

# EUSO

## (Extreme Universe Space Observatory)

*D.H. Koang, C. Bérat, J. Chauvin, D. Lebrun, F. Montanet, S. Moreggia, A. Stutz*

*The EUSO experiment will be installed on the International Space Station at the end of this decade. Its aim is the detection of Ultra High Energy Cosmic Rays, above the GZK cut-off (few  $10^{19}$  eV). It is essential for the astrophysicists and particle physicists to understand how and where these UHECR can be produced : acceleration by cosmic accelerators or decay of super heavy relic particles ? EUSO will detect the atmospheric showers produced by the primary particles coming from space. A telescope will record the signals produced when particles from the shower interact with the atmosphere : the fluorescence light and the Čerenkov light. The received light will be imaged by a large Fresnel lens optic onto a finely segmented focal plane detector, equipped with multi-anode PMTs. The LPSC is involved in several parts of this project : design and test of the Front End Electronics, mainly the analog part, study of the influence of atmosphere on the creation and propagation of UV light, study of the UV background and light reflection on earth with the ULTRA experiment.*

Dans la nature, les particules les plus énergétiques jamais observées sont les rayons cosmiques. L'existence et l'origine de rayons cosmiques d'énergie de l'ordre de  $10^{20}$  eV soulèvent des questions dans les domaines de la physique fondamentale, la cosmologie et l'astrophysique. Le projet EUSO a pour but l'observation et l'étude de ces rayons cosmiques, en utilisant un télescope installé sur la Station Spatiale Internationale pour détecter de la lumière UV émise lors de l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère terrestre nocturne.

La collaboration EUSO regroupe plusieurs pays d'Europe, le Japon et les USA. Les trois agences spatiales (ESA, NASDA, NASA) ont accueilli favorablement le projet. En France, trois laboratoires de l'IN2P3, dont le LPSC, s'impliquent dans la construction de l'instrument dont l'installation sur la station spatiale est prévue pour la fin de la décennie.

### Rappel des objectifs de la Physique de Euso

Depuis les travaux pionniers de Victor Hess en 1912, l'étude des rayons cosmiques (RC), c'est-à-dire la mesure de leur flux, de leur nature et de leur origine a considérablement progressé et leur spectre en énergie est connu aujourd'hui jusqu'à des énergies aussi extrêmes que  $10^{20}$  eV. Si la répartition des sources est uniforme et si le spectre primaire s'étend bien au-delà de  $10^{20}$  eV, le flux de protons qui est le flux majoritaire à plus basse énergie devrait être coupé par l'interaction avec le fond de photons cosmologiques (effet GZK : Greisen-Zatsepin-Guzmin). La publication par l'expérience AGASA de l'observation d'une dizaine d'événements au delà de  $10^{20}$  eV, donc à une énergie bien au-delà de la coupure GZK, a suscité de vives discussions, notamment en regard des résultats d'expériences concurrentes comme HiRes ou Haverah Park. En effet, des analyses récentes de ces deux dernières expériences ont ramené des événements initialement « super-GZK » en deçà de la coupure. Il en résulte une situation expérimentale peu claire. L'observatoire Pierre Auger devrait permettre d'ici peu de clarifier cette situation et de savoir si le spectre « remonte » au delà de la coupure GZK comme le mesure AGASA.

Physiciens et astrophysiciens sont confrontés à deux difficultés importantes : d'une part les Zevatrons cosmiques (étoiles à neutrons, AGN...) modélisés par les astrophysiciens ont du mal à atteindre de telles énergies extrêmes (processus bottom-up) et d'autre part, aucun

Le candidat « Zevatron » n'est suffisamment proche pour que le ralentissement des UHECR soit négligeable.

Des solutions pourraient être trouvées au-delà de la physique connue : désintégration de particules super massives reliques des transitions de phase primordiales telles que les imaginent les physiciens des particules ( $10^{15}$  GeV soit  $10^{24}$  eV pour les théories de grande unification), existence de dimensions d'espace supplémentaires, évaporation de trous noirs primordiaux, ou brisure de l'invariance de Lorentz... Les rayons cosmiques permettraient d'avoir des indications sur une nouvelle physique à des énergies bien au-delà des performances des accélérateurs actuels, même si bien entendu le prix à payer est une luminosité extrêmement faible (1 particule par  $\text{km}^2$  et par siècle !) et un calorimètre, l'atmosphère, dont la structure complexe et changeante, est difficile à connaître de façon précise à chaque instant. De plus, bien entendu, la modélisation des gerbes atmosphériques indispensable pour caractériser la particule primaire (énergie, nature...), nécessite des extrapolations à des énergies ou des angles souvent bien au-delà des données actuelles (il faut noter qu'une collision d'un proton de  $10^{20}$  eV sur un proton au repos correspond à une énergie centre de masse de 450 TeV). Toutefois, la difficulté de ces expériences ne doit pas faire oublier que ces rayons cosmiques d'ultra haute énergie constituent sans doute notre unique chance d'accéder à des énergies aussi extrêmes. En particulier, l'astronomie des neutrinos d'énergie extrême pourrait constituer un des meilleurs accès vers les nouvelles physiques.

