

Astroparticules et Cosmologie observationnelle

L'Univers comme source de particules

L'Univers présente des phénomènes uniques, impossibles à reproduire en laboratoire.

Des particules, particulièrement celles de très haute énergie – d'origine solaire, galactique ou extragalactique selon leur nature et leur énergie, bombardent en permanence les couches supérieures de l'atmosphère dans laquelle elles produisent des cascades de particules secondaires. Si les mécanismes d'interaction avec notre environnement local et les particules créées sont bien connus aujourd'hui (sauf pour les énergies les plus extrêmes), l'origine de ce rayonnement cosmique demeure largement mystérieux. Identifier ces sources, comprendre comment les particules sont accélérées et interagissent avec le milieu galactique constituent les objectifs de la physique du rayonnement cosmique. Les enjeux sont de nature astrophysique, mais aussi de physique fondamentale, car l'étude des rayons cosmiques permet d'accéder à un domaine d'énergie bien au-delà de celui exploré par les accélérateurs de particules.

On peut aujourd'hui détecter les photons libérés au moment du découplage entre matière et rayonnement et émis sous forme d'un rayonnement de corps noir parfait lorsque l'Univers était très jeune et encore extraordinairement homogène, à quelques millièmes près.

Caractériser le contenu et la géométrie de l'Univers ainsi que son origine et son évolution globale est l'objectif de la cosmologie. Mesurer finement les propriétés de ce rayonnement fossile est l'un des moyens observationnels les plus puissants disponibles pour déduire ces informations.

Nous savons aujourd'hui qu'environ 85% de la matière est de nature non baryonique, c'est-à-dire essentiellement inconnue. Déterminer la nature exacte de la (ou des) particule(s) qui la constitue est un défi majeur du XXI^e siècle. Si la physique des particules propose des candidats tels que le neutralino, la détection directe permettrait une formidable avancée dans ce domaine, à la fois en cosmologie et en physique des hautes énergies. Le plus grand mystère reste cependant l'énergie noire qui constitue environ les $\frac{3}{4}$ de l'énergie de notre Univers aujourd'hui. Simple constante, cinquième force ou autre, chaque hypothèse apporte bien plus de nouvelles questions que de réponses et la mesure de son évolution temporelle est un point clé pour les années à venir.

Enfin on peut étudier, d'un point de vue théorique, les caractéristiques de différentes sources potentiellement présentes dans l'Univers. En particulier, parce qu'ils poussent relativité générale et mécanique quantique dans leurs retranchements, les trous noirs sont des objets privilégiés pour tester les théories novatrices.

Des instruments dédiés



Fig. 1 : Lancement de la mission Planck/Herschel de l'Agence Spatiale Européenne le 14 mai 2009 depuis le port spatial de Kourou en Guyane Française. Crédits ESA/CNES/Arianespace (à gauche). Vol imminent de l'expérience ballon CREAM le 18 décembre 2008 depuis la base américaine de McMurdo en Antarctique. Crédits collaboration CREAM (à droite).

Des instruments spécifiques doivent être conçus, construits puis exploités afin de mener à bien les divers objectifs scientifiques. Le LPSC apporte une contribution instrumentale majeure aux expériences auxquelles il participe. Dans le cadre de collaborations nationales ou internationales, pour des instruments au sol, embarqués en ballon ou sur des satellites, que ce soit en électronique, mécanique, instrumentation ou informatique, ingénieurs, techniciens et physiciens mettent tout en œuvre pour assurer la réussite de ces expériences tout en participant à la conception des futurs détecteurs.

Après le succès de l'expérience ballon Archeops, c'est à présent le satellite Planck qui mesure le rayonnement fossile. Après le succès du vol navette de AMS-01, c'est l'expérience ballon CREAM et prochainement AMS-02 à bord de la station spatiale internationale qui détecteront le rayonnement cosmique du GeV au PeV. Après avoir participé à l'étude de faisabilité de la mission EUSO, le LPSC a rejoint les collaborations AUGER et CODALEMA qui cherchent à compren-

dre l'origine et la nature des particules les plus énergétiques qui frappent la Terre. Suite à l'expérience acquise avec MacHe3, la R&D en détection directe de matière noire se poursuit de façon plus ambitieuse avec MIMAC. Enfin un nouveau domaine s'ouvre avec le projet de grand télescope LSST équipé de la plus grande camera CCD jamais réalisée pour sonder les grandes structures de l'Univers et, entre autres, essayer de cerner le problème de l'énergie noire.

Analyser et interpréter

Les mesures, aussi difficiles soient-elles, ne constituent pas l'objectif des expériences. Il faut ensuite extraire les informations pertinentes d'un « bruit de fond » souvent supérieur au signal de plusieurs ordres de grandeur, les comparer aux modèles afin de les affiner, les confronter aux théories afin de les valider – ou non. De la plus proche des données à la plus théorique, ces études sont résumées dans les pages qui suivent, en lien avec leurs expériences.

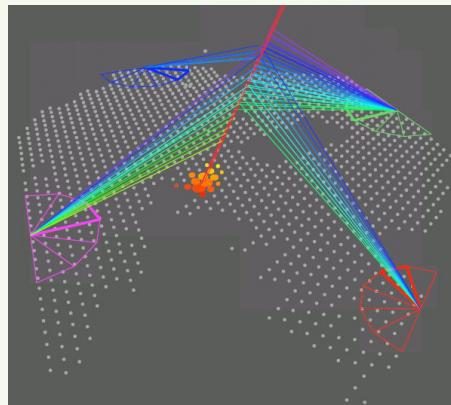


Fig. 2 : Un événement cosmique vu par le détecteur de surface ainsi que par les quatre détecteurs à fluorescence du site Auger Sud. Chaque détecteur enregistre la croissance et la décroissance de la cascade composée de milliards de particules secondaires dans l'atmosphère ainsi que celles qui arrivent au sol. Ce détecteur s'étend sur une superficie comparable à celle d'un département français (3600 km²). Crédits : Collaboration Auger.

Rayonnement cosmique de haute énergie

A. Barrau, M. Buénerd, L. Derome, M. Mangin-Brinet, A. Putze, Y. Sallaz-Damaz
L. Eraud, J.-L. Bouly, O. Bourrion, B. Boyer, J.-P. Scordilis, Service Électronique

A century after the discovery of cosmic ray, central questions about its source and the propagation processes are still unresolved. These key questions are related to Galactic astrophysics and also dark-matter detection. The LPSC is participating to two major experiments in direct cosmic ray detection: AMS02 which is planned to be installed on the space station in September 2010 and CREAM which consist of a series of balloon flights in Antarctica. In parallel to this experimental activity, the group is also interested in cosmic ray phenomenology and in particular in the study of propagation processes. We recently developed a MCMC (Markov Chain Monte Carlo) technique to estimate the probability density function of the propagation parameters.

Mesure directe du Rayonnement Cosmique

Expérience AMS¹

Le rayonnement cosmique a été découvert il y a maintenant un siècle. On sait qu'il s'agit de particules énergétiques, principalement des noyaux ionisés produits et accélérés à des énergies relativistes dans les fronts de chocs associés à des explosions d'étoiles (super novae). Ces particules sont ensuite propagées et diffusées 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 rayonnement cosmique est toujours un domaine scientifique de grande activité autant d'un point de vue expérimental que théorique. En effet, de nombreuses questions sont toujours sans réponses quant à l'origine du rayonnement cosmique et aux processus de propagation. De plus, certaines composantes rares du rayonnement cosmique peuvent permettre de sonder la présence de matière noire dans notre Galaxie. En effet, on sait qu'une grande partie de la masse de notre Galaxie est invisible: cette matière noire serait en fait constituée de particules lourdes interagissant faiblement qui peuvent laisser une trace dans le rayonnement cosmique via les particules produites lors de leur annihilation.

Notre groupe est impliqué dans la physique du rayonnement cosmique depuis 1997 avec la participation du laboratoire à AMS01, le vol précurseur d'AMS à bord de la navette spatiale.

L'expérience AMS a pour objectif de mesurer très précisément la composition du rayonnement cosmique d'énergie entre quelques centaines de MeV et jusqu'au TeV, domaine dans lequel le rayonnement cosmique est le plus abondant. Les mesures ont pour ambition d'être « définitives » dans cette plage d'énergie. Le détecteur AMS02 est destiné à être installé sur la station spatiale internationale (ISS) pour une durée de trois ans.

