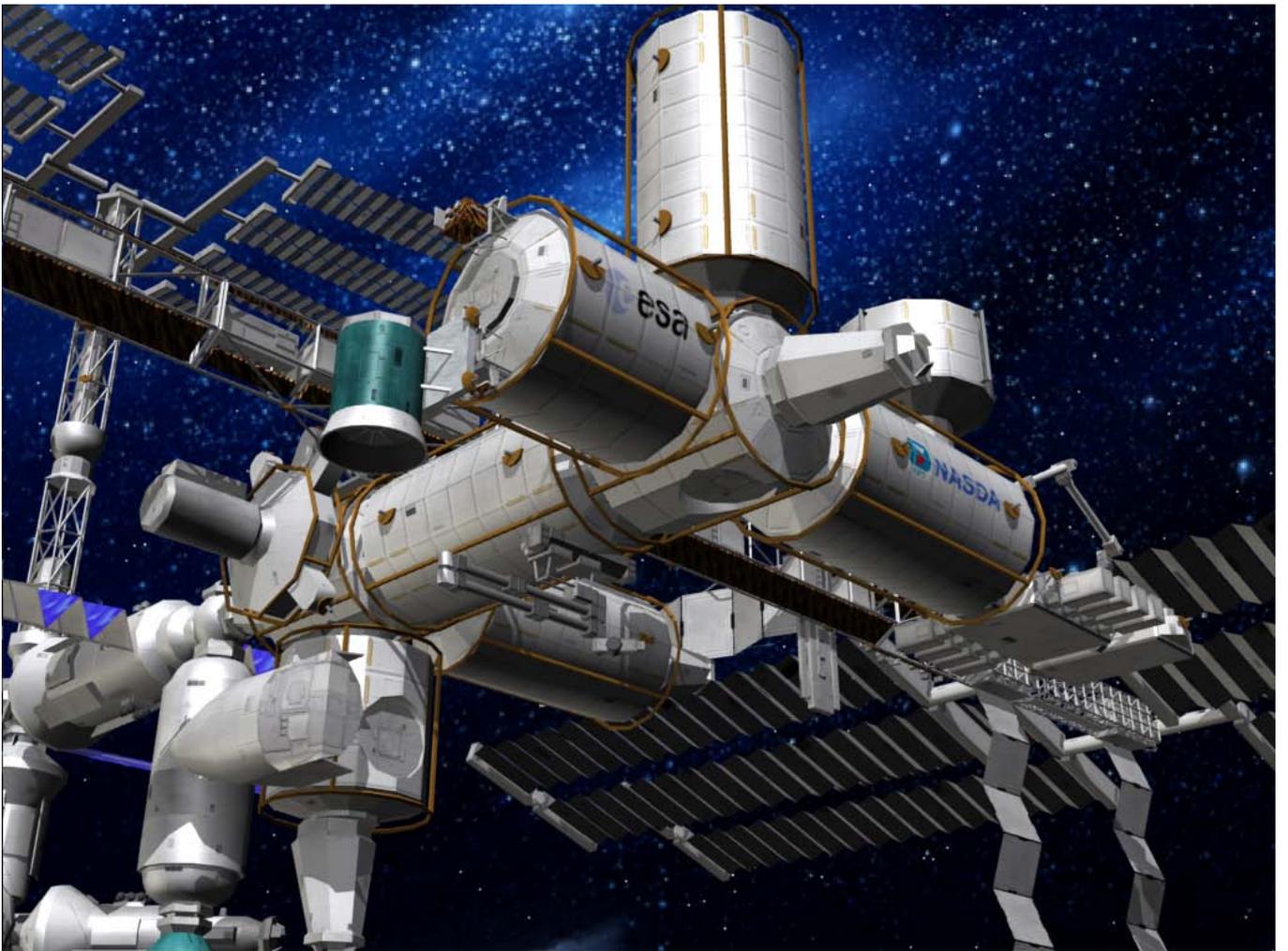


E U S O

(Extreme Universe Space Observatory)

～宇宙からの大気蛍光法による極限エネルギー宇宙線観測～



EUSO-JAPAN

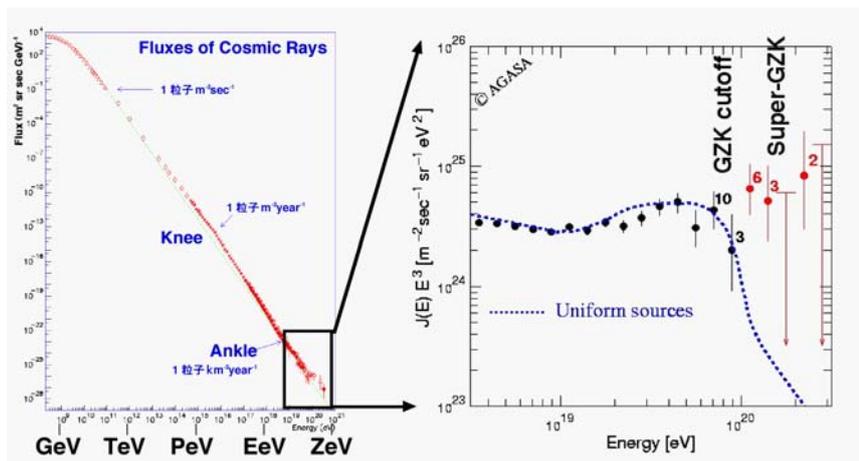
EUSO とは

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には 10^{20} 電子ボルト(eV)あたりに「上限」があると理論的に予測されました¹。宇宙背景放射光子との衝突によるパイオン生成の閾エネルギーを超える宇宙線は伝搬途中でエネルギーを失うためです。ところが1990年代前半になって、日本のAGASA、米国のFly's Eyeと呼ばれる観測装置で、この「上限」を超える「極限エネルギー宇宙線」が観測されました。これにより「上限」の存在の確認と、極限エネルギー宇宙線の起源とが物理学の重要な課題として注目を集め、国際共同研究のAuger計画と日米中心のTelescope Array計画の建設が始まっています。これらの次の計画であるEUSO (Extreme Universe Space Observatory)は、「宇宙から地球大気を観測する」という全く新しい概念を使って、極限エネルギー宇宙線の観測数の飛躍的増大を図り、その起源の解明を目指します。

EUSOは日米欧の三極の協力で建設される予定です。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します。これまでに理研を中心とする日本グループはEUSOの観測主体である焦点面検出装置の開発研究、観測シミュレーションとデータ解析の準備等に貢献をしてきました。EUSOは2010年頃に欧州宇宙機構(ESA)の責任で国際宇宙ステーション欧州所有のコロンバスの外部観測パレットに装着される予定です。

EUSOは宇宙初期における物質活動、位相欠陥の存否、極限エネルギー宇宙現象などを探査するための新しいタイプの観測実験です。極限エネルギー宇宙線は銀河間空間や銀河系内の磁場では曲げられることなくほぼ直進します。しかしそれらの到来方向には、粒子を極限エネルギーまで加速できそうな際立った天体はGZK地平線内に見つかりません。EUSOは3年間で約2,000個の極限エネルギー宇宙線を観測できる能力を持ち、これらの起源や伝播の謎を解明します。また、大気中の発光現象の観測には、雷などの放電現象、流星など、さまざまな地球現象が介在します。物理学の究極的問題を身近な地球大気現象の精査によって解明するという斬新な設定はEUSOを科学の新しい潮流にしています。

¹この上限エネルギーを最初に予測したGreisen, Zatsepin, Kuzminの頭文字をとってGZK限界、これを超えるエネルギーの宇宙線を超GZK宇宙線、減衰をあまり受けずに到達できる距離の限界をGZK地平線と呼びます。



