

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244042

研究課題名(和文) JEM-EUSOプロトタイプ望遠鏡による空気シャワー横方向粒子分布の観測

研究課題名(英文) Observation lateral particle distribution airshower with JEM-EUSO prototype telescope

研究代表者

戎崎 俊一 (Ebisuzaki, Toshikazu)

独立行政法人理化学研究所・戎崎計算宇宙物理研究室・主任研究員

研究者番号：10183021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,200,000円

研究成果の概要(和文)：JEM-EUSO ミッションのプロトタイプとなるTA-EUSO 望遠鏡を製作、その機能検証を行った。観測イベントを同時観測し、データを比較するため、Telescope Array サイトのブラックロックメサステーションの蛍光望遠鏡付近に設置した。概ね設計通りの性能が達成されていることを確認し、そのデータを持ち帰り解析を行い、2015年夏の宇宙線国際会議で報告する予定である。超高エネルギー宇宙線イベントを観測するため、Telescope Array 望遠鏡からのトリガによるイベント取得観測を行っている。国際JEM-EUSO コラボレーションのメンバーと観測を継続し、宇宙線イベントの取得を目指す。

研究成果の概要(英文)：We developed a prototype telescope of the JEM-EUSO instrument with a 1 square meter lens and tested it in Japan. It was installed at the Black Rock Mesa station of the telescope Array site. The performance of the telescope was confirmed as designed. The initial observational data were brought to Japan and under the detailed analysis. The results will be reported at International Cosmic Ray Conference 2015 at Hague, Netherlands. We observed real airshower events and laser generated events with the external trigger supplied by Telescope Array in cooperation with the International JEM-EUSO collaborators.

研究分野：天文学

キーワード：宇宙線 宇宙物理

1. 研究開始当初の背景

ビッグバン宇宙の証拠である宇宙背景放射が発見された1965年の翌年、宇宙線のエネルギーは 10^{20} eVあたりに「上限」(GZK限界)があると理論的に予測された[1,2]。1990年代になり、その極限エネルギー領域での宇宙線の研究は、日本のAGASAグループの地上検出器による観測、米国のHiResグループによる大気蛍光法を用いた観測で進められた。しかし、どちらも有効検出面積が小さすぎるため、確定的な結論には至らなかった。この状況を克服するため、Pierre Auger天文台[3]とTelescope Array (TA)実験[4]が、それぞれアルゼンチンの平原と米国ユタ州の砂漠に建設され運用中である。これらは、地上粒子検出器アレイとともに、大気蛍光望遠鏡も設置したハイブリッド実験であり、互いの結果を校正し合いながら、より正確な結果を導き出すことが期待されてきた。

2011年8月の第32回国際宇宙線会議(北京)において、Auger天文台7年分、TA実験3年分のデータが開示されて議論された。 6×10^{19} eV付近にスペクトルの急峻化がみられ、GZK限界の予測と矛盾しないことについては一致を見たが、 $10^{18} \sim 10^{20}$ eV領域の宇宙線フラックスについて50%程度の不一致がみられ、また、一次宇宙線の化学組成についても、両方で食い違った結果が報告されている[3, 4]。さらに地上検出器から得られたエネルギーが、蛍光望遠鏡から得られた同じシャワーのエネルギーに対して系統的に約25%程度大きいことが、TA実験、Auger天文台ともに報告されている。これは、空気シャワーの発達とその観測手法のどこかに、未知の系統誤差因子が存在していることを示している。その原因として、空気の紫外蛍光効率と大気中での伝搬の不確定性、空気シャワー中の高エネルギー事象(2×10^{14} eV以上の超LHCエネルギー)における新規の相互作用チャンネルの発現などの可能性が指摘されており、それを明らかにすることが当該分野の急務とされている。

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard JEM)ミッション[4,5]では、口径約2.5 mで約60度の視野を持つ超広視野望遠鏡で、高度約400 kmの軌道上の国際宇宙ステーションから、 10^{20} eVを超える極限エネルギー宇宙線を観測する。宇宙から観測することにより、飛躍的に大きな有効面積を実現する(図1)。この高い統計精度は、荷電粒子による新しい天文学を創始し、永年の謎である極限エネルギー宇宙線の起源を解き明かす。

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module)ミッション[5, 6]は、口径約2.5 mで約60度の視野を持つ超広視野望遠鏡で、高度約400 kmの軌道上の国際宇宙ステーションから、 10^{20} eVを

