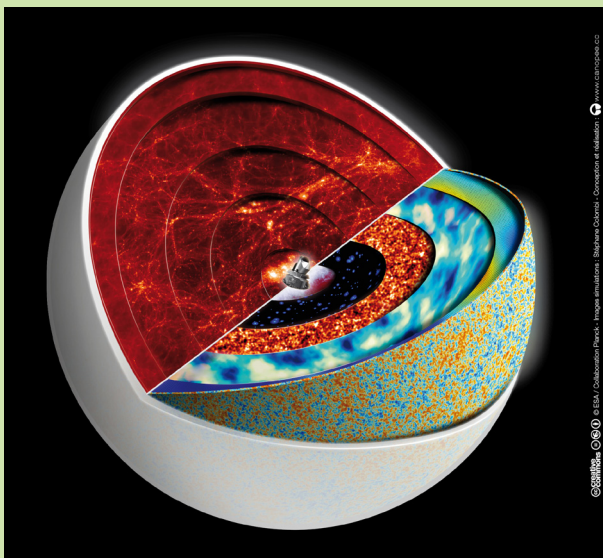


Astroparticules et Cosmologie

Les chercheurs et personnels techniques du LPSC participent à plusieurs projets qui couvrent un très vaste domaine scientifique, de la détermination des paramètres cosmologiques à la recherche directe des particules de la matière sombre, de l'étude des rayonnements cosmiques d'origine galactique à celle des astroparticules aux énergies les plus hautes. Chacun de ces projets de la thématique Astroparticules et Cosmologie a franchi une étape très importante de sa vie dans les deux dernières années.

Le satellite Planck, lancé en 2009, a rendu publique une nouvelle moisson de résultats scientifiques sur l'étude du rayonnement fossile (ou CMB pour Cosmic Microwave Background) avec une résolution et une sensibilité sans précédent. Ces résultats ont été unanimement salués comme constituant un bond qualitatif considérable dans le domaine de la cosmologie observationnelle. Ils ont permis de contraindre précisément les paramètres cosmologiques tels que la géométrie et le contenu de l'Univers mais également la dynamique de la période d'inflation.



Le spectromètre AMS-02 a lui été lancé par la navette spatiale et installé sur l'ISS en 2011. Les premiers résultats étaient également très attendus car d'une richesse et d'une précision inégalées. On peut citer par exemple l'étude du flux de positrons qui constitue un premier test avec les données d'AMS-02 de la présence d'antimatière dans l'Univers. De nombreux autres résultats sont bien entendu encore à venir et constitueront sans nul doute un essor considérable de notre connaissance du rayonnement cosmique.

Ce bond qualitatif et quantitatif, l'observatoire Pierre Auger l'avait déjà franchi en 2008 alors qu'il terminait son installation en Argentine, atteignant son acceptation optimale qui dépassait par plus d'un facteur dix celle des expériences antérieures. Ceci en fait le plus grand détecteur de rayons cosmiques du monde, tout en bénéficiant d'un dispositif considérablement plus précis et complet que ses prédécesseurs. Depuis, chaque année a démontré cette prédominance en termes de résultats scientifiques. Cependant, comme toute grande avancée scientifique, les réponses apportées soulèvent à leur tour de nouvelles questions qui ne pourront être résolues que grâce à d'autres progrès qualitatifs dans les observations. Ainsi la collaboration Pierre Auger étudie la possibilité de compléter

et d'améliorer la mesure des rayons cosmiques aux plus hautes énergies pour une seconde phase du projet au-delà de 2015.

En effet, les avancées scientifiques sont toujours précédées de progrès technologiques. Ainsi le projet MIMAC d'un détecteur directionnel, dont le but ultime est la recherche directe des particules de la matière sombre, a également franchi une frontière de sensibilité dans la mesure trajectographique des reculs nucléaires de très basse énergie. Au-delà des résultats spectaculaires qui seront détaillés plus loin, le fait marquant de ces deux dernières années a été l'installation d'un prototype dans le laboratoire souterrain de Modane et son exploitation.

De même, l'étude du rayonnement fossile au-delà du domaine de sensibilité accessible au satellite Planck, nécessite le développement de nouveaux capteurs basés sur des matrices d'antennes d'un nouveau type. C'est le but du projet NIKA qui teste ces nouveaux types de détecteurs, conçus à l'Institut Néel en collaboration avec le LPSC, sur les radiotélescopes de l'IRAM près de Grenoble. Évidemment, les ambitions de NIKA vont au-delà d'un développement technologique et visent à terme à obtenir la sensibilité et la haute résolution angulaire nécessaires à l'étude des modes polarisés du CMB et à celle angulaire des amas de galaxies et de l'époque de ré-ionisation de l'Univers.

Chacun des projets cités implique évidemment une contribution technique importante des services du laboratoire pendant les étapes de R&D mais également de maintenance. Les physiciens ne sont pas en reste, car ils interviennent en amont à la définition et à l'optimisation des instruments, puis dans l'analyse des données et leur interprétation y compris dans l'étude des implications théoriques.

Un exemple de ce développement en synergie est illustré par les activités autour du projet LSST : les mêmes personnes qui travaillent sur des aspects très théoriques de la cosmologie quantique à boucles mènent de front le développement d'une nouvelle méthode de reconstruction des décalages vers le rouge ainsi que la conception, la validation et la construction d'un dispositif d'étalonnage de l'immense caméra qui équipera le télescope.

Ainsi, les aspects «Astroparticules et Cosmologie» du LPSC couvrent un très vaste spectre tant sur le plan des thématiques que sur celui de la nature des activités mises en jeu. Cette large palette va vous être présentée dans les pages qui suivent.

Rayonnement cosmique de haute énergie

L. Derome, A. Barrau, M. Buénerd, B. Coste, W. Gillard, D. Maurin, J.-S. Ricol
O. Bourrion, L. Eraud, J.-P. Scordilis, Service Électronique.
F. Melot, Service Informatique.

A century after the discovery of cosmic rays, their origin and propagation processes still evade us. The LPSC participates in two major experiments of direct detection covering the GeV-PeV energy range: AMS-02 on the International Space Station (since 19 May 2011), and CREAM, a balloon-borne experiment flown six times in Antarctica. Involved earlier with the detector development and construction, the group main activities are data analysis and their interpretation.

Mesure du rayonnement cosmique

L'expérience AMS¹

Le rayonnement cosmique galactique (RCG) a été découvert il y a maintenant un siècle. Il s'agit de particules énergétiques, principalement des noyaux ionisés qui ont pu être produits et accélérés à des énergies relativistes dans les fronts de chocs associés à des explosions d'étoiles (supernovæ). Ces particules se propagent ensuite dans la galaxie et notre système solaire. Le flux de particules frappant la partie supérieure de l'atmosphère terrestre est de l'ordre de 1000 particules par m² et par seconde.

Bien qu'étudié depuis un siècle, le RCG est toujours un domaine scientifique de grande activité tant d'un point de vue expérimental que théorique. En effet, de nombreuses questions sont toujours sans réponses quant à son origine et aux processus de propagation. De plus, certaines composantes rares du RC peuvent permettre de sonder la présence de matière noire dans notre Galaxie via les particules produites lors de leur annihilation.



Fig. 1 : Détecteur AMS-02 installé sur la station spatiale.

Notre groupe est impliqué dans la physique du RCG depuis 1997 avec la participation du laboratoire à AMS-01 (vol précurseur d'AMS-02) à bord de la navette spatiale. L'objectif d'AMS-02 (sur la station spatiale internationale) est la mesure « définitive » de la composition du RC d'énergie entre la centaine de MeV et le TeV. Un des éléments essentiels pour l'identification des particules du RCG est l'imageur Cherenkov (RICH) d'AMS-02, qui permet la mesure de la charge et de la vitesse des particules traversant le détecteur. Le LPSC a été impliqué dans sa

¹ Alpha Magnetic Spectrometer

conception et sa construction. Il a aussi eu la responsabilité de la caractérisation, des tests et de l'intégration des photomultiplicateurs, ainsi que de la réalisation de l'électronique front-end. Le lancement de la navette spatiale Endeavour STS-134 embarquant AMS-02 a eu lieu le 16 mai 2011. Le 19 mai, AMS-02 était installé sur la station spatiale (Fig. 1). Le détecteur fonctionne depuis de manière continue. Le contrôle de l'instrument est effectué depuis le CERN à Genève.

Le groupe du LPSC travaille actuellement sur les données de vol d'AMS-02. En premier lieu, nous avons travaillé à la caractérisation des détecteurs et l'étude de leurs performances. Un exemple est donné par l'utilisation des protons du RCG pour réaliser une cartographie complète de l'indice de réfraction du radiateur aérogel utilisé dans le RICH d'AMS-02. En effet, la connaissance précise de l'indice du radiateur est essentielle pour atteindre les performances en termes de reconstruction de vitesse et de charge. Ici, des protons de haute rigidité ($R > 50$ GV) sont utilisés pour estimer directement l'indice de réfraction en chaque point du radiateur. Sur la carte obtenue (Fig. 2), les différentes tuiles qui composent le radiateur aérogel apparaissent clairement.

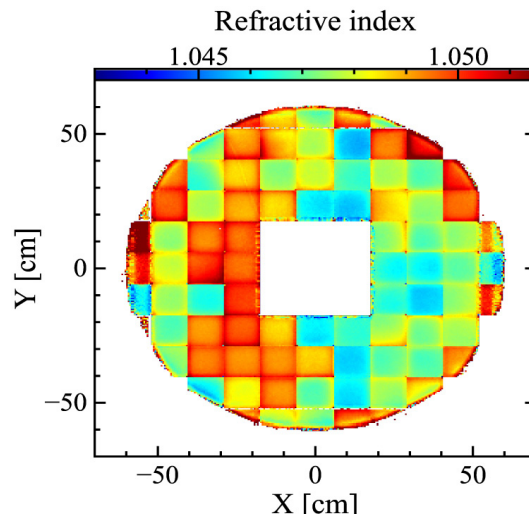


Fig. 2: Carte de l'indice de réfraction de l'AGL du RICH reconstruit à partir des données d'AMS-02.

Concernant l'exploitation des données, plusieurs analyses sont menées en parallèle. L'une d'elles est l'étude du RCG à basse énergie en lien avec l'activité solaire. La figure 3 représente l'évolution dans le temps du flux de protons à différentes rigidités. Ce résultat montre qu'AMS-02 permet, pour la première fois, une mesure fine de l'influence de l'activité solaire sur le RCG : les pics, en bleu sur la figure, correspondent à des éruptions solaires (émission de particules accélérées par le soleil), suivies par une diminution du flux, appelé décroissance « Forbush » (cet effet est en quelque sorte un écrantage du RCG par le plasma éjecté par le soleil).

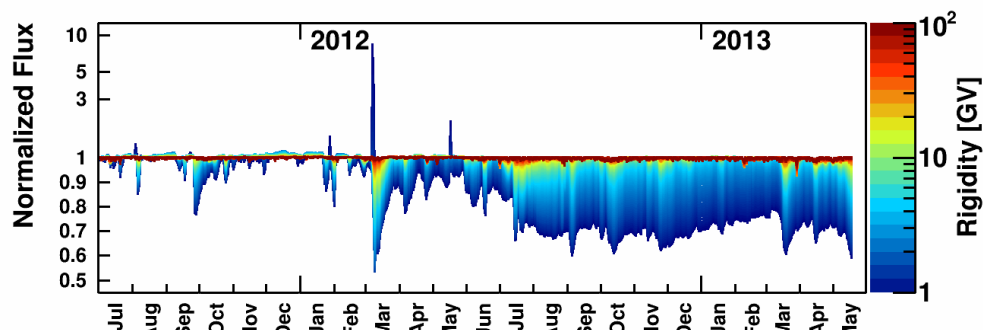


Fig. 3: Variation temporelle du flux de protons du RCG (normalisé à un flux de référence). À chaque couleur est associée une énergie (voir code couleur sur la droite de la figure).

