

The JEM-EUSO Mission

戎崎俊一（理化学研究所）

JEM-EUSO Collaboration

The JEM-EUSO Mission

Toshikazu Ebisuzaki (RIKEN) for JEM-EUSO Collaboration

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory on ISS/JEM) is the science mission to detect extreme energy particles with the energy above 10^{20} eV. It is a super wide-field telescope (60 degree) that observes UV photons from air-showers produced by primary particles in dark side of the Earth. JEM-EUSO is planned to be attached to Japan experiment module (JEM) of International Space Station. It is promoted international collaboration of scientists among, Japan, USA, France, Germany Italy, Russia, Switzerland, Mexico, Spain, Poland, Slovakia, Bulgaria, and Korea.

キーワード：宇宙線、宇宙ステーション、空気シャワー

(Keywords, cosmic-rays International Space Station, air-shower)

1. はじめに

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。1990 年代前半になって、極限エネルギー領域での宇宙線の研究は、日本の AGASA グループが地上アレイによる定常的な観測を行っていた[1]。しかしながら、有効検出面積が 100 km^2 程度に過ぎなかった。一方で、大気蛍光法を用いた観測方法で、米国で HiRes グループが観測を行っている。しかし、どちらも有効検出面積が少なすぎて確定的な結論にまで至っていない。この状況を克服するため、Auger[2]と Telescope Array[3]実施中である。Auger はアルゼンチンの平原に幅 50 km 長さ 70 km の面積に水タンク検出器と大気蛍光望遠鏡を置くものである。また、Telescope Array では、日本が米国と協力して、半径約 20km の領域にシンチレータ検出器と大気蛍光望遠鏡を置く。これらの実験は、どちらも、従来からある地表粒子検出器アレイと大気蛍光法の両方を用いたハイブリッド検出器である。それぞれの検出結果をお互いに較正しながら、より正確な結果を導き出すことが期待されている。

JEM-EUSO(Extreme Universe Space Observatory onboard JEM) ミッション[3, 4, 5, 6]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)。この飛躍的に高い統計精度は、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のに十分である。

宇宙から到来する極限的なエネルギー粒子は、地球の大気原子核と衝突して主に電子・陽電子・ガンマ線からなる巨大な空気シャワーを形成する。JEM-EUSO はこのとき励起された窒素分子から放射される蛍光紫外線を時間分解能 $2.5 \mu \text{ sec}$ 、角度分解能 0.1° で撮像し、空気シャワーの発達を三次元的に再構築する。これによりその到来方向を 0.2 度から数度の角度分解能で決定する。JEM-EUSO は、半径約 220km の領域の地球大気を一度に観測できる。観測能力は、夜間に限られること、大気中の雲の状態に影響を受けることなどを考慮しても、アルゼンチンの原野に建設された Auger の 20 倍以上の感度を有し、3 年間の観測で 500 個以上の極限エネルギー宇宙線 (5×10^{19} eV 以上)を検出する能力を有している。現在建設中の新規な地上観測装置でえられると予想されるイベント数は、1 年あたり 40 個程度である。JEM-EUSO は、極限エネルギー宇宙線研究に対して多大なインパクトを与える。

JEM-EUSO は、日本の H2B ロケットで打ち上げられ、HTV (H2 Transfer Vehicle) で ISS へ運搬される予定である。JAXA によって 2008 年 5 月に JEM 曝露部第二期利用ミッション候補として JAXA に選定され、理研と JAXA および米国、メキシコ、イタリア、フランス、ドイツ、スペイン、スイス、ポーランド、スロバキア、ブルガリア、ロシア、韓国の国際協力で 3 年間の phase-A 研究が行われた。

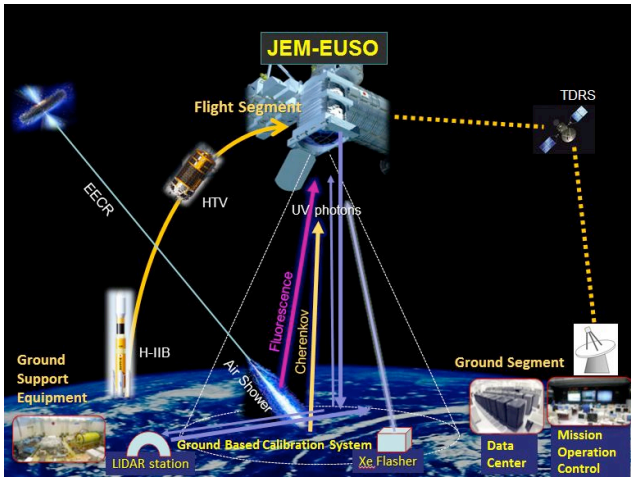


図 1. JEM-EUSO の観測方法

2. JEM-EUSO の科学的目標

JEM-EUSO の科学的目標は、基本研究と、探求的試験研究に分けられる [7, 8]。

〈2・1〉 基本研究：極限エネルギー宇宙線による荷電粒子天文学の創始

JEM-EUSO では全天をほぼ一様に観測でき、粒子の到来方向分布を精度よく決定できる。 10^{20} eV 付近のエネルギーを持つ荷電粒子は、銀河磁場でも曲がらない。したがって、粒子の到来方向を決定すればその方向にその起源天体があるはずである。JEM-EUSO によって、このような荷電粒子天文学が初めて可能となる。

