

Cosmologie, Rayons cosmiques et Neutrinos

- **AMS**
- **Archeops & Planck-HFI**
- **Mache3**
- **EUSO**
- **MUNU**

L'« Astroparticules » est une thématique relativement nouvelle qui s'est développée à l'interface, d'une part, de la physique des particules et des noyaux, d'autre part, de l'astrophysique et de la cosmologie. Cette discipline utilise souvent des méthodes et des développements expérimentaux issus de dispositifs employés auprès des accélérateurs.

L'expérience AMS

L'objectif de cette expérience est d'étudier depuis l'espace le rayonnement cosmique de haute énergie (du GeV au TeV) et de mesurer avec une grande précision sa composition et son spectre, une attention particulière étant portée aux antiprotons et antinoyaux. Des distorsions dans les spectres pourraient être dues à l'annihilation de neutralinos, les plus légères des particules supersymétriques prévues par le modèle standard minimal, et candidates potentielles à la masse manquante de l'Univers. Cette expérience mesurera aussi les rayons gamma de haute énergie. L'installation de l'expérience sur la Station Spatiale Internationale est prévue pour le printemps 2007.

L'équipe du LPSC est impliquée dans la construction de l'imageur Čerenkov ; au niveau théorique, elle étudie la phénoménologie du rayonnement cosmique galactique, la dynamique de son interaction avec l'atmosphère, et les sources exotiques de rayonnement cosmique primaire.

Les expériences Archéops et Planck

L'observation de l'Univers à grande échelle contraint les modèles cosmologiques et leurs paramètres. L'étude des fluctuations du fond cosmologique diffus (CMB) permet de mesurer ces paramètres et d'en déduire la quantité et donc la nature de la matière et de l'énergie noire de l'Univers. La collaboration Archéops a obtenu de beaux résultats sur la mesure de la densité totale et de la densité de baryons, déduites du spectre de puissance des fluctuations du CMB. Ces résultats permettent d'envisager avec confiance l'arrivée prochaine des volumes de données plus importantes de la mission spatiale Planck, prévue en 2007.

En ce qui concerne cette dernière, le laboratoire est fortement impliqué dans la conception, la réalisation et les tests des systèmes de contrôle des cryogénérateurs à 20 K et 0,1 K du satellite, ainsi que dans l'analyse des données sur la polarisation du fond diffus.

MACHe3 (R&D)

L'existence de matière sombre dans l'Univers est une des questions centrales de la cosmologie et de la physique des particules. La masse manquante pourrait être due à l'existence d'un nouveau type de particules interagissant très faiblement avec la matière, les Wimps. Les théories supersymétriques prévoient l'existence d'un bon candidat Wimp : le neutralino.

Depuis plusieurs années, l'équipe du LPSC travaille en collaboration avec un groupe du CRTBT sur le développement d'un détecteur pour la recherche de cette matière sombre, basé sur une matrice de cellules bolométriques d' ^3He superfluide. Une première expérience avec une cellule prototype a été analysée, et un prototype de plusieurs cellules a été construit et testé. Des résultats préliminaires encourageants ont été obtenus.

L'expérience EUSO

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, de la cosmologie et de 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 la lumière UV émise lors de leur interaction avec l'atmosphère.

Le laboratoire est impliqué dans la conception et les tests de l'électronique Front End, l'étude de l'influence de l'atmosphère sur la création et la propagation des UV, ainsi que l'étude du fond UV et la mesure de la lumière réfléchie UVA Čerenkov par la surface terrestre (expérience ULTRA).

La mesure du moment magnétique du neutrino (expérience MUNU)

À ce jour, les neutrinos restent des particules dont toutes les caractéristiques physiques ne sont pas connues. Leur masse étant très petite par rapport à celles des autres particules élémentaires, leurs propriétés pourraient découler d'une physique où les distances caractéristiques seraient beaucoup plus petites que celles sondées jusqu'ici avec les accélérateurs. Toute avancée dans la connaissance de ces propriétés aura donc des conséquences fondamentales en physique des particules ainsi que dans la compréhension de l'Univers.

L'expérience MUNU s'est intéressée à une propriété intrinsèque du neutrino, son moment magnétique. L'étude a été effectuée à l'aide de la diffusion neutrino électron auprès d'un réacteur nucléaire du Bugey. Elle utilisait une chambre à projection temporelle (TPC) gazeuse immergée dans un détecteur liquide scintillant agissant comme anti-Compton.

AMS

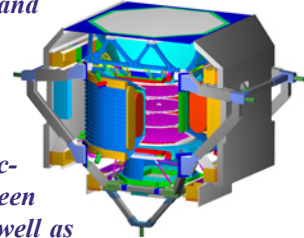
M. Buénerd, F. Barao, A. Barrau, B. Baret, G. Boudoul, L. Derome, R. Duperray, J. Grain, K. Protasov, M. Vargas-Trevino, O. Véziant

The AMS experiment will search for primordial antimatter and dark matter in space. Three main topics are discussed below:

1. the design and prototype study of the Čerenkov imager of the spectrometer are described. The in beam ion test results are reported.

2. a phenomenological study of the secondary particle production in the cosmic ray flux - atmosphere interactions has been conducted. Protons, leptons, and light nuclei production, as well as light antinuclei production have been calculated. The former successfully accounts for the AMS-01 results.

3. primordial black holes have been considered as sources of antiprotons and antideuterons. Measurements of the flux of the later could provide a signature for the existence of the former. The results are reported.



L'expérience AMS recherchera l'antimatière d'origine primordiale et la matière noire, et elle étudiera le rayonnement cosmique de particules chargées ainsi que le rayonnement gamma cosmique pendant plusieurs années d'opération sur la station spatiale internationale (ISS). L'installation de l'expérience a été retardée par la perte de la navette spatiale Columbia. Le lancement est actuellement prévu pour le printemps 2007.

L'équipe AMS du LPSC a participé à la phase préliminaire du programme expérimental AMS-01. Elle a travaillé sur l'analyse et apporté une contribution majeure à l'interprétation des résultats (voir rapport précédent et publications).

Elle est actuellement engagée dans la préparation de la seconde phase du programme expérimental à plusieurs niveaux :

1. sur l'instrumentation du spectromètre avec une participation à la construction de l'imageur Čerenkov. Deux générations de prototypes ont été construites et étudiées au LPSC. Un faisceau d'ions secondaires a été développé au CERN dans le but de tester la dernière version du prototype ;
2. sur la phénoménologie du rayonnement cosmique galactique et sur la dynamique de l'interaction RC-atmosphère. L'objectif principal de ce travail étant de préparer l'exploitation des futures données d'AMS en élaborant une connaissance de base des flux secondaires atmosphériques et galactiques aussi approfondie que possible ;
3. sur les sources exotiques de rayonnement cosmique primaire (trous noirs primordiaux, matière noire...) pour préparer la recherche des signatures expérimentales de ces sources dans les données de l'expérience.

Les sections suivantes détaillent ces activités.

► Construction de l'imageur Čerenkov (RICH)

Collaborations INFN Bologna, LPSC Grenoble, LIP Lisbonne, CIEMAT Madrid, U. Maryland, IFUNAM Mexico

L'imageur Čerenkov d'AMS aura pour fonction principale d'identifier les ions du rayonnement cosmique :

- en masse pour les noyaux $A \leq 12$ dans le domaine d'impulsion $1 < P < 12$ GeV/c par nucleon ;
- en charge dans tout le domaine d'énergie d'AMS.

Le principe du détecteur est celui de l'imageur annulaire à focalisation de proximité dont la simplicité d'architecture faisait le meilleur candidat pour une expérience embarquée et de longue durée.