Nous travaillons de plus sur la mesure de la fraction de positrons. Les résultats d'AMS-02, publiés en avril 2013 (Fig 3), dépassent le domaine en énergie précédemment sondé et viennent confirmer, avec une précision accrue, l'excès de positrons. Si cette mesure ne laisse place à aucun doute quant à l'existence de cet excès, son origine reste en revanche inexplicée. Il pourrait être le fait de pulsars proches de notre galaxie, ou être la signature de l'existence de particules de matière noire. Notre groupe s'est intéressé à l'évolution dans le temps des flux d'électrons et positrons (et de la fraction de positrons) à basse énergie. La mise en place d'une analyse reposant sur l'utilisation du RICH et du TRD (pour identifier les électrons/positrons dans le RCG) a permis de montrer que l'activité solaire avait des effets similaires sur les composantes électron et positron, et donc que la fraction de positrons était stable dans le temps.

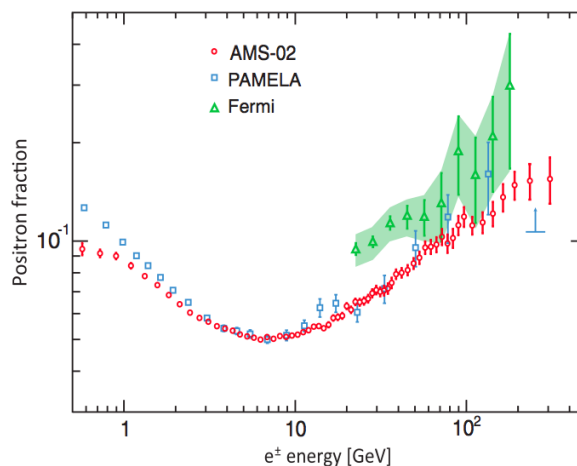


Fig. 4: Fraction de positrons mesurée par l'expérience AMS-02.

Expériences CREAM et ISS-CREAM

L'expérience CREAM est une expérience embarquée sur ballon stratosphérique. Son objectif est de mesurer le RCG entre 1 TeV et 1 PeV, domaine d'énergie complémentaire de celui d'AMS-02. Ces mesures permettront de mieux comprendre les processus de production et de propagation du RCG.

Pour l'ensemble de la physique de CREAM, l'identification des éléments (mesure de la charge) est une tâche centrale. Le groupe du LPSC, invité à rejoindre cette collaboration, a construit en 2006 un imageur Cherenkov appelé CherCam, dérivé du RICH d'AMS-02. CherCam a été embarqué sur quatre campagnes de vol (Fig. 5) en Antarctique : CREAM III, IV, V, et VI.



Fig. 5: Lancement de CREAM lors de la campagne de vol 2010-2011.

Depuis la mise en service du détecteur CherCam, le service électronique du laboratoire a participé aux opérations de maintenance de l'instrument, de récupération du détecteur après chaque vol, ainsi qu'au reconditionnement et à la réintégration de CherCam dans l'ensemble CREAM.

Le travail de thèse de Benoît Coste a porté sur l'analyse des mesures prises lors de ces vols, en particulier sur la reconstruction des flux des noyaux B, C, N, O et du rapport B/C dans le RCG (Fig. 6) pour la physique de la propagation du RCG. À haute énergie (typiquement le domaine de CREAM), le rapport secondaire sur primaire est dominé par la seule diffusion du rayonnement cosmique dans la galaxie alors qu'à plus basse énergie (domaine d'AMS) ce rapport est sensible à la diffusion mais aussi aux effets conjoints du vent galactique, de la réaccélération diffuse, et des interactions nucléaires. La mesure conjointe des rapports secondaire sur primaire par AMS et CREAM permet donc d'accéder aux différents processus régissant la propagation du RCG.

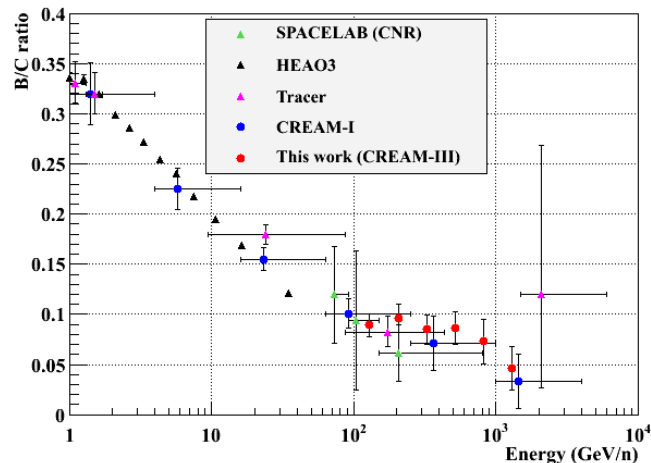


Fig. 6: Mesure du rapport B/C par l'expérience CREAM-III.

Pour le futur, une nouvelle évolution du programme CREAM est en cours : l'installation du détecteur dans une configuration simplifiée sur la station spatiale internationale. Ce nouvel instrument (ISS-CREAM), destiné à être installé sur l'ISS en 2014, permettrait d'accumuler une grande statistique sans atmosphère résiduelle, comme le fait actuellement AMS-02, mais à plus haute énergie. Le service électronique a développé des alimentations 12 kV pour les HPD² du calo-

² Hybrid Photo Detector

rimètre de CREAM. Ces modules ont été développés et réalisés au laboratoire et sont utilisés dans les campagnes de vol depuis CREAM VI. Ces modules ont été adaptés pour équiper ISS-CREAM.

Phénoménologie: RCG et Matière Noire

La physique du rayonnement cosmique galactique (RCG) et la recherche indirecte de matière noire font partie des objectifs majeurs de l'expérience AMS-02. Les abondances des ions du RCG mesurées au niveau de la terre sont des indicateurs des processus d'accélération (p. ex. dans les ondes de choc issues de l'explosion des supernovæ), de transport (interactions avec les champs magnétiques réguliers et turbulents de la Galaxie), et d'interactions du RCG avec le gaz du milieu interstellaire. Ces processus astrophysiques doivent être bien modélisés pour espérer mettre en évidence un signal de matière noire (particules gravitant dans le halo de notre Galaxie). La recherche indirecte de matière noire consiste ainsi à chercher dans le spectre des particules chargées (anti-protons, positrons) ou neutres (γ), dans la gamme d'énergie du GeV au TeV, un excès par rapport à la production astrophysique standard. Dans ce cadre, l'expérience AMS-02 (pour les espèces chargées) et le satellite Fermi-LAT ou les détecteurs Tcherenkov au sol (pour les γ), sont les meilleurs instruments.

Contraintes sur les modèles de propagation et base de données publique CRDB

La phénoménologie du RCG s'intéresse aux paramètres des modèles de propagation utilisant: les espèces dites primaires (p, He, C, O, etc.) qui sont les plus abondantes et qui tracent les sources du RCG, et espèces dites secondaires (2 H, ^3He , B, etc.) qui tracent les mécanismes de transport dans la galaxie. Pour tirer parti au mieux des mesures d'AMS-02 et de CREAM à venir, nous avons développé et utilisé (pour la première fois dans le rayonnement cosmique) un Markov Chain Monte Carlo (MCMC) pour contraindre les paramètres de la propagation. Récemment, nous nous sommes intéressés aux quatre isotopes les plus légers du RCG (^1H , ^2H , ^3He , ^4He). Nous avons pu montrer que l'utilisation des données existantes, bien que peu précises et rares (Fig. 7), conduisait à des contraintes similaires à celles données par le rapport B/C habituellement utilisé.

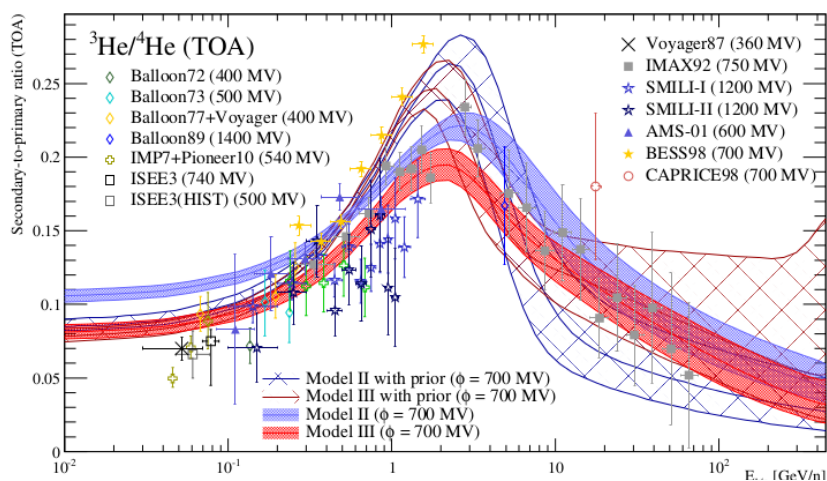
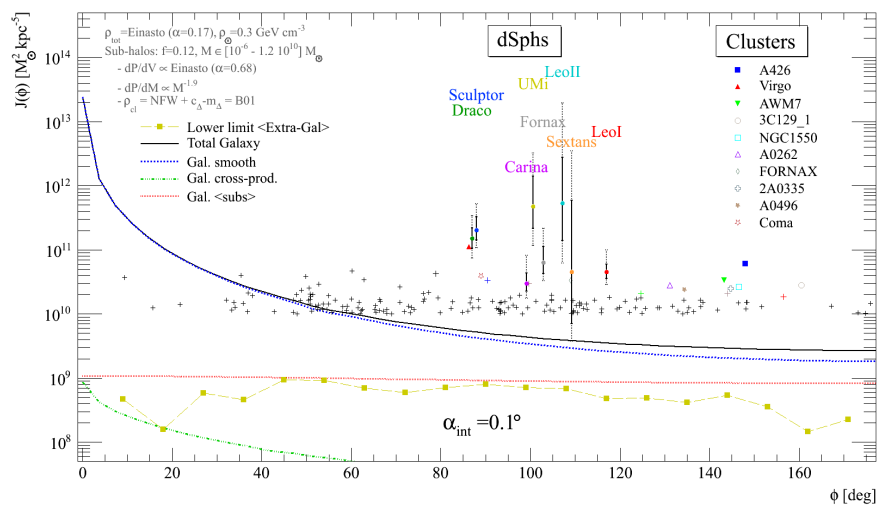


Fig. 7.: Rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$ mesuré par les expériences avant AMS-02 (symboles). Les enveloppes des courbes correspondent aux différents types de modèles de propagation autorisés (Coste et al., 2012).

En parallèle à cette activité, nous avons développé avec le service informatique du laboratoire, une base de données (CRDB) des espèces chargées du RCG (e^- , e^+ , et noyaux jusqu'à $Z = 30$), pour des énergies en-deçà de quelques TeV/nucléon (ceci correspond à plus de deux cents expériences dans deux cents publications). Chaque donnée est attachée à un instrument (contenant sa description) et à une référence bibliographique. Les données peuvent être extraites en fonction d'une sélection sur la quantité mesurée, la gamme d'énergie, le nom des expériences et la date de la mesure. En retour, l'utilisateur accède à des fichiers ASCII, des macros ROOT et les entrées BibTEX pour les publications associées. Un dernier point original de cette base est la possibilité d'ajouter de nouvelles données à l'aide d'une interface web, en faisant un véritable outil collaboratif pour la communauté du RCG. Cette base est très appréciée des utilisateurs (nombreux dans la collaboration AMS-02), avec une centaine de visites par mois.

