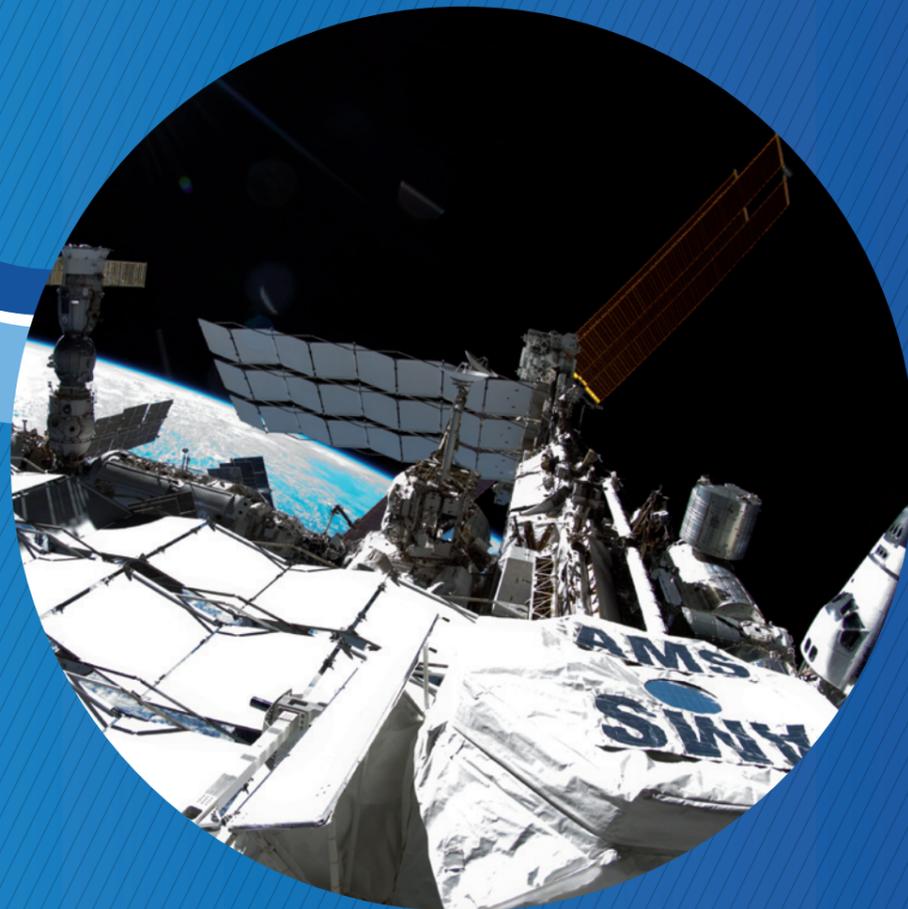


LES GROUPES
EXPÉRIMENTAUX

L'univers comme
laboratoire

ETUDE DES RAYONS COSMIQUES AVEC AMS



Le détecteur AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) a rejoint la Station Spatiale Internationale (ISS) à bord de la navette Endeavour, lors de la mission STS-134 le 19 mai 2011. Depuis lors, AMS observe et mesure les rayons cosmiques avec une précision inégalée pour sonder la matière noire, l'anti-matière primordiale et la matière étrange. AMS est le plus complet des détecteurs de particules jamais construit pour l'espace : 7,5 tonnes, 4 m de haut, 5 m de large. AMS mesure l'énergie, l'impulsion, la charge ou la vitesse des rayons cosmiques et identifie leur nature. Tout fonctionne normalement depuis la mise sous tension dans l'espace. Un suivi du détecteur est assuré 24 heures sur 24 depuis le centre de contrôle Payload Operation and Control Center (POCC) situé au CERN. Ces quatre dernières années, le groupe du LAPP, impliqué dans AMS depuis 1996, s'est particulièrement investi dans la mise en service et le suivi du calorimètre électromagnétique, et la préparation des analyses de recherche de matière noire.

FIGURES 1A, 1B, 1C

En haut, tests de compatibilité électromagnétique à l'ESTEC (ESA) ; au centre et ci-contre, installation d'AMS sur la station spatiale internationale (NASA).

