

## JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory on ISS/JEM)

Japan : T. Ebisuzaki, H. Omori, K. Kawai, Y. Kawasaki, M. Sato, Y. Takizawa, Y. Uehara (Riken), Y. Takahashi (Tohoku Univ.), T. Murakami, D. Yonetoku (Kanazawa Univ.), M. Nagano (Fukui Inst. Tech.), Y. Arai, Y. Kurihara, H. Shimizu, J. Fujimoto (KEK), M. Takeda (ICRR, Univ. Tokyo), N. Inoue, S. Hasegawa, K. Miyazawa, Y. Wada (Saitama Univ.), K. Asano, S. Inoue, N. Sugiyama, Y. Mizumoto (NAOJ), Y. Uchihori (NIRS), S. Yoshida (Chiba Univ.), N. Sakaki, T. Shibata (Aoyama Gakuin Univ.), H. Ikeda (ISAS, JAXA), Y. Ito (STEL, Nagoya Univ.), A. Saito (Kyoto Univ.), S. Nagataki (YITP, Kyoto Univ.), K. Inoue, F. Kajino, M. Sakata, A. Sasaki, T. Sawabe, Y. Noguchi, Y. Yamamoto (Konan Univ.), M. Nagata (Kobe Univ.), T. Tajima (KPSI, JAEA)

USA : J. H. Adams, S. Mitchell, M. J. Christl, J. Watts Jr., A. English (MSFC, NASA), Y. Takahashi, K. Pitalo, J. Hadaway, J. Geary, P. Readon (Univ. Alabama), H. Crawford, C. Pennypacker (LBL, Univ. California, Berkeley), K. Arisaka, D. Cline (UCLA), T. Weiler, S. Czorna (Vanderbilt Univ.)

France : P. Gorodetzky, P. Salin (CNRS at Coll. de France), J. Dolbeau (Coll. de France), T. Patzark (Univ. Paris)

Switzerland : A. Maurissen (Neuchatel, Switzerland)

Italy : M. E. Bertaina (Torino Univ.)

Republic of Korea : I. H. Park (Ewha W. Univ.)

Presented by T. Ebisuzaki, RIKEN, 2-1 Hirosawa Wako 351-0198

E-Mail: ebisu@riken.jp

**Abstract:** 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, and Europe. The phase-A study (conceptual design) under ESA has been successfully finished in July, 2004. 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. It will be submitted to call for proposal of the second phase utilization mission candidate of JEM/EF, has released in November 2006. The proposal will include recent technical progresses, such as, a new optical system with the better optical performance, track trigger algorithm, and new detectors with higher quantum efficiencies.

**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  $100 \text{ km}^2$  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ものである。また、Telescope Array 計画では、日本が米国と協力して、半径約 20 km 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を超える粒子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。

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 5 年間のミッション中、約 1,000 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は口径約 2.5 mで約 60 度の視野を持つ超広視野地球望遠鏡で、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。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  $2.5 \mu\text{sec}$  と空間分解能 約  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  (角度分解能  $0.1^\circ$ ) 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  $4.9 \text{ m}^2$ )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る。その総画素数は、20 万ピクセルである。

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  $\mu$  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。JEM-EUSOは、半径約 220kmの領域の地球大気を一度に観測できる。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 30 倍以上の感度を有し、5 年間の観測で約 1000 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粒子は 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は、1 年あたり 10 個程度である。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。

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)。

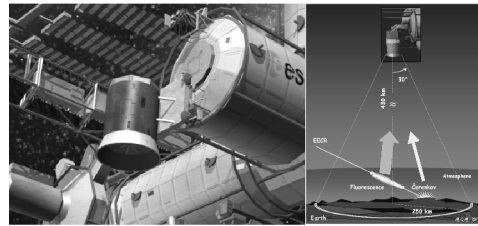


Fig.1 ESA-EUSO on ISS and observation

### JEM-EUSO 計画の開始

EUSO ミッション計画 (以下、ESA-EUSO) (Fig. 1.) は、シャトルの事故等による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、2005 年 12 月に、日本と米国は、日本の JEM 曝露部へ EUSO を設置する JEM-EUSO 計画 (Fig. 2.) として検討を開始した。

