

Extreme Universe Space Observatory (EUSO)

理化学研究所 戒崎俊一

Extreme Universe Space Observatory (EUSO)

Toshikazu Ebisuzaki and EUSO-Japan Collaboration

RIKEN, 2-1 Hirosawa Wako 351-0198

E-Mail: ebisu@ riken.jp

Abstract: EUSO (Extreme Universe Space Observatory) is the science mission to detect Ultra High energy Cosmic-ray with an energy above 10^{20} eV. It is a super wide-field telescope (60 degree) that observes UV photons from air-showers produced by cosmic-rays in dark side of the Earth. EUSO is planned to be attached to Columbus module of International space station. It is promoted international collaboration of scientists among Europe, USA, and Japan. The phase-A study (conceptual design) under ESA has been successfully finished in July. However, Italian space agency and ESA are in difficulties to move to the phase-B study. Therefore, Japan and US team decided to challenge to the second phase of JEM/EF (Japan Experiment Module / Exposure Facility) mission.

Key words: Space Utilization, Space Station, Ultra High energy Cosmic-ray

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。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 計画と Telescope Array 計画が進行中である。Auger 計画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。また、Telescope Array 計画では、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。しかし、これらの有効面積では、 10^{20} eV を超える宇宙線を年間数十例程度しか検出することができず、その起源を議論するに十分な統計精度が得られるまでにはいたらない。なお、これらの地上実験はさらなる大面積化などの発展は事実上望めないことに注意すべきである。

EUSO(Extreme Universe Space Observatory)ミッションは、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。その 3 年間のミッション中、約 2,000 個の極限エネルギー事象を観測する。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。

EUSO 計画とその目的

EUSO 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} 電子ボルト(eV)を超える極限エネルギー宇宙線を観測する。宇宙から到来する極限的なエネルギー宇宙線は、地球の大気原子核と衝突して主に電子・陽電子からなる巨大な空気シャワーを形成する。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数 μ 秒の時間間隔で撮像し、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。半径約 220km の領域の地球大気を一度に観測できる (Fig.1)。夜間観測に限られること、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中の Auger の数十倍の感度を有し、3 年間の観測で約 2000 個の極限エネルギー宇宙線を検出する見込みである。有史以来、人類が観測した極限エネルギー宇宙線は 20 個に満たず、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では 1 年あたり 100 個を超えない。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。

EUSO は、直径 2.5m の大型曲面プラスチックフレネルレンズ 2 枚 (軽量、高い耐衝撃性を達成)

を用い超広角（±30度）の視野を実現し、広大な面積に降る宇宙線空気シャワーの軌跡を時間分解能 2.5 μsec と空間分解能 約 1 km×1 km(角度分解能 0.1°)の三次元で撮像記録できる望遠鏡であり、宇宙観測用大型広視野光学望遠鏡として新しい可能性を開く望遠鏡である。EUSO の焦点面（約 4.9 m²）には、約 6,000 本のマルチアノード光電子増倍管を隙間なく敷き詰めた構成にし、その総画素数は、20 万ピクセルに達する。宇宙観測器として初めて、多数の光電子増倍管を使った高速・大フレームカメラが実現する。このように、宇宙から空気シャワーを観測すると、地上の観測装置では得られなかった到来粒子の弁別能力と広い有効面積が得られる（Fig.1）。



Fig.1 EUSO telescope on ISS and observation

EUSO は 2010 年に欧州宇宙機構(ESA)の責任で国際宇宙ステーション欧州コロンバスモジュールの外部パレットに装着予定である。2004 年 7 月に ESA における Phase-A 研究(概念設計)が終了し、現在 Phase-B (詳細設計段階)の遂行体制を日米欧三極で協議している。

EUSO の科学的目標

EUSO の科学的目標は、大きくは以下の 3 つである。

1. 極限エネルギー宇宙線の起源やその伝播の謎を解明する

EUSO は極限エネルギー宇宙線のエネルギー分布と到来方向分布を飛躍的に高い精度で測定できる。観測効率を考慮した有効面積は、建設中の Telescope Array の 30 倍、Auger の 10 倍であり、事象数とデータの質を飛躍的に向上させる(3 年間で 2000 個以上)。また EUSO では全天をほぼ一様に観測でき、宇宙線の到来方向分布を精度よく決定できる。さらに、極限エネルギー宇宙線が宇宙初期に作られた重たい粒子の崩壊によるもの場合、ガンマ線が多数を占めることになる。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。

2. 極限エネルギーニュートリノ天文学を創始する

EUSO は空気シャワーの最大発達の大気深さを使って一次粒子の識別ができる。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（EUSO によってのみ検出可能）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型ニュートリノが作る上向きシャワーも検出できる可能性がある。