L'expérience EUSO propose une approche nouvelle de détection des gerbes atmosphériques générées par les rayons cosmiques, qui consiste à placer un imageur dans l'espace, sur la station orbitale internationale (ISS) de façon à bénéficier d'un angle de vue très important. Cette méthode pourrait augmenter de un à deux ordres de grandeur le nombre d'événements super GZK détectés par rapport aux données existantes et permettre une analyse plus fine (composition, localisation et spectre des sources...). EUSO constitue une mission pionnière dans le domaine.

### ► Les gerbes atmosphériques et le détecteur EUSO

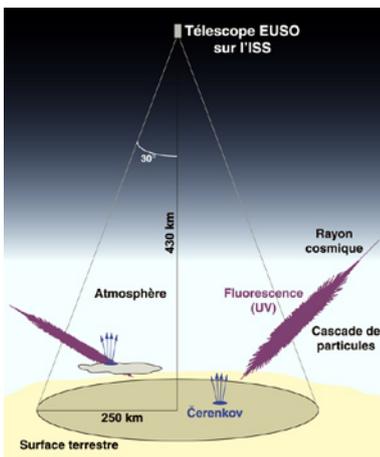


Figure 1

L'interaction du rayon cosmique primaire avec l'atmosphère se situe à des altitudes de l'ordre de 30 km au-dessus du sol et très rapidement le flux de particules secondaires est largement dominé par les particules électromagnétiques : électrons, positrons et gammas. Leur nombre atteint quelques  $10^{11}$  particules au maximum d'une gerbe de  $10^{20}$  eV. Ce maximum se produit en moyenne bien au-dessus de la basse atmosphère, entre 3 000 et 6 000 mètres selon l'inclinaison de la gerbe.

Ces particules chargées relativistes excitent les molécules d'azote de l'atmosphère, générant l'émission de lumière de fluorescence. Le spectre de fluorescence de l'azote est large, mais le rapport signal sur bruit est favorable dans la bande 330-400 nm. Puisque la réponse des molécules d'azote après l'excitation est rapide, la gerbe apparaît comme une sorte de petit disque lumineux se déplaçant en ligne droite à la vitesse de la lumière. La quantité de lumière est proportionnelle

au dépôt d'énergie à différentes profondeurs de pénétration dans l'atmosphère. L'intégrale de la lumière enregistrée, ainsi que la quantité de lumière au maximum de la gerbe, permettent de mesurer l'énergie de la particule primaire. La forme de la gerbe, en particulier la position du maximum en fonction de la profondeur de pénétration, donne une indication sur la nature du primaire. Pendant leur propagation dans l'atmosphère, les particules chargées relativistes produisent également de la lumière Čerenkov, qui est focalisée vers l'avant. La lumière Čerenkov réfléchi sur le sol produit une impulsion lumineuse qui indique précisément la position et le temps d'arrivée au sol. Ce point de repère sur le signal conduira à une estimation plus précise de l'altitude du maximum de la gerbe d'une

part, et de son angle d'autre part. Bien que la lumière UV produite le long de la gerbe atteigne quelques  $10^{15}$  photons, l'angle solide sous lequel ils sont vus depuis l'ISS située à 400 kms au-dessus du sol n'est que de quelques  $10^{-11}$  sr. Le bruit de fond UV, provenant essentiellement de l'atmosphère, est vu sous le même angle solide.

Le télescope EUSO est conçu pour collecter la lumière émise par une gerbe et permettre d'en reconstruire les paramètres caractéristiques. Le détecteur EUSO de conception relativement simple, comportant un système optique composé de lentilles de Fresnel de 2 m de diamètre, un plan focal constitué de photomultiplicateurs à anodes multiples (MAPMT) totalisant  $2,2 \cdot 10^5$  pixels, une électronique (digitale et analogique) et un système de déclenchement et de reconnaissance de gerbes, constitue toutefois un défi technologique important. Grâce à un champ de vue de  $\pm 30$  degrés, une surface au sol de 160 000 km<sup>2</sup> peut être couverte, chaque pixel du plan focal correspondant à un peu moins d'1 km<sup>2</sup> au sol (Figure 1)

L'optique d'EUSO sera réalisée par la composante américaine de la collaboration, les photodétecteurs par la composante japonaise et l'Europe est actuellement en charge de l'électronique. L'équipe du LPSC a la responsabilité de la conception de l'électronique analogique front end, participe aux études de l'impact de l'atmosphère (transfert radiatif), du bruit de fond UV, du cycle utile et de la réflectivité des surfaces terrestres (expérience ULTRA).