超える極限エネルギー宇宙線を観測する。宇宙から観測することにより、TA実験、Auger天文台に比べて、1桁以上大きな有効面積を実現する(図1)。この飛躍的に高い統計精度により、荷電粒子による新しい天文学を創始し、長年の謎である極限エネルギー宇宙線の起源を解き明かす。

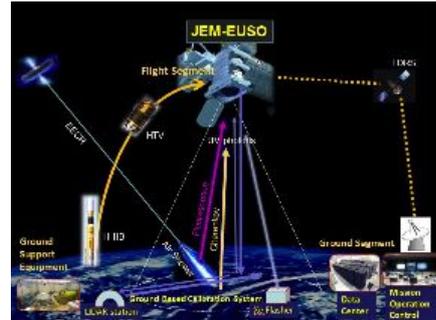


図1 JEM-EUSOはISS曝露部から観測する

JEM-EUSO望遠鏡は、大口径(開口径約2.5m)、超高速(2.5μ 秒)で高度に画素化(30万画素)された超広角($\pm 30^\circ$)デジタルカメラである[7]。近紫外線領域(330~400nm)でのシングルフォトン検出を行う。望遠鏡は、光学系、焦点面検出器および電子回路からなる。光学系は三枚のレンズから構成され、光子を 0.07° の空間分解能で焦点面に集め、焦点面検出器で電気パルスに変換する。

その焦点面は、ほぼ独立に機能する137台のPhoto Detector Module (PDM)で覆われる。ひとつのPDMは、 6×6 個のマルチアノード-光電子増倍管(8×8 画素)で構成される。PDMの実装密度が高いため、実際の宇宙における運用に先立ち、野外における試験観測を行い万全を期す。

参考文献

- [1] K. Greisen 1966, Phys. Lett. 16, 148.
- [2] G.T. Zatsepin, V.A. Kuzmin 1966, JETP Phys. Lett. 4, 78.
- [3] F. Stokes *et al.* 2011, Proc. of 32nd Int. Cosmic Ray Conf. (Beijing), ID1297.
- [4] D. Ikeda *et al.* 2010, in Proc. of 32nd Int. Cosmic Ray Conf, ID1264.
- [5] T. Ebisuzaki *et al.*, in Proc. of 32nd Int. Cosmic Ray Conf, ID0120.
- [6] Y. Takahashi *et al.* 2009, New J. Phys. 11, 065009.
- [7] F. Kajino *et al.* 2011, Proc. of 32nd Int. Cosmic Ray Conf., ID1297.

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、JEM-EUSO ミッションのプロトタイプとなるTA-EUSO望遠鏡(開口面積 1m^2)を製作し、TAサイトに設置して機能検証を行うことである。

第二の目的は、TA-EUSO望遠鏡を用いて、TA実験の地上検出器および蛍光望遠鏡と空気シャワーを同時観測することである。特

に条件のよいイベントについては、それらの相互比較により、上空における横方向粒子分布の情報を得る。

3. 研究の方法

(1) JEM-EUSO プロトタイプ望遠鏡 (TA-EUSO) の製作

TA-EUSO 望遠鏡は、光学系と焦点面検出器からなる。光学系は、開口面積約 1m^2 のフレネルレンズ2枚で構成され、焦点距離は約 1.5m 、視野は 16° である。スポットサイズを、視野 $\pm 4^\circ$ の領域にわたって、 6mm (RMS) 以下である。

焦点面検出器には Photo-Detector Module (PDM) を設置する。PDM は、64 チャンネルのマルチアノード光電子増倍管 (M64) と、それに付随する読出し ASIC、高圧電源、トリガー回路から構成されている。JEM-EUSO ミッションにおいて、PDM の基本性能は、以下のように定義されている:

- ・質量 2.1kg 以下
- ・消費電力 3.85W 以下
- ・ $2.5\ \mu\text{s}$ 分解能でのシングルフォトン計数
- ・制御ボードによる第一レベルトリガー発行
- ・トリガー前後のデータ収集能力

これらを、野外における実際の空気シャワー観測において確認し、TA サイト既設の検出器群と比較することにより性能の最終検証とする。

(2) TA-EUSO 望遠鏡による TA 実験の TA サイトへの設置と TA 実験の蛍光望遠鏡・地上検出器との同時空気シャワー観測

TA-EUSO 望遠鏡は、Telescope Array サイトの Black Rock Mesa ステーションの蛍光望遠鏡 (FD) 付近に設置する。この場所には、較正用の小型電子加速器 (ELS) 施設と大気モニタ用 LIDAR が、 100m 以内にあり、TA-EUSO 望遠鏡の較正に都合がよい。ELS は $1\ \mu\text{s}$ 幅のピームパルスを天頂方向に射出する。このパルスは 40MeV の約 10^9 個の電子を含んでおり、TA-EUSO 望遠鏡では、約 1300 個の光電子を検出する。また、このステーションから約 21km 離れた場所にある Central Laser Facility (CLF) から天頂方向に射出されるレーザーからも、 $2.5\ \mu\text{s}$ 当たり、 200 光電子以上の受光信号が得られる。これらは TA-EUSO 望遠鏡の較正に十分な強度である。