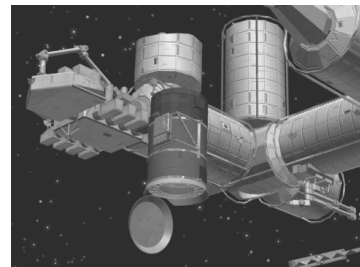


Fig. 2. JEM-EUSO onboard JEM/EF

JEM は 2008 年までの打ち上げが決定しており、第一期利用が順次終わる 2010 年以降の利用についての議論が本格化している。2006 年 11 月にその第二期利用のためのミッション候補公募が JAXA 宇宙環境利用センターから出された。また、JAXA 宇宙理学委員会は、JEM-EUSO を含めた第二期利用ミッション候補二件に関して新たにワーキンググループ設置を認め、それらの科学的価値と技術的成熟度を評価する体制を整えた (2006 年 6 月)。我々は、JEM 第二期利用のためのミッション候補公募 (2007 年 2 月 16 日〆切) に対して、JEM-EUSO ミッションの提案を行なう。採択されると 2007 年度から、基本設計研究 (Phase-A) が開始となる予定である。

JEM-EUSO 計画では、ESA で完了している Phase-A 研究を基本とし、それ以降の技術進歩を取り入れる。それらは

- 1) アモルファスフッ素樹脂 CYTOP による色収差を大幅に軽減し 1.5 倍明るい新光学系
- 2) シャワートラックを高精度で判定するトラックトリガロジック

である。また、2006 年後半に浜松ホトニクスが発表した Ultra-バイアルカリ光電面を採用した光電子増倍管を用いると、量子効率が従来の約 1.7 倍

となる。さらに、JEM の暴露部のポートは十分な耐荷重を有しているため、傾斜モードをもうける (Fig. 3)。これは、ESA-EUSO にはなかった機能で、観測期間の途中で、望遠鏡を 30 度前後傾けて、大気を斜めに観る。これにより、観測有効面積の 5 倍程度増大することができる。

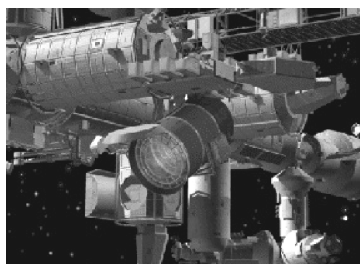


Fig. 3. JEM-EUSO 傾斜 モード

### JEM-EUSO の科学目的

JEM-EUSO の科学的目的は、大きくは以下の一つの基本目的 3 つの探求目的からなる。

#### 基本目的 1：極限エネルギー宇宙線による荷電粒子天文学

JEM-EUSO は極限エネルギー粒子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 (5 年間で 1000 個以上)。また 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。実際、1000 個の荷電粒子を観測したとき、数十個の起源天体が同定される可能性がある。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。JEM-EUSO によって、このような荷電粒子天文学が可能となる。

さらに、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。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。

#### 探求目的 1：極限エネルギー宇宙ニュートリノの検出

JEM-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を横向きに長距離にわたり発達するシャワー (JEM-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  $\tau$  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。

#### 探求目的 2：超 LHC 物理の探求

基礎物理学に関するいくつかの検証実験が可能である。極限エネルギー粒子が関与する相互作用の質点系エネルギーは、Large Hadron Collider (LHC) が到達できるエネルギーを二桁以上超えている。また、JEM-EUSO は、宇宙の暗黒物質としての超重粒子の存在や、高  $\gamma$  極限 ( $\gamma \sim 10^{11}$ ) におけるローレンツ不変性の宇宙論的検証、時間差を用いた量子重力理論の検証などのための実証データを提供できる唯一の実験である。

#### 探求目的 3：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。

### JEM-EUSO の国際協力

JEM-EUSO は、日本を軸とした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、日本が統括し実行する。欧州が担う部分は調整中である。その確認作業は、宇宙科学本部宇宙理学委員会の援助で進められている。すなわち、国際協力と役割分担を決めるため 2007 年 1 月に米国、ロシア、フランス、イタリア、ドイツ、スイス、韓国などからの参加者を交えて国際協力会合を開く。また、3 月下旬には科学コミュニティに開かれた国際ワークショップを開催する予定である。