L'ÉQUIPE DU LAPP

PHYSICIENS

G. Coignet, A. Fiasson, C. Goy, R. Kossakowski, M. Pannicia, V. Poireau, **S. Rosier-Lees**, J.-P. Vialle

DOCTORANTS

L. Basara, L. Tao

VISITEUR

F. Barao (LIP)

EQUIPE TECHNIQUE

S. Elles, J.-M. Dubois, N. Fouque, R. Hermel, J. Jacquemier, V. Lepareur, M. Maire, J. Tassan

STAGIAIRES

L3 (2), M1 (2), M2 (2)

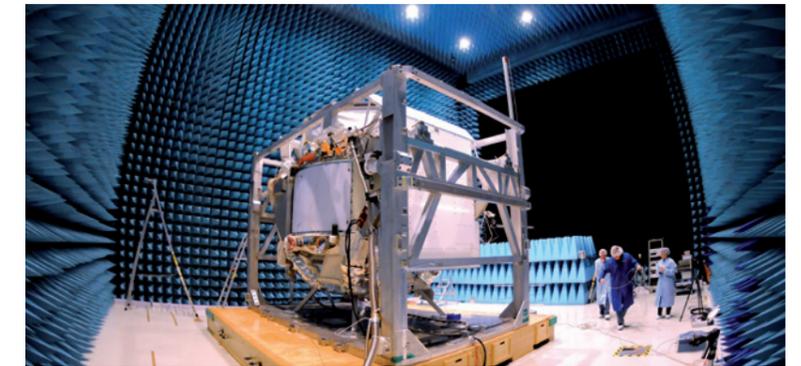


FIGURE 2

Le détecteur AMS avec une vue éclatée des sous-détecteurs qui le composent.

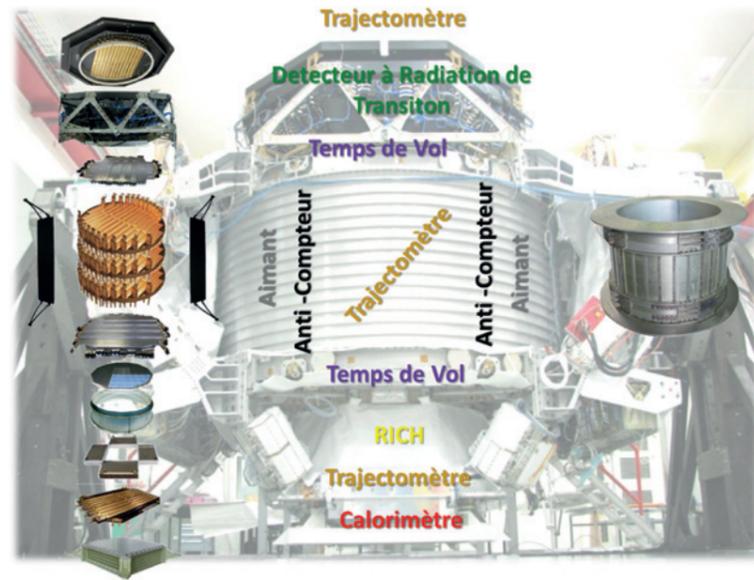
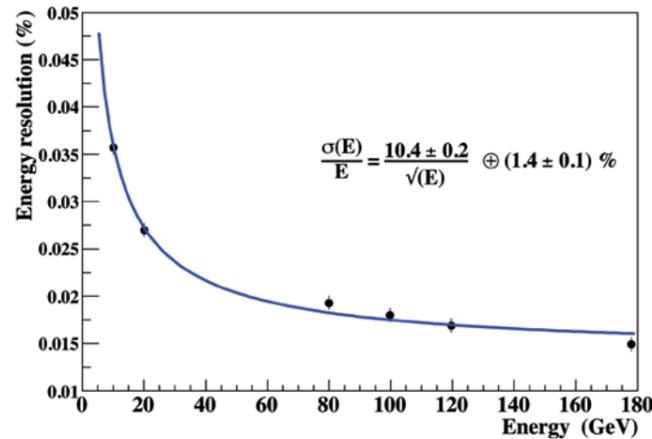


FIGURE 3

Résolution de l'énergie mesurée dans le calorimètre électromagnétique lors des tests en faisceaux d'août 2010. La ligne pointillée représente le résultat de l'ajustement sur les données.



COLLABORATION

La collaboration AMS regroupe environ 600 physiciens et ingénieurs issus de 50 instituts répartis dans 16 pays. La France est représentée par 3 laboratoires : le LAPP, le LPSC à Grenoble (CNRS - Université Joseph Fourier) et le LUPM à Montpellier (CNRS - Université Montpellier2).