## ► L'électronique analogique d'EUSO

### Les signaux dans EUSO

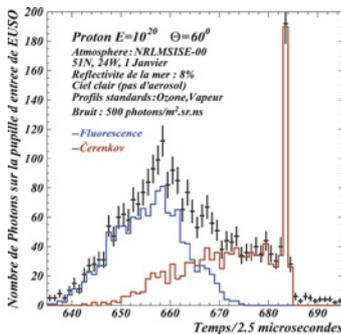


Figure 2

L'ensemble de détection composé du télescope d'EUSO et de l'atmosphère dans son champ de vue constitue une véritable chambre à projection temporelle. Le plan focal segmenté d'EUSO fournit la projection X-Y. La projection Z est donnée par la différence en temps de propagation. L'altitude absolue peut être déduite du temps de référence que fournit le signal Čerenkov arrivant au sol. La structure en temps du signal de fluorescence (émission isotrope) et du signal Čerenkov (quasiment colinéaire à la gerbe) est illustrée sur la figure 2.

L'électronique d'EUSO doit assurer le déclenchement, la mesure et l'acquisition des données. L'électronique de déclenchement doit être capable de distinguer une structure spatio-temporelle provenant de la fluorescence d'une gerbe du bruit ambiant. Celui-ci est constitué par un fond aléatoire que des mesures en ballon et en micro satellite ont estimé à 500 photons/m<sup>2</sup>/sr/ns. Ce bruit de fond induit un taux moyen de  $\sim 0,7$  photoélectron pour un signal attendu de quelques photoélectrons par pixel et par microseconde pour les MAPMT M36. Ce signal s'étale sur une dizaine de pixels et quelques dizaines de microsecondes pour un UHECR de  $10^{20}$  eV. Il faut y ajouter les phénomènes lumineux localisés de la haute atmosphère (airglow, elves et sprites) et les divers produits de l'activité humaine, qui peuvent localement dépasser le fond moyen de plusieurs ordres de grandeur.

### Architecture des photo détecteurs

Le plan focal du télescope d'EUSO, tapissé de photomultiplicateurs (PM) multianodes (MAPMT) est segmenté en 200 000 pixels. Les MAPMT sont regroupés en microcellules formées par un ensemble de 4 PM. Plusieurs (9) microcellules forment un module de photodétecteurs (ou PDM). La logique de déclenchement électronique est basée sur des modules indépendants appelés macrocellules. Une macrocellule couvre en pratique un PDM de 36 MAPMT de 36 pixels chacun. Un pixel peut être identifié par sa position en X et Y dans la macrocellule. La macrocellule est pourvue de son électronique propre, ce qui permet le pré-assemblage, et les tests jusqu'à la logique de prise de décision.

## Principe de mesure et de déclenchement

Le signal recherché dépend de l'altitude à laquelle se produit la gerbe et de son inclinaison. Il apparaît typiquement sur des dizaines de pixels avec quelques photoélectrons par pixel et par microseconde pendant une dizaine à une centaine de microsecondes. Le principe de mesure et de déclenchement est basé sur le comptage de photon unique.

Chaque fois qu'un signal amplifié d'un pixel arrive à dépasser un certain seuil analogique, un compteur digital est incrémenté d'une unité. Si le contenu du compteur dépasse un nombre préfixé, un signal de déclenchement de premier niveau est créé en même temps que les signaux OR-X, OR-Y. A la fin de chaque unité de temps de base ou GTU (Gate Timing Unit), les valeurs X,Y et le nombre de photoélectrons des pixels touchés pendant cette période sont écrits dans des mémoires circulaires d'une profondeur adéquate.

Un signal de déclenchement du système est produit s'il y a la persistance dans le temps et la proximité dans l'espace (même macrocellule ou proximité XY) des signaux lumineux dans une ou plusieurs macrocellules. Les mémoires circulaires des macrocellules seront lues sur ordre du processeur central, quand celui-ci décide qu'un événement intéressant doit être pris en considération et enregistré. Cette méthode permet également de lire un nombre déterminé de mémoires antérieures et postérieures à l'événement ayant déclenché l'acquisition.

Plusieurs modes de déclenchement ont été prévus : mode normal, mode calibration et mode lent. Le mode normal correspond à une prise normale des données avec un GTU de 2,5 microsecondes. Le mode calibration avec un GTU de quelques centaines de nanosecondes permet la mesure du spectre de photoélectron unique ou la mesure d'une source lumineuse étalon embarquée. Le mode lent devra permettre l'étude des phénomènes lumineux tels que les météores avec un GTU qui peut aller jusqu'à des millisecondes.