宇宙線エネルギースペクトル。右側の拡大図は、AGASA で観測された極限エネルギー領域の宇宙線スペクトルです。大局的な E^{-3} のエネルギー依存性からのずれを強調するために、 E^3 を乗じてあります。破線は宇宙線源が全宇宙に一樣に分布していると仮定した場合に、GZK 限界によって元々の宇宙線スペクトルの高エネルギー部分が抑制されている様子を示しています。測定点に付けられている数字は、その点に含まれる観測事象数を示しています。

I. 科学的目標

EUSO の目標は以下の3つです。

- (1) 極限エネルギー宇宙線の起源と伝播の解明
- (2) 極限エネルギーニュートリノ天文学の創始
- (3) 大気発光現象の網羅的研究

それぞれについて以下に簡単に述べましょう。

極限エネルギー宇宙線の起源と伝播の謎を解く

極限エネルギー宇宙線の実験結果を説明するためにさまざまなモデルが提唱されてきました。それが陽子などの通常の粒子ならば、その源である天体までの距離はGZK地平線である50Mpc程度以下に限られます。ガンマ線バーストや電波銀河のホットスポットなどの非常に活動的な領域で 10^{20} eVまでの加速される可能性があります。これらはボトムアップシナリオと呼ばれています。しかし残念なことに、一般にこれらまでの距離は非常に遠く、50Mpc以内には一つも見つかっていません。一方で、素粒子論・宇宙論の観点から、さらに高いエネルギーの現象からの二次生成物として極限エネルギー宇宙線を生成するさまざまなモデルが提唱されています。例えば宇宙初期にできた位相欠陥(コズミックストリングなど)が現在になって崩壊して生成されるというモデル、銀河系ハローの重力場に捕らわれた長寿命の超重粒子の崩壊によるモデルなどです。これらはトップダウンモデルと呼ばれ、極限エネルギーのガンマ線もしくはニュートリノの検出がその有力な検証方法です。その他に、極限エネルギー宇宙線が通常の粒子ではなく超対称性粒子である可能性なども提唱されています。

もし極限エネルギーで特殊相対論が破れていればGZK地平線を越えた場所からでも地球に到達可能であることがホットな話題として議論されています。もっとも、30年以上も前の1972年には、すでに、甲南大学の佐藤文隆氏が「絶対系からの速度差のローレンツ因子が $\gamma \sim 10^{12}$ というような大きな慣性系にまで相対性原理が成立するのか」という物理学の根幹に係わる疑問を呈していました。このように極限エネルギー宇宙線の起源についてさまざまな議論がなされていますが、未だ結論が出ていません。これは、主として観測事例の少なさが原因です。

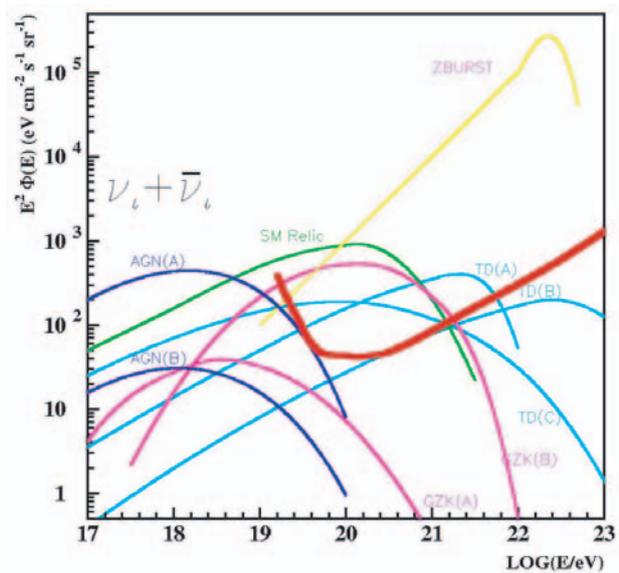
EUSO ミッションは、宇宙から観測することにより、飛躍的(AGASAの300倍)な有効面積を実現します。その3年間のミッション中、約2,000個の極限エネルギー宇宙線を観測します。これらの宇宙線の到来方向分布やエネルギー分布を飛躍的に高い統計精度で確認することにより、永年の謎である極限エネルギー宇宙線の起源を解き明かします。また、宇宙線が陽子などのハドロンか、ガンマ線か、ニュートリノかなど、それらの種類の同定も重要です。それが陽子や重い原子核なら極めて近くに未知の天体が存在し、AGASAの実験結果から推定すれば、数十個の点源が発見されるでしょう。新たにハドロン天文学が開かれると同時に、点源のまわりの分布から銀河系磁場を使った宇宙線の分光観測の可能性が期待されます。これにより、まだ未知の銀河系外磁場の値にも強い制限を得ることが

できるでしょう。もし近くに起源が存在しなければ、背景放射光子との衝突によるエネルギー損失を受けないことを意味し、相対論のほころびを示唆するのかもしれない。

ガンマ線やニュートリノだった場合には、極限エネルギー宇宙線はトップダウン起源の可能性が高まり、宇宙線のエネルギーは 10^{21} eV をはるかに超えて伸びているかも知れません。更なる実験計画へと飛躍的發展が期待されます。

ニュートリノ天文学

活動銀河核 (AGN)、宇宙初期の位相欠陥 (TD) の崩壊、超 GZK 宇宙線と背景放射光子の衝突 (GZK)、宇宙初期に生成されたダークマター (SMrelic) の崩壊、宇宙背景ニュートリノとの Z 中間子共鳴過程 (ZBURST) などにより超高エネルギーニュートリノが生成されると予想されています (右図)。しかしニュートリノの大気中での衝突は稀であるため、これまでの実験は全て上限値を与えてきただけでした。一方、EUSO は 10^{13} トンもの大気を検出器として用いるので、超高エネルギーニュートリノの検出が可能です。地表に殆んど平行で、数 100km もの大気をつき抜けて観測される空気シャワーはニュートリノによるものに限られるので、陽子や他の原子核、あるいは光子によるそれと明確に区別することができます。それぞれのモデル計算に用いられた仮定により、AGN(A), AGN(B) などとフラックスは大きく変わりますが、赤い太線で示したように EUSO は様々なニュートリノ起源において予想されるフラックスを検出できます。



さまざまなモデルから予測される宇宙ニュートリノフラックス。赤線は、EUSO 視野内でエネルギー一桁あたり 1 年に 1 イベント起こったときの 1 フレーバーあたりの検出感度を赤太線で示しています。

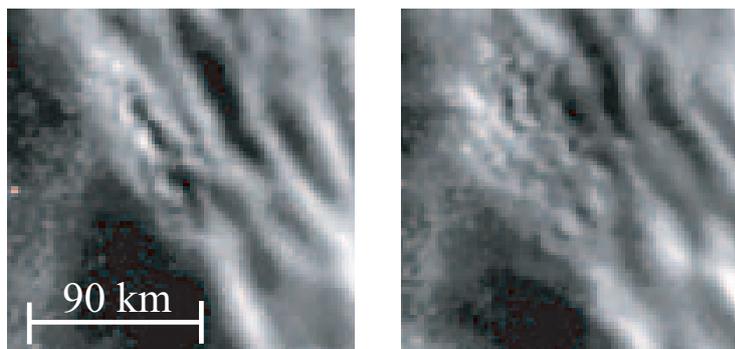
超高エネルギーでは ν_e , ν_μ に対して地球は不透明になります。一方、 ν_τ は τ と ν_τ を交互に生成しながら地球を突き抜けられるので上向き空気シャワーを作ることができます。この、上向きシャワーにおいては、シャワー粒子の進行方向に集中したチェレンコフ光ビームを直接 EUSO で観測できれば 10^{16} eV ぐらいまで検出限界エネルギーが下がります。