La participation de l'équipe du LPSC à la construction du RICH avait été anticipée dès la phase I du programme et avait commencé avec l'initiative d'un travail de simulation et la construction d'un prototype d'étude de l'instrument, étape préliminaire qui a permis de déterminer les performances de base accessibles et le domaine d'identification des particules associé.

La construction du prototype de seconde génération est intervenue ensuite sur la base de l'étude d'architecture et des choix définitifs d'instrumentation. Ce prototype correspond à un demi module du compteur définitif. Il comprend 96 photomultiplicateurs (PM) multianodes 16 pixels et 1 536 canaux de lecture électroniques. Cette version a été testée en rayonnement cosmique (muons), puis à deux reprises au moyen d'un faisceau secondaire « multi-ions » au SPS du CERN décrit ailleurs dans ce rapport.

► Tests en faisceau du prototype

Figure 1 : Vue générale de l'ensemble expérimental mis en œuvre au SPS du CERN pour les tests en faisceau d'ions du prototype. L'ensemble est vu de dessus. Le faisceau d'ions arrivait par le bas de l'image. On distingue, en haut, la matrice du prototype d'imageur dans son support mécanique (boîte à vide), entourée de son électronique. Deux chambres proportionnelles multifils étaient utilisées pour la reconstruction des trajectoires incidentes, encadrant un ensemble de palettes de scintillateurs et un radiateur Čerenkov pour la définition du signal de déclenchement (trigger) de l'acquisition.



L'objectif de ces tests était d'explorer la réponse du détecteur aux ions dans un domaine de charge nucléaire depuis $Z = 1$ jusque dans la région du fer $Z = 26$, et de valider le détecteur pour ses performances d'identification.

Les deux tests ont eu lieu à un an d'intervalle, avec des ions secondaires obtenus par fragmentation du fer à 20 GeV par nucléon en octobre 2002, puis en octobre 2003 avec un faisceau primaire d'indium (In) de 158 GeV par nucléon.

► Analyse des données

Au cours du test de 2003, 11 millions d'événements ont été collectés. Pour l'étalonnage du détecteur, des données spécifiques ont été enregistrées périodiquement. Des outils d'analyse ont été développés afin de traiter ces données d'étalonnage et d'établir ainsi, pour chaque pixel, la relation entre le nombre de coups ADC et le nombre de photoélectrons. Cette procédure est essentielle pour atteindre une précision optimum sur la reconstruction de charge.

Le point d'impact de la particule sur le radiateur était déterminé au moyen de deux chambres à fils placées en amont du prototype. Des outils d'analyse ont été développés pour aligner les chambres à fils avec le prototype en utilisant d'une part la forme de l'anneau Čerenkov et d'autre part l'information contenue dans le pixel témoin du passage de la particule dans le plan de détection.

La reconstruction de la vitesse des particules est faite à partir de la détermination de l'angle Čerenkov reconstruit à partir de l'anneau Čerenkov observé. Une résolution de 10^{-3} est obtenue pour des particules de charge unitaire et une distance de dérive de l'ordre de 40 cm. La détermination de la vitesse pour les différents ions incidents permet de vérifier la loi de décroissance en Z^{-1} de cette vitesse. L'analyse permettra de sélectionner les meilleurs aérogels dans une dizaine d'échantillons testés, d'origines et indices optiques divers. Elle permet aussi de tester et valider les différentes procédures de reconstructions et montre un bon accord avec les performances attendues du détecteur.

La détermination de la charge dans le RICH est faite en intégrant le nombre de photoé-

lectrons dans l'anneau Čerenkov et en prenant en compte les contraintes expérimentales (absorption de photons dans le radiateur, acceptance de la forme de l'anneau).

La figure ci-dessous (Figure 2) illustre les résultats obtenus. Elle montre un anneau Čerenkov associé à un noyau de Fe ($Z = 26$) et un spectre des charges reconstruites par l'imageur au cours du dernier test en faisceau d'ions qui illustre la séparation des charges jusque dans la région $Z \sim 30$.

La résolution en vitesse obtenue est $\sigma(\beta) \sim 10^{-3}$ par photoélectron pour les ions de basse charge. Les tests en faisceau ont permis de mesurer la résolution par événement en fonction de Z . Elle décroît comme Z^{-1} conformément à l'augmentation du nombre de photons Čerenkov émis ($N_{ph} \sim Z^2$), jusque vers $Z \sim 20$ puis elle tend vers une valeur asymptotique de l'ordre de $0,8 \cdot 10^{-4}$, fixée par la taille des pixels des photomultiplicateurs pour les valeurs supérieures de Z .

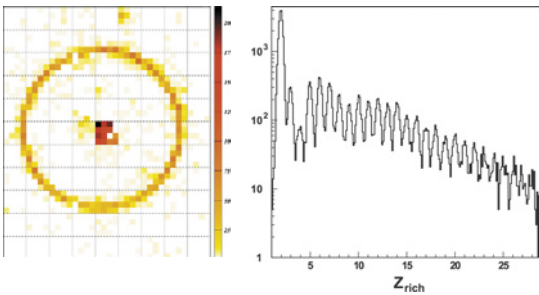


Figure 2 : La résolution en charge expérimentale obtenue est $\sigma(Z) \approx 0,25$ unité de charge environ, croissant faiblement avec Z . Les performances mesurées sont en bon accord avec la simulation.

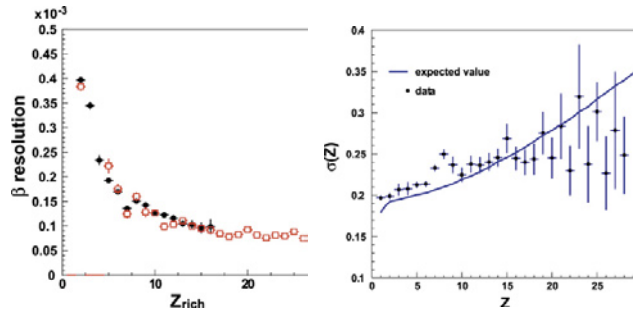
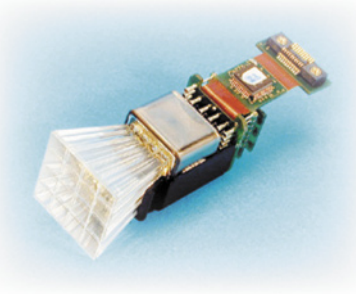


Figure 3 : Les 680 modules de photodétecteurs sont en cours d'assemblage au LPSC. L'intégration du modèle de vol du compteur se fera à Madrid en fin d'année. L'ensemble sera ensuite testé et transporté au CERN pour intégration dans le spectromètre AMS-02 en 2005.

Figure 4 : Cellule de photodétecteur montée dans une demi coquille plastique. On distingue le photomultiplicateur (Hamamatsu R_7600 M16) 16 pixels, équipé de sa matrice de guides de lumière et de son ensemble diviseur haute tension et électronique frontale de lecture rapide. Le tout est logé dans un blindage magnétique.



Étude de l'interaction du rayonnement cosmique dans l'environnement terrestre

M. Buénerd, B. Baret, L. Derome, C.Y. Huang, Y. Liu

L'équipe AMS a initié depuis plusieurs années une activité de phénoménologie de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère et le champ magnétique terrestre.

La motivation première de cette activité a été de comprendre l'origine des particules détectées sous la coupure géomagnétique par AMS-01. La coupure géomagnétique correspond à l'énergie minimale que doivent avoir les particules du rayonnement cosmique pour franchir le bouclier géomagnétique et atteindre la terre. Cette énergie seuil est maximale pour un point situé au niveau de l'équateur et minimale au niveau des pôles. Cette dépendance avec la latitude s'explique par la nature dipolaire du champ.

AMS-01 a mis en évidence un flux important de particules sous la coupure géomagnétique, et donc nécessairement d'origine secondaire et résultant de l'interaction de cosmiques dans l'environnement terrestre, composé de protons, positrons et électrons mais aussi d'héliums.

