

# Les astroparticules



Comprendre les mécanismes d'émission de rayonnements et d'accélération des particules, au sein d'objets de l'univers placés dans des conditions extrêmes, est d'une grande importance pour la physique et l'astrophysique.

Le spectromètre **AMS**, qui sera installé sur la station spatiale internationale en 2007, a pour but de mesurer avec une très bonne précision le spectre et la composition des rayons cosmiques chargés dans la gamme d'énergie du GeV au TeV et de rechercher de l'antimatière (antihélium) dont l'absence n'est pas explicable actuellement par la seule violation de CP. De plus, à partir des spectres enregistrés, la possibilité de signer la présence d'un éventuel neutralino, candidat à la matière noire, est ouverte.

En raison des interactions avec le rayonnement fossile à 3 K, on s'attend à ce que le spectre des rayons cosmiques s'arrête autour de  $10^{19}$  eV (coupure GZK). L'observation d'événements à une énergie supérieure pose le problème de la compréhension des processus d'accélération et de propagation du rayonnement cosmique dans l'univers. Le projet **EUSO** se propose d'étudier les interactions de rayons cosmiques d'ultra-haute énergie avec l'atmosphère en observant la fluorescence des gerbes atmosphériques depuis l'espace, avec un champ de vue équivalent à 150000 km<sup>2</sup>.



# Expérience AMS sur la Station Spatiale Internationale

## Participation du LAPP

**Expérimentateurs :** C. Adloff, G. Coignet, J. Favier, C. Goy, R. Kossakowski, S. Rosier-Lees, **J.-P. Vialle**

**Equipe technique :** F. Cadoux, G. Cougoulat, J.-M. Dubois, D. Fougeron, N. Fouque, R. Hermel, V. Hermel, L. Journet, V. Lepareur, B. Lieunard, C. Montanari, F. Peltier, T. Rambure

**Visiteur étranger :** G. Zhu

**Doctorants :** L. Girard, J. Pochon

**Stagiaires :** F. Ciaramella, M.-H. Gualdi, L. Jimenez, F. Morandat

## Abstract

The AMS02 detector will be the first magnetic spectrometer launched in space for a long duration. A precursor flight with a prototype detector AMS01 took place on the shuttle DISCOVERY in June 1998 to check the technical feasibility. It collected 100 millions of cosmic rays and published precise measurements of fluxes above and below the geomagnetic threshold. An effect of trapping of secondary particles in an equatorial belt was observed for the first time. The LAPP team was first to find and explain the origin of such phenomena. For the second phase, the detector AMS02 will be installed in June 2007 for 3 years on the international space station ISS. It comprises a super-conducting magnet of  $0.86 \text{ Tm}^2$  bending power, a silicon tracker, a time of flight system, a transition radiation detector, a RICH counter, and a lead-scintillating-fibers electromagnetic calorimeter. AMS02 will be able to measure with high precision and high statistics the charged cosmic ray fluxes, including light nuclei and their isotopes up to the oxygen, improving our knowledge of spectra by 3 to 4 orders of magnitude. This high sensitivity will allow to search for primordial antimatter (related to CP violation), for non-baryonic dark matter, and will allow to constrain cosmological models, giving a link between infinitely small (particle physics) and infinitely large (cosmology). Gamma rays emission from point-like sources (AGN, GRB, SNR, ...) or dark matter would also be measured in the GeV to TeV energy range. LAPP shares major responsibilities in the design and construction of the electromagnetic calorimeter, which plays a key role for physics with gamma and leptons. LAPP has shown the competing performances of the calorimeter for high energy gamma rays physics and was able to design a trigger for this.

AMS02 est une expérience spatiale dans le domaine des Astroparticules (physique des particules cosmiques) qui entend apporter une contribution fondamentale à la résolution des questions actuelles majeures de la cosmologie et de l'astrophysique :

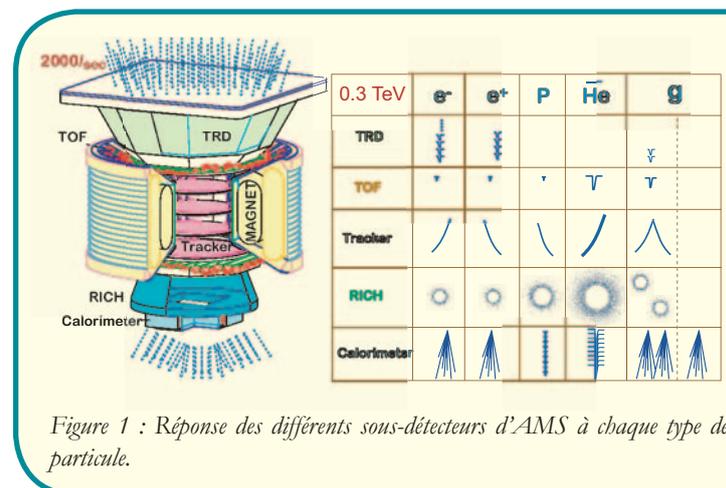
- Recherche d'antimatière primordiale (venant des origines de l'univers).
- Recherche de l'existence et de la nature de la matière noire non-baryonique.
- Mesure systématique et à haute statistique des flux de particules cosmiques chargées.
- Mesure des flux de noyaux légers identifiés en masse jusqu'à  $A < 25$  et en charge jusqu'à  $Z < 25$ .
- Observation et mesure des flux de gamma provenant de sources ponctuelles (noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma, pulsars, etc ...) ou éventuellement d'annihilations de matière noire.

Ces thèmes sont complètement liés aux questions qui se posent dans la physique des particules : violation du nombre baryonique, de PC, théories supersymétriques, etc. Pour remplir ce programme, AMS02 doit gagner jusqu'à trois ordres de grandeur en statistique par rapport aux expériences existantes, et couvrir avec des mesures de précision un domaine d'énergie largement inexploré dans le domaine des rayons cosmiques, allant du GeV au TeV.