3. 大気内発光現象の網羅的な研究を行う

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。

日本の参加の内容

EUSO は日米欧の三極の協力で建設される予定である：米国が光学系、日本が焦点面検出器、欧州がエレクトロニクスを担当する（Fig.2）。

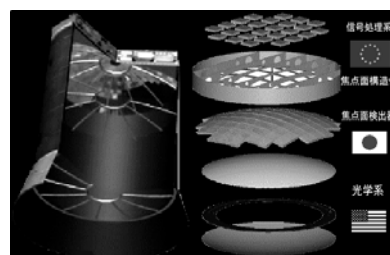


Fig.2 EUSO telescope structure

EUSO の焦点面は直径約 2.5m の曲面である。Phase-A 研究における概念設計においては、焦点面は約 6000 本のマルチアノード光電子増倍管（浜松ホトニクス社製 R8900-M36）で覆う。4 本の光電子増倍管を田の字に配置した Elementary Cell (EC)、9 つの EC を 3x3 のアレイ状に配置した Photo Detector Module (PDM)を要素として構成する。焦点面全体で約 1,500 個の EC、約 160 個の PDM が並ぶことになる（Fig.3）。

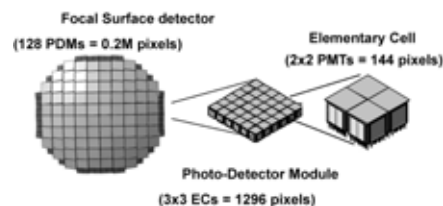


Fig.3 Focal surface detector

光電子増倍管に供給する高圧電源は、PDM 一個に一つの割合で取り付ける。光電子増倍管から出

力されるパルス信号は、フロントエンド電子回路を含んだ ASIC に送られる。ここでデジタル化された信号は、その画素の X-Y 位置と時間の情報をつけて、トリガ制御回路に送られる。トリガ制御回路は光速で直線状に進行するイベントを検出してトリガをかける。これらの焦点面検出器の構成案は Phase-B 研究における詳細設計を経て最終的に決定される。

焦点面検出器に関する具体的な日本の担当は、
 1. 光電子増倍管を EC の形に組み上げて供給する。
 2. 光電子増倍管に供給する高圧電源とプリーダを供給する。
 である。

フロントエンドエレクトロニクスは、イタリアとフランス、焦点面を力学的に支える構造体はフランス、焦点面検出器としての組み上げはイタリアが担当することになっている。

日本の活動

1. 国内 EUSO WG の組織と運営

EUSO に関する研究活動を推進するため、日本国内に WG を組織した。日本 PI の戒崎が所属する理化学研究所が取りまとめ役となり、甲南大学、青山学院大学、埼玉大学などのメンバーが参加し、分担して開発研究を推進している。だいたい一月に一回の割合で、研究連絡会議を実施し、各グループ間の調整を行っている。

2. フレネルレンズのプロトタイプ製作

直径が 0.4 m の両面フレネルレンズを 2 枚組み合わせた型のプロトタイプを製作した。両面フレネルレンズの製作、光学システムの検証、使用するマルチアノード光電子増倍管の性能評価を経て、明野観測所において、試験観測を行い、空気シャワーチェレンコフ光、紫外線レーザーによる擬似空気シャワー大気蛍光の測定に成功した。この結果により、このような特殊な EUSO 光学系が実際に機能することを口径 0.4 m という規模で確認した。【理研】

3. 新型マルチアノード光電子増倍管開発

EUSO 観測装置の焦点面検出器を構成するマルチアノード光電子増倍管の開発を行ってきた。現在市販されているものでは、有感領域が 45 % 程度しかなく、大きな問題であった。この問題を解決するために光電面と第一ダイノードの間に弱い電

場をかけ光電子を収束させる改善を施し 85 % まで向上させたマルチアノード光電子増倍管を開発した (Fig.4)。さらにライトガイドを装着することで有感領域を約 93 % まで向上させた。さらに、この光電子増倍管が宇宙での観測に必要な諸仕様 (耐放射線性、耐振動性、長時間耐久性等) を満たし、EUSO の焦点面検出器に採用することに問題ないことを確認した。【理研・放医研】

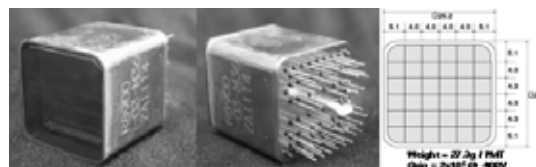


Fig.4 Multianode photomultiplier (R8900-03-M36)

4. 焦点面検出器の熱設計

焦点面上には約 20 万チャンネルの光電子増倍管がとりつけられ、データ収集回路を含めた焦点面での発熱は 700 W 程度と予想される。宇宙環境での熱的条件下で光電子増倍管が動作する -30 ~ +40 の設定温度 ± 5 に温度を制御するため、宇宙ステーション軌道上での温度解析をおこなった。その結果、5 ~ 10 m² の放熱板を鏡筒の周りに設置すれば、制御可能であることを明らかにした。外周部と中央部の温度差も 3.5 度以内に保持できる予測がえられた。【福井工大】