Le travail de phénoménologie entrepris dans le groupe AMS s'articule autour d'un outil de simulation Monte Carlo qui comprend la génération des particules du rayonnement cosmique primaire, sa propagation dans le champ magnétique terrestre, l'interaction dans

l'atmosphère et la production de particules secondaires et donc la formation de cascades de particules.

Certains ingrédients comme le modèle géomagnétique où le modèle atmosphérique existait ont pu être directement intégrés à la simulation alors que la propagation et l'interaction des particules ont été entièrement développées dans le groupe. En particulier pour la production des particules secondaires, on a choisi d'utiliser des sections efficaces inclusives paramétrées ajustées sur l'ensemble des données expérimentales disponibles.

Ce travail a permis de montrer que les particules sous la coupure géomagnétique sont des particules secondaires produites dans la haute atmosphère et s'en échappant pour ensuite être piégées dans le champ géomagnétique. La simulation reproduit les flux de particules sous la coupure, ainsi que les caractéristiques principales de cette composante comme les rapports positron/électron et ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ mesurés [1].

Production atmosphérique d'antimatière

On a pu de façon naturelle étendre l'outil de simulation précédent pour aborder des thématiques touchant le cadre de la physique d'AMS-02. Ainsi en intégrant dans la simulation la production d'antiprotons, on a pu simuler le flux d'antiprotons atmosphériques à haute altitude dans l'atmosphère, que les expériences de mesure du flux d'antiprotons embarquées sur ballon doivent prendre en compte pour déduire des flux mesurés la contribution d'origine cosmique. On a, de plus, pu estimer la composante d'antiprotons atmosphériques piégée dans le champ magnétique terrestre qui sera vue par AMS-02 sur la station spatiale [2].

De récents travaux ont montré que les antideutons pouvaient, comme les antiprotons, signer la présence de matière noire. On a donc aussi utilisé la simulation pour étudier la production d'antideutons dans l'atmosphère et le piégeage de ces particules dans le champ géomagnétique. Ici la modélisation de la production de noyau d'antimatière repose sur le modèle de coalescence. Avec le même mécanisme, on peut étudier la production d'antinoyaux légers (anti d, anti ${}^4\text{He}$) atmosphériques et leur contribution prévisible dans la recherche d'antimatière extragalactique [3].

Neutrinos atmosphériques

La production de neutrinos dans l'atmosphère par le rayonnement cosmique constitue un outil unique d'étude des oscillations des neutrinos. La puissance de cet outil a été particulièrement mise en évidence par l'expérience SuperKamiokande au Japon. Les paramètres d'oscillations sont déterminés grâce à la comparaison du flux de neutrinos estimé et du flux mesuré, notamment en comparant l'évolution du rapport ν_μ/ν_e avec l'angle zénithal, c'est à dire la distance de vol. La détermination des paramètres d'oscillation nécessite une connaissance précise des flux théoriques de neutrinos atmosphériques. La simulation développée a pu être utilisée pour estimer le flux des neutrinos atmosphériques au niveau de la mer et a été parmi les premiers calculs de neutrinos atmosphériques en 3 dimensions. L'ensemble des caractéristiques des flux de neutrinos a pu être exploré en détails ainsi que l'asymétrie est-ouest [4].

Population des ceintures de Van-Allen

(M. Buénerd, L. Derome, B.X. Sun)

Les ceintures de Van-Allen sont aussi des particules piégées (essentiellement des électrons et des protons) dans le champ géomagnétique terrestre mais à beaucoup plus grande distance (de l'ordre de plusieurs rayons terrestres) que la composante détectée par AMS et d'énergie plus faible. Ces particules « orbitent » loin de la terre et voient donc très peu de matière résiduelle. Elles vont donc rester piégées pendant très longtemps. L'hypothèse privilégiée pour le mécanisme de population de ces particules est la désintégration des neutrons atmosphériques. Ces neutrons produits dans l'atmosphère par le rayonnement cosmique,

s'échappent de l'atmosphère et ont une probabilité faible mais non nulle de se désintégrer suffisamment près de la terre pour que le proton ou l'électron produit puisse être piégé. Le programme de simulation est donc utilisé pour faire une étude quantitative de l'injection de protons dans les ceintures de radiations. Ce calcul du terme source pourra ensuite être intégré dans l'équation de diffusion régissant l'évolution des ceintures de radiations.

Étude de la production d'anti-noyaux légers dans la galaxie

M. Buénerd, G. Boudoul, R. Duperray, K. Protasov

L'objectif de ce travail a été de reprendre en détail le calcul de la production d'antimatière sous la forme de \bar{p} , \bar{d} , \bar{t} , ${}^3\bar{\text{He}}$, ${}^4\bar{\text{He}}$ sur des bases phénoménologiques incontestables. Cette étude se justifie à plusieurs titres. Tout d'abord, la recherche d'antimatière primordiale dans le rayonnement cosmique (RC) fait l'objet de plusieurs projets expérimentaux (en particulier AMS). Dans ce contexte, un excès de \bar{p} ou de \bar{d} dans le RC pourrait signer la présence de matière noire (par annihilation de neutralinos) et de trous noirs primordiaux (par évaporation).

Une première étape importante est l'estimation des sections efficaces de production d'antimatière dans les collisions pp et pA. Pour cela les données expérimentales disponibles ont été utilisées pour contraindre les paramètres d'un modèle phénoménologique. La section efficace de production de \bar{p} a ainsi pu être reproduite dans une large gamme d'énergie incidente et de masse de noyaux cibles. La production d'anti-noyaux légers $\bar{A} \geq 2$ a été calculée dans le cadre du modèle de coalescence, dans une approche standard mais aussi dans une version microscopique par une approche en diagramme de Feynman [5]. Un ingrédient essentiel de ces modèles est la section efficace de production de \bar{p} [6]. La propagation dans la galaxie a été réalisée à partir d'un programme de transport développé par le LAPTH d'Annecy, et aussi au moyen du modèle phénoménologique simple de la « boîte qui fuit ». Le flux de \bar{p} obtenu reproduit bien les mesures expérimentales ; le flux de \bar{d} obtenu est d'environ d'un facteur 10 supérieur aux précédentes estimations. De plus, la réaction de diffusion non-annihilante $\bar{d} + p, A \rightarrow \bar{d} + X$, a été prise en compte dans les calculs. Cette réaction a pour effet de repeupler le spectre de \bar{d} à basse énergie par un transfert du flux aux énergies plus élevées, ce qui pourrait masquer les signaux exotiques (matière noire, trous noirs primordiaux). Les flux de ${}^3\bar{\text{He}}$ et ${}^4\bar{\text{He}}$ sont inférieurs d'un facteur d'environ 10^{-8} et 10^{-12} respectivement, à celui de \bar{p} , et probablement négligeables pour la détection par des expériences comme AMS. La connaissance de leur ordre de grandeur est importante néanmoins pour l'analyse des futures données de l'expérience. Au cours de sa période d'activité sur l'ISS, AMS devrait donc détecter quelques dizaines de \bar{d} secondaires mais pas d'anti-noyaux avec $\bar{A} \geq 3$ secondaires produits dans la galaxie (publication en préparation).

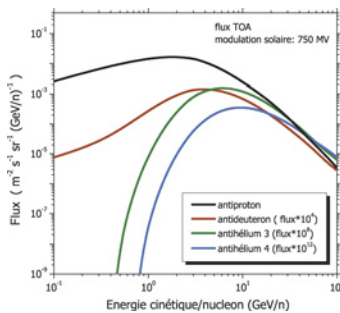


Figure 5

La figure ci-contre montre les distributions des flux calculés, en fonction de l'énergie cinétique de la particule.