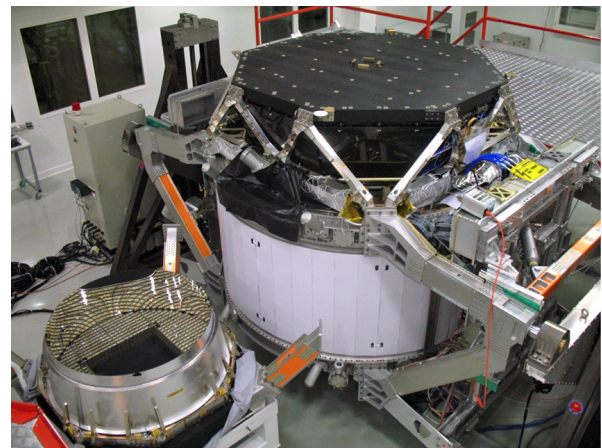


Fig. 1: Intégration d'AMS02 au CERN. Le détecteur RICH, en cours d'intégration, est visible sur la gauche.

Le LPSC est impliqué dans la construction de l'imageur Cherenkov (RICH) d'AMS02; ce détecteur a pour fonction de mesurer très précisément la charge et la vitesse des particules traversant le détecteur, c'est un élément essentiel pour l'identification des particules du rayonnement cosmique. Le LPSC, qui avait largement contribué à la conception du détecteur, a eu pour responsabilité la caractérisation, les tests et l'intégration des photomultiplicateurs et la réalisation de l'électronique front-end. L'ensemble des cellules de photomultiplicateurs a été livré en 2005 pour l'intégration du détecteur et les tuiles d'aérogel ont été livrées et intégrées dans le détecteur en 2007. Le RICH est aujourd'hui en cours d'intégration finale dans AMS02.

Le programme AMS02 a subi d'importants retards suite aux problèmes sur la navette spatiale américaine. La situation a très favorablement évolué au cours de la dernière année et le vol permettant d'installer AMS02 sur la station spatiale est aujourd'hui programmé pour septembre 2010. Dans le futur, nous allons participer à l'analyse des données de l'expérience AMS02. Nous sommes particulièrement intéressés par l'analyse des données du sous-détecteur RICH que nous avons construit et sur lequel nous avons déjà une bonne expérience de l'analyse grâce aux tests effectués sur faisceau et par la reconstruction grâce au RICH

¹ Alpha Magnetic Spectrometer

des flux des éléments du rayonnement cosmique et des rapports secondaires sur primaires ainsi que des rapports isotopiques.

Expérience CREAM²

Dans le contexte des importants retards sur le programme AMS02, le groupe du LPSC s'est engagé sur le projet CREAM. L'expérience CREAM est une expérience embarquée sur ballon stratosphérique. Son objectif est de mesurer le rayonnement cosmique à plus haute énergie qu'AMS, entre 1 TeV et 1 PeV. Dans ce domaine d'énergie, la mesure du rayonnement cosmique permettra de mieux comprendre à la fois les processus de production ainsi que les processus de propagation du RC. De plus la région autour de 10 PeV, appelée le genou, est particulièrement intéressante car on sait que le spectre du rayonnement cosmique change d'indice autour de cette énergie. La mesure des spectres à plus basse énergie avec une expérience comme CREAM permettra d'étalonner les détecteurs au sol qui étudient la structure du genou, comme l'expérience KASCADE.



Fig. 2: Lancement de CREAM lors de la campagne de vol 2007-2008.

Pour l'ensemble de la physique de CREAM, l'identification des éléments (mesure de la charge) est donc une tâche centrale que doit remplir ce détecteur. Le groupe du LPSC, invité à rejoindre cette collaboration, a pro-

posé de construire un imageur Cherenkov, dérivé du RICH d'AMS, pour mesurer la charge des particules: CherCam.

Le détecteur a été construit au cours de l'année 2006 et il a participé aux campagnes de vol en Antarctique pendant les saisons 2007-2008 (CREAM III) et de 2008-2009 (CREAM IV). Nous travaillons à l'analyse des données de ce détecteur qui a fonctionné de manière nominale lors des vols. Le détecteur a participé à un nouveau vol (CREAM V) à la fin de l'année 2009. La possibilité de participer au premier vol de très longue durée grâce à des nouveaux ballons en cours de développement (ULDB – Ultra Long Duration Balloon) peut aussi être envisagée dans le futur.

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 de celui-ci et à sa réintégration dans l'ensemble CREAM. De nouvelles cartes d'alimentations basse tension de CherCam ont été produites pour remplacer l'alimentation, qui après deux vols sans problème, a présenté des signes de faiblesses lors de la phase d'intégration pour CREAM V.



Fig. 3: Un des modules d'alimentation 12 kV spécifiquement développés pour fonctionner dans une atmosphère à faible pression résiduelle.

Une des difficultés spécifiques des vols ballons est le fonctionnement des détecteurs dans une atmosphère résiduelle de l'ordre de quelques millibars. À cette pression, la tension de claquage devient très faible et tous les points de haute tension dans le détecteur doivent être protégés contre ces claquages. La réalisation d'alimentation haute tension constitue dans ces conditions un véritable challenge, et des alimentations haute tension spécifiques ont été entièrement réalisées pour CherCam. Dans le prolongement de cette activité, le service électronique a développé des alimentations 12 kV pour les HPD³ du calorimètre de CREAM. Ces modules ont été développés et réalisés au laboratoire et sont en cours d'intégration sur les blocs HPD pour participer à la campagne de vol CREAM VI.

² Cosmic Ray Energetics And Mass

³ Hybrid Photo Detector

Phénoménologie du Rayonnement Cosmique

La physique du rayonnement cosmique est un des objectifs majeurs à la fois de l'expérience AMS et aussi de l'expérience CREAM. Ces deux expériences sont complémentaires car elles mesurent les abondances des ions du rayonnement cosmique dans des domaines d'énergie différents: AMS permettra de mesurer avec une grande précision les abondances absolues et relatives des ions dans le domaine du GeV au TeV alors que CREAM les mesurera dans le domaine du TeV au PeV.

En particulier la mesure des rapports secondaires sur primaires (ici les secondaires sont les secondaires Galactiques produits par fragmentation des primaires sur le milieu interstellaire) permet de contraindre très efficacement les modèles de propagation du rayonnement cosmique dans la galaxie.

En particulier nous nous intéressons aux contraintes que pourront nous apporter les données futures d'expériences comme AMS02 ou CREAM sur les paramètres des modèles de propagation. Il existe plusieurs modèles de propagation du plus simple comme le Leaky-Box aux plus évolués comme les modèles de diffusion à plusieurs zones. Pour cela on a mis en place une collaboration avec des phénoménologues du LAPTH (Annecy) et du LPNHE (Paris) qui ont développé un programme incluant différents modèles de propagation. Notre travail est centré sur le développement et l'utilisation d'un outil statistique Monte Carlo appelé Markov Chain Monte Carlo (MCMC) qui permet d'échantillonner les distributions des paramètres d'un modèle phénoménologique, ici un modèle de propagation du rayonnement cosmique, en prenant en compte les mesures expérimentales. Le MCMC a été développé et testé dans un premier temps dans le cadre du modèle simple de Leaky-Box et ce travail est poursuivi avec des modèles de diffusion.

Pour en savoir plus

- « Un Imageur Cherenkov pour la mesure de charge des éléments du rayonnement cosmique nucléaire », Y. Sallaz-Damaz, thèse de l'Université Joseph Fourier (2008)
- "A Markov chain Monte Carlo for galactic cosmic ray physics: I. method and results for the leaky box model" A. Putze, L. Derome, D. Maurin, L. Perotto, R. Taillet, *Astronomy & Astrophysics* 497, (2009) 991-1007

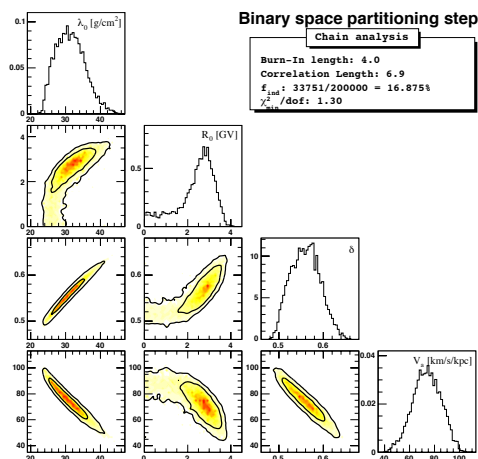


Fig. 4: Distributions 1D (diagonale) et 2D (hors diagonale) des paramètres de propagation du rayonnement cosmique dans le cadre du modèle Leaky-Box obtenus par la méthode MCMC.