## Électronique Frontale (FEE pour Front End Electronics)

EUSO associe une électronique à la fois digitale pour le comptage des photons uniques, et analogique pour l'intégration des charges des photoélectrons collectés. Elle devra permettre de couvrir une gamme de dynamique supérieure à 4 ordres de grandeur.

L'électronique digitale remplit essentiellement les fonctions de comptage et de marquage X-Y, et de déclenchement décrites ci-dessus. L'électronique analogique assure le rôle de préamplificateur, d'intégration des signaux et de stockage dans des mémoires analogiques. Elle permet de gérer les événements de haute énergie ainsi que les signaux brefs et de grande amplitude associés à la lumière Čerenkov qui pourraient excéder les capacités de la partie digitale. Pour des raisons de compacité, de connectique, d'économie d'énergie et de fiabilité, l'ensemble de l'électronique frontale sera construit par assemblage de circuits intégrés spécifiques (ASIC), conçus et réalisés pour ce projet suivant les normes de qualification spatiale. Toujours dans le souci d'économie de puissance consommée et de simplicité, différentes approches sont envisagées : l'une, plus coûteuse en puissance, concerne une approche analogique voie par voie sur chaque signal d'anode, l'autre ne considère qu'une voie analogique par dynode commune (36 voies) ; une solution intermédiaire consiste à regrouper plusieurs pixels. Le circuit devra aussi assurer la communication et le transfert des données au système de lecture et de contrôle.

Pendant la phase A, le LPSC de Grenoble est responsable du sous-système AFEE (électronique analogique Front End) et s'est engagé à évaluer la faisabilité et les performances d'une électronique analogique basée sur la conception de circuits intégrés spécifiques. L'ensemble des études et des prototypes réalisés à ce jour au LPSC est décrit dans les activités du service électronique.

EUSO Analogue Front End Electronics. ICRC2003 p 955

EUSO Analogue Front End Electronics and Calibrations. ICRC2003 p 959

## ► L'atmosphère, un détecteur pour EUSO

L'atmosphère a pour les deux processus de génération de lumière un rôle essentiel. La lumière créée est transmise au télescope EUSO à 400 km d'altitude. Lors du transfert radiatif de ces photons, les phénomènes d'absorption et de diffusion Rayleigh ou Mie liés à l'atmosphère doivent être pris en compte. L'atmosphère a ainsi un triple rôle : celui de cible, de générateur de lumière et de transmission de lumière. Le groupe EUSO du LPSC étudie l'influence de l'atmosphère réelle sur le signal observable par le télescope EUSO. Une partie de ce travail se fait à partir de simulation, tandis que des contacts sont pris avec des spécialistes de l'atmosphère afin de se confronter à des données réelles sur l'atmosphère.

### L'atmosphère

L'atmosphère terrestre est une fine enveloppe de gaz composée principalement d'azote (78 %), d'oxygène (21 %), d'argon (0,9 %), de vapeur d'eau (variable) avec de faibles quantités d'autres gaz tels que l'ozone. Les phénomènes de convection permettent de considérer un poids moléculaire moyen constant jusqu'à 80 km. Du fait de sa formation, la couche d'ozone est quant à elle située à environ 25 km. La troposphère s'étend de 0 à 10 km, elle est caractérisée par une élévation de température d'environ 6,5°C/km. La plupart des phénomènes météorologiques tels que les nuages prend place ici. La frontière de la troposphère est la tropopause caractérisée par une température constante, ainsi que la couche adjacente de la stratosphère jusqu'à environ 20 km. Après quoi la température augmente jusqu'à la fin de la stratosphère qui s'étend jusqu'à 50 km. C'est dans cette région qu'a lieu la première interaction, le maximum du développement de la cascade se situant vers 4 km du sol.

### L'émission de lumière

La lumière de fluorescence est produite lors de l'interaction des particules chargées avec les molécules d'air, essentiellement l'azote. La lumière est émise de manière isotrope dans une zone de longueurs d'onde comprises entre 300 et 450 nm, et provient de la désexcitation de deux états électroniques : les bandes 2P et 1N dont les principales contributions sont respectivement les raies d'émission à 315,9 nm - 337,1 nm - et 357,7 nm pour la bande 2P, et les raies à 391,4 nm et 427,8 nm pour la bande 1N. Ces deux états sont excités suivant des processus dont les sections efficaces varient différemment avec la nature et l'énergie de la particule incidente. La bande 1N est excitée par un processus direct d'ionisation tandis que la bande 2P correspond à un processus à deux étapes dans lequel l'attachement des électrons joue un rôle important, en particulier lors de la présence de polluants tels que l'oxygène ou la vapeur d'eau. Le rendement de fluorescence ainsi que le spectre en longueur d'onde sont le résultat de la combinaison des processus d'excitation et de désexcitation, dans lesquels l'atmosphère joue un rôle prépondérant. Ils sont le reflet des conditions de pression et température dans l'atmosphère ainsi que de la présence d'impuretés telles que la vapeur d'eau. Pour des conditions normales de température et de pression et pour des électrons de 32 MeV, le rendement de fluorescence atteint 4,8 photons par mètre.

