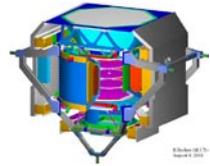


Participation au projet AMS

M. Buénerd, A. Barrau, L. Derome, M. Mangin-Brinet, K. Protasov, M. Vargas-Trevino (th), O. Véziant.

The AMS experiment will perform a high sensitivity study of the charged particles Cosmic Ray (CR) flux, searching for antimatter and dark matter, and performing unmatched abundance measurements of nuclear CRs. The LPSC group participates to the construction of the Cherenkov imager for particle velocity and charge measurements, allowing isotope separation for light nuclei.



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

L'équipe AMS du LPSC a participé à la phase préliminaire du programme expérimental AMS01. Elle a travaillé sur l'analyse et a apporté une contribution majeure à l'interprétation des résultats (voir rapports précédents et publications). Elle est actuellement engagée dans la préparation de la seconde phase du programme expérimental. 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 (voir rapport précédent).

Les travaux réalisés dans ce cadre portent sur :

- la construction de l'imageur Cherenkov d'AMS ;
- la phénoménologie du rayonnement cosmique galactique et la dynamique de l'interaction RC-atmosphère. L'objectif principal de ce travail est 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 ;
- les sources exotiques de rayonnement cosmique primaire (trous noirs primordiaux, matière noire...) afin de préparer la recherche des signatures expérimentales de ces sources dans les données de l'expérience AMS.

Ces activités sont détaillées dans les sections suivantes.



◆ Construction de l'imageur Cherenkov (RICH)

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

- en masse pour les noyaux de masse inférieure ou égale à 12 et pour le domaine d'impulsion de 1 à 12 GeV/c par nucléon,
- en charge dans tout le domaine d'énergie d'AMS (≤ 1 TeV/n).

Le principe du détecteur est celui de l'imageur annulaire à focalisation de proximité dont la simplicité d'architecture faisait de lui 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 un travail de simulation et la construction d'un prototype d'étude de l'instrument (1997 - 2000). Cette étape préliminaire 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. Cette version a été testée avec des muons cosmiques, puis à deux reprises au moyen d'un faisceau d'ions secondaires contenant tous les ions d'un rapport Z/A donné, développé dans ce but au SPS du CERN (Voir rapport précédent et [1]).

Intégration des cellules de photomultiplicateurs

L'ensemble des 680 cellules de photomultiplicateurs qui équiperont le détecteur final a été intégré et testé au LPSC au cours de l'année 2004, et livré début 2005 à l'équipe du CIEMAT de Madrid pour l'intégration mécanique dans l'imager (Figure 1). Cette dernière opération est actuellement en cours.

Cette phase de la construction a représenté un travail considérable de tests et d'étalonnages systématiques des éléments constitutifs de chaque cellule : photomultiplicateur et microcircuit d'électronique frontale (voir *M. Vargas-Trevino, thèse, U. Joseph Fourier, Grenoble, juillet 2005*). L'ensemble des photomultiplicateurs et des circuits intégrés de lecture a fait l'objet d'un tri croisé destiné à apparier les gains des PMs avec les propriétés temporelles des circuits intégrés, pour finalement obtenir un plan de détection aussi homogène que possible.

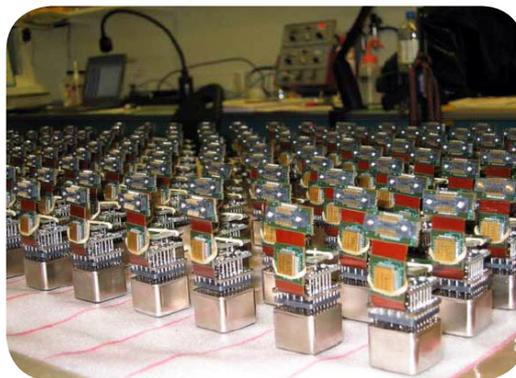


Figure 1 : Cellules de photodétecteurs de l'imager Cherenkov d'AMS en cours d'intégration au LPSC après leur assignation de position dans le plan du détecteur en fonction des caractéristiques en gain des PMs et en temps des circuits intégrés de l'électronique frontale.