Le principe expérimental d'un spectromètre magnétique opérant dans l'espace a été testé en 1998 avec le détecteur

AMS01 embarqué pour 12 jours à bord de la navette spatiale DISCOVERY. Le test technique a été un succès scientifique avec 6 publications et l'observation d'un effet de piégeage des particules cosmiques chargées autour de l'équateur dû à la configuration particulière du champ magnétique terrestre. Le groupe LAPP a montré l'origine de ce phénomène et, à partir des données mesurées d'AMS01, a pu prédire les flux de neutrinos atmosphériques dont la connaissance est vitale pour l'étude des oscillations de neutrinos. Ce travail a été publié dans le Physical Review D.

Pour AMS02 le détecteur doit être installé sur la station spatiale internationale ISS à partir de 2007 pour une durée d'exposition de trois à cinq ans. L'instrument est un spectro-



## AMS sur l'ISS. En Juin 2007 pour 3 à 5 ans



Vue artistique d'AMS sur la station spatiale ISS.

mètre magnétique de grande ouverture ( $0.6 \text{ m}^2 \cdot \text{Sr}$ ) organisé autour d'un aimant supraconducteur à champ dipolaire d'un pouvoir de courbure de  $0,86 \text{ Tm}^2$ . 8 plans de détecteur de traces en Silicium, un système de temps de vol fait de 4 plans de scintillateurs, un détecteur à radiation de transition, un compteur Cerenkov de type RICH, et un calorimètre électromagnétique (ECAL) permettent une mesure redondante des paramètres cinématiques des particules et noyaux ainsi que leur identification, comme le montre la Figure 1. Le pouvoir de séparation de l'antihélium par rapport aux protons et aux héliums est voisin de  $10^{10}$ .

Pour la conception et la construction du détecteur, le groupe AMS du LAPP est impliqué dans le calorimètre électromagnétique (ECAL). Le ECAL est essentiel pour la mesure et l'identification des particules électromagnétiques, et donc pour les flux de positons, d'électrons, et de rayons gamma. La recherche de matière noire et les sources de gamma de haute énergie (AGN, Sursauts Gamma, etc.) sont donc les domaines de physique liés directement au ECAL et pour lesquels le groupe AMS du LAPP apporte un effort particulier en termes de simulation de la physique et d'étude des performances attendues. Ces thèmes de physique font l'objet de deux thèses en cours actuellement dans le groupe. Le LAPP a aussi démontré la faisabilité d'un système de déclenchement sur les gamma de haute énergie se convertissant directement dans le calorimètre ce qui ouvre la voie à l'étude des phénomènes cosmiques cataclysmiques.

Le ECAL est formé d'un sandwich de feuilles de plomb et de couches de fibres scintillantes formant un « super-module », 9 super modules étant empilés et orientés alternativement en X et en Y pour former le ECAL d'environ  $16X_0$  d'épaisseur. Les fibres sont lues à une extrémité par des photomultiplicateurs multi-anodes et on obtient ainsi un échantillonnage en trois dimensions des gerbes, avec une granularité de  $1X_0$  en profondeur et de  $0,5$  rayon de Molière transversalement.

Le groupe AMS du LAPP a la responsabilité de l'instrumentation du ECAL, ce qui comprend :

- Le système de collection de lumière.
- L'électronique front-end du ECAL, la numérisation et la mémorisation.
- La mécanique d'équipement (comprenant les blindages magnétiques, les guides de lumière, les supports de photomultiplicateurs et les joints, ainsi que les panneaux de support en aluminium et les supports d'électronique, et enfin les radiateurs).
- L'assemblage du ECAL (modèle d'ingénierie et modèle de vol) ainsi que l'intégration dans AMS.
- Les calculs par éléments finis de la structure mécanique de support (conjointement avec Beijing), ainsi que la coordination de l'ensemble de la mécanique du ECAL par rapport à la NASA.

Le LAPP apporte aussi une contribution substantielle, non seulement aux logiciels et à l'analyse des données du ECAL, mais aussi à la simulation pour l'ensemble de l'expérience.

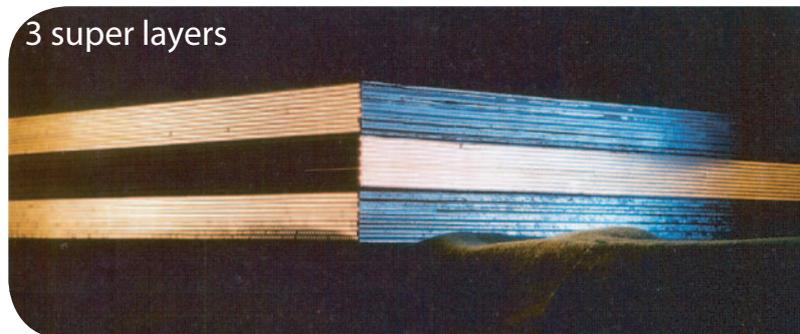


Figure 2a : 3 supermodules faits d'un sandwich de plomb/fibres scintillantes.

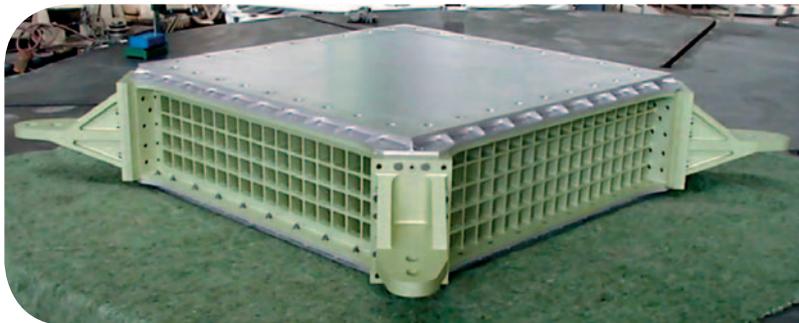


Figure 2b : ECAL dans sa structure mécanique support.

