

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 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]が実施中である。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いる。

JEM-EUSO(Extreme Universe Space Observatory onboard JEM)ミッションでは、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(AGASA の 700 倍)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、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。

宇宙から到来する極限的なエネルギー粒子は、地球の大気の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 30 倍以上の感度を有し、5 年間の観測で 1000 個以上の極限エネルギー宇宙線 (7×10^{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 10 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 に選定された。現在、JAXA のもとで phase-A 研究が進行中である。

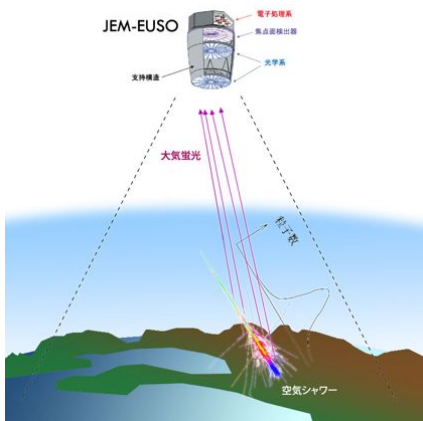


図 1. JEM-EUSO の観測方法

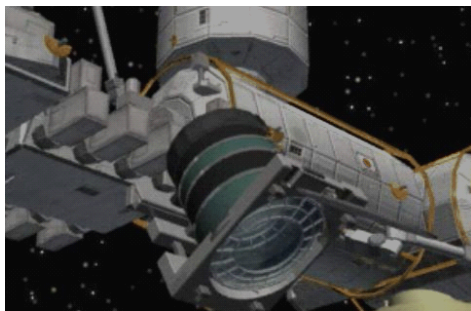


図 2. ISS に設置された JEM-EUSO (傾斜観測モード)

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。

〈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、Auger 実験 3 年間で得られた 5.7×10^{19} eV 以上の事象データ 27 個の到来方向には近傍の活動的銀河核との相関が見られたと報告している^[4]。

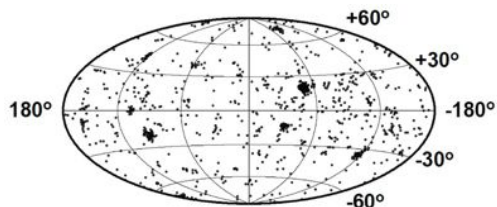


図 3. JEM-EUSO で予想される到来方向分布。点源が 3 次元空間に一様に分布すると仮定した。個々の線源でスペクトルを比較により、GZK 過程や加速過程によるスペクトル急峻化の議論ができる。

実際、1000 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 (図 3)。そうなれば、線源同士のスペク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。報告されているスペクトルの急峻化が理論の予測どおり GZK 過程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ことで、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。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。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で、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. HTV への搭載性

Phase-A 研究の一環として、JEM-EUSO の HTV への搭載概念設計を行った。パレットの底に穴を開け (図 4)、視野を確保する。鏡筒を 3 つのリングに分割し、このリングの移動により望遠鏡を伸展することとした (図 5、6)。科学成立性の観点から、望遠鏡の開口面積をできるだけ大きくとるために、円筒形にこだわらず、望遠鏡の側方をカットした縦長の形状とし

た（図 4）。このとき、当初の提案に比べ 90%の開口面積を確保でき、科学の成立性が保障できることがわかった。レイトレース法によるシミュレーションの結果を図 7 に与える。