Caractérisation optique des tuiles d'aérogel

La vitesse des particules doit être mesurée dans l'imager Cherenkov (RICH) d'AMS avec une précision relative de 1 pour mille, pour conduire, une fois combinée avec les informations fournies par le détecteur de traces au silicium, à une détermination de la masse nucléaire pour les noyaux légers de masse inférieure ou égale à 12.

Cette contrainte de précision sur la mesure de la vitesse se traduit par la nécessité de déterminer l'indice de réfraction du matériau radiateur avec une précision de l'ordre de $\Delta n \sim 10^{-4}$.

Le principal radiateur du RICH d'AMS est constitué d'aérogel de silice d'indice de réfraction $n = 1,05$. Les 100 tuiles qui équiperont le détecteur sont produites par les Instituts Budker (Physique Nucléaire) et Borekov (catalyse) de Novosibirsk.

Une installation expérimentale spécifiquement dédiée à la détermination de l'indice de réfraction de ces tuiles par mesure de déviation laser en utilisant la méthode du prisme (Figure 2), a été mise en place dans une salle propre du LPSC. Les diverses corrections intervenant au niveau de précision requis, telles par exemple que l'influence des variations de pression, de température, de l'indice de l'air... ont été incluses, pour une précision optimale des mesures.

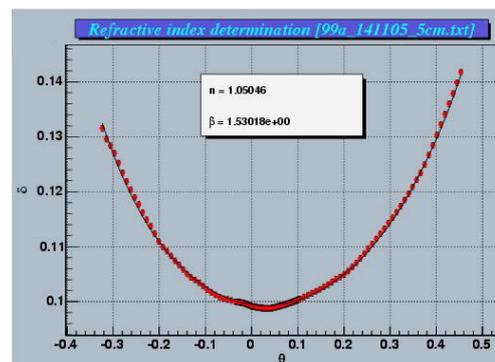
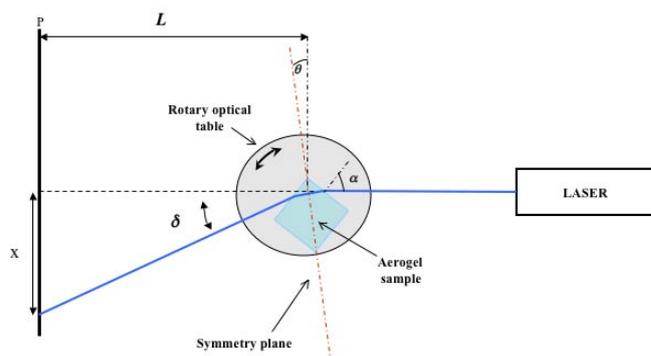


Figure 2 : Schéma de l'installation expérimentale (à gauche) pour la détermination de l'indice de réfraction des tuiles d'aérogel par mesure de minimum de déviation, et exemple de variation de la déviation mesurée en fonction de l'angle d'incidence du faisceau laser (à droite). Les corrections géométriques, celles liées au coefficient de clarté, et celles dues à l'indice de l'air, ont été incluses dans les calculs.

Une attention particulière a dû être portée aux variations d'indice à l'intérieur même des tuiles. Pour confirmer ou infirmer cette inhomogénéité, des mesures en faisceau ont été réalisées au BTF (Beam Test Facility) de Frascati, avec des électrons de 500 MeV. L'installation est illustrée sur la figure 3. La mesure se fait par réflexion du cône Cherenkov sur un miroir sphérique. L'anneau Cherenkov est focalisé sur une plaque photographique. Les plaques sont ensuite analysées par densitométrie. Deux tuiles ont ainsi pu être cartographiées et l'analyse des résultats est en cours.