図2は、Black Rock Mesa ステーション周辺の地上検出器の配置と TA-EUSO 望遠鏡の視野を示している。図中の破線の左上の領域では、TA 実験の地上検出器からの情報も得られるため、この領域にコアが落ちるイベントを同時観測の対象とする。本研究では、空気シャワーイベントのトリガー情報を、TA 実験の蛍光望遠鏡から得る。

TA 蛍光望遠鏡では、仰角 $3\sim 33^\circ$ を観測しており、TA-EUSO 望遠鏡の視野中心の仰角を 30° を設定すると、視野の一部が重複す

るので、信号強度を直接比較できる。TA-EUSO 望遠鏡と TA 実験の蛍光望遠鏡のデータを比較し、TA-EUSO 望遠鏡の性能確認を行う。

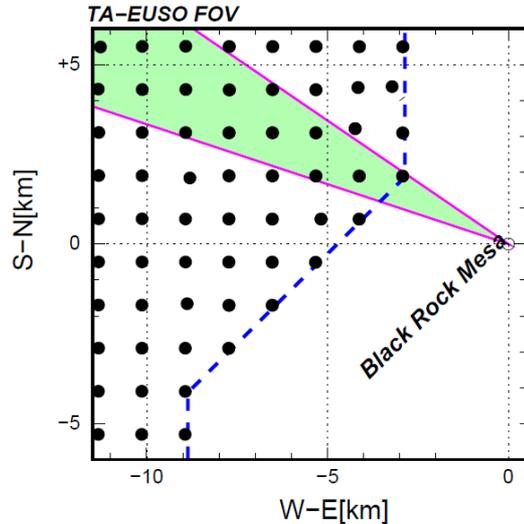


図2: Black Rock Mesa ステーション周辺の地上検出器の配置

同時観測される空気シャワーイベントは、クラス A とクラス B に分られる。クラス A イベントは、 400 光電子以上の信号が検出され、TA-EUSO 望遠鏡の近傍 $3\sim 4\text{km}$ 付近を通るものである。クラス B イベントは、 100 光電子以上の信号が検出されるものであり、 10^{18} eV 空気シャワーの場合、約 10km の距離にある。なお、対応する背景光は 70 光電子程度である。それぞれのクラスで、 10^{18} eV 以上での予想頻度は、以下ようになる:

クラス	光電子数 [$2.5\ \mu\text{s}$]	予想頻度[年] ($E > 10^{18}\text{ eV}$)
A	≥ 400	~ 10
B	≥ 100	~ 100

ここでは、北京での国際宇宙線会議で報告された TA 実験の宇宙線エネルギースペクトルと、運用実績から得られた、暗夜・好天の条件を満たす観測デューティ比 10% を仮定した。

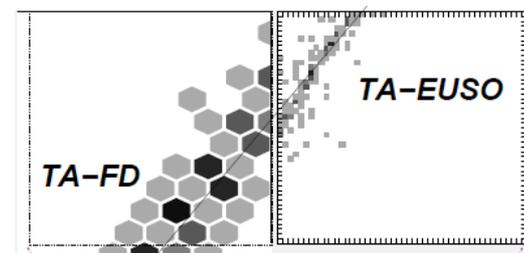


図3: クラス A イベントの例。TAEUSO 望遠鏡では空気シャワーコアの横方向粒子分布を解像できる。

クラス A イベントについては、空気シャワーの極大近く(上空約 2km)でのコアを、シャワー軸に垂直な方向に約 30m の分解能で解像し、これらから横方向粒子分布を推定する。クラス B イベントについては、TA-EUSO 望遠鏡と TA 実験の蛍光望遠鏡のデータを比較する(図 4)。このとき両者の ELS や CLF の信号についても、同様に比較する。