Recherche de matière noire en γ et code public CLUMPY

Les meilleures cibles pour la détection de matière noire en γ au TeV (avec des détecteurs comme H.E.S.S.) doivent être proches, avoir une forte densité de matière noire, et peu de fonds astrophysiques. À cet égard, les galaxies naines sphéroïdes (ayant un fond astrophysique quasi-nul) semblent être les meilleures candidates. Ces deux dernières années, nous avons aussi étudié la détectabilité des amas de galaxies (plus grandes structures virialisées de l'Univers) par les observatoires γ présents et futurs. En utilisant le catalogue X le plus complet et précis à ce jour (MCXC) pour obtenir les profils de matière noire, nous avons pu recalculer leurs facteurs astrophysiques d'annihilation (appelé facteur J) et les comparer à ceux obtenus pour les galaxies naines sphéroïdes (Fig. 8). Si les instruments actuels n'ont toujours pas mis au jour la matière noire, les perspectives sont intéressantes puisque l'on commence à toucher du doigt une partie de l'espace des paramètres de cette nouvelle physique. Cette étude nous a aussi permis d'établir dans quelle condition une stratégie d'empilement du signal (issu des milliers d'objets du catalogue MCXC) devenait intéressante pour améliorer les limites d'exclusion de la matière noire. Pour l'ensemble de ces calculs, nous avons développé le code CLUMPY, premier et seul code public de ce domaine.



au signal attendu des huit galaxies naines sphéroïdes classiques (tiré de Charbonnier et al., 2011). Les symboles colorés sans barre d'erreurs correspondent aux dix amas de galaxies les plus lumineux, et les symboles + aux amas de galaxies dont le J est plus grand que $10^{10} M_{\text{sol}}^2 \text{kpc}^{-5}$ (Nezri et al., 2012).

Pour en savoir plus sur la phénoménologie du RCG

« [Mesure et phénoménologie du RC avec l'expérience CREAM](#) », Benoît Coste, thèse UJF (2012).

« [Constraining GCR parameters with \$Z \leq 2\$ nuclei](#) », Coste, Derome, Maurin, Putze, A&A 539, A88 (2012).

Pour en savoir plus sur la recherche indirecte de matière noire

« [Disentangling cosmic-ray and dark-matter induced \$\gamma\$ -rays in galaxy clusters](#) », Maurin, Combet, Nezri, Pointecouteau, A&A 547, 16 (2012).

« [\$\gamma\$ -rays from annihilating dark matter in galaxy clusters: stacking versus single source analysis](#) », Nezri, White, Combet, Hinton, Maurin, Pointecouteau, MNRAS 425, 477 (2012).

« [Decaying dark matter: a stacking analysis of galaxy clusters to improve on current limits](#) », Combet, Maurin, Nezri, Pointecouteau, Hinton, White, PRD 85, 063517 (2012).

Outils publics

<http://lpsc.in2p3.fr/crdb>: « [A database of charged cosmic rays](#) », Maurin, Melot, Taillet, arXiv:1302.5525.

<http://lpsc.in2p3.fr/clumpy>: « [CLUMPY: A code for \$\gamma\$ -ray signals from dark matter structures](#) », Charbonnier, Combet, Maurin, CPC 183, 656 (2012).

Rayons cosmiques d'ultra haute énergie

C. Bérat, M. Avenier, J. Chauvin, D-H. Koang, D. Lebrun, S. Le Coz, K. Louedec, F. Montanet, A. Stutz, M. Tartare
P. Stassi, C. Bernard, M. Chala, M. Marton, J.-F. Muraz, Service Détecteurs et Instrumentation
G. Dargaud, F. Melot, Service Informatique
J. Bouvier, E. Lagorio, J.-P. Scordilis, Service Électronique

Research on Ultra High Energy Cosmic Rays is carried out by our team within the Pierre Auger Collaboration. The team participates to the monitoring of the experiment, as well as to the observatory upgrade studies. Data analysis is performed, in particular to search for high energy cosmic neutrinos. The team is also involved in R&D for shower radio detection in the framework of the P. Auger Observatory as well as on a small scale and local project aiming at the detection of neutrinos interacting in mountains.

Introduction

L'activité de recherche du groupe porte sur les rayons cosmiques les plus énergétiques et sur les moyens de les détecter. L'étude de ces rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE) présente deux intérêts majeurs : elle permet d'explorer un domaine d'énergie inaccessible aux accélérateurs et elle ouvre la voie à l'utilisation des particules cosmiques chargées dans l'astronomie.

Le groupe fait partie de la collaboration internationale Pierre Auger (19 pays), à l'origine du plus grand détecteur de rayons cosmiques en fonctionnement, l'Observatoire Pierre Auger. Situé dans la pampa argentine, cet observatoire est conçu pour mesurer à la fois le développement longitudinal dans l'atmosphère et la distribution latérale au niveau du sol des gerbes générées par les interactions des particules cosmiques primaires avec l'atmosphère. Les particules chargées et les photons qui atteignent le sol sont échantillonnés avec le Détecteur de Surface (SD) constitué d'un réseau de 1660 détecteurs Cherenkov (WCD) autonomes, répartis sur 3000 km². Chaque WCD contient 12 m³ d'eau pure et est équipé de 3 photomultiplicateurs (PM) qui détectent la lumière Cherenkov émise dans l'eau. La lumière de fluorescence produite dans l'atmosphère par les particules chargées de la gerbe est détectée, lors de nuits claires sans lune, par le Détecteur de Fluorescence (FD) formé de 27 télescopes répartis en quatre points autour du réseau. Les prises de données ont démarré en 2004, le déploiement des détecteurs s'est achevé en 2008. L'Observatoire a ensuite été complété pour étendre le domaine de détection à plus basse énergie.

Durant les deux dernières années, de nombreux résultats ont été publiés par la collaboration P. Auger, en particulier concernant l'origine des RCUHE (études des anisotropies, recherche de sources) et leur nature (interprétation de la profondeur du maximum de développement de la gerbe, limites sur le flux de neutrinos). Lors de la conférence ICRC³ en juillet 2013, les derniers résultats ont été présentés. Avec une augmentation de l'exposition de 50% en deux ans, celle-ci a atteint 32000 km².sr.an mi 2013 ; la détermination de l'énergie des gerbes a été entièrement revue ; le spectre en énergie qui combine les résultats de quatre analyses distinctes couvre une gamme de 0,3 EeV (1 EeV = 10¹⁸ eV) à plus de 100 EeV (4 événements au dessus de 100 EeV) avec une précision remarquable.

³ International Cosmic Ray Conference

Les données de l'expérience Pierre Auger permettent d'étudier les interactions hadroniques aux énergies extrêmes. Les nombreuses analyses et les résultats importants publiés démontrent le riche potentiel en termes de physique des interactions fondamentales. La tâche d'analyse au sein de laquelle ces études sont menées est coordonnée par un des membres du groupe du LPSC. Les modèles hadroniques qui sont développés et utilisés pour l'étude des grandes gerbes atmosphériques ont été confrontés aux données récentes du LHC et ont été modifiés pour mieux reproduire certaines distributions. La comparaison entre les observables mesurées par l'Observatoire Pierre Auger et les prédictions des modèles nous montre que ceux-ci doivent encore être amendés pour reproduire des données toujours plus précises. Le nombre de muons dans les gerbes, leur profondeur de production dans l'atmosphère, etc. sont des observables très sensibles aux détails des interactions hadroniques d'UHE. La confrontation, par modèles interposés, des données précises, directes et détaillées des expériences sur collisionneur d'une part, et des observables des études des RCUHE d'autre part, certes plus indirectes mais près d'un facteur 10 à 100 plus haut en énergie dans le centre de masse, promet de rapides progrès dans ce domaine de physique exclusif.

En été 2013, de nouveaux critères de déclenchement ont été implémentés dans chaque WCD, abaissant ainsi le seuil en énergie pour lequel le SD est totalement efficace de 3 à 1 EeV, et augmentant le taux de gerbes détectées autour de l'EeV, ce qui ouvre des perspectives pour la précision des résultats dans cette gamme d'énergie.

Le groupe est engagé dans le contrôle du fonctionnement du réseau de surface de l'Observatoire, et dans le monitoring de l'atmosphère. Depuis plusieurs mois, la volonté d'améliorer les performances de l'Observatoire, en particulier pour une meilleure identification des rayons cosmiques primaires, a entraîné l'émergence de différents projets au sein de la collaboration. Le groupe participe d'une part au projet d'amélioration et de rénovation de l'électronique du SD, indispensable pour l'évolution de celui-ci, et d'autre part au projet de modifications des WDC (segmentation du volume de détection). Nous participons à la recherche de neutrinos cosmiques d'ultra haute énergie dans les données de l'Observatoire, et sommes impliqués dans l'étude des interactions hadroniques aux énergies extrêmes. Depuis plusieurs années nous collaborons à des programmes de R&D sur la détection radio des gerbes atmosphériques; cette activité est menée au sein d'Auger via les projets AERA⁴ et EASIER⁵,

Les connaissances acquises dans la recherche de neutrinos d'ultra haute énergie (ν UHE) d'une part, et dans le développement de stations de détection autonomes d'autre part, a permis de mettre en œuvre, en site isolé de montagne, le « télescope » NOY⁶ dédié à l'observation des gerbes atmosphériques horizontales induites par l'interaction des ν cosmiques dans les montagnes proches de Grenoble.

⁴ Auger Engineering Radio Array

⁵ Extensive Air Showers Identification with Electron Radiometers

⁶ Neutrino Observatory

Participation au fonctionnement de l'Observatoire P. Auger

Contrôle en ligne du détecteur de surface

Le SD doit fonctionner en continu pendant plusieurs années. Un outil de contrôle en ligne (monitoring) a été développé pour faciliter la surveillance du bon fonctionnement de l'ensemble des détecteurs du site et permettre une identification rapide de tout problème. Le groupe contribue au développement du monitoring du SD depuis 2008. Ces deux dernières années, les contributions ont porté sur le développement d'outils de contrôle spécifiques des WCD équipés d'antennes radio d'EASIER, le traçage des PM qui présentent un fonctionnement anormal, le contrôle des taux de déclenchement de chaque WCD, particulièrement utile lors de l'implémentation de nouveaux triggers.

De récents développements concernent le contrôle de la qualité des données sur le long terme :

- suivi de l'évolution du réseau (repositionnement de détecteurs, destruction accidentelle de certains, remplacement...)
- évaluation de l'uniformité de la réponse du détecteur de surface et de l'évolution de cette réponse en fonction du temps, par l'affichage de paramètres mesurés par les PM et utilisés dans l'étalonnage des WCD
- contrôle du taux de déclenchement (global) du SD, qui reflète également l'évolution de la réponse du SD.

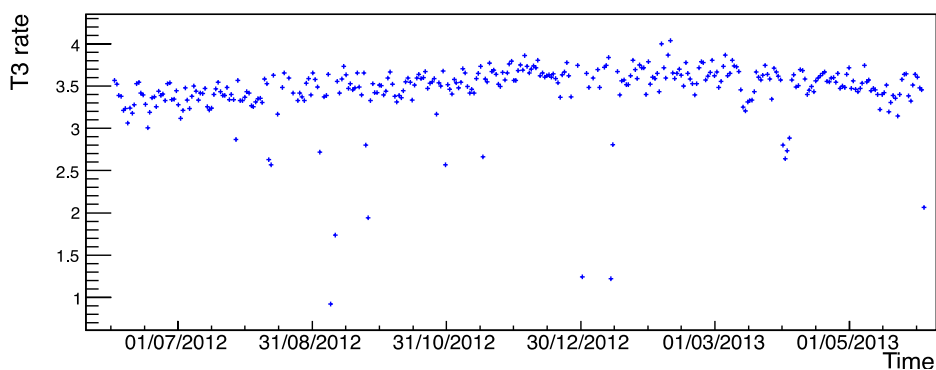


Fig. 1 : Taux de déclenchement du SD de juin 2012 à juin 2013.

Contribution à la caractérisation de l'atmosphère

La lumière de fluorescence issue de la désexcitation du diazote lors du passage des particules chargées des gerbes atmosphériques est détectée par les télescopes du FD. Le nombre de photons de fluorescence, émis principalement dans la gamme en longueurs d'onde 300-430 nm, est directement proportionnel à l'énergie déposée par la gerbe dans l'atmosphère. Il est donc primordial de bien reconstruire ces photons de fluorescence produits. L'atmosphère est utilisée ici comme un calorimètre géant en constante évolution. Afin de réduire autant que possible les incertitudes systématiques sur les mesures de fluorescence, les propriétés de l'atmosphère doivent être suivies continuellement. Les quantités physiques décrivant le caractère diffusant de l'atmosphère, telles que la profondeur optique ou la fonction de phase - ces deux quantités peuvent être comprises comme la mesure de la concentration et de la section efficace différentielle -, sont les plus fluctuantes au cours de la nuit. Les activités du groupe pour cette partie

se sont principalement axées sur les aérosols atmosphériques. Les aérosols sont de fines particules en suspension dans l'atmosphère, avec une taille de l'ordre du micromètre, et sont responsables d'une part importante de l'atténuation des photons dans la partie basse de l'atmosphère. Ces particules peuvent rester dans l'atmosphère plusieurs jours, voire plusieurs semaines, tout ceci dépendant de leur altitude, de leur composition chimique et des précipitations durant la même période. Afin d'étudier et de simuler l'effet des aérosols sur la propagation des photons de fluorescence, trois quantités physiques sont nécessaires: la distance moyenne parcourue par un photon avant de rencontrer un aérosol, l'angle de diffusion et la répartition en altitude des aérosols. Ces informations ont été étudiées en estimant, respectivement, la profondeur optique des aérosols, la fonction de phase de diffusion des aérosols et la couche limite atmosphérique.