実際、数百個の荷電粒子を観測したとき、数十個の天体が極限エネルギー宇宙線の線源として同定される可能性がある。そうなれば、線源同士のスpekトルの比較などにより、確実にその加速機構が議論できるようになる。報告されている Spekトルの急峻化が理論の予測どおり GZK 過程 [9] によるものであれば、同定された天体の距離と急峻化の強さが強く相関するはずである。これを確認することにより確実な GZK 過程の確認が可能になる。

〈2・2〉 探求的試験研究

極限エネルギー宇宙ガンマ線の測定

超高エネルギーガンマ線は、地球磁場と相互作用をするので、地磁気緯度によるシャワー発達の違いとしてそれを認識できる [10]。極限エネルギー粒子が宇宙初期に作られた重たい粒子の崩壊もしくは対消滅によるもの（いわゆるトップダウンシナリオ）場合、ガンマ線が多数を占めることになる。

極限エネルギーニュートリノの検出

ニュートリノは大気中に深く突っ込んだシャワーや大気中を横向きに長距離にわたり発達するシャワーとして観測される [10]。また、ニュートリノ振動によって作られた τ 型ニュートリノが作る上向きシャ

ワーも直接入射のチェレンコフ光によって検出できる可能性がある。

銀河磁場の構造と強度の推定

線源が高エネルギー事象のクラスターとして特定できれば、その周りのより低エネルギーの事象の分布を調べることにより、銀河磁場のトポロジーと強度を推定できる。

相対論、量子重力効果の検証

GZK 過程の存在確認は、特殊相対論の超高 γ 極限における検証を行う。また、余剰次元理論が正しい場合は、ニュートリノ断面積が約 100 倍に増えることが予想されている。JEM-EUSO はニュートリノ事象の数を確認することで、余剰次元理論に制限を与える唯一の現実的な実験装置である。

大気内発光現象の網羅的な研究

JEM-EUSO は、地球物理学において重要な研究対象である夜間大気光、雷放電、流星などの大気発光現象をも網羅的に調べる能力を有している。

3. 観測装置

観測装置は、主望遠鏡、大気モニタ、そして較正システムからなる [11]。主望遠鏡は、大口徑（開口径約 2.3m）、超高速（ 2.5μ 秒）、で高度に画素化（ 3×10^5 画素）された、超広角（ $\pm 30^\circ$ ）デジタルカメラである。近紫外線（330-400nm）の一光子検出が可能である。望遠鏡は 4 つの部分からなる。つまり、光学系、焦点面検出器および電子回路、そして構造体である。光学系は光子を 0.1 度の空間分解能で焦点面に集める。焦点面検出器はそれをまず、光電子に、ついで電気パルスに変換する。

光学系は 2 枚の外形 2.65m の薄型両側湾曲フレネルレンズと色収差を補正する 1 枚の回折光学レンズ、合計三枚のレンズで構成される [12]。中心部分 1.5m の 3 枚のレンズが試作され、1m を超える大口徑において、広視野と高い紫外線透明度度ともに実現できることを示した。（図 2、図 3） [13]。

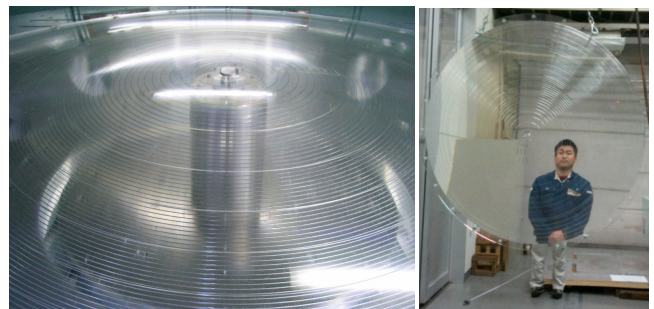


図 2. 製作されたフレネルレンズ中央部分の写真
出来上がった中央部分の 3 枚組みレンズセットは、米国に送られて性能評価を実施されている。



図 3. 製作した中央部分光学系の写真
出来上がった中央部分の 3 枚組みレンズセットは、米国にて性能評価を実施されている。



図 4. 8x8 画素を持つ位置検出型光電子増倍管 M64

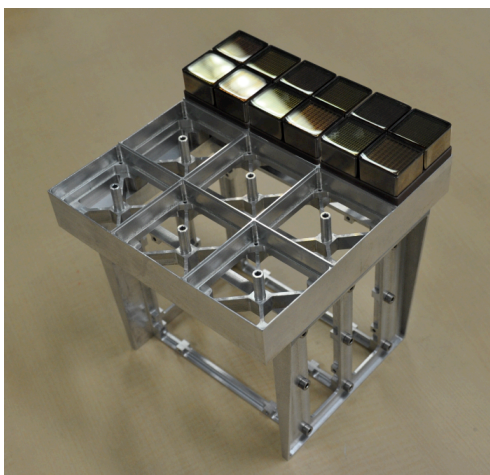


図 5. Photo Detector Module 構造体の試作

焦点面は曲率半径約 2.5m の球面で、約 5,000 本のマルチアノード型光電子増倍管でおおわれる[14]。4 個の光電子増倍管で、一つの Elementary Cell (EC)、9 個の EC が集まって一つの Photo Detector