Le rayonnement Čerenkov est produit lorsque les particules chargées traversent l'atmosphère avec une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce milieu. Le rayonnement est émis vers l'avant et est focalisé suivant l'axe du développement de la cascade. Cette lumière n'est pas directement visible par EUSO du fait de sa direction initiale, mais sera observée après réflexion au sol. Cependant une faible partie du rayonnement diffuse lors de son transfert vers le sol sur les molécules d'air et s'ajoute ainsi à la lumière de fluorescence. L'énergie nécessaire à la production du rayonnement Čerenkov, ainsi que le nombre de photons produits dépendent de l'indice de réfraction de l'air qui est fonction des conditions locales de l'atmosphère.

## Le transfert radiatif

La transmission des photons dans l'atmosphère est affectée par les processus de diffusions Rayleigh et Mie d'une part et d'absorption d'autre part. La diffusion Rayleigh sur les molécules d'air de faible dimension est le processus dominant autour du maximum de développement de la cascade. Elle dépend de la longueur d'onde. Lorsque la taille des centres diffuseurs devient plus grande que la longueur d'onde, comme dans le cas des gouttelettes d'eau et des aérosols (poussières, fumées), c'est la diffusion Mie qui devient dominante. Ceci se produit essentiellement dans les très basses couches de l'atmosphère. Contrairement à la diffusion Rayleigh, la diffusion Mie n'est que faiblement dépendante de la longueur d'onde et est fortement non isotrope. Elle est également plus difficile à modéliser car elle dépend de la nature des centres diffuseurs (forme, taille). Dans le domaine de longueurs d'onde de l'UV, l'ozone est l'absorbeur dominant, en particulier en dessous de 330 nm.

L'effet de ces différents phénomènes a été étudié avec un programme standard LOWTRAN 7. Cet outil permet de calculer la transmission de la lumière suivant différentes conditions atmosphériques. Ainsi dans les conditions d'une atmosphère dite « US Standard », les courbes suivantes (Figure 3) présentent la transmission verticale des photons jusqu'au télescope EUSO en fonction de la longueur d'onde d'une part (avec le sol comme point de départ) et de l'altitude de création du photon d'autre part (pour une longueur d'onde de 337 nm).

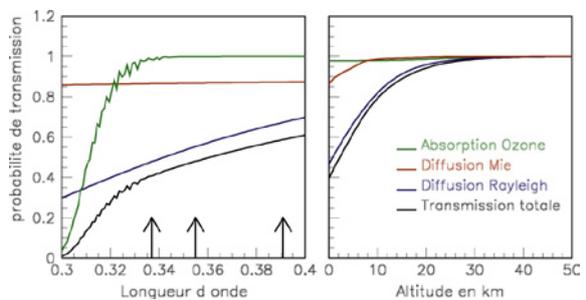


Figure 3

## Une atmosphère variable

La station spatiale survolant la terre entre les latitudes  $\pm 51^\circ$  et se déplaçant à une vitesse de 7 km/sec, les conditions atmosphériques dans le champ de vision du télescope EUSO vont changer minute par minute. De plus la surface observée étant importante (supérieure à 150 000 km<sup>2</sup>), un certain degré d'inhomogénéité peut apparaître, en particulier à cause de la présence de nuages.

Afin d'étudier l'effet de la variabilité de l'atmosphère, nous avons utilisé des modèles empiriques, recommandés par le Committee for Space Research (COSPAR) et basés sur 40 années de mesures continuellement mises à jour. Ces modèles concernent uniquement les propriétés globales de l'atmosphère telles que les profils de température, de pression ainsi que de densité des principaux éléments, en tout point du globe et pour différentes périodes de l'année. Les profils de densité des composants secondaires tels que l'ozone peuvent être obtenus à partir de données de satellites comme GOME. Il a été montré que la variabilité de ces profils atmosphériques peut induire des différences géométriques dans le développement de la cascade du même ordre de grandeur que celles qui pourraient être observées entre une interaction primaire d'un proton et celle d'un fer. Il est donc indispensable de connaître en tout point du globe survolé par EUSO les profils atmosphériques ; pour cela il est envisagé d'utiliser les données satellites et météorologiques.