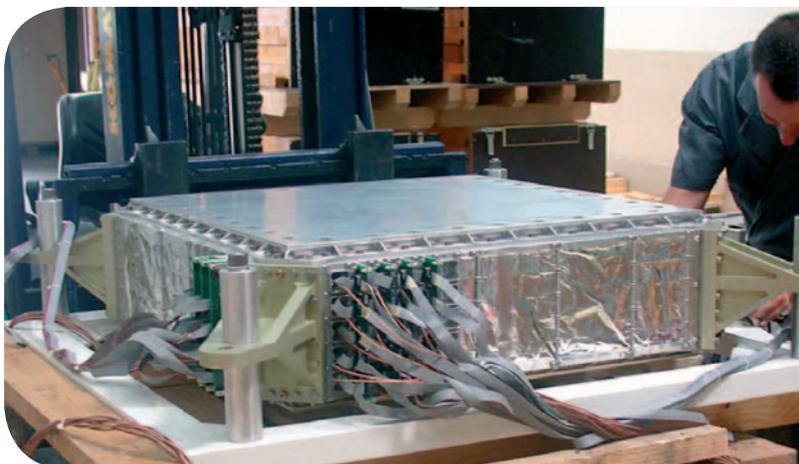


Figure 2c : ECAL équipé en électronique pour le faisceau test au CERN.

Le ECAL devant détecter et mesurer aussi bien une particule au minimum d'ionisation qu'une gerbe électromagnétique de 1 TeV, une électronique front-end de 60000 de gamme dynamique a été réalisée à l'aide d'un ASIC comprenant deux gammes d'amplification pour chacune des 4 anodes d'un PM et traitant aussi la dernière dynode pour la redondance (la dynode sert indépendamment pour l'électronique de déclenchement sur les gamma cosmiques de haute énergie dont la partie analogique est en cours de réalisation au LAPP). L'ensemble de l'instrumentation du ECAL et de sa mécanique support a fait l'objet d'un développement poussé, de réalisation de prototypes, et enfin

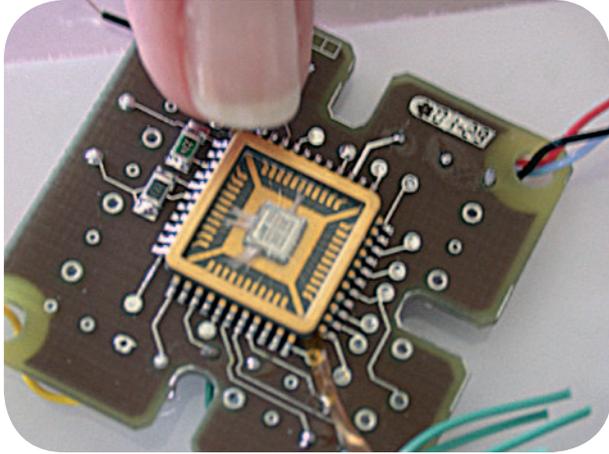


Figure 3a : Electronique Front-end.

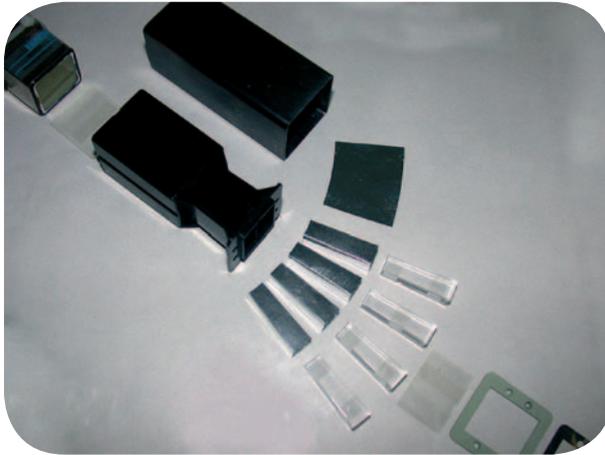


Figure 3b : Système de collection de lumière.

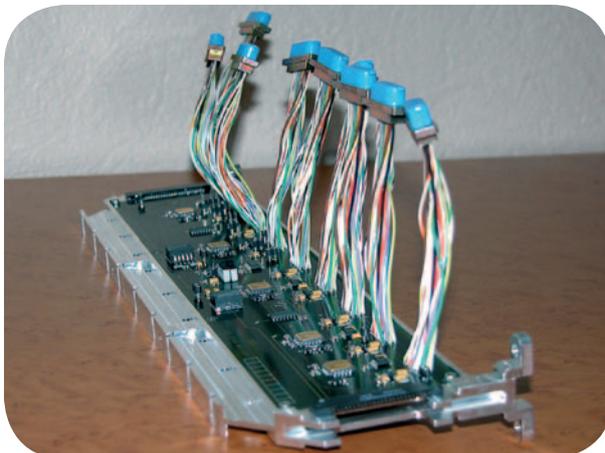


Figure 3c : Carte interface pour 9 PM.

un ensemble de 64 blocs de collection de lumière a été assemblé sur le modèle d'ingénierie du ECAL et complètement testé et validé.

Pour tous ces développements, et en vue de l'intégration du ECAL, une salle blanche a été construite et le groupe s'est équipé d'une enceinte thermique complétée par un système de vide développé au LAPP. Un banc de tests en rayons cosmiques a été étudié et réalisé ainsi que des bancs de test pour l'électronique. Des tests de vibration du système de collection de lumière ont été réalisés en utilisant les installations (pot vibrant) de l'ESIA. Le LAPP a contribué aux tests de qualification spatiale de la structure mécanique porteuse à Beijing. Le LAPP a préparé et réalisé les tests de « mission success » avec le module d'ingénierie instrumenté partiellement, en utilisant la nouvelle installation de vibration à Terni (Italie).