Trous noirs primordiaux et cosmologie

A. Barrau, G. Boudoul, J. Grain

Depuis quelques années, le groupe AMS s'est intéressé à la formation, à la détection et aux conséquences cosmologiques de l'éventuelle présence de trous noirs primordiaux dans notre Univers [7]. Ces petits trous noirs seraient des objets fascinants dans la mesure où leur comportement (et, en particulier, leur évaporation) est régi tout autant par la relativité générale que par la mécanique quantique. Ils sont aussi des sondes exceptionnelles de l'Univers primordial à des échelles totalement inaccessibles aux observables habituelles de l'astrophysique expérimentale.

Lors de leur émission de particules, par effet Bekenstein-Hawking, les petits trous noirs se couplent « démocratiquement » à tous les champs élémentaires. Parmi les corpuscules résultants, les antiprotons sont particulièrement intéressants dans la mesure où la composante « secondaire » (i.e. due aux processus physiques conventionnels) est bien connue [8], relativement ténue et bien mesurée (en particulier par BESS et AMS-01). On peut ainsi évaluer le flux qui serait dû à une densité donnée de trous noirs et en inférer une limite supérieure sur la quantité de ces derniers en calculant le flux différentiel initial, les fonctions de fragmentation, le spectre de masse et le profil de densité. Cette démarche conduit à [9] : Ω (trous noirs primordiaux) $< \text{qq} \times 10^{-9}$. On peut aussi procéder identiquement pour les photons gamma (essentiellement issus de la désintégration des pions neutres), intégrer sur le large volume d'Univers (la profondeur optique permet de sonder jusqu'à des décalages spectraux $z \sim 700$) et tenir compte du fond diffus associé aux quasars et aux galaxies. Cette démarche, pourtant largement indépendante, conduit à des limites [10] du même ordre de grandeur qui fiabilisent le résultat. Il est également intéressant d'aller au-delà de ces limites supérieures et de proposer de nouvelles méthodes pour tenter de détecter effectivement des trous noirs primordiaux dans la galaxie. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser les antideutons, noyaux qui ne peuvent être formés par les processus de spallation qu'à assez haute énergie, compte tenu du seuil élevé de la réaction, tandis que le processus d'évaporation favorise les basses énergies (parce qu'il est dominé par la fragmentation des quarks et gluons). Nous avons montré que la fenêtre ainsi ouverte [11] devrait permettre à AMS d'améliorer la sensibilité actuelle d'un ordre de grandeur environ.

Il est utile d'utiliser ces limites pour contraindre les fluctuations dans l'Univers aux tous premiers instants. Les trous noirs primordiaux, s'ils existent, se sont nécessairement formés juste après l'inflation (typiquement 10^{-23} s après le Big-Bang) et leur actuelle non-détection signifie qu'il ne peut y avoir eu une très grande puissance dans le spectre primordial aux très petites échelles. Pour en dériver une contrainte quantitative sur les paramètres inflatoires (et même sur la forme du potentiel du champ d'inflaton) nous avons relaxé l'hypothèse habituelle d'invariance d'échelle du $P(k)$, qui est vérifiée aux échelles du fond à 3 K mais qui n'a que peu de raisons de demeurer valide sur 45 ordres de grandeur, et calculé la formation de trous noirs par processus quasi-critique [12]. Il en résulte que la fraction de masse de l'Univers formant des trous noirs doit avoir été inférieure à 10^{-28} pour des masses de Hubble de l'ordre de 10^{15} g, ce qui signifie que le paramètre de brisure doit être supérieur à 10^{-3} environ. Ce cadre permet également de s'intéresser au problème de la matière noire : nous avons suggéré un nouveau candidat à la masse manquante, soit sous forme de trous noirs, soit sous forme de reliques de trous noirs [13]. L'espace des paramètres compatibles avec le modèle est très large et il est expérimentalement testable (via l'émission d'ondes gravitationnelles par les trous noirs en coalescence) mais il requiert un niveau assez élevé de *réglage fin* pour l'amplitude de la brisure d'invariance d'échelle qui devra être reliée à des descriptions de microphysique.

Enfin, ces petits trous noirs seraient des sondes uniques pour tester des effets de gravitation quantique. Le comportement en fin de vie, i.e. dans la région de Planck, devient sensible aux effets non semi-classiques et la description de Hawking ne peut plus demeurer valable. Nous avons étudié l'évaporation dans le cadre des modèles de gravité de corde de type *Gauss-Bonnet*. Ces derniers se fondent sur l'ajout de termes d'ordres supérieurs en courbure scalaire au Lagrangien gravitationnel. C'est, à la fois, motivé d'un point de vue phénoménologique (une sorte de développement de Taylor dont la relativité générale serait la limite à basse énergie) et d'un point de vue théorique (les modèles de cordes hétérotiques conduisent à ces résultats). Nous avons montré dans ce contexte que l'évaporation s'arrêterait, que se formaient des reliques de Planck stables et que la capacité calorifique changeait de signe [14]. De plus, si notre espace-temps comporte plusieurs dimensions supplémentaires de taille suffisante (ce qui permet, entre autre, de solutionner le problème de hiérarchie entre l'échelle électrofaible et l'échelle gravitationnelle), l'énergie de Planck peut être de l'ordre du TeV et des trous noirs pourraient alors se former au collisionneur LHC. Nous avons montré qu'il serait possible de mettre ainsi expérimentalement en évidence le nombre total de dimensions de l'espace-temps et, surtout, la constante de couplage de *Gauss-Bonnet*, c'est-à-dire d'esquisser les bases d'une théorie gravitationnelle quantique [15].

- [1] Phys.Lett. B 489 (2000) 1, B 515 (2001) 1, B 521 (2001) 139, Phys. Rev. D 68 (2003) 53009
- [2] Phys. Rev. D 68 (2003) 53008, D 68 (2003) 094017
- [3] Astro-ph/0306221
- [4] Phys. Rev. D 67 (2003) 073022
- [5] Eur. Phys. J. A 16 (2003) 27 et Eur. Phys. J. A 18 (2003) 597
- [6] Phys. Rev. D 68 (2003) 094017
- [7] A. Barrau, Astropart. Phys., 12 (2000) 269
- [8] F. Donato et al., Astrophys. J., 568 (2001) 172
- [9] A. Barrau et al., Astronom. Astrophys., 388 (2002) 676
- [10] A. Barrau et al., Proc. Du 28^{ème} ICRC (2003)
- [11] A. Barrau et al., Astronom. Astrophys., 398 (2003) 403
- [12] A. Barrau et al., Phys. Lett. B 551 (2003) 218
- [13] A. Barrau et al., sous presse pour Annalen der Physik
- [14] S. Alexeyev et al., Class. Quantum Grav., 19 (2002) 4431
- [15] A. Barrau et al., sous presse pour Phys. Lett. B

Archeops et Planck-HFI : L'étude du fond cosmologique

D. Santos, A. Garrigue, J.-C. Hamilton, J.F. Macías-Pérez, A. Pelissier, G. Perrin, N. Ponthieu, C. Renault, P. Stassi, M. Tristram, F. Vezzu, O. Zimmermann

Archeops is a balloon-borne experiment designed to measure the anisotropies of the Cosmic Microwave Background (CMB). The LPSC is deeply involved in full data analysis, going from raw data to angular power spectrum, through sky maps. Both temperature and polarization analyses have been performed and first results have been published. In parallel the Planck satellite mission is prepared.

► L'expérience Archeops

L'expérience Archeops vise à mesurer les anisotropies du fond de rayonnement cosmologique à 3 K (CMB pour Cosmic Microwave Background) avec une résolution angulaire de 10 minutes d'arc sur environ un quart de la voûte céleste. L'instrument est refroidi à 0,1 K par un système de dilution à cycle ouvert développé au CRTBT en vue d'applications spatiales, notamment du satellite Planck. La description de l'objectif scientifique, de l'instrument, le résumé des diverses campagnes de vol d'Archeops et les résultats sont disponibles sur le site www.archeops.org.