La couverture nuageuse, elle aussi variable, est un paramètre important à prendre en compte. En effet elle affecte non seulement l'acceptance du détecteur, mais aussi la forme de certaines cascades. Les événements dont le maximum du développement de la cascade a lieu au-dessous d'une couche nuageuse épaisse seront perdus pour EUSO tandis que les signaux provenant de cascades produites en dessous de cirrus de haute altitude seront atténués et l'énergie apparente de ces événements sous-estimée. Des cas intermédiaires peuvent se produire dans lesquels la réflexion du signal Čerenkov sur les nuages bas peut être fortement augmentée, et où la réflexion d'une partie du signal de fluorescence sur ces mêmes nuages peut venir brouiller le signal de fluorescence directe. L'étude de ces différents phénomènes est en cours. Elle exploite la base de données ISCCP (International Cloud Climatology Project) qui fournit des données précises sur la couverture nuageuse autour du globe.

## La modélisation

L'atmosphère joue donc un rôle essentiel dans la formation du signal lumineux observé par le télescope EUSO. La compréhension fine des différents phénomènes qui ont lieu dans l'atmosphère est indispensable à toute interprétation future des signaux d'EUSO. Le groupe de Grenoble met actuellement l'accent sur la mise en place de la description de ces différents phénomènes dans la structure de développement logicielle ESAF (EUSO Simulation and Analysis Framework). Cet ensemble de logiciels, développés en C++/ROOT, doit constituer une chaîne complète de simulation et de reconstruction des événements. Il permet également d'intégrer des parties écrites en Fortran, et donc d'inclure des logiciels « standards » tels que LOWTRAN.

## Cycle utile et bruit de fond

Le détecteur EUSO ne fonctionnera que lorsqu'il survolera la zone de nuit. L'étude de la lumière de bruit de fond est bien entendu d'importance capitale. Afin de déterminer le cycle utile du détecteur, il est nécessaire de connaître les périodes où il surplombera l'obscurité en prenant en compte la position relative du soleil, de la lune, et la trajectoire de l'ISS autour de la terre. Pour évaluer le rapport signal sur bruit et les efficacités de déclenchement, il est nécessaire d'évaluer le bruit de photons au niveau du détecteur, en prenant en compte différentes sources nocturnes de lumière UV : les sources naturelles, telles que l'émission aurorale permanente (airglow) des couches élevées de l'atmosphère par désexcitation de l'oxygène atomique, la lumière stellaire diffuse, les sources artificielles dues essentiellement aux activités humaines au sol. Deux aspects ont été particulièrement étudiés au LPSC : l'influence du bruit de fond induit par la lumière lunaire sur le cycle utile [1,2], et l'évaluation des autres sources naturelles de lumière nocturne [2].

## Lumière lunaire et cycle utile d'EUSO

Une première option conservatrice consiste à restreindre les périodes de fonctionnement du télescope aux instants de l'orbite où à la fois le soleil et la lune sont éclipsés par la terre, et où non seulement la zone du globe survolée mais également le détecteur sont dans le cône d'ombre de la terre. Le cycle utile d'EUSO est alors réduit à environ 13 % indépendamment d'autres considérations. Il s'avère cependant qu'il est possible de récupérer une fraction non négligeable de temps de fonctionnement en relâchant cette condition très restrictive sur l'angle zénithal de la lune.

Nous avons donc entrepris de quantifier le bruit de fond de photons induit dans le détecteur par la présence de la lune dans le ciel de la zone observée. Nous modélisons le flux de lumière lunaire incidente en haut de l'atmosphère en fonction de la phase de la lune et de son angle zénithal et estimons la fraction de lumière diffusée en direction d'EUSO par l'atmosphère et le sol. Le calcul prend en compte de façon détaillée les propriétés de la lune en tant que réflecteur de la lumière solaire, les éphémérides exactes du soleil et de la lune ainsi que la phase de cette dernière, les propriétés de l'atmosphère en tant que diffuseur UV, la trajectoire précise de l'ISS autour de la terre en incluant la précession de son orbite. L'évaluation de la lumière de bruit de fond d'origine lunaire est calculée minute par minute sur une période d'une année complète [1].

Nous avons constaté qu'il était possible d'accroître la fraction de cycle utile de 13 % à 18 % sans augmentation notable de bruit de fond. Le gain essentiel résulte du fait d'accepter que la lune puisse être juste sous l'horizon ou basse au-dessus de l'horizon lors du premier ou du dernier quartier de lune. Notons que le fait de relâcher la contrainte sur le bruit de fond de la lune offre un autre effet positif : cela permet de diminuer le nombre d'opérations d'ouverture-fermeture du télescope en réduisant le nombre d'ouvertures de très courte durée.

En conclusion, on peut considérer, avec une bonne marge de sécurité, que la contrainte d'obscurité limite le cycle utile d'EUSO à au moins 18 % sans augmenter le bruit de fond.