Le test du ECAL et de l'électronique front-end en faisceau de  $p$ ,  $e^-$ ,  $e^+$ , et  $\mu$  au CERN en juillet 2002 ont permis de montrer que les performances nominales sont atteintes, comme le montrent les Figures 5a et 5b.

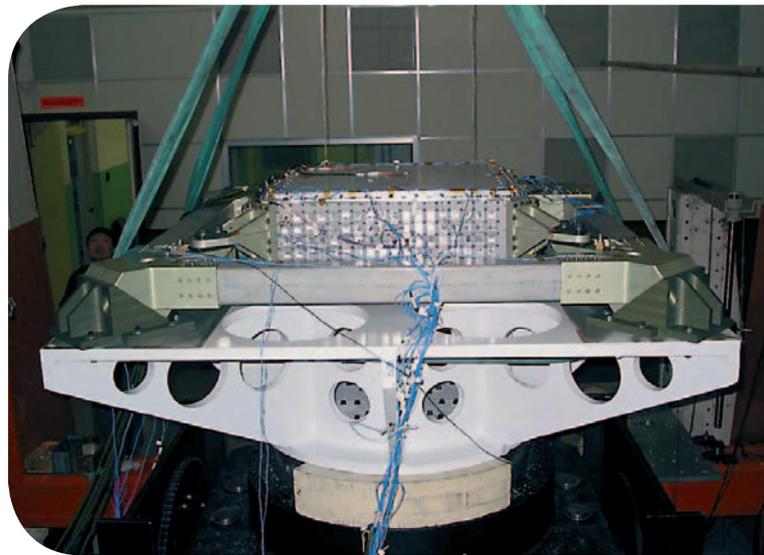


Figure 4a : Tests en vibration de la structure mécanique porteuse à Beijing.

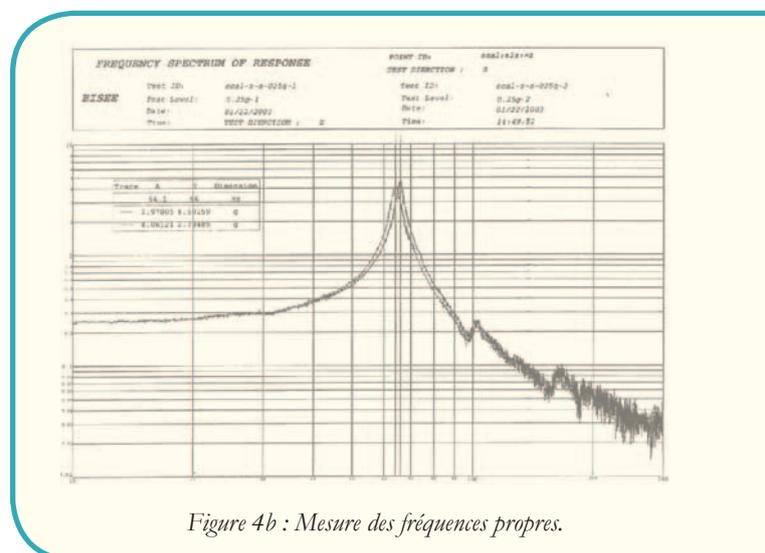


Figure 4b : Mesure des fréquences propres.

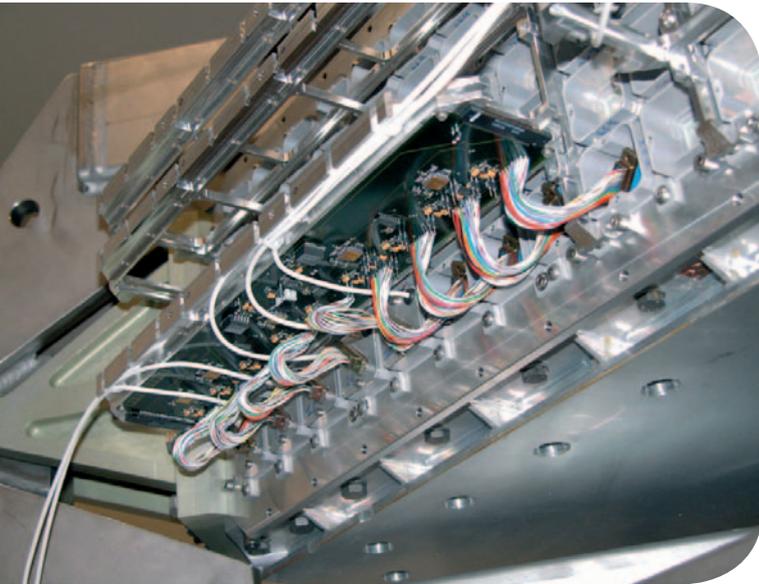


Figure 4c : Équipement du ECAL pour les tests de « mission success ».

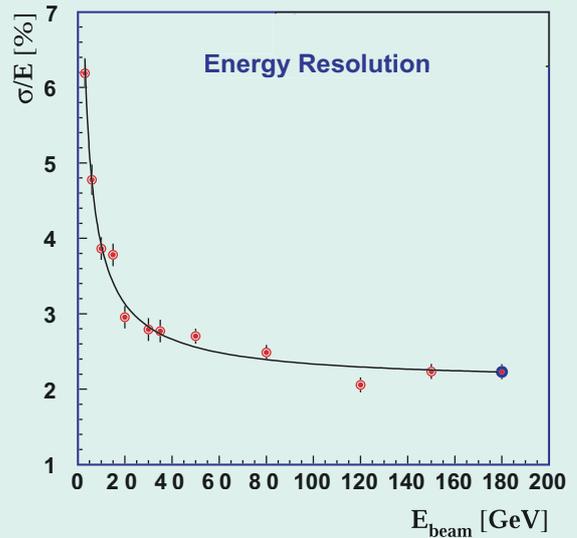


Figure 5b : Résolution en énergie mesurée en faisceau-test.