5. EC 構造体・PDM 構造体の開発

EC 構造の開発および EC 構造を決定するために必要な PDM 構造体の試作を行った。(Fig.5)。これらの構造体を用いて耐振動試験を行い、光電子増倍管の保持方法等を検討してフライト用の詳細設計に反映させる。PDM 構造体の試作は、2005 年上期に完成し、それぞれ、20G rms までの振動試験を行い、耐振動性を十分に有することを確認した。【理研・甲南大】

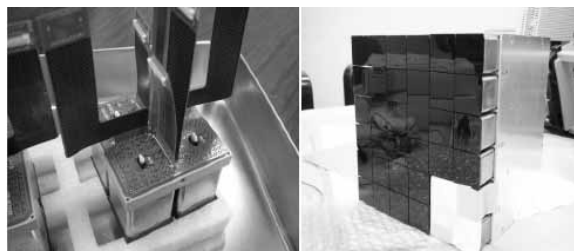


Fig.5 Pictures of EC (left) & PDM (Right) Structure

6. 高電圧電源の開発

光電子増倍管のためのアクティブプリーダと

高電圧電源 (Fig.6.) の設計、製作を行い、所定の性能を発揮することを確認した。また、これらを PDM 構造体に搭載し、20G rms までの振動試験を行い、耐振動性を十分に有することを確認した。

【甲南大・理研】

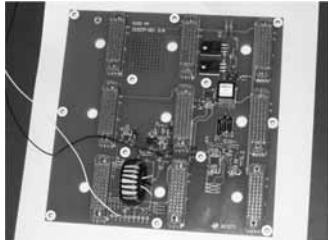


Fig.6. EUSO onboard JEM/EF

7. End-to-End シミュレータ開発

鉄、陽子、ガンマ線による空気シャワー生成プログラムの開発と、望遠鏡光学系のレイ・トレーシングおよび焦点面での光子検出の再現シミュレータを開発を行った。現在、機能の充実化など、アップデート作業を行っている。【埼玉大・理研】

8. 気球実験

地球大気の子光強度は月齢や雲量により大きく異なる。この値の変動幅を定量的に推定しておくことは、EUSO が高い S/N 比で大気蛍光を観測するために必要不可欠である。そこで、2005 年 8 月末に、気球に光電子増倍管を搭載し実際にバックグラウンド光測定を行い、データ解析中である。

(Fig.7) 【青山学院大】

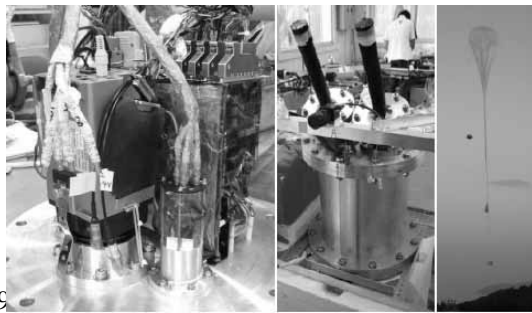


Fig.7. Balloon experiment.

EUSO によって、雷や流星などの大気発光観測をも可能にするため、焦点面検出器の制御システムの基礎開発を行っている。【理研・東北大】

最後に

以上が、2005 年 11 月頃までの状況であった。その後、EUSO ミッションに関して大きな動きがあった。国際宇宙ステーション計画の先行き不透明感から ESA における Phase-B への進行が大幅に遅れることが明らかになった。そこで、日本と米国は日本の JEM 曝露部へ EUSO を設置することを軸に日本を基軸として、JEM 曝露部第二期利用に向けて提案する方針で行動中である (Fig.8.)。

Phase-A 研究以降のいくつかの技術進歩を取り入れて、エネルギー閾値を下げて超高エネルギーニュートリノの検出を確実なものとし、同時に、雷、オーロラ、夜光などの大気科学の側面を深めるなどの努力を始めている。EUSO は、その巨大な検出面積により定量的な検出が可能なので、極限エネルギー宇宙線観測の標準的手法になると考えられる。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や、大気を斜めに観ることにより有効面積の更なる拡大など、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。

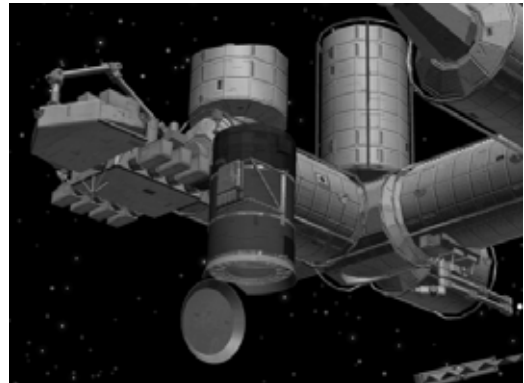


Fig.8. EUSO onboard JEM/EF