大気発光現象

EUSO は、地球大気の紫外線領域での夜間大気光・放電発光・流星などによる発光現象を全て網羅的に調べることができます。宇宙線空気シャワーによる蛍光は、大気の深さによらず $100\mu\text{s}$ 程度の極めて短い現象です。これに比べて、上記の大気紫外線発光現象は、 $300\mu\text{s}$ から数時間以上の時間尺度で変動します。この時間尺度の違いにより、両者を見分けられます。特に地表から観測が困難な超高層大気発光現象の網羅的な観測データはまだありません。EUSO は大変貴重なデータを提供します。

(1) 夜光

夜間大気光は、超高層大気中での構成分子・原子間の化学反応にともなう励起によって発光します。地表観測では、波長領域 300-400nm における発光については、観測データが不足しています。主としてエアロゾルの吸収により、強い減衰を受けるため観測が難しいからです。発光の強さは、季節・時刻・経度緯度・太陽活動の度合・地磁気活動その他様々な因子に依存するばかりではありません。時間変動する小規模構造があり、EUSO のようなエアロゾル吸収の影響を受けない宇宙からの長期観測が有効です。右図に示すような小規模大気重力波は成層大気中において下層大気の運動量を中間圏界面高度に鉛直輸送・伝達する役割を持ちます。EUSO は広い観測視野をもつため、地上観測では困難であった広い領域での空間分布を一度に観測することができます。これにより、中層大気の力学・熱・組成構造の解明に不可欠な、貴重な大量データを取得することが可能となります。



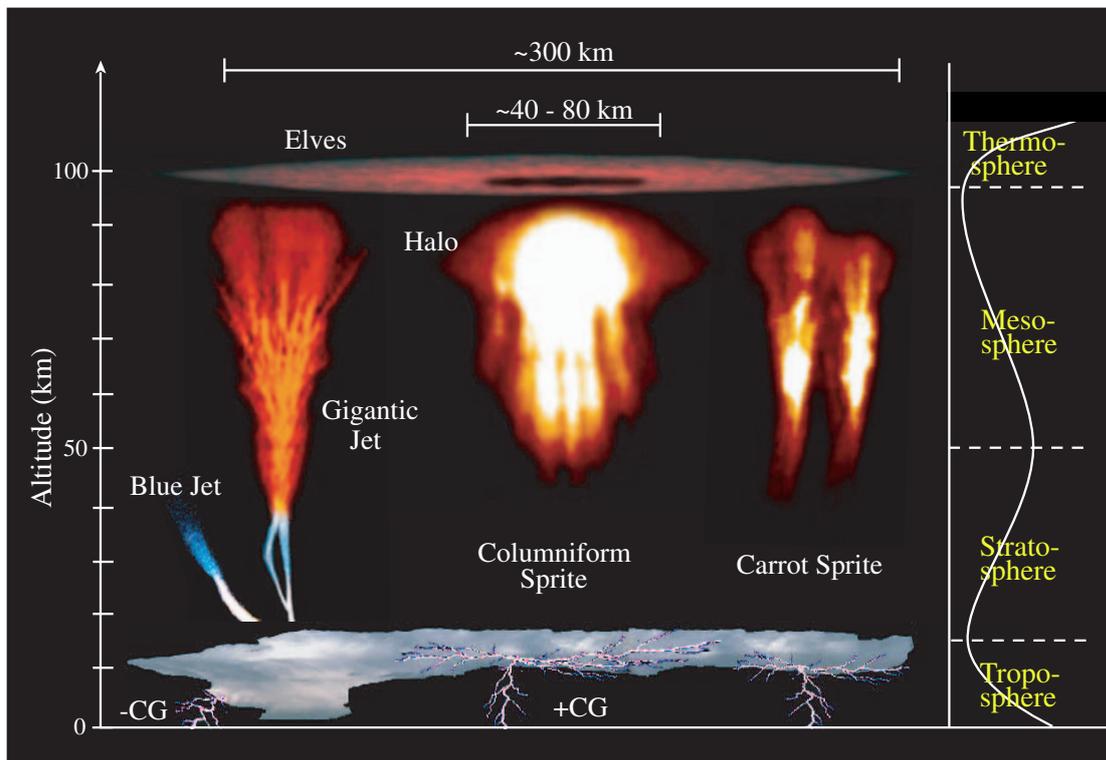
地上から観測した OH 大気光。左は 1995 年 12 月 23 日 1652UT の、右は 1701UT の画像を示しています。左図中央の構造が右図では小さな構造に変化しています。

(2) 雷放電

雷放電に伴って発生する成層圏・中間圏・下部熱圏での発光現象が 1990 年代に相次いで発見されました。下図に示すように、これらの発光現象のうち、雲頂から高度 40km の成層圏で斜め上方に発光が進展する現象をブルージェット、高度 40-90km の中間圏で複雑なストリーマー構造をもった発光現象をスプライト、高度約 90km の下部熱圏で直径数百キロメートルにわたってリング状に発光が進展する現象をエルブスとよんでいます。これまでに行われてきた数々の地上光学観測によって、これらの発

光現象の時間スケールは数ミリ秒から数百ミリ秒であることが明らかになっています。近年では、これらの現象が大気の微量成分、特にオゾン組成に大きく寄与することが指摘されています。しかし地上からの光学観測では、青色発光を定量的に測定できないため発光を引き起こす電子のエネルギー推定が困難である点や、気象・地理的な制約から全球での発生頻度・分布を特定できない点など、未解明な問題が多く残されています。

EUSOは、これらの現象の波長領域300-400nmにおける発光強度を、約 2.5μ 秒というこれまでにない高い時間分解能で観測することが可能です。また真上からの観測が可能であることも大きな特色です。さらに、EUSOは北緯 51° ～南緯 51° 、全経度を観測することができます。これはちょうど雷の多発地帯にあたるため、定量的な全球発生頻度分布を特定することが可能となります。このように、EUSOによるデータは、スプライト／エルブス／ブルージェットと雷放電とを結びつける機構を明らかにし、気象物理・大気電気物理・超高層物理など多くの分野に全く新しい知見を与えます。同時に、EUSOの観測によって初めて、これらの放電現象による大気の微量成分のグローバルな変化を定量的に推定することが可能となり、成層圏・中間圏オゾン化学反応過程の理解と地球環境研究にとって大きなブレイクスルーを与えます。



雷放電に伴う成層圏・中間圏・下部熱圏でのトランジェントな発光現象。

(3) 流星

彗星、小惑星、星間空間などを起源とした宇宙塵が上層大気に突入して、高度100km程度で発光する現象が流星です。特に彗星のダストトレイルと地球軌道が毎年同じ位

置で交差して発生する流星群は、母天体を構成する最小単位となっている微粒子の物性、組成、構造を知る上で、惑星科学にとって重要な観測対象です。

近年大出現したしし座流星群によって数々の新発見がなされました。特に可視・紫外領域で従来より2倍近く高い高度から発光する流星の発光素過程の理解が重要視されています。大気吸収のない宇宙空間から地上を見下ろしながら、地上から見上げる観測よりもはるかに広い大気面積をカバーできる EUSO からの流星観測は、そうした流星科学の新しい謎の解明に大いに役立つと期待されています。