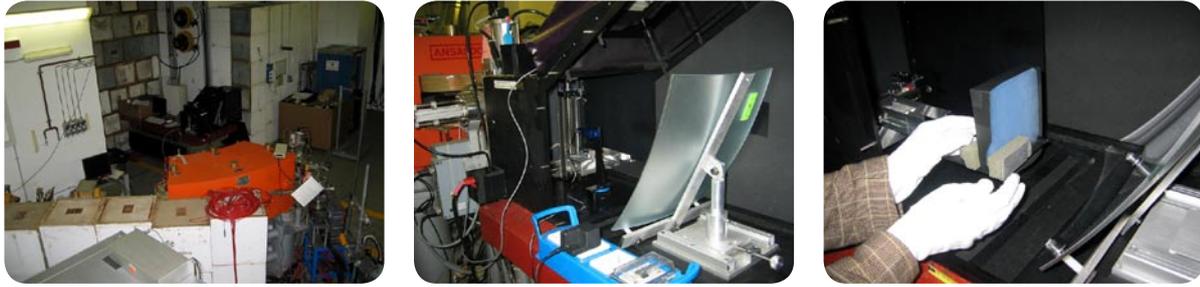


Figure 3 : Zone expérimentale du BTM de Frascati (à gauche), enceinte équipée avec le miroir sphérique et le moteur permettant le déplacement de la tuile (au centre), et positionnement de l'aérogel (à droite).

◆ **Phénoménologie : Interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère dans l'environnement terrestre**

Depuis 2000, une activité de phénoménologie de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère et le champ magnétique terrestre est réalisée dans l'équipe AMS. L'objectif initial était d'interpréter les données mesurées d'AMS01, objectif qui a été largement atteint (voir rapports antérieurs et publications), et dont le succès nous a incité à pousser l'exploration plus loin.

Ce travail de phénoménologie 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 et le développement de cascades de particules.

Le rayonnement cosmique constitue une source unique pour l'étude des oscillations des neutrinos. La puissance de cet outil a été particulièrement mise en évidence par l'expérience Super-Kamiokande 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_e/ν_μ 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 principale difficulté est d'avoir une simulation la plus correcte possible de l'interaction des particules et de la production de particules secondaires. La stratégie utilisée jusqu'alors a été d'utiliser des paramétrisations des sections efficaces inclusives pour chaque particule produite (proton, pion...). Les paramètres sont ajustés sur les mesures disponibles de sections efficaces sur cible fixe.

Cette approche a permis de bien reproduire la production de particules secondaires, mais elle peut s'avérer insuffisante si l'on veut obtenir avec la simulation des résultats d'une grande précision (de l'ordre de quelques pour cents). Pour améliorer les sections efficaces utilisées, des mesures de flux de particules dans l'atmosphère ont été utilisées pour contraindre et ajuster les sections efficaces. En effet, de nouvelles mesures de flux de particules (proton, muons, électrons/positron) dans l'atmosphère (en particulier les mesures effectuées par l'expérience Caprice) sont aujourd'hui disponibles et permettent de contraindre les paramètres de sections efficaces utilisées dans la simulation.

◆ **Recherche de nouvelle physique**

A. Barrau, J. Grain.

Depuis quelques années, le groupe a développé une activité théorique autour des extensions de la relativité générale. Ces deux dernières années, les points suivants ont été étudiés :

Gravitation et cosmologie

La relativité générale, n'étant pas quantifiable, n'est vraisemblablement pas la théorie ultime. Les circonstances où des effets de gravitation quantiques peuvent se manifester demeurent néanmoins extrêmement rares. L'évaporation des trous noirs serait sans doute l'une de celles-ci. Le spectre de particules qu'ils émettent n'est pas tout à fait une loi de corps noir à cause de la forme complexe de la métrique au voisinage de l'horizon. Ce couplage entre les champs quantiques et les trous noirs est entièrement caractérisé par les facteurs de corps gris qui requièrent la résolution des équations de Klein-Gordon et de Dirac en espace courbe avec des conditions aux

limites particulières. Ces coefficients ont été, pour la première fois, calculés pour un espace de type de-Sitter, c'est-à-dire muni d'une constante cosmologique positive et une pour la gravité de Lovelock, c'est-à-dire présentant des termes d'ordres supérieurs en courbure scalaire. Ces calculs ont prouvé que la structure intrinsèque de l'espace temps était reflétée par le processus d'évaporation. Par ailleurs, nous avons montré que l'évaporation des trous noirs permettait de contraindre le spectre de puissance de l'Univers primordial à des échelles très petites et inaccessibles au fond diffus cosmologique [2].