Module (PDM) が作られる。焦点面全体では、約 143 個の PDM が使われる。光電子増倍管は、理研と浜松ホトニクスが共同開発した 64 画素の光電子増倍管 M64 を使う。焦点面全体の画素数は 30 万チャンネルに達する[14]。

焦点面電子回路は、光電子増倍管のアノード信号は、 2.5μ 秒ごとに計数され、記録し、地上に送る[15]。電子回路システムは 10^{19} - 10^{21} 電子ボルトの範囲の宇宙線に対して、高いトリガ効率と線形性を持つ柔軟なトリガアルゴリズムを実装している必要がある。1チャンネル当たりの消費電力は、2.5mW 以下でなければならない。トリガ信号が発行されると、リングメモリに蓄えられていたデータのうち必要なものが読み出される。3 回層の階層構造で、焦点面全体から発生する約 10GB/秒のデータ量を、割り当てられた 297kbps まで圧縮する[16,17]。

大気モニタは、宇宙線検出器として働く視野内の地球大気の状態を常時監視する。宇宙線シャワーから検出される近紫外光の強さは、大気の透明度、雲の被覆率、雲頂高度に依存する。大気モニタは赤外線カメラ、ライダーそして主望遠鏡のスローデータから構成される。赤外線カメラは視野内の $11\text{-}13\mu\text{m}$ の赤外線フラックスから、雲頂温度を測定し、雲頂高度を決定する。その時用いる。このとき用いられる温度・高度変換表は、ライダーによって校正する。Lidar は 355nm の紫外線パルス (20mJ/pulse) を 50Hz の頻度で射出する。帰還シグナルは、主望遠鏡によって計測される。また、スローデータを使い、雲の視差を計測することによりその高さを独立に測定する[18]。

校正システムは、光学系、焦点面、そして電子回路の効率を測定する。まず、打ち上げ前の校正により、検出器の効率、一様性、増幅率などが、紫外線 LED を使って計測され、データベースに保存される。一方、打ち上げ後は、複数の波長の LED を使った拡散光源が、焦点面の直前のレンズおよび焦点面に設置され、それぞれ、焦点面検出器と光学系の効率の経年変化を計測する。また、月などの自然光源も標準光源として用いる。

4. 性能予測

観測機器の性能はend-to-Endシミュレーションによって、見積もられている[19]。鉛直観測モードにおいては、典型的な背景光の強さの場合、JEM-EUSO望遠鏡のトリガ効率は 5×10^{19} eVにおいて50%、 10^{20} eVにおいて 86%である。視野の中心15度の領域では、光学系の効率が高いこと、空気シャワーまでの距離が近いことなどの理由で、エネルギー敷居値 (50%) は、 3.7×10^{19} eV まで下がる。傾斜観測においては、観測露出は増加するが、エネルギー敷居値は増大する[17]。

5. 最後に

JEM-EUSO は、空気シャワーの宇宙からの観測に挑戦する最初のミッションである。これは、極限エネルギー宇宙線観測の標準的手法になり、荷電粒子を用いた天文学を創始し、宇宙の基礎物理の限界に挑戦する。また、観測期間終了後に観測装置を自由衛星化してさらに高い軌道へ投入することなど、新たな展開の可能性もある。これらは、宇宙ステーションの組立工場化の先鞭をつけるもので、日本の有人宇宙開発の一翼を担うものと考えている。

文 献

- 1) <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>
- 2) <http://www.auger.org/>
- 3) <http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 4) Y. Takahashi et al., 2009, New Journal of Physics, 11, 065009.
- 5) T. Ebisuzaki et al., 2008, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 175-176, 237.
- 6) T. Ebisuzaki et al. (JEM-EUSO collab.) , Proc. 31st ICRC, 2009 ([http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html, #icrc1035](http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/#icrc1035)).
- 7) Ebisuzaki et al. 2009, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics - VII, pp369-376.
- 8) A. Santangelo et al., 2009, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics - VII, pp380-387.
- 9) K. Greisen 1966, Phys. Lett. 16, 148. G. T. Zatsepin, V. A.; Kuz'min 1966, JETP Phys. Lett. 4, 78.
- 10) K. Shinozaki, et al., 2009, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics - VII, pp377-379.
- 11) F. Kajino et al. (JEM-EUSO collaboration), 2010, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 623, 422-424.
- 12) Y. Takizawa et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0792).
- 13) K. Maekawa et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0103).
- 14) Y. Kawasaki et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0833).
- 15) F. Kajino et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0711).
- 16) M. Bertaina et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0326).
- 17) M. Casolino et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0770).
- 18) S. Wada et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0724).
- 19) N. Inoue et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0934).