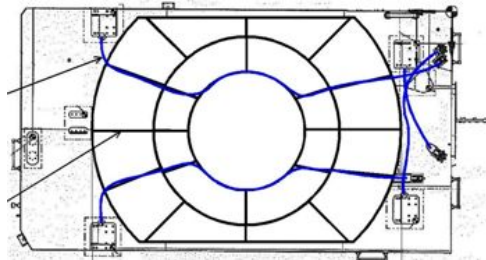


図 4. 望遠鏡の開口部

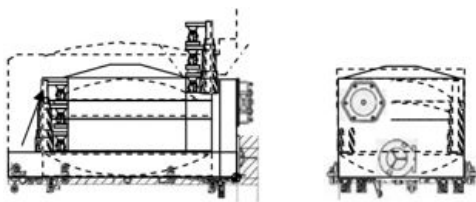


図 5. 収納状態の望遠鏡

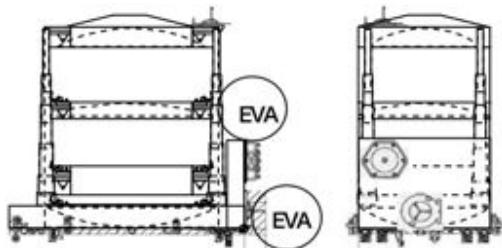


図 6. 伸展状態の望遠鏡

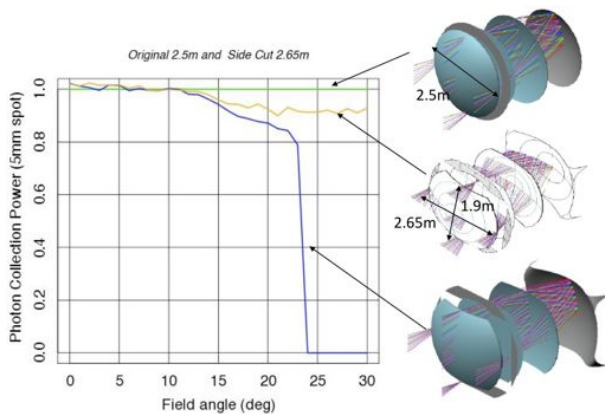


図 7. 側方カット光学系の性能。直径 2.5m の光学系の効率（緑）を 1 とし、側方カット方向と垂直（青）と平行（黄）な視野に対する効率を比較している。

また、収納状態および軌道状態における構造解析も実施し、ほぼ要求を満足する機械強度を持つことが分かった（図 8）。

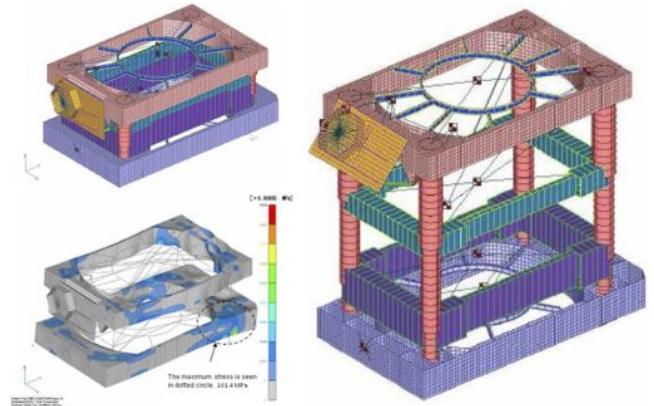


図 8. 構造解析結果

4. フレネルレンズ試作

理研大森素形材工学研究室では、直径 3.4m まで加工可能な加工装置を導入し、米国チームと協力してプラスチック製のフレネルレンズの試作を進めている。第 3 レンズ及び第 2 レンズの中央部分（直径 1.5m）の試作が終了した（図 9）。今後、残りの第 1 レンズ中央部分の製作を今年度中に終わらせる予定である。出来上がった中央部分の 3 枚組みレンズセットは、米国の NASA マーシャル宇宙センターにある光学テストファシリティで性能評価を実施予定である。

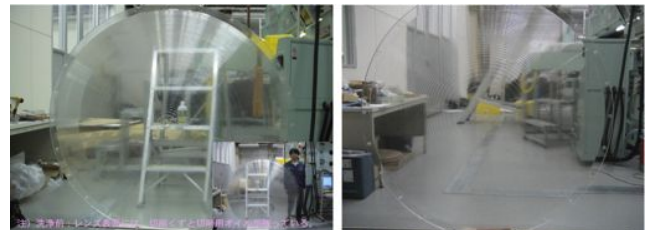


図 9. 試作したレンズ中央部分（直径 1.5m）。左図：第 3 レンズ（湾曲レンズ）、右図：第 2 レンズ（平面レンズ）。この写真は洗浄前に撮影したもので、レンズ表面にはまだ切削屑と切削オイルが付着している。

5. 最後に

JEM-EUSO は、その巨大な検出面積により定量的な検出が出来るため、極限エネルギー宇宙線観測の標準的手法になると考えている。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られる。

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) J. Abraham et al., *Science*, **318**, 5852, 938, 2007.