ハイビジョンカメラによる2001年のしし座流星群と国立天文台野辺山電波観測所45mミリ波望遠鏡。

(Ebizuka, et.al., Leonid MAC Workshop, NASA Ames, Aug., 2003)

II 空気シャワーを用いた宇宙線の観測

空気シャワーとは

高エネルギーの宇宙線(一次宇宙線)が大気中に入ると、大気の原子核と相互作用を起こし、 π^\pm 、 π^0 、 K^\pm 、 K^0 などの2次粒子を生成します。これらの2次粒子のエネルギーも高いので新たな粒子の生成を繰り返して、粒子の雪崩(カスケード)を作ります。2次粒子の内 π^0 は2個の γ に崩壊し、巨大な電磁カスケードシャワーを引き起します。 π^\pm の中には衝突前にミュオンに崩壊するものもあり、多くのミュオンも生成されます。このような電子、ガンマ線、ハドロン、ミュオンなどの粒子で構成される巨大なシャワーを「空気シャワー」といいます。その総粒子数は大気の深さと共に指数関数的に増えていきますが、最大粒子数に達した後、主に電離損失でエネルギーを失いながら減衰に転じます。

観測方法

空気シャワーを利用した極限エネルギー宇宙線の観測には、地上に粒子検出器を多数配置して空気シャワー粒子を観測する方法と、空気シャワー粒子によって励起した窒素分子/イオンが発する300nm-400nm領域の紫外光を反射鏡かレンズで集光し、焦点においた多数の光電子像倍管で撮像する、いわゆる蛍光望遠鏡で観測する方法(大気蛍光法)があります。

(1) 地上アレイ

日本のAGASA、イギリスのHaverah Park、ロシアのYakutskなど従来の極限エネルギー宇宙線観測では、地上にシンチレーター検出器や水チェレンコフ検出器などを多数配置してアレイを構成し、空気シャワー粒子を直接観測する方法が取られてきました。この方法では各検出器で検出された粒子数分布から一次宇宙線のエネルギーを、異なる検出器への粒子到着時間差から到来方向を決定します。現在、アルゼンチンで建設中のAUGER計画では1,600台の水チェレンコフ検出器が設置される予定です。

(2) 地上望遠鏡(蛍光)

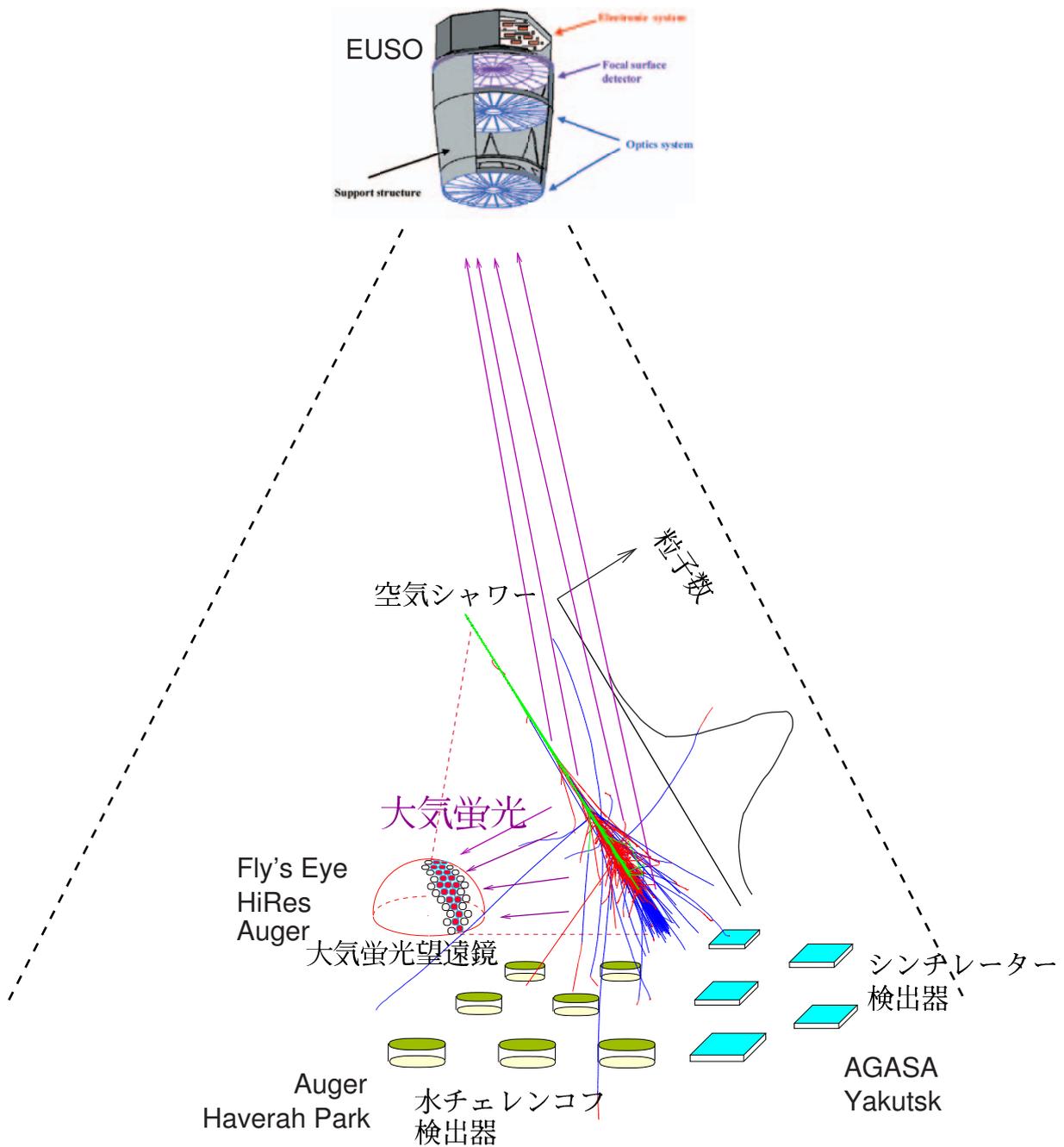
アメリカのFly's Eyeグループにより大気蛍光法による極限エネルギー宇宙線の継続的な観測に成功しました。この方法では多数の光電子増倍管からなるカメラで空気シャワーを画像としてとらえ、光伝播中での光の減衰を補正した光量をもとにエネルギーを、視野を通過する飛跡の通過速度、またはイメージの幾何学的情報をもとに到来方向を決定します。現在、エネルギー決定精度、到来方向決定精度をFly's Eyeより高めたHiRes検出器で観測が継続されています。Auger計画では上記の地上アレイの他に蛍光望遠鏡を設置し、ハイブリッド観測が準備されつつあります。日本のTelescope Array計画でも、米国ユタ大学と協力して、シンチレーター検出器による地上アレイと蛍光望遠鏡とのハイブリッド観測が予定されています。

(3) 宇宙望遠鏡(蛍光)