Études pour l'amélioration du détecteur au sol

L'Observatoire P. Auger prévoit de poursuivre ses recherches au-delà de 2015 avec pour objectifs l'interprétation de la suppression du flux de RCUHE observée au-dessus de 55 EeV, la détermination de la composition du flux et l'étude des interactions hadroniques aux plus hautes énergies. La collaboration étudie différentes possibilités pour améliorer le réseau de surface. Le but est d'obtenir de nouvelles observables permettant une meilleure caractérisation des gerbes atmosphériques aux plus hautes énergies couvertes par l'Observatoire, en particulier par la mesure des composantes muonique et électromagnétique de ces gerbes avec une précision aussi grande que possible.

Conception d'une nouvelle électronique

Pour assurer la séparation des muons et des électrons, on envisage soit d'ajouter de nouveaux détecteurs (scintillateurs, RPC) soit de modifier les WCD. L'acquisition des données du réseau de surface ainsi amélioré sera facilitée en remplaçant l'électronique actuelle de chaque WCD par une électronique moderne de pointe dont la fréquence d'échantillonnage est multipliée par 3 et possédant une meilleure résolution en temps. Cette nouvelle électronique fournira également les capacités nécessaires pour implémenter de nouveaux triggers. Un plan de développement avec une répartition des tâches entre les 15 instituts de la collaboration impliqués dans l'évolution de l'électronique du SD a été mis en place. L'élément clé en est la réalisation d'une nouvelle carte électronique unifiée pour chaque WCD, dont l'étude a été prise en charge par le LPSC.

Segmentation des détecteurs Cherenkov à eau

Les groupes français ont conçu et proposé une segmentation des détecteurs de surface qui permettrait d'élargir très notablement le programme scientifique de l'Observatoire. Le principe est d'avoir deux volumes de scintillation distincts, la partie inférieure étant plus sensible à la composante muonique de la gerbe qu'à la composante électromagnétique, celle-ci déposant son énergie dans la partie supérieure. Le LPSC étudie un prototype original permettant une séparation du volume d'eau minimisant les opérations de modifications des WCD.

R&D pour les observatoires du futur

Les instruments actuels tels ceux utilisés à l'Observatoire Pierre Auger observent les gerbes en détectant les particules arrivant au sol et en détectant la lumière de

fluorescence qu'elles produisent dans l'atmosphère. Ces deux mesures sont limitées, l'une par la difficulté à distinguer les différentes composantes de la gerbe et à remonter à son développement, l'autre par un faible cycle utile d'observation de ~13% (les nuits claires et sans lune). Pour pallier à ces limitations, de nouvelles techniques de détection, basées sur la mesure des ondes radio émises par la composante électromagnétique des gerbes, sont également à l'étude.

AERA

AERA est un instrument dédié à l'étude des ondes radio, dans la gamme 30-80 MHz, associées aux gerbes atmosphériques induites par les rayons cosmiques. L'année 2013 a été marquée par l'installation de 100 nouvelles stations de détection radio VHF de AERA. Aux 24 antennes dipôles de type log-périodique utilisées précédemment dans la phase 1 ont été ajoutées des antennes doubles de type « Butterfly » orientées nord-sud et est-ouest pour tenir compte de la polarisation. Ces détecteurs peuvent fonctionner soit en mode auto-déclenché, soit en coïncidence avec une partie du détecteur de surface et des détecteurs de fluorescence en mode « radio-hybride ». Le seuil de détection permet l'étude de la région de transition entre 10^{17} et 10^{18} eV.

L'acquisition des données est assurée par trois tâches communicant entre elles via des « sockets » : gestion des antennes, détection des stations en coïncidences, étude de la multiplicité associée et reconstruction des événements. Le LPSC développe une interface graphique (GUI) pour contrôler et commander l'acquisition depuis le Web, la communication avec les autres tâches se faisant par les sockets via un canal dédié. Cette interface d'ores et déjà partiellement intégrée au système de la phase 1 est en cours d'adaptation pour tenir compte des contraintes liées à l'extension du réseau d'antennes final et des exigences associées afin de parvenir à une complète intégration dans le dispositif instrumental.

EASIER

Outre la détection des ondes émises par les gerbes dans la gamme du MHz, déjà observées et étudiées par d'autres expériences, la R&D comprend la recherche et la caractérisation de signaux dans la gamme du GHz, détectés en 2008 par une expérience simulant des gerbes auprès d'accélérateurs. Le principe du projet EASIER est d'intégrer en mode esclave la détection des signaux radio aux WCD du réseau de surface de l'Observatoire Pierre Auger en utilisant les systèmes de déclenchement, d'acquisition, de synchronisation temporelle et d'alimentation électrique des WCD. Durant la phase de validation de ce mode de fonctionnement des antennes, l'analyse des signaux radio dans la gamme du MHz (7 WCD équipés chacun d'un récepteur) a permis de mettre en évidence la détection de l'émission géo-synchrotron attendue. Cependant, les dipôles utilisés pour détecter les ondes décimétriques se sont avérés peu résistants aux rudes conditions climatiques de la pampa ; ils ont été remplacés en mars 2013 par des antennes dites « Butterfly » développées par SUBATECH.

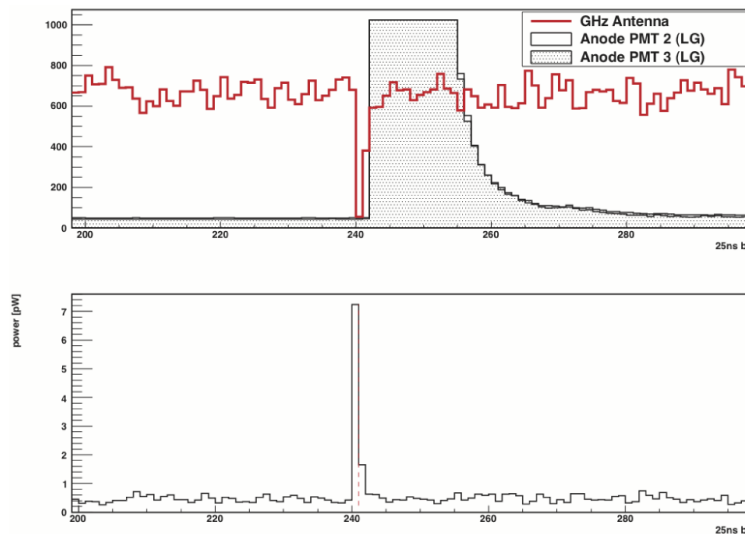


Fig. 2: Gauche : une antenne EASIER (en haut, sur la gauche du mat) sensible dans le GHz, montée en vis à vis de l'antenne Yaggi assurant la communication des données du WCD. Droite : en haut, signal de l'antenne GHz et signal saturé de l'anode (bas gain) des PM 1 et 2 du WCD; en bas, puissance reçue par l'antenne GHz en pico watt après étalonnage.

Dans la gamme du GHz un signal en coïncidence claire avec la détection d'une gerbe atmosphérique a été observé sur l'un des récepteurs du premier dispositif de test comprenant 7 WCD équipés. Au printemps 2012, 61 WCD ont été équipés d'antennes GHz, cette installation ayant été réalisée par des membres du SDI et du service électronique du LPSC. La demande de financement du projet GIGAS⁷ à l'ANR ayant été acceptée en mai 2012, un programme visant à la caractérisation des récepteurs utilisés, et à l'amélioration du rapport signal/bruit a été entrepris. Différentes campagnes de mesures ont été réalisées pour déterminer les performances des antennes installées, de récepteurs commercialisés plus sensibles envisagés, et de cornets fabriqués au laboratoire. Une estimation du signal attendu dans la gamme du GHz est aussi en cours, par la simulation des processus physiques liés au développement de la gerbe dans l'atmosphère susceptibles de produire un rayonnement électromagnétique dans cette gamme de fréquence.

L'analyse des données d'une année d'exploitation des 61 WCD du réseau GHz a mis en évidence 3 nouveaux signaux coïncidant avec une gerbe. Les gerbes atmosphériques associées aux signaux sélectionnés présentent des caractéristiques communes, l'impact de la gerbe se situe à moins de 300 m de l'antenne et son énergie atteint les 10 EeV. Après calibration du détecteur, ces signaux sont respectivement estimés à quelques pico Watts.

Des simulations sont entreprises afin de déterminer l'origine physique des signaux GHz observés. Ces simulations concernent le géo-synchrotron, établi comme étant le mécanisme principal d'émission des signaux MHz, le rayonnement Cherenkov, et le bremsstrahlung moléculaire. Ce dernier a été présenté comme le processus à l'origine d'émissions GHz lors d'un programme expérimental sur faisceau reproduisant le comportement des gerbes atmosphériques. La simulation du bremsstrahlung moléculaire se fait ainsi par deux approches. L'une est basée sur une relation de proportionnalité entre les caractéristiques et résultats de l'expérience faisceau, et celles des gerbes atmosphériques détec-

⁷ Gigahertz Identification of Giant Air Shower

tées à l'observatoire. La seconde se base sur des calculs de sections efficaces dans un environnement plasma.

Neutrinos cosmiques d'UHE

Recherche de neutrinos à l'Observatoire Pierre Auger

L'Observatoire Pierre Auger, en plus d'être à la pointe dans l'étude des RCUHE, s'avère également être le dispositif le plus évolué et le plus performant dans la recherche de neutrinos d'ultra haute énergie. C'est ce qu'attestent les résultats publiés ces dernières années fournissant les meilleures limites sur les flux de neutrinos cosmiques dans cette gamme d'énergie. Il faut souligner l'importance de ces limites, qui apportent des contraintes très fortes sur les mécanismes de production des rayons cosmiques (mécanismes « top-down », neutrinos cosmogéniques ou « GZK »...), sur leur nature exacte (protons-noyaux), sur la distribution de leur sources, etc.

Dans le cadre d'un travail de doctorat mené dans notre groupe, l'étude des neutrinos tau à incidence rasante susceptibles d'interagir dans la croûte terrestre a été poursuivie et en grande partie revisitée notamment par l'étude des incertitudes systématiques sur les modèles d'interactions à UHE des neutrinos et des leptons tau. Cette étude a permis de sonder pour la première fois le domaine des flux de neutrinos à UHE se situant au-delà de la limite phénoménologique de Waxman et Bahcall. Une autre voie a également été explorée en étudiant la sensibilité de l'observatoire à des neutrinos électroniques à incidence rasante. En effet, un neutrino électronique interagissant au sein de la croûte terrestre par courant chargé engendre une gerbe souterraine à dominante électromagnétique dont le développement est retardé par l'effet LPM⁸, effet se manifestant à haute énergie dans un milieu suffisamment dense. Ce ralentissement des processus radiatifs permet à la gerbe de parcourir des distances relativement importantes dans la roche, augmentant de ce fait la masse de cible potentielle et donc la sensibilité du réseau de surface détectant ces gerbes émergentes. Il s'avère cependant qu'à ces énergies, les interactions photo-nucléaires au sein de la gerbe électromagnétique tendent à restreindre la portée de ces gerbes. Ceci a cependant permis de placer une limite spécifique sur le flux de neutrinos électroniques d'énergies supérieures à 10^{19} eV. Les performances attendues du futur observatoire, dans le cadre de propositions pour en étendre encore les performances et pour une période au-delà de 2015, ont également été évaluées. L'étude a porté sur l'impact d'une nouvelle électronique d'acquisition et de nouveaux modes de déclenchements sur l'efficacité de détection des neutrinos à incidence rasante par les stations du réseau au sol. Ce travail de thèse a été soutenu le 30 septembre 2013.