Ceci représente une augmentation de 40 % du cycle utile par rapport à une coupure stricte sur l'angle zénithal de la lune et du soleil. En autorisant une quantité acceptable de bruit de fond additionnel, il est possible d'augmenter encore un peu le cycle utile, mais probablement pas au-delà de 20 %.

### Lumière dans le ciel nocturne

Regardant vers le nadir, le détecteur EUSO sera directement sensible aux sources de lumière situées dans son champ de vue. Il sera également sensible à la lumière venant de l'espace et réfléchi vers le haut par l'atmosphère et le sol.

Toute une variété de phénomènes couvrant toute une gamme d'échelle cosmique est responsable de la composante diffuse de lumière du ciel nocturne sans lune [3]. Dans la bande de longueur d'onde qui nous intéresse, de 300 à 400 nm, trois composantes principales participent au bruit de fond. Du sol au cosmos, on observe l'émission aurorale de la haute atmosphère (« airglow ») liée à la désexcitation de molécules d'oxygène engendrées lors de la recombinaison d'oxygène atomique, la lumière zodiacale qui trouve sa source dans la diffusion de la lumière solaire et dans l'émission thermique des poussières interplanétaires et l'émission diffuse du milieu interstellaire, la lumière stellaire et planétaire. Notons que l'airglow a fait l'objet d'une simulation détaillée, car parmi les sources diffuses, c'est la principale composante du bruit de fond du ciel nocturne sans lune [2].

Le bruit de fond total de photons à la pupille d'entrée du télescope est la somme des photons provenant en direct de l'émission de l'air des hautes couches et des photons du flux incident reflétés par l'atmosphère et le sol. Le flux reflété dépend des conditions locales de profondeur optique de l'atmosphère, de la présence ou non de nuages et d'aérosols.

Au final et hors contribution lunaire, le flux total de bruit de fond dans le détecteur devrait varier de 440 (510) à 925 (1050) photons/m<sup>2</sup>/ns/sr pour le ciel clair (resp. nuageux). Une étude plus approfondie est en cours, incluant différentes conditions de couverture nuageuse et de présence d'aérosols.

### Pollution lumineuse et phénomènes transitoires

La pollution lumineuse issue des activités humaines est étudiée à partir de cartes de données photométriques dans la bande V du satellite Optical Transient Detector [4]. Il est possible de convertir ces données en estimation dans la bande U en utilisant le spectre des lampes d'éclairage public d'usage courant. L'impact de ces sources sur les variations de bruit de fond lors du survol des régions fortement industrialisées est en cours d'étude.

Les phénomènes lumineux transitoires de l'atmosphère tels que les éclairs représentent un sujet d'étude en soi et un réel potentiel d'observation pour EUSO. L'estimation de la contribution de ces phénomènes au bruit de fond, au cycle utile, ainsi que des implications sur la conception du détecteur, (notamment de l'électronique) est en cours. D'autres phénomènes moins bien connus tels que ceux se produisant dans les couches fortement ionisées de la haute atmosphère (elves, sprites and blue jets) sont également pris en compte car ils devraient contribuer au bruit de fond ainsi qu'au temps mort d'EUSO.

[1] F. Montanet, Euso Scientific Support Activity document : EUSO-SIM-REP-009-1 (2003)

[2] C. Berat, D. Lebrun, F. Montanet, J. Adams, Proc. ICRC 2003, Universal Academy Press, Inc. [The 28th International Cosmic Ray Conference, Tsukuba, Japan

[3] Leinert Ch. et al., Astron.Astrophys.Suppl.Ser., 127 (1998) 1-99

[4] Cinzano P. et al. astro-ph/0108052

## ► L'expérience ULTRA (UV Light Transmission and Reflection in the Atmosphere)

### Objectifs

Les objectifs principaux d'ULTRA sont la mesure de la lumière réfléchie UVA Čerenkov associée aux gerbes atmosphériques sur différents types de surfaces terrestres caractéristiques (océans, sables...), et la mesure à différentes altitudes, si possible, du bruit de fond UV ambiant. Beaucoup de données d'albédo et de BRF (Bidirectional Reflection Function) existent dans le visible et l'infrarouge, mais les données dans les UVA sont beaucoup plus fragmentaires.

### Principe de l'expérience et description des instruments

Quatre instruments de base constituent actuellement ULTRA (voir figure 4):

- un petit réseau de cinq stations (ET-Scope) en coïncidence, pour la détection au sol des particules de la gerbe atmosphérique. La géométrie actuelle est celle d'un carré avec une station au centre ;
- un télescope UV (Belenos) placé au centre de l'ET-Scope et regardant vers le haut pour la détection des UV directs. Un Belenos est constitué de deux télescopes identiques en coïncidence. Pour chaque télescope, deux lentilles de Fresnel focalisent la lumière sur la photocathode d'un PM ;
- un télescope UV (UV-Scope) placé en hauteur, pointant vers le sol et dont le champ de vue recouvre la totalité de la surface de l'ET-Scope. Cet UV-Scope mesure les UV réfléchis ;
- un moniteur de bruit de fond travaillant au photon unique (BABY). Cet instrument a effectué déjà plusieurs vols sur ballons.