Rayons cosmiques d'ultra haute énergie Projets Auger et CODALEMA

M. Avenier, A. Belletoile, C. Bérat, J. Chauvin, D-H. Koang, D. Lebrun, F. Montanet, K. Payet, C. Rivière, A. Stutz
C. Bernard, M. Marton, P. Stassi, O. Zimmermann, Service Détecteurs et Instrumentation
G. Bosson, R. Foglio, E. Lagorio, J.-P. Scordilis, Service Électronique
F. Mélot, G. Dargaud, C. Gondrand, Service Informatique
N. Rico, S. Roudier, Service Études et Réalisations Mécaniques

Research on Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) is carried out by the DRAC's team within the Pierre Auger Collaboration. The team participates to the monitoring and maintenance of the experiment. Data analysis is performed, in particular to search for high energy cosmic neutrinos. The team is also involved in R&D for UHECR radio detection, on both Nançay (CODALEMA) and PAO (AERA) sites.

Introduction

Les rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE) permettent aux chercheurs d'accéder à un domaine d'énergie bien au-delà des possibilités des accélérateurs et ils ouvrent la voie à l'exploitation des particules cosmiques dans l'astronomie.

Le groupe DRAC⁴, qui a fait de cette physique son thème de recherche, est depuis 2006 membre de la collaboration internationale (17 pays, 70 laboratoires dont 5 français) à l'origine de la construction de l'Observatoire Pierre Auger (PAO). Situé dans la pampa argentine, le site sud de l'observatoire exploite conjointement deux techniques de détection des gerbes atmosphériques générées par les RCUHE. Il est constitué d'un réseau de 1600 détecteurs de particules répartis sur 3000 km², et de vingt-quatre télescopes de fluorescence. C'est le plus grand détecteur de rayons cosmiques actuellement en fonctionnement. L'analyse des événements détectés a déjà apporté les premières réponses aux énigmes posées par l'observation des RCUHE. Ainsi la forte diminution du flux au-delà du seuil en énergie dit « GZK⁵ » (40 EeV, soit $40 \cdot 10^{18}$ eV) a été confirmée et l'explication de l'origine des RCUHE semble plutôt être astrophysique et extragalactique. De plus, la direction des événements de plus grande énergie (supérieure à 60 EeV) est anisotrope. Des limites supérieures sur le flux de neutrinos et photons cosmiques ont été déterminées. Ces résultats excluent la plupart des modèles « top-down ».

Le groupe est fortement impliqué dans des projets de radiodétection des rayons cosmiques de haute énergie, avec l'expérience CODALEMA à Nançay, et AERA⁶ sur le site de l'Observatoire Pierre Auger.

Développements et études techniques pour l'observatoire Pierre Auger

L'implication du groupe dans le fonctionnement de l'Observatoire concerne le réseau de détecteurs de surface (Fig. 1). Celui-ci échantillonne les particules de la gerbe arrivant au sol grâce à des cuves cylindriques remplies d'eau pure, espacées de 1500 m chacune. La lumière Cherenkov produite par les particules de la gerbe dans l'eau d'une cuve est vue par trois photomultiplicateurs (PM) dont les signaux sont numérisés par des convertisseurs rapides et normalisés au signal que fournirait un muon vertical au centre de la cuve.



Fig. 1: Un des 1600 détecteurs de surface de l'Observatoire Pierre Auger, dans la pampa argentine.

Le contrôle en ligne

L'Observatoire Pierre Auger doit fonctionner en continu pendant plusieurs années. Un outil de contrôle en ligne a donc été développé pour aider l'équipe chargée de surveiller le bon fonctionnement de l'ensemble des détecteurs du site (Fig. 2-a) et du dispositif d'acquisition des données. L'interface avec les bases de données stockant les informations pertinentes sur le fonctionnement de l'Observatoire est un serveur web (Apache). Le groupe du LPSC, avec la forte implication d'un ingénieur du service informatique, a développé un ensemble de pages web sur ce serveur, en utilisant plusieurs langages de programmation (PHP, Javascript, Ajax, MySQL...).

⁴ Détection des Rayons cosmiques à Auger et CODALEMA

⁵ Greisen-Zatsepin-Kuzmin

⁶ Auger Engineering Radio Array

Ainsi une nouvelle fonctionnalité a été conçue et réalisée dans la section des détecteurs de surface du site web « Auger Online Monitoring », pour gérer les maintenances et les interventions visant à réparer les éléments défectueux à l'origine des alarmes. Elle couvre le déroulement des opérations de maintenance et permet de conserver un historique de l'ensemble des opérations effectuées sur le réseau grâce aux différentes bases de données. Elle met à la disposition de la personne en shift les outils de diagnostic et de communication avec les experts et le coordinateur d'opération scientifique. Elle permet à ces derniers de définir une nouvelle maintenance (Fig. 2-b), de lui associer une liste d'actions à faire et de masquer ou pas l'alarme correspondante. Elle permet également au coordinateur de gérer les interventions sur le terrain, depuis la feuille de route fournie à l'équipe d'intervention jusqu'à la validation du rapport d'intervention. Enfin elle fournit des outils de recherche permettant un accès rapide à l'historique. Cette nouvelle fonctionnalité du contrôle en ligne de l'Observatoire a été mise en production en été 2009.

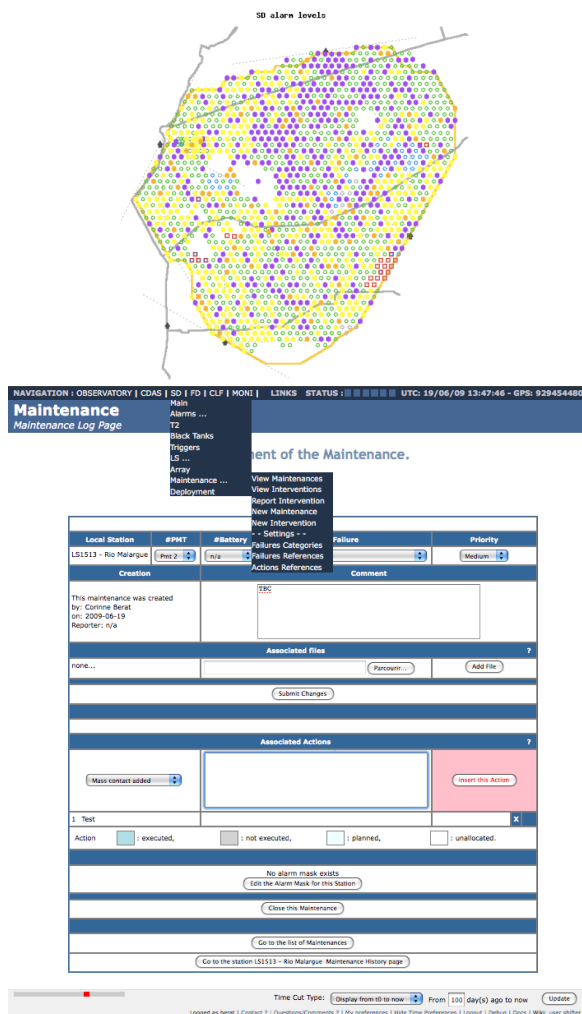


Fig. 2: Site web du contrôle en ligne d'Auger. a: Carte des niveaux d'alarmes des 1600 cuves en fonctionnement (ronds pleins). La couleur du rond indique le niveau de l'alarme b: Une page du site permettant de déclarer une maintenance grâce à un formulaire détaillé en lien avec la base de données de l'Observatoire.

Le groupe a également eu la responsabilité de l'authentification des utilisateurs du site web et de la gestion de leurs préférences. Un ou plusieurs rôles est attribué(s) à chaque utilisateur qui s'identifie. Cela détermine le type d'actions qu'il est autorisé à faire ou non à partir du site web du contrôle en ligne, suivant la machine utilisée pour la connexion et sa localisation, ce qui est primordial en particulier pour la gestion des maintenances.

La maintenance de l'électronique du détecteur de surface

Dans le cadre de la participation du groupe à cette tâche, un banc de test avec chambre climatique a été réalisé pour le test des PMs défectueux et leur électronique. Ces études ont permis d'élucider les causes des dérèglements les plus fréquents affectant une portion non négligeable de l'installation. Le groupe a proposé les remèdes adaptés et défini les procédures de réparation. Ce travail a été soutenu par les services Électronique et Détecteurs et Instrumentation du laboratoire.

Les études pour le futur déploiement du site nord

Avec l'aide des deux mêmes services, le groupe contribue au projet Auger-Nord par l'élaboration d'un module optique avec enceinte étanche pour le PM et l'électronique dans le but de réduire les pannes dues à la corrosion et donc le travail de maintenance (Fig. 3).