Archeops est une collaboration internationale entre le CNRS [SPM (CRTBT), IN2P3 (CdF, ISN, LAL, CSNSM), INSU (IAS, IAP, LAOG, CESR, OMP)], le CEA (SPP), l'Université La Sapienza (Rome, Italie), l'IROE-CNR (Florence, Italie), le Queen Mary College (Cardiff, UK), le California Institut of Technology (Pasadena, USA) et le Jet Propulsion Laboratory (Pasadena, USA).

Le second vol scientifique d'Archeops a eu lieu depuis Kiruna, au nord de la Suède, le 7 février 2001.

Au terme de 19 h de prise de données à 34 km d'altitude, la nacelle s'est posée en Russie à l'est de l'Oural. Le plan focal était composé de 8 photomètres à 143 GHz, 5 à 217 GHz, 6 polarisés à 353 GHz et 1 à 545 GHz, chaque pixel photométrique étant composé d'un bolomètre refroidi à 0,1 K, de filtres à 1,6 K et de cornets destinés à guider l'onde à 10 K. La mesure de l'intensité du rayonnement à différentes fréquences permet de séparer les contributions venant de l'atmosphère, de la poussière galactique et du CMB, chacune ayant une dépendance en fréquence particulière. La stratégie d'observation d'Archeops est différente de celle des autres expériences ballon : au lieu de regarder intensivement quelques pour cents de la voûte céleste, la nacelle tourne sur elle-même à la vitesse de 2 tours par minute avec une élévation constante de 41°. Les grands cercles ainsi obtenus ont permis de couvrir 30 % du ciel en 12 h, donnant ainsi accès au spectre de puissance angulaire de $l = 15$ à $l = 350$.

L'ensemble a été conçu comme un banc-test pour l'expérience Planck-HFI, que ce soit au niveau des détecteurs ou de la stratégie d'observation. Les années 2002 et 2003 ont donc été consacrées essentiellement à l'analyse des données obtenues au cours de ce vol, qu'il s'agisse des données polarisées ou non.

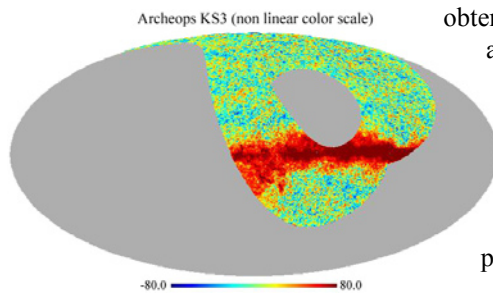


Figure 1

L'analyse des données

Les principales étapes de l'analyse sont :

- signaler et traiter les données manifestement corrompues ;
- réduire les effets systématiques ;
- étalonner en utilisant Jupiter, la Galaxie ou le dipôle cosmologique ;
- obtenir la direction de pointage des bolomètres à l'aide des données du senseur stellaire ;
- faire une carte par fréquence (environ 600 000 pixels) ;
- soustraire les composantes atmosphérique et galactique ;
- estimer le spectre de puissance angulaire du CMB ;
- en déduire des contraintes sur les paramètres cosmologiques.

Le laboratoire a été largement impliqué dans toutes ces étapes, à l'exception de la dernière.

En particulier des méthodes originales de suppression des signaux laissés dans les détecteurs par le rayonnement cosmique, d'estimation des constantes de temps des bolomètres, de modélisation des lobes [1], de filtrage, de soustraction de l'ozone et de la Galaxie, traitement du bruit non-stationnaire [2] ont été développées au laboratoire. L'ensemble de ces techniques est décrit dans [3] et [4]. La figure 1 est une carte présentant à la fois le plan galactique et les fluctuations du CMB à 143 GHz.

La détermination du spectre de puissance en température

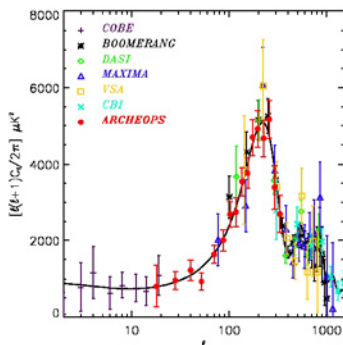


Figure 2

Les cartes obtenues à partir des deux détecteurs les plus sensibles à 143 et 217 GHz montrent des signaux compatibles avec des anisotropies primaires du fond diffus cosmologique. De plus ces signaux semblent incompatibles avec toute source astrophysique connue autre que le CMB. Le spectre de puissance angulaire de ce signal entre les multipoles $l = 15$ et $l = 350$ montre sans ambiguïté un pic vers $l = 200$. Ces résultats sont en accord avec les cosmologies motivées par des modèles d'inflation. Avec seulement une demi-journée d'observation de nuit, Archeops a fourni la meilleure description du premier pic acoustique et en particulier de sa montée à bas l disponible avant les résultats du satellite WMAP publiés en février 2003. Une batterie de tests permet d'estimer la

contribution des erreurs systématiques à une petite fraction des erreurs statistiques et de l'erreur en étalonnage de l'expérience. Le spectre de puissance publié [5] est présenté dans la figure 2. Les paramètres cosmologiques déduits de ce spectre et d'autres expériences [6] ont permis de mieux contraindre les modèles cosmologiques possibles et favorisent particulièrement les modèles inflationnaires.

Une méthode nommée Xspect, basée sur la combinaison optimale des cartes provenant de plusieurs détecteurs, est actuellement en développement [7]. Nous calculons les spectres de puissance croisés à partir d'un ensemble de cartes provenant de différents détecteurs ou différents instruments. Chaque spectre de puissance croisé est une estimation non biaisée des $C(l)$ tant que les bruits des détecteurs sont décorrélés. Les spectres sont alors combinés de façon optimale en un spectre de puissance et les erreurs calculées analytiquement. Cette méthode est testée sur les données de WMAP et sera appliquée à Archeops très prochainement. Elle permettra notamment l'utilisation de plus de bolomètres, ce qui réduira sensiblement les erreurs statistiques.

La détermination de la polarisation

Dès 1968, M. Rees [8] prédit que le CMB doit être polarisé par diffusion Thomson sur les électrons du plasma chaud qui constituait l'Univers au moment du découplage

matière-rayonnement. L'état de polarisation peut être caractérisé par les paramètres de Stokes Q , U (polarisation linéaire) et V (polarisation circulaire). Ces paramètres sont variables dans un repère lié à la direction d'observation, ils ne peuvent donc être exprimés dans un repère commun avec lequel on pourrait faire un développement en harmoniques sphériques similaire à celui employé pour l'étude des anisotropies de température. Pour y remédier, on bâtit à partir de Q et U deux nouvelles observables E et B par une projection de Q et U sur une base adaptée. Ces champs sont indépendants du repère d'observation, comme la température, mais conservent l'information sur la nature de la perturbation qui a engendré la polarisation des photons. En effet, une perturbation scalaire ne crée pas de mode B , contrairement aux ondes gravitationnelles primordiales. Les spectres de E et B sont naturellement sensibles aux paramètres cosmologiques : ils permettent donc d'obtenir une redondance avec les résultats obtenus à partir du spectre en température et de mieux contraindre ces derniers. Ainsi, malgré la faible amplitude du signal - typiquement 100 fois plus faible que l'amplitude des fluctuations de température - les anisotropies de polarisation contiennent des informations précieuses sur l'Univers primordial.

