

BALLOON EUSO 実験計画

理化学研究所	津野克彦、P.ピコツァ、M.カソリーノ、戎崎俊一、滝澤慶之、川崎賀也、篠崎健児、宮本寛子、H. シルバ・ロペス、A. ザロマ、F. フェヌー、N. ニコノフ
甲南大学	梶野文義
埼玉大学	井上直也、東出一洋
CNES	Pascale Danto, Olivier LaMarle
IRAP	Peter von Ballmoos
LAL, PARIS11	Sylvie Dagoret, Pierre Barillon, Ahmad Salleh
APC, PARIS7	Etienne Parizo, Philippe Gorodetzky
IAAT, Tübingen Univ.	Andrea Santangelo, Jörg Bayer
JEM-EUSO チーム	

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 グループの地上アレイによる観測、米国を中心とした HiRes グループによる大気蛍光法を用いた観測方法で、観測が進められた。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[1] と Telescope Array[2]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。

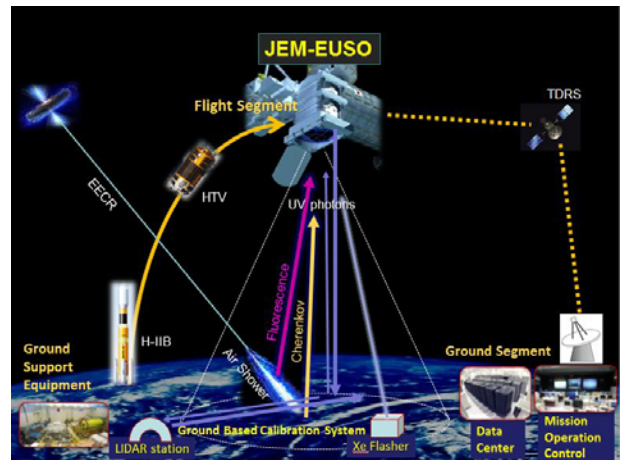


図 1 JEM-EUSO は ISS 暴露部から観測する

JEM-EUSO(Extreme Universe Space Observatory onboard JEM)ミッション[2,3,4,5]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。

JEM-EUSO は次の観測が可能である。

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[6]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。

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[7]。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。

- ・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[7]。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。

2. JEM-EUSO 観測システム開発の現状

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 JEM 暴露部に取り付けられる予定である。JAXA によって 2008 年 5 月に JEM 暴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。2016 年度の打ち上げを想定して準備を進めている。

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[8]。主望遠鏡は、大口径（開口径約 2.3m）、超高速（2.5 μ 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

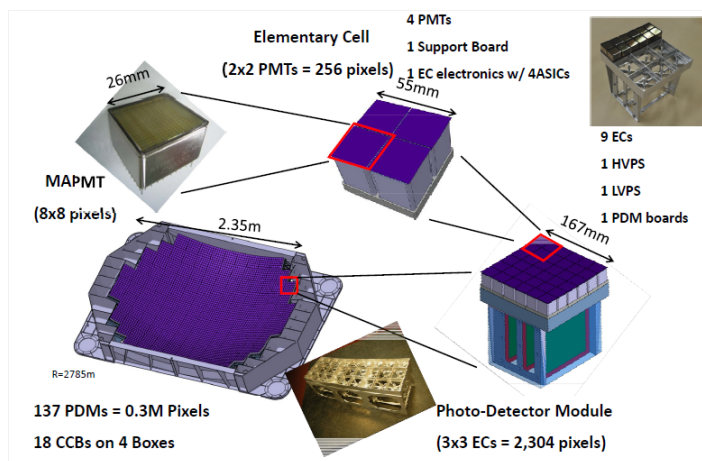


図 2 JEM-EUSO の焦点面の構成

ズ、合計三枚のレンズで構成される[9]。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。[10]。

焦点面は図 2 に示すように、曲率半径約 2.5m の球面をなし、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[11]。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 137 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[11]。

これまでの開発研究において、主要な部分の設計・試作を通じて下記の様な主要な課題を解決してきた。

- (1) M64 光電子増倍管は、安定して 10^6 倍の増幅が得られ、一様性も含め、量産が可能なレベルに達している。
- (2) 64 画素マルチアノードの読み出しを行う ASIC の開発を行い。今年度の詳細な性能評価によって、JEM-EUSO を実現するために十分な性能を有することが確認できた。
- (3) FPGA を用いた PDM 制御ボードの試作が完了している。
- (4) PDM の信号を 8 個単位で処理するクラスターコントロールボード(CCB)を試作し、アルゴリズムおよび処理能力の評価中である。
- (5) PDM の筐体、焦点面構造の部分モデルを試作した。

今年度、M64 光電子増倍管、ASIC、PDM 制御ボードの End-to-end 試験を行い、UV 光の検出とデータ取得に成功した。またこれら成果の内、光電子増倍管、ASIC、PDM 信号処理回路は他のプロジェクトに使用され韓国の研究グループによって衛星搭載化が進められている。

現在、焦点面の構成要素の開発にめどがついたところである。JEM-EUSO 焦点面は観測機器の質量の約 1/4 を有し、電力の 7 割弱を消費する複雑でかつ大型のサブシステムを構成する。実際にフライトに耐える実装を実現し、性能を満たす焦点面の実現を目指して開発を行っている。