DATES CLÉS

- 2008-2009** : Assemblage et mise en service d'AMS dans la salle blanche du CERN
- Février 2010** : Tests en faisceaux au CERN
- Avril 2010** : Tests de qualification à l'ESTEC (Hollande)
- Août 2010** : Tests en faisceaux au CERN
- Automne 2010 et hiver 2011** : Mise en service à KSC (Floride, USA)
- 25 Mars 2011** : AMS est à bord de la navette Endeavour sur le pas de tir à KSC
- 16 Mai 2011** : Lancement de la navette Endeavour (mission STS-134)
- 19 Mai 2011** : Premières données, 3 heures après l'installation d'AMS sur l'ISS
- Juin 2011** : Prise de données à JSC (Texas, USA)
- Juillet 2011** : Prise de données transférée au CERN

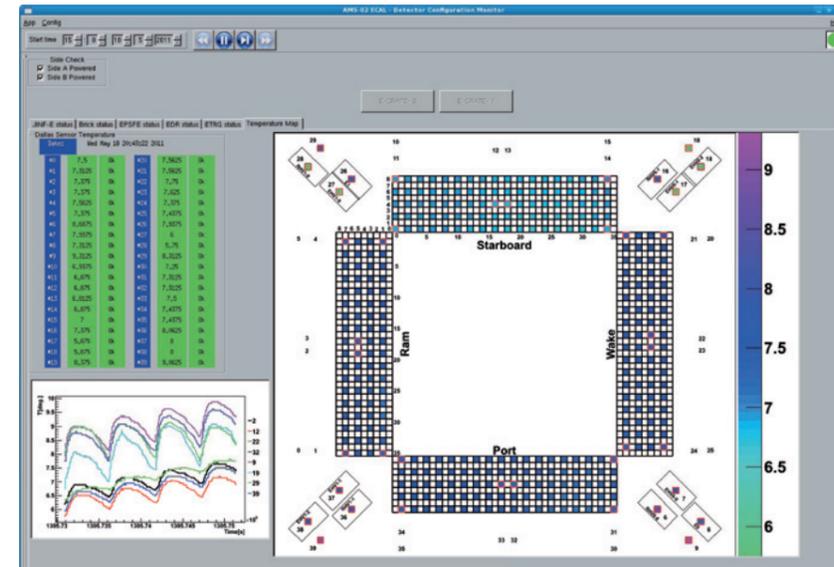


FIGURE 4

Moniteur des températures. Les carrés rouges représentent les senseurs thermiques (6 par faces) dont on déduit les températures en chaque position des photomultiplicateurs (carrés pleins) par interpolation (spline). L'échelle des valeurs de températures est donnée par la barre verticale à droite.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Avant lancement : qualification, tests en faisceaux et mise en service du détecteur

Le LAPP a pris part durant cette période à la création d'outils permettant d'afficher la configuration et l'état du calorimètre en temps réel. Un outil de visualisation de la température du calorimètre a notamment été développé (figure 4) ; il s'est révélé très utile pour contrôler l'évolution des paramètres du détecteur dès après le décollage. Depuis, c'est un des outils du contrôle continu du détecteur.

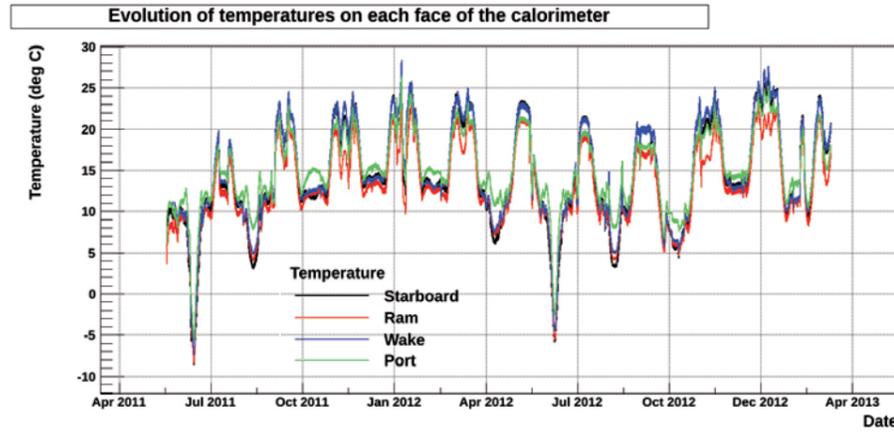
Après lancement : analyse de physique et résultats