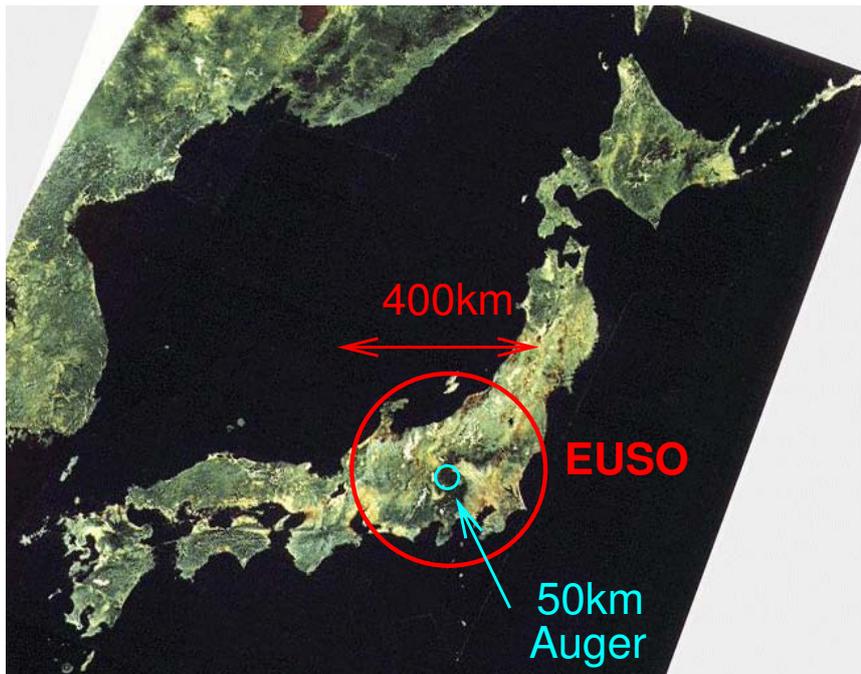
10^{20} eVのエネルギーを持つ宇宙線は1km²、1世紀あたり1個と非常に頻度が低い

で観測例を増やすためにはさらに大きな検出面積を必要とします。しかし、地上観測においては、シャワー粒子を直接観測することから検出面積に比例して検出器の数を増やさなければならないので、飛躍的な増加は望めません。また、地上における大気蛍光法では、検出面積を拡大させるほど、遠方の光の飛跡から望遠鏡に達する光の減衰が大きく、しかも補正量は大気の状態に大きく依存するため、エネルギー決定精度は悪くなります。そこで、宇宙から大気蛍光法により空気シャワーを観測する方法が考えられました。EUSO 望遠鏡のように地上 400km から視野角 60 度で地球大気を眺めたとき、その検出面積は Auger 計画の約 100 倍になります²。そして宇宙から地上を見た場合には、大気の厚さはせいぜい $1000\text{g}/\text{cm}^2$ であり、光の減衰をほとんど受けないので、精度よく宇宙線のエネルギーを決定することが可能です。EUSO で観測される空気シャワーの多くが天頂角が 45 度以上で、シャワーの大部分は光学的に厚い雲の上であり、あまり影響がありません。

²大気蛍光法では昼間など明るい時間帯は観測できません。観測効率は 10%程度と見積もられ有効検出面積は約 10 倍です。



空気シャワーとその検出方法。シャワー粒子を地上に展開したシンチレータ検出器のレイにより観測する方法 (AGASA, Yakutsk)、水チェレンコフ検出器のレイによる観測する方法 (Haverah Park, Auger)、シャワー粒子が励起した窒素分子から放射される蛍光を観測する方法 (大気蛍光法)(Fly's Eye, HiRes, Auger) があります。空気シャワー中の青色の線はミューオン成分を、赤色の線は電磁成分を、緑色の線はハドロン成分を表します。

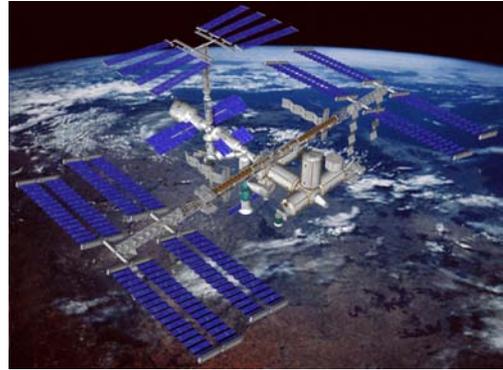


III. EUSO と 国際宇宙ステーション

国際宇宙ステーションとは

国際宇宙ステーション (International Space Station: ISS) は、アメリカ航空宇宙局 (NASA)、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、欧州宇宙機関 (ESA)、カナダ宇宙庁 (CSA)、およびロシア航空宇宙庁 (ROSCOSMOS) が参加する国際協力プロジェクトで、1998年11月に組み立てが開始され、2006年の完成を目指して作業が進められています。2003年のスペースシャトルの事故により、1年半程度の遅れが見込まれています。

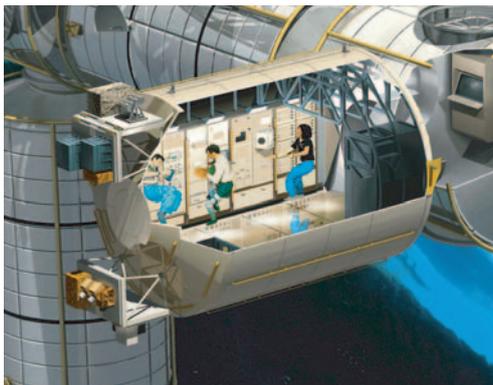
軌道高度約 400km の宇宙空間に浮かぶ国際宇宙ステーションでは、宇宙環境を利用した宇宙実験により、様々な分野で新たな知見が得られることが期待されています。国際宇宙ステーションには、日本の「きぼう」、アメリカの「デスティニー」、ヨーロッパの「コロンバス」、ロシアの研究モジュールなどの実験棟が付設され、微小重力科学・ライフサイエンス実験、地球・天体観測、宇宙利用技術開発などが行われる予定です。



国際宇宙ステーションの完成予想図。

コロンバスモジュールについて

コロンバスモジュールには、暴露部と与圧部があります。暴露部には2つのペイロードがあり、地球観測、宇宙観測、環境物理に利用されます。



コロンバスモジュール。

EUSO ミッションは、コロンバスモジュール暴露部での諸計画の内、第2期ミッションに位置付けられています。第1期ミッションとしては、ACES(微小重力下での原子時計)、SOLAR(太陽観測)、EXPORT(太陽紫外線の生物、偏光測定)、EuTEF(曝露を要する技術開発)などが予定されており、第2期ミッションには、EUSO の他に、LOBSTER(X線全天モニタ)、Rapid Eye(高解像度カメラ)、RoSITA(X線全天撮像モニタ)等が予定されています。

打ち上げ手段

EUSO はスペースシャトルによる打ち上げが予定されています。並行して、日本のHTV(H-II Transfer Vehicle)による打ち上げも検討されています。

EUSO 実験について

EUSO は、口径約 2.5m で約 60 度の視野を持つ超広視野望遠鏡です。高度約 400km の軌道上の国際宇宙ステーションに装着され、半径約 250km の円内の地球大気を一度に観測することができます。焦点面には、光電子増倍管で構成される約 20 万画素のカメラがおかれます。これで大気中での飛跡を約 900m の解像度、 $2.5\mu\text{sec}$ の時間分解能で追跡します。

表 1: EUSO の仕様一覧

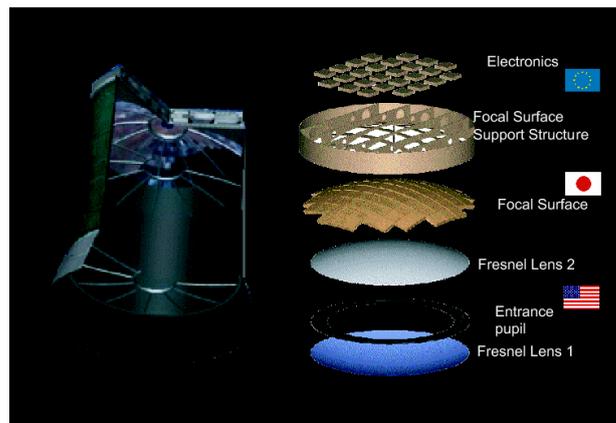
高度	約 400km	焦点面総画素数	約 200,000
観測緯度、経度	北緯 51° ~ 南緯 51°、全経度	地表面での解像度	0.9km
視野	60°	観測効率	12~25%
視野地表面積	約 200,000km ²	稼働年数	3 年
口径	2.5m	総重量	約 1.2 トン
光学系	ダブルフレネルレンズ	総消費電力	約 800W

