

AMS

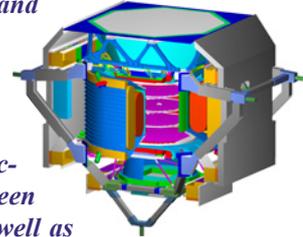
M. Buénerd, F. Barao, A. Barrau, B. Baret, G. Boudoul, L. Derome, R. Duperray, J. Grain, K. Protasov, M. Vargas-Trevino, O. Véziant

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 .

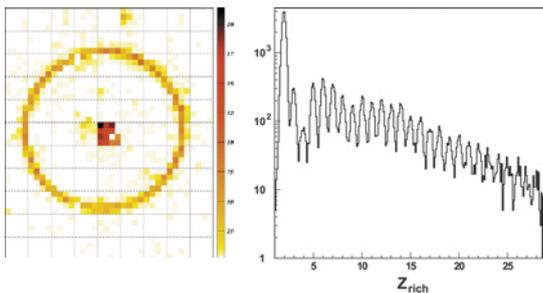


Figure 2 : La résolution en charge expérimentale obtenue est $\sigma(Z) \approx 0,25$ unité de charge environ, croissant faiblement avec Z . Les performances mesurées sont en bon accord avec la simulation.

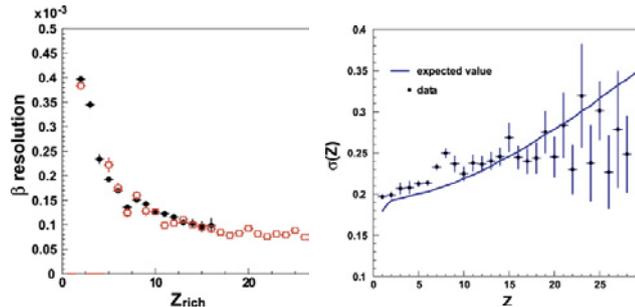
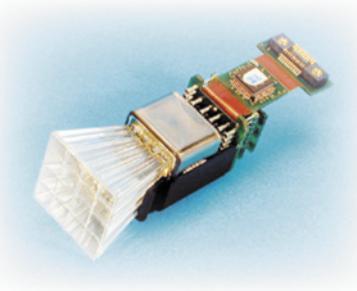


Figure 3 : Les 680 modules de photodétecteurs sont en cours d'assemblage au LPSC. L'intégration du modèle de vol du compteur se fera à Madrid en fin d'année. L'ensemble sera ensuite testé et transporté au CERN pour intégration dans le spectromètre AMS-02 en 2005.

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).

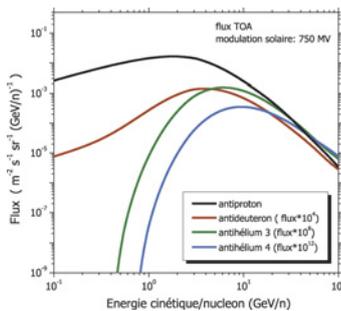


Figure 5

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