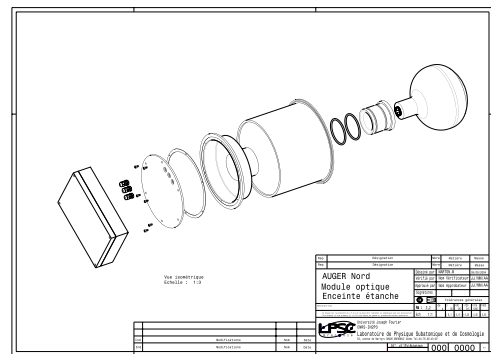


Fig. 3: Prototype d'enceinte de PM et électronique pour le réseau de R&D d'Auger Nord.

Analyse des données de l'observatoire

Le détecteur Auger au complet fonctionne depuis novembre 2008. Bien que la collaboration Auger ait déjà publié des premiers résultats importants, de nombreux travaux d'analyse sont encore en développement. Le groupe du LPSC s'est engagé sur deux d'entre eux: l'astronomie neutrino et l'étude des interactions hadroniques à très haute énergie.

Les neutrinos

L'Observatoire Pierre Auger offre la possibilité de détecter des neutrinos d'ultra haute énergie. Cette détection est possible soit par la détection de gerbes de taus,

induites par l'interaction de neutrinos tau dans la croûte terrestre peu avant la surface, soit par l'étude de gerbes de neutrinos descendantes. Le groupe a développé une nouvelle simulation de la propagation des neutrinos dans la Terre qui a montré l'importance de la régénération, et a permis d'étudier l'influence de la polarisation du tau produit. Le groupe participe également à l'analyse des gerbes très inclinées et à la recherche d'événements neutrino dans les données, étude qui a déjà abouti aux meilleures limites actuelles. La collaboration a publié des limites sur les flux de neutrinos à partir de la recherche de neutrinos tau. L'analyse permettant la recherche des neutrinos descendants est en cours. Le groupe est également très impliqué dans cette analyse.

Certes, pour l'instant seules des limites sur les flux de neutrinos (et de photons) ont pu être données. On peut cependant espérer détecter quelques événements de ce type dans les prochaines années. Il est important de noter que ces limites représentent dès à présent une avancée scientifique importante: en effet, elles permettent d'ores et déjà d'exclure la plupart des modèles de production des rayons cosmiques par des processus «Top-Down». D'autre part, il est déjà possible d'utiliser ces limites pour tester les extrapolations des modèles de physique des particules à des énergies (dans le centre de masse) plus de deux ordres de grandeur au dessus de celle du LHC⁷. Ces travaux seront présentés dans la thèse de K. Payet.

Les interactions hadroniques

Les expériences détectant les rayons cosmiques d'ultra haute énergie, telle l'expérience Pierre Auger, permettent d'étudier les interactions hadroniques aux énergies extrêmes, bien supérieures à celle du LHC. Habituellement la section efficace proton-air peut s'obtenir en étudiant la distribution de la profondeur du maximum du développement de la gerbe dans l'atmosphère, obtenue grâce aux détecteurs de fluorescence. Ceux-ci n'ayant qu'un cycle utile de 10%, il est intéressant de développer une autre méthode utilisant l'ensemble des événements collectés par le détecteur de surface (cycle utile de 100%). L'étude de la distribution angulaire des gerbes de même énergie atteignant le sol au même stade de développement est l'autre méthode proposée, en cours d'étude dans le groupe. La première difficulté de cette méthode concerne la caractérisation du stade de développement d'une gerbe à partir des seules informations du détecteur de surface car cela nécessite d'estimer les composantes muonique et électromagnétique de la gerbe au sol. Les détecteurs de surface de l'Observatoire Pierre Auger étant des détecteurs Cherenkov à eau, seule la forme du signal liée à la perte d'énergie d'un muon dans la cuve (~ 240 MeV) comparée à celle d'un électron ou d'un photon (< 10 MeV) peut permettre de différencier ces deux composantes. Ainsi dans la distribution temporelle du signal enregistré par les FADC⁸, les muons apparaissent comme des pics produits sur un fond électromagnétique, et engendrent une

brusque variation du signal. Un estimateur du nombre de muons dans chaque cuve peut être défini comme la somme des ces variations dépassant un seuil choisi de manière à optimiser l'efficacité de sélection d'un muon et de minimiser la contamination électromagnétique. Cet estimateur dépend des paramètres de la gerbe que sont l'énergie et l'angle zénithal ainsi que de la distance de la cuve à l'axe de la gerbe. L'étalonnage de cet estimateur se fait à partir des données et sur la base d'un modèle validé par des simulations Monte Carlo. L'application de la méthode à des simulations Monte Carlo basées sur CORSIKA⁹ montre que le nombre de muons à 1000 m est déterminé avec une résolution proche de 20% pour une gerbe de 10 EeV et d'angle zénithal 45° .

Ces études sont également liées à celle de la composition du rayonnement cosmique primaire qui reste un enjeu majeur de la physique des RCUHE.

Radio détection des RCUHE

Expérience CODALEMA à l'Observatoire de Nançay

Le dispositif expérimental a été entièrement modifié entre 2005 et 2009 grâce au financement de l'ANR. Ainsi le groupe du LPSC a déployé un réseau de 17 détecteurs de particules ainsi que son électronique /acquisition associée. Le groupe de Subatech (Nantes) a déployé un réseau d'antennes dipolaires décamétriques large bande et de gain isotrope.

Le réseau de 17 scintillateurs

Le réseau de scintillateurs donne une estimation de l'énergie de la particule primaire. En utilisant la méthode CIC (Constant Intensity Cut) exploitant l'isotropie du flux, on déduit la loi d'atténuation pour la taille de la gerbe N en fonction de l'angle zénithal: $N(\theta) = N(0) \exp(-(\sec\theta - 1)X_0/\Lambda_{at})$. La quantité $N(0)$ est reliée à l'énergie en utilisant les résultats des simulations obtenus avec le logiciel AIRES et en supposant la nature du primaire. Les taux de comptage par intervalle d'énergie permettent de calculer le flux.

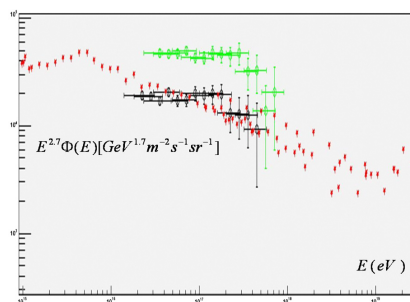


Fig. 4: Flux des rayons cosmiques extraits des données du réseau scintillateur de CODALEMA. Les points noirs sont obtenus en supposant que les particules primaires sont des protons, les points verts en supposant des noyaux de Fer. Les points rouges sont les résultats de plusieurs expériences précédentes.

⁷ Large Hadron Collider

⁸ Flash Analog to Digital Converter

⁹ Cosmic Ray SIMulations for KAscade: programme de simulation des grandes gerbes atmosphériques

L'analyse des données radio

Cette analyse a été menée essentiellement dans le cadre de la thèse de Colas Rivière et en partenariat avec le laboratoire Subatech. Les signaux radio sont filtrés dans une bande de fréquence 37-70 MHz afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. La direction et le temps de passage de l'onde sont déterminés à partir des temps des antennes et comparés aux mêmes paramètres déduits des scintillateurs. L'accord est généralement à quelques degrés près. L'estimation de l'énergie déduite des scintillateurs a permis de montrer que le seuil de détection radio se situe aux alentours de 10^{17} eV. Le résultat le plus remarquable est l'asymétrie Nord-Sud de détection ainsi que les changements de signe des champs électriques mesurés.

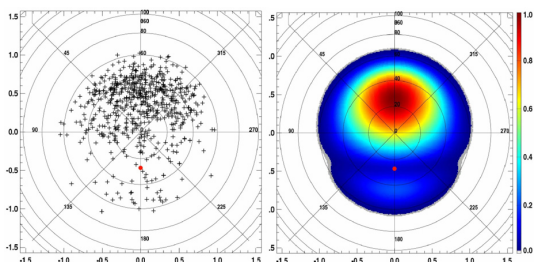


Fig. 5 : À gauche, la carte du ciel des événements radio observés à Nançay. À droite, la carte des efficacités calculées en considérant la composante Est-Ouest du champ électrique. Le zénith est au centre, le nord en haut (0°), l'ouest à gauche (90°). La direction du champ géomagnétique à Nançay est indiquée par le point rouge.