Le statut d'AMS est en permanence contrôlé depuis le POCC situé au CERN. Les données d'AMS sont transmises via satellite à MFSC - Marshall Space Flight Center (Alabama), puis au CERN. Les physiciens du LAPP ont participé aux premières prises de données. Ces premières données nous ont d'abord permis de valider et de vérifier le comportement et les performances en vol du calorimètre. Ainsi, il a été possible de vérifier dès la mise sous tension (3 heures après l'installation d'AMS sur l'ISS) que 100 % des voies électroniques Front-End fonctionnaient et d'afficher un premier si-

gnal de physique. L'électronique de lecture se comporte de façon nominale que ce soit en termes de gain, de piédestal et de bruit. Un exemple est montré par les figures 5a 5b et 5c représentant les variations des piédestaux ou les rapports de gain avec les températures sur la station spatiale. Les mesures obtenues sont conformes aux performances mesurées sur Terre.

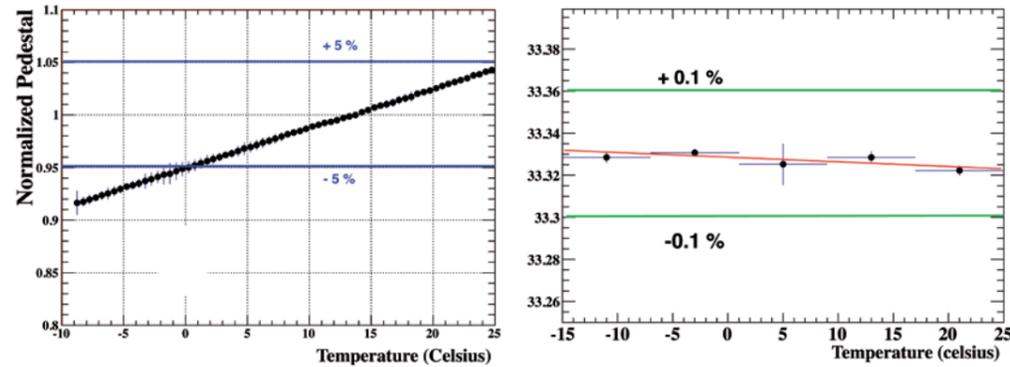
Les performances des PMTs en termes de « bruit », taux de déclenchement, variations avec la température de l'électronique, sont contrôlées et stockées dans une base de données installée au Centre de Calcul de Lyon (CC). En résumé le calorimètre et son système de lecture fonctionnent idéalement. Après deux ans de vie dans l'espace, seulement deux PMTs sur 324 sont défectueux (un l'était déjà avant le décollage). En vue de la préparation à l'analyse, un système automatique de transfert des données réduites du CERN au CC a été mis en place ; cela représente un volume d'environ 3 TeraOctets par an. De même les logiciels officiels de reconstruction et d'analyse ont été installés au CC.

Les noyaux d'hydrogène et d'hélium constituent respectivement 88 % et 10 % des rayons cosmiques. Ces noyaux sont très utiles pour égaliser la réponse des PMTs quand ils sont au minimum ionisant (MIP) ; leur statistique est telle qu'il est possible de suivre le signal du MIP canal par canal toutes les 3 heures. Plus généralement, un algorithme qui identifie les



FIGURES
5A, 5B, 5C

Variation des températures pour chaque face du calorimètre sur une année (fig. 5a haut). Variation des piédestaux avec la température (fig. 5b en bas à gauche). Variation du rapport de gains de l'électronique Front End avec la température (fig 5c en bas à droite).



noyaux au minimum ionisant et reconnaît le point de départ du développement de la gerbe hadronique (Apex) a été développé au LAPP. Il permet de mesurer la charge des noyaux dans le calorimètre avec une précision de 6 % et contribue à la mesure globale de la charge dans AMS (figure 6). Grâce à ces mesures appliquées jusqu'aux noyaux d'oxygène, on peut contrôler la linéarité de la mesure en énergie avec les données en vol à basse énergie.