NOY

Le détecteur de rayons cosmiques NOY est installé à flanc de montagne à 1500 mètres d'altitude et à une heure de marche par temps sec de toute route praticable. L'année 2012 a été pour NOY une année de découverte et d'apprentissage en situation extrême. En effet, la rigueur hivernale et sa longueur exceptionnelle ont obéré une exploitation sur une grande fraction de l'année. Des hauteurs de neige supérieures à 3 mètres ont non seulement recouvert les détecteurs, mais causé des dégâts mécaniques importants aux panneaux solaires. La longueur de

⁸ Landau Pomeranchuk Migdal

l'hiver, les intersaisons à l'ensoleillement peu favorable, conjuguée aux difficultés d'accès sur site, ont retardé notablement la mise en exploitation. Le système de régulation solaire s'est souvent mis en veille, nécessitant des interventions sur site pour remises en route. Des commutations fréquentes ont parfois eu raison des étages d'entrée de l'électronique. Afin de remédier à cet ensemble de dysfonctionnements, une carte électronique de gestion automatique et télécommandable du système électrique a été mise à l'étude, et devrait pouvoir être installée prochainement.

Le cycle utile effectif de fonctionnement annuel a atteint 16 %, essentiellement pendant les campagnes d'été. L'acquisition d'environ 2000 gerbes cosmiques pendant la période stable d'exploitation a permis de calibrer et de valider le bon fonctionnement du détecteur. La distribution des événements acceptés est conforme aux prévisions de la simulation qui tient compte des conditions spécifiques de fonctionnement (plan de détection incliné et scintillateurs dans le plan vertical).

L'été en montagne étant propice aux orages, un système de rejet en ligne d'événements d'orages a pu être exploité de façon satisfaisante. Les résidus d'événements d'orages ont tous été identifiés aisément à l'analyse par la forme du signal comme provenant d'un front d'onde électromagnétique plus ou moins proche du détecteur. Certains de ces événements semblent provenir des montagnes, parmi lesquels quelques uns auraient pu simuler une signature neutrino.

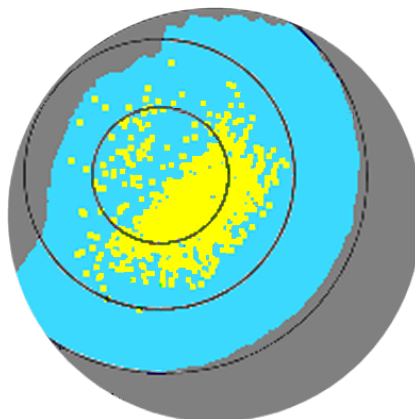


Fig. 3 : Carte du ciel des événements cosmiques détectés par NOY.

Le cercle extérieur délimite le champ de vision de NOY : seules sont visibles sur l'image les directions au-dessus du plan de détection (incliné à 30°). Les cercles noirs sont centrés sur le zénith et représentent les angles zénithaux de 30° , 60° et 90° . La zone bleue : le ciel. La zone grise : les montagnes (Charteuse en haut à gauche, Belledonne et l'écorce terrestre sous l'horizon en bas à droite). Les points jaunes figurent les directions d'arrivée des événements acceptés (cosmiques); les événements « neutrino » devraient provenir de l'intérieur des montagnes soit de la zone grise, notamment à l'Est-Sud-Est (en bas à droite de la figure).

L'exploitation du détecteur en phase opérationnelle se montre clairement satisfaisante et laisse envisager une poursuite de prise de données, lorsque les problèmes du système de gestion de l'énergie, adapté aux conditions climatiques rigoureuses, auront été résolus.

Pour en savoir plus

The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 33rd International Cosmic Ray Conference, the Pierre Auger Collaboration, ICRC 2013, Rio de Janeiro, Brésil, <http://arxiv.org/abs/1307.5059> (2013)

LSST et cosmologie théorique

A. Barrau, A. Choyer, J.-S. Ricol, F. Vidotto, F. Villa
 R. Faure, M. Migliore, Service Détecteur et Instrumentation
 C. Vescovi, Service Électronique
 F. Vezzu, Service Études et Réalisations Mécaniques

The group is involved in various activities around the large telescope LSST. We are developing an efficient method for reconstructing photometric redshifts. We are responsible for the development of camera calibration bench as well as the construction of the filter changer. We also study some aspects of loop quantum cosmology.

Activités liées au télescope LSST

Le projet LSST est un télescope qui permettra dès 2017 de dresser une carte 3D de l'Univers avec une profondeur et une précision inégalées. Le formidable catalogue de plusieurs milliards de galaxies lointaines observées par le télescope permettra une étude sans précédent de notre Univers et fournira des informations capitales en cosmologie. L'étude des oscillations baryoniques, par exemple, permettra de mieux comprendre l'énergie noire qui représente 70% de la densité d'énergie de notre Univers.

Reconstruction des Redshifts photométriques

L'un des enjeux majeurs de l'expérience LSST va être la reconstruction précise du redshift des galaxies. Nous avons développé une méthode qui utilise les caractéristiques des densités de probabilité des paramètres reconstruits (par Template fitting) pour éliminer les catastrophiques et améliorer considérablement les performances, grâce à une coupure sur un paramètre LR (Likelihood Ratio) donnant la probabilité pour une galaxie d'avoir été bien reconstruite. Avec un choix judicieux de coupure sur ce paramètre, notre méthode permet d'atteindre les spécifications de LSST jusqu'à un Redshift de 3 environ.

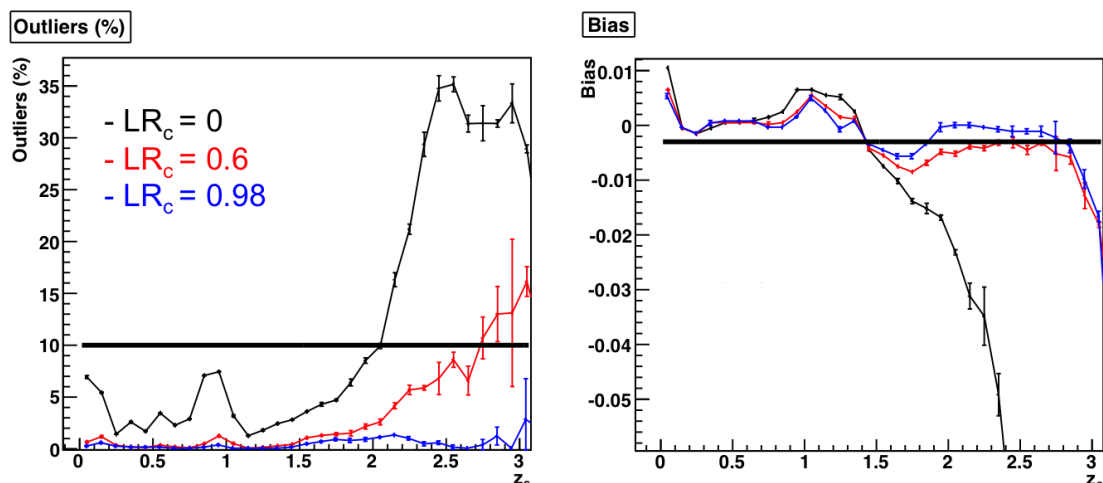


Fig. 1 : Évolution du nombre de catastrophiques (gauche) et du biais (droite) en fonction du Redshift pour différentes coupures sur LR.

Banc de calibration de la caméra (CCOB) et chargeur de filtre

La caméra de LSST sera la plus grosse caméra jamais construite et possèdera plus de 3 milliards de pixels qu'il faudra calibrer à une précision meilleure

que 0,5%. Le banc d'étalonnage de la caméra (CCOB) est à la charge du LPSC et nous sommes actuellement en train de valider un système LED sur un banc prototype. Les efforts de ces dernières années ont porté sur la caractérisation de la structure du faisceau à petite échelle et sur la simulation des performances du CCOB quant à l'alignement mécanique des éléments optiques de la caméra.

Dans le cadre du système d'échangeur de filtres de la caméra, le LPSC a pris la responsabilité de la fourniture de tous les éléments nécessaires à la construction et au fonctionnement du système « Chargeur de filtres ». Le service d'études et de réalisations mécaniques et le service électronique sont impliqués dans ce projet. La conception mécanique détaillée du prototype échelle 1 qui sera testé en 2014 est bien avancée et sera présentée pour la PDR fin 2013. Un premier avant-prototype du système de verrouillage des filtres a été réalisé et une première série de tests a pu être faite. L'architecture du contrôle commande est définie et la mise en œuvre des automatismes est commencée.

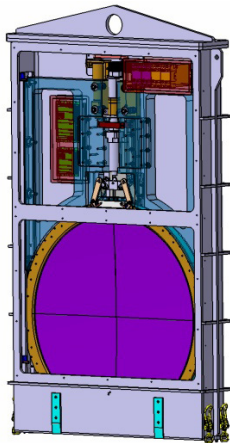


Fig. 2 : Vue CAO de l'ensemble chargeur de filtres.

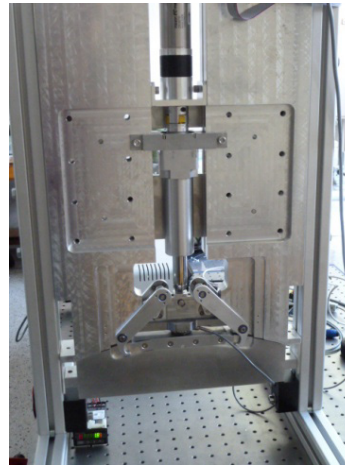


Fig. 3 : Prototype du système de verrouillage des filtres.

Cosmologie théorique

La gravitation quantique à boucles est un des rares modèles cohérents de quantification non-perturbative et invariante de fond de la relativité générale. Une communauté d'environ 200 chercheurs dans le monde travaille sur cette approche. La cosmologie quantique à boucles (LQC) est essentiellement l'application de ce cadre théorique à l'Univers dans son ensemble.

Le résultat principal de la LQC est la disparition du Big Bang : l'évolution cosmologique ne présente plus de singularité et un grand rebond « Big Bounce » remplace le traditionnel Big Bang. Notre travail s'est porté sur (i) La construction d'une algèbre de contraintes cohérente incorporant les corrections d'holonomie et d'inverse-triades (i.e. les deux corrections quantiques majeures en LQC). (ii) La dérivation du spectre tensoriel primordial avec les corrections d'holonomie. (iii) L'étude d'une phase de « silence asymptotique », en accord avec la conjecture BKL, comme limite possible de la théorie à haute densité (ainsi que d'un éventuel changement de signature de la métrique). (iv) La mise en évidence de l'existence systématique d'une phase d'inflation cosmologique suffisamment longue pour être en accord avec les observations. (v) L'étude des anisotropies en cosmologie quantique.

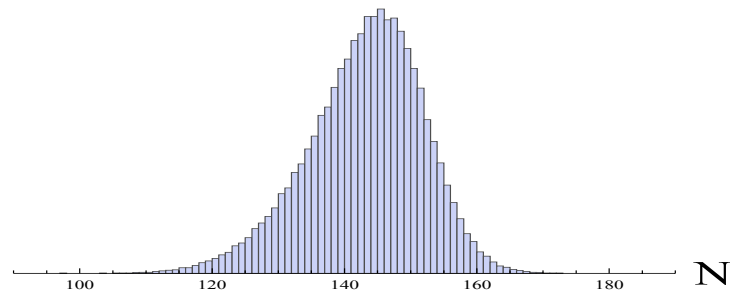


Fig. 4 : Distribution de probabilité du nombre d'e-folds de l'inflation N en cosmologie quantique à boucles

Pour en savoir plus

"A new method to improve photometric Redshift reconstruction. Application to the Large Synoptic Survey Telescope" A. Gorecki et al, submitted to A.A, arXiv:1301.3010.

