

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19840049

研究課題名（和文） Auger 計画による最高エネルギー宇宙線スペクトラム解析

研究課題名（英文）

研究代表者

山本 常夏 (YAMAMOTO TOKONATSU)

甲南大学・理工学部・准教授

研究者番号：40454722

研究成果の概要：

本研究費により Pierre Auger 計画に参加し、最高エネルギー宇宙線の観測を行った。特に観測データを解析しエネルギースペクトルを求めた。この解析により 7 年分の観測データを使い宇宙線のエネルギーを求めた。この結果宇宙線のスペクトルは 10 の 18.5 乗 eV 付近と 19.5 乗 eV 付近に折れ曲がりがあることが確認された。この結果により、40 年以上にわたり様々な宇宙線実験の間で論争になっていた宇宙線スペクトルの最大エネルギーに一応の決着がついた。このスペクトルの構造は宇宙線が銀河間空間を伝搬中に宇宙背景放射と相互作用をした結果であるとも、宇宙線が発生した領域のスペクトルを反映しているとも解釈できる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,360,000	0	1,360,000
2008 年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：物理学・宇宙線

キーワード：宇宙線、宇宙観測

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙にはローレンツファクターが  $10^{10}$  を超える荷電粒子が飛び交っている。これらの粒子は最高エネルギー宇宙線と呼ばれ、その最大エネルギーは  $10^{20}$ eV を超える。発生源は解明されておらず、伝搬過程やこのエネルギー領域の相互作用は高エネルギー物理と天文学両面から重要な研究課題になっている。

10 の 20eV を超える宇宙線は、宇宙背景放射

と相互作用を起こし、光パイオン生成や光破砕反応によりエネルギーを失うはずである。この効果は 40 年前に 3 人の物理学者により同時に提唱され、彼らの頭文字を取って GZK 効果と呼ばれている。この GZK 効果によりな最高エネルギー宇宙線は極端に数が少ないと考えられていた。しかし日本の宇宙線観測装置 AGASA によりこのエネルギーを持った宇宙線が 11 例観測された。この数は宇宙背景

放射の影響から予想される数を大きく上回っており、もしこのような宇宙線が多数存在するならば、相対論の破れや近傍のダークマターの崩壊など新しい物理の発見につながると考えられた。そのためこのエネルギー領域の宇宙線を前例のない精度で測定する Pierre Auger 観測所が南米アルゼンチンの草原に建設された。

## 2. 研究の目的

Auger 観測所で収集された宇宙線データを解析し、宇宙線のエネルギースペクトルを求める。この解析により  $10^{20}\text{eV}$  を超えるエネルギーを持った宇宙線が宇宙背景放射の影響から予想される量を超えて存在するの否か、その是非を明らかにすることが目的である。

## 3. 研究の方法

南 Auger 観測所は、南米アルゼンチンのアンデス山脈麓にある草原に建設されている。地表粒子検出器には  $10\text{m}^2 \times 1.2\text{m}$  の円柱プラスチックタンクに純粋を入れた水チェレンコフ検出器が採用されている。12 トンの水を使い、天頂方向から水平方向まであらゆる方向から来た空気シャワー粒子を観測できる。この検出器を  $3,000\text{km}^2$  の領域に  $1.5\text{km}$  間隔で並べている。さらに観測所の 4 隅に大気蛍光望遠鏡サイトが配置されており、各望遠鏡サイトには  $30 \times 30$  度の視野を持った望遠鏡 6 台が設置されている。図 1 は観測所の概略を示している。

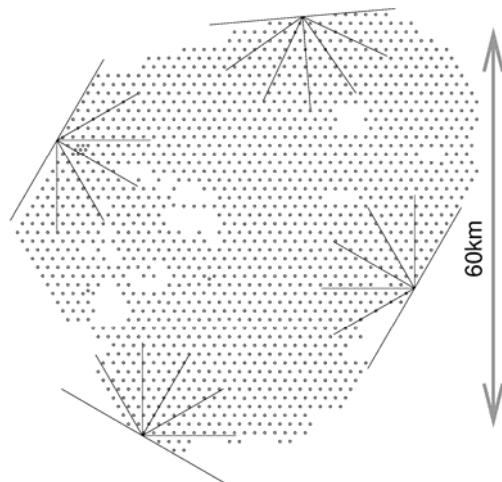


図 1、Auger 観測所の概略。地表検出器を点で、望遠鏡の視野を線で示している。地表検出器は  $3000$  平方  $\text{km}$  の領域に  $1.5\text{km}$  間隔で  $1600$  台並べられている。その上の大気を観測するように  $24$  台の望遠鏡が配置されている。