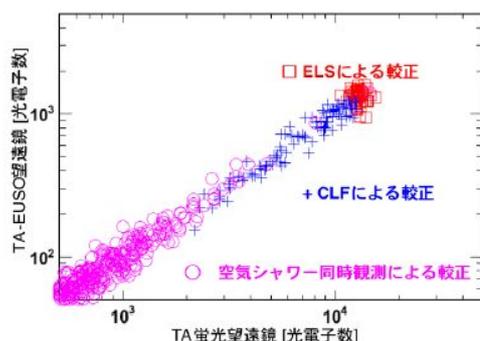


図 4: 同時観測による TA-EUSO 望遠鏡の校正

4. 研究成果

平成 24 年度は、TA-EUSO 望遠鏡の製作と TA サイトの調査を行った。

TA-EUSO 望遠鏡は、主に光学系と光検出装置からなる。光学系は 2 枚の 1m 角の亚克力製フレネルレンズで構成され、視野 ± 4 度の領域にわたって、6mm(RMS)以下のスポットサイズを持つ。理研において、フレネルレンズを製作し、簡易結像性能の確認を行った。その後、米国アラバマ大学の JEM-EUSO 共同研究者により詳細性能の確認を行い、TA-EUSO 光学系が期待した性能を持っていることを確認した。光検出装置は、Photo-Detector Module (PDM)と Data Processing (DP)ユニットで構成される。PDM は、JEM-EUSO 焦点面検出器の基本要素で、64 チャンネルマルチアノード光電子増倍管 36 本と、それに付随する読出し ASIC、高電圧供給装置、トリガ回路からなる。DP ユニットは、データ収集 FPGA、制御 CPU、クロック供給回路、GPS 回路、House Keeping 回路、電源回路からなる。これらの光検出装置は JEM-EUSO の構成に準拠したものとなっており、JEM-EUSO における担当部署において製作を行った。理研において、これらを統合し、統合稼働試験を行い、2.5 μ 秒毎の光子計数データを取得できることを確認した。また理研の屋上において、上記光学系と光検出装置を組み合わせ、紫外線レーザー光の試験観測も行った。

TA サイトで、上記光学系を望遠鏡として組上げ、夜光の試験観測を行った。10-20

counts/2.5 μ s という半月期の曇天としての期待通りの観測値を得た。



図 5 ユタ州 TA サイトの TA-EUSO 望遠鏡。後ろに TA の Black Rock Mesa FD スターションが見える。

平成 25 年度においては、日本において、焦点面検出器の検出効率校正を行った。上記で調整を終えた焦点面検出器のフルシステムについて、1 画素毎に校正された紫外線 LED 光を照射することにより、全 2304 画素の検出効率テーブルを作製した。また、1m 径の簡易光学系に焦点面検出器を設置し、夜光の試験観測を行い、予想通りの信号を得た。これにより、焦点面検出器の動作の確認を終えた。その後、焦点面検出器を米国ユタ州の Telescope Array 実験サイトに搬送した。Telescope Array 望遠鏡の直前に建設した小屋の中に、1m 角の 2 枚のフレネルレンズで構成された光学系と、上記の検出器を設置することにより、TA-EUSO を完成させた。さらに、紫外線 LED と紫外線レーザーポインタを用いて、焦点面位置や視野角などの TA-EUSO 望遠鏡としての基本性能を確認した。

平成 26 年度においては、前年度までに完成させた TA-EUSO の試験観測を行った。

まず、望遠鏡の 45m 及び 325m 前方に設置した LED 光源を用いて、最適焦点位置に焦点面検出器を設置し、視野角の大きさの確認を行った。概ね設計通りの性能が達成されていることを確認した。次に望遠鏡を夜空に向け、背景夜光、恒星、飛行機等の望遠鏡から離れた光源からの信号を観測した。その信号の強さから望遠鏡の検出感度が概ね設計通りであることを確認した。また、恒星の像からは、光学系の Point spread function を確認し、これも概ね設計通りであることを確認した。さらに、Telescope Array 実験の Central Laser Facility からの紫外線レーザーパルスを観測した。現在そのデータを日本に持ち帰って解析を行っており、2015 年夏の宇宙線国際会議で報告することを予定している。

