

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成 21 年度採択分
平成 24 年 5 月 20 日現在

研究課題名（和文） **最高エネルギー宇宙線で探る宇宙極高現象**
研究課題名（英文） Extreme Phenomena in the Universe
Explored by Highest Energy Cosmic Rays

研究代表者

福島 正己 (FUKUSHIMA MASAKI)
東京大学・宇宙線研究所・教授



研究の概要：米国ユタ州の砂漠地帯に設置した Telescope Array (TA) 観測装置で、宇宙から到来する極高エネルギーの放射線を観測し、その起源を探る。

研究分野：宇宙線物理学

科研費の分科・細目：物理学：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、最高エネルギー、GZK 限界、国際共同実験

1. 研究開始当初の背景

山梨県にある宇宙線研・明野観測所に設置した AGASA 空気シャワーアレイで、2003 年までの 13 年間に 10 の 20 乗電子ボルトを超える宇宙線 11 例を観測した。このエネルギーは、極微の素粒子が、自分の静止質量 (m) 相当のエネルギー ($E=mc^2$) の 1000 億倍の運動エネルギーを持っていることに相当し、宇宙の中でどのようにして加速されたのか、大きな疑問となった。

2. 研究の目的

このような極高エネルギーの宇宙線は、宇宙空間を満たしている背景放射と衝突してエネルギーを失うため、ほぼ 1.5 億光年以内の近い宇宙に発生源があると考えられている。TA 実験では、(1) 宇宙線のエネルギー分布スペクトルを測定して、その形に、この衝突の痕跡が残っていることを確かめる。(2) そのような宇宙線が来た方向に、発生源となる特別な天体があるか探す。また、(3) どのような素粒子（陽子、電子、原子核、ガンマ線など…）が、そのような極高エネルギーに加速されるのか調べる。

3. 研究の方法

高エネルギーの宇宙線が地球に到来すると、大気の上層で、窒素や酸素の原子核と衝突し、核を壊して数千の新しい粒子を発生する。これらの粒子は、さらに衝突と反応を繰り返して鼠算式に増殖し、10 の 20 乗電子ボルトの宇宙線では、直径約 10km、1兆個を超える粒子の束となって

地表に降り注ぐ。これを空気シャワーと呼ぶが、エネルギーの高いものは極めて稀で、山手線の内側の領域 ($\sim 100\text{km}^2$) に 1 年に 1 例が落下するくらいの頻度である。

空気シャワーの観測方法には、大きく分けて 2 通りある。第 1 は地表アレイと呼ばれ、地表に点々と粒子検出器（下図）を置いて、検出した粒子の総数から宇宙線のエネルギーを決める。



宇宙線の方向は検出器間の粒子到来時間差から決める。広い領域を 24 時間・365 日安定して観測できる点が強みだが、粒子の総数から宇宙線のエネルギーを決める時に、詳細が良く判っていない大量の計算をしなければならない。

第 2 は大気蛍光望遠鏡と呼ばれ、空気シャワーの大気中での紫外発光を撮像する。この発光は極めて微小なので、大口径の反射鏡で光を集め、カメラには感度の高い光電子増倍管を使う（次頁左上図）。観測は、月がなく晴れて大気が透明な夜に限られる。観測される光の量がエネルギーに比例するので、計算によらずにエネルギーを決められるのが強みであるが、望遠鏡感度の絶対較正や大気透明度の補正がチャレンジングな開発課題になる。

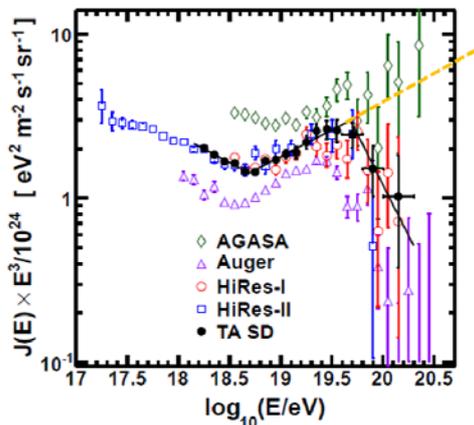


望遠鏡アレイ(TA)実験は、米国ユタ州の砂漠地帯に、地表粒子検出器(前頁右図)を、1.2km間隔で507台設置し、ほぼ700km²の領域をカバーする。また38台の望遠鏡を3ヶ所にまとめて配置し、地表アレイ上空を監視している(上図)。地表アレイと望遠鏡を同じ場所に置いて同時観測を行い、まれな極高エネルギー宇宙線から、可能な限り多くの情報を集めて、正しい測定を行うことを目指している。

4. これまでの成果

TAは日本(特定領域科研費)と米国(国立科学財団)の予算で建設し、平成20年3月から観測を始めた。現在は韓国、ロシアとベルギーが加わり、5カ国・140人の研究者が国際共同研究を進めている。平成21年からは、科研費(特別推進研究)によって運用が行われている。

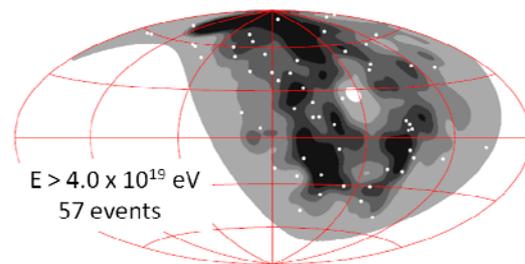
下の図は、TA実験でこれまでに得られた極高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルである。



横軸はエネルギーの対数とし、縦軸はスペクトルの形状(ベキ)変化を見やすくするために、エネルギーの3乗を掛けた到来数(流量)の対数としてプロットした。黒丸が、TAの地表アレイによる3年分のデータである。この図によると、エネルギーが10の19.7乗電子ボルトから流量が急激に減少し始め、18.7乗電子ボルトには「窪み」のような構造が出来ている。到来粒子が陽子であるとして、背景放射との衝突の割合を計算すると、急激な減少は衝突によって核子共鳴状態が生成さ

れ、その崩壊によってエネルギーが急速に失われる事に相当することが判る。窪み構造は、同じようにして電子・陽電子の対生成から生じる。この解釈が正しければ、広い宇宙空間での、極高エネルギー宇宙線と宇宙背景放射の稀な衝突が確認されたことになる。

次の図に、エネルギーが19.6乗以上の57例の宇宙線について、宇宙線がやって来た方向を白い点でプロットした。横軸は銀河系の経度(右端が銀河の中心)、縦軸は銀河系の緯度にあたる。背景の濃淡は、宇宙線が近く(約1.5億光年以



内の銀河で発生して地球にやって来た場合に期待される分布である。色の濃い領域ほど、沢山の銀河があり、宇宙線の到来数も多いことが期待される。

5. 今後の計画

現在まで3年間の研究では、まだ宇宙の特別な銀河や爆発現象と、極高エネルギー宇宙線の発生が関係づけられていない。(上図の黒い領域に特に沢山の白点が集まってはいない)今後の観測で宇宙線の観測数を増やし、装置の性能をより良く理解して、発生源天体を見つけることを目指す。

6. これまでの発表論文

- ① 地表粒子検出器については arXiv:1201.4964
- ② 大気蛍光望遠鏡については arXiv:1201.0002
- ③ スペクトルについては arXiv:1205.5067
- ④ TAの説明と粒子種については arXiv:1111.2507
- ⑤ 到来方向異方性については arXiv:1205.5984

TA実験のホームページ

<http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp/>