スケジュール

衛星軌道からの宇宙線観測計画は、かつて米国で MASS 計画として提案され、その後米国では OWL 計画、欧州では Airwatch 計画として準備が始められました。これらの計画の実現性についての議論は概ね 1995 年頃から本格化し、フレネルレンズを用いた軽量の広角光学系が考案されて以降、急速に実現性が確かなものになってきました。その後 OWL 計画と Airwatch 計画の双方が協力して、単独衛星として打ち上げる EUSO ミッションとして ESA に対して提案を行いました。2000 年に ESA 科学専門委員会において EUSO の科学的な意義が認められ、単独衛星ではなく、国際宇宙ステーションに設置して観測を実行することを ESA から提案され、実施準備が始まりました。2001 年には ESA のコロンバスモジュールで EUSO の目的が実施可能かの検討をおこないました。2002 年には実施に向けた準備研究 Phase-A がスタートしました。2003 年夏にその成果をまとめ、現在 ESA ではその成果を評価中であり、近く次の準備段階の Phase-B に進むことが許可されると考えています。このまま準備が順調に進めば、観測機器の打ち上げ時期としては、2007 年以降 2009 年あたりが想定されています。しかし、スペースシャトル・コロンビアの事故の影響により、1 年半程度の遅れがあるかもしれません。

国際協力体制

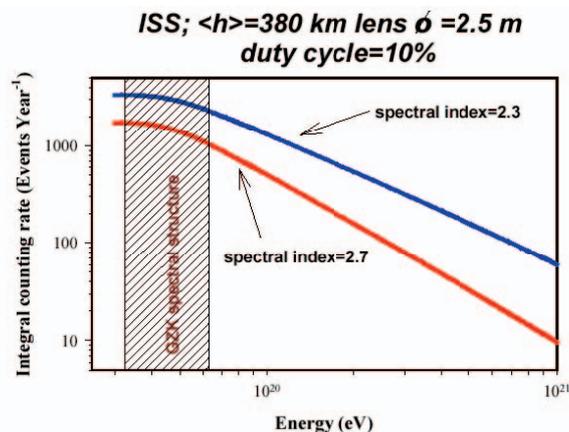
EUSO ミッションは、日米欧の共同研究として、欧州宇宙機構 ESA に取り上げられています。日本グループは EUSO 国際共同研究の中で、焦点面検出器の開発を主に担当しています。また、光学系はアメリカ、読み出し回路系はイタリア・フランス、筐体設計はイタリアが中心となって開発を進めています。参加各国順調に Phase-A 研究を終え、次の Phase-B に向け準備中です。



EUSO 検出器の概念図と国際協力体制。

EUSO の観測能力

図は3年間にEUSOが検出すると予想される、あるエネルギー以上の事象の積分値を示しています。現在AGASAで観測されているエネルギースペクトルがそのまま更に高いエネルギーまで伸びているとしたものが赤線で、 4×10^{19} eV以上の事象が約2,000個観測されることが期待されます。もしトップダウン起源の極限エネルギー宇宙線が存在すれば、そのエネルギースペクトルのべきがより平坦で、青線のように更に多くの事象が観測されるでしょう。



期待される積分エネルギースペクトル。

地上観測実験との比較

現在稼働中の観測装置はAGASAとHiResのみです。AGASAのアレイの規模は 100 km^2 で、電磁シャワー成分を検出するシンチレータとミュオン粒子検出器のアレイで構成されています。2004年始めに約13年にわたる観測を終了しました。米国ユタ州にあるHiResは12.6 km離れて配置された二つの大気蛍光検出器で観測続行中です。地上蛍光法での有効面積にはエネルギー依存性があり、 10^{19} eVにおいて 340 km^2 、 10^{20} eVにおいて 1000 km^2 です。世界最大の検出面積が期待されるAuger計画は、現在アルゼンチンで建設中です。1,600台の粒子検出器が 3000 km^2 に展開され、その外側に4箇所に蛍光望遠鏡が配置される予定です。このように二つの検出手法を混在させることによって、互いに他を校正することができ、それぞれの方法の系統誤差を抑えることができます。完成すると、 $7000 \text{ km}^2 \text{ sr}$ の有効面積を持ち、 10^{20} eVを超える事象を年間約50事象観測すると期待されています。

極限エネルギー宇宙線を観測する諸実験の比較。

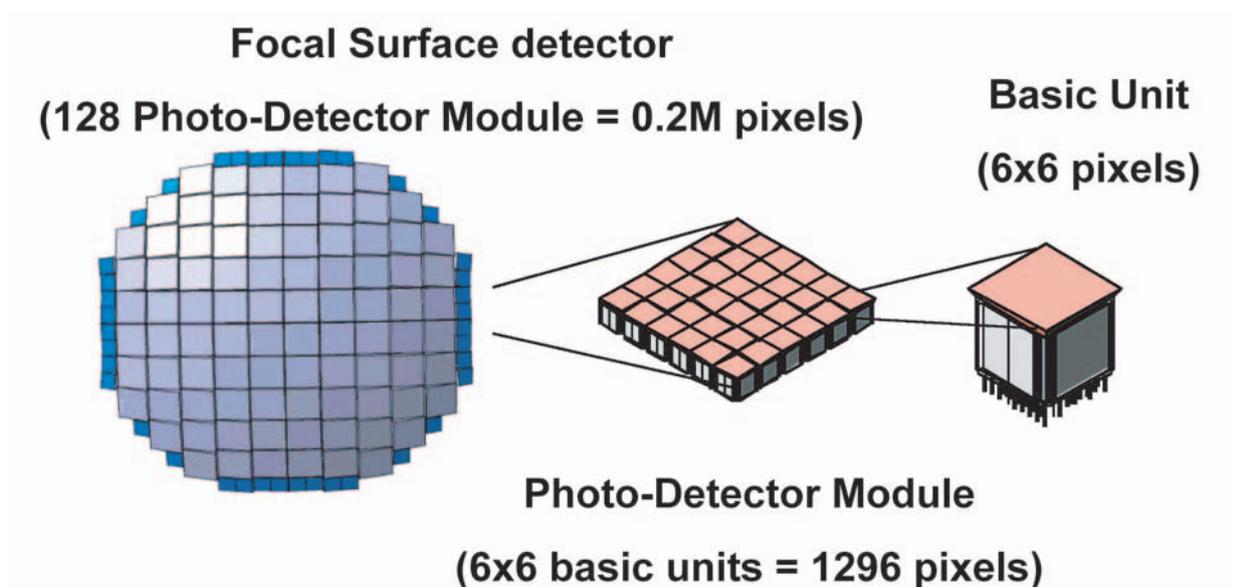
	AGASA	HiRes	Auger	EUSO
検出器の形態	地上アレイ	地上蛍光望遠鏡	地上アレイ+ 地上蛍光望遠鏡	宇宙 蛍光望遠鏡
2004年3月の状況	終了(1990~2004)	稼働中(1997~)	建設中 (2006年完成予定)	Phase-A 終了
有効面積 [km ² ·sr]	150	500	~7,000	~50,000
超 GZK 事象 [個/年]	1	?(未確定)	50	300