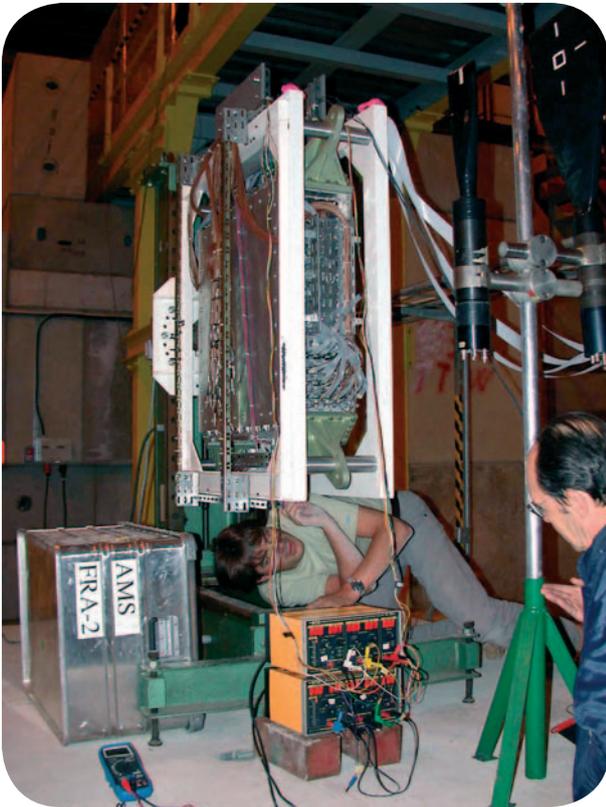


Figure 5a : Calorimètre en faisceau test au CERN.

La production de l'instrumentation pour le modèle de vol est en cours, et le ECAL complètement assemblé et testé devrait être caractérisé en faisceau d'électrons à l'automne 2004.

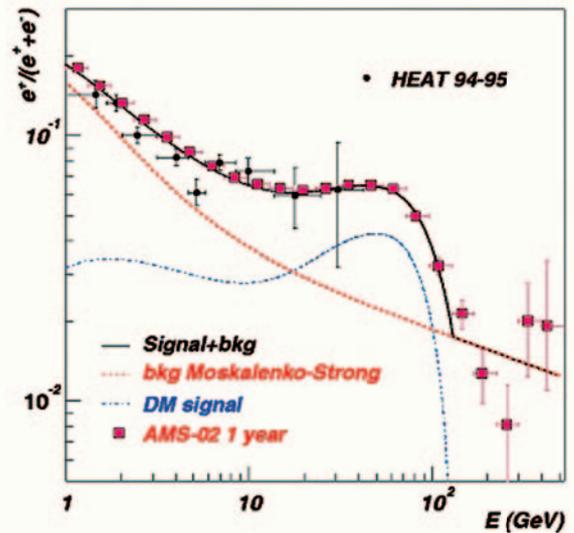


Figure 5c : Prédiction par AMS des spectres de positrons avec et sans neutralinos.

Le calorimètre est un élément essentiel du détecteur pour la recherche de la matière noire. AMS permettra, comme l'ont montré les présentations à la Conférence Internationale sur les Rayons Cosmiques ICRC en 2003 et à la Conférence Internationale HEP 2003 (Figure 5c pour un neutralino de 130 GeV), de gagner plusieurs ordres de grandeur en statistique et de couvrir un domaine d'énergie encore inexploré, ouvrant peut-être la voie à une découverte majeure.

Collaboration internationale regroupant 50 instituts dont 3 laboratoires français : LAPP Anney, LPSC Grenoble, GAM Montpellier.

Pour en savoir plus  
<http://www.lapp.in2p3.fr/AMSLAPP/>

# Projet de Recherche et Développement EUSO sur la Station Spatiale Internationale

## Participation du LAPP

**Expérimentateurs :** J-P. Mendiburu, P. Nédélec, D. Sillou, J-P. Vialle  
**Equipe technique :** J. Ballansat, C. Bombar, F. Cadoux, G. Dromby, M. Cailles  
**Visiteur associé :** D. Naumov  
**Doctorant :** P. Colin

## Abstract

The EUSO (Extreme Universe Space Observatory) project is an experiment aboard the International Space Station (ISS) looking for Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR), having an energy above  $3.10^{19}$  eV, interacting in the atmosphere. The detector is a large field of view ( $60^\circ$ ) telescope pointing to the nadir. The optics is made by two double-sided Fresnel lenses. The focal surface, with a diameter  $\varnothing=2.5$  m, is equipped with multi anode photo multipliers (MAPMT) collecting the UV photons (in the 300-400 nm band) produced by fluorescence and by Čerenkov light emitted by an Extensive Air Shower (EAS) development. The EUSO telescope, observing nightly the Earth atmosphere, is expected to collect several hundred of events during its 3 years observation period. The main topic covered by EUSO is the detail study of the UHECR spectrum above  $10^{20}$  eV, enabling one to solve the GZK problem.

The LAPP group was responsible of the French activities during the Phase A. It is involved in the design of the focal surface, on both the general mechanical structure and on the macro cells. It is also involved in the measurement of the Fluorescence Light Yield which is of paramount importance for the energy determination. The group is also participating in the software machinery, developing tools for simulation of physics (SLAST) and of the detector (ESAF). It has also developed original methods for the reconstruction of the EAS. It is responsible of the code management infrastructure at the CCIN2P3. The organization of the documentation as well as the maintenance of the EUSO-France Web site is also part of its duties.