Le signal polarisé venant du CMB étant très faible, la mesure n'est pas accessible avec Archeops. Cependant, à 353 GHz, l'émission thermique de la poussière galactique domine celle du CMB au voisinage du plan galactique. Archeops a fourni les premières cartes à large couverture spatiale dans le domaine submillimétrique avec une résolution angulaire de 13 minutes d'arc et des détecteurs sensibles à la polarisation. Nous avons montré que l'émission diffuse dans le plan galactique dans la bande de longitude observée par Archeops était polarisée au niveau de 4-5 %, à l'exception de la région du Cygne. Son orientation est grossièrement perpendiculaire au plan galactique et orthogonale, comme attendu, à l'orientation de l'extinction polarisée de la lumière stellaire. Plusieurs nuages de quelques degrés carrés sont polarisés à plus de 10 %, suggérant ainsi un mécanisme efficace d'alignement des grains de poussière dans le milieu interstellaire. Nos résultats sont compatibles avec les modèles basés sur un fort champ magnétique cohérent coplanaire au plan galactique qui suivrait les bras spiraux, tel qu'observé dans des galaxies externes. La figure 3 présente le plan galactique vu à 353 GHz par Archeops. Cette étude a été le sujet d'une thèse [9] et d'une publication [10].

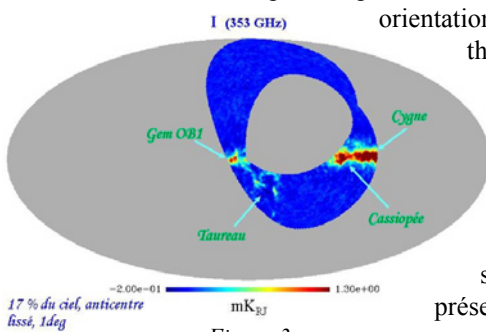


Figure 3

► L'expérience Planck-HFI

En 2007 sera lancé le satellite Planck (ESA) avec à son bord deux instruments : LFI (Low Frequency Instrument) et HFI (High Frequency Instrument). La communauté cosmologique française, dont le LPSC, est fortement impliquée dans HFI. La grande sensibilité de l'instrument ($\Delta T/T \sim 10^{-6}$ à 100 GHz), la couverture totale du ciel et la grande redondance obtenue lors des 18 mois de prise de données donneront accès au spectre des anisotropies de température de $l = 2$ à $l = 2000$ - les erreurs seront essentiellement dominées par le bruit de photons et la variance cosmique. Les premiers spectres en polarisation des modes E et B seront également obtenus. Une version de test de l'instrument ainsi que du code d'analyse doivent être livrés fin 2004 : la préparation de Planck est donc d'ores et déjà une activité importante du groupe.

Ce travail se répartit dans deux domaines : la polarisation avec notamment la fabrication des cartes polarisées et le traitement des données (signaux laissés par le rayonnement cosmique, décorrélation, mesure des lobes, etc). Nous mettons ainsi à profit l'expertise acquise sur Archeops au service de l'analyse de Planck dans le cadre du Niveau 2.

[1] M. Tristram, J.F. Macías-Pérez, C. Renault, J.-Ch. Hamilton, Phys. Rev. D (2003) soumis, astro-ph 03100260

[2] J.F. Macías-Pérez, en préparation « Wavelets analysis of CMB timelines. An application to the Archeops experiment »

[3] A. Benoît et al., en préparation « In-flight performance of the Archeops balloon experiment for mapping CMB anisotropies »

- [4] A. Benoît et al., en préparation « Data processing of the Archeops data and first maps »
 [5] A. Benoît et al., A&A 399 (2003) 19
 [6] A. Benoît et al., A&A 399 (2003) 25
 [7] M. Tristram, J.F. Macías-Pérez et al., en préparation « Xspect, estimating the angular power spectrum by cross-correlation »
 [8] M. Rees et al., Apl. J. 153 (1968) L1
 [9] N. Ponthieu, 2003, thèse de doctorat
 [10] A. Benoît et al., A&A (2003) accepté pour publication, astro-ph 0306222

► Planck-HFI : Électroniques de vol

D. Santos, G. Barbier, O. Bourrion, J. Bouvier, B. Boyer, R. Foglio, A. Garrigue, F. Pancher, P. Stassi, E. Vernay, C. Vescovi, F. Vezzu, O. Zimmermann

Our laboratory is engaged in the on board electronics of the PLANCK satellite, a ESA mission to measure the temperature and polarisation anisotropies of the cosmological microwave background. The LPSC has the responsibility of the analogic, digital and power electronics design, and the software of the sorption cooler electronics (SCE) controlling the sorption cooler compressors built by the Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (USA) and assuring the 20 K temperature for LFI (Low Frequency Instrument) and HFI (High Frequency Instrument) instruments. The LPSC has also the responsibility of the analogic, digital and power electronics design, as well as the thermal and mechanical design and fabrication of the dilution cooler electronics (DCE) to perform the fluid control used by the dilution cryogenics made by Air Liquide (France), assuring a temperature of 100 mK on the HFI bolometers. To perform the different tests, we have to develop the different simulators (space-craft, compressors for the SCE, valves, sensors for the DCE), allowing to put the electronics in the equivalent circuits to study their behaviour and measure the different parameters to be checked (ranges, accuracies, noise, etc.).

Électronique du cryo-générateur à sorption (20 K)

Le laboratoire est fortement impliqué dans la conception, le suivi de la réalisation et les tests de l'électronique de pilotage et de contrôle du cryo-générateur à sorption construit par le Jet Propulsion Laboratory (JPL-NASA) pour la mission Planck. Le travail développé par l'équipe est décrit ailleurs par les différents services impliqués (Acquisition, Détecteurs Instrumentation, Électronique, Études et Réalisation Mécanique). Ce travail concerne la conception (électronique de puissance, analogique et digitale), le routage, l'étude mécanique et thermique des cartes et de la boîte, le suivi de fabrication, le simulateur de communication avec le satellite, le simulateur des éléments à commander du générateur, le logiciel de pilotage des simulateurs, la définition des connecteurs et des câbles cryogéniques et chauds et le logiciel de bord qui assurera le pilotage et le contrôle du cryo-générateur en vol aussi bien que les tests de validation de chaque modèle au JPL.

L'année 2002 a été cruciale pour le développement du premier modèle (EBB). Après une campagne de tests au LPSC du générateur et avec les simulateurs de communication, ce prototype a été couplé au cryo-générateur et testé au JPL, ainsi que la première version du logiciel de contrôle, pendant trois semaines en septembre 2002 (voir figure). Pendant cette période, les différents modes de fonctionnement ont également été explorés. Tous ces tests se sont déroulés avec succès.

Les modèles de qualification et de vol seront fabriqués par un sous-traitant choisi en avril 2003, qui nous a demandé une phase de description et de transfert d'informations. Cette phase a été finalisée avec succès en décembre 2003.

Le logiciel de bord a évolué également, et pour sa version de vol il a été écrit en suivant les règles fixées par l'ESA (European Space Agency). Nous allons tester cette version de vol pendant les prochains essais au JPL durant le mois de juillet 2004.

Électronique du cryo-générateur à dilution (100 mK)

L'électronique de contrôle des fluides ($^4\text{He} - ^3\text{He}$) du cryogénérateur à dilution qui assure une température de 100 mK, température nominale de fonctionnement des bolomètres de l'instrument HFI (High Frequency Instrument) de PLANCK, est sous la responsabilité de notre équipe au LPSC. Tout au long de ces deux dernières années, nous avons développé la conception (électronique de puissance, analogique et digitale), le routage, l'étude mécanique et thermique de la carte et de la boîte, le simulateur de communications avec le DPU (Data Processor Unit), la carte de simulation du comportement électrique des vannes et des senseurs de pression, la définition des câbles et des connecteurs. Pendant l'année 2004 nous allons tester et livrer le modèle CQM (Cryogenic Qualification Model) et le premier modèle de vol.