IV. EUSO-Japan の活動

1) 焦点面検出器について

EUSO 光学系は視野が広く、口径は2.5mのフレネルレンズに対し、焦点面もほぼ同じ口径で、これをおよそ20万画素の検出器で覆います。検出器に要求される条件は、消費電力が低いこと、軽量で小型であること、300-400nmの範囲の紫外光に対して量子効率が高いこと、各画素に数nsecの時間間隔で入射する1個1個の光子を分離計測できる感度と時間応答特性をもつことなどです。

焦点面検出器は、組立の複雑さとテストのしやすさを考えて、基本的には平面状のモジュールを単位として曲面の焦点面を近似するという方針で組み上げます。基本単位は6×6画素のマルチアノード光電子増倍管(MAPM)で、このMAPMの6×6配列を光検出モジュールと呼んでいます。図に示すように、検出面は128個の光検出モジュールで構成します。この構成は設計・製作上の便宜だけでなく、宇宙での使用を前提とした機器開発に適した構成となっています。すなわち正方形の光検出モジュールを単位とし、約6,000個のマルチアノード光電子増倍管を焦点面上に並べ、焦点面全体の90%を覆うものとなっています。



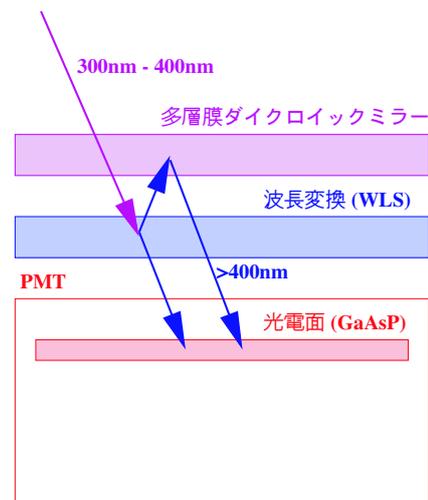
EUSO 焦点面検出器の構造。

2) 検出器の高感度化にむけて

EUSO は地上約 400km という高度から空気シャワーの大気蛍光を観測するため、観測される光子数は非常に少なくなります。また、空気シャワーを画像として捉えるため、検出面全体にわたって効率よく一様な感度を持つことが必要です。2000年にESAにEUSOを提案したときの基本設計では8×8画素のマルチアノード光電子増倍管R7600-03-M64でした。これは実際の面積の約45%しか有感領域がありませんでした。EUSO-Japanグループは、浜松ホトニクスと共同して、マルチアノード光電子増倍管の有感領域を増やす研究を行ってきました。そして、光電面と第一ダイノードの間に電子収束構造を入れることにより光電面の端まで感度を持たせることに成功し、その有感領域は85%となりました。さらに、簡単な補正光学系を用いることによって、有感領域を90%に増加することができます。現在のEUSOの検出器の設計ではR8900-03-M36の使用が承認されています。現在フラットパネル型のマルチアノード光電子増倍管(R8400シリーズ)の開発を推進し、更に軽量化、高い有感領域率を目指しています。その性能が確立すれば、Phase-Bでの採用が検討されるでしょう。

高量子効率光電子増倍管の開発

近紫外線に対する EUSO の光電子増倍管の感度を上げる方法として、より高い量子効率を持つ光電面を利用する方法を研究しています。近年開発された GaAsP 結晶による光電面では、約 40% の量子効率を実現しており、これは従来のマルチアルカリ光電面の量子効率の約二倍に達します。ただし、その有感領域は 500nm 以上の可視光領域にあり、EUSO で観測する近紫外領域とは異なります。そこで、以下のような素子開発を行っています。一つは、観測すべき紫外線光の波長を可視光領域まで伸ばす波長変換素材です。これは EUSO で用いるマルチアノード光電子増倍管の小さな画素に適合するために十分薄い必要がありますが、このフィルターの安定性と効率を最適化する必要があります。もう一つは、変換された光を効率良く収集するための多層膜ダイクロイックミラーです。こちらは元々観測すべき紫外線を透過し、変換後の可視光を反射するという仕様です。これらの組み合わせにより、これまでの約二倍の効率で紫外線を検出できるようになります。

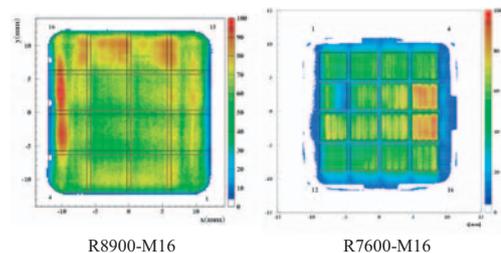


高量子効率光電面利用の概念図。

3) 検出器の特性試験の状況

3-1) ゲイン分布

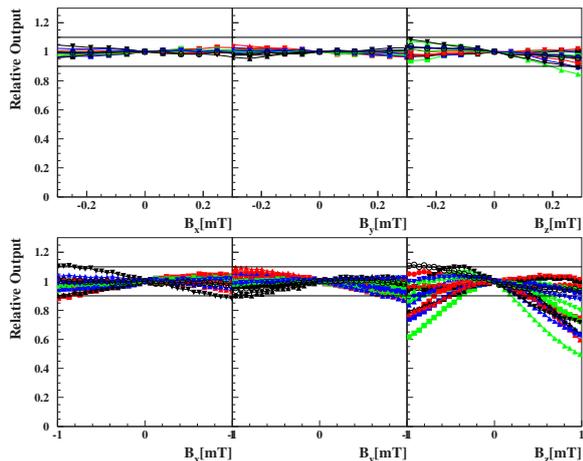
右図は 4 × 4 画素のマルチアノード光電子増倍管 R7600-M16 と新たに開発した弱電子収束型 R8900-03-M16 の相対的なゲイン分布をあらわしています。色のついた四角の部分は光電子増倍管の感度のある部分を示しており、有感領域が拡大していることが見て取れます。色は感度の大きさを示し、一部感度の高いところがありますが、管面全体の画素当たりの一様性は 3 倍以内です。



R8900-03-M16(新型:左) と R7600-M16(従来型:右) の相対ゲインマップ。

3-2) 磁場による影響

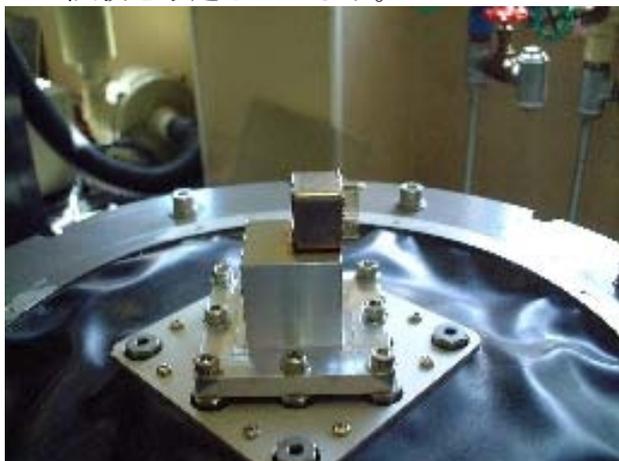
計画当初の基本設計で採用された R7600-03-M64 はメタル管パッケージのため通常の光電子増倍管より磁場に対する影響を受けにくいものでした。しかし、新たに開発した電子収束構造の光電子増倍管は、有感領域が増加した反面、磁場による影響が大きくなる可能性があります。右図は R8900-03-M16 の相対ゲインの磁場強度依存性を示したものです。EUSO の軌道上での地磁気は最大 0.05 ミリテスラ (mT) であるので、地磁気による影響は ±5% 以内です。