## Le projet EUSO

Le projet EUSO - Extreme Universe Space Observatory - est une expérience conçue pour mesurer les rayons cosmiques aux énergies extrêmes (EECR ou UHECR) au-delà de  $E_{CR} > 3.10^{19}$  eV, et permettant d'étudier la région de la coupure GZK au-delà de  $10^{20}$  eV, comme indiqué sur la Figure 1.

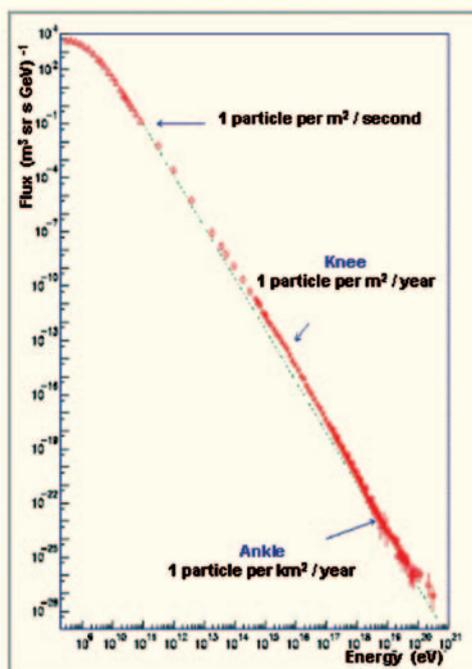


Figure 1a : Le spectre expérimental actuel de rayonnement cosmique entre 100 MeV et  $10^{20}$  eV.

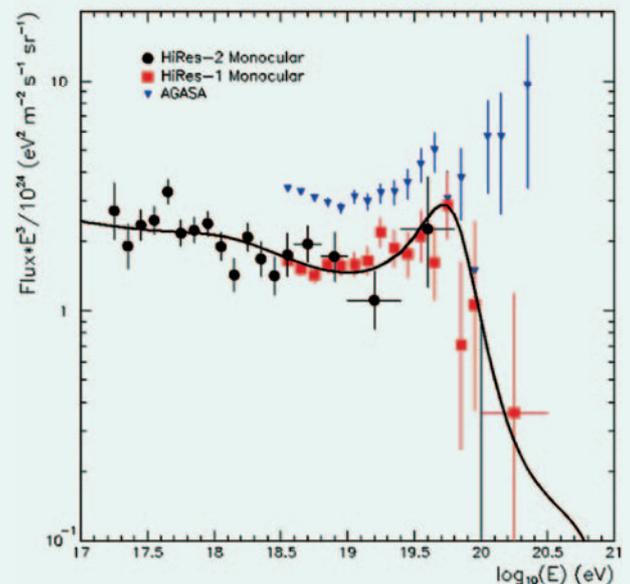


Figure 1b : Agrandissement de la zone au-delà de  $10^{17}$  eV (multiplié par  $E^3_{CR}$ ), avec en trait plein l'ajustement sur les données de l'expérience HiRes.

Situé sur le module européen Columbus de la station spatiale internationale (ISS), le télescope EUSO pointant au nadir observera l'atmosphère pendant les périodes nocturnes. La Figure 2 résume le principe d'EUSO : un rayon cosmique d'énergie extrême,  $E_{CR} > 3.10^{19}$  eV, (EECR ou UHECR) pénètre dans l'atmosphère où il interagit, donnant naissance à une gerbe.

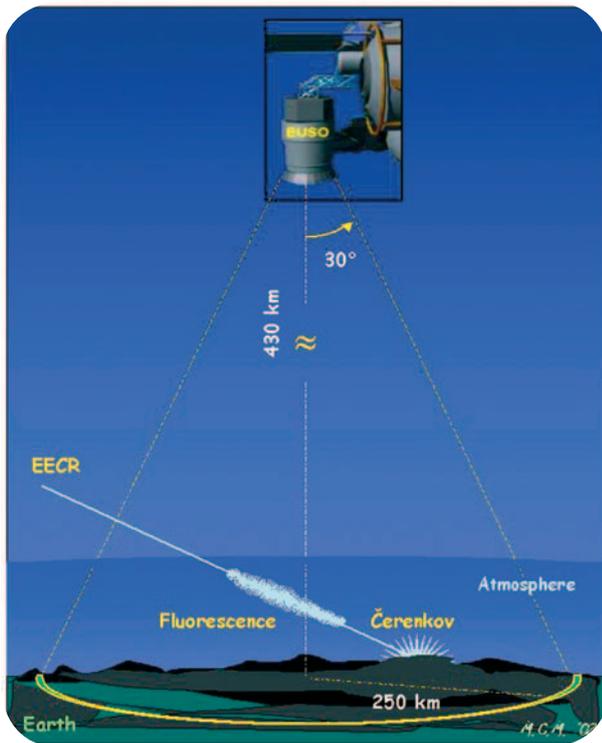


Figure 2 : Schéma de principe d'EUSO.

Celle-ci se développe sur plusieurs kilomètres de longueur en émettant de la lumière de fluorescence de façon isotrope, et du rayonnement Čerenkov collinéairement à la trace incidente. La lumière ainsi produite se propage dans l'atmosphère. Une petite fraction atteint l'optique d'EUSO qui observe dans la bande spectrale subvisible [330-400] nm. L'originalité d'EUSO réside dans l'observation de l'atmosphère depuis l'espace plutôt que depuis le sol. Ceci apporte de nombreux avantages par rapport aux expériences terrestres :

- Observation d'une surface effective de près de  $5.10^5$  km<sup>2</sup>.sr qu'il faut comparer aux 7000 km<sup>2</sup>.sr du plus grand observatoire terrestre actuellement en cours de déploiement (Auger).
- Une couverture totale du ciel : la station se déplace selon une trajectoire de  $\pm 51^\circ$  d'inclinaison.
- Une dépendance plus faible des conditions atmosphériques (aérosols dans les couches basses, etc...).