建設は 2008 年の初めにほぼ終了した。今回の解析で使われたデータは AGASA の 3 倍の統計量に相当する。

地表の検出器は 24 時間安定した観測を行うことができる。広い領域にならべた検出器の利点を生かし、効率よく観測できる。これに対し望遠鏡は月のない晴れた夜しか観測できず稼働率は 10%程度である。そのかわり、カロリメトリックなエネルギー測定ができるという利点がある。今回の解析ではそれぞれの検出器の利点を生かし、地上検出器の観測結果を望遠鏡の観測結果で構成し系統誤差を評価した。図 3 に地表検出器で測定された空気シャワーのサイズと望遠鏡で測定された宇宙線のエネルギーの相関を示す。

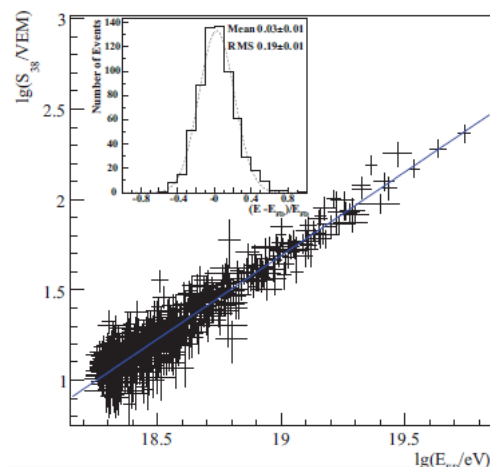


図 3、地表検出器で測定された空気シャワーのサイズ（縦軸）と望遠鏡で測定された宇宙線のエネルギー（横軸）の相関。ヒストグラムは地表検出器と望遠鏡それぞれの測定で得られた宇宙線のエネルギーの違いを示している。

本研究費を使い、これらの解析を完成させるため、シカゴ大やドイツのカーlsruエーのグループと会議を重ね、解析結果のすり合わせをおこなった。

## 4. 研究成果

測定されたスペクトルははっきりとした構造をしめしており、その構造は GZK 効果による流量減少の予想とほぼ一致していた。図 3 にこのスペクトルを示す。低エネルギーで  $E^{-3.3}$  のベキ型スペクトルが  $10^{18.6}\text{eV}$  付近で一旦ならか（ハード： $E^{-2.6}$ ）になり、 $10^{19.5}\text{eV}$  付近で再び急（ソフト： $E^{-4.1}$ ）になっている。このスペクトルだけからは、GZK 効果により流量の減少が起きたのか、宇宙線源においてこれ以上高いエネルギーに加速できない限界が存在しているのか特定できない。しかし

少なくとも GZK の予想と矛盾せず、新しい物理が存在する強い根拠は無いと言える。10<sup>18</sup>eV 付近ではっきりと表れているスペクトルの“折れ曲がり”は AGASA などの観測からも示唆されていた。この“折れ曲がり”の起源には2つの説がある。1つ目は、理論物理学者ベレジンスキー(V.Berezinsky)が提唱している「ディップ(dip)説」で、このモデルは宇宙線陽子が CMB と電子・陽電子対生成を起こすことによりスペクトルのベキが変わるとしている。銀河間を伝搬する間に CMB と相互作用した結果が見えているのだとすると、少なくとも”折れ曲がり”前後のエネルギーの宇宙線は銀河系外起源の陽子が大部分を占めていることになる。もう一つのモデルは、銀河系内と系外で発生している宇宙線がこの”折れ曲がり”のエネルギーを境に入れ替わるとする「アングル(ankle)説」、この場合銀河系内起源の宇宙線は、この境目のエネルギーまで加速されていることになる。エネルギーの低い宇宙線は磁場により銀河系内に閉じ込められていると考えられているが、同じエネルギーでも質量が大きいほど磁場の影響を受けやすい。つまり宇宙線核種の中で質量の大きい鉄が最も高いエネルギーまで銀河系内に閉じ込められていると考えられる。従って「銀河系内最大エネルギー」に相当するこの”折れ曲がり”付近の宇宙線は、鉄が主要成分であるということになる。このエネルギー領域の宇宙線を精密に測定することは、銀河系内の宇宙線加速機構を解明するためにも重要である。