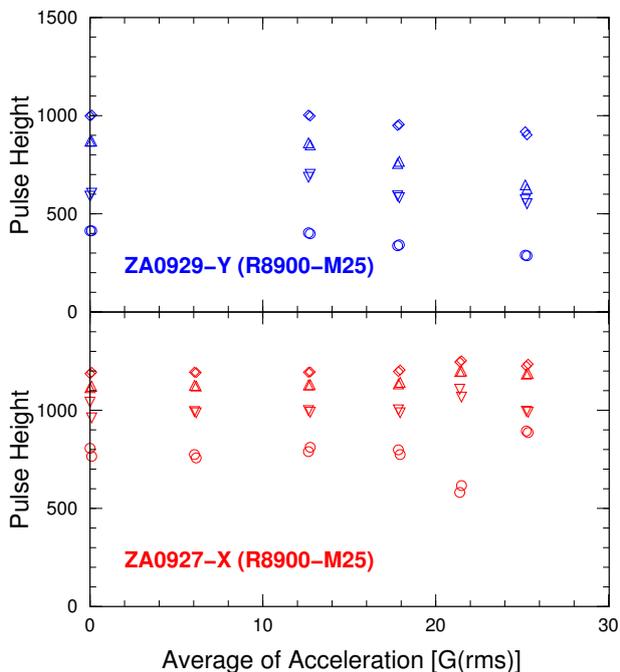
磁場の強度によるゲインの相対変化。左、中、右はそれぞれ直行した 3 方向の磁場に対する場合をプロットしています。上の図は下の図の 0 テスラ付近の拡大図です。

3-3) 振動に対する耐性

EUSO 望遠鏡はスペースシャトルで打ち上げられ国際宇宙ステーションまで運ばれる予定になっています。打ち上げ時に予想される振動は平均約 6.7G のランダム振動です。図はランダム加振の平均強度と R8900-03-M25 のゲイン変動をあらわしています。20G までは光電子増倍管の動作に、ほぼ問題ないことを確認しています。将来は新開発の検出器単体の試験に加え、検出面としての構造体を含めた試験を予定しています。



振動試験の様子と振動強度によるゲインの変化。



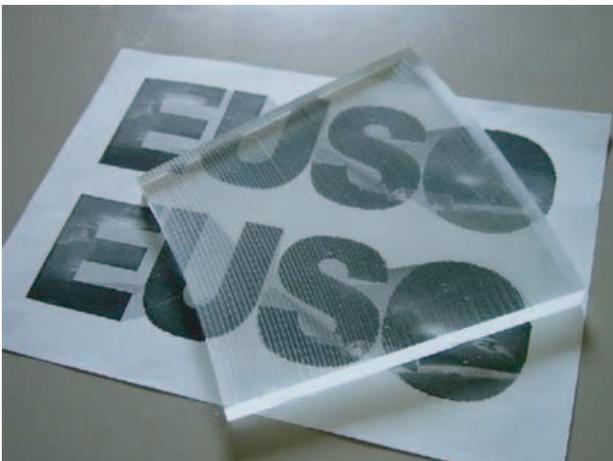
3-4) 温度依存性

光電子増倍管の温度は望遠鏡内外からの熱の流入と放熱性能によって決まります。光子の検出効率を最大にし、熱雑音を低く抑える温度に制御できるように熱設計を行うことが必要です。一般的には 0°C 付近が最適な温度とされていますが、温度依存性をさらに詳しく調べるため恒温槽を用いた測定を進めています。

4) フレネルレンズ

レンズ光学系は反射光学系に比べ工作精度に対する条件が比較的ゆるいので、広視野化が容易です。さらに、アクリルを素材とすることで軽量化が可能です。EUSOに使われるレンズは湾曲させ、さらにレンズの両面に溝を切る両面フレネル構造を採用することで、小型で良い角度分解能を達成しています。さらに、レンズ材の色収差を補正するために、 $0.8\mu\text{m}$ ピッチの微細な溝による回折で補正します(回折光学技術)。2.5m 径の非対称湾曲レンズを一枚で作成することは困難です。口径 1.5m の中心部分と下図左側のような周辺の扇状の部分(ペタル)に分けて作成する予定です。各ペタルは金型による熱成形転写加工により作成します。ペタルを作るための金型は、両面を非対称な曲面に成形し、さらに微細($0.8\mu\text{m}$) な溝を刻まなくてはなりません。

この世界最高難度の加工を実現させるために、理化学研究所素形材工学研究室で培ってきた電解インプロセスドレッシング(ELID)研削を主体とした超精密加工技術を用いました。10nm の位置制御分解能を持ち、直進3軸・回転1軸の自由度を有する超精密加工システムを考案し、金型を加工しました(下右図)。非対称なレンズ面を金型によってアクリル樹脂材へ成形転写加工するための熱プレス成形法も新たに開発しました。熱軟化状態での塑性変形を利用した成形法であるため、成形されたレンズの熱による残留応力は小さく、均質なものが得られます。



波及効果

EUSO を成り立たせる要素技術、つまり高量子効率光電子増倍管、回折光学素子加工技術、大型フレネルレンズ加工技術などは、産業界における実用化の可能性がります。

光電子増倍管は微弱光の時分割検出において広く用いられています。しかし、現在は光電子増倍管はバイアルカリ及び類似の物質を利用しているため、量子効率が概ね 20 % 程度に止まっています。高量子効率のマルチアノード光電子増倍管の出現は、様々な研究現場における光あるいは光を媒介とする放射線検出全般に甚大なインパクトを与え、放射線検出器の信号の信頼度、放射線のエネルギー分解能の向上に、大きく寄与するでしょう。EUSO のための技術開発により高量子効率マルチアノード光電子増倍管が長期的に安定に動作す

るようになれば、さらに需要は広がると考えられます。

また、EUSO フレネルレンズ製作に使われる加工技術は、難易度の高い光学部品製造への応用が可能で、産業界より強い興味が寄せられています。特に回折光学技術は、光学部品の性能を飛躍的に向上させるものとして、光学研究者の注目を集めています。

V. 組織

EUSO-Japan チームは、以下のような 22 研究機関、49 名で構成されています。(所在地北順)

所属	氏名
東北大学	高橋幸弘
金沢大学	村上敏夫, 米徳大輔
信州大学	木舟正
福井工業大学	永野元彦, 宮崎芳郎
加速器研究機構	石川正, 金子敏明, 栗原良将, 清水韶光, 藤本順平
東京大学宇宙線研究所	竹田成宏, 林田直明
埼玉大学	井上直也
理化学研究所	上野嘉之, 上原嘉宏, 戎崎俊一, 大谷知行, 大森整, 郭建強, 川井和彦, 川崎賀也, 榊直人, 佐藤光輝, 清水裕彦, 鈴木亨, 滝澤慶之, 森田晋也, 林偉民, Mario E. Bertaina
立教大学	北本俊二
成蹊大学	近匡
山梨大学	本田建
国立天文台	梶野敏貴, 水本好彦
放射線医学研究所	内堀幸夫
千葉大学	吉田滋
武蔵工業大学	門多顕司
青山学院大学	柴田徹, 吉田篤正
甲南大学	梶野文義, 佐藤文隆, 坂田通徳, 山本嘉昭
原子力研究所	田島俊樹
近畿大学	千川道幸
奈良産業大学	政池明
大阪市立大学	川上三郎
愛媛大学	吉井尚