"The duration of inflation as a prediction of loop quantum cosmology", L. Linsefors, A. Barrau, Phys. Rev. D, 87 (2013) 123509.

Détection directionnelle de matière sombre avec MIMAC

D. Santos, J. Billard, J. Lamblin, F. Mayet, Q. Riffard

C. Bernard, O. Guillaudin, M. Marton, J. Médard, J.-F. Muraz, A. Pelissier, Service Détecteurs et Instrumentation

G. Bosson, J.-L. Bouly, O. Bourrion, J.-P. Richer, J.-P. Scordilis, Service Électronique

C. Fourel, J. Giraud, J.-C. Malacour, D. Fombaron, S. Roni, S. Roudier, Service Études et Réalisations Mécaniques

T. Lamy, J. Angot, P. Sole, P. Sortais, Service des Sources d'ions

O. Meplan, Laboratoire de mesure des faibles radioactivités

MIMAC is a project of a large TPC dedicated to directional dark matter detection. This is a powerful search strategy, which requires measuring both the energy and the 3D track of recoiling nuclei. An important step has been achieved in June 2012 with the installation at Modane Underground Laboratory of the bi-chamber prototype.

Several activities were developed: phenomenology of directional detection, data analysis strategies, primary scintillation and portable ionization quenching facility.

La détection directionnelle constitue une stratégie innovante de recherche de Matière Sombre galactique. L'idée est de profiter du mouvement du système solaire autour du centre galactique et à travers le halo de matière sombre. On observe ainsi un vent relatif de WIMP en provenance de la direction vers laquelle se dirige le système solaire (en l'occurrence vers la constellation du Cygne). Une expérience permettant de mesurer à la fois l'énergie et la direction des reculs nucléaires, devrait donc observer un excès d'événements dans cette direction, clairement discriminable du bruit de fond, isotrope dans le référentiel galactique. Le projet MIMAC est une première étape vers la définition d'un grand détecteur directionnel pour la détection de matière sombre. Dans ce cadre, plusieurs axes de recherches sont développés.

Phénoménologie

La détection directionnelle peut permettre une découverte de la matière sombre, grâce à la reconstruction de la direction principale du signal. Nous avons cherché à estimer la signification statistique qui pourrait être associée à une telle découverte.

Dans une approche fréquentiste des probabilités, la signification d'un processus physique peut être évaluée grâce au test statistique du rapport de vraisemblance profilée. Cela permet de tenir compte des incertitudes astrophysiques, (densité locale de matière sombre, vitesse du soleil), en les considérant comme des paramètres de nuisance dans la fonction de vraisemblance. Cette méthode est d'intérêt général car elle ouvre la voie à des analyses au-delà du modèle standard de la matière sombre, souvent utilisé pour faciliter les comparaisons mais néanmoins marginalement compatible avec les résultats astrophysiques récents.

Cette étude a également permis de montrer quels étaient les paramètres expérimentaux les plus critiques pour la détection directionnelle, en l'occurrence le taux de bruit de fond résiduel et le seuil en énergie. Contrairement à ce que l'on pensait initialement, de bonnes résolution angulaire et efficacité de

reconnaissance du sens de la trace ne constituent pas des conditions sine qua non à la détection directionnelle.

Finalement, nous avons montré qu'un détecteur directionnel de 30 kg.an de CF4 permettrait une découverte à 3σ à 90% CL jusqu'à une section efficace WIMP-nucléon axiale de l'ordre de 10^{-5} pb.

Ce résultat n'est pas influencé par l'éventuelle présence d'un disque de matière sombre en corotation avec notre disque stellaire, comme suggéré par les récents résultats des simulations N-corps. Cette étude répond à l'inquiétude, légitime a priori, apparue dans la communauté de la matière sombre.

En collaboration avec deux chercheurs du LAPTH, nous avons évalué les conséquences au niveau de la supersymétrie de ces futurs résultats. Nous avons montré qu'une large fraction des modèles supersymétriques (minimaux et non-minimaux), avec une masse de WIMP inférieure à 200 GeV, pourrait être découverte avec une signification supérieure à 3σ par les futurs détecteurs directionnels tels que MIMAC.

Analyse de données

La détection directionnelle requiert la reconstruction de l'énergie et de la trace 3D du noyau de recul et ce jusqu'à très basse énergie (~ 5 keV). Cela nécessite le développement de méthodes d'analyse de données optimisées pour en tirer l'information souhaitée.

La première problématique est liée à la reconstruction 3D des événements qui doit fournir in fine :

- La localisation du vertex d'interaction, dans le but de proposer une fiducialisation du détecteur.
- La reconstruction de la direction initiale du recul.
- La reconstruction du sens de la trace.

Nous avons développé une méthode d'analyse de données directionnelle, basée sur une comparaison avec des données simulées, via un maximum de vraisemblance. Nous avons montré que les performances attendues pour le détecteur MIMAC sont suffisantes pour envisager le programme de physique décrit plus haut.

Le second sujet d'étude est lié à la discrimination électron/noyau de recul. Nous avons proposé une méthode d'analyse multivariée par étiquetage des événements (électron ou noyau de recul) en fonction de la sortie d'une analyse en arbres de décision « boostés » qui incorpore les principales observables discriminantes.

Installation du module bi-chambre au LSM

Le prototype du module bi-chambre construit au LPSC constitue la brique élémentaire de la matrice MIMAC. Il consiste en deux chambres de 10 cm x 10 cm x 25 cm avec une cathode commune en mylar aluminisé d'une épaisseur de 12 μm . Chaque chambre est un μTPC avec le mélange gazeux suivant: CF₄ + 28% CHF₃ + 2% C₄H₁₀ fonctionnant à très basse pression (50 mbar). Suite à l'ionisation produite par un noyau de recul les électrons dérivent sous l'effet du champ électrique de collection (~ 180 V/cm) jusqu'à la grille (micromesh). Dans la

zone d'avalanche, un champ électrique plus intense (~ 18 kV/cm) permet ensuite d'amplifier le signal par avalanche, avec un gain de l'ordre de 3000 pour un gap de $256 \mu\text{m}$. L'utilisation d'une Micromegas pixélisée développée en collaboration avec l'IRFU (Saclay) (avec un pitch de $424 \mu\text{m}$) permet d'accéder à la projection de la trace sur l'anode et de mesurer ses coordonnées x et y . La troisième coordonnée est obtenue par une lecture de l'anode avec une fréquence de 50 MHz. En connaissant la vitesse de dérive des électrons, dans ce mélange gazeux et pour ce champ électrique appliqué, il est ainsi possible de reconstruire la coordonnée en z . Une mesure de cette vitesse de dérive a été faite par notre équipe par une méthode originale. Une électronique dédiée a été développée par le service d'électronique du LPSC (voir rapport d'activité 2010-2011). Il s'agit d'une électronique auto-déclenchée comportant un ASIC 64 voies et son acquisition associée. Elle comporte un traitement embarqué qui permet en particulier de limiter le transfert de données à uniquement l'énergie et les coordonnées des pixels touchés. Elle permet la lecture de l'anode toutes les 20 ns, ce qui ouvre la possibilité de reconstruire une trace de quelques millimètres, en trois dimensions, qui est un atout majeur du détecteur MIMAC.

Nous avons installé pour la première fois le prototype bi-chambre à Modane en juin 2012 (Fig. 1).

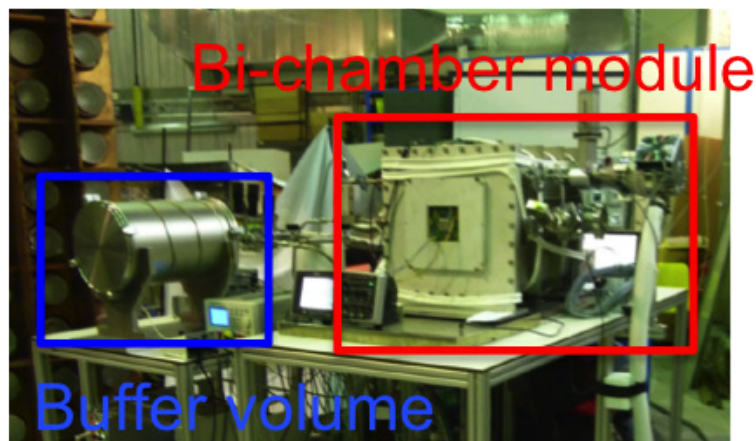


Fig. 1: Installation du prototype bi-chambre à Modane en juin 2012.

Nous avons pu étalonner le détecteur par des rayons X de fluorescence produit par un générateur X sur des feuilles de Cd, Fe, Pb. Nous avons pu montrer la linéarité et la stabilité de l'étalonnage tout au long des 4 mois de mesure en 2012 et puis à partir de juin 2013 après la nouvelle installation.

Nous avons pu détecter pour la première fois les traces des noyaux de recul provenant de la désintégration du ^{222}Rn dans le cas où la particule alpha est absorbée par la matière de la cathode. Ces traces ont une longueur de l'ordre du millimètre et elles ont été clairement identifiées par notre détecteur. Le spectre de ces événements entre 20 keV et 55 keV en ionisation est montré dans la figure 2.

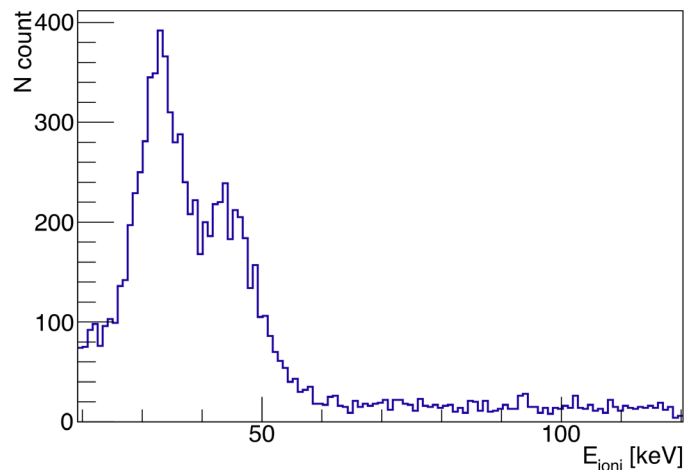


Fig. 2: Spectre des événements présentant une trace en 3D provenant de la désexcitation du ^{222}Rn .

Scintillation primaire dans le CF_4 à 50 mbar

L'une des améliorations possibles du prototype actuel de MIMAC serait l'ajout de photodétecteurs afin d'être sensible à la scintillation primaire du CF_4 . Elle permettrait notamment de mesurer la localisation longitudinale des interactions. En 2012, des tests ont été effectués au LPSC avec une source d'ions permettant d'injecter directement des noyaux de fluor entre 10 keV et 40 keV dans une enceinte contenant une micromegas et un photomultiplicateur. Pour la première fois, la scintillation primaire issue de l'interaction des noyaux de fluor a pu être observée à partir de 10 keV et pour une pression de 50 mbar.

Ligne de Quenching portable: COMIMAC

Voir section *Valorisation*.

Pour en savoir plus

F. Mayet and D. Santos (Eds), *Proceedings of the Third International Conf. on Directional Detection of Dark Matter (CYGNUS 2011)*, EAS Publi. Series, Vol. 53, 2012.

J. Billard, F. Mayet and D. Santos, *Phys. Rev. D* 85 (2012) 035006.

J. Billard et al., *Phys. Lett. B* 718 (2013) 1171.

J. Billard, F. Mayet and D. Santos, *JCAP* 07 (2012) 020.

J. Billard, F. Mayet et al, *arXiv:1305.2360*.

Q. Riffard et al. *Proceedings of the 48th Rencontres de Moriond*, *arXiv:1306.4173*.

J. Lamblin, *HDR de l'Univ. de Grenoble*, 2013.

NIKA

*J. F. Macías-Pérez, R. Adam, J. Angot, A. Catalano, B. Comis, F. Mayet, L. Perotto
C. Vescovi, G. Bosson, J.-L. Bouly, O. Bourrion, J.-P. Girard, J. Menu, S. Muggeo,
J.-P. Scordillis, D. Tourres, Service Électronique
G. Dargaud, Service Informatique
R. Faure, A. Pelissier, O. Zimmermann, Service Détecteurs et Instrumentation
D. Fombaron, G. Freche, C. Geraci, E. Perbet, Service Études et Réalisations Mécaniques*

NIKA is a project dedicated to the construction and scientific exploitation of a millimeter dual band camera, based on arrays of KIDs, to be operated at the IRAM 30m telescope in Granada. The LPSC is a founding member of the collaboration and it is fully invested on this project with large contributions both in the technical and scientific sides. A prototype of the instrument has been constructed and installed in 2013 and first successful scientific results were obtained.