L'instrument est un télescope à grand champ ( $60^\circ$ ), de 2.5 m de diamètre. L'optique est constituée de deux lentilles de Fresnel double face, qui permettent de collecter les photons sur la surface focale.

### Surface focale

La surface focale est une surface courbe équipée de photodétecteurs capables de détecter le simple photo-électron. Le choix actuel se porte sur des photomultiplicateurs multi-anode (MAPMT de 36 pixels) de chez Hamamatsu, les R800-03-36, qui ont été optimisés pour EUSO. Les MAPMTs sont regroupés par quatre, pour former une cellule élémentaire (EC) autonome qui contient l'électronique analogique et digitale de lecture du signal. Les premiers prototypes de EC ont été réalisés par

nos collègues de Gênes qui sont venus tester l'ensemble sur le pont vibrant de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy (ESIA), utilisé dans le cadre de l'expérience AMS.

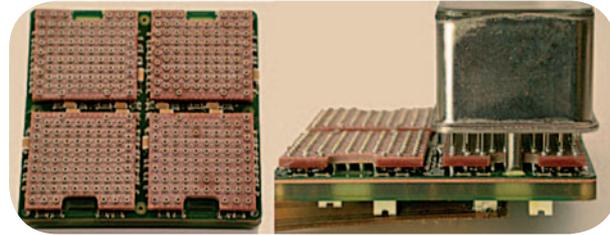


Figure 3a : Support des Elementary Cells (EC), équipé d'un MAPMT Hamamatsu de test R7600-00-M64.



Figure 3b : L'ensemble équipé de ses 4 PMTs est installé sur le pont.

Les EC sont regroupées en *Photo-Detector Modules* (PDM) selon un pavage optimisé pour assurer la meilleure efficacité de collection de la lumière. De nombreuses études concernant la structure porteuse de la surface focale ont été réalisées au laboratoire, permettant au détecteur de supporter les contraintes vibrationnelles et accélérométriques liées au spatial (voir Figure 4).

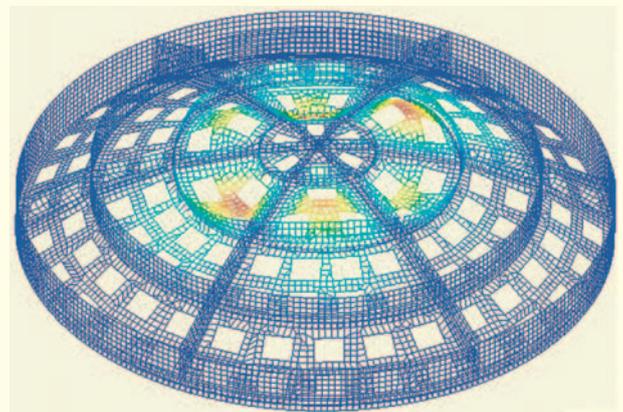


Figure 4a : Etudes vibrationnelles de la structure porteuse de la surface focale.

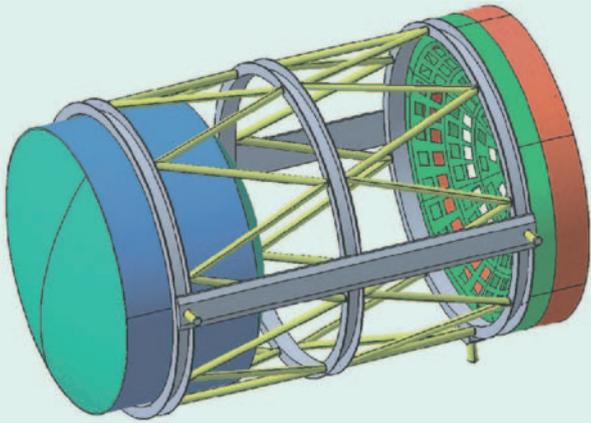


Figure 4b : Intégration de la surface focale dans la structure générale.

## Macfly

Le signal collecté par EUSO provient principalement de la lumière de fluorescence produite dans l'air. La connaissance de ce flux, en fonction des conditions de pression, de température et de composition du gaz, est importante pour une bonne détermination des caractéristiques des gerbes. Dans le cadre du groupe de travail international de mesure de la fluorescence, nous développons un dispositif MacFly (Measurement of Air Čerenkov and Fluorescence Light Yield) permettant la mesure de la fluorescence dans différentes conditions. Le dispositif est composé de deux parties, MF-1 qui sert de référence et permet des mesures en laboratoire, et MF-2 qui doit permettre la mesure de fluorescence produite par des gerbes électromagnétiques auprès d'un faisceau de haute énergie, par exemple des électrons de 50 GeV au CERN.

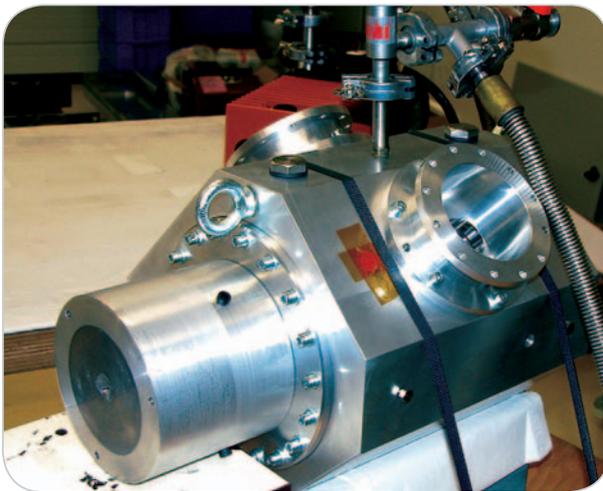


Figure 5a : Le dispositif MF-1 lors des tests d'étanchéité au vide.