### 日本の活動

ESA-EUSO 時代から、次のような研究開発を行ってきた。

- ・フレネルレンズのプロトタイプ製作【理研】
- ・新型マルチアノード光電子増倍管開発【理研・放医研】
- ・焦点面検出器の熱設計【福井工大】
- ・EC 構造体・PDM 構造体の開発【理研・甲南大】
- ・高電圧電源の開発【甲南大・理研】
- ・End-to-End シミュレータ開発【埼玉大・理研】
- ・気球実験【青山学院大】
- ・大気発光観測にむけた制御回路の基礎開発【理研・東北大】

これらに関しては、昨年すでに報告しているので、最新のものに関して次に紹介する。

### 1. 実行体制の確認

JEM-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。PI の戎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。2006 年 6 月に、宇宙理学委員会において、2011 年頃から始まる JEM 第 2 期利用での JEM への EUSO 搭載を検討するグループとして、WG の設置認められた。

さらに、理化学研究所中央研究所は、JEM-EUSO ミッションの推進のため、佐藤文隆甲南大学教授を委員長とした計画化委員会を 2006 年 7 月設立し、JEM-EUSO ミッションの技術準備と理研内体制の明確化と予算化の議論を進めている。

### 2. ロシアのFoton衛星搭載のTUS実験への参加

2009 年打ち上げのロシアの Foton 衛星搭載の TUS (Tracking Ultra-violet Set up) 望遠鏡 (Fig. 4.) に JEM-EUSO 用光電子増倍管を供給する。TUS 望遠鏡は宇宙からの空気シャワー観測を技術実証する JEM-EUSO のパスファインダーであり、衛星軌道高度からの宇宙線空気シャワー蛍光とチェレンコフ光の世界で初めて検出すると期待されている。TUS 衛星実験が予定通りに観測を始まれば、JEM-EUSO に先立って、宇宙からの超高エネルギー宇宙線の観測に着手し、先駆的な位置に立つことになる。TUS 衛星実験は、現行の地上実験 (Auger や TA) と同程度の観測性能を有している。TUS 望遠鏡は、JEM-EUSO に比べ望遠鏡口径が小さいため、超高エネルギー宇宙線の起源の解明に至る臨界露出量には、Auger や TA と同様に達しない。起源の解明は、JEM-EUSO によって行われることになる。

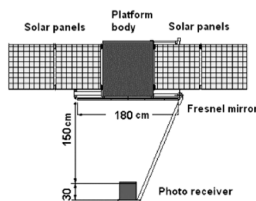


Fig. 4. ロシアの Foton 衛星搭載の TUS 望遠鏡

### 3. 読み出しASICの設計と試作

共同研究機関である甲南大に於いて、甲南学園平生太郎基金科学研究奨励助成金を獲得し、ESA-EUSO では欧州で開発される予定であった読み出し ASIC の設計と試作を、JAXA/ISAS の共同研究者を中心に行っている。16 チャンネルの信号を処理する 3mm 角の CMOS チップを試作しており、2007 年度中に評価が完了する予定である。

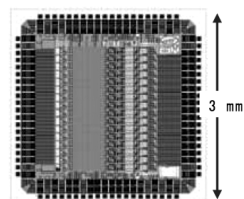


Fig. 5. ASIC 回路のレイアウト

### 4. トラックトリガ法の開発

シャワーイベントを高精度で判定するトリガロジックの開発を行った。2.5  $\mu$  sec が基本単位となる GTU を定義したとき、数 GTU 継続した信号をシャワーイベントと判定する ESA-EUSO 時代のシンプル手法では、背景光によるフィエイクイベントをトリガする頻度が高かった。これを改善するために、新たにシャワートラックを判定するロジックを加えて、トリガ判定の高度化を行った。

### まとめ

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可能なものとし、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、大気を斜めに観ることにより有効面積の更なる拡大や、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。