Après le satellite Planck, construit à partir de détecteurs individuels, le futur de l'étude du Fond Diffus Cosmologique dans le domaine millimétrique passe forcément par l'utilisation de matrices de détecteurs. Celles-ci permettent d'une part d'augmenter significativement la sensibilité des instruments pour la mesure des modes B en polarisation et donc l'étude de l'univers primordial, et d'autre part d'avoir accès à la haute résolution angulaire pour une étude détaillée des amas de galaxies par effet Sunyaev-Zeldovich et de l'époque de réionisation de l'Univers. Dans ce cadre, les caméras à base de « Kinetic Inductance Detectors » (KIDs) peuvent jouer un rôle majeur. Le LPSC, en collaboration avec l'Institut Néel et l'IRAM, est un acteur du projet NIKA. NIKA est un projet pour la construction et l'exploitation d'une caméra bi-bande (140 et 240 GHz) de matrices de KIDs (environ 5000 détecteurs en tout) pour des observations en intensité et polarisation dans le domaine millimétrique au télescope de 30 m de l'IRAM à Pico Veleta, près de Grenade en Espagne. Le projet comporte trois phases principales: 1) construction et test d'un prototype comprenant une centaine de détecteurs par canal, 2) construction et installation de la caméra finale, et 3) exploitation scientifique du temps d'observation garanti.

L'ensemble de la caméra est composé d'un cryostat à dilution 100 mK, de trois matrices de KIDs, d'un système optique de reprise froide, d'un ensemble optique pour la polarisation, d'une électronique froide et des électroniques chaudes RF et de lecture. Un prototype de cette caméra avec une centaine de détecteurs par canal a été réalisé et installé de manière permanente au télescope pendant l'année 2013. Le LPSC a eu la responsabilité du développement et de la construction de l'électronique de lecture baptisée NIKEL (Fig. 1 gauche), du prototype et de la caméra finale ainsi que du système de mesure de la polarisation. Huit boîtiers NIKEL ont été livrés à la collaboration ainsi qu'un système complet de polarisation (lame demi-onde et polariseur tournants). Le LPSC participe également activement à la conception du cryostat de la caméra finale et à sa construction ainsi qu'aux développements mécaniques et des logiciels de contrôle du système cryogénique et de l'instrument.

Des observations de qualité scientifique ont été pour la première fois obtenus avec des KIDs. L'équipe du LPSC a joué un rôle majeur dans l'analyse et interprétation de ces données qui ont conduit notamment aux observations d'un amas de galaxie par effet SZ avec une précision inégalée (Fig. 1 droite). Forte de ce succès, la caméra prototype a été ouverte aux observateurs externes.

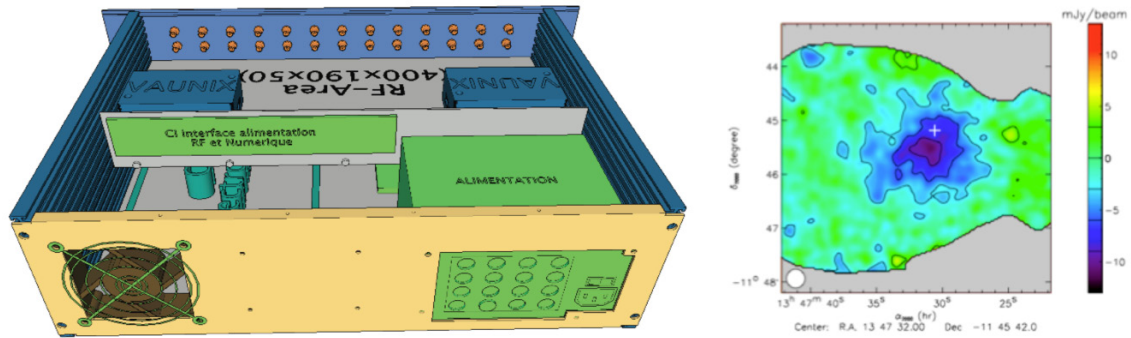


Fig. 1: Rack d'électronique de lecture NIKEL (gauche) et carte de l'effet SZ sur l'amas de galaxies RXJ1347.5-1145.

Pour en savoir plus

Adam et al., "First observation of the thermal Sunyaev-Zel'dovich effect with Kinetic Inductance Detectors", *A&A*, 2013, soumis à publication.

A. Monfardini et al., "Latest NIKA results and the NIKA-2 project", 2013, *JLTP arXiv1310.1230M*.

M. Calvo et al., "Improved mm-wave photometry for kinetic inductance detectors", 2013 *A&A*.551L.12C.

Bourrion, "Electronics and data acquisition for kilopixels kinetic inductance camera", 2012 *SPIE*.8452E 00B.

M. Calvo et al., "The NIKA 2011 run: results and perspectives towards a permanent camera for the Pico Veleta observatory", 2012 *SPIE*.8452E..03C.

Étude du rayonnement fossile avec Planck

*J. F. Macías-Pérez, R. Adam, A. Catalano, C. Combet, B. Comis, G. Hurier, F. Kharab, L. Perotto, C. Renault, L. Sanselme, D. Santos
F. Melot, Service Informatique
F.-X. Désert, P. Hily-Blant, N. Ponthieu, IPAG*

Planck is the first European Spatial Agency (ESA) mission dedicated to the measurement of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation. Since the launch in 2009, May 14th, Planck has collected data which meet or surpass the required quality. The first cosmological results have been published in March 2013 along with the delivery of the maps in temperature and catalogues of sources from the 15 months of the nominal mission.

The LPSC has the responsibility of the processing of the HFI timeline analysis, the extraction of the CO maps, the validation of the SZ source catalogue, the measurement of the diffuse SZ component and a deep contribution to the measurement of the gravitational lensing of the CMB by the line-of-sight matter.

Contexte scientifique

Le fond diffus cosmologique

Le rayonnement fossile à 3 K (ou CMB pour Cosmic Microwave Background) est la plus ancienne image de l'univers qui nous soit accessible. En effet, il correspond à la surface de dernière diffusion, lorsque l'univers s'était suffisamment refroidi pour que les premiers atomes se forment et que les photons, ne pouvant plus agir avec les électrons, se propagent librement jusqu'à nous. C'est une observable fondamentale pour l'élaboration du modèle cosmologique actuel – corroboré par l'ensemble des observations dans ses grandes lignes, dans lequel les fluctuations de courbure générées par l'inflation environ 10^{-30} seconde après le Big-Bang auraient évolué par effondrement gravitationnel dans un Univers en expansion pour donner naissance aux grandes structures de l'Univers (galaxies, amas et super amas de galaxies). L'étude de la carte du CMB sur l'ensemble de la voûte céleste donne accès au spectre de puissance des fluctuations de température moins de 400 000 ans après la période d'inflation. Ce spectre contient donc l'information sur le spectre initial des fluctuations ainsi que sur les propriétés de l'Univers dans lequel elles ont évolué. Par ailleurs, le rayonnement fossile, polarisé à 10%, recèle encore deux observables supplémentaires: le mode E de polarisation, essentiel pour l'étude de la réionisation de l'Univers notamment, et le mode B de polarisation, généré par les ondes gravitationnelles produites à l'issue de la période inflationnaire.

L'expérience satellite Planck

Après COBE et WMAP, Planck est la troisième génération de satellite dédié à l'observation du CMB, et le premier mis en oeuvre par l'agence spatiale européenne. L'objectif de Planck est la mesure définitive des anisotropies primaires en température et une première mesure de précision pour la cosmologie du mode E de polarisation. La mesure du mode B de polarisation sera vraisemblablement l'enjeu de la quatrième génération de satellite, d'ores et déjà à l'étude. À partir de l'étude statistique des observables, les paramètres cosmologiques tels que la

géométrie et le contenu de l'Univers mais également la dynamique de la période d'inflation ont été estimés précisément, avec des erreurs de un à quelques pourcents selon ces paramètres. Cette précision inégalée a permis de défavoriser de nombreux modèles de nouvelle physique qui ont dû faire face à de très fortes contraintes observationnelles. La qualité des cartes fournies, tant en termes de sensibilité que de résolution angulaire, permet également une reconstruction des anisotropies dites secondaires, car affectant le CMB après son émission. Ainsi, Planck a fourni la première reconstruction aux plus grandes échelles angulaires de l'effet de lentille gravitationnelle que les grandes structures impriment sur le CMB, lui conférant ainsi une sensibilité à l'échelle absolue de masse des neutrinos. Planck a détecté aussi un millier d'amas et super amas de galaxies grâce à leur interaction avec le rayonnement fossile par effet Sunyaev-Zeldovich, ouvrant ainsi une nouvelle voie pour l'étude statistique des grandes structures.

Planck est une collaboration internationale organisée autour des deux instruments LFI et HFI (pour Low et High Frequency Instrument), regroupant environ 400 chercheurs, dans une dizaine de pays en Europe et en Amérique, pour un budget d'environ 550 M€. En France, le LPSC a des responsabilités « clés » tant au niveau de l'instrument que de l'analyse de données. La période 2012-2013 a été marquée par la fin des opérations de HFI le 14 janvier 2012 et la fin des opérations de LFI le 13 août 2013. Le fonctionnement des électroniques et logiciels embarqués conçus et testés au LPSC a été nominal. Cette période a également été intense en termes d'analyse et d'interprétations des données, ainsi qu'en rédaction des articles scientifiques qui présentent les résultats de la mission nominale.

Analyse et interprétation des données de Planck

Analyse des données de l'instrument HFI

Le plan focal de l'instrument HFI contient 52 bolomètres sensibles à la température et à la polarisation du ciel dans une large gamme de fréquences d'observation de 100 à 857 GHz. Avant de pouvoir projeter les données issues des détecteurs sur une carte, il est indispensable de séparer l'information venant effectivement du ciel des perturbations issues de l'instrument lui-même. Celles-ci peuvent venir de l'interaction d'un rayon cosmique avec le bolomètre, d'une fluctuation de l'émission thermique d'un élément du système optique (miroirs, cornets, filtres, bolomètres), d'une variation de la réponse du détecteur ou du bruit parasite produit par la machine cryogénique à 4 K. Notre groupe a la responsabilité du développement et de l'intégration des outils nécessaires à cette étape. Ce travail se fait de façon itérative et en relation avec les étapes ultérieures de l'analyse, notamment la fabrication des cartes. Il s'appuie sur de nombreuses études visant à comprendre en détail le fonctionnement du détecteur et à quantifier la qualité des données avant projection sur les cartes par exemple. Les cartes obtenues (Fig. 1) ont été à la base de 29 articles publiés en 2013.