Modélisation et simulations

L'apport de l'équipe de Grenoble a été déterminant dans ce domaine, d'une part avec l'utilisation du logiciel de simulation des gerbes atmosphériques AIRES¹⁰, d'autre part avec la mise au point de modèles nouveaux permettant de comprendre la structure des champs au sol, notamment les signes des différentes polarisations. Il s'agit d'une part d'une approche de l'émission géosynchrotron produite par les gerbes traitée comme un phénomène de diffusion Compton inverse, d'autre part de l'utilisation du formalisme des champs retardés pour une charge ponctuelle et variable permettant d'aboutir à des expressions analytiques des champs. Toute cette activité a donné lieu à plusieurs publications et a permis, non seulement de comprendre les résultats radio mais aussi de proposer des solutions pour les réseaux radio futurs.

Radio détection à l'Observatoire Pierre Auger

Le programme de R&D, AERA s'inscrit dans le cadre de la collaboration Auger. Il regroupe principalement l'Allemagne, la Hollande et la France. L'enjeu est de réaliser d'ici 2012 un réseau d'antennes autonomes couvrant une surface de 20 km² dans la pampa. Contrairement aux installations de Nançay et

¹⁰ AIR shower Extended Simulations : programme de simulation des grandes gerbes atmosphériques

Karlsruhe, il faut non seulement que chaque antenne dispose de sa propre source de puissance, mais surtout que l'électronique et l'informatique embarquées associées soient capables de distinguer les signaux radio « rayons cosmiques » du bruit de fond lié aux phénomènes naturels ou lié à l'activité humaine. La partie française regroupant les laboratoires de Subatech et du LPSC ainsi que d'autres laboratoires français de la collaboration Auger est la seule à avoir réussi à détecter de manière auto-déclenchée les signaux radio associés aux gerbes en utilisant trois stations autonomes, chacune étant reliée à deux antennes dipolaires. C'est le premier pas vers le réseau AERA.

Développement technique : le système d'acquisition COD-ALPES

Afin de pouvoir gérer localement un ensemble de détecteurs quel que soit le site de leur déploiement, le système d'acquisition embarqué COD-ALPES (pour COsmic ray Detection and Acquisition with Low Power Embedded System) a été développé au Service Électronique du LPSC. Ce système est constitué d'un « Tiroir d'acquisition » permettant l'acquisition durant 4 μ s sur 8 voies simultanées de signaux échantillonnés à 250 Msample/s. Son déclenchement est autonome par sa fonction interne « Trigger », gérée par un FPGA XiLinX FX 20 associé à un power PC à cœur Linux. Ces événements sont datés par l'intermédiaire d'un GPS associé à une fonction « Datation » qui prend en compte les dérives de l'électronique. Ces données sont soit transférées vers un ordinateur distant via un modem de communication, soit stockées en interne sur une clé USB. Ce tiroir peut également piloter ses tiroirs hautes tensions distants pour l'alimentation de photomultiplicateurs. L'ensemble est prévu pour fonctionner par l'intermédiaire de panneaux solaires associés à des batteries.

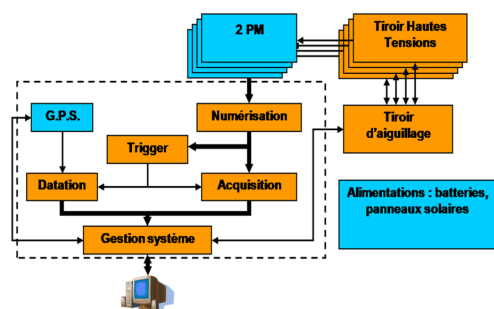


Fig. 6 : Schéma du système d'acquisition embarqué COD-ALPES

Pour en savoir plus

- <http://lpsc.in2p3.fr/DRAC/une.htm>

- Limit on the diffuse flux of ultra-high energy tau neutrinos with the surface detector of the Pierre Auger Observatory, J. Braham et al, Physical Review D 79 (2009) 10200
- Geomagnetic origin of the radio emission from cosmic ray induced air showers observed by CODALEMA, D. Ardouin et al, Astroparticle Physics 31, 3 (2009) 192-200

Étude du rayonnement fossile avec Planck

L. Fauvet, D. Girard, J. F. Macías-Pérez, L. Perotto, C. Renault, Y. Sallaz-Damaz, D. Santos

P. Stassi, O. Zimmermann, Service Détecteurs et Instrumentation

J. Bouvier, E. Lagorio, D. Tourres, C. Vescovi, Service Électronique

G. Dargaud, T. Descombes, F. Melot, Service Informatique

Collaboration : F.-X. Désert, LAOG, France

Planck is the first European Spatial Agency (ESA) mission dedicated to the measurement of the relic radiation. It has been successfully launched the 2009, May 14th. Planck will provide the “definitive” maps of the relic radiation in temperature and the first precise full-sky maps in polarization.

On the instrumental side, the laboratory has responsibilities in the on-board hardware related to the Sorption Cooler Electronics (SCE) and the Dilution Cooler Electronics (DCE), in the on-board software controlling the SCE, in the interface that receives the telemetry and sends the commands to the SCE. On the data analysis side, the LPSC has the responsibility of the processing of the HFI timelines analysis. We naturally are also deeply involved in several physics topics and in the preparation of the next generation of detectors.

Pourquoi et comment mesurer le rayonnement fossile

Intérêt de l'étude de la première image de l'Univers

Le fond diffus cosmologique à 3 K (ou CMB pour Cosmic Microwave Background) est l'image la plus lointaine 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. Selon le modèle cosmologique actuel – corroboré par l'ensemble des observations dans ses grandes lignes, les fluctuations primordiales générées par l'inflation environ 10^{-35} seconde après le Big-Bang auraient évolué pour donner ensuite naissance aux grandes structures de l'Univers (galaxies, amas et super-amas de galaxies) avec un spectre de puissance initial caractéristique de cette période inflationnaire. 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 cette 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. Ces propriétés sont par exemple la géométrie de l'espace-temps, la densité de matière ordinaire, de matière noire, de neutrinos et de photons. Combiné avec d'autres mesures sur la distribution des galaxies ou la vitesse d'expansion, on contraint également l'âge de l'Univers ou la valeur de la constante cosmologique, assimilable à une énergie noire répulsive à grande échelle.

L'expérience satellite Planck

Obtenir la carte la plus précise et la plus sensible possible du CMB est l'un des enjeux majeurs de la cosmologie observationnelle contemporaine. Après COBE et WMAP, Planck est la troisième génération de satellite

dédié à l'observation du CMB, et le premier mis en œuvre par l'agence spatiale européenne. L'objectif de Planck est la mesure « ultime » du spectre de puissance des anisotropies en température et une première véritable mesure du spectre de puissance des anisotropies en polarisation scalaire. La mesure de la polarisation tensorielle sera vraisemblablement l'enjeu de la quatrième génération de satellite, d'ores et déjà à l'étude. On peut raisonnablement parler de « mesure ultime » car Planck devrait être capable de mesurer ces variations infimes de température avec une erreur dominée sur l'ensemble du domaine angulaire pertinent par la variance cosmique, erreur statistique qui quantifie le fait que nous observons un seul univers – erreur que l'on ne peut donc diminuer... À partir de l'étude statistique de cette carte, les paramètres cosmologiques tels que la géométrie et le contenu de l'Univers mais également la dynamique de la période d'inflation devraient être estimés précisément, avec des erreurs de un à quelques pourcents selon ces paramètres. Cette précision inégalée permettra également de tester des modèles de nouvelle physique qui devront faire face à de très fortes contraintes observationnelles.

Les difficultés de cette mesure sont essentiellement de deux natures en raison de la présence des avant-plans et des nombreuses sources d'erreurs systématiques : d'une part, le rapport signal sur bruit est extrêmement faible puisque l'amplitude des fluctuations n'est que de quelque 10^{-6} , d'autre part à ce signal de la surface de dernière diffusion s'ajoutent de nombreuses émissions. Ces émissions peuvent être d'origine astrophysique (extragalactiques, galactiques, locales), ou encore d'origine instrumentale. Le bruit instrumental instantané domine de plusieurs ordres de grandeur le signal cosmologique.

Planck est une collaboration internationale organisée autour des deux instruments (LFI et HFI pour Low et High Frequency Instrument) regroupant respectivement environ 400 chercheurs dans une dizaine de pays en Europe et en Amérique pour un budget total d'environ

ron 550 M€. La France est leader de l'instrument HFI et, après avoir fortement contribué à la réalisation des électroniques de contrôle de 2 des 3 étages thermiques permettant un fonctionnement de l'instrument à 0,1 K, l'équipe Planck du LPSC participe d'ores et déjà intensivement à l'analyse des données.

Les électroniques des réfrigérateurs à 18 K et 0,1 K

La version définitive des contributions instrumentales du LPSC à Planck a été livrée à Liège au début de l'année 2008. Nous avons livré à l'ESA les éléments suivants :

« hardware » embarqué : électronique du cryo-générateur à sorption (SCE, étage à 20 K) et électronique de la dilution (DCE, étage à 0,1 K)

« software » embarqué : logiciel de pilotage et de contrôle de la SCE et interface avec un logiciel de l'ESA pour la télémétrie et les télécommandes.

