. Greissen, 1966, Phys. Rev. Lett., **16**, 748, G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, 1966, JETP Lett., **4**, 78

[3] Y. Uchihori et al., 2000, Astropart. Phys., **13**, 151

[4] A. V. Olinto, 2002, astor-ph/0201257

[5] T. Abu-Zayyad et al., 2002, astor-ph/0208301