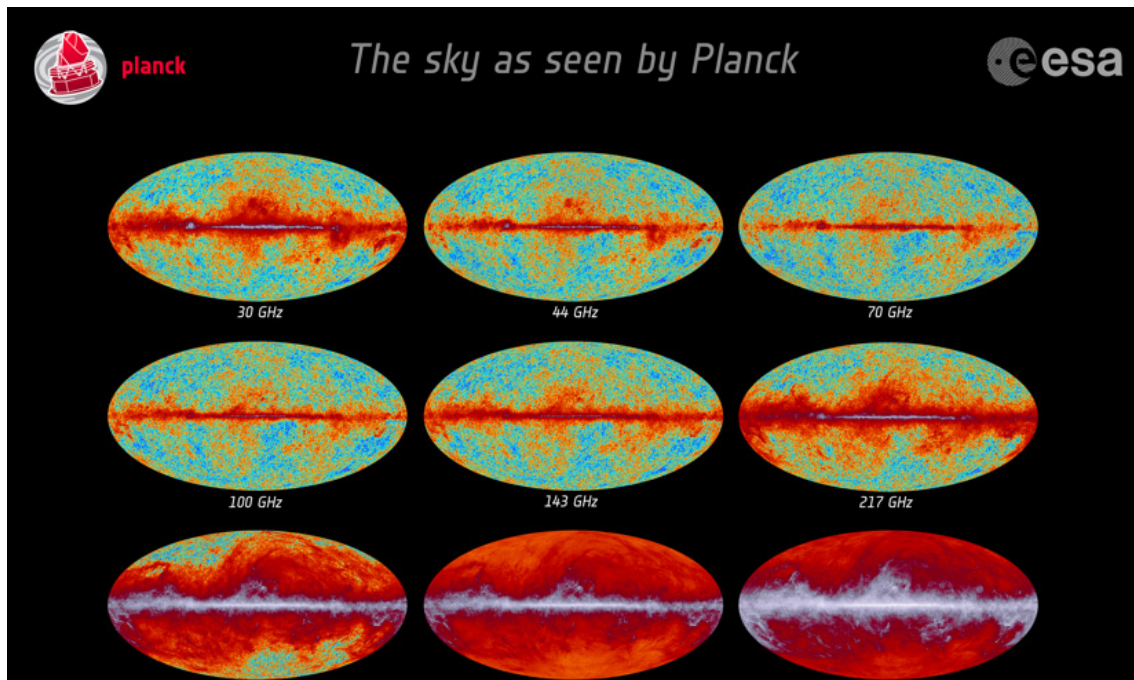


Fig. 1 : Cartes en coordonnées galactiques des 6 fréquences de Planck-HFI. Crédits ESA - collaboration Planck.

Effet de lentille gravitationnelle

Une nouvelle méthode d'analyse, appelée METIS, a été proposée. Elle se base sur la précédente version du pipeline développé au LPSC - incluant un traitement des masques par une technique d'« inpainting », un estimateur du potentiel gravitationnel utilisant les non-gaussianités induites pour l'effet de lentille dans la carte de température et une correction des biais par une méthode Monte-Carlo - et en améliore significativement la robustesse aux effets systématiques par le recours à un traitement a posteriori de la carte reconstruite du potentiel des lentilles. Les masques des sources ponctuelles et de l'émission galactique diffuse destinés aux cartes par fréquence à 100, 143 et 217 GHz ont été optimisés, fournis à la collaboration et utilisés pour l'analyse finale.

La méthode METIS a été appliquée sur des cartes nettoyées des émissions astrophysiques par les 4 techniques de séparation de composantes « officielles », à la fois sur les données et sur les simulations « full-focal plane ». Il a été montré que ces cartes permettent d'obtenir une reconstruction de l'effet de lentille sur près de 90% du ciel (Fig. 2) et qui soit compatible à 1 sigma à la reconstruction officielle.

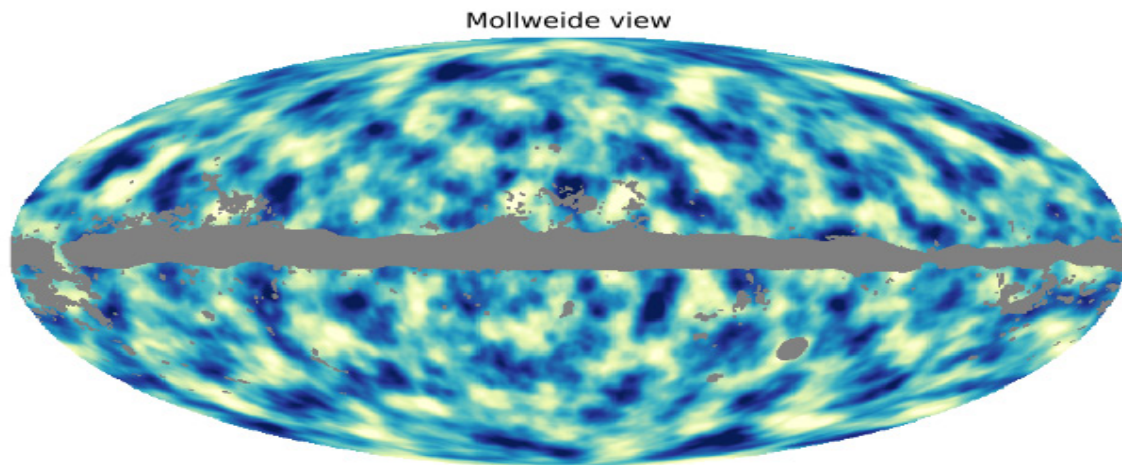


Fig. 2 : Carte en coordonnées galactiques du potentiel gravitationnel intégré sur la ligne de visée déduit des déformations de la carte du rayonnement fossile par effet de lentille gravitationnelle. Crédits ESA - collaboration Planck.

Emissions d'avant-plans et systématiques liés à la polarisation

Les bandes spectrales des détecteurs de Planck étant différentes dans un même canal en fréquence, des fuites du signal en intensité vers le signal en polarisation se produisent inévitablement. Il est indispensable de quantifier cet effet et de le corriger au mieux (correction de couleur et fuite de E dans B). Des méthodes de séparation de composantes dédiées sont appliquées pour estimer et corriger cet effet de fuite. Les données en polarisation n'ont pas été publiées mais l'étude est faite sur chaque version des cartes. La présence de raies du CO dans trois des bandes spectrales de Planck doit aussi être prise en compte. Une méthode de production de cartes du CO (Fig. 3) et de cartes de correction de la contamination par fréquence a été mise au point. Les résultats sont produits pour chaque version des données et font partie des « délivrables », le LPSC ayant eu la responsabilité de ce produit.

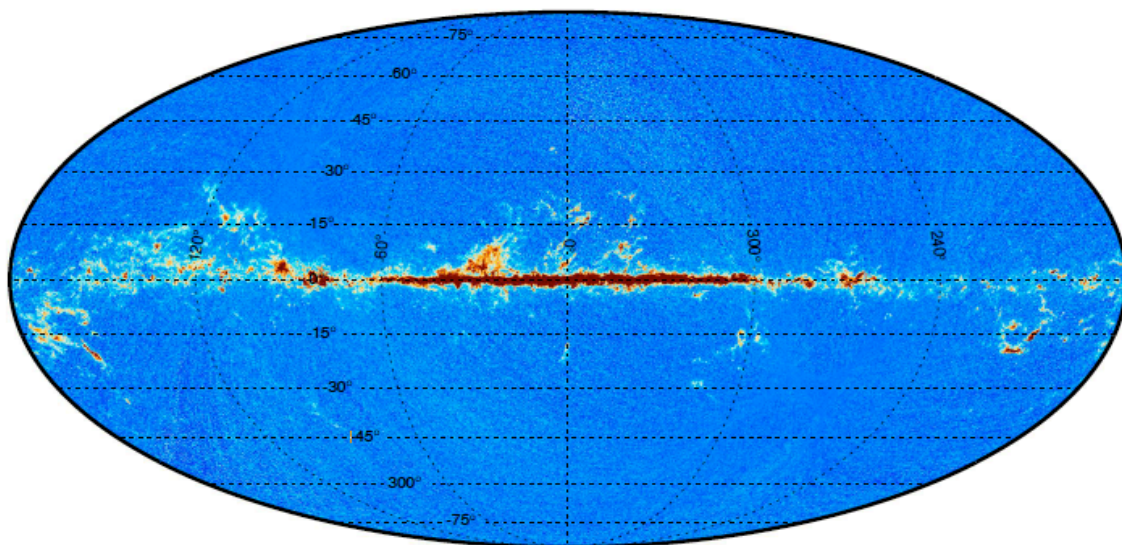


Fig. 3 : Carte en coordonnées galactiques de la raie 1-0 du monoxyde de carbone (CO). Crédits ESA - collaboration Planck.

Effet Sunyaev-Zeldovich (SZ)

L'équipe du LPSC a été très active dans la construction et validation des catalogues successifs d'amas de galaxies détectés via l'effet SZ thermique : plus de 3000 amas candidats étudiés individuellement, plus de 1200 amas validés et publiés en mars 2013. Le catalogue d'amas de galaxies détectés par effet SZ est un livrable de Planck. L'échantillon devient suffisamment important pour que l'effet SZ entre dans la boîte à outils de la cosmologie observationnelle. C'est en particulier le cas pour le paramètre σ_8 qui caractérise les contrastes de densité de la matière qui est mesuré à partir de la statistique des amas de galaxies.

L'émission diffuse a également été scrupuleusement recherchée et étudiée. Une première détection de gaz chaud dans un filament inter-amas a été faite et publiée dans un « Intermediate Paper ». Les simulations montrent qu'une fraction importante de la matière, y compris baryonique, devrait se trouver dans les filaments inter-amas mais ce gaz très ténu et très chaud est particulièrement difficile à détecter directement. L'effet SZ offre une nouvelle possibilité. Un autre système plus compliqué, composé d'au moins trois galaxies massives est également en cours d'étude. De même l'émission diffuse sur tout le ciel a été cartographiée (Fig. 4) et son spectre de puissance angulaire ainsi que ses propriétés statistiques d'ordre supérieur ont été mesurées.

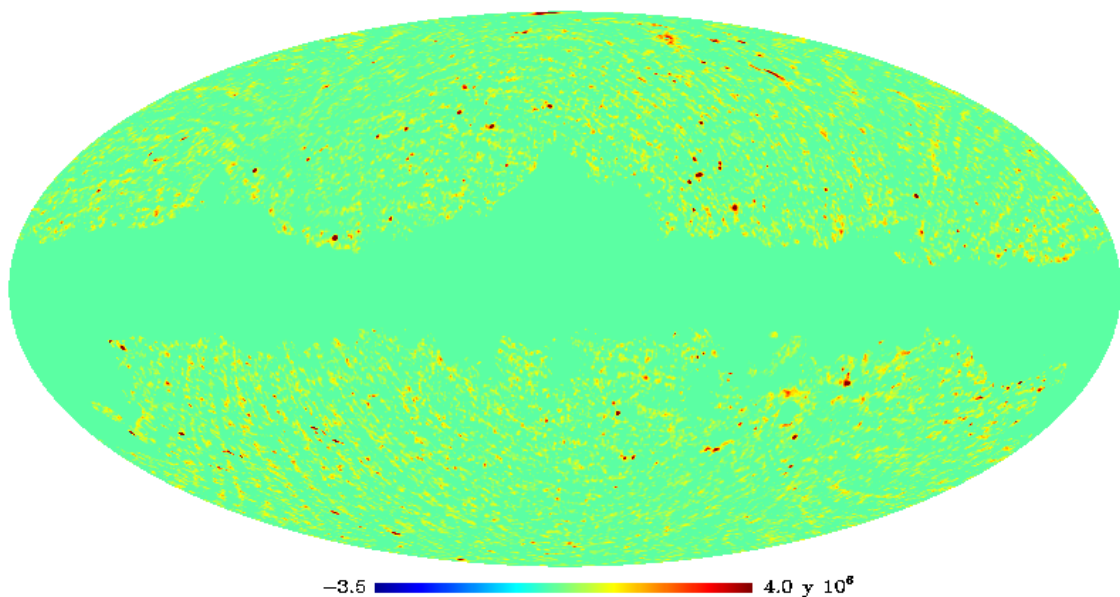


Fig. 4 : Cartes du paramètre de Compton Y mesuré avec la méthode MILCA. Crédits ESA - collaboration Planck.

Communication

Plusieurs actions ont été menées en 2012-2013 : site internet planck.fr (pages de contenu, animations interactives pédagogiques), mallette pédagogique (pour lycées, clubs d'astronomie, animations grand public), intégration d'un bolomètre au contenu de l'exposition (conception et construction du présentoir), diffusion des résultats de mars 2013 (contenu des pages Web), co-écriture d'un film de 5 minutes de présentation de la mission, conception d'une image de l'univers vu

par Planck en 3D, événements grand public (Grenoble, Échirolles, Vaulx-en-Velin, Dijon, Lyon).

Pour en savoir plus

Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results., Planck Collaboration, and 276 colleagues 2013. ArXiv e-prints arXiv:1303.5062.