137 個の PDM には、トータルで 1233 個の EC を使用する。EC 及び PDM を以下に小さく高密度に実装し、光電子増倍管の高圧を安全に供給することが焦点面実現への課題であると認識しており、気球実験によって実証したい項目である。

JEM-EUSO の研究によって設定した主要な PDM 性能を下記に示す。

- PDM 質量 2.1kg 以下 (BG3 フィルターを除く)
- PDM 消費電力 3.85W 以下
- 2.5 μ s 分解能でのシングルフォトン計数
- PDM 制御ボードによる 1st トリガー
- トリガー前後のデータ収集

3. BALLOON EUSO 計画概要

本実験は、JEM-EUSO 研究グループの中のフランスのチームが実験グループ主体となり、CNES の気球を用いて実験を行う。パリ第 7 大学 APC の Etienne Parizot を PI、パリ第 11 大学 LAL の Sylvie Dagoret を PM 中心として、JEM-EUSO の各国のグループが協力する。日本は、光電子増倍管の供給、搭載機器のシステム設計、光学系の供給を担当する。実験の目的は前節で述べ

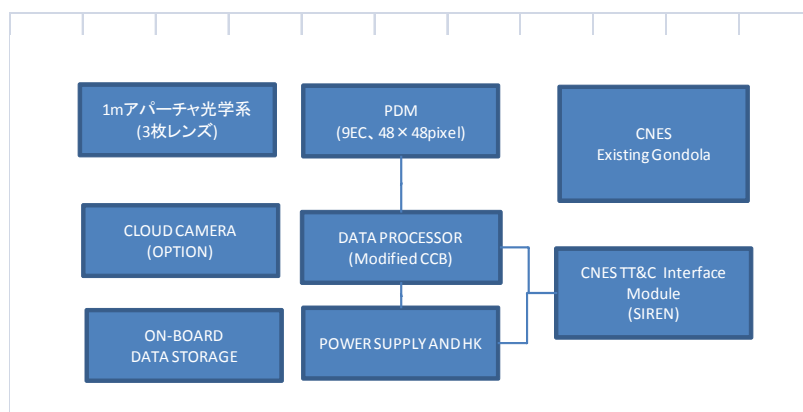


図 3 BALLOON EUSO ブロック図

たように、下記の2点である。

- JEM-EUSO の主要な開発課題である高密度実装の PDM の宇宙環境での動作実証
- 見下ろし観測によるエアershower観測の実証と UV 背景光の計測。

2 回のフライトを計画しており、1 回目は 2012 年 1 月から 2 月を目標に機器の動作の確認とバックグラウンド計測を中心とした予備観測を行うフライトで、2 回目のフライトで長時間(概ね 24 時間以上)のフライトを目指す。実験地は、これからの調整によるが、キルナを希望している。

Balloon EUSO 観測機器の構成を図 3 に示す。CNES から提供されるゴンドラと通信機器を使用し、できるだけ短期間に必要な機器をそろえる計画としたい。観測機器は、現在開発中の JEM-EUSO で使用するハードウェアをもとに開発する。特に、PDM に使う EC は、JEM-EUSO の EM の位置づけであるが、そのまま ISS へのフライトに使用できるレベルのものを使用する計画である。JEM-EUSO の CCB は 8 個の PDM の処理が可能な能力を有するので、FPGA の内容を変更し 1 個の PDM のデータ処理と、その他の機器のコントロールに使用する計画である。光学系は、Balloon EUSO 用として 1m² の口径の 3 枚構成の屈折望遠鏡を新規に設計・製作する計画である。すでに JEM-EUSO 用 BBM として 1.5m 口径の 3 枚レンズの開発に成功しており、最小のリスクで製作できる。

2011 年 9 月から 2012 年 1 月まで 4 カ月間 CNES の Phase-A Study としてシステム設計を進めている。現在、ゴンドラや使用するオプションの選定、インターフェースの設計に着手したところである。Phase-A と並行してに機器の詳細設計を行い 2012 年 3 月に設計審査を経たうえで、製作に着手、2012 年 12 月に観測機器の組み立て試験を終える予定である。

4. まとめ

Balloon EUSO は機器機能実証を行うプロジェクトであり、JEM-EUSO において重要なステップと位置づけられている。約 1 カ月前にスタートしシステム設計が始まった。1 年後には、ほとんど機器が組みあがっている予定であり、次回には機器の詳細性能ならびに開発状況について報告する予定である。

参考文献

- 1) <http://www.auger.org/>
- 2) <http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 3) Y. Takahashi et al., 2009, New Journal of Physics, 11, 065009.
- 4) T. Ebisuzaki et al., 2008, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 175-176, 237.
- 5) T. Ebisuzaki et al. (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (<http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html>).
- 6) K. Greisen 1966, Phys. Lett. 16, 148. G. T Zatsepin, V. A.; Kuz'min 1966, JETP Phys. Lett. 4, 78.
- 7) K. Shinozaki, et al., 2009, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics - VII, pp377-379.
- 8) F. Kajino et al. (JEM-EUSO collaboration), 2010, Nuclear Instruments and Methods in Physics
- 9) Y. Takizawa et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0792).
- 10) K. Maekawa et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0103).
- 11) Y. Kawasaki et al., (JEM-EUSO collab.), Proc. 31st ICRC, 2009 (ibidem #icrc0833).