L'électronique du cryo-générateur à sorption (SCE) a été réalisée en coordination avec nos partenaires du Jet Propulsion Laboratory (JPL) à Pasadena (Californie-USA), responsables des conception et construction des compresseurs de la machine cryogénique et celle du SCE en coordination avec Air Liquide, chargé de la construction de réfrigérateur à dilution.

Ces deux années ont été marquées par les tests au Centre Spatial de Liège puis au port spatial de Kourou. La figure 1 présente les températures des différents étages de Planck HFI, du lancement jusqu'à début juillet 2009. Le fonctionnement de tous les éléments cryogéniques est nominal.

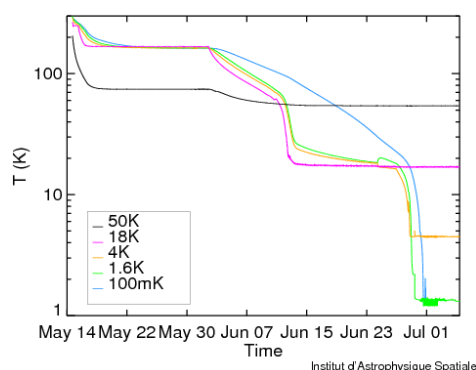


Fig. 1 : Évolution de la température des différents étages cryogéniques lors de la phase de refroidissement, depuis le lancement.

L'analyse des données en temps de Planck-HFI

Le plan focal de l'instrument HFI contient 52 bolomètres sensibles à la température et à la polarisation. La stratégie d'observation consiste à balayer le ciel selon des grands cercles et à répéter l'opération environ 40 fois avant de déplacer légèrement l'axe de rotation. On obtient ainsi une excellente redondance et l'ensemble de la voûte céleste est observé en 7 mois environ.

Avant de pouvoir projeter ces données ordonnées en temps sur une carte, il est indispensable de séparer l'information venant effectivement du ciel des perturbations du signal issues de l'instrument lui-même. Ces perturbations peuvent venir de l'interaction d'un rayon cosmique avec le bolomètre, d'une fluctuation de l'émission thermique de tout ce qui est sur le chemin optique du signal (miroirs, cornets, filtres, bolomètres), d'une variation de la réponse du détecteur ou bien encore 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 de l'analyse appelée « TOIprocessing » (Time Ordered Information) qui s'effectue dans le cadre du Core Team de Planck-HFI. Ce travail se fait de façon itérative et en interaction avec les étapes ultérieures de l'analyse, notamment la fabrication des cartes. Les outils qui conduisent des mesures brutes de tension aux bornes du bolomètre à la puissance venant réellement du ciel et à l'identification des mesures corrompues ont été appliqués avec succès aux mesures des campagnes d'étalement au sol et finalement aux premières véritables données depuis juin 2009. En parallèle, des simulations sont conduites pour s'assurer que les imperfections de l'analyse conduisent à des effets négligeables au niveau des cartes et des spectres de puissance afin de ne pas dégrader les capacités de Planck à sonder la dynamique de l'inflation, par exemple.

Perspectives instrumentales

Les bolomètres refroidis à 100 mK offrent dès à présent une sensibilité instantanée optimale, limitée essentiellement par le bruit de photons de la source. Or cette sensibilité reste vraisemblablement insuffisante pour détecter le mode B (ou tensoriel) de la polarisation du CMB. En effet, ce signal primordial est environ 100 à 1000 fois plus faible que le signal en température. Si le premier cas est à la limite de détectabilité de Planck, le second est hors d'atteinte. La seule stratégie possible est d'augmenter considérablement le nombre de détecteurs, en équipant le plan focal non pas de quelques dizaines de détecteurs individuels mais d'une matrice de milliers de bolomètres. Le LPSC est associé à une collaboration de R&D nationale (DCMB, Développement Concerté de Matrices de Bolomètres) pour réaliser des matrices de bolomètres de grande dimension.

Études scientifiques associées au projet Planck et à la physique de l'Univers primordial

Polarisation des émissions galactiques

La détection du CMB avec Planck passe par une compréhension des émissions d'avant-plan telles que l'émission Galactique de la poussière et du rayonnement synchrotron. En ce qui concerne la température, de nombreuses études ont été réalisées. En revanche, peu d'informations sont actuellement disponibles sur les émissions d'avant-plan polarisées. Au sein des groupes de travail 2 et 7 de Planck, nous avons mis au point des modèles d'émissions polarisées de la poussière et du synchrotron. Ces simulations sont basées sur une modélisation en 3D du champ magnétique galactique et de la densité d'électrons relativistes et de poussière dans la Galaxie. Par une procédure d'intégration sur la ligne de visée nous construisons des cartes patrons aussi bien en température qu'en polarisation de ces émissions qui peuvent ensuite être comparées aux observations.

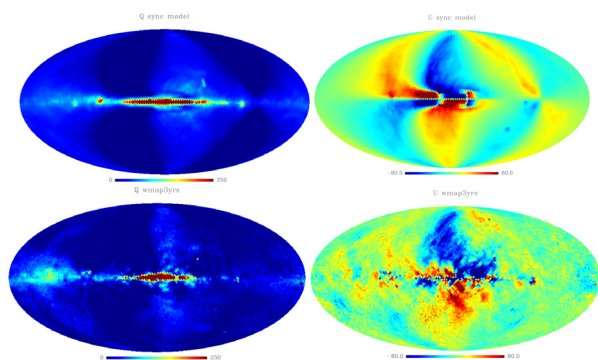


Fig. 2: Cartes de l'émission galactique par effet synchrotron en polarisation Q et U : à gauche, simulations réalisées au LPSC, à droite, observations du satellite WMAP.

Phase de pre-heating

Afin d'exploiter au mieux les données que produira le satellite Planck, nous avons initié, en 2004, une étude sur le «pre-heating». Cette phase correspond à la période de transition entre la fin de l'inflation et l'ère de rayonnement. Dans cette transition il y a une période où le champ scalaire transforme son énergie en rayonnement et matière. Une publication a déjà présenté les premiers résultats sur les perturbations de la métrique pendant cette période pré-baryogénèse.

Effets de lentille gravitationnelle sur le rayonnement fossile

Planck a une résolution et une sensibilité suffisantes pour permettre la première mesure de l'effet de lentille gravitationnelle que les grandes structures impriment sur les anisotropies de température et la polarisation du CMB. Cet effet de lentille laisse plusieurs signatures non négligeables sur les observables : il perturbe les spectres de puissance angulaire de façon suffisante

pour biaiser l'estimation des paramètres cosmologiques, s'il n'est pas précisément pris en compte. Il induit un fort signal au sein du mode B de polarisation ; ce mode B secondaire est une importante source de confusion pour l'extraction du mode B primaire, généré par les ondes gravitationnelles produites lors de la phase inflationnaire. Enfin, il modifie les propriétés statistiques des anisotropies de température et de la polarisation, introduisant des non-gaussianités dans les cartes du CMB, susceptibles de biaiser la mesure de non-gaussianités primordiales. Par ailleurs, ce sont ces non-gaussianités induites dans les cartes qui permettent une reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle. Une telle reconstruction est souhaitable, non seulement parce qu'elle permet de corriger un effet qui, sinon, serait une source de biais non compatible avec les exigences de la cosmologie de précision, mais aussi parce qu'elle fournit une précieuse sonde cosmologique. En effet, la reconstruction de l'effet de lentille sur le CMB est une opportunité, unique dans les prochaines années, d'accéder à la distribution de masse de l'Univers, de la surface de dernière diffusion jusqu'à nous, et ce avec une sensibilité maximale à des décalages vers le rouge de l'ordre de 3 et pour des structures évoluant encore dans un régime linéaire bien modélisable.

/sps/planck/Users/plaszczky/LensFix/2048/phi2048-12345.fits: PHI

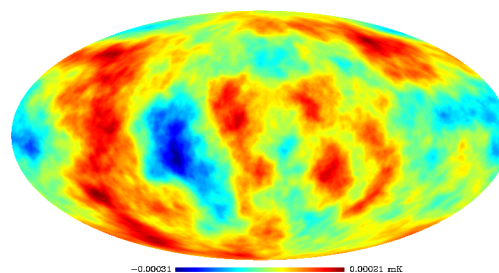


Fig. 3: Carte du rayonnement fossile perturbée par effet de lentille induit par un potentiel gravitationnel simulé. Ce potentiel est intégré de la surface de dernière diffusion jusqu'à nous.