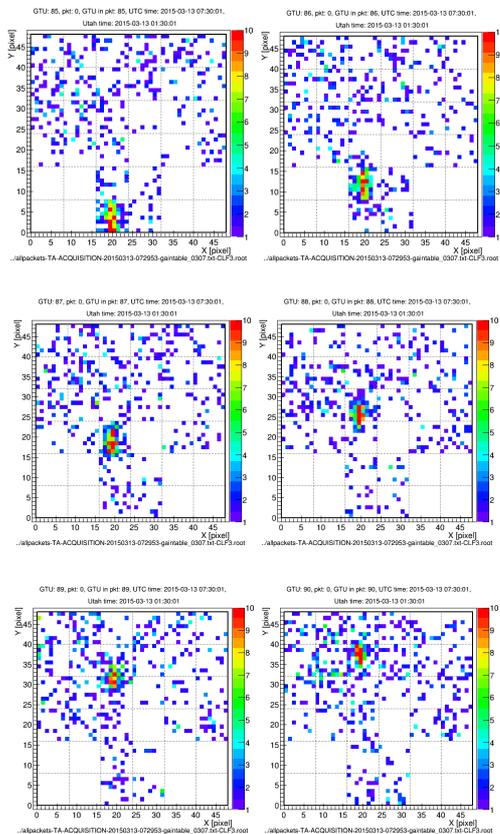


図 6: TA-EUSO による CLF のイベントのクイックビュー。2.5 μ 秒毎の図で、レーザーパルス光が上昇していくところがよく確認できる。

TA-EUSO 望遠鏡観測時には、Telescope Array 実験の望遠鏡でも同時に観測しており、それぞれのデータを比較することにより、TA-EUSO 望遠鏡の能力のさらなる理解につながると期待される。また、超高エネルギー宇宙線イベントを観測するために、Telescope Array 望遠鏡からのトリガによるイベント取得する観測を行っている。現在のところ、有意な宇宙線イベントは取得できていないが、望遠鏡が設計通りの性能を持っていることから、観測時間を延ばすことにより宇宙線イベントを検出することが期待される。次年度以降も継続して観測して、宇宙線イベントの取得を目指す。

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 2 件)

1. Yoshiya Kawasaki, Lech Wiktor Piotrowski, The JEM-EUSO Collaboration, Ground-based tests of JEM-EUSO components at the Telescope Array site, "EUSO-TA", Experimental Astronomy, 2015、査読有、DOI: 10.1007/s10686-015-9441-6

2. M. Casolino for the JEM-EUSO collaboration, Calibration and testing of a prototype of the JEM-EUSO telescope on Telescope Array site, EPJ Web of Conferences, 53, (2013), 09005、査読有、DOI: 10.1051/epjconf/20135309005

[学会発表](計 9 件)

1. 川崎賀也、JEM-EUSO(148) EUSO-TA、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 23 日、早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都・新宿区)

2. 申興秀、JEM-EUSO(147) EUSO-TA の PDM 較正、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 23 日、早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都・新宿区)

3. 川崎賀也、JEM-EUSO(144) EUSO-TA、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 20 日、佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県・佐賀市)

4. Piotrowski Lech、The data structure, visualisation and first results from EUSO-TA、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 20 日、佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県・佐賀市)

5. 申興秀、JEM-EUSO(143) 積分球を用いた MAPMT 較正システム、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 20 日、佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県・佐賀市)

6. 滝澤慶之、JEM-EUSO(142) JEM-EUSO 関連ミッションの光学系デザイン、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 20 日、佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県・佐賀市)

7. Piotrowski Lech、JEM-EUSO(139) On-line and off-line data analysis for the EUSO-TA experiment、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 29 日、東海大学 湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

8. 川崎賀也、JEM-EUSO(136) TA-EUSO、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 23 日、高知大学朝倉キャンパス(高知県・高知市)

9. M.Casolino、TA-EUSO: test and calibration of the JEM-EUSO system on Telescope Array site、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 27 日、広島大学 東広島キャンパス(広島県・東広島市)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://jemeuso.riken.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戎崎 俊一 (Ebisuzaki Toshikazu)
独立行政法人理化学研究所・戎崎計算宇宙
物理研究室・主任研究員
研究者番号：10183021

(2) 連携研究者

カソリーノ マルコ (Casolino Marco)
独立行政法人理化学研究所・EUSO チーム・チームリーダー
研究者番号：10598163

滝澤 慶之 (Takizawa Yoshiyuki)
独立行政法人理化学研究所・戎崎計算宇宙
物理研究室・専任研究員
研究者番号：70312246

川崎 賀也 (Kawasaki Yoshiya)
独立行政法人理化学研究所・EUSO チーム・協力研究員
研究者番号：70344033

梶野 文義 (Kajino Fumiyoshi)
甲南大学・理工学部・教授
研究者番号：50204392

井上 直也 (Inoue Naoya)
埼玉大学・理工学研究科・教授
研究者番号：40168456

佐川 宏行 (Sagawa Hiroyuki)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号：80178590