## Simulation

Le groupe s'est fortement impliqué dans l'activité de simulation de EUSO. Un générateur rapide, décrivant les interactions initiales dans l'air (proton, noyau, photon ou neutrino), le développement de la gerbe, la production de lumière de fluorescence et Čerenkov, la propagation de la lumière à travers l'atmosphère, ainsi qu'une description

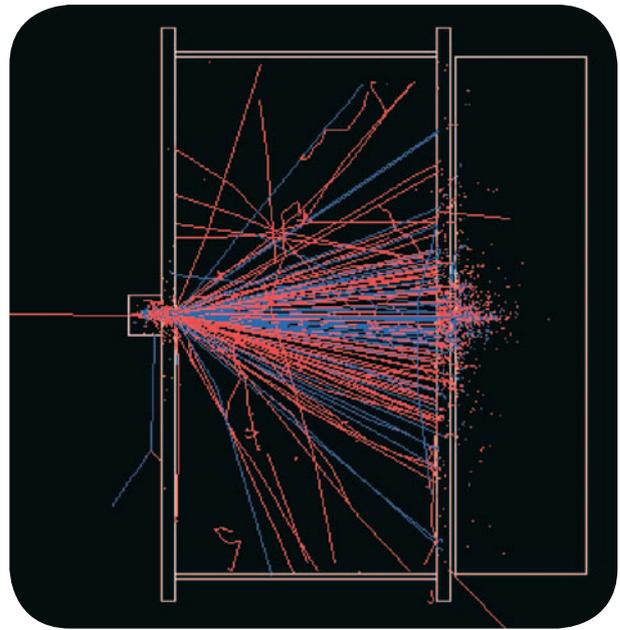


Figure 5b : Simulation Geant4 d'une gerbe électromagnétique de 50 GeV dans MF-2.

simple de EUSO, a été développé dans le groupe (package SLAST). Ce programme, qui permet de simuler en quelques dizaines de secondes des événements qui nécessitent quelques heures avec des programmes plus conventionnels, a été largement utilisé par la collaboration. L'ensemble du code et de la documentation est accessible à la collaboration via le *repository CVS* utilisé pour EUSO.

## Reconstruction

Dans le groupe, nous nous sommes attelés à la reconstruction des gerbes dans l'atmosphère, en essayant de définir un algorithme qui permette de reconstruire les gerbes, même lorsque l'écho Čerenkov n'est pas observé par EUSO.

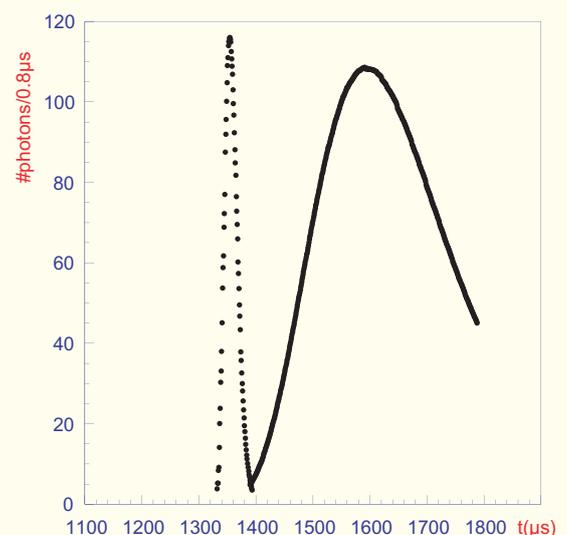


Figure 6a : Spectre temporel d'une gerbe horizontale dont l'amorce est à une altitude de 5 km (pointillé) ou de 20 km (courbe continue).

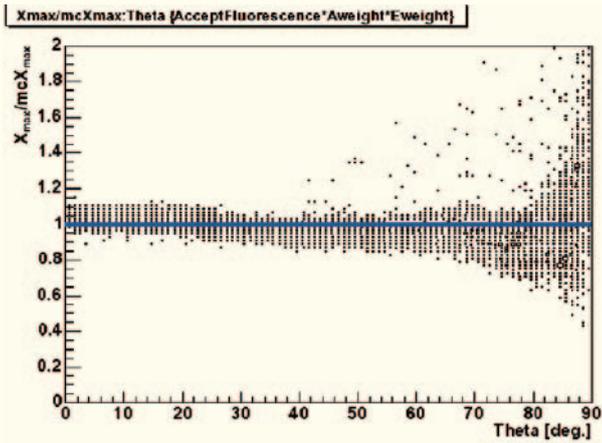


Figure 6b : Résolution relative du maximum de la gerbe ( $X_{max}$ ) en fonction de l'angle d'incidence du rayon cosmique.

Les résultats, bien que préliminaires, sont encourageants et montrent qu'il est possible, sur la base du seul signal de la gerbe, de reconstruire ses caractéristiques. L'adjonction de dispositifs externes pour analyser l'atmosphère, permettra d'obtenir une bien meilleure précision.

### Documentation

Le travail de reconstruction, comme celui de simulation, s'insère dans le cadre général du software développé dans EUSO. Le package ESAF (EUSO Simulation and Analysis Factory) est maintenu et documenté au centre de calcul de l'IN2P3 dans une structure CVS. Le groupe est fortement impliqué dans cette organisation. Il a par ailleurs la responsabilité du site EUSO-France et de listes de diffusions afférentes.



Collaboration internationale sous l'égide de l'ESA, regroupant 24 instituts dont 3 laboratoires français : LAPP Annecy, LPSC Grenoble, PCC Paris.

#### Pour en savoir plus

<http://euso.in2p3.fr>

<http://lappweb.in2p3.fr/MACFLY>