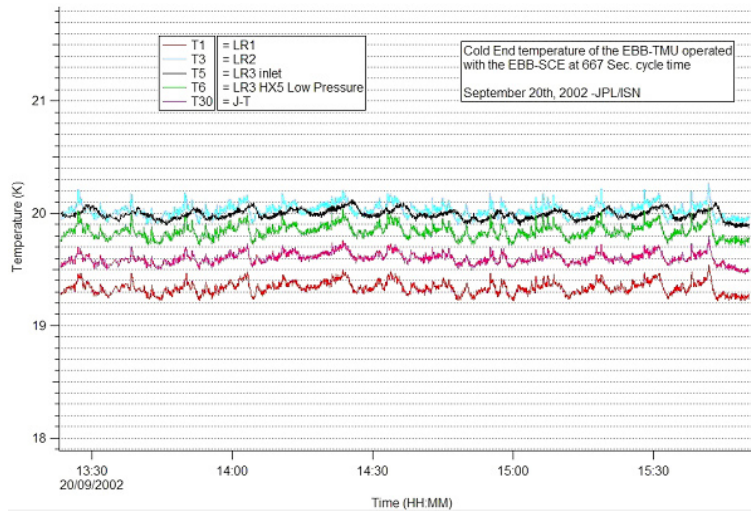


Figure 1

Mache3 (R&D)

*D. Santos, E. Moulin, G. Duhamel, A. Garrigue, J. Genevey, J. Macias-Pérez, F. Mayet, F. Naraghi, E. Perbet, G. Perrin, J.-A. Pinston, J.-P. Richaud
Collaboration CRTBT : E. Collin, C. Winkelman, Y. Bunkov, H. Godfrin*

The existence of non-baryonic matter in the universe is one of the elements of the standard cosmologic model. In order to detect these exotic particles we are working on a detector of a new generation in collaboration with the CRTBT. The first experiment with a prototype cell has been analysed and a multicell prototype has been built and tested. Encouraging preliminary results concerning the detection of low energy electrons are the outcome from this last experiment.

L'existence de matière sombre dans l'univers est une des questions centrales de la cosmologie et de la physique des particules. La contribution baryonique à cette matière non-lumineuse étant contrainte par les mesures d'abondances isotopiques de noyaux légers consistantes avec le modèle de nucléosynthèse primordiale, une contribution non-baryonique et non relativiste est nécessaire dans le cadre du modèle standard de l'univers.

Depuis quelques années nous travaillons en collaboration avec le groupe d'ultra basses températures du CRTBT sur une ligne de recherche et développement d'un détecteur de nouvelle génération pour la recherche de matière sombre non-baryonique. Le détecteur proposé est une matrice de cellules bolométriques de ^3He superfluide (MACHe3). L'utilisation de l'hélium 3 et la configuration matricielle sont les idées clés du détecteur puisque :

- le spin $\frac{1}{2}$ de l'hélium 3 nous permet d'ouvrir le canal axial de l'interaction faible, deux ordres de grandeur supérieure à l'interaction scalaire ;
- sa section efficace Compton est deux ordres de grandeur plus faible que celle du germanium ;
- pas de rayons X ;
- à cause de sa faible masse ($2,8 \text{ GeV}/c^2$) une plus grande sensibilité aux particules plus légères et un plus grand rapport signal sur bruit [les événements attendus sont concentrés sur une plage réduite, entre le seuil de détection ($\sim 1 \text{ keV}$) et 6 keV] ;
- enfin la configuration matricielle nous permet de supprimer des événements du bruit de fond quand il y a plus d'une cellule déclenchée.

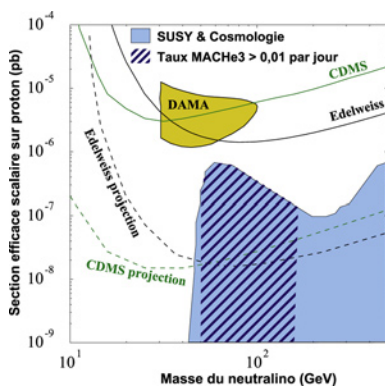


Figure 1

Nous avons publié des articles dans lesquels nous avons étudié par simulation la réponse et la suppression du bruit de fond de MACHe3, et sa contribution à la recherche de particules supersymétriques [1-3] (voir figure 1).

Ces deux dernières années nous avons pu analyser les données de la première expérience réalisée en juin 2001, ce qui nous a permis d'obtenir la distribution de l'énergie laissée par les muons cosmiques à l'intérieur de la cellule bolométrique (voir figure 2), ainsi que

le pic de capture neutronique (voir figure 3). Les résultats de cette expérience [4], nous ont encouragé à poursuivre dans cette voie en construisant un prototype multicellulaire afin de montrer les coïncidences entre cellules par les événements muons. Nous avons également envisagé de fabriquer une source d'électrons de conversion de très basse activité ($\sim 1 \text{ Bq}$) de ^{57}Co afin d'étalonner la cellule bolométrique dans la plage des basses énergies, entre 5 et 13 keV.

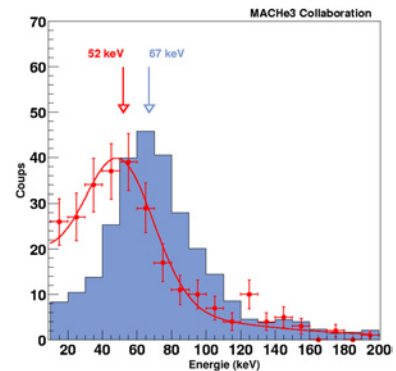


Figure 2

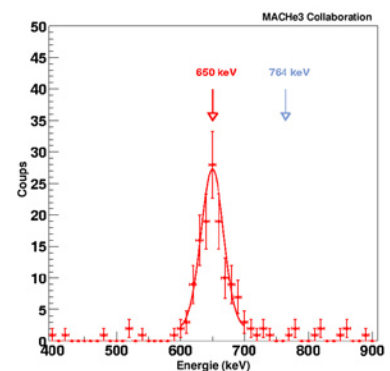


Figure 3

Ce projet a été présenté à la Région Rhône-Alpes dans le cadre des projets Emergence et il a été retenu en juin 2002. Nous avons donc pu grâce à la Région réaliser le prototype, la source d'étalonnage et développer un système d'acquisition qui sera testé en 2004.

L'expérience avec le prototype multicellulaire a démarré en août 2003 et se poursuit jusqu'à mars 2004. Les résultats préliminaires nous permettent de confirmer la détection des électrons de basse énergie.

[1] F. Mayet et al. NIM A 455 (2000) 554.

[2] F. Mayet, D. Santos, Yu. Bunkov, E. Collin, H. Godfrin, Phys. Lett B 538 (2002) 257.

[3] D. Santos, F. Mayet, E. Moulin, G. Perrin, et al, Proceedings of 4th International Workshop on Identification of Dark Matter, York (UK), September 2002.

[4] E. Moulin, F. Naraghi, D. Santos, E. Collin, C. Winkelmann, Y. Bunkov, H. Godfrin, Proceedings of the 4th Marseille International Cosmology Conference on Where Cosmology and Fundamental Physics Meet, Marseille, June 2003

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 Zévatrons 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

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 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

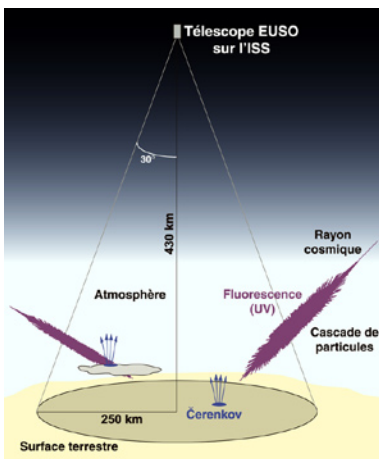


Figure 1

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 ± 30 degrés, une surface au sol de 160 000 km² peut être couverte, chaque pixel du plan focal correspondant à un peu moins d'1 km² 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

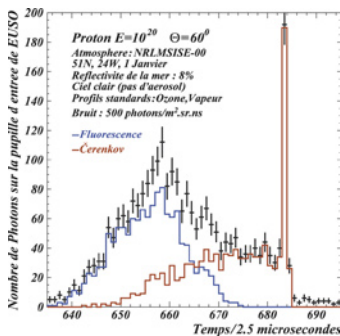


Figure 2

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/m²/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).