L'extraction de l'effet de lentille nécessite le développement d'outils statistiques complexes, basés sur l'estimation des fonctions de corrélation à quatre points des cartes. Notre équipe possède une expertise de ces outils. Forts de cette maîtrise et d'une collaboration avec les équipes Planck du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire et du Service d'astrophysique du CEA/IRFU, nous sommes moteur au sein du consortium Planck pour la préparation à la reconstruction de l'effet de lentille.

L'après Planck

L'étude du fond diffus cosmologique ne s'arrêtera sans doute pas après Planck, nous passerons de l'ère de la cosmologie de précision à l'ère de l'imagerie et de la mesure de la polarisation de précision. Les détecteurs de Planck étant déjà à la limite du bruit de photons, pour améliorer la précision sur la mesure il est nécessaire d'augmenter le nombre de détecteurs et

pour améliorer la résolution il faut avoir un plan focal mieux rempli, en limitant au maximum les espaces morts. Ces contraintes ont conduit à l'idée de matrices de bolomètres. Plusieurs techniques sont explorées actuellement: des matrices de bolomètres traditionnels avec antennes, les matrices de bolomètres de type TES ou bien les matrices de résonateurs de type KIDS (Kinetic Inductance Detectors).

Collaboration DCMB et matrices de bolomètres

En France, la collaboration DCMB (Développement Concerté de Matrices de Bolomètres), dont notre équipe fait partie, est chargée de l'étude des différentes options de matrices de bolomètres. Cette collaboration a pour objectif la construction d'une matrice de quelques milliers de bolomètres (pour comparaison Planck n'a embarqué que 54 bolomètres dans son plan focal) qui soient sensibles à la polarisation. Actuellement, au sein de la collaboration DCMB nous disposons des premières matrices pour les trois technologies décrites avec une centaine de bolomètres qui sont en cours de validation et d'amélioration.

Notre équipe a participé activement à cet effort. Tout d'abord nous avons construit avec l'aide des services mécaniques du laboratoire un interféromètre de type Martin-Peuplet (voir Fig. 4) qui a été aussitôt installé dans le banc de test existant à l'Institut Néel. Cet interféromètre permet de reconstruire la réponse en fréquence et en polarisation de chaque détecteur de la matrice en le couplant à une caméra (ensemble cryostat à 100 mK plus matrice de bolomètres) sensible dans le domaine millimétrique. En outre, le SDI du LPSC s'est fortement impliqué dans le design des matrices de bolomètres à antennes, notamment en ce qui concerne leur réponse à un signal polarisé. Ce travail a été effectué avec le logiciel HFSS qui permet d'étudier la transmission et la réflexion d'une onde électromagnétique dans la matrice de bolomètres. Outre les propriétés en polarisation de la matrice, cette étude permet également la caractérisation de la réponse impulsionnelle de celle-ci.

Récemment notre équipe a pris en charge la construction de l'électronique associée à des matrices de type KID avec comme ambition le multiplexage massif de la lecture des données issues de la matrice. Ce travail est effectué au sein du service d'électronique du laboratoire. Un premier prototype de cette électronique devrait se réaliser dans les prochains mois, permettant ainsi la lecture simultanée d'une centaine de détecteurs.

Perspectives spatiales

Du point de vue scientifique notre équipe est membre de la collaboration Bpol qui a pour objectif le lancement d'un satellite mi-lourd pour l'étude précise des modes B de polarisation du CMB. Ces modes pourraient nous donner des informations sur les ondes gravitationnelles et les champs magnétiques

primordiaux, et donc sur les nouvelles théories physiques comme l'inflation ou autres développées pour expliquer l'origine de notre Univers. Notre équipe a participé activement au travail de préparation et de rédaction de la proposition livrée à l'ESA. Pour mener à bien ce projet l'utilisation de matrices de bolomètres est indispensable et la collaboration DCMB pourrait être le fournisseur de celle-ci.

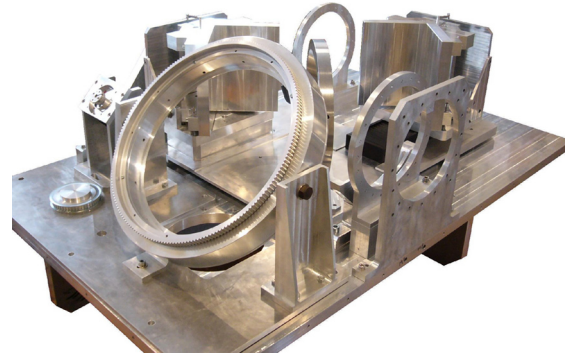


Fig. 4 : Structure mécanique de l'interféromètre Martin-Peuplet conçue et construite au LPSC.

Pour en savoir plus

- "Planck pre-launch status: the HFI instrument, from specification to actual performance", Lamarre *et al.*, 2009
- "Reconstruction of the CMB lensing for Planck", Perotto *et al.*, <http://arxiv.org/abs/0903.1308>
- Le site Internet à destination du grand public : <http://www.planck.fr>

Expérience LSST et activité théorique

A. Barrau, S. Beaumont, L. Derome, A. Gorecki, J. Grain
C. Vescovi, L. Eraud, Service Électronique
M. Migliore, Service Détecteurs et Instrumentation

The Large Synoptic Survey Telescope (LSST) is a major experiment devoted to the study of the Universe at large scales, in particular to understand the fundamental nature of dark energy. With a large mirror (8 meters) and huge camera (3 billions pixels) it should be operated from 2015 and will be the telescope with the highest "étendue" in the history of astronomy. The LPSC-Grenoble is responsible for the calibration bench of the integrated camera, ensures the technical coordination of LSST-France and participates in BAO studies. In parallel, the group is involved in theoretical cosmology. We study cosmological consequences of Loop Quantum Gravity (LQG), scalar-tensor models and some aspects of quantum field theory in curved space-time.

Participation au télescope LSST

Contexte général et enjeu scientifique

L'expérience LSST (Large Synoptic Survey Telescope) entend apporter des éléments de réponse décisifs à l'une des énigmes majeures de la physique contemporaine : pourquoi l'expansion de l'Univers accélère-t-elle ? L'énergie, dite « noire », à l'origine de cette accélération est le contenu dominant de l'Univers et pourrait être associée aux fluctuations quantiques du vide ou à une théorie d'unification des forces fondamentales. Il s'agit donc d'un enjeu à l'intersection de l'astronomie, de la physique des particules et de la cosmologie. Le télescope LSST permettra de sonder l'énergie noire par plusieurs approches complémentaires : oscillations acoustiques de baryons, lentilles gravitationnelles faibles et supernovae.

LSST est une large collaboration internationale menée par les États-Unis. La collaboration LSST-France repose sur 6 laboratoires de l'IN2P3.

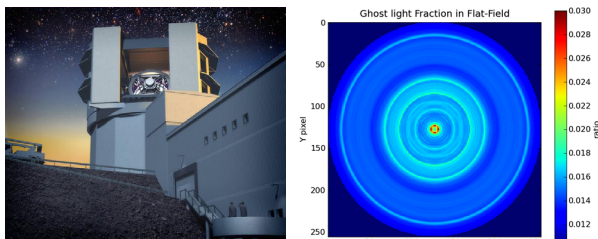


Fig. 1 : À gauche : Vue d'artiste du télescope LSST. À droite : Lumière produite par un « champ plat » dans la caméra de LSST.

Banc d'étalonnage de la caméra intégrée et R&D pour les CCD

Le LPSC a pris la responsabilité de la conception du banc d'étalonnage de la caméra intégrée de LSST. Ce banc devra permettre le *commissioning* de cette caméra qui sera la plus complexe construite jusqu'alors pour un télescope. Il s'agira de mesurer l'ensemble des paramètres optiques et électroniques à l'aide d'un

banc conçu à cet effet qui fonctionnera suivant trois modes différents. Il sera ainsi possible d'étalonner la réponse des senseurs, la lumière diffusée dans la caméra ainsi que les effets d'angle d'incidence et de longueur d'onde. Ce banc a vocation à être utilisé à SLAC et dupliqué sur le site d'observation au Chili.

De manière à valider le concept, un prototype est implémenté dans une salle propre mise en œuvre au LPSC par le service détecteur et instrumentation.

Simulations de la caméra de LSST

Une simulation complète de la propagation de la lumière dans la caméra de LSST avec le logiciel Zemax a été mise en œuvre. Elle a permis de montrer que les effets de « lumière fantôme » dus à la présence des lentilles correctrices de champ étaient importants et devaient être pris en compte. Elle est également un élément fondamental pour le dessin du banc d'étalonnage.