Une des missions du calorimètre est de pouvoir identifier les électrons et les positons et de rejeter en particulier les protons qui peuvent contrefaire la réponse d'un positon. Dans un premier temps, la recherche de l'Apex permet d'éliminer les protons qui commencent une gerbe hadronique tardivement. Puis des variables discriminantes utilisant les propriétés des gerbes électromagnétiques dans les dimensions longitudinales et transverses ont été développées au LAPP et incluses dans le software officiel de reconstruction de la gerbe. Ces variables sont ensuite utilisées dans un estimateur multi variable (Ecal Standalone Estimator- ESE) basé sur la méthode

d'arbres de décision (BDT) qui a été développé au LAPP.

Pour ce faire, le BDT a été entraîné dans un premier temps avec des données en vol, où les électrons et les protons sont sélectionnés grâce à la redondance d'AMS en utilisant le détecteur à radiation de transition (TRD) et le trajectographe. Au-delà de 100 GeV, comme la statistique des données est trop faible, les entraînements utilisent des événements simulés et « repondérés » pour reproduire au mieux les données. Les performances de l'estimateur ECAL à haute énergie sont montrées sur la figure 7. Cet estimateur offre le meilleur pouvoir discriminant d'AMS au-delà de 300 GeV. En combinant les trois détecteurs : TRD, trajectographe et ECAL, des rejections de l'ordre du million pour une efficacité de 90 % sont atteintes pour des énergies inférieures à 100 GeV.

La mesure du rapport de positons sur la somme de positons et électrons a été la priorité dans AMS-02 car cette mesure est très sensible à la présence de sources primaires de positons, d'origine astrophy-

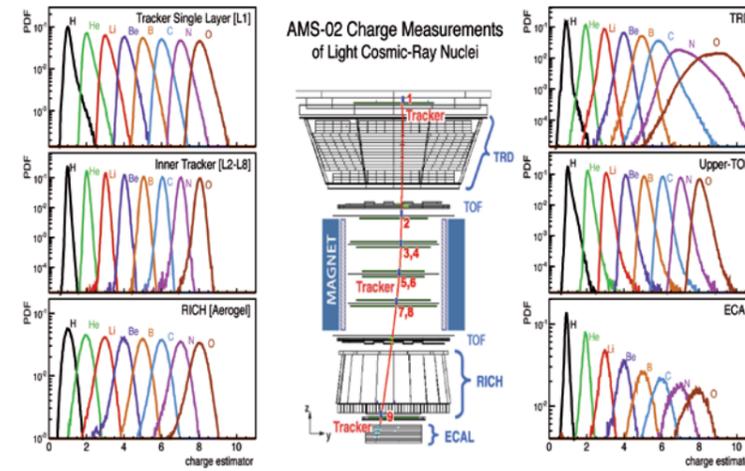


FIGURE 6

Mesure de la charge dans AMS à travers les différents détecteurs dont le calorimètre, et vue d'un événement mesuré dans l'espace.

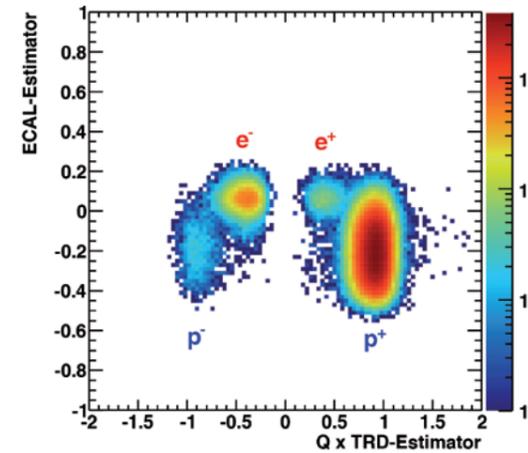
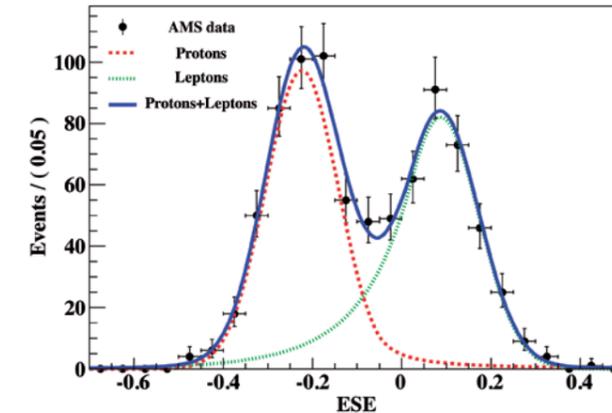