Supersymétrie et matière noire

Certaines particules de Kaluza-Klein, prévues dans le cadre de théories présentant des dimensions supplémentaires, peuvent constituer de bons candidats à la matière noire non baryonique. Nous avons calculé leurs annihilations en antiprotons et les flux résultants. L'espace des paramètres de la théorie se trouve ainsi contraint et de nouvelles perspectives sont tracées pour leur détection.

Par ailleurs, nous avons montré que la mesure des flux de rayons cosmiques avec AMS ou d'autres expériences de cette génération, ainsi que les études du mode tenseur dans le fond diffus cosmologique, pourraient permettre de poser des contraintes sur la supersymétrie locale (supergravité), en particulier sur la masse des gravitinos.

Physique des trous noirs et des hautes énergies

Les modèles de type « Grandes Dimensions Supplémentaires » conduisent naturellement à une échelle de Planck plus faible que la valeur apparente sur notre membrane quadri-dimensionnelle. Elle pourrait même se situer au TeV et devenir donc accessible à des accélérateurs comme le LHC. Nous avons montré que des effets de gravitation quantique – en l'occurrence un terme de Gauss-Bonnet dans la densité lagrangienne – pourraient alors être détectés. La présence d'une constante cosmologique (espaces de-Sitter / Anti-de-Sitter) modifie également la forme du spectre. Enfin, la production locale de trous noirs dans la galaxie et par diffusion thermique dans l'Univers primordial a été évaluée.

Perspectives

À court terme, nous allons poursuivre deux axes de recherche. Le premier, lié à la cosmologie, consiste à finaliser une approche WKB de la dynamique des champs scalaires en espace courbe [3] et à développer une étude de la partie quantique du champ en inflation stochastique. Le second consiste à calculer l'entropie rayonnée par les trous noirs dans les extensions de la relativité générale. Ce dernier point serait une confirmation intéressante de l'hypothèse de Bekenstein qui n'a pas encore été abordée pour les trous noirs de Kerr, les théories de Lovelock et les espaces à $D > 4$.

[1] The AMS RICH collaboration, P. Aguayo et coll., NIM sous presse.

[2] M. Khlopov, A. Barrau, soumis à Class. Quantum Grav.

[3] J. Grain, A. Barrau, soumis à Nucl. Phys. B.

Participation à l'expérience CREAM

M. Buénerd, A. Barrau, L. Derome, M. Mangin-Brinet, Y. Sallaz-Damaz (th).

CREAM is a balloon experiment which was flown already twice over Antarctica, to measure the very high energy (1-1000 TeV) Nuclear Cosmic Ray flux (CR), investigate the energy region where Super Novae front shock acceleration signature is expected for protons, and study the CR transport in the galaxy. The LPSC group has proposed a Cherenkov imager for particle charge measurements over the full range of charge ($1 < Z < 30$), and for backplash and albedo particle rejection. The detector, a proximity focusing imager, is being built in the laboratory.

Figure 1 : Lancement de CREAM à la station antarctique américaine de McMurdo sur un ballon de la NASA en décembre 2005.



L'expérience CREAM (Cosmic Ray Energetics and Mass) permettra d'étudier les rayons cosmiques nucléaires de très haute énergie ($\sim 10^{12}$ à 10^{15} eV) du proton au fer en mesurant leur charge et leur énergie. L'objectif principal est l'observation des caractéristiques spectrales des rayons cosmiques et/ou l'étude des changements en abondance qui pourraient être reliés à la limite d'accélération du front d'onde de choc des supernovae. Cette expérience sera la première à être embarquée sur un ballon de la nouvelle génération (ULDB) développée par la NASA, qui permettra des vols très longue durée, jusqu'à 3 mois.