Coordination technique LSST-France

Une personne du service d'électronique du LPSC assure la coordination technique nationale de LSST. À ce titre, il veille à la cohérence des différentes activités menées dans les laboratoires français, au respect du calendrier et à la visibilité de la communauté française au sein du consortium LSST.

Étude des oscillations acoustiques baryoniques

Une collaboration a été initiée avec le LAL sur l'étude des oscillations acoustiques de baryons. En particulier, le LPSC prend en charge la reconstruction des *redshifts* photométriques. Le code en cours de développement permettra de sonder la précision avec laquelle LSST reconstruira le spectre de puissance de la matière.

Cosmologie théorique

Depuis plusieurs années nous menons une activité en gravitation relativiste. Après avoir étudié les couplages entre les particules élémentaires et les trous noirs, nous avons développé un formalisme général pour étudier le comportement des champs quantiques en es-

pace courbe à l'ordre WKB. Plusieurs voies originales de mesure des paramètres cosmologiques (en particulier la constante cosmologique et le *running* de l'indice spectral) ont également été proposées.

Le groupe s'intéresse aujourd'hui aux conséquences cosmologiques de la gravitation quantique à boucles. Cette approche permet de concilier relativité générale et mécanique quantique dans le formalisme des réseaux de spins. Nous avons montré que les corrections apportées par ces termes non-perturbatifs devraient modifier le spectre tenseur primordial de façon notable par rapport à la relativité générale. Il pourrait s'agir d'une nouvelle voie d'accès à la « physique à l'échelle de Planck ».

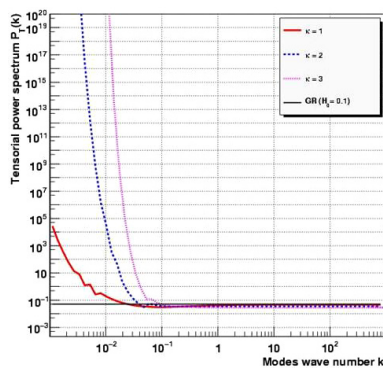


Fig. 3 : Spectre de puissance tenseur primordial permettant de mettre en évidence une déviation des prédictions de la gravité quantique à boucles (traits de couleur) par rapport à la relativité générale (ligne noire).

Pour en savoir plus

- “Cosmological footprints of loop quantum gravity”
J. Grain et A. Barrau, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 081301
- “Semi-classical scalar propagators in curved backgrounds: Formalism and ambiguities” J. Grain et A. Barrau, Phys. Rev. D 76:084009, 2007
- “An original constraint on the Hubble constant: $h > 0.74$ ”
A. Barrau, A. Gorecki, J. Grain, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 389:919-924, 2008

MIMAC (Micro-TPC Matrix of Chambers)

C. Grignon, Ch. Koumeir, F. Mayet, D. Santos

O. Guillaudin, A. Pelissier, Service Détecteurs et Instrumentation

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

J. Angot, Th. Lamy, P. Sole, Service des Sources d'ions

Collaborations: P. Colas, E. Ferrer, I. Giomataris (IRFU Saclay), A. Allaoua, L. Lebreton (IRSN Cadarache)

MIMAC is a project of a large TPC for non-baryonic dark matter search using ionization and track measurements. Quenching factor measurements have been performed using a facility built at the LPSC. A prototype of the elementary chamber of the detector has been designed and tested with a neutron field at low energy produced by AMANDE at the IRSN (Cadarache). The first tracks measured at very low energies (6 keV) of recoils and electrons have been observed.

Le projet MIMAC est une première étape vers la définition d'un grand détecteur directionnel pour la détection directe de matière sombre, dans le cadre européen d'ASPERA, à l'horizon 2011.

L'existence de matière sombre non-baryonique dans l'Univers est confortée par des observations astrophysiques et cosmologiques récentes. La présence de ce type de matière à l'échelle locale dans notre halo galactique pourrait être mise en évidence par la détection directe, à travers la détection de reculs nucléaires provenant de collisions élastiques avec ces particules exotiques. Les candidats les plus favorables sont les particules supersymétriques proposées par les extensions SUSY du modèle standard, interagissant gravitationnellement et faiblement avec la matière ordinaire baryonique (WIMP: Weakly Interacting Massive Particle).

Les neutrons laissant un signal impossible à différencier du recul provenant d'une collision élastique avec un WIMP, la seule signature capable de différencier ce type d'événement est la direction de la particule incidente sur un noyau cible du détecteur, qui doit être corrélée au mouvement de la terre dans le halo galactique.

Le projet MIMAC propose de montrer la faisabilité de ce type de mesure à partir de la double détection: ionisation et trace en 3 dimensions grâce à une TPC gazeuse développée avec l'aide du Service Détecteurs et Instrumentation, du Service d'électronique et du Service de mécanique.

Afin de caractériser la quantité d'ionisation disponible à basse énergie quand un noyau de quelques keV bouge à l'intérieur du détecteur, nous avons développé, avec le Service des Sources d'Ions, une ligne expérimentale dédiée à la mesure du « quenching » à basse énergie, par une méthode originale (source ECR¹¹ couplée au détecteur micromegas par un vide différentiel). Cette ligne nous a permis, pour la première fois, de faire la mesure du quenching dans l'⁴He, jusqu'à l'énergie de 1 keV recul. En 2008, l'inclusion d'un spectromètre magnétique nous a permis de faire les premières mesures sur le ¹⁹F.

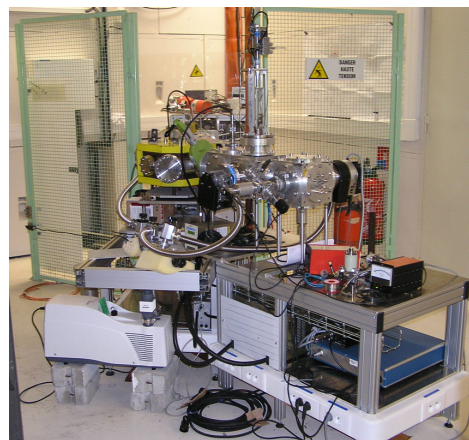


Fig. 1: Ligne expérimentale dédiée à la mesure du facteur de « quenching ».

Pour la mesure de la trace en 3 dimensions, nous avons développé, avec nos partenaires du CEA Saclay, une micromegas pixellisée (à 300 microns) permettant de mesurer la projection de la trace sur l'anode pixellisée. Mais le véritable défi a été de récupérer l'information de la troisième dimension capable de nous donner l'orientation de la trace dans l'espace. Pour ceci, nous avons imaginé, au LPSC, une électronique capable de lire l'anode tous les 25 ns, afin de reconstruire la trace en trois dimensions par la vitesse de dérive. Le premier prototype de cette électronique, avec un design d'un circuit ASIC original (ASIC-MIMAC), a été testé et validé en mars 2009.

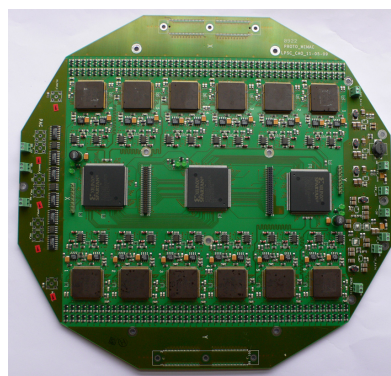


Fig. 2: Carte électronique couplée à la micromegas pixellisée supportant les ASICs MIMAC.

¹¹ Electron Cyclotron Resonance

Une expérience à Cadarache faite en collaboration avec l'IRSN nous a permis de tester le prototype sous un champ de neutrons de basse énergie (8 keV) avec succès. Les premières traces des reculs nucléaires dans la plage de quelques keV ont été identifiées.

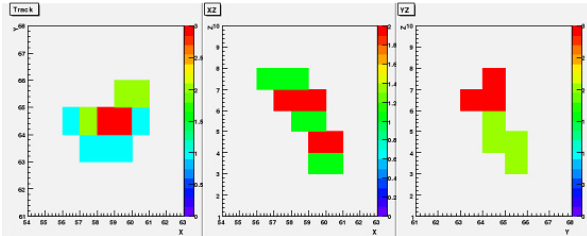


Fig. 3 : Projections X-Y, X-Z et Y-Z d'une trace en 3 dimensions observée par le prototype MIMAC à 300 mbar (95% de ^4He , 5% d'isobutane) correspondant à un recul de ^4He d'une énergie de 6 keV provenant d'une collision élastique avec un neutron de 8 keV.

La réalisation de cette ligne de R&D a été possible entre autres grâce au Programme National d'Astroparticule (2007) et à l'ANR MIMAC-Projet Blanc (01/2008-11/2010) qui nous a encouragés à poursuivre le travail vers les objectifs fixés.