FIGURE 7

A gauche, séparation hadron/lepton à l'aide des estimateurs du calorimètre (ESE) et du TRD pour des énergies comprises entre 50 et 100 GeV. A droite, distribution de l'estimateur du calorimètre (ESE) pour les données AMS dans le dernier bin en énergie 260-350 GeV, correspondant à 18 mois de prise de données. Les composantes protons (courbe rouge) et leptons (courbe verte) sont estimées à partir de distributions « template » construites avec les données.

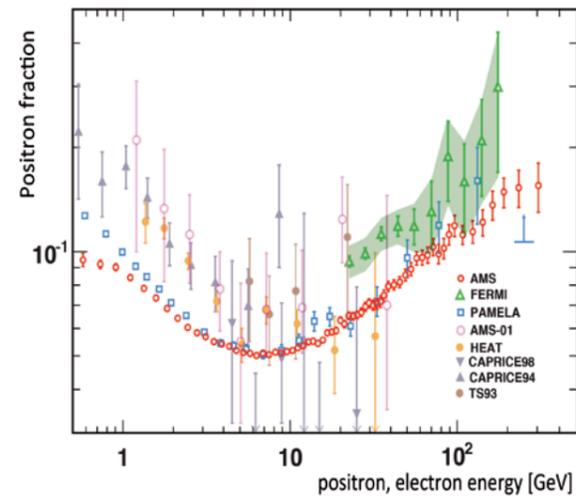


sique ou de Nouvelle Physique comme la matière noire. De plus, elle ne nécessite pas de mesurer les acceptances du détecteur car au premier ordre elles sont identiques pour les électrons et les positons. La fraction positronique a été mesurée au LAPP en utilisant l'estimateur ESE. Pour chacun des 28 bins en énergie de 1,5 à 350 GeV, une modélisation de la distribution d'ESE pour les protons et les électrons est obtenue en sélectionnant les événements indépendamment avec le TRD et le trajec-

tographe. Ensuite, les nombres de protons, positons et d'électrons sont extraits grâce à un ajustement de ces modèles sur les données de vol comme illustré sur la figure 7. Puis la confusion de charge entre électrons et positons a été estimée à la fois sur les données de tests en faisceaux et sur les données simulées, en collaboration avec Fernando Barao, professeur du LIP et visiteur au LAPP fin 2012. Au final, des résultats obtenus au LAPP ont validé avec une sensibilité statistique comparable,

FIGURE 8

Fraction de positrons mesurée par AMS (18 mois de données) entre 0.5 et 350 GeV comparée aux mesures de Pamela et de Fermi.



ceux obtenus avec une méthode indépendante s'appuyant sur l'estimateur du TRD (figure 8).

En vue de l'interprétation des données d'AMS et en étroite collaboration avec le LAPTh, des membres du groupe AMS-LAPP ont développé une partie du générateur MicrOmegas en incluant les spectres d'électrons, positons, antiprotons, et gamma à la source des produits d'annihilations de matière noire, puis les effets de propagations et les différents modes (effet de polarisation du boson W). Grâce à ce générateur, il est possible de se placer dans un modèle théorique particulier (CMSSM, NMSSM, extra-dimension, etc.) ou un modèle moins contraint en fixant les rapports d'embranchement. De même, il est possible de tester différents modèles de propagation ou de les contraindre avec les prochaines mesures d'AMS telle que la mesure du rapport des flux de Bore sur Carbone. Une illustration de travail préliminaire d'interprétation avec MicrOmegas est donnée sur la figure 9, où différentes masses de neutralinos sont données pour une configuration de rapport d'embranchement d'annihilation de 50 % en paire (τ^+ , τ^-) avec différents facteurs d'amplification (boost factor) pour ajuster les données.

PERSPECTIVES ET STRATÉGIE POUR 2014-2018

Au-delà de la mesure de la fraction de positons, plus d'informations sont portées par la mesure respective des flux de positons et d'électrons. Ces mesures, qui peuvent être complétées par la mesure du flux d'antiprotons, mènent d'une part à un travail pour améliorer la prédiction du fond cosmique d'origine standard ; d'autre part, une fois le fond et son incertitude maîtrisés, un travail d'interprétation sera conduit sur l'existence de sources de positons d'origine conventionnelle comme les pulsars ou d'origine exotique comme l'annihilation de matière noire.