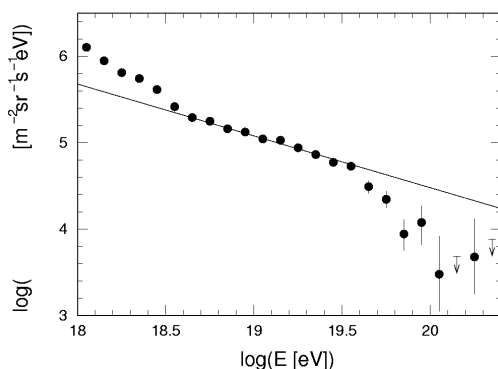


図3、今回の研究で得られた最高エネルギー宇宙線のスペクトル。

これらの結果はメキシコで行われた宇宙線国際会議で本研究代表により発表された後、Physical Review Letters に論文が掲載された。

これらの結果を受け、10<sup>18</sup>eV 付近の宇宙線の精密測定をする計画を進めている。この計画

はアルゼンチン、ブラジル、メキシコなど南米のグループとアメリカとドイツのグループと共同で複数の種類の検出器を Auger 観測所に設置し空気シャワーを多角的に観測する計画で、日本はシンチレータ検出器を地表に置く計画を担当している。本研究費を使い実際にシンチレータ検出器を組み実験室で感度の測定を行った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① T.Yamamoto for the Auger Collaboration, The UHECR spectrum measured at the Auger Observatory and its astrophysical implications, Proc. of the 30<sup>th</sup> ICRC. HE1.4.A, 318, 321, 2007, 無
- ② D. Allard, M.Ave, N.Busca, M.A.Malkan, A.V.Olinto, E.Parizot, F.W.Stecker, T.Yamamoto, Cosmogenic Neutrinos from the propagation of Ultra High Energy Cosmic Rays, Proc of the 30<sup>th</sup> ICRC, OG.2.5, 852, 856, 2007, 無
- ③ J.Abraham - T.Yamamoto and the Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), Correlation of the highest-energy cosmic rays with positions of nearby active galactic nuclei, Astroparticle Physics, 29, 188-204, 2007, 有
- ④ J.Abraham - T.Yamamoto and the Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), Correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic objects, SCIENCE, 318, 939, 943, 2007, 有
- ⑤ J.Abraham - T.Yamamoto and the Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), Anisotropy studies around the galactic centre at EeV energies with the Auger Observatory, Astroparticle Physics, 27, 244, 264, 2007, 有
- ⑥ J.Abraham - T.Yamamoto and the Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), An upper limit of the photon fraction in cosmic rays above 10<sup>19</sup> eV from the Pierre Auger Observatory, Astroparticle Physics, 27, 155, 176, 2007, 有
- ⑦ J.Abraham - T.Yamamoto and the Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), Observation of the Suppression of the Flux of CR above 4x10<sup>19</sup>eV, Physical Review Letters, 101, 061101-1, 7, 2008, 有
- ⑧ J.Abraham - T.Yamamoto and the

(3) 連携研究者

- Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), Upper Limit on the Diffuse Flux of Ultra-high Energy Tau Neutrinos from the Pierre Auger Observatory, Physical Review Letters, 100, 211101-1, 7, 2008, 有
- ⑨ J.Abraham - T.Yamamoto and the Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), Upper Limit on the Cosmic-Ray Photon Flux Above 1019eV Using the Surface Detector of the Auger Observatory, Astroparticle Physics, 29, 243, 256, 2008, 有
- ⑩ J.Abraham - T.Yamamoto and the Auger Collaboration (422 in all, 413 番目), Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei, Astroparticle Physics, 29, 188, 204, 2008, 有
- ⑪ 山本常夏、最高エネルギー宇宙線の謎に迫る・The Pierre Auger 計画の観測成果と展望、日本物理学会誌, 64, 112, 116, 2008, 無
- ⑫ 山本常夏、荷電粒子天文学の開闢、天文月報、101, 256, 263, 2008, 無
- ⑬ 山本常夏、最高エネルギー宇宙線、パリティ、24, 49, 50, 2009, 無

[学会発表] (計 4 件)

- ① 山本常夏、Pierre Auger Project の最新結果、日本物理学会 第 62 回年次大会、2007 年 9 月 23 日、北海道大学
- ② 山本常夏、Pierre Auger 観測所における低エネルギー拡張計画、日本物理学会 第 63 回年次大会、2008 年 3 月 23 日、近畿大学
- ③ 山本常夏、特別講演：粒子天文学を切り開く、最高エネルギー宇宙線の観測と展望、日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年 3 月 24 日、国立オリンピック青少年センター
- ④ T. Yamamoto, The UHECR spectrum measured at the Auger Observatory and its astrophysical implications, 30<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, July, 6, 2007, Merida, Yucatan, Mexico

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本常夏 (YAMAMOTO TOKONATSU)  
甲南大学・理工学部・准教授  
研究者番号：40454722

(2) 研究分担者