Un imageur Cherenkov (CHERenkov CAMera) pour la mesure de la charge dans une version évoluée de l'expérience, est en cours de réalisation au LPSC (groupe AMS/CREAM). Le principe de l'imageur est le même que celui utilisé dans AMS (focalisation de proximité). Il comprend un radiateur Cherenkov (aérogel de silice), un espace de glissement de 10 cm environ pour le développement du cône Cherenkov et un plan de détection constitué de photomultiplicateurs Photonis XP3112. La géométrie détaillée de l'instrument est en cours de finalisation.

La figure 2 montre la structure (CAO, vue en coupe verticale) du détecteur en cours de construction.

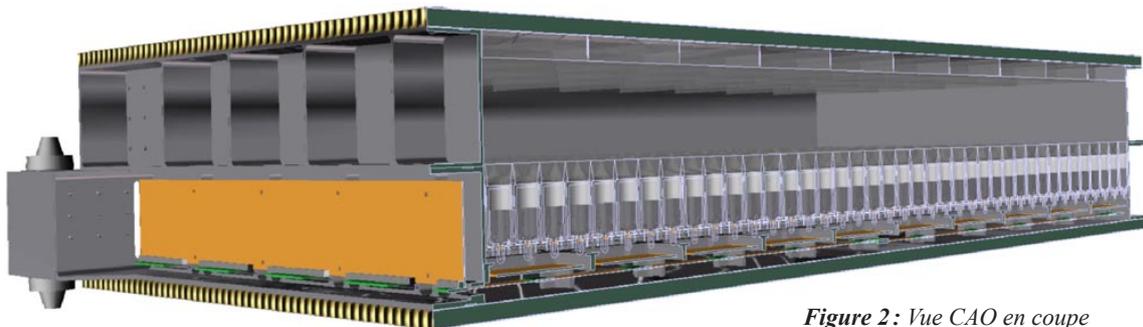


Figure 2 : Vue CAO en coupe du détecteur en cours de construction.

Simulation

Un programme de simulation du détecteur Cherenkov de CREAM est développé en utilisant l'environnement logiciel de GEANT4. La figure 3 ci-dessous montre quelques premiers résultats.

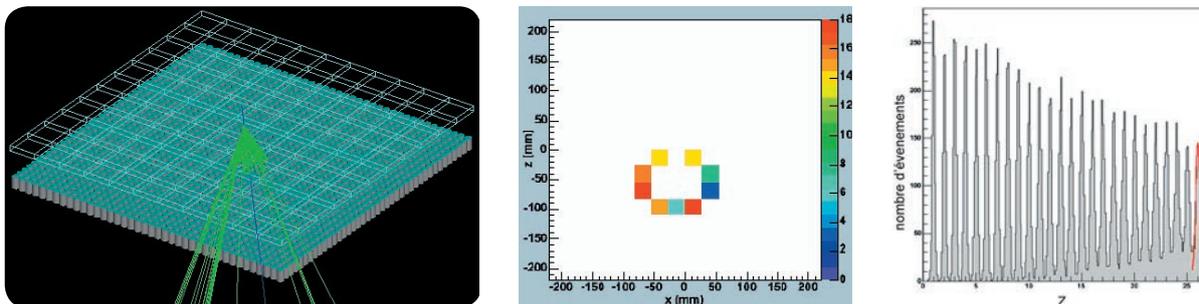


Figure 3: Exemple d'événement simulé (proton, 1 GeV) (à gauche), distribution des photons obtenue sur le plan de photomultiplicateurs (au centre), et reconstruction de la charge pour une résolution spatiale supposée de 1 mm (à droite).

La simulation comporte la modélisation des photomultiplicateurs et contient pour l'instant comme processus physiques, l'effet Cherenkov (aérogel, guides de lumière, et fenêtre d'entrée des photomultiplicateurs), la diffusion Rayleigh (aérogel), la réflexion (aérogel, guides de lumière, et fenêtre d'entrée des photomultiplicateurs) et l'absorption (guides de lumière éventuels et surfaces latérales des photomultiplicateurs). L'efficacité des photocathodes est aussi incluse, conformément aux données fournies par le constructeur.

Les modules de programmes de reconstruction de l'angle Cherenkov et de la charge à partir des données simulées sont en cours d'élaboration.