Une période faste s'ouvre pour AMS : le détecteur est pleinement opérationnel et enregistre plus de 1 milliard d'événements par mois. La statistique accumulée sur quelques années permettra d'effectuer des mesures de précision sur une grande gamme de particules (p, \bar{p}, e^+, e^-) et noyaux (He, mesure du rapport B / C, anti He, anti C, ...).

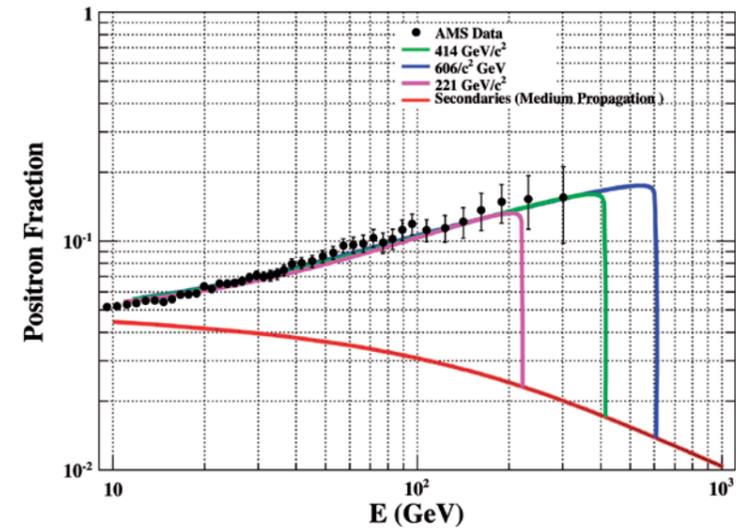


FIGURE 9

Interprétation préliminaire avec MicrOmegas des données d'AMS en supposant que l'excès provienne d'annihilation de neutralinos et un modèle intermédiaire de propagation (courbe rouge). Les rapports d'embranchement en paire de (τ^+ , τ^-), paires de (W^+W^- ou ZZ), et paires de (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$) étant respectivement de 50 %, 25 % et 25 % et des facteurs d'amplification de 55, 200 et 270 pour des masses de neutralinos de respectivement 221, 414 et 606 GeV/c².

PUBLICATIONS IMPORTANTES

- [1] *The AMS-02 lead-scintillating fibres electromagnetic calorimeter*, C. Adloff, L. Basara et al., soumis en septembre 2012, accepté en février 2013, Nuclear Instruments and Methods A714, (2013) 147
- [2] *Performance of the AMS-02 electromagnetic calorimeter in space*, S. Rosier-Lees, Journal of Physics: Conference Series 404 (2012) 012034
- [3] *Indirect search for dark matter with micrOMEGAs2.4*, S. Rosier-Lees et al., Comput. Phys. Commun. 182 (2011) 842

S. Rosier-Lees, *The AMS ECAL design and performance*, Conférence CALOR 2012, Santa Fe, Etats-Unis, juin 2012

S. Rosier-Lees, *AMS-02: a high Energy Physics detector in space*, Trans-European School of High Energy Physics, Petnica, Serbie, juillet 2012

S. Rosier-Lees, *AMS-02: a status report*, Meeting DMastroLHC, LAPP, novembre 2012

S. Rosier-Lees, *Overview and challenges for AMS-02*, Nuclear Physics for Galactic Cosmic Rays in the AMS-02 Era Workshop, LPSC, Grenoble, France, décembre 2012

PRÉSENTATIONS À DES CONFÉRENCES

J.-P. Vialle, *Colloque France-China Particle Physics Laboratory (FCPPL)*, Huazhong normal university, Wuhan, Chine, mars 2009

J.-P. Vialle, *AMS - a cosmic ray explorer*, 1st Institute of Advanced Studies School on Particle Physics and Cosmology, Nanyang Technological University, Singapour, janvier 2012

POUR EN SAVOIR PLUS

Site de la NASA : <http://ams.nasa.gov/>
Site AMS02 : <http://www.ams02.org/>
Site de l'expérience AMS au LAPP :
<http://lapp.in2p3.fr/spip.php?rubrique157>