Figure 4

Le déclenchement du système est assuré par l'ET-Scope. Celui-ci permet de détecter avec une bonne statistique (fréquence = 0,015 Hz) les rayons cosmiques aux énergies voisines du « genou » ( $10^{15}$  eV). La reconstruction de la gerbe (pied de gerbe et nombre de particules N au sol) permet d'obtenir une première estimation du nombre de photons Čerenkov incidents NC. En effet, les simulations effectuées avec le logiciel Corsika à Grenoble montrent que le rapport  $NC/N$  ne varie que de quelques pourcents même pour de fortes fluctuations de N. Bien entendu dans ces simulations Corsika, aucun phénomène atmosphérique complexe (nuages...) n'est pris en compte.

Une mesure directe des photons Čerenkov est réalisée par les Belenos mais pour le moment, seulement pour une faible fraction des événements. La réalisation d'un réseau de Belenos est en cours. Les performances du détecteur de particules (ET) sont illustrées sur la figure 5 : reconstruction de la distribution latérale des électrons, du nombre d'électrons total au sol (shower size), de la direction apparente de la source en coordonnées galactiques et reconstruction du centre de la gerbe.

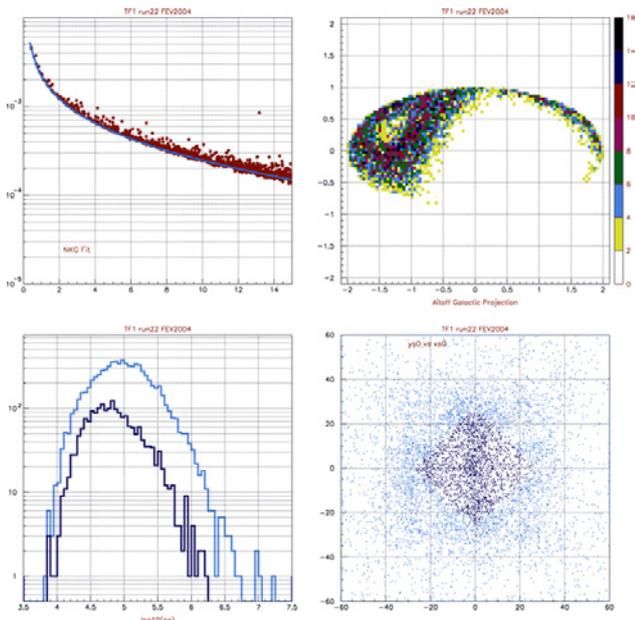


Figure 5

## Résultats des prises de données au Mont-Cenis et à Grenoble

Deux campagnes de mesures menées au Mont-Cenis (octobre 2002 et juin 2003) ont permis de mettre au point les différents sous-instruments d'ULTRA.

- L'ET-Scope dont Turin et Grenoble ont la responsabilité marche parfaitement. La direction des gerbes, leur taille (N) et la position du cœur sont bien reconstruites (voir figures 5). L'accord avec les simulations effectuées est assez remarquable.
- Les signaux UV vus par les Belenos sont bien associés aux gerbes (ils sont synchrones à 5 ns des signaux vus par la station ET centrale, l'amplitude du signal est proportionnelle à N, etc.). De plus ils ont l'amplitude prévue par les simulations.
- L'UV Scope a permis d'obtenir une valeur limite sur la réflectivité du sol au Mont-Cenis (6 %). Toutefois des difficultés de synchronisation entre ce détecteur situé en altitude et l'ET-Scope ont limité fortement le temps de disponibilité de cet instrument.

## Le programme futur

Avant de déployer ULTRA sur la mer, peut-être en 2004, il est nécessaire de disposer d'une électronique permettant la synchronisation parfaite de l'UV-Scope. Une des solutions possibles est celle proposée et mise en œuvre actuellement par le LIP de Lisbonne : cartes d'électronique munies de GPS assurant une synchronisation à quelques nanosecondes.

D'autre part, pour les événements de haute fréquence ( $10^{15}$  eV), le rapport signal de lumière réfléchi sur bruit physique UVA doit être augmenté de façon significative si on veut minimiser les temps de prises de données. Une des façons d'y arriver est sans doute de disposer d'UV-Scope avec plusieurs PM en coïncidence dans le plan focal de l'optique, et peut-être de construire plusieurs UV-Scopes de ce type de façon à mesurer la réflectivité à plusieurs angles à la fois.

The ET Scope Ground Array for the Ultra experiment, J. Chauvin et al, ICRC 2003