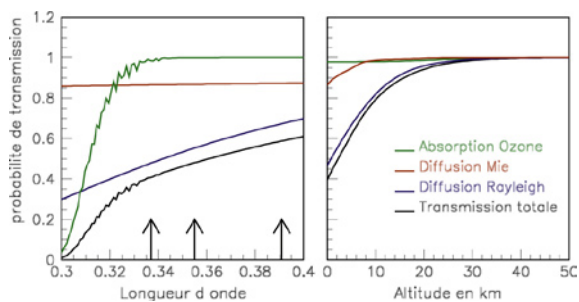


Figure 3

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 km²), 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/m²/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 BRP (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.

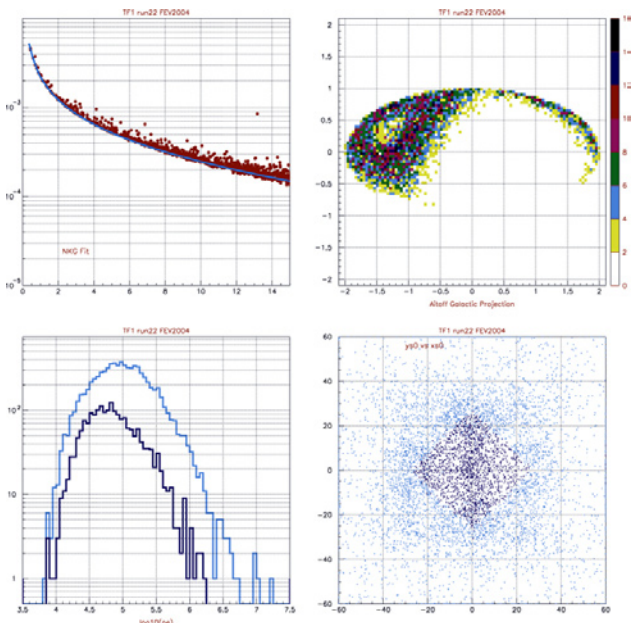


Figure 5

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

MUNU

$\mu\nu$: Moment Magnétique du Neutrino

D.H. Koang, M. Avenier, G. Bagieu, J. Lamblin, D. Lebrun, A. Stutz

The MUNU experiment was carried out at the BUGEY nuclear reactor. The aim was the study of antineutrino-electron elastic scattering reaction at low energy. The recoil electrons were detected in a gas time projection chamber, immersed in an Anti-Compton liquid scintillator detector, which allows to reject background from cosmic and gamma rays. An upper limit on the neutrino magnetic moment of $10^{-10} \mu_B$ (90% C.L.) was obtained.

Dans le cadre de la collaboration MUNU (Grenoble, Neuchâtel, Padoue, Zurich), nous nous sommes intéressés à une propriété intrinsèque du neutrino, son moment magnétique. Dans le modèle électrofaible minimal standard, le neutrino uniquement gauche n'a ni masse ni moment magnétique. L'adjonction de neutrinos droits n'ayant pas d'interaction de jauge introduit un moment magnétique μ_ν proportionnel à la masse du neutrino m_ν . La valeur attendue est dans ce cas très faible soit $10^{-19} m_\nu$ exprimée en magnéton de Bohr (μ_B) avec m_ν en eV. Dans un modèle avec une symétrie gauche-droite, le terme prédominant est proportionnel à la masse du lepton chargé associé et à la proportion de mélange entre bosons droit et gauche, μ_ν peut prendre alors des valeurs plus grandes ($\sim 10^{-14} \mu_B$). Dans des modèles avec des secteurs de Higgs plus riches, la présence de symétries supplémentaires permet notamment d'annuler les termes contribuant à la masse des neutrinos sans réduire ceux contribuant au moment magnétique. Des valeurs beaucoup plus importantes sont alors possibles. C'est par exemple le cas de la symétrie dite horizontale dans laquelle les 2 familles de neutrinos électronique et muonique sont pratiquement dégénérées.

L'étude expérimentale a été faite à l'aide de la diffusion neutrino électron. La faible valeur de la section efficace de cette réaction permet une bonne sensibilité à une éventuelle composante électromagnétique. La contrepartie est un taux de comptage très faible nécessitant un détecteur très bas bruit de fond. L'expérience s'est effectuée à l'aide du flux très intense de neutrinos de basse énergie disponible auprès d'un réacteur nucléaire du Bugey. L'expérience MUNU utilise une TPC d'1 m³ remplie de CF₄ servant de cible d'électrons. La TPC (Figure 1) permet de mesurer l'énergie et la direction des particules chargées. Elle a des parois en acrylique transparent mince (5 mm) et est immergée à l'intérieur de l'enceinte du détecteur anti-Compton, constitué de 10 m³ de scintillateur liquide et équipé de photomultiplicateurs. Le détecteur extérieur joue un rôle actif de protection en permettant le rejet des rayons cosmiques et aussi des gammas internes comme externes. La collection de la lumière de scintillation du CF₄ produite à l'intérieur de la TPC complète et améliore la mesure de la charge au niveau du plan d'anode et permet

la localisation absolue des événements alpha et muon. L'ensemble peut supporter une pression de 5 bars. Une description détaillée du détecteur a été donnée précédemment [1] et les résultats de nos analyses ont été publiés [2-3]. La valeur limite supérieure obtenue est de $10^{-10} \mu_B$ (90 % C.L.). Elle constitue la meilleure limite actuelle pour le moment magnétique des antineutrinos électroniques. Une valeur très proche de $1,1 \cdot 10^{-10} \mu_B$ a été obtenue tout récemment par l'expérience Super-Kamiokande pour les neutrinos électroniques [4].

Une étude des possibilités de ce détecteur pour les neutrinos solaires de basse énergie a aussi été réalisée avec la TPC fonctionnant à 1 bar.

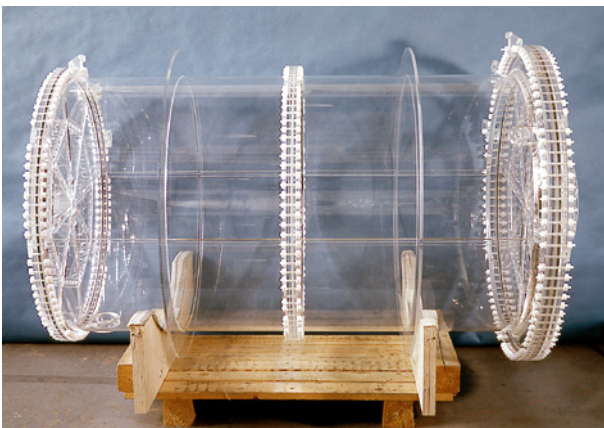


Figure 1 : Corps de la TPC en acrylique

- [1] *Sub MeV particles detection and identification in the MUNU detector*, Nucl. Instr. and Meth. 482 (2002) 408
- [2] *A new measurement of the neutrino electron elastic cross section at very low energy* - Phys. Lett. B 545 (2002) 57
- [3] *Limits on the neutrino magnetic moment from the MUNU experiment* - Phys. Lett. B 564 (2003) 190
- [4] *Limits on the magnetic moment using 1496 days of Super-Kamiokande-I Solar Neutrino data* hep-ex/0402015 v1 8 feb 2004